

AKTÜATÖR ÇİZGİ METODU İLE BİR RÜZGAR TÜRBİNİNİN MODELLENMESİ VE HESAPLAMALI AKIŞ ÇÖZÜMÜ SONUÇLARININ DOĞRULANMASI

Hüseyin Can Önel*
ve İsmail Hakkı Tuncer†
Orta Doğu Teknik Üniversitesi,
Ankara

ÖZET

Bu çalışmada açık kaynak kodlu bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yazılımı olan OpenFOAM ve Aktüatör Çizgi Metodu kullanılarak bir rüzgar türbini modellenmiş, çalışma koşullarındaki türbinin üzerine eksenel yönde gelen hava akışı simüle edilmiştir. İleriye dönük olarak, rüzgar tarlalarının üretim hesabında basitleştirilmiş bir model olan Aktüatör Çizgi Metodu'nun uygulanabilirliğinin incelenmesi amaçlanmıştır, bunun için de metodun sadece bir türbin üzerindeki yaklaşıklık değeri değerlendirilmiştir. Hava, sıkıştırılmayan bir akışkan kabul edilmiş, Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes denklemleri zamana bağlı olarak çözülmüş, $k - \epsilon$ türbülans modeli kullanılmıştır. Örnek türbin olarak 3 kanatlı NREL 5MW referans rüzgar türbini ele alınmıştır. Kanat kesitlerindeki airfoillerin kaldırma ve direnç katsayılarının hesaplanmasında viskoz panel metodunun uygulandığı XFOIL kodu kullanılmıştır. Simülasyon sonucunda; türbinin güç ve itki katsayısı, kanatlar üzerindeki kuvvet bileşenleri, lokal hız, kaldırma ve direnç katsayıları gibi parametrelerin dağılım grafikleri ve akış alanının çeşitli koordinatlarındaki alan değişkenlerinin dağılımları elde edilmiştir. Bu sonuçlar, Kanat Elemanı Momentum Teorisi'nin verdiği çözüm ve literatürdeki mevcut sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar diğer çalışmaların sunduğu sonuçlar ile kısmen uyumlu olmakla birlikte, aktüatör çizgi modeli kodundaki bazı muhtemel hataların giderilmesi ve iyileştirmelerin yapılmasıyla rüzgar türbini simülasyonlarında az kaynak kullanımı ile elverişli sonuçlar verme potansiyeline sahip bir model olduğu görülmüştür.

*Araştırma Görevlisi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, E-posta: canon@metu.edu.tr

†Prof. Dr., Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, E-posta: ismail.h.tuncer@ae.metu.edu.tr

GİRİŞ

Dünyadaki hızla artan enerji ihtiyacı ve buna bağlı olarak azalan miktarı ve artan fiyatlarıyla fosil yakıtlar, yenilenebilir enerjiye olan ilgiyi arttırmaktadır. 2015 yılında tüm dünyada sağlanan elektrik enerjisinin 3.7%'si rüzgardan elde edilmiş [GWEC, 2015], sadece 2016 yılında tüm dünyada toplam 54GW gücünde yeni rüzgar enerjisi santrali kurulmuş ve aynı yıl kümülatif kapasite 12%'den fazla artarak 486GW'ın üzerine çıkmıştır. Bu kapasitenin 2021 yılının sonunda 817GW'a kadar çıkması öngörülmektedir [GWEC, 2016]. Rüzgar enerjisi santrallerinin işletme ömrü ortalama 25 yıl olarak hesaplanmakta; bu süre içindeki üretim tahminlerinde ise türbin seçimi, kurulum yapılacak bölgenin genel iklimi, arazi yapısı, mevcut meteorolojik verilerin yanı sıra türbinlerin optimum yerleşimi yatırımcılar açısından çok önemli rol oynamaktadır.

Rüzgar tarlalarının sayısal simülasyonlarında bütün bir arazinin uzunluk ölçeği 10^3m mertebelerine çıkmakta, bu geometrinin ayrıklaştırıldığı bir çözüm ağında 10^1m mertebesindeki kord uzunluğu ve $10^{-3}m$ mertebesindeki sınır tabakasının çözülmesi hesaplama yükü açısından pratik olarak verimsiz kalmaktadır ve basitleştirilmiş bir modelin uygulanması gereği doğmuştur. Birincil amaç, türbin rotor alanından geçen hava akışındaki hız düşüşünü ve türbülans şiddeti artışını (izbölgesi) ve bunun diğer türbinlerde sebep olacağı güç azalmasını hesaplayabilmektir. Bu amaç için çeşitli basitleştirilmiş analitik ve sayısal modeller geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Bu modellerden Aktüatör Disk (ADM) ve Aktüatör Çizgi (ALM) modelleri, Navier-Stokes denklemlerinin ayrıklaştırılarak çözüldüğü bir çözüm alanına uygulanabilir olmalarıyla öne çıkmaktadırlar [Crao, 2008]. Yapılan çalışmalarda ALM'nin ADM'ye göre daha fazla kaynak gerektirmesine rağmen daha doğru sonuçlar verdiği, atmosfer sınır tabakası gibi rotor düzleminde homojensizlik oluşturan durumları daha başarılı çözümlenebildiği görülmüştür. Bu nedenle, ileriye dönük potansiyeli de düşünülerek ALM'nin kullanılmasında karar kılınmıştır.

ALM ilk kez Sorensen ve Shen'in 2002 yılında yaptıkları bir çalışmada geliştirilmiş ve uygulanmıştır [Sorensen, 2002]. Denklemler vortisite-hız değişkenleri cinsinden formüle edilmiş ve silindirik koordinat sisteminde çözülmüştür. Kanatların hareketi ve akış alanından hesaplanan yerel hücum açıları ile kanatlardaki yükler iteratif olarak hesaplanmıştır. Bu şekilde rotor etrafındaki akışın iyi bir şekilde yakalanabildiği görülmüştür. Shen v.d.'nin çalışmasında uç vorteksleri sebebiyle oluşan kayıp modelleyen yeni bir uç kaybı düzeltme fonksiyonu geliştirilmiştir [Shen, 2005]. Deneysel değerler ile karşılaştırıldığında bu yeni düzeltme fonksiyonunun kanat ucunda aerodinamik yük dağılımını daha iyi öngörebildiği ve yüksek uç hız oranı değerlerinde daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Sorensen v.d.'nin 2015'te yaptığı bir diğer çalışmada ise bu sefer ALM'nin yakın izbölgesindeki performansına odaklanılmıştır [Sorensen, 2015]. Türbülansın çözülmesinde LES kullanılmış, NTNU rüzgar türbini 43 çizgi elemanı kullanılarak 24 milyon hücreden oluşan bir ağda çözüm yapılmıştır. Hesaplanan güç ve itki katsayılarının deneysel ölçümlerle maksimum 9%'a varan bir sapma ile uyum içinde olduğu sonucuna varılmıştır. 2016'da Sarmast v.d. yaptıkları çalışmada MEXICO rüzgar türbinini ADM ve ALM ile simüle ederek izbölgesindeki akışı PIV deneysel sonuçları ile karşılaştırmışlardır [Sarmast, 2016]. Naselin olduğu ve olmadığı durumlar analiz edilmiştir. PIV sonuçları ile uyumlu değerler alınmıştır. Naselin hesaba katılıp katılmamasının genel olarak izbölgesi sonuçlarına ihmal edilebilir bir etkisi olduğu görülmüştür. Matiz-Chicacausa ve Lopez'in 2018'deki çalışmasında ise OpenFOAM'da ALM kullanılarak bir rüzgar türbini modellenmiştir [Matiz-Chicacausa, 2018]. Modelde kullanılan parametrelerin kanatlardaki yüklerin öngörülmesine etkisi ve bu yüklerin deneysel sonuçlar ile uyumluluğu üzerine çalışılmıştır. Çözüm ağının çözünürlüğünün sonuçlar üzerine etkisi gözlemlenmiştir. Elde edilen verilerin deneysel çalışmalar ile uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmada, geliştirilmekte olan bir ALM kodunun doğrulaması, öncelikle en basit yöntem olan Kanat Elemanı Momentum Teorisi (BEMT) ile ve literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılarak yapılmıştır. Kodun özellikle ucuz bir türbülans modeli olan $k - \epsilon$ ile performansı değerlendirilmiş, güç ve itki katsayıları ve izbölgesindeki akış incelenmiştir. Halihazırda rüzgar tarlası üretim

hesabında analitik metodların yanısıra, arazideki hava akışının Navier-Stokes denklemleri ile çözülerek türbin merkez yüksekliğindeki rüzgar gücü kullanılmaktadır [Hrafnkelsson, 2016]. Kodun tek bir türbinde başarılı sonuçlar vermesi durumunda, izbölgesinin sayısal olarak çözülmesi nedeniyle, rüzgar tarlalarının üretim tahmini üzerine yapılacak gelecek çalışmalarda daha yüksek yaklaşıklıkla kullanılması düşünülmektedir.

YÖNTEM

Bütün sonuçlar sayısal yöntemler kullanılarak bilgisayar ortamında yapılan simülasyonlar ile elde edilmiştir. Akış çözümünde C++ dilinde yazılmış açık kaynak kodlu bir yazılım olan OpenFOAM'un zamana bağlı sıkıştırılmayan akış çözücüsü `pimpleFoam` kullanılmıştır. Zamana bağlı RANS denklemleri çözülmüş, türbülans modeli olarak $k - \epsilon$ seçilmiştir. Türbin kanatları fiziksel bir sınır şartı olarak değil, Aktüatör Çizgi Modeli ile elemanlara bölünerek momentum denkleminde bir hacimsel kuvvet terimi olarak tanımlanmış ve çözüm ağında kanatların denk geldiği hücrelere bu şekilde geçirilmiştir. Aynı zamanda aynı türbin için Kanat Elemanı Momentum Teorisi (BEMT) çözümü de mevcut bir BEMT kodu kullanılarak hesaplanmıştır. ALM ve BEMT çözümlerinde gerekli olan airfoil polar verileri XFOIL ile hesaplanmıştır.

OpenFOAM

OpenFOAM, oldukça geniş bir akış çözücü kütüphanesi bulunan, sonlu hacim metodunun kullanıldığı ve çözüm ağı oluşturulmasını sağlayan modüllerin de mevcut olduğu açık kaynak kodlu bir yazılımdır. `pimpleFoam`; SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) ve PISO (*Pressure Implicit with Split Operator*) algoritmalarının kombinasyonunu kullanan bir çözücüdür. SIMPLE'da basınç-hız çifti tamamen çözümlenmez, iteratif bir yöntemdir. Momentum denklemleri çözülerek bir *tahmini* hız dağılımı elde edilir, önceki iterasyondan gelen basınç dağılımı ile basınç gradyanı hesaplanır, özel bir *basınç düzeltme* denklemleri yeni basınç dağılımını elde etmek için kullanılır ve daha sonra hız dağılımı bu basınç dağılımı kullanılarak süreklilik denklemini sağlayacak şekilde düzeltilir. Kararlı haldeki problemlerin çözümünde kullanılmıştır. PISO algoritması, SIMPLE'in bir uzantısıdır ve 1986 yılında zamana bağlı sıkıştırılabilir problemlerin büyük zaman adımlarıyla çözülmesi için geliştirilmiş olsa da sıkıştırılmayan akışlara da başarılı şekilde uyarlanmıştır.

Sayısal Model: Problemdaki akışkan olan hava, çözüm sınırları içinde Mach sayısı 0.3'ü geçmediği için sıkıştırılmayan olarak kabul edilmiştir, bu sebeple sıkıştırılmayan akış çözücüsü kullanılmıştır. Kütle ve momentumun korunumundan oluşan Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri, korunum formunda Sonlu Hacim Metodu ile ayrıştırılmıştır. Konvektif terimlerde 1. derece upwind, zaman adımlarında ise 1. derece ileri Euler yöntemi kullanılmıştır. Çözüm alanı, yapılandırılmış dikdörtgen prizma şeklindeki hücrelere ayrıştırılmıştır. Akış rejimi türbülanslıdır ve zamana bağlıdır. Önceki çalışmalarda LES her ne kadar yüksek yaklaşıklıkta sonuçlar vermiş olsa da, mevcut çalışmada daha düşük hesaplama yükü gerektiren bir alternatif olan RONS kullanılmıştır ve türbülansın modellenmesinde $k - \epsilon$ modeli seçilmiştir.

Sıkıştırılmayan RANS denklemleri (sırasıyla kütle ve momentum korunumu):

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1a)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{\rho} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial (-\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} + \frac{f_i}{\rho} \quad (1b)$$

RANS momentum denkleminde f_i hacimsel kuvveti ifade etmektedir ve `turbinesFoam` ile hesaplanan kuvvet bileşenleri denklemde bu terime geçirilir.

Aktüatör Çizgi Metodu (ALM)

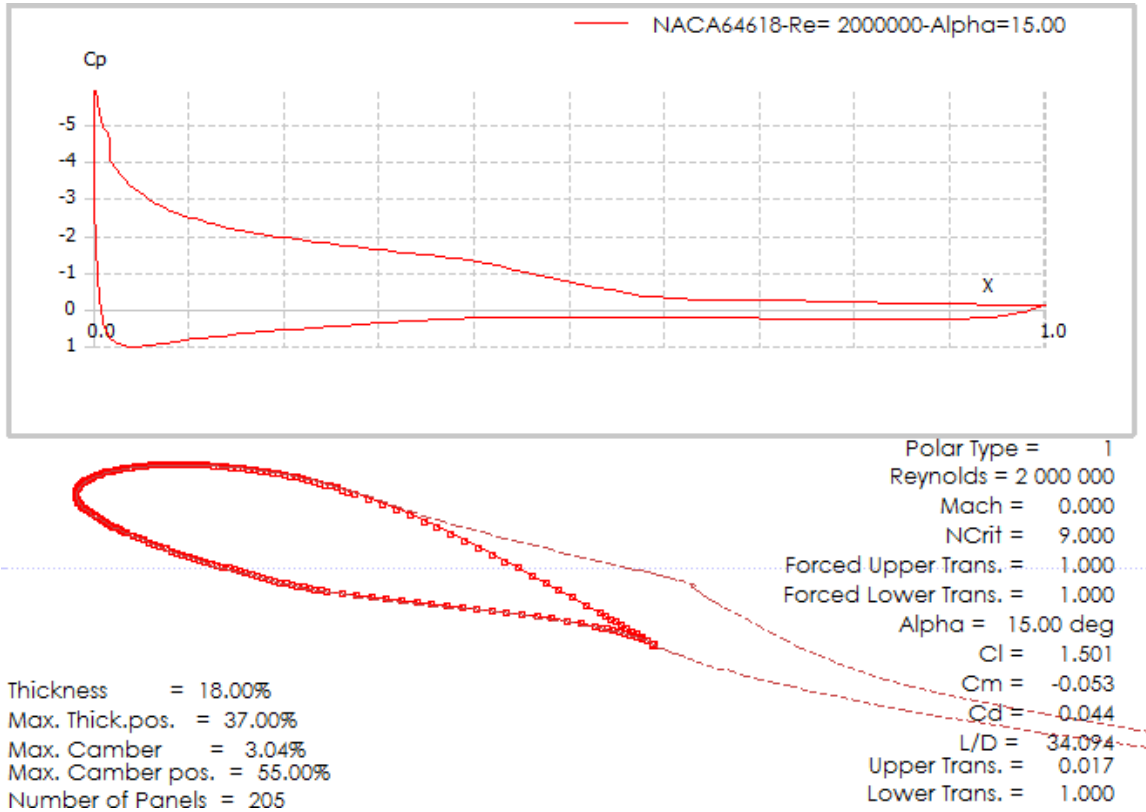
Sørensen ve Shen tarafından 2002 yılında ortaya konmuş bir metoddur, BEM'in RANS denklemlerinin sayısal olarak çözüldüğü Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) simülasyonlarında uygulanabildiği bir modeldir [Sorensen, 2002]. ALM'de türbin kanatları dönen birer çizgi olarak modellenir ve kanat genişliği yönünde elemanlara bölünür. Her bir elemanın 2 boyutlu kesitinin aerodinamik özellikleri (C_l , C_d , C_m gibi) tanımlanarak kanat üzerindeki yükler hesaplanır. Büyük Girdap Simülasyonu'nun (LES) uygulandığı araştırmalarda kullanılmıştır. Ana avantajı, kanat yüzeyindeki sınır tabakanın çözümlenmesine gerek kalmadığı için daha düşük bir hesaplama gücüyle akış alanı değişkenlerinin, türbinin izbölgesinin ve dolayısıyla türbinler arası etkileşimin hesaplanabilmesidir.

turbinesFoam: Türbin kanat elemanlarının ALM ile hareketli bir hacim kaynağı olarak çözüm ağındaki hücrelere tanımlanabilmesini sağlayan OpenFOAM eklentisidir [Bachant, 2016]. Türbinin kanat, kule ve merkez gibi bileşenleri çözüm alanına geometrik olarak tanımlanıp fiziksel sınır şartları tanımlanmaksızın; OpenFOAM içindeki topoSet modülü vasıtasıyla tüm çözüm ağı içinde türbin bileşenlerinin kapladığı hacime denk gelen hücreler tespit edilir ve zamana bağlı çözüm esnasında her bir zaman adımında kanatların konumsal olarak hangi hücreler ile kesiştiği hesaplanır ve kanatlar bu hücreler ile temsil edilir. Disklerin bir sınır şartı yerine hacim kaynağı olarak eklenebilmesi, bu çalışmada kullanılmış olmasa da, ilerideki çalışmalarda hesaplama esnasında çözüm ağı tanımının değiştirilmeden türbinlerin konumunun kolayca değiştirilmesi avantajını sunmaktadır. Rotor merkezinin koordinatı ve oryantasyonunun tanımlanmasından sonra rotor referans koordinat sisteminde kanatların geometrisi girilir. Bunlar; kanat eleman sayısı, her bir elemanın kesit profilleri, eksenel mesafesi, radyal konumu, açıl konumu, kord uzunluğu, kord dönme merkezi ve yerel burulma açısıdır (twist). Ayrıca her kesitin farklı hücum açıları için c_l ve c_d verileri sağlanmalıdır.

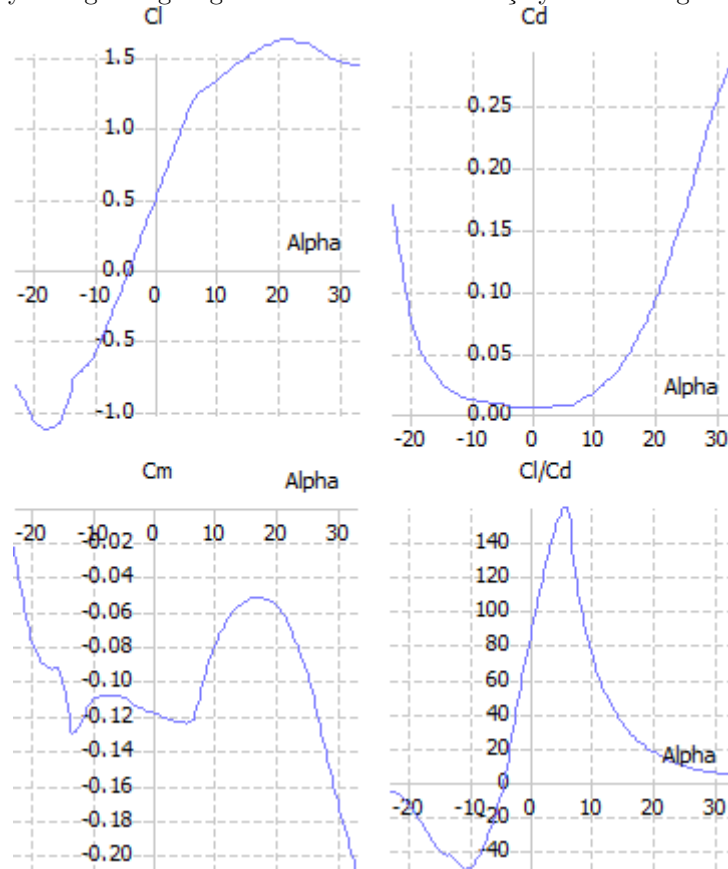
XFOIL

XFOIL, ses hızı altındaki akış etkisindeki yalıtılmış airfoillerin analiz edilmesinde kullanılan bir yazılımdır. İlk versiyonu 1986 yılında Mark Drela tarafından geliştirilmiştir. Airfoil profillerinin polarlarının (farklı hücum açısı altındaki c_l , c_d , basınç dağılımı gibi parametrelerin) hesaplanmasında kullanılan standart bir yazılımdır. Yazılımda yüksek mertebeli bir panel yöntemi, Drela ve Giles tarafından geliştirilen [Drela, 2001] tam akuple bir viskoz/viskoz olmayan etkileşim metodu ile birleştirilmiştir. Verdiği sonuçlar, sayısal ve deneysel yöntemlerle elde edilen verilere karşı bir çok kez doğrulanmıştır (düşük [Fuglsang, 1998] ve yüksek [Zhang, 2004] hücum açıları için).

Bu çalışmada XFOIL, QBlade üzerinden kullanılmış ve özelliklerinin bir kısmı uygulama için yeterli olmuştur. Kanatta bulunan airfoil profillerinin geometrisi içe aktarılmıştır. Profillerin viskoz/viskoz olmayan analizi yapılırken XFOIL'in laminardan-türbülanslıya zorunlu sınır tabakası geçişi özelliği kullanılmamış, bu geçişin serbest hesaplanması sağlanmıştır. Kaldırma ve direnç katsayıları farklı Reynolds sayıları ve hücum açıları için hesaplanmış ve turbinesFoam'a tablolanmış data olarak sunulmuştur.



Şekil 1) Örnek XFOIL çözümü. NACA64618 airfoil profilinin 15° hücum açısı altındaki basınç katsayısı dağılımı grafiği ve sınır tabakası ile akış ayrılmasının görüntüsü.



Şekil 2) Örnek XFOIL çözümü. NACA64618 airfoil profilinin hücum açlarına karşılık kaldırma katsayısı, direnç katsayısı, moment katsayısı ve c_l/c_d grafikleri

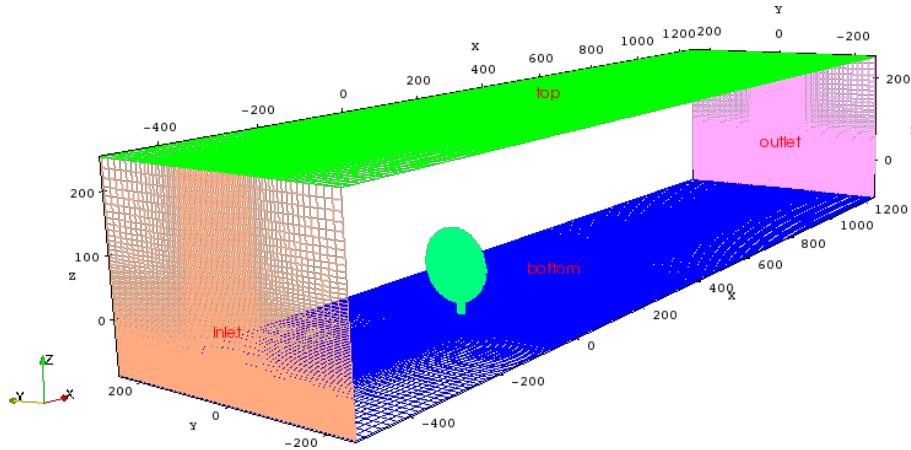
Kanat Elemanı Momentum Teorisi (BEMT)

Kanatların süpürdüğü disk, radyal yönde halka elemanlara bölünür ve akış 2 boyutta çözülür. Kanatların tamamen rijit olduğu, her bir halkada akışın üniform olduğu ve halkalar arasında (radyal ve açılal yönlere) bir akışın olmadığı kabul edilir. Bu kabul, kanat uçlarındaki uç etkilerinin ihmal edilmesine sebep olur ve durum bazı uç kaybı düzeltme fonksiyonları kullanılarak telafi edilir. Kanat elemanlarının tam 2 boyutlu airfoil kesitlerinden oluştuğu varsayılır ve bu kesitlere sadece düzlemsel kaldırma ve direnç katsayılarının (C_l , C_d) etkin olduğu kabul edilir.

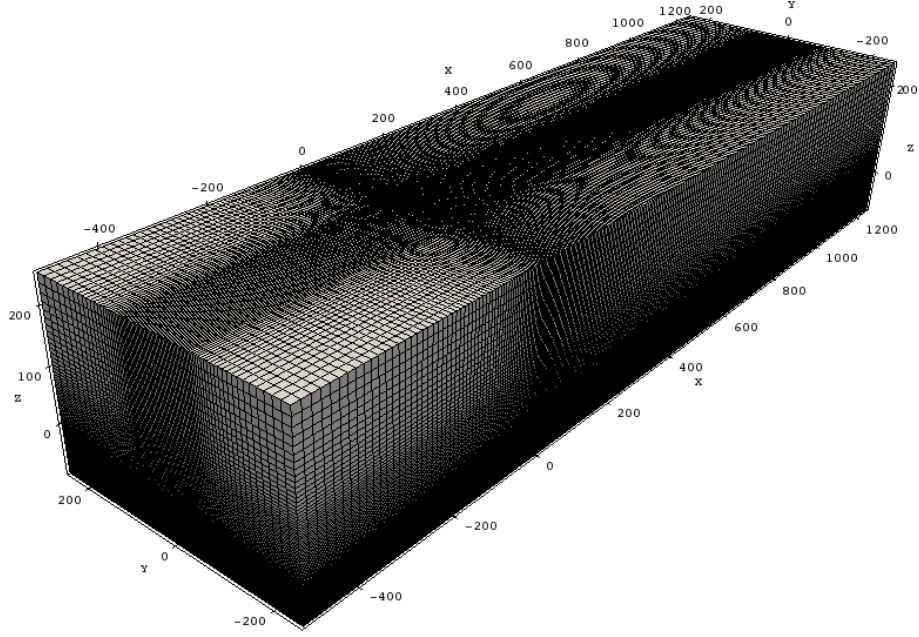
QBlade: Rüzgar enerjisi ile alakalı endüstriyel ve akademik çevrelerde yaygın biçimde kullanılan bir koddur. Kanat Eleman/Momentum yöntemini kullandığı için oldukça hızlı sonuçlar vermektedir. Türbinin farklı koşullarda farklı geometrilere sahip olduğu senaryoları analiz ederek önemli parametrelerin değerlendirilmesi ve optimize edilmesi için sonuçlar sağlamaktadır, bu da QBlade'i ön tasarım sürecinde önemli bir yazılım haline getirmiştir. Entegre XFOIL çözücüsü, kanat ara kesitlerini 2 boyutlu airfoil bilgisi olarak alır, viskoz panel yöntemi ile sınır tabaka ve akış ayrılmasını da modelleyerek airfoil profillerinin istenen hücum açıları için kaldırma ve direnç katsayısı değerlerini verir. Bu verileri kullanarak çeşitli akış koşullarında türbin rotorunun güç ve itki katsayıları hızlı biçimde hesaplanır.

Çözüm Ağı

Çözüm ağı tek bir dikdörtgen prizmadan oluşmaktadır. Yapılandırılmış kartezyen bir ağı kullanılmıştır. Türbin rotorunun fiziksel olarak kapladığı alan ve yakınına denk gelen hücre sıraları tüm uzaysal yönlerde iyileştirilmiştir. Rotor içindeki hücrelerin boyutu 2.52m'dir, türbin çapının 126m olduğu düşünülürse çap boyu 50 hücreye bölünmüştür ve oldukça kaba bir çözüm ağı kullanılmıştır. Akış yönü ve türbin eksenini $+x$ yönünde, zeminden yükseklik ise $+z$ yönünde olacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 3) Yer etkisine maruz türbin probleminde kullanılan çözüm ağında sınır yüzeylerinin, kule ve türbin hücrelerinin görünüşü (anlaşılabilirlik amacıyla yan (sides) sınırlar gizlenmiştir). Akış giriş (inlet) sınırından çıkış (outlet) sınırına doğru $+x$ yönündedir.



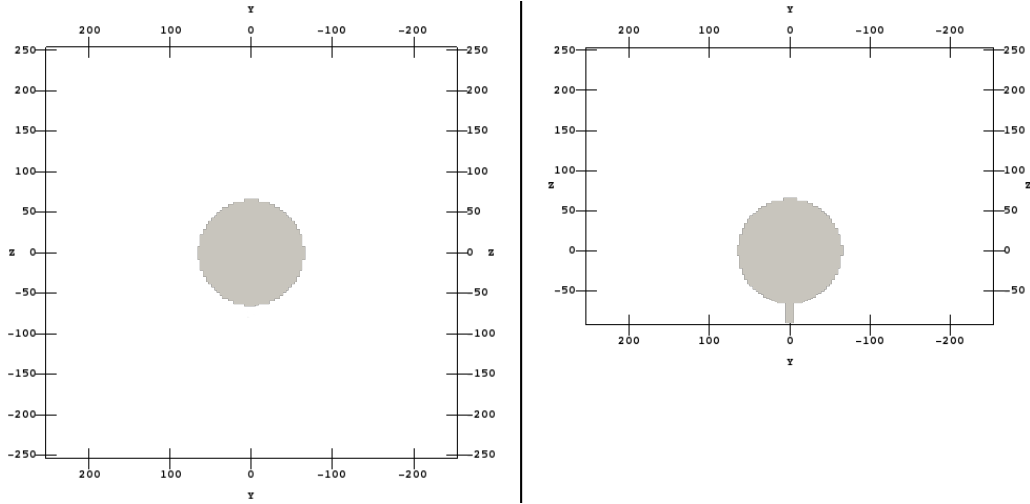
Şekil 4) Yer etkisine maruz türbin probleminde kullanılan çözüm ağının hücrelerin ve hücre sınırlarının görünüşü.

UYGULAMALAR ve SONUÇLAR

Bu çalışmada bir adet yatay eksenli rüzgar türbini Aktüatör Çizgi Modeli (ALM) ile modellenmiş ve üzerine eksenel yönde sabit hızda gelen akış çözülmüştür. Türbinin hatasız bir jeneratör kontrolcüsü ile sabit bir açısal hızda çalıştığı varsayılmış, dolayısıyla tek ve sabit bir uç hız oranı değeri tanımlanmıştır. Örnek türbin olarak NREL 5MW kullanılmıştır.

Genel olarak 2 durum için simülasyon yapılmıştır:

1. Durum: Türbin, alan sınırları etkisinden uzak olacak şekilde çözüm alanının ortasına yerleştirilmiştir ve kule tanımlanmamıştır. Bu durumun çözümü, BEM çözümüne benzerliği sebebiyle QBlade sonuçlarıyla doğrudan karşılaştırmak için kullanılmıştır. Üst, alt ve yan sınırlarda serbest kayma sınır şartı tanımlanmıştır.
2. Durum: Türbin, üst ve yan alan sınırları etkisinden uzak olacak şekilde yerleştirilmiştir, ancak rotor merkezi zemine kule yüksekliği kadar mesafede bulunmaktadır ve kule tanımlanmıştır. Tamamen düz bir zemin üzerinde sınırlarında serbest akışın olduğu koşullar simüle edilmiştir, atmosferik sınır tabaka modellenmemiştir. Üst ve yan sınırlarda serbest kayma sınır şartı, zeminde ise kaymama sınır şartı tanımlanmıştır.



Şekil 5) Sınır etkilerinden uzak (solda) ve yer etkisine maruz (sağda) problemlerindeki türbinin rotor düzlemindeki taraftan görünüşleri. Sadece rotor (ve varsa kule) hücreleri gösterilmiş, diğer hücreler gizlenmiştir.

Her iki durumda da giriş yüzeyinde sabit hız değeri ve sıfır gradyan basınç sınır şartları, çıkışta ise giriş/çıkış hız ve sabit 0 basınç değeri sınır şartları uygulanmıştır. Türbin rotor merkezi $(0, 0, 0)$ noktasına yerleştirilmiştir. Çözüm alanı sınırları rotor merkezinden y ve z yönlerinde (rotor düzleminde) $8R$, $+x$ (akış arkası) yönünde $20R$ mesafeye konumlandırılmıştır.

Problem $t_{max} = 100s$ 'lik bir süre için çözülmüştür. Zaman adımı $\Delta t = 0.05s$ 'dir. Maksimum Courant sayısı 0.22'yi geçmemiştir. Türbinin rotor hızı $1.2667rad/s = 12.1RPM$ 'dir. Çözümde zaman adımının, rotor düzlemi içindeki zamana bağlı akış değişiminin yakalanmasına imkan sağlayacak kadar küçük olması gerekmektedir. Bu koşullarda bir zaman adımında türbin kanatları $\approx 3.6^\circ$ dönmektedir (1 tur dönüşte ≈ 100 zaman adımı vardır).

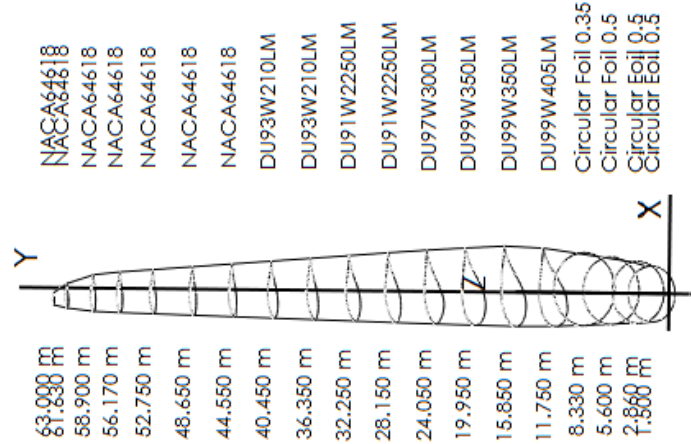
NREL 5MW Rüzgar Türbininin Özellikleri

NREL 5MW, Amerikan Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvar'ı (NREL) tarafından, açık deniz rüzgar türbini uygulamaları üzerine yapılan kavramsal ve sayısal çalışmalarda kullanılması amacıyla temsili bir türbin oluşturulması fikrinden yola çıkılarak tasarlanmış 3 kanatlı, yatay eksenli, kulesi ve naseli rotor arkasında bulunan, saat yönünde dönen, değişken hızlı ve kanat açısı ayarlanabilir bir rüzgar türbinidir.

Tablo 1: NREL 5MW genel bilgileri ve çalışma koşulları

Rotor yarıçapı (R)	63.0m
Referans rüzgar geliş hızı (U_{ref})	11.4m/s
Tasarım uç hız oranı (TSR)	7
Rotor dönüş yönü	Saat yönünde (+1)
Kule yüksekliği	90m

Türbin kanadı geometrisi türbin tasarımcıları tarafından 19 noktada tanımlanmıştır.



Şekil 6) NREL 5MW türbininin kanat geometrisi. 19 adet ara kesidin görselleri, radyal pozisyonları ve profil isimleri verilmiştir.

Tablo 2: NREL 5MW kanat geometrisi (QBlade formatında, 19 noktada geometrik bilgi mevcuttur). r: radyal pozisyon, c: kord, ω : burulma açısı

r (m)	c (m)	ω (deg)	Airfoil Profili
1.500	3.200	13.08	Dairesel0.5 ($c_d = 0.5$)
2.860	3.540	13.08	Dairesel0.5 ($c_d = 0.5$)
5.600	3.850	13.08	Dairesel0.5 ($c_d = 0.5$)
8.330	4.167	13.08	Dairesel0.35 ($c_d = 0.35$)
11.75	4.550	13.08	DU99W405LM
15.85	4.652	11.48	DU99W350LM
19.95	4.458	10.16	DU99W350LM
24.05	4.249	9.011	DU97W300LM
28.15	4.007	7.795	DU91W2250LM
32.25	3.748	6.544	DU91W2250LM
36.35	3.502	5.361	DU93W210LM
40.45	3.256	4.188	DU93W210LM
44.55	3.010	3.125	NACA64618
48.65	2.764	2.319	NACA64618
52.75	2.518	1.526	NACA64618
56.17	2.313	0.863	NACA64618
58.90	2.086	0.370	NACA64618
61.63	1.400	0.160	NACA64618
63.00	0.700	0.000	NACA64618

Türbinde 6 farklı airfoil profili yer almaktadır. Bu profiller, kanat boyunca farklı radyal pozisyonlarda yer aldıkları için farklı akış hızları görmektedirler ve farklı kord uzunluklarına sahiptirler. Bu nedenle farklı Reynolds sayıları ve hücum açıları altındaki kaldırma ve direnç katsayılarının hesaplama esnasında hazır bulunması gerekmektedir. `turbinesFoam` kodunun bu kabiliyeti mevcuttur ve anlık bir Reynolds sayısı için mevcut veriden interpolasyon yapabilmektedir, bu nedenle ne kadar sık aralıklarla Reynolds için katsayı değerleri mevcut ise o kadar yaklaşık sonuç beklenmektedir. Bu sebeple 62,000 ile 32,000,000 arasında 20 Reynolds değeri için -25° 'den $+40^\circ$ 'ye kadar 0.5° aralıkla hücum açıları XFOIL'de simüle edilmiş ve kaldırma ve direnç katsayıları hesaplanmıştır.

QBlade kanat geometrisi tablosundan alınan airfoil profil noktaları aktüatör çizgi elemanlarının merkezine denk gelecek şekilde `turbinesFoam` formatına dönüştürülmüştür. Interpolasyon gereken durumlarda lineer interpolasyon yöntemi kullanılmıştır. Kanadın dönme (pitching) eksenini tüm profillerde gerçek kord uzunluğunun %25'inden geçmektedir ve bu eksen tüm profiller için $0.8m$ akış önu tarafında yer almaktadır.

Sınır Şartları ve Türbülans Özellikleri

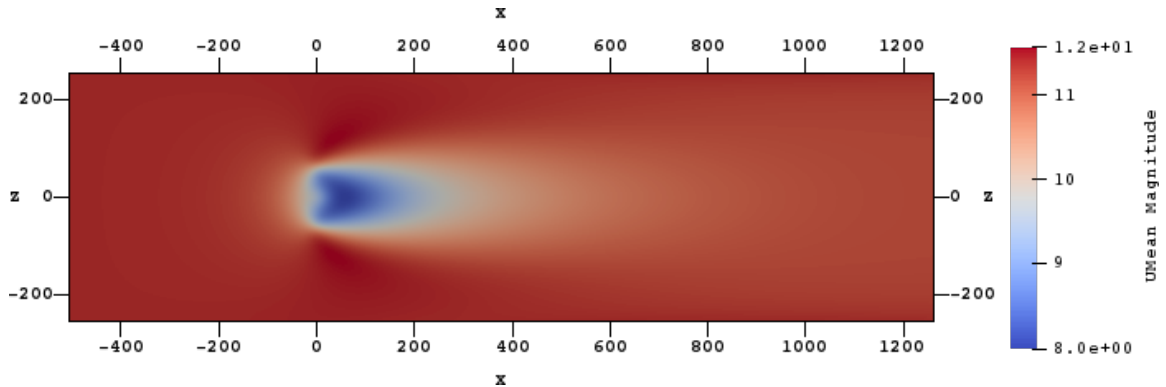
Türbülans yoğunluğu (turbulence intensity) değeri, türbülansın az olduğu atmosferik şartlar kabulü ile $I = 5\%$ olarak seçilmiştir. Dolayısı ile giriş türbülans enerjisi $k = \frac{3}{2}(U_{ref}I)^2 = 0.48735$ olarak hesaplanmıştır. Bir türbülans modeli sabiti olan C_μ , genellikle simülasyonlarda aldığı değer olan $C_\mu = 0.09$ 'a sabitlenmiştir. Türbülanslı akışlarda büyük girdapların boyutunu temsil eden türbülans uzunluk ölçeğini (turbulent length scale), bu çalışmadaki gibi dış akış problemlerinde yaklaşık tahmin etmek pek mümkün değildir; bu yüzden bu uzunluk ölçeği, türbin yarıçapı olan $l = 63m$ olarak seçilmiştir. Türbülans yayılma oranı (turbulent dissipation rate) $\epsilon = C_\mu \frac{k^{3/2}}{l} = 4.860303 \times 10^{-4}$ olarak hesaplanmıştır.

Tablo 2 - Sınır şartları

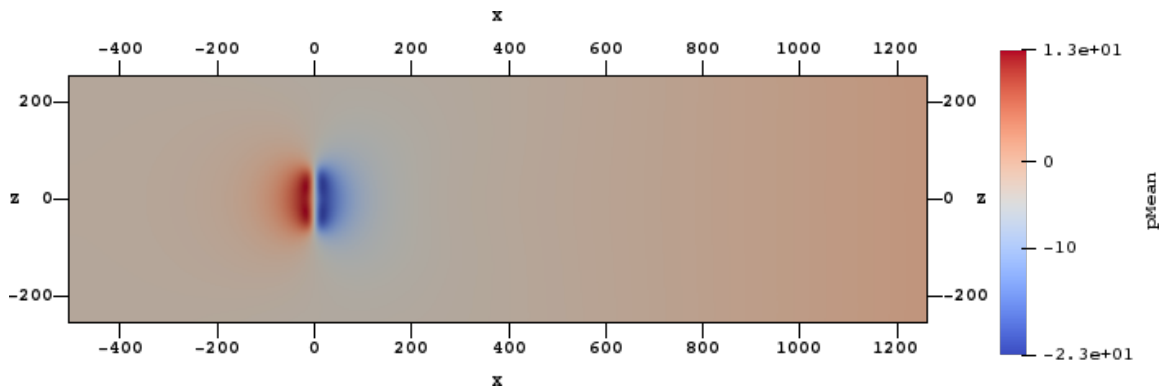
Sınır	U	P	k	ϵ	ν_t
Giriş	fixedValue	zeroGradient	slip	fixedValue	calculated
Çıkış	inletOutlet	fixedValue	slip	inletOutlet	calculated
Yanlar	inletOutlet	zeroGradient	slip	fixedValue	calculated
Üst	inletOutlet	zeroGradient	slip	fixedValue	calculated
Alt (1)	inletOutlet	zeroGradient	slip	fixedValue	calculated
Alt (2)	noSlip	zeroGradient	kqRWallFunction	epsilonWallFunction	nutkWallFunction

Durum 1: Sınır Etkilerinden Uzak NREL5MW Rüzgar Türbini

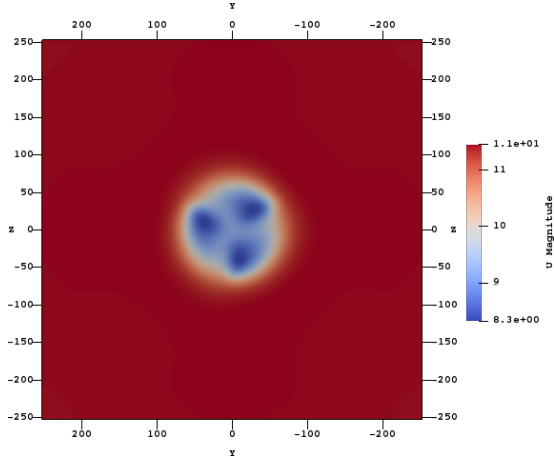
Sınır etkilerinden uzak şartlarda türbinin alanın ortasında yer alması dolayısıyla y ve z düzlem kesitlerinde alınan sonuçlar aynı olmaktadır, bu sebeple sadece rotor merkezinden geçen x (rotor düzlemi) ve y (yan görünüş) düzlemlerindeki sonuçlar gösterilmiştir. Hız, basınç ve türbülans değerleri konturları incelenmiş ve izbölgesi analiz edilmiştir.



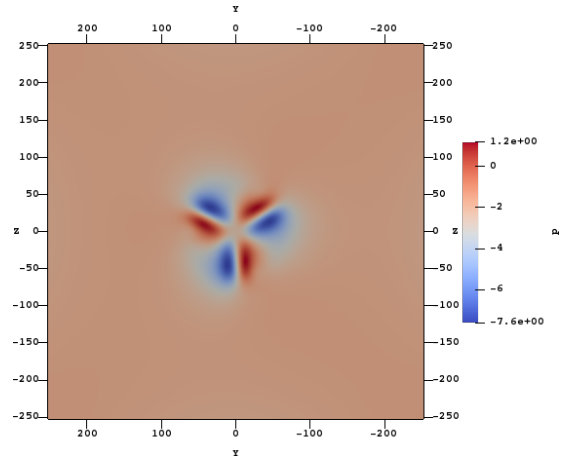
Şekil 7) Sınır etkilerinden uzak türbinin y düzlemi kesitindeki zaman ortalaması alınmış hız büyüklüğü konturları



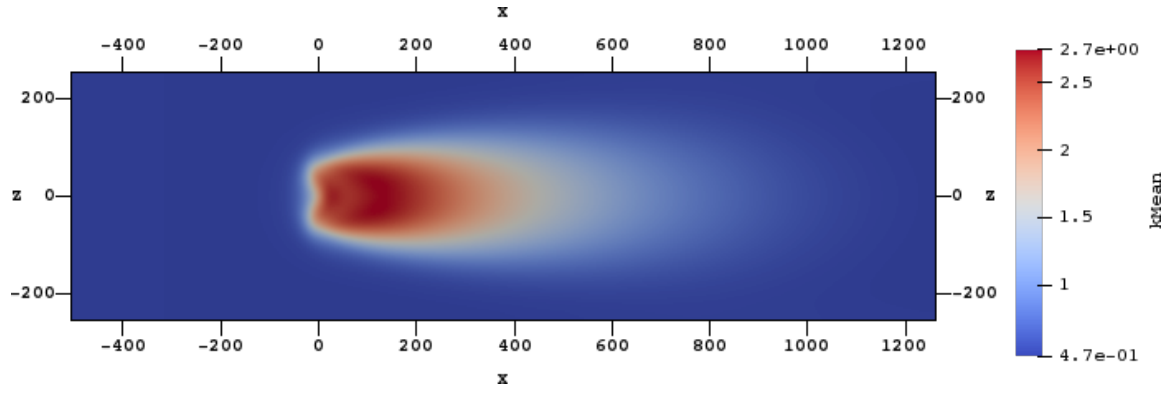
Şekil 8) Sınır etkilerinden uzak türbinin y düzlemi kesitindeki zaman ortalaması alınmış statik gösterge basıncı konturları



Şekil 9) Sınır etkilerinden uzak türbinin x düzlemi kesitindeki anlık hız büyüklüğü konturları

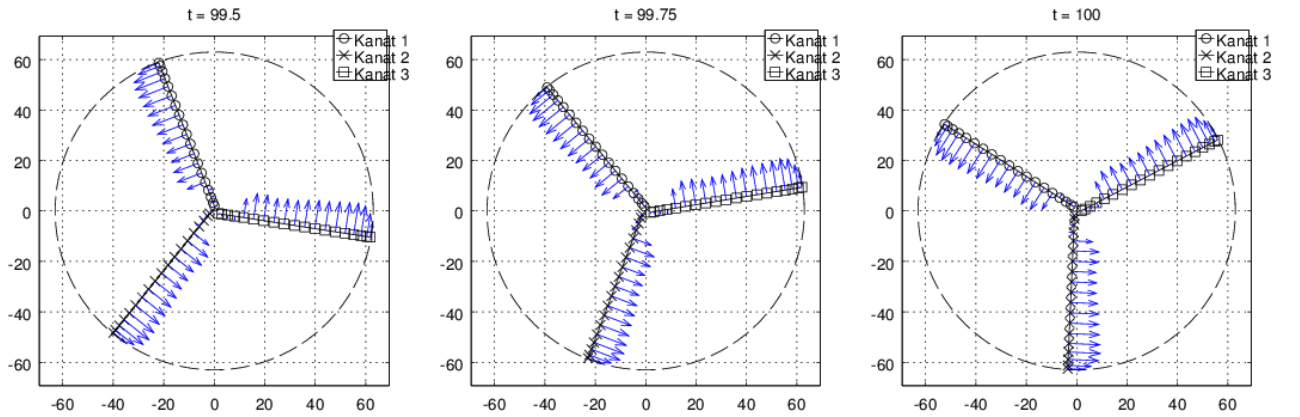


Şekil 10) Sınır etkilerinden uzak türbinin x düzlemi kesitindeki anlık statik gösterge basıncı konturları

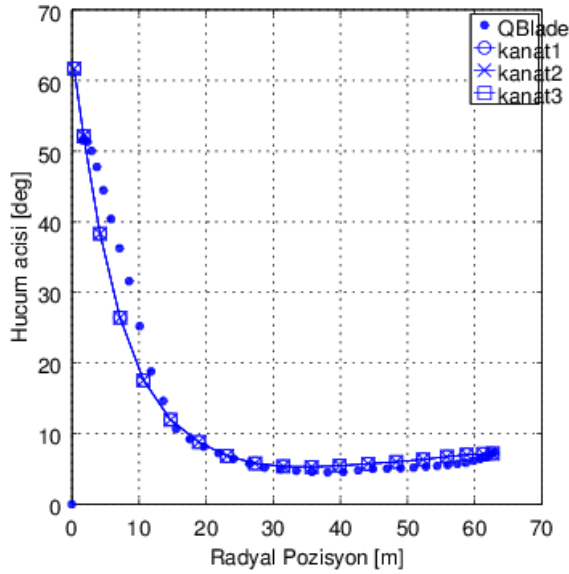


Şekil 11) Sınır etkilerinden uzak türbinin y düzlemi kesitindeki zaman ortalaması alınmış türbülans kinetik enerjisi konturları

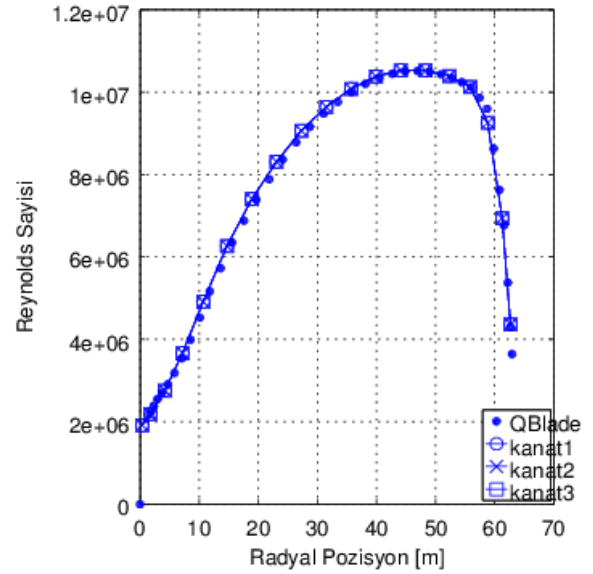
Beklendiği gibi toplam hız türbin arkasında düşmüştür, türbin rotor düzlemindeki hız konturları ise kanatların yakınında hızın düştüğünü göstermektedir. Basınç konturları, *1 Boyulu Momentum Teorisi*'nin sonucuna oldukça benzerlik göstermekte, türbin düzleminin önu ve arkasında yüksek bir basınç farkı ve süreksizlik gözlemlenmektedir. Rotor düzlemindeki basınç konturları ise kanatların dönüş yönü göz önüne alınarak incelendiğinde; kanatların üst (emme) yüzeyinde düşük, alt (bası) yüzeyinde yüksek basınç meydana gelmiştir. Türbülans kinetik enerjisi konturları göstermektedir ki türbin önünde çok düşük olan türbülans şiddeti rotor düzleminde sonra ani bir artış göstermiş ve yaklaşık 1000 metre akış arkası mesafeye kadar azalarak devam etmiştir.



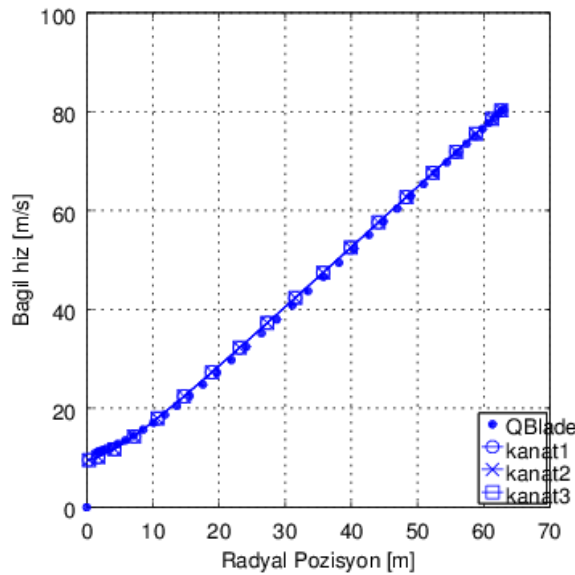
Şekil 12) Rotor düzleminde türbin kanatlarının akış arkası taraftan (kule tarafından) son 0.5 saniyedeki sıra ile 3 anlık görünüşü (bu açıdan bakıldığında dönüş saat yönü tersi görünmektedir). Vektörler uzunluk başına normal kuvveti temsil etmektedir.



Şekil 13) Kanatlar boyunca hücum açısı dağılımı
($t = 100s$)

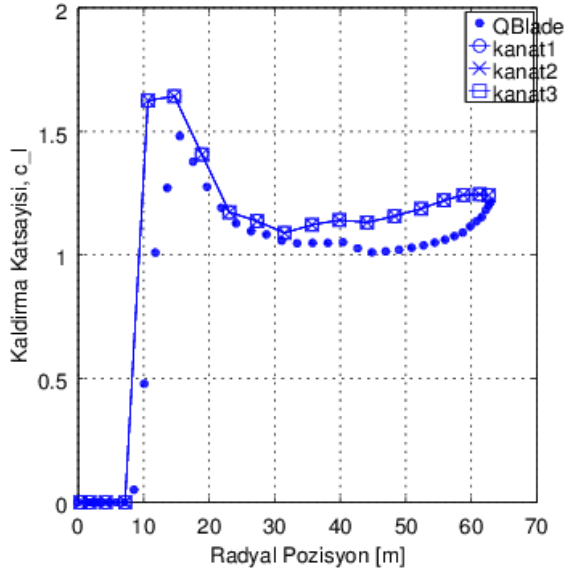


Şekil 14) Kanatlar boyunca Reynolds sayısı dağılımı
($t = 100s$)

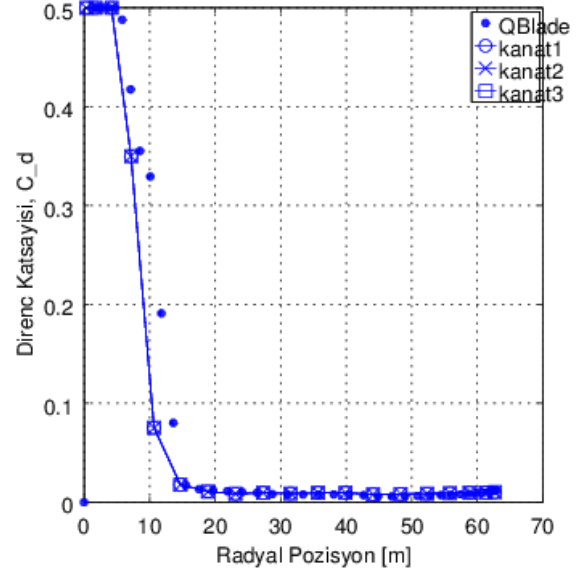


Şekil 15) Kanatlar boyunca bağıl hız dağılımı ($t = 100s$)

Türbin sınır etkilerinden uzak olduğu için her 3 kanadın da bağıl hız, Reynolds sayısı ve hücum açısı grafikleri birbirleriyle çakışmış durumdadır. Bağıl hız, aksel hız sabit olduğu ve çevresel hız uca yaklaştıkça arttığı için beklendiği şekilde sürekli artan bir davranış göstermektedir. Reynolds sayısı kord uzunluğunun da etkisiyle 40 – 50m radyal pozisyon aralığında pik yapmıştır. Her iki değer de QBlade değerleriyle bire bir uyum içindedir. Hücum açısı 20m radyal pozisyona kadar düşüş göstermiş, bu noktadan sonra yaklaşık düz seyretmiştir. Hücum açısı, QBlade değerleriyle bazı radyal pozisyonlarda hatalı sonuca sebep olacak miktarda farklılık göstermiştir.

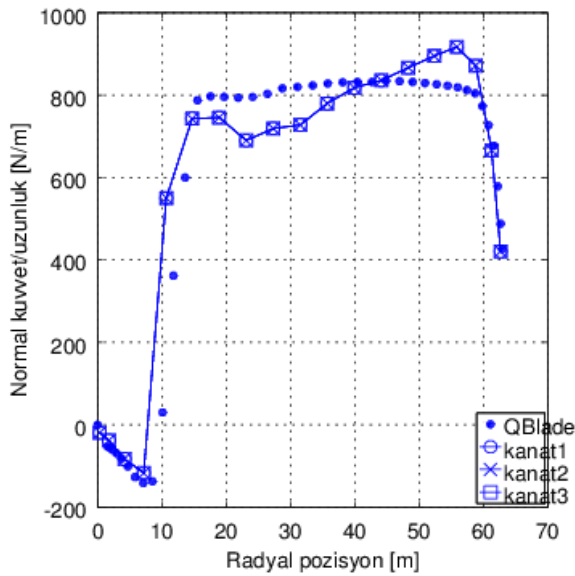


Şekil 16) Kanatlar boyunca kaldırma katsayısı (c_l) dağılımı ($t = 100s$)

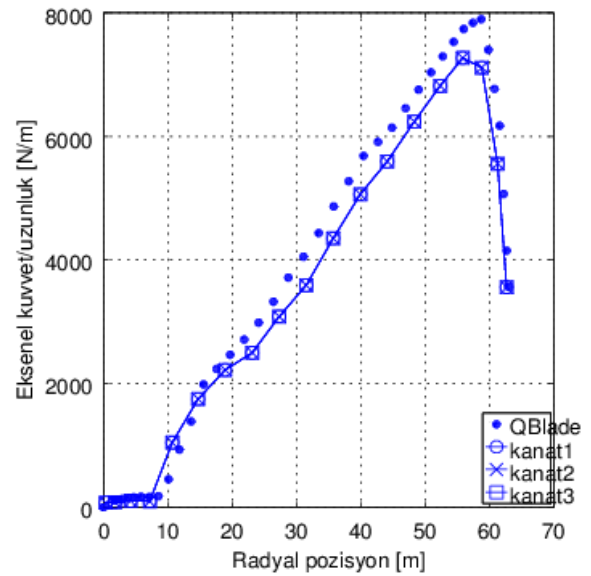


Şekil 17) Kanatlar boyunca direnç katsayısı (c_d) dağılımı ($t = 100s$)

Direnç katsayısı değerleri kanat boyunca QBlade değerlerine çok yakın bir seyir izlese de, hücum açısındaki farklılığın etkisi kaldırma katsayısı grafiğinde net bir şekilde görünmektedir. Kanat boyunca QBlade c_l değerleri ile 5% – 25% arasında değişen farklılıklar meydana gelmiştir. Özellikle $r = 10m$ yakınındaki yüksek farklılık göze çarpmaktadır. Bunun sebebinin $r = 8 - 11m$ aralığındaki dairesel profilden airfoil profiline geçiş olduğu değerlendirilebilir. Gerçek kanat geometrisinde airfoil kesitleri birbirlerine akıcı bir şekilde *splinelar* ile bağlanmaktadır, dolayısıyla geçiş bölgelerinde tanımlanmamış airfoil kesitleri mevcuttur. Ne var ki bu geçiş bölgesindeki ara airfoil kesitleri mevcut koda tanımlı değildir (ve bir interpolasyon yöntemi kullanılmamıştır) ve QBlade bu kesitlerin c_l, c_d değerlerini interpolate ederken mevcut kod tamamını mevcut airfoil profili olarak ele almıştır. Değerler kanat ucunda birbirleriyle örtüşse de, torku en çok sağlayan kanat orta kısmı bu farklılıktan yüksek oranda etkilenmiştir.



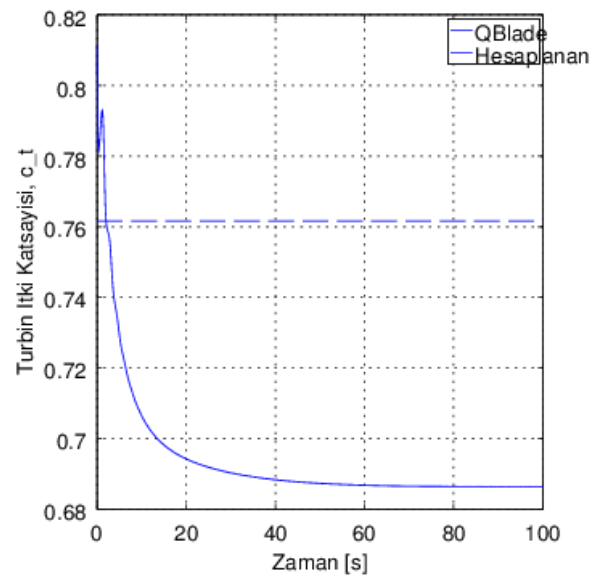
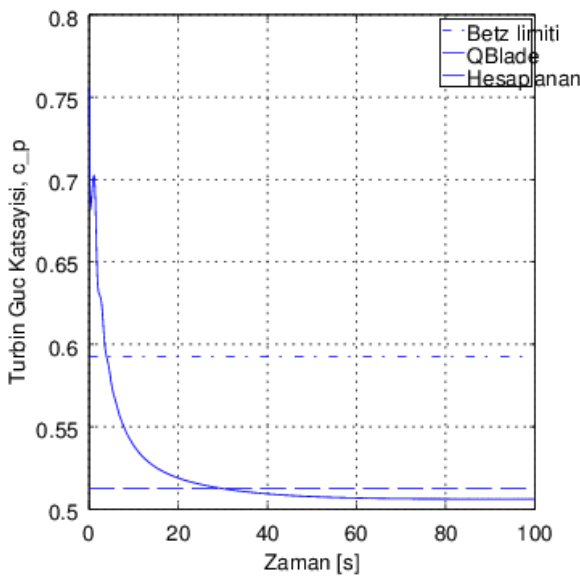
Şekil 18) Kanatlar boyunca uzunluk başına normal kuvvet dağılımı ($t = 100s$)



Şekil 19) Kanatlar boyunca uzunluk başına aksel kuvvet dağılımı ($t = 100s$)

Eksenel kuvvet değerleri $r = 20m$ 'ye kadar QBlade'e yakın, fakat buradan sonra istikrarlı ancak daha düşük kalmıştır. Normal yük dağılımları c_l değerlerindeki farklılık sebebiyle sapma göstermektedir. Dairesel profil - airfoil profili arasındaki geçiş bölgesinin sonuçlara etkisi bu grafikte de gözlemlenmektedir. Normal kuvvet dağılımının $r = 40m$ 'nin altında düşük olması çözümün tam bir RONS çözümü olması ve bir öndeki kanadın rotor düzleminde yarattığı izbölgesinin ardından gelen kanat üzerindeki akışı etkilemesiyle, $r = 40m$ 'nin üstünde yüksek olması ise uç kayıp düzeltmelerinin uygulanmamış olmasıyla bağdaştırılmıştır. Yine, türbinin sınır etkilerinden uzak olması sebebi ile her 3 kanat da aynı değerlere sahiptir.

Simülasyonun periyodik-kararlı hale gelmesi belli bir süre almıştır, çünkü simülasyonun başlarında türbin rotoru içinde başlangıç şartı olan eksenel yönde üniform $11.4m/s$ hız sebebiyle kanatların gördüğü rölatif hız gerçek çalışma şartlarından farklı olmakta ve kuvvetler hatalı hesaplanmakta, zaman içinde bu hata düzelenek c_p ve c_t değerleri terminal bir değere ulaşmaktadır.



Şekil 20) Türbin güç katsayısı c_p yakınsama grafiği Şekil 21) Türbin itki katsayısı c_t yakınsama grafiği

Yer etkisinden uzak türbinin güç ve itki katsayıları yaklaşık $t = 70s$ 'den sonra nihai değere ulaşmıştır. Sonuçlar QBlade ile karşılaştırıldığında; güç katsayısı oldukça yaklaşık çıkarken, itki katsayısı daha düşük ($\approx 7\%$ hata ile) elde edilmiştir. Rüzgar türbinlerinde (eğer türbin optimum tasarlanmış ise) güç ve itki değerlerinde kanatlar üzerindeki kaldırma kuvvetinin (lift) direnç kuvvetine (drag) göre daha yüksek etkisi olduğu bilinmektedir. Bu sonuç, c_l ve dolayısı ile kaldırma kuvveti değerlerinin daha yüksek çıkması göz önüne alındığında, hatanın hücum açısından kaynaklandığını göstermektedir.

Kaynak	c_p	c_t	Yöntem ve detay
Bu çalışma	0.513	0.69	ALM, Uç kayıp modeli yok
QBlade	0.506	0.76	BEMT, Uç kayıp modeli yok
[Burmester, 2016]	0.52	0.83	3D CFD ve RANS-BEMT
[Tabib, 2017]	0.48	—	3D CFD MRF

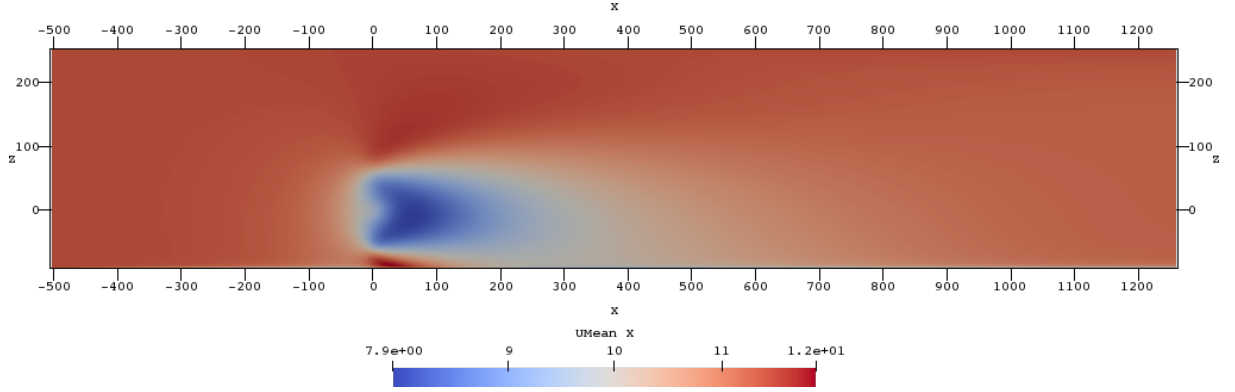
Tablo 4: TSR = 7 için güç (c_p) ve itki (c_t) katsayılarının diğer çalışmalar ile karşılaştırılması

Yapılan diğer çalışmalarda RANS-BEMT metodu bu çalışmadaki sonuçlara oldukça yakın değerler vermiştir [Burmester, 2016]. Ne var ki, kanat geometrisi ve sınır tabakanın tamamen çözümlendiği ve çoklu referans sistemi (MRF) metodunun kullanıldığı çalışma çok daha düşük bir güç katsayısı değeri vermiştir [Tabib, 2017]. Bu durum; BEMT ve ALM gibi basitleştirilmiş metodların hataya açık olduğu, uç kayıp düzeltme fonksiyonu ve/veya diğer ampirik düzeltme faktörlerinin bu gibi

modellere dahil edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

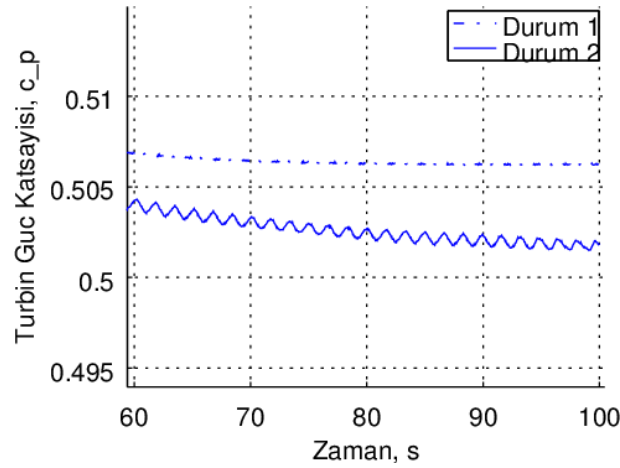
Durum 2: Zemin Etkisine Maruz NREL5MW Rüzgar Türbini

Bu durumda türbinin açık ve düz bir zemin üzerinde çalışması simüle edilmiş ve rotor merkezi kule yüksekliği olan 90m'ye yerleştirilmiş, ancak atmosferik sınır tabaka modellenmemiştir. 1. durumdan farklı olarak rotorun zemine yakın olması ve kanatların zemin yakınından geçerken gösterdiği davranışa odaklanılmıştır.

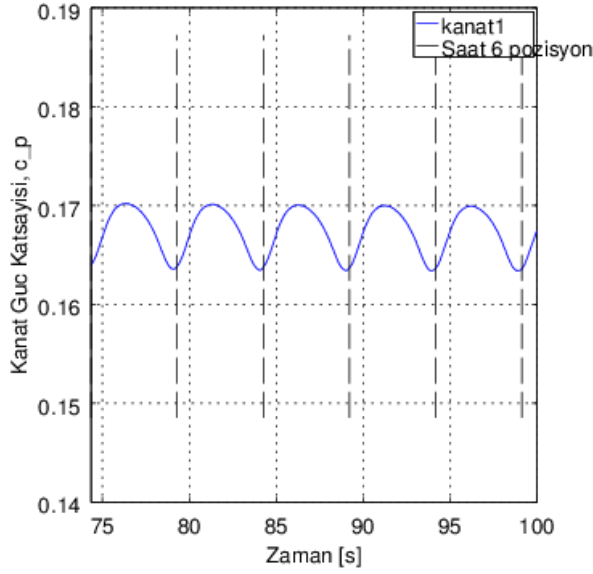


Şekil 22) Eksenel yöndeki hız bileşeninin zaman ortalaması alınmış konturları (y düzleminde)

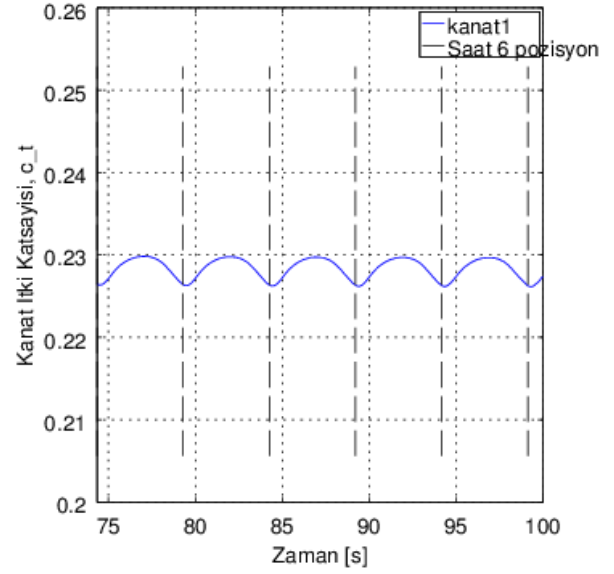
İki durumdaki güç katsayısı yakınsama grafikleri incelendiğinde zemin etkisinin ortalama güç üretiminde bir miktar düşüşe neden olduğu görülmektedir; durum 1'de güç katsayısı 0.506 iken yer etkisinde bu değer 0.502'ye düşmüştür. Ayrıca zemin etkisindeki rüzgar türbininin ortalama güç üretiminin dalgalı bir seyir izlediği gözlemlenmiştir: üç kanadın toplam zemin etkisini en fazla hissettiği anlarda güç dip yapmış, aksi durumlarda maksimum değerine ulaşmıştır.



Şekil 23) Durum 1 ve 2'de son 40 saniyedeki türbin güç katsayısı yakınsama grafikleri: yer etkisinin güç üretimine etkisi.

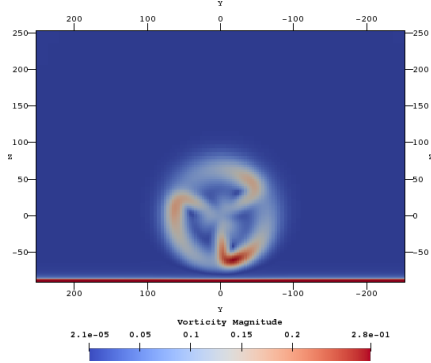


Şekil 24) 1. kanadın zamana bağlı güç katsayısı c_p grafiği. Kesikli çizgiler kanadın zemine en yakın dikey pozisyona geldiği anları işaretlemektedir.

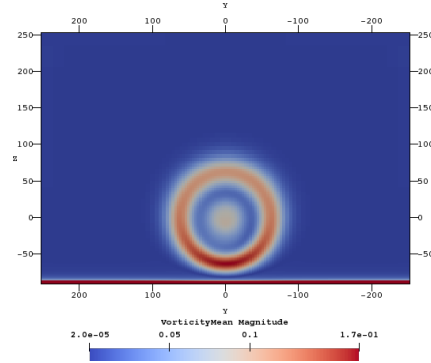


Şekil 25) 1. kanadın zamana bağlı itki katsayısı c_t grafiği. Kesikli çizgiler kanadın zemine en yakın dikey pozisyona geldiği anları işaretlemektedir.

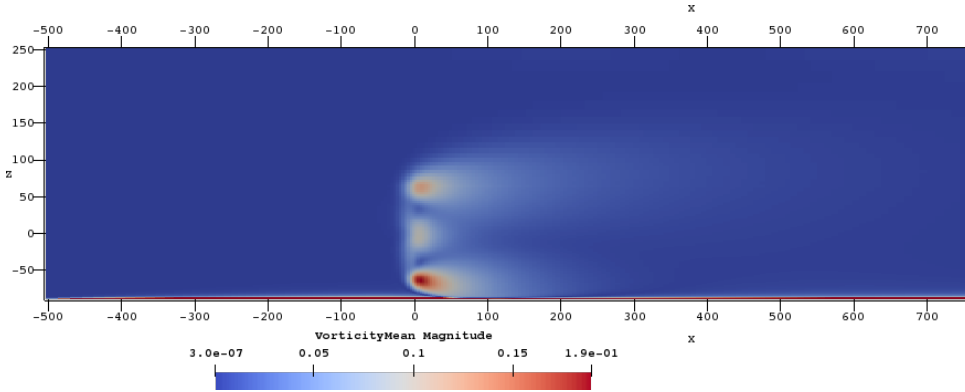
Kanatların bu duruma tekil etkisini yakından incelemek için sadece 1. kanadın güç ve itki üretimine katkısını gösteren grafik çıkarılmıştır. Güç ve itki katsayılarının yaklaşık olarak yere en yakın konuma geldiklerinde minimum değere düştükleri görülmüştür. Yakından bakıldığında güç katsayısının saat 6 pozisyonundan $\approx 18^\circ$ geride, itki katsayısının ise saat 6 pozisyonundan $\approx 18^\circ$ ileride en düşük değere ulaştıkları fark edilmiştir.



Şekil 26) Rotor düzlemindeki anlık vortisite konturları ($t = 100s$)

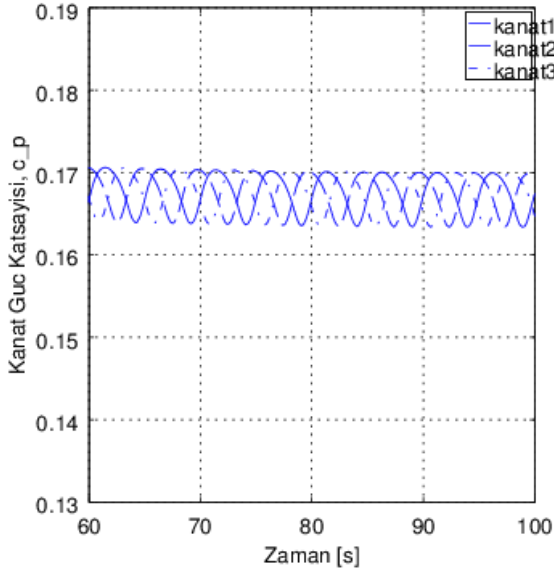


Şekil 27) Rotor düzlemindeki zaman ortalamalı vortisite konturları

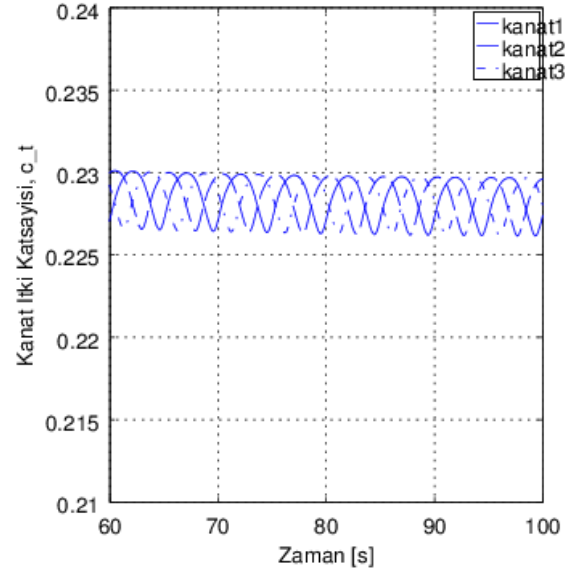


Şekil 28) y düzlemindeki zaman ortalamalı vortisite konturları

Özellikle kanat uçlarına doğru artan ve kanat uçlarında maksimum değere ulaşan vortisite değerleri gözlemlenmiştir. Anlık vortisite konturları çizildiğinde zemine en yakın olan kanadın uçlarında diğer kanatlara oranla daha fazla vorteks üretildiği görülmektedir. Aynı durum, vorteks değerlerinin zaman ortlaması alındığında da ortaya çıkmaktadır: kanatlar zemine yaklaştıklarında daha fazla vorteks üretimine yol açmaktadırlar. Bu durum, zeminin varlığının güç üretimine etkisini vorteks üretimi açısından da göstermektedir.

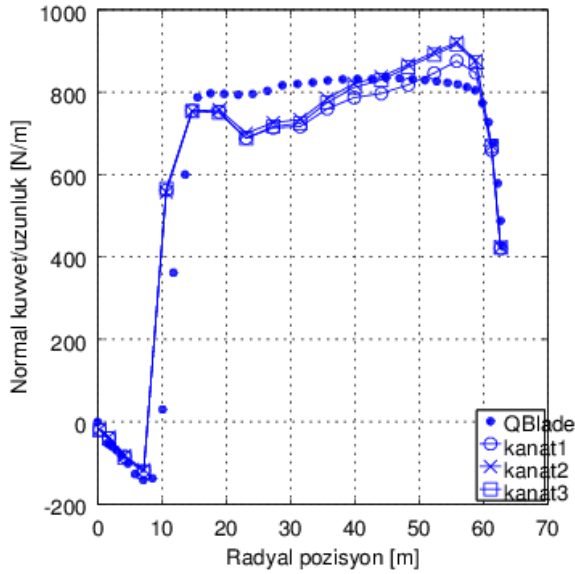


Şekil 29) Her bir kanadın son 40s'deki tekil güç katsayısı grafiği

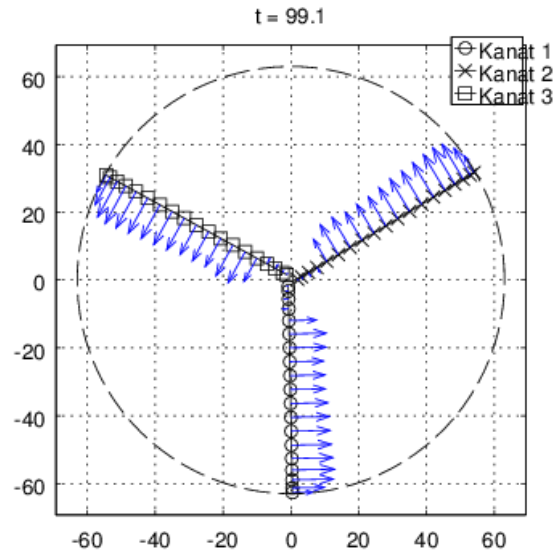


Şekil 30) Her bir kanadın son 40s'deki tekil itki katsayısı grafiği

Kanatların zemine yakın bir pozisyonda iken güç üretimine katkılarının düştüğü açıkça görülmektedir. Her bir kanadın bu pozisyondan sıra ile geçtiği ve sabit bir periyod ile dalgalı bir grafik çizdiği saptanmıştır. Dolayısı ile, türbinin toplam güç üretimi grafiğinde, kanatlara göre genliği daha düşük ancak frekansı daha yüksek bir dalgalanma davranışı vardır.

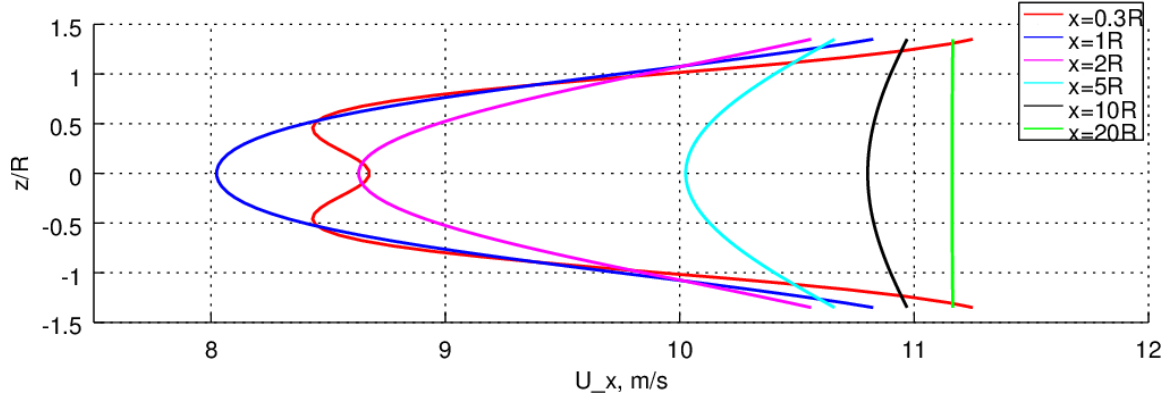


Şekil 31) Kanatlar boyunca uzunluk başına normal kuvvet dağılımı ($t = 99.1s$)

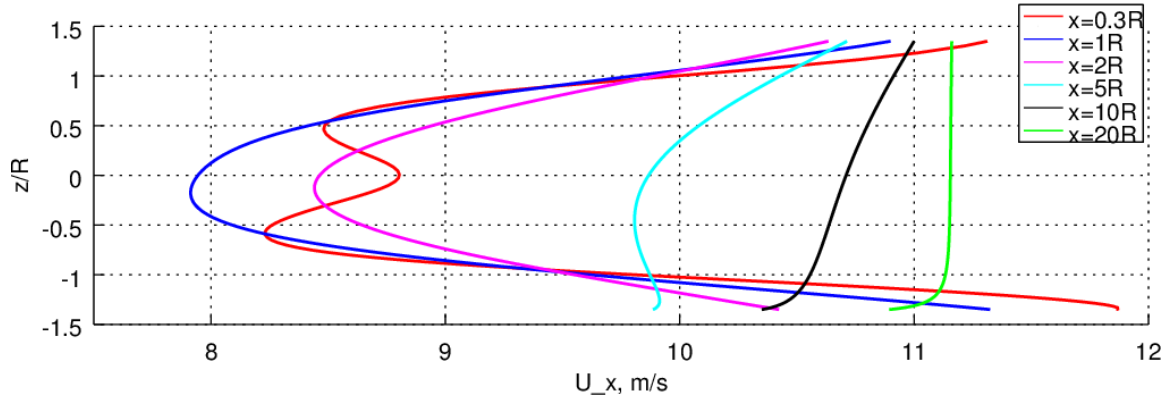


Şekil 32) Türbin kanatlarının anlık konumu ($t = 99.1s$)

Her bir kanadın normal kuvvet dağılımı aynı an için çizildiğinde, kanatların konumu ve zemine olan yaklaşıklıkları sebebi ile farklı eğriler verdikleri görülmüştür. Şekilde, zeminden eşit mesafede uzak olan Kanat 2 ve Kanat 3'ün birbirlerine çok yakın kuvvet değerleri vermesinin yanısıra, zemine en yakın kanat olan Kanat 1'in diğer kanatlara göre daha düşük kuvvet değerleri verdiği görülmüştür.



Şekil 33) Rotorun akış arkasındaki 6 x istasyonunda z ekseninde aksiyel hız bileşeni profilleri (Durum 1 için)



Şekil 34) Rotorun akış arkasındaki 6 x istasyonunda z ekseninde aksiyel hız bileşeni profilleri (Durum 2 için)

Zemin etkisinin mevcut olmadığı ve olduğu durumlarda rotorun akış arkası tarafındaki hız profillerinde de farklılık gözlemlenmiştir. Her iki durumda da rotordan uzaklaştıkça homojenleşen hız grafikleri elde edilmiştir. Durum 1'de profiller x eksenine göre simetrik iken, zemin etkisi ile sınır tabaka oluşmaktadır. Rotorun alt yarısında daha düşük hız değerleri, bu bölgeye giren kanatlardaki güç üretimindeki düşüşü açıklamaktadır.

İleriye dönük çalışmalar:

- Mevcut koddaki hücum açısı ve c_l/c_d hesaplama hatalarının kaynağının bulunması ve giderilmesi.
- Kodun çeşitli serbest rüzgar hızları ve rotor dönme hızları ile farklı rüzgar türbinleri (MEXICO, NTNU, DTU gibi) üzerinde test edilmesi ve sonuçların istikrarının değerlendirilmesi.
- Verilen 19 kesit bilgisi ile 3 boyutlu süpürülmüş kanat yüzeyi geometrisi elde edilip bu yüzey kullanılarak ara kesit geometrileri üretilip eleman sayısının artırılması. Bu geliştirmenin özellikle $r = 10m$ yakınındaki dairesel profilden airfoil profiline geçişten kaynaklanan hata üzerine etkisinin incelenmesi.
- Aynı dönme eksenine art arda yerleştirilmiş iki türbinin simüle edilip izbölgesinde kalan türbindeki güç kaybının gözlemlenmesi ve mevcut çalışmalar ile karşılaştırılması.

- Prandtl uç kayıp düzeltme düzeltme fonksiyonunun entegre edilmesi ile kanat uçlarındaki girdap etkisinin güç üretimine etkisinin hesaba katılması.

Kaynaklar

- Global Wind Energy Council, 2015. <http://gwec.net/global-figures/wind-in-numbers/>, web
- Global Wind Energy Council, 2016. <http://gwec.net/publications/global-wind-report-2/global-wind-report-2016/>, web
- Jens Norkaer Sorensen, Wen Zhong Shen, 2002 *Numerical Modeling of Wind Turbine Wakes*
- Wen Zhong Shen, Robert Mikkelsen and Jens Nørkær Sørensen, 2005 *Tip Loss Corrections for Wind Turbine Computations*
- Sorensen JN, Mikkelsen RF, Henningson DS, Ivanell S, Sarmast S, Andersen, 2015 *Simulation of wind turbine wakes using the actuator line technique*
- S. Sarmast, W.Z. Shen, W.J. Zhu, R.F. Mikkelsen, 2016 *Validation of the actuator line and disc techniques using the New MEXICO measurements*
- A. Matiz-Chicacausa and Omar D. Lopez, 2018 *Full Downwind Turbine Simulations Using Actuator Line Method*
- Birgir Hrafnkelsson, Gudmundur V. Oddsson and Runar Unnthorsson *A Method for Estimating Annual Energy Production Using Monte Carlo Wind Speed Simulation*
- Fuglsang P, Antoniou I, Sorensen N, Madsen H A, 1998 Validation of a wind tunnel testing facility for blade surface pressure measurements
- Zhang J H, 2004 Numerical modeling of a vertical axis wind turbine (VAWT)
- Drela M, Youngren H, 2001 XFOIL 6.94 User Guide
- Bachant, Pete., 2016 *Actuator line modeling extension library for OpenFOAM*
<https://github.com/turbinesFoam/turbinesFoam>
- Crasto, Giorgio & Gravdahl, Arne., 2008 *CFD wake modeling using a porous disc*
- Mandar Tabib, M Salman Siddiqui, Adil Rasheed, Trond Kvamsdal, 2017 *Industrial scale turbine and associated wake development - comparison of RANS based Actuator Line vs Sliding Mesh Interface vs Multiple Reference Frame method*
- S Burmester, S Gueydon, M Make, 2016 *Determination of Scaled Wind Turbine Rotor Characteristics from Three Dimensional RANS Calculations*
- Mark Drela, MIT, 1988 *XFOIL: Subsonic Airfoil Development System*
<http://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/>