

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**SEÇİLEN GÜNEŞ VE JEOMANYETİK AKTİVİTE İNDEKSLERİNİN
DOĞRUSALLIĞININ İNCELENMESİ VE TAHMİNİ**

Kemalhan GERÇEKER

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2025

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**SEÇİLEN GÜNEŞ VE JEOMANYETİK AKTİVİTE İNDEKSLERİNİN
DOĞRUSALLIĞININ İNCELENMESİ VE TAHMİNİ**

Kemalhan GERÇEKER

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2025

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SEÇİLEN GÜNEŞ VE JEOMANYETİK AKTİVİTE İNDEKSLERİNİN
DOĞRUSALLIĞININ İNCELENMESİ VE TAHMİNİ**

Kemalhan GERÇEKER

UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Bu tez Nonlinear Prediction of Space Weather and Solar Activity Parameters
(Uzay Havası ve Güneş Aktivitesi Parametrelerinin Doğrusal Olmayan Tahmini)
isimli 124N011 numaralı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
(TÜBİTAK) ile Bulgaristan Bilimler Akademisi (BAS) İkili İşbirliği Programı
(2502) tarafından desteklenmiştir.**

HAZİRAN 2025

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SEÇİLEN GÜNEŞ VE JEOMANYETİK AKTİVİTE İNDEKSLERİNİN
DOĞRUSALLIĞININ İNCELENMESİ VE TAHMİNİ

Kemalhan GERÇEKER
UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 24/06/2025 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ali KILÇIK (Danışman)
Prof. Dr. Zahide Funda BOSTANCI GÜVER
Dr. Öğr. Üyesi Burçin DÖNMEZ

ÖZET

SEÇİLEN GÜNEŞ VE JEOMANYETİK AKTİVİTE İNDEKSLERİNİN DOĞRUSALLIĞININ İNCELENMESİ VE TAHMİNİ

Kemalhan GERÇEKER

Yüksek Lisans Tezi, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ali KILÇIK

Haziran 2025; 86 sayfa

Bu tez çalışmasında, Güneş ve Dünya arasındaki etkileşimleri yansıtan seçili güneş (SSN, F10.7) ve jeomanyetik (aa, Dst) aktivite indekslerinin doğrusal olmayan özellikleri, nedensellik ilişkileri ve bu indekslerin gelecek dönemlerdeki davranışlarının tahmini amaçlanmıştır. Güneş aktivitesi, uzay havası koşullarını şekillendirmesi ve Dünya ve civarında konuşlandırılmış teknolojik sistemler üzerindeki etkileri nedeniyle ciddi önem arz etmektedir. Bu nedenle, güneş çevrimlerinin doğasında var olan kaotik özelliklerin anlaşılması ve indekslerin nedensellik yapılarının ortaya konulması hem sistemlerin dinamiklerinin daha iyi anlaşılması hem de tahmin modellerinin geliştirilmesi açısından kritik rol oynamaktadır.

Literatürde güneş ve jeomanyetik aktivite indeksleri arasındaki ilişkiler üzerine birçok çalışma yapılmış olup, son yıllarda bu ilişkilerin doğrusal olmayan dinamiklerle açıklanabileceğine yönelik güçlü bulgular elde edilmiştir. Bu çalışmada, SSN, F10.7, aa ve Dst indekslerine ait aylık ortalama veriler kullanılarak Hurst üssü, Lyapunov üssü ve korelasyon boyutu yöntemleriyle serilerin doğrusal olmayan özellikleri analiz edilmiş, Convergent Cross Mapping (CCM) yöntemi ile de indeksler arası nedensellik ilişkileri değerlendirilmiş ve Simplex Projection yöntemi kullanılarak da Güneş Çevrimi 25 ve bir sonraki Güneş Çevrimi 26'ya yönelik tahminler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları, çalışmada kullanılan hem güneş hem de jeomanyetik aktivite indekslerinin pozitif otokorelasyon, uzun bellek ve deterministik kaotik davranışlar sergilediğini ortaya koymuştur. Nedensellik analizleri, özellikle SSN'nin aa ve Dst indeksleri üzerinde yönlü ve anlamlı bir etkisi olduğunu göstermiştir. Tahmin aşamasında elde edilen sonuçlar, Simplex Projection yönteminin kısa, orta ve görece uzun vadeli güneş ve jeomanyetik aktivite tahminlerinde oldukça başarılı sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur.

ANAHTAR KELİMELELER: Doğrusal Olmayan ve Nedensel Analizler, Güneş ve Jeomanyetik Aktivite, Tahminler, Uzay Havası

JÜRİ: Prof. Dr. Ali KILÇIK

Prof. Dr. Zahide Funda BOSTANCI GÜVER

Dr. Öğr. Üyesi Burçin DÖNMEZ

ABSTRACT

INVESTIGATION AND PREDICTION OF THE LINEARITY OF SELECTED SOLAR AND GEOMAGNETIC ACTIVITY INDICES

Kemalhan GERÇEKER

MSc Thesis in Space Sciences and Technologies Department

Supervisor: Prof. Dr. Ali KILÇIK

June 2025; 86 pages

In this thesis, the nonlinear properties, causal relationships, and future behavioral predictions of selected solar (SSN, F10.7) and geomagnetic (aa, Dst) activity indices, which reflect the interactions between the Sun and the Earth, are examined. Solar activity is of great importance because of the shapes space weather conditions and its impact on technological systems deployed on and around the Earth. Therefore, understanding the intrinsic chaotic nature of solar cycles and uncovering the causal structures among related indices play a vital role in both enhancing the understanding of system dynamics and improving prediction models.

There have been many studies in the literature on the relationships between solar and geomagnetic activity indices, and in recent years there has been strong evidence that these relationships can be explained by nonlinear dynamics. In this study, monthly mean values of SSN, F10.7, aa, and Dst indices, the nonlinear properties of the series were analyzed by Hurst exponent, Lyapunov exponent, and correlation dimension methods, the causal relationships between the indices were evaluated by Convergent Cross Mapping (CCM) method, and predictions for Solar Cycle 25 and the next Solar Cycle 26 were performed using Simplex Projection method. The analysis results revealed that both solar and geomagnetic activity indices used in this study exhibit positive autocorrelation, long-term memory, and deterministic chaotic behavior. Causality analysis demonstrated that SSN has a directional and statistically significant influence on both the aa and Dst indices. The prediction results showed that the Simplex Projection method gives very successful results for short-term, mid-term, and relatively long-term predictions of solar and geomagnetic activity.

KEYWORDS: Nonlinear and Causality Analyses, Predictions, Solar and Geomagnetic Activity, Space Weather

COMMITTEE: Prof. Dr. Ali KILÇIK

Prof. Dr. Zahide Funda BOSTANCI GÜVER

Asst. Prof. Dr. Burçin DÖNMEZ

ÖNSÖZ

Güneş ve jeomanyetik aktivitenin dinamik yapısı ve buna bağlı olarak uzay havasına etkileri uzun zamandır hem bilimsel topluluğun hem de benim kişisel ilgi alanımın merkezinde yer almaktadır. Bu tez, bu merakı sistematik bir araştırmaya dönüştürme çabasının bir ürünüdür. Uzay havası olaylarının Dünya üzerindeki etkileri, yalnızca bilimsel açıdan değil, aynı zamanda günlük yaşamda karşılaştığımız teknolojik sorunlar açısından da dikkat çekici boyutlara ulaşmaktadır. Bu nedenle, güneş ve jeomanyetik indekslerin sistem dinamiklerini doğrusal olmayan ve nedensel analiz teknikleriyle anlamak ve tahminler üreterek uzay havasının olumsuz etkilerine karşı hazırlıklı olunmasını sağlamak bu tezin temel motivasyonunu oluşturmaktadır.

Akademik hayatımın önemli bir aşamasını oluşturan bu tez çalışmasının ortaya çıkmasında hem bilimsel merakım hem de bana destek olan değerli hocalarım, aile üyelerim ve arkadaşlarımın katkısı büyük olmuştur. İlk olarak, bir gencin potansiyelini hangi alanda değerlendirebileceğini oldukça iyi gören ve beni doğru çalışma konusuna yönlendiren değerli danışmanım Prof. Dr. Ali KILÇIK'a rehberliği ve yardımlarından dolayı çok teşekkür ederim. Yüksek lisans öğrenimimin çok başlarında, danışmanım Simplex Projection metodunu bana önerdiğinde kodlama konusunda sıkıntılar yaşamıştım. Bu konuda, kritik bir dönemde bana yardımcı dokunan hocam Dr. Volkan SARP'a da minnettarım. İlk akademik makaleme katkılar sunan ve bana farklı bir bilimsel bakış açısı kazandıran sayın Prof. Vasył YURCHYSHYN'e de çok teşekkür ederim. Desteğini unutmayacağım bir kişi daha var ki o da sevgili hocam Dr. Öğr. Üyesi Seray ŞAHİN SOLAKCI'dan başkası değildir. Kendisi, akademik hayatlarının başında olan biz gençlere çok iyi bir şekilde mentörlük yapıp, tavsiyeleriyle moralimizi her zaman yüksek tutmuş, müthiş yardımsever bir insandır.

Değerli ailem, iyi günlerimiz oldu, herkes gibi kötü zamanlarımız oldu ama siz desteğinizi hiçbir zaman esirgemediniz ve hep yanımda oldunuz. Sevgili Babam Özden GERÇEKER'e ve güzel kardeşim Beste GERÇEKER'e her zaman minnettar olacağımı ve onları seveceğimi söylemek isterim. Canım annem Ferahnur GERÇEKER, beni bir yerlerden gördüğünü umarak seni her zaman seveceğimi, gururlandırmaya çalışacağımı ve sana layık olmaya çalışacağımı bilmeni isterim. Bunun yanında, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, ikinci annem diyebileceğim canım teyzem İlkey Şemsinur TUĞRUL'a ve sevgili dayım Doç. Dr. Koç Mehmet TUĞRUL'a sonsuz sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Değerli arkadaşlarım, hepinize minnettarım ama aranızda değinmem gerekenler var. Sevgili dostlarım Furkan VEZİRO, Dilara SOLMAZ ACAR, Çağrı KAPUSUZ ve Melike TIRNAKÇI, bana katlandığınız ve yanımda olduğunuz için teşekkür ederim.

Son olarak, teşekkür ve minnetlerin en büyüğü laik Türkiye Cumhuriyeti Devleti'nin kurucusu Ulu Önder Gazi Mustafa Kemal ATATÜRK'edir. Çürümekte olan bir toplumu aldın, parlattın ve bizlere emanet ettin. Çağının çok ötesinde bir karakter olarak yaşadın ve her zaman bilimin ve aklın yolunu tercih ettin. Şu anda bu satırları yazabiliyorsam, hayatının ve akademik kariyerinin başında olan genç bir bilim insanı adayını olarak bir yüksek lisans tezi üretebiliyorsam, bu senin sayendedir. Her zaman senin yolunda, her zaman senin ışığınla, Yüce ATATÜRK!

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
AKADEMİK BEYAN	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	4
2.1. Güneş.....	4
2.2. Güneş Aktivitesi	4
2.3. Jeomanyetik Aktivite.....	9
2.4. Güneş ve Jeomanyetik Aktivite İndekslerinin Doğrusallık Durumları ve Kaotik Özellikleri	12
2.5. Güneş ve Jeomanyetik Aktivite İndekslerinin Tahminleri.....	15
2.5.1. Güneş Aktivite İndekslerinin Tahmini	15
2.5.2. Jeomanyetik Aktivite İndekslerinin Tahmini	16
2.5.3. Güneş ve Jeomanyetik Aktivite İndekslerinin Tahminlerinde Doğrusal Olmayan/Kaotik Yöntemlerin Önemi.....	17
3. MATERYAL VE METOT	18
3.1. Tez Çalışmasında Kullanılan Veriler	18
3.2. Doğrusal Olmayan Yaklaşımlar ve Kaos Analizleri	19
3.2.1. Hurst Üssü	19
3.2.2. Lyapunov Üssü	21
3.2.3. Korelasyon Boyutu	23
3.3. Nedensellik Analizi	24
3.3.1. Yakınsak Çapraz Eşleme (Convergent Cross Mapping - CCM).....	24
3.4. Tahmin.....	27
3.4.1. Simplex Projection.....	27
4. BULGULAR.....	32
4.1. Hurst Üssü ile Bellek Yapısı ve Trend Davranışının Analizi	32
4.2. Lyapunov Üssü ile Kaotik Davranış ve Öngörülebilirlik Analizi.....	34

4.3. Korelasyon Boyutu ile Karmaşıklık ve Fraktal Boyut Analizi	36
4.4. Yakınsak Çapraz Eşleme (CCM) ile Nedensellik Analizi	38
4.5. Simplex Projection Yöntemi ile Üretilen Tahminler	40
4.5.1. Güneş Leke Sayısı (SSN) için Güneş Çevrimi 25 ve 26 Tahminleri	41
4.5.2. F10.7 için Güneş Çevrimi 25 ve 26 Tahminleri	49
4.5.3. aa İndeksi için Güneş Çevrimi 25 ve 26 Tahminleri	50
4.5.4. Dst İndeksi için Güneş Çevrimi 25 ve 26 Tahminleri	52
5. TARTIŞMA	54
5.1. Hurst Üssü	54
5.2. Lyapunov Üssü	55
5.3. Korelasyon Boyutu	56
5.4. Yakınsak Çapraz Eşleme (CCM)	57
5.5. Tahminler	60
5.5.1. Güneş Çevrimi 25 ve 26 için SSN Tahminleri	60
5.5.2. Güneş Çevrimi 25 ve 26 için F10.7 Tahminleri	65
5.5.3. Güneş Çevrimi 25 ve 26 için aa İndeks Tahminleri	66
5.5.4. Güneş Çevrimi 25 ve 26 için Dst İndeks Tahminleri	68
6. SONUÇLAR	70
6.1. Zaman Serilerinin Doğrusal Olmayan Özellikleri	70
6.2. Nedensellik Analizi Sonuçları (CCM)	70
6.3. Simplex Projection ile Güneş Çevrimi 25 ve 26 için Tahmin Sonuçları	71
6.3.1. SSN Tahmin Sonuçları	71
6.3.2. F10.7 Tahmin Sonuçları	72
6.3.3. aa İndeks Tahmin Sonuçları	72
6.3.4. Dst İndeks Tahmin Sonuçları	72
7. KAYNAKLAR	74
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Seçilen Güneş ve Jeomanyetik Aktivite İndekslerinin Doğrusallığının İncelenmesi ve Tahmini” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

04/07/2025

Kemalhan GERÇEKER



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

H : Hurst üssü

λ : En büyük Lyapunov üssü

D_2 : Korelasyon boyutu

ρ : Pearson Korelasyon katsayısı

CCM - ρ : Çapraz Haritalama Becerisi (CCM Pearson Korelasyon Değeri)

τ : Zaman Gecikmesi

E : Gömme boyutu

L : Kütüphane uzunluğu

t : Zaman

$X(t), Y(t)$: Zaman serileri

$y(t)$: Tahmin edilen değer

v_n : n . gözleme karşılık gelen vektör

v_j : j . komşu vektör

v_i : i . en yakın komşu vektör

ω_i : i . komşuya ait ağırlık katsayısı

ω_{avg} : Ortalama ağırlık katsayısı

$C(r)$: Korelasyon integrali

$S(t)$: Ortalama ayrışma fonksiyonu

r : Ölçek (mesafe) parametresi

MAE : Ortalama Mutlak Hata

R/S : Yeniden ölçeklendirilmiş aralık / standart sapma oranı

$\log$: Doğal logaritma

$\log_{10}$: 10 tabanında logaritma

$\exp$: Üstel fonksiyon

$\|\cdot\|$: Vektör normu (mutlak mesafe)

Bu tezde ondalık işareti olarak nokta (.) kullanılmıştır.

Kısaltmalar

aa : Jeomanyetik aa İndeksi (aa indeksi)

AE : Auroral Electrojet İndeksi

Ap : Günlük Jeomanyetik Aktivite İndeksi (doğrusal ölçekte)

ap : 3 saatlik Jeomanyetik Aktivite İndeksi (doğrusal ölçekte)

ARIMA : AutoRegressive Integrated Moving Average

SARIMA : Seasonal AutoRegressive Integrated Moving Average

CCM : Convergent Cross Mapping (Yakınsak Çapraz Eşleme)

CME : Coronal Mass Ejection (Koronal Kütle Atımı)

CIR : Corotating Interaction Region (Eşdönmeli Etkileşim Bölgesi)

Dst : Disturbance Storm Time Index

EDM : Empirical Dynamic Modeling (Ampirik Dinamik Modelleme)

F10.7 : 10.7 cm Güneş Radyo Akısı

GCR : Galactic Cosmic Rays (Galaktik Kozmik Işınlr)

GPS : Global Positioning System

HMI : Helioseismic and Magnetic Imager

HSS : High-Speed Stream (Yüksek Hızlı Güneş Rüzgarı Akışı)

IMF : Interplanetary Magnetic Field (Gezegenlerarası Manyetik Alan)

SSN : Sunspot Number (Güneş Leke Sayısı)

Kp : Planetary K İndeksi (3 saatlik jeomanyetik aktivite ölçütü)

LSTM : Long Short-Term Memory (Uzun Kısa Süreli Bellek Ağları)

MCMESI : Maximum CME Speed Index (Maksimum Koronal Kütle Atım Hız İndeksi)

MHD : MagnetoHydroDynamics (Manyetohidrodinamik)
ML: Machine Learning (Makine Öğrenmesi)
ML : McNish-Lincoln Yöntemi
NASA : National Aeronautics and Space Administration
rEDM : R Package for Empirical Dynamic Modeling
SC : Solar Cycle (Güneş Çevrimi)
SIDC : Solar Influences Data Analysis Center
SI : Système International d'Unités (Uluslararası Birim Sistemi)
SF : Solar Flare (Güneş Patlaması)
SHARP : Space weather HMI Active Region Patch
SM : Smoothed (Düzleştirilmiş)
SSN : Sunspot Number (Güneş Leke Sayısı)
SW : Solar Wind (Güneş Rüzgarı)
TCN : Temporal Convolutional Network
UV : Ultraviolet (Morötesi)
VLF : Very Low Frequency (Çok Düşük Frekans)
X-ray : X-ışını

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Manyetik Kelebek Diyagramı. Bu diyagram, Hale'in Polarite Yasalarını, Joy Yasasını (güneş lekesi çiftlerinin eğimlerinin enleme bağlı olarak sistematik bir şekilde arttığını belirten yasa), kutup manyetik alanlarının tersine dönmesini ve daha yüksek enlemlerdeki manyetik alan elemanlarının kutuplara doğru taşınmasını göstermektedir (http://www.solarcyclescience.com/ adresinden alınan D.H. Hathaway çizimidir).....	6
Şekil 2.2. Güneş Leke Sayılarının ve Çevrimlerin Zamanla Değişimi (Sunspot Index and Long-term Solar Observations (SILSO) Royal Observatory of Belgium, 2025 tarafından sağlanmış ve https://www.sidc.be/SILSO/home adresinden alınmıştır).	7
Şekil 2.3. Güneş rüzgarı, CME'ler ve Dünya manyetosferi arasındaki etkileşim. Manyetosfer, güneş rüzgarı tarafından sıkıştırılır ve manyetik kuyruk oluşturur. Bu etkileşim, jeomanyetik fırtınaların temel mekanizmasını açıklar (NASA, Sally Bensusen 2013. https://svs.gsfc.nasa.gov/30481/ adresinden alınmıştır).	10
Şekil 3.1. Yakınsak Çapraz Eşleme (CCM) yönteminin temel adımları (Takahashi vd. 2021'den alınmıştır).....	25
Şekil 3.2. Tahmin edilecek gelecek değer için mevcut durumun belirlenmesi (Petchey 2016'dan alınmıştır).	29
Şekil 3.3. Gömülü uzayda benzer komşulukların belirlenmesi (Petchey 2016'dan alınmıştır).	30
Şekil 3.4. Komşuların gelecek değerlerinin belirlenmesi (Petchey 2016'dan alınmıştır).	30
Şekil 3.5. Gelecek değer (tahminin) ağırlıklı ortalama ile hesaplanması (Petchey 2016'dan alınmıştır).	31
Şekil 4.1. Güneş aktivite indeksleri kapsamında aylık ortalama SSN (üst panel) ve F10.7 (alt panel) için Hurst üssü sonuçları.....	32
Şekil 4.2. Jeomanyetik aktivite indeksleri kapsamında aylık ortalama aa (üst panel) ve Dst (alt panel) için Hurst üssü sonuçları.	33
Şekil 4.3. Güneş aktivite indeksleri kapsamında aylık ortalama SSN (üst panel) ve F10.7 (alt panel) için Lyapunov üssü sonuçları.	34
Şekil 4.4. Jeomanyetik aktivite indeksleri kapsamında aylık ortalama aa (üst panel) ve Dst (alt panel) için Lyapunov üssü sonuçları.	35

Şekil 4.5. Güneş aktivite indeksleri kapsamında aylık ortalama SSN (üst panel) ve F10.7 (alt panel) için Korelasyon Boyutu sonuçları.	36
Şekil 4.6. Jeomanyetik aktivite indeksleri kapsamında aylık ortalama aa (üst panel) ve Dst (alt panel) için Korelasyon Boyutu sonucu.	37
Şekil 4.7. Aylık ortalama SSN ile aylık ortalama F10.7 (üst panel), aa (orta panel) ve Dst (alt panel) indeksleri arasındaki CCM sonuçları.	39
Şekil 4.8. 13-aylık düzleştirilmiş SSN verileri kullanılarak oluşturulan geçmiş güneş çevrimlerinin tekli tahminleri.....	42
Şekil 4.9. Aylık ortalama SSN kullanılarak üretilen geçmiş güneş çevrimlerinin tekli tahminlerinin orijinal (üst panel) ve 13-aylık filtrelenmiş (alt panel) versiyonu. Yeşil çizgiler (alt panel), net bir karşılaştırma için Şekil 4.8'deki 13-aylık düzleştirilmiş aylık SSN tekli tahminlerini göstermektedir.....	43
Şekil 4.10. Aylık ortalama SSN (siyah çizgi) kullanılarak oluşturulan geçmiş çevrimlerin çiftli tahminleri (kırmızı çizgi).	44
Şekil 4.11. Şekil 4.10'da aylık ortalama SSN kullanılarak oluşturulan çiftli tahminlerin 13-aylık filtrelenmiş versiyonu.....	45
Şekil 4.12. Aylık ortalama SSN kullanılarak oluşturulan Güneş Çevrimi 25 ve 26 tahminlerinin (üst panel) ve 13-aylık filtrelenmiş (alt panel) versiyonu. Renkli çizgiler değişen E ve tau değerleri kullanılarak üretilen en başarılı tahminleri içerir. ...	46
Şekil 4.13. Kümeler için optimal (sol üst panel) ve optimal olmayan (sol alt panel) ayırma noktası (split point) seçimiyle aylık ortalama SSN kullanılarak oluşturulan Güneş Çevrimi 25 ve 26 tahminleri ve bu tahminlerin 13-aylık filtrelenmiş versiyonu (sağ üst ve alt panel).....	48
Şekil 4.15. Aylık ortalama aa indeksi kullanılarak oluşturulan Güneş Çevrimi 25 ve 26 tahminleri. Kırmızı ve mavi çizgiler $E=2$ için farklı tau değerleri kullanılarak üretilen en başarılı iki tahmini içerir.	51
Şekil 4.16. Aylık ortalama Dst indeksi kullanılarak oluşturulan Güneş Çevrimi 25 ve 26 tahminleri. Kırmızı ve mavi çizgiler değişen E ve tau değerleri kullanılarak üretilen en başarılı iki tahmini içerir.	52

1. GİRİŞ

Güneş, içinde bulunduğumuz güneş sisteminin ana yıldızı olmakla birlikte Dünya'ya yakınlığı dolayısıyla yüzeyini ayrıntılı olarak gözleyebildiğimiz tek yıldızdır. Bu yakınlık iki önemli hususta ele alınmalıdır: Yaşamın ve uygarlığın başlatıcısı olması ve sürdürülmesi üzerindeki ciddi etkisi. Esasında, ilk ifade Güneş'in en önemli özelliği, yani, Dünya üzerindeki yaşamın ana kaynağı olmasını vurgular. İkinci husus ise artık süregelen yaşamı ve belirli bir "teknolojik" seviyeye erişmiş olan uygarlığımızın üzerindeki büyük etkisini irdeler. Teknolojik kısmı özellikle vurgulanır ki, sahip olduğumuz teknolojik ve elektronik her bir sistemin Güneş aktivitesine bağlı olan aktif güneş olayları tarafından her an etkilenmeye açık olduğudur.

Güneş'in karmaşık ve halen tam olarak anlaşılamamış manyetik alanı, güneş aktivitesi açısından önemlidir. Güneş aktivitesi tam olarak bu manyetik alandan kaynaklanır (Svalgaard 2013). Manyetik alanın pertürbe ettiği sıcak plazma ve buna bağlı enerji, aktiviteyi tetikler ve çeşitli aktif olaylar meydana getirir. Oldukça dinamik bir yapıda olan Güneş'in, atmosfer katmanlarında (fotosfer, kromosfer, geçiş bölgesi ve korona) farklı aktif olaylar gerçekleşir. Yüzeyde (diğer bir deyişle fotosfer katmanında) gözlemlenen güneş lekeleri aktivitenin oldukça iyi bir temsili olmakla birlikte, kromosferde gözlenen güneş patlamaları (SF) ve korona katmanında gerçekleşen koronal kütle atımları (CME) da önemli aktif olaylardır. Bu olayların şiddeti, sayıları veya büyüklükleri indekslerle tanımlanarak aktivite takibinin yapılmasına olanak tanır. Bu olaylardan sonra dış uzaya, yani güneş sistemi ve dışına ciddi miktarda enerji ve yüklü parçacık (protonlar, elektronlar ve alfa parçacıkları) güneş rüzgarlarıyla (SW) taşınır. Taşınan bu parçacıklar ise uzay havası olarak da ele aldığımız Güneş ve Dünya arasındaki ortamı, manyetik alanı ve parçacıkları etkileyerek uzay hava koşullarını önemli derecede etkiler. Dolayısıyla Güneş'te meydana gelen aktif olaylar, Güneş sistemini etkilemesinin yanında uzay hava koşullarını da değiştirir. O halde, uzay havasından direkt etkilenen jeomanyetik aktivitedeki değişikliği ölçebilmek/tahmin edebilmek, güneş aktivitesinin takibine giden bir diğer yoldur.

Uzay havası koşullarını ve değişkenliğini tanımlamak için jeomanyetik aktivite kavramına değinmek gerekir. Jeomanyetik aktivite, basitçe Dünya'nın manyetik alanının durumudur. Dünya'nın manyetik alanı, Dünya'dan dış uzaya doğru uzanarak manyetosfer olarak isimlendirilen bir katman oluşturur. Bu katman bir manyetik kalkan görevi görerek, Dünyamızı dış uzaydan gelen veya güneş rüzgarlarıyla taşınan yüklü parçacıklardan korur. Manyetik alandaki değişkenlikler, jeomanyetik aktivite indeksleriyle takip edilir. En bilinen indekslerden bazıları şunlardır: Kp, ap, Ap, aa ve Dst indeksleri. Halihazırda dinamik olan jeomanyetik aktivite, Güneş'in de etkisiyle daha vurucu ve kaotik bir etki olarak karşımıza çıkar ve Dünya'yı direkt olarak etkiler. Sonuç olarak, elimizde dinamik olayların meydana geldiği Güneş, kendi içinde dinamik olan ve Güneş'ten etkilenerek daha karmaşık hale gelen jeomanyetik aktivite ve tüm bu aktif etkilere maruz kalan Dünya var. Bu noktada, "yarın uygarlık hangi durumda olacak?" ya da "gelecek güneş çevriminde aktivite nasıl olacak?" soruları iki aynı sorunun farklı şekilde ifadesidir. Bu sorular ve uyandırdığı merak, bizi bir şeyleri tahmin etmeye ve olabilecekleri öngörmeye çalışmaya iten esas motivasyondur.

Güneş, yarı periyodik (quasi-periodic) bir yıldızdır ve yaklaşık 11 yıllık bir güneş leke çevrimine (Solar Cycle - SC) sahiptir (Eddy 1976). Güneş lekelerinin

izlediği bu 11 yıllık yarı tekrarlama durumu Schwabe çevrimi olarak da bilinir. 11 yıllık bir güneş leke çevrimi periyodu daha büyük bir çevrim olan manyetik çevrimin ilk yarısıdır. Hemen ardından bir diğer çevrime, yani bir diğer 11 yıllık döneme geçildiğinde manyetik kutuplar yer değiştirir ve 22 yıllık manyetik çevrim olarak da bilinen Hale çevriminin ikinci yarısı başlar. İkinci 11 yılın sonunda 22 yıllık çevrim tamamlanır, manyetik kutuplar tekrar aynı halini alır ve yeni bir 11 yıllık dönemle yeni bir manyetik çevrim başlar. Kısaca, ardışık iki ayrı güneş leke çevrimi bir bütün manyetik çevrim oluşturur. Bu iki farklı çevrime ek olarak, güneş leke çevrimi kendi içinde daha kısa ve uzun periyodikliklere/çevrimlere de sahiptir. Örneğin, 27 gün, 150 gün, 70-100 yıl aralığında olan Gleissberg Çevrimi (Gleissberg 1939) veya yaklaşık 210 yıllık daha uzun vadeli bir periyodikliğe sahip olan Suess Çevrimi (de Vries 1958; Suess 1980) bunlardan bazılarıdır. Güneş lekeleri ve çevrimi, güneş aktivitesinin takibinde birinci sırada gelir, çünkü en uzun süreli kayda sahip olan veri güneş leke sayısı verisidir. Yaklaşık 400 yıllık kayıtları mevcut olan güneş leke sayıları (SSN), güneş aktivite çevriminin temelini oluşturur ve çevrimler 11 yıllık periyotlara göre numaralandırılmıştır.

Güneş ve jeomanyetik aktivite çevrimleri, belirli bir periyoda sahip olsa da her çevrim birbirinden tamamen bağımsız değildir. Diğer bir ifadeyle, çevrimler birbirinden farklı gibi gözükse de aslında bir o kadar da birbirine benzerdir. Bu süreçler doğrusal bir düzen içinde gerçekleşmez; küçük başlangıç farkları zamanla büyük değişimlere yol açar. Bu durum, aktivitenin kaotik özellikler gösterdiğini ve deterministik kaos ile ele alınması gerektiğini ortaya koyar. Yani, sistem tamamen rastgele/kaotik değildir, ama tamamen bir düzen de yoktur. Diğer bir ifadeyle, çevrimler belirli bir düzeni takip ediyor gibi görünse de bu düzenin içinde bir düzensizlik vardır. Bu durum, tam olarak deterministik kaosa işaret eder. Bu nedenle, güneş çevriminin bu özelliği bizi kaos teorisi ve doğrusal olmayan yaklaşımların uygulamasına götürür. Güneş çevriminin kaotik yapısı, çevrimlerin her seferinde benzer desenler sergilemesine rağmen küçük ölçeklerde farklılık göstermesine neden olur. Böylece, güneş aktivite çevrimleri doğrusal olmayan, karmaşık bir sistem olarak kabul edilir ve matematiksel olarak kaos teorisi bağlamında ele alınır. Güneş çevrimlerinde gözlemlenen kaotik dalgalanmaları daha iyi ortaya koymak ve tahmin etmek için doğrusal olmayan dinamiklerin kullanımı önemli bir yaklaşımdır. Özellikle, son yıllarda kaos teorisi ve doğrusal olmayan dinamiklerin uygulanması, güneş çevrimlerinin karmaşıklığını anlamak ve uzun vadeli tahmin modellerini geliştirmek için değerli bilgiler sağlamıştır (Jevtic vd. 2001; Letellier vd. 2006; Spiegel 2009; Kılçık vd. 2009; Crosson ve Binder 2009; McIntosh vd. 2017, 2020; Petrovay 2020). Bu nedenle, bu tez çalışmasında Hurst üssü, Lyapunov üssü, korelasyon boyutu ve Convergent Cross Mapping (CCM) gibi doğrusal olmayan ve nedensellik durumlarını inceleyen yaklaşımlar kullanılacaktır. Verilerin doğrusallık ve nedensellik durumları belirlendikten sonra, analiz sonuçlarına göre en optimal ve en başarılı tahmine giden yol aranacaktır.

Gezegeneimizin geleceği ve uygarlığımızın ilerlemesi, güneş aktivitesinin anlaşılması ve tahmin edilmesiyle yakından bağlantılıdır. Buna ek olarak, Güneş-Dünya ilişkisinin araştırılması ve anlaşılmasında önemli bir faktör, çeşitli güneş aktivite olaylarından kaynaklanan ve jeomanyetik aktiviteyle de ilişkili olan uzay havasının analizi ve tahminidir. Gelecekte gerçekleşecek aktif olayları ve muhtemel etkilerini öngörebilmek, gerekli önlemlerin alınmasına ve hazırlıklı olunmasına olanak tanır.

Uygarlığımızın son 30-40 yıldaki teknolojik gelişmişliğini ele alalım; uydu sistemleri, telekomünikasyon sistemleri, internet ve elektrik şebekeleri, GPS ve haberleşme sistemleri, kısacası, tüm teknolojik ve elektronik sistemler hayatımızın büyük bir parçası olmuş ve insanlık bunlara bağımlı hale gelmiştir. Bu sistemlerde meydana gelebilecek bir bozulma, hatta en ufak bir hatanın ciddi sonuçları olabileceği aşıkardır. En önemlisi de tüm bu sistemlerin, güneş ve buna bağılı uzay havası olaylarından etkilenmeye fazlasıyla açık olmasıdır. Bu nedenle, güneş aktivite değişimlerinin, şiddetlerinin, sürelerinin vb. özelliklerinin indeksler aracılığıyla kısa ve uzun vadeli tahmini fazlasıyla önem arz etmektedir. Bu tez çalışmasının motivasyonu bu temele dayanarak, güneş ve jeomanyetik aktivite indeksleri için geleceğe yönelik en doğru tahminleri üretmeyi amaçlar. Bu tez çalışmasında indekslerin doğrusallık durumları incelendikten sonra, doğrusal olmayan sistemlerin analizi ve tahminleri literatürde yaygın olarak kullanılan “Simplex Projection” yöntemi yardımıyla yapılmıştır.



2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Güneş

Güneş, içinde bulunduğumuz Samanyolu galaksinin Sagittarius kolu üzerinde ve galaksi merkezinden yaklaşık 26 bin ışık yılı uzaklıkta bulunur. G2V tayf türünden bir cüce olan Güneş, kısmen genç sayılabilir ve metalce zengindir, bu sebeple ikinci kuşak olarak tanımlanan popülasyon I yıldızlarındandır. Şu anda anakol evresinde bulunan Güneş yaklaşık 4.5 milyar yıl yaşındadır ve bir bu kadar süre sonra yaşamının son bulması beklenmektedir. Bir yıldızın evriminin ilerleyişini yönlendiren iki ana parametre vardır: Kimyasal kompozisyon ve kütle. Güneş'in kimyasal kompozisyonu kütle açısından yaklaşık olarak %72 hidrojen (H), %25 helyum (He) ve kalan %3'lük kısım ise diğer ağır elementlerden oluşur. Kütle açısından diğer yıldızlarla karşılaştırıldığında çok da büyük olmayan ve küçük-orta bir yıldız olarak sınıflandırılabilen Güneş, evrimsel sürecinde çekirdeğindeki hidrojen tükendiğinde Kırmızı Dev evresine girecek, ardından Asimptotik Dev evresindeki yoğun kütle kaybıyla dış katmanlarını uzaya savurarak bir gezegenimsi bulutsu oluşturacak ve geride kalan sıcak karbon-oksijen çekirdeği zamanla soğuyup beyaz cüceye dönüşerek yaşamını sonlandıracaktır.

Güneş'in fiziksel ve kimyasal özellikleri, iç yapısı, katmanları, enerji üretim mekanizmaları gibi literatüre ait bilgiler daha önceki birçok makale ve tez çalışmalarında sunulmuştur (Kılçık 2009; Stix 2012; Broomhall vd. 2014; Sarp 2018; Christensen-Dalsgaard 2020). Bu tez çalışmasında, daha ziyade güneş ve jeomanyetik aktivite, uzay havası, aktivite parametreleri/indeksleri, indekslerin doğrusallık durumlarının analizleri ve indekslerin tahminleri üzerinden kaynak taraması sunulacaktır.

2.2. Güneş Aktivitesi

Güneş aktivitesi, Güneş'in yüzeyinde ve dış katmanlarında meydana gelen ve Güneş'in manyetik alanının karmaşık etkileşimleri tarafından yönlendirilen bir dizi dinamik ve yüksek enerjili olayı ifade eder. Bu tezahürler, Güneş'in atmosferinde depolanan manyetik enerjinin serbest kalmasından kaynaklanan ani, yoğun radyasyon patlamaları olan güneş patlamaları ile, Güneş'in fotosferinde konveksiyonu engelleyen yoğun manyetik aktivitenin neden olduğu karanlık, daha soğuk bölgeler olan güneş lekelerini içerir. Ek olarak, koronal kütle atımları (CME'ler) Güneş'in koronasından uzaya doğru plazma ve manyetik alanların büyük çaplı atımlarını temsil eder ve genellikle güneşin manyetik alanının büyük ölçekli yeniden yapılandırılmasıyla bağlantılıdır.

Güneş olaylarının arkasındaki temel itici güç, Güneş'in iç kısmında faaliyet gösteren güneş dinamosu süreci tarafından sürekli olarak üretilen ve değiştirilen, Güneş'in manyetik alanıdır (Svalgaard 2013). Bu dinamik faaliyetler sadece Güneş ortamını etkilemekle kalmaz, aynı zamanda etkilerini helyosfer (Güneş'ten yayılan parçacıkların oluşturduğu devasa manyetik alan) boyunca genişleterek gezegen atmosferlerini, uzay hava koşullarını ve hatta Dünya'daki teknolojik sistemleri de etkiler. Sonuç olarak, güneş aktivitesini yöneten altta yatan mekanizmaları anlamak, Dünya'nın manyetosferi, uydu operasyonları, güç şebekeleri ve iletişim ağları üzerindeki etkisini tahmin etmek için gereklidir.

Manyetik Çevrim: Güneş'in manyetik alanı, yaklaşık 22 yıllık bir çevrimsel değişim süreci sergileyerek, Güneş'in yüzeyindeki manyetik yapıların ve aktivite seviyelerinin belirli periyotlarla değişmesine neden olur. Bu süreç, Güneş manyetik çevrimi/güneş çevrimi olarak adlandırılır ve temelde Güneş'in iç yapısında yer alan güneş dinamosu mekanizmasına dayanır (Charbonneau 2020).

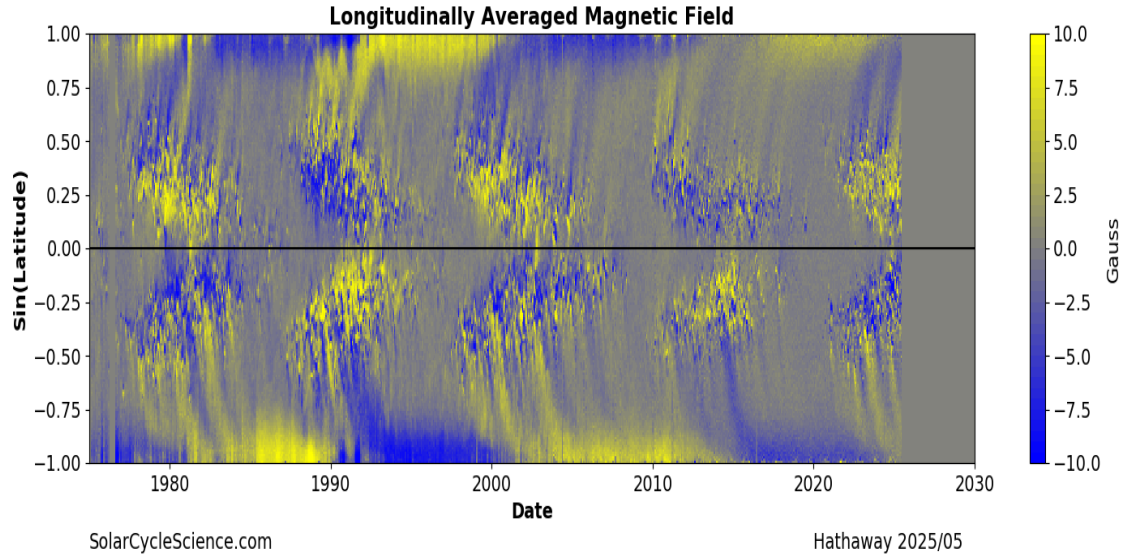
Manyetik çevrim, Güneş'in dipol manyetik alanının yön değiştirmesiyle karakterize edilir ve bu süreç iki ana evreye ayrılır: Manyetik maksimum ve manyetik minimum. Güneş manyetik minimumunda, güneş lekeleri ve diğer aktivite göstergeleri düşük seviyededir. Ancak, manyetik maksimum sürecinde, Güneş yüzeyinde yoğun manyetik aktivite gözlemlenir; güneş lekesi sayıları artar, güneş patlamaları ve CME'ler daha sık görülür (Hathaway 2015). Manyetik çevrimin temel sürükleyici mekanizması, güneş dinamosu sürecidir. Güneş'in iletken plazma yapısı nedeniyle, manyetik alan sürekli olarak iç plazma hareketleri (örneğin diferansiyel rotasyon ve konvektif akışlar) tarafından bükülür, gerilir ve yön değiştirilerek yeniden şekillendirilir. Bu süreç, iki temel bileşene sahiptir:

- **Diferansiyel Rotasyon:** Güneş katı bir cisim olmadığı için farklı enlem kuşakları farklı hızlarda döner; bu duruma diferansiyel dönme/rotasyon (kendi eksenini etrafında dönme) denir. Gözlemler, Güneş'in Ekvator bölgesinin yaklaşık 25 günde dönerken, kutup bölgelerinin bu dönüşü yaklaşık 33-36 gün arasında tamamladığını göstermektedir. Böylece oluşan açısal hız farkı, Güneş'in iç yapısındaki iletken plazma nedeniyle yüzey ve alt tabakalardaki manyetik alan çizgilerini zamanla gererek ve bükerek, başlangıçta kutuplara dik olan poloidal (kutupsal) alanları ekvatora paralel toroidal (ufuksal) alanlara dönüştürür (Parker 1955). Bu süreç, Güneş dinamosunun temel bir mekanizmasıdır ve manyetik çevrim boyunca gözlenen güneş lekelerinin oluşumunda belirleyici rol oynar.
- **Meridyonal Akış ve Manyetik Yeniden Bağlanma Mekanizmaları:** Güneş içindeki konvektif hareketler (sıcak plazmanın yükselip soğuk plazmanın batmasıyla oluşan döngüsel hareketler), yüzeye çıkan manyetik alanları şekillendirir ve sonunda manyetik kutupların yer değiştirmesine neden olur. Bu süreç, Güneş'in dipol manyetik alanının yeniden üretilmesini sağlar ve böylece kuzey-güney doğrultusundaki (kutupsal) poloidal manyetik alanın ortaya çıkmasına yol açar (Babcock 1961; Leighton 1969).

Şekil 2.1'deki diyagram, içinde bulunduğumuz mevcut çevrim 25'in günümüze kadarki durumu ve son dört Güneş çevrimi boyunca Güneş yüzeyindeki manyetik alanın ortalama dağılımını göstermektedir. Burada pozitif manyetik polarite (kutupluluk) sarı, negatif manyetik polarite ise mavi renkle ifade edilmiştir. Güneş çevrimleri sırasında kutuplar, maksimum Güneş aktivitesi dönemlerinde bir çevrimden diğerine tersine döner (ters manyetik polariteye sahip olur). Manyetik kelebek diyagramı, Güneş'teki manyetik alanın birkaç çevrim boyunca nasıl evrildiğini görselleştirir ve bu evrim, Güneş çevrimi tahminlerinde kullanılan modellerin temelini oluşturur.

Güneş Leke Çevrimi: Güneş lekeleri Güneş'in manyetik çevriminin fotosferdeki en belirgin göstergelerinden biridir ve gözlenen lekelerin sayısı yaklaşık 11 yıllık bir periyoda sahiptir (Hale vd. 1919). Bu çevrim, Güneş yüzeyinde gözlemlenen güneş lekelerinin sayısındaki düzenli artış ve azalışlarla karakterize edilir. Güneş lekeleri,

Güneş'in manyetik alanının yoğun olduğu bölgelerde oluşan, çevresine göre daha soğuk ve karanlık görünen alanlardır (Schrijver ve Zwaan 2000).



Şekil 2.1. Manyetik Kelebek Diyagramı. Bu diyagram, Hale'in Polarite Yasalarını, Joy Yasasını (güneş lekeleri çiftlerinin eğimlerinin enleme bağlı olarak sistematik bir şekilde arttığını belirten yasa), kutup manyetik alanlarının tersine dönmesini ve daha yüksek enlemlerdeki manyetik alan elemanlarının kutuplara doğru taşınmasını göstermektedir (<http://www.solarcyclescience.com/> adresinden alınan D.H. Hathaway çizimidir).

Güneş leke çevrimi, Güneş'in manyetik aktivitesinin bir göstergesi olarak hem Güneş'in dinamiklerini hem de uzay havası üzerindeki etkilerini anlamak için kritik öneme sahiptir. Bu çevrim, Wolf Güneş Leke Sayısı veya rölatif sayı (R) ile nicel olarak ifade edilir. Bu sayı, belirli bir zamanda gözlemlenen güneş lekelerinin ve leke gruplarının sayısını dikkate alarak hesaplanır (Clette vd. 2014). Güneş leke sayısı, çevrim boyunca değişim gösterir ve bu değişim, çevrimin evrelerini (maksimum, minimum, çıkış ve iniş kolları) tanımlamak için kullanılır. Çevrim başlangıcında (çıkış kolu) leke sayısı düşük iken, maksimum evrede bu sayı pike ulaşır ve ardından tekrar düşüşe geçer (iniş kolu).

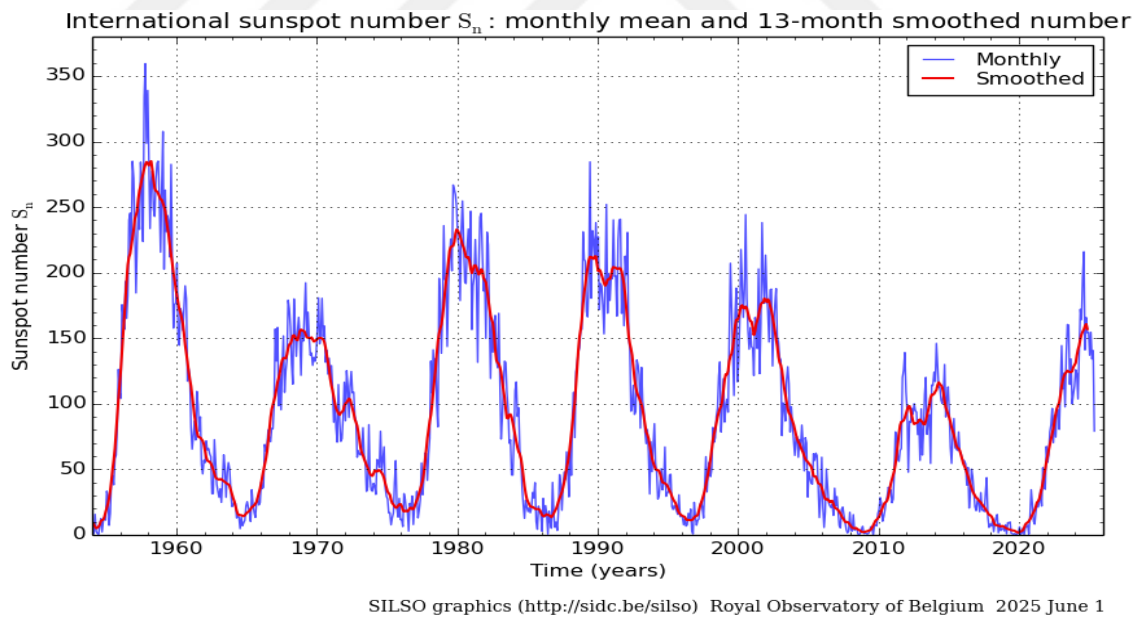
Güneş leke çevrimi, dört ana evrede incelenir: Minimum, çıkış kolu, maksimum ve iniş kolu.

- **Güneş Minimumu:** Bu evrede, Güneş yüzeyindeki leke sayısı oldukça düşüktür ve manyetik aktivite minimum seviyededir. Güneş lekeleri biten çevrim için genellikle ekvatorun yakınında, yaklaşık $\pm 5^\circ$ - 10° enlemlerinde görülürken, yeni başlayan çevrime ait lekeler ise $\pm 30^\circ$ - 40° enlem kuşağında gözlenir ve Güneş'in genel manyetik alanı dipol yapısını korur (Hathaway 2015).
- **Güneş Maksimumu:** Bu evrede, Güneş yüzeyindeki leke sayısı ve manyetik aktivite en yüksek değerine ulaşır Güneş lekeleri, ekvatorun her iki tarafında daha geniş bir enlem aralığında görülür. Bu dönemde, güneş patlamaları, CME'ler ve diğer aktif olaylar daha sık meydana gelir (Pesnell 2012).

Güneş leke çevrimi, Güneş'in manyetik alanındaki değişimlerle doğrudan ilişkilidir. Çevrim boyunca, Güneş'in manyetik kutupları tersine döner ve bu süreç, manyetik

çevrimin bir parçası olarak her 11 yılda bir gerçekleşir. Ancak, tam bir manyetik çevrim (Hale çevrimi) 22 yıl sürer ve bu süre zarfında manyetik kutuplar ilk haline gelir (Hale vd. 1919; Hale 1924; Charbonneau 2020). Şekil 2.1’de gösterilen Manyetik Kelebek Diyagramı, Güneş leke çevriminin enlemlere göre dağılımını ve zaman içindeki evrimini görselleştirir. Güneş lekeleri, çevrim başlangıcında yüksek enlemlerde ortaya çıkması ve çevrim ilerledikçe ekvatora doğru hareket etmesi Spörer Yasası olarak bilinir ve Güneş leke çevriminin karakteristik bir özelliğidir (Maunder 1904; Hathaway 2015). Ayrıca, diyagramda Hale’in Polarite Yasaları ve Joy Yasası gibi manyetik alanın evrimiyle ilgili temel ilkeler de gözlemlenebilir (Hale vd. 1919; Wang ve Sheeley 1989). Güneş leke çevrimi, sadece Güneş’in kendi dinamiklerini anlamak için değil, aynı zamanda Dünya üzerindeki etkileri nedeniyle de önemlidir. Çevrim maksimumunda artan güneş leke sayısı, uzay havası olaylarının (örneğin, jeomanyetik fırtınalar, radyo haberleşme kesintileri ve uydu arızaları) daha sık ve şiddetli olmasına neden olabilir (Schrijver ve Siscoe 2010). Bu nedenle, güneş leke çevriminin izlenmesi, güneş ve jeomanyetik aktivite tahminleri ve Dünya’daki teknolojik altyapının korunması açısından kritik bir rol oynar.

Şekil 2.2’deki diyagram, 1954’ten günümüze kadar olan dönemde gerçekleşen son güneş çevrimleri için (Güneş çevrimi 19, 20, 21, 22, 23, 24 ve 25’in ilk yarısı) uluslararası güneş leke sayısının (Sunspot Number, SSN) aylık ortalamalarını (mavi çizgi) ve 13-aylık düzeltilmiş değerlerini (kırmızı çizgi) göstermektedir. Çevrimlerin yaklaşık 11 yıllık periyodik doğası açıkça görülmektedir. Güneş leke sayısındaki artış ve azalışlar, çevrimlerin minimum ve maksimum evrelerini temsil eder.



Şekil 2.2. Güneş Leke Sayılarının ve Çevrimlerin Zamanla Değişimi (Sunspot Index and Long-term Solar Observations (SILSO) Royal Observatory of Belgium, 2025 tarafından sağlanmış ve <https://www.sidc.be/SILSO/home> adresinden alınmıştır).

Güneş Aktivite İndeksleri: Güneş, aktif bir yıldız olarak tanımlanabilir ve bu aktivite kısmi periyodik davranışlar sergiler. Aktivitenin takibi ve zamansal davranışını

incelemek için güneş aktivite parametreleri (Güneş Leke Sayıları (SSN), Güneş Leke Alanları (SSA), Güneş Patlama (SF) Sayıları, 10.7 cm Güneş Radyo Akısı (F10.7), Koronal Kütle Atımları (CMEs), Maksimum Koronal Kütle Atım Hız İndeksi (MCMESI) vb.) kullanılır.

- **Güneş Leke Sayıları (SSN):** Güneş lekeleri, Güneş'in yüzeyinde (fotosfer katmanında) gözlenen karanlık, manyetik alanın yoğunlaştığı bölgelerdir. Lekeler, Güneş'in manyetik aktivitesinin doğrudan bir göstergesi olup yaklaşık 11 yıllık bir çevrim gösterir. Uluslararası Güneş Leke Sayıları (ISSN), bireysel gözlemlerden elde edilen ve istatistiksel olarak düzeltilmiş bir veri setidir. Güneş aktivitesinin en eski kayıtlarına sahip olup, en uzun vadeli veri (yaklaşık 420 yıl) olmasının da etkisiyle, en iyi aktivite göstergelerindendir (Clette vd. 2014; Hathaway 2015).
- **Güneş Leke Alanları (SSA):** Güneş yüzeyindeki toplam güneş lekesi alanını ifade eder ve genellikle Güneş'in görünen yarı küresinin milyonda biri (MSH - millionths of solar hemisphere) cinsinden ifade edilen yüzey alanları şeklinde ölçülür. Bu alanlar, teleskopik gözlemlerden elde edilen yüksek çözünürlüklü görüntüler üzerinde leke sınırlarının belirlenmesiyle hesaplanır. Güneş leke alanları, sadece leke sayısına değil, lekelerin büyüklüğüne de duyarlı olduğu için manyetik aktivitedeki değişimleri zaman içinde daha ayrıntılı ve duyarlı bir şekilde izlemeye olanak tanır ki güneş leke alanları ile toplam manyetik akı arasında pozitif ve anlamlı bir korelasyon bulunmuştur (Balmaceda vd. 2009; Pevtsov vd. 2014; Mandal vd. 2020).
- **Güneş Patlamaları (SF):** Güneş patlamaları, Güneş'in manyetik alanındaki yeniden yapılandırmalarla ilişkilidir ve bu süreç manyetik yeniden bağlantı (magnetic reconnection) olarak adlandırılır (Sweet 1958; Shibata ve Magara 2011). Yeniden bağlantı sırasında, manyetik alanda depolanan enerji (genellikle 10^{28} - 10^{29} erg düzeyinde) tipik olarak onlarca dakikalık bir süre içinde aniden serbest bırakılır (Fletcher vd. 2011). Elektromanyetik spektrumun tüm dalga boylarında gözlemlenebilen bu olaylar, X-ışınları ve radyo dalgaları da dahil olmak üzere geniş bir enerji aralığında ışıınım yapar. Güneş'in aktif bölgelerinde meydana gelirler ve şiddetlerine göre A, B, C, M ve X sınıflarına ayrılırlar (Fletcher vd. 2011; Benz 2017).
- **10.7 cm Güneş Radyo Akısı (F10.7):** Güneş'in 10.7 cm (2800 MHz) dalga boyunda yaydığı radyo akısının ölçümüdür ve güneş aktivitesinin güvenilir bir göstergesidir. F10.7 akısı, üst atmosferin iyonizasyon seviyesi ile doğrudan ilişkilidir ve güneş aktivitesine ek olarak uzay havası tahminlerinde de sıklıkla kullanılan bir parametredir (Covington 1947; Tapping 2013).
- **Koronal Kütle Atımları (CMEs):** CME'ler, Güneş'in korona tabakasından büyük miktarda plazmanın ve manyetik alanın fırlatılmasıdır. CME'lerin sayısı ve atım hızları, Güneş'in manyetik aktivitesinin önemli göstergelerinden biridir ve Dünya'ya yöneldiğinde jeomanyetik fırtınalara neden olabilir (Gopalswamy, 2006; Webb vd. 2012).

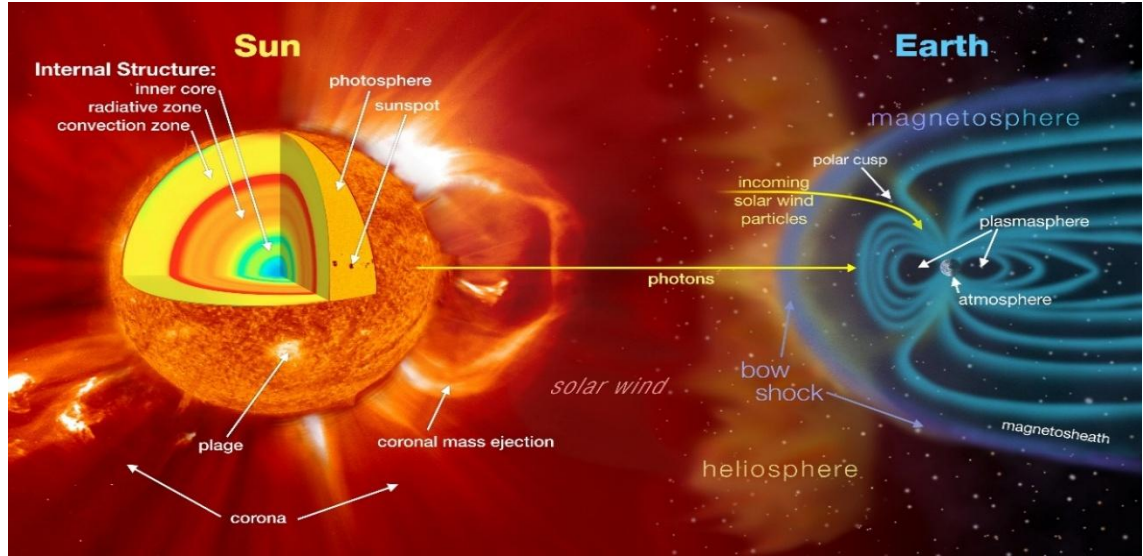
- **Maksimum Koronal Kütle Atım Hız İndeksi (MCMESI):** CME'ler çeşitli hızlarda (genellikle 250 km/s ile 3000 km/s arasında) uzaya atılır. Günlük gerçekleşen CME'ler içinde maksimum atım hızına sahip olan CME'nin hız değeri (çoğunlukla 1000 km/s ve üzeri) MCMESI olarak kabul edilir ve genellikle km/s cinsinden verilir. CME'lerin hızı, potansiyel jeomanyetik etkileri belirlemede kritik bir faktördür (Kılçık vd. 2011).

Güneş değişkenliğinin en kolay gözlemlenebilir özelliği, görünür güneş yarım küresindeki güneş lekelerinin sayısıdır (Echer vd. 2005). Gözlenen güneş lekesi sayısının kayıtları, yaklaşık 11 yıllık yarı düzenli çevrim göstermektedir (Eddy 1976). Bunun yanında, güneş patlamaları ve koronal kütle atımları güneş aktivitesinin diğer önemli göstergelerindendir. Yoğun jeomanyetik aktivite ve fırtınalar, şok dalgaları, güneş enerjik parçacık olayları vb. uzay havasındaki önemli tedirginliklerdendir. Bu olaylar çoğunlukla iki geçici güneş aktivite olgusuyla ilişkilidir: güneş patlamaları ve koronal kütle atımları (Gosling 1993). Güneş patlamaları, ilk olarak 1859'da Carrington tarafından güneş yüzeyinde ani parlaklık artışı şeklinde gözlenmiştir. Güneş patlamaları, bazı CME'lerle bağlantılı olarak ortaya çıktıkları ve parçacık hızlanmasında önemli bir role sahip oldukları için uzay havası açısından önemlidir (Gosling 1993). Güneş'in dış atmosferi olan korona, ani ve şiddetli kütle atım ve püskürmelere sebep olur. Bu olay, koronal kütle atımı olarak isimlendirilir ve CME sayıları da aktivite takibi açısından önemli bir göstergedir. Güneş aktivitesi kapsamında bahsedilmesi gereken önemli göstergelerden biri de 10.7 cm dalga boyundaki (2800 MHz) güneş radyo akısıdır. Genellikle F10.7 olarak adlandırılan bu indeks, Güneş'in üst atmosferinden (kromosfer ve korona) yayılan radyo emisyonlarını ölçer. Bu emisyonlar, güneş lekeleri, ultraviyole ışıma ve plazma yoğunluğu gibi aktivite olaylarıyla yakından ilişkilidir (Tapping 2013). Radyo dalgaları atmosferin optik geçirgenliğinden etkilenmediği için, F10.7 ölçümleri bulutluluk gibi hava koşullarından bağımsızdır ve güvenilir şekilde düzenli veri alınabilir. Bu nedenle F10.7, hem güneş aktivitesinin önemli bir göstergesi hem de uzay havası tahminlerinde sıkça kullanılan uzun süreli ve istikrarlı bir veridir. Bir diğer gösterge, Maksimum Koronal Kütle Atım Hız İndeksi'dir (MCMESI). MCMESI özellikle güneş aktivitesinin yanı sıra, jeomanyetik aktivite parametreleriyle dikkate değer bir ilişki göstermesi açısından oldukça önemlidir (Kılçık vd. 2011).

2.3. Jeomanyetik Aktivite

Jeomanyetik aktivite, Güneş'in manyetik alanından kaynaklanan dinamik olayların, Dünya'nın manyetosferi ile etkileşiminden ortaya çıkan bozulmaları ifade eder. Bu olaylar, Dünya'nın manyetik alanında oluşan ani değişiklikler, manyetik fırtınalar ve auroral etkinlikler gibi çeşitli fenomenleri kapsar (Kivelson ve Russell 1995). Jeomanyetik aktivitenin temel kaynakları, güneş rüzgarının dünya manyetosferi ile etkileşiminden, CME'ler ve güneş rüzgarındaki hızlı akış bölgelerinden (HSS) kaynaklanan manyetik fırtınaları içerir (Tsurutani ve Gonzalez 1995).

Şekil 2.3, Güneş ve Dünya manyetosferi arasındaki etkileşimi göstermektedir. Şekilde, Güneş'in iç yapısı (çekirdek, radyatif bölge, konvektif bölge), yüzey katmanları (fotosfer, korona), bu katmanlarda gözlenen bazı aktif olaylar (güneş lekeleri, plaj bölgeleri, CME'ler gibi) ve bunların dünya ile etkileşimi gösterilmektedir. Güneş'ten yayılan güneş rüzgarı, Dünya'nın manyetosferi ile etkileşime girerek jeomanyetik fırtınalara neden olur.



Şekil 2.3. Güneş rüzgarı, CME'ler ve Dünya manyetosferi arasındaki etkileşim. Manyetosfer, güneş rüzgarı tarafından sıkıştırılır ve manyetik kuyruk oluşturur. Bu etkileşim, jeomanyetik fırtınaların temel mekanizmasını açıklar (NASA, Sally Bensusen 2013. <https://svs.gsfc.nasa.gov/30481/> adresinden alınmıştır).

Manyetosfer, Dünya'nın manyetik alanı tarafından oluşturulan koruyucu bir kalkan görevi görür ve güneş rüzgarının etkisiyle sıkışarak güneşe bakan tarafında daralır, arkada kalan karanlık tarafta ise uzayda bir manyetik kuyruk (magnetotail) oluşturur. Güneş rüzgarı ve manyetosferin çarpıştığı bölge, bow shock olarak adlandırılır ve bu bölgede güneş rüzgarı yavaşlar ve yön değiştirir. Güneş'teki manyetik aktivite, güneş lekeleri, patlamalar ve CME'ler gibi olaylarla artar ve bu olaylar, uzay havasını etkileyerek Dünya'daki teknolojik sistemlerde (örneğin, uydu iletişimi, navigasyon sistemleri ve elektrik şebekeleri) bozulmalara yol açabilir.

Jeomanyetik Fırtınalar ve Etkileri: Jeomanyetik fırtınalar, CME'lerin veya hızlı güneş rüzgarı akımlarının (HSS) Dünya manyetosferi ile etkileşime girmesi sonucunda meydana gelen büyük çapta manyetik bozulmalardır (Kamide vd. 1998). Bu olaylar, Dünya'nın manyetik alanında ani ve şiddetli değişimlere neden olarak, özellikle uydular, radyo iletişimi, elektrik şebekeleri ve navigasyon sistemleri üzerinde olumsuz etkilere yol açabilir (Baker 1998).

Jeomanyetik Aktivite İndeksleri: Jeomanyetik aktivite indeksleri, Dünya'nın manyetik alanındaki değişimleri nicel olarak ifade etmek ve bu değişimlerin şiddetini ölçmek için kullanılan önemli göstergelerdir. Bu indeksler, uzay havası tahminlerinde kritik bir rol oynar ve jeomanyetik fırtınaların etkilerini anlamak için kullanılır. Örneğin, Kp indeksi, küresel ölçekte manyetik aktivitenin genel seviyesini belirlerken, Dst indeksi, manyetosferdeki halka akımının (ekvatorial manyetosferde, enerjik yüklü parçacıkların oluşturduğu ve Dünya'nın manyetik alanını zayıflatan akım sistemi) gücünü ve jeomanyetik fırtınaların şiddetini ölçer. Auroral Electrojet (AE) indeksi, auroral bölgelerdeki elektrik akımlarını izlerken, ap ve Ap indeksleri, manyetik aktivitenin günlük ve kısa vadeli değişimlerini doğrusal bir ölçekle ifade eder. aa indeksi, jeomanyetik aktivitenin uzun vadeli değişimlerini izlemek için analizlerde sıklıkla

kullanılan bir parametredir. Bu indeksler, uzay havasının teknolojik altyapılar üzerindeki potansiyel etkilerini tahmin etmek için hayati öneme sahiptir. Ayrıca, uzun vadeli jeomanyetik aktivite trendlerini izlemek ve Güneş-Dünya etkileşimlerini anlamak için de kullanılır.

Yukarıda bahsedilen jeomanyetik aktivite indekslerinin daha ayrıntılı tanımları aşağıdaki gibi verilebilir;

- **Kp İndeks:** Kp (planetary K index), gezegenler arası manyetik fırtınaların global bir göstergesi olan bir parametredir. Dünya çapındaki manyetik aktivite seviyesinin 3 saatlik bir ölçüsü olan Kp indeks ilk olarak Bartels (1949) tarafından tanımlanmıştır. Amacı, küresel ölçekte alt-auroral bölgede gözlenen manyetik bozulmayı izlemektir (Rostoker 1972; Matzka vd. 2021). Dünya genelindeki farklı manyetik gözlem istasyonlarından (44 derece ile 60 derece kuzey veya güney jeomanyetik enlemleri arasındaki) alınan verilerle hesaplanır (Yamazaki vd. 2022) ve her 3 saatlik periyot boyunca kutup bölgesindeki manyetik alan değişimlerini ölçer. Kp, Dünya'daki jeomanyetik aktivitenin genel seviyesini belirtir ve 0 ile 9 arasında değişen bir logaritmik ölçek kullanır (Matzka vd. 2021). Yüksek Kp değerleri, daha güçlü jeomanyetik aktiviteyi ve manyetik fırtınaları ifade eder (Bartels 1949; Menvielle ve Berthelier 1991).
- **AE (Auroral Electrojet) İndeks:** AE indeksi, auroral elektrojetteki (kutup bölgelerinde yer alan aurora kuşağındaki elektrik akımlarında oluşan değişimler) aktivitenin bir ölçüsüdür ve Davis ve Sugiura (1966) tarafından tanımlanmıştır. Auroral bölge aktivitesini incelemek için auroral elektrojet katkısını maksimize etmek önemlidir ve bu, AE indeksinin geliştirilmesi ile başarılmıştır (Rostoker 1972). Bu indeks, Dünya'nın kuzey ve güney kutup bölgelerindeki manyetik gözlem istasyonlarından alınan verilerle hesaplanır. AE, auroral bölgedeki manyetik alan sapmalarını ölçer ve yüksek AE değerleri, şiddetli auroral aktiviteyi ve dolayısıyla jeomanyetik fırtınaları işaret eder. AE indeksi, auroral bölgedeki elektrik akımlarının gücünü ve değişimlerini anlamak için kullanılır (Davis ve Sugiura 1966).
- **ap İndeks:** ap, Dünya'nın manyetik alanındaki jeomanyetik aktiviteyi ölçmek için kullanılan bir indekstir. Aktivitenin ortalama değerlerini hesaplamak için aktivite ile lineer olarak ilişkili bir indeks gerektiği fikri ap indeksin üretilmesinde öncü olmuştur ve bu fikirden yola çıkılarak Bartels ve Veldkamp (1954) tarafından tanımlanmıştır. Bu indeks, Kp indeksinin 3 saatlik değerlerinden türetilir ve her 3 saatlik periyot için bir ap değeri hesaplanır. ap, Kp'nin logaritmik ölçeğini doğrusal bir ölçeğe dönüştürerek jeomanyetik aktivitenin şiddetini daha nicel bir şekilde ifade eder. ap değeri "ap birimleri" cinsinden ifade edilir: 1 ap birimi yaklaşık olarak 2 nT'ye (nanoTesla) karşılık gelir. 0 ile 400 arasında değişir ve yüksek değerler, daha güçlü jeomanyetik aktiviteyi gösterir (Bartels vd. 1954).
- **Ap İndeks:** Ap, bir gün boyunca hesaplanan 8 adet 3 saatlik ap değerinin aritmetik ortalamasıdır ve "ap birimleri" cinsinden ifade edilir (Menvielle vd. 2010). Bu indeks, Dünya'nın manyetik alanındaki günlük jeomanyetik aktivitenin genel seviyesini temsil eder. Ap, jeomanyetik aktivitenin günlük

değişimlerini ve uzay havası koşullarındaki uzun vadeli trendleri incelemek için kullanılır (Mayaud 1980).

- **aa İndeks:** aa indeksi, Dünya'nın manyetik alanındaki jeomanyetik aktivitenin uzun vadeli değişimlerini izlemek için kullanılan bir parametredir ve Mayaud (1972) tarafından tanımlanmıştır. Bu indeks, kuzey ve güney yarımküredeki iki manyetik gözlem istasyonundan alınan verilerle hesaplanır. aa, her 3 saatlik periyot için yerel manyetik alanın en büyük sapmalarını ölçer ve bu sapmaların büyüklüğünü sayısal bir değere dönüştürür. Daha sonra bu değerler birleştirilerek günlük ortalama elde edilir. aa indeksi, 1868 yılından itibaren hesaplanmaya başlanmış ve jeomanyetik aktivitenin uzun vadeli değişimlerini incelemek için önemli bir araç olmuştur (Mayaud 1972).
- **Dst (Disturbance Storm Time) İndeks:** Dst indeksi, ekvatorial manyetik alan şiddetindeki değişiklikleri izleyen bir parametredir ve özellikle jeomanyetik fırtınaların şiddetini ölçmek için kullanılır. Dünya manyetosferindeki bir ekvatorial halka akımı, genellikle jeomanyetik fırtına esnasında ortaya çıkan bozulma alanlarının eksenel simetrik bileşeninin fiziksel kaynağı olarak kabul edilir. Dst indeksi, bu simetrik bozulma alanını oluşturan akımın büyüklüğünü ölçmek amacıyla Sugiura (1963) tarafından ortaya atılmıştır. Dst, Dünya'nın ekvatorial bölgelerindeki manyetik gözlem istasyonlarından alınan verilerle hesaplanır. Jeomanyetik fırtınalar şiddetlerine göre beş ana kategoriye ayrılmaktadır (Gonzalez vd. 1994; Loweve ve Prölss 1997) ve bu sınıflama, Dst indeksine dayanmaktadır. Dst indeksinin -30 nT ile -50 nT arasında olduğu durumlar görece zayıf bozulmaları karakterize eder. Orta şiddetteki fırtınalar ise -50 nT ile -100 nT arasındaki Dst değerleriyle tanımlanır ki bu fırtınalar, manyetosferde daha belirgin bir etkilenmeye yol açar. Şiddetli fırtınalar, -100 nT ile -200 nT arasında ölçülen Dst değerleriyle, Dünyanın manyetik alanında kayda değer bir değişimi temsil eder. Çok şiddetli fırtınalar -200 nT ile -350 nT aralığında yer alır ve sistem üzerindeki etkileri oldukça büyüktür. Dst değeri -350 nT'nin altına düştüğünde, bu tür olaylar büyük fırtına (great storm) olarak adlandırılır ve bunlar en uç jeomanyetik fırtına örneklerini oluşturur. Dst indeksi, Dünya'nın Ekvator bölgesinde ölçülen manyetik alanın yatay bileşenindeki azalmayı temsil eder (Heilig 2018) ve bu azalma Dünya'nın çevresinde oluşan halka akımının gücüyle doğrudan ilişkilidir (Temerin ve Li 2006; Hanslmeier 2010). Başka bir deyişle, Dst indeksi ne kadar negatife kayarsa, halka akımının manyetosfer üzerindeki etkisi o kadar büyük olur. Bu da jeomanyetik fırtınaların şiddetini değerlendirmek açısından Dst indeksi son derece kritik bir parametre haline getirir (Sugiura 1963; 1991).

2.4. Güneş ve Jeomanyetik Aktivite İndekslerinin Doğrusallık Durumları ve Kaotik Özellikleri

Güneş aktivitesi ve jeomanyetik indeksler arasındaki ilişki, özellikle SSN, CME'ler ve güneş rüzgarı parametreleri ile jeomanyetik aktivite indeksleri (Kp, Dst, aa) arasındaki korelasyonlar üzerinden incelenmiştir (Echer vd. 2004; Kılıçık vd. 2010; Du 2011). Bu ilişki, güneş çevriminin farklı evrelerinde değişiklik göstermektedir. Cliver vd. (1996), SSN ile jeomanyetik aktivite arasında güçlü bir ilişki olduğunu göstermiştir. Özellikle güneş çevriminin maksimum dönemlerinde ilişki daha belirgin hale

gelmektedir. Güneş leke sayılarındaki artış, Güneş'in manyetik aktivitesinin yoğunlaştığını ve bunun sonucunda jeomanyetik fırtınaların daha sık ve şiddetli hale geldiğini göstermektedir (Richardson ve Cane 2012). Cane vd. (2000), CME'ler ile bu olayların uzayda gözlemlenen karşılıkları olan interplanetary ejecta (IP ejecta) ve jeomanyetik fırtınalar arasındaki ilişkiyi incelemiştir; IP ejecta'ların, özellikle manyetik alanı güçlü bir güney yönlü dikey manyetik alan bileşeni ($B_z < 0$) içerdiğinde, şiddetli jeomanyetik fırtınaların oldukça tetikleyicileri olduğunu göstermiştir. Echer vd. (2004), SSN ile Dst indeksi arasındaki uzun dönemli korelasyonları incelemiştir ve iki veri seti arasındaki ilişkinin doğrusal olmadığını, çevrimsel değişimlere bağlı olarak farklılık gösterdiğini belirtmiştir. Daha yakın tarihli bir çalışma olan Kilpua vd. (2017), CME'lerin manyetik alanlarının jeomanyetik fırtınaların şiddeti üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde analiz etmiş ve bu olayların özellikle çevrim maksimumunda daha etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca, Gopalswamy vd. (2015), CME hızlarının ve manyetik alanlarının, özellikle şiddetli jeomanyetik fırtınaların oluşumunda belirleyici olduğunu rapor etmiştir. Borovsky ve Denton (2006), CME kaynaklı jeomanyetik fırtınalar ile CIR (Corotating Interaction Region - Güneş'in rotasyonu nedeniyle, hızlı ve yavaş güneş rüzgarlarının çarpışmasıyla oluşan etkileşim bölgeleri) kaynaklı fırtınalar arasındaki farkları analiz etmiş ve güneş rüzgarı parametrelerinin jeomanyetik aktivite üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmalarında, CME kaynaklı jeomanyetik fırtınaların genellikle daha kısa süreli ancak daha yoğun güneş rüzgarı parametrelerine sahip olduğu, bu fırtınaların daha güçlü halka akımları, daha derin Dst sapmaları ve sıklıkla güneş enerji parçacıkları (SEPs) ile şiddetli auroral aktivite ile ilişkili olduğunu göstermişlerdir. Buna karşılık, CIR kaynaklı fırtınaların daha uzun süreli, yüksek sıcaklıklı plazma yapıları ve daha güçlü elektron akıları ile karakterize olduğunu ve özellikle manyetosferik iç kuşakta daha kalıcı etkiler bırakarak uzay tabanlı teknolojik sistemler için ciddi risk oluşturduğunu belirtmişlerdir. Yermolaev vd. (2010), CME, HSS, CIR aktivitelerinin jeomanyetik aktivite üzerindeki etkilerini karşılaştırmış ve bu olayların farklı jeomanyetik indekslerle olan ilişkilerini detaylandırmıştır.

Güneş çevrimi ile jeomanyetik aktivite indeksleri arasındaki uzun dönemli korelasyonlar, özellikle çevrimin maksimum ve minimum dönemlerinde farklılık göstermektedir. Stamper vd. (1999), SSN ile aa indeksi arasındaki uzun dönemli korelasyonları incelemiştir ve bu ilişkinin güneş çevriminin farklı evrelerinde farklı olduğunu göstermiştir. Çevrimin maksimumunda, SSN'deki artış, aa indeksinde de belirgin bir artışa neden olmaktadır. Ancak, çevrim minimumunda bu ilişki zayıflamaktadır. Gonzalez vd. (2002), CME'lerin jeomanyetik aktivite üzerindeki etkilerini incelemiştir; özellikle çevrim maksimumlarında ortaya çıkan hızlı CME'lerin uzaydaki karşılıkları olan interplanetary coronal mass ejections (ICME) yapılarının, şiddetli jeomanyetik fırtınaların başlıca tetikleyicisi olduğunu göstermiştir. Kilpua vd. (2015), CME'lerin hızlarının ve manyetik alanlarının, jeomanyetik fırtınaların şiddeti üzerindeki etkilerini analiz etmiş ve bu parametrelerin Dst ve Kp indeksleri ile güçlü bir şekilde ilişkili olduğunu belirtmiştir. Verbanac vd. (2011), güneş çevrimi ile jeomanyetik aktivite arasındaki ilişkiyi analiz etmiş ve bu ilişkinin çevrimsel değişimlere bağlı olarak farklılık gösterdiğini belirtmiştir.

Güneş aktivite indekslerinin kaotik özellikleri, zaman serisi analizleri ve kaos teorisi kullanılarak literatürde kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Örneğin, Letellier vd. (2006), SSN'nin kaotik bir dinamik sergilediğini ve bu davranışın Güneş'in manyetik

çevrimiyle ilişkili olduğunu göstermiştir. Aynı çalışmada, SSN zaman serilerinde kaotik bir yapı gözlemlenmiş ve Lyapunov Üssü metoduyla bu serilerin hassas başlangıç koşullarına duyarlılığı ortaya konmuştur. Benzer şekilde, Spiegel (2009), Güneş çevriminin kaotik doğasını analiz etmiş ve çevrimlerin doğrusal olmayan bir sistemin sonucu olduğunu öne sürmüştür. Zhou vd. (2014) ise SSN'nin kaotik özelliklerini analiz etmek için Lyapunov Üssü metodunu kullanmış ve zaman serilerinin düşük boyutlu kaos sergilediğini ve fraktal özellikler taşıdığını doğrulamıştır. Sello (2001), SSN'nin Hurst üssünü hesaplayarak bu serilerin uzun dönemli bellek (bir zaman serisinin geçmişteki değerlerinin, çok uzun vadeli gelecekteki değerler üzerinde hala etkili olması durumu) özellikleri taşıdığını ve kaotik bir yapıya sahip olduğunu belirtmiştir. Daha yeni bir çalışma olan Chowdhury vd. (2021), entropi tabanlı yöntemler kullanarak SSN verisinin doğrusal olmayan bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir.

Jeomanyetik aktivite indekslerinin kaotik özellikleri de literatürde benzer yöntemlerle incelenmiştir. Örneğin, Yu vd. (2007), Dst indeks zaman serisi analizinde verinin kaotik davranışlar sergilediğini ve bu davranışların manyetosferdeki halka akımı ile ilişkili olduğunu belirtmiştir. Bu çalışmada, "Chaos Game Representation" (CGR) yöntemi kullanılarak Dst indeksin multifraktal özellikleri incelenmiş ve jeomanyetik fırtına olaylarının tahmini için bir algoritma geliştirilmiştir. Ogunjo vd. (2021), Dst indeksin dinamik karmaşıklıklarını analiz ederek bu indeksin jeomanyetik aktivite sırasında manyetosferdeki süreçlerle ilişkili kaotik özellikler sergilediğini ortaya koymuştur. Bu analizler, jeomanyetik aktivite indekslerinin doğrusal olmayan özelliklerini anlamamanın, uzay havası tahminlerinde kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Güneş ve jeomanyetik aktivite indekslerinin kaotik doğasını anlamak için Lyapunov üsleri, zaman gecikmeli yeniden yapılandırma ve Hurst üssü gibi yöntemler kullanılmakta ve bu çalışmalar hem Güneş'in manyetik çevrimi hem de jeomanyetik süreçlerin dinamiklerini anlamada önemli bir temel sağlamaktadır.

Güneş ve jeomanyetik aktivite ve bunlara bağlı aktivite indeksleri arasında bir ilişki olduğu gerçeği açıktır. Jeomanyetik aktivite indekslerinin birbirleriyle olan ilişkilerine dair çalışmalar sınırlı olsa da özellikle aa ve Dst indeksleri ile Güneş'te meydana gelen olaylar arasındaki ilişkiler üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır (Akasofu 1981; Gorney 1990; Gonzales vd. 1999; Richardson vd. 2006; Zerbo vd. 2013; Dremukhina vd. 2018; Chapman vd. 2020). Dünya çevresi için güneş çevrimine bağlı değişkenlik incelenmiş, güneş lekeleri ve jeomanyetik aktivite ele alınarak uzun dönemli korelasyon analiz çalışmaları yapılmıştır (Cliver vd. 1996; Kishcha vd. 1999; Stamper vd. 1999; Richardson vd. 2002b; Wang vd. 2000; Echer vd. 2004; Verbanac 2010; Kilpua vd. 2015; Samsonov vd. 2019; Somaïla vd. 2022). Buna ek olarak, gelecekteki güneş çevrimleri için potansiyel tahmin yöntemleri ve sonuçlarını içeren fazlasıyla çalışma mevcuttur. (Schatten ve Pesnell 1993; Schatten vd. 1996; Hathaway vd. 1999; Sello 2001; Pesnell 2008; Kılçık vd. 2009; Wang vd. 2009; Petrovay 2010; Pesnell 2016; Sarp vd. 2018; Pesnell ve Schatten 2018; Chowdhury vd. 2021). Güneş aktivitesi tahmin çalışmalarında, çeşitli veriler ve parametrelerin kaotik (doğrusal olmayan) davranışı incelenmiş ve kaotik dinamiklere dair önemli kanıtlar sunulmuştur (Jevtic vd. 2001; Letellier vd. 2006; Spiegel 2008).

2.5. Güneş ve Jeomanyetik Aktivite İndekslerinin Tahminleri

2.5.1. Güneş Aktivite İndekslerinin Tahmini

Güneş aktivitesinin tahmin edilmesi için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Öncül yöntemler, güneş çevriminin erken veya geç aşamalarında gözlenen parametreleri (jeomanyetik aktivite, polar manyetik alan, SSA vb.) kullanarak gelecekteki maksimum aktivite seviyesini tahmin etmeye çalışır (Schatten ve Pesnell 1993; Schatten vd. 1996; Kane 2007; Pesnell 2016; Pesnell ve Schatten 2018).

Zaman serisi modelleri, güneş aktivite indekslerinin tahmininde yaygın olarak kullanılmaktadır (Xu ve Zhang 2008; Abdel-Rahman ve Marzouk 2018; Wu ve Qin 2021). Doğrusal zaman serisi modelleri, ARIMA/SARIMA ve benzeri teknikler kullanarak indekslerin gelecekteki değerlerini tahmin etmeye çalışır (Box vd. 2015). Ancak güneş aktivitesinin doğrusal olmayan doğası nedeniyle, kaotik zaman serisi analizi daha etkili sonuçlar vermektedir. Simplex Projection gibi doğrusal olmayan yöntemler, güneş çevrimlerinin karmaşık dinamiklerini modellemede başarılı olmuştur (Sugihara ve May 1990; Sello 2001; Aguirre vd. 2008; Kılçık vd. 2009; Sarp vd. 2018).

Spektral yöntemler ve dalgacık analizi, güneş aktivitesindeki periyodiklikleri belirlemek için kullanılmaktadır (Le ve Wang 2003; Katsavrias vd. 2012; Frick vd. 2020; Velloso vd. 2023). Fourier analizi ve dalgacık dönüşümü, SSN verisindeki çevrimsel/döngüsel davranışları ortaya çıkarmada etkilidir (Krivova ve Solanki 2002; Barnhart ve Eichinger 2011; Petrovay 2020). Bu yöntemler, farklı zaman ölçeklerindeki periyodiklikleri belirleyerek tahmin modellerinin doğruluğunu artırmaktadır.

Yapay zeka teknikleri, son yıllarda güneş aktivite indekslerinin tahmininde önemli ilerlemeler sağlamıştır. Örneğin, yapay sinir ağları, güneş çevrimlerinin tahmininde başarıyla uygulanmıştır (Conway vd. 1998; Covas 2017; Covas vd. 2019; Pala ve Atici 2019; Camporeale 2019; Upendran vd. 2020). Destek vektör makineleri ve bulanık mantık sistemleri de güneş aktivitesi tahmininde kullanılan diğer yapay zeka teknikleridir (Huang vd. 2009; Attia vd. 2013; Nandy 2021).

Güneş patlamalarının tahmini, uzay hava durumu uygulamaları için büyük önem taşımaktadır. Bayesian yaklaşımlar ve makine öğrenimi algoritmaları, güneş patlamalarının olasılığını tahmin etmek için kullanılmaktadır (Wheatland 2004; Bobra ve Couvidat 2015; Florios vd. 2018; Nishizuka vd. 2018; Chen vd. 2019). Solar Dynamics Observatory (SDO; Pesnell vd. 2012)/The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI; Scherrer vd. 2012) vektör manyetik alan verileri ve SHARP parametreleri (Space weather HMI Active Region Patch - aktif bölgelerdeki manyetik alan yapısını, akımı ve enerji birikimini niceliksel olarak tanımlayan; örneğin toplam manyetik akı, akım helisitesi ve serbest manyetik enerji gibi 20'den fazla fiziksel parametreyi içeren göstergeler), güneş patlaması öncülerinin belirlenmesinde etkili olmaktadır. Abduallah vd. (2023), güneş patlamalarının tahmini için bir transformer tabanlı çerçeve önererek, bu yöntemin operasyonel tahminlerdeki etkinliğini göstermiştir.

Güneş manyetik alanının uzun vadeli modellemesi, güneş aktivitesinin tahmininde önemli bir rol oynamaktadır (Jiang vd. 2011; Henney vd. 2012; Bhowmik ve Nandy 2018). Manyetik akı taşınım modelleri, F10.7 gibi güneş radyo akısı

parametrelerinin tahmininde kullanılmaktadır. Bu modeller, güneş yüzeyindeki manyetik alanın evrimini simüle ederek gelecekteki aktivite seviyelerini tahmin etmeye çalışır.

Güneş aktivitesinin uzamsal-zamansal tahmini, güneş lekesi ve kelebek diyagramının gelecekteki evrimini modellemek için kullanılmaktadır (Jiang vd. 2011; Covas 2017; Zhao vd. 2025). Bu yaklaşımlar, güneş aktivitesinin hem zamansal hem de uzamsal dağılımını tahmin etmeye çalışarak daha kapsamlı tahminler sağlar. Zhao vd. (2025), güneş leke sayısı tahmininde Temporal Convolutional Network (TCN) tabanlı bir model geliştirerek, geleneksel Long-Short Term Memory (LSTM) modellerine göre daha yüksek doğruluk elde etmişlerdir.

Kaotik dinamiklerin analizi, güneş aktivitesinin doğrusal olmayan doğasını anlamak için önemlidir (Sugihara ve May 1990; Sello 2001; Ogunjo vd. 2017). Tekrarlama niceliksel analizi gibi teknikler, Güneş'in kaotik özellikleri incelemek için kullanılmaktadır. Bu analizler, güneş aktivitesinin deterministik kaos sergilediğini ve doğrusal olmayan yöntemlerle daha iyi modellenebileceğini göstermektedir.

2.5.2. Jeomanyetik Aktivite İndekslerin Tahmini

CME'lerin Dünya'ya varış zamanının tahmini, jeomanyetik fırtınaların tahmin edilmesinde kritik öneme sahiptir. Ampirik modeller ve makine öğrenimi teknikleri, CME'lerin yayılma dinamiklerini modelleyerek varış zamanlarını tahmin etmektedir (Gopalswamy vd. 2013; Möstl vd. 2014; Mays vd. 2015; Liu vd. 2018; Wang vd. 2019). Ensemble modelleme yaklaşımları, CME tahminlerinin güvenilirliğini artırmak için kullanılmaktadır.

Jeomanyetik aktivite indekslerinin (Kp, Dst, AE) tahmini için güneş rüzgarı parametreleri ve gezegenlerarası manyetik alan (IMF) verileri kullanılmaktadır. Yapay sinir ağları ve hibrit modeller, bu indekslerin kısa ve orta vadeli tahminlerinde etkili sonuçlar vermektedir (Wu ve Lundstedt 1996; Boberg vd. 2000; Gleisner ve Lundstedt 2001; Wing vd. 2005; Pallochia vd. 2006; Wei vd. 2007; Newell vd. 2007; Bala ve Reiff 2012; Ji vd. 2012; Lazzús vd. 2017; Wintoft 2017; Podladchikova vd. 2018; Tan vd. 2018; Gruet vd. 2018). aa indeksi, uzun vadeli güneş-jeomanyetik aktivite ilişkilerinin incelenmesinde kullanılmakta ve çeşitli istatistiksel ve makine öğrenimi teknikleriyle tahmin edilmektedir (Clilverd vd. 2006; Du 2011). ap ve Ap indeksleri ise uydu yörünge hesaplamaları ve atmosferik sürüklenme etkilerinin tahmin edilmesi için önemli olup, tekrarlayan sinir ağları ve regresyon modelleriyle tahmin edilmektedir (Menvielle ve Berthelier 1991; Joselyn 1995). Güneş rüzgarı-manyetosfer etkileşim fonksiyonları, tüm bu jeomanyetik indekslerin tahmininde önemli bir rol oynamaktadır.

Derin öğrenme yöntemleri, özellikle LSTM ağları, Kp ve Dst indekslerinin kısa vadeli tahminlerinde yüksek doğruluk sağlamaktadır (Tan vd. 2018; Gruet vd. 2018; Sexton vd. 2019; Chakraborty ve Morley 2020). Bu modeller, güneş rüzgarı parametrelerinin (örneğin, hız, plazma yoğunluğu, manyetik alan büyüklüğü ve özellikle Bz bileşeni gibi) zamansal değişimlerini dikkate alarak jeomanyetik fırtınaların başlangıcını ve şiddetini tahmin edebilmektedir.

Jeomanyetik fırtınaların farklı bileşenlerinin belirlenmesi ve modellenmesi, tahmin doğruluğunu artırmak için önemlidir (Alberti vd. 2016). Manyetosferik ve yer gözlemlerindeki farklı manyetik alan katkılarının tanımlanması, jeomanyetik fırtınaların daha iyi anlaşılmasını sağlar. Mevsimsel etkiler de jeomanyetik aktivitenin tahmininde dikkate alınması gereken faktörlerdir (Hejda ve Bochníček 2005). Abdullah vd. (2022), güneş rüzgarı parametrelerini kullanarak Kp indeksinin kısa vadeli tahmini için transformer tabanlı bir model geliştirmiştir. Bunu izleyen çalışmada, Abdullah vd. (2024), Kp ve diğer jeomanyetik indekslerin tahmininde yalnızca güneş rüzgarı verilerini değil, aynı zamanda SDO (Solar Dynamics Observatory) uydusunun HMI (Helioseismic and Magnetic Imager) ve AIA (Atmospheric Imaging Assembly) enstrümanlarından elde edilen güneş görüntülerini de entegre ederek, güneş aktivitesinin hem fiziksel hem görsel özelliklerini dikkate alan daha kapsamlı bir model sunmuşlardır.

2.5.3. Güneş ve Jeomanyetik Aktivite İndekslerinin Tahminlerinde Doğrusal Olmayan/Kaotik Yöntemlerin Önemi

Güneş ve jeomanyetik aktivite indekslerinin tahmininde kullanılan yöntemler arasında, doğrusal olmayan ve kaotik yaklaşımlar özel bir öneme sahiptir. Geleneksel doğrusal tahmin yöntemleri, bu indekslerin karmaşık davranışlarını tam olarak modellemekte yetersiz kalmaktadır. Güneş aktivitesi ve jeomanyetik indeksler, basit periyodik davranışların ötesinde, çoklu zaman ölçeklerinde etkileşimler, ani değişimler ve tahmin edilmesi zor dalgalanmalar göstermektedir (Mundt vd. 1991; Consolini vd. 1996; Pavlos vd. 1999; Donner vd. 2019; Alberti vd. 2020; Alberti vd. 2021). Bu karmaşık davranışlar, doğrusal olmayan dinamik sistemlerin temel özelliklerini yansıtmakta ve kaos teorisi çerçevesinde daha iyi anlaşılmaktadır.

Güneş ve jeomanyetik aktivite indeksleri belirli bir düzeni/doğrusallığı takip ediyor gibi gözükse de mevcut olan düzenin içinde bir düzensizlik/kaos vardır. Bu durum, “deterministik kaos” ile açıklanır. Bu nedenle, dinamik ve kaotik davranışlar sergileyen güneş ve jeomanyetik aktivite için, doğrusallık durumu üzerinden ilgili indekslerin tahminine gitme çabası mantıklı gözükmemektedir. Doğrusal olmayan yaklaşım (kaotik yaklaşım) bu tarz sistemlere yönelik uygulamalarda yeteneklerini kanıtlamıştır (Sugihara 1994; Maye vd. 2007; Tsonis vd. 2015) ve ampirik dinamik modelleme (EDM) adı verilen yeni bir yöntem ve buna bağlı Simplex Projection yaklaşımı bu tür araştırmalarda önemli ilerlemeler kaydetmiştir. (Sugihara vd. 2012; Deyle vd. 2013; Ye vd. 2015). Buradan yola çıkarak, güneş ve jeomanyetik aktivite indeksleri için doğrusal olmama/kaotiklik derecelerini ortaya koyup, doğrusal olmayan yaklaşımlar üzerinden tahminler üretmek diğer yöntemlere kıyasla daha uygun gözükmemektedir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Tez Çalışmasında Kullanılan Veriler

Bu tez çalışmasında, seçilen güneş ve jeomanyetik aktivite indekslerinin doğrusal davranış sergileyip sergilemedikleri birden fazla metotla (Hurst üssü, Lyapunov üssü ve Korelasyon Boyutu) değerlendirilmiş ve bu veriler arasındaki nedensellik ilişkileri Yakınsak Çapraz Eşleme (Convergent Cross Mapping - CCM) yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Sonrasında, doğrusal olmayan sistemlerin analizi ve tahmininde kullanılan Simplex Projection metoduyla indekslerin uzun vadeli tahminleri üretilmiştir. Bu amaçla hem güneş hem de jeomanyetik aktivite için ikişer indeks seçilmiştir: güneş aktivitesi için Güneş Leke Sayıları (SSN) ve 10.7 cm'deki Güneş Radyo Akısı (F10.7), jeomanyetik aktivite için Dst indeks (Disturbance Storm Time Index) ve Jeomanyetik aa indeks. İlgili indekslerden üretilen tahminler, Güneş Çevrimi 25'in geri kalan kısmı ve sonraki Güneş Çevrimi 26 için aylık veriler üzerinden oluşturulmuştur. Çalışmada kullanılan veri setleri arasında 13-aylık düzleştirilmiş SSN verisi sadece geçmiş çevrimlerin tahminlerini (postcast olarak isimlendirilir) üretmek için kullanılmıştır. Diğer tüm veri setleri ise doğrusal olmayan analizler, nedensellik analizi, postcast'ler ve tahminler üretmek için kullanılmıştır. Veri setlerinin birçoğunun aylık değerlerini elde etmek amacıyla, her ilgili ay için mevcut olan saatlik/günlük değerlerin toplamının ortalaması alınarak aylık değerler hesaplanmıştır. Kullanılan veri setleri aşağıda kısaca tanımlanmıştır:

- **Güneş Leke Sayıları (SSN)**
 - *13-aylık düzleştirilmiş (smoothed) aylık toplam SSN:* Günlük değerlerden elde edilen aylık ortalama toplam güneş leke sayılarının 13 aylık yürüyen ortalama alınmış versiyonudur ve World Data Center SILSO'dan (SILSO, World Data Center - Sunspot Number and Long-term Solar Observations, Royal Observatory of Belgium, on-line Sunspot Number catalog: <http://www.sidc.be/SILSO/>, 1749-2024) direkt olarak alınmıştır. Veri seti Temmuz 1749'dan Aralık 2024'e kadar olan zaman aralığını kapsamaktadır.
 - *Aylık ortalama toplam SSN:* Günlük güneş leke sayılarının toplamının aylık ortalama versiyonudur ve World Data Center SILSO'dan direkt olarak alınmış olup, Ocak 1749'dan Aralık 2024'e kadar olan zaman aralığını kapsar.
- **F10.7**
 - *Aylık ortalama F10.7:* Günlük 10.7 cm'deki güneş radyo akısının aylık ortalama alınmış versiyonudur. Günlük veriler NASA/OMNIWEB'ten (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>) alınmış olup, bu verilerden faydalanılarak aylık ortalama değerler tarafımızca hesaplanmıştır. Aralık 1963'ten Mart 2025'e kadar olan zaman aralığını kapsar.
- **Dst İndeksi**
 - *Aylık ortalama Dst indeksi:* Birer saatlik Dst verilerinden günlük değerlerin ve günlük değerlerden aylık ortalamanın elde edildiği versiyondur. Birer saatlik veriler WDC/Kyoto'dan (World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>) alınmış olup,

günlük ve aylık değerler tarafımızca hesaplanmıştır. Veriler, Ocak 1957'den Mart 2025'e kadar olan zaman aralığını kapsar.

- **aa İndeksi**

- *Aylık ortalama aa indeksi*: Üçer saatlik aa verilerinden günlük değerlerin ve günlük değerlerden aylık ortalamasının elde edildiği versiyondur. Üçer saatlik veriler ISGI'den (International Service of Geomagnetic Indices, <https://isgi.unistra.fr/>) alınmış olup, günlük ve aylık değerler tarafımızca hesaplanmıştır. Veriler, Ocak 1868'den Mart 2025'e kadar olan zaman aralığını kapsar.

3.2. Doğrusal Olmayan Yaklaşımlar ve Kaos Analizleri

3.2.1. Hurst Üssü

Hurst üssü, ilk olarak İngiliz hidroloji mühendisi Harold Edwin Hurst tarafından tanımlanmıştır. Hurst (1951), Nil Nehri'nin taşkınlarını incelemek amacıyla yaptığı uzun vadeli gözlemler sırasında, su rezervuarlarının kapasitesini optimize etmeye yönelik çalışmalarında bu kavramı ortaya koymuştur. Zaman serilerinde sıradan rastgele trend modellerinin açıklayamadığı uzun dönemli bellek (long-term memory) ya da kalıcılık (persistence) davranışını gözlemlemiş ve bu gözlemi nicel olarak ifade etmek için Hurst üssü olarak bilinen ölçütü geliştirmiştir (Hurst 1951).

Hurst üssü, bir zaman serisinin gelecekteki değerlerinin, geçmiş değerlere olan bağımlılık derecesini ölçer. Diğer bir deyişle, serinin kendi kendine benzerlik (self-similarity) ve fraktal özelliklerini tanımlar. Bu üs, 0 ile 1 arasında bir değer alır:

- $H < 0.5$: Seride negatif otokorelasyon vardır. Artışları genellikle düşüşler, düşüşleri ise artışlar takip eder. Bu durum, serinin ortalama dönüşlü (mean-reverting) bir yapıya sahip olduğunu gösterir; yani gelecekteki değerler, geçmişin tersi yönünde hareket etme eğilimindedir.
- $H = 0.5$: Seri belleksiz bir yapıya sahiptir ve beyaz gürültü (white noise) davranışı sergiler. Bu durumda geçmiş değerler, gelecekteki değerler üzerinde hiçbir etkiye sahip değildir.
- $H > 0.5$: Seride pozitif otokorelasyon gözlenir. Artış eğilimindeki bir seri büyük olasılıkla artmaya, azalan bir seri ise azalmaya devam eder. Bu yapı, serinin kalıcı (persistent) bir davranış gösterdiğini ve gelecekteki değerlerin/yapıların geçmişe benzer eğilimde olacağını ifade eder.

Hurst üssü hesabında, genellikle Rescaled Range (R/S) Analizi kullanılır. Zaman serisi $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ olmak üzere, serinin ortalaması şu şekilde hesaplanır:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3.1)$$

İlk adım, serinin genel düzeyini temsil eden merkez değerini elde etmek amacıyla gerçekleştirilir. Serinin ortalaması ($\bar{x}$), daha sonra yapılacak merkezleme ve

varyans hesaplamaları için referans noktası olarak kullanılır. Burada N serideki toplam veri sayısını temsil eder.

Sonrasında her bir veri noktası (x_i) ortalamadan ($\bar{x}$) çıkarılarak merkezlenmiş veri serisi (Y_i) elde edilir:

$$Y_i = x_i - \bar{x} \quad (3.2)$$

Bu işlem, serideki her bir gözlemin ortalamaya göre ne kadar sapma gösterdiğini belirler. Bu merkezleme, serinin sıfır ortalama etrafındaki dalgalanmalarını değerlendirmeye olanak tanır.

Merkezlenmiş serinin birikimli toplamı alınarak, her bir zamandaki toplam sapma miktarı Z_t (yani, merkeze göre sapmaların t zamana kadar kümülatif toplamı) hesaplanır:

$$Z_t = \sum_{i=1}^t Y_i \quad (3.3)$$

Bu adım, serinin zaman içinde nasıl kümülatif/birikimsel bir davranış gösterdiğini (yani sapmaların zamanla nasıl üst üste eklenerek kalıcı etkiler oluşturduğu) ortaya koyar. Özellikle trend benzeri yapıların ve kalıcılığın belirlenmesinde bu kümülatif toplam önemli bir göstergedir.

Kümülatif sapma serisinin maksimum ve minimum değerleri arasındaki fark alınarak aralık değeri elde edilir:

$$R(N) = \max(Z_1, Z_2, \dots, Z_N) - \min(Z_1, Z_2, \dots, Z_N) \quad (3.4)$$

Bu ifade, serinin toplamda ne kadar yukarı-aşağı sapma yaptığını, yani en büyük dalgalanma genişliğini temsil eder. Bu büyüklük, varyansa oranlandığında serinin istikrarı hakkında bilgi verir.

Merkezlenmiş serinin standart sapması ($S(N)$) aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$S(N) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.5)$$

Standart sapma, serinin ortalama etrafındaki yayılma derecesini ifade eder. R/S analizinde bu değer normalleştirici rolü vardır; çünkü serinin dalgalanma aralığını, gözlemler arasındaki tipik sapmaya oranlamak gerekir.

Serideki toplam dalgalanmanın, $R(N)$, tipik sapmaya, $S(N)$, oranı şu şekilde tanımlanır:

$$\frac{R(N)}{S(N)} \quad (3.6)$$

Bu oran, her pencere boyutu için ayrı ayrı hesaplanarak, serinin ölçeğe bağlı davranışı analiz edilir. Bu davranış, serinin fraktal veya kendine benzer bir yapıya sahip olup olmadığını ortaya koyar.

Yukarıdaki oran, farklı uzunluktaki alt seriler (pencereler) için hesaplandığında, şu biçimde logaritmik bir ilişki gözlenir:

$$\frac{R(n)}{S(n)} \sim n^H \rightarrow \log \left(\frac{R(n)}{S(n)} \right) = H \cdot \log(n) + C \quad (3.7)$$

Bu ifade, log-log ekseninde çizildiğinde doğrusal bir ilişki verir ve bu doğrunun eğimi Hurst üssü (H) olarak tanımlanır. Buradaki n, serinin tamamı yerine kullanılan alt pencere (alt seri) uzunluğunu, yani ölçek seviyesini temsil eder. Başlangıçta tanımlanan N, serinin toplam uzunluğuyken; n, bu seri içinde artan büyüklükte seçilen parçalardır. Her bir n değeri için R(n)/S(n) oranı hesaplanır ve bu oranların logaritmaları çizilerek elde edilen doğrunun eğimi H ile ifade edilir. Bu işlem, serinin ölçek bağımlı davranışını analiz etmeye ve uzun dönemli bağımlılık özelliklerini belirlemeye olanak tanır.

3.2.2. Lyapunov Üssü

Lyapunov üssü, ilk olarak Rus matematikçi Aleksandr Mihayloviç Lyapunov tarafından 1892 yılında, diferansiyel denklemlerle tanımlanan sistemlerin kararlılığını incelemek amacıyla geliştirilmiştir. Lyapunov, fiziksel ve mekanik sistemlerde denge noktalarının zamanla nasıl evrildiğini belirlemek için geliştirdiği bu ölçütü, özellikle küçük başlangıç farklarının sistemin uzun dönemli davranışına etkisini ortaya koymuştur (Lyapunov 1892). Daha sonra, bu yaklaşım kaos teorisinin gelişmesiyle birlikte zaman serisi analizine uyarlanmış ve dinamik sistemlerin deterministik kaotik özelliklerini sayısal olarak nitelemek için yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Wolf vd. 1985).

Lyapunov üssü (λ), özellikle negatif, sıfıra yakın ya da pozitif olması durumunda, sistemin zaman içindeki davranışı hakkında önemli bilgiler sağlar. Bu üs, birim zamanda iki yakın yörünge arasındaki ortalama logaritmik ayrışma oranını temsil eder ve şu şekilde yorumlanabilir:

- $\lambda < 0$: Sistem karardır ve yörüngeler zamanla birbirine yaklaşır. Bu durum sabit nokta (fixed point) davranışına işaret eder ve sistemin tahmin edilebilirliğinin yüksek olduğunu gösterir. Ancak bu tür sistemlerde dinamik çeşitlilik sınırlı olduğundan tahmin modelleri genellikle basittir.
- $\lambda = 0$: Sistem nötr bir denge durumundadır ya da periyodik davranış gösterir. Bu durumda yörüngeler sabit kalabilir veya periyodik olarak tekrarlanan bir döngüye girer. Kaotik yapı bulunmaz; sistem tahmin edilebilir ve karmaşıklık düzeyi düşüktür.
- $\lambda > 0$: Sistem deterministik kaotik davranış sergilemektedir. Başlangıç koşullarına olan yüksek duyarlılık nedeniyle, birbirine çok yakın başlangıç noktalarından çıkan yörüngeler zamanla üstel olarak ayrışır. Bu durum, sistemin

tahmin edilemezliği ve karmaşıklığını gösterir. Ancak bu tip sistemler deterministik bir yapıya sahip olduklarından, uygun yöntemlerle (örneğin, bu tez çalışmasında kullanılan Simplex Projection yöntemi gibi) tahminler üretilmesi mümkündür.

λ 'nın değeri, zaman serilerinin altında yatan dinamik yapıyı belirlemek açısından önemli bir temel sağlar. Özellikle pozitif Lyapunov üssü ($\lambda > 0$), deterministik kaosu en belirgin göstergesi olarak kabul edilir.

Bu tez çalışmasında, zaman serilerinden en büyük Lyapunov üssünün (Largest Lyapunov Exponent, LLE) hesaplanmasında Rosenstein yöntemi kullanılmıştır (Rosenstein vd. 1993). Bu yöntem, zaman serisinin gecikmeli vektörlerle gömülmesini ve bu gömülü uzayda en yakın komşularla olan uzaklıkların zamanla logaritmik olarak nasıl değiştiğini analiz eder.

İlk olarak zaman serisi $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ gömülü uzaya dönüştürülür:

$$X_i = [x_i, x_{i+\tau}, x_{i+2\tau}, \dots, x_{i+(E-1)\tau}] \quad (3.8)$$

Burada, E gömme boyutu (embedding dimension), τ zaman gecikmesi (time delay) olarak tanımlanır.

Daha sonra her X_i için en yakın komşu $X_{j(i)}$ bulunur. Bu noktadan itibaren, her i için başlangıçta aralarındaki uzaklık:

$$d_0(i) = |X_i - X_{j(i)}| \quad (3.9)$$

Zamanla bu iki yörünge arasındaki uzaklık:

$$d_t(i) = |X_{i+t} - X_{j(i)+t}| \quad (3.10)$$

olarak ifade edilir. Bu uzaklıkların ortalamasının logaritması alınarak elde edilen $S(t)$ değeri:

$$S(t) = \left\langle \log \left(\frac{d_t(i)}{d_0(i)} \right) \right\rangle \quad (3.11)$$

şeklinde tanımlanır. Zamanla bu logaritmik uzaklığın doğrusal artışı şu şekilde modellenir:

$$S(t) \approx \lambda \cdot t + C \quad (3.12)$$

Bu ifade, $S(t)$ ile t arasında doğrusal bir ilişki varsayımı altında sistemin ayrışma hızını temsil eder ve eğim değeri en büyük Lyapunov üssü λ olarak tanımlanır. Elde edilen λ değeri, serinin başlangıç koşullarına duyarlılığını ve uzun vadeli tahmin edilebilirliği belirlemek açısından kritik bir göstergedir.

3.2.3. Korelasyon Boyutu

Korelasyon boyutu, ilk olarak Grassberger ve Procaccia (1983a, 1983b) tarafından, deterministik kaotik sistemlerin garip çekicilerinin (strange attractors) fraktal boyutunu tahmin etmek amacıyla geliştirilmiş bir ölçüttür. Bu yöntem, bir zaman serisinin temsil ettiği dinamik sistemin faz uzayındaki geometrik karmaşıklığını anlamaya yönelik olarak, faz uzayında yeniden yapılandırılmış vektörler arasındaki mesafeleri analiz eder. Korelasyon boyutu, özellikle sınırlı sayıda gözlem içeren zaman serilerinde, kaotik dinamikleri karakterize etmek ve deterministik yapıların varlığını ortaya koymak için Lyapunov üssü gibi daha karmaşık ölçütlere alternatif olarak sıklıkla tercih edilmektedir.

Bu yöntem, belirli bir yarıçap r altında bulunan vektör çiftlerinin olasılığı olan korelasyon toplamı $C(r)$ ile, bu toplamın yarıçap ile olan ilişkisini log-log düzlemde inceleyerek, sistemin fraktal boyutunu belirlemeyi amaçlar. Korelasyon boyutu D_2 , bu doğrusal ilişkinin eğimi olarak hesaplanır ve sistemin dinamiklerini sürdüren etkili serbestlik derecesini sayısal olarak ifade eder. Korelasyon boyutu, elde edilen değer büyükliğüne göre sistemin kaotik yapısı ve tahmin edilebilirliği hakkında aşağıdaki şekilde yorumlanır:

- $D_2 < 2$: Sistem düşük boyutlu deterministik kaotik bir yapıya sahiptir. Sistemin davranışları tahmin edilebilir ve dinamikleri az sayıda serbestlik derecesiyle (sistemin davranışını belirleyen bağımsız değişken sayısı; az olması, sistemi daha basit ve tahmin edilebilir kılar) açıklanabilir. Diğer bir ifadeyle, sistemin davranışları birkaç temel değişkenle açıklanabildiğinden, yapısı hem modellenilebilir hem de kısa vadede tahmin edilebilir bir karakter sergiler.
- $2 \leq D_2 \leq 5$: Sistem orta düzeyde karmaşıklık ve deterministik kaotik yapı içerir. Bu aralık, kaotik ancak belirli ölçüde tahmin edilebilir yapıları temsil eder.
- $D_2 > 5$: Sistem yüksek boyutlu, karmaşık ve muhtemelen stokastik bir davranış sergiler. Bu durumda sistemin tahmin edilebilirliği düşüktür ve doğrusal olmayan deterministik modeller bile sınırlı oranda bir başarı sağlar.

Bu sınıflandırma, zaman serisinin altta yatan yapısal karmaşıklığını anlamak ve uygun modelleri geliştirmek için bir temel sağlar. Özellikle, korelasyon boyutunun artan gömme boyutuna rağmen sabit bir değerde sabitlenmesi (plateau) durumu, sistemin gerçek fraktal boyutunun doğru şekilde yakalandığını ve deterministik kaotik yapının ortaya çıkarıldığını gösterir. Bunun yanında, tek bir optimal τ zaman gecikmesi (time delay) ve E gömme boyutu (embedding dimension) belirlenip hesaplama da yapılabilir.

Bu sınıflandırma, zaman serisinin altında yatan yapısal karmaşıklığını anlamak ve uygun modelleri geliştirmek için bir temel sağlar. Özellikle, korelasyon boyutunun artan gömme boyutuna rağmen sabit bir değerde kalması (plateau oluşumu), sistemin gerçek fraktal boyutunun doğru şekilde yakalandığını ve deterministik kaotik yapının varlığını gösterir.

Bu tez çalışmasında, korelasyon boyutu, seçilen güneş ve jeomanyetik aktivite indekslerinin fraktal yapısını incelemek, sistemlerin deterministik/kaotik olup

olmadığını değerlendirmek ve genel yapısal karmaşıklık düzeylerini belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Hesaplamalarda Grassberger-Procaccia algoritması uygulanmış ve log-log ölçeğinde $\log(C(r))$ ile $\log(r)$ arasındaki doğrusal ilişkiden D_2 değeri elde edilmiştir.

Zaman serisi $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ aşağıdaki gibi gömülü uzayda vektör haline getirilir:

$$x_i = [x_i, x_{i+\tau}, x_{i+2\tau}, \dots, x_{i+(E-1)\tau}] \quad (3.13)$$

Burada E gömme boyutu, τ ise zaman gecikmesidir.

Gömülü uzaydaki tüm nokta çiftleri için belirli bir r yarıçapı altında kaç tanesinin birbirine yakın olduğunu sayarak elde edilen korelasyon toplamı şu şekilde tanımlanır:

$$C(r) = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N [\Theta(r - ||x_i - x_j||)] \quad (3.14)$$

Burada Θ Heaviside adım fonksiyonunu, $||$ ise Öklidyen normu temsil eder.

Farklı r değerleri için $C(r)$ hesaplandıktan sonra logaritmik dönüşüm uygulanır ve aşağıdaki doğrusal ilişki elde edilir:

$$\log C(r) = D_2 \cdot \log r + c \quad (3.15)$$

Bu ifade, $\log C(r)$ ile $\log r$ arasında doğrusal bir ilişki varsayımı altında sistemin geometrik karmaşıklığını temsil eder ve doğrultunun eğimi korelasyon boyutu D_2 olarak tanımlanır. Literatürde eğimin sabit olduğu bölgenin dikkatli seçilmesi gerektiği vurgulanmıştır; çünkü hem çok küçük hem de çok büyük r değerleri, istatistiksel olarak güvenilir sonuçlar vermeyebilir (Theiler 1986). Sonuç olarak elde edilen D_2 değeri, zaman serisinin faz uzayındaki fraktal yapı ve boyutsal karmaşıklığı hakkında önemli bilgiler sunar.

3.3. Nedensellik Analizi

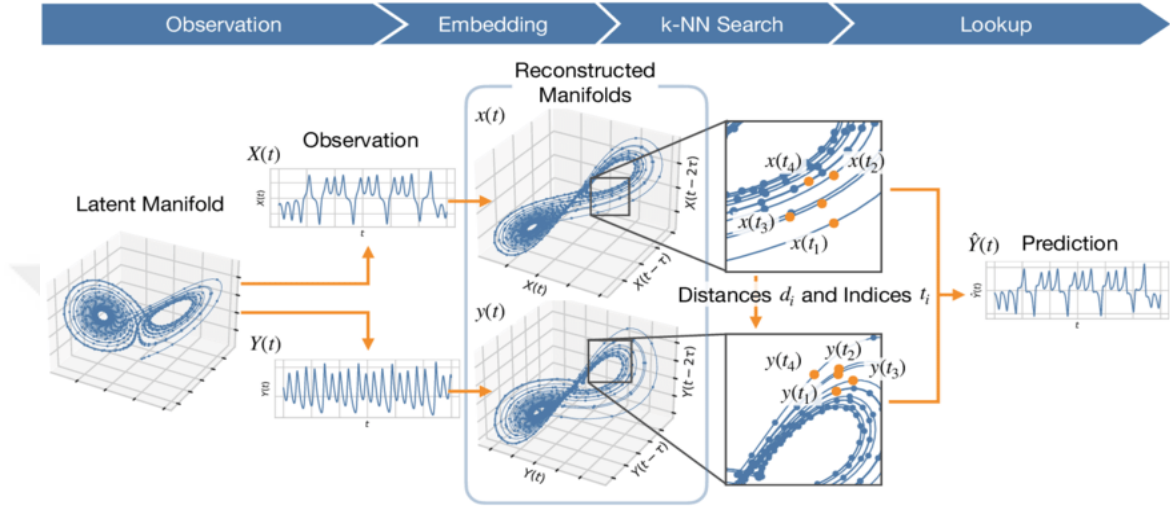
3.3.1. Yakınsak Çapraz Eşleme (Convergent Cross Mapping - CCM)

Yakınsak Çapraz Eşleme (CCM), Sugihara vd. (2012) tarafından geliştirilen ve iki zaman serisi arasındaki nedensel ilişkiyi ortaya koymayı amaçlayan ampirik dinamik modelleme (Empirical Dynamic Modeling - EDM) yaklaşımına dayalı bir yöntemdir. Bu yöntem, geleneksel nedensellik analizlerinden farklı olarak, doğrusal varsayımlar yerine sistemin dinamik yapısına odaklanır ve özellikle kaotik ya da doğrusal olmayan sistemlerde daha etkili sonuçlar verir. CCM, Takens teoremi (Takens 1981) kapsamında sistemin faz uzayını yeniden yapılandırarak, bir zaman serisinin geçmiş değerlerinden diğer bir zaman serisinin durumunun ne kadar doğru şekilde haritalanabildiğini ölçer.

CCM'nin temel mantığı şudur: Eğer bir değişken (örneğin Y) diğer bir değişkeni (örneğin X) nedensel olarak etkiliyorsa, Y'nin geçmiş değerleri X'in dinamiklerini

yeterince yansıtır; dolayısıyla Y'nin gömülü uzayından X'in durumunu çapraz haritalamak (cross map) mümkündür.

Şekil 3.1'deki diyagram, CCM yönteminin temel adımlarını özetlemektedir: gözlemlerin alınması, faz uzayına gömme, en yakın komşuların (k-NN) aranması ve tahmin süreci. Yöntem, bir zaman serisinin (örneğin Y) geçmiş değerlerinden elde edilen gömülü faz uzayının (M_Y), diğer bir zaman serisinin (örneğin X) dinamiklerini yansıtıp yansıtmadığını test eder.



Şekil 3.1. Yakınsak Çapraz Eşleme (CCM) yönteminin temel adımları (Takahashi vd. 2021'den alınmıştır).

Eğer Y, X üzerinde nedensel bir etkiye sahipse, M_Y üzerinden X'in geçmiş değerleri yaklaşık olarak yeniden haritalanabilir. Bu süreçte, kütüphane uzunluğu (L) arttıkça haritalama doğruluğu artar ve belirli bir değere yakınsar, bu da nedenselliğin varlığına işaret eder.

Takens teoremi, tek bir zaman serisinin geçmiş değerlerinden orijinal sistemin faz uzayının bir izdüşümünü oluşturmanın mümkün olduğunu söyler. Bu bağlamda, bir değişkenin faz uzayında yeniden yapılandırılmış hali şu şekilde tanımlanır:

$$M_X(t) = (X(t), X(t - \tau), X(t - 2\tau), X(t - 3\tau), \dots, X(t - (E - 1)\tau)) \quad (3.16)$$

Burada, E gömme boyutu (embedding dimension), τ zaman gecikmesi (time delay), $M_X(t)$ ise X değişkeninin faz uzayında yeniden yapılandırılmış vektörüdür.

Benzer şekilde, Y zaman serisi için de bir gömülü uzay oluşturulur:

$$M_Y(t) = (Y(t), Y(t - \tau), Y(t - 2\tau), Y(t - 3\tau), \dots, Y(t - (E - 1)\tau)) \quad (3.17)$$

Eğer $X \rightarrow Y$ yönünde bir nedensellik varsa, Y'nin faz uzayında gömülü hali X'in geçmiş durumlarına dair bilgi taşır. Bu durumda, $M_Y(t)$ vektöründen yola çıkarak $X(t)$ 'yi

yeniden tahmin edebiliriz. Bu süreç çapraz haritalama (cross mapping) olarak adlandırılır ve şu şekilde tanımlanır:

1. $M_Y(t)$ 'de, belirli bir t anında $E+1$ adet en yakın komşu bulunur (örneğin, Öklidyen mesafe kullanılarak).
2. Bu komşulara karşılık gelen zaman noktalarındaki X değerleri alınır: $X(t_1), X(t_2), \dots, X(t_{E+1})$
3. Ağırlıklı ortalama yöntemiyle tahmini değer hesaplanır:

$$X(t) = \sum_{i=1}^{E+1} w_i X(t_i) \quad (3.18)$$

Ağırlıklar, komşuların benzerliğine göre üstel olarak tanımlanır:

$$w_i = \frac{\exp(-d_i/d_1)}{\sum_{j=1}^{E+1} \exp(-d_j/d_1)} \quad (3.19)$$

Burada d_i , gömülü faz uzayında tahmin edilen vektör ile i . komşu vektör arasındaki Öklidyen mesafeyi ifade eder. Benzer şekilde, d_j 'de j . komşu ile olan mesafeyi temsil eder ve komşuluk ağırlıklarının hesaplanmasında kullanılır.

Tahmini değerler $\hat{X}(t)$ ile gerçek değerler $X(t)$ arasındaki korelasyon katsayısı (genellikle Pearson korelasyonu ρ) kullanılarak çapraz haritalama doğruluğu ölçülür. Bu korelasyon, kütüphane büyüklüğü (yani, kullanılan veri alt kümesi) L arttıkça sabit bir değere yakınsar. Bu durum, sistemin dinamiğini doğru şekilde yansıttığını ve gerçek bir nedensel ilişki olduğunu gösterir.

Elde edilen korelasyon şu şekilde ifade edilir:

$$\rho_{X|M_Y}(L) = \text{corr}(X(t), \hat{X}(t)|M_Y, L) \quad (3.20)$$

Benzer şekilde, ters yönde çapraz haritalama da yapılır. Bu sayede çift yönlü nedensellik analiz edilebilir. Nedensellik ise şu şekilde yorumlanır:

- $Y \rightarrow X$ yönünde nedensellik varsa:
 - Bu durumda, Y zaman serisi X 'in dinamiğini yansıttığı için, X 'in geçmiş bilgileri Y 'nin manifolduna M_Y gömülerek haritalanabilir hale gelir. Bu nedenle, kütüphane uzunluğu L arttıkça, X ile Y 'den elde edilen haritalama $\hat{X}(t)$ arasındaki korelasyon katsayısı giderek artar ve belirli bir değere yakınsar. Bu yakınsama, sistemde $Y \rightarrow X$ yönünde gerçek bir bilgi akışı olduğuna işaret eder.
- $X \rightarrow Y$ yönünde nedensellik yoksa:
 - Eğer X 'in dinamikleri Y 'yi etkilemiyorsa, Y 'nin geçmiş bilgileri kullanarak X haritalanamaz. Bu durumda korelasyon katsayısı, kütüphane uzunluğu arttıkça ya sabit kalır ya da artmaz. Korelasyonda

anlamalı bir yükseliş ve yakınsama gözlemlenmez, bu da $X \rightarrow Y$ yönünde nedenselliğin bulunmadığını gösterir.

- Her iki yönde korelasyon artıyorsa:
 - Hem hem de değerleri kütüphane uzunluğu arttıkça yükseliyor ve yakınsıyorsa, iki olasılık söz konusudur:
 1. *Çift yönlü nedensellik*: X ve Y birbirini etkileyen sistemler olabilir; yani etkileşim simetriktr.
 2. *Ortak bir kaynak etkisi*: X ve Y'nin ikisi de üçüncü bir değişken (örneğin güneş aktivitesi gibi) tarafından sürülüyor olabilir. Bu durumda nedensellik görünüşte iki yönlü gibi görünse de arkasında yatan sebep dışsal bir ortak etkidir.

Bu tez kapsamında, güneş ve jeomanyetik aktivite indeksleri arasındaki nedensel ilişkileri belirlemek amacıyla CCM yöntemi uygulanacaktır. Analiz için belirli bir indeks referans alınarak diğer serilerle iki yönlü çapraz haritalama yapılacak ve elde edilen korelasyonlar incelenecektir. Böylece, indeksler arasındaki nedenselliğin yönü ve gücü değerlendirilecektir.

3.4. Tahmin

3.4.1. Simplex Projection

Ampirik Dinamik Modellemenin (Empirical Dynamic Modeling, EDM) temel bileşenlerinden biri olan Simplex Projection yöntemi, doğrusal olmayan ve kaotik sistemlerin analizinde yaygın olarak kullanılan öngörüsöl bir tekniktir. Bu yöntem, özellikle zaman serilerinin geometrik yapısını dikkate alarak sistemin gelecekteki durumunu geçmiş gözlemler üzerinden tahmin etmeyi amaçlar. Sugihara vd. tarafından geliştirilen EDM (Sugihara ve May, 1990; Sugihara vd. 1994), sistem dinamiklerinin yalnızca gözlemsel verilerden elde edilebileceğini savunur. Bu yaklaşım, zaman serilerinde gömülü olan dinamik bilgileri açığa çıkarmayı hedefler.

Simplex Projection, temel olarak Takens Teoremi'ne dayanır (Takens 1981; 2006). Bu teorem, tek bir zaman serisinden sistemin faz uzayının yeniden yapılandırılabilirliğini belirtir. Zaman serileri, bir sistemin davranışına ait ardışık gözlemlerdir ve bu nedenle sistemin davranışını yöneten kurallara dair bilgiler verilerin içinde gömülü (embedded) hâlde bulunur. Takens Teoremi, bu bilgilerin yalnızca tek bir zaman serisi aracılığıyla nasıl geri kazanılabileceğini ifade eder ve gözlemler arası belirli bir zaman gecikmesi (τ) ve gömme boyutu (E) kullanılarak oluşturulan gömülü vektör şu şekilde tanımlanır:

$$X(t) = [x(t), x(t - \tau), x(t - 2\tau), \dots, x(t - (E - 1)\tau)] \quad (3.21)$$

Burada X, özgün durum uzayını temsil eden bir vektörü, x, t zamanında alınan bir örneği, τ (tau), zaman gecikmesini ve E, faz uzayını yeniden yapılandırmak için kullanılan gömme (embedding) boyutunu ifade eder. Bu yaklaşım, x(t) gözlemi ile onun τ aralıklı geçmiş değerlerini içeren bir vektör X(t) oluşturur. Bu şekilde birden fazla gecikmeli gözlemin kullanılmasıyla, sistemin temel dinamiklerinin yalnızca bir zaman serisinden yeniden yapılandırılması mümkün olur. Teorem, belirli koşullar altında, bir sistemin dinamiklerinin daha yüksek boyutlu bir uzayda doğru şekilde temsil

edilebileceğini ve böylece geçmiş verilere dayanarak gelecekteki durumların analiz edilebileceğini ifade eder. Bu nedenle τ ve E parametrelerinin seçimi, sistemin geçmiş davranışlarının etkili şekilde belirlenmesi ve yeniden yapılandırılan çekicinin (attractor) gerçek sistem dinamiklerini doğru şekilde yansıtması açısından kritik öneme sahiptir.

Simplex Projection, bir sistemin geçmiş davranışına dayanarak gelecekteki durumunu tahmin etmek amacıyla kullanılan geometrik tabanlı bir yaklaşımdır. Örneğin elimizde mevcut bir durum vektörü $X(t)$ varsa ve bu vektör üzerinden bir sonraki durum $X(t+1)$ tahmin edilmek isteniyorsa, ilk adım olarak $X(t)$ 'nin faz uzayındaki en yakın $E+1$ komşusu bulunur. Bu komşular $X_1, X_2, \dots, X_{E+1}$ olarak adlandırılır. Ardından, bu komşuların gelecek değerlerinin ağırlıklı ortalaması alınarak tahmin değerleri $Pred_{[1, 2, \dots, T_a]}$ hesaplanır:

$$Pred_{[1,2,\dots,T_a]} = \sum_{j=1}^{E+1} \omega_j v_{(i+[1,2,\dots,T_a])}^1 \quad (3.22)$$

Burada ω_i , her bir komşunun $X(t)$ 'ye olan Öklidyen uzaklığına göre belirlenen ve tahmin sürecinde komşuya ne kadar güvenileceğini gösteren ağırlıktır. Bu ağırlık aşağıdaki formüle göre hesaplanır:

$$\omega_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^{E+1} \exp\left(\frac{-||v_n - v_j||}{\omega_{avg}}\right)} \exp\left(\frac{-||v_n - v_i||}{\omega_{avg}}\right) \quad (3.23)$$

Burada $||v_n - v_i||$, v_n ve v_i vektörleri arasındaki uzaklığı; ω_{avg} ise ortalama bir ölçekleme katsayısını ifade eder. Bu yöntem, zaman serisinde gömülü olan geçmiş davranış kalıplarını kullanarak sistemin gelecekteki durumlarını tahmin etmeye olanak tanır. $Pred_{[1, 2, \dots, T_a]}$ işlemi yinelenildiğinde, çok adımlı ileriye dönük tahminler elde edilebilir.

Aşağıda tahmin oluşturma sürecinin adımları ve ardından şekiller üzerinden açıklamalar verilmiştir:

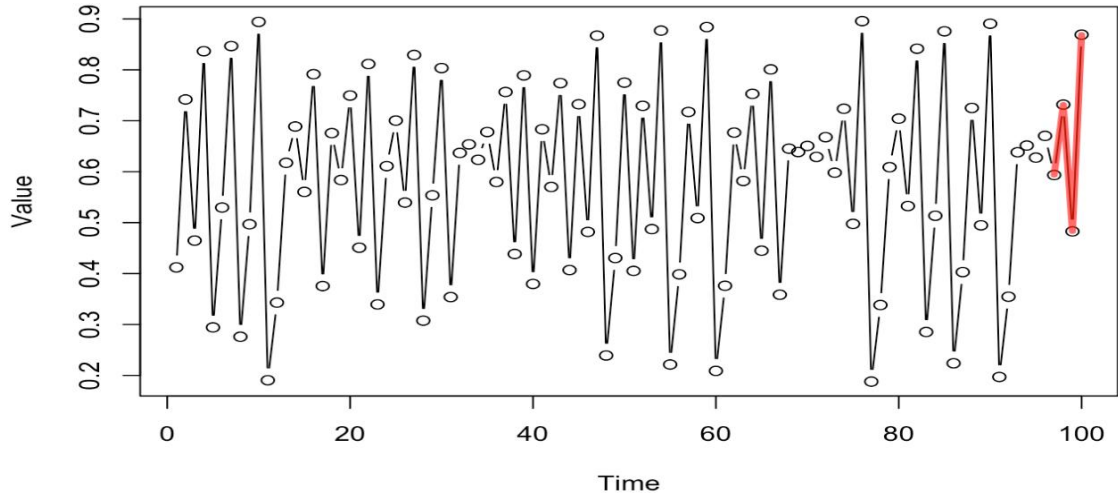
Zaman Serisinin Faz Uzayına Gömülmesi: Zaman serisi verilerinin faz uzayına gömülmesi (embedding) süreci, Takens Gömme Teoremi (Takens' Embedding Theorem) kullanılarak gerçekleştirilir. Bu teorem, yalnızca zaman serisi verilerine dayanarak, dinamik bir sistemin faz uzayında yeniden yapılandırılmasına olanak tanır. Böylece sistemin temel yapısal özellikleri, daha yüksek boyutlu bir gömme uzayında matematiksel olarak temsil edilebilir. Faz uzayı oluşturulduktan sonra, sistemin farklı zamanlardaki durumlarını temsil eden vektörler belirli bir zaman gecikmesi (τ) ve gömme boyutu (E) kullanılarak oluşturulur ve bu vektörlerin meydana getirdiği yapıya gömme uzayı (embedding space) denir. Her bir vektör, geçmiş gözlemleri E boyutuna kadar kapsayacak şekilde tanımlanır ve bu sayede sistemin geçmiş davranışlarını kapsamlı biçimde temsil eder.

Kütüphane ve Tahmin Kümelerinin Oluşturulması: En yakın komşuları bulmak ve benzerlikleri tespit etmek için faz uzayına gömülen veriler iki alt kümeye ayrılır:

kütüphane kümesi (library set) ve tahmin kümesi (prediction set). Kütüphane kümesi, gömme uzayını oluşturmak ve en yakın komşuları belirlemek için kullanılan geçmiş (tarihsel) verileri içerir. Bu küme, sistemin geçmiş dinamiklerini öğrenmek ve benzer geçmiş durumları tanımlamak için temel veri kaynağını oluşturur. Tahmin kümesi ise, gelecekteki durumları tahmin etmek için kullanılan güncel durum vektörlerini içerir. Kütüphane kümesinin sona erdiği ve tahmin kümesinin başladığı nokta, yani veri setindeki “ayırma noktası” (split point), yapılacak tahminin başarısı açısından kritik öneme sahiptir ve dikkatle seçilmelidir (Gerçek vd. 2025, hakem aşamasında).

En Yakın Komşulara Dayalı Tahmin Süreci: Kümeler oluşturulduktan sonra, mevcut durum vektörünün (örneğin $X(t)$) faz uzayı içindeki en yakın komşuları belirlenir. Bu komşular, geçmişteki benzer sistem durumlarını temsil eder. Benzerlik, mevcut vektör ile diğer tüm vektörler arasındaki uzaklıkların hesaplanması yoluyla belirlenir. Mevcut duruma en yakın olan vektörler, sistemin geçmişteki en benzer davranışlarını temsil eder ve tahminin doğruluğu açısından belirleyicidir. Daha sonra, belirlenen bu komşular kullanılarak bir projeksiyon (simplex projection) oluşturulur. Bu projeksiyon, en yakın komşuların gelecekteki değerlerinin, mevcut duruma olan uzaklıklarına göre ağırlıklandırılarak ortalamasının alınması ile gerçekleştirilir. Uzaklığı daha az olan komşulara daha yüksek ağırlık verilerek tahmin yapılır. Bu işlem, sistemin geçmişteki benzer davranışlarını kullanarak gelecekteki davranışını etkili biçimde tahmin etmeyi sağlar.

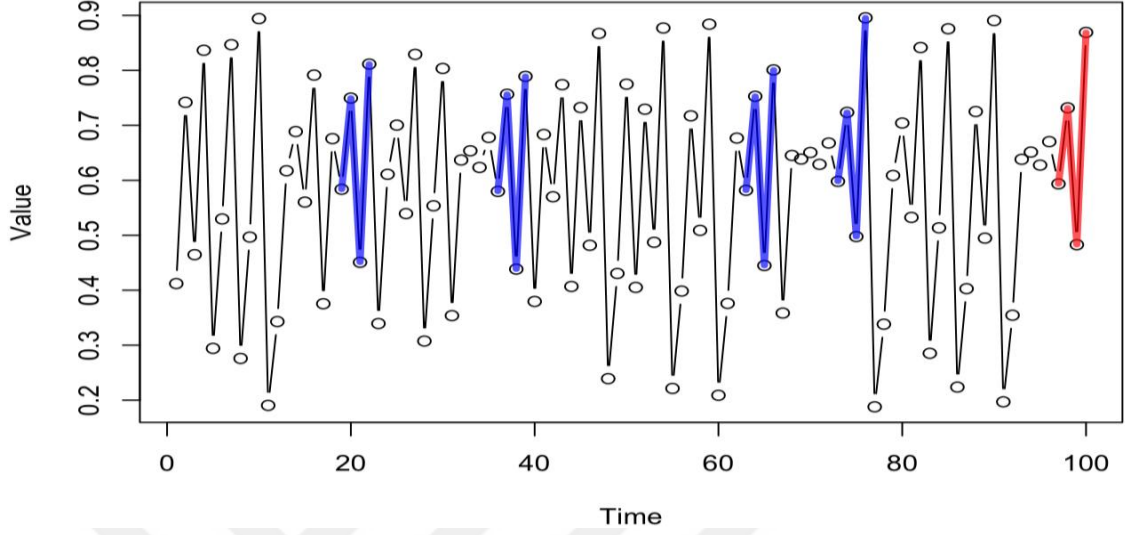
Simplex Projection yönteminin işleyişini daha iyi anlamak için Petchey (2016) tarafından oluşturulan aşağıdaki görseller örneği ele alınmıştır. Bu görseller, kaotik bir zaman serisi üzerinden tahmin sürecini adım adım ortaya koymaktadır. Aşağıda dört aşamalı olarak açıklanan bu süreç, zaman serisi verileriyle modelleme yapan araştırmacılar için bir anlayış geliştirmeyi ve yöntemi temel olarak açıklamayı amaçlar.



Şekil 3.2. Tahmin edilecek gelecek değer için mevcut durumun belirlenmesi (Petchey 2016’dan alınmıştır).

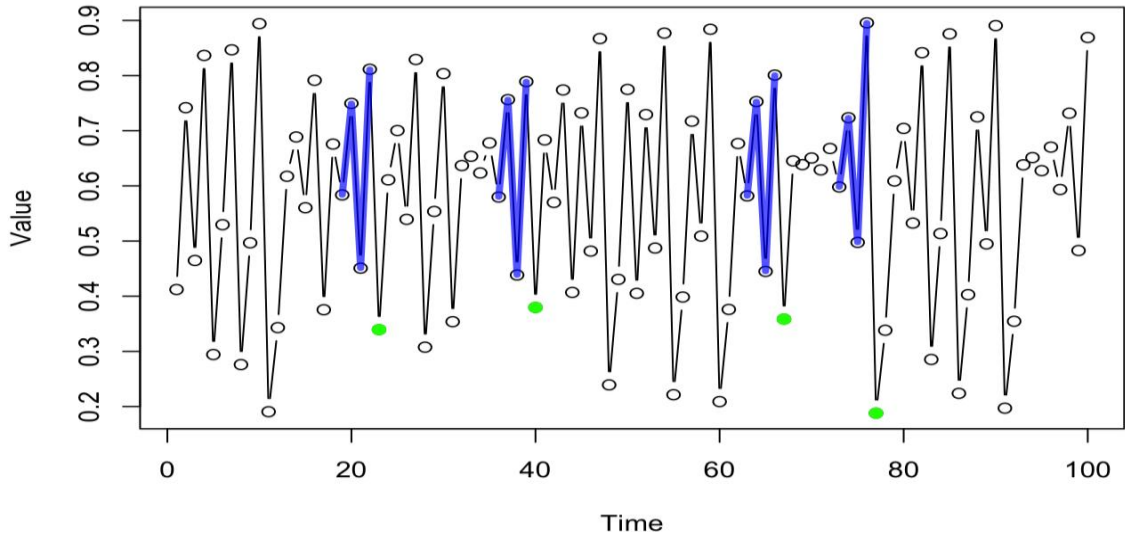
Şekil 3.2’de, zaman serisi boyunca gözlemlenen değerler siyah çizgi ile gösterilmiş; son birkaç veri noktası ise kırmızı ile vurgulanmıştır. Kırmızı bölge, modelin tahmin etmeyi hedeflediği gelecekteki değer(ler)den hemen önceki mevcut

durumu temsil eder. Bu adım, tahminin yapılacağı nokta(lar)ın ve zaman aralığının net olarak belirlenmesini sağlar.



Şekil 3.3. Gömülü uzayda benzer komşulukların belirlenmesi (Petchey 2016'dan alınmıştır).

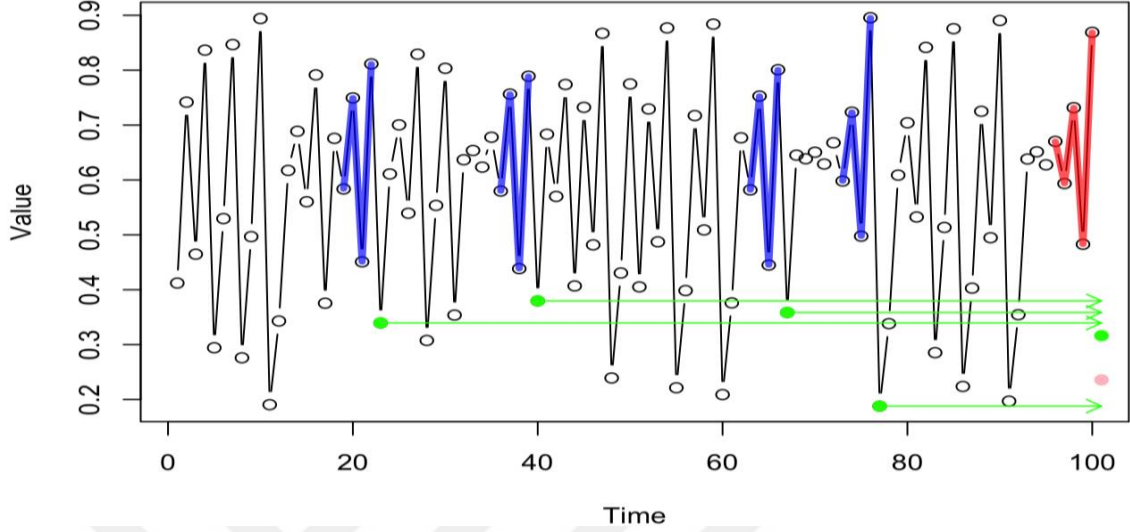
Şekil 3.3'te, geçmişteki zaman noktalarına karşılık gelen benzer örüntüler (pattern) mavi çizgilerle işaretlenmiştir. Bu noktalar, tahmin edilecek nokta(lar)dan hemen önce, mevcut kırmızı durum ile benzer davranış sergileyen E+1 adet en yakın komşuyu temsil eder. Böylece, mevcut durum ile benzeyen gömülü uzaydaki (embedding space) en yakın geçmiş durumlar tanımlanmış olur.



Şekil 3.4. Komşuların gelecek değerlerinin belirlenmesi (Petchey 2016'dan alınmıştır).

Şekil 3.4'te, maviyle belirtilen en yakın komşuların bir sonraki adımlarına karşılık gelen değerler yeşil noktalarla gösterilmiştir. Bu değerler, tahmin sürecinde

kullanılacak olan geçmiş örneklerin gelecek değerleridir. Böylece, mevcut durumdan sonra tahmin edilecek nokta, bu noktalara benzeme eğiliminde olacaktır.



Şekil 3.5. Gelecek değerin (tahminin) ağırlıklı ortalama ile hesaplanması (Petchey 2016'dan alınmıştır).

Şekil 3.5'te, yeşil noktalar üzerinden tahmin edilen değerlerin, vektörel uzaklığa bağlı ağırlıklı ortalaması alınarak alt kısımdaki kırmızı tahmin noktası oluşturulmuştur. Oklarla gösterilen yönler, her komşunun gelecekteki değerinden tahmin yapılan noktaya olan katkısını ifade eder.

Bu dört adım, Simplex Projection yönteminin geçmiş verilerdeki örüntüleri nasıl tanımlayıp kullandığını, bu örüntülere dayalı olarak sistemin gelecekteki durumunun nasıl hesapladığını açıkça göstermektedir. Simplex Projection yöntemi, öncül yöntemler, otoregresif modeller (AR), yapay sinir ağları (ANN), destek vektör regresyonu (SVR), parametrik yaklaşımlar (örneğin ARIMA/SARIMA) ve rastgele ormanlar (RF) ile uzun-kısa süreli bellek ağları (LSTM) gibi makine öğrenmesi yöntemleriyle karşılaştırıldığında çeşitli avantajlara sahiptir. Bu yöntem, sistemin altında yatan dinamiklere ilişkin herhangi bir varsayımda bulunmayı gerektirmeyen, parametrik olmayan (nonparametric) bir yaklaşımdır. Bu nedenle, doğrusal olmayan ve kaotik sistemler için güçlü tahminler sunabilir. Ayrıca, bu yöntem hesaplama açısından da oldukça verimlidir; çünkü küresel optimizasyon yerine yerel doğrusal yaklaşımlardan faydalanır ve bu da onu büyük veri kümeleri için uygun hale getirir.

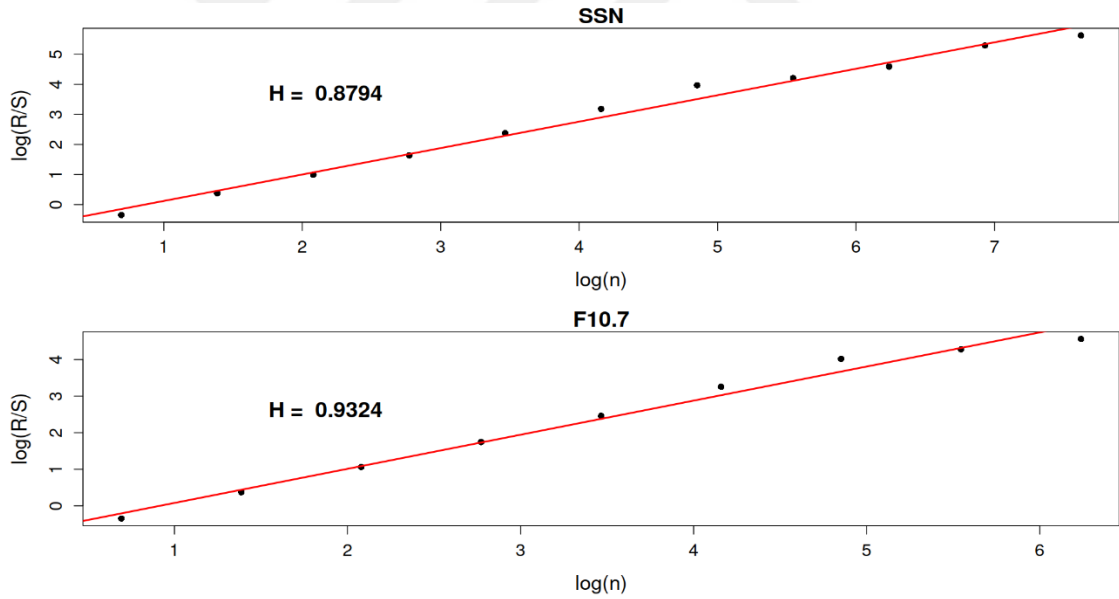
Bu tez çalışmasında, Simplex Projection yöntemi güneş ve jeomanyetik aktivite indekslerinin 25. ve 26. güneş çevrimi için uzun vadeli tahminlerini üretmek amacıyla kullanılmıştır. Bu bölümde sunulan kuramsal çerçeve ve görsel anlatımlar, yöntemin çalışma prensibini açık bir şekilde ortaya koymakta; bir sonraki bölümde ise yöntem kullanılarak tez çalışması kapsamında indeksler için elde edilen sonuçlar ve tahmin performansına ilişkin bulgular ele alınacaktır.

4. BULGULAR

4.1. Hurst Üssü ile Bellek Yapısı ve Trend Davranışının Analizi

Bu tez çalışmasında, Güneş ve jeomanyetik aktivite indekslerinin uzun dönemli bellek özellikleri Hurst üssü yöntemiyle incelenmiştir. Hurst üssü, bir zaman serisinin rastgelelikten sapma derecesini ve eğilim devamlılığını değerlendirmeye olanak tanıyarak, serinin trend yapısı hakkında bilgi sunar (bkz. Bölüm 3.2.1). Elde edilen Hurst üssü değerleri, ilgili indekslerin ortalama dönüşlü, kalıcı ya da rastgele karaktere sahip olup olmadığını ortaya koymak amacıyla değerlendirilmiştir.

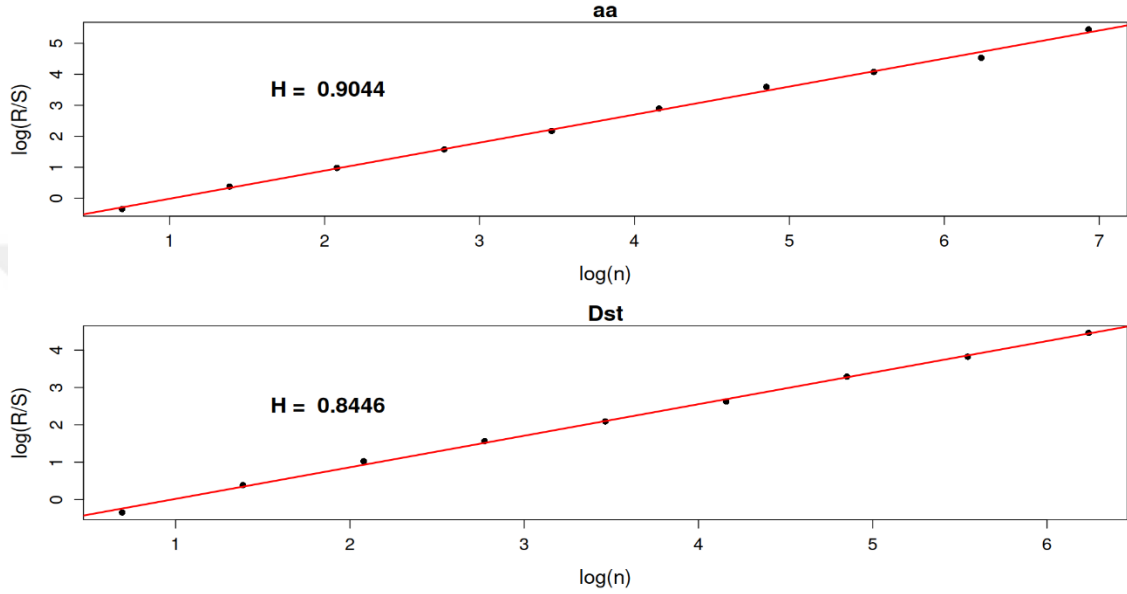
Hurst üssü analizinde kullanılan log-log grafikleri, $\log(R/S)$ değerlerinin farklı n pencere uzunlukları için logaritmik olarak çizilmesiyle elde edilir. Yatay eksen $\log(n)$, dikey eksen ise $\log(R/S)$ değerleri yer alır. Grafik üzerindeki noktalar, her bir pencere boyutuna karşılık gelen normalize edilmiş dağılım oranını temsil eder. Bu noktalar üzerine uygulanan doğrusal regresyonun eğimi, Hurst üssü (H) olarak kabul edilir. Eğimin 0.5'ten büyük olması seride pozitif otokorelasyon ve kalıcılık; 0.5'ten küçük olması ise negatif otokorelasyon ve ortalama dönüşlü (mean-reverting) davranış anlamına gelir. Bu nedenle, şekiller sadece sayısal sonuç sunmakla kalmaz, aynı zamanda zaman serisinin uzun dönemli davranış yapısını görsel olarak değerlendirme olanağı sağlar.



Şekil 4.1. Güneş aktivite indeksleri kapsamında aylık ortalama SSN (üst panel) ve F10.7 (alt panel) için Hurst üssü sonuçları.

Şekil 4.1, SSN ve F10.7 için hesaplanan Hurst üssü analiz sonuçlarını göstermektedir ve H değerleri sırasıyla 0.8794 ve 0.9324 olarak bulunmuştur. Bu değerlerin her ikisi de 0.5'ten büyük olduğundan, her iki zaman serisinin de pozitif otokorelasyon içerdiği ve belirgin bir kalıcılık (persistence) gösterdiği sonucuna varılabilir. Başka bir deyişle, serilerdeki artış eğilimleri gelecekte de artış yönünde devam etme eğilimindedir; benzer şekilde azalışlar da azalışla gitme eğilimindedir. F10.7 için elde edilen daha yüksek Hurst üssü değeri, bu indeksin uzun dönemli bağımlılık düzeyinin SSN'ye kıyasla biraz

daha yüksek olduğunu ve daha belirgin bir trend sürekliliği sergilediğini göstermektedir. Bu bulgu, F10.7'deki değişimlerin SSN'e göre daha istikrarlı ve süreklilik arz eden bir yapı sergileyebileceğini gösterebilir. Fakat, SSN'in daha fazla veri içerdiği ve daha uzun vadeli bir zaman serisi olduğu unutulmamalıdır. Belki de, bu kısmi farkın sebebi seriler arasındaki veri sayısı farkıdır. Yine de, her iki serinin de 0.5 ile 1.0 arasında kalan ve özellikle 0.8'den büyük olan Hurst üssü değerleri, kaotik ama deterministik sistemlerde sıklıkla gözlemlenen, doğrusal olmayan dinamik yapıların varlığına da işaret etmektedir.



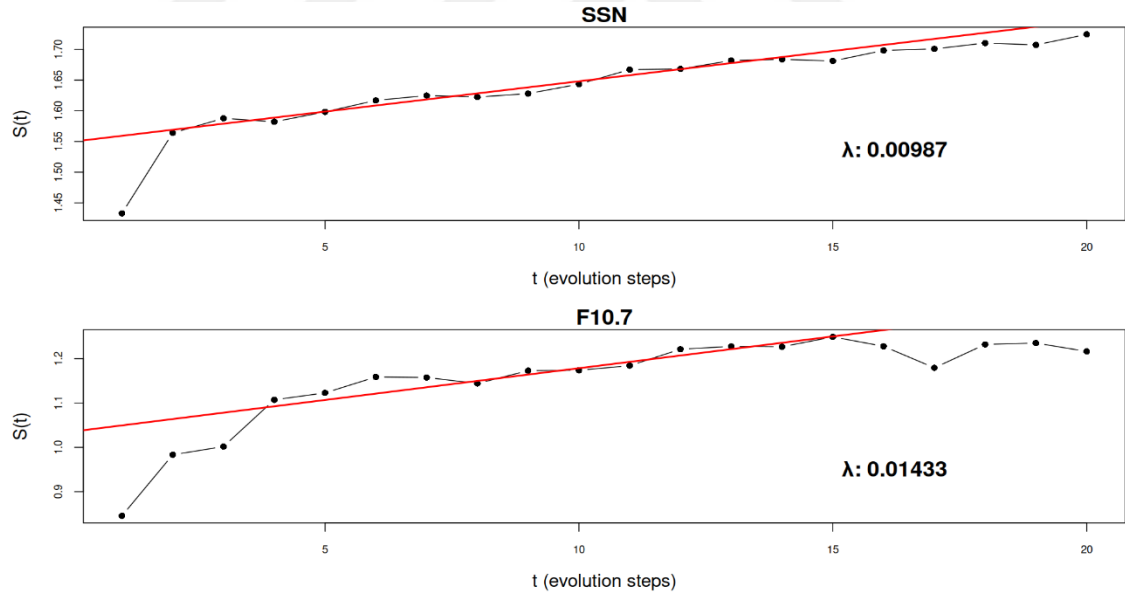
Şekil 4.2. Jeomanyetik aktivite indeksleri kapsamında aylık ortalama aa (üst panel) ve Dst (alt panel) için Hurst üssü sonuçları.

Şekil 4.2, aa ve Dst indeksleri için elde edilen Hurst üssü sonuçlarını gösterir ve H değerleri sırasıyla 0.9044 ve 0.8446 olarak bulunmuştur. Bu değerler, her iki serinin de 0.5'ten anlamlı şekilde büyük olduğunu ve dolayısıyla güçlü bir kalıcılık özelliği sergilediklerini göstermektedir. Bu durum, geçmişteki jeomanyetik aktivite eğilimlerinin, gelecekteki davranış üzerinde etkili olduğunu ve serilerin rastgele değil, trend yönünde süreklilik arz eden bir yapı taşıdığını ortaya koymaktadır. Özellikle aa indeksinin Hurst üssü değerinin Dst indeksine kıyasla daha yüksek olması, jeomanyetik alanın küresel ölçekte (aa) daha belirgin uzun dönemli bağımlılık ve istikrarlılık sergilediğini göstermektedir. Buna karşın, Dst indeksin de benzer şekilde 0.8'in üzerinde bir Hurst değeri taşıması, jeomanyetik fırtınaların etkisinin zamansal olarak istikrarlı ve sistematik biçimde dağıldığını desteklemektedir. Her iki indeksin kalıcı davranış göstermesi, jeomanyetik aktivitenin zamansal yapısında deterministik ve doğrusal olmayan dinamiklerin etkili olabileceğini gösterir.

4.2. Lyapunov Üssü ile Kaotik Davranış ve Öngörülebilirlik Analizi

Güneş ve jeomanyetik aktivite indekslerinin kaotik özellikleri ve deterministik yapıları Lyapunov üssü yöntemiyle değerlendirilmiştir. Lyapunov üssü, bir zaman serisinin başlangıç koşullarına duyarlılığını ölçerek, sistemin kaotik davranış sergileyip sergilemediğini belirlemeye olanak tanır. Bu yöntem, büyük pozitif değerler aldığı anda sistemin uzun vadede öngörülemez, sıfıra yakın veya negatif değerlerde ise daha düzenli ve tahmin edilebilir bir yapı sergilediğini gösterir (bkz. Bölüm 3.2.2). Elde edilen Lyapunov üssü değerleri, incelenen indekslerin deterministik kaotik bir yapıya mı yoksa rastlantısal ya da düzenli bir davranışa mı sahip olduklarını ortaya koymak amacıyla yorumlanmıştır.

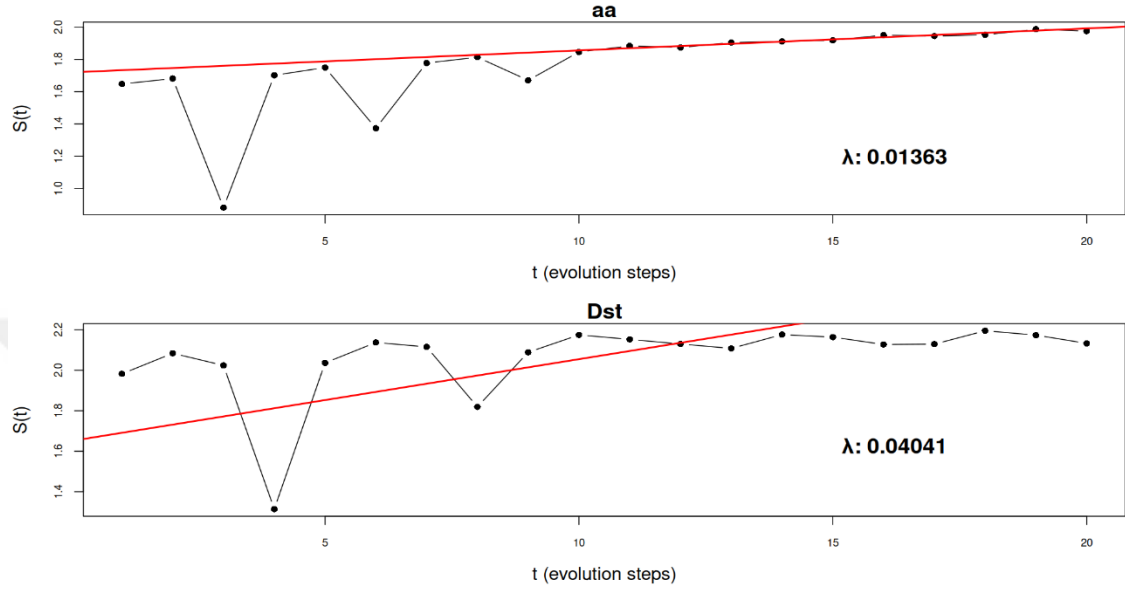
Rosenstein yöntemi (Rosenstein vd. 1993), en büyük Lyapunov üssünü belirlemek amacıyla faz uzayında gömülü zaman serisindeki komşu noktalar arasındaki ortalama ayrışmayı $S(t)$ fonksiyonu ile ifade eder. Yatay eksen evrim adımlarını (t), dikey eksen ise zamanla logaritmik ayrışma büyüklüğünü ($S(t)$) göstermektedir. Grafiklerde $S(t)$ eğrisi üzerinde belirli bir doğrusal aralık seçilerek bu aralıkta doğrusal regresyon uygulanır ve elde edilen $S(t)$ (kırmızı) doğrunun eğimi, en büyük Lyapunov üssü λ olarak yorumlanır. Elde edilen λ değeri pozitifse, sistem deterministik kaotik yapı sergiler; eğimin büyüklüğü ise sistemin tahmin edilebilirliğinin ne kadar sürede kaybolduğunu yansıtır. Bu nedenle, şekiller yalnızca kaosu varlığını değil, aynı zamanda sistemin öngörülebilirlik süresini de görsel olarak değerlendirme imkanı sunar.



Şekil 4.3. Güneş aktivite indeksleri kapsamında aylık ortalama SSN (üst panel) ve F10.7 (alt panel) için Lyapunov üssü sonuçları.

Güneş aktivite indekslerinin dinamik yapılarındaki deterministik kaotik özellikler, Lyapunov üssü yöntemiyle nicel olarak değerlendirilmiştir. Şekil 4.3'te sunulan sonuçlara göre hem SSN hem de F10.7 için en büyük Lyapunov üssü değeri pozitif bulunmuştur; bu durum, her iki serinin de kaotik ve başlangıç koşullarına duyarlı bir dinamik yapı sergilediğini göstermektedir. SSN için $\lambda = 0.00987$, F10.7 için ise $\lambda =$

0.01433 olarak hesaplanan bu değerler, F10.7 serisinin daha yüksek düzeyde kaotik davranış gösterdiğini ortaya koymaktadır. Lyapunov üssü büyüklüğündeki fark, F10.7'nin kısa vadeli tahmin edilebilirliğinin SSN'ye kıyasla daha hızlı azaldığını ve sistemin öngörülebilirliğinin daha sınırlı olduğunu ima etmektedir. Dolayısıyla, SSN serisi görece daha kararlı ve tahmin edilebilir bir yapıya sahipken, F10.7 serisi daha düzensiz ve dinamik bir yapıyı yansıtmaktadır.



Şekil 4.4. Jeomanyetik aktivite indeksleri kapsamında aylık ortalama aa (üst panel) ve Dst (alt panel) için Lyapunov üssü sonuçları.

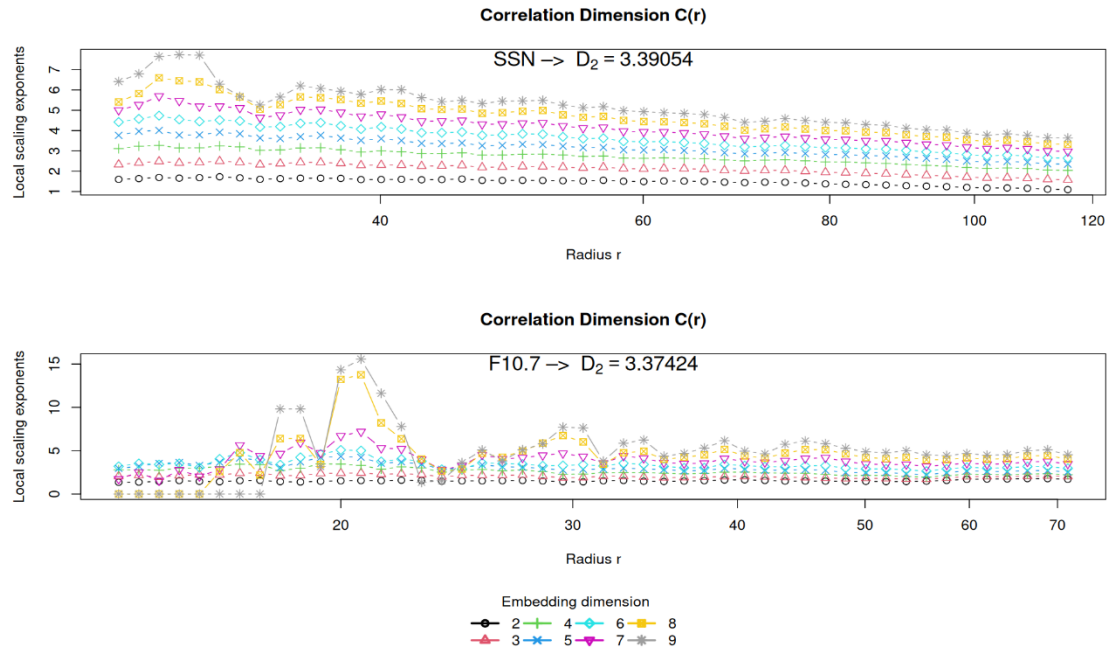
Jeomanyetik aktivite indekslerinin kaotik özelliklerini değerlendirmek amacıyla yapılan Lyapunov analizi, aa ve Dst serilerinin deterministik kaotik yapılar sergilediğini ortaya koymuştur. Şekil 4.4'te görüldüğü üzere, her iki serinin de en büyük Lyapunov üssü pozitif bulunmuştur; bu durum, sistemin başlangıç koşullarına duyarlılık taşıdığını ve zamanla tahmin edilebilirliğin azaldığını göstermektedir. aa indeksi için hesaplanan $\lambda = 0.01363$ değeri, sistemin belirli düzeyde kaotik bir yapı sergilediğine işaret ederken, Dst verisi için bulunan $\lambda = 0.04041$ değeri çok daha güçlü bir kaotik davranışa işaret etmektedir. Bu fark, Dst indeksinin tahmin edilebilirliğinin daha sınırlı olduğunu ve sistemin daha düzensiz, daha karmaşık bir dinamik yapı sergilediğini göstermektedir. Buna karşılık, aa serisinin daha düşük Lyapunov üssü değeri, daha kararlı bir dinamik yapıya ve görece daha uzun vadeli öngörülebilirliğe olanak tanımaktadır.

Özetle, güneş ve jeomanyetik aktivite indeksleri için hesaplanan en büyük Lyapunov üssü (Largest Lyapunov Exponent) değerleri sırasıyla SSN için $\lambda = 0.00987$, F10.7 için $\lambda = 0.01433$, aa için $\lambda = 0.01363$ ve Dst için $\lambda = 0.04041$ olarak bulunmuştur. Bu değerler, sistemlerin tahmin edilebilirlik düzeyleri açısından önemli ipuçları sunmaktadır. SSN verisi en düşük Lyapunov üssü değerine sahip olup, en kararlı ve öngörülebilir yapıyı sergilerken; Dst verisi en yüksek Lyapunov üssüne sahip olup, en güçlü kaotik davranış ve en düşük öngörülebilirliği yansıtmaktadır. F10.7 ve aa indeksleri ise bu iki uç arasında yer almakta, sınırlı düzeyde kaotik ancak hala tahmin gücü barındıran dinamik özellikler göstermektedir.

4.3. Korelasyon Boyutu ile Karmaşıklık ve Fraktal Boyut Analizi

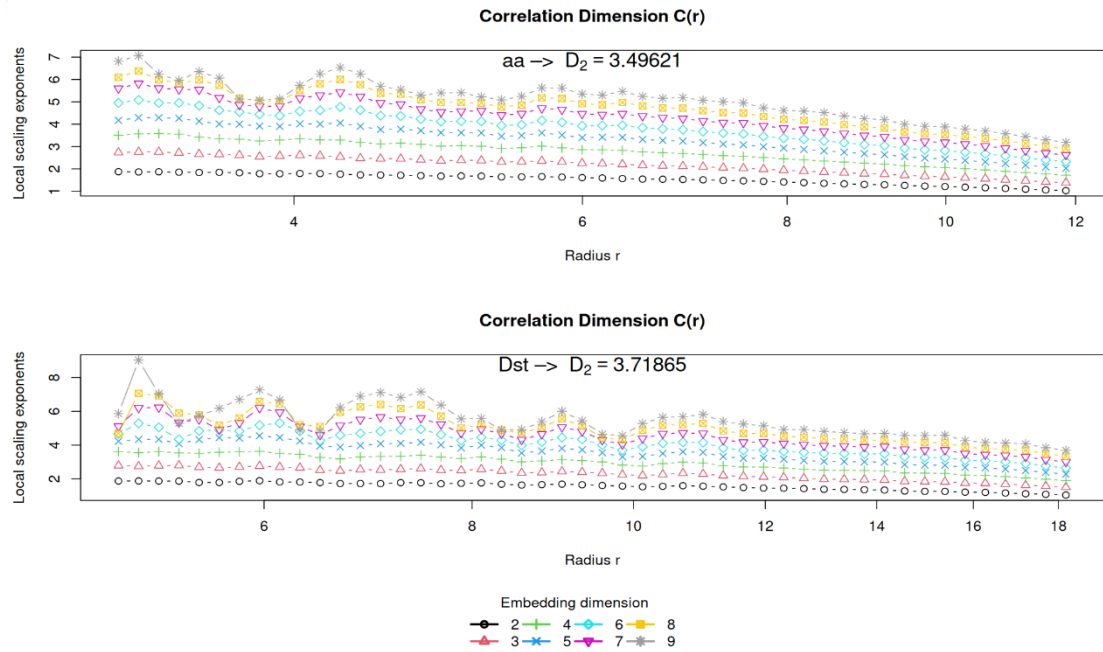
Güneş ve jeomanyetik aktivite indekslerinin dinamik yapılarındaki karmaşıklık düzeyleri ve fraktal özellikleri, korelasyon boyutu (D_2) yöntemi ile incelenmiştir. Korelasyon boyutu, kaotik sistemlerin temel niceliklerinden biri olup, faz uzayına gömülen zaman serisinin doldurduğu geometrik yapının boyutunu istatistiksel olarak tahmin etmeye olanak tanır. Bu yöntem yalnızca sistemin dinamik karmaşıklığını ölçmekle kalmaz, aynı zamanda fraktal yapıya sahip olup olmadığını da ortaya koyar. D_2 değeri, sistemin etkin boyut sayısı ve karmaşıklık derecesi hakkında bilgi sunarak, özellikle kaotik sistemlerde alt boyutlu çekicilerin (attractor) varlığının tespitinde kritik rol oynar (bkz. Bölüm 3.2.3). Bu bağlamda, her bir indeks için korelasyon boyutunun hesaplanması; zaman serilerinin deterministik olup olmadığını, kaç boyutlu bir faz uzayında geliştiğini ve dinamiklerinin ne ölçüde karmaşık olduğunu anlamak açısından büyük önem taşımaktadır.

Korelasyon boyutu analizinde elde edilen şekiller, farklı gömme boyutları (E) için hesaplanan yerel skala/ölçeklenme üslerini ($\log C(r)$ - $\log r$ eğimlerini) göstermektedir. Eğrilerin belirli bir yarıçap (r) aralığında birbirine yakınsanması ve sabitlenir hale gelmesi, sistemin dinamik boyutunun bu değer etrafında doygunlaştığını ve güvenilir bir korelasyon boyutu (D_2) tahmini yapıldığını gösterir. Bu sabitlenmiş plato bölgesinde, y-ekseni üzerindeki ortalama değer, o zaman serisinin korelasyon boyutu olarak kabul edilir. Eğer gömme boyutu artırıldığında bu değerlerde önemli bir değişim gözlemlenmiyorsa, bu durum sistemin dinamiklerinin o boyutta yeterli şekilde temsil edildiğini gösterir. Böylece şekilsel analiz, serinin deterministik olup olmadığını, kaç boyutlu bir faz uzayında geliştiğini ve karmaşıklık derecesini değerlendirmek için görsel bir temel sunar.



Şekil 4.5. Güneş aktivite indeksleri kapsamında aylık ortalama SSN (üst panel) ve F10.7 (alt panel) için Korelasyon Boyutu sonuçları.

Şekil 4.5'te sunulan korelasyon boyutu analizlerine göre, hem SSN hem de F10.7 için D_2 değerleri yaklaşık olarak 3.4 civarında bulunmuştur. Bu değerler, zaman serilerinin rastgele değil, deterministik bir yapıya sahip olduğunu ve sınırlı sayıda serbestlik derecesi (degree of freedom) içeren kaotik sistemler tarafından üretildiğini göstermektedir. Korelasyon boyutunun belirli bir gömme (embedding) boyutundan sonra sabitlenmesi, bu seriler için hesaplanan kesirsel (fraktal) boyutun güvenilir olduğunu ve analiz edilen sistemin gerçek dinamik boyutunu temsil ettiğini göstermektedir. SSN için elde edilen $D_2 = 3.39054$ ve F10.7 için $D_2 = 3.37424$ değerleri birbirine oldukça yakın olup, her iki serinin de benzer düzeyde karmaşık bir dinamik yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, güneş leke sayısı ve F10.7 güneş radyo akısı gibi güneş aktivite parametrelerinin, farklı ölçüm temellerine dayanmasına rağmen, benzer nitelikte kaotik dinamikler tarafından yönetildiğine işaret etmektedir. Korelasyon boyutunun (D_2) 3 ile 4 arasında olması, sistemin orta düzeyde bir fraktal karmaşıklığa sahip olduğunu ve deterministik kaos çerçevesinde incelenebileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.6. Jeomanyetik aktivite indeksleri kapsamında aylık ortalama aa (üst panel) ve Dst (alt panel) için Korelasyon Boyutu sonucu.

Şekil 4.6'da gösterilen korelasyon boyutu analizlerine göre hem aa hem de Dst indeksleri için D_2 değerleri 3.5 ile 3.7 aralığında bulunmuş ve faz uzayında sabitlenme eğilimi gözlemlenmiştir. Bu durum, her iki serinin de doğrusal olmayan fakat deterministik bir sistemin çıktısı olduğunu ve rastgelelikten önemli ölçüde ayrıldığını göstermektedir. Dst indeksi için elde edilen $D_2 = 3.71865$ değeri, analiz edilen dört indeks içinde en yüksek korelasyon boyutuna karşılık gelmektedir; bu da Dst zaman serisinin diğerlerine kıyasla daha yüksek dinamik karmaşıklık içerdiğine işaret etmektedir. Diğer yandan, aa serisi için hesaplanan $D_2 = 3.49621$ değeri de benzer şekilde fraktal bir yapıya ve kaotik bir sistemin karakteristik özelliklerine sahiptir. Her iki indeksin korelasyon boyutlarının embedding boyutları arttıkça doygunluğa ulaşması,

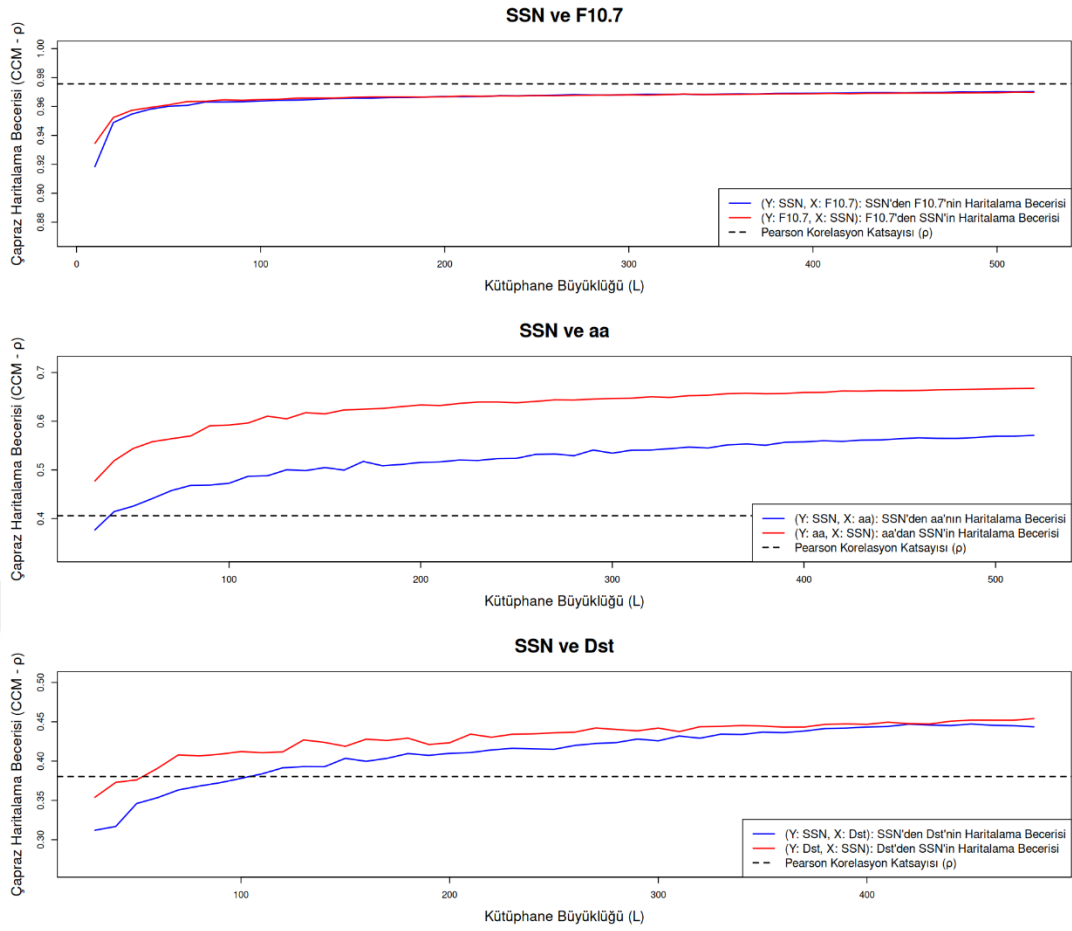
hesaplanan D_2 değerlerinin sistemin gerçek dinamik boyutunu yansıttığını ve analiz sonuçlarının güvenilir olduğunu desteklemektedir. Bu bulgular, jeomanyetik aktivite indekslerinin zamansal olarak oldukça karmaşık yapılar sergilediğini ve deterministik kaos ile ele alınması gerektiğini göstermektedir.

4.4. Yakınsak Çapraz Eşleme (CCM) ile Nedensellik Analizi

Güneş ve jeomanyetik aktivite indeksleri arasındaki nedensel ilişkilerin yönü ve gücü, bu çalışmada Yakınsak Çapraz Eşleme (Convergent Cross Mapping - CCM) yöntemiyle araştırılmıştır. CCM, geleneksel doğrusal nedensellik yaklaşımlarının ötesine geçerek, doğrusal olmayan ve kaotik sistemler içerisinde değişkenler arası bilgi akışını ampirik olarak değerlendirmeye olanak tanır. Bu yöntem, bir zaman serisinin diğer bir serinin dinamiklerini ne ölçüde yansıttığını test ederek, gözlemsel verilere dayalı nedensellik analizi yapılmasına imkan sağlar (bkz. Bölüm 3.3.1). Bu kapsamda, analizlerde SSN referans indeks olarak alınmış ve hem güneş (F10.7) hem de jeomanyetik (aa ve Dst) aktivite indeksleri ile olan potansiyel nedensel ilişkiler iki yönlü olarak test edilmiştir.

CCM analizinde kullanılan şekillerde, yatay eksen kütüphane uzunluğunu (L), düşey eksen ise çapraz haritalama becerisini ifade eden korelasyon katsayısını (CCM - ρ) göstermektedir. Şekillerde genellikle iki yönlü haritalama eğrileri yer alır: örneğin Y: SSN, X: aa (mavi çizgi), SSN'in geçmiş değerlerinden aa'nın çapraz haritalaması ve Y: aa, X: SSN (kırmızı çizgi), aa'nın geçmiş değerlerinden SSN'in çapraz haritalaması. Bu iki durum, kaynak değişkenin (Y) geçmiş değerleri kullanılarak hedef değişkenin (X) ne ölçüde doğru şekilde çapraz haritalanabildiğini gösterir. CCM yönteminin temel ilkesi gereği, eğer bir değişkenin (örneğin aa) geçmiş değerlerinden SSN başarılı bir şekilde çapraz haritalanabiliyorsa, bu durum SSN'in aa üzerinde nedensel etkisi olduğu anlamına gelir. Yani, şekillerdeki çapraz haritalama başarısı, nedenselliğin ters yönüne işaret eder: Y, X'i ne kadar iyi haritalıyorsa, X'in Y üzerinde o kadar güçlü bir nedensel etkisi vardır.

Şekillerde ayrıca, iki zaman serisi arasındaki doğrudan (statik) Pearson korelasyon katsayısını temsil eden kesikli bir çizgi yer alır. Eğer CCM çapraz haritalama eğrisi bu kesikli çizginin üzerinde yer alıyorsa, haritalama becerisi yalnızca doğrusal korelasyonla açıklanamayacak kadar güçlüdür ve bu durum, değişkenler arasında doğrusal olmayan dinamik bir nedensel ilişkinin varlığına işaret eder. Aksine, eğrinin kesikli çizginin altında kalması, haritalama becerisinin doğrudan korelasyon düzeyini aşmadığını gösterir ve güçlü bir nedensellik varsayımını desteklemez. Bu nedenle, CCM grafikleri yalnızca haritalama performansını değil, aynı zamanda değişkenler arasındaki asimetrik ve doğrusal olmayan bilgi akışlarını da görsel olarak değerlendirme imkanı sunar.



Şekil 4.7. Aylık ortalama SSN ile aylık ortalama F10.7 (üst panel), aa (orta panel) ve Dst (alt panel) indeksleri arasındaki CCM sonuçları.

Şekil 4.7, aylık ortalama SSN ile sırasıyla aylık ortalama F10.7, aa ve Dst indeksleri arasındaki karşılıklı CCM analizlerini göstermektedir. Şekillerde yatay eksen kütüphane büyüklüğünü (L), dikey eksen ise CCM çapraz haritalama becerisini temsil eden korelasyon katsayısını (CCM - ρ) göstermektedir. Her bir panelde iki yönlü çapraz haritalama eğrisi yer almaktadır: (Y: SSN, X: diğer indeks) ifadesi, SSN'in geçmiş değerleri kullanılarak diğer indeksin haritalanmasını; (Y: diğer indeks, X: SSN) ise diğer indeksin geçmişinden SSN'nin haritalanmasını temsil etmektedir. CCM yönteminin doğası gereği, bir değişkenin geçmiş değerlerinden başka bir değişken başarıyla haritalanabiliyorsa, bu durum haritalanan hedef değişkenin (X) haritalayan kaynak değişken (Y) üzerinde nedensel etkisi olduğunu gösterir.

Üst panelde görülebileceği gibi, F10.7 ile SSN arasındaki CCM eğrileri oldukça yüksek korelasyon düzeyine ulaşsa da her iki yönlü haritalama doğruluğu (mavi ve kırmızı çizgi, CCM - $\rho \approx 0.97$), Pearson korelasyon çizgisinin altında kalmaktadır ($\rho \approx 0.9756$). Bu durum, F10.7 ve SSN arasındaki ilişkinin büyük ölçüde doğrusal yapıda olduğunu ve CCM yöntemiyle ek bir doğrusal olmayan nedensel etki ortaya çıkmadığını göstermektedir. Dolayısıyla, iki seri senkronize hareket etse de dinamik yapı açısından güçlü bir tek yönlü nedensellikten söz etmek zordur.

Orta panelde, aa indeksi için SSN'den aa'nın haritalama becerisi (mavi çizgi, CCM - $\rho \approx 0.571$), aa'dan SSN'e göre (kırmızı çizgi, CCM - $\rho \approx 0.668$) daha düşüktür. Her iki eğri de Pearson korelasyon katsayısı olan $\rho \approx 0.406$ değerinin üzerinde yer alsa da aa'nın geçmiş değerlerinden SSN'in haritalanması daha yüksek bir haritalama becerisi göstermektedir. Bu durum, SSN'in aa üzerinde doğrusal olmayan bir nedensel etkisinin varlığına işaret etmektedir. SSN'in aa üzerindeki etkisi daha güçlü görünse de mavi çizginin de Pearson korelasyonunun üzerinde başarı göstermesi, SSN'in de aa hakkında dolaylı bilgi içerebileceğini ve bazı çıkarımlara olanak tanıdığını göstermektedir.

Alt paneldeki Dst analizi incelendiğinde, SSN'den Dst'nin haritalama becerisi (mavi çizgi, CCM - $\rho = 0.447$), Dst'den SSN'e göre (kırmızı çizgi, CCM - $\rho = 0.454$) biraz daha düşüktür. Her iki yönlü CCM haritalama eğrisi, mutlak değeri $|\rho| \approx 0.38$ olan Pearson korelasyon çizgisinin üzerine çıkmıştır. Bu sonuçlar, SSN ile Dst arasında karşılıklı doğrusal olmayan bilgi taşınımı olduğunu, ancak etkilerin görece zayıf olduğunu göstermektedir. Dst'nin geçmiş değerlerinden SSN'in haritalamasının (kırmızı çizgi) korelasyon açısından daha yüksek olması, SSN'in Dst üzerinde doğrusal olmayan bir bilgi taşıdığını ve bu yönde kısmen zayıf da olsa bir nedensel etkinin varlığını desteklemektedir.

Sonuç olarak, SSN ve F10.7 arasındaki ilişki güçlü ancak esasen doğrusal, SSN ile aa ve Dst arasındaki ilişkiler ise daha düşük doğrusal korelasyona rağmen anlamlı doğrusal olmayan nedensel etkileşimler içermektedir. Bu durum, özellikle jeomanyetik indekslerin güneş aktivitesinden etkilendiğini ve bu etkinin karmaşık, doğrusal olmayan yollarla ortaya çıktığını göstermektedir. Bu bağlamda CCM yöntemi, özellikle doğrusal korelasyonun yetersiz kaldığı durumlarda, güneş ve jeomanyetik aktivite değişkenleri arasındaki karmaşık ve nedensel etkileşimleri daha iyi ortaya koyma potansiyeline sahiptir.

4.5. Simplex Projection Yöntemi ile Üretilen Tahminler

Bu bölümde, güneş ve jeomanyetik aktivite indekslerinin gelecekteki değerlerini tahmin etmek amacıyla kullandığımız Simplex Projection yöntemi ile elde edilen tahmin sonuçları sunulmaktadır. Bu yöntem, zaman serilerinin geçmiş değerlerinden gömülü faz uzayı (embedding space) oluşturularak, sistemin geometrik yapısına dayalı bir şekilde ileriye dönük tahminler üretmektedir (bkz. Bölüm 3.4.1). Özellikle doğrusal olmayan ve kaotik sistemler için uygun olan Simplex Projection, geçmiş örüntülerden (patterns) hareketle benzer durumların gelecekteki sonuçlarını tahmin etme prensibine dayanır. Analizlerde hem aylık ortalama güneş (SSN, F10.7) hem de aylık ortalama jeomanyetik (aa, Dst) indeksler için tahminler yapılmış; modellerin performansı görsel ve sayısal olarak değerlendirilmiştir. Tahminlerin doğruluğu, mevcut olan belirli gerçek değerlerle tahmin edilen değerler arasındaki ortalama mutlak hata (MAE) ve korelasyon katsayısı (ρ) gibi ölçütlerle analiz edilmiştir. Bu bölümde sunulan şekiller, tahmin edilen değerlerin zaman içindeki davranışlarını ortaya koyarak, sistemlerin uzun vadeli tahmin edilebilirliğini ve Simplex Projection yönteminin uygulanabilirliğini değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Güneş Çevrimi 25 ve 26 için en başarılı tahminleri elde edebilmek amacıyla, split point (ayırma noktası), E (gömme boyutu) ve τ (zaman gecikmesi)

parametrelerinin tüm farklı kombinasyonları denenmiştir. Split point (ayırma noktası), kütüphane (library) kümesi ile tahmin (prediction) kümesi arasındaki ayırma yerini belirler ve kaotik sistemlerde tahmin performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir (Gerçekker vd. 2025, hakem aşamasında). Gömme boyutu, sistemin durum uzayının yeniden yapılandırılabilmesi için gereken değişken sayısını belirler ve güneş çevrimlerinin temel dinamiklerini yakalamak açısından kritik öneme sahiptir. Daha yüksek gömme boyutları, sistemin davranışının daha ayrıntılı bir şekilde yeniden yapılandırılmasını sağlarken, daha düşük boyutlar sistemi olması gerekenden fazla basitleştirebilir. Zaman gecikmesi ise, durum uzayı yeniden yapılandırılırken kullanılan ardışık noktalar arasındaki zamansal aralığı temsil eder ve verideki otokorelasyonları yakalamaya yardımcı olur. Bu iki parametre ile split point değerlerini ayarlayarak yalnızca en iyi tahminleri üretmeyi değil, aynı zamanda tahminlerin kararlılığını ve doğruluğunu da test etmek amaçlanmıştır. Bu parametrelerin farklı değerleri, özellikle çevrimlerin zamanı ve genliği açısından tahmin eğrilerinde hafif kaymalara yol açabilir. Örneğin, bazı durumlarda daha yüksek E değerleri daha karmaşık dinamikleri yakalayabilir ve bu da maksimum noktalarının biraz daha erken ya da geç gerçekleşmesine neden olabilir. Benzer şekilde, τ 'nın farklı değerleri, çevrimlerin yükseliş ve düşüş evrelerindeki geçişlerin yumuşaklığı üzerinde etkili olabilir. Bu çalışmada tahminlerde gözlemlenen farklılıklar büyük ölçüde split point, E ve τ kombinasyonlarının çeşitliliğinden kaynaklanmaktadır. Bu yaklaşım, tahminlerin parametre duyarlılığını ortaya koymamıza olanak tanımış ve Güneş Çevrimi 25 ve 26'nın potansiyel şekline daha kapsamlı bir bakış sunmuştur.

Güneş Çevrimi 25'in geri kalan kısmı ile bir sonraki Güneş Çevrimi 26'nın birleşik tahmini amacıyla, tahminler her senaryo için E (2 ile 10 arası), τ (1 ile 70 arası) ve split point (1000 ile 2700 arası) değerleri değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Bu üç parametrenin çeşitli kombinasyonlarını denemek için: İlk olarak 1000. split point'ten başlanmış, gömme boyutu E=2 olarak sabitlenmiş ve her τ değeri için tahminler üretilmiştir. Aynı hesaplamalar gömme boyutu sabit tutulmak kaydıyla diğer tüm split pointler için tekrarlanmıştır. Daha sonra gömme boyutu E=3'ten E=10'a kadar aynı işlemler tekrarlanmıştır. En başarılı tahminleri seçmek için MAE (ortalama mutlak hata) ve ρ (korelasyon katsayısı) kriterleri kullanılmıştır. Bu kriterler, Güneş Çevrimi 25'e ait şu ana kadar ki tüm gözlem verilerine (yaklaşık 60 ay) göre hesaplandı. Son olarak, her indeks için en başarılı tahminler seçilmiştir.

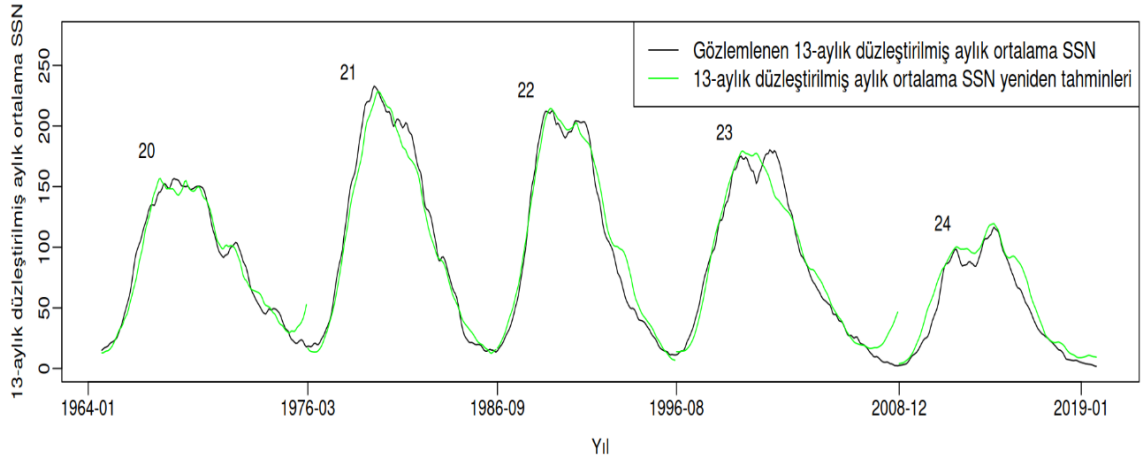
4.5.1. Güneş Leke Sayısı (SSN) için Güneş Çevrimi 25 ve 26 Tahminleri

4.5.1.1. Geçmiş Çevrimlerin Tekli ve Çiftli Tahminleri (Postcast'leri)

Güneş Çevrimi 25'in geri kalan kısmı ve bir sonraki Güneş Çevrimi 26'nın tahminlerine başlamadan önce, tahmin yönteminin performansını göstermek amacıyla son beş güneş çevrimi (Güneş Çevrimleri 20-24) için tahminler gerçekleştirilmiştir. Tahmin edilecek her bir çevrim için, gözlemsel veri seti bir önceki çevrimin sonuna kadar library set olarak alınmış ve izleyen çevrim(ler) tahmin edilmiştir. Tahminlerin başarısını belirlemek için Ortalama Mutlak Hata (MAE) ve Korelasyon Katsayısı (ρ) kullanılmıştır. Her iki veri seti için de ρ değerinin 0.95'in üzerinde olması tahminin başarılı kabul edilmesi için gerekli kriter olarak seçilmiştir. MAE değeri açısından ise, aylık düzeltilmiş veriler için %5'in, aylık ortalama veriler için ise %20'nin altında olması başarı ölçütü olarak kabul edilmiştir. Gömme boyutu ve zaman gecikmesi ve

split point değişkenleri ($E = 2-10$, $\tau = 1-70$ ve split point = 1000-2700) için birden fazla başarılı tahmin elde edilmiştir. Sonuç olarak, her bir gömme boyutu için elde edilen tüm başarılı tahminler dikkate alınarak her bir çevrim (Güneş Çevrimleri 20-24) için en yüksek performansa sahip tahminler en başarılı olarak seçilmiştir. (Geçmiş çevrimlerin tekli tahminleri için Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'a bakınız).

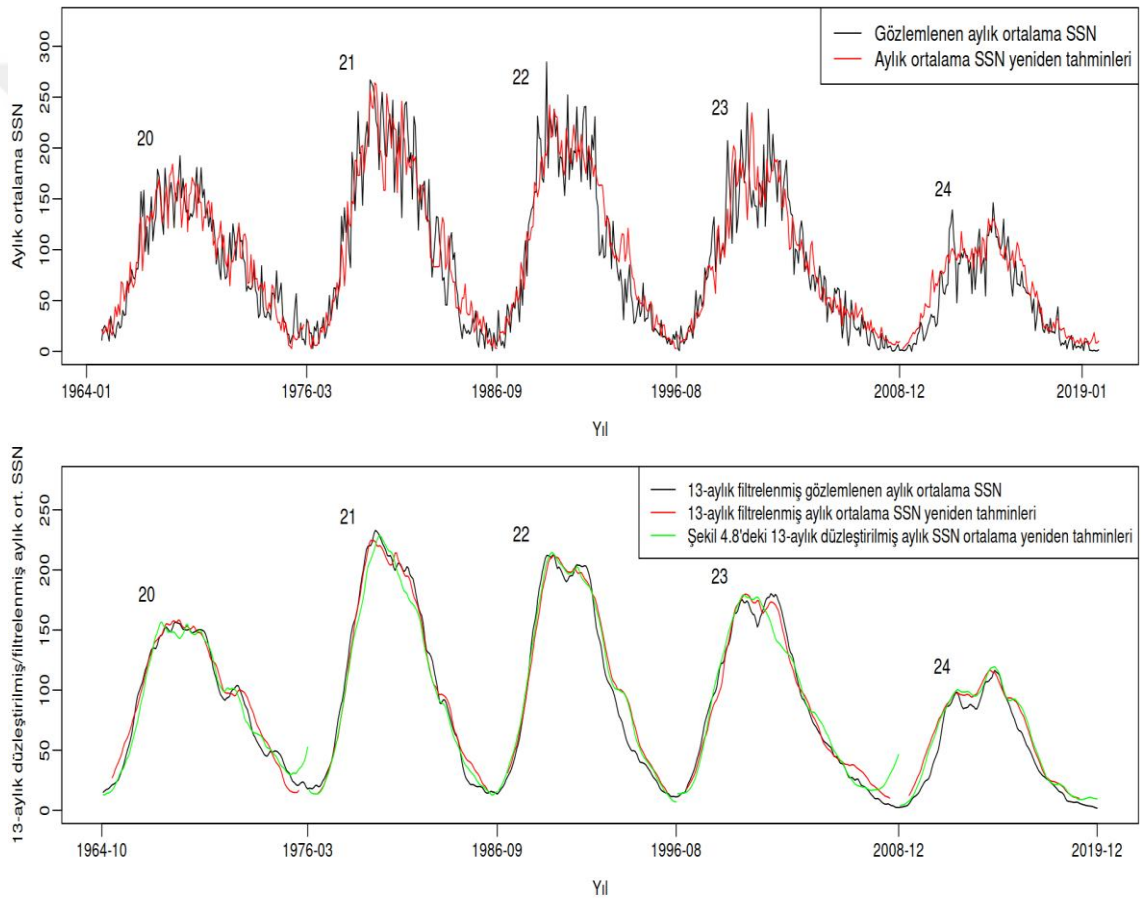
Şekil 4.8, 13-aylık düzleştirilmiş SSN veri setine dayalı olarak elde edilen geçmiş çevrimlerin tahminlerini göstermektedir. 13-aylık düzleştirilmiş (smoothed) gözlemler (siyah) ve tahmin edilen (yeşil) veriler arasında, çevrim maksimumları için dikkat çekici bir uyum gözlemlenmektedir. Ancak Güneş Çevrimi 23'ün ikinci piki yüksek doğrulukla yeniden yapılandırılmamıştır. Bu durum, Güneş Çevrimi 23'ün görece olağandışı bir çevrim olmasından kaynaklanmaktadır. Özellikle bu çevrim, daha düşük güneş leke aktivitesi, güneş leke sayısındaki değişiklikler, azalmış toplam güneş ışıınımı (TSI) değişimleri ve önceki çevrimlerden belirgin sapmalar ile tanımlanan anormal bir çevrim olarak kabul edilmektedir (de Toma vd. 2004). Ayrıca, hem Güneş Çevrimi 23 hem de Güneş Çevrimi 20 için minimum dönemlerde önemli sapmalar mevcuttur. Bu nedenle, aylık düzleştirilmiş verilerden elde edilen tahminlerin performansı, maksimum dönemlere kıyasla minimum dönemlerde daha düşüktür.



Şekil 4.8. 13-aylık düzleştirilmiş SSN verileri kullanılarak oluşturulan geçmiş güneş çevrimlerinin tekli tahminleri.

Şekil 4.9'un üst paneli, aylık ortalama SSN veri setine (kırmızı) dayalı olarak elde edilen geçmiş çevrimlerin tahminlerini göstermektedir; bu tahminler, gözlenen verilerle (siyah) oldukça tutarlıdır. Aylık ortalama veriler, ani artışlar ve azalmalar gibi kısa vadeli değişimleri doğrudan yansıttığı için daha kaotik bir yapı sergilemektedir. Bu tür verilerde bozulmalar ve gürültü bileşenleri daha belirgindir. Tahmin edilen verilerdeki küçük dalgalanmaları azaltmak ve genel eğilimi ortaya koymak amacıyla 13 aylık hareketli ortalama filtresi uygulanmıştır. Bu nedenle, tahmin (postcast) ve tahminlerin filtrelenmiş haline "13-aylık filtrelenmiş ortalama SSN" olarak atıfta bulunulacaktır (13-aylık düzeltme ve 13-aylık filtreleme aynı işlemdir, fakat karışıklık yaratmaması açısından aylık ortalama verilerden üretilen tahmin ve bu tahminlere uyguladığımız düzeltme işlemine filtreleme diyerek vurguluyoruz). Şekil 4.9'un alt panelinde görüldüğü üzere, aylık ortalama verilere dayalı güneş çevrimi tahminleri, özellikle çevrim maksimumları için, 13-aylık düzleştirilmiş verilere (yeşil)

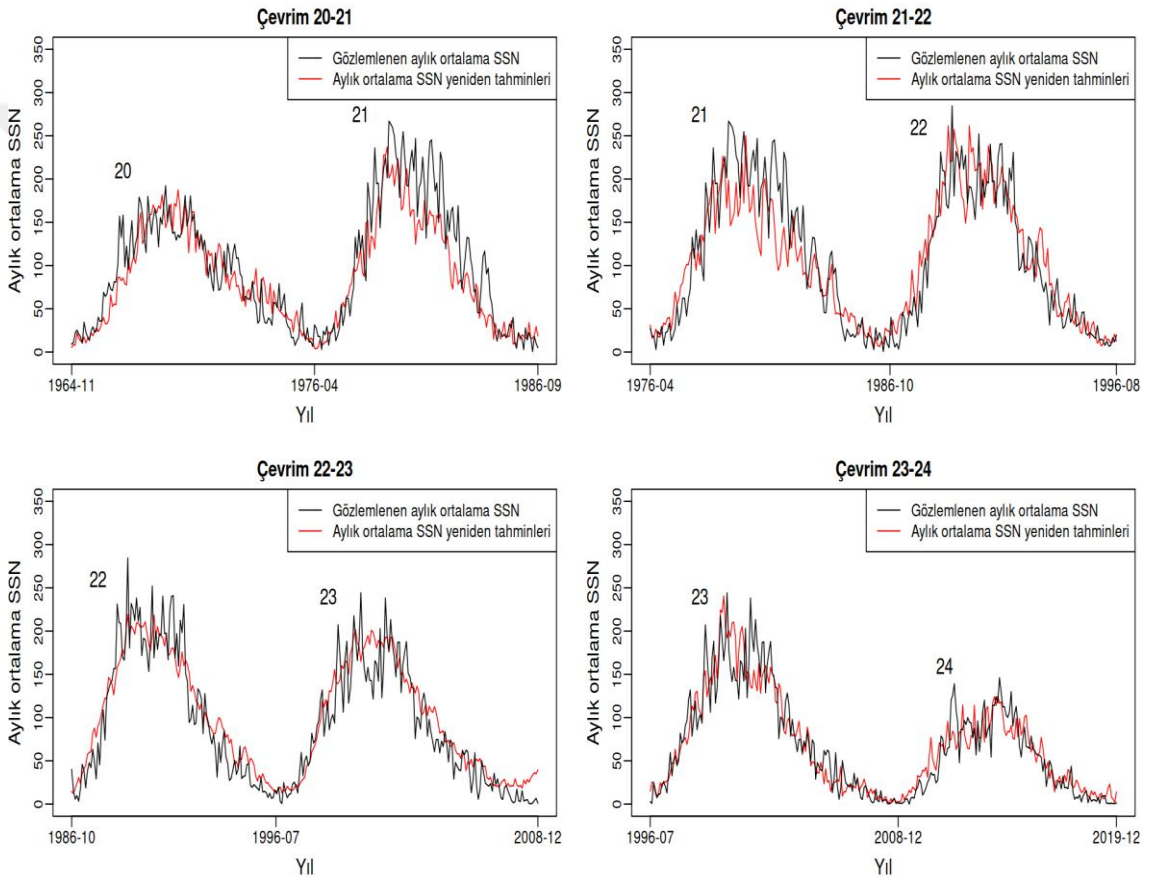
dayalı tahminlere kıyasla daha iyi sonuçlar üretmektedir. Bu fark, çevrim minimumları için daha da belirgindir. Ancak şunu da belirtmek gerekir ki, 13-aylık düzleştirilmiş verilerden elde edilen tahminlerde veri kaybı yaşanmamaktadır. Buna karşın, 13-aylık filtrelenmiş tahmin verileri, filtreleme işlemi sırasında oluşan kenar etkisi nedeniyle ilk 6 ve son 6 veri noktasını kaybeder. Bu nedenle, 13-aylık filtrelenmiş tahmin verilerinde (kırmızı), çevrimlerin başlangıç ve bitiş minimumlarında küçük boşluklar oluşmaktadır. Buna rağmen, özellikle bazı çevrimlerin tahminlerinde minimumlar için 13-aylık düzleştirilmiş verilere (yeşil) kıyasla çok daha iyi performans göstermiştir. Ayrıca, ortalama korelasyon katsayısı (ρ) temelinde yapılan değerlendirmede, 13-aylık filtrelenmiş tahminlerin ($\rho = 0.9959$), 13-aylık düzleştirilmiş tahminlere ($\rho = 0.9952$) göre daha üstün olduğu sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, bundan sonraki tahmin işlemlerinde yalnızca aylık ortalama veriler kullanılacak ve bu verilerden aylık ortalama tahminler üretilerek sonrasında 13-aylık filtrelenmiş versiyonları sunulacaktır.



Şekil 4.9. Aylık ortalama SSN kullanılarak üretilen geçmiş güneş çevrimlerinin tekli tahminlerinin orijinal (üst panel) ve 13-aylık filtrelenmiş (alt panel) versiyonu. Yeşil çizgiler (alt panel), net bir karşılaştırma için Şekil 4.8'deki 13-aylık düzleştirilmiş aylık SSN tekli tahminlerini göstermektedir.

Uzun vadeli zaman adımlarında (iki çevrimlik) elde edilen sonuçları ve tahmin performansını değerlendirebilmek amacıyla, aynı yöntem geçmiş beş çevrim için de uygulanmıştır. Bu tahminlerde, yukarıdaki sonuçlar dikkate alınarak yalnızca aylık ortalama SSN kullanılmış ve dört çift güneş çevrimi için tahminler üretilmiştir: 20-21, 21-22, 22-23 ve 23-24. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.10'da sunulmakta olup, çevrimlerin

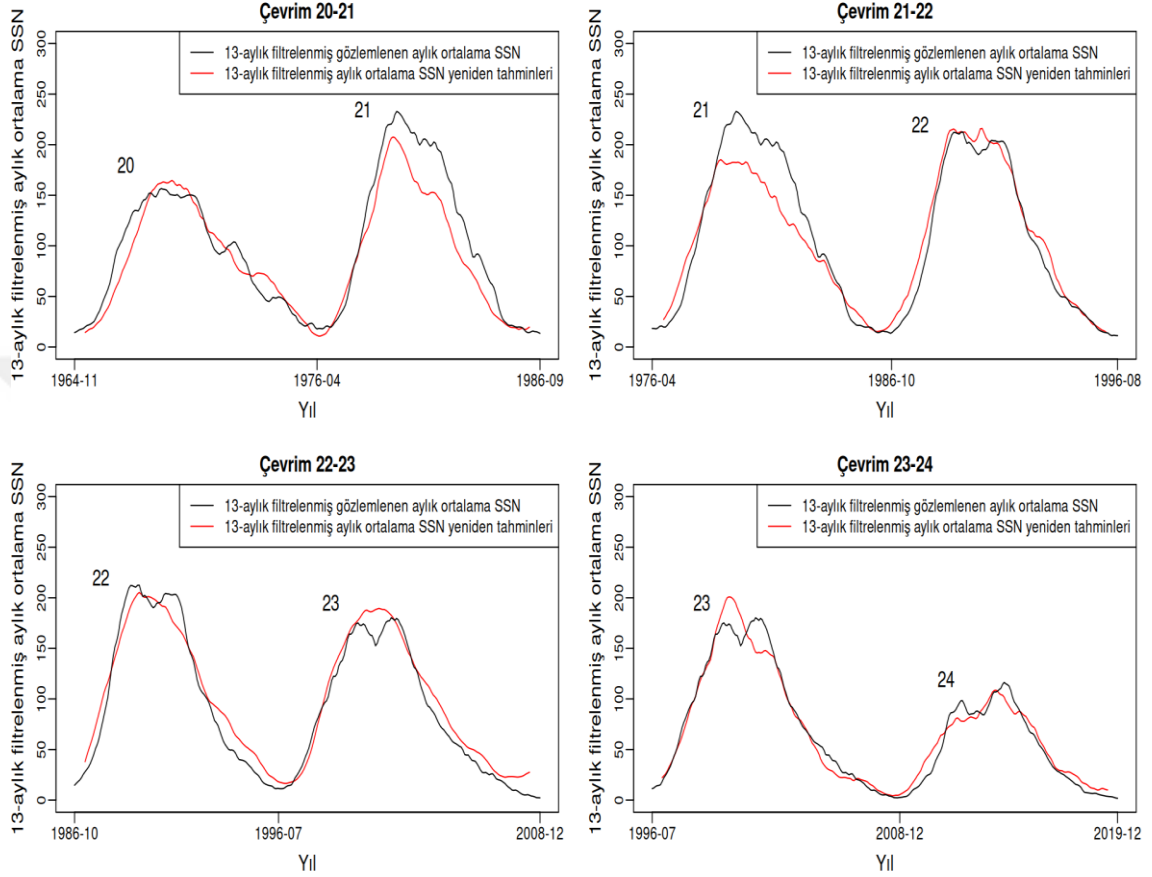
genliği ve genel yapısının başarılı şekilde yakalandığı görülmektedir. Bununla birlikte, özellikle bazı çevrimlerin maksimum evrelerinde (Güneş Çevrimi 21 ve 23) küçük farklılıklar gözlemlenmektedir; bu çevrimlerde tahmin edilen değerler gözlemsel verilerden belirli oranda sapmaktadır. Bu tür sapmalar tekli çevrim tahminlerinde görülmediği için, bu durum kaotik davranış gösteren verilerde uzun vadeli tahmin üretmenin doğal bir sonucu olarak değerlendirilmiştir. Bu da güçlü pik noktalarına sahip (örneğin Güneş Çevrimi 21) ya da belirgin çift pik yapısı sergileyen (örneğin Güneş Çevrimi 23) çevrimler için uzun vadeli tahminlerin doğruluğunun biraz daha düşük olabileceğini düşündürmektedir. Yine de maksimumlardaki sapmalar aşırı düzeyde değildir ve minimumlar başarılı şekilde tahmin edilmiştir. Sonuç olarak, aylık ortalama veriler kullanılarak uzun vadeli zaman adımlarında üretilen tahminlerin oldukça başarılı olması, kullanılan tahmin yönteminin performansını bir kez daha doğrulamaktadır.



Şekil 4.10. Aylık ortalama SSN (siyah çizgi) kullanılarak oluşturulan geçmiş çevrimlerin çiftli tahminleri (kırmızı çizgi).

Bir sonraki adımda, Şekil 4.10'da sunulan tahmin değerlerine 13-aylık filtreleme uygulanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Tahminlerin filtrelenmiş sonuçları hem çift çevrim tahminlerinin başarısını hem de Şekil 4.10'a kıyasla gözlemlenen değişimleri daha net bir şekilde ortaya koymaktadır. Yalnızca 21-22 çiftinde, Güneş Çevrimi 21 için sapma nispeten yüksektir; buna karşın genel yapı ve Güneş Çevrimi 22 başarıyla yakalanmıştır. 20-21 çevrim çifti için ise, Güneş Çevrimi 21'in iniş evresi küçük ölçekli bir sapma ile başarılı şekilde tahmin edilmiştir; bu sapmanın muhtemelen bu çevrimin analiz edilen diğer çevrimlere kıyasla daha güçlü

olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. 23-24 çevrim çifti değerlendirildiğinde ise, daha önce belirtildiği gibi Güneş Çevrimi 23'ün belirgin çift pik yapısına sahip olması nedeniyle pik noktasındaki sapma bu duruma atfedilebilir. Diğer çift çevrimlerin tahminlerinde ise genlik ve yapılar oldukça iyi örtüşmekte ve yöntem, çift çevrim tahmininde de başarısını ortaya koymaktadır.

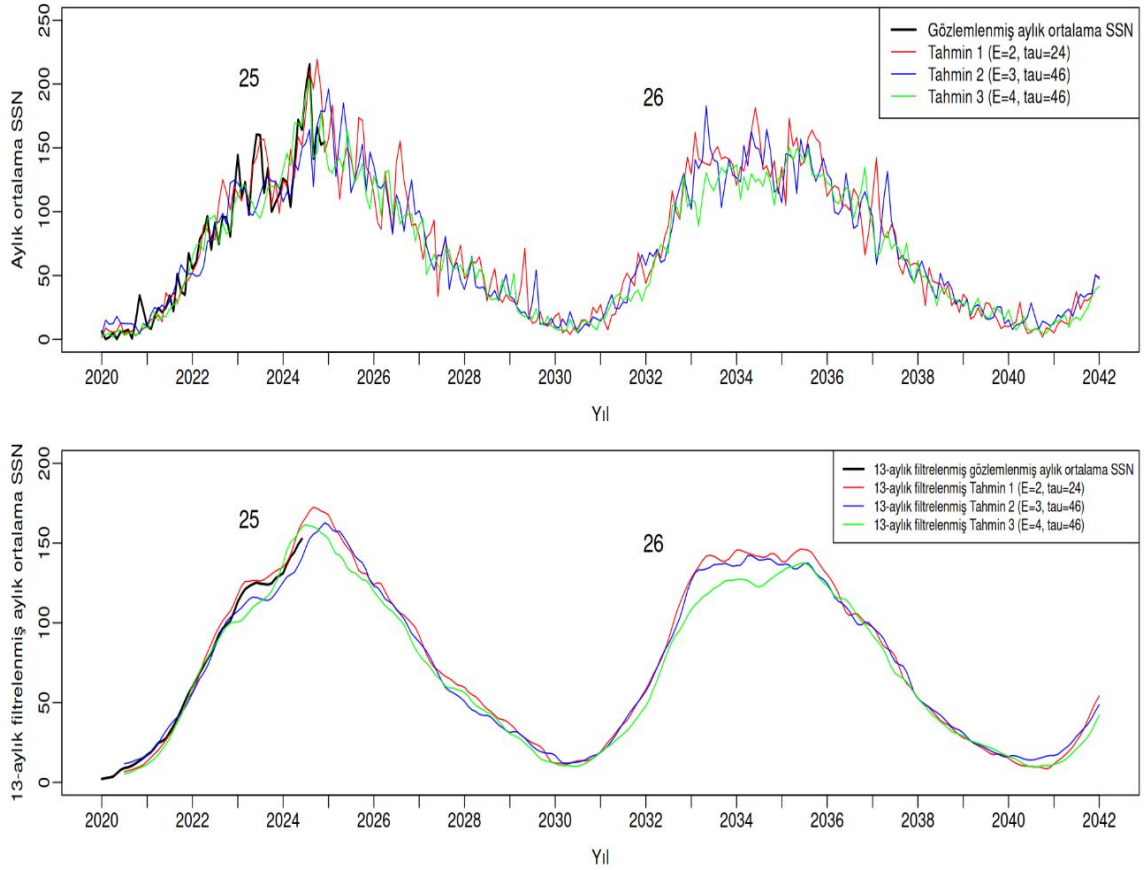


Şekil 4.11. Şekil 4.10'da aylık ortalama SSN kullanılarak oluşturulan çiftli tahminlerin 13-aylık filtrelenmiş versiyonu.

Tüm şekiller ve sonuçlar incelendiğinde, tekli çevrim tahmin performansının çiftli çevrim performansına göre daha iyi olduğu görülmektedir. Bu, beklenen bir sonuçtur; çünkü kaotik ve doğrusal olmayan sistemlerde tahmin süresi uzadıkça tahmin başarısı düşer (Kantz ve Schreiber 2003; Bradley ve Kantz 2015; Lorenz 2017). Ancak, tahmin süresi iki katına çıkmasına rağmen performansta iki katlık bir düşüş gözlenmemiştir. Buna göre, yöntem çift çevrim tahminlerinde de oldukça iyi bir performans sergilemiş, neredeyse tüm çift çevrimleri ve bunların genliklerini doğru şekilde yakalamış ve tahmin etmiştir. Bu sonuçlara dayanarak, Güneş Çevrimi 25'in geri kalan kısmı ile Güneş Çevrimi 26'nın birleşik tahmini için sağlam bir temel sunulmakta ve güneş çevrimlerinin çiftli/ikili tahmininin uygulanabilirliği vurgulanmaktadır.

4.5.1.2. Aylık ortalama SSN kullanılarak Güneş Çevrimi 25'in Geri Kalan Kısımı ve Bir Sonraki Güneş Çevrimi 26'nın Tahminleri

Şekil 4.12'nin üst paneli, aylık ortalama SSN kullanılarak üretilen Güneş Çevrimi 25 ve 26 tahminlerini göstermektedir; alt panelde ise aynı verilerin 13-aylık filtrelenmiş versiyonları sunulmaktadır. Üst panelde yer alan tahminler, Güneş Çevrimleri 25 ve 26'nın birleşik tahmini için farklı parametrelerle üretilmiş en başarılı üç tahmini (farklı renklerle gösterilmiştir) göstermektedir. Tahminlerin başladığı dönem olan Çevrim 25'in ilk yarısındaki tahmin sonuçları ve performansı büyük önem taşımaktadır. Çünkü, mevcut gözlemsel verilerin tamamı (siyah çizgi) bu kısmı kapsamaktadır. Başarılı tahminlerin, gözlemlenen verilerle başlangıçta yüksek derecede örtüşmesi, tahminlerin devam eden gerçekleşmemiş kısımlarına güvenilebileceğini göstermektedir. Alt panelde ise, yapılan tahminlere 13-aylık filtre uygulanarak elde edilen çevrimler sunulmuştur. Bu panelde, tahminlerin gözlemlenen kısımla örtüşmesi ve tahmin edilen çevrimlerin potansiyel yapıları daha belirgin hale gelmektedir. Tahminler birbirine oldukça paralel ilerlemektedir; yalnızca Tahmin 3 (yeşil), özellikle Çevrim 26 için, genlik bakımından biraz daha düşük kalmaktadır.



Şekil 4.12. Aylık ortalama SSN kullanılarak oluşturulan Güneş Çevrimi 25 ve 26 tahminlerinin (üst panel) ve 13-aylık filtrelenmiş (alt panel) versiyonu. Renkli çizgiler değişen E ve tau değerleri kullanılarak üretilen en başarılı tahminleri içerir.

Şekil 4.12'de de görülen en başarılı 3 tahmine göre, Güneş Çevrimi 25, çift pikli bir yapıya sahip olan maksimum evresine halihazırda ulaşmıştır. Yapılan tahminler,

Güneş Çevrimi 26'nın Çevrim 25'ten biraz daha zayıf ancak Çevrim 24'ten daha güçlü olacağını göstermektedir. Çevrim 26'nın genel yapısı belirgin bir çift pik şeklinde olabilir; ancak daha doğru tahminler, Çevrim 25'in sonuna gelindiğinde ve daha fazla veri gözlemlendiğinde yapılabilecektir. Ayrıca, tahmin edilen Çevrim 26'nın geçmiş çevrimlerle karşılaştırıldığında Çevrim 20'ye benzediği görülmektedir. Bu 6-7 çevrimlik dönem, yaklaşık 70-100 yıl süren uzun vadeli Gleissberg Çevrimi'nin (Gleissberg 1939) bir başka kanıtı olabilir. Bu nedenle, Çevrim 26 için iki olası senaryo öne çıkmaktadır: i) Belirgin çift pikli yapıya sahip, Çevrim 20'ye benzer bir çevrim, ii) Hafif dalgalanan düz bir pike sahip, aylık ortalama SSN açısından 150.6-181.5 aralığında (veya 13-aylık filtrelenmiş SSN'e göre 137.4-146.2 aralığında) bir pik değeri olan ve genel yapısı itibarıyla yine Çevrim 20'ye benzeyen bir çevrim.

Son olarak, maksimum ve minimum pik değerleri ve bunların gerçekleştiği tarihlere ilişkin bulgular aşağıda özetlenmiştir:

Güneş Çevrimi 25'in minimumunun, aylık ortalama SSN'e göre 3.8-5.3 ile 2030 yılı Mayıs-Temmuz ayları civarında gerçekleşmesi öngörülmektedir. Bu tahmin sonuçlarına 13-aylık filtre uygulandığında, minimumun zamanı Nisan-Haziran 2030 olarak değişmiş ve bu dönemdeki aylık filtrelenmiş SSN'nin 9.9-12.1 aralığında olacağı tahmin edilmiştir.

Güneş Çevrimi 26'nın maksimumunun, aylık ortalama SSN'ye göre 150.6-181.5 aralığına ulaşmasıyla, Haziran 2034 - Mart 2035 ayları arasında gerçekleşmesi beklenmektedir. Minimumun ise 2040 Ekim ayında, aylık ortalama SSN'ye göre 1.9-7.8 aralığında olduğu dönemde gerçekleşeceği öngörülmektedir. 13-aylık filtrelenmiş tahmin sonuçlarına göre, Çevrim 26'nın maksimumunun Haziran 2035 civarında, 13-aylık filtrelenmiş SSN'ye göre 137.4-146.2 aralığında gerçekleşmesi; minimumunun ise 2040 Temmuz-Kasım ayları civarında, 8.5-13.9 aralığında olması beklenmektedir.

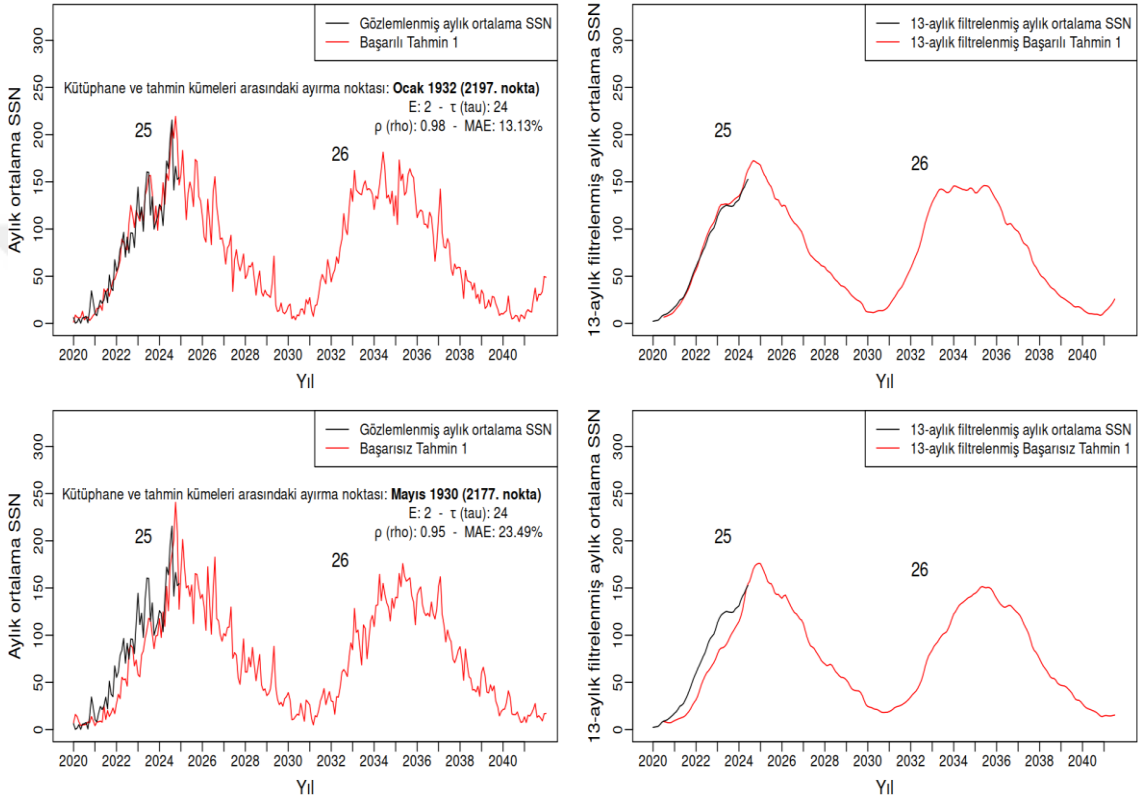
4.5.1.3. Tahmin Performansının Kütüphane ve Tahmin Kümelerine Bağımlılığı: Split Point'in (Ayırma Noktasının) Önemi

Kaos teorisi, başlangıç koşullarına duyarlı dinamik sistemleri inceler. Kaotik sistemlerde, başlangıç koşullarındaki küçük değişiklikler, sistemin gelecekteki davranışında önemli sapmalara yol açabilir. Bu nedenle, başlangıç koşulları uzun vadeli tahmin edilebilirlik açısından sınırlayıcı bir etkidir.

Simplex Projection yönteminde, başlangıç koşullarının doğru şekilde belirlenmesi, tahmin sürecinin başarısını doğrudan etkiler. Gözlemsel veri kümesinin bittiği noktanın (bu nokta, tahmin kümesinin bittiği nokta ile aynıdır), yani, tahminin başladığı noktanın (başlangıç noktası) önemi ilk olarak Sarp vd. (2018) tarafından ortaya konmuştur.

Ancak tahmin başarısı yalnızca tahminin başlangıç noktasına bağlı değildir. Başarılı bir tahmin elde edebilmek için, kütüphane (library) kümesinin sona erdiği ve tahmin (prediction) kümesinin başladığı noktanın seçimi - yani split point (ayırma noktası) - tahmin başarısı açısından son derece önemlidir.

Şekil 4.13, aylık ortalama SSN kullanılarak üretilen başarılı (sol üst panel) ve başarısız (sol alt panel) bir tahmin örneğini göstermektedir; aynı tahminlerin 13-aylık filtrenilmiş versiyonları ise sağ panellerde sunulmuştur. Bu tahminler, aynı parametreler ve aynı koşullar altında üretilmiştir (Şekil 4.12’deki Tahmin 1, $E=2$, $\tau=24$). Başarısız tahmin, Güneş Çevrimi 25’in yükselen kolunun genliğini ve Güneş Çevrimi 25 ve 26’nın tüm izleyen evrelerini belirgin şekilde düşük tahmin etmiştir; bu durum, gözlemsel veri ve üst panellerdeki başarılı tahminle karşılaştırıldığında açıkça görülmektedir. Buradaki başarısız tahminin nedeni, optimal split point’in değiştirilmiş olmasıdır.



Şekil 4.13. Kümeler için optimal (sol üst panel) ve optimal olmayan (sol alt panel) ayırma noktası (split point) seçimiyle aylık ortalama SSN kullanılarak oluşturulan Güneş Çevrimi 25 ve 26 tahminleri ve bu tahminlerin 13-aylık filtrenilmiş versiyonu (sağ üst ve alt panel).

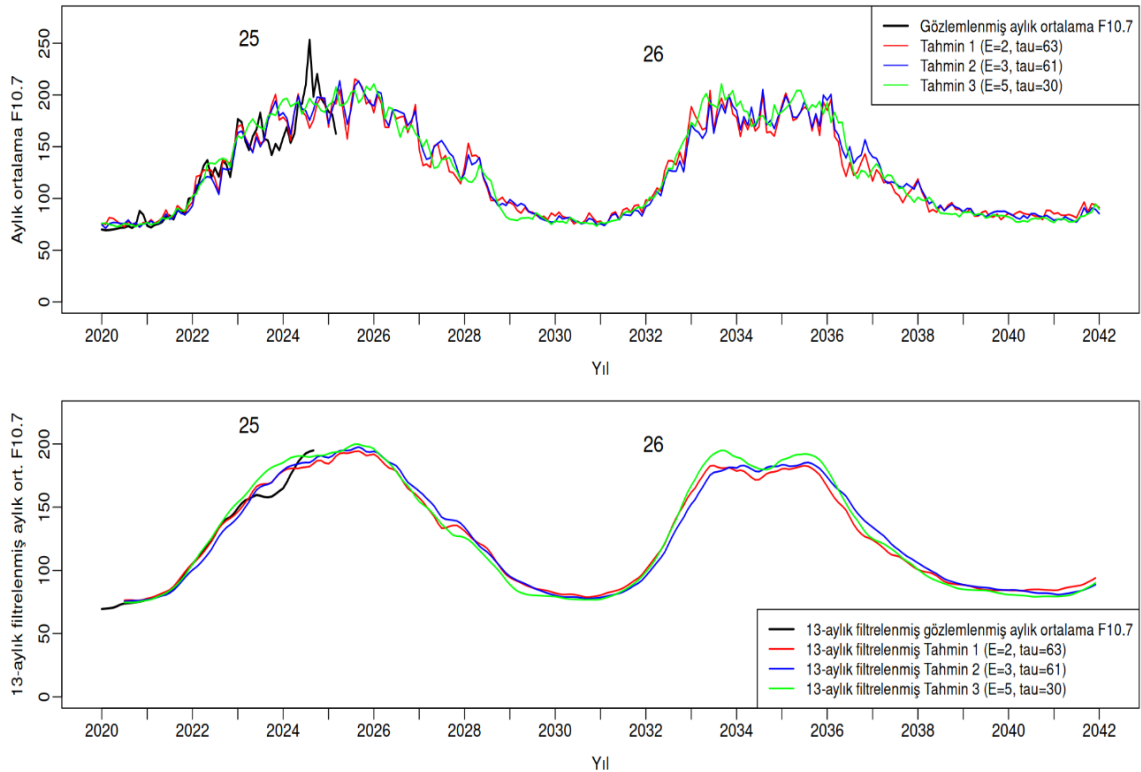
Tahminlerde kullanılan aylık ortalama SSN veri seti, Temmuz 1749’dan Aralık 2019’a kadar olan dönemi kapsayan yaklaşık 3250 veri noktasından oluşmaktadır. Başarılı tahmin için, ilk 2197 veri noktası kütüphane (library) kümesi olarak alınmış, kalan 1053 nokta ise tahmin (prediction) kümesi olarak kullanılmıştır. Başarısız tahmin için ise split point 2177/1073 olarak belirlenmiştir. Başka bir deyişle, kütüphane kümesinin son 20 veri noktası kütüphaneden çıkarılarak tahmin kümesine dahil edilmiştir. Başarılı Tahmin 1 (üst panel), Güneş Çevrimi 25’in yükselen kolunun başlangıcı ile iyi bir uyum göstermekte ve Güneş Çevrimi 26’nın potansiyel yapısını tutarlı şekilde tahmin etmektedir. Buna karşılık, başarısız Tahmin 1 (alt panel), yükselen kolda belirgin sapmalar göstermekte, tahminin devamı ve Güneş Çevrimi 26’nın potansiyel şekli (Şekil 4.12’deki tahminlere ve potansiyel şekillere göre) önemli ölçüde kayma içermektedir. Ayrıca, Ortalama Mutlak Hata (MAE) başarılı tahmin için %13.13,

başarısız tahmin için ise %23.49'dur. Yani, optimal ayırma noktasının değiştirilmesi MAE değerinin neredeyse iki kat artmasına yol açmıştır. Bu iki tahmin sonucu, doğrusal olmayan ve kaotik sistemlerde kütüphane ve tahmin kümeleri arasındaki ayırma noktasının (split point) doğru seçilmesinin ne kadar kritik olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

4.5.2. F10.7 için Güneş Çevrimi 25 ve 26 Tahminleri

Bu bölümde, aylık ortalama F10.7'ye yönelik Güneş Çevrimi 25'in geri kalan kısmı ve yaklaşmakta olan Güneş Çevrimi 26'nın tahminleri sunulmaktadır. Tahmin süreci, daha önce SSN indeksinde izlenen adımlarla benzer şekilde uygulanmıştır; çeşitli parametre kombinasyonları denenerek en başarılı tahminler seçilmiştir. Farklı olarak, bu ve gelecek indeksler için geçmiş çevrimlerin tahminleri (postcast) üretilmemiştir. Bunun nedeni, F10.7, aa ve Dst indekslerinin veri sayısının SSN'e kıyasla daha az olması ve SSN tahminlerinde tahmin yönteminin performansının halihazırda kanıtlanmış olmasıdır.

Şekil 4.14, aylık ortalama F10.7'den elde edilen Güneş Çevrimi 25 ve 26 tahminlerini göstermektedir. Burada, çevrimlerin yapısının SSN tahminlerinden elde edilen olası şekillere benzer olduğu görülmüştür ve Güneş Çevrimi 26 için iki olası şekil önerilmektedir: i) Hafif dalgalı ve kısmen düz bir pik yapısı, ii) net bir çift pik yapısı. Elde edilen tahminler, tıpkı SSN sonuçlarında olduğu gibi Güneş Çevrimi 26'nın Çevrim 25'ten biraz daha zayıf ancak Çevrim 24'ten daha güçlü olacağını göstermektedir.



Şekil 4.14. Aylık ortalama F10.7 kullanılarak oluşturulan Güneş Çevrimi 25 ve 26 tahminlerinin (üst panel) ve 13-aylık filtrelenmiş (alt panel) versiyonu. Renkli çizgiler değişen E ve tau değerleri kullanılarak üretilen en başarılı tahminleri içerir.

Güneş Çevrimi 25'in minimumu aylık ortalama sonuçlara göre Aralık 2030 ile Şubat 2031 civarında 73.3-74.4 SFU (Solar Flux Unit - Güneş Akı Birimi) aralığında aylık ortalama F10.7 ile beklenmektedir. Bu sonuçlara 13-aylık filtre uygulandığında minimum zamanı Ekim 2030 ile Aralık 2030 civarında 76.8-79.7 SFU olarak elde edilmiştir.

Güneş Çevrimi 26'nın maksimumu aylık ortalama sonuçlara göre Haziran 2033 ile Mayıs 2035 civarında 204.3-205.3 SFU aralığında, 13-aylık filtrelenmiş sonuçlara göre de maksimum Eylül 2033-Ağustos 2035 civarında 182.8-195 SFU aralığında elde edilmiştir. SSN ile karşılaştırıldığında tahmin sonuçları genlik açısından oldukça benzer, fakat zaman açısından daha geniş bir aralıkta kalmıştır. Bu da Güneş Çevrimi 26'nın F10.7'den elde edilen olası şeklinin yukarıda verilen ikinci ihtimale (ii) daha yakın olabileceğini gösterir.

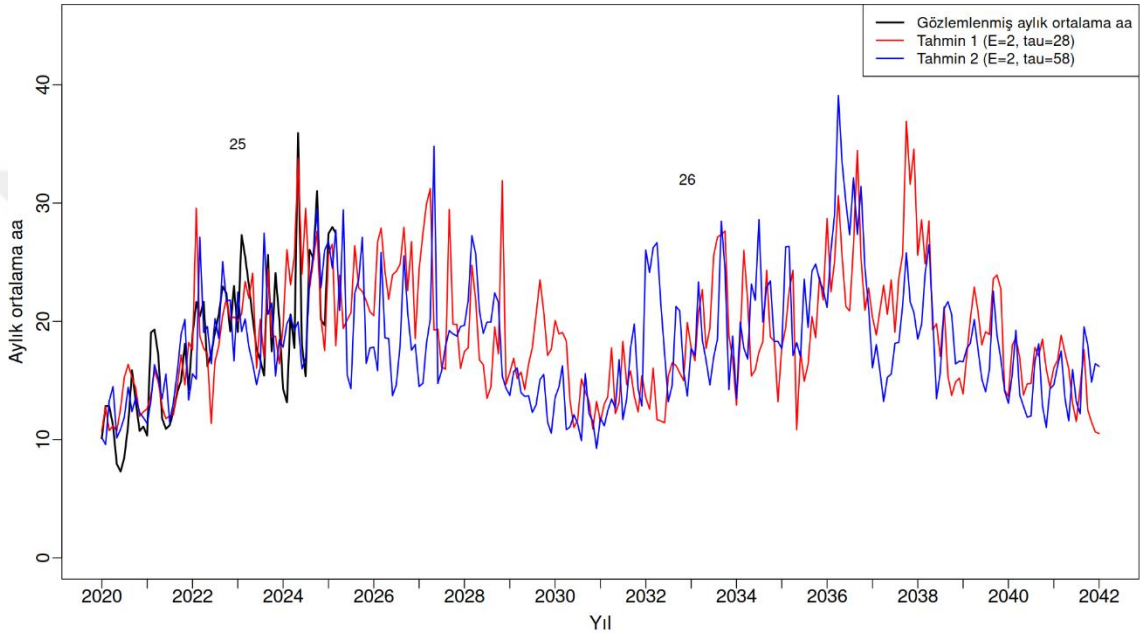
Güneş aktivite göstergeleri kendi içinde değerlendirildiğinde, SSN ve F10.7 hem fiziksel temelleri hem de zamansal davranışları açısından oldukça benzer özellikler sergilemektedir. Bu iki veri seti arasındaki korelasyon katsayısının ($\rho \approx 0.976$) oldukça yüksek olması, güneş çevrimlerinin genel yapısı ve evrimsel süreçleri açısından ortak bilgi taşıdıklarını göstermektedir. SSN, doğrudan gözlemlenebilen güneş lekeleri üzerinden hesaplanırken; F10.7, güneş koronasından yayılan radyo emisyonlarının bir ölçüsüdür ve özellikle güneş atmosferindeki plazma koşullarını yansıtır. Ancak her iki gösterge de güneş aktivitesinin farklı boyutlarını temsil etse de çevrimsel davranışları büyük ölçüde paralel seyretmektedir.

Bu bağlamda, F10.7 tahminleri ile SSN için daha önce elde edilen tahminlerin benzer sonuçlar vermesi, çevrimler için elde edilen tahminlerin yapısal güvenilirliğini ve modelin genel geçerliliğini güçlendirmektedir. Özellikle Güneş Çevrimi 25 ve 26 için hem SSN hem de F10.7'nin tahmin edilen maksimum ve minimum noktalarının zaman ve genlik açısından yakınlık göstermesi ve şekil olarak benzemesi, farklı veri kaynaklarından elde edilen tahminlerin birbiriyle tutarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu tür örtüşmeler, yalnızca kullanılan yöntemin sağlamlığını değil, aynı zamanda güneş çevrimlerinin olası gelecekteki evrim şekillerine ilişkin varsayımların doğruluğunu da desteklemektedir. Ayrıca bu durum, modelin güneş aktivitesine ait temel dinamikleri hem gözle doğrudan sayılan görsel göstergeler (SSN) hem de güneş atmosferinin fiziksel özelliklerine dayalı ölçümler (F10.7 radyo akısı) üzerinden başarıyla temsil edebildiğini göstermektedir.

4.5.3. aa İndeksi için Güneş Çevrimi 25 ve 26 Tahminleri

Bu bölümde, küresel jeomanyetik aktiviteyi temsil eden aa indeksi için Güneş Çevrimi 25'in kalan kısmı ve yaklaşmakta olan Güneş Çevrimi 26'ya ilişkin tahminler sunulmaktadır. Tahmin süreci, daha önceki bölümlerde SSN ve F10.7 için izlenen yöntemle paralel biçimde yürütülmüş; gömme boyutu (E) ve zaman gecikmesi (τ) ve split point parametrelerinin geniş bir kombinasyon aralığında test edilmesiyle elde edilen en başarılı tahminler seçilmiştir. Ancak, farklı olarak aa indeksi sonuçlarına 13-aylık filtreleme uygulanmamıştır. Bunun temel nedeni, jeomanyetik aktivite serilerinde literatürde filtrelenmiş veya düzleştirilmiş versiyonların nadiren kullanılması ve analizlerde genellikle doğrudan aylık ortalama değerlerin tercih edilmesidir.

Şekil 4.15, Güneş Çevrimi 25 ve 26 için üretilen iki farklı aylık ortalama aa tahmini içermektedir. Her iki tahmin eğrisi de gözlemlenen veriyle (siyah çizgi) oldukça uyumlu ilerlemekte, bu da tahminlerin geçerliliğini desteklemektedir. Tahminlere göre, Güneş Çevrimi 25 için jeomanyetik aktivitenin minimuma erişeceği zamanı 2030 yılı Kasım-Aralık ayları civarında 9.25-10.9 nT (nanoTesla) aylık ortalama aa ile gerçekleşecektir. Güneş Çevrimi 26'da jeomanyetik aktivitenin maksimumu ve minimumu için iki ihtimal vardır: a) maksimumu 36.9 nT aylık ortalama aa ile Ekim 2037 ve minimumu 11.5 nT aylık ortalama aa ile Temmuz 2041, b) maksimumu 39.1 nT aylık ortalama aa ile Nisan 2036 ve minimumu 11 nT aylık ortalama aa ile Kasım 2040 olarak elde edilmiştir.



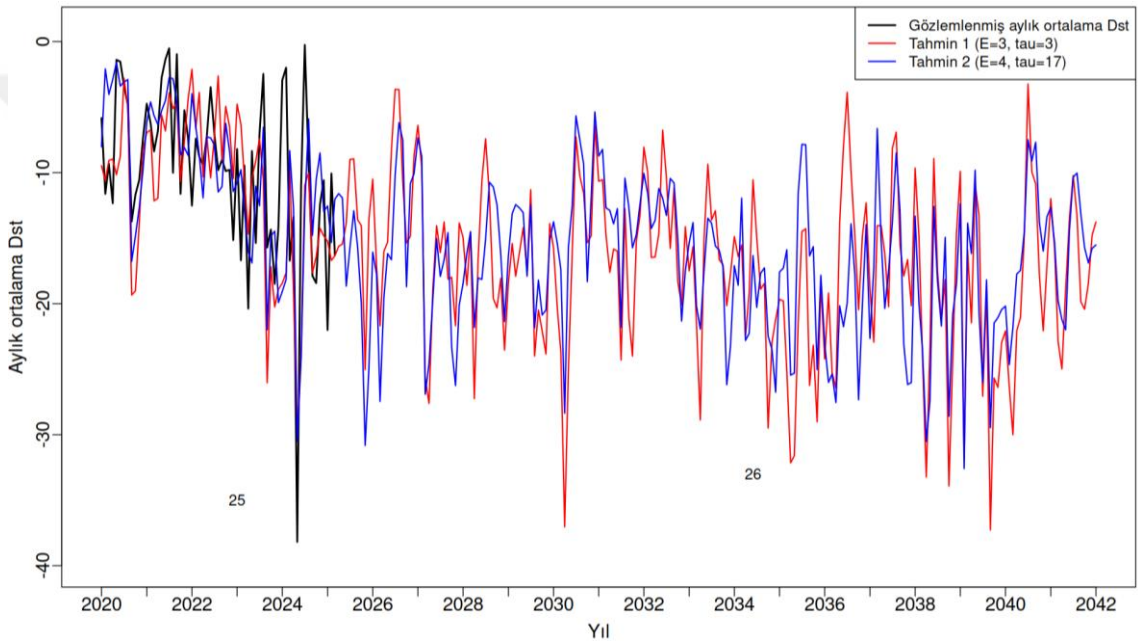
Şekil 4.15. Aylık ortalama aa indeksi kullanılarak oluşturulan Güneş Çevrimi 25 ve 26 tahminleri. Kırmızı ve mavi çizgiler E=2 için farklı tau değerleri kullanılarak üretilen en başarılı iki tahmini içerir.

Tahmin sonuçları, SSN ve F10.7 sonuçlarıyla karşılaştırıldığında bazı önemli farklılıklar içermektedir. Özellikle, aa indeksine dayalı tahminlerde Güneş Çevrimi 26'nın maksimum evresinde, Güneş Çevrimi 25'e kıyasla daha güçlü bir jeomanyetik aktivite tahmin edilmektedir. Ancak çevrimlerin genel şekil ve eğilimleri göz önüne alındığında, Güneş Çevrimi 26, yalnızca maksimum genlik açısından baskın görünmektedir; genel yapısal bütünlük ve ortalama düzey bakımından ise Güneş Çevrimi 25'e benzer ya da bir miktar daha zayıf bir çevrim gibi gözükmemektedir. Bu durum, Güneş Çevrimi 26'nın Çevrim 24'ten daha güçlü, ancak Çevrim 25'e kıyasla sınırlı ölçüde daha zayıf olacağı yönündeki çıkarımımızı desteklemektedir. Sonuç olarak, aa indeksi üzerinden elde edilen tahminler, SSN ve F10.7 gibi güneş aktivite göstergelerden elde edilenlerle genel olarak tutarlı bir eğilim ortaya koymakta; ancak jeomanyetik sistemin daha yüksek frekanslı ve doğrudan Güneş kaynaklı olaylara duyarlı yapısı, tahminlerde daha fazla kısa vadeli dalgalanmanın gözlenmesine neden olmaktadır.

4.5.4. Dst İndeksi için Güneş Çevrimi 25 ve 26 Tahminleri

Bu bölümde, küresel jeomanyetik fırtına şiddetini temsil eden aylık ortalama Dst indekse yönelik olarak Güneş Çevrimi 25'in geri kalanı ve yaklaşmakta olan Güneş Çevrimi 26'nın tahmin sonuçları sunulmuştur. Diğer jeomanyetik indeks olan aa için olduğu gibi, burada da 13-aylık filtreleme uygulanmamıştır; çünkü Dst gibi ani ve yüksek frekanslı değişim içeren indekslerde filtreleme, sistemin karakteristik özelliklerini bastırabilmektedir.

Şekil 4.16'da yer alan grafik, Güneş Çevrimi 25 ve 26'ya ilişkin iki farklı Dst tahminini göstermektedir. Her iki tahmin, özellikle Güneş Çevrimi 25'in bitiş evresinde ve Güneş Çevrimi 26'nın yükseliş evresinde önemli ölçüde tutarlılık göstermektedir. Bu durum, tahminlerin güvenilirliğini desteklemektedir.



Şekil 4.16. Aylık ortalama Dst indeksi kullanılarak oluşturulan Güneş Çevrimi 25 ve 26 tahminleri. Kırmızı ve mavi çizgiler değişen E ve tau değerleri kullanılarak üretilen en başarılı iki tahmini içerir.

Tahmin sonuçlarına göre, Güneş Çevrimi 25'in minimumu, 2030 yılı Aralık ayında -5.4 nT ile -6.4 nT aylık ortalama Dst aralığında beklenmektedir. Güneş Çevrimi 26'nın maksimumunun ise -37.3 nT ile Eylül 2039 veya -28.6 nT ile Ekim 2038'de aylık ortalama Dst ile en şiddetli piki yapması beklenmektedir (Dst indeksinde negatif değerlerin büyüklüğü, jeomanyetik aktivitenin şiddetiyle doğru orantılıdır; büyük negatif değerler, daha güçlü fırtınaları işaret eder). Yine de, genel yapıya bakıldığında çevrimin genel maksimumu için iki olası durum vardır: a) -25.1 nT ile -31.6 nT aylık ortalama Dst ile Mart-Nisan-Mayıs 2035 aylarında, b) -25.4 nT ile -27.6 nT aylık ortalama Dst ile Şubat-Mart-Nisan 2036 aylarında maksimum genliğe ulaşacaktır. Güneş Çevrimi 26'nın minimumu ise Temmuz 2040'ta -3.2 nT ile -7.5 nT aylık ortalama Dst aralığında beklenmektedir.

Tahmin eğrileri, ani düşüşler ve kısa vadeli dalgalanmalar açısından Dst indeksinin karakterine uygun bir yapı sergilemektedir. Bu yönüyle, Dst indeksine ait tahmin sonuçları; daha düzgün seyreden SSN ve F10.7 tahminlerinden farklı bir davranış sunsa da genel çevrimsel yapı açısından onlarla uyumludur. Ayrıca, aa indeksi ile Dst tahminleri arasındaki tutarlılık da sonuçlarda görülebilir: Özellikle Güneş Çevrimi 26'nın yükseliş evresi ve maksimum evresi gibi dönemlerde, aa indeksindeki artış ile Dst indeksindeki azalma (büyük negatif değerlere iniş) senkronize şekilde gözlemlenmektedir. Bu zıt yönlü dinamik, her iki jeomanyetik indeksin fiziksel temelleriyle uyumlu olup, tahminlerin iç tutarlılığını ve fiziksel anlamlılığını desteklemektedir. Bu bağlamda, Dst indeksine ait tahminlerin hem genel çevrim yapısında hem de aylık ortalama aa tahminleri ile olan ilişkilerinde yüksek düzeyde tutarlılık sergilediği görülmektedir. Bu bulgu, Simplex Projection yönteminin Dst gibi yüksek değişkenlik gösteren seriler için bile anlamlı sonuçlar üretebildiğini ortaya koymaktadır.



5. TARTIŞMA

5.1. Hurst Üssü

Bu tez çalışmasında, güneş ve jeomanyetik aktivite indekslerine ait zaman serilerinin uzun dönemli bellek özellikleri Hurst üssü yöntemiyle analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar literatürde bildirilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Hesaplamalar sonucunda, SSN için $H = 0.8794$, F10.7 için $H = 0.9324$, aa için $H = 0.9044$ ve Dst için $H = 0.8446$ bulunmuştur. Bu değerler, tamamının 0.8'in oldukça üzerinde olması nedeniyle güçlü bir uzun vadeli kalıcılığa işaret etmektedir. Özellikle F10.7 için hesaplanan $H = 0.9324$ ve aa için $H = 0.9044$ gibi yüksek değerler, bu indekslerin geçmiş eğilimlerini güçlü biçimde sürdürme eğiliminde olduğunu ve güneş ile jeomanyetik aktivitenin doğrusal olmayan ancak deterministik doğasının bir yansıması olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Dst indeksine ait $H = 0.8446$ değeri ise, kısa vadeli rastlantısal dalgalanmaların ötesinde, özellikle aylık ve yıllık ortalama düzeyde önemli bir kalıcılığa sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, elde edilen bulgular güneş ve jeomanyetik aktivite serilerinin uzun vadeli korelasyonlar taşıdığını doğrulamakta ve bu indekslerin tamamen rastlantısal süreçlerle kontrol edilmediğini, geçmişten gelen dinamiklerin gelecekteki davranış üzerinde anlamlı etkiler yarattığını göstermektedir.

Literatürdeki pek çok çalışma, güneş aktivite göstergeleri olan SSN ve F10.7 serilerinin belirgin bir uzun vadeli hafıza sergilediğini ortaya koymuştur. Farklı veri aralıkları ve analiz teknikleriyle elde edilen H değerleri genellikle 0.7-0.9 bandında yer almakta olup, 0.5'ten anlamlı biçimde büyük oldukları görülmektedir. Örneğin, Kılçık vd. (2009) SSN için $H \approx 0.87$ raporlamış, Xapsos ve Burke (2009) ise aylık SSN verisinde $H \approx 0.81$ elde ederek 1700'lü yıllardan günümüze uzanan uzun SSN kayıtlarında kalıcılığın yüksek olduğunu vurgulamışlardır. Rypdal ve Rypdal (2012) tarafından yapılan daha kapsamlı bir çalışmada ise, SSN ve çeşitli güneş aktivite göstergeleri üzerinde Hurst üssü, DFA (Detrended Fluctuation Analysis), varyans ölçekleme ve güç spektrumu (PSD) analizi gibi çeşitli zaman serisi analiz yöntemleri uygulanarak, bu serilerin uzun dönemli bağımlılık gösterdiği ve Hurst üssü değerinin $H \approx 0.9$ civarında olduğu bulunmuştur. Bu bulgular, güneş çevrimlerinin tamamen rastlantısal süreçler olmadığını ve geçmiş eğilimlerin geleceği etkilediğini göstermektedir.

Benzer şekilde, doğrudan güneş aktivitesini ölçen F10.7 de uzun vadeli bellek özellikleri bakımından SSN ile benzer bir yapı sergiler. 1947'den günümüze uzanan F10.7 serisini inceleyen çalışmalar, bu indeksin Hurst üssü değerinin SSN'ye çok yakın ya da daha yüksek olduğunu raporlamıştır. Örneğin, Singh ve Bhargawa (2017), 1947-2017 dönemi için F10.7 verisi üzerinde gerçekleştirdikleri yeniden ölçeklenmiş aralık (R/S) analizinde $H \approx 0.93$ bulmuş, aynı analizde SSN için $H \approx 0.90$ raporlamışlardır. Bu değer, F10.7 serisinin de kalıcı bir karakter taşıdığını; yani yüksek veya düşük aktivite dönemlerinin art arda gelme eğiliminde olduğunu göstermektedir.

Dst indeksi, Dünya'nın ekvatorial bölgesindeki manyetik alan değişimini ölçer ve özellikle manyetik fırtına dönemlerinde ani negatif sapmalarla karakterize edilir. Bu indeksin uzun dönemli hafıza özellikleri ise zaman ölçeğine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Kiselev (2017), 1957-2011 yılları arasındaki saatlik Dst verileri üzerinde

gerçekleştirdiği analizde, Hurst üssü değerlerinin yıllık veriler için $H = 0.79-0.94$ ve aylık veriler için $H = 0.8-1$ aralığında değiştiğini belirlemiştir ki bu sonuçlar tez çalışmasındaki bulgularla uyumludur.

5.2. Lyapunov Üssü

Güneş ve jeomanyetik aktivite indekslerinin kaotik özellikleri bu tez kapsamında Lyapunov üssü yöntemi ile analiz edilmiş ve her bir indeks için en büyük Lyapunov üssü (LLE) değeri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, SSN için $\lambda = 0.00987$, F10.7 için $\lambda = 0.01433$, aa için $\lambda = 0.01363$ ve Dst için $\lambda = 0.04041$ bulunmuştur. Bu değerlerin tamamı pozitiftir ve bu durum, analiz edilen tüm indekslerin deterministik kaotik bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. SSN ve F10.7 gibi güneş aktivite göstergeleri, nispeten düşük Lyapunov üssü değerleri ile görece daha kararlı bir yapıyı işaret ederken, özellikle Dst indeksi için elde edilen yüksek λ değeri, sistemin daha hızlı öngörülemez hale geldiğini göstermektedir. Bu fark, Dst indeksinin daha yüksek frekanslı ve dışsal etkilerle şekillenen jeomanyetik bir sistemin parçası olduğunu yansıtmakta ve sistemin daha karmaşık bir dinamik yapı taşıdığını ortaya koymaktadır.

Literatürde, Lyapunov üssü uzun yıllardır güneş ve jeomanyetik zaman serilerinin kaotik doğasını değerlendirmede kullanılan ölçütlerden biridir. Özellikle SSN, F10.7 ve Dst indeksleri üzerine yapılan çalışmalar, bu serilerin deterministik kaotik özellikler sergilediğini ortaya koymuştur. Örneğin, Ostryakov ve Usoskin (1990), aylık ortalama SSN verileri (1749-1987) üzerinde gerçekleştirdikleri analizde en büyük Lyapunov üssünü $0.03-0.04$ aralığında hesaplamışlardır. Mundt vd. (1991), 1878-1945 dönemine ait 12 günlük ortalama SSN verileri ile yaptıkları analizde, $\lambda \approx 0.02$ bulmuş ve bu değer deterministik kaotik yapı ile uyumlu olduğunu vurgulamışlardır. Pavlos vd. (1992) ise aylık SSN serisinde pozitif Lyapunov üssü tespit etmiş ve sistemin rastlantısal değil, deterministik bir yapı sergilediğini belirtmiştir. Zhang (1995), SSN verileri üzerinde yaptığı çalışmada $\lambda \approx 0.023$ bulmuş ve bu değer yaklaşık 3.6 yıllık bir öngörülebilirlik ufkuna karşılık geldiğini ifade etmiştir. Kremliovsky (1995), 13-aylık düzleştirilmiş SSN verisi üzerinde gerçekleştirdiği analizde $\lambda \approx 0.02$ elde etmiş ve bu değer güneş çevrimlerinin 4-5 yıl gibi sınırlı bir süre boyunca tahmin edilebilir olduğunu ortaya koymuştur. Zhang (1996) da benzer şekilde, güncellenmiş SSN serileri ile yaptığı çalışmada Lyapunov üssünü $\sim 0.01-0.03$ aralığında bulmuştur. Greenkorn (2009), hem SSN hem de F10.7 serileri üzerinde gerçekleştirdiği analizde Lyapunov zamanını yaklaşık 4 yıl olarak belirlemiş, bu da $\lambda \approx 0.02$ büyüklüğünde bir üssün varlığını göstermektedir. Aynı çalışmada, 19. yüzyıldaki çevrimlerin daha stokastik, 20. yüzyıldaki çevrimlerin ise daha düzenli ve kaotik yapıda olduğu vurgulanmıştır. Crosson ve Binder (2009), SSN ve F10.7 verileri için yaptıkları çalışmada Simplex Projection yöntemiyle tahminler üretmiş ve elde ettikleri Lyapunov üssünü ~ 0.02 olarak raporlamışlardır. Jeomanyetik aktivite indeksleri açısından ise, Oludehinwa vd. (2021), saatlik Dst verisi üzerinde gerçekleştirdikleri analizde, fırtına şiddetine bağlı olarak Lyapunov üssü değerlerinin değiştiğini ortaya koymuşlardır. Hafif fırtınalarda LLE daha yüksek, şiddetli fırtınalarda ise daha düşük bulunmuştur; bu durum, güçlü jeomanyetik olayların sistemin dinamiklerini daha düzenli hale getirebileceğini göstermektedir.

5.3. Korelasyon Boyutu

Bu tez kapsamında, güneş ve jeomanyetik aktivite indekslerinin dinamik karmaşıklığını ortaya koymak amacıyla korelasyon boyutu (D_2) hesaplanmıştır. Elde edilen bulgulara göre, SSN için $D_2 = 3.39054$, F10.7 için $D_2 = 3.37424$, aa için $D_2 = 3.49621$ ve Dst için $D_2 = 3.71865$ 'tir. Bu değerlerin tümü, sistemlerin kaotik fakat deterministik bir doğaya sahip olduğunu ve rastgele süreçlerden önemli ölçüde ayrıldığını göstermektedir. SSN ve F10.7 gibi güneş aktivite göstergeleri, benzer D_2 değerleriyle birbirine yakın düzeyde dinamik karmaşıklık sergilemekte ve bu iki serinin benzer çekici yapılarıyla yönlendirildiği izlenimini vermiştir. Diğer yandan, Dst indeksinin 3.7'yi aşan D_2 değeri, bu serinin jeomanyetik süreçler içerisindeki daha yüksek düzeydeki dinamik karmaşıklığını ve daha fazla serbestlik derecesine sahip bir sistem tarafından üretildiğini ortaya koymaktadır.

Literatürde korelasyon boyutu yöntemi, güneş ve jeomanyetik aktivite zaman serilerinin kaotik doğasını belirlemek amacıyla sıklıkla kullanılmıştır. Mundt vd. (1991), 1878-1945 dönemine ait aylık SSN verileriyle gerçekleştirdikleri çalışmada korelasyon boyutunu $D_2 \approx 2.3$ olarak belirlemişlerdir. Bu çalışma, SSN'nin düşük boyutlu deterministik bir sistem tarafından üretildiği hipotezini güçlendirmektedir. Ardından, Kremliovsky (1994), 1749'dan itibaren başlayan aylık SSN serisi üzerinde gerçekleştirdiği analizde $D_2 \approx 2.4 \pm 0.2$ bulmuş ve bu değer, sistemin deterministik doğasını ve sınırlı bir öngörülebilirlik ufkunu yansıttığını ileri sürmüştür. Zhang (1996), 1850-1992 arası aylık SSN verileriyle gerçekleştirdiği analizde korelasyon boyutunu $D_2 \approx 2.8$ olarak raporlamış; bu değer, SSN serisinin orta düzeyde bir fraktal karmaşıklığa sahip olduğunu ve sınırlı derecede öngörülebilir bir yapıya işaret ettiğini göstermiştir. Greenkorn (2009) tarafından yapılan kapsamlı bir literatür özeti çalışmasında ise, çeşitli zaman aralıklarını kapsayan SSN verileri üzerinde yapılan korelasyon boyutu analizlerinde D_2 değerlerinin genellikle 2.0 ile 3.3 arasında değiştiği raporlanmıştır. Örneğin, Price vd. 1749-1992 arası aylık SSN verilerini kullanarak korelasyon boyutunu $D_2 \approx 3.3$ olarak hesaplamışlardır. Bu sonuç, bu tezde SSN için elde edilen $D_2 = 3.39054$ değeriyle oldukça tutarlıdır. Sonucun yukarıda verilen diğer çalışmalardan biraz daha farklı olmasının başlıca nedeni, kullanılan veri setinin daha uzun zaman aralığını kapsamaması ve daha güncel çevrimleri içermesi olduğu düşünülmektedir. Böylece sistemin faz uzayındaki yapısı daha ayrıntılı örneklenmiş ve dinamik karmaşıklık daha yüksek tahmin edilmiştir.

F10.7 verileri üzerinde yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Romanelli vd. (1987), 1964-1984 dönemine ait günlük F10.7 verilerini kullanarak korelasyon boyutunu yüksek güneş aktivitesi dönemlerinde $D_2 \approx 3.3$, düşük aktivite dönemlerinde ise $D_2 \approx 4.5$ olarak raporlamışlardır. Bu sonuçlar, güneş çevriminin farklı evrelerinde sistemin karmaşıklığında değişim yaşandığını, fakat genel olarak düşük boyutlu kaotik bir yapı sergilediğini ortaya koymuştur. Bu tezde elde edilen $D_2 = 3.37424$ değeri, özellikle yüksek aktivite dönemlerine karşılık gelen bu aralığa oldukça yakın olup, literatürle uyum içerisinde.

Jeomanyetik indeksler açısından bakıldığında, özellikle aa ve Dst verileri üzerinde yapılan korelasyon boyutu analizleri daha sınırlı sayıdadır. Ancak AE indeksi gibi benzer jeomanyetik göstergelerden elde edilen sonuçlar yol gösterici olmuştur. Vassiliadis vd. (1990), AE indeksi üzerinde gerçekleştirdikleri analizde $D_2 \approx 3.6$

değerini elde etmişlerdir. Takalo vd. (1993) ise yine AE serisinden ortalama $D_2 \approx 3.4$ hesaplamıştır. Bu değerler, bu tezde aa verisi için hesaplanan $D_2 = 3.49621$ değeriyle aynı düzeyde olup, küresel jeomanyetik aktivitenin de sınırlı boyutta deterministik bir sistemden kaynaklandığını göstermektedir.

Dst indeksine ilişkin daha güncel bir çalışma Ogunjo vd. (2021) tarafından sunulmuştur. 1964-2008 dönemine ait saatlik Dst verileri analiz edilerek, dört güneş çevriminde düşük boyutlu kaotik yapılar belirlenmiş ve korelasyon boyutunun genel olarak 3-5 aralığında değiştiği bildirilmiştir. Bu çalışma, bu tezde Dst için hesaplanan $D_2 = 3.71865$ değeriyle tutarlıdır. Ayrıca, Dst indeksinin diğer indekslere kıyasla daha yüksek bir dinamik karmaşıklığa sahip olduğu da hem bu çalışma hem de tez bulgularıyla desteklenmektedir.

Sonuç olarak, korelasyon boyutu yöntemiyle elde edilen bulgular, güneş ve jeomanyetik aktivite indekslerinin tamamının rastlantısal süreçler tarafından değil, düşük boyutlu deterministik sistemler tarafından üretildiğini ortaya koymaktadır. Elde edilen D_2 değerleri, literatürdeki önceki çalışmalarla büyük ölçüde örtüşmekte ve söz konusu zaman serilerinin deterministik kaotik yapılar barındırdığını doğrulamaktadır.

5.4. Yakınsak Çapraz Eşleme (CCM)

Bu bölümde SSN, F10.7, aa ve Dst indeksleri arasındaki nedensel ilişkiler konusunda yakınsak çapraz eşleme (CCM) yöntemiyle elde edilen bulgularımız, literatürde bildirilen sonuçlarla karşılaştırılarak tartışılmaktadır. Genel olarak, CCM analizleri güneş aktivite göstergelerinin jeomanyetik aktivite üzerinde yönlendirici (nedensel) etkiye sahip olduğunu, ters yönde ise zayıf bir etkinin bulunduğunu göstermiştir. Bu asimetri, literatürde uzun süredir bilinen bir olgu olup (Kamide ve Maltsev 2007; Du ve Wang 2011; Kirov vd. 2015; Reda vd. 2023), güneş çevrimi kapsamındaki değişimler jeomanyetik indekslerde yakından izlenebilmekte, ancak jeomanyetik indekslerin güneş aktivitesini belirlemesi sınırlı kalmaktadır.

Öncelikle, doğrusal ilişkiler temelinde yapılan klasik çalışmalar, güneş aktivitesi ile jeomanyetik indeksler arasında güçlü korelasyonlar olduğunu ortaya koymuştur. Örneğin, Waheed vd. (2015) Güneş Çevrimi 23 (1996-2008) ile Güneş Çevrimi 24 minimumunu kapsayan aylık veriler üzerinde yaptığı incelemede, SSN ile çeşitli jeomanyetik indeksler arasında korelasyon katsayılarını %80'e varan yüksek değerlerde bulmuştur. Özellikle SSN ile Dst, Kp, aa ve Ap indeksleri sırasıyla $r \approx 0.78, 0.83, 0.81$ ve 0.86 düzeyinde korelasyon göstermiş; benzer şekilde F10.7 de bu jeomanyetik indekslerle benzer yüksek korelasyonlar sergilemiştir ($r \approx 0.77-0.88$). Bu sonuçlar, güneş aktivitesinin uzun vadeli dalgalanmalarının jeomanyetik aktivitedeki değişimleri yakından yönlendirdiğini doğrulamaktadır. Nitekim tez çalışmasında CCM ile belirlediğimiz nedensel yön de bu korelasyonlarla uyumlu olarak SSN'den jeomanyetik indekslere doğru çıkmıştır. Bunun anlamı, SSN veya F10.7 gibi göstergelerdeki artışların, bir süre sonra jeomanyetik aktivite seviyesini yükselttiğidir. Literatürde de birçok çalışma güneş çevriminin yaklaşık 11 yıllık periyodunun jeomanyetik indekslerle senkronize bir artışla izlendiğini göstermiştir (bkz. Mayaud 1980; Le Mouél vd. 2012). Ancak bu ilişki tamamen eş-zamanlı değildir; örneğin Güneş Çevrimi 23'te jeomanyetik aktivitenin piki (aa ve Ap vb.), SSN'in pikinden birkaç ay daha geç gerçekleşmiştir. Gerçekten de 2000 yılında SSN pik değerine ulaşmışken, küresel jeomanyetik indeksler

(Kp, aa vb.) en yüksek seviyelerini 2001 yılında göstermiştir; bu durum jeomanyetik aktivitenin güneş aktivitesine gecikmeli bir yanıtının olduğunu ortaya koymaktadır (Kane 2002). Söz konusu gecikme, özellikle çevrimlerin düşüş fazında yüksek hızlı güneş rüzgarı akışlarının ve tekrarlayan koronal kütle atımlarının devam etmesine bağlanmıştır. Dolayısıyla, korelasyon analizleri Güneş ve Dünya sisteminin bağlantısını doğrularken, zamanlama ve nedensellik yönü hakkında sınırlı bilgi vermektedir.

Doğrusal olmayan nedensellik teknikleri, bu noktada devreye girerek geleneksel korelasyon yaklaşımlarının ötesine geçmektedir. Son yıllarda literatürde, Güneş-Dünya arasındaki karmaşık etkileşimleri çözümlemek için CCM, transfer entropisi, karşılıklı bilgi gibi yöntemler uygulanmaya başlanmıştır. Örneğin Wing vd. (2018), aktivite parametreleri arasındaki nedensel ilişkileri transfer entropisi (TE) yöntemiyle analiz etmiş ve SSN ile aa indeksi arasındaki bilgi akışının çift yönlü olduğunu ancak baskın yönün SSN'den aa'ya doğru olduğunu göstermiştir. Wing'in çalışmasında 1967-2014 dönemine ait aylık veriler kullanılmış ve TE analizleri sonucunda, geleneksel korelasyon grafiğinde görülmeyen önemli bir ayrıntı ortaya çıkmıştır: SSN'den aa'ya bilgi aktarımı, ters yönden istatistiksel olarak anlamlı derecede büyüktür. Yani SSN'deki değişimler, birkaç yıllık gecikmelerle (örneğin ~30-40 aylık gecikmeyle) jeomanyetik aa indeksine bilgi taşımakta; buna karşılık aa'daki dalgalanmalar da SSN hakkında bir miktar bilgi içermekte ancak etkisi çok daha zayıf kalmaktadır. Bu bulgu, tez çalışmasındaki CCM analizleriyle tutarlıdır: Tezde SSN ve F10.7'nin jeomanyetik indeksler üzerinde nedensel etkisini tespit ederken, jeomanyetik indekslerinden güneş göstergelerine belirgin bir nedensel etki saptanmamıştır. Wing vd. (2018) TE analizine göre aa'dan SSN yönüne düşük de olsa bir bilgi akışı bulunması, jeomanyetik indekslerin bir sonraki güneş çevrimine dair ipuçları barındırdığı şeklinde yorumlanabilir. Nitekim literatürde "jeomanyetik öncü (precursor)" yöntemler olarak bilinen ve güneş minimumu dönemlerindeki aa indeksinin bir sonraki çevrimin SSN pik değerini tahmin ettiği çalışmalar mevcuttur (Ohl 1976; McCracken ve Beer 2007; Kirov vd. 2018). Örneğin, Kirov vd. (2018) aa indeksinin minimum değerlerini kullanarak Güneş Çevrimi 24'ün maksimum SSN değerini tahmin etmişlerdir. Bu tür sonuçlar, jeomanyetik indekslerin Güneş'in kutup manyetik alanına duyarlı olduğunu ve bu alanın bir sonraki çevrimin dinamiklerini taşıdığı bilgisini desteklemektedir.

Öte yandan, CCM ve benzeri doğrusal olmayan nedensellik tekniklerinin uzay havası araştırmalarına uygulanmasına dair literatür henüz sınırlı olmakla birlikte giderek artmaktadır. Bu yöntemler, özellikle doğrusal korelasyon analizlerinin yetersiz kaldığı durumlarda değişkenler arası yönlü bilgi akışlarını ortaya koymak açısından büyük avantaj sunmaktadır. Literatürde, güneş patlamaları ile jeomanyetik indeksler arasındaki etkileşimleri inceleyen bazı çalışmalar, CCM yönteminin bu tür karmaşık ilişkileri belirlemede etkili olduğunu göstermiştir. Örneğin, Kılçık vd. (2020) tarafından yapılan bir çalışmada, farklı sınıf güneş patlamaları ile koronal kütle atımı hız endeksi (MCMESI) arasındaki nedensellik CCM yöntemiyle analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda, C ve M sınıfı patlamaların CME hızını X sınıfına kıyasla daha güçlü nedensel etkiyle artırdığı; ayrıca yalnızca C sınıfı patlamalar ile CME hızı arasında çift yönlü bir nedensel ilişki bulunduğu belirtilmiştir. Bu bulgu, CCM'nin yalnızca Güneş-Dünya arasındaki etkileşimleri değil, aynı zamanda Güneş'in kendi içsel süreçleri arasındaki doğrusal olmayan bilgi akışlarını da tespit etme gücüne sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu tür analizler, fiziksel olarak da anlamlıdır: Şiddetli X sınıfı

güneş patlamaları sıklıkla koronal kütle atımlarıyla ilişkilidir ve Dünya'ya ulaştıklarında Dst indeksinde belirgin düşüşlere neden olarak şiddetli jeomanyetik fırtınalara yol açarlar. Daha küçük ölçekli aktivitelerin (örneğin C sınıfı patlamalar) ancak belirli koşullar altında Dst üzerinde etkili olabilmesi, CCM gibi doğrusal olmayan nedensellik yöntemlerinin önemini bir kez daha vurgulamaktadır. Bu yöntemler, küçük fakat sistematik etkileşimleri ve bağlamlara özgü bilgi akışlarını ortaya koyabilme potansiyeli nedeniyle uzay havası modellemelerinde önemli bir araç olarak değerlendirilmektedir.

Son olarak, veri çözünürlüğü konusuna değinmek gerekir. Literatürde jeomanyetik indekslerle güneş aktivitesi arasındaki nedensel ilişkiler çoğunlukla aylık ya da yıllık ölçeklerde incelenmiştir. Bunun nedeni, yaklaşık 11 yıllık güneş çevrimi gibi uzun ölçekli bileşenlerin net biçimde ortaya konmak istenmesidir. Nitekim tartıştığımız çalışmaların birçoğu aylık ortalama değerler kullanmıştır. Ancak, günlük ve saatlik verilerle yapılan karşılaştırmalı çalışmalar da mevcuttur. Yüksek zaman çözünürlüğünde nedensellik incelemesi yapmak zordur, çünkü Güneş'ten Dünya'ya bilgi aktarımı tipik olarak saatler-günler mertebesinde gecikmelerle ve birçok ara süreçle gerçekleşir. Yine de günlük veriler üzerinde en azından sürücü-sonuç ilişkisini doğrulayan korelasyon çalışmaları bulunmaktadır. Örneğin, Pokharia vd. (2018) günlük Dst indeksini kullanarak, büyük manyetik fırtınaların en önemli tetikleyicisinin güneş rüzgarının güney yönlü manyetik alan bileşeni (Bz) olduğunu göstermiştir; hesaplamalarında Dst ile IMF-Bz arasında anlık korelasyon $r \approx 0,8$ mertebesinde bulunmuştur. Bu tür çalışmalar saatlik/dakikalık ölçekte güneş rüzgarı ve manyetosfer etkileşiminin nedensel zincirini doğrusal modellerle (örneğin Burton vd. 1975 modelindeki gibi) başarılı biçimde yakalamıştır. Ancak, bu hızlı etkileşimler zaten fiziksel mekanizması bilinen sebeplere dayandığından (örneğin güney yönlü Bz halka akımını güçlendirir ve Dst'yi düşürür), yeni nedensel keşif daha çok düşük frekanslı bileşenlerde gerekmektedir. CCM ve benzeri yöntemler işte bu noktada devreye girerek, aylar ve yıllar ölçeğindeki dolaylı etkileri ve gizli etkileşimleri açığa çıkarabilmektedir.

Özetle, tez çalışmasında CCM yöntemiyle elde edilen bulgular literatürdeki genel kanıyla uyumludur: güneş aktivite göstergeleri (SSN, F10.7), jeomanyetik aktivitenin göstergelerine (Dst, aa) nedensel olarak etki etmektedir. Bu etki, doğrusal olmayan yöntemlerle incelendiğinde bile belirgin şekilde ortaya çıkmakta ve hatta geleneksel korelasyon analizlerinde saklı kalabilecek gecikme ve çift yönlülük gibi durumlar tespit edilebilmektedir. Literatürle karşılaştırıldığında, SSN/F10.7 $\rightarrow$ aa/Dst yönündeki nedensellik hem istatistiksel analizlerle (Echer 2004; Waheed 2015) hem bilgi kuramı tabanlı yöntemlerle (Wing vd. 2018) ortaya konmuştur. Tez çalışmasındaki sonuçlar da bu durumu teyit etmektedir. Ters yöndeki etkileşim ise çok zayıf olup sadece uzun dönemli trendlerde anlam kazanabilir (örneğin aa'nın sonraki çevrime etkisi); bu durum da jeomanyetik indekslerin Güneş'in manyetik akısını yansıtmasıyla bağlantılıdır. Nitekim McCracken ve Beer (2007) çalışmasında olduğu gibi, uzun dönemli (yüzyıllık) jeomanyetik kayıtlar kullanılarak Güneş'in helyosferik alanındaki değişimler ortaya konmuştur. Bu sayede 20. yüzyılda Güneş'in manyetik aktivitesinin önceki ortalamalara göre belirgin biçimde arttığı anlaşılmış; bu artışın Dünya'nın manyetosferinde bıraktığı izler aa indeksi aracılığıyla tespit edilmiştir. Tez çalışmasında incelenen dönemde de güneş aktivitesinin dalgalanmaları ile jeomanyetik tepki arasındaki nedensel bağ, CCM analizlerimizle sayısal olarak doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, önceki çalışmalarla kıyaslandığında, Güneş-Dünya sistemindeki karmaşık

etkileşimlerin anlaşılması yönünde önemli bir katkı sunmaktadır. Artık bilinmektedir ki doğrusal korelasyonlar tek başına nedenselliği garanti etmese de CCM gibi yöntemlerle desteklendiğinde hangi indeksin hangisini ne derecede ve belki de ne kadar süre gecikmeyle etkilediği daha net ortaya çıkarılabilmektedir. Bu da güneş aktivitesi ve uzay havası tahmin modellerinde hangi parametrelere öncelik verilmesi gerektiğine dair bilimsel bir temel sağlamaktadır. Sonuç olarak, CCM yöntemiyle varılan nedensel ilişki tespitleri, önceki çalışmaların bulgularıyla tutarlı bir çerçeve çizmekte ve güneş kaynaklı bilgi akışının jeomanyetik sistem üzerindeki etkisine dair kanıtlar sunmaktadır.

5.5. Tahminler

5.5.1. Güneş Çevrimi 25 ve 26 için SSN Tahminleri

Bu bölümde, Simplex Projection yöntemi kullanılarak elde edilen SSN tahmin sonuçları sunularak literatürdeki diğer tahminlerle karşılaştırılmıştır. Öncelikle, yöntemin geçerliliğini test etmek amacıyla geçmiş beş güneş çevrimi (Güneş Çevrimi 20-24) için tekli ve çiftli tahminler (postcast) üretilmiş ve yüksek korelasyon katsayısı ile düşük hata oranlarına sahip tahminler belirlenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, Güneş Çevrimi 25'in maksimumuna halihazırda ulaşılmış olup bu çevrim, çift pikli bir yapıya sahiptir. Güneş Çevrimi 26 ise Güneş Çevrimi 25'e kıyasla daha zayıf, ancak Güneş Çevrimi 24'ten daha güçlü bir genliğe sahip olacak şekilde tahmin edilmiştir. Özellikle tahmin edilen SSN değerleri ve zamanları, çevrimlerin yapısı ve uzunluğu hakkında da bilgi sunmaktadır.

Literatürde Güneş Çevrimi 25'in maksimumu için yapılan tahminler geniş bir aralığa yayılmaktadır (bkz. Düşük, Orta ve Yüksek Genlikli Tahminler); bu durum, kullanılan yöntemlerin farklılıklarını ve içsel belirsizlikleri yansıtmaktadır. Çalışmaların çoğu, Güneş Çevrimi 25'in pik noktasını 2024-2025 civarında konumlandırırsa da tahmin edilen genlikler çok zayıftan orta veya nispeten güçlü değerlere kadar değişmektedir. Öne çıkan bazı örnekler aşağıda verilmiştir:

Düşük Genlikli Tahminler: Bazı doğrusal olmayan dinamo ve spektral modeller, alışılmadık derecede zayıf bir Güneş Çevrimi 25 öngörmüştür. Örneğin, Kitiashvili (2020) tarafından sunulan veri-asimilasyon temelli bir model, 2024-2025 civarında yalnızca yaklaşık 50 ± 15 SSN'lik bir pik tahmin etmiştir. Benzer şekilde, Javaraiah (2015) tarafından yapılan uzun dönemli Fourier analizi de yaklaşık 50 ± 10 maksimum SSN genlikli bir tahmin üretmiştir. Bu tahminler, Güneş Çevrimi 25'in Dalton Minimum düzeylerinde olacağını ima etmektedir; ancak bu kadar düşük tahminler günümüzde geçerliliğini kaybetmiştir.

Orta Genlikli Tahminler: Çalışmaların geneli, Güneş Çevrimi 25'in pikinin kısmen daha zayıf olan Güneş Çevrimi 24'e (13-aylık düzleştirilmiş SSN pik değeri ~ 116) benzer ya da biraz üzerinde olacağını öngörmüştür. Örneğin Guo vd. (2021) tarafından geliştirilen bir güneş dinamosu modeli, yaklaşık olarak 126 SSN değerine sahip 13-aylık düzleştirilmiş bir pik tahmin etmiştir. Benzer şekilde, Aparicio vd. (2023), yükselme fazının infleksiyon eğimini (eğrinin en hızlı değişim gösterdiği noktadaki eğim) kullanarak 13-aylık düzleştirilmiş SSN maksimumu için 131 ± 32 SSN öngörmüştür. Jeomanyetik indeksler ve önceki çevrim özelliklerine dayalı öncül (precursor) yöntemler de bu orta aralıkta sonuçlar vermiştir. Örneğin, Lu vd. (2022),

Güneş Çevrimi 25'in maksimumunu 13-aylık düzleştirilmiş SSN verisi kullanarak 2024 sonunda yaklaşık 145 olarak tahmin etmiştir; Upton ve Hathaway (2023), kutup alanlarını kullanarak Güneş Çevrimi 25 maksimumunu 13-aylık düzleştirilmiş SSN ile 134 ± 8 olarak 2024'ün sonlarında tahmin etmiştir. Çok sayıda makine öğrenmesi modeli sonucu da bu aralıkta değişmektedir: örneğin, hibrit LSTM-ARIMA ağları ve derin öğrenme modelleri Güneş Çevrimi 25'in maksimumu için 2023-2024 arasında 13-aylık düzleştirilmiş SSN kullanarak 133-137 aralığında pik tahminleri sunmuştur. Bu değerler, yalnızca Güneş Çevrimi 24'ün pikinden biraz daha yüksektir ve Güneş Çevrimi 25'in uzun vadeli ortalama genliğinin altında kalacağını işaret etmektedir.

Yüksek Genlikli Tahminler: Az sayıda tahmin, belirgin şekilde daha güçlü bir Güneş Çevrimi 25 öngörmüştür. Örneğin, Asikainen ve Mantere (2022), Hale çevrimi periyodikliği ile jeomanyetik öncülleri birleştirerek Mayıs 2024 civarında 13-aylık düzleştirilmiş veriden 171 ± 23 SSN'lik bir maksimum tahmin etmiştir ve bu da 20. yüzyıl ortasındaki güçlü çevrimlere yaklaşan bir genlik anlamına gelmektedir. McIntosh vd. (2020) ise çok daha yüksek genlikli bir tahminde bulunmuş; Güneş Çevrimi 24'ün beklenenden erken sona ermesinin, son 50 yılın en güçlü çevrimlerinden birinin habercisi olabileceğini öne sürmüştür. Yapılan çalışmada, %95 güven aralığıyla 159-310 arasında değişen 13-aylık düzleştirilmiş SSN değerleri içinde, yaklaşık 233 düzeyinde bir 13-aylık düzleştirilmiş SSN maksimum piki tahmin edilmiştir. Bu çeşitliliğe rağmen, çalışmaların çoğu, Güneş Çevrimi 25'in maksimum pik noktasının 2024 ortası ile 2025 ortası arasında gerçekleşmesini beklemektedir. Örneğin, kutup akısı, spektral analiz ve makine öğrenmesini birleştiren bir toplu (ensemble) model (Rodriguez vd. 2024), maksimumu Temmuz 2024'te (13-aylık düzleştirilmiş SSN ≈ 131) öngörmüştür. Öte yandan, doğrusal olmayan bir otoregresif sinir ağı (Wu ve Qin 2021), pikin Şubat 2025'te (13-aylık düzleştirilmiş SSN ≈ 116) gerçekleşeceğini tahmin etmiştir. Neredeyse tüm yöntemler, Aralık 2019'daki güneş minimumundan yaklaşık 4-5 yıl sonra Güneş Çevrimi 25'in maksimumunun olacağını tahmin etmiş ve bu durum geçmiş çevrimlerin gidişatları ile tutarlıdır.

Pik değerinin ötesinde, literatürdeki çalışmalar Güneş Çevrimi 25'in yapısal özelliklerini de incelemişlerdir; bunlar arasında Gnevyshev boşluğu (çift pikli maksimum) sergileyip sergilemeyeceği, çevrimin uzunluğu ve simetrisi (yükseliş ve düşüş süresi) yer almaktadır. Birçok tahmin çalışması çift pikli bir güneş maksimumu olasılığını dikkate almıştır; bu, sık karşılaşılan bir olgudur. Örneğin, Kalkan vd. (2023) tarafından geliştirilen NARX sinir ağı modeli, Güneş Çevrimi 25 için çift pikli bir maksimumu açıkça üretmiş ve SSN aktivitesindeki Gnevyshev boşluğunu başarıyla modellemiştir. Benzer şekilde, Javaraiah (2023), kutup alanlarına dayalı olarak yaptığı 13-aylık düzleştirilmiş SSN tahmininde 125 ± 7 genlikli ve çift pik yapısına sahip bir maksimum öngörmüş; böylece ikincil bir pik olasılığını da dolaylı olarak vurgulamıştır. Bu çalışmalar, Güneş Çevrimi 25'in maksimum evresinin keskin ve tek bir pik yerine, geniş çift pikli ya da çıkıntılı bir plato şeklinde gelişebileceğini göstermektedir.

Zamanlama açısından, tahminler kabaca ikiye ayrılmaktadır: bazıları ilk pikin baskın olacağını öngörürken, diğerleri çevrim ilerledikçe ikinci pikin ilkine eşit ya da ondan büyük olabileceğini ileri sürmektedir. Örneğin, Aparicio vd. (2023) makine öğrenmesi çalışması kullanarak en yüksek 13-aylık düzleştirilmiş SSN'nin Eylül 2024'te pik yapacağını tahmin ederken, Kalkan vd. (2023) modeli 2024'teki ilk çıkıştan sonra 2025 başlarında daha geç bir pike işaret etmektedir. Bu tahmin, tez çalışmasında

sunulan Simplex Projection tahminiyle de uyumludur; tez bulguları da uzamış yüksek aktivite fazına sahip çift pikli bir Güneş Çevrimi 25 sunmaktadır.

Çevrim uzunluğu ve simetrisi açısından, çoğu tahmin Güneş Çevrimi 25'in geçmiş çevrimlerle benzer şekilde gelişeceğini, yani yükseliş evresinin hızlı, düşüş evresinin ise görece yavaş olarak tipik bir çevrim olacağını öngörmektedir. Güneş çevrimleri genellikle hızlı bir yükseliş ve yavaş bir düşüş gösterir, modeller de bunu yansıtır. Wu ve Qin (2021), Güneş Çevrimi 25 için yaklaşık 4.8 yıl süren bir yükselme evresi ve toplamda yaklaşık 11 yıl süren bir çevrim uzunluğu tahmin etmiştir; bu da yaklaşık 6 yıllık bir düşüş evresine işaret etmektedir. Bu, güçlü çevrimlerin hızlı yükseldiğini belirten Waldmeier (Waldmeier 1935) etkisiyle de tutarlıdır; her ne kadar Wu ve Qin (2021)'in tahmininde çevrim orta büyüklükte olsa da. İlginç biçimde, Kalkan vd. (2023) Güneş Çevrimi 25'in biraz daha kısa olabileceğini (yaklaşık 9.2 yıl) bulmuş, ancak bunu takip eden Güneş Çevrimi 26'nın daha uzun olacağını ve bu nedenle bir dengeleme olacağını belirtmiştir. Genel olarak, tahminler bir sonraki güneş minimumunun (Güneş Çevrimi 25'in sonu) yaklaşık 2029-2031 civarında gerçekleşeceğini, çevrim süresinin yaklaşık 10 ± 1 yıl olacağını öne sürmektedir (Wu ve Qin 2021; Kalkan vd. 2023).

2025 ortası itibariyle, Güneş Çevrim 25'in hangi evresinde olduğumuz hala tartışılabilir bir sorudur. Birçok tahmin pikin 2024'te olacağını öngörmüştü, ancak 2025'in başlarında SSN aktifliği yüksek seyretmeye devam etmiştir. Bu durum, Güneş Çevrimi 25'in maksimumunun hala devam ettiğine veya ikinci bir pikin oluşmakta olduğuna işaret edebilir ki bu da çift maksimum öngören modellerle uyumludur. Gerçekten de yakın zamandaki gözlemsel SSN eğilimleri, 2025 yılına kadar yüksek aylık değerlerin sürdüğünü göstermektedir ve bu da Güneş Çevrimi 25'in pikinin uzun süren bir maksimum olduğu ve muhtemelen hala tam olarak geride bırakılmadığı fikrini güçlendirmektedir.

İleriye dönük olarak, Güneş Çevrimi 26 (bir sonraki çevrim) için yapılan tahminler de belirsizlikler içermektedir. Güneş Çevrimi 26'nın genliğinin Güneş Çevrimi 25 ile karşılaştırılabilir ya da biraz daha düşük olacağı yönünde literatürde bir fikir birliği var gibi gözükmemektedir (Wu ve Qin 2021; Kalkan vd. 2023; Liu vd. 2023; Cao vd. 2024; Luo ve Tan 2024; Rodríguez vd. 2024); bu da mevcut düşük güneş aktivite döneminin uzayacağını göstermektedir. Bu durum, güneş aktivitesinin yaklaşık 70-100 yıllık uzun vadeli bir periyodu olan Gleissberg çevrimi kavramıyla ilişkilidir. Güneş Çevrimleri 24, 25 ve 26'nın yüzyıllık bir Gleissberg minimumu ile çakıştığı varsayılmaktadır. Çeşitli modeller, 24., 25. ve 26. çevrimlerin birlikte uzun vadeli bir periyodikliğin en düşük noktasını oluşturduğunu savunmaktadır; tıpkı 19. yüzyıl sonlarında zayıf geçen 12., 13. ve 14. çevrim üçlüsü gibi. Sayısal olarak, Güneş Çevrimi 26 için tahmin edilen maksimum SSN pik değerleri 13-aylık düzleştirilmiş SSN verilerine dayanılarak genellikle 100-130 aralığında yer almaktadır. Örneğin, Kalkan vd. (2023), Güneş Çevrimi 26'nın Ekim 2036'da yaklaşık 113.25 13-aylık düzleştirilmiş SSN değerine ulaşacağını tahmin etmektedir. Wu ve Qin (2021)'in lojistik modeli de benzer şekilde kısmen düşük bir pik (~ 107 13-aylık düzleştirilmiş SSN) öngörmekte, bu tahmin Güneş Çevrimi 25 için 13-aylık düzleştirilmiş SSN'den ~ 115 'lik bir pik sonrası gelmektedir. Rodríguez vd. (2024) tarafından yapılan güncel bir çalışma, kutup alanı öncülleri ve makine öğrenimi kullanarak, Güneş Çevrimi 26 için Eylül 2034'te 121 ± 10 'luk bir 13-aylık düzleştirilmiş SSN maksimumu öngörmüş, buna karşılık

Güneş Çevrimi 25 için 131 ± 10 olacak şekilde 13-aylık düzleştirilmiş SSN tahmininde bulunmuştur. Bu yaklaşımların tümü, Güneş Çevrimi 26'nın genliğinin kayda değer bir şekilde artmayacağını, hatta biraz daha düşük kalabileceğini ve zayıf aktivitenin devam edeceğini tutarlı biçimde göstermektedir. Buna bağlı olarak, Güneş Çevrimi 26'nın beklenen süresi genellikle ortalamaya yakın ya da biraz daha uzun olarak verilmiştir (Kalkan vd. 2023 ~ 11 yıl; Wu ve Qin 2021 ~ 10.97 yıl), bu da Güneş Çevrimi 26'nın minimumunun yaklaşık 2040-2041 yılları arasında gerçekleşeceğine işaret etmektedir.

Güneş Çevrimi 26'nın yapısı belirsizlikler içermektedir, ancak tahmin edilen genlik göz önünde bulundurulduğunda, şekil olarak Güneş Çevrimi 20'ye benzeyebileceği düşünülmektedir (muhtemelen tek ya da çift pikli kısmen düşük genlikli bir çevrim). Mevcut tahminler Güneş Çevrimi 27'ye kadar, SSN değerlerinde belirgin bir artış ya da güçlü bir çevrim beklentisini öne sürmemektedir. Bu tahminlerin ortaklaştığı bir diğer önemli çıkarım ise, Güneş'in şu anda çoklu çevrimli bir minimum fazdan geçmekte olduğudur: 24., 25. ve 26. çevrimler birlikte, daha güçlü çevrimlerden oluşan maksimum evreler arasında yer alan görece zayıf bir dönem oluşturmaktadır. Bu Gleissberg minimumu yorumu, çok sayıda çalışma tarafından açıkça dile getirilmiştir.

Güneş çevrimlerinin tahmininde, özellikle tahminin başlangıç noktasının uygun biçimde belirlenmesinin önemi birçok çalışma tarafından vurgulanmıştır. Sarp vd. (2018), doğrusal olmayan tahmin modellerinde başlangıç noktasının belirleyici bir parametre olduğunu ortaya koymuş ve önceki çevrimlerin analizine dayanarak optimal başlangıç noktalarını belirlemiştir. Yakın zamanda Zhu vd. (2023), Güneş Çevrimi 25'in tahmini için optimize edilmiş bir LSTM sinir ağı modeli geliştirmiş ve bu modelde giriş uzunluğu ile tahmin ufku gibi hiperparametrelerin seçiminde hassasiyetin başarıyı doğrudan etkilediğini göstermiştir. Bu çalışmalar, kaotik ve doğrusal olmayan sistemler için başlangıç ve bitiş noktalarının doğru belirlenmesinin tahmin doğruluğu açısından kritik öneme sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Bu tez çalışmasında, Simplex Projection yönteminin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için, tahmin (prediction) ve kütüphane (library) kümeleri arasındaki ayırma noktasının (split point) dikkatli bir biçimde seçilmesinin gerekli olduğu gösterilmiştir. Önceki çevrimlerin başlangıç ve bitiş noktalarını analiz ederek, literatürdeki bazı çalışmalara kıyasla (örneğin Sarp vd. 2018) daha uygun ayırma noktaları değerleri belirlenmiş ve buna bağlı olarak hem daha düşük hata oranları hem de yüksek korelasyon katsayıları içeren tahminler (postcast'ler) elde edilmiştir. Özellikle son beş çevrime yönelik tahminlerde (Güneş Çevrimi 20-24), Sarp vd. (2018) çalışmasına kıyasla önemli bir performans artışı gözlenmiştir.

Sarp vd. (2018), bu tez çalışmasında da kullanılan Simplex Projection yöntemini kullanarak Güneş Çevrimi 25 için maksimum pik değerini 154 ± 12 (13-aylık düzleştirilmiş SSN) olarak tahmin etmiş ve çevrim minimumunun 2030 ortasında gerçekleşeceği öngörmüştür. Zhu vd. (2023), güneş leke alanı verisine dayalı optimize edilmiş bir LSTM modeli kullanarak 2025 Ocak ayında yaklaşık 213 SSN değeriyle güçlü bir çevrim öngörmüştü. Penza vd. (2023) ise Mg II çekirdek/kanat oranı, F10.7 radyo akısı ve toplam güneş ışıınımı (TSI) gibi çeşitli güneş aktivite göstergelerine dayalı tahminler sunarak, Güneş Çevrimi 25'in yükselen kolunda gözlemlerle uyumlu sonuçlar elde etmiş ve farklı model yaklaşımlarının güvenilirliğini desteklemiştir. Ayrıca, Gnevyshev-Ohl kuralı (Gnevyshev ve Ohl 1948) ile tutarlı olarak, tek sayılı

çevrimlerin genellikle bir önceki çift sayılı çevrimlerden daha güçlü olduğu vurgulanmıştır.

Güneş Çevrimi 26'ya ilişkin yukarıda da değinilen literatürde yer alan tahminler ve farklı yöntemlerle elde edilen sonuçlar, bu çalışmada Simplex Projection yöntemiyle elde edilen bulgularla karşılaştırılmıştır. Aşağıda, literatürdeki bu tahminlerin ayrıntılı değerlendirmesi sunulmaktadır:

- Tang (2015), Grey Topolojik Teori kullanarak çevrim maksimumunu 130 (13-aylık düzeltilmiş SSN) ve çevrim minimumunu 10 (13-aylık düzeltilmiş SSN) olarak öngörmüş, bunların sırasıyla 2033 Kasım ve 2039 yıllarında gerçekleşeceğini belirtmiştir. Bu sonuçlar, tez kapsamında Güneş Çevrimi 26 için tahmin edilen genlikten biraz daha düşüktür.
- Singh ve Bhargawa (2019), Simplex Projection yöntemini kullanarak Çevrim 26 için yalnızca 78 ± 7 (13-aylık düzeltilmiş SSN) gibi oldukça düşük bir maksimum tahmini yapmıştır. Bu tahmin, tez çalışmasında kullanılan aynı yöntemle elde edilen tahmine göre belirgin şekilde daha düşük olup, yöntemin uygulama farklılıklarına duyarlı olduğunu göstermektedir.
- Wu ve Qin (2021), TMLP ve TMLP-E modelleriyle Güneş Çevrimi 26 için maksimumun 107.3 13-aylık düzeltilmiş SSN tahmini ile Kasım 2035'te ve minimumun 2041 Ağustos'ta gerçekleşeceğini öngörmüşlerdir. Maksimum genlik tezdeki tahminlerden daha düşük olmakla birlikte zamanlama büyük ölçüde örtüşmektedir.
- Kalkan vd. (2023), NARX sinir ağı ile 13-aylık düzeltilmiş SSN'den 113.25'lik bir maksimumu Ekim 2036 için öngörmüş ve minimumun 2040'ta olacağını belirtmiştir. Bu tahmin, bu tez çalışmasının bulgularına (Haziran 2035'te 137.4-146.2 13-aylık düzeltilmiş SSN) göre daha düşük bir genlik öngörmektedir.
- Liu vd. (2023), LSTM modeli ile maksimumu 135 (13-aylık düzeltilmiş SSN) olarak 2035 Ocak'ta tahmin etmiştir. Genlik açısından tez bulgularıyla oldukça uyumludur; zamanlama ise biraz daha erkendir.
- Cao vd. (2024), Informer ve Transformer modelleriyle pikin 133.4 13-aylık düzeltilmiş SSN ile 2036 Mayıs'ta oluşacağını tahmin etmişlerdir. Bu çalışmanın 2. pik tahmini, bu tez kapsamında Güneş Çevrimi 26 için tahmin edilen Haziran 2035 maksimumuyla tarih olarak yakın fakat daha düşük genliktedir.
- Luo ve Tan (2024), Phase Similar Prediction yöntemiyle 133 ± 32 13-aylık düzeltilmiş SSN'lik maksimumu 2035-2036 aralığında tahmin etmiş ve genlik açısından tez çalışmasıyla oldukça benzer sonuçlara ulaşmıştır.
- Xu vd. (2024), SARIMA + ML yöntemiyle 141 13-aylık düzeltilmiş SSN'lik bir maksimum öngörmüş ve bu değeri 2037 Mart'a konumlandırmıştır. Bu tarih, diğer çalışmalara göre daha geç bir maksimum öngörmektedir.

- Rodriguez vd. (2024), çok değişkenli istatistiksel ve ML tabanlı modellerle 121.2 ± 10 13-aylık düzleştirilmiş SSN'lik bir maksimumu 2034 Eylül ayında tahmin etmiştir. Bu tahmin, genlik açısından tez çalışmasına biraz daha yakındır ancak tarih açısından bir yıl kadar daha erkendir.

Bu karşılaştırmalı analiz, Simplex Projection yöntemiyle elde edilen Güneş Çevrimi 26 tahmininin; genlik bakımından orta düzeyde, zamanlama açısından ise literatürdeki çoğu çalışmayla tutarlı olduğunu göstermektedir. Özellikle, Cao vd. (2024), Liu vd. (2023), Luo ve Tan (2024) ve Rodriguez vd. (2024) gibi çalışmalarda sunulan genlik ve zaman tahminleri ile oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Genlik açısından tez çalışmasındaki Simplex Projection tahmini, yalnızca Singh ve Bhargawa (2019) ve Wu ve Qin (2021) gibi daha düşük tahminlerde bulunan çalışmalardan ayrılmaktadır.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında sunulan Güneş Çevrimi 26'nın, Güneş Çevrimi 25'ten biraz daha zayıf ancak Güneş Çevrimi 24'ten daha güçlü olacağı yönündeki fikir, literatürle büyük ölçüde tutarlıdır. Özellikle Gleissberg minimumu özelinde 24., 25. ve 26. çevrimlerin kısmen zayıf bir faz oluşturduğuna dair genel kanı, Simplex Projection yöntemiyle ulaşılan sonuçlarla desteklenmektedir. Bu da hem yöntemin başarısını hem de literatürle olan bütünlüğünü ortaya koymaktadır.

5.5.2. Güneş Çevrimi 25 ve 26 için F10.7 Tahminleri

Bu bölümde, Simplex Projection yöntemi kullanılarak elde edilen F10.7 tahmin sonuçları literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir. Elde edilen bulgulara göre, Güneş Çevrimi 25'in maksimumuna halihazırda ulaşılmış olup bu çevrim, F10.7 değerlerine göre çift pikli bir yapıya sahiptir. Güneş Çevrimi 26 ise, Güneş Çevrimi 25'e kıyasla daha zayıf; ancak Güneş Çevrimi 24'ten daha güçlü bir genliğe sahip olacak şekilde tahmin edilmiştir.

Literatürde yer alan F10.7 tabanlı tahmin çalışmalarıyla karşılaştırıldığında, tez çalışmasında elde edilen bulgular zamanlama ve genlik açısından birçok modern yaklaşımla tutarlılık göstermektedir. Örneğin, Zhu vd. (2022), optimize edilmiş uzun-kısa vadeli bellek (LSTM) sinir ağı modeli ile 13-aylık düzleştirilmiş F10.7 verisi kullanarak Güneş Çevrimi 25'in maksimumunu 156.3 SFU F10.7 ile Temmuz 2025 civarında tahmin etmiştir. Bu sonuç, genlik açısından bu tez çalışmasındaki sonuçlara kıyasla daha düşük kalsa da zamanlama açısından oldukça benzerdir. Zhu vd. (2022) modelinde Güneş Çevrimi 26 yapısı tek pik şeklindedir; oysa bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar, özellikle Güneş Çevrimi 26 için çift pik olasılığına da dikkat çekmektedir. Penza vd. (2023) ise daha farklı bir yaklaşım benimseyerek Mg II indeksi, F10.7 ve toplam güneş ışıınımını içeren çok göstergeli bir parametrik model geliştirmişlerdir. Bu model, Güneş Çevrimi 25'in yükselme fazı boyunca gözlemsel verilerle oldukça iyi örtüşen sonuçlar üretmiş, özellikle F10.7'nin kümülatif eğilimi üzerinde yüksek tutarlılık sağlamıştır. Ancak modelin çıktılarında sayısal maksimum-genlik tahmini verilmemiş, daha çok eğilim odaklı görsel ve parametrik karşılaştırmalar sunulmuştur. Yine de bu çalışma, F10.7'nin çevrimsel davranışlarının modellenmesinde alternatif fiziksel temellere dayalı yaklaşımların da başarılı olabileceğini ortaya koymaktadır. Kısa vadeli tahmine dayalı çalışmalar (örneğin Wang vd. 2018; Du 2020) çoğunlukla 27 günlük veya günlük F10.7 verisi ile kısa periyotlara yönelik tahminler

üretmiş, genellikle otoregresif modeller veya yapay sinir ağları ile birkaç haftalık tahminlerde yüksek doğruluk sağlamışlardır. Ancak bu çalışmalar, uzun vadeli çevrim tahminleri sunmamaktadır. Bu nedenle burada sunulan analizlerle doğrudan karşılaştırılamazlar. Buna karşın, kısa vadeli tahminlerin başarısı, F10.7 verisinin yüksek zamansal çözünürlüğe sahip yapısının, modellemeye elverişli olduğunu göstermektedir. Güneş Çevrimi 26 için doğrudan F10.7 verisi ile yapılmış tahminler henüz oldukça sınırlıdır. Bazı çalışmalar bu çevrim için SSN ya da diğer öncül göstergelere dayalı genel eğilimler sunmakla birlikte, belirli bir F10.7 pik değeri veya zamanlaması vermemektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, bu tez kapsamında elde edilen F10.7 tahmin sonuçları, özellikle Güneş Çevrimi 25'in maksimum zamanı ve çevrim yapısı açısından literatürle örtüşmektedir. Zhu vd. (2022) ile zamanlamadaki uyum ve Penza vd. (2023) ile yükseliş fazındaki eğilim benzerliği, yöntemin geçerliliğini göstermektedir. Öte yandan, Güneş Çevrimi 26'ya ilişkin tahminlerin henüz sınırlı olması, bu çalışmanın sunduğu F10.7 tahminlerini gelecekteki analizler açısından daha değerli hale getirmektedir. Elde edilen yapısal benzerlikler ve tahmin edilen zamanlamaların tutarlılığı, Simplex Projection yönteminin sadece SSN değil, F10.7 gibi daha fiziksel temelli göstergeler üzerinde de başarılı biçimde uygulanabileceğini ortaya koymaktadır.

5.5.3. Güneş Çevrimi 25 ve 26 için aa İndeks Tahminleri

Bu bölümde, Simplex Projection yöntemi kullanılarak elde edilen aa indeksi tahmin sonuçları literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir. Tez çalışmasındaki tahmin bulgularına göre, Güneş Çevrimi 25'in minimumunun 2030 yılı Kasım-Aralık ayları civarında 9.25-10.9 nT aylık ortalama aa değeri ile gerçekleşeceği öngörülmektedir. Güneş Çevrimi 26 için ise iki farklı senaryo öne çıkmaktadır: birinci senaryoya göre maksimum Ekim 2037'de 36.9 nT, minimum Temmuz 2041'de 11.5 nT; ikinci senaryoya göre ise maksimum Nisan 2036'da 39.1 nT, minimum Kasım 2040'ta 11 nT düzeyinde beklenmektedir. Elde edilen sonuçlar, Güneş Çevrimi 26'nın maksimum jeomanyetik aktivite bakımından Güneş Çevrimi 25'ten daha güçlü olabileceğini, buna karşın, çevrim bütünündeki genel ortalama aa aktivitesi bakımından benzer ya da biraz daha düşük seviyede kalabileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, jeomanyetik sistemin Güneş kaynaklı olaylara karşı daha yüksek frekanslı tepki verdiği göz önüne alındığında, tahmin eğrilerinde kısa vadeli dalgalanma yoğunluğunun arttığı görülmektedir. Bu durumun, aa indeksinin SSN ve F10.7 gibi göstergelere kıyasla daha değişken yapısının bir sonucu olabileceği değerlendirilmektedir.

Du (2020) çalışmasında, aylık ortalama aa yerine her 3 günde bir en yüksek 3-saatlik aa değerine (aaH) dayalı ve 363 günlük kaydırmalı ortalamaayla düzleştirilmiş bir veri dizisi kullanılmıştır. Bu çalışmada, $aaH_{min}(25) = 29.57$ nT ve $aaL_{min}(25) = 2.94$ nT değerlerine dayalı olarak yapılan regresyon analizleri sonucunda, Güneş Çevrimi 25 için maksimum aaH değeri $aaH_{max}(25) = 83.7 \pm 6.9$ nT olarak tahmin edilmiştir. Bu değer, Güneş Çevrimi 24'ün yaklaşık %29 üzerinde bir jeomanyetik aktivite düzeyine işaret etmektedir. Aynı çalışmada, aa-Ap ilişkisi üzerinden hesaplanan $Ap_{max}(25) \approx 47.4 \pm 4.4$ nT olarak verilmiştir. Ayrıca, aaHmin ile aaHmax arasındaki yükselme süresi ile pik değeri arasındaki korelasyon $r = -0.42$ ile zayıf bulunmuş; bu nedenle zaman tahminlerinde belirsizliklerin yüksek olabileceği ifade edilmiştir. Du (2023) ise önceki çalışmasından farklı olarak, Güneş Çevrimi 25'e ilişkin tahminlerini güncelleyerek benzer-çevrim (similar-cycle) yöntemini uygulamıştır. Bu çalışmada yine 3-günlük

periyotlarla hesaplanan en yüksek 3-saatlik aa değerleri (aaH), 121 noktalık (yaklaşık 1 yıl) kaydirmalı ortalama ile düzleştirilmiş ve Güneş Çevrimi 25'e en çok benzeyen çevrimler belirlenmiştir. En çok benzeyen çevrimler Güneş Çevrimi 16, Güneş Çevrimi 15, Güneş Çevrimi 24 ve Güneş Çevrimi 12 olarak tanımlanmış; bu çevrimlerdeki aaHmax değerlerinin ağırlıklı ortalaması üzerinden $aaH_{max}(25) = 73.8 \pm 4.4$ nT sonucu elde edilmiştir. Bu tahmin, Du (2020)'deki regresyon analizine dayalı tahminlerden (~ 83.7 nT) biraz daha düşüktür, ancak genel eğilim açısından uyumludur. Ayrıca çalışmada, aa ve Ap indeksleri arasındaki yüksek korelasyon ($r = 0.93$) kullanılarak $Ap_{max}(25) \approx 47.4 \pm 4.4$ nT değeri elde edilmiştir. Bu bulgular, Güneş Çevrimi 24'te ölçülen $aaH_{max}(24) = 64.81$ nT değerine kıyasla, Güneş Çevrimi 25 için yaklaşık %14 daha yüksek bir jeomanyetik aktivite seviyesi beklendiğini göstermektedir. Yükselme süresi ile pik değeri arasındaki ilişki bu çalışmada da zayıf bulunmuş ($r \approx -0.42$) ve pik zamanı tahmini olarak Ağustos 2025 ± 2 yıl verilmiştir. Du'nun 2020 ve 2023 yıllarına ait bu iki çalışması bir arada değerlendirildiğinde, kullanılan yöntem farklılıklarına rağmen Güneş Çevrimi 25 için orta düzeyin üzerinde bir jeomanyetik aktivite beklendiği anlaşılmaktadır. 2020 çalışmasında regresyona dayalı tahminler yapılırken, 2023 çalışmasında benzer çevrim analizine dayalı istatistiksel bir ağırlıklandırma uygulanmıştır. Her iki yöntemin de ortak sonucu olarak, Güneş Çevrimi 24'e kıyasla 25. çevrimde belirgin ancak aşırıya kaçmayan bir jeomanyetik aktivite artışı tahmin edilmektedir.

Qvick vd. (2025) uzun dönemli aa serisini (1868-2023) parametrelili bir modelle ele alarak Güneş Çevrimi 25'in tahminini yapmıştır. Burada her çevrim, asimetrik Gauss benzeri bir eğri ile iki parametre kullanılarak tanımlanmış; bu parametreler geçmiş aa verilerinden ve güneş çevrimi tahminlerinden türetilmiştir. Bu modele göre, Güneş Çevrimi 25 için aa indeks maksimumu 21 ± 3 nT olarak belirlenmiş ve pikin Temmuz 2022'de olduğu öngörülmüştür. Model ayrıca, Güneş Çevrimi 25'in düşüş fazında Güneş Çevrimi 11 ve Güneş Çevrimi 13'e benzer biçimde belirgin ikincil bir pike sahip olmaması gerektiğini belirtmiştir. Yani bu çalışmada yine aylık aa verisi kullanılmış, ancak istatistiksel korelasyondan ziyade geçmiş çevrim örüntüleri parametrik bir modelle uyarlanmıştır. Çalışma, Güneş Çevrimi 25 için elde edilen pik değerinin 20-30 nT bandında olduğunu ve çevrim şeklini simetrik, ikinci bir geç pik olmadan tahmin etmiştir.

İncelenen çalışmaların tahminleri, bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlarla büyük ölçüde örtüşmektedir. Örneğin Du (2020) çalışmasında, 3-günlük en yüksek 3-saatlik aa değerlerine (aaH) dayalı regresyon analizleri sonucunda $aaH_{max}(25) = 83.7 \pm 6.9$ nT olarak tahmin edilmiştir. Bu değer, Güneş Çevrimi 24'e göre yaklaşık %29 daha yüksek bir jeomanyetik aktiviteye işaret etmektedir. Du (2023) çalışması ise benzer çevrim yöntemini kullanarak aynı verinin ağırlıklı ortalaması üzerinden $aaH_{max}(25) = 73.8 \pm 4.4$ nT sonucunu vermiştir. Bu tez çalışmasında ise daha farklı zaman çözünürlüğüne sahip verilerle yapılan analizler sonucunda maksimum aa değeri yaklaşık 25-35 nT aralığında öngörülmüştür. Sonuçlardaki farklılıklar, kullanılan veri türü (aylık, 3-saatlik) ve analitik yöntemlerin doğasından kaynaklanmaktadır. Zaman tahminleri açısından da genel eğilim büyük ölçüde uyumludur: Du (2020) çalışmasında maksimum zamanı Nisan 2025 civarında tahmin edilmişken, Du (2023) çalışması bu tarihi daha belirsiz biçimde Ağustos 2025 ± 2 yıl aralığında vermiştir. Qvick vd. (2025) çalışmasında ise farklı bir modelleme yaklaşımıyla, maksimum pik zamanı olarak

Temmuz 2022 önerilmiş; bu, diğer çalışmalardan daha erken bir tarihi işaret etmektedir. Tez çalışmasında elde edilen bulgular ise genel olarak 2024-2025 aralığında bir maksimum zamanı desteklemekte ve literatürdeki tahminlerle büyük ölçüde uyum göstermektedir. Sonuç olarak, aa indekse dayalı literatür tahminleri Güneş Çevrimi 25 için orta düzeyde veya bir miktar daha yüksek jeomanyetik aktivite öngörmektedir. Maksimum aa değerleri farklı yöntemlerle yaklaşık 20-30 nT (aylık veri bazlı) ile 70-85 nT (aaH veri bazlı) aralığında değişmektedir. Pik zamanı içinse çoğu tahmin 2022 ile 2025 arasını işaret etmektedir. Tez çalışmasında elde edilen bulgular bu sonuçlarla uyumlu olup, Güneş Çevrimi 25'in karakteristiği hakkında literatürdeki genel görüşü desteklemektedir. Güneş Çevrimi 26'ya yönelik olarak ise bilgimiz dahilinde literatürde henüz aa indeksine dayalı ayrıntılı bir tahmin çalışması bulunmamakta; bu nedenle ilerleyen yıllarda yapılacak yeni çalışmaların yakından izlenmesi önem arz etmektedir.

5.5.4. Güneş Çevrimi 25 ve 26 için Dst İndeks Tahminleri

Simplex Projection yöntemi kullanılarak elde edilen Dst indeksi tahmin sonuçları literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, Güneş Çevrimi 25'in minimumunun 2030 yılı Aralık ayında -5.4 nT ile -6.4 nT arasında aylık ortalama Dst değerine karşılık geleceği tahmin edilmiştir. Güneş Çevrimi 26 için ise farklı gerçekleşme zamanlarına sahip iki olası maksimum senaryosu öne çıkmaktadır: Birincisine göre, çevrimin maksimumu -37.3 nT Dst ile Eylül 2039'da gerçekleşecekken; ikinci senaryoya göre -28.6 nT Dst ile Ekim 2038'de gerçekleşecektir. Bununla birlikte, çevrimin yapısına bakıldığında, maksimuma yakın ikinci bir aktif dönem daha gözlenecektir: Mart-Mayıs 2035 arasında -25.1 nT ile -31.6 nT; ya da Şubat-Nisan 2036 arasında -25.4 nT ile -27.6 nT Dst değerleriyle gerçekleşecektir. Güneş Çevrimi 26'nın minimumunun ise Temmuz 2040'ta -3.2 nT ile -7.5 nT aralığında gerçekleşeceği öngörülmektedir. Dst eğrileri, özellikle ani düşüşler ve kısa vadeli dalgalanmalar bakımından bu indeksin karakterine uygun bir yapı sergilemektedir. Genel çevrim yapısı açısından SSN ve aa indeksleriyle yüksek tutarlılık gösteren bu tahminler, jeomanyetik aktivitenin güneş aktivitesine verdiği hızlı ve keskin yanıtların Dst üzerinden daha net gözlemlenebildiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, elde edilen sonuçlar hem çevrimsel düzeyde hem de indeksler arası yapısal paralellik açısından Simplex Projection yönteminin Dst serileri üzerinde de geçerli ve anlamlı çıktılar üretebildiğini göstermiştir.

Literatürde Dst indeksine dayalı uzun vadeli tahmin çalışmaları oldukça sınırlı olmakla birlikte, özellikle Güneş Çevrimi 25'e yönelik bazı tahminler bulunmaktadır. He ve Zhu (2024) tarafından yapılan çalışmada, geçmiş 11 güneş çevrimine ait normalize edilmiş aylık Ap ve Dst verileri kullanılarak Non-metric Multidimensional Scaling (NMDS; Ölçümsüz Çok Boyutlu Ölçekleme) analizi yapılmış ve bunu takiben optimize edilmiş bir LSTM+ (Long Short-Term Memory) sinir ağı modeli uygulanmıştır. Bu modelle, Güneş Çevrimi 25'in maksimum Ap değerinin ve buna karşılık gelen en düşük Dst değerinin 2026 Mayıs ile 2027 Ocak ayları arasında gerçekleşeceği öngörülmüştür. Çalışmada, SSN ile jeomanyetik indeksler arasında bilinen 1-3 yıllık faz gecikmesi dikkate alınmış ve çevrimsel dinamiklerle uyumlu sonuçlar üretmiştir. Modelin geçmiş çevrimler üzerindeki test performansı da oldukça yüksektir: Örneğin, Güneş Çevrimi 24 verileriyle yapılan doğrulamada Dst için Nash-Sutcliffe katsayısı (NSE) 0.80, ortalama hata ise yalnızca %8.11 olarak rapor edilmiştir (NSE, model performansını değerlendirirken kullanılan ve 1'e yaklaştıkça uyumu

gösteren bir ölçüttür; 0 ise modelin ortalama kadar iyi olduğunu, negatif değerler ise modelin yetersiz olduğunu gösterir). Öte yandan, doğrudan Güneş Çevrimi 26'ya yönelik Dst tahmini sunan bir çalışmaya henüz rastlanmamıştır. Güneş Çevrimi 26 için yalnızca genel çevrim genliği tahminleri mevcuttur ve bu tahminlerde Dst gibi jeomanyetik göstergeler dolaylı olarak ele alınmaktadır. Ancak, bu çalışmalar Dst indeksine özgü sayısal ya da tarihsel maksimum/minimum tahmini sunmamaktadır. Dst indeksine yönelik kısa vadeli tahmin çalışmaları ise daha fazladır. Zhang vd. (2023), 2018-2023 dönemi saatlik Dst verilerini kullanarak LSTM ve EMD-LSTM modelleriyle kısa vadeli tahminler gerçekleştirmiştir. LSTM modeli aktif fırtına dönemlerinde ortalama 7.34 nT hata (RMSE) ve 0.96 korelasyon değeri sunarken, sakin dönemlerde hata 2.64 nT'ye düşmüş, korelasyon ise 0.97'ye çıkmıştır. EMD-LSTM modeli ise benzer doğrulukta olsa da, özellikle zaman gecikmesini azaltma konusunda daha iyi performans göstermiştir. Hu vd. (2022), SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) uydusundan elde edilen tam-disk görüntülerden (MDI, EIT ve LASCO enstrümanları) yararlanarak geliştirdikleri evrimsel sinir ağı (CNN, Convolutional Neural Network) tabanlı topluluk model ile Dst indeksinin 1 ila 3 gün öncesinden fırtına olasılığına dayalı tahminlerini gerçekleştirmiştir. Bu model, Dst < -100 nT koşulunun gerçekleşme olasılığını 24 saat önceden True Skill Statistic (TSS) ≈ 0.68 ve Matthews Correlation Coefficient (MCC) ≈ 0.47 ile tahmin edebilmektedir. Modelin performansı, geleneksel devamlılık (persistence) yaklaşımına kıyasla anlamlı ölçüde daha başarılı bulunmuştur. Ayrıca, Park vd. (2021), KASI (Korea Astronomy and Space Science Institute) Dst Prediction (KDP) adı verilen bir model geliştirmiştir. Bu model, ampirik formüller ile yapay sinir ağı (ANN) algoritmalarını birleştirerek, CME ve CIR kaynaklı fırtınaları ayırt etmekte ve özellikle toparlanma evresi için ayrı bir parametrik yapı kullanmaktadır. Giriş olarak ACE ve DSCOVR uydularından elde edilen güneş rüzgarı verileri kullanılmakta; çıktı her saat başı güncellenerek 24 saatlik ileri tahmin sunulmaktadır. KDP modeli, geleneksel ANN modellerine göre daha yüksek doğruluk sağlamış ve özellikle operasyonel uzay havası tahminleri için uygulanabilir bulunmuştur.

İncelenen çalışmalarda Güneş Çevrimi 25 için aylık Dst tahminleri genellikle çevrimin kısmen orta döneminde (2023-2027 yılları arası) en düşük (negatif) Dst'nin oluşacağını öngörmektedir. Örneğin He ve Zhu (2024) modeline göre Güneş Çevrimi 25'in en güçlü jeomanyetik fırtınası 2026 ortası ile 2027 başı arasında beklenmektedir. Çalışmada Dst'nin mutlak değer tahmini yerine eğilimlerin doğru yakalanması ön planda tutulmuştur. Kısa vadeli modeller ise daha çok anlık Dst değişimleriyle ilgilidir (Zhang vd. 2023). Bu tahminler, aylık ortalama tahminlerinden çok farklı bir perspektiftir. Bu tez çalışmasında elde edilen bulgular için aylık veri analizine dayalı tahminler ile literatürdeki sonuçlar arasında genel olarak uyum vardır: Dst indeksinin pik (en negatif) değerinin önümüzdeki birkaç yıl içinde beklenmesi ortak fikirdir. Öte yandan, Güneş Çevrimi 26'ya yönelik literatürde henüz kesin bir aylık ortalama Dst tahmini olmadığından, Güneş Çevrimi 26 için elde edilen bulgular doğrudan karşılaştırılamamıştır. Sonuç olarak, elde edilen literatür bulguları bu tez çalışmasında tespit edilen çevrimin genel zamanlaması ve dinamikleriyle tutarlı görünmekte, ancak tüm modellerde tahmin belirsizlikleri bulunmaktadır.

6. SONUÇLAR

Bu çalışma, güneş (SSN, F10.7) ve jeomanyetik (aa, Dst) aktivite göstergelerinin doğrusal olmayan analiz yöntemleri ve nedensellik analiziyle incelenmesini ve ilgili indekslerin gelecekteki değerlerini Simplex Projection yöntemi ile tahmin etmeyi amaçlamıştır. Analizler, hem zaman serilerinin içsel dinamiklerini ortaya koymuş hem de Güneş Çevrimi 25 ve 26 için sayısal ve yapısal tahminler ortaya koyarak, yöntemin tahmin kapasitesini göstermiştir. Çalışmanın genel sonuçları aşağıda listelenmiştir:

6.1. Zaman Serilerinin Doğrusal Olmayan Özellikleri

- *Hurst Üssü (H) Sonuçları:* Tüm indeksler (SSN, F10.7, aa, Dst) için Hurst üssü değerleri 0.5'in ve özellikle 0.8'in üzerinde bulunmuştur. Bu sonuç, söz konusu serilerin uzun dönemli kalıcılık ve pozitif otokorelasyon sergilediğini göstermektedir. F10.7'nin Hurst üssü 0.9324 ile en yüksek değeri gösterirken, SSN için bu değer 0.8794 olarak hesaplanmış ve en düşük Hurst üssü 0.85 ile Dst indeks verilerinde hesaplanmış olup Dst indeks verilerinde çalışmada kullanılan diğer verilere göre biraz daha düşük bir kalıcılık seviyesi tespit edilmiştir. Bu bulgular hem güneş hem de jeomanyetik aktivitenin doğrusal olmayan dinamik özellikler barındırdığını ortaya koymuştur.
- *Lyapunov Üssü (λ) Sonuçları:* Tüm indeksler için en büyük Lyapunov üssü pozitif olarak elde edilmiştir (SSN(λ) = 0.00987, F10.7(λ) = 0.01433, aa(λ) = 0.01363, Dst(λ) = 0.04041). Değerler, sistemlerin deterministik kaotik yapıya sahip olduğunu ve başlangıç koşullarına hassas bir şekilde duyarlı olduğunu göstermektedir. Özellikle Dst indeksinin en yüksek Lyapunov üssüne sahip olması, bu serinin tahmin edilebilirliğinin kısmen daha kısıtlı olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, SSN en düşük λ değerine sahip olup en kararlı ve uzun vadeli tahmin edilebilirliğe sahip seri olarak tespit edilmiştir.
- *Korelasyon Boyutu (D_2) Sonuçları:* Korelasyon boyutu analizleri, tüm indekslerin 3.3 ile 3.8 arasında D_2 değerlerine sahip olduğunu ortaya koymuştur (SSN(D_2) = 3.39054, F10.7(D_2) = 3.37424, aa(D_2) = 3.49621 ve Dst(D_2) = 3.71865). Değerler, analiz edilen serilerin doğrusal olmayan ancak deterministik sistemlerden türediğini göstermektedir. Dst indeksinin en yüksek korelasyon boyutuna sahip olması, bu serinin daha yüksek düzeyde dinamik karmaşıklık taşıdığını ve sistemin faz uzayında daha geniş bir bölgeyi doldurduğunu göstermektedir.

6.2. Nedensellik Analizi Sonuçları (CCM)

- SSN ile F10.7 arasındaki ilişki oldukça yüksek Pearson korelasyonu ($\rho \approx 0.976$) göstermektedir; ancak CCM analizi her iki yönlü haritalamada da bu ilişkinin büyük ölçüde doğrusal olduğunu ortaya koymuştur. Dolayısıyla, bu iki gösterge arasında güçlü fakat simetrik ve doğrusal yapı bir bağ bulunmaktadır; belirgin bir nedensellik yönü ortaya konulamamıştır.
- SSN ve aa indeksleri arasındaki CCM sonuçları, SSN'den aa'ya doğru daha güçlü bir nedensel etkileşim olduğunu göstermiştir (CCM - $\rho \approx 0.668$). Bu

durum, güneş aktivitesinin küresel jeomanyetik aktivite üzerinde doğrusal olmayan bilgi aktarımı sağladığını ve SSN'in aa üzerinde etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

- SSN ile Dst arasındaki karşılıklı CCM analizlerinde, Dst'den SSN'ye olan çapraz haritalama daha yüksek (CCM - $\rho \approx 0.454$) bulunmuştur. Bu bulgu, SSN'in Dst'yi belirli ölçüde etkilediğini, ancak bu etkinin kısmen daha zayıf ve karmaşık bir doğrusal olmayan yapıya sahip olduğunu göstermektedir.
- CCM analizi sonuçları; SSN ile F10.7 arasındaki ilişkinin esasen eş-zamanlı ve doğrusal olduğunu, buna karşılık SSN ile aa ve Dst arasındaki ilişkilerin kısmen daha düşük korelasyon düzeyine rağmen anlamlı doğrusal olmayan nedensel bağlar içerdiğini göstermektedir. Bu bağlamda, jeomanyetik indekslerin Güneş kaynaklı süreçleri/dinamikleri doğrusal olmayan ve karmaşık biçimde yansıttığı, CCM analizleriyle ortaya konmuştur. Bu durum, klasik korelasyon analizlerinin ötesine geçilerek, güneş ve jeomanyetik aktivite indeksleri arasındaki bilgi akışının yön ve yapısına ilişkin daha kapsamlı çıkarımlar yapılmasına olanak sağlamıştır.

6.3. Simplex Projection ile Güneş Çevrimi 25 ve 26 için Tahmin Sonuçları

6.3.1. SSN Tahmin Sonuçları

- Literatürde tahmin çalışmaları için genellikle tercih edilmeyen düzleştirilmemiş (13-aylık düzleştirme işlemi içermeyen) aylık ortalama verilerin, sistem dinamiklerini karakterize etme açısından daha uygun olduğu tespit edilmiştir.
- Kütüphane ve tahmin kümeleri arasındaki ayırma noktası (split point) seçimi, kaotik ve doğrusal olmayan sistemlerin başarılı şekilde tahminlerini üretebilmek için kritik öneme sahiptir.
- SSN tahminlerine göre Güneş Çevrimi 25'in minimumunun 2030 yılı Mayıs-Temmuz ayları arasında, aylık ortalama SSN'in 3.8-5.3 aralığına düşmesiyle gerçekleşeceği öngörülmektedir. Bu tahminlere 13-aylık filtre uygulandığında, minimum zamanı Nisan-Haziran 2030 dönemine kaymakta ve SSN değerleri 9.9-12.1 aralığına yükselmektedir.
- SSN tahminlerine göre Güneş Çevrimi 26'nın maksimumunun Haziran 2034-Mart 2035 döneminde, aylık ortalama SSN'in 150.6-181.5 aralığında gerçekleşmesi, minimumunun ise Ekim 2040'ta 1.9-7.8 SSN aralığında olması beklenmektedir. 13-aylık filtrelenmiş sonuçlara göre maksimum Haziran 2035'te 137.4-146.2 SSN ile, minimum ise Temmuz-Kasım 2040 arasında 8.5-13.9 SSN aralığında gerçekleşeceği bulunmuştur.
- Güneş Çevrimi 26'nın, Güneş Çevrimi 25'ten zayıf fakat Güneş Çevrimi 24'ten daha güçlü olacağı ve şu iki olasılıkla çevrimin şekillenebileceği öne sürülmektedir: i) Belirgin çift pikli ve Güneş Çevrimi 20'ye benzer bir çevrim, ii) Hafif dalgalanmalar içeren daha düz pik şekline sahip ve Güneş Çevrimi 20'ye benzer bir çevrim.

- Güneş Çevrimi 26'nın tahmin edilen şekillerinin/yapılarının Güneş Çevrimi 20 ile benzerlik göstermesi, yaklaşık 70-100 yıl periyotlu Gleissberg çevriminin bir yansıması olabileceği düşünülmüştür. Bu nedenle Güneş Çevrimi 26, uzun dönemli bir Gleissberg Çevriminin sonunu veya yeni bir Gleissberg periyodunun başlangıcını temsil edebilir.

6.3.2. F10.7 Tahmin Sonuçları

- F10.7 tahminlerine göre Güneş Çevrimi 25'in minimumunun 2030 yılı Aralık-Şubat ayları arasında, aylık ortalama F10.7 değerlerinin 73.3-74.4 SFU aralığında olması beklenmektedir. Bu tahminlere 13-aylık ortalama filtre uygulandığında, minimum zamanı Ekim-Aralık 2030'a kaymakta ve filtrelenmiş F10.7 değerleri de 76.8-79.7 SFU aralığında tahmin edilmektedir.
- F10.7 tahminlerine göre Güneş Çevrimi 26'nın maksimumunun Haziran 2033-Mayıs 2035 dönemi aralığında, aylık ortalama F10.7 değerlerinin 204.3-205.3 SFU aralığında olması öngörülmektedir. 13-aylık filtrelenmiş tahminlere göre bu maksimum Eylül 2033-Ağustos 2035 arasında, 182.8-195 SFU aralığında gerçekleşecektir. Güneş Çevrimi 26'nın minimumunun ise 2040 yılı Ekim-Aralık ayları arasında, aylık ortalama F10.7 değerlerinin 71.2-75.6 SFU aralığında gerçekleşmesi beklenmektedir. Bu tahminlere göre, 13-aylık filtreleme uygulandığında minimum zaman aralığı 2040 Temmuz-Kasım ve değer aralığı ise 74.3-78.5 SFU olarak değişmektedir.
- Tahmin edilen bu değerler, çevrimin yapısı açısından SSN tahminleriyle oldukça tutarlıdır. Güneş Çevrimi 26'nın şu iki olası yapıyı sergileyebileceği düşünülmektedir: i) Hafif dalgali ve kısmen düz pik yapısı, ii) Belirgin çift pikli bir çevrim.

6.3.3. aa İndeks Tahmin Sonuçları

- aa tahminlerine göre Güneş Çevrimi 25'in minimumunun Kasım-Aralık 2030 döneminde, aylık ortalama aa indeksinin 9.25-10.9 nT aralığında gerçekleşeceği tahmin edilmektedir.
- aa tahminlerine göre Güneş Çevrimi 26'nın maksimumu için iki olasılık öne çıkmaktadır: i) Nisan 2036'da 39.1 nT, ii) Ekim 2037'de 36.9 nT aylık ortalama aa değerleri. Minimum için de iki olası senaryo vardır: i) Kasım 2040'ta 11 nT, ii) Temmuz 2041'de 11.5 nT aylık ortalama aa değeri.
- Güneş Çevrimi 26, maksimum genlik bakımından Güneş Çevrimi 25'ten güçlü; ancak genel yapı açısından Güneş Çevrimi 25'e benzer ya da hafifçe daha zayıf bir çevrim olarak gerçekleşebilir.

6.3.4. Dst İndeks Tahmin Sonuçları

- Dst tahminlerine göre Güneş Çevrimi 25'in minimumunun Aralık 2030'da, aylık ortalama Dst değerinin -5.4 ile -6.4 nT arasında gerçekleşeceği tahmin edilmektedir.

- Dst tahminlerine göre Güneş Çevrimi 26'nın maksimumu için iki senaryo mevcuttur: i) Ekim 2038'de -28.6 nT, ii) Eylül 2039'da -37.3 nT aylık ortalama Dst değerleri ile gerçekleşmesi beklenmektedir. Ayrıca, Mart-Mayıs 2035 (-25.1 ile -31.6 nT) ve Şubat-Nisan 2036 (-25.4 ile -27.6 nT) dönemlerinde ardışık yüksek aktivite fazları gözlemlenmektedir. Minimumun Temmuz 2040'ta -3.2 ile -7.5 nT aylık ortalama Dst aralığında gerçekleşmesi beklenmektedir.
- Dst eğrileri, ani düşüşler ve keskin dalgalanmalar ile bu indeksin karakteristik yapısına uygun tahminler üretmiştir. aa ile senkronize tahmin yapısı, modelin fiziksel anlamlılığını desteklemektedir.

Bu tez çalışması, hem gözlemsel verilerden elde edilen dinamik analizlerle hem de ileriye yönelik tahminlerle güneş ve jeomanyetik aktivite üzerine çift yönlü bir katkı sunmuştur. Kullanılan yöntemler, sistemlerin kalıcı/tekrarlayan, kaotik ve deterministik yapısını ortaya koymuş; ayrıca Güneş Çevrimi 25 ve 26 için tahminler sunarak hem bilimsel literatüre hem de güneş aktivitesi ve uzay havası tahmin çalışmalarına katkı sağlamıştır. Simplex Projection yöntemi, görece daha az parametrik varsayımla hem güneş hem de jeomanyetik aktivite göstergelerinde çok yönlü ve başarılı tahminler üretebildiğini kanıtlamıştır.

7. KAYNAKLAR

- Abdel-Rahman, H.I. ve Marzouk, B.A. 2018. Statistical method to predict the sunspots number. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 7(2): 175–179.
- Abduallah, Y., Wang, J.T., Wang, H. ve Jing, J. 2024. A transformer-based framework for predicting geomagnetic indices with uncertainty quantification. *Journal of Intelligent Information Systems*, 62(4): s. 887–903
- Abduallah, Y., Wang, J.T., Wang, H. ve Xu, Y. 2023. Operational prediction of solar flares using a transformer-based framework. *Scientific Reports*, 13(1): 13665.
- Abduallah, Y., Wang, J.T., Xu, C. ve Wang, H. 2022. A transformer-based framework for geomagnetic activity prediction. In: *International Symposium on Methodologies for Intelligent Systems*, s. 325–335, Cham: Springer International Publishing.
- Aguirre, L.A., Letellier, C. ve Maquet, J. 2008. Forecasting the time series of sunspot numbers. *Solar Physics*, 249(1): 103-120.
- Alberti, T., Consolini, G. ve De Michelis, P. 2021. Complexity measures of geomagnetic indices in the last two solar cycles. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 217: 105583.
- Alberti, T., Lekscha, J., Consolini, G., De Michelis, P. ve Donner, R.V. 2020. Disentangling nonlinear geomagnetic variability during magnetic storms and quiescence by timescale dependent recurrence properties. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 10: 25.
- Alberti, T., Piersanti, M., Vecchio, A., De Michelis, P., Lepreti, F., Carbone, V. ve Primavera, L. 2016. Identification of the different magnetic field contributions during a geomagnetic storm in magnetospheric and ground observations. *Annales Geophysicae*, 34(11): s. 1069–1084.
- Aparicio, A.J.P., Carrasco, V.M.S. ve Vaquero, J.M. 2023. Prediction of the maximum amplitude of Solar Cycle 25 using the ascending inflection point. *Solar Physics*, 298(8): 100.
- Asikainen, T. ve Mantere, J. 2023. Prediction of even and odd sunspot cycles. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 13: 25.
- Attia, A.F., Ismail, H.A. ve Basurah, H.M. 2013. A neuro-fuzzy modeling for prediction of solar cycles 24 and 25. *Astrophysics and Space Science*, 344(1): 5-11.
- Babcock, H.W. 1961. The topology of the Sun's magnetic field and the 22-year cycle. *Astrophysical Journal*, 133: s. 572.
- Baker, D.N. 1998. What is space weather? *Advances in Space Research*, 22(1): s. 7–16.
- Bala, R. ve Reiff, P. 2012. Improvements in short-term forecasting of geomagnetic activity. *Space Weather*, 10(6).
- Barnhart, B.L. ve Eichinger, W.E. 2011. Analysis of sunspot variability using the Hilbert–Huang transform. *Solar Physics*, 269(2): 439-449.
- Bartels, J. 1949. The standardized index, Ks, and the planetary index, Kp. *IATME Bulletin*, 97(12b): s. 1.

- Bhowmik, P. ve Nandy, D. 2018. Prediction of the strength and timing of sunspot cycle 25 reveal decadal-scale space environmental conditions. *Nature Communications*, 9(1): 5209.
- Boberg, F., Wintoft, P. ve Lundstedt, H. 2000. Real time Kp predictions from solar wind data using neural networks. *Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science*, 25(4): s. 275–280.
- Bobra, M.G. ve Couvidat, S. 2015. Solar flare prediction using SDO/HMI vector magnetic field data with a machine-learning algorithm. *The Astrophysical Journal*, 798(2): 135.
- Bochníček, J. ve Hejda, P. 2005. The winter NAO pattern changes in association with solar and geomagnetic activity. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 67(1–2): s. 17–32.
- Borovsky, J.E. ve Denton, M.H. 2006. Differences between CME-driven storms and CIR-driven storms. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 111(A7).
- Box, G.E.P., Jenkins, G.M., Reinsel, G.C. ve Ljung, G.M. 2015. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. John Wiley & Sons.
- Broomhall, A.M., Chatterjee, P., Howe, R., Norton, A.A. ve Thompson, M.J. 2014. The Sun's interior structure and dynamics, and the solar cycle. *Space Science Reviews*, 186: 191–225.
- Burton, R.K., McPherron, R.L. ve Russell, C.T. 1975. An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst. *Journal of Geophysical Research*, 80(31): 4204–4214.
- Camporeale, E. 2019. The challenge of machine learning in space weather: Nowcasting and forecasting. *Space Weather*, 17(8): 1166–1207.
- Cane, H.V., Richardson, I.G. ve St. Cyr, O. C. 2000. Coronal mass ejections, interplanetary ejecta and geomagnetic storms. *Geophysical Research Letters*, 27(21): s. 3591–3594.
- Cao, J., Xu, T., Deng, L., Zhou, X., Li, S., Liu, Y., ... ve Zhou, W. 2024. An improved prediction of solar cycles 25 and 26 using the Informer model: Gnevyshev peaks and North–South asymmetry. *The Astrophysical Journal*, 969(2): 120.
- Chakraborty, S. ve Morley, S. K. 2020. Probabilistic prediction of geomagnetic storms and the Kp index. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 10: 36.
- Charbonneau, P. 2020. Dynamo models of the solar cycle. *Living Reviews in Solar Physics*, 17(1): s. 4.
- Chen, Y., Manchester, W.B., Hero, A. O., Toth, G., DuFumier, B., Zhou, T., ... ve Gombosi, T.I. 2019. Identifying solar flare precursors using time series of SDO/HMI images and SHARP parameters. *Space Weather*, 17(10): 1404–1426.
- Christensen-Dalsgaard, J. 2021. Solar structure and evolution. *Living Reviews in Solar Physics*, 18(1): 2.
- Clette, F., Svalgaard, L., Vaquero, J.M. ve Cliver, E.W. 2014. Revisiting the sunspot number: A 400-year perspective on the solar cycle. *Space Science Reviews*, 186: s. 35–103.

- Clilverd, M.A., Clarke, E., Ulich, T., Linthe, J. ve Rishbeth, H. 2005. Reconstructing the long-term aa index. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 110(A7).
- Cliver, E.W., Boriakoff, V. ve Bounar, K.H. 1996. The 22-year cycle of geomagnetic and solar wind activity. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 101(A12): s. 27091–27109.
- Consolini, G., Marcucci, M.F. ve Candidi, M. 1996. Multifractal structure of auroral electrojet index data. *Physical Review Letters*, 76(21): s. 4082.
- Conway, A.J., Macpherson, K.P., Blacklaw, G. ve Brown, J.C. 1998. A neural network prediction of solar cycle 23. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 103(A12): 29733-29742.
- Covas, E. 2017. Spatial-temporal forecasting the sunspot diagram. *Astronomy & Astrophysics*, 605: A44.
- Covas, E., Pugh, C. E., Brajša, R., Jedrzejak, D., Medvidović, M., Karlovac, M. ve Gerth, E. 2019. Forecasting the solar activity cycle using neural networks. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 484(4): 5723-5733.
- Crosson, I.J. ve Binder, P.M. 2009. Chaos-based forecast of sunspot cycle 24. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 114(A1).
- Davis, T.N. ve Sugiura, M. 1966. Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations. *Journal of Geophysical Research*, 71(3): s. 785–801.
- de Vries, H. 1958. Variation in concentration of radiocarbon with time and location on Earth. *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen*, Series B, 61(2): s. 94–102.
- Donner, R.V., Balasis, G., Stolbova, V., Georgiou, M., Wiedermann, M. ve Kurths, J. 2019. Recurrence-based quantification of dynamical complexity in the Earth's magnetosphere at geospace storm timescales. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124(1): s. 90–108.
- Du, Z. 2020. Forecasting the daily 10.7 cm solar radio flux using an autoregressive model. *Solar Physics*, 295(9): 125.
- Du, Z. 2020. Predicting the maximum aa/Ap index through its relationship with the preceding minimum. *Annales Geophysicae Discussions*, 2020: 1–15.
- Du, Z. L. 2011. The correlation between solar and geomagnetic activity – Part 2: Long-term trends. *Annales Geophysicae*, 29(8): s. 1341–1348.
- Du, Z.L. 2023. The solar cycle: predicting the maximum amplitude of the smoothed highest 3-hourly aa index in 3 d for cycle 25 based on a similar-cycle method. *Astrophysics and Space Science*, 368(3): 11.
- Du, Z.L. ve Wang, H.N. 2012. The relationships of solar flares with both sunspot and geomagnetic activity. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 12(4): 400.
- Echer, E., Gonzalez, W.D., Gonzalez, A.L.C., Prestes, A., Vieira, L.E.A., Dal Lago, A., ... ve Schuch, N.J. 2004. Long-term correlation between solar and geomagnetic activity. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 66(12): s. 1019–1025.

- Florios, K., Kontogiannis, I., Park, S.H., Guerra, J.A., Benvenuto, F., Bloomfield, D.S. ve Georgoulis, M.K. 2018. Forecasting solar flares using magnetogram-based predictors and machine learning. *Solar Physics*, 293(2): 28.
- Frick, P., Sokoloff, D., Stepanov, R., Pipin, V. ve Usoskin, I. 2020. Spectral characteristic of mid-term quasi-periodicities in sunspot data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 491(4): 5572–5578.
- Gao, P.X. 2016. Long-term prediction of solar activity based on wavelet analysis and fuzzy inference system. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 146: 1–5.
- Gleisner, H. ve Lundstedt, H. 2001. A neural network-based local model for prediction of geomagnetic disturbances. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 106(A5): s. 8425–8433.
- Gleissberg, W. 1939. A long-periodic fluctuation of the sun-spot numbers. *The Observatory*, 62: s. 158–159.
- Gonzalez, W.D., Joselyn, J.A., Kamide, Y., Kroehl, H.W., Rostoker, G., Tsurutani, B.T. ve Vasyliunas, V.M. 1994. What is a geomagnetic storm? *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 99(A4): 5771–5792.
- Gonzalez, W.D., Tsurutani, B.T., Lepping, R.P. ve Schwenn, R. 2002. Interplanetary phenomena associated with very intense geomagnetic storms. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 64(2): s. 173–181.
- Gopalswamy, N., Mäkelä, P., Xie, H. ve Yashiro, S. 2013. Testing the empirical shock arrival model using quadrature observations. *Space Weather*, 11(11): s. 661–669.
- Gopalswamy, N., Mikić, Z., Maia, D., Alexander, D., Cremades, H., Kaufmann, P., ... ve Wang, Y.M. 2006. The pre-CME Sun: Report of working group E. *Space Science Reviews*, 123: s. 303–339.
- Gopalswamy, N., Yashiro, S., Xie, H., Akiyama, S. ve Mäkelä, P. 2015. Properties and geoeffectiveness of magnetic clouds during solar cycles 23 and 24. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120(11): s. 9221–9245.
- Grassberger, P. ve Procaccia, I. 1983. Characterization of strange attractors. *Physical Review Letters*, 50(5): 346–349.
- Grassberger, P. ve Procaccia, I. 1983. Measuring the strangeness of strange attractors. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 9(1–2): 189–208.
- Greenkorn, R.A. 2009. Analysis of sunspot activity cycles. *Solar Physics*, 255: 301–323.
- Gruet, M.A., Chandorkar, M., Sicard, A. ve Camporeale, E. 2018. Multiple-hour-ahead forecast of the Dst index using a combination of long short-term memory neural network and Gaussian process. *Space Weather*, 16(11): s. 1882–1896.
- Guo, W., Jiang, J. ve Wang, J.X. 2021. A dynamo-based prediction of solar cycle 25. *Solar Physics*, 296: 1–13.
- Hale, G.E. 1924. The law of sun-spot polarity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 10(1): s. 53–55.

- Hale, G.E., Ellerman, F., Nicholson, S.B. ve Joy, A. H. 1919. The magnetic polarity of sun-spots. *Astrophysical Journal*, 49: s. 153.
- Hanslmeier, A. 2010. The sun and space weather. In: *Heliophysical Processes*. Springer, Berlin, Heidelberg, ss. 233–249.
- Hathaway, D.H. 2015. The solar cycle. *Living Reviews in Solar Physics*, 12(1): s. 4.
- He, M. ve Zhu, H. 2024. Predicting Geomagnetic Indices for Space Weather Applications in Solar Cycle 25. *Annales Geophysicae Discussions*, 2024: 1–9.
- Heilig, B., Beggan, C. ve Lichtenberger, J. 2018. Natural sources of geomagnetic field variations. Geneva, Switzerland: CERN European Organization for Nuclear Research, 16 ss. (CLIC-Note-1083) (Yayımlanmamış teknik rapor). <http://cds.cern.ch/record/2643499>
- Henney, C.J., Toussaint, W.A., White, S.M. ve Arge, C. N. 2012. Forecasting F10.7 with solar magnetic flux transport modeling. *Space Weather*, 10(2): S02011.
- Hu, A., Shneider, C., Tiwari, A. ve Camporeale, E. 2022. Probabilistic prediction of Dst storms one-day-ahead using Full-Disk SoHO images. *Space Weather*, 20(8): e2022SW003064.
- Huang, J., Ji, H., Shen, C., Wang, H. ve Li, G. 2009. Prediction of solar cycle 24 using support vector regression method. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 33(1): 78–86.
- Hurst, H.E. 1951. Long-term storage capacity of reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 116: 770–799.
- Javaraiah, J. 2015. Long-term variations in the north–south asymmetry of solar activity and solar cycle prediction, III: Prediction for the amplitude of solar cycle 25. *New Astronomy*, 34: 54–64.
- Javaraiah, J. 2023. Prediction for the amplitude and second maximum of Solar Cycle 25 and a comparison of the predictions based on strength of polar magnetic field and low-latitude sunspot area. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 520(4): 5586–5599.
- Javaraiah, J. 2024. Prediction of the amplitude of solar cycle 25 from the ratio of sunspot number to sunspot-group area, low latitude activity, and 130-year solar cycle. *Advances in Space Research*, 74(3): 1518–1534.
- Jevtić, N., Schweitzer, J.S. ve Cellucci, C.J. 2001. Research Note: Nonlinear time series analysis of northern and southern solar hemisphere daily sunspot numbers in search of short-term chaotic behavior. *Astronomy & Astrophysics*, 379(2): s. 611–615.
- Ji, E.Y., Moon, Y.J., Park, J., Lee, J.Y. ve Lee, D.H. 2013. Comparison of neural network and support vector machine methods for Kp forecasting. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(8): s. 5109–5117.
- Jiang, J., Cameron, R H., Schmitt, D. ve Schuessler, M. 2011. The solar magnetic field since 1700 – I. Characteristics of sunspot group emergence and reconstruction of the butterfly diagram. *Astronomy & Astrophysics*, 528: A82.

- Jie, T.A.N.G. 2015. Application of the Grey Topological Theory in the Prediction of Yearly Mean Sunspot Numbers. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 39(1): 45–53.
- Joselyn, J.A. 1995. Geomagnetic activity forecasting: The state of the art. *Reviews of Geophysics*, 33(3): s. 383–401.
- Kalkan, M.Y., Fawzy, D.E. ve Saygac, A.T. 2023. Predictions of solar activity cycles 25 and 26 using non-linear autoregressive exogenous neural networks. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 523(1): 1175–1181.
- Kamide, Y. ve Maltsev, Y.P. 2007. 14Geomagnetic Storms. In: *Handbook of the Solar-Terrestrial Environment*, Springer, ss. 355.
- Kamide, Y., Yokoyama, N., Gonzalez, W., Tsurutani, B.T., Daglis, I.A., Brekke, A. ve Masuda, S. 1998. Two-step development of geomagnetic storms. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 103(A4): s. 6917–6921.
- Kane, R.P. 2002. Some implications using the group sunspot number reconstruction. *Solar Physics*, 205: 383–401.
- Kane, R.P. 2007. A preliminary estimate of the size of the coming Solar Cycle 24, based on Ohl's precursor method. *Solar Physics*, 243(2): 205–217.
- Katsavrias, C., Preka-Papadema, P. ve Moussas, X. 2012. Wavelet analysis on solar wind parameters and geomagnetic indices. *Solar Physics*, 280: 623–640.
- Kılçık, A. 2009. Güneş patlama indeksinin doğrusal olmayan modellenmesi. Doktora Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı, Antalya, 172 s.
- Kılçık, A., Anderson, C.N.K., Rozelot, J.P., Ye, H., Sugihara, G. ve Ozguc, A. 2009. Nonlinear prediction of solar cycle 24. *The Astrophysical Journal*, 693(2): 1173–1177.
- Kılçık, A., Chowdhury, P., Sarp, V., Yurchyshyn, V., Donmez, B., Rozelot, J.P. ve Ozguc, A. 2020. Temporal and periodic variation of the MCMESI for the last two solar cycles; Comparison with the number of different class X-ray solar flares. *Solar Physics*, 295: 1–17.
- Kılçık, A., Yurchyshyn, V.B., Abramenko, V. ve Goode, P.R. 2009. Time series analysis of solar activity. *Solar Physics*, 255(2): 289–302.
- Kilpua, E., Koskinen, H E.J. ve Pulkkinen, T.I. 2017. Coronal mass ejections and their sheath regions in interplanetary space. *Living Reviews in Solar Physics*, 14: s. 1–83.
- Kirov, B., Asenovski, S., Georgieva, K. ve Obridko, V.N. 2015. What causes geomagnetic activity during sunspot minimum?. *Geomagnetism and Aeronomy*, 55: 1033–1038.
- Kirov, B., Asenovski, S., Georgieva, K., Obridko, V.N. ve Maris-Muntean, G. 2018. Forecasting the sunspot maximum through an analysis of geomagnetic activity. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 176: 42–50.
- Kiselev, B.V. 2017. R/S analysis of the Dst index. *Geomagnetism and Aeronomy*, 57: 326–334.

- Kitiashvili, I.N. 2020. Application of synoptic magnetograms to global solar activity forecast. *The Astrophysical Journal*, 890(1): 36.
- Kivelson, M.G. ve Russell, C.T. (Ed.). 1995. Introduction to space physics. Cambridge University Press.
- Kremliovsky, M.N. 1994. Can we understand time scales of solar activity?. *Solar Physics*, 151: 351–370.
- Krivova, N.A. ve Solanki, S.K. 2002. The 1.3-year and 156-day periodicities in sunspot data: Wavelet analysis suggests a common origin. *Astronomy & Astrophysics*, 394(2): 701–706.
- Lazzús, J.A., Vega, P., Rojas, P. ve Salfate, I. 2017. Forecasting the Dst index using a swarm-optimized neural network. *Space Weather*, 15(8): s. 1068–1089.
- Le Mouél, J.L., Blanter, E., Shnirman, M. ve Courtillot, V. 2012. On secular changes of correlation between geomagnetic indices and variations in solar activity. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 117(A9).
- Le, G.M. ve Wang, J.L. 2003. Wavelet analysis of several important periodic properties in the relative sunspot numbers. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, 3(5): 391.
- Leighton, R.B. 1969. A magneto-kinematic model of the solar cycle. *Astrophysical Journal*, 156: s. 1.
- Letellier, C., Aguirre, L.A., Maquet, J. ve Gilmore, R. 2006. Evidence for low dimensional chaos in sunspot cycles. *Astronomy & Astrophysics*, 449(1): s. 379–387.
- Letellier, C., Aguirre, L.A., Maquet, J. ve Gilmore, R. 2006. Topological analysis of sunspot data. *Physical Review Letters*, 96(25): 254102.
- Liu, J., Ye, Y., Shen, C., Wang, Y. ve Erdélyi, R. 2018. A new tool for CME arrival time prediction using machine learning algorithms: CAT-PUMA. *The Astrophysical Journal*, 855(2): 109.
- Liu, X., Zeng, S., Deng, L., Zeng, X. ve Zheng, S. 2023. Predicting the 25th and 26th solar cycles using the long short-term memory method. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 75(3): 691–699.
- Loewe, C.A. ve Prölss, G.W. 1997. Classification and mean behavior of magnetic storms. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 102(A7): 14209–14213.
- Luo, P.X. ve Tan, B.L. 2024. Long-term evolution of solar activity and prediction of the following solar cycles. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 24(3): 035016.
- Mandelbrot, B.B. ve Wallis, J.R. 1968. Noah, Joseph, and operational hydrology. *Water Resources Research*, 4(5): 909–918.
- Matzka, J., Stolle, C., Yamazaki, Y., Bronkalla, O. ve Morschhauser, A. 2021. The geomagnetic Kp index and derived indices of geomagnetic activity. *Space Weather*, 19(5): e2020SW002641.

- Maunder, E.W. 1904. Note on the distribution of sun-spots in heliographic latitude, 1874–1902. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 64: s. 747–761.
- Mayaud, P.N. 1972. The aa indices: A 100-year series characterizing the magnetic activity. *Journal of Geophysical Research*, 77(34): s. 6870–6874.
- Mayaud, P.N. 1980. Derivation, meaning, and use of geomagnetic indices. Vol. 22, s. 154. Washington, DC: *American Geophysical Union*.
- Mays, M.L., Taktakishvili, A., Pulkkinen, A., MacNeice, P.J., Rastätter, L., Odstrcil, D., Jian, L.K., Richardson, I.G., LaSota, J. A., Zheng, Y. ve Kuznetsova, M.M. 2015. Ensemble modeling of CMEs using the WSA-ENLIL+Cone model. *Solar Physics*, 290(6): s. 1775–1814.
- McCracken, K.G. ve Beer, J. 2007. Long-term changes in the cosmic ray intensity at Earth, 1428–2005. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 112(A10).
- McIntosh, S.W. ve Leamon, R.J. 2017. Deciphering solar magnetic activity: Spotting solar cycle 25. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 4: 4.
- McIntosh, S.W., Chapman, S., Leamon, R.J., Egeland, R. ve Watkins, N.W. 2020. Overlapping magnetic activity cycles and the sunspot number: Forecasting sunspot cycle 25 amplitude. *Solar Physics*, 295(12): 1–14.
- Menvielle, M. ve Berthelier, A. 1991. The K-derived planetary indices: Description and availability. *Reviews of Geophysics*, 29(3): s. 415–432.
- Möstl, C., Amla, K., Hall, J.R., Liewer, P.C., De Jong, E.M., Colaninno, R.C., Veronig, A.M., Rollett, T., Temmer, M., Peinhart, V. ve Davies, J.A. 2014. Connecting speeds, directions and arrival times of 22 coronal mass ejections from the Sun to 1 AU. *The Astrophysical Journal*, 787(2): 119.
- Mundt, M.D., Maguire, W.B. ve Chase, R.R. 1991. Chaos in the sunspot cycle: Analysis and prediction. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 96(A2): s. 1705–1716.
- Nandy, D. 2021. Progress in Solar Cycle Predictions: Sunspot Cycles 24–25 in Perspective. *Solar Physics*, 296(12): 162.
- Newell, P.T., Sotirelis, T., Liou, K., Meng, C.I. ve Rich, F.J. 2007. A nearly universal solar wind-magnetosphere coupling function inferred from 10 magnetospheric state variables. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 112(A1).
- Nishizuka, N., Sugiura, K., Kubo, Y., Den, M. ve Ishii, M. 2018. Deep flare net (DeFN) model for solar flare prediction. *The Astrophysical Journal*, 858(2): 113.
- Ogunjo, S.T., Adediji, A.T. ve Dada, J.B. 2017. Investigating chaotic features in solar radiation over a tropical station using recurrence quantification analysis. *Theoretical and Applied Climatology*, 127: s. 421–427.
- Ogunjo, S.T., Rabi, A.B., Fuwape, I.A. ve Obafaye, A.A. 2021. Evolution of dynamical complexities in geospace as captured by Dst over four solar cycles 1964–2008. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126(4): s. e2020JA027873.
- Ostryakov, V.M. ve Usoskin, I.G. 1990. On the dimension of solar attractor. *Solar Physics*, 127: 405–412.

- Pala, Z. ve Atici, R. 2019. Forecasting sunspot time series using deep learning methods. *Solar Physics*, 294(5): 50.
- Pallochia, G., Amata, E., Consolini, G., Marcucci, M.F. ve Bertello, I. 2006. Geomagnetic Dst index forecast based on IMF data only. *Annales Geophysicae*, 24(3): s. 989–999.
- Park, W., Lee, J., Kim, K.C., Lee, J., Park, K., Miyashita, Y., ... ve Yi, Y. 2021. Operational Dst index prediction model based on combination of artificial neural network and empirical model. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 11: 38.
- Parker, E.N. 1955. Hydromagnetic dynamo models. *Astrophysical Journal*, 122: s. 293.
- Pavlos, G.P., Rigas, A.G., Dialetis, D., Sarris, E.T., Karakatsanis, L.P. ve Tsonis, A.A. 1992. Evidence for chaotic dynamics in the outer solar plasma and the earth magnetosphere. *Chaotic Dynamics: Theory and Practice*, s. 327–339.
- Penza, V., Bertello, L., Cantoresi, M., Criscuoli, S. ve Berrilli, F. 2023. Prediction of solar cycle 25: applications and comparison. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 34(3): 663–670.
- Pesnell, W.D. 2008. Predictions of solar cycle 24. *Solar Physics*, 252: s. 209–220.
- Pesnell, W.D. 2012. Solar cycle predictions (invited review). *Solar Physics*, 281: s. 507–532.
- Pesnell, W.D. 2016. Predictions of Solar Cycle 24: How are we doing? *Space Weather*, 14(1): 10–21.
- Pesnell, W.D. ve Schatten, K.H. 2018. An early prediction of the amplitude of Solar Cycle 25. *Solar Physics*, 293(7): 112.
- Petchey, O.L. 2016. Simplex projection walkthrough. DOI: 10.5281/zenodo.57081.
- Petrovay, K. 2010. Solar cycle prediction. *Living Reviews in Solar Physics*, 7(1): s. 1–59.
- Petrovay, K. 2020. Solar cycle prediction. *Living Reviews in Solar Physics*, 17(1): 2.
- Podladchikova, T., Petrukovich, A. ve Yermolaev, Y. 2018. Geomagnetic storm forecasting service StormFocus: 5 years online. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 8: A22.
- Pokharia, M., Prasad, L., Bhoj, C. ve Mathpal, C. 2018. Study of geomagnetic storms and solar and interplanetary parameters for solar cycles 22 and 24. *Solar Physics*, 293(9): 126.
- Price, C.P., Prichard, D. ve Hogenon, E.A. 1992. Do the sunspot numbers form a “chaotic” set?. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 97(A12): 19113–19120.
- Qvick, T., Asikainen, T. ve Mursula, K. 2025. Predicting geomagnetic activity cycles. *Space Weather*, 23(5): e2024SW004074.
- Reda, R., Stumpo, M., Giovannelli, L., Alberti, T. ve Consolini, G. 2024. Disentangling the solar activity–solar wind predictive causality at Space Climate scales. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 35(1): 49–61.

- Richardson, I.G., Webb, D.F., Zhang, J., Berdichevsky, D.B., Biesecker, D.A., Kasper, J.C., ... ve Zhukov, A.N. 2006. Major geomagnetic storms ($Dst \leq -100$ nT) generated by corotating interaction regions. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 111(A7).
- Rodríguez, J.V., Sánchez Carrasco, V.M., Rodríguez-Rodríguez, I., Pérez Aparicio, A.J. ve Vaquero, J.M. 2024. Predicting Solar Cycle 26 Using the Polar Flux as a Precursor, Spectral Analysis, and Machine Learning: Crossing a Gleissberg Minimum?. *Solar Physics*, 299(8): 117.
- Romanelli, L., Figliola, M.A., Hirsch, F.A. ve Radicella, S.M. 1987. Chaotic behaviour of solar radio flux. *Solar Physics*, 110: 391–395.
- Rosenstein, M.T., Collins, J.J. ve De Luca, C.J. 1993. A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 65(1–2): 117–134.
- Rypdal, M. ve Rypdal, K. 2012. Is there long-range memory in solar activity on timescales shorter than the sunspot period?. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 117(A4).
- Sarp, V. 2018. Güneş leke çevriminin modellenmesi ve kaotik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı, Antalya, 114 s.
- Sarp, V., Kılçık, A., Yurchyshyn, V., Rozelot, J.P. ve Ozguc, A. 2018. Prediction of solar cycle 25: a non-linear approach. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 481(3): 2981–2985.
- Schatten, K.H. ve Pesnell, W.D. 1993. An early solar dynamo prediction: Cycle 23 ~ Cycle 22. *Geophysical Research Letters*, 20(20): 2275–2278.
- Schatten, K.H., Myers, D.J. ve Sofia, S. 1996. Solar activity forecast for solar cycle 23. *Geophysical Research Letters*, 23(6): 605–608.
- Schrijver, C.J. ve Siscoe, G.L. (Ed.). 2010. Heliophysics: space storms and radiation: causes and effects. Cambridge University Press.
- Schrijver, C.J. ve Zwaan, C. 2008. Solar and stellar magnetic activity. Vol. 34. Cambridge University Press.
- Sello, S. 2001. Solar cycle forecasting: a nonlinear dynamics approach. *Astronomy & Astrophysics*, 377(1): s. 312–320.
- Sexton, E.S., Nykyri, K. ve Ma, X. 2019. Kp forecasting with a recurrent neural network. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 9: A19.
- Shibata, K. ve Magara, T. 2011. Solar flares: magnetohydrodynamic processes. *Living Reviews in Solar Physics*, 8(1): 1-99.
- Singh, A.K. ve Bhargawa, A. 2017. An early prediction of 25th solar cycle using Hurst exponent. *Astrophysics and Space Science*, 362(11): 199.
- Singh, A.K. ve Bhargawa, A. 2019. Prediction of declining solar activity trends during solar cycles 25 and 26 and indication of other solar minimum. *Astrophysics and Space Science*, 364(1): 12.

- Spiegel, E.A. 2009. Chaos and intermittency in the solar cycle. *Space Science Reviews*, 144: s. 25–51.
- Srivastava, N., Bhonsle, R.V. ve Sharma, S. 2005. A neural network approach to the prediction of the sunspot cycle. *Solar Physics*, 229(1): 181–191.
- Stamper, R., Lockwood, M., Wild, M.N. ve Clark, T.D.G. 1999. Solar causes of the long-term increase in geomagnetic activity. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 104(A12): s. 28325–28342.
- Stix, M. 2012. *The Sun: An Introduction*. Springer Science & Business Media, Berlin, 519 p.
- Suess, H.E. 1980. The radiocarbon record in tree rings of the last 8 000 years. *Radiocarbon*, 22(2): s. 200–209.
- Sugihara, G. ve May, R. M. 1990. Nonlinear forecasting as a way of distinguishing chaos from measurement error in time series. *Nature*, 344(6268): s. 734–741.
- Sugiura, M. 1963. Hourly values of equatorial Dst for the IGY. NASA-TM-X-55238.
- Sugiura, M. 1991. Equatorial Dst index 1957–1986. *IAGA Bulletin*, 40: s. 17–38.
- Sweet, P.A. 1958. 14. The neutral point theory of solar flares. In: Lehnert, B. (Ed.), *Symposium - International Astronomical Union*, Vol. 6, pp. 123–134. Cambridge University Press, Cambridge.
- Takahashi, K., Watanakesuntorn, W., Ichikawa, K., Park, J., Takano, R., Haga, J., ... ve Pao, G.M. 2021. kEDM: a performance-portable implementation of empirical dynamic modeling using Kokkos. *Practice and Experience in Advanced Research Computing 2021: Evolution Across All Dimensions*, pp. 1–8.
- Takalo, J., Timonen, J. ve Koskinen, H. 1993. Correlation dimension and affinity of AE data and bicolored noise. *Geophysical Research Letters*, 20(15): 1527–1530.
- Tan, Y., Hu, Q., Wang, Z. ve Zhong, Q. 2018. Geomagnetic index Kp forecasting with LSTM. *Space Weather*, 16(4): s. 406–416.
- Temerin, M. ve Li, X. 2006. Dst model for 1995–2002. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 111(A4).
- Theiler, J. 1986. Spurious dimension from correlation algorithms applied to limited time-series data. *Physical Review A*, 34(3): 2427–2430.
- Tsurutani, B.T., Gonzalez, W.D., Gonzalez, A L., Tang, F., Arballo, J.K. ve Okada, M. 1995. Interplanetary origin of geomagnetic activity in the declining phase of the solar cycle. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 100(A11): s. 21717–21733.
- Upendran, V., Veetil, R.P., Puthenpurayil, R.S. ve Hariharan, K. 2020. Solar flare prediction using multivariate time series learning. *Solar Physics*, 295(12): 156.
- Upton, L.A. ve Hathaway, D.H. 2023. Solar cycle precursors and the outlook for cycle 25. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 128(10): e2023JA031681.
- Vassiliadis, D.V., Sharma, A.S., Eastman, T.E. ve Papadopoulos, K. 1990. Low-dimensional chaos in magnetospheric activity from AE time series. *Geophysical Research Letters*, 17(11): 1841–1844.

- Velloso, E.N., Anthony, F., Do Nascimento, J.D., Silveira, L.F.Q., Hall, J. ve Saar, S.H. 2023. Multicomponent activity cycles using Hilbert–Huang analysis. *The Astrophysical Journal Letters*, 945(1): L12.
- Verbanac, G., Vršnak, B., Živković, S., Hojsak, T., Veronig, A. M. ve Temmer, M. 2011. Solar wind high-speed streams and related geomagnetic activity in the declining phase of solar cycle 23. *Astronomy & Astrophysics*, 533: A49.
- Waheed, M., Khan, P., Tripathi, S., Aslam, A.M., Mansoori, A.A., Bhawre, P. ve Gwal, A.K. 2015. Long term evolution of geomagnetic activity under the influence of 11 year cyclic variations in solar activity during solar cycle 23 and 24. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4: 18585–18590.
- Waldmeier, M. 1935. Neue eigenschaften der sonnenfleckenkurve. *Astronomische Mitteilungen der Eidgenössischen Sternwarte Zürich*, 14: 105–136.
- Wang, L., Zhang, H., Zhang, X., Peng, G., Li, Z. ve Xu, X. 2024. Deep temporal convolutional networks for F10.7 radiation flux short-term forecasting. *Annales Geophysicae*, 42(1): 91–101.
- Wang, Y., Liu, J., Jiang, Y. ve Erdélyi, R. 2019. CME arrival time prediction using convolutional neural network. *The Astrophysical Journal*, 881(1): 15.
- Wang, Y.M. ve Sheeley, N.R. 1989. Average properties of bipolar magnetic regions during sunspot cycle 21. *Solar Physics*, 124(1): s. 81–100.
- Webb, D.F. ve Howard, T.A. 2012. Coronal mass ejections: Observations. *Living Reviews in Solar Physics*, 9(1): s. 1–83.
- Wei, H.L., Billings, S.A. ve Balikhin, M. 2004. Prediction of the Dst index using multiresolution wavelet models. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 109(A7).
- Weron, R. 2002. Estimating long-range dependence: Finite sample properties and confidence intervals. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 312(1–2): 285–299.
- Wheatland, M.S. 2004. A Bayesian approach to solar flare prediction. *The Astrophysical Journal*, 609(2): 1134.
- Wing, S. ve Johnson, J.R. 2019. Applications of information theory in solar and space physics. *Entropy*, 21(2): 140.
- Wing, S., Johnson, J.R., Jen, J., Meng, C.I., Sibeck, D.G., Bechtold, K. ve Takahashi, K. 2005. Kp forecast models. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 110(A4).
- Wintoft, P., Wik, M., Matzka, J. ve Shprits, Y. 2017. Forecasting Kp from solar wind data: input parameter study using 3-hour averages and 3-hour range values. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 7: A29.
- Wolf, A., Swift, J.B., Swinney, H.L. ve Vastano, J.A. 1985. Determining Lyapunov exponents from a time series. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 16(3): 285–317.

- Wu, J.G. ve Jiang, Z.N. 2013. Prediction of the arrival time of the 2019 coronal mass ejection with the deep learning method. *The Astrophysical Journal*, 763(2): 85.
- Wu, J.G. ve Lundstedt, H. 1996. Prediction of geomagnetic storms from solar wind data using Elman recurrent neural networks. *Geophysical Research Letters*, 23(4): s. 319–322.
- Wu, S.S. ve Qin, G. 2021. Predicting sunspot numbers for solar cycles 25 and 26. *arXiv preprint*, arXiv:2102.06001.
- Xapsos, M.A. ve Burke, E.A. 2009. A new model for solar energetic proton event fluence. *Space Weather*, 7(12).
- Xu, Q., Jain, R. ve Xing, W. 2024. Data-driven forecasting of sunspot cycles: pros and cons of a hybrid approach. *Solar Physics*, 299(2): 25.
- Xu, T., Wu, J., Wu, Z.S. ve Li, Q. 2008. Long-term sunspot number prediction based on EMD analysis and AR model. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, 8(3): 337.
- Yamazaki, Y., Matzka, J., Stolle, C., Kervalishvili, G., Rauberg, J., Bronkalla, O., ... ve Jackson, D.R. 2022. Geomagnetic activity index Hpo. *Geophysical Research Letters*, 49(10): e2022GL098860.
- Yermolaev, Y.I., Lodkina, I.G., Nikolaeva, N.S. ve Yermolaev, M.Y. 2010. Statistical study of interplanetary condition effect on geomagnetic storms. *Cosmic Research*, 48: s. 485–500.
- Yu, Z.G., Anh, V.V., Wanliss, J.A. ve Watson, S.M. 2007. Chaos game representation of the Dst index and prediction of geomagnetic storm events. *Chaos, Solitons & Fractals*, 31(3): s. 736–746.
- Zhang, J., Feng, Y., Zhang, J. ve Li, Y. 2023. The short time prediction of the Dst index based on the long-short time memory and empirical mode decomposition–long-short time memory models. *Applied Sciences*, 13(21): 11824.
- Zhang, Q. 1995. Predictability of the long term variations of monthly mean sunspot numbers. *Acta Astrophysica Sinica*, 15(1): 84–89.
- Zhang, Q. 1996. A nonlinear prediction of the smoothed monthly sunspot numbers. *Astronomy and Astrophysics*, 310: 646–650.
- Zhao, C., Liu, K., Yang, S., Xia, J., Chen, J., Ren, J. ve He, F. 2025. Solar Cycle Prediction Using a Temporal Convolutional Network Deep-learning Model with a One-step Pattern. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 277(2): 42.
- Zhou, S., Feng, Y., Wu, W.Y., Li, Y. ve Liu, J. 2014. Low-dimensional chaos and fractal properties of long-term sunspot activity. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 14(1): s. 104.
- Zhu, H., Zhu, W. ve He, M. 2022. Solar cycle 25 prediction using an optimized long short-term memory mode with F10.7. *Solar Physics*, 297(12): 157.

ÖZGEÇMİŞ

Kemalhan GERÇEKER

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2022-2025	Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı, Antalya
Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2017-2022	Fen Fakültesi, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Bölümü, Antalya

ESERLER

Yayımlanmak için gönderilen hakem aşamasında olan makaleler

- 1- Gerceker, K., Kilcik, A., Oztug, A., Yurchyshyn, V. (2025). Simplex Projection Predictions of the Remainder of Solar Cycle 25 and the Next Solar Cycle 26 based on the Monthly Mean Sunspot Numbers. Solar Physics.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

- 1- Gerceker, K., Kilcik, A. (2024, June). Prediction of Solar Cycle 25 Using Simplex Projection Method: A Long-Term Analysis Based on F10.7. In *Sixteenth Workshop June, 2024* (p. 1).

Yayımlanmak için gönderilen hakem aşamasında olan bildiriler

- 1- Gerceker, K., Kilcik, A. (2025). Daily and Monthly Predictions of the Maximum CME Speed Index for Solar Cycle 25. In *Seventeenth Workshop June, 2025*.
- 2- Kilcik, A., Gerceker, K. (2025). Nonlinear and Causal Dynamics Between Solar and Geomagnetic Activity Indices: Findings from Chaos and Causality Measures. In *Seventeenth Workshop June, 2025*.