# Çift Yıldızlı Sistemlerde Ötegezegenlerin Geçiş Zamanı Analizi

Selahaddin Serttaș<sup>1</sup> • \*, Mehmet Tanrıver<sup>1, 2</sup> •, Mustafa Salman<sup>1</sup> •, Ebubekir Atsız<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Erciyes Üniversitesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, Kayseri, 38030, Türkiye
 <sup>2</sup> Erciyes Üniversitesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Gözlemevi Uygulama ve Araştırma Merkezi (UZAYBİMER), Kayseri, 38281, Türkiye

Accepted: March 17, 2025. Revised: March 17, 2025. Received: November 29, 2024.

# Özet

G0-G8 tayf türleri arasındaki çift yıldız sistemlerinde, Neptün ile Jüpiter arasında yarıçapa sahip ötegezegenlerin ışık eğrileri üzerinden gezegenlerin tutulma anındaki minimum zamanlarından O-C (Observed - Calculated) analizi yapılmıştır. Çalışma kapsamında 33 adet aday ötegezegen incelenmiş ve bu ötegezegenlerin transit geçişleri kullanılarak TESS uydu teleskobu tarafından toplanan veriler değerlendirilmiştir. TESS verilerinden elde edilen ışık eğrileri ile her bir minimum çukuruna Gauss fonksiyonu geçirilerek MCMC (Monte Carlo - Markov Chain) optimizasyon algoritması ile birlikte her sistemin minimum zamanları hesaplanmış, sistemlerin O-C değişim grafikleri oluşturulmuştur ve fark diyagramları elde edilmiştir. Periyodik bir sinyal frekansını işlemek için O-C fark değerlerinden Lomb-Scargle periyodogramı oluşturulup belirli bir frekanstaki herhangi bir sinüzoidal sinyal için bir tepe noktası belirlenmiştir. Lomb-Scargle periyodogramı için FAP (Yanlış Alarm Olasılığı) değerleri hesaplanmıştır. Sonuç olarak FAP değerleri %20-40 arasında hesaplandığı için bu ötegezegenlerin periyodları hakkında tutarlı sonuca varılamamıştır. Bu ötegezegenlerde daha fazla fotometrik gözleme ihtiyaç vardır.

## Abstract

O-C (Observed - Calculated) analysis was performed on the light curves of exoplanets with a radius between Neptune and Jupiter in double star systems between the G0-G8 spectral types. Within the scope of the study, 33 candidate exoplanets were examined and the data collected by the TESS satellite telescope were evaluated using the transits of these exoplanets. With the light curves obtained from TESS data, the minimum times of each system were calculated with the MCMC (Monte Carlo - Markow Chain) optimization algorithm by passing a Gaussian function to each minimum trough with the light curves obtained from TESS data, the O-C change graphs of the systems are created and the difference diagram is extracted. To process a periodic signal frequency, a Lomb-Scargle pediogram is performed from the O-C difference values and a peak is determined for any sinusoidal signal at a given frequency. FAP (false alarm probability) values are calculated for the Lomb-Scargle pediogram. As a result, FAP values Since these exoplanets are calculated between 20-40%. no consistent conclusions could be reached about their periods. This More photometric observations are needed on exoplanets.

Anahtar Kelimeler: Exoplanets, O-C Analysis, Lomb-Scargle

#### 1 Giriş

O-C Analizi bir çift yıldız sisteminin dönem değişimini belirlemek için yapılan bir çalışmadır. O, gözlenen ve C, hesaplanan minimum zamanlarını ifade etmektedir ve zamana göre O-C farkındaki değişimin yorumlanmasına dayanır. Dönem değişimine etki eden 4 farklı mekanizma vardır:

- a. Eksen dönmesi
- b. Korunumlu kütle aktarımı veya korunumsuz kütle kaybı
- c. Manyetik etkinlik
- d. Sistemdeki üçüncü cisim etkisi

Günümüzde yer tabanlı ve uzay teleskopları tarafından yapılan gözlemler sayesinde 182 çift yıldız sistemi etrafında 401 adet onaylanmış ötegezegen bulunmaktadır (NASA Exoplanet Archive).

Ötegezegenlerin keşif yöntemlerinden birisi olan zamanlama yöntemi, ötegezegenli çift yıldızların ışık eğrilerindeki minimum çukurlarına ait minimum zamanlarını tespit etmektedir. Bu tespit edilen minimum zamanlarından

\* serttas2001@gmail.com

© 2025 Turkish Astronomical Society (TAD)

gözlenen ile hesaplanan minimum zamanları arasındaki fark belirlenir ve O-C grafikleri oluşturulur. Oluşturulan O-C grafikleri sisteme göre parabolik, sinüzoidal, doğrusal ya da üst üste binmiş değişimler gösterebilir.

Ötegezegenlerin O-C diyagramındaki veri dağılımı sinüzoidal bir değişim göstermektedir. Bu O-C'deki sinüzoidal değişim Denklem 1'de verilmiştir (Irwin 1959; Mayer 1990). Denklem 2'deki  $a_{12}$ ,  $e_3$ ,  $\omega_3$ ,  $\sin i'$  ve  $\nu$  ise sırasıyla üçlü sistemin kütle merkezi etrafındaki üçüncü cismin yörünge yarı büyük eksen uzunluğu, dışmerkezliği, enberi noktasının boylamı, yörünge eğimi ve gerçel anomali parametreleridir.  $A_{LTE}$  ise sinüs eğrisinin genliğini ifade etmektedir (Irwin 1959; Mayer 1990):

$$O-C = \frac{A_{\text{LTE}}}{\sqrt{1 - e_3^2 \cos \omega_2}} \left[ \left( \frac{1 - e_3^2}{1 + e_3 \cos \nu} \right) \sin (\nu + \omega_3) \right]$$
(1)  
$$A_{\text{LTE}} = \frac{1}{2} \left[ (O-C)_{\text{max}} - (O-C)_{\text{min}} \right]$$
$$= \frac{a_{12} \cdot \sin i' \left( \sqrt{1 - e_3^2 \cdot \cos^2(\omega_3)} \right)}{173.15}$$
(2)

O-C grafiğinin artık kısımları oluşturulmakta ve periyodik



Şekil 1. XO-2 N b ötegezegenine ait ışık eğrisi.

sinyalleri tespit etmek için bu artıklara LombScargle periyodogram analizi uygulanmaktadır. Lomb-Scargle periyodogramın ana amacı Denklem 3'te verilen bir zaman serisi veri kümesi y(t) içindeki periyodik bir sinyalin frekansını (f) belirlemektedir:

$$y(t) = a\cos(2\pi ft) + b\sin(2\pi ft)$$
(3)

Lomb-Scargle periyodogramlarında belirli bir frekanstaki sinüzoidal sinyal için tepe noktası beklenir ve böyle bir tepe noktası için istatiksel önemi değerlendirmek amacı ile FAP (Yanlış Alarm Olasılığı) hesaplanır. Herhangi bir FAP hesaplamaya yönelik çeşitli yaklaşımlar vardır.

Bu çalışmada, FAP hesaplamak için bootstrap (ön yükleme) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, verilerin birçok rastgele yeniden örneklemesiyle istatistiksel dağılımı yaklaşık olarak tahmin etmeyi sağlamaktadır.

# 2 Gözlemler ve Analizler

TESS (Sullivan ve diğ. 2015) verileri Nasa Exoplanet Archive veritabanından alınmıştır (Barclay ve diğ. 2018), gezegenin  $T_0$  (başlangıç zamanı) ve P (periyod/dönem) değerleri de aynı veritabanından elde edilmiştir.

Python programlama dilinde yer alan lightkurve (Lightkurve Collaboration ve diğ. 2018) kütüphanesi kullanılarak yıldız isimlerine göre TESS uydu teleskobundan alınan ışık eğrileri her sektör için indirilmiştir. Böylelikle her bir sektöre ait ışık eğrisi elde edilmiştir. Bu ışık eğrilerinden başlangıç  $T_0$  ve P değerleri kullanılarak evre hesaplaması yapılmış ve ışık eğrileri bu evrelere göre düzenlenerek çizilmiştir. Aynı  $T_0$  ve P değerleri kullanıldığında farklı sektörlerdeki ışık eğrilerinin minimum çukurları evresel olarak aynı değerlere denk gelecektir ve tüm minimum çukurları üst üste binmiş olacaktır. XO-2 N b örnek bir ötegezegen ışık eğrisi olarak Şekil 1 de verilmiştir.

# 2.1 Minimum Çukurlarının Belirlenmesi

Ötegezegenlerin ışık eğrilerindeki minimum noktaların belirlenmesi için evrelendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu evre hesabı aşağıdaki denklemde kullanılmıştır:

$$\mathsf{Evre} = \left(\frac{t - t_0}{P} - \left|\frac{t - t_0}{P}\right|\right) \tag{4}$$

Burada t<br/> gözlem zamanı,  $t_0$  başlangıç zamanı ve P ötege<br/>zegenin yörünge periyodudur. Bu işlem sonucunda hesaplanan

evrelere, ötegezegenin yörünge periyodu eklenerek diğer minimum noktaların zamanları belirlenmiştir. Evrelendirme işlemi sırasında, her bir minimum çukuruna Gauss fonksiyonu uygulanabilmesi için alt ve üst sınırlar tanımlanmıştır. Her bir ışık eğrisindeki minimum noktalar, ayrı ayrı paketler şeklinde kaydedilerek analiz edilmiştir. Elde edilen her minimum çukur için Gauss fonksiyonu uygulanmış ve bu süreç sonucunda her bir ışık eğrisindeki minimum noktalar kadar veri seti oluşturulmuştur. Bu yöntem, ötegezegenlerin ışık eğrilerinden yörünge dinamiklerinin ve fiziksel parametrelerinin daha hassas bir şekilde belirlenmesini sağlamaktadır.

#### 2.2 Gauss fonksiyonu ve MCMC uygulaması

Her sektörde elde edilen minimum çukurlarına ait veri dosyaları Python dilinde yazılmış olan Gauss fonksiyonu yaklaştırma modeli (Ford 2005), pymc3 Python paketi (Salvatier ve diğ. 2016), MCMC optimizasyon algoritması ile çalıştırılır. "Gauss + MCMC" yöntemi minimum çukurlarına ait orta noktayı ifade eden minimum zamanını hesaplamak için kullanılan en gelişmiş yöntemlerden bir tanesidir. MCMC algoritması hesaplanan bu minimum zamanı çıktıları için hata miktarını hesaplamada yardımcı olmaktadır.

Elde edilen bu minimum zamanını gösteren veriler ayrı bir dosyaya kaydedilir. Minimum çukurlarını içeren liste bir Gauss modeli ile MCMC optimizasyon koduyla işlenir. Çıktılar ise MCMC optimizasyon fonksiyonundan çıkan çukurların en derin noktası ve bu noktaların hesaplama hatası olur.

#### 2.3 O-C diyagramının oluşturulması

Gauss modeli ile MCMC optimizasyon kodu ile TESS ışık eğrilerinden elde edilen minimumlar daha önce literatürde verisi paylaşılmış ve farklı gökyüzü taramalarındaki minimum zamanları ile birleştirilir. TESS exoplanet veritabanındaki veriler BJD'ye göre akı değerleri olarak verilmektedir. Literatürde ise birçok minimum zamanı verisi HJD olarak verilmektedir. Bu nedenle HJD verileri Eastman ve diğ. (2010) yöntemi kullanılarak BJD değerlerine dönüştürülmüştür (bkz Şekil 2).

O-C değişim diyagramına ikinci dereceden polinom fonksiyonu geçirilerek en iyi uyum sağlayan parabol denklemi bulunur ve ardından O-C değişim grafiğindeki her verinin bu fonksiyondan olan farklarını gösteren artıklar diyagramı elde edilir. Ötegezegenlere ait hesaplanmış O-C ve artıkları gösteren



Şekil 2. XO-2 N b ötegezegenine ait O-C ve artıklar grafiği.



Şekil 3. XO-2 N b ötegezegenine ait Lomb-Scargle grafiği.

verilerin grafik haline getirilmesi Python'da matplotlib kütüphanesi kullanarak gerçekleştirilirmiştir.

# 2.4 Lomb-Scargle Periyodogramının oluşturulması

Ötegezegenlere ait hesaplanmış O-C verilerinden artıklar ve ışık elemanı  $(T_0, P)$  değerleri kullanılarak Lomb-Scargle periyodogram (frekans) analizi (VanderPlas 2018) yapılır. İlk olarak, numpy ve matplotlib gibi temel kütüphanelerin yanı sıra, astronomik zaman serisi analizinde kullanılan astropy.timeseries modülünden Lomb-Scargle sınıfı dahil edilir. Daha sonra, örnek olarak verilen şekil 3'teki gibi en yüksek güç değeri bulunur ve bu değere karşılık gelen frekans ve periyod hesaplanır. Ayrıca, her bir ötegezegenin periyodogramına ait FAP değeri bulunur (Horne & Baliunas 2004). Bulunan değer, bu sinyalin rastgele bir gürültüden kaynaklanma olasılığını gösterir. Elde edilen sonuçları logaritmik ölçekte bir Lomb-Scargle periyodogramıyla görselleştirilir (Şekil 3). Genel olarak bulunan bu FAP değerleri %1 den (şekilde kesikli kırmızı çizgi) düşük olduğu için maksimum frekansa ait periyod sonuçları tutarlı değildir. Bu nedenle böyle durumda olan ötegezegenler için daha iyi fotometrik gözlemlere ihtiyaç vardır.

# 3 Sonuç

Ötegezegen içeren G0–G8 tayf türlerinden 33 çift yıldız sisteminin ışık eğrileri incelenmiştir. Bu ışık eğrilerinin 22 tanesinde minimum zamanları bulunmuştur. Diğer 11 tanesinin minimum zamanları, ışık eğrisinin kötü veya çok az veri olmasından dolayı O-C ve Lomb-Scargle analizi yapılamamıştır.

DS Tuc A b ötegezegeninin O-C analizinde iki adet gözlemsel veri olması nedeniyle Lomb-Scargle işlemi yapılmamıştır. Bu sistem için daha fazla fotometrik gözleme ihtiyaç vardır.

HAT-P 3 b'nin TESS verilerindeki ışık eğrisi analiz edilebilecek durumda olmadığından bu ötegezegenin O-C ve Lomb-Scargle analizi yapılmamıştır.

TOI-1338 b ötegezegeninin TESS verisi olarak iki adet gözlemsel veri olmasından dolayı Lomb-Scargle işlemi yapılmamıştır. Bu sistem için de daha fazla fotometrik gözleme ihtiyaç vardır.

NASA Exoplanet Archive kataloğundan bu çalışmada incelenen ötegezegenlere ait TESS ışık eğrileri elde edilmiştir. Her bir ışık eğrisindeki minimum çukurlarına Gauss ile MCMC algoritması uygulanarak minimum zamanları hesaplanmıştır. O-C verilerinin işlemleri MS Office Excel yaygın programı ile gerçekleştirilmiştir. Sonrasında bu veriler Python programlama dili kullanılarak çizdirilmiştir (Şekil 4). Ayrıca, Lomb-Scargle periyodogramları oluşturulmuştur (Şekil 5). Lomb-Scargle periyodogramı sonucunda ele alınan 22 ötegezegenin FAP değerleri %20-40 arasında hesaplandığı için bu ötegezegenlerin periyodları hakkında tutarlı sonuca varılamamıştır. Bu nedenle her bir ötegezegene ait daha fazla fotometrik gözleme ihtiyaç vardır. Böylelikle S/N oranı daha yüksek olan fotometrik gözlemlerle FAP değerlerinin %1'in altına inmesi sağlanabilir.

O-C analizine göre, bazı ötegezegenlerin yörünge periyotları ve yarı-büyük eksen uzunlukları artarken, bazılarının ise azalmaktadır. CoRoT-2 b, TrES-2 b, HAT-P-22 b, WASP-114 b, WASP-129 b, WASP-139 b, K2-29 b, KELT-23 A b, TOI-4145 A b, WASP-98 b, XO-2 N b ve TrES-1 b ötegezegenlerinde yörünge periyotları ve yarı-büyük eksen uzunlukları artmaktadır. Böylelikle bu ötegezegenler bağlı oldukları çift yıldız sistemlerinden uzaklaşmaktadır. Diğer taraftan, WASP-104 b, HAT-P-27 b, HATS-58 A b, WASP-140 b, WASP-56 b, WASP-64 b, TOI-1937 A b ve WASP-77 A b ötegezegenlerinde ise yörünge periyotları ve yarı-büyük eksen uzunlukları azalmaktadır. Bu durum ise bu ötegezegenlerin çift yıldız sistemlerine yaklaştığı anlamına gelmektedir (bkz. Çizelge 1).

Ayrıca, WASP-168 b ve TOI-858 B ötegezegenleri O-C grafiklerinde doğrusal bir değişim göstermektedirler. Bu ötegezegenler için düzeltilmiş TO (geçiş zamanı) ve P (periyot) değerleri hesaplanmıştır ve değerler Çizelge 2'de verilmiştir.

# Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Programları Başkanlığı (BİDEB) tarafından yürütülen 2209 A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında TÜBİTAK-2209-A-1919B012320391 numaralı proje ile desteklenmiştir. Verdiği desteklerden ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız. Bu çalışmada yardımlarını esirgemeyen Dr. Ahmet Keskin'e teşekkürlerimizi sunarız.

Sistemler	$T_0$	P	dP/dE
	(BJD)	(gün)	$(s y   l^{-1})$
CoRoT-2 b	2457347.043140	1.742997	0.015406
TrES-2 b	2453957.635800	2.470613	0.000688
WASP-104 b	2457048.590610	1.755406	-0.113894
HAT-P-22 b	2456603.794290	3.212233	0.085277
WASP-114 b	2456667.735820	1.548774	0.169855
HAT-P-27 b	2456638.938520	3.039578	-0.018386
WASP-129 b	2457027.437300	5.748145	0.043671
WASP-139 b	2457196.793300	5.924262	0.027235
HATS-58 A b	2459036.642020	4.218073	-0.085070
WASP-140 b	2456912.351050	2.235984	-0.076135
K2-29 b	2458508.094300	3.258831	0.010630
KELT-23 A b	2458785.399304	2.255287	4.661589
WASP-56 b	2455841.609390	4.617065	-1.035455
WASP-64 b	2455582.601690	1.573292	-0.07019
TOI-1937 A b	2459085.910230	0.946679	-0.010881
WASP-77 A b	2456663.347570	1.360029	-0.349098
TOI-4145 A b	2458925.882110	4.066443	14.020467
WASP-98 b	2456333.391300	2.962640	0.006233
XO-2 N b	2456923.177110	2.615860	0.008194
TrES-1 b	2453898.873420	3.030070	0.003569

Çizelge 1. Parabolik Fit ile Analiz Edilen Ötegezegenler

Çizelge 2. Doğrusal Fit ile Analiz Edilen Ötegezegenler.

	T <sub>0</sub> (BJD)	P	Yeni <i>T</i> <sub>0</sub> (BJD)	Yeni P
	+2450000	(gün)	+2450000	(gün)
WASP-168 b	9252.138447	4.153662	9252.138039	4.153655
TOI-858 b	8386.452350	3.279718	8386.453363	3.279712

### Kaynaklar

- Barclay T., ve diğ., 2018, The Astrophysical Journal Supplement Series, 239, 2
- Eastman J., Siverd R., Gaudi B. S., 2010, PASP, 122, 935
- Ford E. B., 2005, Bayesian Methods in Astronomy. Springer Science & Business Media
- Horne J. H., Baliunas S. L., 2004, Astrophysical Journal, 302, 757–771
- Irwin J. B., 1959, The Astronomical Journal, 64, 149
- Lightkurve Collaboration ve diğ., 2018, Lightkurve: Kepler and TESS time series analysis in Python, Astrophysics Source Code Library (ascl:1812.013)
- Mayer P., 1990, Bulletin of the Astronomical Institute of Czechoslovakia (BAICz), 41, 231
- Salvatier J., Wiecki T. V., Fonnesbeck C., 2016, PeerJ Computer Science, 2, e55
- Sullivan P. W., ve diğ., 2015, Proceedings of the International Astronomical Union, 11, 314
- VanderPlas J. T., 2018, The Astrophysical Journal Supplement Series, 236, 16

#### Access:

M25-0314: Turkish J.A&A — Vol.6, Issue 3.



Şekil 4. Ötegezegenlerin O-C ve artık grafikleri.

# Çift Yıldızlı Sistemlerde Ötegezegenlerin Geçiş Zamanı Analizi 133



Şekil 4 – devamı.



Şekil 4 – devamı.



Şekil 5. Ötegezegenlerin Lomb-Scargle grafikleri.



Şekil 5 – devamı.



Şekil 5 – devamı.



Şekil 5 – devamı.