

ACIK DENİZ YÜZER RÜZGAR TÜRBİNİ DENEY METODOLOJİSİ VE ATMOSFERİK SINIR TABAKA İLE BİR YATAY RÜZGAR TÜRBİNİNİN ÖLÇEKLENDİRİLMİŞ MODELLEMESİ

Ali Arıdıcı, Serkan Erol, Ünver Özkol

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Urla
aliaridici@iyte.edu.tr, serkanerol@iyte.edu.tr, unverozkol@iyte.edu.tr

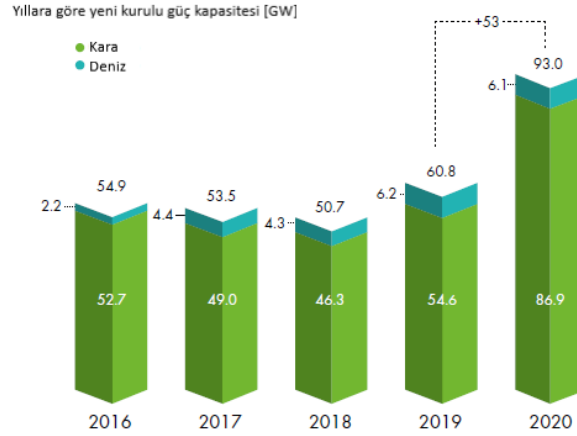
ÖZET

Dünyanın artan enerji talebine karşı yeşil ve yenilenebilir enerji kaynağı olarak açık deniz rüzgâr enerjisi her geçen gün daha fazla önem kazanmaktadır. Düşük pürüzlülük ve dinamik yüzeyi sayesinde rüzgâr enerji yoğunluğu karaya kıyasla açık denizlerde çok daha fazladır. Fakat bu yüksek rüzgâr hızının hissedilebilmesi için kıyı şeridinden en az birkaç km civarında uzaklaşmak gerekmektedir. Karadan uzak mesafelerde, özellikle ülkemiz sularında, su derinlikleri genelde 50m'den fazla olmasından dolayı, türbin direklerini deniz tabanına sabitlemek ekonomik olarak mümkün olmamaktadır. Bu durumda yüzer rüzgâr türbinleri (YRT) çözüm olmaktadır. YRT'ler doğada birleşmiş hidrodinamik ve aerodinamik kuvvetlerin etkisi altında çalışmak zorundadır. Türbinlerin üzerine gelen rüzgâr ve dalga kaynaklı değişken kuvvetler, türbin sistemini her 3 ekseninde doğrusal ve dönme yönünde salınıma tabii tutar. Türbinin maruz kaldığı tüm bu salınımlar, özellikle akışkan kaynaklı oldukları için kolayca kararsız bir hal alabilmekte ve kötü bir senaryoda birbirlerini destekleyici de olabilmektedirler. Sistemin dinamiklerini anlamak amacıyla tüm parametreler dikkate alınarak sonuçların elde edilmesi için deneysel çalışmaların yapılması gerekmektedir. Deneysel çalışmalardan güvenilir sonuç elde edilebilmesi için yüzer rüzgâr türbini sistemi ile çevre koşullarının sistematik ölçeklendirilmesi hayati önem taşımaktadır. Bu çalışmada yüzer platforma bağlı bir rüzgâr türbininin rotoru ve yüksek hızdaki atmosferik rüzgâr profili Froude benzeşimi kullanılarak 1/40 ölçek faktörüyle ölçeklendirilmesi yapılmıştır.

1.GİRİŞ

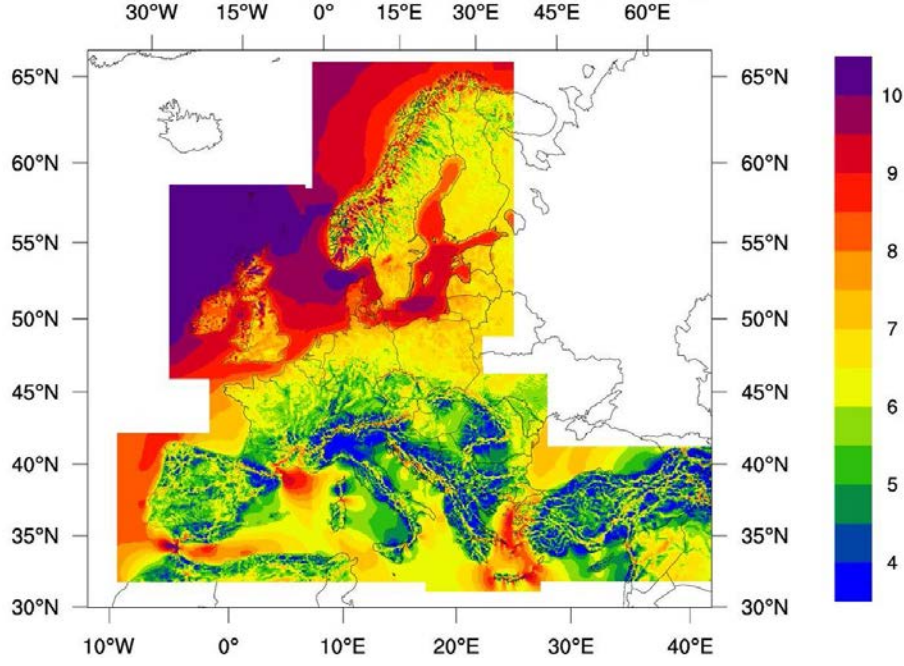
Dünyanın artan enerji talebine karşın ana enerji kaynağı olarak kullanılan fosil yakıtlar hızla tükenmektedir. Fosil yakıt tüketimindeki olağanüstü artış karbon ayak izini olumsuz etkilemektedir. Bu etki atmosferin alt katmanlarının kirlenmesi ve zararlı gazlarda önemli artış gibi ciddi sorunlara neden olmaktadır [1]. Son gelişmelerle desteklenen katı çevre düzenlemeleri ile rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi hızla artmaktadır. Rüzgâr enerjisinin kullanımı hızla genişlemekte olup, rüzgâr enerjisi artık birçok bölgede elektrik tedariki ve enerji sektörünün dekarbonizasyonu için en düşük maliyetli sürdürülebilir enerjiler arasında yer almaktadır [2, 3]. Küresel rüzgâr enerjisi kurulu gücü 2020 yılında bir önceki yıldaki kurulan güce göre %53 büyüme göstererek 93 GW kapasite ile toplam 743 GW kurulu güce ulaşmıştır. Dünyanın en büyük rüzgâr enerji pazarına sahip olan Çin ve Amerika liderliğinde karada 86.9 GW ile en büyük büyüme ve denizde 6.1 GW ile en büyük ikinci büyüme gerçekleşmiştir [4].

Son yıllardaki kurulu güçteki artış ile karada bulunan uygun arazilerin çoğu tükenmektedir. Özellikle uygun arazi kullanımının limite ulaştığı Kuzey Avrupa bölgesinde yatırımcılar alternatif arazilere yönelmektedir. Tepe, dağ ve orman arazilerinin hâkim olduğu Akdeniz ülkelerinde karadaki rüzgâr enerjisi potansiyeli kısıtlanmaktadır [5]. Açık deniz rüzgâr enerjisinin kara rüzgâr enerjisine kıyasla birçok avantajı bulunmaktadır. Düşük pürüzlülük ve dinamik yüzeyi sayesinde rüzgâr enerjisi yoğunluğu açık denizlerde çok daha fazladır [6]. Deniz yoluyla taşınım kolaylığı sayesinde çok daha büyük ölçekte rüzgâr türbinleri üretilebilmektedir. Görsel etki ve gürültü sorunları deniz üstü rüzgâr türbinleri ile ortadan kalkmaktadır [7]. Açık deniz rüzgâr teknolojisi son 10 yılda hızlı bir ilerleme kaydetmektedir. Küresel açık deniz rüzgâr enerjisi kurulu gücü 2020 yılında 6.1 GW'lık büyüme ile 35.3 GW kapasiteye ulaşmıştır. Maliyet azaltma adına son yıllarda yapılan üretim, ticari inovasyon, mühendislik çalışmaları ışığı altında yapılan geniş çaplı analiz sonucunda deniz üstü rüzgâr enerjisi maliyetinin 2050 yılında %37-49 oranında düşeceği öngörülmektedir [8]. Mevcut açık deniz rüzgâr enerjisi pazar tahminleri, gelecek 30 yılda dünya genelinde 1400 GW kurulu güce ulaşılacağını öngörmektedir [9].



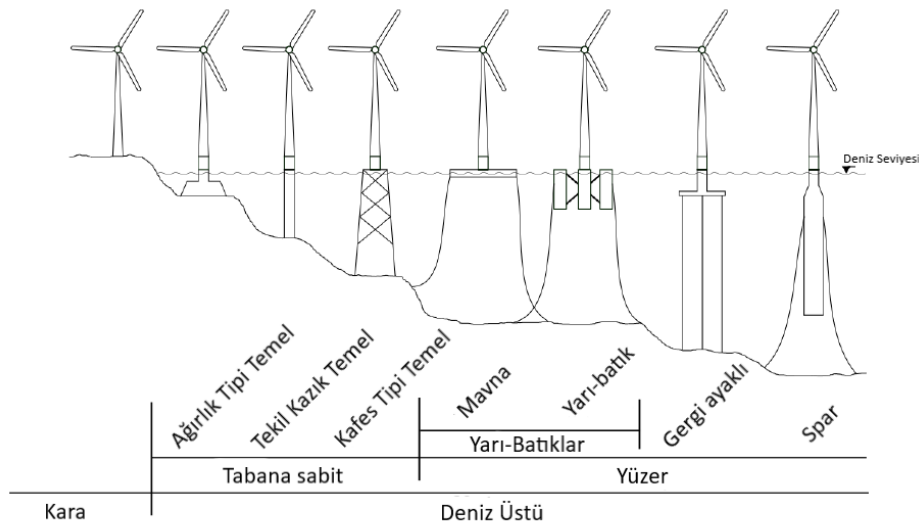
Şekil 1. 2016-2020 yılları arası yıllık yeni rüzgâr enerjisi kurulu güç kapasitesi [4]

Açık deniz rüzgâr türbinleri ve platformlar kurulmak istenen bölgeye göre değişiklik göstermektedir. Platformlar çeşitli derinliklerdeki kullanıma göre genel olarak tabana sabitlenmiş ve yüzer olarak ikiye ayrılır. Kurulduğu bölgenin su derinliği ile doğru orantılı olarak maliyeti artan tabana sabitlenmiş platformlar fiziksel ve ekonomik olarak 50 metrenin altındaki derinliklerde uygundur [10]. Yeni Avrupa rüzgâr atlası (Şekil 2), Avrupa komisyonunun 7. Çalışma programı çerçevesinde ERA-Net Plus enstrümanları aracılığıyla finanse edilen bir projedir. Bu proje düz arazide %3'ten daha az belirsizliğe ve rüzgâr enerjisi üretimi ve rüzgar türbinlerinin tasarımını etkileyen rüzgar koşullarına ilişkin diğer kompleks arazilerde %10'dan az belirsizliğe sahip olarak rüzgar enerjisi potansiyelini ölçmede önemli katkı sağlamaktadır [11]. Şekil 2'de görüldüğü üzere ülkemiz sularının rüzgâr potansiyeli yüksek bölgelerinin kullanımını tabana sabitlenmiş platformlar oldukça kısıtlamaktadır. Karadan uzaklaştıkça rüzgâr potansiyelinin artması, daha küçük taban iziyle deniz tabanına daha az zarar vermesi, beşerî alanlarda görüntü ve gürültü kirliliği yaratmaması ve çok daha derin denizlerde kullanılabilmesi gibi avantajları sayesinde yüzer rüzgâr türbinleri (YRT) üzerine çalışmalar son yıllarda hız kazanmıştır.



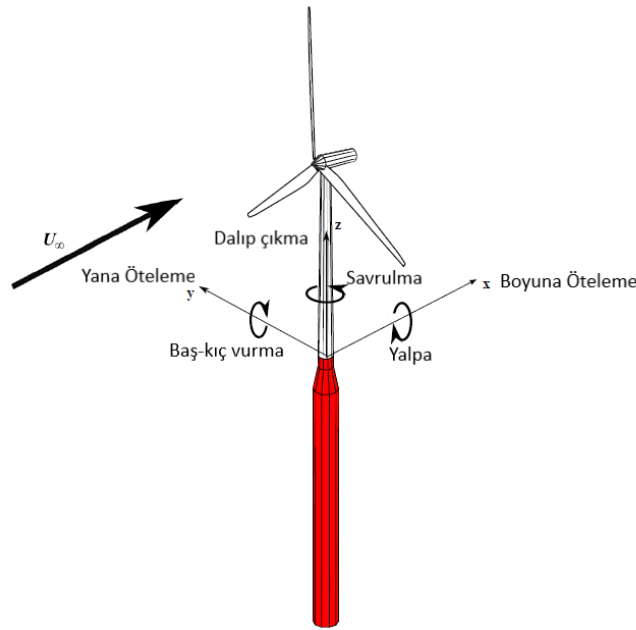
Şekil 2. Yeni Avrupa Rüzgar Atlası [12]

Mevcut açık deniz rüzgâr enerjisinden elde edilen birim enerji başına yapılan maliyeti düşürmek amacıyla rüzgâr türbini rotor çapları her geçen gün artmaktadır. YRT'ler yüksek derecede kompleks sistemlerdir. Tabana sabitlenmiş rüzgâr türbinlerinden farklı olarak YRT'ler her 3 ekseninde öteleme ve dönme hareket serbestliğine sahiptir. YRT'lerin dinamik modellerinde, yüzer platformdan ve platformun halatlarından gelen hidrodinamik kuvvetler ile türbinden gelen aerodinamik kuvvetlerin birleşimi, esneyebilen yapısal bileşimler, elastisite, kanat yunuslama açısı kontrolü ve halatların ilk durumuna dönme istekleri gibi durumların teknik ve ekonomik uygunluk olarak doğrulanmasının yapılması gerekir [13].



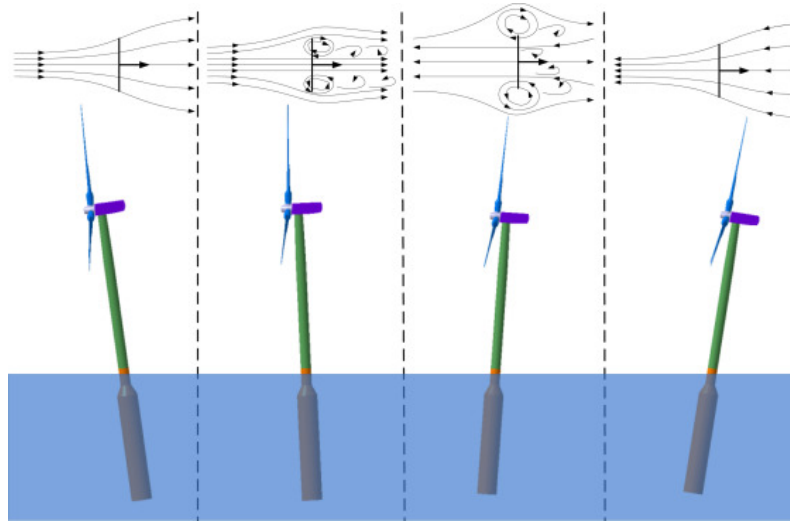
Şekil 3. Rüzgar türbini platform türleri [14]

Ölçeklendirilmiş model deneyleri, saha içi ölçümler ve sayısal benzetimler YRT'lerin teknik uygunluğunu test etmek için genel olarak kullanılan üç yöntemdir. Saha içi ölçümler için Japonya'da küçük ve ful ölçekli çalışmalara yapılmış olup [15], bazı çalışmalarda modellerin özellikle ekstrem koşullar altındaki dinamiği incelenmiştir. Sayısal benzetimler saha içi ölçümlere göre çok daha az maliyetli ve hızlıdır. Buna karşın sayısal benzetim yazılımlarının güvenilirliğini arttırmak için optimizasyon testleri halen uygulanmaktadır. Sayısal benzetim için birçok program geliştirilmesine rağmen lineer olmayan etkilerin, ekstrem ve karmaşık kuvvetlerin ve sistem dinamik davranışının doğrulanması amacıyla ölçeklendirilmiş model ve çevre deneyleri kullanımı önemli rol oynamaktadır. Sayısal benzetimlerde, ekstrem dalga ve viskoz kuvvetler, dalga-akıntı etkileşiminin halatlı yüzer platform yapıları üzerindeki etkisi gibi durumların modellenmesi oldukça zordur [16].



Şekil 4. Yüzer rüzgâr türbini hareket serbestlikleri [17]

Rüzgâr değişimi (wind shear), hamle(gust), türbülans, nasele savrulma hareketi gibi etkilerin altında çalışan rüzgâr türbininin etrafındaki akış karmaşık bir fiziksel yapıya sahiptir. Üç dönme (savrulma, baş-kıç vurma, yalpa) ve üç öteleme (dalıp çıkma, boyuna öteleme, yana öteleme) serbestliğine sahip yüzer platform hareketinden kaynaklanan rüzgâr kuvvetlerinin rotor üzerindeki değişimi YRT tasarımında kritik etmendir. Baş-kıç vurma ve savrulma hareketleri, rüzgâr değişimi, dinamik stall, kanat-iz (blade-wake) etkileşimi, verevlik açısı (skewed angle) gibi durumlar meydana getirerek dönen rotor kanadının aerodinamiğini önemli ölçüde zamana bağlı hale getirmektedir. Şekil 5 spar tip yüzer platformun baş-kıç vurma hareketi sırasında kanat etrafındaki akışı göstermektedir. Rotor kanadı akış yönünde giderek kanat-iz etkileşimine girer ve türbülans bölgesi oluşturur. Bu hareket geçiş akış durumu oluşturarak YRT'ler için potansiyel simülasyon ve operasyon problemi oluşturmaktadır [18].



Şekil 5. Yüzer platform baş-kıç vurma hareketi ve akışa etkisi [18]

Platform hareketinden dolayı nasel ve kule üzerinde oluşan büyük atalet kuvvetleri, sistemin zamana bağlı aerodinamik kuvvetlerini platform hareketinin frekansına ve şiddetine bağlı hale getirmektedir. YRT sistemlerinin geliştirilmesi ve doğrulanmasında ölçeklendirilmiş rüzgâr/dalga havuzu testleri, tasarım döngüsünün bir parçası olarak saha içi ölçümden daha az kaynak ve zaman kullanıp YRT'lerin kompleks dinamik hareketini doğru bir şekilde modellemekte ve tam-birleşmiş simülasyon programlarının doğrulanması için gerçek veri sağlamaktadır. Ölçeklendirilmiş modelleme için ilk milli türbin olan Northel POYRA P36/300 rüzgâr türbini referans olarak seçilmiştir. Bu türbinin rotor çapı 36 metredir. Çalışmada belirtilen ekstrem koşulları belirlemek için türbinin devrede kaldığı 20 m/s rüzgâr hızındaki elde edilen veriler kullanılarak ölçeklendirme çalışmaları yapılmıştır.

2. ÖLÇEKLENDİRME METODOLOJİSİ

Deneyisel çalışmalarda tercih edilen yöntemlerden biri de ölçeklendirmedir. Tasarlanan sistemlerin çok büyük boyutlara sahip olması, test edilebilmesi açısından maddi ve fiziki olarak çok büyük kayıplara sebebiyet verebilir. Bu olumsuzlukları en aza indirebilmek ve güvenlik riskleri de göz önünde bulundurulduğunda sistemleri ölçeklendirerek teste tabii tutmak verimli bir yöntem olarak kabul edilir. Ölçeklendirilmek istenilen sistemin çevresel etkilerini ve üzerine etki eden kuvvetlerin doğru bir şekilde benzerliğini sağlamak için 3 temel benzerlik kuralının sağlanması gerekmektedir. Geometrik benzerlik, kinematik benzerlik ve dinamik benzerlik kullanılarak elde edilen ölçeklendirme ile prototip ve model arasında tam benzerlik kurulur [19].

Ölçeklendirme faktörü (λ), model ile prototip parametresi arasındaki oran olarak tanımlanır. Bu ölçeklendirme faktörünün karakteristik uzunluk üzerinde uygulanması ile geometrik benzerlik sağlanır.

$$\lambda = \frac{P_m}{P_p} \quad (1)$$

Yüzer rüzgâr türbinlerinin üzerine etkiyen hidrodinamik kuvvetler Froude sayısı ile ölçeklendirilmelidir ve bu boyutsuz sayı dinamik benzerliği sağlar.

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gL}} \quad (2)$$

Reynolds sayısı, aerodinamik kuvvetlerin benzeşimini sağlamak için kullanılan bir boyutsuz sayıdır ve dinamik benzerliği sağlar.

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad (3)$$

Denklem 2 ve 3 göz önünde bulundurulduğunda dinamik benzerliği sağlamak için Froude ve Reynolds sayılarını aynı anda kullanmak mümkün değildir. Denklemlerdeki yerçekimi kuvveti ve viskozite değerleri model ile prototip arasında sabit tutulduğunda farklı akış hızları elde edilmektedir. YRT sistemi ve çevre ölçeklendirilmesinde Froude sayısı kullanımı, hidrodinamik ve aerodinamik akışlar için Reynolds sayısını büyük ölçüde azaltmaktadır. Yüzer platformların akışkan-katı etkileşimli akışları için tam ölçekli dinamik davranışlarını başarılı bir şekilde taklit eden yüzen yapıların ölçekli model testlerinde Froude sayısı ölçeklendirmesi yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Diğer yandan Martin [20] yaptığı çalışmada model ile prototip arasında geometrik benzerliği sağlayarak Reynolds benzeşimi yapmış, rotora etki eden itki kuvveti ve elde edilen güç arasında büyük farklar elde etmiştir. Reynolds benzeşimi kullanılamamasının diğer nedeni de orta ve büyük ölçekli türbinler dikkate alındığında ortalama olarak türbinlerin devreye girme ve çıkma aralıkları 3-25m/s olarak değerlendirilmiştir. Örnek olarak karakteristik uzunluğa göre 1/40 oranında bir ölçeklendirme faktörü kullanıldığında Reynolds benzeşimi ile modelde kullanılması gereken hız aralığı 120-1000m/s olarak hesaplanır. Model ve prototip arasındaki bu hız farkı ses altı ve ses üstü hızlar arasında geçişe neden olur ve doğru bir akış modellenmesi de elde edilememiş olur. Hidrodinamik kuvvetler YRT’de baskın olduğu için Froude benzeşimi kullanılır ve böylelikle dinamik benzerlik sağlanmış olur.

Reynolds sayısı ile aerodinamik kuvvetlerin doğru bir şekilde modellenemediği için bu kuvvetlerin benzeşimini sağlamak ve kinematik benzerliği elde etmek için kanat uç hız oranı denklemi (TSR) kullanılmalıdır.

$$TSR = \frac{\Omega R}{U} \quad (4)$$

denklemden, Ω rotor hızı, R rotor yarıçapı, U rüzgâr hızı olarak tanımlanır. Özetle YRT’de tam benzeşimi sağlamak için Froude (Fr) sayısı ve kanat uç hız oranı (TSR) kullanmak dinamik, kinematik ve geometrik benzeşimi sağlamış olur.

Kullanılan bu denklemler ile birim analizi yapılarak kullanılacak her bir parametrenin ölçeklendirme faktörü belirlenir. Bu çalışmada aerodinamik kuvvetlerin modellenmesi üzerine odaklanılmış olup platform modellenmesinde kullanılan daha fazla parametre için Chakrabarti’nin açık deniz yapıları modellenmesi kitabı [21] incelenebilir.

Tablo 1. Parametrelerin ölçeklendirme faktörleri

Parametre	Birim	Ölçeklendirme Faktörü
Uzunluk	[L]	Λ
Alan	[L] ²	λ^2
Hacim	[L] ³	λ^3
Yoğunluk	[M][L] ⁻³	1
Kütle	[M]	λ^3
Zaman	[T]	$\lambda^{0.5}$
Frekans	[T] ⁻¹	$\lambda^{-0.5}$
Hız	[L][T] ⁻¹	$\lambda^{0.5}$
İvme	[L][T] ⁻²	1
Kuvvet	[M][L][T] ⁻²	λ^3
Moment	[M][L] ² [T] ⁻²	λ^4
Güç	[M][L] ² [T] ⁻³	$\lambda^{3.5}$
Gerilme	[M][L] ⁻¹ [T] ⁻²	Λ
Kütle atalet momenti	[M][L] ²	λ^5
Alan atalet momenti	[L] ⁴	λ^4

3. ROTOR MODELLEMESİ

Yüzer rüzgâr türbinlerinin büyük ebatlarından dolayı yüksek ölçeklendirme faktörleri kullanıldığı için Reynolds benzeşiminin yapılamadığı açıklanmıştır. Rüzgâr türbinleri için Reynolds sayısındaki büyük azalma rüzgâr türbini performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Düşük Reynolds sayısında özellikle kanadın alçak basınç tarafında akış yer değiştirme kalınlığı çok daha büyüktür ve akış kanadın hücum kenarına yakın laminar bölgede ayrılarak optimal basınç dağılımını bozmaktadır. Bu etki rüzgâr türbini kanadını oluşturan kanat profili bölümlerinin kaldırma (C_l) ve taşıma katsayısında (C_d) büyük değişikliklere yol açar. Bu katsayılar kanatta kullanılan airfoil profillerinde oluşan kaldırma ve taşıma kuvvetinin önemli bir bileşenidir.

$$F_L = \frac{1}{2} \rho V^2 c C_l$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho V^2 c C_d$$

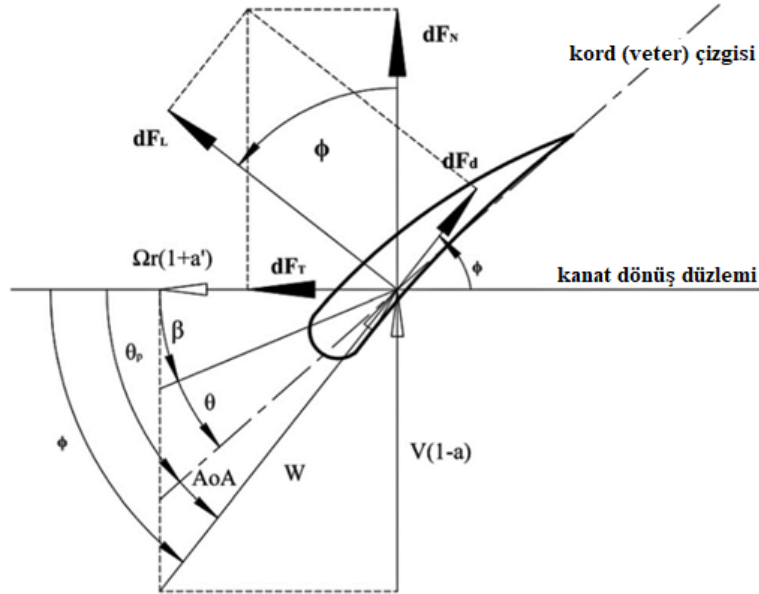
Literatüre bakıldığında rotor modellemesi; modellenen kulenin üzerine eklenen delikli plakalar, düz plaka, fan ekleme gibi yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmesi çalışılsa da bu yöntemlerde dönen bir rotorun olmaması, gelen akışın bloke edilmesi veya hiç kullanılmaması gibi nedenlerle sisteme etki eden birkaç kuvvetin çıkarılması anlamına gelmektedir. Yapılan çalışmalarda sisteme gelen veya oluşan tüm kuvvetlerin kullanıldığı en doğru modelleme şeklinin itki ve güç değerlerinin ölçeklendirilerek yapılan kanatlı rotor modellemesi olduğu ortaya çıkmıştır.

Aşağıdaki şekilde Kanat elemanı momentum teorisine göre rüzgâr türbini kanat eksenine etki eden kuvvetler ve açılar gösterilmiştir. Burada iki önemli faktör bulunmaktadır. Bunlar aksel indüklenme ve teğetsel indüklenme faktörleridir. Bu faktörler kanadın aksel olarak ve teğetsel olarak arkasında oluşan rüzgâr hızlarının bilinmemesinden kaynaklı iteratif olarak hesaplanan değerlerdir.

$$a = \frac{U_\infty - U_d}{U_\infty} \quad (6)$$

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (7)$$

a aksel indüklenme faktörüdür ve serbest akış hızı ile kanat üzerindeki akış hızı parametrelerinden oluşur. a' ise teğetsel indüklenme faktörüdür ve teğetsel olarak kanadın arkasında oluşan hız ile kanat dönüş hızı parametrelerinden oluşur.



Şekil 6. Yatay rüzgâr türbini kanat kesiti [22]

Rüzgâr türbinin bütün sisteme ilettiği temel kuvvetler, jiroskopik momentler ile rotor torku ve itkisidir. Froude ölçeklendirme ile doğru bir şekilde ölçeklendirilmiş kütle özellikleri ve kanat uç hızı ile jiroskopik moment korunur. Rotor torku (F_Q) ile itkisi (F_T) daha önce belirtildiği gibi korunmaz ve her iki kuvvetin istenilen şekilde elde edilebileceği senaryo mümkün değildir. Rotor itki kuvveti ve bu kuvvetten dolayı oluşan halat kuvvetlerinin devrilme momentine etkisi daha büyük olduğundan itki kuvveti korunumuna öncelik verilir.

$$F_Q = F_L \sin \phi_i - F_D \cos \phi_i$$

$$F_T = F_L \cos \phi_i + F_D \sin \phi_i \quad (8)$$

Yapılan çalışmalarda geometrik ölçeklendirmenin işe yaramadığından bahsetmiştik bu nedenle referans türbinin kanat yapısını oluşturan NACA4415 ve türevlerinden oluşan airfoiller kullanıldığında da istenilen itki ve güç elde edilememiştir.

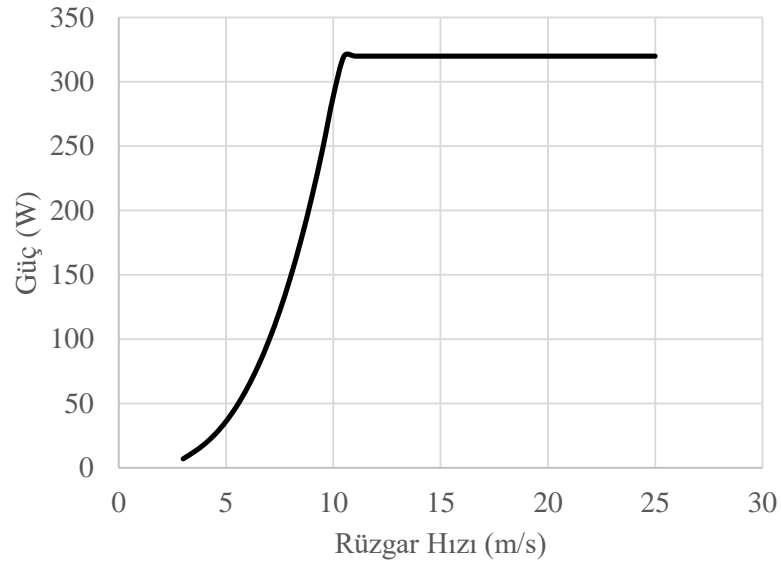
a. Referans Türbin

Bu çalışmada kullanılan referans türbinine ait operasyon özellikleri verilmiştir.

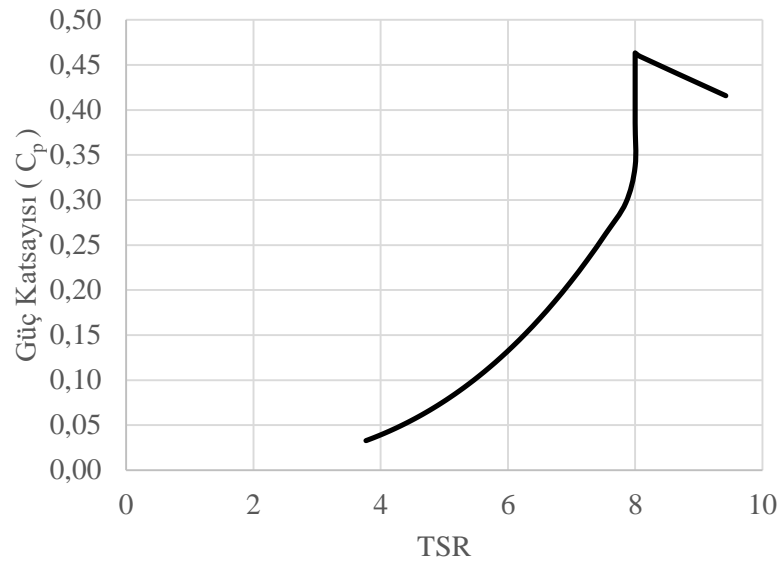
Tablo 2. Northel Poyra P36/300

Parametre	Açıklama
Kanat sayısı	3 kanat
Hub çapı	2 metre
Rotor çapı	36 metre
Devreye giriş rüzgâr hızı	2.9 m/s
Devreden çıkış rüzgâr hızı	25 m/s
Minimum rotor devri	15 dev/dk
Maksimum rotor devri	50 dev/dk
Türbin nominal gücü	320 kW
Güç regülasyonu	Pitch kontrollü

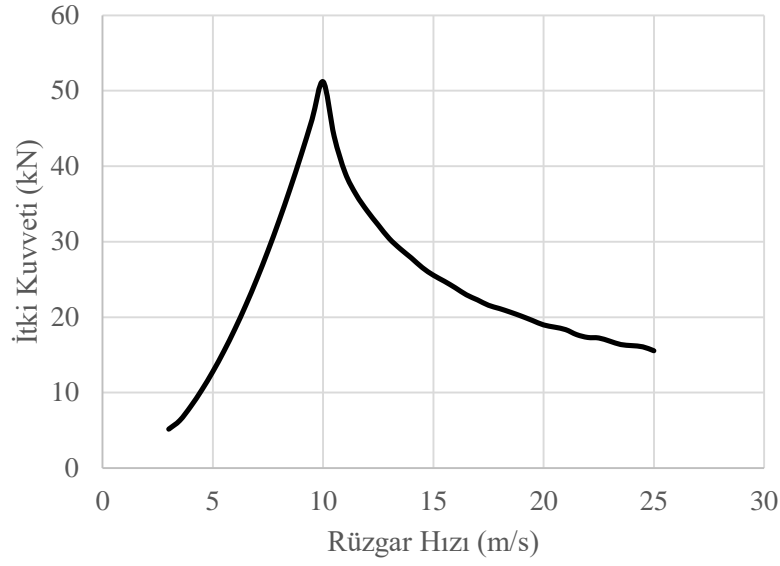
Referans türbinin kanadı NACA4415 ve türevlerinden oluşan airfoillerden tasarlanmıştır. Alınan türbine ait teknik veriler ve aerodinamik analiz sonuçları kanat modellemesinde kullandığımız QBlade [23] yazılımı ile tekrar analiz edilmiş hem yazılımın güvenilirliği hem de şirketten alınan verilerin doğruluğu teyit edilmiştir. Yazılım kanat elemanı metoduna göre analiz yaptığı için bazı kısıtlamaları bulunmaktadır bunlar çevresel akış, iz (wake) etkisi, vortisite etkisi ve türbülanstır. Bu nedenle yazılımın içerisine eklenen düzeltme faktörleri kullanılarak sonuç gerçeğe daha da yakınsatılır. Bunlar; prandtl uç ve çatı kayıpları, 3D doğrulama, Reynolds taşıma düzeltmesi, airfoil interpolasyonudur. QBlade yazılımında yapılan analizlerde elde edilen veriler ile şirketten alınan verilerin birebir uyduğu yapılan çalışmalarda teyit edilmiştir.



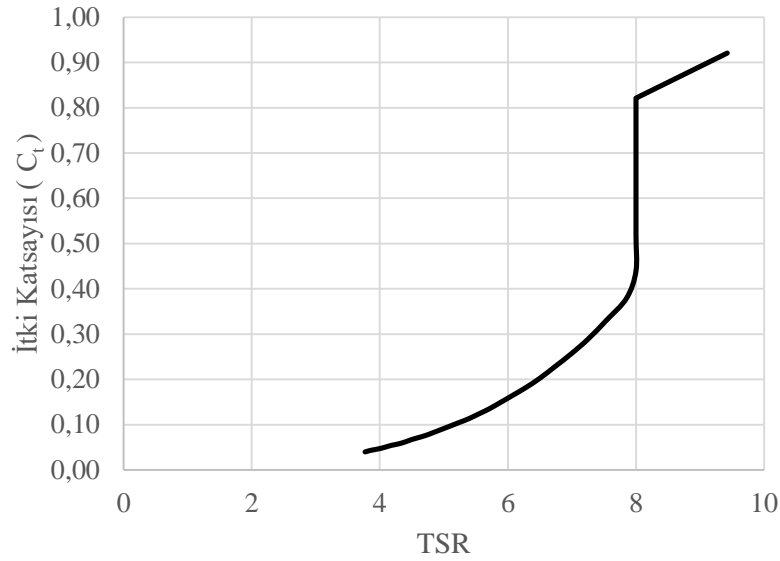
Şekil 7. Rüzgâr hızına göre referans türbin güç grafiği



Şekil 8. Güç katsayısının kanat uç hız oranıyla değişimi



Şekil 9. Rüzgâr hızına göre referans türbin itki kuvveti



Şekil 10. İtki katsayısının kanat uç hız oranıyla değişimi

Rüzgâr hızına ve kanat uç hızı oranına bağlı grafiklerinden de anlaşılacağı gibi türbin rotoru 10 m/s rüzgâr hızından sonra nominal güce ulaşıyor. Bu rüzgâr hızından sonra sabit güç üretmeye devam ederken rotorun üzerine etkiyen itki kuvveti de azalan yönde tepki gösteriyor.

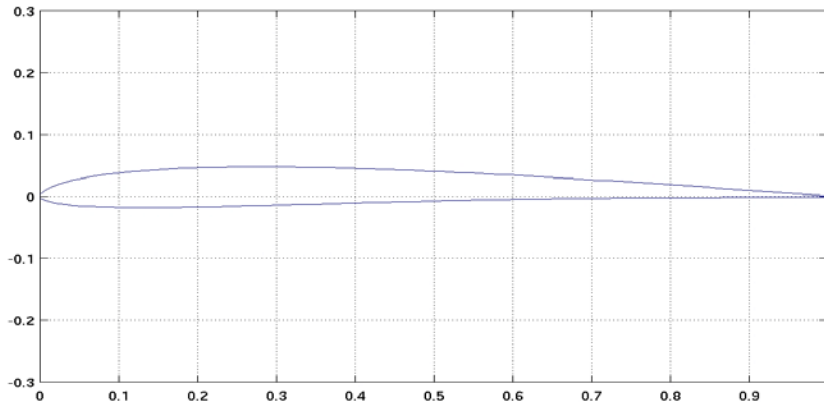
b. Model Türbin Tasarım ve Analiz

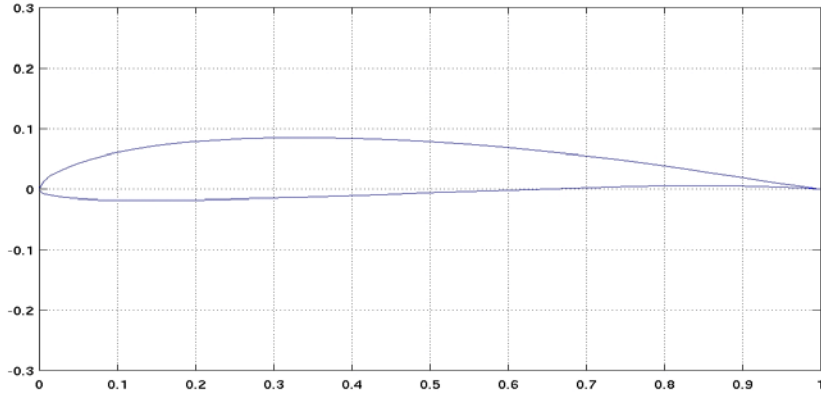
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nün Hidrodinamik laboratuvarının altyapısına bağlı olarak maksimum boyutta test edebileceğimiz bir model için 1/40 oranında bir ölçeklendirme faktörü seçilmiştir. Testin amacı ekstrem rüzgâr ve dalga koşullarında olduğu için model türbinin tasarımı türbinin devreden çıkma hızına yakın olduğu 20 m/s rüzgâr hızı seçilmiştir.

Tablo 3. İstenilen model rotor ölçeklendirmesi

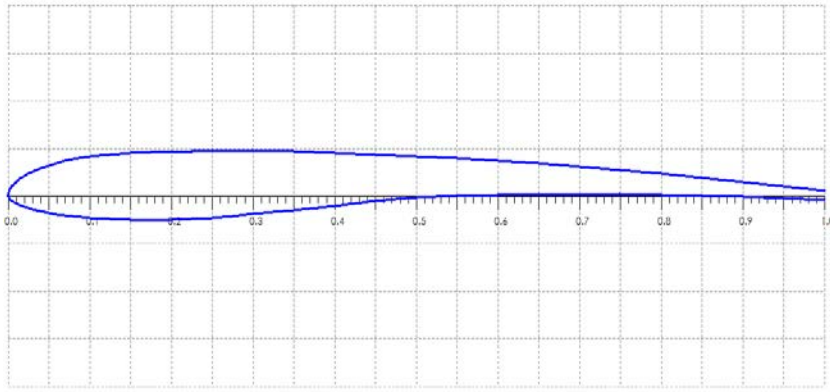
Parametreler	Referans Türbin	Ölçeklendirme Faktörü	Model Türbin
Hub çapı	2 metre	λ	0.05 metre
Rotor çapı	36 metre	λ	0.9 metre
Rüzgâr Hızı	20 m/s	$\lambda^{0.5}$	3.16 m/s
Rotor devri	50 dev/dk	$\lambda^{-0.5}$	316.22 dev/dk
TSR	4.71	1	4.71
Güç	320 kW	$\lambda^{3.5}$	0.79 W
İtki Kuvveti	18.9 kN	λ^3	0.296 N
Kanat Ağırlığı	1774 kg	λ^3	27.72 gr

Yapılan literatür taramasına göre Martin [20] çalışmasında geometrik ölçeklendirme yapmış, ne istenilen güç verisine ne de istenilen itki kuvvetini elde edebilmiştir. Bayati [24] çalışmasında geliştirdiği aeroelastik kod ile kanat profillerini değiştirerek istenilen güç ve itki kuvvetine ulaşmıştır. Fakat bu kod megavat üstü büyük türbinlerde ve küçük ölçeklendirme faktörlerinde kullanıldığı için projemizde kullanmamıza uygun değildir. Sonuç olarak yapılan tasarımda rijit cisim yaklaşımı kullanılarak tasarım elde edilmiştir. Benzer çalışmalarda kullanılan iki farklı düşük Reynolds kanat profili vardır, bunlar Martin'in çalışmasında kullanılan AG04 ve Bayati'nin çalışmasında kullanılan SD7032'dir. Bu kanat profilleri modelleme çalışmasında kullanılmak üzere seçilmiştir. Ayrıca Mars projesi için tasarlanan Ishii kanat profili [25] de dikkate alınmıştır.

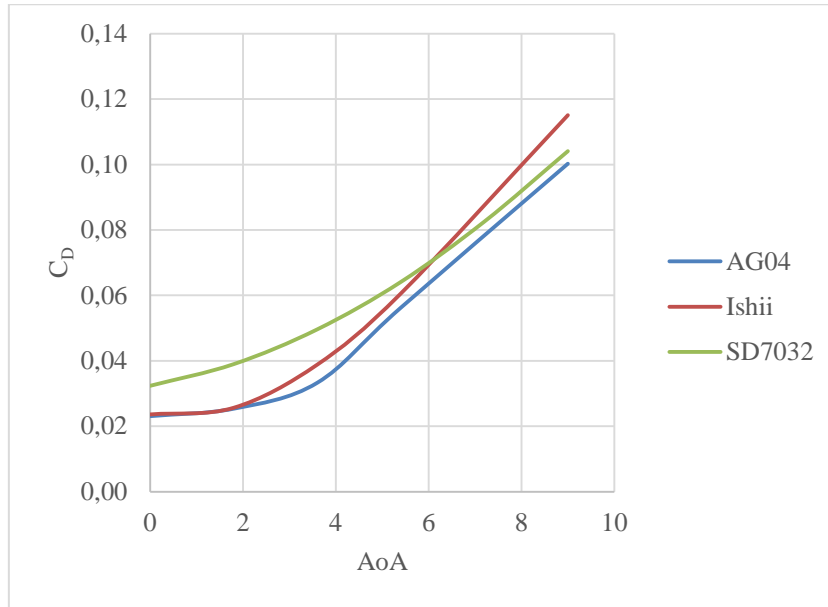
**Şekil 11.** AG04 airfoil



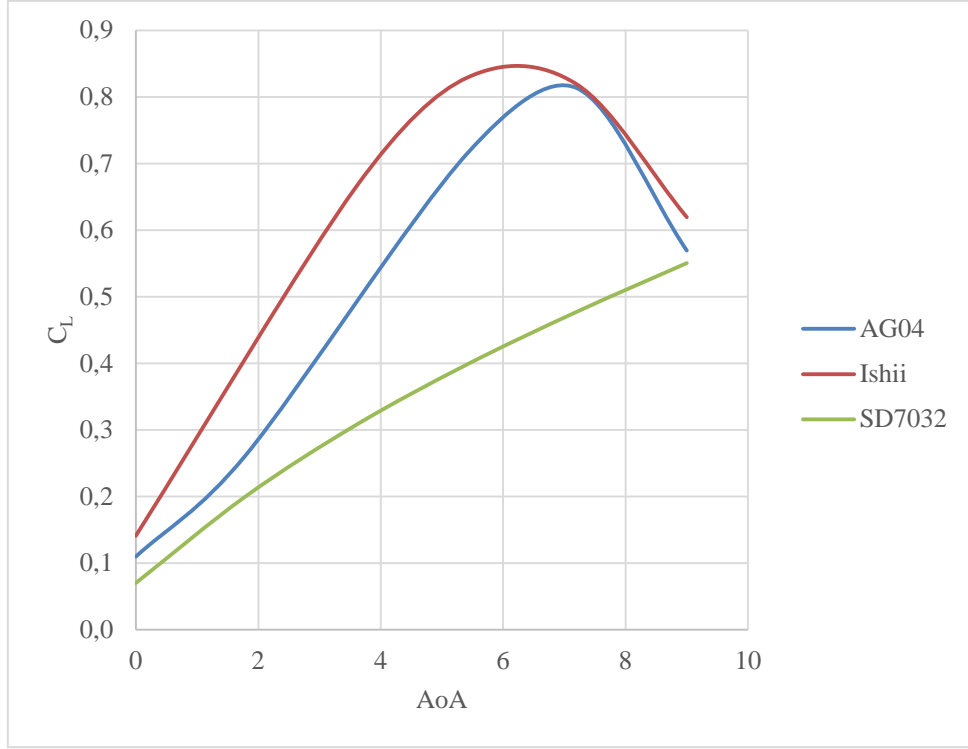
Şekil 12. SD7032 airfoil



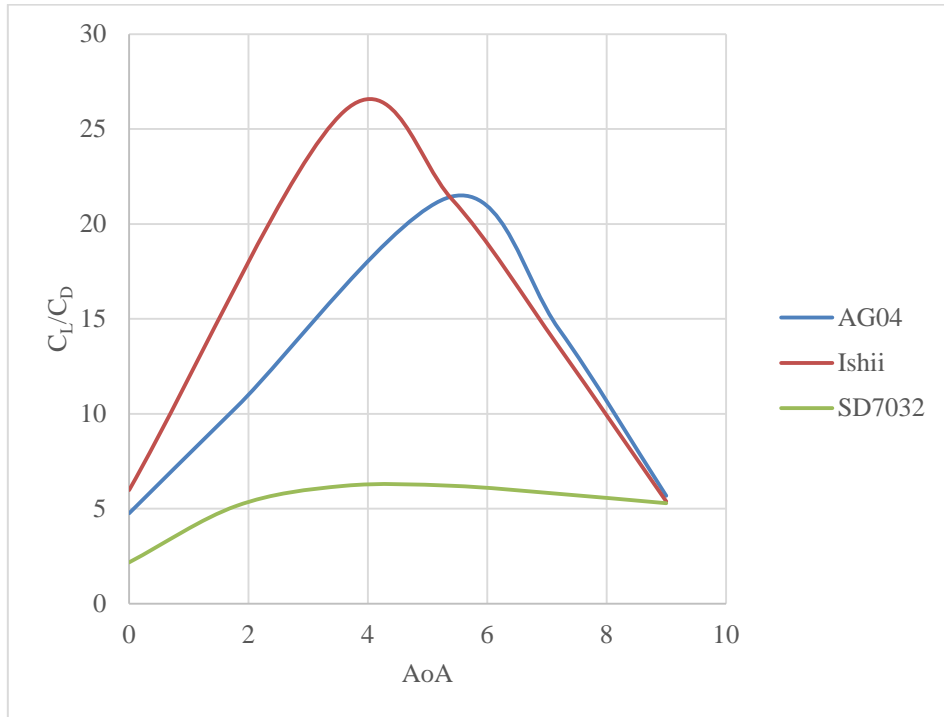
Şekil 13. Ishii airfoil



Şekil 14. Hücüm açısına bağlı taşıma katsayısı (Re=19200)



Şekil 15. Hücüm açısına bağlı kaldırma katsayısı (Re=19200)



Şekil 16. Seçilen airfoil profillerinin polar verisi (Re=19200)

Seçilen üç airfoile ait kaldırma ve taşıma katsayıları kanadın uç konumunda hesaplanan 19200 Reynolds sayısına göre XFoil yazılımında analiz edilmiştir. Grafiklerden de basitçe anlaşıldığı gibi en iyi kaldırma kuvveti katsayısı ve kaldırma kuvveti katsayısının taşıma kuvveti katsayısına oranına göre en yüksek değere sahip olan Ishii airfoil'in daha yüksek performansa sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 4'te belirtilen airfoiller ve metot ile oluşturulan kanatların QBlade ile rotor analiz sonuçları verilmiştir. Model rotor ölçeklendirme metoduna göre 3.16 m/s rüzgar hızı, 316.22 devir/dakika ve 4.71 TSR koşulları altında seçilen üç airfoil için ayrı ayrı analiz edilmiştir.

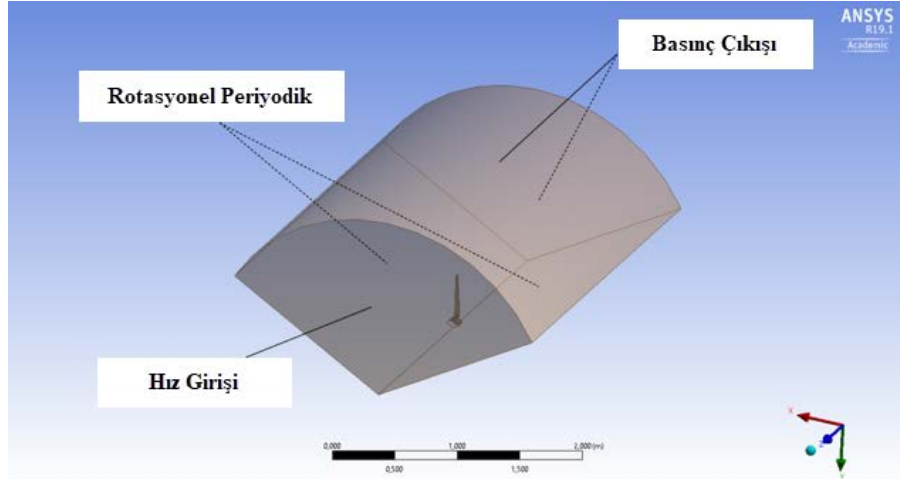
Tablo 4. Model rotor analizleri

Kullanılan airfoil	Güç (W)	Güç Katsayısı	İtki (N)	İtki Katsayısı
AG04	-0.148	-0.0120	0.302	0.0776
Ishii	0.138	0.0112	0.303	0.0778
SD7032	-0.144	-0.0117	0.298	0.0765

Kanat elemanı metoduna göre yapılan tasarımda model ile prototip arasında sabit itki katsayısı (C_T) elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu nedenle kullanılan airfoiller arasındaki kaldırma kuvveti farklılığından dolayı AG04 ve SD7032 airfoilleri belirtilen koşullar altında negatif güç sahiptir yani enerji tüketmektedir. Çalışmalara pozitif güç üreten Ishii airfoil ile tasarlanan rotorla devam edilmiştir.

Ishii kanadı, kanat elemanı metodu kullanılarak bazı kısıtlamalar altında analiz edildiği için buradaki sonuçları daha güvenilir metot olan hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kullanarak teyit etmek gerekir. Bu amaçla HAD çalışmasında ANSYS Fluent programı kullanılmıştır.

120 derecelik periyodik model ile oluşturulan çözüm hacminin alan yarıçapı, rotor dış yarıçapının 3.3 katıdır. Aynı mesafe (rotor dış yarıçapının 3.3 katı) roturun önü ve arkasındaki hacmi boyutlandırmada kullanılmıştır. Bu nedenle, girişten çıkışa etki alanı, rotor dış yarıçapının 6.6 katıdır. Çözüm hacmi Şekil 17'de gösterilmiştir.



Şekil 17. HAD çözüm hacmi

Çözüm hacmindeki sınır koşulları; Giriş, hız girişi ve çıkış, basınç çıkışıdır. Yukarıda gösterildiği gibi, alan dış yarıçapı Euler (viskoz olmayan) duvarı olarak belirtilmiştir. Sıkıştırılamaz akış modeli kullanılmıştır (yoğunluk 1.225 kg / s alınmıştır). Kullanılan çözüm modelleri;

- Reynolds Ortalama Navier Stokes (RANS) modeli
- Hücre-merkezli Sonlu Hacim
- Basınç-hız bileşimi için birleşmiş çözücü
- Konvektif terimler için ikinci dereceden upwind scheme
- Türbülans (Laminar akıştan türbülanslı akışa geçiş sınır tabakasını modellemek için k-omega SST + gamma + Reynolds Theta denklemleri) için Geçiş SST modeli

Tablo 5. HAD analiz çalışmaları

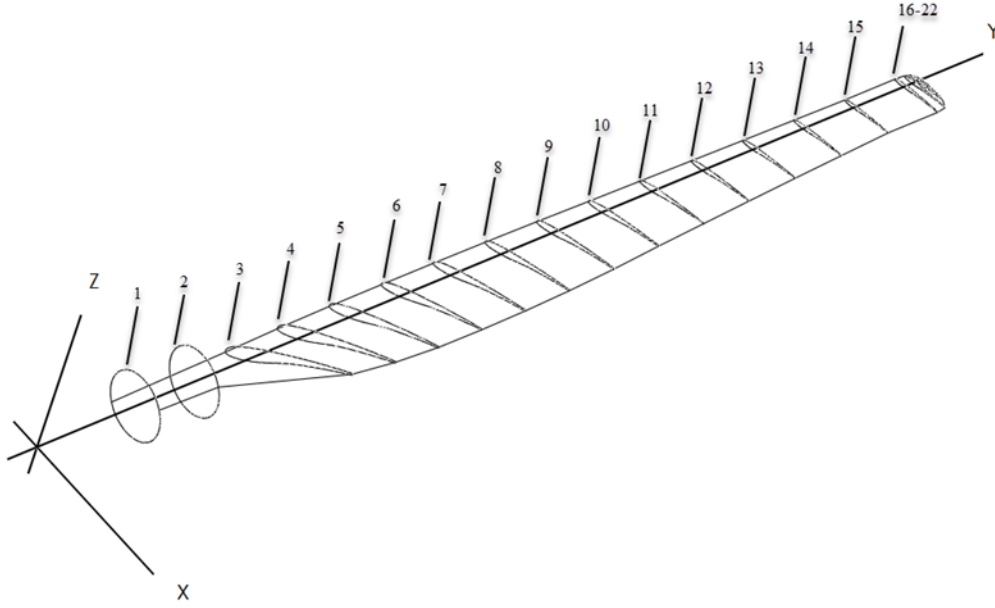
	Çalışma 1	Çalışma 2	Çalışma 3	Çalışma 4
Ağ hacmi sayısı	2.8M	5.3M	14.1M	21M
Yüzey ağ boyutu	1.2 mm	0.9 mm	0.6 mm	0.5 mm
Sınır tabakayı daha iyi çözümlenmek için kullanılan tabaka ağı sayısı	20	20	20	20
Menzil dışı alanın ağ boyutu	100 mm	100 mm	100 mm	50 mm
Kanat ve menzil dışı alan arası ağ büyüme oranı	1.20	1.15	1.10	1.10
y+	0.16	0.12	0.077	0.060
Güç	0.32 W	0.32 W	0.37 W	0.39 W
İtke kuvveti	0.33 N	0.32 N	0.32 N	0.32 N

Farklı ağ sayıları ile yapılan analizlerde 4.çalışmada güç ve itki kuvveti verilerinden ağ sayısı bağımsızlığı sağlanmıştır ve 0.39W güç, 0.32N itki elde edilmiştir. İstenilen itki değeri ile yaklaşık 8% fark vardır ve bu tasarım için kabul edilebilir bir orandır.

Ishii airfoil ile oluşturulan kanadın geometrik verileri ve görünümü Tablo 6 ve Şekil 18’de verilmiştir.

Tablo 6. Model kanadın geometrik verileri

Bölüm	Airfoil	Radyal Pozisyon (m)	Kord Uzunluğu (m)
1	Silindir	0.05000	0.03000
2	Silindir	0.08000	0.03000
3	Ishii	0.11000	0.08000
4	Ishii	0.13548	0.07310
5	Ishii	0.16093	0.06687
6	Ishii	0.18640	0.06116
7	Ishii	0.21187	0.05591
8	Ishii	0.23734	0.05115
9	Ishii	0.26281	0.04675
10	Ishii	0.28828	0.04250
11	Ishii	0.31374	0.03864
12	Ishii	0.33921	0.03513
13	Ishii	0.36468	0.03193
14	Ishii	0.39015	0.02903
15	Ishii	0.41562	0.02639
16	Ishii	0.44108	0.02613
17	Ishii	0.44553	0.02500
18	Ishii	0.44775	0.02000
19	Ishii	0.44887	0.01500
20	Ishii	0.44944	0.01000
21	Ishii	0.44972	0.00750
22	Ishii	0.45000	0.00005



Şekil 18. Model kanadın görünümü

4.ATMOSFERİK SINIR TABAKA ÖLÇEKLENDİRİLMESİ

Atmosferik sınır tabaka düşey ekseninde üçe ayrılır. En alçak tabaka yüksekliği sadece birkaç milimetrelik laminar bir tabakadır ve rüzgâr enerjisi uygulamalarında dikkate alınmaz. Rüzgâr hızının yükseklik ile hızla arttığı 100 metrenin üzerinde yüksekliği ile havanın türbülans viskozitesinden dolayı kuvvetlerin oluştuğu yüzey tabaka atmosferik sınır tabakanın ikinci aşamasını oluşturur. Üçüncü ve en yüksek tabaka atmosferik sınır tabakanın %90'ını oluşturan Ekman tabakasıdır. Rüzgârın dünya yüzeyinden etkilendiği yüzey tabakasında rüzgâr profili logaritmik denklem ile şu şekilde tanımlanır [26]:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (9)$$

z ortalama yer seviyesinden yükseklik, z yükseklikteki rüzgâr hızı u , u_* sürtünme hızı ve κ Von-Karman sabiti olup, sınır tabaka meteorolojisinde 0.40 alınmaktadır. Kaydırmama koşulundan (no-slip condition) dolayı yüzey sınır tabakadaki rüzgâr hızı yüzeye yaklaştıkça azalmalı ve sıfır olmalıdır. Rüzgâr hızının sıfır olduğu yükseklik (z_0) pürüzlülük ya da aerodinamik pürüzlülük olarak tanımlanır ve z_0 değeri sıfıra eşit değildir.

Tablo 7. Çeşitli arazi türlerine bağlı pürüzlülük değerleri [6]

Arazi Türleri	Su	Kar	Çim	Tarla	Orman	Şehir
Pürüzlülük (m)	$2 * 10^{-4}$	10^{-3}	0.03	0.1	0.8	1.0

Dünya yüzeyinin yaklaşık 2/3'ü okyanus, deniz ve göl gibi su yüzeylerinden oluşur ve küçük ölçekteki hava-su etkileşiminde deniz sınır tabaka büyük rol oynar. Toprak ve su yüzeyi arasında termodinamik ve dinamik karakteristik kaynaklı büyük farklılıklar vardır. Su için pürüzlülük $2 * 10^{-4}$ m olarak belirlenmiştir. Uzun iklimsel süreçler düşünüldüğünde bu kabul edilebilir. Sakin ve fırtınalı deniz karşılaştırıldığında pürüzlülüğün rüzgâr hızına bağlı olduğu görülür. Açık okyanuslar üzerindeki çetin fırtınalı hava koşullarında dalgaların 20 m – 30 m gibi ürkütücü boyutlara çıktığı gözlemlenmiştir. Havanın su ile etkileşime geçtiği kompleks bölgeler için Charnock pürüzlülük denklemini Fünme hızına bağlı bir denklem ile tanımlamıştır:

$$z_0 = a \frac{u_*^2}{g} \quad (10)$$

$g = 9.81 \text{ m/(s}^2\text{)}$ yerçekimi sabiti ve su yüzeyinde gerçekleştirilen çeşitli pürüzlülük ve sürtünme hızlarının deney sonucunda a sabiti 0.0185 olarak hesaplanmıştır.

Su yüzeyinde rüzgâr hızları üç farklı grupta incelenmektedir. Sakin, zayıf rüzgarlar ($U_{10} < 2.5 \text{ m/s}$), göreceli sert orta dereceli rüzgarlar ($2.5 \text{ m/s} < U_{10} < 7.5 \text{ m/s}$), tamamen sert ve güçlü rüzgarlar ($U_{10} > 7 \text{ m/s}$). Dalgalar, rüzgâr ile fazla direnç göstermeden hareket ettiği için tropik fırtına koşullarında dahi çok küçük ($10^{-4} - 10^{-1} \text{ m}$) pürüzlülükler gözlemlenmiştir. Charnock denklemi, tamamen sert güçlü rüzgâr deney verileri ile karşılaştırıldığında yüksek oranda tutarlılık payı vardır [27].

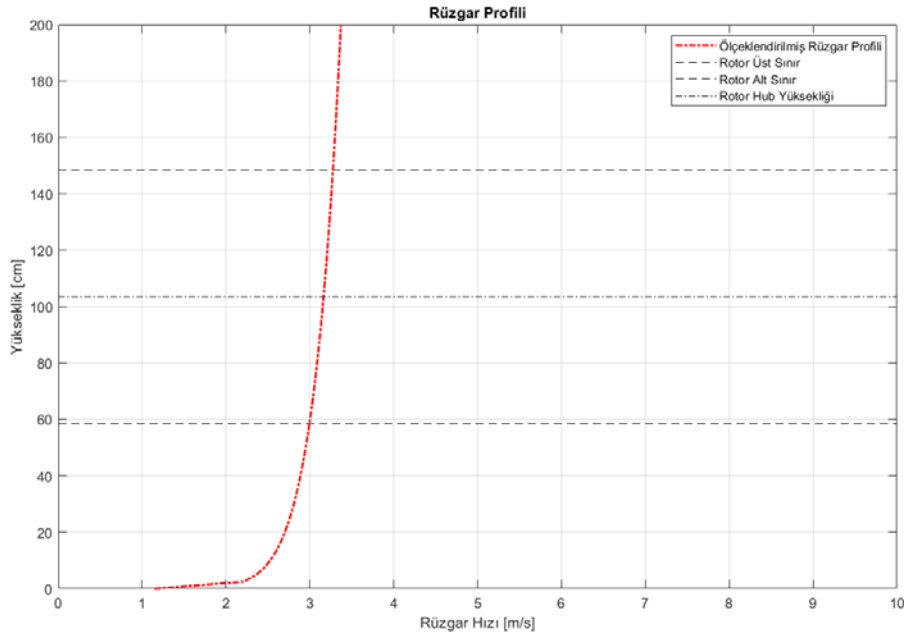
Pürüzlülük ve sürtünme hızı değerleri bölgenin yerel koşullarına ve rüzgâr hızına bağlıdır. Bundan dolayı Froude ölçekli rüzgâr tüneli akış profilini oluştururken güç yasası denklemi kullanılmıştır.

$$u(z) = u_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (11)$$

Referans türbinin 20 m/s rüzgâr hızındaki işletme koşulları ve 1/40 ölçeklendirme faktörüne göre model türbinin (36 m) hub yüksekliğinde istenilen rüzgâr hızı 3.16 m/s olarak hesaplanmıştır. Charnock pürüzlülük denklemi (Denklem 10), logaritmik rüzgâr profili denklemindeki (Denklem 9) pürüzlülük terimi yerine yazılarak verilen yükseklik ve hız değeri yerine konulduğunda bir bilinmeyenli denklem çözülmüştür. Hub yüksekliğindeki istenilen rüzgâr hızına göre u_* ile z_0 değerleri sırasıyla 0.7567 m/s ve 0.0011 m bulunmuştur. α değerinin pürüzlülüğe bağlı korelasyonu Counihan tarafından aşağıdaki gibi tanımlanmıştır [28]:

$$\alpha = 0.096 \log_{10} z_0 + 0.016(\log_{10} z_0)^2 + 0.24 \quad (12)$$

$0.001 \text{ m} < z_0 < 10 \text{ m}$ için verilen bu denkleme göre α değeri 0.0960 bulunmuştur. Bu hesaplamalar sonucunda logaritmik rüzgâr profilinden güç yasası rüzgâr profiline geçilmiştir. 1 boyutlu rotor süpürme alanına göre oluşan rüzgâr profili aşağıdaki şekilde görülmektedir.



Şekil 19. Froude benzeşimi ile ölçeklendirilmiş rüzgâr profili

5. SONUÇ

Ölçeklendirilmiş model deneyleri, saha içi ölçümlerden daha düşük maliyetli ve daha az riskli olmasının yanı sıra YRT'lerin kompleks dinamik hareketini doğru bir şekilde modellemekte ve tam-birleşmiş sayısal benzetim programlarının doğrulanması için gerçek veri sağlamaktadır.

Büyük ölçek faktörü (örneğin 1/80), hem Reynolds sayısına bağlı sorunları daha da kötüleştireceğinden hem de tasarım ve imalat sırasında ulaşılması imkansız yakın model ağırlık hedefleri oluşturacağından tercih edilmez. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nün Hidrodinamik laboratuvarının altyapısına bağlı olarak en uygun ölçek faktörü 1/40 olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada ilk milli türbin olan Northel POYRA P36/300 ait teknik veriler ve aerodinamik analiz sonuçları kanat modellemesinde kullandığımız QBlade yazılımı ile çeşitli düzeltme faktörleri, Froude benzeşimi ve 1/40 ölçek faktörü kullanılarak, türbin kanadı ölçeklendirilmiş bununla beraber ekstrem çevresel operasyon koşulları için atmosferik sınır tabaka rüzgâr profili ölçeklendirilmesi yapılmıştır. Hem yazılımın güvenilirliği hem de şirketten alınan verilerin doğruluğu teyit edilmiştir.

YRT'ler kompleks dinamik davranışlarına katkıda bulunan çok sayıda değişkene sahip yapılardır. Eşzamanlı hidrodinamik ve aerodinamik kuvvetler, türbin aerodinamiği ve esnek yapısal bileşenler modelin doğru ölçeklendirilmesini hayati hale getirir. Ölçeklendirilmek istenilen sistemin çevresel etkilerini ve üzerine etki eden kuvvetlerin doğru bir şekilde benzerliğini sağlamak için 3 temel benzerlik kuralının (geometrik, kinematik, dinamik) sağlanması gerekmektedir.

YRT sistemi ve çevre ölçeklendirilmesinde Froude sayısı kullanımı, Reynolds sayısını büyük ölçüde azaltmaktadır. Düşük Reynolds sayısı türbin aerodinamiğini değiştirmektedir. Kanat uç hızının korunması, türbin dönüş hızının yanı sıra sistem uyarma frekanslarının düzgün şekilde ölçeklenmesini sağlar. Ölçeklendirilmiş rotor itki kuvveti, YRT sistemi dinamik davranışında önemli etkiye sahiptir. Düşük Reynolds sayısına özel kanat tasarımı, itki kuvvetlerini Froude ölçekli rüzgarlarla eşleştirmeye izin verir ve rüzgâr türbini sönmüleme etkilerini daha iyi yakalar. Bu nedenle, yeniden tasarlanmış bir rotor en iyi seçenektir.

Atmosferik sınır tabaka, rüzgâr türbininin iz (wake) bölgesinin incelenmesi ya da yüzer platformun devrilme momentinin incelenmesi gibi dinamik olayların gözlemlenmesi ve hesaplanması açısından oldukça önemlidir. Atmosferik sınır tabaka kullanılarak rüzgâr türbinine gelen yüklerin gerçeğe yakın bir şekilde simülasyonu sağlanabilmektedir.

TEŞEKKÜRLER

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 217M451 numaralı, “Yüzer Rüzgâr Türbini Salınım Dinamiği ve Performansının Deniz Dalgaları ve Aşırı Rüzgâr Hızları Altında İncelenmesi- Investigation of the Oscillation Dynamics and the Performance of a Floating Wind Turbine Under Sea Waves and Extreme Winds” başlıklı projesi kapsamında fonlamış ve desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Chakraborty, S., Dutta, S. & Biswas, N., *A Review Paper of Wind Energy*, in *National Conference on Advances & Research in Electrical System Technology*. 2011. p. pp. 202-206.
- [2] Lazard, . *Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis–Version 14.0* 2020.
- [3] Barthelmie, R. and S. Pryor, *Potential contribution of wind energy to climate change mitigation*. *Nature Climate Change*, 2014. **4**: p. 684-688.
- [4] GWEC, *Global Wind Report* 2021.
- [5] Bingöl, F., *Complex Terrain and Wind Lidars*, in. *Risø National Laboratory for Sustainable Energy*. 2010: Risø.
- [6] Landberg, L., *Meteorology for wind energy : an introduction*. 2016.
- [7] Bilgili, M., A. Yasar, and E. Simsek, *Offshore wind power development in Europe and its comparison with onshore counterpart*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011. **15**(2): p. 905-915.
- [8] Wiser, R., et al., *Expert elicitation survey predicts 37% to 49% declines in wind energy costs by 2050*. *Nature Energy*, 2021. **6**(5): p. 555-565.
- [9] GWEC, *Global Offshore Wind Report* 2020. 2020.
- [10] Bailey, H., K. Brookes, and P. Thompson, *Assessing Environmental Impacts of Offshore Wind Farms: Lessons Learned and Recommendations for the Future*. *Aquatic biosystems*, 2014. **10**: p. 8.
- [11] *Call for Wind Data for the New European Wind Atlas (NEWA)*. 2015: DTU Risø Campus, Frederiksborgvej 399, DK-4000 Roskilde.
- [12] *New European Wind Atlas*. 2019; Available from: <https://www.neweuropeanwindatlas.eu/>.
- [13] Jonkman, J., *Dynamics of Offshore Floating Wind Turbines-Model Development and Verification*. *Wind Energy*, 2009. **12**: p. 459-492.
- [14] Olondriz Erdozain, J., et al., *A Feedback Control Loop Optimisation Methodology for Floating Offshore Wind Turbines*. *Energies*, 2019. **12**: p. 3490.
- [15] Utsunomiya, T., et al., *At Sea Experiment of a Hybrid Spar for Floating Offshore Wind Turbine Using 1/10-Scale Model*. Vol. 135. 2010.
- [16] Chen, P., J. Chen, and Z. Hu, *Review of Experimental-Numerical Methodologies and Challenges for Floating Offshore Wind Turbines*. *Journal of Marine Science and Application*, 2020.
- [17] Sebastian, T. and M. Lackner, *Analysis of the Induction and Wake Evolution of an Offshore Floating Wind Turbine*. *Energies*, 2012. **5**: p. 968-1000.
- [18] Tran, T. and D.-H. Kim, *The platform pitching motion of floating offshore wind turbine: A*

- preliminary unsteady aerodynamic analysis*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015. **142**.
- [19] Çengel, Y.A. and J.M. Cimbala, *Fluid mechanics : fundamentals and applications*. 2010, Boston: McGraw-Hill Higher Education.
- [20] Martin, H., *Development of a Scale Model Wind Turbine for Testing of Offshore Floating Wind Turbine Systems*. 2011.
- [21] Chakrabarti, S.K., *Offshore structure modeling*. 1994, Singapore; New Jersey; London: World scientific.
- [22] Hu, Y. and S. Rao, *Robust Design of Horizontal Axis Wind Turbines Using Taguchi Method*. Journal of Mechanical Design, 2011. **133**: p. 111009.
- [23] Marten, D., et al., *QBLADE: An Open Source Tool for Design and Simulation of Horizontal and Vertical Axis Wind Turbines*. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2013. **3**: p. 264-269.
- [24] Bayati, I., et al., *Scale model technology for floating offshore wind turbines*. IET Renewable Power Generation, 2017. **11**.
- [25] Anyoji, M., et al., *Computational and Experimental Analysis of a High-Performance Airfoil Under Low-Reynolds-Number Flow Condition*. Journal of Aircraft, 2014. **51**: p. 1864-1872.
- [26] Emeis, S., *Wind Energy Meteorology - Second Edition*. 2018.
- [27] Hanna, S., *Introduction to Micrometeorology (2nd edition)*. By S. P. ARYA. Academic Press, 2001. 420 pp. ISBN 0 12 059354 8. £ 53.95. Journal of Fluid Mechanics, 2003. **497**: p. 441-443.
- [28] Manwell, J., J. McGowan, and A. Rogers, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, Second Edition*. 2006.