

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**RÜZGAR ÇİFTLİKLERİNİN METEOROLOJİK PARAMETRELER
ÜZERİNDEKİ ETKİSİ : MODEL PERSPEKTİFİNDEN İNCELEME**

DOKTORA TEZİ

Tarık KAYTANCI

Meteoroloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Atmosfer Bilimleri Programı

OCAK 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**RÜZGAR ÇİFTLİKLERİNİN METEOROLOJİK PARAMETRELER
ÜZERİNDEKİ ETKİSİ : MODEL PERSPEKTİFİNDEN İNCELEME**

DOKTORA TEZİ

**Tarık KAYTANCI
(511162012)**

Meteoroloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Atmosfer Bilimleri Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şükran Sibel MENTEŞ

OCAK 2024

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**THE IMPACT OF WIND FARMS ON THE METEOROLOGICAL
PARAMETERS : THE INVESTIGATION FROM THE MODEL PERSPECTIVE**

PhD THESIS

**Tarık KAYTANCI
(511162012)**

Department of Meteorological Engineering

Atmospheric Sciences Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Şükran Sibel MENTEŞ

JANUARY 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 511162012 numaralı Doktora Öğrencisi Tarık KAYTANCI, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “RÜZGAR ÇİFTLİKLERİNİN METEOROLOJİK PARAMETRELER ÜZERİNDEKİ ETKİSİ : MODEL PERSPEKTİFİNDEN İNCELEME” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Sükran Sibel MENTEŞ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Yurdanur ÜNAL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Zafer ASLAN
İstanbul Aydın Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet Duran ŞAHİN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Veli YAVUZ
Samsun Üniversitesi

Teslim Tarihi : 27 Kasım 2023
Savunma Tarihi : 26 Ocak 2024





Aileme,



ÖNSÖZ

Tüm tez sürecinde teknik ve mental açıdan her daim motivasyon ve destek sağlayan tez danışmanım Prof. Dr. Şükran Sibel MENTEŞ'e teşekkür etmek isterim.

Ek olarak, tüm tez ilerleme rapor sunum sürecinde sağladıkları düşünsel ve bilimsel destek nedeniyle tez izleme komitesinde bulunan İstanbul Teknik Üniversitesi Meteoroloji Mühendisliği'nden öğretim üyesi Prof. Dr. Yurdanur ÜNAL ve İstanbul Aydın Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği'nden öğretim üyesi Prof. Dr. Zafer ASLAN'a teşekkür etmek isterim. Ayrıca, doktoram süresince başarı burs desteği sağlayan TÜBİTAK ve YÖK kurumlarına da teşekkür etmek isterim.

Son olarak, beni, tüm hayatım boyunca aldığım kararlarda desteklerini esirgemeyen aileme teşekkür etmek isterim

Kasım 2023

Tarık KAYTANCI
(Yüksek Meteoroloji Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxv
SUMMARY	xxix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Genel Giriş ve Motivasyon	1
1.2 Rüzgar Çiftliklerinin Meteorolojik Parametreler Üzerindeki Etkisi: Literatür Araştırması	2
1.3 Mezo Ölçek Rüzgar Çiftlik Parametrizasyonlarının İncelemesi.....	6
1.4 Tezin Amacı	10
2. YÖNTEM VE VERİ	13
2.1 Mezo Ölçek WRF Modeli	13
2.2 Fitch WFP Şeması	15
2.3 Reanaliz Verisi	18
3. MYNN ATMOSFERİK SINIR TABAKA PARAMETERİZASYONUNDA YAPILAN DEĞİŞİKLİKLER ALTINDA RÜZGAR ÇİFTLİK ETKİSİ BENZETİMİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ	19
3.1 Giriş	19
3.2 Veri ve Yöntem	21
3.2.1 Çalışma bölgesi, ölçüm bilgisi ve seçilmiş zaman periyodu	21
3.2.2 Model simülasyonları.....	22
3.2.3 MYNN PBL şeması	25
3.2.4 Hipotetik rüzgar çiftlik tasarımı	27
3.3 Sonuçlar ve Tartışma.....	28
3.3.1 Model simülasyonlarında uygun yatay ve düşey çözünürlüğün berlirlenmesi	28
3.3.2 Ana simülasyonlarda WRF modelinin çevre akış öngörüsündeki başarımı.....	30
3.3.3 Rüzgar çiftliğinin TKE üzerindeki etkisi	31
3.3.4 Rüzgar çiftliğinin rüzgar şiddeti üzerindeki etkisi.....	37
3.3.5 Rüzgar çiftliğinin hava sıcaklığı üzerindeki etkisi.....	39
3.3.6 Rüzgar çiftliğinin atmosferik sınır tabaka yüksekliği üzerindeki etkisi....	43
4. RÜZGAR ÇİFTLİK PARAMETERİZASYONUNDA TÜRBÜLANSLI KİNETİK ENERJİ KAYNAĞI HESAPLAMASINDA YENİ YAKLAŞIM .	47
4.1 Giriş	47
4.2 Bir Boyutlu Momentum Teorisinin WFP C_{TKE} Hesabında Uygulanması.....	49

4.3 Sonuç ve Tartışma	50
5. ARAZİ KULLANIMI DEĞİŞİMİNDE RÜZGAR ÇİFTLİĞİ ETKİSİNDEKİ VE GÜÇ ÜRETİMİNDEKİ DEĞİŞİMİN İNCELENMESİ.....	63
5.1 Giriş	63
5.2 Veri ve Yöntem	64
5.2.1 Çalışma bölgesi, ölçüm bilgisi, ve seçilmiş zaman periyodu.....	64
5.2.2 Hipotetik rüzgar çiftliği tasarımı	65
5.2.3 WRF model simülasyonları.....	65
5.3 Sonuç ve Tartışma	69
5.3.1 ORG simülasyonu ile model öngörü başarımının değerlendirilmesi	69
5.3.2 Seçili yama alanında arazi kullanımı değişikliği sonucunda rüzgar çiftliği iz etkisinin seçili meteorolojik parametreler üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi.....	70
5.3.3 Seçili yama alanında arazi kullanımı değişikliği sonucunda rüzgar çiftliğinde güç üretiminin değerlendirilmesi.....	79
6. RÜZGAR ÇİFTLİKLERİNİN KAR YAĞIŞI VE KAR KALINLIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ: 24-25 OCAK 2022 İSTANBUL KAR YAĞIŞI ÖRNEĞİ.....	83
6.1 Giriş	83
6.2 21-25 Ocak 2022 Tarihleri Arasında İstanbul ve Çevresinde Etkili Olan Yağış Sisteminin Sinoptik Olarak Değerlendirilmesi.....	85
6.3 Veri ve Yöntem	87
6.3.1 Çalışma bölgesi, ölçüm bilgisi, ve seçilmiş zaman periyodu.....	87
6.3.2 Model simülasyonları.....	87
6.4 Sonuçlar.....	90
6.4.1 Modelin çevre koşulları öngörüsündeki başarımı	90
6.4.2 23-25 Ocak periyodundaki çevre koşullarının değerlendirilmesi	92
6.4.3 Rüzgar çiftliğinin kar yağışı, kar kalınlığı ve ele alınan diğer meteorolojik parametreler üzerindeki etkisini değerlendirmek üzere rüzgar çiftlik konumu ve çiftlikteki türbin boyutlarının belirlenmesi	95
6.4.4 Açık deniz rüzgar çiftliğinin kar yağışı, kar kalınlığı ve diğer seçili meteorolojik parametreler üzerindeki etkisi	95
7. GENEL SONUÇ VE ÖNERİLER.....	101
7.1 Bölüm 3'e Ait Genel Sonuç ve Öneriler	101
7.2 Bölüm 4'e Ait Genel Sonuç ve Öneriler	105
7.3 Bölüm 5'e Ait Genel Sonuç ve Öneriler	107
7.4 Bölüm 6'ya Ait Genel Sonuç ve Öneriler	108
KAYNAKLAR.....	111
EKLER.....	121
ÖZGEÇMİŞ.....	137

KISALTMALAR

1DMOM	: Bir Boyutlu Momentum Teorisi
DBF	: Yaprak Döken Geniş Yapraklı Orman (Deciduous Broadleaf Forest)
DC	: Kuru Tarım Arazisi (Dryland Cropland)
EDMF	: Eddy diffusivity / Mass-Flux
ERA-5	: ECMWF Reanaliz v5
KE	: Kinetik Enerji
LES	: Büyük Girdap Simülasyonu (Large Eddy Simulation)
MAE	: Mutlak Ortalama Hata
MBE	: Ortalama Yanlılık Hata
MYNN	: Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino
NW	: Kuzey Batı
ORGMYNN	: Orijinal MYNN
PBL	: Atmosferik Sınır Tabaka (Planetary Boundary Layer)
PBLH	: Atmosferik Sınır Tabaka Yüksekliği
RMSE	: Kök Ortalama Kare Hata
SW	: Güney Batı
TKE	: Türbülanslı Kinetik Enerji
UTC	: Coordinated Universal Time
WFP	: Rüzgar Çiftlik Parameterizasyonu (Wind Farm Parameterization)
WPS	: WRF Preprocessing System
WRF	: Weather Research and Forecasting



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

- Çizelge 3.1 :** Rüzgar şiddeti (V) ve Yönüne (D) ait ortalama ve standart sapma değerleri..... 22
- Çizelge 3.2 :** Ana simülasyonların (siyah punto) ve ek simülasyonları (kırmızı punto) açıklamaları. Kırmızı punto ile açıklanan simülasyonlar ana simülasyonlara dahil değildir ve simüle edilen rüzgar çiftlik etkilerinde, TKE adveksiyonu kullanımında WFP bileşenlerinin katkılarını göstermek üzere gerçekleştirilmiştir. Çizelgedeki ikinci sütun MYNN PBL şeması tercihini (varsayılan MYNN şeması ve EDMF şeması) temsil etmektedir. Üçüncü sütun karışım uzunluğu yaklaşımı tercihini, dördüncü sütun TKE adveksiyonunun kullanılıp kullanılmadığını ve kullanımında ise düzeltilmiş (D) ya da düzeltilmemiş ($\sim D$) versiyonunun tercih edildiğini temsil etmektedir. Beşinci sütun C_{TKE} için kullanılan düzeltme katsayısını, altıncı ve yedinci sütun WFP bileşenlerinin açık veya kapalı olma durumlarını temsil etmektedir... 27
- Çizelge 5.1 :** Çalışma periyoduna (20-27 Ağustos 2015) ait rüzgar ölçüm istatistikleri verilmektedir. Tabloda V_{ort} , S_V , D_{ort} , S_D , F_{esme} , Sek_{esme} sütunları sırasıyla günlük ortalama rüzgar şiddeti, rüzgar şiddetindeki standart sapma, ortalama rüzgar yönü, rüzgar yönündeki standart sapma, esme frekansı ve esme frekansının en yüksek olduğu rüzgar yön sektörü (16 sektör için)..... 65
- Çizelge 5.2 :** İç model alanı için WRF çıktısına ait USGS arazi kullanım indeksi ve ona karşılık gelen arazi kullanım bilgisi. 68
- Çizelge 6.1 :** Meteorolojik ölçüm istasyon bilgileri. 87
- Çizelge 6.2 :** Kara yüzey şeması Noah (Noah) ve Noah-MP (NMP) kullanımı ile WRF modelinin seçili meteoroloji istasyon lokasyonlarında çevre koşullarını (Kar kalınlığı, rüzgar şiddeti, hava sıcaklığı, deniz seviyesi basıncı) simüle etmedeki başarımına ait ortalama mutlak hata (MAE) ve ortalama yanlılık hata (MBE) sonuç tablosu. 92



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

- Şekil 1.1 :** Danimarka’da bulunan Horns Rev açık deniz rüzgar çiftliğindeki rüzgar türbin izlerinin etkileşimi. Fotoğraf Cristian Steiness tarafından çekilmiştir..... 2
- Şekil 2.1 :** a) Bir yatay model hücresinde rüzgar türbinlerinin konumları ve n_t ile ifade edilen ilgili hücredeki türbin yoğunluğu, b) model düşey seviyeleri ile türbin rotorunun kesişim alanı. Şekil direkt olarak Fischereit ve diğ.’nin [73] çalışmasından alınmıştır.. 16
- Şekil 2.2 :** WRF-WFP modelinde TKE adveksiyonu kullanımında (namelist.input dosyasında bl_mynn_tkeadvect=true olarak ayarlanır) QKE hesaplanma sürecinin akış çizgesi: a) problemin mevcut olduğu durum, b) problemin düzeltildiği durum. Bu akış çizgesi direkt Archer ve diğ.’nin [81] çalışmasından alınmıştır ve çizgedeki ilgili kutucuklar Türkçe’ye tercüme edilmiştir..... 17
- Şekil 3.1 :** En iç model alanına ait yükselti haritası (a), siyah nokta gösterimi ile rüzgar çiftliğindeki rüzgar türbinlerinin düzeni (b) ve yuvalanmış model alanlarının yapısı (c). Yuvalanmış model alanlarından (c) kırmızı ile gösterilen model alanı 1 km yatay çözünürlüklü en iç model alanını temsil etmektedir. Rüzgar türbinlerinin düzenini gösteren şekilde (b) Δx , ITS ve Δh ve Δd sırasıyla ilgili model alanın yatay çözünürlüğü, türbinler arası mesafeyi, ölçüm lokasyonu (siyah yıldız) ile ona en yakın model düğüm noktası lokasyonu (kırmızı yıldız) arasındaki rakım farkını ve bunlar arasındaki yatay mesafeyi temsil etmektedir.. 24
- Şekil 3.2 :** İki farklı düşey seviye yapısının gösterimi. Üst ve alt yatay çizgiler sırasıyla bu bölümde kullanılan Siemens SWT3.6-120 kara tipi rüzgar türbin modelinin rotor tabakasının üst ve alt yükseklikleridir. Yatay eksendeki Δz düşey çözünürlüğü temsil etmektedir ve yerden yaklaşık 400 m’ye kadar düşey çözünürlük soldaki düşey yapı için düşey 12 m ve sağdaki düşey yapı için yaklaşık 35 m’dir. Sonraki yüksekliklerde düşey çözünürlük kademeli olarak azalmaktadır..... 26
- Şekil 3.3 :** Yatay ve düşey çözünürlük değişiminde rüzgar çiftlik iz etkisindeki değişimin gösterimi: a), e), i) ve m) 1 km yatay çözünürlüklü baz simülasyonunu; b), f), j) ve n) 3 km yatay çözünürlüklü DX3 simülasyonunu; c), g), k) ve o) 9 km yatay çözünürlüklü DX9 simülasyonunu; ve d), h), l) ve p) ise 35 m düşey çözünürlüklü DZ35 simülasyonunu temsil etmektedir. Diğer simülasyonlar 12 m düşey çözünürlüğe sahiptir. a)-d), e)-h), i)-l) ve m)-p) sırasıyla rüzgar çiftlik etkisindeki türbin gövde yüksekliğindeki (90 m) rüzgar şiddeti farkını (ms^{-1}), 90 m’deki TKE farkını (m^2s^{-2}), yere yakın (2 m) hava sıcaklığı farkını ve atmosferik sınır tabaka yükseklik farkını (m) temsil etmektedir..... 29
- Şekil 3.4 :** Rüzgar şiddeti a) ve yönü b) için model simülasyon başarımlı ölçüsü için RMSE sonuçları. 31

- Şekil 3.5 :** Rüzgar şiddeti (a-e, 81 m için) ve yönü (f-j, 78 için) için simülasyon ile ölçüm verisi kıyaslaması. Mavi çizgi model simülasyonunu, kırmızı çizgi ise ölçümü temsil etmektedir. Gri alanlar rüzgar şiddeti ve yönü için 18 Temmuz kıyaslamasını temsil etmektedir. Düşey düz çizgiler her gün için gün doğumunu kesikli düşey çizgiler ise her gün için gün batımını temsil etmektedir..... **32**
- Şekil 3.6 :** Türbin gövde yüksekliğindeki (90 m) rüzgar şiddeti farkı a) ve yere yakın (2 m) hava sıcaklığı farkına b) ait gece ve gündüz için model alanındaki toplam etki alanı ($\times 10 \text{ km}^2$)..... **33**
- Şekil 3.7 :** Rüzgar çiftliğinin türbin gövde yüksekliğindeki TKE üzerindeki etkisi. Simülasyonlara (a-g) ait detaylar Çizelge 3.2’de verilmektedir. Çizimlerde rüzgar vektörlerinin gösterim çözünürlüğü (wind barb) 27 km’dir. Kalın siyah çizgi kıyı şeridinin temsil etmektedir. Siyah kare kutu rüzgar çiftliğini, üzerinden geçen kesikli ince çizgi ise düşey kesit hattını temsil etmektedir..... **35**
- Şekil 3.8 :** Hem yatay kesit gösterimi (a,b,e,f,i,j,m,n) hem de düşey kesit gösterimi (c,d,g,h,k,l) ile WFP MOM ve TKE bileşenlerinin sınır tabaka değişkenlerinden TKE, rüzgar şiddeti (V), hava sıcaklığı (T) ve PBL yüksekliği (PBLH) üzerindeki etkisi. Sol panel: Çizimlerde gösterim stratejisi olarak rüzgar vektörlerinin (wind barbs) gösterim çözünürlüğü ilgili simülasyonun yatay çözünürlüğünden bağımsız olarak 27 km olarak belirlenmiştir. Kalın siyah çizgi kıyı şeridinin temsil etmektedir. Siyah kare kutu rüzgar çiftliğini, üzerinden geçen kesikli ince çizgi ise düşey kesit hattını temsil etmektedir. Sağ panel: Siyah dörtgen kutu rüzgar çiftliğini, ortasından geçen yatay kesikli siyah çizgi türbin gövde yüksekliğini temsil etmektedir.. **36**
- Şekil 3.9 :** Düşey kesit gösterimi ile rüzgar çiftliğinin TKE üzerindeki etkisi. Siyah dörtgen kutu rüzgar çiftliğini, ortasından geçen kesikli çizgi ise türbin gövde yükseliğini temsil etmektedir. **38**
- Şekil 3.10 :** Şekil 3.7 ile aynı açıklamaya sahiptir ancak türbin gövde yüksekliğindeki rüzgar şiddeti farkı içindir.. **40**
- Şekil 3.11 :** Şekil 3.9 ile aynı açıklamaya sahiptir ancak rüzgar şiddeti farkı içindir..... **41**
- Şekil 3.12 :** Şekil 3.7 ile aynı açıklamaya sahiptir ancak yere yakın hava sıcaklığı içindir..... **43**
- Şekil 3.13 :** Şekil 3.9 ile aynı açıklamaya sahiptir ancak hava sıcaklığı farkı içindir..... **44**
- Şekil 3.14 :** Şekil 3.7 ile aynı açıklamaya sahiptir ancak atmosferik sınır tabaka yüksekliği farkı içindir.. **45**
- Şekil 4.1 :** Bu çalışmada kullanılan Siemens SWT3.6-120 kara tipi rüzgar türbin modeline ait güç (kW) ve itki (C_T) /güç katsayısı (C_P) eğrisi gösterilmektedir; b) C_{TKE} katsayısı eğrisinin WFP Fitch şemasındaki orijinal (ORG), düzeltilmiş (ARCHER), değiştirilmiş (1DMOM) versiyonları gösterilmektedir..... **51**

- Şekil 4.2 :** Rüzgar çiftliği hücrelerinde ve bir düğüm noktası rüzgar üstünde ve altında geceye ait rüzgar şiddeti farkının (ms^{-1}) zamansal ortalamasının düşey kesit gösterimi. Düşey kesikli çizgiler rüzgar çiftliğinin rüzgar üstü ve rüzgar altı sınırlarını göstermektedir. Yatay kesikli çizgiler yukarıdan aşağı doğru sırasıyla rüzgar çiftliği rotor tabakasının üst yüksekliğini, türbin gövde yüksekliğini ve alt yüksekliğini temsil etmektedir. Ele alınan düşey kesit Bölüm 3'te ele alınan düşey kesittir. Gece için zamansal ortalama TSİ (UTC+3) 22:00-03:00 zaman aralığını kapsamaktadır 52
- Şekil 4.3 :** Şekil 4.2 ile aynı açıklamaya sahiptir ancak TKE farkı (m^2s^{-2}) içindir.... 54
- Şekil 4.4 :** Şekil 4.2 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak hava sıcaklığı farkı ($^{\circ}\text{C}$) içindir. ... 55
- Şekil 4.5 :** Rüzgar çiftliği etkisinde türbin gövde yüksekliğindeki rüzgar şiddetinde a) ve TKE'de b) ve yüzeye yakın hava sıcaklığında rüzgar çiftliği hücrelerinde oluşan değişimin gündüz (kırmızı) ve gece (mavi) için zamansal ortalamalarının kutu diyagram gösterimi. Gündüz ve gece için zaman aralıkları TSİ (UTC+3) sırasıyla 10:00-15:00 ve 22:00-03:00'dır..... 56
- Şekil 4.6 :** Rüzgar çiftliği etkisinde rüzgar şiddetinde (a, d), TKE'de (b, e) ve hava sıcaklığında (c, f) rüzgar çiftliği hücrelerinde oluşan değişimin gündüz (a-c) ve gece (d-f) için zamansal-zamansal ortalamalarının düşey profilinin gösterimi. Gündüz ve gece çizimleri TSİ (UTC+3) sırasıyla 10:00-15:00 ve 22:00-03:00 zaman aralıklarını kapsamaktadır. Çizimlerdeki siyah, gri, mavi ve kırmızı düz çizgiler sırasıyla ADV, ADVBF, ADVBF_CCTKE ve ADVBF_MCTKE simülasyonlarını temsil etmektedir. Yatay kesikli çizgiler yukarıdan aşağı doğru sırasıyla rüzgar çiftliği rotor tabakasının üst yüksekliğini, türbin gövde yüksekliğini ve alt yüksekliğini temsil etmektedir. Düşey kesikli çizgi ise pozitif ve negatif farkları ayıran sınırı temsil etmektedir..... 60
- Şekil 5.1 :** Simülasyonlar için oluşturulan model yuvalama alanları (c) ve iç model alanında arazi kullanımı dağılımı (a-b). Yuvalama alanlarından kırmızı çizgi ile gösterilen model alanı rüzgar çiftliği simülasyonlarının gerçekleştirildiği iç model alanıdır. Bu alanı temsil eden (a-b) arazi kullanımı dağılımında verilen renk spektrumundaki nümerik değerler wrf çıktısındaki arazi kullanımı indekslerine karşılık gelmektedir ve bu indekslere ait arazi kullanım bilgisi Çizelge 5.2'de verilmektedir. İç model alanında beyaz alan (b) arazi kullanımı değişikliğinin yapıldığı alanı temsil ederken merkezindeki küçük kare alan ise rüzgar çiftliğini temsil etmektedir..... 67
- Şekil 5.2 :** Düşey seviyeler. Yatay kesikli çizgiler rotor tabakasının üst ve alt sınırlarını temsil etmektedir..... 69
- Şekil 5.3 :** Yama alanında (siyah kesikli çizgili kare alan) arazi örtüsünün tamamen kuru tarım arazisine (a, c, e) ve tamamen yaprak döken geniş yapraklı ormana (b, d, f) dönüştürülmesi ile rüzgar çiftliğinin türbin gövde yüksekliğinde (90 m) rüzgar şiddeti (a, b) ve TKE (c, d) ve yere yakın (2 m) hava sıcaklığı (e, f) üzerindeki etkisinin gösterimi. Yama alanındaki siyah düz çizgili kare alan rüzgar çiftliğini temsil etmektedir. Rüzgar dikenini (wind barb) model alanındaki gösterim çözünürlüğü 27 km'dir.. 72

- Şekil 5.4 :** Yama alanında (siyah kesik çizgili kare alan) arazi örtüsünün tamamen kuru tarım arazisinden (DC) tamamen yaprak döken geniş yapraklı ormana (DBF) geçişte rüzgar çiftliğinin türbin gövde yüksekliğinde (90 m) rüzgar şiddeti ve TKE, ve yere yakın (2 m) hava sıcaklığı üzerindeki etkisinin değişiminin gösterimi. Yama alanındaki siyah düz çizgili kare alan rüzgar çiftliğini temsil etmektedir. 73
- Şekil 5.5 :** Yama alanında arazi örtüsünün tamamen kuru tarım arazisine (DC) ve tamamen yaprak döken geniş yapraklı ormana (DBF) dönüştürülmesinde rüzgar çiftliğinin rüzgar şiddeti a), TKE b) ve hava sıcaklığı c) üzerindeki etkisinin rüzgar çiftliği hücrelerindeki uzamsal-zamansal ortalamasının düşey profil gösterimi..... 76
- Şekil 5.6 :** Yama alanında arazi örtüsünün tamamen kuru tarım arazisine (DC) ve tamamen yaprak döken geniş yapraklı ormana (DBF) dönüştürülmesinde rüzgar çiftliğinin türbin gövde yüksekliğinde (90 m) rüzgar şiddeti ve TKE, ve yere yakın (2 m) hava sıcaklığı üzerindeki etkisinin rüzgar çiftliği hücrelerinde gündüz ve gece boyunca uzamsal ortalamalarının kutu diyagramı gösterimi. 20-27 Ağustos 2015 tarihlerinde gün doğum 06:30 ve gün batımı 20:00 olarak ele alınmıştır. Uzamsal ortalamaların gündüz ve gece ayrımında, gündüz verisi gün doğumu ile gün batımı arasındaki zaman dilimini kapsamakta iken gece verisi gün batımı ile gün doğumu arasındaki zaman dilimini kapsamaktadır. Her yatay dörtlü kutu diyagram gösteriminde dikey siyah çizgi gündüz gece ayrımını yaparken yatay ince siyah çizgi ilgili parametreye ait negatif ve pozitif farkların ayrımını göstermektedir. Kutu diyagramı içinde yatay ince çizgi ve siyah nokta sırasıyla medyan ve ortalama değerleri göstermektedir. Ortalama değer aynı zamanda uzamsal-zamansal ortalama tekabül etmektedir. Diyagramın üst ve alt sınırları küçükten büyüğe sıralanan verinin ilk çeyreklik ve üçüncü çeyreklik değerini temsil etmektedir. Diyagramı takip eden kuyrukların uzunluğu kutu açıklığının 1.5 katıdır. Dışında kalan kırmızı artı sembolleri aykırı değerleri temsil etmektedir..... 78
- Şekil 5.7 :** Yama alanında arazi örtüsünün tamamen kuru tarım arazisinden (DC) tamamen yaprak döken geniş yapraklı ormana (DBF) geçişte rüzgar çiftliğinin türbin gövde yüksekliğinde (90 m) rüzgar şiddeti ve TKE, ve yere yakın (2 m) hava sıcaklığı üzerindeki etkisinin yüzdesel değişiminin bar çizim gösterimi. Bar çizim gösterimi gündüz ve gece için DC ve DBF arasındaki rüzgar çiftlik hücrelerindeki uzamsal ortalamaların dağılımında medyan değerlerindeki farkların DC'ye göre yüzdesel değişimini temsil etmektedir. 20-27 Ağustos 2015 tarihlerinde gün doğum 06:30 ve gün batımı 20:00 olarak ele alınmıştır. Uzamsal ortalamaların gündüz ve gece ayrımında, gündüz verisi gün doğumu ile gün batımı arasındaki zaman dilimini kapsamakta iken gece verisi gün batımı ile gün doğumu arasındaki zaman dilimini kapsamaktadır..... 79
- Şekil 5.8 :** Yama alanında (siyah kesikli çizgili alan) tamamen kuru tarım arazisi (DC) ve tamamen yaprak döken geniş yapraklı orman arazisi (DBF) kullanıldığında rüzgar çiftliğindeki güç üretimlerinin ve kuru tarım arazisinden geniş yapraklı ormana geçişte güç üretimindeki fark (DC – DBF) verilmektedir. Sonuçlar zamansal ortalamaları temsil etmektedir. Yama alanındaki güç üretimi ve güç üretimin farkının gösterildiği renkli alan rüzgar çiftliğini temsil etmektedir. 81

- Şekil 5.9 :** Yama alanının tamamen kuru tarım arazisine (DC) ve tamamen yaprak dökken geniş yapraklı ormana dönüştürülmesi ile gündüz ve gece için rüzgar çiftliği hücrelerindeki güç üretimine ait uzamsal ortalamaların kutu diyagramı ve DC'den DBF'ye geçişte uzamsal ortalama dağılımına ait medyan değerlerindeki yüzdesel değişim .20-27 Ağustos 2015 tarihlerinde gün doğum 06:30 ve gün batımı 20:00 olarak ele alınmıştır. Uzamsal ortalamaların gündüz ve gece ayırımında, gündüz verisi gün doğumu ile gün batımı arasındaki zaman dilimini kapsamakta iken gece verisi gün batımı ile gün doğumu arasındaki zaman dilimini kapsamaktadır..... **82**
- Şekil 6.1 :** Simülasyonlar için oluşturulan model yuvalama alanları a) ve en iç modelde alanına ait rakım haritası b). Yuvalama alanlarından kırmızı ile gösterilen model alanı a) rüzgar çiftlik simülasyonlarının gerçekleştirildiği en iç model alanını temsil etmektedir. En iç model alanına ait yükselti haritasında b) Karadeniz üzerinde bulunan dörtgen alanlar, özellikle kar yağışı / kalınlığı üzerinde en kuvvetli rüzgar çiftliği etkisini elde etmek için uygun rüzgar çiftlik konumunu belirlemek üzere tasarlanan hipotetik açık deniz rüzgar çiftlikleri. Rakım haritasında yer alan “asl” deniz seviyesinden olan rakımı temsil etmektedir..... **89**
- Şekil 6.2 :** Periyot boyunca (23 Ocak (a, d, g, j), 24 Ocak (b, e, h, k) 25 Ocak (c, f, i, l) 2022) WRF modeli ile simüle edilen koşulları: Türbin gövde yüksekliğindeki rüzgar şiddeti (a-c), yere yakın (2 m) hava sıcaklığı (d-f), grid ölçeğinde toplam kar yağışı (g-i), kar kalınlığı (j-l). Kar yağışı ve kalınlığı için kullanılan birimler sırasıyla mm ve cm'dir. Gösterilen sonuçlar UTC saati ile günlük ortalamalardır.. **94**
- Şekil 6.3 :** WRF modeli ile simüle edilen çevre koşullarının (Türbin gövde yüksekliğindeki rüzgar şiddeti (a-c), yere yakın (2 m) hava sıcaklığı (d-f), grid ölçeğinde toplam kar yağışı (g-i), kar kalınlığı (j-l)) periyot ortalaması. Kar yağışı ve kalınlığı için kullanılan birimler sırasıyla mm ve cm'dir.. **96**
- Şekil 6.4 :** İstanbul'un kuzeyine Karadeniz'e kurulan hipotetik rüzgar çiftliğinin periyot boyunca (23-25 Ocak 2022) kar yağışı/kalınlığı ve ele alınan diğer meteorolojik parametreler (türbin gövde yüksekliğindeki rüzgar şiddeti ve yere yakın (2 m) hava sıcaklığı) üzerindeki günlük ortalama etkisinin gösterimi. Çizimdeki vektörler rüzgar akış yönünü temsil etmektedir ve gösterim çözünürlüğü 27 km'dir. Kalın siyah çizgiler İstanbul ve güney Marmara sahil şeridini ve, Karadeniz'deki dörtgen siyah alan da rüzgar çiftliğini temsil etmektedir. Kar yağışı ve kalınlığı için kullanılan birimler sırasıyla mm ve cm'dir..... **98**
- Şekil 6.5 :** İstanbul'un kuzeyine Karadeniz'e kurulan hipotetik rüzgar çiftliğinin kar yağışı/kalınlığı ve ele alınan diğer meteorolojik parametreler (türbin gövde yüksekliğindeki rüzgar şiddeti ve yere yakın (2 m) hava sıcaklığı) üzerindeki etkisinin periyot ortalamasının (23-25 Ocak 2022) gösterimi. Çizimdeki vektörler rüzgar akış yönünü temsil etmektedir ve gösterim çözünürlüğü 27 km'dir. Kalın siyah çizgiler İstanbul ve güney Marmara sahil şeridini ve, Karadeniz'deki dörtgen siyah alan da rüzgar çiftliğini temsil etmektedir. Kar yağışı ve kalınlığı için kullanılan birimler sırasıyla mm ve cm'dir.. **100**
- Şekil A.1 :** Şekil 3.7 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak 17 temmuz gündüz (10:00 – 15:00 TSİ) ortalamasını temsil etmektedir..... **122**

Şekil A.2 :	Şekil 3.7 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak 18 temmuz gündüz (10:00 – 15:00 TSİ) ortalamasını temsil etmektedir.....	122
Şekil A.3 :	Şekil 3.7 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak 18 temmuz gündüz (22:00 – 03:00 TSİ) ortalamasını temsil etmektedir.....	123
Şekil A.4 :	Şekil 3.7 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak 90 m TKE için 17 temmuz gündüz (10:00 – 15:00 TSİ) ortalamasını temsil etmektedir.....	123
Şekil A.5 :	Şekil 3.7 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak 90 m TKE için 18 temmuz gündüz (10:00 – 15:00 TSİ) ortalamasını temsil etmektedir.....	124
Şekil A.6 :	Şekil 3.7 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak 90 m TKE için 18 temmuz gündüz (22:00 – 03:00 TSİ) ortalamasını temsil etmektedir.....	124
Şekil A.7 :	Şekil 3.7 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak 2 m hava sıcaklığı için 17 temmuz gündüz (10:00 – 15:00 TSİ) ortalamasını temsil etmektedir..	125
Şekil A.8 :	Şekil 3.7 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak 2 m hava sıcaklığı için 18 temmuz gündüz (10:00 – 15:00 TSİ) ortalamasını temsil etmektedir..	125
Şekil A.9 :	Şekil 3.7 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak 2 m hava sıcaklığı için 18 temmuz gündüz (22:00 – 03:00 TSİ) ortalamasını temsil etmektedir...	126
Şekil A.10 :	Şekil 3.7 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak PBLH için 17 temmuz gündüz (10:00 – 15:00 TSİ) ortalamasını temsil etmektedir.....	126
Şekil A.11 :	Şekil 3.7 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak PBLH için 18 temmuz gündüz (10:00 – 15:00 TSİ) ortalamasını temsil etmektedir.....	127
Şekil A.12 :	Şekil 3.7 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak PBLH için 18 temmuz gündüz (22:00 – 03:00 TSİ) ortalamasını temsil etmektedir.....	127
Şekil A.13 :	Şekil 3.9 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak 17 temmuz gündüz (10:00 – 15:00 TSİ) ortalamasını temsil etmektedir.....	128
Şekil A.14 :	Şekil 3.9 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak 18 temmuz gündüz (10:00 – 15:00 TSİ) ortalamasını temsil etmektedir.....	128
Şekil A.15 :	Şekil 3.9 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak 18 temmuz gündüz (22:00 – 03:00 TSİ) ortalamasını temsil etmektedir.....	129
Şekil A.16 :	Şekil 3.9 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak TKE için 17 temmuz gündüz (10:00 – 15:00 TSİ) ortalamasını temsil etmektedir.	129
Şekil A.17 :	Şekil 3.9 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak TKE için 18 temmuz gündüz (10:00 – 15:00 TSİ) ortalamasını temsil etmektedir.	130
Şekil A.18 :	Şekil 3.9 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak TKE için 18 temmuz gündüz (22:00 – 03:00 TSİ) ortalamasını temsil etmektedir.	130
Şekil A.19 :	Şekil 3.9 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak hava sıcaklığı için 17 temmuz gündüz (10:00 – 15:00 TSİ) ortalamasını temsil etmektedir.....	131
Şekil A.20 :	Şekil 3.9 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak hava sıcaklığı için 18 temmuz gündüz (10:00 – 15:00 TSİ) ortalamasını temsil etmektedir.....	131
Şekil A.21 :	Şekil 3.9 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak hava sıcaklığı için 18 temmuz gündüz (22:00 – 03:00 TSİ) ortalamasını temsil etmektedir.....	132
Şekil B.1 :	Şekil 6.4 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak aynı rüzgar türbinli (Siemens SWT6.0-154) rüzgar çiftliği denize İstanbul'un Asya tarafında kurulmuştur.	133
Şekil B.2 :	Şekil 6.4 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak aynı küçük ebatlı rüzgar türbinli (Siemens SWT3.6-120) rüzgar çiftliği denize İstanbul'un Asya tarafında kurulmuştur.	133
Şekil B.3 :	Şekil 6.4 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak aynı lokasyonda daha küçük ebatlı rüzgar türbinli (Siemens SWT6.0-154) rüzgar çiftliği kurulmuştur.	134

- Şekil B.4 :** Şekil 6.5 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak aynı rüzgar türbinli (Siemens SWT6.0-154) rüzgar çiftliği denize İstanbul'un Asya tarafında kurulmuştur. **134**
- Şekil B.5 :** Şekil 6.4 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak daha küçük ebatlı rüzgar türbinli (Siemens SWT3.6-120) rüzgar çiftliği denize İstanbul'un Asya tarafında kurulmuştur.. **135**
- Şekil B.6 :** Şekil 6.5 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak aynı lokasyonda daha küçük ebatlı rüzgar türbinli (Siemens SWT6.0-154) rüzgar çiftliği kurulmuştur. **135**





RÜZGAR ÇİFTLİKLERİNİN METEOROLOJİK PARAMETRELER ÜZERİNDEKİ ETKİSİ : MODEL PERSPEKTİFİNDEN İNCELEME

ÖZET

Düşük karbonlu elektrik enerjisi üretimi sağlamaları nedeniyle rüzgar enerjisine hızla artan talep ve ihtiyaç neticesinde dünya üzerinde rüzgar çiftliklerinin sayısı ve boyutlarının yanı sıra, çiftliklerde kullanılan rüzgar türbin ebatları da artmaktadır. Bir rüzgar türbini elektrik enerjisi üretmek üzere gelen rüzgarın kinetik enerjisini kullanarak, türbinin rüzgar altı kısmında rüzgar akışını, rüzgar şiddetini azaltarak ve akıştaki türbülans seviyesini artırarak bozmaktadır. Rüzgar altındaki bu alan rüzgar türbin izi olarak tanımlanmaktadır. İz alanında artan düşey türbülanslı karışım da atmosferik sınır tabakadaki sıcaklık, nem, türbülanslı yüzey akılarını yeniden düzenleyerek yer-atmosfer etkileşimini önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Bir rüzgar çiftliği ebatına bağlı olarak onlarca ya da binlerce rüzgar türbini ihtiva edebilir. Böylece bir rüzgar çiftliğindeki her bir rüzgar türbin izinin doğrusal olmayan kümülatif etkisi atmosferde potansiyel etkiler oluşturmaktadır ve bu potansiyel etkiler incelenmelidir. Bu inceleme ya gözlemsel olarak yapılmaktadır ya da model aracılığıyla yapılmaktadır. Ancak, rüzgar çiftliklerinde ve çevrelerinde gözlemsel verinin zaman ve uzamsal olarak kısıtlı mevcudiyetinden dolayı, rüzgar çiftliklerinin etkilerini ve bu etkilere neden olan fiziksel mekanizmayı daha detaylı anlayabilmek için, model kullanımı önemli bir araç haline gelmektedir. Rüzgar çiftliği üç şekilde modellenebilmektedir. Bunlardan biri büyük girdap simülasyonudur (LES: Large Eddy Simulation). LES ile türbin dinamiği ölçeğine inerek rüzgar türbinlerinin meteorolojik etkilerine yönelik daha detaylı bilgi sağlanmaktadır. Ancak bu ölçek ile tüm rüzgar çiftliğini simüle etmek çok fazla hesaplama kaynağı gerektirmektedir. Bir diğer yöntem ise rüzgar çiftliklerinin yüzey pürüzlülüğü olarak kabul edilmesidir. Ancak bu yöntemde ilgili rüzgar çiftliği için uygun pürüzlülük uzunluğunun bulunamaması veya atmosferden kinetik enerji eldesinin türbin gövde yüksekliği yerine yüzeye yakın yükseklikten gerçekleşmesi abartılı sonuçların üretilmesine neden olmaktadır. Ancak bu yöntem model yatay çözünürlüğün onlarca kilometre olan mezo ölçek veya küresel ölçek model çalışmalarında kullanıma uygundur. Rüzgar çiftliğini son modelleme yöntemi ise rüzgar türbinin güç ve itki eğrisi kullanılarak rüzgar türbinlerinin momentumu azaltan ve türbülanslı kinetik enerji kaynağı olarak parametrikleştirilmesidir. Bu yöntem mezo ölçek atmosfer modellerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Rüzgar enerjisi uygulamalarında en yaygın kullanılan mezo ölçek atmosfer modeli ise WRF modelidir. Bu tez çalışması dört ayrı başlık altında mezo ölçek Weather Research and Forecasting (WRF) modelini rüzgar çiftlik parametrisasyonu (WFP) ile birlikte kullanarak model perspektifinden rüzgar çiftliğinin atmosfer üzerindeki etkisi ve WRF-WFP modelinde yapılan değişikliklerde rüzgar çiftlik etkisindeki değişim incelenmiştir.

İlk çalışmada (3. Bölüm) Türkiye'nin Çanakkale ilinin düz olmayan bir bölgesinde kurulan hipotetik rüzgar çiftlik iz etkisinin WRF modelinde Mellor-Yamanda-

Nakanishi-Niino (MYNN) atmosferik sınır tabaka (PBL) şemasında yapılan değişikliklerin neticesindeki değişimi incelenmiştir. Bu çalışma literatürde bu konu ile ilgili yapılmış ilk çalışma niteliği taşımaktadır. Böylece MYNN PBL şemasında karışım uzunluğu (yerel karışım) yaklaşımı değiştirilerek, kütle akışı şeması (yerel olmayan karışım) aktive edilerek, ve modeldeki ilgili bir modülde bir kod bloğu eksikliği nedeni ile WFP kullanımında TKE adveksiyonunun yanlış işlenmesi (son model zaman adımına kadar WFP tarafından rüzgar çiftliği hücrelerine eklenen ek TKE'nin ilgili hücre dışına advekta olamaması) ve bu eksik kod bloğunun eklenmesi ile TKE adveksiyonunun doğru işlenmesi ile yapılan WRF-WFP simülasyonları ile WFP ile MYNN PBL şeması arasındaki etkileşim ortaya konmuştur. Buna ek olarak, WFP'de türbülanslı kinetik enerji (TKE) katsayısına (C_{TKE}) yönelik bir düzeltme uygulanmıştır. Ancak ana simülasyonlara geçmeden önce rüzgar çiftlik iz etki büyüklüklerini daha iyi yakalayabilmek için uygun model yatay ve düşey çözünürlükleri belirlemek üzere uzamsal çözünürlüklerin değiştirildiği bir dizi simülasyon gerçekleştirilmiştir. Rüzgar çiftlik iz etki örüntüsünü ve büyüklüğünü yakalayabilmek için yüksek düşey (12 m) ve yatay (1 km - 3 km) çözünürlük kullanılması gerektiği bulunmuştur. Bu ilk çalışmaya ait sonuçlarda MYNN PBL şemasında yapılan değişikliklerde rüzgar çiftlik izi simülasyonlarına yönelik WRF-WFP çözümlerinde önemli değişimler elde edilmiştir. Genel olarak rüzgar çiftliği özellikle çiftlik içerisinde rüzgar şiddetini azaltmakta, TKE'yi ve hava sıcaklığını artırmaktadır. Ancak, TKE adveksiyonunun yanlış kullanımı ve WFP C_{TKE} için 0.25 düzeltme faktörünün kullanımı WRF-WFP modelinin özellikle rüzgar çiftliğinin TKE ve hava sıcaklığı üzerindeki etki öngörüsünde yanlış sonuçlar ürettiği bulunmuştur. Çalışmada ayrıca simüle edilen rüzgar çiftliği iz etkisinde karışım uzunluğunda yapılan değişikliklerin MYNN PBL şemasını EDMF (eddy diffusivity/mass-flux) şemasına dönüştürmek üzere kütle-akı şemasının aktivasyonundan daha büyük değişimler yarattığı ortaya konmuştur. Çalışmada ayrıca MYNN PBL şemasında TKE adveksiyonunun doğru ve yanlış kullanımında WFP'nin TKE tandans ve momentum tandans bileşenlerinin katkıları incelenmiştir. TKE adveksiyonunun yanlış kullanımında ya da (doğru kullanımında) C_{TKE} için düzeltme faktörünün uygulanmasında simüle edilen rüzgar çiftlik iz etki öngörülerinde yanlış sonuçların üretilmesi, WFP TKE tandans bileşeninden gelen katkının olduğundan daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

İkinci çalışmada (4. Bölüm) ilk çalışmadaki çalışma alanı ve periyodu ele alınarak TKE adveksiyonunun doğru kullanımında orijinal WFP C_{TKE} kullanımı neticesinde devam eden yüksek TKE üretimi nedeniyle WFP C_{TKE} için uygulanan düzeltme faktörünün özellikle hava sıcaklığında yanlış rüzgar çiftlik etki öngörülerinin üretilmesine neden olmasından dolayı WFP C_{TKE} için yeni bir yaklaşım olarak bir boyutlu momentum teorisi uygulanarak sonuçlar yeniden değerlendirilmiştir. Bu yeni C_{TKE} hesabı yaklaşımıyla gerçekleştirilen simülasyon sonucunu kıyaslamak üzere ilk çalışmadaki TKE adveksiyonunun doğru ve yanlış kullanıldığı simülasyonla birlikte C_{TKE} için 0.25 düzeltme faktörünün uygulandığı simülasyonlar ele alınmıştır. Bu çalışma literatürde Fitch WFP C_{TKE} hesabı için bir boyutlu momentum teorisinin uygulandığı ilk çalışma olma niteliğini taşımaktadır. Yeni C_{TKE} hesabı için uygulanan bir boyutlu momentum teorisi ile WFP TKE tandans bileşeninden gelen katkı artarak rüzgar çiftliğinde rotor tabakasının altında beklenen ancak zayıf ısınma sinyalleri bulunmuştur. C_{TKE} hesabında 0.25 düzeltme faktörünün uygulandığı simülasyonda negatif TKE farkları türbin gövde yüksekliğinden yüzeye kadar görülürken C_{TKE} için yeni yaklaşımın uygulandığı simülasyonda rotor tabakasının altından yüzeye kadar görülmektedir. Yeni yaklaşımla diğer simülasyonlar arasındaki fark gece

belirmektedir. Ancak ne gece ne gündüz rüzgar çiftliğinin rüzgar şiddeti açısından diğer simülasyonlarla kıyaslandığında yeni yaklaşım önemli bir fark yaratamamıştır.

Üçüncü çalışmada (5. Bölüm) arazi örtüsü değişikliğinde yüzey sürüklenme etkilerinin türbin rotorunun üst uç yüksekliğine kadar ulaşabilmesi için rüzgar çiftliği merkezinde olacak şekilde belirlenen bir kare bir alanda arazi örtüsü değiştirilerek rüzgar çiftliğinin atmosfer üzerindeki etkileri ve güç üretimindeki değişim incelenmiştir. Çalışma Türkiye'nin Kırklareli ilinin tarımsal faaliyetin yoğun olduğu düz olmayan bir bölgesinde WRF WFP modeli ile hipotetik bir rüzgar çiftliği kurgulanarak gerçekleştirilmiştir. Arazi örtüsünün değiştirileceği hesaplanan alanda en yüksek alansal paya sahip arazi örtüleri kuru tarım arazisi ve yaprak döken geniş yapraklı orman olduğundan model simülasyonları belirlenen alanda alan tamamen kuru tarım arazisine ve yaprak döken geniş yapraklı ormana dönüştürülerek gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada WFP'de orijinal C_{TKE} hesabı kullanılmıştır. WRF WFP model simülasyonları ile elde edilen bulgular rüzgar çiftliğinin atmosfer üzerindeki etkiler söz konusu olduğunda yaprak döken geniş yapraklı ormanın rüzgar çiftlik etkilerini, kuru tarım arazisindeki sonuçlara göre, azalttığını ancak söz konusu rüzgar çiftliğindeki güç üretimi ise güç üretimini artırdığını göstermiştir.

Dördüncü ve son çalışmada (6. Bölüm) 21-27 Ocak 2022 tarihinde gerçekleşen Elpis Fırtınasının özellikle İstanbul üzerinde 24-25 Ocak 2022 tarihinde etkili olması ile meydana gelen yoğun kar yağışı için, İstanbul'un karadeniz kıyısının açıklarında hipotetik bir rüzgar çiftliği varlığında kar yağışında ve meydana gelecek kar kalınlığındaki değişim 24 Ocak günü öncesi de dahil edilmek üzere 23-25 Ocak 2022 periyodu için incelenmiştir. Ancak özellikle kar yağışındaki/kalınlığındaki değişimin nispeten en yüksek olduğu durumu elde edebilmek için sonuçlar rüzgar çiftliğinin konumu ve kullanılan türbin modeli açısından incelemiştir ama rüzgar çiftliğinin kar yağışı ve diğer meteorolojik parametreler (rüzgar şiddeti ve hava sıcaklığı) üzerindeki etkisine yönelik ayrıntılı değerlendirmeler en yüksek etkiyi sağlayan rüzgar çiftlik konumu ve türbin ebatı çifti için yapılmıştır. Rüzgar çiftliklerinin yağmur üzerindeki etkisine yönelik literatürde birçok çalışma bulunmasına rağmen henüz kar yağışı üzerindeki etkisine yönelik bir çalışma bulunmaması nedeniyle tezin bu son çalışması literatürde ilk çalışma olma niteliği taşımaktadır. Çalışmada İstanbul'un Avrupa yakasında Karadeniz'de konumlandırılmış rüzgar çiftliği bu çalışmada ele alınan parametreler açısından Asya yakasında Karadeniz'de konumlandırılmış rüzgar çiftliğinden daha büyük meteorolojik etki sergilediği ve buna ek olarak, rüzgar çiftliğinin konumu farketmeksizin daha büyük ebatlı rüzgar türbin modelinin kullanımının daha büyük rüzgar çiftlik etkisine neden olduğu ortaya konmuştur. Simülasyon sonuçlarına göre kar yağışının özellikle 24 Ocak'ta İstanbul'da etkisini göstermeye başladığı 25 Ocak'ta seçilen iç model alanında Tüm Karadeniz'i ve İstanbul'u etkilemesine paralel olarak İstanbul'un Avrupa yakasının Karadeniz kıyısının açığında seçilen büyük türbin ebatıyla kurulan hipotetik rüzgar çiftliği kar yağışındaki en yüksek etkiyi inceleme periyodunun son günü 25 Ocak'ta sergilemiştir. Periyot boyunca kar yağışındaki değişim -17 mm ile 20 mm arasında iken kar kalınlığındaki değişim -9 cm ile 9 cm arasındadır. Periyot ortalaması ele alındığında ise kar yağışındaki değişim -11 mm ile 14 mm arasında iken kar kalınlığındaki değişim -4 cm ile 4 cm arasındadır.



THE IMPACT OF WIND FARMS ON THE METEOROLOGICAL PARAMETERS : THE INVESTIGATION FROM THE MODEL PERSPECTIVE

SUMMARY

As a result of fast growing demand and need for wind energy due to its low-carbon electrical energy generation, wind farms over the world continue to grow in terms of number, size (installed capacity) and wind turbine size. A wind turbine uses kinetic energy of the incoming wind flow to generate electrical energy and disturbs the downwind wind flow by decreasing the wind speed and increasing the turbulence in the flow. The disturbed wind flow region in the downwind is called wind turbine wake. The increasing vertical turbulent mixing in the wake region redistributes the air temperature, humidity and turbulent surface fluxes in the atmospheric boundary layer and so considerably modifies the land-atmosphere interaction. A wind farm can consist of dozens or thousands of wind turbines, depending on its size. Therefore, the non-linear aggregation of individual wind turbine wakes in a wind farm can have potential impacts on atmosphere, and these potential impacts need to be investigated. This investigation is carried out by observational or modelling. However, because the observed spatiotemporal data in and around the wind farm is limited, the use of models is becoming an important tool to understand in more detail the effects of wind farms and the physical mechanism that causes these effects. Several modelling techniques are used to model wind farms. The one of them is Large Eddy Simulation (LES). More detailed information about the meteorological effects of wind turbines is provided using LES, which operates at the wind turbine dynamics scale. However, this method is too computational expensive to model the entire wind farm at this scale. The other method is to assume the wind farm as a surface roughness. However, in this method, the failure to find the appropriate roughness length for the relevant wind farm or the fact that kinetic energy is obtained from the atmosphere from a height close to the surface instead of the wind turbine's hub height causes exaggerated results to be produced. Nevertheless, this method is suitable for use in mesoscale or global model studies where the model horizontal resolution is tens of kilometers. The last method is that wind turbines are parameterized as a momentum sink and a source of turbulent kinetic energy. This method is widely used in mesoscale atmospheric models. The widely used mesoscale model in the wind energy applications is WRF model.

This thesis study uses the WRF model coupled with the last mentioned wind farm parametrization (WFP) method. This WFP is called Fitch scheme in WRF model. This parameterization scheme extracts some fraction of kinetic energy from the mean flow at the vertical levels intersecting with the rotor area within wind farm grid cell(s), depending on the thrust coefficient of the wind turbine. Some fraction of this extracted kinetic energy is also converted into electrical energy, based on the power coefficient of the same wind turbine. The thrust and power coefficients are functions of wind speed. In this parametrization, electromechanical losses are ignored. Therefore, the

rest of the extracted kinetic energy that is not converted into electrical energy is assumed to be converted into TKE. Its fraction is quantified by the difference between the thrust and power coefficients and is called the coefficient of TKE (C_{TKE}). This parametrization neglects the wind direction within the wind farm grid cell(s). Therefore, wind turbines are assumed to be oriented perpendicular to the wind flow. It also neglects the wind farm layout, and therefore, wind turbines within the same grid cell are treated as front-row turbines and experience the same wind condition. A code bug in the WRF model causes a miscalculation of QKE, twice the TKE, at wind farm cell(s) when *bl_mynn_tkeadvect* is set to true as a namelist parameter in the WRF model configuration in the case of the WPS use. The corrected version of the code bug in the WRF model is released with WRF version 4.2.1. Therefore, correction procedures to fix the code bug in the TKE advection are followed for the chapters that uses the earlier version (v3.8.1). In addition, one-quarter of the original values of the C_{TKE} is applied in two chapters (Chapter 3 and 4) because of the still-high added TKE values from wind farms, even though the code bug is fixed according to the literature. Finally, one dimensional momentum theory as a new approach is applied for C_{TKE} in one chapter (Chapter 4) because correction for the C_{TKE} with a factor of 0.25 causes the incorrect predictions of wind farm impact especially on air temperature.

This thesis consists of four different studies. In these studies, the wind farm impacts on the meteorological variables from the model perspective and the change in the model solutions for the wind farm impacts in the changes made in the model configuration were investigated by using Weather Research and Forecasting (WRF) model coupled with wind farm parametrization (WFP).

In the first study of thesis (Chapter 3), the changes in the simulated wind farm wake impacts as a result of the changes made in Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino (MYNN) planetary boundary layer (PBL) scheme in WRF model. This study is the first study on this topic in the literature. Thus, the interaction between WFP and MYNN PBL schemes was exhibited with WRF-WFP simulations performed by changing mixing length (local mixing) options, activating the mass-flux scheme (non-local mixing), enabling the correct/incorrect TKE advection in MYNN PBL scheme. In addition to this, in the case of correct TKE advection, one more simulation, in which a correction factor of 0.25 for turbulent kinetic energy (TKE) coefficient (C_{TKE}) in WFP was applied, was performed. However, before the main simulations which show the interactions between WFP and MYNN PBL schemes, a series of simulations in which model spatial resolutions were changed are performed in order to determine the optimum model horizontal and vertical resolutions for capturing the patterns and magnitudes of the wind farm wake impacts. The high vertical (12 m) and horizontal (1 km – 3 km) resolutions should be used to capture the patterns and magnitude of the wind farm wake impacts. The results of this first study show that the WRF-WFP solutions for the wind farm wake impact significantly change with the change in the MYNN PBL scheme. In general, wind farm wake impact reduce the wind speed, increase the TKE and the air temperature, especially within the wind farm. However, the incorrect treatment of TKE advection and the correction factor of 0.25 for the C_{TKE} in WRF-WFP simulations cause the unexpected wrong predictions for the wind farm wake impacts particularly on TKE and air temperature. In addition, this study shows modifications in the mixing length rather than activation of mass-flux scheme create greater changes in simulated wind farm wake impacts. This study also investigated the

contributions of TKE and momentum tendency components of the WFP for the simulations with the correct/incorrect treatment of TKE advection for providing additional explanation in these simulations. The unexpected wrong wind farm wake impacts for the simulations with the incorrect treatment of TKE advection and the use of correction factor of 0.25 for the C_{TKE} in the case of correct treatment of TKE advection are because the contribution comes from the WFP TKE tendency component are underestimated.

In the second study (Chapter 4), the case study in the first study was reevaluated by performing an additional simulation in which one dimensional momentum theory as a new approach was implemented into the C_{TKE} estimation because correction of the C_{TKE} with a factor of 0.25 in the case of correct treatment of TKE advection causes the incorrect predictions of wind farm impact especially on air temperature. Therefore, a new approach was considered for the C_{TKE} calculation and it was based on one dimensional momentum theory, and the results are evaluated. The results of simulations with correct/incorrect TKE advection and corrected C_{TKE} are reconsidered from the first study to be compared to the results of the simulation in which one dimensional momentum theory was implemented into the C_{TKE} calculation. This study is the first study in the literature in terms of the implementation of one dimensional momentum theory for the C_{TKE} calculation. The contribution from the WFP TKE tendency component increased when this new approach for the C_{TKE} calculation was implemented, and so, for instance, the expected nighttime warming impact by wind farm especially below the rotor layer at wind farm cells were found. In the simulation with the corrected C_{TKE} with a factor of 0.25, negative TKE difference are found from the hub height to surface, but in the simulation with the implementation of the new approach for C_{TKE} , those are found below the rotor layer. The difference between both methods applied for the C_{TKE} clearly appears especially for the nighttime results of TKE and air temperature difference. However, for the wind speed difference, both methods have produced similar results.

In the third study (Chapter 5), the changes in the wind farm impact and power production in the case of land use change were investigated in an identified square patch area. The hypothetical wind farm is centered in it, because influences of surface drag must be reached up to the upper rotor tip height in the case of land use change. The study was performed by building a hypothetical wind farm in a non-flat terrain of Kırklareli province which is characterized by intensive agricultural activities. In the identified square patch area, there are two land uses with the highest areal ratios. These land uses are dryland cropland and deciduous broadleaf forest. Therefore, in the WRF-WFP model simulations in the case of land use change, the square patch area is converted to completely dryland cropland and completely deciduous broadleaf forest. In the study, the original C_{TKE} was used. The results of the WRF-WFP simulations show that deciduous broadleaf forest reduce the wind farm impact in the case of wind farm impacts on the atmosphere, when compared to the dryland cropland. However, in the case of power production, it was found that dryland cropland increase the power production of the wind farm when compared to the deciduous broadleaf forest.

In the fourth and the last study (Chapter 6) of thesis, the change in snowfall and snow depth under the impact of a hypothetical offshore wind farm in Black Sea in the north

of Istanbul was investigated for the period of 23-25 January 2022 because heavy snowfall occurred when the Storm Elpis, which took place on 21-27 January 2022, was effective on Istanbul especially on 24-25 January. However, the impact of the offshore wind farm especially on the snowfall/snow depth over Istanbul was investigated in terms of the position of the wind farm on the Black Sea and the size of wind turbine in order to obtain the largest change in the snowfall/snow depth by wind farm. After that, the detail evaluation of the impacts of the hypothetical offshore wind farm on snowfall / snow depth and other meteorological variables (wind speed and air temperature) was made for the wind farm position-wind turbine size couple which provide the largest impact especially on snowfall / snow depth. Because although there are many studies on wind farm impact on the precipitation (rainfall) there is no study for the wind farm impact on snowfall / snow depth, this study is the first study on this topic in the literature. The study shows that an offshore wind farm on Black Sea in north of the European side rather than the Asian side of Istanbul has a greater wind farm impact and in addition the larger wind turbine size regardless of wind farm position has a greater wind farm impact. According to simulation results, snowfall began to show its effect in Istanbul especially on January 24, and on January 25 the snowfall effects the whole Black Sea and Istanbul in the inner model domain and parallel with this the hypothetical offshore wind farm builded with larger wind turbine size exhibits its greatest impact on January 25. During the investigation period (23-25 January), the change range in the snowfall / snow depth is -17 mm – 20 mm / -9 cm – 9 cm. In addition, the period average for change in the snowfall / snow depth is -11 mm – 14 mm / -4 cm – 4 cm.

1. GİRİŞ

1.1 Genel Giriş ve Motivasyon

Elektrik güç üretimi için konvansiyonel güç santrallerinde fosil yakıtların yakılması sürecinde atmosfere salınan sera gazlarının neden olduğu sıcaklık artışını 1.5 °C'nin altında tutmak için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımındaki artış oldukça önemlidir, ve rüzgar enerjisi en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Rüzgar türbinleri aracılığıyla atmosferden rüzgar enerji eldesi ile elektrik güç üretim sürecinde karbon emisyonu sıfır olmakla birlikte rüzgar türbinlerinin yaşam döngüsü sürecinde karbon emisyonu oldukça düşüktür. Ancak her enerji üretim teknolojisinde olduğu gibi rüzgar enerjisi üretimi teknolojisi (rüzgar türbinleri) de çevre koşullarını etkilemektedir. Örneğin, bir rüzgar türbini hem rüzgar üstündeki hem de rüzgar altındaki akışı etkileyebilmektedir. Rüzgar türbininden etkilenen rüzgar üstü bölgeye *indüksiyon bölgesi* denmektedir ve bu bölgede rüzgar türbinin varlığından meydana gelen ters basınç gradyanı ve türbin rotor tabakasından momentum adveksiyonu sonucunda rüzgar şiddeti azalmaktadır. Rüzgar türbinin etkilediği rüzgar altı bölgeye de *iz (wake)* denmektedir (Şekil 1.1). İz, rüzgar türbinin elektrik güç üretimi sürecinin ilk safhasında atmosferin ortalama akışına ait kinetik enerjisini kullanma neticesinde meydana gelmektedir. Bu bölgede rüzgar şiddeti azalmaktadır ve çevresine göre akış daha türbülanslıdır. Vermeer ve diğ. [1] rüzgar türbinini, rüzgar türbininin hemen rüzgar altından türbin rotor çapının 2 ile 4 katı bir bölgeyi kapsayan *yakın iz (near wake)* ve daha uzak rüzgar altı bölgeyi kapsayan *uzak iz (far wake)* olmak üzere iki bölgeye ayırmaktadır. Yakın iz direkt olarak rüzgar türbinin geometrisinden etkilenmektedir [2], ve bu bölge yüksek türbülanslı, üç boyutlu ve heterojen akış dağılımı ile karakterize edilmektedir. Yakın izin tersine uzak iz bölgesinde akış rüzgar türbin geometrisinden az etkilenmektedir. Bu bölgedeki ortalama akış dağılım öngörüsü daha çok rüzgar türbinine ait itki ve güç katsayısı parametreleri ve gelen akış koşulu ile belirlenmektedir. Türbülans yoğunluğu (turbulence intensity) rüzgar şiddetinin bir fonksiyonu olduğundan [3], izde rüzgar şiddetindeki azalma türbülans seviyesinde de bir azalma anlamına gelmesine rağmen izdeki türbülans seviyesindeki

artış iki farklı mekanizmadan, türbin rotorunun dönüş hareketi ve izde momentumdaki azalmadan kaynaklanmaktadır. İzde akışın momentumundaki azalma nedeniyle meydana gelen rüzgar kayması küçük ölçekli türbülanslı girdapları (turbulent eddies) oluşturarak rüzgar türbinlerinin üzerindeki daha yüksek rüzgar şiddetli akışın aşağı taşınması ile izdeki azalmayı zayıflatmaktadır. Her iki mekanizma da iz türbülansını (wake turbulence) artırarak düşey türbülanslı karışımda artışa neden olmaktadır. Artan düşey türbülanslı karışım da atmosferik sınır tabakadaki sıcaklık, nem, türbülanslı yüzey akılarını yeniden düzenlemektedir ve böylece yer-atmosfer etkileşimini önemli ölçüde değiştirebilmektedir.



Şekil 1.1 : Danimarka’da bulunan Horns Rev açık deniz rüzgar çiftliğindeki rüzgar türbin izlerinin etkileşimi. Fotoğraf Cristian Steiness tarafından çekilmiştir.

1.2 Rüzgar Çiftliklerinin Meteorolojik Parametreler Üzerindeki Etkisi: Literatür Araştırması

Rüzgar türbinleri genel olarak rüzgar çiftliği olarak tanımlanan bir alan içerisinde kümelenmektedir. Bir rüzgar çiftliği ebatına göre onlarca veya binlerce rüzgar türbininden oluşabilmektedir. Rüzgar çiftliğindeki her bir rüzgar türbin izinin kümülatif etkisi *rüzgar çiftlik izi (wind farm wake)* olarak tanımlanmaktadır ve atmosferik çevre üzerinde farklı ölçeklerde potansiyel etkilerinin mevcut olduğu

ortaya konmuştur. Örneğin, bazı gözlemsel çalışmalar [4-6] büyük ölçekli açık deniz rüzgar çiftliklerinin iz etkisindeki rüzgar altı rüzgar şiddetindeki azalmanın, özellikle kararlı koşulda, 70 km'ye kadar ulaştığını ortaya koymuştur. Burada rüzgar şiddetindeki azalma mesafesi ya da iz mesafesi sadece çevre rüzgar şiddetine değil aynı zamanda rüzgar yönüne, atmosferik kararlılığa, çevresel türbülans seviyesine, arazi örtüsüne, rüzgar çiftlik ebatına, türbinlerin konumlarına ve türbinler arası mesafeye de bağlıdır. Örneğin, kararlı koşuldaki iz etki mesafesi kararsız koşuldaki iz etkisi mesafesinin 14 katına kadar çıkabilmektedir [6]. Rüzgar şiddetindeki azalmaya yönelik böyle bir uzun etki mesafesi rüzgar altında konumlanmış komşu bir rüzgar çiftliğin güç üretimini de etkileyebilmektedir. Lundquist ve diğ. [7] karadaki bir rüzgar çiftlik izinin rüzgar altındaki komşu rüzgar çiftliğindeki güç üretimini 5 yıllık bir periyotta ortalama % 5 kadar düşüreceğini ve bunun da yaklaşık 3.7 milyar dolar kazanç kaybına neden olacağını göstermiştir.

Rüzgar çiftliklerinin rüzgar şiddeti haricinde diğer meteorolojik parametreler üzerinde de etkileri bulunmaktadır. Baidya Roy ve diğ. [8] bölgesel atmosferik model aracılığıyla rüzgar çiftliklerinin yüzeye yakın hava sıcaklığı üzerinde önemli bir etkisi olduğu göstermiştir. Bu çalışma literatürde yerel ölçekte doğrudan bir rüzgar çiftliğinin potansiyel etkilerini gösteren öncü çalışma niteliğindedir. Daha sonra yapılan yerden (in-situ) çalışmalar [9-14], uydu çalışmaları [12, 15-21], ve model çalışmaları [22-28] da rüzgar çiftliklerinin yüzey sıcaklığı ve yere yakın hava sıcaklığı üzerindeki etkisini göstermiştir. Bu çalışmalar rüzgar çiftliklerinin yüzey sıcaklığı ve yüzeye yakın hava sıcaklığı üzerindeki etkisinde, etkinin özellikle gece saatlerinde (kararlı sınır tabaka) daha kuvvetli olduğunu ve sıcaklıkta bir artışa (ısınma etkisi) neden olduğunu göstermiştir. Bu durum rüzgar türbinleri nedeni ile artan düşey karışımın gece saatlerinde yukarıdaki daha sıcak havanın aşağı, yüzeye doğru taşınması sonucunda oluşmaktadır. Isınma genel olarak rotor tabakasının alt yarısından yüzeye kadar gözlemlenmektedir. Ancak rotor tabakasının üst yarısından itibaren genellikle soğuma görülmektedir [23, 29]. Eğer atmosferik sınır tabaka gündüz saatlerinde gözlemlendiği gibi güçlü konveksiyonla kararsızsa, rüzgar çiftliklerinin yüzey sıcaklığı ve yere yakın hava sıcaklığı üzerindeki etkisinde tam tersi durum, bir soğuma etkisi gözlemlenmelidir. Ancak bu durum konveksiyonun gücüne bağlıdır. Eğer atmosferik sınır tabaka iyi karışmışsa ve nötr kararlılık sergiliyorsa rüzgar türbinleri nedeni ile artan düşey karışım yer atmosfer arasındaki gradyanları ve,

yüzey tabaka ve yüzey sıcaklığını değiştirmeyecektir. Freedman ve diğ [30] ve Xia ve diğ [14] türbülanslı kinetik enerjinin (TKE) ve atmosferik kararlılığın rüzgar türbinlerinin kara yüzey sıcaklığında meydana getirdiği değişimdeki etkisini gündüz-gece farkı ve mevsimsel değişkenlik açısından ortaya koymuştur. Gecenin aksine gündüz rüzgar çiftliklerinin yüzey sıcaklığı ve yüzeye yakın hava sıcaklığı üzerindeki etkisinde çalışmaların ortaya koyduğu sonuçlarda farklılıklar gözlemlenmektedir. Bazı çalışmalar [8, 9, 11, 25] gündüz saatlerinde rüzgar çiftliklerinin soğuma etkisi yarattığını gösterirken, bazı çalışmalar da [10, 12, 16, 18, 23] önemli bir soğuma ya da ısınma etkisi olmadığını göstermiştir.

Rüzgar çiftliklerinin yüzeye yakın meteorolojik koşulları üzerindeki etkisini gösteren çalışmalar genellikle yüzey sıcaklığı ve yüzeye yakın hava sıcaklığındaki değişim üzerine odaklanmaktadır. Ancak bazıları çalışmalar rüzgar çiftliklerinin nem üzerindeki etkisini de incelemiştir. Nemdeki değişim bitkilerin büyüme sezonunu ve gece solunumunu, çiy süresini, ve bulut ve sis oluşumunu etkileyebilmektedir. Bu açıdan rüzgar türbinlerinin nem üzerindeki etkisinin incelenmesi önem arz etmektedir. Yer tabanlı gözlemlerde Henschen ve diğ. [31] rüzgar çiftliği üzerindeki bir hava akışının geçişi esnasında çiftlik üzerindeki bağıl nemin % 11 kadar düştüğünü ve buharlaşmanın hızlandığını tespit etmiştir. Rajewski ve diğ. [32] ve Takle ve diğ. [33] rüzgar türbinlerinin iyi karışmış nötr koşulda nemi değiştirmede, zayıf kararlı koşulda yükseklikle artan rüzgar altı nem değişimine neden olduğu ancak artan kararlılıkta rotor tabakasının altında nemlilikte büyük bir düşüşe buna karşın üst seviyelerde de nemlilikte bir artışa neden olduğunu göstermiştir. Armstrong ve diğ.'nin [13] çalışmasında rüzgar türbinlerinin çalıştığı ve çalışmadığı durumlarda nemlilikteki değişimin incelenmesi ile gündüz mutlak nemde herhangi bir değişim gözlemlenmezken, gece çiftliğin yaklaşık 200 m rüzgar altı mesafesine kadar mutlak nemde mesafeyle zayıflayan bir artış gözlemlenmiştir. Araştırma uçuşları yapılan gözlemlerde [6, 29, 33, 34] rüzgar türbinlerinin nemde neden olduğu değişimin kararlılığa güçlü bir şekilde bağlı olduğu ve rüzgar çiftliğinin sadece güçlü kararlı koşulda nemi değiştirebildiği gösterilmiştir. Uçuşların genelinde iz alanında havadaki nemin azaldığı gözlemlenmiştir. Adkins ve Sescu [36] ve Adkins [37] gece enverziyonu yok olmadan önce deniz şafağından hemen sonra yapılan gözlemlerde rüzgar altında yüzey yakınında nemin azaldığını yukarı seviyede (türbin gövde yüksekliği ya da hemen altı) ise arttığını göstermiştir. WRF modeli aracılığıyla

bölgesel ölçeğe odaklanan bazı nümerik çalışmalarda [38-40] rüzgar çiftliklerinin kurulu olduğu büyük alanlar üzerinde (Iowa) mevsimsel olarak (yaz) ortalama yüzeye yakın nemlilikte (bağıl nemde) belirli bir artış (<%5) gözlemlenmiştir. Daha yerel ölçekte yapılan nümerik çalışmalarda [8, 26, 37, 41] pozitif nem değişimi (positive humidity lapse rate) nedeni ile rüzgar çiftliğinde yere yakın havanın daha kuru olduğu ancak sınır tabakanın daha üst katmanlarında havanın daha nemli olduğu bulunmuştur. Mangara ve diğ. [42] ise gündüz rüzgar çiftliğinde su buharı karışma oranının azaldığını gece ve seher saatinde de tam tersi durumunu meydana geldiğini göstermiştir. Wang ve diğ. [43] Çin'in özerk bölgesi İç Moğolistan'daki çayırarda kurulu rüzgar çiftliklerinin toprağın nem kaybetmesine neden olduğunu ve topraktaki nemin en fazla rüzgar çiftliğinde azaldığını göstermiştir. Ayrıca çalışmada bu şekilde artan kuraklığın bölgedeki ekolojiyi etkileyebileceği vurgulanmıştır.

Ruan ve diğ [28] ilk defa Çin'in Zhangjiaokou bölgesindeki rüzgar çiftliklerinin hava kirliliği açısından direkt ve indirekt etkilerini WRF-CMAQ aracılığıyla araştırmıştır. Araştırmacılar, direkt etki açısından, rüzgar çiftliklerin bölgesel ortalama göre PM_{2.5} konsantrasyonunu artırdığını ancak indirekt olarak kömür yakan termal santrallerle yer değiştirildiğinde özellikle CO₂ emisyonlarını ve kırsal bölgelerdeki ısınmanın neden olduğu hava kirliliğini azaltarak PM_{2.5} konsantrasyonunu azalttığını ortaya koymuştur. Ancak indirekt ve direkt etkilerin bileşik etkisi kışın bir bölgede PM_{2.5} konsantrasyonu artarken diğer bir bölgede azaltmaktadır. Li ve diğ. [44] de rüzgar çiftliklerinin PM_{2.5} konsantrasyonundaki direkt etkilerini ortaya koyarak rüzgar çiftliklerinin neden olduğu bu değişimin özellikle kirletici konsantrasyonunun yüksek olduğu bölgelerde saatlik bazdaki hava kalitesi tahminlerini etkileyebileceğini göstermiştir. Mo ve diğ. [45] Çin'de dünyanın en büyük rüzgar çiftlik kümesinin 110 km uzağındaki demir ve çelik fabrikasının neden olduğun NO₂ emisyonunun rüzgar çiftliğine ulaştığı bir durumda çiftlikteki ve çevresindeki NO₂'deki değişimi incelemiştir. Araştırmacılar, sınır etkisi olarak adlandırdıkları rüzgar çiftliğinin neden olduğu pürüzlülük değişimi neticesinde gelişen bir iç sınır tabakadan dolayı, NO₂ konsantrasyonunun rüzgar çiftliğinin hemen rüzgar üstü bölgesinde ve çiftliğin rüzgar üstü sınırlarında arttığını ancak çiftlikte ve rüzgar altı bölgesinde azaldığını ortaya koymuştur. Wang ve diğ.'nin [46] Çin Zangbei bölgesinde bulunan büyük ölçekli rüzgar çiftliklerin ele alındığı çalışmalarında, gece rüzgar çiftliğinin sınır tabaka yüksekliğini artırma eğiliminin sınır tabakadaki atmosferik kirleticilerin düşey

difüzyonuna katkı sağlayarak yerel hava kalitesini bir ölçüde geliştirebileceğini ifade etmektedir. Rüzgar çiftliğinin sınır tabaka yüksekliğini artırma eğilimini gösteren sonuçlar Kaytancı ve diğ.'nin [47] çalışmasında da ortaya konmuştur.

Rüzgar çiftliklerinin yerel meteoroloji üzerindeki etkilerinin yanı sıra sinoptik ve kıtasal ölçekte rüzgar paternleri ve sirkülasyonu, sıcaklık ve yağış üzerindeki etkileri WRF ve küresel modeller aracılığıyla yapılan çalışmalarla [48-60] incelenmiştir. Rüzgar çiftliklerinin yağış üzerindeki etkisine yönelik literatür araştırması Bölüm 6'da ayrıntılı olarak verilmiştir.

1.3 Mezo Ölçek Rüzgar Çiftlik Parametrizasyonlarının İncelemesi

Atmosfer modellerinde kullanılan rüzgar çiftliği parametrizasyonu için iki farklı yaklaşım ele alınmaktadır. Bu yaklaşımlarda ele alınan yatay ölçek (mezo ölçek, küresel ölçek vb) ve modelin uzamsal çözünürlüğü iki önemli faktördür. Ele alınan rüzgar çiftlik parameterizasyon yaklaşımları “Dolaylı” (Implicit) ve “Açık” (Explicit) yaklaşımlardır. Dolaylı parametrizasyonda rüzgar çiftliği artan pürüzlülük uzunluğu olarak ele alınmaktadır. Bu yaklaşım genel olarak küresel ölçek genel sirkülasyon modellerinde (GCM) kullanılmaktadır, çünkü bu modellerde uzamsal (yatay ve düşey) çözünürlükler oldukça düşüktür ve çoğu zaman rüzgar çiftliği düşeyde ilk model seviyesinin altında kalacak şekilde tek bir model hücresinde bulunmaktadır. Bu şekilde tek bir yapı gibi davrandığından ilgili hücrenin/hücrelerin pürüzlülük uzunluğu artırılır. Yapılan çalışmalarda rüzgar çiftliğini temsil edecek pürüzlülük uzunluğu bilgisi türbin yoğunluğu, türbin gövde yüksekliği ve ilk model seviyesi yüksekliği gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir [49, 51, 61-64]. Diğer parametrizasyon yaklaşımında, Açık parameterizasyonda, rüzgar çiftliği artan momentum kaybını ve bazılarında aynı zamanda TKE kaynağını temsil etmektedir. Bu yaklaşım yatay çözünürlüğün nispeten yüksek olduğu mezo ölçek atmosfer modellerinde (WRF, RAMS vb) kullanılmaktadır. Bu parametrizasyon yaklaşımında Kapalı parameterizasyon yaklaşımının aksine rüzgar çiftliğini temsil eden model hücrelerinde yüzey pürüzlülüğü değiştirilmemektedir. Ek olarak, bu yaklaşımda akış dinamiğini açıklayabilmek üzere kullanılan RANS denklemlerine ek terimler eklenir. Literatürde şu ana kadar on farklı açık parametrizasyon kullanılmıştır [8, 49, 65-72]. Bunlardan ikisi [71, 72] Fitch ve diğ. tarafından [66] açık parmetrizasyonunda yapılan iyileştirmeleri ve düzenlemeleri temsil etmektedir. Ancak tüm açık rüzgar çiftlik

parametrizasyonlarında benzer varsayımlar yapılmaktadır: (i) Türbinler hücre içinde rüzgar yönüne hassasiyet göstermediğinden akışa dik konumlanmaktadır; (ii) Model hücresindeki akış yatay olarak homojendir ve hücre içi türbin iz etkileşimleri ihmal edilmektedir; (iii) türbin kule etkisi ihmal edilmektedir; (iv) yatay model çözünürlüğü ele alınan Açık parametrizasyona bağlı olarak türbin rotor çapının 3 ile 5 katı arasında olmalıdır. Fischereit ve diğ.'nin [73] çalışmasına göre açık parametrizasyonlar arasında literatürde en çok kullanılan parametrizasyon Fitch ve diğ.'nin [66] parametrizasyonudur. Bu parametrizasyon halihazırda açık kaynak mezo ölçek model WRF (Weather Research and Forecasting) modelinde kullanılmaktadır. Bu modelde Fitch WFP şemasından sonra en sık kullanılan ikinci açık WFP şeması Volker ve diğ.'nin [70] geliştirdiği EWP (Explicit Wind-Farm Parametrization) şemasıdır. Ancak EWP şu anda sadece WRF v3.8.1 modeline entegre edilmiştir. Diğer geliştirilen açık WFP şemaları ise oldukça sınırlı sayıdaki çalışmalara uygulanmıştır [73].

Mezo ölçek atmosfer modellerinde, mezo ölçek ile LES ölçeği arasında Terra Incognita olarak tanımlanan nümerik boşluk nedeni ile rüzgar enerjisi uygulamalarında genelde kullanılan en yüksek yatay çözünürlük olan 1 km ile bir model hücresi, rüzgar çiftliğini temsil eden birçok rüzgar türbinini ihtiva edebilir. Bu modellerde kullanılan düşey çözünürlük ise rüzgar türbin rotor tabakasını ve altını yeteri kadar iyi temsil edecek düzeydedir. Rotor tabakasını çevreleyecek bir kontrol hacminde Açık WFP şemasında rüzgar çiftliğini temsil eden momentum kaybı, f_t “direkt” ya da “indirekt” yaklaşımla parametrikleştirilebilir [74]. Direkt yaklaşımda [75] her rüzgar türbinin indüklediği kuvvet

$$F_T = 0.5C_T\rho U^2 A_r \quad (1.1)$$

denklemleri ile ifade edilmektedir. Burada U referans akış hızını, A_r rotor alanını ve C_T itki katsayısını temsil etmektedir. Kuvvet sonrasında rotor tabakasını çevreleyen kontrol hacmine (ΔV) bölündüğünde momentum kayıp terimi

$$f_t = 0.5C_T U^2 A_r / \Delta V \quad (1.2)$$

şeklini almaktadır. Direkt yaklaşımın tersine indirekt yaklaşımda rüzgar türbini kinetik enerji azaltıcı olarak sayılmaktadır. Rüzgar türbinlerin hava akışından kinetik enerjisi elde

$$\frac{\partial E_t}{\partial t} = 0.5\rho C_{KE} U^3 A_r \quad (1.3)$$

kontrol hacmindeki kinetik enerji değişim oranı

$$\left(\frac{\partial E_V}{\partial t}\right)_t = \rho U \left(\frac{\partial U}{\partial t}\right)_t \Delta V \quad (1.4)$$

ile eşitlendiğinde momentum balans denklemi

$$\left(\frac{\partial U}{\partial t}\right)_t = \frac{0.5 C_{KE} U^2 A_r}{\Delta V} \quad (1.5)$$

denklemi ile ifade edilir ki bu ifade $\bar{f}_t$ terimini temsil etmektedir. Burada C_{KE} türbinlerin rüzgarın ortalama kinetik enerjisinden elde ettiği kinetik enerji oranını temsil etmektedir. Örneğin, Fitch WFP şeması [66] $\bar{f}_t$ için indirekt yaklaşımı kullanmaktadır. Ancak her iki yaklaşımda da bir model hücresi birden fazla rüzgar türbini ihtiva edebileceğinden ve yatayda hücre içi iç akış hızı homojen kabul edildiğinden, ele alınan açık WFP şemasına bağlı olarak belirli bir model seviyesindeki veya türbin gövde yüksekliğindeki yatay hücre akış hızı kullanılır [8, 49, 65-67, 70, 76]. Bu yöntemlerin dışında Abkar ve Porte-Agel [75] hücre akış hızı yerine hücre içinde türbin düzeninin etkisini gösterecek bir hücre-içi akış hızını sağlamak için, serbest akış hızı ve türbin rotorundaki akış hızı arasındaki farkı ele alacak bir düzeltme faktörü kullanmaktadır. Böylece bu ve Pan ve Archer'ın [71] WFP şemalarında ızgara-altı (sub-grid) süreçler hesaba katalırken, Volker ve diğ. [70] hücre için düşey iz genişlemesini hesaba katabilmek için klasik iz teorisinden yararlanmıştır. Boettcher ve diğ. [69] tüm rüzgar çiftliğini temsil eden ortalama bir akış hızı kullanmaktadır. Redfern ve diğ. [72] ise türbin eksenini ile rüzgar yönü arasındaki açıyı göz önüne alarak rüzgar yönünün yükseklikle değişimini hesaba katmaktadır. Referans rüzgar şiddeti haricinde C_{KE} için de parametrizasyonlar arasında farklılaşma görülmektedir. Örneğin, bazı parametrizasyonlarda [8, 49] C_{KE} için sabit bir değer kullanılırken, bazılarında [65, 66, 69-72, 76] rüzgar şiddetinin bir fonksiyonudur. Blahak ve diğ. [65] C_{KE} hesabına ayrıca elektromekanik kayıpları da dahil etmektedir.

Rüzgar (türbinleri) çiftliği, Açık parameterizasyon yaklaşımında artan momentum kaybı olarak tanımlanırken bazılarında TKE kaynağı da eklenmektedir. Ancak rüzgar türbinleri Açık parameterizasyon yaklaşımlarında dolaylı veya açık TKE kaynağı olarak ele alınmaktadır. Kapalı TKE kaynağında (Örneğin, Volker ve diğ. [70]) TKE üretimi rüzgar türbinlerinin mezo ölçek modeldeki sınır tabaka (PBL) parametrizasyonu ile olan etkileşimi ile türbinlerin neden olduğu momentum kaybının

indüklediği rüzgar kayması ile başlatmaktadır. Eğer açık bir TKE kaynak terimi eklenmezse, rüzgar kayması nedeni ile rüzgar çiftliğinin rüzgar altında kademeli olarak TKE seviyesi kuvvetlenecektir. Ters durumda yani açık bir TKE kaynak terimi eklenirse TKE üretimi rüzgar çiftliğinde artacaktır. WRF modelinde EWP [70] şeması ile yapılan model simülasyonlarında rüzgar çiftlik etkilerinin Fitch WFP [66] şeması ile yapılan model simülasyonlarındaki rüzgar çiftlik etkilerinden daha zayıf olmasının temel nedeni EWP şemasında açık TKE kaynak teriminin kullanılmamasıdır [77-78]. Fischereit ve diğ.'nin [73] inceleme çalışmasına göre EWP şeması haricinde iki farklı WFP şeması da [49, 69] dolayı TKE kaynak terimi kullanırken, Fitch WFP şeması dahil olmak üzere yedi farklı WFP şeması [8, 65-68, 71, 72, 76] açık TKE kaynak terimi kullanmaktadır. Açık TKE kaynak terimi ise temelde

$$\bar{p}_t = 0.5C_{TKE}(U)U^3A_r \quad (1.6)$$

denklemi ile ifade edilmektedir, ve burada C_{TKE} TKE katsayısını yani rüzgar türbinlerinin atmosfere ne kadar TKE eklediğini açıklayan bir katsayıyı ifade etmektedir. Momentum kayıp teriminde olduğu gibi TKE kaynak teriminde de parametrisasyonlar arasında farklılıklar bulunmaktadır. Örneğin, Fitch WFP şemasında [66] TKE kaynak terimindeki C_{TKE} rüzgar türbinine ait itki katsayısı (CT) ile güç katsayısı (CP) arasındaki fark ile tanımlanırken, Baidya Roy'un [8, 76] WFP şemasında sabit bir değer ile tanımlanmaktadır. Rüzgar çiftliğinin meydana getirdiği rüzgar kayması neticesinde TKE üretimi mezo ölçek modeldeki PBL şemasında gerçekleşirken, açık TKE kaynak teriminden gelen ek TKE, her model zaman adımında PBL şemasından gelen TKE'ye eklenmektedir. WRF modelindeki Fitch WFP şeması [66] Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino (MYNN) PBL şeması [79] ile etkileşmektedir. Rüzgar türbininin neden olduğu ek TKE ana akış ile advekte olduğundan WRF modelinde Fitch ve EWP şemalarında TKE adveksiyonunun kullanımı önem arz etmektedir. Ancak, örneğin, Siedersleben ve diğ. [80] TKE adveksiyonu kullanımında rüzgar çiftliği üzerinde simüle edilen TKE seviyesinin oldukça düşük olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum WRF modelinin 3.5 versiyonu ile 4.2.1 versiyonu arasındaki model versiyonlarında Archer ve diğ.'nin [81] çalışmalarında ortaya koyduğu WFP şemasının, modeldeki bir kod bloğu eksiği sonucunda, MYNN PBL şeması ile etkileşmemesinden dolayı rüzgar türbinlerinin ürettiği ek TKE'nin doğru şekilde advekte olamamasından kaynaklanmaktadır. Bu kod

bloğu eksikliği, Fischereit ve diğ.'nin [73] inceleme çalışmasına göre 43 çalışmadan 24'nün sonuçlarını değiştirmektedir.

1.4 Tezin Amacı

Düşük karbonlu elektrik enerjisi üretimi sağlamaları nedeniyle rüzgar enerjisine hızla artan talep ve ihtiyaç neticesinde dünya üzerinde rüzgar çiftliklerinin sayısı ve boyutlarının yanı sıra, çiftliklerde kullanılan rüzgar türbin ebatları da artmaktadır. Bir rüzgar türbini elektrik enerjisi üretmek üzere gelen rüzgarın kinetik enerjisini kullanarak, türbinin rüzgar altı kısmında rüzgar akışını, rüzgar şiddetini azaltarak ve akıştaki türbülans seviyesini artırarak bozmaktadır. Rüzgar altındaki bu alan rüzgar türbin izi olarak tanımlanmaktadır. İz alanında artan düşey türbülanslı karışım da atmosferik sınır tabakadaki sıcaklık, nem, türbülanslı yüzey akılarını yeniden düzenleyerek yer-atmosfer etkileşimini önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Bir rüzgar çiftliği ebatına bağlı olarak onlarca ya da binlerce rüzgar türbini ihtiva edebilir. Böylece bir rüzgar çiftliğindeki her bir rüzgar türbin izinin doğrusal olmayan kümülatif etkisi atmosferik sınır tabakada potansiyel meteorolojik etkiler oluşturmaktadır ve bu potansiyel etkiler incelenmelidir. Bu tez çalışması mezo ölçek WRF modelini Fitch WFP [66] ile beraber kullanarak bir rüzgar çiftliğinin meteoroloji (rüzgar, TKE, sıcaklık, sınır tabaka yüksekliği, kar yağı ve kalınlığı) üzerindeki etkilerini model perspektifinden lokal (rüzgar çiftliği ve hemen çevresi) ve bölgesel ölçekte (rüzgar çiftlik iz ve blokaj bölgesi) inceleyemeyi amaçlamıştır.

Bölüm 2'de Bölüm 3 ile Bölüm 6 arasındaki çalışmalarda kullanılan yöntem (WRF modeli ve WFP) ve veri (reanaliz verisi) tanıtılmaktadır. Ancak Bölüm 3 ile Bölüm 6 arasında model validasyonlarında kullanılan ölçüm verisi, model konfigürasyonlarında yapılan değişikliklere ait bilgi ilgili bölüm içerisinde verilecektir.

Rüzgar türbinleri atmosferik sınır tabakada çalışırlar ve bu tabaka ile etkileşirler. WRF modeli sürümlerinde Fitch WFP şeması [66] şu anda sadece MYNN2.5 PBL şeması ile çalışmaktadır. Archer ve diğ.'nin [81] çalışması haricinde hiçbir çalışma Fitch WFP şeması ile MYNN2.5 şeması arasındaki etkileşime direkt olarak odaklanmamıştır. Bölüm 3'te yapılan çalışmada ise MYNN PBL şemasında yapılan değişimler altında rüzgar çiftliği iz etkileri simülasyonları için WRF-WFP çözümlerindeki değişimleri inceleyerek literatürdeki boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır. Bölüm 3'te, MYNN

PBL şemasında karışım uzunluğu (yerel karışım) yaklaşımları değiştirerek, kütle-akı şemasını (yerel olmayan karışım) aktive ederek ve TKE adveksiyonunu doğru ve yanlış şekilde kullanarak gerçekleştirilen bir dizi simülasyon sonucunda WFP ile MYNN PBL şeması arasındaki etkileşime dair yeni bilgiler verecektir. Dahası TKE adveksiyonunun kullanıldığı model simülasyonlarında WFP'nin TKE ve momentum tandans bileşenlerinin bağıl katkılarını göstermek üzere sadece bir bileşenin açık diğerinin ise kapalı olduğu iki ek simülasyon gerçekleştirilmiştir. Böylece, WFP bileşenlerinin davranışları da incelenmiştir. Ek olarak, TKE adveksiyonunun doğru kullanıldığı bir simülasyonda WFP'deki C_{TKE} için Archer ve diğ'nin [81] çalışmalarında önerdiği 0.25 düzeltme katsayısı kullanılarak rüzgar çiftliği iz etkisi rüzgar çiftliğinden gelen ek TKE'deki değişim açısından incelenmiştir. Ancak bu simülasyonlara geçilmeden önce simüle edilen rüzgar çiftliği iz etkisinin modeldeki yatay ve düşey çözünürlüğe bağlı değişimi incelenerek en uygun yatay ve düşey çözünürlük belirlenmiştir.

Bölüm 4 ise Bölüm 3'ün devamı olup bir boyutlu momentum teorisi ele alınarak C_{TKE} hesabı sadece itki katsayısı cinsinden yeniden yazılarak rüzgar çiftliğinin özellikle gece saatlerinde TKE ve hava sıcaklığı üzerindeki etkisinde daha doğru sonuçlar üretilmesi hedeflenmiştir. Bu yaklaşıma ait model simülasyonu Bölüm 3'teki çalışmaya uygulanmıştır. Bu nedenle, çalışmanın uygulandığı bölge, kurgulanan rüzgar çiftliği ve çiftlikte kullanılan türbin modeli ile birlikte ele alınan zaman periyodu Bölüm 3'teki ile aynıdır.

Bölüm 5'te 2015 yılının Ağustos ayına ait 8 günlük bir periyot üzerinden yüzey özelliklerindeki değişikliğin türbin rotorunun tepe yüksekliğine kadar ulaşabilmesi için belirlenen bir alanda yapılan arazi kullanım değişikliği ile rüzgar çiftliğine ait ortalama meteorolojik etkiler ve güç üretimi ve ek olarak bu değişikliğin sonucunda sonuçlardaki değişim değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Arazi değişikliği rüzgar enerji potansiyelinin nispeten yüksek ve iz etkisinin nispeten kuvvetli olabileceği 8 günlük bir yaz periyodunun belirlendiği Kırklareli bölgesinde gerçekleştirilmiştir. Arazi değişikliğinin gerçekleştirileceği bölgede (yama alanı) kuru tarım arazisi ve yaprak dökken geniş yapraklı orman en yüksek arazi kullanım alanına sahip olduğundan yama alanında bu iki arazi örtüsünün birbirine kıyasla rüzgar çiftliğinin meteorolojik etkisinde ve güç üretimindeki farkı incelenmiştir.

Rüzgar çiftliklerinin yağmur üzerindeki etkisine yönelik birçok çalışma bulunmasına rağmen literatürde henüz kar yağışı üzerindeki etkisine yönelik bir çalışma bulunmamaktadır. Bölüm 6’da literatürdeki bu eksikliği gidermek üzere 21-27 Ocak 2022 tarihinde gerçekleşen Elpis Fırtınasının özellikle İstanbul üzerinde 24-25 Ocak 2022 tarihinde etkili olması ile meydana gelen yoğun kar yağışı için, İstanbul’un karadeniz kıyısının açıklarında hipotetik bir rüzgar çiftliği varlığında kar yağışında ve meydana gelecek kar kalınlığındaki değişim incelenmiştir. Ancak özellikle kar yağışındaki / kalınlığındaki değişimin nispeten en yüksek olduğu durumu elde edebilmek için sonuçlar rüzgar çiftliğinin konumu ve kullanılan türbin modeli açısından ayrıca incelemiştir ama rüzgar çiftliğinin kar yağışı ve diğer meteorolojik parametreler üzerindeki etkisine yönelik ayrıntılı değerlendirmeler en yüksek etkiyi sağlayan rüzgar çiftlik konumu ve türbin ebatı çifti için yapılmıştır.

2. YÖNTEM VE VERİ

2.1 Mezo Ölçek WRF Modeli

Mezo ölçek modellerde akışın dinamiğini açıklayabilmek için RANS denklemleri kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında tüm simülasyonlar mezo ölçek WRF modeli ile gerçekleştirilmiştir. WRF modeli ABD’de bulunan Ulusal Atmosferik Araştırma Merkezi (NCAR) tarafından geliştirilmiştir ve atmosferik araştırma ve operasyonel tahmin için yaygın olarak kullanılmaktadır. WRF modeli tamamen sıkıştırılabilir, hidrostatik olmayan korunum denklemlerini hidrostatik-basınç düşey koordinatlarını takip eden arazi yapısını kullanarak bir Arakawa kademeli (staggered) C-grid üzerinde ayrıklaştırarak çözmektedir. WRF modeli ile ilgili teknik detaylar Skamarock ve diğ.’nin [82] çalışmasında yer almaktadır. Bölüm 1.2’de açıklandığı üzere rüzgar çiftliğini temsil eden artan momentum kaybını ve bazı açık parametrizasyonlar için de TKE kaynağını mezo ölçek atmosferik modellere dahil edebilmek için RANS denklemlerine ek terimler eklenir. RANS denklemi aşağıdaki ifade (Denklem 2.1) ile tanımlanmaktadır:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} - 2\varepsilon_{ijk} \Omega_j \bar{u}_k - \delta_{i3} g - (\delta_{i1} + \delta_{i2}) \bar{f}_{ti} \quad (2.1)$$

Denklem 2.1’de u_i i yönünde ki bu da akış doğrultusunda ($i = 1$), yanal (akışa dik) doğrultuda ($i = 2$) ve düşey doğrultudaki ($i = 3$) hız bileşenini temsil ederken, t zamanı, p basıncı, ρ yoğunluğu, ε_{ijk} Levi-Civita sembolünü, Ω_j yerin rotasyon vektörünü, δ_{ij} Kronecker delta’yı ve g de yerçekimi ivmesini temsil etmektedir. Denklem 2.1’de eşitliğin sağ tarafındaki son terimde, $\bar{f}_{ti}$ ise rüzgar türbin rotor hareketinin neden olduğu ortalama yatay kuvveti temsil etmektedir. Denklem 2.1 birim kütledeki kuvvet olarak yazıldığından $\bar{f}_t$ kontrol hacmi için momentum kayıp terimini temsil etmektedir. Denklem 2.1’de değişkenlerin üzerindeki yatay çizgi (örn. $\bar{f}_t$) zamansal (Δt) ve uzamsal ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$) aralıktaki ilgili değişkenin ortalamasını ifade ederken, üs işareti (örn. u') ortalamadan olan sapmayı (pertürbasyon) ifade etmektedir.

Denklem 2.1’de Reynold stres bileşenleri ($\overline{u'_i u'_j}$) 1.5 merteye (2.5 seviye) bir sınır tabaka şeması (örn. MYNN2.5 PBL şeması) ile parametrikleştirilmektedir:

$$\overline{u'_i u'_j} = -K_m \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (2.2)$$

Burada K_m girdap yayılma (eddy diffusivity) terimi ise aşağıdaki eşitlikle açıklanmaktadır:

$$K_m = q l S_m \quad (2.3)$$

Burada q türbülans hız vektörünü, l türbülans uzunluk ölçeğini ve S_m ise momentum için kararlılık fonksiyonunu temsil etmektedir. Türbülans hız vektörü (the turbulence velocity) TKE’nin iki katının karekökü olarak tanımlanmaktadır. Türbülanslı karışım uzunluğu ve kararlılık fonksiyonu ele alınan PBL şemasına bağlıdır. Bu tez çalışmasında rüzgar çiftliği simülasyonlarında kullanılan Fitch WFP şeması sadece MYNN PBL şeması ile çalışmaktadır. MYNN PBL şemasında türbülanslı karışım uzunluğu aşağıdaki eşitlikle tanımlanmaktadır:

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{l_s} + \frac{1}{l_t} + \frac{1}{l_b} \quad (2.4)$$

Denklem 2.4’te l_s , l_t ve l_b sırasıyla boyansı (buoyancy), türbülans ve yüzey uzunluk ölçeklerini temsil etmektedir [79]. MYNN PBL şemasında orijinal [79] ve iki modifikasyon olmak üzere üç karışım uzunluğu formülasyon seçeneği bulunmaktadır. Bu üç karışım uzunluğu formülasyonu ile ilgili detaylar Olso ve diğ.’nin [83] çalışmasında yer almaktadır. Bir 2.5 seviye kapamada, çözümlenmiş-ölçek TKE ($e = 0.5 \overline{u'_i u'_i}$) için denklem, ortalama olmayan denklemden RANS denklemini çıkartıp sonuç denklemin u'_i ile çarpılmasıyla elde edilmektedir ve aşağıda ifade edilmektedir:

$$\frac{\partial \bar{e}}{\partial t} = -\bar{u}_j \frac{\partial \bar{e}}{\partial x_j} - \frac{\partial \overline{u'_j e}}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{u'_j p'}}{\partial x_j} + \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \bar{P}_b + \bar{P}_t - \varepsilon \quad (2.5)$$

Burada eşitliğin sol tarafındaki terim TKE tendansını temsil ederken, sağ tarafındaki ilk terim TKE’nin ortalama akışla adveksiyonunu, ikinci terim TKE’nin türbülanslı taşınımını, üçüncü terim TKE’nin basınç pertürbasyonlarıyla nasıl tekrar düzenlendiğini ifade eden basınç korelasyonunu, dördüncü terim mekanik veya kayma üretimini/kaybını, beşinci terim boyansı üretimini/kaybını ve yedinci terimi ise TKE disipasyonunu temsil etmektedir. Denklem 2.5’de eşitliğin sağ tarafındaki altıncı terim, $\bar{P}_t$, rüzgar türbinlerinin neden olduğu hacimsel ortalama türbülans üretimini temsil etmektedir.

Bir sonraki alt başlıkta detayları verilecek olan Fitch WFP şeması q 'yu artıracak bir TKE kaynak terimi ekleyerek ve $\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$ ifadesini değiştirecek bir momentum kayıp terimi ekleyerek MYNN PBL şeması ile etkileşmektedir. Bu nedenle Fitch WFP şeması dolaylı olarak türbülanslı akıların da değiştirmektedir. Fitch WFP şeması pertürbasyonları rüzgar çiftliğini temsil eden model hücrelerinde üretir ve MYNN PBL şeması da adveksiyon (TKE adveksiyonu opsiyonu kullanılırsa) ve difüzyon süreçleri ile rüzgar altına taşır.

2.2 Fitch WFP Şeması

Bölüm 1.2'de birçok dolaylı ve açık WFP şeması tanıtılmıştır. Bu tez çalışmasında, WRF model simülasyonlarında, açık WFP şemalarından Fitch WFP şeması [66] kullanılmıştır. Bu parametrisasyon şeması ilk olarak rüzgar türbin modeline ait itki katsayısına bağlı olarak rüzgar çiftliği hücrelerinde rotor alanı ile kesişen düşey seviyelerdeki ortalama akışa ait kinetik enerjinin belirli bir oranını elde etmektedir. Bu elde edilen enerjinin ise belirli bir oranı aynı türbin modeline ait güç katsayısına bağlı olarak elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Rüzgar türbin modeline ait itki ve güç katsayıları rüzgar şiddetinin bir fonksiyonudur. Ancak bu WFP şemasında elektromekaniksel kayıplar ihmal edilmektedir. Bu nedenle ilk adımda elde edilen kinetik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülemeyen kısmı ise direkt TKE'ye dönüştürüldüğü varsayılmaktadır ve oranı ise rüzgar türbin modeline ait itki ve güç katsayısı arasındaki fark ile belirlenmektedir. Bu oran TKE katsayısı (C_{TKE}) olarak tanımlanmaktadır.

WFP şeması TKE ve momentum tandans terimlerinden oluşmaktadır. Rüzgar çiftliği hücrelerinde türbinlerin rüzgardan kinetik enerji eldesi (Fitch ve diğ. [66]: Denklem 5) aynı zamanda o hücrelerde aynı oranda bir rüzgarda KE kaybı (Fitch ve diğ. [66]: Denklem 7) anlamına da gelmektedir ve bu eşitlik durumu momentum tandası terimini oluşturmaktadır:

$$\frac{\partial |V|_{ijk}}{\partial t} = - \frac{0.5 N_t^{ij} C_T (|V|_{ijk}) |V|_{ijk}^2 A_{ijk}}{(z_{k+1} - z_k)} \quad (2.6)$$

Bu denklemde i, j ve k zonal, meridyonel ve düşey düğüm indisleridir, $|V|_{ijk}$ yatay rüzgar bileşeni, N_t yatay düğüm hücreesindeki rüzgar türbini sayısı, A_{ijk} ij düğüm hücreesinde k ve $k + 1$ model seviyeleri arasındaki rotora ait kesit alanı, ve z_k ise k model seviyesindeki yüksekliktir (Şekil 2.1). Elektrik enerjisine dönüştürülmek üzere türbin modelinden güç eldesi ise

$$\frac{\partial P_{ijk}}{\partial t} = \frac{0.5 N_t^{ij} C_P (|V|_{ijk}) |V|_{ijk}^3 A_{ijk}}{(z_{k+1} - z_k)} \quad (2.7)$$

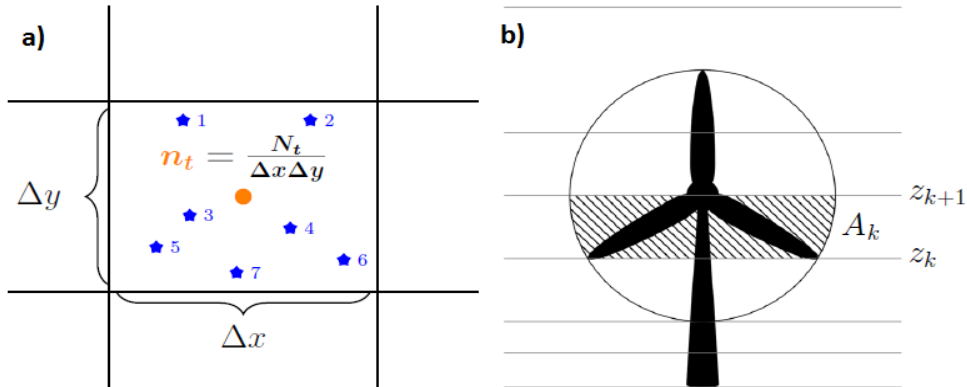
denklemini ile verilmektedir ve elektrik enerjisine dönüşmeyen TKE tansiyon terimi ise

$$\frac{\partial TKE_{ijk}}{\partial t} = \frac{0.5 N_t^{ij} C_{TKE} (|V|_{ijk}) |V|_{ijk}^3 A_{ijk}}{(z_{k+1} - z_k)} \quad (2.8)$$

denklemini ile verilmektedir. Burada

$$C_{TKE} = C_T - C_P \quad (2.9)$$

olarak ifade edilmektedir.

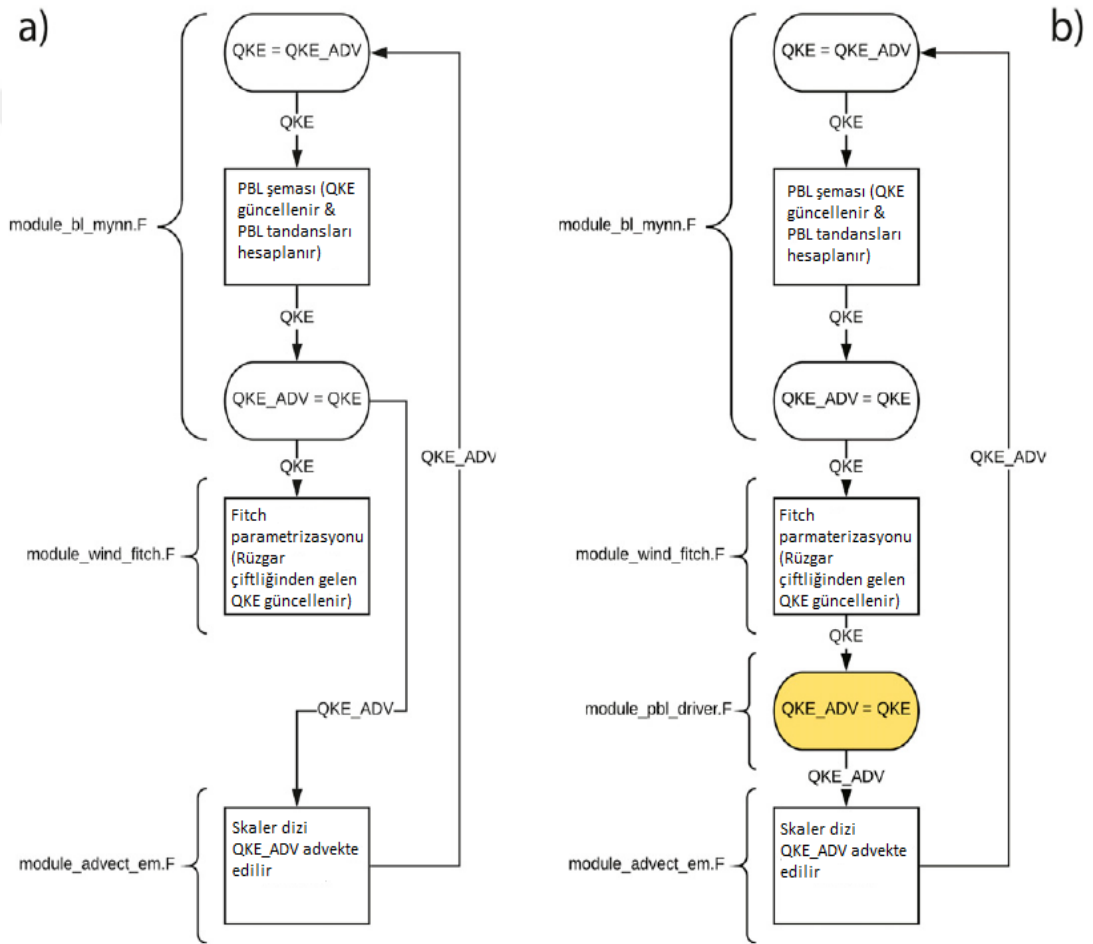


Şekil 2.1 : a) Bir yatay model hücreesinde rüzgar türbinlerinin konumları ve n_t ile ifade edilen ilgili hücredeki türbin yoğunluğu, b) model düşey seviyeleri ile türbin rotorunun kesişim alanı. Şekil direkt olarak Fischereit ve diğ.'nin [73] çalışmasından alınmıştır.

Bu WFP şemasında Bölüm 1.2'de de açıklandığı üzere rüzgar çiftliği hücrelerindeki rüzgar türbinlerinin rüzgar akışına dik olarak konumlandırıldığı varsayılmaktadır. Bu nedenle rüzgar çiftliğindeki rüzgar türbinlerinin original konumları hücre içerisinde ihmal edilmektedir ve böylece aynı hücredeki rüzgar türbinleri önsıra (front-row) türbinleri olarak ele alınmaktadır ve aynı rüzgar koşuluna maruz kalmaktadır (11).

WFP şeması kullanımında eğer WRF modelinde TKE adveksiyonu etkinleştirilirse modelde PBL şemasında hesaplanan QKE ($=2 \times TKE$) WFP'den gelen ek QKE

tarafından, her WRF çıktı (WRF output) periyodunda son model zaman adımına kadar güncellenememektedir. QKE sadece WRF çıktı periyodunun son model zaman adımında güncellenmektedir. Bu durum module_pbl_driver.F fortran modülünde WFP şemasının kullanıldığını gösteren ilgili satır bloğunda skaler bir dizi olan QKE_ADV parametresinin WFP'den gelen QKE ile güncellenmemesinden kaynaklanmaktadır (Şekil 2.2). Güncellenemeyen QKE_ADV ise adveksiyon ve difüzyon süreçlerinin gerçekleştiği module_advect_em.F fortran modülüne girdi olarak girerek her WRF çıktısında elde edilen QKE parametresinin yanlış bir şekilde düşük değerlerde olmasına sebep olacaktır.



Şekil 2.2 : WRF-WFP modelinde TKE adveksiyonu kullanımında (namelist.input dosyasında bl_mynn_tkeadvect=true olarak ayarlanır) QKE hesaplanma sürecinin akış çizgesi: a) problemin mevcut olduğu durum, b) problemin düzeltildiği durum. Bu akış çizgesi direkt Archer ve diğ.'nin [81] çalışmasından alınmıştır ve çizgedeki ilgili kutucuklar Türkçe'ye tercüme edilmiştir.

Bu problem ilk olarak Archer ve diğ.'nin [81] çalışmasında WRF modelinin 3.5 versiyonundan beri mevcut olduğu gösterilmiştir. WRF modelinin 4.2.1 versiyonu ile problem ortadan kaldırılmıştır. Ancak bu versiyondan önce Archer ve diğ.'nin [81]

çalışmasında verdiği düzeltme prosedürü takip edilmelidir. WRF v3.8.1 modelinde problemin başladığı module_pbl_driver.F modülünde ilgili satır bloğuna (1864. İle 1866. satır arasına) QKE_ADV'nin rüzgar çiftliğinden gelen QKE ile güncellenmesi sağlayacak bir “if” koşulu eklenmesi sonrasında WRF modelinin derlenmesi ile problem düzeltilmiş olacaktır. İlgili satır aralığına eklenmesi gereken “if” koşulu aşağıda verilmektedir:

```
IF (bl_mynn_tkeadvect) THEN
```

```
    qke_adv=qke
```

```
ENDIF
```

Archer ve diğ. [81] çalışmasında ayrıca TKE adveksiyonuna ait problem düzeltilmesine rağmen WFP'nin TKE tandans bileşenindeki C_{TKE} nedeni ile rüzgar çiftliğinden gelen ek TKE seviyesinin halen yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Araştırmacılar bunu düzeltmek üzere WRF-WFP'nin LES sonuçlarına göre optimizasyonu sonucunda C_{TKE} için 0.25 düzeltme faktörünün elde etmiştir. Ancak bu düzeltme faktörü idealize edilmiş WRF-WFP simülasyonları ile elde edilmiştir. C_{TKE} için düzeltme WRF modelinde module_wind_fitc.F fortan modülünde gerçekleştirilmektedir. WRF modelinin 4.2.1 versiyonundan önceki versiyonları için C_{TKE} düzeltme prosedürünün detayları Archer ve diğ'nin [81] çalışmasında verilmektedir.

2.3 Reanaliz Verisi

Bu tez çalışmasına dört ayrı çalışmadan oluşmaktadır, ve tüm alt çalışmalarda WRF modeli için sınır ve başlangıç koşulu olarak ERA-5 verisi kullanmıştır. ERA-5 reanaliz [84] verisi 0.25° yatay çözünürlüklü erişime sunulmaktadır. Ancak, 0.25° yatay çözünürlük yatayda yaklaşık 28 km'ye tekabül ettiğinden model simülasyonlarında en dış alanın 27 km olarak belirlendiği alt çalışmalarda (Bölüm 3, Bölüm 4 ve Bölüm 6) C3S veritabanından ERA-5 verisi 0.3° yatay çözünürlükle elde edilmiştir. Örneğin, Yeni Avrupa Rüzgar Atlası (NEWA) projesinin çıktısı olan Hahmann ve diğ. [85] çalışmasında da en dış alan 27 km olduğu için kullanılan ERA-5 verisi 0.3° olarak ayarlanmıştır.

3. MYNN ATMOSFERİK SINIR TABAKA PARAMETRİZASYONUNDA YAPILAN DEĞİŞİKLİKLER ALTINDA RÜZGAR ÇİFTLİK ETKİSİ BENZETİMİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

3.1 Giriş

Birçok çalışma WRF-WFP ile rüzgar çiftliği etkilerini yerel ölçekten [39, 46, 86-90] bölgesel ölçeğe [39, 46, 57, 58, 60, 91] kadar incelemiştir ancak bu çalışmalar yatay çözünürlük, düşey çözünürlük ve model fiziği gibi farklı WRF model konfigürasyonları kullanmıştır ve nihayetinde çelişkili sonuçlar üretmiştir. Bu durum model konfigürasyon seçiminin simülasyon öngörülerini nasıl etkilediğinin bir ifadesidir ve yakın zaman itibarı ile WRF-WFP çalışmalarında model konfigürasyon seçiminin etkileri incelenmeye başlanmıştır. Örneğin son WRF-WFP çalışmaları [26, 42, 80, 92] rüzgar çiftliği iz etkilerini daha iyi sunabilmek için model yatay çözünürlüğün karmaşık ya da düz kara arazi tipi ya da bir deniz çevre koşulu durumuna göre 1 km ile 5 km arasında olması gerektiği ve model düşey çözünürlüğün ise aşağı seviyede özellikle rotor tabakası ve aşağısı için 10 m ile 12 m arasında olması gerektiği ifade edilmektedir. Sun ve diğ. [91] simüle edilen rüzgar çiftliklerinin iklimsel etkilerinde WFP momentum ve TKE tandas bileşenlerinin bağıl katkılarını göstermiştir. Ek olarak, Xia ve diğ. [25] bu bileşenlerin bağıl katkılarında altta yatan fiziksel mekanizmayı sağlamıştır. Tomaszewski ve Lunquist [26] ve Siedersleben ve diğ. [80] simüle edilen rüzgar çiftliği izinin özellikle hava sıcaklığı ve TKE üzerindeki etkisinde WFP TKE tandans bileşeninin önemini vurgulamıştır. Witha ve diğ. [93] ve Hahmann ve diğ. [85] MYNN PBL şemasında karışım uzunluğu yaklaşımı değiştirildiğinde rüzgar şiddeti simülasyon öngörülerinde farklılaşma tespit etmiştir. Nihayetinde rüzgar şiddeti öngörüsündeki farklılaşma aynı zamanda rüzgar çiftliği iz etkisini de etkileyecektir. Bu durumu Tomaszewski ve Lundquist (2020) indirekt olarak WRF modelinin farklı versiyonlarını test ederek (v3.8.1 ve v4.0) incelemiştir. Ancak iki versiyondaki farklı karışım uzunluğu yaklaşımları rüzgar çiftliği iz etkisi öngörülerinde önemli olmayan oldukça küçük bir fark oluşturmuştur. Siedersleben ve

diğ. [80] WRF-WFP simülasyonlarında TKE adveksiyonunun kullanımında rüzgar çiftliği üzerindeki TKE seviyelerinin oldukça düşük olduğu göstermiştir. Bazı çalışmalar [71, 86, 89] da TKE adveksiyonu kullanılmadığında WFP'den gelen ek TKE'nin oldukça yüksek olduğunu göstermiştir. Abkar ve Porte-Agel [75] de Fitch WFP'den gelen ek TKE'nin LES ile elde edilen ek TKE'ye göre oldukça yüksek olduğunu bulmuştur. TKE seviyesi ile ilgili problemlerin kökeni ilk defa Archer ve diğ. [81] tarafından ortaya konmuştur ve problemlere ilişkin düzeltme prosedürleri sağlanmıştır. TKE seviyesindeki oldukça düşük ve oldukça yüksek öngörüler sırasıyla WFP kullanımında modeldeki bir kod bloğu eksikliği nedeni ile TKE adveksiyonunun doğru işlenmemesi ve WFP TKE tandas denklemindeki C_{TKE} katsayısından gelen yüksek değerdir.

Rüzgar türbinleri atmosferik sınır tabakada çalışırlar ve bu tabaka ile etkileşirler. Fitch WFP şeması [66] ise WRF modelinde şu anda sadece MYNN2.5 PBL şeması ile çalışmaktadır. Archer ve diğ'nin [81] çalışması haricinde hiçbir çalışma Fitch WFP şeması ile MYNN2.5 şeması arasındaki etkileşime direkt olarak odaklanmamıştır. Bu çalışma ise MYNN PBL şemasında yapılan değişimler altında rüzgar çiftliği iz etkileri simülasyonları için WRF-WFP çözümlerindeki değişimleri inceleyerek literatürdeki boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır. Bu nedenle bu bölüm, MYNN PBL şemasında karışım uzunluğu (yerel karışım) yaklaşımları değiştirerek, kütle-akı şemasını (yerel olmayan karışım) aktive ederek ve TKE adveksiyonunu doğru ve yanlış şekilde kullanarak gerçekleştirilen bir dizi simülasyon sonucunda WFP ile MYNN PBL şeması arasındaki etkileşime dair yeni bilgiler verecektir. Dahası TKE adveksiyonunun kullanıldığı model simülasyonlarında WFP'nin TKE ve momentum tandans bileşenlerinin bağıl katkılarını göstermek üzere sadece bir bileşenin açık değerinin ise kapalı olduğu iki ek simülasyon gerçekleştirilmiştir. Böylece, WFP bileşenlerinin davranışları da incelenmiştir. Ek olarak, TKE adveksiyonunun doğru kullanıldığı bir simülasyonda WFP'deki C_{TKE} için Archer ve diğ'nin [81] çalışmalarında önerdiği 0.25 düzeltme katsayısı kullanılarak rüzgar çiftliği iz etkisi rüzgar çiftliğinden gelen ek TKE'deki değişim açısından incelenmiştir. Ancak bu simülasyonlara geçilmeden önce simüle edilen rüzgar çiftliği iz etkisinin modeldeki yatay ve düşey çözünürlüğe bağlı değişimi incelenerek en uygun yatay ve düşey çözünürlük belirlenmiştir. Bu bölüme ait bulgular *Atmosphere* dergisinde yayımlanmıştır [47].

3.2 Veri ve Yöntem

3.2.1 Çalışma bölgesi, Ölçüm bilgisi, seçilmiş zaman periyodu

Bu çalışma Türkiye'nin Çanakkale ilinde seçilmiş bir bölgede gerçekleştirilmiştir. Bu seçilen bölgedeki ölçüm verisi aynı zamanda Yeni Avrupa Rüzgar Atlası (NEWA) projesinin ilk safhasındaki hassasiyet simülasyonlarında kullanılmıştır [93]. Ölçümün elde edildiği rüzgar ölçüm direği 370 m rakıma sahip tepenin eteğine kurulmuştur ve buradan alınan rüzgar verisi WRF modelinin WFP olmadan öngörü başarımını test etmede kullanılmıştır. Rüzgar ölçüm direğinde rüzgar şiddeti verisi 31 m, 61 m ve 81 m'deki kup anemometreleri aracılığı ile ölçülürken, rüzgar yönü sadece 78 m'de yön sensörü ile ölçülmektedir. Rüzgar şiddeti ve yönü verisinin örneklem zaman periyodu ise 10 dk'dır.

Bu bölüme ait çalışmada seçilen zaman periyodu rüzgar şiddeti ve yönü için ele alınan belli kıstaslara göre belirlenmiştir. Rüzgar şiddeti için ele alınan kıstaslar standart sapması düşük ve nispeten yüksek rüzgar enerjisi ihtiva eden rüzgar şiddeti değerleri iken rüzgar yönü için ele alınan kıstaslar ise belirli bir sektörde yüksek frekanslı ve düşük standart sapmalı rüzgar yönü değerleridir. Buna göre rüzgar şiddeti için 8 ms^{-1} – 12 ms^{-1} rüzgar şiddeti aralığı belirlenmiş olup standart sapmanın 1.5 ms^{-1} 'den düşük olması beklenmiştir. Rüzgar yönü için ise belirli bir rüzgar yön sektöründe esme frekansının % 90'dan fazla olması ve standart sapmanın ise 10° 'den düşük olması beklenmiştir. Böylece kararlı bir rüzgar akışında çoğu rüzgar türbin modeli için yukarıdaki beklenen rüzgar şiddeti aralığının yüksek itki katsayı üretmesi rüzgar çiftliği iz etkisini daha belirgin hale getirir ve bu şekilde model simülasyonları arasındaki fark daha iyi gözlemlenir. Yukarıda ele alınan kıstaslar sadece 2015 yılının yaz mevsiminden Temmuz ayına uygulanmıştır çünkü gözlemsel çalışmalar [16, 17, 19] rüzgar çiftliği iz etkisinin genellikle yaz mevsiminde daha kuvvetli olduğunu gözlemlemiştir ve bu çalışmada yaz mevsimi için rüzgar yön ve şiddet verisinin tam olduğu ay ise Temmuz ayıdır. Bu şekilde tanımlanan kıstaslara göre 2015 yılının temmuz ayı belirlenen zaman periyodu 17 ve 18 Temmuz'dur. Bu günlerde rüzgar kuzey doğu sektöründen esmektedir ve esme frekansı sırasıyla % 95.1 ve % 90.2'dir. Rüzgar şiddeti ve yönü için her iki güne ait ortalama ve standart sapma değerleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

3.2.2 Model simülasyonları

Bu bölüm ait çalışmadaki tüm simülasyonlar WRF v3.8.1 ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada MYNN PBL şemasında karışım uzunluğu yaklaşımları değiştirilerek, kütle-akı şeması aktifleştirilerek ve TKE adveksiyonu doğru ve yanlış şekilde etkinleştirilerek bu şemada yapılan değişimler altında rüzgar çiftliği iz etkisindeki değişimler incelenmiştir. Aynı zamanda MYNN PBL şemasında TKE adveksiyonunu doğru şekilde etkinleştirildiği bir model simülasyonunda WFP'deki C_{TKE} Archer ve diğ'nin [81] önerdiği biçimde 0.25 düzeltme katsayısı ile modifiye edilmiştir. Diğer model opsiyonları tüm simülasyonlarda aynı bırakılmıştır. Bu opsiyonlarda uzun ve kısa dalgaboylu radyasyon için Rapid Radiative Transfer Model for General circulation Model (RRTGM) şeması [94], mikrofizik için single moment 5-class şeması [95], kümülüs fiziği için Kain-Fritsch şeması [96], kara yüzey fiziği için Noah Land Surface modeli [97] kullanılmıştır. Atmosferik sınır tabaka için ise bu ve diğer bölümlerde olduğu üzere MYNN2.5 [79] PBL şeması kullanılmıştır. Çalışmada belirlenen model zaman adımı ise en dış model alanı için 30 s'dir.

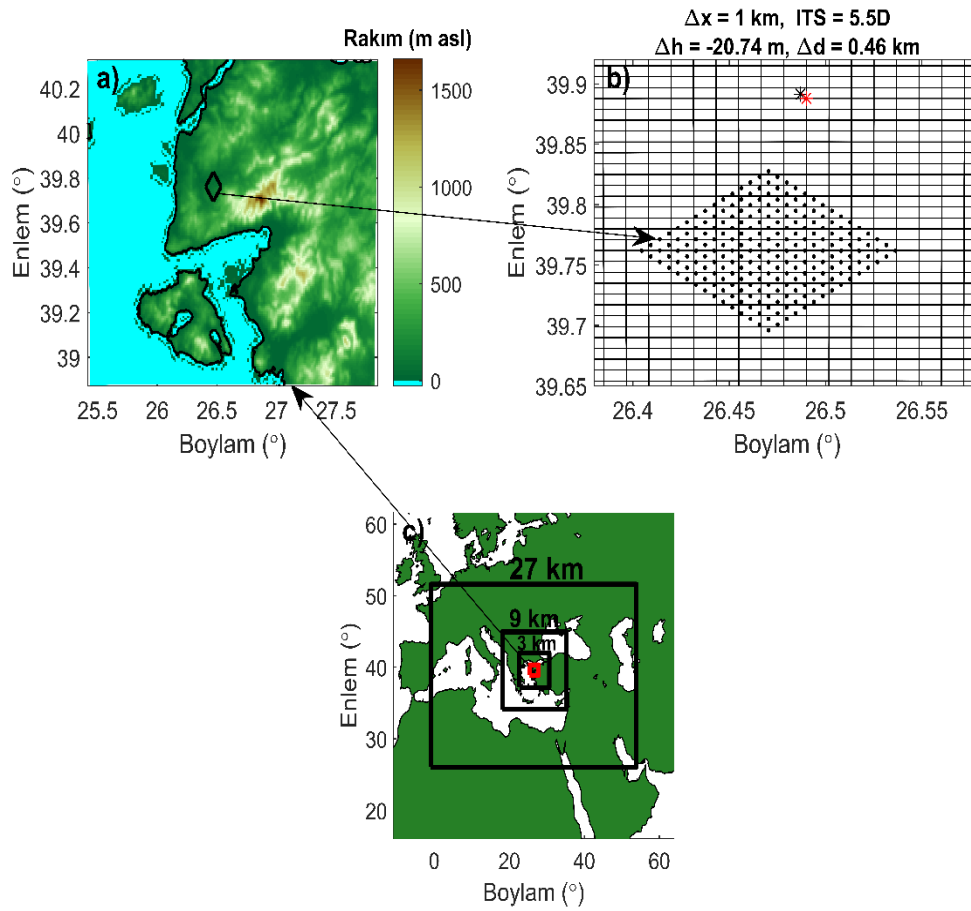
Çizelge 3.1 : Rüzgar şiddeti (V) ve yönüne (D) ait ortalama ve standart sapma değerleri

2015/7/17				
	V (ms^{-1})	V (ms^{-1})	V (ms^{-1})	D ($^{\circ}$)
	@ 31 m	@ 61 m	@ 81 m	@ 78 m
Ortalama	9.76	10.83	11.4	60.71
Standart Sapma	0.97	0.67	0.72	6.13
2015/7/18				
	V (ms^{-1})	V (ms^{-1})	V (ms^{-1})	D ($^{\circ}$)
	@ 31 m	@ 61 m	@ 81 m	@ 78 m
Ortalama	8.82	9.95	10.55	57.63
Standart Sapma	0.97	1.03	1.26	9.17

Çalışmada dört yuvalanmış model alanı kullanılmıştır. Model alanlara ait yatay çözünürlükler dıştan içe doğru sırasıyla 27 km, 9 km, 3 km ve 1 km'dir (Şekil 3.1c). Bu çalışmada Çanakkale ilinin seçilen bölgesinde kurulan hipotetik rüzgar çiftliği tüm model alanlarının merkezinde olacak şekilde konumlandırılmıştır. Literatürde Terra Incognita ya da Türkçe tercümesiyle bilinmeyen yer olarak tanımlanan mezo-ölçek ve

LES ölçeği arasındaki nümerik aralık nedeni ile en iç model alanı için en yatay çözünürlük olan 1 km'nin kullanımı belirlenmiştir. Ancak MYNN PBL şemasında yapılacak değişimlere ait model simülasyonları gerçekleştirmeden önce model öngörüsünde yatay çözünürlüğe bağlı değişim incelenmiştir. Bunun için sadece en dış model alanı kalana kadar her model simülasyonu için bir iç model alanı çıkarılır. Örneğin 3 km'lik yatay çözünürlüğe sahip simülasyonu için 1 km'lik en iç model alanı çıkarılır ya da 9 km'lik yatay çözünürlüğe sahip model simülasyonu için 3 km ve 1 km'lik iç model alanları çıkarılır. Buna ek olarak model öngörüsünde düşey çözünürlüğe bağlı değişim de incelenmiştir. Bunun için iki düşey yapı test edilmiştir (Şekil 3.2). İlkinde yerden 400 m'ye kadar 12 m düşey çözünürlüğe sahip 81 düşey seviyeden oluşan düşey yapı test edilirken ikinci testte ise yerden 200 m'ye kadar düşey çözünürlüğün 35 m olduğu 50 düşey seviyeye sahip bir düşey yapı test edilmiştir (Şekil 3.2). Düşey çözünürlük testinde yatay yuvalanmış dört model alanı da kullanılmıştır. Yatay çözünürlük testinde ise referans simülasyonda 81 düşey seviyeden oluşan düşey yapı kullanılmıştır. Dolayısıyla yatay ve düşey çözünürlük test edilirken çözünürlüğün düşürülmesinin rüzgar çiftliği iz etkisi açısından model öngörüsündeki etkisi incelenmiştir. Bu şekilde ana simülasyonlara geçilmeden önce uygun yatay ve düşey çözünürlükler belirlenmiştir. Tüm model simülasyonlarında yükseklik ve arazi örtüsü altlık verisi için sırasıyla 30 s çözünürlüklü GMTED2010 ve USGS LU verisi kullanılmıştır. MYNN2.5 PBL şemasında yapılan değişiklikleri temsil eden ana simülasyonlara ait model konfigürasyonları Çizelge 3.2'de verilmektedir. Ana simülasyonlarda 7 model simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.2'de ifade edilen BASE simülasyonu Referans simülasyonu temsil etmektedir ve WRF v3.8.1'deki varsayılan MYNN PBL şeması kullanılmıştır. Bu nedenle bu simülasyonda TKE adveksiyonu opsiyonu kapalıdır. ORGMYNN simülasyonunda Nakanishi ve Niino'nun [79] çalışmasında gösterilen orijinal MYNN PBL şeması kullanılmıştır. EDMF simülasyonlarında MYNN şemasında kütle-akı şeması aktifleştirilmiştir ancak EDMFv1 şemasında karışım uzunluğundaki ilk modifikasyon opsiyonu kullanılırken EDMFv2 şemasında ikinci modifikasyon opsiyonu kullanılmıştır. ADV simülasyonunda TKE adveksiyonu (yanlış şekilde) aktifleştirilmiştir. Bu yanlış aktifleştirme modeldeki problemden kaynaklıdır ve ilk defa Archer ve diğ'nin [81] çalışmasında gösterilmiştir. ADVBF simülasyonunda ise Archer ve diğ'nin [81] çalışmasındaki prosedür izlenerek WRF v3.8.1 için modeldeki TKE adveksiyonuna yönelik problem giderilmiştir. Bu nedenle bu simülasyonda TKE

adveksiyonu doğru şekilde kullanılmıştır. ADVBF_MCTKE ise önceki simülasyona ek olarak WFP’de C_{TKE} için Archer ve diğ’nin [81] çalışmasında uygun ek TKE seviyesi üretmek üzere elde ettiği 0.25 düzeltme katsayısı kullanılmıştır. Son olarak TKE adveksiyonunun yanlış ve doğru kullanıldığı simülasyonlarda WFP’nin TKE ve momentum tansiyon bileşenlerinin bağlı katkılarını inceleyebilmek üzere sırasıyla TUR ve MOM olmak üzere iki ek simülasyon daha yapılmıştır ancak bu simülasyonlar ana simülasyonların değerlendirmesinde olmayıp sadece TKE adveksiyonu nedeni ile WFP bileşenlerinin bağlı katkılarındaki değişimi gösterebilmek üzere gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1 : En iç model alanına ait yükselti haritası (a), siyah nokta gösterimi ile rüzgar çiftliğindeki rüzgar türbinlerinin düzeni (b) ve yuvalanmış model alanlarının yapısı (c). Yuvalanmış model alanlarından (c) kırmızı ile gösterilen model alanı 1 km yatay çözünürlüklü en iç model alanını temsil etmektedir. Rüzgar türbinlerinin düzenini gösteren şekilde (b) Δx , ITS ve Δh ve Δd sırasıyla ilgili model alanın yatay çözünürlüğü, türbinler arası mesafeyi, ölçüm lokasyonu (siyah yıldız) ile ona en yakın model düğüm noktası lokasyonu (kırmızı yıldız) arasındaki rakım farkını ve bunlar arasındaki yatay mesafeyi temsil etmektedir.

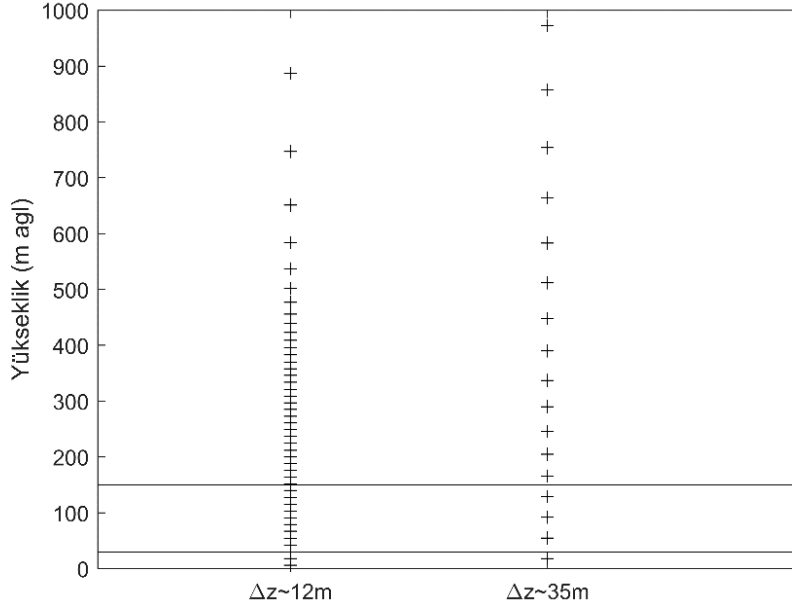
Model simülasyonlarına ait simülasyon periyodu 36 saat olarak belirlenmiş olup bunun ilk 12 saati, İngilizce literatürde spin-up olarak geçen, modelin dengeye ulaşabilmesi için gerekli olan süre olarak tanımlanmıştır. Dolayısıyla seçili günler ayrık yani günlük simülasyonlar olarak gerçekleştirilmiştir ve bu nedenle simülasyon başlangıç zamanı önceki günün UTC saati ile öğlen 12'dir. Rüzgar çiftliği iz etkisi, model simülasyonlarının WFP'li ve WFP olmadan olan öngörülerindeki fark ile değerlendirilmektedir. Rüzgar çiftliği iz etkisinin değerlendirmesinde ele alınan parametreler ise rüzgar şiddeti, TKE, hava sıcaklığı ve atmosferik sınır tabaka yüksekliğidir.

Ancak, rüzgar çiftliğinin dahil edildiği model simülasyonlarına geçilmeden önce WRF modelinin WFP olmadan çevre (ambient) rüzgar şiddeti ve yönündeki öngörü başarımı ölçüm verisi ile kıyaslanarak doğrulanmıştır. Bu bölümdeki çalışmada model başarımleri olarak sadece ortalama karekök hata (RMSE) kullanılmıştır. Ancak, rüzgar yönü dairesel bir değişken olduğundan rüzgar yönü için RMSE hesabı farklı bir şekilde tanımlanmış olup eğer simülasyon öngörüsü ile ölçüm verisi arasındaki fark -180° den az ise veya 180° den fazla ise bu farka sırasıyla ya 360° eklenir ya da bu farktan 360° çıkarılır. Böylece rüzgar yönündeki mutlak sapma 180° 'yi aşmayacaktır.

3.2.3 MYNN PBL şeması

Bu çalışmanın ana kısmı MYNN PBL şemasında yapılan değişimler altında simüle edilen rüzgar çiftliği iz etkisinin seçilen atmosferik sınır tabaka değişkenleri üzerindeki etkisindeki değişimi incelemektir, çünkü WRF modelindeki Fitch WFP şu anda sadece MYNN PBL şeması ile çalışmaktadır. MYNN PBL şemasında yapılan değişimler karışım uzunluğu (yerel karışım) yaklaşımındaki modifikasyonlarını, kütle-akı (mass-flux) şemasının (yerel olmayan karışım) etkinleştirilmesini, TKE adveksiyonunun doğru ve yanlış şekilde etkinleştirilip kullanılmasını kapsamaktadır. Orijinal MYNN PBL şemasında [79] kullanılan karışım uzunluğu yaklaşımına yönelik iki ayrı modifikasyon sonuç karışım uzunluğu (resultant mixing length) ölçeğinin komponentleri olan yüzey, türbülanslı ve boyansı (bouyancy) karışım uzunluk ölçekleri ile ilişkili problemleri çözmek üzere gerçekleştirilmiştir. Orijinal karışım uzunluğuna ve bu yaklaşıma yapılan modifikasyonlara ait detaylar Olson ve diğ.'nin [83] çalışmasında yer almaktadır. Orijinal karışım uzunluğu ve modifikasyonları WRF namelist.input dosyasında fizik opsiyonlarından *bl_mynn_mixlength* parametresi 0 (orijinal), 1 veya 2 (modifikasyonlar) seçilerek kullanılır. MYNN PBL şeması skaler

değişkenlerin ve momentumun yerel karışımını dikkate alırken konvektif (kararsız) tabakaya ait yerel olmayan karışımı ihmal etmektedir. Bu nedenle yerel olmayan karışım için bir kütle-akı şeması kullanılmaktadır.



Şekil 3.2 : İki farklı düşey seviye yapısının gösterimi. Üst ve alt yatay çizgiler sırasıyla bu bölümde kullanılan Siemens SWT3.6-120 kara tipi rüzgar türbin modelinin rotor tabakasının üst ve alt yükseklikleridir. Yatay eksenindeki Δz düşey çözünürlüğü temsil etmektedir ve yerden yaklaşık 400 m'ye kadar düşey çözünürlük soldaki düşey yapı için düşey 12 m ve sağdaki düşey yapı için yaklaşık 35 m'dir. Sonraki yüksekliklerde düşey çözünürlük kademeli olarak azalmaktadır.

Bu şema burgaç yayınlılık (eddy diffusivity) yani normal (regular) MYNN şemasına eklenmektedir ve bu şekilde MYNN şemasını EDMF (eddy diffusivity/mass-flux) şemasına dönüştürmektedir. EDMF şemasına ait teknik detaylar Olson ve diğ'nin [83] çalışmasında yer almaktadır. EDMF şemasını etkinleştirmek için her model alanı için WRF namelist.input dosyasının fizik opsiyon kısmında `bl_mynn_edmf` parametresi 1 olarak ayarlanır. MYNN PBL şemasında TKE bütçesindeki TKE adveksiyonu ihmal edilmektedir ama WRF namelist input dosyasının fizik opsiyon kısmında `bl_mynn_tkeadvect` parametresi `true` olarak ayarlanarak etkinleştirilmektedir. Ancak Archer ve diğ'nin (2020) çalışmasında belirtildiği üzere WRF modelinin 3.5.1 versiyonu ile başlayan WFP kullanıldığında rüzgar çiftliği simülasyonlarında TKE adveksiyonu ile ilgili problem 4.1.2 versiyonunda çözüldüğünden bu çalışmada kullanılan 3.8.1 versiyonu için ilgili çalışmada verilen prosedür takip edilerek bu

problem giderilmiştir. Bu prosedür sadece ADVBF ve ADVBF_MCTKE simülasyonlarına uygulanmıştır.

Çizelge 3.2 : Ana simülasyonların (siyah punto) ve ek simülasyonların (kırmızı punto) açıklamaları. Kırmızı punto ile açıklanan simülasyonlar ana simülasyonlara dahil değildir ve simüle edilen rüzgar çiftlik etkilerinde, TKE adveksiyonun kullanımında WFP bileşenlerinin katkılarını göstermek üzere gerçekleştirilmiştir. Çizelgedeki ikinci sütun MYNN PBL şeması tercihini (varsayılan MYNN şeması ve EDMF şeması) temsil etmektedir. Üçüncü sütun karışım uzunluğu yaklaşımı tercihini, dördüncü sütun TKE adveksiyonun kullanılıp kullanılmadığını ve kullanımında ise düzeltilmiş (D) ya da düzeltilmemiş (~D) versiyonunu tercih edildiğini temsil etmektedir. Beşinci sütun C_{TKE} için kullanılan düzeltme katsayısını, altıncı ve yedinci sütun WFP bileşenlerinin açık veya kapalı olma durumlarını temsil etmektedir.

	PBL	bl_mynn_m ixlength no	TKE adv.	CF for C_{TKE}	TKE tand (WFP)	Mom. tand. (WFP)
BASE	MYNN	1	Kapalı	1	Açık	Açık
ORGMYNN	MYNN	0	Kapalı	1	Açık	Açık
EDMFv1	EDMF	1	Kapalı	1	Açık	Açık
EDMFv2	EDMF	2	Kapalı	1	Açık	Açık
ADV	MYNN	1	Açık (~D)	1	Açık	Açık
ADVBF	MYNN	1	Açık (D)	1	Açık	Açık
ADVBF- MCTKE	MYNN	1	Açık (D)	0.25	Açık	Açık
MOM	MYNN	1	Kapalı	1	Kapalı	Açık
TUR	MYNN	1	Kapalı	1	Açık	Kapalı

3.2.4 Hipotetik rüzgar çiftliği tasarımı

Ölçüm lokasyonunda bulunan tepenin karmaşık arazi özelliği rüzgar çiftliği iz etkisini hızlı bir şekilde zayıflatacağından çalışmada hipotetik rüzgar çiftliği ölçüm lokasyonunun 8 km güney batısında kurulmuştur (Şekil 3.1a). Bu hipotetik rüzgar çiftliği yoğun tarımsal aktivitenin gerçekleştiği yaklaşık 100 km²'lik bir alan üzerinde bulunmaktadır. Manwell ve diğ. [98] düz bir arazi tanımı için rüzgar çiftliği çevresinde 11.5 m çaplı bir çember alanındaki herhangi bir noktada rakım farkı 60 m'den yüksek olmaması gerektiğini ifade etmektedir. Hipotetik rüzgar çiftliğinin kurulduğu arazi Manwell ve diğ.'nin [98] düz arazi koşulunu sağlamamasından dolayı karmaşık arazi olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada rüzgar çiftliği iz etkisini artırmak üzere hipotetik rüzgar çiftliğinde akış ekseninde ve yanal eksende türbinler arası mesafenin rotor çapının 5.5 katı (5.5D) olduğu, rüzgar akışı doğrultusunda 15 x 15 hizalı (aligned) konumda toplam 225 tek tip rüzgar türbin modeli bulunmaktadır. Bu sıkışık düzendeki rüzgar çiftliği Bölüm 3.1'deki rüzgar koşuluna maruz kalması sonucunda rüzgar çiftliği iz etkisinin daha da artacağı Gupta ve Baidya Roy'un [99] çalışmasında da gösterilmiştir. Belirlenen türbinler arası mesafe ise Wu ve Porte-Agel'in [100]

çalışmasındaki ile uyumludur. Hipotetik rüzgar çiftliğinde kullanılan tek tip rüzgar türbin modeli ise Siemens SWT3.6-120 rüzgar türbin modelidir ve bu türbin modeline ait rüzgar şiddetine bağlı itki katsayısı ve güç üretim (W) verisi Fitch WFP şemasına girdi olarak verilmektedir. Bu türbin modeli 3.6 MW kurulu güce sahip olup rotor çapı 120 m ve türbin gövde yüksekliği 90 m'dir. Hipotetik rüzgar çiftliğinde kullanılan türbin modeli ve sayısına göre çiftliğe ait toplam kurulu güç 810 MW'tır.

3.3 Sonuçlar ve Tartışma

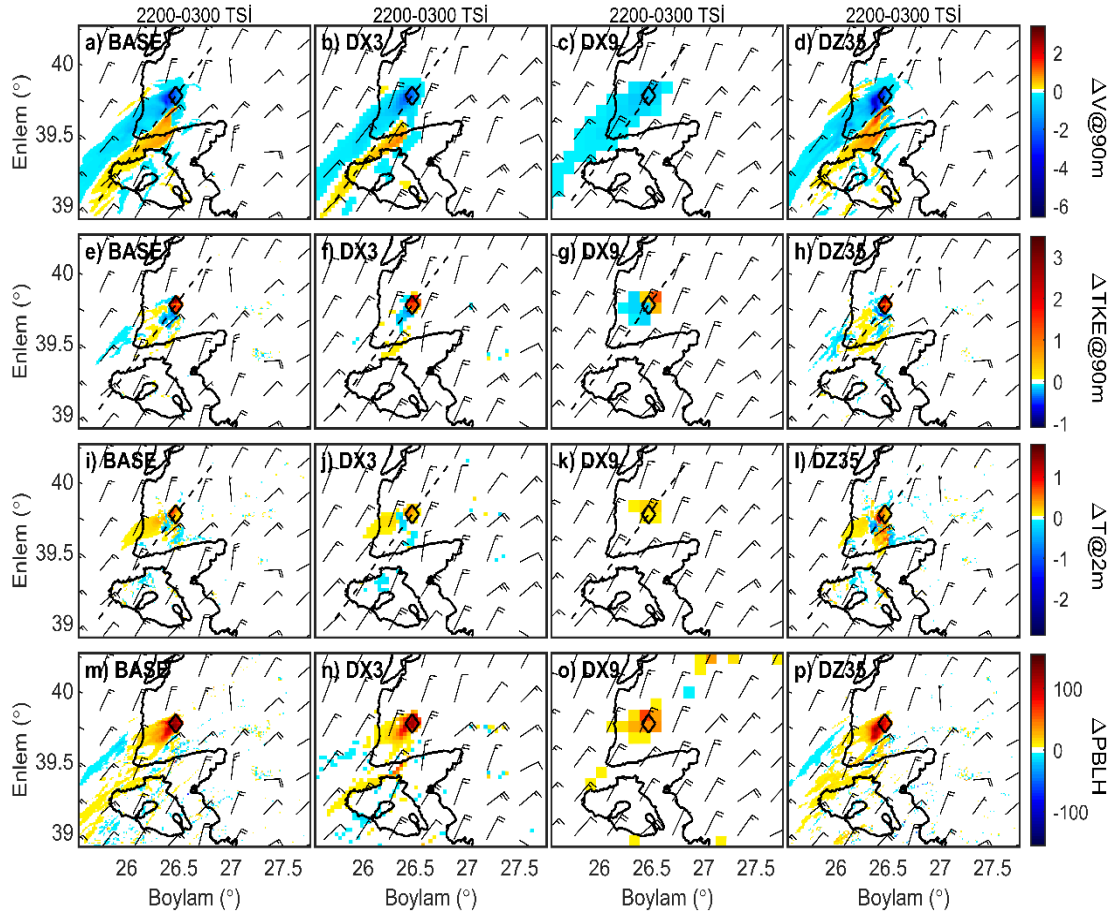
3.3.1 Model simülasyonlarında uygun yatay ve düşey çözünürlüğün belirlenmesi

MYNN PBL şemasında yapılacak değişikliklerle rüzgar çiftliği iz etkisindeki değişimin belirleneceği model simülasyonlarına geçilmeden önce rüzgar çiftliği iz etkisine ait büyüklüklerin öngörülerini daha doğru elde etmek üzere bu simülasyonlara ait uygun yatay ve düşey çözünürlüğün belirlenmesinde bir dizi simülasyon gerçekleştirilmiştir. Yatay ve düşey çözünürlüklerin belirlenmesi için gerçekleştirilecek model simülasyonlarına ait detaylar yukarıda, Bölüm 3.2'de yer verilmiştir. Bu bölümde sadece 27 km yatay çözünürlüklü model simülasyonu hariç diğer yatay ve düşey çözünürlüklü model simülasyonlarına ait yatay kesit sonuçlarına yer verilmiştir.

Şekil 3.3'te değişen yatay ve düşey çözünürlükler DX ve DZ olarak ifade edilmektedir. Örneğin, DX9 simülasyonda 9 km yatay çözünürlüğün kullanıldığını ifade ederken, DZ35 simülasyonda 35 m düşey çözünürlüğün kullanıldığını ifade etmektedir. Yatay çözünürlüklerin 9 km (DX9) ve 27 km (DX27) olduğu model simülasyonları, tüm ölçüm yükseklikleri için çevre rüzgar yönü ve şiddetinde, sırasıyla en iyi ve en zayıf öngörü doğruluğuna sahip olduğu bulunmuştur. Örneğin, 81 m'deki modelin çevre rüzgar şiddeti öngörü başarımı için tüm yatay ve düşey çözünürlüklü model simülasyonlarına ait RMSE sonuçları 2.52 ms^{-1} ile 3.55 ms^{-1} arasında değişmektedir. Rüzgar yönündeki model simülasyonların başarımı ise 7.41° ile 9.43° arasında değişmektedir. Bu sonuçlar yatay ve düşey çözünürlüğün değiştirildiği rüzgar çiftliği simülasyonlarının gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır.

Yatay çözünürlüğün düşürülmesi rüzgar çiftliğinin ilgili sınır tabaka parametreleri üzerindeki etkisini büyüklük (magnitude) açısından zayıflattığı görülmektedir (Şekil 3.3). Ek olarak, yatay çözünürlüğün 9 km (Şekil 3.3c,k,g,o) ve 27 km olduğu

sonuçlarda rüzgar çiftliği iz etkisine ait yüksek büyüklüklerin üretilmediği görülmektedir.



Şekil 3.3 : Yatay ve düşey çözünürlük değişiminde rüzgar çiftlik iz etkisindeki değişimin gösterimi: a), e), i) ve m) 1 km yatay çözünürlüklü baz simülasyonunu; b), f), j) ve n) 3 km yatay çözünürlüklü DX3 simülasyonunu; c), g), k) ve o) 9 km yatay çözünürlüklü DX9 simülasyonunu; ve d), h), l) ve p) ise 35 m düşey çözünürlüklü DZ35 simülasyonunu temsil etmektedir. Diğer simülasyonlar 12 m düşey çözünürlüğe sahiptir. a)-d), e)-h), i)-l) ve m)-p) sırasıyla rüzgar çiftlik etkisindeki türbin gövde yüksekliğindeki (90 m) rüzgar şiddeti farkını (ms^{-1}), 90 m'deki TKE farkını (m^2s^{-2}), yere yakın (2 m) hava sıcaklığı farkını ve atmosferik sınır tabaka yükseklik farkını (m) temsil etmektedir.

Ayrıca bu simülasyonlar düşük yatay çözünürlük nedeni ile arazi detaylarının yakalanamaması sonucu tüm model alanında rüzgar akışını hemen hemen tek yönlü olarak üretmektedir. Yatay çözünürlüğün düşürülmesi aynı zamanda düşey etkiyi daha sığ hale getirmektedir. Yine de, bir ölçüde, 3 km yatay çözünürlüğün 1 km yatay çözünürlüğün ürettiği etki örüntüsünü yakalayabildiği görülmektedir (Şekil 3.3b,f,j,n). Ancak ana simülasyonlar için rüzgar çiftliği iz etkisine ait daha yüksek büyüklükleri yakalayabilmek üzere 1 km yatay çözünürlüğün kullanılmasına karar verilmiştir.

Öte yandan düşey çözünürlüğün düşürülmesi etkinin büyüklüğü ve yatay dağılımında küçük bir etkiye neden olduğu görülmektedir (Şekil 3.3d,h,l,p). Ancak, düşey kesitteki farklar (rüzgar çiftliği iz etkisi) özellikle yüzeyden rotor tabakasının üst seviyesine kadar kayda değerdir. Genel olarak, düşey çözünürlüğün düşürülmesi nedeni ile, bu çalışmada ele alınan tüm sınır tabaka değişkenleri için yerden türbin gövde yüksekliğinin hemen altına kadar düşey kesit boyunca her değişken için tanımlanan rüzgar çiftliği iz etki değer aralığına göre herhangi bir etki gözlenmemiştir. Bu nedenle bu çalışmada ana simülasyonlar için düşey çözünürlük olarak düşey çözünürlüğün yerden 400 m'nin altında yaklaşık 12 m olduğu toplamda 81 seviyeli düşey yapının kullanılmasına karar verilmiştir.

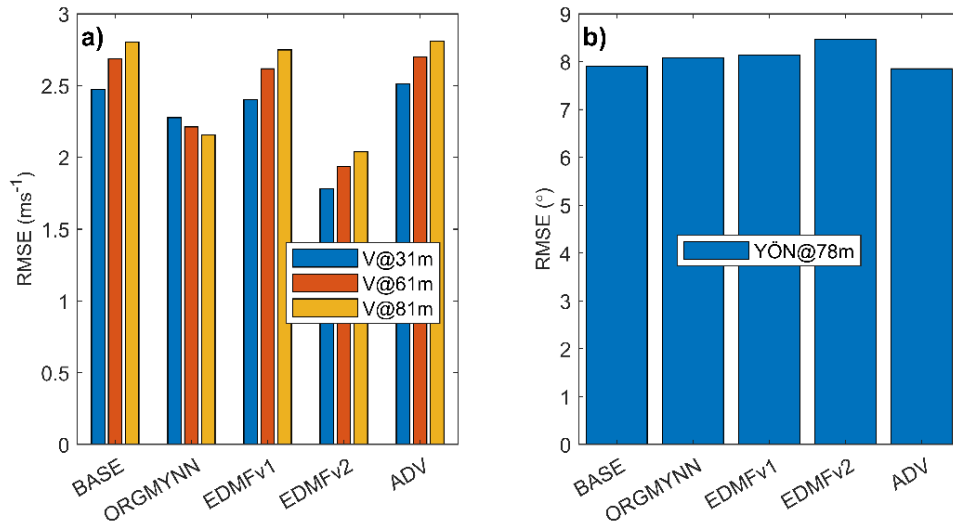
3.3.2 Ana simülasyonlarda WRF modelinin çevre akış öngörüsündeki başarımı

MYNN PBL şemasında yapılan değişikliği temsil eden ana simülasyonlar için WRF modeli, WFP şeması yani rüzgar çiftliği olmadan, ölçüm verisi ile kıyaslanarak çevre rüzgar şiddeti ve yönü için öngörü doğruluğu açısından doğrulanmıştır. Bu değerlendirmede, ADVBF, ADVBF_MCTKE, MOM ve TUR simülasyonları model başarımı değerlendirmesine dahil edilmemiştir çünkü bu simülasyonlarda model konfigürasyonunda yapılan değişiklikler rüzgar çiftliğinin dahil edildiği simülasyonlara uygulanmıştır.

Rüzgar çiftliğinin dahil edilmediği ana simülasyon öngörülerinin ölçüm verisi ile kıyaslanması sonucunda tüm model konfigürasyonlarının rüzgar şiddetinde makul ölçüde ancak rüzgar yönünde önemli ölçüde başarımlı bulunduğu bulunmuştur. Ancak tüm ana simülasyonlar tüm ölçüm yüksekliklerinde rüzgar şiddetini tüm simülasyon periyodu boyunca yüksek öngörüdürüğü gözlemlenmiştir. Örneğin Şekil 3.5'te tüm ana simülasyonların 81 m'deki rüzgar şiddeti öngörüsündeki ölçüm verisine göre yüksek öngörüsü iki günlük zaman periyodu için gösterilmektedir. Ek olarak, ORGYMNN simülasyonu hariç tüm ana simülasyonlara ait model konfigürasyonları artan yükseklikle RMSE değerinde artış eğilimi sergilemektedir (Şekil 3.4). Örneğin, Referans (BASE) simülasyonu 31 m, 61 m ve 81 m için sırasıyla 2.47 ms^{-1} , 2.69 ms^{-1} ve 2.80 ms^{-1} RMSE değerleri sergilemektedir. Ancak ORGYMNN simülasyonu diğer simülasyonların tersi bir eğilim sergilemesine rağmen rüzgar şiddeti için tüm ölçüm yükseklik seviyelerinde daha düşük RMSE değerlerine sahiptir. Diğer ana simülasyonlar BASE simülasyonu ile kıyaslandığında, örneğin, her iki EDMF simülasyonu da rüzgar şiddetin öngörüsündeki RMSE değerini düşürmektedir. Ek

olarak, rüzgar şiddetinin daha yüksek öngörüsü ve RMSE'nin yükselikle artışı daha düşük uzamsal çözünürlüklere sahip simülasyonlarda da görülmektedir.

Yukarıda belirtildiği üzere, tüm ana simülasyonlar rüzgar yönünde önemli ölçüde öngörü doğruluğu göstermiştir. Şekil 3.5'te iki ayrı günlük simülasyon periyodu boyunca 78 m'deki rüzgar yönüne ait öngörü ve ölçüm değerleri gösterilmektedir. Şekil 3.4b'de BASE simülasyonu 7.91° RMSE sergilemektedir. Rüzgar şiddeti öngörüsüne ait RMSE değerlerinin tersine, rüzgar yönü için RMSE değerleri ORMYNN simülasyonu (8.09°) ve EDMF simülasyonları (EDMFv1 için 8.47° ve EDMFv2 için 8.14°) için daha yüksek iken ADV simülasyonu (7.83°) için daha düşük olduğu bulunmuştur.

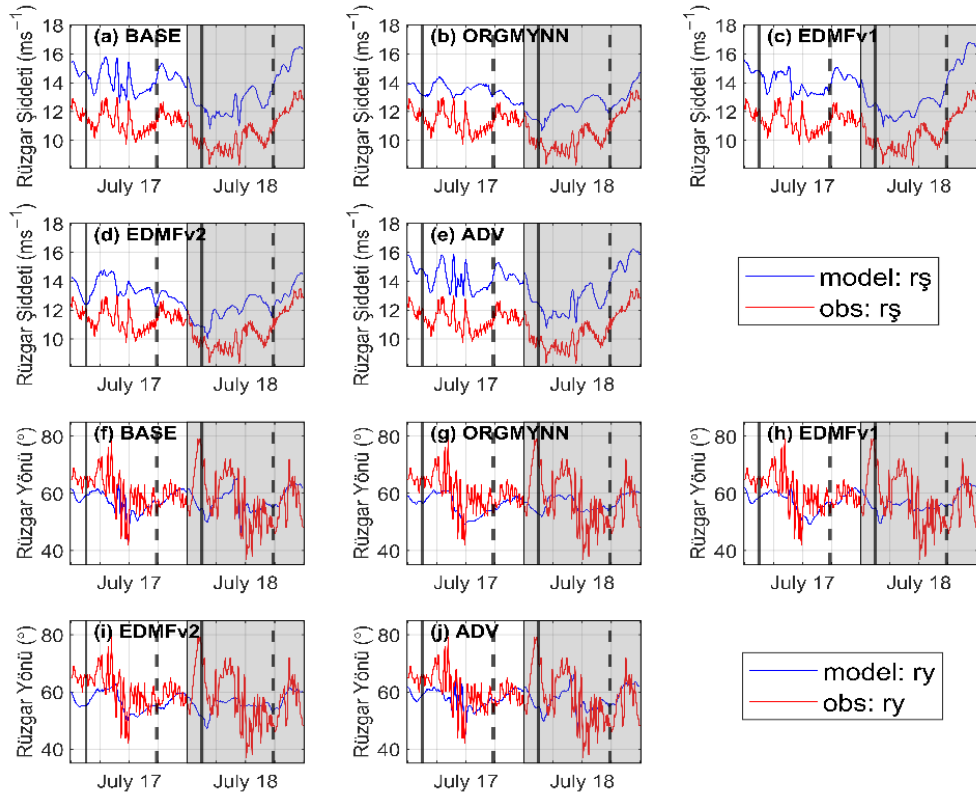


Şekil 3.4 : Rüzgar şiddeti a) ve yönü b) için model simülasyon başarımları ölçüsü için RMSE sonuçları

3.3.3 Rüzgar çiftliğinin TKE üzerindeki etkisi

MYNN PBL şemasındaki yapılan değişikliklere bağlı olarak simüle edilen rüzgar çiftliği iz etkisindeki değişimi değerlendirmeden önce simülasyonlar için gündüz ve geceye ait rüzgar çiftliği iz etkisindeki farkı gösterilecektir. Bu amaç için sadece türbin gövde yükseliğindeki rüzgar şiddeti ile yüzeye yakın (2 m) hava sıcaklığı ele alınacaktır. Sonuçlar gece saatlerinde gündüz saatlerine göre rüzgar çiftliği iz etkisinde daha büyük etki büyüklükleri (gösterilmemektedir) ve daha büyük etki alanı görülmektedir (Şekil 3.6). Etki büyüklükleri ve etki alanları arasındaki ilişkiyle ilgili sonuçlar Tomaszewski ve Lundquist'in [26] sonuçları ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Tüm bu nedenlerden dolayı bu bölümde gece saatlerine ait sonuçlar gösterilecektir. Ancak, Xia ve diğ. [25] çalışmalarında rüzgar çiftliği izinin hava

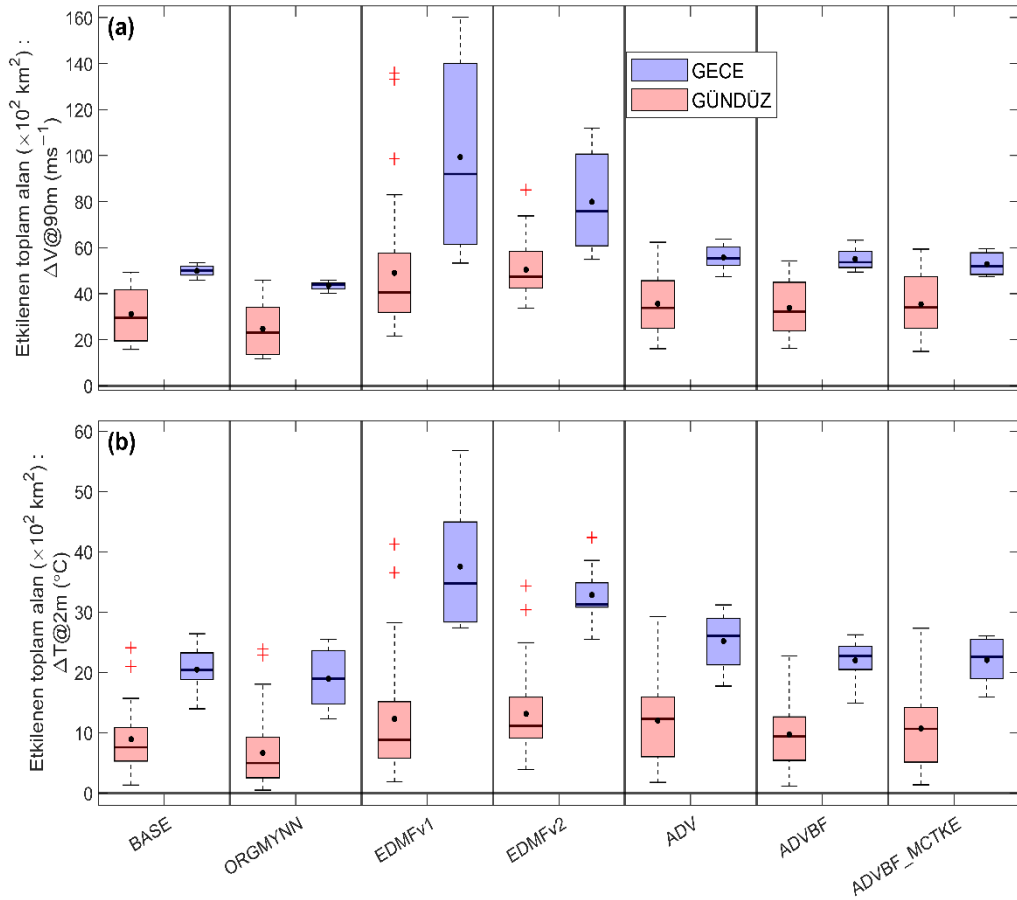
sıcaklığı üzerindeki etkisinin gün batımından sonra kuvvetlenmeye başladığı gün doğumundan önce en kuvvetli hale geldiğini göstermektedir. Bu nedenle, bu çalışmada her iki ayrı günün günlük simülasyon için model çıktılarına ait son beş UTC (19:00-22:00) saatinin sonuçlarının ortalaması alınmıştır. 2015 yılı Temmuz ayı için yerel saat UTC + 3 olarak hesaplanmaktadır. Ek olarak bu bölümde sadece ilk günün son beş UTC saatin ortalamalarına ait sonuçlara yer verilmiştir ve analizler bu sonuçlar üzerinden yapılmıştır. Diğer sonuçlar (ilk günün gündüz (10:00-15 UTC) ve ikinci günün gündüz ve gece sonuçları) Ek A’da gösterilmektedir.



Şekil 3.5 : Rüzgar şiddeti (a-e, 81 m için) ve yönü (f-j, 78 için) için simülasyon ile ölçüm verisi kıyaslaması. Mavi çizgi model simülasyonunu, kırmızı çizgi ise ölçümü temsil etmektedir. Gri alanlar rüzgar şiddeti ve yönü için 18 Temmuz kıyaslamasını temsil etmektedir. Düşey düz çizgiler her gün için gün doğumunu kesikli düşey çizgiler ise her gün için gün batımını temsil etmektedir.

Rüzgar çiftliğinin TKE üzerindeki etkisi sonucu tüm simülasyonlarda TKE artışına (pozitif TKE farkı) ait büyük değerler rüzgar çiftliğinde görülmektedir, çünkü rüzgar türbin kaynaklı TKE üretimi burada, rüzgar çiftliğinde, gerçekleşmektedir (Şekil 3.7). Türbin gövde yüksekliğinde yani 90 m’de TKE’deki maksimum artış BASE simülasyonu için $3.24 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ ’dir. Ancak, rüzgar çiftliğinde gözlemlenen türbin gövde

yüksekliğindeki yüksek pozitif TKE farkı çiftliğin rüzgar altı tarafında hızlıca zayıflamaktadır. Rüzgar altı bölgede, Fitch ve diğ.'nin [66] çalışmasında belirtildiği üzere çiftliğin dışında rüzgar kaymasındaki değişim nedeni ile en büyük TKE üretim kaynaklarından biri olan kayma üretimindeki değişim sonucu hem pozitif hem de negatif TKE farkları görülmektedir. Bu nedenle en yüksek TKE seviyeleri burada rüzgar çiftliği hücrelerinde görülmektedir (Şekil 3.7a) ancak TKE adveksiyonunun kapalı olmasından dolayı bu simülasyonda (BASE) her zaman adımında rüzgar çiftliğinden gelen ek TKE seviyesi bu hücrelerde birikmektedir.



Şekil 3.6 : Türbin gövde yüksekliğindeki (90 m) rüzgar şiddeti farkı a) ve yere yakın (2 m) hava sıcaklığı farkına b) ait gece ve gündüz için model alanındaki toplam etki alanı ($\times 10 \text{ km}^2$).

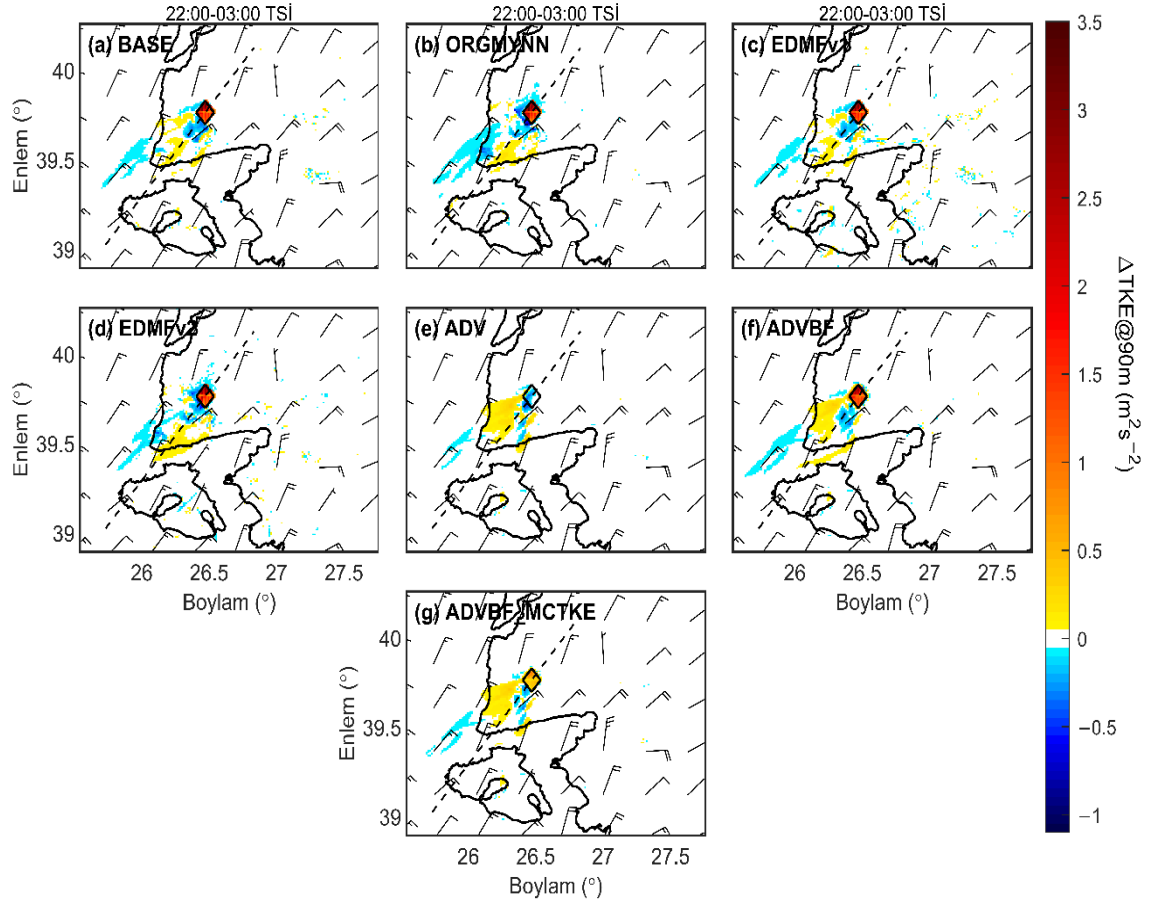
Bu durum TKE adveksiyonunun kapalı olduğu olduğu ORGMYNN ve her iki EDMF simülasyonlarında da gerçekleşmektedir (Şekil 3.7b-d). MYNN PBL şemasında yapılan değişiklik sonucunda rüzgar çiftliği iz etkisi öngörülerinin etkilediği gözlemlenmiştir. Örneğin, WRF modelinde namelist.input dosyasının fizik opsiyonu bloğunda bl_mynn_mixlength parametresinin 0 olarak ayarlanması sonucu orijinal MYNN PBL şemasının kullanıldığı ORGMYNN simülasyonunda rüzgar çiftliğinde

daha büyük pozitif TKE farkları elde edilmiştir ancak çiftliğin dışında pozitif TKE farklarının zayıfladığı ve negatif TKE farklarının kuvvetlendiği görülmektedir (Şekil 3.7b). EDMFv1 simülasyonu TKE farkındaki etki büyüklüğünde ve alanında zayıf bir değişime neden olmuştur (Şekil 3.7c). Öte yandan, EDMFv2 simülasyonu ise rüzgar çiftliğindeki TKE üretim büyüklüklerini artırmaktadır ve TKE farkı açısından etki alanında gözlemlenebilir bir değişim yaratmıştır (Şekil 3.7d). ADV simülasyonunda (Şekil 3.7e), TKE adveksiyonunun yanlış kullanılması nedeni ile Archer ve diğ.'nin [81] çalışmasında açıklandığı üzere rüzgar çiftliğinden gelen ek TKE yanlış bir şekilde sadece model çıktı periyodunun son model zaman adımında üretildiğinden çok düşük seviyede kalması sonucu rüzgar çiftliğinde 90 m'deki TKE farkının yanlış öngörüldüğü bulunmuştur. Bu Archer ve diğ.'nin [81] çalışması dahil olmak üzere literatürdeki ilgili hiçbir model çalışmasında gözlemlenmemiştir.

Bölüm 3.2'de açıklandığı üzere MOM ve TUR simülasyonları TKE adveksiyonunun dahil edildiği ADV, ADVBF ve ADVBF_MCTKE simülasyonları için WFP'nin özellikle TKE tandans bileşenindeki değişim ile ek açıklama getirmek üzere gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.8a-d WFP momentum tandans (MOM) ve TKE tandans (TUR) bileşenlerinin rüzgar çiftliğinde sırasıyla negatif ve pozitif TKE farkları rüzgar çiftliğinin dışında ise tam tersi TKE farklarına neden olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle, Şekil 3.7e'de, rüzgar çiftliğinde TKE farkının yanlış olması, bu simülasyonda (ADV) WFP momentum tandans bileşeninin TKE bileşenine baskın olmasından kaynaklanmaktadır. TKE adveksiyonunun doğru işlendiği ADVBF simülasyonunda (Şekil 3.7f) WFP TKE bileşeninin tekrar baskın hale gelmesi sebebi ile rüzgar çiftliğinde gözlemlenen TKE farklarına ait büyüklüğün işaret doğru olmasına rağmen fark değerleri halen yüksektir. Ayrıca bu simülasyon TKE farkının büyüklüğünde ve etki alanında önemli bir değişime sebep olmamıştır. Bir önceki simülasyona ek olarak WFP'de C_{TKE} için 0.25 düzeltme faktörünün uygulandığı ADVBF_MCTKE simülasyonu ADVBF simülasyonunda rüzgar çiftliğinde gözlemlenen yüksek TKE farklarını halen doğru büyük işareti üretmek üzere zayıflatmıştır. Ek olarak, rüzgar çiftliğinin dışında, bu simülasyonda ADV simülasyonundaki benzer TKE farkları ve etki alanı gözlemlenmiştir (Şekil 3.7e,g).

Düşey kesitte, BASE simülasyonu TKE adveksiyonunu kapalı olması sonucu her model zaman adımında biriken ek TKE nedeni ile rüzgar çiftliği alanında yaklaşık 700 m'ye kadar pozitif TKE farkları sergilemektedir (Şekil 3.9a). Benzer düşey yapı TKE

adveksiyonunun kapalı olduğu simülasyonlarda da görülmektedir (Şekil 3.9b-d). Tüm simülasyonlarda pozitif TKE farkı maksimum değerine rotor tabakasının tepesine yakın bir yükseklikte ulaşmıştır çünkü en büyük rüzgar kayması o seviyede görülmektedir.

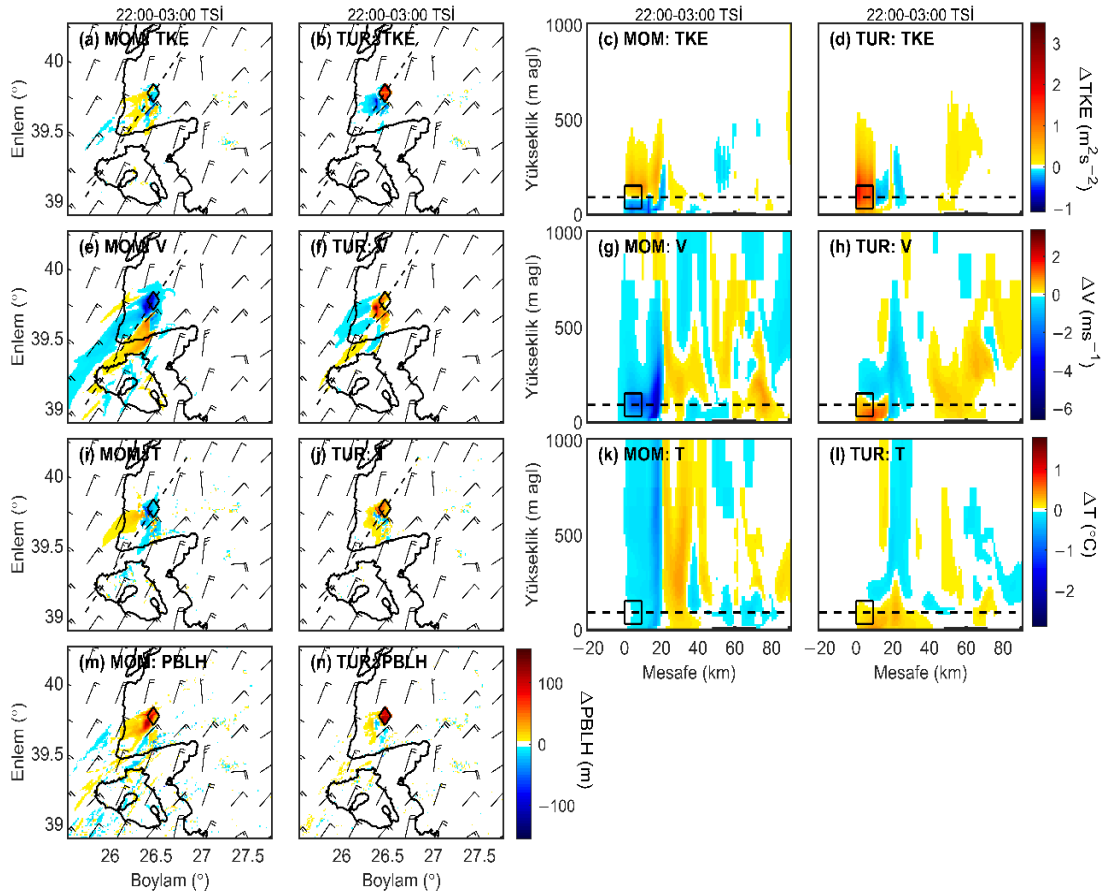


Şekil 3.7 : Rüzgar çiftliğinin türbin gövde yüksekliğindeki TKE üzerindeki etkisi. Simülasyonlara (a-g) ait detaylar Çizelge 3.2’de verilmektedir. Çizimlerde rüzgar vektörlerinin gösterim çözünürlüğü (wind barb) 27 km’dir. Kalın siyah çizgi kıyı şeridinin temsil etmektedir. Siyah kare kutu rüzgar çiftliğini, üzerinden geçen kesikli ince çizgi ise düşey kesit hattını temsil etmektedir.

Yatay kesitte olduğu gibi düşey kesit sonuçların da MYNN PBL şemasında yapılan değişiklikler sonucunda değiştiği gözlemlenmiştir. Örneğin, EDMFv2 simülasyonu TKE düşey kesit farklarında rüzgar çiftliğinde ve rüzgar altı tarafında kayda değer değişimler göstermiştir (Şekil 3.9d). EDMFv1 simülasyonu ise TKE farkının düşey etkisinde ve büyüklüğünde küçük değişimlere neden olmuştur (Şekil 3.9c). Ancak, EDMFv2 simülasyonu TKE farkının büyüklüğünü $3.5 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ ’ye kuvvetli bir şekilde artırırken düşey etkiyi 1000 m’ye kadar ulaştırmıştır. ORGMYNN simülasyonunda da

etki örüntüsü ve büyüklüğündeki gözlemlenebilir değişim açısından benzer sonuçlar sergilenmiştir (Şekil 3.9b).

Ancak bu simülasyonda TKE farkına ait 1000 m'yi aşan düşey etkisi TKE adveksiyonun kapalı olması haricinde karışım uzunluğu formülasyonundaki aşırı büyük türbülanslı uzunluk ölçeğinden kaynaklanmaktadır [83] ve bundan dolayı TKE farklarının büyüklükleri genelde daha küçüktür. Bu nedenle, karışım uzunluğunda yapılan değişikliğin TKE fark öngörüsü üzerinde daha büyük etki yarattığı söylenebilir.



Şekil 3.8 : Hem yatay kesit gösterimi (a,b,e,f,i,j,m,n) hem de düşey kesit gösterimi (c,d,g,h,k,l) ile WFP MOM ve TKE bileşenlerinin sınır tabaka değişkenlerinden TKE, rüzgar şiddeti (V), hava sıcaklığı (T) ve PBL yüksekliği (PBLH) üzerindeki etkisi. Sol panel: Çizimlerde gösterim stratejisi olarak rüzgar vektörlerinin (wind barbs) gösterim çözünürlüğü ilgili simülasyonun yatay çözünürlüğünden bağımsız olarak 27 km olarak belirlenmiştir. Kalın siyah çizgi kıyı şeridinin temsil etmektedir. Siyah kare kutu rüzgar çiftliğini, üzerinden geçen kesikli ince çizgi ise düşey kesit hattını temsil etmektedir. Sağ panel: Siyah dörtgen kutu rüzgar çiftliğini, ortasından geçen yatay kesikli siyah çizgi türbin gövde yüksekliğini temsil etmektedir.

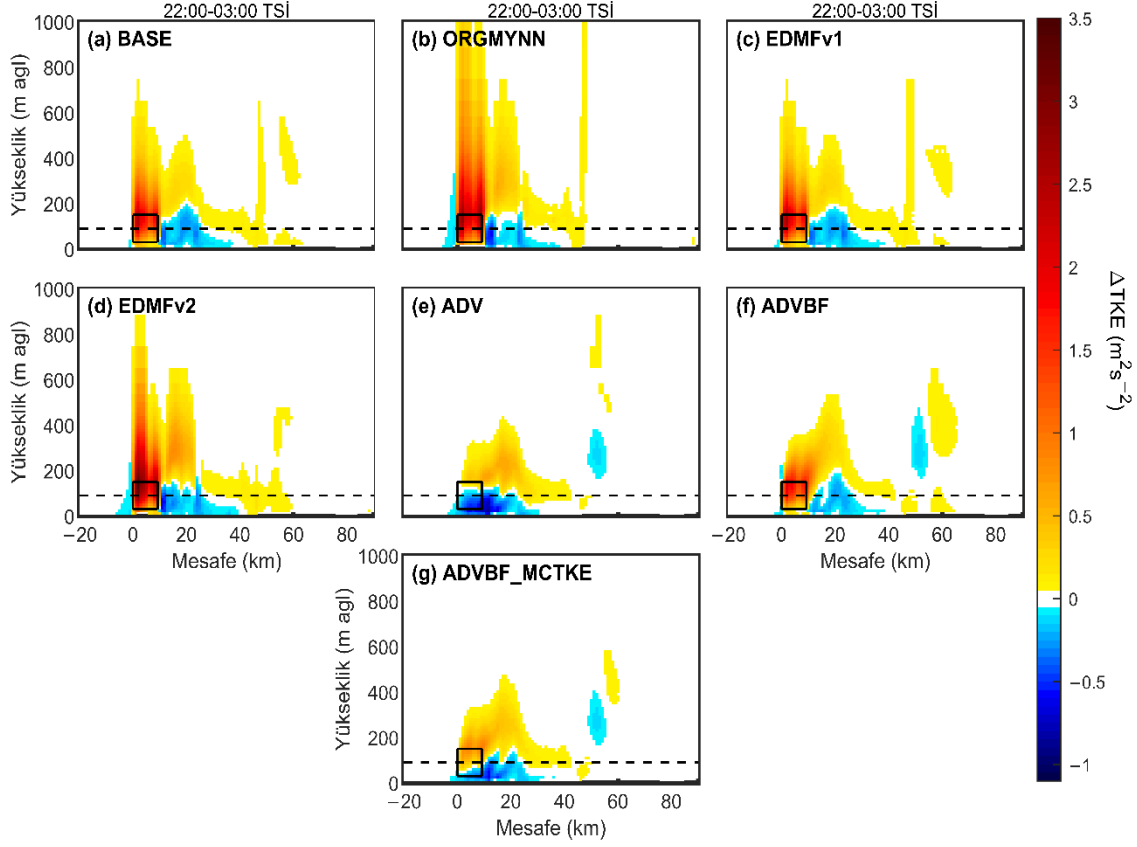
TKE farkları, ADV ve ADVBF_MCTKE simülasyonlarında advekte olabilmesine rağmen bu simülasyonlarda, sırasıyla, TKE adveksiyonunun yanlış işlenmesi ve

WFP’de C_{TKE} için uygulanan 0.25 düzeltme faktörünün bu çalışma için yetersiz olması nedeniyle WFP TKE tandans bileşenin bağıl katkısının zayıflaması sonucu rüzgar çiftliğinde yanlış büyüklük işaretine sahiptir (Şekil 3.9e,g). Şekil 3.9e’de, ADV simülasyonu rüzgar çiftliğinde yüzeyden rotor tabakasının üst yüksekliğine kadar negatif TKE farkları sergilemektedir. Aynı şekilde, ADVBF_MCTKE simülasyonu (Şekil 3.9g) yüzeyden rotor tabakasının alt yarısına kadar yanlış negatif TKE farkları sergilemektedir. Ancak, Şekil 3.9f’de ADVBF simülasyonu rüzgar çiftliğinde makul TKE fark düşey dağılımı ve büyüklüğü ürettiği görülmektedir.

3.3.4 Rüzgar çiftliğinin rüzgar şiddeti üzerindeki etkisi

Referans (BASE) simülasyonunda rüzgar çiftliğinin 90 m’deki rüzgar şiddeti üzerinde önemli bir etki yarattığı görülmektedir (Şekil 3.10a). Bu önemli etki rüzgar şiddeti üzerindeki etki büyüklüğü ve etki alanını kapsamaktadır. Rüzgar çiftliği iz etkisi kaynaklı negatif rüzgar şiddeti farkı 3.2 ms^{-1} maksimum değeri ile birlikte rüzgar çiftliğinin rüzgar altı tarafında 80 km+ mesafeye kadar ulaşmaktadır. Buna ek olarak, rüzgar çiftliğinin her iki tarafında maksimum değeri $+ 1.5 \text{ ms}^{-1}$ ’ye ve etki mesafesi yaklaşık 80 km’ye varan pozitif rüzgar şiddeti farkları bulunmaktadır. BASE simülasyonunda elde edilen bu bulgular diğer simülasyonlarda da görülmektedir (Şekil 3.10b-g). Ancak diğer simülasyonlarda MYNN PBL şemasında yapılan değişikliklerin WRF-WFP rüzgar şiddeti farkı öngörülerinin büyüklüğünü ve etki dağılımını net bir şekilde değiştirdiği görülmektedir. ORGMYNN simülasyonu negatif ve pozitif rüzgar şiddeti farklarını zayıflatmaktadır ve izli akışı daraltmaktadır (Şekil 3.10b). EDMFv1 simülasyonunda rüzgar şiddeti farkının rüzgar çiftliğinden oldukça uzak bölgelerde de gözlemlenmekle birlikte neredeyse tüm model alanı etkilenmektedir (Şekil 3.10c). Bu uzak etki alanı EDMFv2 simülasyonunda zayıflamaktadır (Şekil 3.10d). EDMFv1 simülasyonunda uzak bölgelerde gözlemlenen bu rüzgar şiddeti farkının EDMFv2 simülasyonunda zayıflaması tamamen seçilen karışım uzunluğu yaklaşımının EDMF şeması ile uyumlu olup olmaması ile ilişkilidir.

Olso ve diğ. [83] orijinal karışım uzunluğunda yapılan ilk değişikliğin EDMF şemasıyla uyumlu olmadığını ifade etmektedir ancak WRF modeli EDMF şeması ile bu karışım uzunluğu yaklaşımının beraber kullanılmasına izin vermektedir. Bu nedenle EDMFv1 simülasyonunda özellikle rüzgar üstü bölgede beklenmeyen rüzgar şiddeti farkları gözlemlenmektedir.



Şekil 3.9 : Düşey kesit gösterimi ile rüzgar çiftliğinin TKE üzerindeki etkisi. Siyah dörtgen kutu rüzgar çiftliğini, ortasından geçen kesikli çizgi ise türbin gövde yükseliğini temsil etmektedir.

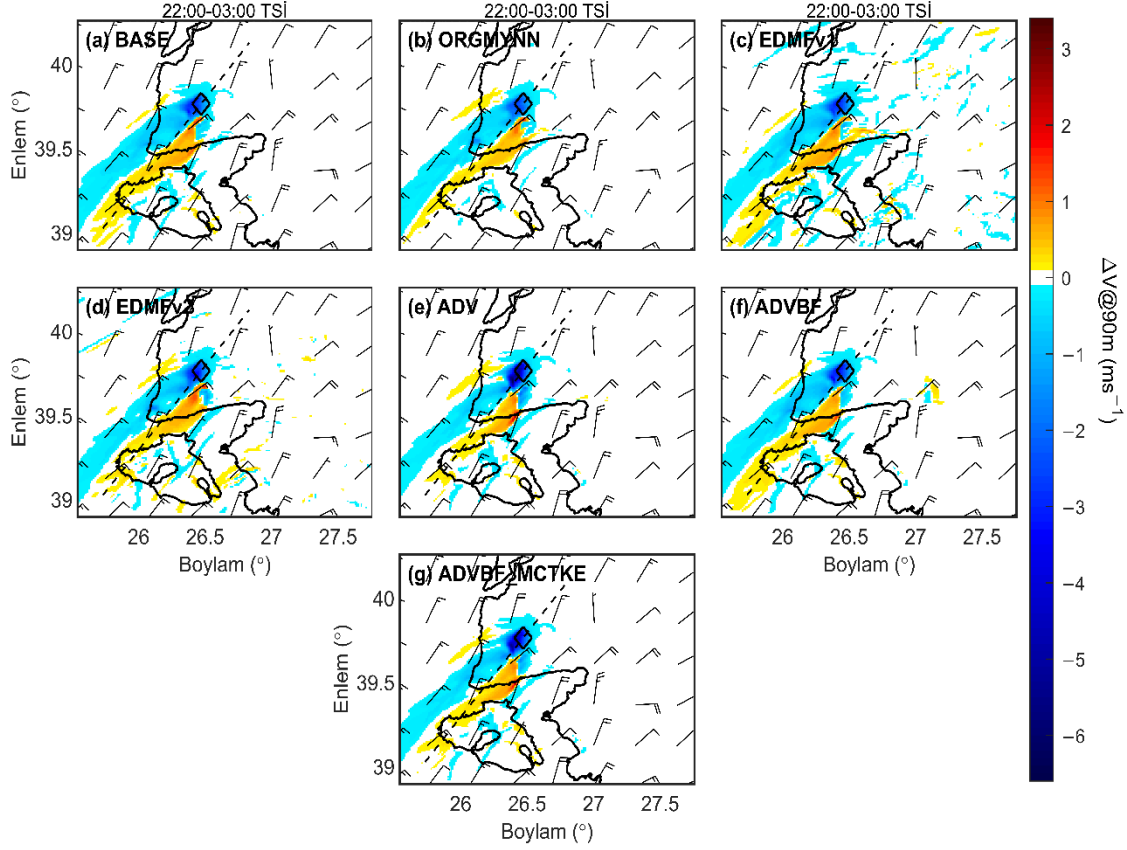
Orijinal karışım uzunluğunda yapılan ikinci modifikasyon ise EDMF şeması ile iyi test edilmiş olduğundan EDMFv1 simülasyonunda rüzgar üstünde gözlemlenen bu rüzgar şiddeti farkları EDMFv2 simülasyonunda oldukça zayıflamış veya sönümlenmiştir. ADV simülasyonunda rüzgar çiftliğinde ve hemen rüzgar altında negatif rüzgar şiddeti farkları kuvvetlenmiştir (Şekil 3.10e). Bu simülasyonda elde edilen en yüksek negatif rüzgar şiddeti farkı büyüklüğü ise 6.51 ms^{-1} 'dir. Bu simülasyona ait rüzgar şiddeti farkı etkileri rüzgar çiftliğinin uzak rüzgar altı mesafelerine ulaşmaktadır ancak büyüklüklerin çok kısa mesafelerde zayıfladığı gözlemlenmektedir. Bu simülasyonda rüzgar çiftliğinde ve hemen rüzgar altında gözlemlenen kuvvetli negatif rüzgar şiddeti farkları TKE adveksiyonunun yanlış işlenmesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 3.8e-h'de görüleceği üzere rüzgar çiftliği ve yakın çevresinde, WFP momentum tandans bileşeni negatif rüzgar şiddeti farkından sorumlu iken TKE tandans bileşeni pozitif rüzgar şiddeti farkından sorumludur. Dahası rüzgar şiddeti farkının genel örüntüsünden WFP momentum tandans bileşeninin sorumlu olduğu görülmektedir (Şekil 3.8e). Bu simülasyona ait sonuçlar doğrultusunda, ADV simülasyonunda WFP

momentum tandans bileşeni TKE tandans bileşenine baskın gelmektedir. Bu durum Archer ve diğ.'nin [81] çalışmasında belirtildiği üzere rüzgar çiftliği üzerinde negatif rüzgar şiddeti farkının kapanmasını sağlayacak yüksek hızlı akışın aşağı yönlü ikmalinin zayıflamasına neden olmaktadır. ADVBF simülasyonunda ise TKE adveksiyonunun doğru işlenmesi ile rüzgar çiftliği ve hemen rüzgar altında ADV simülasyonunda gözlemlenen yüksek negatif rüzgar şiddeti farkları zayıflamaktadır (Şekil 3.10f). ADVBF_MCTKE simülasyonu, ADV simülasyonundaki benzer nedenlerden dolayı, rüzgar şiddeti farkının büyüklüğünde ve etki alanında gözlemlenebilir etki yaratmaktadır (Şekil 3.10g). Bu Archer ve diğ.'nin [81] çalışmasında WFP C_{TKE} için önerilen 0.25 düzeltme faktörünün bu çalışma için uygun olmadığı anlamına gelmektedir, çünkü WFP TKE tandans bileşeninden gelen bağıl katkıyı azaltmaktadır.

Tüm simülasyonlar için hakim rüzgar yönü doğrultusunda rüzgar şiddeti farkına ait düşey kesit sonuçları Şekil 3.11'de verilmektedir. Şekil 3.11'de görüleceği üzere genel olarak yüzeyden rotor tabakasının tepesine kadar negatif rüzgar şiddeti farkı çiftliğın rüzgar üstü sınırından yaklaşık 40 km sonra kaybolmaktadır, ve bu mesafeden sonra çizim alanının doğu sınırına kadar pozitif rüzgar şiddeti farkı bulunmaktadır. ADV ve ADVBF_MCTKE simülasyonları haricinde diğer simülasyonlarda rüzgar çiftliğinde rotor tabakasının altında rüzgar şiddetinin arttığı pozitif rüzgar şiddeti farkları bulunmaktadır. Bu durum yukarı seviyelerdeki yüksek momentumlu havanın rüzgar türbinlerinin ürettiği ek TKE kaynaklı artan düşey karışımından kaynaklanmaktadır.

3.3.5 Rüzgar çiftliğinin hava sıcaklığı üzerindeki etkisi

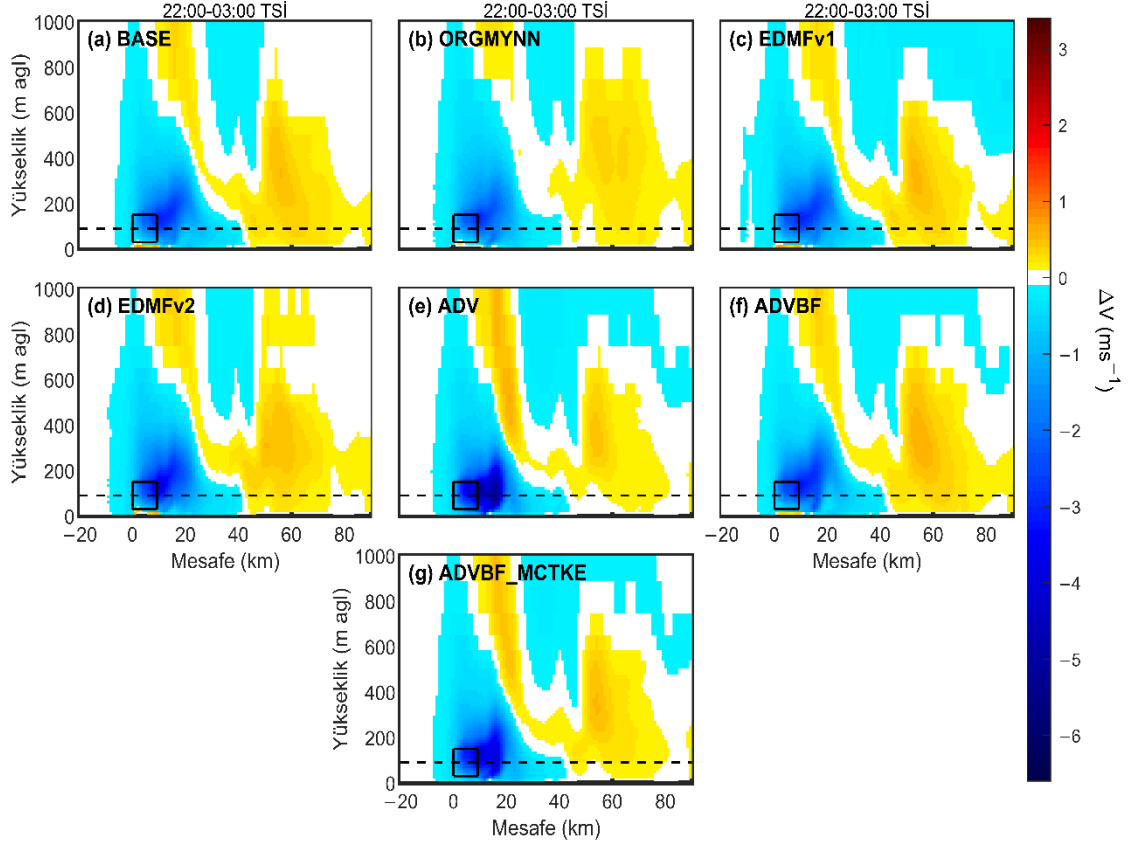
Bir rüzgar çiftliğinin etkileyebileceği en önemli meteorolojik değişkenlerden biri hava sıcaklığıdır. Gece yüzey tabakada yüzey yakınında hava sıcaklığı güneş radyasyonunun yokluğunda radyatif soğuma nedeni ile üzerindeki hava sıcaklığından düşüktür. Geceleyin TKE üretimini sürdüren tek mekanizma ise rüzgar kaymasıdır ve bundan dolayı gece çevre TKE seviyesi gündüze kıyasla oldukça düşüktür. Uydu gözlemleri [12, 16, 17, 19] ve yerden yapılan gözlemler [10, 11, 13, 14] rüzgar çiftliklerinin gece saatlerinde ya da kararlı atmosferik koşullarda yüzey sıcaklığını / yüzeye-yakın hava sıcaklığını artırdığını göstermektedir. Rüzgar türbin izi gece saatlerinde nihayetinde yukarıdaki daha sıcak havayı aşağıya yüzeye doğru taşıyarak atmosferdeki düşey ısı profilini yeniden düzenlemektedir [58].



Şekil 3.10 : Şekil 3.7 ile aynı açıklamaya sahiptir ancak türbin gövde yüksekliğindeki rüzgar şiddeti farkı içindir.

Ancak, rüzgar çiftliği iz etkisinden kaynaklanan yüzeye yakın hava sıcaklığındaki artış fosil yakıt yakan güç santrallerinin neden olduğu sera etkisi nedeni ile 21. Yüzyılda beklenen ısınma projeksiyonundan küçüktür. Ek olarak Chang ve diğ. [19] çalışmalarında rüzgar çiftliği iz etkisinden gelen ısınmanın şehir ısı adalarının neden olduğu ısınmadan daha küçük olduğu gösterilmiştir.

Genel olarak, bu alt bölüme ait sonuçlar Tomaszewski ve Lundquist [26] ve Xia ve diğ'nin [26] çalışmalarındaki bulgularla uyumlu olduğu bulunmuştur. Örneğin, BASE simülasyonu gece rüzgar çiftliğinde ve dışında yüzeye yakın gece ısınma sinyalleri ve rüzgar çiftliğinin rüzgar altı tarafında yüzeye yakın gece soğuma sinyalleri göstermektedir. Xia ve diğ'nin [25] çalışmasında belirtildiği üzere WFP TKE tandans bileşeni ısınma momentum bileşeni ise soğuma sinyallerinden sorumludur. Bu iki bileşenin doğrusal olmayan kombinasyonu ise hava sıcaklığına ait net fark sinyalini vermektedir. Ancak soğuma sinyalleri ne uydudan ne de yerden yapılan gözlemlerde görülmemektedir. Bu durum yukarıda belirtildiği üzere modelden yani WFP momentum tandans bileşeninden kaynaklanmaktadır.



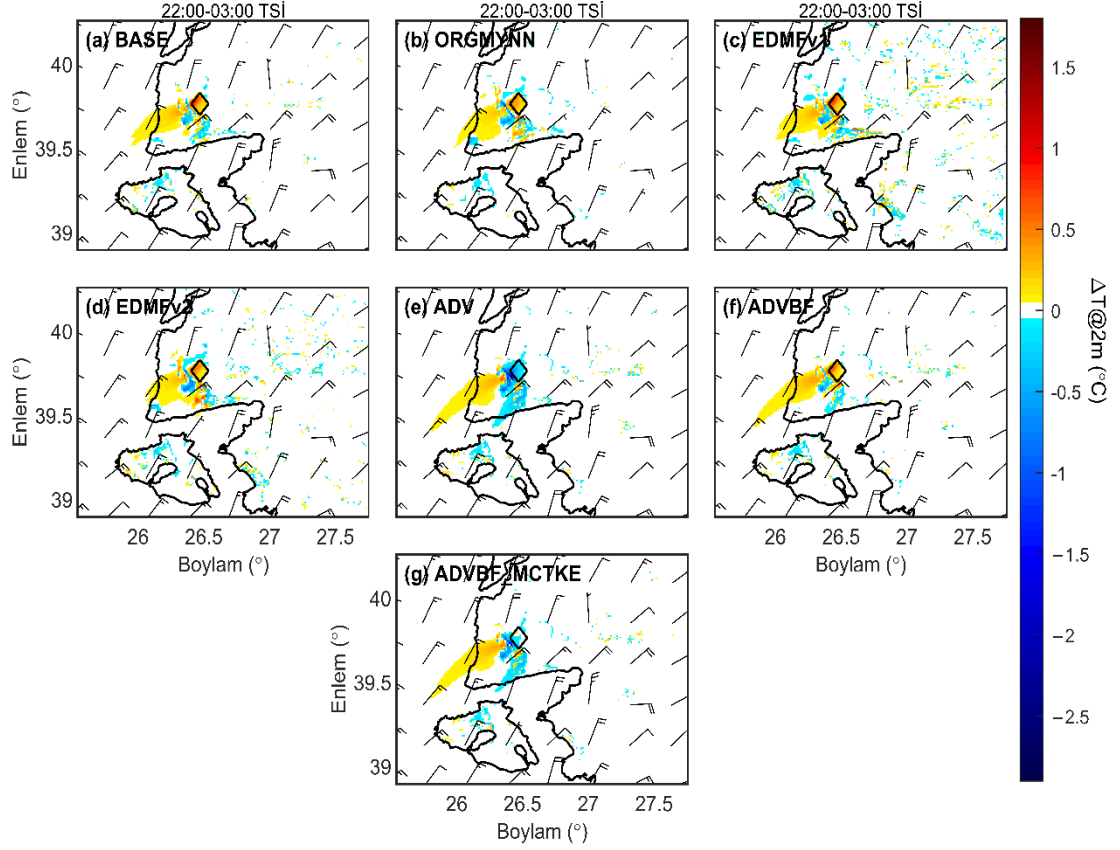
Şekil 3.11 : Şekil 3.9 ile aynı açıklamaya sahiptir ancak rüzgar şiddeti farkı içindir.

Tüm simülasyonlarda gözlemlenen en yüksek ısınma sinyali 1.1 °C ile rüzgar çiftliğinde bulunmuştur. MYNN PBL şemasında yapılan değişiklikler ile birlikte WFP’de yapılan C_{TKE} düzeltmesi önceki alt bölümlerde yer verilen rüzgar şiddeti ve TKE değişkenlerinde olduğu gibi hava sıcaklığı fark öngörülerini de etkilemektedir. ORGMYNN yüzeye yakın (2 m) hava sıcaklığı farkına ait büyüklüğü ve etki şeklini değiştirmektedir (Şekil 3.12b). Rüzgar çiftliğinde ve dışında yüzeye yakın 2 m hava sıcaklığı farkı zayıflarken, soğuma sinyallerinin yüksek olduğu düğüm sayılarında artış gözlemlenmektedir. Öte yandan, Şekil 3.12c’de EDMFv1 simülasyonunda rüzgar çiftliğinden oldukça uzak lokasyonlarda gözlemlenen 2 m hava sıcaklığı farklılıkları, bölüm 3.3.4’te açıklandığı üzere, EDMF şeması ile karışım uzunluğuna yapılan ilk modifiyakasyonun uyumsuzluğundan kaynaklanmaktadır. EDMFv2 simülasyonunda ise bu uzak etkiler mevcut olmakla birlikte etkilere ait büyüklükler zayıflamaktadır (Şekil 3.12d). Her iki EDMF simülasyonunda ise rüzgar çiftliğinin rüzgar altında gözlemlenen ısınma örüntüsünün diğer simülasyonlara göre daha kısa olduğu gözlemlenmiştir. ADV (Şekil 3.12e) ve ADVBF_MCTKE (Şekil 3.12g) simülasyonlarında, gece, rüzgar çiftliği hücrelerinde diğer simülasyonların tersine

soğuma sinyalleri bulunmaktadır. Bu soğuma sinyalleri bu simülasyonlarda TKE adveksiyonunun yanlış işlenmesi (ADV) ve WFP C_{TKE} için uygulanan 0.25 düzeltme faktörünün bu çalışma için uygun olmaması sonucu WFP momentum tandans bileşeninin bağıl katkısının TKE tandas bileşeninin bağıl katkısından daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 3.8i-l). ADVBF_MCTKE simülasyonunda rüzgar çiftliğinde bulunan soğuma sinyallerinin büyüklükleri ADV simülasyonunda bulunan soğuma sinyallerinden daha zayıftır, çünkü ADVBF_MCTKE simülasyonunda TKE adveksiyonunun doğru işlenmesi C_{TKE} için uygulanan düzeltme faktörünün yanlış öngörü etkisini bir miktar zayıflatmaktadır. Bu nedenle ADVBF simülasyonunda (Şekil 3.12f), rüzgar çiftliğinde gece beklenen ısınma sinyalleri gözlemlenmektedir ancak Şekil 3.12a-d'deki simülasyonlarda gözlemlenen rüzgar çiftliği ısınma sinyallerinden daha zayıftır, çünkü bu simülasyonda TKE adveksiyonu rüzgar çiftliğinde gerçekleşen daha sıcak havayı yatayda rüzgar akışı doğrultusunda taşımaktadır. Bu nedenle bu simülasyonda ve TKE adveksiyonunun doğru ya da yanlış işlendiği diğer simülasyonlarda (Şekil 3.12e,g) rüzgar altındaki 2 m hava sıcaklığı fark etki örüntüsü daha uzak mesafelere ulaşmaktadır.

Düşey kesit açısından tüm model simülasyonları için rüzgar çiftliği izi hava sıcaklığı üzerinde rotor tabakasının tepesinden itibaren benzer etkiler göstermektedir (Şekil 3.13). Farklılıklar rotor tabakasından yüzeye kadar olan düşey mesafede görülmektedir. ADV ve ADVBF_MCTKE simülasyonları dışında diğer simülasyonlarda rüzgar çiftliği kesitinde genelde yerden türbin gövde yüksekliğine kadar ısınma sinyalleri görülmektedir. Ancak sonrasında rotor tabakasının tepesine kadar bir etki görülmemektedir.

Rotor tabakasının tepesinden 1000 m'ye çizim tepesine kadar hava sıcaklığı farklılıkları zayıflamakta ve soğuma sinyallerine dönüşmektedir. Bu yüksekliklerde en kuvvetli soğuma sinyalleri 600-700 m'de görülmektedir. Ek olarak, rotor tabakası ve altında ısınma sinyalleri gösteren simülasyonlarda ısınma etkisi alınan düşey kesitte yaklaşık 30 km mesafeye ulaşmaktadır. ADV ve ADVBF_MCTKE simülasyonlarında rüzgar çiftliği düşey kesitine ait tüm sütunda soğuma sinyalleri görülmektedir. Böylece bu simülasyonların sadece gece 2 m hava sıcaklığı öngörülerinde değil aynı zamanda rotor tabakasındaki gece hava sıcaklığı farkı öngörülerinde de yanlışlığı görülmektedir.

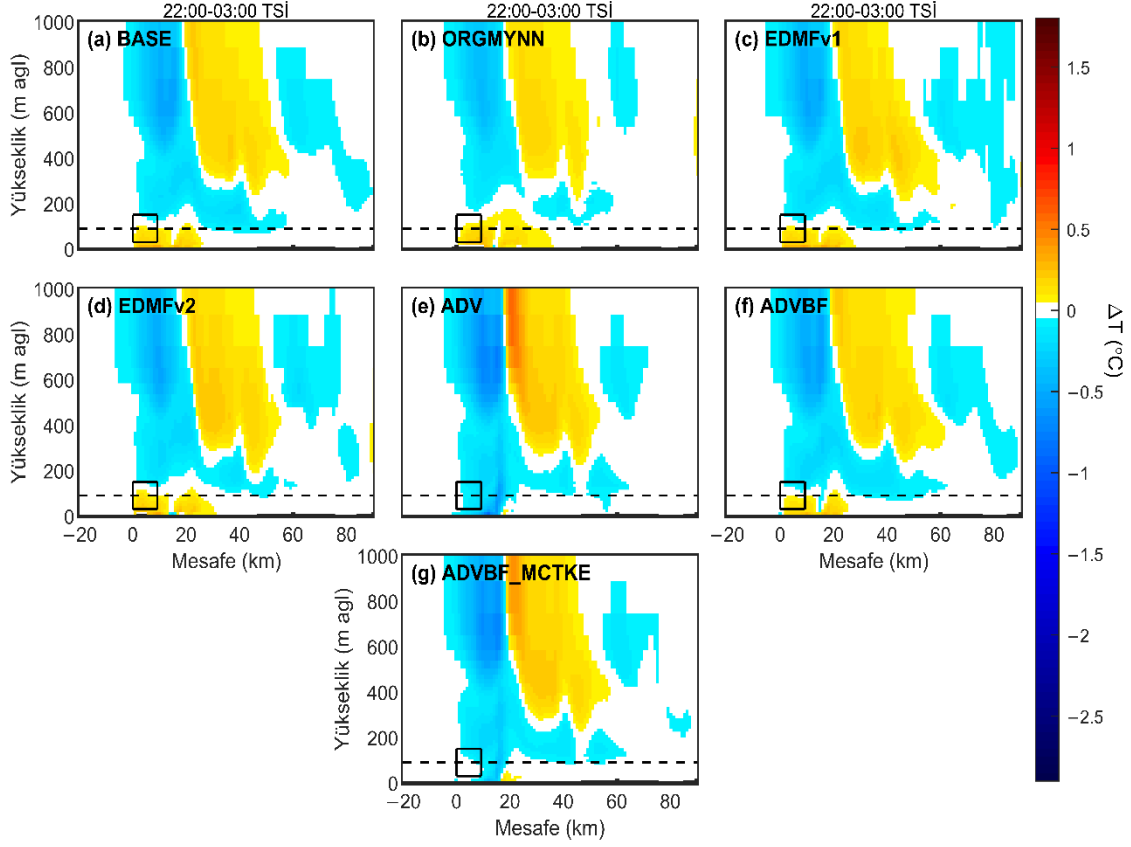


Şekil 3.12 : Şekil 3.7 ile aynı açıklamaya sahiptir ancak yere yakın hava sıcaklığı içindir.

3.3.6 Rüzgar çiftliğinin atmosferik sınır tabaka yüksekliği üzerindeki etkisi

Atmosferik sınır tabaka yüksekliği (PBLH), rüzgar çiftliğinde rüzgar türbini kaynaklı düşey karışıma karşılık olarak rüzgar çiftliğinin sınır tabaka değişkenleri üzerindeki düşey etkiyi karakterize etmektedir. PBLH, MYNN PBL şemasında teta-artışı (theta-increase) ve TKE yöntemlerindeki PBLH teşhislerinin ağırlıklı toplamaları aracılığıyla hesaplanır [79, 101].

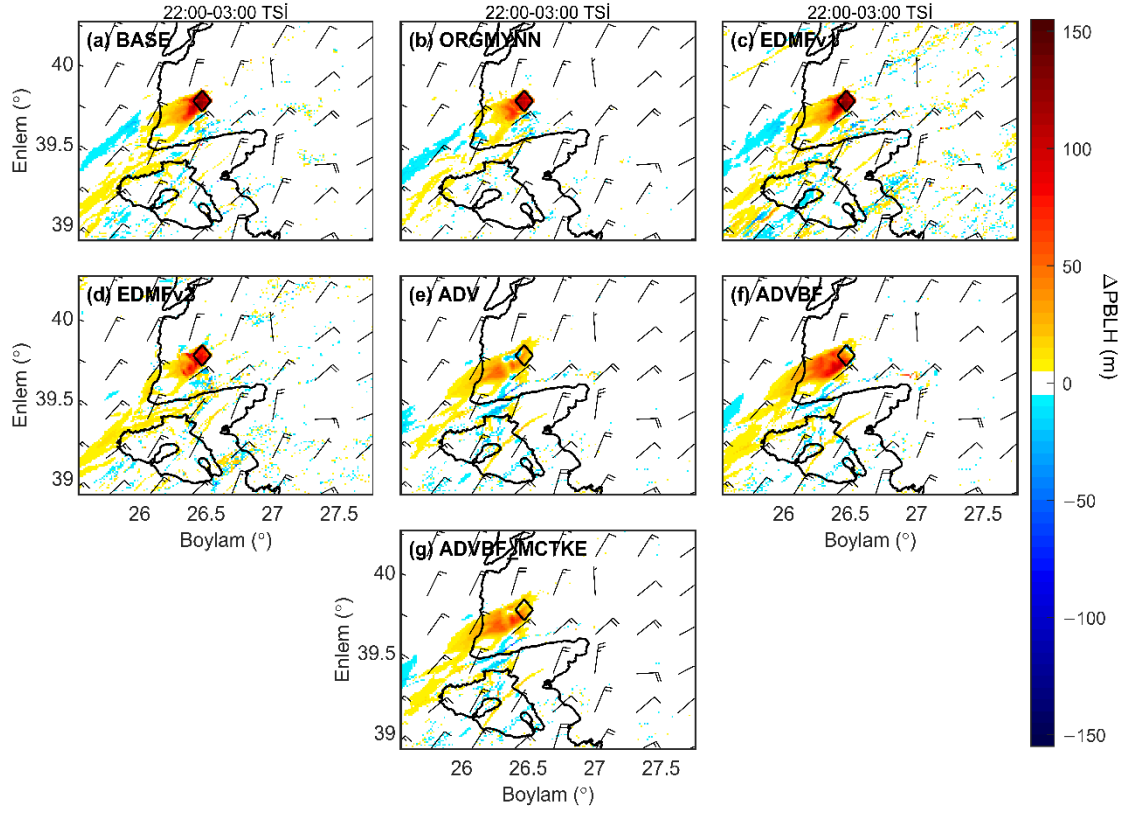
Tüm simülasyonlar rüzgar çiftliğinde PBLH'ı artırma eğilimi sergilemektedir (Şekil 3.14). Ek olarak, nispeten yüksek PBLH artışları (pozitif PBLH farkları) genel olarak kara üzerinde görülmektedir. Ancak, deniz üzerinde zayıf pozitif ve negatif PBLH farkları görülmektedir. Wang ve diğ. [46] çalışmalarında gece rüzgar çiftliğinin PBLH'ı artırma eğiliminin sınır tabakadaki atmosferik kirleticilerin düşey difüzyonuna katkı sağlayarak yerel hava kalitesini bir ölçüde geliştirdiğini ifade etmektedir. Genel olarak, gece ve gündüz görülen pozitif PBLH farkları rüzgar çiftliğinin altından Ege kıyısına kadar olan bölgeye kadar varmaktadır.



Şekil 3.13 : Şekil 3.9 ile aynı açıklamaya sahiptir ancak hava sıcaklığı farkı içindir.

Pozitif PBLH farkına en büyük bağıl katkı WFP TKE tandas bileşeninden gelmesine rağmen her iki WFP bileşeni de PBLH’i artırma eğilimi sergilemektedir (Şekil 3.8m-n). Model simülasyon öngörülerini rüzgar çiftliğinin PBLH üzerindeki etkisinde de model konfigürasyon seçimine olan hassasiyetini göstermektedir. Örneğin, ORGMYNN simülasyonu (Şekil 3.14b) BASE simülasyonuna (Şekil 3.14a) göre rüzgar çiftliğinin PBLH üzerindeki etkisi biraz zayıflatmaktadır. EDMFv1 simülasyonu ise PBLH farklarının dağılımında ve büyüklüğünde zayıf bir değişime neden olmaktadır (Şekil 3.14c). EDMFv1 simülasyonuna benzer olarak, EDMFv2 simülasyonu PBLH’i rüzgar çiftliğinin uzak bölgelerinde etkilemektedir ancak bu uzak bölge etkileri nispeten zayıf ve daha az saçılmış haldedir (Şekil 3.14d). ADV simülasyonu önemli ölçüde negatif ve pozitif PBLH farklarını yumuşatmaktadır (Şekil 3.14e). Ancak, ADVBF simülasyonunda TKE adveksiyonu doğru işlendiğinde ADV simülasyonundaki görece zayıf PBLH farkları kuvvetlenmektedir ancak yine de özellikle en yüksek pozitif PBLH farkları rüzgar çiftliğinin rüzgar altında görülmektedir (Şekil 3.14f). ADVBF_MCTKE simülasyonunda C_{TKE} için uygulanan 0.25 düzeltme faktörü WFP TKE tandas bileşeninin bağıl katkısını zayıflattığından ADVBF

simülasyonundaki nispeten yüksek pozitif PBLH farklarını azaltmaktadır (Şekil 3.14g).



Şekil 3.14 : Şekil 3.7 ile aynı açıklamaya sahiptir ancak atmosferik sınır tabaka yüksekliği farkı içindir.



4. RÜZGAR ÇİFTLİK PARAMETRİZASYONUNDA TÜRBÜLANSLI KİNETİK ENERJİ KAYNAĞI HESAPLAMASINDA YENİ YAKLAŞIM

4.1 Giriş

Fitch ve diğ.'nin [66] geliştirdiği WFP şeması, literatürde yaygın olarak kullanılan WRF modelinde rüzgar çiftliklerinin atmosferik koşullar üzerindeki potansiyel etkilerini araştırmada sıklıkla kullanılmaktadır [73]. Ancak, Fitch WFP şemasında ve bu şemanın WRF modeli ile etkileşimi hususunda zaman içerisinde bazı eksikler, hatalar tespit edilmiştir. Archer ve diğ. [81] WRF modelinin 3.5.1 versiyonu itibarıyla WFP kullanımında modeldeki bir kod eksikliği nedeni ile TKE adveksiyonunun yanlış işlendiğini ve bu şemada TKE tandas bileşenine ait denklemde yer alan C_{TKE} ($=C_T-C_P$) hesabının eksik ek TKE ürettiğini göstermiştir ve bu problemleri çalışmalarında kullandığı 4.1.2 versiyonunda düzeltmiştir. WFP şemasından gelen yüksek ek TKE problemi önceki bazı çalışmalarda [71, 86, 89] ifade edilmiştir, ancak bu çalışmalarda TKE adveksiyonu modelde kapalı tutulmuştur. Archer ve diğ. [81] TKE adveksiyonundaki problemi düzeltmesine rağmen devam eden yüksek ek TKE düşürülmesi için Fitch WFP şemasında ihmal edilen türbinlere ait elektromekaniksel kayıpları hesaba katmak üzere WRF-WFP öngörülerinin LES yaklaşımı ile doğrulanması sonucunda C_{TKE} için elde ettikleri 0.25 düzeltme faktörünü araştırmacıların sonraki çalışmalarına sunmuştur. TKE adveksiyonunun kullanıldığı önceki çalışmalarda, Archer ve diğ.'nin [81] farkettileri problemlerin farkedilmemesinin muhtemel nedeni TKE adveksiyonun yanlış işlenmesi sonucunda rüzgar çiftliğinin TKE üzerindeki etkisini düşük öngörmesi ile WFP C_{TKE} 'nin yüksek ek TKE sağlaması birbirini elimine etmektedir, ve bu nedenle problem fark edilmemekte ve hatta model öngörülerini gözlemle veya LES ile doğrulanmaktadır. Buna karşılık Siedersleben ve diğ. [80] çalışmalarında TKE adveksiyonu kullanılmasına rağmen açık deniz rüzgar çiftliği üzerinde oldukça düşük TKE seviyeleri bildirmiştir. Birçok çalışmada, bu düzeltmeler, WRF 4.1.2 versiyonu öncesi versiyonlarda [77, 102, 103] prosedür izlenerek ya da sonrası versiyonlarda [103-109]

direkt olarak kullanılmıştır. Ancak bazı çalışmalar [110-114] C_{TKE} için yapılan düzeltmeyi kullanmak yerine orijinal C_{TKE} 'yi kullanmayı tercih etmiştir. Ayrıca, Pryor ve diğ. [115] çalışmalarında WRF-WFP'de orijinal C_{TKE} kullanımını düzeltilmiş C_{TKE} kullanımına göre daha iyi bir başarımla elde ettiklerini göstermiştir. Dahası, Kaytancı ve diğ. [47] düzeltilmiş C_{TKE} kullanımında WRF modelinin, rüzgar çiftlik izinin özellikle TKE ve hava sıcaklığı üzerinde yanlış etki öngörülerini ürettiğini göstermiştir, ve bu nedenle daha iyi C_{TKE} hesabı geliştirilene kadar orijinal C_{TKE} hesabının kullanılmasını önermiştir. Orijinal C_{TKE} hesabı bir boyutlu momentum teorisi ile sadece C_T açısından yazılabilmektedir. Bu yaklaşım Pena ve diğ.'nin [116] çalışmasında ifade edilmiştir ancak uygulanmamıştır. Ruan ve diğ. [117] Çin'in Zhangjiakou dağlık bölgesindeki büyük ölçekli rüzgar çiftliğinin düzeltilmiş C_{TKE} kullanımında hem gündüz hem de gece yüzey sıcaklığını düşürdüğünü göstermiştir. Çalışmada bu beklenmeyen gece soğuma etkisinin, vadi rüzgarının ve rüzgar türbinlerinin neden olduğu yer rüzgarlarındaki artışın birleştirilmiş etkisinden kaynaklandığı ifade edilmiştir. Ancak çalışmada model Fitch WFP şemasının [66] orijinal C_{TKE} kullanımı ile tekrar koşuturulup elde edilen öngörülerin düzeltilmiş versiyonun öngörülerini ile kıyaslanmamıştır.

Bu bölümde bir boyutlu momentum teorisi ele alınarak C_{TKE} hesabı sadece itki katsayısı cinsinden yeniden yazılmıştır ve bu yaklaşıma ait model simülasyonu Bölüm 3'teki çalışmaya uygulanmıştır. Bu nedenle, çalışmanın uygulandığı bölge, kurgulanan rüzgar çiftliği ve çiftlikte kullanılan türbin modeli ile birlikte ele alınan zaman periyodu Bölüm 3'teki ile aynıdır. Bu simülasyona ait sonuçlar ise Bölüm 3'te gerçekleştirilen ADV, ADVBF ve ADVBF_MCTKE simülasyonlara ait sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ancak Bölüm 3'te sunulan sonuçlar genel olarak ilk günün son beş UTC saatine (19:00-00:00 UTC ya da 22:00-03:00 UTC+3) ait ortalama sonuçlarıdır. Bu bölümde ise Bölüm 3'te seçilen iki gün de (17-18 Temmuz 2015) ele alınarak tüm periyot üzerinden gece (22:00-03:00 UTC+3) ve gündüz (10:00-15:00 UTC+3) için ortalama uzamsal, zamansal ve uzamsal-zamansal sonuçlara yer verilmiştir. Ayrıca, bu bölümdeki çalışma literatürde Fitch WFP C_{TKE} hesabı için bir boyutlu momentum teorisinin uygulandığı ilk çalışma olma niteliğini taşımaktadır. Ek olarak, Bölüm 3'te Archer ve diğ.'nin [81] TKE adveksiyonu ve WFP C_{TKE} için gerçekleştirdiği düzeltmelerin birlikte uygulandığı ADVBF_MCTKE simülasyonu bu bölümde ADVBF_CCTKE olarak değiştirilmiştir ve bu bölümde bundan sonra o şekilde

sunulacaktır. Bir boyutlu momentum teorisinin C_{TKE} hesabı için uygulandığı yeni yaklaşımın model simülasyonu ise bu bölümde ADVBF_MCTKE olarak adlandırılmıştır. Bu nedenle bu simülasyon, Bölüm 3'teki ADVBF_MCTKE simülasyonuyla karıştırılmamalıdır.

4.2 Bir Boyutlu Momentum Teorisinin WFP C_{TKE} Hesabında Uygulanması

Fitch WFP şemasında TKE tandas bileşenin ait denklem 2.9'da $C_{TKE} = C_T - C_P$ olarak tanımlanmaktadır. Archer ve diğ. [81] WFP'den gelen yüksek ek TKE seviyesinin düşürmek üzere C_{TKE} hesabına elektromekaniksel kayıpları katmak üzere çalışmalarında ideal koşullarda koşturulan WRF-WFP öngörülerinin LES ile doğrulanması sonucunda C_{TKE} , $c_f = 0.25$ çarpanı ile

$$C_{TKE} = c_f(C_T - C_P) \quad (4.1)$$

olarak değiştirilmiştir. Ancak Bölüm 3'te görüleceği üzere bu düzeltilmiş C_{TKE} hesabı ile gerçekleştirilen simülasyonda (ADVBF_CCTKE) rüzgar çiftliğinin özellikle TKE ve hava sıcaklığı üzerindeki etki öngörülerinde yanlış sonuçlar üretildiği görülmüştür. Bu problemin çözümüne yönelik daha iyi bir C_{TKE} hesap yaklaşımının araştırılması Bölüm 3'te vurgulanmıştır. Buna yönelik olası çözüm yöntemlerinden biri C_{TKE} 'nin sadece C_T açısından bir boyutlu momentum teorisinin uygulanarak tekrar yazılmasıdır. Yukarıda belirtildiği üzere bu yaklaşım ilk defa Pena ve diğ.'nin [116] çalışmasında ifade edilmiştir ancak yaklaşım çalışmalarına uygulanmamıştır. Bir boyutlu momentum teorisinde güç katsayısı, C_P , rotorun akış üzerindeki etkisini belirten, literatürde ' a ' ile tanımlanan, eksenel indiksiyon ile yazılmaktadır ve

$$C_P = 4a(1 - a)^2 \quad (4.2)$$

denklemini ile verilmektedir. Burada

$$a = 0.5 - 0.5\sqrt{1 - C_T} \quad (4.3)$$

olarak ifade edilmektedir. Yukarıda verilen bir boyutlu momentum teorisindeki C_P ve a tanımları, C_{TKE} hesabına uygulandığında

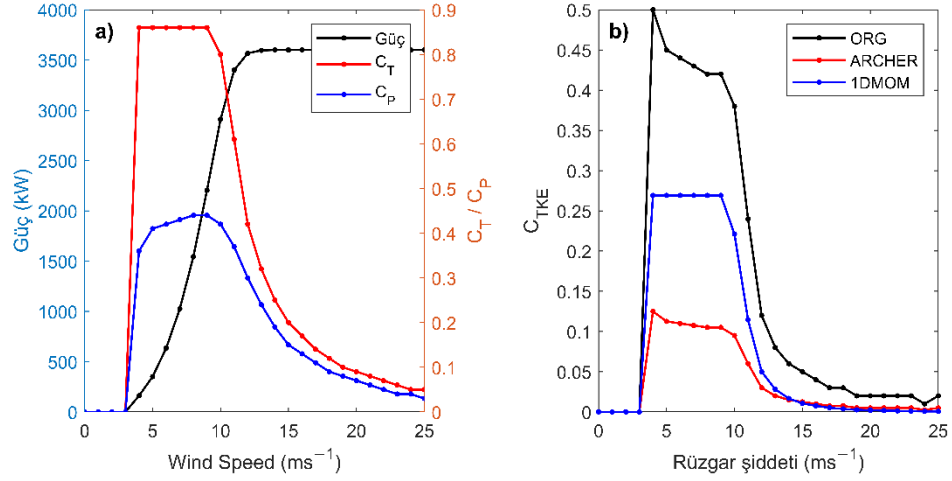
$$C_{TKE} = 0.5(C_T - C_T\sqrt{1 - C_T}) \quad (4.4)$$

olarak ifade edilmektedir. Denklem 4.4'te yer alan yeni C_{TKE} hesabı Abkar ve Porte Agel'in [75] çalışmasında $\xi=1$ durumundaki TKE tandas denklemine benzemektedir. Ancak Abkar ve Porte Agel'in [75] çalışmasındaki TKE tandas denkleminde yatay rüzgar bileşeni türbin gövde yüksekliği için hesaplanmaktadır ve hücre içindeki türbinlerin düzenini hesaba katmak üzere hücre akış hızını düzenleyen ξ parametresi yer almaktadır. Halbuki, Fitch WFP şemasındaki [66] TKE tandans denkleminde (Denklem 2.8) yatay rüzgar bileşeni rotor tabakasının kesiştiği düşey seviyelerde hesaplanmaktadır ve hücre içi türbinlerin düzeni ihmal edilmektedir ve bu durum Abkar ve Porte Agel'in (9) TKE tandas denkleminde $\xi=1$ ile ifade edilir.

Orijinal (ORJ), Archer ve diğ. [81] tarafından düzeltilen (ARCHER) ve bir boyutlu momentum teorisinin (1DMOM) uygulandığı C_{TKE} hesapları, çalışmada ele alınan Siemens SWT3.6-120 kara tipi rüzgar türbin modeli için Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Şekil 4.1b'de açıkça görüleceği üzere devreye giriş hızı ile 13 ms^{-1} arasında (Şekil 4.1a) 1DMOM C_{TKE} değerleri ARCHER C_{TKE} değerlerinden yüksektir. Sonraki rüzgar şiddeti değerleri için ise her ikisi de benzer C_{TKE} değerleri göstermektedir. Ek olarak, tüm rüzgar şiddeti değerleri için ORJ C_{TKE} diğer iki C_{TKE} hesabından daha yüksek değerler sergilemektedir. Yüksek C_{TKE} değeri, WFP TKE tandans bileşeninden daha yüksek bağlı katkı gelmesi sonucu simüle edilen rüzgar çiftliğinden daha yüksek ek TKE gelmesini sağlamaktadır. Bu nedenle 1DMOM C_{TKE} hesabı ile simüle edilen rüzgar çiftliğinden gelen ek TKE, ORJ C_{TKE} 'den gelen ek TKE'den daha az ancak ARCHER C_{TKE} 'den gelen ek TKE'den daha yüksek olacaktır.

4.3 Sonuç ve Tartışma

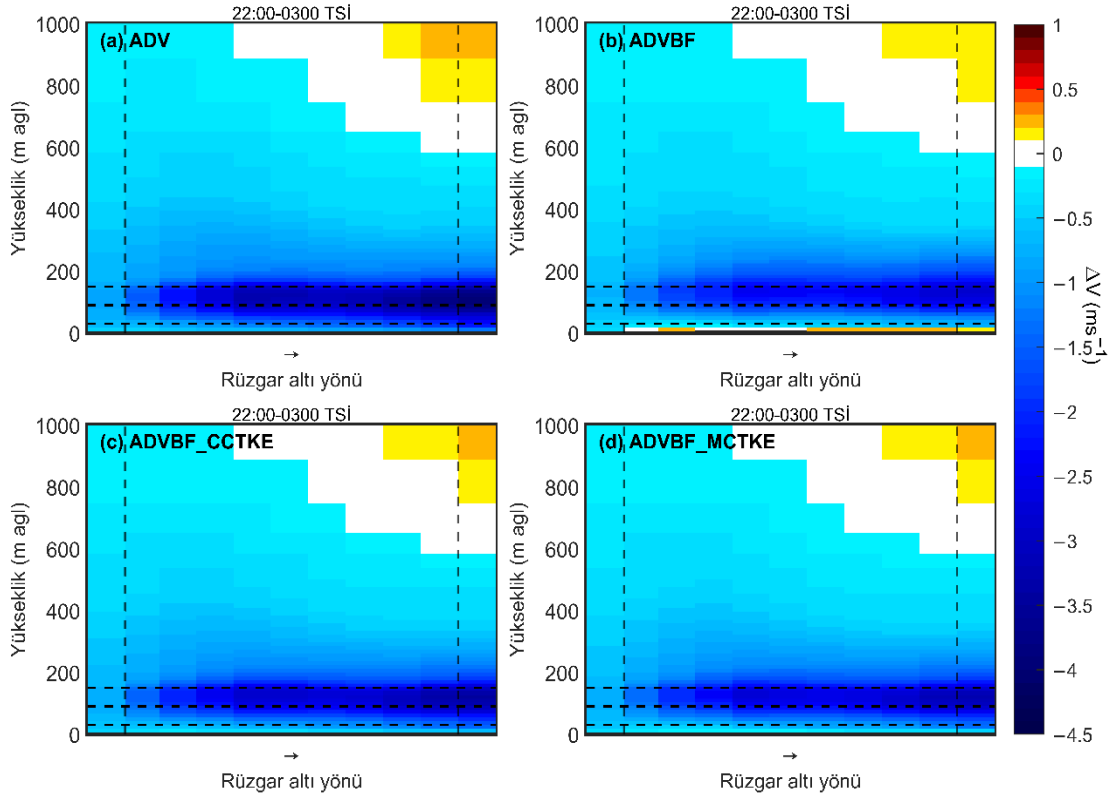
Bu çalışma sadece rüzgar çiftliğine odaklanmaktadır çünkü WFP'de yapılan değişiklikler direkt olarak rüzgar çiftliği hücrelerini etkilemektedir. Çalışmaya ait sonuçlar Bölüm 3'te seçilen iki günlük (17-18 Temmuz 2015) periyot üzerinden gece (22:00-03:00 UTC+3) için yine Bölüm 3'te tanımlanan düşey kesit boyunca zamansal ortalamalar, gece ve gündüz (10:00-15:00 UTC+3) için düşey kesitlerde uzamsal ortalamalar ve düşey profillerde zamansal-uzamsal ortalamalar olarak verilecektir. Ek olarak, çalışma sadece rüzgar çiftliğine odaklanmasına rağmen düşey kesit görsellerinde çiftliğin bir hücre rüzgar üstü ve bir hücre rüzgar altına ait sonuçlar da gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : a) Bu çalışmada kullanılan Siemens SWT3.6-120 kara tipi rüzgar türbin modeline ait güç (kW) ve itki (C_T) /güç katsayısı (C_P) eğrisi gösterilmektedir; b) C_{TKE} katsayısı eğrisinin WFP Fitch şemasındaki orijinal (ORG), düzeltilmiş (ARCHER), değiştirilmiş (1DMOM) versiyonları gösterilmektedir.

Şekil 4.2a’da ADV simülasyonunda Bölüm 3’te belirtildiği üzere MYNN PBL şemasından gelen TKE, WFP şemasından gelen ek TKE ile son model zaman adımına kadar güncellenip adveksiyon ve difüzyon süreçlerine dahil olamaması sonucu, WFP TKE tandans bileşeninin bağıl katkısı oldukça zayıflamaktadır. Bu durum Şekil 4.2’de negatif rüzgar şiddeti farkında en kuvvetli farkların görülmesine neden olmaktadır. ADVBF simülasyonunda (Şekil 4.2b) TKE doğru bir şekilde güncellenip advekte olmaktadır, ve bu nedenle, ADV simülasyonunda gözlemlenen kuvvetli negatif rüzgar şiddeti farkları zayıflamaktadır ve rotor tabakasının altında da rüzgar şiddetinin arttığı pozitif rüzgar şiddeti farkları görülmektedir. ADVBF_CCTKE simülasyonunda ise Bölüm 3’te belirtildiği üzere C_{TKE} için uygulanan 0.25 düzeltme faktörü yine WFP TKE tandans bileşenini bağıl katkısını zayıflatmaktadır ve bu nedenle ADVBF simülasyonunda ADV simülasyonuna göre zayıflayan negatif rüzgar şiddeti farkları tekrar kuvvetlenmekte ve rotor tabakasının altında gözlemlenen pozitif rüzgar şiddeti farkları negatif farklara dönüşmektedir. Düşey kesit olarak ADV ve ADVBF_CCTKE birbirine benzemesine rağmen ADV’deki negatif rüzgar şiddeti farkları daha kuvvetlidir. C_{TKE} hesabında bir boyutlu momentum teorisinin uygulandığı ADVBF_MCTKE simülasyonunda rüzgar şiddeti farkları ADVBF_CCTKE simülasyonu ile oldukça benzerdir. ADVBF simülasyonunda rotorun altında görülen pozitif rüzgar şiddeti farklarının bu simülasyonda görülmemesi C_{TKE} hesabı yaklaşımındaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır, çünkü ADVBF simülasyonunda kullanılan ORJ C_{TKE} rüzgar çiftlik hücrelerine yüksek seviyede ek TKE sağlaması

sonucu daha kuvvetli türbülanslı karışım ile yukarıdan nispeten yüksek momentumlu hava aşağı taşınmaktadır. Sonuç olarak düşey kesit açısından C_{TKE} hesabı için bir boyutlu momentum teorisini uygulayan bu yeni yaklaşım, $c_f = 0.25$ düzeltme faktörünün uygulandığı ARCHER C_{TKE} hesabından farklı bir sonuç vermemektedir.

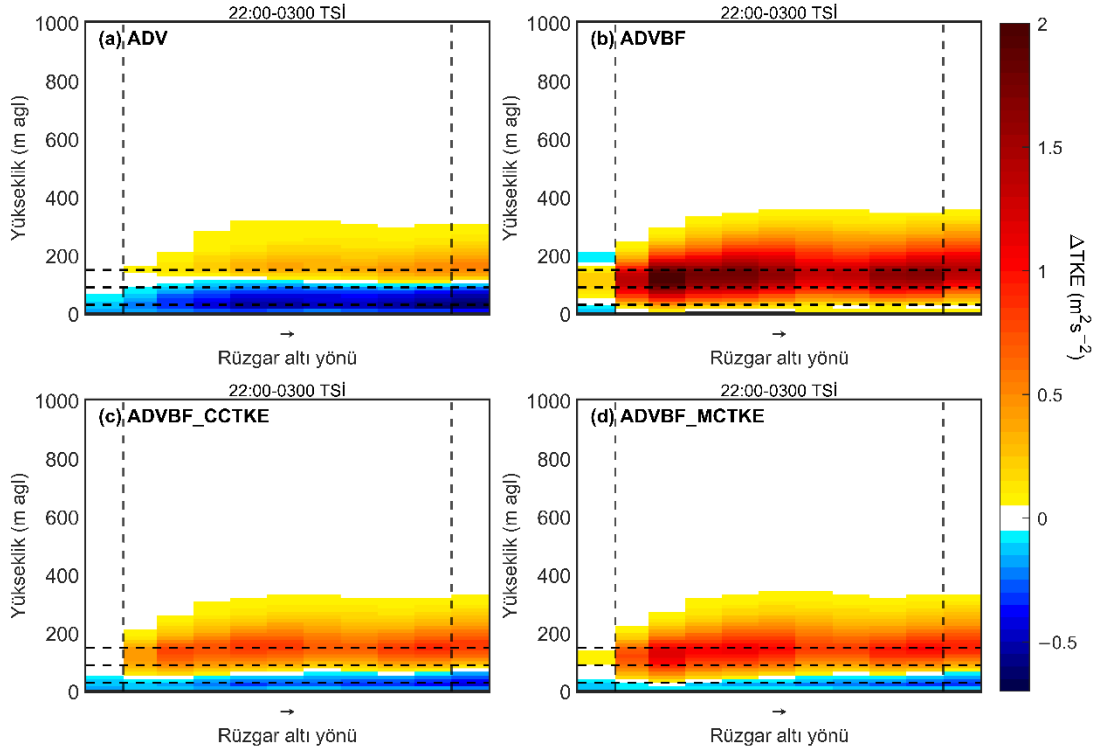


Şekil 4.2 : Rüzgar çiftliği hücrelerinde ve bir düğüm noktası rüzgar üstünde ve altında geceye ait rüzgar şiddeti farkının (ms^{-1}) zamansal ortalamasının düşey kesit gösterimi (a-d). Düşey kesikli çizgiler rüzgar çiftliğinin rüzgar üstü ve rüzgar altı sınırlarını göstermektedir. Yatay kesikli çizgiler yukarıdan aşağı doğru sırasıyla rüzgar çiftliği rotor tabakasının üst yüksekliğini, türbin gövde yüksekliğini ve alt yüksekliğini temsil etmektedir. Ele alınan düşey kesit Bölüm 3’te ele alınan düşey kesittir. Gece için zamasal ortalama TSİ (UTC+3) 22:00-03:00 zaman aralığını kapsamaktadır.

ADV simülasyonu yüzeyden türbin gövde yükseliğine kadar negatif TKE farkları göstermektedir ve türbin gövde yüksekliğinin üzerindeki en zayıf pozitif TKE farkları bu simülasyonda görülmektedir (Şekil 4.3a). Dahası en yüksek negatif TKE farkları da bu simülasyon da görülmektedir. Öte yandan, ADVBF simülasyonu rüzgar çiftliğinde ve bir hücre rüzgar altında yerden yaklaşık 400 m’ye kadar sadece pozitif fark olmak üzere en büyük TKE farklarını sergilemektedir (Şekil 4.3b). ADVBF_CCTKE simülasyonunda negatif TKE farkları genelde yerden rotor

tabakasının alt yarısına kadar bulunmaktadır (Şekil 4.3c). ADVBF_MCTKE simülasyonunda ise negatif TKE farkları genelde rotor tabakasının altında kalmaktadır (Şekil 4.3d). Şekil 4.3c-d’de, sadece ADVBF_CCTKE ve ADVBF_MCTKE simülasyonları ele alınıp birbirleriyle karşılaştırıldığında, büyük negatif ve pozitif TKE farkları sırasıyla ADVBF_CCTKE ve ADVBF_MCTKE simülasyonlarında bulunmaktadır. Ek olarak, Şekil 4.3b-d’de en büyük pozitif TKE farkları rüzgar çiftliği düşey kesitinin ikinci hücresinde rotor tabakasının tepe yüksekliğine yakın bir yerde bulunmaktadır. 1DMOM C_{TKE} hesabının uygulandığı ADVBF_MCTKE simülasyonu, ARCHER C_{TKE} hesabının uygulandığı ADVBF_CCTKE simülasyonu ile kıyaslandığında, rotor tabakasının üzerinde ve altında, sırasıyla TKE farklarını kuvvetlendirmiştir ve zayıflatmıştır. Bu durum ADVBF_MCTKE simülasyonunda 1DMOM C_{TKE} hesabı nedeni ile rüzgar çiftliğinden daha fazla ek TKE gelmesinden kaynaklanmaktadır.

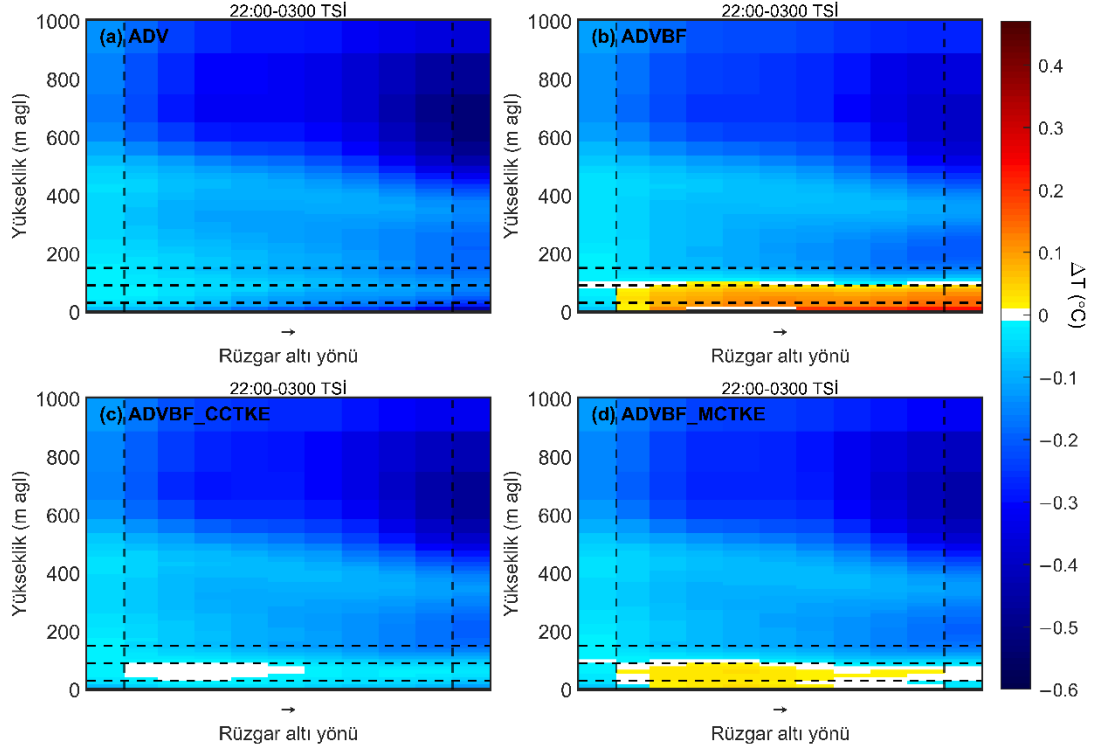
Rüzgar çiftliğinin hava sıcaklığı üzerindeki etkisinde açıkça görüleceği üzere ADV ve ADVBF_CCTKE simülasyonları (Şekil 4.4a,c) gece kararlı atmosferik koşulda tüm yükseklik-mesafe (z-x) düzleminde sadece negatif hava sıcaklık farkı (soğuma etkisi) göstermektedir, çünkü bu simülasyonlarda sırasıyla TKE adveksiyonunun yanlış işlenmesi ve uygun olmayan C_{TKE} hesabı (ARCHER C_{TKE}) sonucunda ısınma etkisinden (pozitif hava sıcaklığı farkı) sorumlu WFP TKE tandas bileşeninden gelen bağıl katkının azalması ile soğuma etkisinden sorumlu WFP momentum tandans bileşeni baskın bileşen olmaktadır. ADVBF simülasyonunda ise ORJ C_{TKE} hesabının kullanılması rüzgar çiftliği ve bir hücre rüzgar altı boyunca türbin gövde yüksekliğinin altında pozitif hava sıcaklığı farkı sergilemektedir (Şekil 4.4b). Ayrıca, en yüksek ısınma etkisi bu simülasyonda görülmektedir. Şekil 4.4d’deki ADVBF_MCTKE simülasyonunda da türbin gövde yüksekliğinin altında ısınma etkisi görülmektedir ancak ısınma etkisine ait büyüklükler ADVBF simülasyonuna göre daha zayıftır. Ek olarak, bu simülasyonda, rüzgar çiftliğinde rotor tabakasının altında ilk hücrede soğuma etkisi bulunmaktadır. Ancak bu simülasyonda bulunan ısınma etkisi C_{TKE} hesabında bu yeni yaklaşımın uygulanması açısından önemlidir, çünkü gece rüzgar çiftliği özellikle yüzeye yakın seviyede ısınma etkisi yaratmaktadır. Bu parametre hususunda bu simülasyonda elde edilen sonuç ile 1DMOM C_{TKE} hesabının Fitch WFP şemasında uygulanabilirliği söz konusu olmalıdır.



Şekil 4.3 : Şekil 4.2 ile aynı açıklamaya sahiptir ancak TKE farkı (m^2s^{-2}) içindir.

Gündüz ve gece için rüzgar çiftliği hücrelerine ait uzamsal ortalamaların kutu diyagramları Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Şekil 4.5a'da açıkça görüleceği üzere rüzgar çiftliği alanında gündüz negatif rüzgar şiddeti fark dağılımı tüm simülasyonlar için benzerdir ve gece dağılımına göre daha zayıftır çünkü gündüz iyi karışmış konvektif tabaka mevcuttur. Ancak, uzamsal ortalama açısından en zayıf gündüz negatif rüzgar şiddeti farkı ORJ C_{TKE} hesabından gelen yüksek ek TKE nedeni ile ADVBF simülasyonunda görülmektedir. Şekil 4.5a'ya göre tüm simülasyonlar için gündüz negatif rüzgar şiddeti farkının rüzgar çiftliğindeki uzamsal ortalamalarına ait medyan değerleri ADV, ADVBF, ADVBF_CCTKE ve ADVBF_MCTKE için sırasıyla -1.13 ms^{-1} , -0.93 ms^{-1} , -1.07 ms^{-1} , -1.05 ms^{-1} 'dir. Geceleyin rüzgar çiftliği iz etkisi daha belirgin olduğundan tüm simülasyonlarda negatif rüzgar şiddeti farkı daha kuvvetlidir.

Tüm simülasyonlar arasında en kuvvetli rüzgar şiddeti farkları ADV simülasyonunda TKE adveksiyonun yanlış işlenmesi nedeni ile görülmektedir. Öte yandan en zayıf negatif rüzgar şiddeti farkları ise ADVBF simülasyonunda ORJ C_{TKE} hesabının neden olduğu nispeten yüksek TKE tandas bileşen katkısı nedeni ile görülmektedir.

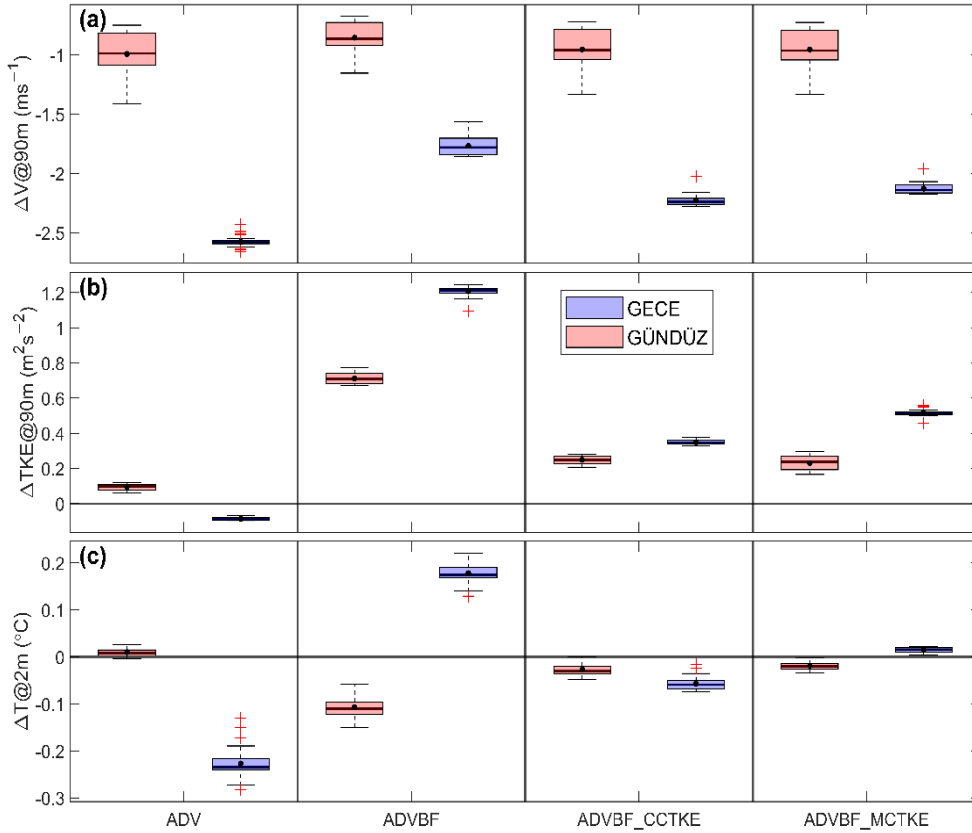


Şekil 4.4 : Şekil 4.2 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak hava sıcaklığı farkı ($^{\circ}\text{C}$) içindir.

Daha önce belirtildiği üzere, ADVBF_CCTKE’de ARCHER C_{TKE} hesabı nedeni ile rüzgar çiftliğinden gelen ek TKE seviyesi, ADVBF_MCTKE’de 1DMOM C_{TKE} hesabı nedeni ile rüzgar çiftliğinden gelen ek TKE seviyesinden daha küçüktür. Ancak bu simülasyonlar gündüz negatif rüzgar şiddeti farkı sonuçlarında olduğu gibi gece negatif rüzgar şiddeti farkında da benzer oldukları bulunmuştur. Bu nedenle, rüzgar çiftliği hücreleri üzerinden alınan türbin gövde yüksekliğindeki rüzgar şiddeti farkına ait uzamsal ortalamaların kutu diyagramı gösterimi açısından 1DMOM C_{TKE} hesabı ARCHER C_{TKE} hesabına göre önemli bir fark yaratamamıştır. Gece negatif rüzgar şiddeti farkının rüzgar çiftliğindeki uzamsal ortalamalarına ait medyan değerleri ADV, ADVBF, ADVBF_CCTKE ve ADVBF_MCTKE için sırasıyla -2.51 ms^{-1} , 1.70 ms^{-1} , -2.15 ms^{-1} ve -2.07 ms^{-1} ’dir.

Ancak ADVBF_CCTKE ile ADVBF_MCTKE arasındaki fark rüzgar çiftliğinin TKE ve hava sıcaklığı üzerindeki etkisine ait sonuçlarda belirgin hale gelmektedir (Şekil 4.5b-c). Gece ve gündüz için türbin gövde yüksekliğindeki en düşük TKE farkları ADV simülasyonunda bulunmuştur (Şekil 4.5b). Ancak, diğer simülasyonların tersine,

uzamsal ortalama dağılımdaki gece TKE fark değerleri bu simülasyonda tamamen negatiftir.



Şekil 4.5 : Rüzgar çiftliği etkisinde türbin gövde yüksekliğindeki a) rüzgar şiddetinde (V) ve b) TKE’de ve c) yüzeye yakın hava sıcaklığında (T2) rüzgar çiftliği hücrelerinde oluşan değişimin gündüz (kırmızı) ve gece (mavi) için uzamsal ortalamalarının kutu diyagram gösterimi. Gündüz ve gece için zaman aralıkları TSİ (UTC+3) sırasıyla 10:00-15:00 ve 22:00-03:00’dır.

ADVBF simülasyonunda gece ve gündüz TKE farkları, ADV hariç diğer simülasyonlarda olduğu gibi sadece pozitiftir, ancak büyüklük açısından diğer simülasyonlar arasında en yüksektir. ORJ C_{TKE} değerlerinin dörtte birine düşürüldüğü ADVBF_CCTKE simülasyonunda, gece ve gündüz TKE farkları, ADVBF’ye kıyasla, önemli ölçüde zayıflamıştır, ancak yine de pozitiftir. ADVBF_MCTKE simülasyonu ADVBF_CCTKE ile kıyaslandığında, gündüz TKE fark dağılım aralığı genişlemesine rağmen benzer medyan ve ortalamaya sahipken, gece TKE fark dağılım aralığı daralmasına rağmen farklar kuvvetlenmiştir. Bu bulgular ışığında, Fitch WFP şemasında ARCHER C_{TKE} yerine 1DMOM C_{TKE} hesabının uygulanması özellikle gece rüzgar çiftliğindeki uzamsal ortalama TKE farkları açısından önemli bir farklılık

yaratmaktadır. Gündüz/Gece TKE farklarına ait medyan değerleri ADV, ADVBF, ADVBF_CCTKE ve ADVBF_MCTKE için sırasıyla 0.09/-0.07 m²s⁻², 0.76/1.22 m²s⁻², 0.27/0.36 m²s⁻² ve 0.30/0.52 m²s⁻²'dir.

Yerden yapılan [12, 16, 17, 19] ve uydu [10, 11, 13, 14] gözlem çalışmaları rüzgar çiftliğinin geceleyin yer sıcaklığını ve yüzeye yakın hava sıcaklığını artırma eğilimi sergilediğini göstermektedir. Modelleme çalışmaları da bu ısınma etkisini göstermektedir. Gündüz ise tam tersi gözlemlenmektedir. Ancak Bölüm 3'te TKE adveksiyonunun yanlış işlendiği ADV simülasyonu ya da doğru işlenmesine rağmen uygun olmayan ARCHER C_{TKE} hesabının uygulandığı ADVBF_CCTKE simülasyonu rüzgar çiftliğinin hava sıcaklığı üzerindeki etkisini yanlış öngörmesine (soğuma etkisine) neden olmaktadır. Bu bölüme ait iki gün üzerinden yapılan değerlendirmelerde de bu simülasyonlar için aynı yanlış gece etki öngörülleri (soğuma etkisi) bulunmuştur (Şekil 4.5c). Ek olarak, ADVBF_CCTKE'nin tersine ADV simülasyonu gündüz de beklenen soğuma etkisi yerine ısınma etkisi sergileyerek yanlış sonuçların üretimine neden olmaktadır. ADVBF_CCTKE simülasyonunda ise doğru şekilde gündüz soğuma etkisi üretilmektedir. Bu simülasyonda ARCHER C_{TKE} hesabı sonucu üretilen ek TKE zayıflamasına rağmen hava sıcaklığı açısından gecenin tersine gündüz doğru sonuç üretmesi gündüz konvektif aktivite nedeni ile zaten iyi karışımış tabaka mevcudiyetinden kaynaklanmaktadır. Gündüz en büyük soğuma etkisi ADVBF simülasyonunda bulunmaktadır. ADVBF_CCTKE ve ADVBF_MCTKE benzer soğuma etki dağılımı sergilemektedir. Ancak, ADVBF_CCTKE'nin tersine ADVBF_MCTKE gece doğru ancak oldukça zayıf ısınma etkisi göstermektedir. Hava sıcaklığı parametresi için 1DMOM C_{TKE} hesabının uygulandığı ADVBF_MCTKE simülasyonunun etki büyüklüğünün işareti açısından doğru sonuç üretmesi, bu simülasyonun ileriki bir çalışmada LES ile kıyaslanarak doğrulama testinin gerçekleştirilmesi kayda değer olacaktır. Yere yakın hava sıcaklığı farkı için rüzgar çiftliği hücrelerinin uzamsal ortalama dağılımına ait gündüz/gece medyan değerleri ADV, ADVBF, ADVBF_CCTKE ve ADVBF_MCTKE için sırasıyla 0.02/-0.20 °C, -0.1/0.17 °C, -0.02/-0.05 °C ve -0.02/0.02 °C'dir.

Model simülasyonları için rüzgar çiftliği hücrelerindeki sonuçların uzamsal-zamansal ortalamalarına ait düşey profiller Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Tüm simülasyonlar için gündüz negatif rüzgar şiddeti farkı 1 ms⁻¹'den daha azdır (Şekil 4.6a). Tüm simülasyonlarda maksimum negatif rüzgar şiddeti farkı türbin gövde yüksekliğinin

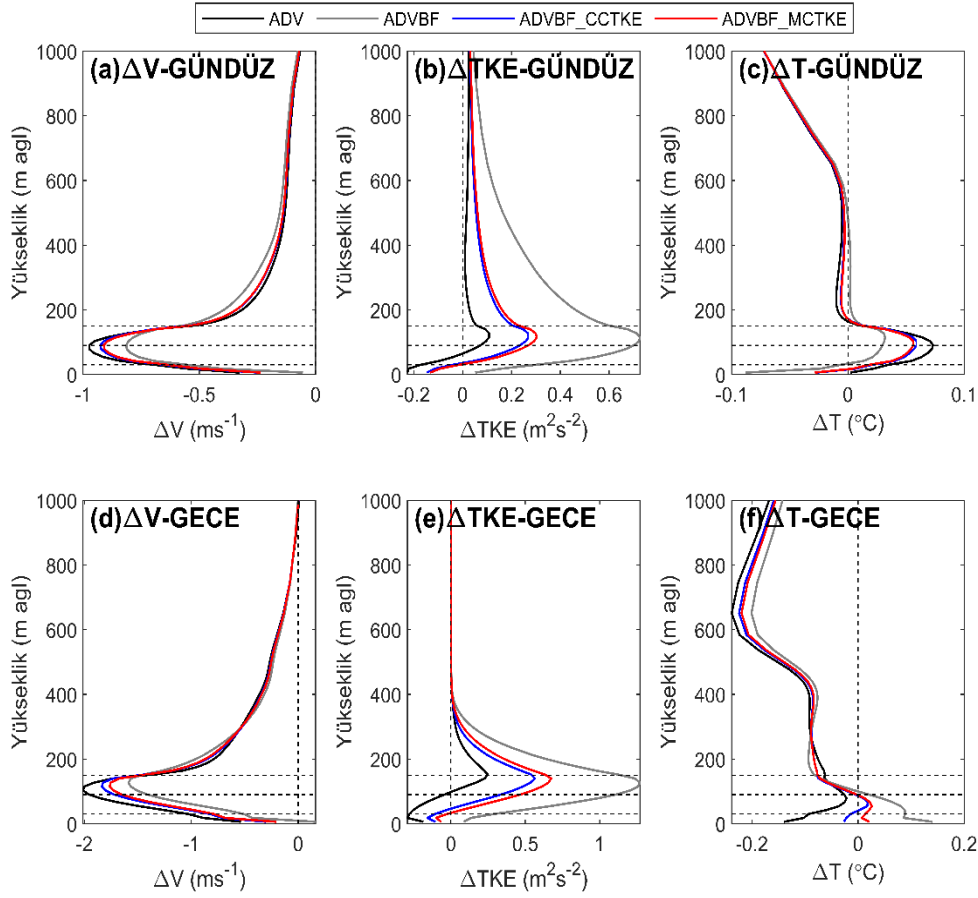
biraz altında bulunmaktadır. Simülasyonlar arasında negatif rüzgar şiddeti farkı rotor tabakasında farklılaşmaktadır. Ancak, rotor tabakasının üstünde ve altında negatif rüzgar şiddeti farkı profilleri benzerdir. ADV simülasyonu -0.97 ms^{-1} ve ADVBF simülasyonu -0.81 ms^{-1} olmak üzere sırasıyla en büyük ve en küçük negatif rüzgar şiddeti farkına sahiptir. ADVBF_CCTKE ve ADVBF_MCTKE simülasyonları, düşey kesit (gece zamsal ortalama) ve kutu diyagramı (gündüz/gece uzamsal ortalama) sonuçlarında olduğu gibi, benzer gündüz rüzgar şiddeti farkı profillerine sahiptir. ADVBF_CCTKE ve ADVBF_MCTKE için maksimum negatif rüzgar şiddeti farkı sırasıyla -0.93 ms^{-1} ve -0.91 ms^{-1} 'dir. Gece negatif rüzgar şiddeti farkı kararlı atmosferik koşul nedeniyle kuvvetlenmektedir ve rotor tabakasında 1 ms^{-1} 'dedir (Şekil 4.6d). Maksimum gece negatif rüzgar şiddeti farkı lokasyonu tüm simülasyonlarda rotor tabakasının üst yarısına yükselmiştir. Gece uzamsal-zamansal ortalamalar için yine ADV simülasyonu -2.01 ms^{-1} ve ADVBF -1.59 ms^{-1} olmak üzere sırasıyla en büyük ve en küçük gece negatif rüzgar şiddeti farkına sahiptir. Bu durum ADV için TKE adveksiyonunun yanlış işlenmesi nedeni ile düşük ek TKE katkısı ve ADVBF için ORJ C_{TKE} hesabı nedeniyle gelen yüksek ek TKE katkısı ile ilgilidir. ADVBF için belirtilen bu durum ayrıca rotor tabakasının altında pozitif rüzgar şiddeti farkının oluşmasına neden olmaktadır. ADVBF_CCTKE ve ADVBF_MCTKE simülasyonları gece negatif rüzgar şiddeti farkında rotor tabakasının üst yarısında bir miktar farklılaşmaktadır. Ancak düşey profil boyunca ADVBF_MCTKE ADVBF_CCTKE'ye göre daha küçük negatif rüzgar şiddeti farkları sergilemektedir. İki simülasyonda C_{TKE} hesabı nedeni ile rüzgar şiddeti farkına WFP TKE tandas bileşeninden gelen bağıl katkı önemli derecede farklı olmasına rağmen düşey profillerin bu kadar farklı olmaması negatif rüzgar şiddeti farkından WFP momentum tandans bileşenin sorumlu olmasıdır. Ancak sonra görüleceği üzere TKE ve hava sıcaklığı açısından etken bileşen WFP TKE tandans bileşenidir. ADVBF_CCTKE ve ADVBF_MCTKE için maksimum gece negatif rüzgar şiddeti farkı sırasıyla -1.84 ms^{-1} ve -1.76 ms^{-1} 'dir. Rüzgar çiftliği hücrelerinde rüzgar şiddeti farkının uzamsal-zamansal ortalama açısından, 1DMOM C_{TKE} hesabının ARCHER C_{TKE} hesabına göre sonuçlarda önemli bir fark yaratmadığı görülmektedir.

Tüm simülasyonlar TKE farkına ait uzamsal-zamansal ortalama profilleri büyüklük açısından gündüz ve gece için aynı sırayı takip etmektedir (Şekil 4.6b,e). Ancak, gündüz TKE farkları (Şekil 4.6b) gece TKE farklarından küçüktür. Şekil 4.6b ve Şekil

4.6e’de açıkça görüleceği üzere hem gece hem de gündüz için ADV ve ADVBF simülasyonları düşey profil boyunca sırasıyla en küçük ve en büyük uzamsal-zamansal ortalama TKE farklarına sahiptir. Ancak, diğer simülasyonların tersine, ADVBF simülasyonu hem gündüz hem de gece rotor tabakasının altında pozitif TKE farkları sergilemektedir. Rüzgar şiddeti farkına ait düşey profil sonuçlarında gözlemlendiği gibi, simülasyonların gündüz/gece TKE fark profilleri rotor tabakasında, tabakanın üstünde ve altında olduğundan daha çok farklılaşmaktadır. Şekil 4.6b’ye göre, maksimum gündüz TKE farkları tüm simülasyonlarda rotor tabakasının üst yarısında bulunmaktadır ve ADV, ADVBF, ADVBF_CCTKE ve ADVBF_MCTKE simülasyonları için sırasıyla $0.11 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$, $0.73 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$, $0.27 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ ve $0.30 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ ’dir. Profil boyunca ADVBF_MCTKE simülasyonu ADVBF_CCTKE simülasyonundan zayıf bir şekilde daha yüksek gündüz TKE farklarına sahip olmasına rağmen benzer profil sergilemektedirler. Gece ise bu iki simülasyon arasındaki fark belirginleşmektedir (Şekil 4.6e). Tüm simülasyonlarda maksimum gece TKE farkı ya tam rotor tabakasının üst yüksekliğine ya da oldukça yakın bir seviyeye kaymaktadır ki bu seviyeler gece rüzgar kaymasının en büyük olduğu yerlerdir. Maksimum gece TKE farkları ADV, ADVBF, ADVBF_CCTKE ve ADVBF_MCTKE simülasyonları için sırasıyla $0.25 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$, $1.27 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$, $0.57 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ ve $0.67 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ ’dir. C_{TKE} hesabındaki farklılık nedeniyle ADVBF_CCTKE yüzeyden rotor tabakasının alt yarısına kadar negatif TKE farkları gösterirken ADVBF_MCTKE sadece rotor tabakasının altında negatif TKE farkları göstermektedir ve sonrasında üst seviyelere doğru pozitif TKE farkları sergilemektedir.

Şekil 4.6c ve Şekil 4.6f’ye göre rüzgar çiftliğinin hava sıcaklığı üzerindeki etkisinde gündüz ve gece rüzgar çiftliği hücrelerinin uzamsal-zamansal ortalamalarının profilleri birbirinden oldukça farklı olduğu görülmektedir. Gündüz tüm profiller birbirini düzgün bir şekilde takip etmektedir. Ancak gece tüm profiller özellikle türbin gövde yüksekliğinin altında oldukça farklılaşmaktadır. Gündüz ADV hariç diğer simülasyonlar rotor tabakasının altında soğuma sinyalleri sergilemektedir. Ek olarak, ADVBF_CCTKE ve ADVBF_MCTKE gündüz büyüklük açısından da benzer profiller sergilemektedir. Maksimum gündüz soğuma sinyali rotor tabakasının altında ADVBF simülasyonunda görülürken, maksimum gündüz ısınma sinyali de rotor tabakasında ADV simülasyonunda görülmektedir. Rotor tabakasının üstünde ADVBF hariç diğer simülasyonlar yaklaşık 500 m’ye kadar oldukça zayıf, sıfıra yakın, soğuma

sinyalleri göstermektedir. Sonraki yüksekliklerde tüm simülasyonlarda soğuma sinyali $-0.09\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye yükselmektedir.



Şekil 4.6 : Rüzgar çiftliği etkisinde rüzgar şiddetinde (a, d), TKE’de (b, e) ve hava sıcaklığında (c, f) rüzgar çiftliği hücrelerinde oluşan değişimin gündüz (a-c) ve gece (d-f) için uzamsal-zamansal ortalamalarının düşey profilinin gösterimi. Gündüz ve gece çizimleri TSİ (UTC+3) sırasıyla 10:00-15:00 ve 22:00-03:00 zaman aralıklarını kapsamaktadır. Çizimlerdeki siyah, gri, mavi ve kırmızı düz çizgiler sırasıyla ADV, ADVBF, ADVBF_CCTKE ve ADVBF_MCTKE simülasyonlarını temsil etmektedir. Yatay kesikli çizgiler yukarıdan aşağı doğru sırasıyla rüzgar çiftliği rotor tabakasının üst yüksekliğini, türbin gövde yüksekliğini ve alt yüksekliğini temsil etmektedir. Düşey kesikli çizgi ise pozitif ve negatif farkları ayıran sınırı temsil etmektedir.

Maksimum gündüz soğuma sinyali bu nedenle tüm simülasyonlarda $-0.09\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Maksimum gündüz ısınma değerleri ise ADV, ADVBF, ADVBF_CCTKE ve ADVBF_MCTKE için sırasıyla $0.07\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Gündüzün aksine geceleyin rüzgar çiftliğinin hava sıcaklığı üzerindeki etkisi daha belirgindir. Simülasyonlara ait gece hava sıcaklık farkı profilleri genel olarak yüzeyden rotorun üst uç yükseliğine kadar olan bir aralıkta oldukça farklılaşmaktadır (Şekil 4.6f). ADVBF

(ADVBF_MTCKE) simülasyonu yüzeyden (yaklaşık) türbin gövde yükseliğine kadar ısınma etkisi göstermektedir. Yukarı seviyelerde ise her iki simülasyon da soğuma etkisi göstermektedir. Tersine, ADV simülasyonu profil boyunca sadece soğuma etkisi göstermektedir, ama ADVBF_CCTKE simülasyonu yerden rotorun alt uç yüksekliğine kadar soğuma etkisi göstermektedir. Ancak bu simülasyon rotor tabakasının alt yarısında ısınma etkisi sonraki yüksekliklerde ise yeniden soğuma etkisi sergilemektedir. ADV ve ADVBF_CCTKE simülasyonlarında özellikle rotor tabakasının altında gözlemlenen soğuma etkisi yani yanlış öngörü sonuçları sırasıyla TKE adveksiyonunun yanlış işlenmesi ve C_{TKE} için uygun olamayan düzeltme faktörünün uygulanması nedeniyle WFP TKE tandansından gelen bağıl katkının zayıflamasından kaynaklanmaktadır. Geceleyin özellikle rotor tabakasının altında beklenen etki ısınma etkisidir. Simülasyonlar arasında maksimum ısınma etkisi 0.15°C ile ADVBF simülasyonunda yere yakın seviyede (6 m, ilk model seviyesi) görülmektedir. ADVBF_MCTKE için bu maksimum değer 0.02°C 'dir. Tüm simülasyonlarda 600 m'nin biraz üzerinde aynı yükseklikte maksimum soğuma etkisi bulunmaktadır. ADV, ADVBF, ADVBF_CCTKE ve ADVBF_MCTKE için o seviyede gözlemlenen maksimum soğuma etkisi sırasıyla -0.24°C , -0.20°C , -0.22°C ve -0.22°C 'dir. Dahası bu bölüm ARCHER C_{TKE} hesabının özellikle rüzgar çiftliğinin hava sıcaklığın üzerindeki yanlış etki öngörüsüne neden olması sebebiyle daha iyi bir C_{TKE} hesap yaklaşımın geliştirilmesini hedeflemesi ile yeni yaklaşım 1DMOM C_{TKE} 'nin uygulandığı ADVBF_MCTKE'nin ARCHER C_{TKE} 'nin uygulandığı ADVBF_CCTKE ile kıyaslanması sonucunda rüzgar çiftliği hücrelerinin uzamsal-zamansal ortalamasına ait düşey profil açısından ADVBF_MCTKE öngörüsünün ADVBF_CCTKE öngörüsünden oldukça farklılaştığı ve beklenen etkileri oldukça zayıf büyüklüklerle de gösterdiği görülmüştür. Bu nedenle ileriki bir çalışmada 1DMOM C_{TKE} hesabın LES gibi bir yaklaşımla doğrulanmasına ihtiyaç duyulmaktadır.



5. ARAZİ KULLANIMI DEĞİŞİMİNDE RÜZGAR ÇİFTLİĞİ ETKİSİNDEKİ VE GÜÇ ÜRETİMİNDEKİ DEĞİŞİMİN İNCELENMESİ

5.1 Giriş

Bu bölüme ait çalışmada arazi kullanım değişikliği sonucunda bir rüzgar çiftliğinin meteoroloji üzerindeki etkilerin ve güç üretimindeki değişimin incelenmesi amaçlanmıştır. Literatürde arazi kullanım değişikliği ile rüzgar çiftliği etkileşimini gösteren bir çalışma bulunmamasına rağmen belirli bir arazi kullanımı üzerinde o araziye yönelik bazı parametrelerin değiştirilmesi sonucunda rüzgar çiftliğine ait izin dinamiğindeki ya da güç üretimindeki değişim incelemiştir ancak bu çalışmaların sayısı oldukça az olduğu gözlemlenmiştir. Adedipe ve diğ. [118] yaprak alan indeksi (LAI) aracılığı ile farklı orman yoğunluklarının rüzgar türbin izi üzerindeki etkisini incelenmiştir. Ormanın olmadığı (LAI=0 m²/m²) ve olduğu (LAI=0.42,1.70,4.25 m²/m²) durumların kıyaslanması neticesinde ormanın rüzgar türbinlerinden gelen ek türbülansın sönümlenmesini sağladığı ve bu nedenle yüksek rüzgar üstü türbülansa sahip ormanın rüzgar türbin izinin etki mesafeni kısaltacağı ortaya konmuştur. Ek olarak, benzer sonuçlar Agafona ve diğ.'nin [119] çalışmasında da bulunmuştur. Agafona [120] ayrıca ormanın rüzgar türbin izini zayıflatmasına rağmen orman alanındaki yüksek türbülans yoğunluğunun ve rüzgar çiftliğinde düşey rüzgar profilindeki artan rüzgar kaymasından dolayı rüzgar güç potansiyelinin ormansız alana göre azaldığını göstermiştir. Adedipe ve diğ. [121] ayrıca orman heterojenliğinin rüzgar türbin izi üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada ormana ait yüksek heterojenliğin rüzgar türbin izine ait etkiyi kuvvetlendirdiği bulunmuştur. Wanderwende ve diğ. [90] belirlenen bir yama alanının iki farklı pürüzlülük uzunluğuna sahip ekin arazisine (soya ve mısır) dönüştürülmesiyle ekin yüksekliğinin rüzgar çiftliğinde üretilen rüzgar enerjisini ne yönde etkileyeceğini araştırmıştır. Çalışmada yüksek pürüzlülükten (mısır) düşük pürüzlülüğe (soya) geçişte türbin gövde yüksekliğindeki rüzgar şiddetinin arttığı rotor tabakasındaki rüzgar kaymasının azaldığı ve bu nedenle sırasıyla rüzgar enerji üretiminin arttığı ve türbin üzerindeki

yorulma yükünün azaldığı ortaya konmuştur. Bu bölüme ait çalışma bu açıdan literatürde ilk olma özelliği taşıyacaktır. Bu çalışmada aşağıda detayların verileceği 2015 yılının Ağustos ayına ait 8 günlük bir periyot üzerinden yüzey özelliklerindeki değişikliğin türbin rotorunun tepe yüksekliğine kadar ulaşabilmesi için belirlenen bir alanda yapılan arazi kullanım değişikliği ile rüzgar çiftliğine ait ortalama meteorolojik etkiler ve güç üretimi, ve ek olarak bu değişikliğin sonucunda sonuçlardaki değişim değerlendirilmiştir.

5.2 Veri ve Yöntem

5.2.1 Çalışma bölgesi, Ölçüm bilgisi, seçilmiş zaman periyodu

Bu bölüme ait çalışma Kırklareli ilinin seçili bir bölgesinde gerçekleştirilmiştir. Seçili bölgeye ait ilgili lokasyondaki ölçüm verisi Yeni Avrupa Rüzgar Atlası projesinin ilk safhasında Türkiye'yi içeren model alanında gerçekleştirilen hassasiyet simülasyonlarının başarımının test edilmesinde kullanılmıştır [93]. Rüzgar ölçümün gerçekleştiği rüzgar ölçüm direği 277 m rakıma sahip yoğun tarımsal aktivitenin olduğu hafif eğimli bir tepe üzerinde bulunmaktadır. Bu ölçüm verisi seçilen zaman periyodu için WFP olmadan gerçekleştirilen WRF model simülasyonlarının başarımını değerlendirmede kullanılmıştır. Rüzgar ölçüm direğinde rüzgar şiddeti verisi 31 m, 61 m, ve 81 m'deki taslı anemometreler (cup anemometers) aracılığı ile elde edilirken rüzgar yönü verisi sadece 78 m'de yön sensör ile elde edilmektedir. Rüzgar şiddeti ve yön verisinin örneklem zaman periyodu ise 10 dk'dır.

Bölüm 3'te olduğu gibi bu bölümde de simülasyonlar arasındaki farkı belirleyebilmek üzere rüzgar çiftliği iz etkisinin kuvvetli olabileceği bir zaman periyodu seçilmiştir. Bu periyot, yine Bölüm 3'te ifade edildiği üzere gözlemsel çalışmalarda [16, 17, 19] rüzgar çiftliği iz etkisi genellikle yaz mevsiminde daha etkin olduğundan, yaz mevsiminden seçilmiştir. Bu mevsimde rüzgar şiddeti için nispeten yüksek rüzgar enerjisi ihtiva etmesi ile birlikte seçili türbin modeli için yüksek itki katsayısı üretmesi beklenirken rüzgar yönü için bulunduğu rüzgar yön sektöründe yüksek frekansta esmesi ve ortalama standart sapmasının düşük olması beklenmektedir. İlgili kıstaslar göz önünde bulundurulduğunda bu bölüme ait çalışma periyodu 20-27 Ağustos 2015 olarak belirlenmiştir. Bu 8 günlük periyot için her güne ait ortalama, standart sapma değerleri ile esme frekansı ve sektörü (yön için) Tablo 5.1'de verilmiştir. Tablo 5.1'de rüzgar şiddeti için veriler bilgiler sadece bu çalışmada kullanılan Siemens SWT3.6-

120 kapa tipi türbin modeline ait 90 m türbin gövde yüksekliğine en yakın ölçüm yüksekliği olan 81 m bilgileridir.

Çizelge 5.1 : Çalışma periyoduna (20-27 Ağustos 2015) ait rüzgar ölçüm istatistikleri verilmektedir. Tabloda V_{ort} , S_V , D_{ort} , S_D , F_{esme} , Sek_{esme} sütunları sırasıyla günlük ortalama rüzgar şiddeti, rüzgar şiddetindeki standart sapma, ortalama rüzgar yönü, rüzgar yönündeki standart sapma, esme frekansı ve esme frekansının en yüksek olduğu rüzgar yön sektörü (16 sektör için).

	V_{ort} (ms^{-1})	S_V (ms^{-1})	D_{ort} ($^{\circ}$)	S_D ($^{\circ}$)	F_{esme} (%)	Sek_{esme} (-)
20/08/2015	8.51	2.31	31.59	16.04	66.67	KKD
21/08/2015	9.12	2.18	15.56	14.07	82.64	KKD
22/08/2015	11.63	2.45	13.52	7.14	93.06	K
23/08/2015	5.50	2.55	12.62	30.79	50.69	K
24/08/2015	6.06	1.44	4.15	14.69	63.19	K
25/08/2015	7.84	1.19	12.66	16.79	63.89	K
26/08/2015	7.24	1.61	14.56	15.78	61.11	K
27/08/2015	8.13	2.56	28.31	18.08	59.72	KKD

5.2.2 Hipotetik rüzgar çiftliği tasarımı

Hipotetik rüzgar çiftliği ölçüm lokasyonunun yaklaşık 10 km güney batısına (270°) kurulmuştur. Rüzgar çiftliğinin kurulduğu alanda yoğun tarımsal faaliyetler gerçekleştirilmektedir. Bölüm 3'te ifade edilen Manwell ve diğ.'nin [98] düz arazi koşuluna göre, bu bölüme ait çalışmada hipotetik rüzgar çiftliği düz olmayan bir arazi üzerine kurulmuştur. Rüzgar çiftliği yama alanında merkezde olacak şekilde kuzey-güney doğrultusunda (0°) 10 x 10 hizalı olmak üzere toplam 100 Siemens SWT3.6-120 kara tipi rüzgar türbini ihtiva etmektedir (Şekil 5.1b). Türbinler arası mesafe ise türbin rotor çapının 6 katı (6D ya da 720 m) olarak belirlenmiştir. Bu şekilde rüzgar çiftliği ebatı 6480 m x 6480 m'dir ve kurulu gücü 3600 MW'tır.

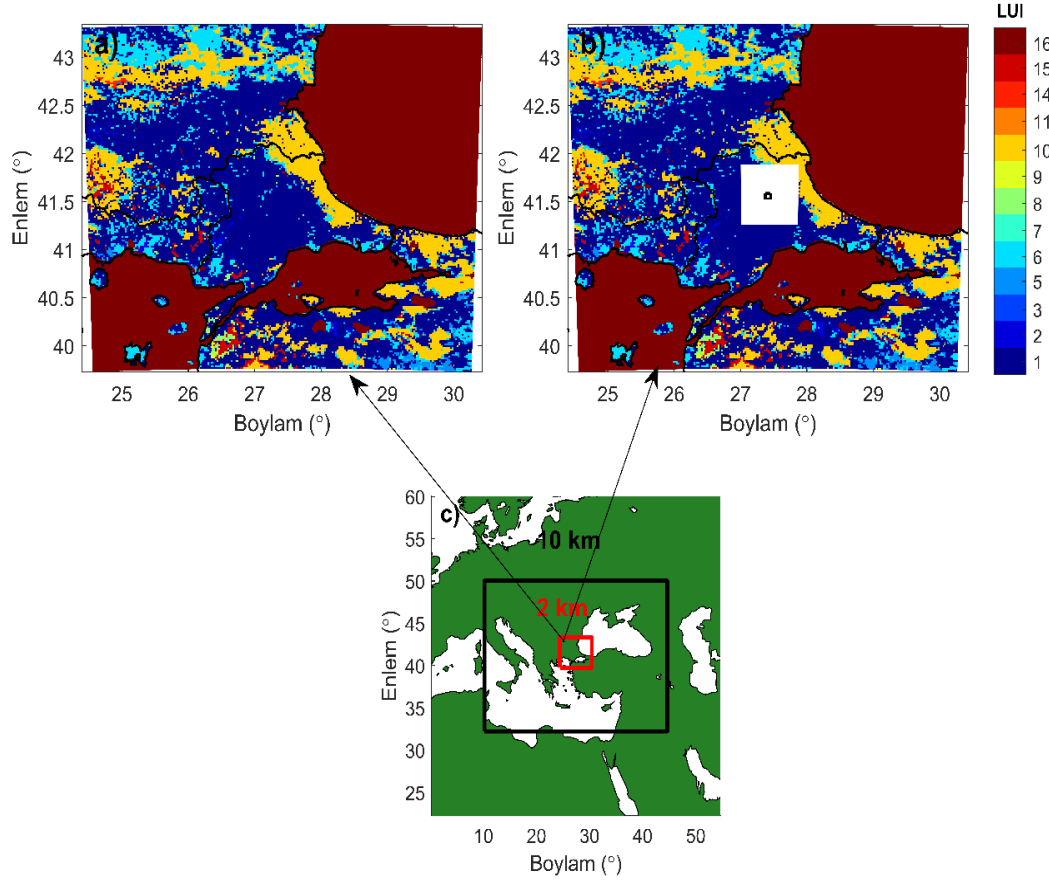
5.2.3 WRF model simülasyonları

Bu çalışmada Bölüm 3 ve Bölüm 4'ün aksine WRF v3.8.1 yerine WRF v4.2.1 kullanılmıştır, çünkü bu modelde Archer ve diğ.'nin [81] çalışmasında belirtilen TKE adveksiyonu problemi bu üst versiyonda düzeltilmiş haldedir. Bu bölümde yine Bölüm 3 ve Bölüm 4'ün aksine hesaplama zamanını düşürmek üzere iki model yuvalama alanı kullanılmıştır (Şekil 5.1c). Dış model alanın yatay çözünürlüğü 10 km iken iç model alanın yatay çözünürlüğü 2 km'dir. Model alanlarındaki düğüm (grid) sayısı doğu-batı

x güney-kuzey biçiminde verilmek üzere dış alan 254 x 191 iken iç alan 246 x 241'dir. Ancak iç alan eş zamanlı olarak hem türbinli hem de türbinsiz olarak simüle edildiğinden modelde namelist.input dosyasında max_dom sayısı üçtür. İkinci model alanında WFP kullanılmazken üçüncü alanda kullanılmaktadır. Böylece bu çalışmada rüzgar çiftliği iz etkisi üçüncü alan öngörüsü ile ikinci alan öngörüsü arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Düşey seviye olarak Tomaszewski ve Lundquist'in [26] çalışmalarında kullandıkları yaklaşık 300 m'ye kadar yaklaşık 12 m düşey çözünürlüğe sahip 58 düşey seviyelik düşey yapı kullanılmıştır. Böylece bu bölümde kullanılan düşey seviye yapısında Bölüm 3 ve Bölüm 4'te kullanılan Siemens SWT3.6-120 kara tip rüzgar türbin modeli kullanıldığında rotor alanında on düşey seviye bulunurken, rotor alanının altında iki düşey seviye bulunmaktadır (Şekil 5.2). Simülasyonlarda sınır ve başlangıç koşulu olarak 0.3° x 0.3°'lik ERA-5 reanaliz verisi kullanılmıştır. Topoğrafya ve arazi örtüsü için 30 s'lik USGS verisi kullanılmıştır. WRF model fizik opsiyonlarında, atmosferik sınır tabaka için MYNN2.5 PBL şeması, uzun ve kısa dalga boylu radyasyon için RRTMG şeması, mikrofizik için single moment 5-class şeması, kümülüs fiziği için Kain-Fritsch şeması, kara yüzeyi (land surface) fiziği için Noah LSM, yüzey tabaka için MYNN şeması kullanılmıştır. Kümülüs fiziği sadece dış alan (10 km) için kullanılmıştır. TKE adveksiyonu TKE bütçesine dahil edilmiştir. Bu bölümde, Archer ve diğ.'nin [82] çalışmasında WFP C_{TKE} için önerilen 0.25 düzeltme faktörünün Bölüm 3 ve Bölüm 4'te belirtildiği üzere rüzgar çiftlik izinin özellikle TKE ve hava sıcaklığı üzerinde yanlış öngörüler üretmesi nedeniyle orijinal C_{TKE} değerleri kullanılmıştır. Bu bölümde ayrıca, Hahmann ve diğ.'nin [85] çalışmalarında revize ettikleri LANDUSE.TBL ve VEGPARM.TBL dosyaları kullanılmıştır. Hahman ve diğ. [85] bu dosyalarda her bir arazi örtüsüne yönelik pürüzlülük uzunluklarını revize ederek yaz ve kış mevsimi için sabit bir değere ayarlamıştır.

Arazi örtüsü ve vejetasyon parametrelerinde yapılan değişikliklerin rüzgar çiftliği izi etkisinde yarattığı değişimi incelemek üzere, Wanderwende ve Lundquist'in [90] ve Mason'ın [122] çalışmaları birlikte ele alındığında ve bu bölümde kullanılan türbin modelinin türbin rotor tabakası tepe yüksekliğinin 150 m olduğu göz önüne alındığında, arazi yüzeyi (arazi kullanımı) değişikliğinde pürüzlülükteki değişime istinaden yüzey sürüklenme etkilerinin (surface drag) rotor tabakasının tepesine kadar yayılabilmesi için kare şeklindeki hipotetik rüzgar çiftliği kenar sınırlarından itibaren

30 km bir yatay uzunluk belirlenmiştir. Böylece çalışmada ele alınan pürüzlülük yama alanı (roughness patch) rüzgar çiftliği (6.5 km x 6.5 km) dahil olmak üzere 66.5 km x 66.5 km'dir.



Şekil 5.1 : Simülasyonlar için oluşturulan model yuvalama alanları (c) ve iç model alanında arazi kullanımı dağılımı (a-b). Yuvalama alanlarından kırmızı çizgi ile gösterilen model alanı rüzgar çiftliği simülasyonlarının gerçekleştirildiği iç model alanıdır. Bu alanı temsil eden (a-b) arazi kullanımı dağılımında verilen renk spektrumundaki nümerik değerler wrf çıktısındaki arazi kullanımı indekslerine karşılık gelmektedir ve bu indekslere ait arazi kullanım bilgisi Çizelge 5.2’de verilmektedir. İç model alanında beyaz alan (b) arazi kullanımı değişikliğinin yapıldığı alanı temsil ederken merkezindeki küçük kare alan ise rüzgar çiftliğini temsil etmektedir.

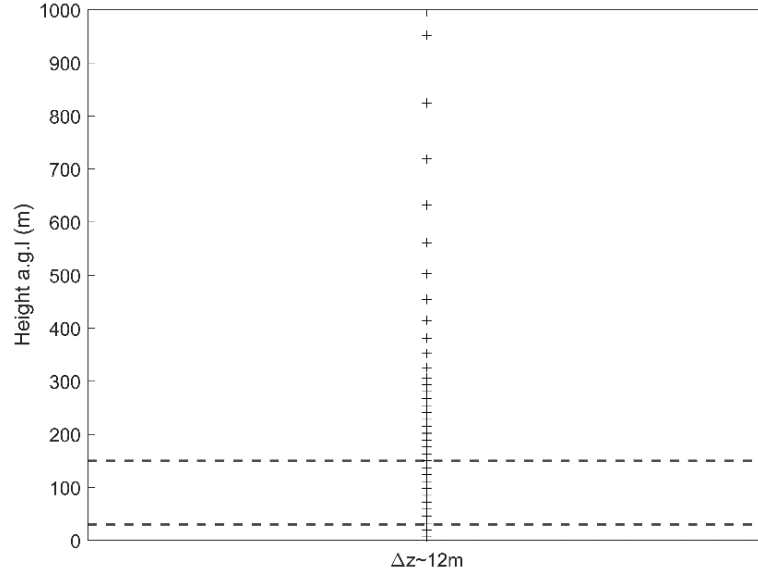
Kullanılan arazi örtüsü verisi (30s USGS) ile bu yama alanında yedi arazi örtüsü kategorisi bulunmaktadır. Yama alanı kompozisyonundaki en yüksek oran % 86 ile kuru tarım alanında (dryland cropland) görülürken, sonraki en yüksek oran % 8 ile yaprak döken geniş yapraklı ormanda (deciduous broadleaf forest) bulunmaktadır (Şekil 5.1a-b). Alanda, şehir ve yapısal alanın (urban and built up) oranı % 0.5’in altındadır.

Çizelge 5.2 : İç model alanı için WRF çıktısına ait USGS arazi kullanım indeks ve ona karşılık gelen arazi kullanım tanımı bilgisi.

Arazi Kullanımı İndeksi (LUI)	Arazi Kullanımı tanımı
1	Kentsel ve yerleşik arazi
2	Kurak tarım arazisi ve mera
3	Sulu tarım arazisi ve mera
5	Tarım arazisi / otlak mozaïği
6	Tarım arazisi / ormanlık mozaïği
7	Otlak alan
8	Çalılık alan
9	Karışık çalılık / otlak alan
10	Savan
11	Yaprak döken geniş yapraklı orman
14	Yaprak dökmeyen iğne yapraklı orman
15	Karma orman
16	Su alanları

Bu nedenle, yama alanında yapılan arazi kullanım değışikliğinin rüzgar çiftliği izi etkisinde yarattığı değışimi incelemek üzere, sırasıyla, tamamen kuru tarım alanına ve tamamen yaprak döken geniş yapraklı ormana dönüştürülmüştür (Şekil 5.1b). Dönüşüm, yama alanında “su alanı” bulunmadığından, WPS’te tek adımda, “ncap2 – O –s ‘LU_INDEX(:,y1:y2,x1:x2)=A;’ geo_em.d0B.nc geo_em.d0B.nc” komutu ile gerçekleştirilmiştir. Komutta “A”, dryland cropland için 2’yi, deciduous broadleaf forest için 11’i temsil ederken, “B” türbinsiz iç alan için 2’yi, türbinli iç alan için 3’ü temsil etmektedir. WPS’te yapılan dönüşümün WRF’ye yansımaları için ./real.exe’den önce namelist.input dosyasında “surface_input_source=3” olarak ayarlanmıştır.

Bölüm 5.1’de belirtildiği üzere çalışma periyodu 20-27 Ağustos 2015’dir. Bölüm 3’te olduğu gibi günlük simülasyonlar yerine 8 günlük periyot tek seferde simüle edilmiştir. Bu nedenle simülasyon 24 saat öncesinden 19 Ağustos 2015 00:00 UTC ile başlatılıp 28 Ağustos 2015 00:00 UTC ile bitirilmiştir ve ilk 24 saat spin-up periyodu olarak kabul edilmiştir. Çalışmada toplam üç farklı 9 günlük model simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlardan biri model başarımını değerlendirmek için modeldeki mevcut arazi örtüsünün kullanıldığı ORG simülasyonu, diğer ikisi ise model başarımının validasyonu sonrası belirlenen yama alanında mevcut arazi kullanımlarının kuru tarım arazisine ve yaprak döken geniş yapraklı ormana dönüştürüldüğü sırasıyla DC ve DBF simülasyonlarıdır. ORG simülasyonu sonuçları DC ve DBF simülasyonlarına ait sonuçların değerlendirmesine katılmamıştır sadece model başarımının değerlendirilmesinde kullanılmıştır.



Şekil 5.2 : Düşey seviyeler. Yatay kesikli çizgiler rotor tabakasının üst ve alt sınırlarını temsil etmektedir.

ORG simülasyonunun çevre rüzgar şiddeti ve yönündeki başarımını değerlendirmede Bölüm 3'te olduğu gibi sadece RMSE hesabı kullanılmıştır. Model çıktıları 30 dakikalık olarak belirlenmiştir. İki simülasyon (DC ve DBF) için yapılacak değerlendirme DC'den DBF'ye geçişe göre yapılacaktır, çünkü yukarıda belirtildiği üzere yama alanında DC oranı % 86'dır ve DBF oranı % 8'dir. Arazi kullanımı değişikliği rüzgar çiftliği iz etkisindeki değişimi incelemek üzere bu bölümde ele alınan parametreler rüzgar şiddeti, TKE ve hava sıcaklığıdır. Ayrıca çiftlikteki güç üretiminde meydana gelen değişim de incelenmiştir. Bu bölümde değerlendirmeler 8 günlük periyot üzerinden ve gündüz-gece ayrımı yapılarak gerçekleştirilmiştir.

5.3 Sonuçlar ve Tartışma

5.3.1 ORG simülasyonu ile model öngörü başarımının değerlendirilmesi

Bölüm 5.1.3'te açıklandığı üzere ORG simülasyonu modelde seçilen arazi kullanım altlığının orijinal yapısını kullanmaktadır ve belirlenen yama alanında arazi kullanım değişikliği ile rüzgar çiftliği etkisindeki değişimin incelenmesinden önce rüzgar çiftliği olmadan modelin rüzgar şiddeti ve yönü açısından öngörü başarımının değerlendirmesinde kullanılmıştır. Yine Bölüm 5.1.3'te ifade edildiği üzere modelin rüzgar şiddeti ve yönündeki başarımının değerlendirilmesinde RMSE hesabı kullanılmıştır.

Bölüm 3'te elde edildiği üzere modelin rüzgar şiddeti öngörüsündeki RMSE değerleri yükseklikle artmaktadır. ORG simülasyonunda rüzgar şiddeti öngörüsü RMSE değerleri 31 m, 61 m ve 81 m için 2.48 ms^{-1} , 2.83 ms^{-1} ve 2.98 ms^{-1} 'dir. Simülasyonun 78 m'deki rüzgar yönü öngörüsündeki RMSE değeri ise 33.78° 'dir. ORG simülasyonunda elde edilen sonuçlara göre, modelin rüzgar şiddeti ve yönü açısından öngörü başarımı seçili yama alanında yapılacak arazi kullanım değişikliği ile rüzgar çiftliği simülasyonlarına geçilmesi için yeterli olarak değerlendirilmiştir.

5.3.2 Seçili yama alanında arazi kullanımı değişikliği sonucunda rüzgar çiftliği iz etkisinin seçili atmosferik sınır tabaka değişkenleri üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi

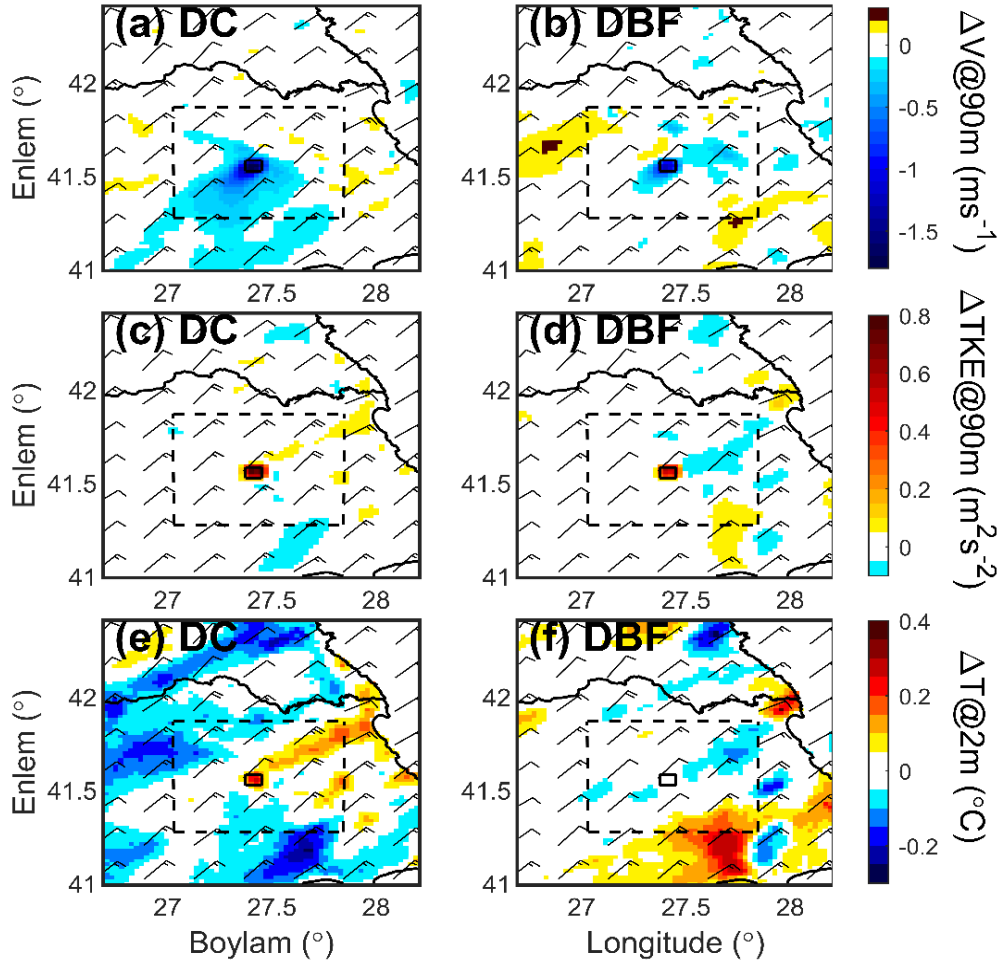
Bu çalışmada, ilk olarak arazi kullanımı değişikliğinde, yani belirlenen yama alanında arazi kullanımlarının tamamen kuru tarım arazisine (DC) ve tamamen yaprak döken geniş yapraklı ormana (DBF) dönüştürülmesinde, rüzgar çiftliğinin meteoroloji üzerinde etkisi incelenmiş ve arazi değişiminde etkiler arasında farkın oluşmasına neden olan fiziksel mekanizmalar ortaya konmuştur. Sonrasında yama alanında mevcut arazi kullanımında en yüksek pay % 86 ile kuru tarım arazisinde olduğundan, yama alanının tamamen kuru tarım arazisine dönüştürüldüğü (DC) durumdan tamamen yaprak döken geniş yapraklı ormana dönüştürülmesinde (DBF) rüzgar çiftliği iz etkisindeki değişim niceliksel olarak incelenmiştir. Bu nedenle iki simülasyon arasındaki farkı ve yüzdesel sapmayı gösteren çizimler DC ile DBF arasındaki farka dayanmaktadır. Şekil 5.3'te yama alanının ilk olarak tamamen DC'ye ve tamamen DBF'ye dönüştürüldüğünde rüzgar çiftik izinin seçili atmosferik sınır tabaka parametreleri üzerindeki etkisi yatay kesit üzerinden incelenmiştir. DC simülasyonunda yama alanında ve rüzgar altı tarafta genel olarak negatif rüzgar şiddeti farkı görülmekte olup en kuvvetli hatta iki simülasyon arasında da en kuvvetli negatif rüzgar şiddeti farkları bu simülasyonda rüzgar çiftliğinde görülmektedir (Şekil 5.3a). Her iki simülasyonda yama alanında ve dışında zayıf pozitif rüzgar şiddeti farkları da görülmektedir. DBF simülasyonunun rüzgar şiddeti farkında DC simülasyonundan oldukça farkı sonuçlar ürettiği görülmektedir. Bu simülasyonda yama alanında negatif rüzgar şiddeti farkı rüzgar çiftliğinde daha zayıf olup rüzgar altı tarafta bu farka ait etki mesafesinin DC simülasyonuna göre oldukça kısa olduğu görülmektedir (Şekil 5.3b). Bu durum muhtemelen ormanın sahip olduğu nispeten yüksek çevresel türbülans seviyesinin rüzgar çiftliği izinin daha hızlı sönümlenmesine neden

olmasından kaynaklanmaktadır. Bu simülasyonda ayrıca yama alanının dışında genel olarak zayıf ancak daha fazla alanı etkileyecek şekilde pozitif rüzgar şiddeti farkları görülmektedir. Yaklaşık 0.3 ms^{-1} ile maksimum pozitif rüzgar şiddeti farkı bu simülasyonda görülmektedir. Rüzgar çiftliğinin rüzgar şiddeti üzerindeki etkisi açısından iki simülasyon arasındaki fark yama alanında -0.6 ms^{-1} (rüzgar çiftliğinde) ile 0.4 ms^{-1} (rüzgar üstünde) arasında değişmektedir (Şekil 5.4a). DC simülasyonunda kuru tarım arazisine ait pürüzlülük uzunluğu ormana göre daha düşük olması nedeniyle çevresel türbülans seviyesinin daha düşük olması sonucunda rüzgar çiftliği iz etkisi daha kuvvetli olmaktadır. Ancak Şekil 5.3a-b’de meteorolojik rüzgar vektörü (wind barb) incelendiğinde rüzgar çiftliği iz etkisi DC simülasyonunda daha kuvvetli olmasına rağmen yama alanında WFP’li simülasyonlarda rüzgar şiddeti yine bu simülasyonda daha yüksek olduğu görülmektedir ve bu da daha sonra görüleceği üzere rüzgar güç üretimini de etkileyecektir. İki simülasyon arasındaki bu durum DBF simülasyonunda yüksekliği 20 m’ye varan geniş yapraklı orman alanının düşük poroziteye yani düşük akış geçirgenliğine sahip olması bu alana giren rüzgar akışının zayıflamasına neden olmasından kaynaklanmaktadır.

TKE açısından da iki simülasyon arasında özellikle rüzgar çiftlik dışında ciddi farklılaşma tespit edilmiştir (Şekil 5.3c-d). DC ve DBF simülasyonunda en kuvvetli pozitif TKE farkları türbinlerin ek TKE üretmesi nedeniyle rüzgar çiftliğinde görülürken, DC’deki pozitif TKE farkları bu simülasyonda, DBF’ye göre, yama alanındaki nispeten düşük pürüzlülük uzunluğu sonucunda rotorun etkisinin nispeten daha kuvvetli olması nedeniyle daha yüksektir. Rüzgar çiftliğinin dışında da iki simülasyon birbirine göre zıt sonuçlar üretmiştir.

DC simülasyonunda yama alanı ve dışında rüzgar çiftliğinin rüzgar üstünde ve altında TKE farkları sırasıyla pozitif ve negatif iken, DBF simülasyonunda ise tam tersi olduğu gözlemlenmektedir. Örneğin, rüzgar üstünde ortalama akış yönünde sürekli ormanın TKE’yi azaltan, sürekli tarım arazisinin ise TKE’yi artıran bir yapıya sahip olduğu söylenebilir. TKE farklarının etkisi bu çalışmada ele alınan diğer sınır tabaka parametrelerine ait farkların etkisine göre daha hızlı sönümlendiğinden her iki simülasyonda da büyük etkiler genel olarak çiftlik ile sınırlı olduğu görülmektedir. Maksimum pozitif TKE farkı yaklaşık $0.8 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ ile DC simülasyonunda görülmektedir (Şekil 5.4b). DC ile DBF simülasyonu arasındaki fark ise $-0.2 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ ile $0.3 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ arasındadır ve yüksek pozitif farklar rüzgar çiftliğinde ve yüksek negatif farklar ise

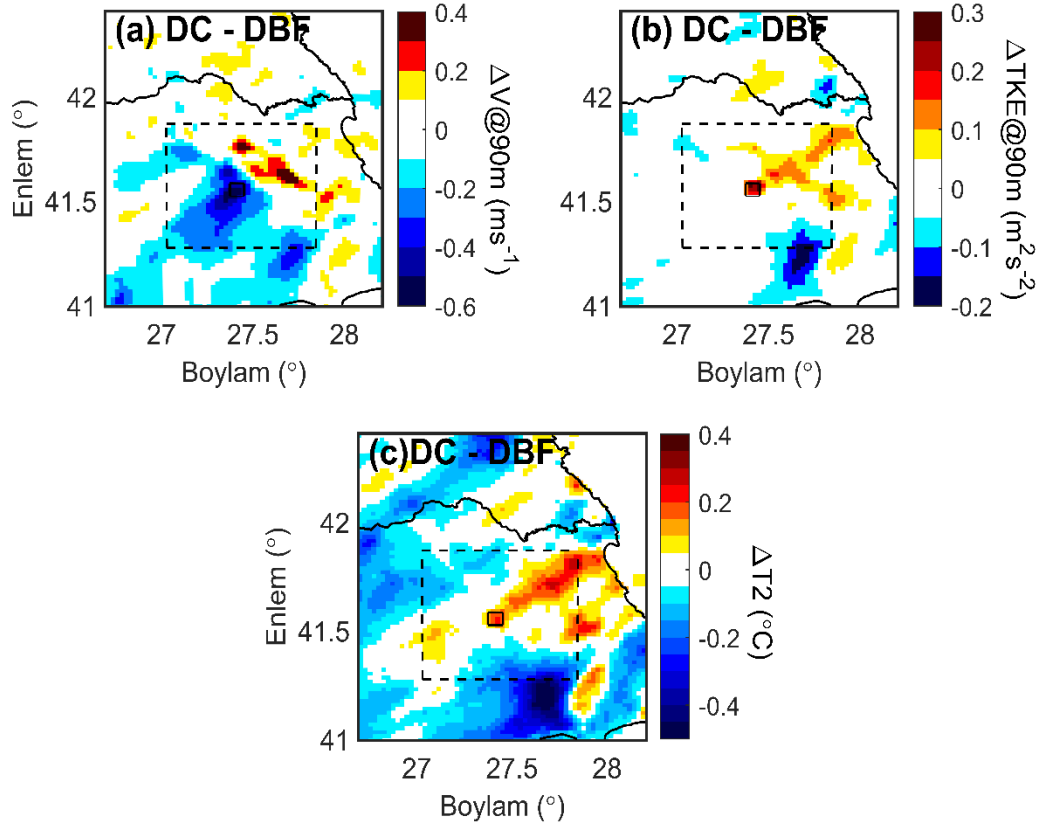
yama alanının dışında rüzgar üstü ve rüzgar altı bölgelerde gözlemlenmektedir (Şekil 5.4b).



Şekil 5.3 : Yama alanında (siyah kesikli çizgili kare alan) arazi örtüsünün tamamen kuru tarım arazisine (a, c, e) ve tamamen yaprak döken geniş yapraklı ormana (b, d, f) dönüştürülmesi ile rüzgar çiftliğinin türbin gövde yüksekliğinde (90 m) rüzgar şiddeti (a, b) ve TKE (c, d) ve yere yakın (2 m) hava sıcaklığı (e, f) üzerindeki etkisinin gösterimi. Yama alanındaki siyah düz çizgili kare alan rüzgar çiftliğini temsil etmektedir. Rüzgar dikenini (wind barb) model alanındaki gösterim çözünürlüğü 27 km’dir.

Rüzgar çiftliğinin 2m’de yere yakın hava sıcaklığı üzerindeki etkisi incelendiğinde iki simülasyonda da etkilerin ele alınan iç model alanının geneline yayılmasına rağmen özellikle rüzgar çiftliği dışında zıt olduğu görülmektedir. (Şekil 5.3e-f). DBF simülasyonunda rüzgar çiftliğinde T2 farkı görülmemesi Şekil 5.3e-f’nin ortak kullanımdaki renk spektrumunda farkların $-0.05 < T2 < 0.05$ değer aralığında kalmasındandır. Aslında DBF simülasyonunda rüzgar çiftliğinde çok zayıf pozitif T2 farkları (ya da ısınma sinyalleri) görülmektedir. DC simülasyonunda ise rüzgar

çiftliğinde 0.3 °C'ye varan pozitif T2 farkları görülmektedir. Çiftliğin dışında ise TKE sonuçlarında olduğu gibi T2 farkında da iki simülasyon genel olarak birbirinden zıt sonuçlar üretmektedir.



Şekil 5.4 : Yama alanında (siyah kesik çizgili kare alan) arazi örtüsünün tamamen kuru tarım arazisinden (DC) tamamen yaprak döken geniş yapraklı ormana (DBF) geçişte rüzgar çiftliğinin türbin gövde yüksekliğinde (90 m) rüzgar şiddeti ve TKE, ve yere yakın (2 m) hava sıcaklığı üzerindeki etkisinin değişiminin gösterimi. Yama alanındaki siyah düz çizgili kare alan rüzgar çiftliğini temsil etmektedir.

Örneğin DC simülasyonunda yama alanında ortalama rüzgar akış yönünde nispeten zayıf pozitif T2 farkları görülürken DBF simülasyonunda nispeten zayıf negatif T2 farkları (ya da soğuma sinyalleri) görülmektedir, ya da rüzgar altında yama alanı ve dışında DC simülasyonunda soğuma sinyalleri görülürken DBF simülasyonunda ise ısınma sinyalleri görülmekle beraber bu alandaki ilginç bir sonuç ise DC simülasyonundaki kuvvetli soğuma alanının olduğu yerde DBF simülasyonunda kuvvetli ısınma alanı bulunmaktadır. Birbirine zıt T2 fark sonuçlarının gözlemlendiği ilgili bölgelerde, bu çalışmada gösterilmemesine rağmen türbülanslı yüzey ısı akısı da bu iki simülasyonda büyüklük işareti açısından birbirinin zıttıdır. Türbülanslı yüzey

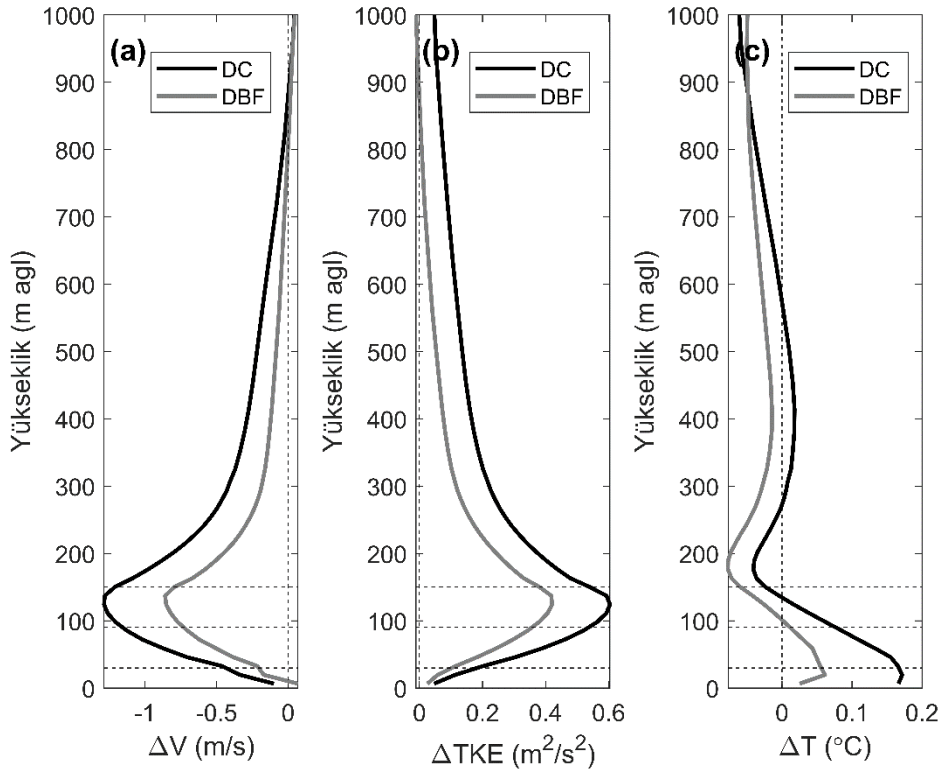
ısı akısının pozitif yani yukarı yönlü olması durumunda soğuma sinyalleri görülmesi gerekirken negatif olması yani aşağı yönlü olması durumunda ısınma sinyalleri görülmesi gerekir. Her iki simülasyonda da T2 fark etkileri tüm model alanına yayılmasına rağmen DC simülasyonunda etki alanı DBF simülasyonuna göre oldukça büyüktür. DC simülasyonunda rüzgar çiftliğinde nispeten büyük ısınma sinyalleri görülmesine rağmen 0.4 °C ile maksimum ısınma sinyali DBF simülasyonunda yama alanının dışında görülmektedir. Maksimum soğuma sinyali ise iki simülasyonda da 0.3 °C'dir ve yama alanının dışında bulunmaktadır. İki simülasyon arasında fark ise -0.5 °C ile 0.4 °C arasındadır (Şekil 5.4c), ve özellikle çiftlikte ve rüzgar üstünde ortalama akış yönünde nispeten yüksek pozitif farklar görülürken model alanının genelinde negatif farklar görülmektedir (Şekil 5.4c).

Şekil 5.5'te sadece rüzgar çiftlik alanı ele alınarak yerden 1000 m yüksekliğe kadar tüm zaman periyodu üzerinden çiftliği temsil eden model hücrelerin ortalamasının düşey profili yani rüzgar çiftlik alanındaki zamansal-uzamsal ortalamaların düşey profili gösterilmektedir. Rüzgar şiddeti farkına ait düşey profilde şekil açısından iki simülasyon benzer bir yapı göstermesine rağmen büyüklük açısından, özellikle rotor tabakasının altında, önemli farklılaşma göstermektedir (Şekil 5.5a). DC simülasyonunda rotor tabakasının altında -0.5 ms^{-1} 'den daha zayıf negatif rüzgar şiddeti farkı görülürken DBF simülasyonunda ise ilk model seviyesinde (6 m) zayıf bir pozitif rüzgar şiddeti farkı görülmektedir. Bu sonuca göre, yama alanında başlayan sürekli orman yapısının rüzgar çiftliğinde yere yakın seviyede rüzgar şiddetini artırma eğilimi gösterdiği söylenebilir. İlk model seviyesinden sonra diğer yukarı seviyelerde ise bu simülasyonda negatif rüzgar şiddeti farkları görülmektedir. DC simülasyonu DBF simülasyonuna göre büyüklük açısından yerden yaklaşık 800 m'ye kadar daha büyük rüzgar şiddeti farkları sergilemektedir. Bu fark özellikle rotor tabakasında belirginleşmektedir ve en büyük fark ise her iki simülasyonda da maksimum negatif rüzgar şiddeti farkının (DC için -1.3 ms^{-1} ve DBF için -0.9 ms^{-1}) görüldüğü rotor tabakasının üst yüksekliğine yakın bir seviyede görülmektedir. Rotor tabakasının üstünde yaklaşık 800 m'ye kadar iki simülasyon arasındaki fark azaltmakta ve her iki simülasyonda negatif rüzgar şiddeti farkları 0 ms^{-1} 'ye yaklaşmakta ve bu seviyenin üstünde ise iki profil üst üste binerek yaklaşık 900 m'den itibaren pozitif rüzgar şiddeti farkları göstermektedir. Şekil 5.5b'de her iki simülasyonda da tüm profil boyunca pozitif TKE farkları görülmektedir. Bu durum Bölüm 4'te açıklandığı üzere Fitch WFP

şemasında Orijinal C_{TKE} hesabının kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Yama alanında tamamen kuru tarım arazisinin kullandığı DC simülasyonundaki pozitif TKE farkları, tamamen geniş yapraklı orman arazisinin kullanıldığı DBF simülasyonundaki pozitif TKE farklarından tüm profil boyunca daha yüksektir. İki simülasyon arasındaki fark rotor tabakasının altından yere doğru azalırken, rotor tabakasında yükselmektedir ve rüzgar şiddeti farkında olduğu gibi en büyük fark rotor tabakasının üst yüksekliğine yakın bir seviyede görülmektedir. Ancak, sonrasında fark tabakanın üst yüksekliğine kadar hızla azalmaktadır ve tabakanın üstünden itibaren kalan profil boyunca ise yaklaşık benzer farklar görülmektedir. Maksimum pozitif TKE farkları aynı yükseklikte görülmektedir ve DC ve DBF simülasyonları için bu değer sırasıyla $0.6 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ ve $0.4 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 'dir. TKE ve rüzgar şiddeti farkı sonuçlarının tersine hava sıcaklığı farkı sonuçlarında iki simülasyon arasındaki en büyük fark rotor tabakasında değil rotor tabakasının altında ilk model seviyesinde, $0.09 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($= \text{DC} - \text{DBF} = 0.17 \text{ }^{\circ}\text{C} - 0.06 \text{ }^{\circ}\text{C}$) olarak, bulunmuştur (Şekil 5.5c). Profil boyunca DC simülasyonunda daha büyük ısınma sinyalleri ve daha zayıf soğuma sinyalleri görülürken DBF simülasyonunda tam tersi görülmektedir. Rotor tabakası ve altı ele alındığında DC simülasyonunda ısınma yerden rotorun üst yüksekliğine yakın bir seviyeye kadar görülürken DBF simülasyonunda yerden türbin gövde yüksekliğinin hemen üstüne kadar görülmektedir. Bu durum yama alanındaki arazi yapısının sahip olduğu çevresel türbülansın, WFP şemasında rüzgar çiftliği hücrelerinde üretilen ek TKE'nin türbülanslı düşey karışımında ne kadar etkili olduğu ile ilgilidir. Rotor tabakasının üstünden itibaren DBF simülasyonunda sadece soğuma etkileri bulunurken DC simülasyonunda ısınma ve soğumanın görüldüğü değişken bir profil yapısı bulunmaktadır.

Rüzgar çiftlik etkileri tüm periyodun dikkate alınmasının yanı sıra gündüz ve gece periyotları için de değerlendirilmiştir. Değerlendirme sadece rüzgar çiftliği hücreleri ele alınarak 90 m seviyesinde rüzgar şiddeti ve TKE için ve 2 m seviyesindeki hava sıcaklığı için uzamsal ortalamaların kutu diyagramı gösterimi ile yapılmıştır (Şekil 5.6). Şekil 5.6'da 90 m rüzgar şiddeti farkına ait uzamsal ortalamaların sonuçları ele alındığında DC simülasyonu özellikle gece DBF simülasyonundan farklılaşarak daha kuvvetli negatif rüzgar şiddeti farkları sergilemektedir. Her iki simülasyon da gece ve gündüz pozitif rüzgar şiddeti farkları sergilemektedir. Ancak bu pozitif rüzgar şiddeti farkları genel olarak DBF simülasyonunda daha büyük olduğu görülmektedir. DC ve

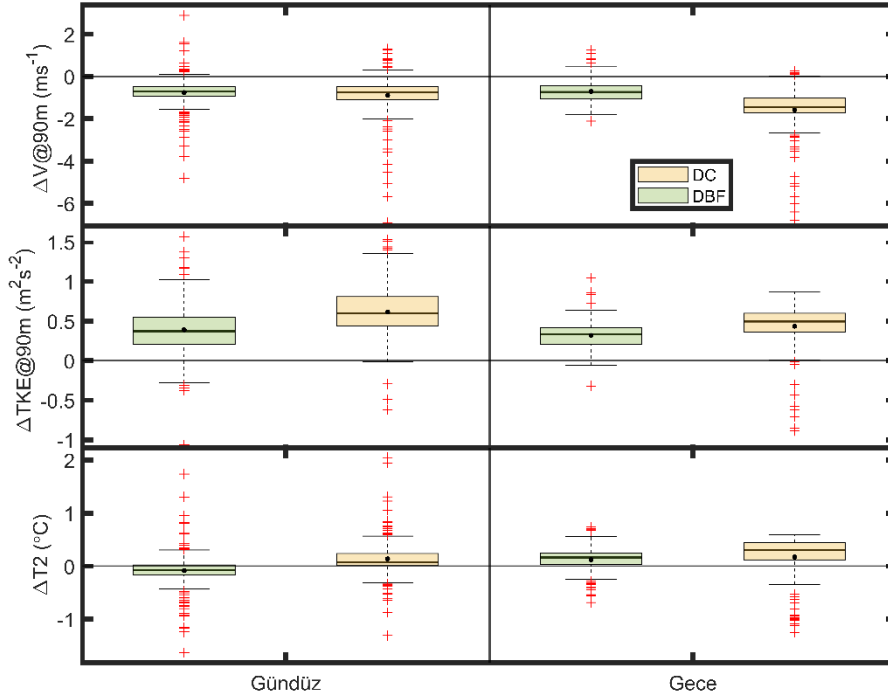
DBF simülasyonu için gündüz / gece medyan rüzgar şiddeti fark değerleri sırasıyla -0.75 / -1.45 ms^{-1} ve -0.72 / -0.74 ms^{-1} 'dir. Yama alanında kuru tarım arazisinden geniş yapraklı ormana geçişte rüzgar şiddeti farkına ait medyan değerlerindeki yüzdesel değişim gündüz ve gece için sırasıyla % -4.49 ve % -49.21'dir ve buna göre DC'den DBF'ye geçişte gecedeki değişim gündüzdekinden daha yüksektir (Şekil 5.7).



Şekil 5.5 : Yama alanında arazi örtüsünün tamamen kuru tarım arazisine (DC) ve tamamen yaprak döken geniş yapraklı ormana (DBF) dönüştürülmesinde rüzgar çiftliğinin rüzgar şiddeti a), TKE b) ve hava sıcaklığı c) üzerindeki etkisinin rüzgar çiftliği hücrelerindeki uzamsal-zamansal ortalamasının düşey profil gösterimi.

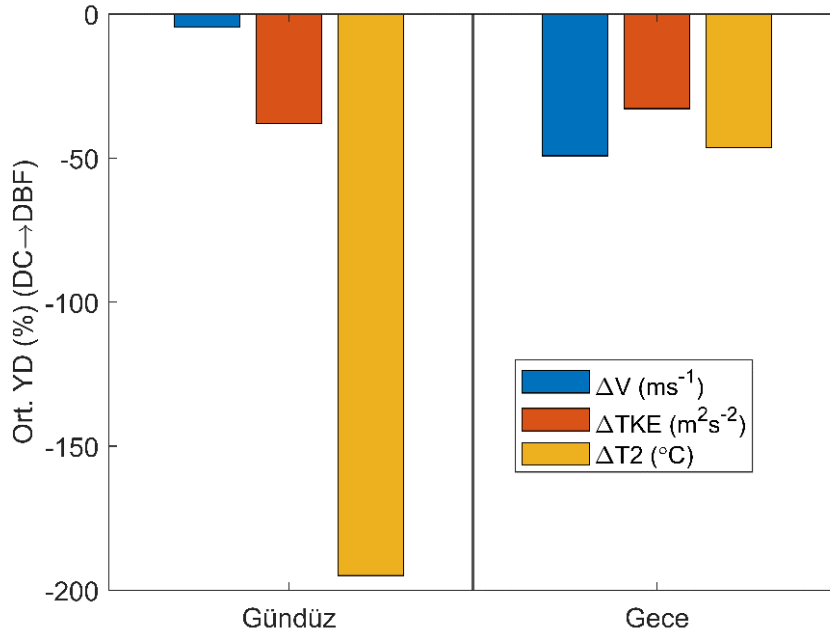
Ancak ele alınan diğer iki parametrede değişim açısından tam tersi söz konusudur. Türbin gövde yüksekliğindeki (90 m) TKE farkına ait uzamsal ortalamalar dağılımında çeyreklikler aralığını temsil eden kutu ele alındığında her iki simülasyon da gündüz geceye göre daha yüksek pozitif TKE farklarını da ihtiva eden daha geniş bir değer aralığına sahip olduğu görülmektedir. Uç değerler dahil edildiğinde 90 m'de gündüze ait maksimum pozitif TKE farkı her iki simülasyon için de $>1.5 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 'dir. Gece ise 90 m'de maksimum pozitif TKE farkı her iki simülasyon için de $<1.0 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 'dir. Her iki simülasyonda da uç değerler olarak gündüz ve gece 90 m'de negatif TKE farkları görülmektedir ancak DC simülasyonunda daha fazla sayıda ve daha yüksek

büyükölükte görölmektedir. Ek olarak her iki simölasyon da gündüz sağ çarpık gece de sola çarpık bir dağılıma sahiptir. Örneğin, 90 m'deki rüzgar şiddeti farkına ait uzamsal ortalamaların dağılımında ise daha farklıdır: Gündüz DC ve DBF sola çarpık dağılıma sahipken gece DC sola çarpık DBF de sağ çarpık dağılıma sahiptir. DC ve DBF simölasyonu için gündüz / gece 90 m TKE farklarına ait medyan değerleri sırasıyla $0.60 / 0.40 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ ve $0.38 / 0.33 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 'dir. Yama alanında kuru tarım arazisinden geniş yapraklı ormana geçişte 90 m TKE farkına ait medyan değerlerindeki yüzdesel değişim gündüz ve gece için sırasıyla % -37.96 ve % -33.84'dir ve buna göre DC'den DBF'ye geçişte gecede ki değişim, yukarıda bahsedildiği gibi rüzgar şiddetinden farklı olarak, gündüzdekinden daha düşüktür (Şekil 5.7). Gündüz rüzgar çiftliğinin 2 m hava sıcaklığı (T2) üzerindeki etkisinde DC ve DBF simölasyonları farklı sonuçlar sergilemektedir. Çeyreklikler aralığı ele alındığında gündüz DBF simölasyonunda soğuma etkisi yani negatif 2 m hava sıcaklığı farkları görölürken DC simölasyonunda genel olarak tam tersi bir etki, ısınma etkisi, görölmektedir. Bu rüzgar çiftliğinde beklenen zayıf soğuma etkisine zıt bir sonuçtur. Simölasyonlardaki güneze ait 2 m hava sıcaklığı fark dağılımının medyan değerleri sıfıra olduğuça yakındır ve bu da gündüz rüzgar çiftliklerinin 2 m hava sıcaklığı üzerindeki etkisinin zayıf olduğunu göstermektedir. Ek olarak her iki simölasyonda da 8 günlük periyotta gündüzleri bazı zamanlarda, uç değer olarak, $|1| \text{ }^\circ\text{C}$ 'i aşan kuvvetli ısınma ve soğuma sinyalleri bulunmuştur. Gündüz DC simölasyonu sağ çarpık bir dağılıma sahipken DBF simölasyonu sola çarpık bir dağılıma sahiptir. Geceleyin her iki simölasyon da, çeyreklikler aralığını temsil eden kutu göz önüne alındığında rüzgar çiftliğinde beklenen ısınma etkileri yani pozitif 2 m hava sıcaklığı farkları sergilemektedir. Ancak DC simölasyonunda rüzgar çiftliğindeki ısınma etkileri daha kuvvetlidir. Ek olarak kutu diyagramının alt kuyruğu ve onu takip eden uç değerler ele alındığında rüzgar çiftliğinde görölen soğuma etkisinde de DC simölasyonu daha yüksek büyüölüklerle sahiptir. DC ve DBF simölasyonu için gündüz / gece medyan 2 m hava sıcaklığı fark değerleri sırasıyla $0.08 / 0.31 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $-0.07 / -0.17 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Yama alanında kuru tarım arazisinden (DC) geniş yapraklı ormana (DBF) geçişte 2 m hava sıcaklığı farkına ait medyan değerindeki yüzdesel değişim gündüz ve gece için sırasıyla % -194.88 ve % -46.46'dır ve bu da DC'den DBF'ye geçişte gündüzde ki değişimin gecede kinden daha yüksek olduğunu göstermektedir. (Şekil 5.7).



Şekil 5.6 : Yama alanında arazi örtüsünün tamamen kuru tarım arazisine (DC) ve tamamen yaprak döken geniş yapraklı ormana (DBF) dönüştürülmesinde rüzgar çiftliğinin türbin gövde yüksekliğinde (90 m) rüzgar şiddeti (üst dörtlü diyagram) ve TKE (orta dörtlü diyagram), ve yere yakın (2 m) hava sıcaklığı (alt dörtlü diyagram) üzerindeki etkisinin rüzgar çiftliği hücrelerinde gündüz ve gece boyunca uzamsal ortalamalarının kutu diyagramı gösterimi. 20-27 Ağustos 2015 tarihlerinde gün doğum 06:30 ve gün batımı 20:00 olarak ele alınmıştır. Her yatay dörtlü kutu diyagram gösteriminde dikey siyah çizgi gündüz gece ayrımını yaparken yatay ince siyah çizgi ilgili parametreye ait negatif ve pozitif farkların ayrımını göstermektedir. Kutu diyagramı içinde yatay ince çizgi ve siyah nokta sırasıyla medyan ve ortalama değerleri göstermektedir. Ortalama değer aynı zamanda uzamsal-zamansal ortalamaya tekabül etmektedir.

Özet olarak, rüzgar çiftliğinin rüzgar şiddeti, TKE ve hava sıcaklığı gibi atmosferik sınır tabaka değişkenleri üzerindeki etkisi ele alındığında rüzgar çiftlik etkilerini belirgin kılacak seçili 8 günlük periyot boyunca, gündüz ve gece yama alanında kuru tarım arazisinden yaprak döken geniş yapraklı ormana geçişte etkilerin zayıfladığı bulunmuştur. Ormanlık alanın rüzgar akışını engelleyici etkisi ve daha yüksek türbülanslı yapısı yama alanının merkezinde bulunan rüzgar çiftlik etkilerinin zayıflamasında etkili olmaktadır. Ancak, DC simülasyonunda rüzgar çiftlik etkileri daha kuvvetli olmasına rağmen sonraki alt bölümde görüleceği üzere güç üretiminde tam tersi söz konusudur.



Şekil 5.7 : Yama alanında arazi örtüsünün tamamen kuru tarım arazisinden (DC) tamamen yaprak döken geniş yapraklı ormana (DBF) geçişte rüzgar çiftliğinin türbin gövde yüksekliğinde (90 m) rüzgar şiddeti (V) ve TKE, ve yere yakın (2 m) hava sıcaklığı (T2) üzerindeki etkisinin yüzdesel değişiminin bar çizim gösterimi. Bar çizim gösterimi gündüz ve gece için DC ve DBF arasındaki rüzgar çiftlik hücrelerindeki uzamsal ortalamaların dağılımında medyan değerlerindeki farkların DC'ye göre yüzdesel değişimini temsil etmektedir. 20-27 Ağustos 2015 tarihlerinde gün doğum 06:30 ve gün batımı 20:00 olarak ele alınmıştır. Uzamsal ortalamaların gündüz ve gece ayrımında, gündüz verisi gün doğumu ile gün batımı arasındaki zaman dilimini kapsamakta iken gece verisi gün batımı ile gün doğumu arasındaki zaman dilimini kapsamaktadır

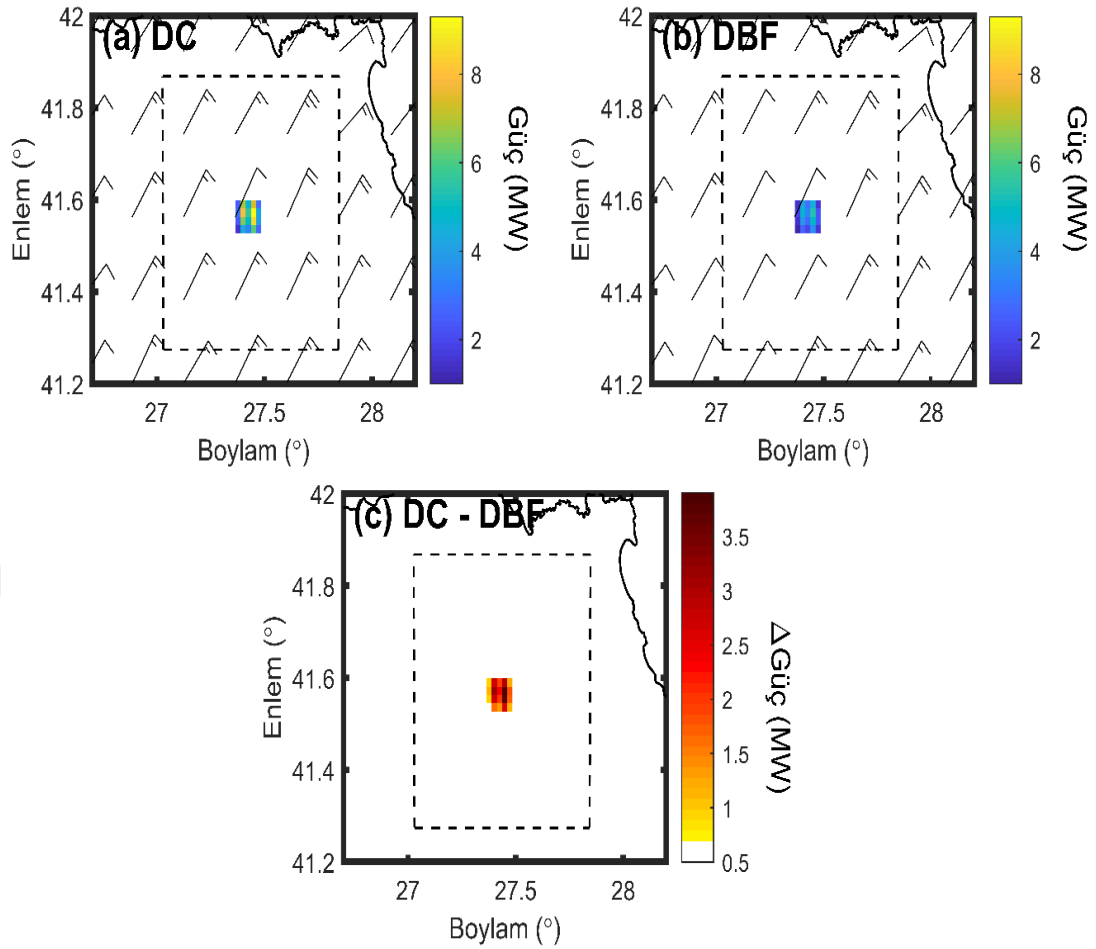
5.3.3 Seçili yama alanında arazi kullanımı değişikliği sonucunda rüzgar çiftliğinde güç üretiminin değerlendirilmesi

Rüzgar güç üretim hesabında en önemli parametreler rüzgar şiddeti ve güç katsayısıdır. Fitch WFP şemasında ise rüzgar türbinlerini ihtiva eden model hücrelerinde türbinlerin dizilimi ihmal edildiğinden türbinler hücreye giriş yapan aynı rüzgar koşuluna maruz kalmaktadır. Bu nedenle hesaba ayrıca hücredeki türbin yoğunluğu da katılmaktadır. Ayrıca Fitch WFP şemasında güç hesabı sadece ilgili türbin modelinin türbin gövde yüksekliğinde yapılmaktadır. Tüm bunlar göz önünü alındığında sonuçlara ait değerlendirmeye geçmeden önce Fitch WFP şeması ile yapılan güç üretimi öngörüsü gerçekten daha yüksek olacağı söylenmelidir. Bu nedenle özellikle kısa periyotlu güç üretim tahmini yapılacaksa mikro-ölçek ile mezo-ölçek arasındaki nümerik boşluğu temsil eden terra incognita (bilinmeyen yer) ihlal edilerek hücre içerisindeki türbin

sayısını düşürmek üzere yatay çözünürlük 1 km'nin altına indirilerek güç üretimi tahmin doğruluğu artırılabilir.

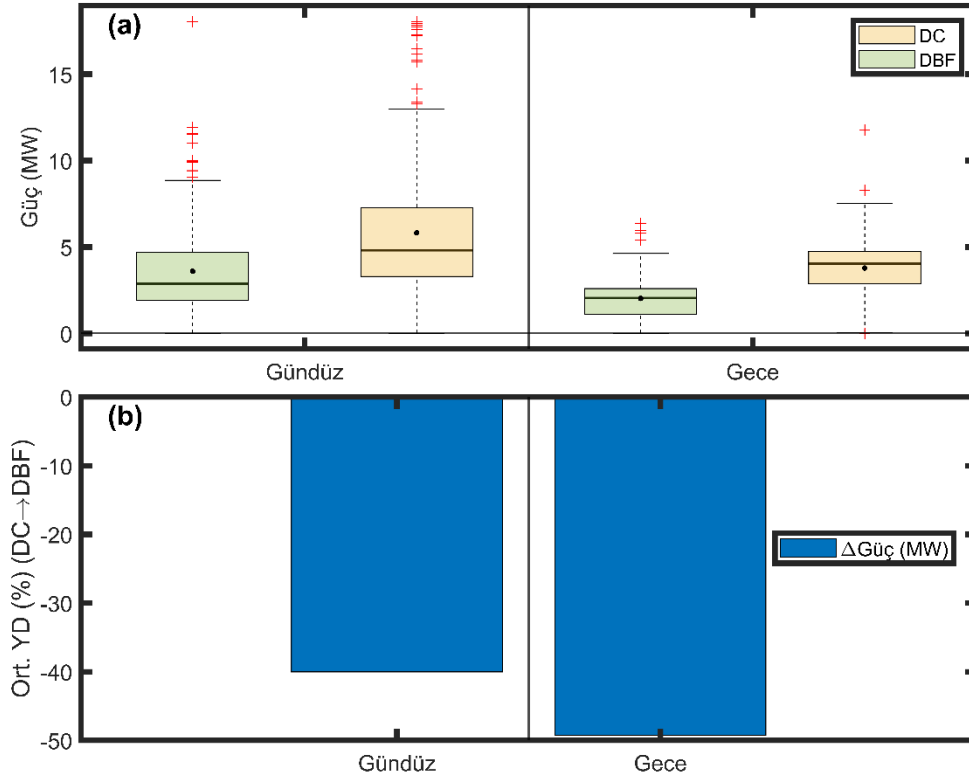
Şekil 5.8'de yama alanında tamamen kuru tarım arazisi ve tamamen yaprak döken geniş yapraklı orman arazisi kullanıldığında rüzgar çiftliğindeki güç üretimleri ve kuru tarım arazisinden geniş yapraklı ormana geçişte güç üretimindeki fark verilmektedir. Bölüm 5.2.2'de görüleceği üzere DC simülasyonunda rüzgar çiftliğinin ilgili atmosferik sınır tabaka parametreleri üzerinde artırıcı ve azaltıcı etkisi DBF simülasyonuna göre daha kuvvetlidir. Ancak Şekil 5.8a-b'de DC simülasyonunda rüzgar çiftliğindeki ortalama güç üretimi DBF simülasyonundaki ortalama güç üretiminden yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum yama alanına giren rüzgar akışının tarım arazisine kıyasla orman arazisinde daha fazla etkilenmesi nedeni ile rüzgar şiddetinin tarım arazisinde daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Güç üretimine ait 8 günlük ortalamaların uzamsal dağılımında minimum / maksimum değerler DC ve DBF simülasyonu için sırasıyla 1.49 / 9.28 MW ve 0.95 / 5.34 MW'dur. Arazi kullanım değişikliği ile iki simülasyon arasındaki fark (DC - DBF) 0.54 MW ile 3.94 MW arasında değişmektedir. Her iki simülasyonda da en yüksek güç üretimi, ortalama rüzgar yönüne göre rüzgar çiftliği 5 (sütun) x 4 (sıra) model hücresinden oluştuğu göz önüne alındığında, doğu-batı doğrultusunda ikinci sütunda görülmektedir. Ancak bu sütunda iki simülasyon arasında fark arttığından en yüksek farklar burada görülmektedir. Ek olarak her iki simülasyonda en düşük güç üretimi rüzgar çiftliğine ait son sıra hücrelerinde görülmektedir.

Gündüz ve gece için rüzgar çiftliği güç üretimine ait uzamsal ortalamaların kutu diyagramı ve DC'den DBF'ye geçişte uzamsal ortalama dağılımına ait medyan değerlerindeki yüzdesel değişim Şekil 5.9'da gösterilmektedir. Şekil 5.9a değerlendirildiğinde her iki simülasyonda da rüzgar çiftliği gündüz geceye göre daha yüksek güç üretmektedir. Bu durum gündüz güneş radyasyonunun yeri ısıtması ile meydana gelen konvektif aktivitenin aşağı atmosferin düşeyde karışımına neden olarak yukarıdaki daha kuvvetli rüzgarın aşağı taşınması sonucudur. Rüzgar çiftliği hücrelerinin güç üretimi dağılımında çeyreklikler aralığını temsil eden kutu gündüz geceye göre daha geniş bir değer aralığına sahip olmakla birlikte güç üretim dağılımı her iki simülasyonda da gündüz sağ çarpık gece ise sola çarpıktır. Ancak geceye ait çarpıklık daha küçüktür.



Şekil 5.8 : Yama alanında (siyah kesikli çizgili alan) tamamen kuru tarım arazisi (DC) ve tamamen yaprak döken geniş yapraklı orman arazisi (DBF) kullanıldığında rüzgar çiftliğindeki güç üretimlerinin ve kuru tarım arazisinden geniş yapraklı ormana geçişte güç üretimindeki fark (DC – DBF) verilmektedir. Sonuçlar zamansal ortalamaları temsil etmektedir. Yama alanındaki güç üretimi ve güç üretimin farkının gösterildiği renkli alan rüzgar çiftliğini temsil etmektedir.

DC ve DBF ayrımı açısından değerlendirildiğinde gündüz ve gece DC simülasyonu açık bir şekilde DBF simülasyonundan daha yüksek rüzgar çiftliği güç üretimine sahiptir. Rüzgar çiftliği hücrelerinin güç üretiminin uzamsal ortalamalarına ait maksimum, medyan ve ortalama (zamansal-uzamsal ortalama) değerleri DC simülasyonu için 18.05 MW, 4.81 MW ve 5.82 MW iken DBF simülasyonu için 18.04 MW, 2.88 MW ve 3.60 MW'dur. Yama alanında DC'den DBF'ye geçişte rüzgar çiftliği güç üretimine ait uzamsal ortalamaların medyan değerindeki yüzdesel sapma gündüz % -40.03 iken gece % -49.26'dır.



Şekil 5.9 : Yama alanının tamamen kuru tarım arazisine (DC) ve tamamen yaprak döken geniş yapraklı ormana dönüştürülmesi ile gündüz ve gece için rüzgar çiftliği hücrelerindeki güç üretimine ait uzamsal ortalamaların kutu diyagramı ve DC’den DBF’ye geçişte uzamsal ortalama dağılımına ait medyan değerlerindeki yüzdesel değişim .20-27 Ağustos 2015 tarihlerinde gün doğum 06:30 ve gün batımı 20:00 olarak ele alınmıştır. Uzamsal ortalamaların gündüz ve gece ayrımında, gündüz verisi gün doğumu ile gün batımı arasındaki zaman dilimini kapsamakta iken gece verisi gün batımı ile gün doğumu arasındaki zaman dilimini kapsamaktadır.

6. RÜZGAR ÇİFTLİKLERİNİN KAR YAĞIŞI VE KAR KALINLIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELEMESİ: 24-25 OCAK 2022 İSTANBUL KAR YAĞIŞI ÖRNEĞİ

6.1 Giriş

Rüzgar çiftlikleri rüzgarı, TKE'yi, sınır tabaka yüksekliğini, hava sıcaklığını, vejetasyonu örtüsünü, nemi ve bulutluluğu etkilediği gibi yağışı da etkileyebilmektedir. Buna yönelik ilk gözlemsel bulgu Fahel ve Archer'ın [123] çalışması ile sağlanmıştır. Bu çalışmada İngiltere'nin farklı bölgelerinde kıyı yakınına kurulu iki açık deniz rüzgar çiftliğinde de kurulum sonrası yağışta büyüklük olarak küçük ancak istatistiksel olarak önemli ölçüde azalma meydana gelmiştir. Başka gözlemsel çalışma bulunmamasına rağmen model çalışmaları da rüzgar çiftliklerinin yağış üzerindeki etkisine yönelik bulguları ortaya koymuştur. Pan ve diğ. [124] WRF modeli ile Harvey Kasırgası sırasında Amerika Birleşik Devletleri'nin Florida kıyısına kurulacak olan farklı ölçeklerdeki açık deniz rüzgar çiftliklerinin karada, rüzgar altı bölgede, artan yatay rüzgar diverjansı ve düşük düşey rüzgar hızı nedeni ile yağışın o bölgede azaldığı, denizde ise artan rüzgar konverjansı ve yüksek düşey rüzgar hızı nedeni ile yağışın arttığı bulunmuştur. Tomaszewski ve Lundquist [125] WRF modeli ile Texas Lubbock'taki bir rüzgar çiftliğinin yaklaşan bir cephesel fırtınada yarattığı değişimin incelenmiştir. Yağışta cephe geçişi sırasında lokal değişimlerin minimal düzeyde meydana geldiği ancak model alanı boyunca, hücrelerin %93.4'ünde, toplam yağışta bir değişimin olmadığı bulunmuştur. Lee ve diğ. [126] "Thousand Wind Turbines Project" kapsamında Tayvan boğazında kurulması planlanan açık deniz rüzgar çiftliklerinin ekstrem bir hava durumunda (Tayfun olayı örneği), olası atmosferik çevre üzerindeki etkilerinin WRF modeli aracılığı ile incelenmiştir. Yağışta 1.08 mm kadar bir azalma meydana geldiği gösterilmiştir. Yukarıdaki çalışmalar yerel olmakla birlikte daha büyük yatay ölçekleri (bölgesel, kıtasal ve küresel) kapsayan çalışmalar da gerçekleştirilmiştir. Keith ve diğ. [49] çalışmalarında küresel olarak yağışta, 1 TW rüzgar gücü için, +/- 1 mm değişim olacağını öngörürken, Kirk-

Davidoff ve Keith'in [50] rüzgar çiftliklerini yüzey pürüzlülüğündeki değişim olarak ele aldıkları çalışmada yüksek miktarda rüzgar gücünün küresel olarak yağışta yılda +/- 1 mm değişim yaratacağı öngörmüştür. Wang ve Prinn [53] çalışmalarında açık deniz rüzgar çiftliklerinin sıcaklık ve bulut üzerindeki etkisinin yanı sıra yağış üzerinde de bir etkilerinin olduğu sonucunu elde etmişlerdir. Ancak bu etkinin lokal olmayan etkileri bir önceki çalışmalarında (Wang ve Prinn [52]) kara üzerindeki elde ettikleri lokal olmayan etkilerden daha zayıf olduğu bulunmuştur. Fiedler ve Bukovsky [127] Teksas'tan kuzey Nebraska'ya kadar 182.700 km ile Amerika Birleşik Devletleri'nin doğusunun 2/3'ünü kapsayan dev bir rüzgar çiftliğinin, 62 yıla ait sıcak mevsimdeki yağışa etkisini incelemiştir. Çalışmada, rüzgar çiftliklerinin yağışa sadece bir mevsimde önemli bir etkisi bulunurken, 62 yıllık sıcak mevsime ait ortalama yağışa istatistiksel olarak önemli bir etkisi olmadığı bulunmuştur (62 yıl için ortalama %1 artış). Possner ve Caldeira [128] çalışmalarında açık denizlerdeki rüzgar enerjisinin jeofiziksel potansiyelini küresel iklim modeli CESM (The Community Earth System Model) ile incelemiştir. Bu çalışmada yüzey yağışında orta dereceli değişimler elde edilmiş ve bu değişimlerin istatistiksel olarak önemli olmadığı bulunmuştur. Li ve diğ. [56] Sahra çölü üzerinde 9 milyon km²'lik bir alanda hipotetik rüzgar ve güneş çiftliklerinin kurulumu ile hava sıcaklığı, yağış ve vejetasyondaki değişim incelemiştir. Çalışmada rüzgar çiftliklerinin olduğu bölgede ortalama yağışta 0.25 mm/gün bir artış bulunurken Sahel bölgesinde yağıştaki ortalama artış 1.12 mm/gün olarak bulunmuştur. Araştırmacılar yağıştaki bu artışın vejetasyon örtüsündeki artış ile ilişkili olduğunu ve bunun da pozitif albedo-yağış-vejetasyon geribeslemesini yarattığını göstermiştir.

Rüzgar çiftliklerinin yağmur üzerindeki etkisine yönelik birçok çalışma bulunmasına rağmen literatürde henüz kar yağışı üzerindeki etkisine yönelik bir çalışma bulunmamaktadır. Bu bölüme ait çalışma literatürdeki bu eksikliği gidermek üzere 21-27 Ocak 2022 tarihinde gerçekleşen Elpis Fırtınasının özellikle İstanbul üzerinde 24-25 Ocak 2022 tarihinde etkili olması neticesinde meydana gelen yoğun kar yağışı için, İstanbul'un karadeniz kıyısının açıklarında hipotetik bir rüzgar çiftliği varlığında kar yağışındaki/kalınlığındaki değişim incelenmiştir. Ancak özellikle kar yağışındaki/kalınlığındaki değişimin nispeten en yüksek olduğu durumu elde edebilmek için sonuçlar rüzgar çiftliğinin konumu ve çiftlikte kullanılan türbin ebatı açısından incelemiştir ama rüzgar çiftliğinin kar yağışı ve diğer meteorolojik

parametreler üzerindeki etkisine yönelik ayrıntılı değerlendirmeler en yüksek etkiyi sağlayan rüzgar çiftlik konumu ve türbin ebatı çifti için yapılmıştır.

6.2 21.01.2022-25.012022 Tarihleri Arasında İstanbul ve Çevresinde Etkili Olan Yağışlı Sistemin Sinoptik Olarak Değerlendirilmesi

Sinoptik değerlendirmeler için yer ve yukarı seviye kartları “wetter3” web sayfasından elde edilmiştir Yer Seviyesi için 21.01.2022 tarih ve 12 UTC saatinde Türkiye’nin batı bölgeleri Ukrayna üzerinde merkez değeri 996 hPa olan Alçak basınç alanının etkisi altında bulunmaktadır. Bu basınç sistemi ile ilişkili soğuk cephe İstanbul üzerinde bulunmaktadır. Cephe geçişi ile birlikte rüzgar güney batıdan (SW) kuzeyli yönlerle dönmekte ve 24 Ocak günü rüzgar şiddeti 25 knot şiddetine kadar ulaşmaktadır. 24 Ocak 06 UTC den itibaren bölge üzerinde yüksek basınç alanı etkili olmaktadır.

500 hPa seviyesinde 21 Ocak günü Ukrayna üzerinde 520 gpdam değerindeki alçak merkez kuzeyden Yunanistan üzerine doğru oluk şeklinde etki alanını genişletmekte, ilerleyen saatlerde doğuya doğru hareketle Türkiye’nin batı bölgeleri üzerinde etkili olmaktadır. 23 Ocak 00 UTC den itibaren Türkiye’nin kuzey batı bölgeleri üzerinde 530 gpdam değerinde bir alçak merkez oluşmuş durumdadır. Bu alçak merkezle ilişkili olarak izoterm oluşu da bölge üzerinde 500 hPa seviyesinde -40°C değerinde düşük sıcaklık değerlerini göstermektedir. 1000hPa ve 500 hPa seviyeler arasındaki kalınlık değerleri ise 500 gpdam değerine kadar düşmüş olup, İstanbul ve çevresinde kuvvetli bir soğuk adveksiyon etkili olmaktadır.

500hPa seviyesinde pozitif bağıl vortisiti 21.01.2022 12 UTC den itibaren etkili olmaya başlayıp, 22.01.2022 18UTC’de ise $16 \cdot 10^{-5} \text{ sn}^{-1}$ değerine ulaştığı görülmektedir. Buda havanın yükselici hareketlerini artırmaktadır.

500 hPa seviyesinde rüzgar 22.01.2022 00 UTC’de İstanbul üzerinde 70 knot değerine ulaşmış olup, önceleri SW yönlerden esmekte, 12 UTC den itibaren ise oluk hattı geçişiyle birlikte akış NW’ya dönmüş ve rüzgar şiddetinin değeri ise 20 knot’a kadar zayıflamıştır. Oluk geçişini takiben pozitif bağıl vortisiti değerinde azalma görülmektedir. 25.01.2023 00 UTC’den itibaren ise yeniden pozitif bağıl vortisiti kuvvetlenmektedir.

850 hPa seviyesinde 21.01.2022 00 UTC ‘de sıcaklık İstanbul’un kuzey ve doğusunda -2°C civarında iken ilerleyen saatlerde soğuk hava taşınımı güneye ve doğuya doğru

etki alanını genişleterek sıcaklık -5°C değerine düşmüştür. 22.01.2022 06 UTC'de İstanbul'un Avrupa yakası üzerinde -10°C izotermi geçmekte, ilerleyen saatlerde ise sıcaklık bu seviyede İstanbul genelinde -12°C 'ye düşmektedir. Sıcaklık değeri 26.01.2022 tarihinden itibaren artış göstermektedir. 850 hPa seviyesindeki düşük sıcaklık değerleri İstanbul için kar yağışı limit değerlerinin altında olup, meydana gelen yağışın kar şeklinde etkili olmasını sağlamaktadır.

Yağış oluşumunda diğer bir önemli parametre ise havadaki nem miktarıdır. 700hPa seviyesindeki bağıl nem analizi irdelendiğinde 21.01.2022 06 UTC saatinden itibaren bağıl nem değeri Türkiye'nin batı bölgeleri üzerinde artış göstererek %70 değerine ulaşmakta, 12 UTC den itibaren ise İstanbul'un üzerinde %90 değerinin üzerine çıkmaktadır. 22.01.2022 12 GMT de bağıl nem %50 değerine düşmekte, ancak Trakya üzerinde kuzeyden yeni bir nemli hava taşınımı ile önce batı kesimleri, 23.01.2022 00 UTC den itibaren ise özellikle Anadolu yakası üzerinde bağıl nem %90'ın üzerine çıkmaktadır. 25.01.2022 tarihine kadar kuvvetli nem taşınımı devam etmektedir. Atmosferdeki yüksek nem yükselen havanın adyabatik olarak soğuyarak yoğunlaşmasını, bulut ve yağış oluşumunu tetikleyici rol oynamaktadır.

Orta enlem bölgelerinde özellikle 300 hPa seviyesinde kış aylarında kuvvetlenerek içinde bulunduğumuz enlem derecelerine kadar etki alanını genişleten polar jetlerin yüzey üzerindeki sistemlerin gelişimi ve hareket yörüngeleri üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. İncelenen periyotta polar jet akımları Türkiye'nin batı bölgeleri üzerinde etkili olup 80 knt değerindeki rüzgarların etkili olduğu polar jetin diverjans bölgesi İstanbul üzerinde olup, bölge yüzeyinde konverjans alanının kuvvetlenmesine ve buna bağlı olarak da kuvvetli bir yükselici hareketin gelişmesini tetiklemektedir.

Yer yüzeyinden itibaren 200hPa'a kadar Atmosfer katmanlarındaki sinoptik ve mezo ölçekteki sistemlerin hareketleri ve meteorolojik elemanların inceleme periyodu boyunca bölge üzerindeki değişimi incelendiğinde; yüzeydeki alçak basınçla ilişkili cephesel sistemin geçişi, yukarı seviyelerdeki alçak merkez ve oluk hattının etkisi, kuvvetli yüzey konverjansı, kuvvetli pozitif bağıl vortisiti etkisi, yer ve yukarı seviyeler arasındaki sıcaklık farkı, 850 hPa seviyesindeki sıcaklığın kritik değerin altına düşmesi, Karadeniz üzerinden kuvvetli rüzgarlar ile nem taşınımı inceleme bölgesi üzerinde kuvvetli bir yükselici hareketi takiben kar yağışının gelişmesinde uygun koşullar oluşturmaktadır. Özellikle 24.01.2022 tarihinde tüm seviyeler incelendiğinde deniz etkili kar yağışını tetikleyen koşullar sağlanmaktadır.

6.3 Veri ve Yöntem

6.3.1 Çalışma bölgesi, ölçüm bilgisi, seçilmiş zaman periyodu

Bu bölüme ait çalışmada çalışma bölgesi kar kalınlığı açısından sadece İstanbul ancak kar yağışı açısından İstanbul ve yakın çevresini kapsamaktadır. İstanbul’da 24 Ocak 2022 tarihinde konvektif vorteksin neden olduğu kuvvetli kar yağışı ve rüzgar şiddeti ve sonraki gün de (25 Ocak 2022) devam eden yoğun kar yağışı nedeni ile inceleme için seçilen zaman periyodu 24 Ocak, 1 gün öncesi ve 1 gün sonrası olmak üzere 23-25 Ocak 2022 tarihini kapsamaktadır. Çalışmada İstanbul’un Karadeniz kıyısına hipotetik rüzgar çiftliğinin kurulumundan önce modelin çevre koşullarındaki başarımını değerlendirmek üzere seçili bazı meteoroloji istasyonlarına ait ölçüm verileri ile kıyaslanmıştır. Model başarım değerlendirmesinde, seçilen istasyonlar Sarıyer/Kumköy-Kilyos, İstanbul Atatürk Havalimanı, Sarıyer, İstanbul Sabiha Gökçen Havalimanı, İstanbul Bölge, İstanbul Havalimanı istasyonlarıdır. Bu istasyonlara ait bilgiler Tablo 6.1’de verilmektedir.

Çizelge 6.1 : Meteorolojik ölçüm istasyon bilgileri.

İstasyon no	İstasyon adı	İl	İlçe	Enlem (°)	Boylam (°)	Rakım (m)
17058	İstanbul Havalimanı	İstanbul	Arnavutköy	41.2647	28.7288	91
17059	Sarıyer/Kumköy-Kilyos	İstanbul	Sarıyer	41.2505	29.0384	38
17060	İstanbul Atatürk Havalimanı	İstanbul	Bakırköy	40.9819	28.8208	33
17061	Sarıyer	İstanbul	Sarıyer	41.1464	29.0502	59
17063	Sabiha Gökçen Havalimanı	İstanbul	Pendik	40.8977	29.3033	99
17064	İstanbul Bölge	İstanbul	Kartal	40.9113	29.1558	18

Bu istasyonlara ait seçili periyot için bağıl nem (%), hava sıcaklığı (°C), deniz seviyesine indirgenmiş hava basıncı (hPa), rüzgar şiddeti (ms^{-1}) ve yönü (°) ve kar kalınlığı (cm) verisi modelin bu parametrelerin öngörüsündeki başarımının değerlendirmesinde kullanılmıştır. Meteoroloji istasyonlarında bağıl nem ve hava sıcaklığı 2 m’de ölçülürken, rüzgar şiddeti ve yönü 10 m’de ölçülmektedir. Kar kalınlığı ölçüm verisi gün içerisinde UTC saati ile sadece saat 6’da kaydedilirken, diğer parametreler için ölçüm verisi saat başı kaydedilmiştir.

6.3.2 Model simülasyonları

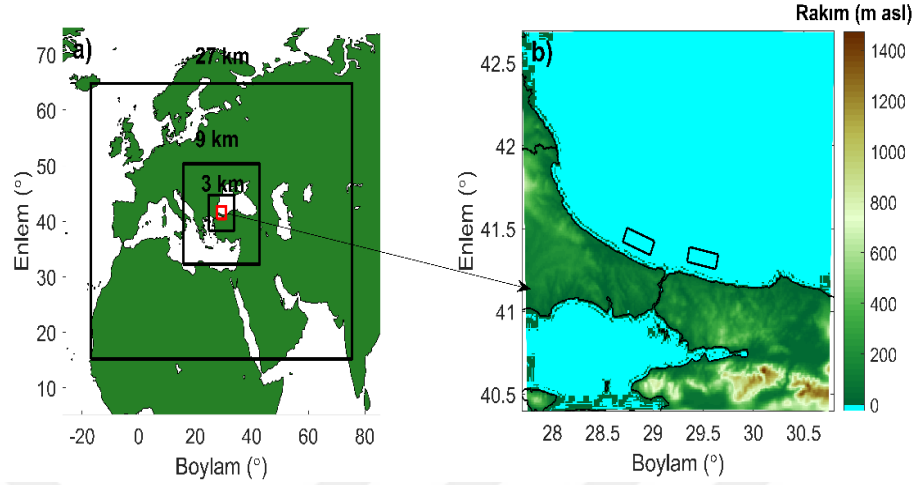
Bu bölüme ait çalışmada WRF model simülasyonları WRF v3.8.1 modeli ile gerçekleştirilmiştir. Modelde dört yuvalama alanı kullanılmıştır ve kullanılan alanların

dıştan içe doğru yatay çözünürlükleri sırasıyla 27 km, 9 km, 3 km ve 1 km'dir (Şekil 6.1a). Belirlenen model alanlarında doğu-batı ve güney-kuzey doğrultusunda düğüm sayısı aynıdır. Dıştan içe doğru model alanlarında doğu-batı (ya da güney-kuzey) doğrultusundaki düğüm sayısı 200, 220, 238 ve 256'dır. Bu şekilde en iç alan, rüzgar çiftlik etkisinin incelendiği model alanı, $(256 - 1)^2 = 65025 \text{ km}^2$ 'yi kapsamaktadır. Düşey seviyede Bölüm 5'te kullanılan (Şekil 5.1) 300 m'ye kadar yaklaşık 12 m düşey çözünürlüğe sahip 58 düşey seviye kullanılmıştır (Tomaszewski ve Lundquist [26]). Simülasyonlarda sınır ve başlangıç koşulu olarak $0.3^\circ \times 0.3^\circ$ 'lik ERA-5 reanaliz verisi kullanılmıştır. Topoğrafya ve arazi örtüsü için 30 s'lik USGS verisi kullanılmıştır. WRF model fizik opsiyonlarında, atmosferik sınır tabaka için MYNN2.5 PBL şeması, uzun ve kısa dalga boylu radyasyon için RRTMG şeması, mikrofizik için single moment 5-class şeması, kümülüs fiziği için Kain-Fritsch şeması, kara yüzey (land surface) fiziği için Noah LSM, yüzey tabaka için MYNN şeması kullanılmıştır. Kümülüs fiziği sadece dış alan (10 km) için kullanılmıştır. Ancak modelin özellikle kar öngörü başarımında kara yüzey (land surface) şeması için Bölüm 3-5'te kullanılan Noah LSM şeması haricinde model Noah-MP LSM şeması ile de koşturulmuştur. Çalışmada TKE adveksiyonu TKE bütçesine dahil edilmiştir. Bölüm 5'te olduğu gibi bu bölümde de Bölüm 3 ve Bölüm 4'te belirtilen nedenlerden dolayı rüzgar çiftlik simülasyonları kapsamında Fitch WFP şemasında orijinal C_{TKE} değerleri kullanılmıştır.

Rüzgar çiftlik simülasyonlarında kar yağışı üzerindeki etkisini incelemek üzere dört farklı simülasyon gerçekleştirilmiştir. Rüzgar çiftliğinin kar yağışı ve ele alınan diğer meteorolojik parametreler üzerindeki etkisi, çiftliğin konumu ve çiftlikte kullanılan türbin ebatları açısından, ele alınmıştır. Bu simülasyonlardan kar yağışı ve ele alınan diğer meteorolojik parametreler üzerinde en yüksek etkisi olan simülasyona ait sonuçlar değerlendirilmiştir. Diğer simülasyonlara ait sonuçlar Ek B'de yer almaktadır.

Hipotetik rüzgar çiftliğinin konumunun değiştirildiği simülasyonlarda çiftlik bir simülasyonda İstanbul'un Avrupa (batı) yakasında Karadeniz'de kurulurken diğer simülasyonda İstanbul'un Asya (doğu) yakasında Karadeniz'de kurulmuştur (Şekil 6.1b-c). Bu simülasyonlarda Siemens SWT3.6-120 açık deniz tipi rüzgar türbin modeli kullanılmıştır. Bu türbin modeline ait itki ve güç katsayısı verisi, Bölüm 3-5'te

kullanılan bu türbin modelinin kara tipine ait itki ve güç katsayısı verisi ile aynıdır. Bu nedenle bu türbin modeline ait teknik detaylar önceki bölümlerden elde edilebilir.



Şekil 6.1 : Simülasyonlar için oluşturulan model yuvalama alanları a) ve en iç modelde alanına ait rakım haritası b). Yuvalama alanlarından kırmızı ile gösterilen model alanı a) rüzgar çiftlik simülasyonlarının gerçekleştirildiği en iç model alanını temsil etmektedir. En iç model alanına ait yükselti haritasında b) Karadeniz üzerinde bulunan dörtgen alanlar, özellikle kar yağışı / kalınlığı üzerinde en kuvvetli rüzgar çiftliği etkisini elde etmek için uygun rüzgar çiftlik konumunu ve rüzgar türbin çiftini belirlemek üzere tasarlanan hipotetik açık deniz rüzgar çiftlikleri. Rakım haritasında yer alan “asl” deniz seviyesinden olan rakımı temsil etmektedir.

İki simülasyonda da seçili rüzgar türbin modeli ile türbinler arası mesafe türbin rotor çapının 6 katı olacak şekilde, İstanbul’un kıyı yapısı nedeni ile kuzey doğu – güney batı doğrultusunda Avrupa yakasında 20° , Asya yakasında 10° eğimli olacak şekilde 35 (batı-doğu) x 15 (güney-kuzey) hizalı bir hipotetik rüzgar çiftliği tasarlanmıştır (Şekil 6.1b-c). Rüzgar çiftlik konumu haricinde türbin ebatlarının kar yağışı ve kalınlığı üzerindeki etkisi de ele alınmıştır. Bu incelemede hücre içi türbinlerin konumları yani türbinler arası etkileşim ihmal edildiğinden ilk türbin modelindeki (Siemens SWT3.6-120) türbinler arası mesafe korunarak aynı rüzgar çiftliği ebatında daha büyük ebatlı bir açık deniz tipi rüzgar türbin modeli daha kullanılmıştır. Bu türbin modeli ise Siemens SWT6.0-154’tür. Türbin gövde yüksekliği, rotor çapı ve nominal güç üretim kapasitesi sırasıyla 110 m, 154 m ve 6.0 MW’dur. Böylece bir önceki rüzgar çiftlik ebatında daha büyük ebatlı türbin modelinin kullanımı ile gerçekte türbinler arası mesafe kısalmasına rağmen daha önce belirtildiği üzere hücre içi rüzgar türbin konumları ihmal edilmektedir.

Bölüm 6.1’de belirtildiği üzere analiz periyodu 23-25 Ocak 2022’dir. Bu analiz periyodu tek seferde simüle edilmiştir. Bu nedenle simülasyonlar 24 saat öncesinden

22 Ocak 2022 00:00 UTC ile başlatılıp 26 Ocak 2022 00:00 UTC ile bitirilmiştir ve ilk 24 saat spin-up periyodu olarak kabul edilmiştir. Rüzgar çiftlik simülasyonlarından önce model başarımını değerlendirmek üzere Fitch WFP şemasının kullanılmadığı iki simülasyon gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonların birinde Noah LSM şeması kullanılırken diğerinde Noah-MP LSM şeması kullanılmıştır. Model başarımında daha yüksek öngörü sağlayacak olan model konfigürasyonu rüzgar çiftliğinin dahil edileceği simülasyonlarda kullanılacaktır. WFP şemasının dahil edilmeyerek çevre koşullarında model başarımını değerlendirmek üzere gerçekleştirilen simülasyonlar bu bölüm boyunca NWFP_Noah ve NWFP_NoahMP olacak adlandırılacaktır.

Rüzgar çiftlik etkisi, daha önceki bölümlerde de belirtildiği üzere, Fitch WFP şemasının kullanıldığı ve kullanılmadığı simülasyonların öngörü sonuçları arasındaki fark ile tanımlanmaktadır. Rüzgar çiftliğinin konumunun ve çiftlikteki rüzgar türbin modelinin değiştirildiği, E_SWT36, E_SWT60, A_SWT36 ve A_SWT60 olarak adlandırılan dört farklı rüzgar çiftlik simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Burada, E ve A sırasıyla İstanbul'un Avrupa (Europe) ve Asya (Asia) yakasında kurulan rüzgar çiftliğini temsil ederken, SWT36 ve SWT60 rüzgar çiftliğinde kullanılan rüzgar türbin modelini temsil etmektedir. Rüzgar çiftlik etki değerlendirmesinde kar yağışı ve kar kalınlığının yanı sıra türbin gövde yüksekliğindeki rüzgar şiddeti ve 2 m hava sıcaklığındaki değişim de incelemiştir.

6.4 Sonuçlar

6.4.1 Modelin çevre koşulları öngörüsündeki başarımı

Rüzgar çiftlik simülasyonlarına geçmeden önce WRF modelinin Fitch WFP şeması kullanılmadan meteorolojik çevre koşullarındaki başarımının değerlendirilmiştir. Model başarımının değerlendirilmesi, Tablo 6.1'de belirtilen 6 meteoroloji istasyonunda ait kar kalınlığı, rüzgar şiddeti, hava sıcaklığı, deniz seviyesine indirgenmiş hava basıncı parametreleri için gerçekleştirilmiştir. Başarım değerlendirmesinde MAE ve MBE başarım metrikleri kullanılmıştır. Bu alt bölümde esas olan yüksek başarım sağlayan model konfigürasyonunun belirlenmesinde Noah ve Noah MP kara yüzey şeması arasında seçim yapmaktır. Model konfigürasyon seçiminde birincil hedef kar kalınlığındaki öngörü başarımı, ikincil hedef ise diğer meteorolojik parametrelerdeki öngörü başarımıdır.

Tablo 6.2’de görüleceği üzere Noah LSM şemasının kullanıldığı WRF model konfigürasyonu (NWFP_Noah) kar kalınlığı öngörüsünde 17060 (İstanbul Atatürk Havalimanı) hariç diğer istasyon lokasyonlarında daha yüksek başarımlar sağlamıştır. NWFP_Noah simülasyonu 17060 istasyonu lokasyonunda (lokasyona en yakın model düğüm noktasında) $|9.10|$ cm hata metriği (MAE ve MBE) sergilerken, NWFP_NoahMP $|7.60|$ cm hata metriği sergilemektedir. Her iki konfigürasyonda model üç istasyonda (17060, 17063, 17064) sürekli düşük öngörü sergilerken iki istasyonda (17059, 17061) sürekli yüksek öngörü sergilemektedir. Rüzgar şiddeti öngörüsünde ise üç istasyon lokasyonunda (17059, 17060, 17061) NWFP_Noah daha yüksek başarımlar sergilerken, diğer üç istasyon lokasyonunda (17058, 17063, 17064) NWFP_NoahMP daha yüksek başarımlar sergilemektedir. NWFP_Noah için MBE ve MAE değer aralığı, sırasıyla, $-1.56 \text{ ms}^{-1} - 2.11 \text{ ms}^{-1}$ ve $1.54 \text{ ms}^{-1} - 2.99 \text{ ms}^{-1}$ iken, NWFP_NoahMP için bu değer aralıkları, sırasıyla, $-1.56 \text{ ms}^{-1} - 1.95 \text{ ms}^{-1}$ ve $1.54 \text{ ms}^{-1} - 3.49 \text{ ms}^{-1}$ ’dir. Her iki konfigürasyon da rüzgar şiddetinde sadece 17058 ve 17060 istasyonlarında genel olarak düşük öngörü sergilerken, diğer istasyonlarda genel olarak yüksek öngörü sergilemiştir. Avrupa yakasında kuzeyde konumlanan 17058 ve 17060 nolu (Kumköy ve Sarıyer) istasyonlar kuzey ve kuzey doğulu yönlerden deniz üzerinden esen rüzgarlara açık konumda bulunmaktadır. Cephe geçişinin olduğu periyotta kuvvetli kuzeyli rüzgarların etkisi, konumlarından dolayı bu iki istasyon üzerinde daha fazla gözlemlenmektedir. Kuzeyli rüzgarlar İstanbul’un güneyinde konumlanan istasyonları kara üzerinden akışla etkiledikleri için bu istasyonlar üzerinde zayıflamaktadır. Bu nedenle model simülasyonları kuzey istasyonlarında gözlemlere göre daha düşük, güney istasyonlarında ise daha yüksek değerlerdedir. Hava sıcaklığında her iki konfigürasyon da tüm istasyon lokasyonlarında genel olarak düşük öngörü sergilemektedir. Ancak 17060 istasyonu hariç diğer istasyonlarda NWFP_Noah hava sıcaklığında daha yüksek başarımlar sergilemektedir. NWFP_Noah için MBE ve MAE değer aralıkları, sırasıyla, $-0.98 \text{ }^{\circ}\text{C} - -0.45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $1.45 \text{ }^{\circ}\text{C} - 1.98 \text{ }^{\circ}\text{C}$ iken, NWFP_NoahMP için bu aralıklar, sırasıyla, $-0.53 \text{ }^{\circ}\text{C} - -2.53 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $1.44 \text{ }^{\circ}\text{C} - 2.78 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ’dir. Deniz seviyesi basıncında her iki simülasyonda 17058 ve 17063 istasyonu lokasyonları haricinde diğer istasyon lokasyonlarında genel olarak düşük öngörü sergilemiştir. Deniz seviyesi basıncı öngörüsünde NWFP_Noah üç istasyonda (17058, 17060, 17063) daha yüksek başarımlar sergilerken, diğer istasyon lokasyonlarında NWFP_NoahMP daha yüksek başarımlar sergilemiştir. NWFP_Noah için MBE ve MAE değer aralıkları, sırasıyla, $-6.63 \text{ hPa} - 5.21 \text{ hPa}$ ve $3.78 \text{ hPa} - 6.63 \text{ hPa}$ iken,

NWFP_NoahMP için bu aralıklar, sırasıyla, -6.40 hPa – 4.41 hPa ve 3.39 hPa ve 6.40 hPa’dır. Sonuç olarak, tüm parametreler ve istasyonlardaki WRF model konfigürasyonları genel başarımı ele alındığında NWFP_Noah model konfigürasyonunun nispeten daha yüksek başarımleri sergilediği bulunmuştur. Bu nedenle sonraki bölümde, rüzgar çiftliğinin kar yağışı ve kar kalınlığı üzerindeki etkisinin incelenmesinde, rüzgar çiftlik simülasyonlarında LSM şeması olarak Noah LSM şeması kullanılacaktır.

Çizelge 6.2 : Kara yüzey şeması Noah (Noah) ve Noah-MP (NMP) kullanımı ile WRF modelinin seçili meteoroloji istasyon lokasyonlarında çevre koşullarını (Kar kalınlığı, rüzgar şiddeti, hava sıcaklığı, deniz seviyesi basıncı) simüle etmedeki başarımına ait ortalama mutlak hata (MAE) ve ortalama yanlılık hata (MBE) sonuç tablosu.

İstasyon no	Simülasyon	Kar Kalınlığı (m)		Rüzgar Şiddeti (ms^{-1})		Hava sıcaklığı ($^{\circ}$)		Deniz seviyesi basıncı (hPa)	
		MAE	MBE	MAE	MBE	MAE	MBE	MAE	MBE
17058	Noah	4.90	-0.17	2.76	-1.56	1.89	-0.45	4.68	4.15
	NMP	8.09	2.09	2.64	-1.56	1.88	-0.70	5.07	4.41
17059	Noah	0.46	0.46	2.99	1.19	1.98	-0.90	6.31	-6.31
	NMP	7.47	7.47	3.49	1.30	2.78	-2.23	6.01	-6.01
17060	Noah	9.10	-9.10	2.08	-0.67	1.75	-0.77	3.87	-1.00
	NMP	7.60	-7.60	2.10	-0.69	1.71	-0.53	4.05	-1.22
17061	Noah	1.49	1.49	2.68	1.81	1.97	-0.56	3.78	-3.78
	NMP	2.26	2.26	3.09	1.53	2.78	-1.55	3.39	-3.39
17063	Noah	4.55	-4.30	1.54	0.67	1.82	-0.98	5.50	5.21
	NMP	5.80	-5.80	1.54	0.14	2.09	-1.12	5.98	5.46
17064	Noah	2.67	-1.34	2.47	2.11	1.45	1.29	6.63	-6.63
	NMP	2.67	-1.34	2.28	1.95	1.44	1.35	6.40	-6.40

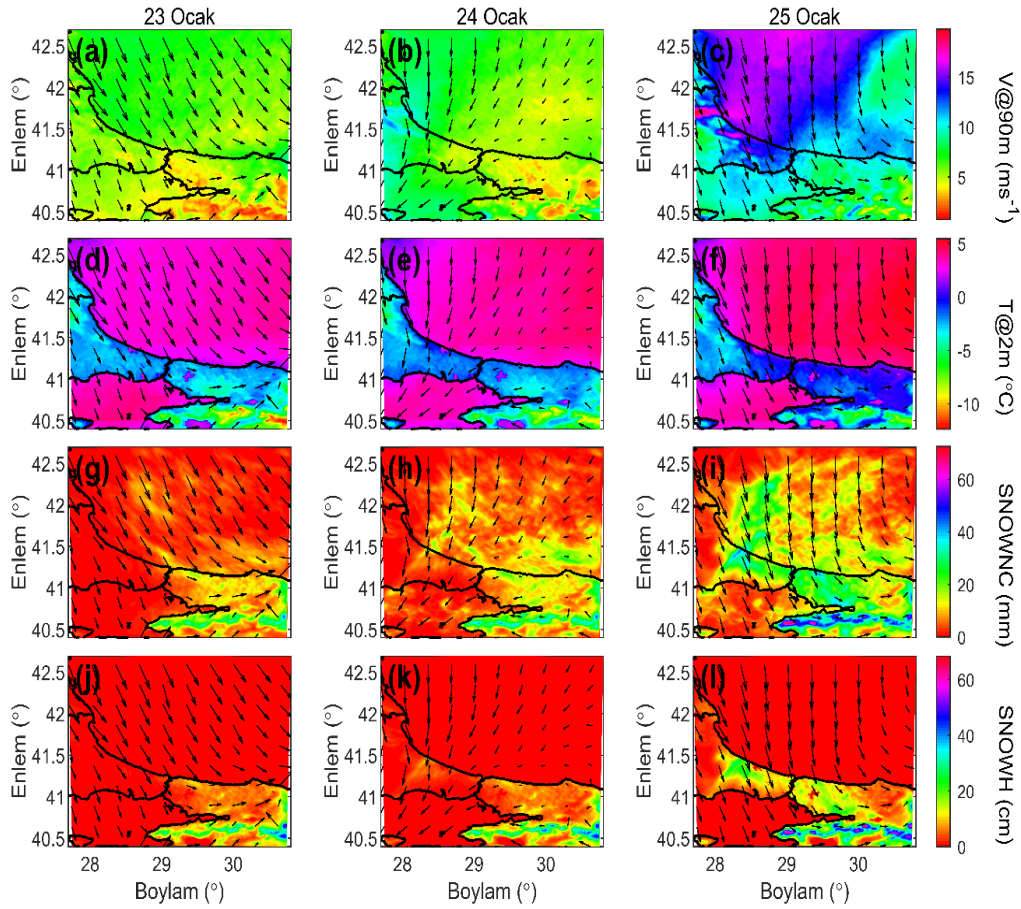
6.4.2 23-25 Ocak periyodundaki çevre koşullarının değerlendirilmesi

Rüzgar çiftliğinin dahil edilmediği, çevre koşulunun simüle edildiği 23-25 Ocak 2022 periyodunda çevre koşulu değerlendirmesinde 90 m’deki rüzgar şiddeti (Siemens SWT3.6-120 türbin modelinin türbin gövde yüksekliği), 2 m hava sıcaklığı, ızgara ölçeğinde (grid scale) toplam birikmiş kar (ya da buz) yağışı ve kar kalınlığı ele alınmıştır. Ele alınan bu parametrelerle rüzgar çiftliğinin yüzey etkilerinin değerlendirilmesinden önceki çevre koşulunun incelenmesi hedeflenmiştir. Bu incelemede model alanında genel olarak İstanbul ve kuzeyindeki Karadeniz’e odaklanılmıştır. Bu nedenle bu odakta kara İstanbul’u ve deniz ise Karadeniz’i temsil etmektedir.

İstanbul’da 23 Ocak 2022 tarihinde ortalama akış hareketinde nispeten kuvvetli kuzey kuzey batılı akış hakim iken, ertesi gün (24 Ocak) akış zayıflayarak kuzey kuzey doğuluya dönüşmüştür (Şekil 6.2a-b). Ancak 25 Ocak günü ise ortalama akış hareketi

yine kuvvetlenerek kuzeyli akışa dönüşmüştür (Şekil 6.2c). İlk iki gün (23-24 Ocak) rüzgar şiddeti Karadeniz’de ve İstanbul’da günlük ortalama rüzgar şiddeti 3-8 ms⁻¹ arasında iken 25 Ocak günü rüzgar şiddetinin oldukça kuvvetlendiği ve özellikle İstanbul’un Avrupa yakasında karada ve batı Karadeniz’de 15 ms⁻¹’nin üzerine çıktığı görülmektedir. Yüzeye yakın (2 m) hava sıcaklığı İstanbul’un kuzey batısı ile güney doğusunda negatif değerlerde olup, denizde karadan daha yüksek olmakla beraber özellikle periyodun sonuna doğru karada 2 m hava sıcaklığında artış gözlemlenmektedir (Şekil 6.2d-f). Üç günlük simülasyon periyodunda ortalama 2 m hava sıcaklığına ait minimum değerler ilk gün (23 Ocak) için -5.2 °C, ikinci gün (24 Ocak) -4.6 °C ve üçüncü gün (25 Ocak) için -4.5 °C olarak bulunmuştur. Tüm simülasyon periyodu boyunca deniz’de 2 m hava sıcaklığının 3 °C’un üstünde olduğu gözlemlenmektedir. Kar yağışı 23 Ocak günü maksimum 19.6 mm olmak üzere gene olarak İstanbul’un Asya yakasında etkil olduğu görülürken sonraki 24 Ocak günü Avrupa yakasını da etkilemeye başlamıştır (Şekil 6.2g-h). Sonraki 25 Ocak günü ise kar yağışının tüm İstanbul’u ve model alanının temsil eden tüm Karadeniz’i etkisi altına aldığı görülmektedir (Şekil 6.2i). Karadeniz ve İstanbul’da görülen grid ölçeğindeki toplam birikmiş (grid-scale accumulated) ortalama kar yağışına ait maksimum değer 44.8 mm ile 25 Ocak günü bulunmuştur. Kar yağışı ilk gün genel olarak İstanbul’un Asya yakasında etkili olduğundan kara yüzeyinde kar birikimi burada 14 cm’ye ulaşmaktadır (Şekil 6.2j). Ertesi gün Avrupa yakasının da etkilenmesiyle beraber özellikle bu bölgenin kuzeyinde yüzeyde kar birikimi görülmektedir ve maksimum kar kalınlığı Asya yakasında 20 cm’ye ulaşmaktadır (Şekil 6.2k). Ancak, Bölüm 6.3.1’de gösterildiği üzere model kar kalınlığı değerlerini genel olarak ölçümlerden düşük öngörmektedir. Periyodun son günü tüm İstanbul’un kar ile örtüldüğü görülmektedir. Özellikle her iki yakanının kuzeyinde 40 cm’yi aşmaktadır (Şekil 6.2l). Periyot ortalaması (23-25 Ocak) ele alındığında ortalama akış hareketinin kuzeyli olduğu görülmektedir (Şekil 6.3). Ancak özellikle karada İstanbul’un Asya yakasında akış batılı akışa dönüşmektedir. Bu ortalama akışta rüzgar şiddeti Avrupa yakasında Asya yakasına göre daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 6.3a). Avrupa yakasındaki ortalama rüzgar şiddeti 5-11 ms⁻¹ arasında iken Asya yakasında 5-7 ms⁻¹ arasında olduğu bulunmuştur. Karadeniz’in özellikle kuzey batı tarafında ortalama rüzgar şiddeti 9-11 ms⁻¹ arasında değişmektedir ve model alanı içerisinde Karadeniz’in doğu tarafında ortalama rüzgar şiddeti daha düşük olmakla birlikte 5-9 ms⁻¹ arasında değişmektedir. Bu periyotta deniz üzerindeki ortalama rüzgar

şiddeti koşulu, özellikle model alanında Karadeniz'in batı bölgesi için, rüzgar enerjisi açısından yeterli potansiyel ihtiva etmektedir.



Şekil 6.2 : Periyot boyunca (23 Ocak (a, d, g, j), 24 Ocak (b, e, h, k) 25 Ocak (c, f, i, l) 2022) WRF modeli ile simüle edilen koşulları: Türbin gövde yüksekliğindeki rüzgar şiddeti (a-c), yere yakın (2 m) hava sıcaklığı (d-f), grid ölçeğinde toplam kar yağıışı (g-i), kar kalınlığı (j-l). Kar yağıışı ve kalınlığı için kullanılan birimler sırasıyla mm ve cm'dir. Gösterilen sonuçlar UTC saati ile günlük ortalamalardır.

Ortalama 2 m hava sıcaklığında İstanbul üzerinde 2 m hava sıcaklığı -4°C ile -1°C arasında değişirken deniz üzerindeki 2 m hava sıcaklığı genel olarak 3°C 'ın üzerinde olduğu gözlemlenmektedir (Şekil 6.3b). İnceleme bölgesi olmamasına rağmen model alanındaki en düşük 2 m hava sıcaklığı -10.5°C ile karada, Kocaeli ilinde, gözlemlenmiştir. Izgara ölçeğinde toplam birikmiş ortalama yağış miktarı açısından İstanbul'da en fazla kar yağışı alan bölge İstanbul'un Asya yakası olmakla birlikte bu bölgede maksimum ortalama kar yağışı miktarı 27 mm 'yi bulmaktadır (Şekil 6.3c). Ancak, İstanbul'un Avrupa yakasının özellikle kuzey bölgesinin de yoğun kar yağışına maruz kaldığı görülmektedir. Bu bölgede ortalama kar yağışı miktarı 20 mm 'ye

varmaktadır. Periyot boyunca kar birikiminin neden olduğu ortalama kar kalınlığı İstanbul'un Asya yakasında genelinde 8-20 cm arasında iken Avrupa yakasında yüksek kar kalınlığı genel olarak kuzey batıda yaklaşık 20 cm'ye varmaktadır (Şekil 6.3d). Avrupa yakasının iç ve güney kesimlerinde ise ortalama kar kalınlığının 3 cm'ye kadar indiği gözlemlenmiştir.

6.4.3 Rüzgar çiftliğinin kar yağışı, kar kalınlığı ve ele alınan diğer meteorolojik parametreler üzerindeki etkisini değerlendirmek üzere rüzgar çiftlik konumu ve çiftlikteki türbin ebatının belirlenmesi

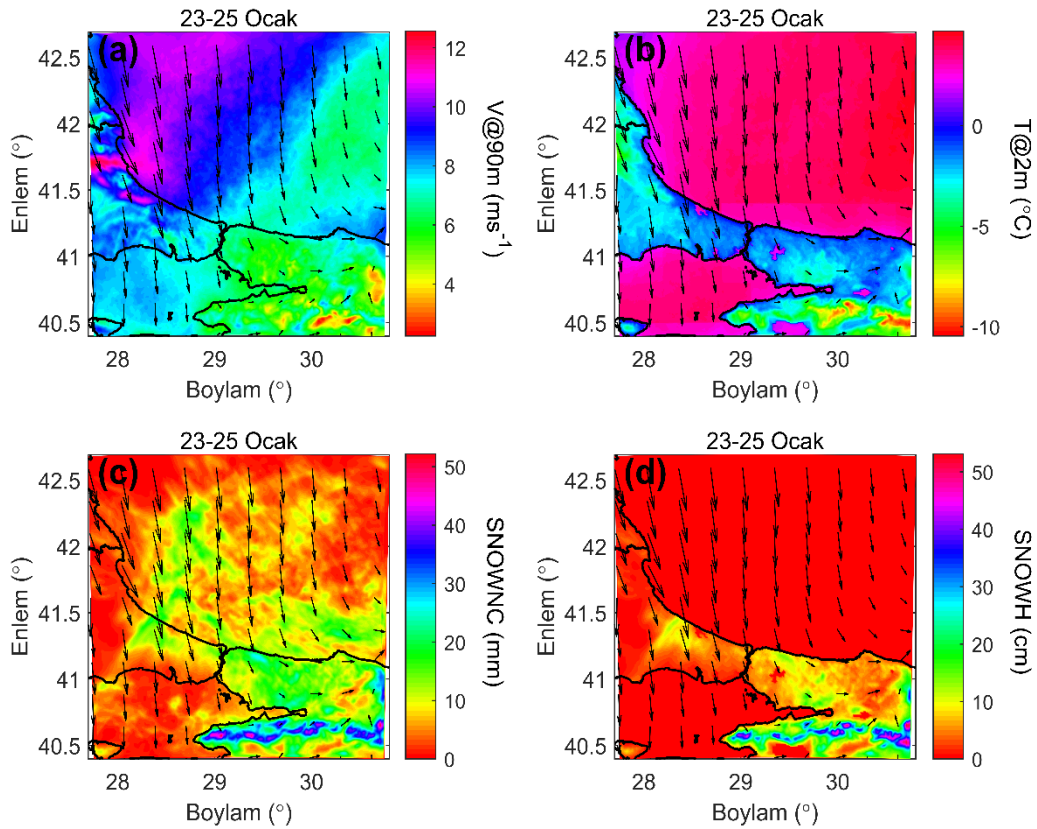
Bölüm 6.2.1'de belirtildiği üzere inceleme periyodu 23-25 Ocak 2022 olarak belirlenmiştir. Bu bölüme ait çalışmada rüzgar çiftliğinin ilgili parametreler üzerindeki etkisi günlük ortalamalar, periyot ortalaması ve 24 Ocak 2022 için üç saat aralıklı saatlik olmak üzere üç farklı şekilde değerlendirilmiştir. Üç değerlendirmede de İstanbul'un Avrupa yakasında Karadeniz'de konumlandırılmış rüzgar çiftliği bu çalışmada ele alınan parametreler açısından Asya yakasında Karadeniz'de konumlandırılmış rüzgar çiftliğinden daha büyük meteorolojik etki sergilemektedir (Ek B). Buna ek olarak, rüzgar çiftliğinin konumu farketmeksizin daha büyük ebatlı rüzgar türbin modelinin kullanımı (Siemens SWT6.0-154) diğer türbin modelinin kullanımına (Siemens SWT3.6-120) göre daha büyük rüzgar çiftlik etkisine neden olmaktadır (Ek B).

Bu nedenle ve bölüm 6.3.2'de sunulan periyot ortalamasına ait rüzgar şiddeti koşulu göz önüne alındığında, bu bölüme ait sonraki alt başlıklarda İstanbul'un Avrupa yakasında Karadeniz'de Siemens SWT6.0-154 deniz tipi rüzgar türbin modeli ile kurulmuş hipotetik rüzgar çiftliğinin kar yağışı ve ele alınan diğer meteorolojik parametreler üzerindeki etkisine ait sonuçlar değerlendirilecektir. Diğer simülasyon sonuçları Ek B'de yer verilmiştir. Bu simülasyon sonuçları ile mevcut meteorolojik hadisede rüzgar çiftliğinin konumu ve çiftlikte kullanılan türbin ebatlarının önemli vurgulanmaktadır.

6.4.4 Açık deniz rüzgar çiftliğinin kar yağışı, kar kalınlığı ve diğer seçili meteorolojik parametreler üzerindeki etkisi

İstanbul'un Avrupa yakasının kuzey kıyısından yaklaşık 5 km açıkta tasarlanan hipotetik açık deniz rüzgar çiftlik etkisinin üç günlük simülasyon periyodundaki günlük ortalamalarının gösterildiği Şekil 6.4'te, rüzgar şiddeti üzerindeki etki (110

m'deki rüzgar şiddeti farkı) ele alındığında, rüzgar çiftliği etki örüntüsünün büyük bir bölümü, akışın kuzey batılı olduğu 23 Ocak'ta İstanbul'un Asya yakasında ve Karadeniz'in doğusunda, akışın kuzey doğulu olduğu 24 Ocak'ta İstanbul'un Avrupa yakasında ve Karadeniz'in batısında görülmektedir (Şekil 6.4a-b) Ancak akışın kuzeyli olduğu 25 Ocak'ta ise rüzgar şiddeti fark örüntüsü tüm İstanbul'u ve Karadeniz'i kapsamaktadır (Şekil 6.4c). Bunlara ek olarak, periyot boyunca rüzgar çiftliğinin rüzgar altında rüzgar şiddeti farkının negatif olduğu bir alan bulunmaktadır ve bu alanın akış doğrultusunu takip ettiği görülmektedir ve hatta 25 Ocak'taki bu takip 40.5° enlemine kadar devam etmektedir.



Şekil 6.3 : WRF modeli ile simüle edilen çevre koşullarının (Türbin gövde yüksekliğindeki rüzgar şiddeti (a-c), yere yakın (2 m) hava sıcaklığı (d-f), grid ölçeğinde toplam kar yağışı (g-i), kar kalınlığı (j-l)) periyot ortalaması. Kar yağışı ve kalınlığı için kullanılan birimler sırasıyla mm ve cm'dir.

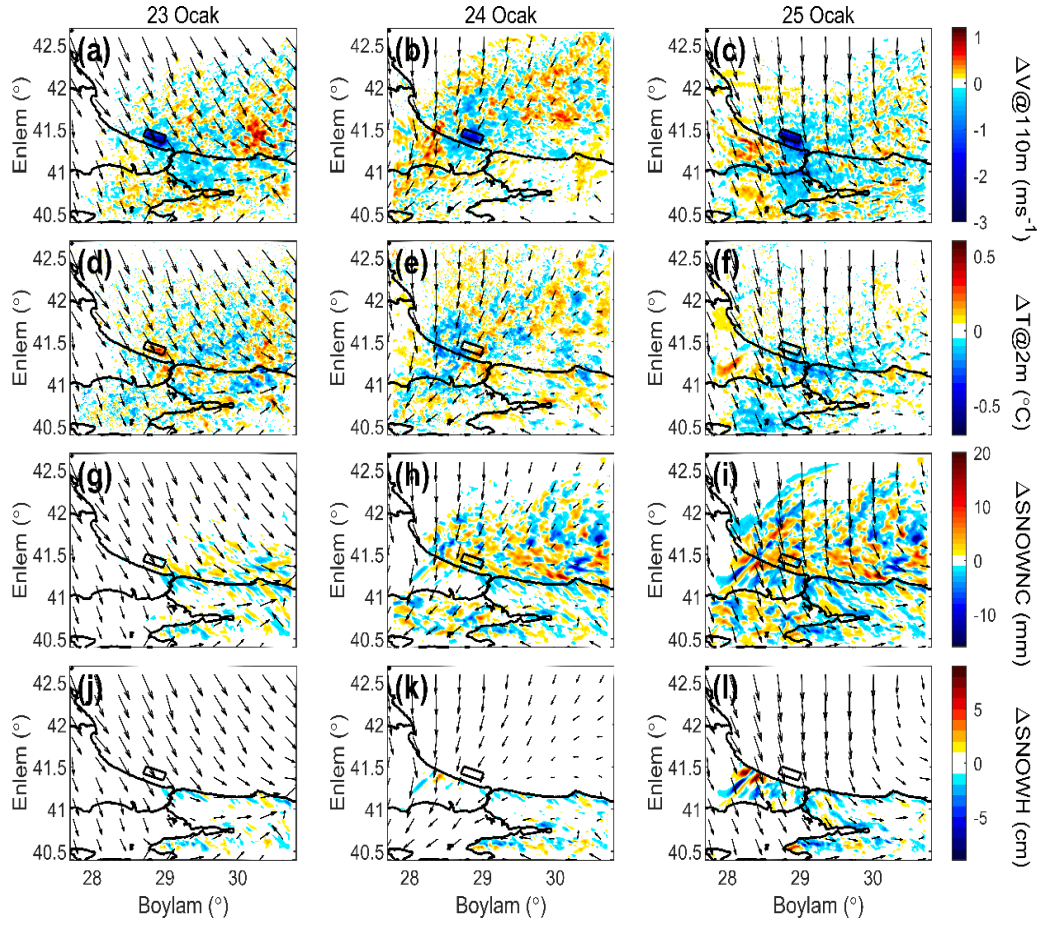
Periyot boyunca, rüzgar şiddeti farkı $-3 ms^{-1}$ ile $1 ms^{-1}$ arasında değişmektedir ve en kuvvetli negatif rüzgar şiddeti farkları rüzgar çiftliğinde bulunduğu gözlemlenmektedir. Rüzgar çiftliğinin yere yakın 2 m'deki hava sıcaklığı üzerindeki etkisi ele alındığında, 23 Ocak'ta rüzgar çiftliğinde pozitif hava sıcaklığı farkları

(ısınma) görülürken 24 Ocak'ta bu pozitif fark büyüklüklerinin zayıfladığı 25 Ocak'ta ise pozitif farkların negatife farklara (soğuma) dönüştüğü görülmektedir (Şekil 6.4d-f). Periyodun son günü 25 Ocak'ta rüzgar çiftliğinin çevresinde ve rüzgar altı bölgesinde genel olarak negatif sıcaklık farkları görülmektedir ve ek olarak periyottaki diğer günlerin aksine rüzgar çiftlik etkisi Karadeniz'de seyrek bir örüntü biçimde ve İstanbul'un genelinde gözlemlenmektedir. İlk iki gün rüzgar şiddeti farkında olduğu gibi 2 m hava sıcaklığı farkında da etki genel olarak akış doğrultusuna bağlı olarak 23 Ocak'ta Asya yakasında 24 Ocak'ta ise Avrupa yakasında yoğunlaşmıştır. Ancak ilk iki gün en kuvvetli pozitif 2 m hava sıcaklığı farkları rüzgar çiftliğinde görülmektedir. Rüzgar çiftliğinin etkisi kuzey batılı rüzgar durumunda (23 Ocak) rüzgarın soğuk kara üzerinden (kıyı) akışı nedeniyle çiftliğin rüzgar altı tarafında sıcaklığı artırıcı bir etkisi bulunurken, kuzey doğulu rüzgar durumunda (24 Ocak) ise akışın tamamen bağlı olarak daha sıcak olan deniz üzerinden olması nedeniyle rüzgar çiftliğinin rüzgar üstü tarafında genel olarak sıcaklığı artırma, rüzgar altı tarafında ise genel olarak azaltma etkisi olmaktadır. Periyot boyunca ortalama 2 m sıcaklık farkı -0.9°C ile 0.7°C arasında değişmektedir.

Kar yağışı 23 Ocak günü genel olarak nispeten zayıf bir biçimde Karadeniz'in ve İstanbul'un Asya tarafını etkilediğinden rüzgar çiftliğinin kar yağışı üzerindeki etkisi bu bölgede görülmektedir (Şekil 6.4g). Rüzgar çiftliği, İstanbul üzerinde 23 Ocak günü genel olarak Asya yakasının kuzey tarafını etkilemektedir. Rüzgar çiftliğinin 23 Ocak günü kar yağışını -7 mm ile 6 mm arasında değiştirdiği bulunmuştur. Kar yağışının İstanbul'un genelini etkilediği 24 Ocak günü rüzgar çiftliğinin kar yağışını genel olarak Karadeniz'de etkilediği görülmektedir (Şekil 6.4h). Periyodun ilk günü 23 Ocak'ta olduğu gibi, ancak Avrupa yakası da dahil olmak üzere, rüzgar çiftliği kar yağışını İstanbul üzerinde genel olarak kuzeyde etkilemektedir. İstanbul üzerinde rüzgar çiftliğinin kar yağışını genelde zayıflattığı ancak sadece bir bölgede kuvvetlendirdiği gözlemlenirken Karadeniz'de etki örüntüsünde genel olarak kar yağışında bir artış gözlemlenmektedir. Kar yağışının rüzgar çiftliği üzerinde ise genelde kuvvetlendiği görülmektedir.

Rüzgar çiftliğinin kar yağışını 24 Ocak günü ortalama -15 mm ile 19 mm arasında etkilemektedir. Model simülasyonlarında tüm İstanbul'un ve model alanındaki Karadeniz'in yoğun kar yağışı etkisinde kaldığının gözlemlendiği ve akışın genel

olarak kuzeyli olduğu 25 Ocak günü rüzgar çiftliğinin kar yağışını tüm Karadeniz’de ve İstanbul’da en kuvvetli şekilde etkilediği görülmektedir (Şekil 6.4i).



Şekil 6.4 : İstanbul’un kuzeyine Karadeniz’e kurulan hipotetik rüzgar çiftliğinin periyot boyunca (23-25 Ocak 2022) kar yağışı (g-i) / kar kalınlığı (j-l) ve ele alınan diğer meteorolojik parametreler türbin gövde yüksekliğindeki (110 m) rüzgar şiddeti (a-c) ve yere yakın (2 m) hava sıcaklığı (d-f) üzerindeki günlük ortalama etkisinin gösterimi. Çizimdeki vektörler rüzgar akış yönünü temsil etmektedir ve gösterim çözünürlüğü 27 km’dir. Kalın siyah çizgiler İstanbul ve güney Marmara sahil şeridini ve, Karadeniz’deki dörtgen siyah alan da rüzgar çiftliğini temsil etmektedir. Kar yağışı ve kalınlığı için kullanılan birimler sırasıyla mm ve cm’dir.

Etki örüntüsünde Karadeniz’de kar yağışı genel olarak kuvvetlenirken İstanbul üzerinde genel olarak zayıflamaktadır. Ancak İstanbul üzerinde bir bölgede daha kuvvetli olmak üzere birkaç bölgede kar yağışında kuvvetlenme görülmektedir. Ortalama akış genel kuzeyli olduğundan İstanbul üzerinde nispeten en büyük kar yağışı farkları Avrupa yakasında görülmektedir. İnceleme periyodunun son günü 25 Ocak’ta rüzgar çiftliği kar yağışını ortalama -17 mm ile 20 mm arasında

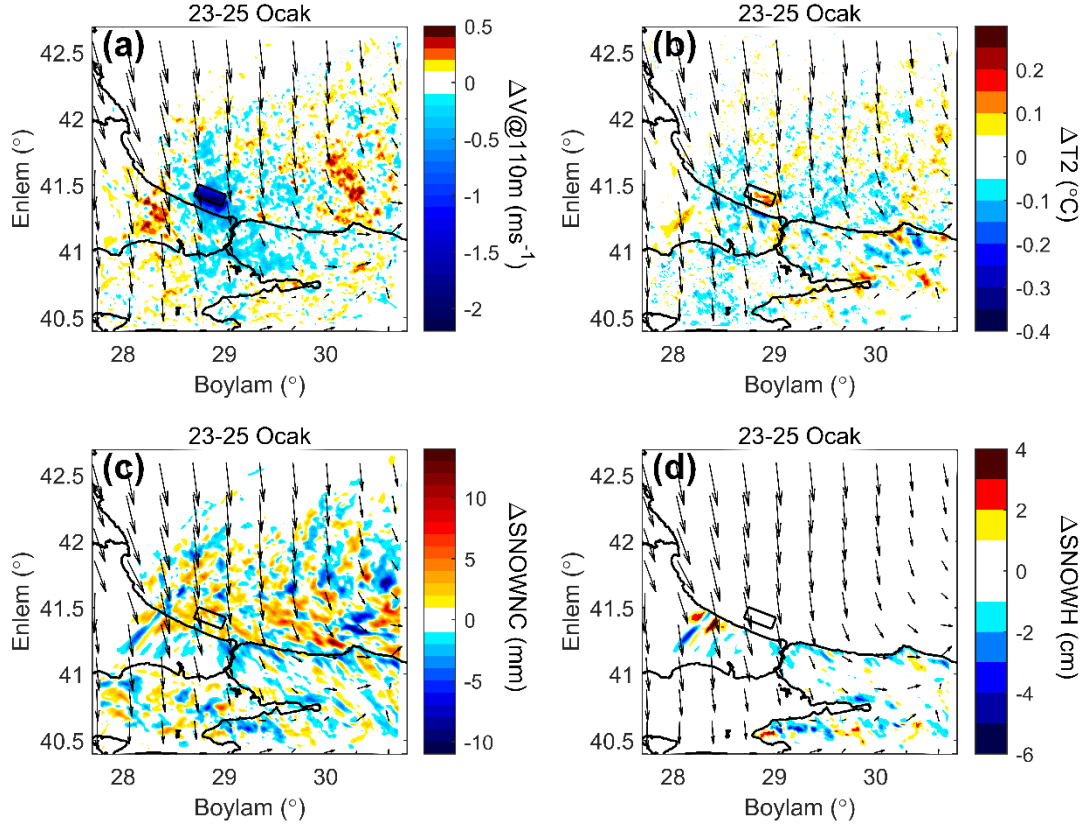
değiştirmektedir. Buna ek olarak diğer günlerin aksine 25 Ocak'ta hemen hemen kar yağışının gerçekleştiği tüm alanların etkilendiği gözlemlenmektedir.

Rüzgar çiftliğinin kar birikimi sonucunda kar kalınlığı üzerindeki etkisi ele alındığında inceleme periyodunun ilk günü 23 Ocak'ta, sadece İstanbul göz önüne alındığında, genel olarak Sarıyer'de ve Asya yakasının kuzeyinde kar kalınlığının genel olarak azaldığı görülmektedir (Şekil 6.4j). Ortalama kar kalınlığındaki değişim -2 cm ile 2 cm arasında elde edilmiştir. Ertesi gün 24 Ocak'ta rüzgar çiftliği genel olarak her iki yakanın kuzeyinde ortalama kar kalınlıklarını zayıflatmaktadır (Şekil 6.4k). Ancak Avrupa yakasının kuzey batısında, rüzgar çiftliği etkisinde, ortalama kar kalınlığında bir artış gözlemlenmektedir. Ortalama kar kalınlığındaki değişim 24 Ocak günü -3 cm ile 4 cm arasında elde edilmiştir. İnceleme periyodunun son günü 25 Ocak'ta özellikle Avrupa yakası olmak üzere tüm İstanbul'da rüzgar çiftliği kar kalınlığını etkilemektedir. İstanbul'un Avrupa yakasında, Çatalca, Silivri, Arnavutköy ve Büyükçekmece ilçelerinde tüm inceleme periyodundaki en yüksek kar kalınlığı değişimleri gözlemlenmektedir. Çatalca ve Arnavutköy'de kar kalınlığındaki değişim 9 cm'ye varırken, Silivri ve Büyükçekmece'de kar kalınlığındaki değişim -9 cm'ye varmaktadır. Asya yakasında ise kar kalınlığındaki en büyük değişim -5 cm ile Şile ilçesinde görülmektedir. Ayrıca, Asya yakasının iç bölgelerinde 3 cm'ye varan değişimler de gözlemlenmektedir. Son olarak, her iki yakanın İstanbul boğazı sınırı boyunca negatif kar kalınlığı farkları görülmektedir.

İnceleme periyodu (23-25 Ocak) ortalamasında akış kuzeylidir ve rüzgar çiftliği 110 m'deki rüzgar şiddetini -2.2 ms⁻¹ ile 0.5 ms⁻¹ arasında değiştirmektedir. En yüksek negatif rüzgar şiddeti farkları rüzgar çiftliğinde gözlemlenirken en yüksek pozitif rüzgar şiddeti farkları Karadeniz'in Asya yakasında ve İstanbul'un Avrupa yakasında gözlemlenmektedir. Akış doğrultusunda rüzgar çiftliğinin rüzgar altında negatif rüzgar şiddeti fark alanı (iz alanı) yaklaşık 40.5° enlemine kadar uzamaktadır. Periyot ortalamasında 2 m hava sıcaklığındaki değişimde rüzgar çiftliğinde 0.2 °C'a varan ısınma sinyalleri bulunurken çiftliğin çevresinde genelde, İstanbul ve Karadeniz'de, 0.35 °C'ye varan soğuma sinyalleri bulunmaktadır. Çiftliğin çevresindeki ısınma sinyalleri maksimum 0.15 °C'dır. En yüksek ısınma sinyali 0.3 °C ile İstanbul dışında Kocaeli ilinde bulunmaktadır.

Kar yağışındaki değişim için periyot ortalaması alındığında rüzgar çiftliğinde, kar yağışında genelde bir artış görülmekle beraber bu artış maksimum 5 mm'dir. Çiftlik

dışında İstanbul üzerinde kar yağışında genelde bir azalma görülmektedir. Bu azalma özellikle boğaz kıyısının kuzeyinde, Asya yakasının kuzeyinde ve Avrupa yakasının güneyinde Silivri tarafında daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 6.5 : İstanbul'un kuzeyine Karadeniz'e kurulan hipotetik rüzgar çiftliğinin kar c) yağışı / d) kar kalınlığı ve ele alınan diğer meteorolojik parametreler a) türbin gövde yüksekliğindeki (110 m) rüzgar şiddeti ve b) yere yakın (2 m) hava sıcaklığı) üzerindeki etkisinin periyot ortalamasının (23-25 Ocak 2022) gösterimi. Çizimdeki vektörler rüzgar akış yönünü temsil etmektedir ve gösterim çözünürlüğü 27 km'dir. Kalın siyah çizgiler İstanbul ve güney Marmara sahil şeridini ve, Karadeniz'deki dörtgen siyah alan da rüzgar çiftliğini temsil etmektedir. Kar yağışı ve kalınlığı için kullanılan birimler sırasıyla mm ve cm'dir.

İstanbul üzerinde kar yağışındaki en yüksek artış 7 mm ile Çatalca bölgesinde bulunmaktadır. Kar yağışındaki en yüksek değişimler -11 mm ve 14 mm ile Karadeniz'de bulunmaktadır. Kar yağışındaki bu değişime istinaden İstanbul üzerinde, tüm periyot ortalamasında, kar kalınlığındaki en yüksek değişimler, -5 cm ile Silivri'de 4 cm ile Çatalca'da görülmektedir. Yine kar yağışındaki değişime paralel olarak boğaz kıyısının kuzey bölgesi ve Asya yakasının kuzeyinde ortalama kar kalınlığında 3 cm'ye varan azalma bulunmaktadır.

7. GENEL SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu bölümde 3., 4., 5. ve 6. Bölümlere ait genel sonuçlara ve önerilere yer verilmektedir. Her bölüme ait genel sonuç ve öneriler ayrı alt başlıklarla verilmektedir.

7.1 Bölüm 3'e Ait Genel Sonuç ve Öneriler

Bölüm 3'e ait çalışmada WRF-WFP modelinde MYNN PBL şemasında yapılan değişiklikler (ve ayrıca WFP C_{TKE} 'de yapılan modifikasyon) sonucunda simüle edilen hipotetik rüzgar çiftliği iz etkisindeki değişim incelenmiştir. MYNN PBL şemasında yapılan değişiklikler farklı karışım uzunluğu yaklaşımlarının kullanımı, TKE adveksiyonunun doğru ve yanlış şekilde işlenmesi, ve yerel olmayan karışım için kütle-akı şemasının etkinleştirilmesini kapsamaktadır. Ek olarak, TKE adveksiyonunun doğru ve yanlış işlendiği simülasyonlarda WFP momentum ve TKE tandas bileşenlerinin bağıl katkılarını inceleyebilmek üzere WFP bileşenlerinden sadece biri açık diğerrinin kapalı tutulduğu iki ek simülasyon gerçekleştirilmiştir. Ancak bu bölüme ait çalışmanın ana temasını temsil eden tüm bu model simülasyonlar için uygun bir yatay ve düşey çözünürlük çiftini belirlemek üzere yatay ve düşey çözünürlüğün değiştirildiği bir dizi simülasyon gerçekleştirilmiştir. Yatay çözünürlük için 1 km, 3 km, 9 km ve 27 km test edilirken, düşey çözünürlük için 12 m (81 seviye) ve 35 m (50 seviye) test edilmiştir. Yatay çözünürlüğün değiştirildiği simülasyonlarda 81 seviyeli düşey yapı kullanılırken, düşey çözünürlüğün değiştirildiği simülasyonlarda 1 km yatay çözünürlük kullanılmıştır. Bu sayede yatay ve düşey çözünürlüğün düşürülmesi ile rüzgar çiftliği iz etkisindeki değişim incelenmiştir. Sonuç olarak, yüksek yatay (1 km) ve düşey (12 m, 81 seviye) çözünürlük çiftinin rüzgar çiftliği iz etkisine ait yatay ve düşey etki dağılımını ve dağılıma ait özellikle yüksek büyüklükleri daha iyi yakalayabildiği gözlemlendiği için ana simülasyonlarda bu çözünürlük çifti kullanılmasına karar verilmiştir.

Bu çalışmada hipotetik rüzgar çiftliği Çanakkale ilinde seçili bir bölgede, düz olmayan bir arazi üzerinde tasarlanmıştır. Model simülasyonları için 17 ve 18 Temmuz 2015 periyodu seçilmiştir çünkü bu zaman periyodunda rüzgar akışına yönelik ölçüm verisi standart sapması düşük düzenli akışın olduğunu göstermektedir. Ölçülen rüzgar şiddeti zaman serisi nispeten yüksek enerji potansiyeli taşımaktadır ve seçili türbin modeli için yüksek itki katsayısı üretmektedir. Ölçülen rüzgar yönü zaman serisi ise hakim yön olarak kuzey doğu sektörü olmakla birlikte bu sektörde esme frekansı oldukça yüksek ve yöne ait standart sapma da oldukça düşüktür. Rüzgar şiddeti ve yönüne ait bu ölçüm verileri tasarlanan hipotetik rüzgar çiftliğinde iz etkisini artırıcı yöndendir. Ayrıca rüzgar çiftliği iz etkisini kuvvetlendirmek üzere çiftlik sıkışık düzende tasarlanmıştır. Model simülasyonları her gün için günlük olarak ayrı gerçekleştirilmiştir. Simülasyon periyodu 36 saat olarak belirlenmiş olup simülasyon başlangıç zamanı önceki günün UTC saati ile öğlen 12'dir ve bu ilk 12 saat spin-up süresi olarak tanımlanmıştır.

MYNN PBL şemasında yapılan değişikliklerle simüle edilen rüzgar çiftliği iz etkisinde değişimi değerlendirmek üzere rüzgar şiddeti, hava sıcaklığı, TKE ve atmosferik sınır tabaka yüksekliği olmak üzere atmosferik sınır tabaka değişkeni ele alınmıştır. Bu değerlendirmeye geçmeden önce ilk olarak sadece seçili türbine ait (Siemens SWT3.6-120) türbin gövde yüksekliğindeki (90 m) rüzgar şiddeti ve yere yakın (2 m) hava sıcaklığını ele alarak gündüz ve geceye ait rüzgar çiftliği iz etkisinin farkı ortaya konmuştur. Geceleyin gündüze kıyasla rüzgar çiftliği iz etkisi daha kuvvetli olmakla birlikte daha büyük bir alanı etkilediği bulunmuştur. Bu nedenle, model simülasyonları arasındaki farkı daha iyi gösterebilmek için bu bölümde sadece geceye ait sonuçlara yer verilmiştir.

Genel olarak rüzgar çiftliği izi rüzgar şiddetini azaltmakta ve TKE, hava sıcaklığı ve sınır tabaka yüksekliğini artırmaktadır. Ancak, MYNN PBL şemasında değişiklik yapıldığında (ve WFP C_{TKE} 'de modifikasyon yapıldığında) modelin rüzgar çiftliği iz etkisi öngörülerinde değişimin gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

WFP kullanımında TKE adveksiyonunun modelde yanlış işlenmesi, rüzgar çiftliği izinin, özellikle rüzgar çiftliği alanında, TKE ve hava sıcaklığı üzerindeki beklenen etkinin tam tersini öngörerek yanlış sonuçlar üretilmesine neden olmuştur. Bu durumda WFP kullanımında WRF modelinde bir kod hatası nedeni ile, MYNN PBL şeması ile üretilen TKE, WFP'den gelen ek TKE ile son model zaman adımına kadar

güncellenememektedir. Bu nedenle, rüzgar çiftliğinden gelen ek TKE seviyesi, olduğundan daha düşük öngörülmekle birlikte son model zaman adımına kadar TKE adveksiyonunun kapalı olduğu simülasyonlardaki gibi, çiftlikteki mevcut TKE, rüzgar çiftliği hücrelerini terk edememektedir. Buna ek olarak, WFP momentum ve TKE tandans bileşenleri rüzgar çiftliğinde, sırasıyla, negatif ve pozitif TKE ve hava sıcaklığı farklılıkları üretmektedir. TKE adveksiyonunun yanlış işlenmesi sonucunda WFP momentum tandans bileşeninden gelen bağıl katkı TKE tandans bileşeninden gelen katkıdan daha büyük olmaktadır ve bu durum modelin yanlış öngörüler üretmesine neden olmaktadır. Yine de, bu durum rüzgar çiftliğinin rotor tabakasından yukarı seviyelere kadar rüzgar şiddeti ve sınır tabaka yüksekliği üzerinde beklenen etki işaretini doğru üretmektedir, ancak negatif rüzgar şiddeti farkını kuvvetlendirmekte ve pozitif PBLH farkını zayıflatmaktadır. Ancak, rüzgar çiftliğinde rotor tabakasının altında yere yakın gözlemlenen rüzgar şiddeti farkına ait işaret pozitif yerine negatif olarak öngörülmektedir. TKE adveksiyonundaki problemin Archer ve diğ.'nin [81] çalışmasında verilen prosedür izlenerek düzeltilmesi sonucunda rüzgar çiftliğinin özellikle TKE ve hava sıcaklığı üzerinde beklenen etkiyi sergilediği görülmektedir. Bununla birlikte rüzgar çiftliğinden gelen ek TKE de artık TKE adveksiyonunun doğru işlenmesi ile rüzgar çiftliğini temsil eden model hücrelerinden ayrılabilir. Ancak Archer ve diğ.'nin [81] çalışmasında rüzgar çiftliğinden gelen ek TKE'nin halen yüksek olması nedeniyle WRF-WFP öngörülerini LES yöntemi ile doğrulayarak WFP C_{TKE} için elde ettiği 0.25 düzeltme faktörünün, maalesef bu çalışma için uygun olmadığı bulunmuştur. Bu düzeltme faktörünün TKE adveksiyonunun doğru işlendiği simülasyona uygulandığında, TKE adveksiyonun yanlış işlendiği simülasyonda olduğu gibi rüzgar çiftliğinin TKE ve hava sıcaklığı üzerindeki etkisinde yanlış öngörüler üretmektedir, çünkü yine WFP momentum tandans bileşeni baskın bileşen haline gelmektedir. Ancak rüzgar şiddeti ve sınır tabaka yüksekliği için bu simülasyon (ADVBF_MCTKE) ve TKE adveksiyonunu doğru ve yanlış işlendiği simülasyonlar (ADV ve ADVBF) benzer etki büyüklükleri ve şekilleri üretmiştir. Bu çalışmaya göre C_{TKE} için 0.25'ten daha yüksek düzeltme faktörü ya da daha iyi yeni bir yaklaşım gerekli olduğu söylenebilir. Bu nedenle bu konu üzerine daha fazla araştırma yapılması gereklidir ve bir sonraki bölüm bu hususu ele alacaktır. Ancak tezin bu altı çalışması C_{TKE} için daha iyi bir hesap sağlanana kadar WFP'de varsayılan C_{TKE} hesabının kullanılmasını önermektedir. Bu paragrafa istinaden özet olarak TKE adveksiyonunun

kullanımının önemi ve simülasyon sonuçları üzerindeki etkisinin dikkatlice yorumlanması gerektiği ve daha iyi C_{TKE} hesabı gerektiği vurgulanmıştır.

MYNN PBL şemasında kütle-akı şemasının etkinleştirilmesi ile elde edilen EDMF (eddy-diffusivity / mass-flux) şemasının orijinal karışım uzunluğuna (bl_mynn_mixlength=0) ilk modifikasyon (bl_mynn_mixlength=1) ile kullanımının (EDMFv1 simülasyonu) rüzgar çiftliğinin uzak bölgelerde bu çalışmada ele alınan tüm sınır tabaka değişkenlerini etkilemesine neden olmaktadır, çünkü Olson ve diğ.'nin [83] çalışmasına göre, orijinal karışım uzunluğuna yapılan ilk modifikasyon kütle-akı şeması olmadan çalışacak şekilde tasarlanmıştır ancak yine de model her ikisinin birlikte kullanımına izin vermektedir ve bu neden bu uygun olmayan birliktelik bu çalışmada test edilmiştir. Öte yandan karışım uzunluğunda yapılan ikinci modifikasyonun (bl_mynn_mixlength=2) EDMF şeması ile birlikte kullanımı (EDMFv2 simülasyonu) EDMFv1 simülasyonunda görülen ve beklenmeyen uzak mesafe etkilerini kısmen zayıflamıştır ya da sönümlendirmiştir. Ek olarak her iki EDMF simülasyonu rüzgar çiftliğinin ele alınan sınır tabaka değişkenleri üzerindeki etkinin sahip olduğu etki örüntüsünü önemli ölçüde değiştirmiştir. Dahası buradan yola çıkarak karışım uzunluğu seçiminin kütle akı şemasının etkinleştirilmesine göre sonuçlar üzerinde daha belirgin bir etki yarattığı bulunmuştur. Orijinal MYNN şeması (ORGMYNN) genel olarak rüzgar çiftliği izini yarattığı etki örüntüsünü biraz değiştirmektedir ve etkinin büyüklüğünü de zayıflatmaktadır. Ancak, TKE üzerindeki etkisi ise tam tersidir. Bu simülasyonda rüzgar çiftliğinin TKE üzerindeki etkisi kuvvetlenmekte ve yatay kesitte etki örüntüsü görünür bir şekilde değişmektedir. Dahası TKE farkının düşey etki mesafesi en yüksek bu simülasyonda görülmektedir. Eğer TKE adveksiyonunun kapalı olması durumunun TKE farkı hususunda düşeyde yarattığı etki ihmal edilirse bu durum muhtemelen orijinal MYNN şemasında türbülanslı uzunluk ölçeğinin yüksek büyüklüğe sahip olması ve bu ölçeğin yüzeyden sınır tabaka yüksekliği yerine model tepe seviyesine kadar entegre edilmesinden kaynaklanmaktadır, ve bundan dolayı gerçeği yansıtmayan yüksek bir karışıma neden olmaktadır. Bu paragrafa istinaden bu çalışmanın sonuçları bize kesin bir yargıya varmamakla birlikte yine de elde edilen sonuçlara göre WRF3.8.1'de varsayılan MYNN PBL şemasını ya da EDMFv2 konfigürasyonunun kullanımını önermektedir.

Bu çalışma WRF modelinde bir dizi rüzgar çiftliğinin iz etki simülasyonlarını gerçekleştirerek Fitch WFP şeması [66] ile MYNN PBL şeması arasındaki ilişkiye

yeni bakış sağlamaktadır, çünkü Fitch WFP şeması [66] henüz sadece MYNN PBL şeması ile çalışmaktadır. Ancak bu çalışmada WRF-WFP öngörülerinin MYNN PBL şemasında yapılan değişiklikler sonucundaki değişimin değerlendirilmesi tek bir (düz olmayan) arazi ve zaman periyodu için gerçekleştirilmiştir. Tomaszewski ve Lundquist'in [26] araştırmasında belirtildiği gibi daha uzun zaman periyodu veya farklı lokasyonlar (deniz, kıyı veya yüksek karmaşık arazi) için ileri değerlendirmeler faydalı olabilir. Örneğin yüksek çevre türbülansı üreten karmaşık arazi ve daha düşük çevre türbülanslı deniz koşulu MYNN PBL şemasında yapılan değişikliklerin WRF-WFP öngörülerindeki etkisi bu çalışmadan farklılık gösterebilir. Son olarak, WFP C_{TKE} için kullanılan 0.25 düzeltme faktörünün [81] özellikle TKE ve hava sıcaklığı açısından rüzgar çiftliği iz etkisine dair yanlış öngörülere neden olduğu anlaşılmıştır. WFP ve MYNN PBL şeması karşılık olarak birbirlerini etkilemektedir. Bu neden ileriki çalışma bu ilişki üzerine yoğunlaşmalıdır.

7.2 Bölüm 4'e Ait Genel Sonuç ve Öneriler

Bölüm 4'e ait çalışmada, Bölüm 3'te yer alan çalışma için, C_{TKE} hesabı sadece C_T cinsinden bir boyutlu momentum teorisinin kullanımı ile tekrar yazılarak uygulandığı simülasyonun sonuçları değerlendirilmiştir. Bu yeni yaklaşıma ait simülasyon öngörülerinin değerlendirilmesinde Bölüm 3'teki ADV, ADVBF ve ADVBF_CCTKE simülasyonlarının öngörülleri de yer almaktadır ancak bu bölümde değerlendirme önceki bölümün tersine sadece ilk günün geceye ait sonuçları değil ele alınan tüm zaman periyodu (iki gün) üzerinden yapılmıştır. Ayrıca değerlendirme yine Bölüm 3'ün aksine sadece rüzgar çiftliği hücreleri ele alınarak üç farklı gösterim ile gerçekleştirilmiştir: gece için zamansal ortalamaların Bölüm 3'te tanımlanan düşey kesit gösterimi, gece ve gündüz için uzamsal ortalamaların kutu diyagram gösterimi, ve gece ve gündüz için uzamsal-zamansal ortalamaların düşey profil gösterimi. Uzamsal, zamansal ve uzamsal-zamansal ortalamalar için bu çalışmada iki gün üzerinden gece için 22:00-03:00 UTC+3 ve gündüz için 10:00-15:00 UTC+3 zaman aralıklarına ait WRF çıktıları ele alınmıştır. Bu çalışmada yukarıda belirtildiği üzere değerlendirmede sadece rüzgar çiftliği hücreleri ele alınmıştır çünkü WFP'de yapılan değişiklikler direk rüzgar çiftliği hücrelerini etkilemektedir.

Rüzgar çiftlik iz etkisine dair WRF model simülasyon öngörülerinde WFP momentum ve TKE tandans bileşenlerinin bağıl katkıları anahtar faktördür. Bu bileşenlerden

birinin, özellikle TKE tandans bileşeninin, yüksek veya düşük bağıl katkısı rüzgar çiftliği iz etkisinde beklenmeyen sonuçların üretilmesine neden olabilmektedir. Örneğin, Bölüm 3'te de açıklandığı üzere, ADV ve ADVBF_CCTKE simülasyonlarında sırasıyla TKE adveksiyonunun yanlış işlenmesine neden olan bir kod eksikliği ve bu çalışma için uygun olmayan C_{TKE} için uygulanan bir düzeltme faktörü sonucunda rüzgar çiftliğinin özellikle hava sıcaklığı üzerindeki etkisinde ısınma yerine beklenmeyen soğuma sinyalleri bulunmuştur. Ancak ADVBF_CCTKE'nin tersine, ADV ayrıca tüm rotor tabakasında yanlış TKE fark öngörülerini üretmiştir. Öte yandan, ORJ C_{TKE} ile doğru işlenen TKE adveksiyonunun beraber kullanıldığı ADVBF simülasyonunda örneğin rotor tabakasında ve altında rüzgar çiftliğinin hava sıcaklığı üzerindeki gece ve gündüz etkisi doğru etki işareti ile üretilmiştir. Dahası diğer simülasyonların tersine bu simülasyon rüzgar çiftliğinde 1000 m'lik düşey profil boyunca tamamen pozitif gece ve gündüz TKE farkları üretmiştir. Ayrıca sadece bu simülasyonda yüzeye yakın pozitif rüzgar şiddeti farkı gözlemlenmiştir ve genel olarak en zayıf negatif rüzgar şiddeti farkları görülmüştür çünkü bu simülasyon rüzgar şiddeti farkında WFP TKE tandans bileşeninden gelen en yüksek katkı bu simülasyonda bulunmuştur. ARCHER C_{TKE} hesabının uygulandığı ADVBF_CCTKE simülasyonu ile IDMOM C_{TKE} hesabının uygulandığı ADVBF_MCTKE simülasyonu arasındaki fark, zamansal, uzamsal ve uzamsal-zamansal ortalamalar açısından rüzgar çiftliğinin özellikle hava sıcaklığı ve TKE üzerindeki gece etkisinde belirginleşmektedir. Örneğin, ADVBF_CCTKE (ADVBF_MCTKE) rotor tabakasının altında beklenmeyen yanlış (beklenen doğru) gece soğuma (ısınma) etkisi göstermektedir. Ancak ADVBF_MCTKE simülasyonundaki bu beklenen doğru ısınma etkisinin büyüklüğü oldukça zayıftır. Diğer bir örnek ise ADVBF_MCTKE rotor tabakasının altında negatif TKE farkları sergilerken, ADVBF_CCTKE'de rotor tabakasının alt yarısında da negatif TKE farkları görülmektedir. Ancak tüm bunlara rağmen rüzgar şiddeti farkı açısından hiçbir değerlendirmede hem gece hem de gündüz bu iki simülasyon arasında önemli bir fark görülmemektedir. ORJ ya da ARCHE C_{TKE} hesabı nedeni ile rüzgar çiftliğinden gelen ek TKE seviyesi ilgili problem devam etmektedir ve bu çalışma C_{TKE} hesabında bir boyutlu momentum teorisinin kullanarak yeni bir yaklaşım getirirken bu yaklaşım ile model simülasyon öngörülerinin LES gibi bir yaklaşımla doğrulanması hususunda makul bir araştırma sorusu bırakmaktadır. Ayrıca daha uzun

bir simülasyon periyodu daha açıklayıcı bir sonuç üretilmesini sağlayacaktır. Gelecek çalışmalarda tüm bunlar göz önüne alınacaktır.

7.3 Bölüm 5'e Ait Genel Sonuç ve Öneriler

Bölüm 5'e ait çalışmada belirlenen bir yama alanında arazi değişikliği sonucunda yama alanının merkezinde kurulan hipotetik rüzgar çiftliğinin rüzgar şiddeti, TKE ve hava sıcaklığı üzerindeki etkisi ile çiftlikteki güç üretimi değerlendirilmiştir. Kare biçimindeki yama alanı, yüzey değişikliği ile yüzey sürüklenme etkilerinin türbin rotorunun tepe yüksekliğine ulaşabilmesi için Mason ve diğ.'nin [122] çalışmasına dayanan yama kenar uzunluğu hesabı ile belirlenir. WRF v4.2.1 modelinde bu çalışma için kullanılan USGS arazi kullanım verisi yama alanında 7 arazi kullanımının mevcut olduğu göstermektedir. Bu alan içerisinde arazi kullanımında en yüksek orana sahip ilk iki ise sırasıyla kuru tarım (DC) ve yaprak döken geniş yapraklı orman (DBF) arazilerdir. Bu nedenle çalışmada belirlenen yama alanında sırasıyla tamamen DC ve tamamen DBF arazileri kullanılmıştır. İlk olarak bu yama alanındaki arazilerin merkezine hipotetik rüzgar çiftliğinin kurulması ile DC ve DBF simülasyonların değerlendirmeleri yapılmıştır ve sonrasında yama alanında USGS verisine göre DC oranı (%86) DBF'den (%8) yüksek olduğu için DC'den DBF'ye geçişte rüzgar çiftliğinin etkilerindeki ve güç üretimdeki değişim değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler özellikle rüzgar çiftlik etkisi daha belirgin kılabilmek üzere belirlenen 8 günlük periyot üzerinden ve gündüz / gece ayrımı yaparak iç model alanında zamansal ortalamalar, rüzgar çiftliğini temsil eden model hücrelerinde uzamsal ve zamansal-uzamsal ortalamalar ile yapılmıştır. Çalışmaya ait ana bulgular:

- Rüzgar çiftliğinin rüzgar şiddeti, TKE ve hava sıcaklığı gibi atmosferik sınır tabaka değişkenleri üzerindeki etkisi ele alındığında, tüm periyot üzerinden ve gündüz-gece ayrımı ile zamasal, uzamsal, zamansal-uzamsal ortalamaların değerlendirilmesi sonucunda, yama alanı tamamen DC'ye dönüştürüldüğünde rüzgar çiftlik etkilerinin yama alanının tamamen DBF'ye dönüştürülmesi ile gözlemlenen etkilerden daha kuvvetli olduğu ortaya konulmuştur. DC'den DBF'ye geçişte rüzgar çiftlik etkilerinin zayıflaması ormanlık alanın rüzgar akışını engelleyici etkisi ve daha yüksek türbülanslı yapısı sonucu rüzgar türbinlerinin daha zayıf iz alanı oluşturması ile ilişkilidir.

- Yukarıdaki bulgulara DC simülasyonunda rüzgar çiftliği etkileri daha büyük olmakla birlikte tüm periyot üzerinden ve gündüz-gece ayrımı ile zamsal, uzamsal, zamansal-uzamsal ortalamaların değerlendirilmesi sonucunda rüzgar çiftliğindeki güç üretiminde de DC simülasyonu DBF simülasyonuna göre daha yüksek güç üretimi sergilemektedir. Bu durum yama alanında DC’de serbest akıştaki rüzgar şiddetinin DBF’dekenden daha yüksek olması ile ilgilidir.

Bu bölüme ilişkin bulgular eğer atmosferik etkiler söz konusu ise geniş yapraklı ormanın rüzgar çiftliği etkilerini zayıflattığını ama eğer güç üretimi söz konusu ise kuru tarım arazisinin üretimi arttırdığını göstermektedir. Elbette çalışmada Fitch WFP’nin orijinal C_{TKE} hesabının kullanılması özellikle rüzgar çiftliğinin TKE ve hava sıcaklığı üzerinde daha yüksek etkiye neden olmaktadır. Buna ek olarak güç üretimi hesabında sadece türbin gövde yükseliği ve deniz seviyesindeki hava yoğunluğu ele alınmaktadır. Ayrıca hem rüzgar çiftliği etkisinde hem de güç üretiminde, rüzgar çiftliği hücrelerinde rüzgar türbinlerinin dizilimi ihmal edilmektedir ve aynı rüzgar koşuluna maruz kaldığı kabul edilmektedir. Tüm bu durumların göz önüne alınması rüzgar çiftliği etkileri ve güç üretimi simülasyonu konusunda daha yüksek doğrulukta öngörüler sağlayacaktır. Söz konusu durumlardan C_{TKE} hesabının revizyonu Bölüm 4’te ele alınmış olup belirlenen çalışma alanında ve periyodunda orijinal C_{TKE} hesabına göre özellikle TKE ve hava sıcaklığında daha uygun rüzgar çiftliği iz etkisi öngörülerin üretilmesini sağlamıştır. Gelecek araştırmalarda söz konusu diğer problemler (güç üretimi hesabı, türbinlerin dizilimin ihmalı) ele alınacaktır.

7.4 Bölüm 6’ya Ait Genel Sonuç ve Öneriler

Bu tez çalışmasının 6. Bölümünde 21-27 Ocak 2022 tarihinde etkili olan Elpis Fırtınasının özellikle 24-25 Ocak 2022 tarihinde İstanbul’u etkisi altına alan yoğun kar yağışı ve fırtınasında İstanbul’un kuzeyinde, Karadeniz’de, bir hipotetik rüzgar çiftliğinin kurulumunun kar yağışını nasıl etkilediği incelenmiştir. Kar yağışı dışında simülasyonlarda kullanılan türbin modelin ait türbin gövde yüksekliğinde rüzgar şiddetindeki değişim ile yere yakın seviyede (2 m) hava sıcaklığındaki değişim de incelemiştir. Rüzgar çiftliğinin ele alınan meteorolojik parametreler üzerindeki etkisinin değerlendirilmesinden önce bu parametelerde Elpis Fırtınasının İstanbul’un

kuvvetli şekilde etkilendiği 24-25 Ocak gününe ve bir gün öncesine, 23 Ocak gününe ait simüle edilmiş çevre koşulları değerlendirilmiştir. Simüle edilmiş çevre koşulların değerlendirilmesinden sonrasında kar yağışını ve ele alınan diğer parametreleri en kuvvetli şekilde etkileyecek rüzgar çiftliği konumu ve çiftlikte kullanılan türbin ebatı belirlenmiştir. İstanbul'un Avrupa yakasında Karadeniz'de konumlandırılmış rüzgar çiftliği bu çalışmada ele alınan parametreler açısından Asya yakasında Karadeniz'de konumlandırılmış rüzgar çiftliğinden daha büyük meteorolojik etki sergilediği ve buna ek olarak, rüzgar çiftliğinin konumu farketmeksizin daha büyük ebatlı rüzgar türbin modelinin kullanımı (Siemens SWT6.0-154) diğer türbin modelinin kullanımına (Siemens SWT3.6-120) göre daha büyük rüzgar çiftlik etkisine neden olduğu ortaya konmuştur. Bu nedenle, rüzgar çiftlik etkisinin detaylı değerlendirilmesinde, İstanbul'un Avrupa yakasında Karadeniz'de büyük ebatlı rüzgar türbin modeli ile kurulmuş hipotetik rüzgar çiftliği simülasyonlarına ait sonuçlar ele alınmıştır. Ek olarak, bu simülasyon sonuçları ile mevcut meteorolojik hadisede rüzgar çiftliğinin konumu ve çiftlikte kullanılan türbin ebatlarının önemli vurgulanmaktadır. Simüle edilmiş çevre koşullarının ve hipotetik rüzgar çiftliğinin kar yağışı ve diğer parametreler üzerindeki etkisinin değerlendirilmesinde periyot ortalamaları (23-25 Ocak ortalaması) ve günlük ortalamalar ele alınmıştır. Bu bölümün temelini oluşturan rüzgar çiftliğinin İstanbul'daki kar yağışı üzerindeki etkisi esas alındığında günlük periyot ortalamasında kar yağışının etkisine paralel olarak rüzgar çiftliğinin etkisinin de değiştiği tespit edilmiştir. Periyodun ikinci günü 24 Ocak'ta rüzgar çiftliğinin etkisindeki kar yağışındaki değişim İstanbul'un kuzeyinde ve Karadeniz'de etkili iken ertesi gün 25 Ocak ortalamasında tüm çiftliğin tüm İstanbul ve Karadeniz üzerindeki kar yağışını etkilediği gözlemlenmiştir. Rüzgar çiftlik etkisindeki kar yağışındaki değişimin periyot boyunca -17 mm ile 20 mm arasında değiştiği bulunmuştur. Periyot ortalamasındaki değişim ise -11 mm ile 14 mm arasında bulunmuştur. İstanbul üzerinde rüzgar çiftliğinin kar yağışını en çok etkilediği bölgeler genel olarak Avrupa yakasında Çatalca, Silivri, Büyükçekmece ve Arnavutköy iken Asya yakasında Beykoz ve Şile ile birlikte İstanbul Boğazı'nın kıyı ilçeleridir. Rüzgar çiftliğinin kar yağışını etkilemesiyle beraber kar kalınlığındaki değişim periyot boyunca -9 cm ile 9 cm arasında değişmektedir. Periyot ortalamasındaki değişim ise -4 cm ile 4 cm arasında bulunmuştur.

Rüzgar çiftliklerinin rüzgar şiddetini, TKE'yi, hava sıcaklığını, nemi ve bir cephesel fırtına sınırını [125] ve hatta bir kasırganın bıraktığı kuvvetli yağışı [124] nasıl etkilediği ve değiştirdiğini ortaya koyan çalışmalar ile birlikte İstanbul'u da etkileyen böyle bir meteorolojik olayın (Elpis Fırtınası) neden olduğu yoğun kar yağışında hipotetik bir rüzgar çiftliğinin kar yağışını nasıl etkilediğini ve değiştirdiğini gösterebilmek bilimsel açıdan önem arz etmektedir. Bu çalışmada, ayrıca, rüzgar çiftliğinin kar yağışı üzerindeki etkisinin ortaya konmasında çiftlik konumunun ve çiftlikte kullanılan türbin ebatının önemi de vurgulanmıştır. Ancak, türbin sayısı ve türbinler arası mesafe açısından rüzgar çiftlik ebatının kar yağışını nasıl etkileyeceği bu çalışmada ortaya konmamıştır. Ek olarak, bu alt çalışma tek bir kar yağışı olayını ele almıştır. Rüzgar çiftliklerinin kar yağışı üzerindeki etkisinin genelleştirilebilmesi için birden fazla kar yağışı olayının ele alınması gerekmektedir. Gelecek çalışmada bunların ele alınması önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Vermeer, L., Sørensen, J. & Crespo, A.** (1979). Wind turbine wake aerodynamics. *Progress in Aerospace Science*, 39, 467-510.
- [2] **Crespo, A. & Hernández, J.** (1986). Turbulence characteristics in wind-turbine wakes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 61(1), 71-85.
- [3] **Stull, R.B.** (2012). An Introduction to Boundary Layer Meteorology, vol 13. Springer, New York.
- [4] **Christiansen, M.B., Hasager, C.B.** (2005). Wake effects of large offshore wind farms identified from satellite SAR. *Remote Sensing of Environment*, 98(2), 251-268.
- [5] **Hasager, C., Vincent, P., Badger, J., Badger, M., Di Bella, A., Peña, A., Husson, R. & Volker, P.** (2015). Using satellite SAR to characterize the wind flow around offshore wind farms. *Energies*, 8(6), 5413–5439.
- [6] **Platis, A., Siedersleben, S.K., Bange, J., Lampert, A., Bärfuss, K., Hankers, R., Cañadillas, B., Foreman, R., Schulz-Stellenfleth, J., Djath, B., Neumann, T. & Emeis, S.** (2018). First in situ evidence of wakes in the far field behind offshore wind farms. *Scientific Reports*, 8(1), 2163.
- [7] **Lundquist, J.K., DuVivier, K.K., Kaffine, D. & Tomaszewski, J.M.** (2019). Cost and consequences of wind turbine wake effects arising from uncoordinated wind energy development. *Nature Energy*, 4, 26-34.
- [8] **Baidya Roy, S.** (2004). Can large wind farms affect local meteorology? *Journal of Geophysical Research*, 109(D19):D19101.
- [9] **Baidya Roy, S. & Traiteur, J.J.** (2010). Impacts of wind farms on surface air temperatures. *The Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(42), 17899–17904.
- [10] **Smith, C.M., Barthelmie, R.J. & Pryor, S.C.** (2013). In situ observations of the influence of a large onshore wind farm on near-surface temperature, turbulence intensity and wind speed profiles. *Environmental Research Letters*, 8(3):034006.
- [11] **Rajewski, D.A., Takle, E.S., Lundquist, J.K., Oncley, S., Prueger, J.H., Horst, T.W., Rhodes, M.E., Pfeiffer, R., Hatfield, J.L., Spoth, K.K. & Doorenbos, R.K.** (2013). Crop wind energy experiment (CWEX): Observations of surface-layer, boundary layer, and mesoscale interactions with a wind farm. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94, 655–672.

- [12] **Slawsky, L.M., Zhou, L., Baidya Roy, S., Xia, G., Vuille, M. & Harris, R.A.** (2015). Observed thermal impacts of wind farms over Northern Illinois. *Sensors*, 15, 14981–15005.
- [13] **Armstrong, A., Burton, R.R., Lee, S.E., Mobbs, S., Ostle, N., Smith, V., & Whitaker, J.** (2016). Ground-level climate at a peatland wind farm in Scotland is affected by wind turbine operation. *Environmental Research Letters*, 11, 044024.
- [14] **Xia, G., Zhou, L., Freedman, J. & Baidya Roy, S.** (2016). A case study of effects of atmospheric boundary layer turbulence, wind speed, and stability on wind farm induced temperature changes using observations from a field. *Climate Dynamics*, 46, 2179–2196.
- [15] **Walsh-Thomas, J.M., Cervone, G., Agouris, P. & Manca, G.** (2012) Further evidence of impacts of large-scale wind farms on land surface temperature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 6432–6437.
- [16] **Zhou, L., Tian, Y., Baidya Roy, S., Thorncroft, C., Bosart, L.F. & Hu, Y.** (2012). Impacts of wind farms on land surface temperature. *Nature Climate Change*, 2, 539–543.
- [17] **Zhou, L., Tian, Y., Baidya Roy, S., Dai, Y., & Chen, H.** (2013a). Diurnal and seasonal variations of wind farm impacts on land surface temperature over Western Texas. *Climate Dynamics*, 41, 307–326.
- [18] **Harris, R.A., Zhou, L. & Xia, G.** (2014). Satellite observations of wind farm impacts on nocturnal land surface temperature in Iowa. *Remote Sensing*, 6, 12234–12246.
- [19] **Chang, R., Zhu, R., & Guo, P.** (2016) A case study of land-surface-temperature impact from large-scale deployment of wind farms in China from Guazhou. *Remote Sensing*, 8, 790.
- [20] **Qin, Y., Li, Y., Xu, R., Hou, C., Armstrong, A., Bach, E., Wang, Y. & Fu, B.** (2022). Impacts of 319 wind farms on surface temperature and vegetation in United States. *Environmental Research Letters*, 17, 024026.
- [21] **Liu, N., Zhao, X., Zhang, X., Zhao, J., Wang, H. & Wu, D.** (2022). Heterogeneous warming impacts of desert wind farms on land surface temperature and their potential drivers in Northern China. *Environmental Research Communications*, 4, 105006.
- [22] **Cervarich, M.C., Baidya Roy, S. & Zhou, L.** (2013). Spatiotemporal structure of wind farm-atmospheric boundary layer interactions. *Energy Procedia*, 40, 530–536.
- [23] **Fitch, A.C., Lundquist, J.K. & Olson, J.B.** (2013a). Mesoscale influences of wind farms throughout a diurnal cycle. *Monthly Weather Review*, 141(7), 2173–2198.
- [24] **Xia, G., Cervarich, M., Baidya Roy, S., Zhou, L., Minder, J., Freedom, J.M., & Jiménez, P.A.** (2017). Simulating impacts of real-world wind farms on land surface temperature using WRF model: Validation with MODIS observations. *Monthly Weather Review*, 145, 4813–4836.

- [25] **Xia, G., Zhou, L., Minder, J.R., Fovell, R.G. & Jimenez, P.A.** (2019). Simulating impacts of real-world wind farms on land surface temperature using the WRF model: Physical mechanisms. *Climate Dynamics*, 53, 1723–1739.
- [26] **Tomaszewski, J.M. & Lundquist, J.K.** (2020). Simulated wind farm wake sensitivity to configuration choices in the Weather Research and Forecasting model version 3.8.1. *Geoscientific Model Development*, 13, 2645–2662.
- [27] **Golbazi, M., Archer, C.L. & Alessandrini, S.** (2022). Surface impacts of large offshore wind farms. *Environmental Research Letters*, 17, 064021.
- [28] **Ruan, Z., Lu, X., Wang, S., Xing, J., Wang, W., Chen, D., Nielsen, C.P., Luo, Y., He, K & Hao, J.** (2022). Impacts of large-scale deployment of mountainous wind farms on wintertime regional air quality in the Beijing-Tian-Hebei area. *Atmospheric Environment*, 278, 119074.
- [29] **Siedersleben, S.K., Lundquist, J.K., Platis, A., Bange, J., Bärffuss, K., Lampert, A., Cañadillas, B., Neumann, T. & Emeis, S.** (2018a). Micrometeorological impacts of offshore wind farms as seen in observations and simulations. *Environmental Research Letters*, 13(12), 124012.
- [30] **Freedman, J.M., Flores, I., Zack, J., Schroeder, J., Ancell, B., Brewster, K., Basu, S., Banunarayanan, V. & Ela, E.** (2014). The wind forecast improvement project (WFIP): A public/private partnership for improving short term wind energy forecasts and quantifying the benefits of utility operations—The southern study area. *AWS Truepower Final Technical Report*, DOE (Department of Energy, USA).
- [31] **Henschen, M.F., Herrholtz, B., Rhudy, L., Demchak, K., Doogs, B., Holland, J., Larson, E., Martin, J. & Rudkin, M.** (2011). DoWind Turbines Affect Weather Conditions? A Case Study in Indiana. *Journal of Purdue Undergrad. Research*, 1, 22–29.
- [32] **Rajewski, D., Takle, E., VanLoocke, A. & Purdy, S.** (2016). Observations show that wind farms substantially modify the atmospheric boundary layer thermal stratification transition in the early evening. *Geophysical Research Letters*, 47, e2019GL086010.
- [33] **Takle, E.S., Rajewski, D.A. & Purdy, S.L.** (2019). The iowa atmospheric observatory: Revealing the unique boundary layer characteristics of a wind farm. *Earth Interactions*, 23, 1–27.
- [34] **Emeis, S., Siedersleben, S., Lampert, A., Platis, A., Bange, J., Djath, B., Stellenfleth, J.S. & Neumann, T.** (2016). Exploring the wakes of large offshore wind farms. *Journal of Physics: Conference Series*, 753, 92014.
- [35] **Lampert, A., Bärffuss, K., Platis, A., Siedersleben, S., Djath, B., Cañadillas, B., Hunger, R., Hankers, R., Bitter, M., Feuerle, T., ve diğ.** (2020). In situ airborne measurements of atmospheric and sea surface parameters related to offshore wind parks in the german bight. *Earth Systems Science Data*, 12, 935–946.

- [36] **Adkins, K.A. & Sescu, A.** (2017). Observations of relative humidity in the near-wake of a wind turbine using an instrumented unmanned aerial system. *International Journal of Green Energy*, 14, 845–860.
- [37] **Adkins, K.** (2017). Analysis of Near-Surface Relative Humidity in a Wind Turbine Array Boundary Layer Using an Instrumented Unmanned Aerial System and Large-Eddy Simulation. Ph.D. Dissertation, Mississippi State University, Starkville, MS, USA.
- [38] **Pryor, S.C., Barthelmie, R.J., Hahmann, A., Shepherd, T.J. & Volker, P.** (2018). Downstream effects from contemporary wind turbine deployments. *Journal of Physics: Conference Series*, 1037, 072010.
- [39] **Pryor, S.C., Barthelmie, R.J. & Shepherd, T.J.** (2018). The influence of real-world wind turbine deployments on local to mesoscale climate. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 123, 5804–5826.
- [40] **Shepherd, T.J., Barthelmie, R.J. & Pryor, S.C.** (2020). Sensitivity of wind turbine array downstream effects to the parameterization used in WRF. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 59, 333–361.
- [41] **Haywood, J., Sescu, A. & Adkins, K.** (2020). Large eddy simulation study of the humidity variation in the shadow of a large wind farm. *Wind Energy*, 23, 423–431.
- [42] **Mangara, R.J., Guo, Z. & Li, S.** (2019). Performance of the wind farm parametrization scheme coupled with Weather Research and Forecasting model under multiple resolution regimes for simulating an onshore wind farm. *Advances in Atmos Sciences*, 36, 119–132.
- [43] **Wang, G., Li, G. & Liu, Z.** (2022). Wind farms dry soil in temporal and spatial variation. *Science of the Total Environment*, 857, 159293
- [44] **Li, S., Huang, T., Mo, J., Li, J., Zhang, X., Du, J., Tao, S., Liu, J., Jiang, W., Lian, L., Gao, H., Mao, X., Zhao, Y. & Ma, J.** (2020). Do large-scale wind farms affect air quality forecast? Modeling evidence in Northern China. *Atmospheric Chemistry and Physics (Discussion)*, 2020, 1–35.
- [45] **Mo, J., Huang, T., Zhang, X., Zhao, Y., Liu, X., Li, J., Gao, H. & Ma, J.** (2017). Spatiotemporal distribution of nitrogen dioxide within and around a large-scale wind farm – a numerical case study. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 14239–14252.
- [46] **Wang, Q., Luo, K., Weu, C. & Fan, J.** (2019). Impact of substantial wind farms on the local and regional atmospheric boundary layer: Case study of Zhangbei wind power base in China. *Energy*, 183, 1136–1149.
- [47] **Kaytancı, T., Menteş, Ş.S. & Ünal, Y.** (2022). Simulating the impacts of wind farm wake under the changes in MYNN planetary boundary layer scheme in high resolution Weather Research and Forecasting model. *Atmosphere*, 13, 1838.
- [48] **Ivanova, L.A. & Nadyozhina, E.D.** (2000). Numerical simulation of wind farm influence on wind flow. *Wind Engineering* 24(4), 257–269.

- [49] **Keith, D.W., DeCarolis, J.F., Denkenberger, D.C., Lenschow, D.H., Malyshev, S.L., Pacala, S. & Rasch, P.J.** (2004) The influence of large-scale wind power on global climate. *The Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(46), 16115–16120.
- [50] **Kirk-Davidoff, D.B. & Keith, D.W.** (2008). On the climate impact of surface roughness anomalies. *Journal of Atmospheric Sciences*, 65(7), 2215–2234.
- [51] **Barrie, D.B. & Kirk-Davidoff, D.B.** (2010). Weather response to a large wind turbine array. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(2):769–775.
- [52] **Wang, C. & Prinn, R.G.** (2010). Potential climatic impacts and reliability of very large-scale wind farms. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(4), 2053–2061.
- [53] **Wang, C. & Prinn, R.G.** (2011). Potential climatic impacts and reliability of large-scale offshore wind farms. *Environmental Research Letters*, 6(2):025, 101.
- [54] **Jacobson, M.Z. & Archer, C.L.** (2012). Saturation wind power potential and its implications for wind energy. *The Proceedings of the National Academy of Sciences*.
- [55] **Adams, A.S. & Keith, D.W.** (2013) Are global wind power resource estimates overstated? *Environmental Research Letters*, 8(1):015, 021.
- [56] **Li, Y., Kalnay, E., Motesharrei, S., Rivas, J., Kucharski, F., Davidoff, D.F., Bach, E., & Zeng, N.** (2018). Climate model shows large-scale wind and solar farms in the Sahara increase rain and vegetation. *Science*, 361, 1019–1022.
- [57] **Vautard, R., Thais, F., Tobin, I., Breon, F.M., de Lavergne, J.G.D., Colette, A., Yiou, P. & Ruti, P.M.** (2014). Regional climate model simulations indicate limited climatic impacts by operational and planned European wind farms. *Nature Communications*, 5, 3196.
- [58] **Miller, L.M. & Keith, D.W.** (2018). Climatic impacts of wind power. *Joule*, 2, 2618–2632.
- [59] **Huang, J.-B., Lou, P.-K., Sun, H.-W., Luo Y., & Zhao Z.-C.** (2019). Numerical experimental study on the potential climatic impacts of large-scale wind farms in China. *Advances in Climate Change Research*, 10, 143–149.
- [60] **Pryor, S.C., Barthelmie, R.J. & Shepherd, T.J.** (2020). 20% of US electricity from wind will have limited impacts on system efficiency and regional climate. *Scientific Reports*, 10, 1–14.
- [61] **Ivanova, L.A. & Nadyozhina, E.D.** (1998). Wind flow deformation inside the wind farm. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 74–76, 389–397.
- [62] **Frandsen, S.T., Jørgensen, H.E., Rathmann, O., Badger, J., Ott, S., Rethore, P.E., Larsen, S.E., Barthelmie, R., Hansen, K. & Jensen, L.E.** (2009). The making of a second-generation wind farm efficiency model complex. *Wind Energy*, 12(5), 445–458.

- [63] **Fitch, A.C., Olson, J.B., & Lundquist, J.K.** (2013b). Parameterization of wind farms in climate models. *Journal of Climate*, 26, 6439–6458.
- [64] **Fitch, A.C.** (2015). Climate impacts of large-scale wind farms as parameterized in a global climate model. *Journal of Climate*, 28(15), 6160–6180.
- [65] **Blahak, U., Goretzki, B. & Meis, J.** (2010). A simple parameterization of drag forces induced by large wind farms for numerical weather prediction models. *European Wind Energy Conference and Exhibition*, 6(1), 4577–4585.
- [66] **Fitch, A.C., Olson, J.B., Lundquist, J.K., Dudhia, J., Gupta, A.K., Michalakes, J. & Barstad, I.** (2012). Local and mesoscale impacts of wind farms as parameterized in a mesoscale NWP Model. *Monthly Weather Review*, 140(9), 3017–3038.
- [67] **Adams, A.S. & Keith, D.W.** (2013). Are global wind power resource estimates overstated? *Environmental Research Letters*. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015021>.
- [68] **Abkar, M. & Porté-Agel, F.** (2015b). A new wind-farm parameterization for large-scale atmospheric models. *Journal of Renewable Sustainable Energy*, 7(1), 013121.
- [69] **Boettcher, M., Hoffmann, P., Lenhart, H.J., Schlünzen, K.H. & Schoetter, R.** (2015). Influence of large offshore wind farms on North German climate. *Meteorologische Zeitschrift*, 24(5), 465–480.
- [70] **Volker, P.J.H., Badger, J., Hahmann, A.N. & Ott, S.** (2015). The explicit wake parametrisation V1.0: a wind farm parametrisation in the mesoscale model WRF. *Geoscientific Model Development*, 8(11), 3715–3731.
- [71] **Pan, Y. & Archer, C.L.** (2018). A hybrid wind-farm parametrization for mesoscale and climate models. *Boundary-Layer Meteorology*, 168(3), 469–495.
- [72] **Redfern, S., Olson, J.B., Lundquist, J.K., Clack, C.T.M.** (2019). Incorporation of the rotor-equivalent wind speed into the weather research and forecasting model's wind farm parameterization. *Monthly Weather Review*, 147(3), 1029–1046.
- [73] **Fischereit, J., Brow, R., Larsen, X.G., Badger, J. & Hawkes G.** (2021). Review of mesoscale wind-farm parametrization and their applications. *Boundary-Layer Meteorology*, 182, 175–224.
- [74] **Porté-Agel, F., Bastankhah, M. & Shamsoddin, S.** (2020). Wind-turbine and wind-farm flows: a review. *Boundary-Layer Meteorology*, 174(1), 1–59.
- [75] **Abkar, M. & Porté-Agel, F.** (2015b). A new wind-farm parameterization for large-scale atmospheric models. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 7(1):013, 121.
- [76] **Baidya Roy, S.** (2011). Simulating impacts of wind farms on local hydrometeorology. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99(4), 491–498.

- [77] **Larsén, X.G. & Fischereit, J.** (2021). A case study of wind farm effects using two wake parametrizations in the Weather Research and Forecasting (WRF) model (V3.7.1) in the presence of low-level jets. *Geoscientific Model Development*, 14, 3141-3158.
- [78] **Pryor, S.C., Shepherd, T.J., Volker, P.J.H., Hahmann, A.N. & Barthelmie, R.J.** (2020). “Wind Theft” from onshore wind turbine arrays: sensitivity to wind farm parameterization and resolution. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 59(1), 153–174.
- [79] **Nakanishi, M. & Niino, H.** (2009). Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer. *Journal of Meteorological Society of Japan*, 87, 895–912.
- [80] **Siedersleben, S.K., Platis, A., Lundquist, J.K., Djath, B., Lampert, A., Barfuss, K., Canadillas, B., Schulz-Stellenfleth, J., Banges, J., Neumann, T., ve diğ.** (2020). Turbulent kinetic energy over large offshore wind farms observed and simulated by the mesoscale model WRF (3.8.1). *Geoscientific Model Development*, 13, 249–268.
- [81] **Archer, C.L., Wu, S., Ma, Y. & Jimenez, P.A.** (2020). Two corrections for turbulent kinetic energy generated by wind farms in the WRF model. *Monthly Weather Review*, 148, 4823–4835.
- [82] **Skamarock, W., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D., Barker, D., Duda, M., Huang, X., Wang, W. & Powers, J.** (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3. *NCAR Technical Note*, NCAR: Boulder, CO, USA.
- [83] **Olson, J.B., Kenyon, J.S., Angevine, W.A., Brown, J.M., Mariusz, P. & Sušelj, K.** (2019). A Description of theMYNN-EDMF Scheme and the Coupling to Other Components inWRF-ARW. *NOAA Technical Memorandum OAR GSD-61*, NOAA: Silver Spring, MD, USA.
- [84] **Copernicus Climate Change Service (C3S): ERA5 Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate, Copernicus Climate Change Service Climate Data Store.** Erişim adresi: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>. Erişim Zamanı: 14 November 2018.
- [85] **Hahmann, A.N., Sile, T., Witha, B., Davis, N.N., Dörenkämper, M., Ezber, Y., García-Bustamante, E., González Rouco, J.F., Navarro, J., Olsen, B.T., ve diğ.** (2020). New European wind atlas, part 1: Model sensitivity. *Geoscientific Model Development*, 13, 5053–5078.
- [86] **Eriksson, O., Lindvall, J., Breton, S.P. & Ivanell, S.** (2015). Wake downstream of the Lillgrund wind farm—A Comparison between LES using the actuator disc method and aWind farm Parametrization in WRF. *Journal of Physics: Conference Series*, 625, 012028.
- [87] **Jimenez, P.A., Navarro, J., Palomares, A.M. & Dudhia, J.** (2015). Mesoscale modeling of offshore wind turbine wakes at the wind farm resolving scale: A composite-based analysis with the Weather Research and Forecasting model over Horns Rev: Mesoscale modeling at the wind farm resolving scale. *Wind Energy*, 18, 559–566.

- [88] **Miller, L.M., Brunsell, N.A., Mechem, D.B., Gans, F., Monaghan, A.J., Vautard, R., Keith, D.W. & Kleidon, A.** (2015). Two methods for estimating limits to large-scale wind power generation. *The Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112, 11169–11174.
- [89] **Wanderwende, B.J.; Kosovic, B.; Lundquist, J.K.; Mirocha, J.D.** (2016). Simulating the effects of a wind-turbine arrays using LES and RAS: Simulating turbines using LES and RANS. *Journal of Advances in Model Earth Systems*, 8, 1376–1390.
- [90] **Vanderwende, B.J. & Lundquist, J.K.** (2016). Could crop height affect the wind resource at agriculturally productive wind farm sites? *Boundary-Layer Meteorology*, 158, 409–428.
- [91] **Sun, H., Luo, Y. & Chang, R.** (2018). The impacts of Chinese wind farms on climate. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 123, 5177–5187.
- [92] **Lee, J.C.Y. & Lundquist, J.K.** (2017). Evaluation of the wind farm parametrization in Weather Research and Forecasting model (version 3.8.1) with meteorological and turbine power data. *Geoscientific Model Development*, 10, 4229–4244.
- [93] **Witha, B., Hahmann, A., Sile, T., Dörenkämper, M., Ezber, Y., García-Bustamante, E., González-Rouco, J.F., Leroy, G. & Navarro, J.** (2019). WRF model sensitivity studies and specifications for the NEWA mesoscale wind atlas production runs. *Zenodo*.
- [94] **Iacono, M.J., Delamere, J.S., Mlawer, E.J., Shephard, M.W., Clough, S.A. & Collins, W.D.** (2008). Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research*, 113, D13103.
- [95] **Hong, S.Y., Dudhia, J. & Chen, S.H.** (2004). A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parametrization of clouds and precipitation. *Monthly Weather Review*, 132, 103–120.
- [96] **Kain, J.S.** (2004). The Kain-Fritsch convective parametrization: An update. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 43, 170–181.
- [97] **Ek, M.B., Mitchell, K.E., Lin, Y., Rogers, E., Grunmann, P., Koren, V., Gayno, G. & Tarpley, J.D.** (2003). Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 108, 2002jd003296.
- [98] **Manwell, J.F., McGowan, J.G. & Rogers, A.I.** (2002). *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. Wiley, NJ, USA, 2002.
- [99] **Gupta, T. & Baidya Roy, S.** (2021). Recovery processes in a large offshore wind farm. *Wind Energy Science*, 6, 1089–1106.
- [100] **Wu, Y.T. & Porté-Agel, F.** (2011). Large-Eddy Simulation of Wind-Turbine Wakes: Evaluation of Turbine Parametrisations. *Boundary-Layer Meteorology*, 138, 345–366.

- [101] **Xie, B., Hunt, J.C., Carruthers, D.J., Fung, J.C.H. & Barlow, J.F.** (2013). Structure of the planetary boundary layer over southeast England: Modeling and measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 118, 7799–7818.
- [102] **Pena, A. & Mirocha, J.D.** (2021). Comparison of large-eddy simulations of wakes with wind farm wake parametrizations using the Weather Research and Forecasting model. *Journal of Physics: Conference Series*, 1934, 012010.
- [103] **Porchetta, S., Munoz-Esparza, D., Munters, W., van Beeck, J. & van Lipzig, N.** (2021). Impact of ocean waves on offshore wind farm power production. *Renewable Energy*, 180, 1179-1193.
- [104] **Bodini, N., Lundquist, J.K. & Moriarty, P.** (2021). Wind plants can impact long-term local atmospheric conditions. *Scientific Reports*, 11, 22939.
- [105] **Fischereit, J., Larsen, X.G. & Hahmann, A.N.** (2022). Climatic impacts of wind-wave-wake interactions in offshore wind farms. *Frontiers in Energy Research*, 10, 881459.
- [106] **Rybchuk, A., Juliano, T.W., Lundquist, J.K, Rosencrans, D., Bodini, N. & Optis, M.** (2022). The sensitivity of the Fitch wind farm parametrization to a three-dimensional planetary boundary layer scheme. *Wind Energy Science*, 7, 2085-2098.
- [107] **Antonini, E.G.A. & Calderia, K.** (2021). Atmospheric pressure gradient and Coriolis force provides geophysical limits to power density of large wind farms. *Applied Energy*, 281, 116048.
- [108] **Golbazi, M., Archer, C.L. & Alessandrini S.** (2021). Surface impacts of large offshore wind farms. *Environmental Research Letters*, 17, 064021.
- [109] **Ma, Y., Archer, C.L. & Vassel-Be-Hug, A.** (2022). The Jensen wind farm parametrization. *Wind Energy Science*, 7, 2407-2431.
- [110] **Gupta, T. & Baidya Roy, S.** (2021). Recovery processes in a large offshore wind farm. *Wind Energy Science*, 6, 1089-1106.
- [111] **Gupta, T. & Baidya Roy, S.** (2021). Recovery processes in coastal wind farms under sea-breeze conditions. *Advances in Geosciences*, 56, 129-139.
- [112] **Wu, C., Luo, K., Wang, Q. & Fan, J.** (2022). A refined wind farm parametrization for the weather research and forecasting model. *Applied Energy*, 306, 118082.
- [113] **Wang, Q., Luo, K., Wu, C., Zhu, Z. & Fan J.** (2022). Mesoscale simulations of a real onshore wind power base in complex terrain: Wind farm wake behavior and power production. *Energy*, 241, 122873.
- [114] **Wang, Q., Luo, K., Wu, C., Mu, Y., Tan, J. & Fan, J.** (2022). Diurnal impact of atmospheric stability on inter-farm wake and power generation efficiency at neighboring onshore wind farms in complex terrain. *Energy Conversion and Management*, 267, 115897.
- [115] **Pryor, S.C., Barthelmie, R.J., Shepherd, T.J., Hahmann, A.N. & Garcia Santiago, O.M.** (2022). Wakes in and between very large offshore arrays. *Journal of Physics: Conference Series*, 2265, 022037.

- [116] **Pena, A., Mirocha, J.D. & van der Laan, A.P.** (2022). Evaluation of the Fitch wind-farm parametrization with large-eddy simulations of wakes using the Weather Research and Forecasting model. *Monthly Weather Review*, 150, 3051-3064.
- [117] **Ruan, Z., Lu, X., Wang, S., Xing, J., Wang, W., Chen, D., Nielsen, C.P., Luo, Y., He, K. & Hao, J.** (2022). Impacts of large-scale deployment of mountainous wind farms on wintertime regional air quality in the Beijing-Tian-Hebei area. *Atmospheric Environment*, 278, 119074.
- [118] **Adedipe, T. A., Chaudhari, A. & Kauranne, T.** (2020). Impact of different forest densities on atmospheric boundary-layer development and wind turbine wake. *Wind Energy*, 23, 1165-1180.
- [119] **Agafonova, O., Avramenko, A., Chaudhari, A. & Hellsten, A.** (2016). Effects of the canopy created velocity inflection in the wake development in a large wind turbine array. *Journal of Physics: Conference Series*, 753(3).
- [120] **Agafonova O.** (2017). A numerical study of forest influences on the atmospheric boundary-layer and wind turbines. PhD thesis. Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland.
- [121] **Adedipe, T., Chaudhari, A., Hellsten, A., Kauranne, T. & Haario, H.** (2022). Numerical Investigation on the Effects of Forest Heterogeneity on Wind-Turbine Wake. *Energies*, 15, 1896.
- [122] **Mason, P.J.** (1988). The formation of areally-averaged roughness lengths. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 114, 399–420
- [123] **Fahel, N. A. & Archer, C.L.** (2020). Observed onshore precipitation changes after the installation of offshore wind farms. *Bulletin of Atmospheric Science and Technology*, 1, 179–203.
- [124] **Pan, Y., Yan, C. & Archer C.L.** (2018). Precipitation reduction during Hurricane Harvey with simulated offshore wind farms. *Environmental Research Letters*, 13, 084007.
- [125] **Tomaszewski, J.M. & Lundquist, J.K.** (2021). Observations and simulations of a wind farm modifying a thunderstorm outflow boundary. *Wind Energy Science*, 6, 1-13.
- [126] **Lee, T.-Y., Wu, Y.-T., Kueh, M.-T., Lin, C.-Y., Lin, Y.-Y. & Sheng, Y.-F.** (2022). Impacts of offshore wind farms on the atmospheric environment over Taiwan Strait during an extreme weather typhoon event. *Scientific Reports*, 12, 823.
- [127] **Fiedler, B.H. & Bukovsky, M.S.** (2011). The effect of a giant wind farm on precipitation in a regional climate model. *Environmental Research Letters*, 6, 045101.
- [128] **Possner, A. & Calderia, K.** (2017). Geophysical potential for wind energy over the open oceans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(43), 11338-11343.

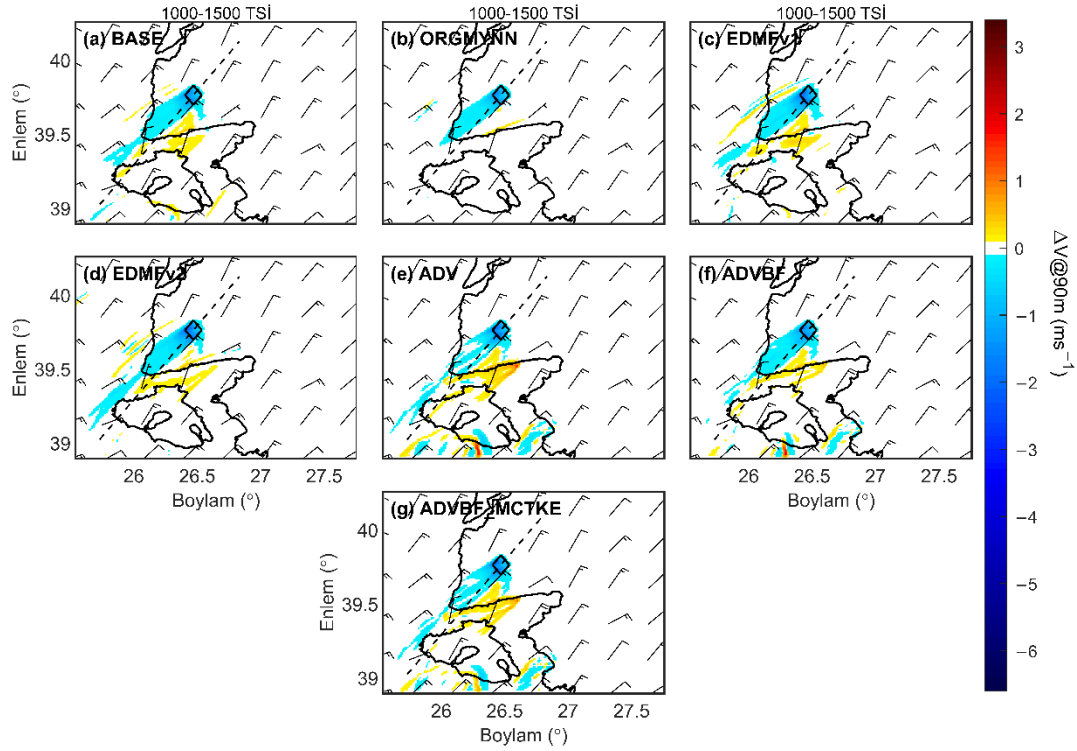
EKLER

EK A: Bölüm 3'e ait ek haritalar

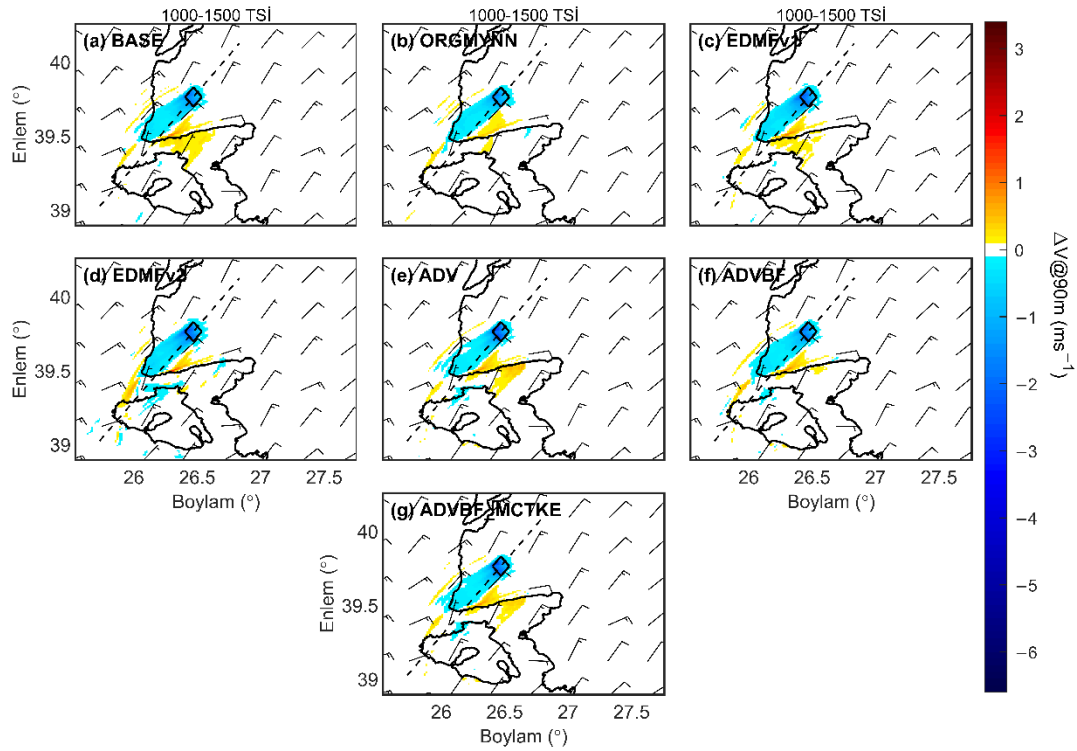
EK B: Bölüm 6'ya ait ek haritalar



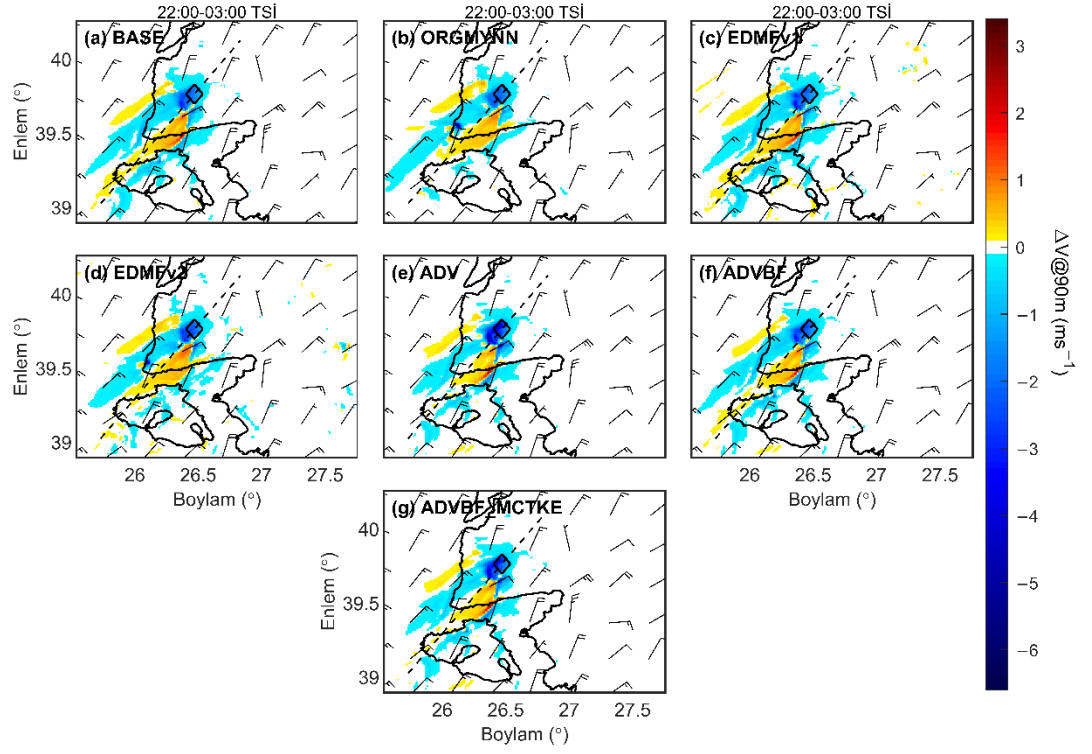
EK A : Bölüm 3'e ait ek haritalar



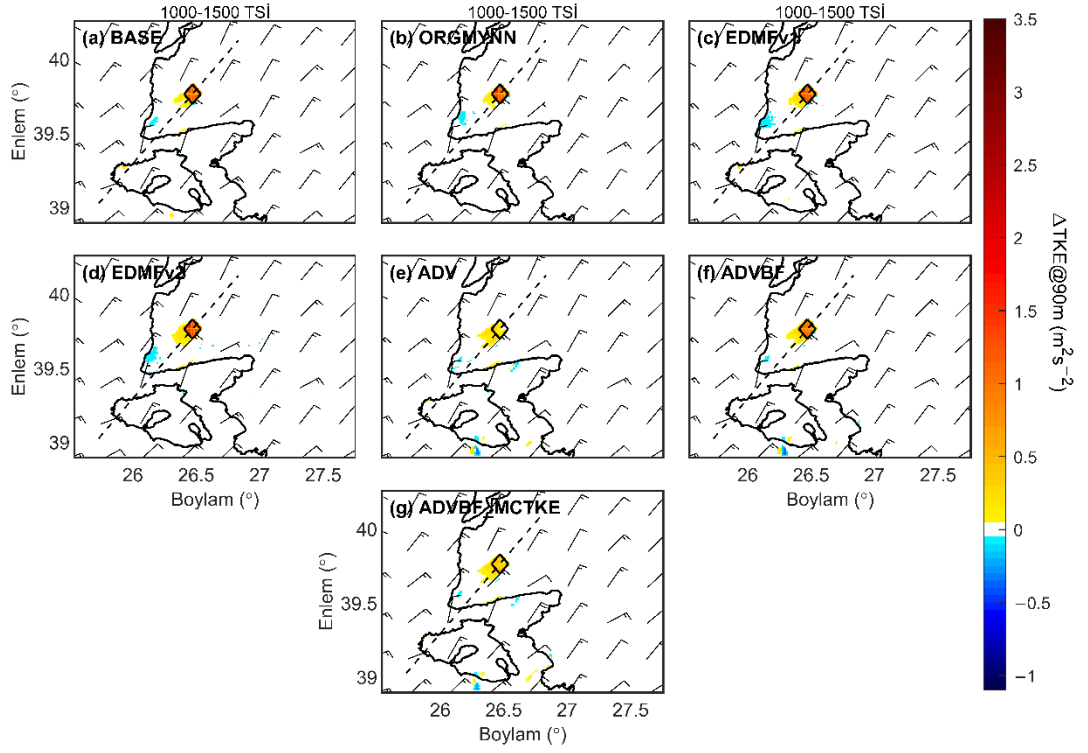
Şekil A.1 : Şekil 3.7 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak 17 temmuz gündüz (10:00 – 15:00 TSi) ortalamasını temsil etmektedir.



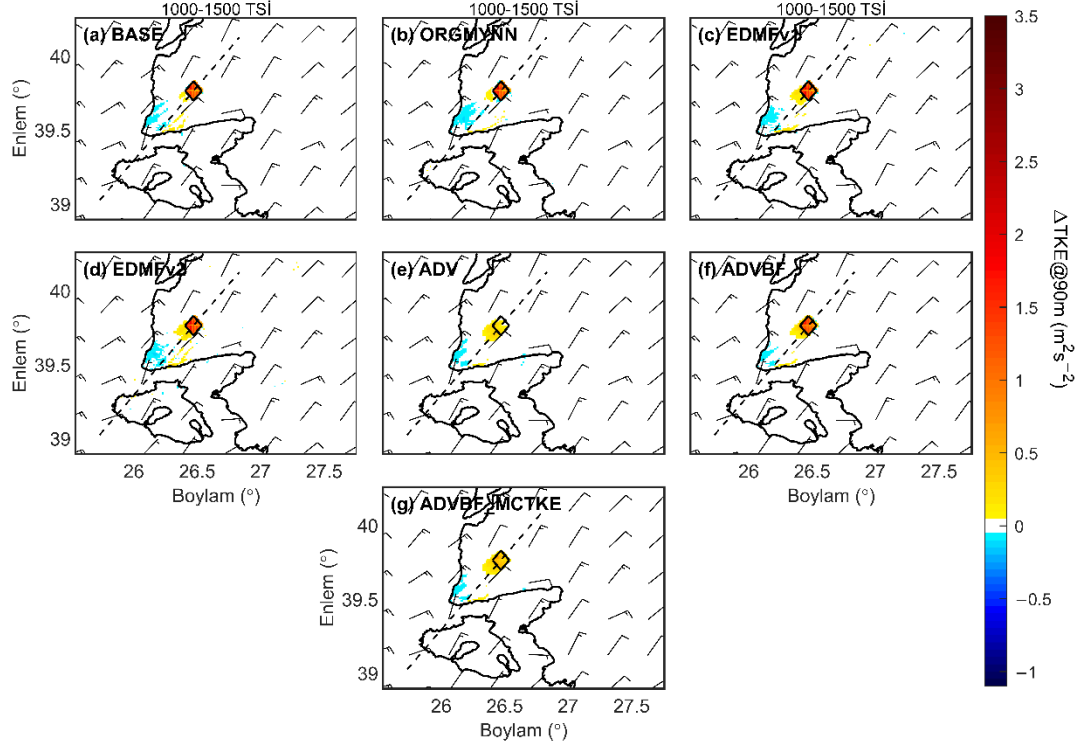
Şekil A.2 : Şekil 3.7 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak 18 temmuz gündüz (10:00 – 15:00 TSi) ortalamasını temsil etmektedir



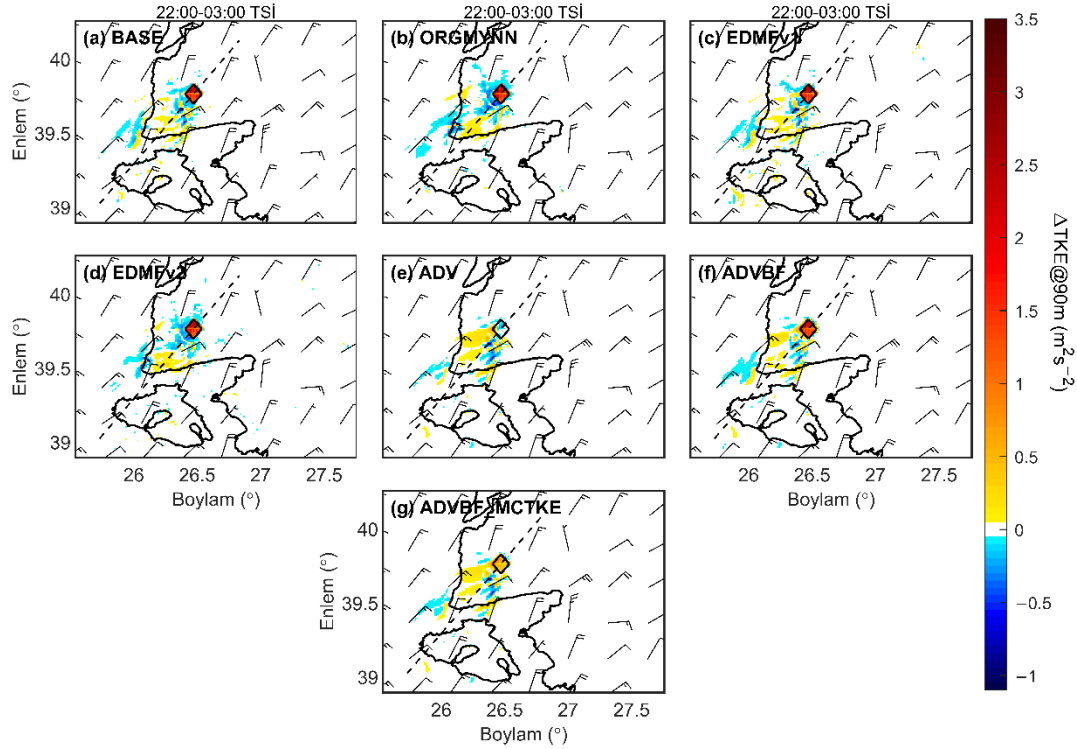
Şekil A.3 : Şekil 3.7 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak 18 temmuz gündüz (22:00 – 03:00 TSI) ortalamasını temsil etmektedir



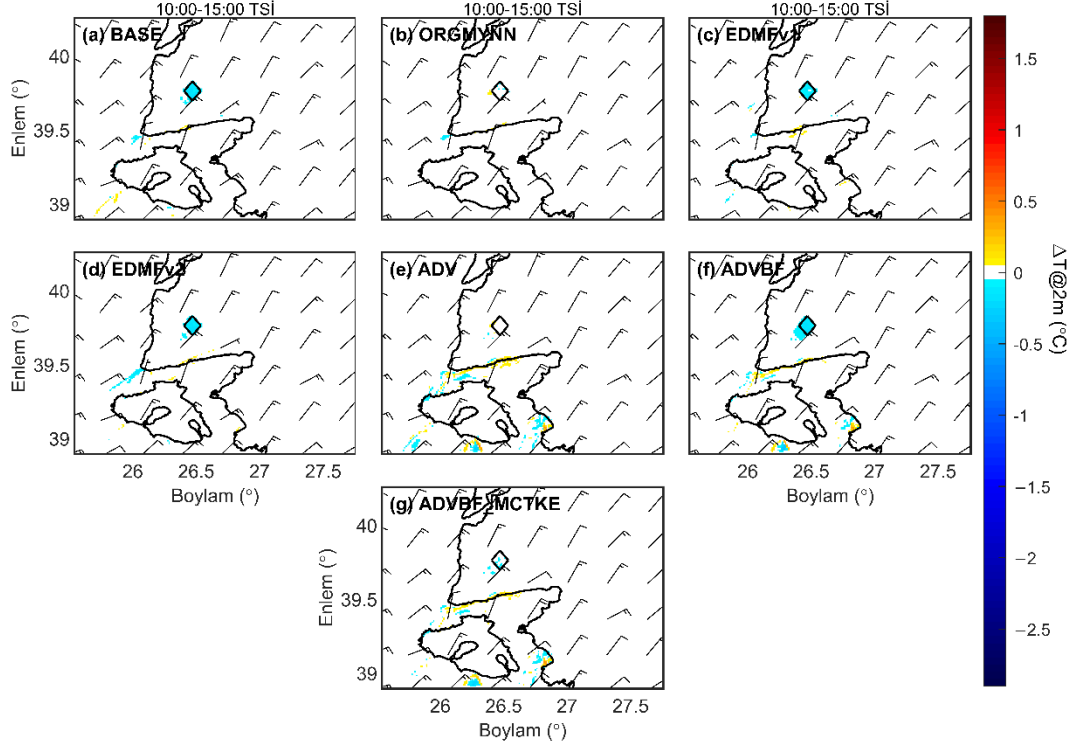
Şekil A.4 : Şekil 3.7 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak 90 m TKE için 17 temmuz gündüz (10:00 – 15:00 TSI) ortalamasını temsil etmektedir.



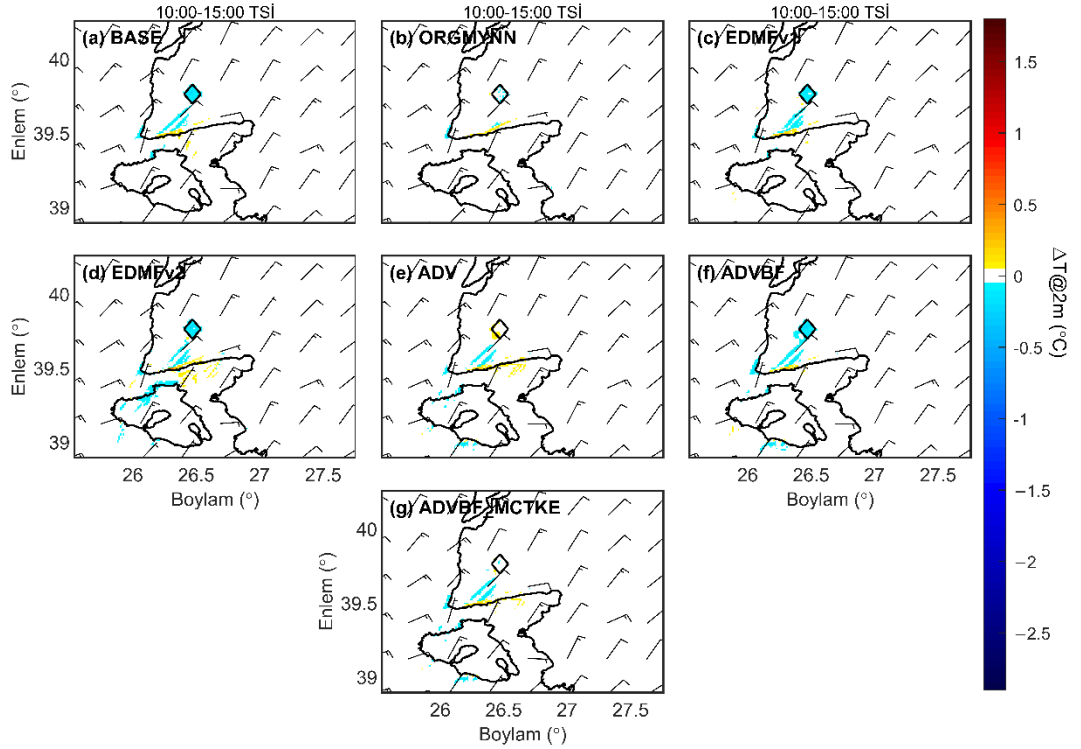
Şekil A.5 : Şekil 3.7 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak 90 m TKE için 18 temmuz gündüz (10:00 – 15:00 TSI) ortalamasını temsil etmektedir.



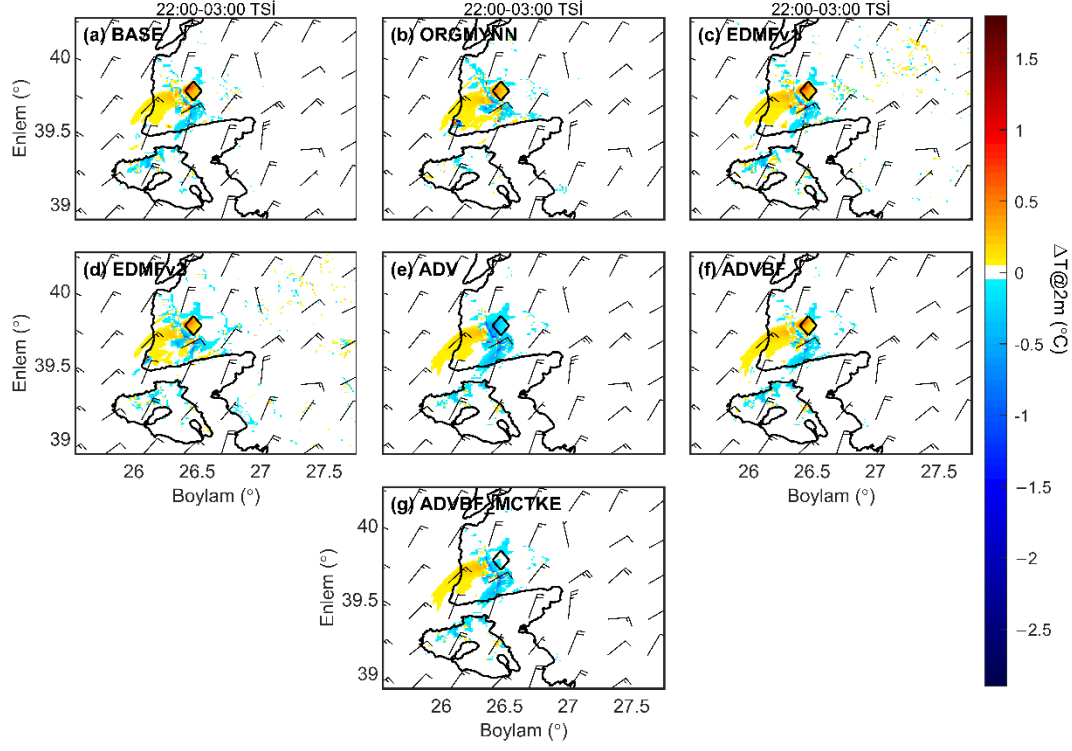
Şekil A.6 : Şekil 3.7 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak 90 m TKE için 18 temmuz gündüz (22:00 – 03:00 TSI) ortalamasını temsil etmektedir



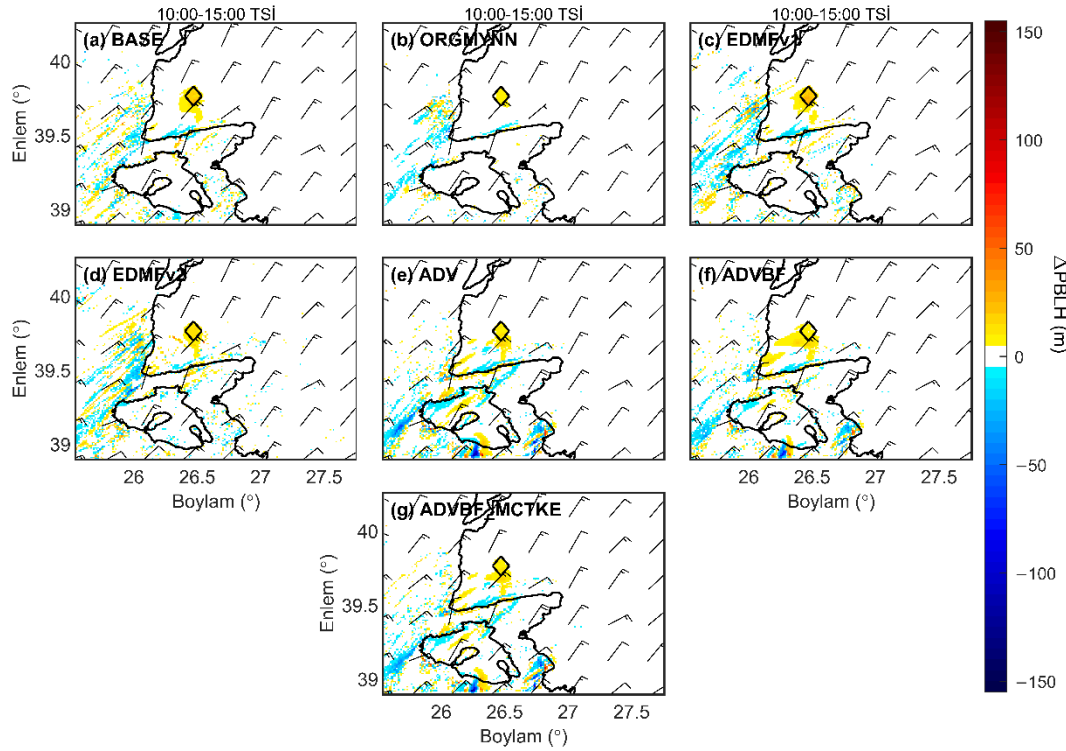
Şekil A.7 : Şekil 3.7 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak 2 m hava sıcaklığı için 17 temmuz gündüz (10:00 – 15:00 TSİ) ortalamasını temsil etmektedir.



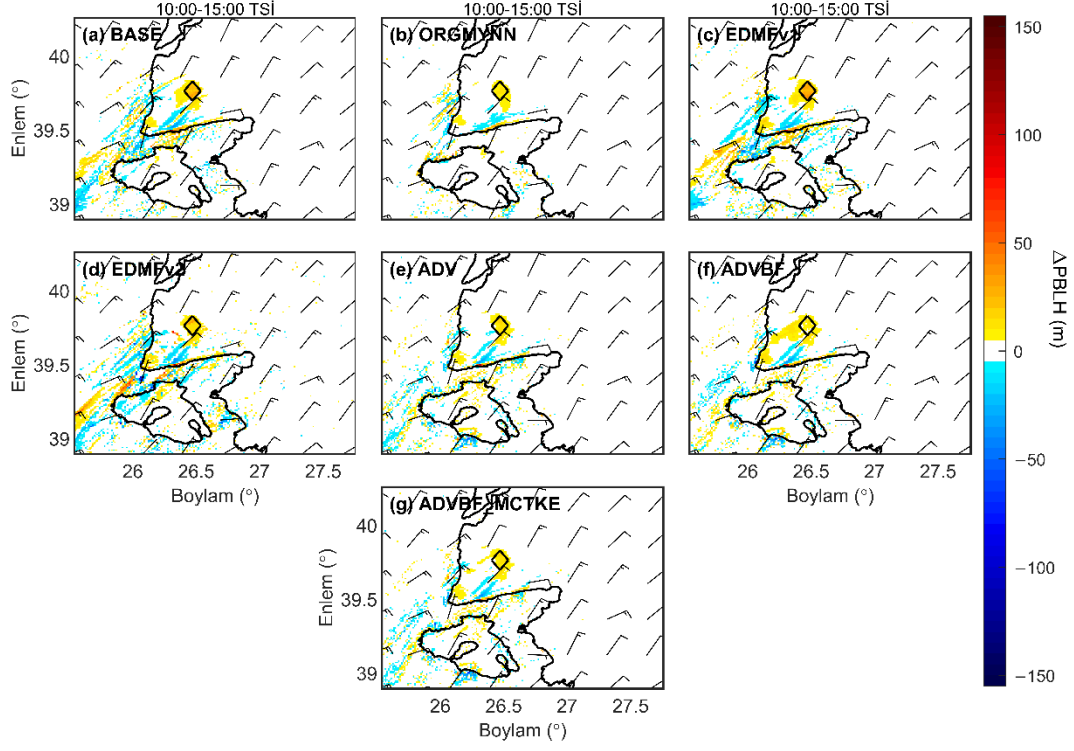
Şekil A.8 : Şekil 3.7 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak 2 m hava sıcaklığı için 18 temmuz gündüz (10:00 – 15:00 TSİ) ortalamasını temsil etmektedir.



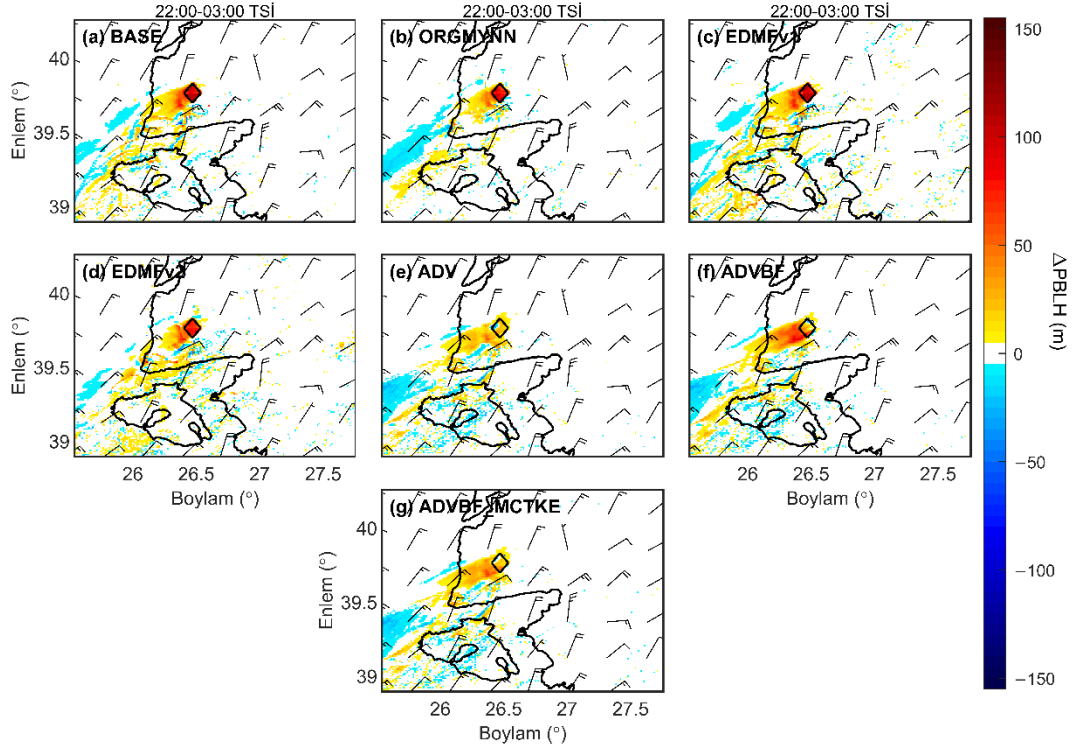
Şekil A.9 : Şekil 3.7 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak 2 m hava sıcaklığı için 18 temmuz gündüz (22:00 – 03:00 TSi) ortalamasını temsil etmektedir.



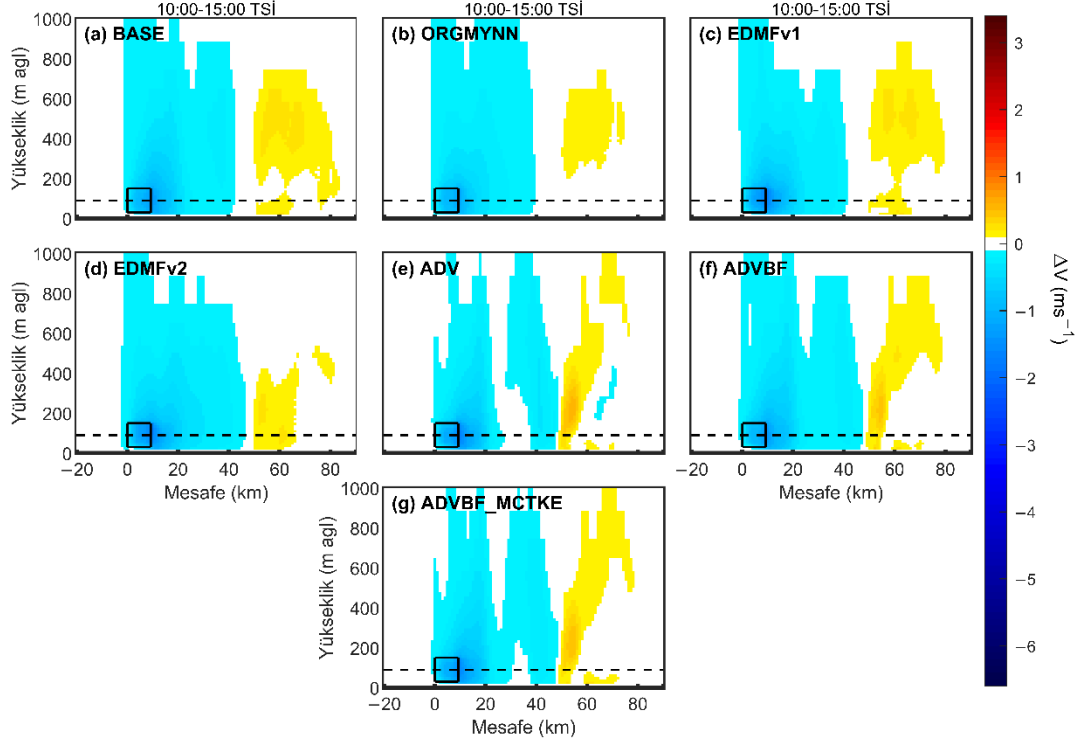
Şekil A.10 : Şekil 3.7 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak PBLH için 17 temmuz gündüz (10:00 – 15:00 TSi) ortalamasını temsil etmektedir.



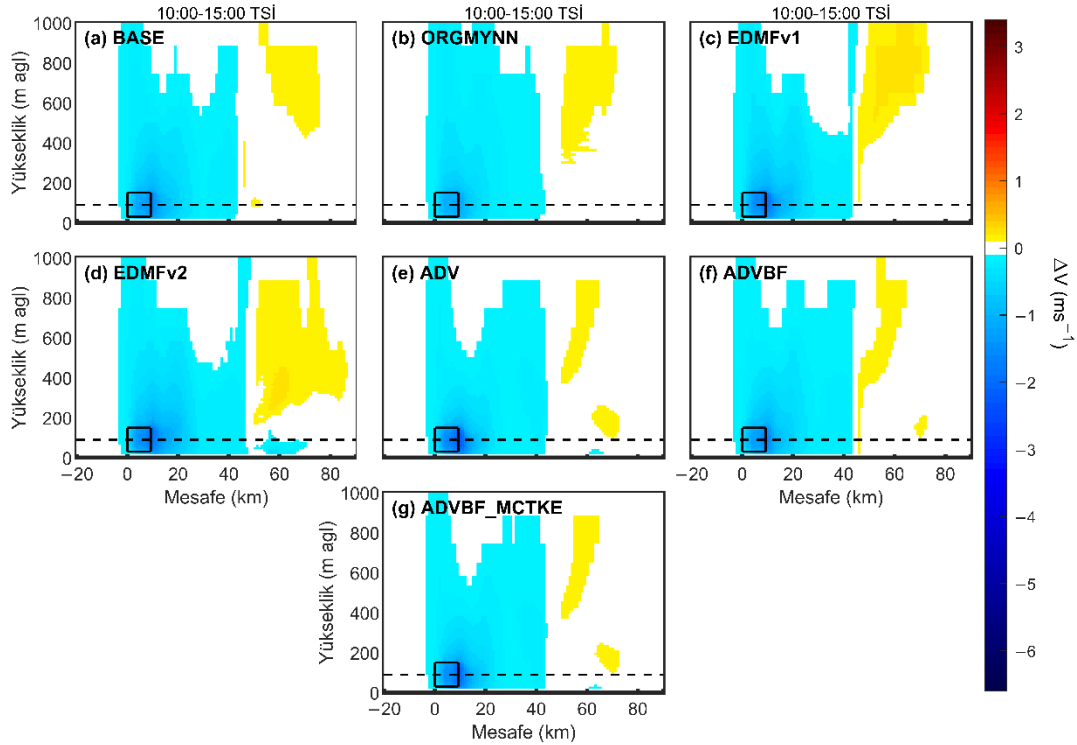
Şekil A.11 : Şekil 3.7 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak PBLH için 18 temmuz gündüz (10:00 – 15:00 TSi) ortalamasını temsil etmektedir.



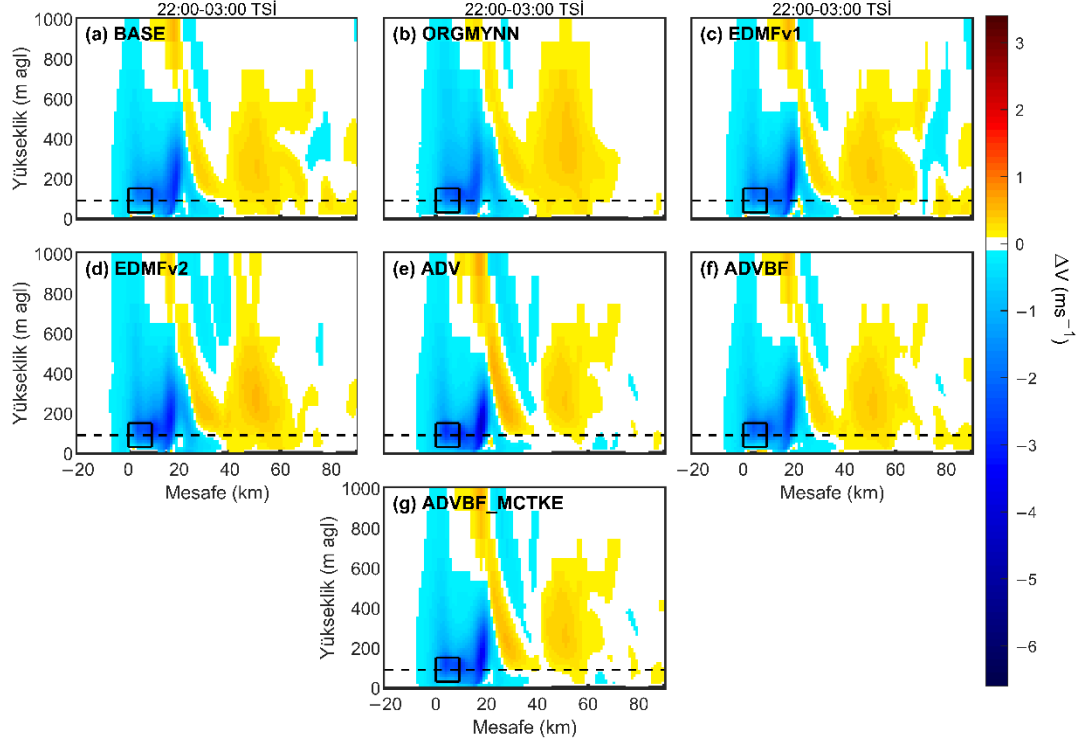
Şekil A.12 : Şekil 3.7 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak PBLH için 18 temmuz gündüz (22:00 – 03:00 TSi) ortalamasını temsil etmektedir.



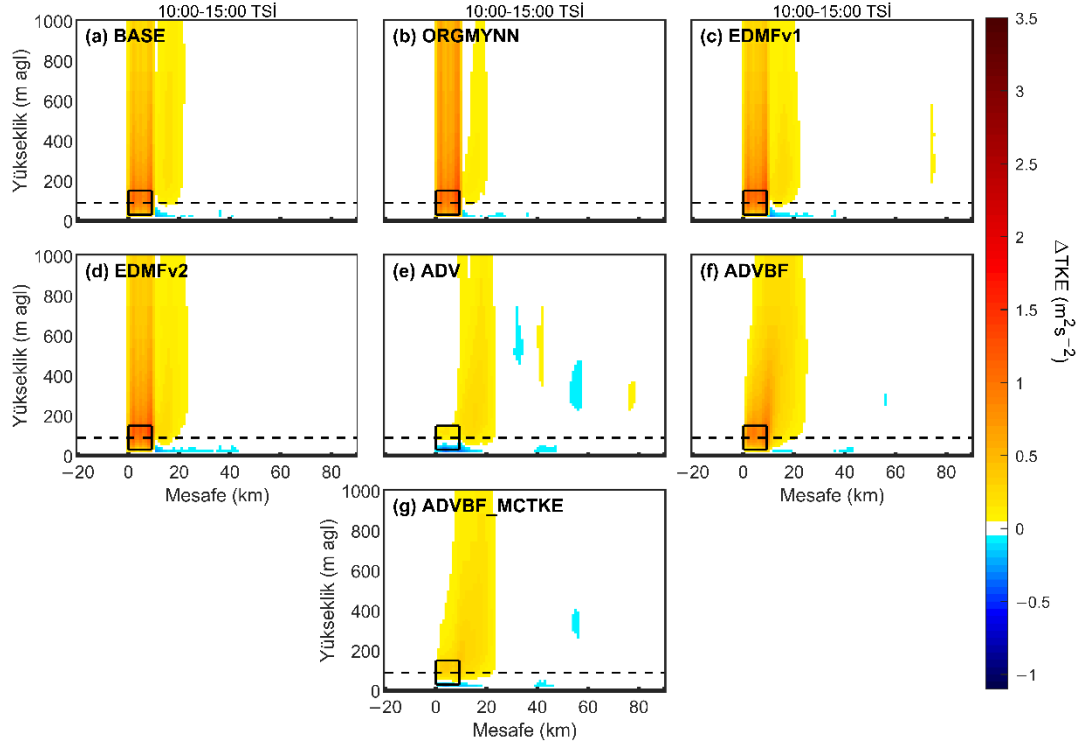
Şekil A.13 : Şekil 3.9 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak 17 temmuz gündüz (10:00 – 15:00 TSi) ortalamasını temsil etmektedir.



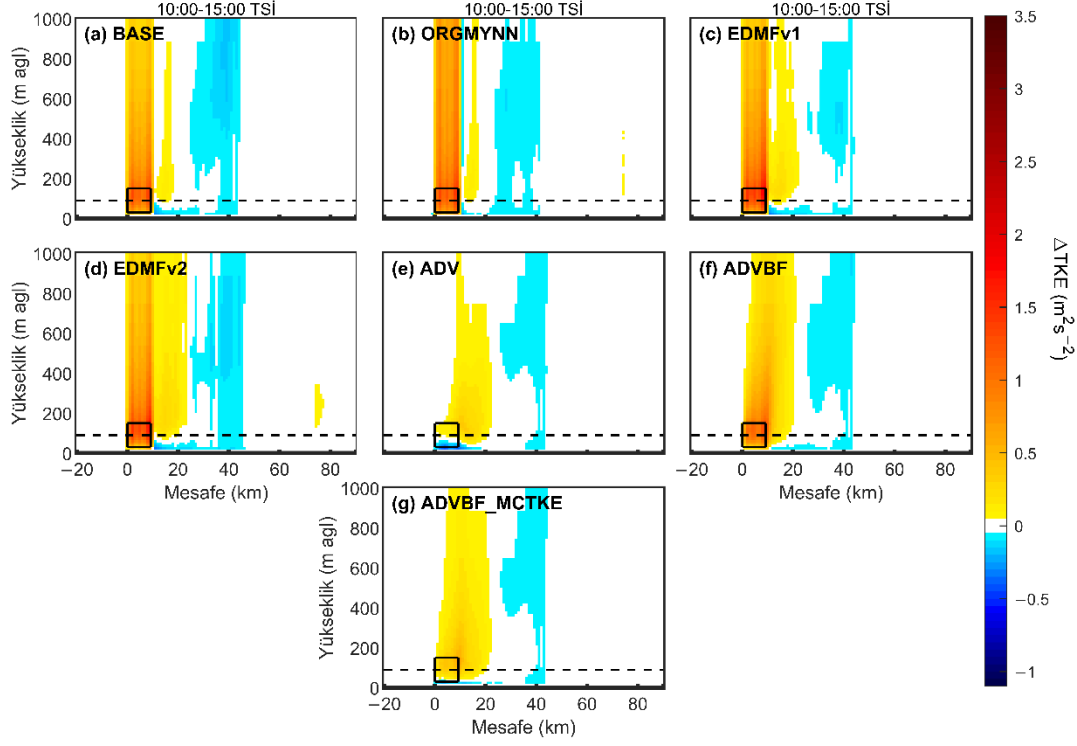
Şekil A.14 : Şekil 3.9 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak 18 temmuz gündüz (10:00 – 15:00 TSi) ortalamasını temsil etmektedir



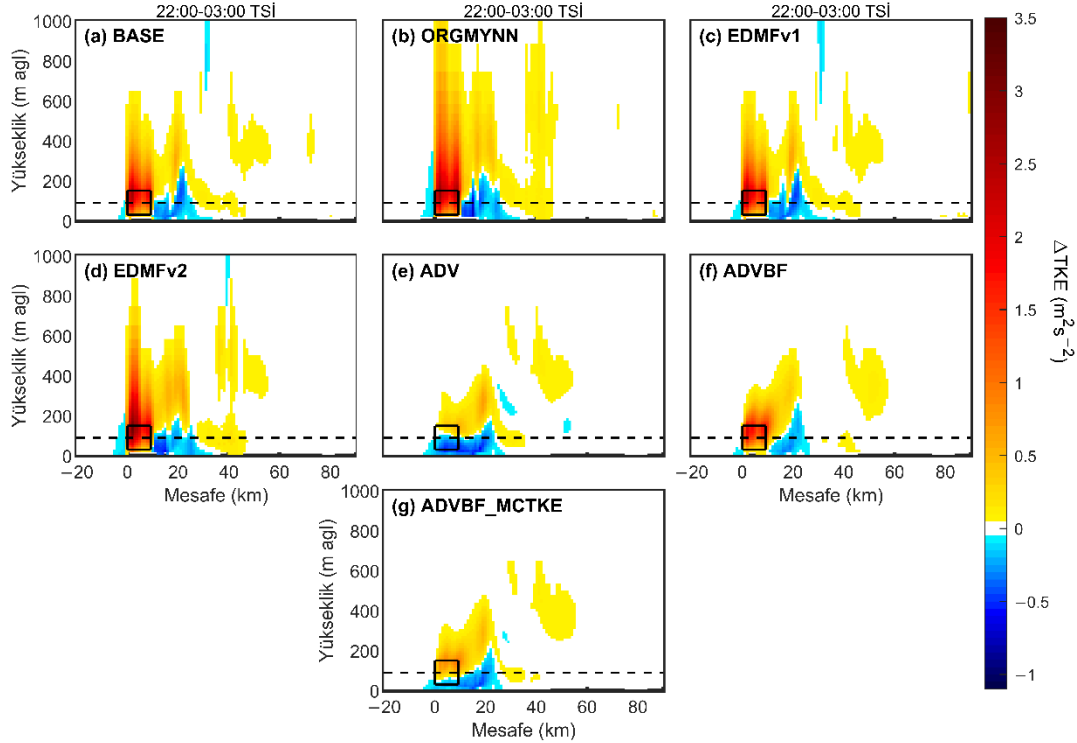
Şekil A.15 : Şekil 3.9 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak 18 Temmuz gündüz (22:00 – 03:00 TSİ) ortalamasını temsil etmektedir.



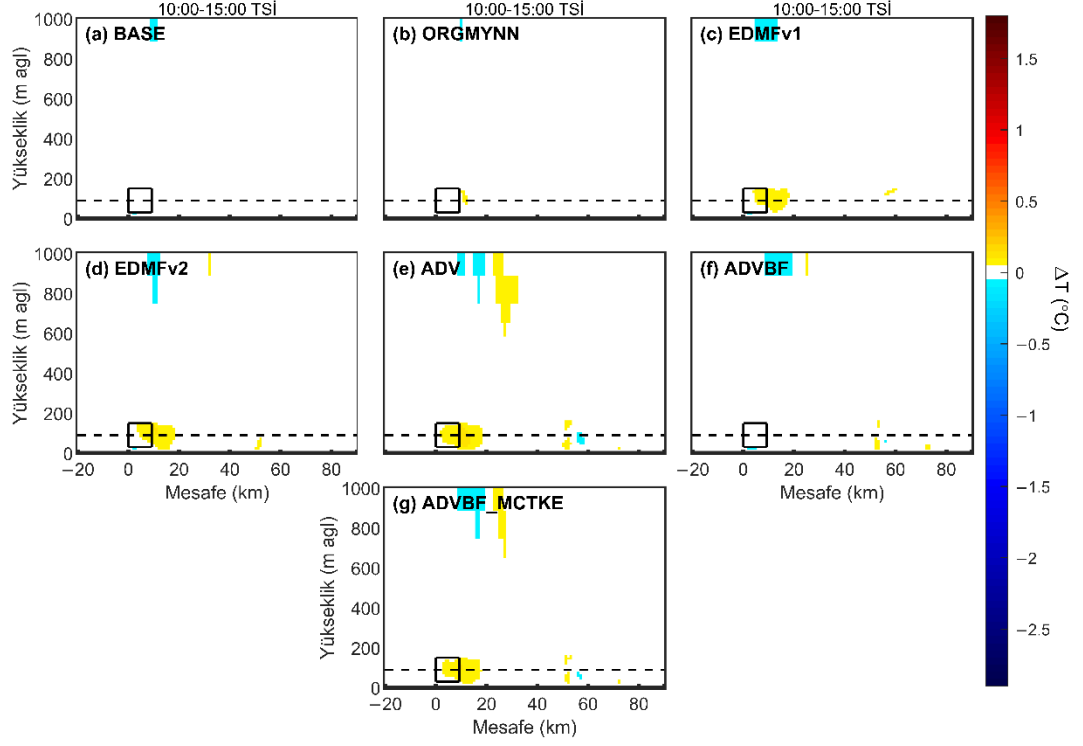
Şekil A.16 : Şekil 3.9 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak TKE için 17 Temmuz gündüz (10:00 – 15:00 TSİ) ortalamasını temsil etmektedir



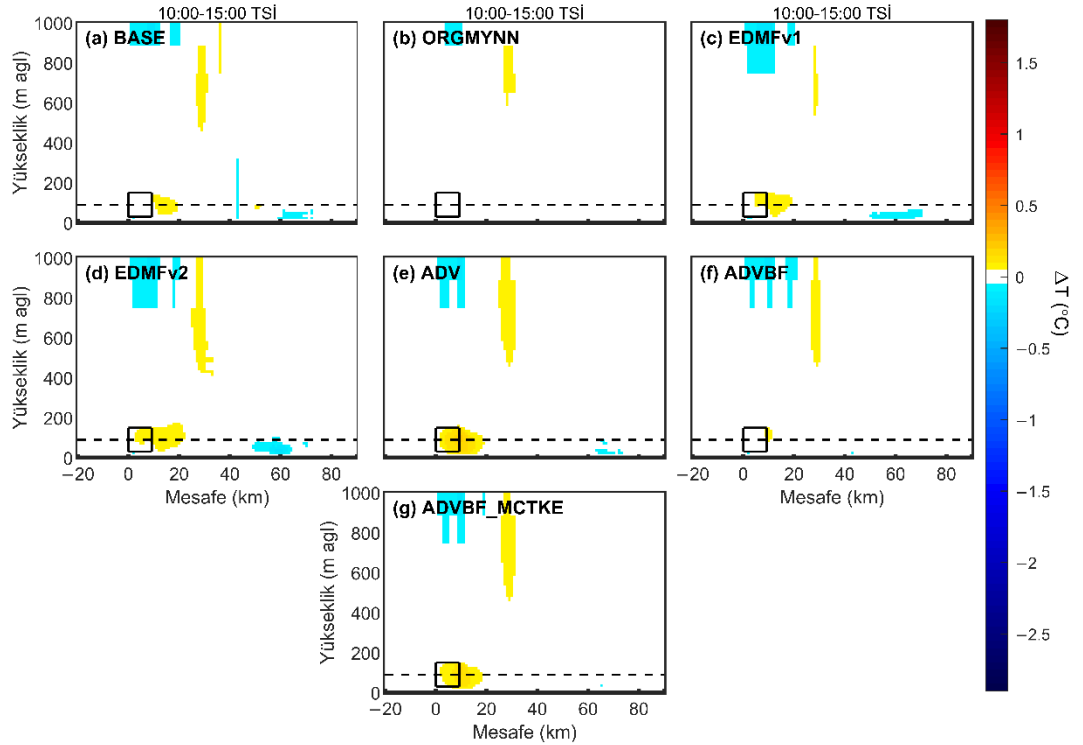
Şekil A.17 : Şekil 3.9 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak TKE için 18 temmuz gündüz (10:00 – 15:00 TSİ) ortalamasını temsil etmektedir.



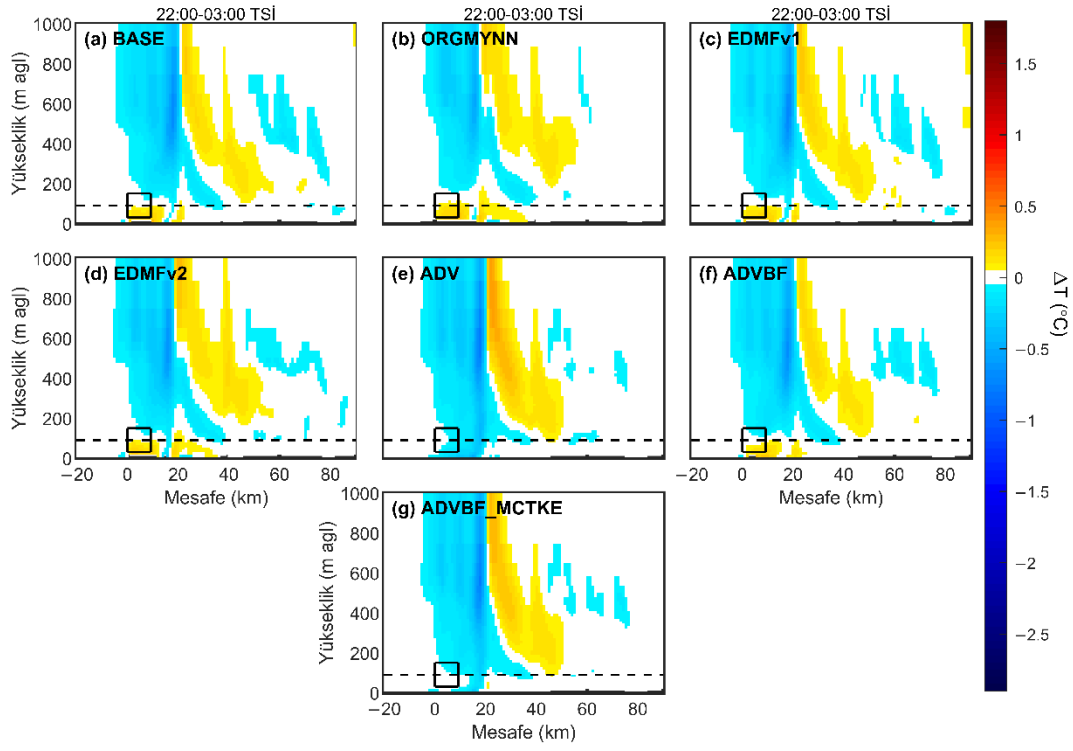
Şekil A.18 : Şekil 3.9 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak TKE için 18 temmuz gündüz (22:00 – 03:00 TSİ) ortalamasını temsil etmektedir.



Şekil A.19 : Şekil 3.9 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak hava sıcaklığı için 17 temmuz gündüz (10:00 – 15:00 TSI) ortalamasını temsil etmektedir.

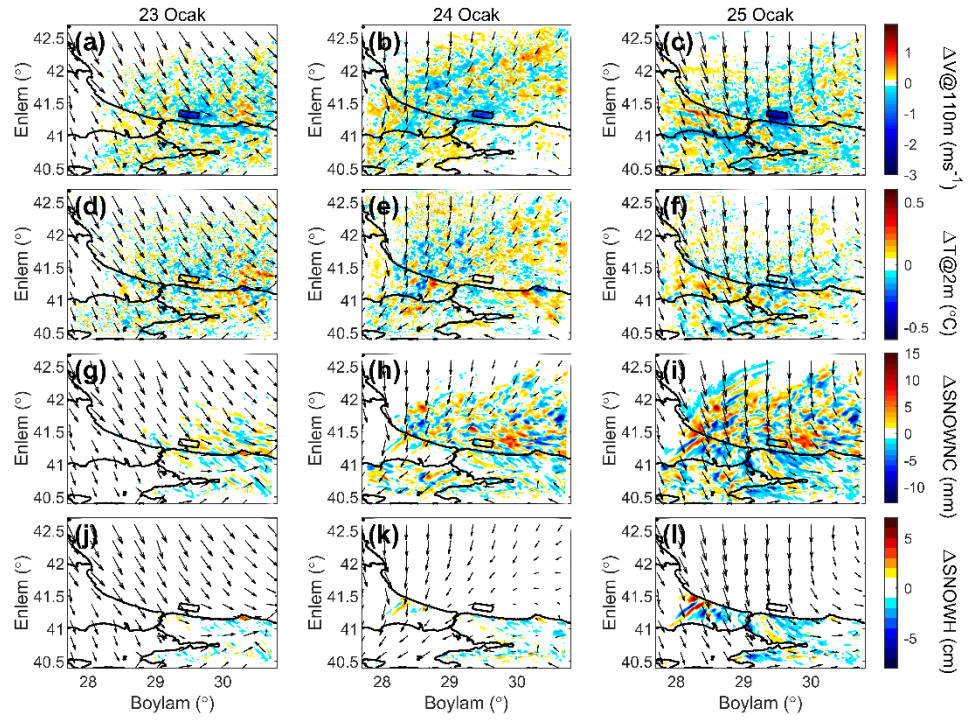


Şekil A.20 : Şekil 3.9 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak hava sıcaklığı için 18 temmuz gündüz (10:00 – 15:00 TSI) ortalamasını temsil etmektedir.

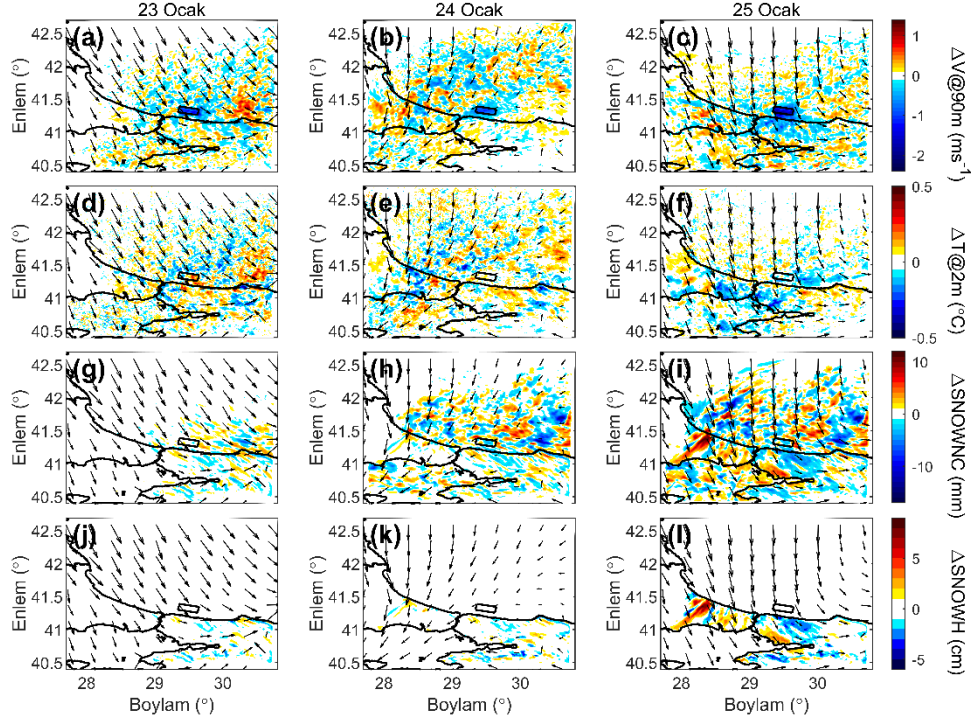


Şekil A.21 : Şekil 3.9 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak hava sıcaklığı için 18 temmuz gündüz (22:00 – 03:00 TSİ) ortalamasını temsil etmektedir.

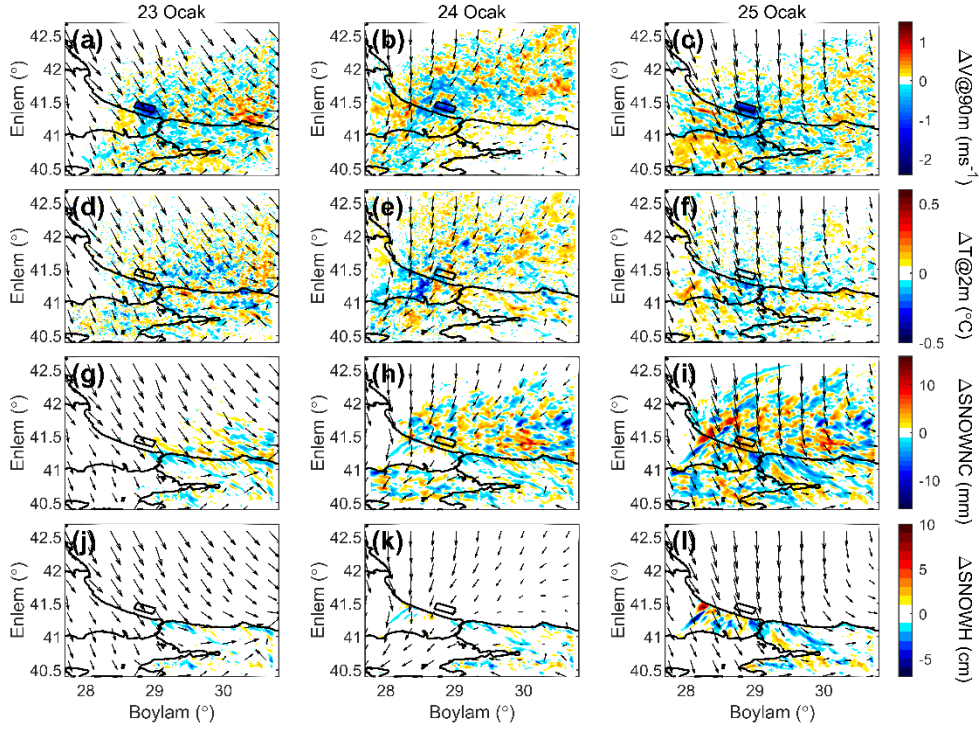
EK B : Bölüm 6'ya ait ek haritalar



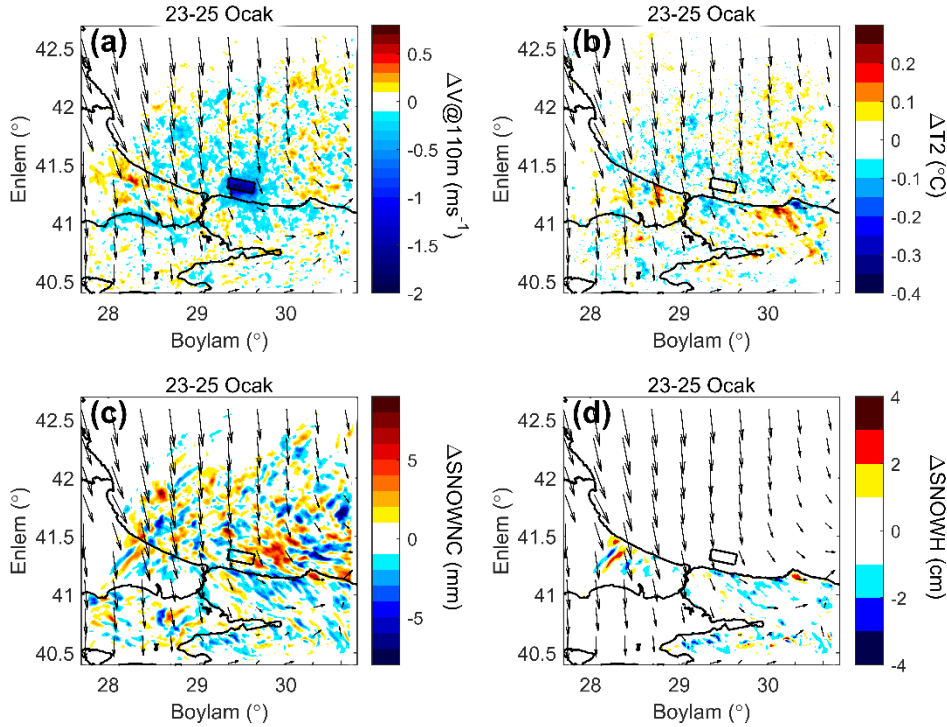
Şekil B.1 : Şekil 6.4 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak aynı rüzgar türbinli (Siemens SWT6.0-154) rüzgar çiftliği denize İstanbul'un Asya tarafında kurulmuştur.



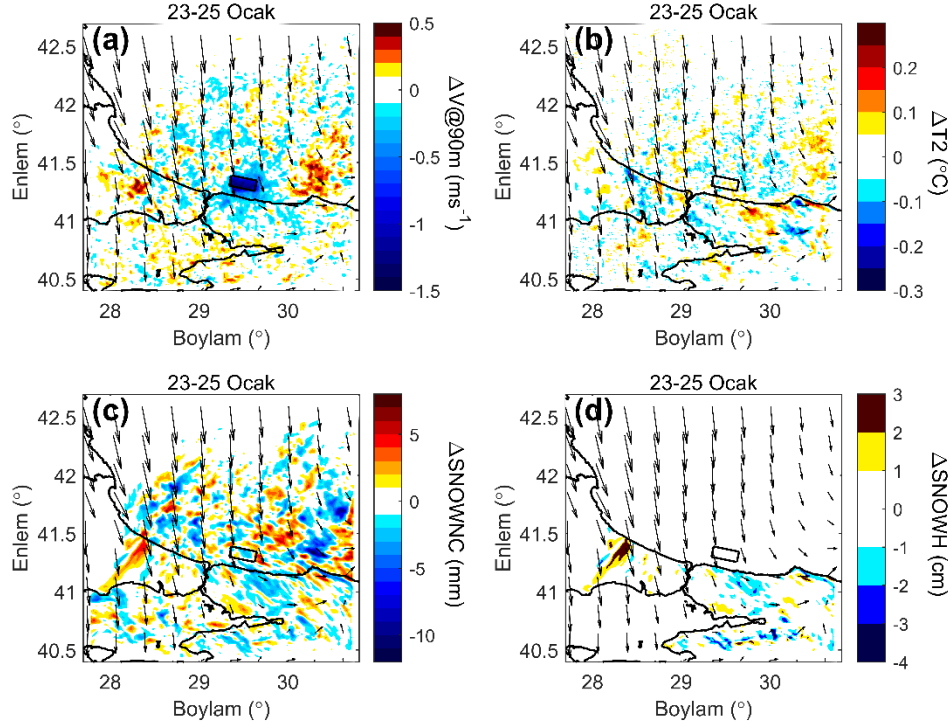
Şekil B.2 : Şekil 6.4 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak aynı küçük ebatlı rüzgar türbinli (Siemens SWT3.6-120) rüzgar çiftliği denize İstanbul'un Asya tarafında kurulmuştur.



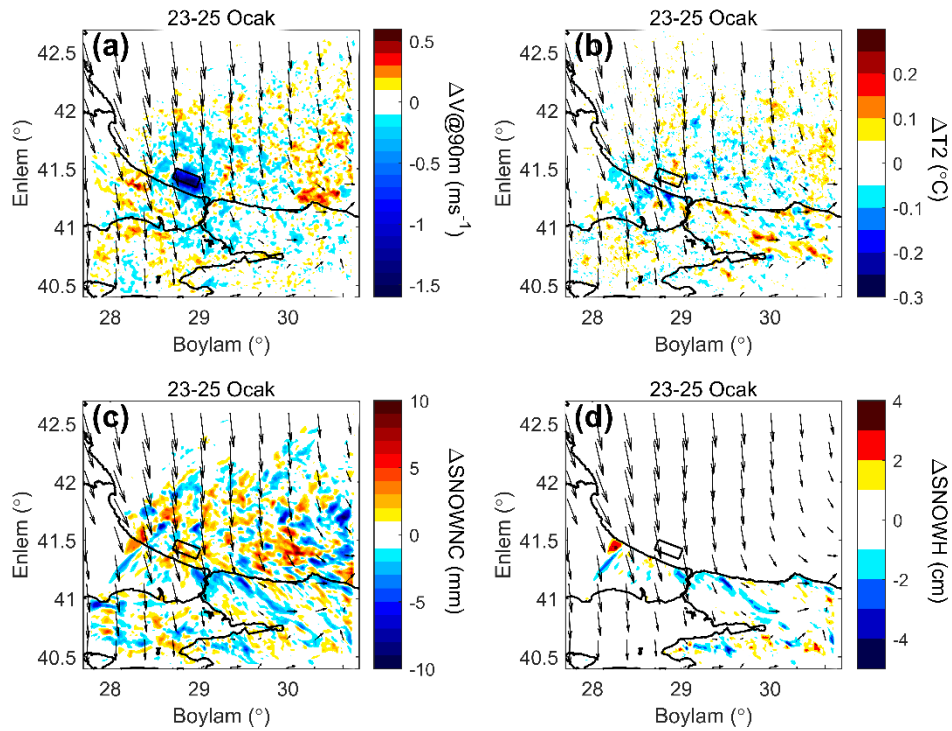
Şekil B.3 : Şekil 6.4 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak aynı lokasyonda daha küçük ebatlı rüzgar türbinli (Siemens SWT6.0-154) rüzgar çiftliği kurulmuştur.



Şekil B.4 : Şekil 6.5 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak aynı rüzgar türbinli (Siemens SWT6.0-154) rüzgar çiftliği denize İstanbul'un Asya tarafında kurulmuştur.



Şekil B.5 : Şekil 6.4 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak daha küçük ebatlı rüzgar türbinli (Siemens SWT3.6-120) rüzgar çiftliği denize İstanbul'un Asya tarafında kurulmuştur.



Şekil B.6 : Şekil 6.5 ile aynı açıklamaya sahiptir, ancak aynı lokasyonda daha küçük ebatlı rüzgar türbinli (Siemens SWT6.0-154) rüzgar çiftliği kurulmuştur.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad

: Tarık KAYTANCI

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, Bahçeşehir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2016, İstanbul Teknik Üniversitesi, Meteoroloji Mühendisliği ABD, Atmosfer Bilimleri Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2013-2015 yıllarında “Development of numerical wind forecasting model for short-term wind energy forecasting in wind farms” başlıklı TÜBİTAK 3501 projesinde bursiyer olarak çalıştı
- 2017-2019 yıllarında “Investigation and modelling of the breeze effect on wind energy potential in the west coast of Turkey” İTÜ BAP projesinde yer aldı.
- 2017-2019 yıllarında “New European Wind Atlas (NEWA)” başlıklı TÜBİTAK 1001 ERA-NET+ projesinde bursiyer olarak çalıştı.
- 2017-2021 yıllarında YÖK 100/2000 Doktora bursuna hak kazandı.
- 2019-2023 yıllarında TÜBİTAK BİDEB 2211-A Yurt İçi Doktora bursuna hak kazandı.
- 2008-2012 yıllarında Bahçeşehir Üniversite Mühendislik Fakültesi Onur ve Yüksek Onur derecelerini kazandı.
- 2012 yılında Bahçeşehir Üniversitesi’nden Yüksek Onur derecesi ile mezun oldu.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Kaytancı, T.**, Menteş, Ş.S. & Ünal, Y. (2022). Simulating the impacts of wind farm wake under the changes in MYNN planetary boundary layer scheme in high resolution Weather Research and Forecasting model. Atmosphere, 13, 1838.
- Gülübol, S., **Kaytancı, T.**, & Menteş, Ş.S. (2022). Changes Occuring in the Wind Farm During a Cyclone Transition in the Marmara Region. 10th International Hybrid Symposium on Atmospheric Sciences, 18-21 October 2022, Istanbul, Turkey.