

Geçiş Zamanları Değişimi Yöntemiyle HAT-P-16b ve TrES-3b Ötegezegenlerinin İncelenmesi

Y. Aladağ¹★, A. Akyüz^{1,3}, Ö. Baştürk⁴, N. Aksaker^{1,2}, E.M. Esmer⁴,
S. Yalçinkaya⁴

¹Uzay Bilimleri ve Güneş Enerjisi Araştırma ve Uygulama Merkezi (UZAYMER), Çukurova Üniversitesi, 01330, Adana, Turkey

²Adana Organize Sanayi Bölgesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Çukurova Üniversitesi, 01330, Adana, Turkey

³Fizik Bölümü, Çukurova Üniversitesi, 01330, Adana, Turkey

⁴Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, Ankara Üniversitesi, Ankara, Turkey

Accepted: June 16, 2021. Revised: June 6, 2021. Received: May 10, 2021.

Özet

Bu çalışmada, HAT-P-16b ve TrES-3b ötegezegenlerinin geçiş gözlemleri Çukurova Üniversitesi UZAYMER Gözlemevi'nde bulunan 50 cm (UT50) Ritchey Chretien tipi teleskobu ile gerçekleştirilmiştir. Her iki ötegezegenin ışık eğrileri analizleri yapılarak uygun modeller ile sistem parametreleri elde edilmiştir. HAT-P-16 için bu sistem parametrelerinden bazıları: $M_P = 4.172 \pm 0.163M_J$, $R_P = 1.309 \pm 0.111R_J$, $a/R_* = 7.1922 \pm 0.0017$ ve $b = 0.1003 \pm 0.1533$ olup Buchhave et al. (2010) çalışmasında verilen değerler ile uyumludur. TrES-3 sistemi için bu parametreler: $M_P = 1.959 \pm 0.111M_J$, $R_P = 1.320 \pm 0.169R_J$, $a/R_* = 6.0656 \pm 0.4899$ ve $b = 0.7892 \pm 0.0700$ olup O'Donovan et al. (2007) çalışmasında sunulan değerler ile uyumludur. HAT-P-16b için geçiş ışık eğrileri kullanılarak oluşturulan Lomb-Scargle (LS) periyodogramı ile yapılan frekans analizi sonucunda anlamlı (Yalancı Alarm Olasılıkları – FAP=%96) bir Geçiş Zamanları Değişimi (TTV) bulgusuna rastlanmamıştır. Bununla birlikte TrES-3b ışık eğrilerinden elde edilen LS periyodogramında 32.38 günlük bir baskın dönem ve 41.07 günlük ikincil dönem tespit edilmiştir. FAP değerleri sırasıyla %3.41 ve %1.88 olan bu dönemliliklerin yıldızın dönme dönemine yakın olduğundan leke kaynaklı ışık değişimleri modülasyonlarından kaynaklanabileceğini değerlendirmekteyiz.

Abstract

In this study, the transit observations of HAT-P-16b and TrES-3b exoplanets were carried out at Çukurova University UZAYMER Observatory with a 50 cm Ritchey Chretien type telescope. By analyzing the light curves of both exoplanets, system parameters have been obtained with acceptable models. Some of these parameters for HAT-P-16 systems were found to be: $M_P = 4.172 \pm 0.163M_J$, $R_P = 1.309 \pm 0.111R_J$, $a/R_* = 7.1922 \pm 0.0017$ and $b = 0.1003 \pm 0.1533$ which are consistent with the values given in Buchhave et al. (2010). Also, for the TrES-3 system, the same parameters were calculated as $M_P = 1.959 \pm 0.111M_J$, $R_P = 1.320 \pm 0.169R_J$, $a/R_* = 6.0656 \pm 0.4899$ and $b = 0.7892 \pm 0.0700$. These values are also consistent with the values given in O'Donovan et al. (2007). No significant Transit Timing Variations (TTV) was found as a result of the Lomb-Scargle (LS) periodogram for HAT-P-16b by using the transit times obtained from the transit light curves (False Alarm Probabilities – FAP) = 96%). However, a significant periodicity was found at 32.38 days and a secondary periodicity was found at 41.07 days were determined as a result of the LS periodogram obtained from the TrES-3b data. We interpret that these periods with FAP of 3.41% and 1.88%, respectively, are close to the rotation period of the host star. Therefore, these periods could be due to the modulation of spot-induced light variations.

Anahtar Kelimeler: planets and satellites: individual: HAT-P-16b and TrES-3b - planetary systems - methods: observational - techniques: photometric - methods: data analysis

1 Giriş

Güneş'ten başka bir yıldızın etrafında dolanan gezegenlere ötegezegen (*exoplanet*) adı verilmektedir. İlk ötegezegen 1992 yılında, bir atarca olan PSR 1257+12'nin çevresinde bulunmuştur (Wolszczan & Frail 1992). Ayrıca çevresinde bir ötegezegen olduğu belirlenen ilk anakol yıldızı ise güneş benzeri bir yıldız olan 51 Pegasi'dir (Mayor & Queloz 1995). Bu keşiflerden sonra ötegezegen araştırmaları astronomi alanında çok çalışılan konular arasında yer almıştır. Teknolojik gelişmelerin katkısıyla günümüzde keşfedilen ötegezegen sayısı her geçen gün artış göstermektedir. Ötegezegen keşifleri farklı yöntemlerle yapılabilmektedir. Bugüne kadar sayıları 4311'i bulan ötegezegenler-

den 1'i astrometri (*astrometry*), 106'sı kütleçekimsel mercekle (*gravitational microlensing*), 51'i doğrudan görüntüleme (*direct imaging*), 829'u dikine hız (*radial velocity*, RV), 3322'si geçiş (*transit*) yöntemiyle keşfedilmiştir (bkz. NASA Exoplanet Web Sayfası). Yaygın olarak kullanılan geçiş yönteminde hem ötegezegen hem de barınak (*host*) yıldızın özellikleri hakkında bilgi edinilir. Geçiş yapan bir ötegezegen Kepleryan olduğu varsayılan bir yörüngede eşit zaman aralıklarında, dönemli olarak barınak yıldızının önünden geçer. Sistemde ikinci bir gezegen varsa yörüngeleri Kepleryan yörüngelere benzemez ve geçişler eşit aralıklı olmaz (Agol et al. 2005), yani gözlenen dönem değişir. Geçiş zamanı değişimi (*Transit Timing Variations* - TTV) yöntemi, bilinen ötegezegenlerin geçiş zamanındaki değişikliklerin izlenmesine dayanır (Nesvorný 2009). Gözlenen minimum ışık zamanı (O), hesaplanan minimum ışık za-

★ aladagyasmin@gmail.com

manı (C) olmak üzere O-C diyagramları çift yıldızların dönem değişimlerini çalışmak için uzun zamandır kullanılmaktadır. Günümüzde ötegezegen araştırmalarında da O-C diyagramları yaygın olarak kullanılmaktadır. Hassas ölçümlerden elde edilmiş çok sayıda döneme ait geçiş ortası zamanları kullanılarak oluşturulan O-C diyagramları, TTV analizinin standart veri setini oluşturur. Geçiş zamanı değişimleri ilk olarak geçiş yöntemiyle aynı yıldız etrafında keşfedilen Kepler-9b ve Kepler-9c ötegezegenlerinin geçişlerinde gözlenmiştir (Holman et al. 2010). Bu yöntemle keşfedilen ilk gezegen ise Kepler-19c'dir (Ballard et al. 2011). Yapılan TTV analizlerinde dönem bulabilmek için yaygın olarak Lomb-Scargle (LS) periyodogramları kullanılmaktadır. Lomb (1976) ve Scargle (1982) O-C diyagramında çevrimsel bir değişimin varlığını araştırmak için O-C artıklarından (*residual*) LS periyodogramları elde etmişlerdir. LS metodu, eş zaman aralıklı olmayan veride, zayıf periyodik sinyalleri bulmanın ve bunların önemini test etmede izlenen bir yoldur (Press & Rybicki 1989).

TTV yöntemiyle HAT-P-16b ve TrES-3b ötegezegenlerinin geçiş zamanları değişimini analiz etmek üzere yapılan bu çalışma için UZAYMER Gözlemevi'nde bulunan UZAYMER Teleskobu (UT50) ile geçiş gözlemleri yapılmıştır. Sistem parametrelerinin belirlenmesinde UT50'den alınan geçiş verilerine ek olarak T100 (TUBİTAK Ulusal Gözlemevi - TUG), İST60 (İstanbul Üniversitesi Gözlemevi Uygulama ve Araştırma Merkezi) ve ATA50 (Atatürk Üniversitesi Astrofizik Uygulama ve Araştırma Merkezinde) teleskoplarından veriler alınmıştır. Ayrıca TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite, Ricker et al. 2009) verileri de çalışmamızda kullanılmıştır. TTV analizlerinde sistem parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan ışık eğrilerinden ölçülen geçiş ortası zamanlarının yanı sıra *Exoplanet Transit Database* (ETD - Poddany et al. 2010) ve literatürde yayınlanan geçiş ışık eğrilerinin yeniden modellenmesiyle ölçülen geçiş ortası zamanları kullanılarak O-C ışık eğrileri oluşturulmuştur. TTV analizlerinde dönem bulabilmek için LS periyodogramlarından yararlanılmıştır.

1.1 HAT-P-16b

HAT-P-16b ötegezegeni 2009 yılında yapılan gözlemlerle geçiş yöntemi kullanılarak keşfedilmiştir (Buchhave et al. 2010). Bu ötegezegen, parlaklığı $m_V = 10.8$ kadir değerine sahip, F8 tayfsal tipteki barınak yıldızının etrafında ~ 2.8 günlük yörünge döneminde dolanmaktadır ve yıldızının önünden geçiş süresi 183.7 ± 1.9 dakikadır. Gezegen kütlesi $M_P \sim 4M_J$ ve yarıçapı $R_P \sim 1.2R_J$ olarak belirlenmiştir.

Moutou et al. (2011)'nin HAT-P-16b ile ilgili yaptıkları çalışmada, Haute-Provence Gözlemevi'nde 1.93 m teleskop üzerinde bağlı SOPHIE tayfçeki ile yapılan tayfsal gözlemlerden elde edilen Rossiter-McLaughlin Etkisi (Ohta et al. 2005)'nin (RME) büyüklük ve şekline dayanarak, HAT-P-16b ötegezegeninin yörünge düzlemiyle barınak yıldızın dönme eksenini arasındaki açının gökyüzü düzlemine izdüşüm açısını (*sky-projected spin-orbit alignment angle*) $\lambda = -10^\circ \pm 16^\circ$ ve yıldızın dönme hızını $v \sin i_* = 3.9 \pm 0.8 \text{ km.s}^{-1}$ olarak hesaplamışlardır.

Husnoo et al. (2012), yıldızlarına yakın gezegenlerin yörüngesel evrimlerini incelemek için bilinen geçiş ötegezegenlerinin dikine hız ölçümlerini analiz etmiştir ve HAT-P-16b'nin dış merkezliğini $e = 0.034 \pm 0.003$ olarak belirlemişlerdir. Sıfır olmayan bu dış merkezlik değeri, yörüngeyi tedirgin eden, gözlenmiş ancak sisteme kütle çekimle bağlı olabilecek bir gezegenin varlığına bağlanabilir. HAT-P-16b ile ilgili başka bir

çalışmada Ciceri et al. (2013b), eşzamanlı olarak iki orta sınıf teleskoptan odak dışı gözlem (*defocusing*) tekniğiyle (Southworth 2009; Baştürk et al. 2015) HAT-P-16b'nin geçiş gözlemlerini yapmıştır. TTV analizi sonucunda sistemde 3. cismin varlığına dair herhangi bir kanıt bulamamışlardır. Bu ötegezegen hakkında yapılan çalışmaların az olması, bu çalışmada seçtiğimiz kaynaklardan biri olmasının önemli bir nedenidir.

1.2 TrES-3b

TrES-3b ötegezegeni 2007 yılında yapılan gözlemlerle, geçiş yöntemi kullanılarak keşfedilmiştir (O'Donovan et al. 2007). Kaynak, parlaklığı $m_V = 12.4$ kadir değerine sahip, G tayf türünden barınak yıldızının etrafında ~ 1.3 gün yörünge döneminde dolanmaktadır ve geçiş süresi 77.9 ± 1.9 (Sada et al. 2012) dakikadır. Gezegen $M_P \sim 1.9M_J$ kütle ve $R_P \sim 1.3R_J$ yarıçapa sahiptir. Bu ötegezegenin geçiş ışık eğrisi ile ilgili en çarpıcı özellik, yüksek etki parametresi nedeniyle ($b = 0.83$) geçiş sinyalinin "V" şeklindeki yapısıdır. Bu yapı geçiş ortası zamanının hassas belirlenmesine ve bu nedenle geçiş zamanlarının değişiminin çalışılmasına yardımcı olmaktadır. TrES-3b ile ilgili yapılan diğer bir çalışmada Gibson et al. (2009), TrES-3 sisteminde varsayımsal ikinci gezegen varlığını TTV yöntemiyle araştırmak için, Liverpool Teleskoptaki RISE cihazı ile yaptıkları gözlem verilerini ve önceki gözlem verilerini kullanmışlardır. İstatistiksel olarak anlamlı bir TTV sinyali belirlenememesine rağmen, TrES-3b geçişlerinden elde edilen O-C grafiğinden hareketle, sistemde varsayımsal ikinci bir gezegenin dönem oranının fonksiyonu olarak üst kütle sınırları belirlenmiştir. Ayrıca Lee et al. (2011), SOAO (*Sobaeksan Optical Astronomy Observatory*) ve LOAO (*Lemmon Optical Astronomy Observatory*) gözlemlerinden alınan gözlem verileriyle TrES-3b'nin geçiş ışık eğrilerinin analizlerini yapmışlardır. Çalışmada, TTV analizi sonucunda 1.97 gün dönemli frekans bulunarak bunun, yıldız lekesi gibi manyetik aktiviteye bağlı bir yüzey parlaklık düzensizliğinden kaynaklandığı belirtilmiştir.

Püsküllü et al. (2017) TrES-3b ile ilgili yaptıkları çalışmada, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Gözlemevi'nde (ÇOMUO) kurulu olan T122 ve T60 teleskopları ile T100 (TUG) teleskobunu kullanarak geçiş gözlemi verilerinin analizlerinden sistem parametrelerini güncellemiş ve TTV ölçümü yapmışlardır. TTV analizinde TrES-3b için önemli bir sinyal belirlenmemiştir, 84.79 ± 0.35 günlük bir TTV dönemine karşılık gelen 0.0154 ± 0.0001 çevrim/dönem frekans bulunmuştur. Mannaday et al. (2020)'nin TrES-3b ile ilgili yaptıkları çalışmada, 2012-2018 yılları arasında elde edilen 12 geçiş ışık eğrisi ile birlikte önceki çalışmalardan 71 geçiş ışık eğrisi verilerinin, geçiş ortası zamanlarını kullanarak yeni doğrusal efemerisler türetmiş ve TTV analizinde sistemde 3. cisim olasılığını güçlendiren sonuçlar elde etmişlerdir. Bununla birlikte, frekans analizi ile olası TTV'nin periyodik olma ihtimalinin belirlenen istatistiksel anlamlılık seviyesinin düşük olmasından dolayı sistemde ek cismin varlığının zayıf bir olasılık olduğunu değerlendirmişler ve daha çok gözlem için sistemin takibini önermişlerdir. TrES-3b'nin genelleştirilmiş LS periyodogramında istatistiksel olarak en anlamlı pik değerini 0.043867 çevrim/dönem (29.78 gün) bulmuşlardır. Yıldızın belirlenen dönme dönemi (27.43) bu döneme yakındır. Bu durum, daha önce Mackebrandt et al. (2017) tarafından manyetik etkinlik kökenli lekelerin zamanlamaya etkili olmayabileceği şeklindeki önerilerin de tartışmaya açık olduğunu göstermektedir. Zira bu önemlilik, leke kaynaklı ışık eğrisi asimetrilerinin geçiş zamanı değişimlerine neden olmasından kaynaklanabilir. Sistem, olası

Çizelge 1. HAT-P-16b ve TrES-3b UT50 gözlem bilgileri.

Ötegezegen	Gözlem Tarihi	Filtre	Poz Süresi (s)	Binning
HAT-P-16b	09.11.2019	Rc	90	2x2
HAT-P-16b	23.11.2019	Rc	60	2x2
HAT-P-16b	18.12.2019	Rc	60	2x2
HAT-P-16b	21.10.2020	Rc	60	2x2
TrES-3b	17.04.2020	Clear	120	2x2
TrES-3b	17.05.2020	Clear	120	2x2
TrES-3b	21.05.2020	Clear	90	2x2
TrES-3b	07.06.2020	Clear	90	2x2
TrES-3b	24.06.2020	Clear	80	2x2
TrES-3b	03.07.2020	Clear	60	2x2
TrES-3b	28.07.2020	Clear	90	2x2
TrES-3b	04.10.2020	Clear	90	2x2
TrES-3b	21.10.2020	Clear	90	2x2

TTV için defalarca çalışılmışsa da bu çalışmalar eksik, güncel olmayan veriler üzerinden farklı araştırmacıların farklı yöntemlerle yaptığı geçiş zamanı ölçümlerine dayanmaktadır. Bu ötegezegen, sistemde olası bir 3. cismin tedirginlik etkisinden kaynaklanabilecek, sıfırdan farklı bir dış merkezlilik değerine sahip olması ve "V" şeklindeki geçiş sinyalinin bu olgunun tespitinde önemli bir avantaj oluşturacak olması nedeniyle seçilmiştir.

2 Gözlemler ve Veri Analizi

Bu çalışmada incelenen ötegezegenler için gözlem verileri Çukurova Üniversitesi Uzay Bilimleri ve Güneş Enerjisi Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde (UZAYMER) konuşlandırılmış 50 cm ayna çaplı f/8 odak oranına sahip Ritchey Chretien (RC) tipi UZAYMER Teleskobu (UT50) ile alınmıştır. UZAYMER'in teknik altyapısı, astrometeorolojik ve gözlem şartları ayrıntılı olarak araştırılmıştır (Solmaz et al. 2021). Kaynaklarının UT50 gözlem bilgileri Tablo 1'de gösterildiği gibidir. TTV ölçümünde UT50 geçiş gözlemi verilerine ek olarak, Tablo 2'de optik sınıfı RC olan, 100 cm ayna çaplı f/10 odak oranına sahip T100 ile odak oranları f/8 olan 60 cm ayna çaplı İST60 ve 50 cm ayna çaplı ATA50 teleskoplarından alınan veriler sunulmuştur. Ayrıca çalışmamızda kullanılan literatür, TESS ve ETD verileri de Tablo 2'de verilmektedir. ETD'den alınan geçiş zamanlarından çalışmaya dahil edilenler DQ (Data Quality) değerleri 1–3 aralığında olan verilerdir.

Geçiş tarihleri ETD'den takip edilerek gözlem planı yapılmış ve uygun hava koşullarında gözlemler gerçekleştirilmiştir. Kaynakların gözlenebilirliği ilgili web sayfasındaki gözlenebilirlik araçları kullanılarak kontrol edilmiştir. Yapılan gözlemlerde teleskobun doğru kaynağa yönelmişinden emin olmak için ilk alınan veri astrometry.net (Lang 2009) yazılımının web sayfasına yüklenmiş, oluşturulan yeni dosya SAOImage DS9 (Smithsonian Astrophysical Observatory 2000) programında açılıp, kaynağın sağ açıklık (RA) ve dik açıklık (DEC) değerleri kontrol edilmiştir.

HAT-P-16b ve TrES-3b gözlemlerinin AstrolmageJ (AIJ - Collins & Kielkopf 2013) programı kullanılarak aletsel etkilerden arındırılan bias-dark-flat düzeltmesi, Barycentric Julian Date (BJD-TDB) zamanına dönüştürülen, belirlenen bir grup mukayese yıldızına göre diferansiyel parlaklıkları elde edildikten sonra hava kütlesi etkisinden arındırılan ve geçiş dış parlaklığa normalize edilerek oluşturulan geçiş ışık eğrileri EXOFAST (sürüm 1.7) (Eastman et al. 2013) ile modellenmiştir.

Çizelge 2. TESS, ETD, İST60, T100, ATA50 ve önceki çalışmalardan alınan geçiş gözlemi verileri.

Ötegezegen	Veri Kaynağı	Veri Seti Sayısı
HAT-P-16b	ETD	36
HAT-P-16b	ATA50	1
HAT-P-16b	Buchhave et al. (2010)	2
HAT-P-16b	Ciceri et al. (2013a)	4
HAT-P-16b	TESS	7
TrES-3b	T100 (TUG)	2
TrES-3b	İST60	1
TrES-3b	ETD	182
TrES-3b	Turner et al. (2013)	7
TrES-3b	Jiang et al. (2013)	5
TrES-3b	von Essen et al. (2019)	1
TrES-3b	Sozzetti et al. (2009)	8
TrES-3b	Colón et al. (2010)	1
TrES-3b	Kundurthy et al. (2013)	10
TrES-3b	Vaňko et al. (2013)	14
TrES-3b	Lee et al. (2011)	4
TrES-3b	Ricci et al. (2017)	6
TrES-3b	TESS	36

Geçiş ışık eğrilerini modellemek üzere EXOFAST-v1'in web sürümünü kullanılarak sisteme ilişkin parametreler (i , T_{eff} , Fe/H, P ve e) için başlangıç değerleri ve belirsizlikleri literatürden (HAT-P-16 Buchhave et al. 2010, TrES-3 için Sozzetti et al. 2009) alınıp, yine aynı web arayüzü ile sağlanan gözlemsel veri Nelder-Mead optimizasyon tekniğiyle (Dennis & Torczon 1988) uyumlandı (fit) ve sonuç olarak bu parametrelerin en optimize değerleri elde edildi. Uyumlamalar sırasında kenar kararım katsayıları serbest bırakıldı, ancak filtre bilgisi girildi. Ayrıca yıldızın sıcaklığı da fit parametreleri arasında olduğundan kenar kararım katsayılarının başlangıç değerleri EXOFAST-v1 tarafından, Claret & Bloemen (2011) çalışmasındaki tablolardan ilgili sıcaklık için ara değer hesabı yapılarak (interpolasyon) belirlendi. Yörünge dönemi, referans yayından çekilen değer başlangıç parametresi yapılarak uyumlanırken, ana amaç olarak belirlenmesi istenen geçiş ortası zamanı başlangıç değeri olmaksızın serbest bırakıldı. Uyumlandırmanın başarısı indirgenmiş kare istatistiği ve RMS (Root Mean Square) bağlamında değerlendirilirken, bulunan parametrelerin ve geçiş ortası zamanının doğruluğu ise geçiş süresi ve geçiş derinliğinin literatürle uyumu bağlamında değerlendirildi. Ayrıca EXOFAST sonuç dosyasından elde edilen parametrelerin Microsoft Excel programında ağırlıklı ortalama ve standart sapmalarının hesaplanmasıyla sistem parametreleri belirlenmiştir. Elde edilen kütle, yarıçap ve yörünge eğimi gibi sistem parametreleri incelenen sistemin keşif makalesindeki (Buchhave et al. 2010; O'Donovan et al. 2007) değerlerle karşılaştırılmıştır (Tablo 3).

Veriler EXOFAST-v1 ile modellendikten sonra, geçiş ortası zamanları ve belirsizlikleri elde edildi (Aladağ 2021). Gözlenen bu geçiş zamanları (O) ile referans efemeris parametreleri (T_0 ve P) kullanılarak hesaplanan geçiş ortası zamanları (C) arasındaki farklar (O-C) hesaplandı. Bu farklara emcee paketi fonksiyonlarına (Foreman-Mackey et al. 2013) dayanan bir Python kodu ile birer doğru ve parabol uyumlaması yapıldı. Uyumlamaları fonksiyonların katsayıları, en küçük kareler yöntemiyle yapılan uyumlamalardan elde edilen en iyi değerleri merkez, parametre hatalarını ise standart sapma olarak kabul eden normal dağılımlardan rastgele seçildi. Bu seçim için 50 rastgele yürüyüşün (ran-

Çizelge 3. HAT-P-16 ve TrES-3 sistem parametrelerinin bu çalışma ve önceki çalışmalardaki değerleri. Kütle-çekim odaklama parametresi olarak tanımlanan Safronov sayısı denklem 3 ve hatası denklem 2 ile hesaplanmıştır. ^a ve ^b ile gösterilen parametreler, sırasıyla, denklem 1 ve 2 ile hesaplanmıştır. Hata yerine hataların standart sapması kullanılmıştır. ^c ve ^d ile gösterilen parametreler, sırasıyla, Sozzetti et al. (2009) ve Torres et al. (2008)'nin çalışmalarından alınmıştır.

Parametre	Birimi	HAT-P-16		TrES-3	
		Bu Çalışma	Buchhave et al. (2010)	Bu Çalışma	O'Donovan et al. (2007)
a/R_*	-	7.192±0.002	7.17±0.28	6.066±0.490	6.06±0.10
Etki parametresi (b)	-	0.1002±0.1533	0.439±0.065	0.789±0.070	0.828±0.010
Delta (geçiş derinliği)	-	0.012±0.002	-	0.0276±0.0053	-
Yıldız yoğunluğu (ρ)	cgs	0.9141±0.0007	2.42±0.35	2.523±0.667	2.30±0.06 ^c
Demir bolluğu [Fe/H]	dex	0.165±0.006	0.17±0.08	-0.190±0.001	-0.19±0.08 ^c
Dış merkezlik(e)	-	0.079±0.027	0.036±0.004	0.0016±0.0092	-
Eğim (i)	Derece	89.19±1.21	86.6±0.7	82.28±1.06	82.15±0.21
Periyod (P)	Gün	2.7760 Sabit	2.7760±3.10 ⁻⁶	1.3062 Sabit	1.3062±1.10 ⁻⁵
Yarı-büyük eksen (a)	AU	0.0412±2.10 ⁻⁵	0.0413±0.0004	0.0229±4.10 ⁻⁵	0.0226±0.0013
Yarıçap (R_p)	R_J	1.31±0.11	1.29±0.07	1.32±0.17	1.30±0.08
Kütle (M_p)	M_J	4.172 ^a ±0.163 ^b	4.193±0.094	1.959 ^a ±0.111 ^b	1.920±0.23
Denge sıcaklığı(T_{eq})	Kelvin	1625±3	1626±40	1626±61	1623±26 ^d
Safronov sayısı (Θ)	-	0.221±0.011	0.220±0.011	0.073±0.058	0.038±0.003 ^d

dom walk) 5000 adım boyunca parametre uzayını taramasıyla her bir parametre setinin ardıl olasılık dağılımları hesaplandı. Bu dağılımların medyan (ortanca) değeri uyumlanan fonksiyonun ilgili katsayısının değeri, %16 ve %84 yüzdelerik değerleri ise belirsizliklerinin alt ve üst limitleri olarak belirlendi.

O-C değerlerinin çevrime karşı çizdirilmesiyle elde edilen TTV diyagramlarındaki olası dönemlilikleri araştırmak üzere Lomb-Scargle (LS) periyodogramları kullanıldı. Bu amaçla *astropy* (The Astropy Collaboration 2018) paketinin LS modülü (VanderPlas 2018) kullanıldı.

UT50, İST60, T100, ATA50 teleskoplarından ve TESS uydusundan alınan geçiş gözlemi verilerinin analizleri ile birlikte bu analizlerin sonuçları verilmiştir. Geçiş ışık eğrileri modelleri ile birlikte çizdirilmiştir. Sistem parametreleri, geçiş ışık eğrilerinin modellenmesiyle elde edilen parametrelerin ağırlıklı ortalaması alınarak hesaplanmıştır ve önceki çalışmalardaki değerleri ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

2.1 HAT-P-16b Ötegezegeninin Geçiş Işık Eğrileri

HAT-P-16b ötegezegeninin geçiş ışık eğrileri yörünge dönemine evrelendirilerek Şekil 1 üst panelde verilmiştir. TESS gözlem verileri 120 s poz süresinde 8 Ekim 2019 tarihinde alınmaya başlanmıştır. TESS yazılımı tarafından (*pipeline*) kırmızı gürültüden arındırılmış ışık eğrileri (dvt uzantılı dosyalardaki LC-DETTREND sütunundaki akılar) yaklaşık 27 günlük gözlemleri içermektedir (Sektör-17). Geçiş öncesini ve geçiş sonrasında içerecek şekilde evre aralığı seçilerek oluşturulan ışık eğrileri Şekil 1 alt panelde verilmiştir.

2.2 TrES-3b Ötegezegeninin Geçiş Işık Eğrileri

TrES-3b ötegezegeninin UT50 geçiş ışık eğrileri yörünge dönemine evrelendirilerek Şekil 2'te verilmiştir. TESS gözlem verileri 120 s poz süresinde Sektör-25'ten 14 Mayıs 2020 tarihinde, Sektör-26'dan 9 Haziran 2020 tarihinde alınmaya başlanmıştır. Geçiş öncesini ve geçiş sonrasında içerecek şekilde evre aralığı seçilerek oluşturulan ışık eğrileri (Şekil 3) her sektör için 18 geçiş olmak üzere toplam 36 geçiş içermektedir.

2.3 HAT-P-16 ve TrES-3 Sistemlerinin Parametreleri

UT50, T100, İST60 ve ATA50 ile yapılan geçiş gözlemi verileri ile birlikte TESS uydusundan sağlanan verilerin temel analiz adımlarından sonra elde edilen ışık eğrileri EXOFAST ile modellenmiştir (Eastman et al. 2013). Modellenen verilerden belirlenen sistem parametrelerinin ağırlıklı ortalamaları ve standart sapmaları Excel programında hesaplanarak sistem parametreleri güncellenmiştir. Her iki kaynağın geçiş ışık eğrilerinden elde edilen yıldız ve gezegen parametreleri, önceki çalışmalarda belirlenen parametrelerin hata sınırları içerisinde yer almaktadır. Tablo 3'te HAT-P-16b ve TrES-3b sistem parametrelerinin çalışmamızdan elde edilen değerleri ve literatürde verilen değerleri gösterilmektedir. EXOFAST modellemesinde gezegen kütleli hesaplanmadığı için, hesaplamalarda kütle oranı (q) değeri

$$q = \frac{M_*}{M_P} \quad (1)$$

olarak değişmez kabul edilmiştir. q 'yu hesaplamada HAT-P-16 ve TrES-3 sistemleri için sırasıyla Buchhave et al. (2010) ve Sozzetti et al. (2008) çalışmalarındaki parametreler referans alınmıştır. q hesapladıktan sonra bu çalışmada hesaplanan yıldız kütleli denklem 1'de yerine yazılarak ötegezegen kütleli ve denklem 2 (Bevington & Robinson 1992) ile hatası hesaplanmıştır; $a = b \times c$ ya da $a = b/c$ ise hata:

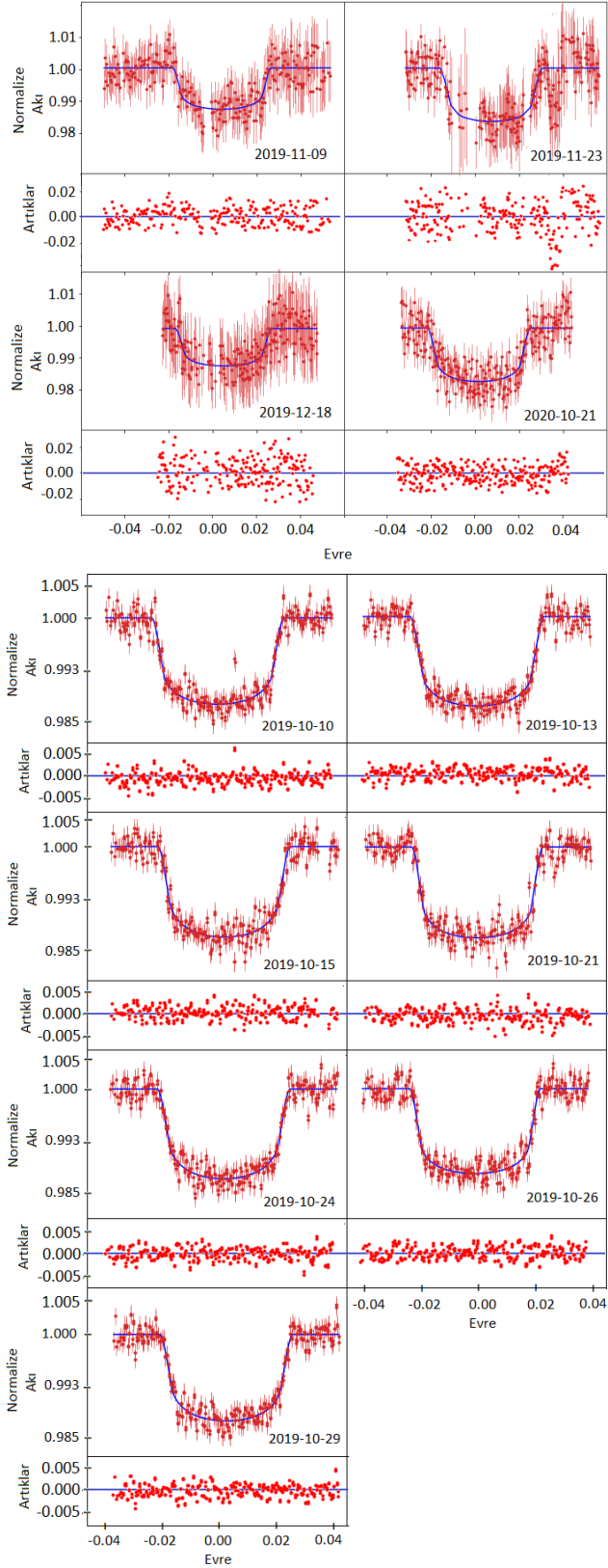
$$\left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 = \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta c}{c}\right)^2 \quad (2)$$

ile hesaplanır.

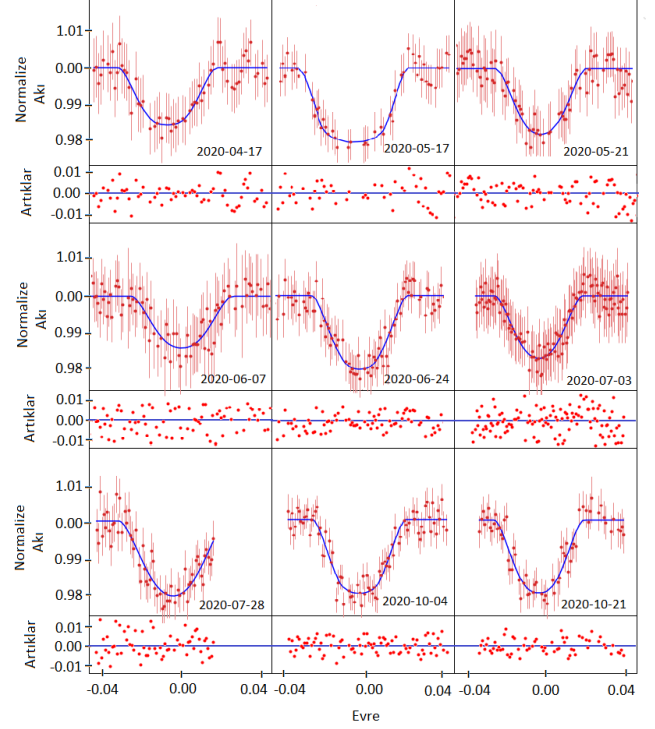
$$\Theta = \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{v_k}{v_y}\right)^2 = \frac{aM_P}{R_P M_*} \quad (3)$$

Burada v_k kaçış hızı ve v_y yörünge hızını ifade eder. Denklem 3'ten Safronov sayısı HAT-P-16b ve TrES-3b için sırasıyla 0.22115 ve 0.07338 olarak hesaplanmıştır.

Ağırlıklı ortalamalardan hesaplanan parametre değerleri denklem 1'den elde edilen M_P , HAT-P-16b için Buchhave et al. (2010) çalışması, TrES-3b için O'Donovan et al. (2007) çalış-



Şekil 1. (Üst Panel) HAT-P-16b'nin UT50 geçiş gözlemleriyle elde edilen ışık eğrileri, hataları, modelleri ve artıkları. (Alt Panel) HAT-P-16b'nin TESS ışık eğrileri, hataları, modelleri ve artıkları (Sektör 17). Hepsinde geçiş dışı görelî akı 1'e normalize edilmiştir. Orjinal veriler ve artıkları kırmızı, modeller mavi renk ile gösterilmiştir.



Şekil 2. TrES-3b'nin UT50 geçiş ışık eğrileri, hataları, modelleri ve artıkları. Hepsinde geçiş dışı görelî akı 1'e normalize edilmiştir. Orjinal veriler ve artıkları kırmızı, modeller mavi renk ile gösterilmiştir.

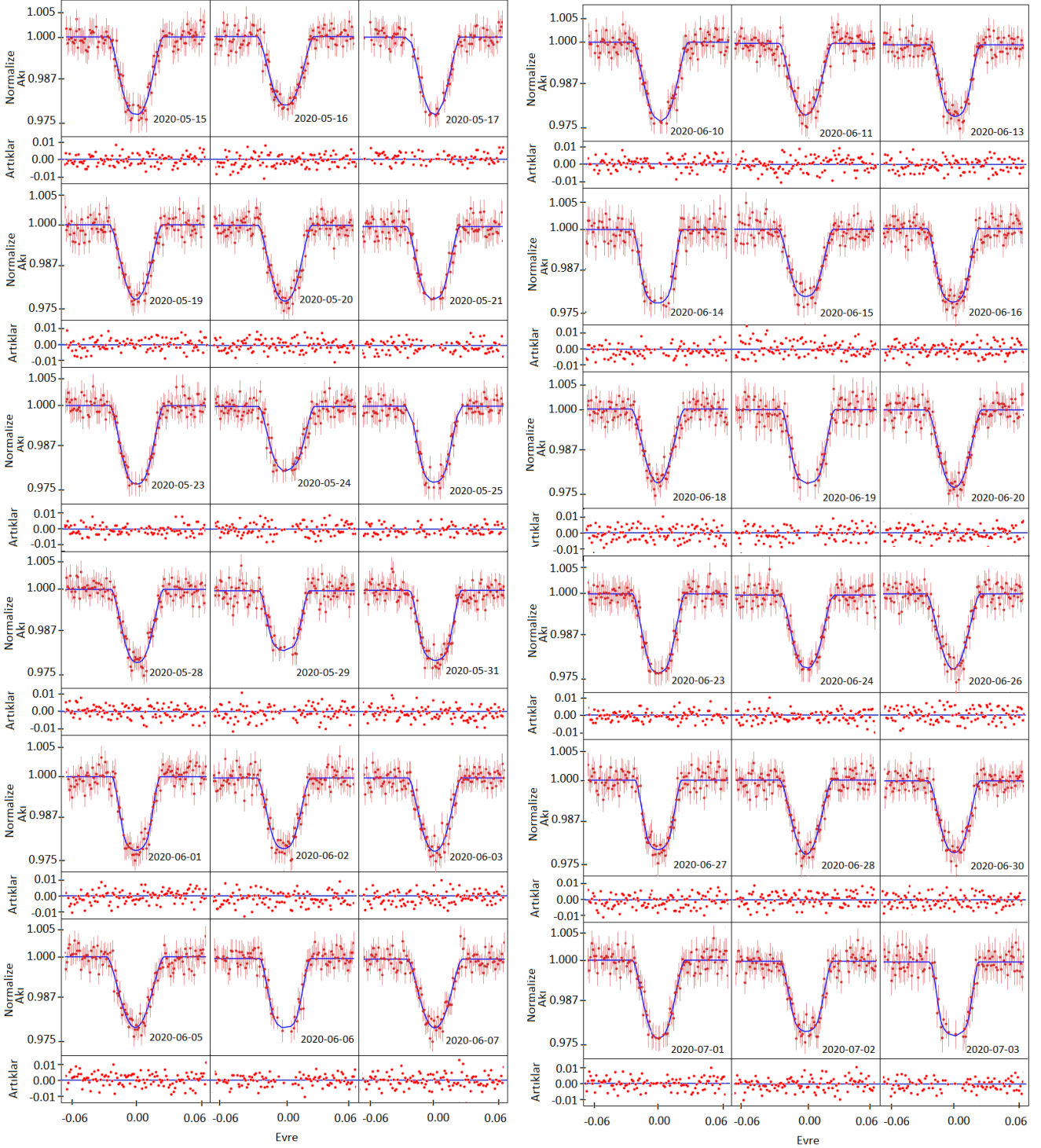
masında belirtilen değerler ile uyumludur. “Foton gürültüsü” ya da “Johnson gürültüsü” olarak da adlandırılan beyaz gürültü, CCD'nin algılama empedansının neden olduğu termal gürültüdür (Rongtai Cai et al. 2011). Fotometri gürültü oranı (PNR) ile sayısallaştırılan beyaz gürültünün, ışık eğrisinin kalitesini değerlendirmek için hesaplanması gerekir. Bunun yanı sıra model parametreleri gezegen-yıldız yarıçap oranı ve yörünge eğimi, PNR değeri büyüdükçe olumsuz etkilenir. Fulton et al. (2011) bu gürültüyü şu şekilde tanımlanmıştır:

$$PNR = \frac{rms}{\sqrt{\tau}} \quad (4)$$

Burada rms ışık eğrisi artıklarının standart sapması olup dakika başına ortalama pozlama sayısıdır (okuma süresi dâhil), τ (tau) parametresi ise geçişin başlama zamanının bitiş zamanına bölümünü ifade eder. Bu çalışmada PNR Microsoft Excel programında denklem 4 ile hesaplanmıştır. Beta parametresi ile tanımlanan kırmızı gürültü, atmosferik koşullar, hava kütlesi, astrofizik kaynaklı yıldız değişkenliği ve teleskop takibi gibi sistematik hataların neden olduğu gürültüdür. Kırmızı gürültü geçiş derinliğini, dolayısıyla yıldız-gezegen yarıçap oranını etkiler. Kırmızı gürültü,

$$\beta = \frac{\sigma_r}{\sigma_N} \quad (5)$$

denklemini ile hesaplanır (Winn et al. 2008). Burada σ_r , artıkların N noktasının M bin'e ortalaması alınarak ve binlenmiş artıkların standart sapmasının hesaplanmasıyla elde edilir. σ_N beklenen standart sapmadır. Kırmızı gürültünün yokluğunda $\beta = 1$ olduğundan, hemen hemen tüm geçişlerde beyaz gürültü baskın olur (Petrucci et al. 2015). Bu çalışmada β değerleri Python



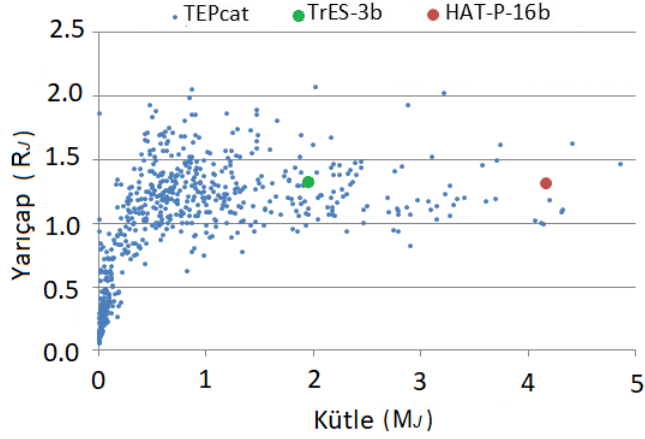
Şekil 3. TrES-3b'nin TESS ışık eğrileri, hataları, modelleri ve artıkları (Sektör 25 ve 26). Hepsinde geçiş dışı görelî akı 1'e normalize edilmiştir. Orjinal veriler ve artıkları kırmızı, modeller mavi renk ile gösterilmiştir.

programında yazılan kodlar ile hesaplanmıştır. Geçiş ışık eğrilerinin kalitesinin değerlendirilmesinde β değeri 2.5 üzerinde olan veriler çalışmadan çıkarılmıştır.

3 Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada HAT-P-16b ve TrES-3b ötegezegenlerinin TTV yöntemi ile incelenmesi amaçlanmıştır. Bunun için UT50, T100,

İST60 ve ATA50 teleskoplarından alınan geçiş verileri ile birlikte, ETD, TESS ve literatür verileri AIJ programı ile düzenlendikten sonra EXOFAST ile modellenmiştir. Sistem parametreleri hesaplanırken geçiş ışık eğrisi verilerinin ağırlıklı ortalaması kullanılmıştır. Safronov sayısı (denklem 3) HAT-P-16b için 0.22115 ve TrES-3b için 0.07338 olarak hesaplanmıştır. TrES-3b için hesaplanan bu değer, Hansen & Barman (2007)



Şekil 4. TEPcat verilerinden oluşturulmuş kütle-yarıçap dağılımı

tarafından önerilen sınıflamaya göre I. Safronov sınıfını işaret etmekte, HAT-P-16b ise her iki sınıflamaya da girmemektedir. Şekil 4'te 1 Şubat 2021 tarihinde alınan TEPcat verilerinden oluşturulan kütle-yarıçap dağılım grafiği gösterilmiştir. Benzer şekilde, Southworth (2012) çalışmasında ötegezegenlerin Safronov numaralarına göre iki sınıfa ayrılmasının için belirleyici olmadığını göstermiştir. Dahası, Fressin et al. (2009)'nın oluşturdukları modeller Safronov sayılarının sürekli bir dağılıma sahip olduğunu göstererek bu bulguları desteklemektedir.

TTV analizleri sonrasında O-C grafikleri elde edilmiştir. O-C hesaplarında, HAT-P-16b'nin T_0 değeri ($T_0=2456204.604209\pm 0.000318$) Ciceri et al. (2013a) çalışmasından ve dönemi ETD'den ($P=2.77596$), TrES-3b'nin T_0 değeri ve dönemi ($T_0=2454552.948971\pm 0.000147$, $P=1.30618581\pm 0.00000051$) Sozzetti et al. (2009) çalışmasından referans olarak alınmıştır. Şekil 5'te HAT-P-16b'nin ve Şekil 6'da TrES-3b'nin TTV grafikleri verilmiştir.

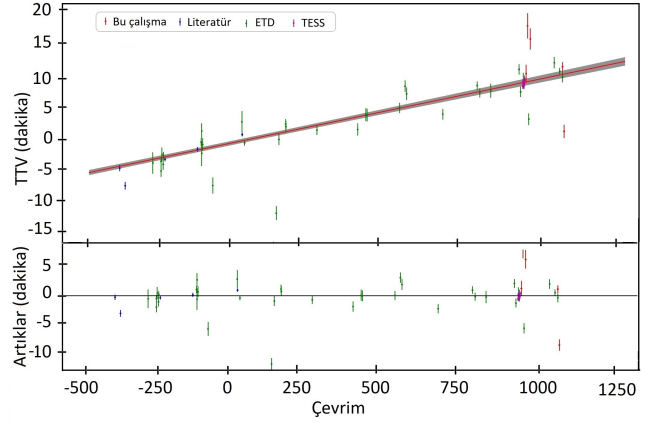
O-C analizlerinden elde edilen TTV grafiklerine lineer fit uygulanmış, T_0 ve P düzeltmesi yapılmıştır. HAT-P-16b'nin yeni efemerisi; $T_0=2456204.604148\pm 0.000069$; $P=2.77596735\pm 0.00000011$ ve TrES-3b'nin yeni efemerisi; $T_0=2454552.949831\pm 0.00107$; $P=1.30618581\pm 0.00000051$ olarak güncellenmiştir. Tablo 4'te HAT-P-16b'nin, Tablo 5'te TrES-3b'nin geçiş ortası zamanları ve O-C değerleri gösterilmiştir. Veri seti sayısı çok olduğu için tablolarda Türkiye'de yapılan geçiş gözlemi verileri ve TESS verilerine yer verilmiştir. Çalışmada kullanılan tüm veri setlerinin T_0 ve O-C değerleri Aladağ (2021) çalışmasında verilmiştir.

HAT-P-16b'nin frekans analizinde 54 veri setinden oluşturulan O-C artıkları kullanarak LS periyodogramı elde edilmiştir. Şekil 7 üst panelde HAT-P-16b'nin LS periyodogramı gösterilmiştir.

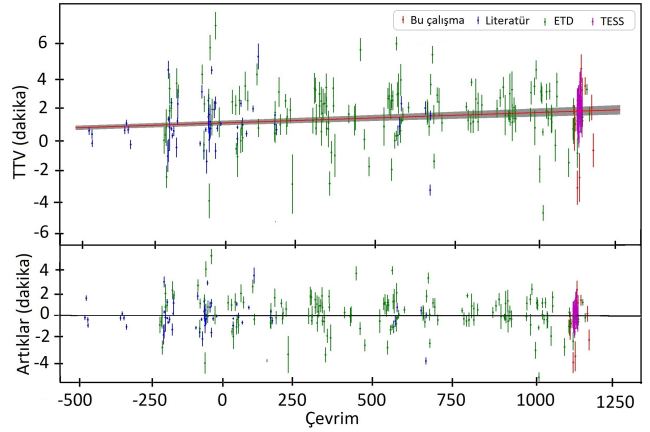
HAT-P-16b'nin frekans analizinde bulunan 64.63 günlük dönem, FAP değeri çok yüksek (%99.6) olduğundan istatistiksel olarak anlamlı değildir. Önceki çalışmalarda da belirgin TTV bulgusuna rastlanılmamıştır. Bu kaynak ile ilgili dönem değişiminin izlenebilmesi için daha fazla veriye ihtiyaç vardır.

TrES-3b'nin frekans analizinde 285 veri setinden oluşturulan O-C artıkları kullanarak LS periyodogramı elde edilmiştir. Şekil 7 alt panelde TrES-3b'nin LS periyodogramı gösterilmiştir.

TrES-3b'nin frekans analizinde elde edilen LS periyodogramı sonucunda 32.38 günlük bir baskın dönem ($FAP=\%$



Şekil 5. HAT-P-16b'nin 54 geçiş ortası zamanı kullanılarak elde edilen TTV grafiği (üst panel) ve lineer modelden (kırmızı doğru ve belirsizliği gri taralı alan ile gösterilmiştir) artıklar (alt panel)



Şekil 6. TrES-3b'nin 285 geçiş ortası zamanı kullanılarak elde edilen TTV grafiği (üst panel) ve lineer modelden (kırmızı doğru ve belirsizliği gri taralı alan ile gösterilmiştir) artıklar (alt panel).

3.41) ve 41.07 günlük ikincil dönem ($FAP=\%1.88$) tespit edilmiştir. Şekil 8'de her iki döneme göre evrelendirilmiş O-C grafiği verilmiştir.

Bu iki dönemden ilki Mannaday et al. (2020) çalışmasında verilen 29.78 günlük değişime çok yakın olup bu değişim olası lekenin dönme modülasyonundan kaynaklı olduğuna işaret etmektedir. Bu değişim, soğuk yıldız lekelerinin geçiş ışık eğrisinde oluşturdukları asimetrilere dolaylı olarak geçiş ortası zamanının doğru belirlenememesine neden olabilir.

Barınak yıldız kabaca Güneş benzeri ($T=5720\pm 150$ K) ve 3 milyar yıl yaşında bir anakol yıldızdır (O'Donovan et al. 2007). Bu tür yıldızlarda manyetik aktivitenin neden olduğu böyle bir dönme döneminin beklendiği farklı çalışmalarda sunulmuştur (Lagrange et al. 2010). Lekenin sinyali, geçiş eğrileri üzerinde görülmesi de neden oldukları asimetri bu dönemi doğrulayabilir. Bunun bir üçüncü bileşen kaynaklı sinyal olduğunu iddia etmek için elimizde yeterince veri bulunmamaktadır.

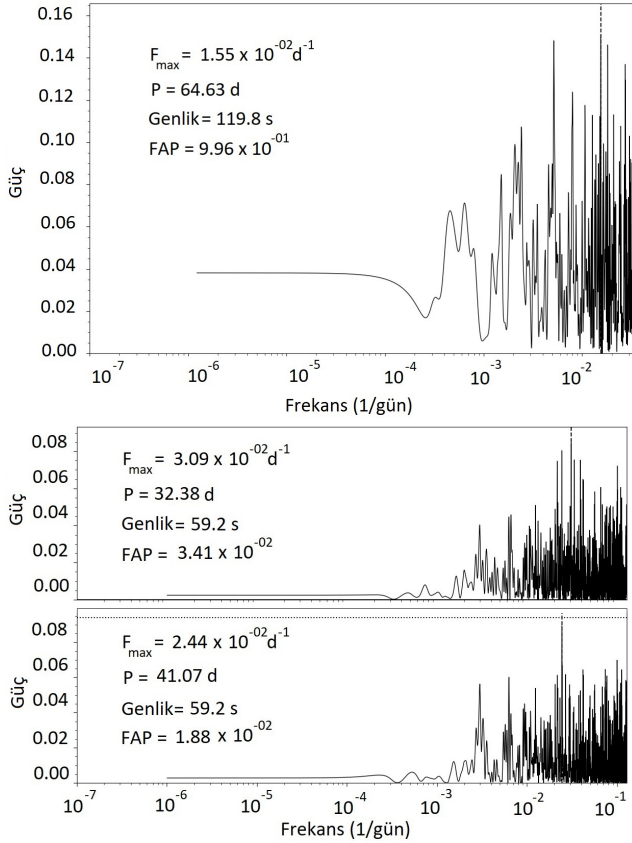
Çift yıldızların dönem değişimi çalışmalarından bilindiği; Mazeh et al. (2013); von Essen et al. (2018) çalışmalarında da

Çizelge 4. HAT-P-16b geçiş ortası zamanları ve O-C değerleri (Tabloda UT50, ATA50 ve TESS verilerine yer verilmiştir)

Teleskop	T_0	T_0 err	O-C
UT50	2458797.358617	0.001027	0.00096642
UT50	2458811.243992	0.001467	0.00650461
UT50	2458836.226094	0.001233	0.00490035
UT50	2459144.346886	0.000759	-0.00668483
ATA50	2459130.474612	0.000521	0.00087798
TESS	2458766.821569	0.000287	-0.00044060
TESS	2458769.598131	0.000263	0.00015404
TESS	2458772.373761	0.000279	-0.00018332
TESS	2458777.925386	0.000288	-0.00049305
TESS	2458780.702133	0.000263	0.00028659
TESS	2458783.477647	0.000266	-0.00016677
TESS	2458786.254065	0.000263	0.00028387

Çizelge 5. TrES-3b geçiş ortası zamanları ve O-C değerleri (Tabloda UT50, T100, İST60 ve TESS verilerine yer verilmiştir)

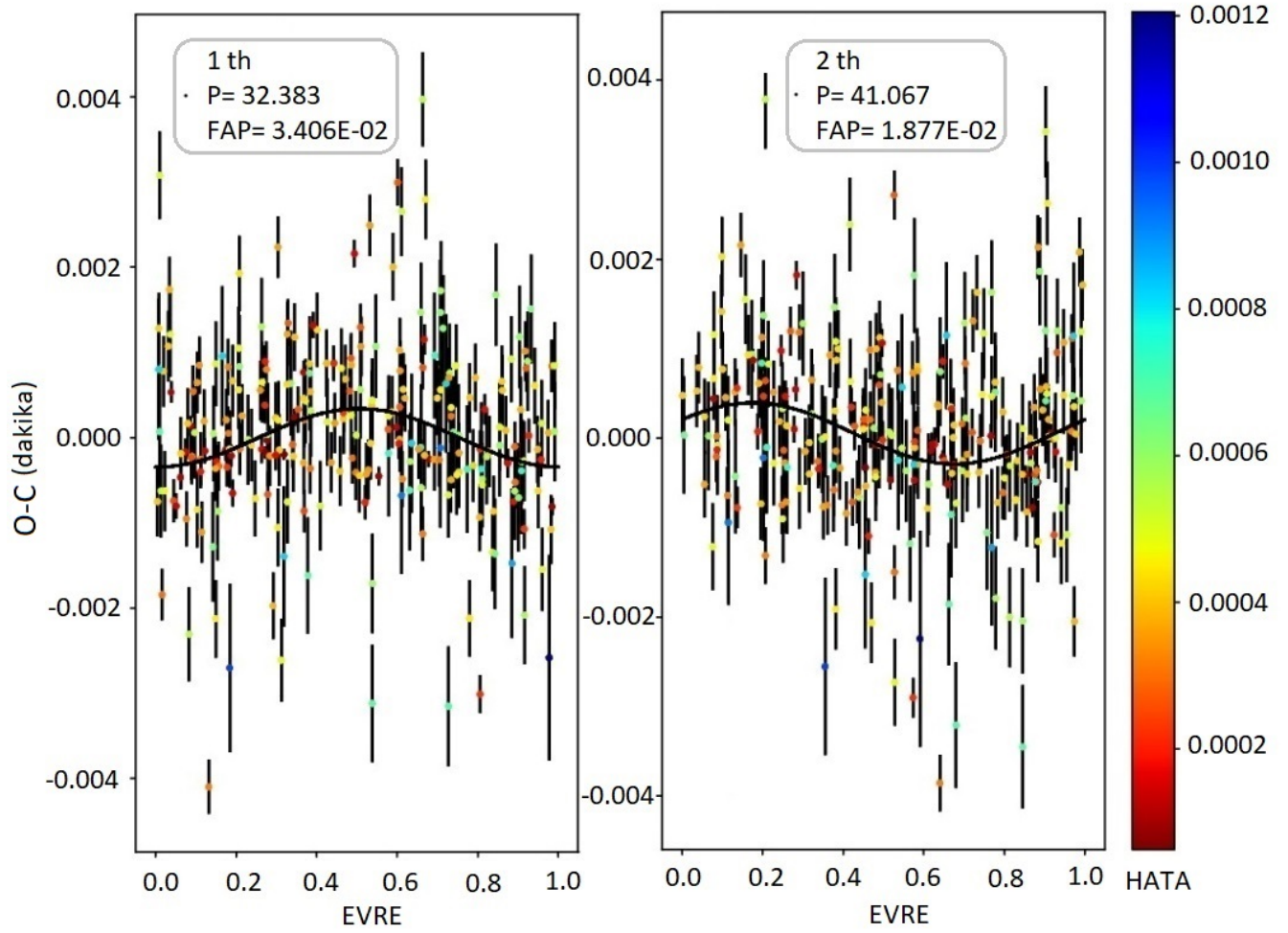
Teleskop	T_0	T_0 err	O-C
UT50	2458790.226088	0.001233	0.00096642
UT50	2458957.409090	0.000922	0.00650461
UT50	2458987.449195	0.000684	0.00490035
UT50	2458991.366991	0.000806	-0.00668483
UT50	2459008.348329	0.000989	0.00096642
UT50	2459025.333177	0.000578	0.00650461
UT50	2459034.475602	0.000507	0.00490035
UT50	2459059.294972	0.000735	-0.00668483
UT50	2459127.214106	0.000514	0.00096642
UT50	2459144.192784	0.000684	0.00650461
T100	2459017.494626	0.000226	0.00490035
T100	2459064.518055	0.000348	-0.00668483
İST60	2459106.315072	0.000576	0.00087798
TESS	2458984.839284	0.000404	0.00000052
TESS	2458986.145895	0.000512	-0.00174075
TESS	2458987.452491	0.000491	-0.00021302
TESS	2458988.758491	0.000474	0.00043270
TESS	2458990.064886	0.000388	-0.00061657
TESS	2458991.370023	0.000558	0.00003288
TESS	2458992.677261	0.000433	0.00043861
TESS	2458993.983045	0.000654	0.00052506
TESS	2458995.289637	0.000406	-0.00073321
TESS	2458997.902096	0.000413	0.00058051
TESS	2458999.207024	0.000634	-0.00110576
TESS	2459000.514524	0.000444	-0.00065403
TESS	2459001.819024	0.000403	-0.00021531
TESS	2459003.125662	0.000468	-0.00087358
TESS	2459004.432287	0.000423	0.00001615
TESS	2459005.737815	0.000447	-0.00273213
TESS	2459007.044891	0.000557	-0.00016513
TESS	2459008.350896	0.000450	0.00017505
TESS	2459010.964055	0.000470	0.00114978
TESS	2459012.269795	0.000455	0.00028650
TESS	2459013.576956	0.000397	0.00015523
TESS	2459014.882279	0.000539	0.00026096
TESS	2459016.188334	0.000510	0.00019296
TESS	2459017.494558	0.000409	0.00104041
TESS	2459018.800075	0.004290	0.00027113
TESS	2459020.107778	0.000605	-0.00023841
TESS	2459021.413195	0.000418	0.00169431
TESS	2459024.025058	0.000394	0.00053031
TESS	2459025.332013	0.000454	-0.00035823
TESS	2459026.637203	0.000465	-0.00019251
TESS	2459027.943497	0.000424	0.00005422
TESS	2459029.249849	0.000413	-0.00031205
TESS	2459030.556282	0.000400	-0.00065333
TESS	2459031.862102	0.000496	0.00081540
TESS	2459033.167947	0.000437	0.00004240
TESS	2459034.474829	0.000579	-0.00043142

**Şekil 7.** HAT-P-16b'nin (üst panel) ve TrES-3b'nin (alt panel) LS periyodogramları.

görüldüğü üzere O-C bulguları; veri kalitesi, veri sayısı ve minimum zamanı belirleme yöntemine çok bağlıdır. [Mannaday et al. \(2020\)](#) çalışmasında verilerin bir kısmını yeniden modelleden, yayınlanmış başka çalışmalardan aldıkları T_0 değerlerini kullandıkları için % 26 FAP'la ~ 30 gün civarında dönemlilik bulmuşlardır. Bizim bu dönemliliği TESS verisi kullanarak ve tüm verileri yeniden modelleyerek ~ 32 gün civarında ve ~ 4 FAP'la bulmuş olmamız önemli bir bulgudur.

Şekil 8'de kullanılan verilerin gözlem hassasiyeti gereği

saçılması çok olduğundan bu dönemlere göre evrendirilmiş grafiklerde değişim çok belirgin görülmemektedir. Ancak birinci dönem (32.38 gün) değişimin yıldızın dönmesi kaynaklı olduğunu düşünmekteyiz. Bunun nedeni, [Vaňko et al. \(2013\)](#) çalışmalarında bu yıldızın dönme dönemi ~ 28 gün olarak belirlenmiştir. İkinci (41.07 gün) hakkında yorum yapmak için henüz erkendir ve sinyal istatistiksel olarak yeterince anlamlı değildir. FAP=%1.88 değeri, istatistiksel olarak daha anlamlı olan 32.38 günlük dönemlilik çıkarılmadan hesaplandığı için yanıltıcı olmamalıdır. Her iki dönemlilikten de emin olmak için



Şekil 8. Bu çalışmada elde edilen birincil (32.38 gün) ve ikincil (41.07 gün) döneme göre evrelendirilmiş O-C grafiği (noktaların rengi sahip oldukları hatanın büyüklüğüne göre mavi ile kırmızı arasında değişmektedir).

daha çok veriye ihtiyaç vardır. TrES-3 Haziran ve Temmuz 2021 döneminde TESS tarafından tekrar gözlenecektir ve bu süre içerisinde toplanacak verilerle birlikte sistem incelediğinde bu dönemlilikler konusunda daha anlamlı yorumlar yapılabilir.

4 Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan Python kodları Doç. Dr. Özgür Baştürk yürütücülüğündeki 118F042 numara ve "Zamanlama Yöntemiyle Ötegezegen Keşfi" başlıklı TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında geliştirilmiştir. Kendisine bu kodları kullanıma açtığı için teşekkür ederiz. 16BT100-1034 ve 17BT100-1196 numaralı gözlem projeleri kapsamında T100'ün kullanımına izin veren TÜBİTAK'a teşekkür ederiz. 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. ATA50'nin kullanımına izin veren Atatürk Üniversitesi Astrofizik Araştırma ve Uygulama Merkezine (ATASAM) teşekkür ederiz. İST60 Teleskobu Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı'nın 2016K12137 numaralı, İstanbul Üniversitesi'nin BAP-3685 ve FBG-2017-23943 numaralı projeleri tarafından desteklenmiştir. İST60'ün kullanımına izin

veren İstanbul Üniversitesi Gözlemevi Uygulama ve Araştırma Merkezine (İUGUAM) teşekkür ederiz. UZAYMER'e CCD sağlanmasındaki desteği için TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'ne teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Agol E., Steffen J., Sari R., Clarkson W., 2005, *MNRAS*, 359, 567
 Aladağ Y., 2021, Master's thesis, ÇÜ FBE Astronomi ve Astrofizik, Çukurova University
 Baştürk Ö., Hinse T. C., Özavcı İ., Yörükoğlu O., Selam S. O., 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. 370 ([arXiv:1508.04500](https://arxiv.org/abs/1508.04500))
 Ballard S., et al., 2011, *ApJ*, 743, 200
 Bevington P. R., Robinson D. K., 1992, *Data reduction and error analysis for the physical sciences*, p.44. McGraw-Hill Education
 Buchhave L. A., et al., 2010, *ApJ*, 720, 1118
 Ciceri S., et al., 2013a, *VizieR Online Data Catalog*, pp J/A+A/557/A30, *ADS*
 Ciceri S., et al., 2013b, *A&A*, 557, A30
 Claret A., Bloemen S., 2011, *A&A*, 529, A75
 Collins K., Kielkopf J., 2013, *AstrolmageJ: ImageJ for Astronomy* (ascl:1309.001)

- Colón K. D., Ford E. B., Lee B., Mahadevan S., Blake C. H., 2010, *MNRAS*, 408, 1494
- Dennis J. E., Torczon V., 1988, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. pp 187–191, doi:10.1117/12.944050
- Eastman J., Gaudi B. S., Agol E., 2013, *PASP*, 125, 83
- Foreman-Mackey D., Hogg D. W., Lang D., Goodman J., 2013, *PASP*, 125, 306
- Fressin F., Guillot T., Nasta L., 2009, *A&A*, 504, 605
- Fulton B. J., Shporer A., Winn J. N., Holman M. J., Pál A., Gazak J. Z., 2011, *The Astronomical Journal*, 142, 84
- Gibson N. P., et al., 2009, *ApJ*, 700, 1078
- Hansen B. M. S., Barman T., 2007, *ApJ*, 671, 861
- Holman M. J., et al., 2010, *Science*, 330, 51
- Husnoo N., Pont F., Mazeh T., Fabrycky D., Hébrard G., Bouchy F., Shporer A., 2012, *MNRAS*, 422, 3151
- Jiang I.-G., et al., 2013, *The Astronomical Journal*, 145, 68
- Kundurthy P., Becker A. C., Agol E., Barnes R., Williams B., 2013, *The Astrophysical Journal*, 764, 8
- Lagrange A. M., Desort M., Meunier N., 2010, *A&A*, 512, A38
- Lang D., 2009, PhD thesis, University of Toronto, Canada
- Lee J. W., Youn J.-H., Kim S.-L., Lee C.-U., Koo J.-R., 2011, *PASJ*, 63, 301
- Lomb N. R., 1976, *Ap&SS*, 39, 447
- Mackebrandt F., et al., 2017, *A&A*, 608, A26
- Mannaday V. K., et al., 2020, *AJ*, 160, 47
- Mayor M., Queloz D., 1995, *Nature*, 378, 355
- Mazeh T., et al., 2013, *ApJS*, 208, 16
- Moutou C., et al., 2011, *A&A*, 533, A113
- Nesvorný D., 2009, *ApJ*, 701, 1116
- O'Donovan F. T., et al., 2007, *ApJ*, 663, L37
- Ohta Y., Taruya A., Suto Y., 2005, *ApJ*, 622, 1118
- Petrucci R., Jofré E., Melita M., Gómez M., Mauas P., 2015, *MNRAS*, 446, 1389
- Poddaný S., Brát L., Pejcha O., 2010, *New Astron.*, 15, 297
- Press W. H., Rybicki G. B., 1989, *ApJ*, 338, 277
- Püsküllü Ç., Soyduğan F., Erdem A., Budding E., 2017, *New Astron.*, 55, 39
- Ricci D., et al., 2017, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 129, 064401
- Ricker G. R., et al., 2009, in American Astronomical Society Meeting Abstracts #213. p. 403.01
- Rongtai Cai Qingxiang Wu Wenzao Shi Honghai Sun Yuanhao Wu Zichen Wang 2011, in 2011 International Conference on Image Analysis and Signal Processing. pp 389–394, doi:10.1109/IASP.2011.6109069
- Sada P. V., et al., 2012, *PASP*, 124, 212
- Scargle J. D., 1982, *ApJ*, 263, 835
- Smithsonian Astrophysical Observatory 2000, SAOImage DS9: A utility for displaying astronomical images in the X11 window environment (ascl:0003.002)
- Solmaz A., et al., 2021, *Turkish J.A&A*, 2, 1
- Southworth J., 2009, *MNRAS*, 394, 272
- Southworth J., 2012, *MNRAS*, 426, 1291
- Sozzetti A., et al., 2008, *A&A*, 249, 261
- Sozzetti A., et al., 2009, *ApJ*, 691, 1145
- The Astropy Collaboration 2018, astropy v3.0.5: a core python package for astronomy, doi:10.5281/zenodo.2556700
- Torres G., Winn J. N., Holman M. J., 2008, *ApJ*, 677, 1324
- Turner J. D., et al., 2013, *MNRAS*, 428, 678
- VanderPlas J. T., 2018, *ApJS*, 236, 16
- Vaňko M., et al., 2013, *MNRAS*, 432, 944
- Winn J. N., Henry G. W., Torres G., Holman M. J., 2008, *ApJ*, 675, 1531
- Wolszczan A., Frail D. A., 1992, *Nature*, 355, 145
- von Essen C., et al., 2018, *A&A*, 615, A79
- von Essen C., et al., 2019, *A&A*, 628, A115

Access:

M21-0104: *Turkish J.A&A* — Vol.2, Issue 1.