

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**GÜNEŞ LEKE ÇEVRİMİNİN MODELLENMESİ VE KAOTİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Volkan SARP

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

TEMMUZ 2018

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**GÜNEŞ LEKE ÇEVİRİMİNİN MODELLENMESİ VE KAOTİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Volkan SARP

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

TEMMUZ 2018

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜNEŞ LEKE ÇEVİRİMİNİN MODELLENMESİ VE KAOTİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

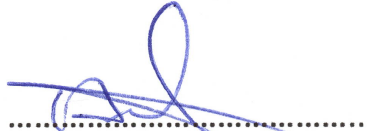

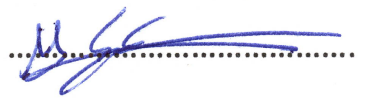
Volkan SARP
UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 05/07/2018 tarihinde jüri tarafından oy birliği ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Ali KILÇIK

Prof. Dr. M. Türker ÖZKAN

Dr. Öğr. Ü. Murat KAPLAN


.....

.....

.....

ÖZET

GÜNEŞ LEKE ÇEVİRİMİNİN MODELLENMESİ VE KAOTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

VOLKAN SARP

Yüksek Lisans Tezi, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ali KILÇIK

Temmuz 2018, 43 sayfa

Güneş aktivitesinin yapısı ve bu aktiviteye sebep olan süreçler henüz tam olarak aydınlatılamamıştır. Bunun yanında, gelişen teknoloji, başlıca kaynağın güneş olduğu uzay havası etkilerine gün geçtikçe daha da hassas bir duruma gelmektedir. Bu çalışmada, güneş aktivitesinin kaotik dinamiklerini incelemek amacıyla faz uzayı analizi, Hurst üsteli ve korelasyon boyutu teknikleri güneş leke sayıları zaman serisine uygulanmıştır. Yapılan faz uzayı incelemelerinde kaotik süreçlerin temsilcisi olan çekici oluşumlarına rastlanmıştır. Hurst üstelinin hesaplanan değeri (0.86) incelenen zaman serisinin yüksek derecede uzun dönemli hafızaya sahip olduğunu ortaya çıkarmıştır ve bu da yine kaotik süreçlerin beklenen bir özelliğidir. Korelasyon boyutu tekniğiyle yapılan incelemeler sonucunda ise güneş leke sayılarına etki eden 6 farklı süreç olduğu belirlenmiştir.

Deneyisel dinamik modelleme, altında yatan süreçlerin tam olarak belirlenemediği sistemlerin modellenmesinde ve tahmininde kullanılan yeni bir yaklaşımdır. Bir sistemi modellemek için kullanılan denklemler yerine, bu yöntemde sistemden alınan bir ölçümün zaman serisindeki düzenler açığa çıkartılarak kullanılır. Bu yaklaşım güneş leke sayılarına uygulanmış ve son beş leke çevriminin (20, 21, 22, 23 ve 24) gözlenen değerleri ile uyumlu tahminler elde edilmiştir. Bunun yanında deneyisel dinamik modelleme yaklaşımında dış değer biçme amacıyla kullanılan ve güneş çevrimi tahminlerinde oldukça popüler olan bir algoritmanın (Simplex Projection) performansını arttıran yeni bir parametre (tahmin başlangıç noktası) tanımlanmıştır. Bu yeni parametrenin de kullanılmasıyla 25. Güneş leke çevrimi için bir tahmin oluşturulmuştur. Bu tahmine göre sıradaki çevrimin çift maksimuma sahip bir çevrim olması, ilk maksimumun Şubat-Mayıs 2024 arasında 70-100 arasında düzleştirilmiş aylık ortalama leke sayısı ile gerçekleşmesi ve ikinci maksimumun Kasım 2025-Şubat 2026 arasında 87-93 arasında düzleştirilmiş aylık ortalama leke sayısı ile gerçekleşmesi beklenmektedir.

ANAHTAR KELİMELELER: Doğrusal olmayan yöntemler, Güneş çevrimi, Kaos, Tahmin, Uzay Havası

JÜRİ: Doç. Dr. Ali KILÇIK
Prof. Dr. M. Türker ÖZKAN
Dr. Öğr. Üyesi Murat KAPLAN

ABSTRACT

ANALYSIS OF CHAOTIC FEATURES AND MODELLING OF SUNSPOT CYCLE

VOLKAN SARP

M.Sc. Thesis, Space Science and Technologies

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Ali KILÇIK

July 2018, 43 pages

The nature of solar activity and the processes that cause it are not yet fully understood. However, developing technology is becoming more and more vulnerable to the effects of space weather, where the main source is the sun. In this study, phase space analysis, Hurst exponential and correlation dimension techniques were applied to sunspot number time series in order to investigate the chaotic dynamics of solar activity. In the phase space analysis, the attractor formations which are representative of the chaotic processes are encountered. The calculated value of Hurst exponent (0.86) reveals that the examined time series has a high level of long-term memory which is also an expected feature of chaotic processes. As a result of the studies made by correlation dimension technique, it is determined that there are 6 different processes affecting the sunspot numbers.

Empirical Dynamic Modelling is a new approach to modelling and predicting systems that underlying processes are not fully defined. Instead of a set of equations used to model a system, in this method patterns are searched and used by analyzing time series of a system variable. This approach was applied to sunspot number time series and the prediction results were consisted with observed values of the last five sunspot cycles (20, 21, 22, 23 and 24). In addition, a new parameter (prediction starting point) has been defined that improves the performance of an extrapolation algorithm (Simplex Projection) which is very popular in solar cycle predictions. Using this new parameter, a prediction for the 25th sunspot cycle was created. According to this prediction, it is expected that the next cycle will be a double peaked cycle. The first maximum is expected to occur between February and May 2024 with smoothed monthly mean sunspot number between 70-100. The second maximum is expected to occur between November 2025 and February 2026 with smoothed monthly mean sunspot number between 87-93.

KEYWORDS: Chaos, Non-linear methods, Prediction, Solar Cycle, Space Weather

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Ali KILÇIK
Prof. Dr. M. Türker ÖZKAN
Asst. Prof. Dr. Murat KAPLAN

ÖNSÖZ

Güneş aktivitesinin kökeni ve periyodik değişimi, güneş fiziğinin henüz cevaplanmamış temel sorularının başında gelmektedir. Özellikle son yıllarda, Güneş aktivitesinin Dünya ve yakın uzay çevresine etkileri gelişen teknolojiye paralel olarak her geçen gün daha fazla önem kazanmaktadır. Bu sebeple güneş aktivitesinin modellenmesi ve tahmin edilmesi hem bilimsel hem de teknolojik açıdan oldukça önemlidir. Fakat bugüne kadar yapılan çalışmalarda güneş aktivitesini tüm detaylarıyla ve tam olarak tahmin edebilen bir yöntem ortaya çıkmamıştır.

Dinamik sistemler teorisi ve alt dallarından olan kaos konusu, ortaya çıkardığı etkileyici sonuçlar sayesinde özellikle son yıllarda bilimin birçok alanında popüler hale gelmiştir. Bu alandaki çalışmalar, makro ölçekte karmaşık ve değişken davranışlar sergileyen sistemlerin tanımlanmasında ve tahmin edilmesinde, geleneksel yöntemlere kıyasla oldukça başarılı sonuçlar üretmektedir. Her ne kadar zorlayıcı ve emek isteyen bir konu olsa da uzun süreli araştırma ve çalışmalar sonucunda, literatürdeki örnekleri incelenerek güneş aktivitesinin de dinamik sistemler merceğinde analiz edilebileceği ortaya konulmuştur. Yapılan bu çalışmanın güneş aktivitesinin kaotikliğinin anlaşılması ve özellikle tahmini konularında literatürdeki güneş fiziği çalışmalarına katkı sağlamasını dilerim.

Çalışmanın bu halini almasında çok büyük emeği ve özverisi olan, çalışmalarım süresince bana çok şey katan ve hiçbir desteğini esirgemeyen akademik danışmanım Sayın Doç. Dr. Ali Kılçık'a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmada yer alan denklemsiz dinamik modelleme konusunda değerli eleştiri ve önerileriyle beni yönlendiren Amerika BBSO'dan Sayın Dr. Vasyl Yurchyshyn'a, Fransa OCA-CNRS'ten Sayın Prof. Dr. Jean-Pierre Rozelot'a ve Kandilli Rasathanesi'nden Sayın Prof. Dr. Atila Özgüç'e teşekkür ederim.

Mühendislik mesleğimi bırakarak hayallerimin peşinden bilim camiasına giriş yapmama vesile olan ve bu süreç boyunca desteğini her daim hissettiren sevgili eşim Meltem Sarp'a teşekkür ederim.

Ayrıca hayatım boyunca hep yanımda olan, hiçbir zaman hiçbir desteklerini benden esirgemeyen, eğitim ve bilim konusunda küçük yaşlardan itibaren beni yönlendiren başta ebeveynlerim olmak üzere tüm aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
AKADEMİK BEYAN	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	3
2.1. Güneş	3
2.2. Uzay Havası	5
2.3. Güneş Aktivitesi ve Leke Çevrimi	6
2.4. Simülasyon ve Tahmin Yaklaşımları	9
3. MATERYAL VE YÖNTEM	11
3.1. Çalışmada Kullanılan Veri Seti	11
3.2. Denklemsiz Modelleme	13
3.3. Kaotik Dinamikler	17
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	21
4.1. Uzun Dönemli Hafıza	21
4.2. Faz Uzayı Analizleri	23
4.3. Korelasyon Boyutu	25
4.4. Modelleme ve Tahmin	31
5. SONUÇLAR	38
6. KAYNAKLAR	40
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum "GÜNEŞ LEKE ÇEVİRİMİNİN MODELLENMESİ VE KAOTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ" adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

Volkan SARP

.....

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

cm	: santimetre
km	: kilometre
g	: gram
kg	: kilogram
K	: Kelvin
e^-	: elektron
ν_e	: elektron nötrinosu
γ	: gama ışını
H^1	: Hidrojen
D^2	: Döteryum
He^3	: Helyum-3
He^4	: Helyum-4
m	: Gömme Boyutu
τ	: Zaman Gecikmesi

Kısaltmalar

NOAA	: National Oceanic and Atmospheric Administration
SIDC	: Solar Influences Data Analysis Center
SILSO	: Sunspot Index Long-term Solar Observations
SSN	: Güneş Leke Sayıları (Sun Spot Numbers)
DDM	: Deneysel Dinamik Modelleme
SP	: Simplex Projection
KOH	: Karesel Ortalama Hata

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Güneş merkezinden yüzeyine doğru yoğunluk ve sıcaklığın yarıçapa bağlı değişimi	4
Şekil 2.2. Güneş atmosferinde yüzeyden itibaren yüksekliğe bağlı olarak sıcaklık ve yoğunluk değişimi.....	5
Şekil 3.1. International SSN ilk versiyon (kırmızı), ikinci versiyon (mavi) ve Boulder SSN (siyah) veri setlerinin zamansal karşılaştırılması	11
Şekil 3.2. Zamana bağlı güneş leke sayıları.....	12
Şekil 3.3. Takens teoremi ile gölge-çekici oluşturulma sürecinin şekilsel gösterimi.....	14
Şekil 3.4. Simplex Projection algoritması ile tahmin oluşturulma süreçleri	15
Şekil 3.5. Fiziksel bir sürecin faz uzayı içerisinde modellenmesi ve çekici oluşturulması (Kaynak: Bezruchko ve Smirnov 2010)	17
Şekil 4.1. Yeniden ölçeklendirilmiş aralık analizi ile Hurs üstelinin hesaplanması	22
Şekil 4.2. a) 9 ay; b) 18 ay; c) 27 ay; d) 36 ay; e) 45 ay; f) 54 ay; g) 63 ay; h) 72 ay zaman gecikmesi ile oluşturulan faz uzayları.....	24
Şekil 4.3. İki boyutlu faz uzayında zaman gecikmesi-korelasyon boyutu değişim grafiği.....	26
Şekil 4.4. Farklı zaman gecikmeleri ile oluşturulmuş komşulukları arası mesafe (E1)-Gömme boyutu (d) grafiği (Kaynak: Lettelier vd. 2006)	27
Şekil 4.5. a) 2 boyut; b) 3 boyut; c) 4 boyut; d) 5 boyut; e) 6 boyut için ortalama yer değiştirme fonksiyonu	28
Şekil 4.6. Korelasyon toplamı - eşik değeri logaritmik grafiği.....	29
Şekil 4.7. Gömme boyutlarına karşılık gelen korelasyon boyutları.....	30
Şekil 4.8. Güneş leke sayıları zaman serisinden oluşturulan arşiv (mavi) ve test (kırmızı) veri setleri	31
Şekil 4.9. Ortalama korelasyon katsayısı - gömme boyutu ilişkisi	32
Şekil 4.10. Başarılı tahmin sayısı - gömme boyutu ilişkisi	33

Şekil 4.11. Başarılı tahminlerin başlangıç noktalarının (* sembolü) son beş güneş leke çevrimi üzerindeki dağılımı (Kaynak: Sarp vd. 2018).....	33
Şekil 4.12. 25. Çevrim için üretilen tahminler (Kaynak Sarp vd. 2018).....	35
Şekil 4.13. a) 20. Çevrim; b) 21. Çevrim; c) 22. Çevrim; d) 23. Çevrim; e) 24. Çevrim için gözlenen (kesikli çizgi) ve oluşturulan tahminler (düz çizgi) f) 25. Çevrim için oluşturulan üç olası tahmin (Kaynak: Sarp vd. 2018).....	36
Şekil 4.14. Bugüne kadar gözlemelenen güneş leke çevrimleri (siyah) ve 25.Çevrim için üretilen en olası tahmin (kırmızı)	37

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. Yeniden ölçeklendirilmiş aralık analizi için kullanılan aralık büyüklükleri, bu aralık büyüklerinin veri setine oranı ve aralık sayıları.....	21
Çizelge 4.2. Güneş leke sayıları için gömme boyutu - zaman gecikmesi ve korelasyon boyutu değerleri.....	30

1. GİRİŞ

Güneş, Samanyolu galaksisindeki milyarlarca yıldızdan sadece biridir. Galaksi merkezine yaklaşık 26.000 ışık yılı uzaklıkta ve Güneş Sisteminin merkezinde bulunur. Dünyaya en yakın yıldız olması sebebiyle gezegenimizdeki hayatın başlıca enerji kaynağı olarak kabul edilen Güneş, neredeyse mükemmel küresellikte bir plazma kütesidir. Bize en yakın yıldız olması dolayısıyla yüzeyini inceleyebilmemiz diğer astrofizik çalışmalarına da ışık tutmaktadır.

Güneşin kimyasal yapısı ve enerjisini sağladığı nükleer reaksiyonlar bilinse de manyetik yapısı ve bu manyetizmayı oluşturan süreçler henüz tam anlamıyla anlaşılammıştır. Güneş dinamosu olarak bilinen bu süreç periyodik değişimler göstermektedir. Hale çevrimi veya manyetik çevrim, güneş leke çiftlerinin manyetik kutuplarının tersine döndüğü ve daha sonra orijinal halini aldığı yaklaşık 22 yıllık süreçtir. Bu çevrimin yarısı boyunca güneş leke çiftlerinin öncül lekeleri, örneğin pozitif kutba sahipken, çevrimin diğer yarısında öncül leke negatif kutba dönüşecektir. Manyetik çevrimin yarısını oluşturan, Schwabe çevrimi veya aktivite çevrimi olarak bilinen 11 yıllık süreçte ise güneş leke sayılarının periyodik değişimi gözlenmektedir. Bu iki çevrimin aynı fazda olması ve güneş lekelerinde ölçülen şiddetli manyetik alanlar güneş aktivitesinin manyetik kökenine dair kanıtlardır.

Güneşteki manyetik aktivitenin sonucunda, güneş lekeleri dışında farklı olaylar da gözlenmektedir. Bunlardan bazıları, güneş patlamaları, koronal kütle atımları, plaj alanları ve filamentler olarak sıralanabilir. Tüm bu olaylar aktivite çevrimi ile uyum içerisindedir.

Uzay havası, Güneşin etkilerinin Dünya’da ve yakın uzayda yarattığı sonuçlar olarak tanımlanabilir. Gün geçtikçe gelişen teknoloji uzay havasına karşı daha hassas bir noktaya gelmektedir. Bu sebeple Güneş aktivitesinin daha iyi anlaşılabilmesi ve doğru tahmin edilebilmesi uzay havası bakımından da kritik önem taşımaktadır.

Güneş aktivitesinin bugüne kadar farklı yöntemlerle yapılan modelleme ve tahmin çalışmalarında istenilen sonuçlar tam olarak elde edilememiştir. Bu durum güneş aktivitesine sebep olan süreçlerin henüz tamamıyla aydınlatılamamış olmasından kaynaklanmaktadır.

Kaos konusunda son yıllarda yapılan araştırmalar birçok doğal sürecin ilk bakışta karmaşık olarak görülen davranışlarının altında yatan belirli düzenlerin olduğunu ortaya koymaktadır. Bu düzenlerin açığa çıkartılması ve tahmin amacıyla kullanılması için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir.

Deneysel dinamik modelleme, altında yatan süreçlerin tam olarak aydınlatılamadığı sistemlerin modellenmesinde denklem kullanmadan yapılan bir yaklaşımdır. İncelenen mekanizmanın deterministik denklemlerine başvurulmadan, sürecin geçmiş dönemde ölçülen değerleri yardımıyla oluşturulan faz uzayı üzerinden yapılan bir modelledir.

İyi bir modelin, geçmiş gözlemlerle uyumlu olması, gelecek değerleri tahmin edebilmesi, diğer modellere entegre edilebilir olması ve mümkün olduğunca

karmaşıklık içermemesi beklenir. Bu bakımdan, bu çalışmada kullanılan model son beş güneş çevriminde (20, 21, 22, 23 ve 24. Çevrimler) geçmiş gözlemler ile karşılaştırıldığında oldukça benzer sonuçlar üretmiştir. Bu sonuçlar kullanılarak bir sonraki güneş çevrimi tahmin edilmiştir. Bu model, güneş aktivitesinin diğer göstergelerine de uygulanabilir nitelikte olup kullanılan algoritma oldukça basittir. Öte yandan bu çalışmada modelleme ve tahmin haricinde güneş aktivitesinin kaotik özellikleri incelenerek, kaotikliğin bazı göstergeleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar güneş aktivitesinin kaotik yapısını belirgin bir şekilde ortaya çıkarmaktadır. Buna dayanarak kaotik zaman serilerinde başarılı sonuçlar veren deneysel dinamik modelleme yaklaşımının, güneş aktivitesinin modellenmesinde de kullanılmasının uygun olduğu sonucu elde edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında yer alan tüm yöntemler için gereken algoritma ve kodlamalar IDL yazılımı kullanılarak tarafımda hazırlanmıştır. Elde edilen sonuçlardan 25. güneş leke çevriminin tahmini ile ilgili olan kısım “Monthly Notices of Royal Astronomy” isimli dergide “Prediction of Solar Cycle 25: A Nonlinear Approach” başlığıyla yayınlanmak üzere gönderilmiş ve ilk hakem değerlendirmesi alınmıştır. Bu makale yayınlandığında tahmin için kullanılan IDL kodlarının ek olarak sunulması planlanmaktadır.

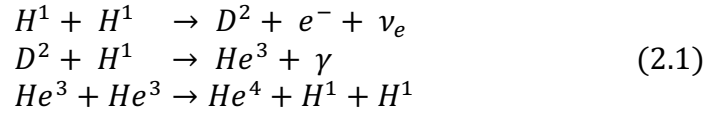
2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Güneş

Güneş, Samanyolu galaksinin Sagittarius kolunda G2 tayf sınıfından cüce bir yıldızdır. Ortalama sıcaklığı 5700° K, yaşı ise 4,57 milyar yıldır. Parçacık sayısı olarak %92,1 hidrojen, %7,8 helyum, ve %0,1 ağır elementlerden oluşmaktadır. Dünya ve astrofizik açısından 3 temel önemi vardır.

- 1) Yaşamın temel kaynağı olup sürekliliğini sağlar
- 2) Bize en yakın ve yüzey gösteren tek yıldızdır.
- 3) Güneş sisteminin toplam kütesinin %99,8'ini oluşturur.

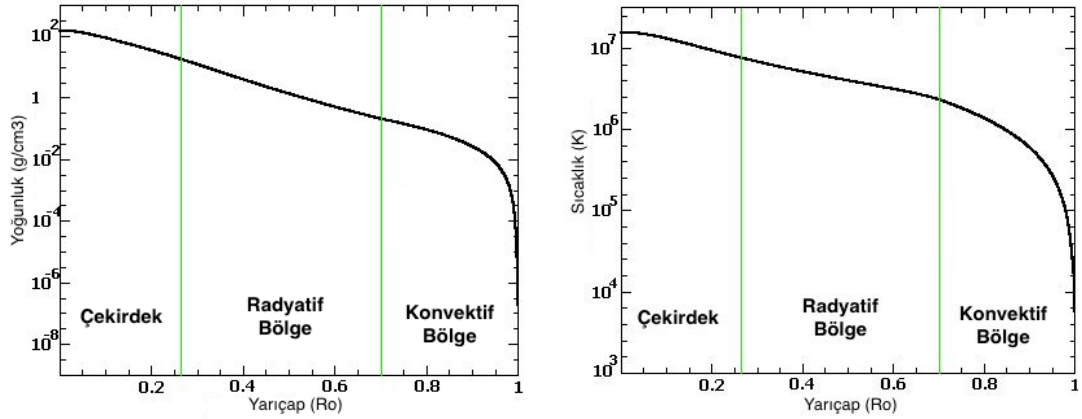
Güneş, yarıçapı 696000 km, kütesi 1.99×10^{30} kg olan neredeyse mükemmel küresellikte dev bir plazma topudur. Güneş'in içyapısı opak olduğundan gözlenemez. Mevcut bilgiler, atmosfer gözlemlerinden ve helyosismoloji çalışmalarından elde edilmiş içyapı modellerine dayanmaktadır. Yüzeyin altında kalan kısım farklı fiziksel özelliklere sahip 3 bölgeye ayrılır. Bunlar sırasıyla çekirdek, radyatif bölge ve konvektif bölgedir. Toplam hacmin %1,6'sı, toplam kütenin %50'si çekirdekte bulunmaktadır. Çekirdeğin yarıçapı toplam güneş yarıçapının 1/4 kadardır. Güneş enerjisinin %99'u çekirdeğinde gerçekleşen nükleer reaksiyonlardan sağlanır. Bu reaksiyonlar sırasında saniyede 4.4×10^6 ton güneş kütesi 4×10^{33} erg enerjiye dönüşür. Çekirdekte gerçekleşen proton-proton reaksiyonları 2.1 bağıntısındaki gibi ifade edilir.



Bu reaksiyonlar ile açığa çıkan enerji radyatif transfer ile radyatif bölge boyunca çekirdekte konvektif bölgeye taşınır. Radyatif transferde enerji taşınımı fotonlar sayesinde olur. Merkezden yayınlanan bir fotonun radyatif bölgeden konvektif bölgeye ulaşması ancak 10^5 - 10^7 yılda gerçekleşir. Bu sürecin bu kadar uzun olmasının sebebi, radyatif bölgenin opak olmasından dolayı fotonun maruz kaldığı soğrulma ve saçılma olaylarıdır. Radyatif bölge, güneş yarıçapının %70'lik kısmında son bulur. Bu bölgenin hemen bitiminde, konvektif bölge ile radyatif bölge arasında güneş yarıçapının onda biri kadar incelikte tachokline olarak isimlendirilen geçiş tabakası bulunur. Güneşin manyetik alanı burada üretilir (Stix 2004).

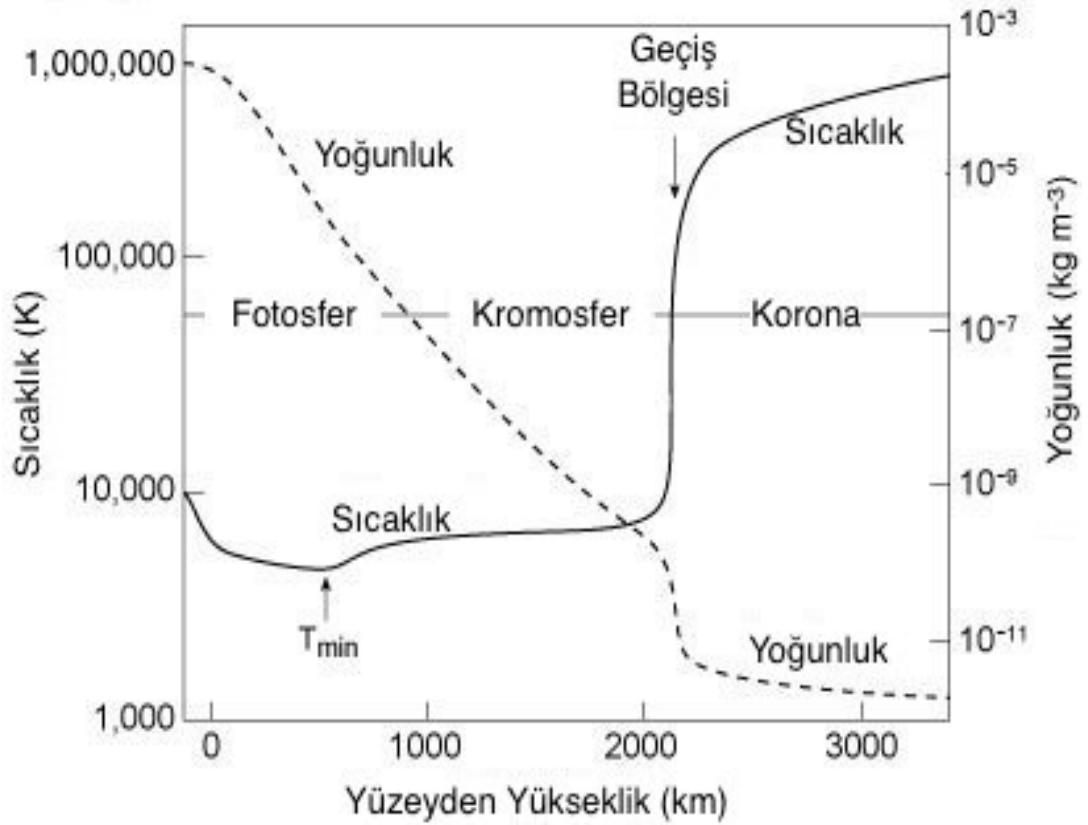
Radyatif transfer ile konvektif bölgeye ulaşan enerji bu tabaka boyunca konvektif transfer ile yüzeye taşınır. Konveksiyon ile enerji taşınımı farklı büyüklük ve derinlikteki hücresel yapıların hareketi sayesinde olur. Taşınan enerji, yüzeyden ise başlıca optik ve kızılötesi ışınım olarak ayrılır. Yüzeydeki ışınım akısı saniyede 6×10^{10} erg.cm⁻² mertebesindedir. Optik ve kızılötesi akıya ek olarak saniyede 10^6 erg.cm⁻² mertebesinde, uç morötesi ve x-ışınımı, radyo ışınımı ve parçacıklardan oluşan bir akış vardır. Bu akışın güneş aktivite çevrimi ile korelasyona sahip olduğu düşünülmektedir (Evans 1970).

Güneşin iç kısmında, yoğunluk ve sıcaklık, yarıçapa bağlı olarak yüzeye yaklaştıkça hızlı bir şekilde düşüş gösterir. Bu durum hidrostatik denge ve içyapı denklemlerinin bir sonucu olarak yorumlanabilir. Merkezde $151,3 \text{ g/cm}^3$ olan yoğunluk yüzeyde 10^{-6} g/cm^3 değerine düşer. Sıcaklık ise merkezde $15,6 \times 10^6 \text{ K}$ değerindeyken yüzeyde 5777 K değerine düşer. Güneşin iç katmanlarında yoğunluk ve sıcaklık değerlerinin yarıçapa bağlı değişimi Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Güneş merkezinden yüzeyine doğru yoğunluk ve sıcaklığın yarıçapa bağlı değişimi.

Güneş atmosferi elektromanyetik spektrumun radyo dalgalarından gama ışınları bölgesine kadar geniş bir aralıkta ışınım yapar. Her dalga boyunda atmosferin farklı tabakaları ve bu tabakalardaki yapılar gözlenebilir. Konvektif bölgenin hemen üstünde fotosfer tabakası yer alır. Bu tabaka, Güneşin beyaz ışıkta gözlenen son derece ince dış yüzeyi olup kalınlığı yaklaşık 500 km’dir. Bu tabakanın sıcaklığı 5780° K olup, parlaklığı düzenli değildir. Güneş ışınımının %90’ı fotosferden gelir. Granül hücreleri, Güneş lekeleri ve fotosferik plaj alanları bu tabakada gözlenen belirgin yapılardır. Fotosferin üzerinde kromosfer tabakası yer alır. Kromosfer tabakası görsel bölgede yayınlanan radyasyona karşı geçirgen olduğu için normal şartlarda gözlenemez. Çıplak gözle sadece tam güneş tutulmaları esnasında görülür. Güneş patlamaları, prominensler, spiküller, kromosferik ağ yapı ve kromosferik plaj alanları bu bölgede gözlenir. Bu tabakanın üstünde ise korona yer alır. Fakat kromosfer tabakası ile korona tabakası arasında oldukça ince bir geçiş bölgesinin varlığı bilinmektedir. Bu geçiş bölgesinde sıcaklık ani bir artış gösterirken yoğunluk ani bir düşüş gösterir. Güneş atmosferinin tüm tabakalarında sıcaklık ve yoğunluk değişimleri Şekil 2.2’de verilmiştir. Korona, Güneşin en dış atmosfer tabakası olup Güneş rüzgarları ile Dünyaya kadar uzandığı bilinmektedir. Miğferimsi yapılar, kutup tüycükleri, koronal luplar, koronal delikler korona tabakasında gözlenen yapılardır. Yoğunluğu çok düşük olan bu tabakanın şekli güneş aktivite çevrimine bağlılık gösterir.



Şekil 2.2. Güneş atmosferinde yüzeyden itibaren yüksekliğe bağlı olarak sıcaklık ve yoğunluk değişimi.

Güneş, sıcak ve statik bir plazma küresinden çok daha karmaşık ve aktif bir yapı sergilemektedir. Güneş yüzeyinde kısa veya uzun süreli birtakım olaylar gözlenmektedir. Güneş patlamaları, güneş lekeleri, prominensler ve koronal kütle atımları bu olaylardan bazılarıdır. Bu olayların manyetik kökenine bir açıklama getirmek üzere Parker, 1955 yılında diferansiyel dönmeye ve siklonik hareketlere dayanan basit bir dinamo modeli ortaya sürmüştür (Parker 1955). Sonradan ortalama alan teorisi ve α -etkisi gibi faktörlerle güçlendirilen dinamo modeli bir takım matematiksel ve dinamik doğrusal olmama durumlarıyla karakterize edilebilmektedir. Matematiksel doğrusal olmama durumu, kinetik sarmallık ve akışkan hareketleri üzerindeki manyetik alan etkisi ile açıklanır (Kleeorin ve Rogachevskii 2007). Dinamik doğrusal olmama durumu ise küçük ölçekli manyetik sarmalların türbülanslı plazmadaki durumları ile açıklanır (Kitiashvili 2009). Fiziksel süreçleri tümüyle aydınlatılmamış olan Güneş dinamosunun kaotik bir süreç takip ettiği düşünülmektedir (Arlt ve Weiss 2014).

2.2. Uzay Havası

Uzay havası, hem kendi başına bilimsel bir disiplin hem de kamu ve özel sektör açısından önemli bir risk kaynağı olarak tanımlanmaktadır. Güneş aktivitesinin Dünyada ve yakın uzayda yarattığı etkiler uzay havası olarak tanımlanabilir. Gelişen teknoloji, uzay havası etkilerinin öncesine göre daha fazla önem kazanmasını da beraberinde getirmiştir. Bu etki ilk olarak elektrik şebekelerinde düzensiz ve kontrol

edilemeyen elektrik akımları oluşturarak kendini hissettirmiştir. Daha sonra aynı etki, tren ve boru hatlarında da gözlenmiştir. Bu durum elektrik sektöründe, maliyetlerin artmasına ve verimliliğin düşmesine, boru hatlarında ise taşınan maddelerin ısınarak güvenlik açısından risk oluşturmasına sebep olmaktadır. Havacılık sektörü açısından da uzay havası dikkate alınması gereken bir faktördür. İletişim, navigasyon ve dijital kontrol sistemleri, uzay havasının yarattığı manyetik alanlardan etkilenmekte ve bu sistemlerin içerisindeki hassas elektronik ekipmanlarda işlev bozukluğuna sebep olabilmektedir. Bunun yanı sıra, oluşan radyasyon seviyeleri, havayolu taşımacılığında yolcu ve personel sağlığını etkileyebilmekte, uzay araçlarında ise doğrudan önlem alınması gereken bir durum yaratmaktadır. (National Research Council 2008).

Hapgood (2017) tarafından uzay havası etkilerinin dünyada görüldüğü bölümler beş sınıf altında toplanmıştır. Bunlardan ilki yeryüzündeki doğal jeoelektrik alanlardır. Güneşin iyonosfer ve manyetosferdeki elektrik alanlarına etkisi sonucunda bu doğal jeoelektrik alanlarda değişimler oluşur. Bunun sonucunda ise yeryüzüne elektrikle bağlanmış yani topraklanmış altyapıda istenmeyen elektrik akımları gözlenir. Bu sınıfta en kritik etki elektrik şebekelerinde oluşur. Bunun yanı sıra demir yollarındaki güç ve kontrol sistemleri, boru sistemleri ve okyanus tabanlarındaki fiberoptik altyapı da etkilenmektedir. Atmosferik radyasyon ortamı bir diğer etki bölgesidir. Bu bölgede galaktik kozmik ışınların etkileriyle nötronlar oluşur. Nötronlar havadaki ve yerdeki elektronik cihazlara nüfuz ederek arızalı çalışmalarına veya bozulmalarına sebep olur. Genellikle araçlar bu etkileri önleyecek şekilde tasarlanırsa da şiddetli uzay havası olayları, radyasyon seviyelerinde saat mertebesinde devasa artışlara sebep olarak alınan önlemleri aşabilir. Diğer bir etki bölgesi yaklaşık 90 km – 1000 km arasındaki üst atmosferdir. Bu bölgenin dinamikleri uzay havasıyla güçlü ilişki içerisinde. Bu bölge nötr ve iyonize bileşenlerden oluşur ve iyonizasyon oranları uzay havası etkileriyle değişir. Nötr bileşenin etkisi, atmosferik sürüklenmede görünür. Yörüngeleri bu bölgeden geçen uydular değişen atmosferik sürüklenme etkilerine maruz kalacaktır. İyonize bileşenin etkisi, radyo sinyallerinde gecikmeler ve sintilasyon olarak görülür. Uyduların içinde bulunduğu plazma ortamı bir başka etki bölgesidir. Serbest elektron, proton ve iyonlar uydu yüzeylerini devamlı bombardıman altında bırakırlar ve enerjisi yeteri kadar yüksek olan parçacıklar uydulara nüfuz ederek elektronik aksamalarını olumsuz etkiler. Bu sınıflandırmadaki son başlık radyo frekans gürültüsüdür. Güneş, geniş bir frekans aralığında radyo gürültüsü yayarak, dünyanın gündüz kısmında uydu navigasyon sinyallerini ve radarları olumsuz etkiler.

2.3. Güneş Aktivitesi ve Güneş Leke Çevrimi

Güneşin büyük ölçekli manyetik alanının çevrimsel değişimi, güneş aktivitesi olarak bilinen tüm olguların kökenidir. Bu manyetik alan, güneş plazması ile etkileşim halindedir. Güneşin iç kısmında manyetik alan ve iyonize olmuş plazma birlikte hareket ederek bu harekete ters yönde akımlar oluşmasına sebep olur. Burada büyük oranda plazma basıncı, manyetik basınca göre daha baskındır ve plazma kinetik enerjisi, manyetik enerjiden fazladır. Sonuç olarak manyetik alanlar, plazma akışları tarafından taşınır ve dönüştürülür. Hangi plazma akışlarının, manyetik alan oluşumuna nasıl katkıda bulunduğunu açıklayarak güneş aktivitesinin çevrimsel

hareketini belirlemeye çalışan farklı dinamo modelleri mevcuttur (Cameron vd. 2017).

Çoğu dinamo modelinde 2 temel süreç ve 2 temel manyetik alan yer almaktadır. Bu süreçlerden ilki, omega etkisi olarak bilinir ve manyetik alanı güçlendiren ve plazma akışları ile hizalayan makaslama (shearing) hareketleridir. İkinci süreç, alfa etkisi olarak isimlendirilir ve manyetik alanı farklı bir düzleme taşıyan ve dönüşüne sebep olan sarmal hareketlerdir. Omega etkisi genellikle güneşin diferansiyel dönüşü ile, alfa etkisi ise manyetik akının kutuplara taşınımı ile ilişkilendirilir. 2 temel manyetik alandan ilki kutupsal (poloidal) alandır. Kutupsal alan güneş çevriminin minimumunda güneşin dönme eksenine hizalanmış durumdadır ve güneş yüzeyinden geçerek boylam çizgileri boyunca iki zıt kutbu birbirine bağlar. Diferansiyel dönüş ile kutupsal alan makaslanarak, daha güçlü olan diğer temel manyetik alanı (toroidal) oluşturur. Toroidal alan, enlem çizgilerine paralel olarak güneşin etrafını sarar. Bu 2 temel manyetik alanın çevrimsel olarak birbirine dönüşümü güneş leke çevrimi ile yakından ilişkilidir (Babcock 1961).

Dinamo modelleri genellikle plazma hareketlerinin oluşturduğu ve sürdürdüğü manyetik alanlar ile ilgili olduğundan veri olarak yüzey manyetik ve hız alanlarının zaman serilerini kullanır. Manyetik alanın bir diğer temsilcisi ise en uzun süreli doğrudan gözlemsel veri olan güneş leke sayılarıdır. Güneş lekeleri yoğun manyetik alana sahip karanlık bölgelerdir. Güneş yüzeyinde ortalama manyetik alan şiddeti 1 Gauss iken, güneş lekelerinde bu değer 3000 Gauss mertebesinde. Leke sayılarının her 10-12 yılda bir minimum gösterecek şekilde çevrimsel değişimi ilk olarak Schwabe (1849) tarafından keşfedilmiştir. Schwabe'nin bu keşfinden sonra Johann Rudolf Wolf, günlük güneş gözlemleri yapmaya başlamıştır ve kayıtları geçmiş yıllara uzandırmaya çalışmıştır (Wolf 1861). Wolf çalışmaları sırasında her bir leke yerine leke gruplarını saymanın daha iyi sonuçlar vereceğini düşünerek literatürde Wolf sayısı (R) olarak bilinen göreceli güneş leke sayısını tanımlamıştır. Bu tanıma göre günlük toplam güneş leke sayısı ve rölatif sayı;

$$R = k (10 g + n) \quad (2.2)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Burada k , gözlemciye ve gözlem şartlarına özgü bir düzeltme faktörü, g güneş leke gruplarının sayısı ve n ise gözlenen toplam güneş leke sayısı olarak tanımlanır. Bu sisteme göre birinci gözlemcinin düzeltme faktörü (k) 1.0 olarak alınır. Eğer birinci gözlemci o gün için gözlem yapamazsa ikinci veya üçüncü gözlemcilerin tespit ettiği leke sayıları onlara özel düzeltme faktörleri ile kullanılır.

1981 yılından itibaren Belçika – Royal Observatory tarafından sunulan uluslararası güneş lekeleri sayıları (R_I) kullanılmaya başlanmıştır. Bu yeni sistemde tek bir gözlemcinin tespit ettiği sayıları kullanmak yerine birçok farklı gözlemcinin güneş leke sayıları belirli bir ağırlıklandırma ile kullanılmaktadır. Fakat bu sistemde de ağırlıklandırma birincil gözlemciye göre yapılmaktadır. Günümüzde hala en sık kullanılan güneş leke sayıları olan R_I , 2015 yılında bir takım istatistiksel düzenlemeler ve yeni gözlemci katsayıları ile 2. versiyonu kullanıma sunulmuştur. Bu yeni versiyonda gözlemci katsayısına gelen düzenleme ile leke sayıları daha önce

kullanılan leke sayılarına göre yaklaşık %45 artış göstermiş ve modern gözlemler ile uyumlu hale gelmiştir (Clette ve Lefevre 2016). Bu çalışmada 2. Versiyon güneş leke sayıları veri seti kullanılmıştır.

Bugüne kadar yapılmış olan güneş leke gözlemleri sonucunda güneşin manyetizmasına dair birçok düzen açığa çıkartılmıştır. Bunlardan ilki güneş lekelerinin çevrim başlangıcında 35° - 40° civarındaki yüksek enlemlerde oluşması ve çevrim ilerledikçe alt enlemlere doğru kayarak 8° civarındaki enlemlerde yaşam döngüsünü tamamlamasıdır. Bu olay literatürde *Spörer yasası* olarak bilirse de ilk olarak Carrington (1858) tarafından keşfedildiği açığa çıkmıştır. Diğer bir düzen *Hale yasası* olarak bilinen, güneş leke gruplarındaki öncül leke ve takipçi lekelerin farklı manyetik kutuplara sahip olması durumudur. Her öncül leke bulunduğu yarımküredeki baskın kutba sahiptir ve yarımküreler zıt kutupludur. Her leke çevriminde bu kutuplar yer değiştirir (Hale 1919). Hale yasasından daha az belirgin bir düzen ise bir leke grubu içindeki öncül lekelerin, ekvatora takipçi lekelerden daha yakın olmasıdır ve literatürde *Joy yasası* olarak bilinir (Hale 1919). Bu etkinin tam olarak gözlenebilmesi için çok sayıda leke grubu içeren bir örneklem alınmalıdır. Yine de Spörer, Hale ve Joy yasaları gözlemsel olarak kanıtlanmıştır.

Gözlemsel olarak açığa çıkan fakat henüz tam anlamıyla kanıtlanamamış farklı olgular da bulunmaktadır. Örneğin *Waldmeier etkisi* güçlü çevrimlerin zayıf çevrimlere nazaran daha önce maksimuma ulaştığını söyler (Waldmeier 1941). Fakat bu durum güneş aktivite göstergelerinin tümü için geçerli değildir. Diğer bir olgu ise *kuzey-güney asimetrisi* olarak bilinir. Leke sayıları, her yarımküreye eşit dağılmamıştır ve bu asimetrik davranış birçok çevrim boyunca uyumunu bozmadan devam edebilir (Carbonell vd. 1993). Fakat unutulmaması gereken önemli bir nokta vardır. Tüm bu yasalar ve olgular, son birkaç yüzyıllık veriye dayanmaktadır. Gerçekte güneş aktivitesinin çok düşük yaşandığı Maunder minimumu gibi dönemlerin de olduğu bilinmektedir ve bu dönemlerin ortalama her 300 yılda bir gerçekleştiği düşünülmektedir (Usoskin vd. 2007). Bu uzun minimum veya maksimum dönemleri, güneş dinamosunun farklı davranışlar sergileyebileceğini ortaya koymaktadır.

Güneş leke çevrimlerinin maksimumları incelendiğinde bazı çevrimlerin bu süreç içerisinde tek bir maksimuma bazılarının ise çift maksimuma sahip olduğu görülür. Bu durum ilk olarak Gnevyshev (1963) tarafından bildirilmiştir ve bu sebeple aynı çevrimin iki maksimumunun arasında kalan daha az leke sayısına sahip bölge *Gnevyshev boşluğu* olarak isimlendirilmiştir. Çift maksimuma sahip çevrimlere olası bir açıklama getirmek amacıyla Kilcik ve Ozguc (2014), güneş lekelerini morfolojilerine göre büyük (kompleks) ve küçük (basit) lekeler olarak 2 sınıfa ayırmış ve bu iki sınıfın maksimuma farklı zamanlarda ulaştığı sonucuna varmıştır. Bu sonuca göre, büyük lekeler, küçük lekelerden iki yıl sonra maksimuma ulaşmaktadır ve bu iki yıllık gecikme Gnevyshev aralığının ortalama süresiyle uyumludur. Aynı çalışmada, 24. Leke çevriminin çift maksimuma sahip olacağı da başarılı bir şekilde tahmin edilmiştir. Bu bulgulara dayanarak, küçük ve basit lekelerin ilk maksimumu, büyük ve kompleks lekelerin ise ikinci maksimumu oluşturduğu sonucuna varılır. Tek maksimuma sahip çevrimlerde ise, bu iki leke grubunun üst üste binerek aynı zamanda maksimuma ulaştığı söylenebilir.

2.4. Simülasyon ve Tahmin Yaklaşımları

Güneş aktivitesini ve onun çevrimsel davranışını incelemek amacıyla oluşturulmuş farklı simülasyonlar üzerinden yapılan çalışmalar literatürde yer almaktadır. Bilgisayarların hesaplama kapasitesindeki artışla birlikte özellikle yüksek türbülanslı kompleks bölgelerin simülasyonlara dahil edilmesi mümkün olmuştur. Bu simülasyonların hepsi konveksiyon özelliklerini ve onun sürdürdüğü büyük ölçekli akışları paralel bilgisayar sistemleri üzerinde manyetohidrodinamik (MHD) denklemler ve onların nümerik çözümleri yardımıyla üreterek güneşin manyetik çevrim sürecini canlandırmaya çalışmaktadır.

ASH (Anelastic Spherical Harmonics) kodu, küresel geometride formüle edilmiş üç boyutlu elastik olmayan hareket denklemlerini spektral yaklaşımla çözerek dönen küresel bir kabuktaki türbülanslı konveksiyonu taklit etmektedir (Clune vd. 1999). Bu denklemlerdeki hız değişkenleri doğrusal olmayan yapıda, termodinamik değişkenler ise doğrusal yapıdadır. Fakat güneşte gözlenen çevrim sürecini elde edebilmek için, bu simülasyondaki yıldızın güneşten üç kat daha hızlı dönmesi gerekmektedir (Brown vd. 2010).

EULAG (Eulerian/semi-LAGRangian numerical model for fluids) kodu, herhangi bir ölçekteki akışların elastik olmayan denklemlerle çözüldüğü sanal bir laboratuvardır (Prusa vd. 2008). Bu simülasyonda enerji kaybı ve ısı kaybı gibi yitim olayları (dissipation) açık olarak formüle edilmek yerine nümerik yaklaşımla çözülür. Bu kod ile yapılan simülasyonlar güneş çevrimine benzer sonuçlar üretse de güneşte gözlenen ortalama manyetik alanın enlemsel hareketi tam anlamıyla yansıtılmamaktadır (Racine vd. 2011).

PENCIL kodu kısmi diferansiyel denklemleri sonlu farklar yöntemiyle çözerek manyetik alana sahip hidrodinamik akışların simülasyonunu yapar. Bu kod ile yapılan simülasyonlarda ortalama manyetik alanın enlemsel hareketi üretilebilse de çevrimsel hareketin periyodu 33 yıl olarak bulunmuştur (Kopyla vd. 2012).

Simülasyonlara ek olarak güneş aktivite tahmin yaklaşımları üç temel sınıf altında incelenmektedir (Petrovay 2010). *Öncü (precursor) yöntemleri*, belirli bir zamanda elde edilen güneş aktivitesi veya manyetik aktivitenin bir ölçüsünü kullanarak bir sonraki çevrimin genliğinin tahmin edildiği çalışmalardır. *Dışdeğer biçme (extrapolation) yöntemleri*, güneş lekelerini ortaya çıkartan fiziksel sürecin orta vadede istatistiksel olarak homojen olduğu varsayımına dayanarak, geçmiş gözlemler üzerinde zaman serileri analiz yöntemleri ile tahminlerin oluşturulduğu çalışmalardır.

Bir sonraki çevrimin maksimumdaki leke sayısı ile mevcut çevrimin minimumunda güneş kutuplarındaki manyetik alan şiddetleri arasında yüksek bir korelasyon bulunmaktadır (Munoz-Jaramillo vd. 2013). Öncü yöntemleri genel olarak bu teoriyi kullanmaktadır. Kutup bölgelerindeki manyetik alan şiddeti direk olarak ölçülemediğinden bazı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlar genellikle jeomanyetik indislere dayanmaktadır. 25. Güneş çevrimi için *jeomanyetik aa indisi* ve öncü yöntem kullanılarak yapılan tahmin bu çalışmada elde edilen sonuçlarla uyumludur (Kirov vd. 2017).

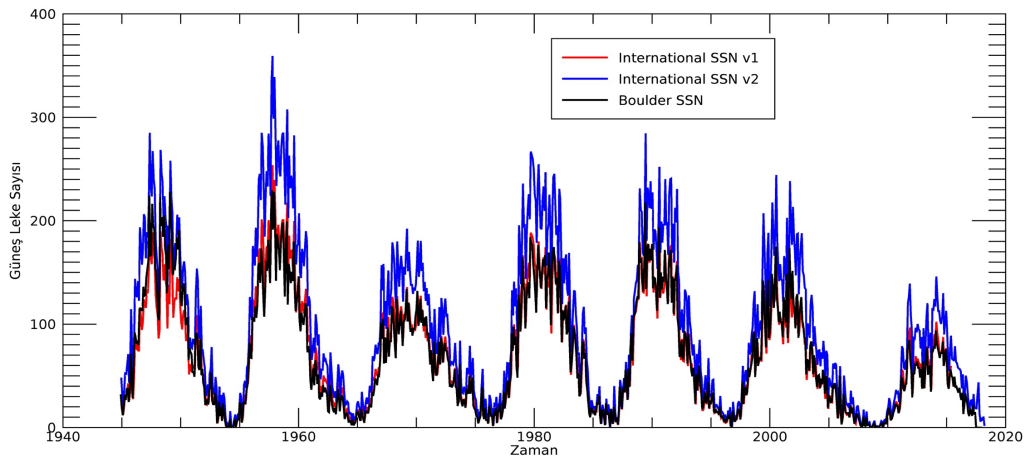
Öncü yöntemlerin aksine dışdeğer biçme yöntemlerinde tek bir noktadaki veri yerine tüm geçmiş veriler kullanılarak elde edilen gidimler ve dizgiler yardımıyla tahmin oluşturulur. Dışdeğer biçme yöntemleri kendi arasında üç temel başlık altında toplanabilir; doğrusal yöntemler, doğrusal olmayan yöntemler ve spektral yöntemler (Petrovay 2010). Doğrusal yöntemler geçmiş değerlerin doğrusal kombinasyonu ile gelecek değerleri tahmin ederken doğrusal olmayan yöntemlerde bu kombinasyon daha kompleks bir biçimde ifade edilir. Spektral yöntemlerde ise veriyi çözümlenerek içerisinde yer alan karakteristik fonksiyonların (eigenfunction) yardımıyla tahmin oluşturulur. Bu yöntemi kullanarak yapılan bir çalışmada 24 ve 25. Çevrimlerin tahminleri oluşturulmuştur (Rigoza vd. 2011). 24. Çevrim oldukça iyi bir isabetle tahmin edilmiş, 25. Çevrimin tahmini ise bu çalışmada elde edilen sonuçlarla uyumludur. Bunun yanında bu çalışmanın sonucunda elde edilen tahmin de bu kategoride doğrusal olmayan yöntemlerin altında değerlendirilmektedir.

Modele dayalı yöntemler ise, önceki bölümlerde anlatılan dinamo modellerindeki fiziksel süreçlere dayalı tahminler yapılan çalışmalardır. Bu yöntem son yıllarda ortaya çıkan yeni bir yöntemdir. Bunun nedeni güneş dinamosundaki yeni keşiflerden ziyade bilgisayarların artan performansı dolayısıyla en ince ayrıntıya kadar yapılabilen benzetimlerdir. Fakat 24. çevrim için modele dayalı yöntemler oldukça geniş bir aralıkta tahminler ortaya çıkarmıştır (Tripathy 2016). Bir sonraki çevrim için literatürde yer alan bir çalışma, öncü ve modele dayalı yöntemleri birleştirerek 25. Çevrim için bahsedilen diğer tahminlerle uyumlu bir sonuç ortaya çıkarmıştır (Hathaway ve Upton 2016).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Çalışmada Kullanılan Veri Seti

Zamana bağlı güneş leke sayılarının kayıtları çeşitli isimlerle literatürde mevcuttur. Bu kayıtlardan en sık kullanılan iki tanesi “Boulder SSN” ve “International SSN” olarak bilinmektedir. Boulder SSN günlük olarak Amerika’da NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) tarafından bağıntı 2.2’ye göre hesaplanır. International SSN ise günlük olarak Belçika’da SIDC (Solar Influences Data Center) tarafından yine aynı bağıntı göre hesaplanır. Bu iki veri setinin birbirinden tek farkı, farklı gözlemevleri verilerinin kullanılmasıdır. International SSN hesaplanırken “SILSO güneş lekeleri ağı (SILSO sunspot network)” adı verilen dünya genelinde bir gözlem ağı kullanılır. Bu ağ dahilinde 30’dan fazla ülkeden gözlemciler bulunmaktadır. Bu gözlemcilerin yaklaşık %30’u profesyonel gözlemevleri, %70’i ise amatör astronomlardan oluşmaktadır. Fakat bu ağa amatör astronom olarak kabul edilmek katı şartlara tabiidir. Bunun yanında NOAA tarafından hesaplanan Boulder SSN için yalnızca Amerika’da bulunan gözlemevleri kullanılmaktadır.

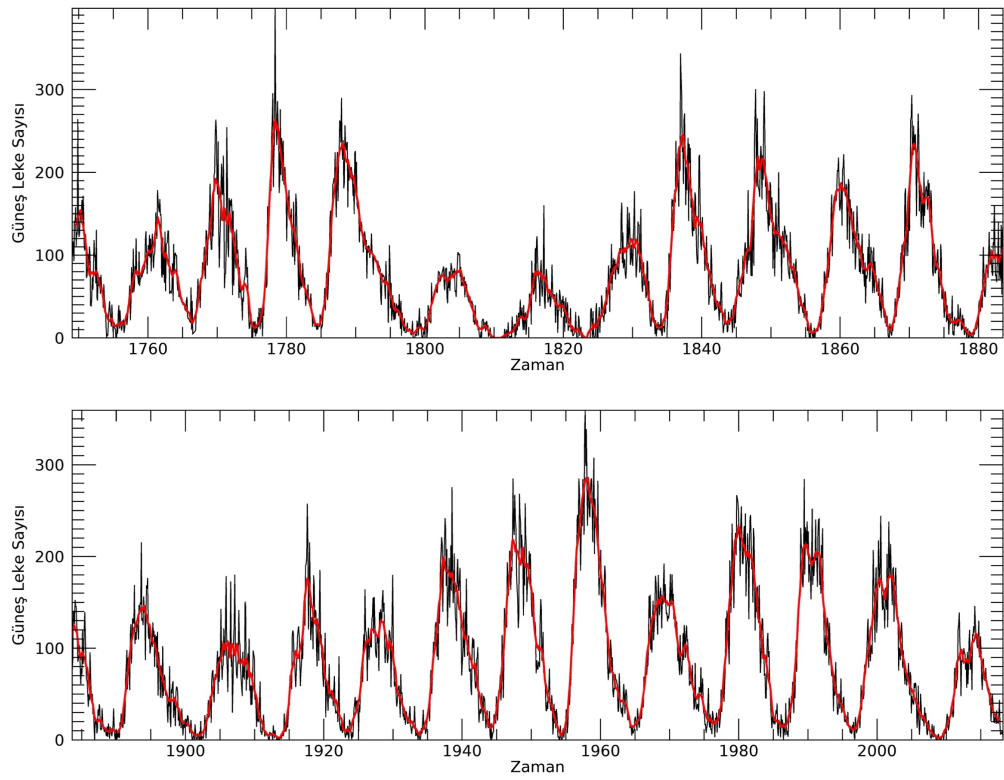


Şekil 3.1. International SSN ilk versiyon (kırmızı), ikinci versiyon (mavi) ve Boulder SSN (siyah) veri setlerinin zamansal karşılaştırılması.

Diğer güneş aktivite göstergeleriyle (SSA, F10.7 akısı ve benzeri) International SSN veri setini daha uyumlu hale getirebilmek amacıyla, 1 Haziran 2015 tarihinden itibaren yapılan güncelleştirmeler ve iyileştirme çalışmaları sonucuyla revize edilerek International SSN 2. versiyonuna geçmiştir. Bu versiyondaki temel yenilik 2.2 bağıntısındaki birincil gözlemcinin düzeltme faktörünün değiştirilmesidir. Bunun sonucunda leke sayıları yaklaşık olarak %45 oranında artış göstermiştir. International SSN birinci ve ikinci versiyonları ile Boulder SSN veri setlerinin karşılaştırılması Şekil 3.1’de verilmiştir. Eski veri setinin 2015 yılında son bulması sebebiyle çalışma boyunca International SSN verilerinin ikinci versiyonu kullanılmıştır. Bu veriler, SIDC web sayfasında, aşağıdaki haliyle dört farklı şekilde sunulmaktadır.

- 1) Günlük toplam leke sayıları (1/1/1818'den itibaren)
- 2) Aylık ortalama toplam leke sayıları (1/1749'dan itibaren)
- 3) 13-aylık yürüyen ortalamalı aylık toplam leke sayıları (1/1749'dan itibaren)
- 4) Yıllık ortalama toplam leke sayıları (1700'den itibaren)

Günlük toplam leke sayıları, çalışma kapsamında gereğinden fazla detay içerdiği için, yıllık ortalama toplam leke sayıları ise güneş aktivite dinamiklerini tam anlamıyla ortaya koyamadığı için aylık ortalama toplam leke sayıları kullanılmasının isabetli olduğuna karar verilmiştir. Aylık ortalama toplam leke sayıları iki farklı halde mevcuttur (2 ve 3 numara). Bu verilerin zamana bağlı grafikleri Şekil 3.2'de verilmiştir. Bu grafikte siyah ile gösterilen veri aylık ortalama leke sayıları (2 numara), kırmızı ile gösterilen veri ise 13-aylık yürüyen ortalamalı aylık ortalama leke sayılarıdır (3 numara).



Şekil 3.2. Zamana bağlı güneş leke sayıları.

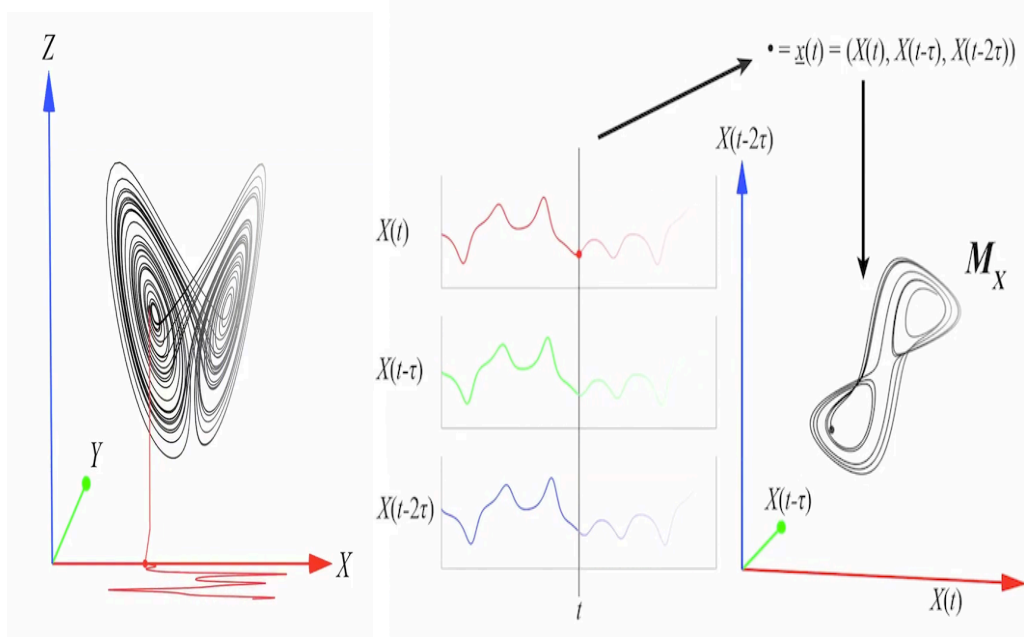
Şekil 3.2'den görülebileceği gibi iki numaralı veri kısa zaman aralıklarında oldukça değişken bir seyir izlemektedir. Bu varyasyon, yapılacak analizleri ve modelleme çalışmalarını olumsuz etkileyeceğinden, bu çalışma kapsamında verinin genel gidişatını daha düz bir şekilde ortaya koyan üç numaralı veri yani 13-aylık yürüyen ortalamalı aylık ortalama leke sayıları kullanılmıştır. 13-aylık yürüyen ortalama işleminden dolayı veri setinin ilk ve son altı aylık dönemi kullanılamamaktadır. Bu sebepten ötürü kullanılan veri seti Temmuz 1749 – Temmuz 2017 arasındaki zaman dilimini kapsamaktadır. Bu zaman serisi 3217 adet veri noktası içermektedir.

3.2. Denklemsiz Modelleme

2003 yılında karmaşık sistemlerin analizine yeni bir yaklaşım önerilmiştir; denklemsiz modelleme (Equation-Free Modelling) de denilen bu teknikte sistemi oluşturan tüm etkileşim denklemlerinin kapalı formda (limit, türev, integral gibi operatörlerin kullanılmadığı, sonlu sayıda işlem adımı içeren çözüm) çözülerek sistemin genel evrimine ulaşılmasının (deterministik yaklaşım) mümkün olmadığı durumlarda, algoritma tabanlı makro ölçekte benzetimlerle sistemin genel davranışı elde edilmektedir (Kevrekidis vd. 2003). Özellikle, altında yatan fiziksel sebeplerin tam olarak açıklanamadığı doğa olaylarında bu yaklaşımın başarılı uygulamaları literatürde mevcuttur (DeAngelis ve Yurek 2015; Wang vd. 2009).

Denklemsiz modellemenin, bir uygulaması Deneysel Dinamik Modelleme (Empirical Dynamical Modelling) olarak öne çıkmaktadır. Doğrusal olmayan modellemeye dayanan bu yaklaşım, kompleks bir sistemin geçmiş gözlemlerini girdi olarak kullanmaktadır. Bu girdiler, zaman gecikmesi (ardışık iki olayın veya verinin ortaya çıkışını ayıran gecikme) tabanlı bir faz uzayı (her bir eksenin, fiziksel sistemin bir durumunu veya fazını belirtmek için gerekli koordinatlardan birine karşılık geldiği çok boyutlu alan) içinde açılarak incelenmekte ve sistemin gelecek değerleri (tahminler), faz uzayı içerisinde şekillenen çekicinin incelenen noktaya yakın olan komşuluklarına belirli ağırlıklar verilerek elde edilmektedir. Klasik yaklaşımda yer alan sabit denklemler yerine, sistemin davranışı sadece geçmiş gözlem değerleri kullanılarak oluşturulur. Bu sayede değişkenlerin birbirleriyle olan etkileşimi de geleneksel matematiksel modeller yerine, zaman-gecikmesi tabanlı ilişkiler yardımıyla ortaya konulur. (Ye vd. 2015).

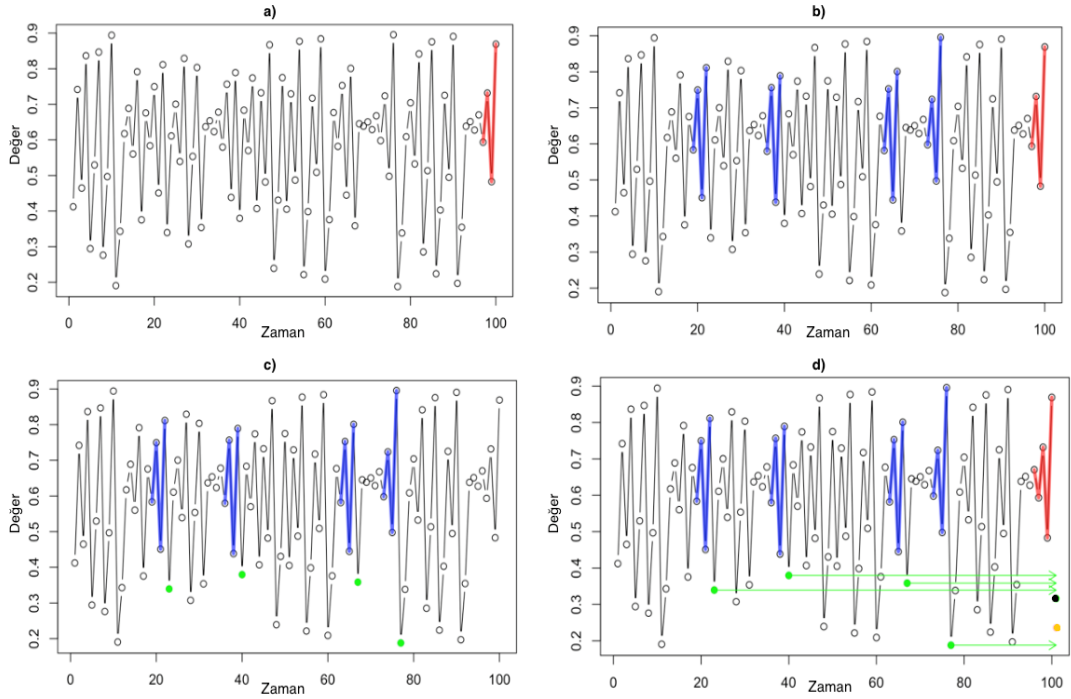
Deneysel Dinamik Modelleme (DDM) yaklaşımının matematiksel temelleri Takens Teoremine (Takens 1981) dayanmaktadır. Bu teoreme göre herhangi bir sistemin dinamikleri, o sistemi oluşturan değişkenlerden bir tanesi incelenerek anlaşılabilir. Dinamik sistemler, bir dizi fazın, yüksek boyutlu bir faz uzayındaki (manifold) hareketlerini yönlendiren bazı kurallara uygun olarak zaman içindeki evrimi olarak tanımlanabilir. Bu manifold üzerindeki hareketin herhangi bir koordinat eksenine izdüşümü alınarak bir zaman serisi elde edilebilir. Bu zaman serisi, belirli bir zaman gecikmesi kullanılarak, istenen mertebede bir çekici (dinamik bir sistemin faz uzayındaki evrimini temsil eden set) oluşturmak için kullanılarak sistemin dinamikleri analiz edilir. Şekil 3.3'de bu sürecin örnek bir gösterimi sunulmuştur. Şekil 3.3'de sol panel, dinamik bir sistemin orijinal çekicisidir. Bu çekicinin x ekseninde iz düşümü alınarak bir zaman serisi oluşturulmuş daha sonra bu zaman serisinden τ birimlik zaman gecikmeleriyle iki farklı zaman serisi daha oluşturulmuştur (Şekil 3.3 orta panel). Bu üç zaman serisi özünde aynı veriye sahip olup aralarında her biri arasında τ birimlik gecikme bulunmaktadır. Şekil 3.3 sağ panelde ise bu üç zaman serisi kullanılarak üç boyutlu bir gölge-çekici (zaman gecikmesi yöntemiyle oluşturulan çekici) oluşturulmuştur. Takens teoremine göre, uygun gömme boyutu (faz uzayını oluşturmak için kullanılan boyut) ve zaman gecikmesi seçilmesi durumunda, orijinal çekicinin topolojik ve dinamik özellikleri korunmaktadır. Bu sayede sistemin özellikleri, oluşturulan gölge-çekici vasıtasıyla analiz edilebilmektedir.



Şekil 3.3. Takens teoremi ile gölge-çekici oluşturulma sürecinin şekilsel gösterimi.

DDM yaklaşımında, dışdeğer biçme (extrapolation) amacıyla kullanılan temel yöntem “Simplex Projection (SP)” olarak bilinen doğrusal olmayan tahmin algoritmasıdır (Sugihara ve May 1990). Bu algoritmanın en önemli kullanım alanı, rastlantısal gürültüden oluşan zaman serileri ile kaotik zaman serilerini ayırt etmektir. Bu amacın arkasında yatan temel fikir ise, kaotik zaman serilerinin gelecek değerlerinin, benzer geçmiş değerlerin davranışı sayesinde tahmin edilebilmesidir. Tahminin başarısı, tahmin aralığı arttıkça kaotik zaman serileri için yüksek bir değerden düşüğe geçerken, rastlantısal gürültüden oluşan zaman serileri için her zaman sabit ve düşük bir değerde kalacaktır. SP algoritması, zaman gecikmeli bir faz uzayı içerisindeki benzer noktaların ileriye evrimini takip eden bir en yakın komşuluk tahmin algoritmasıdır (Hsieh vd. 2005).

Şekil 3.4’de gömme boyutu dört olan bir veri seti için SP algoritmasının çalışma prensibi gösterilmiştir. Bu örnekte 100 veri içeren kaotik bir zaman serisinin bir adım sonrası tahmin edilecektir. Şekil 3.4.a’da zaman serisinde tahmin için kullanılacak son dört noktanın oluşturduğu dinamik, kırmızı ile gösterilmiştir. Tahmin edilecek nokta 101. veri yani kırmızı ile gösterilen dinamik yapının bir adım sonrasında gelecek veridir. Şekil 3.4.b’de zaman serisinin geçmiş değerlerinde aynı (veya yakın) dinamiğe sahip dört verilik aralıklar tespit edilerek mavi ile işaretlenmiştir. Şekil 3.4.c’de tespit edilen dinamiklerin birer adım ileriye projeksiyonuyla tahmin için kullanılacak noktalar tespit edilmiş ve yeşil ile gösterilmiştir. Şekil 3.4.d’de ise bu noktaların ağırlıklı ortalaması alınarak oluşturulan tahmin siyah nokta ile, bu noktanın gözlemsel değeri ise turuncu nokta ile gösterilmiştir. Şunu da belirtmek gerekir ki bu basit anlatımda, SP algoritmasının birçok detayı göz ardı edilmiştir.



Şekil 3.4. Simplex Projection algoritması ile tahmin oluşturulma süreçleri.

Daha detaylı incelemek gerekirse SP algoritması iki temel parametre içerir. Bunlardan ilki gömme boyutu (m), aranacak dinamiğin kaç veri noktası içereceğini, diğer bir deyişle zaman serisinin temsil edileceği faz uzayının boyutunu veren parametredir. Diğer parametre olan zaman gecikmesi (τ) ise, aranacak dinamiği oluşturan ardışık noktalar arasındaki veya faz uzayındaki her bir noktayı temsil edecek vektör elemanları arasındaki veri sayısını tanımlar. Bu iki parametre birbiriyle oldukça ilişkilidir ve bu parametre çiftinin iyi seçilmesi hem analiz için gereken veri setinin uzunluğunu hem de verideki gürültünün olumsuz etkilerini azaltır (Otani ve Jones, 2000). Zaman serisi, belirlenen parametrelerle faz uzayı içerisinde açıldıktan sonra Denklem 3.1'deki gibi bir dizi vektör (v) oluşturulmuş olacaktır

$$v_1 = \begin{pmatrix} l_1 \\ l_{1+\tau} \\ l_{1+2\tau} \\ \vdots \\ l_{1+(m-1)\tau} \end{pmatrix}, v_2 = \begin{pmatrix} l_2 \\ l_{2+\tau} \\ l_{2+2\tau} \\ \vdots \\ l_{2+(m-1)\tau} \end{pmatrix}, \dots, v_n = \begin{pmatrix} l_n \\ l_{n+\tau} \\ l_{n+2\tau} \\ \vdots \\ l_{n+(m-1)\tau} \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Burada l , zaman serisindeki verileri, m , gömme boyutunu ve τ da zaman gecikmesini temsil etmektedir. Bu yönteme göre oluşturulan vektörlerin sayısı;

$$n = N - (m - 1) * \tau \quad (3.2)$$

ile ifade edilen Denklem 3.2 kullanılarak hesaplanabilir. Burada N , zaman serisindeki veri sayısını temsil etmektedir.

Daha sonra, tüm vektörler için aranacak dinamiğe yani son vektöre (tahmin vektörü) olan öklidyen uzaklıklar hesaplanarak en yakın $m + 1$ sayıda vektör seçilir. Seçilen vektörlerin her birinin tahmin vektörüne olan uzaklığına göre ağırlıklandırma yapılır. Bu ağırlıklandırma yapılırken seçilen tüm vektörlerin tahmin vektörüne olan uzaklıkları hesaplanarak ortalaması alınır ve bu ortalama her vektör için oranlanarak ağırlıklandırma oluşturulur. Bu ağırlıklandırma yöntemi Denklem 3.3’de verilmiştir.

$$w_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^{m+1} \exp\left(-\frac{\|v_n - v_j\|}{\bar{w}}\right)} \exp\left(-\frac{\|v_n - v_i\|}{\bar{w}}\right) \quad (3.3)$$

$$\bar{w} = \frac{1}{m + 1} \sum_{j=1}^{m+1} \|v_n - v_j\|$$

Burada v_n , v_i ve v_j sembolü ile Denklem 3.1’de tanımlanan vektörler ifade edilmiştir. Tahmin vektörü (v_n), tahmine başlangıç noktasının hemen öncesindeki verinin bulunduğu vektördür, v_i ve v_j ise vektör seti içindeki i . ve j . vektörleri temsil eder. Gömme boyutu m ile gösterilmiştir. Seçilen her komşuluk için ortalama ağırlık, \bar{w} ile, o komşuluğa özel ağırlık ise w_i ile gösterilmiştir. Son adımda ise seçilen vektörlerin ilk elemanları kullanılarak istenen tahmin aralığı (T_a) kadar projeksiyonla ve o vektörün ağırlığı ile çarpılarak Denklem 3.4’deki gibi tahmin oluşturulur.

$$Tahmin_{[1,2,\dots,T_a]} = \sum_{j=1}^{m+1} w_j * v_{j+[1,2,\dots,T_a]}^1 \quad (3.4)$$

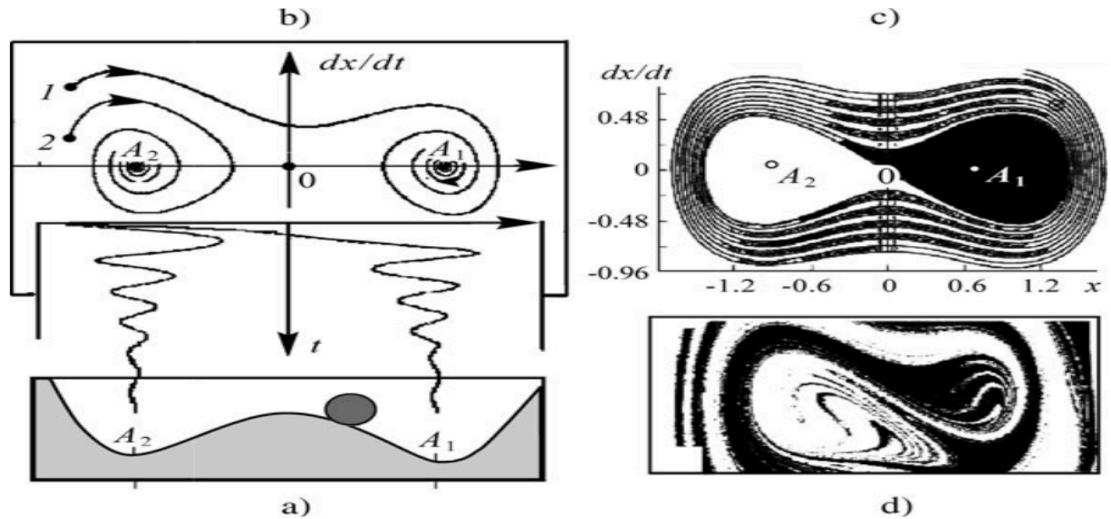
SP algoritmasının ilk temel parametresinin seçiminde genel yaklaşım belirli bir gömme boyutu aralığı seçilerek, aralıktaki her gömme boyutu için algoritmanın çalıştırılması ve en yüksek tahmin performansını veren parametrenin seçilmesi şeklindedir. Aynı zamanda her gömme boyutu değeri için bir zaman gecikmesi hesaplamak gerekmektedir. Zaman gecikmesinin tespitinde genel kabul gören bir yöntem bulunmamakla birlikte, literatürde otokorelasyon (autocorrelation), ortak bilgi (mutual information), küçük-pencere çözümü (small-window solution) ve ortalama yer değiştirme yöntemi (average displacement method) gibi farklı yöntemler yer almaktadır (Rosenstein vd. 1994). Bahsedilen bu yöntemler yaklaşık aynı sonuçları ortaya çıkarmaktadır. Bu çalışmada zaman gecikmesi tespitinde kullanılan yöntem olarak, “ortalama yer değiştirme yöntemi (average displacement method)” (Rosenstein vd. 1994) seçilmiştir. Bu yöntemin kullanılmasının başlıca nedenleri geometri-tabanlı bir yöntem olduğundan elde edilecek sonuçların yorumlanmasındaki kolaylık ve algoritmanın çok hızlı çalışmasıdır. Bu yöntemin amacı, ardışık zaman gecikmesi değerleri arasından en yüksek bilgi kazancını veren değeri tespit etmektir.

Bunun için faz uzayındaki noktaların, gerçek pozisyonlarından itibaren ortalama yer değiştirmeleri hesaplanır. Bu yer değiştirmenin en fazla olduğu zaman gecikmesi, en yüksek bilgi kazancını vermektedir. N adet veri içeren bir zaman serisi için m gömme boyutuna göre, ortalama yer değiştirme miktarı, zaman gecikmesinin (τ) bir fonksiyonu olarak aşağıda gösterilen Denklem 3.5'e göre hesaplanır. Bu denklemde veri setinin elemanları $l_{j+i\tau}$ ve l_j olarak gösterilmiştir. Bunun anlamı iki veri seti elemanı arasında zaman gecikmesinin 1'den m 'e kadar katları şeklinde fark bulunması gerektiğidir.

$$S_m(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sqrt{\sum_{i=1}^m (l_{j+i\tau} - l_j)^2} \quad (3.5)$$

3.3. Kaotik Dinamikler

Kaotik dinamiklerin araştırılmasında birçok yaklaşımın temel başlangıç noktası, incelenen sistemin faz uzayının inşa edilmesidir. Sistem değişkenleri kullanılarak, sistemin herhangi bir andaki durumu, kullanılan değişken sayısı boyutunda bir faz uzayı içerisinde tanımlanabilir. Örneğin termodinamik bir sistem için basınç ve sıcaklık değişkenleri kullanılarak iki boyutlu bir faz uzayı inşa edilebilir. Tipik olarak sistemin durumunu tanımlayan değişkenler zamana bağlı olarak değişim gösterecek ve bunun sonucunda faz uzayında, sistemin dinamiklerini temsil eden bir yörünge oluşacaktır. Teorik olarak, yeteri kadar zaman geçtikten sonra bu yörüngeyi şekli analiz edilerek sistem hakkında ipuçları elde edilebilmektedir. Birçok kaotik ve periyodik sistemin fraktal (kesirsel) boyuta (bir desendeki detayın ölçüldüğü ölçekle nasıl değiştiğini karşılaştırarak karmaşıklığının bir ölçüsünü veren istatistiksel orana) sahip karmaşık çekicilerden limit çemberleri gibi basit çekicilere uzanan aralıkta tipik faz uzayı portreleri bulunmaktadır.



Şekil 3.5. Fiziksel bir sürecin faz uzayı içerisinde modellenmesi ve çekici oluşturulması (Kaynak: Bezruchko ve Smirnov 2010).

Fiziksel bir sistemin, girdileri, çıktıları ve durum değişkenleri olan matematiksel bir model ile ifadesinden faz uzayı oluşturulabilir. Faz uzayı, öklidyen bir uzayı ifade eder ve eksenleri durum değişkenlerine karşılık gelir. Şekil 3.5'deki görselin sol tarafında (Şekil 3.5.a ve Şekil 3.5.b), aşağıdan yukarıya doğru fiziksel bir sistemin, faz uzayına dönüşümü gösterilmiştir. Şekil 3.5.b'de yer alan faz uzayında x eksenini konumu y eksenini ise hızı ifade eder. A1 ve A2 noktaları, denge noktalarıdır. Şekil 3.5.c'de, A1 ve A2 noktalarının etrafında ayrı ayrı şekillenen iki “çekici (attractor)” görülmektedir. Her çekici için bir “çekim havzası (basin of attraction)” bulunur. Sağdaki faz uzaylarında, başlangıç koşulları siyah bölgeden seçilen durumlarda sistem, A1 noktasında dengeye ulaşır ve bu bölge A1 noktasının çekim havzası olarak adlandırılır, beyaz bölgelerin denge noktası ise A2 noktasıdır diğer bir deyişle A2 noktasının çekim havzası beyaz bölgedir.

Genellikle, bir sistemin tüm değişkenlerini gözlemlemek mümkün olmamaktadır. Fakat sistem değişkenleri arasındaki etkileşimler sebebiyle, tek bir değişkenden faz uzayı oluşturulabilmektedir. Bu çalışma kapsamında incelenen sistem güneş aktivitesi ve kullanılan değişken de güneş leke sayılarıdır. Bu sebeple Takens teoremine (Takens 1981) dayanarak tek değişkenin zaman gecikmesi yöntemiyle çoğaltılmasıyla faz uzayı inşa edilmiştir. Bu yöntemle oluşturulan faz uzayı, orijinal faz uzayı ile birebir aynı olmasa da dinamik ve topolojik özellikleri korunmakta ve analiz için yeterli bilgiyi sağlamaktadır. Oluşturulan faz uzayı genellikle görsel olarak analiz edilmekte ve içi boş çemberler, eliptik şekiller gibi belirgin yapılar aranmaktadır. Şekil 3.5.c'de yer alan çekici bu belirgin yapılara örnek olarak verilebilir.

Kaos konusundaki ilginin büyük bir bölümü, görünürde belirli bir düzen içermeyen zaman serilerinin düşük boyutlu dinamiklerini açığa çıkartarak basit modellemeler ve kısa dönemli tahminler yapmaya uygun hale getirme çabasıyla oluşmaktadır (Sprott 2003). Düşük boyutlu kaosu önemli bir göstergesi, bir çekicinin varlığıdır. Bu yüzden gözlemsel verilerde kaos tespiti bu çekicinin boyutunu belirlemeyi içermektedir. Çekici boyutu, sistemi oluşturan dinamikleri modellemek için gereken minimum değişken sayısını gösterir. Basit çekicilerin temsil ettiği verilerin boyutları tamsayı değerleri alırken, daha karmaşık çekicilerin boyutları kesirli sayılarla ifade edilebilmektedir.

Çekici boyutunu tanımlamanın ve hesaplamaların farklı yöntemleri literatürde mevcuttur. Örneğin, kesin ve açık şekilde kendi kendine benzerlik taşıyan çekiciler için “benzerlik boyutu (similarity dimension)” (Moran 1946) kullanılır. Kendi kendine benzerlik özelliği bariz olmayan çekiciler için “kapasite boyutu (capacity dimension)” (Russel vd. 1980) kullanılır. Fakat bu iki çekici boyutunu kullanabilmek için teorik olarak sonsuz noktadan oluşan bir veri setinden veya denklemlerle tanımlanmış bir sistemden yararlanmak gereklidir. Sonlu sayıda veri içeren zaman serilerinden oluşan çekicilerin boyutunu hesaplamada “korelasyon boyutu (correlation dimension)” (Grassberger ve Procaccia 1983) daha kullanışlıdır. Grassberger-Procaccia algoritması yardımıyla hesaplanan korelasyon boyutunu belirleyebilmek için öncelikle $C(r)$ ile tanımlanan korelasyon toplamı Denklem 3.6 bağıntısına göre hesaplanır.

$$C(r) = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{j=1}^N \sum_{i=j+1}^N \Theta(r - r_{ij}) \quad (3.6)$$

Burada N , m boyutlu faz uzayındaki noktaların sayısını, r , değişken olarak alınacak bir eşik uzaklığını, r_{ij} ise faz uzayındaki i ve j noktaları arasındaki normu temsil eder. Θ , Heaviside adım fonksiyonudur ve Eşitlik 3.7'de tanımlanmıştır.

$$\Theta(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

Faz uzayındaki nokta sayısı (N), faz uzayının gömme boyutuna (m) göre değişeceğinden ortalama yer değiştirme miktarı bağıntısı (Denklem 3.5) her bir gömme boyutu için farklı sonuç verecektir. Bu sebeple korelasyon boyutu farklı gömme boyutları için hesaplanmalıdır. Uygun bir aralıktan alınan r değişkenlerine karşı $C(r)$ hesaplandıktan sonra Eşitlik 3.8'deki oran kullanılarak korelasyon boyutu (D) elde edilir.

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log C(r)}{\log r} \quad (3.8)$$

Çekici boyutu dışında araştırılabilecek bir diğer konu ise zaman serisindeki noktalar arasındaki korelasyondur. Rastlantısal gürültüden oluşan zaman serilerinde noktalar arası korelasyon anlamlı olmamaktadır. Feller (1951), sonlu varyansa sahip herhangi bir bağımsız rastlantısal sürecin (X_n), asimptotik davranışının Denklem 3.9 kullanılarak ifade edilebileceğini kanıtlamıştır.

$$\frac{R}{\sigma} = \left(\frac{\pi n}{2}\right)^{1/2} \quad (3.9)$$

Bu bağıntıda n , veri sayısı, σ , X_n 'in standart sapması, R ise Denklem 3.10 kullanılarak hesaplanacak Y_n serilerindeki maksimum ve minimum değerler arasındaki fark olarak tanımlanmıştır.

$$Y_n = \sum_{i=1}^n (X_i - \langle X \rangle) \quad (3.10)$$

R/σ oranının sabit bir değere yakınsaması oldukça yavaş olduğundan iyi bir sonuç elde etmek için n yeterince büyük olmalıdır. R/σ genel olarak Denklem 3.11'de verilen kuvvet yasasıyla uyumlu olarak artar.

$$\frac{R}{\sigma} \propto n^H \quad (3.11)$$

Burada H , Hurst üstelidir (Hurst vd. 1965). Hurst üsteli, zaman serilerinin gidiminin bir ölçüsünü verir. Mandelbrot (1975) bu değer $0 \leq H \leq 1$ aralığının dışına çıkamayacağını kanıtlamıştır. H değerinin aldığı değere göre zaman serisi üç

farklı sınıfa ayrılır. $H < 0.5$ ise süreksiz gidime sahip, $H=0.5$ ise rastlantısal bir süreçtir. Bu iki sınıftaki zaman serileri için kaostan söz edilemez ve doğrusal olmayan yöntemler ile tahmin yapılamaz. $H > 0.5$ ise zaman serisi sürekli bir gidime sahiptir. Diğer bir deyişle veri içinde tekrar eden örüntüler bulunmaktadır. Hurst vd. (1965), nehir tahliyeleri, çamur çökeltileri ve ağaç halkaları gibi birçok doğal süreçte $H = 0.73 \pm 0.09$ değerine ulaştıklarını ve bu sebeple doğal süreçlerin uzun dönemli hafızaya sahip olduklarını bildirmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Uzun-Dönemli Hafıza

Bu çalışmada incelenen güneş aktivitesi değişkeni olan güneş leke sayılarının oluşturduğu zaman serisinin uzun dönemli hafızaya sahip olup olmadığını araştırmak için Hurst üstelinden yararlanılmıştır. Hurst üsteli 0,5 değerinin üstüne çıktıktan sonra 1 değerine ne kadar yakınsarsa verinin geçmiş değerle bağılılığı o oranda artmaktadır. Hurst üsteli hesaplanırken “yeniden ölçeklendirilmiş aralık analizi (rescaled range analysis)” (Hurst vd. 1965) kullanılmıştır. Yeniden ölçeklendirilmiş aralık analizi, verilerin zaman içindeki değişkenliğini ve doğasını değerlendirmek için tasarlanmış istatistiksel bir tekniktir. Bu teknik, bir zaman serisinin farklı uzunluklarda ölçeklendirilmiş aralıklarını kullanarak her aralık için belirli bir değer elde eder ve bu değerlerden geçirilen doğrunun eğimi ile Hurst üsteli değeri elde edilir. İncelenen güneş leke sayılarının zaman serisi 3217 veri içermektedir. Bu zaman serisi, ikinin kuvvetleri şeklinde bölünerek yeniden ölçeklendirilmiş 11 aralığa ayrılmıştır (bkz: Çizelge 4.1)

Çizelge 4.1. Yeniden ölçeklendirilmiş aralık analizi için kullanılan aralık büyüklükleri, bu aralık büyüklerinin veri setine oranı ve aralık sayıları

Aralık Büyüklüğü	Veri Setine Oranı	Aralık Sayısı
3217	$1/2^1$	1
1608	$1/2^2$	2
804	$1/2^3$	4
402	$1/2^4$	8
201	$1/2^5$	16
100	$1/2^6$	32
50	$1/2^7$	64
25	$1/2^8$	128
12	$1/2^9$	256
6	$1/2^{10}$	512
3	$1/2^{11}$	1024

Yukarda bahsedildiği haliyle 2047 adet aralık $\{X_t, t = 1, 2, \dots, 2047\}$ oluşturularak her bir aralık için ayrı ayrı ortalamaları $\{m_t, t = 1, 2, \dots, 2047\}$ hesaplanmıştır. Daha sonra her aralık Denklem 4.1’de verildiği gibi kendi ortalamasından sapma şeklinde yeni bir diziyeye $\{Y_t, t = 1, 2, \dots, 2047\}$ dönüştürülmüştür.

$$\{Y_t\} = \{X_t\} - m_t \quad (4.1)$$

Bu adımdan sonra ise $\{Y_t\}$ dizilerinin ayrı ayrı kümülatif toplamı alınarak $\{Y'_t\}$ dizileri oluşturulmuştur.

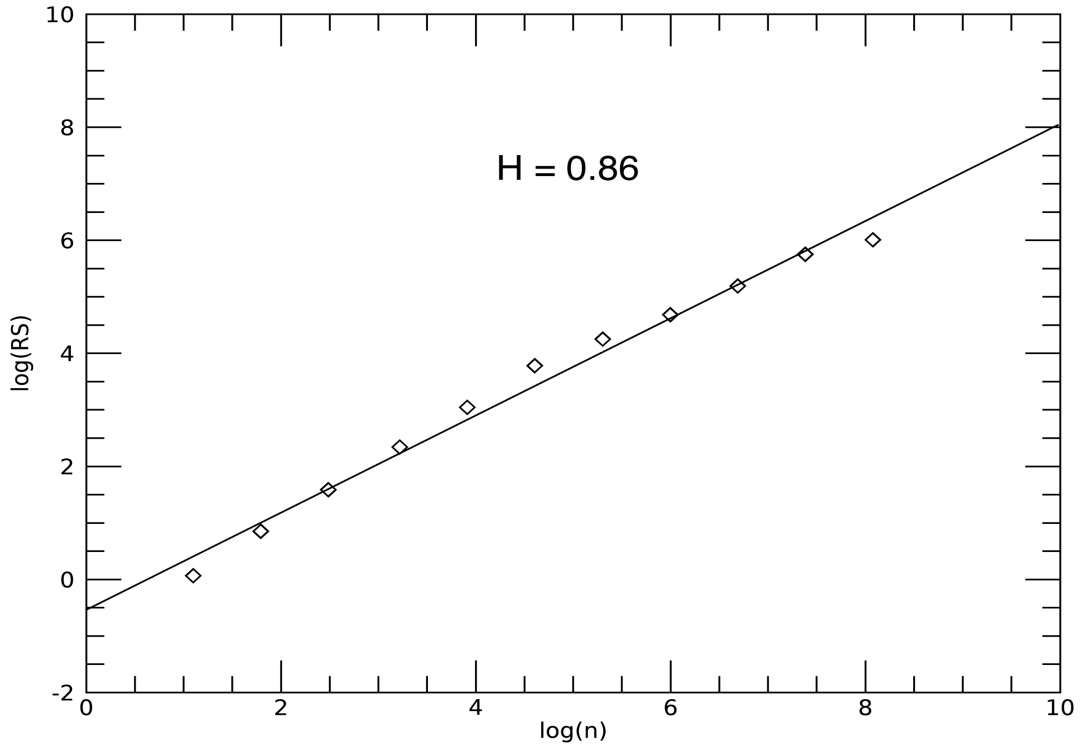
$$RS_t = \frac{R_t}{S_t} \quad (4.2)$$

Bu diziler kullanılarak Denklem 4.2 ile Hurst üsteline yakınsamada kullanılacak değerler hesaplanmıştır. Burada R_t ile ifade edilen değerler, $\{Y'_t\}$ dizisindeki maksimum ve minimum değerler arasındaki farkı göstermektedir. S_t ise $\{X_t\}$ 'nin standart sapmasını ifade etmektedir

Her bir aralık büyüklüğü (n) için RS_t değerlerinin ortalaması alınarak 11 adet RS değeri elde edilmiştir. Bu değerlere karşılık aralık büyüklükleri (n), üstler kuralına göre Hurst değerini vermektedir. Yeniden ölçeklendirilmiş aralık analizi yöntemiyle bulunan değerlerin logaritmaları alınarak oluşturulan grafik, Şekil 4.1'de verilmiştir. Bu grafiğin eğimi Hurst üstelini vermektedir. Bu noktalardan $y = A + Bx$ doğrusal denklemine uyan en iyi doğrusal fit geçirilmiştir. Bu fit 4.3 denklemi ile verilmiştir.

$$y = -0,537858 + 0,859848x \quad (4.3)$$

Buna göre doğrunun eğimi, yaklaşık olarak 0,86 olup bu değer de Hurst üsteline eşittir.



Şekil 4.1. Yeniden ölçeklendirilmiş aralık analizi ile Hurst üstelinin hesaplanması.

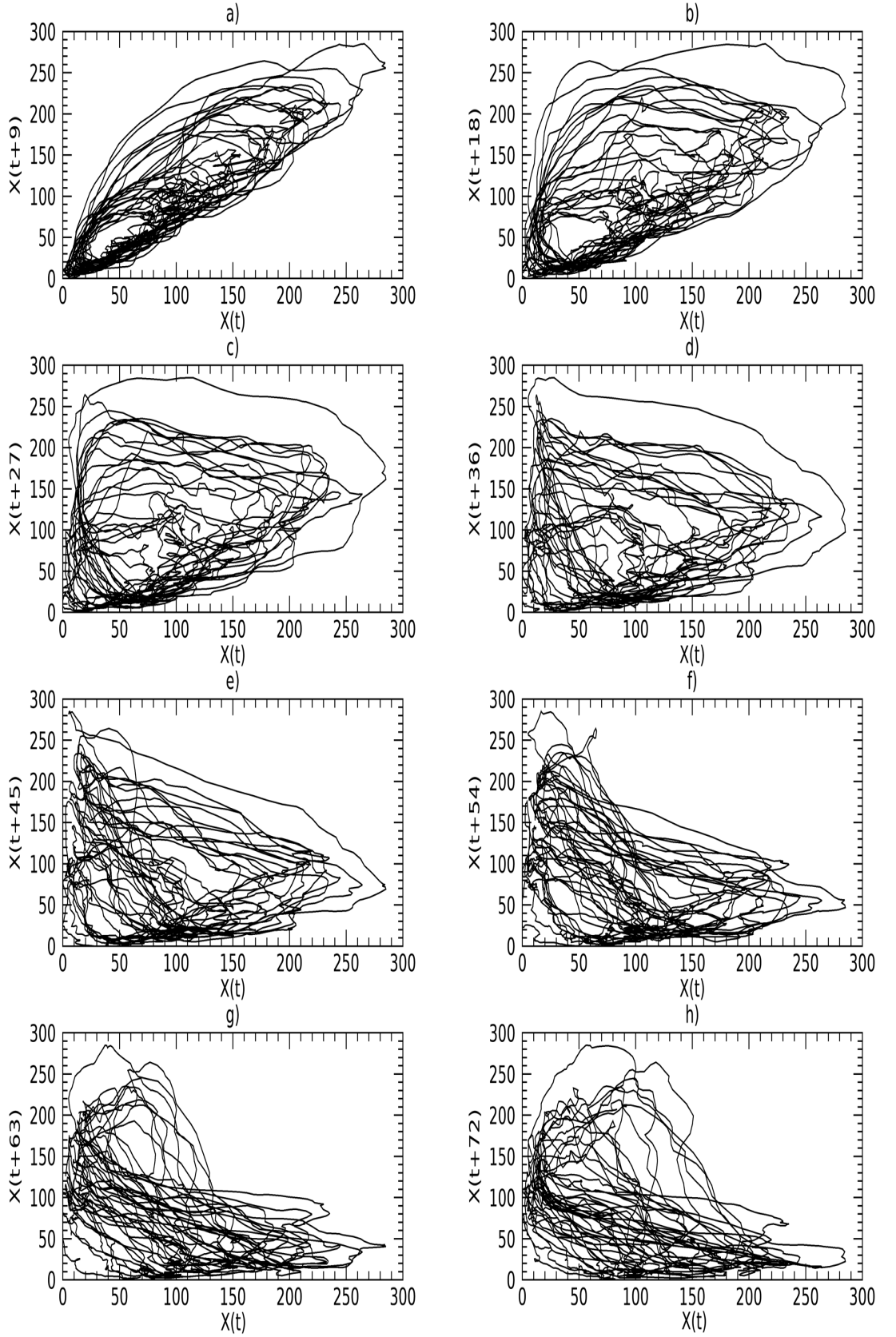
Bulunan bu değer, güneş leke sayılarının oldukça yüksek düzeyde uzun dönemli hafızaya sahip olduğunu göstermektedir. Bu yüksek değer, verideki düzenin korunduğu ve geçmiş değerler kullanılarak gelecek değerlerin tahmin edilebileceği anlamına gelmektedir. Ayrıca bulunan değer (0,86) Bölüm 3.3'de bahsedilen, farklı doğal süreçlerden hesaplanan Hurst üstellerinden (0,73) daha yüksek bir değer olması, güneş aktivitesinin birçok doğal olaydan daha fazla tahmin edilebilir olduğunu ortaya çıkarmaktadır. Bunun sebebi, güneş aktivitesindeki periyodik gidimin düzenli seyri olarak açıklanabilir.

Burada hesaplanan Hurst üstelinin doğruluğunu sınamak adına literatürde yer alan benzer çalışmalara başvurulmuştur. Kilcik vd. (2009) 1700-2007 yılları arasındaki güneş leke sayılarının Hurst üstelini tam olarak bu çalışmadaki ile aynı değerde (0,86) hesaplamıştır. Fakat aynı çalışmada 1700 ile 1848 yıllar arasındaki verinin güvenilirliğinin sorgulanabileceği fikriyle, Hurst üstelini 1848-2007 yılları için tekrar hesaplayarak 0,88 değerine ulaşmışlardır. Singh ve Bhargawa (2017) farklı güneş aktivite parametreleri için Hurst üstelini hesaplamışlardır. Bu yazarlar, yaptıkları çalışmada 1976-2016 yılları arasındaki verileri kullanmış ve güneş leke sayıları için Hurst üstelinin değerini 0,86 olarak bulmuşlardır. Bu değer, bu çalışmada hesaplanan Hurst üsteli ile tam olarak aynıdır.

4.2. Faz Uzayı Analizleri

Faz uzayı analizleri, genellikle görsel olarak yapılmaktadır. Bu sebeple iki boyutun üstünde faz uzayı oluşturmak pratik değildir. Faz uzayı içerisinde görsel olarak düzenli bir yapı bulunması, verinin elde edildiği süreçteki tekrarlanan desenleri göstermektedir. Bu düzenli yapıya çekici ismi verilir. Güneş leke sayılarının farklı zaman gecikmeleri kullanılarak oluşturulan faz uzayları Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

Faz uzayı oluşturmak için seçilen zaman gecikmeleri keyfi olarak 9 ve katları olarak seçilmiştir. Bu seçimin amacı geniş bir aralıktaki zaman gecikmelerinin oluşturduğu çekici şekillerini analiz edebilmektir. Şekil 4.2’den faydalanılarak artan zaman gecikmesinin etkisiyle çekici evriminin nasıl olduğu incelenebilir. Bu grafiklerde x eksenini orijinal zaman serisini ifade ederken, y eksenini, bu zaman serisinin τ kadarlık gecikmelerle oluşturulmuş halidir. Şekil 4.2.a ve Şekil 4.2.b incelendiğinde güneş lekeleri sayılarının 0-100 arasında olduğu zamanda eliptik yapı gösteren çekici açıkça görülmektedir. Faz uzayındaki yörüngeler bu eliptik yapı etrafında toplanmış belirgin bir yapı ortaya koymaktadır. Daha yüksek güneş lekeleri değerlerinde ise faz uzayındaki karmaşık yörüngeler buralarda herhangi bir düzenin olmadığını işaret etmektedir. Bu durumda güneş leke sayılarının 9 ile 18 aylık zaman gecikmesi ile oluşturulan 2 boyutlu faz uzaylarında, güneş aktivitesinin zayıf olduğu zamanlarındaki kaotik yapının ortaya konduğu söylenebilir.



Şekil 4.2. a) 9 ay; b) 18 ay; c) 27 ay; d) 36 ay; e) 45 ay; f) 54 ay; g) 63 ay; h) 72 ay zaman gecikmesi ile oluşturulan faz uzayları.

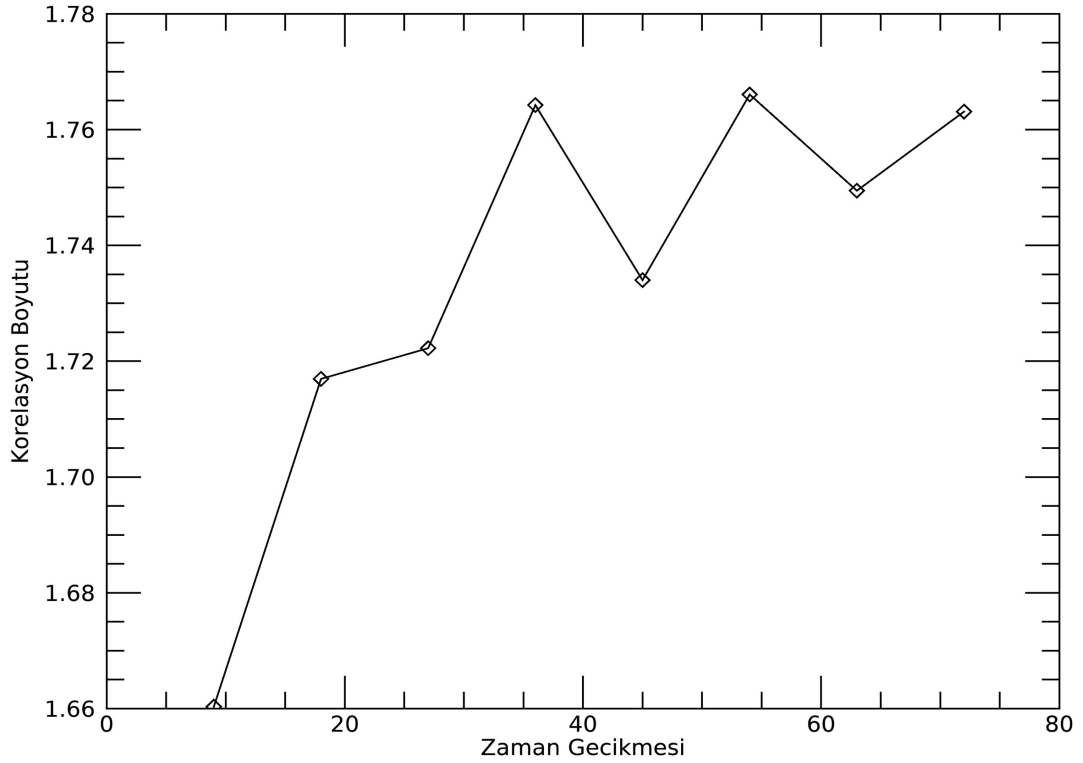
Şekil 4.2.c, Şekil 4.2.d ve Şekil 4.2.e incelendiğinde daha düşük zaman gecikmeleriyle oluşturulan faz uzaylarındaki belirgin eliptik yapı yok olsa da belirli bir merkez çevresinde dolanan yörüngelerin olduğu görülmektedir. Aynı zamanda oluşan çekici, daha düşük zaman gecikmesine sahip diğer faz uzaylarına kıyasla daha fazla alan kaplamaktadır. Bu grafiklerde herhangi bir düzenli yapıya rastlanmasa da çekicinin faz uzayının büyük bir kısmını kaplaması sebebiyle verinin dinamiklerinin daha iyi anlaşılabilmesi şeklinde açılmış olduğunu göstermektedir. Bu durumda, seçilen zaman gecikmelerinin uygun olmadığı veya daha yüksek gömme boyutları ile açığa çıkabilecek bir çekicinin yörüngelerinin üst üste binmiş halinin görüldüğü düşünülebilir.

Şekil 4.2.f'de daha önceki faz uzaylarındaki yörüngelerin etrafında şekillendiği merkez tamamen ortadan kaybolmuştur. Çekici kendi içine doğru çökmeye başlayarak faz uzayında kapladığı alan azalmıştır. Bu sürecin devamında, Şekil 4.2.e'de açığa çıkan çekici incelendiğinde çekicinin aldığı şekilde düzenli bir yapıdan söz edilebilir. Burada her iki eksendeki 100-200 değerleri arasında yörüngelerin birbirine oldukça yaklaştığı ve neredeyse doğrusal bir şekil aldığı görülebilir. Bu düzenli yapı Şekil 4.2.h'de y eksenini için 100-150 aralığına, x eksenini için ise 150-250 aralığına kayarak belirginliğini kaybetmeye başlamıştır.

Bir önceki bölümde leke sayılarının uzun dönemli hafızaya sahip olduğu ortaya konulmuştu. Burada oluşturulan faz uzayları sonucunda ise bu uzun dönemli hafızanın nasıl açığa çıkartılabileceği analiz edilmiştir. Sonuç olarak leke çevriminin minimum zamanlarındaki desenler düşük zaman gecikmeleriyle açık bir şekilde ortaya konabilirken, maksimum zamanlarındaki desenler ise daha yüksek zaman gecikmeleri kullanımlarına rağmen tam anlamıyla belirgin bir çekici ortaya çıkaramamıştır. Farklı gömme boyutları kullanmak, böyle bir çekicinin varlığını açığa çıkartabilir fakat bu durumda görsel analiz yeterli olmamakta ve farklı yöntemlere başvurmak gerekmektedir. Bu yöntemlerden bir tanesi faz uzayına dayanan tahmin algoritmalarının tahmin tutarlılıklarının gömme boyutuna bağlı olarak incelenmesidir. Bölüm 4.4'te bu yöntemeye dayanan detaylı bir analiz yer almaktadır.

4.3. Korelasyon Boyutu

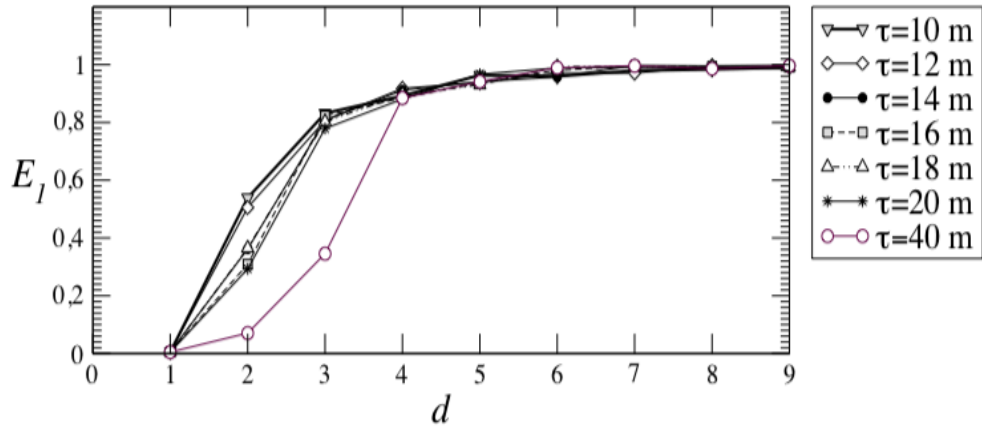
Bir önceki bölümde elde edilen çekicilerin hesaplanacak boyutları, verinin karmaşıklığı hakkında bilgi taşır. Çekicinin boyutu, içine gömüldüğü uzayın boyutundan küçük olmak zorundadır. Ayrıca faz uzayının boyutu tam sayı iken, çekicinin boyutu, tekrarlanan desenlere bağlı olarak tam sayı olmak zorunda değildir. Boyutu tam sayı olmayan çekicilere fraktal çekici denir. Güneş leke sayılarının fraktal boyutunu elde etmek için Bölüm 3.3'de bahsedilen korelasyon boyutu yaklaşımı tercih edilmiştir. Bu yöntemeye göre gömme boyutunun iki olduğu durumda, farklı zaman gecikmeleri (τ), için hesaplanan korelasyon toplamlarının ($C(r)$), eşik uzaklıklara (r), göre oranı Şekil 4.3 ile verilmiştir. Burada kullanılan zaman gecikmeleri, Bölüm 4.2'de öne sürülen zaman gecikmeleri ile aynıdır.



Şekil 4.3. İki boyutlu faz uzayında zaman gecikmesi-korelasyon boyutu değişim grafiği.

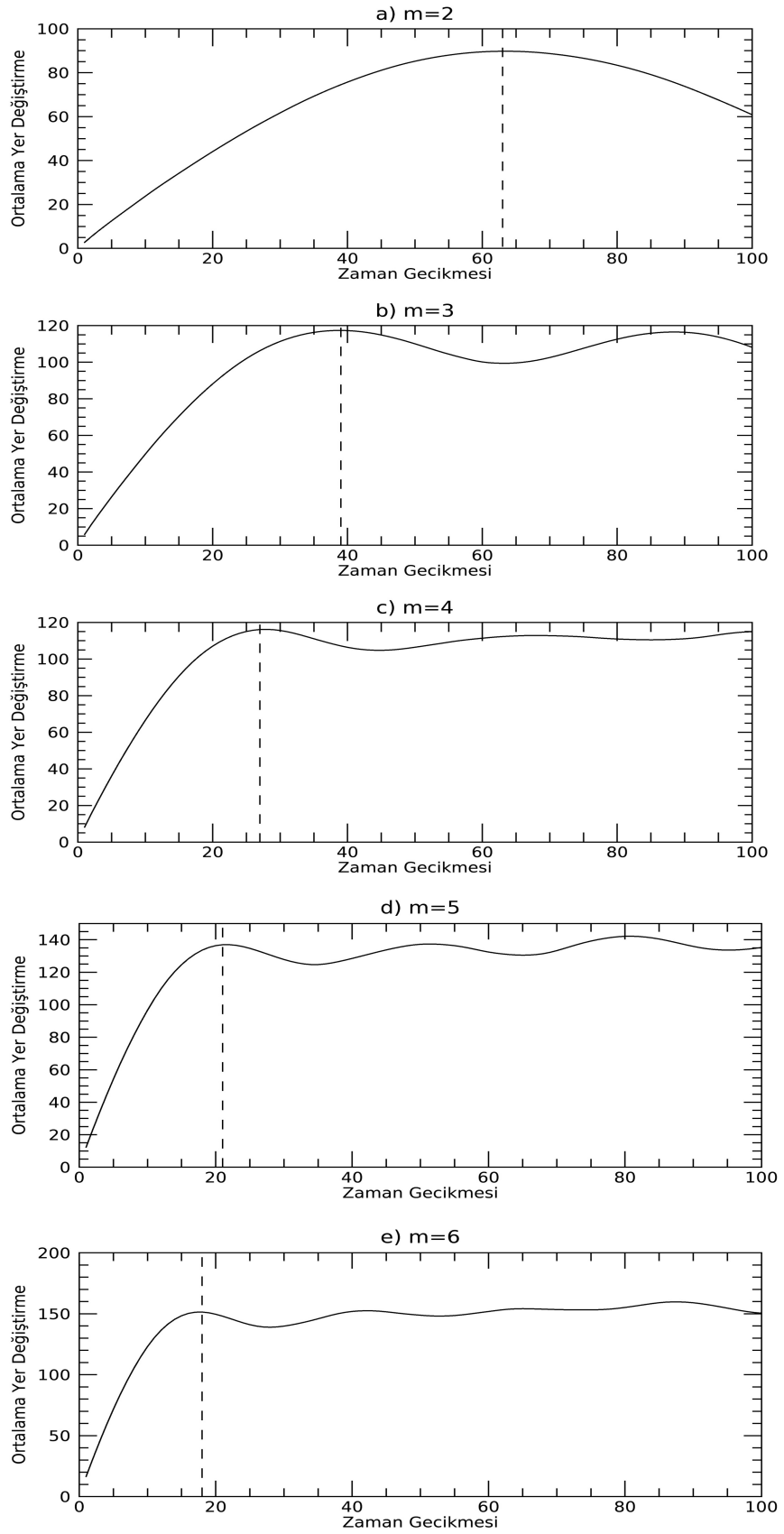
Şekil 4.3'den de görülebileceği gibi korelasyon boyutu, zaman gecikmesine karşı oldukça hassastır. Zaman gecikmesi 9 ay olduğunda korelasyon boyutu en düşük değeri olan 1,66 iken zaman gecikmesi 54 ay olduğunda korelasyon boyutu en yüksek değeri olan 1,76 olmaktadır. Bu sebeple en uygun korelasyon boyutunu belirleyebilmek için öncelikle uygun bir zaman gecikmesi seçmek gerekmektedir. Bu seçim analiz edilecek her gömme boyutu için ayrı ayrı yapılmalıdır. Bu sebeple öncelikle bir gömme boyutu aralığı belirlenmeli, daha sonra belirlenen aralıktaki her gömme boyutu için bir zaman gecikmesi belirlenmeli ve daha sonra bu parametreler kullanılarak korelasyon boyutu hesaplanmalıdır.

Uygun bir gömme boyutu aralığı belirleyebilmek için literatürdeki benzer çalışmalardan yararlanılmıştır. Alt limit olarak Rozelot (1995) tarafından korelasyon katsayıları yöntemiyle hesaplanan gömme boyutu değeri (3) alınmıştır. Üst limit olarak Sello (2001) tarafından komşuluk analizi yöntemiyle hesaplanan gömme boyutu değeri (5) alınmıştır. Çalışma kapsamında incelenen dinamiklerin daha iyi açığa çıkabilmesi için literatürden elde edilen alt ve üst limitler birer ardım daha genişletilerek incelenecek gömme boyutu aralığı [2,6] olarak seçilmiştir. Seçilen bu aralık, Letellier vd. (2006) tarafından da Şekil 4.4'te yer alan komşuluklar arası mesafe yöntemiyle yapılan çalışmanın sonuçları ile de uyumludur. Bu şekil incelendiğinde farklı zaman gecikmeleri için altı boyuta kadar gömme boyutu arttıkça komşuluklar arası mesafede belirgin bir artış olurken, altıncı boyuttan sonra grafik sabit bir doğruya yakınsamaktadır. Bunun anlamı gömme boyutundaki artışın altıncı boyuttan sonra kaotik dinamiklerin analizi için önemli bir farklılık yaratmadığıdır.



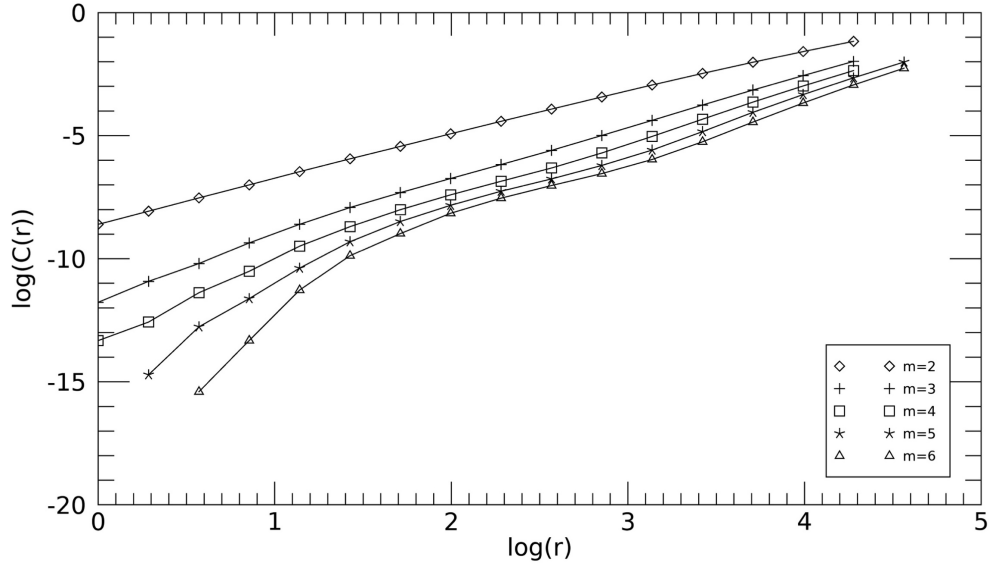
Şekil 4.4. Farklı zaman gecikmeleri için oluşturulmuş komşuluklar arası mesafe (E_1) – Gömme boyutu (d) grafiği (Kaynak: Letellier vd. 2006).

Gömme boyutu aralığı belirlendikten sonra, aralıkta bulunan her değer için Denklem 3.4 kullanılarak zaman gecikmesine karşılık ortalama yer değiştirme fonksiyonu Şekil 4.5'te verilmiştir. Bu fonksiyonun ilk tepe noktası uygun zaman gecikmesini belirlemek için kullanılmıştır ve bu noktalar kesikli çizgilerle grafikte işaretlenmiştir.



Şekil 4.5. a) 2 boyut; b) 3 boyut; c) 4 boyut; d) 5 boyut; e) 6 boyut için ortalama yer değiştirme fonksiyonu.

Bu yöntemle elde edilen zaman gecikmeleri şu şekildedir; 2 boyut için 63 ay, 3 boyut için 39 ay, 4 boyut için 27 ay, 5 boyut için 21 ay ve 6 boyut için 18 ay. Elde edilen bu parametrelerle korelasyon boyutu için oluşturulan korelasyon toplamı – eşik değeri logaritmalarının grafikleri Şekil 4.6’te verilmiştir. Korelasyon boyutu bu grafiklerin eğiminden elde edilmektedir.

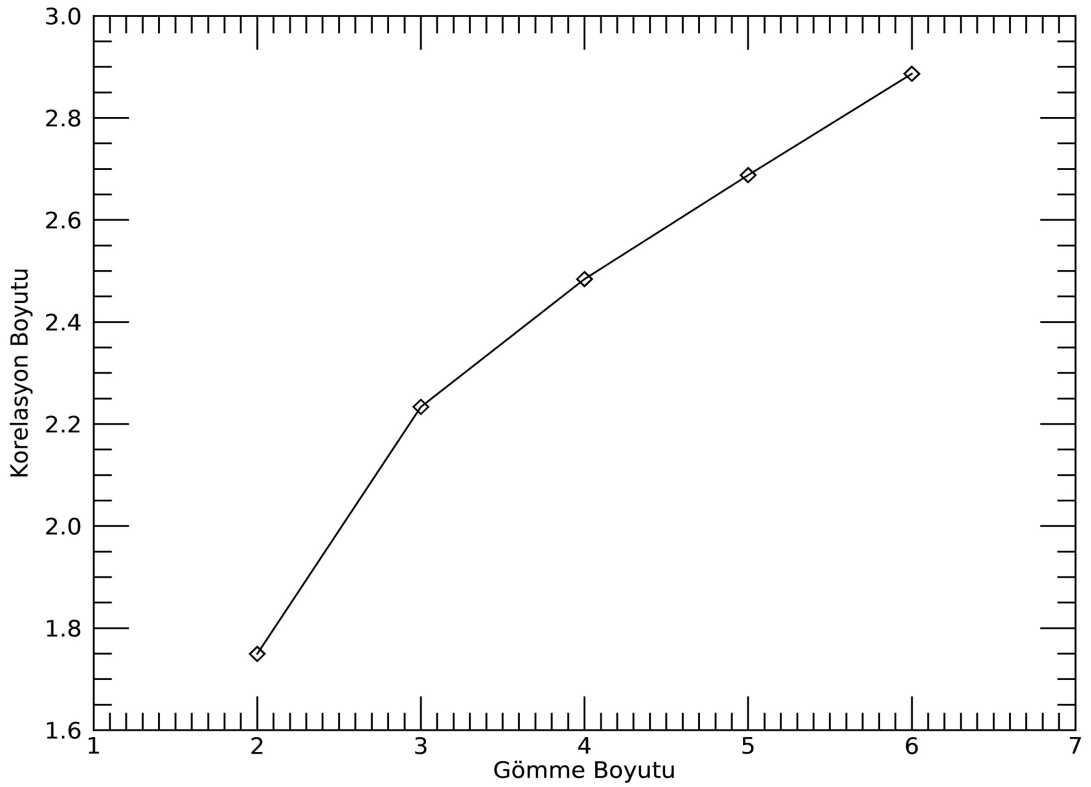


Şekil 4.6. Korelasyon toplamı – eşik değeri logaritmik grafiği.

Korelasyon toplamları-eşik değerlerinin logaritmalarına karşı çizilen grafikler gömme boyutu arttıkça doğrusallığını kaybetmektedir. Bu sebeple 2 ve 3 değerine sahip gömme boyutları, Şekil 4.6’dan da görülebileceği gibi daha doğru sonuçlar verirken daha yüksek gömme boyutlarında hata payı artmaktadır. Bu hesaplamalar yapılırken eşik değer aralığının keyfi olarak yaklaşık [1,7] arasında olması uygun bulunmuştur. Bu aralıkta uygun eşik değerleri belirleyebilmek için 1,13 ün üstleri şeklinde 16 adet noktadan yararlanılmıştır. Buna bağlı olarak eşik değeri $[1,13^1; 1,13^{16}]$ aralığında yani $[1,13; 7,07]$ aralığında değişmektedir. Denklem 3.7’de de belirtildiği gibi eşik değerinin limitinin sıfıra gittiği bir doğrultu doğru korelasyon boyutunu verecektir. Bu sebeple daha fazla nokta kullanılarak eşik değerinin daha büyük değerlere çıkması engellenmiştir. Bu engelleme yapılmadığı takdirde, elde edilen noktalara doğrusal bir fit geçirmek mümkün olmamaktadır. Bu yöntemle elde edilen korelasyon boyutları Şekil 4.7’de verilmiştir.

Bu bölümde elde edilen zaman gecikmesi ve korelasyon boyutu değerleri, belirlenen gömme boyutu aralığı için Çizelge 4.2’de detaylı olarak özetlenmiştir. Bu değerler bir sonraki bölüm olan modelleme ve tahminde tekrar hesaplanmadan bu çizelgeye atıf yapılarak kullanılacaktır. Buradaki korelasyon boyutları, fraktal boyutun (D_F) bir yaklaşımıdır. Bu fraktal boyut, çekicinin tam olarak açılacağı faz uzayının boyutunun alt limitini belirlemede de kullanılır. D_F fraktal boyutundaki bir çekicinin tam olarak açıldığı faz uzayının gömme boyutu en az $2D_F$ olmalıdır (Sauer vd. 1991). Bu durumda $2D_F$ kesirli bir sayı olacağından, bu değerden büyük en yakın tam sayı kullanılır. Çizelge 4.2’de yer alan D_F değerleri incelendiğinde, çekicinin tam

olarak açılabilmesi için en uygun gömme boyutunun 6 olduğu açığa çıkmaktadır. Bunun sebebi 2,89 değerindeki korelasyon boyutunun iki katı olan 5,78 değeri 6'nın altında kalmaktadır. Diğer gömme boyutları için hesaplanan fraktal boyutların iki katı olan değerler her seferinde gömme boyutunu aşmaktadır. Bu durumda detaylı bir çekici oluşturup analiz edebilmek için en az 6 boyutlu bir faz uzayı gerekmektedir. Bu durumda, Güneşte, leke sayılarını etkileyen altı farklı dinamik bulunmaktadır. Fakat bu değer, tahmin ve modelleme çalışmalarını etkilememektedir çünkü burada teorik olarak gölge-çekiciler zaman gecikmesi yöntemiyle sınırlı sayıda veri kullanılarak oluşturulmaktadır.



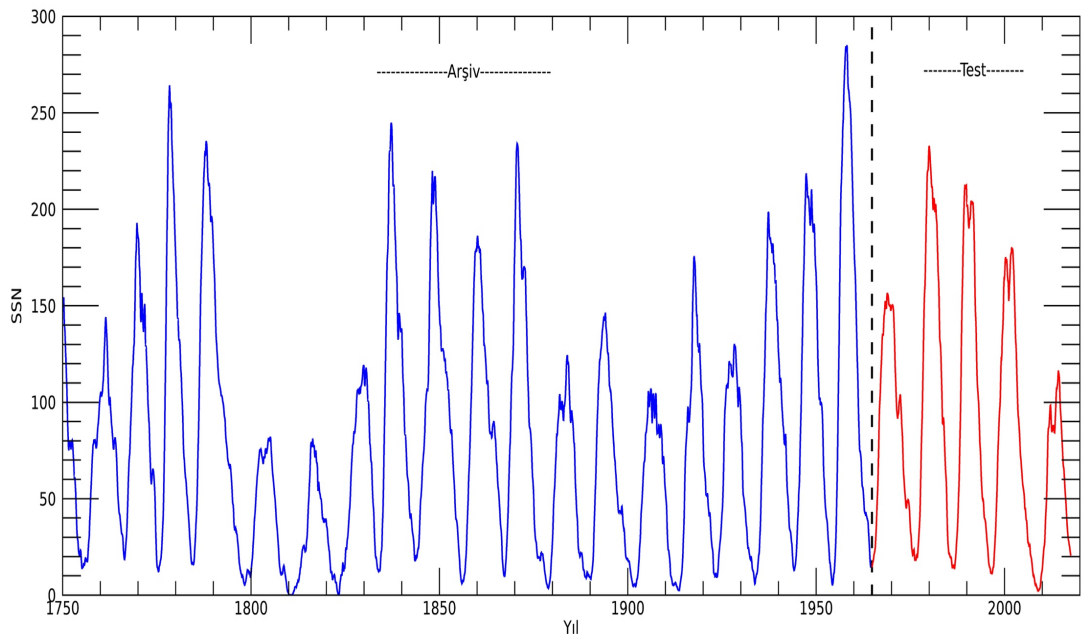
Şekil 4.7. Gömme boyutlarına karşılık gelen korelasyon boyutları.

Çizelge 4.2. Güneş leke sayıları için Gömme Boyutu – Zaman Gecikmesi ve Korelasyon Boyutu değerleri

Gömme Boyutu (m)	Zaman Gecikmesi (τ)	Korelasyon Boyutu (D_F)
2	63 ay	1,75
3	39 ay	2,23
4	27 ay	2,48
5	21 ay	2,69
6	18 ay	2,89

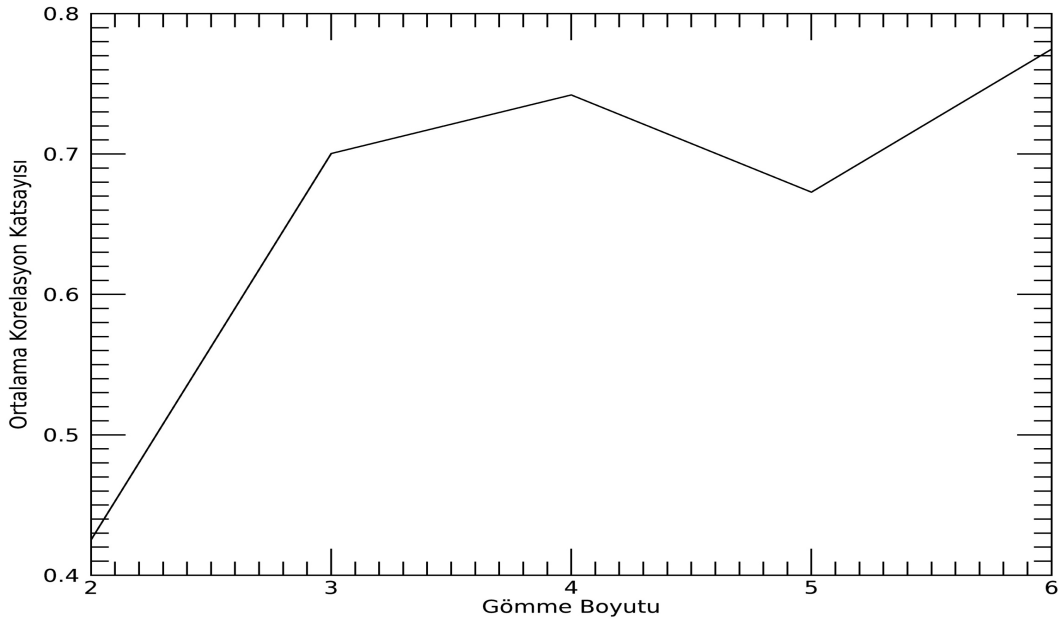
4.4. Modelleme ve Tahmin

Deneysel Dinamik Modelleme (DDM) yaklaşımında temel amaç faz uzayındaki koordinatları oluşturan veriler arasındaki dinamik ilişkileri belirlemektir. Bu sayede basit bir dizi denklem ile ifade edilemeyecek karmaşıklıkta ve değişkenlikteki dinamik ilişkiler deneysel olarak açığa çıkartılabilmektedir. Fakat bunu yapabilmek için öncelikle faz uzayının boyutunu, diğer bir deyişle gömme boyutunu belirlemek gerekmektedir. En iyi gömme boyutunu belirleyebilmek için Bölüm 3.3’de tanımlanan Simplex Projection (SP) algoritmasından yararlanılmıştır. İlk olarak güneş leke sayıları zaman serisi, arşiv seti ve test seti olarak Şekil 4.8’deki gibi iki parçaya ayrılmıştır. Arşiv kısmı 1’den 19’a kadar olan güneş çevrimlerini, test kısmı ise 20’den 24’e kadar olan güneş çevrimlerini içermektedir.



Şekil 4.8. Güneş leke sayıları zaman serisinden oluşturulan arşiv (mavi) ve test (kırmızı) veri setleri.

Daha sonra SP algoritması Çizelge 4.2’de yer alan gömme boyutu-zaman gecikmesi parametre çiftlerinin her biri için arşiv veri seti üzerinden çalıştırılmıştır. Tahmin uzunluğu olarak ortalama güneş çevrim uzunluğu olan 132 ay seçilmiştir. Her bir gömme boyutu için 500 adet ardışık başlangıç noktasına sahip, 132 ay uzunluğunda tahmin sonucu elde edilmiştir. Elde edilen tüm tahmin sonuçları, test setindeki gözlem sonuçları ile karşılaştırılarak korelasyon katsayıları hesaplanmış ve her gömme boyutu için korelasyon katsayılarının ortalaması alınmıştır.



Şekil 4.9. Ortalama korelasyon katsayısı – gömme boyutu ilişkisi.

Şekil 4.9 ile verilen ortalama korelasyon katsayıları, tutarlı bir tahmin için beklenen korelasyon katsayısından (~ 0.90) oldukça düşüktür. Bunun sebebi üretilen 500 adet tahminden bazılarının başarılı tahmin (yüksek korelasyona sahip), bazılarının ise başarısız tahmin (düşük korelasyona sahip) olmasıdır. Bu ikisi arasındaki farkı analiz edebilmek ve bir tahminin başarısını etkileyen faktörleri belirleyebilmek amacıyla aşağıdaki iki kriter kullanılarak başarılı tahminler belirlenmiştir.

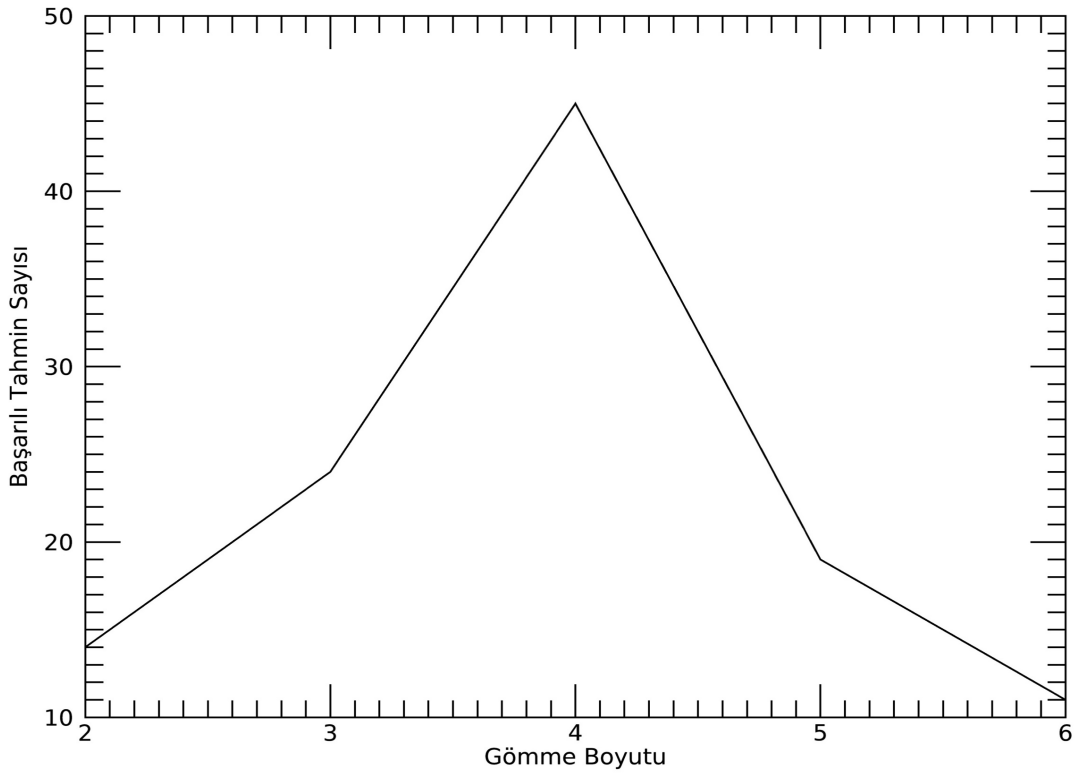
Başarılı tahmin kriteri;

- 1) Korelasyon Katsayısının 0.90 veya daha yüksek olması
- 2) Karesel ortalama hatanın 20 veya daha az olması

Bu tanımlama yapılırken karesel ortalama hatanın (KOH) hesabında Denklem 4.4 ile verilen bağıntı kullanılmıştır. Bu bağıntıda tahmin değerleri x ile gözlem değerleri y ile gösterilmiştir.

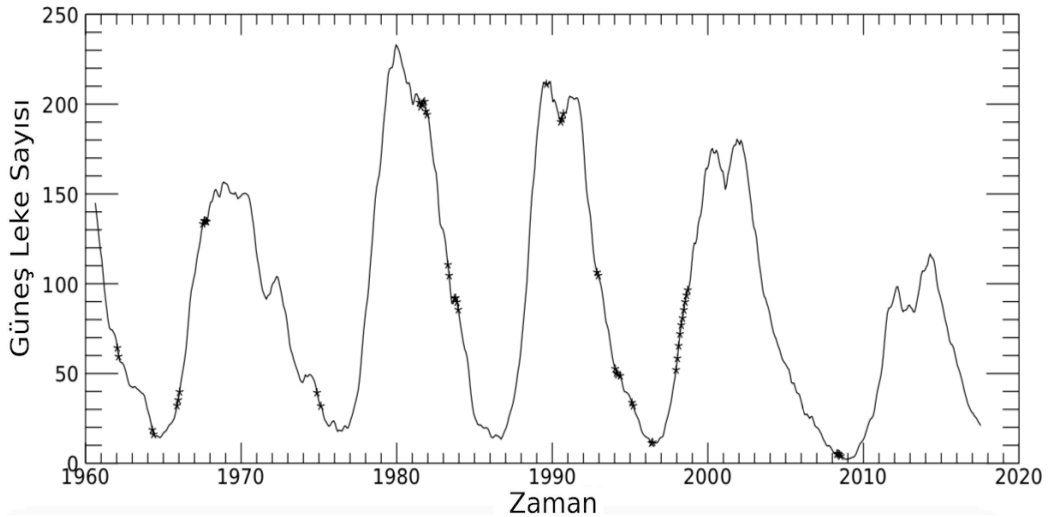
$$KOH = ortalama \{ (x - y)^2 \} \quad (4.4)$$

Bu kritere göre her gömme boyu için kaç adet başarılı tahmin üretildiği Şekil 4.10 ile gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre SP algoritmasından elde edilen başarılı tahminler gömme boyutu dört olduğunda ciddi bir artış göstermektedir. Buna karşılık Şekil 4.9' ve 4.10'da görüldüğü gibi en yüksek ortalama korelasyon katsayısını veren gömme boyutu altı için başarılı tahminler en az sayıdadır. Bunun sebebi Ye vd. (2010) tarafından tartışılmış ve DDM yaklaşımında sahte (nedensellik ifade etmeyen) korelasyonlar olabileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.10. Başarılı tahmin sayısı - gömme boyutu ilişkisi.

Sonuç olarak SP algoritmasından en iyi sonucu alabilmek için gömme boyutunun 4 olması gerektiği anlaşılmış olup sadece gömme boyutunu doğru belirlemenin, başarılı bir tahmin elde etmek için yeterli olmadığı fark edilmiştir. Bu sebeple, başarılı tahminlerin dağılımını incelemek amacıyla Şekil 4.11’de verilen grafikte başarılı tahminlerin güneş leke çevrimi üzerindeki dağılımları oluşturulmuştur.

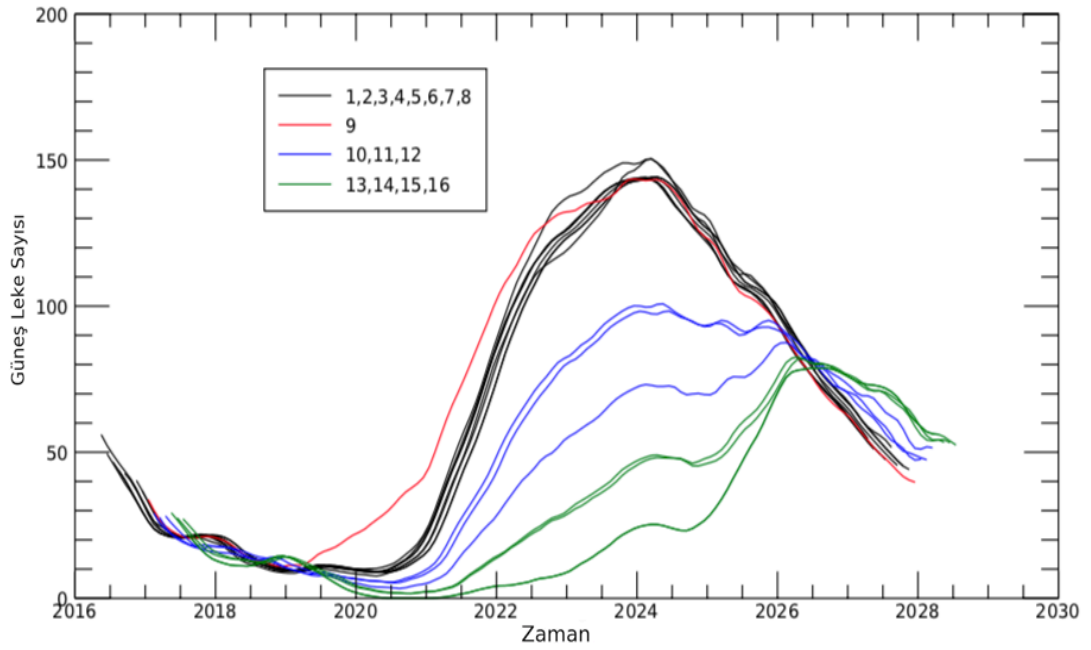


Şekil 4.11. Başarılı tahminlerin başlangıç noktalarının (* sembolü) son beş güneş leke çevrimi üzerindeki dağılımı (Kaynak: Sarp vd. 2018).

Şekil 4.11’de gösterilen yıldız işaretleri başarılı tahminlerin başlatıldığı noktaları diğer bir deyişle Bölüm 3.2’de tanıtılan tahmin vektörlerinin son elemanlarını göstermektedir. Fakat 24. Güneş leke çevrim için yapılan tahminlerin uzunluğu 132 ay yerine 100 ay olarak belirlenmiştir. Bunun sebebi 24. Güneş leke çevrimin henüz tamamlanmamış bir çevrim olması ve tahmin sonuçlarının gözlemlerle karşılaştırılabilir nitelikte olması gerekliliğidir. Bu sonuçlara göre, başarılı bir tahmin elde etmek için, SP algoritmasını rasgele bir noktadan başlatmak mümkün değildir. Bunu bir örnekle açıklamak gerekirse; 22. Güneş leke çevrimini yukarıda bahsedilen kriterlere göre başarılı olarak tahmin etmek için SP algoritması 21. Güneş leke çevriminin iniş kolunda, leke sayılarının 100 veya 200 olduğu zamanlarda başlatmak gereklidir. Şekil 4.10 incelendiğinde, bahsedilen çevrim için başarılı tahmin başlangıç noktalarının bu iki leke sayısı civarında gruplandığı görülmektedir. Bu noktaların dışında seçilen tahmin başlangıç noktaları, KOH değeri 20’den büyük veya korelasyon katsayısı 0.90’dan küçük tahminler üretecektir. Bu tahminler ise gerçeği yansıtmayacaktır. Ayrıca Şekil 4.10 incelendiğinde, her çevrim için standart bir başlangıç noktası almanın da mümkün olmadığı görülmektedir.

Yukarıda elde edilen sonuçlara dayanarak, iyi bir tahmin elde edebilmek için başlangıç noktasının özenle seçilmesi gerektiği anlaşılmıştır. 25. Güneş leke çevrimini tahmin edebilmek adına SP algoritmasının başlatılacağı noktayı bir önceki çevrim olan 24. Güneş leke çevrimi üzerinden seçmek gerekmektedir. Bu amaçla Şekil 4.10 ile gösterilen başarılı tahmin noktalarından yararlanılarak bir aralık oluşturulmuştur. Bu aralığın alt limitini (başlangıcını) belirlemek için daha önceki çevrimlerde başarılı olarak tespit edilen başlangıç noktalarının minimuma en yakın olanları arasından en geride olanı seçilmiştir. Diğer bir deyişle minimuma en yakın noktalar arasından bulunduğu çevrimin sonuna en uzak nokta seçilmiştir. Bunun sebebi başarılı başlangıç noktası aramaya ne kadar geriden başlanabileceği belirlemektir. Aranan bu nokta 21. Güneş çevrimindeki son başarılı başlangıç noktasıdır.

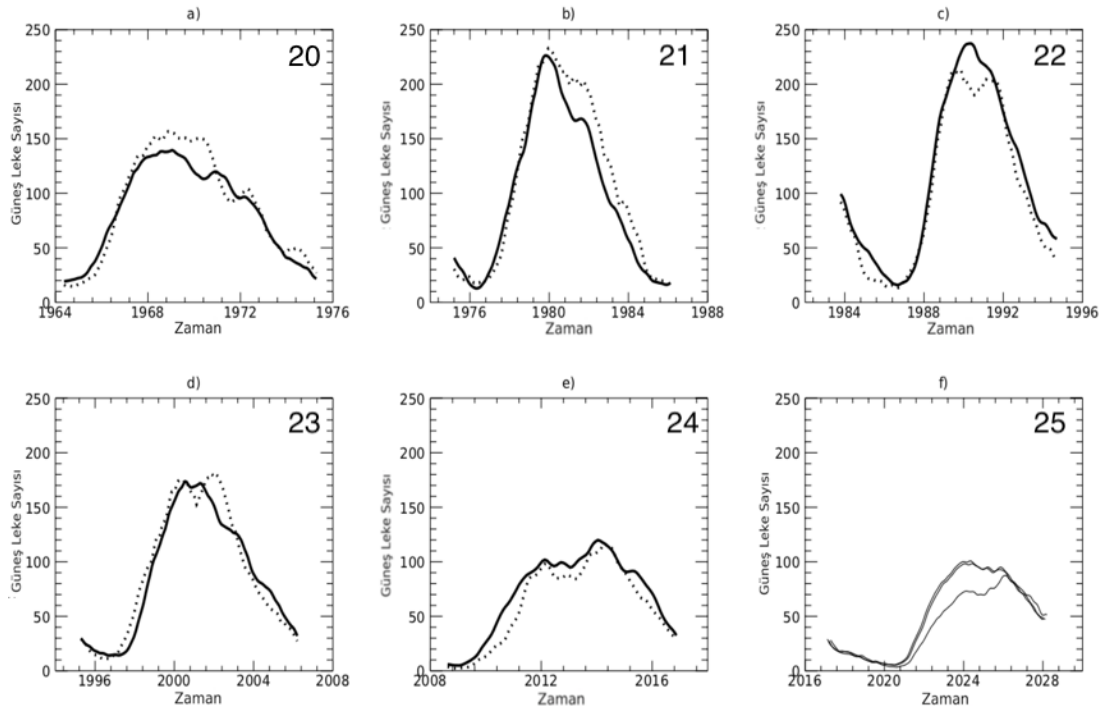
Bu noktayı 24. Güneş leke çevrimine taşıyabilmek için güneş leke sayılarının oranından yararlanılmıştır. 21. Güneş çevriminde belirlenen noktadaki leke sayısının (91.7), 24. Güneş çevrimin maksimumundaki leke sayısına (232.9) oranı 0,39 değerini vermektedir. Bu sebeple seçilecek aralığın alt limitindeki leke sayısının, 24. Güneş leke çevriminin maksimumundaki leke sayısının (116.4) 0,39 katı civarında olması beklenir. Bu orana en yakın nokta 47,8 leke sayısı ile Nisan 2016 olmaktadır. Seçilen aralığın üst limiti (bitişi) ise verinin son adımı olan Haziran 2017 olarak kabul edilmiştir. Seçilen bu aralıkta 16 adet nokta bulunmaktadır. SP algoritması tüm bu adımlar kullanılarak çalıştırılmış ve Şekil 4.11 ile verilen tahmin sonuçları elde edilmiştir.



Şekil 4.12. 25. Çevrim için üretilen tahminler (Kaynak: Sarp vd. 2018).

Şekil 4.12 'de görüldüğü gibi yukarıda bahsedilen aralıktaki 16 ardışık başlangıç noktasından 16 farklı tahmin üretilmiştir. Bu tahminler tek maksimuma sahip güçlü bir çevrimden çift maksimuma sahip ortalama bir çevrime doğru kademeli bir şekilde değişim göstermektedir. Siyah çizgi ile gösterilen ilk sekiz tahmin eğrisi aylık ortalama leke sayısı 150 civarında bir maksimuma ulaşmaktadır. Kırmızı çizgi ile gösterilen dokuzuncu tahmin eğrisi kritik bir nokta olarak ele alınabilir çünkü bu noktadan önceki tahminler benzer olarak gruplanabilirken, bu noktadan sonra gelen tahminler önemli değişimler göstermektedir. Mavi ile gösterilen 10, 11, ve 12. tahminler ilk maksimumları farklı fakat ikinci maksimumları aynı leke sayısını gösteren çevrimleri ifade etmektedir. Yeşil ile gösterilen son dört tahmin eğrisi ise tipik bir güneş çevrimine benzememektedir ve bu sebeple dikkate alınmamıştır. Bu dört tahmin eğrisinin tahmin başlangıç noktası verinin son dört adımındadır. Buna bağlı olarak veri setinin sonuna yakın noktaların iyi tahmin oluşturmadığı düşünülebilir.

Herhangi bir güneş leke çevriminin çıkış kolunda bulunan başarılı tahmin başlangıç noktaları kullanılarak elde edilen tahminler, 132 ay olarak belirlenen tahmin uzunluğundan dolayı bir sonraki çevrimin maksimumunu içermemektedir. Bu sebeple Şekil 4.10'da yükseliş kollarındaki başlangıç noktaları dikkate alınmazsa, kalan başlangıç noktalarının dağınık bir yapıda olduğu görülür. Hiçbir çevrim için peş peşe gelen bir dizi halinde dörtten fazla sayıda başlangıç noktası bulunmamaktadır. Buradan hareketle ilk sekiz tahmini elemek mümkündür çünkü eğer bu tahminler başarılı ise, arka arkaya gelen sekiz başlangıç noktası bahsedilen bu düzene aykırı olacaktır. Başarılı başlangıç noktalarının çevresinde çok daha az sayıda farklı başlangıç noktaları yer almalıdır. Yapılan bu elemelerden sonra yalnızca üç adet mümkün tahmin eğrisi (10,11 ve 12) kalmıştır. Bu eğriler için kullanılan başlangıç noktaları sırasıyla, Ocak, Şubat ve Mart 2017'dir.



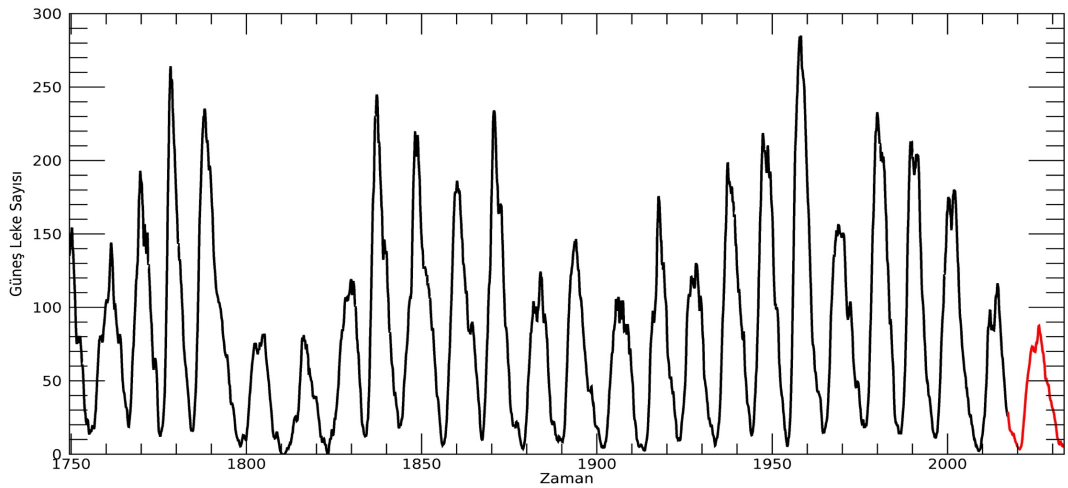
Şekil 4.13. a) 20. Çevrim; b) 21. Çevrim; c) 22. Çevrim; d) 23. Çevrim; e) 24. Çevrim için gözlenen (kesikli çizgi) ve oluşturulan tahminler (düz çizgi); f) 25. Çevrim için oluşturulan üç olası tahmin (Kaynak: Sarp vd. 2018).

Burada bahsedilen yöntemle elde edilen 20., 21., 22., 23., ve 24. Güneş leke çevrimlerinin tahminleri ile birlikte gözlenen değerlerinin karşılaştırılması ve 25. Güneş leke çevrimi için yapılan tahminler Şekil 4.13'de verilmiştir. Bu şekilde sağ üst köşedeki sayılar çevrim numaralarını temsil etmektedir. Çevrimlerin maksimumlarının zamanı ve leke sayıları oldukça isabetli bir şekilde tahmin edilmiş olup, çevrim sırasındaki çift maksimum gibi bazı dalgalanmalar da tahminlerde yer almaktadır. Bunun yanısıra Şekil 4.13.f'de 25. Güneş leke çevrimi için oluşturulan üç farklı alternatif tahmin verilmiştir. Bu sonuçlara göre 25. Güneş leke çevriminin çift maksimuma sahip bir çevrim olması beklenmektedir. İlk maksimumun Şubat 2024 ile Mayıs 2024 arasında gerçekleşmesi ve en yüksek aylık ortalama düzleştirilmiş leke sayısının 70 ile 100 arasında olması beklenmektedir. İkinci maksimumun ise Kasım 2025 ile Şubat 2026 arasında olması ve en yüksek aylık ortalama düzleştirilmiş leke sayısının 87 ile 93 arasında olması beklenmektedir.

Şekil 3.2'de yer alan kırmızı çizgi ile gösterilen aylık ortalama güneş leke sayıları incelendiğinde son 15 güneş leke çevriminde çift maksimuma sahip ve maksimumdaki leke sayısı 150'nin altında kalan altı adet çevrim olduğu görülmektedir. Bu çevrimlerden yalnızca bir tanesinde güneş leke sayıları bakımından ilk maksimum ikinci maksimumdan daha yüksektir. Geri kalan beş çevrimde de ikinci maksimumdaki güneş leke sayıları ilk maksimumdan daha yüksektir. Bu sebeple, yukarıda bahsedilen elemelerden sonra geriye kalan Şekil 4.12'deki 12 numaralı eğrinin en mümkün tahmin olduğu düşünülmektedir.

Bu sonuçlar göz önüne alındığında DDM yaklaşımında, doğrusal olmayan tahmin oluşturmak için seçilen başlangıç noktası son derece önemlidir. Bunun sebebi genel olarak algoritmanın tahmin oluşturmak için kullandığı tahmin vektörünün, seçilen başlangıç noktasına son derece bağımlı olmasıdır. Başlangıç noktasının hemen öncesindeki son $(m * \tau) + 1$ nokta kullanılarak tahmin vektörü oluşturulmaktadır ve seçilen yakın başlangıç noktaları bu kuraldan dolayı farklı tahmin vektörlerinin oluşmasına neden olacaktır. Tutarlı bir tahmin elde etmek için uygun başlangıç noktasının tespiti göz önüne alınmalıdır. Geçmiş çevrimlerden elde edilen başlangıç noktaları kullanılarak en iyi başlangıç noktası tespit edilebilir.

DDM yaklaşımıyla elde edilen tahmin sonuçları literatürde yer alan tahmin sonuçlarıyla karşılaştırıldığında benzer sonuçlara rastlanmaktadır. Örneğin Singh ve Bargawa (2017) oldukça benzer bir yaklaşımla Hurst üstelini kullanarak 25. Güneş leke çevriminin maksimumdaki leke sayısını 103 olarak tahmin etmiş ve bu maksimumun 2024 yılı civarında beklendiğini belirtmiştir. Öncü yöntemler kullanılarak yapılan çalışmalar (Hathaway ve Upton 2016; Cameron vd. 2016) ise 25. Güneş leke çevriminin mevcut çevrim olan 24. Güneş leke çevrimi ile hemen hemen aynı seviyede olacağını belirtmektedir. Tüm bu sonuçlar, bu çalışmada elde edilen tahmin ile tutarlıdır. Bunun yanısıra, güneş leke çevrimleri maksimumlarında gözlenmesi mümkün olan çift maksimumlar ile ilgili tahminler bahsedilen bu çalışmaların hiçbirinde yer almamaktadır. DDM yaklaşımıyla yapılan tahmin sonucunda 25. Güneş leke çevriminde ikinci bir maksimum olacağı bu çalışma kapsamında tahmin edilmektedir. Geçmiş tüm çevrimler ile 25. Çevrim için elde edilen en olası tahmin Şekil 4.14'te gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Bugüne kadar gözlemlenen güneş leke çevrimleri (siyah) ve 25. Çevrim için üretilen en olası tahmin (kırmızı).

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada güneş aktivitesinin kaotik yapısı, güneş leke sayıları zaman serisi kullanılarak analiz edilmiş ve Deneysel Dinamik Modelleme (DDM) yaklaşımının bu zaman serisine uygulanabilirliği araştırılmıştır.

Kaotik zaman serilerinin belirgin bir düzeni hafızasında tuttuğu kabul edilir ve bu uzun dönemli hafızanın bir ölçüsü olarak Hurst üsteli kullanılır. Bu çalışmada hesaplanan Hurst üsteli oldukça yüksek (0,86) olup güneş leke sayılarının uzun dönemli bir hafızaya sahip olduğunu göstermektedir (bkz: Şekil 4.1).

Güneş leke çevriminin kaotik dinamiklerini araştırmak amacıyla, güneş leke sayıları zaman serisi farklı zaman gecikmeleri ile oluşturulan faz uzayları üzerinden analiz edilmiş ve kaotik zaman serilerinde rastlanan çekici oluşumları gözlenmiştir (bkz: Şekil 4.2).

Zaman serilerinin karmaşıklığının bir ölçüsü olarak Korelasyon boyutu kullanılır ve bu değer çekicinin tam olarak açılacağı faz uzayı alt limitini belirlemede kullanılmaktadır. Yapılan analizler sonucunda güneş leke serilerinden bir çekici oluşturmak için gereken minimum faz uzayı boyutu altı olarak tespit edilmiştir.

DDM yaklaşımıyla 20., 21., 22., 23., ve 24., Güneş leke çevrimlerinin tahmini oluşturulmuş ve bu tahminler gözlenen değerlerle oldukça benzer sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Özellikle çift pike sahip maksimumların başarıyla tahmin edilmesi (bkz: Şekil 4.12.d ve 4.12.e) ve çevrim boyunca gözlenen dalgalanmaların tahmin sonuçlarında da yer alması (bkz: Şekil 4.12.a ve 4.12.b) literatürdeki benzer çalışmalarda yer almayan sonuçlardır. Bu durum güneş leke çevriminin fiziksel denklemlerle yapılan modellemelerinin yanında farklı bir modellemesinin DDM algoritmaları kullanılarak yapılabileceğini ortaya çıkarmıştır.

SP algoritması kullanılarak bugüne kadar yapılan çalışmalarda iki temel parametre (zaman gecikmesi ve gömme boyutu) kullanılmış ve bu parametrelerin seçimi korelasyon katsayıları kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmada oluşturulan başarılı tahmin kriteri sayesinde diğerlerinden daha yüksek ortalama korelasyon katsayısına sahip bir gömme boyutunun çok daha az sayıda başarılı tahmin üretebileceği gösterilmiştir. Buna bağlı olarak DDM yaklaşımında kullanılan SP algoritmasının bugüne kadar kullanılmayan bir parametresi (tahmin başlangıç noktası) bu çalışma ile literatüre kazandırılmıştır. Bu parametre, tahmin sonuçlarının tahminin başlangıç noktasına olan yüksek bağlılığı sonucu keşfedilmiştir. Bu durum göz önüne alındığında uygun başlangıç noktası seçilerek yapılan tahminler, rasgele bir noktadan başlatılan tahminlere göre daha tutarlı sonuçlar ortaya çıkarmaktadır.

Başlangıç noktası parametresinin de kullanımıyla 25. Güneş leke çevrimi için bir tahmin oluşturulmuştur. Bu tahmine göre gelecek çevrimin çift maksimuma sahip bir çevrim olması beklenmektedir. Bu detay literatürde yer alan diğer tahmin çalışmalarında yer almamaktadır. İlk maksimumun Şubat 2024 ile Mayıs 2024 arasında gerçekleşmesi ve en yüksek aylık ortalama düzleştirilmiş leke sayısının 70 ile 100 arasında olması beklenmektedir. İkinci maksimumun ise Kasım 2025 ile Şubat

2026 arasında olması ve en yüksek aylık ortalama düzleştirilmiş leke sayısının 87 ile 93 arasında olması beklenmektedir.

Bu çalışmada DDM yaklaşımı yalnızca bir değişken (güneş leke sayıları) kullanılarak uygulanmıştır. Çalışmanın devamında, DDM yaklaşımının farklı aktivite göstergelerinin birlikte kullanılmasıyla genişletilmesi öngörülmektedir. Bu değişkenler güneş patlamaları, jeomanyetik indisler, koronal kütle atımları veya güneş rüzgarlarından elde edilebilir. Bu sayede güneş aktivitesinin dinamikleri daha açık bir şekilde anlaşılabilir ve çok daha uzun dönemli tahminler gerçekleştirilebilir. Bunun yanında güneş aktivite çevrimlerinde farklı değişkenlerin davranışlarının birbirleri üzerindeki etkisi ve bu etkilerin çevrim sürecinde nasıl değişikliklere yol açtığı açığa çıkartılabilir. Son olarak, fraktal boyutu hesaplamaya yarayan tekniklerin güneş leke sayıları yerine güneş leke görüntüleri üzerinde uygulanması da yakın gelecekte planlanan çalışmalar arasında yer almaktadır.

6. KAYNAKLAR

- Arlt, R. and Weiss, N. 2014. Solar activity in the past and the chaotic behavior of the dynamo. *Space Science Reviews*, 186: 525-533.
- Babcock, H.W. 1961. The topology of the Sun's magnetic field and the 22-year cycle. *Astrophys. J.*, 133: 572-587.
- Bezruchko, B.P. and Smirnov, D.A. 2010. Extracting Knowledge from Time Series, Springer Series in Synergetics, 0172-7389, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp 33-34.
- Brown, B.P., Browning, M.K., Brun, A.S., Miesch, M.S., Toomre, J. 2010. Persistent magnetic wreaths in a rapidly rotating sun. *Astrophys. J.*, 711: 424-438.
- Cameron, R.H., Dikpati, M. and Brandenburg, A. 2017. The global solar dynamo. *Space Science Reviews*, 210: 367-395.
- Carbonell, M., Oliver, R. and Ballester, J.L. 1993. On the asymmetry of solar activity. *Astron. Astrophys.*, 274: 497-502.
- Carrington, R.C. 1858. On the distribution of the solar spots in latitudes since the beginning of the year 1854 with a map. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 19: 1-3.
- Clette, F. and Lefevre, L. 2016. The new sunspot number: Assembling all corrections. *Sol. Phys.*, 291(9-10): 2629-51
- Clune, T.L., Elliot, J.R., Glatzmaier, G.A., Miesch, M.S. and Toomre, J. 1999. Computational aspects of a code to study rotating turbulent convection in spherical shells. *Parallel Comput.*, 25: 361-380.
- DeAngelis, D.L. and Yurek, S. 2015. Equation-free modelling unveils the behavior of complex ecological systems. *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.*, 112(13): 3856-57.
- Evans, J.W. 1970. Introductory Review of Solar Activity. In McIntosh, P.S. and Dryer, M. (Ed.), *Solar Activity Observations Predictions*. MIT Press, England, pp. 3-4.
- Feller, W. 1951. The asymptotic distribution of the range of sums of independent random variables. *Annals of Mathematical Statistics*, 22(3): 427-43.
- Gnevyshev, M.N. 1963. The corona and 11-year solar activity. *Sov. Astron. A. J.*, 7: 311-318.
- Grassberger, P. and Procaccia, I. 1983. Measuring the strangeness of strange attractors. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 9:189-208.
- Hale, G.E., Ellerman, F., Nicholson, S.B. and Joy, A.H. 1919. The magnetic polarity of sun-spots. *Astrophys. J.* 49: 153-79.
- Hapgood, M. 2017. Linking Space Weather Science to Impacts – The View from the Earth. In Buzulukova, N. (Ed.), *Extreme Events in Geospace*. Elsevier, Amsterdam, pp. 4-8.
- Hathaway, D.H. and Upton, L.A. 2016. Predicting the amplitude and hemispheric asymmetry of solar cycle 25 with surface flux transport, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121(10): 744-753.

- Hsieh, C., Glaser, S.M., Lucas, A.J. and Sugihara, G. 2005. Distinguishing random environmental fluctuations from ecological catastrophes for the North Pacific Ocean. *Nature*, 435: 336–340.
- Hurst, H.E., Black, R.P. and Simaika, Y.M. 1965. Long-term storage: an experimental study. Constable, London. 145 s.
- Kapyla, P.J., Mantere, M.J. and Brandenburg, A. 2012. Cyclic magnetic activity due to turbulent convection in spherical wedge geometry. *Astrophys. J. Lett.*, 755(1): L22.
- Kevrekidis, I.G., Gear, C.W., Hyman, J.M., Panagiotis, G.K., Runborg, O. and Theodoropoulos, C. 2003. Equation-free, coarse-grained multiscale computation: enabling microscopic simulators to perform system-level analysis. *Comm. Math. Sci.*, 1: 715-762.
- Kilcik, A., Anderson, J.N.K., Rozelot, J.P., Ye, H., Sugihara, G. and Özgüç, A. 2009. Nonlinear prediction of solar cycle 24. *Astrophys. J.*, 693: 1173-1177.
- Kirov, B., Asenovski, S., Georgieva, K., Obridko, V.N. and Maris-Muntean, G. 2017. Forecasting the sunspot maximum through an analysis of geomagnetic activity. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, (in press).
- Kitiashvili, I.N. and Kosovichev, A.G. 2009. Nonlinear dynamical modeling of solar cycles using dynamo formulation with turbulent magnetic helicity. *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, 103: 53-68.
- Kleorin, N. and Rogachevskii, I. 2007. New mechanism of generation of large-scale magnetic field in a shared turbulent plasma. *Planet. Space Sci.*, 55: 2315-2318.
- Letellier, C., Aguirre, L.A., Maquet, J. and Gilmore, R. 2006. Evidence for low dimensional chaos in sunspot cycles. *Astron. Astrophys.*, 449: 379-387
- Mandelbrot, B.B. 1975. Stochastic models for the Earth's relief, the shape and fractal dimension of the coastlines, and the number-area rule for Islands. *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.*, 72: 3825-8.
- Moran, P.A.P. 1946. Additive functions of intervals and Hausdorff measure, *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 42(1): 15–23.
- Munoz-Jaramillo, A., Dasi-Espuig, M., Balmaceda, L. A. and DeLuca, E.E. 2013. Solar cycle propagation, memory, and prediction: insights from a century of magnetic proxies. *Astrophys. J. Lett.*, 767(25): L25.
- National Research Council. 2008. “Severe Space Weather Events: Understanding Societal and Economic Impacts: A Workshop Report”. Washington, DC: The National Academies Press.
- Otani, M. and Jones, A.J. 2000. Automated embedding and the creep phenomenon in chaotic time series. Retrieved from <http://users.cs.cf.ac.uk/O.F.Rana/Antonia.J.Jones/UnpublishedPapers/Creep.pdf> [Son erişim tarihi:18.05.2018].
- Parker, E.N. 1955. Hydromagnetic dynamo models, *Astrophys. J.*, 122: 293-314.

- Petrovay, K. 2010. Solar cycle prediction. *Living Rev. Solar Phys.* 7: A6.
- Prusa, J.M., Smolarkiewicz, P.K., and Wyszogrodzki, A.A. 2008. EULAG, a computational model for multiscale flows. *Comput. Fluids.*, 37: 1193-1207.
- Racine, E., Charbonneau, P., Ghizaru, M., Bouchat, A. and Smolarkiewicz, P.K. 2011. On the mode of dynamo action in a global large-eddy simulation of solar convection. *Astrophys. J.*, 735: A46.
- Rigozo, N.R., Souza-Echer, M.P., Evangelista, H., Nordemann, D.J.R. and Echer, E. 2011. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73: 1294-1299.
- Rosenstein, M.T., Collins, J.J. and De Luca, C.J. 1994. Reconstruction expansion as a geometry-based framework for choosing proper delay times. *Physica D: Nonlinear Phenomena.*, 73: 83-98.
- Rozelot, J.P. 1995. On the chaotic behavior of the solar activity. *Astron. Astrophys.*, 297: L45.
- Russel, D.A., Hanson, J.D. and Ott, E. 1980. Dimension of strange attractors. *Physical Review Letters*, 45: 1175-8.
- Sarp, V., Kilcik, A., Yurchyshyn, V., Ozguc, A. and Rozelot, J.P. 2018. Prediction of solar cycle 25: A nonlinear approach. Submitted to *Mon. Not. R. Astron. Soc.*
- Sauer, T.D.; Yorke, J.A. and Casdagli, M. 1991. Embedology. *Journal of Statistical Physics*, 65: 579-616.
- Schwabe, M. 1849. Sonnen-und Saturn-Beobachtungen im Jahre 1848 von Herrn Hofrath Schwabe in Dessau. *Astronomische Nachrichten*, 28: 302.
- Sello, S. 2001. Solar cycle forecasting: A nonlinear dynamics approach. *Astron. Astrophys.*, 377: 312-320.
- Singh, A.K. and Bhargawa A. 2017. An early prediction of 25th solar cycle using Hurst exponent. *Astrophysics and Space Science*, 362(11): A199.
- Sprott, J.C. 2003. Calculation of the Fractal Dimension In: Chaos and Time Series Analysis. Oxford University Press. pp. 302-327.
- Stix, M. 2004. The Sun. 0941-7834. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp 428-431.
- Sugihara, G. and May, R.M. 1990. Nonlinear forecasting as a way of distinguishing chaos from measurement error in time series. *Nature*, 344: 734-41.
- Takens, F. 1981. Detecting strange attractors in turbulence. Dynamical Systems and Turbulence, *Lecture Notes in Mathematics*, 898: 366-381.
- Tripathy, S.C. 2016. Predictions of solar cycle. *Asian Journal of Physics*, 25(3): 387-410.
- Usoskin, I. G., Solanki, S.K. and Kovaltsov, G.A. 2007. Grand minima and maxima of solar activity: new observational constraints. *Astron. Astrophys.*, 471: 301-309.
- Waldmeier, M. 1941. Ergebnisse und Probleme der Sonnenforschung, *Astronomische Nachrichten*, 272(5): 246-246.

- Wang, R., Zhu, J., Luo, Z. and Navon, I.M. 2012. An equation-free, reduced-order modeling approach to tropical pacific simulation. In Gan, J. et al. (Eds.), *Advances in Geosciences*, World Scientific Publishing Company, pp. 1-16.
- Wolf, R. 1861. Abstract of his latest results. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 21: 77–78.
- Ye, H., Beamish, R.J., Glaser, S.M., Grant, S.C., Hsieh, C.H., Richards, L.J., Schnute, J.T. and Sugihara, G. 2015. Equation-free mechanistic ecosystem forecasting using empirical dynamic modeling. *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.*, 112(13): E1569-76.

ÖZGEÇMİŞ

VOLKAN SARP

theneutron@gmail.com



ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2016-2018	Fen Fakültesi, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Bölümü, Antalya
Lisans	TOBB ETÜ
2007-2013	Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

Kilcik, A., Yurchyshyn, V., Sahin, S., Sarp, V., Obridko, V., Ozguc, A. and Rozelot, J. P. 2018. The evolution of flaring and non-flaring active regions. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 477(1): 293-297. Doi: 10.1093/mnras/sty388

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

Sarp, V. and Kilcik, A. 2018. Nonlinear prediction of solar cycle 25. *IAU Proceeding Series, IAU Publisher, Cambridge University Press.*

Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

Sarp, V. and Kilcik, A. 2018. Solar flares and geomagnetic activity relations. *Turkish Journal of Physics.* 42:283-292. Doi: 10.3906/fiz-1712-18