



## Dokuz Tane Örten Çift Yıldız Sisteminde Eksen Dönmesi ve Işık-Zaman Etkisi Analizi

İbrahim Bulut<sup>1</sup> , Mehmet Süheyil Tarın<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Bölümü, Çanakkale

<sup>2</sup>Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Çanakkale

Geliş Tarihi/Received Date: 14.03.2022

Kabul Tarihi/Accepted Date: 20.12.2022

### Öz

Bu çalışmada dokuz tane örten çift yıldız sisteminin eksen dönmesi ve ışık-zaman etkisi, (O-C) analizi kullanılarak incelenmiştir. Analizlerden eksen dönmesi parametreleri ve çift sisteme bağlı muhtemel üçüncü cisme ilişkin parametreler belirlenmiştir. Dokuz sistem arasında en kısa eksen dönmesi dönemine sahip olan sistemin U Oph olduğu bulunmuştur ( $U = 19.7 \pm 1.2$  yıl). Bu çalışmada incelenen sistemler için, sistemlere çekimsel bağlı muhtemel üçüncü cisimlerin kütleleri,  $i = 90$  derece varsayımı altında,  $0.09 - 4.97 M_{\odot}$  aralığında hesaplanmıştır. Eksen dönmesine sebep olan fiziksel süreçlerin, gözlenen eksen dönmesi hızına olan katkıları da hesaplanmıştır. Gözlenen eksen dönmesine en büyük katkının (RR Lyn ve V889 Aql dışında) bileşen yıldızların eksenleri etrafında dönmesi ve karşılıklı çekim nedeniyle oluşturdukları basıklık etkilerden geldiği görülmüştür. RR Lyn ve V889 Aql sistemlerinde ise eksen dönmesine genel göreliliğin katkısının daha büyük olduğu bulunmuştur. Diğer sistemlerde ise bu etkinin katkısının %1 ile %13 arasında olduğu hesaplanmıştır. Dokuz sistem için gözlenen eksen dönmesine üçüncü cisim nedeniyle oluşan etkinin diğer etkiler yanında ihmal edilebilir büyüklükte olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** örten çift yıldız, eksen dönmesi, ışık-zaman etkisi

## Analysis of Apsidal Motion and Light-Time Effect in Nine Eclipsing Binaries

### Abstract

In this study, the apsidal motion and the light-time effect of nine eclipsing binary star systems were investigated by using (O-C) analysis. The apsidal motion and the third-body parameters were determined from the analyses. According to the results, the shortest apsidal motion period was calculated for U Oph ( $U = 19.7 \pm 1.2$  years). Third-body masses gravitationally bound to the systems were also found to be in the range of  $0.09 - 4.97 M_{\odot}$ . It has been determined that the greatest contribution to the apsidal motion rate (except RR Lyn and V889 Aql) comes from the effects of the components due to the rotation and the tidal effect. It was determined that the effect of General Relativity on the axis rotation was more significant in RR Lyn and V889 Aql systems. In other systems, this effect was calculated to be less than 15%. It has been determined that the third-body effect is negligible within the observed axis rotation for all systems.

**Keywords:** eclipsing binary stars, apsidal motion, light-time effect

## Giriş

Basık yörüngeli örten çift yıldız sistemleri, yıldızların içyapısı hakkında gözlemsel bilgilere ulaşmanın önemli bir aracıdır. Bu tür çift sistemlerde gözlenen eksen dönmesi etkisi astronomide yaklaşık yüzyıldır bilinmektedir (Cowling, 1938; Sterne, 1939). Eksen dönmesi, çift yıldızın yörünge asal eksenin uzayda dönmesi olarak tanımlanır. Eksen dönmesinin hızı, çift yıldız oluşturan bileşenlerin içyapısına bağlıdır. Bu nedenle eksen dönmesi hareketin incelenmesi, yıldız yapısı ve kuramsal evrim modellerinin gözlemsel testinin yapılmasına olanak sunar (Bulut vd., 2017; Claret vd., 2021). Ayrıca eksen dönmesi çalışmaları Güneş Sistemi dışında genel görelilik kuramının gözlem testini yapmak içinde kullanılır (Baroch vd., 2021; Guinan ve Maloney 1985). Bu çalışmalar eksen dönmesi dönemi hesaplanabilen örten çift yıldız sistemleri sayesinde gerçekleştirilmektedir.

Çok sayıdaki çift yıldız sisteminde olduğu gibi eksen dönmesi gösteren sistemlerde de üçüncü bir bileşenin varlığı gözlenebilmektedir. Bu tür çoklu sistemler, yıldız astrofiziğinde çok çeşitli süreçleri incelemek için mükemmel bir gök mekaniği laboratuvarı olarak hizmet ederler.

Bu çalışmada eksen dönmesi gösteren dokuz tane çoklu örten çift yıldız sisteminin eksen dönmesi ve ışık-zaman etkisi analiz yapılmış, eksen dönmesi ve muhtemel üçüncü cisme ilişkin parametreler belirlenmiştir. Ayrıca çift sisteme çekimsel olarak bağlı üçüncü cismin, eksen dönmesine etkisi de araştırılmıştır.

## Materyal ve Yöntem

### Sistemler

Bu çalışma için V889 Aql, TV Cet, HS Her, RW Lac, RR Lyn, U Oph, V1094 Tau, YY Sgr ve AO Vel örten çift yıldız sistemleri seçilmiştir. Seçilen dokuz örten çift yıldızda hem basık yörüngeli, hem de üçüncü cisme sahip olduğu çok uzun süredir bilinen sistemlerdir. Bu sistemler Bulut ve Demircan'ın (2007) basık yörüngeli örten çift yıldızlar kataloğunda da yer almakta olup farklı araştırmacılar tarafından fotometrik ve tayfsal çalışmaları yapılmış, dönem değişimleri incelenmiştir. Tablo 1'de sistemlere ilişkin literatürde yer alan son çalışmalardan elde edilen sonuçlar listelenmiştir. Bu tabloda çift yıldızın yörünge dönemi ( $P$ ), maksimum parlaklığı ( $m_v$ ) ve tayf türü yıldız kataloglarından alınmıştır. Tabloda yer alan eksen dönmesi dönemi ( $U$ ) ve üçüncü bileşenin kütlesi ( $m_3$ ) değerlerinin alındığı kaynak son sütunda verilmiştir.

**Tablo 1.** Sistemlerin Literatürdeki Çalışmalardan Alınan Bazı Parametreleri

Sistem	$P$ (gün)	$m_v$ (kadir)	Tayf türü	$U$ (yıl)	$m_3$ ( $M_\odot$ )	Kaynak
V889 Aql	11.120820	9.1	B9.5V+A0V	$26406 \pm 597$	1.6	Kıran vd. (2019)
TV Cet	9.103293	9.32	F2V+F5V	$25043 \pm 11760$	0.18	Bozkurt ve Değirmenci (2007)
HS Her	1.637434	8.97	B5V+A4V	$82.3 \pm 4.3$	1.72	Bozkurt ve Değirmenci (2007)
RW Lac	10.369220	11.0	G5V+G7V	$9000 \pm 1900$	0,41	Kim vd. (2018) Wolf vd. (2006)
RR Lyn	9.945078	6.03	A6IV+F0V	2000	0.1	Khaliullin ve Khaliullina (2002)
U Oph	1.677346	6.56	B5V+B5V	$20.7 \pm 4$	0,74	Bozkurt ve Değirmenci (2007)
V1094 Tau	8.988545	9.43	G0V+G3V	13600	0.17	Wolf vd. (2010)
YY Sgr	2.628475	10.73	B5V+B6V	$294 \pm 1.4$	0.73	Wolf vd. (2006)
AO Vel	1.584612	9.79	BpSi+B8V	$54.4 \pm 0.5$	4.4	Wolf vd. (2005)

Bulgular ve tartışma bölümünde Tablo 1'de verilen literatür sonuçları, bu çalışmada elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak tartışılmıştır.

## Eksen Dönmesi

Eksen dönmesi basık yörüngeli çift sistemlerde gözlenen bir olaydır. Bu olay çift yıldızın yörünge asal ekseninin uzayda dönmesidir. Eksen dönmesinin hızı çift yıldız yörüngesinin enberi noktasının boylamındaki değişimle ölçülür. Eksen dönmesine iki temel fiziksel etki sebep olmaktadır. Bunlarda birincisi eliptik yörüngeli çift sistemde bileşenlerin dönme nedeniyle kutuplardan basıklaşmaları ve karşılıklı çekim nedeniyle armutlaşmalarıdır. Bu etkilerden kaynaklanan enberi noktası boylamındaki değişim, toplam eksen dönmesine klasik katkı ( $\dot{\omega}_{klasik}$ ) olarak adlandırılır.

Diğer etki ise genel görelilik kuramından gelir. Bu kurama göre çift yıldız bileşenleri nokta kütle olsalar bile yörünge asal ekseninin uzayda döneceği öngörülür. Relativistik etkilerden kaynaklı yörünge enberi noktasının boylamındaki değişim (relativistik katkı) için Gimenez (1985) tarafından

$$\dot{\omega}_{rel} = 5,45 \times 10^{-4} \frac{1}{1-e^2} \left( \frac{M_1+M_2}{P} \right)^{2/3} \quad (1)$$

ifadesini vermiştir. Burada ( $M_1$ ) ve ( $M_2$ ) bileşenlerin kütleleri, ( $P$ ) ise yörünge dönemidir.

Eksen dönmesi gösteren bir çift sisteme çekimsel olarak bağlı üçüncü bir cismin bulunması enberi noktasının boylamındaki değişimi hızlandıracağı Martynov (1948) tarafından belirtilmiştir. Martynov (1948) üçüncü cisim etkisinin enberi noktası boylamındaki değişime katkısını

$$\dot{\omega}_3 = \frac{3}{8} \lambda m^2 + \frac{225}{32} \lambda^2 m^3 \quad (2)$$

denklemleri vermiştir. Burada

$$\lambda = \frac{m_3}{M_1+M_2+m_3} \quad (3)$$

ve

$$m = \frac{P_S}{P_3} \quad (4)$$

ifade edilir. Burada ( $m_3$ ) üçüncü bileşenin kütlesi, ( $P_3$ ) üçüncü bileşenin yörünge dönemi, ( $P_S$ ) ise yıldızıl dönemdir.

Bu durumda üçüncü bileşeni bulunan basık yörüngeli bir çift yıldız sisteminin ( $\dot{\omega}_{göz}$ ) enberi noktasının boylamındaki gözlenen toplam değişim

$$\dot{\omega}_{göz} = \dot{\omega}_{rel} + \dot{\omega}_{klasik} + \dot{\omega}_3 \quad (5)$$

biçiminde olur. Burada enberi noktasının boylamındaki toplam değişime; ( $\dot{\omega}_{rel}$ ) relativistik katkısı, ( $\dot{\omega}_{klasik}$ ) klasik katkısı, ( $\dot{\omega}_3$ ) ise üçüncü cisim etkisinden gelen katkısı göstermektedir.

## Eksen Dönmesi ve Işık-Zaman Etkisi Analizleri

Bu çalışma için hem eksen dönmesi hem de ışık-zaman etkisi gözlenen dokuz tane örten çift yıldız sistemi seçilmiştir. Seçilen tüm sistemler (V889 Aql, TV Cet, HS Her, RW Lac, RR Lyn, U Oph, V1094 Tau, YY Sgr ve AO Vel) basık yörüngeli örten çift yıldız sistemleridir. Sistemlerin eksen dönmesi ve ışık-zaman etkisi, (O-C) diyagramı analizi aracılığıyla incelenmiştir. (O-C) diyagramları oluşturulurken C değerlerinin hesaplanmasında Kreiner vd.'den (2001) alınan lineer ışık elemanları kullanılmıştır. Oluşturulan (O-C) diyagramlarında çift sistemin eksen dönmesi hareketinden kaynaklı değişimin üstüne binmiş, üçüncü bir cismin varlığının neden olduğu ışık-zaman etkisini gösteren değişimler gözlenmiştir (Şekil 1).

Eksen dönmesi hızını hesaplamak için Giménez ve García-Pelayo (1983) tarafından önerilen daha sonra Giménez ve Bastero (1995) tarafından revize edilen yöntem kullanılmıştır. Eksen dönmesi analizinde hesaplanan parametreler; yıldızıl dönem ( $P_s$ ) kavuşum dönemi ( $P_a$ ), yörünge enberi noktasının boylamındaki değişim ( $\dot{\omega}$ )'dır.

Üçüncü cismin sebep olduğu ışık-zaman etkisinin analizi için Irwin (1952) tarafından verilen

$$\tau = \frac{A}{\sqrt{1-e_3^2 \cos^2 \omega_3}} \left[ \frac{(1-e_3^2) \sin(\gamma + \omega_3)}{1+e_3 \cos \gamma} + e_3 \sin \omega_3 \right] \quad (6)$$

analitik formül kullanılmıştır. Burada ( $\tau$ ) üçüncü cismin neden olduğu ışık-zaman gecikmesi veya ilerlemesidir. ( $A$ ) ışık zaman etkisiyle oluşan dönemli değişimin yarı genliği (gün biriminde), ( $e_3$ ) ve ( $\omega_3$ ) sırasıyla üçüncü cismin yörüngesinin dışmerkezliği ve enberi noktasının boylamıdır.  $v$  ise örten çiftin kütle merkezinin bağlı yörünge üzerindeki konumunun gerçek anomalisidir.

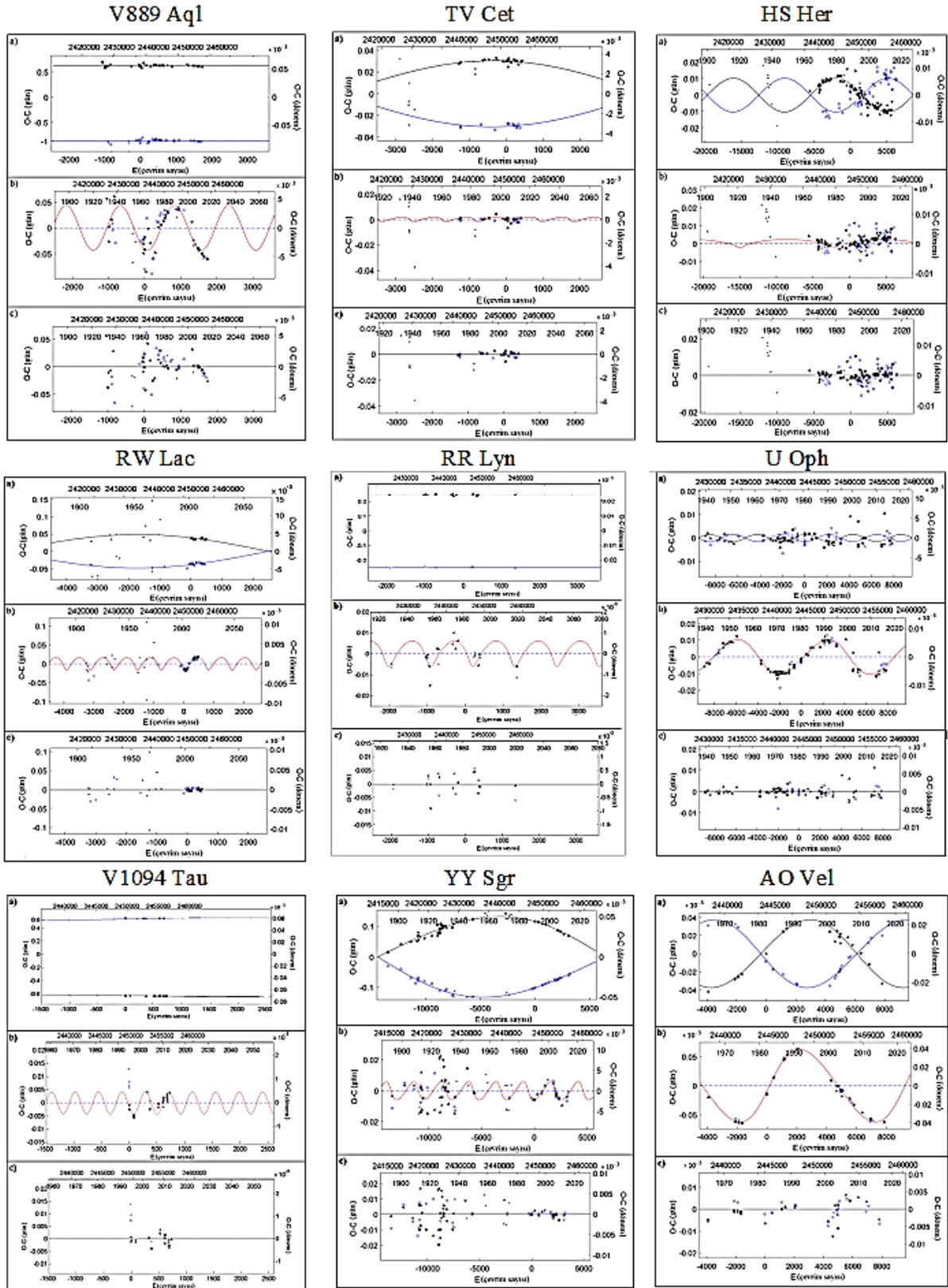
(O-C) analizlerinde (O-C) GATEWAY veri tabanında (Paschke and Brát, 2006) bulunan gözlenmiş minimum zamanları kullanılmıştır. Analizlerde farklı ağırlık verilerek (görsel = 1, fotografik = 3, fotometrik/CCD = 10) tüm minimum zamanları kullanılmıştır. (O-C) analizleri Zsche vd. (2009) tarafından yazılan MATLAB ortamında çalışan bilgisayar programı kullanılarak yapılmıştır. Analizlerden elde edilen eksen dönmesi parametreleri ile muhtemel üçüncü bileşene ait parametreler Tablo 2’de listelenmiştir. Tabloda analizlerde serbest bırakılan parametrelerin hataları parantez içinde verilmiştir. (O-C) eğrileri ile onların eksen dönmesi ve ışık-zaman etkilerini temsil eden kuramsal eğrileri ise Şekil 1’de gösterilmiştir. Şekil 1’in (a) panelinde (O-C) eğrilerine eksen dönmesi için yapılan çözümlerin, gözlemlerle uyumu, (b) panelinde bunların artıklarına üçüncü cisim etkisi için yapılan çözümlerin eğrileri, (c) panelinde ise kuramsal eğrilerden olan farklar görülmektedir.

### Bulgular ve Tartışma

Sunulan çalışmada dokuz basık yörüngeli örten çift yıldız sisteminin dönem analizi gerçekleştirilmiş, eksen dönmesi parametreleri ile muhtemel üçüncü cisme ilişkin yörünge parametreleri belirlenmiştir (Tablo 2). Üçüncü cisim kütlesi ve diğer hesaplamalarda kullanılan mutlak parametreler Bulut ve Demircan (2007) çalışmasından alınmıştır.

Sonuçlara göre en kısa eksen dönmesi dönemi U Oph için hesaplanmıştır ( $U= 19.7$  yıl). U Oph, HS Her ve AO Vel sistemlerinin eksen dönmesi dönemlerinin 100 yılın altında olduğu ve eksen dönmesinin oldukça hızlı olduğu görülmektedir. Bulunan sonuçlar Tablo 1’de verilen literatürdeki değerle karşılaştırıldığında TV Cet, V1094 Tau ve RW Lac için hesaplanan eksen dönmesi dönemlerinin literatürdeki değerlerden daha kısa, RR Lyn için ise daha uzun olduğu görülmektedir. Sonuçlardaki farklılıklar bu sistemlerin yavaş eksen dönmesi göstermeleri, dolayısıyla analiz edilen gözlem verilerinin eksen dönmesi döneminin çok küçük bir bölümünü kapsamamasından kaynaklandığı düşünülebilir. Bu nedenle sistemler için gelecekte yapılacak yeni minimum zamanı gözlemleri önemli olacaktır. Diğer sistemler için hesaplanan eksen dönmesi dönemleri Tablo 1’de verilen literatür sonuçlarıyla uyumludur.

V899 Aql ve AO Vel dışındaki sistemler için hesaplanan üçüncü cisim kütlesi  $1 M_{\odot}$ ’den küçük bulunmuştur. V899 Aql için hesaplanan üçüncü cismin kütesinin, çifti oluşturan bileşenlerin kütlelerine ( $2.4 + 2.2 M_{\odot}$ ) çok yakın olduğu ve AO Vel için hesaplanan üçüncü cisim kütesinin ise bileşenlerin kütlelerinden ( $4.4 + 3.6 M_{\odot}$ ) daha büyük olduğu görülmektedir. HS Her için bulunan üçüncü cisim kütlesi, Bozkurt ve Değirmenci (2007) tarafından verilen değerden oldukça küçük olduğu görülmektedir. Diğer sistemler için bulunan üçüncü cisim kütleleri Tablo 1’de verilen literatür sonuçlarıyla uyumludur.



**Şekil 1.** Sistemlerin Dönem Değişimleri

Grafiklerde birinci minimum zamanları içi dolu, ikinci minimum zamanları içi boş sembollerle gösterilmiştir. (a) Eksen dönmesi ve ışık-zaman etkisini içeren (O-C) diyagramları ve yapılan en iyi fitler, (b) (O-C) diyagramlarında eksen dönmesi etkisi çıkarıldıktan sonra kalan artıklara sadece ışık-zaman etkisi için yapılan fitler, (c) (O-C) diyagramlarına yapılan fitlerden kalan artıklar görülmektedir.

**Tablo 2.** Eksen Dönmesi ve Üçüncü Cisme İlişkin Parametreler

Parametre	V889 Aql	TV Cet	HS Her	RW Lac	RR Lyn	U Oph	V1094 Tau	YY Sgr	AO Vel
$T_o$ (HJD) 2400000+	38241.7516 (11)	52873.5259 (50)	47382.4226 (7)	52253.6438 (84)	44988.2530 (59)	44416.3857 (8)	49702.4467 (22)	48059.5775 (14)	45043.6704 (94)
$P_s$ (gün)	11.120769 (1)	9.1032913 (45)	1.6374337 (2)	10.369206 (6)	9.945073 (64)	1.6773459 (2)	8.988546 (44)	2.6284740 (2)	1.5846156 (23)
$P_o$ (gün)	11.120769 (1)	9.1038391 (45)	1.6375489 (2)	10.369823 (6)	9.945083 (64)	1.6777369 (2)	8.990485 (44)	2.628537 (2)	1.5847377 (23)
$e$	0.375 (13)	0.011(6)	0.012 (6)	0.0147 (45)	0.078 (25)	0.003 (2)	0.27 (5)	0.157 (4)	0.074 (2)
$\dot{\omega}$ (°/çevrim)	0.00045 (2)	0.0217 (2)	0.0253 (25)	0.0214 (1)	0.0004 (1)	0.0839 (84)	0.0019 (2)	0.0086 (13)	0.0277 (14)
$\omega_o$ (°)	127.66	187.95	229.4	216.84	176.87	176.26	333.08	214.3	100.14
$U$ (yıl)	25584 (2050)	414 (40)	63 (6)	478(20)	28405 (5600)	19.7 (1.2)	4635 (450)	300 (15)	56.3 (2.5)
$P_3$ (yıl)	45.78	21.71	58.65	22.42	30.24	38.3	11.07	18.7	39.32
$e_3$	0.0003	0.677	0.811	0.412	0.529	0.129	0.0007	0.406	0.196
$\omega_3$ (°)	117.65	218.28	277.76	8.76	4.71	177.21	4.06	164.89	356
$T_3$ (HJD) 2400000+	48727.742	53374.6	22977.299	60580.013	46640.964	37723.304	55221.68	53177.637	45180.414
$a_{12}\sin i_3$ (AB)	7.508656	0.3705208	0.4149502	2.8195711	1.099123	1.8123106	0.6925602	1.103098	1.09761325
$A$ (gün)	0.0434	0.0018	0.0024	0.0161	0.0062	0.0104	0.004	0.0059	0.0622
$f(m_3)$ ( $M_\odot$ )	0.2019737	0.0001079	0.0000208	0.0445892	0.0014516	0.004057	0.002712	0.0038368	0.8551106
$m_3(M_\odot)$ ( $i=90$ )	2.08	0.09	0.11	0.64	0.27	0.75	0.36	0.63	4.97

**Tablo 3.** Gözlenen Eksen Dönmesi İçinde Farklı Etkilerin Enberi Noktası Boylamındaki Değişim Miktarları

Yıldız Adı	$\dot{\omega}$ (obs)	$\dot{\omega}$ (rel)	% katkısı	$\dot{\omega}$ (klasik)	% katkısı	$\dot{\omega}_3$	% katkısı
V889 Aql	0.00045	0.000352	78	0.0000981	22	5.19E-08	0.0115266
TV Cet	0.0217	0.00024	1	0.0214	99	1.68E-08	0.0000776
HS Her	0.0253	0.00155	6	0.0238	94	3.01E-11	0.0000001
RW Lac	0.0214	0.00017	1	0.0212	99	1.59E-07	0.0007446
RR Lyn	0.000359	0.000267	74	0.0000917	26	2.24E-08	0.0062392
U Oph	0.0839	0.00173	2	0.0822	98	4.00E-10	0.0000005
V1094 Tau	0.00191	0.000223	12	0.00169	88	2.73E-07	0.0143029
YY Sgr	0.00862	0.00111	13	0.00751	87	4.40E-09	0.0000504
AO Vel	0.0277	0.00161	6	0.0261	94	1.80E-09	0.0000063

Sistemlerdeki eksen dönmesine neden olan etkilerin enberi noktası boylamının toplam ilerleme hızına olan katkıları da hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Tablo 3'de verilmiştir. Bu tabloya bakıldığında V889 Aql ve RR Lyn sistemlerin dışında gözlenen eksen dönmesi dönemine en büyük katkının bileşenlerin kendi eksenleri etrafında dönmesi ve karşılıklı çekim nedeniyle oluşan basıklık etkilerden (klasik katkı) geldiği görülmektedir. V889 Aql ve RR Lyn sistemleri dışındaki sistemlerde toplam eksen dönmesi oranı içinde relativistik katkının yaklaşık %1 ile %13 aralığında olduğu da belirlenmiştir. Buna karşın V889 Aql ve RR Lyn sistemlerinde toplam eksen dönmesi içinde genel görelilikten gelen katkının sırasıyla %78 ve %74 olduğu hesaplanmıştır. Diğer taraftan tüm sistemler için gözlenen eksen dönmesi içinde üçüncü cisimden kaynaklanan etkinin oranı diğer etkilerle karşılaştırıldığında çok küçük olduğu görülmektedir.

U Oph için üçüncü cismin yörünge döneminin, eksen dönmesi döneminden daha uzun olduğu, HS Her ve AO Vel sistemlerinde ise bu dönmelerin birbirine yakın değerlere sahip olduğu bulunmuştur. Diğer sistemlerde (V889 Aql, TV Cet, RW Lac, V1094 Tau ve YY Sgr) üçüncü cismin yörünge döneminin, eksen dönmesi döneminden çok kısa olduğu görülmektedir.

### Sonuç ve Öneriler

Eksen dönmesi ve ışık-zaman etkisi gösteren dokuz tane örten çift yıldız üzerine yapılan bu çalışmada eksen dönmesine katkı sağlayan fiziksel etkiler karşılaştırılmıştır. Buna göre eksen dönmesine en büyük katkının bileşenlerin karşılıklı çekimi ve bileşenlerin dönmesinden kaynaklanan etkilerden geldiği hesaplanmıştır. Genel Görelilik kuramından gelen etkinin eksen dönmesi içinde baskın olduğu iki sistemin (V889 Aql ve RR Lyr) eksen dönmesi dönemlerinin çok uzun olduğu görülmüştür. Toplam eksen dönmesi içinde üçüncü cismin katısının % 0.01 altında olduğu da bulunmuştur. Bu sistemler için ileride yapılacak hassas minimum zamanı gözlemleri elde edilen sonuçların denetlenmesi açısından önemli olacaktır.

### Destek ve Teşekkür

Bu çalışma, İbrahim BULUT danışmanlığında Mehmet Süheyil TARIN tarafından tamamlanan "Basık Yörüngeli Örten Çift Yıldız Sistemlerinde Eksen Dönmesi ve Üçüncü Cisim Etkisi" başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir (Tez No. 598913).

### Yazar Katkısı

*İbrahim Bulut*, deneysel ortamı hazırlandı ve deneysel süreci takip etti. *Mehmet Süheyil Tarin*, verilerin toplanması ve istatistiksel analizleri gerçekleştirdi. Yazarlar makaleyi birlikte yazdı, okudu ve onayladı.

### Etik

Bu makalenin yayınlanmasıyla ilgili herhangi bir etik sorun bulunmamaktadır.

### Çıkar Çatışması

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını belirtmektedir.

### ORCID

*İbrahim Bulut*  <https://orcid.org/0000-0002-7128-8887>

*Mehmet Süheyil Tarin*  <https://orcid.org/0000-0002-2948-6142>

### Kaynaklar

Baroch, D., Giménez, A., Ribas, I., Morales, J. C., Anglada-Escudé, G. ve Claret, A.(2021). Analysis of apsidal motion in eclipsing binaries using TESS data-I. A test of gravitational theories. *Astronomy & Astrophysics*, 649, A64. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202040004>

Bozkurt, Z. ve Değirmenci, Ö. L. (2007). Triple systems showing apsidal motion. *Monthly Notices of The Royal Astronomical Society*, 379 (1), 370-378. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.11971.x>

Bulut, İ. ve Demircan, O. (2007). A new catalogue of eclipsing binary stars with eccentric orbits. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 378(1), 179–181. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.11756.x>

Bulut, İ., Bulut A. ve Demircan, O. (2017). New observational data on the internal structure constants of main-sequence stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 468(3), 3342–3346. <https://doi.org/10.1093/mnras/stx593>

- Claret, A., Giménez, A., Baroch, D., Ribas, I., Morales, J. C. ve Anglada-Escudé, G., (2021). Analysis of apsidal motion in eclipsing binaries using TESS data: II. A test of internal stellar structure. *Astronomy & Astrophysics*, 654, A17. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141484>
- Cowling, T.G., (1938). On the motion of the apsidal line in close binary systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 98, 734. <https://adsabs.harvard.edu/pdf/1938MNRAS..98..734C>
- Giménez, A. ve Bastero, M.(1995). A revision of the ephemeris-curve equations for eclipsing binaries with apsidal motion. *Astrophysics and Space Science*, 226, 99-107. <https://doi.org/10.1007/BF00626903>
- Giménez, A. ve García-Pelayo, J.M. (1983). A new method for the analysis of apsidal motions in eclipsing binaries. *Astrophysics and Space Science*, 92, 203-222. <https://doi.org/10.1007/BF00653602>
- Giménez, A. (1985). General-Relativistic Periastron Advances in Eclipsing Binary Systems. *The Astrophysical Journal*, 297, 405-412. <https://adsabs.harvard.edu/pdf/1985ApJ...297..405G>
- Guinan, E. F. ve Maloney, F. P. (1985). The apsidal motion of the eccentric eclipsing binary DI Herculis - an apparent discrepancy with general relativity. *The Astrophysical Journal*, 90 (8), 1519–1528. <https://adsabs.harvard.edu/pdf/1985AJ.....90.1519G>
- Irwin, J. B.(1952). The determination of a light-time orbit. *Astrophysical Journal*, 116, 211-217. [https://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-iaarticle\\_query?1952ApJ...116..211I&defaultprint=YES&filetype=.pdf](https://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-iaarticle_query?1952ApJ...116..211I&defaultprint=YES&filetype=.pdf)
- Kiran, E., Bakış, V., Bakış, H. ve Değirmenci, Ö. L. (2019). Absolute Parameters and Apsidal Motion Of The Eccentric Binary V889 Aql. *Astrophysics and Space Science*, 364(214). <https://doi.org/10.1007/s10509-019-3699-5>
- Kim, C. H., Kreiner, J. M., Zakrzewski, B., Ogłóza, W., Kim, H. W. ve Jeong, M. J. (2018). A comprehensive catalog of galactic eclipsing binary stars with eccentric orbits based on eclipse timing diagrams. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 235(2), 41. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/aab7ef>
- Kreiner, J. M., Kim, C. H., & Na, I. S. (2001). *An atlas of OC diagrams of eclipsing binary stars*. Naukowe Akademii Pedagogicznej.
- Martynov, D. Ya.(1948). *Izv. Engelhardt Obs.* Kazan.
- Paschke, A. ve Brat, L. (2006). OC gateway, a collection of minima timings. *Open European Journal on Variable Stars*, 23, 13. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2006OEJV...23...13P/abstract>
- Sterne, T. E. (1939). Apsidal motion in binary stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 99, 451-462. <https://adsabs.harvard.edu/pdf/1939MNRAS..99..451S>
- Zasche, P., Liakos, A., Niarchos, P., Wolf, M., Manimanis, V. ve Gazeas, K. (2009). Period Changes in Six Contact Binaries, WZ and, V803 Aql, DF Hya, PY Lyr, FZ Ori, and AH Tau. *New Astronomy*, 14(2), 121-128. <https://doi.org/10.1016/j.newast.2008.06.002>
- Wolf, M., Kucakova, H., Hynek, T. ve Smelcer L. (2010). The triple system AO Monocerotis. *Astronomy and Astrophysics*, 514, A75. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201014181>
- Wolf, M., Niarchos, P. G., Gazeas, K. D., Manimanis, V. N., Kotkova, L., Paschke, A. ve Zejda, M.(2006). Eccentric eclipsing binary YY sagittarii. In Giménez, À., Guinan, E., Niarchos, P. ve Rucinski, S. (Eds.), *Close binaries in the 21st century: New opportunities and challenge* (pp. 179-181). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5027-5\\_44](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5027-5_44)



Wolf, M. ve Zejda, M.(2005). Apsidal motion in southern eccentric eclipsing binaries: V539 Ara, GG Lup, V526 Sgr and AO Vel. *Astronomy and Astrophysics*, 437(2), 545–551.  
<https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041868>

Wolf, M., Kotkova, L., Zejda, M. ve Brat, L. (2006). RW Lacertae: A new photometric triple star. *Information Bulletin on Variable Stars*, 5682, 1-4.  
<https://ibvs.konkoly.hu/pub/ibvs/5601/5682.pdf>