

Güneş Patlaması Kaynaklı Koronal Yağmurların Zürih Güneş Lekesi Sınıfları ile İlişkisi

Emel ÖZDÜZENCİLER¹, Sunay AYDIN², Seray ŞAHİN³, Melike TIRNAKÇI⁴

^{1,2,3} Akdeniz Üniversitesi, Fen Fakültesi, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Bölümü, 07058, Antalya, Türkiye

⁴ University of Zagreb, Faculty of Geodesy, Hvar Observatory, 10000 Zagreb, Croatia

(Alınış / Received: 16.04.2026, Kabul / Accepted: 22.08.2026, Online Yayınlanma / Published Online: 25.08.2026)

Anahtar Kelimeler

Koronal yağmur,
Güneş Patlaması,
Güneş lekeleri

Öz: Koronal yağmur, Güneş koronasındaki termal kararsızlığın önemli bir göstergesidir. Bu yapılar, Güneşin dış atmosferindeki kütle ve enerji dengesini anlamak için bir anahtar görevindedir. Bu çalışmada, koronal yağmur oluşumunun ve yaşam süresinin, hem Güneş patlama sınıfına (C-, M- ve X-sınıfı) hem de Güneş lekelerine ev sahipliği yapan aktif bölgelerin Zürih Güneş lekesi sınıflarına nasıl bağlı olduğu incelenmiştir. Sonuçlar, koronal yağmur oluşma olasılığının GOES patlama sınıfı ile birlikte arttığını göstermektedir. C sınıfı Güneş patlamaları daha az sıklıkla yağmur üretirken, M ve X sınıfı Güneş patlamaları çok daha yüksek oluşum oranları göstermektedir. Bu eğilim neredeyse tüm Güneş leke gruplarında gözlemlenmektedir. Bazı durumlarda, yüksek GOES sınıfına sahip patlamalara rağmen koronal yağmur görülmemektedir ki bu durum aktif bölge morfolojisinin ve altta yatan manyetik yapının önemli bir rol oynadığını düşündürmektedir. Ayrıca, ortalama yağmur süresinin GOES patlama sınıfıyla birlikte artma eğilimi gösterdiği bulunmuştur. Tipik süreler, C sınıfı patlamalarda on dakikadan X sınıfı olaylarda 150-200 dakikaya kadar yükselmektedir. Bu, daha güçlü patlamaların, uzun süreli soğuma ve yoğunlaşma çevrimlerini sürdürebilen daha uzun ömürlü patlama sonrası koronal luplar ürettiğini göstermektedir. Leke sınıfları arasındaki farklılıklar, leke yapılanmasının ve buna bağlı olabilecek aktif bölge özelliklerinin koronal yağmur özellikleriyle ilişkili olabileceğini göstermektedir. Genel olarak, sonuçlarımız koronal yağmurun hem GOES patlama sınıfı hem de Zürih Güneş lekeleri sınıfları ile ilişkili olduğunu göstermektedir.

The Relationship Between Flare-Driven Coronal Rain and Zürich Sunspot Classes

Keywords

Coronal Rain,
Solar Flare,
Sunspots

Abstract: Coronal rain is a significant indicator of thermal instability within the solar corona. These structures serve as a key to understanding the balance of mass and energy in the Sun's outer atmosphere. In this study, we investigated how the occurrence and duration of coronal rain depend on both the GOES solar flare class (C-, M-, and X-class) and the Zürich sunspot classes of the active regions hosting the flares. The results indicate that the probability of coronal rain occurrence increases strongly with GOES flare class. While C-class flares produce rain less frequently, M- and X-class flares exhibit much higher formation rates. This trend is observed across almost all Zürich sunspot classes. In some instances, despite high GOES flare classes, no rain is observed, suggesting that active region morphology and associated magnetic properties may also play an important role. Furthermore, it was found that the average duration of coronal rain tends to increase with GOES flare class. Typical durations range from approximately ten minutes for C-class flares to 150–200 minutes for X-class events. This may indicate that larger flares are associated with post-flare coronal loop systems capable of sustaining prolonged cooling and condensation cycles. Differences observed among Zürich sunspot classes also suggest that sunspot morphology and related active region properties may be linked to coronal rain characteristics. Overall, our results demonstrate that coronal rain properties are associated with both GOES flare class and Zürich sunspot classes. These findings highlight the potential combined influence of flare properties and active region morphology on the thermal evolution of coronal loops.

1. Giriş

Güneş, atmosferindeki plazmanın ve manyetik alanın arasındaki etkileşimden kaynaklanan çok çeşitli manyetik olaylara ev sahipliği yapar. Bu olaylardan en belirgin olanları Güneş lekeleri, Güneş patlamaları ve dinamik koronal yapılarıdır (koronal yağmur gibi). Bu yapıların neredeyse hepsi manyetik alan evrimi ve manyetik alanın yeniden yapılandırılmasıyla yakından ilişkilidir. Bu yüzden bu etkileşimi anlamak, Güneşin dış atmosferindeki kütle ve enerji dengesini karakterize etmek ve doğal olarak koronal ısıtma problemini [1] anlamak için çok önemlidir.

Güneş patlamaları, evrendeki, uzamsal ve zamansal olarak çözömlenebilen en büyüleyici ve aynı zamanda en yüksek enerjili olaylardan biridir. Bu olayın temelinde manyetik yeniden bağlanma [2, 3] yer alır. Bu yeniden bağlanma sırasında manyetik alanda depolanmış olan enerji ($\sim 10^{28}$ – 10^{32} erg) [4], Güneş patlamasıyla, onlarca dakikalık bir zaman ölçeği içerisinde aniden serbest bırakılır. Tablo 1'de gösterildiği üzere, Güneş patlamaları, Geostationary Orbiting Environmental Satellites (GOES) tarafından gözlemlenen, 1 ila 8 Å aralığındaki yumuşak X-ışını (SXR) maksimum akı şiddetine dayalı olarak beş ana sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar A, B, C, M ve X'tir [4]. Her bir Güneş patlaması sınıfı, 1'den 9'a kadar uzanan logaritmik bir ölçeğe ayrılır. Örneğin, bir X5 patlaması, bir X2 patlamasından yaklaşık 2.5 kat daha yüksek tepe yumuşak X-ışını akısına sahipken, bir M6 sınıfı patlamadan ise yaklaşık 8 kat daha yüksek tepe yumuşak X-ışını akısına sahiptir.

Tablo 1. Maksimum X-ışını akısına dayalı Güneş patlaması sınıflandırması

Patlama Sınıfı	1- 8 Å Dalga Boylarındaki Maksimum Akı (I) (W/m^2)
A	$10^{-8} \leq I < 10^{-7}$
B	$10^{-7} \leq I < 10^{-6}$
C	$10^{-6} \leq I < 10^{-5}$
M	$10^{-5} \leq I < 10^{-4}$
X	$10^{-4} \leq I$

Diğer yandan, Güneş patlamaları zamansal olarak üç sınıfa ayrılır. Bunlar: i) patlama öncesi, ii) impulsif (ani enerji salınımı fazı) ve iii) kademeli (sönümlenme veya soğuma) evredir [5]. Patlama öncesi evrede, manyetik olarak aktif bir bölge üzerinde bir dizi küçük parlama meydana gelir. Bu küçük parlamalar bir Güneş patlamasını tetikleyen süreçlerin erken göstergeleri olarak bilinir. Bu tetikleyici süreçler, yeni manyetik akıların fotosfere yükselmesi ve zıt kutuplu manyetik alanların etkileşimi sonucunda meydana gelir. Plazmayı içeren bu sistem termal olarak dengesizleşmeye başladığında, manyetik akılar arasındaki etkileşim yeniden bağlanma yoluyla gerçekleşir. Bu süreç, büyük miktardaki manyetik enerjiyi serbest bırakarak bir Güneş patlamasını başlatır. Başka bir deyişle, bu süreç impulsif evreyi devreye sokar. Bunun sonucunda, manyetik alanın

dağılmasıyla ve hızlandırılmış parçacıklar yoluyla salınan enerji, sert ve yumuşak X-ışınları (sırasıyla HXR ve SXR), gama ışınları, aşırı-morötesi (EUV) ve hatta beyaz ışık emisyonu da dahil olmak üzere elektromanyetik spektrum tüm dalga boylarında kolaylıkla gözlemlenebilir [4]. İmpulsif evre sırasında, ısınmış ve hızlanmış parçacıklar (elektron ve iyon demetleri) termal iletim yoluyla koronal luplar boyunca Güneş atmosferinden aşağıya, yani kromosfere doğru hareket eder ve enerjilerini lupların ayakucu noktalarında bırakarak kromosferi ısıtırlar. Kromosferdeki bu enerji birikimi, koronal lupları dolduran kromosferik buharlaşmayı [6, 7] tetikler. Sıcak kromosferik madde koronal lup boyunca homojen bir şekilde dağılmak yerine, koronal lupların ayakucu noktaları civarında yoğunlaştığında ortaya çıkan yapı son derece katmanlı bir hal alır. Koronal lupların tepe noktası buharlaşma yoluyla sağlanan yüksek yoğunluğunu korurken, nispeten düşük düzeyde de olsa bu sıcak plazma ile ısıtılmaya devam eder. Bu tür koşullar altında, radyatif soğuma zamanla koronal lupların tepe noktalarındaki enerji dengesinde baskın hale gelebilir ve buharlaşma, soğuma ve yoğunlaşmanın tekrarlayan evreleriyle karakterize edilen termal dengesizlik (TNE) çevrimini başlatabilir [8, 9]. Tüm bunlar, impulsif evrenin ardından, birkaç saat süren ve hatta bir güne veya daha uzun bir süreye yayılabilen, bir Güneş patlamasının kademeli evresi, yani soğuma evresi ile başlar. Bu evre, soğuma süreçleri ve X-ışını ile EUV emisyonlarının şiddetindeki azalma ile karakterize edilir. Yüksek sıcaklıklar tarafından yönlendirilen birincil kayıp mekanizması termal iletimdir. Sıcaklık kademeli olarak azaldıkça, düşük sıcaklıklarda artan radyasyon kaybı fonksiyonu [10] yardımıyla radyasyonla soğuma daha baskın hale gelir. Sonuç olarak, termal kararsızlığın (TI) başlamasıyla soğuma hızlanır ve koronal lupların tepe noktalarında radyasyon yayan, yoğun ve soğuk koronal yoğunlaşmalar üretilir. Eğer bu yoğunlaşmalar Güneş kütleçekimi ve/veya diğer fiziksel kuvvetler dolayısıyla manyetik alan çizgileri boyunca Güneş yüzeyine doğru hareket ederse koronal yağmur olarak adlandırılır. Ancak, bu yoğunlaşmalar, Güneş yüzeyine doğru hareket etmek yerine, bu lupların tepe noktalarında birikmeye devam ederlerse “prominens veya filament” olarak adlandırılırlar. Lupların ayakucu noktasındaki ısıtma süreci devam ettikçe, termal dengesizlik-termal kararsızlık (TNE-TI) süreçleri tekrarlanır ki bu durum ısınma ve soğuma süreçlerinden oluşan TNE-TI çevrimi olarak bilinir [11, 12].

Koronal yağmur, Güneş atmosferinde gözlemlenen soğuk ($\sim 10^3$ – 10^5 K) ve oldukça yoğun (10^{10} – 10^{12} cm^{-3}) dinamik (~ 70 km s^{-1}) yapılarıdır. Tipik olarak H α , Ca II veya He I/He II çizgileri gibi kromosferik veya geçiş bölgesi spektral çizgilerinde gözlemlenir ve koronal ısıtma, termal dengesizlik ve korona ile kromosfer arasındaki kütle-enerji taşınımı hakkında önemli

bilgiler sağlar. Bu yapılar, sakin ve patlama kaynaklı koronal yağmur olmak üzere iki ana sınıfa ayrılır [12]. Sakin koronal yağmurlar neredeyse bütün aktif bölgelerdeki koronal luplarda meydana gelir. Patlama kaynaklı olan ise, bir Güneş patlamasının kademeli evresinde (yani soğuma evresinde) gözlemlenen koronal yağmurlardır [13, 14, 15]. Patlama kaynaklı bu yağmurların neredeyse her patlamada mevcut olduğu görülmektedir [16], ancak bu konuda halen daha büyük ölçekli bir istatistiksel araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Koronal yağmurun oluşumu ve özellikleri Güneş patlamasından etkilenebilmektedir [17]. Gözlemsel çalışmalar, patlamaların hem büyüklüğünün hem de süresinin, yağmur oluşumunun olasılığını ve zamansal kapsamını belirlediğini göstermektedir. Örneğin, daha yüksek enerjili patlamalar (X-sınıfı), genellikle TNE çevrimlerini on dakikadan birkaç saate kadar sürdürebilen, daha uzun ömürlü patlama sonrası lupları oluştururken, daha zayıf patlamalar (C-sınıfı) yalnızca kısa ömürlü, hatta ihmal edilebilir düzeyde yağmur olayları meydana getirebilir [16, 11]. Bununla birlikte, patlama özellikleri ile koronal yağmur arasındaki ilişki doğrusal değildir. Son derece enerjik olan patlamalar, hızlı yeniden bağlanma (veya parçalanma) yoluyla önceden mevcut olan koronal lup yapılarını bozarak, patlama sonrası koronal yağmur oluşumunu engelleyebilir [18].

Aynı derecede önemli olan bir diğer olgu ise, koronal lupların manyetik yapısını ve TNE çevrimini destekleme yeteneklerini belirleyen aktif bölgelerdeki Güneş lekeleridir. Güneş lekeleri geleneksel olarak leke grubunun karmaşıklığına, kutupluluğuna ve evrimsel aşamasına göre sınıflandırılır [19]. Önceki çalışmalar, karmaşık ve çok kutuplu aktif bölgelerin genellikle daha geniş ve karmaşık koronal lup sistemleriyle ilişkili olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, daha basit veya bozulmuş tek kutuplu aktif bölgeler farklı koronal manyetik yapıların ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Gözlemsel çalışmalar koronal yağmurun tercihen manyetik alan içerisine yerleşmiş (gömülü) iki kutuplu yapılarla sahip olan patlama sonrası koronal lup yapılarında meydana geldiğini, büyük ölçekli tek kutuplu yapıların (H-sınıfına ev sahipliği yapan aktif bölgeler) ise sürekli TNE-TI çevrimlerinden ziyade, patlama enerjisini jetler, püskürmeler veya hızlı yeniden yapılandırma yoluyla dağıtma olasılığının daha yüksek olduğunu göstermektedir [16, 19]. Tek kutuplu bu yapılarda, aktif bölge içerisindeki akı iptalinin azalması ve/veya daha geniş koronal lup sistemleri, özellikle orta şiddetli (C veya M sınıfı) patlamaları takiben, bir kez başladığında sürdürülebilir soğuma çevrimlerine olanak tanır [18].

Bu sonuçlar birlikte ele alındığında koronal yağmurun hem Güneş patlamasının enerjisi hem de aktif bölgenin **yapısal özellikleri ile ilişkili olabileceğini göstermektedir**. Güneş patlaması sınıfı ve Güneş leke

morfolojisinin yağmur oluşumunu birlikte nasıl etkilediğine dair sistematik bir değerlendirme, özellikle farklı aktif bölge tipleri ve Güneş patlaması enerjileri arasında sınırlı kalmaktadır. Önceki çalışmalar, yağmur üretimini öncelikle C ve M sınıfı Güneş patlamalarında incelemiş olup [20] Güneş lekeleri gruplarına odaklanmamıştır. Bu çalışmada ise ilk kez, patlama kaynaklı koronal yağmur istatistikleri hem GOES Güneş patlaması sınıfı hem de Zürih Güneş lekeleri sınıfları birlikte ele alınarak incelenmiştir. Bu yaklaşımın, koronal yağmur özellikleri ile aktif bölge morfolojisi arasındaki ilişkinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, 2 Şubat 2011 ve 9 Ekim 2017 tarihleri arasında GOES sınıflandırmasına göre hazırlanmış ve koronal yağmur bilgisini içeren 240 Güneş patlamasından (C, M ve X) oluşan örnek veri seti kullanılmıştır [20]. Bu sınıflardan 118 tanesi C sınıfı, 78 tanesi M sınıfı ve 44 tanesi X sınıfı patlamaya karşılık gelmektedir. Koronal yağmurun varlığı/yokluğu bilgisi ile koronal yağmur süreleri [20] tarafından oluşturulan olay kataloğundan doğrudan alınmıştır ve bu çalışma kapsamında yeniden sınıflandırılmamış veya yeniden hesaplanmamıştır. Söz konusu çalışmada patlama kaynaklı koronal yağmur olayları, patlama sonrası koronal lup sistemlerinde gözlemlenen ve manyetik alan çizgileri boyunca aşağı yönlü hareket eden yoğunlaşmaların gözlemsel olarak tespit edilmesiyle belirlenmiştir. Koronal yağmur süresi ise, ilk yağmur yapısının gözlemlendiği an ile son yağmur yapısının kaybolduğu an arasındaki zaman farkı olarak tanımlanmıştır [20]. Olay kataloğuna ait tam veri seti Zenodo veri arşivinde paylaşılmış olup DOI adresi üzerinden erişilebilmektedir (doi:10.5281/zenodo.7028211). Bu veriye ek olarak, her bir patlama için, patlamanın olduğu aktif bölgelerdeki Zürih leke sınıfları [19] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA; <https://www.noaa.gov/>) internet sitesinden istatistiksel analiz için elde edilmiştir. 240 veriden 2 tanesi A, 2 tanesi B, 24 tanesi C, 83 tanesi D, 70 tanesi E, 46 tanesi F ve 13 tanesi H leke sınıfına karşılık gelmektedir (bkz. Tablo 2). Ancak, A ve B sınıfı lekeler ev sahipliği yapan aktif bölgelerin sayısının son derece düşük olması sebebiyle, çalışma kapsamında bu iki leke sınıfı istatistiksel analizin dışında tutulmuştur. Bu çalışmada kullanılan Güneş patlaması süreleri, GOES kataloglarında verilen patlama başlangıç ve bitiş zamanları kullanılarak elde edilmiş olup, patlama süresi başlangıç ve bitiş zamanları arasındaki fark olarak tanımlanmıştır. Patlama süresi ve koronal yağmur süresi arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla, koronal yağmurun tespit edildiği olaylar alt kümesi üzerinde Pearson korelasyon analizi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. 2 Şubat 2011 ve 9 Ekim 2017 tarihleri arasında gözlemlenen 240 Güneş patlamasını içeren aktif bölgelerde tespit edilen leke sınıflarının toplam sayısı

Leke Sınıfı	Toplam Leke Sınıf Sayısı
A	2
B	2
C	24
D	83
E	70
F	46
H	13

Bu alt kümelerdeki toplam sayı leke sınıfı sayıları C sınıfı için 13, D için 53, E için 38, F için 22 ve H için 9 olarak bulunmuştur (Tablo 3). Pearson korelasyon katsayısı (R), her bir leke sınıfı için aşağıdaki formül (Denklem 1) kullanılarak ayrı ayrı hesaplanmıştır.

$$R = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

Burada x_i ve y_i , sırasıyla patlama süresi ve koronal yağmur süresi değerlerini, $\bar{x}$ ve $\bar{y}$ ise bunların ilgili ortalamalarını temsil etmektedir. Bu doğrusal korelasyon yöntemi, patlama enerjisi ve patlama sonrası olaylar üzerine yapılan önceki çalışmaların [20, 21], süre ve enerji ilişkilerindeki eğilimleri başarıyla belirlemiş olması nedeniyle tercih edilmiştir.

3. Bulgular

Güneş patlaması içeren 240 olayın 136'sında koronal yağmur olayı tespit edilmiştir. Bu değer toplam örneklemin yaklaşık %57'sine karşılık gelmektedir. Tablo 3'te, bu leke sınıflarında meydana gelen koronal yağmur olaylarının toplam sayısı (ikinci kolon) ve bu yağmurların gözlem zamanı boyunca ortalama yaşam süresi (üçüncü kolon) verilmiştir. Burada, koronal yağmur oluşumu ile Güneş patlaması içeren aktif bölgelerin Zürich Güneş leke sınıfları arasındaki ilişkiyi araştırmak için, koronal yağmur olaylarının sayısı Güneş lekeleri sınıflandırmasının bir fonksiyonu olarak analiz edilmiştir. Aktif bölgelerdeki toplam leke sınıfı olaylarının sayısı önemli ölçüde farklılık gösterdiğinden (bkz. Tablo 2), toplam yağmur olaylarının sayısının doğrudan karşılaştırılması uygun olmadığından koronal yağmur olaylarının sayısı her sınıftaki toplam aktif bölge sayısına göre normalize edilmiştir. Normalize edilmiş yağmur oluşum oranı şu şekilde hesaplanmıştır (Denklem 2):

$$R = \frac{N_y}{N_z} \quad (2)$$

Burada N_y , belirli bir leke sınıfında tespit edilen toplam koronal yağmur olay sayısını, N_z ise veri setinde bu sınıfa ait, patlama üreten aktif bölgedeki leke sınıflarının sayısını temsil eder. Şekil 1'de gösterildiği üzere, aktif bölge başına düşen yağmur oluşum oranları %48 (F sınıfı) ile %69 (H sınıfı) arasında değişkenlik göstermektedir. En yüksek oran

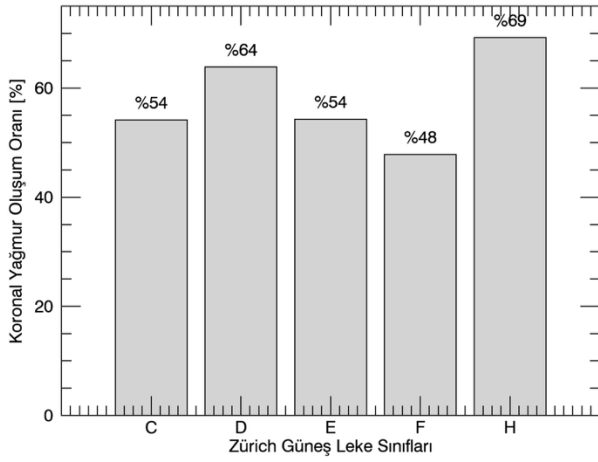
H sınıfı Güneş lekelerine ev sahipliği yapan aktif bölgelerde gözlenirken, en düşük oran F sınıfı aktif bölgelerde gözlenmiştir. Bu değerler, koronal yağmur olaylarının daha gelişmiş Zürich leke sınıflarına sahip aktif bölgelerde daha sık meydana geldiğini göstermektedir. En basit Güneş lekeleri gruplarında (A ve B sınıfları) ise, koronal yağmur son derece nadir görülmüş, hatta A sınıfında hiç görülmemiştir. B sınıfında ise yalnızca tek bir olay gözlemlenmiş olup, daha önce de belirtildiği üzere bu sayı anlamlı bir istatistiksel analiz yapmak için yetersizdir.

Koronal yağmur olaylarının ortalama süreleri de Güneş leke sınıflarına bağlı bir değişim göstermektedir (Tablo 3). En kısa ortalama süre (yaklaşık 61±46 dakika), C sınıfı Güneş leke gruplarına ev sahipliği yapan aktif bölgelerde bulunmuştur. Buna karşılık, daha karmaşık Güneş leke gruplarına (D, E ve F) ev sahipliği yapan aktif bölgeler daha uzun ortalama yaşam süreleri göstermektedir. Bu değerler, D sınıfında ~118±104 dakikaya, E sınıfında ~111±95 dakikaya ve F sınıfında ise ~116±74 dakikaya kadar ulaşmaktadır.

Tablo 3. Güneş patlaması üreten aktif bölgelerdeki leke sınıfı, aktif bölgelerdeki koronal yağmur olaylarının toplam sayısı ve ortalama yaşam süreleri

Güneş Leke Sınıfı	Koronal yağmur içeren toplam olay sayısı	Ortalama yağmur süresi ve standart sapması (dakika)
A	0	-
B	1	-
C	13	61.15±45.99
D	53	118.34±103.69
E	38	111.02±95.35
F	22	115.86±74.25
H	9	130.77±85.38

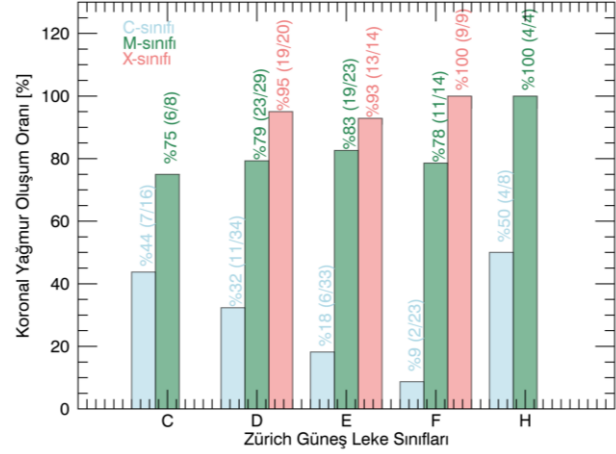
En uzun süre olan ~131±85 dakika ise H sınıfı leke gruplarına ev sahipliği yapan aktif bölgelerde gözlenmiştir. Tablo 3'te de verildiği üzere, tüm sınıflarda gözlenen yüksek standart sapma değerleri, olaylar arasında yüksek bir değişkenliğin bulunduğu işaret etmektedir. Bu da muhtemelen bireysel koronal lup uzunluklarından, manyetik alan yapılanmalarından (alan çizgilerinin nasıl düzenlendiği, birbirine bağlandığı ve birbiriyle etkileşime girdiği), lupların ayakucundaki ısınma süreçlerinden ve son olarak her bir aktif bölge içerisindeki toplam enerji birikimi arasındaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Yine de bu sonuçlar, koronal yağmur olaylarının hem oluşum sıklığının hem de zamansal olarak kalıcılığının, Güneş patlamalarını üreten aktif bölgelerin Zürich leke sınıfları ile ilişkili olduğunu düşündürmektedir.



Şekil 1. Zürich Güneş lekesi sınıflarına göre koronal yağmurun meydana gelme olasılığının yüzdesel dağılımı. Yüzdelere, Tablo 3'te verilen koronal yağmur içeren olay sayılarının Tablo 2'de verilen ilgili sınıftaki toplam olay sayısına bölünmesiyle hesaplanmıştır

Koronal yağmur, leke sınıf morfolojisi ve patlama büyüklüğü (diğer bir deyişle patlama sınıfı) arasındaki ilişkiyi daha derinlemesine incelemek amacıyla, tespit edilen olaylar ilişkili patlama sınıfına (C, M ve X) göre sınıflandırılmıştır. Her bir leke sınıfı için koronal yağmur oluşma potansiyeli, ilgili patlama sınıfı içerisinde koronal yağmur gözlenen aktif bölge sayısının toplam aktif bölge sayısına oranı olarak hesaplanmıştır (bkz. Şekil 2). Şekil 2 üzerinde her sütun için verilen değerler, ilgili leke sınıfı ve patlama sınıfı kombinasyonu için koronal yağmur gözlenen olay sayısının toplam olay sayısına oranını (örneğin 19/20) göstermektedir. Bu yaklaşım, farklı aktif bölge morfolojilerinin farklı Güneş patlama enerjisi koşulları altında ne kadar verimli bir şekilde yağmur ürettiğinin doğrudan karşılaştırılmasına olanak tanımaktadır. C sınıfı patlamalar için (açık mavi), koronal yağmurun oluşum oranı leke sınıfları arasında önemli ölçüde değişkenlik göstermektedir. En yüksek yağmur üretim potansiyeli H sınıfı bölgelerde (%50) bulunmakta olup, bunu C sınıfı bölgeler (%44) izlemektedir. Buna karşılık, daha karmaşık manyetik morfolojiye sahip lekelerde (D, E ve F) belirgin ölçüde daha düşük oluşum değerleri bulunmuştur. Spesifik olarak, D, E ve F sınıfı lekeler sırasıyla %32, %18 ve %9 oranlarında yağmur oluşum oranları göstermektedir. Bu durum, daha zayıf patlamalar sırasında koronal yağmur oluşumunun nispeten seyrek gerçekleştiğini ve ev sahibi aktif bölgenin manyetik yapısına bağlı olduğunu göstermektedir. M-sınıfı patlamalar için (açık yeşil), tüm leke sınıfları genelinde yağış görülme oranının belirgin bir şekilde yükseldiği görülmektedir. C, D, E ve F sınıfı bölgeler sırasıyla %75'inde, %79'unda, %83'ünde ve %78'inde koronal yağmur üretirken, H sınıfı bölgelerde, gözlemlenen tüm olaylarda (%100) koronal yağmur görülmüştür. Bu sonuç, orta enerjili patlamaların, geniş bir manyetik yapı aralığında koronal yağmur süreçlerini tetiklemeye yetecek güçte bir ısınma ve enerji girdisi sağladığını göstermektedir. X sınıfı Güneş patlamaları için (açık pembe), mevcut leke

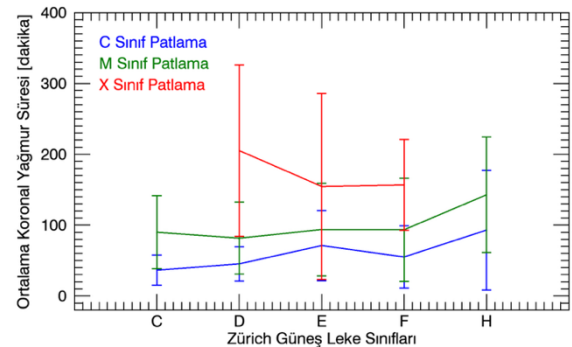
sınıflarında yağmur oluşumu neredeyse her yerde görülmektedir. Veri setimizde, D, E ve F sınıfı bölgeler sırasıyla %95, %93 ve %100 koronal yağmur üretim oranlarına sahiptir ki bu da bu morfolojilerdeki neredeyse tüm X sınıfı Güneş patlamalarının gözlemlenebilir koronal yağmur ürettiğini göstermektedir



Şekil 2. C, M ve X sınıfı Güneş patlamalarına göre her bir Güneş lekesi grubu için koronal yağmurun oluşum yüzdesi

Buna karşılık, C ve H sınıfı Güneş leke gruplarında gözlemlenebilir bir koronal yağmur üretimi gerçekleşmemiştir. Bu durum, veri setinde bu tür olayların bulunmamasından veya bu bölgelerdeki farklı manyetik yeniden yapılandırma süreçlerinden kaynaklanmakta olduğunu düşündürmektedir.

Koronal yağmur oluşum oranlarının yanı sıra, her bir Güneş leke sınıfı için, koronal yağmur olaylarının ortalama süresi de C, M ve X sınıfı patlamalar için ayrı ayrı hesaplanmıştır (Şekil 3). A ve B sınıfı leke içeren aktif bölgeler yetersiz sayıda olay içerdiğinden (veya hiç olay içermediğinden), bu analiz de sadece C, D, E, F ve H sınıflarına ev sahipliği yapan aktif bölgelerle sınırlandırılmıştır. X-sınıfı Güneş patlamaları (Şekil 3 kırmızı çizgi) söz konusu olduğunda, yukarıda da belirttiğimiz üzere, C ve H sınıflarına ev sahipliği yapan aktif bölgelerde herhangi bir koronal yağmur olayı tespit edilememiştir. Bu nedenle, X-sınıfı patlamalara ilişkin yağmur süresi istatistikleri yalnızca D, E ve F sınıfını içeren aktif bölgeler için verilmiştir.

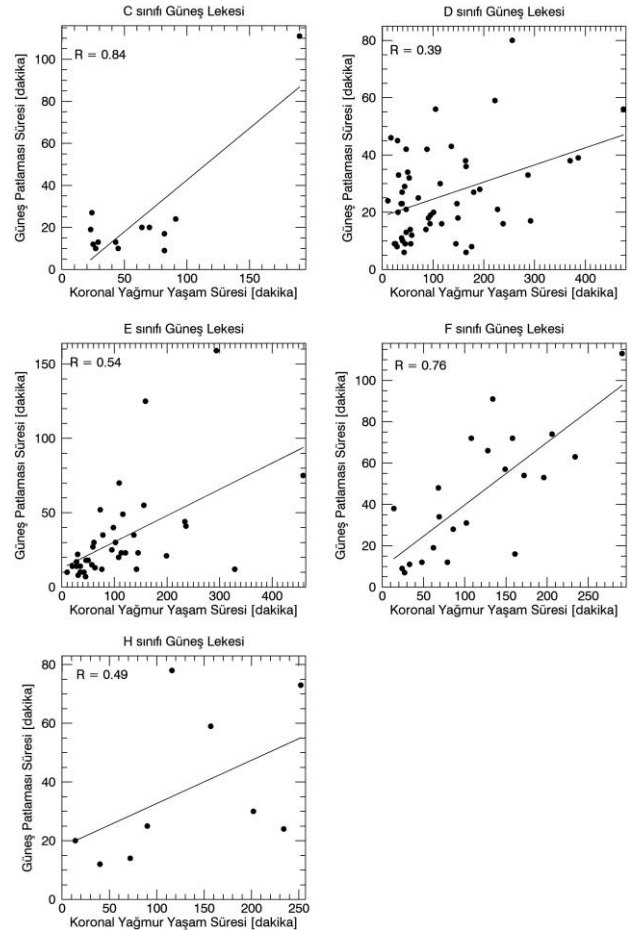


Şekil 3. C, M ve X sınıfı Güneş patlamaları için, koronal yağmurun ortalama süresi ile Güneş lekesi gruplarının Zürich sınıflandırması arasındaki ilişki

Şekil 3'te görüldüğü üzere, Güneş patlaması sınıfına bağlı olarak koronal yağmur süresinde belirgin bir genel artış bulunmuştur. Örneğin, C-sınıfı patlamalar (mavi çizgi) en kısa süreli olayları (morfolojiye bağlı olarak yaklaşık 36-93 dakika), M-sınıfı patlamalar (yeşil çizgi) orta düzeydeki süreleri (yaklaşık 81-143 dakika) ve X-sınıfı patlamalar (kırmızı çizgi) en uzun süreli olayları (yaklaşık 155-205 dakika) üretmiştir. C-sınıfı patlamalar için, koronal yağmur süreleri basit ve iki kutuplu gruplarda (yani C ve D) en kısa, büyük ve tek kutuplu (H sınıfı) leke gruplarına ev sahipliği yapan aktif bölgelerde ise en uzun bulunmuştur. M-sınıfı patlamalar için, bu süreler D ve F sınıfı leke gruplarına ev sahipliği yapan aktif bölgelerde karşılaştırılabilir düzeyde bulunmuştur (sırasıyla ~81, ~91 dakika), ancak yine H sınıfı leke grubu bölgelerinde daha uzundur (~143 dakika). X-sınıfı patlamalarda ise en uzun koronal yağmur süresi (~205 dakika) D, biraz daha kısa ancak yine de uzun süren yağmurlar da E ve F sınıfı (sırasıyla ~155, ~157 dakika) leke gruplarını içeren aktif bölgelerde bulunmuştur. Özellikle, X-sınıfı patlamalar için büyük standart sapmalar, aynı morfolojik sınıf içinde bile koronal lup geometrisindeki ve toplam enerji salınımindaki farklılıklarla da tutarlı olarak bu olaylar arası önemli değişkenliği yansıtmaktadır. Genel olarak elde edilen sonuçlar, hem Güneş leke gruplarının manyetik karmaşıklığının hem de patlama büyüklüğünün koronal yağmur olaylarının sürelerini etkilediğini göstermektedir. Daha karmaşık Güneş leke gruplarında meydana gelen daha güçlü patlamalar, belirgin ölçüde daha uzun süreli koronal yağmur olaylarıyla ilişkiliyken, daha zayıf patlamalar ise genellikle daha kısa ömürlü koronal yağmur olayları ortaya çıkarmaktadır.

Buna ek olarak, Güneş patlaması süresi (impulsif faz ile kademeli faz arasındaki zaman dilimi) ile koronal yağmur süresi arasındaki ilişkinin, ev sahibi aktif bölgelerdeki manyetik morfolojiye bağlı olup olmadığı incelenmek amacıyla, bu iki nicelik arasındaki ilişki her bir Güneş leke sınıfı için Pearson korelasyon analizi kullanılarak ayrı ayrı elde edilmiştir (Şekil 4). Daha önce de belirtildiği üzere, mevcut olay sayısının, istatistiksel açıdan anlamlı bir değerlendirmeye olanak tanımayacak kadar sınırlı olması nedeniyle, A ve B leke sınıfları analiz kapsamı dışında bırakılmıştır. Orta düzeyde gelişmiş leke gruplarında (C-sınıfı) 13 olaya dayalı olarak yüksek bir korelasyon ($R=0.84$) elde edilmiştir. Her ne kadar bu sonuç yalnızca 13 olaydan elde edilmiş olsa da söz konusu bölgelerde, daha uzun süreli Güneş patlaması olaylarının genellikle daha uzun ömürlü koronal yağmur olayları ile ilişkili olduğunu düşündürmektedir. Ancak not etmek isteriz ki, örneklem büyüklüğünün sınırlı olması ve korelasyonun az sayıdaki uzun süreli olaydan etkilenme olasılığı nedeniyle, bu sonucun gelecekte daha geniş örneklemeler kullanılarak doğrulanması önem taşımaktadır. D sınıfı bölgeler ise farklı bir davranış sergilemiştir. Bu leke sınıfı, veri

setindeki en yüksek olay sayısını ($N=53$) içermesine rağmen, korelasyon katsayısı nispeten zayıf bulunmuştur ($R=0.39$). Bu durum, Güneş patlaması süresi ile koronal yağmur süresi arasında daha dağınık bir ilişki bulunduğuna işaret etmektedir. Bu bulgu, söz konusu lekeye ev sahipliği yapan aktif bölgelerde koronal yağmurun süresini belirleyen baskın faktörün yalnızca Güneş patlamasının süresi olmayabileceğini ortaya koymaktadır. E sınıfı bölgeler ($N=38$) için korelasyon orta düzeyde güçlenmektedir ($R=0.54$). Bu da başka fiziksel süreçlerin katkısını göstermekle birlikte, aynı zamanda patlama süresinin koronal yağmur süresini etkileme konusunda daha belirgin bir rol oynadığını da ortaya koymaktadır. İlginç bir şekilde, veri setimizdeki yapı olarak en gelişmiş leke gruplarından biri olan F sınıfı bölgeler ($N=22$) için, yine güçlü ve pozitif bir korelasyon ($R=0.76$) sonucu elde edilmiştir. Bu durum, büyük ve karmaşık yapılanmaya sahip aktif bölgelerde, daha uzun süreli patlamaların, daha uzun süreli koronal yağmur olaylarını tetikleme eğiliminde olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. Farklı Güneş leke sınıfları için patlama süresi ile koronal yağmur süresi arasındaki ilişki

Son olarak, H sınıfı lekeler ev sahipliği yapan aktif bölgeler, dokuz ($N=9$) olaya dayalı olarak orta düzeyde bir korelasyon ($R=0.49$) sergilemektedir. Ancak, sınırlı örneklem büyüklüğü, elde edilen ilişkinin istatistiksel güvenilirliğini azaltmakta ve

sonuçların dikkatli yorumlanmasını gerektirmektedir. Genel olarak korelasyon analizi, patlama süresi ile koronal yağmur süresi arasındaki ilişkinin tüm Zürih leke sınıfları için tekdüze olmadığını, aksine bu ilişkinin farklı leke sınıfları arasında belirgin değişkenlik gösterebildiğini ortaya koymaktadır.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada sunulan bulgular koronal yağmur oluşumu, ortalama yağmur süresi, patlama büyüklüğü ve aktif bölgelerin Güneş lekesi sınıfları arasında bir ilişki olup olmadığını ortaya koymaktadır. Tespit edilen yağmur olaylarının sayısını, her bir leke sınıfındaki aktif bölge sayısına göre normalize edilmiştir. Sonuç olarak, koronal yağmur oluşum oranlarının Zürih Güneş lekesi sınıfları arasında farklılık gösterdiği bulunmuştur. En yüksek oluşum oranı H sınıfı aktif bölgelerde (%69) gözlenirken, bunu D sınıfı bölgeler (%64) takip etmektedir. Buna karşılık, E (%54) ve F (%48) sınıflarında daha düşük oluşum oranları elde edilmiştir. Bu sonuçlar, koronal yağmur oluşumunun Zürih Güneş lekesi morfolojisi ile ilişkili olabileceğini, ancak bu ilişkinin monoton bir artış biçiminde olmadığını göstermektedir. Buna ek olarak, C leke sınıfından D ve H leke sınıflarına doğru gözlemlenen koronal yağmur sürelerinin uzaması, aktif bölge morfolojisinin koronal yağmur özellikleriyle ilişkili olabileceğini düşündürmektedir. Bu durum, önceki çalışmalarda koronal yağmurun oluşumu ve sürelerinin koronal lup özellikleri, ısıtma süreçleri ve termal dengesizlik koşulları ile ilişkili olabileceğini gösteren sonuçlarla da genel olarak uyumludur [16,22,26]. Daha yaygın (uzamsal olarak) ve daha karmaşık iki kutuplu leke gruplarına (D, E ve F) ev sahipliği yapan aktif bölgeler ve büyük, tek kutuplu lekeler (H), TNE koşullarını uzun süreler boyunca sürdüren daha uzun koronal lupları desteklemektedir [22]. Bu çalışmada elde edilen süreler (61-131 dakika), aktif bölgelerde gözlemlenen sakin koronal yağmur ortalamaları ~35 dakika [23] ile daha uzun süreye sahip patlama sonrası koronal lup olayları arasında bir aralıkta yer almaktadır. Bu durum, veri setimizde patlama içeren bölgeler dahilinde hem patlama sonrası gerçekleşen hem de yarı sakin nitelikteki yağmur olaylarının bir karışımını yakaladığını göstermektedir.

Bu çalışmada sunulan ve leke morfolojisine bağlı olan sonuçlar, daha önceki çalışmalarda [20] elde edilen patlama sınıfı istatistikleriyle oldukça uyumludur. Bu çalışmada gerçekleştirilen, patlama seçimine bağlı ancak leke morfolojisi odaklı çalışmamız, daha yüksek oluşum oranı ve ara süreler göstermiş olup, patlama şiddetlerinin ve evrimsel aşamaların bir karışımını içermesiyle de tutarlıdır. Karmaşıklıkla birlikte, koronal lup oluşumunda kesin bir monoton artışın olmaması (örneğin, F sınıfı leke gruplarında daha düşük), koronal lupun eğimi, toplam manyetik akı ve koronal lupların ayakucundaki ısıtma süreçleri gibi faktörlerin koronal yağmur özelliklerini basit, iki

kutuplu yayılımın ötesinde olabileceğini vurgulamaktadır.

Ayrıca, bu çalışmada hem koronal yağmur süresinin hem de oluşum oranlarının Güneş patlamasına olan bağımlılığı da ortaya konulmuştur. C sınıfından M ve X sınıfı patlamalara doğru gözlemlenen koronal yağmur oluşumundaki artış, büyük olasılıkla patlama kaynaklı kromosferik buharlaşmanın rolünü yansıtmaktadır. Bu kromosferik buharlaşma, patlama sonrası koronal luplara büyük miktarda kütle-enerji girdisi sağlar ve radyatif soğuma baskın hale geldiğinde yoğun yoğunlaşmaların (koronal yağmur) oluşumunu yol açar [6, 24]. Bu nedenle, daha güçlü patlamalar, koronal yağmur oluşumu için birincil mekanizma olarak kabul edilen TNE çevrimleri için gerekli olan yüksek yoğunluklu koronal lup koşullarını oluşturmada daha yeteneklidir [9, 11]. Buna karşılık, daha zayıf C sınıfı patlamalar, uzun süreli buharlaşma-yoğuşma çevrimini sürdürmek için her zaman yeterli enerji girdisi sağlamayabilir ki bu da önemli ölçüde daha düşük yağmur oluşum oranlarına yol açabilir.

Güneş leke morfolojisine olan bu bağımlılık, aktif bölge morfolojisinin koronal yağmur oluşumu ile ilişkili olabileceğini düşündürmektedir. Önceki çalışmalar, D, E ve F sınıfı Güneş lekesi morfolojilerine sahip aktif bölgelerin farklı koronal lup sistemleri ile ilişkili olabileceğini göstermektedir [19,25]. Öte yandan, tek kutuplu ve ileri düzeyde gelişmiş H-sınıfı aktif bölgelerde, orta enerjili patlamalar sırasında yoğunlaşmayı kolaylaştıran uzun ve kararlı koronal luplar bulunabilir ki bu bölgeler, çok enerjik olaylar gerçekleştiğinde hızlıca manyetik olarak yeniden yapılanma gösterebilirler. Bu sonuçlar, koronal yağmur oluşumunun, koronal lup termodinamiği, ısıtma süreçleri ve manyetik yapı ile ilişkili olabileceğini öne süren önceki çalışmalarla genel olarak tutarlılık göstermektedir [16, 26].

Ortalama süreler baktığımız zaman, C-sınıfı Güneş patlamalarından (tipik olarak 36-93 dakika), M-sınıfına (81-143 dakika) ve X-sınıfına (155-205 dakika) doğru sistematik bir artış eğilimi gözlenmektedir. Özellikle, D leke gruplarına ev sahipliği yapan aktif bölgelerde meydana gelen X-sınıfı Güneş patlamaları için elde edilen ortalama koronal yağmur süresi (~205 dakika), bu çalışmadaki en yüksek ortalama yağmur süresini temsil etmektedir. Bu sonuçlar, daha enerjik patlamaların daha uzun süreli koronal yağmur olayları ile ilişkili olabileceğini düşündürmektedir. Daha yüksek GOES sınıfına sahip patlamaların daha yoğun manyetik yeniden bağlanma süreçleri ve daha güçlü enerji salımları ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Bu durum, luplarda termal dengesizlikler oluşturabilir ve radyatif soğuma sürecini başlatabilir. Radyatif soğuma süreci ise koronal yağmurları tetikleyen zaman ölçeğini (radyatif soğuma zamanı) uzatabilir [11].

Söz konusu bu süreler, uzun süreli ısınmayı takiben kademeli soğuma nedeniyle (yani impulsif fazdan kademeli faza geçiş) en yoğun olaylarda genellikle birkaç saate ulaşmaktadır [20, 25]. İlginç bir şekilde, veri setimizde C ve H sınıfı Güneş lekelerine ev sahipliği yapan aktif bölgelerde X sınıfı patlama gözlenmemiştir. Bu sonuç, morfolojik olarak daha basit aktif bölge yapılanmalarında koronal yağmur oluşumunun sınırlı olması, manyetik yapıların termal dengesizlik çevrimlerini sürdürebilme kapasitesiyle ilişkili olabilir. Örneğin, morfolojik olarak en basit iki kutuplu C sınıfı leke grubuna ev sahipliği yapan aktif bölgelerde koronal yağmurun gözlenmemesi, X-sınıfı patlama olaylarına özgü güçlü impulsif ısınma koşulları altında uzun süreli termal dengesizlik çevrimini sürdürebilecek kadar geniş veya daha karmaşık manyetik lup sistemlerinin bulunmamasından kaynaklanıyor olabilir. Bu tür basit manyetik yapılarda, patlama sonrası manyetik yeniden bağlanma genellikle nispeten kısa ya da parçalı koronal lupları oluşturabilir. Bu luplar ya çok hızlı soğudukları için ya da gözlemlenebilir bir yoğunlaşmanın oluşabilmesi için gerekli olan kütle ve entalpi birikimini sağlayamadıkları için koronal yağmurun gözlenmesi mümkün olmayabilir. Bu durum, koronal yağmur oluşumunun etkin bir şekilde gerçekleşebilmesi için belirli bir minimum enerji birikimi eşiği gerektiğine işaret etmektedir [20]. Benzer şekilde, H sınıfı leke gruplarına ev sahipliği yapan aktif bölgelerde koronal yağmurun gözlenmemesi, güçlü patlamalar sırasında gerçekleşen hızlı büyük ölçekli manyetik yeniden yapılanma ile açıklanabilir. Tek kutuplu yapılanmalar genellikle daha açık veya zayıf manyetik alanlara sahiptirler. Bu durum patlama sonrası koronal lupların oluşumunu zorlaştırabilir veya manyetik alanın hızla yeniden yapılandırılmasına yol açabilir. Bu koşullar, termal dengesizlik kaynaklı koronal yağmur oluşum süreçleri için gerekli olan ve süreklilik gösteren ısınma ve soğuma çevrimini bozabilir [18, 16]. Öte yandan, gözlemsel çalışmalar, koronal yağmurun manyetik sıfır nokta topolojisinde veya iki kutuplu yapılar içeren karmaşık manyetik bölgelerde yaygın olduğunu göstermiştir [27, 28]. Buna karşılık, geniş ölçekli tek kutuplu bölgelerde enerji boşalımı çoğu zaman püskürme veya jet benzeri akışlarla gerçekleşebilir ve bu durum stabil koronal lup soğuması yerine alternatif enerji boşalım yollarını tercih edebilir [29]. Ancak bu davranış, daha düşük enerjili patlamalar için elde edilen sonuçlarla çelişmektedir. Hem C- hem de M-sınıfı patlamalar için, veri setimizdeki H sınıfı leke gruplarına ev sahipliği yapan aktif bölgeler, M sınıfı olaylar sırasında ~143 dakikaya varan sürelerle en uzun ortalama yağmur sürelerini sergilemektedir. Bu belirgin karşıtlık, H sınıfı bölgelere özgü, büyük ve nispeten kararlı lup sistemlerinin, orta enerjili patlamalar sırasında uzun süreli yağmur oluşumunu desteklediğini düşündürmektedir. Buna karşılık, son derece enerjik X sınıfı patlamaların ise, sürekli yoğunlaşma için gerekli olan patlama sonrası lupların

oluşumunu sekteye uğratan hızlı bir manyetik yeniden yapılanmayı tetikleyebilmektedir.

Güneş leke gruplarına olan bağımlılık, aktif bölge yapısının koronal yağmur oluşumuyla ilişkili olabileceğini düşündürmektedir. Karmaşık aktif bölgelerin, termal dengesizlik çevrimlerini sürdürebilme yetisine sahip, geniş kapsamlı ve yapılu lup sistemlerine ev sahipliği yaptığı bilinmektedir [30, 26]. Bu tür ortamların, tekrarlayan yoğunlaşma ve uzun süreli yağmur olaylarıyla ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Ki bu da veri setimizdeki D, E, F ve H tipi bölgelerde gözlemlenen daha yüksek oluşum oranlarını ve daha uzun yaşam sürelerini açıklayabilir. Daha genel bir ifadeyle, Güneş leke morfolojisi, yağmur süresinin patlama sınıfına olan bağımlılığına ek bir ayar getirmektedir. C ve M sınıfı patlamalar söz konusu olduğunda en uzun süreli yağmur olaylarına H sınıfı aktif bölgeler hakimken, en karmaşık iki kutuplu sınıflar (E ve F), daha zayıf patlamalar sırasında orta uzunlukta yağmur süreleri üretme eğilimindedir. Ancak X sınıfı patlamalar sırasında, bu bölgeler en uzun süreli yağmurlara ev sahipliği yaparlar. Bu davranış, ilgili Güneş lekeleri morfolojilerinin literatürde yüksek patlama üretkenliği ile ilişkilendirildiğini gösteren önceki çalışmalarla genel olarak uyumludur [19, 31]. İlginç bir şekilde, veri setimizdeki en yüksek ortalama yağmur süresi, X sınıfı patlamalar sırasında D sınıfı bölgelerde (~205 dk) gerçekleşmektedir. Bu sonuç, koronal yağmur sürelerinin yalnızca Güneş patlaması büyüklüğüne değil, aynı zamanda aktif bölge morfolojisine de bağlı olabileceğini düşündürmektedir. Bu durum, orta düzeyde manyetik karmaşıklığa sahip bölgelerin, uzun süreli yağmur oluşumu için özellikle elverişli koşullar sağladığına işaret edebilir. Bu tür durumlarda manyetik luplar daha karmaşık aktif bölgelerde meydana gelebilecek şiddetli parçalanmaya maruz kalmaksızın, yeniden bağlanma kaynaklı verimli bir ısınma yapısını sürdürürken, aynı zamanda uzun süreli soğumaya olanak tanıyacak kadar da uzun olabilirler. Ancak not edilmelidir ki, bu çalışmada koronal lup geometrisi, enerji girdisi veya manyetik yeniden yapılanma süreçlerine ilişkin doğrudan bir ölçüm gerçekleştirilmediğinden, bu farklılıkların altında yatan fiziksel mekanizmalar gelecekteki çalışmalar ile daha ayrıntılı olarak araştırılmalıdır.

Güneş patlaması süresi ile koronal yağmur süresi arasındaki ilişki, ev sahibi aktif bölgenin manyetik yapısı ve karmaşıklığından etkilenebilir. Özellikle, C ve F sınıfına ait lekeler için gözlemlenen nispeten güçlü korelasyonlar, bazı manyetik yapılanmalarda, Güneş patlaması süresinin, koronal yağmur oluşumuna yol açan sonraki soğuma süreçlerinin süresini de doğrudan etkileyebileceğini göstermektedir. Bu gibi durumlarda, daha uzun süren Güneş patlamaları, koronal luplara daha fazla enerji gönderebilir veya daha uzun süreler boyunca ısınmayı sürdürebilir [32, 33, 12] böylece daha sonra termal kararsızlığa ve yoğunlaşmaya uğrayan plazma miktarını da

artırabilir. Buna karşılık, D sınıfı leke bölgeleri için gözlemlenen daha zayıf korelasyon, Güneş patlaması süresinin tek başına bu aktif bölgelerdeki yağmur süresindeki gözlemlenen değişkenliği tam olarak açıklayamadığını da göstermektedir. Bu ara yapılanmalarda, karmaşık lup geometrisi ve birçok ince luptan oluşan koronal lup etkileşimleri gibi ek süreçlerin, yağmur süresinin patlama süresinden ayırabileceğini [26, 34, 35] düşündürmektedir. Simülasyon ve gözlemsel çalışmalar, koronal yağmur oluşumunun temel itici gücü olan termal kararsızlığın, radyatif soğumanın yerel ısınmayı aştığı durumlarda ortaya çıktığını ve ayrıntılı başlangıç ve zaman ölçeğinin lup uzunluğuna, ısıtma fonksiyonuna ve uzamsal yapıya bağlı olduğunu göstermektedir [36, 14]. Dahası, son çalışmalar, patlama kaynaklı termal kararsızlık ve soğuma süreçlerinin, patlama içermeyen luplardaki durgun yağmur oluşumundan önemli ölçüde farklılık gösterebileceğini, bunun da muhtemelen lup termodinamiğini bozan ani ısınma süreçleri ve yeniden bağlanma dinamiklerinden kaynaklanabileceğini göstermiştir [22]. Güneş leke sınıfları genelinde gözlemlenen korelasyonların karışık gücü, bu nedenle soğuma ve yoğunlaşma zaman ölçeklerini etkileyen geometrik ve ısıtma değişkenlerinin bir kombinasyonunu yansıtabilir. Bu sonuçlar, aktif bir bölgenin manyetik morfolojisinin ve ilişkili koronal lup özelliklerinin, patlama kaynaklı ısınmanın termal kararsızlığa ve koronal yağmur oluşumuna ne kadar etkili bir şekilde dönüştüğünü belirlediğini göstermektedir. Ancak, bazı Züriç-GOES alt gruplarında olay sayılarının sınırlı olması ve alt sınıflardaki yüksek standart sapmaların bulunması nedeniyle, burada sunulan eğilimlerin daha geniş örneklemeler kullanılarak gelecekteki çalışmalarla desteklenmesi önem taşımaktadır. Ayrıca, burada sunulan analiz, bireysel lup ve koronal yağmur takibinden ziyade belirli bir tarih aralığındaki olay sayımlarına dayanmaktadır. Buna ek olarak, gözlemsel duyarlılık, sönük veya kısa ömürlü koronal yağmur olaylarının tespitini etkileyebilir. Bu açıdan bakıldığında, gelecekte yüksek çözünürlüklü gözlemler ayrıntılı lup takibi ve sayısal modelleme analizlerini daha açık bir şekilde ortaya koyabilir. Böylece, bu gözlemler, koronal yağmur oluşumunu ve evrimini yöneten fiziksel süreçleri daha net bir şekilde anlamamıza yardımcı olacaktır.

Teşekkür

M.T., ‘Yeni Doktora Öğrencilerinin Eğitimi’ başlıklı Genç Araştırmacıların Kariyer Gelişimi Projesi kapsamında Hırvat Bilim Vakfı tarafından sağlanan destek için teşekkür eder.

Etik Beyanı

Bu çalışmada, “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine

Aykırı Eylemler” başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] Klimchuk, J.A., 2006. On solving the coronal heating problem. *Solar Physics*, 234(1), pp.41-77.
- [2] Sweet, P.A., 1958, January. 14. The neutral point theory of solar flares. In *Symposium-International Astronomical Union* (Vol. 6, pp. 123-134). Cambridge University Press.
- [3] Shibata, K. and Magara, T., 2011. Solar flares: magnetohydrodynamic processes. *Living Reviews in Solar Physics*, 8(1), pp.1-99.
- [4] Fletcher, L., Dennis, B.R., Hudson, H.S., Krucker, S., Phillips, K., Veronig, A., Battaglia, M., Bone, L., Caspi, A., Chen, Q. and Gallagher, P., 2011. An observational overview of solar flares. *Space science reviews*, 159(1), p.19.
- [5] Golub, L. and Pasachoff, J.M., 2010. The solar corona. Cambridge University Press.
- [6] Fisher, G.H., Canfield, R.C. and McClymont, A.N., 1985. Flare loop radiative hydrodynamics. VI. Chromospheric evaporation due to heating by nonthermal electrons. *Astrophysical Journal*, Vol. 289, pp. 425-433.
- [7] Dudík, J., Polito, V., Janvier, M., Mulay, S.M., Karlický, M., Aulanier, G., Zanna, G.D., Dzifčáková, E., Mason, H.E. and Schmieder, B., 2016. Slipping magnetic reconnection, chromospheric evaporation, implosion, and precursors in the 2014 September 10 X1.6-class solar flare. *The Astrophysical Journal*, 823(1), p.41.
- [8] Antolin, P., Vissers, G., Pereira, T.M.D., Voort, L.R.V.D. and Scullion, E., 2015. The multi-thermal and multi-stranded nature of coronal rain. *The Astrophysical Journal*, 806(1), p.81.
- [9] Klimchuk, J.A., 2015. Key aspects of coronal heating. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 373(2042).
- [10] Culhane, J.L., Rappley, C.G., Bentley, R.D., Gabriel, A.H., Phillips, K.J., Acton, L.W., Wolfson, C.J., Catura, R.C., Jordan, C. and Antonucci, E., 1981. X-ray spectra of solar flares obtained with a high-resolution bent crystal spectrometer. *Astrophysical Journal*, Part 2-Letters to the Editor, vol. 244, Mar. 15, 1981, p. L141-L145. Research supported by the Science Research Council and Lockheed Independent Research Program.
- [11] Antolin, P., 2020. Thermal instability and non-equilibrium in solar coronal loops: from coronal rain to long-period intensity pulsations. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 62(1), p.014016.

- [12] Antolin, P. and Froment, C., 2022. Multi-scale variability of coronal loops set by thermal non-equilibrium and instability as a probe for coronal heating. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 9, p.820116.
- [13] Foukal, P., 1978. Magnetic loops, downflows, and convection in the solar corona. *Astrophysical Journal*, Part 1, vol. 223, Aug. 1, 1978, p. 1046-1057., 223, pp.1046-1057.
- [14] Scullion, E., Voort, L.R.V.D., Antolin, P., Wedemeyer, S., Vissers, G., Kontar, E.P. and Gallagher, P.T., 2016. Observing the formation of flare-driven coronal rain. *The Astrophysical Journal*, 833(2), p.184.
- [15] Şahin, S. and Antolin, P., 2024. From chromospheric evaporation to coronal rain: an investigation of the mass and energy cycle of a flare. *The Astrophysical Journal*, 970(2), p.106.
- [16] Mason, E.I., Antiochos, S.K. and Viall, N.M., 2019. Observations of solar coronal rain in null point topologies. *The Astrophysical Journal Letters*, 874(2), p.L33.
- [17] Şahin, S. and Antolin, P., 2025. Do Flares Impact Neighboring Quiescent Coronal Rain?. *Solar Physics*, 300(11), p.158.
- [18] van Driel-Gesztelyi, L. and Green, L.M., 2015. Evolution of active regions. *Living Reviews in Solar Physics*, 12(1), p.1.
- [19] McIntosh, P.S., 1990. The classification of sunspot groups. *Solar Physics*, 125(2), pp.251-267.
- [20] Mason, E.I. and Knizevski, K.L., 2022. To rain or not to rain: correlating GOES flare class and coronal rain statistics. *The Astrophysical Journal*, 939(1), p.21.
- [21] Reep, J.W., Benavitz, L.F., To, A.S., Brooks, D.H., Laming, J.M., Antolin, P., Long, D.M. and Baker, D., 2025. Radiative hydrodynamic simulations of FIP fractionation in solar flares. *arXiv preprint arXiv:2509.25695*.
- [22] Şahin, S., Antolin, P., Froment, C. and Schad, T.A., 2023. Spatial and temporal analysis of quiescent coronal rain over an active region. *The Astrophysical Journal*, 950(2), p.171.
- [23] Şahin, S. and Antolin, P., 2022. Prevalence of thermal nonequilibrium over an active region. *The Astrophysical Journal Letters*, 931(2), p.L27.
- [24] Reep, J.W., Warren, H.P., Crump, N.A. and Simões, P.J., 2016. Transition region and chromospheric signatures of impulsive heating events. II. Modeling. *The Astrophysical Journal*, 827(2), p.145.
- [25] Toriumi, S. and Wang, H., 2019. Flare-productive active regions. *Living Reviews in Solar Physics*, 16(1), p.3.
- [26] Froment, C., Auchère, F., Mikić, Z., Aulanier, G., Bocchialini, K., Buchlin, E., Solomon, J. and Soubrié, E., 2018. On the occurrence of thermal nonequilibrium in coronal loops. *The Astrophysical Journal*, 855(1), p.52.
- [27] Li, L., Peter, H., Chitta, L.P. and Song, H., 2020. Relation of coronal rain originating from coronal condensations to interchange magnetic reconnection. *The Astrophysical Journal*, 905(1), p.26.
- [28] Qiao, F., Li, L., Tian, H., Hou, Z., Song, H., Ji, K. and Sun, Z., 2024. Three types of solar coronal rain during magnetic reconnection between open and closed magnetic structures. *The Astrophysical Journal*, 973(1), p.57.
- [29] Keppens, R., Zhou, Y. and Xia, C., 2025. Modeling multiphase plasma in the corona: prominences and rain: R. Keppens et al. *Living Reviews in Solar Physics*, 22(1), p.4.
- [30] Antolin, P. and Rouppe van der Voort, L., 2012. Observing the fine structure of loops through high-resolution spectroscopic observations of coronal rain with the CRISP instrument at the Swedish Solar Telescope. *The Astrophysical Journal*, 745(2), p.152.
- [31] Janssens, J., Delouille, V., Clette, F. and Andries, J., 2025. Solar flare rates and probabilities based on the McIntosh classification: Impacts of GOES/XRS rescaling and revisited sunspot classifications. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 15, p.14.
- [32] Auchère, F., Froment, C., Soubrié, E., Antolin, P., Oliver, R. and Pelouze, G., 2018. The coronal monsoon: thermal nonequilibrium revealed by periodic coronal rain. *The Astrophysical Journal*, 853(2), p.176.
- [33] Froment, C., Auchère, F., Bocchialini, K., Buchlin, E., Guennou, C. and Solomon, J., 2015. Evidence for evaporation-incomplete condensation cycles in warm solar coronal loops. *The Astrophysical Journal*, 807(2), p.158.
- [34] Johnston, C.D., Cargill, P.J., Antolin, P., Hood, A.W., De Moortel, I. and Bradshaw, S.J., 2019. The effects of numerical resolution, heating timescales and background heating on thermal non-equilibrium in coronal loops. *Astronomy & Astrophysics*, 625, p.A149.
- [35] Klimchuk, J.A. and Luna, M., 2019. The role of asymmetries in thermal nonequilibrium. *The Astrophysical Journal*, 884(1), p.68.
- [36] Müller, D.A.N., Hansteen, V.H. and Peter, H., 2003. Dynamics of solar coronal loops-I. Condensation in cool loops and its effect on transition region lines. *Astronomy & Astrophysics*, 411(3), pp.605-613.