ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

V871 PER, V359 CAS ve CK AQR'NIN DÖNEM DEĞİŞİMLERİ

Fatma Betül KARCI

ASTRONOMİ ve UZAY BİLİMLERİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2025

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

V871 PER, V359 CAS VE CK AQR'NIN DÖNEM DEĞİŞİMLERİ

Fatma Betül KARCI

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mesut YILMAZ

Bu çalışmada, V871 Per, V359 Cas ve CK Aqr örten çift yıldızlarının dönem değişimleri incelendi. Literatürde mutlak parametreleri olmadığı için ilk olarak q-i taramasıyla bileşenlerinin en olası kütle oranları (q) belirlendi ve bu değerlere göre sistemlerin ışık eğrisi analizleri gerçekleştirildi. V871 Per, V359 Cas ve CK Aqr'nin kütle oranları sırasıyla 0.6, 0.53 ve 4.05 olarak bulundu. Yıldızların uzaklıkları ve yıldızlararası sönümleme değerleri kullanılarak da mutlak parametreler belirlendi. O-C grafikleri bu parametreler yardımıyla analiz edilerek, dönem değişimlerine dair parametreler ortaya kondu. V871 Per'in eksen dönmesi gösterdiği ve bu hareketinin periyodunun 70.6 yıl olduğu bulundu. V359 Cas'taki dönem değişiminin ise sisteme kütle çekimsel bağlı üçüncü cisimden kaynaklandığı saptandı ve bu üçüncü cismin yaklaşık 26.8 yıl periyotla yörüngede hareket ettiği ve kütlesinin 1.72 $M_\odot$ olduğu hesaplandı. Ayrıca, ikili yıldız sisteminin bileşenlerinin arasında kütle aktarımı olduğu ve bunun yörünge dönemini artırdığı belirlendi. Dönem artış hızı 1.84×10^{-8} gün/yıl, kütle transfer oranı 1.54×10^{-8} ($M_\odot$/yıl) olarak hesaplandı. CK Aqr'nin dönem değişimi ise iki farklı mekanizma ile açıklandı: biri sisteme bağlı üçüncü ve dördüncü cisimlerin varlığı, diğeri ise üçüncü cisim ve manyetik çevrim etkisiyle gerçekleşen dönem değişimidir. İlk yaklaşımda, üçüncü ve dördüncü cisimlerin kütleleri sırasıyla 0.37 ve 0.26 $M_\odot$ olarak bulundu. İkinci yaklaşımda ise üçüncü cismin kütlesi 0.43 $M_\odot$, manyetik çevrim periyodu 9.67 yıl ve manyetik alan şiddeti 17 kG olarak belirlendi.

Şubat 2025, 61 sayfa

Anahtar Kelimeler: Dönem değişimi, örten çift yıldız, O-C analizi, yıldızlar: V871 Per, V359 Cas, CK Aqr

ABSTRACT

MSc Thesis

PERIOD CHANGES OF V871 PER, V359 CAS AND CK AQR

Fatma Betül KARCI

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Astronomy and Space Science

Supervisor: Prof. Dr. Mesut YILMAZ

In this study, the period variations of the eclipsing binary systems V871 Per, V359 Cas, and CK Aqr were examined and analyzed. Since absolute parameters were not available in the literature, the component's most probable mass ratios (q) were initially determined by scanning q-i, and light curve analyses of the systems were performed based on these values. The mass ratios of V871 Per, V359 Cas, and CK Aqr were found as 0.6, 0.53, and 4.05, respectively. Using the stars' distances and interstellar absorption values, the absolute parameters were also determined. O-C diagrams were analyzed with these parameters, and period change parameters were derived. It was found that V871 Per exhibits absidal motion with a period of 70.6 years. The period variation in V359 Cas was caused by a third body with a mass of 1.72 $M_{\odot}$ and an orbital period of 26.8 years. Additionally, mass transfer between the components of the binary system was identified, which is increasing the orbital period. The period increase rate was calculated as 1.84×10^{-8} days/year, and the mass transfer rate was 1.54×10^{-8} ($M_{\odot}$/year). The period variation in CK Aqr was explained by two mechanisms: the presence of third and fourth bodies and the effect of the third body and magnetic cycle. In the first approach, the masses of the third and fourth bodies were found to be 0.37 and 0.26 $M_{\odot}$, respectively. In the second approach, the mass of the third body was calculated as 0.43 $M_{\odot}$, with a magnetic cycle period of 9.67 years and a magnetic field strength of 17 kG.

February 2025, 61 pages

Key Words: Period changes, eclipsing binary stars, O-C analysis, stars: V871 Per, V359 Cas, CK Aqr

TEŞEKKÜR

Bilgi ve deneyimleriyle bu tezi tamamlamamızı sağlayan danışmanım Prof. Dr. Mesut YILMAZ'a öncelikli teşekkürlerimi sunuyorum.

Eğitim dönemim boyunca sorularıma cevap veren ve bana destek olan sevgili hocalarım Prof. Dr. Selim O. Selam, Prof. Dr. Hakan Volkan Şenavcı, Dr. İbrahim Özavcı ve Dr. Engin Bahar'a teşekkür ediyorum.

Yüksek lisans eğitimim boyunca beraber hem eğlendiğimiz hem oturup ders çalıştığımız sevgili arkadaşım Tuğçe Tuncer'e, rasathanede bana destek olan Oğuzhan Karadeniz, Elif Şura Etişken, Merve Oylum, Minel Kasar, Furkan Akar, Alperen Kul, Anıl Temelci, Ezgi Sertkan, Ahmet Kutluay, Kerem Erdem, Korhan Kara, Eda Burcu Yorulmaz, adını sayamadığım bütün bölüm arkadaşlarıma ve beni bu süreçte destekleyen, işlerimi kolaylaştıran MTA'daki mesai arkadaşlarıma ayrı ayrı teşekkür ediyorum.

Hayatım boyunca hep yanımda olan, bana maddi ve manevi her konuda destek olan aileme; babam Bekir Karcı, annem Memnune Karcı ve kardeşim Galip Karcı'ya sonsuz sevgilerimi sunuyorum. Bir gün aile arası sohbette madem astronomiyi çok seviyorsun neden yüksek lisans yapmıyorsun diyerek benim bu yola girmeme vesile olan Atıf amcama da ayrıca teşekkür ediyorum. En büyük teşekkür ve minnet sizlere sevgili ailem...

Sevgili kuzenim, manevi kardeşim ve en yakın arkadaşım Ethem Günaydın sonsuza kadar kalbimde olacaksın...

Fatma Betül KARCI
Ankara, Şubat 2025

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI
ETİK i
ÖZET ii
ABSTRACT iii
TEŞEKKÜR iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ vi
ŞEKİLLER DİZİNİ viii
ÇİZELGELER DİZİNİ x
1. GİRİŞ. 1
2. KURAMSAL TEMELLER 4
2.1 Çift Yıldızlarda Dönem Analizi 4
2.1.1 Kütle aktarımı ve kütle kaybı 5
2.1.2 Eksen dönmesi 6
2.1.3 İlave cisim varlığı 10
2.1.4 Çevrimli manyetik aktivite 11
2.2 Işık Eğrisi Analizi 13
2.3 Kaynak Özetleri 14
2.3.1 V871 Per ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar 14
2.3.2 V359 Cas ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar 15
2.3.3 CK Aqr ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar 16
3. MATERYAL ve YÖNTEM 17
3.1 Fotometrik Eğriden Işık Parametreleri Çözümü 18
3.2 Sistemlere Ait Mutlak Parametreler 25
3.3 Minimum Zamanların Elde Edilmesi ve O-C Analizi 28
4. ANALİZ BULGULARI 31
4.1 V871 Per Dönem Analizi 31
4.2 V359 Cas Dönem Analizi 33
4.3 CK Aqr Dönem Analizi 36
5. TARTIŞMA ve SONUÇ 43
KAYNAKLAR 50
EKLER 54
ÖZGEÇMİŞ 61

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

a	Yarı-büyük eksen uzunluğu
a_{12}	Çift sistemin üçlü sistemin ortak kütle merkezi etrafındaki yörüngesinin yarı büyük eksen uzunluğu
$asini_3$	Üçüncü cismin yörüngesinin görünür yarı büyük ekseni
$asini_4$	Dördüncü cismin yörüngesinin görünür yarı büyük ekseni
A	Bolometrik albedo
B	Aktif yıldızın Gauss biriminde manyetik alan şiddeti
A_{LTE}	O-C eğrisinde sinüsün yarı genliği
α_{2000}	Ekvator koordinat sisteminde sağ açıklık
δ_{2000}	Ekvator koordinat sisteminde dik açıklık
σ	Stefan-Boltzmann sabiti ($\approx 5.67\times10^{-8}$ W m^{-2} K^{-4})
d	Parsek biriminde uzaklık
e	Yörünge dışmerkezliği
e_3	Üçüncü cismin yörüngesinin basıklığı
e_4	Dördüncü cismin yörüngesinin basıklığı
E	Çevrim sayısı
EA	Algol türü örten çift sistemleri
EB	β Lyr türü örten çift sistemler
EW	W UMa türü örten çift sistemler
$f(m_3)$	Kütle fonksiyonu
g	Çekimsel kararma sabiti
G	Evrensel çekim sabiti ($\approx 6.674\times10^{-11}$ m3 kg^{-1} s^{-2})
$i(°)$	Yörünge düzleminin bakış doğrultusuna dik düzlem ile yaptığı açı
$i_3(°)$	Üçüncü cismin yörünge eğikliği
k_2	İç yapı sabiti
$l_{1,2}$	Yıldızların göreceli ışınım oranları
$L_{1,2}$	Bileşen yıldızların ışınım güçleri
$M_{1,2}$	Bileşen yıldızların kütleleri
$M_\odot$	Güneş kütlesi birimi
P	Sistemin yörünge dönemi
P_a	Kavuşum dönemi
P_s	Yıldızıl yörünge dönemi
P_3	Üçüncü cismin yörünge dönemi
P_4	Dördüncü cismin yörünge dönemi
$R_\odot$	Güneş yarıçapı birimi
q	Bileşen yıldızların kütlelerinin oranı (M_2/M_1)
r	Ortalama kesirsel yarıçap
$R_{1,2}$	Bileşen yıldızların Güneş yarıçapı biriminde yarıçapları
T_0	Başlangıç minimum zamanı
t_{03}	üçüncü cismin en beri geçiş zamanı
$T_{1,2}$	Bileşen yıldızların etkin sıcaklıkları
V_{max}	maksimum görünür parlaklığı
$\Omega_{1,2}$	Bileşen yıldızların yüzey potansiyelleri
ω	Enberi noktasının boylamı
$\acute{\omega}$	Çevrim başına eksen dönmesinin açısal hızı
$\acute{\omega}_N$	Enberi noktası boylamının değişimindeki klasik katkı
$\acute{\omega}_{obs}$	Enberi noktasının boylamındaki değişimin gözlemsel değeri
$\acute{\omega}_{rel}$	Enberi noktasının ilerlemesindeki rölativistik katkının miktarı
ω_0	T_0'daki en beri boylamı

ω_3	Üçüncü cismin yörüngesinin enberi noktasının boylamı
ω_4	Dördüncü cismin yörüngesinin enberi noktasının boylamı
ϕ	Evre kayması
φ	Lekenin yıldız üzerindeki enlemi
λ	Lekenin yıldız üzerindeki boylamı
θ	Lekenin açısal yarıçapı
T_{eff}	Yıldızın etkin sıcaklığı
TF	Lekenin sıcaklık faktörü
$U_{(gün)}$	Eksen dönmesinin periyodu
ΔE	Açısal momentum transferi için gerekli enerji
ΔL	Aktif yıldızın ışınım gücündeki değişim
ΔJ	Açısal momentum transferi
ΔT_0	Başlangıç zamanı (T_0) düzeltmesi
ΔP	Sistemin dönem değişimi
χ^2	Veri uyum ölçüsü

Kısaltmalar

AAVSO	The American Association of Variable Star Observers
BJD	Barycentric Julian Date
CCD	Charge Coupled Device, Renkli Kamera Sistemleri
GCVS	General Catalog of Variable Stars
HJD	Heliocentric Julian Date
LTE	Light Time Effect, Işık Zaman Etkisi
MAST	Mikulski Archive for Space Telescopes
TESS	Transiting Exoplanet Survey Satellite
TIC	TESS Input Catalog

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Çift yıldızların ortak kütle merkezi etrafındaki hareketi ve oluşan ışık eğrisi (mavi – sıcak yıldız, sarı -soğuk yıldızı temsil etmektedir). 2
Şekil 2.1 A'nın değerine göre O-C eğrileri. 6
Şekil 2.2 Eksen dönmesi gösteren bir örten çift sistemin temsili O-C grafiği 7
Şekil 2.3 V871 Per'in O-C grafiği (Kim 2018) 14
Şekil 2.4 V359 Cas'ın O-C grafiği (Özkardeş 2019) 15
Şekil 2.5 CK Aqr'nın O-C grafiği (Bonnardeau 2021) 16
Şekil 3.1 CK Aqr için yapılan q-i taraması. Koyu alanlar χ2 değerinin en düşük olduğu yerleri göstermektedir. 19
Şekil 3.2 V359 Cas için yapılan q-i taraması. Koyu kırmızı alanlar χ2 değerinin en düşük olduğu yerleri göstermektedir. 19
Şekil 3.3 V871 Per için yapılan q-i taraması. Koyu alanlar χ2 değerinin en düşük olduğu yerleri göstermektedir. 20
Şekil 3.4 V871 Per'in yörünge eğikliği i=85.5° sabit tutularak yapılan q taraması 20
Şekil 3.5 CK Aqr'nın evrelendirilmiş ışık eğrisi (mavi noktalar) ve en iyi model fit (sürekli kırmızı eğri). Alttaki panel modelden olan artıkları göstermektedir. 23
Şekil 3.6 V359 Cas'ın evrelendirilmiş ışık eğrisi (mavi noktalar) ve en iyi model fit (sürekli kırmızı eğri). Alttaki panel modelden olan artıkları göstermektedir. 23
Şekil 3.7 V871 Per'in evrelendirilmiş ışık eğrisi (mavi noktalar) ve en iyi model fit (sürekli kırmızı eğri). Alttaki panel modelden olan artıkları göstermektedir. 24
Şekil 3.8 CK Aqr'nın 0.25 evresindeki 2D geometrisi. 24
Şekil 3.9 V359 Cas'ın 0.25 evresinde 2D geometrisi 25
Şekil 3.10 V871 Per'in 0.25 evresinde 2D geometrisi 25
Şekil 4.1 V871 Per O-C grafiği ve elde edilen en iyi model fit (kesikli çizgi lineer fit, sürekli çizgi ise en son modeli yani lineer+sinüs göstermektedir). Alt panel fitten kalan artıkları göstermektedir. 32
Şekil 4.2 V871 Per'in MCMC yöntemi ile elde edilen köşe grafiği ve parametre dağılımı 33
Şekil.4.3 V359 Cas'ın O-C grafiği ve elde edilen en iyi model fit (kesikli çizgi kütle aktarımını ifade eden parabol fitini, sürekli çizgi ise en son modeli yani parabol+sinüs göstermektedir). Alt panelde fitten kalan artıklar görülmektedir. 34
Şekil 4.4 Artıkların büyütülmüş görünümü. 35
Şekil 4.5 V359 Cas'ın MCMC yöntemi ile elde edilen köşe grafiği ve parametre dağılımı 36
Şekil 4.6 CK Aqr'nin dönem değişim (O-C) grafiği 38

Şekil 4.7 CK Aqr'ya uygulanan lineer ve sinüs fitleri: üst panelde lineer fit, orta panelde 3. cisim modellemesini (lineer fitten kalan artıklara yapılan fiti), alt panelde 4. cisim modellemesini (sinüs fitinden kalan artıklara yapılan fiti) göstermektedir.....38

Şekil 4.8 CK Aqr'ya uygulanan nihai en iyi model (lineer+sinüs(LTE3)+sinüs(LTE4)): üst panelde uygulanan toplam fiti, alt panelde fitten kalan artıkları göstermektedir.....39

Şekil 4.9 CK Aqr'nin MCMC yöntemi ile elde edilen köşe grafiği ve parametre dağılımı 39

Şekil 4.10 CK Aqr'ya uygulanan lineer ve sinüs fitleri: üst panelde lineer fit, orta panelde 3. cisim modellemesini (lineer fitten kalan artıklara yapılan fiti), alt panelde manyetik çevrim modellemesini (sinüs fitinden kalan artıklara yapılan fiti) göstermektedir.....41

Şekil 4.11 CK Aqr'ya uygulanan nihai en iyi model (lineer+sinüs(LTE)+sinüs(MA)): üst panelde uygulanan toplam fiti, alt panelde ise fitten kalan artıklar gösterilmektedir. 42

Şekil 5.1 V871 Per'in Claret ve Gimenez (1993) diyagramında gösterilmesi 44

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 CK Aqr ve V359 Cas fotometrik gözlem tarihleri, verilen tarihte toplanan veri sayısı, filtre bilgileri 17
Çizelge 3.2 MAST veri tabanından alınan TESS ışık eğrilerine ait sektör ve tarih bilgileri.....17
Çizelge 3.3 Aday yıldızların ışık elemanları 21
Çizelge 3.4 Işık eğrisi çözüm sonuçları.....22
Çizelge 3.5 Sistemlere ait mutlak parametreler.....28
Çizelge 3.6 T35 teleskopu ile yapılan gözlemlerden elde edilen minimum zamanlar....29
Çizelge 4.1 V871 Per'in O-C analizinden elde edilen parametreler 32
Çizelge 4.2 V359 Cas'ın O-C analizinden elde edilen parametreler.....35
Çizelge 4.3 CK Aqr'nin O-C analizinden elde edilen parametreler (ışık-zaman etkisi).40
Çizelge 4.4 CK Aqr'nin O-C analizinden elde edilen parametreler (manyetik çevrim) .42
Çizelge 5.1 V871 Per'in eksen dönmesi parametrelerinin önceki çalışmalarla kıyaslanması 43
Çizelge 5.2 V359 Cas'ın bu çalışmada elde edilen parametrelerinin önceki çalışmayla kıyaslanması 46
Çizelge 5.3 CK Aqr'nın bu çalışmada elde edilen parametrelerinin önceki çalışmayla kıyaslandığı tablo.....49

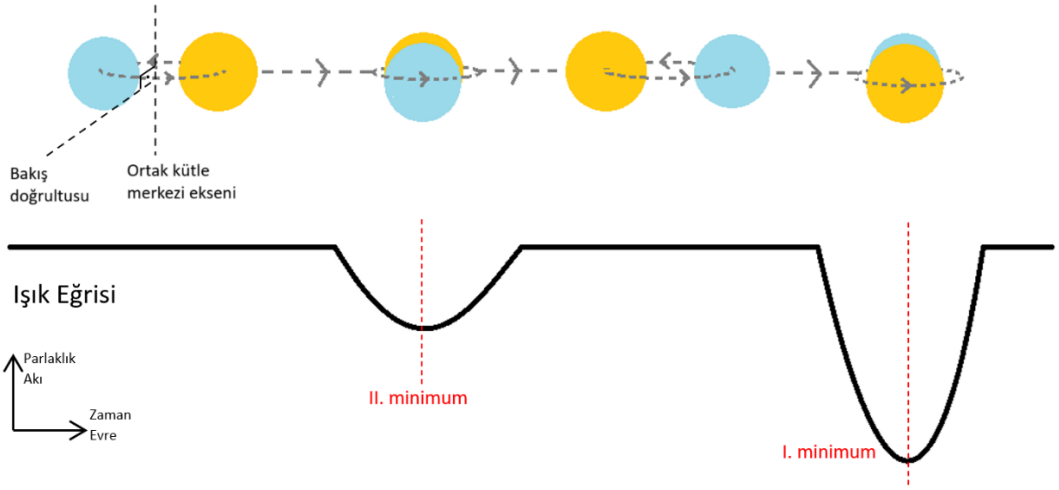
1. GİRİŞ

Çift yıldızlar, ortak kütle merkezi etrafında Kepler yasalarına göre hareket eden birbirlerine kütle çekimiyle bağlı yıldız çiftlerinden oluşmaktadır. Çift yıldızlar evrende oldukça yaygın olmalarıyla birlikte gözlenme durumlarına göre görsel, örten, astrometrik ve tayfsal çiftler olarak sınıflandırılmaktadırlar.

Örten çift yıldızlar ya da diğer adıyla tutulma gösteren çiftler, gözlemcinin bakış doğrultusuna dik yönde periyodik olarak birbirlerinin önünden geçmeleri nedeniyle gözlemlenen toplam parlaklıklarındaki değişimden tespit edilmektedirler (Şekil 1.1). Çift yıldız sisteminin bileşenleri arasındaki sıcaklık farkı nedeniyle tutulma esansında sistemin toplam parlaklığında azalmalar meydana gelir. Bunlara minimum zamanları denir ve bu tutulma zamanlarının analizi ile sistemin yörünge dönem değişim analizleri yapılabilmektedir. Bir yörünge döneminde iki adet minimum zaman gözlenir. Bunlardan soğuk olan bileşenin sıcak olanı örttüğü zaman I. minimum, sıcak olanın soğuk olanı örttüğü zaman ise II. minimum olarak adlandırılmaktadır. Bir minimumun gözlendiği zamandan aynı türde minimumun tekrar gözlendiği zamana kadar geçen süre sistemin yörünge dönemini *(P)* verir. Gözlenen herhangi bir minimum zamanı başlangıç bir minimum zamanı (T_0) olarak kabul edilir ve yörüngenin de çembersel olduğu kabul edilirse belirli bir yörünge dönemi için bir çift yıldızın herhangi bir zamandaki minimum zamanının ne zaman meydana geleceği $C = T_0 + P \times E$ formülü ile kolayca tespit edilebilmektedir (E: çevrim sayısı).

Çift yıldızların dönem değişimi incelenerek yıldızların fiziksel yapısı ve evrim durumlarına ilişkin bilgilere ulaşılabilmektedir. Uzaklık ve yörünge dönemi bilinen çift yıldız sistemlerinin bileşenlerinin kütleleri Kepler'in üçüncü yasasına göre hesaplanabilmektedir. Kütle bilgisi ise yıldızların evrim süreçlerinin anlaşılabilmesi için ihtiyaç duyulan en temel parametrelerden biridir. Kütle bilgisinin yanında bileşenlerin yarıçap ve ışınım gücü gibi temel parametreler de elde edilebilirse yıldızların fiziksel özellikleri ve evrim durumlarının daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır.

Yukarıdaki bir minimum zamanının ne zaman meydana geleceğine ilişkin verilen formül yörüngenin dairesel ve yörünge döneminin değişmediği varsayımına dayalıdır. Ancak, 19. Yüzyılın sonlarında Edward Charles Pickering, Algol (Beta Persei) örten çift sisteminin yörünge döneminin sabit olmadığı ve zamanla değiştiğini gözlemlemiştir (Pickering 1881).Vogel (1889) tarafından tayf ölçümleriyle yapılan çalışma, yörünge periyotlarının, bileşenler arasındaki kütle transferi veya sistemdeki üçüncü bir cismin kütle çekimsel etkisi nedeniyle değişebileceğine dair ilk doğrudan gözlemsel çalışmalardan birisi olmuştur. Daha sonraki çalışmalarda gökbilimciler periyot değişimlerini doğrulamış ve bunları çeşitli mekanizmalarla açıklarmışlardır. Buna göre dönem değişimine sebep olan en temel olgular; bileşenler arasında kütle aktarımı, sisteme kütle çekimsel bağlı üçüncü cismin varlığı, bileşenler arasındaki manyetik etkileşimler ve eksen dönmesidir. Bunlardan kütle aktarımı ve manyetik etkinlik sistemin doğrudan fiziksel yapısında değişiklikler olmasından kaynaklanan gerçek dönem değişimine sebep olurken üçüncü cisim etkisi (ya da ışık-zaman etkisi) ve eksen dönmesi ise gözlemciye göre sistemin uzaklığının değişmesinden kaynaklı olarak döneminin değişiyormuş gibi görünmesinden kaynaklanmaktadır. Yani gerçek bir dönem değişimi yoktur.



Şekil 1.1 Çift yıldızların ortak kütle merkezi etrafındaki hareketi ve oluşan ışık eğrisi (mavi – sıcak yıldız, sarı -soğuk yıldızı temsil etmektedir.)

Bu tez çalışması için seçilen yıldızlar, bahsi geçen dönem değişimine sebep olan mekanizmaların hepsini kapsamaktadır. Minimum zaman gözlemleri henüz çok fazla

olmayan ve literatürde çok az dönem değişimi çalışması bulunan yıldızlar, tez çalışması için uygun adaylar olarak düşünülmüştür. Bu yıldızlardan; V871 Per'in eksen dönmesi gösterdiği (Wolf vd. 2013), CK Aqr'nin ışık-zaman etkisinde dönem değişimi gösterdiği (Bonnardeau 2021) ve V359 Cas'ın ışık-zaman etkisi ve kütle aktarımı etkisinde dönem değişimi gösterdiği (Özkardeş 2019) literatürde yer almaktadır. Bu tez kapsamında eklenen yeni gözlemsel veriler ve yapılan daha detaylı çalışmalar ile sistemlere ait güncel parametrelerin elde edilmesi amaçlanmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Çift Yıldızlarda Dönem Analizi

Çift yıldızlarda dönem değişimi, sistemin yörünge periyodunun zamanla düzenli veya düzensiz bir şekilde değişmesi durumudur. Hesaplanan periyodik hareket ile gözlemlenen periyodik hareket arasında oluşan farklılıklar, sistemin tutulma ortası zamanlarındaki kaymalarla tespit edilir. Bu kaymaların analiz edilmesinde kullanılan yöntem ise "O-C analizi" olarak adlandırılır. Burada; İngilizce terimler olan *O*-observed yani gözlemlenen tutulma ortası zamanı, *C*-calculated yani hesaplanan tutulma ortası zamanı ifade etmektedir. Zamana göre oluşan bu farklar bir grafiğe aktarıldığında yorumlanabilir hale gelmektedir. Eğer sistemin döneminde hiçbir değişim olmazsa O-C farkı 0 olur ve grafikte sıfır civarında sabit bir değişim çıkar. Dönem değişimi varsa grafikte dönem değişimini meydana getiren mekanizmaların karakteristiğine uygun olarak bir takım anlamlı değişiklikler gözlemlenir. Bu değişiklikleri en iyi açıklayan fiziksel yaklaşımlarla modeller oluşturulur ve bunlara ait parametreler elde edilir.

$$(O - C) = O - (E \times P + T_0)$$

O-C farkı her bir minimum için hesaplanır. Burada T_0 ve P daha önce hesaplanmış olan ışık elemanlarıdır. Burada *E (Epoch)* çevrim sayısıdır yani T_0 anından sonra sistemin kaçıncı periyodik hareketinde olduğunu göstermektedir. Bu değer 1'in katları şeklinde olduğunda birinci minimum zamana denk geldiğini, 0.5'in katları şeklinde olduğunda ikinci minimum zamana geldiğini ifade eder ve basitçe gösterimi

$$\left(\frac{T - T_0}{P}\right) = tamsayı + kesir$$

şeklindedir. Burada *T ise* gözlenen minimum zamanıdır. Tamsayı kısmı çevrim değerini verirken kesirli kısım ise aynı çevrim içerisinde sayısal olarak 0 ile 1 arasında olup tutulmanın belirli evrelerine karşılık gelmektedir. Işık eğrilerinin evrelendirme işlemi de bu mantığa dayanarak yapılmaktadır. Ancak 0.5'in katları minimumlara denk gelmiyorsa

kullanılan ışık elemanları yanlış hesaplanmış olabilir ya da sistemde dönem değişimine sebep olan bir etki mevcuttur.

Çift yıldızlarda dönem değişimine sebep olan dört farklı mekanizma bulunmaktadır. Bunlar;

- Bileşenler arası kütle aktarımı,
- Eksen dönmesi,
- Sisteme kütle çekimi ile bağlı üçüncü bir cismin varlığı,
- Manyetik etkinliktir.

2.1.1 Kütle aktarımı ve kütle kaybı

Çift yıldız sistemlerinde, bileşenlerden biri Roche lobunu doldurduğunda diğer bileşene doğru kütle akmaktadır. Yıldızlarda kütle aktarımının bir sonucu olarak yörünge açısal momentumlarında da değişiklilere yol açmaktadır. Ayrıca, yıldızın merkezi bölgesi radyatif olsa bile, nükleer reaksiyon süreçlerindeki düzensizlikler madde hareketlerini tetikleyebilmekte ve bu durum merkezde açısal momentumun değişmesini gerektirmektedir (Selam 1998).

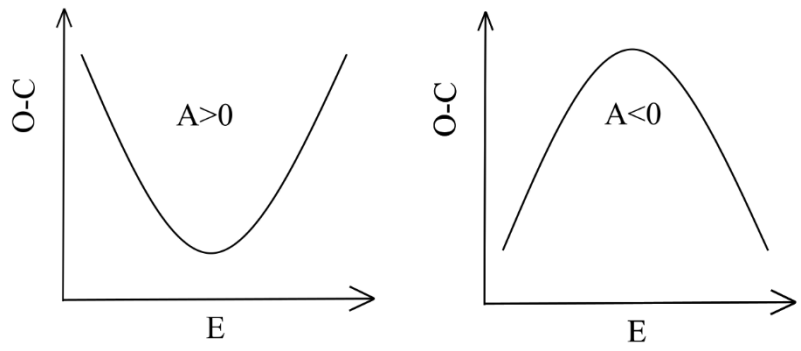
Etkileşen çift yıldız sistemlerinde (O-C) grafiğinde parabolik bir değişim gözlemleniyorsa, bu durum sistemin yörünge döneminin doğrusal bir hızla artmakta veya azalmakta olduğunu gösterir. Bu genellikle bileşenler arasında kütle aktarımı veya sistemden uzaya kütle kaybı gibi mekanizmalarla ilişkilendirilir.

Böyle bir O-C eğrisi,

$$O\text{-}C = \Delta T_0 + \Delta P \cdot E + A \cdot E^2$$

şeklinde ifade edilen bir modelle uyumlandırılır. Bu modelde, ΔT_0 başlangıç zamanı (T_0) düzeltmesini, ΔP sistemin dönem değişimini, A kütle aktarımını temsil eden katsayıyı ifade eder. Eğer $A>0$ ise; dönem düzgün olarak artmaktadır ve kütle aktarımı kütlece küçük bileşenden büyük olana doğru olduğunu göstermektedir. Eğer $A<0$ ise; dönem düzgün olarak azalıyordur ve kütle aktarımı kütlece büyük bileşenden küçük bileşene

doğrudur (Biermann ve Hall 1973). Buna ilişkin örnek bir O-C grafiği aşağıdaki Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1 *A*'nın değerine göre O-C eğrileri

Böyle bir durumda dönem değişimi (gün/çevrim);

$$\frac{dP}{dE} = 2A$$

gün başına dönem değişimi (gün/gün),

$$\Delta P_{(g)} = \frac{2A}{P}$$

dönemin yıllık değişimi (gün/yıl),

$$\Delta P_{(y)} = \frac{2A}{P} \cdot 365.25$$

ve kütle aktarım miktarı ($M_\odot$/gün)

$$\Delta M = \frac{\Delta P}{P} \frac{M_1 M_2}{M_1 - M_2} \frac{1}{3}$$

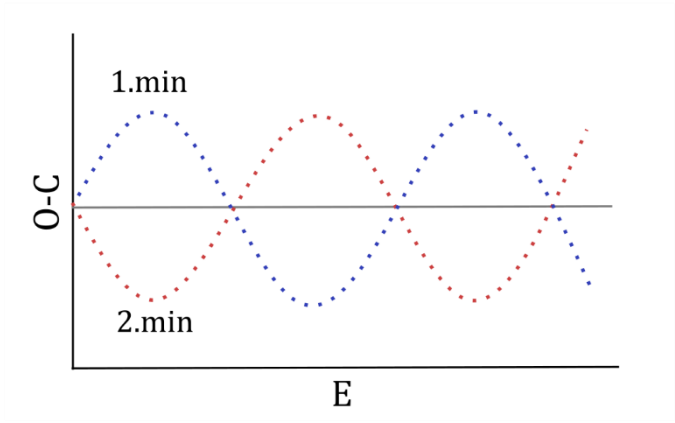
formülleriyle hesaplanmaktadır (Selam 1998).

2.1.2 Eksen dönmesi

Yakın çift yıldız sistemlerinde bileşenler, karşılıklı çekim kuvveti nedeniyle şekil bozulmasına uğrar. Çekim kuvvetinin büyüklüğüne bağlı olarak yıldızlar küresel simetriden sapar ve armut benzeri bir şekle dönüşürler. Ayrıca, kendi eksenleri etrafında

dönmeleri, kutuplardan basıklaşmalarına yol açar. Eğer yörünge eliptikse, bileşenler arasındaki mesafe sürekli değişir, bu da yıldızların potansiyelini etkiler ve biçimlerinde dalgalanmalara neden olur. Yörüngenin dış merkezliği arttıkça bu değişim daha belirgin olur. Yapılan uzun süreli gözlemler, bu tür durumlarda yörünge asal ekseninin uzayda döndüğünü göstermiştir; bu olaya eksen dönmesi (ing. apsidal motion) denir. Bu etki ayrıca rölativistik katkılardan da etkilenir. Einstein'ın rölativite teorisi, bileşen yıldızların nokta kütle olarak kabul edilmesi durumunda bile, çift yıldız sistemlerinin yörüngelerinde büyük eksenin bir dönme hareketi sergileyeceğini öngörmektedir. Bu durum, Merkür gezegeninin yörüngesinde gözlemlenen enberi noktasının ilerlemesine benzer şekilde, büyük çekim alanlarında bulunan küçük kütleli cisimlerin çevresindeki uzayın eğriliğinden kaynaklanmaktadır ve çift yıldız sistemlerinde de dikkate değer düzeyde eksen dönmesine neden olabilmektedir (Bulut 2003).

Dış merkezli yörüngeye sahip örten çiftlerde gerçek anlamda dönem değişimi olmadığı halde gözlemciye göre sistemin yarı büyük ekseninin dönmesi sonucu birinci ve ikinci minimumlar arasında 180 derece evre farkı oluşmasına neden olmaktadır. Bu fark O-C grafiğinde zıt fazlı iki ayrı sinüs eğrisi olarak görülür (bkz. Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Eksen dönmesi gösteren bir örten çift sistemin temsili O-C grafiği

Eksen dönmesi hareketin göreli olarak yakın çift yıldız sistemlerinde incelenmesi, yıldız iç yapı modellerini belirlemede oldukça kullanışlı yollarından biridir. Yıldız bileşenlerinin dönme ve kütleçekimsel etkileşimler nedeniyle küresel simetriden sapması,

Kepler yörüngesini bozarak, yıldızların denge durumlarındaki iç yoğunluk dağılımını araştırma imkânı sunar (Gimenez ve Garcia-Pelayo 1983).

Gimenez ve Bastero (1995) eksen dönmesi gösteren sistemler için minimum zamanları hesaplama formülü olarak aşağıdaki ifadeyi sunmuştur:

$$T = T_0 + P_S E + \frac{P_a}{2\pi}\left\{(2j-3)\left[A_1 \cos\omega - \frac{1}{4}A_3 \cos 3\omega + \frac{1}{16}A_5 \cos 5\omega\right] + \frac{1}{2}\left[A_2 \sin 2\omega - \frac{1}{4}A_4 \sin 4\omega + \frac{1}{16}A_6 \sin 6\omega\right]\right\}$$

Burada birinci ve ikinci minimum için *j* sırayla 1 ve 2 dir. T_0; başlangıç minimum zamanı, *E*; başlangıçtan bu zamana geçen çevrim sayısını, P_s; yıldızıl yörünge dönemini ve P_a; kavuşum dönemini göstermektedir. Formülde *A* katsayısı, yörünge eğimi *i* ve yörünge basıklığı *e*'ye bağlı bir katsayıyı göstermektedir (bkz. Gimenez ve Bastero 1995). Denklemdeki ω ise enberi noktasının boylamıdır ve

$$\omega = \omega_0 + \acute{\omega} E$$

şeklinde verilmektedir. Burada ω_0, T_0' daki en beri boylamı, $\acute{\omega}$ çevrim başına eksen dönmesinin açısal hızıdır. Yıldızıl dönem ile kavuşum dönemi arasındaki bağıntı ise,

$$P_s = P_a(1 - \acute{\omega}/360°)$$

ve eksen dönmesinin periyodu $U_{(gün)}$,

$$U = 360° P_a/\acute{\omega}$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır.

Eksen dönmesinin miktarı, yörüngenin enberi noktasındaki ilerlemeyle ölçülür. Enberi noktasının ilerlemesindeki rölativistik katkının miktarı,

$$\acute{\omega}_{rel} = 5.45 \cdot 10^{-4} \frac{1}{1-e^2}\left(\frac{M_1 + M_2}{P}\right)^{2/3}$$

bağıntısı ile (Gimenez 1985) hesaplanmaktadır. Eğer enberi noktasının boylamındaki değişimin gözlemsel değeri ($\acute{\omega}_{obs}$) belirlenebilirse, enberi noktası boylamının değişimindeki klasik katkı

$$\acute{\omega}_N = \acute{\omega}_{obs} - \acute{\omega}_{rel}$$

eşitliğinden bulunabilmektedir.

Eksen dönmesi çalışmaları, yıldızın iç yapı sabitini (k_2) gözlemsel olarak belirlemenin en önemli yollarından biridir. Ancak, örten çift yıldız sistemlerinde eksen dönmesi döneminin belirlenmesi, bileşen yıldızların iç yapı sabitlerini ayrı ayrı hesaplamaya olanak vermez; yalnızca sistem için ortalama bir k_2 değeri bulunabilmektedir. Kopal (1978) iç yapı sabitini şu eşitliklerden elde etmiştir:

$$\frac{P_a}{U} = \frac{\acute{\omega}_N}{360} = c_{21}k_{21} + c_{22}k_{22}$$

Burada c katsayılarının yaklaşık değerleri

$$c_{2i} = r_i^5 \left[\left(\frac{\Omega_i}{\Omega_k} \right)^2 \left(1 + \frac{m_{3-i}}{m_i} \right) f(e) + 15 \frac{m_{3-i}}{m_i} g(e) \right]$$

Bu eşitlikte f ve g yörünge dış merkezliğinin (e) fonksiyonudur ve

$$f(e) = \frac{1}{(1-e^2)^2}$$

$$g(e) = \frac{(8 + 12e^2 + e^4) f(e)^{2.5}}{8}$$

biçiminde ifade edilir. Burada r bileşenlerin kesirsel yarıçapları ve $\frac{\Omega_i}{\Omega_k}$ yıldızların eksenleri etrafındaki açısal dönme hızları ile yörünge açısal hızı arasındaki orandır. Yapılan gözlemsel çalışmalar armutlaşma kuvvetlerinin maksimum olduğu enberi noktasında bileşen yıldızlarda eş-dönmede olduğunu ve

$$\left(\frac{\Omega_i}{\Omega_k} \right)^2 = \frac{1+e}{(1-e)^3}$$

yaklaşımının yazılabileceğini göstermiştir (Kopal 1978).

2.1.3 İlave cisim varlığı

Çift yıldız sistemine kütle çekimsel olarak bağlı ilave bir cisim olduğunda ikili sistemin gözlenen minimumlarında dönem değişimi gözlenir. Bu durum, ikili sistemin ilave sistemle birlikte oluşturduğu ortak kütle merkezi etrafında hareket etmesinden kaynaklanmaktadır. Bu değişimi oluşturan etkiye aynı zamanda ışık-zaman etkisi (ing. light-time effect - LTE) de denmektedir. Böyle bir etki O-C grafiğinde sinüs biçimli bir eğri oluşturur. Irwin (1952, 1959) ışık-zaman etkisi gösteren bir O-C eğrisinin şu şekilde ifade edilebileceğini göstermiştir:

$$O - C = \frac{A_{LTE}}{\sqrt{(1 - e_3^2 cos^2 \omega_3)}} \left\{ \left[\frac{1 - e_3^2}{1 + e_3 \cos v} \sin(v + \omega_3) \right] + e_3 \sin \omega_3 \right\}$$

Burada A_{LTE}, gün biriminde O-C eğrisinde sinüsün yarı genliğidir ve.

$$A_{LTE} = \frac{1}{2} \left[(O - C)_{max} - (O - C)_{min} \right] = \frac{a_{12} \sin i_3 \sqrt{(1 - e_3^2 cos^2 \omega_3)}}{173.15}$$

bağıntısı ile verilir. Bu bağıntıdaki a_{12}, e_3, i_3 ve ω_3 sırasıyla, çift sistemin üçlü sistemin ortak kütle merkezi etrafındaki yörüngesinin yarı büyük eksen uzunluğu, üçüncü cismin yörünge basıklığı, yörünge eğikliği ve yörüngesinin enberi noktasının boylamıdır. Denklemde verilen v, gerçek anomali olarak adlandırılır ve üçüncü cismin enberiden geçiş zamanı T_3 ve bu cismin yörünge dönemi P_3'ü içeren Kepler denklemine göre her bir gözlem zamanına karşılık gelen yörüngenin gerçek ayrıklığını ayrı ayrı hesaplar. 173.15 sabiti ise AB/gün biriminde ışık hızıdır.

Sistemde üçüncü cismin minimum kütle değeri $f(m_3)$ kütle fonksiyonu ile hesaplanabilmektedir.

$$f(m_3) = \frac{(a_{12} \sin i_3)^3}{P_3^2}$$

Üçüncü cismin yörünge eğikliği i_3, O-C eğrisinden hesaplanamadığı için yaklaşık olarak ikili sistemin yörünge eğikliği i'ye (ikili sistem ile aynı yörünge eğikliği ile ortak kütle merkezi etrafında yörünge hareketi yaptığı varsayımı ile) eşit alınabilmektedir. Eğer birinci ve ikinci birleşenin kütleleri de biliniyorsa,

$$f(m_3) = \frac{(a_{12} \sin i_3)^3}{P_3^2} = \frac{(m_3 \sin i_3)^3}{(m_1 + m_2 + m_3)}$$

üçüncü cismin kütlesi hesaplanmış olur. Üçüncü cismin üçlü sistemin ortak kütle merkezi etrafındaki yörüngesinin yarı büyük ekseni ise,

$$a_3 = \frac{a_{12}(m_1 + m_2)}{m_3}$$

bağıntısından hesaplanmaktadır.

2.1.4 Çevrimli manyetik aktivite

Bazı örten çift sistemlerde, manyetik olarak aktif bileşenin değişken formasyonu, sistemin dönüş hareketindeki açısal momentumu etkileyen önemli bir faktördür. Manyetik olarak aktif yıldızlarda, yıldız rüzgarları ve koronal kütle atımları nedeniyle açısal momentum kaybı meydana gelir. Bu kayıp, bileşenlerin birbirine yaklaşmasına ve yörünge periyodunun azalmasına yol açabilir. Ayrıca, manyetik alanın gelgit etkilerini değiştirmesi ve yıldızın yapısal değişiklikleri periyotta dalgalanmalara sebep olabilir. Tüm bu süreçler sonucunda, sistemin yörünge periyodu zamanla değişim göstermektedir. Bu değişim, $\Delta P/P \approx 10^{-5}$ genliğinde çevrimli olarak meydana gelmektedir ve O-C eğrisinde sinüs şeklinde görülmektedir. Hall (1989) kromosferik aktif RS CVn yıldızları ile geç tayf türü bileşene sahip Algol tipi yıldızlarda manyetik etkinlik kaynaklı dönem değişimlerini incelemiş, Applegate (1992) ise aktif yıldızın iç ve dış katmanı arasındaki açısal momentumunun çevrimli olarak değişimini sağlayacak bu mekanizmayı açıklayan bir model sunmuştur. Bu model, manyetik aktif yıldızın ışınım gücünün $\Delta L/L \approx 0.1$, diferansiyel dönmesinin $\Delta\Omega/\Omega \approx 0.01$ seviyesinde bir değişim yaratmaktadır. Enerji korunumu gereği bu değişim birkaç kilo Gauss civarında bir manyetik alan şiddetine

neden olarak sistemin açısal momentumu değiştirecek bir tork üretmektedir (Applegate, 1992).

Manyetik aktiviteye bağlı dönem değişimlerini modellemek için oluşturulan O-C eğrisi şu formülle ifade edilmektedir (Applegate 1992);

$$O - C = \beta + Asin\left(2\pi \frac{E - E_s}{P_s}\right)$$

Bu formülde; β sabit bileşen (O-C eğrisinin temel doğrusal kısmını temsil eder), A sapmanın genliği, E çevrim sayısı, E_s çevrim başlangıcındaki tutulma sayısı, P_s manyetik çevrimin dönemidir.

Bu mekanizmaya göre O-C eğrisinde çevrimin dönemi P_{sin} ve eğrinin yarı genliği A_{sin} gün biriminde alınırsa dönem değişim miktarı;

$$\frac{\Delta P}{P} = 2\pi \frac{A_{sin}}{P_{sin}}$$

ile verilmektedir. Böyle bir dönem değişiminin neden olduğu açısal momentum transferi de;

$$\Delta J = -\frac{GM^2}{R}\left(\frac{a}{R}\right)^2 \frac{\Delta P}{6\pi}$$

ile hesaplanabilir. Burada M ve R sırasıyla aktif bileşenin kütlesi ve yarıçapı, a ise bileşenler arası uzaklıktır. G kütle çekim sabitidir. Açısal momentum transferi için gerekli enerji;

$$\Delta E = \omega_d \Delta J + \frac{(\Delta J)^2}{2\, I_{etkin}}$$

formülü ile verilmektedir. Burada; ω_d ve I_{etkin} yıldızın iç yapısıyla ilgili ilişkili değerlerdir.

Enerji konvektif katmanda tutuluyorsa aktif yıldızın ışınım gücündeki değişim;

$$\Delta L = \pi \frac{\Delta E}{P_{sin}}$$

bağıntısıyla belirlenir. Aktif yıldızın Gauss biriminde manyetik alan şiddeti ise;

$$B^2 = 10 \frac{GM^2}{R^4} \left(\frac{a}{R}\right)^2 \frac{\Delta P}{P_{sin}}$$

formülü ile hesaplanabilmektedir. Burada M ve R aktif yıldızın kütle ve yarıçap parametreleridir.

2.2 Işık Eğrisi Analizi

Yıldızların ışık eğrileri, zamanla değişen parlaklıklarının grafiksel bir temsili olup, bu eğriler yıldızların fiziksel ve geometrik özelliklerini anlamada önemli bir araçtır. Işık eğrilerinin analizi sayesinde çift yıldız sistemlerinde, bileşen yıldızların kütleleri, yarıçapları, ışınım güçleri, yörünge eğikliği ve yıldızların küresellikten sapma miktarları gibi birçok parametre elde edilebilmektedir.

1960'ların sonlarına doğru, gelişen bilgisayar teknolojisiyle birlikte, Roche modeline dayalı sentetik ışık eğrisi yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemde, çift yıldız sistemlerini modellemek için çeşitli fiziksel ve geometrik parametreler bir araya getirilir ve daha sonra elde edilen sentetik ışık eğrisi gözlemlerle uyum sağlanana kadar deneme-yanılma veya diferansiyel düzeltme gibi tekniklerle optimize edilir. Gözlemlerle iyi bir uyum sağlandığında, sentetik modelden elde edilen parametreler, sistemin fiziksel özelliklerini temsil eder.

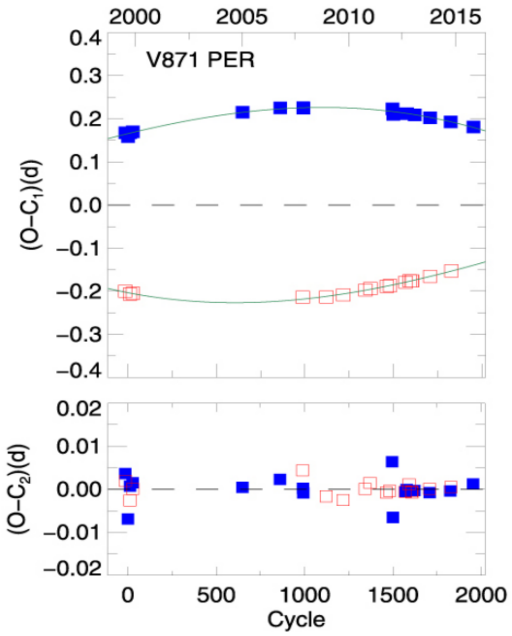
Işık eğrisi analiz yöntemlerine; Wilson ve Devinney (1971-1973), Lucy (1973), Rucinski (1973) ve Binnendijk (1977) çalışmaları örnek olarak gösterilebilir. Işık eğrisi analizi ile sistemin eğiklik (i), bileşenlerin kütle oranı (q) ve sıcaklıkları (T_1 ve T_2) gibi parametreleri belirlenebilirken, dikine hız eğrilerinin de analize dahil edilmesiyle sistemin mutlak parametre değerleri doğrudan (a, M_1, M_2, R_1, R_2) hesaplanabilmektedir.

Dönem değişimi incelenen çift yıldız sistemlerinde, analizlerin detaylı şekilde yapılabilmesi için sistemlerin mutlak parametrelerine ihtiyaç vardır. Bu nedenle, tez kapsamında dönem analizi gerçekleştirilen üç örten değişen çift sistemin literatürde mutlak parametrelerinin bulunmaması nedeniyle, ışık eğrisi analizleri de çalışmaya dahil edilmiştir.

2.3 Kaynak Özetleri

2.3.1 V871 Per ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar

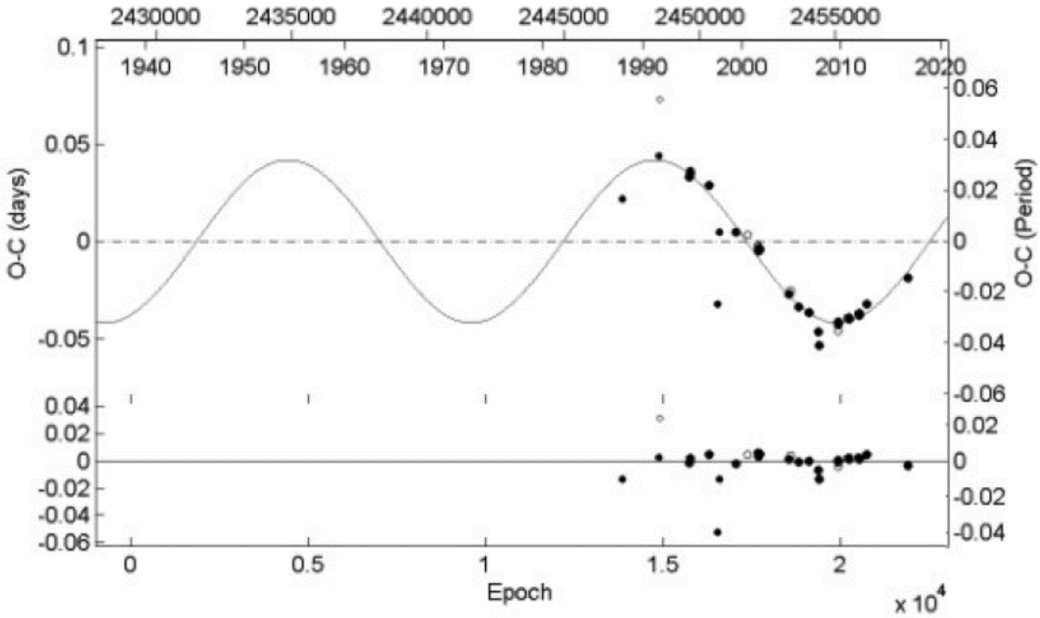
V871 Per (GSC 3708-1325; BD+56 704; V_{max} = 10^{m}.89) Hardorp vd. (2000) tarafından 1959-1965 tarihleri arasında yapılan birçok çalışmanın bir araya getirildiği katalogda OB tayf türünden bir yıldız olarak yer almıştır. Otero vd. (2004) sistemi dışmerkezliğe sahip (e = 0.24) Algol türü bir örten çift sistem olarak ilk kez tanımlamışlardır. Dönem analizi ilk olarak Wolf vd. (2013) tarafından yapılmış ve sistemin eksen dönmesi gösterdiği belirtilmiştir. Eksen dönme dönemi 71 yıl olarak, sistemin dışmerkezliği de 0.235 olarak belirlenmiştir. Daha sonra Kim vd. (2018) tarafından yapılan dönem analizinde ise eksen dönmesinin dönemi 72.3 yıl, dışmerkezliği ise 0.234 olarak yeniden belirlenmiştir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 V871 Per'in O-C grafiği (Kim 2018)

2.3.2 V359 Cas ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar

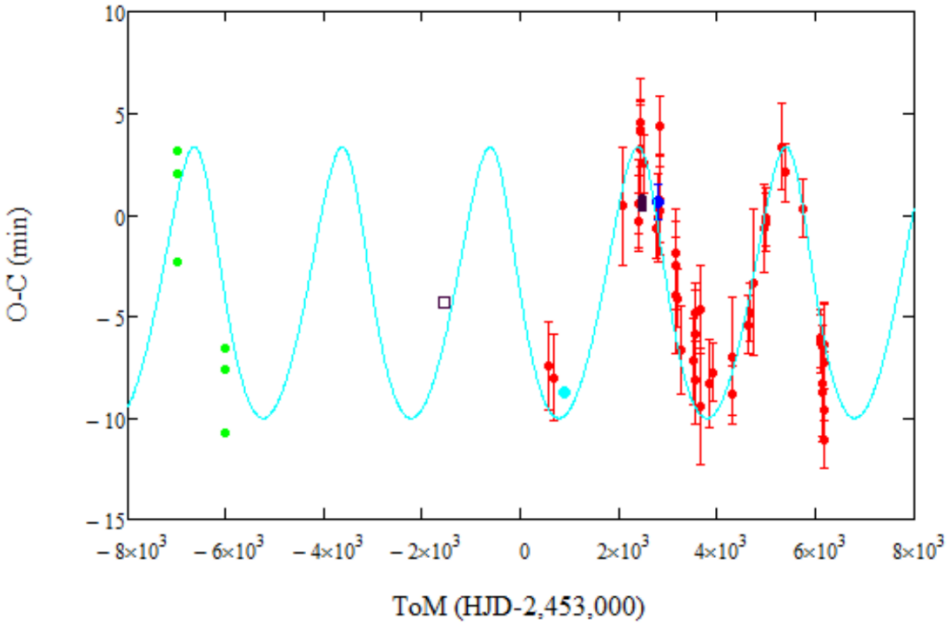
V359 Cas (GSC 4008-1283; V_{max} = $12^{m}.47$) Hoffmeister (1949) tarafından ilk kez bir değişen çift yıldız sistem olarak belirlenmiştir. Agerer ve Huebscher (1997)'in hazırladığı 95 çift yıldız sistemini içeren katalogda V359 Cas'ın pulsasyon gösterdiği bildirilmiştir. Malkov vd. (2006) çalışmasında sistemin gözlemlenen ışık eğrisi türü β Lyrae (EB), dönemi 1.3039 gün ve tayf türü A0 olarak sunulmuştur. Avvakumova vd. (2013) 7200 örten değişen yıldızın morfolojisini ve parametrelerini içeren bir katalog yayımlamıştır. Bu kataloğa göre V359 Cas'ın evrimsel sınıfı, Algol tipi bir yıldız çifti olarak değerlendirilmiştir. Sistemin ışık eğrisi ve dönem analizi ise Özkardeş (2019) tarafından yapılmış ve sisteme çekimsel bağlı bir üçüncü cisim tespit edilmiştir (Şekil2.4). Üçüncü cismin kütlesi 3.67 $M_{\odot}$ bulunurken, cismin ikili sistem etrafındaki yörünge dönemi ise 37 yıl olarak hesaplanmıştır. Işık eğrisi analizi sonucunda ise birinci bileşenin kütlesini 6.75 $M_{\odot}$, ikinci bileşenin kütlesini ise 2.25 $M_{\odot}$ bulmuştur.



Şekil 2.4 V359 Cas'ın O-C grafiği (Özkardeş 2019)

2.3.3 CK Aqr ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar

Ck Aqr, ilk kez Shapley ve Hugues (1935) tarafından değişen yıldız olarak keşfedilmiştir. Tsesevich (1964) çiftin yörünge dönemini 0.124 gün olarak hesaplamıştır ve yıldızı GCVS kataloğuna δ Sct türü örten değişen olarak tanımlamıştır. Daha sonra Le Borgne vd.'nin (1989) sönük δ Sct yıldızlar üzerine yaptıkları çalışmada CK Aqr'nin yanlış sınıflandırıldığını ve 0.2833 gün döneme sahip W UMa türü bir değişen yıldız olduğunu tespit etmiş ve tayf türünü G5-G8 olarak belirlemişlerdir. Bunun yanında literatüre 6 adet minimum zaman katkısı da yapmışlardır. CK Aqr'nin dönem değişimi Bonnardeau, M. (2021) tarafından ilk kez incelenmiştir. 2005 – 2020 yılları arasında minimum zaman gözlemi yaparak 49 minimum zaman elde etmiştir. Yaptığı dönem analizi sonucunda O-C grafiğindeki sinüsün periyodundan, sisteme kütle çekimsel olarak bağlı ve dönemi 8.2 yıl olan üçüncü bir cismin varlığını tespit etmiştir. (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 CK Aqr'nın O-C grafiği (Bonnardeau 2021)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu tez çalışmasında CK Aqr ve V359 Cas'ın fotometrik gözlemleri Ankara Üniversitesi Kreiken Rasathanesi'nde bulunan 35 cm çaplı (Meade LX200 14") teleskop ve ona bağlı Apogee ALTA U47 CCD kamera kullanılarak gerçekleştirildi. Fotometreik gözlemlerden yeni minimumlar elde edildi. Bu verilerin yanı sıra V359 Cas'ın TESS veri tabanında bulunan ışık eğrileri de kullanıldı. Bu ışık eğrilerinden de yeni minimum zamanlar hesaplandı ve O-C analizine dahil edildi. Çalışmada bir diğer yıldız olan V871 Per'in ise gözlemleri yapılamadı fakat TESS'in iki sektörde ve farklı yıllarda aldığı ışık eğrilerinden minimum zamanlar hesaplandı. Ayrıca bu çalışmada dönem analizinin yanı sıra ışık eğrisi analizi de yapıldığı için, adaylardan V359 Cas ve V871 Per'in ışık eğrisi çözümlerinde yine TESS ışık eğrileri kullanıldı. CK Aqr'nın ışık eğrisi çözümü için ise rasathanede yapılan gözlemlerden 2023 yılında alınan ışık eğrilerinin R bandında olanları kullanıldı. Gözlemlere ilişkin bilgiler Çizelge 3.1'de verildi. MAST Portal veri tabanından alınan TESS ışık eğrilerine ait bilgiler ise Çizelge 3.2'de verildi.

Çizelge 3.1 CK Aqr ve V359 Cas fotometrik gözlem tarihleri, verilen tarihte toplanan veri sayısı, filtre bilgileri

T35 Gözlem Günleri	Toplam Veri Sayısı	Filtre	Sistem
21.07.2023	221	V,R,I	CK Aqr
28.07.2023	308	V,R,I	CK Aqr
04.08.2023	361	V,R,I	CK Aqr
11.10.2023	468	V,R,I	V359 Cas
13.10.2023	456	V,R,I	V359 Cas
04.11.2023	262	V,R,I	V359 Cas
06.11.2023	212	V,R,I	V359 Cas
08.11.2023	352	V,R,I	V359 Cas
27.07.2024	125	V,R	CK Aqr
31.07.2024	135	V	CK Aqr

Çizelge 3.2 MAST veri tabanından alınan TESS ışık eğrilerine ait sektör ve tarih bilgileri

V871 Per (TIC 264922092)		V359 Cas (TIC 252045551)	
Sektör	Tarih	Sektör	Tarih
18	Kasım 2019	24	Nisan 2020
58	Kasım 2022	57	Ekim 2022

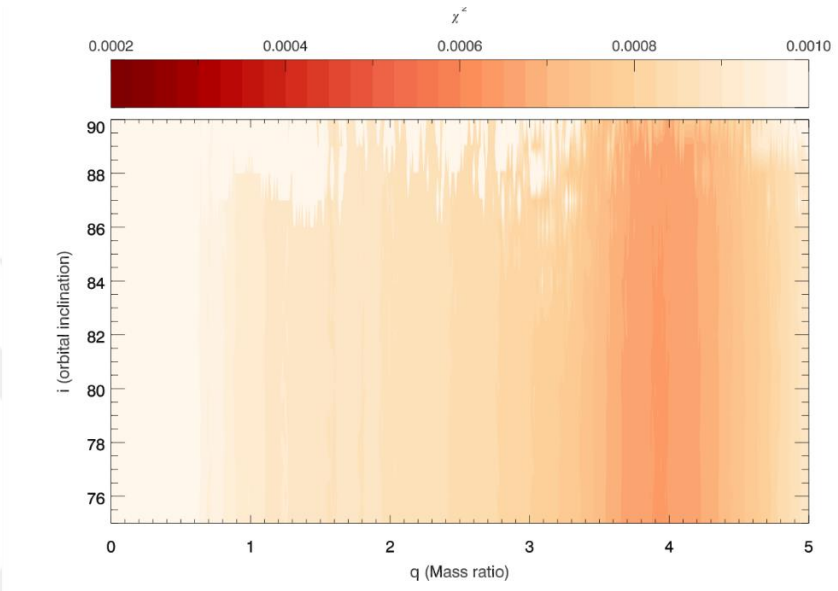
3.1 Fotometrik Eğriden Işık Parametreleri Çözümü

Bu tez çalışmasında üç örten değişen çift sistemin mutlak parametreleri literatürde olmadığı için ışık eğrisi çözümü yapılması ihtiyacı doğmuştur. Bu nedenle, CK Aqr için *R* bandında alınmış fotometrik veriler ile V871 Per ve V359 Cas'ın MAST Portal veri tabanından alınan TESS'e ait fotometrik verileri ışık eğrisi analizi için kullanıldı. V871 Per'in sektör 18'den alınan, V359 Cas'ın sektör 24'ten alınan TESS ışık eğrileri için KSPSAP_FLUX (en uygun açıklık ile elde edilen değerler) kolonuna karşılık gelen akı değerleri kullanıldı. Daha sonra bu verinin zaman değerleri kütle merkezli Jülyen gününden (BJD: Barycentric Julian Date)'den Güneş merkezli Jülyen gününe (HJD: Heliocentric Julian Date)'ye dönüştürüldü. CK Aqr'nın gözlemsel verileri ise AstroImageJ (Collins vd. 2017) programı kullanılarak çoklu mukayese yöntemi ile standart bir şekilde indirgenmeleri yapıldıktan sonra kaynağın koordinat ve gözlemevinin koordinat değerleri yardımıyla HJD zamanlarına karşılık gelen ışık eğrileri akı cinsinden elde edildi. Dolayısıyla, bu çalışmada her üç aday yıldız için tüm analizlerde HJD zamanı dikkate alındı.

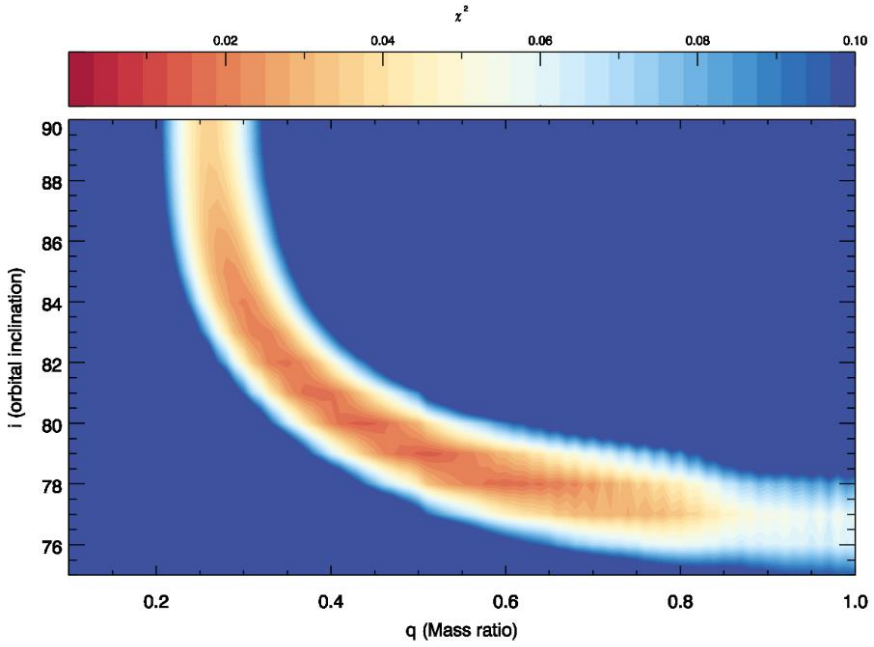
Adayların ışık eğrisi analizleri, Wilson-Devinney yöntemini (Wilson ve Devinney 1971) temel alan Python kodlama dilinde yazılmış PHOEBE (Prša ve Zwitter 2005) ve PyWD2015 (Güzel ve Özdarcan 2020) programında gerçekleştirildi ve sistemlerin bileşenlerinin fiziksel ve geometrik parametreleri elde edildi.

Her üç sistemin de literatürde tayfsal gözlemi olmadığından ve bileşenlerin kütle oranlarını veren *q* parametresi bilinmediğinden dolayı *q*-*i* taraması yapıldı. Bu şekilde belirlenen kütle oranına fotometrik kütle oranı adı verilmektedir ve özellikle tam tutulma gösteren ışık eğrilerinde çok daha güvenilir *q* parametre değerleri vermektedir (Terrell ve Wilson 2005). Bu amaç için PHOEBE programı kullanılarak adayların *q*-*i* taraması yapıldı. W UMa türü bir örten değişen olan CK Aqr'nin taramasında *q* için 0.05 artımla 0-5 aralığı, yörünge eğikliği *i* için 1 derece artımla 75-90 derece aralığı dikkate alındı ve en iyi çözümün (χ^2 = 0.000546) q = 3.94 ve i = 81° durumunda elde edildi (Şekil 3.1). Benzer artım değerleri kullanarak β Lyrae türü olan V359 Cas'ın *q* aralığı 0-1, *i* aralığı 75-90 derece alınarak tarama yapıldı ve en iyi çözüm (χ^2 = 0.007618) q = 0.52 ve i = 79°

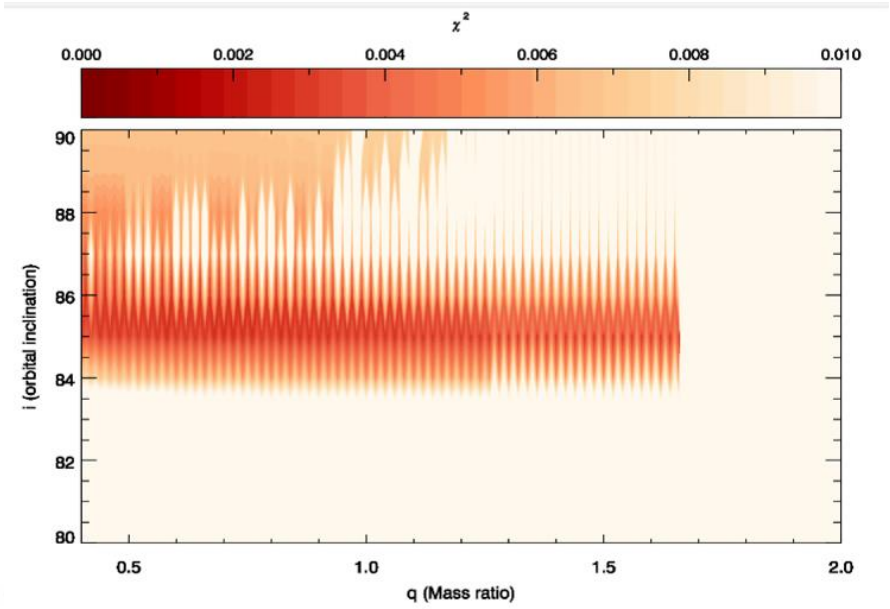
değerleri için belirlendi (Şekil 3.2). Algol türü V871 Per'in ise q değeri aralığı 0-2 ve i için de 80-90 derece aralığında taraması yapıldı. Yörünge eğimi için en iyi çözümün 85.5° derecede olduğu fakat q değerinin geniş bir dağılım gösterdiği görüldü (Şekil 3.3). Daha sonra i'nin 85.5° değeri sabit tutularak yeniden tarama yapıldığında en iyi çözüm (χ^2 = 0.002571) q = 0.6 için elde edildi (Şekil 3.4).



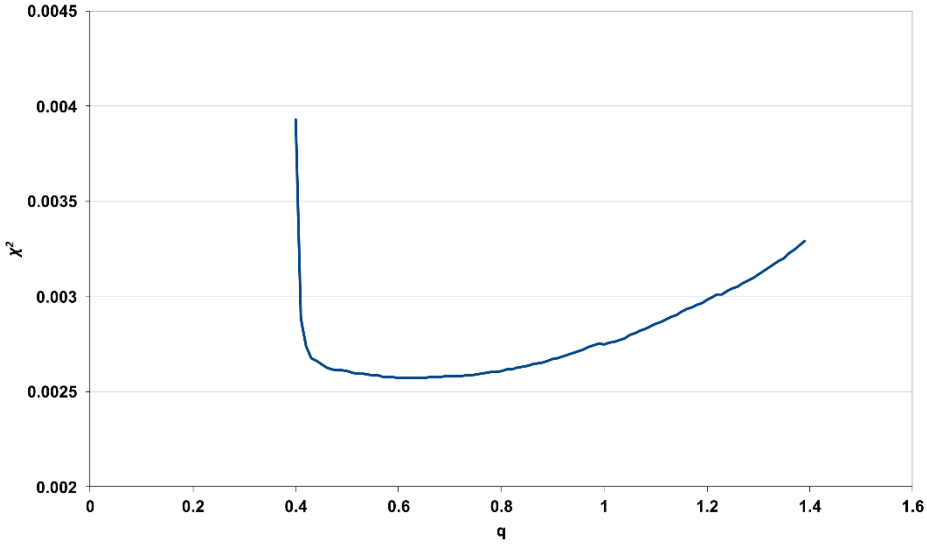
Şekil 3.1 CK Aqr için yapılan q-i taraması. Koyu alanlar χ^2 değerinin en düşük olduğu yerleri göstermektedir



Şekil 3.2 V359 Cas için yapılan q-i taraması. Koyu kırmızı alanlar χ^2 değerinin en düşük olduğu yerleri göstermektedir



Şekil 3.3 V871 Per için yapılan q-i taraması. Koyu alanlar χ^2 değerinin en düşük olduğu yerleri göstermektedir



Şekil 3.4 V871 Per'in yörünge eğikliği i=85.5° sabit tutularak yapılan q taraması

Son olarak taramadan elde edilen q değerleri, ışık eğrisi analizinde başlangıç kütle oranı olarak kullanıldı ve bu değerlere göre ışık eğrileri PyWD2015 ile yeniden modellendi. Işık eğrisi analizinde fotometrik veriler aşağıda Çizelge 3.3'de verilen ışık elamanlarına göre evrelendirildi.

Çizelge 3.3 Aday yıldızların ışık elemanları

Yıldız Adı	T_0 (HJD)	P	Kaynak
CK Aqr	2437547.3340	0.283372	Le Borgne vd. (1989)
V359 Cas	2429079.4990	1.303885	Kreiner (2004)
V871 Per	2451421.7190	3.023885	Otero vd. (2004)

Işık eğrisi analizinde birinci bileşenlerinin sıcaklıkları Gaia DR3 veri tabanından alındı (Gaia Collaboration et al. 2022). V871 Per, V359 Cas ve CK Aqr için sırasıyla birinci bileşenlerinin etkin sıcaklıkları (T_{eff}) 6416 K, 11672 K ve 5435 K olarak PyWD2015 programına girildi.

V871 Per'in ışık eğrisi analizinde sistemin ayrık olduğunu belirten mod 2, V359 Cas için ise ikinci bileşeni Roche lobunu doldurmuş olduğu yarı ayrık yaklaşımını ifade eden mod 5 ve CK Aqr için de değen çift sistem olduğunu belirten mod 3 yaklaşımları kullanıldı. Analizlerde birinci bileşenin sıcaklığı (T_1) sabit tutularak; ikinci bileşenin sıcaklığı (T_2), yörünge eğim açısı (i), kütle oranı (q), birinci bileşenin kesirsel ışınım şiddeti (l_1) ve bileşenlerin yüzey potansiyelleri ($\Omega_{1,2}$) parametreleri serbest bırakılarak sistemlerin ışık eğrisi çözümleri gerçekleştirildi. Bolometrik albedo değerleri (A_1, A_2) sırasıyla, radyatif zarfa sahip yıldızlar için 1.0 ve konvektif zarfa sahip yıldızlar için 0.5 olarak alındı (Rucinski 1969). Çekimsel kararma sabitleri (g_1, g_2), radyatif zarfa sahip yıldızlar için 1.0 (Von Zeipel 1924) ve daha soğuk olan konvektif yıldızlar için 0.32 (Lucy 1967) değerleri sabit değerler olarak kullanıldı. Kenar kararma katsayıları van Hamme'nin (Hamme 1993) tablolarından yıldızın gözleminin yapıldığı ilgili fitrelere karşılık gelen tablolardan alındı. CK Aqr'nın ışık eğrisinde, ikinci maksimumun (0.75 evresi bölgesi) birinci maksimumdan daha parlak olduğu gözlemlendi. Bu durum, bileşen yıldızlardan birinin yüzeyinde bir lekenin varlığı ihtimalini güçlendirdi ve bu durum O'Connell etkisi (O'Connell 1951) ile ilişkilendirildi. Aynı şekilde V871 Per'in maksimumundaki asimetrik yapı da lekeye işaret ettiğinden dolayı bu iki yıldız için yapılan ışık eğrisi çözümünde ikinci bileşen üzerinde leke olduğu varsayımı yapılarak, leke parametreleri de serbest parametre olacak şekilde modele dahil edildi. CK Aqr için bir leke, V871 Per için iki leke ile modellendi.

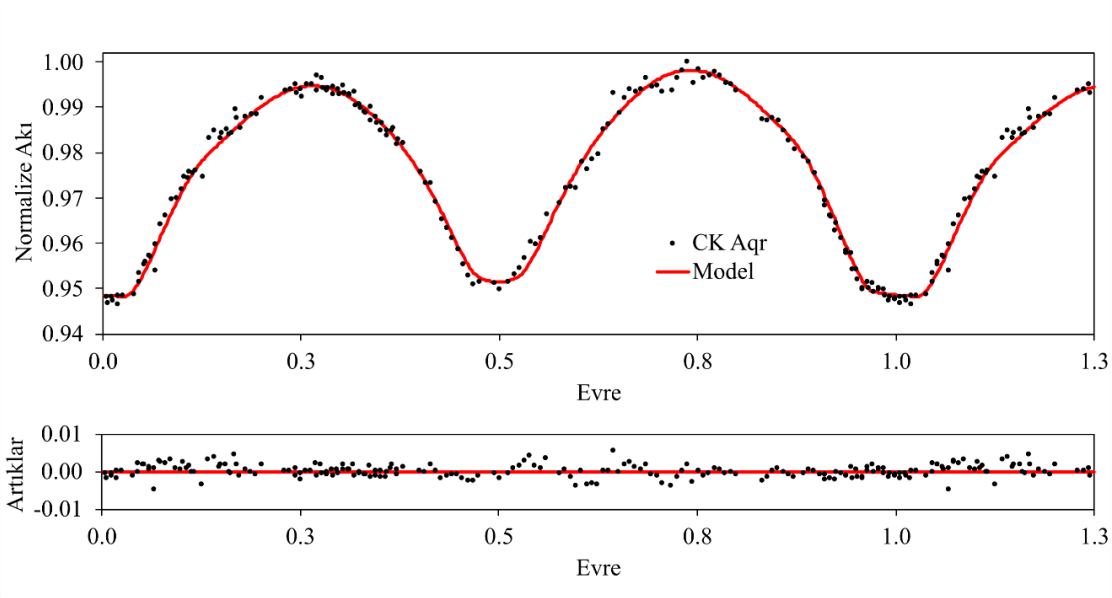
Işık eğrisi analizinden elde edilen sonuçlar Çizelge 3.4'te verildi. Burada; ϕ evre kayması, Ω yüzey potansiyelleri, r ortalama kesirsel yarıçapları ifade etmektedir. Ayrıca leke parametrelerinden; φ lekenin yıldız üzerindeki enlemi, λ lekenin yıldız üzerindeki boylamı, θ lekenin açısal yarıçapı ve TF lekenin sıcaklık faktörünü göstermektedir. TF parametresi, yıldızın yüzeyindeki lekenin sıcaklığının altındaki fotosferin sıcaklığına göre oranını ifade etmektedir. TF >1 olduğunda, sıcak noktalara (ing. hot spots) işaret eder; yani leke, çevresindeki fotosferden daha sıcak demektir. TF<1 olduğunda ise soğuk noktalar (ing. cool spots) anlamına gelir, yani leke çevresindeki fotosferden daha soğuktur.

Şekil 3.5-7'de, gözlemsel veriye en uygun kuramsal model ve bu modele göre yapılan fitten kalan artıklar gösterildi. Ayrıca, leke modeli uygulanan CK Aqr'nın 2D geometrisi Şekil 3.8'de, V359 Cas'ın Şekil 3.9'da ve iki leke modelli V871 Per'in ise Şekil 3.10'da sunuldu.

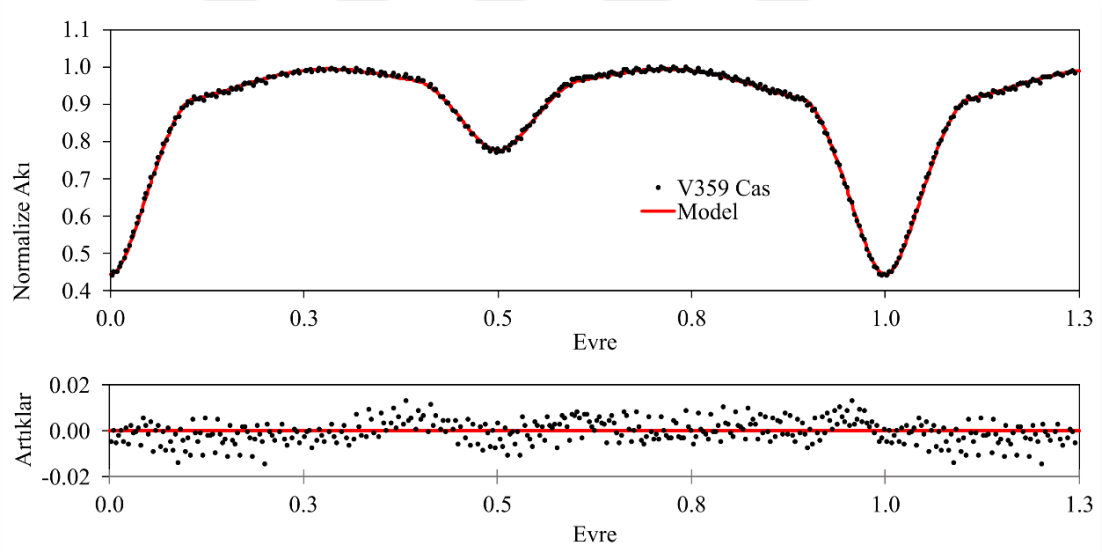
Çizelge 3.4 Işık eğrisi çözüm sonuçları

	V871 Per	V359 Cas	CK Aqr
Parametre	Değer	Değer	Değer
ϕ	0.0455	0	-0.0717
i (°)	85.34	78.78	81.21
T_1 (K)	6416	11672	5435
T_2 (K)	5870	7223	5261
$q(M_2/M_1)$	0.6035	0.5279	4.0481
$l_1/(l_1+l_2)$	0.6354	0.7323	0.2492
$l_2/(l1+l2)$	0.3646	0.2677	0.7508
r_1	0.2016	0.2987	0.2805
r_2	0.1781	0.3232	0.5182
Ω_1	3.7705	2.9022	0.1725
Ω_2	2.7169	1.0941	0.1523
$\chi 2$	0.0102	0.0096	0.0006
Leke parametreleri			
yıldız	2	-	2
φ_1 (°)	112	-	30
λ_1 (°)	190	-	130
θ_1(°)	13	-	25
TF_1	0.85	-	0.85
φ_2 (°)	21	-	-
λ_2 (°)	64	-	-
θ_2 (°)	21	-	-
TF_2	0.85	-	-

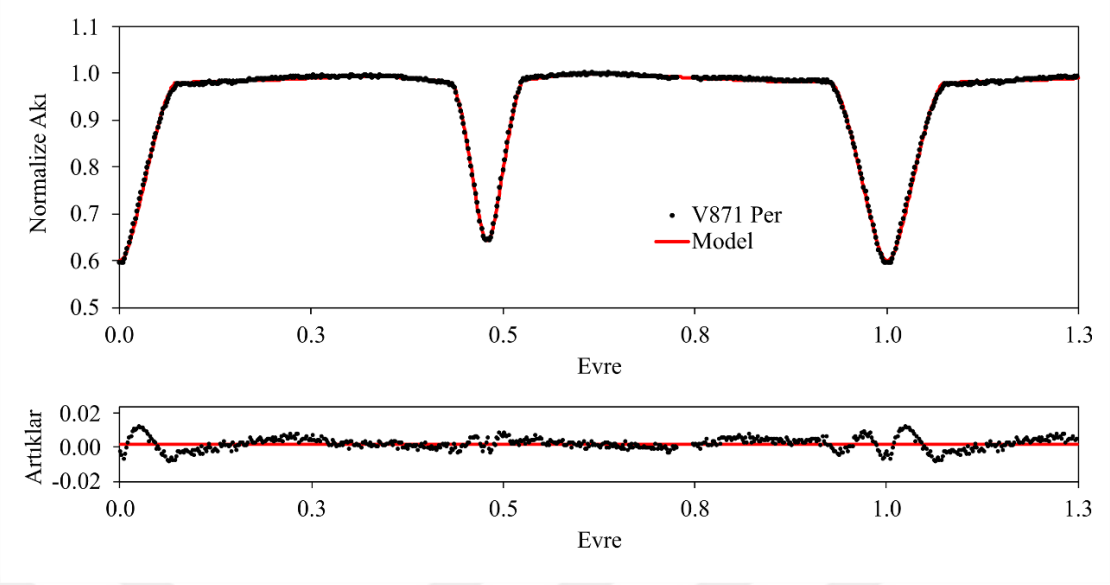
Not: Üstte 1 indisi birinci bileşeni, 2 indisi ikinci bileşeni ifade etmektedir. Alttaki leke parametrelerinde ise 1 indisi birinci lekeyi, 2 indisi ikinci lekeyi ifade etmektedir.



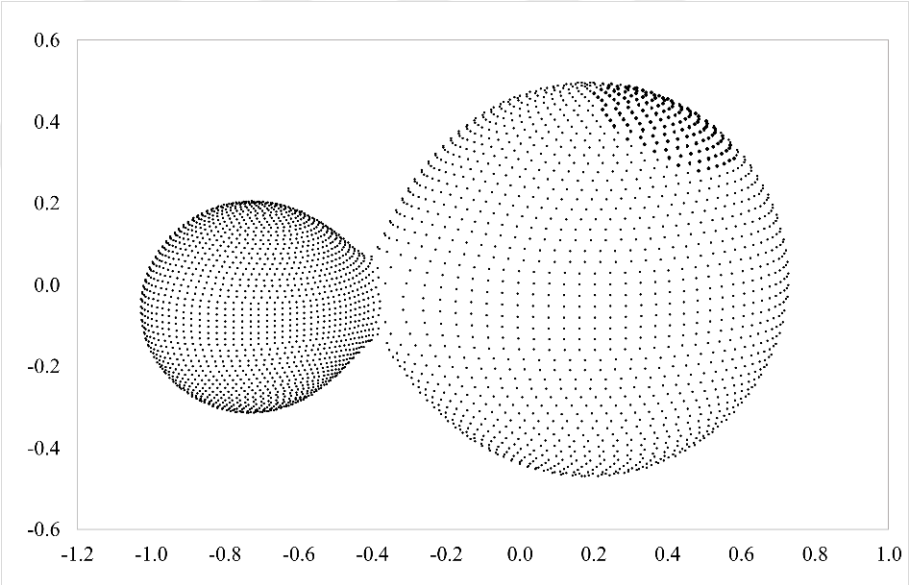
Şekil 3.5 CK Aqr'nın evrelendirilmiş ışık eğrisi (mavi noktalar) ve en iyi model fit (sürekli kırmızı eğri). Alttaki panel modelden olan artıkları göstermektedir



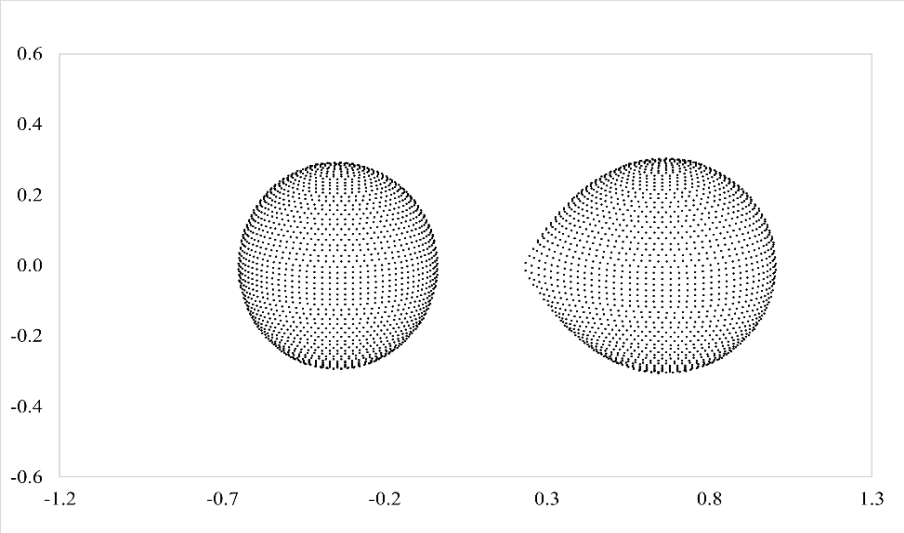
Şekil 3.6 V359 Cas'ın evrelendirilmiş ışık eğrisi (mavi noktalar) ve en iyi model fit (sürekli kırmızı eğri). Alttaki panel modelden olan artıkları göstermektedir



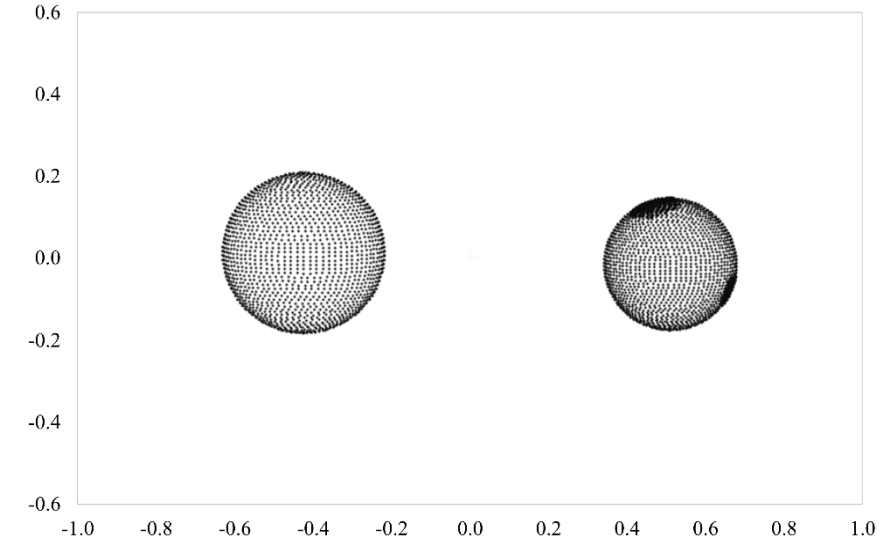
Şekil 3.7 V871 Per'in evrelendirilmiş ışık eğrisi (mavi noktalar) ve en iyi model fit (sürekli kırmızı eğri). Alttaki panel modelden olan artıkları göstermektedir



Şekil 3.8 CK Aqr'nın 0.25 evresindeki 2D geometrisi



Şekil 3.9 V359 Cas'ın 0.25 evresinde 2D geometrisi



Şekil 3.10 V871 Per'in 0.25 evresinde 2D geometrisi

3.2 Sistemlere Ait Mutlak Parametreler

Fotometrik verilerin mevcut olduğu durumlarda, mutlak parametrelerin tahmini için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biri, yörünge periyodu (*P*) ve kütle (*M*) arasındaki ilişkilere dayalı denklemleri kullanmaktır. Gazeas ve Stępień (2008) ile Poro ve vd. (2024) tarafından yapılan çalışmalarda, ikili sistemlerin mutlak parametre tahmini için yörünge periyodu ile yarı-büyük eksen arasındaki bağıntı ifadeleri

verilmiştir. Bu çalışmada da mutlak parametreler bu bağıntılarda verilen denklemler kullanılarak benzer şekilde hesaplandı.

Bileşenlerin kütlelerini hesaplayabilmek için yarı büyük eksen uzunluğu (a), Kepler'in üçüncü yasası kullanılarak belirlendi. Bunun için öncelikle, mutlak parlaklık formülü ile yıldızların kesirsel ışınım şiddetine göre her iki bileşenin mutlak parlaklığı belirlendi. Işık eğrisi analizden elde edilen her bir bileşenin sıcaklık değerleri kullanılarak bileşen yıldızların Bolometrik düzeltme değerleri (BC) ve belirlendi. Ardından Gaia veri tabanından elde edilen uzaklık bilgisi ve hesaplanan bolometrik mutlak parlaklıklar Güneş'in bolometrik parlaklığı ile karşılaştırılarak her bir bileşen için ışınım gücü *(L)* elde edildi. Sıcaklık ve ışınım gücü belirlenen bileşenlerin Stefan-Boltzmann yasası kullanılarak yarıçapları (R) hesaplandı. Daha sonra, yarı büyük eksen uzunluğu, $a=R/r$ oranından elde edildi. Yarı büyük eksen uzunluğu (a) ve kütle oranı (q) bilindiğinden, Kepler'in üçüncü yasası kullanılarak birinci ve ikinci bileşenlerin mutlak parametreleri elde edildi (Çizelge 3.5). Bu aşamadaki hesaplama adımları şu şekilde gerçekleştirildi;

1. Sistemin mutlak parlaklığı uzaklık modülü formülü ile hesaplandı:

$$M_{V(sistem)} = \left(m_{V_{maks}}\right) - 5\log(d) + 5 - (A_v)$$

- $m_{V_{maks}}$: Sistemin gözlemlenen maksimum görünür parlaklığı (Simbad veri tabanından alındı; Çizelge 3.4),
- d: Sistemin parsek biriminde uzaklığı (Gaia veri tabanından alındı; Çizelge 3.4),
- A_v: Yıldızlararası ortamdan kaynaklanan V bandındaki sönümleme miktarıdır. $R_v = A_v/E(B-V)$ formülüyle hesaplanır. $E(B-V)$ kızarma değerleri toz haritalarından (dustmap) elde edildi (Green 2018). $R_v = 3.1$ alındı (Cardelli vd. 1989).

2. Bileşenlerin mutlak parlaklıkları, sistemin toplam mutlak parlaklığı ve bileşenlerin göreceli ışınım oranları kullanılarak hesaplandı:

$$M_{V1,2} - M_{V(sistem)} = -2.5log\left(\frac{l_{1,2}}{l_{top}}\right)$$

- $M_{V1,2}$: Birinci ve ikinci bileşenlerin mutlak parlaklıkları.

- $M_{V(sistem)}$: Tüm sistemin toplam mutlak parlaklığı.
- $l_{1,2}$: Işık eğrisi analizinden elde edilen bileşenlerin göreceli ışınım oranları (Çizelge 3.4).
- l_{top}: Toplam ışınım oranı.

3. Bolometrik parlaklıklar, mutlak parlaklıklara bolometrik düzeltmeler (*BC*) eklenerek hesaplandı:

$$M_{bol} = M_v + BC$$

- *BC*: Bolometrik düzeltmeler (Eker vd. 2018).

4. Bolometrik parlaklık ve ışınım gücü arasındaki bağıntıdan bileşenleri ışınım güçleri (*L*) hesaplanmıştır.

$$M_{bol} - M_{bol\odot} = -2.5log\left(\frac{L}{L_{\odot}}\right)$$

- M_{bol}, yıldızın; $M_{bol\odot}$, Güneş'in bolometrik parlaklığı

5. Bileşenlerin yarıçapları (*R*), Stefan-Boltzmann yasası ile belirlendi (σ, Stefan-Boltzmann sabiti $\approx 5.67\times10^{-8}$ W m^{-2} K^{-4}).

$$R = \sqrt{\frac{L}{4\pi\sigma T^4}}$$

6. Yarı-büyük eksen (*a*), bileşenlerin yarıçaplarının kesirsel yarıçaplarla ilişkisi kullanılarak belirlendi (Volkov vd. 2017):

$$a = \frac{R}{r}$$

- r: Işık eğrisi çözümünden elde edilen ortalama kesirsel yarıçap.

7. Son olarak Kepler'in üçüncü yasası kullanılarak bileşenlerin kütleleri hesaplandı (G, evrensel çekim sabiti $\approx 6.674\times10^{-11}$ m^3 kg^{-1} s^{-2}).

$$\frac{a^3}{G(M_1 + M_2)} = \frac{P^2}{4\pi^2}$$

Yukarıdaki adımlar sonucunda hesaplanan bütün parametreler Çizelge 3.5'te verildi. Hesaplamalarda Güneş'e ait değerler Teff = 5771 K, Mbol = 4.755 mag alındı (Pecaut ve Mamajek 2013).

Çizelge 3.5 Sistemlere ait mutlak parametreler

	CK Aqr	V359 Cas	V871 Per
Parametreler	Değer	Değer	Değer
m_{vmax}	12.89	12.47	10.89
d (pc)	402	1720	410
E(B-V)	0.09	0.767	0.64
Av	0.133	1.132	0.945
BC_1	-0.14	-0.733	-0.005
BC_2	-0.17	0.012	-0.05
a ($R_\odot$)	2.173	8.270	12.349
L_1 ($L_\odot$)	0.287	98.592	8.964
L_2 ($L_\odot$)	0.890	18.147	5.362
R_1 ($R_\odot$)	0.604	2.427	2.422
R_2 ($R_\odot$)	1.135	2.719	2.260
M_1 ($M_\odot$)	0.341	2.930	1.719
M_2 ($M_\odot$)	1.378	1.547	1.053

Not: 1 indisi birinci bileşeni, 2 indisi ikinci bileşeni ifade etmektedir.

3.3 Minimum Zamanların Elde Edilmesi ve O-C Analizi

Gözlemsel olarak elde edilen ışık eğrilerinden minimum zamanı, eğrinin minimum çukurunun hassas bir şekilde belirlenmesi ile elde edilmektedir. Bu tez çalışmasında minimum zaman hesabı için Kwee-Van Woerden (1956) yöntemi hem kolay bir yöntem olduğu hem de hata değerlerini verdiği için tercih edildi.

Yöntemin çalışma şekil temel olarak minimum civarındaki bir zaman göre verilerin simetrik bir çift oluşturacak şekilde katlanması ve karşılıklı gelen gözlemler arasındaki farkın (ışık eğrisi kadir biriminde alındıysa kadir farkı, akı biriminde alındıysa akı farkı) karelerinin toplamı şeklinde çalışmaktadır. Simetrik veriler arasındaki zaman farkları kullanılarak ışık eğrisinin minimum noktası ara değer bulma yöntemiyle belirlenmektedir. Bu işlem genellikle doğrusal ara değer bulma ile yapılmaktadır, ancak gerektiğinde daha karmaşık ara değer bulma yöntemleri de kullanılabilmektedir.

Bu çalışmada Python kodlama dilinde yazılmış MinLight adlı program kullanılarak Kwee-Van Woerden yöntemi ile minimum zamanlar hesaplandı. (Özel görüşme: Bahar 2024). Yapılan fotometrik gözlemlerden elde edilen minimum zamanlar Çizelge 3.6'de verildi.

O-C analizi için literatürde farklı yöntemlerle elde edilmiş minimum zamanlar ve yapılan gözlemlerden elde edilenler minimum zamanlar bir araya getirilerek oluşturuldu. Burada önemli olan bir araya getirilen verilerin aynı zaman ölçüm sistemlerinde olması (JD, HJD, BJD), değilse dönüşümlerinin yapılması ve hata değerlerinin ise makul oranda olmasıdır. Kullanılacak minimum zamanların hata büyüklükleri bilinmiyorsa elde edilme yöntemlerine göre (görsel, fotoğrafik, fotoelektrik ve ccd) farklı ağırlıklandırma değerleriyle hesaplamalar yapılmaktadır.

Çizelge 3.6 T35 teleskopu ile yapılan gözlemlerden elde edilen minimum zamanlar

	Minimum Zamanı (HJD)	Min türü (p: birinci; s: ikinci)	Metot	Filtre
V359 Cas	60229.350862	p	CCD	V,R,I
	60231.307134	s	CCD	V,R,I
	60253.470312	s	CCD	V,R,I
	60255.427808	p	CCD	V,R,I
	60257.386762	s	CCD	V,R,I
CK Aqr	60147.381575	p	CCD	V,R,I
	60147.520019	s	CCD	V,R,I
	60154.464641	p	CCD	V,R,I
	60161.405744	s	CCD	V,R,I
	60161.552713	p	CCD	V,R,I
	60519.448437	p	CCD	V,R
	60523.416497	p	CCD	V

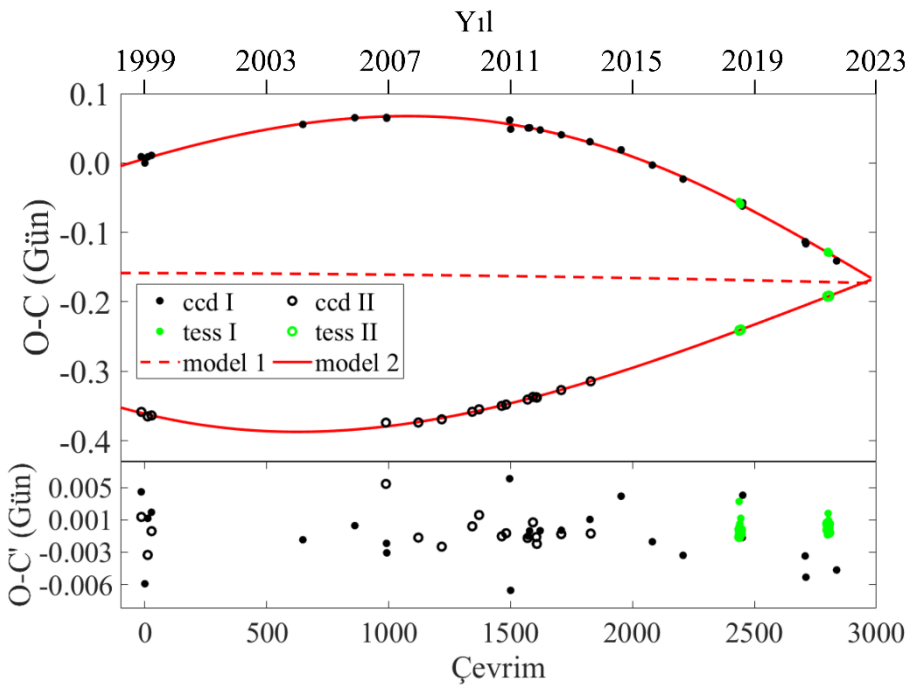
Bu çalışmada V871 Per, V359 Cas ve CK Aqr 'nın yörünge dönemi analizi için Python kodlama dilinde yazılmış ve Monte-Carlo yöntemiyle ile çalışan OCFit (Gajdoš ve Parimucha 2019, Gajdoš 2023) programı kullanıldı. Monte Carlo yöntemi, stokastik optimizasyon yöntemleri arasında en yaygın kullanılanlardan biridir (Brooks vd. 2011). Temel çalışma prensibi çözüm uzayında rasgele sayılar üreterek incelenen sistemin istenen olasılık dağılımında global en iyi çözüme ulaşmayı sağlayacak durumları elde etmektir. OCFit programında Markov zincirleri üreten Metropolis uygulaması kullanılmaktadır. Markov Zincirleme Monte Carlo (MCMC) yöntemi tüm parametrelerin

belirsizliklerini nihai dağılımda kolaylıkla yakınsama sağlayabilmektedir (Gajdoš ve Parimucha 2019). Yöntemin en doğru şekilde çalışması için başlangıç parametrelerine ihtiyaç vardır. Bu nedenle öncelikle excel programında O-C grafikleri oluşturulup, Bölüm 2.1' bahsedilen teorik temellere dayanarak, sistemlerdeki dönem değişimlerini en iyi ifade eden modellerle başlangıç parametreleri elde edildi. Ardından OCFit programına bu değerler girilerek yeterli iterasyon sayısı ile istatistiksel en küçük hata değerleri elde edilene kadar çözüm yapıldı ve uygun modellerle sistemlere ilişkin güncel parametreler elde edildi.

4. ANALİZ BULGULARI

4.1 V871 Per Dönem Analizi

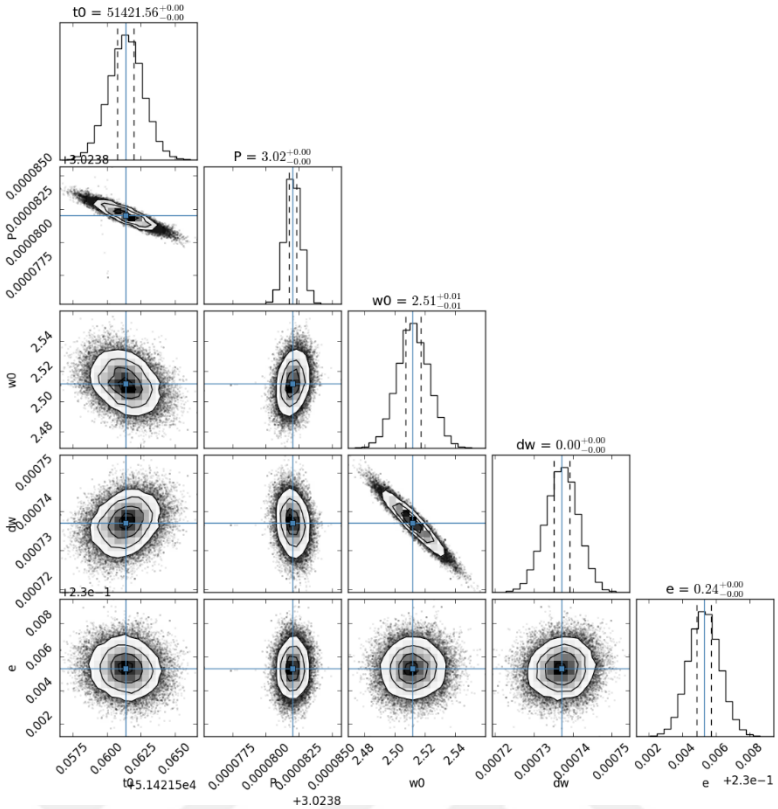
Uzun dönemli (P=3.02 gün) yıldızının literatürdeki minimum zamanları O-C Gateway'den (Paschke ve Brat 2006) ve AAVSO (The American Association of Variable Star Observers) veri kaynağından alındı. Başka kaynaklar da tarandı fakat bulunamadı. Bunlara ek olarak TESS ışık eğrisinden elde edilen minimum zamanlar eklendi. Sisteme ait tüm minimum zamanlar EK-1a'da verildi. T35'de çeşitli aksaklıklar nedeniyle gözlemi yapılamamış olan bu sistem için literatürden ve TESS ışık eğrisinden elde edilen minimumlarla O-C analizi gerçekleştirildi. Çeşitli filtrelerde ve farklı gözlemciler tarafından alınan verilerde saçılma görülmemektedir. Bu nedenle verilerin tamamı kullanıldı ve hem CCD hem TESS minimumları için ağırlıklandırma 10 katsayısı kullanıldı. Toplamda 39 birinci minimum, 33 ikinci minimum olmak üzere 72 minimum zaman ile Çizelge 3.3'deki ışık elamanlarına göre O-C grafiği oluşturuldu. Eksen dönmesi gösterdiği bilinen (Wolf vd. 2013) sistemin O-C analizi için kullanılan OCFit programında Monte Carlo yöntemiyle (MCMC) eksen dönmesini temsil eden sinüs fiti uygulanarak bütün parametreler aynı anda çözüldü (ApsidalQuad). Programa ışık elemanları, birinci ve ikinci cismin kütleleri ve yörünge eğim açısı değerleri ışık eğrisinden elde edilen değerler girilerek programda T_0, P, Q, w_0, d_w ve e parametreleri (sırasıyla; başlangıç anı, yıldızıl dönem, T_0 anında en beri noktasının boylamı, eksen dönmesini miktarı, dışmerkezlik) önceden belirlenen başlangıç parametrelerine göre belirli değer aralıklarında serbest bırakılarak hesaplamaların yapılması sağlandı. Kütle aktarımı olmadığı varsayıldığı için Q parametresi 0 olarak dikkate alındı. En son uygulanan fitin artıkları hata sınırlarının içerisinde kaldığı (χ^2 = 0.0004) ve artıklarda herhangi bir periyodik değişim tespit edilmediği için analiz bu şekilde tamamlandı. Uygulanan fit ve artıkları Şekil 4.1'de görülmektedir. O-C eğrisinden elde edilen yeni ışık elemanları, analiz sonucunda elde edilen eksen dönmesine ilişkin parametreler Çizelge 4.1'de verildi. Çözüm uzayında parametreler arasındaki ilişki ise Şekil 4.2'de köşe grafiği ile görülmektedir. Sonuçlar bir sonraki bölümde detaylı olarak tartışıldı. Ayrıca programda hesaplanmayan k iç yapı sabiti de belirlendi.



Şekil 4.1 V871 Per O-C grafiği ve elde edilen en iyi model fit (kesikli çizgi lineer fit, sürekli çizgi ise en son modeli yani lineer+sinüs göstermektedir). Alt panel fitten kalan artıkları göstermektedir

Çizelge 4.1 V871 Per'in O-C analizinden elde edilen parametreler

Parametre	Birim	Değer	Hata
P	gün	3.024	3.29×10^{-7}
d_w	derece	0.042	0.0001
e		0.235	0.0005
t_0	HJD	51421.56	0.0007
w_0	derece	143.95	0.34
Eksen dönmesine ilişkin parametreler			
K_3	sn	19567.8	42.9
K_3	dk	326.1	0.7
P_s	gün	3.024	1.18×10^{-6}
P_s	yıl	0.008	3.24×10^{-9}
U	gün	25775.8	82.6
U	yıl	70.57	0.23
χ^2		0.0004	

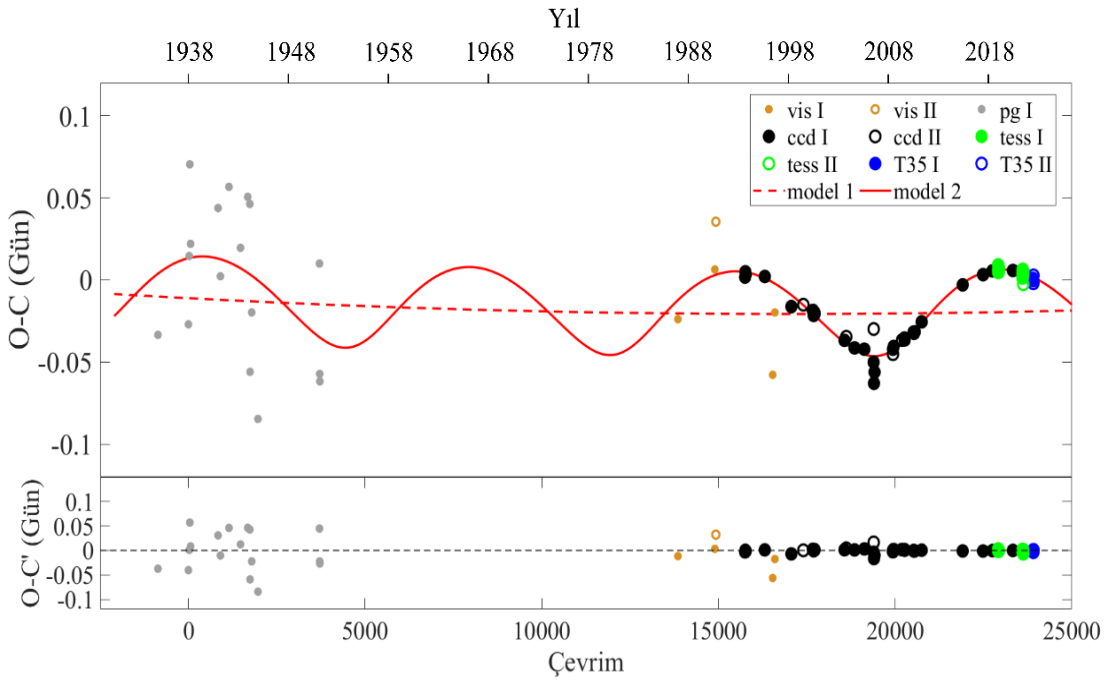


Şekil 4.2 V871 Per'in MCMC yöntemi ile elde edilen köşe grafiği ve parametre dağılımı

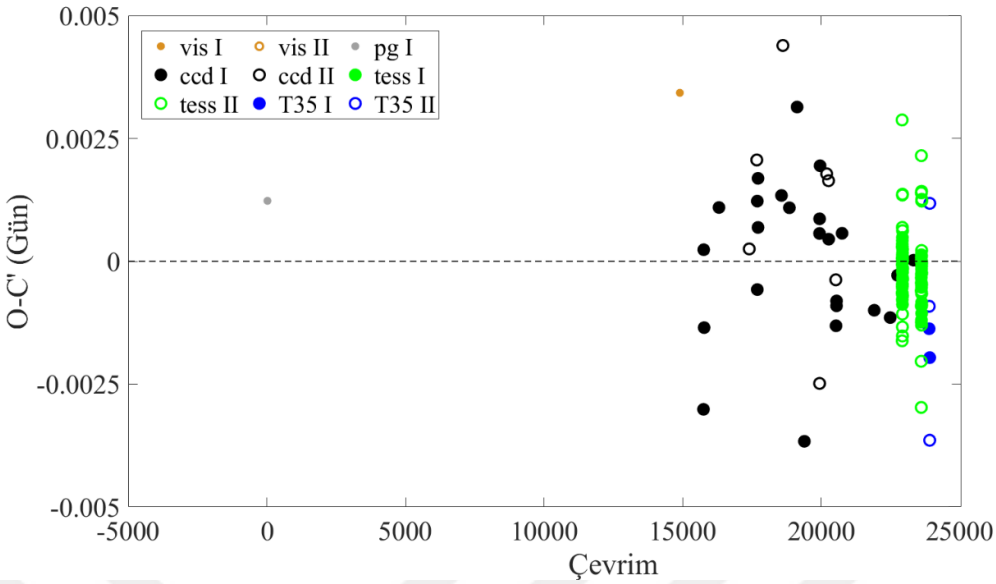
4.2 V359 Cas Dönem Analizi

V359 Cas yörünge dönemi değişimini incelemek için O-C analizi yöntemi kullanıldı. Kwee-Van Woerden yöntemiyle TESS ışık eğrilerinden hesaplanan 75 minimum zaman ve T35 telekobuyla yapılan fotometrik gözlemelerden eklenen 5 minimum zaman ile birlikte toplamda 80 minimum zamanı bu tez çalışması kapsamında elde edildi. Bu minimum zamanlarının yanında Özkardeş (2019) çalışmasından 4 adet minimum ve BRNO veri tabanından alınan ışık eğrilerinden ise 3 adet minimum zamanı da bu listeye çalışmasından (Özkardeş 2019) eklendi. Bununla birlikte, aday yıldızımız için birçok veri tabanı da tarandı ve başka veriye ulaşılamadı. Bu şekilde toplamda 137 minimum zaman analizlerde kullanılmak üzere bir araya getirilmiş oldu (Ek-1b). Bunlardan 88'i birinci, 49'u ikinci minimum zamanıdır. O-C diyagramı oluşturulurken Çizelge 3.3'teki lineer ışık elemanları kullanıldı. Şekil 4.3'te de görüleceği gibi O-C eğrisinde fotoğrafik veriler ve görsel veriler eğrinin genel düzenine uymamaktadır. Bu nedenle analizde bu verilere düşük ağırlıklandırma katsayıları verilerek gerçekleştirildi. Farklı ağırlıklandırma

katsayılarıyla tüm minimum zamanlar hesaplamalara katıldı (kullanılan ağırlıklandırmalar; görsel = 1, fotoğrafik = 3, ccd = 10). O-C diyagramının karakteristiğine uygun olarak, kütle aktarımı (parabol fiti) ve ışık-zaman etkisi (sinüs fiti) yaklaşımında bulunuldu (uygulamada LiTE3Quad modu seçildi). OCFit programında bileşenlere ait kütle ve yörünge açı parametreleri girildikten sonra t_0 (başlangıç anı), P(dönemi), Q, $asini_3$ (üçüncü cismin yörüngesinin görünür yarı büyük ekseni), w_3 (üçüncü cismin en beri noktasının boylamı), e_3 (üçüncü cismin dışmerkezliği), t_{03} (üçüncü cismin en beri geçiş zamanı) ve P_3 (üçüncü cismin yörünge dönemi) parametreleri, önceden belirlenmiş başlangıç değerlerine dayanarak belirli aralıklar içinde serbest bırakıldı ve hesaplamalar gerçekleştirildi. MCMC yöntemiyle çözülen parametrelerden uygulanan fit ve artıkları Şekil 4.3'te görülmektedir. En son uygulanan fitin artıkları için $\chi^2 = 0.0335$ dir. Burada fotografik veriler fazla saçıldığı için artıklarda dikkate alınmazsa, $\chi^2 = 0.006$'dır ve artıkların sıfır etrafına toplanarak herhangi bir periyodik değişimi olmadığı görülmektedir (Şekil 4.4). Analiz sonucunda yeni ışık elemanları ve sisteme ait güncel parametreler elde edildi (Çizelge 4.2). Çözüm uzayında parametreler arasındaki ilişkin köşe grafiği ise Şekil 4.5'te görülmektedir.



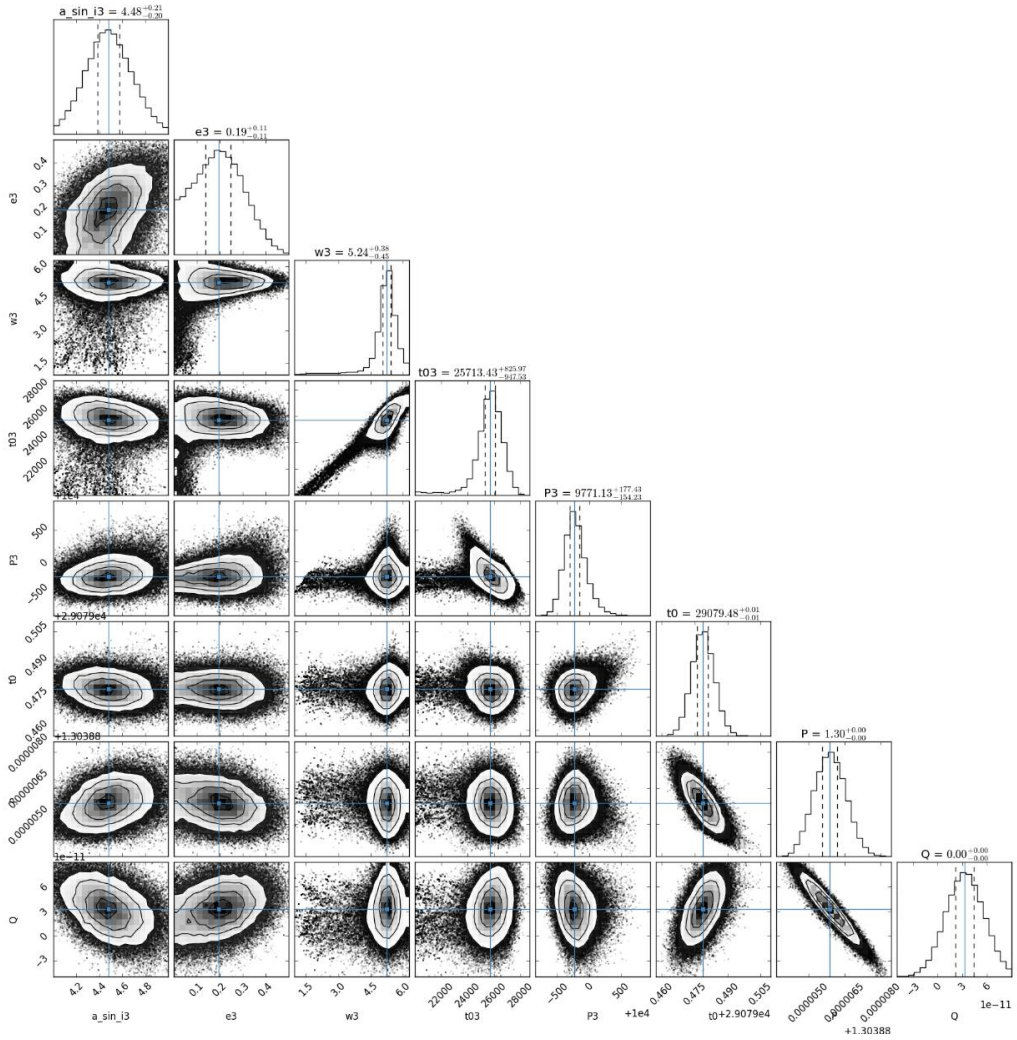
Şekil.4.3 V359 Cas'ın O-C grafiği ve elde edilen en iyi model fit (kesikli çizgi kütle aktarımını ifade eden parabol fitini, sürekli çizgi ise en son modeli yani parabol+sinüs göstermektedir). Alt panelde fitten kalan artıklar görülmektedir



Şekil 4.4 Artıkların büyütülmüş görünümü

Çizelge 4.2 V359 Cas'ın O-C analizinden elde edilen parametreler

Parametre	Birim	Değer	Hata
P	gün	1.304	6.58×10^{-7}
P_3	Gün	9785.2	178
P_3	yıl	26.8	0.5
Q	gün	3.28×10^{-11}	2.27×10^{-11}
$a\sin i_3$	AB	4.483	0.2
e_3		0.195	0.106
t_0	HJD	29079.48	0.005
t_{03}	HJD	25564.57	1169.78
w_3	derece	293.6	40.9
Üçüncü cisme ilişkin parametreler			
K_3	sn	2230.4	98.6
K_3	dk	37.2	1.6
M_3	$M_\odot$	1.723	0.107
$M_3\sin i_3$	$M_\odot$	1.692	0.105
a	AB	16.448	1.241
a_{12}	AB	4.571	0.201
a_3	AB	11.877	1.039
$f(m_3)$	$M_\odot$	0.126	0.017
Kütle aktarımına ilişkin parametreler			
dM	$M_\odot$/yıl	1.54×10^{-8}	1.20×10^{-8}
dP	g/g	5.04×10^{-11}	3.48×10^{-11}
dP	g/yıl	1.84×10^{-8}	1.27×10^{-8}
dP/P	1/g	3.86×10^{-11}	2.67×10^{-11}
χ^2(*tüm veri*)		0.0335	
χ^2(*pg hariç*)		0.006	



Şekil 4.5 V359 Cas'ın MCMC yöntemi ile elde edilen köşe grafiği ve parametre dağılımı

4.3 CK Aqr Dönem Analizi

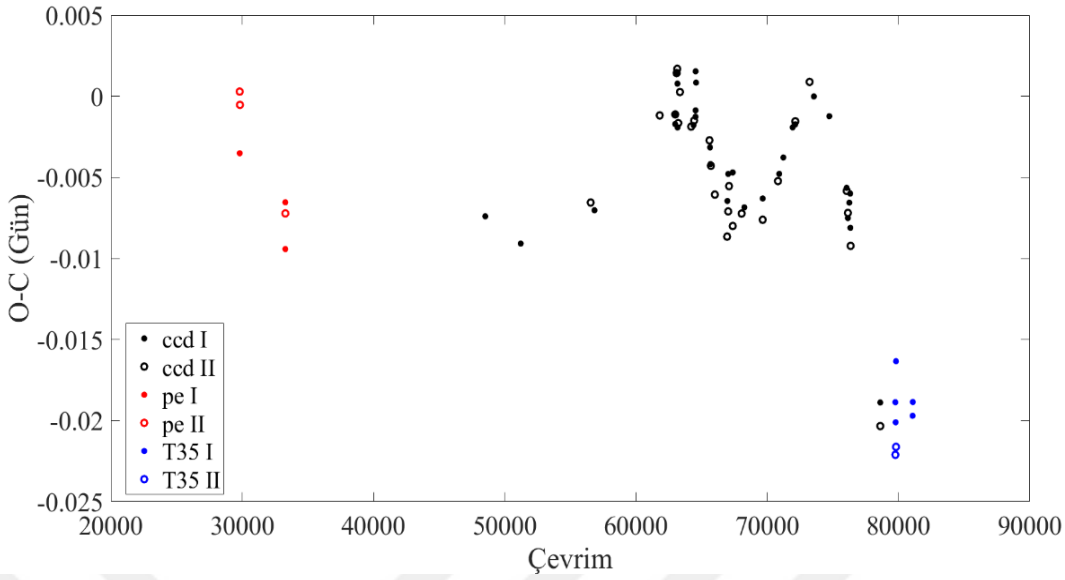
CK Aqr'nın literatürde yapılan dönem analizinde üçüncü bir cismin varlığı öne sürülmüştür (Bonnardeau 2021). Bu tez kapsamında, 2023 yılında T35 teleskobu ile yapılan gözlemlerden elde edilen minimum zamanlar O-C grafiğine eklendiğinde, daha önce görünen eğrinin trendine uygun bir yapı göstermediği fark edildi. Bu durumu açıklığa kavuşturmak için, 2024 yılında iki gece daha yapılan gözlemlerden elde edilen veriler ile birlikte AAVSO'nun veri kaynağından alınan ışık eğrilerinden hesaplanan minimum zamanlar da analize dahil edildi. Bu eklemeler sonucunda, O-C eğrisine uzun dönemli ikinci bir sinüs bileşeni eklenmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır.

Sinüs modeli ile açıklanabilen mekanizmalar, ilave cisim varlığı ya da manyetik etkinlik ile ilişkilendirilebilir (Bkz. Bölüm 2.1). Bu nedenle, üçüncü cismin artıklarına hem ilave bir dördüncü cismin varlığı hem de manyetik etkinlik yaklaşımıyla bir dönem analizi yapıldı.

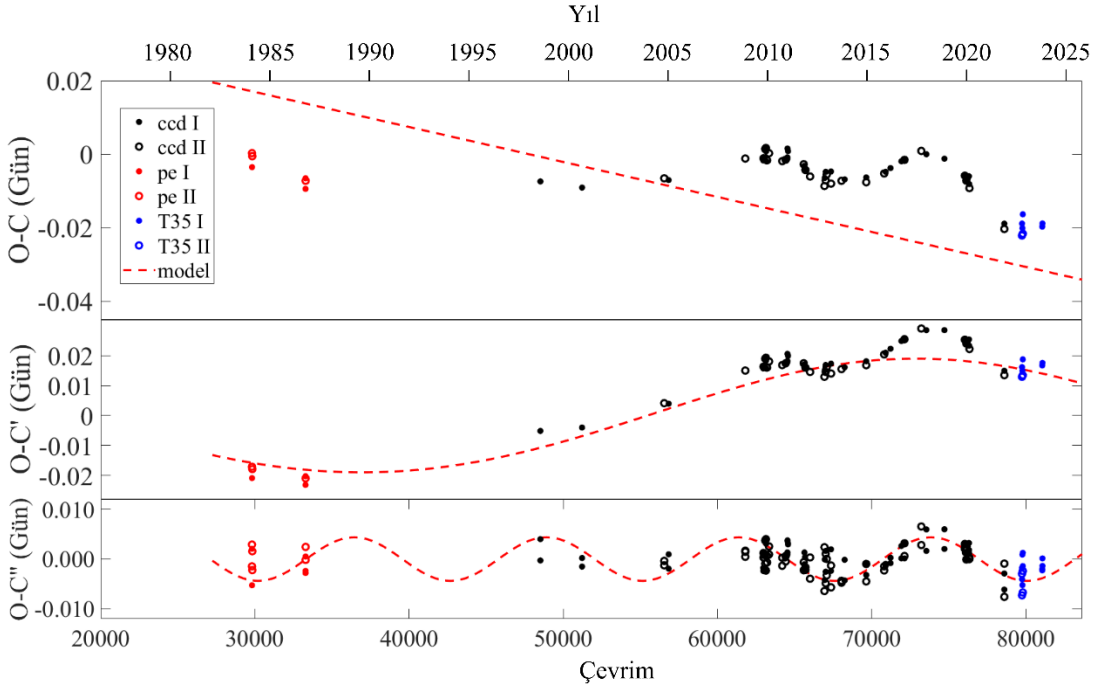
O-C grafiğini oluştururken, literatürde yer alan minimum zamanlara ek olarak 2 minimum zaman AAVSO veri tabanından ve 7 minimum zaman T35 teleskobuyla yapılan gözlemlerden eklendi. Analizde toplamda 71 minimum zaman kullanıldı; bunların 43'ü birinci minimum, 31'i ise ikinci minimumdan oluşmaktadır (Ek-1c). Fotoelektrik (pe) gözlemler için ağırlıklandırma katsayısı 5, CCD gözlemler için ise katsayı 10 olarak belirlendi. Çizelge 3.3'te verilen lineer ışık elemanları kullanılarak O-C grafiği oluşturuldu ve Şekil 4.6'da gösterildi.

Dönem değişimine üçüncü ve dördüncü bir cismin varlığının sebep olduğu düşünülen modelde, OCFit programı ile Monte Carlo (MCMC) yöntemi kullanıldı. Bu analizde, lineer düzeltme ve ek cisimler için Lite34Quad modellemesi tercih edildi. Sistemin O-C grafiği sistematik kütle aktarımını ifade eden parabolik bir değişim göstermediği ve doğrusal bir değişime işaret ettiği için Q parametresi hesaplamalara dahil edilmedi. Daha önce belirlenmiş başlangıç parametreleri programa girilerek; P (çiftin dönemi), P_3 ve P_4 (üçüncü ve dördüncü cisimlerin dönemleri), t_0, t_{03} ve t_{04} (minimum geçiş zamanları), e_3 ve e_4 (üçüncü ve dördüncü cisimlerin dışmerkezlikleri), w_3 ve w_4 (enberi noktalarının boylamları), $asini_3$ ve $asini_4$ (yörüngelerin görünür yarı büyük eksenleri) serbest parametre olarak seçildi. Tüm parametrelerin eşzamanlı çözümü gerçekleştirildi.

Şekil 4.7'nin üst panelinde lineer fit gösterilmektedir. Lineer fitten kalan artıklar ve bunlara uygulanan birinci sinüs fiti ortadaki panelde, bundan kalan artıklar ve uygulanan ikinci sinüs fiti ise alt panelde verildi. Şekil 4.8'de, tüm veriye uygulanan nihai model (lineer+sinüs+sinüs) üst panelde, fitten kalan artıklar ise alt panelde gösterilmektedir. En son uygulanan fitin artıkları hata sınırlarının içerisinde kaldığı (χ^2 = 0.0002) ve bu noktadan sonra artık verilerinde herhangi bir periyodik değişim tespit edilmediği için analiz bu aşamada tamamlandı.

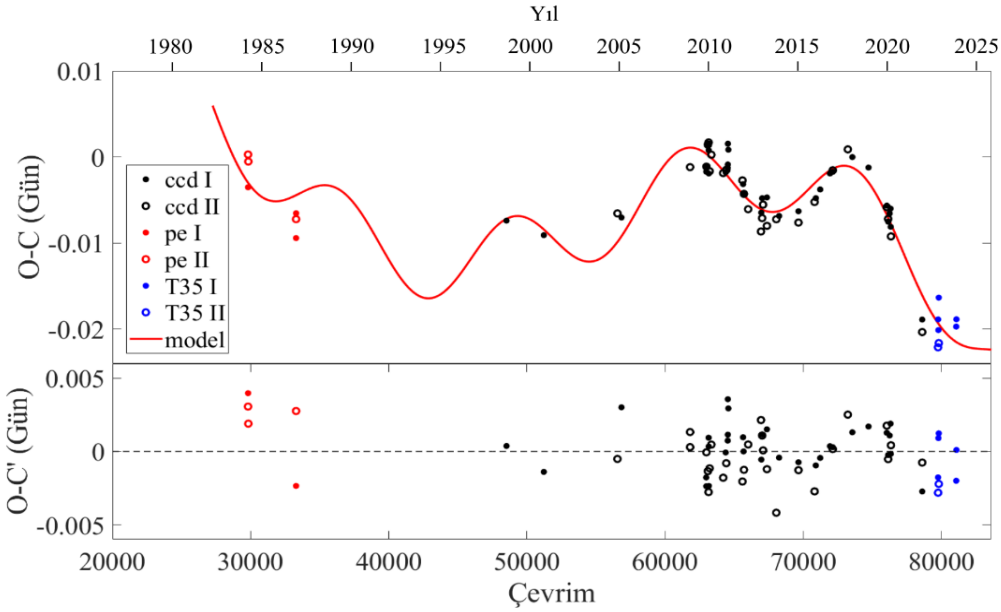


Şekil 4.6 CK Aqr'nin dönem değişim (O-C) grafiği

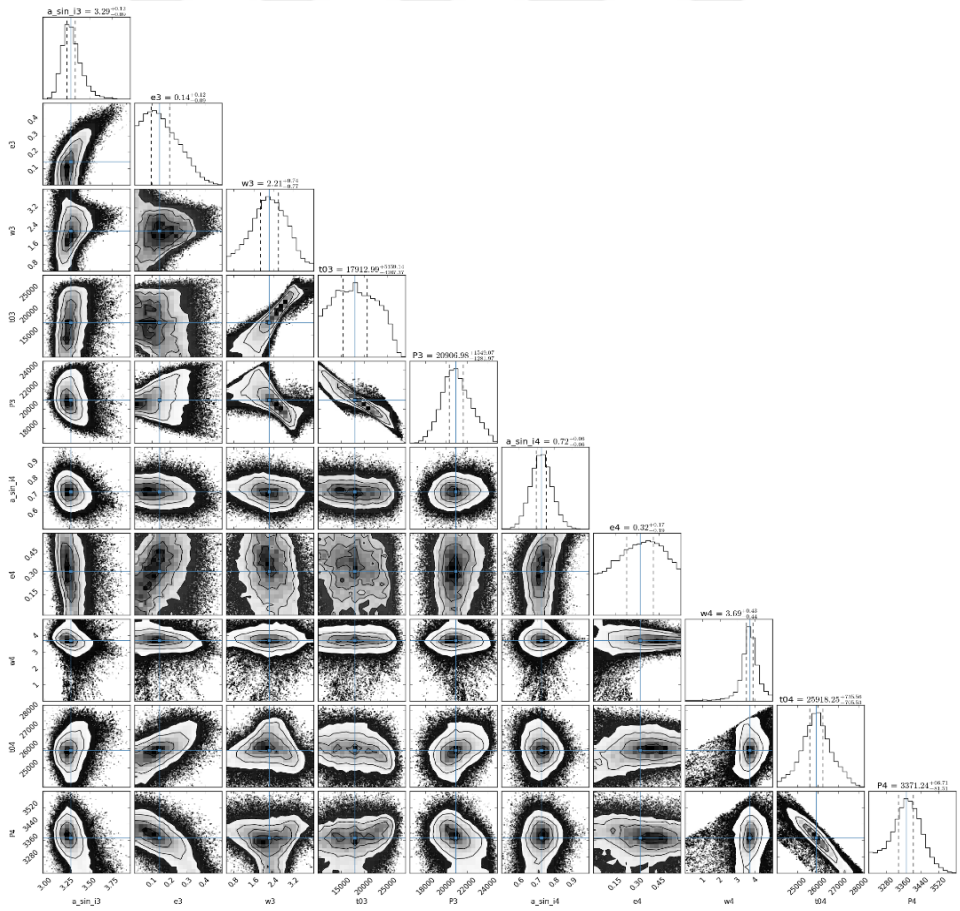


Şekil 4.7 CK Aqr'ya uygulanan lineer ve sinüs fitleri: üst panelde lineer fit, orta panelde 3. cisim modellemesini (lineer fitten kalan artıklara yapılan fiti), alt panelde 4. cisim modellemesini (sinüs fitinden kalan artıklara yapılan fiti) göstermektedir

Analiz sonucunda yeni ışık elemanları ve sisteme ait güncel parametreler elde edildi (Çizelge 4.3). Çözüm uzayında parametreler ilişkin köşe grafiği ise Şekil 4.9'da görülmektedir.



Şekil 4.8 CK Aqr'ya uygulanan nihai en iyi model (lineer+sinüs(LTE3)+sinüs(LTE4)): üst panelde uygulanan toplam fiti, alt panelde fitten kalan artıkları göstermektedir



Şekil 4.9 CK Aqr'nin MCMC yöntemi ile elde edilen köşe grafiği ve parametre dağılımı

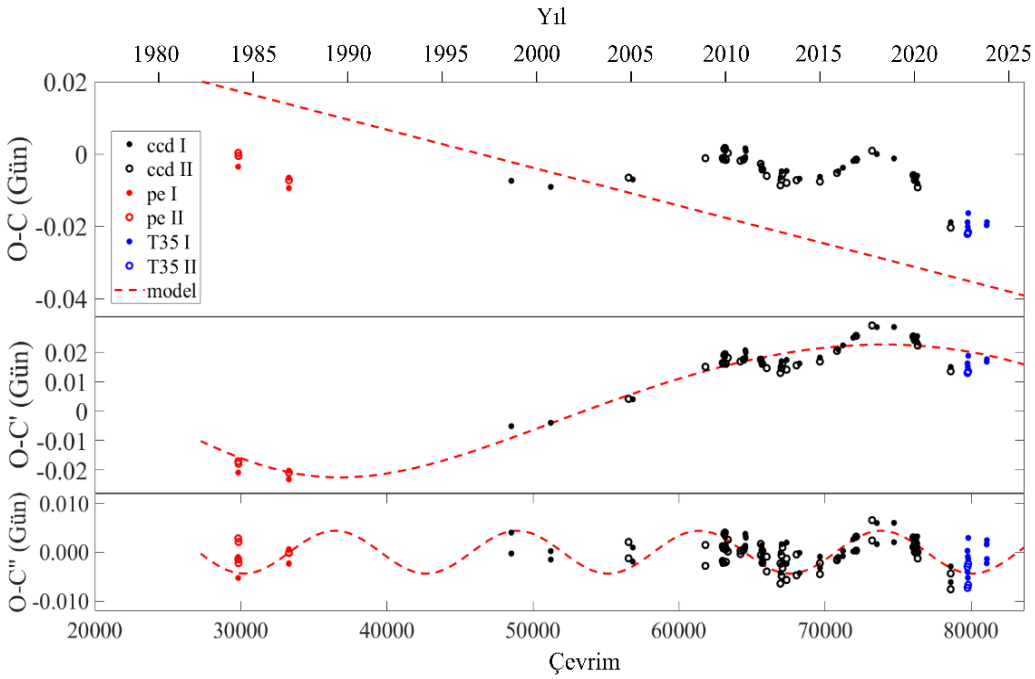
Çizelge 4.3 CK Aqr'nin O-C analizinden elde edilen parametreler (ışık-zaman etkisi)

Parametre	Birim	Değer	Hata
P	gün	0.283	7.09×10^{-8}
P_3	gün	20991.94	517.95
P_3	yıl	57.47	1.42
P_4	gün	3366.68	69.91
P_4	yıl	9.2	0.2
$a\sin i_3$	AB	3.302	0.221
$a\sin i_4$	AB	0.725	0.063
e_3		0.155	0.042
e_4		0.314	0.092
t_0	HJD	37547.38	0.0041
t_{03}	HJD	18053.73	938.21
t_{04}	HJD	25926.32	694.43
w_3	derece	126.16	7.98
w_4	derece	208.33	16.36
Üçüncü ve dördüncü cisme ilişkin parametreler			
K_3	sn	1640.5	60.7
K_3	dk	27.342	1.012
K_4	sn	347.4	37.9
K_4	dk	5.790	0.632
M_3	$M_\odot$	0.366	0.035
$M_3\sin i_3$	$M_\odot$	0.362	0.035
M_4	$M_\odot$	0.263	0.031
$M_4\sin i_4$	$M_\odot$	0.260	0.031
a	AB	25.165	4.123
a_{12}	AB	3.341	0.112
$a_{12\text{-}3}$	AB	19.026	2.533
a_{123}	AB	0.733	0.061
a_3	AB	15.686	2.422
a_4	AB	21.824	4.061
$f(m_3)$	$M_\odot$	0.011	0.002
$f(m_4)$	$M_\odot$	0.004	0.001
χ^2		0.0002	

O-C eğrisinde sinüzoidal yapıyı açıklayan ikinci bir mekanizma olarak çevrimsel manyetik aktivite yaklaşımı da değerlendirildi. Bu bağlamda, OCFit programında bu tür modelleme için uygun bir modül bulunmadığından, hesaplamalar Bölüm 2.1.4'te açıklanan teorik temellere dayanarak IDL programı kullanılarak gerçekleştirildi. Hesaplamalar için giriş parametreleri olarak referans minimum zamanı (T_0), yörünge periyodu (P), birinci ve ikinci bileşenlerin kütleleri (M_1, M_2), ışınım güçleri (L_1, L_2), yarıçapları (R_1, R_2), sistem yarı-büyük ekseni (a) ve yörünge eğim açısı (i) programa tanımlandı. Ayrıca, üçüncü cismin parametrelerine ek olarak çevrimsel manyetik aktiviteyi modellemek amacıyla manyetik çevrimin başlangıç zamanı (T_s), manyetik çevrim periyodu (P_s) ve sinüsün genliği (A) parametreleri belirli değer aralıklarında

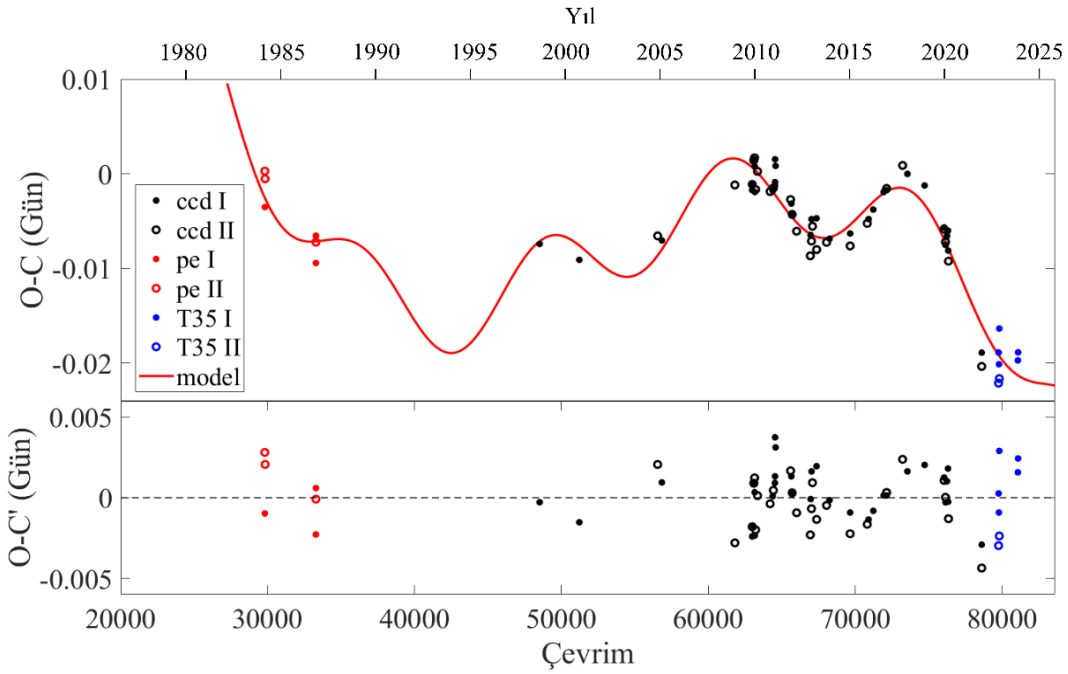
serbest bırakılarak çözüme dahil edildi. En küçük kareler yöntemi ile yapılan iterasyon sonucunda χ^2 =0.0002 değerine ulaşıldı ve fitin artıkları hata sınırları içinde kaldığı için analiz bu aşamada tamamlandı.

Şekil 4.10'un üst panelinde lineer fit gösterilmektedir. Lineer fitten kalan artıklar ve bunlara uygulanan birinci sinüs fiti ortadaki panelde, bundan kalan artıklar ve uygulanan ikinci sinüs fiti ise alt panelde verildi. Şekil 4.11'de, tüm veriye uygulanan nihai model (lineer+sinüs+sinüs) üst panelde, fitten kalan artıklar ise alt panelde gösterilmektedir.



Şekil 4.10 CK Aqr'ya uygulanan lineer ve sinüs fitleri: üst panelde lineer fit, orta panelde 3. cisim modellemesini (lineer fitten kalan artıklara yapılan fiti), alt panelde manyetik çevrim modellemesini (sinüs fitinden kalan artıklara yapılan fiti) göstermektedir

Analiz sonucunda yeni ışık elemanları ve sisteme ait güncel parametreler elde edildi (Çizelge 4.4).



Şekil 4.11 CK Aqr'ya uygulanan nihai en iyi model (lineer+sinüs(LTE)+sinüs(MA)): üst panelde uygulanan toplam fiti, alt panelde ise fitten kalan artıklar gösterilmektedir

Çizelge 4.4 CK Aqr'nin O-C analizinden elde edilen parametreler (manyetik çevrim)

Parametre	Birim	Değer	Hata
Üçüncü cisme ilişkin parametreler			
P_3	yıl	53.242	5.828
P_3	gün	68625.87	7512.37
$a\sin i_3$	AB	3.944	3.158
a_{12}	AB	3.991	3.22
e		0.219	0.223
w	derece	-128.535	40.577
T_s	HJD	7448.87	41597.6
A	gün	0.023	0.002
$f(M_3)$	$M_\odot$	0.022	0.057
m_3	$M_\odot$	0.428	0.066
Manyetik aktiviteye ilişkin parametreler			
P_s	yıl	9.672	
ΔP	sn/çevrim	0.19	
ΔJ	grcm^2/sn	-1.95×10^{47}	
ΔE	erg	8.99×10^{40}	
ΔL	erg/sn	9.26×10^{32}	
B	gauss	17076.81	
ΔM	kadir	0.15	
χ^2		0.0002	

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

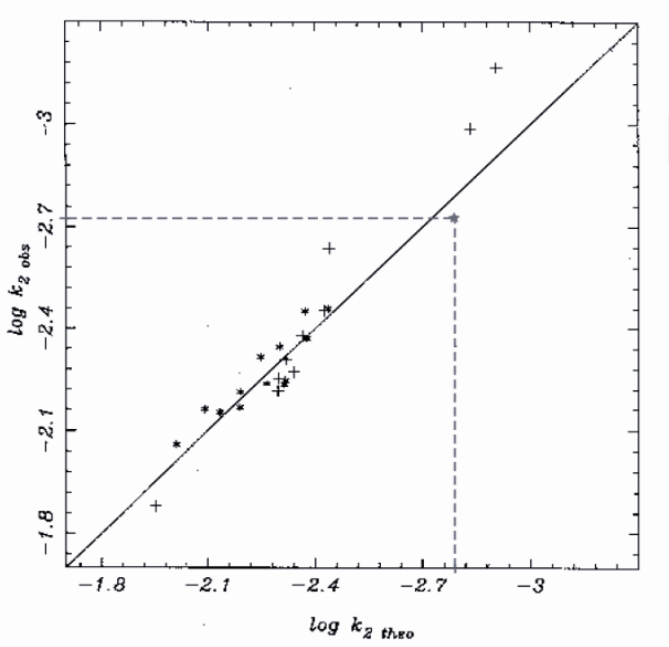
Algol türü örten değişen ve eksen dönmesi gösteren V871 Per'in mutlak parametreleri ilk kez bu tez çalışmasında hesaplandı. Yeni eklenen minimum zaman verileriyle birlikte gerçekleştirilen detaylı dönem analizi, sistemin güncel yörünge parametrelerini ortaya koymuştur. Yapılan analiz sonucunda elde edilen parametreler, literatürde daha önce yapılmış dönem analizleriyle kıyaslandı ve uyumlu sonuçlar elde edildi. Bu karşılaştırmalar, sonuçların doğruluğunu destekler nitelikte olup, Çizelge 5.1'de detaylı olarak sunuldu.

Çizelge 5.1 V871 Per'in eksen dönmesi parametrelerinin önceki çalışmalarla kıyaslanması

Parametreler	Birim	Wolf vd. (2013)	Kim vd. (2018)	Bu çalışma
Min. Zaman	-	20	32	72
T_0	HJD	51421.5607	51421.5601	51421.5614
P_s	gün	3.023882	3.023883	3.023527
P_a	gün	3.024233	3.024230	3.023882
$\acute{\omega}$	der./çev.	0.0418	0.0412	0.0422
ω_0	der.	144.8	144.8	144.0
e	-	0.2353	0.2338	0.2353
U	yıl	71.0	72.3	70.6
K_{ap}	gün	-	0.2265	0.2265

Bu çalışmanın bir diğer önemli katkısı, V871 Per sisteminin iç yapı sabiti (k_2) ve rölativistik katkı değerlerinin ilk kez hesaplanmış olmasıdır. Sistemin yörüngesinin rölativistik eksen dönmesi miktarı $\acute{\omega}_{rel}$ = 0.00054 °/çevrim olarak hesaplandı. Bu değer, sistemin toplam gözlenen eksen dönmesine yalnızca %1.3 oranında katkıda bulunmakta ve rölativistik etkinin sistemde oldukça küçük bir paya sahip olduğunu göstermektedir. Rölativistik katkının toplam eksen dönmesinden çıkarılmasıyla, eksen dönmesindeki klasik katkı $\acute{\omega}_N$ = 0.04168 °/çevrim olarak bulundu. Klasik katkı, sistemin bileşen yıldızlarının fiziksel özelliklerine (şekil bozulması ve armutlaşma etkisi gibi) ve yörünge geometrisine bağlıdır ve bu sonuç eksen dönmesine klasik katkının çok düşük olduğunu göstermektedir.

İç yapı sabiti, yıldız içindeki yoğunluk dağılımı ile ilişkilidir ve yıldız evrim modeli ile ilgili bilgi sağlamaktadır. Yapılan eksen dönmesi çalışması her bileşen için ayrı ayrı iç yapı sabiti hesaplama olanağı vermemektedir. Bu nedenle her iki bileşenin benzer iç yapı özelliğine sahip olduğu varsayımıyla ortalama iç yapı sabiti elde edildi. Kopal (1978)'in denklemlerine dayanarak (bkz. Bölüm 2.1.2) yapılan hesaplamalar ile sistemin ortalama gözlemsel iç yapı sabiti $\log k_{2,obs}$=-2.073 olarak hesaplandı. Bununla birlikte sistemin kuramsal modellerden teorik iç yapı sabiti de elde edildi. Sistemin teorik iç yapı sabitini belirlemek için Claret (1995, 1997), Claret ve Gimenez (1995, 1998)'in kuramsal modellerden elde ettiği çizelgeler kullanıldı ve teorik değer $\log k_{2,teo}$= -2.079 olarak tespit edildi. Elde edilen bu değerler, Claret ve Gimenez'in 1993'te hazırladığı 24 eksen dönmesi gösteren sistemin teorik ve iç yapı sabitlerinin karşılaştırıldığı diyagrama yerleştirildi (Şekil 5.1). Bu sonuçta, yıldızda merkezi yoğunlaşmanın modellere göre bir miktar daha düşük olduğu görüldü.



Şekil 5.1 V871 Per'in, Claret ve Gimenez'in (1993) karşılaştırma diyagramında gösterilmesi

Yıldızlar evrimleştikçe merkez yoğunlukları artmakta, dolayısıyla iç yapı sabitinin değeri de küçülmektedir (Bulut 2003). Buna göre gözlemsel ve teorik değerler karşılaştırıldığında, modele göre V871 Per'in daha genç bir yıldız olması gerektiği sonucuna varıldı. Bu sonuçlar, ilk kez ışık eğrisi analizi yapılan ve bu analizlerde güncel

TESS ışık eğrilerinin kullanılmasıyla mutlak parametreleri elde edilen V871 Per'in yörünge dinamikleri ve yapısal özellikleriyle ilgili literatüre katkı sağlamaktadır. Bu çalışma, gelecekte yapılacak gözlemsel çalışmalar ve teorik modellemeler için bir temel oluşturacaktır. Özellikle, sistemin tayfsal gözlemlerinin gerçekleştirilmesiyle mutlak parametrelerin daha hassas bir şekilde belirlenmesi mümkün olacaktır. Ayrıca, daha uzun süreli minimum zaman gözlemleriyle eksen dönmesi ve diğer parametreler üzerine daha güvenilir analizler yapılabilecektir.

β lyr türü örten değişen olan V359 Cas sistemi üzerinde detaylı dönem analizi ve yörünge parametreleri incelendi. Sistemin yörünge dönemi P_{orb}=1.303886 gün olarak belirlendi. O-C artıkları, sinüzoidal bir dönem değişimi olduğunu göstermektedir. Sisteme fiziksek olarak bağlı üçüncü bir cismin yaratmış olduğu ışık-zaman etkisi kabulü altında yapılan O-C analizi neticesinde üçüncü cismin yaklaşık 27 yıllık bir yörünge hareketine sahip olduğu ve kütlesinin $M_3 \approx 1.72$ $M_\odot$ olduğu hesaplandı. Ayrıca, üçüncü cismin yörüngesinin dış merkezliği e=0.195 olarak bulundu.

Sistemin Roche lobunu dolduran bir bileşene sahip olması, modelleme aşamasında kütle transferinin dikkate alınmasını gerekli kılmıştır. Elde edilen düşük genlikli parabol, literatürde benzer örneklerin bulunması nedeniyle hesaplamalara dahil edilmiştir. Nitekim Yıldırım (2019), yarı ayrık sistemler üzerine yaptığı çalışmada kütle transfer oranlarını 10^{-5}–10^{-8} gün/yıl mertebelerinde hesaplamıştır. Bu çalışmada V359 Cas'ın dönem analizi sonuçları, küçük kütleli bileşenden büyük kütleli bileşene kütle transferi olduğunu (yukarı yönlü parabol) ve bunun yörünge dönemini artırdığını göstermektedir. Yörünge dönemindeki artış hızı 1.84×10^{-8} gün/yıl, kütle transfer oranı ise 1.54×10^{-8} $M_\odot$/yıl olarak hesaplandı. Ayrıca ışık eğrisi analizinde bileşenlerin sırasıyla %68 ve %100 Roche dolum oranına sahip olduğu belirlendi. Birinci bileşen yani diğer bileşene göre da büyük kütleli, daha küçük yarı çaplı, geç B tayf türü (11672 K) ve kütle alan bileşendir. Diğeri ise daha küçük kütleli, daha büyük yarı çaplı, geç A tayf türü (7223 K) ve kütle aktarımı yapan bileşendir ve bu yapısıyla sistemin klasik Algol tanımına uyduğunu göstermektedir. Bu durum Avvakumova (2013) ve Özkardeş (2019)'in sonuçları ile uymaktadır.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, B. Özkardeş (2019) tarafından yapılan analiz sonuçlarıyla karşılaştırıldı (Çizelge 5.2). Söz konusu çalışmada yörünge dış merkezliğinin sıfır olarak kabul edilmesi, üçüncü cismin kütlesinin 3.67 $M_\odot$ olarak hesaplanmasına neden olmuştur. Bu çalışmada ise dış merkezlik hesaba katılarak üçüncü cismin kütlesi 1.72 $M_\odot$ olarak belirlendi. Benzer şekilde, üçüncü cismin yörünge periyodu önceki çalışmada 32 yıl olarak hesaplanırken, bu çalışmada 27 yıl olarak hesaplandı. Bu farklılıkların, özellikle ışık eğrisi çözümlerinde kullanılan yöntemlerin farklı olmasıyla ve analize yüze yakın yeni minimum zaman verisinin dahil edilmesiyle ilişkili olduğu düşünülmektedir. Ayrıca önceki çalışmada birinci bileşenin sıcaklığı yıldızın tayf türüne göre amprik değerlerle belirlenip ışık eğrisi çözümü yapılmışken; bu çalışmada, Gaia'nın güncel verileriyle, TESS ışık eğrisi üzerinden ve *q-i* taraması gibi detaylı yöntemlerle daha doğru bir ışık eğrisi çözümü yapılmıştır. Bu nedenle birinci ve ikinci bileşenlerin kütleleri de her iki çalışmada bir miktar farklı sonuçların çıkmasına sebep olmuştur. Özkardeş ışık eğrisi analizinden birinci ve ikinci bileşenin kütlesini sırasıyla 6.75 ve 2.25 $M_\odot$ bulmuşken, bu çalışmada ise 2.93 ve 1.55 $M_\odot$ olarak elde edildi.

Çizelge 5.2 V359 Cas'ın bu çalışmada elde edilen parametrelerinin önceki çalışmayla kıyaslanması

Parametreler	Birim	Özkardeş (2019) Değer	Bu Çalışma Değer
Min. Zaman	-	27	137
T_0	HJD	29079.3384	29079.4787
P	gün	1.3039	1.3039
P_3	yıl	37	27
T_3	HJD	21396	25565
e	-	0	0.195
w	derece	90	292.6
$f(m_3)$	-	0.28	0.13
M_3	$M_\odot$	3.67	1.7
M_1	$M_\odot$	6.75	2.93
M_2	$M_\odot$	2.25	1.55

Not: Üst kısım dönem değişimi, alt kısım ışık eğrisi analizi sonuçlarının kıyaslamasını göstermektedir.

Sonuç olarak, V359 Cas sisteminde gözlemlenen dönem değişimlerinin temel olarak bileşenler arası kütle transferinden ve sisteme kütle çekimsel olarak bağlı üçüncü cismin etkilerinden kaynaklandığı belirlenmiştir. Bu bulgular, sistemin yörünge yapısı ve evrimsel sürecine ilişkin önemli bilgiler sunmaktadır. Sistemin gelecekte yapılabilecek

tayfsal gözlemleri ile daha hassas mutlak parametreler elde edilmesi hem bu çalışmanın bulgularını güçlendirecek hem de sistemin evrimsel durumuna dair daha net çıkarımlarda bulunulmasını sağlayacaktır.

W tipi W UMa olan CK Aqr'nin dönem değişimi O-C eğrisinde iki ayrı çevrimli dönem değişimi görüldü. Daha önce Bonnardeau (2021) tarafından yapılan dönem analizinde sadece 3. cisimden söz edilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında yapılan gözlemlerden elde edilen minimum zamanların eklenmesiyle üçüncü cisme ek dördüncü bir cismin varlığı veya yapılan analizler sonucu daha olası bir durum olan manyetik çevrimin neden olduğu değerlendirildi. Daha önce sistemin tayf türü G5-G8 belirlenmiş olması (Le Borgne 1989) ve ışık eğrisi çözümünde bir bileşeninde leke barındırması manyetik aktivite nedeniyle oluşan dönem değişimini desteklemektedir. Ayrıca manyetik çevrim analizinde ΔP/P oranı 2.2×10^{-6} olarak bulunması Applegate mekanizmasını ($\Delta P/P\approx10^{-5}$) desteklemektedir. Ancak aktif yıldızın manyetik alan şiddeti 17 kG olarak hesaplandı. Bu durum literatürde manyetik olarak en aktif yıldız olarak bilinen RS CVn'nin manyetik alan şiddetinden (ki bu değer13 kG) daha büyük çıkmaktadır. Bu nedenle Lanza'nın (2020) önerdiği model ile yıldız bileşenlerinin manyetik aktiviteye bağlı dönem değişimlerini ortaya çıkartmak için gerekli olan enerji bağıntıları kullanıldı. Bu bağıntılar yardımıyla birinci ve ikinci bileşen için sırasıyla ΔE_1=-$1.36309\times10^{+42}$erg ve ΔE_2=-$8.34708\times 10^{+40}$erg olacak şekilde aşağıdaki eşitliğe göre hesaplandı (Han vd. 2023):

$$\Delta E = -[mr_0^2\Omega^2]\frac{\Delta t}{3T}$$

Burada; m sistem için indirgenmiş kütle ($m=M_1M_2/(M_1+M_2)$), r_0 yörünge yarıçapı, $\Omega=2\pi/P_{orb}$ açısal hız ve $\Delta t/T = \Delta P/P$ periyod değişiminin göreli genliğidir. Bu hesaplamalar sonucu bileşenlerin ışınım zaman ölçeği $\Delta E_1/L_1$=39.34 yıl ve $\Delta E_2/L_2$=0.78 yıl olarak bulundu. Bunlardan manyetik olarak aktif olan ikinci bileşenin değeri sistemin gözlemlenen çevrimli döngüsü P_s=9.67 yıldan daha küçüktür. Ayrıca birincil ve ikincil bileşenlerde üretilen enerjiye göre gerekli enerji oranları $\Delta E_1/E_1$=4.07 ve $\Delta E_2/E_2$=0.08 olarak belirlendi. Özellikle ikinci bileşen için $\Delta E/E$ oranın 1'den küçük olması gözlemlenen çevrimin manyetik aktivite ile açıklanabileceği anlamına gelmektedir (Čeki vd. 2024).

G-F tayf türü genç yıldızlarda iç katmanlarda manyetik dinamo etkisi kuvvetlidir ve ömürlerinin büyük bir kısmında yüksek düzeyde manyetik aktivite gösterebilmektedirler (Selam 1998). Hall (1991), Lanza ve Roddono (1999), Berdyugina (2005), Strassmeier (2005) gibi birçok araştırmacı tarafından yapılan çalışmalar göstermiştir ki değen çiftlerde madde aktarımı ve yıldızın dönme hareketi hızlıysa ve bileşenlerden en az biri lekeye sahipse manyetik etkinliği yüksektir. Yine de özellikle manyetik etkinliği yüksek olarak bilinen RS CVn türü yıldızlarda bile 1000 ile 13000 Gauss arası bir manyetik etkinlik şiddeti görülürken (Applegate 1992), bu değerin CK Aqr'de 17kG civarında çıkması iki durum ile açıklanabilir. Birincisi; bu yıldız daha önce görülmemiş türde bir manyetik etkinlik gösteriyor ve bu çalışma ile ilk kez ortaya çıkarılmış olabilir. İkincisi; CK Aqr'nin ışık eğrisi çözümleri yapılırken kütle oranı değeri, tayfsal bir çalışması olmadığı için, fotometrik yöntemlerle belirlendi. Dolayısıyla buradan gelen etkinin bir yansıması ile de açıklanabilir. Kütle oranı taramasının güvenilirliği tartışılabilir. Manyetik alan şiddetinin çok yüksek çıkması tek bir modelden elde edilen sonuçlar ile net bir şekilde açıklanamaz. Özellikle Doppler haritalama teknikleri gibi yöntemler ve gelecekte yapılacak yüksek çözünürlüklü tayfsal gözlemler ile sistemin doğası ve manyetik dinamikleri hakkında detaylı veriler elde edildiğinde burada tartışılan mekanizmalara ilişkin daha kesin sonuçlara ulaşılacağı düşünülmektedir.

CK Aqr'nın dönem değişimi için ikinci bir yaklaşım olarak ilave dördüncü cisim hesaplamaları da yapıldı. Daha önce Bonnardaeu (2020) yalnızca üçüncü cisim yaklaşımında bulunmuştu. Bu çalışma kapsamında yapılan gözlemlerden eklenen yeni verilerle daha uzun dönemli üçüncü cisme ilave dördüncü bir cismin varlığı için hesaplamalar yapıldı. Sonuçların karşılaştırılması Çizelge 5.3'te paylaşıldı. Sonuçlar incelendiğinde dördüncü cisim ve manyetik çevrim için yapılan çözümlerde üçüncü cisim parametrelerinin farklı olduğu görülmektedir. Bunun sebebi hesaplamaya katılan parametre sayısının farklı olması, çözüm yöntemlerinin farklı olması (birisinde en küçük kareler diğerinde Monte-Carlo yöntemi) ve manyetik çevrim için yapılan hesaplamalarda düzgün bir sinüs için (dışmerkezlik hesaplamalara katıldığında sinüs eğrisinin simetrisi bozulmaktadır) çözümün yapılıyor olmasından kaynaklanmaktadır. Üçüncü cismin periyodik hareketini tamamlama süresi ve kütlesi ise birbirine çok yakın çıkmıştır. Her iki çözümde de artıkların genlikleri hemen hemen aynı aralıkta kalmıştır (-0.005, 0.005).

Çizelge 5.3 CK Aqr'nın bu çalışmada elde edilen parametrelerinin önceki çalışmayla kıyaslandığı tablo

		Bonnardeau 2020	Bu Çalışma	
			LTE3+4	LTE3+MA
Parametreler	Birim	Değer	Değer	Değer
e_3	-	0.273	0.155	0.219
$a\sin i_3$	AB	0.8078	3.3016	3.9437
w_3	der	-65.75	126.16	-128.54
P_3	yıl	8.237	57.474	53.242
M_3	$M_\odot$	-	0.37	0.37
M_4	$M_\odot$		0.26	
P_4	yıl	-	9.22	-
P_s	yıl	-	-	9.67
e_4	-	-	0.314	-

CK Aqr için detaylı çözümler gerçekleştirilmiş olsa da her iki yaklaşım için tayfsal gözlemlerden elde edilecek veriler ve uzun süreli minimum zaman gözlemleriyle O-C eğrisinin değişiminin incelenmesi bu sistemde gözlenen dönem değişim mekanizmasının daha net bir şekilde açıklanmasını sağlayacaktır. Bu nedenle bu tez kapsamında elde edilen sonuçların gelecekte yapılacak çalışmalara ışık tutacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Agerer, F., and Huebscher, J. 1997. Photoelectric minima of selected eclipsing binaries and maxima of pulsating stars. *Information Bulletin on Variable Stars*, No. 4472.

Anonim. 2023. Web Sitesi: https://var.astro.cz/ Erişim Tarihi: 23.01.2024 adresinden alındı

Applegate, J. H. 1992. A mechanism for orbital period modulation in close binaries. *The Astrophysical Journal, 385*, 621–629.

Avvakumova, E. A., Malkov, O. Y., and Kniazev, A. Y. 2013. Eclipsing variables: Catalogue and classification. *Astronomische Nachrichten, 334(8),* s. 860-865.

Bahar, E. 2024. Sözlü görüşme. Ankara Üniversitesi Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, Ankara, Türkiye.

Berdyugina, S. V. 2005. Starspots: a key to the stellar dynamo. *Living Reviews in Solar Physics*, 2(1), 8.

Biermann, P., and Hall, D. S. 1973. A model to explain alternate period changes in Algol-like binaries. *Astronomy and Astrophysics, Vol. 27,*, s. 249-253.

Bonnardeau, M. 2021. CK Aqr time keeping. Evidence for a third body. *arXiv preprint arXiv:2104.04957*.

Brooks, S., Gelman, A., Jones, G., and Meng, X. L. 2011. *Handbook of markov chain monte carlo.* CRC press.

Bulut, İ. 2003. Örten Çift Yyıldızlarda Eksen Dönmesi. Doktora Tezi. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Cardelli, J. A., Clayton, G. C., and Mathis, J. 1989. The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction. *Astrophysical Journal, Part 1 (ISSN 0004-637X), vol. 345*, s. 245-256.

Čeki, A., Şenavcı, H. V., Latković, O., Uzunçam, E., Yorulmaz, E. B., and Bahar, E. 2024. Comprehensive analysis of the eclipsing binaries V527 Dra and V2846 Cyg. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 532(3),* s. 3582-3603.

Claret, A., and Giménez, A. 1993. The apsidal motion test of the internal stellar structure-comparison between theory and observations. Astronomy and Astrophysics, Vol. 277, NO. 2/OCT (I), P. 487, 1993, 277, 487.

Claret, A. 1995. Stellar models for a wide range of initial chemical compositions until helium burning. I. From X= 0.60 to X= 0.80 for Z= 0.02. *Astronomy and Astrophysics Suppl., Vol. 109*, s. 441-446.

Claret, A., and Gimenez, A. 1995. Stellar models for a wide range of initial chemical compositions until helium burning. II. From X= 0.63 to X= 0.80, for Z= 0.01. *Astronomy and Astrophysics Supplement, v. 114*, s. 549.

Claret, A. 1997. Stellar models for a wide range of initial chemical compositions until helium burning-III. From X= 0.55 to X= 0.75, for Z= 0.03. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 125(3), s. 439-443.

Claret, A., and Gimenez, A. 1998. Stellar models for a wide range of initial chemical compositions until helium burning-IV. From X= 0.65 to X= 0.80, for Z= 0.004. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 133(1),* s. 123-127.

Collins, K. A., Kielkopf, J. F., Stassun, K. G., and Hessman, F. V. 2017. AstroImageJ: Image Processing and Photometric Extraction for Ultra-Precise Astronomical Light Curves. *The Astronomical Journal, 153(2),* s. 77.

Eker, Z., Bakış, V., Bilir, S., and Soydugan, F. 2018. Interrelated main-sequence mass–luminosity, mass–radius, and mass–effective temperature relations. *MNRAS, 479(4),* s. 5491-5511.

Gaia Collaboration, Vallenari, A., Brown, A. G. A. et al. 2022. *Astronomy and Astrophysics, 674, A1 (Data Release 3).*

Gajdoš, P. 2023. New features in software OCFIT. *Open European Journal on Variable Stars.*

Gajdoš, P., and Parimucha, S. 2019. New tool with GUI for fitting OC diagrams. *Open European Journal on Variable Stars, 197,,* 71.

Giménez, A. 1985. General-relativistic periastron advances in eclipsing binary systems. *Astrophysical Journal, Part 1, vol. 297,* p. 405-412.

Giménez, A. 1994. Eclipse monitoring of eccentric binary systems. *Experimental Astronomy, 5(1),* 91-97.

Giménez, A., and Bastero, M. 1995. A revision of the ephemeris-curve equations for eclipsing binaries with apsidal motion. *Astrophysics and Space Science, 226,* 99-107.

Gimenez, A., and Garcia-Pelayo, J. M. 1983. A new method for the analysis of apsidal motions in eclipsing binaries. *Astrophysics and Space Science, 92,* 203-222.

Green, G. M. 2018. dustmaps: A Python interface for maps of interstellar dust. *Journal of Open Source Software, 3(26),* s. 695.

Güzel, O., and Özdarcan, O. 2020. PyWD2015–A new GUI for the Wilson-Devinney code. *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso*, s. 535-538.

Hall, Douglas S. 1989. The Relation Between Rs-Canum and Algol. *Space Science Reviews, Volume 50, Issue 1-2, pp. 219-233*

Hamme, W. V. 1993. New limb-darkening coefficients for modeling binary star light curves. *Astronomical Journal (ISSN 0004-6256), vol. 106, no. 5,* s. 2096-2117.

Han, Z. T., Qian, S. B., Han, Q. W., Zang, L., Soonthornthum, B., Li, L. J., and Na, W. W. 2023. Orbital period variations in HT Cas: evidence for additional angular momentum loss and a High-eccentricity Giant Planet. *The Astrophysical Journal, 953(1),* s. 63.

Hardorp, J., Rohlfs, K., Stock, J., and Slettebak, A. 2000. VizieR Online Data Catalog: Luminous Stars in the Northern Milky Way (LS)(Hardorp+ 1959-1965). *VizieR Online Data Catalog, 3076*, III-76A.

Hoffmeister, C. 1949. *Astronomische Abhandlungen: Ergänzungshefte zu den Astronomischen Nachrichten (Vol. 12, No. 1, p. A3).*

Irwin, J. B. 1952. The Determination of a Light-Time Orbit. *Astrophysical Journal, vol. 116*, s. 211.

Irwin, J. B. 1959. Standard light-time curves. *Astronomical Journal, Vol. 64*, s. 149.

Kim, C. H., Kreiner, J. M., Zakrzewski, B., Ogłoza, W., Kim, H. W., and 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)*, s. 41.

Kinnunen, T., and Skiff, B. A. 2000. Coordinates and Identifications for Sonneberg Variables on MVS 308-316. *Information Bulletin on Variable Stars, No. 4906,# 1., 4906.*

Kopal, Z. 1978. *Dynamics of Close Binary Systems.* UK: Springer Dordrecht.

Kwee, K., and Woerden, H. V. 1956. A method for computing accurately the epoch of minimum of an eclipsing variable. *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands, Vol. 12*, s. 327.

Lanza, A. F., and Rodono, M. 1999. Orbital period modulation and quadrupole moment changes in magnetically active close binaries. *Astronomy and Astrophysics, v. 349*, p. 887-897.

Lanza, A. F. 2020. Internal magnetic fields, spin–orbit coupling, and orbital period modulation in close binary systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 491(2), 1820-1831.

Le Borgne, J. F., Poretti, E., and Figer, A. 1989. On the Misclassification of CK Aquarii. *Information Bulletin on Variable Stars, No. 3316*, 1.

Lucy, L. B. 1967. Gravity-darkening for stars with convective envelopes. *Zeitschrift für Astrophysik, Vol. 65*, s. 65, 89.

Malkov, O. Y., Oblak, E., Snegireva, E. A., and and Torra, J. 2006. A catalogue of eclipsing variables. *Astronomy and Astrophysics, 446(2)*, 785-789.

O'Connell, D. J. 1951. The so-called periastron effect in eclipsing binaries. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 111(6)*, s. 642-642.

Otero, S. A., Wils, P., and Dubovsky, P. A. 2004. New Eclipsing Binaries Found in the NSVS Database I. *IBVS, 5570*.

Özkardeş, B. 2019. Light Curve and Period Analysis of The Beta Lyrae Type System V359 Cas. *Turkish Physical Society 35th International Physics Congress*, s. 145-151.

Paschke, A., and Brat, L. 2006. OC gateway, a collection of minima timings. *Open European Journal on Variable Stars, 23*, s. 13.

Pecaut, M. J., and Mamajek, E. E. 2013. Intrinsic colors, temperatures, and bolometric corrections of pre-main-sequence stars. *The Astrophysical Journal Supplement Series, 208(1)*, s. 9.

Pickering, E. C. 1881. Photometric Measurements of the Variable Stars [beta] Persei and DM. 81° 25, Made at the Harvard College Observatory. *University Press: J. Wilson and Son*.

Prša, A., and Zwitter, T. 2005. computational guide to physics of eclipsing binaries. I. Demonstrations and perspectives. *The Astrophysical Journal, 628(1)*, 426.

Rucinski, S. M. 1969. The proximity effects in close binary systems. II. The bolometric reflection effect for stars with deep convective envelopes. *Acta Astronomica, Vol. 19,*, s. 245, 19, 245.

Selam, S. O. 1998. Yakın çift yıldızların dönem değişimleri; Yakın çift yıldızların dönem değişimleri. Doktora Tezi. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara

Strassmeier, K.G., 2005, "Stellar activity cycles: observing the dynamo?", *Astron. Nachr*., 326, 269–277.

Terrell, D., and Wilson, R. E. 2005. Photometric mass ratios of eclipsing binary stars. *Zdeněk Kopal's Binary Star Legacy* (s. 221-230.). içinde Springer.

Tsessevich, V. P. 1964. On the 95 RR Lyrae stars. *Astronomicheskii Tsirkulyar, Vol. 295*, 3-6.

Vogel, H. C. 1889. Über die spectroskopische Beobachtungen der Bewegung des Sterns Algol. *Astronomische Nachrichten, 127(6)*, s. 1-10.

Volkov, I. M., Chochol, D., Grygar, J., Mašek, M., and Juryšek, J. 2017. Orbital period changes in RW CrA, DX Vel and V0646 Cen. *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso, 47*, s. 29-52.

Von Zeipel, H. 1924. The radiative equilibrium of a rotating system of gaseous masses. *MNRAS Vol. 84*, s. 84, 665.

Yildirim, M. F. 2019. Değmeye yakın ve erken değme evresindeki yakın çift yıldızların temel parametre ilişkilerinin ve evrim durumlarının incelenmesi. *Doktora Tezi*.

Wilson, R. E., and Devinney, E. J. 1971. Realization of accurate close-binary light curves: application to MR Cygni. *Astrophysical Journal, vol. 166*, p. 605, 166, 605.

Wolf, M., Zasche, P., Kučáková, H., Lehký, M., Svoboda, P., and Šmelcer, L. Z. 2013. Apsidal motion in five eccentric eclipsing binaries. *Astronomy and Astrophysics*, 549, A108.

EKLER

EK 1 V871 Per'in minimum zamanları

EK 2 V359 Cas'ın minimum zamanları

EK 3 CK Aqr'nin minimum zamanları

EK 1 V871 Per'in minimum zamanları

HJDmin	P/S	Metot	Kaynak
51376.3698	p	ccd	M. Wolf (2013)
51377.5141	s	ccd	M. Wolf (2013)
51421.7190	p	ccd	M. Wolf (2013)
51456.1285	s	ccd	M. Wolf (2013)
51458.0144	p	ccd	M. Wolf (2013)
51503.3749	p	ccd	AJSS235.41
51504.5121	s	ccd	AJSS235.41
53381.2520	p	ccd	IBVS5741
54025.3492	p	ccd	OEJV0074
54410.4552	s	ccd	AJSS235.41
54418.4546	p	ccd	M. Wolf (2013)
54421.4774	p	ccd	M. Wolf (2013)
54812.6321	s	ccd	IBVS5871
55102.9297	s	ccd	IBVS5920
55480.9263	s	ccd	IBVS5960
55565.5985	s	ccd	IBVS5992
55846.8248	s	ccd	IBVS6011
55901.2566	s	ccd	M. Wolf (2013)
55945.5128	p	ccd	M. Wolf (2013)
55957.5952	p	ccd	M. Wolf (2013)
56167.3657	s	ccd	M. Wolf (2013)
56175.3167	p	ccd	M. Wolf (2013)
56193.4602	p	ccd	M. Wolf (2013)
56233.8950	s	ccd	IBVS6042
56276.2290	s	ccd	IBVS6114
56282.2762	s	ccd	OEJV0160
56323.4842	p	ccd	IBVS6114
56584.6755	s	ccd	IBVS6114
56586.5552	p	ccd	IBVS6114
56940.3398	p	ccd	IBVS6152
56950.5782	s	ccd	IBVS6204
57327.3853	p	ccd	BAVN244
57714.4206	p	ccd	OEJV0211
58095.4100	p	ccd	BAVJ031
58830.1752	p	ccd	OEJV0205
58836.2275	p	ccd	BAVJ052
59610.2861	p	ccd	AAVSO
59619.3547	p	ccd	AAVSO
60000.3396	p	ccd	AAVSO

EK 2 V359 Cas'ın minimum zamanları

HJDmin	P/S	METOT	KAYNAK
27955.5060	p	pg	VSS4.170
29079.4630	p	pg	VSS4.170
29109.4940	p	pg	VSS4.170
29130.4120	p	pg	VSS4.170
29160.3530	p	pg	VSS4.170
30173.4950	p	pg	VSS4.170
30259.5100	p	pg	VSS4.170
30576.4090	p	pg	VSS4.170
31001.4390	p	pg	VSS4.170
31267.4630	p	pg	VSS4.170
31344.3880	p	pg	VSS4.170
31353.4130	p	pg	VSS4.170
31413.4280	p	pg	VSS4.170
31645.4550	p	pg	VSS4.170
33914.3130	p	pg	VSS4.170
33923.3730	p	pg	VSS4.170
33928.5840	p	pg	VSS4.170
47139.6050	p	vis	BAVM079
48503.5010	p	vis	BAVM080
48539.3870	s	vis	BAVM081
49615.7120	p	ccd	BAVM132
49627.4502	p	ccd	BAVM132
49644.3991	p	ccd	BAVM132
50344.5852	p	ccd	BAVM099
50636.5960	p	vis	BBSAG116
50717.4750	p	vis	BBSAG117
51323.7860	p	ccd	ROTSE (Paschke Anton)
51766.4568	s	ccd	BAVM152
52122.4144	s	ccd	BAVM152
52146.5333	p	ccd	BAVM158
52146.5351	p	ccd	OEJV74
52180.4351	p	ccd	BAVM183
52180.4361	p	ccd	BAVM183
53283.5076	p	ccd	IBVS5653
53349.3561	s	ccd	BAVM173
53656.4147	p	Ir	IBVS5653
54017.5906	p	Ir	IBVS5731
55072.4352	p	ccd	IBVS5941
55074.3880	s	Ir	IBVS5941
55076.3472	p	Ir	IBVS5941
55098.5146	p	Ir	IBVS5941
55409.4955	s	Ir	IBVS5984
55495.5532	s	Ir	IBVS6010
55502.7235	p	V	IBVS5960

V359 Cas'ın minimum zamanları

HJDmin	P/S	METOT	KAYNAK
55838.4792	s	Ir	IBVS6010
55849.5615	p	U-I	IBVS6010
55874.3362	p	ccd	IBVS6010
55874.3363	p	Ir	IBVS6010
56132.5120	p	ccd	BAVM234
57646.3473	p	ccd	OEJV211
58397.3924	p	ccd	BRNO
58741.6209	p	ccd	BRNO
59496.5717	p	ccd	BRNO
54360.5050	p	ccd	Özkardeş (2019)
54362.4810	s	ccd	Özkardeş (2019)
54373.5310	p	ccd	Özkardeş (2019)
54394.4000	p	ccd	Özkardeş (2019)
60229.3509	p	ccd	Bu çalışma (T35)
60231.3071	s	ccd	Bu çalışma (T35)
60253.4703	s	ccd	Bu çalışma (T35)
60255.4278	p	ccd	Bu çalışma (T35)
60257.3868	s	ccd	Bu çalışma (T35)
58956.1139	s	ccd	TESS
58956.7629	p	ccd	TESS
58957.4143	s	ccd	TESS
58958.0669	p	ccd	TESS
58958.7172	s	ccd	TESS
58959.3702	p	ccd	TESS
58960.0227	s	ccd	TESS
58960.6746	p	ccd	TESS
58961.3269	s	ccd	TESS
58961.9789	p	ccd	TESS
58962.6298	s	ccd	TESS
58963.2816	p	ccd	TESS
58963.9338	s	ccd	TESS
58964.5864	p	ccd	TESS
58965.2378	s	ccd	TESS
58965.8906	p	ccd	TESS
58966.5428	s	ccd	TESS
58967.1939	p	ccd	TESS
58967.8474	s	ccd	TESS
58969.8023	p	ccd	TESS
58970.4524	s	ccd	TESS
58971.1055	p	ccd	TESS
58971.7562	s	ccd	TESS
58972.4087	p	ccd	TESS
58973.0605	s	ccd	TESS
58973.7136	p	ccd	TESS

V359 Cas'ın minimum zamanları

HJDmin	P/S	METOT	KAYNAK
58974.3668	s	ccd	TESS
58975.0176	p	ccd	TESS
58975.6700	s	ccd	TESS
58976.3209	p	ccd	TESS
58976.9733	s	ccd	TESS
58977.6249	p	ccd	TESS
58978.2771	s	ccd	TESS
58978.9293	p	ccd	TESS
58979.5806	s	ccd	TESS
58980.2330	p	ccd	TESS
58980.8847	s	ccd	TESS
58981.5361	p	ccd	TESS
59853.8344	p	ccd	TESS
59854.4852	s	ccd	TESS
59855.1388	p	ccd	TESS
59855.7905	s	ccd	TESS
59856.4431	p	ccd	TESS
59857.0950	s	ccd	TESS
59857.7466	p	ccd	TESS
59858.3959	s	ccd	TESS
59859.0509	p	ccd	TESS
59859.7041	s	ccd	TESS
59860.3534	p	ccd	TESS
59861.0087	s	ccd	TESS
59861.6583	p	ccd	TESS
59862.3100	s	ccd	TESS
59862.9619	p	ccd	TESS
59866.8729	p	ccd	TESS
59868.1777	p	ccd	TESS
59868.8300	s	ccd	TESS
59869.4813	p	ccd	TESS
59870.1352	s	ccd	TESS
59870.7855	p	ccd	TESS
59871.4376	s	ccd	TESS
59872.0887	p	ccd	TESS
59872.7402	s	ccd	TESS
59873.3934	p	ccd	TESS
59874.0456	s	ccd	TESS
59875.3486	s	ccd	TESS
59876.0002	p	ccd	TESS
59876.6523	s	ccd	TESS
59877.3043	p	ccd	TESS
59877.9568	s	ccd	TESS
59878.6089	p	ccd	TESS
59879.2621	s	ccd	TESS
59879.9124	p	ccd	TESS
59880.5661	s	ccd	TESS
59881.2167	p	ccd	TESS
59881.8619	s	ccd	TESS

EK 3 CK Aqr'nin minimum zamanları

HJDmin	P/S	METOT	KAYNAK
45995.3680	s	pe	IBVS3316
45996.3560	p	pe	IBVS3316
46001.3180	s	pe	IBVS3316
46979.9350	p	pe	IBVS3316
46980.7880	p	pe	IBVS3316
46980.9290	s	pe	IBVS3316
51295.9790	p	ccd	ROTSE (Paschke Anton)
52061.6490	p	ccd	ASAS (Paschke Anton)
53571.6003	s	ccd	OEJV0209
53653.3527	p	ccd	OEJV0209
55061.5767	s	ccd	OEJV0209
55061.5767	s	ccd	OEJV0209
55391.5637	p	ccd	OEJV0209
55393.5467	p	ccd	OEJV0209
55396.5227	s	ccd	OEJV0209
55426.5627	s	ccd	OEJV0209
55440.4482	s	ccd	OEJV0209
55441.4397	p	ccd	OEJV0209
55443.4227	p	ccd	OEJV0209
55445.4036	p	ccd	BAVM215
55461.4144	s	ccd	BAVM215
55498.2547	s	ccd	OEJV0209
55740.5358	s	ccd	OEJV0209
55791.4012	p	ccd	BVS6033
55803.4448	s	ccd	OEJV0209
55833.3408	p	ccd	OEJV0209
55835.3248	p	ccd	OEJV0209
55836.4607	p	ccd	OEJV0209
55846.6614	p	ccd	IBVS6011
56135.5558	s	ccd	OEJV0209
56148.4488	p	ccd	OEJV0209
56158.3658	p	ccd	OEJV0209
56166.4418	s	ccd	OEJV0209
56252.3018	s	ccd	OEJV0209
56516.4021	s	ccd	BAVM232
56522.4968	p	ccd	OEJV0209
56539.3568	s	ccd	OEJV0209
56539.5008	p	ccd	OEJV0209
56558.3443	s	ccd	OEJV0209
56637.2643	p	ccd	OEJV0209
56638.2528	s	ccd	OEJV0209
56829.5298	s	ccd	OEJV0209
56887.4798	p	ccd	OEJV0209
57284.3418	s	ccd	OEJV0209

CK Aqr'nin minimum zamanları

HJDmin	P/S	METOT	KAYNAK
57284.4848	p	ccd	OEJV0209
57614.4728	s	ccd	OEJV0209
57640.4018	p	ccd	OEJV0209
57730.2318	p	ccd	OEJV0209
57930.5778	p	ccd	OEJV0209
57987.3943	s	ccd	OEJV0209
57987.5358	p	ccd	OEJV0209
58296.5558	s	ccd	OEJV0209
58389.3593	p	ccd	OEJV0209
58721.4703	p	ccd	OEJV0209
59096.3673	p	ccd	OEJV0209
59096.5088	s	ccd	OEJV0209
59123.2858	p	ccd	OEJV0209
59123.4278	s	ccd	OEJV0209
59153.3242	p	ccd	OEJV0209
59172.3107	p	ccd	OEJV0209
59176.2758	p	ccd	OEJV0209
59181.2337	s	ccd	OEJV0209
59821.7869	p	ccd	AAVSO
59821.9271	s	ccd	AAVSO
60147.3816	p	ccd	Bu çalışma (T35)
60147.5200	s	ccd	Bu çalışma (T35)
60154.4646	p	ccd	Bu çalışma (T35)
60161.4057	s	ccd	Bu çalışma (T35)
60161.5527	p	ccd	Bu çalışma (T35)
60519.4484	p	ccd	Bu çalışma (T35)
60523.4165	p	ccd	Bu çalışma (T35)