

AKÜ FEMÜBİD 21 (2021) 057202 (1231-1246)

AKU J. Sci. Eng. 21 (2021) 057202 (1231-1246)

DOI: 10.35414/akufemubid.888661

Araştırma Makalesi / Research Article

Güney Okyanusunun Atmosfer ve Okyanus Sirkülasyonlarının Sayısal Modeller Yardımıyla İncelenmesi

Yasemin EZBER^{1*}, Bilge TUTAK^{2,3}, Mehmet ILICAK¹¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü, İstanbul² İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Bölümü, İstanbul.³ İstanbul Teknik Üniversitesi, Kutup Araştırmaları Uyg-Ar Merkezi (PoLReC), İstanbul.Sorumlu yazar e-posta: ezber@itu.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4512-685X>e-posta: tutak@itu.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2885-9338>e-posta: milicak@itu.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4777-8835>

Geliş Tarihi: 01.03.2021

Kabul Tarihi: 14.10.2021

Öz

Bu çalışmada amacımız, Güney Okyanusu üzerindeki rüzgar dinamiklerini ve bunun okyanus devinim sirkülasyonu üzerindeki etkisini incelemektir. Bu amaçla, atmosfer ve bileşik okyanus-deniz buzu yüksek çözünürlüklü bölgesel modelleri ayrı ayrı koşturulmuştur. 2007 ve 2013 yılları arasında eşzamanlı olarak üç benzetim gerçekleştirilmiştir. İlk benzetim, gözlemlenen deniz yüzeyi sıcaklığı ve deniz buzu konsantrasyonu tarafından zorlanan sadece atmosfer bölgesel modelidir. Model, ortalama deniz seviyesi basıncı, 2 metre hava sıcaklığı, yukarı atmosfer jetleri ve Stratosferik Polar Vortex gibi önemli atmosferik özelliklerin mevsimselliğini başarıyla yakalamıştır. Model, Antarktika'daki gözlem istasyonlarıyla uyumluluk göstermektedir. İkinci benzetim, reanaliz atmosferik veri seti ile zorlanan kontrol okyanus-deniz buzu bileşik bölgesel modeldir. Okyanus modeli, deniz yüzeyi sıcaklık gradyanını doğru şekilde yakalamayı başarmıştır. Drake Geçidi'ndeki taşınım değerleri gözlemler dahilinde yaklaşık 152 Sv'dir. Son olarak, Güney Okyanusu üzerindeki bölgesel rüzgar gerilmesinin 1,5 kat arttığı bir duyarlılık benzetimi de yapılmış ve daha güçlü Drake Geçidi taşınımı ve Deacon Hücreli sirkülasyonu gözlemlenmiştir. Bu çalışma ileride gerçekleştirilebilecek Güney Okyanusu tamamen bütünleşik atmosfer-okyanus modeli geliştirilmesi için kapasite ve kabiliyetlerin ortaya konmasını sağlamıştır.

Anahtar kelimeler

MITgcm; WRF; Güney Okyanusu; Antarktika; Modelleme

Analysis of the Atmospheric and Oceanic Circulations of the Southern Ocean with the Help of Numerical Models

Abstract

In this study, our aim is to investigate Southern Ocean wind dynamics and its impact on the ocean overturning circulation. To this end, we performed atmosphere and ocean-sea ice coupled regional high-resolution models separately. We conduct three concurrent simulations spanning between 2007 and 2013. The first simulation is atmosphere only regional model forced by observed sea surface temperature and sea ice concentration. The model successfully captures important atmospheric properties such as mean and seasonality of the sea level pressure, 2 meter air temperature, upper level jet, Stratospheric Polar vortex. The model compares well against the observation stations throughout the Antarctica. The second simulation is the control ocean-sea ice coupled regional model forced with reanalysis atmospheric dataset. In the ocean model, we capture the sea surface temperature gradient. The transport at the Drake Passage is around 152 Sv which is within the observation values. Finally, we conduct a sensitivity simulation where the zonal wind stress over the Southern Ocean is increased 1.5 times. This leads to stronger Drake Passage transport and Deacon Cell overturning circulation in the model. This study has provided to demonstrate the capacity and capabilities to develop a Southern Ocean integrated fully coupled atmosphere-ocean model that can be carried out in the future.

Keywords

MITgcm; WRF; Southern Ocean; Antarctica; Modeling

1. Giriş

Okyanus hacminin çoğunluğunu oluşturan su kütleleri ya Güney Okyanusu'nda oluşmuş, değişmiş ya da o bölgeden geçmiştir (Sverdrup vd. 1942, Doney vd. 1998). Güney Okyanusu'ndaki orta ölçekli girdaplar (mesoscale eddies) bu bölgede oldukça önemli bir role sahiptirler. Son zamanlarda kabul edilen teoriye göre Antarktika Kutupsal Akıntısı (Antarctic Circumpolar Current-ACC) tabakalaşması ve devinim sirkülasyonu (overturning circulation) aslında orta ölçekli girdaplar ile rüzgâr yoluyla yüzeye çıkma (wind driven upwelling) arasındaki etkileşimden ibarettir (Marshall ve Radko 2003, Abernathy ve Cessi 2014). Okyanusların büyük çoğunluğunda, rüzgarlardan oluşan yatay hareket, düşük yoğunluktaki yüzey sularının kıtaların kenarlarına yığılması ile dengelenir (Veronis 1996). Bu sayede rüzgar sirkülasyonun sadece yüzeyde oluşmasına neden olur. Fakat, Güney Okyanusu'nda bazı boylamlarda kıta kenarı bulunmamaktadır. Bu bölgede esen rüzgarlar Ekman taşınımı ile kuzeye doğru yüzey akıntısı oluşturur. Bunu dengelemek için de derin okyanus akıntısının güneye akması gerekmektedir. Bu dengeye ait jeostrofik hızın boylamsal bileşeni olamaz (kıta sınırları olmadığı için), ve bu nedenle akıntıların dinamiğinde büyük bir kısıtlamaya neden olur (Hughes ve de Cuevas 2001). Kısıtlama özellikle orta ölçekli girdaplarda kendini gösterir.

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC 2007) için yapılan benzetimler ve gözlemler Güney Okyanusu üstündeki batılı rüzgarların 1950'den beri kutba doğru kaydığını (poleward shift) ve şiddetlerinin arttığını göstermektedir (bakınız Şekil 1, Farneti vd. 2015). Bu değişim 21. yüzyıl iklim projeksiyonlarında da benzer şekilde devam etmektedir. Antarktika Kutupsal Akıntısı'nın (ACC) buna nasıl cevap vereceği ise belirsizdir. Bu konuda kabul edilen iki farklı teori vardır: 1) rüzgâr arttıkça Ekman taşınımı artacak ve bu etki ACC'yi hızlandıracaktır. Bu senaryoda orta ölçekli girdaplar doyum noktasında olmaları (eddy saturation) nedeniyle değişmezler, 2) diğer bir olasılık ise Ekman taşınımı artarken aynı zamanda baroklinik kararsızlıkların da artması ile birlikte girdap enerjisini arttırıp geri Ekman taşınımını bastırarak

ACC hızının değişmesini girdap dengelenmesi (eddy compensation) ile engelleyecektir (Marshall ve Radko 2003). Orta ölçekli girdapların rüzgar değişikliği altındaki davranışlarının küresel etkisi de vardır. Meridyonel devinim sirkülasyonu (Meridional Overturning Circulation, MOC) da Güney Okyanusu rüzgarlarına direkt olarak bağlıdır. Bu rüzgarlar oluşacak olan soğuk ve derin su kütlelerini değiştirebilir. Bununla birlikte, bu soruyu cevaplamaya yardımcı olabilecek okyanus gözlemleri nispeten azdır. Güney Okyanusu'nun 1980'den 2010'a kadar önemli ölçüde ısındığını ve bu dönemde daha az tuzlu olduğunu gösteren gözlemler mevcuttur (Böning vd. 2008, Gille 2008, Durack ve Wijffels 2010). Ek olarak, Böning vd., (2008) kutup ve subantarktik cephe arasındaki üst 2 km'deki meridyonel izopiknik eğimlerinde çok az değişiklik olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, 30 yıl boyunca ACC hızında çok az değişiklik olduğuna işaret eder. Bununla birlikte, ACC kütle taşınım tahminleri büyük hata aralıklarına sahip olduğundan yapılan gözlemlerin doğruluğu sorgulanabilir. MOC'un nasıl değiştiği sorusunun cevabı önemlidir, çünkü MOC Güney Okyanusu'ndaki ısı ve karbondioksit alımını (uptake) etkilemektedir.

Güney Okyanusunda MOC'nin doğrudan ölçümleri olmadığından dolayı, artan bölgesel rüzgar gerilmelerinin MOC'yi nasıl etkilediğini anlayabilmek için sayısal modellerin kullanılması gerekmektedir. Bugüne kadar yapılan modelleme çalışmalarını toplam dört grup altında toplayabiliriz: 1) Quasi-Geostrophic (QG, Yarı-Jeostrofik) kanal modelleri; bunlar QG denklemlerini çözerek ACC değişimine bakmışlardır (Meredith and Hogg 2006, Hogg vd. 2008, Meredith vd. 2012). Bu modellerin temel avantajı, yüksek yerel çözünürlük kullanarak girdapları temsil etme yetenekleridir. Dezavantajı ise QG denklemlerinin iki boyutlu (enlem, boylam) olmaları nedeniyle MOC ile ilgili bilgi vermemeleridir. 2) Üç boyutlu denklemleri çözen okyanus modelleri; bunlar idealize kanal topografyasını kullanıp rüzgârı değiştirerek ACC değişimini incelemişlerdir (Henning ve Vallis 2005, Viebahn ve Eden 2010, Wolfe ve Cessi 2010). Bu modellerin temel problemi ise basit topografya bilgisi kullanılmaları nedeniyle gerçeklikten uzak olmalarıdır. 3) Bölgesel okyanus modelleri; atmosfer tarafından zorlanan yüksek çözünürlüklü okyanus ve deniz buzu

bütünleşik modelleridir. Hallberg ve Gnanadesikan (2006) 0.17 derece yatay çözünürlüklü model ile rüzgârı %20 artırıp-azaltarak girdap enerjisini incelemişlerdir. Bu tip modellerin en büyük dezavantajı ise atmosfer-okyanus etkileşimini ihmal etmeleridir. 4) Tamamen bütünleşik çalışan atmosfer, okyanus ve deniz buzu küresel modelleri; bu tür modeller çok yüksek miktarda hesaplama kaynağına ihtiyaç duydukları için yatay yersel çözünürlükleri orta ölçekli girdapları çözmede yetersiz kalır. Orta ölçekli girdaplar, düşük yersel çözünürlüğe sahip okyanus modellerinde basitleştirilmiş alt modeller kullanılarak (parametrizasyonlar) tanımlanmak zorundadır. Bu problemin çözülmesi amacıyla son yirmi yılda birçok farklı yöntem öne sürülmüştür. Bunların en önemlisi Gent ve McWilliams ya da bilinen adı ile GM (Gent and McWilliams 1990, Gent *et al.* 1995) alt modelidir. GM alt modelinde izopiknik katmanlarının açısı (slope of isopycnic layers) hesaba katılır ve bu bilgi sahte bir hız (bolus velocity) olarak kullanılır. Ancak, bu tür alt modeller MOC'nin nasıl değişeceğini hesaplamakta büyük bir belirsizlik yaratmaktadır. Bu yüzden en iyi yaklaşım hem orta ölçekli girdapları çözebilen hem de atmosfer-okyanus etkileşimini tanımlayabilen yersel bütünleşik model sistemleridir (Farnetti ve Gent 2011).

Bu çalışmadaki amacımız, bütünleşik bir atmosfer, okyanus ve deniz buzu modeli geliştirmeden önceki gerekli olan modellerin Antarktika ve Güney Okyanusu için olan performanslarını incelemek ve ayrıca iklim değişikliğinden kaynaklanan rüzgar artımı etkisini inceleyebilmektir. Bu amaçla bölgesel yüksek çözünürlüklü atmosfer ve okyanus-deniz buzu modelleri ayrı ayrı çalıştırılmış ve rüzgarın etkisini incelemek için duyarlılık benzetimleri yapılmıştır. Bölüm 2'de kullanılan modeller tanıtılmış, model alanları ve özellikleri hakkında bilgiler verilmiştir. 3. Bölümde atmosfer sonuçları incelenmiş ve okyanus-deniz buzu modeli ile yapılan duyarlılık benzetimleri analiz edilmiştir. Bölüm 4'te ise sonuçlar tartışılmış, gelecekteki çalışılacak konular hakkında bilgi verilmiştir.

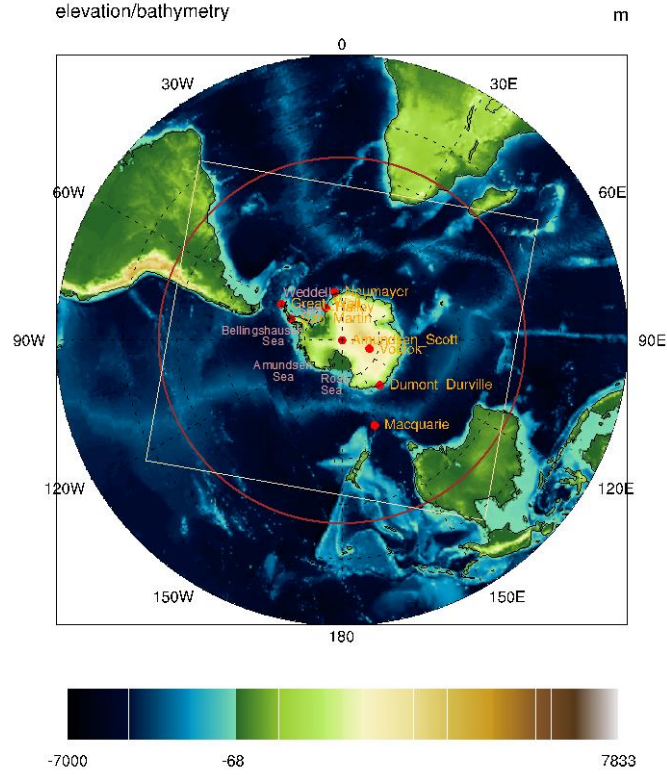
2. Materyal ve Metot

Güney Okyanusu'nda iklim değişikliği ile beraber yaşanacak olası değişimleri tespit etmek üzere okyanus ve atmosfer modelleri birlikte kullanılarak bir hassasiyet çalışması yürütülmüştür. Bu kısımda atmosfer ve okyanus modellerinin ayrı ayrı çalışma alanları ve kurulum detayları ile ilgili bilgiler verilmektedir.

2.1 Atmosfer ve Okyanus Modeli Çalışma Alanları

Bu çalışmada atmosfer modeli olarak "Weather Research and Forecasting (WRF)" modeli kullanılmıştır. WRF, National Center for Atmospheric Research (NCAR) tarafından geliştirilmiş açık kaynak kodlu sıkıştırılabilir (fully compressible), hidrostatik olmayan (non-hydrostatic) bir atmosfer modelidir (Skamarock *et al.* 2008). Yatay modeli ağı olarak Arakawa-C ağ kullanırken, düşeyde ise topografyayı takip eden (terrain-following) bir ağ yapısına sahiptir. Model iç içe yuvalanmış olarak (nest) ve farklı düşey seviyelerde çalıştırılabilir. Model ayarları, sınır tabaka, kümülüs bulut, uzun dalga ve kısa dalga radyasyon ve mikrofizik parametrizasyonları için kullanıcıya oldukça geniş bir şema yelpazesi sunmaktadır. Güney Okyanusu ve Antarktika Kıtası'nın uygun bir şekilde modellenebilmesi amacıyla Atmosfer modelinin alanı kıta Antarktika'sı merkezde kalacak şekilde Şekil 1'de görüldüğü gibi belirlenmiştir (sarı kare alan). Atmosfer modeli 25 km x 25 km yatay çözünürlüğe sahip, USGS (United States Geological Survey) tarafından sunulan yüzey verileri kullanılarak oluşturulan altlıkla model koşturmaları için hazırlanmıştır.

Bu çalışmada Antarktika kıtası için yapılacak benzetimlerde meteorolojik veriler ise ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecast) tarafından hazırlanıp servis edilen yeni veri seti ERA5'ten (C3S 2017) elde edilmiştir. ERA5 veri seti tüm dünya için 30km yatay çözünürlüğüne ve yerden 80 km'ye kadar 137 düşey seviyeye sahip, gelişmiş modelleme teknikleri ve veri asimilasyon sistemlerini gözlem verileri ile birleştirerek hazırlanmış bir veri setidir.



Şekil 1. Güney yarımküre topoğrafya ve batimetrisi ile gözlem istasyonlarının bulunduğu konumlar. WRF model alanı sarı kare ile, MITgcm model alanı ise kırmızı daire ile gösterilmiştir.

Çalışmada modelin analiz periyodu 2007-2013 yıllarını kapsamaktadır. Bu bağlamda modelin spin-up zamanı da göz önünde tutularak model koşurmalarında yüzey ve basınç seviyeleri için gerekli meteorolojik parametreler, ERA5 verisinden 2006 yılı Ocak ayından 2014 yılı Ocak ayına kadar olan bir periyodu kapsayacak şekilde 6 saatlik veri setleri olarak hazırlanmıştır. Bununla birlikte modelin günlük deniz suyu sıcaklığı ve deniz buzu verileri küresel olarak 0.25 derece yatay çözünürlüğe sahip Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OISST, NCEI 2016) verisi kullanılarak hazırlanmıştır.

Çizelge 1’de verilen model ayarları, Antarktika kıtası için yapılan çalışmalar ve modeli geliştiren kurumun kutup bölgesi için tavsiye ettiği ayarlar göz önünde tutularak hazırlanmıştır.

Çizelge 1. Atmosfer modelinde kullanılan konfigürasyon detayları

Ayar	Ayar Değeri
Toplam Ağ Boyutu	414 x 368
Hücre Boyutları (dx, dy)	25km x 25km
Düşey Seviye Sayısı	44
Mikrofizik parametrisasyonu	WSM5
Kısa-Uzun dalga Radyasyon şemaları	Goddard, RRTMG
Bulut şeması	Kain-Fritsch
PBL şeması	MYJ
Kara yüzey şeması	Noah-LSM

Dinamik Parametrisasyon Ayarları	
	Simple diffusion
	No vertical damping
	Positive definite
	advection of moisture and scalars

Bu fiziksel ve dinamik parametrisasyonlara ilave olarak model alanı spektral nudging tekniği ile girdi olarak verilen meteorolojik durumdan uzaklaşmaması için sınırlardan zorlanmıştır. Spektral nudging (Skamarock vd. 2021) yapılmasının en önemli sebebi WRF modelinin yapılan çalışmalarda daha çok günlük, haftalık ya da aylık tahmin ya da meydana gelmiş herhangi bir meteorolojik olayın detaylı incelenmesinde tercih edilmesidir (Glisan vd 2013, Markina vd. 2018). Bir bölgesel model gibi çalıştırıldığında başlangıç-sınır şartlarından uzaklaşması model sonuçlarının istenilen ve/veya beklenen doğrulukta olmamasına neden olabilecektir. Bu durumda modelin başlangıç ve sınır şartlarından çok uzaklaşmaması için rüzgar (u ve v), sıcaklık ve nem değişkenlerine ilk 20 seviyenin üzerinde her 6 saatte dalga sayıları (wavenumbers) x yönünde 10 ve y yönünde 9 olacak şekilde zorlama yapılmıştır. Model, 1 Ocak 2006 yılından 1 Ocak 2014 tarihine kadar sürekli koşurulmuştur.

Okyanus ve deniz buzu modeli olarak Massachusetts Institute of Technology (MIT) Üniversitesi tarafından geliştirilen MIT Genel Sirkülasyon Modeli'nin (MITgcm General Circulation Model, Adcroft *et al.* 1999) revizyon 65 sürümü kullanılmıştır. MITgcm açık kaynak, üç boyutlu, serbest yüzey ve z^* koordinatlarını kullanarak Reynolds ortalama Navier-Stokes eşitliklerini, hidrostatik ve Boussinesq kabullerini kullanarak çözen bir modeldir. Modeli oluşturan eşitlikler akı formunda olup yatay ekseninde küresel koordinatları ve düşey ekseninde kısmi z^* -koordinatlarını kullanmaktadır. Model sıcaklık, tuzluluk ve momentum için ikinci, üçüncü ve dördüncü dereceden yatay ve düşey iletim şemalarını desteklemektedir. Tanımlanan parametreler ile kullanılan alt modeller ve sayısal çözüm teknikleri değiştirilerek farklı uygulamalar için modeli özelleştirmek mümkündür. Okyanus model alanı Antarktika kıtasından 24°G enlemine kadar seçilmiştir (Şekil 1 kırmızı daire). MITgcm modeli 1/12 derece yatay çözünürlüğe sahip, batimetrisi GEBCOV1 (Becker *et al.* 2009) açık kaynak kullanılarak hazırlanmış ve model koşturmaları için hazırlanmıştır. Kuzey sınır bölgesinin 24°G enlemine kadar alınmasının nedeni hem ACC'yi iyi çözebilmek hem de deniz buzu açık sınır koşullarında oluşabilecek problemlere karşı deniz buzunun erişemeyeceği enlemlere çıkmaktır. Okyanus modeli için kullanılan yüzey sınır koşulları atmosfer modelinde de olduğu gibi ERA5 reanaliz veri seti kullanılarak koşturulmuştur. Kuzeydeki yatay sınır koşulları da The Simple Ocean Data Assimilation (SODA, Carton *et al.* 2018) okyanus reanaliz veri setinden üretilmiştir. Çalışma kapsamında modelin analiz periyodu 2007-2013 yıllarını kapsamaktadır. Zaman aralığı seçimlerinde özellikle atmosfer modeli ile aynı zaman aralığı seçilmiştir. Model çalışmasında seçilen yüksek çözünürlüğün (1/12 derece) avantajı orta ölçekli girdapları parametrize etmeye yarayan Gent-McWilliams şemasına gerek kalmadan, girdapların çözülebilesidir.

Çizelge 2. Okyanus model konfigürasyonu

Ayar	Ayar Değeri
Toplam Ağ Boyutu	4320 x 640
Hücre Boyutları (dx, dy)	4km x 4km
Düşey Seviye Sayısı	42
GM Thickness diffusion	Kapalı
Deniz buzu şemaları	MITgcm Seaice package
Sınır tabakası şeması	KPP
Dinamik	Implicit diffusion
Parametrizasyon	Leith Viscosity
Ayarları	7th order advection scheme

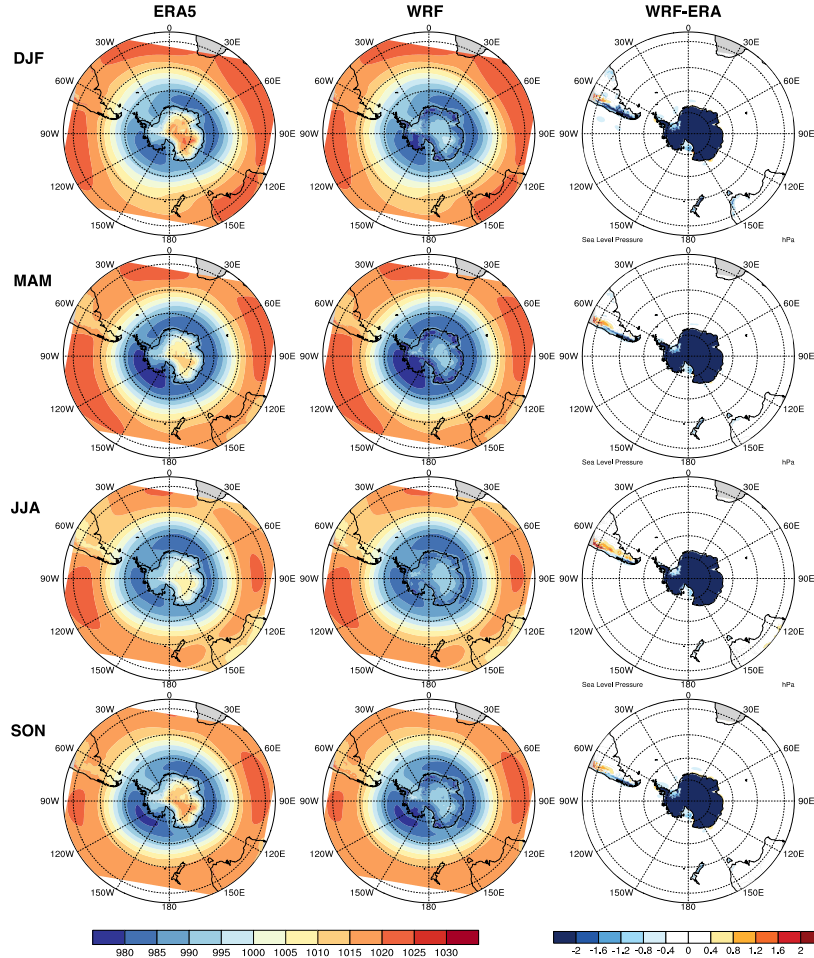
Çizelge 2'de verilen model ayarları, MITgcm modelinin kullanıldığı ve daha öncede test edilen Southern Ocean State Estimate (SOSE, Mazloff *et al.* 2010) konfigürasyonuna benzer olarak seçilmiştir. Bu fiziksel ve dinamik parametrizasyonlara ilave olarak kuzey sınırda Orlanski tipi açık sınır koşulları kullanılmıştır. Modelde herhangi bir zorlama (nudging) kullanılmamıştır. Model, 1 Ocak 2007 yılından 1 Ocak 2014 tarihine kadar sürekli olarak koşturulmuştur. Toplam iki adet farklı model benzetimi yapılmıştır. Bunlardan biri kontrol benzetimidir. Kontrol (bundan sonra Ctrl) benzetiminde açık sınır koşulları SODA okyanus reanaliz model veri setinden alınmıştır. İkinci benzetimde yatay rüzgar gerilmeleri Güney Okyanusu üzerinde 1.5 kat artırılarak duyarlılık analizi yapılmıştır.

3. Bulgular

3.1. Atmosferik Model Bulguları

Benzetim sonuçlarını karşılaştırmak için girdi verisi olarak ERA5 verilerinin 2007-2013 yıllarını kapsayan uzun dönem mevsimsel ortalamaları ile WRF sonuçlarının mevsimsel ortalamaları alansal olarak karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte modelin koşturulduğu döneme ait gözlem verilerine sahip olan bazı istasyonlar için sıcaklık ile rüzgar yön ve hızı için zaman serisi şeklinde karşılaştırmalar da yapılmıştır.

ERA5 ile WRF benzetimleri sonucunda elde edilen deniz seviyesi basınçları karşılaştırıldığında, modelin mevcut alçak ve yüksek basınç alanlarının yerlerini tespit etmede bütün mevsimler için başarılı olduğu Şekil 2'den görülmektedir.

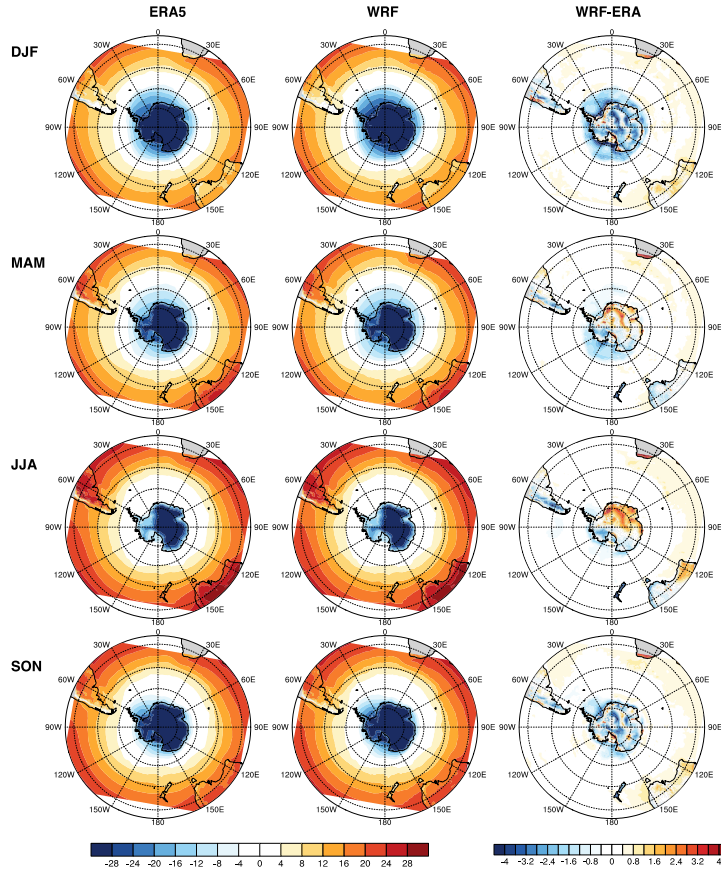


Şekil 2. Güney yarımküre (austral) mevsimsel (kış-DJF; ilkbahar-MAM; yaz-JJA; sonbahar-SON) deniz seviyesi basıncının ERA5 ve WRF ve WRF ile ERA5 farkı için dağılımı.

Bellingshausen-Amundsen Denizi üzerindeki alçak basınç merkezi bütün mevsimler boyunca hem ERA5 hem de WRF için gözlemlenmektedir ve fark haritalarına bakıldığında alçak merkezin büyüklükleri için fark çok küçüktür (± 0.2 hPa). Ancak model buz örtüsü (ice sheet) üzerinde bütün mevsimlerde daha derin bir alçak basınç merkezi (fark -2 hPa üzerinde) göstermektedir. Güney Amerika'nın Pasifik Okyanusu kıyılarına komşu olan kara alanlarında ise model daha düşük basınçlar gösterirken, Avustralya üzerinde belirgin bir fark gözlenmemiştir.

Model ve ERA5 reanaliz veri arasında 2 m'deki hava sıcaklıkları karşılaştırıldığında her iki veri mevsimsel olarak benzer örüntülere sahiptirler. Kıta

Antarktika'sı Güney Okyanusu'na göre hem model hem de reanaliz verisinde daha soğuktur. Her iki veri birbiri ile karşılaştırıldığında ise kış ve sonbahar (DJF ve SON) mevsimlerinde buz örtüsü üzerinde model daha düşük sıcaklık değerlerine sahiptir (Şekil 3). Bu çalışmada mevsimler Austral mevsim olarak gösterilmiştir (DJF: Austral kış, JJA: Austral yaz gibi). Yine Şekil 3'de ilkbahar ve yaz ayları için ise $60^{\circ}B-60^{\circ}D$ alanları arasında model buz örtüsü üzerinde $2^{\circ}C$ 'den fazla sıcaklık farkı meydana gelirken Bellingshausen-Amundsen Denizi kıyılarında $2^{\circ}C$ daha düşük sıcaklıklara sahiptir. Kıtaların doğu kıyılarında ise modelin okyanus üzerinde en fazla $1^{\circ}C$ 'ye kadar daha sıcak bir havaya sahip olduğu görülmektedir.

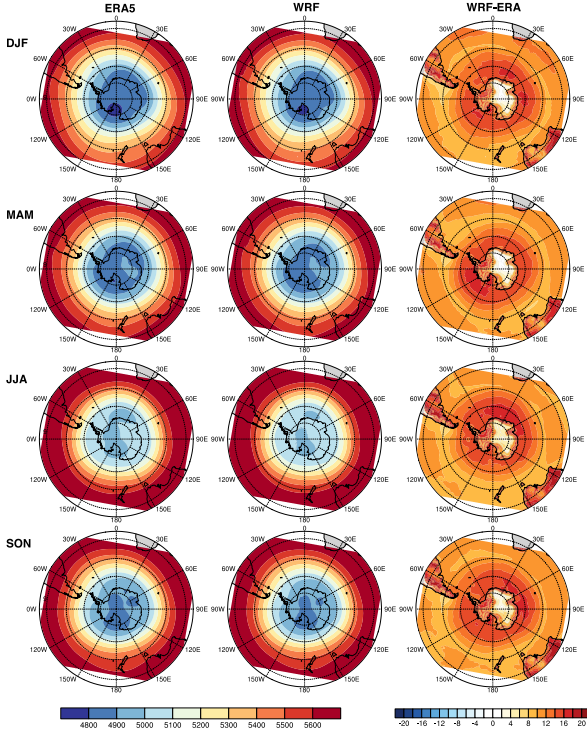


Şekil 3. Güney yarımküre (austral) mevsimsel (kış-DJF; ilkbahar-MAM; yaz-JJA; sonbahar-SON) 2m sıcaklığı için ERA5, WRF ve WRF ile ERA5 farkı dağılımı.

Yukarı seviyede modelin nasıl bir benzetim gerçekleştirdiğini ortaya koyabilmek için 500 hPa jeopotansiyel yükseklikleri arasındaki fark incelendiğinde, genel olarak modelin daha yüksek jeopotansiyel değerlere sahip olduğu ve bu değerlerin yaklaşık 10 hPa ile 20 hPa arasında değiştiği Şekil 4'te gözlemlenmiştir. Bu değişimler bütün mevsimlerde benzer örüntüler göstermektedir. Antarktik Yarımadası dışında kalan kıtanın doğu kıyılarındaki ise basınç değişiklikleri 6 hPa'dan daha düşük değerlere sahiptir. Bellingshausen-Amundsen Denizi'nde görülen alçak basınç merkezi ile uyumlu olarak 500 hPa jeopotansiyel yüksekliğinde daha batıda meydana gelen oluk, yaz (güney yarımküre) mevsimi hariç bütün mevsimler boyunca gözlemlenmektedir. Ancak meydana gelen oluk sonbaharda model sonuçlarında Ross Denizi yakınlarında daha küçük bir alan üzerine yerleşmiştir.

Güney Kutbu etrafını halka şeklinde çeviren sürekli güçlü batılı rüzgarlar bandı mevcuttur. Bu kuvvetli batılı rüzgarlar yapılan benzetimlerde de elde

edilmiştir. Bu batılı rüzgar bandının kuzey-güney hareketi Southern Hemisphere Annular Mode (SAM) olarak da bilinen Antarktik Salınımının pozitif ya da negatif fazını bu da batılı rüzgar bandının güneye Antarktika'ya ya da kuzeye ekvatora doğru yer değiştirmesini göstermektedir. Birkaç hafta süren salınımın negatif fazı güçlü batılı rüzgarlar, kararsız hava ve fırtınaların Yeni Zelanda bölgesinde meydana gelmesine neden olmaktadır.

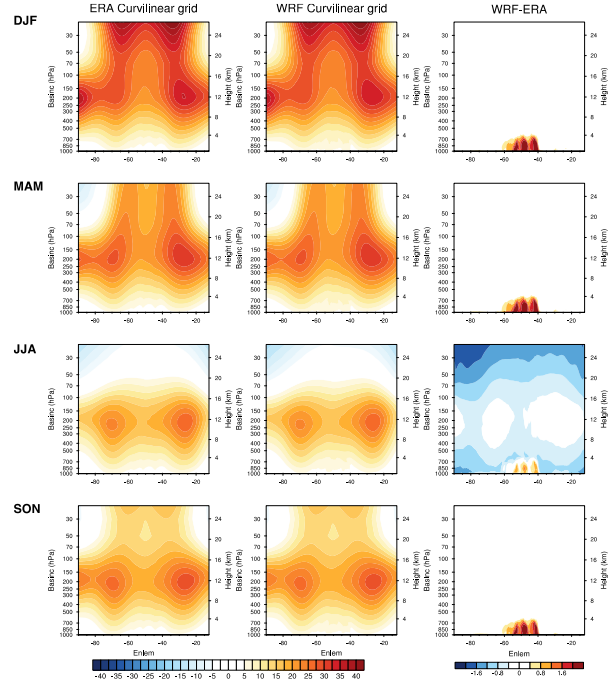


Şekil 4. Güney yarımküre (austral) mevsimsel (kış-DJF; ilkbahar-MAM; yaz-JJA; sonbahar-SON) 500hPa jeopotansiyel yüksekliği için ERA5, WRF ve WRF ile ERA5 farkı dağılımı.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen benzetimlerde bütün mevsimler için meydana gelen batılı rüzgarların örüntüsü ERA5 reanaliz verisi ile karşılaştırıldığında benzerlik göstermektedir. Ancak büyüklük olarak irdelendiğinde modelin genel olarak kutup dairesi etrafındaki okyanus üzerinde yaklaşık 1 ms^{-1} daha zayıf rüzgarlara sahip olduğu ve güney yarımküre kış ve sonbahar mevsimlerindeki bu rüzgar farkının yaz ve ilkbahar mevsimlerinde genel olarak 1 ms^{-1} 'nin altında olduğu görülmüştür. Kıta Antarktika'sı üzerinde ise bu farklar 1 ms^{-1} 'nin üzerinde değerlere sahiptir.

Yer seviyesi ya da belli bir basınç seviyesinde sıcaklık, rüzgar, basınç, jeopotansiyel yükseklik gibi bazı parametrelerdeki değişimin yanı sıra bazı değişkenlerin bütün atmosfer sütunu boyunca olan değişimi de önemlidir. Güney yarımküre üzerinde özellikle zonal rüzgarın değişiminin buradaki atmosferik olaylar açısından önemli olması nedeniyle zonal rüzgarın zonal ortalamasının basınç seviyelerindeki değişimi incelenmiştir. 1000 hPa-20 hPa arasındaki basınç seviyeleri boyunca model tarafından gerçekleştirilen mevsimsel zonal rüzgar

benzetimlerinin ERA5 reanaliz verisi ile benzer bir yapı gösterdiği Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 5. Güney yarımküre (austral) mevsimsel (kış-DJF; ilkbahar-MAM; yaz-JJA; sonbahar-SON) zonal rüzgarın zonal ortalamasının ERA5, WRF ve WRF ile ERA5 farkı dağılımı.

Yine Şekil5'te 200 hPa-100 hPa basınç seviyesinde güçlü batılı rüzgarların hakim olduğu jetlerin görüldüğü model sonuçları ERA5 ile benzerdir. Bu kuvvetli rüzgarların meydana geldiği enlemler polar vortex olarak ifade edilir. Polar vortex bütün mevsimler boyunca görülür. Bununla birlikte daha yukarı basınç seviyelerine baktığımızda sonbahardan ilkbahara kadar batılı rüzgarların hakim olduğu stratosferik polar vortex'de hem model hem de ERA5 analizlerinden gözlemlenmektedir. Yaz ayında herhangi bir stratosferik polar vortex'in mevcut olmadığı da Şekil 5'teki JJA dağılımından görülmektedir.

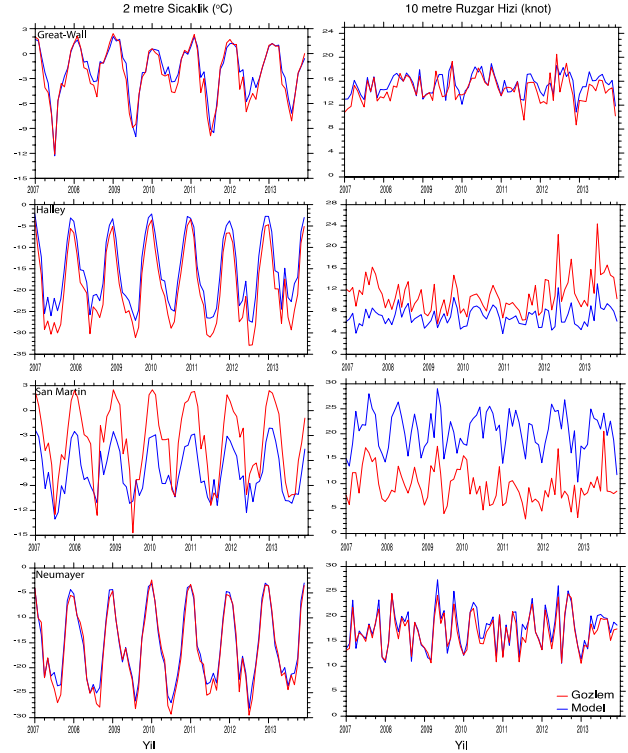
Model ve ERA5 arasındaki farklara baktığımızda iki veri arasında büyük farklar (1 ms^{-1} üzerinde) daha çok 1000 hPa'dan 700 hPa'a kadar olan atmosfer tabakasında 40°G - 60°G enlemleri arasında meydana gelmekte, model daha güçlü rüzgarlar üretmektedir. Genel olarak troposferik polar vortex'in yer aldığı seviyelerde fark yaklaşık 0.4 ms^{-1} 'dir. En büyük farkın yaz mevsiminde meydana geldiği Şekil 5'den de açıkça görülmektedir. Polar vortex'in görüldüğü 200 hPa ile 100 hPa arası hariç genel olarak model daha

düşük zonal rüzgar verileri ile benzetimi gerçekleştirmiştir. Yaz mevsiminde, model tarafından diğer mevsimlerde kuvvetli batılı rüzgarların görüldüğü 40°G-60°G enlemleri arasında düşeyde 700 hPa kadar olan tabakada görülen rüzgarların diğer mevsimlerden görece daha zayıf olduğu söylenebilir.

Model benzetimlerinin ERA5 reanaliz verileri ile karşılaştırması ilk olarak basınç, sıcaklık, rüzgar mevsimsel örüntüleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Alansal karşılaştırmanın yanı sıra çalışmanın yapıldığı 2007-2013 tarihlerine ait, kalite kontrolü gerçekleştirilmiş gözlem verileri ile model sonuçlarını noktasal olarak karşılaştırmak için British Antarctic Survey Yüzey İstasyonları (BASSM 2013) listesinde yer alan gözlem istasyonları içerisinde sekiz istasyonun sıcaklık ve rüzgar hızları zaman serisi olarak incelenmiştir. Seçilen istasyonların bulunduğu konumlar Şekil 1'de yer alan yükseklik ve batimetri haritası üzerinde görülmektedir. Sekiz gözlem istasyonuna ait model sonuçları elde edilirken istasyona en yakın ağ noktaları kullanılmıştır. Şekil 6 ve Şekil 7'de zaman serileri verilen istasyonların dört tanesi (Amundsen - Scott (2835 m), Vostok (3490 m), Dumont D'urville (43 m) ve Macquarie (8 m)) doğu boylamlarında diğer dört istasyon ise (Great Wall (10 m), Halley (30 m), San Martin (4 m) ve Neumayer (50 m)) batı boylamlarında yer almaktadır.

Yükseltisi daha düşük olan batı boylamlarında yer alan istasyonlara baktığımızda model sıcaklığının yıllar arası aylık salınımlarının gözlemlerle büyük uyum sağladığını söylemek mümkündür. San Martin istasyonu dışında modelin diğer istasyonlarda (Great Wall istasyonu 2009 yılı sonbahar ayları hariç) daha yüksek sıcaklıklara sahip olduğu Şekil 6'dan görülmektedir. Antarktika Yarımadası'nda yer alan ve 4 m yükseltiye sahip olan San Martin istasyonunda ise model sıcaklıkları 5-6 °C daha düşüktür. Genel olarak yıllık değişimlere baktığımızda ise özellikle Haziran-Temmuz-Ağustos (güney yarımküre kışı) aylarında modelin sıcaklık benzetimlerindeki farkların daha büyük olduğu görülmektedir. Bu istasyonlar arasında modelin daha az bir farkla sıcaklık benzetimi gerçekleştirdiği istasyonlar Great Wall ve Neumayer istasyonlarıdır.

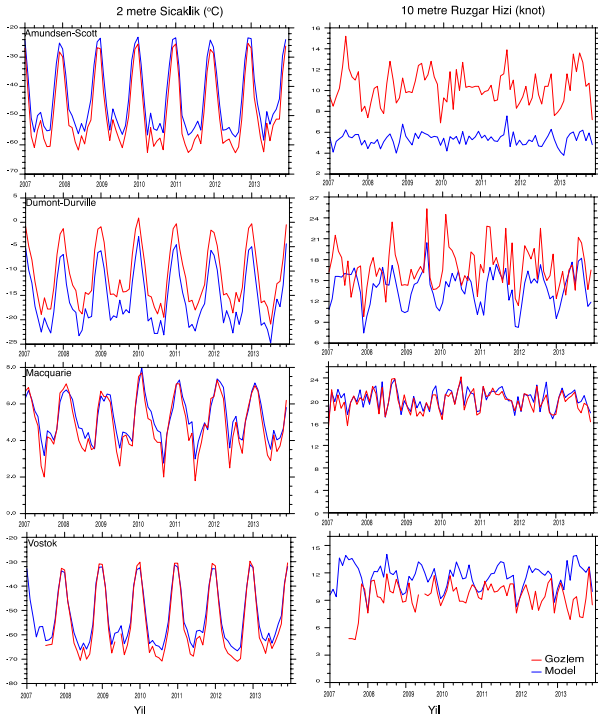
Rüzgar hızının zamansal değişimine baktığımızda ise San Martin istasyonunda model yüksek hızlara sahiptir ve gözlem ile arasındaki fark ortalama olarak 10 ms⁻¹'in üzerindedir. 30 m topoğrafyaya sahip Halley istasyonunda ise model gözlemlere göre daha zayıf rüzgar benzetimleri gerçekleştirmektedir. Great Wall ve Neumayer istasyonlarında ise rüzgar hızlarının benzetimlerinin model tarafından oldukça başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği yine Şekil 6'dan görülmektedir.



Şekil 6. Kıtada Antarktika'nın batı bölgesinde yer alan istasyonlarda model ve gözlem sonuçlarının sıcaklık ve rüzgar hızı karşılaştırması. Mavi çizgi model kırmızı gözlem verilerini göstermektedir.

Şekil 7'de yer alan doğu boylamları üzerindeki istasyonlar incelendiğinde 43 m yükseltiye sahip Dumont D'urville istasyonunda modelin sıcaklık benzetimleri gözlemlerden daha düşük, diğer istasyonlarda ise genel olarak sıcak olduğu görülmektedir. Bununla birlikte Macquarie ve Vostok istasyonlarındaki sıcaklıklarda ise hataların daha düşük olduğunu söylemek mümkündür. Yıllar arası ve mevsimsel değişimler model tarafından oldukça iyi bir şekilde temsil edilmiştir. Özellikle iki yüksek istasyon Amundsen-Scott ve Vostok istasyonlarındaki model ve gözlemin yıllar içindeki

ısınma ve soğuma periyodlarının aynı değişimlere sahip olduğu görülmektedir.



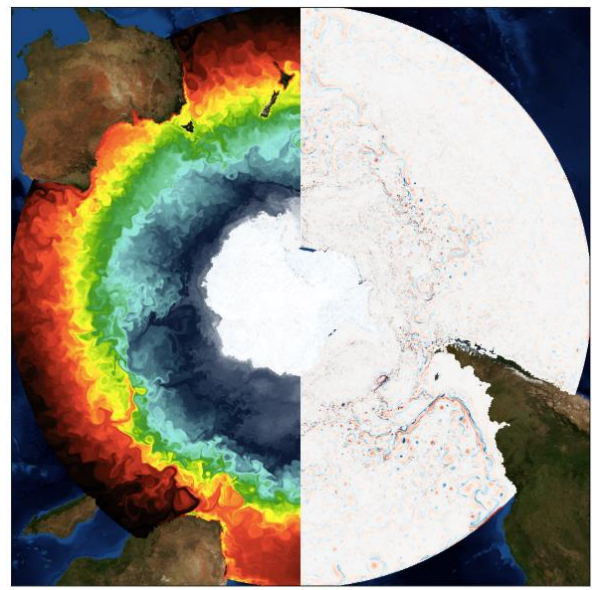
Şekil 7. Kıtı Antarktika'nın doğu bölgesinde yer alan istasyonlarda model ve gözlem sonuçlarının sıcaklık ve rüzgar hızı karşılaştırması. Mavi çizgi model kırmızı gözlem verilerini göstermektedir.

Rüzgar hızında ise beklendiği gibi model yüksek istasyonlarda oldukça büyük hatalar ile benzetimler gerçekleştirmiştir. Amundsen - Scott hariç diğer üç istasyon büyüklük olarak rüzgar hızında farklılıklar gösterse de genel olarak istasyonla uyumlu bir şekilde rüzgar değişimlerini (düşüş ve yükselişleri) takip edebilmektedir. Ancak burada dikkat çeken bir diğer husus modelin her iki istasyonda (Amundsen-Scott ve Vostok) benzer bir örüntü göstererek bütün benzetim periyodunda gözleme göre daha zayıf ya da daha kuvvetli rüzgarlar üretmiş olmasıdır. Bu istasyonlardan tam kutup noktasından bulunan Amundsen - Scott istasyonunda bu hızlar gözlemden $8-10 \text{ ms}^{-1}$ daha düşük iken Vostok istasyonunda ise Amundsen - Scott istasyonuna göre görece daha az bir hata ile daha yüksek rüzgar hızları model tarafından üretilmiştir. Dumont D'urville istasyonunda da yine model gözlemlerden daha zayıf rüzgarlara sahiptir. Doğu boylamında yer alan bu dört istasyondan daha kuzeyde kıta Antarktika'sı üzerinde yer almayan ve daha düz bir topografyaya sahip Macquarie istasyonunda ise daha düşük hatalar ile model benzetiminin gerçekleştiği Şekil

7'de görülmektedir. Gözlem ve model arasında meydana gelen farklarda modelin düşük çözünürlüğünün etkisi de önem teşkil etmektedir.

3.2. Okyanus Modeli Bulguları

Şekil 8'de Kontrol benzetiminin (Ctrl) 15 Ocak 2008 günlük yüzey deniz sıcaklığı (SST) ile göreceli girdaplık (relative vorticity) alanları gösterilmiştir. Antarktika Kutupsal Akıntısı (ACC) üzerinde bulunan SST gradyanı başarılı bir şekilde yakalanmıştır. Ayrıca ACC üzerindeki girdaplar da şeklin sağ tarafındaki göreceli girdaplık alanında rahatça görülebilmektedir.

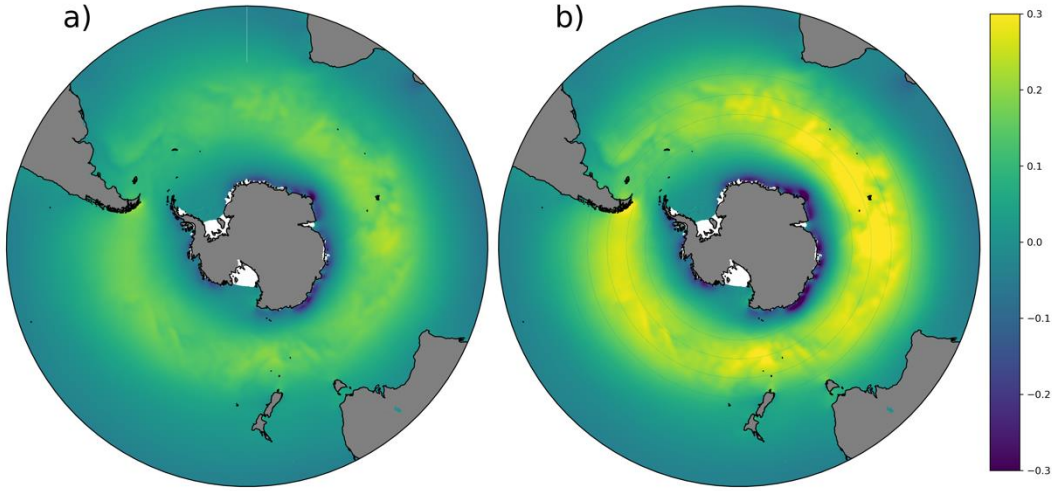


Şekil 8. MITgcm modelinin toplam alanı, solda 15 Ocak 2008 günü deniz yüzey sıcaklığı ve sağda göreceli girdaplık (relative vorticity) alanları gösterilmiştir.

Yapılan ikinci benzetim (1.5x rüzgar) ise kontrol benzetiminin üzerine Güney Okyanusu'ndaki Batılı rüzgarların yatay gerilme değerleri 1.5 katı artırılması ile elde edilmiştir. Okyanusun zorlandığı toplu formüllerde (Bulk formula) yatay rüzgar gerilmesi artırıldığında Ekman kuvveti değişir. Bu yüzden rüzgar değiştiğinde mekanik bir kuvvet yaratır. Şekli 9'da okyanus benzetimlerinde yatay gerilmelerin 7 yıllık ortalaması verilmiştir. Şekil 9a kontrol benzetimini göstermektedir. Şekil 9b ise yatay rüzgar geriliminin 1.5 katı artırıldığı benzetimdir. Kontrol benzetimindeki maksimum gerilme değeri yaklaşık olarak 0.2 Nm^{-2} olmasına rağmen 1.5x rüzgar benzetiminde bu değer beklenildiği gibi yaklaşık olarak 0.3 Nm^{-2} 'dir.

Güney Okyanusu'ndaki ACC'de oluşan değişimi anlamanın iki farklı yolu vardır. Bunlardan biri aynı zamanda model doğrulaması olarak da kullanılan Drake Geçidi su taşınımıdır (Drake Passage

transport). Şekil 10'da bütün benzetimlerin zamana bağlı Drake Geçidi taşınım miktarları gösterilmiştir. Drake Geçidi'nin taşınım miktarını ölçebilmek deniz koşulları nedeni ile oldukça zahmetli bir işlemdir.

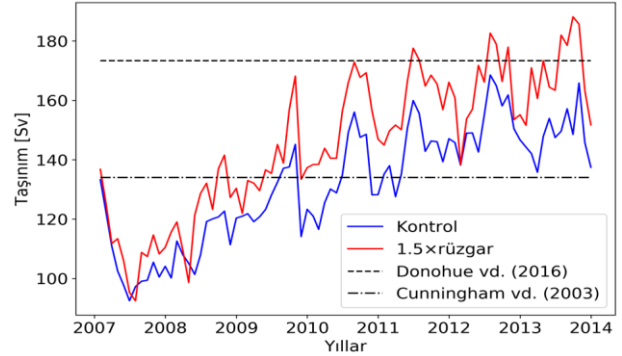


Şekil 9. İki farklı benzetimin yatay rüzgar gerilme değerleri (τ_x) gösterilmiştir.

Cunningham vd. (2003) taşınımı yaklaşık 137 Sv ($1\text{Sv}=10^6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) olarak hesaplamışlardır (noktalı kesikli çizgi). Drake taşınımı zaman ile de değişiklik göstermektedir. Donohue vd. (2016) da debiyi 173 Sv olarak hesaplamıştır (kesikli çizgi). Model çıktılarında elde edilen sonuçların her ikisinde ilk yılda bir düşme göstermektedir. İlk yıldaki düşüşe rağmen modelin hızlı alışması (model adjustment) sayesinde, daha sonraki senelerde taşınımın büyüklüğü artmaya başlamış ve üçüncü yılın sonunda dengelenmiştir. Kontrol benzetiminin son dört yıldaki ortalama taşınım değeri yaklaşık 152 Sv'dir. Bu değer literatürde bulunan iki gözlem değerinin arasında yer almaktadır. Bunun yanında iklim çalışmalarında kullanılan CMIP5 ve CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project, 5 ve 6. versiyon) modelleri de oldukça farklı taşınım değerleri gösterebilmektedir. Hatta bu model çalışmalarının bazıları 80 Sv'un altında veya 200 Sv'un üstündedirler (Meijers *et al.* 2012, Farneti *et al.* 2015). Kontrol benzetimlerinin literatürde verilen iki önemli değer arasında bir sonuç üretiyor olması modelin önemli dinamikleri doğru bir şekilde temsil ettiğini ortaya koymaktadır.

Duyarlık deneyi için yapılan değişiklikte rüzgar hızı artırıldıkça Drake Geçidi'ndeki taşınım miktarı da artış göstermiştir. Kontrol ile arasındaki farkın son dört yıl ortalaması yaklaşık olarak 14 Sv'dur. Bu da

yüzeyde yoğunluk gradyanının (meridional density gradient) değiştirdiğini göstermektedir. Bu değişim düşeyde de devam etmektedir.



Şekil 10. Farklı benzetimlerin zamana bağlı Drake Geçidi taşınım debisi. Daha önceki gözlem değerleri çizgili ve noktalı çizgili doğrular ile gösterilmiştir.

Değişimi ölçmenin diğer bir yolu da akım fonksiyonu (stream function, Ψ) alanına bakmaktır. Bunu hesaplamak için 1-3 numaralı denklemler kullanılmıştır.

$$U = \frac{-\partial\Psi}{\partial y} \quad (1)$$

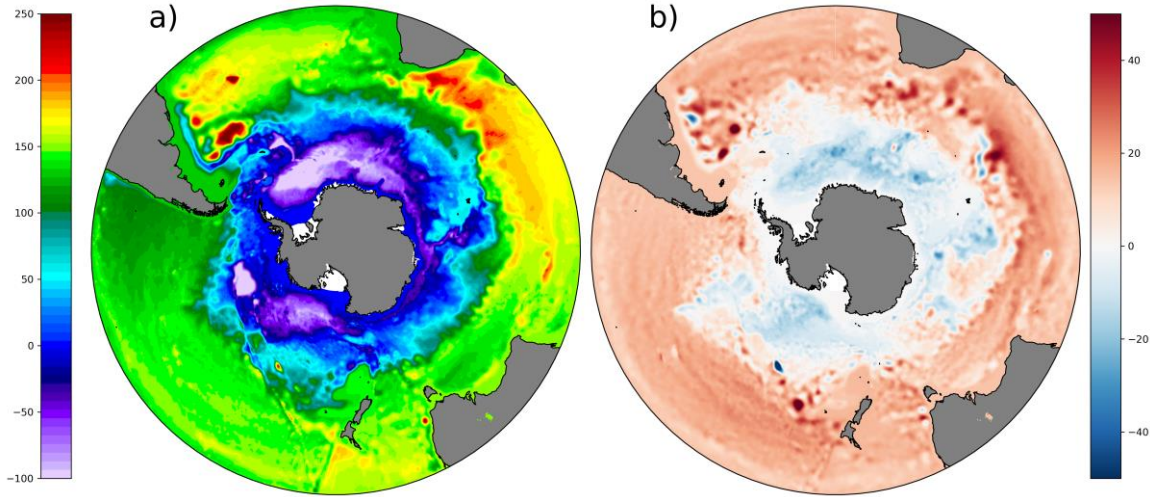
$$\int U \partial y = - \int \partial\Psi \quad (2)$$

$$\int U \partial y = - \int_{lat=Antarktika}^{lat=24^\circ G} \partial\Psi \quad (3)$$

Burada U iki boyutlu Barotropik yatay hızı göstermektedir. İntegral işlemi Antarktika Kıtası'nın

kıyısından başladığı için başlangıç koşulu sıfır alınır ve her enlem boyunca yatay Barotropik hız toplanarak hesaplanır. Şekil 11a'da Ctrl benzetiminin yedi yıllık ortalama akım fonksiyonu değerleri gösterilmiştir. Weddel Gyre ve etrafında güçlü bir akıntı gözükmektedir. Model alanının büyüklüğünden dolayı Agulhas akıntısının yeri de belirgindir (Afrika Kıtasının güney ucu). Model çalışmalarında Agulhas akıntısını çözebilmek önemli bir göstergedir. Çünkü ACC'nin tam yerini

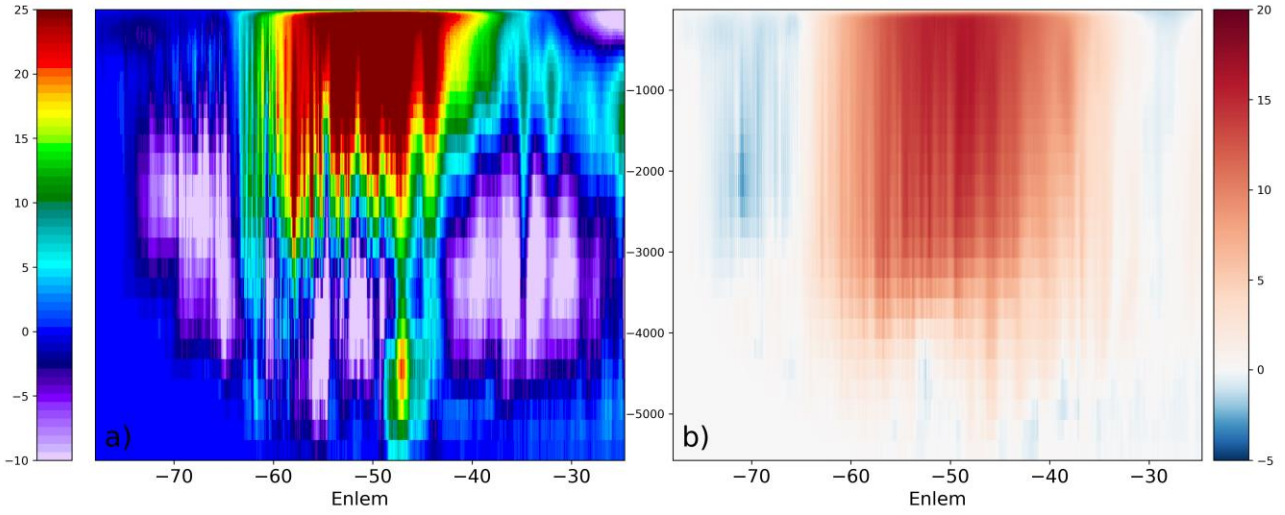
şekillendirme konusunda önemli bir dinamiğe sahiptir. Şekil 11b ise 1.5x rüzgar benzetimi ile kontrol benzetimi arasındaki farkı göstermektedir. Şekil 11b'den net olarak gözüktüğü gibi artan rüzgar gerilmesi akım fonksiyonunu negatif yönde güçlendirmiştir. Bu da daha önce belirtildiği gibi daha yüksek bir Drake Geçiş taşınımına sebep olmaktadır. Akım fonksiyonunun gradyan değişimi de bu artışın diğer bir göstergesidir.



Şekil 11. a) Ctrl benzetiminin 7 yıllık ortalama akım fonksiyon alanı. b) 1.5x rüzgar benzetim değerlerinin Ctrl benzetiminden çıkartılması ile elde edilmiştir.

Son olarak Güney Okyanus'unda Batılı rüzgarların artmasının ACC'ye olan etkisini incelemek için oşinografide sıklıkla kullanılan overturning sirkülasyonu (derinliğe bağlı olarak) hesaplanmıştır. Şekil 12 bu sirkülasyonları göstermektedir. Kontrol benzetim sirkülasyonu Şekil 12a'da gösterilmiştir. Pozitif olan yüzey ve yüzey altı (surface, sub-surface) devinim ACC'nin etkisini ortaya koymaktadır. 60°G'den daha güneye doğru oluşan negatif sirkülasyon, derinden gelen Kuzey Atlantik Derin Suyunun (North Atlantic Deep Water) batılı rüzgarlar ile yüzeye doğru çıkmasından (upwelling) kaynaklanmaktadır. Aynı noktada Deacon

hüresinin de görülmesi mümkündür. Deacon hüresinin maksimum büyüklüğü 8-9 Sv mertebesinde ve bu değer de gözlem değerleri ile uyumludur. Şekil 12b, 1.5x rüzgar benzetiminin devinim sirkülasyon alanının kontrol benzetimi ile aralarındaki farkı göstermektedir. Artan rüzgar hızı ACC tarafındaki sirkülasyonu da arttırmıştır (kırmızı alanlar). Toplam artış yaklaşık olarak 20 Sv seviyesindedir. Özellikle yüksek enlemlerde (30°G enlemi ve kuzeyi), değişen izopiknik konturlarının etkisi net olarak gözükmektedir.



Şekil 12. a) Ctrl benzetiminin 7 yıllık ortalama devinim sirkülasyon (overturning circulation) alanı. b) 1.5x rüzgar benzetim değerlerinin Ctrl benzetiminden çıkartılması ile elde edilmiştir. Renk ölçeği doğrusal verilmemiştir.

4. Tartışma ve Sonuç

İnsan kaynaklı iklim değişikliğinin bir sonucu olarak Güney Okyanusu üzerindeki Batılı rüzgarların kutba doğru kayması ve hızlarının artması beklenmektedir. Rüzgarlardaki bu artışın Antarktika Kutupsal Akıntısı'nın üzerindeki etkileri henüz tam olarak bilinmemektedir. Bu çalışmada bölgesel atmosfer ve okyanus-deniz buzu modelleri geliştirilmiş ve rüzgar artışlarının ACC üzerindeki etkisi incelenmiştir. Atmosfer modeli, 2007-2013 yıllarını içeren periyod için koşturulmuştur. Bu benzetim sonucunda modelin mevcut hali ile Antarktika kıtasındaki önemli atmosfer özelliklerini oldukça iyi bir şekilde temsil etmektedir. Model ortalama deniz seviyesi basınç alanlarını yersel olarak yakalamış olmakla beraber özellikle deniz buzu üzerinde büyüklük olarak daha derin alçak basınç merkezlerine sahiptir ve bu değer 2hPa değerlerine kadar ulaşabilmektedir. Buz örtüsü üzerinde modelin yere yakın atmosfer sıcaklığı (2 metre) güney yarımküre kış ve sonbahar mevsimlerinde daha soğuktur. İlkbahar ve yaz mevsimlerinde ise Bellingshausen-Amundsen Denizi kıyılarında daha soğuk, 60°B-60°D alanları arasında ise reanaliz verisine göre daha sıcak yere yakın hava sıcaklığı değerleri hakimdir. Model ayrıca kıtaların doğu kıyılarında yer alan okyanuslar üzerinde 1°C daha sıcak atmosfere sahiptir. Modelin yukarı atmosfer benzetimleri ise beklenen bütün temel motiflerin ve bunların mevsimsel değişimlerin oldukça iyi bir şekilde yakalandığına işaret etmektedir. Büyüklük olarak ise genelde model

daha yüksek basınç değerlerine sahiptir. Yukarı seviyelerde jet alanları ve bununla birlikte Polar vortex ve Stratosferik Polar vortex'in hakim olduğu alanlar ve mevsimsel davranışlar model tarafından yakalanmıştır. Model, aşağı ve orta troposferde 1ms⁻¹'den daha güçlü rüzgarlara sahiptir. Bu daha güçlü rüzgarlar yukarı seviyelere doğru gücünü azaltmaktadır. İstasyon özelinde baktığımızda model mevsimsel ve yıllar arası değişimleri iyi bir şekilde göstermektedir. Yüksek istasyonlarda (Amundsen - Scott ve Vostok) ise modelin rüzgarda çok büyük hatalara sahip olması beklenen bir sonuçtur. Buradaki hataların bilindiği gibi bir kısmı model çözünürlüğünün normalde noktasal karşılaştırma için çok kaba olmasından dolayısıyla modelin üretmiş olduğu topoğrafya ile gözlem noktasının yükseltisi arasında meydana gelecek farktan, bir kısmı da gözlem noktası yerinin ağ üzerindeki en yakın nokta olarak tespit edilmesinden kaynaklanmaktadır. Ancak burada modelin mevsim geçişlerini ve yıllar arası değişimi yakalamış olması modelin seçilen dinamik ve fiziksel parametrisasyonları ile yapılmış olan benzetimlerin gözlemlerle uyumlu olduğuna işaret etmektedir.

Atmosfer modeli çalışmaları ile uyumlu olarak iki adet okyanus-deniz buzu model benzetimi yapılmıştır. Bu benzetimler atmosfer modelinde olduğu gibi 2007-2013 tarihleri arasında koşturulmuştur. Kontrol benzetimi deniz yüzey sıcaklığı grayanını ve orta ölçekli girdapları başarı ile

yakalamıştır. Drake Geçidi taşınım değerleri yaklaşık olarak 152 Sv olarak hesaplanmıştır. Bu değer gözlem değerlerinin içinde yer almaktadır ve modelin Drake Geçidi dinamiklerini doğru bir şekilde benzeştirdiğini göstermektedir. Rüzgar yatay gerilmesinin 1.5 kat artırıldığı benzetimde Drake Geçidi taşınımı yaklaşık olarak 14 Sv artış göstermiştir. Bu da yüzeyde yoğunluk gradyanının değiştiğini göstermektedir. Akım fonksiyon değerlerini incelediğimizde Güney Okyanusu üzerinde 30 Sv artış gözlenmiştir. Derinliğe bağlı olan devinim sirkülasyonuna baktığımızda ise Deacon hücresi Barotropik olarak 20 Sv kadar artmıştır. Kutupaltı hücresi (Subpolar cell) büyüklüğü ise -5 Sv negatif yönde artmıştır.

Bu çalışmada, Güney Okyanusu'nda iklim değişikliği ile meydana gelecek olası değişimleri tespit etmek için yüksek çözünürlüklü okyanus modelinden elde edilen deniz suyu sıcaklığı ve deniz buzu parametreleri atmosfer modeline girdi olarak verilerek bir hassasiyet çalışması yürütülmüştür. Bu çalışmanın sonrasında amacımız daha önce gerçekleştirilmemiş bir hassasiyet analizi yaparak atmosfer ve okyanus-deniz buzu modellerini tamamen bütünleşik olarak çalıştırmak ve yatay gerilme artmasının atmosfer geri beslemelerini de inceleyebilmektir. Bu sayede Antarktika Kıtası ve Güney Okyanusunu kapsayan son teknoloji (state-of-the-art) bir modelleme sistemi işlevsel hale gelmiş olacaktır.

Teşekkür

Bu proje, TÜBİTAK tarafından Proje No: 118Y329 olarak fonlanmıştır. Proje kapsamında kullanılan hesaplama kaynakları Ulusal Yüksek Başarımlı Hesaplama Merkezi (UHEM) tarafından 1006542019 numaralı sözleşme ile sağlanmıştır.

5. Kaynaklar

Abernathey, R., and Cessi, P., 2014. Topographic enhancement of eddy efficiency in baroclinic equilibration. *Journal of Physical Oceanography*, **44**, 2107–2126.

Adcroft, A., Hill, C. N., and Marshall, J.C., 1999. A new treatment of the coriolis terms in c-grid models at both high and low resolutions. *Monthly Weather Review*, **127**, 1928-1936.

Becker, J.J., Sandwell, D.T., Smith, W.H.F., Braud, J., Binder, B., Depner, J., Fabre, D., Factor, J., Ingalls, S., Kim, S.H. and Ladner, R., 2009. Global bathymetry and elevation data at 30 arc seconds resolution: SRTM30_PLUS. *Marine Geodesy*, **32(4)**, 355-371.

Böning C.W., Dispert, A., Visbeck, M., Rintoul, S.R., Schwarzkopf, F.U., 2008. The response of the Antarctic Circumpolar Current to recent climate change. *Nature Geosciences*, **1**, 864–869.

Carton, J. A., Chepurin, G. A., & Chen, L., 2018. SODA3: A new ocean climate reanalysis. *Journal of Climate*, **31(17)**, 6967-6983.

Cunningham, S. A., Alderson, S. G., King, B. A., & Brandon, M. A., 2003. Transport and variability of the Antarctic circumpolar current in drake passage. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **108 (C5)**.

Doney, S. C., Large, W. G., and Bryan, F. O., 1998. Surface ocean fluxes and water mass transformations in the coupled NCAR Climate System Model. *Journal of Climate*, **11**, 1420–1441.

Donohue, K. A., Tracey, K. L., Watts, D. R., Chidichimo, M. P., & Chereskin, T. K., 2016. Mean antarctic circumpolar current transport measured in drake passage. *Geophysical Research Letters*, **43(22)**, 11-760.

Durack, P.J., Wijffels, S.E., 2010. Fifty-year trends in global ocean salinities and their relationship to broad-scale warming. *Journal of Climate*, **23**, 4342–4362.

Farneti R. and Gent P.R., 2011. The effects of the eddy-induced advection coefficient in a coarse-resolution coupled climate model. *Ocean Modelling*, **39**, 135-145.

Farneti, R., Downes, S. M., Griffies, S. M., Marsland, S. J., Behrens, E., Bentsen, M., ... & Yeager, S. G., 2015. An assessment of Antarctic Circumpolar Current and Southern Ocean meridional overturning circulation during 1958–2007 in a suite of interannual CORE-II simulations. *Ocean Modelling*, **93**, 84-120.

Gent, P.R., McWilliams, J.C., 1990. Isopycnal mixing in ocean circulation models. *Journal of Physical Oceanography*, **20**, 150–155.

- Gent, P.R., Willebrand, J., McDougall, T. J. and McWilliams, J. C., 1995. Parameterizing eddy-induced tracer transports in ocean circulation models. *Journal of Physical Oceanography*, **25**, 463–474.
- Gille, S.T., 2008. Decadal-scale temperature trends in the Southern Hemisphere ocean. *Journal of Climate*, **21**, 4749–4765.
- Glisan J.M., Gutowski JR. W. J., Cassano J.J. and Higgins M.E., 2013. Effects of Spectral Nudging in WRF on Arctic Temperature and Precipitation Simulations. *Journal of Climate*, **26**, 3985-3999.
- Hallberg, R., Gnanadesikan, A., 2006. The role of eddies in determining the structure and response of wind-driven Southern Hemisphere overturning: results from the modeling eddies in the Southern Ocean (MESO) project. *Journal of Physical Oceanography*, **36**, 2232–52.
- Henning, C.C., Vallis, G.K., 2005. The effects of mesoscale eddies on the stratification and transport of an ocean with a circumpolar channel. *Journal of Physical Oceanography*, **35**, 880–896.
- Hughes, C.W. and De Cuevas, B.A., 2001. Why western boundary currents in realistic oceans are inviscid: A link between form stress and bottom pressure torques. *Journal of Physical Oceanography*, **31(10)**, 2871-2885.
- Hogg, A.M., Meredith, M.P., Blundell, J.R., Wilson, C., 2008. Eddy heat flux in the Southern Ocean: response to variable wind forcing. *Journal of Climate*, **21**, 608–620.
- IPCC, 2007. The Physical Science Basis. Contribution of WGI to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, in Climate Change 2007, edited by S. Solomon, et al., Cambridge University Press, Cambridge, 996.
- Markina M., Gavrikov A., Gulev S., Barnier B., 2018. Developing configuration of WRF model for long-term high-resolution wind wave hindcast over the North Atlantic with WAVEWATCH III. *Ocean Dynamics*, **68**, 1593-1604.
- Marshall, J., and Radko, T., 2003. Residual-mean solutions for the Antarctic Circumpolar Current and its associated overturning circulation. *Journal of Physical Oceanography*, **33**, 2341–2354.
- Mazloff, M. R., Heimbach, P., & Wunsch, C., 2010. An eddy-permitting Southern Ocean state estimate. *Journal of Physical Oceanography*, **40(5)**, 880-899.
- Meijers, A. J. S., Shuckburgh, E., Bruneau, N., Sallee, J.-B., Bracegirdle, T. J., Wang, Z., 2012. Representation of the Antarctic Circumpolar Current in the CMIP5 climate models and future changes under warming scenarios, *Journal of Geophysical Research*, **117**, C12008.
- Meredith, M. P. and Hogg, A. M., 2006. Circumpolar response of Southern Ocean eddy activity to a change in the Southern Annular Mode. *Geophysical Research Letters*, **33**, L16608.
- Meredith, M. P., Naveira-Garabato A. C., Hogg, A.M., Farneti, R., 2012. Sensitivity of the overturning circulation in the Southern Ocean to decadal changes in wind forcing. *Journal of Climate*, **25**, 99–110.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G, Huang, X.-Y., Wang, W., and Powers, J. G., 2008. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113. doi:10.5065/D68S4MVH.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., ... Huang, X. -yu., 2021. A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3. doi:10.5065/1dfh-6p97.
- Sverdrup, H. U., Johnson, M. W., and Flemming, R. H., 1942: The Oceans: Their Physics, Chemistry and General Biology. Prentice Hall, 1087.
- Veronis, G., 1996: Effect of a constant, zonal wind on wind-driven ocean circulation. *Journal of Physical Oceanography*, **26**, 2525–2528.
- Viebahn J., Eden C., 2010. Towards the impact of eddies on the response of the Southern Ocean to climate change. *Ocean Modelling*, **34**, 150–165.
- Wolfe, C.L., Cessi, P., 2010. What sets the strength of the middepth stratification and overturning circulation in eddying ocean models? *Journal of Physical Oceanography*, **40**, 1520–1538.

İnternet kaynakları

1-<https://legacy.bas.ac.uk/met/READER/surface/>,
(03.02.2020)

2-<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>,
(07.04.2019)

3-<https://doi.org/10.5067/GHAAO-4BC02>, (08.05.2019)