

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ER VUL ÇİFT YILDIZININ DOPPLER GÖRÜNTÜLEME TEKNİĞİ İLE
YÜZEY PARLAKLIK DAĞILIMININ MODELLENMESİ

Javid BASHIRZADE

ASTRONOMİ VE UZAY BİLİMLERİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2023

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ER VUL ÇİFT YILDIZININ DOPPLER GÖRÜNTÜLEME TEKNİĞİ İLE YÜZEY PARLAKLIK DAĞILIMININ MODELLENMESİ

Javid BASHIRZADE

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hakan Volkan ŞENAVCI

Soğuk yıldızlarda manyetik aktivite doğasının ve altta yatan astrofiziksel süreçlerin (Örn. dinamo mekanizması) daha iyi anlaşılabilmesi için, geç tayf türünden yıldızların yüzeylerinde bulunan lekelerin evrimini incelemek oldukça önemlidir. Bu incelemelerin yapılabilmesi kapsamında kullanılan en yaygın gözlem tekniği aktif yıldızın zamana bağlı yüksek çözünürlüklü tayfsal gözlemlerinin elde edilmesi ve en etkin analiz yöntemi ise Doppler görüntüleme tekniğidir. Bununla birlikte çift yıldızlar, bileşenler arası etkileşimin (Örn. spin-yörünge eşleşmesi) yüksek olması nedeniyle hem daha şiddetli hem de daha karmaşık manyetik aktivite süreçleri gösterirler. Bu bağlamda, çift yıldızlardaki manyetik aktivite süreçlerinin anlaşılabilmesi için literatürde az olan örnek sayısının artırılması gerekmektedir. Bu tez çalışmasında, ER Vul çift yıldızının yüzey parlaklık dağılımı, Doppler görüntüleme tekniği ile modellenmiştir. Sistemin yüksek çözünürlüklü tayfsal verileri, Ankara Üniversitesi Kreiken Rasathanesinde bulunan 80 cm çapındaki T80 – Prof. Dr. Berahitdin Albayrak Teleskobuna bağlı olan R ~30000 çözünürlükteki tayfçeker ile 8 gece boyunca yapılan gözlemler ile elde edilmiştir. Verilerin sinyal/gürültü (S/N) oranı LSD (Least Squares Deconvolution) yöntemi ile arttırıldıktan sonra elde edilen hız profilleri, Doppler Görüntüleme Tekniğine dayanan DoTS kodu kullanılarak modellenmiş ve sistemin her iki bileşenine ilişkin yüzey parlaklık dağılımı haritaları elde edilmiştir.

Temmuz 2023, 34 sayfa

Anahtar Kelimeler: Doppler görüntüleme tekniği, manyetik aktif yıldızlar, yıldız lekeleri

ABSTRACT

MSc Thesis

MODELING OF SURFACE BRIGHTNESS DISTRIBUTION OF ER VUL BINARY STAR SYSTEM WITH DOPPLER IMAGING TECHNIQUE

Javid BASHIRZADE

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Astronomy and Space Sciences

Supervisor: Prof. Dr. Hakan Volkan ŞENAVCI

For a better understanding of the nature of magnetic activity and underlying astrophysical processes (eg, the dynamo mechanism) in cold stars, it is important to study the evolution of spots on the surfaces of late spectral stars. The most common observation technique used within the scope of these investigations is to obtain time-dependent high-resolution spectral observations of the active star, and the most effective analysis method is Doppler Imaging Technique. However, binary stars show both more intense and more complex magnetic activity processes due to the high interaction between components (eg spin-orbit coupling). In this context, in order to understand the magnetic activity processes in binary stars, the number of examples in the literature should be increased. In this thesis, the surface brightness distribution of the ER Vul binary star was modeled by Doppler imaging technique. The high-resolution spectral data of the system were obtained using the T80 – Prof. Dr. Berahittin Albayrak Telescope during 8 nights with a $R \sim 30000$ resolution spectrograph. After achieving high signal/noise (S/N) ratio of the data with the help of the LSD (Least Squares Deconvolution) technique, the velocity profiles were modeled using the DoTS code based on Doppler Imaging Technique, to reconstruct the surface brightness distribution maps of both components of the system.

July 2023, 34 pages

Key Words: Doppler imaging technique, magnetically active stars, star spots

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında beni anlayışla karşılayıp motive eden, her konuda yardımcı ve destek olan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Hakan Volkan ŞENAVCI başta olmak üzere, anlamadığım konularda, rasathane gözlemlerinde ve veri indirgemelerinde çok yardımcı olan Öğr. Gör. Dr. İbrahim ÖZAVCI ve Arş. Gör. Dr. Engin BAHAR ve diğer bölüm hocalarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Javid BASHIRZADE
Ankara, Temmuz 2023



İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	3
2.1 Soğuk Yıldızlarda Aktivite	3
2.2 Soğuk ve Aktif Yıldızların Yüzey Görüntülemesi için Kullanılan Yöntemler ...	7
2.2.1 İnterferometrik gözlemler	7
2.2.2 Fotometrik gözlemler	7
2.2.3 Tayfsal gözlemler	8
2.3 Doppler Görüntüleme Tekniğinin Temelleri.....	8
2.3.1 Doppler görüntülemesi tekniği için gerekli koşullar	11
3. KAYNAK ÖZETLERİ	13
4. MATERYAL ve YÖNTEM.....	19
4.1 Gözlem ve Verilerin İndirgenmesi.....	19
4.2 En Küçük Kareler Dekonvolüsyonu (Least Squares Devoncolution) Tekniği ..	21
5. BULGULAR.....	24
6. TARTIŞMA ve SONUÇ	29
KAYNAKLAR	30
ÖZGEÇMİŞ.....	34

SİMGELER DİZİNİ

T_{fot}	Fotosfer sıcaklığı
T_{etkin}	Etkin sıcaklık
K	Kelvin
$M_{\odot}$	Güneş kütlesi, 1.99×10^{33} gr
i	Eksen eğikliği
V_r	Dikine hız
$v \sin i$	Yıldızın izdüşümsel dönme hızı
λ	Dalgaboyu
P_d	Dönme dönemi
$P_{\text{yör}}$	Yörünge dönemi
n	Tam sayı
R	Tayfçeker çözünürlüğü
$\text{\AA}$	Angström
q	Kütle oranı
T_0	Enberiden geçiş zamanı
K_1, K_2	Radyal hız genlikleri
$\log g$	Yüzey çekim ivmesi
[Fe/H]	Metal bolluğu

Kısaltmalar

HJD	Heliocentric Julian Date, Güneş Merkezli Julyen günü
MJD	Modified Julian Date, Modifiye edilmiş Julyen günü
DoTS	Doppler Tomography of Stars
LSD	Least Squares Deconvolution, En Küçük Kareler
Dekonvolüsyonu	
S/N	Signal-to-noise ratio, Sinyal/Gürültü oranı
MEM	Maximum Entropy Method, Maksimum Entropi Metodu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 HR diyagramı. Sıcak ve soğuk yıldızlar	1
Şekil 1.2 Maksimum ve minimum aktivite evrelerinde güneş fotosferi (Görsel bantta alınan görüntüler)	2
Şekil 2.1 HD48676 yıldızının. Ca II'nin H ve K salma çizgileri	3
Şekil 2.2 J034241.89+241158.3 yıldızının tayfindan alınan H α salma çizgileri (6563 Å civarı)	4
Şekil 2.3 Güneş yüzeyinde gözlemlenen plaj bölgeleri ve filamentler	5
Şekil 2.4 Hızlı dönen bir yıldızın soğurma çizgisi profilinde soğuk leke varlığı nedeniyle meydana gelen hörgüç yapısının şematik gösterimi	10
Şekil 2.5 Yıldızın farklı evrelerinde yüksek ve düşük enlemlerdeki lekelerin hız profilleri üzerinde oluşturdıkları hörgüç yapının farkı.....	11
Şekil 3.1 ER Vul'un farklı yörünge evrelerindeki yüzey sıcaklık haritaları	14
Şekil 3.2 2004 (üst), 2006 (orta) ve 2008 (alt) yıllarında baş bileşen için elde edilen yüzey haritaları.....	16
Şekil 3.3 Şekil 3.2 ile benzer ancak yoldaş bileşenin yüzey haritası	17
Şekil 3.4 ER Vul sisteminin baş (sol tarafta) ve yoldaş (sağ tarafta) bileşenleri için yüzey haritaları	18
Şekil 4.1 ER Vul tayfının Tetra yazılımı ile tellürik çizgilerinden arındırılmadan önceki (üstteki) ve sonraki (alttaki) hali	20
Şekil 4.2 ER Vul sisteminin 0.142 evresindeki tayfı ve ilgili tayf kullanılarak elde edilen LSD profili	22
Şekil 5.1 ER Vul sisteminin gözlenen tayfları kullanılarak elde edilen LSD profilleri (siyah içi dolu daireler), sistem parametreleri kullanılarak (mavi sürekli çizgiler) ve MEM iterasyonu sonrası (kırmızı sürekli çizgiler) elde edilen sentetik LSD profilleri	24
Şekil 5.2 ER Vul sisteminin birinci bileşeninin mercator gösteriminde leke dağılımı ...	25
Şekil 5.3 ER Vul sisteminin ikinci bileşeninin mercator gösteriminde leke dağılımı	26
Şekil 5.4 ER Vul sisteminin farklı evrelerdeki (0.0, 0.25, 0.5 ve 0.75) leke dağılımının geometrik gösterimi.....	28

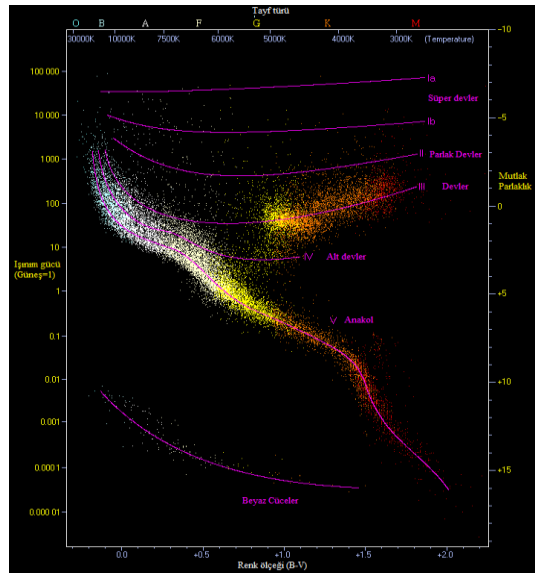
ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Yıldızın Doppler Görüntülemeye aday olması için gerekli kısıtlamaların bir özeti, yıldız yüzeyi haritalaması için uygun gözlem koşulları ile verilmiştir	12
Çizelge 4.1 Gözlem bilgileri	21
Çizelge 4.2 Doppler Görüntüleme Tekniği için kullanılan ER Vul parametreleri	23



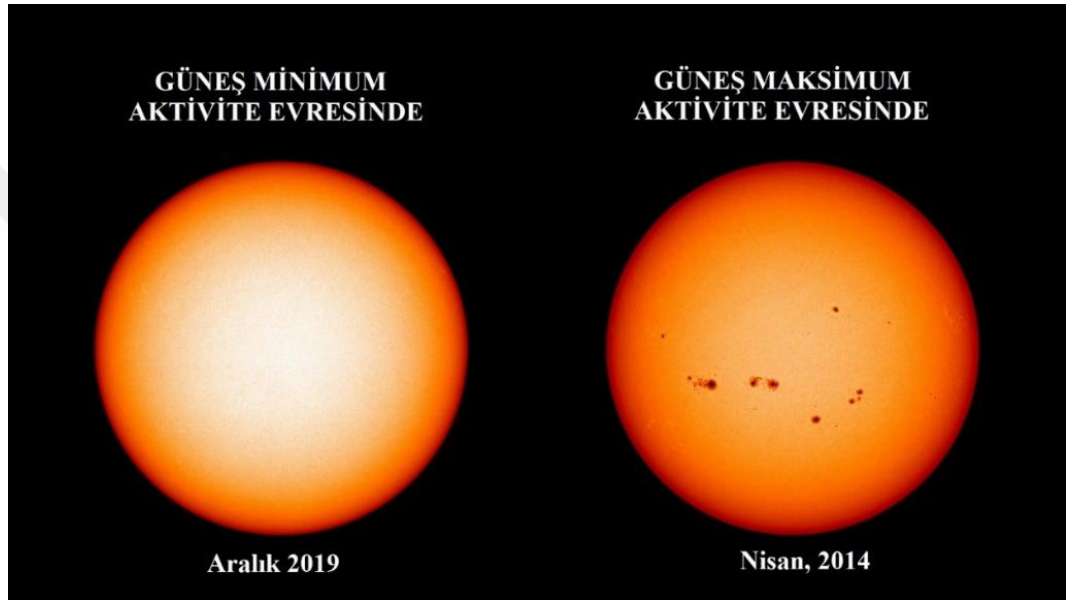
1. GİRİŞ

Soğuk yıldızların incelenmesi, özellikle manyetik aktivite doğasının ve yıldız evrimine olan etkisinin anlaşılabilmesi açısından, astrofiziğin önemli konularından biridir. Bu yıldızlar, fotosfer sıcaklıkları $T_{\text{fot}} < 7000$ K (Şekil 1.1) olan ve tayf türleri A'dan daha geç olan soğuk, yani dış katmanları konvektif olan yıldızlar olarak kabul edilirler. Hızlı dönmeye konveksiyonun birleşik etkisi, hareketin mekanik enerjisini manyetik enerjiye dönüştüren bir dinamo mekanizmasının ortaya çıkmasına neden olur. Bu durum ise yıldız fotosferinde lekeler, filamentler ve koronal ilmekler gibi bir aktivitenin varlığına neden olur (Şekil 1.2). Daha geç tür yıldızların daha derin konvektif katmana sahip olmaları sebebiyle bu yıldızlarda aktivite daha da şiddetli gözlenmektedir. Çok genç anakol öncesi yıldızlar olan T Tauri'ler dışında, en yüksek aktiviteye sahip yıldızlar, kromosferik aktif olan BY Dra, RS CVn, W UMa gibi yakın çift, soğuk (tayf türü G-M aralığında olan) yıldızlardır. Bu tür sistemlerde bileşenler, birbirilerine uyguladıkları tedirginlik etkileri nedeniyle hızla dönmeye zorlanırlar ve bu sebeple yörünge dönemleriyle dönme dönemleri genellikle senkronize olur. Dinamo teorisine göre manyetik alanlar, yıldızın dönme döneminin, konvektif çevriminden daha kısa olduğu zaman daha etkin bir şekilde üretilmektedir (Charbonneau 2014).



Şekil 1.1 HR diyagramı. Sıcak ve soğuk yıldızlar
(<http://www.atlasoftheuniverse.com/hr.html>)

Soğuk yıldız sınıfına en iyi örnek verilebilecek yıldız Güneştir. Güneş, G2 tayf türünde ve yaklaşık 5700 K etkin sıcaklığa sahip anakolun orta-alt kısmında yer alan bir cüce yıldızdır. Dünya'ya oldukça yakın mesafesinden dolayı (ortalama 149 600 000 km), yüzeydeki aktivitenin kolaylıkla gözlemlenebildiği bir yıldızdır. Güneş lekeleriyle ilgili ilk detaylı rapor, teleskopun 1609'da Galileo Galilei tarafından astronomik gözlemler için kullanılmaya başlanmasından kısa bir süre sonra 9 Mart 1611'de David Febricius tarafından yayınlanmıştır.



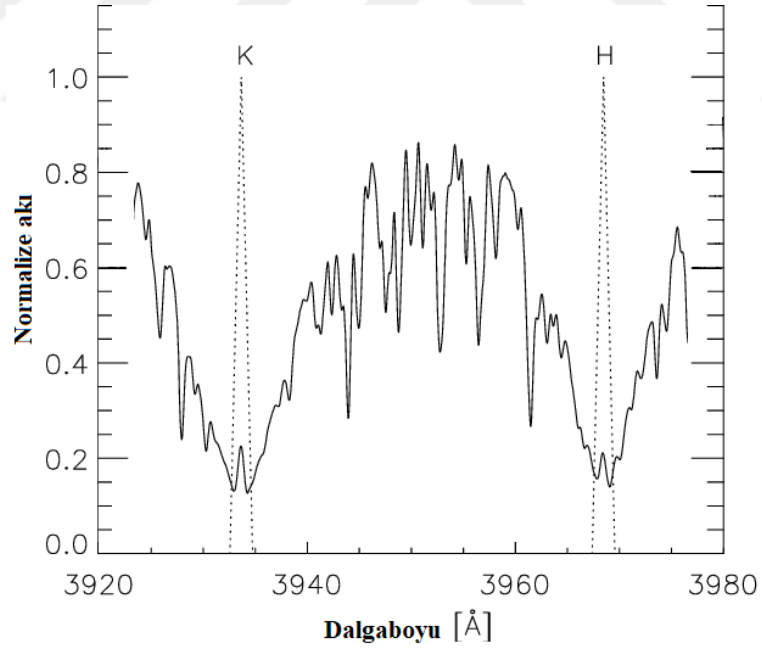
Şekil 1.2 Maksimum ve minimum aktivite evrelerinde güneş fotosferi (Görsel bantta alınan görüntüler) (<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2020/what-will-solar-cycle-25-look-like-sun-prediction-model>)

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Soğuk Yıldızlarda Aktivite

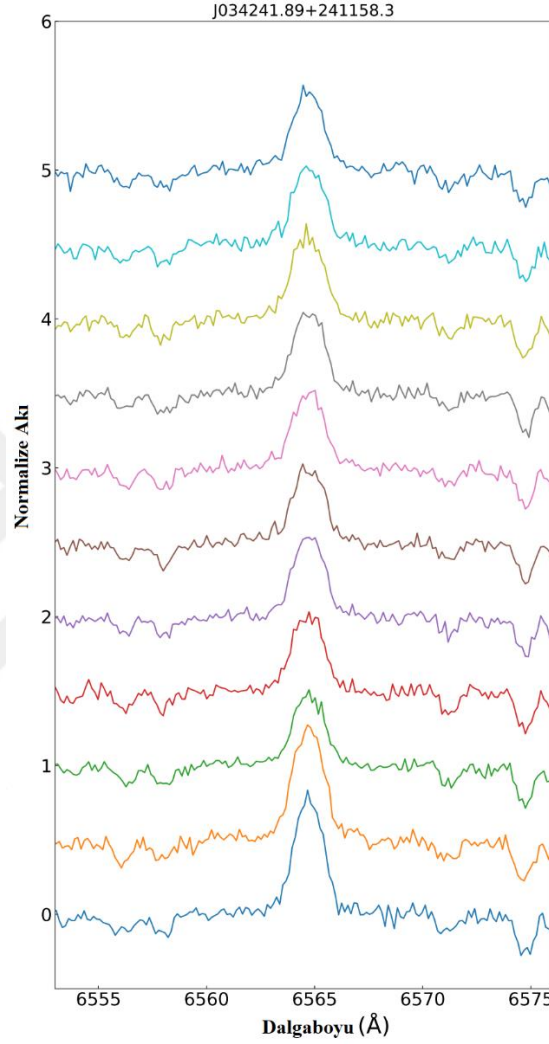
Livingston vd. (2007) Güneş'in 11 yıllık aktivite çevrimi sırasında Ca II'nin H ve K çizgileri ile hidrojenin Balmer serisine ait H α salmaları arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarmıştır. Böyle bir ilişkinin diğer yıldızlarda da mevcut olduğu birçok araştırmacı tarafından da ileri sürülmüştür (Giampapa vd 1989, Pasquini ve Pallavicini 1991, Montes vd 1995).

Yıldızlardaki manyetik aktivite genel olarak yıldız lekeleri, kromosferik yapılar, X-ışın ve radyo salmaları gibi çeşitli yöntemlerle tespit edilebilmektedir. En çok tercih edilen ve iyi bilinen yöntem, elektron basıncına ve sıcaklığa oldukça duyarlı olan Ca II'nin H ve K salma çizgileridir (Babcock ve Babcock 1955, Leighton 1959).



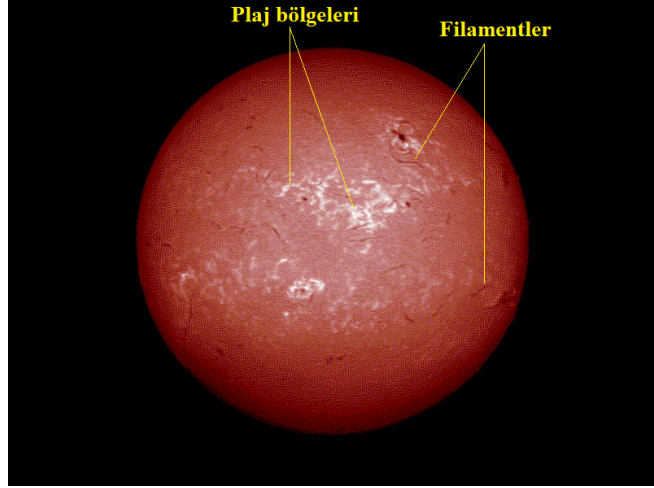
Şekil 2.1 HD48676 yıldızının. Ca II'nin H ve K salma çizgileri(C. Schröder vd. 2009)

Sönük ve soğuk yıldızlar için Ca II'nin H ve K çizgileri, sıcak yıldızlara kıyasla daha az belirgin olduğundan, tespit edilmesi oldukça zordur. Kromosferik aktivitenin alternatif bir belirtici ise H α salmasıdır (Şekil 2. 2).



Şekil 2.2 J034241.89+241158.3 yıldızının tayflarındaki H α salma çizgileri (6563 Å civarı) (Han vd. 2023)

Meunier ve Delfosse (2009), Güneş'in aktivite çevrimi esnasında, plaj bölgelerinin (Şekil 2.3) ve filamentlerin Ca II ve H α salma çizgilerine nasıl etki ettiğini incelediler. Elde edilen sonuçlara göre, plaj bölgelerinin hem Ca II'nin H ve K hem de H α salma çizgilerinin şiddetinin artmasına, filamentlerin ise H α çizgisinin sadece soğurmasına katkıda bulunduğunu keşfedildi.



Şekil 2.3 Güneş yüzeyinde görsel bölgede gözlemlenen plaj bölgeleri ve filamentler (<https://solarscience.msfc.nasa.gov/feature2.shtml>)

Bazı araştırmalar, $H\alpha$ salma çizgisinin yıldızın manyetik alanı ve dönme dönemiyle yakından ilişkili olduğunu (Reiners vd. 2012, Newton vd. 2017) ileri sürdüler. Bu ise yıldızlarda manyetik ilmeklerin oluşmasına sebep olan mekanizmada kilit rol oynamaktadır (Yang vd. 2017).

Farklı tayf türünden yıldızların aktivite süreçleri farklı kökenlidir. Günümüzde yıldızların yüzeylerinde manyetik kökenli lekeler olduğuna inanılan 8 farklı yıldız grubu bilinmektedir. Bunlar:

- Kırmızı cüceler ve BY Draconis türü yıldızlar ($0.08 M_{\odot}$ ila $0.5 M_{\odot}$ kütle aralığında tayf türü M veya geç K olan anakol yıldızı);
- Güneş türü yıldızlar (kütle olarak Güneş'e yakın ve tayf türü F7'den K2'ye kadar olan anakolun alt bölgesinde bulunan yıldızlar);
- T Tauri yıldızları (10 milyon yıldan daha genç, yaklaşık $1 M_{\odot}$ kütleli anakol öncesi yıldızlar);
- FK Com yıldızları (birkaç gün mertebesinde kısa dönemli, G'den K'ya geç tür dev yıldızlar);
- RS CVn türü yıldızlar (G-K tayf türünden dev yıldız ve yoldaş bileşeni G-M türünden alt dev veya cüce olan çift yıldız sistemleri);

- W UMa türü çift yıldızlar (konvektif yapıda ortak zarfla çevrili ve 5 – 20 saatlik dönme dönemlerine sahip, Güneş benzeri iki bileşenden oluşan çift yıldız sistemleri);
- Algoller (B-F tayf türünden sıcak anakol yıldızı ile G veya K altdev olan daha soğuk ve daha düşük kütleli yoldaş bileşeni olan sistemler).

RS Canum Venaticorum (RS CVn) türü sistemler, baş bileşeni dev veya alt dev, tayf türü F'den K'ya kadar olan ve daha soğuk cüce veya alt dev ve tayf türü G'den M'ye kadar olan yoldaş bileşenden oluşan çift yıldızlardır (Biermann ve Hall 1976). Bu yıldızlar birbirilerine çekimsel olarak bağlı ve kısa, senkronize dönme dönemine sahip olup, bu nedenle iki ayrı tek yıldızla göre daha aktif sistemlerdir (Hall 1972, Dempsey vd. 1993). Optik dalgaboylarında en dikkat çekici özellikleri yörünge dönemleri boyunca gösterdikleri fotometrik değişimlerdir. Bu değişimin sebebi, yüzeylerinin %10'u kadar bir alanın lekelerle kaplı olmasından ve yıldızın periodik dönmesinden kaynaklanmaktadır.

Farklı türden soğuk yıldızların kromosferik aktivite gözlemleri, yıldızların manyetik aktivitesinin etkin sıcaklık ve dönme hızı gibi temel yıldız parametrelerine bağlılığı hakkında önemli bilgileri sağlayabilir. Bu yıldızlardaki lekelerin uzun vadeli gözlemleri, Güneş ve soğuk yıldızların dinamo mekanizmasının daha iyi anlaşılabilmesi açısından oldukça önemlidir.

2.2 Soğuk ve Aktif Yıldızların Yüzey Görüntülemesi için Kullanılan Teknikler

Güneş'teki gibi aktivitenin diğer yıldızlarda da meydana geldiği bilinmektedir. Günümüzde, yıldızların yüzey parlaklık dağılımlarının ortaya çıkarılabilmesi için birçok farklı gözlem tekniği kullanılmaktadır. Bu teknikler ağırlıklı olarak interferometrik, fotometrik ve tayfsal gözlemlere dayanmaktadır.

2.2.1 İnterferometrik gözlemler

Nokta kaynak olarak görünen yıldız yüzeyinin doğrudan görüntülenebilmesi, diğer yöntemlerin tutarlılığını doğrulamak için oldukça önemlidir. İnterferometrik gözlem tekniklerinin daha da gelişmesiyle günümüzde yıldız yüzeyinin doğrudan görüntülenmesine olanak sağlamaktadır. İnterferometrik yöntem ile birçok küçük teleskop bir araya getirilerek, aralarındaki mesafe çapında tek bir teleskop gibi çalışmasını sağlamaktadır. Böylelikle daha yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilebilmektedir. Bu yöntemle elde edilen görüntüler yüksek açısal çözünürlüğe sahip olmasına rağmen, elde edilen toplam ışık miktarı aynı çaplı gerçek teleskoba kıyasla daha düşüktür. Bu nedenle, bu yöntem sadece yüksek parlaklığa sahip yakın çift yıldız sistemleri, nebula ve galaksi gibi cisimler için kullanılmaktadır. İnterferometrik yöntem hızlı dönen yıldızlar, genişleyen nebula, ve yıldız lekelerinin görüntülerini elde etmek için kullanılmıştır (Zhao vd. 2009, Schaefer 2014, Roettenbacher vd. 2016).

2.2.2 Fotometrik gözlemler

Yer bazlı teleskoplar veya Kepler (Koch vd. 2010) gibi uzay teleskobuyla yıldızlardan devamlı çok sayıda fotometrik veriler elde etmek mümkündür. Yıldız fotosferinde bulunan lekeler yıldız fotosferine kıyasla daha soğuk olduğundan, ışık eğrilerinde dönemsel değişimler sergilerler. Manyetik aktif olduğu doğrulanmış yıldızların fotometrik verilerinin incelenmesi, yıldız yüzeyinde bulunan lekelerin ömrü ve hatta yıldızın diferansiyel dönmesi hakkında önemli bilgiler verebilmektedir

Fotometrik Light Curve Inversion (LCI) algoritmaları dönen bir yıldızın yüzey özelliklerini yeniden oluşturmak için bir veya daha fazla ışık eğrisi kullanır (Örn. Harmon ve Crews 2000, Savanov ve Strassmeier 2008). Bu algoritmalar farklı türden dönen yıldızlara uygulanabilerek yüzey özelliklerinin boylamının doğru bir şekilde belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Yüzey modellemelerinde hataları azaltmak için bazı yıldız parametreleri (Örn. leke ve fotosfer sıcaklıkları ve yıldızın eğimi) hakkında bilgiler gerekmektedir. LCI algoritmalarında tek boyutlu zaman serilerinin kullanılması

sebebiyle, analiz sonuçlarında elde edilen yıldızın yüzey leke dağılımının sadece boylamsal bilgileri elde edilebilmektedir.

2.2.3 Tayfsal gözlemler

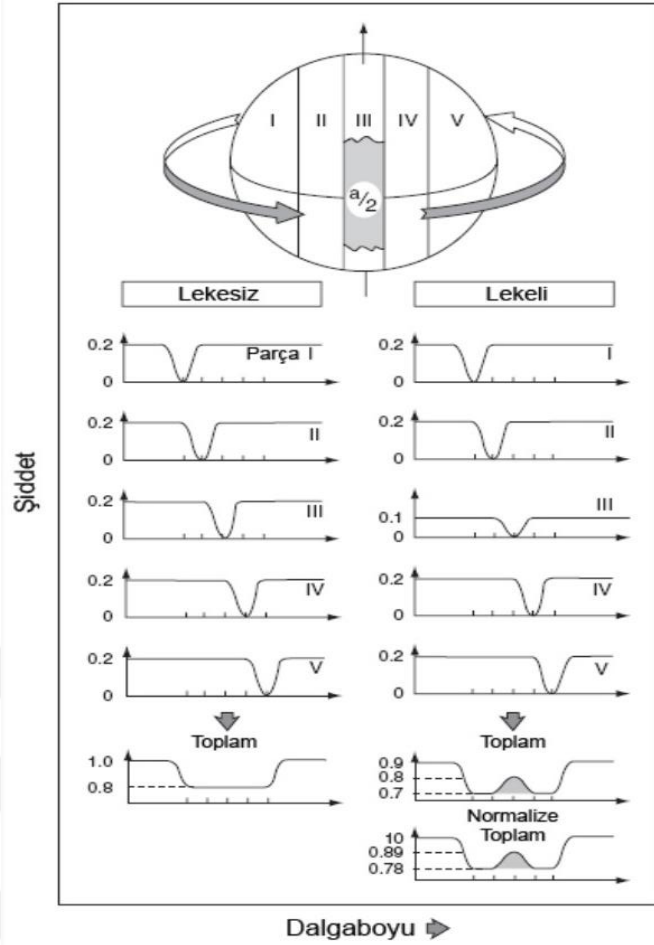
Kromosferik aktivite belirteci çizgilerin (Örn. Balmer serisine ait $H\alpha$ çizgisi) şiddetlerinin zamana bağlı değişimlerinin incelenmesiyle, yıldızların yüzey parlaklık dağılımları elde edilebilmektedir. Bu yöntemle Doppler görüntüleme tekniği denilmektedir ve bu teknik diğer tekniklere nazaran bir adım öne çıkmaktadır. Doppler görüntüleme tekniği ile yıldızın farklı evrelerinde elde edilen yüksek çözünürlüklü ve yüksek Sinyal/Gürültü (kısaca S/N) oranına sahip tayfsal veriler kullanılarak yıldız yüzeyindeki sıcak/soğuk lekeleri ve yüzey manyetik alanları haritalanabilmektedir (Vogt vd. 1987, Rice vd. 1989, Piskunov 1991). Yüzey haritasının elde edilebilmesi için yıldızın sıcaklık, dönme hızı, yüzey çekim ivmesi ($\log g$) gibi parametrelere ihtiyaç duyulmaktadır. Hızlı dönen yıldızın yüzeyindeki manyetik aktif bölgeler elde edilen tayf çizgilerinde birtakım düzensizliklerin görülmesine sebep olmaktadır. Bu düzensizliklerden yıldız yüzeyindeki lekelerin enlem ve boylam bilgileri, leke sıcaklıkları gibi önemli bilgiler elde edilmektedir. Son 20 yılda kromosferik aktif geç tayf türünden yıldız yüzeylerinin modellenmesi için Doppler Görüntüleme Tekniği oldukça geliştirilmiştir. Bu teknik ile ilk yüzey modellemesi Vogt ve Penrod (1983) tarafından, RS CVn türü HR 1099 yıldızı için gerçekleştirilmiştir

2.3 Doppler Görüntüleme Tekniğinin Temelleri

Doppler görüntüleme tekniği, farklı yörünge veya dönme evrelerinde alınmış tayfsal çizgi profillerinden 2-boyutlu (enlem ve boylam) yüzey parlaklık haritalarını oluşturmak için kullanılan bir tersinir tekniktir. Bu teknik 1842'de Avusturyalı matematikçi ve fizikçi Christian Doppler tarafından keşfedilen “Doppler Etkisine” dayanmaktadır. Doppler Görüntüleme tekniği temelde yıldız yüzeyindeki lekelerin tayfsal çizgi profillerinde oluşturdukları bozulmaların modellenerek yüzey parlaklık dağılımlarının elde edilmesi mantığına dayanır. Yıldız yüzeyindeki lekelerden ileri gelen bozulma tayfsal çizgi profillerinde nerede konumlanacağı dikine hız değerleri ile ilişkilidir.

Yıldız yüzeyindeki bir soğuk leke, çizgi profilinde kendisini salma çizgisine benzer bir “hörgüç” yapısı olarak gösterir. Bunun en basit bir modeli Şekil 2.4’te gösterilmiştir. Şekil 2.4’ten görüldüğü üzere, yıldız yüzeyi 5 parçaya bölünmüştür. Dikine hız değerinin her bir bölgede yaklaşık aynı değere sahip olduğu varsayılmaktadır. Yıldızın gözlemciye göre saatin ters yönünde döndüğü varsayıldığında I ve II numaralı bölgeler gözlemciye yaklaşmaktadır ve bu bölgelerin dikine hız değerleri negatiftir. III numaralı bölgenin gözlemciye göre bir dikine hız bileşeni yoktur ve böylece dikine hız değeri sıfırdır. IV ve V numaralı bölgeler ise gözlemciden uzaklaştığı için pozitif dikine hız değerlerine sahiptir. Bu durumda I ve II numaralı bölgelerde bulunan tayf çizgileri maviye doğru kayarken, IV ve V numaralı bölgelerde bulunan tayf çizgileri ise kırmızıya doğru kayacaktır. Fakat III numaralı bölgenin gözlemcinin bakış doğrultusu boyunca bir hareketi olmadığı için bu bölgede bulunan tayf çizgilerinde kayma meydana gelmemektedir. Tüm bu bölgelerden gelen tayf çizgileri sahip oldukları dikine hız değerlerine göre bileşke tayfı oluştururlar. Yıldızın dönme hızına bağlı olarak bileşke tayf genişlemektedir. Bu ise, yıldızın dönmesiyle ilgili önemli bilgiler vermektedir.

III numaralı bölgenin %50’sinin siyah bir lekeyle kaplı olduğu varsayıldığında (lekeden gelen akı 0 kabul edilirse) bu bölgeden gelen sürekli akı oranı lekesiz olduğu durumundan %50 daha az olacaktır. Bu beş bölgenin tayfsal çizgi profilleri toplandığında ise lekenin bulunduğu bölgenin dikine hız değeri sıfır olduğu için bileşke çizgi profilinin merkezinde salma benzeri bir hörgüç yapısı görülür. Bu durum aslında III numaralı bölgeden gelen akı katkısının yarıya indiği anlamına gelmektedir. Bu hörgüç yapısı yıldızın diskinin dönmesiyle çizgi profilinde de maviden kırmızıya doğru hareket eder. Bu ise lekenin doğrudan boylam bilgisini vermektedir. Gerçekte elde edilen çizgi profillerinde durum biraz daha karmaşıktır. Modellemeler esnasında kenar kararması ve çekim karması (özellikle görece hızlı dönen yıldızlarda) gibi önemli olguları hesaba katmak gerekir.

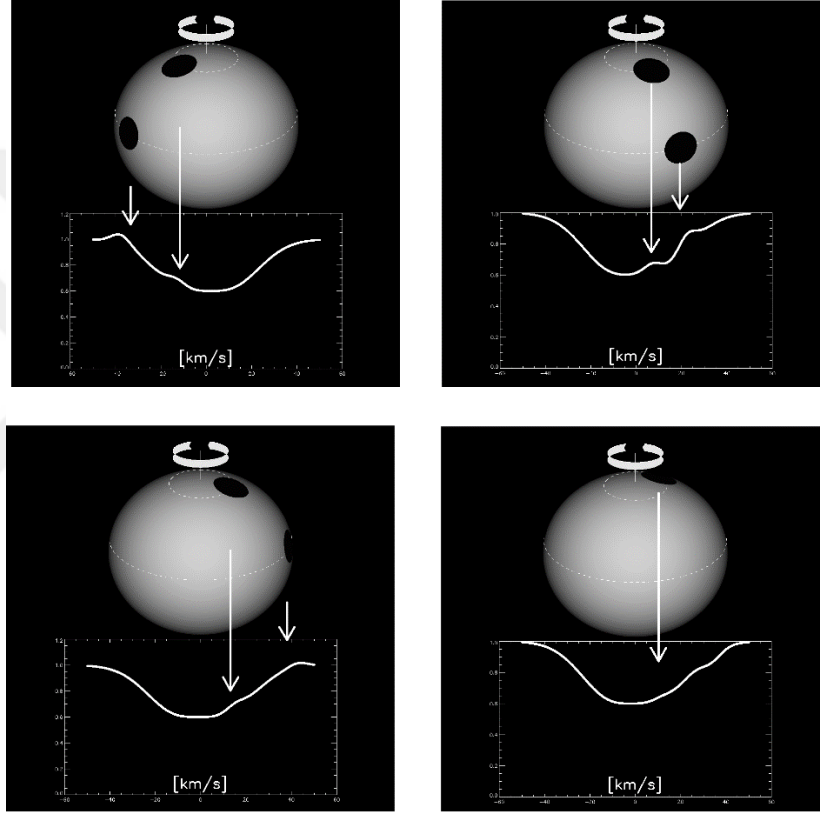


Şekil 2.4 Hızlı dönen bir yıldızın soğurma çizgisi profilinde soğuk leke varlığı nedeniyle meydana gelen hörgüç yapısının şematik gösterimin (Vogt ve Penrod 1983) (H.V.Şenavcı 2011)

Yıldız yüzeyindeki lekelerin dikine hız değerleri tayfsal çizgi profillerinde oluşturdukları hörgüç yapılarının konumunu belirlerken, sıcaklıkları ve kapladıkları alanlar ise bu yapıların şiddetini ve profiller üzerinden ne kadar yer işgal ettiklerini belirler. Hörgüç yapılarının profiller üzerindeki konumu ile lekelerin boylam bilgisi elde edilebilmektedir. Doppler görüntüleme tekniği aynı zamanda hörgüç yapısının tayfsal çizgi profillerindeki zamana bağlı olarak hareketinin incelenmesi ile lekenin enleminin belirlenmesine de olanak sağlamaktadır. Çünkü farklı enlemlerdeki lekelerin profile oluşturdukları hörgüç yapısı yıldızın kendi eksenine etrafında dönüşü sırasında profil merkezi boyunca farklı genliklerde salınır. Örneğin bir kutup lekesinin profile oluşturacağı hörgüç yapısı tam profil merkezindedir ve zamanla yeri değişmez. Kutuptan ekvatora doğru lekenin enlemi değiştikçe hörgüç yapısının profil merkezindeki salınımı artar. Tam ekvatorunda bulunan

lekeden ileri gelen hörgüç yapısı profilinin kırmızı ucundan mavi ucuna kadar tüm profil boyunca hareket eder (Şekil 2.5).

Doppler görüntüleme tekniği ile elde edilen haritaların kalitesini özellikle yıldızın dönme hızı, tayfsal verilerin çözünürlüğü ve S/N oranı belirler. Yıldızın hızlı dönmesi durumunda çizgi profili genişlediğinde yüksek çözünürlüklü ve yüksek S/N oranına sahip tayflarda bu hörgüç yapının çizgi profili boyunca hareketi daha iyi incelenebilmektedir.



Şekil 2.5 Yıldızın farklı evrelerinde yüksek ve düşük enlemlerdeki lekelerin hız profilleri üzerinde oluşturdukları hörgüç yapının farkı (Rice 2002)

2.3.1 Doppler görüntüleme tekniği için gerekli koşullar

Bir yıldızın Doppler görüntüleme tekniği kullanılarak yüzey parlaklık dağılımının haritalanabilmesi için en önemli koşullardan biri yıldızın görece yüksek bir dönme hızına ($v \cdot \sin i$) sahip olmasıdır. Öte yandan, farklı dönme hızları için bile çizgilerin eşdeğer genişliği neredeyse sabittir. Bu nedenle, daha yüksek dönme hızlarına sahip yıldızlar daha “az derin” çizgiler üretecektir. Çizgi profilindeki hörgüç yapının ulaşabileceği maksimum

değer, sürekliliğin yaklaşık %3-4'üdür, ancak ortalama büyüklükteki bir leke için yaklaşık %1'dir. Çizgiler çok sık ise, yıldız yüzeyindeki lekenin ürettiği küçük “hörgüç” yapı gürültüden ayırt edilemez. Bu nedenle, genellikle sadece $v\sin-i$ değeri 80-100 km/sn'den fazla olmayan yıldızlar dikkate alınır.

Yüksek çözünürlüklü tayflar ($\lambda/\Delta\lambda \geq 30000$) bu türden yüzey parlaklık dağılımı analizlerinin hassasiyeti ve doğruluğu bakımından kritiktir bir öneme sahiptir. “Hörgüç” yapıların küçük boyutları nedeniyle (genellikle sürekliliğin sadece %1'i) gözlemlenen tayflarda yüksek bir S/N ($S/N \geq 200$) olması beklenir. Ayrıca, daha kesin bir yıldız yüzey haritası elde etmek için mümkün olduğunca çok sayıda farklı dönme veya yörünge evresini kapsayan zaman serisi biçiminde gözlemlerin olması da gerekir. Lekelerin evrimleşme ve/veya göç durumları göz önünde bulundurularak, gözlemlerin mümkün olduğunca kısa bir zaman aralığı içinde yapılması gerekmektedir. Eksen eğikliğinin $i = 0^\circ$ ve $i = 90^\circ$ olan yıldızlar Doppler görüntüleme tekniği için uygun adaylar değildir. $i = 0^\circ$ olduğu durumda yıldız yüzeyinin hiçbir noktasından dikine hız katkısı gelmez ve lekelerin enlem ve boylamları ayırt edilemez. Benzer şekilde $i = 90^\circ$ olduğu durumda ise yıldızın güney ve kuzey yarı kürelerinden gelen dikine hız katkıları aynıdır. Böylece kuzey ve güney yarı küre ayrımı tek yıldızlar için yapılamaz. Çift yıldızlarda eğim açısı 90° olsa bile bileşenlerin birbirlerinin yüzeylerini taramasından dolayı bu sorun önemli ölçüde ortadan kalkar.

Çizelge 2.1 Yıldızın Doppler Görüntülemeye aday olması için gerekli kısıtlamaların bir özeti, yıldız yüzeyi haritalaması için uygun gözlem koşulları ile verilmiştir

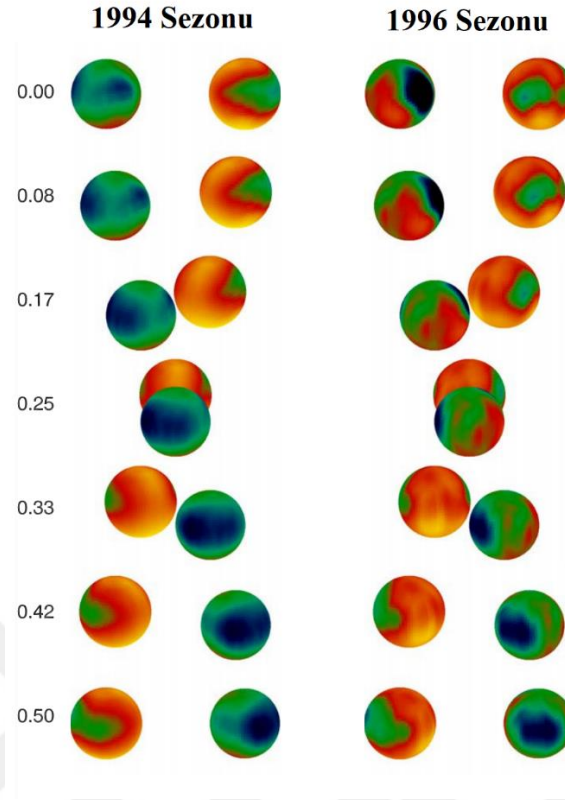
Gözlemler	
Evre aralığı	> homojen dağılmış 6 tayf verisi
Tayfsal çözünürlük	≥ 30000
S/N	≥ 200
Gözlem dönemi	< 2-3 ay
Yıldız parametreleri	
$v\sin-i$	20 - 100 km/s
Eğim açısı i	$20^\circ - 70^\circ$
Dönme dönemi	Günün tam katı olmayan ve $P < 2$ ay

3. KAYNAK ÖZETLERİ

ER Vulpeculae (ER Vul) kısa yörünge dönemine ($P_{yör} = 0.698$ gün) sahip RS CVn türü bir çift yıldız sistemidir. Baş bileşeni G0V ve yoldaş bileşeni G5V tayf türünden olup, tutulma kaynaklı 7.27-7.49 kadir aralığında bir parlaklık değişimi gösterir. Sistemin baş bileşeni $1.02 M_{\odot}$, yoldaş bileşeni ise $0.97 M_{\odot}$ kütlelerinde olup (Harmanec vd. 2004), Lazaro ve Arevalo (1997) tarafından yapılan çalışmada sistemin her iki bileşeninin yüksek seviyede kromosferik aktiviteye sahip olduğu bulunmuştur. Hall (1976), ER Vul'u kısa dönemli bir RS CVn türü çift yıldız olarak sınıflandırmıştır. Çakırlı vd. (2003) her iki bileşenden elde edilen H_{α} tayf çizgilerinden ikinci bileşenin birinci bileşenden daha aktif olduğu sonucunu bulmuştur.

Işık eğrisi modellenmesi kullanılarak ER Vul'un her iki bileşeninde de soğuk lekelerin varlığı ortaya çıkarılmıştır (Olah vd. 1994, Ekmekçi vd 2002; Wilson ve Raichur 2011). Pop ve Vamos (2013), yaklaşık 55 yılı kapsayan fotometrik verilerden sistemin yörünge dönem değişimini ortaya çıkarmış ve kaynağının her iki bileşenin manyetik aktivitesinden veya üçüncü bileşenin varlığından kaynaklandığını belirtmiştir.

Piskunov vd. (2001), sistemin 1994 ve 1996 yıllarında elde ettikleri 96 ve 41 adet tayfı kullanılarak ER Vul'un yüzey haritaları elde edilmiştir. Tayfsal veriler Uppsala Astronomi Gözlemevi'nde bulunan 2.5m'lik Nordic Optical Telescope ile $R \sim 86000$ çözünürlükte ve 2 m'lik Ritchey-Chretien-Coude (RCC) teleskobu ile $R \sim 32000$ çözünürlükte elde edilmiştir. Gözlemler tüm evre aralıklarını iyi bir şekilde kapsamakla birlikte S/N oranı genel olarak 150'nin üzerinde elde edilmiştir. Elde edilen yüzey haritaları, ER Vul'un her iki bileşeninde önemli derecede sıcaklık dağılımı değişimleri olduğunu göstermiştir (Şekil 3.1).



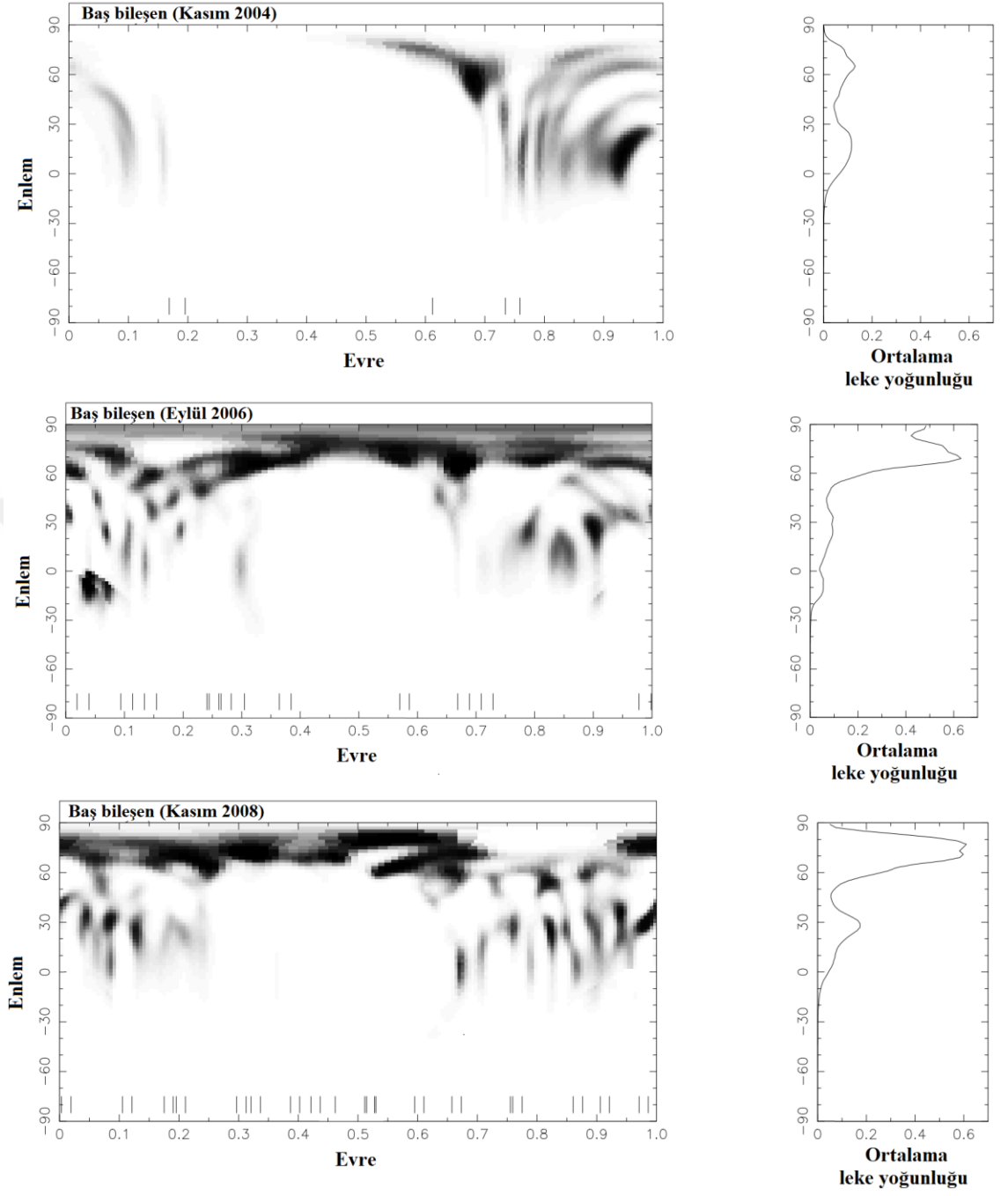
Şekil 3.1 ER Vul'un farklı yörünge evrelerindeki yüzey sıcaklık haritaları (Piskunov vd. 2001)

Baş bileşen üzerindeki soğuk lekenin fotosfer ile sıcaklık farkı 400 K iken, yoldaş bileşenin daha aktif olması sebebiyle bu değer 1000 K civarındadır.

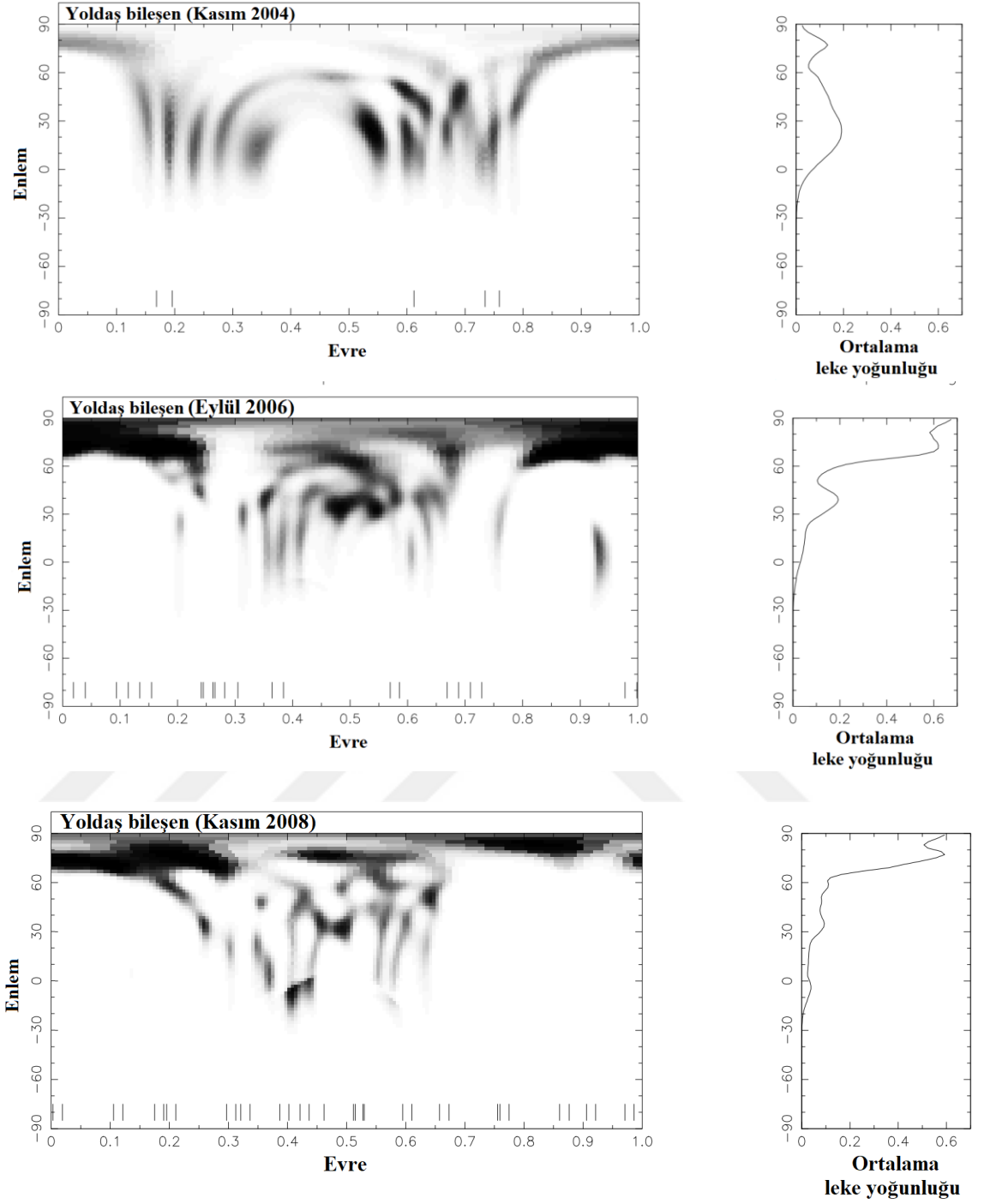
Xiang vd. (2015) tarafından sistemin 2004, 2006 ve 2008 yıllarında Çin'in Xinglong Ulusal Gözlemevi'nde bulunan 2.16 metrelik teleskop ve ona bağlı tayfçeker ile çözünürlüğü yaklaşık $R \sim 37000$ ve dalgaboyu aralığı ise 5622 Å- 9000 Å olan tayfsal veriler elde edilmiştir. 2006 ve 2008 yıllarında elde edilen görüntüler için, poz süreleri 900 ile 1200 saniye arasında (ER Vul yörünge döneminin yaklaşık %1.5-2'si olacak şekilde) ve 2004 yılında yapılan gözlemlerde, gerekli S/N oranı elde etmek için poz süreleri 2400-3600 saniye (yörünge döneminin yaklaşık %5-6'sı) aralığında alınmıştır. Şekil 3.2'de, 2004 yılı için elde edilen yüzey haritalarından baş bileşenin 0.7 evresinde yüksek enlemli ve 0.95 evresinde düşük enlemli yoğun leke bölgesi görülmektedir. Yoldaş bileşenin ise 0.6-0.7 evresinde düşük-orta enleminde lekeli bölgeler görülmektedir (Şekil 3.3). Aynı zamanda, 2004 yılı gözlemlerinde elde edilen tayfların dar bir evre aralığını kapsaması nedeniyle iyi bir yüzey haritalaması yapılamamıştır. 2006

yılı için elde edilen haritalarda baş bileşenin yüksek enlemlerde yoğun lekelerle kaplı olduğu görülmektedir. 0.0-0.3 ve 0.7-1.0 evrelerinde düşük enlemlerde lekelerle kaplı bölgeler görülmektedir. Yoldaş bileşenin yüksek enlemlerinin neredeyse tamamı, düşük-orta enlemlerinin ise 0.30-0.65 evre aralığında lekelerle kaplı olduğu görülmektedir. 2008 verileri kullanılarak baş bileşen için elde edilen yüzey haritaları ile 2006 yılında elde edilen yüzey haritaları benzerdiler, ancak 2008 yılı yüzey haritalarında düşük enlemlerinde daha fazla lekeli alanlar görülmektedir.





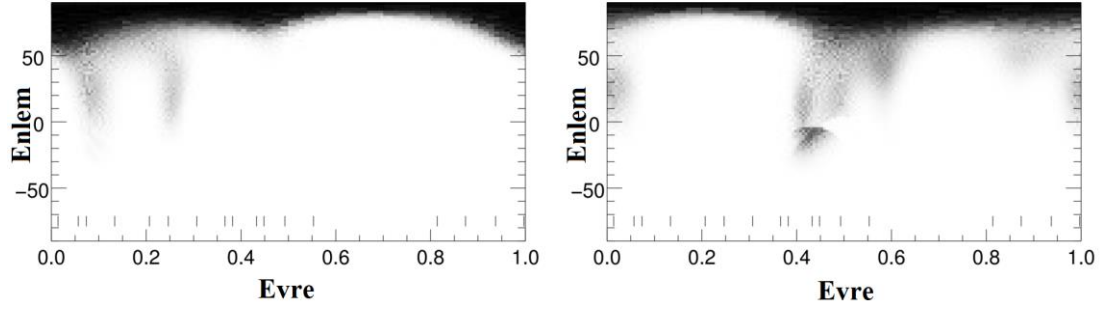
Şekil 3.2 2004 (üst), 2006 (orta) ve 2008 (alt) yıllarında baş bileşen için elde edilen yüzey haritaları. Gözlenen evreler ‘Evre’ eksenî üzerinde çubuklarla işaretlenmiştir. Ayrıca sağ tarafta, enleme bağılı ortalama leke yoğunluğu da çizilmiştir (Xiang vd. 2015)



Şekil 3.3 Şekil 3.2 ile benzer ancak yoldaş bileşenin yüzey haritası (Xiang vd. 2015)

ER Vul'un bir başka Doppler görüntüleme çalışması Özavcı vd. (2019) tarafından Ankara Üniversitesi Kreiken Rasathanesi'nde bulunan 40 cm çaplı Kreiken Teleskobu ve ona bağlı orta çözünürlüklü ($R \sim 13500$) tayfçeker ile 3600 saniyelik (yörünge döneminin %6'sına karşılık gelen) poz süreleriyle 2018 yılında elde edilen tayfsal veriler

kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.3'te görüldüğü üzere, baş ve yoldaş bileşenlerin yüksek enlemlerinde yoğun lekeli alanlar görülmektedir. Yoldaş bileşenin ise 0.4-0.5 evreleri arasında orta ve düşük enlemlerde de lekeli bölgeler görülmektedir.



Şekil 3.4 ER Vul sisteminin baş (sol tarafta) ve yoldaş (sağ tarafta) bileşenleri için yüzey haritaları (Özavcı vd. 2019)

4. MATERİYAL VE YÖNTEM

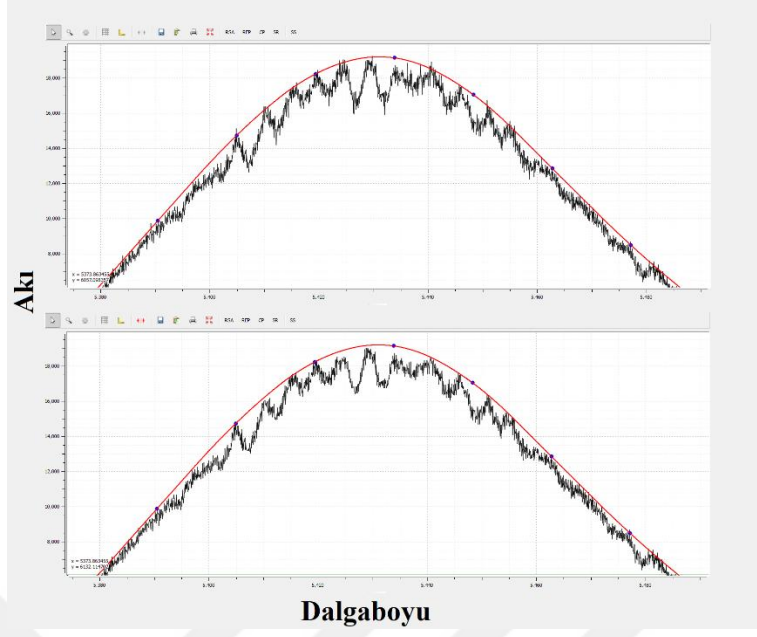
4.1 Gözlem ve Verilerin İndirgenmesi

Bu tez çalışmasında ER Vul'un yüzey parlaklık dağılımlarını elde etmek için 06-12 Kasım 2021 tarihlerini kapsayan ve Ankara Üniversitesi Kreiken Rasathanesi'nde 6 gece boyunca elde edilen tayfsal veriler kullanıldı. Veriler 80 cm açıklığa ve Nasmyth odağına sahip T80- Prof. Dr. Berahittin Albayrak teleskobu ile elde edildi. Teleskobun tayfçeker odağı için limit parlaklığı fiber kabloya bağlı olup ($R \sim 15000$ için ~ 10 kadir ve $R \sim 30000$ için ~ 9 kadir), iki farklı çözünürlükte gözlem yapmaya olanak sağlamaktadır. Gözlemler $R \sim 30000$ çözünürlükte ve S/N oranı en uygun olacak şekilde 900-1800 (dönemin $\sim \%1.5-2.1$) saniye arasında poz süreleri ile gözlemlendi.

Gözlemlerde yavaş dönen ve aktif olmadığı bilinen HD161053 (K7III), HD4277 (F8V) ve HD143761 (G0) standart yıldızlar da gözlemlendi. Bu yıldızlardan elde edilen tayflar, yerel çizgi profilleri olarak kullanıldı. HD4277 yıldızı baş bileşenin ($T_{\text{etkin}} = 6000$ K), HR_143761 ise yoldaş bileşenin ($T_{\text{etkin}} = 5750$ K) fotosfer sıcaklığı için ve HD161053 (K0IV) yıldızı ise leke sıcaklığı için kullanıldı.

Elde edilen tüm tayfların indirgemeleri IRAF¹ (Image Reduction and Analysis Facility) paketleriyle gerçekleştirildi. Bu indirgemelerde bias, dark ve flat düzeltmesi gibi ön indirgemeleri, dalgaboyu kalibrasyonu ve dikince hız düzeltmeleri gibi işlemler yapıldı. Dalgaboyu kalibrasyonu aynı gözlem gecesinde gözlenen ThAr lamba tayfı ile yapıldı. Tayf çizgilerinin tellürik çizgilerinden arındırılması ve normalizasyon aşamaları ise Ankara Üniversitesi Astronomi ve Uzay Bilimleri bölümü öğretim elemanı Dr. Engin BAHAR tarafından yazılan Tetra programı ile gerçekleştirildi (Şekil 4.1).

¹ IRAF yazılımı, Tucson, Arizona'daki National Optical Astronomy Observatories (NOAO) tarafından yazılmıştır. Bu yazılım, genellikle astronomik verilerin indirgenmesi ve analizi için kullanılmaktadır.



Şekil 4.1 ER Vul tayfının Tetra yazılımı ile tellürük çizgilerinden arındırılmadan önceki (üstteki) ve sonraki (alttaki) hali

ER Vul'un yüzey haritasını modellemek için, tüm evre aralığını kapsayacak şekilde en yüksek S/N oranına sahip 20 adet tayf seçildi. İlgili tayfların HJD, evre, poz süresi ve S/N değerleri gibi bazı bilgiler Çizelge 4.1'de verilmiştir. Sistemin yörünge evreleri TESS ışık eğrilerinden elde edilen ve aşağıda verilen ışık elemanları yardımıyla hesaplandı.

$$\text{HJD} = 58727.03946 + 0.698095 * E$$

Çizelge 4.1 Gözlem bilgileri

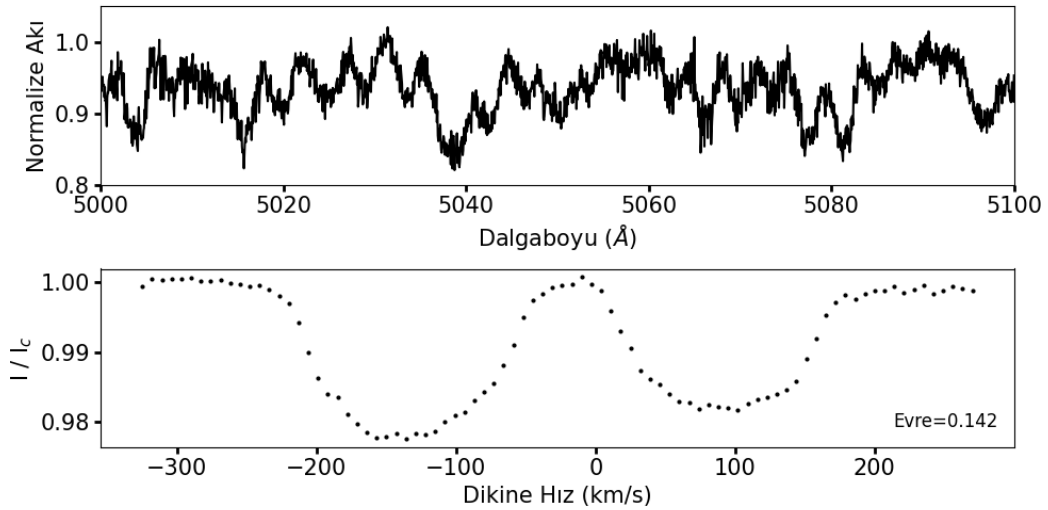
Tarih (gün/ay/yıl)	HJD 2400000+	Evre	Poz Süresi (sn)	S/N (tayf)	S/N (LSD)
10/11/2021	59529.27212	0.0095	900	55	772
10/11/2021	59529.30364	0.0546	900	52	861
10/11/2021	59529.33517	0.0998	900	60	781
08/11/2021	59527.27003	0.1419	900	90	115
06/11/2021	59525.19879	0.1754	1800	82	982
08/11/2021	59527.32257	0.2172	900	73	1014
08/11/2021	59527.35410	0.2623	900	61	982
06/11/2021	59525.28537	0.2994	1800	85	1186
11/11/2021	59530.22205	0.3700	900	75	872
11/11/2021	59530.25357	0.4152	900	56	994
11/11/2021	59530.28509	0.4603	900	61	937
11/11/2021	59530.31662	0.5055	900	57	933
11/11/2021	59530.33763	0.5355	900	74	937
07/11/2021	59526.26122	0.6971	1800	109	1367
12/11/2021	59531.18268	0.7459	900	87	1133
12/11/2021	59531.21421	0.7910	900	65	1080
12/11/2021	59531.24572	0.8362	900	61	987
12/11/2021	59531.28775	0.8964	900	63	1013
12/11/2021	59531.30877	0.9265	900	65	865
10/11/2021	59529.24059	0.9643	900	52	801

4.2 En Küçük Kareler Dekonvolüsyonu (Least Squares Deconvolution) Tekniği

Daha önce de bahsedildiği gibi, Doppler Görüntüleme Tekniği için tayflarda yüksek S/N oranına ihtiyaç duyulmaktadır. Yıldızların hızlı dönmesi ve gözlem için kullanılan cihazlar elde edilen tayf çizgilerinde genişlemelere ve gürültülere sebep olmaktadır. Tayflarda S/N oranını önemli derecede artırmak için En Küçük Kareler Dekonvolüsyonu (LSD: Least Squares Deconvolution) tekniği kullanılmaktadır. Bu tekniğinin uygulaması ilk kez Donati vd. (1997) tarafından yapılmıştır.

Lekelerin varlığı esasen her bir fotosferik tayf çizginin morfolojisini benzer şekilde etkilemekte ancak tayf çizgilerinin genişlemesi ve S/N oranına bağlı olarak bu etkiler zayıflamaktadır. LSD tekniği yardımıyla, birçok zayıf ve orta şiddetli çizgilerin toplanarak yüksek S/N oranına sahip, hız uzayında ortalama bir tayf çizgisi profili elde edilebilmektedir. Bu sayede daha yüksek S/N oranına sahip ve dolayısıyla leke kaynaklı asimetriklerin daha sağlıklı modellenebileceği bir hız profili elde edilebilmektedir.

Bu tekniğin uygulanması için bir atomik veri tabanına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu veri tabanında tayf çizgilerinin merkezi dalgalıboyları ve görelı şıddetleri yer almaktadır. Bu tez çalışmasında atomik veri tabanı için Vienna Atomik Çizgi Veritabanı (VALD²) (Kupka vd. 1999) kullanıldı. Elde edilecek ortalama hız profillerini olumsuz etkileyecek olan, kromosferik aktiviteye duyarlı çizgiler (Hidrojen Balmer ve kalsiyum triplet çizgileri gibi) bu listeden çıkarıldı. Hız profilleri elde etmek için ortalama 1330 adet tayf çizgisi kullanıldı. LSD tekniğinin uygulanmasından sonra elde edilen hız profillerinin S/N değeri 772 ile 1367 arasında değişmektedir (Çizelge 4.1). Çizelgeden görüldüğü üzere S/N oranı, LSD tekniğinin uygulanmasından sonra yaklaşık 10-15 kat artmıştır. Bu tez çalışmasında ER Vul için elde edilen örnek bir LSD profili Şekil 4.2’de gösterildi.



Şekil 4.2 ER Vul sisteminin 0.142 evresindeki tayfı ve ilgili tayf kullanılarak elde edilen LSD profili

ER Vul çift sistemi literatürde uzun süredir detaylı olarak incelendiğinden sistem bileşenlerinin tayf türü ve sıcaklık bilgileri ve bazı fiziksel parametreleri iyi bilinmektedir. Dolayısıyla bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen analizlerde baş ve yoldaş bileşenin tayf türleri ve sıcaklıkları sırasıyla G0V ve 6000 K, ile G5V ve 5750 K olarak dikkate alındı.

² <http://vald.astro.uu.se/>

Doppler Görüntüleme Tekniği için yıldız parametrelerinin iyi bilinmesi oldukça önemlidir. Yanlış girilen parametreler, elde edilecek olan yüzey görüntülerinde gerçekte olmayan yapıların oluşmasına sebep olabilmektedir. ER Vul çift sisteminin literatürdeki çok sayıda çalışması sayesinde, sistemin fiziksel parametreleri iyi bilindiğinden, DoTS kodu ile analiz esnasında literatürden alınan ve Çizelge 4.2’de listelenen parametreler kullanıldı.

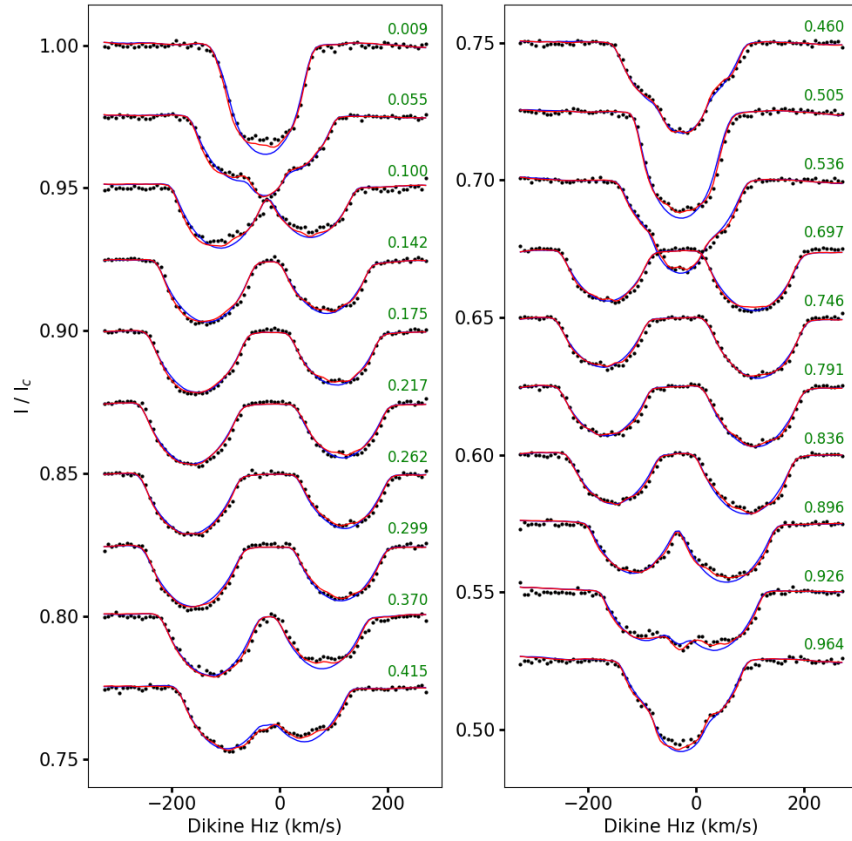
Çizelge 4.2 Doppler Görüntüleme Tekniği için kullanılan ER Vul parametreleri

Parametre	Değer	Referans
$q=M_2/M_1$	0.949 ± 0.019	Özavcı vd. (2019)
$K_1 (km s^{-1})$	138.67 ± 2.06	Özavcı vd. (2019)
$K_2 (km s^{-1})$	146.13 ± 1.90	Özavcı vd. (2019)
$i (^{\circ})$	66.3	Özavcı vd. (2019)
T_0 (HJD)	58727.03946	Bu çalışma
P (gün)	0.698095	Bu çalışma
$v \sin i_1 (km s^{-1})$	83.9	Xiang vd. (2015)
$v \sin i_2 (km s^{-1})$	77.9	Xiang vd. (2015)
$Tetkin_1$ (K)	6000	Xiang vd. (2015)
$Tetkin_2$ (K)	5750	Xiang vd. (2015)
$\log g$	4.5	Xiang vd. (2015)
$V\gamma (km s^{-1})$	-26.26	Özavcı vd. (2019)
albedo _{1,2}	0.5	Özavcı vd. (2019)

Collier Cameron vd. (1992) tarafından geliştirilen DoTS kodu (**D**oppler **T**omography of **S**tars), Doppler Görüntüleme Tekniği ile tayf çizgilerinin yapısını ele alarak yıldız yüzeylerinin haritasını maksimum entropi metoduna dayanarak (MEM) modellenmesine olanak sağlamaktadır. Doppler görüntüleme bir kötü konulmuş problem (ill-posed problem) olduğundan dolayı eşsiz tek bir çözüm elde edilemez. Bu sorunun düzenleme fonksiyonları kullanılarak aşılmaktadır. Maksimum entropi metodu da (Skilling ve Bryan 1984) bir düzenleme fonksiyonudur. Bu fonksiyonda en yüksek entropiye yüzeyde hiç lekenin olmadığı durumda ulaşılır. DoTS kodu Doppler görüntülemeyi gerçekleştirirken düzenleme fonksiyonu olarak maksimum entropi metodunu kullanır. Bu metot modellenecek çizgi profilleri gerektirmediği sürece yüzey parlaklık dağılımında bir değişime izin vermez

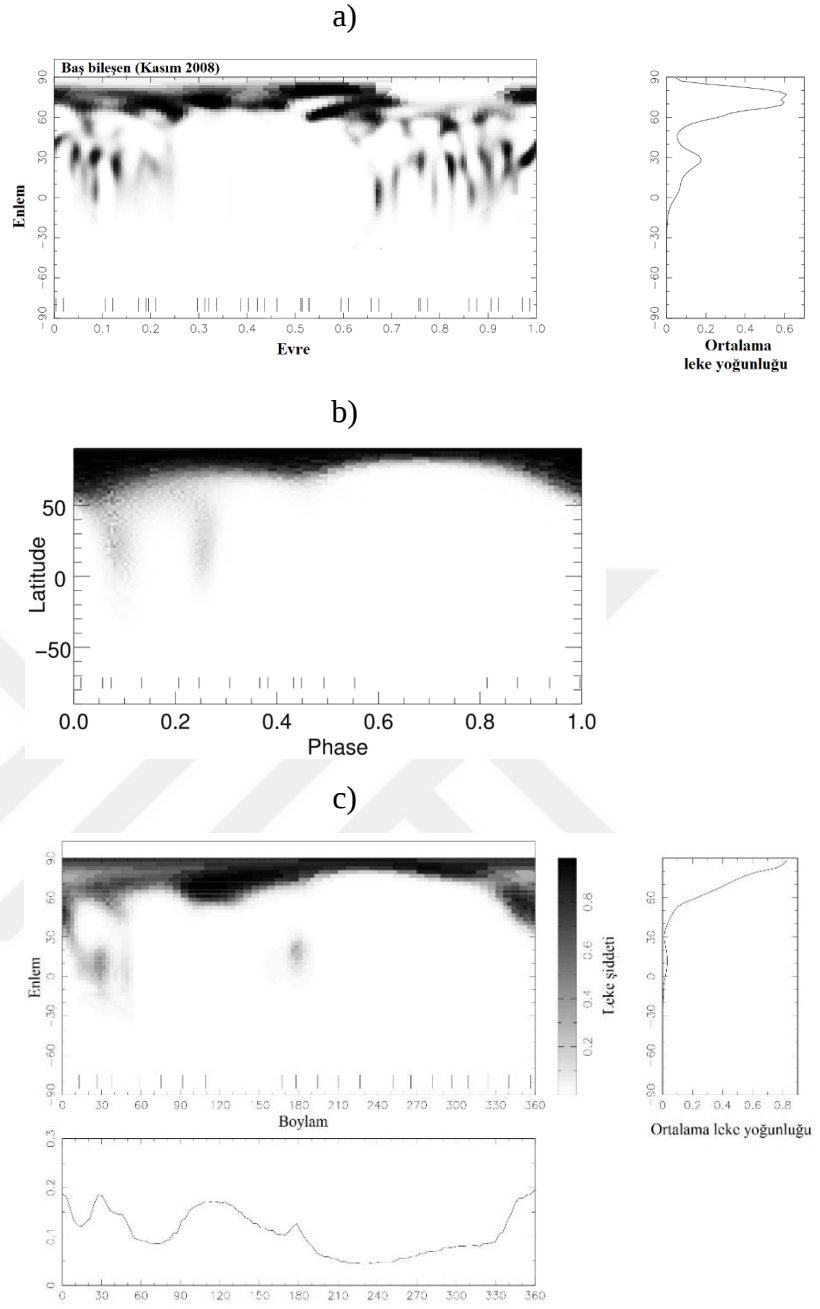
5. BULGULAR

Bu tez çalışmasında ER Vul sistemindeki her iki bileşenin eş zamanlı yüzey haritalarını oluşturmak için Maksimum entropi yöntemine dayanan DoTS kodu kullanıldı. Sistemin evreye bağlı ve gözlemsel tayflardan elde edilen LSD profilleri (siyah içi dolu daireler) Şekil 5.1’de verildi. Ayrıca şekillerde Maksimum entropi iterasyonları öncesi (mavi sürekli çizgiler) ve sonrası (kırmızı sürekli çizgiler) sentetik profiller de gösterildi.



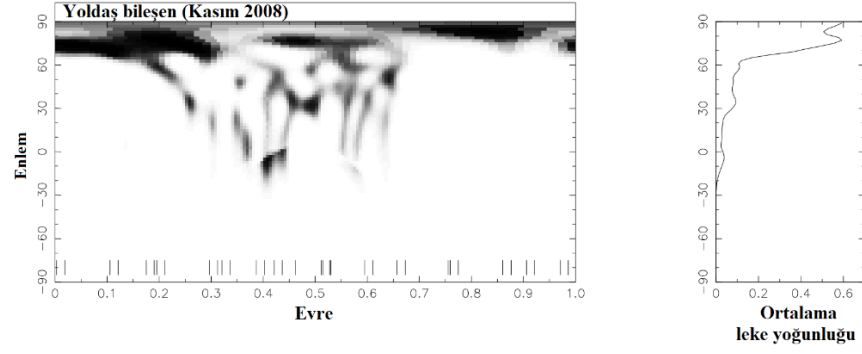
Şekil 5.1 ER Vul sisteminin gözlenen tayfları kullanılarak elde edilen LSD profilleri (siyah içi dolu daireler), sistem parametreleri kullanılarak (mavi sürekli çizgiler) ve MEM iterasyonu sonrası (kırmızı sürekli çizgiler) elde edilen sentetik LSD profilleri

Bu tez çalışmasında bu profiller yardımıyla ve daha önce diğer araştırmacılar tarafından elde edilen baş ve yoldaş bileşen yüzey leke dağılımları sırasıyla Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’te gösterilmiştir.

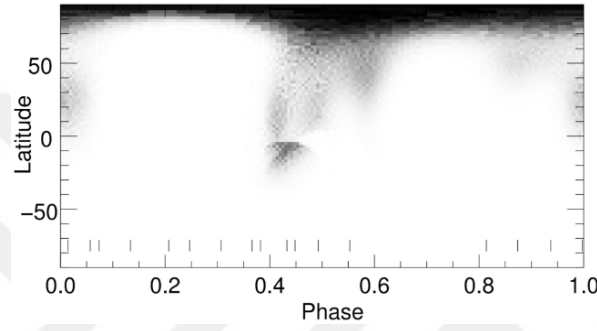


Şekil 5.2 ER Vul sisteminin baş bileşeninin a) Xiand vd. (2015) tarafından b) Özavcı vd. (2019) tarafından c) bu tez çalışmasında elde edilen Mercator gösteriminde yüzey leke dağılımı

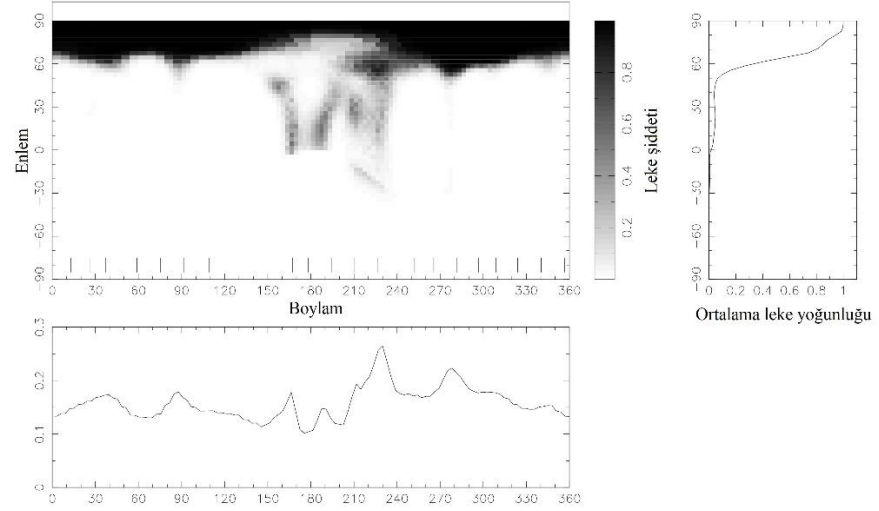
a)



b)



c)



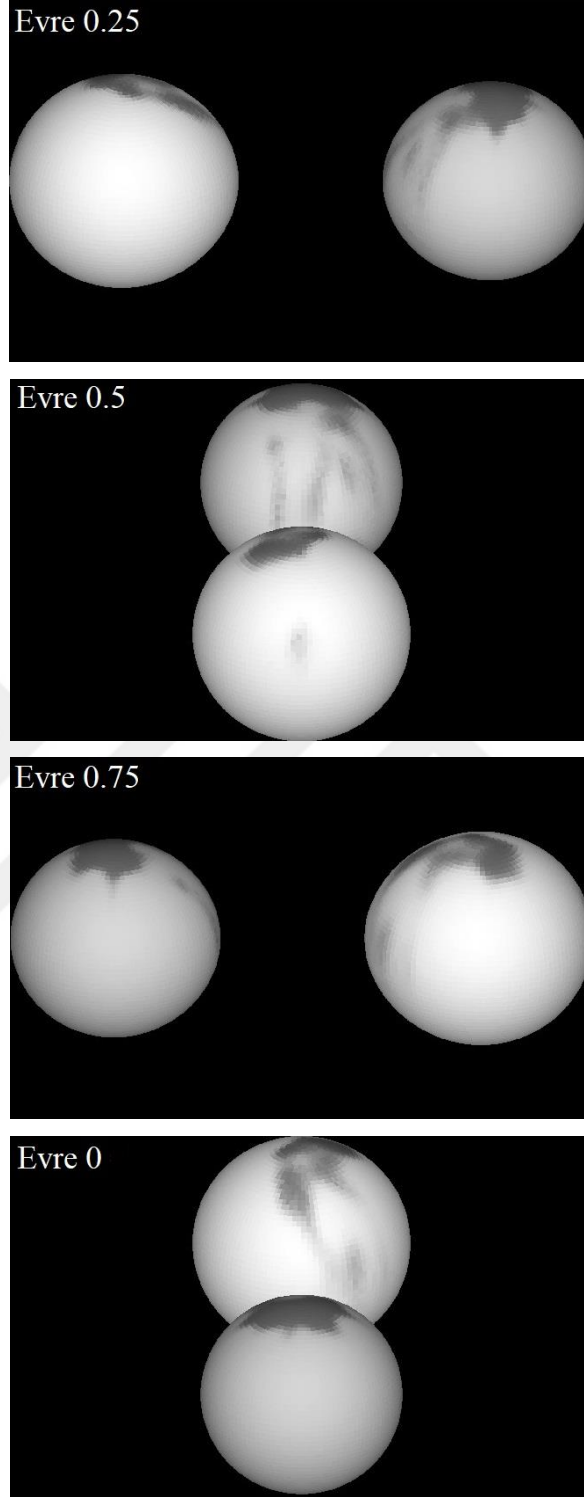
Şekil 5.3 Şekil 5.2 ile aynı sadece yoldaş bileşen için

Bileşenlerin ortalama enlemsel ve boylamsan leke yoğunluğu şekillerin sırasıyla sağ ve alt kısmında gösterilmiştir. Mercator görüntülerden, (Şekil 5.2 ve Şekil 5.3) yapılan tüm çalışmalarda ER Vul'un her iki bileşeninin de yoğun leke dağılımlarına sahip oldukları

görülmektedir. En dikkat çekici özellik lekelerin yoğun olarak kutuplar civarında dağılım göstermesidir. Xiang vd. (2015) 2006 ve 2008 yıllarında ve Özavcı vd. (2019) 2018 yılında elde ettikleri tayflarla yaptıkları analizler sonucu her iki bileşen için benzer yüzey haritaları elde etmişlerdir. Her iki bileşende lekeler orta enlemlerden başlayarak yıldızın yüksek enlemlerine kadar uzamaktadır. Ayrıca elde edilen yüzey haritalarından, yoldaş bileşen kutbunun neredeyse tamamen lekeyle kaplı olduğu görülmektedir. Hızlı dönen yıldızlarda yüksek enlemlerli kutupsal lekelerin varlığı yapılan nümerik simülasyonlarla daha önce Schüssler vd (1996) ve Granzer vd (2000) tarafından önerilmiştir. İlgili çalışmada elde edilen sonuçlara göre Coriolis kuvveti, yıldızın hızlı dönmesiyle güçlenerek konvektif bölgenin alt kısmından yükselen manyetik akıyı yıldızın üst enlemlerine taşıyabilmektedir. Baş bileşenin yüzey parlaklık dağılımı haritasında göze çarpan bir diğer olgu 180 derece boylamı civarında orta enlemlere yakın bir bölgede görülen leke yapısıdır. Yoldaş bileşenin yüzey parlaklık dağılımı haritasında yine 180 derece boylamı civarına dağılmış ve orta – düşük enlemlerde görülen leke uzantıları da dikkat çekmektedir. Buna benzer leke dağılımı daha önce modellenen yüzey haritalarında da iyi bir şekilde görülmektedir.

Bileşenlerin birbirlerine göre olan konumları ile leke dağılımları arasındaki ilişkinin daha da iyi görülebilmesi için sistemin geometrik gösterimleri Şekil 5.4’de verildi. Bu bağlamda, Şekil 5.4’ten de görüldüğü gibi, lekeler genel olarak bileşenlerin birbirine bakan yüzeylerinde görülmektedir. Benzer leke dağılımları Xiang vd. (2015) tarafından ER Vul için elde edilen haritalarda da görülmekle birlikte Garcia-Alvarez vd. (2003) tarafından RS CVn türü olan HR 1099 yıldızı için ve Strassmeier ve Rice (2003) tarafından $\sigma 2$ CrB yıldızı için oluşturulan modellerde de görülmektedir.

RS CVn türü RT And çift yıldız sisteminin birbirine bakan yüzeylerinde lekelerin varlığı Pribulla vd. (2000) tarafından bulunmuştur. Pribulla vd. (2000), bu çift sistem arasında aslında bir manyetik ‘köprünün’ olduğunu ve bu lekelerin bulundukları bölgelerden bileşenler arası bir madde aktarımının gerçekleşebileceğini ileri sürmüşlerdi.



Şekil 5.4 ER Vul sisteminin farklı evrelerdeki (0.0, 0.25, 0.5 ve 0.75) leke dağılımının geometrik gösterimi

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

ER Vul çift yıldız sisteminin her iki bileşeni için yüzey haritası elde edilerek leke dağılımları incelendi. ER Vul sistemi için literatürde yapılan tüm çalışmalarda (Piskunov vd. (2001), Xiang vd. (2015), Özavcı vd. (2019)) her iki bileşenin yüzeyinin de yoğun lekelerle kaplı olduğu görülmekte ve bu tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlarla örtüşmektedir. Bununla birlikte elde edilen leke dağılımlarının özellikle bileşenlerin birbirlerine bakan yüzeylerinde görülmesi yine bu tür çift sistemlerin manyetik aktivite doğasının bir sonucudur. Hussain (2002), birkaç tek ve çift yıldız üzerinde yapılan Doppler görüntüleme ve fotometrik çalışmaların sonuçlarını değerlendirmiş ve yakın çift yıldızlarda yıldız lekelerinin tek yıldızlara göre çok daha uzun ömre sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bazı RS CVn türü çift yıldızlarda kutup lekeleri onlarca yıl var olabilmektedir. Bu bağlamda, gerek bu tez çalışması kapsamında, gerekse literatürdeki yüzey parlaklık dağılımı haritalarında görülen yüksek enlemli ve / veya kutup lekelerinin varlığı gerçekten de bu tür yapıların uzun ömürlü olduklarını destekler niteliktedir. Ayrıca, uzun ömürlü yıldız lekeleri, RS CVn tipi çift yıldızlarda yaygın olan aktif boylam göçlerinin izleyicileridir (Berdyugina ve Tuominen 1998). Bununla birlikte lekelerin özellikle bileşenlerin birbirlerine bakan yüzeylerinde kalıcı olması Uchida ve Sakurai (1985) tarafından, RS CVn-türü çift yıldızların etkileşen manyetosferleri için önerdikleri model ile uyumludur. Bu model, yakın çift yıldızlardaki her iki bileşen yıldızın da manyetik olarak bağlandığını ve aktif boylam kuşaklarının manyetik alanlar arasındaki etkileşimle ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Lekelerin konumlarını belirleyen en önemli faktörün bileşenler arası gel git ve manyetik alan kuvvetlerinin olduğunu Olah (2016) tarafından önerilmiştir, ancak ER Vul gibi yüzey çekim kuvvetinin daha yüksek olduğu yıldızlar için manyetik alan etkileşimlerinin leke aktivitesini gel-git kuvvetinden daha çok etkilediğini de bulmuştur. Dolayısıyla ER Vul gibi RS CVn türü sistemlerin bu türden yüzey parlaklık dağılımı haritalarının elde edilmesi bu modelin doğrulanması açısından oldukça önemli olup bu tez çalışması kapsamında elde edilen bulguların da bu alanda literatüre katkı sağladığı düşüncesindeyiz.

KAYNAKLAR

- Babcock, H. W., Babcock, H. D., 1955. The Sun's Magnetic Field, 1952-1954. *Astrophysical Journal*, 121, 349.
- Berdyugina S. V., Tuominen I., 1998. Permanent active longitudes and activity cycles on RS CVn stars. *Astronomy and Astrophysics*, 336, 25.
- Charbonneau, P., 2014, Solar Dynamo Theory. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 52, 251-290. Çakırlı, Ö., İbanoğlu, C., Frasca, A., Catalano, S., 2003. H α variations of the RS CVn type binary ER Vulpeculae. *Astronomy and Astrophysics*, 400, 257-264.
- Dempsey, R. C., Linsky, J. L., Fleming, T. A., Schmitt, J. H. M. M., 1993. The ROSAT All-Sky Survey of Active Binary Coronae. I. Quiescent Fluxes for the RS Canum Venaticorum Systems. *Astrophysical Journal*, Supplement 86, 599.
- Donati, J.-F., Semel, M., Carter, B. D., Rees, D. E., Cameron, A. C., 1997. Spectropolarimetric observations of active stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 291, 658.
- Ekmekçi, F., Özeren, F. F., Ak, H., 2002. Chromospherically active binary systems, RT and ER Vul: 1995-1998 observations and spot distributions. *Astronomische Nachrichten*, 323, 31-35.
- Giampapa, M. S., Cram, L. E., Wild, W. J., 1989. The CA II resonance lines in M dwarf stars without H-alpha emission. *Astrophysical Journal*, 345, 536-542.
- Granzer, Th., Schüssler, M., Caligari, P., Strassmeier, K. G., 2000. Distribution of starspots on cool stars. II. Pre-main-sequence and ZAMS stars between 0.4 M_{sun} and 1.7 M_{sun}. *Astronomy and Astrophysics*, 355, 1087-1097.
- Hall, D. S., 1972. A T Tauri-Like Star in the Eclipsing Binary RS Canum Venaticorum. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 84, 323.
- Hall, D.S., 1976, in IAU-Colloq. No.29, Multiple Periodic Variable Stars, ed. W.S. Fitch (Dordrecht: Reidel), 287.
- Han, H., Wang, S., Bai, Y., Yang, H., Fang, X., Liu, J., 2023. Stellar Chromospheric Activities Revealed from the LAMOST-K2 Time-domain Survey. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 264, 12.
- Harmanec, P., Božić, H., Thanjavur, K., Robb, R. M., Ruždjak, D., Sudar, D., 2004. An improved ephemeris and physical elements of ER Vul. *Astronomy and Astrophysics*, 415, 289-297.
- Harmon, R. O., Crews, L. J., 2000. Imaging Stellar Surfaces via Matrix Light-Curve Inversion. *The Astronomical Journal*, 120, 3274-3294.
- Hussain, G. A. J., 2002. Starspot lifetimes. *Astronomische Nachrichten*, 323, 349.
- Hutchings, J. B., 1979. Book-Review - Structure and Evolution of Close Binary Systems. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 73, 386-387.
- Koch, D.G., Borucki, W.J., Basri, G., Batalha, N. M., Brown, T. M., Caldwell, D.,

- Christensen-Dalsgaard, J., Cochran, W. D., DeVore, E., Dunham, E. W., Gautier, T. N., Geary, J. C., Gilliland, R. L., Gould, A., Jenkins, J., Kondo, Y., Latham, D. W., Lissauer, J. J., Marcy, G., Marcy, G., Monet, D., Sasselov, D., Boss, A., Brownlee, D., Caldwell, J., Dupree, A. K., Howell, S. B., Kjeldsen, H., Meibom, S., Morrison D., Owen, T., Reitsema, H., Tarter, J., Bryson, S. T., Dotson, J. L., Gazis, P., Haas, M. R., Kolodziejczak, J., Rowe, Jason F., Van Cleve, J. E., Allen, C., Chandrasekaran, H., Clarke, B. D., Li, J., Quintana, E. V., Tenenbaum, P., Twichen, J. D., Wu, H., 2010. Kepler Mission Design, Realized Photometric Performance, and Early Science. *The Astrophysical Journal Letters*, 713, 79-86.
- Kupka, F., Piskunov, N., Ryabchikova, T. A., Stempels, H. C., Weiss, W. W. 1999. VALD-2: Progress of the Vienna Atomic Line Data Base. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 138, 119.
- Lazaro, C., Arevalo, M. J., 1997. Time-Resolved Spectroscopy of RS CVn Short-Period Systems. I. CG CYG, BH VIR, and ER VUL. *Astronomical Journal*, 113, 2283.
- Leighton, R. B., 1959. Observations of Solar Magnetic Fields in Plage Regions. *Astrophysical Journal*, 130, 366.
- Livingston, W., Wallace, L., White, O. R., Giampapa, M. S., 2007. Sun-as-a-Star Spectrum Variations 1974-2006. *The Astrophysical Journal*, 657, 1137-1149.
- Meunier, N., Delfosse, X., 2009. On the correlation between Ca and H α solar emission and consequences for stellar activity observations. *Astronomy and Astrophysics*, 501, 1103-1112.
- Montes, D., Figuera-Fernandez, M. J., De Castro, E., Cornide M., 1995. Excess H α emission in chromospherically active binaries. *Astronomy and Astrophysics*, 294, 165-176.
- Newton, E. R., Irwin, J., Charbonneau, D., Berlind, P.; Calkins, M. L., Mink, J., 2017. The H α Emission of Nearby M Dwarfs and its Relation to Stellar Rotation. *The Astrophysical Journal*, 834, 85.
- Noyes, R. W., Hartmann, L. W., Baliunas, S. L., Duncan, D. K., Vaughan, A. H., 1984. Rotation, convection, and magnetic activity in lower main-sequence stars. *Astrophysical Journal*, 279, 763-777.
- Olah, K., Budding, E., Kim, H. -L., Etzel, P. B., 1994. The active close binary system ER Vulpeculae. *Astronomy and Astrophysics*, 291, 110-120.
- Olah, K., 2006. Doppler Images of ζ Andromedae. *Astrophysics and Space Science*, 304, 145.
- Özavcı, İ., Bahar, E., Şenavcı H. V., 2019. Surface inhomogeneities of the eclipsing binary
- ER Vul. *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso* 49, 278-286.
- Pasquini, L., Pallavicini, R., 1991. H α absolute chromospheric fluxes in G and K dwarfs and subgiants. *Astronomy and Astrophysics*, 251.199-209.
- Piskunov, N. E., 1991. *The Art of Surface Imaging. The Sun and Cool Stars. Activity,*

- Magnetism, Dynamos. Proceedings of Colloquium No. 130 of the International Astronomical Union, held in Helsinki, Finland, July 17-20, 1990. Editors, I. Tuominen, D. Moss, G. Rudiger; Publisher, Springer-Verlag, Berlin, Germany; New York, NY, 1991. ISBN # 3-540-53955-7. LC # QB524 .I59 P.309, 1991
- Piskunov, N., Vincent, A., Duemmler, R., Ilyin, I., Tuominen, I., 2001. 11th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems and the Sun, ASP Conference Proceedings, Vol. 223. Edited by Ramon J. Garcia Lopez, Rafael Rebolo, and Maria Rosa Zapaterio Osorio. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, ISBN: 1-58381-055-2, p.1285.
- Pribulla T., Chochol D., Milano L., Errico L., Vittone A. A., Barone F., Parimucha S., 2000.
- Active eclipsing binary RT Andromedae revisited. *Astronomy and Astrophysics* 362, 169.
- Pop, A., Vamoş, C., 2013. Orbital period modulation of the eclipsing binary system ER Vulpeculae: Real or not? *New Astronomy*, 23, 27-35.
- Reiners, A., Joshi, N., Goldman, B., 2012. A Catalog of Rotation and Activity in Early-M Stars. *The Astronomical Journal*, 143, 93.
- Rice, J. B., Wehlau, W. H., Khokhlova, V. L., 1989. Mapping stellar surfaces by Doppler imaging: technique and application. *Astronomy and Astrophysics*, 208, 179-188.
- Rice, J. B., 2002 Doppler imaging of stellar surfaces – techniques and issues. *Astronomische Nachrichten*, 323, 220-235.
- Roettenbacher, R. M., Monnier, J. D., Korhonen, H., Aarnio, A. N., Baron, F., Che, X., Harmon, R. O., Kővári, Zs., Kraus, S., Schaefer, G. H., Torres, G., Zhao, M., Ten Brummelaar, T. A., Sturmann, J., Sturmann, L., 2016. No Sun-like dynamo on the active star ζ Andromedae from starspot asymmetry. *Springer Nature*, 533, 217–220.
- Savanov, I. S., Strassmeier, K. G., 2008. Light-curve inversions with truncated least-squares principal components: Tests and application to HD 291095 = V1355 Orionis. *Astronomische Nachrichten*, 329, 364.
- Schaefer, G. H., Brummelaar, T. Ten, Gies, D. R., Farrington, C. D., Kloppenborg, B., Chesneau, O., Monnier, J. D., Ridgway, S. T., Scott, N., Tallon-Bosc, I. , McAlister, H. A., Boyajian, T., Maestro, V., Mourard, D. , Meilland, A., Nardetto, N., Stee, P., Sturmann, J., Vargas, N., Baron, F., Ireland, M., Baines, E. K., Che, X., Jones, J., Richardson, N. D., Roettenbacher, R. M., Sturmann, L., Turner, N. H., Tuthill, P., van Belle, G., Braun, K., Zavala, R. T., Banerjee, D. P. K., Ashok, N. M., Joshi, V., Becker, J., Muirhead, P. S., 2014. The expanding fireball of Nova Delphini. *Springer Nature*, 515, 234–236.
- Schröder, C., Reiners, A., Schmitt, J. H. M. M., 2009. Ca II HK emission in rapidly rotating stars. *Astronomy and Astrophysics*, 493, 1099-1107.
- Schüssler M., Caligari P., Ferriz-Mas A., Solanki S. K., Stix M., 1996. Distribution of starspots on cool stars. I. Young and main sequence stars of $1M_{\text{sun}}$. *Astronomy and Astrophysics*, 314, 503.

- Skilling, J., Bryan, R. K., 1984. Maximum Entropy Image Reconstruction - General Algorithm. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 211, 111.
- Uchida, Y., Sakurai T., 1985. Unstable Current Systems and Plasma Instabilities in Astrophysics. International Astronomical Union. Symposium, 281
- Vaughan A. H., Preston G.W., Wilson O. C., 1978. Measurements of Ca II H and K emission. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 90, 267-274.
- Vogt, S. S., Penrod, G. D., 1983. Doppler imaging of spotted stars : application to the RS Canum Venaticorum star HR 1099. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 95, 565-576.
- Vogt, S., Penrod, G., Hatzes, A., 1987. Doppler Images of Rotating Stars Using Maximum Entropy Image Reconstruction. Astrophysical Journal, 321, 496.
- Wilson, R. E., Raichur, H., 2011. Distance and temperature from absolute light curves of three eclipsing binaries. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 415, 596-604.
- Wilson, O. C., 1978. Chromospheric variations in main-sequence stars. Astrophysical Journal, 226, 379-396.
- Xiang, Y., Shenghong, G., Cameron C.A., Barnes, J. R., 2015. Doppler images of the eclipsing binary ER Vulpeculae. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 447, 567-576.
- Yang, H., Liu, J., Gao, Q., Fang, X., Guo, J., Zhang, Y., Hou, Y., Wang, Y., Cao, Z., 2017.
- The Flaring Activity of M Dwarfs in the Kepler Field. The Astrophysical Journal, 849, 36.
- Zhao, M. ; Monnier, J. D., Pedretti, E., Thureau, N., Mérand, A., ten Brummelaar, T., McAlister, H., Ridgway, S. T., Turner, N., Sturmman, J., Sturmman, L., Goldfinger, P. J., Farrington, C., 2009. Imaging and Modeling Rapidly Rotating Stars: α Cephei and α Ophiuchi. The Astrophysical Journal, 701, 209–224.
- Anonymous. 2011. Web Sites: <http://www.atlasoftheuniverse.com/hr.html>. Eriřim Tarihi: 28.05.2023
- NASA. 2020. Web Sites: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2020/what-will-solar-cycle-25-look-like-sun-prediction-model>. Eriřim Tarihi 28.05.2023.
- NASA. 2014. Web Sites: <https://solarscience.msfc.nasa.gov/feature2.shtml>. Eriřim Tarihi: 28.05.2023