
Araştırma Makalesi / Research Article

KIC 7821010 Çift Yıldız Sisteminin Işık Eğrisi ve ETV Analizi

Çağlayan NEHİR^{1*}, İbrahim BULUT²

¹Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü

²Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Bölümü
(ORCID: 0000-0003-3195-9196) (ORCID: 0000-0002-7128-8887)

Öz

Bu çalışmada, *Kepler* uzay teleskobuyla gözlenen basık yörüngeli ayrık tür KIC 7821010 çift yıldız sisteminin ışık ve ETV eğrilerinin analizleri yapılmıştır. Işık eğrisi ve bileşenlerin dikine hız eğrileri eş zamanlı analiz edilmiş ve elde edilen çözümler ile sistemin mutlak parametreleri hesaplanmıştır. ETV analizi için Python tabanlı iki adet kod yazılmıştır. Bu kodlar kullanılarak *Kepler* veritabanından alınan ışık eğrilerinden tutulma zamanları hesaplanmış ve ışık zaman etkisiyle birlikte dinamik etki de göz önüne alınarak ETV analizi yapılmıştır. ETV grafiğinde değişime neden olarak sisteme çekimsel olarak bağlı yaklaşık 991 ± 2 gün dönemli ve $2.05 \pm 0.06 M_J$ kütleli üçüncü bir bileşenin varlığı önerilmiştir.

Anahtar kelimeler: Çift yıldız, ötegezegen, ETV analizi.

Light Curve and ETV Analyses of KIC 7821010 Binary Star System

Abstract

Light curve and ETV curve of eccentric detached-type KIC 7821010 binary star system which was observed by *Kepler* space telescope were analysed in this work. Light curve and radial velocity curves of components were analysed simultaneously and absolute parameters of the system were computed by using that obtained solutions. Two Python based codes were written for ETV analysis. Using these codes, eclipse timings were calculated from light curves which were downloaded from Kepler database and ETV analysis was conducted taking light time effect and dynamical effect into account. It is suggested that a third body with approximately 991 ± 2 day period and $2.05 \pm 0.06 M_J$ masses which is bounded the system gravitationally causes the variations in ETV graph.

Keywords: Binary star, extrasolar planet, ETV analysis.

1. Giriş

Örten çift yıldız sistemleri yıldız astrofiziğinde oldukça önemli kaynaklardır. 2009-2013 yılları arasında görev yapan *Kepler* uzay teleskobuyla yapılan hassas ve kesintisiz gözlemler sayesinde örten çift yıldız sistemlerinin araştırılmasında yeni bir çıkış açılmıştır. Kepler-16 sisteminin keşfiyle [1] çift yıldız sistemlerinin etrafında dolanan gezegenler (circumbinary planets, P-type planets) olduğu görülmüştür. Bu tür çoklu sistemler üzerine yapılan çalışmalar dinamik evrimin anlaşılması, sisteme dâhil olan bileşenlerin yörünge parametrelerinin belirlenebilmesi açısından önemlidir.

Bir örten çift yıldız sisteminde gözlenen ve hesaplanan tutulma zamanlarının farkı düzenli veya düzensiz değişim (eclipse timing variation, ETV) gösterebilir. ETV diyagramında değişime neden olan fiziksel olaylar, bileşenler arası kütle aktarımı veya kaybı, açısal momentum kaybı, dış merkezli yörüngelerde eksen dönmesi, sisteme çekimsel olarak bağlı cisim veya cisimler nedeniyle ortak kütle merkezi etrafında dolanımı sırasında meydana gelen ışık zaman gecikmesi etkisi (light travel time effect, LTE) ve aktif yıldızlardaki manyetik çevrim olarak söylenebilir [2].

Örten çift sistem, ortak kütle merkezi etrafında yörüngesi üzerinde hareket ederken sistemin tutulma zamanı, gözlemciye ışığın aldığı yol ölçeğinde daha erken veya geç gelerek çevrimsel bir değişim gösterir [3, 4]. Bununla birlikte, sistem bileşenleri birbirleriyle etkileşime girerek yörünge

*Sorumlu yazar: caglayannehir@gmail.com

Geliş Tarihi: 16.10.2019, Kabul Tarihi: 16.03.2020

dönemlerini etkileyen yörüngesel tedirginlikler gösterebilirler. Dinamik etki olarak adlandırılan bu tesir [5-8] sistemin döneminde gerçek bir değişime neden olur. ETV analizi kendi başına sistem bileşenlerinin kütlelerini ve yörünge parametrelerini hesaplayabilmek için yeterli olmasından dolayı, ETV gösteren sistemlere büyük ilgi gösterilmektedir.

Bu çalışmada, KIC 7821010 örten çift yıldız sisteminin ışık eğrisi ve radyal hız eğrileri eş zamanlı analiz edilmiş ve ETV analizleri yapılmıştır. ETV analizleri yapılırken LTE'yle birlikte dinamik etki de göz önüne alınmıştır.

2. KIC 7821010

KIC 7821010 (KOI-2938, $V=10^m.92$), yaklaşık $P = 24.2$ gün dönemli, Algol türü, basık yörüngeli örten bir çift yıldız sistemidir [9]. *Kepler* uzay teleskobu tarafından yaklaşık dört yıl boyunca gözlenmiştir. Borkovits ve ark. [10] tarafından sistemin ETV analizi yapılarak kütlesi $2.5 M_J$ olan üçüncü bir bileşenin varlığından bahsedilmiştir. Işık eğrisi analizi JKTEBOP programıyla yapılmıştır [11, 12]. Ayrıca yine bu çalışmada yedi HIDES tayfı elde edilip bileşenlerin dikine hızları belirlenmiştir.

3. Gözlemsel Veriler ve Verilerin Analizlere Hazırlanması

Bu çalışmada, *Kepler* uzay teleskobunun yaklaşık dört yıllık verisi kullanılmıştır. Bu teleskoptaki gözlem zamanları "Quarter" adı verilen 17 döneme ayrılmıştır. Ayrıca veriler, poz süresinin aralığına göre uzun ritim (long-cadence, LC) ve kısa ritim (short-cadence, SC) olarak ikiye ayrılmıştır. KIC 7821010 sistemi için LC verisi 17 dönemin tümünü, SC verisi ise 2. dönem ve 9.-17. dönemler arasında (17 dâhil) kapsamaktadır.

Işık eğrisi analizi için bir gecelik SC verisi, ışık eğrisinde tutulma görülen evrelerdeki nokta sayısı diğer evrelere göre daha yoğun olacak şekilde hazırlanmıştır. Ayrıca Helminiak ve ark. [11] tarafından elde edilen bileşenlerin dikine hızları eş zamanlı olarak analize dâhil edilmiştir. Işık eğrisinde evrelendirme yapılırken kullanılan ışık elemanları aşağıda verilmiştir.

$$\text{Min I} = BJD\ 2454969.615845 + 24^s.2382426 \times E \quad (1)$$

ETV analizi için birinci tutulma zamanları kullanılmıştır. Gauss modelleme yöntemini kullanan Python tabanlı en küçük kareler yöntemiyle eğri modelleme paketi 'LMFIT' [13], Python dilinde yazdığımız bir koda uygulanarak tutulma zamanları hesaplanmıştır. Tüm dönemlerdeki ışık eğrilerinden, SC verisi var olan dönemler için SC verisi ve diğer dönemler için LC verisi kullanılarak 58 tutulma zamanı ETV analizinde kullanılmak üzere belirlenmiştir.

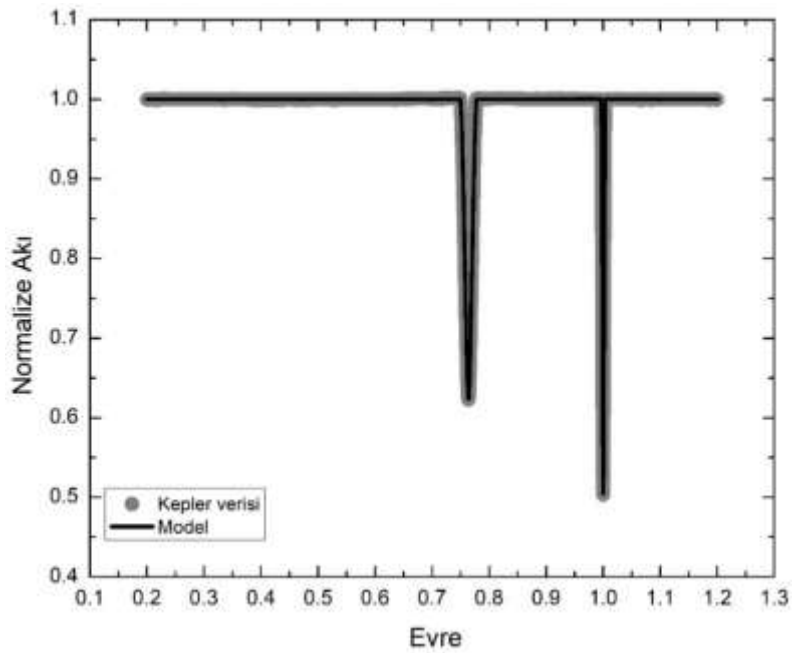
4. Işık Eğrisi Analizi

Analizler Wilson-Devinney (WD) [14] metodunun 2015 versiyonunda yapılmıştır. Çözümleri için ayrık çift sistemler için kullanılan MOD 2 seçilmiştir. Sistemin fiziğine uygun olarak bazı parametreler analiz sırasında sabit alınmıştır. Buna göre birinci bileşenin sıcaklığı $T_1=6538$ K [15], çift sistemin kütle oranı $q = 0.956$ [12] olarak alınmıştır. Bileşenlerin bolometrik yansıma katsayıları ($A_1=A_2=0.5$, [16]) ve çekimsel kararım katsayılarının ($g_1=g_2=0.32$, [17]) değerleri konvektif atmosfer kabulü altında sabit alınmıştır.

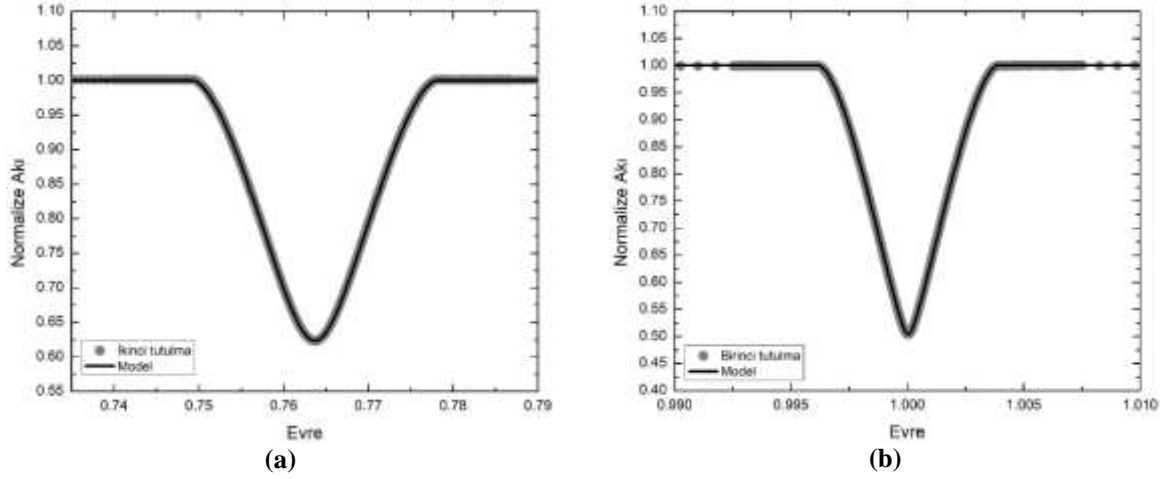
Analizlerde serbest bırakılan parametreler; T_0 çift yıldız için referans tutulma zamanı, P çift bileşenin yörünge dönemi, PSHIFT dönemdeki kayma miktarı, e yörünge dış merkezliliği, ω enberi noktasının boylamını, i çift bileşenin yörünge eğikliği, $V\gamma$ çift sistemin hızı, a yörünge yarı-büyük eksen uzunluğu, T_2 ikinci bileşenin sıcaklığını, L_1 birinci bileşenin kesirsel ışınım gücü ve $\Omega_{1,2}$ yüzey potansiyelleridir. Işık eğrisi ve dikine hız eğrilerinin eş zamanlı çözümlerinden elde edilen sonuçlar Tablo 1'de listelenmiştir. Bu tabloda $r_{1,2}$ bileşenlerin kesirsel yarıçaplarını göstermektedir. Çözümlerden hesaplanan kuramsal ışık eğrisiyle, gözlem noktalarının uyumu Şekil 1'de, tutulma zamanlarının yakın görünümü Şekil 2'de ve kuramsal dikine hız eğrileriyle gözlem noktalarının uyumu da Şekil 3'te görülmektedir.

Tablo 1. KIC 7821010 sisteminin ışık eğrisi analizi sonucunda hesaplanan değerler

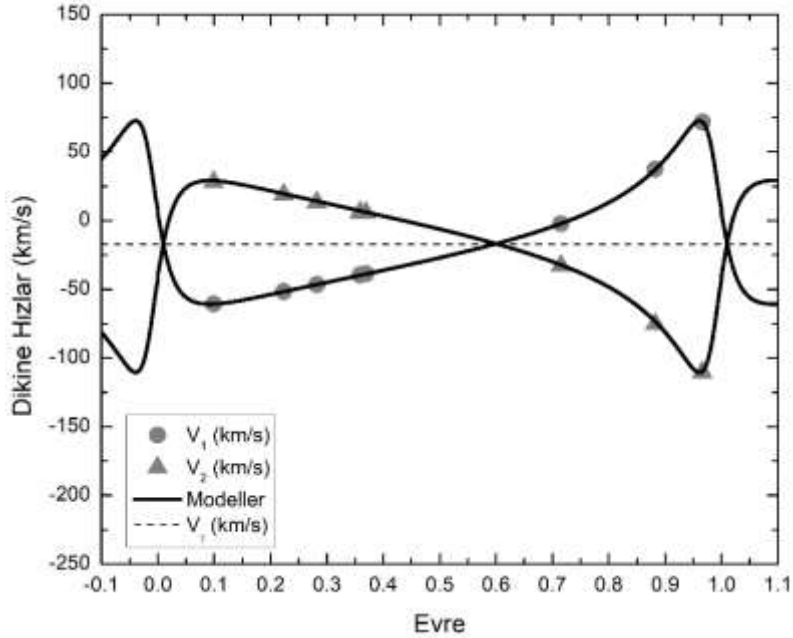
Parametre	Değer
T_0 (BJD)	2454969.615845
P (gün)	24.2382426
a (R_\odot)	48.01 ± 0.79
e	0.6790 ± 0.0001
ω ($^\circ$)	59.247 ± 0.002
PSHIFT	0.0730 ± 0.0001
$V\gamma$ (km/sn)	-17.21 ± 0.72
i ($^\circ$)	89.550 ± 0.001
T_1 (K)	6538
T_2 (K)	6417 ± 203
Ω_1	40.893 ± 0.006
Ω_2	40.176 ± 0.007
q	0.956
$A_1 = A_2$	0.5
$g_1 = g_2$	0.32
$L_1/(L_1+L_2)$	0.5294 ± 0.0002
$L_2/(L_1+L_2)$	0.4706
L_2/L_1	0.8895
L_3/L_{Top}	0
r_1 (pole)	0.02637 ± 0.00001
r_1 (point)	0.02639 ± 0.00001
r_1 (side)	0.02637 ± 0.00001
r_1 (back)	0.02639 ± 0.00001
r_2 (pole)	0.02581 ± 0.00001
r_2 (point)	0.02583 ± 0.00001
r_2 (side)	0.02581 ± 0.00001
r_2 (back)	0.02583 ± 0.00001



Şekil 1. KIC 7821010 sisteminin tüm ışık eğrisi.



Şekil 2. Tutulma çukurları ve model uyumunun yakından görünümü. Sol panelde (a) ikinci, sağ panelde (b) birinci tutulma çukurları gösterilmiştir.



Şekil 3. Bileşenlerin dikine hızları ve model eğrileri. Kesikli çizgi sistemin hızını göstermektedir.

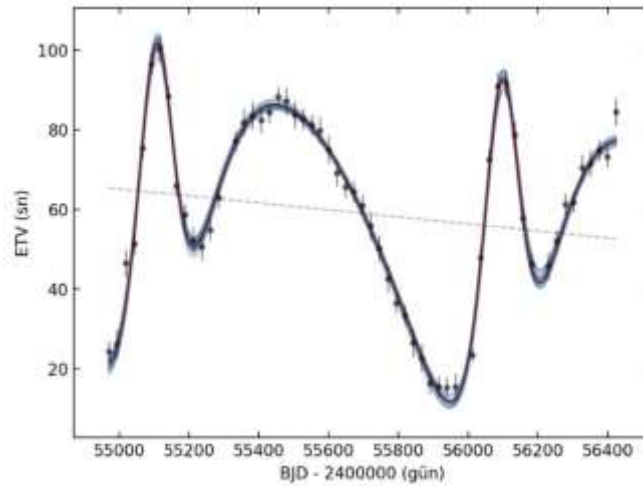
4. ETV Analizi

Sisteme çekimsel dâhil ilave bir cisim olması durumunda gözlenen ve hesaplanan tutulma zamanlarının farkı sinüs benzeri bir değişim gösterir. LTE olarak adlandırdığımız bu etki Irwin [3] tarafından açıklanmıştır. Basık yörüngeli çift yıldız olan KIC 7821010 sisteminin ETV diyagramında LTE dışında, yörüngesel tedirginlikler nedeniyle meydana gelen dinamik etki de görülmektedir. Çözümlemelerde LTE ile birlikte Borkovits ve ark. [7] tarafından ifade edilen dinamik etki de göz önüne alınmıştır.

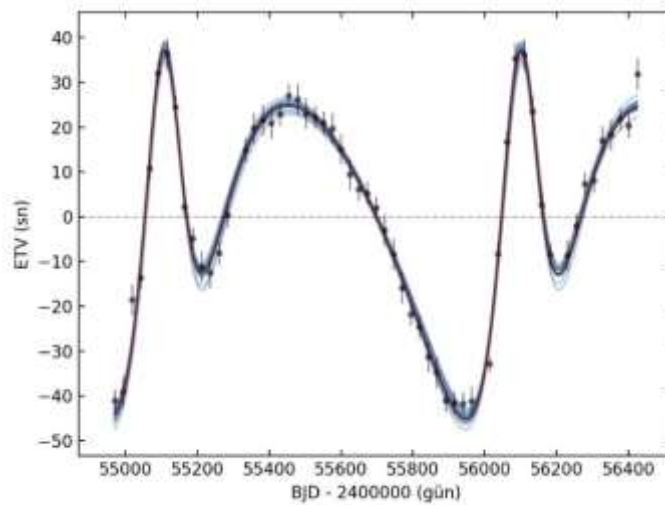
ETV analizi için Python programlama dilinde bir kod yazılmıştır. Bu kod, Nested-sampling algoritmasıyla çalışan ‘MultiNest’ [18] kodunun Python tabanlı versiyonu ‘PyMultiNest’ [19] versiyonunu kullanmaktadır. ETV analizi sonucunda elde edilen parametreler Tablo 2’de, Borkovits ve ark. [10] tarafından hesaplanan değerler ile karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Şekil 4’te modeller doğrusal model ile birlikte, Şekil 5’te doğrusal model çıkarılmış haliyle sadece LTE ve dinamik etki ve Şekil 6’da tüm modellerin verilerden çıkarılmasıyla kalan artıklar gösterilmiştir.

Tablo 1. KIC 7821010 sisteminin ETV analizi sonucunda elde edilen değerler ve Borkovits ve ark.[10] ile karşılaştırması

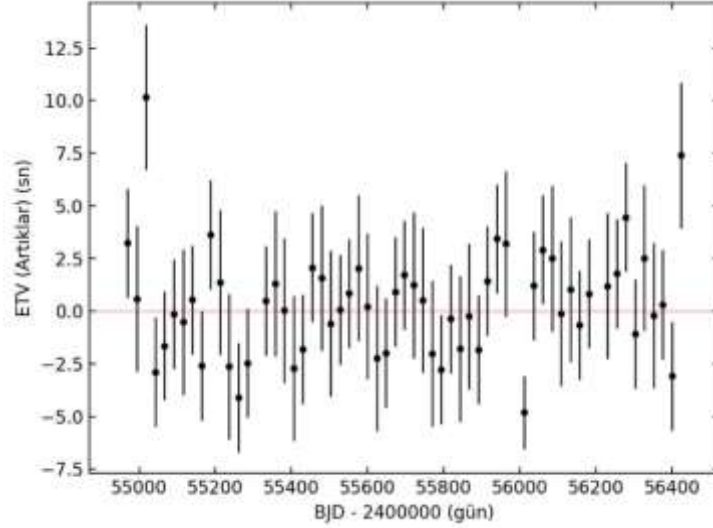
Parametre	Bu çalışma		
	[10]	Posterior	Prior
T_0 (BJD)		54969.6166 $^{+1.44 \times 10^{-5}}_{-1.45 \times 10^{-5}}$	54969.614, 54969.617
P_{12} (gün)	$24.238246 \pm (2 \times 10^{-6})$	24.23823844 $^{+1.08 \times 10^{-6}}_{-1.09 \times 10^{-6}}$	24.237, 24.239
T_s (BJD)	55124 ± 6	55118.8912 $^{+2.6024}_{-2.5735}$	54500, 55500
P_3 (gün)	991 ± 3	991.0954 $^{+1.9236}_{-1.9292}$	600, 1350
e_3	0.372 ± 0.009	0.3822 $^{+0.0066}_{-0.0069}$	0, 0.95
ω_3 (°)	126 ± 2	213.4794 $^{+58.0856}_{-10.3667}$	80, 280
a_3 (R_\odot)	551 ± 23	567.9215 $^{+0.7377}_{-0.7327}$	–
$\cos i_3$	-0.2588	0.1365 $^{+0.0802}_{-0.0930}$	0, 0.25
ΔQ (°)	-19 ± 2	-33.4794 $^{+58.0856}_{-10.3667}$	-180, 180
M_{12} (M_\odot)	2.3 ± 0.3	2.498	–
M_3 (M_J)	2.5 ± 0.3	2.1405 $^{+0.1424}_{-0.1084}$	$(1 \times 10^{-4}), 0.05$



Şekil 4. KIC 7821010 sisteminin ETV analizi. Noktalar, gözlenen ve hesaplanan zamanların hatalarıyla birlikte farkının (O-C) zamana göre değişimini göstermektedir. Kırmızı düz çizgi en iyi modeli, mavi düz çizgiler analizlerde elde edilen rastgele seçilmiş 20 modeli ve kesikli çizgi doğrusal modeli temsil etmektedir.



Şekil 5. Doğrusal model çıkarılmış ETV grafiği.



Şekil 6. ETV eğrisinden en iyi model verileri çıkarıldıktan sonra kalan artıklar.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, KIC 7821010 basık yörüngeli örten çift yıldız sisteminin ışık eğrisi ve ETV analizleri yapılmıştır. Işık eğrisi ve dikine hız eğrileri eş zamanlı olarak WD metodu kullanılarak analiz edilmiş, sistemin geometrik ve fiziksel parametreleri belirlenmiştir. Buna göre sistem oldukça basık ($e = 0.6790 \pm 0.0001$) bir yörüngeye sahiptir. Işık eğrisi çözümlerinden elde edilen parametreler kullanılarak sistemin mutlak parametreleri de hesaplanmış ve bu parametreler Tablo 3'te verilmiştir. Çift sistemin bileşenlerinin kütleleri 1.277 ± 0.019 ve $1.221 \pm 0.019 M_{\odot}$, yarıçapları da 1.291 ± 0.107 ve $1.263 \pm 0.110 R_{\odot}$ olarak belirlenmiştir.

Sistemin Kepler gözlemlerinden hesaplanan tutulma zamanları kullanılarak oluşturulan ETV diyagramında, dönemsel bir değişim görülmüştür. Bu değişimin nedeni için sisteme çekimsel olarak bağlı üçüncü bir cismin varlığı düşünülmüştür. Bu kabul altında üçlü sistemin yörünge parametreleri LTE ve dinamik etki birlikte göz önüne alınarak belirlenmiştir. ETV analizinde, dikine hız eğrisinden belirlenen çift sistem bileşenlerinin kütleleri kullanıldığından, üçüncü cismin kütlesi oldukça duyarlı bir şekilde tayin edilmiştir. Analizler sonucunda üçüncü cismin dönemi ve kütlesi, sırasıyla, yaklaşık olarak 991 ± 2 gün ve $2.14 \pm 0.12 M_J$ olarak hesaplanmıştır. Bu değerlere göre sisteme dâhil olan üçüncü cismin bir ötegezegen olduğu söylenebilir.

Sistemin basık yörüngeli olması eksen dönmesi gösterdiğinin önemli bir kanıtıdır. Ancak sistemin şu ana kadar gözlemlendiği zaman aralığı göz önüne alındığında mevcut veriler ile eksen dönmesi analizi yapmak mümkün olmamıştır. Sistemin gelecekteki yeni tutulma zamanı gözlemleriyle yapılacak ETV analizleriyle hem eksen dönmesi parametreleri belirlenebilecek hem de üçüncü cisim için elde edilen sonuçlar denetlenebilecektir.

Tablo 3. KIC 7821010 çift sisteminin mutlak parametreleri

Mutlak Parametreler	Değer
$M_1 (M_{\odot})$	1.277 ± 0.019
$M_2 (M_{\odot})$	1.221 ± 0.019
$R_1 (R_{\odot})$	1.291 ± 0.107
$R_2 (R_{\odot})$	1.263 ± 0.110
$\log g_1 (cm/sn^2)$	4.322 ± 0.072
$\log g_2 (cm/sn^2)$	4.322 ± 0.076
$L_1 (L_{\odot})$	2.728 ± 0.526
$L_2 (L_{\odot})$	2.424 ± 0.485
$M_{bol1} (kadir)$	3.660 ± 1.110
$M_{bol2} (kadir)$	3.788 ± 1.236
$d (pc)$	339.8 ± 27.1

Teşekkür

Görüş ve önerilerinden dolayı hakemlere teşekkür ederiz. Bu makale Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı doktora öğrencisi Çağlayan NEHİR'in doktora tez çalışmasından üretilmiştir.

Yazarların Katkısı

Yazarlar çalışmaya eşit oranda (%50) katkı sunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- [1] Doyle L.R., Carter J.A., Fabrycky D.C., Slawson R.W., Howell S.B., Winn J.N., Orosz J.A., Prša A., Welsh W.F., Quinn S.N., Latham D., Torres G., Buchhave L.A., Marcy G.W., Fortney J.J., Shporer A., Ford E.B., Lissauer J.J., Ragozzine D., Rucker M., Batalha N., Jenkins J.M., Borucki W.J., Koch D., Middour C.K., Hall J.R., McCauliff S., Fanelli M.N., Quintana E.V., Holman M.J., Caldwell D.A., Still M., Stefanik R.P., Brown W.R., Esquerdo G.A., Tang S., Furesz G., Geary J.C., Berlind P., Calkins M.L., Short D.R., Steffen J.H., Sasselov D., Dunham E.W., Cochran W.D., Boss A., Haas M.R., Buzasi D., Fischer D. 2011. Kepler-16: A Transiting Circumbinary Planet. *Science*, 333 (6049): 1602-1606.
- [2] Hilditch R.W. 2001. *An Introduction to Close Binary Stars an Introduction to Close Binary Stars*. Cambridge University Press, 392s. Cambridge.
- [3] Irwin J.B. 1952. The Determination of a Light-Time Orbit. *The Astrophysical Journal*, 116: 211-217.
- [4] Irwin J.B. 1959. Standard Light-Time Curves. *The Astronomical Journal*, 64: 149-155.
- [5] Borkovits T., Érdi B., Forgács-Dajka E., Kovács T. 2003. On the Detectability of Long Period Perturbations in Close Hierarchical Triple Stellar Systems. *Astronomy and Astrophysics*, 398 (3): 1091-1102.
- [6] Borkovits T., Csizmadia S., Forgács-Dajka E., Hegedüs T. 2011. Transit Timing Variations in Eccentric Hierarchical Triple Exoplanetary Systems: I. Perturbations on the Time Scale of the Orbital Period of the Perturber. *Astronomy and Astrophysics*, 528: id. A53.
- [7] Borkovits T., Rappaport S., Hajdu T., Sztakovics J. 2015. Eclipse Timing Variation Analyses of Eccentric Binaries with Close Tertiaries in the Kepler Field. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 448 (1): 946-993.
- [8] Rappaport S., Deck K., Levine A., Borkovits T., Carter J., El Mellah I., Sanchis-Ojeda R., Kalomeni B. 2013. Triple-Star Candidates among the Kepler Binaries. *The Astrophysical Journal*, 768 (1): id. 33.
- [9] Slawson R.W., Prša A., Welsh W.F., Orosz J.A., Rucker M., Batalha N., Doyle L.R., Engle S.G., Conroy K., Coughlin J., Gregg T.A., Fetherolf T., Short D.R., Windmiller G., Fabrycky D.C., Howell S.B., Jenkins J.M., Uddin K., Mullally F., Seader S.E., Thompson S.E., Sanderfer D.T., Borucki W., Koch D. 2011. Kepler Eclipsing Binary Stars. II. 2165 Eclipsing Binaries in the Second Data Release, *The Astronomical Journal*, 142 (5): id. 160.
- [10] Borkovits T., Hajdu T., Sztakovics J., Rappaport S., Levine A., Bíró I.B., Klagyivik P. 2016. A Comprehensive Study of the Kepler Triples via Eclipse Timing. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 455 (4): 4136-4165.
- [11] Helminiak K.G., Ukita N., Kambe E., Kozłowski S.K., Sybilski P., Maehara H., Ratajczak M., Konacki M., Pawłaszek R.K. 2017. HIDES Spectroscopy of Bright Detached Eclipsing Binaries

- from the Kepler Field – II. Double- and Triple-Lined Objects. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 468 (2): 1726-1746.
- [12] Helminiak K.G., Konacki M., Maehara H., Kambe E., Ukita N., Ratajczak M., Pigulski A., Kozłowski S.K. 2019. HIDES Spectroscopy of Bright Detached Eclipsing Binaries from the Kepler Field – III. Spectral Analysis, Updated Parameters and New Systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 484 (1): 451-475.
- [13] Newville M., Ingargiola A., Stensitzki T., Allen D.B. 2014. LMFIT: Non-Linear Least-Square Minimization and Curve-Fitting for Python. Zenodo.
- [14] Wilson R.E., Devinney E.J. 1971. Realization of Accurate Close-Binary Light Curves: Application to MR Cygni. *The Astrophysical Journal*, 166: 605-619.
- [15] Armstrong D.J., Gómez M.C.Y., Faedi F., Pollacco D. 2014. A Catalogue of Temperatures for Kepler Eclipsing Binary Stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 437 (4): 3473-3481.
- [16] Ruciński S. 1969. The Proximity Effects in Close Binary Systems. II. The Bolometric Reflection Effect for Stars with Deep Convective Envelopes. *Acta Astronomic*, 19: 245-255.
- [17] Lucy L.B. 1967. Gravity-Darkening for Stars with Convective Envelopes. *Zeitschrift Für Astrophysik*, 65: 89-92.
- [18] Feroz F., Hobson M.P., Bridges M. 2009. MultiNest: An Efficient and Robust Bayesian Inference Tool for Cosmology and Particle Physics. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 398 (4): 1601-1614.
- [19] Buchner J., Georgakakis A., Nandra K., Hsu L., Rangel C., Brightman M., Merloni A., Salvato M., Donley J., Kocevski D. 2014. X-Ray Spectral Modelling of the AGN Obscuring Region in the CDFS: Bayesian Model Selection and Catalogue. *Astronomy and Astrophysics*, 564: id. A125.