




















Zamanlama Yöntemiyle Ötegezegen Keşfi

Özgür Baştürk¹ *, Ekrem Murat Esmer¹ , Selçuk Yalçinkaya¹ , Fatma Tezcan² ,
Sinan Aliş^{3,8} , Nazım Aksaker^{4,6} , Cihan Tuğrul Tezcan^{2,5} , Yasemin Aladağ⁶ ,
Şeyma Torun⁷ , Furkan Akar⁷ , Süleyman Fişek^{3,8} , Fatemah Davoudi⁹ ,
Seda Kaptan¹⁰ , Arif Solmaz¹¹ , Korhan Yelkenci^{3,8} , Mesut Yılmaz^{1,12} ,
Cahit Yeşilyaprak^{2,5} , Aysun Akyüz^{13,6} , Selim Osman Selam¹ 

¹ Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 06100, Ankara, Türkiye

² Atatürk Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 25240, Erzurum, Türkiye

³ İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 34116 İstanbul, Türkiye

⁴ Çukurova Üniversitesi, Adana Organize Sanayi Bölgesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, 01410, Adana, Türkiye

⁵ Atatürk Üniversitesi Astrofizik Araştırma ve Uygulama Merkezi (ATASAM), Yakutiye, 25240, Erzurum, Türkiye

⁶ Çukurova Üniversitesi, Uzay Bilimleri ve Güneş Enerjisi Araştırma ve Uygulama Merkezi (UZAYMER), 01330, Adana, Türkiye

⁷ Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı, 06100, Türkiye

⁸ İstanbul Üniversitesi Gözlemevi Uygulama ve Araştırma Merkezi, İstanbul, Türkiye

⁹ Université de Liège, Allée du 6 août 19C, 4000 Liège, Belgium

¹⁰ İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 34116 İstanbul, Türkiye

¹¹ Çağ Üniversitesi, Uzay Gözlem Araştırma ve Uygulama Merkezi (ÇUGAM), Mersin, Türkiye

¹² Ankara Üniversitesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Araştırma ve Uygulama Merkezi (Kreiken Rasathanesi), Ankara, Türkiye

¹³ Çukurova Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 01330, Adana, Turkey

Accepted: December 13, 2022. Revised: December 12, 2022. Received: November 13, 2022.

Özet

Bu çalışmada sıcak-Jüpiter türü çok sayıda ötegezegenin barınak yıldızlarının önünden geçiş zamanlarının değişimleri ile büyük çoğunluğu ortak zarf evresini tamamlamış bir grup çift yıldızın tutulma zamanlarının değişimleri üzerine yapılan uzun süreli bir araştırma ve bu araştırma kapsamında Türkiye'deki beş ayrı gözlemevinde yapılan gözlemlerin sonuçları sunulmaktadır. Son olarak, geçiş zamanları değişimi gösterdiğinden şüphelenilen TrES-5 sistemine ilişkin ön analizler bir örnek çalışma olarak sunulmuştur.

Abstract

The findings of a long-term research project on the transit timing variations of selected hot-Jupiter type exoplanets and the eclipse timing variations observed in a group of eclipsing binary systems, most of which have completed their post-common envelope evolutions, and the results of their observations carried out at five observatories across Turkey are presented within this contribution. Finally, preliminary analysis of the TrES-5 system, which has been claimed to display variations in its transit timings, is provided as a case study.

Anahtar Kelimeler: stars: planetary systems – stars: eclipsing binaries – techniques: timing – techniques: photometry

1 Giriş

Zamanlama yöntemi, önceden gezegen barındırdığı tespit edilen gezegen ya da yıldız sistemlerine kütle çekimle bağlı ancak başka bir yöntemle saptanamayan cisimlerin, gözlenen sistemdeki bazı olguların zamanlarındaki değişimlerden yararlanılarak keşfedilmesine dayanır. Bu çalışmada, yıldızın önünden geçişi gözlenen gezegen(ler) barındıran sistemlerdeki ek bileşenleri bulmayı hedefleyen Geçiş Zamanları Değişim Yöntemi (ing. Transit Timing Variation Technique – TTV) ve çift yıldız sistemlerine kütleçekimle bağlı ilave cisimlerin belirlenmesine dayalı Çift Yıldız Tutulma Zamanlaması Yöntemi (ing. Eclipse Timing Variation – ETV) ile bu sistemlere bağlı

ancak gözlenemeyen ek bileşenlerin bulunmasına yönelik olarak yürütülen uzun soluklu bir çalışmanın sonuçları sunulmaktadır. Bunların dışında pulsarların radyo bölgesinde gözlenen atımlarının ve zonklayan yıldızların ronklama (pulsasyon) frekanslarındaki değişimin belirlenmesine dayanan iki ayrı zamanlama yöntemi daha bulunmaktadır. Yöntemlerin tümünde gözlenen olgunun gözlem zamanlarında değişimin ana nedeni ışık-zaman etkisidir (ing. Light Time Effect – LiTE). Gözlenen sistemin görünmeyen bileşen ya da bileşenlerle ortak kütle merkezi etrafındaki hareketi sırasında gözlemciye yaklaşıp uzaklaşması ve ışık hızının da sonlu olmasından kaynaklı bu olgu ilk kez Danimarkalı gökbilimci Ole Rømer tarafından 1668–1678 yılları arasında yapılan Jüpiter'in uydularının örtülme gözlemleri sırasında farkedilmiştir. [NASA Exoplanet Archive](#) veritabanına göre TTV yöntemiyle 23, ETV yöntemiyle ise

* obasturk@ankara.edu.tr

18 ötegezegen keşfedilmiştir. Gezegen barındıran sistemlerde zamanlama değişimlerinin bir başka nedeni gezegenlerarası kütleçekimsel etkileşimlerdir (pertürbasyon). ETV yöntemiyle keşfedilen ötegezegenlerin yörüngeleri çok uzun dönemli ve az sayıda çoklu gezegen sistemi bulunabilmiş olduğundan bu etki gözlenmezken, çoklu gezegen sistemlerinde bu olgu da gözlenmekte ve Newton yasalarından hareketle gezegenlerin kütlelerinin yüksek duyarlılıkla belirlenmesini sağlayabilmektedir (Agol ve diğ. 2021).

Bu çalışmada §2'de verilen kriterler bağlamında seçilen ötegezegen sistemleri ile çift yıldız sistemlerinin literatür, açık veritabanları ve teleskop arşivlerinden elde edilen ışık eğrileri ve geçiş veya tutulma zamanlarının yanı sıra 1 m çaplı "TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi (TUG) T100" teleskobu, 80 cm çaplı "Ankara Üniversitesi Kreiken Rasathanesi (AUKR)" "Prof. Dr. Berahitdin Albayrak (T80)" ve 35 cm çaplı "Yrd. Doç. Dr. Zekeriya Müyesseroğlu (T35)" teleskopları, 60 cm çaplı "İstanbul Üniversitesi Gözlemevi İST60" teleskobu, 50 cm çaplı "Atatürk Üniversitesi Astrofizik Araştırma ve Uygulama Merkezinin (ATASAM) ATA50" teleskobu ve 50 cm çaplı "Çukurova Üniversitesi Uzay Bilimleri ve Güneş Enerjisi Araştırma ve Uygulama Merkezinin (UZAYMER) UT50" teleskobu ile yapılan fotometrik gözlemler sonucu elde edilen ışık eğrileri ve geçiş veya tutulma zamanları kullanılarak yapılan zamanlama analizleriyle ulaşılan sonuçlar sunulmaktadır. Bu teleskoplarla yapılan gözlemlere ilişkin genel bilgiler §3, yapılan analizler §4 ve sisteme ilave bir başka ötegezegenin uyguladığı kütleçekim etkileri nedeniyle yörünge dönemi değişiminden şüphelenilen (Sokov ve diğ. 2018) TrES-5 b ötegezegeninin geçiş gözlemleri ve TTV analizi örnek bir çalışma olarak §5'te sunulmuştur. Çalışmanın genel sonuçları ve bu sonuçlara ilişkin genel bir değerlendirme §6'da verilmiştir.

2 Çalışılan Sistemler ve Seçim Kriterleri

Zamanlama yöntemiyle gezegen arayan bir projede hedef cisimlerin çok sayıda ve geniş zaman aralığına yayılmış, yüksek hassasiyette fotometrik gözlemine ihtiyaç duyulur. Bu koşulu sağlayabilmek üzere bu çalışma için seçilen sistemler $m_V < 14^m$ parlaklık koşulunu sağlamaktadır. Bu ihtiyaç, kuzey yarı-küreden yapılan gözlemlerin fazlalığı nedeniyle seçilen cisimlerin dikaçıklıklarının -25° den büyük olması sonucunu doğurmuştur. Hedeflenen zamanlama hassasiyetine erişebilmek amacıyla geçiş sırasındaki ışık değişiminin derinliği için limit koşul $\delta m_V > 0^m005$ olarak belirlenmiştir. Seçilen ötegezegen sistemlerinin yörünge dönemi $P < 5$ gün koşulunu sağlarken, çalışılan çift sistemler daha kısa yörünge dönemlidir ($P < 2.5$ gün). Nesne seçiminde ayrıca, literatür, teleskop veri arşivleri ve açık veritabanlarındaki verinin sayı ve kalitesi de göz önünde bulundurulmuştur.

Geçiş yapan gezegenler için kısa yörünge dönemi ve yüksek derinlik koşullarının yanı sıra uzun süreli ve çok sayıda, kaliteli gözlem ihtiyacı, örnekleme sıcak-Jüpiter türü gezegenlerle sınırlamıştır. Ancak bu gezegenlerin olası yoldaşlarını belirlemek, oluşumları ve göç mekanizmalarını daha iyi anlamının yanı sıra bu tür sistemlerin mimarilerini çalışmak açısından da önemlidir (Knutson ve diğ. 2014; Nunez & Johnson 2017). Bu cisimlerin saptanması konusunda TTV, dikine hız, kızılöte tayfölcümü, doğrudan görüntüleme ve astrometri ile birlikte öne çıkan bir yöntemdir (Ngo ve diğ. 2015; Piskorz ve diğ. 2015; Ngo ve diğ. 2016). Geçiş gözlenen ötegezegenin yörüngesinde istatistiksel olarak anlamlı bir dışmerkezliğin belirlenmiş ya da dikine hızlarında uzun

dönemli trendlerin rapor edilmiş olması TTV için aday belirleme safhasında en önemli kriterler olarak belirlenmiştir.

Kısa yörünge dönemi ve hassas minimum zaman belirleme koşulları çift yıldızlar için de bir tür sınırını beraberinde getirmektedir. İlaveten seçilen sistemin ortak kütle merkezi etrafındaki hareketinin radyal doğrultudaki bileşeninin tespiti için toplam kütlelerinin küçük olması gerekliliği, seçilen sistemlerin büyük ölçüde ortak zarf evresini tamamlamış (ing. Post Common Envelope Binaries, PCEB) örten çiftler ve kataklizmik değişenlerle sınırlı kalması sonucunu doğurmaktadır. Bu türlerin dışında etraflarında yıldızaltı kütle limitleri dahilinde cisimlerin ETV yöntemiyle önerildiği yalnızca 2 sistem (FL Lyr ve KIC 5095269) daha bulunmaktadır (Kozyreva ve diğ. 2015; Getley ve diğ. 2017) ve bu sistemler de hedef listesine dahil edilmiştir.

Sonuç olarak 40 ötegezegen ve 6 çift yıldız sistemi geçiş veya tutulma zamanlarının olası değişimlerini çalışmak üzere seçilmiştir.

3 Gözlemsel Veri

3.1 Açık Veritabanları

Öncelikle seçilen cisimlerin açık veritabanlarından ışık eğrileri ve bu veritabanlarına bildirilen geçiş veya tutulma ortası zamanları ve hataları toplanmıştır. Bu amaçla [Exoplanet Transit Database \(ETD\)](#), [ARIEL Uzay Teleskobu Efemeris Servisi ExoClock](#), [AXA gözlemcileri](#), [Amerikan Değişen Yıldız Gözlemcileri Birliği \(AAVSO\)](#), [Cenevre Gözlemevi DACE Veritabanı](#), [O-C Veri Servisi O-C Gateway](#) ve [Örten Çift Yıldızların O-C Atlası](#) veritabanlarından faydalanılmıştır.

3.2 Teleskop Arşivleri

Ayrıca geçiş yöntemiyle gezegen arayan KELT, WASP, HATNet gibi tarama çalışmalarının yanı sıra UKIRT, AMOA gibi kütleçekimsel mercek araştırmaları, ASTERIA gibi servisler de ışık eğrilerine erişim sağlarlar. [NASA Exoplanet Archive](#) tüm bu servislerle erişim için gerekli linklerin yanı sıra uzay teleskoplarının ışık eğrilerinin sağlandığı internet sitelerinin linklerini de web sitesi üzerinden yayınlamaktadır. Bunlara ilaveten pek çok profesyonel veritabanı da herkesin kullanımına açık bir şekilde ışık eğrisi sağlamaktadır. Güney Yarımküre'deki Paranal Şili'de geçiş yöntemiyle gezegen arayan Next Generation Transit Survey (NGTS), 20 cm'lik 8 teleskopla tarama çalışmalarını sürdürmekte (Wheatley ve diğ. 2018) ve elde ettiği ışık eğrilerini [ESO Veri Arşivi](#) aracılığıyla isteyen herkesin kullanımına sunmaktadır. ESO arşivinde ayrıca en son La Palma İspanya'daki teleskobun da devreye girmesi ile 5 adet 1 m'lik teleskopla temel olarak M-tayf türünden küçü yıldızlar etrafında gezegen arayan SPECULOOS taramasının verileri de sağlanmaktadır (Sebastian ve diğ. 2021; Burdanov ve diğ. 2022).

Kepler ve Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) uzay teleskoplarıyla elde edilen geçiş gözlemlerine ilişkin ışık eğrileri Space Telescope Science Institute (STScI)'nin [Barbara A. Mikulski Archive for Space Telescopes \(MAST\)](#) veritabanının web servisinden indirilmiştir. Kepler uzay teleskobu ışık eğrileri, ötegezegen geçişleri için optimize edilen bir algoritmayla çıkarılan Pre-Data Conditioning Simple Aperture Photometry (PDC-SAP) formatında, TESS ışık eğrileri ise Data Validation Timeseries (DVT) formatında bu çalışma kapsamında geliştirilen Python betikleri aracılığıyla elde edilmiş ve analize hazır hale getirilmiştir. Her iki teleskop için

sırasıyla 1 ve 2 dakikalık integrasyon sürelerinde elde edilen ölçümlerle oluşturulan ışık eğrileri (ing. short cadence – SC) tercih edilirken, 30 dakikalık daha uzun integrasyon süreli veriler (ing. long cadence – LC), bir TESS sektörü (~ 27 gün) ya da Kepler çeyreği (~ 3 ay) boyunca gerçekleşecek geçiş veya tutulma zamanları değişiminin veri duyarlılığında algılanabilir sınırların altında olacağı varsayılarak kaydırılmak suretiyle birleştirilmiş ve veri duyarlılığını arttırmak için uygun miktarlarda binlenmiştir (Esmer ve diğ. 2022). CoRoT, Spitzer ve CHEOPS uzay teleskoplarıyla elde edilen ışık eğrileri, sisteme spesifik ve istenmeyen aletsel etkilerden arındırma (detrending) için ileri işlemler gerektirdiklerinden, doğrudan yayınlandıkları çalışmaların yazarları ile iletişim kurularak, yayınlandıkları formatta kendilerinden alınmıştır.

3.3 Literatür Verisi

Ayrıca, ilgilenilen ötegezegen sistemlerinin literatürde yayınlanmış ışık eğrileri CDS Vizier veritabanına bildirilmiş ise bu veritabanından ya da yayınlandığı derginin çevrimiçi ek kaynakları arasından, bir internet sitesi aracılığıyla paylaşıldığı yayında belirtilmişse ilgili internet sitesinden veya yayının ekler bölümlerinden alınmıştır. Işık eğrisine erişilemeyen her durum için baş ya da sorumlu yazarla doğrudan iletişim kurularak verinin temini yoluna gidilmiştir. Çift yıldız sistemleri için ise ışık eğrilerinin dijital verilerine erişme güçlüğü nedeniyle tutulma minimum zamanları ve hataları literatürden toplanırken, fiziksel parametrelerin elde edilmesi için ihtiyaç duyulan ışık eğrileri tarafımızca elde edilmiş ve/veya teleskop arşivlerinden alınmıştır.

3.4 Fotometrik Gözlemler

Geçiş veya tutulma zamanlarını elde etmek ve çalışılan sistemlerin temel parametrelerini belirlemek üzere fotometrik gözlem ihtiyacı bulunan sistemlerin gözlemleri $\S 1$ 'de açıklımları verilen T35, T80, ATA50, UT50, IST60 ve T100 teleskopları ile yapılmıştır. Ayrıca gerekli görüldüğü her durumda Observatoire des Baronnies Provençales'in Fransa'da konuşlandığı 40, 60 ve 80 cm'lik teleskopları ile La Silla Şili'de yeni kurduğu 80 cm'lik teleskoplardan gözlem zamanı temin edilmiştir. Bu gözlemler sonucu elde edilen bilimsel görüntülerin aletsel etkilerden arındırılması (bias-dark-flat düzeltmeleri), bir grup mukayese yıldızına göre diferansiyel açıklık fotometrilere, gözlemlerin hava kütesinden ve gerektiğinde CCD dedektör üzerindeki hareketleri kaynaklı etkilerden arındırılmaları için AstrolmageJ yazılımı (Collins ve diğ. 2017) kullanılmış ve ışık eğrileri elde edilmiştir. Gerekli görüldüğü durumlarda Gaussian süreçlere başvurularak ışık eğrileri kırmızı gürültüden de arındırılmıştır (Yalçınkaya ve diğ. 2021). Yöntem, gözlem koşullarını ve araçlarını karakterize eden tüm parametreleri iyi bilindiği için sadece tarafımızca elde edilen geçiş gözlemlerine uygulanmıştır.

4 Analizler

4.1 Geçiş Işık Eğrisi Analizi

İstenmeyen tüm etkilerden olabildiğince arındırılmış ötegezegen geçiş ışık eğrileri EXOFAST (Eastman ve diğ. 2013) ile analiz edilmiştir. Analizler sırasında serbest bırakılan parametreler, kontakt zamanları ($t_{1,IV}$), geçiş derinliği (δ) ve yörünge dönemidir (P_{orb}). Bu parametrelerden hareketle geçişin etki parametresi (b) ve ondan hareketle de yörünge yıldız

yarıçapına ölçekli büyüklüğü (a/R_*) ve yörünge eğim açısı (i) elde edilir (Mandel & Agol 2002). Diğer tüm parametreler dikine hız gözlemleri ve yıldız evrim modellerinden elde edilebilecek yıldız parametrelerini gerektirir. Ancak bu çalışmada amaç hassas geçiş ortası zamanı elde etmek olduğu için EXOFAST kodunda ilgili parametreler serbest bırakılarak ışık eğrileri modellenmiş, tüm proje ekibince aynı parametrelerle kullanılmasını garanti ettiği için de kodun NASA Exoplanet Archive tarafından bir web servisi aracılığıyla sağlanan sürümü kullanılmıştır. Geçiş ortası zamanı ve hatası EXOFAST model sonuçlarından alınmıştır. TTV verisinin homojenizasyonu bu şekilde sağlanmıştır.

Işık eğrisi modeline dayalı olarak hesaplanan ve beyaz gürültüyü temsil eden foton gürültüsü seviyesi (PNR, Fulton ve diğ. 2011) geçiş derinliğinden fazla bulunan ve kırmızı gürültüyü karakterize etmek için kullanılan β -faktörü (Winn ve diğ. 2008) 2.5 değerinin üzerinde olan ışık eğrileri elenerek, TTV analizlerine dahil edilmemiştir. Ayrıca, herhangi bir dalgaboyunda bir sistemin eldeki tüm ışık eğrilerinin derinliklerinin ağırlıklı ortalamasından 3 standart sapmanın üzerinde bir derinliğin bulunduğu ışık eğrileri de elenmiştir. Bu kontrol, geçiş parametrelerinin sağlıklı olup olmadığının denetlenmesini de sağlamaktadır. Geçiş süreleri, geniş bir süre aralığını kapsadığı için bir eleme kriteri olarak kullanılmamış, ancak her bir gezegen için yapılan modeller sırasında dikkatle kontrol edilmiştir. Geçiş başlangıcından önce başlayıp, geçiş sonu sonrasına kadarki süre içerisinde modellemeyi etkileyecek büyüklükte veri alınamayan boşluklar bulunan, eksik ya da yarım ışık eğrileri analizlere hiçbir zaman dahil edilmemiştir.

4.2 Çift Yıldız Işık Eğrisi Analizi

Çift yıldızların ışık ve dikine hız eğrisi analizleri literatürde çok iyi bilinen bir konudur ve genellikle Wilson-Devinney algoritması olarak bilinen yöntem takip edilir (Wilson & Devinney 1971). Aynı yöntemi takip eden ancak Wilson-Devinney algoritmasının dikkate almadığı pek çok başka etkiyi ve gözlenebilir olguyu da dikkate alan, aynı algoritmaya dayalı olarak çift yıldızların ışık ve dikine hız eğrilerini eş zamanlı olarak farklı uyumlama ve optimizasyon algoritmalarıyla modelleyebilen PHOEBE yazılımının her iki versiyonu (Prša & Zwitter 2005; Prša ve diğ. 2016) çift yıldızların ışık eğrisi ve dikine hız analizlerinde kullanılmıştır. Çalışılan sistemlerin temel parametrelerinin elde edilmesinin amaçlandığı durumlarda literatürden toplanan dikine hızlar da kullanılmış, modeller PHOEBE-2 ile yapılırken, hesap süresinin uzunluğu nedeniyle parametre hataları PHOEBE LEGACY ile yapılan modellerden alınmıştır (Esmer ve diğ. 2021, 2022).

Işık eğrisi analizleri sonucunda elde edilen parametrelerden biri de iç kavuşum zamanı ve hatasıdır ve model üzerinden belirlenir. Bu zaman model üzerinden ölçülmüş minimum zamanıdır. Ayrıca iyi bilinen Kwee-van Woerden yönteminin (Kwee & van Woerden 1956) yanı sıra tutulma profillerine yapılan polinom fitleriyle de minimum zaman belirlenebilmektedir. Minimum zamanlarını bu ampirik yöntemlerden Kwee-van Woerden yöntemiyle ölçmek üzere Bahar ve diğ. (2015) tarafından geliştirilen XTREMA yazılımı kullanılmıştır. Bu şekilde tutulma zamanları hem model-tabanlı, hem de ampirik yöntemlerle belirlenmiştir. Her iki yöntemle belirlenen minimum zamanlar birbirine yakınsak model-tabanlı olarak belirlenen minimum zamanların saçılmasının daha az olduğu belirlenmiştir (Esmer ve diğ. 2022). Gerek gözlemlerle elde edilen, gerekse de açık veritabanları ve

literatürden toplanan minimum zamanlar Güneş Sistemi'nin kütle merkezine dinamik zaman ölçeğinde indirgenmiştir (BJD-TDB) (Wright & Eastman 2014).

4.3 O-C Eğrilerinin Oluşturulması ve Analizi

Bir gezegen geçişi veya çift yıldızlardaki tutulmalar, başka bir etkenin bulunmaması durumunda sistemin yörünge dönemiyle sürekli tekrarlanması gereken olgulardır. Bu durumda seçilmiş bir geçiş ya da tutulma zamanına (T_0) göre kaç tane (çevrim ya da epoch, E) yörünge dönemi (P) geçmişse gözlenmesi gereken geçiş ya da tutulma zamanı $C=T_0 + E \times P$ denklemiyle kolaylıkla belirlenebilir. Gözlenen minimum zamanları ile hesaplanan arasındaki bu farkların ($O-C$) çevrim sayısına (E) göre çizdirildiği grafiğe "O-C grafiği" adı verilir.

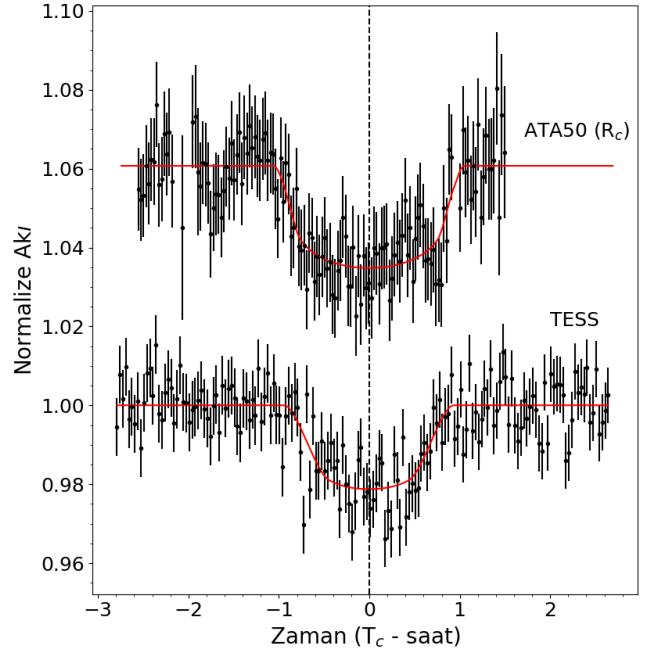
Öncelikle, bu grafikler oluşturulurken kullanılan referans minimum zamanı (T_0) ve yörünge dönemi (P) üzerindeki gözlemsel hataların zaman içindeki birikimi kaynaklı doğrusal trendin giderilmesi gerekir. Efemeris düzeltmesi adı verilen bu işlem sonrası kalan artıklara olası seküler değişimleri belirlemek üzere türevi sabit hızla çevrim başına dönem değişimini (dP/dE) verecek bir polinom, çevrimsel ya da dönemli değişimleri belirlemek üzere ise bir frekans analizi ile bulunabilecek olası değişim frekansları temelinde sinüs uyumlamaları yapılabilir ya da Kepleryan yörünge yaklaşımıyla uyumlamalar aranabilir. Daha kompleks değişimlerin belirlenmesi için olası bu modellerin bileşkeleri uygulanabilir.

Bu çalışmanın gerek ötegezegen sistemi, gerekse de çift yıldız örneklerinin O-C eğrileri üzerinde bu modeller önce lineer olmayan en küçük kareler yöntemiyle Levenberg-Marquardt algoritması temelinde uyumlama için geliştirilmiş LMFIT paketi fonksiyonları kullanılarak uygulanmıştır. Daha sonra her parametre için en küçük kareler yöntemiyle elde edilen değerlerin ortalama, belirsizliklerinin standart sapma olarak kabul edildiği Gaussyen dağılımlar oluşturulmuş ve Markov Chain Monte Carlo (MCMC) yöntemiyle bu parametre uzayından örnekler $n \geq 16$ yürüyücü (ing. walker) ile $N \geq 5000$ adımda seçilerek, olabilirlik (ing. likelihood) değerleri hesaplanmıştır. Bu değerlerden hareketle her bir parametre için oluşturulan ardıl olasılık dağılımlarının ilk $s \geq 500$ adımın (ing. burn-in) atılması sonrası merkezi değerleri, ilgili parametrenin değeri 16. ve 84. yüzdelik değerleri ise hatasının sırasıyla alt ve üst limitleri olarak belirlenmiştir.

Aday her modelin uyumlama başarımı indirgenmiş ki-kare (χ^2_ν), Akaike Bilgi Kriteri (AIC), Bayesian Bilgi Kriteri (BIC) ve Durbin-Watson istatistiği kullanılarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca model seçiminde F-testine de başvurulmuştur (Esmer ve diğ. 2021). Sonuç olarak istatistiksel olarak en anlamlı modeller belirlenmiş ve sonuçların sistemlerin fiziksel ve gözlemsel özellikleri bağlamında yorumlarına geçilmiştir.

5 TrES-5 b Ötegezegenin Geçiş Gözlemleri ve TTV Analizi

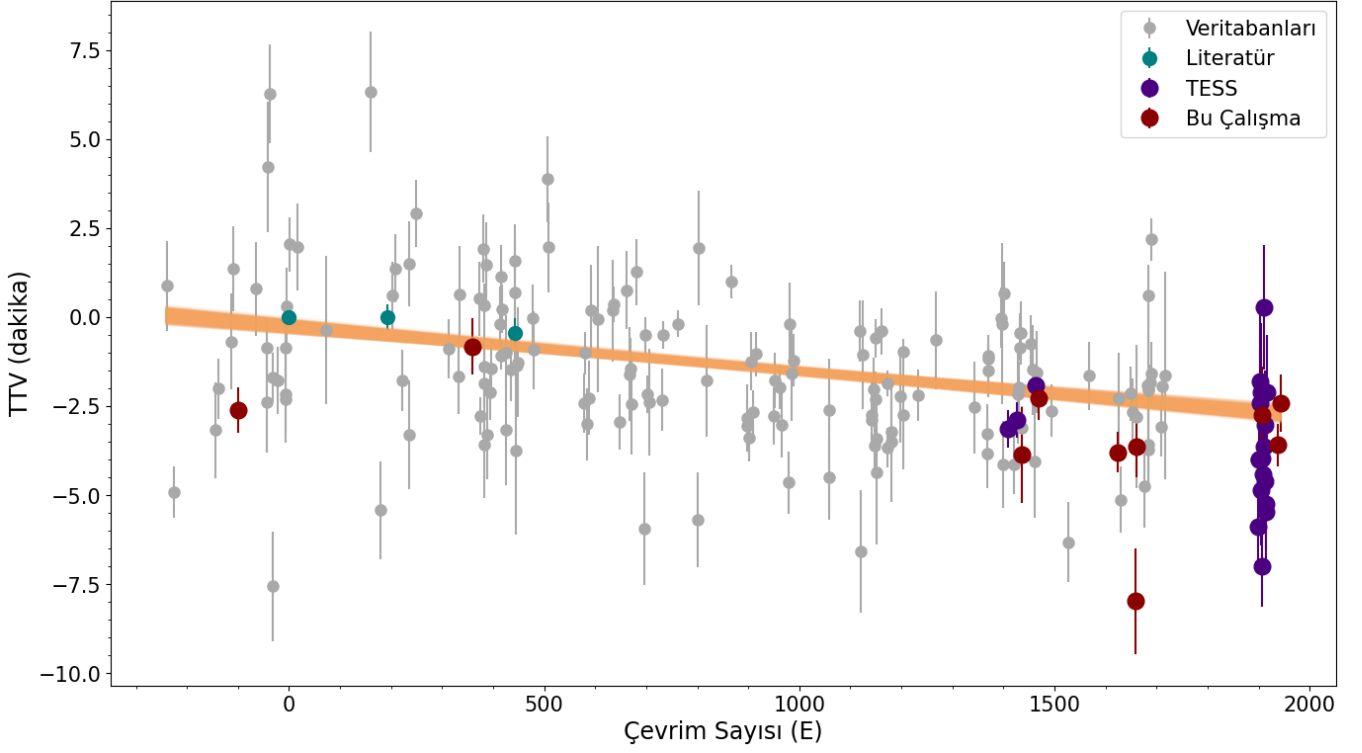
Çalışmaya örnek olması açısından, geçiş derinliği ($\delta \sim \%2$) ve dikaçıklığının ($59^\circ 45'$) yüksekliği nedeniyle Kuzey yarıküreden yer-tabanlı teleskoplarla çok sayıda geçiş gözlemi gerçekleştirilmiş TrES-5 b ötegezegeni seçilmiştir. Gezegen, $m_v = 13^m 68$ parlaklığındaki G/K tayf türünden cüce bir yıldızın etrafında 1.48 günlük yörünge döneminde dolanan $1.78 M_{Jup}$ kütleli bir sıcak-Jüpiterdir (Mandushev ve diğ. 2011). Bonomo ve diğ. (2017) tarafından yapılan dikine hız analizi yörünge dışmerkezliliğinin çok küçük olabileceğini ($e < 0.030$) gösterse



Şekil 1. TrES-5 b'nin ATA50 (üstte) ve TESS (altta) teleskoplarıyla 3 Ağustos 2021'de sırasıyla Johnson-Cousins (R_c) ve TESS bantlarında elde edilen ışık eğrileri (siyah), ve EXOFAST modelleri (kırmızı). Zaman ekseninde geçiş ortası zamanından (T_c) farkları göstermektedir. Kesikli dik doğru TESS geçiş ortası zamanını gösterip, ATA50 ışık eğrisi ve modeli daha iyi karşılaştırma için keyfi bir miktarda yukarı kaydırılmıştır.

de çembersel yörünge varsayımını garanti etmemektedir. Mislis ve diğ. (2015), Maciejewski ve diğ. (2016) ve son olarak Ivshina & Winn (2022) tarafından yapılan TTV analizleri yörünge döneminde herhangi bir değişime işaret etmemektedir. Bununla birlikte Sokov ve diğ. (2018) TrES-5 b'nin geçiş zamanlarının $P \sim 99$ gün dönem ve $A \sim 2.3$ dakika genlikle değiştiğine ilişkin istatistiksel olarak zayıf, yalancı alarm olasılığı ancak $FAP \sim \%18$ düzeyinde bir öneride bulunmuşlar; bunu da gezegen kütlesi limitleri dahilinde ilave bir cisme bağlamışlardır. Maciejewski ve diğ. (2021) de sistemin geçiş zamanlarının lineer efemeristen ayrılan bir değişim gösterdiğini tespit etmiş olmakla birlikte o zamana kadar alınan verisinde çevrimsel ya da seküler bir değişime ilişkin bir kanıt elde edememiştir.

Sistemin tarafımızca 2015 ve 2022 yılları arasında T100, İST60 ve ATA50 ile 10 geçiş gözlemi gerçekleştirilmiş, bu gözlemlerde 90 s'nin altında bir geçiş zamanlaması duyarlılığına erişilmiştir. Şekil 1'in üst panelinde TrES-5 b'nin ATA50 teleskobuyla 3 Ağustos 2021'de Johnson-Cousins R_c filtresiyle gerçekleştirilen bir geçiş gözlemi sonucu Ş3'te tarif edildiği şekilde elde edilen bir ışık eğrisi ve EXOFAST modeli örnek olarak sunulmuştur. Bu ışık eğrisinin modelinden elde edilen geçiş ortası zamanının hatası 82.9 s olup, aynı geçiş için aynı şeklin alt panelinde verilen TESS gözlemlerinde ulaşılan ortalama zamanlama hatasıyla ($\sigma_{TESS} = 81.0$ s) karşılaştırıldığında kabul edilebilir düzeydedir. 3 Ağustos 2021 tarihi bu geçişin ATA50 ($T_c = 2459430.493869$) ve TESS ($T_c = 2459430.493936$) gözlemleri sonucu elde edilen geçiş ortası zamanlar arası fark 5.8 s olup her iki ölçüm belirsizlikleri dahilinde uyumludur. ATA50 ışık eğrisi ile TESS ışık eğrisinin derinlikleri neredeyse aynı iken ($\Delta\delta = 7.0 \times 10^{-5}$), geçiş süreleri ise ancak 1.5σ



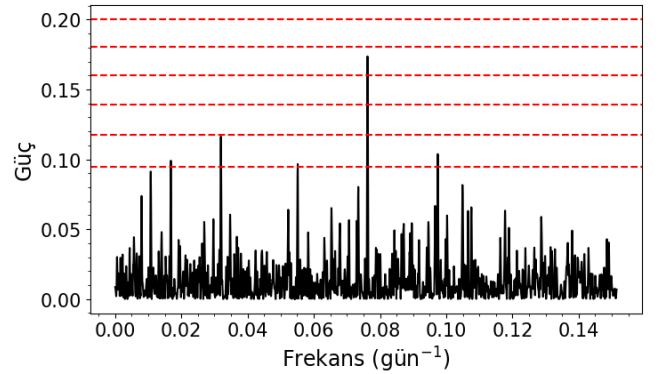
Şekil 2. TrES-5 b'nin TTV diyagramı. Diagram, TTV verisine Ş4'de tarif edildiği şekilde yapılan lineer modellerden en olası olanlar (turuncu taralı bölge), açık veritabanları (gri noktalar), literatür verisi (turkuaz), kendi ışık eğrilerimiz (kirmizi) ve TESS ışık eğrileri (mor) üzerinden ölçülen geçiş ortası zamanları ve belirsizliklerini göstermektedir.

mertebede uyumlu bulunmuştur. Bu görece zayıf uyumun sebepleri ATA50 gözleminin sonunda kötüleşen hava koşulları nedeniyle geçiş çıkışının iyi belirlenememiş olması ve bu gözlemlerdeki sistematik korele gürültüdür. Bu durum Şekil 1'de açıkça görülmektedir. Bu gürültüyle yerden küçük teleskoplarla yapılan gözlemlerde çok sık karşılaşılmaktadır ve en önemli nedenlerinden biri takip hatalarının neden olduğu hedef ve mukayese yıldızların CCD dedektörü üzerindeki konum değişimleridir. Yıldızların farklı zamanlarda üzerine düştüğü piksellein ışığa cevapları dedektör yüzeyi boyunca tekdüze olmadığı gibi zamanla da değişir ve düzalan (flat) düzeltmeleriyle ancak belirli bir düzeyde giderilebilmektedir.

Sistemin 14, 15 ve 17. sektörlerde 30 dakikalık LC (3 adet), 41. sektörde ise 2 dakikalık SC modlarında (17 adet) ve 90 s'den daha iyi bir geçiş zamanlaması duyarlılığında toplam 20 TESS ışık eğrisi elde edilmiştir. Sistemin tarafımızca açık veritabanları ve literatürden toplanan 166 ışık eğrisi ile birlikte toplam 196 ışık eğrisinin EXOFAST modellerinden ölçülen geçiş ortası zamanları ve Maciejewski ve diğ. (2016) tarafından verilen lineer efemeris kullanılarak oluşturulan TTV diyagramı ile Ş4 kısmında verildiği şekilde uyumlanan lineer modeli Şekil 2'de, bu modele göre düzeltilmiş lineer efemeris ise Denklem 1'de verilmiştir:

$$T(\text{BJD-TDB}) = 2456605.334790(65) + E \times 1.48224667(6) \quad (1)$$

Yörünge dönemindeki 5.3 ms düzeyindeki belirsizlik, 8 yılın üzerinde bir zaman aralığına yayılan veri üzerinden şu



Şekil 3. TrES-5 b'nin TTV diyagramının lineer modelden artıklarının Lomb-Scargle periyodogramı (siyah sürekli eğri). Yatay kırmızı kesikli doğrular aşağıdan yukarı sırasıyla %1, %0.1, %0.01, %0.001 ve %0.0001'lik yalancı alarm (FAP) değerlerinin güçlerine karşılık gelmektedir. 13.12 günlük dönemliliğin FAP değeri %0.002 olup istatistiksel olarak anlamlıdır, ancak TESS verisiyle uyumlu değildir.

ana kadar ulaşılan en hassas yörünge dönemine ulaşıldığını göstermektedir.

Veriye yapılan parabol uyumlaması lineer modele göre istatistiksel olarak daha uyumlu bulunmamıştır. Lineer modelden artıklara yapılan frekans analizi sonucu elde edilen Lomb-Scargle periyodogramında ise 13.2 gün dönemlilikte çok düşük bir yalancı alarm olasılığına ($FAP = 2.1 \times 10^{-5}$) karşılık gelen bir maksimum gözlenmiştir (Şekil 3). Ancak bu

Çizelge 1. Proje kapsamında kullanılan TUG'un 1 m çaplı teleskobu T100, İstanbul Üniversitesinin 60 cm çaplı teleskobu İST60, Atatürk ve Çukurova Üniversitelerinin 50 cm çaplı teleskopları ATA50 ve UT50, Ankara Üniversitesinin 35 cm (T35) ve 80 cm (T80) çaplı teleskoplarında yapılan gözlemlere ilişkin istatistikler. Sırasıyla N_T tahsis edilen ve N_G gözlem yapılan gece sayılarını, N_{LC} elde edilen ışık eğrisi sayısını, σ_{RMS} bu ışık eğrilerinin EXOFAST modellerinden fark karelerinin toplamalarının ortalama ve standart sapmasını, σ_t geçiş ortası zamanlarda erişilen ortalama zamanlama hassasiyeti ve standart sapmasını göstermektedir.

Teleskop	N_T (gece)	N_G (gece)	N_{LC} (sayı)	σ_{RMS} (mmag)	σ_t (s)
T100	95	57	84	1.62±0.54	35.2 ± 17.4
İST60	53	27	17	1.96±0.76	48.4 ± 21.5
ATA50	74	28	22	1.87±0.69	49.1 ± 18.9
UT50	NA	NA	28	2.42±0.95	61.7 ± 25.6
T35	87	33	22	2.51±0.97	65.9 ± 28.3
T80	13	8	7	1.71±0.83	45.3 ± 22.7
Toplam	322	159	180	1.91±0.71	46.41 ± 20.78

frekansın sadece açık veritabanlarından gelen veride bulunduğu, bu dönemlilikte bir değişimin iki çevrimini içermesi gereken TESS verisinin bu dönemlilikle uyumlu olmadığı sonucuna varılmıştır. Nitekim, bu frekansın harmonikleri de veriyle uyumlu görünmemektedir. Açık veritabanlarından gelen veri dışarıda bırakılarak yapılan frekans analizinde ise baskın bir frekansa rastlanmamıştır. Ayrıca, [Sokov ve diğ. \(2018\)](#) tarafından $P \sim 99$ günde önerilen ilave cisim kaynaklı olabilecek herhangi bir dönemli değişime gerek tüm veri seti üzerinde, gerekse de ETD verisi dışarıda bırakılarak yapılan analizlerde rastlanmamıştır. Sistemin TTV analizinin, TESS tarafından yapılmakta olan 55, 56 ve 57. sektör gözlemleri ve açık veritabanları ile literatürde bu arada elde edilmiş ışık eğrileri ([Maciejewski ve diğ. 2021](#)) dahil edilerek genişletilecek bir veri seti üzerinden tekrar yapılması gerekmektedir.

6 Sonuçlar

Bu çalışmada, temel amacı seçilmiş ötegezegen ve çift yıldız sistemlerinde gözlenen geçiş, örtme ve tutulma olgularının zamanlarındaki değişimleri incelemek ve olası dönemli değişimlerini belirleyerek bu sistemlere kütle çekim ile bağlı ancak gözlenemeyen ilave bileşenleri ortaya çıkarmak olan uzun soluklu bir proje tanıtılmakta ve yoğun gözlemsel veriye dayalı bu projenin bazı temel sonuçları sunulmaktadır. Projenin erişimi bulunan gözlemlerindeki teleskoplarla yapılan geçiş ve çift yıldız tutulma gözlemlerinde ulaşılan bazı istatistikî sonuçlar Çizelge 1 'de özetlenmektedir. Her bir teleskopta tahsis edilen ve gözlem yapılan gece sayıları ve bu gecelerde elde edilen ışık eğrisi sayılarının yanı sıra ışık eğrisi kalitesini göstermek üzere ışık eğrisi modellerinden farkların ortalaması (σ_{RMS}) milikadir, ölçülen geçiş ortası zamanın üzerindeki belirsizliklerin ortalaması (σ_t) ise saniye biriminde verilmiştir. UZAYMER UT50 teleskobu gecenin açık ve teknik aksaklığın bulunmadığı tüm uygun gecelerde proje kaynaklarının gözlemi için tahsis edilmiştir.

Sonuç olarak bu proje kapsamında yapılan başarılı 180 geçiş gözleminin yanı sıra açık veritabanlarından 1459, literatürden 736, TESS Uzay Teleskobu'ndan 409 ve Kepler K2 teleskobundan 491 olmak üzere 3275 geçiş ışık eğrisi şu ana kadar analiz edilmiş durumdadır. Geçiş ışık eğrilerinin

tarafımızca EXOFAST kullanılarak elde edilen geçiş ortası zamanları ile farklı araştırmacılar tarafından açık veritabanları ve literatüre başka yöntemler ve yazılımlarla ölçülerek rapor edilen geçiş ortası zamanları arasında istatistiksel olarak anlamlı farkların bulunduğu tespit edilmiştir. 10 ötegezegen için yapılan bir örnek çalışmada ölçümlerin medyan değerleri arasındaki farkların 3–59 s arasında değiştiği ve tarafımızca yapılan ölçümlerin saçılmasının, farklı gözlemcilerce rapor edilen ölçümlerin saçılmasına göre daha az olduğu sonucuna varılmıştır ([Baştürk ve diğ. 2022](#), Şekil 3 ve Çizelge 5).

Çalışılan 40 ötegezegen sisteminin TTV analizlerinde seküler ya da çevrimsel bir değişime ilişkin kanıt bulunamamıştır. Ancak, WASP-43 b ötegezegeninin TTV diyagramına yapılan parabol modeli, lineer modele göre bir miktar daha başarılı bulunmuş ve parabolün kuadratik katsayısının negatif bulunmuş olması gezegenin yörünge döneminin küçülüyor olabileceği şeklinde yorumlanmıştır. Sistemin TESS Uzay Teleskobu'yla iki farklı sektörde yapılan gözlemlerinde elde edilen geçiş ortası zamanları arasında da bu küçülmeye işaret eden bir fark bulunmuştur ([Davoudi ve diğ. 2021](#)).

Bu çalışmaya konu proje kapsamında ETV analizleri gerçekleştirilen 6 sistemden HW Vir ([Esmer ve diğ. 2021](#)), NY Vir ve Kepler-451'de ([Esmer ve diğ. 2022](#)) ötegezegen veya kahverengi cüce kütle limitleri dahilinde minimum kütleyle sahip ilave bileşenlerin gözlenen dönemli ETV değişimlerine sebep olabileceği saptanmıştır. Yapılan yörünge kararlılık analizleri HW Virginis sisteminde ETV analizi sonucu belirlenen iki yıldızlı cisim adayının yörüngelerinin kararlı olamayacağını gösterirken, NY Virginis sisteminde belirlenen iki ilave cisim adayının yörüngeleri ise kararlı görünmektedir. Kepler-451 sisteminin ETV analizinde daha önce [Baran ve diğ. \(2015\)](#) tarafından keşfedilen gezegen kütle limitlerindeki cismin 416 gün olarak belirlenen yörünge dönemi, yerden ve uzaydan (TESS) yapılan yeni gözlemlerin analizleriyle 406 gün olarak güncellenmiş; sisteme ilave 43 ve 1800 gün yörünge dönemi, yine gezegen kütlesi limitleri dahilinde iki ilave cismin daha bulunduğu belirlenmiştir. Yapılan yörünge kararlılık analizleri sonucunda uzun zaman aralıklarında kararlı yörüngelerde buldukları tespit edilen bu iki ötegezegen, Kepler-451c ve Kepler-451d isimleriyle [NASA Exoplanet Archive ve Exoplanet Encyclopedia](#) kataloglarında yerlerini almışlardır ([Esmer ve diğ. 2022](#)). Sistemlerin yörünge kararlılık analizlerine ilişkin ayrıntılar 22. Ulusal Astronomi Kongresi'nde proje ekibimiz araştırmacılarından Ekrem M. Esmer tarafından sunulmuştur ve bu yayınla aynı sayıda yer almaktadır. Sistem, ETV yöntemiyle ikiden fazla gezegen barındırdığı bilinen ilk sistem olurken, aynı zamanda da en kısa yörünge dönemi gezegene (Kepler-451d) ev sahipliği yapmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma 2022 yılı içerisinde tamamlanan 118F042 proje numaralı 1001 projesini tanıtmakta ve sonuçlarını özetlemektedir. Projemize desteğinden ötürü TÜBİTAK'a teşekkür ederiz. İST60 Teleskobu ve çevre birimleri Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığının 2016K12137 numaralı, İstanbul Üniversitesinin BAP-3685 ve FBG-2017-23943 numaralı projeleri kapsamında temin edilmiştir. AUKR T80 Teleskobu'nun 18A0759001 numaralı BAP projesiyle temini için destek sağlayan Ankara Üniversitesi'ne teşekkür ederiz. Bu çalışmada, Atatürk Üniversitesi Astrofizik Araştırma ve Uygulama Merkezi (ATASAM) tarafından işletilen ATA50 teleskobu ve arkasındaki

CCD kamera ile elde edilen veriler kullanılmıştır. ATA50 teleskobu Atatürk Üniversitesi (P.No. BAP-2010/40), CCD kamera ise Erciyes Üniversitesi (P.No. FBA-11-3283) Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü Birimi (BAP) tarafından finanse edilmiştir. TÜBİTAK'a, TUG T100 Teleskobu'yla 16AT100-997, 16BT100-1034, 16CT100-1096, 17BT100-1196 17BT100-1208 ve 19AT100-1471 numaralı gözlem projeleri kapsamında tahsis edilen gözlem zamanları için teşekkür ederiz. Gözlemlerin yapıldığı tüm gözlemevlerinin çalışanları ve gözlemlere katılan öğrenci gözlemcilere projemize yaptıkları katkılardan ötürü teşekkürü bir borç biliriz.

Kaynaklar

- Agol E., ve diğ., 2021, *The Planetary Sci.J.*, 2, 1
Baştürk Ö., ve diğ., 2022, *MNRAS*, 512, 2062
Bahar E., Şenavcı H. V., Baştürk Ö., 2015, in Rucinski S. M., Torres G., Zejda M., eds, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series Vol. 496, Living Together: Planets, Host Stars and Binaries*. p. 288
Baran A. S., Zola S., Blokesz A., Østensen R. H., Silvotti R., 2015, *A&A*, 577, A146
Bonomo A. S., ve diğ., 2017, *A&A*, 602, A107
Burdanov A. Y., ve diğ., 2022, *PASP*, 134, 105001
Collins K. A., Kielkopf J. F., Stassun K. G., Hessman F. V., 2017, *AJ*, 153, 77
Davoudi F., Baştürk Ö., Yalçinkaya S., Esmer E. M., Safari H., 2021, *AJ*, 162, 210
Eastman J., Gaudi B. S., Agol E., 2013, *PASP*, 125, 83
Esmer E. M., Baştürk Ö., Hinse T. C., Selam S. O., Correia A. C. M., 2021, *A&A*, 648, A85
Esmer E. M., Baştürk Ö., Selam S. O., Aliş S., 2022, *MNRAS*, 511, 5207
Fulton B. J., Shporer A., Winn J. N., Holman M. J., Pál A., Gazak J. Z., 2011, *AJ*, 142, 84
Getley A. K., Carter B., King R., O'Toole S., 2017, *MNRAS*, 468, 2932
Ivshina E. S., Winn J. N., 2022, *ApJS*, 259, 62
Knutson H. A., ve diğ., 2014, *ApJ*, 785, 126
Kozyreva V. S., Bogomazov A. I., Demkov B. P., Zotov L. V., Tutukov A. V., 2015, *Astronomy Reports*, 59, 1036
Kwee K. K., van Woerden H., 1956, *Bull. Astron. Inst. Netherlands*, 12, 327, *ADS*
Maciejewski G., ve diğ., 2016, *Acta Astron.*, 66, 55, *ADS*
Maciejewski G., Fernández M., Aceituno F., Ramos J. L., Dimitrov D., Donchev Z., Ohlert J., 2021, *A&A*, 656, A88
Mandel K., Agol E., 2002, *ApJ*, 580, L171
Mandushev G., ve diğ., 2011, *ApJ*, 741, 114
Mislis D., ve diğ., 2015, *MNRAS*, 448, 2617
Ngo H., ve diğ., 2015, *ApJ*, 800, 138
Ngo H., ve diğ., 2016, *ApJ*, 827, 8
Nunez L. E., Johnson J. A., 2017, in *American Astronomical Society Meeting Abstracts #229*. p. 245.21
Piskorz D., Knutson H. A., Ngo H., Muirhead P. S., Batygin K., Crepp J. R., Hinkley S., Morton T. D., 2015, *ApJ*, 814, 148
Prša A., Zwitter T., 2005, *ApJ*, 628, 426
Prša A., ve diğ., 2016, *ApJS*, 227, 29
Sebastian D., ve diğ., 2021, *A&A*, 645, A100
Sokov E. N., ve diğ., 2018, *MNRAS*, 480, 291
Wheatley P. J., ve diğ., 2018, *MNRAS*, 475, 4476
Wilson R. E., Devinney E. J., 1971, *ApJ*, 166, 605
Winn J. N., ve diğ., 2008, *ApJ*, 683, 1076
Wright J. T., Eastman J. D., 2014, *PASP*, 126, 838
Yalçinkaya S., ve diğ., 2021, *Acta Astron.*, 71, 223

Access:

M23-0350: *Turkish J.A&A* — Vol.4, Issue 3.