GÜNEŞ BENZERİ YILDIZLARDAKİ LEKE GRUPLARININ BOYLAMSAL ANALİZİ

KARAPINAR, N.[1], ŞENAVCI, H.V.[2], IŞIK E. [3], ÖZAVCI İ. [2], BAHAR E. [2]

[1]Ankara Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü [2] Ankara Üniversitesi/ Astronomi ve Uzay Bilimleri
[3] Max Planck Güneş Sistemi Araştırmaları Enstitüsü
nkarapinar@ankara.edu.tr / nurdankarapinar@gmail.com

UAK 2026

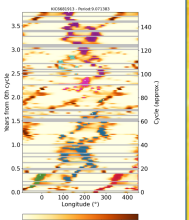
A.Ü.F.F. 1943

ÖZET

Bu çalışmada, Güneş benzeri sekiz yıldızın yüzeydeki aktif bölgelerinin boylamsal dağılımı ve zamansal evrimi incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, aktif boylamların kararlılığını, leke gruplarının oluşum ve sürüklenme davranışlarını karşılaştırmalı olarak araştırmak ve bu özellikleri yıldızların dönme karakteristikleri ile manyetik aktivite düzeyleri bağlamında değerlendirmektir. **Bu kapsamda, Kepler ışık eğrilerinden elde edilen leke noktaları dönme periyotları kullanılarak boylam–zaman uzayına taşınmış; aktif bölgelerin uzaysal organizasyonu DBSCAN tabanlı kümelenme analizi ile belirlenmiş ve kümelenmiş leke noktalarının toplam leke noktalarına oranı olarak tanımlanan Nesting Degree (ND) ile nicel hale getirilmiştir.** Böylece aktif boylamların yalnızca görsel olarak belirlenmesi yerine, **leke öbeklenmesinin çevrimler boyunca nasıl değiştiği, hangi yıldızlarda daha belirgin olduğu ve yıldızların dönme özellikleriyle nasıl ilişkilendiği** sistematik olarak karşılaştırılmıştır.
Elde edilen sonuçlar, yıldız lekelerinin yüzeyde tamamen rastgele dağılmadığını; bazı yıldızlarda belirli boylamlar çevresinde belirgin bir öbeklenme eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır. **Çevrim-çevrim Nesting Degree analizi**, bu organizasyonun zaman içinde sabit olmayabileceğini ve yıldızdan yıldıza farklılık gösterebildiğini ortaya koyarken, leke çevrimi ve çevrim genliği ile birlikte değerlendirildiğinde manyetik aktivitenin yalnızca miktarının değil, **yıldızın manyetik aktivitesinin de** önemli bir karakteristik olduğunu göstermektedir.

MOTİVASYON

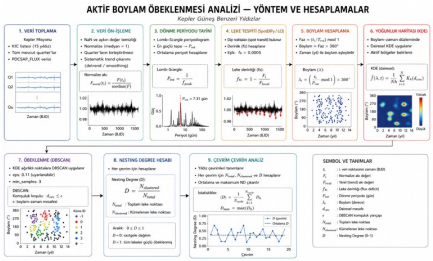
Kepler'in yüksek hassasiyetli fotometrisi, yıldız lekelerinin evrimini ve manyetik aktiviteyi uzun zaman ölçeğinde incelemeyi mümkün kılar.
Yıldız lekeleri, dönme ve manyetik aktivitenin yüzeydeki gözlenebilir izleyicileri olarak yıldız dinamosunun araştırılmasında temel bir araçtır.
Leke dağılımlarının yalnızca aktivite genliğiyle değil, boylam-zaman uzayındaki mekânsal öbeklenmeleriyle incelenmesi, yıldız manyetik alanlarının yüzey aktivitelerinin anlaşılmasına katkı sağlar.



Çalışmanın gelecek aşamasından bir örnek

YÖNTEM

Kepler uzay teleskobu tarafından gözlenen sekiz Güneş benzeri yıldıza ait hassas ve uzun zaman aralığına dağılmış fotometrik verileri kullanılmıştır. Işık eğrileri Python tabanlı analiz araçları ile işlenmiş, SpotDIPy yazılımı kullanılarak LCI (Light Curve Inversion) yöntemi ile yıldız yüzey haritaları elde edilmiştir. Geliştirilen bir iz sürme algoritması yardımıyla leke grupları otomatik olarak belirlenmiş, boylam-zaman haritaları üzerinden aktif bölgelerin evrimi, boylamsal sürüklenmeleri ve zamansal değişimleri nicel olarak analiz edilmiştir.



Yıldızın dönme periyodu P_{rot}, ışık eğrisindeki periyodik modülasyonlardan elde edilmektedir. Kodda bunun için **Lomb–Scargle periodogramı** kullanıldı. Çalışmanın temel gözlemsel girdisi, ışık eğrisindeki **kararlılık yıldız lekelerine karşılık gelen alçalışlar**. Öncelikle normalize edilmiş ışık eğrisinden uzun dönemli dönem çıkarılmaktadır. fs'yi doğrudan "yıldız yüzeyinin gerçek leke alanı" şeklinde ifade etmek yerine **fotometrik leke derinliği** olarak tanımlamak daha doğru olur. Dolayısıyla yöntem, doğrudan her fiziksel lekenin geometrik alanını ölçmekten ziyade, ışık eğrisinde gözlenen **fotometrik kararmayı** leke göstergesi olarak kullanmaktadır. Boylam–zaman düzlemindeki leke noktalarının dağılımı yalnızca görsel olarak değerlendirilmemekte, **DBSCAN** ile nicel olarak analiz edilmektedir.

YILDIZLARA AİT BİLGİLER

Güneş Benzeri Yıldızlar — Kepler Leke Analizi Sonuçları

KIC	Q	Toplam Leke Sayısı	Ortalama Dönme Periyodu (gün)	⟨D⟩
★ 7895206	18	10 135	9.56	**0.931 ± 0.162**
9468789	18	24 330	6.49	**0.997 ± 0.009**
★ 6681913	18	22 040	9.08	**0.991 ± 0.036**
★ 8009475	18	18 229	12.76	**0.970 ± 0.134**
8952106	17	262	20.14	**0.573 ± 0.422**
6351285	18	293	16.31	**0.844 ± 0.316**
★ 7203835	18	13	16.66	**1.000 ± 0.000**
★ 6507505	18	5 951	18.00	**0.885 ± 0.198**
★ 8621906	18	24 354	5.45	**0.996 ± 0.016**
5865729	18	57	18.23	**0.727 ± 0.422**
★ 6764530	18	26 914	4.49	**0.990 ± 0.065**
10975635	18	1 944	23.08	**0.817 ± 0.281**
7611798	18	5 290	13.32	**0.913 ± 0.194**
★ 5773489	14	17 365	7.31	**0.996 ± 0.015**
7190814	17	9 285	9.09	**0.935 ± 0.173**

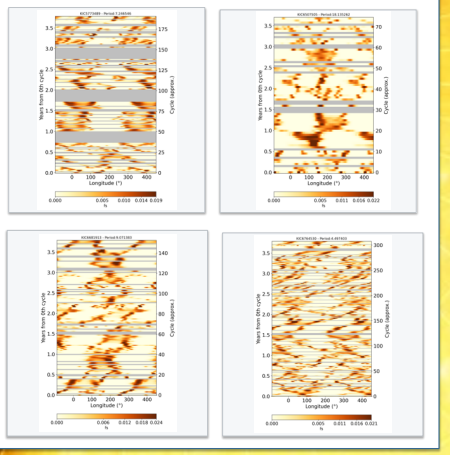
Q: Kepler Quarter sayısı | ⟨D⟩: Çevrimler üzerinden ortalama Nesting Degree

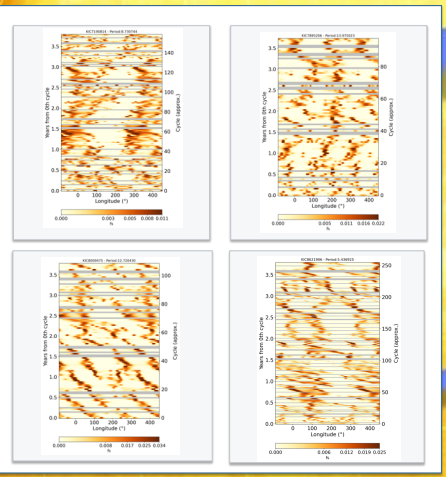
★ Bu çalışma kapsamında seçilen yıldızlar

VERİ ve ÖRNEKLEM

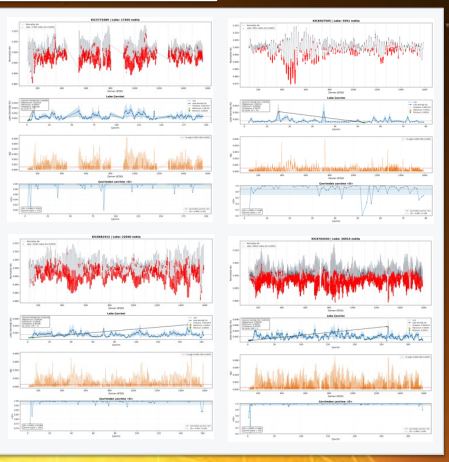
Çalışmada, **NASA Kepler Uzay Teleskobu** tarafından elde edilen yüksek duyarlılıklı fotometrik ışık eğrileri kullanılarak Güneş-benzeri yıldızların yüzey manyetik aktivitesi incelenmiştir. Başlangıç örneklemi, literatürde Güneş-benzeri olarak sınıflandırılan ve Kepler arşivinde yeterli zaman kapsamına sahip **15 yıldızdan** oluşturulmuş; mümkün olduğunca çok sayıda Kepler Quarter'ı bir araya getirilerek uzun süreli ve homojen zaman serileri elde edilmiştir. Bu örneklemde **KIC 7895206, 9468789, 6681913, 8009475, 8952106, 6351285, 7203835, 6507505, 8621906, 5865729, 6764530, 10975635, 7611798, 5773489 ve 7190814** yıldızları yer almaktadır.
Ayrıntılı **aktif-boylam, leke çevrimi ve Nesting Degree** karşılaştırması ise bu 15 yıldız içerisinden, **Güneş-benzeri fiziksel özellikleri daha belirgin olan ve leke izlerinin zaman içinde güvenilir biçimde takip edilebildiği 8 yıldızlık alt örneklem** üzerinde gerçekleştirilmiştir: **KIC 5773489, 6507505, 8009475, 6681913, 8621906, 7895206, 6764530 ve 7190814**. Bu seçimle amaç, örneklem büyüklüğünü artırmaktan ziyade, uzun süreli leke takibi ve boylamsal organizasyonun güvenilir biçimde karşılaştırılabileceği **Güneş-benzeri bir referans örneklem** oluşturmaktır.

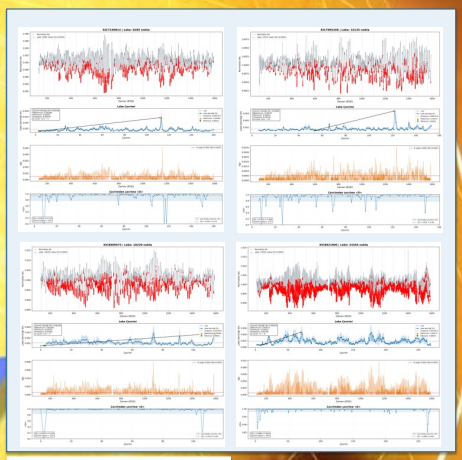
YILDIZ YÜZEY HARİTALARI





SONUÇLAR





BİLİMSEL ETKİ

Sınıflandırma ve karşılaştırma: Güneş benzeri yıldızlar, leke aktivitesi, dönme periyodu ve aktif boylamlardaki öbeklenme derecesi açısından nicel olarak sınıflandırılabilir. Bu karşılaştırma, yıldızlar arasındaki manyetik aktivite ve leke dağılımı farklılıklarının belirlenmesine olanak sağlamaktadır.
Fiziksel yorum: Leke öbeklenmesinin aktivite düzeyi ve yıldızın dönme özellikleriyle ilişkisi, yıldız manyetik alanlarının yüzeydeki oluşum ve dağılım süreçleri hakkında fiziksel kısıtlar sunar. Aktif boylamların sürekliliği ve güçlenmesi, yıldız lekelerinin rastgele olmayan uzaysal organizasyonuna işaret etmektedir.

Geniş kapsamlı bilimsel uygulama: Elde edilen ölçütler, Güneş'in manyetik aktivitesi ile Güneş benzeri yıldızların yüzey aktivitesinin karşılaştırmalı olarak incelenmesinde kullanılabilir. Bu yaklaşım, yıldız aktivite döngülerinin ve manyetik aktivite evriminin daha geniş bir örneklem üzerinden araştırılmasına katkı sağlayabilir.
Gelecek gözlemler ve modelleme: Daha uzun süreli ve yüksek duyarlılıklı fotometrik gözlemler, aktif boylamların uzun dönemli evrimini ve öbeklenme davranışının zamansal sürekliliğini test etmek açısından gereklidir. Elde edilen gözlemsel kısıtlar, yıldız dinamosu ve yüzey manyetik aktivitesini açıklamaya yönelik fiziksel modellerin geliştirilmesi ve sınanmasında kullanılabilir.

TARTIŞMA

Kepler gözlemleri, yıldız lekelerinin zamansal evriminin yanı sıra belirli boylamlarda tercihli olarak kümelenebildiğini göstermektedir. Kepler ışık eğrilerinin yüzey manyetik aktivitesini izlemek için sağladığı güçlü gözlemsel potansiyel, Özavcı et al. (2017, 2018) tarafından da gösterilmiş; KIC 11560447 üzerinde uzun dönemli Kepler verileri kullanılarak yıldız lekelerinin tekrarlayan oluşumu, boylamsal göçü ve tercihli boylamlarda ortaya çıkışı ortaya konmuştur. Özavcı et al. (2017), yıldız lekelerinin iki tercihli boylam çevresinde tekrarlandığını ve leke bölgelerinin boylamal hareketlerinin yıldızın diferansiyel dönmesi hakkında kısıt sağlayabileceğini göstermiştir.
Güneş benzeri yıldızlarda aktif bölgelerin uzaysal olarak kümelenmesi, yalnızca yüzey manyetik alanının dağılımını değil, gözlenen fotometrik değişkenliğin genliğini ve düzenliliğini de etkileyebilir. Işık et al. (2020), aktif-bölge öbeklenmesinin artmasının yıldızların parlaklık değişimlerini güçlendirdiğini ve aktif bölgelerin belirli boylamlar çevresinde tercihli olarak ortaya çıkmasının daha düzenli, sinüzoidal ışık eğrileri üretebildiğini göstermiştir. Son Kepler araştırmaları, güneş benzeri yıldızlarda kalıcı boylamsal aktif yuvaları ortaya çıkardı ve yıldız lekesi bölgelerinin zamansal göçünü gösterdi (Breton vd. 2024; Kaya ve Dal 2024). Burada, boylamsal leke kümelenmesinin derecesini yoğunluk tabanlı bir Yuvalanma Derecesi metriğiyle ölçerek bu çalışmaları genişletiyoruz. Güneş'teki leke gruplarının uzay-zamansal öbeklenmesini nicel olarak ölçmek için geliştirilen KDE–DBSCAN tabanlı yaklaşım (Karapınar vd. 2026) bu çalışmanın metodolojik temelini oluşturmakta; burada aynı çerçeve yıldız lekelerinin boylamsal kümelenmesini değerlendirmek üzere uygulanarak Nesting Degree, ⟨D⟩, üzerinden yıldızlararası karşılaştırma yapılmaktadır.

REFERANSLAR

1. Özavcı, İ., Şenavcı, H. V., Işık, E., Hussain, G. A. J., O'Neal, D., Yılmaz, M., & Selam, S. O. (2017). *Recurrent starspot activity and differential rotation in KIC 11560447.* MNRAS.
2. Özavcı, İ. et al. (2020). *Kepler Verileriyle Bazı Yıldızların Yüzey Parlaklık Dağılımı Haritalaması.* Turkish Journal of Astronomy and Astrophysics, 1, 527–530.
3. Işık, E., Shapiro, A. I., Solanki, S. K., & Krivova, N. A. (2020). *Amplification of Brightness Variability by Active-region Nesting in Solar-like Stars.* The Astrophysical Journal Letters, 901, L21.
4. Karapınar, N., Işık, E., & Şenavcı, H. V. (2023). The Nesting Tendency of Active Regions on the Sun. *Turkish Journal of Astronomy and Astrophysics, 4*(3).
5. Breton, S. N., Lanza, A. F., & Messina, S. (2024). Tracking active nests in solar-type pulsators: Ensemble starspot modelling of *Kepler* asteroseismic targets. *Astronomy & Astrophysics, 682*, A67.
6. Kaya, N. Ö., & Dal, H. A. (2024). Some findings from the longitudinal migration of starspots. *Publications of the Astronomical Society of Australia, 41*, e031.
7. Bahar, E. (2025). *SpotDIPy: An Easy Way for Stellar Doppler Imaging of Cool Single Stars*, Version 0.0.7. Python package.
8. Karapınar, N., Işık, E., Krivova, N. A., & Şenavcı, H. V. (2026). Quantifying Sunspot Group Nesting with Density-Based Unsupervised Clustering. *Solar Physics, 301*, 34.

TEŞEKKÜR/ KATKI

Bu çalışmada, Dr. İbrahim Özavcı'nın 123F018 nolu 1001 projesinden doktora bursiyeri olarak destek sağladığı için teşekkür ederim.