

KIC 10256832, KIC 3109825 ve KIC 9880777 Yıldızlarında Manyetik Aktivite ve Diferansiyel Dönme

İbrahim Özavcı^{1,2}  , Engin Bahar^{1,2} , Eda Burcu Yorulmaz^{1,2} ,
Hakan Volkan Şenavcı^{1,2} , Mesut Yılmaz^{1,2} 

¹ Ankara Üniversitesi Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 06100 Ankara, Türkiye

² Ankara Üniversitesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Araştırma ve Uygulama Merkezi (Kreiken Rasathanesi), 06837 Ankara, Türkiye

Accepted: April 14, 2025. Revised: April 14, 2025. Received: January 31, 2025.

Özet

Bu çalışmada manyetik olarak aktif 3 Kepler yıldızının (KIC 10256832, KIC 3109825 ve KIC 9880777) Kepler Uzay Teleskobun sağladığı 4 yıllık zaman aralığını kapsayan yüksek fotometrik hassasiyetli ışık eğrileri kullanılarak manyetik aktivite kaynaklı yüzey parlaklık dağılımı anomalileri ve diferansiyel dönme doğaları incelendi. Yıldızların yüzey parlaklık dağılımı haritaları ve boylam-zaman grafikleri DoTS kodu kullanılarak elde edildi. Ayrıca yıldızların diferansiyel dönmeye ilişkin parametreleri hem boylam-zaman grafikleri hem de Lomb-Scargle periyodogramları yardımıyla elde edildi. Yapılan analizler sonucunda, KIC 10256832 ve KIC 9880777 yıldızlarında Güneş tipi, KIC 3109825 yıldızında ise ters-Güneş tipi diferansiyel dönme tespit edildi.

Abstract

In this study, we examined surface brightness distribution anomalies and differential rotation characteristics driven by magnetic activity in three magnetically active Kepler stars (KIC 10256832, KIC 3109825, and KIC 9880777). This analysis utilized high-precision photometric light curves spanning approximately four years, provided by the Kepler Space Telescope. Surface brightness distribution maps and time-longitude diagrams of the stars were obtained using the DoTS code. Additionally, differential rotation parameters were derived through both time-longitude diagrams and Lomb-Scargle periodograms. Our analyses revealed Sun-like differential rotation for KIC 10256832 and KIC 9880777, while KIC 3109825 exhibited antisolar differential rotation.

Anahtar Kelimeler: stars: activity, starspots, stars: rotation, stars: individual:KIC 10256832, stars: individual:KIC 3109825, stars: individual:KIC 9880777

1 Giriş

Manyetizma, yıldız evrimini önemli derecede etkileyen faktörlerden biridir (Brun & Browning 2017). Güneş'te gözlenen aktivite değişimlerine benzer süreçler, diğer soğuk yıldızlarda da yaygın olarak gözlemlenmektedir (Kővári & Oláh 2014). Bu tür fenomenlerin incelenmesi, Güneş ve yıldız fiziği arasındaki bağı güçlendirmekte ve bu alanlarda yeni anlayışların geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu tür olguların araştırılması, Güneş ve yıldız fiziği arasındaki köprüyü güçlendirmektedir. Günümüzde yıldız aktivite çevrimlerinin doğasını ortaya koymaya çalışan teoriler olsa da manyetik aktivitenin doğası halen tam olarak anlaşılabilmiş değildir (Brun & Browning 2017).

Manyetik olarak aktif yıldızların yüzeylerinde, Güneş'tekine benzer soğuk lekeler nedeniyle oluşan yüzey parlaklık anomalilerinin olduğu bilinmektedir (Strassmeier 2009). Yıldızlardaki manyetik aktivite mekanizmasını ve diferansiyel dönme olgusunu daha iyi anlayabilmek için, leke özelliklerinin (örneğin konum, sıcaklık, kapladığı alan ve yaşam süreleri) doğru bir şekilde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Yüzey parlaklık düzensizliklerini incelemek için Doppler Görüntüleme ve Moleküler Band Analizi gibi tayfsal yöntemlerin yanı sıra, yüksek fotometrik hassasiyete sahip, kesintisiz ve uzun süreli

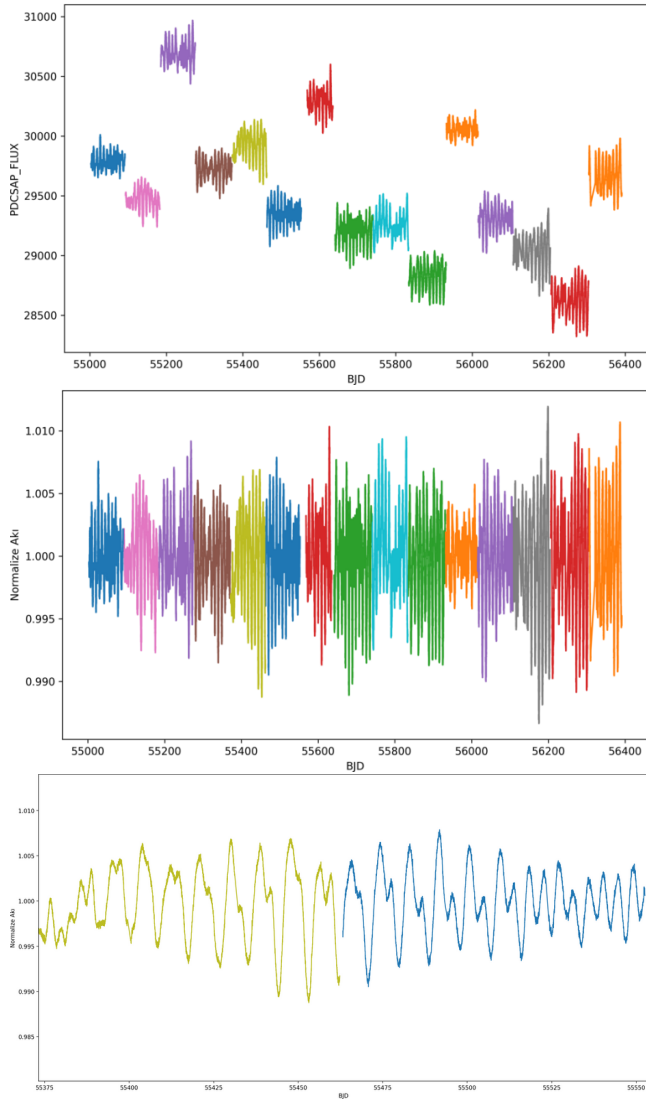
fotometrik gözlemler de önemli bir veri kaynağıdır (Collier Cameron 1997). Bu tür fotometrik veriler, TESS ve Kepler gibi uzay görevleri tarafından sağlanabilmektedir. Bu çalışmada, Kepler uydusunun yüksek hassasiyetli verileri kullanılarak KIC 10256832, KIC 3109825 ve KIC 9880777 yıldızlarında leke aktivitesi ve diferansiyel dönme olguları incelenmiştir.

2 Verilerin Hazırlanması ve Analizi

Çalışmada kullanılan fotometrik veriler MAST veri tabanı üzerinden elde edildi. Analizlerde, gözlemsel verilerdeki sistematik hataların (aletsel hatalar, takip problemleri, hız sapıncı, ısısal etkiler ve kozmik ışınlar vb.) giderildiği PDCSAP_FLUX (Pre-search Data Conditioning SAP Flux) türü veri seti kullanıldı.

Kepler ışık eğrileri DoTS kodu ile modellenmeden önce analize hazır hale getirildi. Kepler uzay teleskobu her 3 ayda bir (quarter - çeyreklik) kendi eksenini etrafında 90° dönmektedir ve her 4 çeyreklikte bir aynı konuma gelmektedir. Dolayısıyla yaklaşık 4 yıllık süre zarfında her bir çeyrekliğe ait ortalama sayım değerlerinin farklı olduğu bilinmektedir (bkz. Şekil 1, üst panel; burada örnek olarak KIC 9880777 yıldızına yapılan işlemler gösterildi). Bu durumu düzeltmek ve/veya verilerin ardışık birbirini takip edebilmesi için verileri uç uca bağlama işlemi (stitching) yapıldı. Bu işlem için Kasliwal ve diğ. (2015) tarafından önerilen yöntem uygulandı. Bu bağlamda

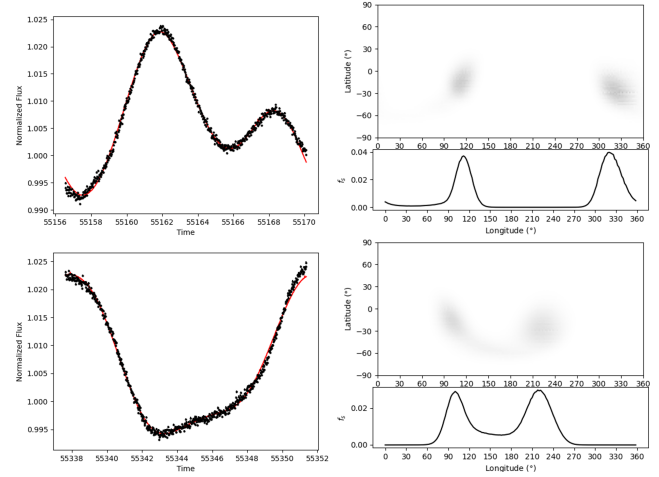
* iozavci@ankara.edu.tr



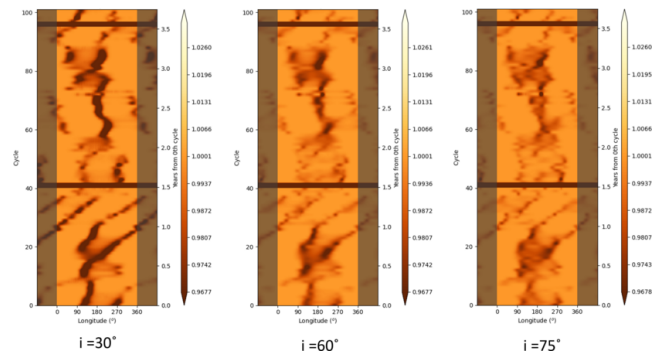
Şekil 1. KIC 9880777 yıldızının (üst panel) farklı çeyrekliklerdeki PDCSAP_FLUX sayım değerleri; (orta panel) dikişleme işleminden sonra normalize edilmiş ışık eğrileri; (alt panel) ışık eğrisinin 175 günlük kısmı.

tarafımızca geliştirilen bir Python kodu ile tüm yıldızların ilk çeyrekliklerindeki son iki çevrimine ait sayımların medyan değeri ile sonraki çeyrekliğin ilk iki çevrimine ait sayımlarının medyan değeri arasındaki fark kadar kaydırma işlemi yapılarak, tüm çeyreklikler birbirine “dikildi” ve medyan değerlerine bölünerek normalizasyon işlemi gerçekleştirildi (bkz. Şekil 1, orta panel). Zaman içerisinde ışık eğrilerindeki değişimin anlaşılabilmesi için KIC 9880777 yıldızının ışık eğrisinin 175 günlük bir kısmı Şekil 1 alt panelde verilmiştir.

Daha sonra bu ışık eğrileri DoTS koduna uygun formata dönüştürülerek analize hazır hale getirildi. Işık eğrileri DoTS ile tek tek modellenip her bir çevrime ait yüzey parlaklık dağılımı haritaları elde edildi. Örnek olarak Şekil 2 sol panelde KIC 10256832 yıldızlarına ait farklı iki çevrimdeki ışık eğrileri ve “Light Curve Inversion” tekniği ile gerçekleştirilen fitler gösterilmektedir. Sağ panelde ise $i=60^\circ$ eksen eğikliği için yüzey parlaklık dağılımı haritaları verilmiştir. Ayrıca elde edilen haritaların alt panellerinde, lekelerin boylamsal dağılımının bir



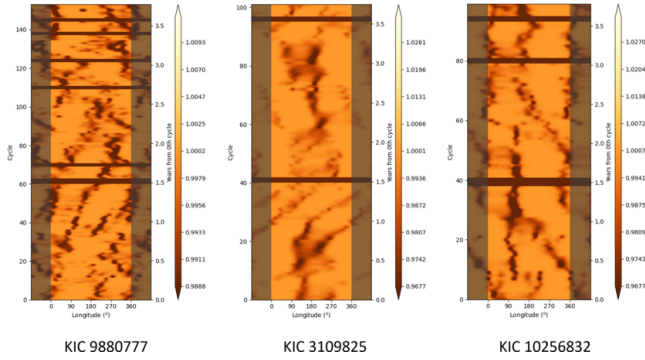
Şekil 2. Sol panel: KIC 10256832 yıldızının $i=60^\circ$ için yukarıdan aşağı 11 ve 24. çevrimine ait ışık eğrileri ve onlara yapılan fitler, sağ panel: ilgili çözüme ilişkin yüzey parlaklık dağılımı haritaları.



Şekil 3. KIC 3109825 yıldızının yaklaşık 4 yıllık zamanı kapsayan boylam-zaman grafikleri (soldan sağa sırasıyla $i=30^\circ$, 60° ve 75° eğim açıları için).

göstergesi olan her bir boylamsal kolona ait verilerin leke doldurma çarpanı (f_s) çizdirilmiştir.

Elde edilen haritalar ışığında manyetik aktivite çevrimi ve lekelerin boylamsal hareketlerini incelemek için f_s değerlerinin zamana göre değişimini veren Boylam-Zaman grafikleri oluşturuldu. Bu grafikler, lekelerin yaşam süreleri, oluşma ve yok olma zamanları, boylamsal kayma miktarlarının çevrimsel değişimi ve hatta farklı enlemlerdeki lekelerin farklı kayma miktarlarına sahip olduğunu göstermesi bakımından oldukça fazla bilgi içermektedir. Bunun için elde edilen her bir çevrime ait lekelerin boylamsal dağılım eğrilerinin, zamana göre değişimi kontur grafik olarak çizdirildi. Şekil 3’de örnek olarak verilen KIC 3109825 yıldızının, yaklaşık 4 yıllık zaman aralığındaki verilerin analizleri ile elde edilen lekelerin boylamsal hareketi, oluşma/yok olma gibi bazı fiziksel süreçleri takip edebileceğimiz boylam-zaman grafikleri verilmiştir. Şekillerdeki dikey eksen zaman veya çevrimi gösterirken, yatay eksen ise yıldız yüzey boylamını göstermektedir. Burada, soldan sağa sırasıyla $i=30^\circ$, 60° ve 75° eğim açıları için elde ettiğimiz boylam-zaman grafikleri görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere, farklı eğim açıları için elde edilen grafikler ilk bakışta birbirlerine oldukça benzer görünse de f_s değerlerinde bir miktar fark



Şekil 4. $i=60^\circ$ için KIC 9880777 (Sol panel, yeni dönem: 9.006274), KIC 3109825 (orta panel, yeni dönem: 13.547194) ve KIC 10256832 (sağ panel, yeni dönem: 13.944225) yıldızlarının yaklaşık 4 yıllık zamanı kapsayan boylam-zaman grafikleri.

bulunmaktadır. Farklı i eğim açıları ile elde edilen boylam-zaman grafikleri benzer yapılar gösterdiği için her 3 yıldız için sadece $i=60^\circ$ eğim açıları için elde edilen boylam-zaman grafikleri verilmiştir (bkz. Şekil 4).

3 Araştırma Bulguları

3.1 Manyetik Aktivite Çevrimi

Çalışmada kullanılan yıldızların leke/manyetik aktivite çevrimlerine sahip olup olmadığını belirlemek için “Toplam fs ” değerlerinin zamana göre değişim gösterip göstermedikleri denetlendi. Bunun için Boylam- fs dağılımında (Şekil 2 alt panel, sağ) her bir boylamdaki fs değerleri toplanarak yıldızın yüzeydeki toplam lekelerin göreceli bir ölçüsü olarak değerlendirilebilecek “Toplam- fs ” değerleri elde edildi. “Toplam- fs ” değerlerinin zamana göre çevrimsel bir yapı sergileyip sergilemediğini belirlemek için ise bu verilere (Zaman-Toplam fs) Lomb-Scargle (Lomb 1976; Scargle 1982) (LS) periyot analizi uygulandı.

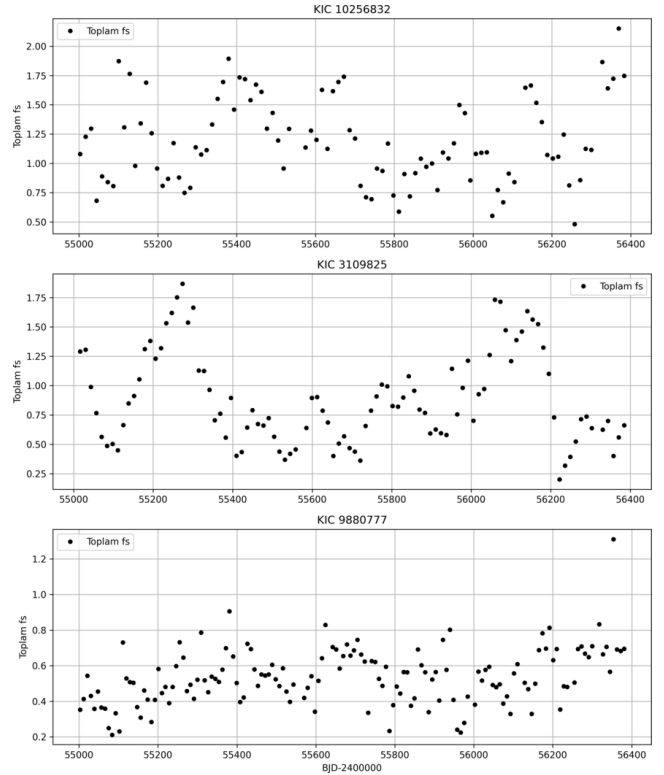
Güneş de dahil olmak üzere manyetik aktif yıldızlar, farklı zaman ölçeklerinde, değişen genliklere sahip çoklu ve değişken manyetik aktivite gösterirler (Oláh ve diğ. 2009). Olası manyetik aktivite çevrimi/çevrimleri belirlenirken çoklu dönemlikler de göz önünde bulundurularak FAP (False Alarm Probability)=0.3'ten daha düşük pik noktalar temel alınmaktadır (Ibañez Bustos ve diğ. 2019). Bir başka deyişle, güç tayfında güvenilirliği %70'ten daha büyük olan pik noktaları en olası dönem/dönemler olarak belirlenebilir. Bunun için her 3 yıldız için de Zaman-Toplam fs dağılımlarına (bkz. Şekil 5) LS periyot analizi ile dönem belirleme işlemleri yapılmıştır.

Yapılan LS periyodogramları neticesinde KIC 9880777 yıldızında anlamlı bir aktivite çevrimine rastlanmazken KIC 10256832 ve KIC 3109825 yıldızlarında elde edilen dönemlikler Çizelge 1 de verilmiştir.

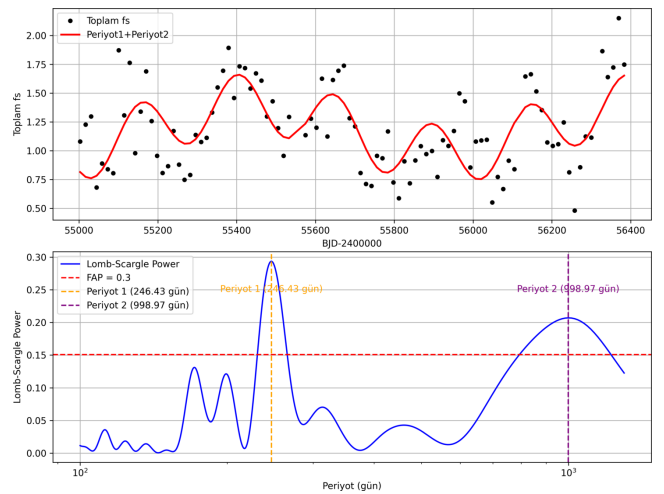
Bu aşamaya örnek olarak Şekil 6 üst panelde KIC 10256832 yıldızının Zaman-Toplam fs dağılımı ve LS periyot analizinden elde edilen 2 baskın dönemim birleşimi, alt panelde ise LS periyot analizinden elde edilen periyot-güç dağılımı verilmiştir. Şekildeki kesikli kırmızı çizgi FAP değeri 0.3 olarak belirlenmiş olup güç tayfında güvenilirliği %70'ten daha büyük olan pik noktaları en olası dönem/dönemler olduğu yerleri göstermektedir.

Çizelge 1. KIC 10256832 ve KIC 3109825 yıldızları için LS periyodogramları ile elde edilen olası manyetik aktivite çevrimleri

Dönemlik	KIC 10256832	KIC 3109825
Periyot1 (gün)	246	808
Periyot2 (gün)	999	415
Periyot3 (gün)	-	288



Şekil 5. Yukarıdan aşağıya KIC 10256832, KIC 3109825 ve KIC 9880777 yıldızlarının zamana göre “Toplam fs ” değerlerinin değişimi.



Şekil 6. KIC 10256832 yıldızının Zaman-Toplam fs dağılımı ve baskın iki dönem (üst panel), LS periyot analizinden elde edilen periyot-güç dağılımı grafiği (alt panel).

3.2 Diferansiyel Dönme

Diferansiyel dönme (DD), Güneş'teki ve büyük ihtimalle diğer yıldızlardaki manyetik alan üretim sürecinde temel bir rol oynayan bir özelliktir. "Güneş tipi diferansiyel dönme" (GTDD) terimi, Güneş'in ekvatorial bölgelerinin kutupsal bölgelere göre daha hızlı döndüğünü belirten gözlemi ifade eder. Bunun zıddı olan ve kutupsal bölgelerin ekvatorial bölgelere göre daha hızlı döndüğü (ters-Güneş tipi diferansiyel dönme – TGTDD) durum ise yalnızca birkaç yıldızda gözlemlenmiştir. Ancak, teorik dinamo modelleri bu tür bir dönüşün varlığına dair güçlü kanıtlar sunmaktadır (Reinhold & Arlt 2015).

Reinhold & Arlt (2015) tarafından önerilen, Kepler verileri gibi zaman-serisi veriler için geliştirilmiş ve ışık eğrilerinde lekeden kaynaklı modülasyonların Lomb-Scargle periyodogramı ile analiz edilerek elde edilen dönemlerin ve harmoniklerinin birbirleri ile ilişkisine dayanan bir teknikte diferansiyel dönmenin varlığı ve türü tayin edilebilir. Düşük enlemdeki lekelerin daha az sinüs şekilli dönme modülasyonuna yol açtığı, bunun da harmoniklere daha fazla güç katarak, ilk harmoniğin temel (dönme) periyoduna olan güç oranını artırdığı argümanına dayanmaktadır. Teknik aşağıdaki şekilde tarif edilmiştir:

- En güçlü periyot belirlenir (P_1).
- Bu periyodun $\pm 30\%$ komşuluğunda 2. bir periyot belirlenir (P_2).
- P_1 ve P_2 'nin birinci harmoniği, ana dönemlerinin yarısının $\pm 1\%$ komşuluğunda olmalıdır:

$$P'_1 = \frac{P_1}{2} \pm 1\%, \quad P'_2 = \frac{P_2}{2} \pm 1\% \quad (1)$$

- Daha sonra birinci harmonikler ile temel dönemleri arasındaki güç oranları hesaplanır.

$$r_1 = \frac{h(P'_1)}{h(P_1)}, \quad r_2 = \frac{h(P'_2)}{h(P_2)} \quad (2)$$

- Eğer $r_1 > r_2$ ise P_1 dönemini oluşturan lekenin P_2 dönemini oluşturan lekeden daha düşük bir enlemde (ekvatora yakın) olduğu sonucuna varılır. Yani P_1 düşük enlemli leke ile (P_{low}), P_2 ise yüksek enlemli leke ile (P_{high}) ilişkilendirilir. Bu durumda $P_{low} < P_{high}$ ise Güneş tipi diferansiyel dönme, $P_{low} > P_{high}$ ise de ters-Güneş tipi diferansiyel dönmenin var olduğu sonucu ortaya çıkar.
- Eğer $r_2 > r_1$ ise P_1 dönemini oluşturan lekenin P_2 dönemini oluşturan lekeden daha yüksek bir enlemde (kutba yakın) olduğu sonucuna varılır. Yani P_1 yüksek enlemli leke ile (P_{high}), P_2 ise düşük enlemli leke ile (P_{low}) ilişkilendirilir. Bu durumda $P_{low} < P_{high}$ ise Güneş tipi diferansiyel dönme, $P_{low} > P_{high}$ ise de ters-Güneş tipi diferansiyel dönmenin var olduğu sonucu ortaya çıkar.

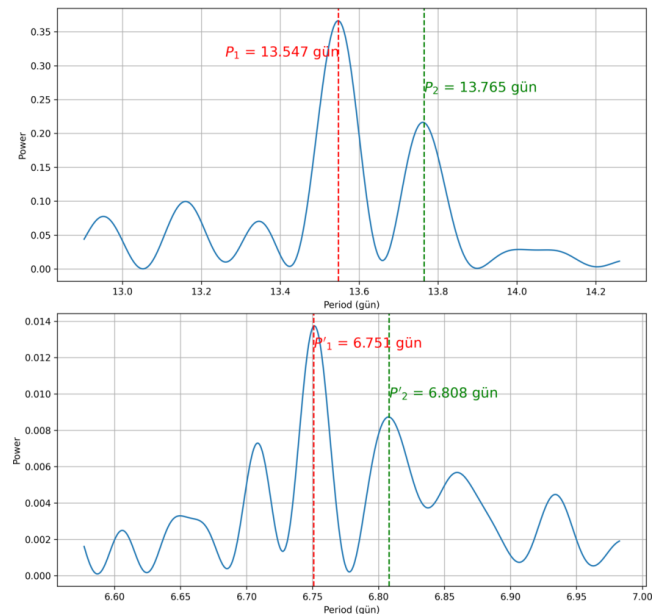
Bu bağlamda her üç yıldız için de LS periyodogramları oluşturularak (bkz. Şekil 7) r_1 ve r_2 oranları ve P_{low} , P_{high} büyüklüklerine bakılarak diferansiyel dönmenin yönü belirlendi. Ayrıca,

$$\alpha_{obs} := \frac{P_{high} - P_{low}}{P_{high}} \quad (3)$$

ile diferansiyel dönmenin tipi ve şiddetinin bir göstergesi olan "gözlenen göreceli diferansiyel dönme" parametresi elde edildi (Reinhold & Arlt 2015). Elde edilen parametreler Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. 3 Kepler yıldızı için LS periyot analizi elde edilen parametreler.

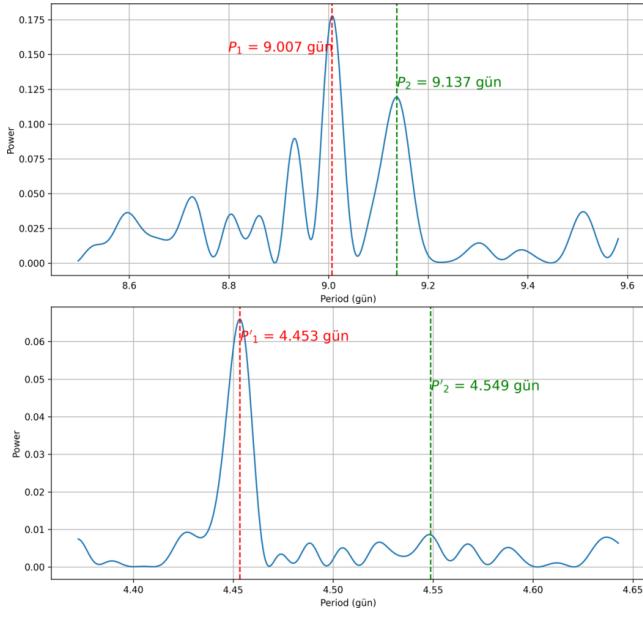
Parametre	KIC 3109825	KIC 9880777	KIC 10256832
$h(P_1)$	0.37	0.18	0.20
$h(P_2)$	0.22	0.12	0.12
$h(P'_1)$	0.014	0.067	0.072
$h(P'_2)$	0.009	0.009	0.020
r_1	0.037	0.372	0.357
r_2	0.040	0.072	0.161
P_1	13.547 (P_{high})	9.007 (P_{low})	13.942 (P_{low})
P_2	13.765 (P_{low})	9.137 (P_{high})	14.795 (P_{high})
DD tipi	TGTDD	GTDD	GTDD
α_{obs}	-0.0161	0.0142	0.0577



Şekil 7. KIC 3109825 yıldızının LS periyot analizi: Ana dönemler (üst panel), birinci harmonikler (alt panel).

4 Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada KIC 3109825, KIC 9880777 ve KIC 10256832 yıldızlarının Kepler ışık eğrileri kullanılarak manyetik aktivite ve diferansiyel dönme olguları araştırıldı. Çalışma sonucunda elde edilen boylam zaman grafiklerinden de görüldüğü üzere (bkz. Şekil 4) leke veya leke gruplarının boylamsal değişimleri farklılık göstermektedir. Örneğin KIC 10256832'de, yıldızın dönme dönemi çerçevesinde ışık eğrisini şekillendiren güçlü bir leke/leke bölgesi yer alırken, farklı bir leke bölgesi zaman içerisinde azalan boylamlara doğru hareket etmektedir. Bu durum, bu iki leke bölgesinin farklı enlem kuşağında olup, diferansiyel dönmenin etkisi ile farklı dönme hızı göstermesinden kaynaklanmaktadır. Bu durum Şekil 1 alt panelde verilen ışık eğrisinden de takip edilebilmektedir. Burada baskın lekeyi oluşturan lekenin yarattığı büyük genlikli değişimin üzerinde gezen daha küçük genlikli bir başka dalga yapısı yer almaktadır. Bu durum, bu baskın leke bölgelerinin yer aldığı enlem kuşaklarının farklı dönme hızlarına sahip olduğunu gösterir. 4 yıllık kesintisiz ışık eğrileri üzerine LS periyodogramları kullanılarak elde edilen sonuçlar da bu durumu doğrulamaktadır



Şekil 7 – devamı. KIC 9880777 yıldızının LS periyot analizi: Ana dönemler (üst panel), birinnci harmonikler (alt panel).

(bkz. §3.2). Gelecekte yapılacak detaylı gözlemler, yıldızların manyetik aktivite ve diferansiyel dönme olgularının doğalarını anlamak adına önemli ipuçları sunacaktır.

Teşekkür

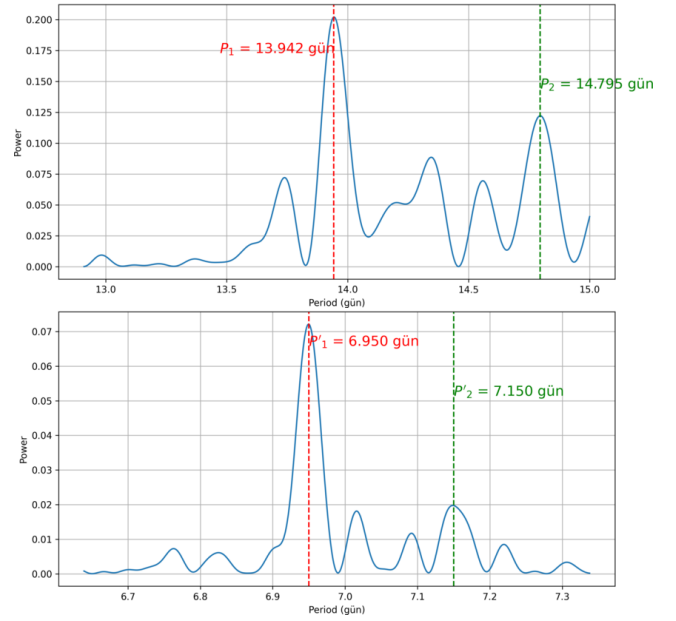
Bu çalışma 123F018 numaralı TÜBİTAK 1001 projesi tarafından desteklenmektedir.

Kaynaklar

- Brun A. S., Browning M. K., 2017, *Living Reviews in Solar Physics*, 14, 4
 Collier Cameron A., 1997, *MNRAS*, 287, 556
 Ibañez Bustos R. V., Buccino A. P., Flores M., Martinez C. I., Maizel D., Messina S., Mauas P. J. D., 2019, *MNRAS*, 483, 1159
 Kővári Z., Oláh K., 2014, *Space Sci. Rev.*, 186, 457
 Kasliwal V. P., Vogeley M. S., Richards G. T., 2015, *MNRAS*, 451, 4328
 Lomb N. R., 1976, *Ap&SS*, 39, 447
 Oláh K., ve diğ., 2009, *A&A*, 501, 703
 Reinhold T., Arlt R., 2015, *A&A*, 576, A15
 Scargle J. D., 1982, *ApJ*, 263, 835
 Strassmeier K. G., 2009, *A&ARv*, 17, 251

Access:

M25-0371: *Turkish J.A&A* — Vol.6, Issue 3.



Şekil 7 – devamı. KIC 10256832 yıldızının LS periyot analizi: Ana dönemler (üst panel), birinnci harmonikler (alt panel).