

Atf İçin: Şahan M, 2022. Kepler Kataloğundan Seçilen Üç W UMa Tipi Değen Çift Yıldızın (KIC3732732, KIC3936357 ve KIC10802917) Işık Eğrisi Analizleri. İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12(2): 735-751.

To Cite: Sahan M, 2022. Photometric Analysis of Three W UMa Type Contact Binaries (KIC3732732, KIC3936357 and KIC10802917) from The Kepler Catalogue. Journal of the Institute of Science and Technology, 12(2): 735-751.

Kepler Kataloğundan Seçilen Üç W UMa Tipi Değen Çift Yıldızın (KIC3732732, KIC3936357 ve KIC10802917) Işık Eğrisi Analizleri

Muhittin ŞAHAN^{1*}

ÖZET: Bu çalışma, Kepler kataloğundan seçilen daha önce çalışılmamış kısa dönemli ($0^{\text{d}}.27 < P < 0^{\text{d}}.39$) KIC3732732, KIC3936357 ve KIC10802917 W UMa tipi örten çift yıldız sistemlerinin fotometrik araştırma sonuçlarını vermektedir. Wilson-Devinney (WD) tabanlı (*Mod 3*) PHOEBE modelleme paket programı kullanılarak sistemlerin fotometrik ışık eğrileri analiz edilmiştir. Fotometrik ışık eğrisi analizlerinden kütle oranları (q), eğim açıları (i), ikinci bileşenin sıcaklığı (T_2), potansiyelleri ($\Omega_1 = \Omega_2$), Roche lobu doldurma faktörleri (f) ve ikincil bileşenlerinin üzerindeki lekeler belirlenmiştir. Sistemler için en iyi çözümlerin KIC3732732 için $q = 0.5$, $i = 57^{\circ}.0$, $T_2 = 5966$ K, $\Omega = 2.8$ ve $f = \%25.4$, KIC3936357 için $q = 0.41$, $i = 76^{\circ}.5$, $T_2 = 5940$ K, $\Omega = 2.6$ ve $f = \%39.4$ ve KIC10802917 için $q = 0.48$, $i = 82^{\circ}.0$, $T_2 = 5080$ K, $\Omega = 2.79$ ve $f = \%16.4$ olduğu bulunmuştur. Sistemlerin birinci ve ikinci bileşenlerin mutlak parametreleri ise sırasıyla, KIC3732732 sistemi için $M_1 = 1.575 M_{\odot}$, $M_2 = 0.785 M_{\odot}$, $R_1 = 1.383 R_{\odot}$, $R_2 = 1.019 R_{\odot}$, $a = 3.024 R_{\odot}$, $L_1 = 2.143 L_{\odot}$ ve $L_2 = 1.180 L_{\odot}$, KIC3936357 sistemi için $M_1 = 1.602 M_{\odot}$, $M_2 = 0.654 M_{\odot}$, $R_1 = 1.373 R_{\odot}$, $R_2 = 0.938 R_{\odot}$, $a = 2.842 R_{\odot}$, $L_1 = 2.093 L_{\odot}$ ve $L_2 = 0.982 L_{\odot}$ ve KIC10802917 sistemi için $M_1 = 1.078 M_{\odot}$, $M_2 = 0.516 M_{\odot}$, $R_1 = 0.940 R_{\odot}$, $R_2 = 0.675 R_{\odot}$, $a = 2.067 R_{\odot}$, $L_1 = 0.470 L_{\odot}$ ve $L_2 = 0.272 L_{\odot}$ olarak belirlenmiştir. Kütle oranlarına, Roche Lobu doldurma faktörlerine ve sıcaklıklarına ($T_2 > T_1$) göre her üç çift yıldız sisteminin aşırı değen W UMa ikili sistemlerinin W-alt türü oldukları görülmektedir. Bileşenlerin sıcaklıklarına göre KIC3732732, KIC3936357 ve KIC10802917 sistemlerinin sırasıyla G0V, G0V ve K2V tayf türünden oldukları tahmin edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: W UMa türü çift yıldız, Işık eğrisi analizi, Değen çift sistemler, KIC3732732, KIC3936357, KIC10802917

Photometric Analysis of Three W UMa Type Contact Binaries (KIC3732732, KIC3936357 and KIC10802917) from The Kepler Catalogue

ABSTRACT: This study presents the results of photometric studies of three previously unstudied short-period ($0^{\text{d}}.27 < P < 0^{\text{d}}.39$) W UMa type eclipsing binary systems from the Kepler Catalogue: KIC3732732, KIC3936357 and KIC10802917. The photometric light curves were analyzed using the PHOEBE modeling package program based on the Wilson-Devinney (WD) (with *Mode 3*). From photometric light curve analyses, the mass ratios (q), inclination angles (i), temperature of the secondary (T_2), potentials ($\Omega_1 = \Omega_2$), fill-out factors (f) and spots on the secondary components were determined. The best solution for systems were found to be $q = 0.5$, $i = 57^{\circ}.0$, $T_2 = 5966$ K, $\Omega = 2.8$ and $f = 25.4\%$, for KIC3732732, $q = 0.41$, $i = 76^{\circ}.5$, $T_2 = 5940$ K, $\Omega = 2.6$ and $f = 39.4\%$, for KIC3936357, $q = 0.48$, $i = 82^{\circ}.0$, $T_2 = 5080$ K, $\Omega = 2.79$ and $f = 16.4\%$ for KIC10802917. The absolute parameters of the systems' primary and secondary components have also been derived to be $M_1 = 1.575 M_{\odot}$, $M_2 = 0.785 M_{\odot}$, $R_1 = 1.383 R_{\odot}$, $R_2 = 1.019 R_{\odot}$, $a = 3.024 R_{\odot}$, $L_1 = 2.143 L_{\odot}$ and $L_2 = 1.180 L_{\odot}$ for KIC3732732 system, $M_1 = 1.602 M_{\odot}$, $M_2 = 0.654 M_{\odot}$, $R_1 = 1.373 R_{\odot}$, $R_2 = 0.938 R_{\odot}$, $a = 2.842 R_{\odot}$, $L_1 = 2.093 L_{\odot}$ and $L_2 = 0.982 L_{\odot}$ for KIC3936357 system and $M_1 = 1.078 M_{\odot}$, $M_2 = 0.516 M_{\odot}$, $R_1 = 0.940 R_{\odot}$, $R_2 = 0.675 R_{\odot}$, $a = 2.067 R_{\odot}$, $L_1 = 0.470 L_{\odot}$ and $L_2 = 0.272 L_{\odot}$ for KIC10802917 system, respectively. The mass ratios and Roche Lobe fill out factors along with temperature of ($T_2 > T_1$) suggest that three binary systems are W-subtype over-contact W UMa binary systems. Considering the temperatures of the components, spectral types of KIC3732732, KIC3936357 and KIC10802917 were estimated as G0V, G0V and K2V, respectively.

Keywords: UMa type binary stars, Light curve analysis, Contact binary systems, KIC3732732, KIC3936357, KIC10802917

¹ Muhittin ŞAHAN (Orcid ID: 0000-0001-6716-8463), Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Osmaniye, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Muhittin ŞAHAN, e-mail: muhittinsahan@osmaniye.edu.tr

GİRİŞ

Gökyüzündeki yıldızların çoğu kütle çekim kuvvetiyle birbirlerine bağlı olan ve bir ortak kütle merkezi etrafında yörünge hareketleri yapan, iki ya da daha fazla yıldız sistemlerinden oluşmaktadır. Çift yıldızlar, yıldızların kütle, yarıçap, ışınım gücü gibi belirli parametrelerin hesaplanmasında oldukça kullanışlıdır (Joshi ve ark., 2016).

Küresel yıldız bileşenlerine sahip olan yakın çift yıldız sistemlerinde, yıldızların birbirini dönemselsel olarak örtmesi sonucu tutulmalar meydana gelir. Dolayısıyla yıldızların ölçülen ışıklarında değişimler gözlenir. Bu çift yıldız sistemleri örten çift yıldızlar olarak adlandırılır ve gözlenen ışık eğrilerine göre Algol türü (EA: örneğin β Persei, ayrıık çiftler), β Lyr türü (EB: örneğin; β Lyrae, yarı ayrıık çiftler) ve W UMa türü (W Ursae Majoris: EW, örneğin; değen çiftler) olmak üzere üç gruba ayrılmaktadırlar (Skelton ve Smith, 2009; Li ve Liua, 2021). Algol türü sistemlerin ışık eğrilerinin, birinci ve ikinci minimumların derinliklerinde çok büyük farklılık vardır ve yörünge dönemleri bir günden daha uzundur. β Lyr türü sistemlerin ışık eğrilerinde birinci ve ikinci minimumlarının derinliklerinde belirgin olacak şekilde farklılık vardır ve tutulmaların dışında sürekli değişiklik gösterirler. Yörünge dönemleri genellikle bir günden daha uzundur (Skelton ve Smith, 2009).

W UMa türü çift yıldız sistemlerinde birinci (baş) ve ikinci (yoldaş) bileşen yıldızlar birbirlerine çok yakın olduklarından, tutulmaların dışında sürekli bir değişim gösteren anakol yıldızlarıdır. Bileşenlerin her ikisi de düşük ışınım güçlerine sahip olduğundan tayf tipleri A-K arasında değişen ve çekirdeklerinde hidrojen yakan küçük kütleli soğuk anakol yıldızlarıdır (Skelton ve Smith 2009; Terrell ve ark., 2012).

W UMa'larda yıldızlar arasındaki madde etkin bir şekilde paylaşıldığından, ışık eğrileri, yaklaşık eşit derinlikli belirgin maksimum ve minimumlara sahip olan ve sürekli parlaklık değişimleri gösteren yıldızlardır (Terrell ve ark., 2012; Joshi ve ark., 2016). Bileşen yıldızların kütleleri genellikle farklı olmasına rağmen, homojen bir sıcaklığa sahip olan bileşenler arasındaki sıcaklık farkı çok düşüktür (birkaç yüz Kelvin) (Eggen, 1967; Lucy, 1967; Skelton ve Smith, 2009). W UMa türü çift yıldızlardaki madde, Roche lobunun dışına taşarak her iki yıldızın etrafını saran ortak zarf oluşturduğunda bunlar aşırı değen (overcontact: OC) çiftler olarak sınıflandırılırlar. Karşılıklı olarak birbirlerine uyguladıkları aşırı derecede etkileşimden dolayı küresellikleri bozulmuştur (Lucy, 1968). Çoğu benzer etkin sıcaklığa sahip olmalarına rağmen, ışık eğrilerinin birincil ve ikincil maksimumları arasında O'Connell etkisi gösteriler (O'Connell, 1951).

W UMa çift yıldız sistemlerini oluşturan birinci ve ikinci bileşenlerin kütleleri birbirinden farklıdır ve kütle oranları ($q = M_2/M_1$) oldukça düşüktür (0.08 - 0.8 arası) (Skelton ve Smith, 2009). Algol ve β Lyr çift yıldız sistemleriyle karşılaştırıldığında, W UMa türü örten çift yıldızlar çok kısa yörünge dönemlerine ($0^{\text{e}}.2 < P < 0^{\text{e}}.8$) sahiptirler (Wadhwa, 2005; Skelton ve Smith, 2009). Dönemlerinin kısa olması gözlemsel olarak bu yıldızların gözlenmesinde bir avantaj sağlamaktadır.

W UMa türü çift yıldız sistemleri yörünge dönemleri, değme oranları, kütle oranları, sıcaklıkları gibi gösterdikleri bazı fiziksel özelliklerine göre W-alt türü ve A-alt türü olmak üzere iki alt gruba ayrılırlar (Binnendijk, 1970; Gazeas ve Stepjen, 2008). Eğer birinci bileşen ikinci bileşenden daha sıcak ise A-alt türünden bir W UMa çift yıldızdır. Bileşenler arasındaki sıcaklık farkı birkaç yüz Kelvin mertebesindedir fakat pek çok çiftler arasında sifıra yakın sıcaklık farkı da vardır (Gazeas ve Stepjen, 2008).

Genel olarak, W-alt türü çift yıldızlarla kıyaslandığında A-alt tipleri daha uzun yörünge dönemlerine (P), daha erken tayf tiplerine ve daha yüksek kütle oranlarına ($q > 0.3$) sahiptir. Yine de

A-alt ve W-alt türündeki çift yıldızlar arasında kesin ve belirgin ayırım yapmak çok kolay değildir (Wadhwa, 2005; Gazeas ve Stepien, 2008; Skelton ve Smith, 2009; Bulut ve Bulut, 2021).

A-alt türü sistemlerde büyük kütleli birinci bileşen daha yüksek sıcaklığa (T_1) sahipken, W-alt türü sistemlerde daha küçük kütleli ikinci bileşen daha yüksek sıcaklığa (T_2) sahiptir (Wadhwa, 2005). Genel olarak, A-alt türü sistemler düşük kütle oranlarına ($q < 0.3$) ve W-alt türü sistemler büyük kütle oranlarına ($q > 0.3$) sahip olmalarına rağmen her iki alt türünün $0.25 < q < 0.4$ aralığında olduğu görülmektedir (Csizmadia ve Klagyivik, 2004). A-alt türü yıldızların yörünge dönemleri genellikle 0.3 günden daha düşükken, W-alt türü sistemlerin yörünge dönemleri $0^s.22$ ile $0^s.40$ arasında değişmektedir (Wadhwa, 2005; Skelton ve Smith, 2009; Joshi ve ark., 2016). Kütle-yarıçap ve renk-parlaklık diyagramlarına dayalı olarak, A-F erken tayf tiplerine sahip olan A-alt türü yıldızlar, G-K geç tayf tiplerine sahip olan W-alt türüne göre daha gelişmişlerdir. Gazeas ve Niarchos (2006), toplam kütleleri ve toplam açısal momentumları daha büyük olduğu için A-türü sistemlerin W-alt türünden daha fazla evrimleşemeyeceğini göstermiştir. Değen ya da aşırı değen W-alt türü yıldızların her iki bileşeni de kritik Roche loblarını doldururlar ya da aşırı doldurup ortak bir konvektif zarfla çevrelenirler.

Örten çift yıldızların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için fotometrik ve spektroskopik çalışmaların yapılması önemlidir (Joshi ve ark., 2016). Bu nedenle bu çalışmada, Kepler kataloğundan seçilen W UMa türü değen KIC3732732, KIC3936357 ve KIC10802917 çift yıldızların Wilson-Devinney (WD) (Wilson ve Devinney, 1971; Wilson, 1990, 1994) yöntemi kullanarak PHOEBE (v.0.31a) (Prsa, 2011) programında fotometrik analizleri yapılmış ve bileşenlerin yarıçapları, kütleleri, kütle oranları, sıcaklıkları, ışınma gücü gibi bazı fiziksel parametreleri elde edilmiştir. Aşağıda yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar detaylı olarak verilmiştir.

MATERYAL VE METOT

Gözlemler

Kepler Uzay Teleskobu, Galaksimizin Cygnus Takımyıldızındaki yıldızların çevrelerindeki Dünya benzeri gezegenlerin varlığını keşfetmek ve gezegenlerin özelliklerini araştırmak amacıyla NASA tarafından Mart 2009 tarihinde uzaya fırlatılmıştır. 1.4 m çaplı birincil aynaya sahip olan Schmidt türü Kepler teleskobu, 0.95 m açıklığına ve 105 derece² görüş alanına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Odak düzlemi üzerinde her bir pikseli 27 mikron boyutunda olan 42 adet 2200 x 1024 piksel boyutlu CCD düzeneği bulunmaktadır. Kepler Uzay Teleskobu, Galaksimizin Orion kolu boyunca Cygnus, Draco ve Lyra takımyıldızlarının bulunduğu ortak bölgeler gözlem hedefi olarak belirlenmiştir. Kepler teleskopunun kısa poz süreli (1 dk) (Short Cadence: SC) ve uzun poz süreli (30 dk) (Long Cadence: LC) olmak üzere iki adet gözlem seçeneği bulunmaktadır. Teleskopun gözlem süreleri üçer aylık dönemler halinde Quarter (Q_i) adı verilen gözlem sezonlarından oluşmaktadır (Kolenberg ve ark., 2010).

Bu çalışmada, kısa dönemli KIC3732732 ($P = 0^s.3961872$), KIC3936357 ($P = 0^s.3691536$) ve KIC10802917 ($P = 0^s.2724524$) W UMa türü ışık eğrilerine sahip örten çift yıldızlarının gözlenen fotometrik ışık eğrisi verileri Villanova Üniversitesi tarafından sağlanan Kepler veri arşivindeki Kepler Örten Çift Yıldız Kataloğu'ndan (Kepler Eclipsing Binary Catalogue) alınmıştır (Prsa ve ark., 2011; Slawson ve ark., 2011; Conroy ve ark., 2014; Kirk ve ark., 2016). Her üç sistem için Kepler kataloğundan elde edilen bilgiler kısaca şu şekilde özetlenebilir. Her üç sistem için Q1-Q17 olmak üzere toplam 17 gözlem sezonları bulunmakta ve gözlemlerin tamamı uzun poz sürelerinde (30 dk, LC) yapılmıştır.

KIC3732732 ($\alpha_{2000} = 19^{\text{sa}}07^{\text{dk}}31^{\text{sn}}.308$, $\delta_{2000} = +38^{\circ}53'34''.62$) çift yıldız sisteminin gözlemleri 02.05.2009 (2454953.5375579 JD) tarihinden başlayıp (Q1 sezonu) 11.05.2013 (2454963.2441088 JD) tarihinde biten (Q17 sezonu) toplam 1471 günlük veriden oluşmaktadır. Birinci bileşenin $T_{\text{eff}} = 5946$ K, Kepler parlaklığı (K_p) = $13^{\text{m}}.462$, fotometrik demir (metal) bolluğu $[Fe/H] = 0.041$ dex (Güneş = 0.0134), $\text{Log}(g) = 4.236 \text{ cms}^{-2}$ (\log_{10} yüzey çekimi), $E(B-V)$ renk artışı = $0^{\text{m}}.114$ ve $V = 13^{\text{m}}.913$ 'dir.

KIC3936357 ($\alpha_{2000} = +19^{\text{sa}}01^{\text{dk}}38^{\text{sn}}.604$, $\delta_{2000} = +39^{\circ}02'28''.14$) çift yıldız sisteminin gözlemlerine 05.02.2009 (1724466.5381481 JD) tarihinden başlayıp (Q1 sezonu) ve 11.05.2013 (2456424.0110185 JD) tarihinde biten (Q17 sezonu) toplam 1557 günlük veriden oluşmaktadır. Birinci bileşen için $T_{\text{eff}} = 5933$ K, $K_p = 13^{\text{m}}.437$, $[Fe/H] = -0.315$ dex, $\text{Log}(g) = 4.057 \text{ cms}^{-2}$, $E(B-V) = 0^{\text{m}}.096$ ve $V = 11.99$ 'dir.

Çizelge 1. KIC3732732, KIC10802917 ve KIC3936357 için sistemlerin Kepler kataloğundan genel bilgiler

Parametre	KIC3732732 (1)	KIC3936357 (2)	KIC10802917 (3)
Kepler_ID	3732732	3936357	10802917
2MASS ID	J19073130+3853346	J19013860+3902281	J19362599+4811039
α (J2000) [sa dk sn]	19 07 31.308	19 01 38.604	19 36 25.999
δ (J2000) [$^{\circ}$ ' '']	+38 53 34.62	+39 02 28.14	+48 11 03.98
T_0 (HJD0+2400000)	54953.918666	54953.852697	54999.905793
periyod [g]	0.3961872	0.3691536	0.2724524
T_1 [K]	5946	5933	4937
K_p Kepler Parlaklığı [m]	13.462	12.437	15.867
$[Fe/H]$ metal bolluğu [dex]	0.041	-0.315	-0.347
$\text{Log}(g)$ [cms^{-2}]	4.236	4.057	4.505
$E(B-V)$ [m]	0.114	0.096	0.128
V Parlaklığı [m]	13.913	11.99	16.143

KIC10802917 ($\alpha_{2000} = 19^{\text{sa}}36^{\text{dk}}25^{\text{sn}}.999$, $\delta_{2000} = 48^{\circ}11'03''.98$) sisteminin gözlemlerine ise yıldız 20.06.2009 (2455002.5174653 JD) tarihinden başlayıp (Q1 sezonu) 11.05.2013 (2456424.0011458 JD) tarihinde biten (Q17 sezonu) toplam 1422 günlük veriden oluşmaktadır. Sistemin birinci bileşenin etkin sıcaklığı = 4937 K, $K_p = 15^{\text{m}}.867$, $[Fe/H]$ oranı = -0.347 dex, $\text{Log}(g) = 4.505 \text{ cms}^{-2}$, $E(B-V) = 0^{\text{m}}.128$ ve $V = 16^{\text{m}}.143$ 'dir. Kepler veri tabanından elde edilen bu üç sistemin temel parametreleri Çizelge 1'de özetlenmiştir.

Her üç sistemde 64500'den fazla ham veri noktası bulunmaktadır. Ham veri noktası çok fazla olduğu için basit işlemde geçirerek her sistemin verileri birleştirilmiştir.

Kepler kataloğundan seçilen W UMa türü değen KIC3732732, KIC3936357 ve KIC10802917 çift yıldızların gözlenmiş ışık eğrilerinin temsil ettikleri bazı parametreleri tahmin etmek amacıyla PHOEBE (v.0.31a) ara yüz yazılım modeli kullanılmış ve verilerin analizleri yapılmıştır. PHOEBE programı farklı türden örten değişen çift yıldız sistemlerinin ışık eğrilerinin (ayrık, yarı-ayrık, değen ve aşırı değen) modellenmesi için Prsa ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir (Prsa, 2011; Prsa ve Zwitter, 2005; Prsa ve ark., 2011). PHOEBE programı, örten çift sistemlere ilişkin geometrik ve fiziksel parametreleri diferansiyel düzeltme yoluyla hesaplayan Wilson-Devinney (WD) kodunu temel almaktadır (Wilson ve Devinney, 1971; Prsa ve Zwitter, 2005; Prsa, 2011). Seçilen çift yıldız sistemlerinin tamamının ışık eğrileri genel olarak değen ya da aşırı değen W UMa türü olduklarından, her bir çift için Wilson-Devinney kodunun "Mod 3" (overcontact binary not in thermal contact) seçeneğini kullanılmıştır.

Binary Maker 3.0 (BM3) (Bradstreet, 2005) ile PHOEBE’de elde edilen fotometrik parametreler kullanılarak sistemlerin birinci ve ikinci bileşenlerin Roche loblarının geometrileri elde edilmiş ve ikili sistemlerin hangi türden (değen, aşırı değen) olup olmadıklarına bakılmıştır. BM3, kütle oranları belirlendikten sonra ayırık, değen ve aşırı değen çift sistemlerin eş potansiyellerinin belirlenmesi amacıyla Lucy ve Wilson (1979) tarafından önerilen parametrenin bir modifikasyonudur.

Işık Eğrisi Analizleri

KIC3732732, KIC10802917 ve KIC3936357 çift yıldız sistemlerinin temel fotometrik parametrelerini belirlemek için yukarıda belirtildiği gibi WD kodu kullanan PHOEBE program kodu (Prsa, 2011) kullanılmış ve fotometrik ışık eğrisi analizleri yapılmıştır. Çift yıldız sistemlerinin her biri için V-bandı (550 nm) lineer bolometrik ve logaritmik kenar kararım katsayıları doğrusal kosinüs yasası modelini temel alan Van Hamme (1993) tablolarından alınmıştır. Konvektif yıldızlar için çekim kararım ve bolometrik albedo katsayıları sırasıyla $g_1 = g_2 = 0.50$ (Rucinski, 1969) ve $A_1 = A_2 = 0.32$ (Lucy, 1967) olarak ayarlanmıştır. Izgara çözünürlük değerleri (PHOEBE’de DC parametreleri) sırasıyla 30, 30, 15, 15 olarak alınmıştır. Yörünge dış merkezliği (e) ve üçüncü ışık etkisinin (L_3) sıfır olduğu varsayılmıştır.

Işık eğrisi analizleri yapılırken fotometrik kütle oranı ($q = M_2/M_1$), yörünge eğim açısı (i), ikinci yıldızın ortalama sıcaklığı (T_2) ve birinci/baş ve ikinci/yoldaş yıldızın yüzey potansiyelleri ($\Omega_{1,2}$) gibi sistem parametrelerinin ayarlanmaları yapılmıştır. Bunun için girdi parametrelerinden yörünge eğim açısı (i), ikincil bileşenin ortalama yüzey sıcaklığı (T_2), birinci bileşenin boyutsuz yüzey potansiyeli ($\Omega_1 = \Omega_2$), birinci bileşenin ışımaya gücü (L_1) değişken olarak seçilirken (yani hiç bir kısıtlama yok), birinci bileşenin yüzey sıcaklığı (T_1), ikinci bileşenin ışımaya gücü (L_2) ve ikinci bileşenin yüzey potansiyeli (Ω_2) sabit tutulmuştur.

Çift yıldız sisteminde $q = M_2/M_1$, çift yıldızların orijinlerini ve evrimlerini anlamamızda oldukça önemli bir parametredir. Kütle oranına duyarlı olan çift yıldız sisteminin Roche geometrisine dayanan Wilson-Devinney (WD) yönteminde önemli bir parametredir. Bu nedenle, WD kodunda ilk girdi parametrelerini elde etmek için kütle oranı (q) tarama yöntemi kullanılmıştır.

Kütle oranı en iyi tayfsal analizlerle belirlenir. Fakat, radyal hız ölçümlerinin olmadığı durumlarda, yıldızların kütle oranlarını belirlemek yörünge eğim açısı (i), ikinci/yoldaş bileşenin sıcaklığı (T_2), birinci ve ikinci yıldızın yüzey potansiyeli ($\Omega_1 = \Omega_2$) ve baş/birinci yıldızın ışımaya gücü (L_1) parametreleri serbest bırakılarak en düşük $\Sigma(O-C)^2$ hata değerine ulaşıncaya kadar q taraması yapılır (Maceroni ve ark., 1983; Joshi ve ark., 2016). Bu nedenle, KIC3732732, KIC3936357 ve KIC10802917 çift yıldızlarının kütle oranlarını belirlemek için tayfsal olarak belirlenmiş bir değer bulunmadığından, ilk olarak PHOEBE programında (Prsa, 2011) her sistem için yörünge i , $\Omega_{1,2}$, T_2 ve L_1 parametreleri serbest bırakılarak her bir sistem için detaylı q -taramaları yapılmıştır. KIC3732732, KIC3936357 ve KIC10802917 sistemlerin analizinde, Çizelge 1’de verildiği gibi baş yıldızların etkin sıcaklıkları (T_1) Kepler veri tabanından sırasıyla 5946 K, 5933 K ve 4937 K olarak alınmıştır.

KIC3732732, KIC3936357 ve KIC10802917 W UMa çift sistemlerinin q taraması yapılırken ve her sistem için en düşük $\Sigma(O-C)^2$ değeri elde edilinceye kadar bir dizi kütle oranları ile tekrarlanmıştır. KIC3732732 sistemi için q taraması yapılırken yörünge eğim açısının (i) $57^\circ.00 \pm 0.03$ olduğu durum için $0.4 \leq q \leq 0.6$ aralığında olacak şekilde 0.01 arttırmayla seçilen q değerleri ile tarama yapılmış ve en düşük $\Sigma(O-C)^2$ değeri $q = 0.500 \pm 0.002$ ’de ($1/q = 2.0$) ulaşılmıştır. KIC3936357 sistemi için q taraması yapılırken yörünge eğim açısının (i) 76.50 ± 0.22 olduğu durum için $0.30 \leq q \leq 0.51$ aralığında olacak şekilde 0.01 arttırmayla seçilen q değerleri ile tarama yapılmış ve en düşük $\Sigma(O-C)^2$ değeri $q = 0.41 \pm 0.01$ ’de ($1/q = 2.439$) ulaşılmıştır. Benzer şekilde, KIC10802917 sistemi için q

taraması yapılırken yörünge eğim açısının (i) $82^{\circ}.00 \pm 0.04$ olduğu durum için $0.38 \leq q \leq 0.58$ aralığında olacak şekilde 0.01 arttırmayla seçilen q değerleri ile tarama yapılmış ve en düşük $\Sigma(O-C)^2$ değerine $q = 0.48 \pm 0.01$ 'de ($I/q = 2.083$) ulaşılmıştır.

Burada verilen hata değerleri PHOEBE'den alınan değerlerdir. KIC3732732, KIC3936357 ve KIC10802917 sistemleri için 0.41 ile 0.51 aralığında ($q > 0.3$) ulaşılan q (M_2/M_1) kütle oranların bu değerleri kütle oranlarının için doğru seçim yapmaya karşılık gelmektedir. Çalışılan üç W UMa çift sistemi için q taraması sonucu (O-C) kareleri ($\Sigma(O-C)^2$) ile q kütle oranı arasındaki ilişki Şekil 1'de gösterilmektedir.

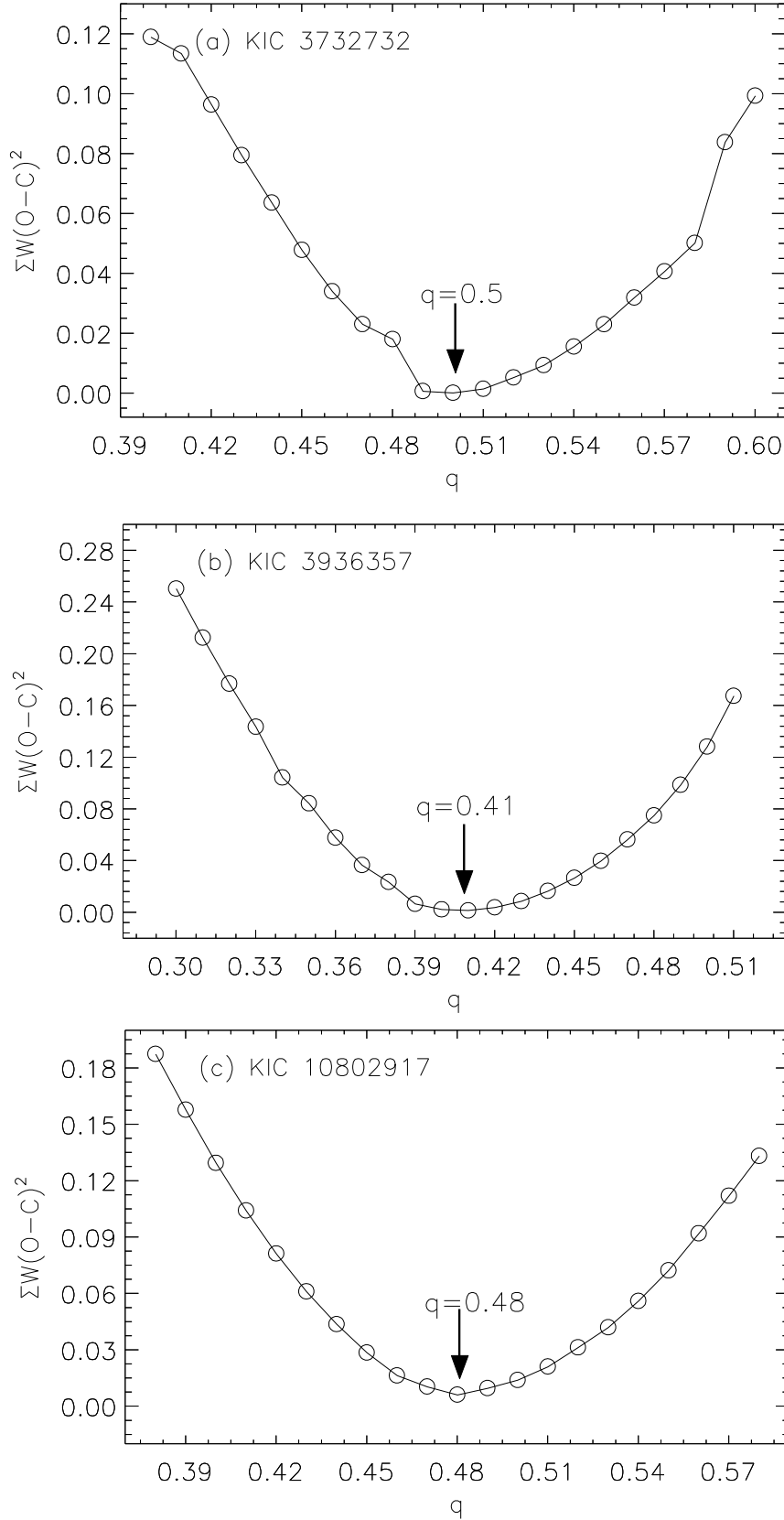
q -taraması sonucunda elde edilen fotometrik q değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. Çizelge 2'de üç sistemin q taraması yapıp χ^2 değerine ulaşıldıktan sonra en iyi ışık eğrileri elde edilmiş ve çözümlerinin sonuçları verilmiştir. Çizelgede; P , $T_0(HJD 2454900+)$, i (derece), q , $T_{1,2}$ (K), $\Omega_{1,2}$ (boyutsuz), $A_{1,2}$ bileşenlerin yüzey bolometrik albedoları, $g_{1,2}$ bileşenlerin çekim kararım sabitleri, f , aşırı değen çift sistemler için doldurma faktörü, $x_{1,2}$ ve $y_{1,2}$ bileşenlerin van Hamme (1993) tablosundan alınan lineer kenar kararım katsayıları, (Ω_{L1} , Ω_{L2}) bileşenler arasında birbirini kesen iç (birinci) ve dış (ikinci) Lagrange noktaları, L_3 üçüncü ışık, e yörünge dış merkezliği (kesirsel), $r_{1,2}$ bileşenler arası uzaklıklar cinsinden kesirsel yarıçaplar ($r_{1,2} = R_{1,2}/a$), $\Delta\phi$ evre kayması, λ , β , α sırasıyla bileşenlerdeki lekelerin derece biriminde enlemi, boylamı ve açısız yarıçapı, $T_f(T_{leke}/T_{yüzey})$ leke sıcaklık faktörünü ve $\Sigma(O-C)^2$ ölçülen değerler ile kuramsal değerler arasındaki artık değerleri göstermektedir. Çizelge 2'deki parametrelerdeki hatalar, PHOEBE değerleridir.

Sonuç olarak, q ve i değerlerine ulaşıldığında sistemlerin son durumlarına karar verilmiştir. Buna göre KIC3732732 sisteminin yeni ışık eğrisi analiz sonuçları $q = 0.5$ kütle oranında birinci ve ikinci bileşenlerin sıcaklıkları $T_1 = 5946$ K ve $T_2 = 5966$ K, $i = 57^{\circ}.00 \pm 0.03$ ve %25.4 doluluk oranı olarak elde edilmiştir. KIC3936357 sisteminin yeni ışık eğrisi analiz sonuçları $q = 0.41 \pm 0.01$ kütle oranında birinci ve ikinci bileşenlerin sıcaklıkları $T_1 = 5933$ K ve $T_2 = 5940$ K, $i = 76^{\circ}.50 \pm 0.22$ ve %39.4 doluluk oranı olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde, KIC10802917 sisteminin yeni ışık eğrisi analiz sonuçları $q = 0.48 \pm 0.01$ kütle oranında birinci ve ikinci bileşenlerin sıcaklıkları $T_1 = 4937$ K ve $T_2 = 5080$ K, $i = 82^{\circ}.00 \pm 0.04$ ve %16.40 doluluk oranı olarak elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlardan üç sistemin kütle oranları $q > 0.3$ olduğu görülmektedir. Üç sistemdeki birinci ve ikinci bileşenlerin T_1 ve T_2 sıcaklıkları yaklaşık olarak bir birlerine çok yakındır. KIC3732732 sistemindeki bileşenlerden birinci bileşen ($T_1 = 5946$ K) ikinci bileşene göre daha sıcak ($T_2 = 5966$ K) olduğu ($T_2 > T_1$) görülmektedir. KIC3936357 sistemindeki ikinci bileşenin sıcaklığı ($T_1 = 5933$ K) birinci bileşene ($T_2 = 5940$ K) göre daha yüksek ($T_2 > T_1$) olduğu ve benzer şekilde KIC10802917 sistemindeki bileşenlerden ikinci bileşenin ($T_1 = 4937$ K) sıcaklığı birinci bileşene göre daha sıcak ($T_2 = 5080$ K) ($T_2 > T_1$) olduğu görülmüştür. q kütle oranlarına ve bileşenlerin sıcaklıklarına bakıldığında W UMa örten çift sistemlerin W-alt türü çift sistem oldukları göstermektedir (Wadhwa, 2005; Skelton ve Smith, 2009). İlk kez bu çalışma ile elde edilen KIC3732732, KIC3936357 ve KIC10802917 verilerinin ışık eğrilerinin analizleri ve çözüm parametrelerine ait tüm sonuçlar Çizelge 2'de detaylı olarak verilmiştir.

KIC3732732, KIC3936357 ve KIC10802917 W UMa örten çift yıldız sistemlerinin her biri için Kepler veri tabanından alınan ve işlenen gözlemsel ışık eğrileri ile PHOEBE programıyla (Prsa, 2011) hesaplanan (kuramsal) ışık eğrileri (Çizelge 2'de) Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2'de içi boş mavi çemberler gözlenen ışık eğrilerini, düz kırmızı çizgiler ise kuramsal (sentetik) ışık eğrilerini temsil etmektedir. Beklendiği gibi üç sistemde kısa dönemli olduklarından değen ya da aşırı değen sistemlerdir. Gözlenen fotometrik eğriler ile elde edilen kuramsal eğriler arasındaki farkları gösteren

ve artık değerleri her eğrinin altında verilmiştir. Artık değerler grafiklerine bakıldığında hesaplanan ışık eğrilerinin gözlenen ışık eğrilerine hemen hemen uyduğu görülmektedir.

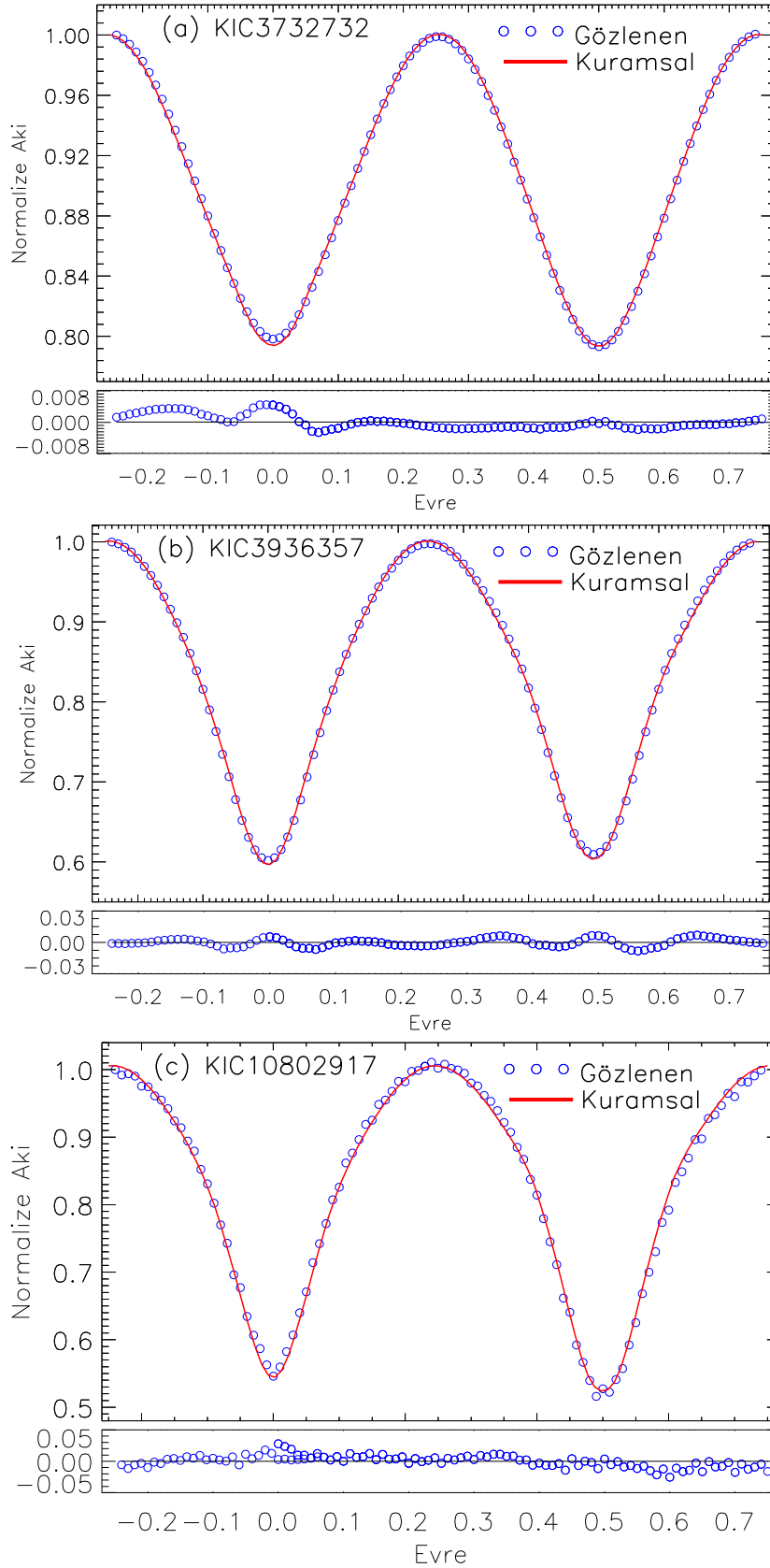


Şekil 1. KIC3732732 (a) KIC3936357 (b) ve KIC10802917 (c) örten çift yıldızları için q kütle oranlarıyla artıkların toplamları ($\Sigma w(O-C)^2$) arasındaki farkı gösteren q -tarama yöntemi

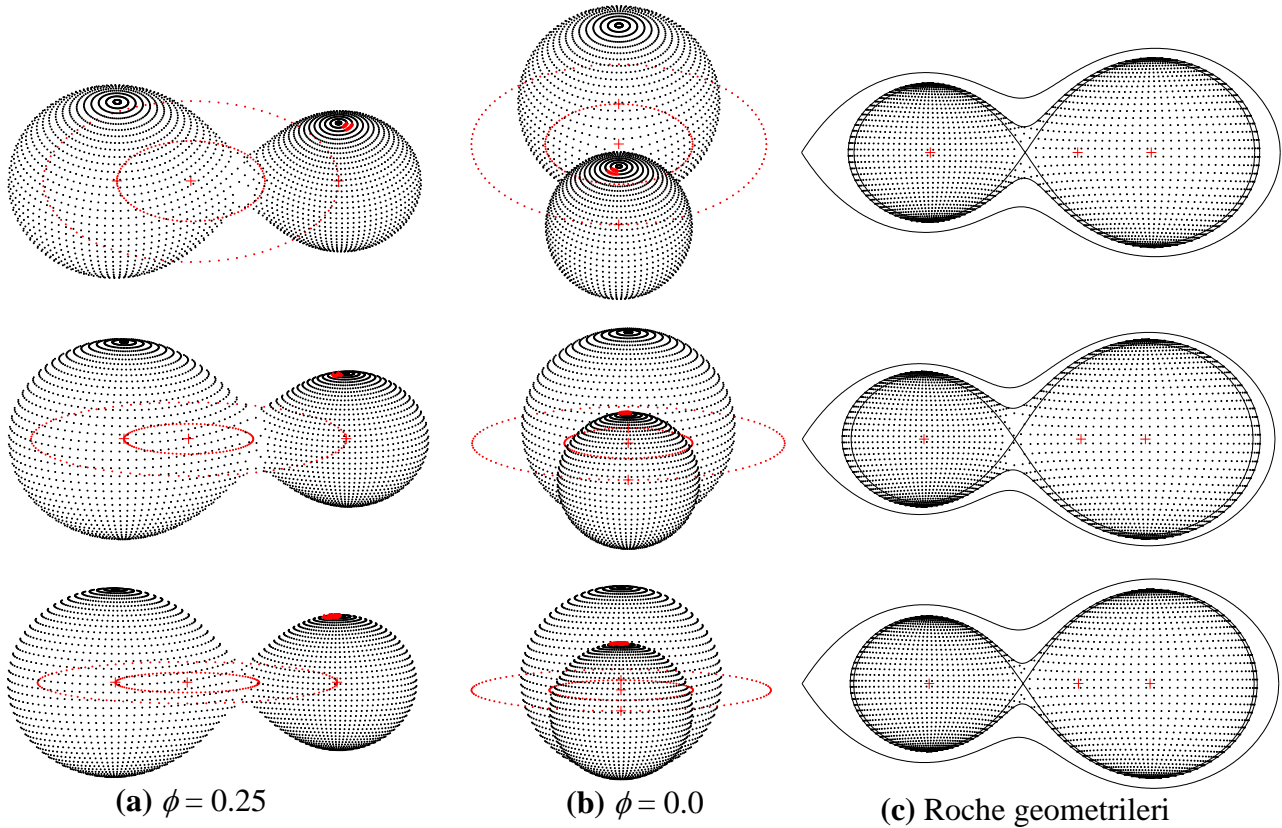
Çizelge 2. PHOEBE kullanılarak KIC3732732, KIC3936357 ve KIC10802917 sistemlerin ışık eğrisi analiz sonuçları

Parametre	KIC3732732 (1)	KIC3936357 (2)	KIC10802917 (3)
P [gün]	0.3961872	0.3691536	0.2724524
T ₀ (HDJ0)	2454953918666	2454953.852697	2454999.905793
i [°]	57.00 ± 0.03	76.50 ± 0.22	82.00 ± 0.04
q (M ₁ /M ₂)	0.500 ± 0.002	0.41 ± 0.01	0.48 ± 0.01
T ₁ [K]	5946 ± 18	5933 ± 47	4937 ± 58
T ₂ [K]	5966 ± 19	5940 ± 48	5080 ± 44
Ω ₁ = Ω ₂	2.800 ± 0.004	2.600 ± 0.013	2.790 ± 0.023
A ₁ = A ₂	0.5	0.5	0.5
g ₁ = g ₂	0.32	0.32	0.32
f= [%]	25.4	39.4	16.4
L ₁ /(L ₁ +L ₂)	0.6450±0.0002	0.6806±0.0010	0.6332±0.0055
L ₂ /(L ₁ +L ₂)	0.3550±0.0001	0.3194±0.0004	0.3668±0.0032
x ₁ [bolo]	0.4963	0.1673	0.4835
x ₂ [bolo]	0.4963	0.1670	0.4830
y ₁ [bolo]	0.2265	0.6242	0.3100
y ₂ [bolo]	0.2265	0.6242	0.3107
Ω _{L1}	2.8758±0.0009	2.6984±0.0038	2.8372±0.0246
Ω _{L2}	2.5773±0.0008	2.4489±0.0034	2.5494±0.0221
Δφ	-0.5	0.000	0.000
L ₃	0	0.0	0.0
e	0	0.0	0.0
r ₁ (kenar)	0.456902±0.000147	0.484084±0.000678	0.454515±0.003941
r ₁ (kutup)	0.427311±0.000137	0.449235±0.000629	0.425827±0.003692
r ₁ (arka)	0.490464±0.000157	0.518777±0.000727	0.485599±0.0036920
r ₁ (ortalama)	0.457500±0.000147	0.483198±0.000677	0.454659±0.003942
r ₂ (kenar)	0.329193±0.000106	0.320226±0.000449	0.319600±0.002771
r ₂ (kutup)	0.313333±0.000059	0.304096±0.000426	0.305050±0.002645
r ₂ (arka)	0.371513±0.000119	0.369776±0.000518	0.358000±0.003104
r ₂ (ortalama)	0.337140±0.000108	0.330219±0.000463	0.326804±0.002833
Leke Parametreleri			
Leke 2 (İkinci)			
Enlem [λ , °]	10	8	5
Boylam [β , °]	148	20	20
Açısal çap [α , °]	5	5	8
Sıcaklık Faktörü [T _f = T _{leke} /T _{yıldız}]	0.92	0.86	0.88
Σ(O-C) ²	0.000321	0.001401	0.008670

KIC3732732, KIC3936357 ve KIC10802917 çift yıldız sistemlerinin geometrik şekillerine ve Roche loblarını doldurma durumlarına bakmak için PHOEBE programından elde edilen sentetik (kuramsal) ışık eğri parametrelerini Binary Maker 3.0 (BM3) programında (Bradstreet, 2005) giriş parametresi olarak kullanılmıştır. Böylece, her sistem için birinci ve ikinci bileşenlerin farklı evrelerde geometrik şekillerini elde edilerek doldurma faktörlerine bakılmıştır. Roche loblarının doluluğuna göre görünüşler ikili sistemlerin hangi türden olup olmadıklarına bakılmıştır. Şekil 3’de sistemlerinin 0.25 ve 0.0 evrelerindeki geometrik görüntüleri ve Roche geometrileri verilmiştir. Üç sistemin tamamı birinci ve ikinci bileşenlerinin Roche loblarını tam olarak doldurup dışarı taşarak ortak bir zarf oluşturdukları ve göreceli olarak, şekil ve boyutlarının elipsoidal bozuklara neden oldukları görülmektedir.



Şekil 2. a) KIC3732732, b) KIC3936357 c) KIC10802917 örten çift yıldız sistemlerinin gözlemsel ve kuramsal ışık eğrileri. Her eğrinin altında gözlenen değer ile kuramsal değerler arasındaki farkları gösteren artıklar.



Şekil 3. Yukarıdan aşağı doğru sırasıyla KIC3732732 (üst), KIC3936357 (orta) ve KIC10802917 (alt) çift yıldız sistemlerinin a) $\phi = 0.25$ b) $\phi = 0.0$ evrelerindeki üç boyutlu geometrik görüntüleri ve c) Roche geometrileri (en sağda). İkinci bileşenlerin yüzeylerindeki kırmızı alanlar lekelerin bulunduğu temsili konumları göstermektedir

Sistemlerin Roche geometrisi ile birlikte ikinci bileşen yıldızların üzerindeki lekelerin konumları Şekil 3’de kırmızı alanlarla gösterilmiştir. Buna göre, Çizelge 2’den de görüleceği gibi, KIC3732732 sisteminin ikinci bileşenin yüzeyi üzerinde bulunun leke enlemi (λ) = 10° ve boylamı (β) = 148° konumunda olup açısız çapı (α) = 5° ve yıldızın sıcaklığına göre %8 ($T_{leke}/T_{yıldız} = 0.92$) oranında daha soğuk etkin sıcaklığı sahip olduğu görülmüştür. KIC3936357 sisteminin ikinci bileşenin yüzeyi üzerinde $\lambda = 8^\circ$ ve $\beta = 20^\circ$ konumunda olan 5° açısız çapa sahip olan lekenin etkin sıcaklığı yıldızın sıcaklığına göre %14 ($T_{leke}/T_{yıldız} = 0.86$) oranında daha soğuk olduğu görülmüştür. Benzer şekilde, KIC10802917 sisteminin ikinci bileşenin yüzeyi üzerinde $\lambda = 5^\circ$ ve $\beta = 20^\circ$ konumunda olan 8° açısız çapa sahip olan lekenin etkin sıcaklığı yıldızın sıcaklığına göre %12 ($T_{leke}/T_{yıldız} = 0.88$) oranında daha soğuk olduğu görülmüştür. W UMa çift yıldız sistemlerin çoğunun bileşenleri yaklaşık olarak benzer sıcaklıklara olmalarına rağmen ışık eğrilerinin birincil ve ikincil maksimum parlaklıkları arasında O’Connell etkisi (O’Connell, 1951) olarak adlandırılan asimetrik farklılıklar gözlenmektedir. Bu asimetriler genellikle bileşenlerin sadece birinde veya her ikisinde de lekelerin olmasından kaynaklanmaktadır. Bu tür farklılıklar birçok W UMa çift yıldız sistemlerinde bulunmaktadır (Joshi ve ark., 2016). Şekil 2’de verilen fotometrik ışık eğrilerinden de görüleceği gibi çift yıldız sistemlerin ikinci bileşenlerinde daha soğuk lekeler olmasına rağmen yukarıda belirtildiği gibi (Şekil 3) herhangi bir O’Connell etkisi gözlenmemiştir (O’Connell, 1951).

BULGULAR VE TARTIŞMA

Kepler kataloğundan seçilen KIC3732732, KIC3936357 ve KIC10802917 W UMa türü çift yıldız sistemlerinin fotometrik analizleri Wilson–Devinney (W-D) programını temel alan PHOEBE yazılımı (Prsa, 2011) ilk kez elde edilmiştir. Kütle oranları ve yörünge eğim açıları KIC3732732

sistemi için $q = 0.5$, $i = 57^\circ.0$, KIC3936357 sistemi için $q = 0.41$, $i = 76^\circ.5$ ve KIC10802917 sistemi için de $q = 0.48$, $i = 82^\circ.0$ olarak belirlenmiştir. Birinci ve ikinci bileşenlerin sıcaklıkları ve sıcaklık farkları sırasıyla KIC3732732 için $T_1 = 5946$ K ve $T_2 = 5966$ K ($\Delta T = 20$ K, $T_2 > T_1$), KIC3936357 için $T_1 = 5933$ K ve $T_2 = 5940$ K ($\Delta T = 7$ K) ve KIC10802917 için $T_1 = 4937$ K ve $T_2 = 5080$ K ($\Delta T = 143$ K) olarak belirlenmiştir. Bunlara ek olarak bileşenlerin diğer fotometrik parametreleri Çizelge 2’de verilmiştir. Bileşenlerinin belirlenen bazı önemli fiziksel/mutlak parametreleri aşağıda verilmiştir.

Mutlak Parametreler

Fotometrik verilerin ışık eğrisi analizlerinden elde edilen değerler ve literatürden elde edilen yörünge dönemlerine (P) bağlı çözümler bulan eşitlikler kullanarak üç çift sistemin mutlak parametreleri türetilmiştir. Aşağıda çözümler detaylı olarak verilmiştir.

KIC3732732, KIC3936357 ve KIC10802917 çift yıldız sistemlerinin bileşenleri arasındaki mesafeleri bulmak için yörünge periyodu-yarı büyük eksen uzunluğu ($P-a$) ilişkisi kullanılmıştır.

$$a = -1.154 + 14.633P - 10.319P^2 \quad (1)$$

Burada a güneş yarıçapı (R_\odot biriminde, 6.96×10^5 km) biriminde yörünge yarı-büyük eksen uzunluğunu (bileşenler arası uzaklık) ve P ise Kepler kataloğundan alınan ve çizelge 1 ve Çizelge 2’de verilen gün birimindeki yörünge dönemini göstermektedir (Dimitrov ve Kjurkchieva, 2015; Bulut ve Bulut, 2021). Buna göre, her sistemin bileşenleri arası uzaklık değerleri sırasıyla $3.024 R_\odot$, $2.842 R_\odot$ ve $2.067 R_\odot$ olarak hesaplanmıştır.

Sistemlerin güneş kütlesi cinsinden ($1 M_\odot = 1.99 \times 10^{33}$ gr), toplam kütleleri ($M_T = M_1 + M_2$) yörünge periyodu kütle ilişkisi ($P-M$) kullanarak

$$M_T = M_1 + M_2 = 0.0134 \frac{a^3}{P^2} \quad (2)$$

formülü ile hesaplanmıştır (Dimitrov ve Kjurkchieva, 2015). Eşitlik 2., yörünge döneminin (P) karesi ile yarı büyük eksen uzunluğunu (a) üçüncü dereceden kuvvetiyle ilişkili olan Kepler’in üçüncü yasasının Newton formülasyonudur ($4\pi^2 a^3 = G(M_1 + M_2)P^2$). Toplam kütlesi hesaplanan çift yıldız sistemlerinin bileşenlerinin kütleleri ise Rucinski (1994) tarafından verilen q (M_2/M_1) kütle oranları kullanılmıştır. q değerleri yukarıda açıklandığı gibi PHOEBE programından (Prsa, 2011) elde edilmiştir. Sistemin toplam kütlesi bileşenlerin her birinin kütleleri toplamından oluştuğundan bileşenlerin her birinin kütleleri

$$M_1 = \frac{M_T}{(1+q)}, \quad M_2 = M_T - M_1 \quad (3)$$

ifadesi kullanılarak güneş kütlesi (M_\odot) cinsinden tek tek hesaplanmıştır. Buna göre, KIC3732732 sisteminin birinci ve ikinci bileşenlerinin kütleleri sırasıyla $M_1 = 1.575 M_\odot$ ve $M_2 = 0.785 M_\odot$ ($M_T = 2.360 M_\odot$), KIC3936357 sisteminin $M_1 = 1.602 M_\odot$ ve $M_2 = 0.654 M_\odot$ ($M_T = 2.256 M_\odot$) ve KIC10802917 sisteminin ise $M_1 = 1.078 M_\odot$ ve $M_2 = 0.516 M_\odot$ ($M_T = 1.594 M_\odot$) olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlardan görüldüğü gibi her üç sistemde birinci bileşenlerin kütleleri ikinci bileşenlerinden daha büyük ($M_1 > M_2$) olduğu (Şekil 3) görülmektedir.

Çift yıldız sistemlerin ortalama kesirsel yarıçapları

$$r_{1,2ort} = \left(r_{1,2 \text{ kenar}} \times r_{1,2 \text{ arka}} \times r_{1,2 \text{ kutup}} \right)^{1/3} \quad (4)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır. Çizelge 2’de verilen $r_{1,2 \text{ kenar}}$, $r_{1,2 \text{ kutup}}$ ve $r_{1,2 \text{ arka}}$ değerlerine göre ortalama kesirsel yarıçapları sırasıyla KIC3732732 için $r_{1ort} = 0.45750$ ve $r_{2ort} = 0.33714$, KIC3936357 için r_{1ort}

= 0.48319 ve $r_{2ort} = 0.33022$ ve KIC10802917 için $r_{1ort} = 0.454659$ ve $r_{2ort} = 0.326804$ olarak hesaplanmıştır.

Hesaplanan ortalama kesirsel yarıçap-yarı büyük eksen uzunluğu ilişkisi ($r_{1,2ort}-a$) kullanarak sistemlerin bileşenlerinin yarıçapları (R_{\odot} cinsinden),

$$R_{1,2} = r_{1,2ort}a \quad (5)$$

ile hesaplanmıştır. Eşitlik 5, Kepler'in üçüncü yasaının basit matematiksel ifadesidir. Buna göre, KIC3732732 sisteminin birinci ve ikinci bileşenlerinin yarıçapları $R_1 = 1.383 R_{\odot}$ ve $R_2 = 1.019 R_{\odot}$, KIC3936357 sistemi için $R_1 = 1.373 R_{\odot}$ ve $R_2 = 0.938 R_{\odot}$ ve KIC10802917 sistemi için de $R_1 = 0.940 R_{\odot}$ ve $R_2 = 0.675 R_{\odot}$ olarak hesaplanmıştır. Buradan her sistemin birinci bileşenlerinin yarıçapları ikinci bileşenlerinden daha büyük ($R_1 > R_2$) olduğu görülmüştür.

Ana koldaki güneş benzeri yıldızlar için toplam ışımaya gücü (L) ifadesi bir yıldızın yarıçapının karesi ile yüzey sıcaklığının dördüncü kuvveti arasında bir ilişki olan Stefan yasasından

$$\frac{L_{1,2}}{L_{\odot}} = \left(\frac{R_{1,2}}{R_{\odot}}\right)^2 \left(\frac{T_{1,2}}{T_{\odot}}\right)^4 \quad (6)$$

kolaylıkla hesaplanabilir. Burada $R_{1,2}$, R_{\odot} cinsinden sistemlerin birinci ve ikinci bileşenlerinin bileşenlerin yarıçapları, $T_{1,2}$ ise güneş sıcaklığı ($T_{\odot} = 5780$ K) cinsinden bileşenlerin sıcaklıkları olmak üzere $L_{1,2}$ bileşenlerin ışınım güçleri güneş parlaklığı cinsinden (L_{\odot} biriminde, 3.827×10^{33} erg/s) hesaplanmıştır. Buna göre, sistemlerin birinci ve ikinci bileşenlerinin ışımaya güçleri sırasıyla KIC3732732 için $L_1 = 2.143 L_{\odot}$ ve $L_2 = 1.180 L_{\odot}$, KIC3936357 sistemi için $L_1 = 2.093 L_{\odot}$ ve $L_2 = 0.982 L_{\odot}$ ve KIC10802917 sistemi için de $L_1 = 0.470 L_{\odot}$ ve $L_2 = 0.272 L_{\odot}$ olarak hesaplanmıştır.

Bileşenlerin logaritmik yüzey çekim ivmeleri güneş birimleri cinsinden (M_{\odot} ve R_{\odot});

$$\log(g)_{1,2} = 4.438 + \log\left(\frac{M_{1,2}}{M_{\odot}}\right) - 2 \log\left(\frac{R_{1,2}}{R_{\odot}}\right) \quad (7)$$

ile hesaplanmaktadır. Buna göre, KIC3732732 sisteminin birinci ve ikinci bileşenleri için yüzey çekim ivme değerleri sırasıyla $\log(g)_1 = 4.353$ cm/s², $\log(g)_2 = 4.316$ cm/s² ve KIC3936357 için $\log(g)_1 = 4.367$ cm/s², $\log(g)_2 = 4.309$ cm/s² ve KIC10802917 için $\log(g)_1 = 4.525$ cm/s², $\log(g)_2 = 4.491$ cm/s² olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, bileşen yıldızların ana koldan bir miktar ayrılmış olduklarını bize göstermektedir.

Bileşenlerin mutlak bolometrik parlaklıkları (kadir biriminde) $R_{1,2}$ bileşenlerin yarıçapları (R_{\odot}), $T_{1,2}$ güneş sıcaklığı ($T_{\odot} = 5780$ K) cinsinden

$$M_{bol1,2} = 4^m.77 - 5 \log\left(\frac{R_{1,2}}{R_{\odot}}\right) - 10 \log\left(\frac{T_{1,2}}{T_{\odot}}\right) \quad (8)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır (Wesselink, 1969). Buna göre, KIC3732732 çift sistemi için birinci ve ikinci bileşenlerinin bolometrik mutlak parlaklıkları sırasıyla $M_{bol1} = 3^m.942$ ve $M_{bol2} = 4^m.591$ olarak, KIC3936357 çift sistem için $M_{bol1} = 3^m.968$ ve $M_{bol2} = 4^m.790$ ve KIC10802917 çift sistem için $M_{bol1} = 5^m.590$ ve $M_{bol2} = 6^m.183$ olarak ve olarak hesaplanmıştır.

Wang (1994) tarafından A-alt ve W-alt türlerine sahip olan 22 W UMa türü çift yıldız sistemleri ile yapılan çalışmada ($(B-V)_0-P$) ilişkisi için

$$(B-V)_0 = 0.062 - 1.310 \log(P) \quad (9)$$

eşitliğini verilmiştir (Wang, 1994; Gazeas ve Stepień, 2008). Burada $(B-V)_0$ sistemin öz rengidir. Eşitlik 9 kullanılarak sistemin öz rengini kadir (m) biriminde hesaplanmıştır. Buna göre, KIC3732732,

KIC3936357 ve KIC10802917 aşırı değen W UMa çift sistemlerinin $(B-V)_0$ öz renkleri sırasıyla $0^m.589$ ($P = 0^s.396187$), $0^m.629$ ($P = 0^s.3691536$) ve $0^m.802$ ($P = 0^s.2724524$) olarak elde edilmiştir.

Gazeas ve Stepień (2008) tarafından verilen $(P-(B-V)_0)$ ilişkisinden W UMa-tip çift yıldızlar için mutlak parlaklık değerleri

$$M_V = -4.44 \log(P) + 3.02(B-V)_0 + 0.12 \quad (10)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır (Rucinski ve Duerbeck, 1997; Gazeas ve Stepień, 2008). Eşitlik 9'da verilen öz renk ifadesi mutlak parlaklık ifadesinde Eşitlik 10'da yerine yazıldığında W UMa türü çift yıldız sistemlerinin mutlak büyüklüğü doğrudan yörünge dönemi bilgisinden

$$M_V = -8.4 \log(P) + 0.31 \quad (11)$$

hesaplanabileceği görülmektedir (Gazeas ve Stepień, 2008). Buna göre KIC3732732, KIC3936357 ve KIC10802917 çift sistemlerinin mutlak parlaklık (M_V) sırasıyla $3^m.683$, $3^m.941$ ve $5^m.049$ olarak elde edilmiştir.

Mochnecki (1981) tarafından önerilen çift yıldız bileşenlerin türetilmiş ortalama yoğunlukları ($\rho_{1,2}$)

$$\bar{\rho}_1 = \frac{0.189}{r_{1ort}^3 P^2 (1+q)} \quad ve \quad \bar{\rho}_2 = \frac{0.189q}{r_{1ort}^3 P^2 (1+q)} \quad (12)$$

eşitlikleri kullanılarak hesaplanmıştır. Buna göre, değen W UMa çift sistemlerinin birinci ve ikinci bileşenlerinin yoğunlukları ($\rho_{1,2}$) sırasıyla KIC3732732 için 0.838 gr/cm^3 ve 1.047 gr/cm^3 , KIC3936357 için 0.872 gr/cm^3 ve 1.120 gr/cm^3 ve KIC10802917 için 1.830 gr/cm^3 ve 2.366 gr/cm^3 olarak elde edilmiştir.

Sonuç olarak, KIC3732732, KIC3936357 ve KIC10802917 çift sistemleri için yukarıda verilen mutlak parametreler Çizelge 3'de özetlenmiştir.

Çizelge 3. Işık eğrisi analizleri ile elde edilen KIC3732732, KIC3936357 ve KIC10802917 sistemlerinin mutlak fiziksel ve yörünge mutlak parametreleri

Parametre	Birim	KIC3732732	KIC3936357	KIC10802917
a	[R_\odot]	3.024	2.842	2.067
M_1	[M_\odot]	1.575	1.602	1.078
M_2	[M_\odot]	0.785	0.654	0.516
M_T	[M_\odot]	2.360	2.256	1.594
R_1	[R_\odot]	1.383	1.373	0.940
R_2	[R_\odot]	1.019	0.938	0.675
L_1	[L_\odot]	2.143	2.093	0.470
L_2	[L_\odot]	1.180	0.982	0.272
$\log(g)_1$	[cm/s^2]	4.353	4.367	4.525
$\log(g)_2$	[cm/s^2]	4.316	4.309	4.491
M_{bol1}	[m]	3.942	3.968	5.590
M_{bol2}	[m]	4.591	4.790	6.183
$(B-V)_0$	[m]	0.589	0.629	0.802
M_V	[m]	3.683	3.941	5.049
ρ_1	[gr/cm^3]	0.838	0.872	1.830
ρ_2	[gr/cm^3]	1.047	1.120	2.366

W UMa (EW) türü sistemler aşırı değen sistemler olup, birinci bileşen Roche lobununun tamamen doldurduktan sonra taşan madde ikinci Roche yüzeyine ulaşır ve bileşenler etraflarında ortak bir zarf oluşturarak tüm eşpotansiyel yüzeylerini doldurmuşlardır (Terrell, 2001). Çift yıldız sistemlerinde diğer önemli bir parametre de sistemlerin doldurma faktörüdür (f). Doldurma faktörü, aşırı değen çift yıldız sistemlerinin bileşenleri arasındaki değme boyutunu gösteren bir ölçüdür. Aşırı değen bir sistem için doldurma faktörü

$$f = \frac{\Omega - \Omega_{L1}}{\Omega_{L2} - \Omega_{L1}} \quad (14)$$

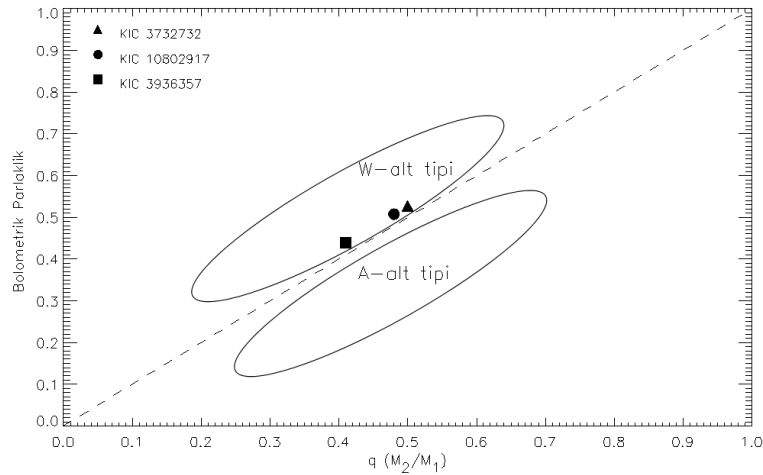
eşitliği ile verilir. Burada $\Omega = \Omega_{1,2}$, yıldız yüzey potansiyeli, Ω_{L1} ve Ω_{L2} sırasıyla içteki ($L1$) ve dıştaki ($L2$) Lagrange yüzeylerindeki kritik Roche potansiyel değerleridir (Lucy ve Wilson, 1979). Eşitlik 14'den görüleceği gibi, bileşen yıldızlar tam değme halindeyken yıldızların yüzeyindeki potansiyel, iç Lagrange yüzeyindeki potansiyele eşit olursa $f = 0$ (%0.0) ve dış Lagrange yüzeyindeki potansiyele eşit olursa $f = 1$ (%100) olur. Değen/aşırı değen çift sistemlerin bileşen yıldızları, Roche Loblarını doldurarak dışa taşarlar ve ortak bir zarfı paylaşırlar. Çift yıldızlar doldurma faktör derecelerine göre ayrık ($f < 0$), yarı-ayrık ($f = 0$) ve değen/aşırı değen ($0 < f < 1$) çiftler olarak üç şekilde sınıflandırılabilir (Skelton ve Smith, 2009; Deb ve Singh, 2011; Prsa, 2011).

Eşitlik 14 kullanılarak aşırı değen KIC3732732, KIC3936357 ve KIC10802917 sistemler için Ω_{L1} ve Ω_{L2} değerleri hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 2'de verilmiştir. Çizelge 2'den KIC3732732 sistemi için $\Omega_{L1} = 2.8758$, $\Omega_{L2} = 2.5773$ ($\Omega_1 = \Omega_2 = 2.8$), KIC3936357 sistemi için $\Omega_{L1} = 2.6984$, $\Omega_{L2} = 2.4489$ ($\Omega_1 = \Omega_2 = 2.6$) ve KIC3936357 sistemi için de $\Omega_{L1} = 2.8372$, $\Omega_{L2} = 2.5494$ ($\Omega_1 = \Omega_2 = 2.79$) olarak belirlenmiştir. Buradan da görüleceği gibi her üç sistem de birinci Roche Loblarını doldurup dışarı taşarak ortak bir zarfı paylaşırlar. Buna göre, KIC3732732 %25.4 ($f = 0.254$), KIC3936357'nin %39.4 ($f = 0.394$) ve KIC10802917'nin %16.40 ($f = 0.164$) dolum faktörlerine sahip oldukları için aşırı değen çift yıldız sistemleridirler (Çizelge 2).

Lucy (1968) gözlemlenebilir parlaklık oranı ile kütle oranı arasında

$$\frac{L_2}{L_1} = \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^{0.92} \quad (15)$$

şeklinde bir orantı olduğunu göstermiştir. Csizmadia ve Klagyivik'in (2004) ise değen çift yıldızların kütle oranı ($q = M_2/M_1$) ile bolometrik parlaklık oranları (L_2/L_1) arasındaki ilişkiyi incelemek için grafik çizdiklerinde A-alt ve W-alt türü çift yıldızların belirli bir dağılımda olduklarını görmüşlerdir (Wadhwa, 2005). Eşitlik 15 kullanılarak KIC3732732, KIC3936357 ve KIC10802917 çift yıldız sistemleri için Lucy (1968) tarafından verilen parlaklık oranı ile kütle oranı grafiği elde edilmiştir (Şekil 4). Şekil 4'de kesikli düz çizgi Lucy'nin (1968) bolometrik parlaklık ile kütle oran ilişkisini ($L_2/L_1 = (M_2/M_1)^{0.92}$) kullanarak A-alt ve W-alt türlerinin bir birinden ayrıldığı bölgeyi göstermektedir. A-alt türü çift yıldızlar genel olarak bu kesikli çizginin altına yerleşirken, W-alt türü çift yıldızlar ise bu çizginin üst bölgesinde yerleşirler. Şekil 4'den görüleceği gibi KIC3732732, KIC3936357 ve KIC10802917 çift yıldız sistemlerin üçü de kesikli çizginin üst bölgesinde bulduklarından W UMa türü çift yıldız sistemlerinin W-alt türüne sahip oldukları görülmüştür.



Şekil 4. Lucy (1968) tarafından verilen Bolometrik parlaklık oranına göre kütle oranı grafiği (Wadhwa, 2005)

SONUÇ

Bu çalışmada, Kepler Kataloğundan alınan üç farklı (KIC3732732, KIC10802917 ve KIC3936357) W Uma türü örten çift yıldızların fiziksel parametrelerini belirlemek için Wilson-Devinney kodu kullanan PHOEBE programı kullanılmıştır. Her sistem için yörünge dönemi (P), birinci bileşenin etkin yüzey sıcaklığı (T_1) değerleri Kepler veri arşivinden alınmıştır. Her sistem için V bandındaki (550 nm) fotometrik analizleri tek tek yapılarak modellenmiş ve ilk fotometrik analizleri yapılmıştır.

Fotometrik ışık eğrisi analizlerine dayalı olarak, her sistem için kütle oranı (q), yörünge eğim açısı (i), ikinci bileşenlerin sıcaklıkları (T_2), yüzey potansiyelleri ($\Omega_1 = \Omega_2$), doldurma faktörleri (f) ve ikinci bileşenlerin yüzeylerine yerleştirilen soğuk lekelerin parametreleri (koordinat, boyut, ve etkin leke sıcaklıkları), belirlenmiştir. Sistemlerin her biri için bileşenlerin literatürden elde edilen eşitlikler kullanılarak bileşenler arası uzaklık, yarıçap, kütle, ışınma gücü, bolometrik parlaklık, yoğunluk gibi bazı mutlak parametreler belirlenmiştir.

Buna göre, KIC3732732 sistemi için $q = 0.5$ ($1/q = 2.0$), $i = 57^\circ.0$, $T_2 = 5966$ K ve $\Omega_1 = \Omega_2 = 2.8$, KIC3936357 için $q = 0.41$ ($1/q = 2.439$), $i = 76^\circ.5$ ve $T_2 = 5940$ K ve $\Omega_1 = \Omega_2 = 2.6$ ve KIC10802917 için $q = 0.48$ ($1/q = 2.083$), $i = 82^\circ.0$, $T_2 = 5080$ K ve $\Omega_1 = \Omega_2 = 2.79$ olarak elde edilmiştir.

Bileşen arasındaki mesafe, KIC3732732 için $a = 3.024 R_\odot$, KIC3936357 için $a = 2.842 R_\odot$ ve KIC10802917 için $a = 2.067 R_\odot$ olarak tahmin edilmiştir.

KIC3732732 sisteminin birinci ve ikinci bileşenlerinin kütleleri ve yarıçapları $M_1 = 1.575 M_\odot$ ve $M_2 = 0.785 M_\odot$ ($M_T = 2.360 M_\odot$) ve $R_1 = 1.383 R_\odot$ ve $R_2 = 1.019 R_\odot$, KIC3936357 sisteminin birinci ve ikinci bileşenlerinin kütleleri ve yarıçapları $M_1 = 1.602 M_\odot$ ve $M_2 = 0.654 M_\odot$ ($M_T = 2.256 M_\odot$) ve $R_1 = 1.373 R_\odot$ ve $R_2 = 0.938 R_\odot$ ve KIC10802917 sisteminin birinci ve ikinci bileşenlerinin kütleleri ve yarıçapları $M_1 = 1.078 M_\odot$ ve $M_2 = 0.516 M_\odot$ ($M_T = 1.594 M_\odot$) ve $R_1 = 0.940 R_\odot$ ve $R_2 = 0.675 R_\odot$ olarak hesaplanmıştır.

KIC3732732 sisteminin birinci ve ikinci bileşenlerinin ışınma güçleri $L_1 = 2.143 L_\odot$ ve $L_2 = 1.180 L_\odot$, KIC3936357 sistemi için $L_1 = 2.093 L_\odot$ ve $L_2 = 0.982 L_\odot$ ve KIC10802917 sistemi için de $L_1 = 0.470 L_\odot$ ve $L_2 = 0.272 L_\odot$ olarak hesaplanmıştır.

Sistemlerin birinci ve ikinci bileşenlerinin yoğunlukları ise sırasıyla KIC3732732'nin $\rho_1 = 0.838$ gr/cm³, $\rho_2 = 1.047$ gr/cm³, KIC3936357'nin $\rho_1 = 0.872$ gr/cm³ ve $\rho_2 = 1.120$ gr/cm³ ve KIC10802917'nin $\rho_1 = 1.830$ gr/cm³ $\rho_2 = 2.366$ gr/cm³ olarak hesaplanmıştır.

Sonuç olarak, her üç sistemin de ikinci bileşenler daha küçük kütle ($M_2 < M_1$) ve yarıçapa ($R_2 < R_1$) sahipken ikinci bileşenleri daha yüksek sıcaklığa ($T_2 > T_1$) sahiptirler.

Doldurma parametresi ile tanımlanan geometrik değme/taşma dereceleri KIC3732732, KIC3936357 ve KIC10802917 için sırasıyla %25.4, %39.4, %16.4'dür. Bu değerler sistemlerin üçünün de aşırı değen W UMa türü örten çift sistemler olduğunu göstermektedir.

W-alt türü çift yıldızların genellikle $0.22 < P < 0.4$ gün aralığında yörünge dönemlerine ve $q > 0.3$ kütle oranlarına sahip olduklarından, incelenen KIC3732732 ($P = 0^{\text{e}}.3961872$ ve $q = 0.5$), KIC3936357 ($P = 0^{\text{e}}.3691536$ ve $q = 0.41$) ve KIC10802917 ($P = 0^{\text{e}}.2724524$ ve $q = 48$) çift yıldız sistemlerinin tamamı W UMa çift yıldızların W alt türü sistemlere uyduğu görülmektedir.

Ayrıca, sistemlerin sıcaklıkları göz önüne alındığında KIC3732732, KIC3936357 sistemlerinin birinci ve ikinci bileşenlerinin yaklaşık G0V tayf türlerine sahipken ve KIC10802917 sisteminin bileşenleri yaklaşık K2V tayf türünden anakol yıldızı olduklarını ortaya koymaktadır (Pecaut ve Mamajek, 2013).

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, Kepler uzay teleskobuyla gözlenen ve Villanova Üniversitesi tarafından hazırlanmış olan Kepler Örten Çift Yıldız Kataloğundan (Kepler Eclipsing Binary Catalogue: KEBC, <http://keplerebs.villanova.edu/>) elde edilen veriler kullanılmıştır.

KAYNAKLAR

- Binnendijk, L., 1970. The orbital elements of W Ursae Majoris systems, *Vistas in Astronomy*, 12: 217-226.
- Bradstreet DH, 2005. BINARY MAKER 3.0, Contact Software, 725 Stanbridge Street, Norristown, PA 19401-5505, USA. <http://www.binarymaker.com/>
- Conroy KE, Prsa A, Stassun, Orosz JA, Fabrycky DC, Welsh WF, 2014. Kepler eclipsing binary stars. IV. precise eclipse times for close binaries and identification of candidate three-body systems. *The Astronomical Journal* 147: 45 (15 sayfa).
- Csizmadia SZ, Klagyivik P, 2004. On the properties of contact binary stars, *Astronomy and Astrophysics*, 426 (3): 1001-1005.
- Deb S., Singh, H. P. 2011. Physical parameters of 62 eclipsing binary stars using the all sky automated survey-3 data – I. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 412 (3): 1787-1803.
- Dimitrov DP, Kjurkchieva DP, 2015. Ultrashort-period main-sequence eclipsing systems: new observations and light-curve solutions of six NSVS binaries, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 448 (3): 2890-2899.
- Eggen, O. J., 1967, Contact binaries, II., *Memoirs of the Royal Astronomical Society*, 70: 111-164.
- Gazeas K, Stepien K, 2008. Angular momentum and mass evolution of contact binaries, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 390: 1577-1586.
- Gazeas KD, Niarchos PG, 2006. Masses and angular momenta of contact binary stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 370: L29-L32.
- Joshi YC, Jagirdar R, Joshi S, 2016. Photometric studies of two W UMa type variables in the field of distant open cluster NGC 6866, *Research in Astronomy and Astrophysics* 16 (4), 63 (10pp).
- Kirk B, Conroy K, Prsa A, Abdul-Masih M, Kochoska A, Matijević G, Hambleton K, Barclay T, Bloemen S, Boyajian T, Doyle LR, Fulton BJ, Hoekstra AJ, ve ark., 2016. Kepler eclipsing binary stars. VII. the catalog of eclipsing binaries found in the entire kepler data set. *The Astronomical Journal*, 151: 68 (21 sayfa).
- Kolenberg K, Szabo R, Kurtz DW, Gilliland RL, Christensen-Dalsgaard J, Kjeldsen H, Brown TM, Benko JM, Chadid M, Derekas A, Di Criscienzo M, Guggenberger E, Kinemuchi K, Kunder A, Kollath Z, Kopacki G, Moskalik P, Nemeč JM, Nusp J, Silvotti R, Suran MD, Borucki WJ, Koch D, Jenkins JM, 2010. First Kepler results on Rr Lyrae stars, *The Astrophysical Journal Letters*, 713: L198-L203.

- Li XZ, Liu L, 2021. KIC 4762887: A near-contact binary or an ellipsoidal variable star? *New Astronomy* 84: (101539), 1-4.
- Lucy LB, 1967. Gravity-darkening for stars with convective envelopes. *Zeitschrift für Astrophysik*, 65: 89-92.
- Lucy LB, 1968. The Structure of Contact Binaries. *Astrophysical Journal*, 151: 1123-1135.
- Lucy LB, Wilson RE, 1979. Observational tests of theories of contact binaries *Astrophysical Journal*, Part 1, 231:502-513.
- Maceroni C, Milano L, Russo, G, 1983. Determination of parameters of W UMa systems. IV - BV Dra, BW Dra, EM Lac, SW Lac, *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 51: 435-442.
- Mochnicki SW, 1981. Contact binary stars, *Journal: Astrophysical Journal*, 245: 650-670.
- O'Connell DJK, 1951. The so-called periastron effect in close eclipsing binaries, *Riverview College Observatory publications*, 2: 85-100.
- Pecaut MJ; Mamajek EE, 2013. Intrinsic colors, temperatures, and bolometric corrections of pre-main-sequence stars, *The Astrophysical Journal Supplement*, 208 (1): 9, (22 sayfa).
- Prsa A, 2011. PHOEBE Scientific Reference PHOEBE version 0.30, Villanova University College of Arts and Sciences, Dept. of Astronomy And Astrophysics.
- Prsa A, Batalha N, Slawson RW, Doyle LR, Welsh WF, Orosz JA, Seager S, Rucker M, Mjaseth K, Engle SG, Conroy K, Jenkins J, Caldwell D, Koch D, Borucki W, 2011. Kepler eclipsing binary stars. I. catalog and principal characterization of 1879 eclipsing binaries in the first data release. *The Astronomical Journal*, 141 (3): 1-16.
- Prsa A, Zwitter T, 2005. A Computational guide to physics of eclipsing binaries. I. demonstrations and perspectives. *The Astrophysical Journal*, 628 (1): 426-438.
- Rucinski SM, 1969. The proximity effects in close binary systems. II. The bolometric reflection effect for stars with deep convective envelopes, *Acta Astronomica*, 19: 245-255.
- Rucinski SM, 1994. $M_V = M_V(\log P, \log T_e)$ Calibrations for W Ursae Majoris Systems, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 106: 462-471.
- Rucinski SM, Duerbeck HW, 1997. Absolute magnitude calibration for the W UMa-type systems based on Hipparcos data, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific (PASP)*, 109 (109): 1340-1350.
- Skelton PL, Smith DP, 2009. Modelling of W UMa-type variable stars, *South African Journal of Science*, 105:120-126.
- Slawson RW, Prša A, Welsh WF, Orosz JA, Rucker M, Batalha N, Doyle LR, Engle SG, Conroy K, Coughlin J, Gregg TA, Fetherolf T, Short DR, Windmiller G, Fabrycky DC, Howell SB, Jenkins JM, Uddin K, Mullally F, Seader SE, Thompson SE, Sanderfer DT, Borucki W, Koch D, 2011. Kepler eclipsing binary stars. II. 2165 eclipsing binaries in the second data release, *The Astronomical Journal*, 142:160 (14 sayfa).
- Terrell D, 2001. Eclipsing Binary Stars: Past, Present, and Future, *Journal of American Association of Variable Star Observer (JAVSO)*, 30: (15 sayfa).
- Terrell D, Gross J., Cooney Jr WR, 2012. A Bv Rc Ic Survey Of W Ursae Majoris Binaries, *The Astronomical Journal*, 143:99 (7 sayfa) .
- Van Hamme W, 1993. New limb-darkening coefficients for modeling binary star light curves. *Astronomical Journal*, 106 (5): 2096-2117.
- Wadhwa SS, 2005. Photometric analysis of southern contact binary stars, part 1: GZ Pup, AV Pup and II Aps. *Astrophys. Space Sci.* 300: 289–296.
- Wang JM, 1994. The Thermal relaxation oscillation states of contact binaries, *Astrophysical Journal*, 434: 277-282.
- Wesselink A J, 1969. Surface Brightnesses in the U, B, V system with applications of M_V and dimensions of stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 144 (3):297–311.
- Wilson RE, 1990. Accuracy and efficiency in the binary star reflection effect, *Astrophysical Journal*, 356, 613.
- Wilson RE, 1994. Binary-star light-curve models, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 106 (703): 921-94.
- Wilson RE, Devinney EJ, 1971. Realization of accurate close-binary light curves: application to MR Cygni. *Astrophysical Journal*, 166: 605-619.