

OpenFOAM' un WRF ile Akuple Edilmesi ve Rüzgar Potansiyeli Tahmini

Engin Leblebici* ve İsmail H. Tuncer†
ODTÜ, Ankara

ÖZET

Bu projede açık kaynaklı Navier-Stokes tabanlı akış çözücü OpenFOAM ile orta ölçekli (meso-scale) hava tahminlerinde kullanılan WRF yazılımı akuple edilerek yüksek çözünürlüklü, mikro ölçekli (micro-scale) atmosferik akış çözüm yöntemleri geliştirilmiştir. WRF global hava tahminlerinde kullanılan, gözlem verileriyle sürekli bir şekilde güncellenen düşük çözünürlüklü, yeryüzünü eşbasınç seviyeleri ile modelleyen global bir atmosferik akış çözücüsüdür. OpenFOAM ise açık kaynak olarak geliştirilen, genel amaçlı bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği, HAD (CFD) yazılımıdır. WRF' in başarısız olduğu karmaşık topografyalarda yere yakın bölgelerde, HAD çözücülerin daha doğru çözüm yaptığı bilinmektedir. Bu sebeple OpenFOAM ve WRF' in akuple edilmesi tahminlerde iyileştirme sağlayacaktır. Düşük çözünürlüklü WRF ile tahmin edilen global atmosferik akış çözümlerinden alınan akış bilgilerinin, yüksek çözünürlüklü dar bölgelerdeki OpenFOAM çözümlerinde başlangıç ve sınır koşulları olarak kullanılmasıyla OpenFOAM ve WRF akuple bir şekilde çalıştırılmıştır. Mersin-Mut bölgesinde 24 saatlik zamana bağlı (unsteady), türbülanslı çözümler yapılmıştır. Yöntemin paralel çalıştırılması için gerekli araçlar geliştirilmiş ve çözüm zamanında önemli iyileştirmeler sağlanmıştır. Geliştirilen akuple çözüm yöntemi mikro ölçekli rüzgar enerji potansiyelinin belirlenmesinde, rüzgar türbinleri için yer seçiminde (micro-siting) ve rüzgar türbinlerinin ileriye dönük, kısa süreli (günlük/haftalık) enerji üretim tahminlerinin elde edilebilmesinde kullanılabilecektir.

GİRİŞ

Çok sayıda rüzgar türbininden oluşan rüzgar çiftlikleri yüksek ilk yatırım maliyetine sahip olduklarından rüzgar çiftliklerinin yer seçimine büyük önem verilmelidir. [Damiani, Cochran, Orwig ve Peterka, 2008; Derickson ve Peterka, 2004]. Düşük çözünürlüklü rüzgar enerjisi potansiyeli atlasları, rüzgar çiftliklerinin makro- yer seçimi için gerekli istatistiki bilgiyi içermekte ama mikro- yer seçimi için kesinlikten yoksun bulunmaktadır. Bu nedenle; bir rüzgar çiftliğinin, mikro bazda, daha yüksek güç elde edecek şekilde yer seçimi için yüksek çözünürlüklü ve daha doğru rüzgar alan bilgilerine ihtiyaç duyulmaktadır.

*Araştırma görevlisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: enginl@ae.metu.edu.tr

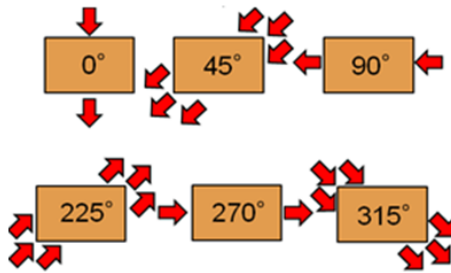
†Prof. Dr., Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: ismail.h.tuncer@ae.metu.edu.tr

Risø raporunda, Bowen[Bowen ve Mortensen, 2004]; Botta [Botta, Castagna, Borghetti ve Mantegna, 1992], Bowen ve Saba [Bowen ve Saba, 1995], Reid[Reid, 1995] ve Sempreviva[Sempreviva, Troen ve Lavagnini, 1986]'nın ticari rüzgar çiftlikleri çalışmalarındaki deneyimlerine dayanarak [Lindley, Musgrove, Warren ve Hoskin, 1993], her bir türbinin özelliklerinin yerel arazinin kompleks yapısına göre yerleştirilmesinin rüzgar enerjisi projesinin çıkışı üzerinde can alıcı bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. F.J.Zajaczkowski [Zajaczkowski, Haupt ve Schmehl, 2011] nümerik hava tahmin modellerini ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonlarını şöyle kıyaslamaktadır: Hava tahmin modelleri ışıınım, nemden kaynaklanan taşınım fiziği, satıh etkileri parametreleştirmeleri, atmosferik sınır tabaka fiziği gibi etkileri hesaba katabilirken 1 km'den daha fazla, düşük çözünürlüklü çözüm ağları kullandığı için türbülans fiziğini hesaba katamazlar. Diğer yandan hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonlarında binalar ve keskin yüzey şekilleri etrafında oluşan küçük ölçekli akışların ve türbülansın iyi ifade edilebildiğini açıkça ortaya koymuştur. Şehirselle veya karmaşık alanlar için yapılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği çalışmalarında karşılaşılan en ciddi zorluk sınır koşullarının zamana bağlı verilmesi ve satıh etkilerinin modellenmesidir.

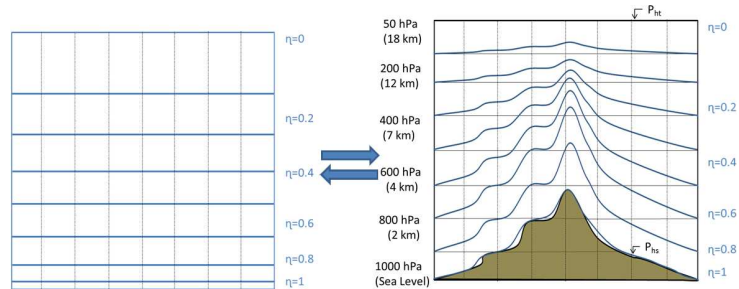
Ticari rüzgar enerjisi tahmin araçlarının çoğunun, ya istatistiksel yöntemleri ya da gözlem verilerine dayanan doğrusallaştırılmış hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) modellerini kullanması gerekmektedir. Bu yazılımlar, genel olarak seçilen bölgedeki ölçüm verileriyle elde edilmiş rüzgar gülleri yardımıyla hakim rüzgar yönlerini tayin eder. Bu yönleri sağlamak üzere çözüm alanına başlangıç ve sınır koşulu olarak belli açısız aralıklarla sabit rüzgar hızlarını Şekil 1 'de görüleceği gibi tanımlanır. Böylece ilgili alanın içindeki rüzgar hızı dağılımlarını sabit ve zamana bağlı olmayan şekilde ele alarak Navier-Stokes denklemleri ile hesaplanır. Bu yöntemin dezavantajlarından biri, en az 1 yıllık gözlem verisine ihtiyaç duyulması ve gözlem verisi toplamak için gerekli rüzgar direklerinin maliyeti artırmasıdır. Bu yöntemler ile ilgili en önemli nokta ise, ortalama değerlerin kullanılmasından ötürü zamana bağlı tahmin yapılamamasıdır.

WRF orta ölçekli atmosferik dolanımı simüle ve tahmin etmek için geliştirilmiş sınırlı alanda çözüm yapan, hidrostatik olmayan, topoğrafyayı takip eden η koordinatlarını kullanan bir modeldir [Skamarock, Klemp, Dudhia, Gill, Barker, Duda, Huang, Wang ve Powers, 2008]. Bu model analiz edilecek bölge için topoğrafyanın yükseklik verisini United States Geographical Survey (USGS) den alır ve bu alan için yapıları çözüm ağı oluşturur. WRF yatay koordinat olarak enlem, boylam dikey dikey koordinat olarak topoğrafyayı takip eden sabit basınç seviyeleri, η , kullanır.

WRF' in η tanımından dolayı yüksek çözünürlüklü topoğrafya etkileri WRF çözümlerinde ihmal edilebilmektedir. Bu durum Şekil 2' den de görülebilmektedir.



Şekil 1: Doğrusal HAD modelleri sınır koşulları



Şekil 2: η koordinat sistemi

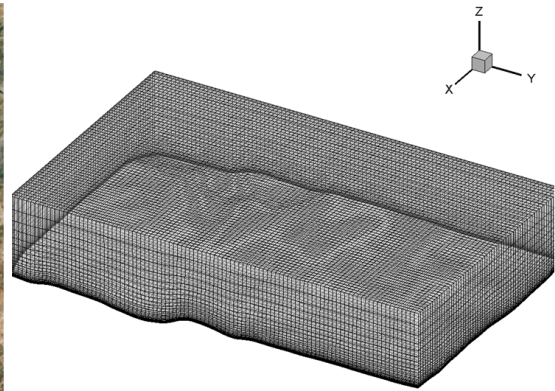
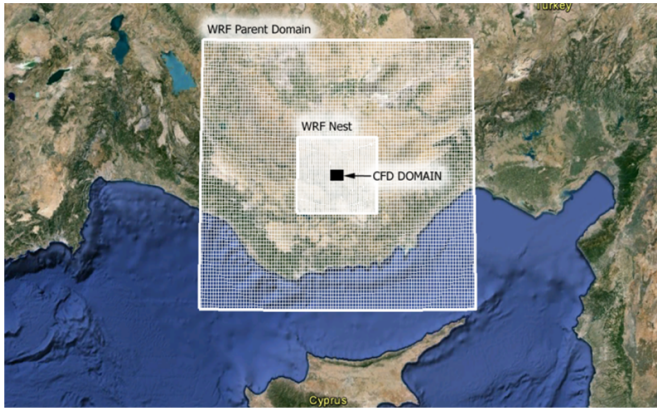
OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) açık kaynaklı bir HAD çözücü yazılım paketidir. [OpenFOAM, 2016] Çözüm ağı üretme, ön ve ard işleme (pre, post processing) için uygulamaları mevcut ve tamamıyla paralel çalışmaya elverişlidir. OpenFOAM sıkıştırılmaz (incompressible) ve sıkıştırılabilir (compressible) akışları çözme yeteneğine sahip olup çözüm alanı

bölümlendirme ve paralel hesaplama yetilerine sahiptir. OpenFOAM işlemci birimler arasındaki veri alış verişi için OpenMPI kullanmaktadır. [OpenFOAM, 2016]

Bu çalışmada orta ölçekli hava tahmin modeli WRF, açık kaynaklı HAD çözümü OpenFOAM ile düşük çözünürlüklü WRF hava tahmin verilerinin yüksek çözünürlüklü OpenFOAM çözüm alanı için başlangıç ve sınır koşulları olarak kullanılması yoluyla akuple edilmiştir.

YÖNTEM

Bu çalışmada, atmosferik hava tahmini yazılımı WRF ile açık kaynak kodlu bir Navier-Stokes çözümü OpenFOAM'un akuple olarak çalıştığı bir çözüm metodolojisi geliştirilmiştir. WRF düşük çözünürlüklü zamana bağlı hava tahmin verileri üretir ve bu veriler yüksek çözünürlüklü yeri takip eden OpenFOAM çözüm alanına zamana ve koordinatlara bağlı değişen başlangıç ve sınır koşulları olarak verilir.



Şekil 3: WRF ve OpenFOAM çözüm alanları

Şekil 4: Yapılı çözüm ağları (OpenFOAM)

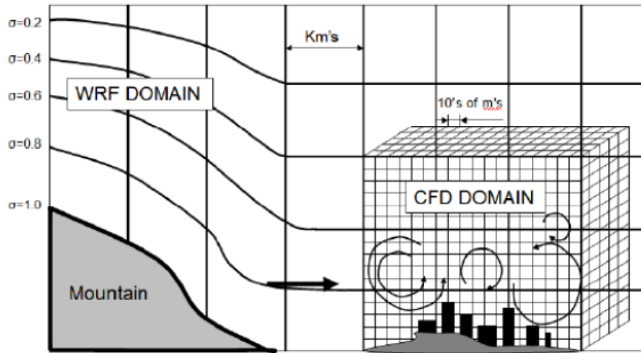
Düşük çözünürlüklü WRF çözümleri, çözülecek olan coğrafi alanda, Mersin-Mut çevresinde, elde edilir. Yerel arazi verileri, UCAR (University Corporation of Atmospheric Research) sunucusundan WRF aracılığıyla otomatik olarak indirilir. WRF çözümü için zamana bağlı başlangıç ve sınır koşulları ECMWF (European Centre of Medium Range Weather Forecast)' den elde edilmiştir. WRF, ölçek büyütülmesi için kullanılabilen 1/3 yuvalama (nesting) oranına sahiptir. Yuva alan 1 km çözünürlüğe sahipken, ana alan 3 km çözünürlüğe sahiptir.

Daha geniş skalalı WRF alanı içerisinde yer alan OpenFOAM çözüm alanının sınırları için zamana bağlı sınır koşulları, 5 dakikalık zaman aralıklarında alınan WRF çözümleri kullanılarak çıkarılır. WRF ve yuva çözüm alanı ile OpenFOAM çözüm alanı Şekil 3 'te gösterilmektedir. WRF' den elde edilen veriler enlem, boylam ve η boyutlarında olduğundan; boyutlar HAD çözüm alanı için metreye çevirilip, her bir sınır hücre yüzünün merkezine trilineer olarak interpolate edilmektedir. Bu sayede her 5 dakika için HAD çözüm alanı sınır koşulu profilleri çıkarılır.

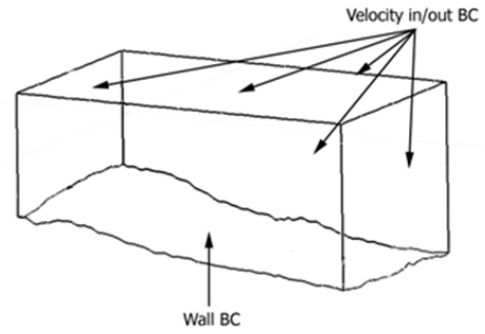
HAD çözümleri için kullanılan çözüm alanları için; yüksek çözünürlüklü arazi topoğrafyası, METI (The Ministry of Economy, Trade, and Industry) ve NASA' nın ürünü olan ASTER GDEM veri takımından 1.5 arc-sec (yaklaşık 30 metre) çözünürlükte elde edilir. Esneyen (stretching) yapıları çözüm ağları kullanılarak OpenFOAM çözüm alanı 164700 hücre ile ayrıştırılmıştır. Rüzgar türbinlerinin bulunduğu atmosferin yüzey tabakasında (surface layer) baskın olan viskozite etkilerini yakalamak için; yatay ve dikey çözünürlüğü sırasıyla 30 metre ve yerde 1 metre olan yeri takip eden çözüm ağları Şekil 4 'te de gösterildiği gibi oluşturulmuştur.

Zamana ve mekana bağlı (spatially and time varying) sınır koşulları WRF çözümünden elde edilen verilerden, her hücre için, zamana (yukarıda bahsedilen sınır koşulu profilleri kullanılarak) ve

mekana göre interpolate edilerek OpenFOAM çözüm alanına sağlanmıştır. Akuple etme yönteminin bir şematığı Şekil 5' te verilmektedir.



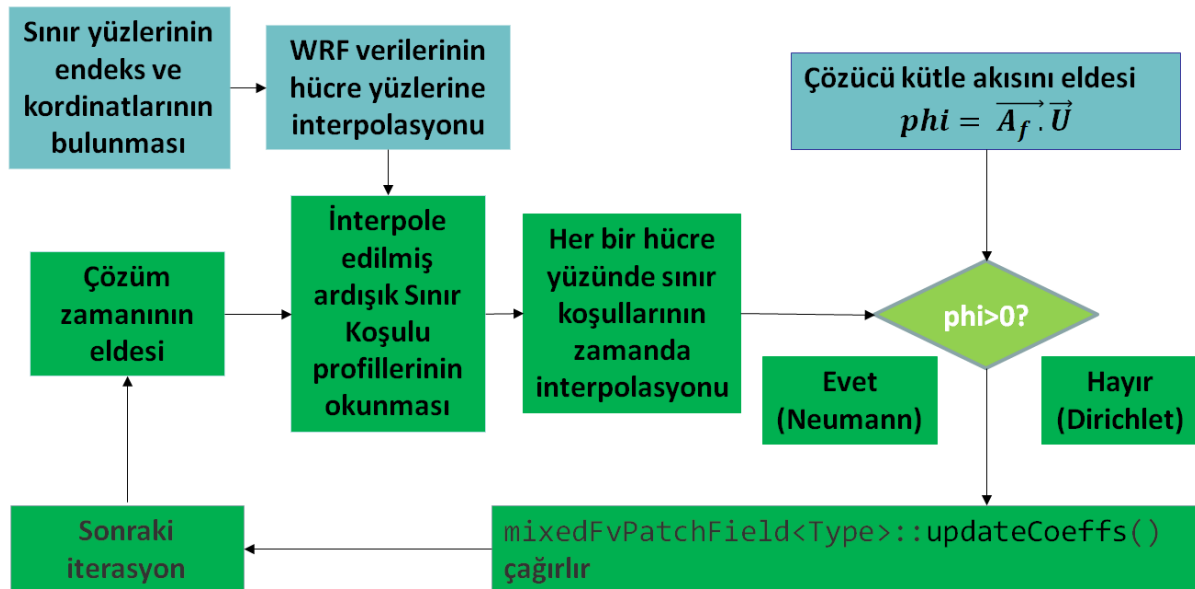
Şekil 5: OpenFOAM ile WRF' in akuple edilmesi



Şekil 6: OpenFOAM çözüm alanı için sınır koşulları

Sınır koşulları olarak, ilgilenilen bölge Şekil 6' da gösterildiği gibi modellenmektedir. Yan ve üst yüzeyler zamana ve mekana bağlı hız giriş-çıkışı (inlet-outlet) olarak modellenirken, topoğrafya kaymaz duvar olarak modellenmiştir. WRF hava tahmin verilerinin yer hariç bütün sınırlarda verilmesi, çözüm alanı içerisine giren kütle debisini sabitlemekte ve kütle korunum denkleminin (continuity) yakınsamasını neredeyse imkansız hale getirmektedir. Bu sebeple OpenFOAM içerisinde fixedValue sınıfı (class) ya da bu sınıfı kalıt alan (inherit) herhangi bir sınır koşulu kullanılamamaktadır. Bu problem için, mixedFvPatchField sınıfının üzerine, WRF'ten alınan sınır koşulu profillerini okuyan, zamana ve mekana göre her sınır hücresi yüzüne interpolate eden yeni bir sınır koşulu (timevaryingmixed) geliştirilmiş ve OpenFOAM' a uygulanmıştır.

Bu sınır koşulunun uygulanması için kullanılan yaklaşım; her zaman adımı ve her hücre içi akışın çözüm alanının içerisine/dışarısına çıktığının kontrol edilmesi ve eğer akış içeri giriyorsa hız bileşenlerinin verilmesi (Dirichlet), dışarı çıkıyorsa hızın gradientinin 0 olarak verilmesi (Neumann) olarak açıklanabilir. Bu sınır koşulunun çalışma şematığı Şekil 7' de verilmektedir.



Şekil 7: timevaryingmixed sınır koşulunun algoritması

Tahmin yeteneğinin gerçek zamanlı uygulanabilmesi için, OpenFOAM çözümlerinin gerçek zamana göre hızlı olması gerekmektedir ve bu sebeple paralel hesaplama bu çalışma için büyük önem arz etmektedir. OpenFOAM paralel koşturulmak için çözüm alanının bölümlendirilmesine ihtiyaç duyar. Bu bölümlendirme işlemi OpenFOAM içerisindeki decomposePar aracı sayesinde otomatik yapılır. Bu araç OpenFOAM' da bulunan birçok sınır koşulu için uygun olsa da, sınır hücrelerinin koşulları mekana bağlı değiştiğinde yani her hücrenin sınır koşulu değeri farklı olduğunda kullanılabilirliğini yitirmektedir. Buna sebep olarak, çözüm alanı bölünmesi sırasında geliştirilen sınır koşuluna ait hücrelerinin farklı bölümlerde olması halinde hücre endekslerinin (sıralamasının) değişmesi verilmektedir.

Bu sorunun giderilmesi için; çözüm alanı farklı bölümlendirildiğinde, timevaryingmixed sınır koşuluna ait olan sınır hücrelerinin aynı işlemci üzerinde tutulması denenmiş ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Bu şekilde bir bölümlendirme için, METIS (Serial Graph Partitioning and Fill-reducing Matrix Ordering) kullanılmasına karar verilmiştir. METIS girdi olarak içerisinde her bir hücrenin komşularının bulunduğu bir grafik dosyası (graph file) alır. Bu grafik dosyasında timevaryingmixed sınır koşuluna komşu hücrelerin hepsi tek bir hücre olarak verilerek, bu hücrelerin ayrı işlemcilere düşme sorunu ortadan kaldırılmıştır. Bu işlem için öncelikle çözüm alanı hücrelerinin komşuluk ve kenar bilgileri okunup, timevaryingmixed sınırına komşu olan bütün hücreler bulunur. Daha sonra timevaryingmixed hücrelerinin komşuları bulunur, eğer komşu sınır veya timevaryingmixed hücresiye atlanır. Hücreler, timevaryingmixed' e komşuluğu olan bütün hücreler 1.' nci hücre olacak şekilde yeniden numaralandırılır ve yeni komşuluk ilişkileri yazılır. Daha sonra eski hücre sıralamasıyla işlemcilere aitlik dosyası yazdırılır ve çözüm alanı bölünür. Bu işlem sonucunda ortaya çıkan bölümlendirme sonuç bölümünde verilecektir.

Sıkıştırılamaz atmosferik Navier-Stoke çözümleri için PimpleFoam adlı çözücü kullanılmıştır. Bu çözücünün en büyük avantajı zaman adımlarının Courant numarasına göre adaptif şekilde çözüm sırasında değişmesi ve bu sayede çözümdeki kararsızlıkları azaltmasıdır. Turbulans modeli olarak duvar fonksiyonlu k-k- ϵ kullanılmıştır.

Diğer yöntemlerin aksine, bu çalışmada, zamana bağımlı enerji tahmin yeteneği elde edilir ve aynı zamanda, gözlemsel veriler bir zorunluluk değildir. Zamana bağlı rüzgar bilgisi elektrik şebekelerinin manipülasyonunda kullanılabilmekle beraber, enerji piyasası için oldukça değerli bir bilgidir.

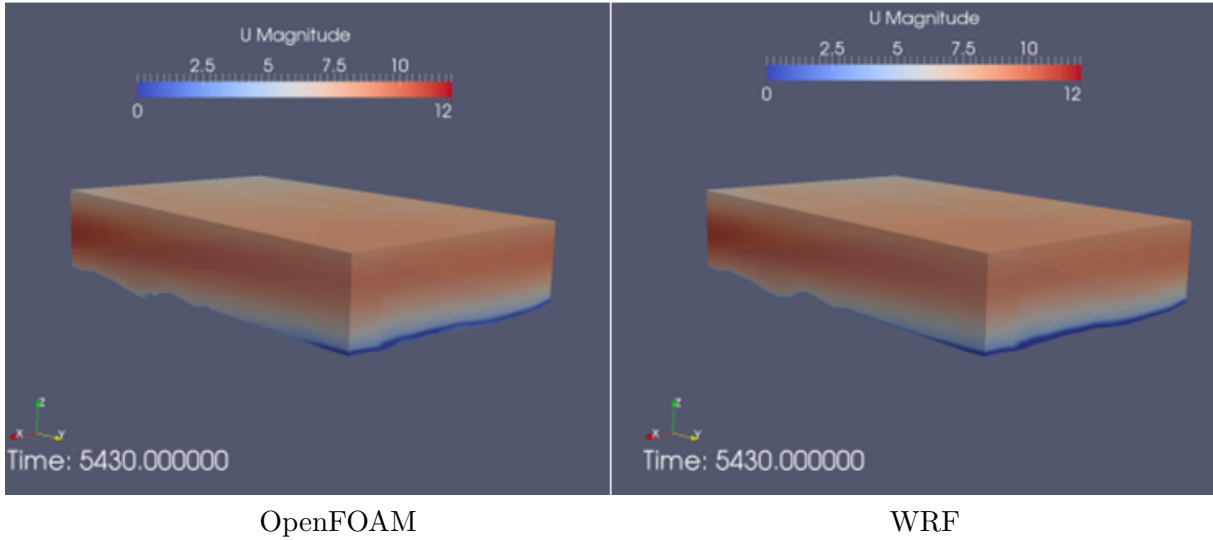
UYGULAMALAR

Zamana bağlı WRF ile akupile OpenFOAM çözümleri yukarıda anlatılan metodoloji kullanılarak esneyen yüksek çözünürlüklü yapıli çözüm ağlarında yapılmıştır. Bölge olarak, bir met-mast 'ın ve rüzgar çiftliğinin bulunduğu Türkiye' deki Mersin-Mut bölgesi seçilmiştir.

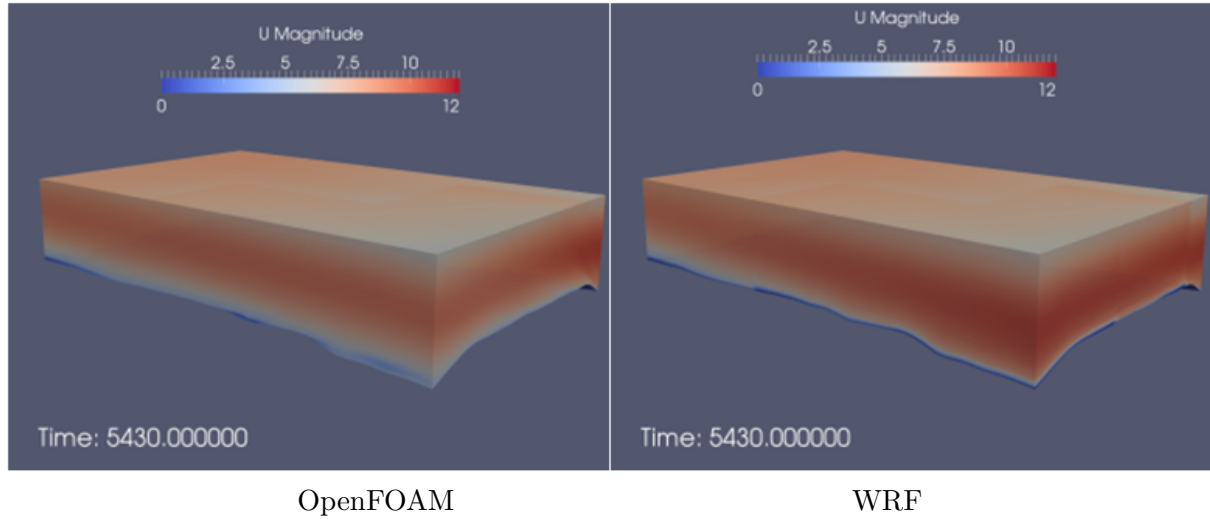
Yuvalanmış WRF çözümleri 1 aylık süre için ana çözüm alanında 3 km, yuvada 1 km yatay çözünürlükte MUT-Mersin bölgesi için yapılmıştır. WRF Ana ve yuvalanmış çözüm alanları, sırasıyla boyut olarak 100x79 (yatay) 50 (dikey), ve 88x67 (yatay) 50 (dikey) dir. WRF çözümleri 5 dakikalık zaman aralıklarıyla OpenFOAM' da kullanılmak üzere saklanmıştır.

OpenFOAM ile yapılan çözümler 04.04.2010 tarihinden itibaren 00:00 dan 24:00 GMT ye kadar yapılmıştır. Zaman adımı olarak 20 Courant numarası kullanılmıştır. Yerden yukarı ilk hücrede y+800 civarından olduğundan duvar fonksiyonlarının kullanılmasına karar verilmiştir. Yapılan turbulanslı çözümlerde geliştirilen yeni sınır koşulu duvar fonksiyonlu standart k-k- ϵ turbulans modeliyle kullanılmıştır.

Geliştirilen sınır koşulunun istenildiği gibi çalıştığının doğrulanması için OpenFOAM çözümleri, WRF hava tahmin verileriyle rasgele bir zaman adımıda karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Şekil 8 ve Şekil 9' de gösterilmektedir.



Şekil 8: OpenFOAM ve WRF çözümleri (çoğunlukla giriş)



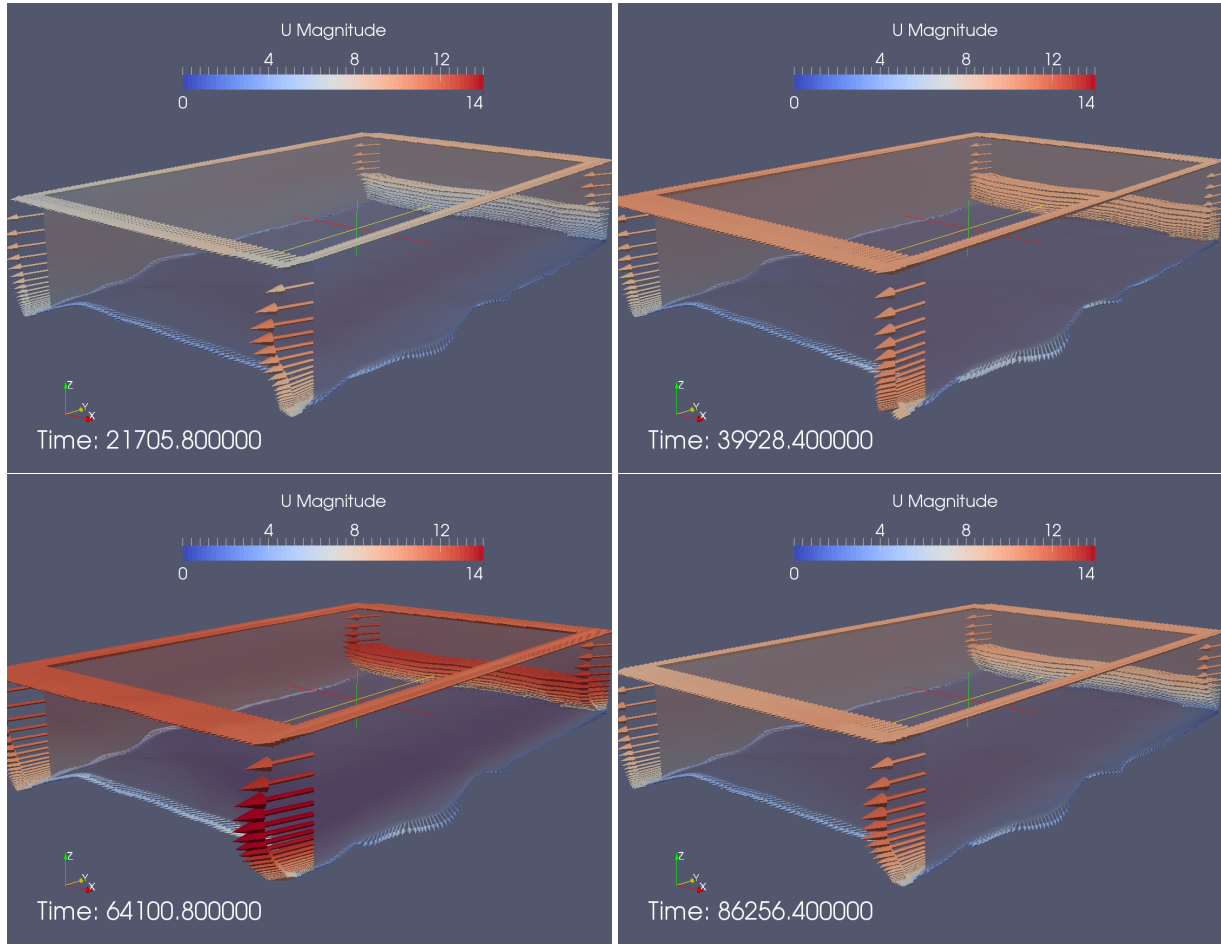
Şekil 9: OpenFOAM ve WRF çözümleri (çoğunlukla çıkış)

Şekil 8 ve Şekil 9' de görüleceği gibi, geliştirilen sınır koşulu beklenildiği gibi davranmaktadır. Çoğunlukla havanın çözüm alanının içerisine girdiği bölgelerde WRF ve OpenFOAM çözümleri tamamen aynı iken; çıkış kısımlarında beklenildiği gibi farklar gözlenmektedir.

Hız giriş çıkış sınırlarındaki hız profilleri 4 farklı zaman adımı Figure 10 'da verilmektedir. Akış alanındaki ve sınır bölgelerdeki değişimler Şekil 10 'da açıkça görülmektedir.

Artan yükseklik ve zamana bağlı rüzgar hızındaki değişikliklerin gözlenmesi amacıyla, yeri takip eden yerden 25 ve 100 metre yukarıda yüzeyler yaratılmış ve çözümler bu yüzeyler üzerine interpolate edilerek Şekil 11' de gösterilmiştir. Yüksek kesimlerde göreceli olarak daha yüksek olan rüzgar hızı, belirli bölgelerde zamana bağlı olarak 3 kat artmaktadır. Ayrıca, yerden yukarı doğru çıkıldığında aynı bölge için rüzgar hızı beklenildiği gibi artmaktadır.

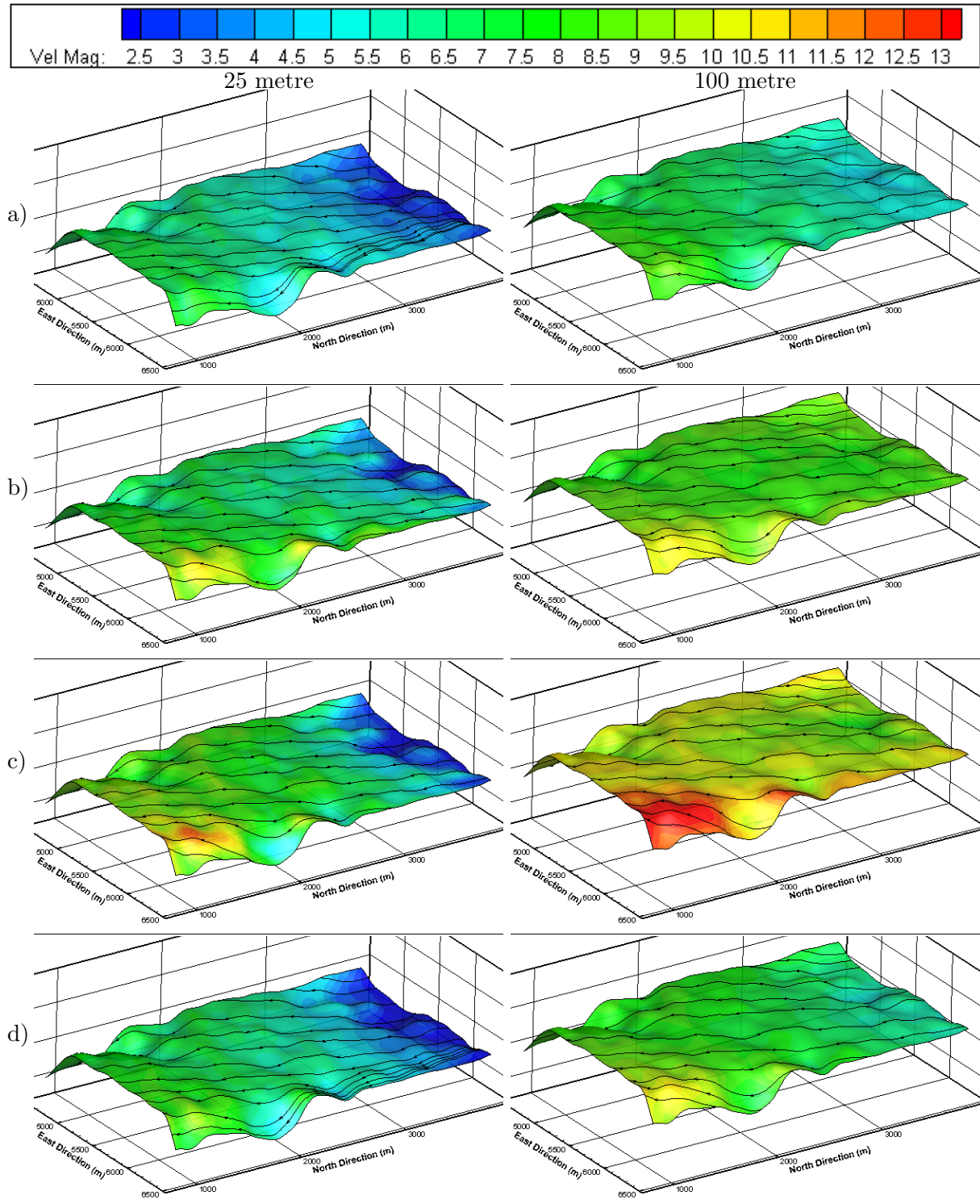
Yeni geliştirilen paralelleştirme yönteminin hesaplama performansına etkilerinin irdelenmesi için OpenFOAM çözüm alanı 2, 4, 8 ve 10 parçaya bölünmüş ve bu bölümlendirme sonucundaki 1



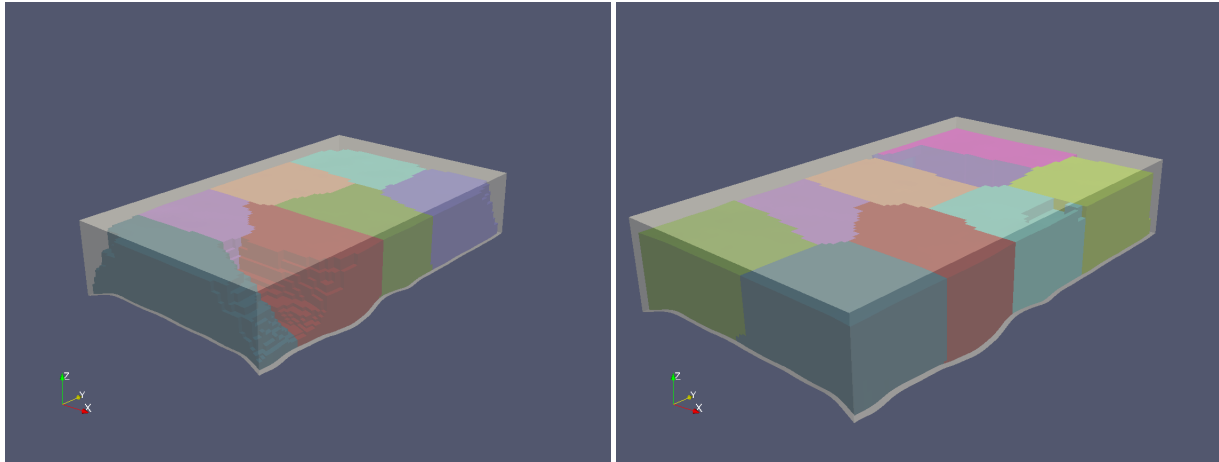
Şekil 10: Zamana bağlı değişen OpenFOAM çözümleri

günlük çözüm süreleri karşılaştırılmıştır. Örnek 8 ve 10 parça için örnek bölümlendirmeler Şekil 12' de verilmektedir. Şekil 12' de her farklı renk ayrı bir çekirdeğe ait bölümü göstermekte olup açık gri renk timevaryingmixed sınır koşullarını içeren bölüm için kullanılmıştır. Bu çözüm ağı bölümlendirilirken, bütün timevaryingmixed sınır koşuluna komşu olan 13946 hücrelerinin bir bölüme girebilecek hücre sayısını sınırlamasından ötürü, 10 bölümden fazla kullanılmamasına karar verilmiştir. Çözüm alanı büyütüldüğünde anlatılan paralelleştirme yönteminin daha etkili olması beklenmektedir. 24 saatlik atmosferik akış çözümleri 2-10 arasında değişen sayıda çekirdek (core) kullanılarak tekrarlanmış ve işlem sürelerine dayalı paralel işlemlerdeki hızlanma eğrileri Şekil 12' de verilmiştir. Hesaplamalar, RUZGEM bünyesinde bulunan yüksek başarımla hesaplama laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan uç birimlerde, 4 adet AMD Opteron 6276 2.3 GHz CPU, 16 çekirdek ve çekirdek başına 4 GB RAM bulunmaktadır.

1 günlük seri çözümler, 20 Courant sayısında yaklaşık 60 saat sürerken, bu süre 8 çekirdek kullanıldığında 7.5 saatin altına düşürülmüştür. Courant sayısı artırılarak bu süre daha da düşürülebilir. Şekil 13' de görülebileceği gibi 10 çekirdek kullanıldığında hızlanma miktarı 8 çekirdekten daha azdır. Bunun sebebinin 2' nin kuvveti olmayan çekirdek sayısı kullanımı olduğu ve işlemlerin yapıldığı bilgisayar kümesinin mimarisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 11: a) ≈ 6 . b) ≈ 12 . c) ≈ 18 . d) ≈ 24 . saatlerde yeri takip eden 25 ve 100 metre yukarıdaki kesitlerde hız dağılımları ve vektörleri



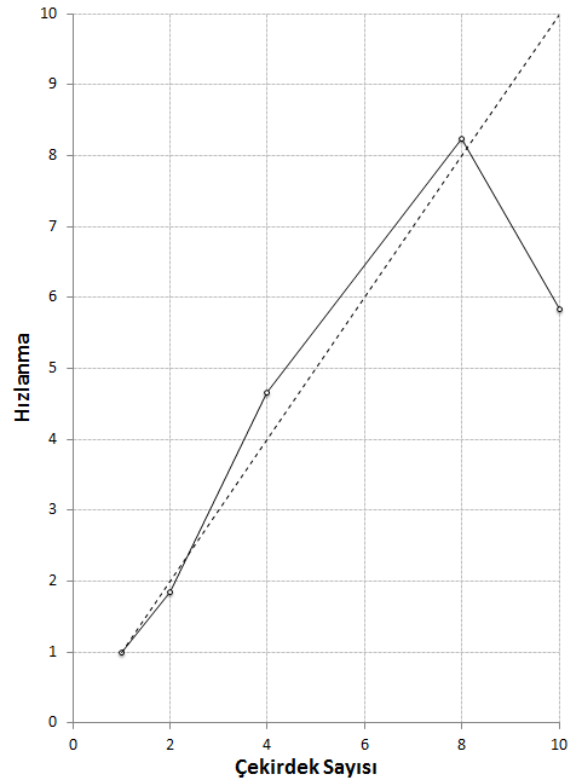
Şekil 12: OpenFOAM çözüm alanının bölümlendirilmesi ((sol 8) (sağ 10) parça)

SONUÇ

Bu çalışmada, açık kaynaklı Navier-Stokes tabanlı akış çözücü OpenFOAM ile orta ölçekli (meso-scale) hava tahminlerinde kullanılan WRF yazılımı akuple edilerek yüksek çözünürlüklü, mikro ölçekli (micro-scale) atmosferik akış çözüm yöntemleri geliştirilmiştir.

Geliştirilen sınır koşulu OpenFOAM' a eklenmiş, bu sınır koşulu için paralel hesaplama yetisi kazanılmıştır. Çözüm süreleri, verilen çözüm alanı için 8 işlemci kullanıldığında 1/8' den daha fazla oranda düşürülmüş, böylece günlük tahmin yapma yetisi kazanılmıştır. Diğer yöntemlerin aksine, bu çalışmada, zamana bağımlı enerji tahmin yeteneği elde edilmiş ve aynı zamanda, gözlemsel veriler bir zorunluluk olmaktan kalkmıştır. Zamana bağlı rüzgar bilgisi elektrik şebekelerinin manipülasyonunda kullanılabilmekle beraber, enerji piyasası için oldukça değerli bir bilgidir.

Geliştirilen akuple çözüm yöntemi mikro ölçekli rüzgar enerji potansiyelinin belirlenmesinde, rüzgar türbinleri için yer seçiminde (micro-siting) ve rüzgar türbinlerinin ileriye dönük, kısa süreli (günlük/haftalık) enerji üretim tahminlerinin elde edilebilmesinde kullanılabilecektir.



Şekil 13: Paralel İşlem Hızlanma eğrisi

TEŞEKKÜR

Bu çalışma "Orta (Meso) Ölçekli Hava Tahmini Yazılımlarıyla Akuplu Edilmiş Mikro Ölçekli Modelleme" adlı 215M385 nolu proje kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmektedir.

Kaynaklar

- Botta G., Castagna R., Borghetti M. ve Mantegna D., 1992. *Wind analysis on complex terrain - The case of Acqua Spruzza*. Riso National Laboratory, (Denmark, Roskilde)
- Bowen Anthony J. ve Mortensen Niels G., 2004. *WAsP prediction errors due to site orography*. Riso National Laboratory, (Denmark, Roskilde)
- Bowen Anthony J. ve Saba T., 1995. *The evaluation of software for wind turbine siting in hilly terrain*. 9th International Conference on Wind Engineering, India
- Damiani R., Cochran B., Orwig K. ve Peterka J., 2008. *Complex Terrain: A Valid Wind Option?*. American Wind Energy Association
- Derickson R.G. ve Peterka J.A., 2004. *Development of a Powerful Hybrid Tool for Evaluating Wind Power in Complex Terrain: Atmospheric Numerical Models and Wind Tunnels*. American Institute of Aeronautics and Astronautics
- Lindley D., Musgrove P., Warren J. ve Hoskin R., 1993. *Operating experience from four UK wind farms*. 15th BWEA Annual Wind Energy Conference, (York, UK), p 41-45
- www.openfoam.org/features OpenCFD Ltd. last accessed: 08.04.2016
- Reid S.J., 1995. *Modelling of channelled winds*. BWEA Conference, (Warwick, UK), pp 391-6
- Sempreviva A.M. , Troen I. ve Lavagnini A. 1986. *Modelling of wind power potential in Sardinia*. European Wind Energy Association Conference and Exhibition, (Rome Italy), pp 391-6
- Skamarock William C., Klemp Joseph B., Dudhia Jimmy, Gill David O., Barker Dale M., Duda Michael G., Huang Xiang-Yu, Wang Wei ve Powers Jordan G., 2008. *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*. National Center for Atmospheric Research, (Boulder, Colorado, USA)
- Zajackowski Frank J., Haupt Sue Ellen ve Schmehl Kerrie J., 2011. *A preliminary study of assimilating numerical weather prediction data into computational fluid dynamics models for wind prediction*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 99 pp 320-329