



# Güneş Türü Yıldızlarda Değişkenliğe Etki Eden Süreçler

Emre Işık<sup>1</sup>  

<sup>1</sup> Türk-Alman Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Şahinkaya Cd. 94, Beykoz 34820 İstanbul, Türkiye

Accepted: December 25, 2022. Revised: December 25, 2022. Received: November 13, 2022.

## Özet

Güneş türü yıldızlarda 1 gün ile 10 yıl arasında gözlenen parlaklık ve tayf değişimleri, manyetik akı yoğunlaşmalarının yıldız dönmesiyle birlikte zamanla değişen desenlerinden ileri gelir. Soğuk yıldızlarda manyetik etkinlik, karasal ötegezegen keşfinin önündeki en belirgin engeldir. Bu makalede farklı yaşlardan G yıldızlarında parlaklık ve tayf değişimlerinin altında yatan olası etkinlik desenlerini ve onlara yol açan fiziksel etkileri gözden geçirdik. Etkin bölgelerin G türü yıldızlarda dönme hızına bağlı olarak yüzeyde nasıl dağıldığını ve zamanla nasıl değiştiğini hesaplayan FEAT (Flux Emergence And Transport) modelimizi tanıttık. FEAT modeli, lekeli yıldızların Doppler görüntülemesinin, manyetik etkinlik kaynaklı astrometrik yalpalamanın ve yüksek çözünürlüklü ışık eğrilerinin sayısal benzetimlerinde kullanıldı. Bu uygulamalarda elde edilen sonuçlar, Güneş türü yıldızlarda manyetik etkinliği ve ölçülebilirliğini daha iyi anlamamıza önemli katkılar yapmıştır.

## Abstract

The photometric and spectroscopic variations observed in solar-type stars in timescales from a day to a decade are due to the changing patterns of magnetic flux concentrations over time as the star rotates. Magnetic activity is the most obvious challenge to the discovery of Earth-mass exoplanets. In our studies, we investigate the possible activity patterns underlying brightness and spectral variations in G stars of different ages and the physical effects that lead to them. In this paper, we will introduce our FEAT (Flux Emergence And Transport) model, which calculates how the active regions are distributed and how the surface distribution changes with rotational velocity in G stars. The FEAT model has been used in numerical simulations of Doppler imaging of spotted stars, magnetic activity-induced astrometric jitter and high-resolution light curves. The results obtained in these applications have contributed significantly to our understanding of magnetic activity and its detectability in solar-type stars.

**Anahtar Kelimeler:** stars: activity, stars: rotation, stars: solar-type, starspots

## 1 Giriş

Güneş'te etkin bölgeler (active regions), ekvatorun çevresindeki  $\pm 40^\circ$  enlem kuşaklarında bulunur. Bunlar, Güneş'in konveksiyon bölgesinden yukarı doğru yükselen ve ışık küreyi kestiği yerlerde güneş lekeleri gibi manyetik akı yoğunlaşmalarını oluşturan geçici yapılar (Fan 2021). Etkin bölgeler, konumda ve zamanda öbekler halinde ortaya çıkma eğilimi gösterir. Güneş'teki manyetik akı çıkışlarında öbeklenme oranı %30-60 aralığında ölçülmüştür (Brouwer & Zwaan 1990; Pojoga & Cudnik 2002).

Güneş'te küresel manyetik etkinlik düzeyi arttıkça, başka bir deyişle Güneş minimumundan maksimumuna doğru gidildikçe, herhangi bir anda fakülaların kapladığı alan, lekelerinkinden daha büyük olduğu için Güneş'in ortalama parlaklığında artış gözlenir. Diğer yandan, Güneş ile aynı türde daha etkin yıldızlara gidildikçe bu durumun tersine döndüğü, belli bir etkinlik düzeyinin üzerinde lekelerin fakülalara baskın olduğu bilinmektedir.

## 2 Yıldızlarda etkin bölge öbeklenmesi

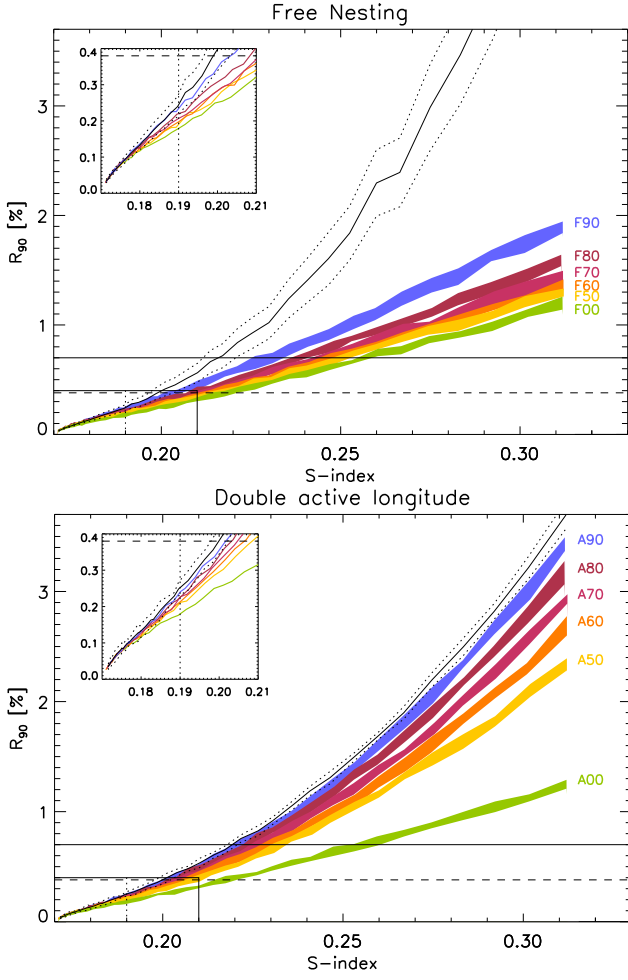
Güneş ile aynı hızda dönen G türü anakol yıldızlarının Kepler ışık eğrileri üzerinden yaptıkları ölçümlerde Reinhold ve diğ. (2020), dönme dönemi ölçülebilen yıldızların Güneş'ten çok daha büyük genlikli ışık eğrileri olduğunu göstermiştir. Bu bulgular, Güneş

ile benzer dönme hızlarında manyetik etkinlik düzeyinin çok daha fazla olabileceğine işaret etmiş de, bu durum Güneş benzeri yıldızları henüz ne kadar az anladığımızı da göstermiştir. Büyük genlikli parlaklık değişimlerinin hangi koşullarda ortaya çıkabileceği üzerine olasılıklı bir model, Işık ve diğ. (2020) tarafından yapılmıştır. Çalışmada etkin bölgeler, karanlık leke ve görüş açısına bağımlı parlak faküla katkılarında oluşturulmuş, Güneş'ten bildiğimiz leke ve faküla evrimi basit fonksiyonlarla modellenmiştir. Sabit olasılıklı bir Bernoulli süreci olarak modellenen etkin bölge öbeklenmesi,  $\pm 40^\circ$  enlemlerde, rastgele boylamlarda oluşturulduğunda özgür yuvalanma, birbiriyle karşı konumdaki etkin boylamlarda oluşturulduğunda etkin boylamlar olarak adlandırılmıştır. Bu iki durumda, farklı öbeklenme dereceleri için elde edilen çoklu ışık eğrilerinin genlik dağılımları, Şekil 1'de gösterilmiştir. Reinhold ve diğ. (2020) çalışmasında bulunan, Güneş'e çok yakın dönme hızına sahip olan birçok yıldızın büyük genlikli ışık değişimleri göstermesini açıklamak için etkinlik düzeyinde beklenen artış, yüksek öbeklenme dereceleri için daha düşük olmaktadır. Bu yıldızlarda etkinlik düzeyinin Güneş'inkinden çok daha yüksek olması beklenmediğinden, öbeklenme derecesinde etkinlik düzeyine koşut bir artış öngörülmüştür.

## 3 Faküla baskınlığından leke baskınlığına geçiş

Işık ve diğ. (2020) çalışmasında üretilen yapay ışık eğrileri, Kepler teleskobunun duyarlılık fonksiyonuna göre oluşturulmuştur (bkz. Némec ve diğ. 2020). Bu ışık eğrilerindeki

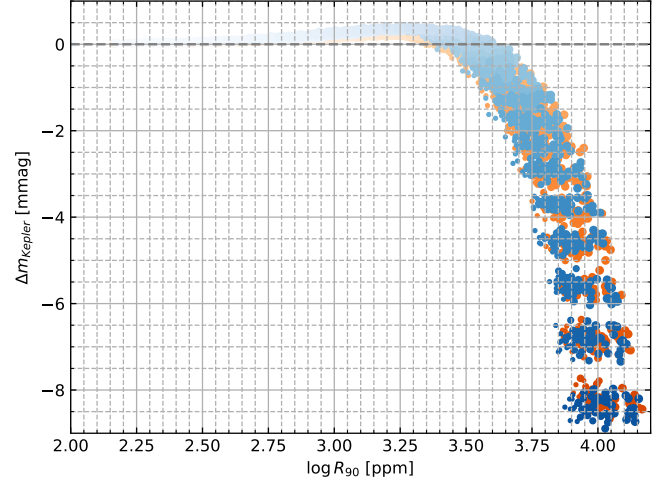
\* emre.isik@tau.edu.tr



**Şekil 1.** Sayısal benzetimlerde özgür öbeklenme (solda) ve etkin boylam öbeklenmesi (sağda) durumunda 90 günlük ortalama ışık değişim genliğinin, renkküresel  $S$  ölçeği biriminde gösterilen etkinlik düzeyine bağlılığı. Farklı renkler, grafikte gösterilen öbeklenme yüzdelerini gösterir. Yatay kesikli ve sürekli çizgiler, Reinhold ve diğ. (2020) çalışmasından, sırasıyla, ortalama ve maksimum değişkenlik düzeyini gösterir. Küçük grafik, Güneş'in de bulunduğu sol-alt köşedeki dikdörtgen bölgeyi gösterir (Işık ve diğ. 2020).

boylanmış ışınım akısı değerlerini kadir ölçeğindeki görelî parlaklık değişimine dönüştürdüğümüzde ortaya çıkan ışık eğrilerinden elde edilen ortalama parlama miktarları, Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu benzetimlerde etkinlik düzeyi, renkküresel  $S$  ölçeği biriminde ifade edilmiştir. Sonuçlar, etkinlik düzeyi ve öbeklenme oranının ortalama değerine bağlı olarak, ortalama 3.50 yöresinde bir değişkenlik genliğinin üzerinde, yıldızların ışık eğrilerinde lekelerin baskın duruma geleceğini öngörmektedir.

Bu ön çalışmalardan hareketle Nêmec ve diğ. (2022a), yüzeydeki leke ve faküla dağılımlarını dönme ve etkinlik çevrimi zaman ölçeklerinde, daha ayrıntılı bir fiziksel modelle hesaplamıştır. Yüzey akı taşınımı (YAT) adı verilen bu modelde (Baumann ve diğ. 2004, 2006; Cameron ve diğ. 2010), Güneş'in ışık küresindeki manyetik alanın yüzeye dik yöneldiği varsayılmaktadır. Bu modelde çift kutuplu manyetik bölgeler, Güneş çevrimleri boyunca doğurulur ve geniş ölçekli yüzey akışları etkisi altında taşınarak ve yitime uğratılır. Nêmec ve diğ. (2022a), YAT modelinin verdiği 1 gün aralıklı yapay



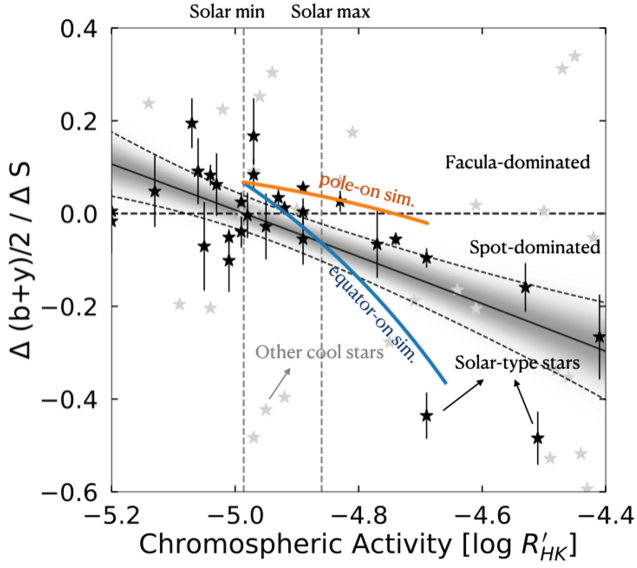
**Şekil 2.** Sayısal ışık eğrisi benzetimlerinde Kepler bandındaki parlamaların ışık eğrisi genliğine bağlılığı. Turuncu ve mavi noktalar, dönme eksen eğikliğinin sırasıyla 90 ve 57 değerlerinde yapılan benzetimleri, nokta büyüklüğü etkin bölgelerin öbeklenme derecesini, noktaların koyuluğu ise  $0.16 < S < 0.24$  aralığında etkinlik düzeyini gösterir. Kesikli yatay çizginin üst yanındaki ışık değişimlerinde fakülalar, alt yanındakilerde ise lekeler baskındır.

manyetogramları kullanarak etkin bölgelerdeki leke ve faküla bölgelerinin zamana bağlı doldurma çarpanlarını ve buradan da yıldızları farklı eğim açılarında döndürerek ışık eğrilerini hesaplamıştır. Bu modele göre, Güneş türü yıldızlarda manyetik etkinlik düzeyi arttıkça, leke kaynaklı parlaklık değişimlerinin faküla kaynaklı değişimlere göre neden giderek daha baskın duruma geldiğine ilk kez fiziksel bir açıklama getirilmiştir: Birim zamanda yüzeye çıkan etkin bölge sayısı arttıkça, görece büyük alanlar kaplayan etkin bölge ağı (ve onun yol açtığı fakülalar), karşı kutupların birbirini yok etmesi ile etkisiz hale gelir. Bu akı sıfırlanma süreci, daha az kesirsel alan kaplayan lekeler için çok daha küçük olasılıkla meydana gelir; yani Güneş'ten daha yüksek etkinlik düzeyindeki yıldızlara gidildikçe lekeler fakülalara göre daha uzun süreler yüzeyde kalabilir. Dolayısıyla, Güneş'ten daha etkin G yıldızlarının ışık eğrileri, lekelerce baskındır.

Şekil 3, on yıllık bir etkinlik çevrimi boyunca orta bant parlaklıktaki artış miktarını renkküre etkinliğinin fonksiyonu olarak göstermektedir. Güneş (dikey çizgiler), tam da leke baskınlığından faküla baskınlığına doğru geçişe yakın bir rejimde yer almaktadır. Radick ve diğ. (1998) gözlemlerine Bayesçi parabolik fit uygulanmış, bu verilerin üzerine nümerik simülasyonların verdiği bağılıklar farklı iki eksen eğikliği değeri için çizilmiştir. Güneş'in on yıllık parlaklık değişiminde fakülaların baskın olduğu bilinmektedir. Güneş'in daha aktif olduğu genç dönemlerinde, etkinlik düzeyi arttıkça parlaklık değişiminde lekelerin baskın olduğu söylenebilir.

#### 4 FEAT modeli ve uygulamaları

Güneş benzeri yıldızlarda parlaklık değişimlerini fiziksel bir modele oturtmak amacıyla Işık ve diğ. (2018), Güneş'te gözlemleri iyi açıklayan iki modeli birleştirmiştir. Daha sonra Akı Çıkışı ve Taşınımı (FEAT; Flux Emergence And Transport) adı verilen bu modelin birinci parçasında, konveksiyon bölgesinin tabanında yattığı varsayılan toroidal manyetik akı tüplerinin kararsızlığa uğrayarak yüzeye çıkışı, farklı dönme



**Şekil 3.** Kromosferik etkinlik düzeyinin fonksiyonu olarak aktiviteye bağlı parlama (pozitif) veya sönükleşme (negatif). Mavi ve turuncu çizgiler  $90^\circ$  ve  $0^\circ$  eksen eğiklikleri için sayısal simülasyon sonuçlarını göstermektedir. Yıldız örnekleme, Radick ve diğ. (1998) çalışmasıdır. Siyah yıldızlar, Güneş'e yakın sıcaklıklardadır ( $\pm 200$  K). Gri yıldızlar örneklemin geri kalanıdır. Gri gölgeli bant, ikinci dereceden bir fonksiyon için Gauss öncülleri kullanan Bayesçi doğrusal regresyonun posterior dağılımıdır (Nemec ve diğ. 2022a).

hızları için sayısal benzetimlerle modellenmiştir. Etkin bölgelerin yüzeye çıkışı için Güneş çevriminin istatistiklerini kullanan bir enlem-zaman dağılımı uygulanmış, bu dağılımın derinden yüzeye doğrusal olmayan biçimde nasıl bağlandığı, akı tüpü benzetimlerinden belirlenmiştir. Bu aşamanın sonunda elde edilen, yüzeydeki doğuş desenidir. Bu desenin belirlenmesi sırasında etkin bölge yuvalanması da ilk kez bu çalışmada olasılıksal bir algoritma ile belirlenmiştir.

#### 4.1 Tayf değişkenliği: Doppler görüntülemesi

FEAT modelinin ilk uygulaması, yapısal olarak Güneş'e çok benzeyen, ancak ondan çok daha genç ( $\sim 35$  Myıl) olan ve hızlı dönen EK Draconis'in parametreleri göz önüne alınarak yapılmıştır Şenavcı ve diğ. (2021). FEAT modelinin verdiği 15 günlük ortalama manyetik alan haritalarından elde edilen leke haritaları DoTS koduna girildiği olarak verilmiş, tayf çizgilerini temsilen yapay LSD kesitleri oluşturulmuş, bunlardan maksimum entropi yöntemiyle yapay Doppler görüntüleri elde edilmiştir. Bu görüntüler, 15 gece boyunca alınmış yüksek çözünürlüklü tayflarından elde edilen Doppler görüntüsü ile karşılaştırılmıştır. Yapay ve gözlenen Doppler görüntülerinin her ikisinde de EK Dra için ölçülmüş diferansiyel dönme oranı göz önüne alındığında, elde edilen haritalar nitel olarak oldukça uyumlu bulunmuştur. Gözlenen Doppler görüntülerinde ekvator yakınlarında görülen lekelerin, yıldızın daha az görünen, ekvator altı yarımküresindeki leke etkinliğinin bir yansıması olduğu, FEAT benzetimleri sayesinde görülmüştür.

#### 4.2 Astrometrik değişkenlik

2013'de fırlatılan Gaia uzay gözlemevi kapsamında gökadamızda iki milyarı aşkın sayıda yıldızın zamana bağlı

duyarlı konum ölçümleri başlamıştır. Güneş türü ve daha soğuk yıldızlarda beklenen buluş, bu yıldızların çevresindeki gezegenlerin yıldızda oluşturduğu kütleçekimsel tedirginliğin ölçülen konumlara yansımalarıdır. Ancak soğuk yıldızlarda meydana gelen manyetik etkinlik ve onun zamanla değişmesi, gözlenen bir yıldızın ışık merkezinin konumunda değişikliklere neden olacaktır (Lanza ve diğ. 2008). Bu da astrometrik yolla gezegen saptanmasını zorlaştıran yalpalama hareketlerine neden olacaktır.

Bu bağlamda, FEAT modelinin ikinci uygulaması olarak Sowmya ve diğ. (2021), farklı etkin bölge yuvalanma oranları ve desenleri ile yapılmış FEAT benzetimlerinden, farklı eksen eğikliklerinde metal bolluklarında leke ve faküla etkilerini göz önüne almış, ışık merkezinin gökküre üzerindeki konumlarını hesaplamıştır. Bu hesaplar, özellikle etkinlik çevrimlerinin küçük eksen eğikliklerinde ışık merkezi konumuna önemli derecede etkisi olacağını göstermiş. Bu etki, etkin bölge öbeklenmesinin derecesi arttıkça daha da büyük genlikli olmaktadır. Gözlenen astrometrik yalpalama genliği, metal bolluğu ile de artış göstermektedir. Özellikle etkin bölge öbeklenmesi yüksek olan yıldızlarda etkinlik sinyalinin Gaia tarafından saptanabilir olduğu gösterilmiştir.

Yine FEAT modelini bu kez Güneş'ten 2-8 kat hızlı dönen Güneş türü yıldızlara uygulayan Sowmya ve diğ. (2022), Güneş'ten belirgin ölçüde daha etkin yıldızların lekelerce baskın ve değişken etkinlik desenlerinin Gaia verilerinde astrometrik titreşme hareketleri olarak saptanabileceğini hesaplamıştır.

#### 4.3 Parlaklık değişkenliği

FEAT modelinin bir başka uygulamasını yıldız ışık eğrilerinin ileri yönlü modellenmesi için geliştiren Nemec ve diğ. (2022b), farklı dönme hızları ve etkin bölge öbeklenme dereceleri için ışık eğrileri üretmiştir. Nemec ve diğ. (2020) tarafından önerilen yöntemle Kepler'in dalgaboyu duyarlılık fonksiyonu göz önüne alınarak üretilen bu ışık eğrilerinden ortalama değişim genlikleri elde edilmiştir. Bu değişim genlikleri, Kepler gözlemlerinden 5500-6000 K sıcaklık aralığındaki yıldızların dönme dönemi - 90 günlük değişim genliği çizgesi ile birlikte değerlendirilmiştir. Bu durumda, gözlenen iki boyutlu ışık değişkenliği dağılımında dönme hızı ile artan değişkenlik, yüksek düzeyde öbeklenme ve/veya dönme etkinliği ilişkisinin varsayılan bire bir ilişkiden sapması ile açıklanabilir. Değişim genliğinde gözlenen saçılmanın arkasında ise farklı dönme eksen eğikliklerinin ve yine öbeklenme oranındaki bünyesel farklılıkların yatıyor olabileceği gösterilmiştir.

#### Kaynaklar

- Baumann I., Schmitt D., Schüssler M., Solanki S. K., 2004, *A&A*, 426, 1075  
 Baumann I., Schmitt D., Schüssler M., 2006, *A&A*, 446, 307  
 Brouwer M. P., Zwaan C., 1990, *Sol. Phys.*, 129, 221  
 Cameron R. H., Jiang J., Schmitt D., Schüssler M., 2010, *ApJ*, 719, 264  
 Fan Y., 2021, *Living Reviews in Solar Physics*, 18, 5  
 Işık E., Solanki S. K., Krivova N. A., Shapiro A. I., 2018, *A&A*, 620, A177  
 Işık E., Shapiro A. I., Solanki S. K., Krivova N. A., 2020, *ApJ*, 901, L12  
 Lanza A. F., De Martino C., Rodonò M., 2008, *New Astron.*, 13, 77  
 Nemec N. E., Işık E., Shapiro A. I., Solanki S. K., Krivova N. A., Unruh Y., 2020, *A&A*, 638, A56  
 Nemec N. E., Shapiro A. I., Işık E., Sowmya K., Solanki S. K., Krivova N. A., Cameron R. H., Gizon L., 2022a, *ApJ*, 934, L23

- Nèmec N. E., Shapiro A. I., Işık E., Solanki S. K., Reinhold T., 2022b, *A&A*, in press
- Pojoga S., Cudnik B., 2002, *Sol. Phys.*, 208, 17
- Radick R. R., Lockwood G. W., Skiff B. A., Baliunas S. L., 1998, *ApJS*, 118, 239
- Reinhold T., Shapiro A. I., Solanki S. K., Montet B. T., Krivova N. A., Cameron R. H., Amazo-Gómez E. M., 2020, *Science*, 368, 518
- Sowmya K., Nèmec N. E., Shapiro A. I., Işık E., Witzke V., Mints A., Krivova N. A., Solanki S. K., 2021, *ApJ*, 919, 94
- Sowmya K., Nèmec N. E., Shapiro A. I., Işık E., Krivova N. A., Solanki S. K., 2022, *ApJ*, 934, 146
- Şenavcı H. V., Kılıçoğlu T., Işık E., Hussain G. A. J., Montes D., Bahar E., Solanki S. K., 2021, *MNRAS*, 502, 3343

**Access:**

M23-0360: [Turkish J.A&A](#) — Vol.4, Issue 3.