





WASP-52 b ve WASP-43 b Geçiş Işık Eğrisi ve TTV Analizleri

Ceren Eyvaz¹  , Sahra Kurt² , Yasemin Aladağ³ 

¹ International Foundation Programme, University of Bristol, Bristol, BS8 1TH, United Kingdom

² Seyhan Borsa İstanbul Fen Lisesi, Adana, 01200, Türkiye

³ Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Çukurova Üniversitesi, Adana, 01330, Türkiye

Accepted: March 30, 2026. Revised: March 30, 2026. Received: November 17, 2025.

Özet

Bu çalışmada, WASP-52 b ve WASP-43 b ötegezegen sistemlerine ait UT50, T100 ve TESS teleskoplarından elde edilen geçiş gözlemleri analiz edilerek, söz konusu sistemlerin güncel fiziksel ve yörüngesel parametreleri belirlenmiştir. Geçiş ışık eğrisi verileri AstroImageJ yazılımı kullanılarak normalize edilmiş ve EXOFAST (sürüm 1.7) programı ile modellenmiştir. Modelleme sonuçlarına göre, WASP-43 b sistemi için normalize yarı büyük eksen oranı $a/R_*=4.90\pm 0.05$ ve yörünge eğim açısı $i=82^\circ 21\pm 2^\circ 20$ elde edilmiş; bu parametreler yardımıyla Kepler'in üçüncü yasası kullanılarak barınak yıldızın ortalama yoğunluğu $\rho_*=3.37\pm 0.10 \text{ g cm}^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. Literatürde verilen barınak yıldız yarıçapı $R_*=0.667_{+0.010}^{-0.011} R_\odot$ esas alınarak Safronov parametresi ($\Theta=0.080$) bulunmuştur. Benzer şekilde, WASP-52 b sistemi için $a/R_*=7.52\pm 0.02$, $i=86^\circ 82\pm 5^\circ 04$ ve $\rho_*=2.63\pm 0.03 \text{ g cm}^{-3}$ parametreleri belirlenmiş; $R_*=0.786\pm 0.017$ değeri kullanılarak Safronov parametresi ($\Theta=0.024$) hesaplanmıştır. WASP-52 b ve WASP-43 b için elde edilen O–C diyagramları, her iki sistemde de zamanlama artıklarının sıfır etrafında simetrik dağıldığını ve mevcut gözlemsel zaman tabanı içerisinde lineer efemeristen istatistiksel olarak anlamlı bir sapma ya da belirgin bir geçiş zamanlama değişimi sinyali bulunmadığını göstermektedir.

Abstract

In this study, transit observations of the exoplanetary systems WASP-52 b and WASP-43 b obtained from the UT50, T100, and TESS telescopes were analyzed, and the updated physical and orbital parameters of these systems were determined. The transit light curves were normalized using the AstrolmageJ software and modeled with the EXOFAST v1.7 program. For the WASP-43 b system, the normalized semi-major axis was found to be $a/R_*=4.90\pm 0.05$ and the orbital inclination angle was determined as $i=82^\circ 21\pm 2^\circ 20$. Using these parameters and Kepler's third law, the mean stellar density was calculated as $\rho_*=3.37\pm 0.10 \text{ g cm}^{-3}$. Using the stellar radius value given in the literature ($R_*=0.667\pm 0.011 R_\odot$), the Safronov parameter was calculated as ($\Theta=0.080$). Similarly, for the WASP-52 b system, the parameters were determined as $a/R_*=7.52\pm 0.02$, $i=86^\circ 82\pm 5^\circ 04$, and $\rho_*=2.63\pm 0.03 \text{ g cm}^{-3}$. Using the stellar radius value from the literature ($R_*=0.786\pm 0.017 R_\odot$), the Safronov parameter was calculated as ($\Theta=0.024$). The O–C diagrams obtained for WASP-52 b and WASP-43 b show that the timing residuals are symmetrically distributed around zero, and within the current observational time baseline, no statistically significant deviation from a linear ephemeris or clear evidence of transit timing variation has been detected.

Anahtar Kelimeler: exoplanets – surveys – techniques: photometric

1 Giriş

Ötegezegen (exoplanet), Güneş Sistemi dışında yer alan ve bir yıldız, yıldız kalıntısı ya da kahverengi cüce gibi bir merkezi cisim etrafında dolanan gezegen kütlelerinde bir cisim olarak tanımlanır. Bununla birlikte, bir cismin etrafında dolanıyor olması tek başına bir ötegezegeni tanımlamak için yeterli olmayıp, kütle sınırları, oluşum süreçleri ve dinamik özellikler de bu sınıflandırmada rol oynamaktadır (Lecavelier des Etangs & Lissauer 2022).

Ötegezegenlerin tespiti genellikle, barınak yıldızlarının önünden geçişleri (transit) sırasında yıldızın gözlenen ışık akısında meydana gelen küçük azalmaların incelenmesiyle gerçekleştirilmektedir. Yıldız parlaklığında gözlenen dönemsel düşüşler bir ışık eğrisi olarak kaydedilmekte ve bu verilerin analiziyle gezegenin temel fiziksel ve yörüngesel parametreleri belirlenebilmektedir (Winn 2010; Seager & Mallén-Ornelas 2003). Günümüze kadar yapılan çok sayıda yer ve uzay

tabanlı fotometrik tarama sonucunda binlerce ötegezegen tespit edilmiştir. NASA Exoplanet Archive veritabanında 28 Aralık 2025 itibarıyla onaylanmış ötegezegen sayısı ~6065'tir. Bunlardan 5'i astrometri, 262'si kütleçekimsel merccek, 90'ı görüntüleme, 1158'i dikine hız ve 4474'ü geçiş yöntemiyle keşfedilmiştir.

Geçiş yöntemiyle yapılan gözlemler, ışık eğrisi üzerinden doğrudan ölçülebilen geçiş parametrelerinin (ör. yarıçaplar oranı, R_p/R_* , geçiş süreleri ve kontakt zamanları) tutarlı biçimde belirlenmesini sağlar. Bu gözlemsel parametrelerden hareketle, yörünge geometrisine ve Kepler'in üçüncü yasasına dayalı olarak normalize yarı büyük eksen oranı, etki parametresi ve barınak yıldızın ortalama yoğunluğu gibi türetilmiş geçiş parametreleri hesaplanabilmektedir (Winn 2010; Seager & Mallén-Ornelas 2003). Bu sonuçlar, sistemin genel yapısının anlaşılmasına katkı sağlamakta ve ileri çalışmalar için uygun hedeflerin seçilmesine olanak tanımaktadır (Hébrard ve diğ. 2013).

Kısa dönemli sıcak Jüpiter sistemlerinde, yıldız–gezegen arasındaki gelgit etkileşimleri zamanla yörünge döneminde

* wk25606@bristol.ac.uk

ölçülebilir değişimlere yol açabilmektedir (Maciejewski ve diğ. 2016). Bu tür sistemlerde geçiş zamanlarının uzun zaman tabanında izlenmesi, hem lineer efemerisin doğrulanmasına hem de olası dönem değişimi (dP/dt) ya da geçiş zamanlarındaki değişimlerin (TTV) araştırılmasına imkân tanımaktadır.

Literatürde farklı gözlem setlerinden elde edilen geçiş zamanlarının heterojen analiz edilmesi, O–C diyagramlarında yapay sapmalara neden olabilmektedir. Bu nedenle geçiş ortası zamanlarının homojen yöntemlerle yeniden analiz edilmesi ve efemeris parametrelerinin güncellenmesi büyük önem taşımaktadır (Baştürk ve diğ. 2022).

Bununla birlikte, O–C diyagramları yalnızca lineer efemerisin geçerliliğini test etmek için değil, aynı zamanda sistemdeki olası dinamik etkileşimlerin ve üçüncü cisim etkilerinin araştırılması için de güçlü bir araçtır. Bu çalışmada WASP-43 ve WASP-52 sistemleri için literatür, VarAstro sitesinden (Exoplanet Transit Database – ETD) elde edilen veriler ve TESS verileri birleştirilerek O–C diyagramları oluşturulmuş ve sistemlerin geçiş zamanlarında bir değişim olup olmadığı test edilmiştir.

WASP-43 b, ilk olarak Hellier ve diğ. (2011) tarafından SuperWASP fotometrik geçiş verileri kullanılarak keşfedilmiş ve SOPHIE spektrografi ile elde edilen dikine hız ölçümleriyle doğrulanmıştır. Sonraki çalışmalarda ise yüksek sinyal-gürültü oranına sahip geçiş ışık eğrileri ve hassas dikine hız gözlemleri kullanılarak sistem parametreleri belirlenmiştir. Gillon ve diğ. (2012a) ile Bonomo ve diğ. (2017) çalışmaları, çoklu bant geçiş fotometrisi ve dikine hız analizlerini birleştirerek temel parametreleri yüksek doğrulukla hesaplamıştır.

Ayrıca Esposito ve diğ. (2017), HARPS ve SOPHIE verilerini kullanarak WASP-43 sisteminin yapısını incelemiş ve parametre belirsizliklerini iyileştirmiştir. WASP-43 b sistemi için yapılan önceki geçiş zamanlama çalışmaları genel olarak doğrusal efemeris ile uyumlu sonuçlar vermiş ve anlamlı bir geçiş zamanlaması ya da yörünge dönemi değişimi tespit edilememiştir (Hoyer ve diğ. 2016; Garai ve diğ. 2021). Bununla birlikte, bazı çalışmalar sistemde yörünge döneminin kısalmasına dair zayıf bir eğilime işaret etmiş, ancak bu sonuçların istatistiksel olarak anlamlı olmadığı vurgulanmıştır (Davoudi ve diğ. 2021).

Son olarak, Bernabò ve diğ. (2025) tarafından gerçekleştirilen kapsamlı analizde, geniş zaman aralığına yayılan geçiş, örtülme ve dikine hız verilerinin birlikte kullanılmasıyla WASP-43 b sisteminde hem gelgit etkileşimleri nedeniyle yörünge küçülmesinin, hem de eksen dönmesinin eş zamanlı olarak tespit edildiği ve bu iki etkinin birlikte gözlemlendiği ilk ötegezegen sistemi olduğu ortaya konulmuştur. Bu durum, yalnızca geçiş zamanlamalarına dayanan önceki çalışmaların aksine, farklı gözlem tekniklerinin birlikte değerlendirilmesinin sistemin yörünge evrimini anlamada kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

WASP-52 b gezegeni ise Hébrard ve diğ. (2013) tarafından SuperWASP-North geçiş verileriyle keşfedilmiş, gezegenin varlığı ve kütlesi SOPHIE spektrografi ile yapılan dikine hız gözlemleriyle doğrulanmıştır. Hébrard ve diğ. (2013) çalışmasında ayrıca, WASP-52 b'nin, Jüpiter'den daha az bir kütleyle fakat çok daha büyük bir yarıçapa sahip olduğu ve bu nedenle, şişkin sıcak Jüpiter kategorisine girdiği belirlenmiştir.

WASP-52 b'nin keşfinin ardından, sisteminin parametreleri farklı çalışmalarda çeşitli fotometrik gözlemlerle incelenmiştir. Mancini ve diğ. (2016); Mancini ve diğ. (2017), farklı filtrelerde ve çok sayıda teleskopla elde edilen yüksek hassasiyetli geçiş ışık

eğrilerini kullanarak sistem parametrelerini yeniden belirlemiş ve literatürdeki değerlerle karşılaştırmıştır.

WASP-52 b sistemi için yapılan geçiş zamanlama çalışmaları sınırlı sayıda olup, mevcut analizler genel olarak doğrusal efemeris ile uyumlu sonuçlar vermektedir. Sonbaş ve diğ. (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, elde edilen O–C diyagramında verilerin büyük çoğunluğunun istatistiksel olarak uyumlu olduğu ve sistemde ek bir cisme işaret eden anlamlı bir geçiş zamanları değişimi bulunmadığı rapor edilmiştir. Benzer şekilde, bazı çalışmalarda geçiş zamanlarında küçük sapmalar gözlemlense de bu sapmaların yıldız aktivitesi veya ölçüm belirsizliklerinden kaynaklanabileceği ve anlamlı bir periyodik TTV sinyali oluşturmadığı belirtilmiştir. Ayrıca, WASP-52 b, süper-sıcak Jüpiterler sınıfı dışında olmasına rağmen H soğurma gözlemi yapılan nadir gezegenlerden biri olup, bu özellik ilk kez Sharipov ve diğ. (2018) tarafından rapor edilmiştir.

WASP-43 ve WASP-52 ötegezegen sistemleri, birçok özellik açısından benzerlikler göstermektedir. İki sistemde de K tipi bir yıldız ve yörüngesindeki bilinen tek gezegen olan birer gaz devi bulunmaktadır. Bu iki sistem arasındaki benzerlik, iki gezegenin arasında da benzerlikler öngörmemizi sağlamakta ve iki gezegenin parametrelerini birlikte incelememize imkan tanımaktadır.

2 Veri Analizi

Ötegezegen araştırmalarına yönelik birçok uzay görevi yürütülmektedir. Bunlardan biri NASA'nın Astrofizik Keşif Programı kapsamında geliştirilen TESS görevidir (Ricker ve diğ. 2009). TESS, parlak yıldızları sürekli tarayarak geçiş yapan ötegezegenleri tespit etmeyi amaçlar. Bu görev kapsamında elde edilen gözlem verileri, açık erişim olarak sunulmaktadır. Bir diğer önemli veri kaynağı ise "Exoplanet Transit Database" (ETD) olarak bilinen VarAstro'dur (Poddany ve diğ. 2010). Çek Cumhuriyeti Astronomi Derneği'ne bağlı Değişken Yıldızlar ve Ötegezegenler Bölümü tarafından yürütülen VarAstro platformu, amatör ve profesyonel gözlemcilerin geçiş verilerini ortak bir arşivde toplayarak ilgilenen tüm araştırmacıların kullanımına sunmaktadır.

Bu çalışmada geçiş ışık eğrilerinin modellenmesinde kullanılan yıldız parametrelerinin başlangıç değerleri NASA Ötegezegen Arşivi servisinin Bileşik Gezegen Verileri tablosundan alınmıştır. Bu tabloda verilen yıldız kütlesi (M_*), yarıçapı (R_*), etkin sıcaklığı (T_{eff}) ve metalitesi ($[Fe/H]$) literatürde yayımlanmış spektroskopik ve fotometrik analizlere dayanmaktadır. Çalışmamızda bu parametreler doğrudan geçiş ışık eğrisinden türetilmemiş, modelleme sürecinde öncül dağılımların (prior) merkezi değerleri olarak kullanılmıştır. EXOFAST kodu, geçiş geometrisinden elde edilen parametreleri (örneğin a/R_* , b , i) yıldız evrim modelleri ile birleştirilerek yıldız yoğunluğu ile tutarlı bir çözüm üretmektedir. Dolayısıyla yıldız kütlesi ve yarıçapı yalnızca geçiş verisinden bağımsız olarak belirlenmemekte; bunun yerine literatürden alınan spektroskopik parametreler ile geçiş çözümünün birlikte değerlendirilmesi sonucu elde edilmektedir. Bu yaklaşım, modelin fiziksel olarak tutarlı ve literatürle uyumlu bir çözüm üretmesini sağlamaktadır.

WASP-52 b ve WASP-43 b için fotometrik geçiş gözlemleri Çukurova Üniversitesi Uzay Bilimleri ve Güneş Enerjisi Araştırma ve Uygulama Merkezindeki 50 cm çaplı, f/8 odak oranlı RC tipi teleskop (UT50) ile alınmıştır (Çizelge 1). Ayrıca, bu çalışmada T100, TESS, ETD ve

Çizelge 1. WASP-52 b UT50 gözlem bilgileri.

Ötegezegen	Gözlem Tarihi	Filtre	Poz Süresi (s)
WASP-52 b	08.11.2019	Rc	90
WASP-43 b	28.04.2020	Clear	90

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

Ötegezegen	Veri Kaynağı	Işık Eğrisi Sayısı
WASP-52 b	TESS (Sektör 83)	14
WASP-52 b	ETD (VarAstro)	61
WASP-52 b	Chen ve diğ. (2017)	1
WASP-52 b	Mancini ve diğ. (2017)	12
WASP-43 b	T100 (TUG)	1
WASP-43 b	TESS (Sektör 36, 35, 62, 89)	50, 24, 28, 33
WASP-43 b	ETD (VarAstro)	55
WASP-43 b	Gillon ve diğ. (2012b)	3
WASP-43 b	Jiang ve diğ. (2016)	5
WASP-43 b	Murgas ve diğ. (2014)	1
WASP-43 b	Chen ve diğ. (2014)	1

literatürde mevcut diğer ışık eğrileri de kullanıldı ve bunlar Çizelge 2’de verildi. ETD veri tabanında sunulan gözlemler arasından, fotometrik kalite, zaman örnekleme ve sistematik etkiler göz önüne alınarak DQ (Data Quality) değeri 1–3 olan ışık eğrileri çalışmaya dâhil edilmiştir. UT50 verisinden elde edilen WASP-52’ye ait ışık eğrisinde olumsuz hava koşulları nedeniyle eksik veri olsa da minimum noktasında yeterli ölçüm olduğu için modellenen ve parametre hesaplarına model sonuçları dahil edilmiştir. WASP-43’e ait TESS gözlem verileri 2019 (Sektör-36), 2021 (Sektör-35), 2023 (Sektör-62) ve 2025 (Sektör-89) yıllarında alınmıştır.

UT50 teleskobu ile yapılan yer tabanlı gözlem verileri standart fotometrik kalibrasyon işlemleri (bias, dark, flat-field düzeltmeleri) uygulanarak indirgenmiştir. Tüm veri setleri modelleme öncesinde incelendikten sonra, “Prepare Data for AstrolmageJ” Python aracı kullanılarak verilerin zaman bilgileri BJD-TDB formatına hizalanmış ve hava kütlesi düzeltmeleri yapılmıştır. Fark ışık ölçüm ve geçiş dışı akı seviyesine normalizasyon için AstroImageJ (AIJ) (Collins ve diğ. 2017) yazılımı tercih edilmiştir. AstrolmageJ, ImageJ’in bir uzantısı olup, astronomiye özgü görüntü kalibrasyonu ve veri indirgeme araçları sunar. AIJ ile hava kütlesi hesaplara dahil edilip veriler normalize edildikten sonra EXOFAST-v1 (Eastman ve diğ. 2013) yazılımı aracılığıyla modellenmiştir. Model sonuçlarından geçiş derinlikleri, geçiş süreleri ve geçiş ortası zamanları tespit edilmiştir.

3 Bulgular

3.1 WASP-52 b ve WASP-43 b’nin ışık eğrileri

WASP-52 ve WASP-43 sistemleri için UT50 ve T100 teleskoplarından, VarAstro ve Vizier veritabanlarından alınan ışık eğrileri sırasıyla Şekil 1 üst ve alt panelde gösterilmektedir. Sistemlerin TESS uydusundan alınan ışık eğrileri ve yörünge evresine bağlı olarak üst üste çizdirilmiş ışık eğrileri sırasıyla Şekil 2 ve 3’de gösterilmektedir. Bu geçiş gözlem verileri

kullanılarak gezegen ve yıldız parametrelerinin bulunmasına yönelik analiz ve modeller gerçeğe getirilmiştir. Çalışmada tüm veri setlerinde her bir ışık eğrisi ayrı ayrı modellenmiştir.

Geçiş ışık eğrisi modellemesinden elde edilen normalize yarı büyük eksen (a/R_*) parametresi ile yörünge dönemi (P) kullanılarak, Kepler’in üçüncü yasasından türetilen bağıntı yardımıyla barınak yıldızın ortalama yoğunluğu hesaplanmıştır (Seager & Mallén-Ornelas, 2003). Dairesel yörünge varsayımı altında yıldız yoğunluğu;

$$\rho_* = \frac{3\pi}{GP^2} \left(\frac{a}{R_*} \right)^3 \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir. Bu çalışmada WASP-43 sistemi için $\rho_* = 3.37 \pm 0.10 \text{ g cm}^{-3}$ elde edilmiştir. WASP-52 sistemi için ise $\rho_* = 2.63 \pm 0.03 \text{ g cm}^{-3}$ bulunmuştur. Hesaplanan değerler literatürde rapor edilen yıldız yoğunluklarıyla (Davoudi ve diğ. 2021; Mancini ve diğ. 2017) uyumlu olup, geçiş modelinden türetilen geometrik parametrelerin fiziksel tutarlılığını desteklemektedir.

Çizelge 3’te verilen parametreler hesaplanırken tüm ışık eğrilerinin modellerinden belirlenen parametrelerin aritmetik ortalaması alınmıştır. Parametre belirsizlikleri ise bu ortalamaların standart sapmaları kullanılarak belirlenmiştir. İki gezegen için de elimizde doğrudan dikine hız ölçümleri bulunmadığı için, gezegen kütlesi Chen & Kipping (2017) tarafından verilen yaklaşıma göre hesaplanmıştır.

$$q = \frac{M_p}{M_*} \quad (2)$$

WASP-52 ve WASP-43 sistemleri için önceki çalışmalardan (Mancini ve diğ. 2017; Esposito ve diğ. 2017) alınan yıldız ve gezegen kütlesi ile q hesaplanmıştır. Sabit q değeri ile bu çalışmada EXOFAST’tan gelen (ölçülmeyen) yıldız kütlesi kullanılarak gezegen kütlesine geçilmektedir. Gezegen kütlesinin belirsizliği, kütle oranı ve yıldız kütlesine ilişkin belirsizlikler kullanılarak standart yöntemle hesaplanmıştır.

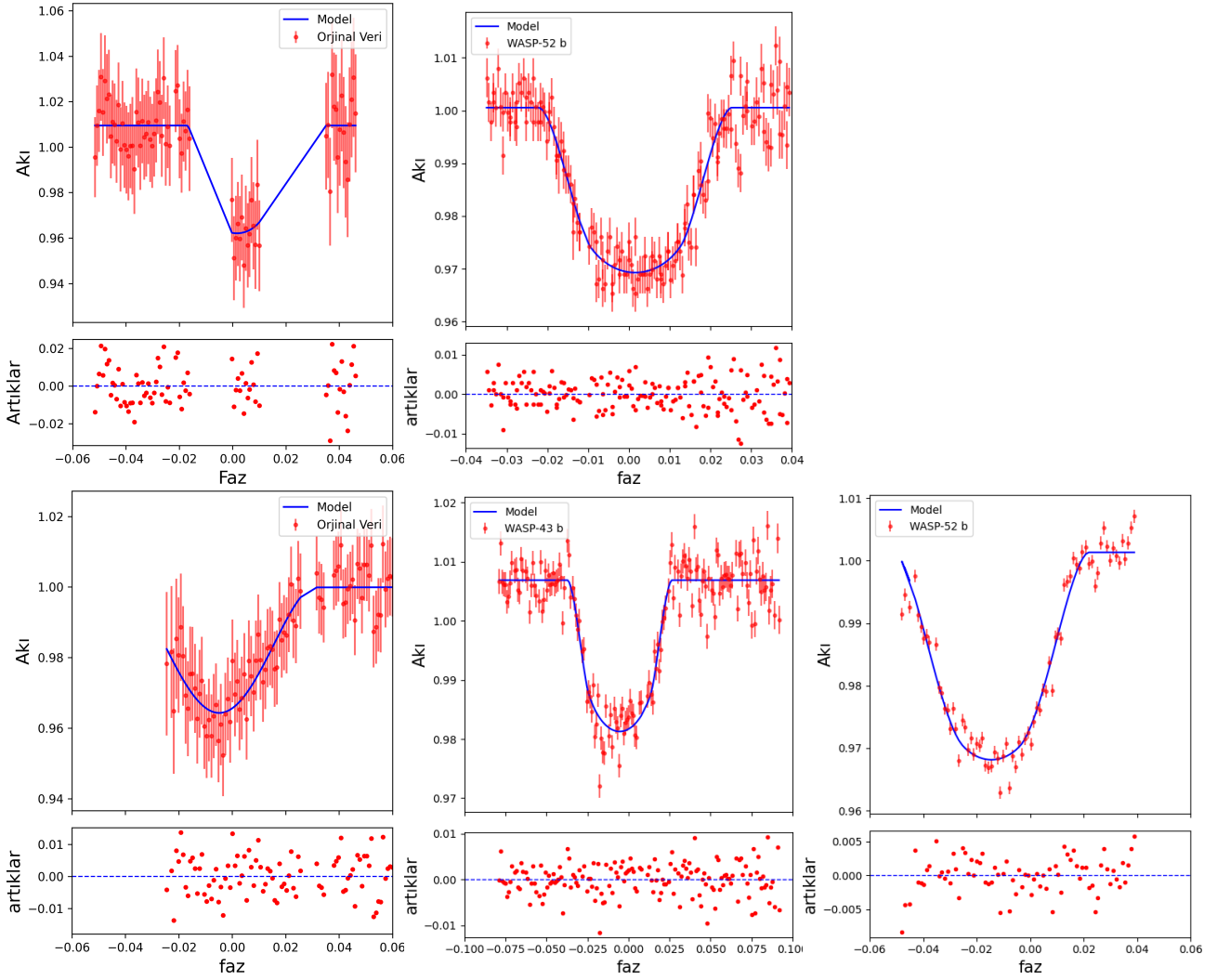
Hesaplamalar sonucunda gezegenlerin tahmini kütlesi WASP-52 b ve WASP-43 b için sırasıyla $M_p = 0.447 \pm 0.021 M_{\text{jüp}}$ ve $M_p = 1.923 \pm 0.048 M_{\text{jüp}}$ olarak bulunmuştur. Burada M_p gezegen kütlesini temsil etmektedir. Şekil 4’da 11 Kasım 2025 tarihinde alınan TEPcat verilerinden oluşturulan kütle-yarıçap dağılım grafiği gösterilmiştir.

3.2 Safronov Analizi ve Sınıflandırma

Safronov parametresi, bir gezegenin kütleçekimsel etkisiyle çevresindeki diğer cisimlerin yörüngelerini ne ölçüde değiştirebileceğini gösteren boyutsuz bir parametredir (Fressin ve diğ. 2009). Safronov sayısı (Θ),

$$\theta = \frac{1}{2} \left(\frac{v_{\text{kaçış}}}{v_{\text{yörünge}}} \right)^2 = \frac{a}{R_p} \cdot \frac{M_p}{M_*} \quad (3)$$

denklemleri ile bulunur (Hansen & Barman 2007). Denklemde $v_{\text{kaçış}}$ kaçış hızını, $v_{\text{yörünge}}$ yörünge hızını, a yarı-büyük eksen uzunluğunu, M_p gezegenin kütlesini, R_p gezegenin yarıçapını ve M_* ise yıldızın kütlesini gösterir. θ değeri büyük olan gezegenler, küçük cisimleri üzerine toplamaktan ziyade, kütleçekimsel olarak daha “etkin” olup çevrelerindeki küçük cisimleri daha güçlü şekilde dağıtarak (scattering) yörüngelerini temizleyebilirler. Hansen & Barman (2007) çalışmasında, bilinen geçiş yapan ilk gezegenler için Safronov sayılarının yaklaşık iki ayrı kümeye ayrıldığını göstermiştir: Sıcak Jüpiterlerin yaklaşık yarısı $\theta = 0.07$ civarında (Sınıf I), diğer



Şekil 1. WASP-52 (üst panel) ve WASP-43 (alt panel) sistemleri için UT50 teleskobu (sol), ETD verisi (orta) ve T100 teleskobundan (sağ) alınan ışık eğrileri ve model uyumları. WASP-52 ve WASP-43 için ETD verisi sırasıyla “17.12.2012 - Mark Salisbury” ve “06.04.2013 - Phil Evans” tarafından alınmıştır. Her gözlemin üst panelinde original ve model uyumu, alt panelinde artıklar gösterilmektedir.

yarısı ise $\theta=0.04$ civarında (Sınıf II) toplanmaktadır. Sınıf II gezegenler, benzer denge sıcaklıklarına sahip Sınıf I gezegenlere göre daha büyük yarıçapa (R_p) sahiptirler. Yani bu gezegenler daha “şişkin” olurlar. Bu gezegenlerin şişkin görünmelerinin ana sebebi, yıldızlarının yoğun ışınımı nedeniyle atmosferlerinin şişmesidir.

Bu çalışmada hesaplanan Safronov sayıları da literatürde tanımlanan bu sınıflandırma ile karşılaştırılarak gezegenlerin olası sınıfları değerlendirilmiştir. WASP-52 b ve WASP-43 b için Safronov sayıları sırasıyla $\theta=0.024$ ve $\theta=0.080$ olarak hesaplanmıştır. Buna göre WASP-43 b Sınıf I kategorisine dahil edilirken WASP-52 b gezegeni Sınıf II nin düşük-Safronov alt sınırında yer aldığı anlaşılmaktadır (bkz. Şekil 4). WASP-52 aslında çok sıcak bir yıldız değildir. Ancak gezegen yıldızına o kadar yakındır ki ($a \approx 0.03$ AB), aldığı enerji miktarı atmosferini şişirmeye yeterlidir. Safronov numarası büyük, WASP-43 b gibi Sınıf I gezegenleri için ise durum tersinedir (bkz. Şekil 3). WASP-43 b de yıldızına çok yakındır; ancak hem yıldızı daha soğuktur, hem de gezegen daha büyük kütlelidir. Bu nedenle WASP-43 b, WASP-52 b’inkinin 4 katından büyük kütlesine karşın daha küçük yarıçapa sahip bir gezegendir.

3.3 Geçiş Zamanı Analizi ve O–C Diyagramı

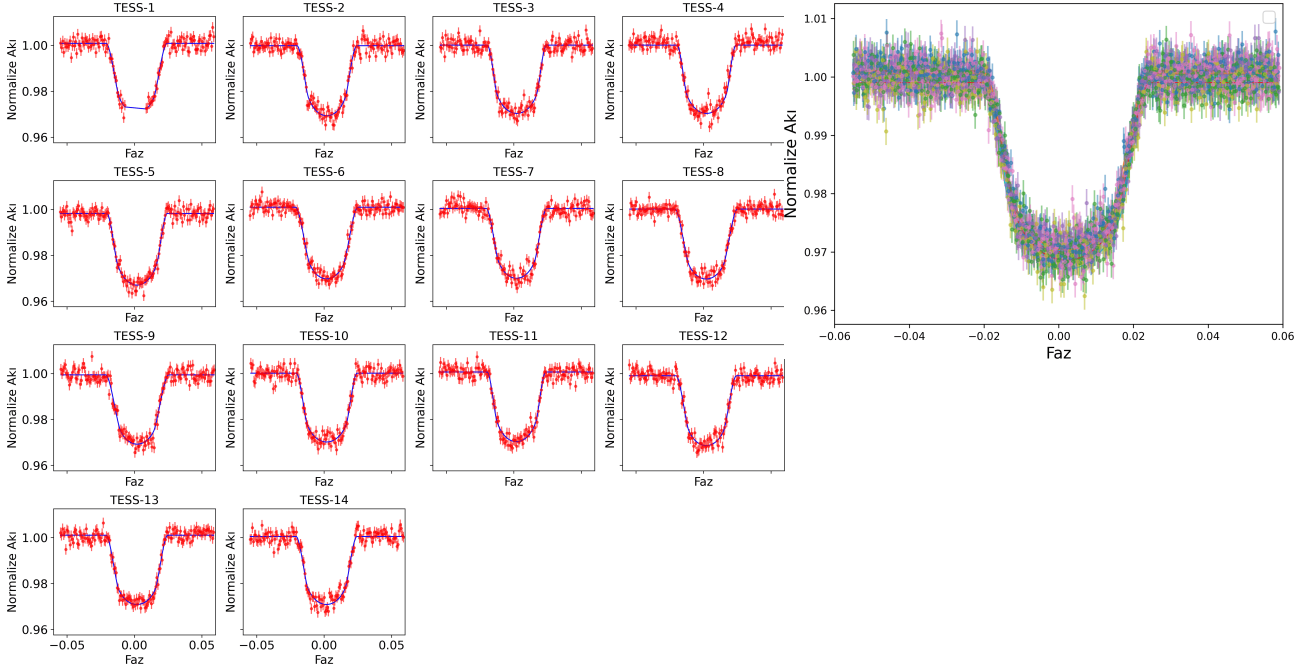
Geçiş zamanı analizleri, lineer efemerisin doğrulanması ve olası yörünge dönemi değişimlerinin araştırılması açısından güçlü bir yöntemdir (Maciejewski ve diğ. 2016; Baştürk ve diğ. 2022). Bu çalışmada WASP-52 ve WASP-43 b sistemleri için literatürden derlenen geçiş orta zamanları ile ETD, TESS ve yer tabanlı gözlemlerden elde edilen yeni ölçümler birleştirilmiştir. Tüm zamanlar BJD_{TDB} sistemine dönüştürülmüş ve referans lineer efemeris

$$T_{\text{calc}}(E) = T_0 + P E \quad (4)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanan beklenen geçiş zamanları ile karşılaştırılmıştır. Burada T_0 referans geçiş zamanı, P yörünge dönemi ve E başlangıç anını (epoch) temsil etmektedir. Her bir gözlem için artık değerler

$$(O - C)_E = T_{\text{obs},E} - T_{\text{calc},E} \quad (5)$$

şeklinde hesaplanmış ve dakikaya dönüştürülerek O–C diyagramı oluşturulmuştur. O–C diyagramları, lineer efemeristen sistematik sapmaların belirlenmesinde ve olası geçiş



Şekil 2. (Sol) WASP-52 b'nin TESS ışık eğrileri, hataları ve modelleri. Tüm eğrilerde geçiş dışı görelî akı 1'e normalize edilmiştir. Orjinal veriler kırmızı, modeller mavi renk ile gösterilmiştir. (Sağ) Verilerin birleştirilmiş yörünge evresine karşılık ışık eğrileri ve model uyumu.

zamanları değişimi (TTV) sinyallerinin araştırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Baştürk ve diğ. 2022). Özellikle kısa dönemli sıcak Jüpiter sistemlerinde, yıldız–gezegen arasındaki gelgit etkileşimlerinin yol açabileceği olası periyod değişimleri (dP/dt) bu yöntemle test edilebilmektedir (Maciejewski ve diğ. 2016).

WASP-52 b ve WASP-43 b için oluşturulan O–C diyagramları (Şekil 5 ve 6), NASA Exoplanet Archive veritabanından alınmıştır (Akeson ve diğ. 2013). Elde edilen artık değerlerin (O–C), sıfır etrafında simetrik biçimde dağıldığı ve gözlemlerin büyük çoğunluğunun birkaç dakikalık bir aralık dahilinde yer aldığı görülmektedir. TESS verilerinin saçılması ($\lesssim 2$ dakika) yer tabanlı gözlemlere kıyasla daha düşüktür; bu durum uzay tabanlı gözlemlerin daha yüksek fotometrik hassasiyetinden kaynaklanmaktadır. Yer tabanlı ETD ve diğer teleskop verilerinde, gözlem koşulları ve analiz yöntemlerindeki farklılıklara bağlı olarak daha geniş aralıkta bir dağılım gözlenmiştir. Mevcut gözlemsel zaman aralığında artık değerlerde belirgin bir doğrusal trend ya da sistematik sapma tespit edilmemiştir.

4 Tartışma ve Sonuç

Çalışma kapsamında, UT50 teleskobundan, VarAstro veritabanından ve TESS uydusundan alınan çeşitli geçiş gözlemi verileri analiz edilmiştir. Geçiş ışık eğrilerinin analize hazır hale getirilip modellenmesi sonucu elde edilen parametre değerlerinin aritmetik ortalamaları alındıktan sonra, WASP-52 b ve WASP-43 b gezegenlerine ve barınak yıldızlarına ait sistem parametreleri hesaplanmıştır.

Yıldızlara ve gezegenlere ait hesaplanan parametre değerlerinin önceki çalışmalarda bulunan değerler ile uyumlu olduğu görülmüştür (Çizelge 3)

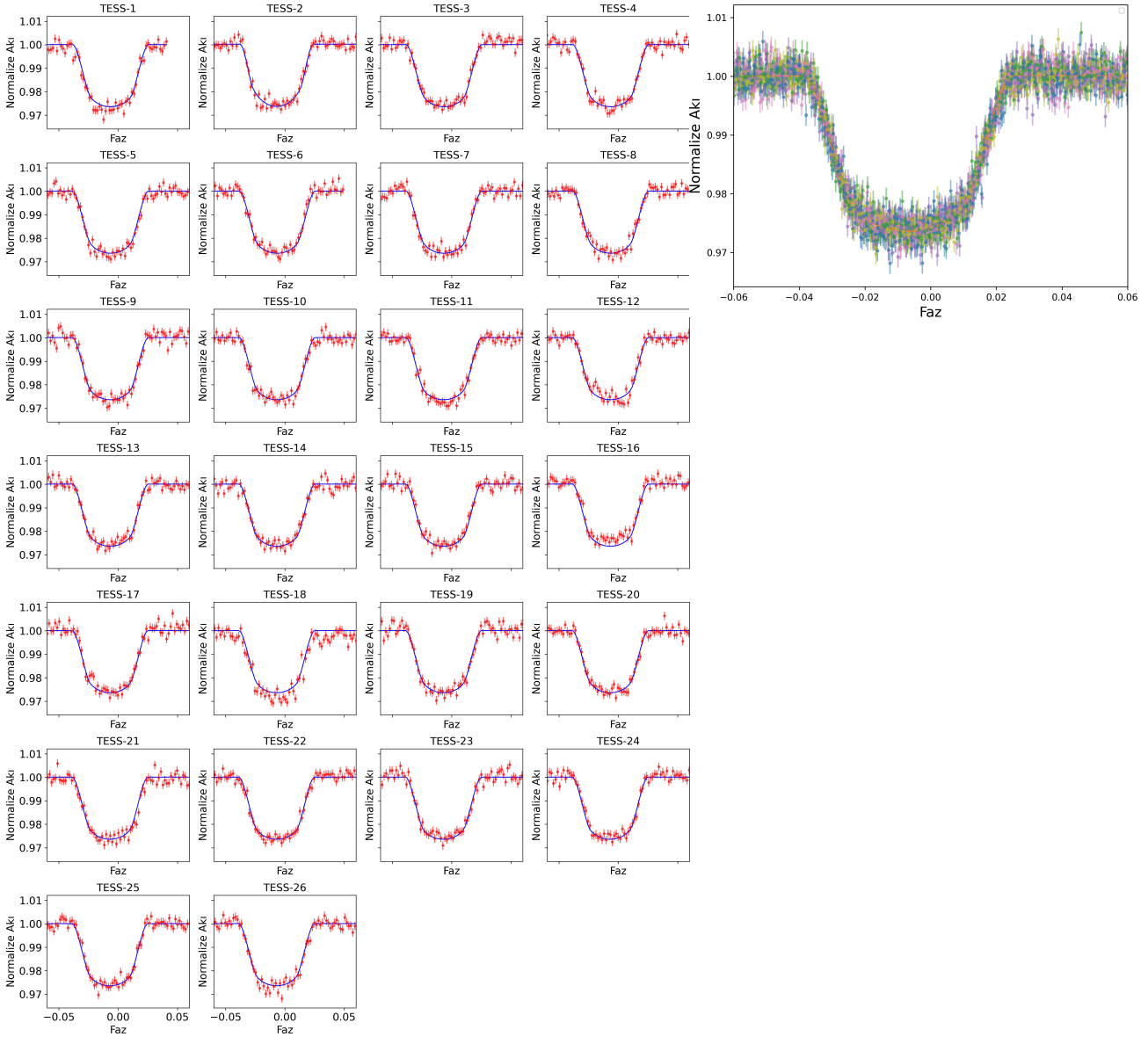
Bu parametre değerlerinden hareketle gezegenlerin fiziksel ve yörüngesel özelliklerini anlamak için Safronov parametresi hesaplanmıştır. Hesaplanan Safronov değerlerine göre WASP-

43 b gezegeni yüksek Safronov sayısı nedeniyle Sınıf I kategorisine dahil edilirken, WASP-52 b gezegeni II. Safronov sınıfı içinde yer almakta olup, bu sınıfın alt sınırına yakın bir Safronov sayısına sahiptir.

Hansen & Barman (2007) tarafından tanımlanan Safronov sınıflandırmasına göre, Sınıf II gezegenler genel olarak daha sıcak barınak yıldızların etrafında dolanırken benzer denge sıcaklıklarına sahip Sınıf I gezegenlere kıyasla daha büyük yarıçaplara sahiptirler. Ayrıca Sınıf II, şişkin sıcak Jüpiterlerin büyük kısmını içermektedir. Bu nedenle bir şişkin sıcak Jüpiter olan WASP-52 b gezegeninin bu sınıfta olması hesaplamaların literatürle tutarlı olduğunu göstermektedir. Çalışmada elde edilen sonuçlar, ayrıca sıcak Jüpiter popülasyonunun iç yapısal çeşitliliğinin daha iyi anlaşılmasına da katkı sağlamaktadır.

Hansen & Barman (2007) çalışmasında, Safronov sayısındaki esas ayrımın yarıçaptan değil, gezegen kütesinden kaynaklandığı da açıklanmıştır. Bu bağlamda, Sınıf II gezegenlerin, benzer denge sıcaklıklarında Sınıf I gezegenlere kıyasla sistematik olarak daha düşük kütlelere sahip olduğu ve daha kütleli yıldızların etrafında dolandığı görülmektedir. Bu çalışmada incelenen sistemler değerlendirildiğinde, WASP-43 b gezegeni yüksek kütesi ve Safronov sayısı ile Sınıf I özellikleri sergilerken, WASP-52 b gezegeninin daha düşük gezegen kütesi, şişkin yarıçapı ve düşük Safronov sayısı ile II. Safronov sınıfı içerisinde yer alıyor olması, literatürde tanımlanan eğilim ile tutarlıdır ve ilgili parametrelerin bağımsız veri setleriyle tutarlılığını desteklemektedir.

Bu çalışmada WASP-43 b ve WASP-52 b sistemlerine ait literatür, ETD ve TESS geçiş zamanları birleştirilerek O–C diyagramları oluşturulmuş ve sistemlerin geçiş zamanlarındaki olası değişimler incelenmiştir. O–C artıklarının kök ortalama kare (RMS) dağılımı hesaplanarak zamanlama ölçümlerinin dağılımını nicelleştirmek için diyagramda gösterilmiştir. Ayrıca WASP-43 b için geçiş zamanlamalarının kısa dönem davranışını daha yüksek hassasiyetle incelemek amacıyla, yalnızca TESS



Şekil 3. (Sol) WASP-43 b'nin TESS ışık eğrileri (Sektör-62), hataları ve modelleri. Tüm eğrilerde geçiş dışı görelî akı 1'e normalize edilmiştir. Orjinal veriler kırmızı, modeller mavi renk ile gösterilmiştir. (Sağ) Verilerin birleştirilmiş yörünge evresine karşılık ışık eğrileri ve model uyumu.

verilerini kullanarak ek bir O–C diyagramı oluşturduk. Elde edilen 0,33 dakikalık RMS değeri, birleşik veri setinden elde edilen değerden önemli ölçüde daha düşüktür ve bu da uzay tabanlı fotometrinin daha yüksek hassasiyetini yansıtmaktadır. Her iki sistemde TESS artıkları sıfır etrafında sıkıca kümelenmiştir ve sistematik bir eğilim göstermemektedir; bu da gözlemlenen dağılımın içsel zamanlama değişimlerinden ziyade ölçüm belirsizliklerinden kaynaklandığını göstermektedir. Hem WASP-43 b hem de WASP-52 b için elde edilen nispeten düşük RMS değerleri, geçiş sürelerinin doğrusal bir efemeris ile iyi bir şekilde tanımlandığını göstermektedir. Sıfırdan herhangi bir sapma, ek dinamik etkilerin göstergesi olmaktan ziyade, ölçüm belirsizliklerinden kaynaklanıyor gibi görünmektedir. Bu nedenle, mevcut veri setinin sınırları içinde, istatistiksel olarak anlamlı bir geçiş zamanları değişimi tespit edilmemiştir.

WASP-43 b'nin kısa yörünge dönemi nedeniyle gelgit etkileşimlerine daha duyarlı bir sistem olması beklenmektedir.

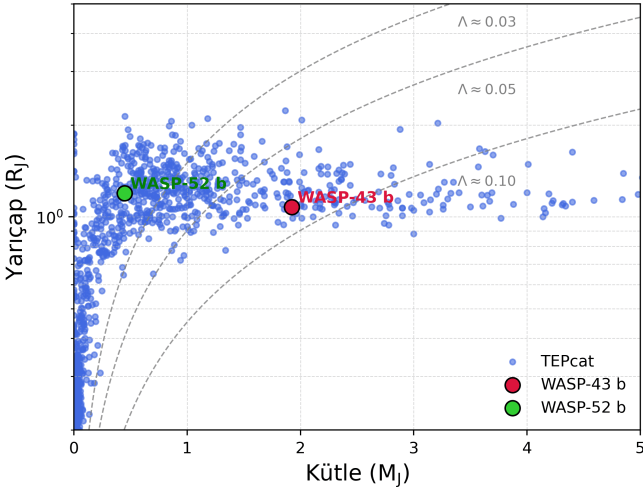
Ancak analizimiz, mevcut veri hassasiyeti ve zaman aralığında ölçülebilir bir dönem evrimi (dP/dt) ya da geçiş zamanlama sapması (TTV) sinyali ortaya koymamaktadır.

Benzer şekilde, WASP-52 b sistemi için zamanlama artıklarının kararlı bir dağılım sergilediği görülmektedir. TESS verilerinin daha düşük saçılım göstermesi, uzay tabanlı gözlemlerin yüksek fotometrik hassasiyeti ile uyumludur. Yer tabanlı gözlemlerde gözlenen daha geniş bir aralıktaki dağılım ise ölçüm belirsizlikleri ve farklı analiz yaklaşımlarından kaynaklanmaktadır.

Genel olarak sonuçlarımız, her iki sistemin de mevcut gözlemsel zaman aralığında kararlı bir yörünge hareketi sergilediğini göstermektedir. Bu çalışma kapsamında geçiş ortası zamanları homojen biçimde yeniden analiz edilmiştir. Tam kapsamlı bir TTV modellemesi gerçekleştirilmemiş olmakla birlikte, elde edilen zamanlama artıklarının mevcut veri hassasiyeti içerisinde lineer efemeris ile uyumlu olduğu

Çizelge 3. WASP-52 ve WASP-43 sistemlerinin literatürdeki sistem parametreleri ile bu çalışmadaki değerlerinin karşılaştırılması.

WASP-52	Parametre	Birim	Hébrard ve diğ. (2013)	Mancini ve diğ. (2017)	Bu Çalışma
Yıldız					
Kütle	M_* (M_\odot)		0.87 ± 0.03	0.804 ± 0.054	0.836 ± 0.012
Yarıçap	R_* (R_\odot)		0.79 ± 0.02	0.786 ± 0.017	0.775 ± 0.005
Sıcaklık	T (K)		5000 ± 100	5000 ± 100	-
Metalisite	[Fe/H] (dex)		0.03 ± 0.12	0.03 ± 0.12	0.143 ± 0.061
Yörünge eğimi	i ($^\circ$)		85.35 ± 0.10	85.15 ± 0.06	85.83 ± 1.28
Dönem	P (gün)		1.749780 ± 0.000001	1.749781 ± 0.000001	1.749780 (sabit)
Gezegen					
Yarı-büyük eksen	a (AB)		0.027 ± 0.001	0.0264 ± 0.0003	0.0272 ± 0.0003
Yarıçap	R_p ($R_{jüp}$)		1.196 ± 0.173	1.253 ± 0.029	1.27 ± 0.03
Kütle	M_p ($M_{jüp}$)		0.447 ± 0.021	0.43 ± 0.02	0.46 ± 0.02
Denge sıcaklığı	T_{eq} (K)		1298 ± 4	1315 ± 26	1315 ± 35
WASP-43	Parametre	Birim	Esposito ve diğ. (2017)	Bonomo ve diğ. (2017)	Bu Çalışma
Yıldız					
Kütle	M_* (M_\odot)		0.688 ± 0.037	0.717 ± 0.025	0.672 ± 0.017
Yarıçap	R_* (R_\odot)		0.651 ± 0.005	$0.667^{+0.010}_{-0.011}$	0.662 ± 0.069
Sıcaklık	T (K)		4500 ± 100	4400 ± 200	-
Metalisite	[Fe/H] (dex)		-0.010 ± 0.150	-0.050 ± 0.170	-0.012 ± 0.009
Yörünge eğimi	i ($^\circ$)		82.11 ± 0.09	82.33 ± 0.20	82.21 ± 2.20
Dönem	P (gün)		0.8134744 ± 0.0000001	0.8134744 ± 0.0000001	0.813475 (sabit)
Gezegen					
Yarı-büyük eksen	a (AB)		0.01493 ± 0.0001	0.0153 ± 0.0002	0.0148 ± 0.0002
Yarıçap	R_p ($R_{jüp}$)		1.006 ± 0.017	1.036 ± 0.019	1.076 ± 0.249
Kütle	M_p ($M_{jüp}$)		1.998 ± 0.079	$2.050^{+0.050}_{-0.052}$	1.923 ± 0.048
Denge sıcaklığı	T_{eq} (K)		1426.7 ± 8.5	-	1439 ± 77


Şekil 4. TEPcat katalogundaki doğrulanmış ötegezegenlerin kütle-yarıçap dağılımı. Grafikte WASP-43 b (kırmızı) ve WASP-52 b (yeşil) ötegezegenleri vurgulanmıştır. Referans Safronov parametresi (Λ) eğrileri, ortalama $a=0.22$ AU ve $M_*=1M_\odot$ varsayımlarıyla çizilmiştir.

belirlenmiştir. Daha uzun zaman tabanına sahip, yüksek hassasiyetli yeni gözlemler, özellikle WASP-43 b gibi kısa dönemli sistemlerde olası zayıf gelgit evrimi sinyallerinin test edilmesine olanak sağlayacaktır.

Bu genel değerlendirmeyi desteklemek amacıyla, çalışmamız kapsamında elde edilen UT50 teleskobu

gözlemlerine ait geçiş ortası zamanları ayrıca incelenmiştir. UT50 teleskobu ile elde edilen geçiş gözlemlerinden belirlenen geçiş ortası zamanları, WASP-52 b ve WASP-43 b için sırasıyla,

$$T_{mid} = 2458796.311266 \pm 0.00076 \text{ BJD}_{TDB} \quad (O-C=6.98 \text{ dk})$$

$$T_{mid} = 2458968.237356 \pm 0.00048 \text{ BJD}_{TDB} \quad (O-C=0.37 \text{ dk})$$

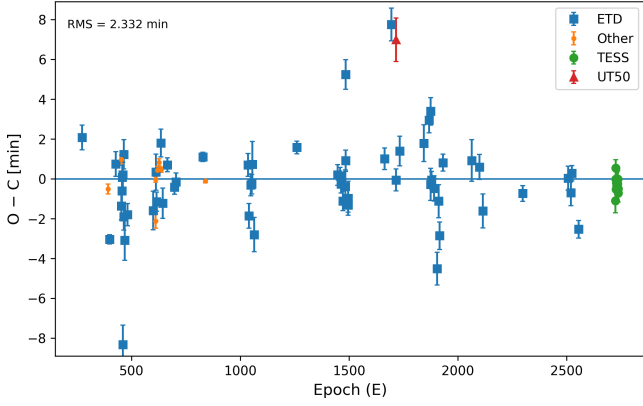
olarak bulunmuştur. Bu değerler literatürde verilen lineer efemeris ile uyumlu olup, mevcut zaman tabanı ve ölçüm belirsizlikleri dikkate alındığında istatistiksel olarak anlamlı bir periyod değişimine işaret etmemektedir.

Teşekkür

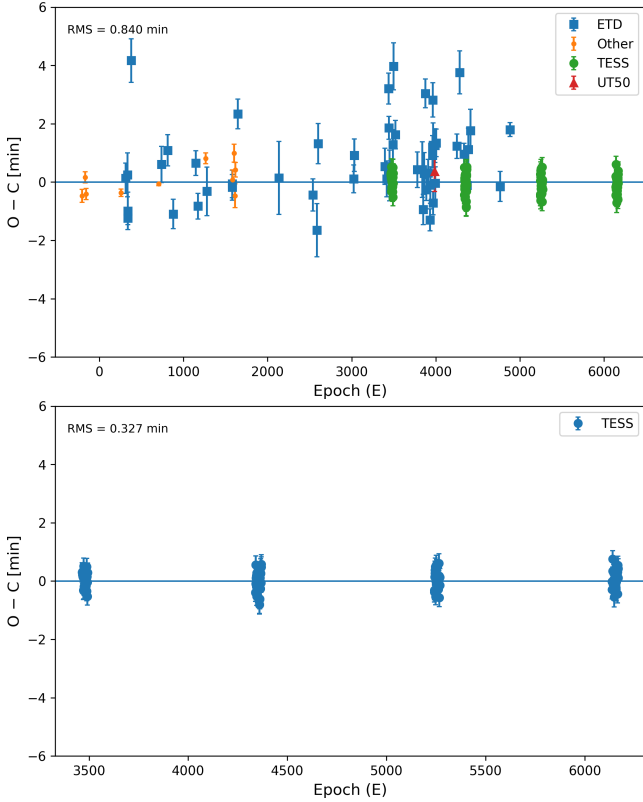
Bu çalışmada kullanılan gözlemsel veriler için Türkiye Ulusal Gözlemevleri (TUG) arşivinden yararlanılmıştır. Yazarlar, TUG'un veri arşivleme ve gözlemsel altyapı olanakları için teşekkür eder. Ayrıca yazarlar, bu çalışma süresince verdikleri değerli destek ve rehberlikleri için UZAYMER'den Prof. Dr. Aysun Akyüz ve Prof. Dr. Nazım Aksaker'e teşekkür eder.

Kaynaklar

- Akeson R. L., ve diğ., 2013, *PASP*, 125, 989
 Baştürk Ö., ve diğ., 2022, *MNRAS*, 512, 2062
 Bernabò L. M., ve diğ., 2025, *A&A*, 694, A233
 Bonomo A. S., ve diğ., 2017, *A&A*, 602, A107
 Chen J., Kipping D., 2017, *ApJ*, 834, 17
 Chen G., ve diğ., 2014, *A&A*, 563, A40
 Chen G., Palle E., Nortmann L., ve diğ., 2017, *AJ*, 154, 109
 Collins K. A., Kielkopf J. F., Stassun K. G., Hessman F. V., 2017, *AJ*, 153, 77
 Davoudi F., Baştürk Ö., Yalçınkaya S., Esmer E. M., Safari H., 2021, *AJ*, 162, 210



Şekil 5. WASP-52 b için O-C diyagramı ($T_0=2455793.68143$, $P=1.74977980$ gün). Farklı gözlem kaynakları (ETD, literatür, UT50 ve TESS) farklı sembol ve renklerle gösterilmiştir.



Şekil 6. WASP-43 b için O-C diyagramı ($T_0=2455726.54336$, $P=0.81347753$ gün). Üst panelde tüm veri setlerinin (ETD, literatür, UT50 ve TESS) birleşik O-C dağılımı, alt panelde ise yalnızca TESS geçiş zamanlarına ait O-C diyagramı gösterilmektedir. RMS değerleri her iki panelde verilmiştir.

Eastman J., Gaudi B. S., Agol E., 2013, *PASP*, 125, 83
 Esposito M., ve diğ., 2017, *A&A*, 601, A53
 Fressin F., Guillot T., Nesta L., 2009, *A&A*, 504, 605
 Garai Z., ve diğ., 2021, *MNRAS*, 508, 5514
 Gillon M., ve diğ., 2012a, *A&A*, 542, A4
 Gillon M., ve diğ., 2012b, *A&A*, 542, A4
 Hansen B. M. S., Barman T., 2007, *ApJ*, 671, 861
 Hébrard G., ve diğ., 2013, *Astronomy & Astrophysics*, 552, A120

Hellier C., Anderson D. R., Collier Cameron A., et al. 2011, *Astronomy & Astrophysics*, 535, L7
 Hoyer S., Pallé E., Dragomir D., Murgas F., 2016, *AJ*, 151, 137
 Jiang I.-G., Lai C.-Y., Savushkin A., Mkrтчian D., Antonyuk K., Griv E., Hsieh H.-F., Yeh L.-C., 2016, *AJ*, 151, 17
 Lecavelier des Etangs A., Lissauer J. J., 2022, *New Astron. Rev.*, 94, 101641
 Maciejewski G., ve diğ., 2016, *A&A*, 588, L6
 Mancini L., Southworth J., Ciceri S., et al. 2016, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 459, 2506
 Mancini L., ve diğ., 2017, *MNRAS*, 465, 843
 Murgas F., Pallé E., Zapatero Osorio M. R., Nortmann L., Hoyer S., Cabrera-Lavers A., 2014, *A&A*, 563, A41
 Poddaný S., Brát L., Pejcha O., 2010, *New Astron.*, 15, 297
 Ricker G. R., ve diğ., 2009, in American Astronomical Society Meeting Abstracts #213. p. 403.01
 Seager S., Mallén-Ornelas G., 2003, *The Astrophysical Journal*, 585, 1038
 Sharipov D. A., Patel K., Morton T. D., et al. 2018, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 478, 1327
 Sonbaş E., Karaman N., Özdönmez A., Er H., Dhuga K. S., Göğüş E., Nasiroglu I., Zejmo M., 2022, *MNRAS*, 509, 5102
 Winn J. N., 2010, in Seager S., ed., , *Exoplanets*. University of Arizona Press, pp 55–77, <https://arxiv.org/abs/1001.2010>

Access:

M26-0101: *Turkish J.A&A* — Vol.7.