

Seçilen Bazı Gezegenli Sistemlerin Kepler, TESS ve SuperWASP Fotometrik Verileri Kullanılarak İncelenmesi

Rahmi Can Yüksel¹ *, Orkun Özdarcan¹ 

¹ Ege Üniversitesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, İzmir, 35100, Türkiye

Accepted: October 23, 2024. Revised: October 23, 2024. Received: August 7, 2024.

Özet

Bu çalışma ötegezegen çalışmalarına genel bir bakışla birlikte Yer konumlu ve uzay teleskobu kaynaklı ötegezegen tarama projelerinde gözlemleri bulunan gezegenli 6 sistemin (Kepler-6, Kepler-12, WASP-1, WASP-4, WASP-6, WASP-17) nicel bir karşılaştırmasını içermektedir. Karşılaştırma için Kepler, TESS ve SuperWASP veri tabanlarından ilgili gezegenli sistemlere ait gözlem verileri çekilerek aynı analiz adımları uygulanmıştır. Yer konumlu teleskopların ve uzay teleskoplarının sağladığı gözlemler birbirleriyle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş, ayrıca Kepler ve TESS teleskoplarından elde edilen ışık eğrisi verileri, analiz sonuçları ve belirsizlikleri açısından kendi aralarında karşılaştırılmıştır.

Abstract

This study includes a general overview of exoplanet studies and a quantitative comparison of 6 planetary systems (Kepler-6, Kepler-12, WASP-1, WASP-4, WASP-6, WASP-17) observed in ground-based and space-borne exoplanet survey projects. For the comparison, observation data of the relevant planetary systems were extracted from the Kepler, TESS and SuperWASP databases and the same analysis steps were applied. Ground-based and space-borne observations were evaluated comparatively with each other and light curve data from the Kepler and TESS missions are compared among themselves in terms of analysis results and their uncertainties.

Anahtar Kelimeler: exoplanets – techniques: photometric – astronomical data bases: miscellaneous

1 Giriş

Bu çalışmada, Yer'den bakış doğrultusuna göre barınak yıldızının önünden geçiş yapan 6 ötegezegenin Yer konumlu ve uzay teleskoplarıyla yapılan gözlem verilerinin karşılaştırmalı analizi amaçlanmıştır. Yer konumlu tarama projelerinden SuperWASP (Wide Angle Search for Planets); uzay teleskoplarından Kepler ve TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite), bu çalışma için fotometrik veri kaynakları olarak benimsenmiştir.

2006 yılında hayata geçen SuperWASP (Butters ve diğ. 2010), La Palma adası ve Güney Afrika'da olmak üzere iki robotik gözlemevi içerir. Her ikisi de 2048×2048 piksel CCD alıcıların bağlı olduğu 11.1 cm açıklığa sahip sekiz adet Canon 200 mm f/1.8 lensli kameradan oluşmaktadır. Bu kameralar gökyüzünde 480 derece²'lik alanı 60 saniyelik poz süreleriyle gözler. Piksel ölçeği ise 13.7 arcsec piksel⁻¹'dir (Pollacco ve diğ. 2006). Halen devam etmekte olan bu proje, 200'e yakın ötegezegen keşfi ile Yer konumlu ötegezegen tarama projeleri arasında en başarılı olanıdır. 2009 yılında fırlatılan Kepler uzay teleskobu, 2013'e kadar uzayda aynı bölgeyi; 2013-2018 arasında da tutulum düzlemindeki farklı noktaları gözlemiştir. 95 cm'lik açıklığa sahip olan Kepler'in fotometrik düzeneği her biri 2200×1024 piksel olan 42 CCD alıcının birleşiminden oluşur ve 400-850 nm dalgaboyu aralığında geçirendir. Piksel ölçeği 4 arcsec piksel⁻¹'dir ve 105 derece²'lik görüş alanına sahiptir (Borucki ve diğ. 2010; Koch ve diğ. 2010; Howell ve diğ. 2014). Kepler verileri 1 dakikalık kısa integrasyon süreli ve 30 dakikalık uzun integrasyon süreli gözlemler halinde sunulur.

2018'de yakıtının bittiği açıklanan Kepler teleskobu 3326 ötegezegenin keşfedilmesini sağlamıştır (Ekim 2024 itibarıyla). Görevine 2018 yılında başlayan TESS uzay teleskobu, 10 cm açıklığa ve f/1.4 odak oranına sahip her biri özdeş 4 kameradan oluşur. Gökyüzünün büyük bir kısmını 27 günlük sektörler halinde 2 yıllık dönemde tarar. 21 arcsec piksel⁻¹'lik piksel ölçeğine ve 2300 derece²'lik geniş görüş alanına sahiptir (Ricker ve diğ. 2015). Kameraları 4096×4096 piksellik CCD alıcılardan oluşmaktadır. Dalgaboyu geçirenliği 600-1000 nm aralığındadır. Görev başlangıçta gezegen geçişleri için 2 ve 30 dakikalık, asterosismoloji için 20 saniyelik integrasyon süreleri içerecek şekilde planlansa da daha sonradan 200 saniyelik ve 10 dakikalık integrasyon süreleri de kullanılmıştır. 2 yıllık bir görev olarak planlanan TESS, görevine aktif bir şekilde devam etmektedir. TESS ile keşfedilen ötegezegen sayısı Ekim 2024 itibarıyla 564'e ulaşmıştır ve gün geçtikçe de artmaktadır.

Hedef gezegenli sistemler belirlenirken NASA Exoplanet Archive (2024)'da bulunan listelerden faydalanılmıştır. Sistemlerin hem Yer konumlu hem de uzay teleskobu kaynaklı ötegezegen taramalarında gözlem verilerinin bulunmasına dikkat edilmiştir. Öncelikle SuperWASP, Kepler ve TESS taramalarında gözlem verisi bulunan, gökyüzünde 1.5' komşuluğu kalabalık olmayan ve/veya bu alanda başka parlak gökcisimi bulunmayan, birden fazla barınak yıldız ve birden fazla ötegezegenine sahip olmayan 11 sistem aday olarak belirlenmiştir. Daha sonra bu adaylar arasından barınak yıldızı manyetik aktivite gösteren veya manyetik aktivite şüphesi taşıyan sistemler adaylıktan çıkarılmıştır. Kalan 5 aday sistemden geçiş derinliği daha yüksek olan Kepler-6 ve Kepler-12 sistemleri hedef sistemler olarak seçilmiştir. Ancak SuperWASP verilerinde geçişlerin saçılmalar nedeniyle

* rahmicanyuksel@gmail.com

Çizelge 1. Hedef sistemlerdeki ötegezegen, barınak yıldız ve sisteme ait literatürde yer alan parametre değerleri. Sistemlerin Yer'e olan uzaklıkları (d) Gaia DR2'den alınmıştır ([a]: [Gaia Collaboration ve diğ. 2016, 2018](#)). Bazı değerler için verilen referanslar: [b]: [Esteves ve diğ. \(2015\)](#), [c]: [Maciejewski ve diğ. \(2014\)](#), [d]: [Bouma ve diğ. \(2019\)](#), [e]: [Tregloan-Reed ve diğ. \(2015\)](#), [f]: [Southworth ve diğ. \(2012\)](#), [g]: [Patel & Espinoza \(2022\)](#), [h]: [Holczer ve diğ. \(2016\)](#), [i]: [Simpson ve diğ. \(2011\)](#), [j]: [Stassun ve diğ. \(2017\)](#).

Gezegen	Kepler-6b [b]	Kepler-12b [b]	WASP-1b [c]	WASP-4b [d]	WASP-6b [e]	WASP-17b [f]
Keşif Yılı	2009	2011	2007	2007	2009	2009
T_0 (JD)	2454954.487	2455004.00915	2453912.5151	2455804.516	2454425.0218	2454592.8015
P (gün)	3.2346996	4.4379629	2.5199454	1.33823147	3.3610021	3.735485
i ($^\circ$)	88.9	88.80	90	89.1	88.4	86.7
a (AB)	0.049	0.055	0.0389	0.0226	0.041	0.051
a/R_*	7.503	8.019	5.687	5.451	10.810 [g]	6.964
b	0.141	0.168	0.000	0.112 [g]	0.332 [g]	0.180 [g]
k	0.0942	0.11887	0.1036	0.152	0.146	0.1255
δ (%)	1.0811 [h]	1.6736 [h]	1.06 [i]	2.300 [j]	2.10 [j]	1.70 [j]
M_p (M_\oplus)	212	137	271	377	154	152
R_p (R_\oplus)	14.6	19.7	16.6	14.8	13.8	21.7
Barınak Yıldız						
M_* (M_\odot)	1.21	1.17	1.24	0.86	0.84	1.29
R_* (R_\odot)	1.39	1.48	1.47	0.89	0.86	1.58
T_{eff} (K)	5647	5947	5920 [a]	5400	5375	6218 [a]
d (pc)	587 [a]	881 [a]	393 [a]	267 [a]	197 [a]	406 [a]

belirlenemediği görülmüştür. Bunun üzerine söz konusu sistemler Kepler ve TESS verilerinin nicel karşılaştırması için kullanılmıştır.

Yer konumlu taramalarla da elde edilen verilerin karşılaştırılabilmesi için SuperWASP taramasıyla keşfedilen, WASP kataloğunda bulunan ötegezegenler incelenmiştir. Hem SuperWASP hem de TESS gözlem verilerine sahip 63 sistem belirlenmiştir. Bu sistemler arasından yakın komşuluğu kalabalık olan ve/veya bu alanda başka parlak gökcsimi bulunan, birden fazla barınak yıldız ve birden fazla ötegezegene sahip olan sistemlerle birlikte manyetik aktiviteye sahip veya manyetik aktivite şüphesi taşıyan barınak yıldızların bulunduğu sistemler adaylıktan çıkarılmıştır. Kalan sistemler arasından 4'ü (WASP-1, WASP-4, WASP-6 ve WASP-17 sistemleri) karşılaştırma için seçilmiştir. Kepler-6 ve Kepler-12 ile birlikte bu 4 sisteme ait literatürde yer alan parametre değerleri Çizelge 1'de verilmiştir. WASP-1 ve WASP-17 sistemlerine ilişkin çalışmalarda barınak yıldızına ait etkin sıcaklık bilgisi mevcut değildir. Bu yüzden söz konusu sistemlere ait etkin sıcaklık değerleri Gaia DR2'den alınmıştır ([Gaia Collaboration ve diğ. 2016, 2018](#)).

2 Işık Eğrilerinin Elde Edilmesi ve Analizi

Bu çalışmada kullanılan tarama projelerinden SuperWASP'ın verileri kadir biriminde verildiği için herhangi bir ön indirgeme yapılmadan doğrudan kullanılmıştır. TESS ve Kepler verilerini analiz edilebilir hale getirmek için bir Python paketi olan Lightkurve'den faydalanılmıştır ([Lightkurve Collaboration ve diğ. 2018](#)). Parlaklık ölçümü bulunmayan (sayısal bir değer bulunmadığı için NaN ifadesiyle işaretlenen) satırlar verilerden arındırılmış, sonrasında tüm veri maksimum ışık düzeyine göre normalize edilmiştir. Bu adımlar Kepler uydusu için Simple Aperture Photometry (SAP) verisine uygulanmıştır. Böylece uydudan veya kameradan kaynaklı aletsel parlaklık değişimlerinin Lightkurve programı yardımıyla kullanıcı tarafından belirlenip veriden arındırılması hedeflenmiştir. Işık eğrilerinde uydudan kaynaklanan düşük frekanslı parlaklık

değişim eğilimleri de araştırılmış ancak bu tür eğilimler tespit edilmediği için başka bir arındırma işlemi uygulanmamıştır. TESS verilerini indirgeyip sunan farklı çalışma grupları bulunsa da bu çalışmada TESS-SPOC (TESS Science Processing Operations Center, [Caldwell ve diğ. 2020](#)) tarafından sunulan ışık eğrisi dosyaları tercih edilmiştir. Kepler verisinin hazırlanmasında benimsenen yol TESS-SPOC verisi için de izlenmiştir. Son adımda, normalize edilmiş Kepler ve TESS verileri Pogson ifadesi $m = -2.5 \times \log_{10}(f)$ yardımıyla kadir birimine dönüştürülmüştür. Bu dönüşümdeki amaç kullanılan uydu verilerinin ışık eğrisi modellemesinde kullanılacak bilgisayar programına uyumlu hale getirilmesidir.

Hedef gezegenli sistemlerin ışık eğrisi verileri SuperWASP, TESS ve Kepler veri tabanlarından çekilmiştir. Yer konumlu tarama projesi SuperWASP'ın 60 saniye olan poz süresi, uzay teleskobu kaynaklı tarama projelerinden elde edilecek verilerin integrasyon sürelerini kararlaştırmada belirleyici olmuştur. Kepler, 60 saniyelik kısa ve 1800 saniyelik uzun integrasyon sürelerine sahiptir. SuperWASP ile aynı poz süresine (60 s) sahip olması seçim yapmayı kolaylaştırmıştır. TESS ise 20, 120, 200, 600 ve 1800 saniyelik integrasyon sürelerine sahiptir. Burada 20 saniyelik integrasyon süresi SuperWASP'ın 60 saniyelik poz süresine matematiksel olarak daha yakın olsa da başlangıç parametrelerini doğru belirleme açısından daha yüksek sinyal/gürültü oranına sahip 120 saniyelik gözlem verilerinin kullanılması tercih edilmiştir. Birbirlerine benzer veya aynı poz sürelerine sahip verilerin kullanılması ilerleyen adımlardaki değerlendirmelerde daha doğru sonuçların elde edilmesini sağlar. Poz sürelerinin özdeş olması için herhangi bir veri binleme işlemi uygulanmamıştır çünkü bu tür bir işlem verideki mevcut sinyalleri yapay olarak değiştirebilir ve modelleme sürecinde ek sorunlara neden olabilir ([Kipping 2010](#)). Bununla beraber veri binlemesi kullanıcıların halen tercih edebileceği bir yoldur.

Işık eğrisi modellemesi için Fortran programlama dilinde yazılmış olan JKTEBOP kodu ([Southworth ve diğ. 2004](#)) kullanılmıştır. Bu program, yıldızları çift eksenli elipsoit olarak

kabul eden Örtün Çiftler Yörünge Programını (EBOP) temel alır (Nelson & Davis 1972; Popper & Etzel 1981). JKTEBOP kodu ayrık çift yıldızların ve geçiş yapan ötegezegenlerin ışık ve dikine hız eğrilerini analiz etmek için uygundur. Bununla beraber, birbirine çok yakın ve küresellikten sapmış geometrik biçimlere sahip bileşenler içeren çift yıldız sistemlerinin analizi için uygun değildir.

Programın içerisinde 9 görev bulunmaktadır. Bu çalışmada, çalışmaya uygunluğu açısından ikinci, üçüncü ve sekizinci görevler kullanılmıştır. İkinci görev verilen bir başlangıç parametre seti için model ışık eğrisi oluşturur. Başlangıç parametrelerinin gözlemlerle uyumunu incelemek için ikinci görev uygundur. Üçüncü görevde, ikinci görev kullanılarak elde edilen başlangıç parametreleri girilerek gözlenen ışık eğrisine en iyi uyum sağlayan model parametre seti elde edilir. Üçüncü görev, Levenberg-Marquardt algoritması vasıtasıyla ışık eğrisini en iyi temsil eden model parametrelerini bulmaya çalışır (Levenberg 1944; Marquardt 1963). JKTEBOP, üçüncü görevin çalıştırılması sonrasında parametre seti, ışık eğrisine en uygun temsil ve gözlem noktaları ile bu temsilin farkını içeren üç ayrı dosya üretir. Sekizinci görev ise Monte Carlo analizini kullanır (Southworth ve diğ. 2004, 2005). Program, Monte Carlo analizi sırasında farklı veri setleri üreterek gözlem verilerini en iyi temsil eden parametreleri ve bu parametrelerin hatalarını hesaplar. Simülasyonu tekrar sayısı ne kadar çok olursa bulunan sonuçlar o denli güvenilir olur. Bu çalışma kapsamında Monte Carlo analizlerinde 10000 tekrar sayısı kabul edilmiştir.

Modellemede başlangıç değeri olarak kullanılacak parametre değerlerinden başlangıç zamanı (T_0) ve yörünge dönemi (P) için hedef ötegezegenlere ilişkin önceden yapılmış çalışmalara başvurulmuştur (Çizelge 1). Işık eğrileri, T her bir verinin gözlem zamanı olmak üzere $T=T_0+E \times P$ formülü kullanılarak evrelendirilmiş ve modelleme, analiz ve karşılaştırmalar evrelendirilmiş ışık eğrileri üzerinden yapılmıştır. Bu formülde E , T_0 anından T anına kadar geçen süredeki çevrim sayısını gösterir. Işık eğrisinde geçişin içten teğet ve dıştan teğet anları (t_1 ve t_4) başlangıç parametrelerini belirlemek için kritik noktalardır. Işık eğrisindeki bu noktalara ve geçiş derinliğine bakılarak barınak yıldız ve ötegezegenine ilişkin yarıçap oranı ($k \equiv R_p/R_*$), gezegenin yıldızın görünen disk merkezine göre nereden geçtiğini belirleyen (kesirsel) etki parametresi (b) ve buna bağlı olarak yörünge düzleminin bakış doğrultusuyla yaptığı açı (i) başlangıç değerleri olarak belirlenmiştir. Işık eğrilerinde ikinci minimum (örtülme) gözlenemediği için yörüngenin çember veya eliptik olmasına ilişkin bir değerlendirme yapılamadığından yörüngenin çembersel olduğu kabul edilmiştir. Dolayısıyla yörüngenin basıklığı (e) ve enberi boyları (ω) sıfır olarak sabitlenmiştir. Barınak yıldızla ilişkin kenar kararına değişimi doğrusal yasa ile ifade edilmiştir. Kenar kararına katsayıları Van Hamme (1993) çalışmasından alınmıştır. Belirlenen başlangıç değerleriyle JKTEBOP'un ikinci görevi yardımıyla model ışık eğrileri oluşturulmuş ve bu modellerin gözlemlerle uyumuna bakılmıştır. Deneme modelleri gözlemlerle yakın uyum sağlayana kadar başlangıç parametreleri değiştirilmiştir. Gözlem ve oluşturulan model arasında yakın uyum elde edildikten sonra JKTEBOP'un üçüncü görevi çalıştırılmış ve gözlemleri en iyi temsil eden model parametreleri aranmıştır. Bu çerçevede T_0 , P , i , k ve ölçek çarpanı parametreleri ayarlanabilir parametreler olarak kabul edilmiştir. İlk çalıştırma sonucu elde edilen modelde artıkların standart sapmasının 3

katından (3σ) daha büyük saçılma gösteren gözlem noktaları çıkarılarak üçüncü görev tekrarlanmıştır. İki adım arasındaki parametre değerlerinin hassasiyeti 3 anlamlı rakam ile ifade edilene kadar bu süreç devam etmiş ve gözlemleri en iyi temsil eden model parametre setine ulaşılmıştır. Bu parametre seti için JKTEBOP'un verdiği hatalar istatistiksel hatalardır ve bazı durumlarda azımsanabilmektedir. Daha güvenilir bir hata analizi yapabilmek için üçüncü görev sonunda elde edilen parametre setiyle Monte Carlo analizi uygulayan sekizinci görev çalıştırılmıştır. Her bir gözlem veri kaynağının üçüncü görev parametre çıktıları kendi içinde Monte Carlo analizi çalıştırılmıştır. Örneğin Kepler-6 sistemi için Kepler verilerinin üçüncü görev parametre çıktılarıyla ayrı, TESS verilerinin üçüncü görev parametre çıktılarıyla ayrı analiz yapılmıştır.

3 Işık Eğrisi Analiz Sonuçları

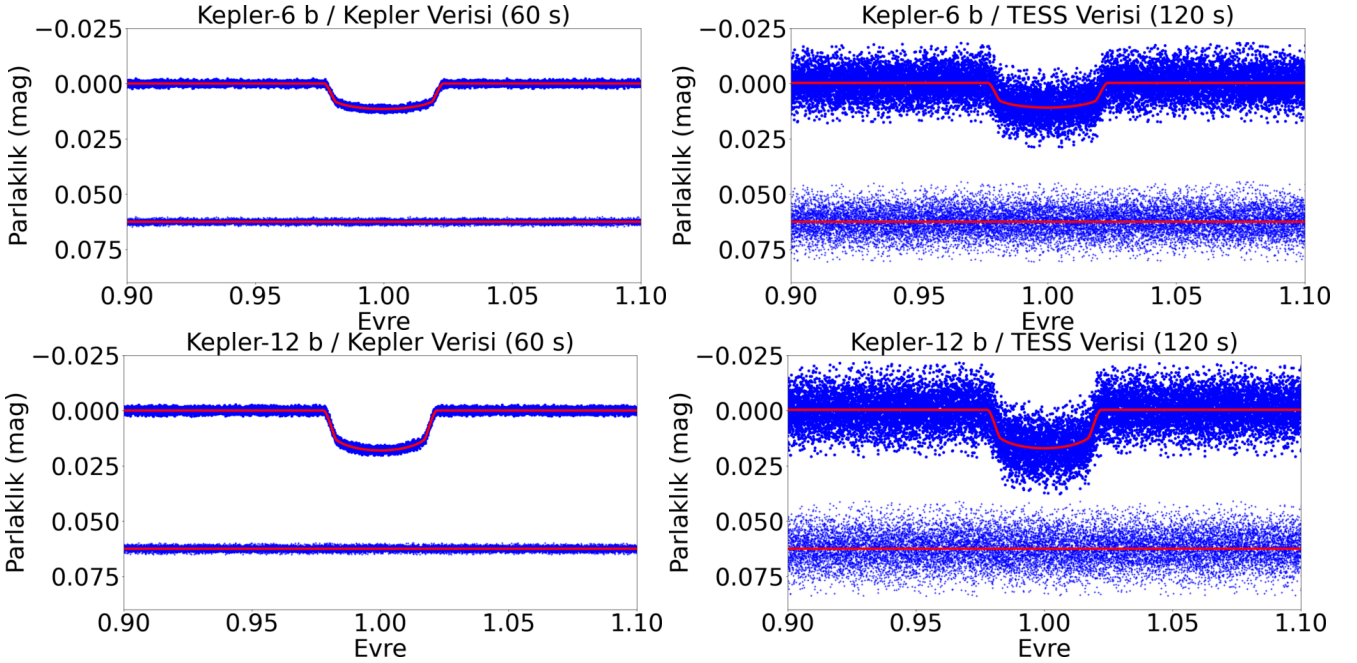
Bir önceki bölümde anlatılan adımlar 6 hedef sistemin her bir gözlem veri kaynağı (SuperWASP, TESS ve Kepler) için ayrı ayrı uygulanmıştır. Literatürden elde edilen parametre değerlerinin gözlemlerle uyumuna bakmak için JKTEBOP'un ikinci görevi çalıştırılmıştır. Girilen parametre değerleri, ikinci görevin çıktı modeli ile gözlemler arasındaki uyum en iyi olana kadar değiştirilmiştir. Bu aşamadaki uyuma gözle yapılan inceleme ile karar verilmiştir. İkinci görev tamamlandığında elde edilen parametre setleri, üçüncü görevde her bir gözlem veri kaynağı için ortak girdi parametresi olarak girilmiştir. Burada analiz başlangıç parametre değerleri uydu verilerinden (TESS veya Kepler) belirlenmiştir ve bu parametreler Yer konumlu gözlem verilerinin (SuperWASP) modellenmesi için de başlangıç parametreleri olarak kabul edilmiştir. Işık eğrileri ile üçüncü görevin ardından elde edilen modelleri ve artıkları, Şekil 1'de verilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen parametre setleri ise Çizelge 2'de listelenmiştir.

Çizelgede karekök ortalaması (RMS) ve indirgenmiş χ^2 değerlerinden de görülebileceği üzere modeller gözlemlerle oldukça uyumludur. Bununla birlikte karekök ortalamalarına bakıldığında, en düşük RMS değerlerine Kepler gözlemlerinde ulaşılmaktadır. TESS gözlemlerine uygulanan modeller, Kepler gözlemlerine oranla biraz daha büyük RMS değerleri göstermekle beraber, sonuç parametreleri halen yüksek duyarlılığa sahiptir. SuperWASP gözlemlerine uygulanan modeller ise Kepler ve TESS gözlemlerine oranla daha büyük RMS değerleri vermektedir.

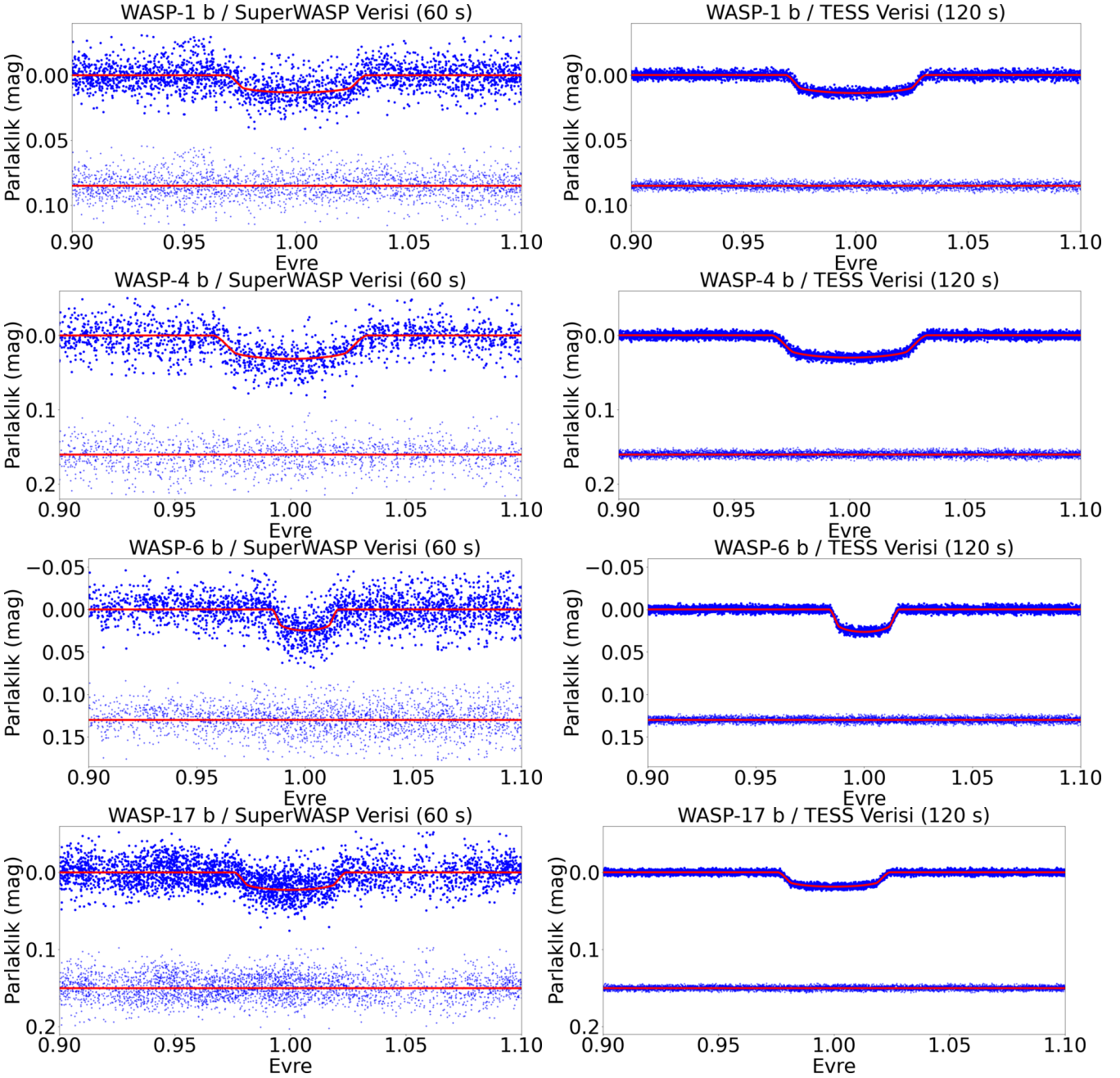
Sekizinci görev sonucunda elde edilen çıktı dosyaları ve corner Python betiği (Foreman-Mackey 2016) kullanılarak köşe diyagramları oluşturulmuş ve parametreler arası korelasyonlar bu diyagramlar üzerinden incelenmiştir. Parametrelerin birbirinden bağımsız olması durumunda grafikteki konturlar çembersel olurken, eliptik bozulmalar parametrelerin birbirleriyle sıkı korelasyona sahip olduğunu göstermektedir. Diyagramlarda, yarıçapların birbirileri arasında ve her birinin i açısıyla ayrı ayrı korelasyon gösterdiği görülebilir. Bu durum, yapılan ışık eğrisi modellerinde elde edilen sonuçların bir miktar yozlaşmış olabileceğini gösterir. Bu tür yozlaşmaların ortadan kaldırılabilmesi için çeşitli farklı tekniklerle elde edilen ek gözlem verileri, örneğin tayf gözlemleri, kullanışlı olabilir. Çizelgede her bir sütunun en üstünde ilgili parametrenin ardl olasılık dağılımı verilmiştir (Şekil 2).

Çizelge 2. Farklı veri kaynaklarından (Kepler, TESS veya SuperWASP) alınan ışık eğrilerinin analiz sonuçları ve literatür sonuçlarının bir arada gösterimi. Hata payları, ilgili basamağın yanında parantez içinde verilmiştir. Her bir sisteme ilişkin model için artıkların karekök ortalaması (RMS) ve indirgenmiş χ^2 değerleri çizelgede karşılaştırma amaçlı olarak verilmiştir. Literatür referansları: [a1]: Bu çalışma (Kepler), [a2]: Bu çalışma (TESS), [a3]: Bu çalışma (SuperWASP), [b]: Esteves ve diğ. (2015), [c]: Maciejewski ve diğ. (2014), [d]: Bouma ve diğ. (2019), [e]: Tregloan-Reed ve diğ. (2015), [f]: Southworth ve diğ. (2012), [g]: Patel & Espinoza (2022), [h]: Holczer ve diğ. (2016), [i]: Simpson ve diğ. (2011), [j]: Stassun ve diğ. (2017).

Hedef	T_0 (BJD) (2450000+)	P (gün)	i ($^\circ$)	a/R_*	b	k	δ (%)	t_{1-4} (saat)	RMS (mmag)	χ^2	Kaynak
Kepler-6b	4954.48659(9)	3.2346991(4)	87.6(2)	7.188	0.301	0.095(1)	0.903	3.580	0.662	0.915	[a1]
	4954.49(1)	3.234697(7)	87(1)	7.356	0.385	0.09(1)	0.81	3.601	5.899	0.892	[a2]
	4954.48653(1)	3.2346996(4)	88.9(2)	7.503	0.141	0.0942(1)	1.0811[h]	3.7108[h]			[b]
Kepler-12b	5004.00928(9)	4.4379619(6)	88.6(2)	8.227	0.201	0.1180(9)	1.392	4.682	0.821	1.028	[a1]
	5003.99(1)	4.43798(1)	88(2)	6.963	0.243	0.116(9)	1.346	4.696	7.005	0.904	[a2]
	5004.00915(1)	4.4379629(6)	88.80(8)	8.019	0.168	0.11887(9)	1.6736[h]	4.7074[h]			[b]
WASP-1b	3912.513(1)	2.519946(8)	85(4)	4.957	0.432	0.10(3)	1.0	3.718	9.685	0.693	[a3]
	3912.54(1)	2.519938(6)	87(1)	5.656	0.296	0.104(5)	1.082	3.763	2.013	0.919	[a2]
	3912.5151(3)	2.5199454(5)	90(1)	5.687	0.000	0.1036(8)	1.06[i]	-			[c]
WASP-4b	5804.509(5)	1.338227(4)	86(4)	0.272	0.019	0.16(3)	2.56	2.123	17.954	0.676	[a3]
	5804.5160(4)	1.3382311(2)	88(1)	4.871	0.170	0.152(4)	2.310	2.158	3.045	0.934	[a2]
	5804.51575(2)	1.33823147(2)	89.1(8)	5.451	0.112[g]	0.1520(4)	2.300[j]	-			[d]
WASP-6b	4425.020(2)	3.361(2)	86(1)	9.576	0.668	0.15(3)	2.25	2.649	15.067	0.679	[a3]
	4425.0219(7)	3.3610022(5)	88.5(4)	11.002	0.288	0.143(4)	2.132	2.589	2.463	0.926	[a2]
	4425.0218(1)	3.3610021(3)	88.4(3)	10.810[g]	0.332[g]	0.146(1)	2.1[j]	-			[e]
WASP-17b	4592.798(3)	3.73546(2)	88(6)	6.648	0.232	0.13(3)	1.69	4.370	17.543	1.023	[a3]
	4592.802(2)	3.735485(2)	87.3(5)	7.005	0.330	0.121(4)	1.464	4.342	2.086	0.929	[a2]
	4592.8015(5)	3.7354845(2)	86.7(3)	6.964	0.180[g]	0.1255(7)	1.70[j]	-			[f]



Şekil 1. Hedef sistemler için Kepler, TESS ve SuperWASP gözlem verilerinin evreye göre parlaklık grafikleri. Şekillerde sadece geçiş gözlemlendiği evre aralığı gösterilmiştir. Farklı kaynaklardan alınan gözlemlerin daha sağlıklı karşılaştırılabilmesi için üst ve alt panelde düşey eksen aralıkları aynı alınmıştır.



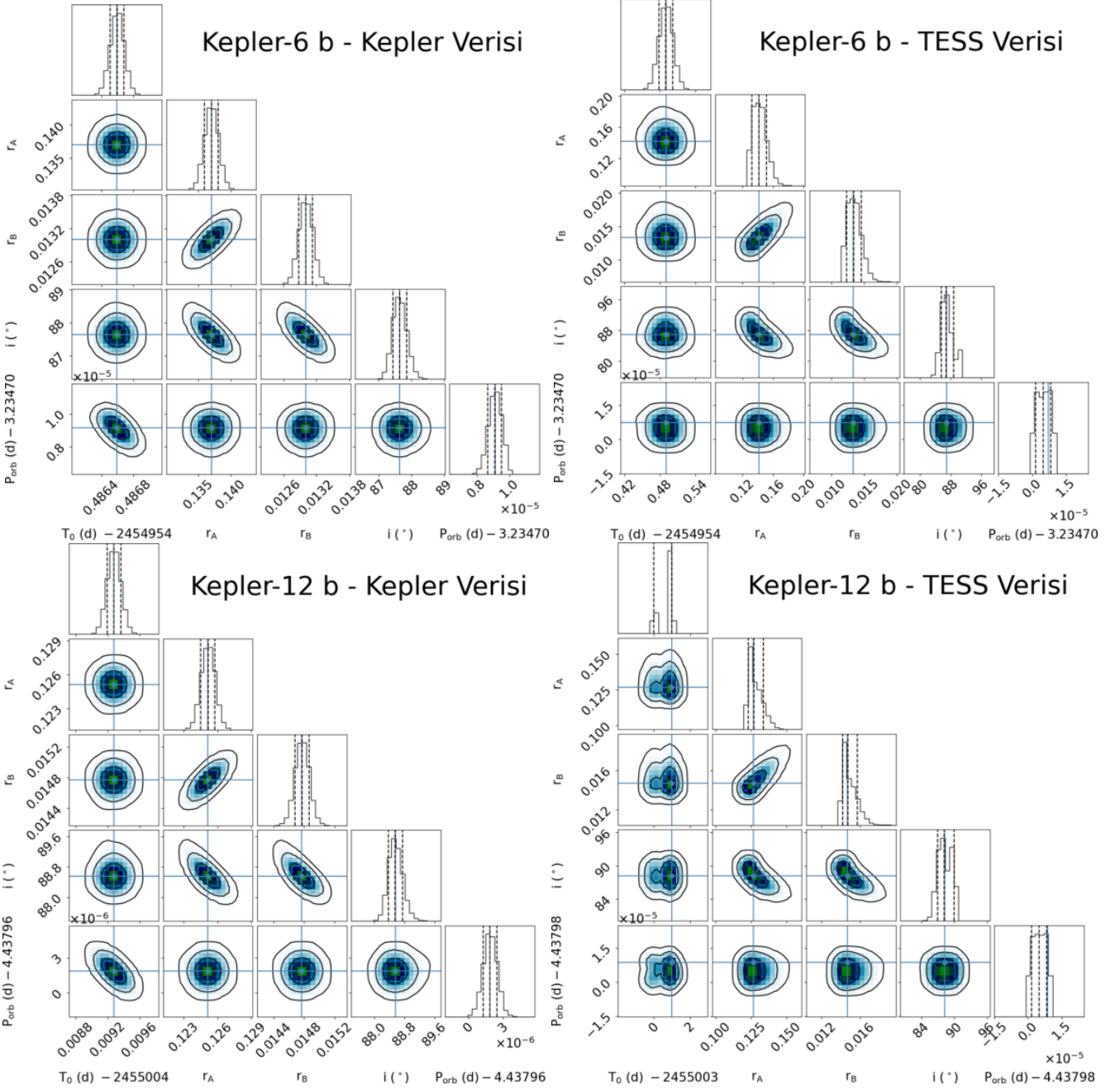
Şekil 1 – devamı.

4 Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada gözlem verilerinin nicel bir karşılaştırmasını yapabilmek için hem Yer konumlu teleskoplarla hem de uzay teleskoplarıyla geçişleri gözlenmiş olan gezegenli 6 sistem seçilmiştir. Bu sistemlerin Yer konumlu teleskoplardan ve uzaydan gözlemlerle elde edilen geçiş ışık eğrileri aynı analiz süreçlerinden geçirilmiştir. Analiz sonuçları karşılaştırılarak Yer konumlu ve uzay teleskobu kaynaklı gözlemlerin birbirlerine göre olumlu ve olumsuz yönleri incelenmiştir. Bununla beraber, inceleme öncesinde bu çalışmada elde edilen ışık eğrisi modelleriyle literatürde verilen modeller karşılaştırılmıştır. Çizelge 2’de bu çalışmada elde edilen model parametreleri, literatürde elde edilenlerle birlikte verilmiştir. Çizelgedeki

değerlerin hatalarıyla birlikte karşılaştırılması sonucunda, bu çalışmada elde edilen ışık eğrisi modellerinin öngördüğü parametrelerin, literatürde verilen modellerin parametreleriyle hata sınırları içerisinde uyumlu olduğu görülmüştür. Modellerin birbirini doğrulaması, bu çalışmanın esas amacı olan Yer’den ve uzaydan yapılan gözlemlerin karşılaştırılması noktasında daha güvenilir yorumlar yapılmasına olanak verir.

SuperWASP verisi bu çalışmada elde edilen T_0 ve P değerlerine (Çizelge 2) göre evrelendirilmiş ve tüm veri olduğu gibi kullanılmıştır. SuperWASP ışık eğrilerinde, yüksek ölçüm duyarlılığına sahip Kepler ışık eğrilerinde gözlenen geçişlerin gürültü içinde kaybolabileceği görülmüştür. Bu nedenle Kepler-6 ve Kepler-12 sistemleri için SuperWASP verileri

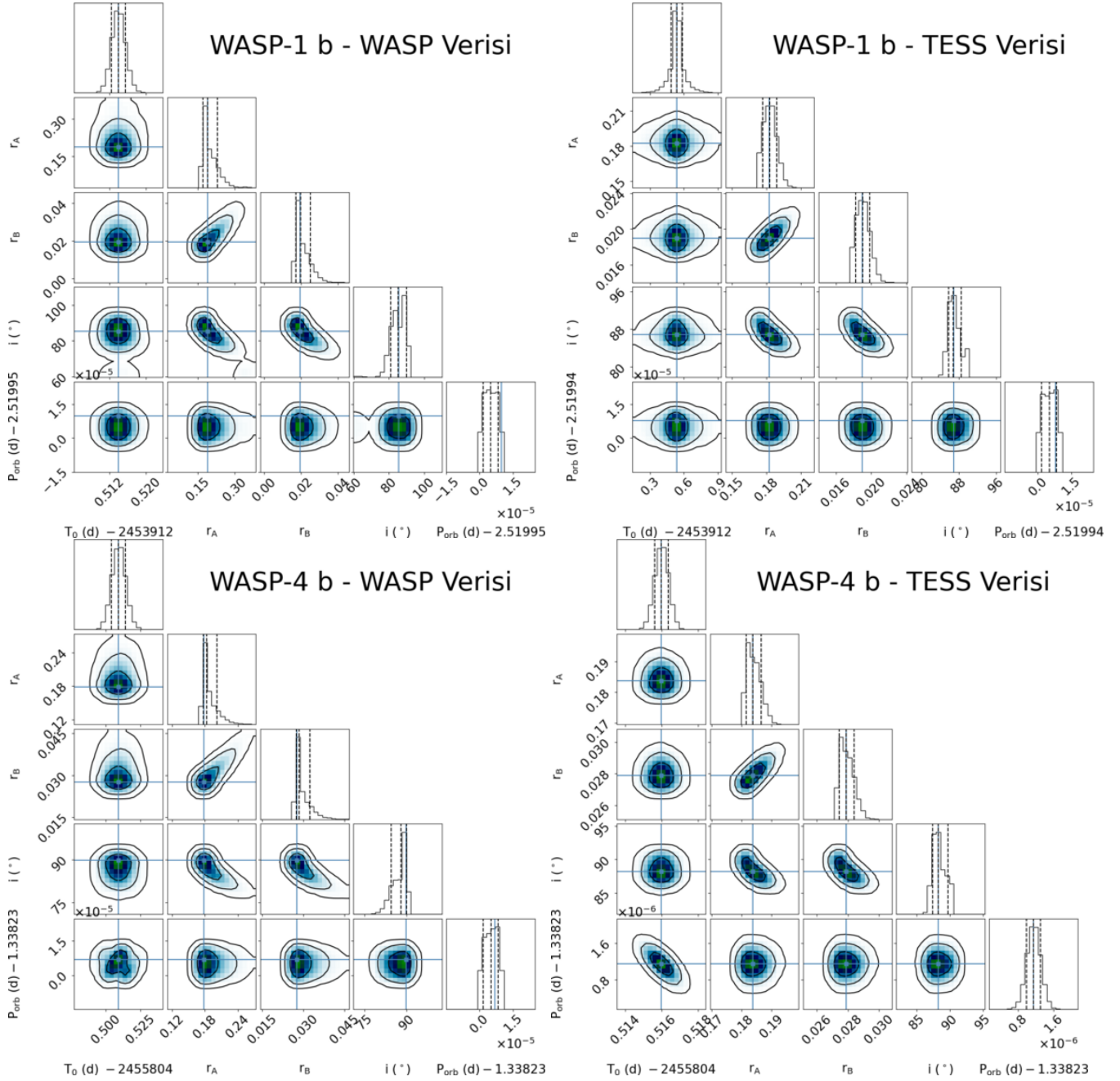


Şekil 2. Hedef gezegenli sistemlere ilişkin verilerin 10,000 Monte Carlo analizi ile elde edilen parametre sonuçları. ($r_A=R_*$, $r_B=R_p$). Şekiller `corner.py` betiği kullanılarak oluşturulmuştur (Foreman-Mackey 2016).

analize dâhil edilememiştir. Ancak söz konusu sistemler uzay teleskoplarının bir karşılaştırması için kullanılmıştır. Kepler ışık eğrilerinin analizinden elde edilen sonuçlar, parametre belirsizlikleri arasındaki farklardan ve RMS değerlerinden de görülebileceği üzere TESS ışık eğrilerinden elde edilen sonuçlardan daha hassastır. Bu, 95 cm açıklığa sahip, ayırma gücü ve ışık ölçüm hassasiyeti yüksek Kepler teleskobu, her birinin açıklığı 10 santimetre olan 4 farklı kameraya ve piksel başına 21 yaysaniyesi ayırma gücüne sahip TESS teleskobuyla karşılaştırıldığında beklenen bir durumdur.

WASP kataloğunda bulunan 4 sistemde ise Yer konumlu sistem olan SuperWASP ile TESS uzay teleskobu

karşılaştırılmıştır. Bu noktada geometrik parametreler olan yarıçaplar oranı (k) ve i açısı için TESS teleskobu ile yapılan analizlerde daha hassas sonuçlara ulaşılmıştır. Zamana bağlı T_0 ve P parametrelerinin hassasiyeti gözlem aralığının uzunluğuna göre değişiklik göstermektedir. Örneğin WASP-1 sisteminin 27 günlük TESS gözlemine karşılık 4 yıllık SuperWASP gözlemiyle elde edilen T_0 ve P değerleri daha hassastır. Öte yandan WASP-4 ve WASP-6 sistemleri için bu durum tam tersidir. 5 yıla yayılan TESS gözlemleriyle ulaşılan T_0 ve P değerleri, 1.5 yıllık SuperWASP gözlemlerine oranla daha küçük hata payına sahiptir. Yani Yer konumlu gözlemlerden daha kısa gözlem



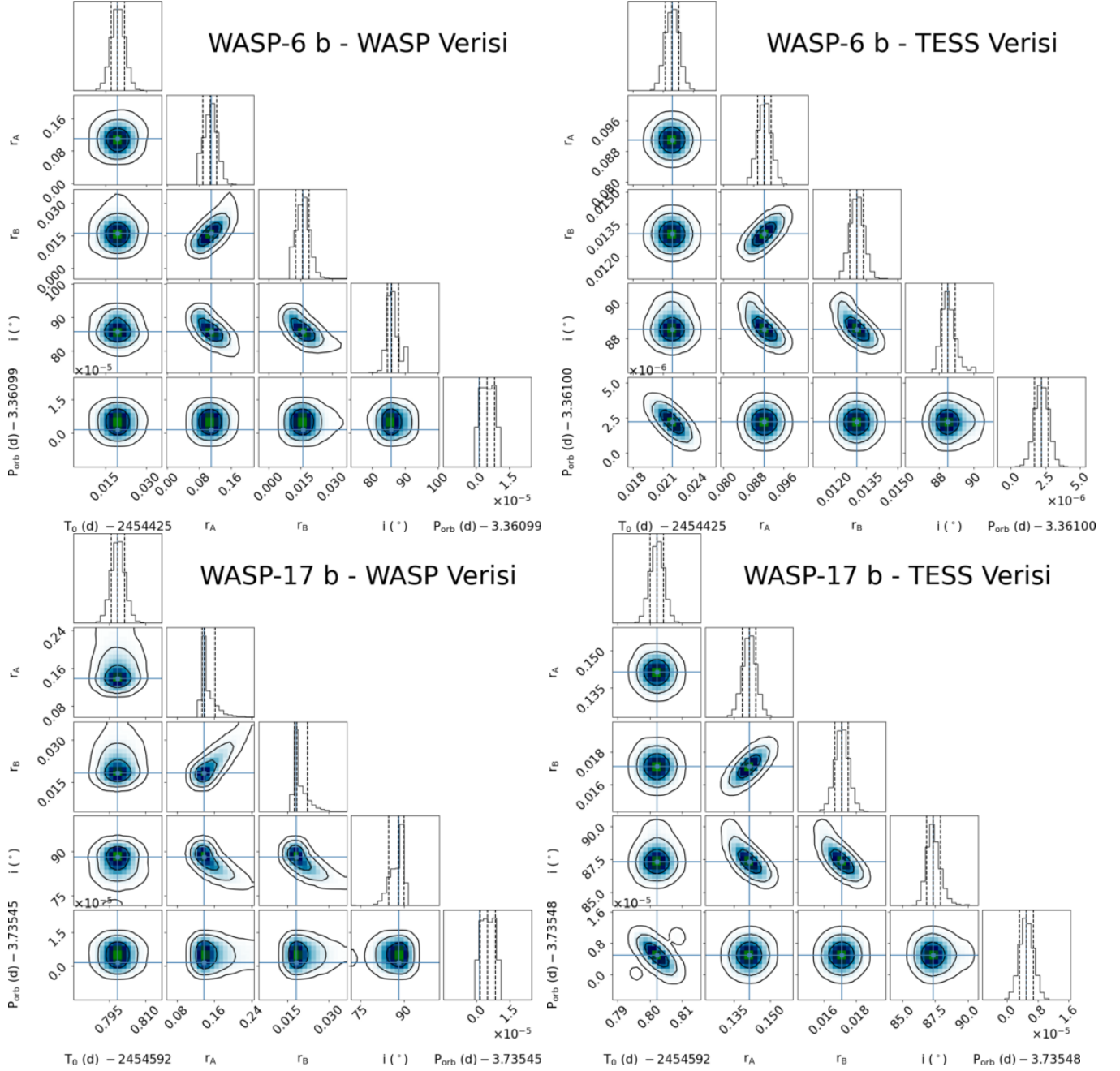
Şekil 2 – devamı.

aralığına sahip gözlemler dışında uzay teleskoplarıyla ulaşılan parametre değerleri daha hassas olmaktadır.

Bu analizler sonucunda duyarlılık konusunda sıralamanın Kepler, TESS ve SuperWASP şeklinde olduğu ve en duyarlı parametrelerin Kepler Uzay Teleskobu gözlemleri sonucu elde edildiği görülmüştür. Bunun nedenlerini anlamak için her bir tarama projesinin giriş bölümünde de yer verilen teknik özelliklerini bilmek faydalı olacaktır. SuperWASP gözlemlerinin en düşük duyarlılıkla sonuçlar vermesi oldukça olağandır. Kullanılan teleskobun açıklığı ve alıcının kalitesi ne kadar iyi olursa olsun Yer'den yapılan gözlemlerin duyarlılığı Yer atmosferi nedeniyle sınırlı olacaktır. Çünkü Yer atmosferinin etkisi yapılan atmosfer sönmükleştirme düzeltmelerine rağmen

tamamen giderilemeyen bir etkidir. Ayrıca Yer atmosferi iyi bir yansıtıcıdır. Ay ve yeryüzündeki aydınlatmalar gibi doğal ve yapay ışık kaynaklarından gelen ışığın yansımaları ve atmosferde saçılmasına neden olabilmektedir. Bu da dalgaboyuna ve gözlem konumuna bağlı olarak değişen bir ardalın gürültüsüne neden olmaktadır. Bu gürültüyü arındırmak için fark ışıkölçümü ve mutlak ışıkölçüm gibi teknikler geliştirilse de gözlem duyarlılığı uzaydan yapılan gözlemlerin duyarlılığına erişemez. Sonuç olarak Yer konumlu gözlemler Yer atmosferinin neden olduğu yansıma, saçılma ve sönmükleştirme etkileri nedeniyle olumsuz etkilenmektedir.

Uzaydan yapılan gözlemlerde Yer atmosferinin etkisi olmadığı için kullanılan teleskopların açıklıkları, kullanılan



Şekil 2 – devamı.

alıcıların özellikleri ve teleskopların ne amaçla üretildikleri öne çıkmaktadır. Kepler ve TESS teleskopları ötegezegen avcılığını amaçlıyor olsa da avlanma şekilleri konusunda birbirlerinden ayrılmaktadır. Kepler teleskobu dar ve sabit bir alanı görecelik yüksek uzaysal çözünürlükle birlikte ötegezegenleri tespit etmeyi amaçlarken TESS ise gökyüzünün tamamındaki ötegezegenleri nispeten daha düşük bir çözünürlükle tespit etme yoluna gitmektedir. Bunun yanı sıra Kepler teleskobu, özellikle Güneş-benzeri yıldız başına kaç gezegen düştüğünü araştıran istatistiksel bir tarama projesiyken, TESS teleskobu James Webb Uzay Teleskobu (JWST) ile uzaydan atmosfer gözlemleri ve Yer'den dikine hız gözlemleriyle kütlesi belirlenerek karakterize edilmek istenen, parlak yıldızlar ($m_V < 13_m$)

etrafında küçük gezegenler arayan bir tam-gökyüzü taraması amaçlamaktadır. Bu noktada Kepler'in avantajı dar alan gözlemesidir. Çünkü teleskop çapının ve kullanılan CCD alıcıların piksel boyutlarının büyük olması, buna bağlı olarak da her bir pikselin gökyüzünde gördüğü açısal boyutun TESS'e göre oldukça küçük olması sayesinde daha iyi bir açısal ayırma sağlamaktadır. Teleskobun açıklığı büyüdükçe teleskop tarafından toplanan foton miktarı da artacağı için ışıkölçüm duyarlılığı artacak, bu da daha küçük gezegenleri geçiş yöntemiyle keşfetmeyi mümkün kılacaktır.

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 makalede, WASP konsorsiyumu tarafından sağlanan WASP verilerinin DR1'indeki veriler ([Butters ve diğ. 2010](#)) ve Çek Cumhuriyeti Eğitim, Gençlik ve Spor Bakanlığı tarafından desteklenen "e-Infrastruktura CZ" (e-INFRA CZ LM2018140) projesi tarafından sağlanan hesaplama kaynakları kullanılmıştır. Bu çalışmada Fransa'nın Strazburg kentindeki CDS (Le Centre de Données astronomiques de Strasbourg)'de işletilen SIMBAD veritabanından yararlanılmıştır. Bu çalışmada, Ötegezegen Keşif Programı (Exoplanet Exploration Program) çerçevesinde NASA ile yapılan sözleşme kapsamında Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü tarafından işletilen NASA Exoplanet Archive'nden yararlanılmıştır. 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 makale Kepler görevi tarafından toplanan ve Uzay Teleskobu Bilim Enstitüsü'ndeki (STScI) MAST veri arşivinden elde edilen verileri içerir. Kepler görevi için finansman NASA Bilim Görevi Müdürlüğü tarafından sağlanmaktadır. STScI, NASA sözleşmesi NAS 5-26555 kapsamında Astronomi Araştırmaları Üniversiteleri Derneği tarafından işletilmektedir. Bu çalışmada, Gaia Veri İşleme ve Analiz Konsorsiyumu (DPAC) tarafından işlenen Avrupa Uzay Ajansı (ESA) Gaia misyonundan alınan veriler kullanılmıştır. DPAC için finansman, özellikle Gaia Çok Taraflı Anlaşması'na katılan kurumlar olmak üzere ulusal kurumlar tarafından sağlanmıştır.

Kaynaklar

- Borucki W. J., ve diğ., 2010, *Science*, 327, 977
 Bouma L. G., ve diğ., 2019, *AJ*, 157, 217
 Butters O. W., ve diğ., 2010, *A&A*, 520, L10
 Caldwell D. A., ve diğ., 2020, *Research Notes of the American Astronomical Society*, 4, 201
 Esteves L. J., De Mooij E. J. W., Jayawardhana R., 2015, *ApJ*, 804, 150
 Foreman-Mackey D., 2016, *The Journal of Open Source Software*, 1, 24
 Gaia Collaboration ve diğ., 2016, *A&A*, 595, A1
 Gaia Collaboration ve diğ., 2018, *A&A*, 616, A1
 Holczer T., ve diğ., 2016, *ApJS*, 225, 9
 Howell S. B., ve diğ., 2014, *PASP*, 126, 398
 Kipping D. M., 2010, *MNRAS*, 408, 1758
 Koch D. G., ve diğ., 2010, *ApJ*, 713, L79
 Levenberg K., 1944, *Quarterly of Applied Mathematics*, 2, 164
 Lightkurve Collaboration ve diğ., 2018, Lightkurve: Kepler and TESS time series analysis in Python, Astrophysics Source Code Library, record ascl:1812.013
 Maciejewski G., ve diğ., 2014, *Acta Astron.*, 64, 11
 Marquardt D. W., 1963, *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11, 431
 NASA Exoplanet Archive 2024, Planetary Systems, [doi:10.26133/NEA12](https://doi.org/10.26133/NEA12)
 Nelson B., Davis W. D., 1972, *ApJ*, 174, 617
 Patel J. A., Espinoza N., 2022, *AJ*, 163, 228
 Pollacco D. L., ve diğ., 2006, *PASP*, 118, 1407
 Popper D. M., Etzel P. B., 1981, *AJ*, 86, 102

- Ricker G. R., ve diğ., 2015, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 1, 014003
 Simpson E. K., ve diğ., 2011, *MNRAS*, 414, 3023
 Southworth J., Maxted P. F. L., Smalley B., 2004, *MNRAS*, 351, 1277
 Southworth J., Smalley B., Maxted P. F. L., Claret A., Etzel P. B., 2005, *MNRAS*, 363, 529
 Southworth J., ve diğ., 2012, *MNRAS*, 426, 1338
 Stassun K. G., Collins K. A., Gaudi B. S., 2017, *AJ*, 153, 136
 Tregloan-Reed J., ve diğ., 2015, *MNRAS*, 450, 1760
 Van Hamme W., 1993, *AJ*, 106, 2096

Access:

M24-0203: [Turkish J.A&A — Vol.5, Issue 2.](#)