

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**GÜNEŞ ENERJİLİ PARÇACIKLAR, X-IŞINI GÜNEŞ PATLAMALARI VE
GÜNEŞ LEKE GRUPLARI ARASINDAKİ İLİŞKİNİN ARAŞTIRILMASI**

Melike TIRNAKÇI

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

HAZİRAN 2024

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**GÜNEŞ ENERJİLİ PARÇACIKLAR, X-IŞINI GÜNEŞ PATLAMALARI VE
GÜNEŞ LEKE GRUPLARI ARASINDAKİ İLİŞKİNİN ARAŞTIRILMASI**

Melike TIRNAKÇI

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

HAZİRAN 2024

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜNEŞ ENERJİLİ PARÇACIKLAR, X-IŞINI GÜNEŞ PATLAMALARI VE
GÜNEŞ LEKE GRUPLARI ARASINDAKİ İLİŞKİNİN ARAŞTIRILMASI

Melike TIRNAKÇI
UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 24/06/2024 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ali KILÇIK
Doç. Dr. Murat KAPLAN
Doç. Dr. Zahide Funda BOSTANCI GÜVER

ÖZET

GÜNEŞ ENERJİLİ PARÇACIKLAR, X-IŞINI GÜNEŞ PATLAMALARI VE GÜNEŞ LEKE GRUPLARI ARASINDAKİ İLİŞKİNİN ARAŞTIRILMASI

Melike TIRNAKÇI

Yüksek Lisans Tezi, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ali KILÇIK

Haziran 2024; 40 sayfa

Güneş ve onun kaotikliği uzun yıllardır bilinen, bilim insanlarının üzerinde çalıştığı ve hala tam olarak anlaşılamamış bir konudur. Tam anlamıyla anlaşılması için tahmin yöntemlerinin, analizlerin gelişmesi ve ileri seviyelere taşınması gerekmektedir. Bu sayede uzay havası, iklim, güneş sistemi gibi alanlara dair bilgi kapsamımız ve alınabilecek önlemler de gelişecektir. Tüm bu gerekliliklerden hareketle, bu tez çalışması kapsamında, uzay havasının önemli ve anlaşılması nispeten güç bir bileşeni olan güneş enerjili parçacıklar (SEP) üzerinde durulmuştur.

SEP'lerin doğasını anlamak için güneş patlamaları ve güneş leke grupları da çalışmaya dahil edilmiştir. Aralarındaki ilişkiyi anlamak için çapraz korelasyon analizi uygulanmış, periyodik davranışlarının Güneş'e ve güneş patlamalarına olan benzerliğini tespit etmek için, sürekli verilerde yüksek doğrulukla çalışan Multi-Taper Metot (MTM) periyot analizi uygulanmıştır. Ek olarak, güneş proton olayları (SPE) da tez çalışmasının kapsamını genişletmek ve tahminlerde olası bir iyileştirme yapabilmek adına incelenmiştir.

Tez çalışması sonucunda, SEP'lerin Güneş'e ve Güneş aktivitesine olan bağımlılığı ortaya konmuş ve SPE'lerin tahmin edilmesinde SEP'lerin kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. En kompleks güneş leke gruplarının ve yüksek enerjili patlamaların daha yüksek SEP üretme potansiyeline sahip olduğu anlaşılmıştır.

ANAHTAR KELİMELEER: Güneş Enerjili Parçacıklar, Güneş Leke Grupları, Güneş Patlaması, Uzay Havası

JÜRİ: Prof. Dr. Ali KILÇIK

Doç. Dr. Murat KAPLAN

Doç. Dr. Zahide Funda BOSTANCI GÜVER

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN SOLAR ENERGETIC PARTICLES, X-RAY SOLAR FLARES AND SUNSPOT GROUPS

Melike TIRNAKÇI

MSc Thesis in Space Sciences and Technologies Department

Supervisor: Prof. Dr. Ali KILÇIK

June 2024; 40 pages

The Sun and its chaotic nature have been known and studied by scientists for many years and is still not fully understood. For it to be fully understood, forecasting methods and analyses need to be developed and advanced levels. In this way, the scope of our knowledge on areas such as space weather, climate, solar system, and the measures that can be taken will also improve. Based on all these requirements, this thesis focuses on solar energetic particles (SEPs), an important and relatively difficult to understand component of space weather.

Solar flares and sunspot groups are also included to understand the nature of SEPs. Cross-correlation analysis was performed to understand the relationship between them, and Multi-Taper Method (MTM) analysis, which works with high accuracy on continuous data, was applied to determine the similarity of their periods to the Sun and solar flares. In addition, solar proton events (SPEs) were also analyzed to extend the scope of the thesis and to improve the predictions.

As a result of the thesis, the dependence of SEPs on the Sun and solar activity has been demonstrated and it has been concluded that SEPs can be used in the prediction of SPEs. It was found that the most complex sunspot groups and higher energy flares have the potential to produce higher SEPs.

KEYWORDS: Solar Energetic Particles, Solar Flare, Space Weather, Sunspot Groups

COMMITTEE: Prof. Dr. Ali KILÇIK

Assoc. Prof. Murat KAPLAN

Assoc. Prof. Zahide Funda BOSTANCI GÜVER

ÖNSÖZ

Güneş, bize en yakın yıldız olmasına rağmen Güneş Fiziği alanında bilinmeyen pek çok özelliğe sahiptir. Bütün çaba ve gayret, Güneş'i daha iyi anlamaya yönelik olup bu konuda ilgilileri de teşvik etmektir. Son yıllarda, bu konuya meraklı olan insanların ve günümüz teknolojisindeki ilerlemenin birleşmesiyle birlikte Güneş ve uzay havasına olan ilgi artmaktadır. Güneş'in yakın uzaya ve çevresine sürekli olarak yüklü parçacık bombardımanı yapması, Dünya'daki iletişimin aksaması, doğaya ve çevreye zarar vermesi ve uzay tabanlı araçlara zarar vermesi konularında insanlığı düşündürmektedir. Bu sebeple Güneş aktivitesi ve onun kaotikliğine dair tahminlerde yapılacak küçük bir iyileştirme oldukça fayda sağlayacaktır.

Bu tez çalışmasında, güneş enerjili parçacıklar, güneş patlamaları ve güneş leke grupları üzerinde durulmuştur. Çalışmayı genişletmek ve bir adım ileri taşımak adına bu çalışmaya koronal kütle atımlarının eklenmesi de uygun olabilir.

Bu alana olan ilgimi, düşünceleri ve bende uyandırdığı fikirlerle alevlendiren; deneyimi ve her aşamada sunduğu destek ile bana rehberlik eden değerli danışmanım Prof. Dr. Ali KILÇIK'a teşekkürü bir borç bilirim.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim süresince, bu uzun yolculukta manevi olarak yanımda olan arkadaşlarıma, verdikleri destek ve yardım için içten teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak bu süreçte her zaman yanımda olan ve bana destek veren aileme, gösterdikleri sabır ve anlayış için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
AKADEMİK BEYAN	v
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	3
2.1. Güneş.....	3
2.2. Uzay Havası	16
3. MATERYAL VE METOT	19
4. BULGULAR.....	24
4.1. Histogramlar	24
4.2. Çapraz Korelasyon	25
4.3. SPE Dağılımları.....	26
4.4. MTM Analizi.....	28
5. TARTIŞMA	31
6. SONUÇLAR	34
7. KAYNAKLAR	35
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Güneş Enerjili Parçacıklar, X-ışını Güneş Patlamaları ve Güneş Leke Grupları Arasındaki İlişkinin Araştırılması” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

24/06/2024

Melike TIRNAKÇI



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Å	: Angstrom
eV	: Elektron volt
G	: Jeomanyetik fırtına
GeV	: Giga elektron volt
H	: Hidrojen
H α	: Hidrojen alfa
He	: Helyum
³ He	: Helyum-3
⁴ He	: Helyum-4
K	: Kelvin
keV	: Kilo elektron volt
kg	: Kilogram
km	: Kilometre
l	: Boylamsal uzanım
MeV	: Mega elektron volt
Pa	: Pascal
r	: Korelasyon katsayısı
R	: Radyo kesintisi
R _z	: Güneş leke sayısı
R _☉	: Güneş yarıçapı
S	: Güneş fırtınası
W	: Watt

Kısaltmalar

CCF : Çapraz Korelasyon Fonksiyonu (Cross-Correlation Function)

CME : Koronal Kütle Atımı (Coronal Mass Ejection)

CNO : Karbon-Azot-Oksijen (Carbon-Nitrogen-Oxygen)

FWHM: Full Width at Half Maximum

GCR : Galaktik Kozmik Işın (Galactic Cosmic Ray)

GLE : Yer Seviyesi Artışları (Ground Level Enhancements)

GOES : Geostationary Operational Environmental Satellite

HR : Hertzsprung-Russell diyagramı

MK : Milyon Kelvin

NASA : National Aeronautics and Space Administration

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

SC : Güneş Leke Çevrimi (Solar Cycle)

SESC : Space Environment Services Center

SF : Güneş Patlaması (Solar Flare)

SGAS : Güneş ve Jeofizik Aktivite Özeti (Solar and Geophysical Activity Summary)

SEP : Güneş Enerjili Parçacıklar (Solar Energetic Particles)

SPE : Güneş Proton Olayı (Solar Proton Event)

SRS : Güneş Bölgesi Özeti (Solar Region Summary)

SWO : Space Weather Observations

SWPC : Space Weather Prediction Center

UT : Evrensel Zaman (Universal Time)

Bu tezde ondalık işareti olarak nokta (.) kullanılmıştır.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Hidrostatik denge.....	4
Şekil 2.2. Güneş'in iç yapısı ve atmosfer tabakaları (NASA)	5
Şekil 2.3. Proton-proton tepkimesinin şematik gösterimi.....	6
Şekil 2.4. Güneş merkezinden atmosferine doğru yoğunluk ve sıcaklığın yarıçapa bağlı değişimi (Alberta Üniversitesi, Güneş'in iç yapısı ders notundan alınarak düzenlenmiştir.).....	7
Şekil 2.5. Güneş atmosferinde yüksekliğe bağlı olarak sıcaklık (T_e ; K) ve yoğunluk (N_e ; cm^{-3}) değişimi (Gallagher, 1999; Long, 2012).....	9
Şekil 2.6. Hinode optik teleskobu tarafından yakalanan güneş lekesi, fotosferde (sağda) granül adı verilen yapı (Tsuneta, 2011).....	9
Şekil 2.7. Güneş leke sayısının zamansal değişimi	10
Şekil 2.8. McIntosh güneş lekesi grubu sınıflandırması (McIntosh, 1990).	13
Şekil 3.1. SWPC tarafından günlük olarak derlenen SRS verilerine bir örnek (https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-region-summary)	19
Şekil 3.2. SWPC tarafından günlük olarak derlenen SGAS verilerine bir örnek (https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-and-geophysical-activity-summary).....	20
Şekil 3.3. SEP ve SPE'nin zamansal değişim grafiği	21
Şekil 3.4. FWHM gösterimi (Tavernier, 2010)	23
Şekil 4.1. Farklı X-ışını güneş patlama sınıfları ve SEP'in histogramı a) SEP ve C sınıfı patlama b) SEP ve M sınıfı patlama c) SEP ve X sınıfı patlama d) SEP ve toplam güneş patlaması	24
Şekil 4.2. Farklı X-ışını güneş patlama sınıfları ile SEP arasındaki çapraz korelasyon analizi sonuçları a) SEP ve C sınıfı patlama b) SEP ve M sınıfı patlama c) SEP ve X sınıfı patlama d) SEP ve toplam güneş patlaması	25
Şekil 4.3. SEP'lerin MTM periyot analizi güç spektrumu. Şekilde; a) 45 ± 1 ; b) 42 ± 0.66 ; c) $38-37 \pm 1$	28
Şekil 4.4. C sınıfı güneş patlamalarının MTM periyot analizi sonuçları.....	28
Şekil 4.5. M sınıfı güneş patlamalarının MTM periyot analizi sonuçları.....	29
Şekil 4.6. X sınıfı güneş patlamalarının MTM periyot analizi sonuçları.....	29
Şekil 4.7. Toplam güneş patlamalarının MTM periyot analizi sonuçları	29

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Güneş'e ait temel fiziksel ve kimyasal özellikler	3
Çizelge 2.2. H-alfa sınıflandırması (https://www.noaa.gov/ , *f: faint (zayıf), n: normal, b: bright (parlak)).....	14
Çizelge 2.3. X-ışını sınıflandırması (Bhatnagar ve Livingston, 2005).....	14
Çizelge 2.4. Uzay havası türleri ve özellikleri. 1'den 5'e kadar olan skala, düşük şiddetten yüksek şiddete doğru gitmektedir, örneğin; G1, düşük şiddetli bir jeomanyetik fırtınayı işaret ederken, G5 yüksek şiddetli bir jeomanyetik fırtınayı göstermektedir (Eastwood ve ark., 2017)	16
Çizelge 4.1. Çapraz korelasyon katsayıları ve denk gelen zaman gecikmeleri	26
Çizelge 4.2. SPE'ler ve dağılımları.....	26
Çizelge 4.3. SPE'nin diğer kaynakları.....	27
Çizelge 4.4. Tespit edilen anlamlı periyotlar ve güven düzeyleri.....	30

1. GİRİŞ

Güneş, içinde bulunduğumuz Güneş sisteminin merkezinde yer alan ve kütlesiyle bu sistemin toplam kütlesinin %99,8'ini oluşturan bir yıldızdır. Evrende sıkça rastlanan sıradan yıldızlardan biri olmasına rağmen onu özel kılan bazı belirgin özelliklere sahiptir. En önemlisi, ısı ve ışık kaynağı olması sayesinde Dünya üzerindeki canlı yaşamın var olmasını ve devam etmesini sağlamasıdır. Ayrıca, Güneş'in Dünya'ya yakın olması, onun yüzeyini detaylı bir şekilde gözlemleyebilmemizi mümkün kılar. Güneş dışında herhangi bir yıldızın bu denli detaylı incelenememesi sebebiyle, bizim için doğal bir laboratuvar konumundadır. Güneş aracılığıyla diğer yıldızlar hakkında da bilgi edinebilmekteyiz.

Şöyle ki; Güneş'i gözlemlemek, izlemek günümüz teknolojisiyle yapılabilir görünse de Güneş'i anlamak düşünüldüğü kadar kolay değildir. Özellikle Güneş'in manyetik alanı oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir ve bu alanın varlığını, Güneş'in yüzeyinde ve atmosferinde meydana gelen değişikliklerden anlamak mümkündür. Örneğin, güneş lekeleri, koronal kütle atımları, güneş patlamaları ve filamentler gibi aktif fenomenler, Güneş'in manyetik alanının etkilerini gözlemlememize yardımcı olur. Ancak, manyetik alanın yapısı ve oluşum süreci manyetik alanın karmaşıklığı sebebiyle hala tam olarak anlaşılamamıştır. Manyetik alanın karmaşık yapısı ve içinde barındırdığı kaos, onu tahmin edilemez kılar. Bu da Güneş'in manyetik alanını anlamının zorluğunu artırır.

Manyetik alanın varlığının bilinen en önemli kanıtı, 11 yıllık Schwabe çevrimi veya diğer adıyla güneş leke çevrimi (SC) ve 22 yıllık Hale çevrimidir. Her 11 yılda bir, güneş lekelerinin manyetik kutupları yer değiştirir (pozitifse negatif, negatifse pozitif) ve 22 yıl sonra başlangıç konumuna geri döner. 11 yıllık süreçte Güneş maksimumu ve Güneş minimumu olarak adlandırılan dönemler bulunmaktadır. Güneş maksimumunda; güneş lekeleri gibi manyetik alan göstergesi olan fenomenlerde artış görülmektedir. Güneş minimumunda da tam tersi durum söz konusudur. İyi bilinen bir diğer periyodiklik de ortalama 27 günlük güneş rotasyon periyodudur. Bu periyot, Güneş'in dönmesinden ve bu dönmenin yüzey dinamosu ile olan etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Benzer şekilde, güneş lekelerinde, aktif bölge olaylarında, jeomanyetik aktivite göstergelerinde 27 günlük periyot görülmektedir.

Güneş maksimumu döneminde aktif olaylarda görülen artış, Dünya'nın jeomanyetik aktivitesinde de artışa sebep olur. Bu artış zaman zaman Dünya'daki hayatı etkilemektedir. Uzay havası kavramı, tam olarak da bu durumda ortaya çıkmaktadır. Uzay havası, güneş aktivitesi fenomenlerinin yakın uzayda ve Dünya üzerinde yarattığı etkiler olarak tanımlanabilir. Bu etkileri, Dünya üzerinde iklimde yaşanan değişimler, iletişimde yaşanan sorunlar, biyolojik etkiler vb.; Dünya dışında ise uydularda yaşanan tek olay etkisi, uydu sürüklenmesi vb. olarak sıralamak mümkündür. Dolayısıyla bu tür olayların önüne geçebilmek için uzay havasını tahmin etmek önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasında, bütün bu gerekliliklerden yola çıkarak uzay havasının önemli bir bileşeni olan Güneş Enerjili Parçacıklar (Solar Energetic Particles, SEP) üzerinde durulmuştur. SEP'ler, çeşitli enerjilere (onlarca keV'den GeV'lere) sahip yüksek enerjili yüklü parçacıkların helyosfere geçici olarak enjekte edilmesidir. Zaman zaman tehlikeli olabilen SEP olayları iki farklı mekanizma aracılığıyla gerçekleşir. İlki güneş patlamaları sırasında manyetik yeniden bağlanma tarafından oluşan itici SEP'lere yol açar, diğeri ise daha büyük kademeli SEP olaylarıyla sonuçlanan hızlı koronal kütle atımıyla (CME) oluşan şok dalgaları tarafından tetiklenir (Klein ve Posner, 2005; Desai ve Giacalone, 2016). Dolayısıyla, sadece SEP'lerin orijinlendiği güneş patlamaları bu çalışmaya dahil edilmiştir. Güneş patlamaları, Güneş yüzeyinde, özellikle güneş lekeleri gibi güçlü manyetik alanlara sahip bölgelerde meydana gelen ani parlaklık artışları olarak tanımlanabilir. Bir patlama sırasında yayılan enerji 10^{20} ila 10^{25} Joule arasında değişir ve radyatif enerji, kinetik kütle enerjisi, termal ve termal olmayan enerji dahil olmak üzere farklı şekillerde ortaya çıkar. Güneş patlamaları da tipik olarak Güneş'teki aktif bölgelerden ortaya çıkar ve genellikle güneş leke gruplarıyla ilişkilidir. Bu bilgi ışığında da güneş leke grupları, çalışmaya dahil edilmiştir. Özellikle X-ışını güneş patlaması ve güneş leke sınıflandırması üzerinde durularak bu fenomenlerin SEP üretme potansiyeli incelenmiştir. Söz konusu olan iki fenomenin iyi anlaşılması, SEP'lerin tahmini ve doğasını anlamak için de oldukça yarar sağlayıcı olacaktır.

Bölüm 2'de Güneş'in iç yapısı ve dış atmosfer tabakaları, güneş lekeleri ve leke sınıflandırılması, güneş patlamaları ve SEP'lerin yapısı ve fiziksel özellikleri hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Bölüm 3'te materyal metot, bölüm 4'te tez süresince elde edilen bulgular, bölüm 5'te tartışma, son olarak bölüm 6'da çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar kısaca verilmiştir.

2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Güneş

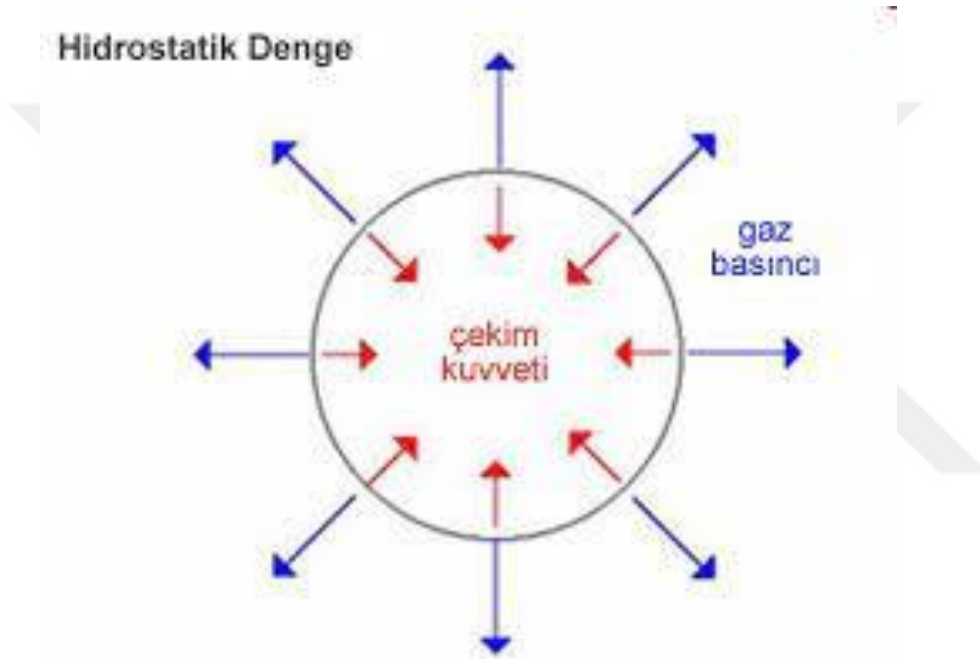
Güneş, evrendeki milyarlarca galaksiden biri olan Samanyolu galaksisinin Sagittarius kolu üzerinde, galaksi merkezinden 26 bin ışık yılı uzaklıkta bulunan G2V tayf türünde sıradan bir cüce yıldızdır. Şu anda HR diyagramında anakol üzerinde bulunan Güneş, yaklaşık 4.5 milyar yıl yaşında olup, ömrünün yarısını harcamış durumdadır.

Çizelge 2.1. Güneş'e ait temel fiziksel ve kimyasal özellikler
(<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html>)

Özellik	Değer
Yaş	4.6 milyar
Yarıçap	696340 km
Hacim	$1.412 \times 10^{27} \text{ m}^3$
Kütle	$1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$
Ortalama yoğunluk	$1.409 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$
Basınç	Merkez: $\sim 2.5 \times 10^{16} \text{ Pa}$
	Fotosfer: $\sim 10^4 \text{ Pa}$
Sıcaklık	Merkez: $\sim 1.5 \times 10^7 \text{ K}$
	Fotosfer: 5777 K
	Korona: $2-3 \times 10^6 \text{ K}$
Lüminosite	$3.828 \times 10^{26} \text{ W}$
Kimyasal bileşim	Hidrojen: %92.1
	Helyum: %7.8
	Diğerleri: %0.1
Manyetik alan	Ortalama: 1 Gauss
	Güneş lekelerinde: 1000-3000 Gauss

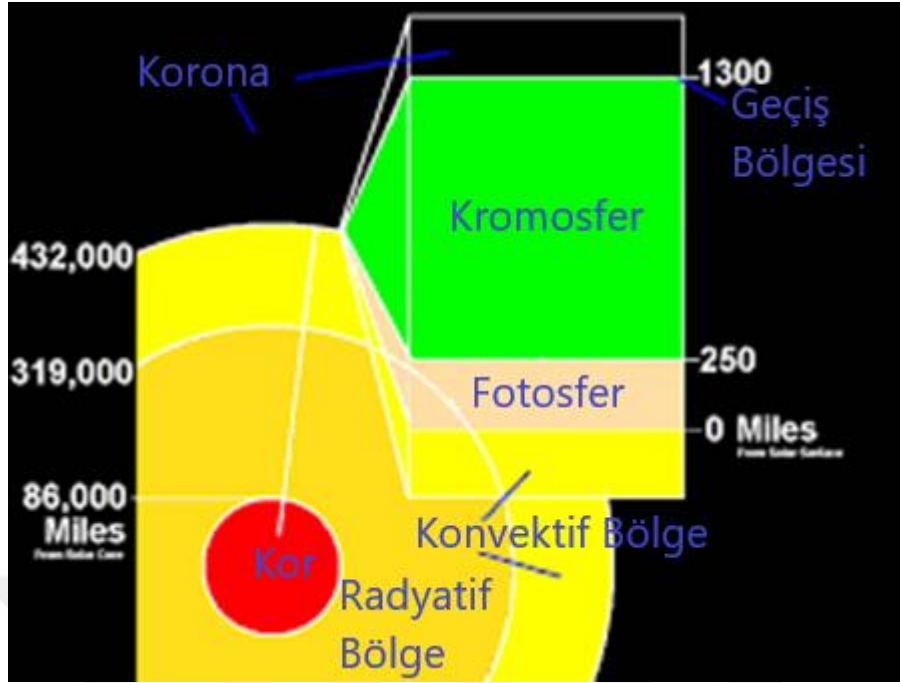
Metalce zengin bir durumda olan Güneş, bu durumu popülasyon I yıldızı olmasına borçludur. Popülasyon I yıldızları, metalce zengin genç yıldızlar olarak düşünülebilir. Kütlesinin %72'si hidrojen (H), %25'i helyum (He) ve %3'ü ağır elementlerden oluşmaktadır ve Güneş sisteminin kütlesinin yaklaşık %99.8'ini oluşturmaktadır. Güneş'e ait temel fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Dev bir plazma topu olarak düşünülmesi mümkün olan Güneş'te hidrostatik denge adı verilen bir denge mekanizması bulunmaktadır. Bu denge mekanizmasının var olma sebebi Güneş'in iç kısmından dışarı doğru sürekli şekilde gerçekleşen gaz basıncı ve dıştan devamlı şekilde Güneş'in merkezine doğru olan kütleçekim kuvvetidir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Hidrostatik denge

Güneş'in biraz daha iç kısmı hakkında bilgi vermek gerekirse, opak olduğunu söylemek mümkündür. Bu opaklık, Güneş'in iç yapısının gözlenmesini imkânsız kılmaktadır. Gözlem yapılamaması sebebiyle Güneş'in iç yapısı hakkındaki bilgiler, helyosismoloji, önceki teorik çalışmalar ve atmosfer gözlemlerinin birleştirilmesiyle sağlanmaktadır. Elde edilen bilgiler ışığında iç yapısı, farklı fiziksel koşullara sahip dört bölgeden oluşurken, farklı gözlem araçları yardımıyla direkt olarak gözlemlenebilen dış atmosferi dört bölgeden oluşur. En iç bölgeden başlayarak, iç yapısı; kor (çekirdek), radyatif bölge, geçiş bölgesi (tachocline) ve konvektif bölgedir. En iç bölgeden başlayarak, dış atmosfer tabakaları; fotosfer, kromosfer, geçiş bölgesi, koronadır (Şekil 2.2).



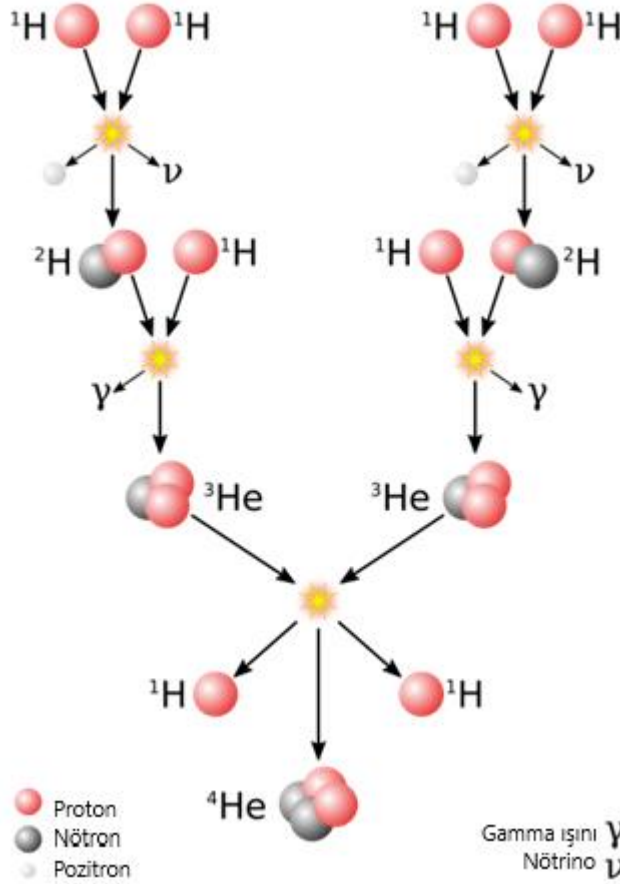
Şekil 2.2. Güneş'in iç yapısı ve atmosfer tabakaları (NASA)

Enerji transfer mekanizmaları: radyasyon (ışınım), konveksiyon (taşıma) ve kondüksiyon (iletim) olarak sınıflandırılabilir. Radyasyon, atom ve moleküllerin elektronik konfigürasyonlarındaki değişimlerin sonucunda oluşan, maddeden fotonlar (ışığın temel birimi) veya elektromanyetik dalgalar halinde yayılan enerji olarak söylenebilir. En temelde, Güneş'ten bize gelen enerjinin taşıma şekli radyasyondur. Konveksiyon, katı yüzey ile akışkan yüzey arasında gerçekleşen, atom ve moleküllerin ötelenmesi ile oluşan transfer mekanizmasıdır. Konveksiyonun en bilinen örneği; kaynayan suda, ısı merkezine en yakın noktadan başlayıp yukarı doğru çıkan ve yüzeye ulaştığında tüm tüzeğe dağılan kabarcıklardır. Kondüksiyon ise enerjinin doğrudan madde üzerinden aktarımıdır ve bu, maddedeki atomların birbirleriyle çarpışması sonucu meydana gelir. Özellikle katılarda görülen bu mekanizma, Güneş'te oldukça az görülür.

Çekirdek, $0.2 R_{\odot}$ mesafesinde bulunan, Güneş'te nükleer reaksiyonların gerçekleştiği, başka bir deyişle Güneş'in hayatının devamlılığını sağlayan bölgedir. İyonlar ve elektronlardan oluşan yoğun ve sıcak plazma burada bulunmaktadır. Sıcaklığı, yaklaşık 15 milyon K olup, Güneş hacminin %1.6'sına sahip olmasına rağmen toplam kütlenin yaklaşık yarısı burada bulunmaktadır.

Yıldızların varlığını sürdürebilmesi için enerji üretmesi, bu enerjinin bir kısmını dış uzaya salması ve ikisi arasındaki dengeyi koruyabilmesi gerekmektedir. Güneş, enerji gerekliliğini %99'u çekirdekte gerçekleşen proton-proton ve CNO (Karbon-Azot-Oksijen) tepkimelerinden sağlamaktadır. Güneş'te özellikle proton-proton tepkimesi daha fazla gerçekleşmektedir. Proton-proton tepkimesi şematik olarak Şekil 2.3'te

gösterilmektedir. Dört hidrojen çekirdeği ile bir helyum çekirdeği arasında % 0.7'lik bir enerji farkı bulunmaktadır. Bu fark sayesinde açığa çıkan enerji Güneş'in temel yaşam kaynağıdır (Elkins-Tanton,2006).



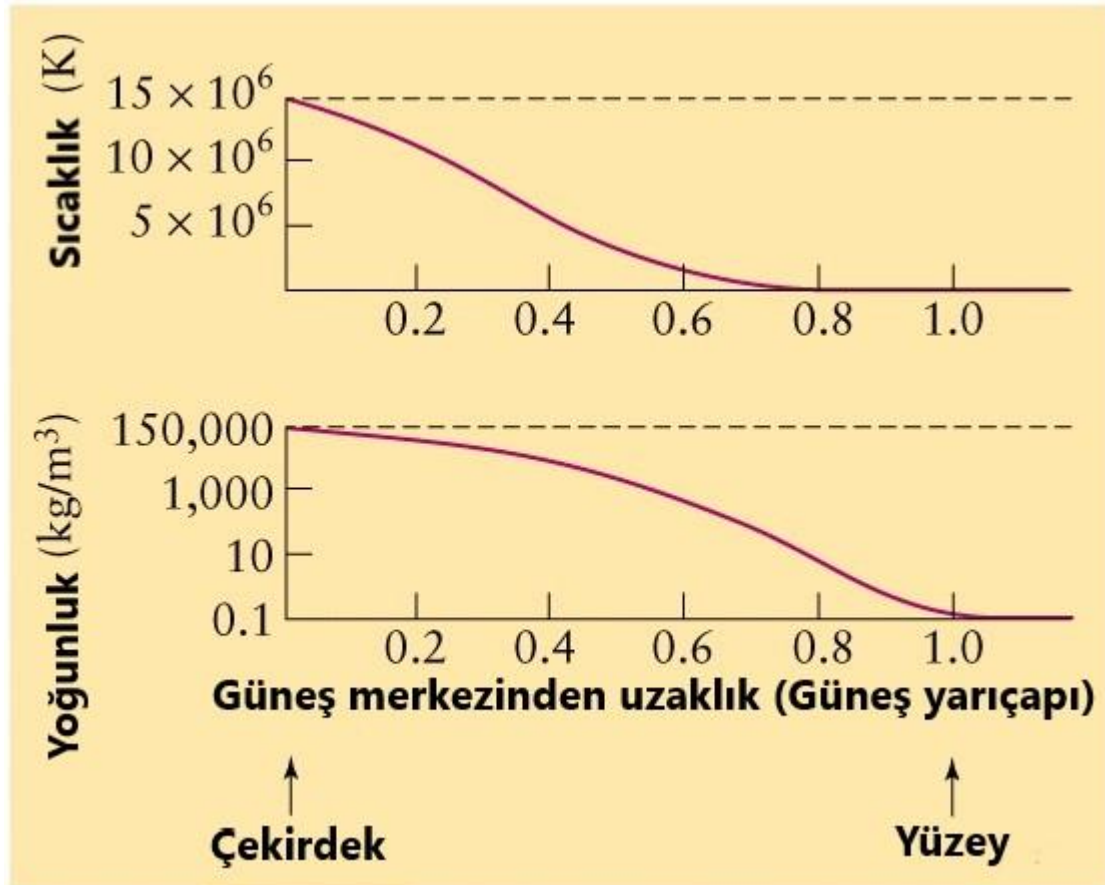
Şekil 2.3. Proton-proton tepkimesinin şematik gösterimi

Radyatif bölge, 0.2-0.71 $R_{\odot}$ aralığında bulunan, merkezde üretilen enerjinin ışıınım yoluyla yüzeye doğru taşındığı bölgedir. Ancak bu taşınma, oldukça zor gerçekleşir. Radyatif bölgede madde yoğunluğu öylesine fazladır ki, opaklık üretilen fotonun yukarı taşınmasını güç hale getirir. Dolayısıyla bir foton, radyatif bölgeyi ortalama $1.7 \times 10^5 - 10^6$ yılda terk etmektedir (Mitalas ve Sills, 1992; Chemin, 2022). Çekirdek sıcaklığı 15 MK, radyatif bölge sıcaklığı ortalama 5-10 MK iken konvektif bölge tabanında bu sıcaklık 2.2 MK'e kadar düşer. Bu noktadan itibaren merkezde üretilen ve konvektif bölgenin tabanına kadar taşınan enerji artık ışıınım yoluyla taşınamaz hale gelir. Sonrasında enerji, konveksiyon ile taşınmaya başlanır.

Konvektif bölgeden hemen önce bu bölgenin tabanını saran tachocline adı verilen ince bir geçiş bölgesi bulunur. Daha önceki çalışmalardan hareketle Basu ve Antia (1997) tarafından konveksiyon bölgesinin tabanının konumu 0.713 $R_{\odot}$ olarak belirlenmiştir. Yine Basu ve Antia (2003) tarafından yapılan bir çalışmada, bu bölgenin Güneş merkezine olan uzaklığının 0.6916 $R_{\odot}$ olup, enleme bağı olarak kalınlığının

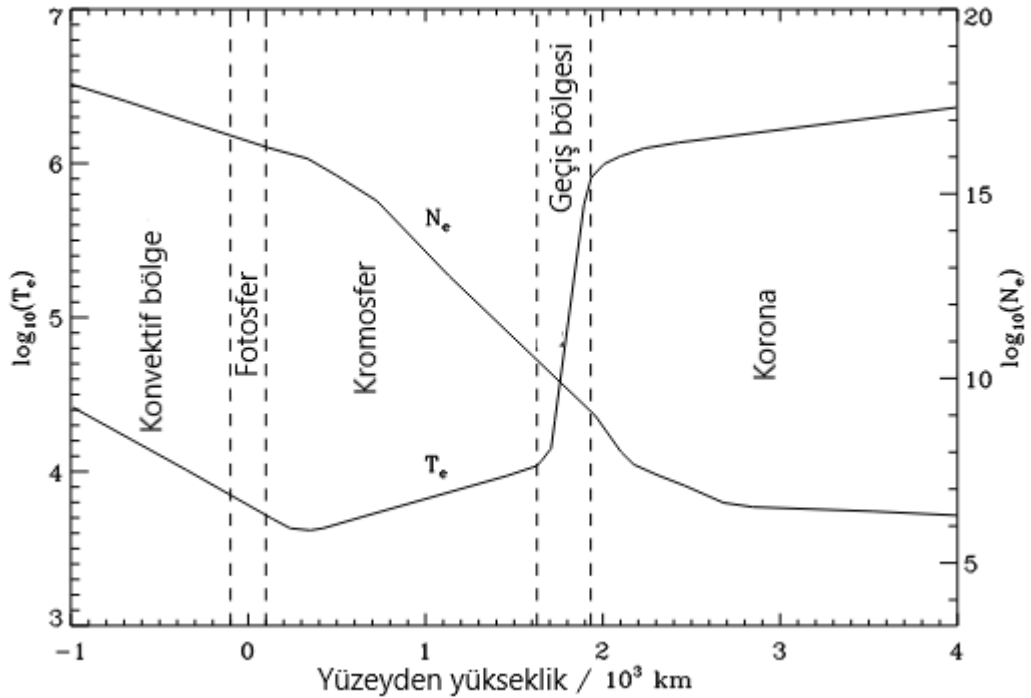
değiştirdiği öne sürülmüştür. Güneş yarıçapının %5'inden daha az kalınlığa sahip olan tachocline, Güneş'teki manyetik alanın kaynağı olarak düşünülebilir (Dikpati, 2006; Strugarek ve ark., 2023).

Opaklık, enerji taşınımında belirleyici bir rol oynamaktadır. Opaklık arttıkça sıcaklık gradyanı (sıcaklık değişimi olarak söylemek mümkündür) artar ve bu artış radyatif taşınımı etkisiz hale getirir. Konvektif bölgenin tabanında 2.2 MK olan sıcaklık, fotosfer yani Güneş'in görünen atmosfer tabakası sınırında 5777 K'e kadar düşer. Konvektif bölge 0.71 $R_{\odot}$ 'ten Güneş yüzeyine uzanan, konvektif bölgenin tabanına kadar ışınlama ile taşınan enerjinin artık konveksiyon ile taşınmaya başladığı bölgedir. Sıcak plazma hücresi yukarı doğru yükselir ve soğuduktan sonra aşağı doğru hareketine devam eder. Konveksiyon ile fotosfere ulaşan plazma hücresi, granül adı verilen yapıları oluşturur. Bu bölgenin bir diğer özelliği çekirdek ve radyatif bölge gibi bir dönüşe sahip olmamasıdır. Çekirdek ve radyatif bölge, katı cisim dönmesi gibi bir hareket sergilerken konvektif bölgede dönüş, diferansiyel dönme adı verilen şekilde gerçekleşir (Howe, 2009). Diferansiyel dönme, Güneş'in ekvatorunun (yaklaşık 25 gün) ve kutup bölgelerinin (yaklaşık 35 gün) farklı dönüş hızına sahip olmasıdır.



Şekil 2.4. Güneş merkezinden atmosfere doğru yoğunluk ve sıcaklığın yarıçapa bağlı değişimi (Alberta Üniversitesi, Güneş'in iç yapısı ders notundan alınarak düzenlenmiştir.)

Güneş'in iç yapısının bir parçası olan konvektif bölgenin bitiminde, Güneş atmosferi başlar. Güneş atmosferi, elektromanyetik spektrumun tüm bölgelerinde ışıma yapar. Farklı fiziksel özelliklere, yüksekliklere ve sıcaklıklara sahip üç temel (fotosfer, kromosfer, korona) atmosfer ve bir geçiş bölgesi bulunmaktadır. Güneş atmosferinde sıcaklık, yükseklikle artış gösterirken (fotosferin tabanından kromosferin tabanına kadar olan bölge hariç; bu bölgede sıcaklık yükseklikle azalır), yoğunlukta azalma meydana gelir (bkz, Şekil 2.5). Her bölge, farklı gözlem teknikleriyle, uygun filtrelerle gözlenir ve her bölgede gözlem tekniğine göre farklı yapıları görmek mümkündür. Örneğin fotosferde; güneş lekeleri, fotosferik plaj alanları, granülasyon gibi yapılar gözlenirken kromosferde; güneş patlamaları ve prominensler gibi yapılar gözlenir. Koronada gözlenen başlıca yapılar ise koronal luplar ve koronal kütle atımlarıdır.



Şekil 2.5. Güneş atmosferinde yüksekliğe bağlı olarak sıcaklık (T_e ; K) ve yoğunluk (N_e ; cm^{-3}) değişimi (Gallagher, 1999; Long, 2012)

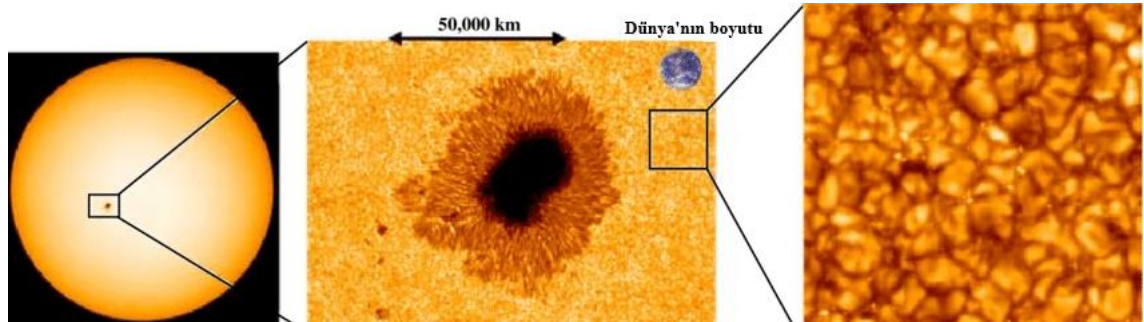
Fotosferi, Güneş'in görünür yüzeyi olarak tanımlamak mümkündür. Nötral yoğunluk filtreler kullanılarak basit bir teleskopla doğrudan fotosfer gözlemi yapılabilmektedir. Ortalama kalınlığı 500 km olup, Güneş yarıçapına göre kıyaslandığında oldukça ince bir katman olduğunu söylemek yanlış olmaz. Radyatif ve konvektif bölgeyi uzun yıllar sonra terk eden foton, bu bölgeye ulaştıktan sonra, gezegenler arası ortamdan rahatlıkla Dünya'ya ulaşabilir durumdadır. Bu bilgi ışığında, Güneş ışıınının %90'ının neden bu bölgeden geldiği anlaşılır hale gelir.

Kenar kararması ve özellikle konvektif taşınma kaynaklı meydana gelen granülasyon, fotosfer katmanında en iyi gözlenen yapılardır. Güneş diskinin merkezi daha sıcak ve daha parlak iken disk kenarlarına doğru bakıldığında daha soğuk ve daha sönük bölgelerle karşılaşılır. Buna ek olarak gözlemcinin bakış doğrultusuna göre; Güneş diskinin merkezinden gelen fotonlar, disk kenarından gelen fotonlara kıyasla Güneş atmosferinde daha az yol kat etmektedir. Bu durumun sonucu olarak Güneş disk merkezi, disk kenarına göre daha parlak görülür. Buna kenar kararması adı verilir. Ortalama yüzey sıcaklığı 5800 K'dir ve kromosfer tabanına doğru gidildikçe bu sıcaklık değerinde azalma görülmektedir.

Fotosferde gözlenen en belirgin yapılar; güneş lekeleri, granüller ve plaj alanlarıdır.

Güneş lekeleri: Güneş aktivitesinin bilinen en iyi göstergelerinden biri olan Güneş lekeleri, Güneş'in yoğun manyetik alanı ile plazması arasındaki etkileşimin bir sonucudur. Güneş lekeleri disk üzerinde genellikle gruplar halinde bulunurlar. Güneş lekesindeki manyetik alanlar, güneş yüzeyi yakınındaki plazmanın konvektif akışını bastırarak kadar güçlüdür ve bölgeye olan ısı akışını azaltır (Şahin, 2023). Yüzey sıcaklığı ortalama 5800 K iken bir güneş lekesinin sıcaklığı ortalama 4000 K'dir. Ömürleri, birkaç günden birkaç aya kadar değişkenlik gösterir ve en sonunda kaybolurlar. Gelişmiş bir güneş lekesi iki kısımdan oluşur: birisi umbra ismi verilen, daha koyu görünen bölge; diğeri, penumbra adı verilen daha açık görünen bölgedir (Şekil 2.6, orta). Umbrada manyetik alan dikey ve güçlü iken, penumbrada eğimli bir halde bulunmaktadır ve nispeten zayıftır (Shapiro ve ark., 2019).

Güneş lekelerinin ilk gözlemleri, teleskobun icadına kadar dayanır (1610). Dolayısıyla en uzun süreli Güneş aktivite göstergesi verisidir. Şekil 2.7'de de görüleceği üzere ortalama 11 yıllık bir çevrimselliğe sahiptir. Bu çevrimselliği ilk kez Schwabe (1849) keşfetmiş olup, Johann Rudolf Wolf tarafından günlük güneş lekelerinin kayıtları daha eski yıllara kadar uzatılmaya çalışılmıştır (Wolf, 1861). Schwabe, 10 yıllık bir çevrimsellik olduğunu iddia etmiştir ancak Rudolf Wolf bu süreyi geliştirerek 11.2 yıla çıkarmıştır.



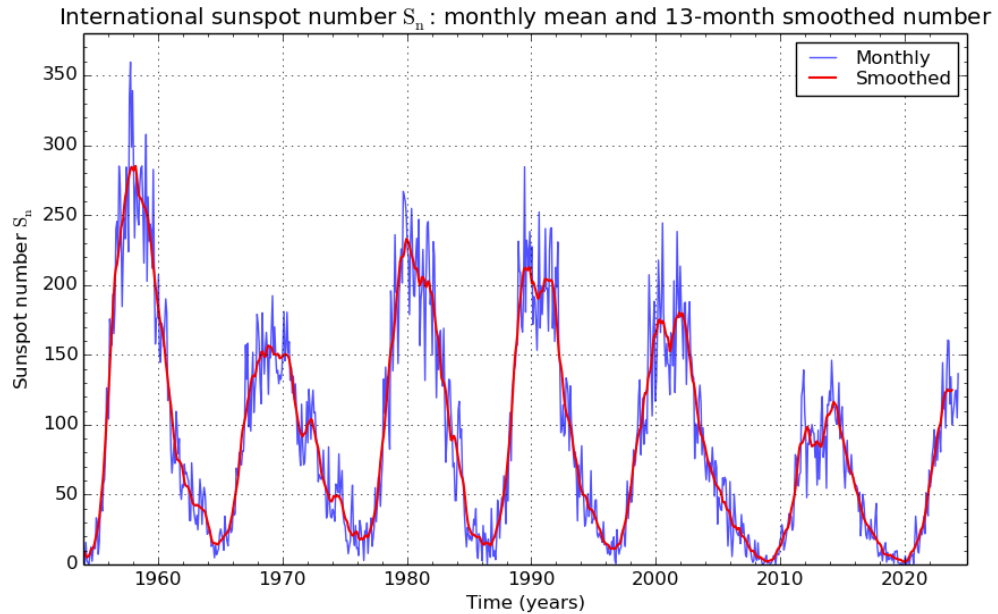
Şekil 2.6. Hinode optik teleskobu tarafından yakalanan güneş lekesi, fotosferde granül (sağda) adı verilen yapı (Tsuneta, 2011)

Güneş lekeleri, tek kutuplu bir nokta halinde yaşamına başlayıp sonrasında çift kutuplu bir hale gelebilir ve ilerleyen safhalarda karışık manyetik kutuplara sahip çok büyük güneş leke gruplarına evrilebilirler.

İsviçreli bir gökbilimci olan Rudolf Wolf, 1849 yılında Güneş üzerindeki güneş leke aktivitesine ilişkin bir tür niceliksel tahmin elde etmek için yalnızca lekelerin sayısının değil leke gruplarının sayısının daha doğru sonuç vereceğini düşünerek, şu anda iyi bilinen, Wolf rölatif güneş leke sayısı (R_z) denklemini literatüre eklemiştir (Kiepenheuer, 1953; Waldmeier, 1961; Hathaway ve ark. 2002):

$$R_z = k (10g + f) \quad (2.1)$$

Denklem 2.1’de f , boyutuna bakılmaksızın belirli bir zamanda görünür disk üzerindeki toplam leke sayısı, g ise leke gruplarının sayısı ve son olarak k faktörü, gözlemcinin lekeleri sayma ve gruplara ayırma yöntemine ve teleskopun açıklığına, kullanılan büyütme ve 'görme' koşullarına bağlı olan bir düzeltme katsayısıdır.

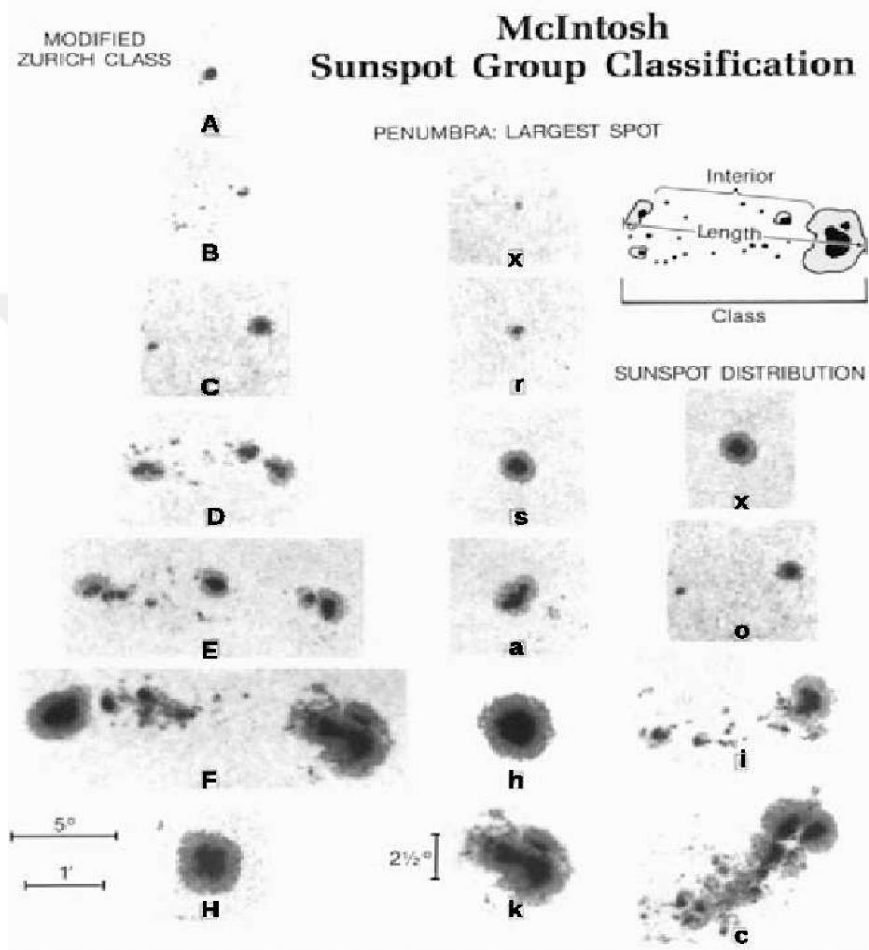


SILSO graphics (<http://sidc.be/silso>) Royal Observatory of Belgium 2024 May 1

Şekil 2.7. Güneş leke sayısının zamansal değişimi

Güneş Leke Grupları: Aynı manyetik akı topluluğuna ait güneş lekelerinin toplamı olarak tanımlanır. Tarihsel olarak, güneş lekeleri gruplarını sınıflandırmak için Mount Wilson, Zürih ve McIntosh sınıflandırmaları gibi çeşitli sınıflandırma sistemleri kullanılmıştır. Hale ve ark. (1919) tarafından tanımlanan Mount Wilson sınıflandırması, güneş lekelerinin manyetik alan özelliklerine odaklanır ve bunları Alfa, Beta, Gama,

Beta-Gama, Delta, Beta-Delta, Beta-Gama-Delta ve Gama-Delta gibi sınıflara ayırır. Waldmeier (1947) tarafından geliştirilen Zürih sınıflandırması, polarite konfigürasyonları, boyut, karmaşıklık, evrim, morfoloji ve güneş leke grupları içindeki penumbranın varlığı veya yokluğu gibi faktörlere dayanmaktadır (Eren ve ark, 2017). Zürih Sınıflandırması, A'dan J'ye kadar dokuz gruptan oluşur; F sınıfı en karmaşık, A sınıfı ise en az karmaşık olandır.



Şekil 2.8. McIntosh güneş lekeleri grubu sınıflandırması (McIntosh, 1990).

McIntosh Sınıflandırması, Zürih Sınıflandırması'ndan uyarlanarak güneş lekeleri ile güneş patlamaları, güneş leke alanları vb. diğer aktif olaylar arasındaki tutarsızlığın giderilmesi amacıyla geliştirilmiş ve bu sınıflandırma 1990 yılında McIntosh tarafından ortaya atılmıştır (McIntosh, 1990). Genel biçimi Zpc olan McIntosh sınıflandırmasında, Z, güncellenmiş Zürih sınıfı, p, penumbrayı tanımlayan ana leke tipini ve c, grubun iç kısmındaki kompaktlık derecesini tanımlar. Z bileşeni, lekenin morfolojisini ve evrimini tanımlar ve yedi sınıftan oluşur: A, B, C, D, E, F ve H. Penumbrayı tanımlayan p parametresi x, r, s, a, h ve k olmak üzere altı sınıftan oluşurken, güneş ara leke dağılımını açıklayan c parametresi x, o, i, ve c olmak üzere dört sınıftan oluşur (Şekil 2.8).

Z parametresinde;

A, penumbra içermeyen tek kutuplu gruptur, Güneş leke evriminin ilk veya son aşamasındaki grubu,

B, grup içerisindeki hiçbir lekede penumbra olmayan, çift kutuplu leke grubunu, C, grup içerisinde, kutuplardan birinde penumbralı leke bulunan öncü ve çift kutuplu leke grubunu,

D, grup içerisinde her iki kutupta da penumbralı leke bulunduran, boylamsal uzanımı $l \leq 10^\circ$ olan leke grubunu,

E, grup içerisinde her iki kutupta da penumbralı leke bulunduran, boylamsal uzanımı $10^\circ \leq l \leq 15^\circ$ olan leke grubunu,

F, grup içerisinde her iki kutupta da penumbralı leke bulunduran, boylamsal uzanımı $l > 15^\circ$ olan leke grubunu,

H, leke evriminin son aşamasını ve penumbraya sahip tek kutuplu leke grubunu ifade eder.

Penumbrayı tanımlayan p parametresinde;

x, penumbrasız lekeyi (genellikle A veya B grubu),

r, en büyük lekeyi çevreleyen, tam gelişmemiş, parçalı penumbrayı ifade eder. Tamamlanmamış, filament gibi bir yapıdan ziyade granüler yapıda olan, olgun bir penumbradan daha parlak görünen ve lekenin umbrasından olan uzaklığı 2200 km'den daha küçük olan penumbra grubudur. İlkel penumbralar genellikle lekenin ilk oluşumu ya da evriminin son aşaması esnasında gözlenir.

s, küçük ve simetriktir. En büyük leke, gelişmiş, koyu renkli, kenarlarında kısmen düzensizlik bulunan, filament gibi bir yapıya sahip, eliptik ya da dairesel penumbrası olan lekelerdir (penumbranın çapı $\leq 2.5^\circ$).

a, küçük ve asimetriktir. En büyük lekenin ana hattı düzensizdir ve içinde birden çok küçük umbra bulunur (penumbranın çapı $\leq 2.5^\circ$).

h, büyük ve simetriktir. Yapısal olarak s grubu ile aynıdır ancak penumbranın çapı 2.5° 'den büyüktür. Bu da alanının, Güneş yarıküresinin 250 milyonda birinden daha büyük olması anlamında gelir.

k, büyük ve asimetriktir. Yapısal olarak a grubuyla aynıdır ancak penumbranın çapı 2.5° 'den büyüktür ve alanı Güneş yarıküresinin 250 milyonda birinden büyüktür.

Son olarak Güneş leke sınıfı ara leke dağılımını tanımlayan c parametresinde;

x, tek kutuplu gruplar için tanımsızdır (A ve H sınıfı),

o, açık olan gruptur. Öncü leke ve artçı lekeler arasında çok küçük boyutlu ve çok az leke bulunmaktadır. E ve F grupları, açık sınıfa ait gruplardır.

i, ara olan gruptur. Öncü leke ve artçı lekeler arasında pek çok leke bulunmaktadır ancak bu lekelerin hiçbiri olgun penumbraya sahip değildir.

c, kompakt olan gruptur. Öncü leke ve artçı leke arasında sayıca fazla leke bulunmaktadır ve en az bir tanesinde olgun penumbra bulunmaktadır.

Granüller: Fotosferde gözlenen, konvektif akışların bir sonucu olan, ortalama boyutu yaklaşık 1000 km ve ortalama ömrü 5-9 dakika aralığında olan yapılardır (Hirzberger ve ark., 2001) (Şekil 2.6, sağ). Ancak patlayıcı granüllerin ömrü (exploding granules) normal granüllerden farklı olarak 10-15 dakika aralığında olabilir (Ellwarth ve ark., 2021). Granüller, Güneş yüzeyinin neredeyse tamamını kaplar (güneş lekeleri hariç), bu sebeple Güneş'te her an birkaç milyon granül bulunur.

Fotosferik plaj alanları: Beyaz ışık görüntülerinde, kenar kararması olayının bir sonucu olarak, disk kenarlarında gözlenen manyetik alanın yoğun olduğu parlak bölgelerdir. Güneş lekeleriyle benzer enlemlerde (± 35) gözlenir. Ortalama manyetik alanları 100-200 Gauss mertebesinde olup, lekelerden daha uzun yaşam sürelerine sahiptir.

Kromosfer, fotosferin üzerinde bulunan, normal şartlar altında radyasyon geçirgenliği olması kaynaklı gözlenmeyen bir katmandır. Özellikle tam güneş tutulmaları başlangıç ve bitişlerinde gözlenir. H-alfa ve Ca II gibi bazı spektral çizgilerde, özel filtreler yardımıyla da gözlenebilmektedir. Özellikle H-alfa (6563 Å) oldukça baskın kırmızı bir çizgidir ve kromosferi incelemenin en iyi yoludur. Ortalama yüksekliği 2500 km'dir ve yükseklikle artan sıcaklığı ve azalan yoğunluğu vardır. Kromosfer tabanında 4500 K olan sıcaklık, korona tabanında 20-30 bin K'e kadar çıkabilir.

Kromosferde gözlenen en önemli ve belirgin yapılar; güneş patlamaları, prominenslerdir.

Güneş patlaması (SF): Genellikle manyetik alanların güçlü olduğu bölgelerde, özellikle de güneş lekeleri, güneş leke grupları civarında meydana gelen, Güneş yüzeyindeki parlaklığın ani artışıdır. Manyetik yeniden bağlanma sürecinde gerçekleşmesi çok daha olasıdır. Patlama esnasında, milyonlarca Kelvin'e kadar ısıtılan madde, manyetik alanı yenerek dış uzaya salınır. Şiddetli patlamalar esnasında yaklaşık 10^{25} Joule enerji açığa çıkarken tipik patlamaların ortalama enerjisi 10^{20} Joule'dir. Patlamaların olduğu bölgede sıcaklık 10-20 MK civarındadır. Gözlemlenen dalga boyuna bağlı olarak güneş patlamaları iki farklı şekilde sınıflandırılır: H-alfa (Çizelge 2.2) ve X-ışını sınıflandırmaları (Çizelge 2.3).

Çizelge 2.2. H-alfa sınıflandırması (*f: faint (zayıf), n: normal, b: bright (parlak), <https://www.noaa.gov/>)

Parlaklık sınıfı	Patlamanın alanı (A)		Parlaklığı
	Gerçek (derece ²)	Görünür (Güneş yarı küresinin milyonda biri)	
S	A < 2	A < 200	f,n,b*
1	2.1 < A < 5.1	200 < A < 500	f,n,b
2	5.2 < A < 12.4	500 < A < 1200	f,n,b
3	12.5 < A < 24.7	1200 < A < 2400	f,n,b
4	A > 24.7	A > 2400	f,n,b

Çizelge 2.2’de gerçek alan, derece² birimi cinsinde, görünür alan ise Güneş diskinin milyonda biri cinsinde verilmiştir. Bu sınıflandırma sistemine göre 4b en parlak sınıf, 1f ise en sönük sınıftır.

Çizelge 2.3. X-ışını sınıflandırması (Bhatnagar ve Livingston, 2005)

Sınıf	Pik akısı (1-8 Å, w/m ²)
A	10 ⁻⁸ -10 ⁻⁷
B	10 ⁻⁷ -10 ⁻⁶
C	10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁵
M	10 ⁻⁵ -10 ⁻⁴
X	>10 ⁻⁴

Çizelge 2.3’te güneş patlamalarında X-ışını sınıflandırılması verilmiştir. Burada görülen X hariç her sınıfta (A, B, C, M) dokuz adet alt sınıf bulunmaktadır ve verilen akı değerleri logaritmiktir. Yani, M6 tipi bir patlamanın C6 tipi bir patlamadan on kat, M3 tipi bir patlamadan iki kat daha enerji içerdiği anlamına gelir (Pietrow, 2022).

Prominensler: H-alfada Güneş diskinin kenarına bakıldığında çok rahatlıkla, ayrıntılı şekilde görülebilecek olan yapılardır. Manyetik alan lupları ile Güneş yüzeyinde asılı duran düşük yoğunluklu madde bulutu olarak düşünülebilir. Disk kenarında gözlemlendiğinde adı prominens iken, disk üzerinde gözlemlendiğinde adı filament olarak literatürde yer alır.

Kromosfer ve korona arasında bir geçiş bölgesi bulunur. Kalınlığı 100 km'nin altındadır ve Şekil 2.5'te de görüleceği üzere bu bölgede sıcaklıkta ani bir artış meydana gelir. Kromosferde on binler mertebesinde olan sıcaklık, koronada milyon mertebesine çıkar. Bu bölgenin etkileri, sıcaklığın bu denli artışının sebebi hala gizemini korumaktadır (Song ve ark., 2023).

Korona, Güneş atmosferinin en üst katmanı olup, uzantısı olan Güneş rüzgarlarıyla Dünya'ya kadar ulaştığı bilinmektedir. Fotosferin yüksek ışıınımı sebebiyle doğrudan gözlemesi mümkün olmayan bir tabakadır ve ancak tam güneş tutulması esnasında doğrudan gözlenebilir. Koronograf gibi bazı özel aletler aracılığıyla gözlemek de olasıdır. Koronada sıcaklığın milyon mertebesinde olması sebebiyle atomların çoğu yüksek derecede iyonize olmuş durumdadır. Yoğunluk da bu sebeple oldukça düşüktür. Korona, Schwabe çevrimine bağlılık gösterir; maksimum döneminde kutuplardan basık ve ekvator boyunca uzamış haldeyken, minimumda, Güneş diski etrafında dairesel bir şekilde bulunur. Başka bir deyişle, koronanın yapısı Güneş'in manyetik alanı tarafından belirlenir.

Koronada gözlenen en önemli yapılar; koronal delikler, koronal kütle atımlarıdır.

Koronal delikler (CH): Güneş'in en karanlık ve en az aktif bölgeleri olan delikler hem Güneş diski üzerinde hem de disk kenarında gözlenebilir. Koronal delikler hızla genişleyen açık manyetik alanlarla ve yüksek hızlı güneş rüzgarının hızlandırılmasıyla ilişkilidir (Cranmer, 2009). Plazma, açık manyetik alan çizgileri sayesinde Güneş'ten dış uzaya sürekli bir şekilde salınır. Hızlı güneş rüzgarları da bu bölgelerden kaynaklanmaktadır.

Koronal Kütle Atımları (CME): Güneş koronasından çok büyük miktarda plazma ve buna eşlik eden manyetik alan salınımı olarak tanımlanabilir. Çoğunlukla güneş patlaması ardından gerçekleşir ya da bir filament veya prominens patlaması kaynaklı CME gözlenir. Koronograf yardımıyla CME'ler gözlenebilmektedir. Diğer aktif güneş olaylarıyla ilişkili olduğu bilinmektedir (Munro ve ark.,1979). Koronal kütle atımları kademeli SEP'lerin başlıca kaynağıdır.

2.2. Uzak Havası

Güneş-Dünya etkileşimi alanındaki ilk adımlar, Mart 1716'da Avrupa'da gerçekleşen auroraların¹ ardından, Dünya'nın manyetik alan çizgileri boyunca hareket eden parçacıkların auroraya neden olduğunu öne süren Edmund Halley tarafından atılmıştır (Pulkkinen, 2007). Ancak bu etkileşimin net olarak anlaşılabilmesi 1859 yılında mümkün olabilmektedir. 1859'da Richard Carrington ve Richard Hodgson, bağımsız olarak bir güneş patlaması ve ardından gelen bir CME'yi gözlemlemiş ve bunun jeomanyetik aktivite ile ilişkili olabileceğini öne sürmüştür. Günümüz teknolojisi sayesinde, artık jeomanyetik aktivitenin CME ve güneş patlaması gibi olayların Dünya'nın manyetosferiyle etkileşiminden kaynaklandığı kabulü vardır. Uzak havası kavramı tam da bu noktada devreye girmektedir. Nihai kaynağı Güneş olan uzak havası, Güneş'teki, gezegenler arası ortamdaki ve manyetosfer-iyonosfer-termosfer sistemindekiler de dahil olmak üzere uzak ortamındaki dinamik, oldukça değişken koşulları ifade eder (Baker, 1998). Bu değişkenlik, Dünya'ya yakın uzak ortamında bulunan uzak araçlarında, yer tabanlı sistemlerde zaman zaman problemlere sebep olabilir. Eastwood ve ark. (2017) tarafından verilen bilgiye göre tipik olarak üç ana uzak havası türü bulunmaktadır: radyo kesintileri (radio blackouts, R), güneş fırtınaları (solar radiation storms, S) ve jeomanyetik fırtınalar (geomagnetic storms, G) (bkz. Çizelge 2.4).

Çizelge 2.4. Uzak havası türleri ve özellikleri. 1'den 5'e kadar olan skala, düşük şiddetten yüksek şiddete doğru gitmektedir, örneğin; G1, düşük şiddetli bir jeomanyetik fırtınayı işaret ederken, G5 yüksek şiddetli bir jeomanyetik fırtınayı göstermektedir (Eastwood ve ark., 2017)

Uzak Havası Türleri	Fiziksel Sebebi	Fiziksel Ölçümü
Radyo kesintileri R1 → R5	Güneş patlamaları: X-ışını emisyonu	Güneş X-ışını akısı
Güneş fırtınaları S1 → S5	CME ve güneş patlamasıyla ivmelendirilen SEP'ler	SEP akısı
Jeomanyetik fırtınalar G1 → G5	CME'ler, güneş rüzgarları	Jeomanyetik indeks

¹ Auroralar, 11 yıllık güneş aktivite çevrimini takip eder ve özellikle Dünya'nın kutup bölgelerinde Güneş-Dünya etkileşiminin Dünya üzerinde gözle görülür bir fenomenidir. Güneş'ten, güneş rüzgarlarıyla gelen yüklü parçacıklar üst atmosfere girer ve yüklü parçacıkların üst atmosferde etkileştiği atom ve moleküle göre çeşitli renklerde ışık yayar.

Uzay havasını anlayabilmek, olası tehditlerin önüne geçebilmek için iyi anlaşılması gereken iki kavram vardır: galaktik kozmik ışınlar (GCR) ve SEP'ler.

Galaktik Kozmik Işınlar (GCR): Dünya'ya sürekli olarak yüklü parçacık bombardımanı halinde olan, galaksideki enerji yoğunluğuna 1 eV cm^{-3} katkıda bulunan, yüksek enerjili parçacıklardır. Blasi'ye (2013) göre çoğunlukla %10 oranında helyum çekirdeği ve daha az miktarda ağır element içeren hidrojen çekirdeklerinden oluşur. Elektron ve pozitronlar sayıca az olmasına rağmen GCR kaynağını ve manyetik alan sayesinde taşınması hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır (Mechbal ve ark., 2020). GCR'lerin enerji aralığı 10^8 - 10^{10} eV/nükleon olup, nükleer olarak karbondan aktinitlere kadar radyoaktif elementleri bünyesinde barındırır (Hayakawa ve ark. 1958; Mewaldt, 1994).

Güneş Enerjili Parçacıklar (SEP): Dünya yakınındaki enerjik parçacık yoğunluğunun kinetik enerjisi $<100 \text{ MeV}$ olan nispeten düşük enerjili kısmına hâkim olan SEP'ler (Vainio, 2009), koronadaki birkaç yüz eV olan ortalama termal enerjinin çok üzerindeki enerjilerde elektronların, protonların ve ağır iyonların parçacık akışlarının uzayda belirgin artışlarıdır (Klein ve Dalla, 2017). SEP'lerin bileşimi (proton, elektron vs) birkaç saatten birkaç güne kadar değişen sürelerle, bir olaydan diğerine çeşitli büyüklük derecelerini kapsayan önemli farklılıklar sergiler (Raukunen ve ark., 2020). SEP olaylarının ana alt sınıfı olan Güneş Proton Olayları (SPE'ler), özellikle enerjileri $>10 \text{ MeV}$ olan protonlarla karakterize edilir. Zaman zaman tehlikeli olabilen SEP olaylarındaki parçacıklar, iki farklı mekanizma yoluyla hızlandırılır: Biri, güneş patlamaları sırasında manyetik yeniden bağlanma ile tetiklenir ve itici SEP'lere yol açar; diğeri ise daha büyük kademeli SEP olaylarıyla sonuçlanan hızlı koronal kütle atımı (CME) şok dalgaları tarafından tetiklenir.

Güneş patlamaları sırasında manyetik yeniden bağlanma süreci meydana gelir. Bu süreç, Güneş'in yüzeyindeki manyetik alan çizgilerinin kırılması ve ardından yeniden bağlanmasıdır. Manyetik yeniden bağlanma, SEP'in hızlandırılmasında çok önemli bir rol oynayan ve "itici" olarak bilinen olayların birincil kaynağıdır. Bir başka parçacık hızlandırıcı ise "kademeli" olaylar olarak bilinen CME'ler tarafından yönlendirilen şok ivmelenmesiyle ilişkilidir (Desai ve Giacalone, 2016). Sıcaklığı $3 \times 10^7 \text{ K}$ olan bir bölgeden kaynaklanan itici olaylar, kısa zaman ölçekleri, yüksek elektron-proton ve $^3\text{He}/^4\text{He}$ oranları ve yüksek iyonlaşma durumu ile karakterize edilir (Klein ve Posner, 2005). Öte yandan, $3 \times 10^6 \text{ K}$ 'lık bir kaynak bölgesiyle karakterize olan kademeli olaylar, daha uzun zaman ölçekleri, koronal veya gezegenler arası şoklar, yüksek proton yoğunlukları, güneş koronasına benzer enerjik bileşimler ve karşılık gelen yük durumları sergiler (Klein ve Posner, 2005; Reames, 1995).

Bu olayların, yaşamın, teknolojinin ve biyolojik organizmaların çeşitli yönleri üzerinde potansiyel olumsuz sonuçlar doğurduğu tespit edilmiştir (Ali ve ark., 2024). Baker'dan (1998) alınan bilgiye göre, kesin maliyetlerin doğru olarak değerlendirilmesi zor olsa da

genel olarak uzay havasından kaynaklanan sosyal ve ekonomik kayıpların her yıl on milyonlarca dolara eşdeğer olduğuna inanılmaktadır (National Space Weather Strategic Plan, 1995). Uzay havası tahmininde yapılacak olan iyileştirmeler, bu tür problemlerin önüne geçmekte fayda sağlayacaktır. Ancak Eastwood ve ark. (2017) göre, bu noktada iki zorluk bulunmaktadır: Birincisi, modern toplum henüz Carrington düzeyinde bir olay yaşamamıştır ve dolayısıyla ekonomik etkilerinin tahmini kaçınılmaz olarak belirsiz kalacaktır. İkincisi, teknik etkilerin ölçülmesi temel olarak sanayinin uygun verileri sağlamasıyla mümkündür ve bu çoğu zaman ticari hassasiyetlerle ters düşmektedir. Öte yandan Sicard-Piet ve ark. (2016)'ya göre, Kasım 2003'te yaşanan Halloween olayı, şiddeti açısından ve Oughton'a (2021) göre 1989'da yaşanan Quebec radyo kesintisi, ekonomik etkileri açısından Carrington olayıyla karşılaştırılabilir durumdadır. Fakat yine de uzay havası tahmininde zorluklar devam etmektedir.



3. MATERYAL VE METOT

Tez çalışması kapsamında; 1996 Temmuz- 2020 Mart arası için National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)'ya ait Space Weather Prediction Center (SWPC)'dan alınan güneş leke grupları, X-ışını güneş patlamaları, SEP'ler ve listelenen 128 adet güneş proton olayı (SPE) verileri kullanılmıştır.

SWPC'de her gün 00.30 UT'de (Evrensel Zaman) günlük olarak derlenen Güneş Bölgesi Özeti (Solar Region Summary-SRS) şu anda güneş diskinde görülebilen aktif bölgelerin ayrıntılı bir açıklamasını içerir (bkz. Şekil 3.1). Her aktif bölgenin özellikleri, SWPC'ye neredeyse gerçek zamanlı olarak rapor veren altı gözlemevinden derlenmektedir. 1996 yılında Space Environment Services Center (SESC)'dan veri olarak NOAA-SWPC bünyesinde yayınlanırken, şu an NOAA-SWPC'ye ait Space Weather Observations (SWO)'dan veri sağlamaktadır.

```
|Product: 19980127SRS.txt
:Issued: 1998 Jan 27 0030 UTC
# Prepared jointly by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA,
# Space Environment Center and the U.S. Air Force.
#
JOINT USAF/NOAA SOLAR REGION SUMMARY
SRS NUMBER 27 ISSUED AT 0030Z ON 27 JAN 1998
REPORT COMPILED FROM DATA RECEIVED AT SWO ON 26 JAN
I. REGIONS WITH SUNSPOTS. LOCATIONS VALID AT 26/2400Z
NMBR LOCATION LO AREA Z LL NN MAG TYPE
8142 S22W49 349 0120 DSO 08 08 BETA
8143 S36E23 277 0250 FSI 17 17 BETA-GAMMA
8144 N13E23 277 0000 AXX 00 01 ALPHA
8145 N28E35 265 0020 BXO 06 05 BETA
8146 N15E34 266 0030 BXO 06 07 BETA
8147 S24W10 310 0000 AXX 00 01 ALPHA
IA. H-ALPHA PLACES WITHOUT SPOTS. LOCATIONS VALID AT 26/2400Z JAN
NMBR LOCATION LO
8139 N19W75 016
8141 N26W47 347
II. REGIONS DUE TO RETURN 27 JAN TO 29 JAN
NMBR LAT LO
NONE
```

Şekil 3.1. SWPC tarafından günlük olarak derlenen SRS verilerine bir örnek
(<https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-region-summary>)

Şekil 3.1'de I'de bulunan NMBR sütunu, SESC tarafından atanan bölge numarasını işaret eder, Temmuz 2002'de beş basamaklı sayılara ulaştığı için başında sıfırlar bulunan dört basamağa indirgenerek kullanılmaya başlanmıştır. LOCATION sütununda, leke grubunun helyografik enlem ve boylama göre konumu bulunur. LO sütununda, leke grubunun Carrington boylamı bulunurken, AREA'da Güneş yarımküresinin milyonda biri cinsinden güneş leke grubunun toplam alanı

bulunmaktadır. Z sütunu; modifiye edilmiş Zürih sınıfını, LL sütunu; grubun helyografik derece cinsinden boylamsal uzanımını, NN; gruptaki görünür güneş lekelerinin toplam sayısını ve son olarak MAG TYPE da grubun manyetik sınıflandırması hakkında bilgi verir. SRS dosyasının Z sütunundan ilgili lekenin Zürih sınıfı elde edilmiştir.

```
[Product: 19971119SGAS.txt
:Issued: 1997 Nov 19 0245 UTC
# Prepared jointly by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA,
# Space Environment Center and the U.S. Air Force.
#
JOINT USAF/NOAA SOLAR AND GEOPHYSICAL ACTIVITY SUMMARY
SGAS NUMBER 323 ISSUED AT 0245Z ON 19 NOV 1997
THIS REPORT IS COMPILED FROM DATA RECEIVED AT SWO ON 18 NOV
A. ENERGETIC EVENTS
BEGIN MAX END RGN LOC XRAY OP 245MHZ 10CM SWEEP
0023 0023 0023 130
0049 0049 0049 220
0829 0845 0911 8108 N18E26 B3.8 SF 150
1202 1609 1801 340
B. PROTON EVENTS: NONE
C. GEOMAGNETIC ACTIVITY SUMMARY: QUIET TO ACTIVE.
D. STRATWARM: NONE
E. DAILY INDICES:
10 CM 092 SSN 071 AFR/AP 008/009 X-RAY BACKGROUND B1.3
DAILY PROTON FLUENCE (FLUX ACCUMULATION OVER 24 HRS)
GT 1 MEV 3.7E+05 GT 10 MEV 1.7E+04 P/(CM2-STER-DAY)
```

Şekil 3.2. SWPC tarafından günlük olarak derlenen SGAS verilerine bir örnek (<https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-and-geophysical-activity-summary>)

X-ışını güneş patlamalarının ve SEP'lerin elde edildiği SWPC dosyası ise Güneş ve Jeofizik Aktivite Özeti (Solar and Geophysical Activity Summary, SGAS), Şekil 3.2'de görülmektedir. SGAS'de derleme her gün 02.45 UT'de yapılır ve güneş patlamaları, proton olayları, jeomanyetik aktivite ve stratosferik ısınma uyarıları da dahil olmak üzere önceki güne ait güneş ve jeofizik olaylarının ve endekslerinin kısa bir listesini sunar. Bölüm A'da bulunan BEGIN, MAX ve END gerçekleşen olayın başlangıcını, maksimum ve bitiş zamanını gösterir. RGN; olayın orijinlendiği SESC numarasını, LOC; helyografik enlem ve boylamı ifade eder. XRAY ve OP, yukarıda anlatıldığı üzere güneş patlamasının sınıfını gösterir. 245 MHz ve 10CM önemli radyo emisyonunu gösterir. Bölüm B'de >10 MeV proton akışı gerçekleşirse, bu olayın başlangıç, maksimum ve bitiş zamanını, proton miktarını, ilişkili olduğu fenomeni² ve fenomenin helyografik enlem ve boylamını gösterir. Burada bulunan proton olayları (SPE), NASA tarafından düzenlenmiş olup (<https://umbra.nascom.nasa.gov/SEP/>), çalışmada kullanmak amacıyla doğrudan alınmıştır. Bölüm E, tez kapsamında kullanılan son veri setinin alındığı kısımdır. Burada DAILY PROTON FLUENCE

² Güneş patlaması, CME, filament vd.

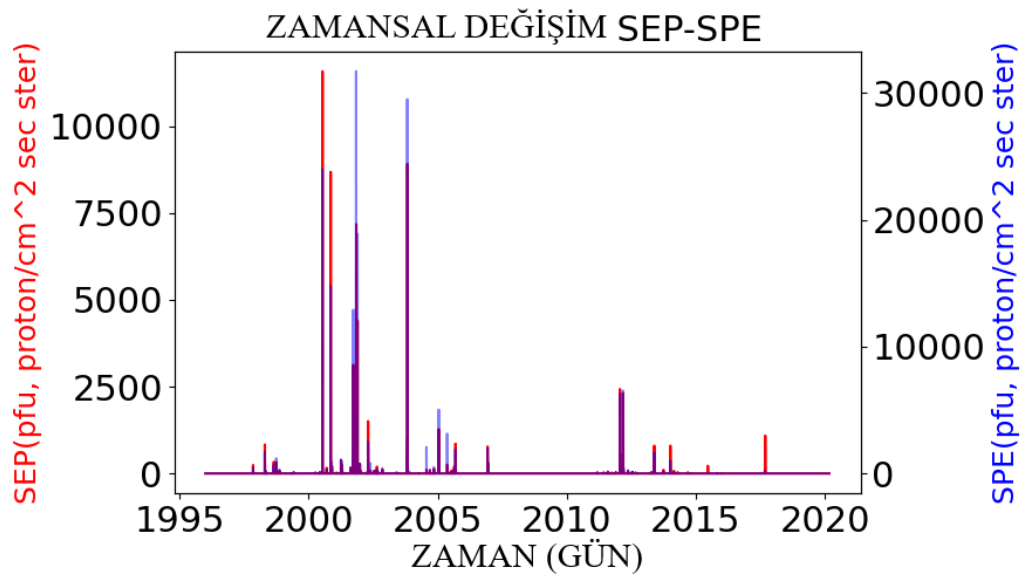
olarak görülen veri, jeosenkron yükseklikte >1 MeV ve >10 MeV protonlar için günlük proton akış bilgisini sağlamaktadır. Proton olayları ve günlük proton akışında birim olarak proton akı birimi (proton flux unit, pfu = proton/cm² sec str) kullanılmaktadır. 1996 yılında NOAA uydusu olan Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) ile veri sağlamaya başlamıştır. İlgilenilen tarihlerde GOES-8 (1994-2004) ile verileri yayınlarken, 2020 yılında GOES-14 (2009-2020) misyonuyla veri sağlamıştır.

Veride üç günden fazla olmayan bazı eksiklikler saptanmıştır. Bu eksiklikleri gidermek adına kübik spline interpolasyon metodu kullanılmıştır. Temelde kübik spline, verilen noktalar arasındaki her bir aralığa üçüncü dereceden bir polinom uydurarak çalışır. Veri alınmış günlerin sayısının çok olması; her aralığın uzunluğunun azalması ve üçüncü dereceden polinomun kısa aralığı daha doğru temsil etmesi sebebiyle avantajlıdır. Ancak, doğruluktan uzaklaşmamak adına bazı kısıtlamalar olmak zorundadır. Buna göre üçüncü dereceden kübik spline polinomları şu şekildedir:

$$s_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3 \quad (3.1)$$

Denklem 3.1'e göre dört adet katsayı gerekmektedir (a_i, b_i, c_i, d_i). Polinomun tekil hale gelebilmesi için de dört denklem olmalıdır. Tekil olmaması, verilen noktalardan sonsuz adet üçüncü dereceden denklem geçeceği anlamına gelir ki bu da doğru bir şekilde sonuçlanmayacaktır (Ankara Üniversitesi, Açık Ders Notu).

Gerekli düzeltmeler yapıldıktan sonra SRS ve SGAS verileri birleştirilerek tez çalışmasında kullanılmak üzere hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.3. SEP ve SPE'nin zamansal değişim grafiği

Çalışmanın ilk aşamasında, SEP ve SPE'nin zamansal değişimi karşılaştırılmış, korelasyon katsayısı hesaplanmıştır (Şekil 3.3). Bu noktada zamansal değişim analizi, SEP ve SPE arasındaki trendi ve uyumu görmek amacıyla uygulanmıştır.

Şekil 3.3'e göre SEP ve SPE oldukça uyumlu görünmekte olup, korelasyonu da yüksek bulunmuştur ($r=0.8$).

Hem SEP hem de X-ışını güneş patlaması verileri için aylık ortalamalar hesaplanmıştır. Aylık ortalamalar, histogramlar için kullanılmıştır. Histogramlar aracılığı ile verilerin dağılımları gösterilmiş ve iki veri setinin arasındaki ilişkinin anlaşılması görsel olarak kolay hale getirilmiştir. Histogram kullanımında, özellikle sayısal olarak birbirinden çok farklı verilerde bir normalizasyon uygulanarak, karmaşık veri setlerinin analizini daha basit hale getirme amacı güdülmektedir.

Ardından, olası gecikmeli iki veri seti arasındaki ilişkinin derecesini ve gecikme miktarını hesaplamak için günlük verilerle çapraz korelasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Çapraz korelasyon analizi, Pearson korelasyon analizinden farklı olarak, iki değişken arasındaki zaman gecikmesini, değişkenler arasındaki birbirini takip etme durumunu da ortaya çıkarır. Çapraz korelasyon fonksiyonu (CCF) kısaca şu şekilde verilir (Welsh, 1999):

$$CCF(\tau) = \int x(t)y(t + \tau) dt \quad (3.2)$$

Denklem 3.2'de t ; zamanı, τ ; zaman gecikmesini ve x ve y de farklı zaman dilimlerinde alınmış olan verileri ifade eder.

SPE'ler çalışmanın bu kısmında ele alınmıştır. İncelenen 128 SPE'nin kaynağı tespit edilmiş olup hangi güneş leke grubunun ya da patlama sınıfının daha çok SPE ürettiği üzerinde analizler yapılmıştır.

Son olarak kübik spline kullanılarak düzeltilmiş günlük veride Multi-Taper Metot (MTM) periyot analiz yöntemi kullanılarak periyot analizi yapılmıştır. Kübik spline yapılmasının en büyük gerekliliği MTM analizi kısmında ortaya çıkmıştır. MTM analizi, sürekli veri koşuluyla iyi şekilde çalışmaktadır. Thomson (1982) tarafından geliştirilmiş olan bu metot, bir dizi tepe kullanarak spektral tahminlerin varyansını azaltmak için geliştirilmiştir (Thomson, 1982; Ghil ve ark.,2002; Bansal ve ark. 2006). Bu yöntem özellikle kısa, gürültülü ve çok değişkenli zaman serilerinde istatistiksel önemi olan düşük genlikli harmonik salınımların tespit edilmesinde kullanışlıdır (Ghil, 1997). Bu yöntemle, F testinin³ başarısız olması durumunda daha büyük genlikli harmonikler de reddedilebilir ki bu, hata çubuklarının pik genlikleriyle ölçeklendiği diğer klasik yöntemlere göre MTM'nin temel avantajıdır (Kılçık ve ark., 2020). Multi-

³ F testi, istatistikte, iki veya daha fazla veri setinin aynı varyansa sahip olup olmadığını anlamak için uygulanan bir testtir.

taper güç spektrumu (P), veri setinde pek çok tepe kullanılarak hesaplanan spektrumların ortalamasıdır ve şu şekilde gösterilebilir:

$$\hat{P}(k) = \|Y_r(k)\|^2 \quad (3.3)$$

Denklem 3.3'e göre $Y_r(k)$; tepe sinyalinin ayrık Fourier dönüşümü olup aşağıdaki bağıntıyla verilir:

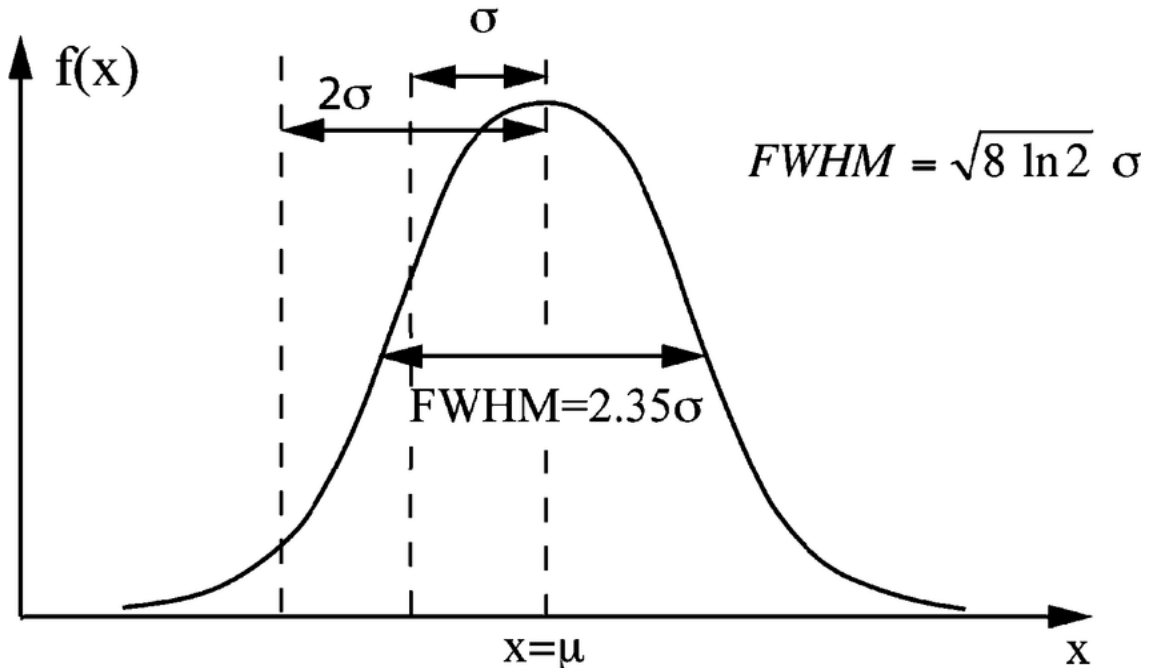
$$X(t)w_r(t): t = 1, \dots, N \quad (3.4)$$

Denklem 3.4'te $X(t)$ verilen sinyal iken; $w_r(t)$ ise r'inci koniktir (Bansal ve ark. 2006).

Bu çalışmada MTM periyot analizinden elde edilen anlamlı periyotların hata hesabını yapmak için Lou ve ark. (2003) tarafından geliştirilen hata hesaplama yöntemi kullanılmıştır (Denklem 3.5).

$$\Delta P = -P \frac{\Delta \omega}{\omega} \quad (3.5)$$

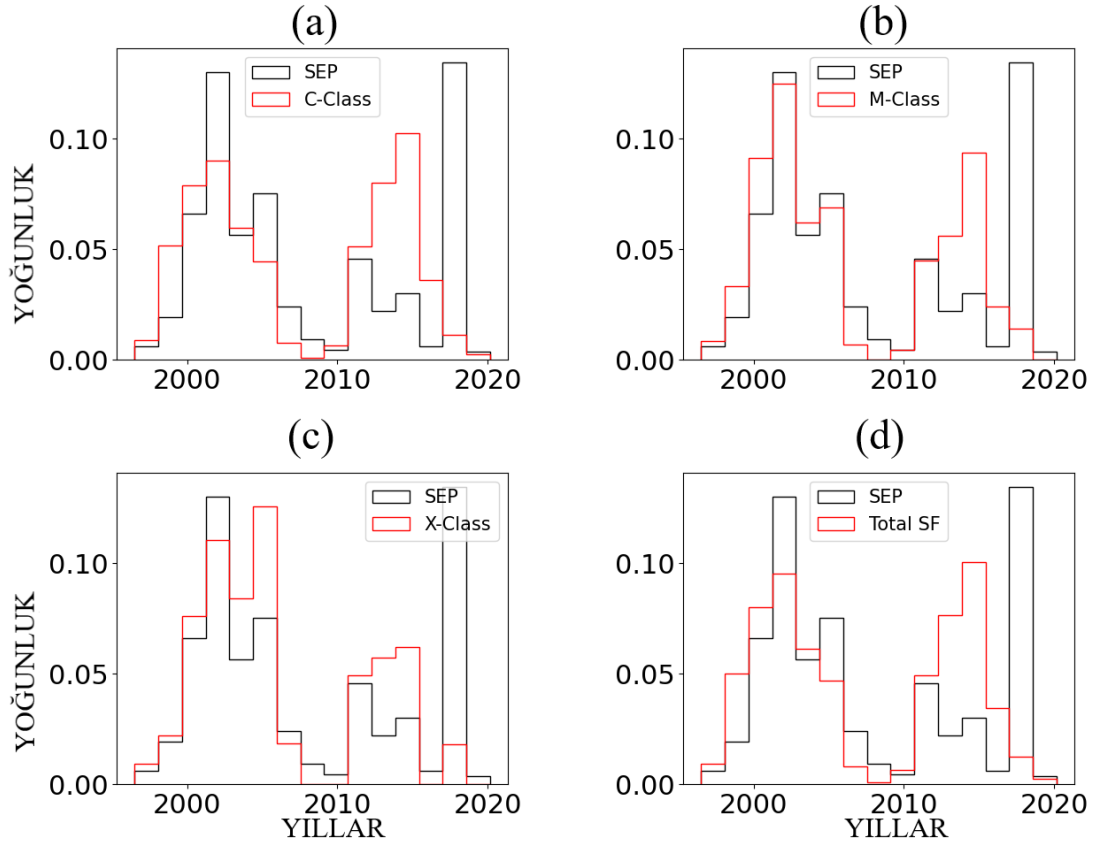
Burada ΔP ; periyot hatasını, P ; periyodu, $\Delta \omega$ pikin yarısının tam genişliğini (full width at half maximum, FWHM), ω ise frekansı ifade eder. FWHM (bkz. Şekil 3.4), periyotları anlamlandırmada önemlidir, örneğin dar bir pik genişliği frekans çözünürlüğünün yüksek olduğunu, pikin güvenilirliğini ve o noktada oldukça anlamlı bir periyodik bileşen olduğunu ifade eder. Daha geniş pikler için tam tersi durum söz konusu olmaktadır.



Şekil 3.4. FWHM gösterimi (Tavernier, 2010)

4. BULGULAR

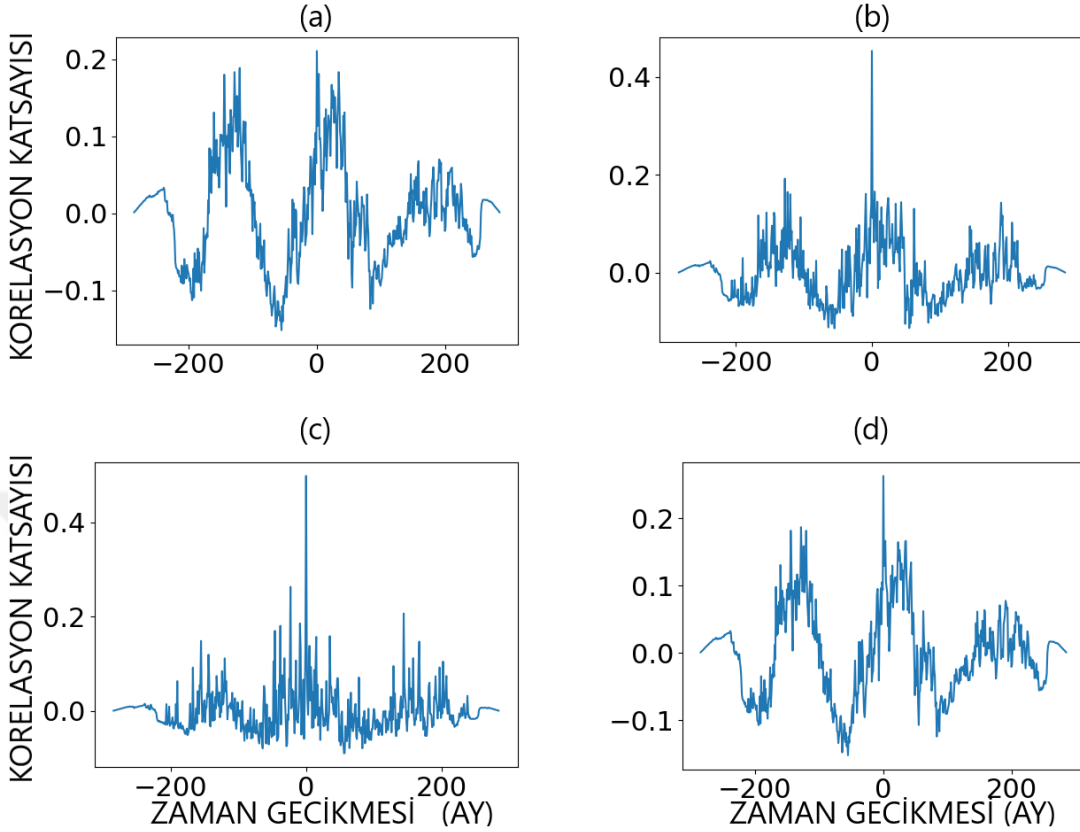
4.1. Histogramlar



Şekil 4.1. Farklı X-ışını güneş patlama sınıfları ve SEP'in histogramı **a)** SEP ve C sınıfı patlama **b)** SEP ve M sınıfı patlama **c)** SEP ve X sınıfı patlama **d)** SEP ve toplam güneş patlaması

Şekil 4.1'de görülebileceği üzere, tez çalışması kapsamında kullanılan tüm veriler güneş leke çevrimini açıkça göstermektedir. SEP'in her iki çevrimde de (23 ve 24. Güneş çevrimi) güneş leke çevriminin (SC) özellikle çift pikli yapısını göstermesi dikkat çekicidir. SEP ve X-ışını güneş patlamaları, SC 23 sırasında SC 24'e kıyasla daha iyi bir ilişki göstermektedir. Farklı bir perspektiften bakıldığında, SEP yoğunluğu SC 23'te SC 24'e kıyasla daha yüksektir. Chandra ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışma da benzer bir sonuca sahiptir ve SC 23'teki daha yüksek yoğunluklu olayların SC 24'e kıyasla o çevrimdeki daha yüksek güneş aktivitesi seviyesiyle ilişkili olduğunu öne sürmektedir. Dolayısıyla, minimum güneş çevrimi zamanı olan 2019 civarında görülen yüksek SEP olayının bir CME veya filament patlamasından kaynaklanmış olabileceğini söylemek mümkündür.

4.2. Çapraz Korelasyon



Şekil 4.2. Farklı X-ışını güneş patlama sınıfları ile SEP arasındaki çapraz korelasyon analizi sonuçları **a)** SEP ve C sınıfı patlama **b)** SEP ve M sınıfı patlama **c)** SEP ve X sınıfı patlama **d)** SEP ve toplam güneş patlaması

Şekil 4.2 ve Çizelge 4.1, bu tez çalışmasında kullanılan farklı X-ışını güneş patlama sınıfları ve SEP arasındaki çapraz korelasyon analizinin sonuçlarını göstermektedir. En yüksek korelasyon katsayısı X-sınıfı güneş patlaması ile SEP ($0.5 \pm$) arasında iken, en düşük korelasyon C-sınıfı güneş patlaması ile SEP ($0.21 \pm$) arasındadır. İncelenen dönem boyunca toplam 13160 C-sınıfı, 1678 M-sınıfı ve 141 X-sınıfı güneş patlaması kaydedilmiştir. Bu bilgiler ışığında, SEP üreten güneş patlamalarının çoğunun M-sınıfı ve X-sınıfı patlamalar olduğunu söylemek mümkündür. C-sınıfı güneş patlamalarının sayısı oldukça fazladır, bu nedenle toplam güneş patlamaları ile korelasyon düşüktür. Herhangi bir veri setinde ay bazında zaman gecikmesi gözlenmemiştir, bunu; güneş patlamaları sonucunda ortaya çıkan yüklü parçacıkların Dünya'ya ulaşma süresinin 3-4 gün olmasıyla açıklamak mümkündür.

Çizelge 4.1. Çapraz korelasyon katsayıları ve denk gelen zaman gecikmeleri

	C sınıfı patlama	M sınıfı patlama	X sınıfı patlama	Toplam güneş patlaması
SEP	0.21±0.06	0.45±0.05	0.5±0.06	0.26±0.06
Zaman gecikmesi (Ay)	0	0	0	0

4.3. SPE Dağılımları

Çizelge 4.2. SPE'ler ve dağılımları

Güneş leke sınıflaması ara leke dağılımı ve patlama sınıfı	X			O			I			C		
	C	M	X	C	M	X	C	M	X	C	M	X
Güneş leke grubu												
A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B	-	-	-	2	-	-	1	-	-	-	-	-
C	-	-	-	2	8	1	-	-	-	-	-	-
D	-	-	-	3	5	3	1	6	6	-	5	5
E	-	-	-	1	2	1	-	12	3	1	5	7
F	-	-	-	-	-	-	-	3	1	-	5	10
H	1	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

SPE'ler, McIntosh sınıflandırmasındaki Z, p ve c parametrelerine göre sınıflandırılmıştır (bkz. Çizelge 4.2). Çizelge 4.2'de güneş patlaması ile ilgili SPE'ler ve bunlara karşılık gelen patlama ve güneş lekesi sınıfları listelenmiştir. Bu çizelgeden görülebileceği gibi güneş leke grubunun karmaşıklığı arttıkça SPE de artmaktadır. Tez kapsamında ilgilenilen dönemde toplam 128 SPE gözlenmiştir. Çizelge 4.2'de sayıca eksik bulunmaktadır. Bunun nedeni SEP/SPE'nin kaynağının sadece güneş patlaması olmamasıdır. Çizelge 4.3'te kaynağı güneş patlaması olmayan SPE'ler, belirlenebilen kaynaklarıyla birlikte verilmiştir. Buradaki olayların SPE oluşturma potansiyeli %18,75'tir.

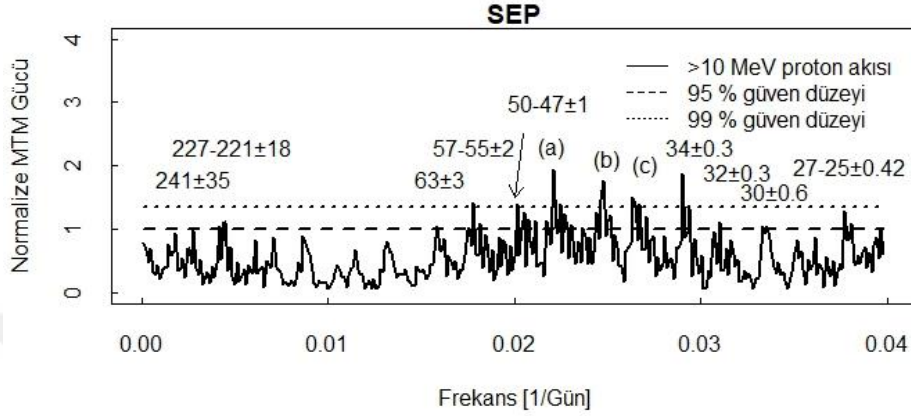
Çizelge 4.3. SPE'nin diğer kaynakları

SPE kaynağı	Sayı
Aktif bölgelerle ilişkili olmayan SPE	5
CME kaynaklı	6
Filament patlaması	3
Lekesiz aktif bölge	1
Güneş diskinin arka tarafında gerçekleşen SPE	4
Belirlenememiş	5

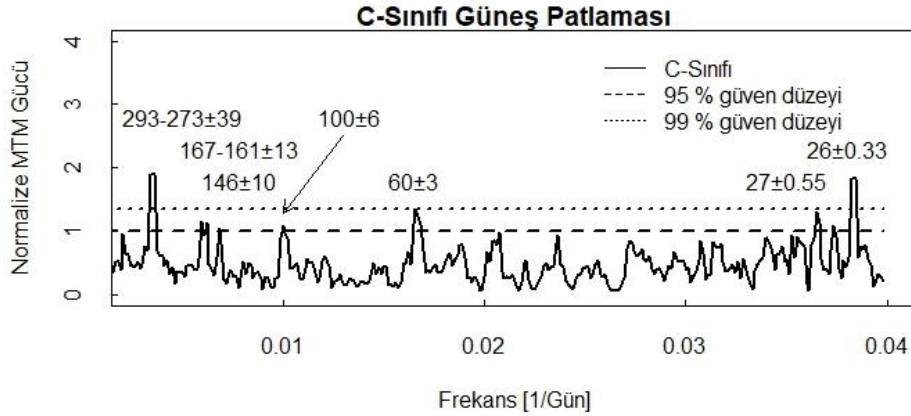
Yukarıdaki bilgiler ve Çizelge 4.3 incelendiğinde, C sınıfı, M sınıfı ve X sınıfı güneş patlamalarının SPE oluşturma potansiyeli sırasıyla %0,09, %3,28 ve %26,24'tür. Ayrıca, Çizelge 4.3'e göre, en fazla sayıda SPE olayı D, E ve F grubu güneş lekelerinde meydana gelmiştir. Bununla birlikte, incelenen zaman aralığında D grubunda 7760, E grubunda 3230 ve F grubunda 1120 güneş lekesi gözlemlenmiştir. D, E ve F gruplarındaki olayların yüzdesi sırasıyla %26,56, %25 ve %14,84'tür. Gözlenen güneş lekesi grubu açısından analiz edilirse, F, E ve D gruplarında SPE üretme potansiyeli sırasıyla %1,7, %1 ve %0,4'tür. Güneş leke sınıflaması ara leke dağılımı açısından baktığımızda ise en yüksek SPE üreticileri sırasıyla c, i, o ve x'tir (%2,32, %1, %0,15, %0,05). Burada hesaplanan yüzdeler, 1996-2020 yılları arasında SPE sayısının tüm patlama sınıflarına, tüm güneş lekesi gruplarına ve tüm güneş lekesi dağılımlarına oranıdır.

4.4. MTM Analizi

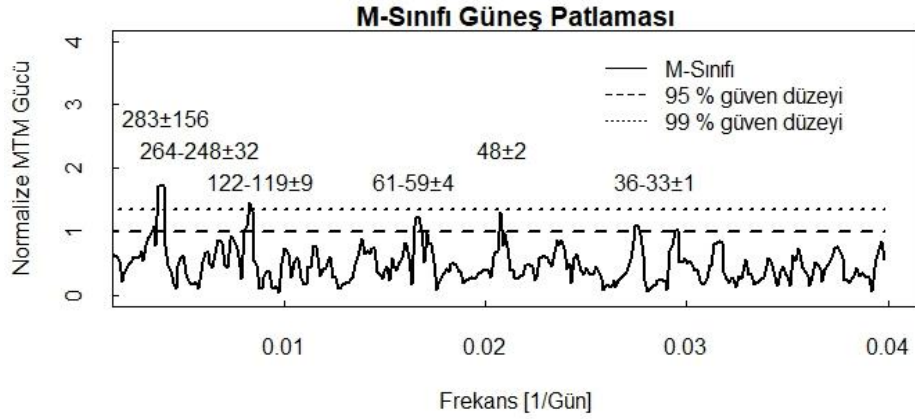
Şekil 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 ve 4.7 MTM analiz sonuçlarını, Çizelge 4.4 ise anlamlı periyotları göstermektedir.



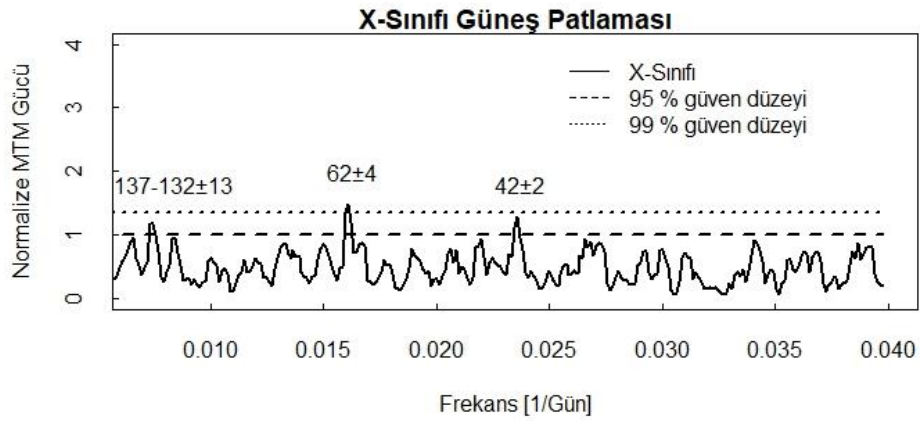
Şekil 4.3. SEP'lerin MTM periyot analizi güç spektrumu. Şekilde; **a)** 45 ± 1 ; **b)** 42 ± 0.66 ; **c)** $38-37\pm1$



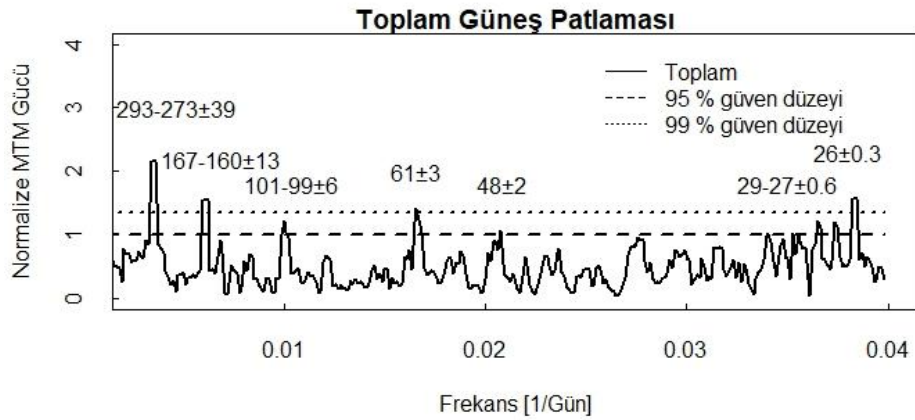
Şekil 4.4. C sınıfı güneş patlamalarının MTM periyot analizi sonuçları



Şekil 4.5. M sınıfı güneş patlamalarının MTM periyot analizi sonuçları



Şekil 4.6. X sınıfı güneş patlamalarının MTM periyot analizi sonuçları



Şekil 4.7. Toplam güneş patlamalarının MTM periyot analizi sonuçları

Çizelge 4.4. Tespit edilen anlamlı periyotlar ve güven düzeyleri

Periyot (Gün)	SEP	C sınıfı	M sınıfı	X sınıfı	Toplam güneş patlaması
248-292	-	+> 99	+> 99	-	+> 99
221-241	+> 95	-	-	-	-
146-167	-	+> 95	-	-	+> 99
120-134	-	-	+> 99	+> 95	-
99	-	+> 95	-	-	+> 95
47-63	+> 95	+> 95	+> 95	+> 99	+> 95
36-46	+> 99	-	+> 95	+> 95	-
25-34	+> 95	+> 99	-	-	+> 95

MTM periyot analizinde, SEP, C sınıfı ve toplam güneş patlaması 25-34 günlük bir güneş rotasyon periyodunu göstermektedir. M ve X sınıfı patlamalar C sınıfı patlamalardan daha az sıklıkta meydana gelir, bu da güneş rotasyon periyodunun görünürdeki eksikliğini açıklayabilir. 36-46 günlük periyot SEP'te, M ve X sınıfı güneş patlamalarında bulunmuştur. Tüm veri setlerinde 47-63 günlük periyot bulunmuştur. C sınıfında görülen yaklaşık 100 günlük (~3,3 ay) periyot, toplam güneş patlamalarında da görülmektedir. M ve X sınıfı güneş patlamalarında farklı güven düzeylerinde 120-134 günlük periyotlar bulunmuştur. Bu periyoda benzer şekilde SEP'te %95 güven düzeyinin hemen altında 115 günlük bir periyot bulunmaktadır ve bu periyodu da 120-134 günlük periyotlarla aynı kökenden olduğunu düşünmekte bir sakınca yoktur. İlk olarak Rieger ve ark. (1984) tarafından önerilen 154 günlük Rieger periyodu, günümüzde kabul gören önemli bir periyottur. Bu tez çalışması kapsamında, 146-167 günlük periyot Rieger periyodisitesine aittir ve C sınıfı ve toplam güneş patlamasında gözlemlenmiştir. Bu periyotlara ek olarak SEP'te %95 güven seviyesine çok yakın 141-163 günlük bir periyot varlığı saptanmıştır. Benzer şekilde M sınıfında 148 günlük, X-Sınıfında ise 151 günlük periyotlar söz konusudur. Bu nedenle C sınıfında güven seviyesi %95 iken toplam güneş patlamasında güven seviyesi %99'a yükselmiştir. SEP'te gözlenen 241 ve 227-221 günlük periyotlara benzer bir periyot %95 güven düzeyinin çok yakınında X sınıfında 221 günlük periyot olarak karşımıza çıkmıştır. C, M ve toplam güneş patlamasında bulunan 248-292 günlük periyotlar, güneş patlamasına ait periyotlardır. Son olarak SEP'te %95 güven düzeyinin hemen altında 356 ve 546 günlük periyotların varlığı saptanmıştır.

5. TARTIŞMA

Güneş aktivitesinin kaotik davranışı nedeniyle SEP olaylarının tahmini oldukça zordur. Olabilecek tüm tehditleri önlemek için bu tahmin mümkün olan en güvenli seviyede yapılmalıdır. Büyük SEP olaylarının meydana gelme oranı, güneş leke indeksi tarafından takip edildiği üzere aktivite çevriminin düşüş aşamasına kadar uzanan geniş bir zaman dağılımı ile güneş çevrimi başına yaklaşık 100'dür (Vainio ve ark., 2013). Bu tez çalışmasının sonucuna benzer şekilde, Sadykov ve ark. (2021) SC 24 için proton ve yumuşak X-ışını verilerinin SPE tahmininde çok iyi sonuçlar verdiğini bulmuştur. Oh ve ark. (2010)'a göre, SEP olayları her zaman yer seviyesi artışı (Ground Level Enhancements, GLE'ler) ile ilişkili değildir, bu nedenle GLE'leri tahmin çalışmasına dahil etmek uzay havası tahmininde daha iyi bir sonuç verebilir.

X sınıfı güneş patlamalarının SEP üretme potansiyeli (%26,24) ve korelasyon katsayısına göre, SEP olaylarının çoğunlukla X sınıfı güneş patlamalarından oluştuğunu göstermektedir. Tırnakçı ve ark. (2023) SEP'leri enerji açısından üç gruba ayırmış ve ardından X-ışını güneş patlamaları ile korelasyon analizleri gerçekleştirmiştir. C sınıfı güneş patlamaları ile 0-10 pfu SEP'ler arasındaki korelasyonun, çalışmada bulunana kıyasla daha yüksek olduğunu bulmuşlardır ($r=0.33$). Bu nedenle, daha düşük enerjili SEP'lerin C sınıfı güneş patlamaları ile ilişkili olduğu sonucuna varılabilir. Gopalswamy ve ark. (2003), X-ışını güneş patlamalarının şiddeti ile SEP yoğunluğu arasındaki korelasyonun ($r=0.41$), CME hızı ile SEP yoğunluğu arasındaki korelasyondan ($r=0.58$) daha düşük olduğunu bulmuşlardır. Bu da tüm büyük güneş patlamalarının SEP üretmediği sonucuna götürmektedir. Marroquin ve ark. (2023) aktif bölgeler ve SEP'leri içeren bir çalışma yapmış ve karmaşık manyetik alanın, en büyük güneş lekесinin boylamsal konumunun, AR'lerin alanının ve penumbra tipinin SEP olaylarının üretimi ile güçlü şekilde ilişkili olduğunu bulmuşlardır. Bronarska ve Michalek (2017) 84 büyük SEP olayını incelemiş, bu olayların büyük çift kutuplu yapılardan (McIntosh sınıflandırmasında C, D, E, F güneş lekесi grupları) ve asimetrik güneş lekelerinden kaynaklandığını ve en enerjik SEP'lerin yalnızca olağanüstü büyük ve karmaşık penumbra ile karakterize edilen aktif bölgelerden tespit edildiğini keşfetmiştir.

Chandra ve ark. (2013) büyük SEP olaylarının çoğunun güneş disk merkezi ve batı yarımküre yakınındaki halo veya kısmi halo CME'lerle ilişkili olduğunu ve kuzey-güney asimetrisinin SEP'ler için de geçerli olduğunu bulmuşlardır. SEP'teki kuzey-güney asimetrisine ek olarak, Bronarska ve Michalek (2017) tarafından yapılan çalışmada, doğu ve batı güneş yarım kürelerinden kaynaklanan SEP olayları incelenmiş ve doğu SEP olaylarıyla ilişkili aktif bölgelerin batı SEP olaylarıyla ilişkili olanlardan daha büyük olduğu bulmuşlardır. Bu sonuç, Güneş'in doğu yarımküresinde meydana gelen ve SEP üreten patlayıcı olayların (güneş patlaması, CME, filament patlamaları) boyutlarının daha büyük olabileceğini de düşündürülebilir. Dierckxsens ve ark. (2015), SEP yoğunluklarının 10 MeV'in altındaki enerjilerde yumuşak X-ışını akısına kıyasla

CME hızına daha güçlü bir bağımlılık gösterdiğini ve 20 MeV'in üzerindeki enerjilerde bunun tam tersi olduğunu öne sürmektedir.

MTM analizi sonucunda bulduğumuz periyotlar, SEP'in güneş aktivitesine, güneş patlamasına ve CME'ye olan bağımlılığını göstermektedir. Bu tez çalışmasındaki periyot analizleri sonucunda 8 periyot bulunmuştur: 248-292, 221-241, 146-167, 120-134, 99, 47-63, 36-46 ve 25-34. Li ve ark. (2021) tarafından yapılan çalışmada, SC22'de 54 gün, SC23'te 52-63 gün ve SC24'te 54-61 gün H α patlama indeks periyotları bulunmuştur. Benzer şekilde, Chowdhury ve ark. (2013) de 57 günlük bir H α patlama indeksi periyodu bulmuştur. Barlyaeva ve ark. (2018) güneş leke alanlarında ~3,1 aylık bir periyot bulmuştur. Bu sonuç, çalışma kapsamında bulunan 99 günlük periyotla örtüşmekte olup, güneş patlamalarının güneş lekeleri gibi güçlü ve karmaşık manyetik alanlarda meydana geldiği düşünüldüğünde anlamlıdır. Buna ek olarak, Chowdhury ve Dwivedi (2011) tarafından yapılan bir çalışmada koronal indekste 120-128 günlük bir periyot bulunmuştur. Bu sonuç çalışma kapsamında bulunan 115, 120 ve 134 günlük periyotlarla uyumlu görünmektedir. Kılçık ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışmada koronal indeks ve CME sayısında, farklı güven düzeylerinde anlamlı 178-240 günlük periyotlar bulunmuştur. SEP'te görülen 221-241 günlük ve X sınıfı güneş patlamasında %95 güven düzeyinin hemen altında görülen 221 günlük periyot, SEP'teki periyodun kaynağının CME ve X sınıfı güneş patlamaları olduğunu göstermektedir. SEP'te %90 seviyesinde anlamlı olan 356 ve 546 günlük periyotlar, CME'lerin SEP üzerindeki etkisi olarak değerlendirilebilir (Lou ve ark., 2003; Kılçık ve ark., 2020).

Mursula ve ark. (2003) 1-2 yıl arasındaki periyotları orta vadeli yarı periyodiklikler olarak adlandırmış ve bunların kaynağının tachoclineda keşfedilen orta vadeli periyodiklik olduğunu ve tachocline dönüş hızının güneş dinamosuna bağlı olduğunu öne sürmüştür. Güneş tachoclineindeki küresel dalga modlarının analizi, manyeto-Kelvin ve hızlı manyeto-Rossby dalgalarının 150-500 gün aralığında çoklu periyodiklikler verebileceğini göstermektedir (Gachechiladze ve ark., 2019). Rieger periyodisitesi olarak adlandırdığımız periyodun güneş tachoclineindeki Rossby dalgaları ile açıklanabileceği öne sürülmüştür (Zaqarashvili ve ark., 2010). Dolayısıyla bu çalışmada Rieger periyodisitesi olarak kabul edilen 146-167 günlük periyodun Rossby dalgalarından kaynaklandığı söylenebilir. Çalışma kapsamında bulunan diğer periyotlar: 120-134, 99, 47-63 gündür. Dimitropoulou ve ark. (2008) tarafından yayınlanan makalede, 128, 102, 51 günlük periyotlar, Rieger periyodisitesinin harmonikleri olarak atfedilmektedir.

SEP'te %95 güven düzeyinin hemen altında bulunan 115, 141-163, 356, 546 günlük periyotlarda da Rossby dalgalarının ve Rieger periyodisitesinin baskın olduğunu söylemek mümkündür. Belirtilen periyotlar, %90 güven düzeyinde anlamlıdır ancak güvenilirliği arttırmak adına, tez çalışmasında %95 güven düzeyi tercih edilmiştir. Son olarak 25-34 ve 36-46 günlük periyot, Kılçık ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışmada bulunan sonuçla örtüşmektedir ve kaynağının güneş rotasyonu ve Güneş'in

yüzey dinamosu ile etkileşimi olarak açıklanmaktadır. SEP'lerin de bu periyodikliği sergilediğinin altını çizmek gereklidir.

Bu çalışma temel olarak, SEP'lerin tahmininde iyileştirme yapma amacı güdölerek yürütölmüştür. Bu amaç, beraberinde, güneş patlamalarının, güneş leke gruplarının ve SPE'lerin de çalışmaya dahil edilmesini getirmiştir. Böylelikle, Güneş aktivitesinin birden fazla yönünü içeren daha kapsamlı bir yaklaşımla SEP'lerin tahmininde iyileştirme yapılabilir durumdadır. Bu tür enerjik parçacıkların gelecekte tahmin edilmesi oldukça faydalı olacaktır. Her ne kadar Güneş ve onun öngörülemezliği ön planda olsa da tahminlerin güvenilirliğini artırmak için benzer çalışmalara devam edilmelidir.



6. SONUÇLAR

Tez çalışması kapsamında SEP/SPE, güneş patlaması ve güneş leke sınıflandırması ve bunların ilişkisine odaklanılmıştır. Bu üç parametre arasındaki ilişkiyi anlamak, uzay hava durumunu daha iyi anlamamızı ve dolayısıyla SEP'lerin potansiyel tehlikelerine karşı önlem almamızı sağlar. Son olarak, sonuçları sıralamak gerekirse:

1. Şekil 3.3'ten hareketle, SEP'ler SPE ile oldukça güçlü bir uyum sergilemektedir ($r=0.8$). Dolayısıyla SPE tahminini SEP'ler üzerinden gerçekleştirmek, sürekli veri mevcut olduğu için uzay havası tahmininde oldukça kullanışlı olacaktır.
2. Histogramlar sonucunda, SEP de dahil olmak üzere bu çalışmada kullanılan tüm veri setleri 11 yıllık çevrimi göstermektedir.
3. SEP'ler, zaman gecikmesi olmaksızın X sınıfı güneş patlamaları ile en yüksek korelasyonu göstermektedir ($r=0.5$).
4. En yüksek SPE üretme potansiyeli, X sınıfı güneş patlamasına aittir (%26,24) ve bunu M sınıfı ve C sınıfı takip etmektedir.
5. SPE olaylarının çoğunluğu D, E ve F güneş lekeli gruplarıyla ilişkilendirilmiş olup, bu gruplar toplamda olayların %66,4'ünü oluşturmaktadır. Bununla birlikte, grup içindeki güneş leke sınıflaması ara leke dağılımı dikkate alındığında, c ve i kategorileri en yüksek SPE üreten kategori konumundadırlar (%55,47).
6. Çalışmada elde ettiğimiz periyotlar (gün olarak) aşağıdaki gibidir: 248-292, 221-241, 146-167, 120-134, 99, 47-63, 36-46, 25-34. Özellikle SEP'teki 25-63 günlük periyotların kaynağını X-ışını güneş patlaması ve H α patlama indeksi ile benzerliği nedeniyle güneş patlaması olarak nitelendirmek mümkündür. Ayrıca 221-241 günlük periyodu da CME kaynaklı olarak değerlendirmek uygun olacaktır. Benzer şekilde güven seviyesine çok yakın periyotlar da SEP'in CME ile yakından ilişkili olduğunu açıkça göstermektedir.

Bu tez çalışması sonucunda, elde edilen en önemli bulgu; SPE tahmini için mutlaka bir proton olayının olmasına ihtiyaç duymadan, doğrudan günlük proton akışlarıyla (bu çalışma kapsamında SEP olarak nitelendirilmiştir) tahmin edilebilir durumda olmasıdır. Bu ve diğer bazı sonuçlar SCI kapsamında bir dergide yayınlanmak üzere hazırlanmakta olup kısa zaman içerisinde dergiye gönderilecektir. Uzay hava durumunu etkileme yüzdesi düşünüldüğünde, bu kayda değer bir sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır. Aynı zamanda güneş leke alanlarının ve güneş lekelerinin de SEP üretme potansiyeli açığa çıkarılmış olup, tahmin iyileştirmesinde kullanılabilir.

7. KAYNAKLAR

- Ali, A., Sadykov, V., Kosovichev, A., Kitiashvili, I. N., Oria, V., Nita, G. M., Illarionov, E., O'Keefe, P. M., Francis, F., Chong, C.-J., Kosovich, P., & Marroquin, R. D. (2024). Predicting solar proton events of solar cycles 22–24 using GOES proton and soft-X-ray flux features. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 270(1), 15. IOP Publishing. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ac29fb>
- Baker, D. N. (1998). What is space weather? *Advances in Space Research*, 22(1), 7-16. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(97\)00944-2](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00944-2)
- Bansal, A. R., Dimri, V. P., & Sagar, G. V. (2006). Depth estimation from gravity data using the maximum entropy method (MEM) and the multi taper method (MTM). *Pure and Applied Geophysics*, 163, 1417-1434. <https://doi.org/10.1007/s00024-006-0115-0>
- Barlyaeva, T., Wojak, J., Lamy, P., Boclet, B., & Toth, I. (2018). Periodic behaviour of coronal mass ejections, eruptive events, and solar activity proxies during solar cycles 23 and 24. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 177, 12-28.
- Basu, S., & Antia, H. M. (1997). Seismic measurement of the depth of the solar convection zone. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 287(1), 189–198. Blackwell Science Ltd Oxford, UK.
- Basu, S., & Antia, H. M. (2003). Changes in solar dynamics from 1995 to 2002. *The Astrophysical Journal*, 585(1), 553. IOP Publishing.
- Bhatnagar, A., & Livingston, W. C. (2005). Fundamentals of solar astronomy (Vol. 6). World Scientific.
- Blasi, P. (2013). The origin of galactic cosmic rays. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 21, 1-73. <https://doi.org/10.1007/s00159-013-0066-3>
- Bronarska, K., & Michalek, G. (2017). Characteristics of active regions associated to large solar energetic proton events. *Advances in Space Research*, 59(1), 384-392.
- Chandra, R., Gopalswamy, N., Mäkelä, P., Xie, H., Yashiro, S., Akiyama, S., ... Nitta, N. V. (2013). Solar energetic particle events during the rise phases of solar cycles 23 and 24. *Advances in Space Research*, 52(12), 2102-2111. doi:10.1016/j.asr.2013.09.005
- Chemin, Y. H. (2022). Introductory Chapter: The Sun and Its Phenomenal Material Flux. In *Magnetosphere and Solar Winds, Humans and Communication*. IntechOpen.

- Chowdhury, P., & Dwivedi, B. N. (2011). Periodicities of sunspot number and coronal index time series during solar cycle 23. *Solar Physics*, 270, 365-383.
- Chowdhury, P., Jain, R., & Awasthi, A. K. (2013). Periodicities in the X-ray emission from the solar corona. *The Astrophysical Journal*, 778(1), 28. doi:10.1088/0004-637X/778/1/28
- Cranmer, S. R. (2009). Coronal holes. *Living Reviews in Solar Physics*, 6(1), 3. <https://doi.org/10.1007/lrsp-2009-2>
- Desai, M., & Giacalone, J. (2016). Large gradual solar energetic particle events. *Living Reviews in Solar Physics*, 13(1), 3. <https://doi.org/10.1007/s41116-016-0002-8>
- Dierckxsens, M., Tziotziou, K., Dalla, S., Patsou, I., Marsh, M. S., Crosby, N. B., ... Tsiropoula, G. (2015). Relationship between solar energetic particles and properties of flares and CMEs: Statistical analysis of solar cycle 23 events. *Solar Physics*, 290, 841-874. doi:10.1007/s11207-014-0641-4
- Dikpati, M. (2006). The importance of the solar tachocline. *Advances in Space Research*, 38(5), 839-844. Elsevier.
- Dimitropoulou, M., Moussas, X., & Strintzi, D. (2008). Enhanced Rieger-type periodicities' detection in X-ray solar flares and statistical validation of Rossby waves' existence. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 386(4), 2278-2284. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.13203.x>
- Eastwood, J. P., Biffis, E., Hapgood, M. A., Green, L., Bisi, M. M., Bentley, R. D., ... Burnett, C. (2017). The economic impact of space weather: Where do we stand? *Risk analysis*, 37(2), 206-218. <https://doi.org/10.1111/risa.12614>
- Elkins-Tanton, L. T. (2006). The Sun, Mercury, and Venus. Infobase Publishing.
- Ellwarth, M., Fischer, C. E., Vitas, N., Schmiz, S., & Schmidt, W. (2021). Newly formed downflow lanes in exploding granules in the solar photosphere. *Astronomy & Astrophysics*, 653, A96.
- Eren, S., Kilcik, A., Atay, T., Miteva, R., Yurchyshyn, V., Rozelot, J. P., & Ozguc, A. (2017). Flare-production potential associated with different sunspot groups. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 465(1), 68-75. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw2742>
- Gachechiladze, T., Zaqarashvili, T. V., Gurgenchvili, E., Ramishvili, G., Carbonell, M., Oliver, R., & Ballester, J. L. (2019). Magneto-Rossby waves in the solar tachocline and the annual variations in solar activity. *The Astrophysical Journal*, 874(2), 162.

- Gallagher, P. T. (1999). Optical and EUV Observations of the Solar Atmosphere (Doktora tezi). Queens University Belfast, Ireland. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1999PhDT...276G>
- Ghil, M. (1997). The SSA-MTM Toolkit: Applications to analysis and prediction of time series. In *Applications of Soft Computing* (Cilt 3165, ss. 216- 230). SPIE.
- Ghil, M., Allen, M. R., Dettinger, M. D., Ide, K., Kondrashov, D., Mann, M. E.,... Varadi, F. (2002). Advanced spectral methods for climatic time series. *Reviews of geophysics*, 40(1), 3-1. <https://doi.org/10.1029/2000RG000092>
- Gopalswamy, N., Yashiro, S., Lara, A., Kaiser, M. L., Thompson, B. J., Gallagher, P. T., & Howard, R. A. (2003). Large solar energetic particle events of cycle 23: A global view. *Geophysical Research Letters*, 30(12).
- Hale, G. E., Ellerman, F., Nicholson, S. B., & Joy, A. H. (1919). The magnetic polarity of sun-spots. *Astrophysical Journal*, 49, 153.
- Hathaway, D. H., Wilson, R. M., & Reichmann, E. J. (2002). Group sunspot numbers: Sunspot cycle characteristics. *Solar Physics*, 211, 357-370.
- Hayakawa, S., Ito, K., & Terashima, Y. (1958). Origin of cosmic rays. *Progress of Theoretical Physics Supplement*, 6, 1-92.
- Hirzberger, J., Koschinsky, M., Kneer, F., & Ritter, C. (2001). High resolution 2D-spectroscopy of granular dynamics. *Astronomy & Astrophysics*, 367(3), 1011-1021.
- Howe, R. (2009). Solar interior rotation and its variation. *Living Reviews in Solar Physics*, 6(1), 1–75. Springer.
- Kiepenheuer, K. O. (1953). The Sun. In G. P. Kuiper (Ed.). Chicago: Univ. Chicago Press.
- Kilcik, A., Chowdhury, P., Sarp, V., Yurchyshyn, V., Donmez, B., Rozelot, J.- P., & Ozguc, A. (2020). Temporal and periodic variation of the MCMESI for the last two solar cycles; Comparison with the number of different class X-ray solar flares. *Solar Physics*, 295, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s11207-020-01611-x>
- Kilcik, A., Rozelot, J. P., & Ozguc, A. (2024). Periodic Behavior of Selected Solar, Geomagnetic and Cosmic Activity Indices during Solar Cycle 24. *Universe*, 10(3), 107.
- Klein, K. L., & Dalla, S. (2017). Acceleration and propagation of solar energetic particles. *Space Science Reviews*, 212, 1107-1136. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0385-6>

- Klein, K. L., & Posner, A. (2005). The onset of solar energetic particle events: prompt release of deka-MeV protons and associated coronal activity. *Astronomy & Astrophysics*, 438(3), 1029-1042. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20042525>
- Li, C., Fei, Y., Tian, X. A., & An, J. M. (2021). The midrange periodicities of solar H α flare index during Solar Cycles 21--24. *Astrophysics and Space Science*, 366(7), 65.
- Long, D. M. (2012). Kinematic Properties of Globally-Propagating Waves in the Solar Corona. [arXiv ön baskısı]. astro-ph.SR. <https://arxiv.org/abs/1202.4360>
- Lou, Y. Q., Wang, Y. M., Fan, Z., Wang, S., & Wang, J. X. (2003). Periodicities in solar coronal mass ejections. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 345(3), 809-818.
- Marroquin, R. D., Sadykov, V., Kosovichev, A., Kitiashvili, I. N., Oria, V., Nita, G. M., Illarionov, E., O'Keefe, P. M., Francis, F., Chong, C. J., & others. (2023). Statistical study of the correlation between solar energetic particles and properties of active regions. *The Astrophysical Journal*, 952(2), 97.
- McIntosh, P. S. (1990). The classification of sunspot groups. *Solar Physics*, 125, 251-267.
- Mechbal, S., Mangeard, P. S., Clem, J. M., Evenson, P. A., Johnson, R. P., Lucas, B., & Roth, J. (2020). Measurement of low-energy cosmic-ray electron and positron spectra at 1 AU with the AESOP-Lite spectrometer. *The Astrophysical Journal*, 903(1), 21.
- Mewaldt, R. A. (1994). Galactic cosmic ray composition and energy spectra. *Advances in Space Research*, 14(10), 737-747.
- Mitalas, R., & Sills, K. R. (1992). On the photon diffusion time scale for the sun. *Astrophysical Journal*, 401(2), 759.
- Munro, R. H., Gosling, J. T., Hildner, E., MacQueen, R. M., Poland, A. I., & Ross, C. L. (1979). The association of coronal mass ejection transients with other forms of solar activity. *Solar Physics*, 61, 201-215.
- Mursula, K., Zieger, B., & Vilppola, J. H. (2003). Mid-term quasi-periodicities in geomagnetic activity during the last 15 solar cycles: Connection to solar dynamo strength--To the memory of Karolen I. Paularena (1957-2001). *Solar Physics*, 212, 201-207.
- National Space Weather Strategic Plan. (1995). Off. Fed. Coord. for Met. Services, NOAA, Silver Spring, MD.

- Oh, S. Y., Yi, Y., Bieber, J. W., Evenson, P., & Kim, Y. K. (2010). Characteristics of solar proton events associated with ground level enhancements. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 115(A10).
- Oughton, E. J. (2021). The economic impact of critical national infrastructure failure due to space weather. *arXiv preprint arXiv:2106.08945*.
- Pietrow, A. G. (2022). Physical properties of chromospheric features: Plage, peacock jets, and calibrating it all (Doktora tezi). Department of Astronomy, Stockholm University.
- Raukunen, O., Paassilta, M., Vainio, R., Rodriguez, J. V., Eronen, T., Crosby, N., et al. (2020). Very high energy proton peak flux model. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 10, 24. <https://doi.org/10.1051/swsc/2020022>
- Reames, D. V. (1995). Solar energetic particles: A paradigm shift. *Reviews of Geophysics*, 33(S1), 585-589. <https://doi.org/10.1029/95RG00585>
- Rieger, E., Share, G. H., Forrest, D. J., Kanbach, G., Reppin, C., & Chupp, E. L. (1984). A 154-day periodicity in the occurrence of hard solar flares? *Nature*, 312(5995), 623-625. <https://doi.org/10.1038/312623a0>
- Sadykov, V., Kosovichev, A., Kitiashvili, I., Oria, V., Nita, G. M., Illarionov, E., O'Keefe, P., Jiang, Y., Ferreira, S., & Ali, A. (2021). Prediction of Solar Proton Events with Machine Learning: Comparison with Operational Forecasts and "All-Clear" Perspectives. *arXiv e-prints*. *arXiv:2107.03911*.
- Sahin, S. (2023). An observational investigation of coronal rain in the quiescent and flaring solar corona (Doktora tezi). Northumbria University.
- Schwabe, M. (1849). Sonnen-und saturn-beobachtungen im jahre 1848, von herrn hofrath schwabe in dessau. *Astronomische Nachrichten*, 28, 302.
- Shapiro, A. I., Peter, H., & Solanki, S. K. (2019). The Sun's Atmosphere. In A. R. Choudhuri & D. Banerjee (Eds.), *The Sun as a Guide to Stellar Physics* (ss. 3- 4). Elsevier.
- Sicard-Piet, A., Boscher, D., & Lazaro, D. (2016). Is Carrington event in 1859 really worse than other recent extreme events? In 2016 16th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS) (pp. 1-6). IEEE.
- Song, P., Tu, J., & Wexler, D. B. (2023). Formation of the Transition Region for the Quiet Sun. *The Astrophysical Journal Letters*, 948(1), L4. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac43f6>

- Strugarek, A., Belucz, B., Brun, A. S., Dikpati, M., & Guerrero, G. (2023). Dynamics of the Tachocline. *Space Science Reviews*, 219(8), 87. Springer.
- Tavernier, S. (2010). Experimental techniques in nuclear and particle physics. Springer Nature.
- Thomson, D. J. (1982). Spectrum estimation and harmonic analysis. Proceedings of the IEEE, 70(9), 1055-1096. <https://doi.org/10.1109/PROC.1982.12433>
- Tirnakci, M., Asenovski, S., & Kilcik, A. (2023). Investigation of Solar Energetic Particles (SEPs) Associated with X-Ray Solar Flares. In Fifteenth Workshop June, 2023 (s. 18).
- Tsuneta, S. (2011). Hinode" A new solar observatory in space". In First Asia-Pacific Solar Physics Meeting ASI Conference Series, 2011, Vol. 2, pp 1-8 Edited by Arnab Rai Choudhuri & Dipankar Banerjee (Vol. 2).
- Vainio, R., Desorgher, L., Heynderickx, D., Storini, M., Flückiger, E., Horne, R. B., ... McKenna-Lawlor, S. (2009). Dynamics of the Earth's particle radiation environment. *Space Science Reviews*, 147, 187-231. <https://doi.org/10.1007/s11214-009-9496-y>
- Vainio, R., Valtonen, E., Heber, B., Malandraki, O. E., Papaioannou, A., Klein, K. L., Afanasiev, A., Agueda, N., Aurass, H., Battarbee, M., & others. (2013). The first SEPServer event catalogue~ 68-MeV solar proton events observed at 1 AU in 1996--2010. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 3, A12.
- Waldmeier, M. (1961). The sunspot-activity in the years 1610-1960. Zurich: Schulthess.
- Welsh, W. F. (1999). On the Reliability of Cross-Correlation Function Lag Determinations in Active Galactic Nuclei. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 111(765), 1347. <https://doi.org/10.1086/316421>
- Wolf, R. (1861). Abstract of his latest results. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 21, 77.
- Zaqarashvili, T. V., Carbonell, M., Oliver, R., & Ballester, J. L. (2010). Magnetic Rossby waves in the solar tachocline and Rieger-type periodicities. *The Astrophysical Journal*, 709(2), 749.

ÖZGEÇMİŞ

MELİKE TIRNAKÇI

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2021-2024	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 2017-2021	Akdeniz Üniversitesi Fen Fakültesi, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Bölümü, Antalya

ESERLER

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

1. Tirnakci, M., Asenovski, S., & Kilcik, A. (2023). Investigation of Solar Energetic Particles (SEPs) Associated with X-Ray Solar Flares. *In Fifteenth Workshop June, 2023* (p. 18).
2. Kilcik, A., & Tirnakci, M. (2022). Critical Frequency of Ionospheric F1 and F2 Layers and Comparison with Solar Flares Observed in the 24th Solar Cycle. *In Fourteenth Workshop June, 2022* (p. 29).
3. Tirnakci, M., & Kilcik, A. (2021). The Relationship between Solar Activity and Geomagnetic Activity Indices in the Last Four Solar Cycles. *In Thirteenth Workshop on Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere* (pp. 153-158).