



ARAŞTIRMA MAKALESİ / RESEARCH ARTICLE

'O⁺ + O₂ → O₂⁺ + O' Reaksiyonu İçin Ortalama Serbest Yol Değişimlerinin Güneş Tutulması Süresince İncelenmesi

Investigation of Mean Free Path Changes for the 'O⁺ + O₂ → O₂⁺ + O' Reaction During the Solar Eclipse

Mehmet YAŞAR^{1*}, Murat CANYILMAZ²

¹ Fırat Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Elazığ, TÜRKİYE

² Fırat Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Havacılık Elektrik ve Elektronik, Elazığ, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author*: mehmetyasar@firat.edu.tr

Öz

Bu çalışmada, Ukrayna/Kharkiv şehri üzerinde gözlemlenen 29 Mart 2006 tarihindeki parçalı güneş tutulmasına, iyonküre kimyasında önemli reaksiyonlardan biri olan 'O⁺ + O₂ → O₂⁺ + O' çarpışması için hesaplanan ortalama serbest yol verilerinin tepkisi incelenmiştir. Hesaplamalarda kullanılan dalar, NRLMSISE-00 atmosfer modelden ve Kharkov saçılma radarından elde edildi. Bu çalışmanın konusu olan ortalama serbest yol verilerinin hesabında kullanılan çarpışma tesir kesitleri, klasik metot kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde, ortalama serbest yolun iyonküresel yükseklik artışı ile arttığı görüldü. Tutulma gününde ortalama serbest yol değişimlerinde görülen karışıklıkların, üst yüksekliklere doğru azaldığı tespit edildi. Bu durumun sebebinin, reaksiyonu oluşturan nötr O₂ yoğunluğunun artan yükseklikle beraber azalması ve alt iyonküresel bölgelerdeki dış mekanizmaların daha etkin olması gibi sebeplerden dolayı kaynaklandığı söylenebilir. Ortalama serbest yol modeli sonuçları neticesinde minimum değerler tutulma zamanı içinde görüldü.

Anahtar Kelimeler: Güneş tutulması, Dünya iyonküresi, İyonküresel reaksiyon süreçleri

Abstract

In this work, the response of the mean free path calculated for the 'O⁺ + O₂ → O₂⁺ + O' collision, which is an important reaction in the ionosphere chemistry, to partial solar eclipse on March 29, 2006 observed over Ukraine/Kharkiv was analysed. The data were obtained from the NRLMSISE-00 atmosphere model and the Kharkov scattering radar. Collision cross sections used in the calculation of mean free path data, which is the subject of this study, were calculated using the classical method. It was observed that the mean free path increased with ionospheric height. The disturbances seen in the mean free path changes on the day of the eclipse decreased towards the upper heights. It can be said that the reason for this situation is due to the decrease in the neutral O₂ density that creates the reaction with increasing altitude and the external mechanisms in the lower ionosphere regions being more effective. As a result of the mean free path model results, the minimum values were seen within the eclipse time.

Keywords: The solar eclipse, Earth ionosphere, The ionospheric reaction processes

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Ionosphere chemistry has a sensitive structure that is affected by internal processes through the interactions of particles with each other and by external processes through events such as earthquakes, meteor showers, the earth's magnetic field, solar flares, and solar eclipses. These internal and external effects cause short, medium and long-term disturbances in the ionosphere. Solar eclipses are one of the important events that create short and medium-scale disturbances on the world's ionosphere [1]. Methods such as gravitational waves, total electron content, doppler technique, critical frequency changes, scattering radar techniques are used to examine the effects of solar eclipses on the ionosphere [2-6]. Scattering radars are one of the measurement-based techniques used to study the ionosphere-eclipse interaction.

The O⁺ ion is one of the most dominant particles in the E and F regions of the ionosphere. Examining O⁺ ion-based reactions, which are converted into molecular ions through reactions such as 'O⁺ + N₂' and 'O⁺ + O₂', will provide important information on the shaping of particle densities, especially in the E and F regions. In this study, the effect of the solar eclipse on March 29, 2006 on the mean free path model results obtained with data from the NRLMSISE-00 atmospheric model and the Kharkov Incoherent Scatter Radar for the 'O⁺ + O₂ → O₂⁺ + O' reactive collision was examined.

Materials and Methods

March 29 solar eclipse;

The solar eclipse observed on Wednesday, March 29, 2006 started with a band in Brazil, continued along the Atlantic ocean and ended in Kazakhstan. Ukraine is one of the centers where this

solar eclipse was recorded as a partial eclipse with an occultation rate of approximately 77.4%. The beginning and ending times of the partial eclipse for Kharkiv city, Ukraine are 13.02 and 15.21 local time, respectively [1, 10].

Mean free path model;

The path taken by a particle between two consecutive collisions is called as the mean free path. The mean free path is as given below;

$$\lambda = \frac{1}{N\sigma}$$

Here, N is the particle density and σ is the collision cross section [12].

NRLMSISE-00 atmosphere model;

NRLMSISE-00 is an experimental and globally referenced atmospheric model of the Earth from Earth to space. Outputs of the model; In addition to He, O, O₂, N, N₂, Ar, H densities, it includes total mass density, anomalous oxygen density, exospheric and temperatures with altitude [13].

1. Giriş

İyonküre kimyası, içinde bulundurduğu elektron, iyon ve nötr bileşenlerin birbirleriyle olan etkileşimleri vasıtasıyla iç süreçlerden, depremler, meteor yağmurları, yerin manyetik alanı, güneş patlamaları, güneş tutulmaları vs. gibi olaylar aracılığıyla da dış süreçlerden etkilenen hassas bir yapıya sahiptir. Bu iç ve dış kaynaklı etkiler, iyonkürede kısa, orta ve uzun süreli bozulmalara neden olurlar. Güneş tutulmaları, dünya iyonküresi üzerinde kısa ve orta ölçekli tedirginliklerin meydana geldiği önemli olaylardan biridir. Bu olaylar, iyonkürede tutulma kaynaklı oluşan bozulmaların araştırılması noktasında önemli fırsatlar sunar [1]. Özellikle tutulma başlangıcından, maksimum örtülme anına ve tutulmanın bitişi ile sonrasında meydana gelebilecek süreçlerin iyonküre üzerindeki etkilerinin araştırılması ve değerlendirilmesi, iyonküre kimyasının daha anlaşılır olmasına büyük katkılar sağlamaktadır.

İyonküre üzerinde güneş tutulması etkilerinin incelenmesi noktasında gerek teorik gerekse de deneysel metotlar kullanılmaktadır. Yerçekimi dalgaları, toplam elektron içeriği, doppler tekniği, kritik frekans değişimleri, saçılma radar teknikleri bu metotlardan bazılarıdır [2-6]. İyonküre-güneş tutulması etkileşiminin araştırılmasında her ne kadar teorik ya da yarı-teorik modellemeler/araçlar yaygın bir şekilde kullanılıyor olsa da, ölçüme dayalı metotların kullanılması, bu etkileşim sonuçlarının daha anlaşılır olmasına katkı sağlayacaktır. Teorik/yarı teorik metotlara erişim daha kolayken, deneysel ölçüm araçlarına ulaşım hem maddi hem de tam veri setlerine ulaşamaması gibi sebeplerden dolayı daha zor ve zaman alıcıdır. Değinen bu gibi nedenlerden dolayı ölçüm teknikleri ile yapılan çalışmaların önemi bir kat daha artmaktadır. Saçılma radarları, iyonküre-tutulma etkileşiminin incelenmesinde başvurulan ölçüme dayalı tekniklerden biridir. Bağlantısız saçılma radarları (incoherent scatter radar) iyonosferik süreçlerin araştırılmasında olağanüstü fırsatlar sunmasının yanında geniş kapsama alanı ve çoklu parametrelerin eş zamanlı ölçümleri gibi pek çok avantaja sahiptirler. Arecibo (Ioannidis ve Farley 1972) ve Jicamarca (Farley 1991) radarları en eski saçılma radarları olarak 1962 den beri rutin bir şekilde çalışmalarını sürdürmektedirler. Günümüz dünyasında Amerika'da, Asya'da, kuzey ve doğu Avrupa'da (Kharkiv ISR) konumlanmış saçılma radarları bulunmaktadır [7]. Ukrayna'nın

Conclusion

As a result of the results obtained, it is thought that the reason why the maximum value of the mean free path is observed after the end of the partial eclipse at altitudes of 209 and 242 km compared to other altitudes is due to the fact that the rate of decrease in O₂ density is less than at other altitudes and the density is quite high at these two altitudes.

It can be said that the reason why the two maximum peaks observed at the lower altitudes are replaced by a single minimum trough at the upper altitudes is due to the decrease in the effect of the O₂ concentration obtained by semi-experimental methods as we move up to the upper altitudes and the fluctuations in the density at the lower altitudes.

The complexity seen in changes at lower elevations decreases towards upper elevations; It can be suggested that occurs because the processes affecting the lower ionosphere are more effective than in the upper ionosphere and the O₂ concentration is higher in the lower ionosphere.

Kharkiv şehrinde kurulu saçılma radarı 25 metrelik yönlendirilebilir ve 100 metrelik sabit dikey bir çanak ile 150MHz frekansta çalışma imkânına sahiptir. Bu radar, Dünya iyonküresinde fiziksel ve kimyasal süreçlerin araştırılmasına ve incelenmesine büyük katkı sağlamaktadır. Son yıllarda iyonküre üzerinde ani, orta ve uzun ölçekli bozulmalarda önemli etkenlerden biri olan güneş tutulmasının iyonküresel çarpışma süreçleri üzerindeki etkilerinin incelenmesinde Kharkiv saçılma radarı data setlerinden faydalanılarak araştırmalar sürdürülmektedir [1, 8-9].

İyonküresel reaksiyon süreçleri serbest iyon, elektron ve nötr parçacıkların dağılımları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu parçacıkların dağılımı iyonküresel yükseklik ve bölgelere göre değişim göstermektedir. O⁺ iyonu iyonkürenin E ve F bölgelerinde en baskın parçacıklarından biridir. 'O⁺ + N₂' ve 'O⁺ + O₂' gibi reaksiyonlar vasıtasıyla moleküler iyonlara dönüştürülen O⁺ iyonu tabanlı reaksiyonların incelenmesi özellikle E ve F bölgelerindeki parçacık yoğunluklarının şekillenmesi üzerinde önemli bilgiler sağlayacaktır. İyonküre kimyası hem kendi içindeki çarpışma süreçleri hem de güneş tutulmaları gibi önemli dış kaynaklı olaylardan etkilenmektedir. İyonkürede meydana gelen bir çarpışmaya ait nümerik sonuçların, tutulma olayı ile etkileşiminin incelendiği bu çalışma ile iyonküre kimyasının daha anlaşılır olacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada iyonküresel çarpışma süreçlerinden biri olan 'O⁺ + O₂ → O₂⁺ + O' reaktif çarpışma için NRLMSISE-00 atmosfer modelden elde edilen nötr yoğunluklar ve Kharkov Incoherent Scatter Radar'dan alınan ölçüm verileri ile elde edilen ortalama serbest yol model sonuçları üzerindeki 29 Mart 2006 da meydana gelen güneş tutulmasının etkisi incelenmiştir.

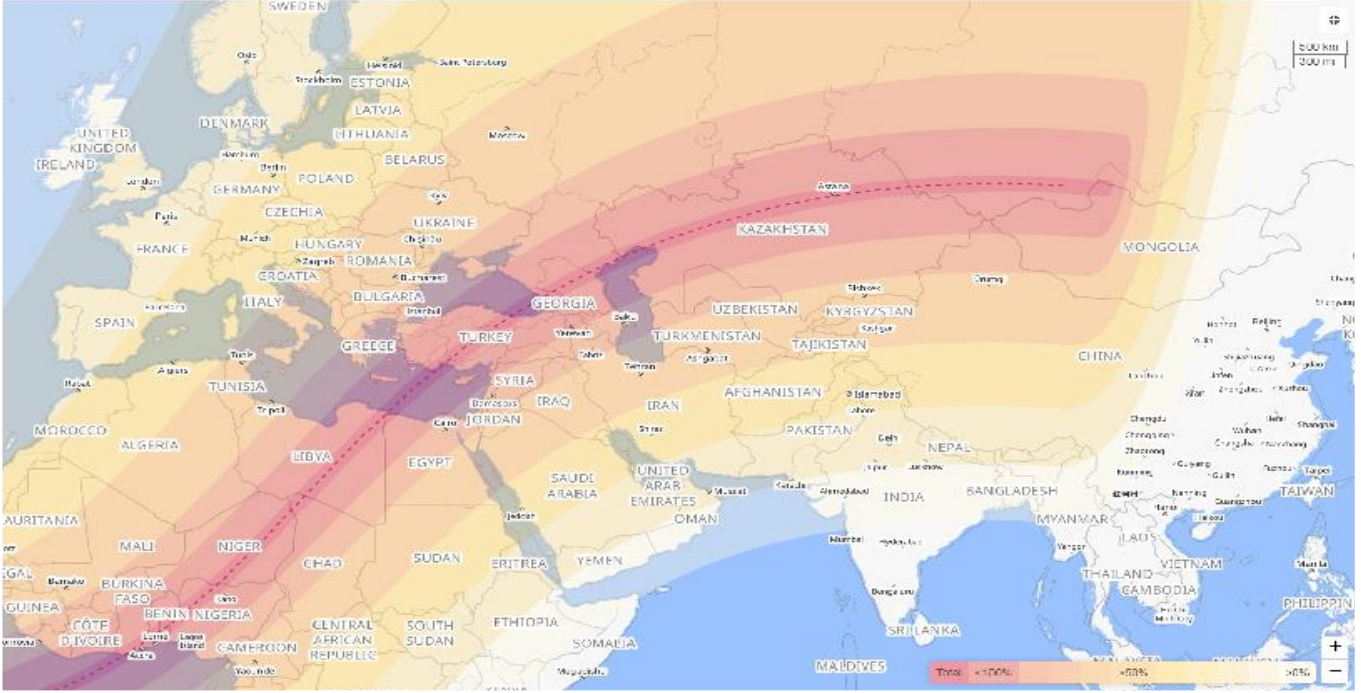
2. Materyal ve Metot

2.1. 29 Mart güneş tutulması

29 Mart 2006 Çarşamba günü gözlemlenen güneş tutulması, Brezilya'dan bir bantla başlayarak Atlantik Okyanusu boyunca devam ederek Kazakistan'da sona ermiştir. Bu güneş tutulması, Avrupa'da parçalı tutulma olarak gözlemlenmiştir. 29 Mart 2006 güneş tutulması, yaklaşık % 77.4 lük örtülme oranı ile parçalı tutulma olarak kayıtlara geçtiği merkezlerden biride Ukrayna'dır. 29 Mart güneş tutulması, bu çalışmanın ana temasını oluşturan Ukrayna'nın Kharkiv şehrinde yerel zaman dilimine göre (YZ)

13.02 civarında başlamış ve 15.21 civarında sona ermiştir. Tutulma toplamda 2 saat 18 dakika sürerek, güneş diskinin maksimum örtülme zamanı yaklaşık 14.15 (YZ) civarında

meydana gelmiştir [1, 10]. 29 Mart güneş tutulmasının genel seyri şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. 29 Mart 2006 güneş tutulmasının izlediği yol [11]

Figure 1. The path of the solar eclipse of March 29, 2006 [11]

2.2. Ortalama serbest yol modeli

Birbirini takip eden iki ardışık çarpışma arasında bir parçacığın aldığı yol, ortalama serbest yol olarak adlandırılır. Başka bir deyişle tek bir parçacığın iki ardışık çarpışması arasındaki ortalama mesafe, ortalama serbest yoldur. Böylece, ortalama serbest yol aşağıda verildiği gibidir;

$$\lambda = \frac{1}{N\sigma} \quad (1)$$

Burada N; parçacık yoğunluğunu, σ ; çarpışma tesir kesitini ifade eder. Bu denklem, ortalama serbest yolun parçacıkların yoğunluğuna ve çarpışma tesir kesitlerine bağlı olduğunu gösterir [12].

Denklem 1'deki ortalama serbest yol verilerinin elde edilme sürecinde, nötr yoğunluklar (N) NRLMSISE-00 atmosfer modelden alınırken, bir reaksiyonda iki parçacık arasında meydana gelen etkileşim olasılığı ile orantılı niceliğin tanımı olarak ifade edilen çarpışma tesir kesitleri (σ) ise en temel haliyle;

$$\sigma = \int_0^\pi dx \sin x \int_0^{2\pi} d\epsilon S(gx) = \int_0^\pi dx \sin x \int_0^{2\pi} d\epsilon \frac{d^2}{4} = \pi d^2 \quad (2)$$

Olarak hesaplanır. Burada d, çarpışma yada etki parametresi olarak tanımlanır.

2.3. NRLMSISE-00 model

NRLMSISE-00, yeryüzünden uzaya kadar olan bölgede dünyanın deneysel ve küresel referanslı atmosfer modelidir. Dünya

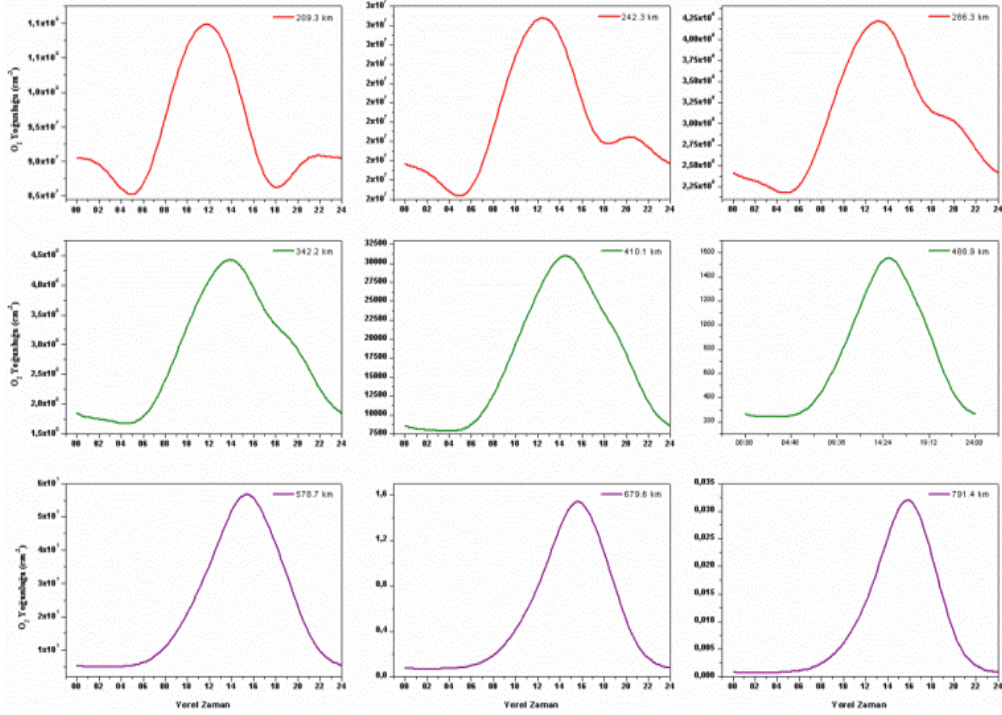
atmosferinin sıcaklık ve yoğunluk bileşenlerinin çıktılarını kullanıcılara sağlayan bir modeldir. Bu modelin kullanım amacı, atmosferik sürüklenmeye bağlı olarak uydusal yörünge bozulmalarının tahmin edilmesine yardımcı olmaktır. Model aynı zamanda gök bilimciler tarafından lazer kılavuz yıldızlarının lazer olmayan teleskoplar üzerindeki etkisini değerlendirmek için teleskoplar ve lazer ışınlar arasındaki hava kütlelerini hesaplamak içinde kullanılmıştır.

Modelin çıktıları; He, O, O₂, N, N₂, Ar, H yoğunluklarına ilaveten, toplam kütle yoğunluğu, anormal oksijen yoğunluğu, ekzosferik ve yüksekliğe göre sıcaklıkları ihtiva etmektedir [13].

3. Bulgular

Bu çalışmada, 'O⁺ + O₂ → O₂⁺ + O' reaksiyonuna ait ortalama serbest yol modeline ait sonuçlar 49.6 °E; 36.3 °N coğrafi koordinatları için elde edildi. Bu dinamikler 29 Mart 2006 güneş tutulması günü, 209, 242, 286, 342, 410, 488, 578, 679 ve 791 km'lik yükseklik değerleri ve yerel zaman diliminde saat 00.00'dan 24.00'a kadar 15'er dakikalık zaman aralıkları için hesaplandı. Bu hesaplamalarda iyonküresel yoğunluklar NRLMSISE-00 atmosfer modelden, sıcaklık değerleri de Kharkov IS radardan alındı.

Şekil 2'de, 29 Mart 2006 tarihinde NRLMSISE-00 modelden elde edilen O₂ nötr yoğunluğuna ait değişimler verilmiştir.



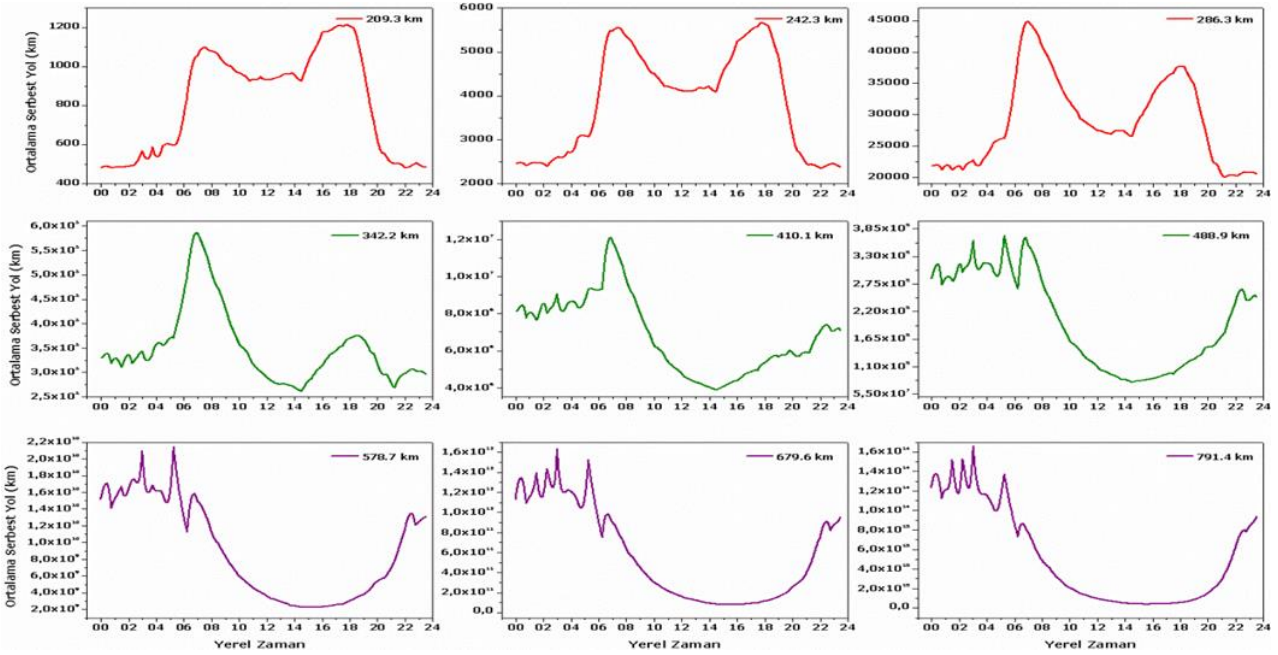
Şekil 2. 29 Mart 2006 tarihinde O_2 yoğunluğunun yükseklik ve zamanla değişimi

Figure 2. Change of O_2 density with altitude and time on March 29, 2006

3.1. Ortalama serbest yol model sonuçları

Rudolf Clausius tarafından gaz kinetik teoriye kazandırılan bu model, kinetik teori gelişiminin hızlanmasını sağlamıştır. Bu sebeple bir parçacığın ortalama serbest yolunun tahmini çarpışmalar esnasında kat ettiği mesafenin bulunması ile birlikte farklı çarpışma dinamiklerinin daha basit bir şekilde

hesaplanmasını da sağlayacaktır. Buradan hareketle, 29 Mart güneş tutulması gününde hesaplanan ortalama serbest yol değerlerinin iyonosferik yükseklik ve yerel zamanla değişimi Şekil 3' te gösterilmiştir.



Şekil 3. Ortalama serbest yolun zaman ve yükseklikle değişimi

Figure 3. Variation of mean free path with time and height

Şekil 3'te ortalama serbest yolun maksimum değeri 209 ve 242. km'lik yükseklikler için tutulmadan sonra görülürken, diğer yüksekliklerde tutulmadan önce görülmüştür. 209 km den 342 km ye kadar olan dört yükseklikte iki maksimum nokta gözlemlenirken, 410. km den 791. km ye kadar olan diğer beş yükseklikte bu maksimumlar yerlerini minimum bir çukura bırakmıştır. İlk dört yükseklik için (209, 242, 286, 342 km) özellikle tutulma başlangıcından tutulmanın sona ermesine kadar var olan değişimlerin, diğer yüksekliklerde görülen değişimlere kıyasla daha karmaşık olduğu tespit edilmiştir.

209 km den 791 km ye kadar olan tüm yüksekliklerde güneş diskinin maksimum örtülme zamanı olan 14.13 civarında ortalama serbest yol değişimlerinde bir azalmanın olduğu görülmektedir.

4. Sonuç ve Tartışma

Elde edilen sonuçlar neticesinde diğer yüksekliklere nazaran 209 ve 242 km lik yüksekliklerde ortalama serbest yolun maksimum değerinin parçalı tutulmanın bitişinden sonra görülme sebebinin, O₂ yoğunluğundaki düşüş hızının diğer yüksekliklere göre daha az olması ve yoğunluğun bu iki yükseklikte oldukça fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Yine alt yüksekliklerde gözlemlenen iki maksimum tepe noktalarının üst yüksekliklerde yerini tek bir minimum çukura bırakma sebebinin, yarı deneysel yöntemlerle elde edilen O₂ yoğunluğunun üst yüksekliklere doğru çıkıldıkça etkisinin azalması ve alt yüksekliklerde yoğunlukta görülen dalgalanmalardan dolayı oluştuğu söylenebilir.

Alt yüksekliklerdeki değişimlerde görülen karmaşıklığın üst yüksekliklere doğru azalması, alt iyonküre üzerinde etkili olan süreçlerin üst iyonküreye göre daha etkin olması ve özellikle de bu çalışmanın ana teması olan ortalama serbest yol hesabının temel bileşenlerinden biri olan O₂ yoğunluğunun alt iyonküredeki fazlalığından kaynaklı nedenlerden oluştuğu ileri sürülebilir.

Üst İyonosferik yüksekliklere doğru çıkıldıkça ortalama serbest yolun ciddi şekilde arttığı gözlemlenmektedir. Alt iyonkürede 10³ seviyesinde olan ortalama serbest yolun üst bölgelerde 10¹⁵ seviyelerine çıktığı elde edilen sonuçlardan tespit edilen bir durumdur. Bu sonuç elektron ortalama serbest yolunun hesaplandığı bir diğer çalışmada [14], elde edilen neticelerle uyum göstermektedir. Yapılan çalışmada ortalama serbest yolun 10⁴ km seviyesinden başlayarak 10¹⁶ km'lik mertebelere çıktığı bulunmuştur.

Parçalı güneş tutulması süresince 'O⁺ + O₂' çarpışması için hesaplanan ortalama serbest yol verilerinin yerel zaman ve iyonküresel yükseklik gibi bağımsız parametrelere göre değişimlerinin incelendiği bu çalışma için aşağıdaki sonuçlar elde edildi;

- Yükseklik artışı ile birlikte ortalama serbest yolda artmıştır.
- Artan yükseklikle beraber ortalama serbest yol değişimlerinde görülen karmaşıklığın azaldığı tespit edildi.
- Alt bölgelerde, yer yer inişli çıkışlı davranışlar gösteren ortalama serbest yol verilerinin, yerini üst bölgelerde daha yumuşak değişimlere bıraktığı görüldü.
- Ortalama serbest yol, tüm yüksekliklerde maksimum örtülme zaman aralığı içinde azalma göstermiştir.
- 29 Mart gününde ortalama serbest yolun minimum değeri, parçalı tutulma zamanı içinde görülmüştür.

Reaksiyon hız sabiti, çarpışma tesir kesiti, ortalama serbest yol, toplam çarpışma sayısı, çarpışma frekansı vb. gibi reaksiyon dinamikleri ile Dünya iyonküresini etkileyen süreçler arasındaki etkileşimlerin incelendiği bilimsel çalışmaların azlığından kaynaklı sebepler literatür karşılaştırmasını kısıtlı kılmaktadır. İyonküre kimyasının daha anlaşılır olmasına yönelik yapılan bu ve bunun gibi çalışmaların sayılarının artması, iyonküre - reaksiyon dinamiği etkileşimlerine ışık tutmasının yanında bu konudaki literatürün zenginleşmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır

Teşekkür

Yazarlar Kharkov Incoherent Scatter Radar çalışanlarına ve nötr yoğunlukların elde edilmesinde kullanılan NRLMSISE-00 atmosfer modeli için modelleme merkezi yönetimine teşekkür eder.

Yazar katkılarının beyanı

Yazar 1: Fikir oluşturma, deney tasarımı, veri toplama, analizlerin gerçekleştirilmesi, yazım

Yazar 2: Eleştirel inceleme

Kaynaklar

- [1] Yaşar, M. 2021. Investigation of the Solar Eclipse Effect on the Changes of the Loss Terms for 'O⁺ + N₂' Reactive Collision in the Upper Ionosphere, BEU Journal of Science, Cilt. 10 (2), s. 304-310. DOI: 10.17798/bitlisfen.842378
- [2] Altadill, D., et al. 2001. Vertical Structure of a Gravity Wave Like Oscillation in the Ionosphere Generated by the Solar Eclipse of August 11, 1999, Journal of Geophys Res, Cilt. 106(A10), s. 21419-21428. DOI: 10.1029/2001JA900069
- [3] Zerefos, C. S., et al. 2007. Evidence of Gravity Waves into the Atmosphere during the March 2006 Total Solar Eclipse, Atmos Chem Phys, Cilt. 7, s. 4943-4951. DOI: 10.5194/acp-7-4943-2007
- [4] Gerasopoulos, E., et al. 2008. The Total Solar Eclipse of March 2006: Overview, Atmos. Chem. Phys, Cilt. 8, s. 5205-5220. DOI: 10.5194/acp-8-5205-2008
- [5] Manju, G., et al. 2014. Gravity Wave Signatures in the dip Equatorial Ionosphere-Thermosphere System during the Annular Solar Eclipse of 15 January 2010, Journal Geophys. Res, Cilt. 119(6), s. 4929-4937. DOI: 10.1002/2014JA019865
- [6] Gang, C., et al. 2015. Plasma Flux and Gravity Waves in the Midlatitude Ionosphere during the Solar Eclipse of 20 May 2012, Journal Geophys. Res, Cilt. 120(4), s. 3009-3020. DOI: 10.1002/2014JA020849
- [7] Ding, Z., Wu, J., Xu, Z. W., Xu, B., Dai, L. D. 2018. The Qijing incoherent scatter radar: system description and preliminary measurements: Earth, Planets and Spaces, Cilt. 70, s. 87. DOI: 10.1186/s40623-018-0859-8
- [8] Yaşar, M. 2021. Investigation of ionospheric losses for the 'O⁺+O₂→O₂⁺ + O' reaction during the solar eclipse, Physica Scripta, Cilt. 96, 094011. DOI: 10.1088/1402-4896/ac0a2d
- [9] Yaşar, M. 2021. THE SOLAR ECLIPSE EFFECT ON DIFFUSION PROCESSES OF O⁺+O₂→O₂⁺ + O REACTION FOR THE UPPER IONOSPHERE OVER KHARKOV, Thermal Science, Cilt. 25 (1), s. S57-S53. DOI: 10.2298/TSCI200619007Y
- [10] Grigorenko, E.I., Lyashenko, M.V., Chernogor, L.F. 2008. Effects of solar eclipse of March 29, 2006, in the ionosphere and atmosphere, Geomagnetism and Aeronomy, Cilt. 48 (3), s. 337-351. DOI: 10.1134/S0016793208030092
- [11] <https://www.timeanddate.com/eclipse/map/2006-march-29>
- [12] Gombosi, T. I. 1994. Gas Kinetic Theory. Cambridge University Press, Cambridge, UK
- [13] <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/models/NRLMSIS~00/>
- [14] Baumjohann, W., Treumann, R.A. 1997. Basic Space. Imperial College Press, 57 Shelton Street, Covent Garden, London WC2H 9HE