



T.C.
MUŞ ALPARSLAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TERMOFERİK TOPLAM KÜTLE
YOĞUNLUĞUNUN UZUN DÖNEMLİ
ANALİZİ

Seval YAPALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Haziran-2025
MUŞ
Her Hakkı Saklıdır



T.C.
MUŞ ALPARSLAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TERMOFERİK TOPLAM KÜTLE
YOĞUNLUĞUNUN UZUN DÖNEMLİ
ANALİZİ

Seval YAPALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Selçuk SAĞIR

Jüri Üyesi: Prof. Dr. Ali YEŞİL

Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Serhat KORLAELÇİ

Haziran-2025
MUŞ
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL ve ONAYI

Seval YAPALI tarafından hazırlanan “**TERMOFERİK TOPLAM KÜTLE YOĞUNLUĞUNUN UZUN DÖNEMLİ ANALİZİ**” adlı tez çalışması 23/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Ali YEŞİL
Fırat Üniversitesi, Fen Fakültesi,
Fizik Bölümü

.....

Danışman

Prof. Dr. Selçuk SAĞIR
Muş Alparslan Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi,
Fizik Bölümü

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Serhat KORLAELÇİ
Muş Alparslan Üniversitesi, SHMYO,
Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü

.....

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu/...../..... Tarih ve/..... nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Selçuk SAĞIR
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Seval YAPALI

23.06.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TERMOFERİK TOPLAM KÜTLE YOĞUNLUĞUNUN UZUN DÖNEMLİ ANALİZİ

Seval YAPALI

Muş Alparslan Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Selçuk SAĞIR

Bu tez çalışmasında termosferik kütle yoğunluğunun uzun dönemli değişimi ile Güneş lekesi sayısı (SSN) arasındaki ilişki gözlemlenmiştir. Güneş lekesi sayısı ile 250 km, 275 km, 325 km, 375 km, 400 km, 425 km, 475 km, 525 km, 550 km, 575 km yükseklikleri için termosferik kütle yoğunluğu değerleri arasındaki ilişki 20., 21., 22., 23. ve 24. Güneş döngüleri boyunca incelenmiştir. Zamansal analizlerde toplam kütle yoğunluğu verilerindeki eğilimleri ve döngüsel bileşenleri daha net ortaya koyabilmek amacıyla tekli spektrum analizi (SSA) yapılmıştır. Ayrıca her bir yükseklik için toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki ilişki korelasyon katsayıları belirlenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, 250 km ve 325 km yüksekliklerde SSN ile termosferik kütle yoğunluğu arasında genellikle 1970 ve 1975 yıllarında ilişki yok denecek kadar zayıf bir ilişki elde edilmiş iken geri kalan tüm yükseklikler ise sadece 1975 yılı korelasyon katsayısı en küçük değerdedir. 250 km ve 325 km yüksekliklerde 1970 yılı hariç incelen tüm yıllar ve yükseklikler için toplam kütle yoğunluğu ve SSN değerleri arasında pozitif bir ilişki görülmektedir. Korelasyon katsayısının incelenen tüm zaman dilimlerinde yüksekliğin artışı ile arttığı gözlenmiştir. Bu durum Güneş ışınlarını geliş açısı ile ilişkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu çalışmada, Güneş aktivitesi ile termosferik kütle yoğunluğu uzun dönemli ve yüksek bağımlığa sahip olduğu görülmektedir. Bu durumun, GNSS sistemleri, uydulara tahminleri, yörüngeye giriş zamanı, yörüngede çarpışma tahmini ve haberleşme teknolojileri için kritik öneme sahip termosferik kütle yoğunluğu modellerin geliştirilmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2025, 37 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Termosferik Kütle Yoğunluğu, Singular Spectrum Analysis, Güneş Lekesi Sayısı

ABSTRACT

MS THESIS

LONG-TERM ANALYSIS OF THERMOSPHERIC TOTAL MASS DENSITY

Seval YAPALI

**Muş Alparslan University
Natural and Applied Science
Department of Physics**

Advisor: Prof. Dr. Selçuk SAĞIR

In this thesis study, the long-term changes of thermospheric mass density obtained at altitudes of 250 km, 275 km, 325 km, 375 km, 400 km, 425 km, 475 km, 525 km, 550 km, 575 km were investigated. In addition, the relationship between mass density and sunspot number (SSN) was analyzed. The relationship between thermospheric mass density values for sunspot number and altitudes was investigated during the 20th, 21st, 22nd, 23rd and 24th solar cycles. In order to reveal the trends and cyclical components in the total mass density data in temporal analyses, single spectrum analysis (SSA) was performed. In addition, correlation coefficients between total mass density and SSN were determined for each altitude. According to the findings, a weak relationship was obtained between SSN and thermospheric mass density at altitudes of 250 km and 325 km in 1970 and 1975, while for all the remaining altitudes, only the correlation coefficient of 1975 was at its lowest value. A positive relationship was observed between total mass density and SSN values for all the examined years and altitudes except 1970 at altitudes of 250 km and 325 km. It was observed that the correlation coefficient increased with the increase in altitude in all the examined time periods. It is thought that this situation is due to the relationship between the angle of incidence of solar rays. In this study, it is seen that the thermospheric mass density has a long-term and high dependence on solar activity. It is thought that this situation will contribute to the development of thermospheric mass density models, which are of critical importance for GNSS systems, satellite orbit predictions, orbit entry times, in-orbit collision prediction and communication technologies.

2025, 37 Pages

Keywords: Thermospheric Mass Density, Singular Spectrum Analysis, SunSpot Number,

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yürütölmesi sırasında göstermiő olduğu rehberlik ve çok değerli katkılarından dolayı danışman hocam Prof. Dr. Selçuk SAĞIR'a teşekkür ederim. Ayrıca çok kıymetli eőim Reha YAPALI'ya, yine çok değer verdiğim sevgili annelerim Zübeyde BERTAN ve Aylin KARATOKA'ya muhabbetle teşekkür ederim.

Seval YAPALI
MUŞ-2025



İÇİNDEKİLER

| | |
|---|-------------|
| ÖZET | iv |
| ABSTRACT..... | v |
| TEŞEKKÜR | vi |
| İÇİNDEKİLER | vii |
| SİMGELER ve KISALTMALAR..... | viii |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | ix |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI | 4 |
| 3. MATERYAL ve YÖNTEM | 6 |
| 3.1 Singular Spectrum Analiz (SSA) algoritması..... | 6 |
| 3.2 Kütle Yoğunluğu Ölçüm Modelleri..... | 9 |
| 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA | 12 |
| 4.1 250 km Yükseklik için Analiz sonuçları..... | 12 |
| 4.2 275 km Yükseklik için Analiz sonuçları..... | 14 |
| 4.3 325 km Yükseklik için Analiz sonuçları..... | 16 |
| 4.4 375 km Yükseklik için Analiz sonuçları..... | 18 |
| 4.5 400 km Yükseklik için Analiz sonuçları..... | 20 |
| 4.6 425 km Yükseklik için Analiz sonuçları..... | 22 |
| 4.7 475 km Yükseklik için Analiz sonuçları..... | 24 |
| 4.8 525 km Yükseklik için Analiz sonuçları..... | 26 |
| 4.9 550 km Yükseklik için Analiz sonuçları..... | 28 |
| 4.10 575 km Yükseklik için Analiz sonuçları..... | 30 |
| 5. SONUÇLAR..... | 34 |
| KAYNAKLAR | 35 |
| ÖZGEÇMİŞ | 37 |

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

ρ : Kütle Yoğunluğu

Kısaltmalar

GPS : Küresel Konumlama Sistemi

HF : Yüksek frekans

VHF : Çok yüksek frekans

UV : Mor ötesi

EUV : Aşırı mor ötesi

LF : Düşük frekans

VLf : Çok düşük frekans

MF : Orta frekans

GNSS : Global Uydu Navigasyon Sistemler

CME : Koronal Kütle Atılımı

QBO : Quasi-Biennial Oscillation (Yaklaşık iki yılda bir salınım)

NRLMSİSE-00 : Deniz Kuvvetleri Araştırma Laboratuvarı Kütle Spektrometresi ve Saçılma Radar Modeli

JB2008 : Sürüklenme yoğunluk modeli

DTM-2013 : Sürüklenme sıcaklık modeli

LSTM : Uzun-Kısa Süreli Bellek Ağı

MAGE : Çok Ölçekli Atmosfer Jeo-Uzay Çevre Modeli

TIEGCM : Termosfer-İyonosfer Elektrodinamik Genel Dolaşım Modeli

DTM : Sürüklenme ve Sıcaklık Modeli

SSA : Tekil Spektrum Analizi

SSN : Güneş Lekesi Sayısı

SVD : Tekil Değer Ayrıştırması

TMD : Termosferik Kütle Yoğunluğu

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | | |
|-------------------|--|----|
| Şekil 4.1 | 250 km yükseklik için SSA modeli ile elde edilen analiz sonuçları..... | 13 |
| Şekil 4.2 | 250 km yükseklik için yıllara göre toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki korelasyon katsayı değerlerinin değişimi..... | 14 |
| Şekil 4.3 | 275 km yükseklik için SSA modeli ile elde edilen analiz sonuçları..... | 15 |
| Şekil 4.4 | 275km yükseklik için yıllara göre toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki korelasyon katsayı değerlerinin değişimi..... | 16 |
| Şekil 4.5 | 325 km yükseklik için SSA modeli ile elde edilen analiz sonuçları..... | 17 |
| Şekil 4.6 | 325 km yükseklik için yıllara göre toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki korelasyon katsayı değerlerinin değişimi..... | 18 |
| Şekil 4.7 | 375 km yükseklik için SSA modeli ile elde edilen analiz sonuçları..... | 19 |
| Şekil 4.8 | 375 km için yıllara göre toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki korelasyon katsayı değerlerinin değişimi..... | 20 |
| Şekil 4.9 | 400 km yükseklik için SSA modeli ile elde edilen analiz sonuçları..... | 21 |
| Şekil 4.10 | 400 km yükseklik için yıllara göre toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki korelasyon katsayı değerlerinin değişimi..... | 22 |
| Şekil 4.11 | 425 km yükseklik için SSA modeli ile elde edilen analiz sonuçları..... | 23 |
| Şekil 4.12 | 425 km yükseklik için yıllara göre toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki korelasyon katsayı değerlerinin değişimi..... | 24 |
| Şekil 4.13 | 475 km yükseklik için SSA modeli ile elde edilen analiz sonuçları..... | 25 |
| Şekil 4.14 | 475 km yükseklik için yıllara göre toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki korelasyon katsayı değerlerinin değişimi..... | 26 |
| Şekil 4.15 | 525 km yükseklik için SSA modeli ile elde edilen analiz sonuçları..... | 27 |
| Şekil 4.16 | 525 km yükseklik için yıllara göre toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki korelasyon katsayı değerlerinin değişimi..... | 28 |
| Şekil 4.17 | 550 km yükseklik için SSA modeli ile elde edilen analiz sonuçları..... | 29 |
| Şekil 4.18 | 550 km yükseklik için yıllara göre toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki korelasyon katsayı değerlerinin değişimi..... | 30 |
| Şekil 4.19 | 575 km yükseklik için SSA modeli ile elde edilen analiz sonuçları..... | 31 |
| Şekil 4.20 | 575 km yükseklik için yıllara göre toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki korelasyon katsayı değerlerinin değişimi..... | 32 |

1. GİRİŞ

Gelişen uzay teknolojileri, özellikle uydu temelli haberleşme, konum belirleme (navigasyon) ve Dünya gözlem sistemlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte, yerkürenin üst atmosfer katmanlarına yönelik bilimsel araştırmalar stratejik bir öneme kavuşmuştur. Yörüngedeki uydu sistemlerinin güvenli, kararlı ve uzun ömürlü bir şekilde çalışabilmesi, büyük ölçüde atmosferik koşulların doğru modellenmesine ve öngörülmesine bağlıdır. Bu bağlamda, özellikle iyonosfer ve termosfer katmanları, elektromanyetik dalgaların uzaydan yeryüzüne ya da yeryüzünden yeryüzüne doğru iletimi sırasında karşılaştığı fiziksel ortamlar olması nedeniyle dikkatle incelenmesi gereken alanlar arasında yer almaktadır.

İyonosfer ve termosfer, uzay ve uydu iletişim aracı olan elektromanyetik dalgaların yayılımını etkileyen en temel bölgelerdir. Bu atmosferik bölgelerde dalga ilerlerken sinyal gecikmeleri, frekans kaymaları, kırılma, sönümlenme ve yansıma gibi birçok fiziksel etkileşime neden olabilmektedirler. Bu etkiler, özellikle radyo dalgaları, GPS (Global Positioning System- Küresel Konumlama sistemi) sinyalleri ve uzaktan algılama teknolojilerinde doğrudan performans kayıplarına yol açabilmektedir. Dolayısıyla bu atmosferik katmanların fiziksel özelliklerinin, yerel zamana, enleme, mevsimsel değişimlerine ve Güneş-Jeomanyetik etkileşimlerle ilişkilerinin detaylı bir biçimde incelenmesi uydu iletişim teknolojileri açısından oldukça önemlidir. Bu tür çalışmalarla yalnızca mevcut teknolojilerin iyileştirilmesini sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda uzay temelli yeni nesil haberleşme sistemlerinin tasarımı ve işletilmesinde karşılaşılabilecek sorunların önceden öngörülmesine de katkı sunması hedeflenmektedir (Emmert, 2015).

İyonosfer, yerküre atmosferinin yaklaşık 60 km ile 1000 km arasında konumlanan ve iyonlaşma derecesinin yüksek olduğu bölgesidir. Bu bölge, serbest elektronlar ve iyonlardan oluşan plazma benzeri yapısıyla elektromanyetik dalgaların yayılımı üzerinde belirleyici bir rol oynar. Gündüz ve gece koşullarına göre yapısı dinamik olarak değişen iyonosfer, hem doğal hem de yapay kaynaklı radyo dalgalarının iletiminde, soğurulmasında veya yansımada önemli bir arayüz görevi görür. Özellikle kısa dalga (HF) ve çok yüksek frekanslı (VHF) sinyallerin uzun mesafeli iletişimde kullanımı, iyonosferik yansımalara dayanmaktadır (Ishii ve ark., 2024).

İyonosferin oluşumunun temelinde, Güneş'ten gelen yüksek enerjili elektromanyetik radyasyon yer almaktadır. Güneş kaynaklı morötesi (UV), aşırı morötesi (EUV) ve X-ışınları gibi kısa dalga boylu fotonlar, atmosferin üst katmanlarında bulunan başlıca nötr gaz bileşenleriyle özellikle azot (N_2), oksijen (O_2) ve argon (Ar) etkileşime girerek bu atom ve moleküllerin iyonlaşmasına neden olur. Foton enerjisinin ilgili gazların bağ enerjisinden büyük olduğu durumlarda, foton bir elektronu atomdan koparır ve sonuçta bir pozitif iyon ile serbest elektron meydana gelir. Bu iyonizasyon süreci, özellikle Güneş ışınlarının doğrudan geldiği gündüz saatlerinde daha yüksek oranlarda gerçekleşir ve iyonosferin Güneşe bakan tarafında maksimum elektron yoğunluğuna ulaşılır (Cai ve ark., 2023).

İyonosferin yapısı, iyonlaşma yoğunluğu D, E ve F olmak üzere üç ana alt bölgeye ayrılır. Bu bölgeler yükseklikle birlikte farklı iyonlaşma derecelerine, elektron yoğunluklarına ve radyo dalgası etkileşim özelliklerine sahiptir.

D bölgesi yaklaşık 50–90 km aralığında yer alır ve iyonosferin en alt bölgesidir. Bu bölge, düşük frekanslı (LF) ve çok düşük frekanslı (VLF) radyo dalgalarını büyük ölçüde absorbe eder. Bu nedenle gündüz saatlerinde düşük frekanslı radyo yayınlarında ciddi zayıflamalar yaşanabilir. D bölgesinde iyonlaşma, büyük ölçüde Güneş'ten gelen Lyman- α radyasyonu ve kozmik ışınlar tarafından sürdürülür. Güneş battığında bu katman hızla iyon kaybeder ve geceleri etkisi neredeyse ortadan kalkar (Zhu ve ark., 2023).

E bölgesi yeryüzünden yaklaşık 90–150 km yükseklikleri arasında bulunur ve orta frekanslı (MF) sinyalleri yansıtarak bölgesel haberleşmeye olanak tanır. Gündüz saatlerinde iyon yoğunluğu artar; fakat gece saatlerinde bu değer ciddi oranda düşer (Sakib ve ark., 2023).

F bölgesi, yaklaşık 150 km'den başlayarak 1000 km'ye kadar uzanır ve iyonosferin en üst ve en yoğun bölgesidir. Gündüz saatlerinde bu bölge, Güneş ışınımının etkisiyle F1 ve F2 olmak üzere iki alt bölgeye ayrılır. F1 bölgesi (~150–190 km) orta yoğunlukta iyonlaşma içerirken, F2 bölgesi (~190-400 km) en yüksek elektron yoğunluğuna sahip katmandır. F2 bölgesi, özellikle HF (high frequency-yüksek frekans) sinyallerin yansıtılması açısından kritik öneme sahiptir ve bu sayede kıtalararası radyo iletişimi mümkün kılınır. Gece saatlerinde F1 bölgesi tamamen dağılırken, F2 düşük yoğunluklu bir yapıya bürünerek etkisini kısmen korur (Danilov ve Lastovicka, 2001). F bölgesinin özelliği, gün boyunca Güneş ışınımı, gece boyunca ise jeomanyetik ve termal etkilerle yapısal olarak değişmesidir. Bu katmanda meydana gelen değişimler,

elektromanyetik sinyallerin kırılma indisinde oynamalara, faz kaymalarına, gecikmelere ve yön sapmalarına neden olabilir. Bu tür etkiler, özellikle GNSS/GPS sistemlerinde konumlama hatalarına ve veri iletiminde kopmalara yol açabilir. Bu nedenle F bölgesindeki elektron yoğunluğunun zamansal ve mekânsal değişimlerinin modellenmesi, uzay-temelli haberleşme ve navigasyon teknolojilerinin güvenilirliği açısından büyük önem arz etmektedir.

İyonosferin diğer atmosfer katmanlarından farkı yüksek derecede iyonize gazlardan oluşmasıdır. Örneğin, troposfer ve stratosfer gibi alt atmosfer katmanlarında iyonlaşma oranı sırasıyla yok ve yok denecek kadar azdır ve bu katmanlar elektromanyetik dalgaların iletimine belirgin bir katkı sağlamazlar. Buna karşılık, iyonosferin plazma karakteri, sinyallerin yayılımında kırılma indisinin değişmesine, bazı frekanslarda tam yansıma veya soğrulmaya, hatta faz gecikmesine neden olabilir. Bu durum, GPS, uzaktan algılama radarları ve uydu haberleşme uygulamalarında hatalara yol açabileceği için bilimsel olarak sürekli izlenmesi gereken bir fenomendir (Emmert, 2009). Ayrıca iyonosfer, yalnızca Güneş kaynaklı fotonlarla değil, aynı zamanda jeomanyetik fırtınalar, Güneş patlamaları ve koronal kütle atımları (CME) gibi olaylarla da doğrudan etkilenir. Bu tür olaylar, iyonosferde yoğunluk değişimine yol açarak haberleşme kesintilerine, sinyal sapmalarına ve navigasyon sistemlerinde doğruluk kayıplarına neden olabilir. Bu sebeple iyonosferik koşulların modellenmesi ve bu koşullara karşı sistemlerin dayanıklılığının artırılması, hem askeri hem de sivil uzay uygulamaları açısından son derece kritik bir konu haline gelmiştir (Matamba ve Habarulema, 2018).

Bu tez çalışmasının temel amacı, termosferik toplam kütle yoğunluğunun zamanla nasıl değiştiğini analiz etmek ve bu değişimi etkileyen başlıca Güneş ve jeomanyetik faktörleri belirlemektir. Bu amaç doğrultusunda çalışmanın 2. bölümünde konuya ilişkin mevcut literatür taraması yapılmış ve konunun öneminin ortaya konulması hedeflenmiştir. Çalışmanın 3. Bölümünde tez çalışmasında kullanılan modeller açıklanmıştır. 4. Bölümde ise elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. Son bölümde ise bu tez çalışmasının sonuçlarına yer verilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Termosferik toplam kütle yoğunluğu, atmosferin üst katmanlarındaki elektromanyetik özellikleri doğrudan etkileyen bir parametre olması nedeniyle son yıllarda uzay havası araştırmaları, uydu yörünge tahminleri ve haberleşme sistemleri bağlamında çok sayıda çalışmanın konusu hâline gelmiştir. Uydu iletişimi ve navigasyon sistemlerinde elektromanyetik dalgaların yayılması sırasında karşılaşılan kırılma, soğurulma ve saçılma gibi etkiler, doğrudan bu parametrenin uzamsal ve zamansal değişimlerine bağlıdır (Emmert, 2015).

Marcos ve ark. (2005) te uzun dönemli verileri analiz ederek termosferik nötr yoğunluğun zaman içinde azaldığını ve bu azalmanın büyük ölçüde karbondioksit birikimi ve solar aktivite döngüleriyle ilişkili olduğunu göstermiştir (Marcos ve ark., 2005). Bu sonuç, atmosferin üst katmanlarının iklim değişikliğiyle doğrudan etkileşim içinde olduğunu ortaya koymaktadır. Emmert (2009) da yörünge seviyelerinde görev yapan uydulardan elde edilen verileri kullanarak termosferik farklı yoğunlukta küresel ortalamaya dayalı bir zaman serisi elde etmiş ve güneş döngüleri ile korelasyonunu ortaya koymuştur. Emmert ve ark. (2010) da yapılan bir diğer çalışmada, 2008 Güneş minimumu sırasında gözlemlenen rekor düzeyde düşük yoğunluklar rapor edilmiş ve bu durum, uzay ortamının jeofiziksel hassasiyetini göstermesi açısından dikkat çekici bulunmuştur (Emmert ve ark., 2010).

Daha yakın dönemli çalışmalarda, termosferik yoğunluğun alt atmosfer ve jeomanyetik etkilerle ilişkisine dair yeni sorular ortaya konmuştur. Stratosferik Quasi-Biennial Oscillation (QBO) salınımlarının termosferik yoğunluk üzerindeki etkisini incelemiş, ancak doğrudan bir nedensel ilişki tespit edilememiştir. Bu durum, alt atmosfer dalga dinamiklerinin üst atmosferdeki etkisinin sınırlı ya da dolaylı olduğunu düşündürmektedir (Li ve ark., 2023). Benzer şekilde, Solomon ve ark. (2011) tarafından yürütülen model tabanlı çalışmalarda da Güneş kaynaklı UV radyasyonun, termosferik sıcaklık ve yoğunluk üzerindeki rolü tartışılmıştır (Solomon ve ark., 2011).

Jeomanyetik fırtınaların termosferik kütle yoğunluğu üzerindeki etkilerini ele alan çalışmalar, özellikle modelleme doğruluğunu artırmak açısından önem arz etmektedir. Wang ve ark. (2022) de NRLMSİSE-00 modelinin jeomanyetik aktif koşullarda yeniden kalibrasyonunu ele almış, Joule ısınması ve elektrik alan katkılarını da içeren verilerle modelin başarısını değerlendirmiştir (Wang ve ark., 2022). Yine aynı yıl, aynı araştırma grubu tarafından yürütülen başka bir çalışmada, makine öğrenmesi

temelli topluluk modelleri (ensemble learning) ve LSTM (Long ShortTerm Memory) algoritmaları birleştirilerek, fırtına zamanlı termosferik yoğunluk tahmini yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, farklı jeomanyetik koşullar altında güçlü bir genelleme yeteneği sergilemiştir.

Cai ve ark. (2023) te Holosen dönemine (MÖ 9455 ile MS 2015) ait uzun vadeli termosfer evrimini modelleyerek, hem nötr yoğunluk hem de sıcaklık değişimlerine dair bakımından detaylı öngörülerde bulunmuştur(Cai ve ark., 2023). Bu çalışma, yalnızca modern gözlem verileriyle değil, aynı zamanda jeolojik zaman ölçeğinde güneş aktivitesinin termosferik etkilerin değerlendirmesi literatürde öncü kabul edilmektedir. (Lin ve ark., 2022) tarafından SpaceX uydularının etkilendiği büyük jeomanyetik fırtına sırasında yapılan simülasyonlar, farklı atmosfer modelleri arasındaki tahmin farklılıklarını ortaya koymuş; MAGE modelinin %150'lik yoğunluk artışı ön görmesine karşın, TIEGCM ve DTM-2013 modellerinin %50 civarında artış tahmin ettiği belirtilmiştir.

Bunlara ek olarak, Golyandina ve Korobeynikov (2014) Singular Spectrum Analysis (Tekli Spektrum Analizi -SSA) yönteminin zaman serisi verileri üzerindeki uygulamalarını detaylı biçimde ortaya koymuş; yöntem, atmosferik veri setlerinin analizinde gürültüden ayıklama, trend ayrıştırma ve öngörü amaçlı kullanılmıştır (Golyandina ve Korobeynikov, 2014). Hassani (2007) tarafından yapılan kapsamlı karşılaştırmalı analiz, SSA'nın diğer parametrik modellere kıyasla daha esnek ve yüksek doğruluklu çıktılar sunduğunu göstermiştir (Hassani, 2007). Ayrıca, Kondrashov ve ark., (2005) gibi araştırmacılar da SSA yönteminin iklim sistemlerindeki çok bileşenli salınım yapılarının ayrıştırılmasında etkili olduğunu ifade etmişlerdir (Kondrashov ve ark., 2005).

Tüm bu çalışmalar ışığında, termosferik toplam kütle yoğunluğunun modellenmesi, sadece geçmiş ve güncel atmosfer koşullarının anlaşılmasını sağlamakla kalmaz; aynı zamanda yüksek çözünürlüklü tahmin teknikleri sayesinde uzay-temelli teknolojilerin güvenliğini artıracak karar destek sistemlerinin geliştirilmesine de olanak tanır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada termosferik kütle yoğunluğu değerleri uydu ölçümlerinden 1967-2019 yılları arasında günlük olarak elde edilmiştir. Aynı dönem için SunSpot Number (SSN-Güneş lekesi sayısı) değerleri <https://www.sidc.be/SILSO/infosndtot> adresinden incelenen süreç için günlük olarak elde edilmiştir. Bu seriler SSA yöntemi uzun süreli olarak değerlendirilmiştir.

SSA, zaman serilerinde yapısal bileşenleri (trend, döngüsel hareketler, gürültü) ayırtmaya olanak tanıyan güçlü ve parametrik olmayan bir yöntemdir. Atmosferik ve uzay bilimlerinde yaygın olarak kullanılan bu yöntem (Hassani, 2007; Golyandina ve ark., 2018) uzun dönemli değişimlerin öngörülmesinde yüksek başarı göstermektedir.

3.1 Singular Spectrum Analiz (SSA) algoritması

SSA temelinde bir zaman serisini, L uzunluğunda kaydırmalı pencere kullanarak üst üste binen alt serilere (gecikmeli vektörlere) dönüştürür. Bu alt seriler, bir yörünge matrisi (trajectory matrix) oluşturur. Bu matrisin satır ve sütunları L ve $K = N - L + 1$ olur. Burada N , orijinal zaman serisinin uzunluğudur. L ($1 < L < N$) yani pencere uzunluğu, oluşturulan matrisin boyutunu belirler ve SSA'nın bileşenleri nasıl ayracağına doğrudan etki eder.

Reel değerli bir zaman seri $X_N = (X_1, \dots, X_N)$ şeklinde ifade edilebilir. SSA; ayrıştırma ve yeniden inşa olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır.

Ayrıştırma işlemini gerçekleştirebilmek için;

1. Adım: Seri, boyutu L olan gecikmeli vektörlerden oluşan bir diziye dönüştürülür. Bu işlem $K = N - L + 1$ tane gecikmeli vektör oluşturularak yapılmaktadır.

$X_i = (x_i, \dots, x_{i+L-1})^T$, $i = 1, \dots, K$. şeklinde tanımlanarak zaman serisine ait yörünge matrisi X_N aşağıdaki gibi elde edilir.

$$X = \mathbf{X} = [X_1 : \dots : X_K] = (x_{ij})_{i,j=1}^{L,K} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_K \\ x_2 & x_3 & x_4 & \dots & x_{K+1} \\ x_3 & x_4 & x_5 & \dots & x_{K+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_L & x_{L+1} & x_{L+2} & \dots & x_N \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Hem satırları hem de sütunları, orijinal zaman serisinin alt serileridir. ters köşegen (çaprazlar) boyunca tüm elemanlar eşittir.

2. Adım: $\{P_i\}_{i=1}^L$ kümesi R^L uzayında ortonormal bir baz olsun, bu durumda yörünge matrisi şu şekilde ayrıştırılabilir;

$$X = \sum_{i=1}^L P_i Q_i^T = X_1, \dots, X_L \quad (3.2)$$

Burada $Q_i = X^T P_i$ her bir bileşene karşılık gelen izdüşüm vektörü, $\lambda_i = \|X_i\|_F^2 = \|Q_i\|^2$ ise her bileşenin karesidir. Baz vektörleri için iki seçenek değerlendirilmektedir.

Birincisi temel yöntem; Temel SSA yöntemi yörünge matrisini doğrudan oluşturur ve bu matrisin kendisi üzerinde tekil değer ayrışımı (SVD) yapar. Bu durumda elde edilen ayrıştırma SVD ile aynı değeri vermektedir.

$\{P_i\}_{i=1}^L$, XX^T matrisinin özvektörleridir.

İkincisi ise Toeplitz yaklaşımı; Toeplitz yaklaşımı ise orijinal yörünge matrisinin yerine, zaman serisinin otokovaryans matrisini kullanır. Bu matris, simetriktir ve elemanları zaman serisinin gecikmeli kovaryanslarına dayanır. Bu otokovaryans matrisi Toeplitz matrisi olarak adlandırılır çünkü her çapraz diyagonal boyunca aynı değere sahiptir (yani elemanlar sadece indeks farkına bağlıdır).

$\{P_i\}_{i=1}^L$, C matrisinin özvektörleridir.

$$C_{ij} = \frac{1}{N-|i-j|} \sum_{m=1}^{N-|i-j|} x_m x_{m+|i-j|}, \quad 1 \leq i, j \leq L$$

Her iki durumda da özvektörler, karşılık gelen özdeğerler azalan sırada yer alacak şekilde sıralanır. Temel yöntem, X matrisinin Tekil Değer Ayrışımına karşılık gelir ;

$$X = \sum_i \sqrt{\lambda_i} U_i V_i^T$$

Burada $P_i = U_i$, X' in sol tekil vektörlerini $Q_i = \sqrt{\lambda_i} V_i$, ise sağ tekil vektörlerini temsil eder. λ_i değeri XX^T matrisinin özdeğeri olup $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_L \geq 0$ eşitsizliğini sağlar. Toeplitz yaklaşım ise daha çok durağan ve sıfır ortalamalı zaman serileri için uygundur.

3.Adım: $d = \max\{j: \lambda_j \neq 0\}$ olarak tanımlansın; sıfır olmayan öz değerlere karşılık gelen en büyük index d olarak alınır. Ayrıştırma işlemi denklem (3.2) de elde edildikten sonra gruplama işlemi indeks kümesi $\{1, 2, \dots, d\}$ üzerinde yapılır ve bu küme m tane birbirinden ayrık alt kümeye ayrılır. Yani I_1, \dots, I_m tanımı yapılır.

$X_I = \sum_{i \in I} X_i$ yardımıyla ayrıştırma şu hale gelir;

$$X = X_{I_1} + \dots + X_{I_m} \quad (3.3)$$

Alt kümenin I_1, \dots, I_m seçilmesi işlemine öz-üçlü gruplama denir. $m = d$ ve her grup sadece bir tek indeks içeriyorsa $I_j = \{j\}$, $j = 1, \dots, d$ bu durumda elde edilen gruplama türüne temel gruplama adı verilmektedir.

Temel yöntem için birden fazla öz-üçlünün birlikte seçilmesi, zaman serisinin en iyi şekilde yaklaşık olarak temsil edilmesini sağlar. Bu da SVD'nin iyi bilinen optimalite özelliği ile ilişkilidir.

4.Adım: diyagonal ortalama alma olarak adlandırılan gruplama sonrası ayrıştırmada elde edilen her bir matris X_{I_j} , yeniden bir zaman serisine dönüştürülür. Elde edilen seri, orijinal zaman serisi ile aynı uzunluğa sahiptir: N .

$Y = y_{ij}$ boyutları $L \times K$ olan bir matris olsun; burada $1 \leq i \leq L, 1 \leq j \leq K$ ve $L \leq K$ varsayalım. Diyagonal ortalama işlemiyle Y matrisi şu şekilde yeni bir seri haline dönüştürülür:

$$\tilde{y}_s = \frac{1}{|A_s|} \sum_{(l,k) \in A_s} y_{lk}$$

Burada $A_s = \{(l, k) : l + k = s + 1, 1 \leq l \leq L, 1 \leq k \leq K\}$ şeklinde tanımlanır ve $|A_s|$, bu kümedeki eleman sayısını ifade eder. Bu işlem matrisin anti-diyagonelleri boyunca yer alan elemanların ortalamasının alınmasına karşılık gelir. Diyagonal ortalama işlemi, her bir X_{I_k} sonucunda elde edilen matrise uygulandığında, şu şekilde bir yeniden oluşturulmuş zaman serisi üretir:

$$\tilde{X}^{(k)} = (\tilde{x}_1^{(k)}, \dots, \tilde{x}_N^{(k)})$$

Sonuç olarak, başlangıçta sahip olduğumuz zaman serisi (x_1, \dots, x_N) şekilde m tane yeniden oluşturulmuş alt seriye ayrıştırılmış olur (Golyandina ve Korobeynikov, 2014).

$$x_N = \sum_{k=1}^m \tilde{x}_n^{(k)}, n = 1, \dots, N \quad (3.4)$$

X yerine toplam kütle yoğunluğunu, N yerine (1 Ocak 1967 ile 31 Aralık 2019 arasındaki gün sayısı) 19.358 değerini kullanarak ölçümler elde edildi. Bu çalışmada kullanılan termosferik toplam kütle yoğunluğu zaman serisinin genel yapısı incelendiğinde, serinin hem uzun dönemli trend bileşeni içerdiği hem de ortalamasının sıfırdan belirgin biçimde sapma gösterdiği görülmektedir. Grafiksiz analizler, serinin

durağan olmayan bir yapıya sahip olduğunu, özellikle zamanla değişen ortalama (trend) ve varyans yapılarının bulunduğunu ortaya koymaktadır.

Bu bağlamda, durağan ve sıfır ortalamalı seriler için önerilen Toeplitz SSA yöntemi, mevcut veri seti için doğrudan uygulanabilir bir seçenek değildir. Zira Toeplitz yapılı otokorelasyon matrisine dayalı bu yaklaşım, yalnızca istatistiksel olarak sabit özellikler gösteren serilerde bileşen ayrıştırmasını anlamlı şekilde gerçekleştirebilir.

Buna karşılık, Temel SSA yöntemi, hem durağan olmayan hem de sıfır ortalama özelliği taşımayan zaman serileri üzerinde esnekliği ve uyarlanabilirliği sayesinde daha uygun bir analiz çerçevesi sunmaktadır. Bu nedenle, tez kapsamında kullanılan analizlerde Temel SSA tercih edilmiştir ve elde edilen grafiksel bileşen yapıları da bu yöntemin kullanıldığını doğrulamaktadır.

3.2 Kütle Yoğunluğu Ölçüm Modelleri

Bu çalışmada termosferik kütle yoğunluğunun ölçülmesi; sürüklenme tabanlı ölçüm, sıcaklığa bağlı ölçüm ve hidrostatik denge koşullarında ölçüm olmak üzere üç farklı şekilde elde edilebilir (Emmert, 2015).

Sürüklenme tabanlı yoğunluk ölçümü, uyduların yörüngelerinden türetilen kütle yoğunluğu veya ivmeölçer verilerinden hareketle, atmosferin etkisiyle oluşan sürüklenme kuvveti kullanılarak hesaplanan atmosferik yoğunluk değeridir. Bu yöntem, özellikle 200–600 km arası yüksekliklerde yaygın olarak kullanılır (200 km'nin altında atmosfer çok yoğundur bu da ölçümü zorlaştırır. 600 km'nin üstünde yoğunluk düşer ve ölçüm zorlaşır). Sürüklenme kaynaklı ivme şu formülle verilir.

$$\dot{v} = -\frac{1}{2}\rho B|V - V_A|^2 e_{V-V_A} \quad (3.5)$$

Bu formül; uydunun yörüngesindeki sürüklenme ivmesinin atmosferik kütle yoğunluğu ve diğer parametrelerle ilişkisini verir. Buradaki negatif işaret sürüklenmenin hızı düşürücü etkisini gösterir, ρ atmosferik kütle yoğunluğu (bu bizim ölçmek istediğimiz parametredir), V uydunun hızı, V_A atmosferin yerel hızı, B ters balistik katsayısını ifade edip aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$B = C_d \frac{A}{m} \quad (3.6)$$

Burada C_d sürüklenme katsayısı (uydunun şekline ve aerodinamik özelliklerine bağlı), A atmosferle etkileşen dik kesit alanı, m uydunun kütlesidir. Fonksiyon Newton mekaniğine ve akışkanlar dinamiğine dayanmaktadır. Newton mekaniği Newton'un 2. Hareket Yasası $F = m \cdot a$;

$$a = \frac{F}{m}$$

Burada F uyduya etki eden sürtünme kuvvetidir. Akışkanlar dinamiğinde ise bir cisme karşıdan gelen akışkan molekülleri tarafından uygulanan direnç kuvveti şu şekilde verilir

$$F = \frac{1}{2} \rho C_d A V^2$$

Burada ρ atmosferik kütle yoğunluğu, V uydunun akışkana göre rölatif hızı, C_d sürüklenme katsayısı, A atmosferle etkileşen dik kesit alanıdır.

Termosferik kütle yoğunluğunun modellenmesinde farklı yaklaşımlar mevcuttur. Sürüklenme tabanlı yöntemler, doğrudan uyduların ivmeölçer verilerine dayanarak Newton'un ikinci hareket yasası ve akışkanlar dinamiği çerçevesinde yoğunluk tahmini yapar. Bu yöntem özellikle 200–600 km aralığında, gerçek ölçümlerle kalibre edilebildiği için oldukça güvenilirdir. Buna karşılık, ampirik modellerden NRLMSISE-00 ve JB2008, çeşitli uzay-hava parametrelerine bağlı olarak yoğunluk tahmini sunarlar. NRLMSISE-00 daha genel geçer ve sade girdilere dayanırken, JB2008 ve DTM-2013 modelleri daha karmaşık parametre setlerine sahiptir ve özellikle son dönem güneş döngülerine karşı daha duyarlıdır. DTM-2013, sürüklenme verisiyle kalibre edilen yarı-fiziksel bir yapı sunarak bu modeller arasında hibrit bir yaklaşım sergilemektedir.

Günümüzde termosferik yoğunluğu tahmin etme amaçlı kullanılan modellerden olan NRLMSISE-00, DTM-2013 ve JB2008 doğrudan sürüklenme tabanlı yoğunluk ölçüm verilerini kullanmaktadır.

NRLMSISE-00 ve DTM-2013 sıcaklık profilini tanımlamak için (Bates, 1951) Bates üstel fonksiyonu kullanmaktadır (Bates, 1951):

$$T(\zeta) = T_{ex} - (T_{ex} - T_0) \exp[-\rho(\zeta - \zeta_0)] \quad (3.7)$$

$$\sigma \equiv \frac{T'_0}{T_{ex}-T_0} \quad (3.8)$$

Burada ζ_0 geopotansiyel yüksekliği temsil etmektedir. JB2008 ise üst termosfer sıcaklığını tanımlamak için bunun yerine daha esnek bir fonksiyon olan arktanjan fonksiyonu kullanır.

$$T_{(z)} = T_0 + \frac{2}{\pi} (T_{ex} - T_0) \tan^{-1} \left\{ -\rho \frac{\pi}{2} (z - z_0) [1 + B(z - z_0)^\beta] \right\} \quad (3.9)$$

Arktanjan fonksiyonu sıcaklığın artış ve doygunluk eğilimini sergiler. Burada z geometrik yüksekliği ifade eder.

Atmosferik modellerde kullanılan hidrostatik denge ilkesi, yerçekimi kuvveti ile basınç gradyan kuvvetinin dikey yöndeki dengesi olarak tanımlanmakta olup; bu ilke sayesinde atmosferdeki basınç ve yoğunluk dağılımları yükseklikle ilişkilendirilebilmektedir.

$$dP = -\rho g dz = -\rho d\Phi = -\rho g_0 d\zeta \quad (3.10)$$

İdeal gaz yasası $PV = nRT$ kullanıldığında denklem şu hale gelir:

$$d(\ln \rho) = -\frac{g_0 M}{kT} d\zeta - d\left(\ln \frac{T}{M}\right) \quad (3.11)$$

İntegral alınarak şu ifade elde edilir:

$$\ln \rho(\zeta) = \ln \rho(\zeta_0) - \ln \frac{T(\zeta)}{T(\zeta_0)} + \ln \frac{M(\zeta)}{M(\zeta_0)} - \frac{g_0}{k} \int_{\zeta_0}^{\zeta} \frac{M}{T} d\zeta' \quad (3.12)$$

Burada integrasyon sınırları 90 km ile 600 km arasında alınabilir. Buradaki ρ değerleri logaritmik olarak elde edilmiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan toplam kütle yoğunluğu değerleri logaritmik değerlerdir.

Bu tezde kullanılan toplam kütle yoğunluğu verileri Naval Research Laboratory bünyesinde Space Science Division bölümünde araştırmacı olarak görev alan Dr. John T. Emmert tarafından CHAMP, GREACE ve GOCE uydularından elde edilen verileri bizlerle paylaşmıştır. Bu nedenle Dr. John T. Emmert'e çok teşekkür ederim.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA

Bu çalışmada iyonosferik yükseklikler olan 250 km, 275 km, 325 km, 375 km, 400 km, 425 km, 475 km, 525 km, 575 km için toplam kütle yoğunluğu değerleri SSA modeli yardımıyla zamanla değişim, Trend analizi, periyodiklik ve Rezidü analizleri yapılarak 1967 yılı ile 2019 yılları arasındaki günlük değişimi her bir yükseklik için analiz edilmiştir.

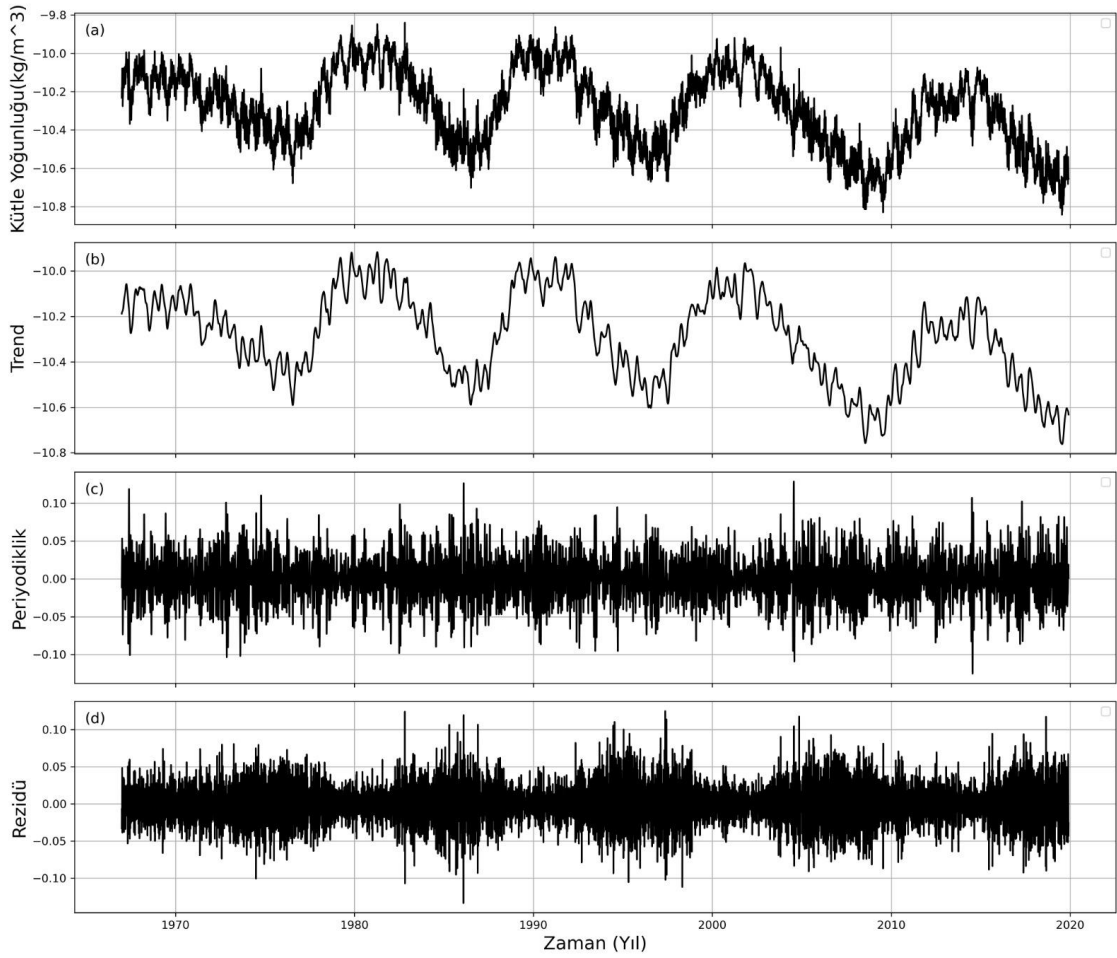
4.1 250 km Yükseklik için Analiz sonuçları

250 km yükseklik için SSA modeli ile elde edilen analiz sonuçları Şekil 4.1 de verilmiştir. Şekil 4.1a' da 1967–2019 dönemini kapsayan 250 km yükseklikteki toplam kütle yoğunluğunun dağılımı Güneş devirlerine zamansal ve dağılımsal olarak benzerdir. 20. Güneş döngüsünden itibaren her bir döngünün maksimum ve minimum evreleri, kütle yoğunluğundaki tepe ve dip noktalarına karşılık gelmektedir. Özellikle 1989–1990 maksimumu (22. Güneş devri) ve 2008–2009 minimumu (23. Güneş devri), sırasıyla en yüksek ve en düşük yoğunluk değerlerini üretmiştir. Bu durum, yıllık Güneş aktivite döngüsüyle bağlantılı olabileceğini göstermektedir.

Şekil 4.1b' de sunulan trend bileşeni, 250 km yükseklikte kütle yoğunluğunun uzun süreli değişimini yansıtmaktadır. Trend analizleri incelendiğinde kütle yoğunluğu değerlerinin 11 yıllık Güneş devirlerini net olarak yansıttığı görülmektedir.

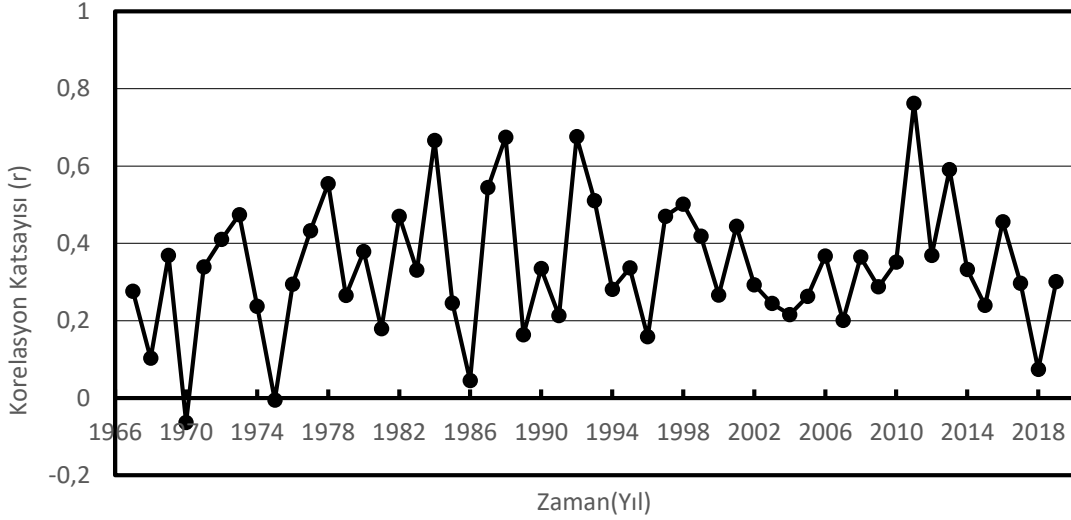
Şekil 4.1c de toplam kütle yoğunluğu değerlerinin periyodik yapısı görülmektedir. Değerler analiz edildiğinde iyonosferik değişimlerde görülen günlük, mevsimsel ve 11 yıllık değişimler görülmektedir.

Şekil 4.1d' de toplam kütle yoğunluğundaki trend eğilimden sapma olarak rezidü değerlerinin zamanla değişimi görülmektedir. Rezidü değerlerinin Güneş devirlerinin artan fazında küçük değerler aldığı, Güneş devirlerinin azalan fazında ise daha büyük değerler aldığı görülmektedir. Rezidü değerlerinin genellikle ± 0.05 aralığında olduğu, bu aralık dışına Güneş devirlerinin azalan fazında çıktığı görülmektedir.



Şekil 4.1. 250 km yükseklik için SSA modeli ile elde edilen analiz sonuçları.

Şekil 4.2’de 250 km yükseklik için yıllara göre toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki korelasyon katsayısı değerlerinin zamanla değişimi görülmektedir. Toplam kütle yoğunluğu değerleri ile SSN değerleri arasında istatistiksel korelasyon analizi incelendiğinde şu sonuçlarla karşılaşmaktayız. Korelasyon katsayısı incelenen 1970 ve 1975 yılları hariç periyodun tümünde pozitif değerler almaktadır. Bu durumda toplam kütle yoğunluğu ile SSN değerleri arasında pozitif ilişkinin olduğu ifade edilebilir. 1978, 1983, 1987, 1988, 199, 2011 ve 2013 yıllarında güçlü korelasyon olarak ifade edilen 0.5 değerinin üzerinde değerler aldığı gözlemlenmiştir. Yıllık katsayılar analiz edildiğinde ise 1970 yılında minimum olan -0.02, 2012 yılında ise maksimum korelasyon katsayısı olan 0.76 değeri elde edilebilir.



Şekil 4.2. 250 km yükseklik için yıllara göre toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki korelasyon katsayı değerlerinin değişimi.

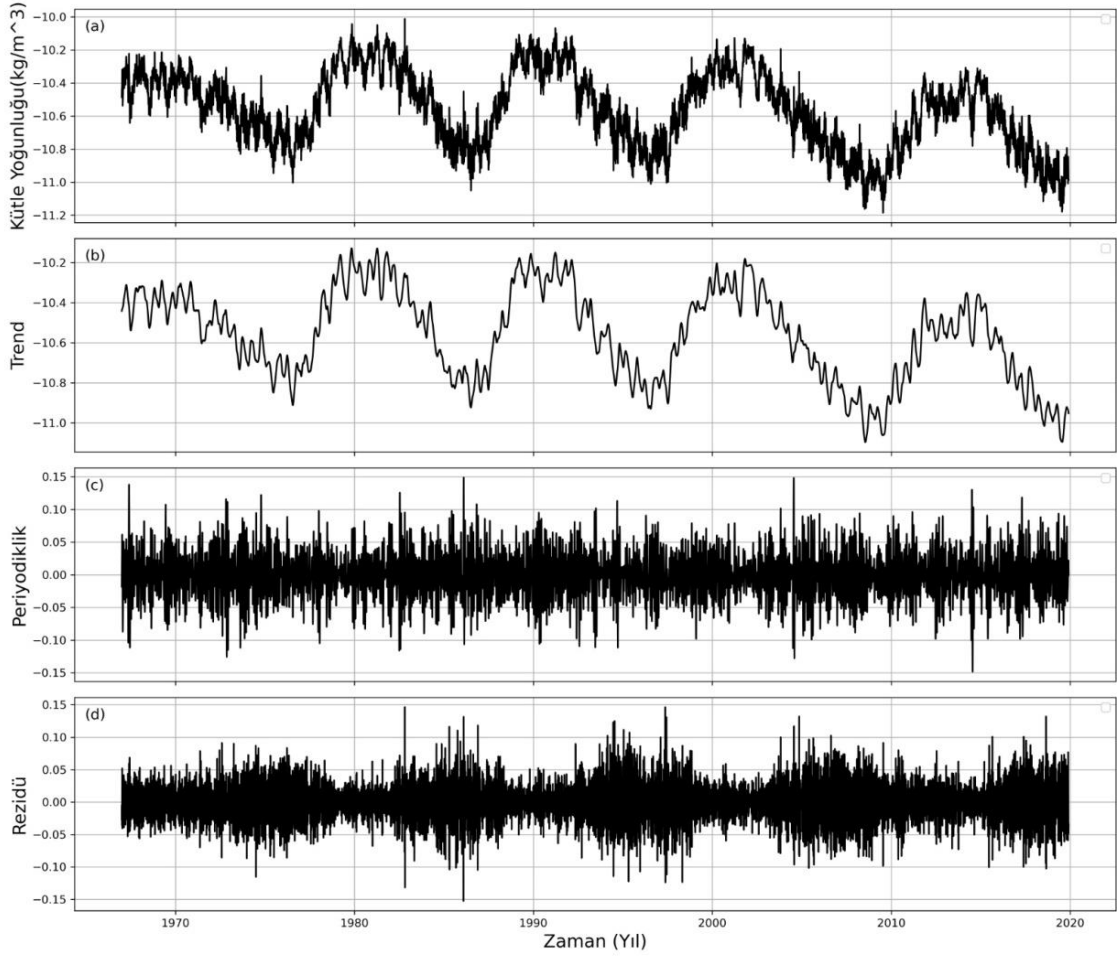
4.2 275 km Yükseklik için Analiz sonuçları

275 km yükseklik için SSA modeli ile elde edilen analiz sonuçları Şekil 4.3 de verilmiştir. Şekil 4.3a' da 1967–2019 dönemini kapsayan 250 km yükseklikteki toplam kütle yoğunluğunun dağılımı Güneş devirlerine zamansal ve dağılımsal olarak benzerdir. 20. Güneş döngüsünden itibaren her bir döngünün maksimum ve minimum evreleri, kütle yoğunluğundaki tepe ve dip noktalarına karşılık gelmektedir. Özellikle 1989–1990 maksimumu (22. Güneş devri) ve 2008–2009 minimumu (23. Güneş devri), sırasıyla en yüksek ve en düşük yoğunluk değerlerini üretmiştir. Bu durum, yıllık Güneş aktivite döngüsüyle bağlantılı olabileceğini göstermektedir.

Şekil 4.3b' de sunulan trend bileşeni, 275 km yükseklikte kütle yoğunluğunun uzun süreli değişimini yansıtmaktadır. Trend analizleri incelendiğinde kütle yoğunluğu değerlerinin 11 yıllık Güneş devirlerini net olarak yansıttığı görülmektedir.

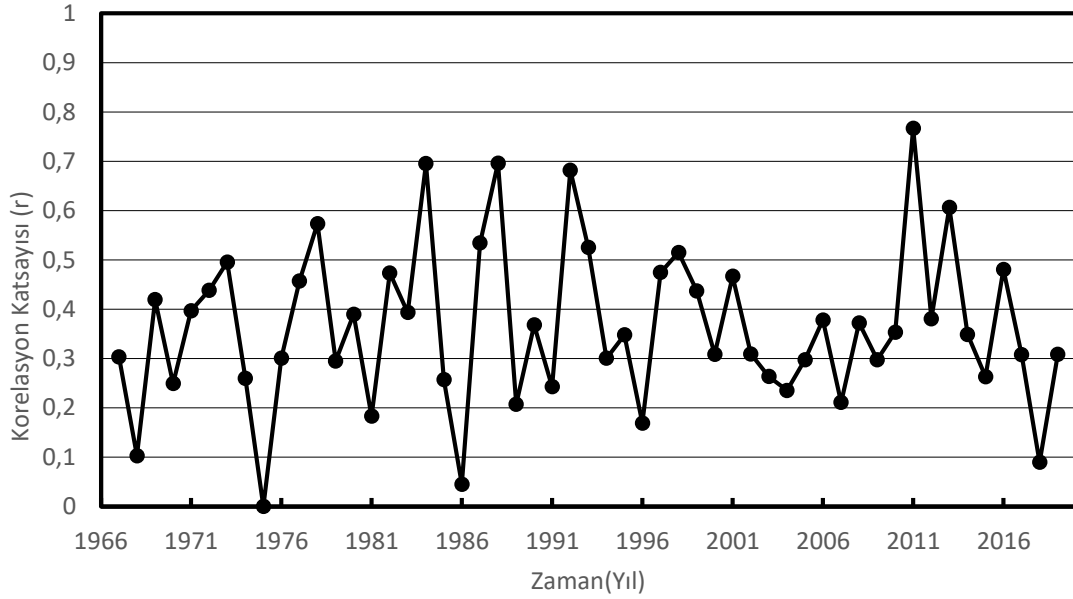
Şekil 4.3c de toplam kütle yoğunluğu değerlerinin periyodik yapısı görülmektedir. Değerler analiz edildiğinde iyonosferik değişimlerde görülen günlük, mevsimsel ve 11 yıllık değişimler görülmektedir.

Şekil 4.3d' de toplam kütle yoğunluğundaki periyodik trend eğilimden sapma olarak rezidü değerlerinin zamanla değişimi görülmektedir. Rezidü değerlerinin Güneş devirlerinin artan fazında küçük değerler aldığı, Güneş devirlerinin azalan fazında ise daha büyük değerler aldığı görülmektedir. Rezidü değerlerinin genellikle $\pm 0,05$ aralığında olduğu, bu aralık dışına Güneş devirlerinin azalan fazında çıktığı görülmektedir.



Şekil4.3. 275 km yükseklik için SSA modeli ile elde edilen analiz sonuçları.

Şekil 4.4'te 275 km yükseklik için yıllara göre toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki korelasyon katsayısı değerlerinin değişimi görülmektedir. Toplam kütle yoğunluğu değerleri ile SSN değerleri arasında istatistiksel korelasyon analizi incelendiğinde şu sonuçlar elde edilmiştir. Korelasyon katsayısının incelenen periyodun tümünde pozitif değerler almaktadır. Bu durumda toplam kütle yoğunluğu ile SSN değerleri arasında pozitif ilişkinin olduğu ifade edilebilir. 1978, 1984, 1987, 1988, 1992, 1993, 1998, 2011 ve 2013 yıllarında güçlü korelasyon olarak ifade edilen 0.5 değerinin üzerinde değerler aldığı gözlemlenmiştir. Yıllık katsayılar analiz edildiğinde ise 1975 yılında minimum olan 0, 2011 yılında ise maksimum korelasyon katsayısı olan 0.76 değeri elde edilebilir.



Şekil 4.4. 275 km için yıllara göre toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki korelasyon katsayı değerinin değişimi.

4.3 325 km Yükseklik için Analiz sonuçları

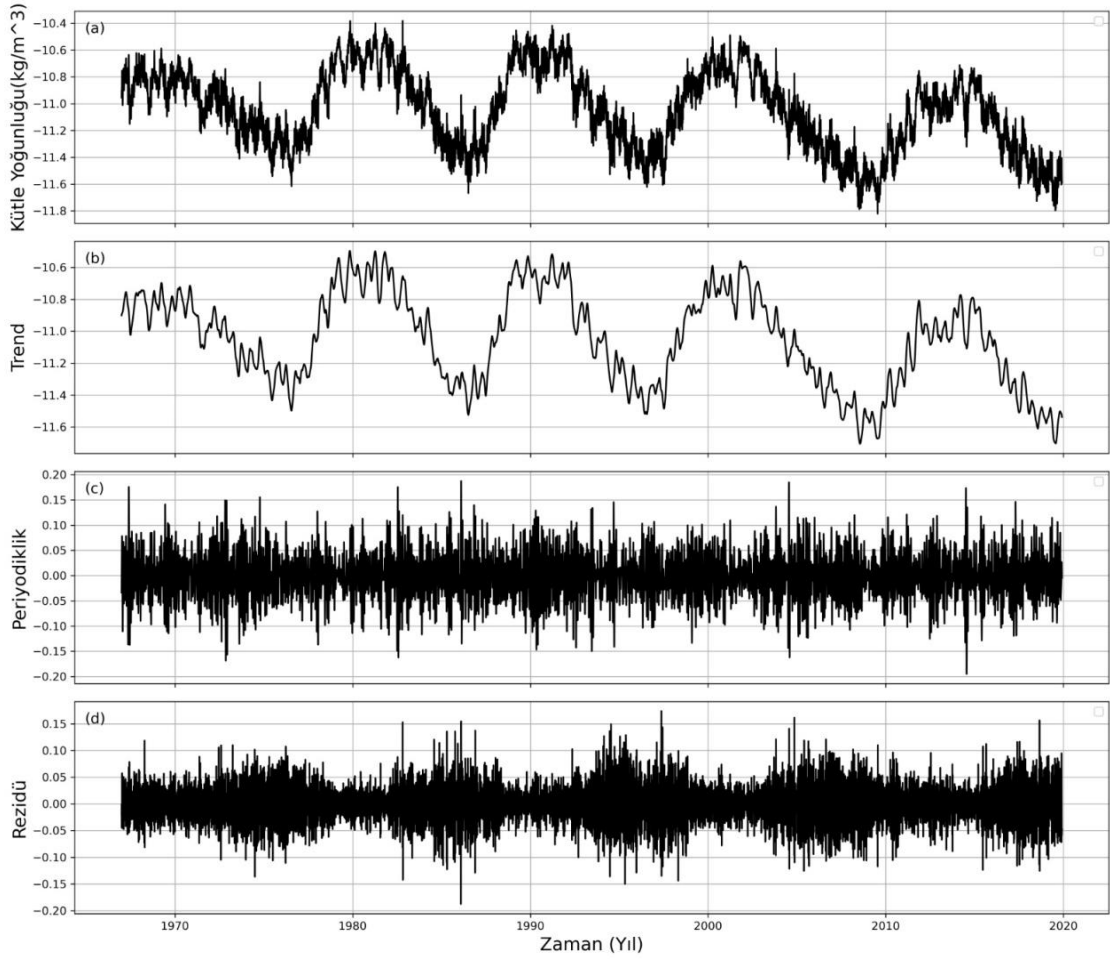
325 km yükseklik için SSA modeli ile elde edilen analiz sonuçları Şekil 4.5 de verilmiştir. Şekil 4.5a' da 1967-2019 önemini kapsayan 325 km yükseklikteki toplam kütle yoğunluğunun dağılımı Güneş devirlerine zamansal ve dağılımsal olarak benzerdir. 20. Güneş döngüsünden itibaren her bir döngünün maksimum ve minimum evreleri, sırasıyla kütle yoğunluğundaki tepe ve dip noktalarına karşılık gelmektedir. Özellikle 1989–1990 maksimumu (22. Güneş devri) ve 2008–2009 minimumu (23. Güneş devri), sırasıyla en yüksek ve en düşük yoğunluk değerlerini üretmiştir. Bu durum, yıllık Güneş aktivite döngüsüyle bağlantılı olabileceğini göstermektedir.

Şekil 4.5b' de sunulan trend bileşeni, 325 km yükseklikte kütle yoğunluğunun uzun süreli değişimini yansıtmaktadır. Trend analizleri incelendiğinde kütle yoğunluğu değerleriniz 11 yıllık Güneş devirlerini net olarak yansıttığı görülmektedir.

Şekil 4.5c de toplam kütle yoğunluğu değerlerinin periyodik yapısı görülmektedir. Değerler analiz edildiğinde iyonosferik değişimlerde görülen günlük, mevsimsel ve 11 yıllık değişimler görülmektedir.

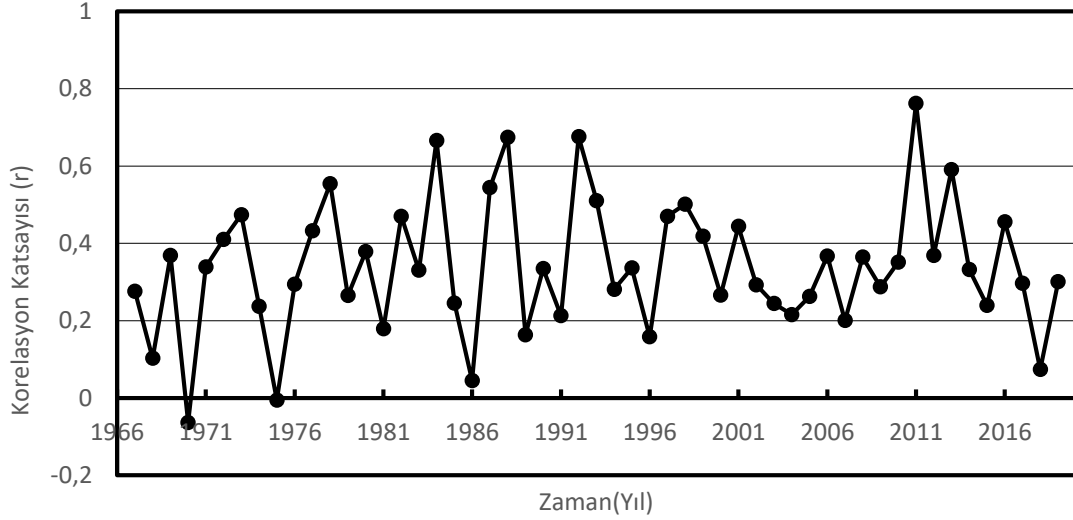
Şekil 4.5d' de toplam kütle yoğunluğundaki periyodik trend eğilimden sapma olarak rezidü değerlerinin zamanla değişimi görülmektedir. Rezidü değerlerinin Güneş devirlerinin artan fazında küçük değerler aldığı, Güneş devirlerinin azalan fazında ise daha büyük değerler aldığı görülmektedir. Rezidü değerlerinin genellikle ± 0.05

aralığında olduğu, bu aralık dışına Güneş devirlerinin azalan fazında çıktığı görülmektedir.



Şekil 4.5. 325 km yükseklik için SSA modeli ile elde edilen analiz sonuçları.

Şekil 4.6’da 325 km yükseklik için yıllara göre toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki korelasyon katsayısı ve SSN değerlerinin değişimi görülmektedir. Toplam kütle yoğunluğu değerleri ile SSN değerleri arasında istatistiksel korelasyon analizi incelendiğinde şu sonuçlarla karşılaşmaktayız. Korelasyon katsayısı incelenen 1970 yılı hariç periyodun tümünde pozitif değerler almaktadır. Bu durumda toplam kütle yoğunluğu ile SSN değerleri arasında pozitif ilişkinin olduğu ifade edilebilir. 1978, 1984, 1987, 1988, 1992, 2011 ve 2013 yıllarında güçlü korelasyon olarak ifade edilen 0.5 değerinin üzerinde değerler aldığı gözlemlenmiştir. Yıllık katsayılar analiz edildiğinde ise 1970 yılında minimum olan -0.02, 2011 yılında ise maksimum korelasyon katsayısı olan 0.76 değeri elde edilebilir.



Şekil 4.6. 325 km için yıllara göre toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki korelasyon katsayı değerlerinin değişimi.

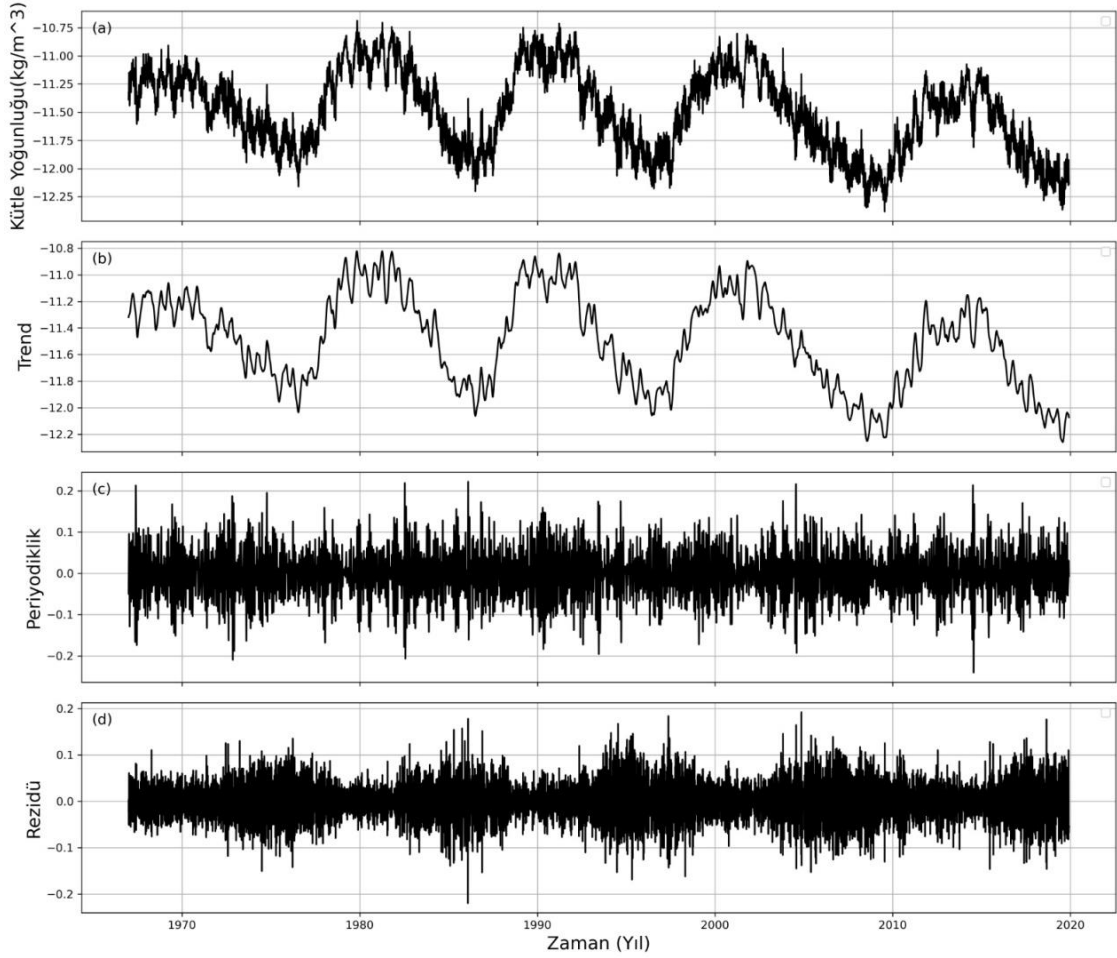
4.4 375 km Yükseklik için Analiz sonuçları

375 km yükseklik için SSA modeli ile elde edilen analiz sonuçları Şekil 4.7 de verilmiştir. Şekil 4.7a' da 1967–2019 dönemini kapsayan 375 km yükseklikteki toplam kütle yoğunluğunun dağılımı Güneş devirlerine zamansal ve dağılımsal olarak benzerdir. 20. Güneş döngüsünden itibaren her bir döngünün maksimum ve minimum evreleri, kütle yoğunluğundaki tepe ve dip noktalarına karşılık gelmektedir. Özellikle 1989–1990 maksimumu (22. Güneş devri) ve 2008–2009 minimumu (23. Güneş devri), sırasıyla en yüksek ve en düşük yoğunluk değerlerini üretmiştir. Bu durum, yıllık Güneş aktivite döngüsüyle bağlantılı olabileceğini göstermektedir.

Şekil 4.7b' de sunulan trend bileşeni, 375 km yükseklikte kütle yoğunluğunun uzun süreli değişimini yansıtmaktadır. Trend analizleri incelendiğinde kütle yoğunluğu değerlerinin 11 yıllık Güneş devirlerini net olarak yansıttığı görülmektedir.

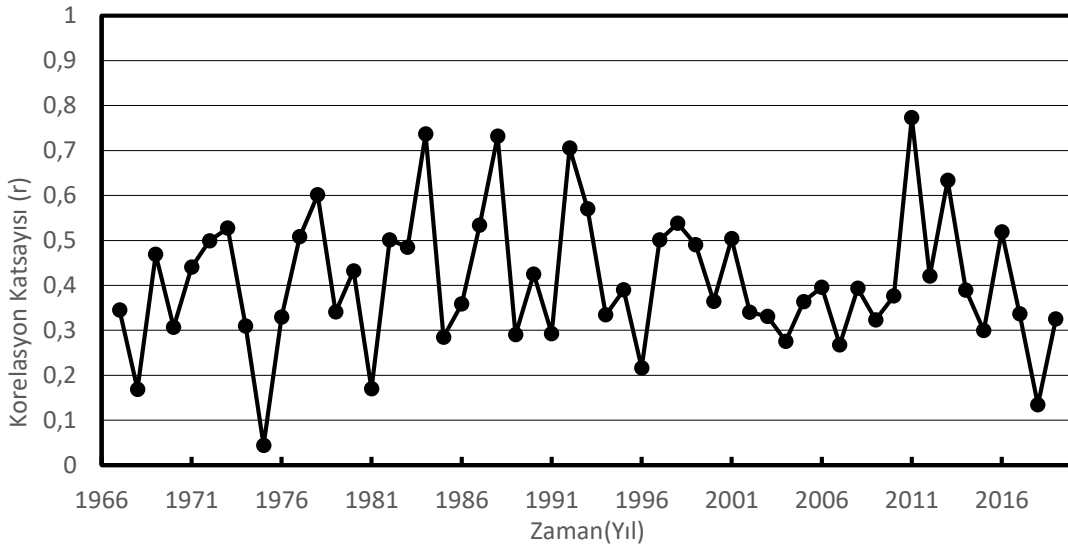
Şekil 4.7c'de toplam kütle yoğunluğu değerlerinin periyodik yapısı görülmektedir. Değerler analiz edildiğinde iyonosferik değişimlerde görülen günlük, mevsimsel ve 11 yıllık değişimler görülmektedir.

Şekil 4.7d' de toplam kütle yoğunluğundaki periyodik trend eğilimden sapma olarak rezidü değerlerinin zamanla değişimi görülmektedir. Rezidü değerlerinin Güneş devirlerinin artan fazında küçük değerler aldığı, Güneş devirlerinin azalan fazında ise daha büyük değerler aldığı görülmektedir. Rezidü değerlerinin genellikle ± 0.1 aralığında olduğu, bu aralık dışına Güneş devirlerinin azalan fazında çıktığı görülmektedir.



Şekil 4.7. 375 km yükseklik için SSA modeli ile elde edilen analiz sonuçları

Şekil 4.8’de 375 km yükseklik için yıllara göre toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki korelasyon katsayısı ve SSN değerlerinin değişimi görülmektedir. Korelasyon katsayısı incelenen periyodun tümünde pozitif değerler almaktadır. Bu durumda toplam kütle yoğunluğu ile SSN değerleri arasında biri artar iken diğ erinin arttığı ifade edilebilir. 1973, 1984, 1988, 1992, 1998, 2011, 2013 ve 2016 yıllarında güçlü korelasyon olarak ifade edilen 0.5 değerinin üzerinde değerler aldığı gözlemlenmiştir. Yıllık katsayılar analiz edildiğinde ise 1975 yılında minimum olan 0.05, 2011 yılında ise maksimum korelasyon katsayısı olan 0.78 değeri hesaplanmıştır.



Şekil 4.8. 375 km için yıllara göre toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki korelasyon katsayı değerlerinin değişimi.

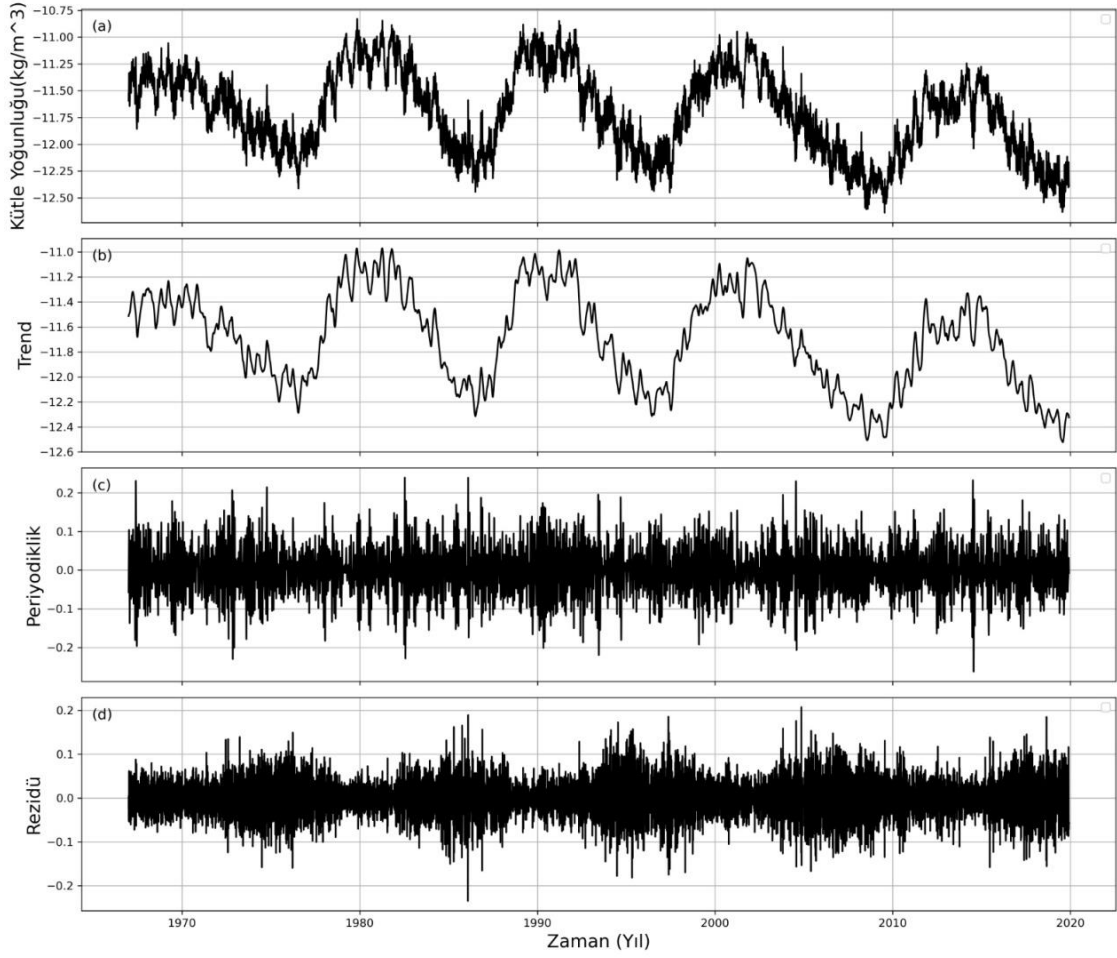
4.5 400 km Yükseklik için Analiz sonuçları

400 km yükseklik için SSA modeli ile elde edilen analiz sonuçları Şekil 4.9 de verilmiştir. Şekil 4.9a' da 1967–2019 dönemini kapsayan 400 km yükseklikteki toplam kütle yoğunluğunun dağılımı Güneş devirlerine zamansal ve dağılımsal olarak benzerdir. Her bir Güneş devrinin maksimum ve minimum evreleri, kütle yoğunluğundaki tepe ve dip noktalarına karşılık gelmektedir. Özellikle 1989–1990 maksimumu (22. Güneş devri) ve 2008–2009 minimumu (23. Güneş devri), sırasıyla en yüksek ve en düşük yoğunluk değerlerini üretmiştir. Bu durum, yıllık Güneş aktivite döngüsüyle bağlantılı olabileceğini göstermektedir.

Şekil 4.9b' de sunulan trend bileşeni, 400 km yükseklikte kütle yoğunluğunun uzun süreli değişimini yansıtmaktadır. Trend analizleri incelendiğinde kütle yoğunluğu değerlerinin 11 yıllık Güneş devirlerini net olarak yansıttığı görülmektedir.

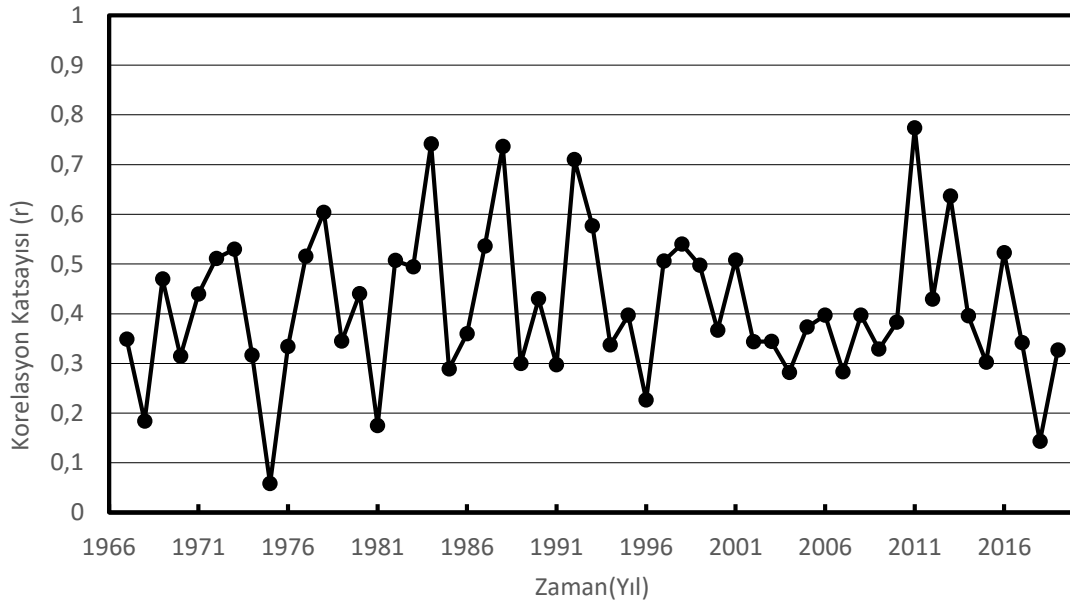
Şekil 4.9c' de toplam kütle yoğunluğu değerlerinin periyodik yapısı görülmektedir. Değerler analiz edildiğinde iyonosferik değişimlerde görülen günlük, mevsimsel ve 11 yıllık değişimler görülmektedir.

Şekil 4.9d' de toplam kütle yoğunluğundaki periyodik trend eğilimden sapma olarak rezidü değerlerinin zamanla değişimi görülmektedir. Rezidü değerlerinin Güneş devirlerinin artan fazında küçük değerler aldığı, Güneş devirlerinin azalan fazında ise daha büyük değerler aldığı görülmektedir. Rezidü değerlerinin genellikle ± 0.1 aralığında olduğu, bu aralık dışına Güneş devirlerinin azalan fazında çıktığı görülmektedir.



Şekil 4.9. 400 km yükseklik için SSA modeli ile elde edilen analiz sonuçları

Şekil 4.10’te 400 km yükseklik için yıllara göre toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki korelasyon katsayısı ve SSN değerlerinin değişimi görülmektedir. Korelasyon katsayısı incelenen periyodun tümünde pozitif değerler almaktadır. Bu durumda toplam kütle yoğunluğu ile SSN değerleri arasında pozitif ilişkinin olduğu ifade edilebilir. 1972, 1973, 1977, 1978, 1982, 1984, 1987, 1988, 1992, 1993, 1998, 2011, 2013 ve 2016 yıllarında güçlü korelasyon olarak ifade edilen 0.5 değerinin üzerinde değerler aldığı gözlemlenmiştir. Yıllık katsayılar analiz edildiğinde ise 1975 yılında minimum olan 0.05, 2011 yılında ise maksimum korelasyon katsayısı olan 0.78 değeri elde edilmiştir.



Şekil 4.10. 400 km için yıllara göre toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki korelasyon katsayı değerlerinin değişimi.

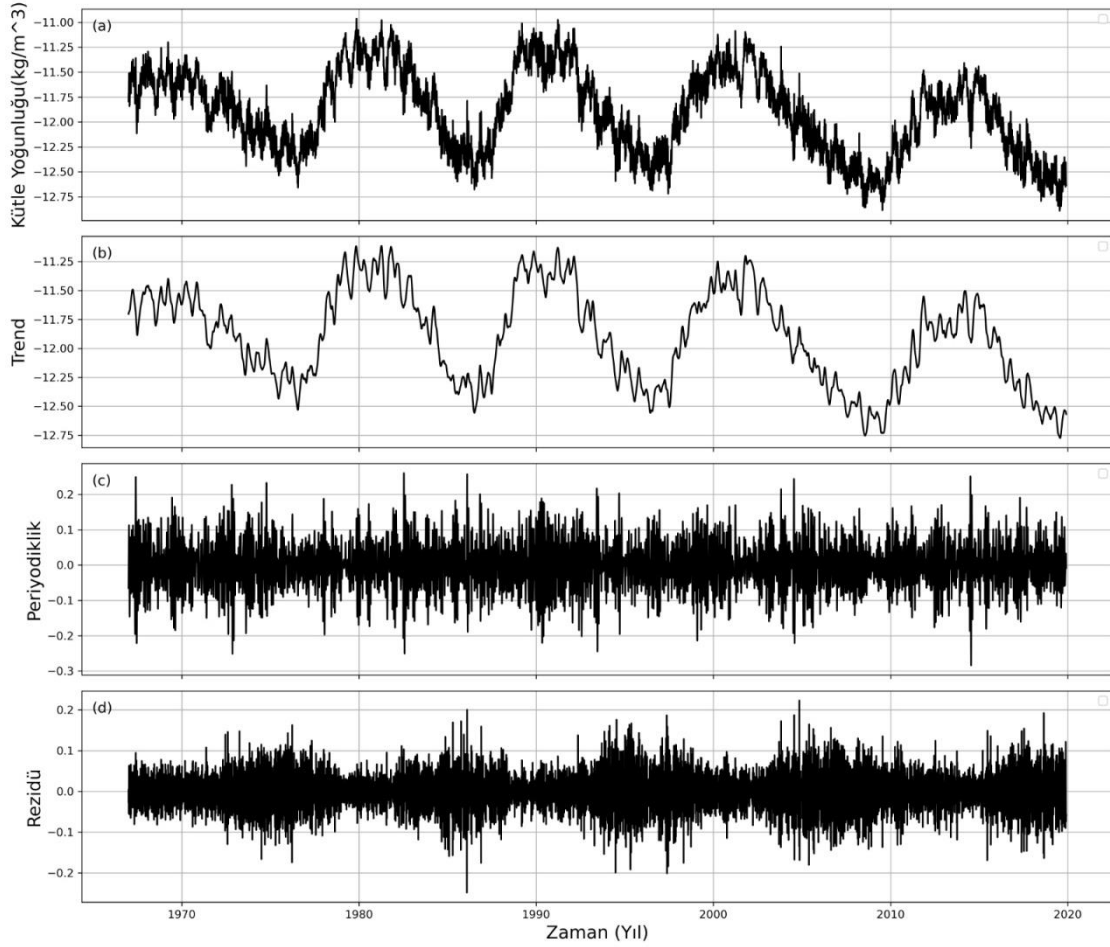
4.6 425 km Yükseklik için Analiz sonuçları

425 km yükseklik için SSA modeli ile elde edilen analiz sonuçları Şekil 4.11 de verilmiştir. Şekil 4.11a' da 1967–2019 dönemini kapsayan 425 km yükseklikteki toplam kütle yoğunluğunun dağılımı Güneş devirlerine zamansal ve dağılımsal olarak benzerdir. Özellikle 1989–1990 maksimumu (22. Güneş devri) ve 2008–2009 minimumu (23. Güneş devri), sırasıyla en yüksek ve en düşük yoğunluk değerlerini üretmiştir. Bu durum, yıllık Güneş aktivite döngüsüyle bağlantılı olabileceğini göstermektedir.

Şekil 4.11b' de sunulan trend bileşeni, 425 km yükseklikte kütle yoğunluğunun uzun süreli değişimini yansıtmaktadır. Trend analizleri incelendiğinde kütle yoğunluğu değerlerinin 11 yıllık Güneş devirlerini net olarak yansıttığı görülmektedir.

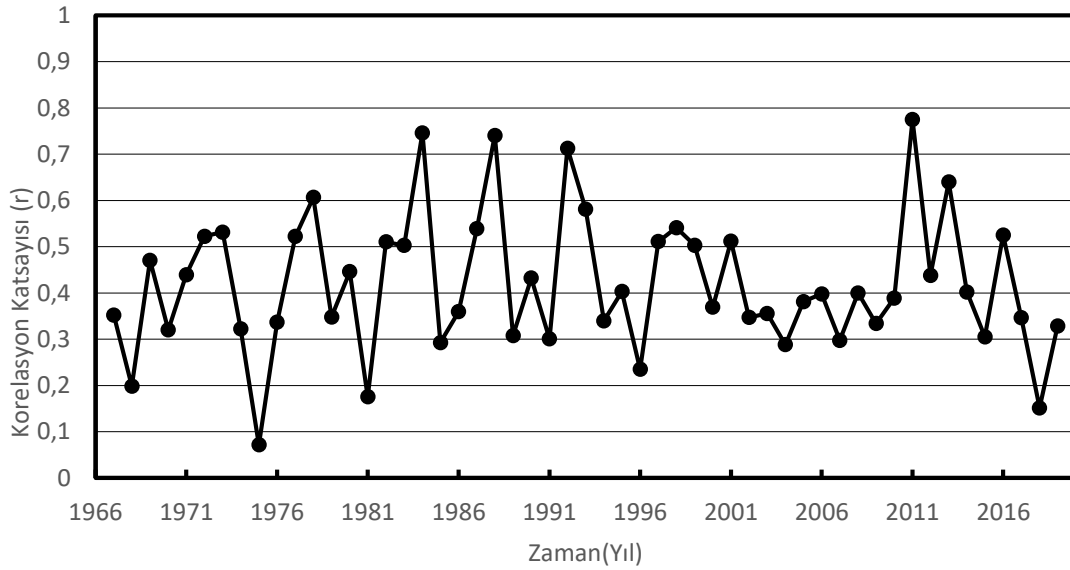
Şekil 4.11c'de toplam kütle yoğunluğu değerlerinin periyodik yapısı görülmektedir. Değerler analiz edildiğinde iyonosferik değişimlerde görülen günlük, mevsimsel ve 11 yıllık değişimler görülmektedir.

Şekil 4.11d' de rezidü değerlerinin zamanla değişimi görülmektedir. Rezidü değerlerinin Güneş devirlerinin artan fazında küçük değerler aldığı, Güneş devirlerinin azalan fazında ise daha büyük değerler aldığı görülmektedir. Rezidü değerlerinin genellikle ± 0.1 aralığında olduğu, bu aralık dışına Güneş devirlerinin azalan fazında çıktığı görülmektedir.



Şekil 4.11. 425 km yükseklik için SSA modeli ile elde edilen analiz sonuçları.

Şekil 4.12’de yıllara göre toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki korelasyon katsayısı ve SSN değerlerinin değişimi görülmektedir. Toplam kütle yoğunluğu değerleri ile SSN değerleri arasında istatistiksel korelasyon analizi incelendiğinde şu sonuçlarla karşılaşmaktayız. Korelasyon katsayısı incelenen periyodun tümünde pozitif değerler almaktadır. Bu durumda toplam kütle yoğunluğu ile SSN değerleri arasında pozitif ilişkinin olduğu ifade edilebilir. 1972, 1973, 1977, 1978, 1982, 1984, 1987, 1988, 1992, 1993, 1998, 2011, 2013 ve 2016 yıllarında güçlü korelasyon olarak ifade edilen 0.5 değerinin üzerinde değerler aldığı gözlemlenmiştir. Yıllık katsayılar analiz edildiğinde ise 1975 yılında minimum olan 0.05, 2011 yılında ise maksimum korelasyon katsayısı olan 0.78 değeri hesaplanmıştır.



Şekil 4.12. 425 km için yıllara göre toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki korelasyon katsayı değerlerinin değişimi.

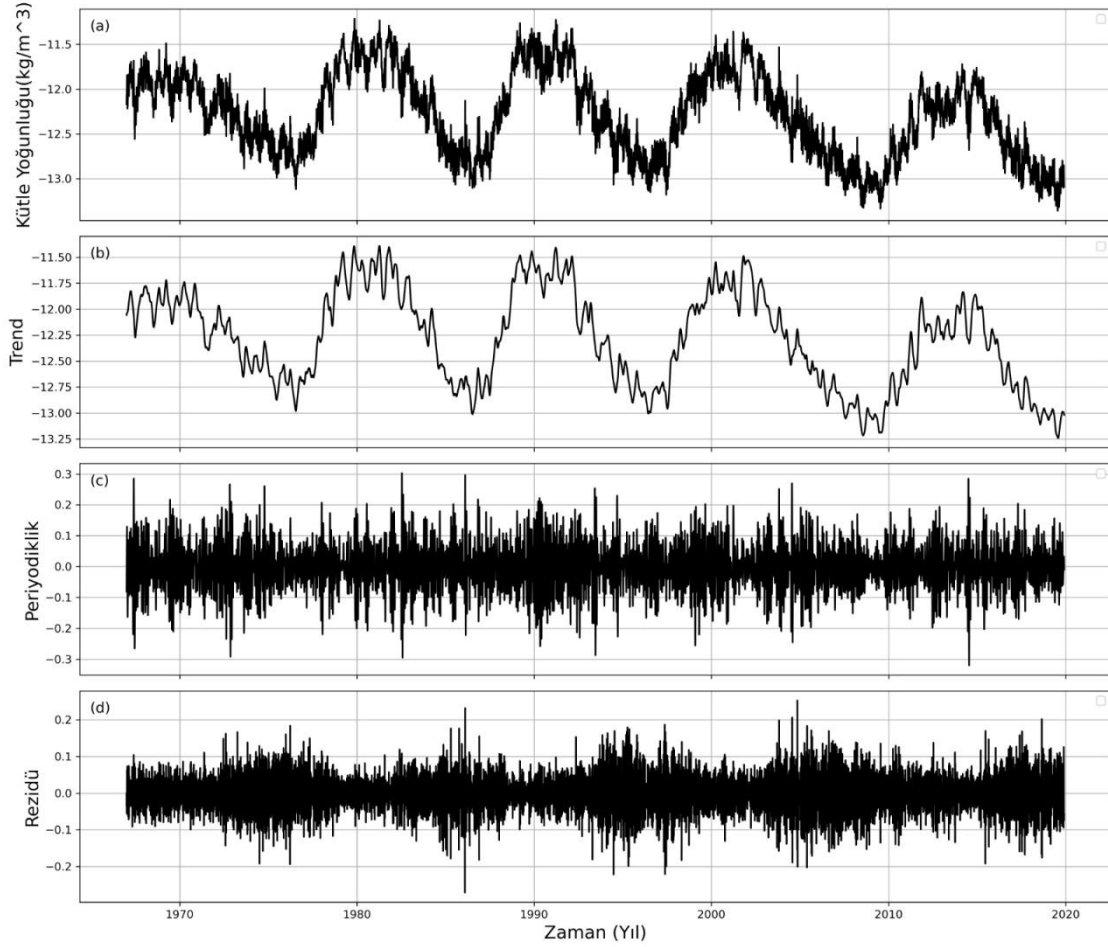
4.7 475 km Yükseklik için Analiz sonuçları

475 km yükseklik için SSA modeli ile elde edilen analiz sonuçları Şekil 4.13 de verilmiştir. Şekil 4.13a' da 1967–2019 dönemini kapsayan 475 km yükseklikteki toplam kütle yoğunluğunun dağılımı Güneş devirlerine zamansal ve dağılımsal olarak benzerdir. Tüm Güneş devirlerinin maksimum ve minimum evreleri, kütle yoğunluğundaki tepe ve dip noktalarına karşılık gelmektedir. Özellikle 1989–1990 maksimumu (22. Güneş devri) ve 2008–2009 minimumu (23. Güneş devri), sırasıyla en yüksek ve en düşük yoğunluk değerlerini üretmiştir. Bu durum, yıllık Güneş aktivite döngüsüyle bağlantılı olabileceğini göstermektedir.

Şekil 4.13b' de sunulan trend bileşeni, 475 km yükseklikte kütle yoğunluğunun uzun süreli değişimini yansıtmaktadır. Trend analizleri incelendiğinde kütle yoğunluğu değerlerinin 11 yıllık Güneş devirlerini net olarak yansıttığı görülmektedir.

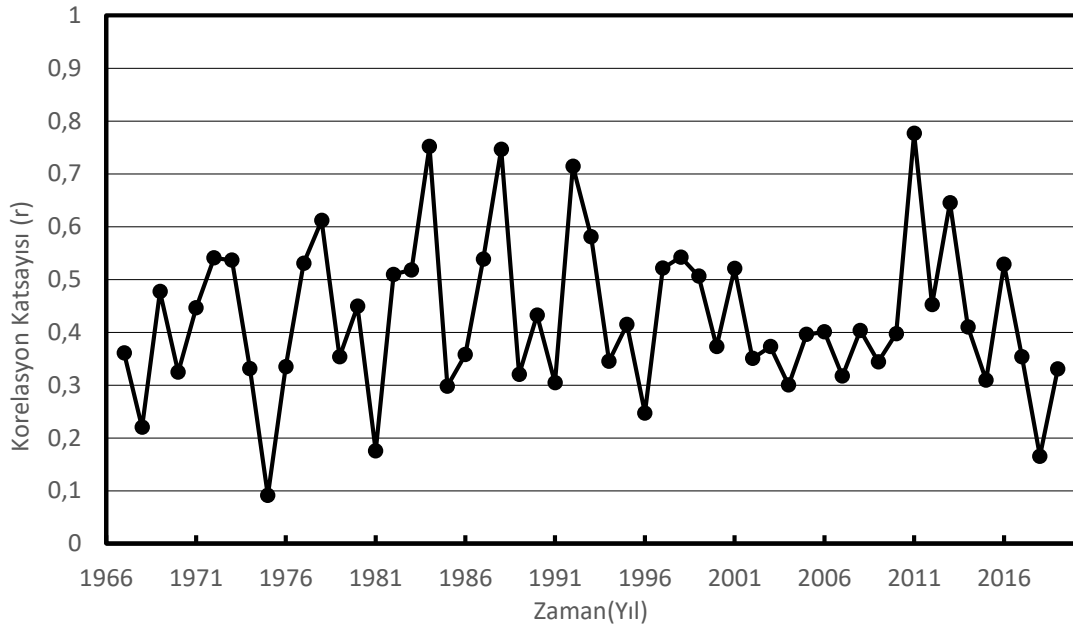
Şekil 4.13c'de toplam kütle yoğunluğu değerlerinin periyodik yapısı görülmektedir. Değerler analiz edildiğinde iyonosferik değişimlerde görülen günlük, mevsimsel ve 11 yıllık değişimler görülmektedir.

Şekil 4.13d' de rezidü değerlerinin zamanla değişimi görülmektedir. Rezidü değerlerinin Güneş devirlerinin artan fazında küçük değerler aldığı, Güneş devirlerinin azalan fazında ise daha büyük değerler aldığı görülmektedir. Rezidü değerlerinin genellikle ± 0.1 aralığında olduğu, bu aralık dışına Güneş devirlerinin azalan fazında çıktığı görülmektedir.



Şekil 4.13. 475 km yükseklik için SSA modeli ile elde edilen analiz sonuçları

Şekil 4.14’te 475 km yükseklik için yıllara göre toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki korelasyon katsayısı ve SSN değerlerinin değişimi görülmektedir. Toplam kütle yoğunluğu değerleri ile SSN değerleri arasında istatistiksel korelasyon analizi incelendiğinde, incelenen periyodun tümünde pozitif değerler almaktadır. 1972, 1973, 1977, 1978, 1982, 1983, 1984, 1987, 1988, 1992, 1993, 1998, 2011, 2013 ve 2016 yıllarında güçlü korelasyon olarak ifade edilen 0.5 değerinin üzerinde değerler aldığı gözlemlenmiştir. Yıllık katsayılar analiz edildiğinde ise 1975 yılında minimum olan 0.09, 2011 yılında ise maksimum korelasyon katsayısı olan 0.78 değeri elde edilmiştir.



Şekil 4.14. 475 km için yıllara göre toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki korelasyon katsayı değişim değerleri.

4.8 525 km Yükseklik için Analiz sonuçları

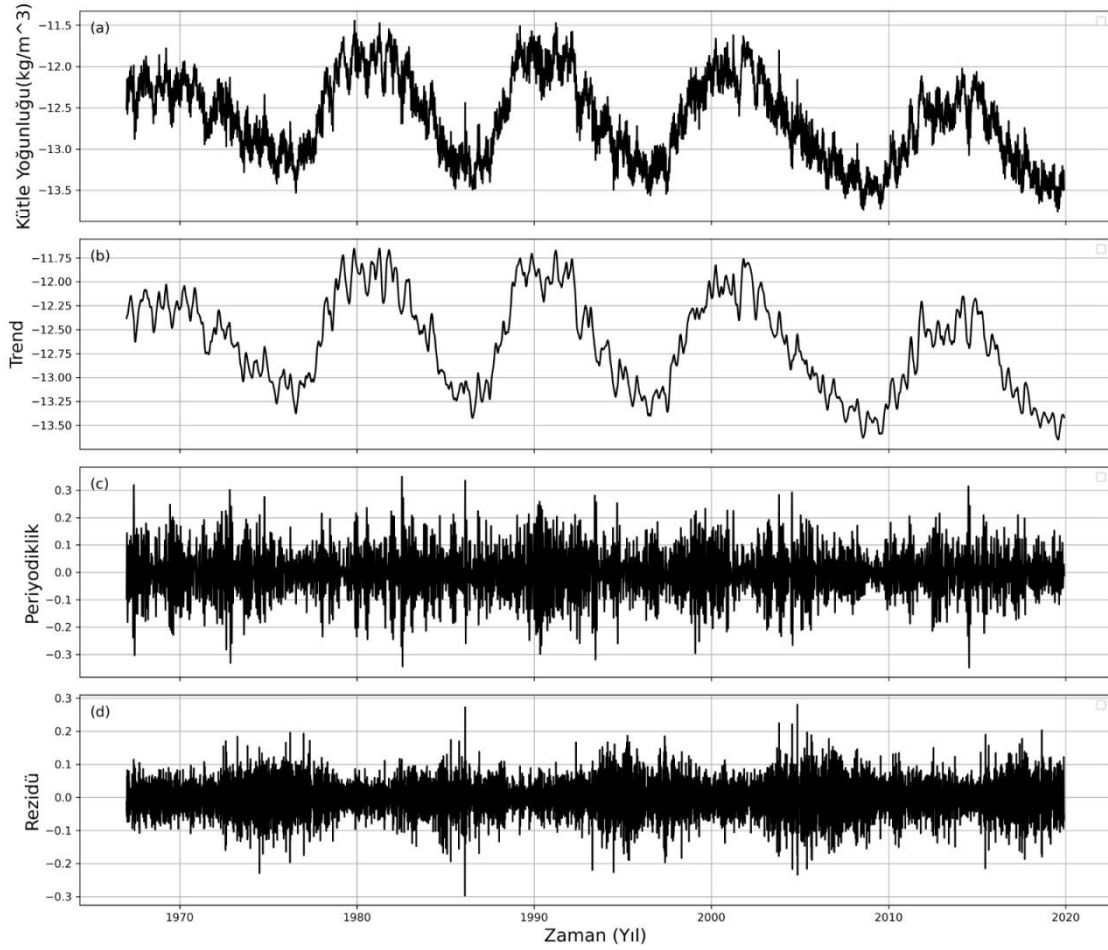
525 km yükseklik için SSA modeli ile elde edilen analiz sonuçları Şekil 4.15 de verilmiştir. Şekil 4.15a' da 1967–2019 dönemini kapsayan 500 km yükseklikteki toplam kütle yoğunluğunun dağılımı Güneş devirlerine zamansal ve dağılımsal olarak benzerdir. 20. Güneş döngüsünden itibaren her bir döngünün maksimum ve minimum evreleri, kütle yoğunluğundaki tepe ve dip noktalarına karşılık gelmektedir. Özellikle 1989–1990 maksimumu (22. Güneş devri) ve 2008–2009 minimumu (23. Güneş devri), sırasıyla en yüksek ve en düşük yoğunluk değerlerini üretmiştir. Bu durum, yıllık Güneş aktivite döngüsüyle bağlantılı olabileceğini göstermektedir.

Şekil 4.15b' de sunulan trend bileşeni, 525 km yükseklikte kütle yoğunluğunun uzun süreli değişimini yansıtmaktadır. Trend analizleri incelendiğinde kütle yoğunluğu değerleriniz 11 yıllık Güneş devirlerini net olarak yansıttığı görülmektedir.

Şekil 4.15c de toplam kütle yoğunluğu değerlerinin periyodik yapısı görülmektedir. Değerler analiz edildiğinde iyonosferik değişimlerde görülen günlük, mevsimsel ve 11 yıllık değişimler görülmektedir.

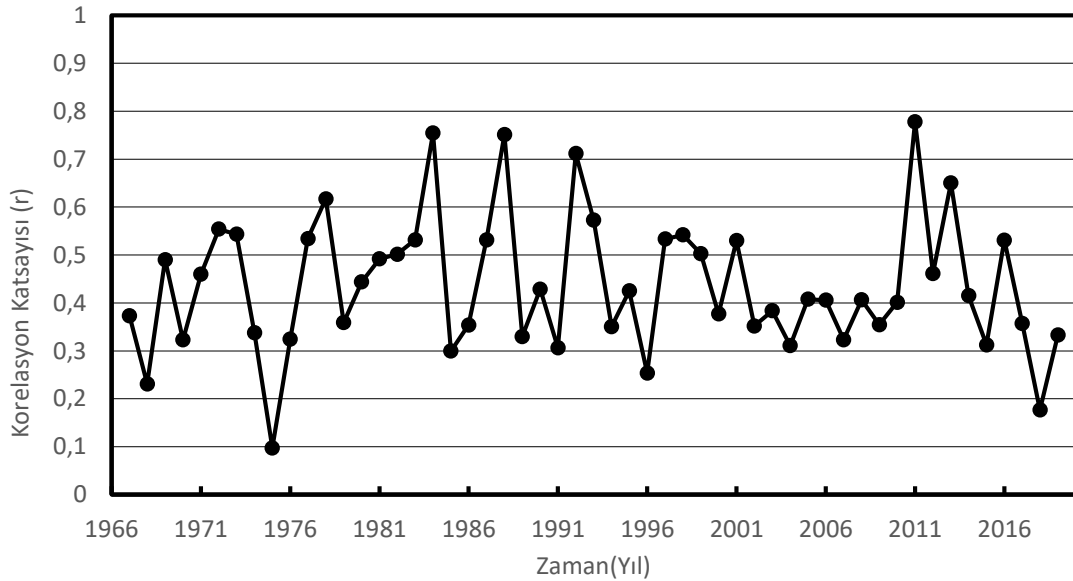
Şekil 4.15d' de toplam kütle yoğunluğundaki periyodik trend eğilimden sapma olarak rezidü değerlerinin zamanla değişimi görülmektedir. Rezidü değerlerinin Güneş devirlerinin artan fazında küçük değerler aldığı, Güneş devirlerinin azalan fazında ise daha büyük değerler aldığı görülmektedir. Rezidü değerlerinin genellikle ± 0.1

aralığında olduğu, bu aralık dışına Güneş devirlerinin azalan fazında çıktığı görülmektedir.



Şekil 4.15. 525 km yükseklik için SSA modeli ile elde edilen analiz sonuçları.

Şekil 4.16’da 525 km yükseklik için yıllara göre toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki korelasyon katsayısı ve SSN değerlerinin değişimi görülmektedir. Toplam kütle yoğunluğu değerleri ile SSN değerleri arasında istatistiksel korelasyon analizi incelendiğinde, incelenen periyodun tümünde pozitif değerler almaktadır. 1972, 1973, 1977, 1978, 1982, 1983, 1984, 1987, 1988, 1992, 1993, 1997, 1998, 2011, 2013 ve 2016 yıllarında güçlü korelasyon olarak ifade edilen 0.5 değerinin üzerinde değerler aldığı gözlemlenmiştir. Yıllık katsayılar analiz edildiğinde ise 1975 yılında minimum olan 0.1, 2011 yılında ise maksimum korelasyon katsayısı olan 0.78 değeri hesaplanmıştır.



Şekil 4.16. 525 km için yıllara göre toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki korelasyon katsayı değişim değerleri.

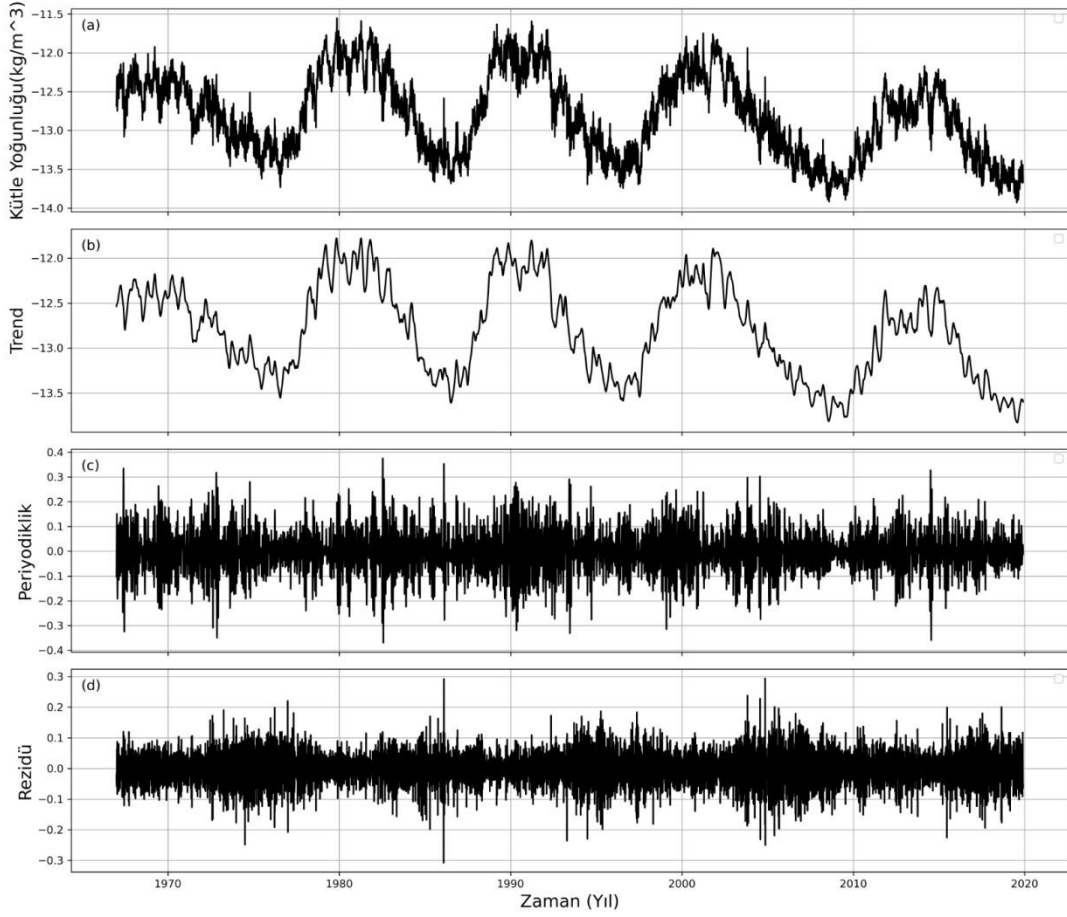
4.9 550 km Yükseklik için Analiz sonuçları

550 km yükseklik için SSA modeli ile elde edilen analiz sonuçları Şekil 4.17 de verilmiştir. Şekil 4.17a' da 1967–2019 dönemini kapsayan 550 km yükseklikteki toplam kütle yoğunluğunun dağılımı Güneş devirlerine zamansal ve dağılımsal olarak benzerdir. Tüm Güneş devirlerinde, her bir döngünün maksimum ve minimum evreleri, kütle yoğunluğundaki tepe ve dip noktalarına karşılık gelmektedir. Özellikle 1989–1990 maksimumu (22. Güneş devri) ve 2008–2009 minimumu (23. Güneş devri), sırasıyla en yüksek ve en düşük yoğunluk değerlerini üretmiştir. Bu durum, yıllık Güneş aktivite döngüsüyle bağlantılı olabileceğini göstermektedir.

Şekil 4.17b' de sunulan trend bileşeni, 550 km yükseklikte kütle yoğunluğunun uzun süreli değişimini yansıtmaktadır. Trend analizleri incelendiğinde kütle yoğunluğu değerlerinin 11 yıllık Güneş devirlerini net olarak yansıttığı görülmektedir.

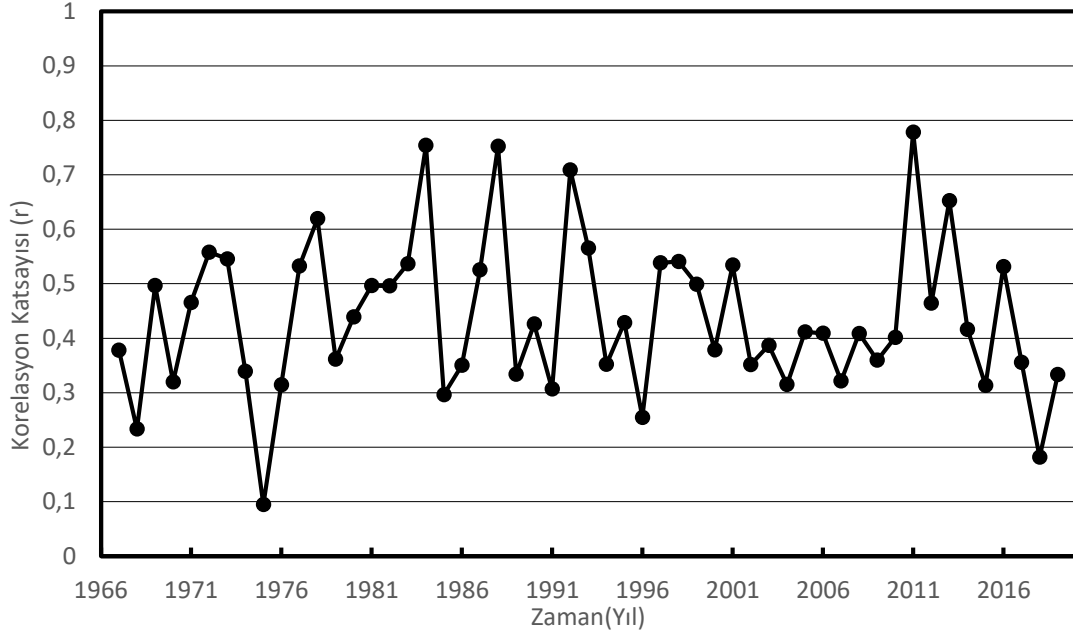
Şekil 4.17c'de toplam kütle yoğunluğu değerlerinin periyodik yapısı görülmektedir. Değerler analiz edildiğinde iyonosferik değişimlerde görülen günlük, mevsimsel ve 11 yıllık değişimler görülmektedir.

Şekil 4.17d' de toplam kütle yoğunluğundaki periyodik trend eğilimden sapma olarak rezidü değerlerinin zamanla değişimi görülmektedir. Rezidü değerlerinin Güneş devirlerinin artan fazında küçük değerler aldığı, Güneş devirlerinin azalan fazında ise daha büyük değerler aldığı görülmektedir. Rezidü değerlerinin genellikle ± 0.1 aralığında olduğu, bu aralık dışına Güneş devirlerinin azalan fazında çıktığı görülmektedir.



Şekil 4.17. 550 km yükseklik için SSA modeli ile elde edilen analiz sonuçları.

Şekil 4.18’de 550 km yükseklik için yıllara göre toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki korelasyon katsayısı ve SSN değerlerinin değişimi görülmektedir. Toplam kütle yoğunluğu değerleri ile SSN değerleri arasında istatistiksel korelasyon analizi incelendiğinde şu sonuçlarla karşılaşılmaktadır. Korelasyon katsayısı incelenen periyodun tümünde pozitif değerler almaktadır. 1972, 1973, 1977, 1978, 1981, 1982, 1983, 1984, 1987, 1988, 1992, 1993, 1997, 1998, 1999, 2001, 2011, 2013 ve 2016 yıllarında güçlü korelasyon olarak ifade edilen 0.5 değerinin üzerinde değerler aldığı gözlemlenmiştir. Yıllık katsayılar analiz edildiğinde ise 1975 yılında minimum olan 0.1, 2011 yılında ise maksimum korelasyon katsayısı olan 0.78 değeri elde edilmiştir.



Şekil 4.18. 550 km için yıllara göre toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki korelasyon katsayı değerlerinin değişimi.

4.10 575 km Yükseklik için Analiz sonuçları

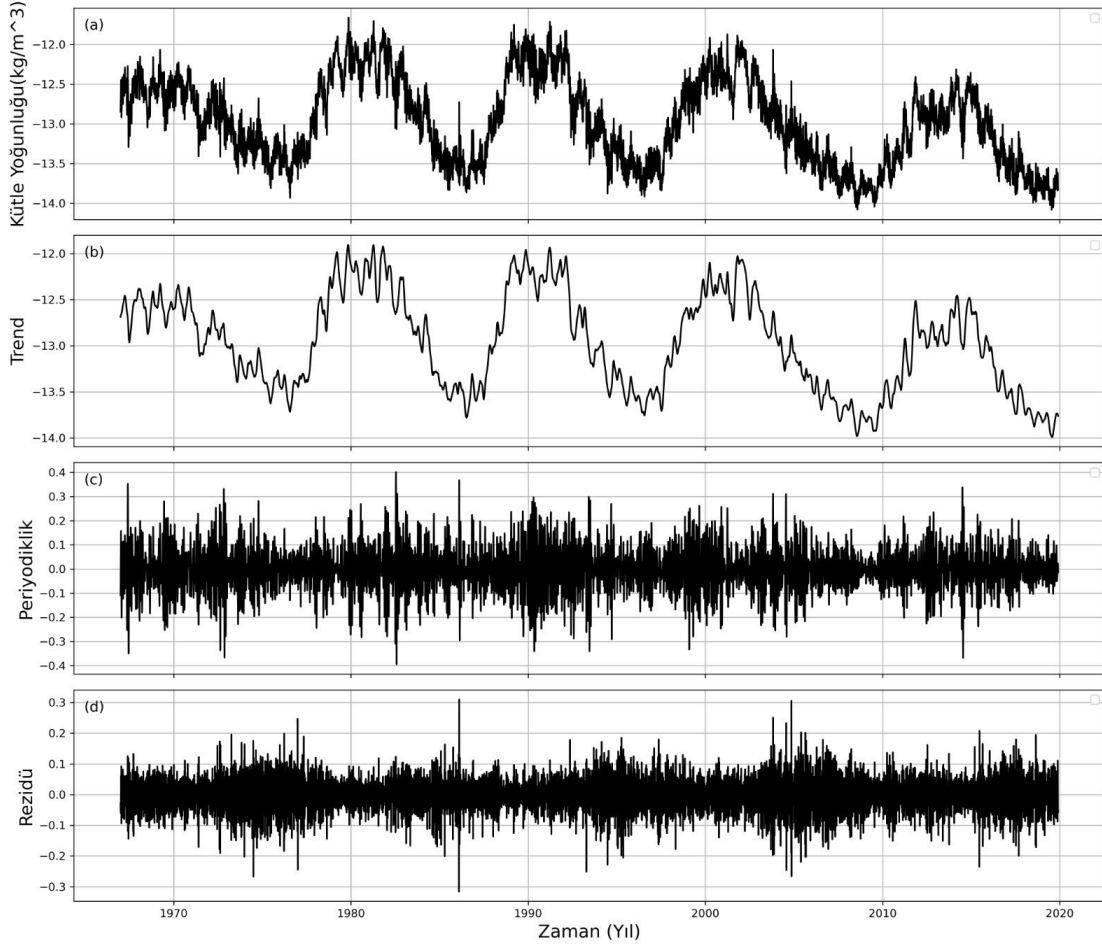
575 km yükseklik için SSA modeli ile elde edilen analiz sonuçları Şekil 4.19 de verilmiştir. Şekil 4.19a' da 1967–2019 dönemini kapsayan 575 km yükseklikteki toplam kütle yoğunluğunun dağılımı Güneş devirlerine zamansal ve dağılımsal olarak benzerdir. 20. Güneş döngüsünden itibaren her bir döngünün maksimum ve minimum evreleri, kütle yoğunluğundaki tepe ve dip noktalarına karşılık gelmektedir. Özellikle 1989–1990 maksimumu (22. Güneş devri) ve 2008–2009 minimumu (23. Güneş devri), sırasıyla en yüksek ve en düşük yoğunluk değerlerini üretmiştir. Bu durum, yıllık Güneş aktivite döngüsüyle bağlantılı olabileceğini göstermektedir.

Şekil 4.19b' de sunulan trend bileşeni, 575 km yükseklikte kütle yoğunluğunun uzun süreli değişimini yansıtmaktadır. Trend analizleri incelendiğinde kütle yoğunluğu değerlerinin 11 yıllık Güneş devirlerini net olarak yansıttığı görülmektedir.

Şekil 4.19c'de toplam kütle yoğunluğu değerlerinin periyodik yapısı görülmektedir. Değerler analiz edildiğinde iyonosferik değişimlerde görülen günlük, mevsimsel ve 11 yıllık değişimler görülmektedir.

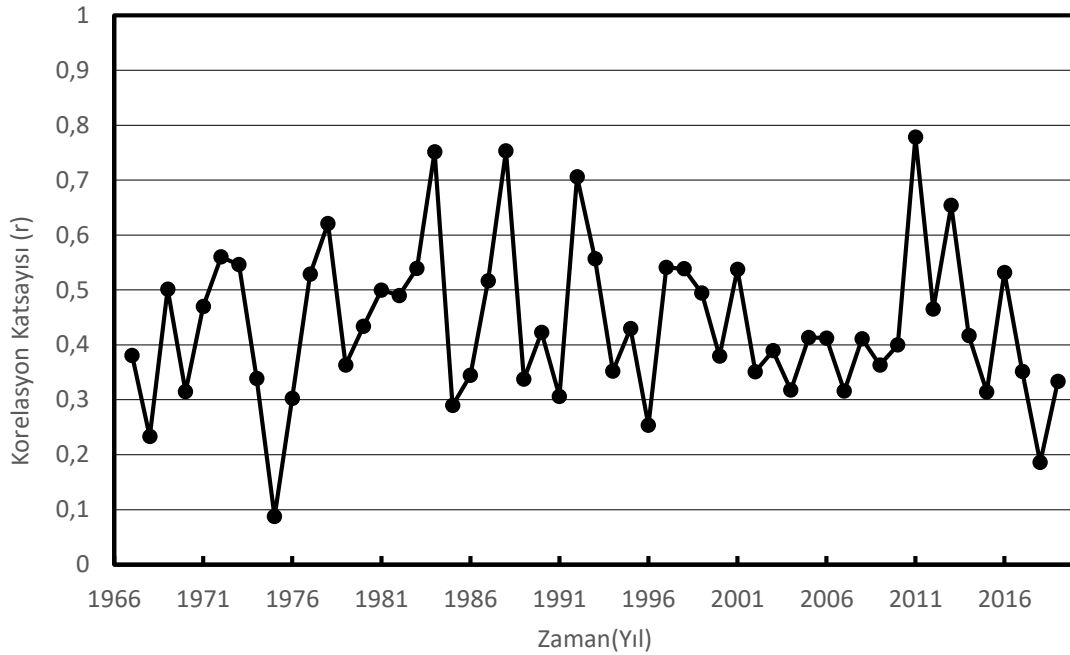
Şekil 4.19d' de toplam kütle yoğunluğundaki periyodik trend eğilimden sapma olarak rezidü değerlerinin zamanla değişimi görülmektedir. Rezidü değerlerinin Güneş devirlerinin artan fazında küçük değerler aldığı, azalan fazında ise daha büyük değerler

aldığı görülmektedir. Rezidü değerlerinin genellikle ± 0.1 aralığında olduğu, bu aralık dışına Güneş devirlerinin azalan fazında çıktığı görülmektedir.



Şekil 4.19. 575 km yükseklik için SSA modeli ile elde edilen analiz sonuçları

Şekil 4.20’de 575 km yükseklik için yıllara göre toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki korelasyon katsayısı ve SSN değerlerinin değişimi görülmektedir. Toplam kütle yoğunluğu değerleri ile SSN değerleri arasında istatistiksel korelasyon analizi incelendiğinde, incelenen periyodun tümünde pozitif değerler almaktadır. 1972, 1973, 1977, 1978, 1981, 1983, 1984, 1987, 1988, 1992, 1993, 1997, 1998, 2001, 2011, 2013 ve 2016 yıllarında güçlü korelasyon olarak ifade edilen 0.5 değerinin üzerinde değerler aldığı gözlemlenmiştir. Yıllık katsayılar analiz edildiğinde ise 1975 yılında minimum olan 0.09, 2011 yılında ise maksimum korelasyon katsayısı olan 0.78 değeri elde hesaplanmıştır.



Şekil 4.20. 575 km için yıllara göre toplam kütle yoğunluğu ile SSN arasındaki korelasyon katsayı değişim değerleri.

Bu tez çalışmasında termosferik kütle yoğunluğunun 11 yıllık Güneş devirlerine benzer şekilde uzun dönemli değişimi gözlemlenmiş ve buna benzer olarak, Marcos ve ark. (2005) te uzun dönemli verileri analiz ederek termosferik nötr yoğunluğun zaman içinde azaldığını ve bu azalmanın büyük ölçüde karbondioksit birikimi ve solar aktivite döngüleriyle ilişkili olduğunu göstermiştir.

Emmert ve ark. (2010) da yapılan bir diğer çalışmada, 2008 Güneş minimumu sırasında gözlemlenen rekor düzeyde düşük yoğunluklar rapor edilmiş ve bu durum, uzay ortamının jeofiziksel hassasiyetini göstermesi açısından dikkat çekici bulunmuştur. Bu tezde de Güneş minimumunda toplam kütle yoğunluğunda düşüşler gözlemlenmiştir.

Golyandina ve Korobeynikov (2014) SSA yönteminin zaman serisi verileri üzerindeki uygulamalarını detaylı biçimde ortaya koymuş; yöntem, atmosferik veri setlerinin analizinde gürültüden ayıklama, trend ayrıştırma ve öngörü amaçlı kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında da SSA yardımıyla zamanla değişim, trend analiz, periyodiklik ve rezidü analizleri yapılmıştır. Her iki çalışmada da toplam kütle yoğunluğu değerlerinin periyodik yapısı iyonosferik değişimlerde görülen günlük, mevsimsel ve 11 yıllık değişimler görülmektedir. Qian ve Solomon. (2012) nötr yoğunluk, termosfer sisteminin dış zorlaması, iç dinamikler ve termosfer ve iyonosfer birleşimi tarafından yönlendirilen karmaşık zamansal ve mekansal değişimleri

incelemiş, zamansal değişimler, dakikalardan saatlere kadar bir zaman ölçeğine sahip ani değişimleri, günlük değişimi, çok günlük değişimi, Güneş dönüşüm değişimini, yıllık/altı aylık değişimi, güneş döngüsü değişimini ve on yıllar süren bir zaman ölçeğine sahip uzun vadeli eğilimleri içerdiğini ifade etmiştir (Qian ve Solomon, 2012). Bu tez çalışmasında Liu ve ark. (2005)' benzer şekilde ivmeölçerlerle kütle yoğunluğu üzerinde çalışmışlardır (Liu ve ark., 2005).



5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, termosferin 250 km, 275 km, 325 km, 375 km, 400 km, 425 km, 475 km, 525 km, 550 km ve 575 km yüksekliklerinde, toplam kütle yoğunluğunun 1967-2019 yılları arasındaki uzun süreli zaman değişimi SSA yardımıyla zamanla değişim, trend analiz, periyodiklik ve rezidü analizleri yapıldı. Ayrıca aynı zaman dilimi için SSN ile toplam kütle yoğunluğunun korelasyon ilişkisi yıllık olarak incelenmiştir. Bu analizler neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Toplam kütle yoğunluğunun zaman değişiminin Güneşin 11 yıllık değişimine benzer olarak Gauss eğrisi şeklinde oluşu gözlemlenmiştir. Yükseklik artışına bağlı olarak toplam kütle yoğunluğu değerleri azalmaktadır. Bunun nedeni ise atmosferde gazların ölçek yüksekliğine göre dağılmasıdır. Termosferik kütle yoğunluğu değerlerinde günlük, mevsimsel ve Güneş devirlerine benzer periyodikliğin olduğu gözlemlenmiştir. Rezidü değerlerinin genellikle 250 km ile 325 km arasında ± 0.05 arasında değerler alırken, geri kalan tüm yüksekliklerde ± 0.1 değerleri arasında değerler aldığı gözlemlenmiştir. Bu değerlerin dışına ise solar minimum yıllarında çıkmaktadır.

Elde edilen bulgulara göre, 250 km ve 325 km arası yüksekliklerde SSN ile termosferik kütle yoğunluğu arasında genellikle 1970 ve 1975 yıllarında ilişki yok denecek kadar zayıf bir ilişki elde edilmiş iken geri kalan tüm yükseklikler ise sadece 1975 yılı korelasyon katsayısı en küçük değerdedir. 250 km ve 325 km yüksekliklerde 1970 yılı hariç incelen tüm yıllar ve yükseklikler için toplam kütle yoğunluğu ve SSN değerleri arasında pozitif yani biri artarken diğeri de artan bir ilişki görülmektedir. Korelasyon katsayısının incelenen tüm zaman dilimlerinde yüksekliğin artışı ile arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum Güneş ışınlarını geliş açısı ile ilişkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Bates, D. 1951. The temperature of the upper atmosphere, *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 64 (9), 805.
- Cai, Y., Yue, X., Zhou, X., Ren, Z., Wei, Y., Pan, Y. 2023. Simulated long-term evolution of the thermosphere during the Holocene–Part 1: Neutral density and temperature, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23 (9), 5009-5021.
- Danilov, A., Lastovicka, J. 2001. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere, *International Journal of geomagnetism and aeronomy*, 2 (3), 209-224.
- Emmert, J. 2009. A long-term data set of globally averaged thermospheric total mass density, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 114 (A6).
- Emmert, J., Lean, J., Picone, J. 2010. Record-low thermospheric density during the 2008 solar minimum, *Geophysical Research Letters*, 37 (12).
- Emmert, J.T. 2015. Thermospheric mass density: A review, *Advances in Space Research*, 56 (5), 773-824.
- Golyandina, N., Korobeynikov, A. 2014. Basic singular spectrum analysis and forecasting with R, *Computational Statistics & Data Analysis*, 71, 934-954.
- Hassani, H. 2007. *Singular spectrum analysis: methodology and comparison*.
- Ishii, M., Berdermann, J., Forte, B., Hapgood, M., Bisi, M.M., Romano, V. 2024. Space weather impact on radio communication and navigation, *Advances in Space Research*.
- Kondrashov, D., Feliks, Y., Ghil, M. 2005. Oscillatory modes of extended Nile River records (AD 622–1922), *Geophysical research letters*, 32 (10).
- Li, B., Cui, R., Weng, L. 2023. Thermospheric density response to the QBO signal, *Atmosphere*, 14 (8), 1317.
- Lin, D., Wang, W., Garcia-Sage, K., Yue, J., Merkin, V., McInerney, J.M., Pham, K., Sorathia, K. 2022. Thermospheric neutral density variation during the “SpaceX” storm: Implications from physics-based whole geospace modeling, *Space Weather*, 20 (12), e2022SW003254.
- Liu, H., Lühr, H., Henize, V., Köhler, W. 2005. Global distribution of the thermospheric total mass density derived from CHAMP, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 110 (A4).
- Marcos, F.A., Wise, J.O., Kendra, M.J., Grossbard, N.J., Bowman, B.R. 2005. Detection of a long-term decrease in thermospheric neutral density, *Geophysical Research Letters*, 32 (4).
- Matamba, T., Habarulema, J. 2018. Ionospheric Responses to CME-and CIR-Driven Geomagnetic Storms Along 300E-400E Over the African Sector From 2001 to 2015. 538556.
- Qian, L., Solomon, S.C. 2012. Thermospheric density: An overview of temporal and spatial variations, *Space science reviews*, 168, 147-173.
- Sakib, M.N., Soto, E., Yiğit, E., Evans, J.S., Meier, R. 2023. Validation of E-region model electron density profiles with AURIC utilizing high-resolution cross

sections, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 128 (10), e2023JA031512.

Solomon, S.C., Qian, L., Didkovsky, L.V., Viereck, R.A., Woods, T.N. 2011. Causes of low thermospheric density during the 2007–2009 solar minimum, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 116 (A2).

Wang, X., Miao, J., Lu, X., Aa, E., Luo, B., Liu, J., Hong, Y., Wang, Y., Ren, T., Zeng, R. 2022. Using temporal relationship of thermospheric density with geomagnetic activity indices and joule heating as calibration for nrlmsise-00 during geomagnetic storms, *Space Weather*, 20 (4), e2021SW003017.

Zhu, M., Xu, T., Sun, S., Zhou, C., Hu, Y., Ge, S., Li, N., Deng, Z., Zhang, Y., Liu, X. 2023. Physical Model of D-Region Ionosphere and Preliminary Comparison with IRI and Data of MF Radar at Kunming, *Atmosphere*, 14 (2), 235.



ÖZGEÇMİŞ**KİŞİSEL BİLGİLER**

Adı Soyadı : Seval YAPALI

EĞİTİM

| Derece | Adı, İlçe, İl | Bitirme Yılı |
|---------------|-----------------------------------|---------------------|
| Lise | : Kulu Lisesi, Kulu, Konya | 2002 |
| Üniversite | : Selçuk Üniversitesi | 2009 |
| Yüksek Lisans | : | |
| Doktora | : | |

İŞ DENEYİMLERİ

| Yıl | Kurum | Görevi |
|------------|---|--------------------------|
| 2021 | Narlıdere Gelecek Özel Öğretim Kursu | Müdür Yardımcısı |
| 2016 | İlçe Milli Eğitim Müdürlüğü | Öğretmen |
| 2014 | Çibder Eğitim | Öğretim Görevlisi |