



Araştırma Makalesi

Açık Gökyüzü Şartlarında Güneş Radyasyonunun WRF Modeli ile Kısa Vadeli Tahmininde Aerosol Etkisinin Değerlendirilmesi

Yaşar Burak ÖZTANER^{1,6✉}, Abdullah KAHRAMAN², Erhan ÇALIŞKAN³, Şeyda TİLEV TANRIÖVER¹, Ceyhan KAHYA¹, Bülent AKSOY², Selahattin İNCECİK¹, Sema TOPÇU¹, Zafer ASLAN⁴, Burak BARUTÇU⁵, İsmail SEZEN², Serim SAKARYA¹, Ali DENİZ¹

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Meteoroloji Mühendisliği Bölümü Maslak 34469 İstanbul

²Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Kalaba Ankara

³Çevre ve Orman Bakanlığı, Ankara

⁴İstanbul Aydın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Florya İstanbul

⁵İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Maslak 3469 İstanbul

⁶İstanbul Teknik Üniversitesi, Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü, Maslak 34469 İstanbul

Sunuluş tarihi: 20 Şubat 2014, Kabul edilme tarihi: 17 Nisan 2014

ÖZET

Güneş radyasyonu verisi periyodik olarak yere dayalı ölçümlerden sağlanmaktadır. Ancak farklı kaynaklardan sağlanabilecek elektriğin yönetilebilmesi için, iki-üç gün gibi kısa vadede güneş santralleri benzeri kaynakların entegre oldukları elektrik gridlerine ne kadar elektrik üretimi aktarabileceğinin bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle güneş radyasyonunun kısa vadeli tahmini güneş enerjisi uygulamalarının pek çok alanı için önem arz etmektedir. Değişken bir parametre olmasına dayalı olarak güneş radyasyonu, bulutluluk, aerosoller ve bağıl nemin etkisi altındadır. Bu çalışmada, Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde 2011 yılı Ağustos ayı açık gökyüzü şartlarında global radyasyonun WRF-ARW (Weather Research and Forecast Model-Advanced Research WRF) meteorolojik modeline dayalı olarak kısa vadeli tahmin sonuçları üzerinde rol oynayan aerosol etkileri değerlendirilmiştir. Bölge üzerinde WRF-ARW modeli 4x4 km yatay çözünürlük ve 35 düşey tabaka ile uygulanmış, güneş radyasyonu öngörüsünde en başarılı sonucu elde etmek üzere kısa ve uzun dalga radyasyon, mikrofizik, sınır tabaka ve yüzey tabaka parametrisasyonlarını içeren beş farklı küme (WRF₀, WRF₁, WRF₂, WRF₃, WRF₄) kullanılmıştır. Toz taşınımının etkin olduğu Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde, Bozova, Ceylanpınar, Kilis, Mardin, Şırnak için global radyasyonun 72 saatlik öngörü simülasyonlarının başarıları istatistiksel ölçümlerle değerlendirilmiş ve sonuçlar üzerinde aerosol etkileri tartışılmış, güneşlenme süresine bağlı olarak güneşlenme indeksi ile yere ulaşan radyasyona bağlı olarak açıklık indeksleri de hesaplanarak açık günler için iki indeks arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Buna ek olarak, çalışma periyodu içinde partiküler madde olarak PM₁₀ konsantrasyonundaki değişim de incelenmiştir. Global radyasyon model öngörülleri ile yere dayalı ölçümler arasındaki farklar üzerinde aerosol etkisinin tespiti için NASA'nın MODIS (Moderate resolution Imaging Spectroradiometer) spektrometresinden alınan aerosol optik derinlik (AOD) verileri kullanılmıştır. Ayrıca AOD ile global güneş radyasyonu gözlemleri arasındaki istatistiksel ilişki araştırılmıştır. Güneydoğu Anadolu Bölgesi'ndeki toz taşınımını incelemek için HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) modeli kullanılmış, toz kaynakları ile bunlara ait yörüngeler değerlendirilmiştir. Tüm istasyonlarda tahmin edilen radyasyon pik değerleri gözlemlere göre daha yüksek bulunmuş, güneşlenme indeksi ile açıklık indeksi arasındaki aşırı sapmaların aerosollerden kaynaklı olabileceği düşünülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Güneş radyasyonu, WRF, MODIS, güneşlenme etkisi, açıklık indeksi

© Tüm yayın hakları Hava Kirlenmesi Araştırmaları ve Denetimi Türk Milli Komitesi'ne aittir.

1. Giriş

Türkiye'nin enerji politikası hedefine göre 2023 yılına kadar yenilenebilir enerji kaynaklarının payının en az %30 olması; güneş kurulu gücünün ise 3000 MW'a ulaşması planlanmaktadır. Buna dayalı olarak "Yeni Enerji Kaynakları ile ilgili Türkiye Politikaları ve Uygulamaları Kanunu" kapsamında yeni enerji kaynaklarının gelişti-

rilmesine çalışılmakta, hedefe ulaşılabilmesi için politik ve mali destekler sağlanmaktadır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2006-2020 yıllarını kapsayan "Ulusal Orta ve Uzun Dönem Bilim ve Enerji Teknolojileri Geliştirme Planı Rapor Özeti"nde önemli bir araştırma konusu olarak güneş enerjisinin odaklı veya düz aynalar yardımıyla odaklanması veya yansıtılması prensibine dayanan

Tablo 1. Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nin güneşlenme süresi ve güneş radyasyonu değerleri

İstasyon	Güneşlenme Süresi (saat)	Güneş Radyasyonu (MJ/m ² yıl)
Bozova	3228	6596
Ceylanpınar	3081	6467
Kilis	3069	6462
Mardin	3213	6362
Şırnak	2840	5921
Ortalama	3086	6362

CSP (Concentrating Solar Power) güç santrallerine yer vermektedir.

Ülkemizde su ısıtma panelleri dışında halen güneş enerjisinden yaygın olarak yararlanılmadığı görülmektedir. Genellikle bu paneller güneşli sahil bölgelerinde sadece iç mekan sıcak su üretimi amaçlı kullanılırken, fotovoltaik panel uygulamaları aydınlanmayı ve veri toplanmasını da sağlamaktadır. Türkiye'nin güneş enerjisinden yararlanabilme potansiyeli gözönüne alındığında tahmini toplam güneş enerjisi üretiminin yaklaşık 0.390 Mtoe civarında olması beklenmektedir (ETKB, 2012). Son yıllarda güneş enerjisinden farklı alanlarda yararlanılması çalışmaları önemli ölçüde artış göstermektedir. Bu bağlamda Türkiye'deki enerji açığının büyük bir kısmının güneş enerjisinden karşılanması, dünya genelinde olduğu gibi ülkemizde de üzerinde önemle durulan konulardan biridir. Türkiye'nin 36-42°N enlemleri arasında yer alan coğrafi konumu, güneş enerji potansiyelinden yararlanılması açısından oldukça elverişlidir. Genel olarak güneş enerjisi potansiyeli yüksek olan diğer Akdeniz ülkeleri ile bir karşılaştırma yapıldığında, güneşlenme değerlerinin, güneş enerjisi açısından önemli bir yere sahip olan İspanya'dan daha yüksek, güneş enerjisi potansiyeli açısından ise İspanya ile kıyaslanabilir ölçüde olduğu görülmektedir. Güney İspanya'da yer alan Endülüs Bölgesi (37°35'N – 05°00'E) kurulu güneş paneli sayısı ve 6512 MWh elektrik enerjisi üreten kurulu 3618 kWp'lik fotovoltaik (PV) tesis ile güneş enerjisi bakımından ülke genelinde lider konumdadır. 1999-2004 verileri itibarı ile yıllık toplam güneşlenme süresi 2890 saat (Climatemp, 2013) olan Endülüs Bölgesi'nin kullanılabilir güneş radyasyonu değeri günde ortalama 4.6±0.3 kWh/m²'dir (Ridao vd., 2007). Endülüs Bölgesi ile aynı enlem üzerinde yer alan Güneydoğu Anadolu Bölgesi de (GAB) (37°00'N – 40°00'E) yıllık toplam güneşlenme süresi ve toplam güneş radyasyonu bakımından Türkiye'nin en önde gelen bölgesidir. EİEİ (Elektrik İşleri Etüd İdaresi) verilerine göre bölgede yıllık toplam güneşlenme süresi 2993 saat, yıllık toplam güneş radyasyonu miktarı ise 1460 kWh/m² olmaktadır. Kaygusuz ve Sarı, (2003) tarafından yapılan bir çalışmada ise Türkiye'nin yıllık ortalama güneş radyasyonu potansiyeli 3.6 kWh/m² gün (~1315 kWh/m² yıl) ve yıllık güneşlenme süresi 2640 saat olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla Güneydoğu Anadolu Bölgesi güneş radyasyonu bakımından ülke ortalamasının %11; güneşlenme süresi bakımından da %13 üzerindedir. GAB'ı temsil etmek üzere gözönüne alınan istasyonlar üzerinden bölgenin ortalama yıllık güneş radyasyonunun yaklaşık 6362 MJ/m² yıl (17.43

MJ/m² gün) ve ortalama yıllık güneşlenme süresinin 3086 saat olduğu bulunmuştur (Tablo 1).

Güneş enerjisi ile ilgili ulaşılması planlanan hedeflerin temel zorluklarından biri de, geniş ölçekli bu enerji eldesinin hali hazırda kurulu şebekeye entegrasyonunda yaşanmaktadır. Farklı kaynaklardan sağlanabilecek elektriğin yönetilebilmesi için, kısa vadede güneş santralleri benzeri kaynakların entegre oldukları elektrik gridlerine ne kadar elektrik üretimi aktarabileceğinin bilinmesi gerekmektedir. Alışılmış yöntemlerle elde edilen elektriğe kıyasla salınımlı bir yapıya sahip olan güneş enerjisi değişiminin atmosfer olaylarının rastgele yapısına bağlı olması yapılan kısa vadeli tahminlerin doğruluğu konusunda temel problemlerden birini teşkil etmektedir. Bu bağlamda güneş radyasyon tahmini üzerinde aerosol ve bulutluluk en etkili parametrelerdir (Lorenz vd., 2009; Lara-Fanego vd., 2012; Ruiz-Arias vd., 2011; Heinemann vd., 2006).

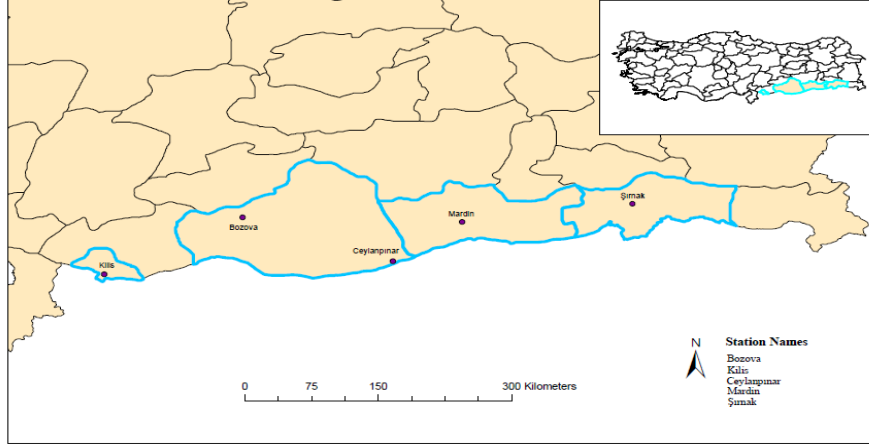
2. Çalışma Alanı ve Kullanılan Veri

Bu çalışmanın amacı WRF-ARW mezoölçek meteorolojik modeli kullanılarak toz taşınımının en etkin olduğu Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde açık gökyüzü koşullarında güneş radyasyonunun 72 saatlik öngörü simülasyonlarını ve bu simülasyonlar üzerindeki aerosol etkilerini değerlendirmektir. Bu amaçla Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde Bozova, Ceylanpınar, Kilis, Mardin ve Şırnak için (Tablo 2) Ağustos 2011 dönemini kapsayan süreçte WRF-ARW ile kısa ve uzun dalgaboylu radyasyon, mikrofizik, sınır tabaka ve yüzey tabaka parametrisasyonlarını içeren beş farklı konfigürasyon; WRF₀, WRF₁, WRF₂, WRF₃ ve WRF₄ kullanılmış ve 4x4 km'lik yatay çözünürlük ve bölge üzerinde 35 düşey tabaka için global güneş radyasyon öngörülleri gerçekleştirilmiştir. Model sonuçlarının başarısı, RMSE, Bias ve korelasyon katsayısı istatistikleri ile karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Ayrıca atmosferin yere ulaşan güneş radyasyonu üzerinde azaltıcı etkisini belirlemek üzere öncelikle güneşlenme süresine bağlı olarak güneşlenme indeksi ve yere ulaşan radyasyona bağlı olarak açıklık indeksleri hesaplanmış ve açık günler için iki indeks arasındaki ilişki araştırılmıştır.

Türkiye'de global güneş radyasyonun en yüksek değere sahip olduğu bölge olması açısından çalışma alanı Güneydoğu Anadolu Bölgesi olarak seçilmiştir (Şekil 1). Global güneş radyasyonu verileri Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden (MGM) temin edilmiştir. MGM, modern gözlem sistemlerine dayalı güneş radyasyonu ölçümlerine

Tablo 2. Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde çalışan istasyonların enlem/boylam ve yükseklikleri

İstasyonlar	Enlem (derece)	Boylam (derece)	Yükseklik (m)
Kilis	36.7085	37.1123	640
Ceylanpınar	36.8601	40.0307	360
Bozova	37.3651	38.5134	622
Şırnak	37.5209	42.4523	1350
Mardin	37.3103	40.7284	1040

**Şekil 1.** Çalışma alanı

2003 yılı sonlarında TEFER Projesi (Türkiye Sel ve Deprem Felaketi Acil Yardım Projesi) ile başlamış, ancak Doğu Bölgeleri için veri alımı 2010 yılına kadar mümkün olmamıştır (TEFER, 2013). Bu çalışmada güneyde bulunan ve büyük bölümü çöl olan Arap Yarımadası'nın zengin bir aerosol kaynağı olarak Güneydoğu Anadolu Bölgesi'ni etkilemesine dayalı olarak, global güneş radyasyonu üzerindeki aerosol etkisi de araştırılmıştır. Bu araştırmanın en uygun şekilde yapılabilmesi için açık gökyüzü koşullarının görüldüğü yaz mevsimini temsilen Ağustos ayı seçilmiş ve süreç 20-22 Ağustos 2011 periyodunu kapsayacak şekilde belirlenmiştir.

Bunlara ek olarak, çalışma periyodu için NASA'ya ait Terra uydusunun MODIS spektrometresinden alınan aerosol optik derinlik (AOD₅₅₀) verileri kullanılmış, (MODIS, 2013) istasyon üzerindeki aerosol optik derinliklerinin değişimlerine göre global güneş radyasyonundaki sapmalar ve değişimler açıklanmaya çalışılmıştır.

3. Yöntem ve Bulgular

3.1. WRF modeli

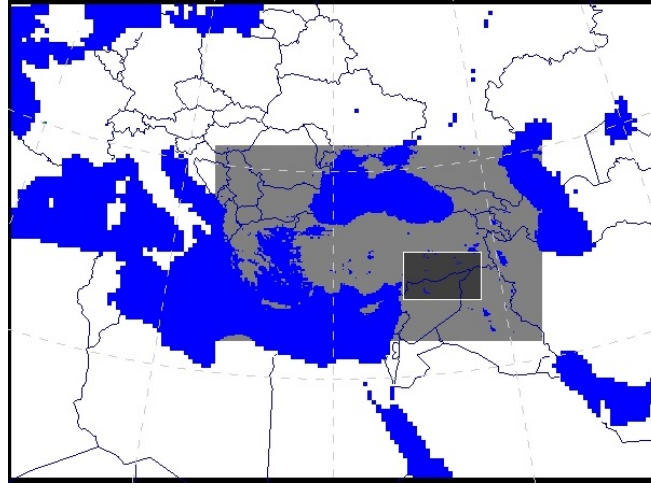
Çalışmada hidrostatik olmayan, orta ölçekli sayısal hava tahmin modeli WRF (Weather Research and Forecast Model) kullanılmıştır. WRF modeli, grid altı süreçlerin modelde temsiline olanak sağlayan birçok fiziksel parametrisasyon seçeneğine sahiptir. Radyasyon tahmini açısından kısa ve uzun dalga radyasyon, mikrofizik, sınır tabaka ve yüzey tabaka parametrisasyonları kritik konuların başında gelmektedir. Kullanılan mikrofizik paketlerinden (Tablo 3) WSM6 (WRF Tek-Zamanlı 6-sınıf),

öncülü WSM5'teki buhar, kar, bulut içi buz, bulut içi su ve yağmur parametrelerine ek olarak grezili de içermektedir. Geniş aralıklı orta ölçekli grid çözünürlüklerinde WSM3, WSM5 ve WSM6 şemalarının işleyişleri arasında belirgin bir fark bulunmazken, bulutta çözümlenebilen grid aralıklarında parametrisasyonlar birbirlerinden oldukça farklı davranışlar sergilemektedir. Verimlilik ve teorik altyapı faktörleri göz önüne alındığında, bu üç WSM şeması arasında bulut çözümleme hücreleri düzeyi için en elverişli olanı WSM6'dır (Hong ve Lim, 2006). Bu nedenle bu çalışmada 4x4 km çözünürlüklü domain göz önünde bulundurularak, WSM6 tercih edilmiştir. Mikrofizik parametrisasyonu için kullanılan bir diğer paket ise Thompson'dır. WRF ve diğer orta ölçekli modellerde kullanılmak üzere geliştirilen bu yeni parametrisasyon önceki tek zamanlı mikrofizik parametrisasyonlarıyla karşılaştırıldığında, hem fiziksel süreçler, hem de yazılım açısından çok sayıda gelişmeyi bünyesinde barındırmaktadır (Skamarock vd., 2008).

Model içinde radyasyon parametrisasyonları radyatif süreçleri ve yerin ısı bütçesindeki katkısını temsil etmektedirler. RRTM (Rapid Radiative Transfer Model) uzun dalga boylu radyasyon paketi (Mlawer vd., 1997), korele-k yöntemi kullanan spektral-bantlı bir parametrisasyondur. Su buharı, karbondioksit ve ozonla ilişkili olarak uzun dalga boylu süreçleri temsil etmek üzere önceden hazırlanmış tabloları kullanır. Ekonomik bir yaklaşım olmakla birlikte ozon konsantrasyonunun yüksek olduğu durumlarda tutarlılığında azalma görüldüğü bilinmektedir (Goody vd., 1989).

Tablo 3. Beş farklı fizik paketi için kullanılan model konfigürasyonları

Fizik Parametreleri	WRF(0)	WRF(1)	WRF(2)	WRF(3)	WRF(4)
KD Radyasyonu	RRTMG	RRTMG	FLG	Goddard	RRTMG
UD Radyasyonu	RRTM	RRTM	FLG	Goddard	RRTM
Mikrofizik	WSM6	Thomson	Thomson	Goddard	WSM6
	Monin	Monin	Monin	Monin	Monin
Yüzey Tabakası	Obukhov & Carlson	Obukhov & Carlson	Obukhov & Carlson	Obukhov & Carlson	Obukhov & Carlson
	Boland	Boland	Boland	Boland	Boland
Yüzey Fiziği	NOAH	NOAH	NOAH	NOAH	NOAH
Küresel Sınır Tabaka	Yonsei Uni	Yonsei Uni	Yonsei Uni	Yonsei Uni	MYJ
Kümüls	Kain Fritsch	Kain Fritsch	Kain Fritsch	Kain Fritsch	Kain Fritsch

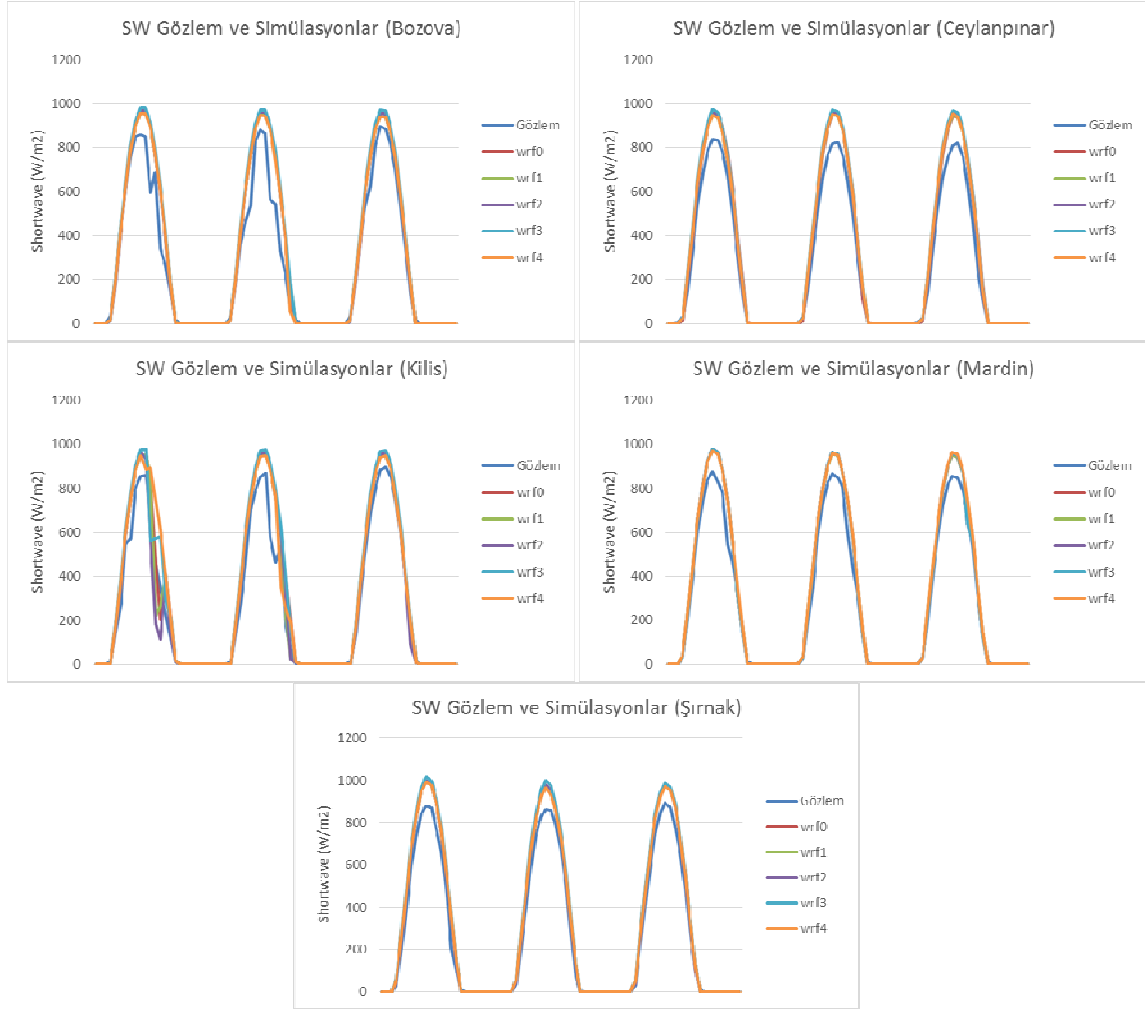
**Şekil 2.** WRF model alanları

Bölgesel modelin başlangıç ve sınır koşullarını oluşturmak için 1° çözünürlüklü NCEP (National Center for Environmental Prediction) GFS (Global Forecast System) küresel operasyonel model analizleri kullanılmış, modelde küresel ölçekli sayısal model çıktıları olarak NCEP ürünlerine yer verilmiştir. Model alanının grid çözünürlükleri sırasıyla 36, 12 ve 4 km'dir (Şekil 2). Orta enlemlerin simüle edilmesi nedeniyle Lambert Conformal projeksiyonu kullanılmış, Güneydoğu Anadolu Bölgesi için yüksek çözünürlüklü iki ayrı domain belirlenmiştir. İlk iki model alanının Doğu-Batı doğrultusunda grid sayıları dıştan içe doğru 146, 220; Kuzey-Güney doğrultusunda ise 108, 133'dür. En içte yer alan Güneydoğu Anadolu Bölgesi için bu sayılar sırasıyla 130,157 ve 106, 97 şeklindedir. Modelde 35 düşey seviye ve topografya verisi olarak USGS (United States Geological Survey) veri setleri kullanılmıştır. Modelin zaman adımı ise 120 saniye olarak belirlenmiştir.

Açık gökyüzü koşulları için elde edilen model çıktılarının gözlem verileri ile karşılaştırılmasını içeren simülasyon sonuçları Şekil 3'de verilmiştir. Genel olarak incelen-

diğinde model çıktılarının gözlemler ile uyum içerisinde olduğu fakat model çıktıların gözlemlerden daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir.

Elde edilen tüm istatistiksel doğrulama ürünleri birleştirilerek, açık günler için sonuçlara ulaşılmıştır (Tablo 4). Kullanılan BIAS ve RMSE (Root Mean Square Error) değerleri gözlemlere göre normalize edilmiş değerlerdir. Buna göre tüm simülasyonlar ve tüm istasyonlar için normalize BIAS değerleri 0.10 ile 0.21 arasında değişmektedir. Kilis, Mardin ve Şırnak istasyonlarında daha düşük ortalama hata elde edilirken, en iyi sonuçların WRF₁ ve WRF₂ fizik parametre setleri ile bulunduğu görülmektedir. Tüm simülasyonlar için normalize RMSE değerleri 0.20 ile 0.39 arasında gerçekleşirken, Mardin ve Şırnak istasyonlarının daha başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. WRF₁ ve WRF₂ simülasyonları da daha düşük normalize RMSE değerlerine sahiptir.



Şekil 3. Model simülasyonları a) Bozova, b) Ceylanpınar, c) Kilis, d) Mardin, e) Şırnak

Tablo 4. Açık gökyüzü koşulları için model konfigürasyonlarına ait istatistiksel değerlendirme

İstasyon	Parametre	WRF 0	WRF 1	WRF 2	WRF 3	WRF 4
Bozova	BIAS	0,17	0,17	0,17	0,21	0,16
	RMSE	0,34	0,34	0,35	0,39	0,34
Ceylanpınar	BIAS	0,18	0,18	0,17	0,21	0,18
	RMSE	0,27	0,26	0,26	0,31	0,27
Kilis	BIAS	0,16	0,13	0,10	0,20	0,17
	RMSE	0,32	0,31	0,34	0,36	0,35
Mardin	BIAS	0,12	0,12	0,11	0,11	0,13
	RMSE	0,21	0,21	0,21	0,21	0,22
Şırnak	BIAS	0,14	0,14	0,13	0,17	0,14
	RMSE	0,21	0,21	0,20	0,25	0,20

3.2. Güneşlenme ve açıklık indeksleri

Çalışmada, yere ulaşan güneş radyasyonu üzerinde atmosferin azaltıcı etkisini belirlemek üzere öncelikle güneşlenme süresine bağlı olarak güneşlenme indeksi ve yere ulaşan radyasyona bağlı olarak açıklık indeksleri de hesaplanmış, açık günler için iki indeks arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Açıklık indeksi, günlük global güneş radyasyonunun atmosferin dışına gelen günlük radyasyona oranını göstermektedir (Eşitlik 1).

$$k = H/H_0 \quad (1)$$

Bu çalışmada açık günler ele alındığından Angstrom-Prescott (1940) eşitliği kullanılmıştır (Eşitlik 2).

$$H/H_0 = a + b (s/S) \quad (2)$$

Hava kalitesini doğrudan temsil etmesi açısından sadece bulutsuz şartlar gözönüne alınmıştır (Eşitlik 3).

$$H_{clear} = H_0 (a+b) \quad (3)$$

H_{clear} , açık bir günde gelen güneş radyasyonunun en büyük değeri anlamındadır. Eğer, eşitlik 1'deki H_0 , H_{clear} ile değiştirilirse, açık bir gün için açıklık indeksini kc ile elde etmek mümkündür:

$$kc = H / H_{clear} \quad (4)$$

Denklemden kc , açık günler için açıklık indeksini temsil etmektedir. Eşitlik 1, hem atmosferin zayıflatıcı etkisini hem de bulut etkisini içermektedir. Eşitlik 4 ise bulutsuz koşullarda sadece atmosferik etkiyi içermektedir. Bu nedenle Eşitlik 4 ile elde edilecek açıklık indekslerindeki değişim miktarları, atmosferin zayıflatıcı etkisinin atmosferi oluşturan bileşenlere ne kadar bağlı olduğunu da ortaya koyacaktır. Bu bağlamda Eşitlik 4 kullanılarak açıklık indeksleri hesaplanmıştır.

Elde edilen sonuçlara dayalı olarak farkların açıklık indeksine göre değişim oranları hesaplanmıştır (Şekil 4). Ceylanpınar hariç Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde analiz edilen istasyonlarda bu değişim oranlarının sıfırdan küçük olan değerleri için güçlü salınımlara sahip olduğu görülmektedir. Bu salınımların başlangıçta belirlenen sınır koşullarına dayalı olarak %20 civarında olması beklenmiş, fakat yaklaşık olarak %100'lük oranda bir azalma görülmüştür. Genel olarak ifade edilmesi gerekirse güneşlenme indeksinin açıklık indeksinden yüksek olması, güneşli havalarda yere ulaşan radyasyonun beklenenden daha az miktarda olduğunu göstermektedir.

Genel olarak atmosfer içerisinde saçılma, soğurma ve yansıtma gibi fiziksel etkileşimler nedeni ile belirli bir oranda azalması beklenen güneş radyasyonu miktarının, beklenenden fazla azalma göstermesi bu fiziksel etkileşimler haricinde bir etkinin varlığını işaret etmektedir. Bu etkinin; gerek sınır ötesi, gerek bölgesel kuru ve yarı-kurak alanlardan kalkan tozların yere ulaşan radyasyon üzerindeki azaltıcı etkisinden kaynaklandığı düşünülebilir.

Genel olarak, yere ulaşması beklenen radyasyondan daha az miktarda gözlenen radyasyonun bazı günler için güneş loşluğuna dayandırılması mümkün olsa da, analiz edilen istasyonların bulunduğu coğrafya, topografik etkiler ve genel atmosferik dolaşım göz önüne alındığında, atmosferdeki toz taşınımına dayalı olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nin kendi özel topografik koşullarına dayalı olarak yerel toz kaynaklarının etkisinin de göz ardı edilmemesi gerekmektedir. Gültekin vd. (2011) tarafından Diyarbakır istasyon verileri ile yapılan bir çalışmada Güneydoğu Anadolu Bölgesinin son yıllarda artan miktarda toz taşınımı etkilerine maruz kaldığı gösterilmiştir. Bu çalışmada ise gözönüne alınan bölgelere en yakın hava kalitesi istasyonlarından alınan PM_{10} kon-

santrasyonları çalışma periyodu içerisinde PM_{10} miktarının azalma eğiliminde olduğu görülmüştür (Şekil 5).

Şanlıurfa hava kalitesi istasyonunda gün batımından sonra meydana gelen episodik değerlerde azalma görülmektedir. Ancak Mardin Hava Kalitesi İstasyonu'nda çalışma periyodu içinde PM_{10} ölçümü yapılmadığı için herhangi bir sonuca varılamamıştır. Bu çalışmada göz önüne alınan günler için Güneydoğu Anadolu Bölgesi'ne 1500 m ve 10 m'de toz taşınımı HYSPLIT modeli kullanılarak da araştırılmış, toz kaynakları ve bunlara ait 72 saatlik geri yörüngeler belirlenmiş, ancak bu dönem içerisinde toz taşınımının belirgin bir şekilde oluşmadığı, ağırlıklı olarak bölgesel aerosol etkinin varlığı gözlenmiştir.

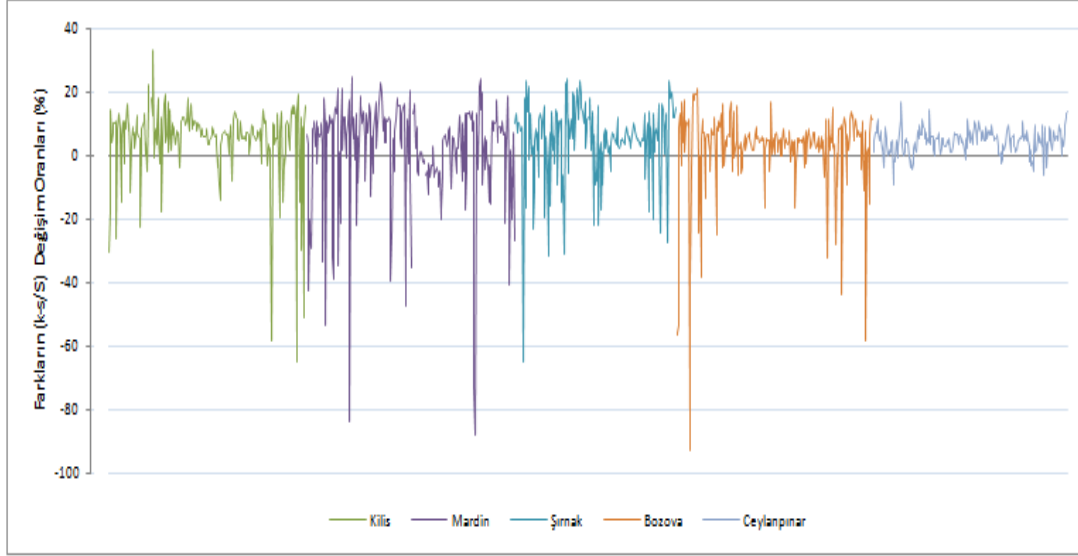
3.3. Global radyasyon model öngörülleri üzerinde aerosol etkisi

Kısa vadeli global radyasyonun elde edilen tahmin sonuçları ve ölçümler ile kullanılan model arasındaki farklar üzerinde aerosol etkisini araştırmak için, NASA'ya ait Terra uydusunun MODIS spektoradyometresinden alınan aerosol optik derinlik (AOD_{550}) verileri kullanılmıştır (MODIS, 2013).

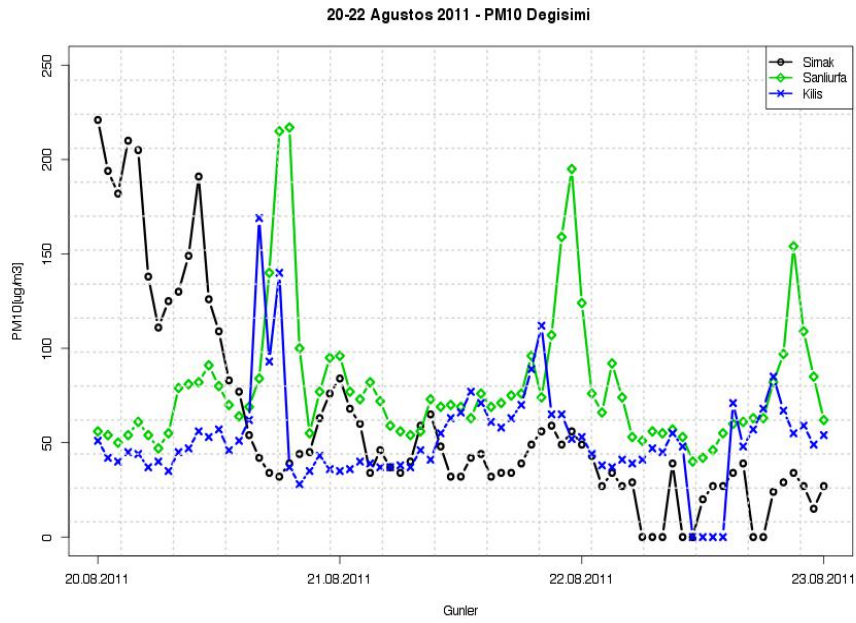
Açık gökyüzü koşullarında yapılan analiz için iki yöntem yer verilmiştir. İlk olarak açık gökyüzü koşulları için elde edilen 72 saatlik model çıktıları ve gözlem verilerinin eğilimi ile AOD_{550} gözlemlerinin eğilimi karşılaştırılmıştır. Buna göre global güneş radyasyonunda 20 Ağustos 2011'den 22 Ağustos 2011'e doğru artış gözlemlenirken, AOD_{550} azalma eğilimi göstermiştir. Model sonuçlarındaki bu artış ve AOD_{550} 'deki azalma eğilimi Bozova istasyonunda belirgin bir şekilde görülmektedir (Şekil 6). Simülasyon sonuçları üzerinde yapılan istatistiksel analizlerde en yüksek ortalama hata Bozova istasyonunda ortaya çıkmaktadır. Ayrıca çalışma periyodunda beklendiği gibi simülasyon sonuçları ile gözlemler arasındaki fark azaldıkça AOD_{550} 'in azaldığı bulunmuştur. (Şekil 7).

Genel olarak AOD_{550} ve global güneş radyasyonu arasındaki ilişkiyi açıklayan korelasyon katsayısı düşük ve negatif yönlü olarak belirlenirken Kilis istasyonu dışındaki yerlerde anlamlılık düzeylerinin %95'in üzerinde olduğu görülmektedir (Tablo 5). Kilis istasyonunda ise anlamlılık düzeyi kabul edilebilir sınırlar içerisinde bulunmamaktadır. Bu istasyon için global güneş radyasyonundaki değişimler aerosol etkisi dışında su buharı vb. parametrelerle açıklanabilir. Ayrıca Ceylanpınar istasyonu, açıklık indeksinde önemli bir değişiklik göstermediği için analizin bu kısmına dahil edilmemiştir.

20 Ağustos günü yüksek AOD_{550} gözlenirken inceleme periyoduna ait en düşük global güneş radyasyonu ölçümleri ve simülasyon değerleri de bu tarihte gözlenmiştir. Yapılan güneşlenme ve açıklık indeksi analizinden elde edilen sapmalar da bu sonuçları desteklemektedir.



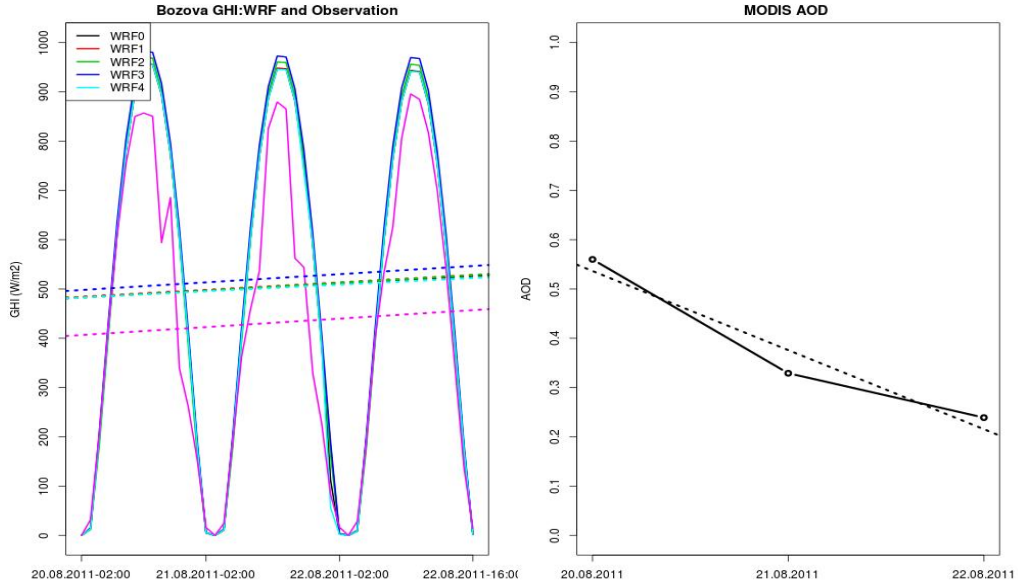
Şekil 4. Açıklık ve güneşlik indeksleri arasındaki farkın, açıklık indeksine göre değişim oranları



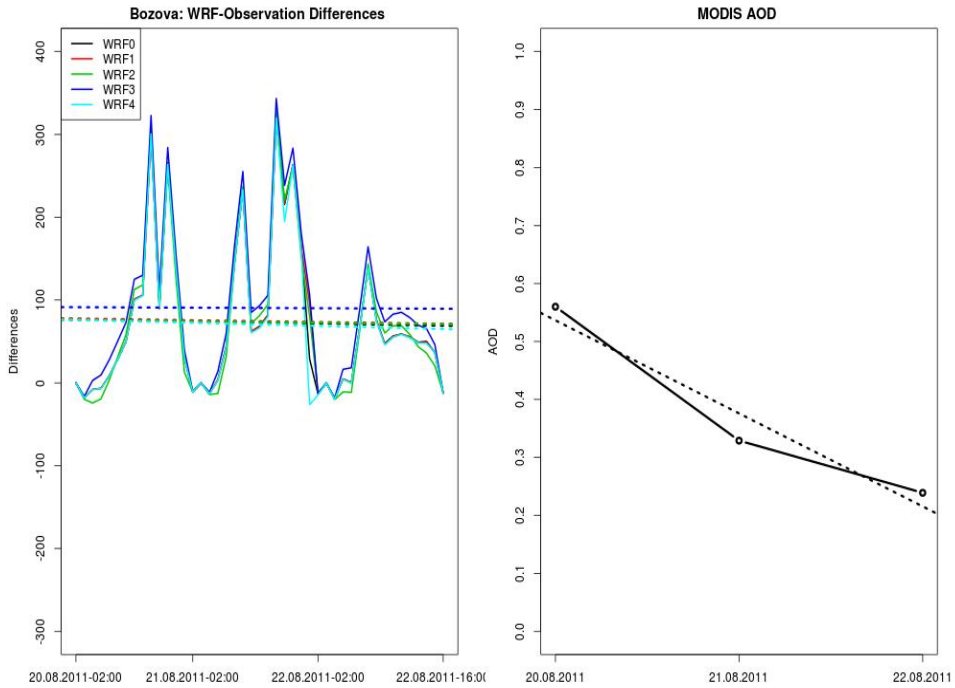
Şekil 5. 20-22 Ağustos 2011 arasındaki PM_{10} değişimi

Tablo 5. 2011 yaz mevsiminde Global güneş radyasyonu ile Aerosol Optik Derinlik arasındaki ilişki

İstasyonlar	r	Anlamlılık Düzeyi	p-değeri
Kilis St.	-0.15	%85	1
Bozova St.	-0.24	%95	0.05
Mardin St.	-0.22	%95	0.05
Şırnak St.	-0.43	%99	0.01



Şekil 6. Bozova istasyonu için Global Güneş Radyasyonu ve AOD_{550} 'nin eğilimi



Şekil 7. Bozova istasyonu için simülasyon sonuçları ile gözlemler arasındaki farklarının ve AOD_{550} 'nin eğilimi

4. Sonuçlar

Bu çalışmada Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde açık gökyüzü koşullarında güneş radyasyonunun 72 saatlik öngörü simülasyonları ve bu simülasyonlar üzerindeki aerosol etkisi değerlendirilmiştir. Bunun için beş farklı fiziksel parametrisasyon seti ile çalıştırılan WRF model tahmin sonuçlarının tüm istasyonlarda gözlemlerden daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. Sonuçların istatistiksel doğrulaması BIAS ve normalize edilmiş RMSE ölçüleri kullanılarak yapılmıştır. Buna göre en düşük BIAS ve

normalize RMSE, Mardin ve Şırnak'ta bulunmuştur. Ayrıca en başarılı simülasyon sonuçları WRF₁ ve WRF₂ fiziksel parametrisasyon setleri ile elde edilmiştir. Bunlara ek olarak, yere ulaşan güneş radyasyonu üzerinde atmosferin azaltıcı etkisini belirlemek için güneşlenme indeksleri ve açıklık indeksleri hesaplanarak değişim oranları belirlenmiştir. Ceylanpınar istasyonu hariç çalışma bölgesinde analiz edilen istasyonlarda bu değişim oranları güçlü negatif salınımlara sahiptir. Belirlenen başlangıç koşullarına göre bu değişimin %20 civarında olması beklenirken

%100'lük oranda azalma tespit edilmiştir. Sonuç olarak, güneşlenme indeksinin açıklık indeksinden yüksek olması, açık gökyüzü koşullarında yere ulaşan güneş radyasyonunun beklenenden az miktarda olduğunu göstermektedir. Bölgenin coğrafi konumu dikkate alındığında toz taşınımı sebebiyle gelen aerosol etkisinin bu azalmada temel unsur olduğu düşünülmüştür. Bölgede yüksek PM₁₀ seviyelerinin gözlemlendiği bir periyod için HYSPLIT modeli çalıştırılarak 72 saatlik geri yörüngeler belirlenmiş, ancak taşınımın belirgin biçimde oluşmadığı, ağırlıklı olarak bölgesel aerosol kaynaklarının bu konsantrasyon seviyeleri üzerinde etkili olabileceği anlaşılmıştır.

2011 yaz ayları için AOD ile global güneş radyasyonu arasındaki ilişki tüm istasyonlar için incelenmiş, ve buna göre korelasyon katsayıları tüm istasyonlarda düşük değerlerde bulunmuştur. Ancak Kilis istasyonu dışında kalan tüm istasyonlarda AOD ile global güneş radyasyonu arası ilişki istatistiksel olarak %95 oranında anlamlı bulunmuştur. Ayrıca açık gökyüzü koşullarında (20 -22

Ağustos 2011) global güneş radyasyonunun ve AOD'nin değişimleri incelenmiştir. Global güneş radyasyonu model sonuçları ve gözlem değerleri artış gösterirken, AOD₅₅₀ azalma eğilimi göstermiştir.

Sonuç olarak, Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde aerosollerin açık gökyüzü şartlarında güneş radyasyonunu azaltan etkisinden söz etmek mümkündür. Bu durum, kurulması planlanan tüm güneş enerjisi santralleri için aerosol etkisinin de mutlaka gözönüne alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK-COST 111Y234 projesinin bir parçasıdır. HYSPLIT Yörünge Modeli'ni sağlamasından dolayı NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) Air Resource Laboratory'e (ARL), ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne sağladığı veriler nedeniyle teşekkürlerimizi sunarız.

Kaynaklar

- Climatempo, 2013. <http://www.andalucia.climatempo.com/>.
- ETKB, 2012. TC Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, http://www.enerji.gov.tr/yayinlar_raporlar/Nukleer_Santraller_ve_Ulkemizdeki_Kurulacak_Nukleer_Santrallerin_Istisna_Bilgi.pdf, alınma tarihi: 05.03.2013.
- Goody, R., West, L., ve Crisp, D. (1989). The correlated-k method for radiation calculations in nonhomogeneous atmosphere. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 42, 539 - 550.
- Gültekin, M., Müslüm, A. Akçakaya (2011). Diyarbakır'da toz taşınımı ve klimatolojik analizi. *V.Atmosfer Bilimleri Sempozyumu*. İstanbul, İTÜ.
- Heinemann, D., Lorenz, E., ve Girodo, M. (2006). Forecasting of solar radiation. E. Dunlop, L. Wald, ve M. Suri içinde, *Solar Energy Resource Management for Electricity Generation from Local Level to Global Scale*. Hauppauge: Nova Science Publishers.
- Hong, S.-Y. ve Lim, J. (2006). The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme(WSM6). *Journal of Korean Meteorology Society* 42, 129 - 151.
- Kaygusuz, K. ve A. Sarı (2003). Renewable energy potential and utilization in Turkey. *Energy Conversion and Management* 44, 459-478.
- Lara-Fanego, V., Ruiz-Arias, J., Pozo-Vázquez, D., Santos-Alamillos, F., ve Tovar-Pescador, J. (2012). Evaluation of the RF model solar irradiance forecasts in Andalusia (Southern Spain). *Solar Energy* 86, 2200-2217.
- Lorenz, E., Remund, J., Müller, S., Traunmüller, W., Steinmaurer, G., Pozo, D., Guerrero, C. (21-25 September 2009). Benchmarking Of Different Approaches To Forecast Solar Irradiance. *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Hamburg, Germany.
- Mlawer, E., Taubman, S., Brown, P., Iacono, M., ve Clough, S. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere:RTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research*, 1663-16682. doi:10.2165/J14
- MODIS, 2013. *MODIS Atmosphere*. Modis Atmosphere Websitesi: modis-atmos.gsfc.nasa.gov
- Ridao, A., Garcia, E., Escobar, B., ve Toro, M. (2007). Solar energy in Andalusia (Spain): present state and prospects for the future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11, 148-161.
- Ruiz-Arias, J., Pozo, D., Lara-Fanego, V., Santos-Alamillos, F., ve Tovar-Pescador, J. (2011). A High-Resolution Topographic Correction Method for Clear-Sky Solar Irradiance Derived with a Numerical Weather Prediction Model. *Journal Of Applied Meteorology And Climatology* 50, 2460-2472.
- Skamarock, W., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D., Barker, D., Duda, M., Powers, J. (2008). *A description of Advanced Research WRF Version 3*.
- TEFER, 2013. *Turkey Emergency Flood and Earthquake Recovery*. TEFER Websitesi: <http://www.wmo.int/>.



Research Article

Evaluation of the Aerosol Impact on the Short Term Prediction of Global Solar Radiation Using WRF Model at Clear Sky Condition

Yaşar Burak ÖZTANER^{1,6}, Abdullah KAHRAMAN², Erhan ÇALIŞKAN³, Şeyda TİLEV TANRIÖVER¹, Ceyhan KAHYA¹, Bülent AKSOY², Selahattin İNCECİK¹, Sema TOPÇU¹, Zafer ASLAN⁴, Burak BARUTÇU⁵, İsmail SEZEN², Serim SAKARYA¹, Ali DENİZ¹

¹ Istanbul Technical University, Department of Meteorological Engineering, Maslak 34469 Istanbul

² Turkish State Meteorological Service, Kalaba Ankara

³ Ministry of Environment and Urban Planning, Ankara

⁴ Istanbul Aydın University, Faculty of Engineering, Florya Istanbul

⁵ Istanbul Technical University, Energy Institute, Maslak 34469 Istanbul

⁶ Istanbul Technical University, Eurasia Institute of Earth Science, Maslak 34469 Istanbul

Received: February 20, 2014; Accepted: April 17, 2014

ABSTRACT

Solar radiation data is obtained from ground based observations, periodically. However in order to manage the electricity that can be provided from different sources, how much electricity production can be transferred to the electrical grids for a short term of two-three days that solar plant like sources have been integrated, should be known. Short term prediction of the solar radiation has an importance in many areas of solar energy applications, consequently. Solar radiation as a variable parameter is under the influence of cloudiness, aerosols and relative humidity. In this study, the aerosol effects acting on the results of the global radiation short term predictions, for the clear sky conditions over Southeastern Anatolia Region for August 2011, based on WRF-ARW (Weather Research and Forecast Model-Advanced Research WRF) meteorological model were evaluated. WRF-ARW model is applied with a horizontal resolution of 4x4 km and 35 vertical layers over the region, and five different configuration (WRF₀, WRF₁, WRF₂, WRF₃, WRF₄) including short and long wave radiation, microphysics, boundary layer and surface layer parameterizations were used in order to obtain the most successful results in solar radiation prediction. The success of the 72 hours simulations of the global radiation was evaluated using statistical measures and the effects of the aerosols on the results were discussed in the Southeastern Anatolia Region for Bozova, Ceylanpınar, Kilis, Mardin and Şırnak, where dust transport is effective. Sunshine index with respect to the sunshine duration and clearness index with respect to the incoming solar radiation reaching the ground were calculated and the relation between the two indices for clear days were researched. Additionally, the change in the concentration of PM₁₀ was examined for the study period. Aerosol Optical Depth (AOD) data from NASA MODIS Spectroradiometer (Moderate resolution Imaging Spectroradiometer) to understand the aerosol effect on the differences between the measurements of global radiation model predictions and ground- based observations were used. Besides the relationship between AOD and global solar radiation were investigated. Additionally, in order to examine the dust transport over Southeastern Anatolia Region HYSPLIT model (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) was performed and sources of dust and their trajectories were evaluated. The peak values of the radiation at all the stations used in the study were found to be higher for the predicted than the observed, and the source of the extreme deviations between sunshine and clearness index were related to the aerosols.

Keywords: Solar Radiation, WRF, aerosol, PM10, MODIS, Sunshine index, Clearness index

© Turkish National Committee of Air Pollution Research and Control.