



Rüzgar Türbün Tarlalarında Kısa Süreli Rüzgar Enerjisi Tahminine Yönelik Sayısal Rüzgar Tahmin Modeli Geliştirilmesi

Program Kodu: 3501

Proje No: 113Y197

Proje Yürütücüsü:
Yard. Doç. Dr. Gökhan KİRKİL

Araştırmacı:
Dr. Yasemin EZBER

Bursiyer:
Tarık KAYTANCI

KASIM 2016
İSTANBUL



ÖNSÖZ

Türkiye, ekonomisindeki yüksek cari açığının kapatılabilmek için yerli enerji kaynaklarına ihtiyaç duymaktadır Rüzgar enerjisi de bu kaynaklardan biridir. Türkiye, karada ve denizde geliştirilmeyi bekleyen rüzgar kaynakları yardımı ile büyük ve küçük ölçekte rüzgar enerji projeleri geliştirilebilir. Ülkemizde son yıllarda sayıları hızla artan rüzgar enerjisi şirketlerine güvenilir tahminler sunulması ve bu tahminler yardımıyla rüzgar gibi hızlı değişim gösteren enerji kaynaklarının şebeke entegrasyonunu kolaylaştırılması oldukça önem arz etmektedir. TÜBİTAK desteği ile tamamlanan bu projede sayısal yöntemler vasıtasıyla atmosfer sınır tabakasındaki türbülans, rüzgar türbünlerinin değişik konfüğürasyonları ve kompleks topografya gibi rüzgarda zamana ve lokasyona bağlı hızlı değişimler yaratan kaynaklar hakkında bilgi elde edilmiştir. Bu projede elde edilen sonuçlar, rüzgarın sürdürülebilir ve ucuz bir enerji kaynağı olarak kullanımını yaygınlaştırılacaktır. Projeye desteklerinden ötürü TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
TABLO VE ŞEKİL LİSTELERİ	iv
ÖZET	5
ABSTRACT	6
1. GİRİŞ	7
2. LİTERATÜR ÖZETİ	8
3. GEREÇ VE YÖNTEM	9
4. BULGULAR	
4.1 Söke-Çatalbük sahası için gerçekleştirilen simülasyonlar	12
4.1.1 Güney-batılı rüzgar durumu	12
4.1.2 Kuzey-doğulu rüzgar durumu	13
4.2 Actuator Disk Modelinin WRF modeline uygulanması	14
4.3 Actuator Disk Modelinin Kullanılması	17
4.3.1. Güney-batılı rüzgar durumu	17
4.3.2. Kuzey-doğulu rüzgar durumu	19
4.4 Mut sahası için gerçekleştirilen simülasyonlar	20
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	21
6. KAYNAKLAR	22

TABLO VE ŞEKİL LİSTELERİ

Tablo 1. WRF simülasyonlarında içiçe kullanılan alanlarla ilgili detaylı bilgiler. (Nx doğu-batı yönünde grid nokta sayısını, Ny ise kuzey-güney yönünde grid nokta sayısını göstermektedir.)	10
Tablo 2. 2-3 Mart simülasyonları için seçilen 2 türbün (T11 ve T13) ve 2 başlangıç koşulu için ortalama mutlak hataların (mean absolute error –mae (m/s)) karşılaştırılması.	13
Tablo 3. 6-7 Mart simülasyonları için seçilen 2 türbün (T1 ve T3) ve 2 başlangıç koşulu için ortalama mutlak hataların (mean absolute error –mae (m/s)) karşılaştırılması.	13
Tablo 4. GFS-FNL başlangıç koşuluyla koşturulan 2-3 Mart ve 6-7 Mart LES simülasyonlarında seçilen 4 türbün (T11, T13 ve T1, T3) için ortalama mutlak hataların (mean absolute error –mae (m/s)) karşılaştırılması.	14
Tablo 5. GFS-FNL başlangıç koşuluyla koşturulan 2-3 Mart ve 6-7 Mart simülasyonlarında seçilen 4 türbün (T10, T12 ve T4, T6) için ortalama mutlak hataların (mean absolute error –mae (m/s)) karşılaştırılması.	18
Şekil 1. WRF çalışma alanı ve yuvalama (nest) yapısı	10
Şekil 2. WRF simülasyonlarında kullanılan (dıştan içe sıralamada) 5. hesaplama alanı ve Söke-Çatalbük türbün tarlasının lokasyonu.	11
Şekil 3. Söke-Çatalbük sahasındaki rüzgar türbünlerinin pozisyonları	12
Şekil 4. Aktuator disk'in WRF modeli içinde hız grid noktaları üzerinde iki farklı görünüşü. a) zonal ve meridional ve dikey hız grid noktaları, sırası ile kare, üçgen ve diamond olarak gösterilmiştir.	16
Şekil 5. Yerden 100 m yükseklikte bir x-y kesidinde rüzgar hızının dağılımı. 90 m çapında 16 adet türbün, ortalama rüzgarın geldiği yöne çevrilmişlerdir.	17
Şekil 6. 2 Mart 2012, 18:00 - 3 Mart 2012, 18:00 arasında (24 saat) GFS-FNL başlangıç koşulları kullanılarak gerçekleştirilen GFS-MYJ-LES-ADM simülasyon sonucunun GFS-MYJ sonucu ve gözlem verisi ile karşılaştırılması (Türbün-10 ve Türbün-12).	18
Şekil-7. 6 Mart 2012, 14:00 - 6 Mart 2012, 14:00 arasında (24 saat) GFS-FNL başlangıç koşulları kullanılarak gerçekleştirilen GFS-MYJ-LES-ADM simülasyon sonucunun GFS-MYJ sonucu ve gözlem verisi ile karşılaştırılması (Türbün-4 ve Türbün-6).	19
Şekil-8. Mut sahası topografyası	20
Şekil-9. Mut sahası için 5 m/s batılı rüzgar altında z=100 m yükseklikte u- hızı konturları.	21
Şekil-10. Mut sahası Türbün-2 için 24 saatlik WRF-LES tahminlerinin saha ölçümleri ile karşılaştırılması.	21



ÖZET

Bu projenin amacı, rüzgar enerjisi üretiminde rüzgardan kaynaklanan hızlı değişimlerin anlaşılması ve karakterize edilmesidir. Projede sayısal yöntemler vasıtasıyla atmosfer sınır tabakasındaki türbülans, rüzgar türbünlerinin değişik konfüğürasyonları ve kompleks topografya gibi rüzgarda zamana ve lokasyona bağlı hızlı değişimler yaratan kaynaklar hakkında bilgi elde edilmiştir. Bu amaca yönelik ilk olarak, kısa ve orta vadede rüzgar tahmini yapabilen bir sayısal model geliştirilmiş ve bu modelin saha ölçümleri vasıtasıyla doğrulanması yapılmıştır. Bu araç LES (Large-eddy Simulation) modellemesi sayesinde meteorolojik hava tahminlerinden (WRF-Weather Research and Forecasting) rüzgar türbünü ölçeğine inerek daha küçük ölçeklerde ve daha küçük zaman aralıklarında rüzgar tahmini yeteneğine sahiptir. İkinci aşamada bu modelin (WRF-LES) rüzgar enerjisi tahminleri yapabilmesi için modele türbün parametrizasyonu eklenmiştir. Bu kodlar yardımı ile belirlenen örnek sahada simülasyonlar yapılarak ölçülen türbün verileriyle simülasyon verileri karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: rüzgar enerjisi, rüzgar tarlaları, rüzgar tahmini, çoklu ölçek modellenmesi, atmosferik modelleme, atmosfer sınır tabakası, karasız rüzgar akımları, yenilenebilir enerji, büyük girdap modellemesi



ABSTRACT

The aim of this project is to better understand and characterize the fluctuations in wind energy caused by the rapid changes in wind resource. By means of numerical methods, we expect to gain new knowledge about the sources of spatial and temporal variability of wind fluctuations such as different configurations of wind turbines and complex topography. For this purpose, we will first develop a numerical method that can perform short to medium-term forecasts and try to verify it using of field measurements. The model will be developed as a multi-scale and mutli-physics atmospheric simulation tool and will meet the wind energy companies' needs of daily and day-ahead forecasts. With the help of Large Eddy Simulation (LES), we will estimate wind fields at spatial and temporal turbine scales down-scaled from meteorological forecasts (using WRF-Weather Research and Forecasting). In the second stage of the project, we will add turbine parametrizations to this model (WRF-LES) in order to make estimates of wind energy generated from wind turbines and also wind loads on turbines. We will simulate wind flow over several wind farm sites using these codes to validate simulation data with field measurements.

Keywords: wind energy, wind farms, wind forecast, multi-scale modeling, atmospheric modeling, atmospheric boundary layer, intermittent energy sources, renewable energy, large eddy simulation.



1. GİRİŞ

Rüzgar enerjisi açısından değişik zaman dilimlerinde güvenli rüzgar tahminlerinin yapılabilmesi oldukça önemlidir. Örneğin bu tahminlerin a) saatlik olanları rüzgar türbünlerinin anlık çalışma kararlarını; b) günlük olanları gün sonrası piyasa operasyonlarını; c) daha uzun zaman dilimlerinde olanları da yatırım kararlarını belirlemeye yöneliktir. Rüzgar enerjisi tahminleri meteorolojik tahminlerden farklıdır. Bu farkların en başında tahminlerin rüzgar türbünlerinin de yer aldığı atmosfer sınır katmanında, yani yerden 1.5-2 km yüksekliğe kadar olan katmanda yapılmasıdır. Bu katman yeryüzündeki topografya etkileri ve yerin ısınma ve soğuma döngülerinden hızlı etkilenen bir katmandır. Bu katmandaki rüzgar yapıları (flow structures) değişik boylarda ve dinamiktir. Yere paralel yönde uzanan, boyları ortalama 1 km. çapları ise 100-200 m. olan bu yapılar rüzgar akımlarında, dolayısı ile türbünlerden elde edilecek enerjide hızlı değişimlere yol açarlar. Diğer bir deyişle bu katmandaki akımlar, mezo ölçeklerden daha çok local ölçeklerde oluşan olaylardan etkilenir, dolayısı ile daha küçük zaman aralıklarında modellenmesi gerekir.

Atmosferik modellemenin yanında rüzgarın değişik zaman dilimlerindeki tahminlerini enerji çıktısında dönüştüren modellere de ihtiyaç vardır. Bu modeller daha küçük ölçeklerde koşturularak rüzgarın türbün üzerinde ne kadar enerji üretebileceğini hesaplamaya ve buna bağlı olarak herhangi bir türbünün arkasında kalan diğer türbünlerin bu türbünden nasıl etkilendiğini bulmaya yönelik tasarlanmalıdır.

Bu projede geliştirmek istediğimiz yüksek çözünürlüklü sayısal atmosferik model, yukarıda belirtilen ihtiyaçlara cevap verecek şekilde tasarlanacaktır. Burada atmosfer çalışmalarında sıklıkla kullanılan WRF (Weather Research and Forecasting) hava tahmin modeli kullanılacaktır. WRF modeli Amerikan Ulusal Atmosfer Çalışmaları Merkezi (NCAR) tarafından geliştirilmiştir. WRF açık kaynak kodlu bir program olup hem operasyonel hem de araştırma amaçlı olarak bir çok ölçeği birden simüle etme yeteneğine sahiptir. WRF bu fonksiyonu içiçe geçmiş birkaç hesaplama alanını (computational domain) kullanarak gerçekleştirir (nesting).

Bu projenin konusu olan rüzgar türbünleri modellenmesi genellikle en içte kalan hesaplama alanı içinde gerçekleşir (rüzgar türbün eksenini yerden 80-120 m yükseklikte yer alır). Dikey yönde ise içiçe geçmiş bütün alanlar aynı grid kullanılır (bu yönde nesting yoktur). Dikey yönde yere yakın olan bölgede bütün alanlar yeryüzü sınır koşullarının etkilerini ifade eden bir parametrisasyon (PBL-planetary boundary layer parametrization) kullanılır. PBL, yere yaklaştıkça gittikçe küçülen rüzgar yapılarının (flow structures) uzun zaman boyunca ortalama etkilerini (Reynolds-averaging) dikkate alır. Mezo ölçekler için geçerli olan bu parametrisasyonlar, grid büyüklüklerinin 300 m den büyük olan alanlarda geçerli olsa da rüzgar

türbünlerini de içine alan en içteki alanda (bu alanda grid büyüklükleri 100 m den küçüktür) doğru sonuç elde etmek için yeterli değildir. Dikey yönde çok daha küçük grid boyutlarına (20 m) ek olarak PBL yerine daha farklı bir parametrizasyon kullanılması gerekir. Atmosferin bu alt katmanının küçük akım yapılarını (flow structures) uzun zaman aralıklarında ortalama etkisi yerine denilen küçük zaman aralıklarında birebir modellenmesi daha uygundur. LES (large eddy simulation) yöntemi, küçük ölçekli ve küçük zaman aralıklarında değişim gösteren grid tarafından çözümlenebilen türbülansın parametrizasyonu konusunda son yıllarda geliştirilmiş en etkili modeldir. Bu parametrizasyon atmosferin en alt 1 km katmanında, atmosfer stabilitesi ve kompleks topografya etkilerinden kaynaklanan küçük ölçekli ve küçük zaman aralıklarında değişim gösteren türbülansın parametrizasyonu yapar. Bu yöntemin rüzgar türbünlerinden elde edilecek enerjinin doğru tahminine yardımcı olabileceği son yıllarda yapılan çalışmalarda gösterilmiştir. LES yöntemi, rüzgarda ve üretilen enerjide ani artışlara neden olan değişimleri de modellemede etkin olduğu bilinmektedir.

Bu projede WRF'un LES modelleme kapasitesine ek olarak rüzgar türbünlerini parametrize edebilecek bir model geliştirilecektir. Bu model rüzgar türbünleri için güç tahminleri yapabilmeye, rüzgar türbünlerinin optimum noktalara konuşturulmasına, rüzgar tarlalarının performansının optimizasyonuna ve rüzgar türbün kanatlarına gelen yüklerin karakterizasyonuna imkan verecektir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Atmosfer sınır tabakası ve bu tabakanın rüzgar türbünleri ile etkileşimi, özellikle rüzgar türbünlerini doğru bölgelere yerleştirilmesi, rüzgardan elde edilecek enerjinin maksimize edilmesi ve türbüne gelen yüklerin minimize edilmesi gibi nedenlerden dolayı önemlidir (Petersen et al., 1998, Vermeer et al., 2003). Son yıllarda WRF modelinin bir çok ölçeği aynı anda modelleme yeteneği nedeniyle atmosfer sınır tabakası, özellikle de rüzgar tarlaları çalışmalarında kullanılmaya başlanmıştır (Storm et al., 2008). WRF modeli büyük ölçeklerden küçük ölçeklere geçişi nesting denilen alanlar arası geçişlerde büyük alanın küçük alana sınır koşullarını sağlaması yoluyla sağlar (Skamarock et al., 2008). Yukarıda belirtildiği üzere rüzgar tarlalarını da kapsayan en içteki alanda PBL yerine LES kullanılması (WRF-LES) oldukça yeni bir konudur (Moeng et al., 2007). Klasik Smagorinsky ve TKE modellerine ek olarak geliştirilen yeni LES modelleri WRF-LES simülasyonlarında iyileşme göstermiştir (Mirocha et al. 2010). Mirocha (2013), WRF-LES simülasyonlarında alanlar arası geçişlerde yani LES-LES ve PBL-LES geçişlerindeki bazı problemlere işaret etmiş ve çözümler sunmuştur. Yeni geliştirilen LES modelleri sayesinde WRF-LES'in mezo ölçeklerden türbün ölçeklerine inerek doğru tahmin yapabileceği gösterilmiştir (Marjanovic et. al., 2010). WRF içerisine araştırmacı tarafından eklenen LES modelleri diğer bazı CFD kodlarında da iyi sonuç vermekte olduğu gözlenmiştir

(Bou zeid et al., 2008) fakat bu kodlar kompleks topografya ve meteoroloji etkilerini modellemekten uzaktır. WRF-LES ise meteorolojiden kaynaklı sınır koşulları ve kompleks topografya etkilerini modelleme kapasitesine sahiptir (Lundquist et al., 2010). Bu projede WRF-LES kapasitesine ek olarak türbün tarlarının modellenmesi için parametrisasyonlar geliştirilmiştir.

Rüzgar türbün veya tarlarının modellenmesi daha önce birçok CFD kodunun içinde denenmiş fakat bu çalışmalarda çoğunlukla LES'den daha basit bir model olan Reynolds-averaging (RANS) modeli kullanılmıştır (örnek, Gomez-Elvira et al., 2005). Calaf et al. (2010), ADM-NR modelini; Wu and Porte-Agel (2011) ise ADM-R ve Sorensen ve Shen (2002) tarafından geliştirilen ALM modellerini bir LES kodu içerisinde türbün modellemesi amacıyla kullanılmıştır.

Bu çalışmada National Center for Atmospheric Research (NCAR) tarafından geliştirilmiş Weather Research and Forecasting (WRF) modeli kullanılarak Söke-Çatalbük sahası için rüzgar simülasyonları gerçekleştirilmiş ve sonuçlar sahada elde edilen gözlem verileriyle karşılaştırılmıştır.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Çalışmada başlangıç ve sınır koşulları olarak iki farklı küresel veri seti kullanılmıştır. Model simülasyonları, European Center for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) ve National Centers for Environmental Prediction (NCEP) verileri ile gerçekleştirilmiştir.

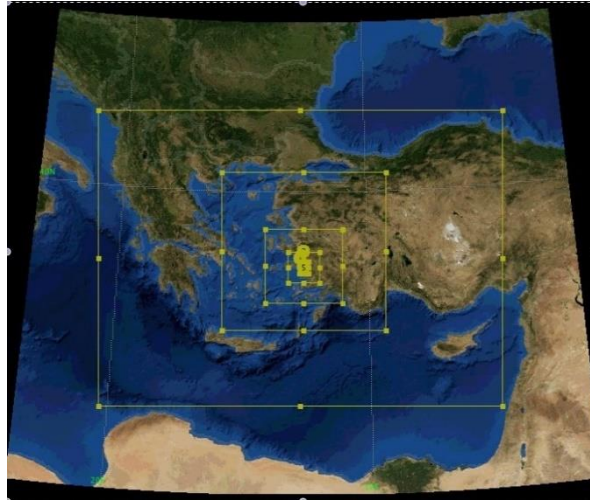
Kullanılan ilk veri, ECMWF tarafından sağlanan 0.75 derece (yaklaşık 75 km) çözünürlükte, ekvator dan kutuba 128 enlem dairesi için 37 basınç seviyesine (1000 mbar'dan 1 mbar'a) sahip tahmin modeli, gözlem veri setleri ve 4-D data asimilasyonu kullanılmasıyla 6 saat aralıklı hazırlanmış European Reanalysis ERA-Interim veri setidir. 1979 yılı itibaren ERA-Interim verisi mevcuttur. Veriler orjinal olarak GRIB formatında olmakla beraber NetCDF formatında elde edilebilmektedir. (http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim_full_daily/)

İkinci veri seti ise, 10x10 (yaklaşık 110 km) grid çözünürlüğünde ve 6 saat aralıklı hazırlanmış NCEP-FNL (Final) Operational Global Analysis verisidir. FNL verisi NCEP-GFS modeli kullanılarak hazırlanmıştır (bu çalışmada FNL-GFS ya da GFS olarak bahsedilecektir). Analizler 26 basınç seviyesine (1000 mbar'dan 10 mbar'a) sahiptir. Veriler orjinal olarak GRIB formatında elde edilebilmektedir (<http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>).

Çalışmada başlangıç ve sınır şartlarına ek olarak, standart yüzey verileri (arazi kullanımı, toprak çeşitleri ve topoğrafya verileri) kullanılmıştır. Yüksek çözünürlüklü (250 m) arazi kullanım verisi olarak European Environment Agency tarafından 2006 yılında hazırlanmış 250 m çözünürlükte Corine (Coordination of information on the environment) arazi kullanım verisi kullanılmıştır (<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2006->

clc2006-250-m-version-12-2009#tab-gis-data). Corine verisinin 44 farklı arazi kullanım tipi, WRF'de tanımlı olan 24 farklı arazi kullanım tipine (USGS) dönüştürülerek kullanılmıştır. Topografya verisi olarak 100 m çözünürlükte The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) topoğrafya verisi kullanılmıştır (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). SRTM verisi Coğrafi Bilgi Sistemi kullanılarak WRF'nin kullanabileceği şekle dönüştürülmüştür.

Çalışmada WRF 3.6 versiyonu kullanılmıştır. Model çalışma alanı, Türkiye'nin batı Ege bölgesinde yer alan Söke-Çatalbük rüzgar tarlası olarak belirlenmiştir. En dış hesaplama alanı, doğuda Yunanistan, batıda Anadolu, kuzey ve güneyde ise Karadeniz ve Akdeniz'i ile çevrelenmiştir. Çalışmanın yapılacağı bölge için modelde altı adet yuvalama (nest) yapılmıştır (Şekil 1).



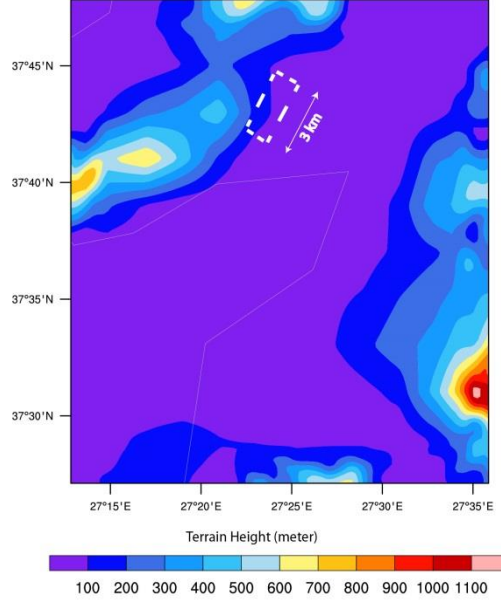
Şekil 1. WRF çalışma alanı ve yuvalama (nest) yapısı

Simülasyonlarla ilgili detaylı bilgi (doğu-batı ve kuzey-güney yönlerindeki grid sayısı, yatay çözünürlük, topografya ve arazi kullanım verileri) Tablo-1'de verilmektedir. Bütün hesaplama alanlarında, atmosferin tepesi 50 mb olarak belirlenmiş ve bu seviyeye kadar atmosfer 50 sigma seviyesine bölünmüştür. Bütün simülasyonlarda aynı setup kullanılmıştır.

Tablo 1. WRF simülasyonlarında içiçe kullanılan alanlarla ilgili detaylı bilgiler. (Nx doğu-batı yönünde grid nokta sayısını, Ny ise kuzey-güney yönünde grid nokta sayısını göstermektedir.)

Hesaplama alanı (domain) no	N _x	N _y	Grid çözünürlük (m)	Topografya çözünürlük	Landuse çözünürlük
1	60	44	24300	5 min. (~9 km)	5 min. (~9 km)
2	73	70	8100	2 min. (~4 km)	2 min. (~4 km)
3	103	97	2700	30 sec. (~0.9 km)	30 sec. (~0.9 km)
4	127	118	900	30 sec. (~0.9 km)	30 sec. (~0.9 km)
5	115	130	300	3 sec. (~0.1 km)	250 m.
6	103	118	100	3 sec. (~0.1 km)	250 m.

5. hesaplama alanı ve topografya Şekil 2’de gösterildiği şekildedir. Şekilde de görüleceği üzere beyaz kesikli çizgi ile gösterilen rüzgar tarlası dar bir vadinin içinde ve dağ yamacına çok yakın bir noktada konuşlanmıştır. Bu yüzden simülasyonlar sırasında yakınsama problemleriyle karşılaşmış ve WRF modelinin çeşitli parametreleri değiştirilerek bu problemler aşılmıştır.



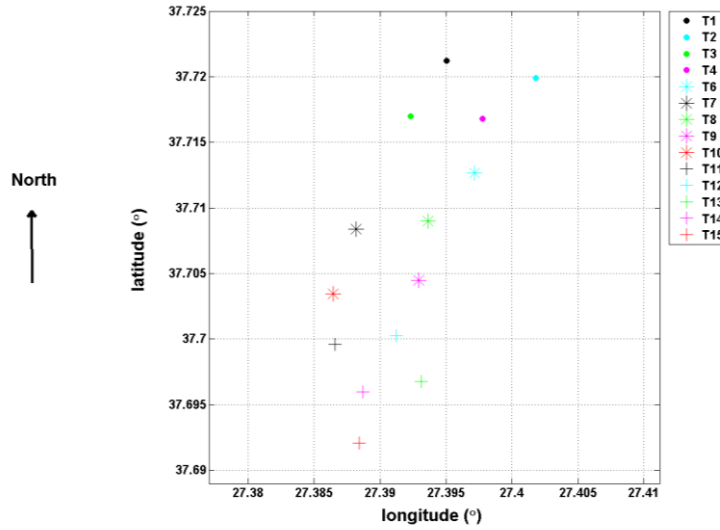
Şekil 2. WRF simülasyonlarında kullanılan (dıştan içe sıralamada) 5. hesaplama alanı ve Söke-Çatalbük türbün tarlasının lokasyonu.

Rüzgar tarlasından türbün üstü cup anemometreleri yoluyla Mart ayına ait 10 dakika aralıklı rüzgar verisi elde edilmiştir. Veriyi dikkatlice incelediğimizde 6 Mart 2012 14:00-7 Mart 2012,14:00 saatleri arası rüzgarın kuzey-doğu ağırlıklı 2 Mart 2012 18:00-3 Mart 2012,18:00 saatleri arasında ise rüzgarın güney-batı ağırlıklı yön takip ettiği belirlenmiştir. Bu zaman aralıkları için 1 gün öncesinden başlayarak (24 saatlik spin-up) 48 saat saatlik test simülasyonları yapılarak 10 dakikalık rüzgar verileri 10 dakikalık türbün üstü rüzgar verileriyle (gözlem) karşılaştırılmıştır.

Simülasyonlarda 1., 2., 3., 4. ve 5. hesaplama alanlarında Planetary Boundary Layer (PBL) parametrizasyonları, 6. hesaplama alanı (100 m) kullanıldığı durumlarda ise Large Eddy Simulation (LES) parametrizasyonları kullanılmıştır. PBL parametrizasyonu olarak MYJ (Mellor-Yamada-Janjic), Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino (MYNN), Quasi-normal Scale Elimination (QNSE) ve Boulac (Bougeault-Lacarrère) modelleri kullanılmıştır. LES parametrizasyonu olarak TKE 1.5 modeli kullanılmıştır. Tüm simülasyonlarında yüzey tabaka fiziği (surface layer physics) olarak ‘Eta-similarity’, kara yüzey fiziği (surface physics) olarak ise ‘Noah land surface’ modeli kullanılmıştır. Ensemble’lar, her başlangıç koşulu için 4 değişik PBL model sonucunun ortalaması olarak hesaplanmıştır.

Sonuçların adlandırılmasında 'Başlangıç koşulu - PBL parametrizasyonu (1.-5. alanlar için) – var ise LES parametrizasyonu (6. alan için)' sırası izlenmiştir (örneğin GFS-MYJ-LES). PBL sonuçları için 5. hesaplama alanı (nest) kullanılırken, LES sonuçları için 6. hesaplama alanı (nest) kullanılmıştır. Burada 6. hesaplama alanının daha yüksek çözünürlüğe sahip olduğu (100 m) hatırlanmalıdır.

Rüzgar türbünlerinin Söke Çatalbük sahasındaki lokasyonları Şekil-3'de gösterilmektedir.



Şekil 3. Söke-Çatalbük sahasındaki rüzgar türbünlerinin pozisyonları

4. BULGULAR

4.1 Söke-Çatalbük Sahası için Gerçekleştirilen Simülasyonlar

4.1.1 Güney-Batılı Rüzgar Durumu (2 Mart 2012 18:00- 3 Mart 2012 18:00)

Rüzgar sahasının güney-batı ucunda bulunan türbünler (T11 ve T13) bu rüzgar yönünde türbün arkası etkilerinden etkilenmeyecek olduğundan bu türbünler seçilerek buradaki 10 dakikalık WRF simülasyon sonuçları 10 dakikalık hız ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Simülasyonlarda 2 değişik başlangıç koşulu kullanmıştır (FNL-GFS ve ERA-Interim).

Nicesel karşılaştırma için simülasyon zamanı boyunca ortalama mutlak hata değerleri (mean absolute error –mae) hesaplanmıştır (Tablo-2). Tabloda görüldüğü üzere başlangıç koşulu olarak FNL-GFS kullanılmasının ERA-Interim kullanılmasından daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Ensemble hatalar için de aynı gözlem geçerlidir. Diğer bir gözlem ise her iki türbün için FNL-GFS başlangıç koşulu kullanıldığında MYJ modelinin en düşük hatayla tahmin yaptığıdır. 2. en iyi performansı MYNN modeli göstermiştir. FNL-GFS yerine ERA-Interim

başlangıç koşulu kullanıldığında ise MYJ ve BOULAC modelleri gözlemlere en yakın tahminleri yapmışlardır.

Tablo 2. 2-3 Mart simülasyonları için seçilen 2 türbün (T11 ve T13) ve 2 başlangıç koşulu için ortalama mutlak hataların (mean absolute error –mae (m/s)) karşılaştırılması.

2 MART 18:00 - 3 MART 18:00				
FNL-GFS			ERA-Interim	
	T11	T13	T11	T13
	mae (m/s)		mae (m/s)	
QNSE	2.0	2.0	2.4	2.5
BOULAC	2.0	2.0	2.4	2.2
MYNN	1.9	1.9	2.4	2.5
MYJ	1.9	1.9	2.4	2.4
ENSEMBLE	1.8	1.8	2.1	2.3

4.1.2 Kuzey-Doğulu Rüzgar Durumu (6 Mart 2012 14:00- 7 Mart 2012 14:00)

Rüzgar sahasının kuzey-doğu ucunda yer alan türbünler (T1 ve T3) bu rüzgar yönünde türbün arkası etkilerinden etkilenmeyecek olduğundan bu türbünler seçilerek 10 dakikalık WRF simülasyon sonuçları bu türbünlerdeki 10 dakikalık hız ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. 2-3 Mart simülasyonlarına benzer şekilde 2 değişik başlangıç koşulu kullanılmıştır (FNL-GFS ve ERA-Interim).

Nicesel karşılaştırma için simülasyon zamanı boyunca ortalama mutlak hata değerleri (mean absolute error –mae) hesaplanmıştır (Tablo-3). 2-3 Mart simülasyonlarına benzer olarak başlangıç koşulu olarak FNL-GFS kullanılmasının ERA-Interim kullanılmasından daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Ensemble hatalar için de aynı gözlem geçerlidir. Her iki türbün için FNL-GFS başlangıç koşulu kullanıldığında MYJ ve MYNN modelleri en düşük hatayla tahmin yaptığı görülmüştür. ERA-Interim başlangıç koşulu kullanıldığında da bu durum değişmemiş, MYJ ve MYNN modelleri gözlemlere en yakın tahminleri yapmışlardır.

Tablo 3. 6-7 Mart simülasyonları için seçilen 2 türbün (T1 ve T3) ve 2 başlangıç koşulu için ortalama mutlak hataların (mean absolute error –mae (m/s)) karşılaştırılması.

6 MART 14:00 - 7 MART 14:00				
FNL-GFS			ERA-Interim	
	T1	T3	T1	T3
	mae (m/s)		mae (m/s)	
QNSE	1.6	1.6	1.9	1.7
BOULAC	1.7	1.7	1.9	1.7
MYNN	1.5	1.3	1.8	1.7
MYJ	1.5	1.4	1.5	1.4
ENSEMBLE	1.5	1.4	1.7	1.5

Yukarıda bahsedildiği üzere, 2 değişik başlangıç koşulu kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlarda, GFS-FNL başlangıç koşulu kullanılarak yapılan simülasyonların daha düşük hatayla tahmin yapabildiği gözlemlenmiştir (Tablo-2 ve 3). Buna ek olarak 2-3 Mart ve 6-7 Mart simülasyonlarında en iyi performansı MYJ ve MYNN PBL parametrizasyonları göstermiştir. Bu nedenlerden ötürü, çalışmanın geri kalan kısmında başlangıç koşulu olarak GFS-FNL, PBL parametrizasyonu olarak ise MYJ ve MYNN modelleri seçilmiş ve 6. hesaplama alanı eklenerek aynı zaman aralığında LES simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Buradaki amaç daha yüksek çözünürlükteki LES simülasyonlarının sonuçlarda bir iyileşmeye yol açıp açmadığını test etmektir. Nicesel karşılaştırma için simülasyon zamanı boyunca ortalama mutlak hata değerleri (mean absolute error –mae) hesaplanmıştır (Tablo-4). Tablo-4’de LES simülasyonlarının her iki türbün ve her iki PBL modeli (MYNN ve MYJ) için de hatayı azalttığı gözlemlenmiştir. Bu etki 2-3 Mart simülasyonlarına kıyasla 6-7 Mart simülasyonlarında daha net gözükmetedir (Tablo-4). PBL parametrizasyonları birbirleriyle karşılaştırıldığında ise MYJ-LES’in MYNN-LES’den daha iyi bir performans gösterdiği gözlenmiştir.

Tablo 4. GFS-FNL başlangıç koşuluyla koşturulan 2-3 Mart ve 6-7 Mart LES simülasyonlarında seçilen 4 türbün (T11, T13 ve T1, T3) için ortalama mutlak hataların (mean absolute error – mae (m/s)) karşılaştırılması.

	2 MART 18:00 - 3 MART 18:00		6 MART 14:00 - 7 MART 14:00	
	T11	T13	T1	T3
	<i>mae (m/s)</i>		<i>mae (m/s)</i>	
GFS-MYNN-LES	1.9	1.8	1.5	1.3
GFS-MYJ-LES	1.8	1.8	1.3	1.3

4.2 Actuator Disk Modelinin WRF Modeline Uygulanması

Sonraki aşamada WRF modeline, rüzgar türbünlerinin varlığı ve türbünlerden kaynaklanan akımlarının birbirleri ile etkileşimlerini modellemek için Actuator Disk Model (ADM) eklenmiş ve basit konfigürasyonlar için testler gerçekleştirilmiştir.

Actuator Disk Modeli’nde (ADM) aşağıdaki varsayımlar kullanılmıştır:

- Türbin kanadının taradığı alan geçirgen bir disk olarak modellenir.
- Bu geçirgen diskin çok ince bir kalınlığa sahip olduğu varsayılır.
- Kanatlar üzerinde kuvvetlerin ve hızların eşit (uniform) dağıldığı kabul edilir.
- Diskin çok önünde ve çok arkasında basınç normale dönmektedir.

ADM’de kanatların geometrilerini tek tek modellemek ve kanat etrafındaki akımları çözmek yerine kanatların taradığı alan, akıma dik ve geçirgen bir disk olarak temsil edilmektedir. Bu

disk alanı üzerinde kanat kuvvetleri akışkanın üzerine etki etmektedir. Bu kuvvetler, belli bir zaman aralığında ortalaması alınmış, türbün tarafından akışkan üzerinde yapılan işe karşılık gelmektedir.

ADM modelinin WRF'a eklenmesi sırasında WRF modelleme çerçevesine bağlı kalınmıştır. WRF dinamik çözücüsü, momentumun korunumu için prognostik denklemlerin integralini alırken, bu denklemler yeryüzünü takip eden bir koordinat sistemi üzerinde formüle edilmektedir. Örneğin, x- yönündeki momentum denklemi yazıldığında, korunan (conserved) değişkenler μ , (burada μ kolon basıncı (Pa) ve u x- yönündeki hız vektörüdür (m/s):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (\nabla \cdot Vu) - \frac{\delta}{\delta x} \left(p \frac{\delta \phi}{\delta \eta} \right) + \frac{\delta}{\delta \eta} \left(p \frac{\delta \phi}{\delta x} \right) - F_u$$

Burada $V=(p_{hs}-p_{ht})v=\mu v$. En sağdaki F_u aktuator diskin etkisini temsil etmektedir ve bu formülasyona uygun olarak şu şekilde ifade edilmektedir:

$$F_u = \mu a_i$$

a_i i- yönündeki ivmelenmenin bileşeni olup bu çalışmada şu şekilde ifade edilmiştir:

$$a_i = \begin{cases} -A |\sin(\theta)| (1-d/L)^\alpha u_i^2 & \dots \text{for } \dots d < L \\ 0 & \dots \text{for } \dots d \geq L \end{cases}$$

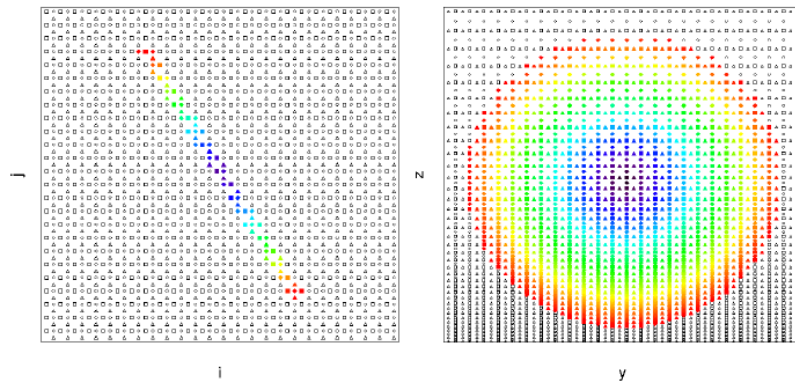
Burada $i=1, 2, 3$ sırasıyla zonal, meridyonal ve dikey yönleri belirtmektedir. a_i i- yönündeki negatif ivmelenme, u_i i- yönündeki hız, θ saatin tersi yönündeki ortalama rüzgar yönü ile türbün arasındaki açı, A canopy modellerindeki gibi yavaşlamanın büyüklüğünü ifade eden bir parametredir. Aktuator disk ile bir hesaplama noktası arasındaki uzaklık d ve ivmelenmenin uygulandığı uzaklık L dir. Örneğin Şekil-4a'da örnek bir hesaplama için türbünün rotorundan $L=2\Delta x$ mesafesindeki grid noktaları renklendirilmiştir (tepe görünümü). Sembollerin rengi o noktanın rotor ekseninden uzaklığını belirtmektedir. Şekil-1b, aynı hesaplama için türbün kesidini göstermektedir. Burada, zonal ve meridyonal ve dikey hız grid noktaları sırası ile kare, üçgen ve diamond olarak gösterilmiştir α parametresi rotor ekseninden uzaklaştıkça negatif ivmelenmenin nasıl değişeceğini göstermektedir. Dolayısı ile $(1-d/L)^\alpha$ ivmelenmedeki azalmanın aktuator yüzeyinin etrafındaki hesaplama noktalarına nasıl dağıldığını ifade etmektedir. En yüksek negatif ivmelenme diskin üzerinde oluşmakta ($d=0$); a_i rotordan uzaklaştıkça azalmakta ve L uzaklığında 0 olmaktadır. Negatif ivmelenmenin bu şekilde fonksiyona bağlı olarak azalarak ifade edilmesi sayısal kararsızlığı azaltmak içindir. Açısız döngü ile ilgili olan terim, $|\sin(\theta)|$, negatif ivmelenmenin, rüzgar akışının rotor eksenine dik olduğu durumda maximum olmasını ve eksene paralel olduğu durumda 0'a ulaşmasını

sağlamaktadır. A , L ve α parametreleri kullanılan türbüne göre değişmektedir. Bu parametrizasyonda kuvvetin ($F=\mu a_i$) şeklinde, yani basınç (pressure, μ) ile ivmelenme (a_i) çarpımı olarak ifade edilmesi WRF un genel fomulasyonu ile uyumludur.

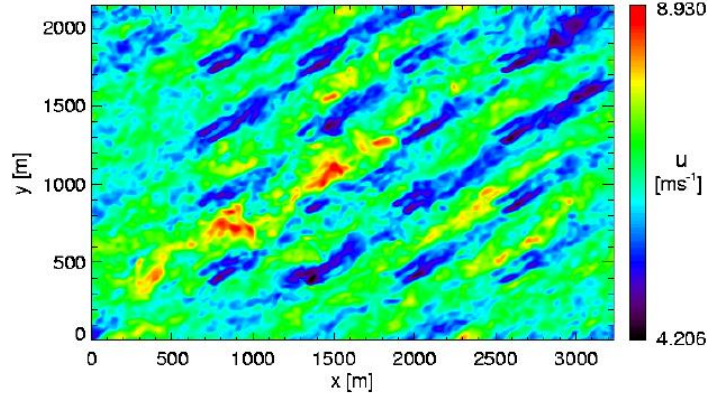
Aktuator modelinin WRF'a eklenmesi sırasında sırasıyla, Registry.EM'e yeni değişkenler eklenmiş; module_first_rk_step_part_2.F'de modeli çağırmak için bir switch oluşturulmuş; bir mediation-layer wake model driver'ı oluşturulmuş ve bu mediation layer'dan çağrılmak üzere bir model-layer ADM subroutine i eklenmiştir. Bu yeni modellerin compilation ı için WRF makefile ı değiştirilmiştir.

Şu anda WRF a sadece ADM türbün modeli eklenmiş olsa da buradaki çerçeve yapı ileride diğer türbün modellerinin de (Actuator Line Model-ALM) WRF a eklenmesine olanak verecektir.

Söke-Çatalbük sahasında türbün çapları 90 m olan Gamesa G90 2 MW türbünler kullanılmıştır. Şekil-4 de 16 adet 90 m çapında rüzgar yönünde döndürülmüş türbünlerin yarattığı rüzgar hız dağılımı gösterilmektedir. Burada neutral ve geostrofik olarak forse edilen düz bir yüzey simüle edilmiştir. 4x4 lük bir rüzgar türbün matrisi için ADM modeli Large Eddy Simülasyonu (LES) içerisinde kullanılmıştır. Burada yatay çözünürlük 9m ($dx=dy$) ve düşey yönde ilk grid noktasının yerden yüksekliği 2.25m dir. Grid, %5 lik bir uzama katsayısı ile dikey yönde esnetilmiştir. Simülasyon, 10 m/s lik bir geostrofik rüzgar ile koşturulmuş, 0.1 m lik bir pürüzlülük ve periodik sınır koşulları kullanılmıştır. Simülasyon 6 saat koşturulmuştur. ADM algoritmasının testi için $A=0.1$, $L=2\Delta x$ ve $\alpha=2$ parametreleri test edilmiştir. Şekil-5 de 16 türbünün arkasında oluşan rüzgardaki yavaşlama ve türbün kenarlarıyla serbest akım arasında gelişen türbülans artışı gözlemlenmektedir.



Şekil 4. Aktuator disk'in WRF modeli içinde hız grid noktaları üzerinde iki farklı görünüşü. a) zonal ve meridiyonal ve dikey hız grid noktaları, sırası ile kare, üçgen ve diamond olarak gösterilmiştir.



Şekil 5. Yerden 100 m yükseklikte bir x-y kesidinde rüzgar hızının dağılımı. 90 m çapında 16 adet türbün, ortalama rüzgarın geldiği yöne çevrilmişlerdir.

Bu başlangıç testlerinin ardından ADM modeli gerçek zamanlı rüzgar ve güç tahminleri için WRF modeline eklenmiştir. Bu simülasyonlarda projenin ilk aşamasında gerçekleştirilen nested (yuvalama) tekniği kullanılmış, ADM modeli sadece en içte kalan LES simülasyonu için aktif hale getirilmiştir. WRF-LES-ADM modeli ile 5 nest üzerinde (9 km den 100 m'ye) 48 çekirdek kullanılarak yapılan 24 saatlik bir tahmin yaklaşık 4 saatte elde edilebilmektedir.

4.3 Actuator Disk Modelinin Kullanılması

Weather Research and Forecasting (WRF) modeline, rüzgar türbünlerinin varlığı ve türbünlerden kaynaklanan akımlarının modellenmek için bir önceki dönemde eklenen Actuator Disk Model (ADM) modeli ile Söke-Çatalbük sahasında bazı testler gerçekleştirilmiştir.

ADM'de kanatların geometrilerini tek tek modellemek ve kanat etrafındaki akımları çözmek yerine kanatların taradığı alan, akıma dik ve geçirgen bir disk olarak temsil edilmektedir. Bu disk alanı üzerinde kanat kuvvetleri akışkanın üzerine etki etmektedir. Bu kuvvetler, belli bir zaman aralığında ortalaması alınmış, türbün tarafından akışkan üzerinde yapılan işe karşılık gelmektedir.

Söke-Çatalbük sahasında türbün çapları 90 m olan Gamesa G90 2 MW türbünler kullanılmıştır. Simülasyonlarda ilk sene için test ettiğimiz 2-3 Mart 2012 18:00 ve 6-7 Mart 2012 14:00 periyotları simüle edilmiştir.

Rüzgar türbünlerinin Söke Çatalbük sahasındaki lokasyonları Şekil-3'de gösterilmektedir.

4.3.1 Güney-Batılı Rüzgar Durumu (2 Mart 2012 18:00- 3 Mart 2012 18:00)

Rüzgar sahasının güney-batısında bulunan türbünler (T10 ve T12) bu rüzgar yönünde türbün arkası etkilerinden en çok etkilenecek olduğundan bu türbünler seçilerek buradaki 10 dakikalık

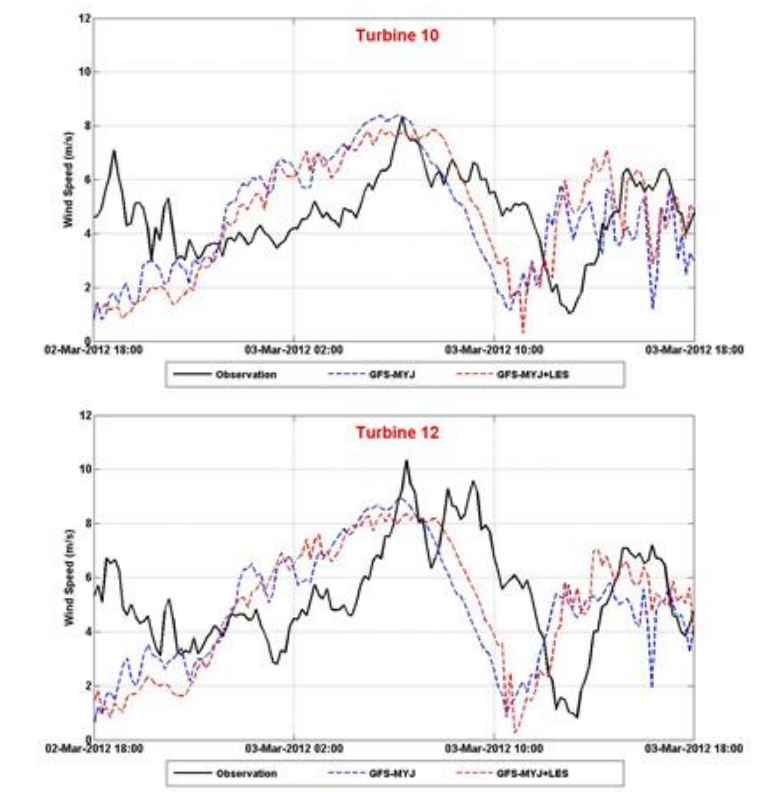
WRF simülasyon sonuçları 10 dakikalık hız ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Simülasyonlarda FNL-GFS başlangıç koşulu kullanılmıştır. PBL parametrizasyonu olarak MYJ modeli seçilmiş ve ek olarak LES-ADM simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

Nicesel karşılaştırma için simülasyon zamanı boyunca ortalama mutlak hata değerleri (mean absolute error –mae) hesaplanmıştır (Tablo-5). Tablo-5’de LES-ADM simülasyonlarının her iki türbün için de hatayı azalttığı gözlemlenmiştir.

Sonuçlar grafiksel olarak Şekil-6’da gösterilmiştir.

Tablo 5. GFS-FNL başlangıç koşuluyla koşturulan 2-3 Mart ve 6-7 Mart simülasyonlarında seçilen 4 türbün (T10, T12 ve T4, T6) için ortalama mutlak hataların (mean absolute error – mae (m/s)) karşılaştırılması.

	2 MART 18:00 - 3 MART 18:00		6 MART 14:00 - 7 MART 14:00	
	T10	T12	T4	T6
	mae (m/s)		mae (m/s)	
GFS-MYJ	1.9	2.1	1.7	1.7
GFS-MYJ-LES	1.8	2.0	1.4	1.5



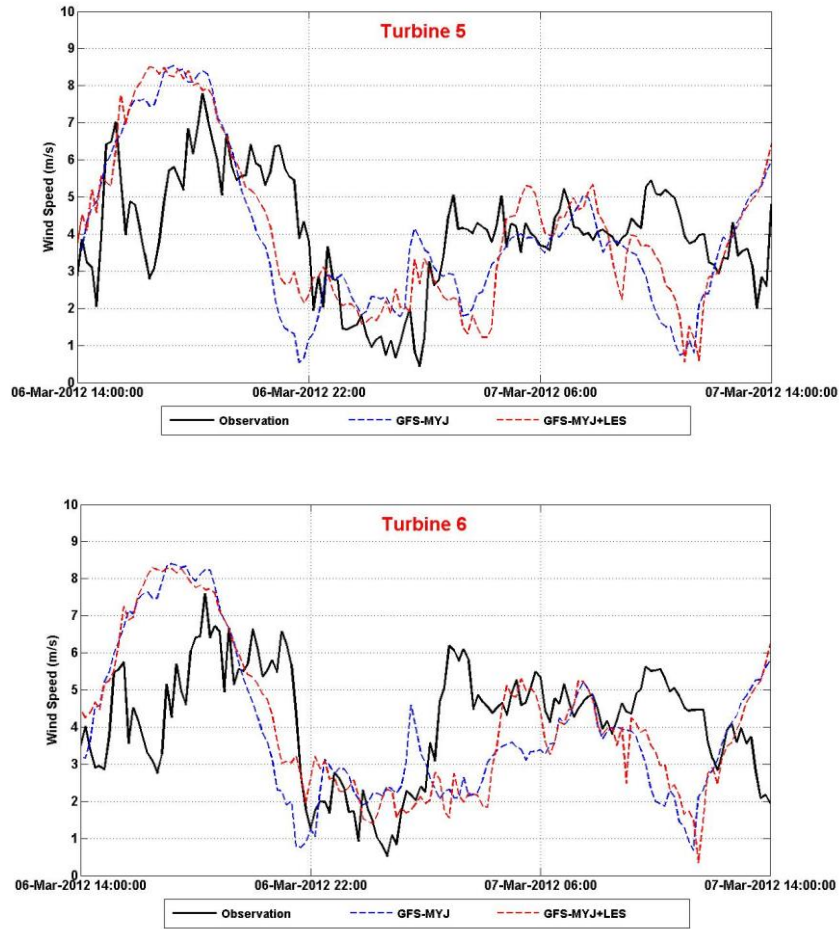
Şekil 6. 2 Mart 2012, 18:00 - 3 Mart 2012, 18:00 arasında (24 saat) GFS-FNL başlangıç koşulları kullanılarak gerçekleştirilen GFS-MYJ-LES-ADM simülasyon sonucunun GFS-MYJ sonucu ve gözlem verisi ile karşılaştırılması (Türbün-10 ve Türbün-12).

4.3.2 Kuzey-Doğulu Rüzgar Durumu (6 Mart 2012 14:00- 7 Mart 2012 14:00)

Rüzgar sahasının kuzey-doğusunda yer alan türbünler (T4 ve T6) bu rüzgar yönünde türbün arkası etkilerinden en çok etkilenecek olduğundan bu türbünler seçilerek 10 dakikalık WRF simülasyon sonuçları bu türbünlerdeki 10 dakikalık hız ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Simülasyonlarda FNL-GFS başlangıç koşulu kullanılmıştır. PBL parametrizasyonu olarak MYJ modeli seçilmiş ve ek olarak LES simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

Nicesel karşılaştırma için simülasyon zamanı boyunca ortalama mutlak hata değerleri (mean absolute error –mae) hesaplanmıştır (Tablo-5). 2-3 Mart simülasyonlarına benzer olarak Tablo-1’de LES-ADM simülasyonlarının her iki türbün için de hatayı azalttığı gözlemlenmiştir.

Sonuçlar grafiksel olarak Şekil-7’de gösterilmiştir.



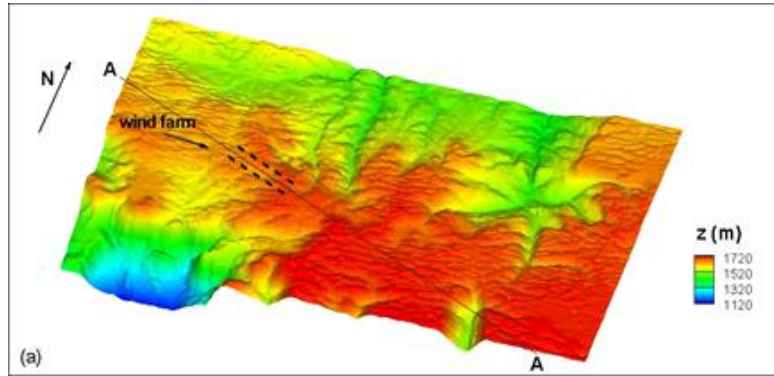
Şekil-7. 6 Mart 2012, 14:00 - 6 Mart 2012, 14:00 arasında (24 saat) GFS-FNL başlangıç koşulları kullanılarak gerçekleştirilen GFS-MYJ-LES-ADM simülasyon sonucunun GFS-MYJ sonucu ve gözlem verisi ile karşılaştırılması (Türbün-4 ve Türbün-6).

Bu raporda sunulan Söke-Çatalbük hesaplamaları European Geophysical Union 2017 toplantısında sunulmuş ve Energy Procedia dergisinde yayınlanmak üzere makale haline getirilmiştir (Kirkil et al, 2017).

4.4 Mut Sahası İçin Gerçekleştirilen Simülasyonlar

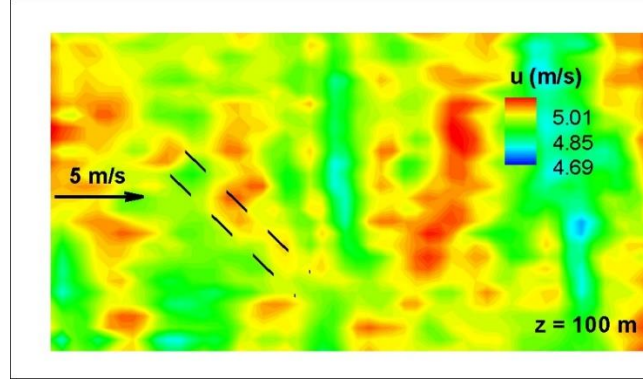
WRF-LES-ADM modeli kullanılarak Söke-Çatalbük sahasına ek olarak Mut (Mersin) rüzgar türbün sahası için de bazı başlangıç simülasyonları gerçekleştirilmiştir. WRF-LES-ADM sonuçları, sahada elde edilmiş türbün üstü gözlem verileriyle karşılaştırılmıştır. Bu amaçla Mut rüzgar tarlasından anemometre kullanılarak 2015 yılına ait 10 dakika aralıklı rüzgar verisi elde edilmiştir.

Başlangıç ve sınır koşulları olarak Söke-Çatalbük simülasyonlarına benzer şekilde oluşturulmuştur. Yüksek çözünürlüklü arazi kullanım verisi olarak European Environment Agency tarafından hazırlanmış 250 m çözünürlükte Corine (Coordination of information on the environment) arazi kullanım verisi, topografya verisi olarak bir önceki bölümde ayrıntılı olarak anlatılan yüksek çözünürlükte topografya verisi WRF-LES-ADM simülasyonları için uygun hale getirilmiştir (Şekil-8).



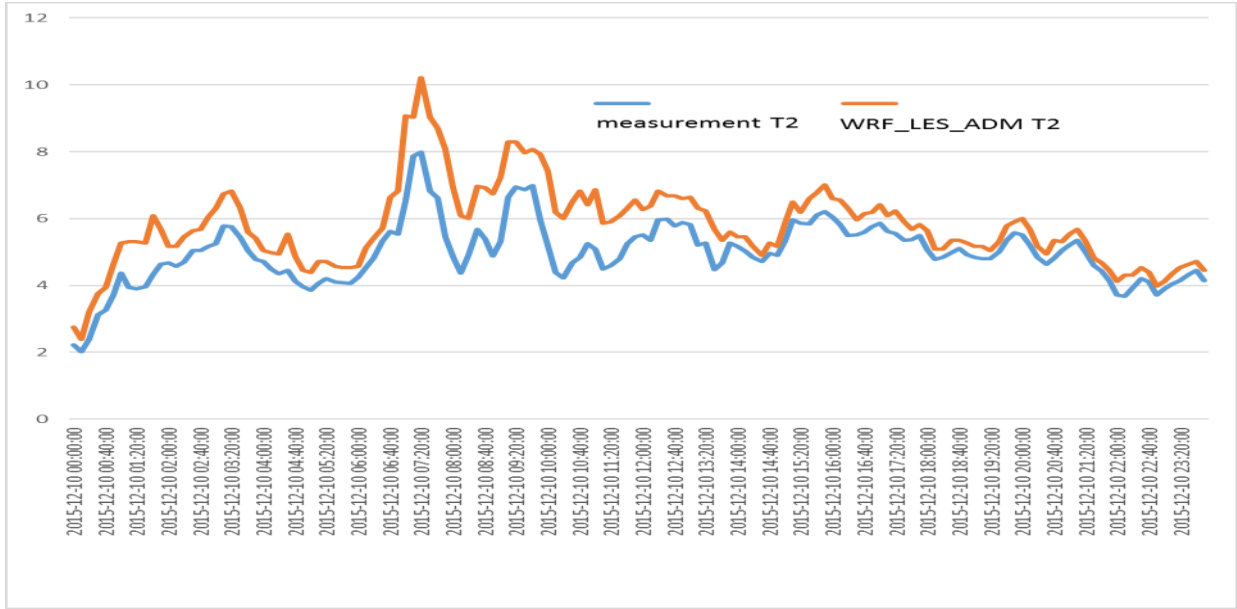
Şekil-8. Mut sahası topografyası.

Başlangıç olarak 5 m/s sabit batılı rüzgarlar altında WRF-LES modelinin performansı ölçülmüştür. 100 m yükseklikte elde edilen hız konturları Şekil-9'da gösterilmiştir. Rüzgar türbünleri, kompleks topografya üzerinde oluşan sınır tabakasındaki yüksek türbülans etkisinde kalmaktadır.



Şekil-9. Mut sahası için 5 m/s batılı rüzgar altında z=100 m yükseklikte u- hızı konturları.

2015 yılı Aralık ayı 10. günü için 24 saatlik WRF-LES-ADM (GFS başlangıç koşulu ve MYNN modeli ile) modeli koşturmuş, Türbün-2 için model ve ölçüm zaman serileri karşılaştırılmıştır (Şekil 10). Kualatif olarak sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil-10. Mut sahası Türbün-2 için 24 saatlik WRF-LES tahminlerinin saha ölçümleri ile karşılaştırılması.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Projenin ilk kısmında Söke-Çatalbük rüzgar tarlası için WRF simülasyonları koşturularak türbünler için elde edilen rüzgar tahminleri türbün üstü rüzgar gözlem verileriyle karşılaştırılmıştır. Yaygınca kullanılan WRF-PBL simülasyonlarına ek olarak oldukça yeni bir yaklaşım olan WRF-LES simülasyonları da koşturulmuştur. Simülasyonlarda iki baskın rüzgar yönü (2-3 Mart kuzeydoğulu, 6-7 Mart güneydoğulu) ve iki değişik başlangıç koşulu (ERA-Interim ve GFS-FNL) kullanılmıştır. Sadece PBL kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlarda

5 hesaplama alanı kullanılmış (çözünürlük=300m), LES simülasyonları için 6. Hesaplama alanı (çözünürlük=100m) eklenmiştir. En içte kalan hesaplama alanı kullanılarak elde edilen 24 saatlik 10 dakika aralıklı simülasyon sonuçları, 24 saatlik 10 dakika aralıklı türbün üstü rüzgar gözlem verileri ile karşılaştırılmıştır. Nicesel karşılaştırma için simülasyon zamanı boyunca ortalama mutlak hata değerleri (mean absolute error –mae) hesaplanmıştır.

Her iki simülasyon periyodu için de (2-3 Mart ve 6-7 Mart) GFS-FNL başlangıç koşulu en düşük hatayla tahmin yapmıştır. PBL model performansları başlangıç koşullarından ve simülasyon yapılan zaman aralığından etkilense de genel olarak en düşük hatalı tahminler MYJ ve MYNN kullanılan simülasyonlardan elde edilmiştir. PBL'lere ek olarak LES simülasyonları koşturulduğunda gözlem sonuçlarına daha fazla yakınsama elde edilmiştir (LES modeli olarak TKE 1.5 modeli kullanılmıştır). MYNN-LES ile karşılaştırıldığında, MYJ-LES modeli daha iyi sonuç vermiştir.

Projenin bir sonraki aşamasında WRF'a ADM türbün parametrizasyonları eklenerek çeşitli testler gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlarda nested (yuvalama) tekniği kullanılarak, ADM modeli sadece en içte kalan LES simülasyonu için aktif hale getirilmiştir. ADM modeli, Söke-Çatalbük sahasında LES simülasyonları için denenmiş ve türbün üstü rüzgar ölçümlerine yakın sonuçlar elde edilmiştir.

WRF-LES-ADM modeli Mersin-Mut rüzgar türbün sahası için de çalıştırılmaya başlanmış, gözlemlerle karşılaştırıldığında başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

6. KAYNAKLAR

Bou-Zeid, E., Vercauteren, N., Parlange, M. B. and Meneveau, C., Scale dependence of subgrid-scale model coefficients: An a priori study, *Physics of Fluids*, 20(11), 115106, (2008).

Calaf, M., Meneveau, C., Meyers, J., Large eddy simulation study of fully developed wind-turbine array boundary layers, *Phys.Fluids*, 22, 015110, (2010).

Gomez-Elvira, R., Crespo, A., Migoya, E., Manuel, F., Hernandez, J., Anisotropy of turbulence in wind turbine wakes, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 93, 797–814, (2005).

Kirkil, G., Ezber, Y and Kaytanci, T., WRF's wind power ensembles for a wind farm located in a coastal area of Turkey, *Energy Procedia*, submitted, (2017).

Kirkil, G, Mirocha, J. D., Chow, F., K., Bou-Zeid, E., Implementation and evaluation of dynamic subfilter-scale stress models for large-eddy simulation using WRF, *Mon. Wea. Rev.*, 140, 266-284, (2012).

Lundquist, K. A., Chow, F. K. and Lundquist, J. K., An immersed boundary method for the weather research and forecasting model, *Monthly Weather Review*, 138 (3), 796–817, (2010).



Marjanovic, N., Chow, F., Lundquist, J.K., Nested mesoscale to large-eddy simulations for wind energy applications, The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010), Chapel Hill, North Carolina, USA, May 23-27, (2010).

Mirocha, J. D., Kirkil, G., Bou-Zeid, E., Chow, F. K., Kosović, B., Transition and Equilibration of Neutral Atmospheric Boundary Layer Flow in One-Way Nested Large Eddy Simulations Using the Weather Research and Forecasting Model, *Mon. Wea. Rev.*, In Press, (2013).

Moeng, C.-H., Dudhia, J., Klemp, J. B., and Sullivan, P. P., Examining two-way nesting for large eddy simulation of the PBL using the WRF model, *Mon. Wea. Rev.*, 135, 2295–2311, (2007).

Petersen, E.L., Mortensen, N.G., Landberg, L., Højstrup, J., Frank, H.P., Wind power meteorology. Part 1: climate and turbulence, *Wind Energy*, 1, 25–45, (1998).

Porte-Agel, F., Wu, Y. T., Lu, H., Conzemius, R. J., Large-eddy simulation of atmospheric boundary layer flow through wind turbines and wind farms, *J of Wind Eng Ind Aerodynamics*, 99, 154-168, (2011).

Skamarock, W. C., and Coauthors, A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-4751STR, National Center for Atmospheric Research, 88 pp, (2008).

Sørensen, J.N., Shen, W.Z., Numerical modeling of wind turbine wakes., *J. Fluids Eng.*, 124, 393–399, (2002).

Storm B., Dudhia J., Basu S., Swift, A., Giammanco, I., Evaluation of the Weather Research and Forecasting Model on Forecasting Low-level Jets: Implications for Wind Energy, *Wind Energy*, 12, 81-90, (2008).

Vermeer, L.J., Sørensen, J.N., Crespo, A., Wind turbine wake aerodynamics, *Prog. Aerosp. Sci.*, 39, 467–510, (2003).

Wu, Y.T., Porte-Agel, F., Large-eddy simulation of wind-turbine wakes: evaluation of turbine parametrisations. *Boundary-Layer Meteorol.*, (2011).

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Yrd. Doç. Dr. GÖKHAN KIRKIL
Proje No:	113Y197
Proje Başlığı:	Rüzgar Türbün Tarlalarında Kısa Süreli Rüzgar Enerjisi Tahminine Yönelik Sayısal Rüzgar Tahmin Modeli Geliştirilmesi
Proje Türü:	3501 - Kariyer
Proje Süresi:	36
Araştırmacılar:	YASEMİN EZBER
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	KADİR HAS Ü. MÜHENDİSLİK VE DOĞA BİLİMLERİ F. ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/10/2013 - 01/10/2016
Onaylanan Bütçe:	246499.0
Harcanan Bütçe:	137673.03
Öz:	<p>Bu projenin amacı, rüzgar enerjisi üretiminde rüzgardan kaynaklanan hızlı değişimlerin anlaşılması ve karakterize edilmesidir. Projede sayısal yöntemler vasıtasıyla atmosfer sınır tabakasındaki türbülans, rüzgar türbünlerinin değişik konfügurasyonları ve kompleks topografya gibi rüzgarda zamana ve lokasyona bağlı hızlı değişimler yaratan kaynaklar hakkında bilgi elde edilmiştir. Bu amaca yönelik ilk olarak, kısa ve orta vadede rüzgar tahmini yapabilen bir sayısal model geliştirilmiş ve bu modelin saha ölçümleri vasıtasıyla doğrulanması yapılmıştır. Bu araç LES (Large-eddy Simulation) modellemesi sayesinde meteorolojik hava tahminlerinden (WRF-Weather Research and Forecasting) rüzgar türbünü ölçeğine inerek daha küçük ölçeklerde ve daha küçük zaman aralıklarında rüzgar tahmini yeteneğine sahiptir. İkinci aşamada bu modelin (WRF-LES) rüzgar enerjisi tahminleri yapabilmesi için modele türbün parametrisasyonu eklenmiştir. Bu kodlar yardımı ile belirlenen örnek sahada simülasyonlar yapılarak ölçülen türbün verileriyle simülasyon verileri karşılaştırılmıştır.</p>
Anahtar Kelimeler:	rüzgar enerjisi, rüzgar tahmini, atmosferik modelleme, yenilenebilir enerji, girdap modellemesi
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- WRF?s wind power ensembles for a wind farm located in a coastal area of Turkey (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),