

Değişen Yıldız Fotometrisinde STEREO Uydu Verilerinin Güvenilirliği

Doğuş ÖZUYAR^{1*}

¹Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, Astrofizik Anabilim Dalı, Ankara

¹<http://orcid.org/0000-0001-8544-0950>

*Sorumlu yazar: dozuyar@ankara.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 03.01.2022

Kabul tarihi:05.05.2022

Online Yayınlanma: 18.07.2022

Anahtar Kelimeler:

STEREO uydusu

TESS uydusu

Fotometri

Veri analizi

Astrosismoloji

ÖZ

Son on yılda, uzay teknolojisinin gelişmesiyle birlikte uzaya yollanan yüksek çözünürlüklü ve kesintisiz gözlem yapabilen teleskoplar sayesinde hem yakın çevremizdeki hem de Evren'in derinliklerindeki gök cisimleri daha ayrıntılı olarak incelenmeye başlanmıştır. Bu çalışmalar arasında galaktik ve galaksi dışı gözlemler, Güneş'in atmosferinin incelenmesi ve ötegezegen araştırmaları başı çekmektedir. Bu araştırmalar için kullanılabilen önemli teleskoplardan ikisi STEREO ve TESS'dir. STEREO'nun asıl görevi Güneş'teki madde atımlarını takip etmek ve TESS'in görevi ise yeni ötegezegenler keşfetmektir. Ancak bunların yanı sıra, bu teleskoplar arkaplanda bulunan milyonlarca yıldızın ışık değişimlerini gözleme özelliğine de sahiptir. Bu sayede yıldız astrofiziğinde oldukça önemli gelişmeler yaşanmaktadır. Bununla birlikte, çok sayıda yıldızın aynı anda gözlenmesiyle büyük veri kümeleri elde edilmeye başlanmış ve bunun sonucu olarak da bilgisayar kodlarının kullanıldığı otomatik veri işleme süreçleri ortaya çıkmıştır. Ancak, bu süreç birçok sorunu da beraberinde getirmektedir. Çok sayıda ve çeşitli türdeki yıldızların analiz edilmeye çalışılması veri indirgeme ve analiz kodlarının aynı hassasiyetle çalışmasına izin vermemekte ve insan kaynaklı hataların da işin içine girmesine neden olmaktadır. Bu duruma, uzay aracından kaynaklanan sorunlar da eklendiğinde elde edilen verilerde ve analiz sonuçlarında ciddi problemler ortaya çıkabilmektedir. Bu bağlamda, STEREO uydusundan elde edilen 41 tane Be türü yıldızın ışık eğrileri analiz edilmiş ve verilerde yıldızlardan kaynaklanmayan bir problem ile karşılaşmıştır. Daha net bilgiler elde edebilmek için bu 41 yıldızdan TESS ile gözlenenler belirlenmiş ve iki uydudan alınan ışık eğrileri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara dayanarak STEREO verilerindeki problem irdelenmiştir.

Reliability of STEREO Satellite Data in Variable Star Photometry

Research Article

Article History:

Received: 03.01.2022

Accepted: 05.05.2022

Published online: 18.07.2022

Keywords:

STEREO satellite

TESS satellite

Photometry

Data analysis

Astroseismology

ABSTRACT

Thanks to space telescopes with high resolution and uninterrupted observations, celestial objects in our immediate surroundings and in the depths of the Universe have been studied in more detail for last ten years. Among these studies, galactic and extragalactic observations, solar atmosphere and exoplanet research are the leading ones. Two of the important telescopes available for these studies are STEREO and TESS. The main task of the STEREO is to follow coronal mass ejections from the Sun while TESS's mission is to discover new exoplanets. These telescopes also have the ability to observe the light variations of millions of stars in the background. Therefore, significant advances have been made in stellar astrophysics. Yet, simultaneous observations of many stars cause large datasets to be obtained and consequently, automatic data processing

processes using computer codes arise. This process brings several problems with it. Attempting to analyze many and various types of stars does not allow data reduction and analysis codes to work with the same precision and also causes human-induced errors to get involved. When spacecraft-related problems are added to this situation, serious problems may arise in the data obtained and in the results of the analysis. In this context, STEREO data of 41 Be type stars were analyzed and a problem not caused by the stars was encountered in the data. In order to obtain clearer information, the ones observed by TESS from these 41 stars were determined and the light curves taken from the two satellites were compared. Based on the results obtained, the problem in the STEREO data was scrutinized.

To Cite: Özuyar D. Değişen Yıldız Fotometrisinde STEREO Uydu Verilerinin Güvenilirliği. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2022; 5(2): 919-942.

1. Giriş

Temel olarak yıldız pulsasyonlarının incelendiği astrosismoloji, ötegezegen karakterizasyonunda kullanılan kütle, yarıçap ve yaş gibi küresel yıldız özelliklerinin doğru belirlenebilmesi (Batalha ve ark., 2011) için ve galaktik arkeoloji yoluyla yapılan galaksi araştırmaları (Miglio ve ark., 2013) için güçlü bir araçtır. Bununla birlikte, astrosismoloji başlı başına Hertzsprung-Russell diyagramı boyunca yıldızların ayrıntılı içyapısı ve evrimi hakkında benzersiz çalışmalara olanak tanınması açısından da önem arz etmektedir (Aerts ve ark., 2010). Literatürde astrosismoloji temelinde yapılan çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda, Beta Cephei türü büyük kütleli ve sıcak yıldızlardan Güneş benzeri salınımlar yapan düşük kütleli ve nispeten soğuk yıldızlara kadar birçok farklı türdeki yıldız değişkenlikleri araştırılmış olup, birçoğunda sadece yeni ötegezegenler keşfedilmemiş aynı zamanda yıldız değişkenliğinin gizeminin çözülmesinde de oldukça başarılı olunmuştur.

Örneğin, Balona ve Ozuyar (2020) frekans analizleri yoluyla 766 tane pulsasyon yapan B türü anakol yıldızının, 5000'den fazla Delta Scuti'nin, 2300 Gamma Doradus ve 114 hızlı dönen Ap yıldız (rapidly oscillating A type peculiar star - roAp) adayının tespit edildiğini belirtmiştir. Ayrıca, yüksek frekanslı zonklamaların yalnızca erken B türü yıldızlar olan Beta Cephei'lerle sınırlı olduğu düşünülürken, Balona ve Ozuyar (2020) bu frekansların tüm B türü yıldızlarda bulunduğunu ve hatta aralığın Delta Scuti yıldızlarına kadar uzandığını göstermiştir. Kahraman Aliçavus ve ark., (2020) yaptıkları çalışmada, beş tane onaylanmış Gamma Doradus ve üç tane onaylanmış sıcak Gamma Doradus/Delta Scuti türü hibrid yıldız bulurken, 16 tane normal Gamma Doradus, Delta Scuti veya hibrid yıldız tespit etmiştir. Benzer bir astrosismoloji çalışmasında, Antoci ve ark. (2019) zonklayan orta kütleli 117 Gamma Doradus ve Delta Scuti yıldızının zonklama mekanizmalarını araştırmış ve dış zarflarındaki karışma sürecinin zonklamayı sürdürmek için önemli bir role sahip olduğunu göstermiştir. Holdsworth ve ark. (2021), frekans analizleri yardımıyla 12 yeni roAp yıldızı keşfetmiş ve bunlardan birinin en uzun zonklama dönemine, bir diğersinin en kısa dönme dönemine ve altı tanesinin ise çok dönemli değişimlere sahip olduğunu rapor etmiştir. Hertzsprung-Russell diyagramının farklı bir bölgesini inceleyen Plachy ve ark. (2021) ise 25 Cepheid yıldızının ışık eğrisi değişimlerini incelemiş ve frekans analizleri sonucunda on tane Cepheid'in temel mod ile, üç tanesinin üst ton ile ve iki tanesinin ise çift mod ile zonklama yaptığını tespit etmiştir. Bununla birlikte, bu

yıldızların dönem dalgalanması ve ışık-zaman etkisinden kaynaklanan zamanlama değişimleri gibi düşük genlikli birçok özelliğe sahip olduğu gösterilmiştir. Ayrıca Cepheid türü yıldızlarda radyal olmayan modların varlığına ilişkin işaretler bulunmuş ve çalışılan yıldızlardan birinde böyle bir modun ilk defa keşfedildiği belirtilmiştir.

Örneklerden de görüleceği gibi, astronomi camiası özellikle son on yılda yıldızların doğasını araştırma ve anlama konusunda oldukça büyük bir yol kat etmiştir. Bu araştırmaların yapılabilmesi adına günümüze kadar, All Sky Automated Survey (ASAS: Pojmanski, 2000), Hungarian Automated Telescope (HATnet: Bakos ve ark., 2002) ve Wide Angle Search for Planets (WASP/SuperWASP: Pollacco ve ark., 2006) gibi birçok yer tabanlı proje ve Convection, Rotation and planetary Transits (CoRoT: Baglin ve ark., 2000), Micro-variability and Oscillations of Stars (MOST: Matthews ve ark., 2000), *Kepler* (Blomme ve ark., 2010) ve Solar Mass Ejection Imager (SMEI: Spreckley ve Stevens, 2008) gibi çok sayıda uzay görevi gerçekleştirilmiştir.

Bu görevlerin başarısı, yüksek bir kadansta ve uzun süreli aralıkları kapsayan yüksek kaliteli fotometrik gözlemler sunma yeteneklerine bağlanabilir. Bu görevlerden bir tanesi NASA'nın Solar TERrestrial RELations Observatory (STEREO) uydusudur. Bu gözlemevi, Güneş'in her iki tarafına iki uzay aracı yerleştirilerek Güneş'te meydana gelen olayların üç boyutlu olarak gözlenmesi için tasarlanmıştır. STEREO'nun Ekim 2006'da fırlatılmasından bu yana, bu özdeş uydular, Güneş'in 360 derecelik bir görünümünü sunarak, Güneş aktivitesini ve koronal kütle atılımlarını (Coronal Mass Ejections - CME) benzeri görülmemiş bir ayrıntıda incelemeyi mümkün kılmıştır. Misyona, Solar and Heliospheric Observatory (SoHO) ve SMEI gibi önceki görevleri içeren mevcut Güneş çalışmalarına önemli katkılarda bulunmuştur. SMEI'de olduğu gibi, STEREO'nun sağladığı fotometrik verilerin de, yerden veya başka uzay görevleriyle kaliteli gözlemi yapılamayan çok çeşitli yıldızlarda, yıldız ve gezegen araştırmaları yapmak için kullanılma potansiyeli bulunmaktadır. STEREO, 20 güne (g) kadar sürekli gözlem yapabilme yeteneği ile birlikte yüksek hassasiyetli verilere sahip olma ve atmosferik etkilerin olmaması gibi büyük avantajlara sahiptir.

Transit Exoplanet Survey Satellite (TESS; Ricker ve ark., 2014) ise yüksek kadanslı, yüksek kaliteli veriler alabilen, uzun gözlem dönemine sahip ve bu bağlamda astrosismolojinin gelişimine büyük katkı sunan son uzay görevlerinden biridir. TESS'den elde edilen veriler yaklaşık olarak 9,7 milyon adet ışık eğrisi içermektedir. Uydu yaklaşık üç yıllık görev süresince her ~27 günlük gözlem aralığı için 120, 600 ve 1800 saniyelik kadanslarda ışık eğrileri elde etmiştir. Bu veriler, yıldızların değişkenliği ve ötegezegenlerin incelenmesi için bir hazine oluşturmaktadır.

Önceden belirlenmiş tek yıldızların yerden ve uzaydan yapılan çalışmaları ile başlayan (Borucki ve ark., 2010; Howell ve ark., 2014) ve bahsi geçen uzay tabanlı görevler aracılığıyla binlerce yıldızın eş zamanlı fotometrik araştırmalarına (Jenkins, 2017) doğru evrilen gözlem teknikleri sonucunda daha büyük veri kümeleri elde edilmeye başlanmış ve doğal olarak verilerin bilgisayar kodlarına odaklı işlenmesi sürecine geçilmiştir. Ancak bu süreç bazı hataları da beraberinde getirmektedir. Evrende çok çeşitli türden yıldız ve yıldız sistemleri bulunmaktadır. Bu çeşitlilik ve çok büyük veri setleriyle

uğraşılması kimi zaman yazılan veri indirgeme ve analiz kodlarının incelenen tüm cisimler için aynı hassasiyette çalışmasına izin vermemekte ve hatta insandan kaynaklanan hataların da işin içine girmesine neden olabilmektedir. Bu duruma uzay aracındaki sistemsel problemlerden kaynaklanan sorunlar da eklendiğinde hem elde edilen veride hem de analiz sonuçlarında önemli problemler olabilmektedir.

Bu çalışmada, 41 tane Be türü değişen yıldızın fotometrik değişimlerine ilişkin STEREO verileri incelenmiş, bu yıldızlardan çoğunun uydu takibinden veya sistemin indirgeme rutinlerinden kaynaklanan bir durumdan dolayı hatalı verilere sahip oldukları fark edilmiş ve hedef yıldızlardan uygun olanların verileri TESS gözlemleriyle karşılaştırılmıştır. Verilerde görülen bu durumun değerlendirilmesi amacıyla; Kısım 1.1'de STEREO uydusu, bu uydudan veri elde etme süreçleri ve bu verilerin özellikleri, Kısım 1.2'de ise TESS uydusu ve bu uydudan alınan fotometrik verilerin özellikleri detaylı olarak anlatılmıştır. Bölüm 2'de her iki uydudan alınan verilerin analiz süreçleri ve elde edilen bulgulardan bahsedilmiş, son bölümde ise elde edilen sonuçların olası nedenleri tartışılmıştır.

1.1. STEREO Uydusu ve Fotometrik Veriler

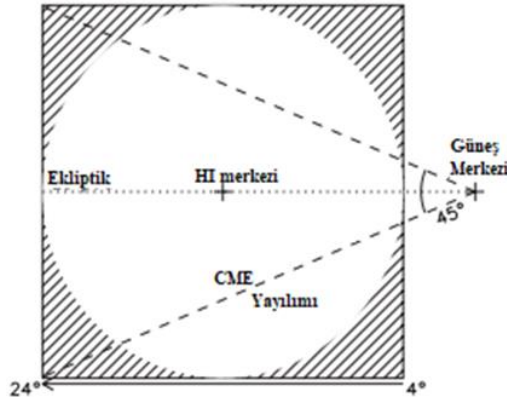
STEREO, stereoskopik izdüşümde koronal kütle atımlarının özelliklerini ve evrimini incelemek için 25 Ekim 2006'da fırlatılan iki özdeş uzay aracından oluşmaktadır. İkiz uydular, STEREO-A ve STEREO-B, sırasıyla 0,97 ve 1,07 Astronomik Birim (AB) çaplarında Güneş merkezli yörüngelerde hareket etmektedirler. Bu yerleşimde STEREO-A Dünya'nın önünde her yıl 22° uzaklaşırken STEREO-B her yıl Dünya'nın 22° gerisinde kalmaktadır. 2014 yılı itibari ile Güneş'in arkasından geçiş yapmışlardır. STEREO-A hala aktif olarak çalışmaktayken STEREO-B ile bu geçiş esnasında iletişim kaybedilmiştir.

Her uyduda, Sun-Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation (SECCHI) adı verilen ve üzerinde birden fazla araç bulunan bir paket bulunmaktadır. Buna bir UV görüntüleyici, bir çift beyaz ışıklı koronograf ve bir çift heliosferik görüntüleyici (HI-1 ve HI-2) dâhildir. Görüntüleyiciler öncelikle yıldızlararası ortam boyunca CME'lerin yayılmasını gözlemek için kullanılmaktadır. Buna ek olarak, 12 ile 215 Güneş yarıçapı (R_\odot) arasında kalan gezegenlerarası bölgede bol miktarda fotometrik veri sağlayan çok sayıda arkaplan yıldızını gözlemektedir. Bu cihazların açıklamaları ve özellikle HI cihazının ayrıntıları için Eyles ve ark. (2009), Brown ve ark., (2009), Bewsher ve ark. (2010) ve Bewsher ve ark., (2012)'a bakılabilir.

Bu çalışmada HI-1A kamera tarafından 2007 ile 2011 yılları arasında takip edilen cisimlere ait veriler kullanılmıştır. HI-1A kamerası, görünür ışığa duyarlı 2048x2048 pikseli bir CCD dedektörü kullanılmaktadır. Her piksel $35,15 \times 35,15$ yaysn²'lik açısal boyutlara sahiptir ve bu da $20^\circ \times 20^\circ$ 'ye varan bir açısal görüş alanı (FOV) sağlamaktadır. Kameranın optik eksenini, ekliptik düzlem ile hizalıdır ve Güneş merkezinden yaklaşık 14° 'lik bir uzaklığa yönlendirilmiştir. Bu, Güneş'i, kameranın sağ

kenarından 4° uzağa yerleştirmektedir. Bu yakınlık nedeniyle, ekliptik düzlemin yakınında bulunan yıldızların gözlemleri, artan Güneş ışığına ve CME'lere maruz kalmaktadır.

CCD yapısal olarak kare olmasına rağmen optik tasarım daireseldir ve bu nedenle dedektörün köşelerinde kenar ayrıntısı yitimi (vinyet) vardır. Şekil 1, Güneş'e göre açısal görüş alanının bir şemasını göstermektedir. Köşelerdeki taralı kısımlar, vinyetten etkilenen alanı temsil etmekte ve kesikli çizgiler ise tipik bir CME yayılımını göstermektedir. Bunların ekliptik düzlem boyunca Güneş'ten dışarı doğru uzanan 45° 'lik bir koni içinde kalmaları beklenmektedir (Socker ve ark., 2000).

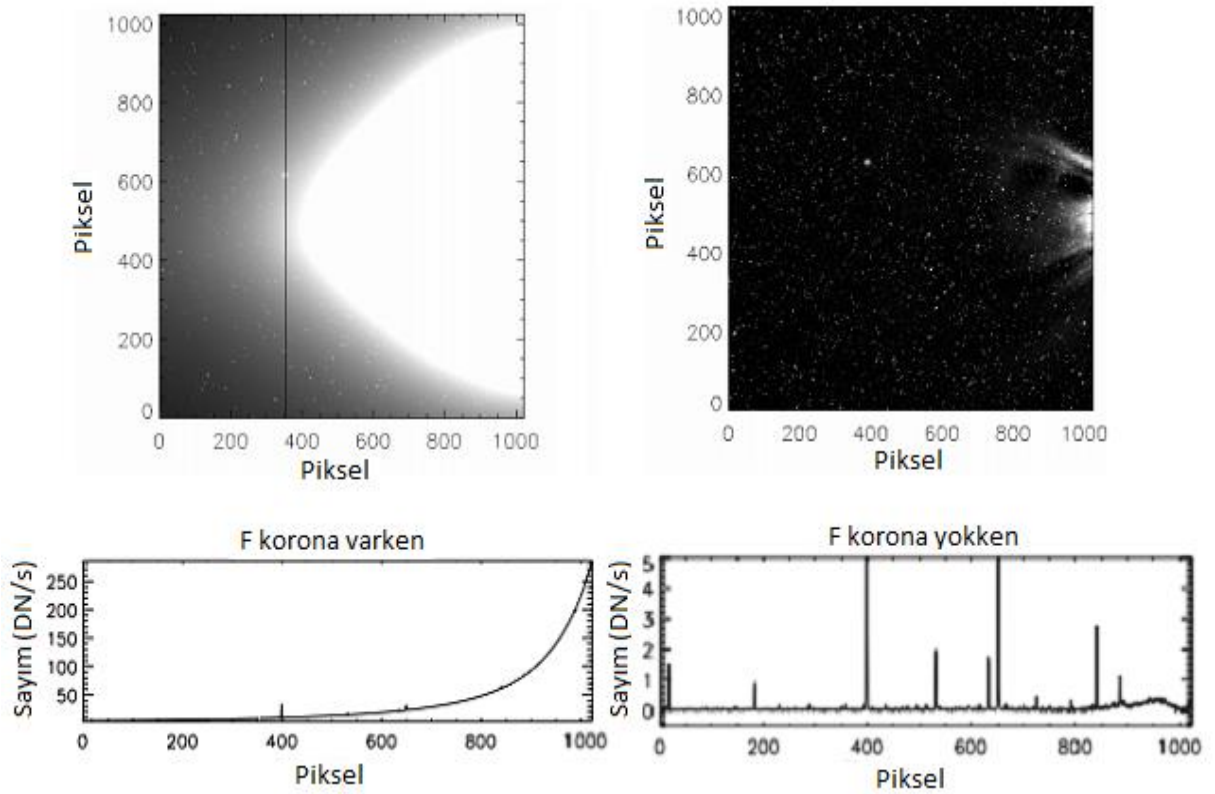


Şekil 1. Bu şema, $20^\circ \times 20^\circ$ açısal görüş alanına sahip olan HI-1A FOV'ünü göstermektedir.

HI-1A kamerası tarafından sağlanan her poz karesi, kozmik ışıklardan arındırılmış 30 adet 40 saniyelik pozlamaların ürünüdür. Sonuç olarak, günde 40 dakikalık bir kadansa sahip 36 kare elde edilmektedir. Görüntülerin pikselleri ayrıca 2×2 olacak şekilde birleştirilmiş olup bir görüntü pikseli $70,3 \times 70,3$ yaysn²'lik bir alana sahiptir. Nokta dağılım fonksiyonu (Point Spread Function - PSF) yaklaşık olarak dairesel olup $3,3$ yaydk²'lik bir alan görmektedir. Karşılaştırma olarak, CoRoT'un PSF'si $0,2$ yaydk²'lik bir alana sahiptir ve ışık eğrileri hala yakındaki yıldızlardan kaynaklanan kirlenmeye maruz kalmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmadaki hedef seçimi, yarıçapı 6 piksele eşit bir daire içinde, iyi izole edilmiş veya yakındaki yıldızlardan en az 1,5 kat daha parlak olan yıldızlarla sınırlandırılmaktadır.

UK Solar System Data Centre (UKSSDC)'dan indirilebilecek üç farklı işlenmiş veri türü bulunmaktadır. L0, toplam ham görüntülerden oluşan kalibre edilmemiş verileri, L1, aletsel ve uydudan kaynaklanan genel etkilerin giderildiği temel süreçlerden geçmiş yarı işlenmiş görüntüleri ve L2, ek bir arkaplan düzeltmesi uygulanan ön işleminden geçirilmiş görüntüleri göstermektedir. Daha önce belirtildiği gibi, HI-1 kamerasının pozlama süresi 40 saniyedir ve her görüntü 30 pozdan oluşmaktadır. Bu şekilde alınan görüntüler sadece satürasyonu önlemekle kalmaz, aynı zamanda gözlemler için gerekli olan sinyal-gürültü oranını (SNR) da üretir. Bu görüntüler uzay aracında bir araya getirilmeden önce, her görüntü, tahmini çarpma hızı saniyede 45 piksel olan kozmik ışıklardan temizlenir (Eyles ve ark., 2009). Bu ışınları ortadan kaldırmak için her poz piksel piksel karşılaştırılır.

Piksel değeri 5σ 'dan büyükse (burada σ , fotoelektron sayısına göre tahmin edilen gürültünün standart sapmasıdır), önceki görüntünün piksel değeri ile değiştirilir. Bu görüntüler toplam ham görüntülerdir. L0 verileri temel indirgeme süreçlerinden geçirilmediğinden bilimsel kullanıma uygun değildir. Bu indirgeme işlemleri, “*secchi_prep*” olarak adlandırılan bir rutin ile yapılmakta olup bu rutin; kayıp verilerin düzeltilmesi, kötü görüntülerin belirlenmesi ve temizlenmesi, satüre olmuş piksellerin düzeltilmesi, düz alan düzeltilmesi, hedefleme parametrelerinin güncellenmesi gibi durumları kapsamaktadır. Bu işlemlerden geçen veriler artık L1 verileri olarak adlandırılır. Bu aşamadaki veriler hala baskın Güneş F-korona'sına sahiptir. F-korona, iç heliosferdeki toz parçacıklarından saçılan Güneş ışığı olup bu ışık Dünya'nın yörüngesine kadar uzanmaktadır. Işığın parlaklığı Güneş diskinin parlaklığının 10^{-12} ile 10^{-6} katı arasında değişmektedir.



Şekil 2. F-korona'nın var olduğu (sol üst) ve çıkarıldığı (sağ üst) örnek görüntüler. Sol üstteki şekilde görülmesi imkânsız olan gezegen ve yıldızlar sağ üstteki şekilde tanımlanabilir hale gelmektedir. Sağ üstteki şekil sonraki analizlerde kullanılacak olan verilere ilişkin şekildir. Altta grafikler, F-korona çıkarma işleminden önce ve sonra alınan görüntülere ilişkin verilerdir. Grafiklerdeki pikler, sol üstteki resimde güçlükle görülebilen parlak yıldızlardır. F-korona çıkarıldığında daha sönük yıldızlar bile tanımlanabilmektedir (sağ alt).

Şekil 2 (üst), yıldız fotometrisi gerçekleştirmek için F-korona'nın neden çıkarılmaya ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Üst soldaki şekilde dikey olarak uzanan koyu çizgi, üst sağdaki şekilde belirgin bir şekilde görülebilen ve 3 kadirden daha parlak bir cismin satürasyonundan kaynaklanmaktadır. Şekilde bulunan alt kısımdaki grafikler, F-korona varken ve F-korona çıkarıldığı zaman arkaplan gökyüzünden gelen sayımları göstermektedir.

Şekil 2’de altta verilen bu grafikler, verilerde F-korona’nın baskınlığını açıkça ortaya koymaktadır. Sol alttaki grafikte sayımları belli olmayan yani neredeyse görünmez olan yıldızlar, F-korona çıkartıldıktan sonra sağ alttaki grafikte açıkça görünür hale gelmektedir. 400 ve 600 piksel civarındaki cisimlerin en parlakları altı kadirdir ve sönük olanlar ise 11 – 12 kadir civarında parlaklıklara sahiptir. Sürecin ilk aşamalarında, bir dizi görüntü için her pikselin minimum değeri hesaplanarak minimum bir arkaplan haritası elde edilir. Bu harita, farklı sayıda görüntü ile yapılan denemeler ve verilerdeki F-korona kalıntıları ve değişimlerine dayanarak oluşturulmaktadır. Bu harita daha sonra F-korona’nın çoğunu ortadan kaldırmak için her bir görüntüden çıkarılmaktadır.

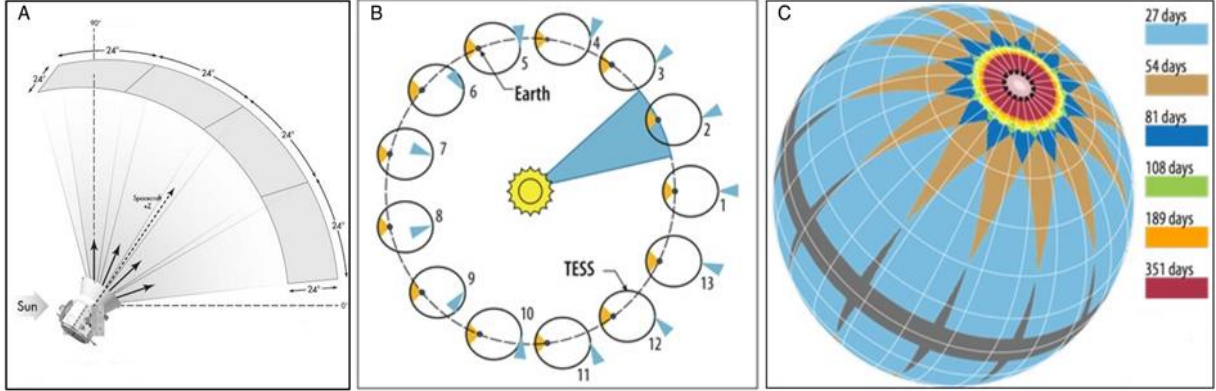
Yıldızlara ilişkin fotometrik bilgiler bu görüntülerden (L2 verileri olarak bilinir) elde edilmektedir. Bunu yapabilmek adına 12 kadirden daha parlak yıldızlar için girdi kataloğu olarak The Naval Observatory Merged Astrometric Dataset (NOMAD; Zacharias ve ark., 2004) kullanılmaktadır. Uydu koordinat sisteminden gökyüzü koordinat sistemine geçilmesinden sonra 4 x 4 piksellik bir alanda arkaplandan 1,5 kat fazla sayıma sahip olan pikseller olası yıldız kaynakları olarak işaretlenmektedir. Bu kaynaklar katalog ile eşleşirse 2 piksellik bir hata marjini kullanılmaktadır. HI görüntülerinin büyük pikselleri, karşılaştırılabilir büyüklükteki yakın hedefler arasında PSF kontaminasyonuna neden olur. Bu etkinin büyük bir kısmını belirlemek ve ortadan kaldırmak için temel bir parlaklık-uzaklık kıstası uygulanmaktadır. Böylece, 10 pikselden daha yakın olan ve 0,5’ten küçük bir parlaklık farkı olan cisim çifti hedef listesinden çıkarılmaktadır. Ayrıca, aynı yarıçap içinde olan ancak 2,5 veya daha az bir parlaklık farkı olan çiftlerdeki daha sönük yıldızlar da çıkarılmaktadır. Bunlar dışında olabilecek daha fazla kontaminasyonu tespit etmek adına akıyı hesaplamak için üç farklı açıklık ölçüsü kullanılmaktadır. Daha parlak olan yıldız için en büyük açıklık ve daha sönük olan yıldız için ise en küçüğü kullanarak, daha fazla karışıklık ortadan kaldırılmaya çalışılmaktadır. Tüm bu önlemlere rağmen, hedeflerin ya kaçırıldığı ya da yakındaki daha yakın ve daha parlak olan yıldızlarla karıştırıldığı durumlar da olmaktadır.

Bu sürecin sonucunda, HI-1A kamerasının gözlemlerinden, her bir yıldız için yaklaşık 700 veri noktasından oluşan 20 günlük veri elde edilmektedir. Görüntüler her 40 dakikada bir alındığı için elde edilen veri setlerinin Nyquist frekansları günde yaklaşık 18 çevrimdir.

1.2. TESS Uydusu ve Fotometrik Veriler

Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS), NASA’nın Explorer Programı tarafından Nisan 2018’den itibaren parlak yıldızların etrafındaki Dünya benzeri gezegenleri aramak için iki yıllık bir görev olarak başlatılmış olup bu süre sonradan Eylül 2022’ye kadar uzatılmıştır (Ricker ve ark., 2014). Temel olarak parlaklıkları 4 ile 15 kadir arasında değişen F, G ve K türü ve 200 ışık yıllık bir yarıçap içinde bulunan M türü cüce yıldızlardaki gezegen geçişlerini inceleyen TESS’in, görevi boyunca etrafında gezegen olduğu düşünülen en az 200000, toplamda ise bir milyardan fazla yıldız gözlemesi planlanmaktadır (Stassun ve ark., 2018). Bu yıldızlar, *Kepler* Misyonu tarafından gözlenenlerden tipik olarak 10 kat daha yakın ve 100 kat daha parlak olup, takip gözlemleri ve gezegen belirlemeleri için

çok daha uygundurlar. TESS uydusu üç yıllık zaman zarfında gökyüzünün %75'inden fazlasını görüntülemeyi başarmış olup 166 yeni ötegezegen ve 4604 gezegen adayı bulmuştur*. TESS'in bilimsel veri işleme kodları, son derece başarılı olan *Kepler* Bilim Operasyon Merkezi kodlarına dayalı olarak geliştirilmiştir.



Şekil 3. TESS'in görüş alanı, her biri 24°x24° olan dört kameradan oluşmaktadır (panel A). TESS, ~27,4 günlük iki yörünge dönemi boyunca veri toplamakta ve ardından bir sonraki görüş alanı Güneş'in aksi yönünde olacak şekilde ~27° dönmektedir (panel B). Tüm güney yarımkürenin bir yıllık bir süre boyunca gözlenmesinin ardından TESS, kuzey yarımküre için gözlemleri tekrarlamak üzere tersine dönmüştür. Yıldızların çoğu yalnızca yaklaşık 27 gün boyunca gözlenirken kutup yönündeki kamera bir yıl boyunca sürekli olarak 450 derece karelik bir alanı gözleyebilmektedir (panel C) (Ricker ve ark., 2014).

Şekil 3'de görüldüğü gibi, TESS'in, her biri 24°x24°'lik bir görüş alanıyla görebilen, ekliptiğin 6° üstünden ekliptik kutbunun 12° ötesine kadar uzanan bir sütunda olan ve Güneş'in aksi yönünde gözlem yapan dört kamerası bulunmaktadır. Bu özelliğiyle tüm gökyüzünü, her biri 24°x96°'lik 26 farklı sektöre bölerek inceleyebilmektedir. Bu sektörlerden 13 tanesi kuzey yarımkürede 13 tanesi ise güney yarımkürededir (Oelkers ve Stassun, 2018). Uydü, Dünya ve Ay arasında dönemi 13,7 gün olan oldukça eliptik bir yörüngede bulunmaktadır. Uzay aracındaki güçlü kameralar her sektördeki yıldızları yaklaşık 27,4 gün boyunca gözlemektedir. Bununla birlikte kutup yönündeki kamera ekliptik kutba merkezlenmiştir. Bu nedenle her yarım kürede ~450°x450°'lik bir alanın bir yıl boyunca sürekli olarak gözlenmesine olanak sağlamaktadır (Jenkins, 2017).

Kameralar, her kameraya geniş (24x24 derece) bir görüş alanı sağlayan özel f/1,4 lenslerle donatılmıştır ve gezegenlerin algılanabilirliğini simüle ederek belirlenen 10 cm (yaklaşık 4 inç) çapında etkili bir diyafram boyutuna sahiptir. Ötegezegenlerin tespiti için yüksek kadans gerektiğinden gezegen arama hedeflerinin ve özellikle ilgi çeken diğer yıldızların pozları her 2 dakikada bir elde edilmektedir.

Ötegezegen çalışmaları için uygun olmasının yanı sıra, TESS ile anakolda bulunan Güneş benzeri zonklayan yıldızların, galaktik arkeoloji çalışmaları için kırmızı devler veya klasik zonklayan yıldızlar gibi evrimleşmiş yıldızların astrosismik çalışması için ise eşzamanlı olarak 30 dakikalık tam kare görüntüler de (full frame images - FFI) elde edilmektedir (Sullivan ve ark., 2015).

* <https://exoplanets.nasa.gov/tess/>

Kullanılan dedektörler, 62x62 mm alana yerleştirilmiş 4096x4096 pikseli, arkadan aydınlatmalı (Back-Illuminated: BI) CCD kameralardır. Görüntüleme alanı 2048x2048 pikselden oluşmaktadır ve kalan pikseller, saniyede 10 elektrondan daha az gürültü okumasıyla (readout noise) hızlı (yaklaşık 4 ms) okumaya izin vermek için bir frame deposu olarak kullanılmaktadır. CCD'ler, kara akımı (dark current) ihmal edilebilir bir düzeye indiren yaklaşık -75°C sıcaklıkta çalışmakta ve 2 saniyelik aralıklarla sürekli olarak okunmaktadır. Veriler, uzay aracında veri işleme birimi tarafından işlenmektedir. Veri işleme birimi, gözlemler için 2 dakikalık (target pixel files - TPFs) veya 30 dakikalık (full frame images - FFIs) kadans oluşturmak üzere 2 saniyelik görüntüleri 60'lı gruplar halinde istiflemektedir. Bu veriler sıkıştırılarak bir arabellekte saklanmakta ve uzay aracı 13,7 günde bir enberi noktasına ulaştığında Dünya'ya iletilmektedir[†].

Bu noktada verilerin hazırlanmasıyla ilgili bir dizi zorluk ortaya çıkmaktadır. Çünkü TESS her ne kadar 30 dakikalık kadans ile gökyüzünün 96°x24°'lik bölgelerinin tam kare görüntülerini toplasa da fotometrik çıkarma işlemi yapılmaz ve ürün olarak hiçbir ışık eğrisi alınmaz. Bu nedenle astrosismik çalışmaları yürütmek için TESS verileri, TESS Data for Asteroseismology (T'DA) grubu tarafından yazılan TESS Asteroseismic Science Operations Center (TASOC) bilgisayar kodu ile düzenlenmektedir. T'DA grubu, temel olarak FFI'lardan (yani 30 dakikalık kadansa sahip görüntülerden) ve TPF'lerden (yani 2 dakika kadanslı görüntülerden) fotometrik zaman serilerinin çıkarılması ile sistematik sinyallerden arındırılmış ve astrosismik analizler için hazırlanmış ışık eğrilerinin elde edilmesinden sorumludur. TASOC kodundaki ilk adım, bir FFI veya TPF'ye düşen 15 kadırlık bir TESS parlaklığına kadar olan her hedef için ışık eğrilerinin fotometrik olarak çıkarılmasıdır. Bu parlaklık sınırı, astrosismolojik olarak ilgilenilen hedeflerin tipik olarak daha parlak olması ve işlem süresini azaltmak amacıyla bu şekilde ayarlanmıştır ancak daha sönük hedefler için kolaylıkla yeniden düzenlenebilir.

TASOC fotometri kodu için temel girdi, zamanın bir fonksiyonu olarak TESS tarafından toplanan ayrı pikselleri içeren ve FITS dosyaları olan kalibre edilmiş FFI'lar ve TPF'lerdir. 2 dakikalık TPF'ler, Science Processing Operations Center (SPOC) kodu ile işlenmektedir. SPOC kodunun kalibrasyon modülü önce CCD'lerden gelen dijital sayımları akı birimlerine ($e^- s^{-1}$) dönüştürür (Clarke ve ark. 2020). Modül, 2D sabit örüntülü gürültüyü çıkarır, her bir okuma satırındaki CCD taban gürültüsünü hesaplayarak ortadan kaldırır. Doğrusalsızlığı ve kazancı düzeltir; her sütundan gelen kara akımla birlikte CCD'lerin perdesiz çalışmasından kaynaklanan dikey yayılan akıyı ölçer ve ortadan kaldırır ve düz alan düzeltmesi yapar.

SPOC kodunun fotometri modülü ise her bir hedef yıldız için, hedef yıldızın TPF'sinin her pikselindeki ortalama akıyı hesaplar (Jenkins ve ark., 2016). Daha sonra arkaplan piksellerini tanımlayarak her bir hedef yıldızın TPF'sinden bu arkaplanları çıkarır. Akı ölçümünün SNR'yi maksimize eden açıklığı belirlemek için yıldız görüntüsünü analiz ederek en uygun açıklığı belirler

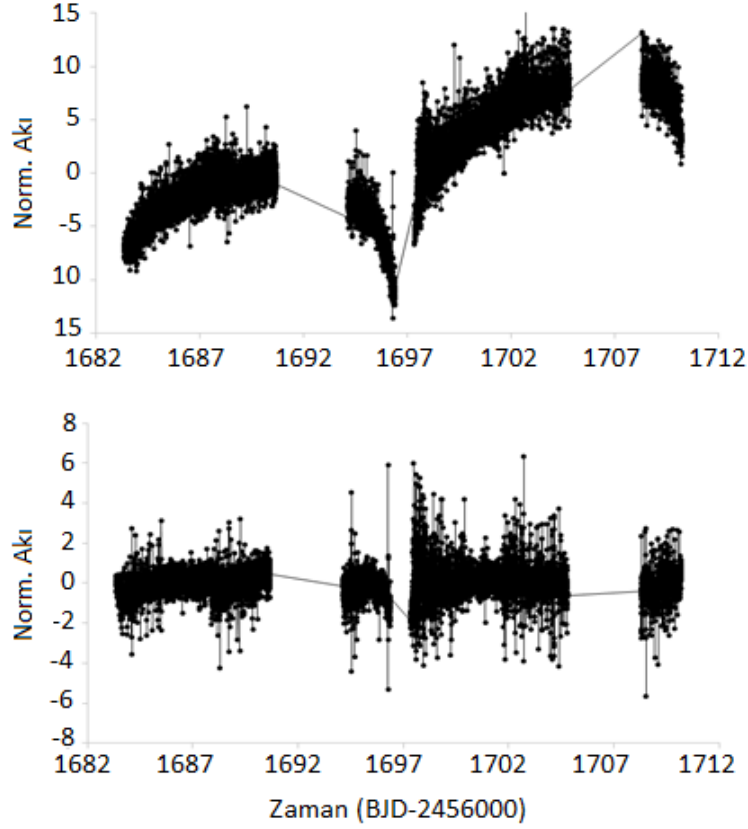
[†] <https://tess.mit.edu/science/>

(Simple Aperture Photometry – SAP; Bryson ve ark., 2020). Daha sonra, hedef yıldızın parlaklığını hesaplamak için optimal açıklıktaki pikselleri toplar (Morris ve ark. 2020). Modül ayrıca her karedeki her bir hedef yıldız için parlaklık ağırlıklı sendroidler elde eder.

Açıklık boyutu parlaklığa bağlıdır. Parlak satüre hedefler için fotometrik açıklıklar oldukça büyük olabilir (2500 piksel). Satüre olmayan yıldızlar için, ilk yıldaki tipik optimum açıklık piksel sayısı, TESS parlaklığı $T_{\text{mag}} \approx 7^{\text{m}}$ için 20 pikselden $T_{\text{mag}} \approx 10^{\text{m}}$ için 11 piksele ve $T_{\text{mag}} \approx 13^{\text{m}}$ için 6 piksele kadar değişir. 11^{m} den sönük yıldızlar için fotometrik açıklıklar, pointing titreşiminden kaynaklanan ışık eğrisi değişimlerini azaltmak amacıyla 2. yılda biraz daha büyütülmüştür. Her bir fotometrik açıklıkta meydana gelen yakın yıldızlardan kaynaklanan kirlenme, bu yıldızların TESS Identification Catalogue (TIC) parlaklıklarından, koordinatlarından (öz hareket düzeltilmesi yapılmış) ve verilen hedefin konumunda interpolasyon yapılan bir piksel yanıt fonksiyonundan hesaplanmaktadır.

SAP ışık eğrisi, TPF’de depolandığı ve tanımlandığı şekliyle, optimum açıklık içine düşen tüm kalibre edilmiş akının bir piksel toplamı zaman serisidir. 1σ hataları, toplam üzerinden TPF hatalarının standart Gauss hata yayılımından hesaplanır. Bir SAP ışık eğrisinin komşu kaynaklar tarafından etkilenebileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Kontaminasyonu belirlemek için eşzamanlı TPF’ler incelenebilir. Özel bir piksel seçimi kullanılarak TPF’den yeni bir SAP ışık eğrisi çıkarılabilir. Ayrıca, SAP fotometrisinin aletsel etkileri içerebileceği de unutulmamalıdır.

SAP verilerini bilimsel olarak kullanmaya devam etmek için, analiz sonuçlarının bunlardan etkilenip etkilenmediğine karar verilmelidir. Örneğin, Güneş benzeri salınımların, δ Scuti ve γ Doradus zonklamalarının astrosismolojisi son derece başarılı olmaktadır. Çünkü $>1 \text{ gün}^{-1}$ (g^{-1}) frekansındaki sinyaller, aletsel etkilerin çoğundan etkilenmez (Balona ve ark., 2011). Bu programlar için sorun yaratabilecek bazı yüksek frekanslı etkiler, sağlanan kalite işaretleri kullanılarak zaman serisinden filtrelenebilir. Dolayısıyla kataklizmik değişenlerin, RR Lyr yıldızları ve Sefeidler veri analizi de aynı derecede başarılı olmaktadır. Bu zonklayan yıldızlarda ilgi duyulan astrofiziksel frekansların çoğu birkaç günden daha uzun olabilir. Bu süreler bir pointing manevrasından sonra uzay aracının termal yeniden konumlanma sürelerine benzer olsa da, hedef yıldızların değişkenliğine ilişkin büyük genlikler sistematik etkilere göre daha baskındır ve sonuç olarak ihmal edilebilir (Szabo ve ark., 2011). SAP verilerinde doğrudan yararlanma olasılığı daha düşük olan birçok astrofiziksel durum vardır. Bunlar, hemen göze çarpmayan ışık eğrisi yapılarını ve birkaç günden daha uzun dönemlere dayanan değişimleri içerir ki bu durumda, tartışılan sistematiklerin önemli olması daha olasıdır. Manyetik aktivite, çift yıldızlar ve uzun dönemli değişenlerin araştırılması SAP verilerininin büyük bir dikkatle incelenmesini gerektirmektedir.

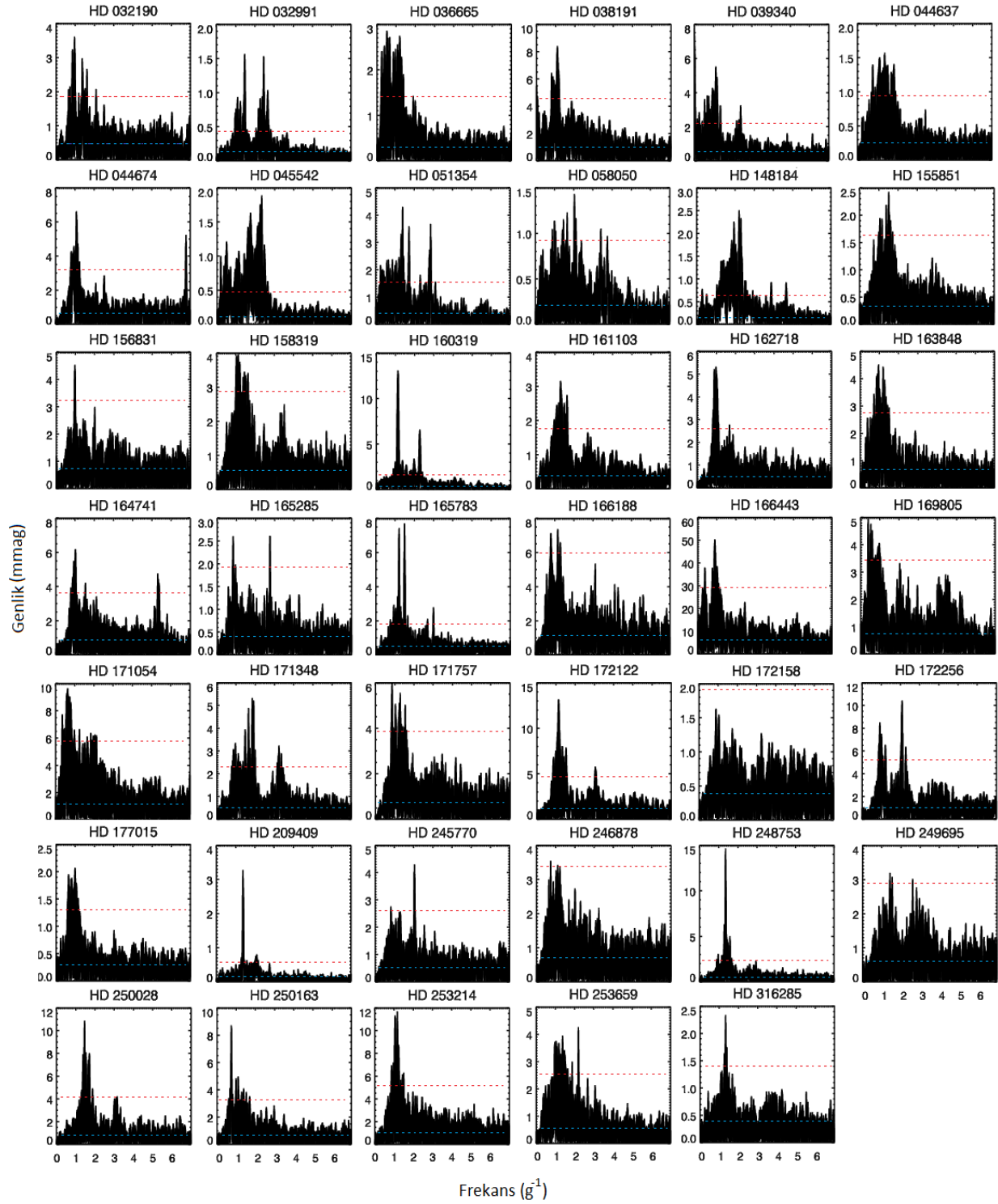


Şekil 4. Üstteki grafik TESS tarafından gözlenen bir yıldızla ilişkin SAP verilerini gösterirken alttaki grafik ise aynı yıldızla ait ve çeşitli etkilerin giderildiği PDCSAP verilerini göstermektedir.

Cisimden kaynaklanmayan değişimlere sebep olan etkileri azaltmak için Presearch Data Conditioning Simple Aperture Photometry (PDCSAP) olarak adlandırılan bir diğer yöntem kullanılmaktadır. PDC modülü, daha fazla astrofiziksel sinyali korurken sistematik etkileri daha etkili bir biçimde ortadan kaldırmak için geliştirilmiştir (Stumpe ve ark., 2014). Bu modül her bir CCD'deki yıldız alanları boyunca olan yüksek oranda ilişkili aletsel etkileri tanımlar ve düzeltir. Modülde ilk olarak, sistematik etkiler stratejik olarak seçilmiş yüzlerce hedef için en yaygın olan özelliklerin belirlenmesiyle karakterize edilir. Bu karakterizasyon, Eş Eğilim Temelli Vektörler (Cotrending Basis Vectors - CBV) olarak adlandırılan vektörlerin saklanmasıyla yapılır. Arşivlenen temel vektörler, en yaygın eğilimleri temsil etmektedir. CBV'lerin oluşturulması için gereken algoritmanın bir açıklaması Stumpe ve arkadaşlarından (2012) elde edilebilir. İkinci olarak ise SAP zaman serisinden CBV'ler çıkarılarak sistematik değişimler ortadan kaldırılır. Sonuçlar arşivlenmiş dosyalarda ve etiketli PDCSAP verilerinde saklanır. Düzeltmeler her hedef için benzersizdir. SAP ve PDC fotometrileri ile elde edilen bir ışık eğrisi arasındaki fark Şekil 4'te gösterilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Klasik Be yıldızları, hidrojenin Balmer çizgilerinde emisyon gösteren ya da en azından bir zamanlar emisyon göstermiş olan cüce ve dev B türü yıldızlardır (Porter ve Rivinius, 2003). Işık ve çizgi profil değişimlerinin gözlemleri birçok Be yıldızının dönemsel değişenler olduğunu göstermektedir.



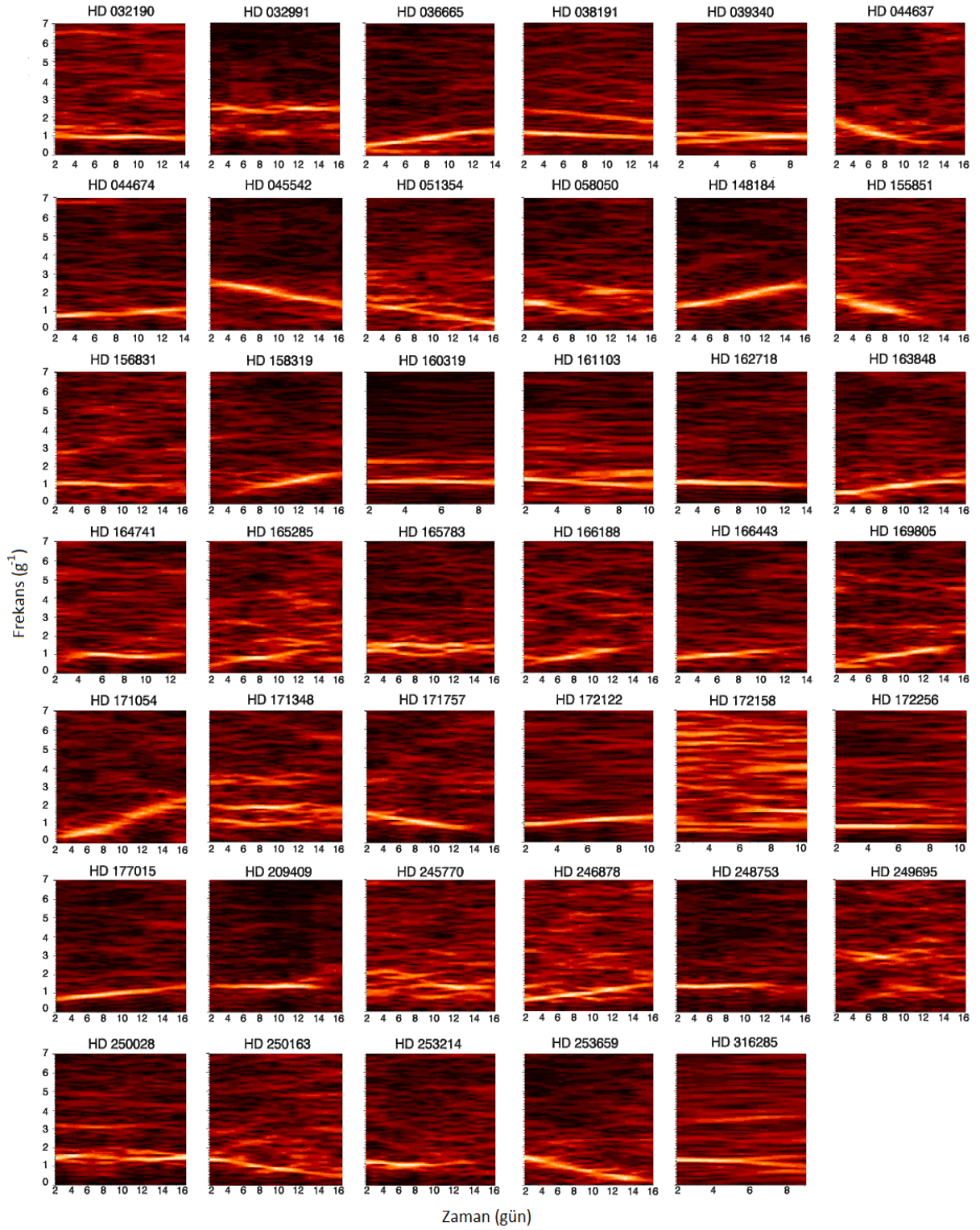
Şekil 5. STEREO-A uydusunun HI-1A kamerasıyla 2007-2011 yılları arasında elde edilen verilerin birleştirilmesi ve Fourier analizlerinin yapılması sonucu elde edilen periodogramlar. Grafiklerde gürültü seviyeleri mavi çizgi ile ve önem seviyeleri ise (SNR = 5) kırmızı çizgi ile gösterilmiştir.

Bu değişkenliğin kökeni pulsasyon ve dönmeye bağlı modülasyonlar olarak yorumlanmaktadır. Gözlenen dönem, dönme dönemine yakın olduğu için bu iki hipotez pek ayırt edilemez. Pulsasyon, kütle kaybı için makul bir tetikleyici unsur olduğundan çekici bir fikirdir. Bu yıldızların fotometrik davranışları incelendiğinde, frekans değişimlerinin geçici değişimler olduğu görülmektedir. Bu nedenle, birkaç gün boyunca gözlem yapılması durumunda, kolayca radyal olmayan pulsasyonlar olarak yorumlanabilirler. Yine de, genel ışık eğrisi yapısı, bir leke veya bulut yapısının mevcut olduğu dönen bir yıldızla tutarlıdır (Balona ve Ozuyar, 2021).

Bu bağlamda bu yıldızların fotosferindeki fiziksel süreçlerin netleştirilmesine yardımcı olabilecek 41 Be yıldızının STEREO tarafından sağlanan verileri incelenmek istenmiştir. Yıldızlar parlaklık ($V < 10^m$), koordinat (STEREO uydusunun gözleyebileceği sağ açıklık ve dik açıklık aralığında), ışık eğrilerinin düzgünlüğü ve uygun bir açıklık fotometrisinin yapıp yapılmamasına göre belirlenmiştir. Seçilen yıldızlara ilişkin veriler 2007 ve 2011 yılları arasında STEREO-A uydusunun HI-1A kamerasından elde edilmiştir. Işık eğrileri yaklaşık 20 günlük gözlemleri kapsamakta olup kadansları 40 dakikadır. Bu beş yıllık verilerin birleştirilmesiyle elde edilen periodogramlar Şekil 5'te verilmektedir.

Be türü yıldızların frekans tayflarında öne çıkan en önemli özellik, belirgin frekans grupları göstermesidir. Bu konfigürasyonlar bir yıldızdan diğerine değişmekte olup çoğunlukla iki, bazı durumlarda üç farklı grup şeklinde meydana gelmektedir. Be değişenleri, H-R diyagramında SPB ve β Cephei yıldızlarıyla aynı bölgeyi paylaşmaktadır. Bu nedenle κ -mekanizmasının Be yıldızlarında p- ve g-modlarını tetikleme beklenmektedir (Neiner ve Hubert, 2009).

Bununla birlikte, Hubert ve Floquet (1998), incelenen erken tür Be yıldızlarının çoğunun ve geç türlerin %30'unun SPB tipi salınımlara karşılık gelen 0,5 ile 3,5 g^{-1} arasında bir döneme sahip olduğunu belirtmektedir. SPB yıldızlarında, salınımların kaynağı demir benzeri elementlerin kısmi iyonlaşma bölgesinde etkili olan donukluk mekanizmasıdır ve bu mekanizma yüksek dereceli, radyal olmayan g modlu pulsasyonlara neden olmaktadır. SPB yıldızlarından farklı olarak, prograd modlar Be yıldızlarında yüksek dereceli g-modları arasında baskın olarak tetiklenir. Bu modlar gözlemci çerçevesinde $|m|f$ civarında frekanslara sahiptir; burada $|m|$ azimut derecesi ve f dönme frekansdır (Cameron ve ark., 2008). Hızlı dönen yıldızlarda ise gözlemci çerçevesindeki frekanslar ya $|m|f$ değerine yakın meydana gelir ya da diğer frekans gruplarından $|m|f$ ile ayrılırlar (Saio, 2014). Bu ayrılma kendini 2:1 şeklinde bir frekans dağılımı olarak gösterir ve genellikle temel bir frekans ve onun birinci harmoniği şeklindedir. Bu duruma örnek olarak, 48 Lib (Ozuyar ve ark., 2018), μ Cen (Rivinius ve ark., 1998), HD 202904 (Neiner ve ark., 2005) ve MOST tarafından tespit edilen HD 127756 ve HD 217543 (Cameron ve ark., 2008) yıldızları verilebilir.



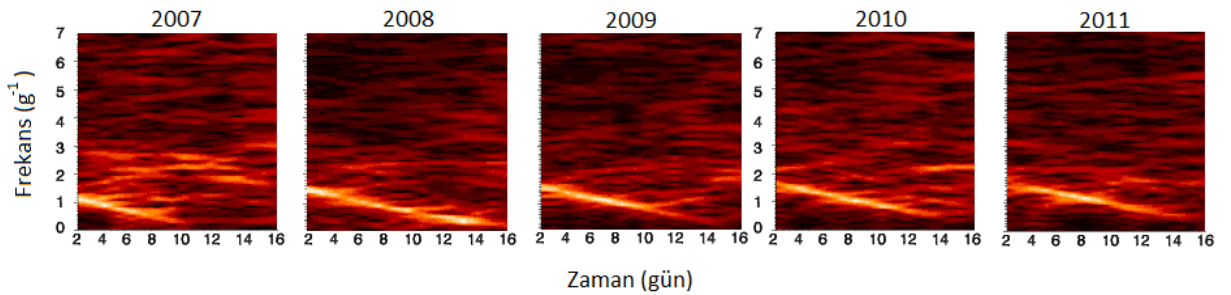
Şekil 6. 41 yıldızın 2008 yılında alınmış olan ışık eğrilerinden elde edilen frekans ve genliklerin zamana bağlı değişimleri.

STEREO uydusu aracılığı ile elde edilen 41 yıldız örneğinin frekans tayflarında bu durum incelendiğinde, yukarıda bahsi geçen frekans gruplarına benzer yapılar sahip örneklerin var olduğu görülmüştür (Şekil 5) (örn: HD 032991, HD 160319, HD 162718 ve HD 250028). Bununla birlikte,

her ne kadar Be yıldızlarına has tipik frekans dağılımları gösteren yıldızlar olsa da, Şekil 5'ten de görüleceği gibi, 41 yıldızdan yaklaşık 20 tanesinin frekans tayfı ne belirgin bir frekansa ne de orantılı bir frekans dağılımına sahiptir (örn: HD 036665, HD 044637, HD 158319, HD 171054 ve HD 253659). Bu yıldızların periodogramları genel olarak bir frekans yığını şeklinde kendini göstermektedir.

İncelenen yıldızlardan bazılarında gözlenen olgunun bu yıldızlarda bünyesel olarak meydana gelen bir durum mu yoksa herhangi farklı bir etkiden dolayı mı ortaya çıktığını anlayabilmek adına, elde edilen frekansların zamana bağlı olarak nasıl değiştiği araştırılmıştır. Bunun için beş yıl boyunca alınan yıllık verilere kayan pencere yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem, belirli bir pencere aralığının seçilmesi, bu aralıkta kalan veri noktalarına istatistiksel yöntemlerin uygulanması ve pencerenin veri seti üzerinde belirli bir miktar kaydırılarak işlemlerin tekrarlanması esasına dayanmaktadır. Buna göre, pencerenin uzunluğu beş gün olarak ayarlanmış olup pencere bir günlük bir zaman adımı ile yıllık ışık eğrileri boyunca kaydırılmıştır. Her kaydırma işleminden sonra ise verilere Lomb-Scargle tekniği uygulanarak bir Fourier analizi yapılmış ve elde edilen frekans değerleri zamanın bir fonksiyonu olarak grafiğe aktarılmıştır. Bu analiz sonucunda her bir yıldız için beşer yıllık frekans değişim grafikleri elde edilmiş olup yerden tasarruf etmek amacıyla yalnızca 2008 yılına ait frekans-zaman grafikleri Şekil 6'da verilmiştir.

Buna göre şekilden, incelenen 41 yıldızdan HD 032190, HD 032991, HD 044674, HD 160319 ve HD 162718 gibi bazı örneklerin $|m/f|$ civarında bir temel frekansa veya bu frekans ile birlikte bir harmoniğe sahip olduğu görülmektedir. Bu frekanslar gözlem süresi boyunca değişim göstermemekte ve çoğunlukla genliklerini korumaktadır. Öte yandan HD 036665, HD 038191, HD 045542, HD 148184, HD 171054 ve HD 253659 gibi örnekler ise her ne kadar belirgin bir frekans dağılımı gösterse de sahip oldukları frekanslar zamana bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Bu türden değişimler, tek bir gözlem sezonu için düşünüldüğünde, Be yıldızlarının yüzeyinde bulunan bir leke bölgesinin veya kütle kaybı sonucu atmosferinde oluşan bulut yapısının göçü (Balona ve Ozuyar, 2021) şeklinde veya radyal olmayan pulsasyon yapısında meydana gelen bir değişim olarak yorumlanabilir. Bu durumun daha net anlaşılabilmesi için beş yıllık verilerin tamamını değerlendirmek gerekmektedir.



Şekil 7. HD 253659 yıldızının beş yıllık frekans değişim grafiği.

Bu bağlamda Şekil 7’de HD 253659 yıldızının beş yıllık frekans değişim grafiği verilmiştir. Şekilden, frekansın, her bir yıl için 16 günlük gözlem süresi boyunca yaklaşık iki kat azalarak tüm yıllar için çarpıcı şekilde değişiklikler gösterdiği fark edilmektedir. Frekansta artış veya azalış olarak kendini gösteren bu durum, 41 Be yıldızının neredeyse yarısında görülmektedir. Eğer bu yıllık değişim rastgele meydana geliyor olsa, incelenen yıldızlarda ciddi bir leke göçü olduğuna işaret ediyor olacaktır. Ancak her yıl benzer bir eğime sahip diyagonal değişim göstermeleri, değişimin yıldızlardan değil de aletsel bir etki veya fotometrik indirgeme işlemleriyle bağlantılı olabileceği şüphesini uyandırmaktadır.

Bu durumun açıklığa kavuşturulması, incelenen yıldızlara ilişkin verilerin ya STEREO uydu veri tabanından yeniden alınarak incelenmesi ya da farklı bir uydunun verilerinin analiz edilmesiyle yapılabilir. Ancak 31 Temmuz 2019’dan sonra STEREO verilerine FTP erişimi sağlanamamaktadır. Dolayısıyla farklı bir uydunun verileri kullanılarak analizlerin tekrarlanması yoluna gidilmesi gerekmektedir. Bu seçenek ile STEREO verilerinde aletsel veya indirgemenen kaynaklanan bir etki varsa doğrudan anlaşılabilir.

Bu amaçla, TESS uzay teleskobundan yararlanılmış, 41 yıldızın hangilerininin TESS tarafından gözlemlendiğine bakılmış ve sadece 3 tanesinin (HD 044637, HD 155851 ve HD 253659) iki uydunun ortak gözlem alanına girdiği tespit edilmiştir. Bu üç örnek için bahsi geçen analizler tekrarlanmıştır. Bu yıldızlara ilişkin TESS ve STEREO verilerinden elde edilen frekans değerleri Tablo 1’de verilmiştir.

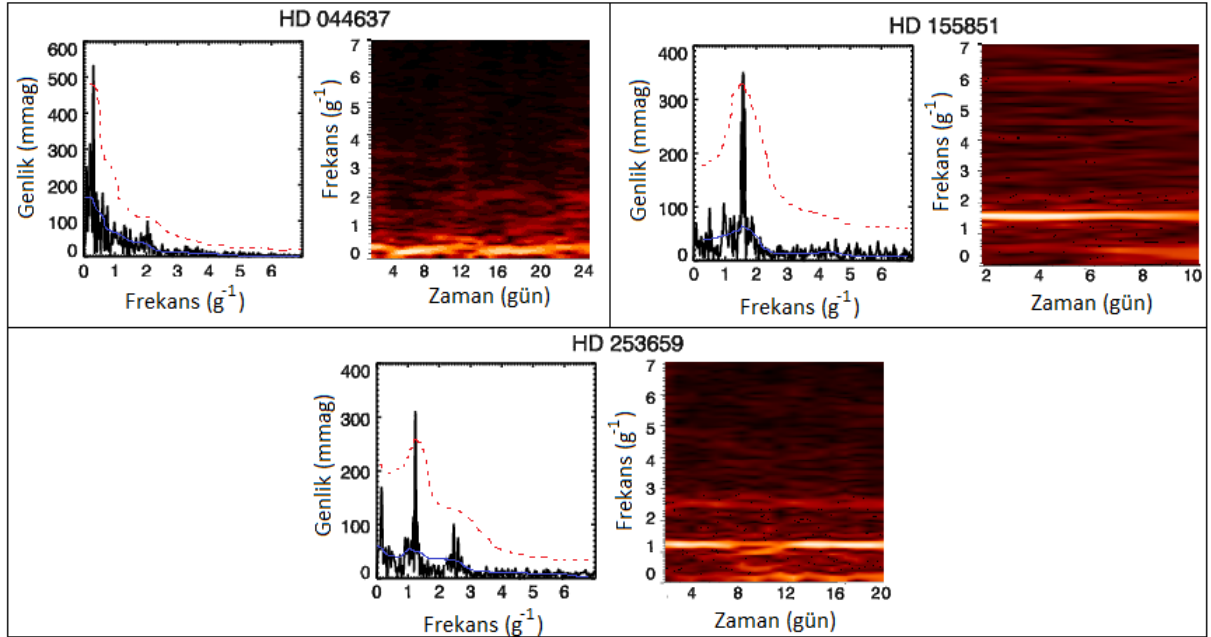
Tablo 1. Üç yıldızla ilişkin TESS ve STEREO verilerinden elde edilen frekanslar ve hataları. SNR değeri 5’ten büyük olan frekanslar dikkate alınmıştır.

HD	TESS $f(g^{-1})$	STEREO $f(g^{-1})$	HD	TESS $f(g^{-1})$	STEREO $f(g^{-1})$	HD	TESS $f(g^{-1})$	STEREO $f(g^{-1})$
044637	0,3076(1)	1,4204(4)	155851	1,5740(2)	1,5152(5)	253659	1,2355(2)	2,2011(4)
		1,1594(3)			1,3895(5)			1,3712(5)
		1,0927(4)			1,0528(7)			0,9647(5)
		1,9077(4)			1,7126(7)			1,0436(4)
		0,7992(4)			1,6116(6)			1,4931(5)
		1,8699(4)			1,1668(6)			1,1883(5)
		1,5768(4)			1,5549(6)			1,5396(5)
		1,3011(3)			0,9869(7)			1,2844(6)
		1,3769(4)			1,6825(8)			1,1188(6)
		1,7627(4)			1,3186(8)			1,8751(6)
		1,3164(5)			1,0768(8)			
		1,0683(4)						
		1,0378(5)						

TESS, bugüne kadar gökyüzünde 49 farklı sektör gözlemiş olsa da üç yıldızla ilişkin veriler yalnızca birer sektörden (HD 044637 için 33. sektör, HD 155851 için 12. Sektör ve HD 253659 için ise 6. sektör) elde edilmiş olup bu çalışmada yalnızca PDC ışık eğrileri kullanılmıştır. Her bir sektörden elde edilen veriler yaklaşık 27 günlük gözlem aralıklarını kapsamaktadır ve her 2 dakikada bir alınan

fotometrik noktalardan oluşmaktadır. Yani, 27 günlük bir veri setinde yaklaşık 20000 veri noktası bulunmaktadır. Bu türden bir gözlem seti, günde yaklaşık $0,036 \text{ g}^{-1}$ çevrimlik frekans çözünürlüğünde ve örnekleme (Nyquist) frekansı yaklaşık 360 g^{-1} olan geniş bir frekans aralığında analiz yapmak için bir fırsat vermektedir. Ancak STEREO verilerinde olduğu gibi TESS verilerinde de nispeten düşük frekanslardaki değişimler inceleneceği için yalnızca $0-7 \text{ g}^{-1}$ aralığında bulunan ve SNR değeri 5'ten (Baran ve Koen, 2021) büyük olan frekanslar dikkate alınmıştır.

Tablo 1'den görüleceği gibi, iki uydunun verilerinden elde edilen frekanslar oldukça farklıdır. STEREO verileri genellikle çok sayıda frekanstan oluşmakta olup bu frekanslar, her yıldız için belirli bir aralıkta toplanma eğilimi göstermektedir. Bununla birlikte temel frekanslar karşılaştırıldığında, yine bir tutarsızlık olduğu görülmektedir. Her ne kadar HD 155851 ve HD 253659 yıldızlarının frekans analizine yönelik bir literatür çalışması olmasa da, HD 044637 yıldızı için Labadie-Bartz ve ark. (2017) tarafından $0,3162 \text{ g}^{-1}$ değeri verilmiştir. Bu değer TESS verilerinden elde edilen değere oldukça yakındır. Daha net bir karşılaştırma yapmak adına TESS verilerinin frekans-genlik ve frekans-zaman grafikleri Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 8'den görüleceği gibi yıldızların periodogramlarındaki frekansları STEREO verilerinde olduğu gibi ne yığın şeklinde ne de belirli bir frekans aralığında oluşmaktadır. Temel frekanslar oldukça belirgin ve şiddetlidir. HD 044637 ve HD 155851 yıldızları yalnızca temel bir frekans gösterirken, HD 253659 yıldızında ise temel bir frekans ve onun harmonikleri (f_1 , $f_1/8$, $2f_1$) açık bir şekilde görülmektedir. Bununla birlikte frekans-zaman grafiklerinde, frekanslar zamana bağlı olarak artış veya azalış göstermemekte ve beklendiği üzere değişmeden kalmaktadır.



Şekil 8. HD 044637, HD 155851 ve HD 253659 yıldızlarının TESS verilerine ilişkin frekans-genlik ve frekans-zaman grafikleri. Grafiklerde gürültü seviyeleri mavi çizgi ile ve önem seviyeleri ise (SNR = 5) kırmızı çizgi ile gösterilmiştir.

3. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada, 41 tane Be yıldızının 2007-2011 yılları arasında STEREO uydusundan alınan beş yıllık verilerine frekans analizleri yapılmış ve elde edilen frekansların zamana bağlı değişimleri incelenmiştir. İnceleme sonucunda bu yıldızlardan büyük bir kısmının frekanslarında zamana bağlı olarak önemli ölçüde değişim meydana geldiği ve beş yıllık bir gözlem verisi dikkate alındığında değişimin rastgele olmadığı görülmüştür. Bu durum, Be yıldızlarının yüzeyinde bulunan bir leke bölgesinin veya madde atımına bağlı olarak atmosferinde oluşan bir bulut yapısının göçü ile veya radyal olmayan pulsasyon yapısında meydana gelen bir değişim ile açıklanamamaktadır. Bu nedenle, STEREO verilerinin doğruluğunu test etmek adına, 41 örnek yıldızdan TESS uydusunun gözlem alanına düşen 3 yıldızın TESS verileri incelenmiştir. Sonuç olarak, bu yıldızların frekanslarında zaman bağlı herhangi bir değişim olmadığı görülmüştür. Dolayısıyla, değişimin STEREO uydusundaki aletsel bir etki veya fotometrik indirgeme süreçleriyle bağlantılı olabileceği düşünülmüştür.

STEREO'nun HI kameralarından alınan verileri kullanan yayınlanmış çok sayıda astronomik çalışma bulunmaktadır. Bunlara örnek olarak, ötegezegenler (Sangaralingam ve Stevens, 2011; Wraight ve ark., 2011; Whittaker ve ark., 2013), örten çift yıldızlar (Wraight ve ark., 2012c; Chaturvedi ve ark., 2014; Belcheva ve ark., 2015), kataklizmik değişenler (Holdsworth ve ark., 2014) ve daha uzun zaman ölçeklerindeki bünyesel değişimlerle (örneğin: Wraight ve ark., 2012a, 2012b; Paunzen ve ark., 2013) ilgili çalışmalar verilebilir. Hatta Valtonen ve ark. (2011), kara delik fiziği araştırmasında HI verilerinin kullanılması olasılığını bile tartışmıştır.

Ancak, genel olarak STEREO verileri, kullanılan rutinlerden kaynaklı veya görüntülerin temel koşullarında meydana gelen sistematik değişiklikler nedeniyle belirli bir bölgedeki tüm yıldızlar için ortak olan eğilimlerin yanı sıra temel araç tasarımının sonucu olan sistematik eğilimler de sergilemektedir. Bunlardan en yaygın olanlarından biri, görüntüde geçici bir Güneş rüzgârı olayının veya bir CME'nin varlığından dolayı akının medyan yoğunluğunun artması veya azalmasıdır. Diğer bir eğilim ise CCD'nin sonunda PSF'nin değişiminden kaynaklanan ve çerçevenin sonuna doğru görüntü karesinde meydana gelen akı kaybıdır. Böyle bir ışık kaybı kendini ışık eğrisinin hem başlangıcında hem de sonunda gösterebilmektedir.

Yaygın olarak görülen başka bir eğilim, tüm ışık eğrileri için ışık eğrisi boyunca sistematik olarak kendini gösteren bir değişimdir. CCD'nin yanıt fonksiyonu ile aynı olan dördüncü dereceden bir polinom fiti ile bu eğilim ortadan kaldırılabilir. Bu nedenle, bu etkinin yanıt fonksiyonunun bir belirtisi olduğunu düşünülmektedir (Bewsher ve ark., 2010). Birçok ışık eğrisinde görülen diğer bir özellik, parlamalara benzer şekilde ani akı artışlarıdır. Birkaç karede görülen bu keskin ve ani akı artışı, cismin çoğunlukla ya bir Güneş flamenti, ya gezegen gibi parlak bir cisim ya da daha parlak bir yıldız ile çakışmasından kaynaklanmaktadır. Bunlar yapı itibarıyla son derece geçici değişimlerdir.

Tüm bu eğilimler, sistematik olmakla birlikte, büyük ölçüde zamana bağlıdır. Bununla birlikte, gözlem zamanından bağımsız olan ancak bunun yerine cismin parlaklığı ile ilgili olan eğilimler de vardır. Bunlar, yıldızın parlaklığına karşı akının göreceli dağılımını içermektedir. İdeal bir durumda, yukarıda

bahsedilen tüm sistematik gürültü ortadan kaldırıldığında, incelenen cismin parlaklığına karşılık gelen foton çekim gürültüsünden kaynaklı sınırlı akı değerleri elde edilmektedir. Uzay tabanlı bir görevin avantajlarından biri olarak tüm sistematik kolayca tanımlanabilir ve dolayısıyla bu sınıra yer tabanlı bir gözlemden çok daha kolay ulaşılabilir. Ancak STEREO uydusunun temel amacı yıldız değişkenliğini araştırmak değil Güneş olaylarını incelemek olduğundan gözlemler daha yüksek akı değerleriyle sınırlandırılmaktadır. Bu sınırlayıcı faktörler arasında parlak Güneş koronası ve gezegenlerin varlığı, büyük görüntü pikselleri, Galaktik düzlem geçişi sayılabilir (Tappin ve ark., 2015, 2017).

Bahsedilen etkilere bağlı olarak ışık eğrilerinde birçok sistematik değişim olduğu görülmektedir. Verilerde görülen dönemlilikleri analiz etmek için bu etkileri ortadan kaldırmak veya azaltmak adına denenen ve sonunda kullanılan bazı yöntemler bulunmaktadır. Bu tür analizler için kullanılan köklü yöntemlerden bazıları, medyan yumuşatma ve hareketli kutu ortalama yumuşatma gibi filtreleme yöntemleri, polinom fiti ve Trend- Filtreleme Algoritması (TFA: Kovacs ve ark., 2005) ve Dae Kim-won'un algoritması (Kim ve ark., 2009) gibi çeşitli özel algoritmalarıdır. Bunlar birçok fotometrik analizin temelini oluştursa da, uydunun kendine has gözlemsel özellikleri ve verilerdeki farklı arkaplan sorunları nedeniyle özellikle uydudan alınan ışık eğrilerine uyarlanmaları gerekmektedir. Verilerde uğraşılması gereken temel konulardan biri kalabalık alandır. Daha önce bahsi geçen karışıklık kıstaslarının uygulanmasından sonra bile, iki cismin uydu tarafından dönüşümlü olarak takip edildiği ve bunun da ışık eğrilerindeki saçılmayı arttırdığı hatta ışık eğrilerinin karakterini bozduğu durumlarla karşılaşmaktadır. Genellikle bu karışıklık, benzer parlaklığa sahip ve birbirine yakın iki veya daha fazla cismin görüş alanında olmasından dolayı ortaya çıkmaktadır. Her ne kadar kıstaslar bu tür cisim çiftleri için uygulansa da yine de bu cisimler bazen takip edilebilmektedir.

TESS'in veri indirgeme prosedürü bir önceki uzay görevi olan *Kepler* verilerinin indirgeme prosedüründen uyarlanmıştır. Dolayısıyla, verilerdeki bozucu etkilerin giderilmesi için kullanılan kodların ne kadar etkili bir şekilde kullanılabileceği ve bozucu etkileri nasıl ortadan kaldırılacağı bilinmektedir. STEREO verilerinde bahsi geçen etkinin ise ne yazık ki tam olarak uydunun kendinden mi yoksa indirgeme prosedürlerinden mi kaynaklandığı bilinmemektedir ve bunun tespiti, STEREO verilerine yeniden erişim sağlanmadan mümkün olamayacaktır. Verilerin tekrar kullanıma açılması durumunda ise eğer yıldız astrofiziği ile ilgili çalışmalar yürütülecekse daha dikkatli ve titiz bir ön çalışmanın yapılması gerektiği aşikârdır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makalede herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederim.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Makaleye %100 katkı sağladığımı beyan ederim.

Kaynakça

- Aerts C., Christensen-Dalsgaard J., Kurtz DW. *Asteroseismology*, Springer, Berlin. 2010; 256-257.
- Antoci V., Cunha MS., Bowman DM., Murphy SJ. The first view of Delta Scuti and Gamma Doradus stars with the TESS mission. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2019; 490: 4040. doi: 10.1093/mnras/stz2787.
- Baglin A., Vauclair G. The space stellar photometry mission COROT: Asteroseismology and search for extrasolar planets. *Journal of Astrophysics and Astronomy* 2000; 21: 319. doi: 10.1007/BF02702417.
- Bakos GA., Lazar J., Papp I., Sari P., Green EM. System description and first light curves of the hungarian automated telescope, an autonomous observatory for variability search. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 2002; 114: 974–987. doi: 10.1086/342382.
- Balona LA., Ozuyar D. TESS observations of Be stars: General characteristics and the impulsive magnetic rotator model. *The Astrophysical Journal* 2021; 921: 5B. doi: 10.3847/1538-4357/ac1a77.
- Balona LA., Ozuyar D. Pulsation among TESS A and B stars and the Maia variables. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2020; 493: 5871. doi: 10.1093/mnras/staa670.
- Balona LA., Guzik JA., Uytterhoeven K., Smith JC., Tenenbaum P., Twicken JD. The Kepler view of Gamma Doradus stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2011; 415: 3531–3538. doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.18973.x.
- Baran, AS., Koen CA. Detection threshold in the amplitude spectra calculated from TESS time-series data. *Acta Astronomica* 2021; 71: 113–121. doi:10.32023/0001-5237/71.2.3.
- Basri G., Walkowicz LM., Batalha N., Gilliland RL. Photometric variability in Kepler target stars: The Sun among stars - A first look. *The Astrophysical Journal* 2010; 713: L155–L159. doi: 10.1088/2041-8205/713/2/L155.
- Batalha NM., Borucki WL., Bryson ST., Buchhave LA. Kepler's first rocky planet: Kepler-10b. *The Astrophysical Journal* 2011; 729: 27. doi: 10.1088/0004-637X/729/1/27.
- Belcheva M., Markov H., Tsvetanov Z., Iliev I., Stateva I. Physical parameters of eclipsing binary components, discovered by STEREO. *Bulgarian Astronomical Journal* 2015; 22: 28.
- Bewsher D., Brown DS., Eyles CJ. Long-term evolution of the photometric calibration of the STEREO heliospheric imagers: I. HI-1. *Solar Physics* 2012; 276: 491–499. doi: 10.1007/s11207-011-9874-7.
- Bewsher D., Brown DS., Eyles CJ., Kellett BJ., White GJ., Swinyard B. Determination of the photometric calibration and large-scale flat field of the STEREO heliospheric imagers: I. HI-1. *Solar Physics* 2010; 264: 433–460. doi: 10.1007/s11207-010-9582-8.
- Blomme J., Debosscher J., De Ridder J., Aerts C. Automated classification of variable stars in the asteroseismology program of the Kepler space mission. *The Astrophysical Journal* 2010; 713: L204–L207. doi: 10.1088/2041-8205/713/2/L204.

- Borucki WJ., Koch D., Basri G., Batalha N. Kepler planet-detection mission: Introduction and first results. *Science* 2010; 327: 977. doi: 10.1126/science.1185402.
- Breger M., Stich J., Garrido R., Martin B. Nonradial pulsation of the Delta Scuti star BU CANCRI in the Praesepe cluster. *Astronomy and Astrophysics* 1993; 271: 482–486.
- Brown DS., Bewsher D., Eyles CJ. Calibrating the pointing and optical parameters of the STEREO heliospheric imagers. *Solar Physics* 2009; 254: 185–225. doi: 10.1007/s11207-008-9277-6.
- Bryson ST., Jenkins JM., Klaus TC., Cote MT. Kepler data processing handbook: Target and aperture definitions: Selecting pixels for Kepler downlink. Kepler Science Document KSCI-19081-003, id. 3. 2020. Editörler: Jon M. Jenkins.
- Cameron C., Saio H., Kuschnig R., Walker GAH. MOST detects SPBe pulsations in HD 127756 and HD 217543: Asteroseismic rotation rates independent of vsini. *The Astrophysical Journal* 2008; 685: 489–507. doi: 10.1086/590369.
- Chaturvedi P., Deshpande R., Dixit V., Roy A. Determination of mass and orbital parameters of a low-mass star HD 213597B. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2014; 442: 3737–3744. doi: 10.1093/mnras/stu1127.
- Clarke BD., Caldwell DA., Quintana EV., Chandrasekaran H. Kepler data processing handbook: Pixel level calibrations. Kepler Science Document KSCI-19081-003, id. 5. 2020. Editörler: Jon M. Jenkins.
- Eyles CJ., Harrison RA., Davis CJ., Waltham NR. The heliospheric imagers onboard the STEREO mission. *Solar Physics* 2009; 254: 387–445. doi: 10.1007/s11207-008-9299-0.
- Holdsworth DL., Rushton MT., Bewsher D., Walter FM. STEREO/HI and optical observations of the classical nova V5583 Sagittarii. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2014; 438: 3483–3489. doi: 10.1093/mnras/stt2455.
- Holdsworth DL., Cunha MS., Kurtz DW., Antoci V. TESS cycle 1 observations of roAp stars with 2-min cadence data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2021; 506: 1073. doi: 10.1093/mnras/stab1578.
- Howell SB., Sobeck C., Haas M., Still M. The K2 Mission: Characterization and early results. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 2014; 126: 398. doi: 10.1086/676406.
- Hubert AM., Floquet M. Investigation of the variability of bright Be stars using HIPPARCOS photometry. *Astronomy and Astrophysics* 1998; 335: 565–572.
- Jenkins JM., Twicken JD., McCauliff S., Campbell J. The TESS science processing operations center. Software and Cyber infrastructure for Astronomy IV 9913. 2016. doi: 10.1117/12.2233418.
- Jenkins JM. Kepler data processing handbook: Overview of the science operations center. Kepler Science Document KSCI-19081-002, 2017. id. 2, Editör: Jon M. Jenkins.
- Kahraman Aliçavuş F., Poretti E., Catanzaro G., Smalley B. Spectroscopy of hot Gamma Doradus and A-F hybrid Kepler candidates close to the hot border of the Delta Scuti instability strip. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2020; 493: 4518. doi: 10.1093/mnras/staa399.

- Kim DW., Protopapas P., Alcock C., Byun YI., Bianco FB. Detrending time series for astronomical variability surveys. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2009; 397: 558–568. doi: 10.1111/j.1365-2966.2009.14967.x.
- Kovacs G., Bakos G., Noyes RW. A trend filtering algorithm for wide-field variability surveys. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2005; 356: 557–567. doi: 10.1111/j.1365-2966.2004.08479.x.
- Labadie-Bartz J., Pepper J., McSwain MV., Bjorkman JE. Photometric variability of the Be star population. *The Astronomical Journal* 2017; 153: 252. doi: 10.3847/1538-3881/aa6396.
- Matthews JM., Kuschnig R., Walker GAH., Pazder J. Johnson, R. Ultra precise photometry from space: The MOST microsat mission. *IAU Colloq. 176: The Impact of Large-Scale Surveys on Pulsating Star Research* 2000; 203: 74–75.
- Michel E., Auvergne M., Baglin A., Catala C. Stellar variability from space with COROT: pulsation and binarity. *Tidal Evolution and Oscillations in Binary Stars* 2005; 333: 264.
- Miglio A., Chiappini C., Morel T., Barbieri WJ. Galactic archaeology: mapping and dating stellar populations with asteroseismology of red-giant stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2013; 429: 423–428. doi: 10.1093/mnras/sts345.
- Morris RL., Twicken JD., Smith JC., Clarke BD. Kepler data processing handbook: Photometric analysis. Kepler Science Document KSCI-19081-003, id. 6. 2020. Editörler: Jon M. Jenkins.
- Neiner C., Hubert AM. The pulsations of Be stars. *Communications in Asteroseismology* 2009; 158: 194.
- Neiner C., Floquet M., Hubert AM., Frémat Y. Rotation, pulsations and outbursts in the Be star HD 202904. *Astronomy and Astrophysics* 2005; 437: 257–272. doi: 10.1051/0004-6361:20041901.
- Oelkers RJ., Stassun KG. Precision light curves from TESS full-frame images: A different imaging approach. *The Astronomical Journal* 2018; 156: 132. doi: 10.3847/1538-3881/aad68e.
- Ozuyar D., Caliskan S., Stevens IR., Elmasli A. Photometric and spectroscopic variability of the Be star 48 Lib: The relation between photometric variations and rotation. *Publications of the Astronomical Society of Australia* 2018; 35: 34. doi: 10.1017/pasa.2018.38.
- Paunzen E., Wraight KT., Fossati L., Netopil M., White GJ., Bewsher D. A photometric study of chemically peculiar stars with the STEREO satellites - II. Non-magnetic chemically peculiar stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2013; 429: 119–125. doi: 10.1093/mnras/sts318.
- Pojmanski G. The all sky automated survey. Catalog of about 3800 variable stars. *Acta Astronomica* 2000; 50: 177–190.
- Pollacco D., Skillen I., Cameron A., Christian JI. The WASP project and SuperWASP camera. *Astrophysics and Space Science* 2006; 304: 253–255. doi: 10.1007/s10509-006-9124-x.
- Porter JM., Rivinius T. Classical Be stars. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 2003; 115: 1153–1170. doi: 10.1086/378307.

- Pribulla T., Rucinski SM., Latham DW., Quinn SN. Eclipsing binaries in the MOST satellite fields. *Astronomische Nachrichten* 2010; 331: 397. doi: 10.1002/asna.201011351.
- Ricker GR., Winn JN., Vanderspek R., Latham DW. Transiting exoplanet survey satellite (TESS). *Space Telescopes and Instrumentation 2014: Optical, Infrared, and Millimeter Wave 2014*; 9143. doi: 10.1117/12.2063489.
- Rivinius T., Baade D., Stefl S., Stahl O., Wolf B., Kaufer A. Stellar and circumstellar activity of the Be star MU Centauri. II. Multiperiodic low-order line-profile variability. *Astronomy and Astrophysics* 1998; 336: 177–190.
- Saio H. A- and B-type star pulsations in the Kepler and CoRoT era: Theoretical considerations. *Putting A stars into context: Evolution, environment, and related stars 2014*; 305–313.
- Sangaralingam V., Stevens IR. STEREO transiting exoplanet and stellar survey (STRESS) - I. introduction and data pipeline. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2011; 418: 1325–1334. doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.19581.x.
- Sockett DG., Howard RA., Korendyke CM., Simnett G. M., Webb D.F. NASA solar terrestrial relations observatory (STEREO) mission heliospheric imager. *Instrumentation for UV/EUV Astronomy and Solar Missions 2000*; 4139: 284–293. doi: 10.1117/12.410528.
- Spreckley SA., Stevens IR. The period and amplitude changes of Polaris alpha UMi from 2003 to 2007 measured with SMEI. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2008; 388: 1239–1244. doi: 10.1111/j.1365-2966.2008.13439.x.
- Stassun KG., Oelkers RJ., Pepper J., Paegert M. The TESS input catalog and candidate target list. *The Astronomical Journal* 2018; 156: 102. doi: 10.3847/1538-3881/aad050.
- Stumpe MC., Smith JC., Van Cleve JE., Twicken JD. Kepler presearch data conditioning I- architecture and algorithms for error correction in Kepler light curves. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 2012; 124: 985. doi: 10.1086/667698.
- Stumpe MC., Smith JC., Catanzarite JH., Van Cleve JE. Multiscale systematic error correction via wavelet-based band splitting in Kepler data. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 2014; 126: 100. doi: 10.1086/674989.
- Sullivan PW., Winn JN., Berta-Thompson ZK., Charbonneau D. The transiting exoplanet survey satellite: Simulations of planet detections and astrophysical false positives. *The Astrophysical Journal* 2015; 809: 77. doi: 10.1088/0004-637X/809/1/77.
- Szabo R., Szabados L., Ngeow CC., Smolec R. Cepheid investigations using the Kepler space telescope. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2011; 413: 2709–2720. doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.18342.x.
- Tappin SJ., Eyles CJ., Davies JA. Determination of the photometric calibration and large-scale flat field of the STEREO heliospheric imagers: II. HI-2. *Solar Physics* 2015; 290: 2143–2170. doi: 10.1007/s11207-015-0737-5.

- Tappin SJ., Eyles CJ., Davies JA. On the long-term evolution of the sensitivity of the STEREO HI-1 cameras. *Solar Physics* 2017; 292: 28. doi: 10.1007/s11207-017-1052-0.
- Valtonen MJ., Mikkola S., Lehto HJ., Gopakumar A., Hudec R., Polednikova J. Testing the black hole no-hair theorem with OJ287. *The Astrophysical Journal* 2011; 742: 22. doi: 10.1088/0004-637X/742/1/22.
- Whittaker GN., Stevens IR., Sangaralingam V. STEREO trend removal pipeline and planet detection possibilities. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2013; 431: 3456–3469. doi: 10.1093/mnras/stt425.
- Wraight KT., Fossati L., Netopil M., Paunzen E. A photometric study of chemically peculiar stars with the STEREO satellites - I. Magnetic chemically peculiar stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2012a; 420: 757–772. doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.20090.x.
- Wraight KT., Bewsher D., White GJ., Nowotny W., Norton AJ., Paladini C. STEREO observations of long period variables. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2012b; 426: 816–832. doi: 10.1111/j.1365-2966.2012.21445.x.
- Wraight KT., Fossati L., White GJ., Norton AJ., Bewsher D. Bright low mass eclipsing binary candidates observed by STEREO. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2012c; 427: 2298–2307. doi: 10.1111/j.1365-2966.2012.22102.x.
- Wraight KT., White GJ., Bewsher D., Norton AJ. STEREO observations of stars and the search for exoplanets. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2011; 416: 2477–2493. doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.18599.x.
- Zacharias N., Monet DG., Levine SE., Urban SE., Gaume R., Wycoff GL. The Naval Observatory Merged Astrometric Dataset (NOMAD). *American Astronomical Society Meeting Abstracts*. 2004.