

# Leke Örtülmelerinin Ötegezegen Geçiş Ortası Zaman Ölçümlerine Etkisi

Arif Solmaz<sup>1,2</sup>  , Özgür Baştürk<sup>3</sup> , Aysun Akyüz<sup>1,4</sup> 

<sup>1</sup> Uzay Bilimleri ve Güneş Enerjisi Araştırma ve Uygulama Merkezi (UZAYMER), Çukurova Üniversitesi, 01330, Adana, Türkiye

<sup>2</sup> Uzay Gözlem, Uygulama ve Araştırma Merkezi, Çağ Üniversitesi, 33800, Mersin, Türkiye

<sup>3</sup> Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 06100, Ankara, Türkiye

<sup>4</sup> Fen-Edeb Fak. Fizik Böl. Çukurova Üniversitesi, Adana, 01330, Türkiye

Accepted: December 30, 2022. Revised: December 4, 2022. Received: November 13, 2022.

## Özet

Geçiş yapan ötegezegenlere ait parametreleri hassas bir şekilde belirleyebilmek için geçiş ışık eğrilerinde görülebilecek zaman değişimlerini tespit etmek oldukça önemlidir. Geçiş ve örtülme ortası zamanları, kenar kararması, yıldız aktivitesi ya da yıldızın basıklığı gibi ışık eğrisi morfolojisini etkileyen nedenlerle ya da sisteme ilave nesnelere, yörünge presesyonu, açılmal momentum değişimi gibi nedenlerle saniye, dakika veya saat mertebesinde, çoğunlukla çevrimsel şekilde değişebilmektedir. Bu çalışmada manyetik aktivite gösteren barınak yıldızlarda gözlenen yüzey lekelerinin gezegen tarafından örtülmesinin geçiş ortası zamanlarındaki değişime etkileri incelenmektedir.

## Abstract

It is critical to detect timing variations in transit light curves in order to accurately determine the characteristics of transiting exoplanets. Transit and occultation timings are subject to change, mostly cyclically, by the anomalies in the light curve morphology due to limb darkening, stellar activity, ellipsoidal variations of the host star, and physical phenomena such as additional bodies in the system, orbital precession, angular momentum change in the order of seconds, minutes, or hours. The effects of the occultations of surface spots observed in magnetically active host stars by a transiting planet on the measurements of mid-transit times are investigated in this study.

**Anahtar Kelimeler:** stellar activity – photometry – transit timing variations

## 1 Giriş

Ötegezegen geçişlerinin fotometrik olarak izlenmesi bir süredir bu sistemleri keşfetmek üzere kullanılan en başarılı yöntemlerden biri haline gelmiştir. Şimdiye kadar keşfedilen 5197 gezegenin 3948'i geçiş, 1018'i dikine hız yöntemi ile bulunmuştur (bkz. [Exoplanet Arşivi](#)). Keşfi yapılan ya da aday halinde olan sistemlere dair takip gözlemleri ve bu etkilerin de daha iyi modellenmesi ile sistemin parametreleri genel olarak daha iyi belirlenmekle birlikte bu etkilerin geçiş zamanı ölçülen ışık eğrilerinde dikkate alınmaması durumunda, örneğin geçiş zamanı değişimi (Transit Timing Variations – TTV) ([Miralda-Escudé 2002](#); [Holman & Murray 2005](#); [Steffen ve diğ. 2013](#); [Baştürk ve diğ. 2022](#)) ya da geçiş süresi değişimi (Transit Duration Variation – TDV) ([Kipping 2009](#); [Szabó ve diğ. 2012](#)) yöntemleri sayesinde sisteme kütleçekimle bağlı olduğu önerilen ilave nesnelere varlığı hakkında şüphe oluşabilmektedir.

TTV ve TDV yöntemleri genel keşif yöntemlerine ek olarak kullanılan görece daha hassas veriye ihtiyaç duyan ve dolaylı gezegen keşif araçlarından ikisidir. Bir sistemde sabit dönem ve genlikli TTV veya TDV etkisinin ortaya çıkarılması için, geçiş yaptığı bilinen ya da bilinmeyen ilave gezegenlerin neden olduğu pertürbasyon ve ışık-zaman etkisi olgularının geçiş zamanlarındaki değişimlerden belirlenmesi gerekir. Kenar kararması, yıldız aktivitesi, yörünge presesyonu,

ev sahibi yıldızın basıklığı gibi barınak yıldızla ilişkin olgular doğru modellenmediğinde geçiş zamanlarını etkileyebilmektedir. Bu da uzun süreli TTV ve TDV gözlemleri ile, diğer yöntemlerle de tespiti zor olan, karasal gezegen boyutlarındaki nesnelere üreteceği sinyal duyarlılığına erişilebilme olasılığını azaltmaktadır ([Agol ve diğ. 2005](#); [Holman & Murray 2005](#)).

Yarıçap, kütle, yüzey çekim ivmesi, kimyasal bileşim, yaş gibi temel parametreler gezegenlerin oluşumu ve evrimini anlamak açısından önemli bilgilerdir ([Baraffe ve diğ. 2008, 2010](#); [Enoch ve diğ. 2012](#)). Ancak bu tür bilgileri edinmek için öncelikle yıldızla dair parametrelerin güvenilir bir şekilde ölçülmesi gerekmektedir. Örneğin anakol üzerindeki geç tayf türünden yıldızlarda görülen yıldız aktivitesi, fotometrik değişimlere ve dikine hız değişimlerine yol açmakta, bu da Yer-benzeri gezegenlerin tespitini zorlaştırmakta, geçiş derinliğini ve dolayısıyla gezegenin fiziksel ve yörüngesel parametrelerinin hatalı belirlenmesine neden olabilmekte; bu nedenle bunlar üzerinden yapılacak tahminleri yanlış yönlendirmektedir ([Sozzetti ve diğ. 2007](#); [Enoch ve diğ. 2010](#); [Oshagh ve diğ. 2015](#)).

Gezegen barındıran büyük çoğunluğu konvektif bir zarfa sahip yıldızlarda düzeyli tayf türü ve yaşla da değişen manyetik aktivite gözlenir. Dinamo teorisi çerçevesinde açıklanan bu olgu yüzeyde parlaklık dağılımı anomalilerine (soğuk lekeler ve faküla bölgeleri) yol açar. Bu anomalilerin oluştuğu bölgeler ve çevreleri arasındaki parlaklık farkları, neden oldukları ışık eğrisi asimetrisi nedeniyle, simetrik bir geçiş modeli kullanıldığında geçiş ortası zamanını değiştirebilmektedir. Gezegen geçiş

\* arif.solmaz@gmail.com

sırasında herhangi bir andaki ışık değişimi yıldız yüzeyinde örtülen kısmın miktarıyla orantılıdır.

Gezegeenin yıldız üzerindeki lekeyi örtmesi geçiş ışık eğrilerinde pozitif akı anomalisi şeklinde kendini göstermektedir. Bu durum geçiş ışık eğrisi üzerindeki profil merkezinin saptanmasını ve dolayısıyla geçiş zamanlarının ölçülmesini güçleştirdiği için gerçek olmayan TTV sinyaline neden olabileceği gibi olası diğer gezegenlerin çekim etkisiyle oluşturabileceği TTV sinyalinin algılanabilmesinde de güçleştirebilmektedir (Oshagh ve diğ. 2013; Daassou ve diğ. 2014). Bu nedenle geçiş ışık eğrilerini incelerken yıldız aktivitesi ve etkilerini de dikkate almak daha hassas fiziksel parametreleri elde etmek ve geçiş yapan gezegenleri düzgün bir şekilde karakterize etmek için oldukça önemli hale gelmektedir. Bu gezegenlerin yıldızlarında yaygın olarak bulunan yıldız lekeleri hem yıldızın iç dinamiği hem de dönmesinden kaynaklı olarak zamana bağlıdır ve geçiş yapan gezegenlerin fotometrik ölçümlerini belirgin biçimde etkilemektedir.

Bugüne kadar TTV yöntemiyle keşfi yapılan gezegen sayısı 23'tür. Bu çalışmada, aktif barınak yıldızlardaki lekelerin geçiş yapan gezegen tarafından örtülmesiyle ortaya çıkabilecek TTV olguları incelenmektedir.

Yüzey lekelerinin geçiş girişinde bulunduğu ve gezegen tarafından örtüldüğü durumlar ile giriş dışında bulunan ve örtülmeyen lekelerin etkileri ikinci bölümde açıklanmaktadır. Geçiş yapan gezegen tarafından örtülen farklı boyutlardaki lekelerin geçiş ortası zaman ölçümü üzerindeki etkileri üçüncü bölümde incelenmekte, dördüncü bölümde ise elde edilen sonuçlar tartışılmaktadır.

## 2 Yüzey Lekeleri ve Etkileri

Carter ve diğ. (2011) lekeli bir yıldızın ışık eğrisi modeli ile yarıçap oranı ve örtülmeyen lekelerin yıldız ışığında ortaya çıkardığı ışık kaybı arasındaki dejenere durumlara dikkat çekmektedir. Geçiş sırasında lekeli bir yıldızdan gelen akı şu şekilde yazılabilir:

$$F(t) = F_0[1 - \varepsilon(t)] - \Delta F(t) \quad (1)$$

Burada  $F_0$  yüzeyinde leke bulunmayan barınak yıldızın geçiş dışı akısı,  $\varepsilon(t)$  lekelerden kaynaklı kısmi ışık kaybı ve  $\Delta F(t)$  gezegen tarafından örtülen akı miktarıdır.  $\varepsilon(t)$  yıldızın dönme dönemi (gün ila ay mertebesinde) ile değişim gösterirken,  $\Delta F(t)$  ise çok daha kısa süreli olan geçiş süresince (saatler mertebesinde) değişim göstermektedir.

Işık eğrisini geçiş dışında ölçülen akıya normalize etmek uygun olduğundan aşağıdaki bağıntı yazılabilir:

$$F(t) = 1 - \frac{1}{1 - \varepsilon} \frac{\Delta F(t)}{F_0} \quad (2)$$

Burada  $\varepsilon$  geçiş süresi boyunca sabit alınmaktadır. Geçiş nedeniyle oluşan kısmi ışık kaybı  $\Delta F(t)/F_0$  hesaplanabilmektedir. Carter ve diğ. (2011) çalışmalarında kuadratik kenar kararması yasası için Mandel & Agol (2002) yaklaşımını kullandıkları için, modellerindeki her geçiş için bulunan  $\varepsilon$  değeri yeni bir parametre olarak eklenmektedir.

Fotometrik hassasiyetin yüksek olduğu durumda  $\varepsilon$  değeri tek bir geçiş ışık eğrisi kullanılarak geçiş başı ya da geçiş sonundaki verilerin lekesiz modelle karşılaştırılması ile hesaplanabilmektedir. Ancak, bu farklar genellikle milyonda birkaç mertebesinde olacağı için pratikte tespiti oldukça zordur.

Sonuç olarak, başka bir gözlemsel değişim olmadan, iki parametreden birinin artışı ile geçiş derinliği artacağından,  $\varepsilon$

**Çizelge 1.** WASP-52 ışık ölçüm analizinde kullanılan dört farklı mukayese yıldızına ait koordinat bilgileri

Mukayese Yıldızları	RA	DEC
C2	23 13 29.1508	+08 45 10.1957
C3	23 14 07.2804	+08 39 29.3537
C4	23 14 08.8380	+08 29 43.0118
C5	23 13 19.5693	+08 30 35.6782

ile gezegen-yıldız yarıçapları oranı ( $R_p/R_*$ ) arasında güçlü bir dejenere durum söz konusudur. Eğer leke kaynaklı bir kararma ortaya çıkıyorsa ( $\varepsilon \geq 0$ ) o zaman ölçülen geçiş derinliği miktarı  $\delta$ , kenar kararması etkilerinin düzeltilmesi varsayımıyla, yarıçap oranları için sadece üst sınırı belirlemek üzere kullanılabilir:

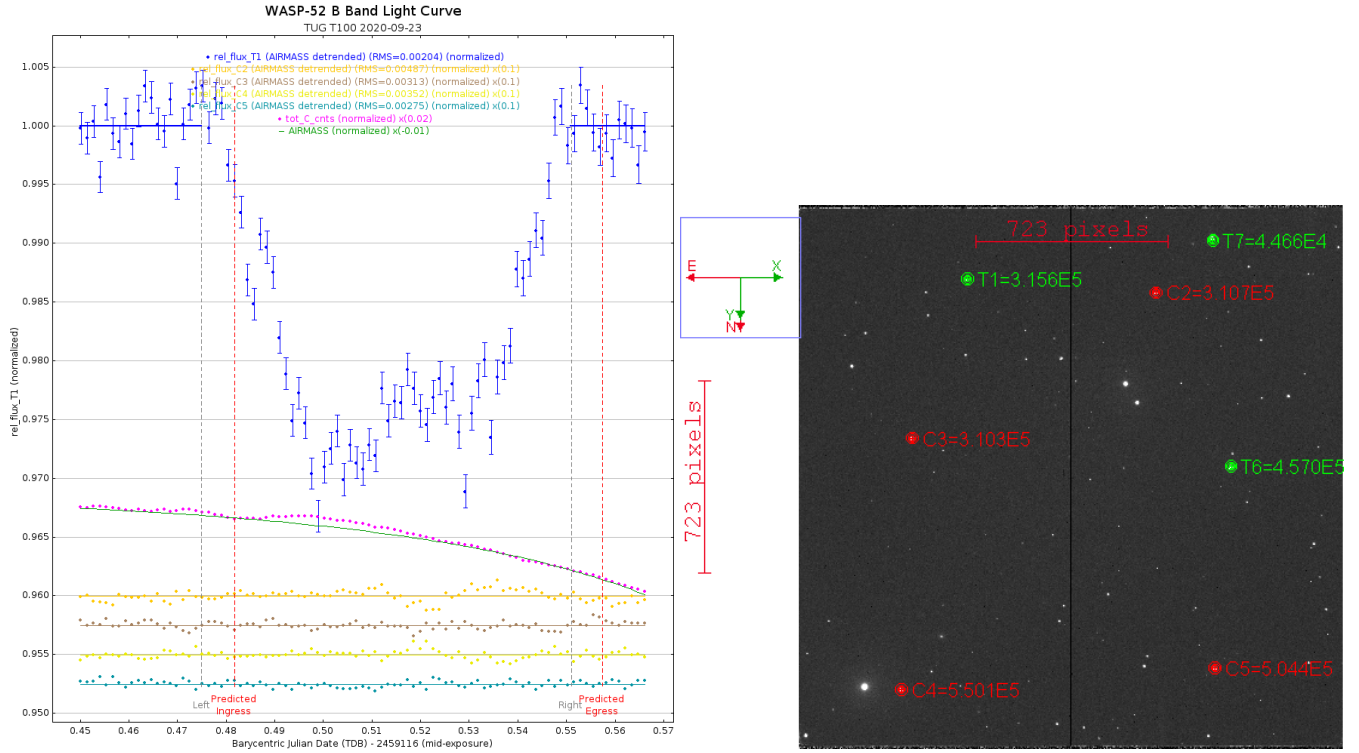
$$R_p/R_* = \sqrt{\delta(1 - \varepsilon)} \leq \sqrt{\delta}. \quad (3)$$

Yıldız yüzeyindeki lekeli bölge zamanla değişim gösterdiğinde geçiş derinliği de her geçiş olayında değişecektir. Geçiş derinliğinin en sığ olduğu durum için yıldızın görünür disk üzerinde leke olmadığı varsayılırsa, gezegen-yıldız yarıçapları oranı minimum yanılma payı ile ölçülebilir. Ancak lekeli alanların tamamen sıfır olduğu durumun hiçbir zaman garantisi yoktur. Barınak yıldızın görünür yüzeyinde bulunan soğuk lekeler geçiş ışık eğrisi üzerinde iki farklı etkiye neden olur. Bu etkilerden birincisinde, lekeler geçiş girişinde bulduklarında, geçiş olayı sırasında gezegen tarafından örtülerek ışık eğrisinde genliği Eşitlik 4 ile bulunabilecek parlama benzeri bir çıkıntı meydana getirirler:

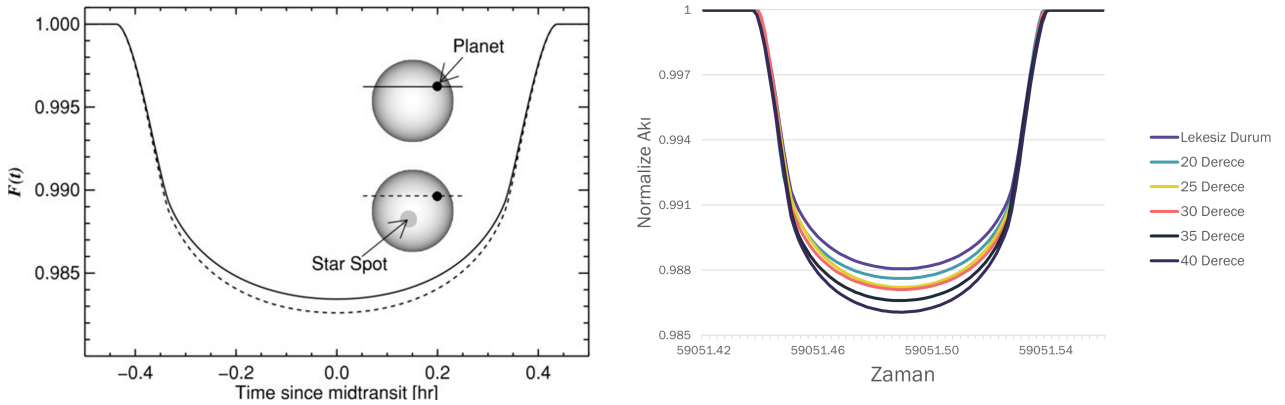
$$\delta_{\text{spot}} = \left(\frac{R_s}{R_*}\right)^2 \left(1 - \frac{I_s}{I_*}\right) \quad (4)$$

Burada  $R_s$  leke yarıçapını,  $I_s$  lekenin ortalama parlaklığını ve  $I_*$  yıldızın lekesiz yüzey parlaklığını ifade etmektedir. Bu etki, 23 Eylül 2020 tarihinde TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'nde (TUG) konuşlandırılmış 1 metrelik T100 teleskobuyla tarafımızca elde edilen, aktif barınak yıldızının önünden geçen WASP-52 b'nin Şekil 1'de verilen geçiş ışık eğrisi üzerinde açık bir şekilde görülebilmektedir. Leke ve çevresindeki yıldız yüzeyi arasındaki kontrastı arttırmak için ışık eğrisi üzerindeki leke sinyalinin maksimum olduğu Johnson-B bandında yapılan gözlemlerin istenmeyen etkilerden arındırılması amacıyla, ön indirgemeleri (bias-dark-flat düzeltmesi), birden fazla mukayese yıldızına göre açıklık fark fotometreleri ve geçiş dışı parlaklığa normalizasyonları astroimagej yazılımı (Collins ve diğ. 2017) ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 1 incelendiğinde geçişin, lineer efemeris ile hesaplanan zamanlarda (kırmızı kesikli dikey doğrular) gerçekleşmediği anlaşılmaktadır. Bu nedenle, ışık eğrisinin normalizasyonu için söz konusu bu zamanlar yerine ışık eğrisinden tarafımızca belirlenen geçiş başlangıç ve bitiş zamanları (gri kesikli dikey doğrular) kullanılmıştır. Hava kütlesi düzeltmesi geçiş-dışındaki (geçiş öncesi ve geçiş sonrası) ışık seviyeleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Analizde kullanılan mukayese yıldızlarını gösteren alan görüntüsü yine Şekil 1'de, bu yıldızlara ait koordinat bilgileri ise Çizelge 1'de verilmektedir.

Diğer taraftan, Şekil 2'de görüldüğü gibi lekeler geçiş girişinde bulduklarında yıldızın genel yüzey parlaklığını düşürecekleri için gezegen tarafından engellenen yıldız ışığının artmasına ve daha derin geçiş ışık eğrisi profili nedeniyle



**Şekil 1.** TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'nde T100 teleskobu ile Johnson-B filtresinde 23 Eylül 2020 gecesi alınan WASP-52 gözlemine ait normalize ışık eğrisi solda ve mukayese yıldızları alan görüntüsü (sağda). Yıldız yüzeyinde bulunan lekenin gezegen tarafından geçiş ortasından hemen sonra örtülmesi ile ışık eğrisi profilinde meydana gelen bozulma etkisi görülmektedir. Yukarıdan aşağı sırasıyla koyu yeşil sürekli eğri hava kütlesinin, mor noktalı eğri ise diferansiyel fotometri için kullanılan mukayese yıldızlarının toplam sayım değerinin gece boyunca değişimlerini; farklı renklerdeki sürekli yatay doğrular üzerinde aynı renklerdeki veri noktaları bu mukayese yıldızlarının gece boyunca normalize akı değişimlerini göstermektedir. Kırmızı dikey kesikli doğrular linear bir efemeris üzerinden ölçülen, griler ise tarafımızca belirlenen geçiş başlangıç ve bitiş zamanlarını göstermektedir.



**Şekil 2.** Solda: Geçiş yapan gezegenin oluşturacağı ışık eğrisi (düz çizgi), eğer barınak yıldız üzerinde örtülmeyen bir leke bulunuyorsa, akı değişimindeki negatif etki nedeniyle derinleşmektedir (kesikli çizgi). Sağda: Geçiş kirişi dışında kalan 20 ila 40 derece boyutlarındaki örtülmeyen yüzey lekelerinin meydana getirdiği geçiş derinliği etkileri.

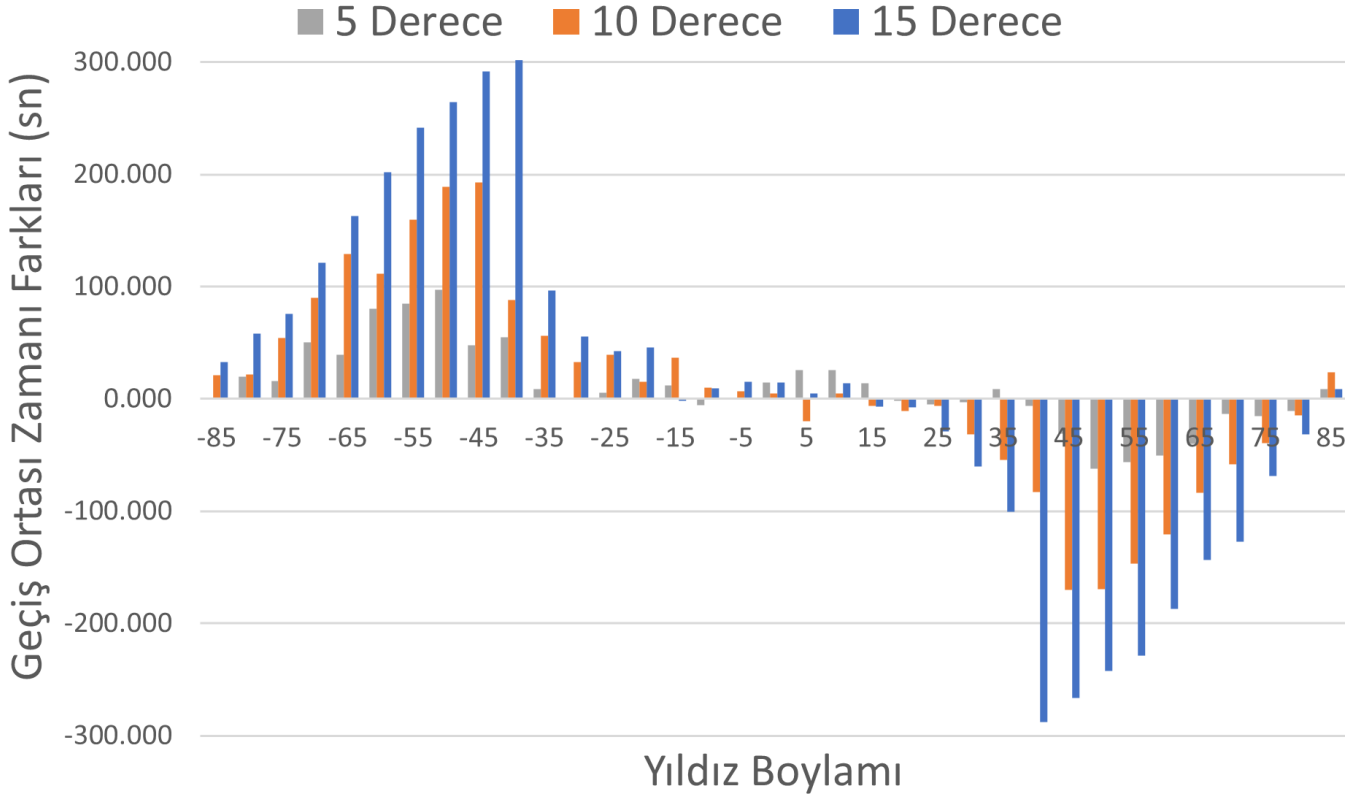
gezegenin boyutunun daha büyük hesaplanmasına neden olacaktırlar.

### 3 Yöntem

Bu çalışmada, TESS ve Kepler uydularının gözlediği aktif yıldızlara benzer yapay bir sistem, PRISM (Planetary Retrospective Intergrated Starspot Model) programı (Tregloan-Reed & Southworth 2013; Tregloan-Reed ve diğ. 2015)

ile simüle edilerek, lekeli ve lekесiz durumların ışık eğrileri üzerindeki olası etkileri araştırılmıştır.

Öncelikle lekесiz bir sistem için geçiş ortası zamanı ölçülmüş ve referans değeri olarak kabul edilmiştir. Daha sonra geçiş başındaki konum yıldız yüzeyi üzerinde boylamda -90 dereceye, geçiş sonundaki konum ise +90 dereceye karşılık gelecek şekilde, geçiş kirişi boyunca tek bir lekenin gezegen tarafından farklı boylamlarda örtülmesi sağlanmıştır. Her örtülme için bir geçiş ortası zamanı ölçülerek, lekесiz



**Şekil 3.** Geçiş olayı sırasında örtülen yıldız lekelerinin meydana getirdiği TTV etkileri. Barınak yıldızın gözlenen yüzeyi 90 derece olarak kabul edildiğinde, 15 derecelik bir lekenin, 40 derece boylamında örtülmesi halinde TTV genliğinin 300 s'ye kadar çıkabildiği görülmektedir. Yüzey Sıcaklığı 5900 K, Leke Sıcaklığı 5100 K alınmıştır.

sistemin referans değerine göre farkı alınmıştır. Bu sayede TTV'nin çeşitli boylamlarda örtülen leke ile ilişkisi Şekil 3'te görüldüğü gibi ortaya çıkmaktadır.

#### 4 Tartışma ve Sonuçlar

Elde edilen sonuçlara göre TTV genliğinin en fazla olduğu bölge, geçiş başlangıcı (ya da sonu) ile geçiş ortası arasında gerçekleşen leke örtülmeleri sırasında kendini göstermektedir. Geçiş ışık eğrilerinin geçiş ortası civarındaki sağ-sol simetrisi nedeniyle, tam olarak geçiş ortasında gerçekleşen örtülmelerin ışık eğrisi üzerindeki etkileri minimize olmaktadır. Geçiş yapan gezegen tarafından örtülen leke boyutları büyüdükçe bu lekelerin geçiş ortası zamanında ortaya çıkardığı değişimler doğrusal olarak artmakta ve örtülen lekenin (-50,-40 ya da 40, 50 derece boylamları arasında) 5 derece olması durumunda maksimum TTV genliği 100s, 10 derece olması durumunda 200s ve 15 derece olması durumunda 300s'ye kadar ulaşabilmektedir. Diğer yandan geçiş kirişi dışında kalan ve geçiş olayı sırasında örtülmeyen lekeler ise geçiş derinliğini etkileyerek, gezegen boyutlarının yanlış hesaplanmasına yol açabilmektedir. Bu nedenle yıldız lekeleri varlığı durumunda yapılan analizlerin doğru sonuçlar verebilmesi için bu sistemlerin uzun dönemli ve sürekli takibinin yer ve uzay konumlu teleskoplarla ve mümkünse eş-zamanlı olarak yapılması gerekmektedir.

#### Teşekkür

AS, **PRISM** simülasyonlarındaki teknik desteği için Jeremy T. Reed'e, Overleaf üzerindeki yardımları için Özge R. Döner'e ve 22. Ulusal Astronomi Kongresi'ne katılım desteği için Çağ Üniversitesi Bilimsel Etkinlikleri Destekleme Birimi'ne teşekkür eder. ÖB, TÜBİTAK'a 118F042 numaralı 1001 projesi kapsamında verdiği destek için teşekkür eder. Ayrıca, TÜBİTAK'a 19AT100-1471 numaralı gözlem projesiyle TUG T100 Teleskobu'nun kullanımı için verdiği desteği nedeniyle teşekkür ederiz.

#### Kaynaklar

- Agol E., Steffen J., Sari R., Clarkson W., 2005, *MNRAS*, 359, 567  
Baştürk Ö., ve diğ., 2022, *MNRAS*, 512, 2062  
Baraffe I., Chabrier G., Barman T., 2008, *A&A*, 482, 315  
Baraffe I., Chabrier G., Barman T., 2010, *Reports on Progress in Physics*, 73, 016901  
Carter J. A., Winn J. N., Holman M. J., Fabrycky D., Berta Z. K., Burke C. J., Nutzman P., 2011, *ApJ*, 730, 82  
Collins K. A., Kielkopf J. F., Stassun K. G., Hessman F. V., 2017, *AJ*, 153, 77  
Daassou A., Benkhaldoun Z., Ait Moulay Larbi M., Elazhari Y., 2014, preprint, ([arXiv:1407.1280](https://arxiv.org/abs/1407.1280)), *ADS*  
Enoch B., Collier Cameron A., Parley N. R., Hebb L., 2010, *A&A*, 516, A33  
Enoch B., Collier Cameron A., Horne K., 2012, *A&A*, 540, A99  
Holman M. J., Murray N. W., 2005, *Science*, 307, 1288  
Kipping D. M., 2009, *MNRAS*, 392, 181  
Mandel K., Agol E., 2002, *ApJ*, 580, L171

- Miralda-Escudé J., 2002, *ApJ*, 564, 1019  
Oshagh M., Santos N. C., Boisse I., Boué G., Montalto M., Dumusque X., Haghhighipour N., 2013, *A&A*, 556, A19  
Oshagh M., ve diğ., 2015, in European Physical Journal Web of Conferences. p. 05003, doi:10.1051/epjconf/201510105003  
Sozzetti A., Torres G., Charbonneau D., Latham D. W., Holman M. J., Winn J. N., Laird J. B., O'Donovan F. T., 2007, *ApJ*, 664, 1190  
Steffen J. H., ve diğ., 2013, *MNRAS*, 428, 1077  
Szabó G. M., Pál A., Derekas A., Simon A. E., Szalai T., Kiss L. L., 2012, *MNRAS*, 421, L122  
Tregloan-Reed J., Southworth J., 2013, *MNRAS*, 431, 966  
Tregloan-Reed J., ve diğ., 2015, *MNRAS*, 450, 1760

**Access:**

M23-0370: *Turkish J.A&A* — Vol.4, Issue 3.