





# Soğuk Yıldızların Doppler Görüntülenmesi: SpotDIpy

Engin Bahar<sup>1,2</sup>  , Hakan Volkan Şenavcı<sup>1,2</sup> , Onur Yörükoğlu<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Ankara Üniversitesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri, 06100, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup> Ankara Üniversitesi Kreiken Rasathanesi, 06837, Ankara, Türkiye

Accepted: November 18, 2022. Revised: November 16, 2022. Received: November 9, 2022.

## Özet

Yıldızların evriminde, gezegenlerin oluşum sürecinde ve hatta gezegenlerin evriminde de önemli etkilere sahip olan manyetik alan olgusu halen araştırma konusudur. Manyetik alanın bir sonucu olan yıldızların yüzey parlaklık dağılımlarındaki heterojenliklerin araştırılmasında kullanılan en etkili yöntemlerden biri Doppler görüntüleme tekniği olup literatürde ilgili tekniğe dayanan kodların ciddi bir kısmının paylaşımına açık olmaması önemli bir eksikliklerdir. Bu çalışmada Doppler görüntüleme tekniğiyle yıldızların yüzey parlaklık dağılımı haritasını oluşturan, herkesin ulaşabileceği, kullanışlı ve açık kaynak kodlu bir yazılım olan SpotDIpy kodu tanıtıldı. Bununla birlikte, bu çalışma kapsamında, V889 Her yıldızının Ankara Üniversitesi Kreiken Rasathanesi'nde bulunan T80 Prof. Dr. Berahitdin Albayrak Teleskobu'na bağlı tayfçeker ile elde edilen yüksek çözünürlüklü ( $R \sim 30000$ ) tayfları kullanılarak, SpotDIpy kodu ile yüzey parlaklık dağılımı haritaları oluşturuldu. Elde edilen bu haritalardan kutup lekesine eşlik eden orta enlemlerle lekelerin yanısıra azalan boylamlara doğru bir leke göçünün olduğu gözlemlendi.

## Abstract

Stellar magnetic fields strongly affect stellar and planetary formations and evolution. Doppler imaging is an effective technique to investigate the heterogeneous surface brightness distribution of stars due to magnetic activity. It is a major disadvantage that the most of the codes based on the technique are unshared in the literature. In this study, we introduced the SpotDIpy code, which is a useful and open source software that can be accessed by everyone, which reconstruct surface brightness distribution of stars using Doppler imaging technique. In addition, within the scope of this study, surface brightness distribution maps of V889 Her were reconstructed with SpotDIpy using high resolution ( $R \sim 30000$ ) spectra obtained with the spectrograph attached to the T80 Prof. Dr. Berahitdin Albayrak Telescope at Ankara University Kreiken Observatory. From these maps, it was determined that there were mid-latitude spots accompanying a polar spot migrating towards decreasing longitudes.

**Anahtar Kelimeler:** magnetic fields – (stars:) starspots – techniques: imaging spectroscopy

## 1 Giriş

Yıldızlardaki manyetik alan olgusu yıldız evriminde, gezegenlerin oluşum ve evrimi sürecinde önemli bir etkiye sahiptir (Strassmeier 2009). Bu olgu bize en yakın yıldız olan Güneş'in detaylı analizleri ile birlikte tek ve çift yıldızların gözlemleriyle incelenmiş olsa da günümüzde halen tam olarak anlaşılabilmiştir (Tobias 2002). Bunun sebeplerinden biri, bu konuda sadece Güneş'in oldukça detaylı olarak incelenmesi, diğeri ise farklı türden (tayf türü, kütle, dönme hızı gibi) ve farklı evrim aşamasında olan yeterli sayıda yıldızın bu anlamda incelenmemiş olmasıdır. Ayrıca manyetik alanın değişiminin incelenmesi geniş zaman aralığında elde edilmiş gözlemleri de gerektirir. Bu konuda da literatür çok zengin değildir. Manyetik alan olgusu özellikle çoklu yıldız sistemlerinde yıldızların birbirleri ile etkileşiminden dolayı, çok daha karmaşıktır.

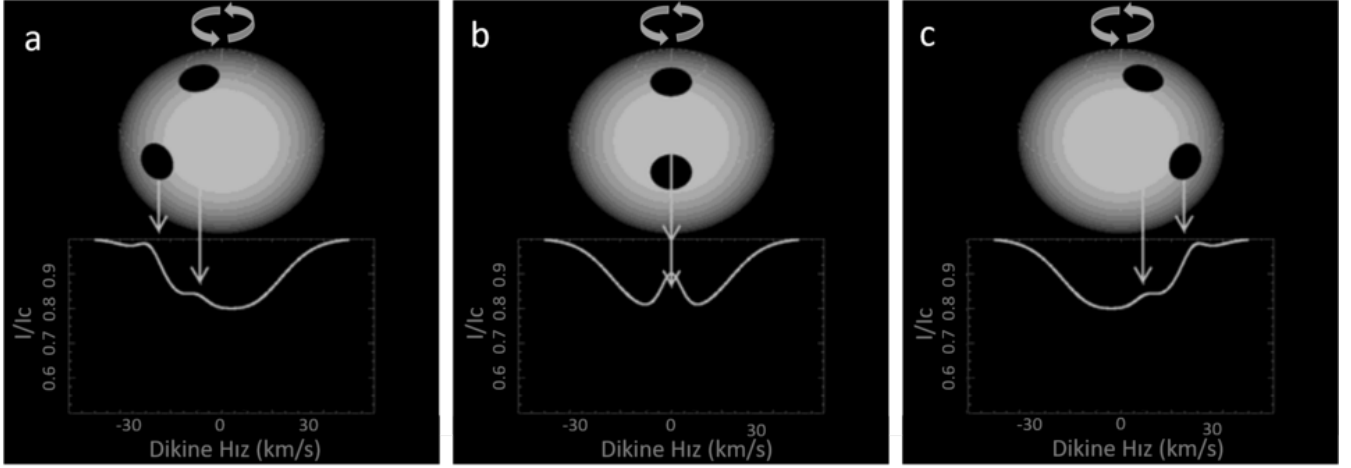
Yıldızlarda konvektif katmanda bulunan yüklü parçacıklar yıldız plazmasının hareketi ile manyetik alan oluştururlar. Oluşan manyetik alan çizgileri yıldız yüzeyine çıktıkları noktadaki yıldız maddesini baskılayarak fotosferden daha soğuk olan leke bölgelerini oluştururlar (Babcock 1961).

Bu lekeler manyetik alanın yıldız yüzeyindeki yansımaları olarak düşünülebilir. Dolayısıyla bu lekelerin yıldız yüzeyindeki konumları, sıcaklıkları, boyutları ve bunların zamana bağlı olarak değişimleri bize manyetik alanın doğası hakkında önemli ipuçları sunar.

Güneş ve interferometrik teknikler ile görüntülenmeye uygun yıldızlar (ki sayıları oldukça azdır) dışındaki yıldızlar nokta kaynak gibi davranırlar. Dolayısıyla bu yıldızlardaki lekelerin incelenmesi ancak fotometrik ya da tayfsal veriler analiz edilerek gerçekleştirilebilmektedir. Literatürde lekelerin incelenmesi için pek çok yöntem mevcuttur. Fakat özellikle diğer yöntemlere göre lekelerin yüzeydeki konumlarının hassas bir şekilde belirlenebilmesi bakımından Doppler görüntüleme tekniği öne çıkar. Ayrıca Doppler görüntüleme yüksek çözünürlüklü tek dolaylı görüntüleme tekniğidir.

Literatürde Doppler görüntüleme tekniği ile yıldız yüzeyinin parlaklık, sıcaklık ya da manyetik haritalarını oluşturan DoTS (Cameron 1992, 1997), TempMap (Rice & Strassmeier 2000), starry (Luger ve diğ. 2021; Luger ve diğ. 2019; Luger ve diğ. 2022), bayesDI (Asensio Ramos ve diğ. 2022) ve Invers13 (Kochukhov ve diğ. 2012) gibi bilgisayar kodları mevcuttur. Fakat bu kodların çoğu açık kaynak kodlu değildir ve sadece belirli araştırma gruplarında mevcuttur. Ayrıca bu kodlar farklı yeteneklere sahip olmakla

\* enbahar@ankara.edu.tr



**Şekil 1.** Soğuk lekelerin tayfsal çizgi profilleri üzerindeki etkisinin şematik gösterimi. Yıldız yüzeyindeki soğuk lekelerden kaynaklı, yıldız tayflarında görülen tümsek yapısı, yıldız yüzeyindeki lekelerin hem boylam hem de enlemlerine bağlı olarak zaman içinde farklılık gösterir. Ekvatorda ve yüksek enlemde bulunan iki leke soldaki şekilde (a) yıldızın gözlemciye yaklaşan kısmında, ortada (b) gözlemcinin bakış doğrultusunda ve sağda (c) ise gözlemciden uzaklaşan kısmında yer almaktadır (Rice 2002).

birlikte Doppler görüntüleme tekniğini farklı yaklaşımlar altında uygulamaktadırlar.

Sonuçların karşılaştırılabilir olması açısından açık kaynak kodlu yazılımlar oldukça önemlidir. Ayrıca kullanımın kolay olması kullanıcı kaynaklı hataların azaltılması konusunda ciddi katkı sağlar. Bu bağlamda, bu çalışmada Python programlama dilinde Doppler görüntüleme tekniği ile tek yıldızların yüzey parlaklık dağılımlarını modelleyerek haritalar üreten, kullanımı kolay ve açık kaynak kodlu olan SpotDIpy kodu tanıtıldı. Ayrıca genç güneş-benzeri bir tek yıldız olan V889 Her yıldızının SpotDIpy kodu ile yüzey parlaklık dağılımı haritaları oluşturularak leke veya leke gruplarının yapısı ve davranışı incelendi.

## 2 Doppler Görüntüleme

### 2.1 Tarihçe

Yıldız yüzeyindeki kimyasal bolluk farklılıkları, sıcaklık farklılıkları veya pulsasyonlar gözlemsel tayflardaki çizgi profillerinde bozucu bir etkiye sahiptir ve yıldızın kendi eksenini etrafında dönmesi ile modüledir. Çizgi profillerindeki bu bozulmalar ilk defa Deutsch (1957) tarafından incelenerek HD 125248 yıldızının manyetik alan ve kimyasal bolluk haritaları oluşturuldu. Goncharskij ve diğ. (1982) gözlemsel çizgi profillerini kullanarak yüzey haritası üreten ilk bilgisayar kodunu geliştirdiler. Soğuk yıldızlarda yüzey haritalaması çalışması ise ilk olarak Vogt & Penrod (1983) tarafından HR 1099 yıldızı için gerçekleştirildi ve optimizasyon işlemi bir dizi deneme yanılma sürecine dayanmaktaydı. Ardından Skilling & Bryan (1984) tarafından geliştirilen bir kod ile optimizasyon işlemi formülleştirildi. Sonraları bu teknik parlaklık (Collier Cameron & Horne 1986; Vogt ve diğ. 1987), sıcaklık (Piskunov ve diğ. 1990; Berdyugina 1998; Rice & Strassmeier 2000), kimyasal bolluk (Adelman ve diğ. 2002) ve manyetik alan (Piskunov & Khokhlova 1983; Brown ve diğ. 1991; Semel 1989; Piskunov & Kochukhov 2002) haritaları üretmeye imkan verecek şekilde yeniden yorumlandı ve geliştirildi. Ters ve kötü konulmuş (İng. inverse and ill-posed) bir problem olan

Doppler görüntüleme için tek bir çözüm elde etmek için maksimum entropi (Skilling & Bryan 1984) ve Tikhonov düzenleme (Tikhonov & Arsenin 1977) metodları yaygın olarak kullanılsa da günümüzde yaklaşık Bayesian teknikleri de problemin çözümü için kullanılmaktadır (Luger ve diğ. 2021; Asensio Ramos ve diğ. 2022).

### 2.2 Tekniğin Temeli

Soğuk yıldızlarda manyetik alan kökenli soğuk lekelerin (ya da leke gruplarının) tayfsal çizgi profillerinde oluşturacağı bozulmalar lekelerle ait enlem, boylam, boyut ve sıcaklık (ya da kontrast) hakkında bilgileri içerisinde barındırır. Bu bozulmalar soğuk leke varlığı durumunda kendisini tayfsal çizgi profillerinde tümsek (bump) yapısı şeklinde gösterir. Bunun sebebi ise lekenin fotosfere göre daha soğuk olmasından dolayı daha düşük bir sürekliliğe ve genliğe sahip olmasındandır. Tümsek yapısı yıldızın kendi eksenini etrafında döndüğü durumda Doppler etkisi ile ilgili tayf çizgisinin mavi kanadından kırmızı kanadına doğru tüm profil boyunca bir hareket gerçekleştirir. Bu hareketin genliği lekeden gelen tayfsal bileşenin gözlemciye göre dalgaboyundaki maksimum kırmızıya ve maviye kayma değerlerine bağlıdır. Diğer bir deyişle lekenin sahip olduğu maksimum ve minimum dikine hız değerlerine bağlıdır. Bu durum ise doğrudan lekenin enlemi ile ilişkilidir. Bu hareketin incelenmesi için yıldızın bir dönme dönemi boyunca yeterli sayıda ve uygun dönme evresi aralığında elde edilen tayfsal gözlemlere ihtiyaç vardır. Tümsek yapının tayfsal çizgi profili üzerindeki yeri çizginin gözlemlendiği dönme evresine bağlı olarak lekenin yıldız yüzeyinde hangi boylamda olduğunu bilgisi verir. Ayrıca tümsek yapısının genliği ve genişliği ise lekenin boyutu ve kontrastı hakkında fikir verir (daha ayrıntılı bilgi için bkz. Vogt & Penrod (1983)). Şekil 1'de lekelerin enlem ve boylamlarına bağlı olarak zaman içerisinde tayfsal çizgi profillerine nasıl bir etkide bulunduğu görülmektedir.

### 2.3 Matematiksel Süreç

Doppler görüntüleme tekniğinin uygulanmasında izlenen matematiksel süreç temelde, gözlemsel tayfsal çizgi profillerine

en iyi uyumu sağlayan modelin belirlenmesidir. Uygun modeli oluşturan yüzey parlaklık dağılımı aranan yüzey haritasını vermektedir. Doppler görüntüleme tekniğinin temelini oluşturan matematiksel ifade Denklem 1'de gösterilmektedir (Rice 2002).

$$E = \sum_{\phi} \sum_{\nu} \left[ \frac{R_{calc}(\nu, \phi) - R_{obs}(\nu, \phi)}{\sigma_{\nu, \phi}} \right]^2 + \lambda S \quad (1)$$

Burada  $R_{calc}$  hesaplanan sentetik tayfsal hız profillerini,  $R_{obs}$  gözlemsel verileri,  $S$  düzenleme fonksiyonunu,  $\lambda$  ise Lagrange çarpanını göstermektedir.  $R_{calc}$  belirli bir dönemde gözlemcinin gördüğü yıldız yüzeyinin her bir noktası için oluşturulan ve ölçeklendirilen yerel tayfsal çizgi profillerinin integrasyonu ile elde edilir. Yerel tayfsal çizgi profilleri için sentetik tayflar kullanılabilir gibi hedef yıldız ile benzer parametrelere sahip fakat manyetik olarak aktif olmayan yavaş dönen yıldızların tayfları da kullanılabilir. İntegrasyon sırasında ilgili yüzey hücrelerinin ilgili evreye bağlı olarak hangi hız ya da dalgaboyu alanında olduğu hesaba katılmalıdır. Ayrıca kenar kararması, çekim kararması ve eksen eğikliği açısından bağlı olarak izdüşümsel alanlar da dikkate alınmalıdır. Bununla birlikte yıldız yüzeyinin nasıl ızgaralara (İng. grid) ayrılacağı da önemlidir. Yıldız yüzeyinde uygun dağılmayan yüzey hücreleri kullanıldığı durumda hesaplanan sentetik tayfsal hız profillerinde yapay bozulmalar meydana gelebilir (Piskunov & Rice 1993).

Doppler görüntüleme tekniği ile parlaklık dağılımı haritası elde etmek için literatürde kullanılan yaklaşımlardan biri iki sıcaklık yaklaşımıdır (Cameron 1992). Bu yaklaşım yıldızın fotosfer sıcaklığı ve leke sıcaklığı için oluşturulan yerel tayfsal çizgi profillerinin belirli bir değerde ( $f_s$ ) ağırlıklı ortalaması üzerinden parlaklık haritası oluşturma mantığına dayanır.  $f_s$  leke doluluk faktörü (İng. spot filling factor) olarak adlandırılır ve leke ve fotosfer için oluşturulan yerel tayfsal çizgi profillerinin yıldız yüzeyindeki ilgili yüzey hücrelerinde işgal ettiği alanın kesirsel bir ifadesidir.

Denklem 1'deki  $\lambda S$  ifadesi denklemin sadece klasik  $\chi^2$  ifadesine bağlı olmadığını gösterir. Bunun sebebi Doppler görüntüleme tekniğinin kötü konulmuş bir problem olmasıdır. Bu da eşsiz tek bir çözüme başka bir kısıtlama olmaksızın ulaşamayacağı anlamına gelir. Doppler görüntüleme maksimum entropi metodu literatürde sıkça kullanılır (Asensio Ramos ve diğ. 2022). Bu metod muhtemel yüzey haritaları arasından, veriler gerektirmedikçe, haritanın farklı bölümleri arasında en az korelasyon olduğu haritayı seçer. Hiç leke olmadığı (yani parlaklık dağılımının homojen olduğu) durumda bu fonksiyon alabileceği en yüksek değeri alır. Maksimum entropi fonksiyonu leke doluluk faktörü cinsinden Denklem 2'deki gibidir (Unruh & Collier Cameron 1995).

$$S(f_s) = - \sum_{i=1}^n w_i \left[ f_{s_i} \log \frac{f_{s_i}}{m} + (1 - f_{s_i}) \log \frac{(1 - f_{s_i})}{(1 - m)} \right] \quad (2)$$

Burada  $m$  lekenin kesirsel olarak işgal ettiği varsayılan alanı gösterir ve bu çok küçük pozitif bir sayıdır.  $w_i$  ise her bir yüzey hücrelerinin alanını göstermektedir.

Lagrange çarpanı,  $\lambda$ , değerinin yanlış seçimi elde edilen modelin görüntüyü de modelleyerek yapay lekelerin ortaya çıkmasına ya da olduğundan daha az lekeli bir haritanın üretilmesine sebep olabilir (Kochukhov 2017). Ayrıntıları Chiang ve diğ. (2005) tarafından verilen, her bir  $\lambda$  değeri için ulaşılan  $\chi^2$  değerlerine karşılık maksimum entropi

fonksiyonunun değerlerinin oluşturduğu eğrinin, maksimum eğriliği kriteri ile belirlenen noktasına karşılık gelen değer uygun  $\lambda$  değeri olarak kullanılabilir.

### 3 SpotDIpy

#### 3.1 Genel Bakış

SpotDIpy Doppler görüntüleme tekniği ile iki sıcaklık yaklaşımı (Cameron 1992) altında yıldızların yüzey parlaklık dağılımı haritalarını üreten Python programlama dilinde yazılmış bir bilgisayar kodudur. Kötü konulmuş problemin çözümünü için maksimum entropi metodunu kullanmaktadır. Girdi verisi olarak, gözlemsel tayflardan LSD (en küçük kareler dekonvolüsyonu) (Donati ve diğ. 1997) yöntemi ile elde edilen ortalama hız profillerini kullanır. Bunun yanında leke ve fotosferi temsil edecek yerel hız profilleri de kullanıcı tarafından koda girilir. SpotDIpy kodunun özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Kullanımı oldukça basittir. Böylece kullanıcı kaynaklı hataların ortaya çıkmasını önemli ölçüde engeller.
- Yüzey ızgarası olarak Python programlama dilindeki **Phoebe** kütüphanesi kullanılır. Dolayısıyla hem üçgenleme (ing. triangulation) hem de Wilson-Devinney tarzı yüzey ızgarasının kullanılabilmesine imkan verir.
- $\Omega(\beta) = \Omega_{eq} - \Delta\Omega \sin^2\beta$  deklemine göre diferansiyel dönmenin etkisini dikkate alır.
- Kenar kararmasını dikkate alır. Bir Python kütüphanesi olan **ldtk** (Husser ve diğ. 2013; Parviainen & Aigrain 2015) yardımıyla hesaplanan kenar kararması katsayıları kullanılarak kenar kararması etkisinin hesabı için 3 farklı yasadandan (doğrusal, ikinci dereceden veya kare-kök) biri seçilebilir.
- Çekim kararması etkisini, ayrıntıları **Espinosa Lara & Rieutord (2011)** tarafından verilen şekli ile dikkate alır.
- Yerel hız profillerinin sentetik tayflardan oluşturulduğu durumda tayfsal çözünürlük üzerinden aletsel profilin etkisi bir Python kütüphanesi olan **PyAstronomy** yardımıyla profillere ekleyebilir.
- Elde edilen yüzey parlaklık dağılımı haritalarından ilgili filtre göz önünde bulundurularak ışık eğrisi üretilebilir.
- Uygun bir yüzey parlaklık dağılımı haritasının elde edilmesi kullanıcının programa gireceği parametrelerin doğruluğuna oldukça bağlıdır. Bazı parametrelerin net olarak bilinmediği durumda (vsini, eksen eğikliği açısı gibi) kullanıcının belirlediği aralık ve adım miktarı göz önünde bulundurularak bir ızgara araması (İng. grid search) yaparak uygun parametreleri bulabilir.
- Çıktı verilerini en uygun şekilde görselleştirerek kullanıcının sonucu doğru bir şekilde değerlendirmesine imkan sunar.

SpotDIpy açık kaynak koduna sahiptir. Yani istenildiği durumda kodun nasıl çalıştığı denetlenebilir. Ayrıca kullanıcılar kodu istedikleri şekilde revize edebilir ve yeni ihtiyaçlara göre geliştirebilirler. Bazı durumlarda farklı Doppler görüntüleme kodları aynı veri için dramatik olmasa da farklı sonuçlar üretebilir. Bu durum tekniğin nasıl ele alındığı ile ilgilidir. Kodların açık kaynak kodlu olması sürecin nasıl işlediğinin anlaşılması ve böylece haritaların daha karşılaştırılabilir hale getirilmesi açısından oldukça önemlidir.

#### 3.2 Testler

SpotDIpy kodunun testleri, araştırma grubumuzun elinde bulunan, Fortran programlama dilinde yazılmış literatürde

Çizelge 1. V889 Her Yıldızının Gözlem Bilgileri. SNR: Sinyal/Gürültü

Tarih	BJD	Evre	Poz Süresi (s)	SNR
2020-09-04	2459097.301938	0.212	2700	53
2020-09-04	2459097.333441	0.235	2700	61
2020-09-04	2459097.400496	0.284	2700	49
2020-09-03	2459096.280314	0.463	2700	72
2020-09-03	2459096.313055	0.487	2700	80
2020-09-03	2459096.345310	0.511	2700	69
2020-09-03	2459096.376986	0.534	2700	81
2020-09-02	2459095.267115	0.721	1200	40
2020-09-02	2459095.281096	0.731	1200	52
2020-09-02	2459095.299856	0.745	1800	65
2020-09-02	2459095.322170	0.761	1800	60
2020-09-02	2459095.343360	0.777	1800	60
2020-09-02	2459095.364331	0.792	1800	54
2020-09-02	2459095.385302	0.808	1800	50
2020-09-02	2459095.406215	0.823	1800	56
2020-09-05	2459098.386161	0.006	2700	62
2020-09-07	2459100.271256	0.387	2700	72
2020-09-07	2459100.303233	0.411	2700	89
2020-09-07	2459100.334805	0.434	2700	84
2020-09-07	2459100.367558	0.458	2700	61
2020-09-06	2459099.297212	0.674	2700	76
2020-09-06	2459099.328599	0.697	2700	81
2020-09-06	2459099.359986	0.720	2700	76
2020-09-06	2459099.391326	0.742	2700	67
2020-09-05	2459098.284409	0.932	2700	61
2020-09-05	2459098.320957	0.958	2700	70
2020-09-05	2459098.354728	0.983	2700	68
2020-09-16	2459109.335423	0.028	2700	53
2020-09-16	2459109.366821	0.051	2700	65
2020-09-16	2459109.398266	0.074	2700	71
2020-09-18	2459111.249720	0.430	2700	61
2020-09-18	2459111.281060	0.453	2700	76
2020-09-18	2459111.312447	0.476	2700	70
2020-09-17	2459110.248958	0.697	2700	48
2020-09-17	2459110.280344	0.720	2700	63
2020-09-17	2459110.311685	0.743	2700	61

çokça kullanılan DoTS kodu ile karşılaştırılarak gerçekleştirildi. Testler üç farklı eksen eğikliği açısı ( $30^\circ$ ,  $60^\circ$  ve  $90^\circ$ ) için oluşturulan yapay parlaklık dağılımı haritalarından üretilen yapay verilerin hem SpotDIpy kodu hem de DoTS kodu ile haritaların yeniden üretilerek birbirleri ile karşılaştırılması şeklinde yapıldı. 10 eş aralıklı dönme evresi için üretilen sentetik tayfsal hız profillerine sinyal/gürültü oranı 1000 olacak şekilde gürültü eklendi. Şekil 2, 3 ve 4'te karşılaştırma sonuçları görülmektedir.

Doppler görüntüleme tekniği ile uygun bir harita elde etmek ancak bazı limitler dahilinde mümkündür (Rice & Strassmeier 2000; Berdyugina 2005; Strassmeier 2009). Uygun bir harita üretmek, yıldız parametrelerinin hassasiyetinin yanında tayfların sinyal/gürültü oranına ve çözünürlüğe de bağlıdır. Bu teknik ile doğrudan eşsiz bir çözüme ulaşamamasının nedenleri de zaten verilerin sonlu sinyal ve çözünürlüğe sahip olmasıdır. Bununla beraber bir dönme evresi süresince gözlenen tayfların sayısı ve ne sıklıkla alındığı, yıldızın ekvatoryal dönme hızı ve eksen eğikliği açısı üretilen haritanın kalitesi üzerinde etkilidir. Şekil 4'te eksen eğikliği açısının  $90^\circ$  olduğu durumda meydana gelen ayna dejenerasyonu (İng. mirror degeneracy) görülmektedir. Bunun sebebi tek yıldızlarda

Çizelge 2. V889 Her Yıldızının Temel Parametreleri.

Parametre	Değer	Kaynak
$T_{eff}(K)$	5800	Willamo ve diğ. (2019)
Eksen Eğikliği ( $^\circ$ )	60	Marsden ve diğ. (2006)
vsini ( $km/s$ )	38.5	Willamo ve diğ. (2019)
Makrotürbülans ( $km/s$ )	3.0	Strassmeier ve diğ. (2003)
logg ( $cgs$ )	4.3	Frasca ve diğ. (2010)
Kütle ( $M_\odot$ )	1.017	Montalto ve diğ. (2021)

eğer eksen eğikliği  $90^\circ$  ise yıldızın kuzey ve güney yarım küreleri tayfsal çizgi profillerinde aynı etkiyi oluşturmasıdır. Dolayısıyla başka bir kısıtlama olmadığı durumda (örn. örtme gösteren çift yıldızlar) profile gelen katkının kuzey yarım küreden mi yoksa güney yarım küreden mi geldiği bilinemez. Şekil 2, 3 ve 4 incelendiğinde SpotDIpy kodunun DoTS kodu ile oldukça benzer sonuçlar verdiği görülür. Her iki kodun da aynı veri için ürettiği modellerin farklarının standart sapmalarının oldukça küçük olması bunun bir göstergesidir.

#### 4 V889 Her Yıldızının Doppler Görüntülenmesi

Hızlı dönen genç bir yıldız olan V889 Her, BY Dra türünden bir dönen değişendir. Önemli bir manyetik aktiviteye sahip olan ( $\log R'_{HK} = -4.175$  (Lehtinen ve diğ. 2016)) yıldız G2 V tayf türündendir. Genç ve Güneş benzeri bir yıldız olması Güneş'in ilk zamanlarında nasıl bir manyetik etkinliğe sahip olduğunun anlaşılması açısından oldukça değerlidir. Bu durumdan dolayı pek çok araştırmancının konusu olmuştur. Yıldızın Doppler görüntüleme çalışmalarında kutup lekesi ile orta ve düşük enlemlerle lekelerin varlığından söz edilmektedir (Strassmeier ve diğ. 2003; Marsden ve diğ. 2006; Järvinen ve diğ. 2008; Kóvári ve diğ. 2011).

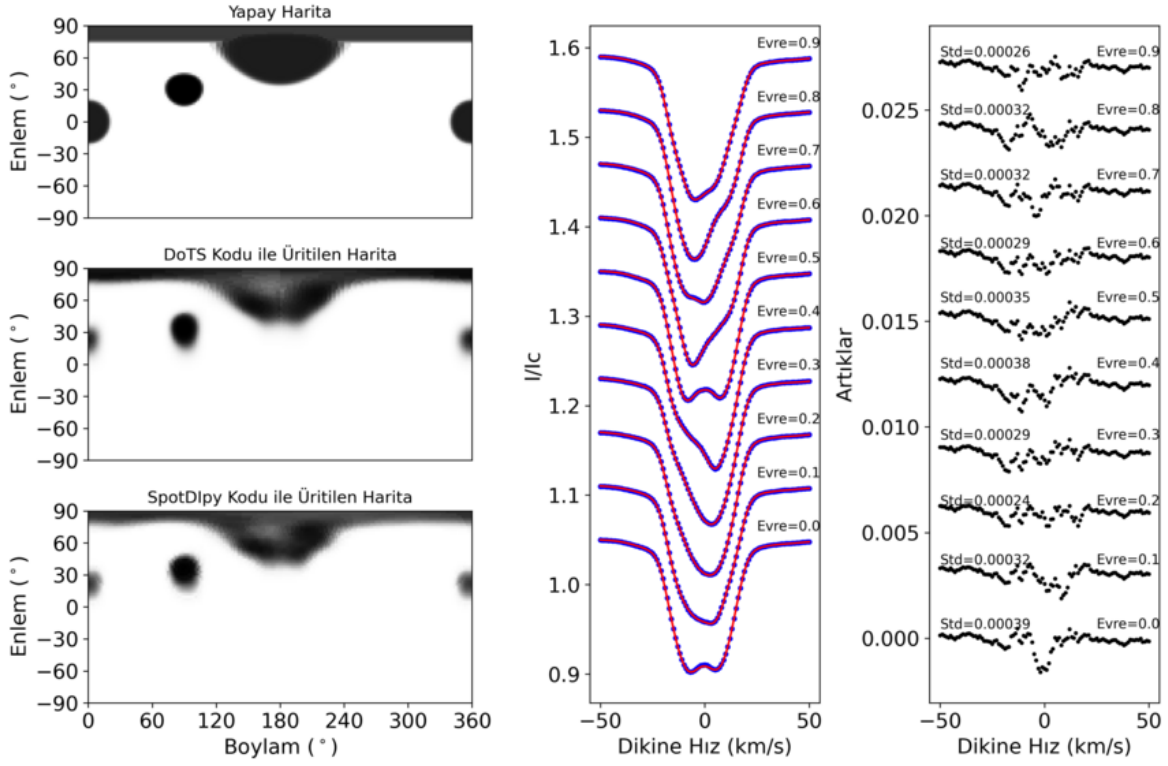
##### 4.1 Gözlemler

V889 Her yıldızının tayfsal gözlemleri Ankara Üniversitesi Kreiken Rasathanesi'nde bulunan 80 cm ayna çapına sahip T80 Prof. Dr. Berahitdin Albayrak Teleskobu'na bağlı Shelyak marka Whopshel model tayfçeker ile gerçekleştirildi. Yaklaşık  $R \sim 30000$  çözünürlüğe sahip, 13 günlük zaman aralığına dağılmış toplamda 37 adet tayf elde edildi. Ayrıca yerel hız profilleri olarak kullanılmak üzere yavaş dönen ve ciddi bir manyetik aktivite göstermeyen HD 143761 (G0 V) ile HD22049 (K2 V) yıldızlarının tayfları da gözlemlendi. V889 Her yıldızının gözlenen tayflarının tarihleri, BJD değerleri, karşılık gelen dönme evreleri, poz süreleri ve sinyal/gürültü değerleri Çizelge 1'de verilmektedir. Yıldızın dönme evreleri aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplandı.

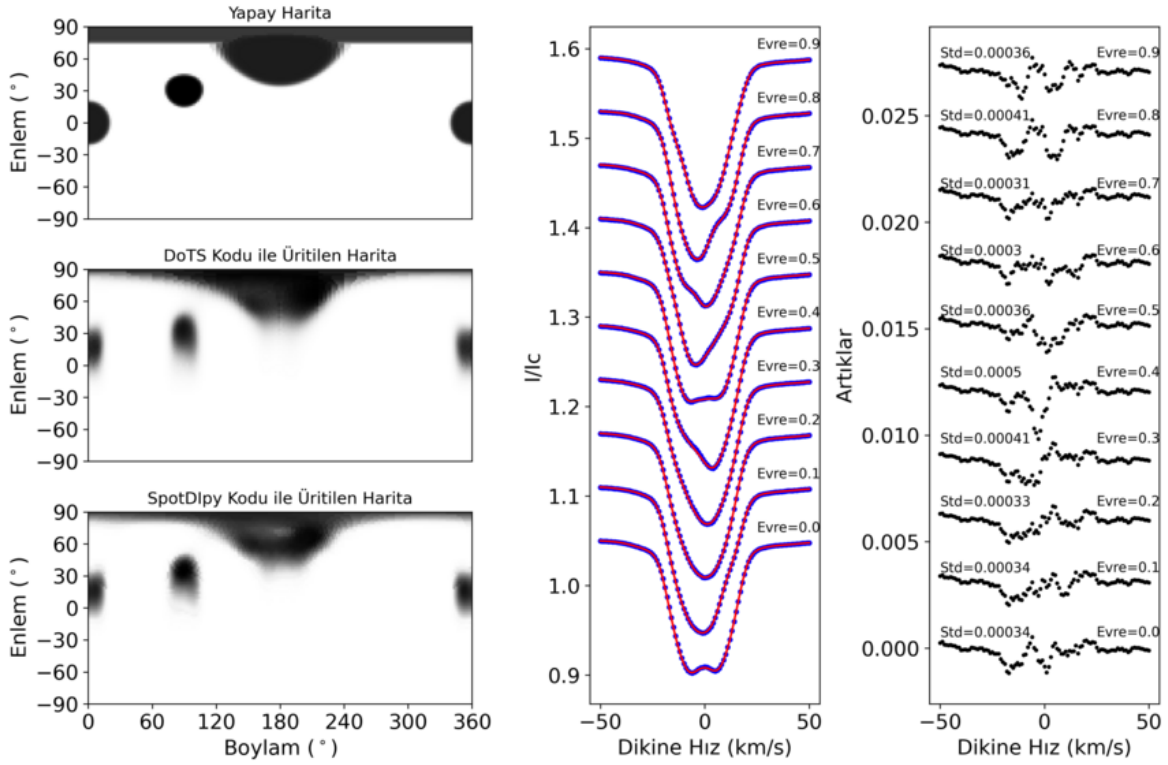
$$BJD = 2449950.55 + 1^d .36494 \times E. \quad (3)$$

##### 4.2 Doppler Görüntüleme

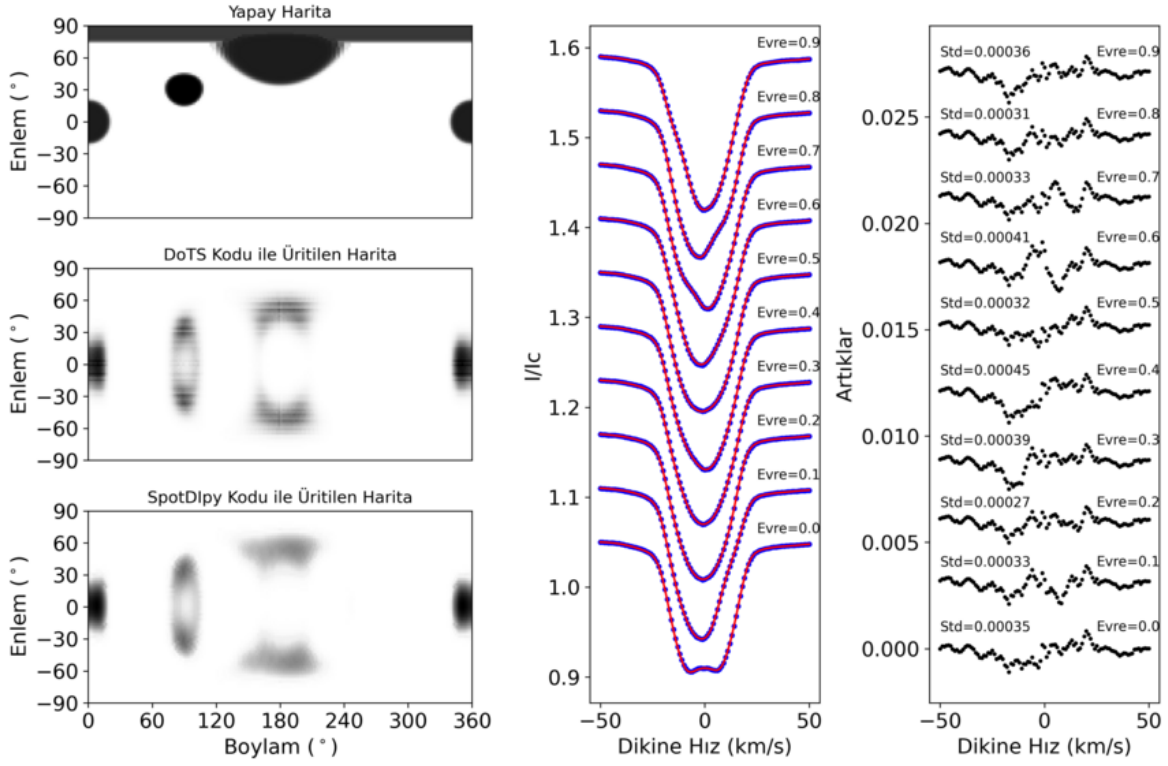
Doppler görüntüleme ile doğru bir harita elde etmek ilgili yıldız parametrelerinin duyarlılığı ile yakından ilişkilidir. Bundan dolayı bu çalışma için güncel parametreler literatürden toplandı (bkz. Çizelge 2'de). Ayrıca tayfların sinyal/gürültü değerlerini arttırmak için tüm tayflardan LSD tekniği yardımıyla ortalama hız profilleri elde edildi. Yıldızın dönme dönemi göz önünde bulundurularak veriler ardaşık 3 ayrı sete ayrıldı (set 1, set 2 ve set 3). Doppler görüntüleme işlemi bu çalışmanın da konusu olan SpotDIpy kodu ile gerçekleştirildi. Yerel tayfsal



**Şekil 2.** Sol sütunda, üretilen yapay harita (üstte), DoTS kodu ile üretilen harita (ortada), SpotDIpy kodu ile üretilen haritalar (altta) görülmektedir. Orta sütunda, yapay veri için DoTS kodunun ürettiği modeller (mavi noktalar) ile SpotDIpy kodunun ürettiği modeller (kırmızı düz çizgi), sağ sütunda ise bu modellerin birbirleri ile olan farkı çizdirilmiştir ve her bir artığın standart sapma değerleri de grafikte görülebilir. Yapay veriler eksen eğikliği açısı  $30^\circ$  olacak şekilde üretilmiştir.



**Şekil 3.** Şekil 2'den farklı olarak eksen eğikliği açısı  $60^\circ$ 'dir.



Şekil 4. Şekil 2'den farklı olarak eksen eğikliği açısı  $90^\circ$ 'dir.

hız profillerini üretmek amacıyla fotosfer sıcaklığı için HD 143761, leke sıcaklığı için HD 22049 yıldızları kullanıldı. Elde edilen haritalar ile birlikte gözlemsel ortalama hız profillerine uygulanan modeller Şekil 5- 10'da görülebilir.

Üretilen üç haritada da baskın bir kutup lekesi ile birlikte orta enlemli lekeler göze çarpmaktadır. Bu durum literatürdeki diğer haritalarla uyum göstermektedir (Strassmeier ve diğ. 2003; Marsden ve diğ. 2006; Järvinen ve diğ. 2008; Kóvári ve diğ. 2011). Çarpıcı sonuçlardan biri ise ardışık zamanlara ait bu haritalar incelendiğinde lekelerin azalan boylamlara doğru hareket ettiği.

### 4.3 Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada açık kaynak kodlu, kolay bir kullanıma sahip olan Doppler görüntüleme kodu SpotDIpy tanıtıldı. Literatürde yaygın olarak kullanılan DoTS kodu ile karşılaştırma sonucunda SpotDIpy kodunun yıldızların yüzey parlaklık dağılımı haritalarını oluşturma konusunda yetkin olduğu rahatlıkla söylenebilir. Açık kaynak kodlu olması kullanıcılar açısından önemli bir avantaj olup, istenildiği durumda kolay bir şekilde güncellenebilir ya da farklı yetenekler kazandırılabilir. 2023 yılının ilk yarısında SpotDIpy kodunun açık kaynak kodu ile birlikte kullanıma açılması planlanmaktadır. Ayrıca bu süreçte yeni özelliklerin de eklenmesi planlanmaktadır.

SpotDIpy kodu ile yüzey parlaklık dağılımları oluşturulan V889 Her yıldızının literatürle de uyumlu bir leke dağılımı (bir kutup lekesi ve orta enlemli lekeler) gösterdiği görülmektedir (Strassmeier ve diğ. 2003; Marsden ve diğ. 2006; Järvinen ve diğ. 2008; Kóvári ve diğ. 2011). Özellikle kutup lekесinin hem bu çalışmadaki 3 sette de var olması hem de literatürdeki haritalarda mevcut olması, kalıcı bir kutup lekесinin varlığını

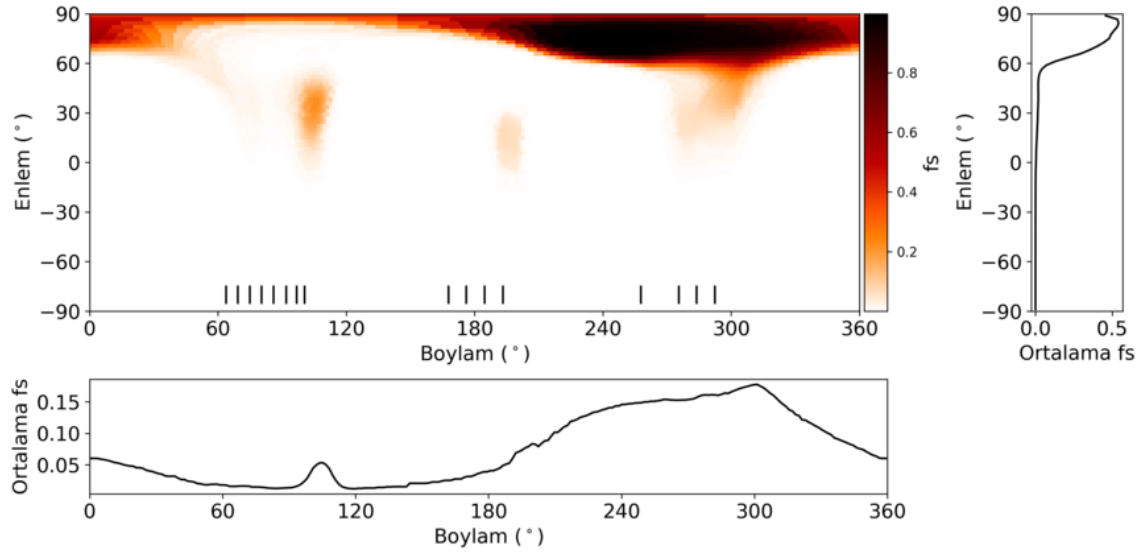
işaret etmektedir. Benzer bir çıkarım Huber ve diğ. (2009) tarafından da yapılmaktadır. Diferansiyel dönmenin tartışma konusu olduğu yıldızda (Järvinen ve diğ. 2008; Jeffers & Donati 2008; Kóvári ve diğ. 2011; Willamo ve diğ. 2019; Williamo ve diğ. 2022) 3 farklı sette azalan boylamlara doğru bir göçün gözlenmesi kayda değerdir. Fakat bu durumu netleştirmek için ardışık çevrimlerde alınmış daha fazla veriye ihtiyaç vardır.

### Teşekkür

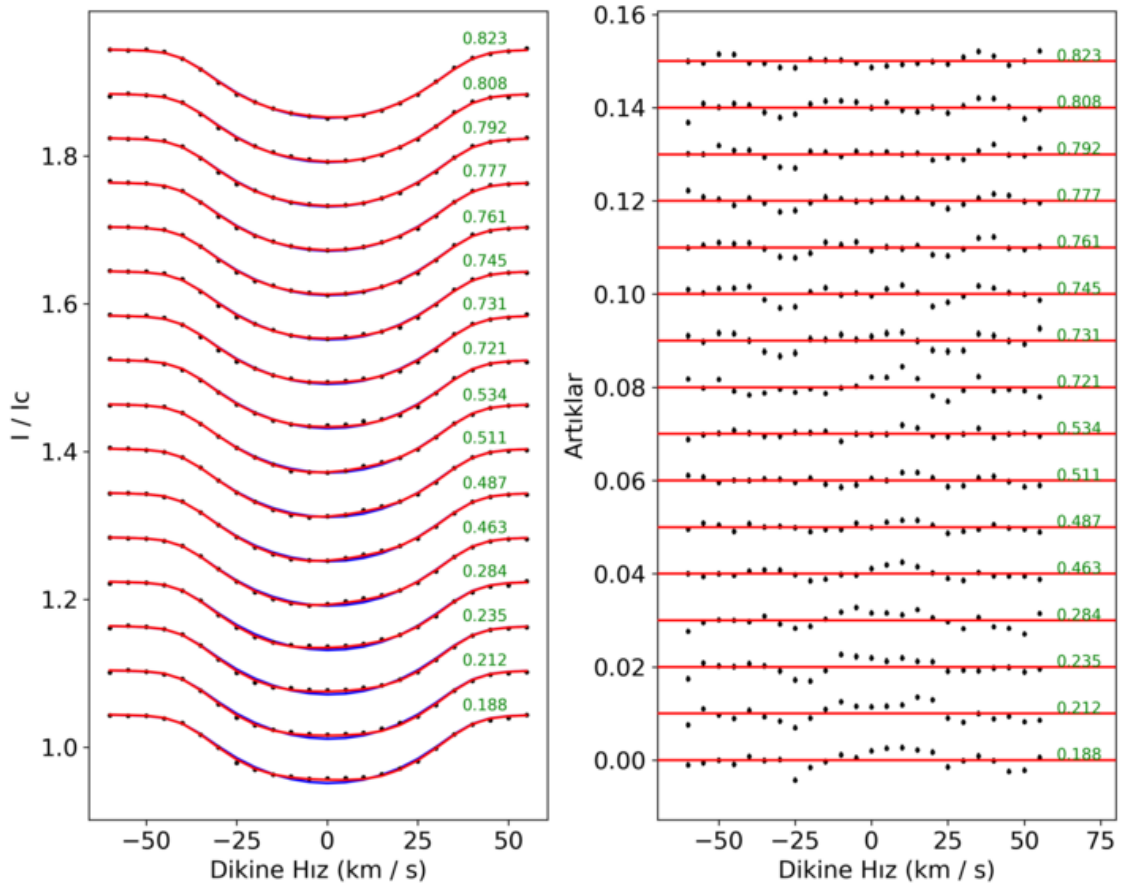
Bu çalışma Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) tarafından 18A0759001 numaralı proje ile desteklenmektedir. Ayrıca SpotDIpy kodunun yazımı sırasında Doppler görüntüleme ile ilgili tüm sorularımıza cevap vererek bize yardımcı olan Uppsala Üniversitesi'nden Prof. Dr. Oleg Kochukhov'a teşekkür ederiz.

### Kaynaklar

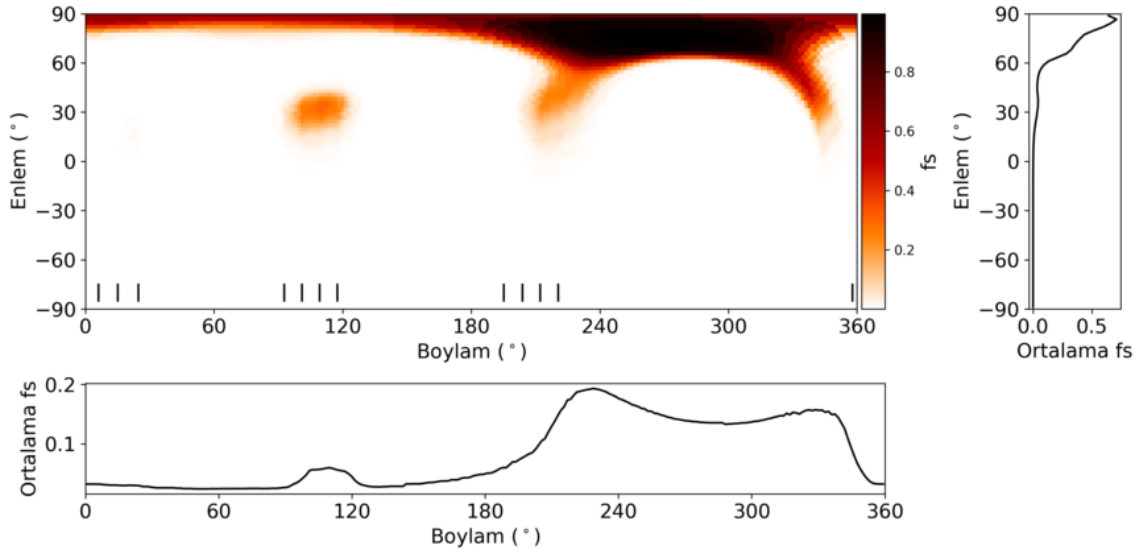
- Adelman S. J., Gulliver A. F., Kochukhov O. P., Ryabchikova T. A., 2002, *ApJ*, 575, 449  
 Asensio Ramos A., Díaz Baso C. J., Kochukhov O., 2022, *A&A*, 658, A162  
 Babcock H. W., 1961, *ApJ*, 133, 572  
 Berdyugina S. V., 1998, *A&A*, 338, 97, *ADS*  
 Berdyugina S. V., 2005, *Living Reviews in Solar Physics*, 2, 8  
 Brown S. F., Donati J. F., Rees D. E., Semel M., 1991, *A&A*, 250, 463, *ADS*  
 Cameron A. C., 1992, in Byrne P. B., Mullan D. J., eds, *Surface Inhomogeneities on Late-Type Stars*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp 33–45, doi:10.1007/3-540-55310-X\_131  
 Cameron A. C., 1997, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 287, 556



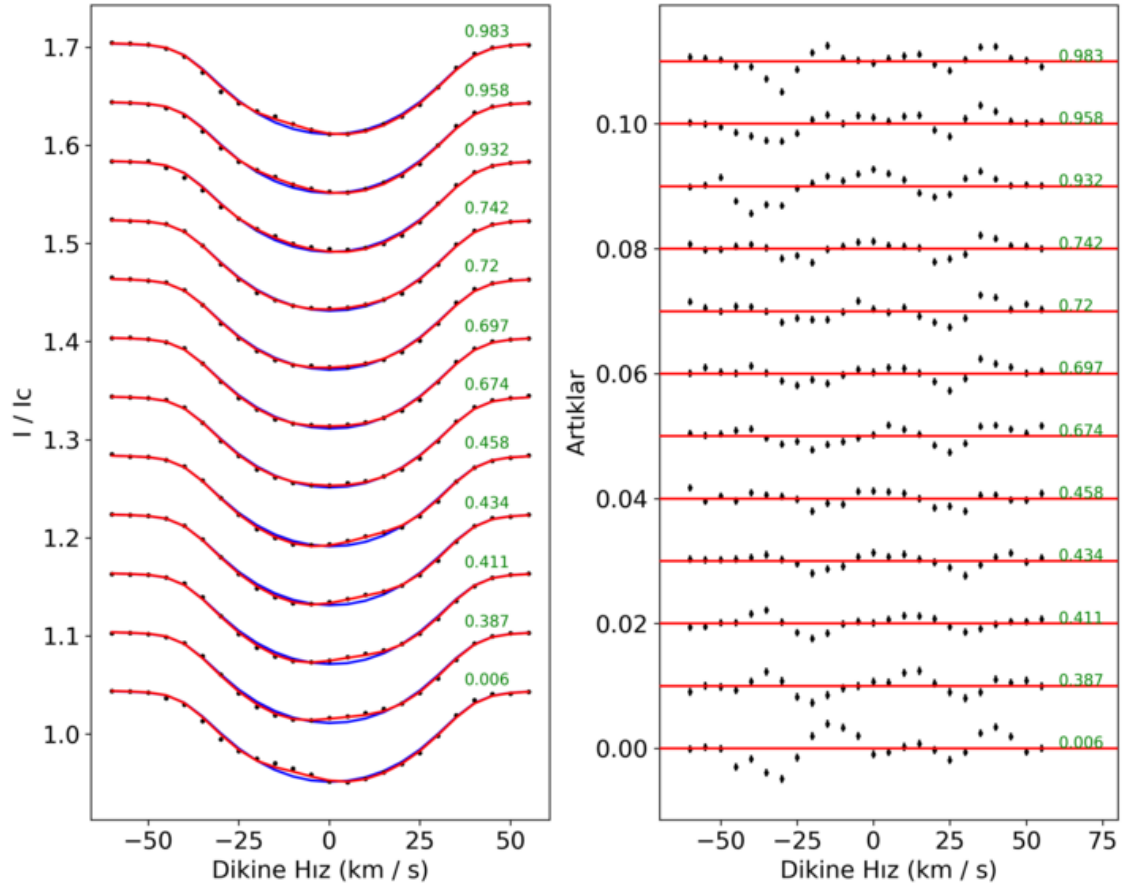
**Şekil 5.** V889 Her yıldızın set 1 verisi kullanılarak SpotDIpy kodu ile elde edilen harita. Haritanın altında her bir boylam kuşağı için ortalama leke doluluk faktörü grafiği görülmektedir, haritanın sağında enlem kuşağı için olanı görülmektedir. Ayrıca ilgili gözlem evrelerine karşılık gelen boylamlar harita üzerinde kısa çubuklarla işaretlenmiştir.



**Şekil 6.** V889 Her yıldızın set 1 verisinin SpotDIpy kodu ile modellenmesi. Sol panelde gözlemsel veriler (siyah noktalar), lekeli model (mavi düz çizgi) ve lekeli model (kırmızı düz çizgi) görülmektedir. Sağ panelde ise artıklar verilmektedir. Her bir verinin yanında evresi gösterilmiştir.

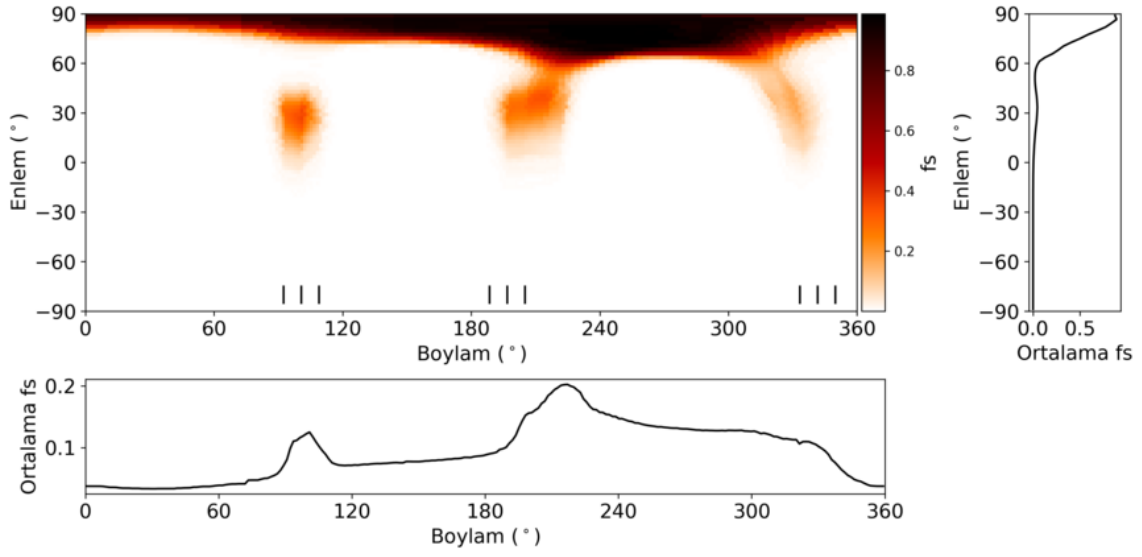


Şekil 7. Şekil 5'den farklı olarak set 2 verisi için elde edilen sonuçlar.

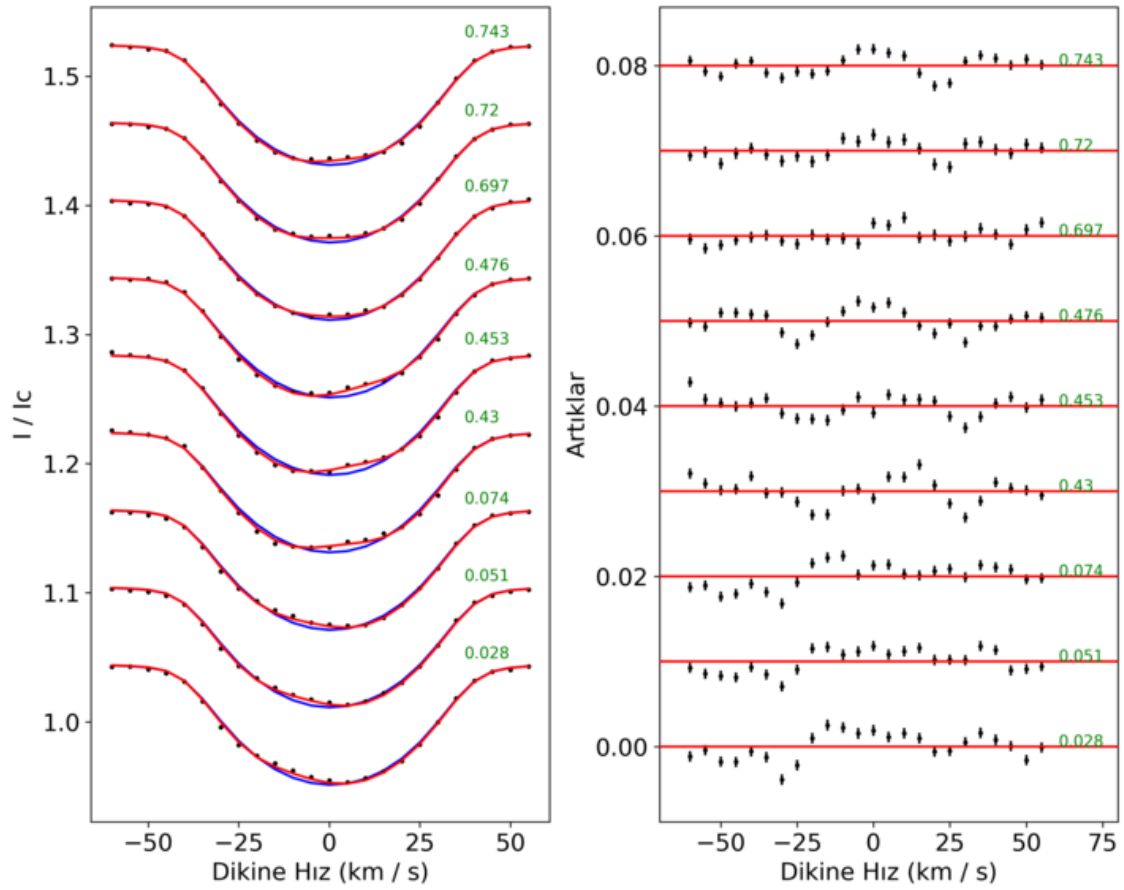


Şekil 8. Şekil 6'den farklı olarak set 2 verisi için elde edilen sonuçlar.





Şekil 9. Şekil 5'den farklı olarak set 3 verisi için elde edilen sonuçlar.



Şekil 10. Şekil 6'den farklı olarak set 3 verisi için elde edilen sonuçlar.

- Chiang Y.-W., Borbat P. P., Freed J. H., 2005, *Journal of Magnetic Resonance*, 177, 184
- Collier Cameron A., Horne K. D., 1986, in Zeilik M., Gibson D. M., eds., Vol. 254, *Cool Stars, Stellar Systems and the Sun*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, p. 205, doi:10.1007/3-540-16763-3\_173
- Deutsch A. J., 1957, *AJ*, 62, 139
- Donati J. F., Semel M., Carter B. D., Rees D. E., Collier Cameron A., 1997, *MNRAS*, 291, 658
- Espinosa Lara F., Rieutord M., 2011, *A&A*, 533, A43
- Frasca A., Biazzo K., Kóvári Z., Marilli E., Çakırlı Ö., 2010, *A&A*, 518, A48
- Gonchariskij A. V., Stepanov V. V., Khokhlova V. L., Yagola A. G., 1982, *Azh*, 59, 1146, *ADS*
- Huber K. F., Wolter U., Czesla S., Schmitt J. H. M. M., Esposito M., Ilyin I., González-Pérez J. N., 2009, *A&A*, 501, 715
- Husser T.-O., Wende-von Berg S., Dreizler S., Homeier D., Reiners A., Barman T., Hauschildt P. H., 2013, *A&A*, 553, A6
- Järvinen S. P., Korhonen H., Berdyugina S. V., Ilyin I., Strassmeier K. G., Weber M., Savanov I., Tuominen I., 2008, *A&A*, 488, 1047
- Jeffers S. V., Donati J. F., 2008, *MNRAS*, 390, 635
- Kóvári Z., Frasca A., Biazzo K., Vida K., Marilli E., Çakırlı Ö., 2011, in *Physics of Sun and Star Spots*. pp 121–125 (arXiv:1010.3511), doi:10.1017/S1743921311015110
- Kochukhov O., 2017, *A&A*, 597, A58
- Kochukhov O., Wade G. A., Shulyak D., 2012, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 421, 3004
- Lehtinen J., Jetsu L., Hackman T., Kajatkari P., Henry G. W., 2016, *A&A*, 588, A38
- Luger R., Agol E., Foreman-Mackey D., Fleming D. P., Lustig-Yaeger J., Deitrick R., 2019, *The Astronomical Journal*, 157, 64
- Luger R., Bedell M., Foreman-Mackey D., Crossfield I. J. M., Zhao L. L., Hogg D. W., 2021, preprint, (arXiv:2110.06271), *ADS*
- Luger R., Agol E., Bartolić F., Foreman-Mackey D., 2022, *AJ*, 164, 4
- Marsden S. C., Donati J. F., Semel M., Petit P., Carter B. D., 2006, *MNRAS*, 370, 468
- Montalto M., ve diğ., 2021, *A&A*, 653, A98
- Parviainen H., Aigrain S., 2015, *MNRAS*, 453, 3821
- Piskunov N. E., Khokhlova V. L., 1983, *Soviet Astronomy Letters*, 9, 346, *ADS*
- Piskunov N., Kochukhov O., 2002, *A&A*, 381, 736
- Piskunov N. E., Rice J. B., 1993, *PASP*, 105, 1415
- Piskunov N. E., Tuominen I., Vilhu O., 1990, *A&A*, 230, 363, *ADS*
- Rice J. B., 2002, *Astronomische Nachrichten*, 323, 220
- Rice J. B., Strassmeier K. G., 2000, *A&AS*, 147, 151
- Semel M., 1989, *A&A*, 225, 456, *ADS*
- Skilling J., Bryan R. K., 1984, *MNRAS*, 211, 111
- Strassmeier K. G., 2009, *A&ARv*, 17, 251
- Strassmeier K. G., Pichler T., Weber M., Granzer T., 2003, *A&A*, 411, 595
- Tikhonov A. N., Arsenin V. Y., 1977, doi:https://doi.org/10.1137/1021044
- Tobias S. M., 2002, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, 360, 2741
- Unruh Y. C., Collier Cameron A., 1995, *MNRAS*, 273, 1
- Vogt S. S., Penrod G. D., 1983, *PASP*, 95, 565
- Vogt S. S., Penrod G. D., Hatzes A. P., 1987, *ApJ*, 321, 496
- Willamo T., ve diğ., 2019, *A&A*, 622, A170
- Willamo T., Hackman T., Lehtinen J. J., Korpi-Lagg M., Kochukhov O., 2022, *The Open Journal of Astrophysics*, 5, 10

**Access:**M23-0348: *Turkish J.A&A* — Vol.4, Issue 3.