

RÜZGAR TÜRBİNİ İZBÖLGELERİNİN NÜMERİK SİMÜLASYONUNDA RANS VE LES TÜRBÜLANS MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Hüseyin C Önel¹ ve İsmail H Tuncer²
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, rüzgar tarlası Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği (CFD) simülasyonlarında seçilen türbülans modelinin rüzgar türbini izbölgelerinin üzerindeki etkisinin incelenmesidir. Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (RANS) tabanlı ve Büyük Çevrinti Simülasyonu (LES) tabanlı olmak üzere CFD simülasyonlarında yaygın olarak kullanılan iki temel türbülans modeli karşılaştırılmıştır. Türbin kanatları Aktüatör Çizgi Modeli (ALM) yaklaşımı ile modellenmiş, böylece çözüm ağındaki hücre sayısı ve hesaplama gücü bakımından tasarruf sağlanmıştır. Öncelikle ALM'nin farklı türbin dönme hızlarındaki doğruluğu test edilmiştir. Daha sonra iki özdeş rüzgar türbini eksenel olarak hizalanmış bir şekilde çözüm alanına yerleştirilmiştir. RANS ve LES türbülans modelleri kullanılarak yapılan ayrı ayrı simülasyonlarda izbölgesi yapıları ve çevrıntilerin davranışları elde edilmiştir. LES türbülans modelinde giriş sınırında laminar giriş şartının yanı sıra iki farklı türbülans üretme modeli de test edilmiştir: Zaman-Mekansal olarak Rastgele Değişen (STRV) ve Iraksamasız Sentetik Çevrinti (DFSEM). Tutarlılık ve bire-bir karşılaştırma amacıyla hem LES hem de RANS çözümleri daimi-olmayan akış şartlarında elde edilmiştir. Simülasyonlar açık kaynak kodlu OpenFOAM akış çözücüsünde paralel olarak gerçekleştirilmiştir. İki-boyutlu kesitlerde hız ve vortisite konturlarının yanı sıra güç üretim değerlerini gösteren grafikler sunulmuştur. ALM'nin farklı uç hız oranlarında başarılı bir şekilde güç üretimini tahmin edebildiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, izbölgesi yapılarının ve akış hızına bağlı güç kayıplarının seçilen türbülans modeline, özellikle de giriş türbülans koşullarına karşı yüksek derecede hassas olduğu sonucuna varılmıştır.

GİRİŞ

Rüzgar tarlaları, birbirlerinin izbölgesinde çalışan bir çok rüzgar türbininden müteşekkildir. Rüzgar tarlalarının tasarımında ve işletilmesinde, toplam güç üretiminin doğru tahmin edilebilmesinin önemi oldukça büyüktür. Baskın rüzgar yönü ve hızı, bir rüzgar tarlasının performansını en çok etkileyen faktörlerden ikisidir. Küçük ölçekte ele alındığında, izbölgeleri, etkiledikleri türbinler

¹Araştırma görevlisi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği., E-posta: honel@ae.metu.edu.tr

²Prof. Dr., Havacılık ve Uzay Mühendisliği, E-posta: ismail.h.tuncer@ae.metu.edu.tr

üzerinde olumsuz etkiye sahiptirler, çünkü düşük rüzgar hızı ve yüksek türbülans içermektedirler. Türbinler arası izbölgesi etkileşiminin, hiç izbölgesi olmayan bir durumla kıyaslandığında %20'ye varan güç kayıplarına neden olduğu bilinmektedir [Barthelmie v.d., 2011]. İzbölgelerini tamamen yok etmek mümkün olmadığı için, etkilerinin en aza indirilmesi, rüzgar tarlası yerleşiminde önemli bir husus olarak öne çıkmaktadır.

Bir rüzgar tarlasının bütünü aerodinamik açıdan ele alındığında çok geniş bir aralıkta uzunluk ve zaman ölçekleri bulunmaktadır. Örneğin uzunluk ölçeği, kanat yüzeylerindeki sınır tabakada milimetre mertebesinde iken arazi boyutlarında kilometreler mertebesine çıkmaktadır. Yüksek isabetli bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD¹) simülasyonunun yapılması için tüm bu ölçeklerin çözülmesi oldukça yüksek maliyetli hale gelmektedir Kalvig v.d. [2012]. Bu sebeple, alışılmış şekle türbin yüzeylerindeki sınır tabakayı çözümlemek yerine alternatif olarak *aktüatör modeli* yaklaşımı ortaya çıkmıştır. Bu modellerde, kanat yakınındaki akış detaylarından feragat edilerek görece daha düşük hesaplama gücü ile izbölgesinin hesaplanması hedeflenmektedir.

Aktüatör modellerinden en yaygın olanları, sağladıkları doğruluk bakımından düşükten yükseğe: *disk*, *çizgi* ve *yüzey* olarak sıralanabilir. Bunlardan Aktüatör Çizgi Modeli (ALM²), isabetlilik ve maliyet açısından en iyi ödünleşimi sunmaktadır. Model, Sorensen v.d. [Norkaer Sorensen ve Shen, 2002] tarafından geliştirilmiş ve yayınlanmıştır. ALM'de her bir türbin kanadı "sanal çizgi" olarak temsil edilir. Bu çizgiler, Kanat Elemanı-Momentum (BEM³) teorisinde olduğu gibi sonlu elemanlara bölünürler. Kanat etrafında sınır tabaka ağı oluşturup basınç dağılımını hesaplayarak tork ve itki kuvvetlerini bulmak yerine ALM'de her bir kanat elemanında 2-boyutlu airfoil teorisi kullanılarak aerodinamik kuvvetler çözüm alanından dekupe ancak iteratif bir şekilde hesaplanır. Hesaplanan bu kuvvetler daha sonra statik durumdaki çözüm ağına aktarılır. Bu şekilde kanat sınır tabakasını çözümlemekten izbölgesinin daimi-olmayan davranışını incelemek mümkün olmaktadır.

Türbin izbölgelerinin oluşma şekli ve vorteks yapıları, izbölgesindeki hız kayıplarında ve dolayısıyla izbölgesinde kalan türbinlerdeki güç eksilmelerinde büyük etkiye sahiptir. Elde edilen izbölgesi sonuçlarının ise seçilen türbülans modeline oldukça hassas olduğu bilinmektedir. Trolborg v.d. [2014], yaptıkları Ayrık Çevrinti Simülasyonunda (DES⁴) giriş sınırında akış laminar olduğunda türbülanslı bir akışa kıyasla ortalama izbölgesi hızının ve türbülans kinetik enerjisinin büyük oranda düştüğünü raporlamışlardır. Nathan v.d. ise ALM ile Büyük Çevrinti Simülasyonu (LES⁵) yöntemlerini giriş sınırında farklı türbülans şiddet değerleri ile test etmişlerdir. Türbülans şiddetinin aksel yöndeki bozunmasını incelediklerinde, türbülans şiddetinin çözümlenen kısmı ile sentetik olarak empoze edilen kısımları arasındaki farkın asıl olarak ağ-altı ölçeklerden (sub-grid scale) kaynaklandığı kaynaklandığını görmüşlerdir. Tabor ve Baba-Ahmedi [Tabor ve Baba-Ahmedi, 2010] ise farklı türbülans oluşturma yöntemlerini incelemişler; öncül simülasyon (periyodik sınır şartlarıyla tam gelişmiş bir akış elde edilmesi ve örnek kesitler alınması) yönteminin en yüksek doğruluk sağlamasına rağmen sentetik türbülans modellerinin ihtiyaca göre daha kolay ayarlanabilir olduğunu teyit etmişlerdir.

Bu çalışmanın amacı, OpenFOAM'a entegre bir ALM modülünün geliştirilmesi, LES türbülans modeli ile bir rüzgar türbini izbölgesindeki hız geri kazanımının ve ikinci bir türbinin maruz kaldığı güç kaybının tahmin edilmesidir. İlk olarak, tek ve izole bir rotorda ALM'nin farklı uç hız oranlarındaki güç tahminleri değerlendirilmiştir. Daha sonra iki rüzgar türbini aksel hizalı olarak arka arkaya yerleştirilmiş, laminar ve türbülanslı giriş koşullarında güç üretimleri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatürdeki diğer sayısal veriler ve yine bu çalışma dahilinde elde edilmiş

¹CFD: Computational Fluid Dynamics

²ALM: Actuator Line Model

³BEM: Blade Element-Momentum

⁴DES: Detached Eddy Simulation

⁵LES: Large Eddy Simulation

daimi-olmayan Reynolds-Ortalımalı Navier-Stokes (URANS⁶) simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Giriş türbülansının izbölgesi yapılarının gelişimi ve güç üretimi üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

YÖNTEM

Bu çalışmanın iki temel bölümü vardır: türbülanslı akış çözücüsü ve türbin modeli. Daimi-olmayan ve sıkıştırılmaz Navier-Stokes denklemleri OpenFOAM'un [Weller v.d., NOV/DEC 1998] ilgili akış çözücüsü pimpleFoam kullanılarak ayrıklaştırılıp çözülmüştür. Türbülans, Büyük Çevrinti Simülasyonu (LES) ile modellenmiştir. Türbin kanatları, çözüm alanına Aktüatör Çizgi Modeli (ALM) kullanılarak dahil edilmiştir. ALM'nin uygulanmasında bir OpenFOAM kütüphane uzantısı olan turbinesFoam [Bachant v.d., 2016] kullanılmıştır. Kartezyen çözüm ağının oluşturulmasında OpenFOAM'da mevcut olan modüllerden faydalanılmıştır. Doğrulama için ise Kanat Elemanı-Momentum (BEM⁷) teorisi tabanlı bir kod olan QBlade [Marten v.d., 2013] kullanılmıştır. ALM'nin çalışması için gerekli olan kaldırma (C_l) ve direnç (C_d) katsayıları XFOIL [Drela, 1989] kodu aracılığıyla elde edilmiştir.

LES Türbülans Modeli ve Akış Çözücüsü: OpenFOAM

Bu çalışmada kullanılan OpenFOAM'un daimi-olmayan ve sıkıştırılmaz akış çözücüsü pimpleFoam, PISO⁸ ve SIMPLE⁹ algoritmalarının bir kombinasyonudur. Simülasyonlarda kanat ucu 0.3 Mach sayısını geçmediği için sıkıştırılmaz akışkan kabulü yapılmıştır. Kullanılan LES türbülans modelinde büyük ölçekli çevrintiler çözüm ağında çözümlenirken, ağ-altı ölçekteki (SGS¹⁰) çevrintiler modellenir:

$$\nabla \cdot \tilde{\mathbf{u}} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \tilde{\mathbf{u}} + (\tilde{\mathbf{u}} \cdot \nabla) \tilde{\mathbf{u}} = -\nabla \tilde{p} + \nu \nabla^2 \tilde{\mathbf{u}} - \nabla \cdot \tau^d + \tilde{f}_b \quad (2)$$

$$\tau_{ij}^d = \tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} \quad (3)$$

Burada $\sim$ sembolü ile ifade edilen değerler çözümlenmektedir. Bu çalışmada SGS gerilme tensörünü (τ_{ij}^d) modellemek için kullanılan klasik Smagorinsky modelinde [Smagorinsky, 1963]:

$$\tau_{ij}^d = -2\nu_{SGS} S_{ij} \quad (4)$$

$$\nu_{SGS} = (C_S \Delta)^2 |S| \quad (5)$$

$$S = \frac{1}{2} (\tilde{u}_{j,i} + \tilde{u}_{i,j}) \quad (6)$$

$$|S| = (2S_{ij} S_{ij})^{(1/2)} \quad (7)$$

olarak hesaplanmıştır. ν_{SGS} SGS viskozitesini, S gerininin zamana göre türevini ifade etmektedir ve C_S bir model sabitidir. Δ , hücre ölçülerine bağlı olarak $\Delta = (\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{(1/3)}$ şeklinde hesaplanmıştır. İzotropik türbülans kabulü ile Smagorinsky sabiti $C_S = 0.168$ [Sagaut, 2001] olarak alınmıştır.

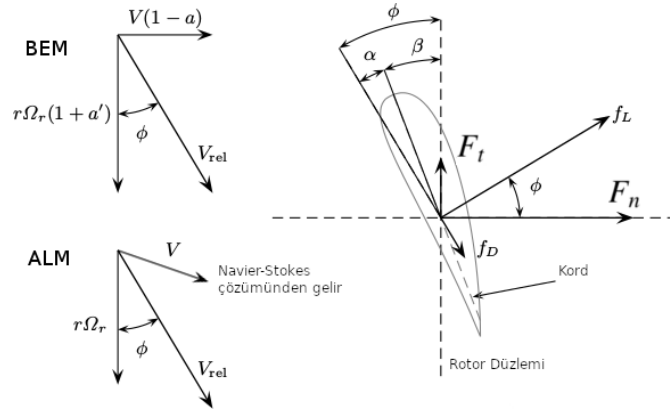
⁶URANS: Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes

⁷BEM: Blade Element-Momentum

⁸PISO: Pressure Implicit with Splitting of Operator

⁹SIMPLE: Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations

¹⁰SGS: Sub-Grid Scale



Şekil 1: Bir kanat elemanında yer alan aktüatör noktasındaki relatif hız, açılar ve kuvvetler.

Aktüatör Çizgi Modeli

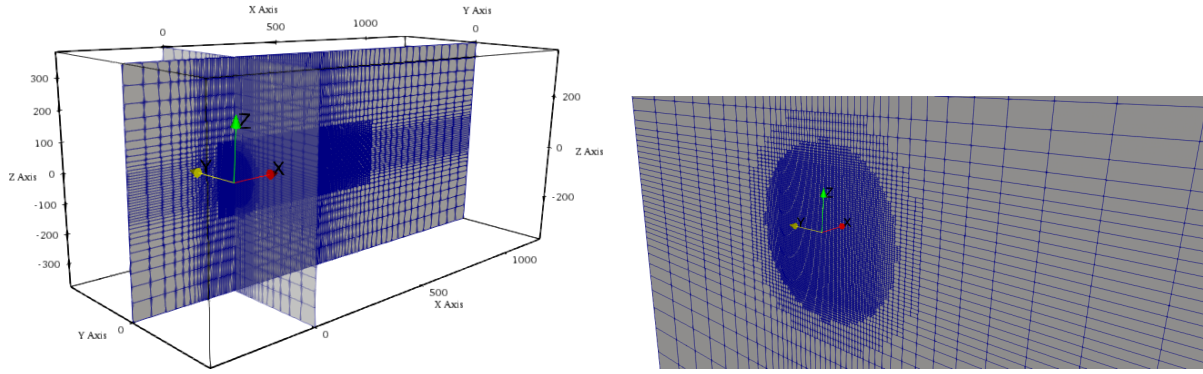
Geleneksel olarak simülasyonlarda rüzgat türbininin kanatları çözüm ağı içerisinde tam-çözümlemiş olarak yer alır. Dönme hareketi ise birbirleri üzerinde kayabilen ağ arayüzleri gibi özel işlemler ile gerçekleştirilir. Bu yaklaşım her ne kadar çok yüksek doğruluk sağlasa da çözüm ağının boyutunun büyümesi ve zaman adımının küçülmesi gerekliliği bakımından yüksek hesaplama gücüne ihtiyaç duymaktadır.

Diğer taraftan, Aktüatör Çizgi Modeli (ALM) [Norkaer Sorensen ve Shen, 2002] yaklaşımında kanatlar sonlu sayıda elemanlara bölünür ve her kesitte 2 boyutlu kaldırma ve direnç kuvvetleri hesaplanır ($[f_L, f_D] = 0.5\rho U_{rel}^2 C_{[l,d]} c \Delta_e$) ve ardından bu kuvvetler çözüm ağına aktarılır. Bu aktarım, momentumun korunumu denklemindeki kuvvet terimi aracılığı ile sağlanır. Gerekli olan kaldırma ve direnç kuvveti katsayıları (C_l ve C_d), farklı hücum açıları ve Reynolds sayıları için önceden hazırlanmış olan tablolardan interpolasyon ile okunur. Bu çalışmada aerodinamik katsayılar XFOIL [Drela, 1989] yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Her bir kanat elemanı için her bir zaman adımında hesaplanan bu kuvvetler, *aktüatör noktası* olarak adlandırılan noktalarda çözüm ağına uygulanırlar. Her bir zaman adımında her bir kanat elemanının aktüatör noktasının konumu değişmekte ve hesaplanmaktadır; dönme hareketi bu şekilde sağlanır. Literatürde aktüatör noktasının kanat elemanının neresinde olması ile ilgili farklı kabuller mevcut olmakla birlikte bu çalışmada kanat elemanı genişliğinin tam ortası ve kord uzunluğunun çeyreği olarak kabul edilmiştir. Son olarak, stabil ve gerçekçi bir çözüm elde etmek amacıyla hesaplanan kuvvetler çözüm ağına tekil bir kaynak olarak geçirilmek yerine komşu hücrelere dağıtılarak geçirilirler, bu işlem toplam kuvvet şiddetini muhafaza edecek bir şekilde yapılmaktadır. Bu dağıtma işlemi genellikle 3 boyutlu bir Gauss fonksiyonu (η) şeklinde gerçekleştirilir:

$$\eta = \frac{1}{\epsilon^3 \pi^{3/2}} \exp\left(-\left(\frac{|\vec{r}_b|}{\epsilon}\right)^2\right), \quad \vec{f}_b = \vec{f}_R \otimes \eta \quad (8)$$

Bu fonksiyon küre şeklinde bir dağılım vermektedir ve en kritik parametre kürenin çapını kontrol eden ϵ 'dur. ϵ , genellikle hücre boyutunun (Δ_g) katı cinsinden ifade edilir ve bu çalışmada $\epsilon = 1.25\Delta_g = 2.46m$ alınmıştır [Onel ve Tuncer, 2020]. $\vec{r}_b$, ilgili hücrenin aktüatör noktasına (kuvvetin merkezine) olan uzaklık vektörüdür. Son olarak hesaplanan kuvvetin ($\vec{f}_R$) η ile konvolüsyonu alınarak her bir hücredeki kuvvet vektörü ($\vec{f}_b$) belirlenmiş olur.

BEM yaklaşımında iterasyonlar eksenel ve teğetsel endüksiyon faktörleri (a ve a') üzerinden yapılırken, buna karşın ALM'de hesaplanan kuvvetler ve hız alanı arasındaki akupple bağıntı üzerine



Şekil 2: Çözüm ağının üç boyutlu (solda) ve rotor düzlemine yakınlştırılmış (sağda) görünüşleri.

iterasyon yapılır (Şekil 1). Hesaplanan kuvvetler çözüm alanına geçirildikten sonra yakın bölgedeki hız alanında bir sapmaya neden olur, bu da çözüm alanında aktüatör noktaları üzerinde okunan hücum açısı ve hız değerlerini etkiler. Hatada belli bir yakınsama sağlanana kadar bu bağıntı üzerine bir zaman adımı içerisinde iterasyon yapılır. Bu yaklaşım sayesinde azalan hücre sayısı ve artan zaman adımı boyutu sayesinde ALM bir avantaj sağlamaktadır.

Son olarak, ALM'de türbin kanatları katı yüzeyler olarak yer almadığı için kanat uçlarındaki basınç kayıpları doğru bir şekilde elde edilemez. Bu sebeple bu kayıplar modellenerek elde edilir. Bu çalışmada Glauert tarafından önerilen ve daha sonra Shen v.d. [Shen v.d., 2005] tarafından geliştirilen bir model kullanılmıştır:

$$F_{\text{kayıp}} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\exp \left(-g \frac{N_B (R - r)}{2r \sin \phi} \right) \right) \quad (9)$$

g , şu şekilde verilmiştir:

$$g = \exp(-0.125(N_B \lambda - 21)) + 0.1 \quad (10)$$

Burada N_B kanat sayısı ve λ ise uç hız oranıdır (TSR¹¹). Hesaplanan kaldırma kuvveti $F_{\text{kayıp}}$ değeri (0 ile 1 arasındadır) ile çarpıldıktan sonra bileşke kuvvet hesaplanır ve çözüm ağına geçirilir.

Çözüm Ağı

Çözüm ağı, bölgesel olarak iyileştirilmiş bir kartezyen ağdan oluşmaktadır. Arka plandaki çözüm ağında hücre boyutu, serbest akışın olduğu uzak bölgelerde 63m'den (rotor yarıçapı) başlamaktadır ve rotorların bulunduğu bölgeye doğru kademeli olarak incelmektedir ve yaklaşık 8m'ye kadar düşmektedir. Buraya kadar tam olarak yapılandırılmış bir ağ mevcuttur. Daha sonra rotorların ve izbölgesinin yer alacağı hacim, her bir hücrenin bütün yönlerde 2'ye (toplamda 8'e) bölünmesiyle istenen ağ çözünürlüğüne getirilmiştir (Şekil 2).

$D = 63m$ rotor çapını ifade etmek üzere: çözüm ağı akış yönünde (x eksen) $-3D$ 'den $10D$ 'ye, yanıl yönlerde (y ve z eksenleri) ise $-3D$ 'den $3D$ 'ye uzanmaktadır ki bu da yaklaşık olarak %2'lik bir blokaj oranına denk gelmektedir. Rotor ve izbölgesindeki hücre yoğunluğu, rotor yarıçapına 32 hücre düşecek şekilde belirlenmiştir. Böylece tipik bir simülasyonda toplam hücre sayısı 28 milyon civarındadır. Türbinin kuleleri ve göbekleri modellenmemişlerdir.

¹¹TSR: Tip Speed Ratio

Sınır Şartları

Sayısal çözümlerde, giriş sınırında üniform akış ve sabit basınç şartları uygulanmıştır. Çıkış sınırında ise tüm alan değişkenlerine sıfır gradyan şartı uygulanmıştır. Yanal sınırların hepsinde kayma sınır şartları mevcuttur, zemin modellenmemiştir ve rotorlar akış kesit alanının tam ortasına yerleştirilmişlerdir. Böylece türbinler sınır etkilerinden bağımsız olarak simüle edilmişlerdir.

İzbölgesi etkileşimlerinin incelendiği simülasyonlarda giriş sınırına serbest akış türbülansı eklenerek etkisi gözlemlenmiştir. LES çözümlerinde giriş türbülansı Zaman-Mekansal olarak Rastgele Değişen (STRV¹²) ve Iraksamasız Sentetik Çevrinti (DFSEM¹³) [Poletto v.d., 2013] modelleri olmak üzere iki farklı yöntem ile oluşturulmuştur. Giriş sınırında DFSEM için gerekli olan Reynolds stres tensörü, URANS çözümünden alınan örnek bir düzlemden eşleştirme yapılarak elde edilmiştir. STRV yaklaşımında ise giriş sınırında her bir hücredeki hıza %10 ölçeğinde rastgele bir dalgalanma uygulanmıştır ki bu da yaklaşık olarak %3.3 türbülans şiddetine denk gelmektedir.

Daimi-olmayan Reynolds-Ortalımalı Navier-Stokes Çözümleri

LES çözümlerinin yanısıra daimi-olmayan bir RANS (URANS) çözümü de karşılaştırma amaçlı elde edilmiştir. Bunun için $k - \varepsilon$ türbülans modeli [Launder ve Spalding, 1974] tarafından önerilen aşağıdaki parametreler ile kullanılmıştır:

$$C_\mu = 0.09; C_1 = 1.44; C_2 = 1.92; C_{3,RDT} = 0.0; \sigma_k = 1.0; \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad (11)$$

Giriş sınırında k ve ε değerleri %3.3'lük bir türbülans şiddeti elde edilecek şekilde belirlenmiştir (STRV ile kıyasın mümkün olması için). %3.3 türbülans şiddeti değeri, stabil bir atmosferik türbülans elde edebilmek için seçilmiştir [Mittelmeier v.d., 2016]. Bunlar dışında ağ çözünürlüğü, zaman adımı, diğer sınır şartları ve bütün ALM parametreleri gibi diğer parametreler LES çözümlerinde kullanılan değerlerle aynı tutulmuştur.

UYGULAMALAR ve DEĞERLENDİRME

Uygulamalarda model türbin olarak NREL-5MW [Jonkman v.d., 2009] kullanılmıştır. NREL-5MW 126m çapında, kanatları 5 farklı airfoil profili ile tanımlanmış 3 kanatlı bir yatay eksenli rüzgar türbinidir. $U_\infty = 11.4m/s$ serbest akış hızı ve uç hız oranı¹⁴ $TSR = 7$ (yaklaşık olarak 12.1RPM'e denk gelir) için tasarlanmıştır. İlki doğrulama amaçlı olmak üzere iki ana başlık altında sonuçlar elde edilmiştir:

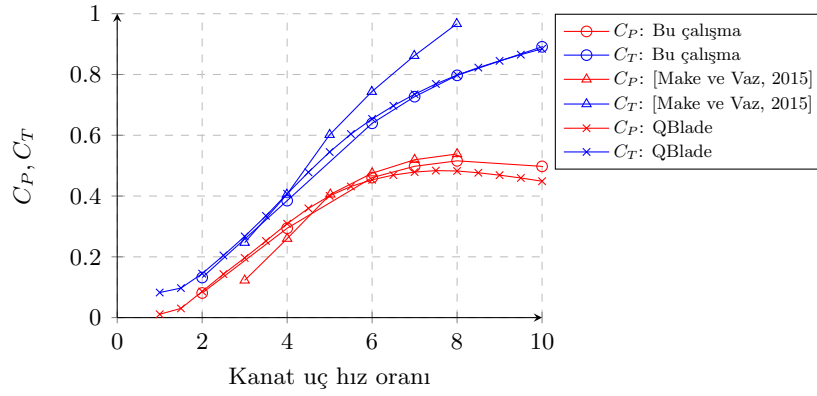
1. İzbölgesi etkilerinden yalıtılmış tek bir türbin farklı dönme hızlarında simüle edilmiş ve modelin doğruluğu değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar hem [Make ve Vaz, 2015] tarafından yayınlanmış olan tam sınır tabaka çözümlemeli sonuçlarla, hem de QBlade [Marten v.d., 2013] ile elde edilen BEM sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.
2. İkinci kısımda ise aynı koşullarda çalışan iki türbin arka arkaya yerleştirilmiş ve izbölgesindeki çevrinti davranışlarıyla arka türbindeki izbölgesine bağlı güç kaybı değerlendirilmiştir.

Hesaplamalar, 64 adet AMD® Opteron™ 6276 çekirdeği çalıştırılan bir sunucu üzerinde paralel olarak gerçekleştirilmiştir. $t = 500s$ saniyelik bir simülasyon yaklaşık olarak 15 günde tamamlanmıştır.

¹²STRV: Spatio-Temporal Random Variation

¹³DFSEM: Divergence-Free Synthetic Eddy Model

¹⁴TSR: Tip Speed Ratio



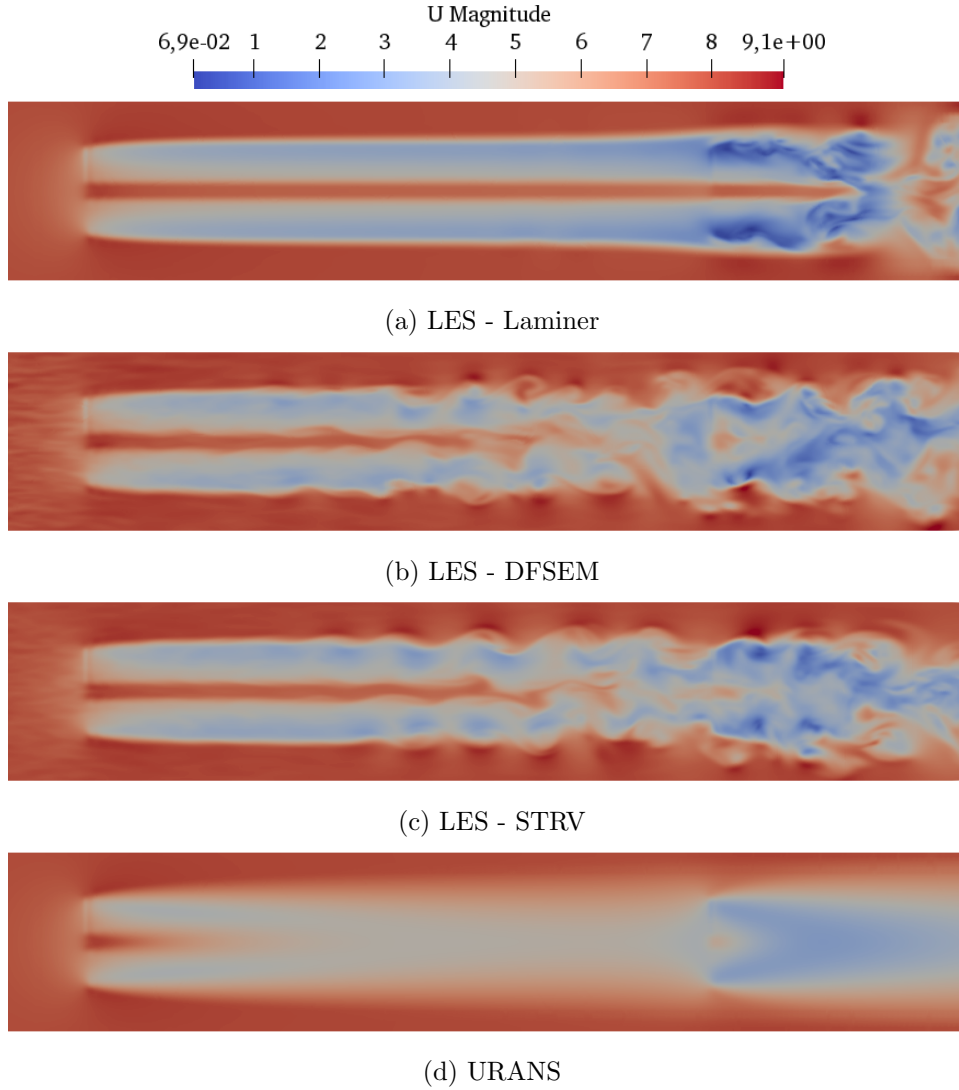
Şekil 3: Farklı uç hız oranlarında hesaplanan güç katsayıları (C_P)

Tek Türbin Simülasyonları

Bu kısımda NREL-5MW türbin tasarım koşullarında çalıştırılmıştır. Zaman adımı boyutu, türbin kanatlarının ucu her bir zaman adımında 1 hücre boyutu kadar mesafe katedecek şekilde sabit tutulmuştur. Üniform akış altında çalışan türbinlerin güç üretimlerinin seçilen türbülans modeline karşı hassas olmadığı bilinmektedir [D. Apsley v.d., 2018], bu sebeple laminar akış girişine sahip LES türbülans modeli kullanılmıştır. Rüzgar türbinlerinin en önemli çıktılarından olan güç ve itki katsayıları (sırasıyla C_P ve C_T) gözlemlenmiştir. Şekil 3'de görüldüğü üzere mevcut simülasyon parametreleri ile (rotor yarıçapı başına 32 hücre ve $\epsilon = 2.46m$) $TSR = 1 - 10$ arasında BEM ile çok yüksek uyum içerisinde sonuçlar alınmıştır. Bu duruma C_l ve C_d tablolarının her iki yöntemde de ortak kullanılmasının etkisi olmakla birlikte bu yüksek uyum mevcut modelde hız-kuvvet bağıntısının başarılı bir şekilde çözüldüğünü göstermektedir. Diğer yandan [Make ve Vaz, 2015] tarafından elde edilen tam sınır tabaka çözümlemeli sonuçlar ile karşılaştırıldığında tasarım noktasına ($TSR = 7$) yaklaştıkça güç katsayısı uyumu yükselmektedir. İtki katsayısında ise $TSR = 4$ 'ten sonra ayrışmaya artmaktadır. Bunun sebebi olarak XFOIL ve 3-boyutlu akış çözümleri arasındaki yöntem farklılığı değerlendirilmiştir.

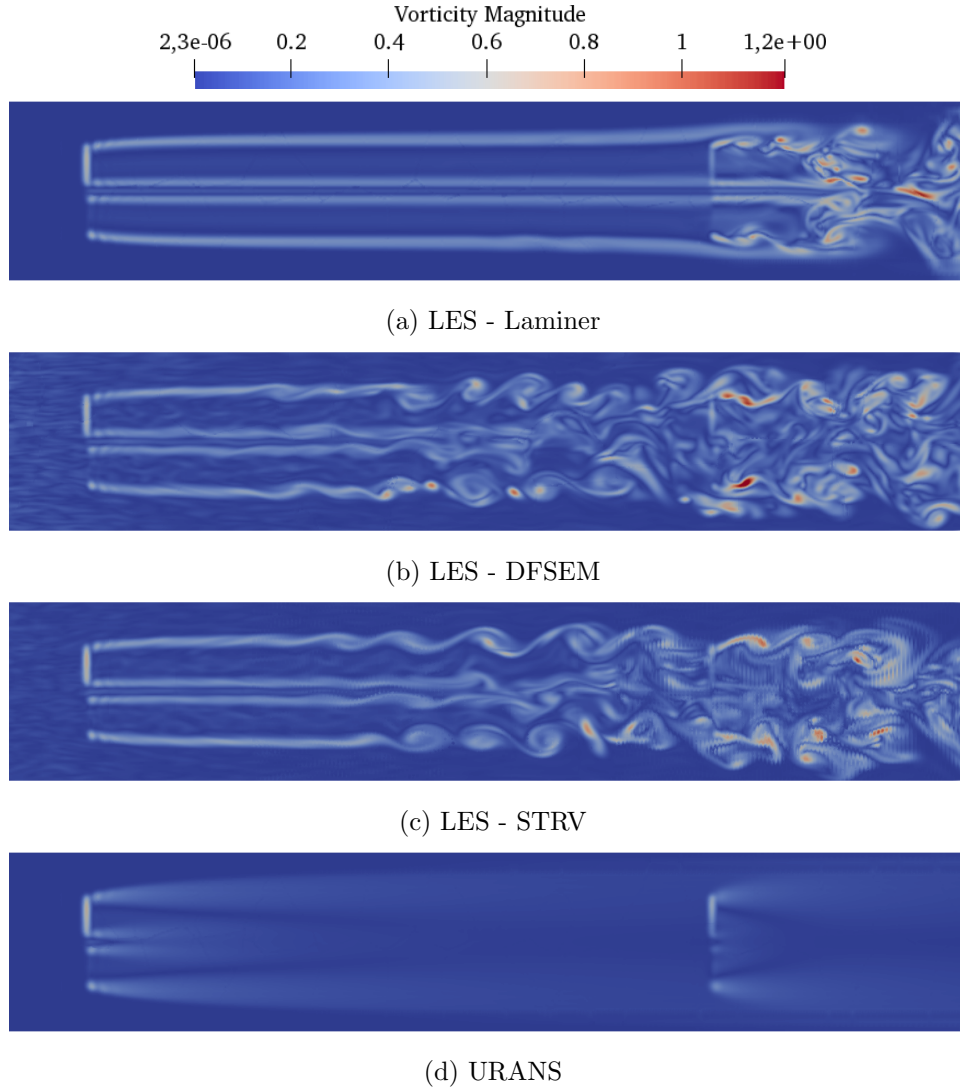
İzöblgesi Etkileşimi Simülasyonları

Bu bölümde iki NREL-5MW türbinin etrafındaki daimi-olmayan akış ve oluşan izöblgesi incelenmiştir. İki türbin eksenel olarak hizalanmış ve aralarında $7D = 882m$ mesafe olacak şekilde çözüm alanına yerleştirilmişlerdir. Serbest akış hızı $U_\infty = 8m/s$ 'dir ve her iki türbin de $TSR = 7.3$ 'te çalıştırılmıştır, böylece [Schmitz ve Jha, 2013] tarafından yayınlanan eş koşullarda yapılmış simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırmak mümkün olmuştur. Kanat uç hızı $58.4m/s$ ve ortalama kord uzunluğu $3.1m$ üzerinden hesaplandığında Reynolds sayısı 12×10^6 'dır (kinematik viskozite $\nu = 1.5 \times 10^{-5}m^2/s$ 'dir). İzöblgesi yapılarını tam olarak yakalayabilmek için rotor bölgelerindeki ağ çözünürlüğü iki rotor arasındaki tüm mesafe boyunca aynı tutulmuştur ve akış-aşağı rotordan sonra $3D = 378m$ daha devam ettirilmiştir. LES türbülans modeliyle üç farklı giriş koşulu (laminer, DFSEM, STRV) ve URANS türbülans modeliyle bir olmak üzere 4 farklı akış rejiminde sonuçlar elde edilmiştir. Simülasyonun son zaman adımıdaki anlık hız, vortisite ve Q-kriteri konturlarıyla birlikte güç üretim grafikleri sunulmuştur.



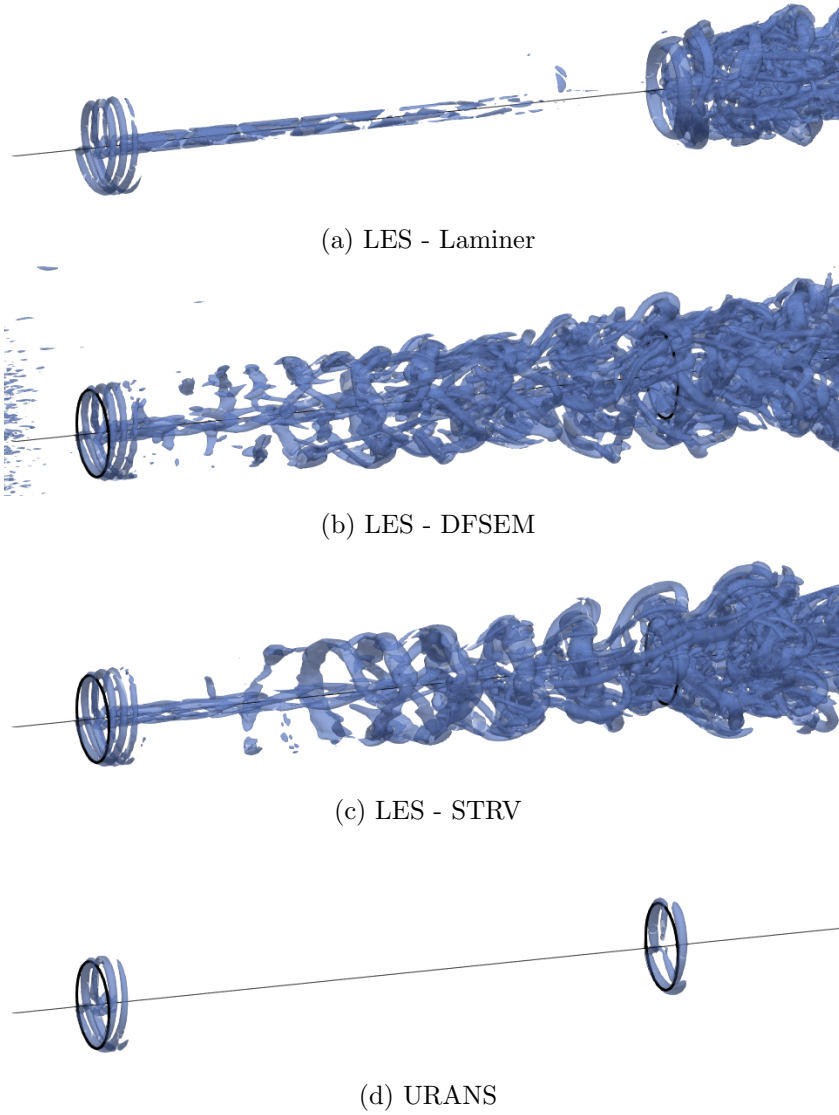
Şekil 4: Hız konturları (hepsi $t = 500s$ anında, görüntüler kırpılmıştır).

Üniform akış altında RT1'in arkasındaki izbölgesinde hem LES hem de URANS hız konturlarında eksenel-simetrik bir yapı görmek mümkündür (Şekil 4). Ancak laminar LES'te hızın yüksek oranda azaldığı bölge RT2'ye kadar uzanırken URANS'ta önemli bir miktarda izbölgesi geri kazanımı gözlemlenmiştir. LES'te izbölgesinin dışa doğru difüzyonu yaklaşık olarak 1 rotor çapı akış-altına kadar görülmekte, daha sonra hemen hemen sabit kalmaktadır. Ancak URANS'ta bu difüzyon izbölgesi RT2'ye ulaşana kadar düzenli olarak devam etmektedir. Türbülanslı giriş şartı barındıran simülasyonların her ikisi de benzer görünmektedir. İzbölgesi belli bir mesafe eksenel-simetriğe yakın seyretmekte ancak daha sonra kararsız hale gelerek çevrintilere dönüşmektedir. Bu mesafe STRV'de DFSEM'e göre biraz daha uzun görünmekle birlikte her iki modelde de birbirine oldukça yakın ve $2.5D$ civarındadır.



Şekil 5: Vortisite konturları (hepsi $t = 500s$ anında, görüntüler kırılmıştır).

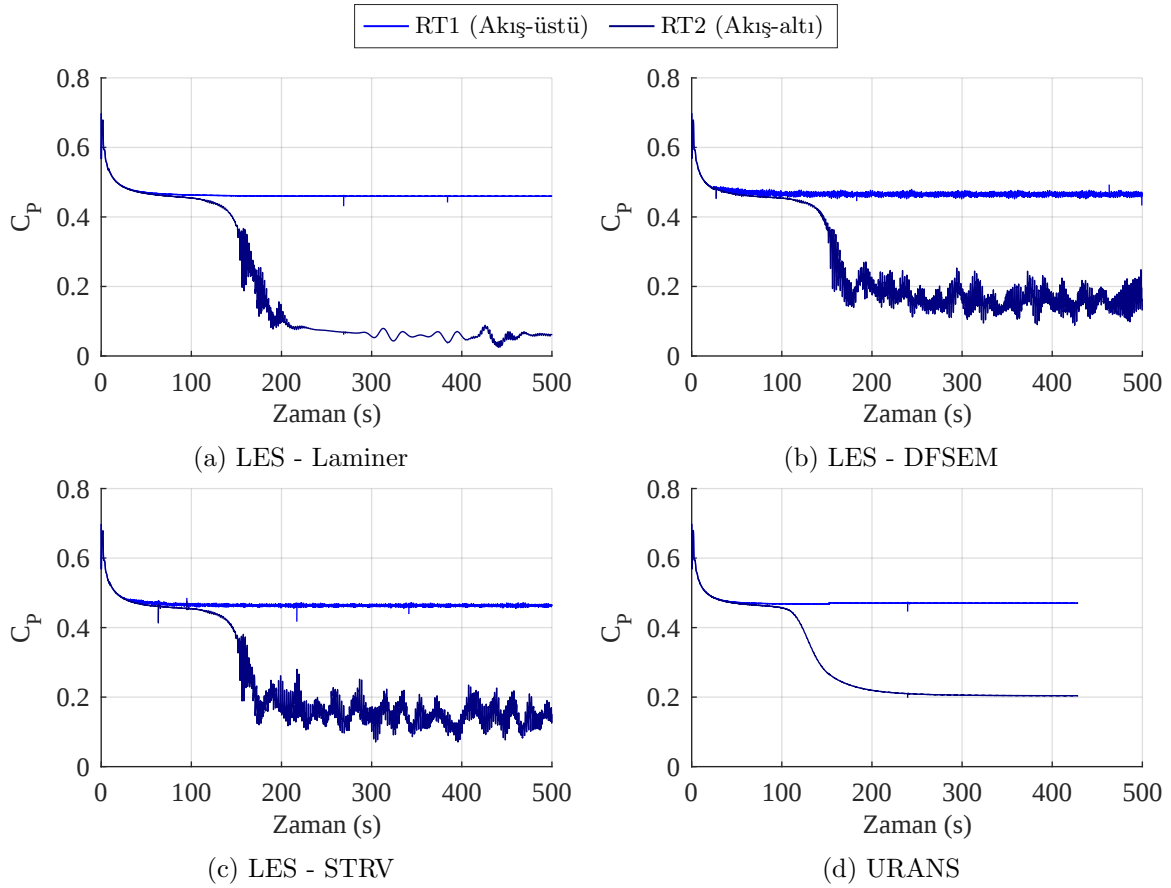
Çevrinti hareketlerini vortisite konturlarında daha ayrıntılı gözlemlemek mümkündür (Şekil 5). RT2'den sonra LES çözümlerinde artan çevrinti hareketliliği mevcuttur, özellikle de türbülanslı giriş şartının bulunduğu DFSEM ve STRV simülasyonlarında bu hareketlilik daha da yüksektir. Üiform laminar LES ve URANS sonuçları kıyaslandığında izbölgesinin URANS'ta ne kadar daha hızlı bir şekilde dağıldığı görülebilir; $3D$ akış-aşağı mesafeden sonra URANS çözümünde LES çözümlerinin aksine vorteks yapılarından neredeyse hiç bir belirginlik kalmamıştır. URANS çözümünde RT1 ve RT2 kanatlarından yayılan vorteksler kıyaslandığında, RT2 izbölgesinde daha hızlı bir difüzyon mevcuttur. Bunun sebebi, DFSEM ve STRV sonuçlarında da açıkça ortada olan, RT1'den zaten yüksek türbülanslı bir şekilde gelen akışa RT2 tarafından ekstra bir çevrinti enerjisinin katılmasıdır. DFSEM ve STRV çözümleri genel itibarıyla birbirine oldukça yakın görünmektedir. DFSEM'de yer yer çok daha şiddetli vorteksler mevcuttur. Bunu da giriş ile RT1 arasındaki çevrinti şiddetleri karşılaştırıldığında DFSEM'in daha yüksek atmosferik türbülansa sahip olmasıyla açıklamak mümkündür.



Şekil 6: 3 boyutlu $Q = 0.005s^{-2}$ konturları (hepsi $t = 500s$ anında, görüntüler kırpılmıştır). Siyah halkalar rotor konumlarını, siyah çizgi ise dönme eksenini temsil etmektedir.

Q konturlarında vortisite ve stres şiddeti arasındaki fark ele alındığı için çevrinti hareketliliğini daha detaylı incelemek mümkündür. LES çözümlerinin hepsinde kanat uçlarından yayılan Q konturları yaklaşık olarak 3 rotor dönüşü akış-altı mesafeye kadar belirgin olarak görülmekte, daha sonra difüzyonun etkisiyle kaybolmaktadırlar. Kanat köklerinden yayılan çevrintiler laminar LES'te atmosferik türbülansın olmaması sebebiyle çok daha uzun bir mesafe boyunca çok az difüzyona uğrayarak devam etmektedirler. URANS'ta bu konturlar çok daha az görülmektedir, çünkü bu türbülans modelindeki ortalamalar sebebiyle vortisite ve stres şiddetleri birbirlerine oldukça yakın çıkmaktadırlar. RT1'in arkasında 2 rotor dönüşü mesafe kadar Q yüzeyleri görülürken RT2'den sonra bu mesafe 1 rotor dönüşüne düşmektedir. İzbölgesinin oldukça hızlı difüze olması ve geri kazanılması dolayısıyla iki rotor arasında hiç Q yüzeyi bulunmamaktadır.

Her bir simülasyondaki türbinlerin zamana bağlı güç üretim verileri Şekil 7'de verilmiştir. Giriş sınırında üniform akış koşulu olduğu durumlarda (laminar LES ve URANS) RT1 gözle görünür bir dalgalanma olmadan güç üretmiştir, türbülanslı akış durumunda ise beklendiği üzere izbölgesi etkisinde olmamasına rağmen RT1'in güç üretiminde dalgalanmalar oluşmaktadır. Asıl farklılık



Şekil 7: Farklı türbülans koşulları altında akış-üstü ve akış-altı türbinlerdeki güç katsayılarının zamana karşı gelişimi.

RT2'de gözlemlenmektedir. URANS kullanıldığında RT2'de de RT1'e benzer stabil bir güç üretimi görülmüştür ve hatta $t = 300s$ civarında RT2 terminal güç değerine ulaşmıştır. Laminer LES'te RT2 URANS'a göre daha osilatif bir grafik gösterse de türbülanslı şartlara göre daha düşük değişimler ve daha periyodik bir davranış sergilemiştir. Bunun sebebi olarak türbülansın olmaması sebebiyle izbölgesinin hiç dağılması, bununla birlikte senkronize halde dönen türbinler sebebiyle $t = 300s$ 'den sonra RT2'nin kendini tekrarlayan bir trende girmesi gösterilebilir. DFSEM ve STRV simülasyonlarında hiç bir periyodik kararlılığa ulaşılamamıştır.

Tablo 1: Farklı türbülans şartlarında türbinlerin tekil ve ortalama güç katsayıları.
Relatif RT2 kaybı $= 1 - C_{P,WT2}/C_{P,WT1}$.

Giriş sınır şartı	$C_{P,RT1}$	$C_{P,RT2}$	Relatif RT2 kaybı	$C_{P,Ort}$
LES - Laminer	0.459	0.062	86%	0.261
LES - DFSEM	0.465	0.168	64%	0.317
LES - STRV	0.465	0.161	65%	0.313
URANS ($k - \epsilon$)	0.470	0.204	57%	0.337

Tablo 1'de güç katsayılarının sayısal değerleri karşılaştırılmıştır. Bütün simülasyonlarda güç üretimi ilk başta çok yüksek bir değerden başlamakta, hatta 0.59 Betz limitini dahi geçmektedir. Bunun sebebi, türbinlerin üniform akışla ilklendirilmiş bir çözüm ağının içine aniden bırakılmalarıdır. Türbülans modelinden bağımsız olarak akış geliştikçe RT1'in güç üretimi 0.465'e yakın bir değere

yakınsamaktadır ki bu D. Apsley v.d. [2018]'in benzer savını doğrulamaktadır. URANS çözümü %57 ile en düşük güç kaybını vermiştir, zira yüksek difüzyon sebebiyle hız kaybı en düşük burada elde edilmektedir. Buna karşın laminar LES'te %86 ile en yüksek güç kaybı gözlemlenmiştir. Hız ve vortisite konturlarından da hatırlanacağı üzere izbölgesinin dağılmamasının etkisi burada da görülmektedir. Bu güç kaybı oranı çok yüksek olsa da [Schmitz ve Jha, 2013] tarafından benzer koşullarda yapılan bir başka çalışmada elde edilen sonuçla çok iyi bir uyum içerisinde. Tam sınır tabaka çözümlemeli başka bir çalışmada [Miao v.d., 2017] $k - \omega$ türbülans modeli kullanılmış ve %80 kayıp hesaplanmıştır. Bununla birlikte DFSEM veya STRV yöntemleriyle atmosferik türbülans uygulandığında laminar akışa göre çok daha yüksek bir RT2 güç üretimi elde edilmiş, kayıp %65'e kadar gerilemiştir. Yüksek izbölgesi difüzyonunun güç üretimine etkisi görülmektedir. RT2'de ise ihmal edilebilir bir farkla benzer güç üretimi hesaplanmıştır.

SONUÇ

Bir Aktüatör Çizgi Modeli (ALM) kodu OpenFOAM üzerinde çalıştırılmış ve art arda yerleştirilmiş iki türbinin incelenmesinde LES türbülans modeli ile başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Rotor yarıçapına 32 hücre gelecek ve Gauss fonksiyon parametresi hücre boyunun 1.25 katı olacak şekilde yapılan simülasyonlarda, geniş bir uç hız oranı aralığında güç ve itki katsayısı değerleri isabetli bir şekilde elde edilmiştir. Farklı giriş türbülansı oluşturma yöntemleri ile LES ve URANS modelleri incelenmiştir. İzbölgesindeki en hızlı toparlanma URANS'ta gözlemlenmiş ve buna bağlı olarak akış-altı türbindeki en düşük güç kaybı %57 ile yine URANS'ta elde edilmiştir. İzbölgesindeki çevrintilerin parçalanmaması sebebiyle en yüksek güç kaybı (%57) laminar LES'te hesaplanmıştır. LES yönteminde girişte sentetik çevrinti oluşturma yöntemleri kullanıldığında laminar LES ve RANS arasında bir güç kayıp değeri elde edilmiştir. Sentetik türbülans oluşturma yöntemlerinden DFSEM ve STRV arasında çevrinti yapısı ve güç üretimi açısından büyük bir farklılık gözlemlenmemiştir. Sonuç olarak ALM'nin büyük rüzgar tarlalarının simülasyonu için kullanıma uygun olduğu, ancak seçilen türbülans modelinin izbölge ve dolayısıyla güç üretimi üzerine kritik etkileri olduğu çıkarımı yapılmıştır.

Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde 119M457 numaralı TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında destek alınmıştır ve yüksek başarımlı hesaplama kaynakları RÜZGEM (ODTÜ Rüzgar Enerjisi Araştırma Merkezi) tarafından sağlanmıştır.

Kaynaklar

- Bachant, P., Goude, A., Wosnik, M. ve Araya, D. [2016], *turbinesFoam: v0.1.0, Actuator line modeling extension library for OpenFOAM*. DOI: 10.5281/zenodo.1482561. <https://zenodo.org/record/1482561>, Last accessed 14 September 2019.
- Barthelmie, R., T Frandsen, S., Rathmann, O., Hansen, K., Politis, E., Prospathopoulos, J., G Schepers, J., Rados, K., Cabezon, D., Schlez, W., Neubert, A. ve Heath, M. [2011], 'Flow and wakes in large wind farms: Final report for upwind wp8'.
- D. Apsley, D., Stallard, T. ve Stansby, P. [2018], 'Actuator-line cfd modelling of tidal-stream turbines in arrays', *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*.
- Drela, M. [1989], XFOIL: An analysis and design system for low reynolds number airfoils, in 'Lecture Notes in Engineering', Springer Berlin Heidelberg, pp. 1–12.

- Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W. ve Scott, G. [2009], Definition of a 5-mw reference wind turbine for offshore system development, Technical Report NREL/TP-500-38060, National Renewable Energy Laboratory.
- Kalvig, S., Manger, E. ve Hjertager, B. [2012], 'Comparing different cfd wind turbine modelling approaches with wind tunnel measurements', *Journal of Physics Conference Series* **555**.
- Launder, B. ve Spalding, D. [1974], 'The numerical computation of turbulent flows', *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **3**(2), 269 – 289.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0045782574900292>
- Make, M. ve Vaz, G. [2015], 'Analyzing scaling effects on offshore wind turbines using cfd', *Renewable Energy* **83**, 1326 – 1340.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115300112>
- Marten, D., Wendler, J., Pechlivanoglou, G., Nayeri, C. N. ve Paschereit, C. O. [2013], 'Qblade an open source tool for design and simulation of horizontal and vertical axis wind turbines', *IJETAE 3 special issue pp. 264–269 2013*.
- Miao, W., Li, C., Pavesi, G., Yang, J. ve Xie, X. [2017], 'Investigation of wake characteristics of a yawed hawt and its impacts on the inline downstream wind turbine using unsteady cfd', *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **168**, 60–71.
- Mittelmeier, N., Blodau, T., Steinfeld, G., Rott, A. ve Kühn, M. [2016], 'An analysis of offshore wind farm scada measurements to identify key parameters influencing the magnitude of wake effects', *Journal of Physics: Conference Series* **753**.
- Norkaer Sorensen, J. ve Shen, W. Z. [2002], 'Numerical modeling of wind turbine wakes', *Journal of Fluids Engineering* **124**, 393.
- Onel, H. ve Tuncer, I. [2020], Estimation of wake induced power loss in wind turbines using actuator line model.
- Poletto, R., Craft, T. ve Revell, A. [2013], 'A new divergence free synthetic eddy method for the reproduction of inlet flow conditions for les', *Flow, Turbulence and Combustion* **91**, 1–21.
- Sagaut, P. [2001], 'Large eddy simulation for incompressible flows. an introduction', *Measurement Science and Technology* **12**(10), 95.
- Schmitz, S. ve Jha, P. [2013], Modeling the wakes of wind turbines and rotorcraft using the actuator-line method in an openfoam -les solver.
- Shen, W. Z., Mikkelsen, R., Sørensen, J. N. ve Bak, C. [2005], 'Tip loss corrections for wind turbine computations', *Wind Energy* **8**(4), 457–475.
URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/we.153>
- Smagorinsky, J. [1963], 'General circulation experiments with the primitive equations', *Mon. Weather Rev.* **91**.
- Tabor, G. ve Baba-Ahmadi, M. [2010], 'Inlet conditions for large eddy simulation- a review', *Computers and Fluids* **39**(4), 553 – 567.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045793009001601>
- Troldborg, N., Zahle, F., Réthoré, P. ve Sørensen, N. [2014], 'Comparison of wind turbine wake properties in non-sheared inflow predicted by different cfd rotor models', *Wind Energy* **18**.
- Weller, H. G., Tabor, G., Jasak, H. ve Fureby, C. [NOV/DEC 1998], 'A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques', *COMPUTERS IN PHYSICS, VOL. 12, NO. 6*.