

Yıldızların Bünyesel Parlaklık Değişimlerinin Örtme Olayı Üzerindeki Etkisi: WASP-19 ve WASP-33 Sistemleri Üzerine Bir Analiz

Rahmi Can YÜKSEL*¹, Orkun ÖZDARCAN²

^{1,2} Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 35100, İzmir, Türkiye

(Alınış / Received: 17.12.2024, Kabul / Accepted: 14.03.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.04.2025)

Anahtar Kelimeler

Ötegezegenler,
Yıldızlar: aktivite,
Yıldızlar: salınım,
Teknikler: fotometrik,
Metotlar: veri analizi,
Astronomik veri tabanları:
TESS

Öz: Bu çalışma, WASP-19 ve WASP-33 sistemlerinin TESS ışık eğrilerinin bir analizini içermektedir. WASP-19 sistemindeki barınak yıldız Güneş benzeri aktivite gösterirken, WASP-33 sistemindeki barınak yıldız zonklama yapmaktadır. Her iki sistemde de transit geçiş yapan birer ötegezegen bulunur. Bu araştırma kapsamında, barınak yıldızları bünyesel parlaklık değişimi gösteren ötegezegenlerin transit ışık eğrisi analizinde ne tür etkilerle karşılaşılabilceğinin bir incelemesi amaçlanmıştır. Işık eğrileri, hem orijinal haliyle hem de barınak yıldızın bünyesel parlaklık değişimlerinden arındırılmış haliyle analiz edilmiştir. Yapılan analizler her iki sistemdeki barınak yıldızın bünyesel parlaklık değişimlerinin ötegezegenle ilişkin parametrelerin ışık eğrisi modellemesi ile hesaplanmasında önemli bir etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır. Ancak bu sonuç barınak yıldızın transit derinliğinden daha derin bünyesel parlaklık değişimi göstermesi durumunda geçerli değildir. WASP-19 sistemine ilişkin ortalama yörünge eğikliği ve yarıçaplar oranı, sırasıyla, 79.2 ± 0.2 ve 0.148 ± 0.002 bulunmuşken WASP-33 sistemi için bu parametrelerin değeri, aynı sırayla, 88.1 ± 1.1 ve 0.1095 ± 0.0005 bulunmuştur.

Effect of Intrinsic Brightness Variations of Stars on Transit: An Analysis of WASP-19 and WASP-33 Systems

Keywords

Exoplanets,
Stars: activity,
Stars: oscillations,
Techniques: photometric,
Methods: data analysis,
Astronomical data bases:
TESS

Abstract: This study involves an analysis of the TESS light curves of the WASP-19 and WASP-33 systems. While the host star in the WASP-19 system exhibits solar-like activity, the host star in the WASP-33 system pulsates. Both systems contain one transiting exoplanet. The research aims to examine the potential effects of intrinsic brightness variations in host stars on the analysis of transit light curves for these exoplanets. Light curves were analyzed both in their original form and after removing the intrinsic brightness variations of the host stars. The analyses concluded that the intrinsic brightness variations of the host stars in both systems do not significantly affect the determination of exoplanetary parameters through light curve modeling. However, this conclusion does not apply if the host star's intrinsic brightness variation exceeds the transit depth. The average orbital inclination and radii ratio for the WASP-19 system were found to be 79.2 ± 0.2 and 0.148 ± 0.002 , respectively, while the values of these parameters for the WASP-33 system were found to be 88.1 ± 1.1 and 0.1095 ± 0.0005 , respectively.

1. Giriş

Ötegezegenler, Güneş Sistemi dışında yer alan ve başka yıldızların yörüngesinde dolanan gezegenlerdir. Kopernik devrimi bilim insanlarından Giordano Bruno, 1584 yılında "De l'infinito Universo et Mondii" kitabında yıldızların kendi gezegenlerine sahip uzak

güneşler olduğunu ve bu gezegenlerin Yer'deki gibi yaşamlar barındırabileceğini savunmuştur. Bu teori, ötegezegenler fikrini akıllara düşüren ilk tohumdur. Struve [1] ise ötegezegenlerin yıldızlarına Güneş sistemindekinden daha yakın olabileceklerini ve süper Jüpiterlerin kısa yörüngelerde dikine hız ve örtme yöntemiyle tespit edilebileceğini öne sürmüştür. İlk

keşiflerin gerçekleşmesi ise 1990'ları bulmuştur. 1992 yılında PSR 1257+12 atarcasının yörüngesinde iki ötegezegen; 1995 yılında Güneş benzeri bir anakol yıldızının (51 Pegasi) yörüngesinde bir ötegezegen keşfedilmiştir [2][3]. Bu uzak dünyaların keşfi, Astronomi biliminde yeni bir araştırma alanı açmış, evrenin çeşitliliği konusunda ufukumuzu genişletmiştir. Uzay teleskoplarıyla hızlanan ötegezegen araştırmalarında keşifler günden güne artmakta, doğrulanmış ötegezegen sayısı 6000'e yaklaşmaktadır [4].

Ötegezegenleri keşfetmenin birçok yöntemi olsa da en etkili yöntem örtme (transit) yöntemidir. Bu yöntem, ötegezegenin kütleçekimsel olarak bağlı olduğu yıldızın (barınak yıldız) önünden geçerken yıldızın ışığında oluşturduğu parlaklık azalmasını ölçmeye dayanır. Yıldızın parlaklığında ölçülen bu değişim, ötegezegenin yörünge dönemine bağlı olarak düzenli aralıklarla tekrarlanır. Parlaklık değişim miktarı, ötegezegenin boyutuna göre değişmekle birlikte genellikle %1'den azdır. Örtme çift yıldız sistemlerinden farklı olarak, gezegenin yıldız tarafından örtüldüğü andaki parlaklık değişimi genellikle gözlenmez. Işık eğrisinde örtülmenin görüldüğü durumlarda ise beaming, elipsoidal değişimler ve yansıtma için öngörülen katkı milyonda 100'den (100 parts per million; ppm) düşük olmasıdır [5]. Yapılan gözlemsel çalışmalar da bu doğrultuda sonuçlar rapor etmektedir [6][7]. Bununla beraber WASP-33 sisteminde örtülme derinliği 305.8 ± 35.5 ppm olarak hesaplanmıştır [8].

Barınak yıldızda gözlenen bünyesel parlaklık değişimleri ötegezegenlerin keşfi ve sınıflandırmasında önemli etkilere sahiptir. Barınak yıldız güneş türü bir yıldız ise, yüzeyinde Güneş'tekine benzer manyetik aktivite yapıları (lekeler, faküller vb.) bulunur ve bu yapılar, yıldızın ışık eğrisinde biçimi ve genliği zamanla değişen dalga benzeri desenler gözlenmesine neden olur. Diğer yandan, barınak yıldız, Hertzsprung-Russell diyagramında kararsızlık kuşağında konumlanıyorsa zonklama mekanizmasının etkin olarak çalışması nedeniyle ışık eğrisinde yine dalga benzeri desenler gösterir. Bu desenlerin biçimleri ve genlikleri, güneş türü yıldızlarda gözlenen desenlerden karakter olarak biraz daha farklıdır. Barınak yıldızın doğası nedeniyle ortaya çıkan bu parlaklık değişimleri, ötegezegenin örtme olayı nedeniyle ortaya çıkan parlaklık değişimiyle üst üste bindiğinde, ışık eğrisi modelleri üzerinden elde edilecek bilgilerin, hatalı veya güvenilirliği düşük olmasına neden olabilir. Örtme olayına denk gelen bir yıldız lekeli geçiş derinliğini kısa bir süreliğine azaltırken, fakülanın denk geldiği durumlarda ise geçiş derinliği kısa bir süreliğine artar. Hatalı sonuçlara yol açmamak için ışık eğrilerinin detaylı modellenmesine ihtiyaç vardır [9][10].

Bu çalışmada, barınak yıldız bünyesel parlaklık değişimi gösteren sistemlerde, bu değişimlerin ötegezegen parametrelerine ne tür etkisi olduğuna ilişkin bir inceleme yapılması amaçlanmıştır. Bu çerçevede, Güneş benzeri yıldız aktivitesi sergileyen WASP-19 ve bir zonklayan yıldız olan WASP-33 sistemleri hedef olarak seçilmiştir [11][12]. WASP-19, $0.965 M_{\odot}$ kütleyle, $1.006 R_{\odot}$ yarıçapa ve 5616 K etkin sıcaklığa sahiptir [13]. Bu yıldızın kütle, yarıçap ve etkin sıcaklık değerleri göz önüne alındığında Güneş türü bir yıldız olduğu anlaşılmaktadır. WASP-33'ün ise kütlesi $1.495 M_{\odot}$, yarıçapı $1.444 R_{\odot}$ ve etkin sıcaklığı 7430 K'dir [14]. WASP-19 b ötegezegeni 2009'da; WASP-33 b ötegezegeni 2010 yılında keşfedilmiştir [15][16]. Barınak yıldızına 0.01652 AB uzaklıkta bulunan WASP-19 b, $1.154 M_{Jup}$ kütleyle, $1.415 R_{Jup}$ yarıçapa, 2113 K etkin sıcaklığa sahiptir [13]. WASP-33 b ötegezegeninin ise kütlesi $2.093 M_{Jup}$, yarıçapı $1.593 R_{Jup}$, etkin sıcaklığı 2781 K'dir ve barınak yıldızına 0.0239 AB uzaklıkta bulunur [14]. Her iki ötegezegen de 'Sıcak Jüpiter' sınıfında yer almaktadır [13][14].

Sistemlerin ışık eğrisi modelleri, önce bünyesel parlaklık değişimi ve ötegezegen geçişinin birlikte gözlemlendiği orijinal ışık eğrileriyle yapılmıştır. Ardından, gözlenen bünyesel parlaklık değişimleri orijinal ışık eğrisinden çıkarılmış ve kalan arındırılmış ışık eğrisi tekrar modellenmiştir. Son adımda, orijinal ve arındırılmış ışık eğrilerinin modellenmesinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak tartışılmıştır.

2. Işık Eğrilerinin Elde Edilmesi ve Analizi

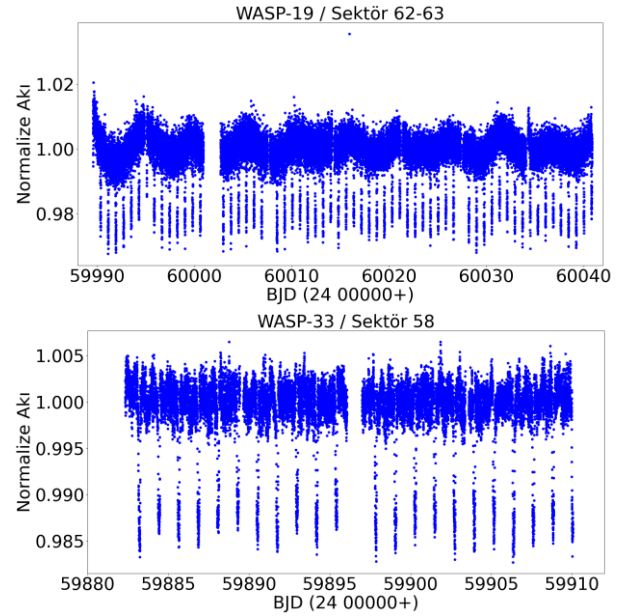
Hedef sistemlerin ışık eğrileri Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) uzay teleskobundan elde edilmiştir. TESS, 2018 yılında görevine başlayan örtme gösteren ötegezegenleri tarama projesidir. 10 cm açıklığa ve f/1.4 odak oranına sahip her biri özdeş 4 kameradan oluşmaktadır. Kameralarına 4096x4096 piksellik CCD alıcılar bağlıdır. 600-1000 nm arasında dalgaboyu geçirgenliğine sahiptir. 21"/piksel'lik piksel ölçeğiyle 2300 derece'lik geniş bir alan görür [17]. TESS projesi kapsamında farklı amaçlarla 20, 120, 200, 600, 1800 saniyelik integrasyon süreleri kullanılmaktadır. TESS, 2 yıllık bir görev olarak planlansa da görevine aktif bir şekilde devam etmektedir.

TESS verilerini ön-indirgeme işlemi uygulayarak sunan farklı çalışma grupları bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında ise 120 saniyelik integrasyon süreli verileri kullanan TESS Science Processing Operations Center (TESS-SPOC) tarafından sunulan ışık eğrisi dosyaları tercih edilmiştir [18]. Örtmenin başlangıç bitiş anlarını çok duyarlı analiz edebilmek ve sadece birkaç saat süren örtme olayı sırasında yeterli gözlem verisi elde edebilmek için kısa poz süreleri tercih edilir. Ancak poz süresi kısalırsa sinyal/gürültü (SN) oranı da düşer. Bu çalışmada SN oranının yeterli olabileceği ama aynı zamanda poz

süresinin de kısa olacağı en uygun durumu yakalamak için 120 saniyelik integrasyon süreli gözlem verileri kullanılmıştır. TESS uydusu, gökyüzünde belirli bir bölgenin yaklaşık 27 gün süren zaman aralığında ışık ölçümünü yapar. Bu zaman aralığında alınan ölçümler bir sektör olarak adlandırılır. İlgili zaman aralığı sona erdiğinde, uydunun programına göre başka bir bölge gözlenmeye başlar ve bu bölgenin 27 günlük gözlemleri de ayrı bir sektör olarak kabul edilir. Her bir sektöre bir numara verilir. WASP-19 sisteminin TESS-SPOC gözlemleri 9, 36, 62 ve 63 numaralı sektörlerde mevcutken, WASP-33 sisteminin sadece 18 ve 58 numaralı sektörlerde TESS-SPOC verisi mevcuttur. Her bir yıldızın mevcut TESS-SPOC verileri Mikulski Archive for Space Telescopes (MAST) portalında herkesin erişimine açık şekilde mevcuttur. Verilerin pratik olarak edinilmesi ve analize hazır hale getirilmesi için Python ortamında hazırlanmış Lightkurve (v2.3.0) programından faydalanılmıştır [19]. Her bir sektöre ilişkin veri tek tek incelenerek uydudan kaynaklı düşük frekanslı parlaklık değişimlerinin varlığı araştırılmış, bu tür bir değişim mevcutsa Lightkurve paketindeki “flatten” işlevi kullanılarak bu değişim veriden arındırılmıştır. Ardından, tüm veri maksimum ışık düzeyine göre normalize edilerek analize hazır veri elde edilmiştir. Bu süreç esnasında, sayısal bir değer bulunmadığı için NaN olarak işaretlenen, yani parlaklık ölçümü bulunmayan ölçümler de verilerden arındırılmıştır. Her iki sisteme ilişkin TESS-SPOC verileri Şekil 1’de gösterilmiştir. Şekilde zamana karşı (Güneş Sistemi’nin kütle merkezine indirgenmiş Jülyen tarihi, BJD) ölçülen parlaklık değerleri noktalanmıştır. Ötegezegenlerin gerçekleştirdiği geçişler, aşağıya doğru uzanan noktalar halinde görülmektedir.

$$m = -2.5 \times \log_{10}(f) \quad (1)$$

Verileri kadir birimine dönüştürmek için Eşitlik (1) kullanılmıştır. Bu dönüşüm, verileri ışık eğrisi modellemesinde kullanılacak olan bilgisayar koduna uyumlu hale getirmek için uygulanmıştır (bkz. Bir sonraki bölüm). Bu noktada bünyesel parlaklık değişimlerinin arındırılmadığı veri analiz için hazırdır. Değişimlerin arındırıldığı verinin elde edilebilmesi için periodogram analizi uygulanmıştır.



Şekil 1. WASP-19 (üstte; 62. ve 63. sektörler) ve WASP-33 (altta; 58. sektör) sistemlerine ait TESS-SPOC gözlemleri.

2.1. Yıldızlardaki bünyesel parlaklık değişimlerinin arındırılması

Barınak yıldızın bünyesel parlaklık değişiminin arındırılmasında, ötegezegen geçişine ilişkin sinyalin veriden silinmemesi için geçişin gözlenmediği zaman aralıklarındaki veriler göz önüne alınmış, geçiş gözlenen zaman aralıkları veriden silinmiştir. Geçiş gözlenmeyen zamanlardaki ışık eğrisine Lomb-Scargle periodogram [20][21] algoritmasını temel alan çoklu frekans analiz yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemde, ilgili veriye bir defa uygulanan periodogram analizi sonucunda bir frekans-genlik tayfı elde edilir. Bu tayfta en güçlü olan sinyalin frekans ve genlik değeri belirlenir. Belirlenen frekans ve genlik değerlerinin iyileştirilmesi ve bu değerlere karşılık gelen evre değerinin belirlenmesi en küçük kareler yöntemi ile yapılır. En küçük kareler yönteminde kullanılan temel eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$I = a_0 + \sum_i A_i \sin [2\pi(w_i t + \Phi_i)] \quad (2)$$

Burada I ışık eğrisindeki ölçümü, a_0 sıfır nokta sabitini, A genliği, ω frekansı ve Φ evreyi ifade eder. En baskın sinyale ilişkin frekans, genlik ve evre değerleri belirlendikten sonra Eşitlik (2) yardımıyla bu baskın sinyal veriden arındırılır. Geriye kalan arındırılmış veriye tekrar periodogram uygulanır ve yukarıda anlatılan adımlar aynen tekrarlanarak başka güçlü sinyallerin varlığı aranır. Bu döngü, periodogram sonucunda bulunan sinyalin SN değerinin, tanımlanan bir eşik değerinin altına düşmesi durumunda sonlandırılır. TESS uydusuyla yapılan 120 saniyelik integrasyon süreli gözlemler için eşik değeri SN=5 olarak önerilmiştir [22][23]. İlgili çalışmalarda verilen

bu eşik değeri gözlemsel olarak belirlenmiştir. Bu değerden daha düşük eşik değerleri kabul edildiğinde uydudan kaynaklı aletsel etkilerin ürettiği düşük genlikli frekanslar yıldızdan kaynaklı düşük genlikli frekanslarla karışabilir. Daha yüksek eşik değeri seçildiğinde yıldızdan kaynaklı değişimleri gösteren frekansların bazılarının belirlenememe durumu ortaya çıkar. Dolayısıyla bu çalışmada eşik değeri SN=5 olarak kabul edilmiştir. Her iki yıldıza yapılan uygulamalarda, frekans tarama aralığı olarak 0 çevrim/gün ile nyquist limiti arasında kalan frekans bölgesi göz önüne alınmıştır. TESS-SPOC verileri 120 saniye poz süresine karşılık gelecek şekilde birleştirilen görüntülerden oluştuğundan 120 saniyeye karşılık gelen nyquist değeri 360 çevrim/gün olarak hesaplanmış ve bu değer frekans tarama aralığının üst sınırı olarak benimsenmiştir.

Ardışık frekans arındırma döngüsünün sona ermesinin ardından, verinin barındırdığı istatistik olarak anlamlı sinyallere ilişkin frekans, genlik ve evre değerleri Tablo 1 ve Tablo 2’de verilmiştir. Periodogram analizinden bulunan frekans, genlik ve evre değerleri en küçük kareler yöntemi ile iyileştirilmiş ve istatistik hata değerleri hesaplanmıştır. Tablo 1 ve Tablo 2’de verilen değerler, bu iyileştirilmiş değerlerdir. Her bir hedef sistemin genlik tayfı da Şekil 2’de gösterilmiştir. Şekilde her bir frekansın hesaplanan genlik değerleri noktalanmıştır. Yüksek genliğe sahip frekanslar grafikte keskin tepeler olarak kendilerini belli etmektedir.

Son adımda, elde edilen sinyallerin frekans, genlik ve evre değerleri yukarıdaki eşitlikte kullanılarak tüm frekansların bileşkesini gösteren model elde edilmiştir ve bu model, orijinal TESS-SPOC gözlemlerinden arındırılmıştır. Bu arındırmayla barınak yıldızla ilişkin bünyesel parlaklık değişimleri veriden tamamen arındırılmıştır ve geriye sadece ötegezegenin geçişini gösteren sinyal kalmıştır.

2.2. Işık eğrisinin analizi

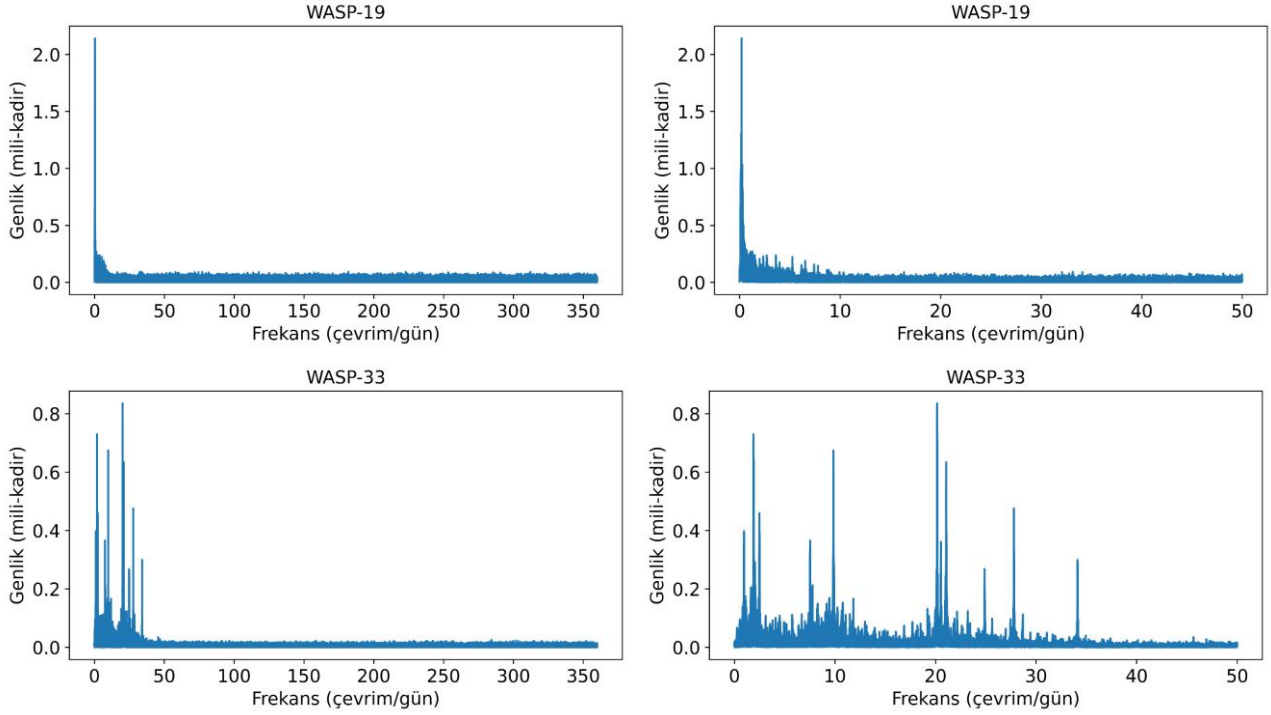
Işık eğrisi modellemesi için, Örtten Çiftler Yörünge Programını (Eclipsing Binary Orbit Program; EBOP) temel alan ve Fortran programlama diline yazılmış olan JKTEBOP kodunun v40 sürümü kullanılmıştır [24]. JKTEBOP kodu, yıldızların çift eksenli elipsoid olduğu varsayımını kullanır Bileşenlerinin biçimleri ideal küre olarak kabul edilebilen ayırık çift sistemlerin ışık eğrilerinin modellemesi için oldukça uygundur. Programın içerdiği işlevler arasında girilen başlangıç model parametre değerleri için model üretme (ikinci görev; TASK 2) ve Levenberg-Marquardt algoritması [25][26] aracılığıyla ışık eğrisine en iyi uyum sağlayan model parametrelerini bulma (üçüncü görev; TASK 3) işlevleri kullanılmıştır.

Tablo 1. WASP-19 hedef sistemi için frekans, genlik ve evre tablosu. Hata değerleri, ilgili basamağın yanında parantez içinde verilmiştir.

	Frekans	Genlik	Evre
F1	0.19346(2)	0.00171(6)	0.351(6)
F2	0.15843(1)	0.00122(3)	0.815(3)
F3	0.18344(1)	0.00109(7)	0.208(8)
F4	0.25608(1)	0.00097(3)	0.566(6)
F5	0.24045(2)	0.00059(4)	0.359(8)
F6	0.28851(1)	0.00084(2)	0.293(4)
F7	0.10531(1)	0.00075(2)	0.715(5)
F8	0.14977(1)	0.00078(3)	0.105(5)
F9	0.21869(1)	0.00084(4)	0.60(1)
F10	0.33019(2)	0.00041(2)	0.02(1)
F11	0.05509(2)	0.00045(2)	0.564(9)
F12	0.38128(1)	0.00039(2)	0.899(7)
F13	0.20064(2)	0.00044(9)	0.58(1)
F14	0.30843(1)	0.00043(2)	0.118(9)
F15	0.09105(2)	0.00032(2)	0.03(1)
F16	0.23672(1)	0.00040(4)	0.188(6)
F17	0.06288(2)	0.00027(2)	0.65(1)

Tablo 2. WASP-33 hedef sistemi için frekans, genlik ve evre tablosu. Hata değerleri, ilgili basamağın yanında parantez içinde verilmiştir.

	Frekans	Genlik	Evre
F1	20.16232(1)	0.00084(3)	0.360(5)
F2	1.90159(1)	0.00071(3)	0.651(6)
F3	9.84676(1)	0.00069(3)	0.227(6)
F4	21.06258(1)	0.00066(3)	0.856(7)
F5	2.48767(4)	0.00046(3)	0.98(2)
F6	27.7958(3)	0.0005(4)	0.862(9)
F7	0.95119(1)	0.00038(3)	0.005(7)
F8	7.52904(3)	0.00036(3)	0.90(1)
F9	20.53756(2)	0.00036(3)	1.00(1)
F10	34.12507(3)	0.00030(3)	0.54(1)
F11	24.88612(3)	0.00027(3)	0.82(2)
F12	2.02427(4)	0.00020(3)	0.27(2)
F13	20.97622(4)	0.00020(3)	0.38(2)
F14	9.43902(4)	0.00018(3)	0.66(2)
F15	2.09689(4)	0.00018(3)	0.15(2)
F16	10.67121(5)	0.00019(3)	0.87(3)
F17	7.76799(5)	0.00018(3)	0.81(2)
F18	27.7944(6)	0.0002(4)	0.98(2)
F19	10.78538(4)	0.00016(3)	0.46(2)
F20	11.82965(5)	0.00016(3)	0.96(3)
F21	9.17469(5)	0.00015(3)	0.21(2)
F22	8.28615(5)	0.00016(3)	0.98(3)
F23	8.35626(7)	0.00015(3)	0.59(4)
F24	1.637729(3)	0.00014(3)	0.776(2)
F25	10.74804(7)	0.00013(3)	0.38(4)
F26	19.97049(6)	0.00013(3)	0.24(3)
F27	23.20588(7)	0.00012(3)	0.81(4)
F28	19.20829(6)	0.00012(3)	0.65(3)
F29	10.25262(7)	0.00012(3)	0.03(4)



Şekil 2. WASP-19 (üstte) ve WASP-33 (altta) hedef sistemlerinin genlik tayfları. Her iki sistem için genlik tayflarının tamamı (sol paneller) ve 50 çevrim/gün değerine sınırlanmış aralığı (sağ paneller) ayrı ayrı gösterilmiştir.

Modellemenin ilk adımında, model parametrelerinin başlangıç değerlerini belirlemek için hedef sistemlere ilişkin önceden yapılmış çalışmalara başvurulmuştur. WASP-19 için Cortés-Zuleta vd. [13] çalışmasından; WASP-33 için Chakrabarty & Sengupta [14] çalışmasından faydalanılmıştır. İlgili çalışmalardan benimsenen model parametreleri başlangıç zamanı (T_0), dönem (P), yarıçaplar oranı ($k=R_p/R_*$; R_p ve R_* , sırasıyla, ötegezegenin ve barınak yıldızın yarıçapıdır), yörünge düzleminin gökyüzü düzlemiyle yaptığı açı (i) olarak sayılabilir. Yukarıda atıf verilen çalışmalardan alınan parametre değerleri Tablo 3'te gösterilmiştir. Ancak Chakrabarty & Sengupta [14] çalışmasında T_0 değeri bulunmadığı için WASP-33 modellemesinde kullanılacak başlangıç T_0 değeri gözlem verisindeki ilk örtme olayının tam ortasına denk gelen zaman olarak belirlenmiştir. Bu parametreler, JKTEBOP programının ikinci görevinde girdi parametreleri olarak kullanılarak test modelleri üretilmiş ve bu modellerin gözlemlerle uyumu incelenmiştir. Bu noktada T_0 ve P 'nin duyarlı olarak belirlenmesi için geçiş zamanı değişimi (Transit Time Variation; TTV) yöntemi kullanılabilir. Ancak bu yöntem sadece T_0 ve P belirlemekle kalmayıp sisteme ilişkin başkaca özelliklerin de keşfedilmesine olanak sağlar [27][28][29]. Ayrıca yıldız aktiviteleri, geçiş sırasında yıldız parlaklığını değiştirerek, geçiş süresini kısaltarak, geçiş derinliğini sığlaştırarak veya asimetrik ışık eğrilerine yol açarak TTV'ye etki etmektedir [30]. Bununla beraber çalışma kapsamında sadece T_0 ve P 'nin iyileştirilmesi amaçlandığından ilgili parametrelerin hesaplanması ışık eğrisi modellemesiyle yapılmıştır. Kabul edilebilir bir uyum bulunduğunda, JKTEBOP kodunun üçüncü

görevi vasıtasıyla T_0 , P , k , i ve ışık eğrisi düzeyini ayarlayan ölçek çarpanı parametresi için ışık eğrisini en iyi temsil eden model parametre değerleri aranmıştır. Modelleme yapılırken, ışık eğrilerinde örtülme olayı (ötegezegenin barınak yıldızın arkasında kaldığı durum) gözlenemediği için yörünge eliptikliği hakkında bilgi üretilememiş, bu nedenle her iki sistem için yörünge çember olduğu varsayılmıştır. Dolayısıyla yörünge basıklığı (e) ve enberi boylamı (w) sıfır olarak sabitlenmiştir. Kenar karar ma katsayıları hesaplanırken göz önüne alınan barınak yıldız parametreleri (etkin sıcaklık, yüzey çekim ivmesinin logaritması ($\log g$) ve metal bolluğu) WASP-19 için Cortés-Zuleta vd. [13] çalışmasından; WASP-33 için Stassun vd. [31] çalışmasından alınmıştır. Buna göre WASP-19 ve WASP-33 için etkin sıcaklıklar, sırasıyla 5616 K ve 7308 K, $\log g$ değerleri, sırasıyla 4.417 ve 4.50 ve metal bolluğu değerleri, sırasıyla 0.040 dex ve 0.0 dex'tir. Barınak yıldızla ilişkin kenar karar ma için lineer yasa benimsenmiş, lineer kenar karar ma katsayıları Van Hamme [32] çalışmasından** alınmıştır. Bu doğrultuda kenar karar ma katsayıları WASP-19 için 0.474; WASP-33 için 0.348 olarak belirlenmiştir. Modelleme süreci tamamlandığında gözlem ve model arasındaki farkların standart sapmasının 3 katından (3σ) daha büyük saçılmaya sahip gözlem noktaları veriden çıkarılmış ve kalan gözlem noktalarıyla modelleme tekrarlanmıştır. Bu işlem, iki adım arasındaki parametre değerlerinin hassasiyeti 3 anlamlı rakam ile ifade edilene kadar tekrarlanmış, bunun sonucunda gözlemleri en iyi temsil eden model parametre setine ulaşılmıştır.

** <https://faculty.fiu.edu/~vanhamme/ldfiles>

3. Işık Eğrisi Analiz Sonuçları

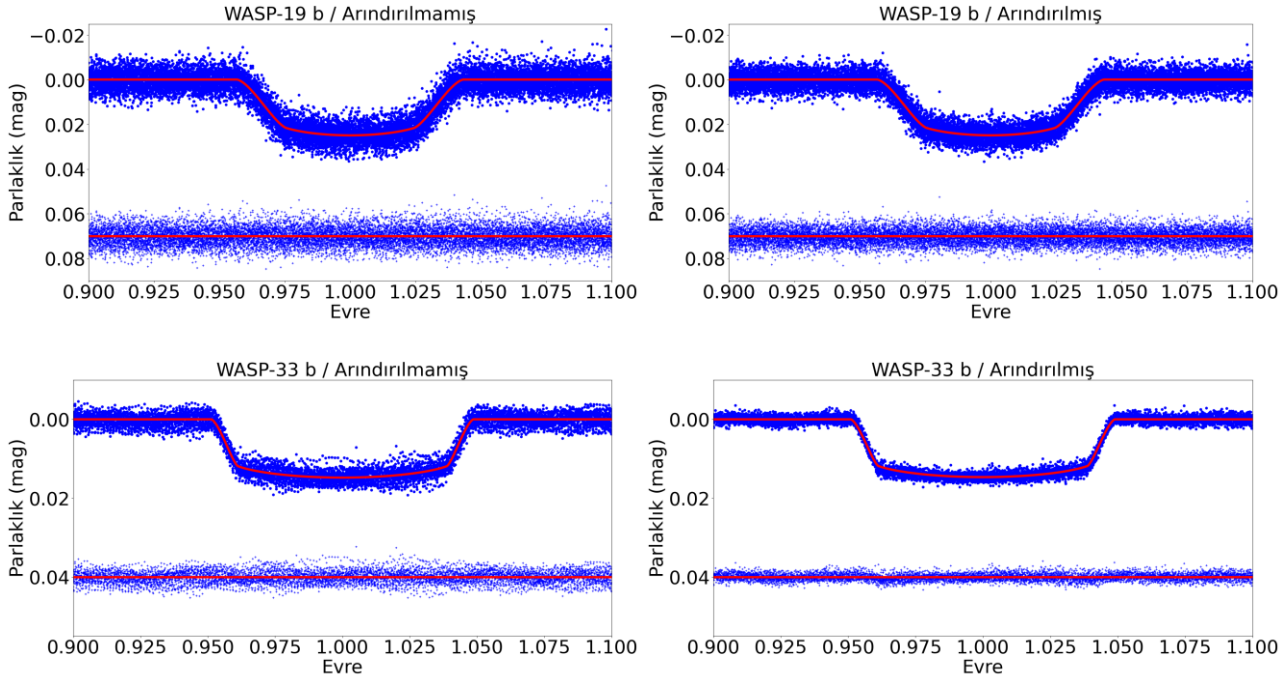
Bir önceki bölümde anlatılan adımlar WASP-19 ve WASP-33 hedef sistemlerinin bünyesel parlaklık değişimleri arındırılmış ve arındırılmamış gözlem verilerinin her biri için ayrı ayrı uygulanmıştır. Her iki hedef sistem için hem orijinal hem de arındırılmış ışık eğrilerinin modellenmesinden elde edilen sonuçlar, Tablo 3'te listelenmiştir. Model sonuçların grafik gösterimi ise artıklarıyla birlikte Şekil 3'te verilmiştir.

Şekilde gözlem verileri evreye göre çizdirilmiş ve sadece geçişin gözlemlendiği evre aralıkları üzerinden arındırılmış ve arındırılmamış veriler kıyaslama için yan yana gösterilmiştir. Evrelendirme Eşitlik (3)'teki ifadeye göre yapılmıştır. Bu eşitlikte T herhangi bir gözlem noktasının zamanı, T_0 alınan bir başlangıç zamanı, P dönem ve E de T_0 anından T anına kadar geçen süredeki çevrim sayısıdır.

$$T = T_0 + E \times P \quad (3)$$

Tablo 3. WASP-19 ve WASP-33 hedef sistemlerinin TESS uzay teleskobundan alınan ışık eğrilerinin analiz sonuçları. Her bir model için artıkların karekök ortalaması (RMS) ve indirgenmiş χ^2 değerleri tabloda karşılaştırma amaçlı olarak verilmiştir. Tabloda $a/R_\star$ yarı-büyük eksen uzunluğunun yıldız yarıçapına oranını, b ölçek çarpanını, δ geçiş derinliğini ve t_{1-4} geçiş süresini vermektedir.

Sistemler	Kaynak	T_0 (BJD) (2450000+)	P (gün)	i (°)	$a/R_\star$	b	k	δ (%)	t_{1-4} (saat)	RMS (mmag)	χ^2
WASP-19	Arındırılmamış	6402.7132(2)	0.78883892(6)	79.2(2)	3.546	0.663	0.148(2)	2.189	1.641	4.129	1.512
	Arındırılmış	6402.7131(2)	0.78883895(6)	79.2(2)	3.544	0.663	0.148(2)	2.187	1.642	3.361	1.008
	[13]	6402.712(2)	0.7888385(8)	79.1(4)	3.533	0.667	0.1441(6)	2.08	1.607		
	[33]	6029.5920(1)	0.7888390(2)	79.5(3)	3.573	0.645		0.020	1.581		
	[11]	4775.3375(2)	0.7888394(3)	78.9(2)			0.1428(6)				
	[34]	5168.9680(1)	0.7888400(3)	79.4(4)		0.657		2.06	1.572		
WASP-33	Arındırılmamış	8791.41399(2)	1.21987082(3)	88.6(6)	3.671	0.087	0.1095(5)	1.200	2.854	1.597	18.715
	Arındırılmış	8791.41399(2)	1.21987078(3)	87.0(1)	3.612	0.189	0.1094(3)	1.196	2.870	0.893	5.847
	[14]		1.219870(1)	86.63(3)	3.571	0.210	0.1118(2)		2.854		
	[35]	2984.8296(3)	1.2199(1)	86.2(2)			0.1143(2)				
	[12]	5507.5222(3)	1.219867(1)	87.9(9)			0.1046(6)				



Şekil 3. WASP-19 (üstte) ve WASP-33 (altta) hedef sistemleri için bünyesel parlaklık değişimleri arındırılmış ve arındırılmamış TESS gözlem verilerinin evreye göre parlaklık grafikleri. Şekillerde sadece geçişin gözlemlendiği evre aralığı gösterilmiştir.

Elde edilen parametrelerin bir karşılaştırılmasının yapılabilmesi için Tablo 3'te ayrıca literatür değerleri de verilmiştir. Tabloda WASP-19 sisteminin literatür değerlerinin verildiği Cortés-Zuleta vd. [13] çalışmasında bünyesel parlaklık değişimi arındırması yapılmazken WASP-33 sisteminin literatür değerlerinin verildiği Chakrabarty & Sengupta [14] çalışmasında arındırma yapılmıştır.

Tablo 3'te WASP-19 sistemine ait arındırılmış ve arındırılmamış ışık eğrilerinin modelleme sonuçları karşılaştırıldığında parametrelerin istatistik hata sınırları içinde aynı çıktığı görülmektedir. WASP-33 sisteminde ise arındırılmış ışık eğrileriyle elde edilen modele ait sonuçlarda i ve k parametreleri daha küçük istatistik hataya sahiptir. Modellerin gözlemlerle uyumlu olduğu karekök ortalaması (RMS) ve indirgenmiş χ^2 değerlerinden görülmektedir. Her modelin RMS ve indirgenmiş χ^2 değerleri karşılaştırıldığında bünyesel parlaklık değişimlerinin arındırıldığı modellerin daha küçük RMS ve χ^2 değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

4. Özet ve Tartışma

Bu çalışma kapsamında, barınak yıldızları bünyesel parlaklık değişim gösteren ötegezegenlerin, ışık eğrisi transit yöntemi ile araştırılması halinde ne tür etkilerle karşılaşılacağına bir incelemesi yapılmıştır. Bu amaçla WASP-19 ve WASP-33 sistemleri hedefler olarak seçilmiştir. WASP-33 sistemindeki barınak yıldız bir zonklayan yıldız, WASP-19 sistemindeki barınak yıldız da Güneş benzeri aktivite gösteren bir yıldızdır. Her iki sistemin ışık eğrilerinde de, sergiledikleri bünyesel parlaklık değişimlerinin izleri net olarak izlenebilmektedir. Bu izlerin genlik tayflarına yansımaları, değişimlerin sahip olduğu frekanslarda meydana gelen kuvvetli tepelerle kendini göstermiştir.

Sistemlerin TESS uydusu ile elde edilmiş TESS-SPOC ışık eğrilerinden uydu ve üzerinde yer alan cihazlardan kaynaklanan aletsel parlaklık değişimleri arındırılmıştır. Ardından, aletsel etkilerin arındırıldığı ışık eğrileri her iki sistem için ayrı ayrı modellenmiştir. Bir sonraki adımda, her iki sistemin sergilediği bünyesel parlaklık değişimi, çoklu frekans analizi yapılarak bir önceki adımda kullanılan ışık eğrilerinden arındırılmıştır. Işık eğrisi modellemeleri, her iki sistem için bu arındırılmış ışık eğrileri ile tekrarlanmıştır.

WASP-19 ve WASP-33 sistemleri için yukarıda özetlenen süreçle elde edilen model sonuçları karşılaştırıldığında, her bir sistem için arındırılmış ve arındırılmamış durumdaki model parametrelerinin genel olarak hata sınırları içinde birbiri ile aynı kabul edilebileceği anlaşılmaktadır. Bu durum arındırılmış ve arındırılmamış modeller arasında anlamlı bir fark olmadığına işaret eder. Bu noktada, WASP-33 sistemi için istisna olarak görünen parametreler de, hata

sınırlarının üzerinde farklılık gösteren i açısıdır. Bu farklılığın nedeninin, gezegenli sistemlerin ışık eğrilerinin, başka herhangi bir kısıtlayıcı veri veya parametre olmadan modellenmesi sonucu ortaya çıkan parametre yozlaşması olduğu tahmin edilmektedir. Benzer bir durum daha önce Kepler-6, Kepler-12, WASP-1, WASP-4, WASP-6 ve WASP-17 sistemlerinde gözlenmiştir [36]. Özellikle, barınak yıldızın ve ötegezegenin yarıçaplar oranı (veya yörünge yarı-büyük eksenin ölçeklenmiş kesirsel yarıçapları) i açısı ile önemli yozlaşma gösterme eğilimindedir. Bu eğilimin ortadan kaldırılması için, modelleme sürecinde serbest bırakılan parametreler üzerinde ek kısıtlama sağlayacak tayf verisi kullanılabilir.

WASP-19 sistemi için bu çalışmada elde edilen kesirsel yarıçaplar ile literatürde yer alan kesirsel yarıçaplar arasında hata sınırları üzerinde bir farklılık görülmektedir. Bu çalışmanın yazarları tarafından bu farkın ilgili literatür çalışmalarında Yer konumlu gözlemlerin de dâhil edilmesi ve ([13] için) bu çalışmaya oranla daha kısa zaman aralığına sahip TESS verisinin kullanılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

WASP-33 sistemi için bu çalışma ve literatürdeki i ve k parametreleri arasında hata sınırları üzerinde bir farklılık mevcuttur. Bu farklılığın olası açıklaması bu çalışmada ve literatür çalışmalarında kullanılan farklı modeller olabilir. Modelleme için bu çalışmada JKTEBOP'tan faydalanılırken [12] ve [14]'te Mandel & Agol [37] tarafından sağlanan *occultquad* modellemesi, [35]'te ise Pearson vd. [38] EXOMOP modellemesi kullanılmıştır. Her bir model içerdiği farklı varsayımlar nedeniyle i ve k parametrelerinin hata sınırları üzerinde sonuçlar bulunmasına neden olmuş olabilir.

WASP-19 ve WASP-33 sistemlerinin bu çalışmada yapılan analizleri, her iki sistemin bünyesel parlaklık değişimlerinin, ötegezegenle ilişkin parametrelerin ışık eğrisi modellemesi vasıtasıyla hesaplanması üzerinde önemli bir etkisi olmadığına işaret etmektedir. Başka bir deyişle arındırma yapmanın veya yapmanın model parametreleri üzerinde anlamlı bir etkisi görülmemektedir. Ancak bu sonuç, barınak yıldız bünyesel parlaklık değişimi sergileyen tüm gezegenli sistemler için kesin olarak kabul edilemez. Kepler-63 sistemi gibi, ötegezegen geçişi ile karşılaştırıldığında çok daha büyük ışık değişimi üreten bünyesel parlaklık değişimleri, transit nedeniyle meydana gelen parlaklık değişimini baskılayacağından, ya veriden arındırılması ya da ışık eğrisi modelinde ek model parametreleri biçiminde göz önüne alınması gereklidir [39]. Temel olarak, ötegezegen geçişi nedeniyle meydana gelen ışık değişiminin barınak yıldızın bünyesel parlaklık değişiminden daha baskın olduğu durumlarda, bünyesel değişimin arındırıldığı ve arındırılmadığı verilerin modellenmesinin pratik olarak birbiri ile

aynı sonuçlar vereceği öngörülebilir. Bünyesel parlaklık değişiminin etkileri açısından, ışık eğrisinde ötegezegenin geçiş derinliği bir sınır gibi görünse de farklı sistemler üzerinden durumun test edilmesi daha kesin sonuçlar verebilir.

Teşekkür

Bu çalışma Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü bünyesinde "Uzay Teleskopları Çağında Ötegezegen Keşifleri" adı altında yürütülen yüksek lisans tez çalışmasından üretilmiştir. Yazarlar, yorumları ve eleştirileriyle çalışmaya olumlu katkı sağlayan hakemlere teşekkür eder. Bu makale, Uzay Teleskobu Bilim Enstitüsü'ndeki (Space Telescope Science Institute; STScI) MAST veri arşivinden elde edilen TESS göreviyle toplanan verileri içermektedir. TESS görevi için finansman NASA Explorer Programı tarafından sağlanmaktadır. Bu araştırmada, Ötegezegen Keşif Programı (Exoplanet Exploration Program) çerçevesinde NASA ile yapılan sözleşme kapsamında Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü tarafından işletilen NASA Exoplanet Archive'nden yararlanılmıştır.

Etik Beyanı

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] Struve, O., 1952, Proposal for a project of high-precision stellar radial velocity work, *The Observatory*, 72, 199-200.
- [2] Wolszczan, A., Frail, D.A., 1992, A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12, *Nature*, 355(6356), 145-147.
- [3] Mayor, M., Queloz, D., 1995, A Jupiter-mass companion to a solar-type star, *Nature*, 378(6555), 355-359.
- [4] NASA Exoplanet Archive, "Exoplanet and Candidate Statistics", <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html> (Erişim tarihi: 10 Aralık 2024)
- [5] Loeb, A., Gaudi, B. S., 2003, Periodic Flux Variability of Stars due to the Reflex Doppler Effect Induced by Planetary Companions, *The Astrophysical Journal*, 588 (2), L117-L120.
- [6] Barbier, H., López, E., 2021, Kepler Planetary Systems: Doppler Beaming Effect Significance, *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, 57, 123-132.
- [7] Mazeh, T., Nachmani, G., Sokol, G., 2012, Kepler KOI-13.01 - Detection of beaming and ellipsoidal modulations pointing to a massive hot Jupiter, *Astronomy & Astrophysics*, 541 (A56), 9.
- [8] von Essen, C., Mallonn, M., Borre, C. C., 2020, TESS unveils the phase curve of WASP-33b. Characterization of the planetary atmosphere and the pulsations from the star, *Astronomy & Astrophysics*, 639 (A34), 19.
- [9] Bruno, G., Deleuil, M., 2023, Stellar activity and transits, *Star-Planet Interactions*, 65.
- [10] Bókon, A., Kálmán, Sz., Bíró, I. B., Szabó, M. Gy., 2023, Stellar pulsations interfering with the transit light curve: Configurations with false positive misalignment, *Astronomy & Astrophysics*, 674 (A186), 14.
- [11] Tregloan-Reed, J., Southworth, J., Tappert, C., 2013, Transits and starspots in the WASP-19 planetary system, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 428 (4), 3671-3679.
- [12] von Essen, C., Czesla, S., Wolter, U., 2014, Pulsation analysis and its impact on primary transit modeling in WASP-33, *Astronomy & Astrophysics*, 561 (A48), 20.
- [13] Cortés-Zuleta, P., Rojo, P., Wang, S., 2020, TraMoS. V. Updated ephemeris and multi-epoch monitoring of the hot Jupiters WASP-18Ab, WASP-19b, and WASP-77Ab, *Astronomy & Astrophysics*, 636 (A98), 17.
- [14] Chakrabarty, A., Sengupta, S., 2019, Precise Photometric Transit Follow-up Observations of Five Close-in Exoplanets: Update on Their Physical Properties, *The Astronomical Journal*, 158 (39), 17.
- [15] Hebb, L., Collier-Cameron, A., Trianaud, A. H. M. J., 2010, WASP-19b: The Shortest Period Transiting Exoplanet Yet Discovered, *The Astrophysical Journal*, 708 (1), 224-231.
- [16] Collier Cameron, A., Guenther, E., Smalley, B., 2010, Line-profile tomography of exoplanet transits - II. A gas-giant planet transiting a rapidly rotating A5 star, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 407 (1), 507-514.
- [17] Ricker, G. R., Winn, J. N., Vanderspek, R., 2015, Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS), *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 1 (1), 014003.
- [18] Caldwell, D. A., Tenenbaum, P., Twicken, J. D., 2020, TESS Science Processing Operations Center FFI target list products, *Research Notes of the AAS*, 4 (11), 201.
- [19] Lightkurve Collaboration, 2018, Lightkurve: Kepler and TESS time series analysis in Python, *Astrophysics Source Code Library*, ascl:1812.013.

- [20] Lomb, N. R., 1976, Least-Squares Frequency Analysis of Unequally Spaced Data, *Astrophysics and Space Science*, 39 (2), 447-462.
- [21] Scargle, J. D., 1982, Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data., *Astrophysical Journal*, 263, 835-853.
- [22] Baran, A. S., Koen, C., 2021, A Detection Threshold in the Amplitude Spectra Calculated from TESS Time-Series Data, *Acta Astronomica*, 71 (2), 113-121.
- [23] Bowman, D. M., Michielsen, M., 2021, Towards a systematic treatment of observational uncertainties in forward asteroseismic modelling of gravity-mode pulsators, *Astronomy & Astrophysics*, 656 (A158), 20.
- [24] Southworth, J., Maxted, P. F. L., Smalley, B., 2004, Eclipsing binaries in open clusters - II. V453 Cyg in NGC 6871, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 351 (4), 1277-1289.
- [25] Levenberg, K., 1944, A method for the solution of certain problems in least squares, *Quarterly of Applied Mathematics*, 2, 164-168.
- [26] Marquardt, D. W., 1963, An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters, *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11, 431-441.
- [27] Agol, E., Steffen, J., Sari, R., 2005, On detecting terrestrial planets with timing of giant planet transits, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 359 (2), 567-579.
- [28] Nesvorný, D., 2009, Transit Timing Variations for Eccentric and Inclined Exoplanets, *The Astrophysical Journal*, 701 (2), 1116-1122.
- [29] Aladağ, Y., Akyüz, A., Baştürk, Ö., 2021, Geçiş Zamanları Değişimi Yöntemiyle HAT-P-16b ve TrES-3b Ötegezegenlerinin İncelenmesi, *Turkish Journal of Astronomy and Astrophysics*, 2 (1), 28-37.
- [30] Barros, S. C. C., Boué, G., Gibson, N. P., 2013, Transit timing variations in WASP-10b induced by stellar activity, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 430 (4), 3032-3047.
- [31] Stassun, K. G., Collins, K. A., Gaudi, B. S., 2017, Accurate Empirical Radii and Masses of Planets and Their Host Stars with Gaia Parallaxes, *The Astronomical Journal*, 153 (136), 20.
- [32] Van Hamme, W., 1993, New limb-darkening coefficients for modeling binary star light curves, *Astronomical Journal*, 106, 2096.
- [33] Lendl, M., Gillon, M., Queloz, D., 2013, A photometric study of the hot exoplanet WASP-19b, *Astronomy & Astrophysics*, 552 (A2), 11.
- [34] Hellier, C., Anderson, D. R., Collier-Cameron, A., 2011, On the Orbit of the Short-period Exoplanet WASP-19b, *The Astrophysical Journal Letters*, 730 (L31), 4.
- [35] Turner, J. D., Pearson, K. A., Biddle, L. I., 2016, Ground-based near-UV observations of 15 transiting exoplanets: constraints on their atmospheres and no evidence for asymmetrical transits, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 459 (1), 789-819.
- [36] Yüksel, R. C., Özdarcan, O., 2024, Seçilen Bazı Gezegenli Sistemlerin Kepler, TESS ve SuperWASP Fotometrik Verileri Kullanılarak İncelenmesi, *Turkish Journal of Astronomy and Astrophysics*, 5 (2), 28-36.
- [37] Mandel, K., Agol, E., 2002, Analytic Light Curves for Planetary Transit Searches, *The Astrophysical Journal*, 580 (2), L171-L175.
- [38] Pearson, K. A., Turner, J. D., Sagan, T. G., 2014, Photometric observation of HAT-P-16b in the near-UV, *New Astronomy*, 27, 102-110.
- [39] Sanchis-Ojeda, R., Winn, J. N., Marcy, G. W., 2013, Kepler-63b: A Giant Planet in a Polar Orbit around a Young Sun-like Star, *The Astrophysical Journal*, 775 (54), 13.