

Kuzey yarıküredeki toplam ozon değişiminin sıcaklık ve girdap ısı akısı ile etkileşimi

Deniz DEMİRHAN BARI*, **H.Sema TOPCU**

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Meteoroloji Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Toplam ozonun en yoğun olarak bulunduğu 15km ile 55 km arasındaki orta atmosfer, dinamik etkilerin de en fazla görüldüğü bölgedir. Brewer-Dobson sirkülasyonu, orta atmosferdeki ozon taşınımını etkileyen temel çevrimdir. Girdap ısı akısı, Brewer-Dobson sirkülasyonu olarak da bilinen, kalan sirkülasyonun, düşey bileşenidir ve dinamik bir bakış için kullanılan rezidüel ortalama teorisinin temelini oluşturmaktadır. Bu çalışmada, toplam ozon değişiminin orta atmosferdeki sıcaklık ve girdap ısı akısı ile etkileşimi dinamik olarak incelenmiştir. Brewer-Dobson sirkülasyonunun matematiksel olarak modellenmesinde, dönüştürülmüş Eulerian ortalama akış denklemlerinden yararlanılmıştır. Çalışmada sirkülasyonun hesaplanmasında 1998-2007 yılları arasındaki ECMWF-ERA-Interim re-analiz verilerinden, toplam ozon değerleri için ise TOMS, OMI uydu verileri ile ECMWF ozon karışma oranı verilerinden yararlanılmıştır. 1998-2007 yılları arasında Kuzey yarıküre ozon değişimleri incelendiğinde, yukarı orta enlemlerde ve kutup bölgesinde ozon miktarının tropiklerden daha fazla olduğu görülmüştür. Orta ve yukarı enlemlerdeki toplam ozonun değişimini de etkileyen birincil mekanizma olan sirkülasyonun, yıl içinde en kuvvetli olduğu dönem Ocak ayı, etkilerinin en az görüldüğü dönem ise Temmuz ayıdır. Gözönüne alınan periyotta toplam ozon değeri ortalama olarak tropiklerde 240DU değerinden kutup bölgelerinde 420 DU değerine kadar değişmektedir. Orta enlemlerde ise 260-360DU arasında değişmektedir. Planeter aktivitenin değişiminin en fazla görüldüğü 100mb seviyesi için orta enlemlerdeki toplam ozonla, sıcaklıklar arasında yakın bir ilişki elde edilmiştir. Benzer şekilde, tropiklerdeki girdap ısı akısının orta enlemlerdeki sıcaklıkları, orta enlemlerdeki girdap ısı akısının da kutuplardaki sıcaklıkları kontrol ettiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: *Stratosferik ozon, Brewer-Dobson sirkülasyonu, ozon azalması.*

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Deniz DEMİRHAN BARI. demirhand@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 31 98.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Atmosfer Bilimleri Programında tamamlanmış olan "Evaluation of stratospheric ozone variability and interactions with Brewer-Dobson circulation" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 12.03.2010 tarihinde dergiye ulaşılmış, 22.04.2010 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.08.2011 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Bu makaleye "Demirhan Bari, D., Topçu, H S., (2011) 'Kuzey yarıküredeki toplam ozon değişiminin sıcaklık ve girdap ısı akısı ile etkileşimi', İTÜ Dergisi/D Mühendislik, 10: 3, 116-124" şeklinde atıf yapabilirsiniz.

Interrelationship between the variability of Northern Hemispheric total ozone, temperature and eddy heat flux

Extended abstract

Ozone levels in the atmosphere have significantly decreased over the last three decades not only over Polar Regions but also over mid-latitudes. This finding led to an intense debate on the characteristics of the stratospheric dynamics and atmospheric transport. Since most of the atmospheric ozone is found in the stratosphere and the vertical motion in the stratosphere is quite slow so the dynamics in this layer becomes of great significance to our climate. Evidently dynamical changes in the circulation contribute to observe ozone trends at northern mid-latitudes. Total ozone trends have been directly connected to changes in various dynamical parameters such as temperature, so thus eddy heat flux.

The eddy heat flux is the product of meridional wind departures and temperature departures. Dynamically eddy heat flux is the vertical component of Brewer-Dobson circulation. Brewer-Dobson circulation which is also known as residual circulation has a strong influence on stratospheric ozone variability and transport processes. Brewer-Dobson circulation is very strong during winter (January) and it increases the total ozone over high latitudes. In summer (July) the circulation is weak.

The global distribution of atmospheric heat transport is supported by zonally averaged parameters namely eddy heat flux and temperature. Since eddy heat flux transports heat, it has been obtained that dynamical temperature change is highly affected by the eddy heat flux. Physically temperature and eddy heat flux are strongly related to each other. Evidently the strong correlation between eddy heat flux and temperature interprets a relationship between total ozone and pronounced parameters.

Dynamical features of Northern Hemispheric ozone transport, temperature and eddy heat flux and their relationships for the specified time interval (1998-2007) makes up the basics of the study. The dynamical processes produced by eddies or wave motion in the stratosphere and mesosphere give

rise to the meridional circulation in the middle atmosphere that closely balances the force caused by the temperature deviation from the radiative equilibrium. Dynamic features affecting ozone include especially the atmospheric transport temperature variability and changes in eddy heat flux.

Ozone transport and variability of eddy heat flux and temperature are defined by zonally averaged parameters. It is easier to examine atmospheric variability through zonal mean fields which is also mathematically less complicated than using 3 dimensional flow equations.. In order to view the residual atmospheric circulation and describe zonally averaged structure of the atmosphere, a mathematical formalism is used for the eddy-mean flow cancellation which provides a separation between eddies and the mean meridional circulation. The formulation defines the transformed Eulerian mean (TEM) or residual circulation. Residual circulation calculation is given by the sum of the Eulerian mean circulation components and the eddy terms. In the study eddy heat flux and temperature are separately processed to be linked with total ozone transport.

In the present research total ozone data from Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) (1998-2004), Ozone Monitoring Instrument (OMI) (2005-2007) and European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ERA-Interim Re-Analysis data (1998-2207) have been used. The selected period for Northern Hemisphere and 180°W- 180°E is compiled for the middle atmosphere which includes the region from 100mb in the lower stratosphere and up to 10mb in the stratosphere. Middle atmosphere is a dynamically driven region compared to the troposphere, which is more sensitive to thermal driven heat engine. Relationship between mid-latitudinal ozone, eddy heat flux and temperature is chosen as the starting point to create an emphasis on the area around this region. It is confirmed that tropical eddy heat flux highly controls the mid-latitudinal total ozone and mid-latitudinal lower stratospheric temperature. Additionally polar ozone is strongly affected by polar eddy heat flux. Eddy heat flux at the mid-latitudes is highly correlated with the polar temperatures.

Keywords: Stratospheric ozone, Brewer-Dobson circulation, ozone depletion.

Giriş

Stratosferik ozon, yeryüzeyindeki ekolojik dengeyi kurulumunda önemli bir rol oynamaktadır. Ozon, canlılar için çok zararlı olan ultraviyole (UV) radyasyonu absorblayarak dünya üzerindeki yaşamın devamını sağlar. Ayrıca ozon, stratosfer ve troposferdeki radyatif etkileri ile iklim değişimine katkısı olan önemli bir sera gazıdır. Ozon ve iklim değişimi, ozonu azaltan gazların iklim değişimine olan katkıları nedeniyle de dolaylı olarak ilişkilidir. Kimyasal aktiviteler sonucu oluşan ozon azalmaları, yeryüzüne ulaşan güneş radyasyonu miktarını da değiştirdiği için ekolojik dengeyi de direkt olarak etkilemektedir. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda stratosferdeki ozonun değişiminin sadece kimyasal süreçlerle açıklanamayacağı dinamik etkilerin de gözönüne alınması gerektiği yönünde görüşler ileri sürülmüştür. Özellikle orta enlemlerdeki ozonun değişiminde stratosferdeki dinamik ve termal etkiler önem kazanmaktadır (NOAA, NASA, UNEP, WMO ve Commission, E. raporu, 2006).

Atmosferdeki toplam ozonun yıllık değişimleri incelendiğinde özellikle kış ve bahar aylarında orta enlemlerde ve kutup bölgelerinde (50°N-70°N) fazlalaştığı, tropiklerde ise azaldığı görülmektedir. Bu durum ozonun tropik bölgelerden kutuplara doğru büyük ölçekli planeter dalgalarla taşınması sonucu gerçekleşmektedir. Planeter dalgaların oluşturduğu bu sirkülasyon, stratosferde meydana gelmektedir ve Brewer-Dobson sirkülasyonu olarak adlandırılmaktadır (Dobson vd., 1946). Stratosferdeki ozonun değişimi ile Brewer-Dobson sirkülasyonu arasındaki ilişkinin araştırılması ile ilgili ilk çalışmalar 1960'da Brewer tarafından başlatılmıştır (Brewer, 1960). Atmosferdeki kalan sirkülasyonun modellenmesi için kullanılan Brewer-Dobson sirkülasyon modeli, atmosferdeki bileşenlerin taşınımının, zonal ortalama bir yöntemle incelenmesine olanak sağlar (Murgatroyd, 1970). Ekim ve Mayıs ayları arasındaki dönemde güç kazanan kalan sirkülasyon, toplam ozonun yukarı enlemlerde birikmesini sağlamaktadır (Nikulın ve Karpechko, 2005). Şubat ayında kimyasal faktörler ön plana çıkmaktadır. Yılın geri kalan zamanlarında, sirkülasyon zayıftır. Bu model, tropikal havanın, polar havadan daha az ozon içerdiğini dinamik olarak açıklar.

1998-2007 yılları arasında yapılan bu çalışmada, toplam ozonun ve orta atmosfer sıcaklığının Kuzey Yarıküre'deki değişimi ve girdap ısı akısı incelenmiştir. Çalışma bölgesi aşağı stratosferde 100mb'dan başlayarak stratosferdeki 10mb'a kadar uzanmaktadır. Çalışmada atmosferdeki zonal ortalama kütle taşınımını tanımlayan dönüştürülmüş Eulerian ortalama denklemleri ile kalan sirkülasyon matematiksel yöntemlerle modellenmiştir. Modellemenin sonucunda elde edilen parametrelerden girdap ısı akısı ve sıcaklığın toplam ozonla ilişkileri istatistiksel yöntemlerle incelenmiştir.

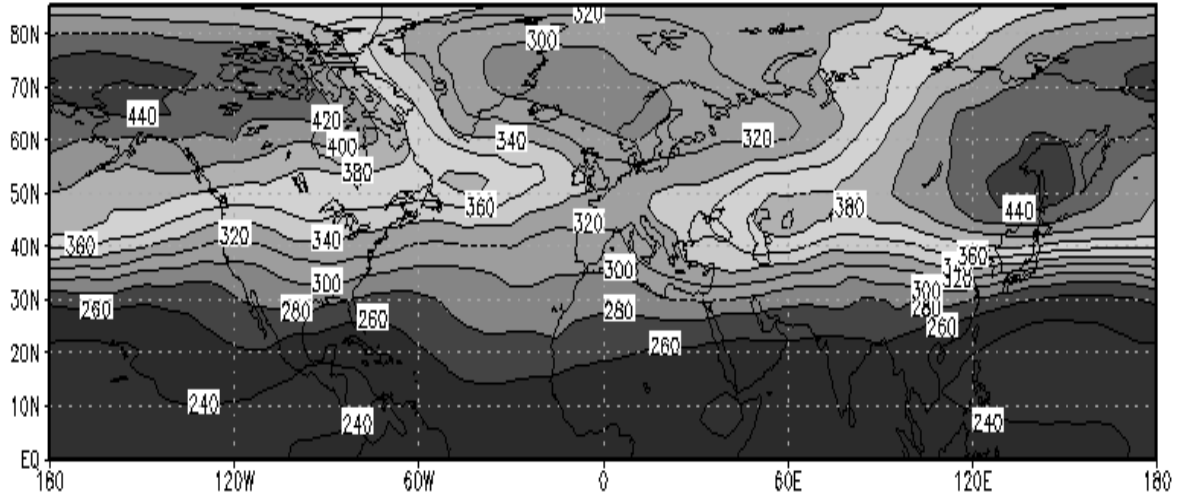
Veri ve yöntem

Çalışmada toplam ozon, sıcaklık, meridyonel rüzgar verileri kullanılmıştır. Toplam ozon verileri Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) uydusundan, ve Ozone Monitoring Instrument (OMI) uydularından sağlanmıştır. Sıcaklık, meridyonel rüzgar hızları gibi atmosferik veriler, The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) (1998-2007) ERA-INTERIM verilerinden temin edilmiştir. ECMWF re-analiz verilerinin çözünürlüğü 5° boylam, 2.5° enlem ve 100mb-10mb arası homojen olmayan yükseklik seviyesi şeklindedir.

Toplam ozonun global değişimi

Ozon dağılımı genel olarak tropiklerden kutup bölgelerine doğru olan büyük ölçekli taşınımınla kontrol edilmektedir. Tropikal aşağı stratosferik hava yukarı doğru hareket ederek, toplam ozonu stratosferik polar bölgelere taşır. Stratosferdeki ozonun kimyasal ömrü oldukça fazla olduğundan burada bir akümülyasyon başlar (Crutzen, 1971). Ortalama toplam ozonun global dağılımı Şekil 1'de gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi tropikal bölgelerde 240DU civarında olan toplam ozon, polar bölgelere doğru 440DU'ya ulaşmaktadır.

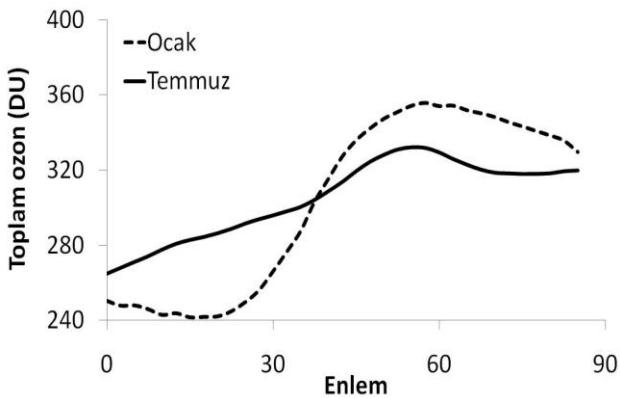
Kutup bölgelerinde meydana gelen ozon birikmesi Brewer-Dobson sirkülasyonu tarafından kontrol edilmektedir. Şekil 2'de zonal ortalama alınmış, toplam ozonun Ocak ayındaki enlemsel dağılımı verilmektedir. Ozonun enlemsel dağılımında özellikle dikkat çeken nokta, Brewer-Dobson sirkülasyonunun en fazla etkili olduğu



Şekil 1. Ortalama toplam ozonun Kuzey Yarıküre'deki değişimi (1998-2007)

ve kimyasal etkilerin en az görüldüğü Ocak ayında, enlemsel farklılıkların belirgin olmasıdır (Fusco ve Salby, 1999). Bunun yanısıra Brewer-Dobson sirkülasyonunun etkilerinin en az görüldüğü yaz aylarında (Temmuz) ise toplam ozon enlemler arasında çok farklılık göstermektedir.

Şekil 2'de gözönüne alınan periyotta (60°N-90°N) enlemleri arasındaki ortalama toplam ozon değişimi diğer enlem aralıklarına göre oldukça değişkendir.



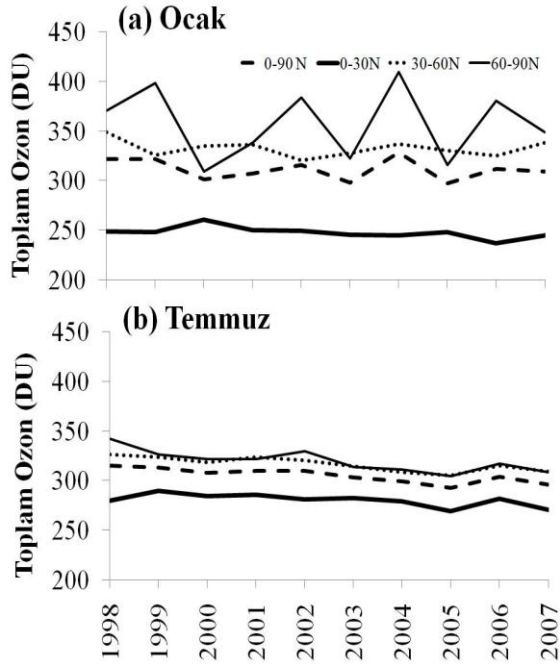
Şekil 2. Kuzey yarımküredeki toplam ozonun Ocak ve Temmuz aylarındaki değişimi (1998-2007)

Ocak ayında özellikle tropikal kuşakta ortalama toplam ozon 244DU-257DU değerleri arasında değişmektedir. Orta enlemlerde ise 325DU-351DU değerleri arasındadır. Maksimum toplam ozon değeri kutup bölgelerinde 2004 yılın-

da 425DU olarak hesaplanmıştır. Ozonun taşınımı göz önüne alındığında Temmuz ayı taşınımın az olduğu bir aydır. Temmuz ayı için gözönüne alınan enlem aralıklarında 1998-2007 yılları arasındaki değişimin az olması beklenmektedir. Bu ayda orta enlemler ev kutup bölgeleri arasındaki yıllık değişim hemen hemen aynıdır. Kuzey yarıküre'de maksimum ozon değeri 1998 yılında 344DU olarak hesaplanmıştır.

Şekil 3'de çeşitli enlem aralıklarındaki ortalama ozon değerleri gösterilmiştir. Şekilde farklı enlem dairelerindeki toplam ozon değerlerinin 1998-2007 yılları arasındaki değişimi verilmiştir. Seçilmiş enlem dairelerinin yıllık değişimlerinin birbirleriyle uyumu incelenmiştir. Şekil 3a'da Ocak ayındaki ozonun yıllık değişimi görülmektedir. Benzer şekilde minimum değerleri de yine aynı yılda gözlenmiştir (2000). Buradan açıkça anlaşılmaktadır ki, Kuzey yarımküredeki ozon değerleri en fazla kutup bölgesindeki ozondan etkilenmektedir. Temmuz ayındaki değişimler ise Ocak ayındaki ozon değişimleri kadar belirgin değildir (Şekil 3b). Tablo 1'de gösterildiği gibi, kış ve bahar aylarında ozon trendleri artmaktadır.

Ocak ayında 1998-2007 yılları arasında, Kuzey yarımküredeki ortalama ozon trendi -%6 olarak bulunmuştur. Benzer bir sonuç Tzanis (2009) tarafından da bulunmuştur. Ozon trendi orta enlemlerde -%6 ve kutuplarda -%8 şeklinde bulunmuştur.



Şekil 3. Belirli enlem dairelerindeki toplam ozonun Ocak ve Temmuz aylarındaki yıllık değişimi (1998-2007)

Yaz aylarında toplam ozonda belirgin bir değişim beklenmemektedir (Chandra vd. 1996). Temmuz ayında 1978-2007 yılları arasında Kuzey yarıküredeki on yıllık ozon trendi $- \%3$ olarak bulunmuştur. 1998-2007 yılları arasında Ocak ayının tersine, Temmuz ayında minimum azalma trendi kutup enlemlerinde ve orta enlemlerde gözlenmiştir ($- \%2$). Tropik bölgelerde ise on yıllık ozon trendi $- \%4$ şeklindedir. Ocak ayında en fazla azalmanın kutup bölgelerinde ($60^{\circ}\text{N}-90^{\circ}\text{N}$) olduğu en düşük azalmanın ise tropik bölgelerde ($0^{\circ}\text{N}-30^{\circ}\text{N}$) olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonuç WMO raporu (2007) sonuçlarıyla uyumludur.

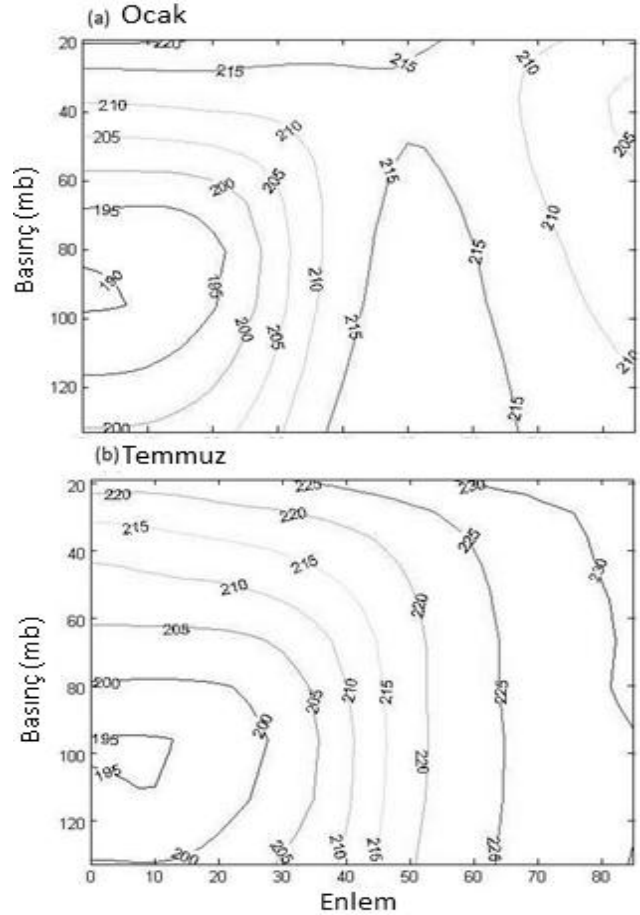
Toplam ozonun yıllar arası değişiminden ve on yıllık trendlerinin analizinden de anlaşılacağı gibi, Kuzey yarıküredeki ortalama toplam ozon değerlerini, kutup bölgesindeki ($60^{\circ}\text{N}-90^{\circ}\text{N}$) toplam ozon miktarı etkilemektedir.

Tablo 1. Toplam ozonun Ocak ve Temmuz aylarındaki on yıllık trendleri

	0-90°N	0-30°N	30-60°N	60-90°N
Ocak	-0.06	-0.05	-0.06	-0.08
Temmuz	-0.03	-0.04	-0.02	-0.02

Toplam ozonun zonal ortalama sıcaklıklarla ilişkisi

Toplam ozondaki yıllık ve enlemsel değişimler mevsimsel değişimlere dolayısıyla sıcaklık değişimlerine duyarlıdır (Finger vd., 1995). Toplam ozonun taşınımı söz konusu olduğunda da toplam ozon ve sıcaklıklar birbirleriyle yakında ilişkili parametrelerdir.



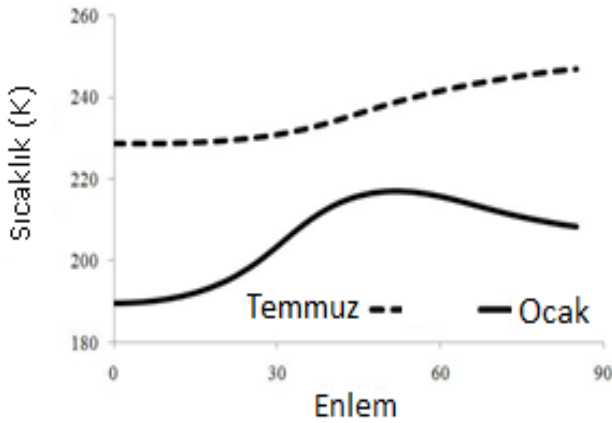
Şekil 4. Ocak ayı (a) ve Temmuz ayı (b) için zonal ortalama sıcaklığın (K) çeşitli basınç seviyelerine göre enlemsel değişimi (1998-2007)

Şekil 4a'da Ocak ayı için orta atmosferde zonal ortalama sıcaklık değerlerinin enlemlere göre dağılımı verilmiştir. Şekilde tropik bölgelerde 190K civarı olan aşağı stratosferik sıcaklıkların orta enlemlerde 215K'e yükselmektedir.

Orta enlemlerde ($40^{\circ}\text{N}-60^{\circ}\text{N}$) gözlenen sıcaklık artışı eddy ısı akısı ile ilişkilendirilmektedir (Nikulın ve Karpechko, 2005). Şekil 4b'de Temmuz ayındaki zonal ortalama sıcaklık değerlerinin enlemlere göre dağılımı gösterilmiştir.

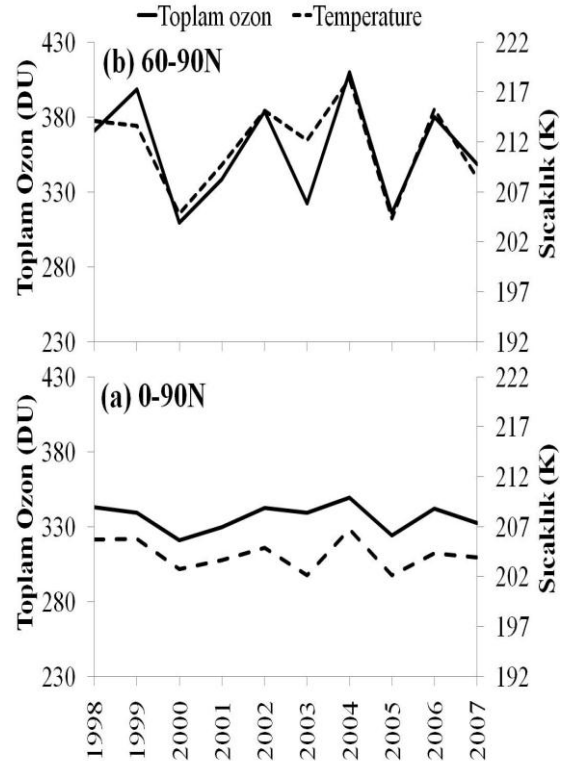
Planeter aktivitelerin en yoğun olarak görüldüğü seviye olarak kabul edilen 100mb basınç seviyesindeki sıcaklık ile toplam ozon arasında kuvvetli bir ilişki olduğu çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir (Nikulin ve Karpechko, 2005, Franchito ve Brahmananda, 2003). Şekil 5'de 100mb seviyesindeki sıcaklık değerlerinin enlemlere göre dağılımı verilmiştir. Toplam ozon değerlerinde Ocak ayında görülen enlemler arası keskin farklılıklar sıcaklıklarda da gözlenmektedir. Ocak ayında gözlenen tropiklerdeki düşük sıcaklıklar ve orta enlemlerdeki yüksek sıcaklıklar gibi enlemsel farklılıklar, Temmuz ayında yeterince belirgin değildir.

Ocak ayı için Kuzey yarıküredeki (Şekil 6a) ve kutup bölgelerindeki (Şekil 6b) sıcaklıklar ve ozonun ilişkisi yıllara göre dağılımları ile incelenmiştir.



Şekil 5. Ocak ve Temmuz ayı için 100mb zonal ortalama sıcaklığın (K) enlemsel değişimi (1998-2007)

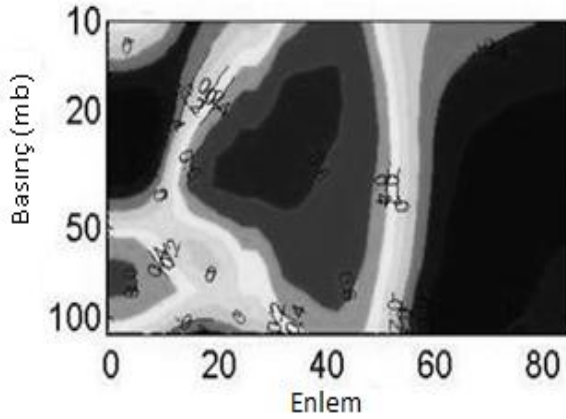
Şekil 6a'da görüldüğü gibi Kuzey yarıküre için toplam ozonla sıcaklığın yıllara göre değişimleri oldukça uyumludur. Benzer bir paralellik Şekil 6b'de gösterilen kutup bölgelerindeki ozon ve sıcaklık değerlerinde de görülmektedir. Kutup bölgelerinde toplam ozonla sıcaklığın maksimum ve minimum değerleri aynı yıllara denk gelmektedir. Kutup bölgelerindeki toplam ozonla 100mb zonal ortalama sıcaklıkları arasındaki korelasyon 0.8 olarak hesaplanmıştır (Şekil 6b). Kutup bölgelerindeki toplam ozonun, Kuzey yarıküre toplam ozonunu yakından etkilediği görülmektedir.



Şekil 6. Ocak ayı, Kuzey yarıküre için (a) ve Temmuz ayı, Kutup enlemleri için (b), 100mb zonal ortalama sıcaklığın (K) ve toplam ozonun yıllara göre değişimi

Çeşitli enlem ve yükseklikler için sıcaklık değerleri ve orta enlemlerdeki toplam ozon arasındaki korelasyonlar incelenmiştir (Şekil 7). 100mb sıcaklıkları ve toplam ozon arasındaki en yüksek korelasyon 0.6 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan korelasyonların sonucunda orta enlemlerdeki toplam ozonun (30°N-40°N) en fazla stratosferik orta enlem sıcaklıklarından etkilendiği görülmüştür (Şekil 7). Bu sonuç yapılan diğer çalışmalarla uyumludur (Ramaswamy vd., 2001). Kutup bölgelerindeki (60°N-70°N) sıcaklıkları orta enlemlerdeki (30°N-40°N) toplam ozon arasında ise negatif korelasyonlar gözlenmiştir. Orta enlemlerdeki toplam ozon, tropikal stratosferik sıcaklıklarla da ters orantılıdır. Kuzey yarıkürede toplam ozon ve sıcaklık arasındaki korelasyon 0.7, orta enlemlerde ve tropiklerde 0.1 olarak bulunmuştur. En yüksek pozitif korelasyonun olduğu bölge stratosfer bölgesindeki (50mb-20mb) ve 30°N-40°N enlemleri arasındaki sıcaklık ile 30°N-40°N enlemleri arasındaki toplam ozonla arasındadır.

Orta enlemlerin diğer bölgelerindeki korelasyonlar 30°N-40°N arasındaki kadar yüksek değildir (Şekil 7).



Şekil 7. Ocak ayı, orta enlem (30°N-40°N) toplam ozon ile enlem ve yüksekliğin fonksiyonu olarak değişen sıcaklık arasındaki korelasyonlar

Toplam ozonun girdap ısı akısı ile ilişkisi

Toplam ozonun taşınımının diagnostik incelemesini için kullanılan Brewer-Dobson sirkülasyon modelinde uygulanan Dönüştürülmüş Ortalama Eulerian ortalama denklemleri 1 ve 2 denklemlerinde verilmiştir. Denklem 1, Brewer-Dobson sirkülasyonunun zonal ortalama yatay bileşenini, denklem 2 ise zonal ortalama düşey bileşenini vermektedir. Denklemlerde $\overline{v'T}$ ile verilen terim ise girdap ısı akısıdır. Zonal ortalaması alınmış terimler üstü çizgili olarak, zonal ortalamadan sapmalar ise kesme işareti ile gösterilmiştir. Atmosferde, toplam ozon için kullanılan ölçek yüksekliği (H) 7km olarak hesaplanmıştır.

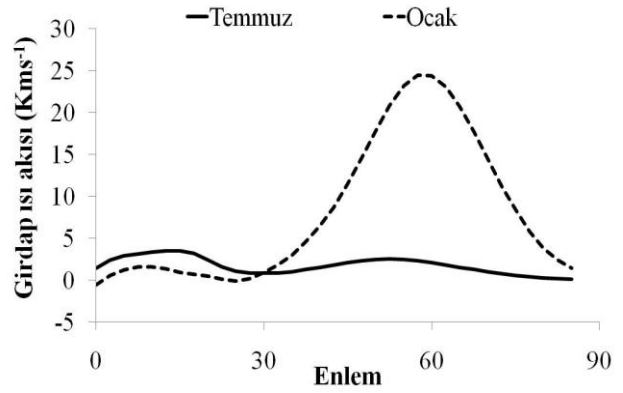
$$\overline{v^*} = \overline{v} - \rho_0^{-1} RH^{-1} \partial(\rho_0 \overline{v'T} / N^2) / \partial z \quad (1)$$

$$\overline{w^*} = \overline{w} - RH^{-1} \partial(\overline{v'T} / N^2) / \partial y \quad (2)$$

Girdap ısı akısı, Brewer-Dobson sirkülasyonunun düşey bileşenidir. Planeter dalga hareketlerinin değişimi girdap ısı parametresini inceleyerek anlaşılabilir. Bu terim, meridyonel rüzgar ve sıcaklık terimlerinin çalkantı bileşenlerinden bulunur.

$$v' = v - v_{ort} \quad (3)$$

$$t' = t - t_{ort} \quad (4)$$



Şekil 8. Ocak ayı (düz çizgi) ve Temmuz (kesikli çizgi) ayları için, girdap ısı akısının (Kms⁻¹) enlemlere göre değişimi

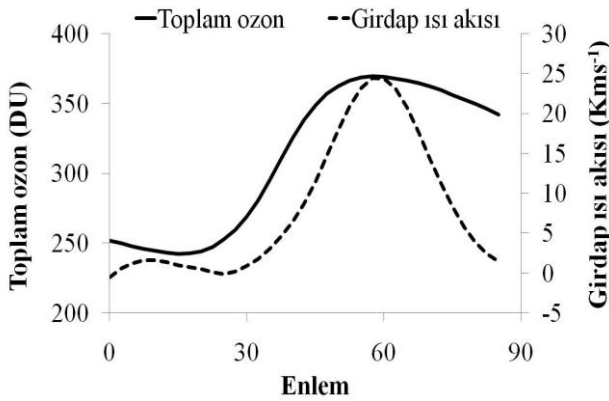
100mb seviyesindeki girdap ısı akısının Ocak ve Temmuz aylarındaki enlemlere göre değişimi Şekil 8'de gösterilmiştir. Sıcaklık ve toplam ozon değerlerinde de gözlemlendiği gibi girdap ısı akısı değerleri de Ocak ayı içinde enlemler arası büyük farklılıklar göstermektedir. Ocak ayında, özellikle tropik bölgelerdeki girdap ısı akısı hemen hemen hiç değişmemektedir (Dunkerton, 1978). Orta enlemlere doğru girdap ısı akısının değeri artarak, maksimum değer olan 24 Kms⁻¹'e 57°N'de ulaştığı görülmüştür. Bu durumun Ocak ayında etkili olan Brewer-Dobson sirkülasyonu ile ilgili olduğu bilinmektedir. Temmuz ayında ise girdap ısı akısının değeri enlemler arasında çok fazla değişmemektedir. Temmuz ayında maksimum değer 5 Kms⁻¹ olarak bulunmuştur.

Girdap ısı akısının, yıllara göre değişimi Şekil 9'da gösterilmiştir. 1998 yılında 2007 yılına kadar girdap ısı akısında pozitif bir trend görülmüştür. Girdap ısı akısının on yıllık trendi %0.6 olarak bulunmuştur. Belirtilen pozitif trende göre, planeter aktivitenin belirtilen yıllarda artış gösterdiğini açıktır. Kuzey yarımküredeki 100mb sıcaklık değerlerinin on yıllık trendinde de %0.01 kadar bir artış görülmüştür. Sıcaklıklarla girdap ısı akısı arasındaki pozitif ilişki, ozonla girdap ısı akısı arasında da görülmüştür.



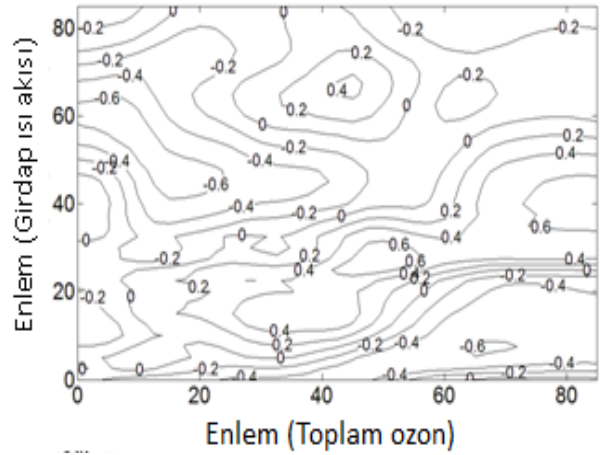
Şekil 9. Ocak ayı 100mb seviyesindeki girdap ısı akısının (KMs^{-1}) yıllara göre değişimi

Toplam ozonla, 100mb girdap ısı akısının enlemlere göre değişimi incelendiğinde aralarındaki yakın ilişki Şekil 10'da net bir şekilde görülmektedir. 100mb seviyesindeki girdap ısı akısı ve toplam ozon tropik bölgelerde düşük ancak orta enlemlere doğru maksimum değerlerine ulaşmaktadır.



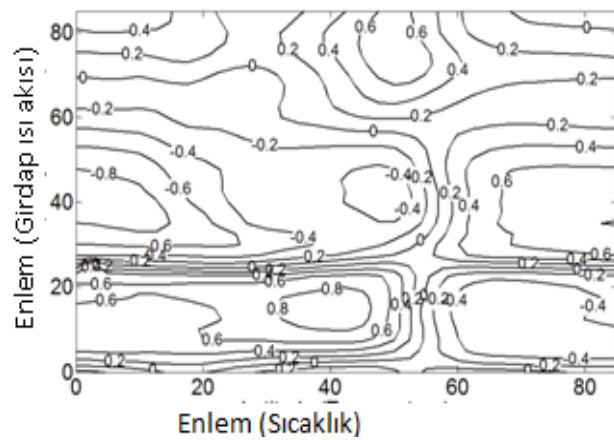
Şekil 10. Ocak ayı 100mb seviyesindeki girdap ısı akısının (KMs^{-1}) ve toplam ozonun enlemlere göre değişimi

Şekil 11'de 1998-2007 yılları arasındaki toplam ozonla, 100mb girdap ısı akısının Ocak ayı için hesaplanmış enlemlere bağlı korelasyonları görülmektedir. Bu grafikte x ekseninde toplam ozonun enlemlere göre korelasyonları, y ekseninde ise girdap ısı akısının enlemlere göre korelasyonları verilmiştir. Toplam ozon ile girdap ısı akısı arasında pozitif korelasyonlar beklenmektedir. Şekilden de görüleceği gibi, tropikal ($20^{\circ}N-30^{\circ}N$) girdap ısı akısı, orta enlemlerdeki toplam ozonu ($45^{\circ}N-55^{\circ}N$) kontrol etmektedir. Orta enlemlerdeki korelasyon değeri 0.6'ya ulaşmaktadır.



Şekil 11. Ocak ayı 100mb seviyesindeki girdap ısı akısının (KMs^{-1}) ile toplam ozonun enlemlere bağlı korelasyonu

Orta enlemlerdeki girdap ısı akısı ($35^{\circ}N-45^{\circ}N$) ise kutuplardaki ($70^{\circ}N-80^{\circ}N$) toplam ozonu yakından etkilemektedir. Benzer korelasyonlar sıcaklık ve girdap ısı akısı arasında da görülmüştür (Şekil 12). 100mb sıcaklıkları ve 100mb girdap ısı akısı arasındaki korelasyonlar, toplam ozonla girdap ısı akısı arasındaki korelasyonlardan daha yüksektir. Şekil 12'de 100mb sıcaklıkları, 100mb girdap ısı akısı arasındaki korelasyonlar verilmiştir. Sıcaklık ve girdap ısı akısı arasında pozitif korelasyonlar beklenmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi, tropiklerdeki 100mb girdap ısı akısı, orta enlemlerdeki sıcaklıklarla yakından ilişkilidir. Orta enlemlerdeki girdap ısı akısı da kutuplardaki 100mb sıcaklıkları kontrol etmektedir.



Şekil 12. Ocak ayı 100mb seviyesindeki girdap ısı akısının (KMs^{-1}) ile 100mb sıcaklıklarla (K) enlemlere bağlı korelasyonu (1998-2007)

Sonuçlar

Bu çalışmada Kuzey yarıkürede, 1998-2007 yılları arasındaki zonal ortalaması alınmış toplam ozon ve orta atmosfer sıcaklıklarındaki ve girdap ısı akısındaki değişim incelenmiştir. Brewer-Dobson sirkülasyonunun düşey bileşeni olan girdap ısı akısının enlemsel dağılımı belirtilen yıllar için hesaplanarak, sıcaklık ve toplam ozon ile olan ilişkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- 100mb sıcaklık değerleri ve toplam ozon arasındaki en yüksek korelasyon, polar bölgedeki toplam ozonla sıcaklık arasında bulunmuştur. Kuzey yarıkürede toplam ozon ve sıcaklık arasındaki korelasyon 0.6, orta enlemlerde ve tropiklerde 0.2 olarak elde edilmiştir. 30°N-40°N enlemleri için ortalama toplam ozonla sıcaklık arasındaki en yüksek pozitif korelasyonun olduğu bölge stratosfer bölgesindeki (50mb-20mb) ve orta enlemlerin başlangıcındaki (30°N-40°N) sıcaklık değerleridir.
- Tropik bölgelerde neredeyse sıfır olan girdap ısı akısı, orta enlemlere doğru keskin bir şekilde artmaktadır. 1998 yılından 2007 yılına kadar girdap ısı akısında pozitif bir trend görülmüştür. Girdap ısı akısının on yıllık trendi %0.6'dır. 1998-2007 yılları arasında Planeter aktivitede net bir artış olduğu görülmektedir. Aynı yıllar arasında Kuzey yarımküredeki 100mb sıcaklık değerlerinin on yıllık trendinde de %0.01 kadar bir artış görülmüştür. Sıcaklıklarla ve ozonla girdap ısı akısı arasındaki yakın bir ilişki söz konusudur. Ocak ayı için hesaplanmış 100mb girdap ısı akısının ozonla korelasyonları tropikal (20°N- 30°N) girdap ısı akısı, orta enlemlerdeki toplam ozonu (45°N-55°N) kontrol etmektedir. Orta enlemlerdeki girdap ısı akısı (35°N-45°N) ise kutuplardaki (70°N-80°N) toplam ozonu yakından etkilemektedir. Tropiklerdeki 100mb girdap ısı akısı, orta enlemlerdeki (40°N-60°N) sıcaklıklarla yakından ilişkilidir. Orta enlemlerdeki girdap ısı akısı da kutuplardaki 100mb sıcaklıkları kontrol etmektedir.

Kaynaklar

Brewer, A.W., (1960). Transfer of ozone into the troposphere, *M.I.T. Planetary Circulations Project Report*.

- Chandra, S., Varotsos, C. ve Flynn, L.E., (1996). The mid-latitude total ozone trends in the Northern Hemisphere, *Geophysical Research Letters*, **23**, 555-558.
- Crutzen, P.J., (1971). Ozone production rates in an oxygen-hydrogen-nitrogen oxide atmosphere, *Geophysical Research Letters*, **76**, 7311-7327.
- Dobson, G. M. B., Brewer, A.W. ve Cwiling, B.M., (1946). Meteorology of the lower stratosphere, *Proceeding of Royal Society*, **185**, 144-175.
- Dunkerton, T., (1978). On the mean meridional mass motions of the stratosphere and mesosphere, *Journal of Atmospheric Sciences*, **35**, 2325-2333.
- Finger, F. G., R. M. Nagatani, M. E. Gelman, C. S. Long, ve A. J. Miller (1995). Consistency between variations of ozone and temperature in the stratosphere, *Geophysical Research Letters*, **24**, 3477-3480.
- Franchito, S.H ve Brahmananda R. V. (2003). The Correlation between Temperature Gradient and Eddy Heat Flux in the Northern and Southern Hemispheres. *Journal of Society of Japan*, **81**, 163-168.
- Fusco, A. C. ve Salby, M. L., (1999). Interannual variations of total ozone and their relationship to variations of planetary wave activity, *Journal of Climate*, **12**, 1619-1629.
- Murgatroyd, R.J., (1970). The global circulation of the atmosphere, *Royal Meteorological Society*, **25**, 325-351.
- Nikulin, G. ve Karpechko, A., (2005). The mean meridional circulation and midlatitude ozone buildup, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **5**, 3159-3172.
- NOAA, NASA, UNEP, WMO ve Commission, E., (2006). Twenty Questions and Answers About the Ozone Layer: 2006 Update.
- Ramaswamy, V., Chanin, M.L., Angell, J., Barnett, J., Gaffen, D., Labitzke, K., O'Neill, A., Nash, J. ve Rood, R., (2001). Stratospheric temperature trends: Observations and model simulations, *Reviews of Geophysics*, **39**, 71-122.
- Tzani, C., (2009). On the relationship between total ozone and temperature in the troposphere and the lower stratosphere, *International Journal of Remote Sensing*, **30**, 6075-6084.
- WMO, (2007). Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006. *Global Ozone Research and Monitoring Project, Report No. 50*, Geneva World Meteorological Organization.