ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SEÇİLMİŞ BAZI ÖRTEN ÇİFT SİSTEMLERİN TAYFSAL ve FOTOMERİK ANALİZİ

Mehmet Alperen KUL

ASTRONOMİ VE UZAY BİLİMLERİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2025

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisan Tezi

SEÇİLMİŞ BAZI ÖRTEN ÇİFT SİSTEMLERİN TAYFSAL VE FOTOMETRİK ANALİZİ

Mehmet Alperen KUL

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mesut YILMAZ

Bu tez çalışması kapsamında, TIC 142587827 (V450 Dra) ve TIC 82224114 (BD+28 1833) örten çift sistemlerinin fotometrik ve dikine hız analizleri eşzamanlı olarak ilk kez yapıldı. Sistemlerin tayfsal gözlem verileri Ankara Üniversitesi Kreiken Rasathanesi'nde bulunan T80 Prof. Dr. Berahitdin Albayrak Teleskobu'na bağlı Whoppshel Tayfçekeri ile R ~ 15000 ve R ~ 30000 çözünürlüğe sahip 105 mikron ve 50 mikron fiber optik kablolar kullanılarak gerçekleştirildi. Sistemlere ait fotometrik veriler MAST veri tabanından elde edildi. Sistemlerin fotometrik ve tayfsal analizleri PyWD2015 programı yardımıyla gerçekleştirildi. Bu tez çalışması kapsamında ışık eğrisi ve dikine hız eğrisi analizleri sonucunda her iki bileşenin tayfsal kütle oranı ilk kez bu çalışma ile elde edildi. Bu çalışmaya göre TIC 142587827 sisteminin kütle oranı (q) 0.17 olarak, TIC 82224114 sisteminin kütle oranı (q) 2.93 olarak belirlendi. TIC 142587827 sisteminin tayfsal verileri analiz edilirken sisteme fiziksel olarak bağlı üçüncü bir cismin varlığına işaret eden ilave bir ışık kaynağı görüldü. İlave bileşenin sisteme fiziksel olarak bağlı olup olmadığını desteklemek amacıyla 2 farklı O-C dönem değişim analizi gerçekleştirildi. Manyetik aktivite kaynaklı dönem değişim analizi sonucunda manyetik çevrim dönemi 20.42 yıl ve manyetik alan şiddeti 12 kG olarak hesaplandı. Işık-zaman etkisi kaynaklı dönem değişim analizi sonucunda ilave cismin yörünge döneminin yaklaşık 22.76 yıl ve kütlesinin ise 0.41 $M_{\odot}$ olarak hesaplandı.

Eylül 2025, 63 sayfa

Anahtar Kelimeler: örten değişen yıldızlar, ışık eğrisi ve dikine hız analizi, O-C analizi, yıldızlar: TIC 142587827, TIC 82224114

ABSTRACT

Master Thesis

SPECTROSCOPIC AND PHOTOMETRIC ANALYSIS OF SOME SELECTED ECLIPSING BINARY SYSTEMS

Mehmet Alperen KUL

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

Supervisor: Prof. Dr. Mesut YILMAZ

In this thesis study, the photometric and radial velocity analyses of the eclipsing binary systems TIC 142587827 (V450 Dra) and TIC 82224114 (BD+28 1833) were simultaneously performed for the first time. The spectroscopic observations of the systems were obtained using the Whoppshel Spectrograph attached to the T80 Prof. Dr. Berahitdin Albayrak Telescope at Ankara University Kreiken Observatory, with 105 micron and 50 micron fiber optic cables, with spectral resolutions of R ~ 15,000 and R ~ 30,000 respectively. The photometric data of the systems were obtained from the MAST database. The photometric and spectroscopic analyses of the systems were obtained using the PyWD2015 software. In this thesis study, the mass ratios of both components of two binary star systems were obtained for the first time through the analysis of light and radial velocity curves. According to this study, the mass ratio (q) of the system TIC 142587827 was found to be 0.17, while the mass ratio of the system TIC 82224114 was determined as 2.93. During the spectral analysis of TIC 142587827, an additional light source was detected, indicating the possible presence of a third body physically bound to the system. To support this possibility, two different O-C period variation analyses were performed. The magnetic activity analysis suggested a magnetic cycle period of 20.42 years and a magnetic field strength of about 12 kG. Based on the light-time effect analysis, the third body was estimated to have an orbital period of about 22.76 years and a mass of approximately 0.41 $M_{\odot}$.

September 2025, 63 pages

Key Words: eclipsing binary stars, light curve and radial velocity analysis, O-C analysis, stars: TIC 142587827, TIC 82224114

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca engin akademik tecrübesi, yol göstericiliği ve her zaman yapıcı desteğiyle bana rehberlik eden değerli danışmanım sayın Prof. Dr. Mesut YILMAZ'a en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Lisans eğitimimden itibaren akademik gelişimime katkı sağlayan; bilimsel bakış açımı geliştirmemde büyük katkıları olan Prof. Dr. Selim O. SELAM, Prof. Dr. Hakan Volkan ŞENAVCI, Prof. Dr. Özgür BAŞTÜRK, Dr. Doğuş ÖZUYAR, Dr. İbrahim ÖZAVCI, Dr. Engin BAHAR ve Arş. Gör. Selçuk YALÇINKAYA'ya değerli katkıları, emekleri ve her daim destekleyici yaklaşımları için teşekkür ederim.

Bu süreçte birlikte çalıştığım, bilgi ve deneyim paylaşımıyla bana katkı sunan arkadaşım Anıl TEMELCİ'ye ve diğer arkadaşlarıma teşekkür ederim. Ayrıca, bu süreçte yalnızca desteğiyle değil, zekasıyla, sabrıyla, anlayışıyla bana güç veren Elif Şura ETİŞKEN'e en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Son olarak, her zaman yanımda olan, sevgileri, sabırları ve maddi-manevi destekleriyle beni bugünlere taşıyan ailem; Babam Mahmut KUL, annem Kadriye KUL, abilerim Murat KUL ve İlyas KUL ve ablam Hilal PEKTAZEL'e en derin teşekkürlerimi sunuyorum.

Mehmet Alperen KUL
Ankara, Eylül 2025

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI
ETİK i
ÖZET ii
ABSTRACT iii
TEŞEKKÜR iv
SİMGELER DİZİNİ vi
ŞEKİLLER DİZİNİ ix
ÇİZELGELER DİZİNİ xi
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER 3
2.1 Işık Eğrisi Analizi 3
2.2 Dikine Hız Ölçüm Analizi 5
2.3 Dönem Değişimi Analizi (O-C Analizi) 6
2.4 Kaynak Özetleri 12
3. MATERYAL ve YÖNTEM 15
3.1 Materyal 15
3.2 Işık ve Dikine Hız Analizi 19
3.2.1 Dönem Değişimi Analizi (O-C Analizi) 21
4. ARAŞTIRMA BULGULARI 23
4.1 TIC 142587827 23
4.2 TIC 82224114 38
5. TARTIŞMA ve SONUÇ 45
KAYNAKLAR 53
ÖZGEÇMİŞ 63

SİMGELER DİZİNİ

a	Yarı-Büyük Eksen Uzunluğu
a_{12}	Çift Sistemin Üçlü Sistemin Ortak Kütle Merkezi Etrafındaki Yörüngesinin Yarı-Büyük Eksen Uzunluğu
a_3	İlave Bileşeninin Yarı-Büyük Eksen Uzunluğu
$a\sin i_3$	İlave Bileşenin Yörüngesinin Görünür Yarı-Büyük Eksen Uzunluğu
$A_{1,2}$	Albedo
A_3	Dönem Değişim Analizi Genliği
AB	Astoronomi Birimi
B	Gauss Biriminde Manyetik Alan Şiddeti
BJD	Güneş Sistemi Kütle Merkezli Jülyen Günü
e	Dışmerkezlik / Basıklık
e_3	İlave Bileşenin Dışmerkezliği / Basıklığı
E	Çevrim Sayısı
$g_{1,2}$	Bileşen Yıldızların Çekim Kararma Sabitleri
$f(m)$	Kütle Fonksiyonu
f	Değme Parametresi
HJD	Güneş Merkezli Jülyen Günü
i	Yörünge Eğim Açısı
K	Kelvin
$K_{1,2}$	Dikine Hız Eğrisi Genliği
$L_{1,2}$	Bileşen Yıldızların Işınım Güçleri
L_3	İlave Bileşenin Işınım Gücü
$L_\odot$	Güneş'in Işınım Gücü
$\log g$	Yüzey Çekim İvmesi
$M_{1,2}$	Bileşen Yıldızların Kütleleri
M_3	İlave Bileşenin Kütlesi
$M_\odot$	Güneş'in Kütlesi
m_v	Mutlak Parlaklık
P	Yörünge Dönemi

P_a	Kavuşum Dönemi
P_s	Yıldızıl Yörünge Dönemi
P_3	İlave Bileşenin Yörünge Dönemi
pc	Parsek
q	Kütle Oranı
$R_{1,2}$	Bileşen Yıldızların Yarıçapları
$R_\odot$	Güneş'in Yarıçapı
t_{03}	İlave Bileşenin Enberiden Geçiş Zamanı
T_{eff}	Etkin Sıcaklık
TF	Lekenin Yıldızın Etkin Sıcaklığına Göre Oranı
T_0	Minimum Orta Zamanı
U	Eksen Dönmesinin Dönemi
vsini	Dönme Hızı
$V\gamma$	Uzay Hızı
w	Enberinin Boylamı
w0	Enberi Noktasının Başlangıç Olarak Seçilen T_0 Anındaki Boylamı
w3	İlave Bileşenin Enberi Noktasının Boylamı
w'	Birim Zamanda Eksen Dönme Miktarı
$x_{1,2}$	Bileşen Yıldızların Kenar Kararma Katsayıları
ΔE	Açısal Momentum Transferi İçin Gerekli Enerji
ΔL	Aktif Yıldızın Işınım Gücündeki Değişim
ΔJ	Açısal Momentum Transferi
ΔP	Sistemin Dönem Değişimi
Δm	Parlaklık Değişimi
$\Omega_{1,2}$	Bileşen Yıldızların Yüzey Potansiyelleri
χ^2	Veri - Uyum Parametresi
ϕ	Lekenin Kutupsal Enlemi
λ	Lekenin Boylamı
θ	Lekenin Açısal Çapı

Kısaltmalar

BAV	Bundesdeutsche Arbeitsgemeinschaft für Veränderliche Sterne
BF	Broadening Functions
BJD	Barycentric Julian Date
CCD	Charge Coupled Device
DC	Differantial Correction
HJD	Heliocentric Julian Date
IBVS	Information Bulletin on Variable Stars
LC	Light Curve
LTE	Light Time Effect
MAST	Mikulski Archive for Space Telescopes
OEJV	Open European Journal on Variable Stars
PHOEBE	Physics of Eclipsing Binaries
SNR	Signal / Noise Ratio
TIC	TESS Input Catalog

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Kütle aktarımı mekanizması için A > 0 ve A < 0 değerlerinin grafik üzerinde gösterimleri 7

Şekil 2.2 Işık-zaman etkisi mekanizmasına bağlı olarak oluşan dönem değişimi 9

Şekil 2.3 Eksen dönmesi nedeniyle oluşan grafik dönem değişimi 12

Şekil 3.1 TIC 142587827 sistemine ait hedef piksel dosyası. 18

Şekil 3.2 TIC 82224114 sistemine ait hedef piksel dosyası. 18

Şekil 4.1 TIC 142587827 sistemine ait ışık eğrisi (mavi nokta) ve en iyi model (kırmızı kesiksiz eğri). Alt panel gözlemsel veri ile model arasındaki farkları göstermektedir. 23

Şekil 4.2 TIC 142587827 sistemine ait dikine hız eğrisi (mavi nokta ve yeşil nokta, sırasıyla 1.bileşen ve 2.bileşen) ve en iyi model (kırmızı kesiksiz eğri). Alt panel gözlemsel veri ile model arasındaki farkları göstermektedir. 24

Şekil 4.3 TIC 142587827 sistemine ait genişleme fonksiyonları (mavi kesiksiz eğri) ve üzerlerine yapılan Gauss uyumlama profilleri (kırmızı kesikli eğri). 27

Şekil 4.4 TIC 142587827 sisteminin tüm minimum zamanları kullanılarak elde edilen O-C grafiği ve doğrusal (lineer) model (noktalar gözlemsel minimum zamanlarını, kırmızı kesiksiz eğri ise modeli temsil etmektedir). Alt panel ise modelden arta kalan artıkları göstermektedir. 28

Şekil 4.5 TIC 142587827 sisteminin tüm minimum zamanları kullanılarak elde edilen O-C grafiği ve manyetik aktivite kökenli model (noktalar gözlemsel minimum zamanlarını, kırmızı kesiksiz eğri ise en iyi modeli temsil etmektedir). Alt panel ise modelden arta kalan artıkları göstermektedir. 29

Şekil 4.6 TIC 142587827 sisteminin tüm minimum zamanları kullanılarak elde edilen O-C grafiği ve ışık-zaman etkisini gösteren model (noktalar gözlemsel minimum zamanlarını, kırmızı kesiksiz eğri ise en iyi modeli temsil etmektedir). Alt panel ise modelden arta kalan artıkları göstermektedir. 32

Şekil 4.7 TIC 142587827 sisteminin tüm minimum zamanları kullanılarak MCMC yöntemi ile elde edilen ışık-zaman etkisine ait köşe (corner) grafiği 33

Şekil 4.8 TIC 142587827 sisteminin TESS minimum zamanlarının ortalaması alınarak elde edilen O-C grafiği ve ışık-zaman etkisini gösteren en iyi model (noktalar gözlemsel minimum zamanlarını, kırmızı kesiksiz eğri ise en iyi modeli temsil etmektedir). Alt panel ise modelden arta kalan artıkları göstermektedir. 35

Şekil 4.9 TIC 142587827'nin TESS minimum zamanlarının ortalaması alınması sonucunda MCMC yöntemi ile ışık-zaman etkisine ait köşe (corner) grafiği 36

Şekil 4.10 TIC 82224114 sistemine ait ışık eğrisi (mavi nokta) ve en iyi model (kırmızı kesiksiz eğri). Alt panel gözlemsel veri ile model arasındaki farkları göstermektedir. 38

Şekil 4.11 TIC 82224114 sistemine ait dikine hız eğrisi (yeşil nokta ve mavi nokta, sırasıyla 1.bileşen ve 2.bileşen) ve en iyi model (kırmızı kesiksiz eğri). Alt panel gözlemsel veri ile model arasındaki farkları göstermektedir. 39

Şekil 4.12 TIC 82224114 sisteminin minimum zamanlarından elde edilen O-C grafiği. 41

Şekil 4.13 TIC 82224114 sistemine ait genişleme fonksiyonları (mavi kesiksiz eğri) ve üzerlerine yapılan Gauss uyumlama profilleri (kırmızı kesikli eğri). 42

Şekil 4.14 TIC 82224114 sistemine ait 0.0 evresi için Roche geometrisi. 43

Şekil 4.15 TIC 82224114 sistemine ait 0.25 evresi için Roche geometrisi ve lekenin en net görüldüğü evre. 43

Şekil 4.16 TIC 82224114 sistemine ait 0.5 evresi için Roche geometrisi. 44

Şekil 4.17 TIC 82224114 sistemine ait 0.75 evresi için Roche geometrisi. 44

Şekil 5.1 TIC 142587827 (V450 Dra) ve TIC 82224114 (BD+28 1833) sistemlerine ait bileşenlerin kütle-yarıçap (M-R) diyagramı üzerindeki konumları. Mavi kesiksiz eğri sıfır yaş anakolunu (ZAMS), kırmızı kesiksiz eğri son yaş anakolunu (TAMS) göstermektedir (Claret vd., 1995). 49

Şekil 5.2 TIC 142587827 (V450 Dra) ve TIC 82224114 (BD+28 1833) sistemlerine ait bileşenlerin kütle-ışınım gücü (M-L) diyagramı üzerindeki konumları. Mavi kesiksiz eğri sıfır yaş anakolunu (ZAMS), kırmızı kesiksiz eğri son yaş anakolunu (TAMS) göstermektedir (Claret vd., 1995). 50

Şekil 5.3 TIC 142587827 (V450 Dra) ve TIC 82224114 (BD+28 1833) sistemlerine ait bileşenlerin H-R diyagramı üzerindeki konumları. Siyah kesiksiz eğri sıfır yaş anakolunu (ZAMS), mavi kesiksiz eğri son yaş anakolunu (TAMS) göstermektedir (Claret vd., 1995). 51

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 TIC 142587827 ve TIC 82224114 yıldızlarına ait fiziksel parametreler..... 14

Çizelge 3.1 Seçilen örten çift yıldızlar 15

Çizelge 3.2 Aday yıldızların tayf gözlem tarihleri, poz süreleri, evreleri, SNR değerleri ve veri sayıları 17

Çizelge 4.1 TIC 142587827 sisteminin ışık ve dikine hız eğrisinden elde edilen parametreler..... 25

Çizelge 4.2 TIC 142587827 sisteminin mutlak parametreleri 29

Çizelge 4.3 TIC 142587827 sisteminin Applegate (1992) kuramına göre dönem değişim parametreleri 29

Çizelge 4.4 TIC 142587827 sisteminin tüm minimum zamanları kullanılarak ışık-zaman etkisi mekanizmasına göre parametreleri 37

Çizelge 4.5 TIC 82224114 sisteminin TESS minimum zamanlarının ortalaması alınması sonucunda ışık-zaman etkisi mekanizmasına göre parametreleri..... 37

Çizelge 4.6 TIC 82224114 sisteminin ışık ve dikine hız eğrisinden elde edilen parametreler 40

Çizelge 4.7 TIC 82224114 sisteminin mutlak parametreleri 47

Çizelge 4.8 TIC 82224114 sisteminin ikinci bileşen üzerindeki leke parametreleri 47

Çizelge 5.1 TIC 82224114 sisteminin ışık ve dikine hız eğrisinden elde edilen parametrelerin, Xiong vd. (2024) ile karşılaştırılması 47

1. GİRİŞ

Astronomide "çift" terimi ilk kez 1802 yılında William Herschel tarafından kütleçekimsel olarak birbirine bağlı olan ve birlikte yörünge hareketi yapan çift yıldızlar için kullanılmıştır. O zamandan beri bilim insanları çift yıldızları keşfetmeye ve incelemeye büyük önem vermeye başladılar. Günümüzde çift yıldızların, yıldız oluşumu, yıldız fiziği, galaksiler ve kozmoloji gibi yıldız astrofiziğinin çeşitli alanlarında önemli roller oynadığı bilinmektedir (Southworth, J. 2020; Herschel, W. 1802).

Çift yıldızlar, birbirlerine kütle çekim kuvvetiyle bağlı, ortak kütle merkezi etrafında yörünge hareketi yapan ve iki veya daha çok yıldızdan oluşan sistemlerdir. Çift yıldız sistemleri, yıldızların kütlelerini doğrudan hesaplayabilme imkanı vermesi (M_1, M_2) ve kütlenin de yıldız evrimine ilişkin en temel parametrelerden biri olması, yıldızların kütle-ışınım gücü ($L\ \alpha\ M^{\alpha}$) ve kütle-yarıçap ($R\ \alpha\ M^{\alpha}$) bağıntılarının oluşturulmasına izin vermesi, fiziksel parametrelerinin belirlenebilmesi nedeniyle uzaklıklarının (d) belirlenebilmesi, yıldızların evrimlerine ilişkin bilgiler sunması ve iç yapılarına ilişkin modellerin oluşturulmasında önemli rol oynadıkları için yıldız astrofiziği açısından büyük bir öneme sahiptir. Gökyüzünde bulunan yıldızların çoğunu çift yıldız sistemleri oluşturur. Yıldızların yaklaşık %85'ini çift sistemler, geri kalanları ise üçlü veya daha çok yıldız barındıran sistemlerdir (Abt ve Levy, 1976).

Son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte KEPLER ve TESS gibi uzay teleskoplarıyla yapılan fotometrik taramalar sonucunda birçok yeni gök cismi keşfedilmiştir. Her ne kadar bu taramaların asıl amacı Güneş Sistemi dışı gezegenleri (ötegezegenler) belirlemek olsa da birçok örten çift yıldız da keşfedilmiştir. Keşfedilen bu sistemlerin birçoğu tayfsal verisi olmaksızın hızlı bir şekilde analiz edilmiş ve sınıflandırılmıştır (Prša vd., 2022; Matijevic vd., 2012). Sadece fotometrik veriye dayalı bu analizlerde bu sistemlerin bazı temel parametreleri (yörünge dönemi, etkin sıcaklık, tayf türü vb.) elde edilmiş ve yayınlanmıştır. Dolayısıyla bu tez çalışmasında bu veri tabanlarında yer alan seçilmiş bazı örten çift sistemlerin fiziksel ve yörünge parametrelerinin daha güvenilir yöntemlerle elde edilmesi planlanmaktadır. Fotometrik ve tayfsal veriler birlikte dikkate

alınarak bu sistemlerin yörünge özellikleri ve mutlak parametrelerinin (kütle, yarıçap, etkin sıcaklık vb.) ortaya çıkarılması ve evrim durumlarının irdelenmesi amaçlanmaktadır. Böylece, elde edilecek sonuçlarla literatürün ihtiyaç duyduğu güvenilir yöntemlerle belirlenmiş yıldız parametre ve örnek sayısına önemli bir katkı sağlaması hedeflenmektedir.

Bu tez çalışmasında, TIC 142587827 ve TIC 82224114 çift yıldız sistemlerinin fotometrik ve tayfsal analizleri gerçekleştirildi. Fotometrik gözlemler, TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) teleskobu ile elde edilen fotometrik veriler, MAST[1] veri tabanından çekildi; tayfsal gözlemler ise Ankara Üniversitesi Kreiken Rasathanesi'nde bulunan T80 Prof. Dr. Berahitdin Albayrak Teleskobu'na bağlı Whoppshel Tayfçekeri ile R ~ 15000 ve R ~ 30000 çözünürlüğe sahip 105 mikron ve 50 mikron fiber optik kablolar kullanılarak gerçekleştirildi. Hedef yıldızların literatürde çalışması bulunmaması sebebiyle kütle oranları (q) dikine hız eğrilerinden belirlendi ve PyWD2015[2] programıyla da eşzamanlı olarak ışık eğrisi ve dikine hız çözümü yapıldı.

Bu tez kapsamında TIC 142587827 çift sistemin O-C eğrisini modelleyebilmek için sisteme fiziksel olarak bağlı ilave bir bileşenin varlığı (ışık-zaman etkisi, LTE) veya manyetik aktivite kökenli dönem değişimi mekanizmaları dikkate alındı. Bu mekanizmalara dair elde edilen parametreler ve sonuçlar Bölüm 4. ARAŞTIRMA BULGULARI kısmında detaylı olarak açıklandı. TIC 82224114 sistemi için de dönem değişim analizi gerçekleştirilmek için minimum zamanlar elde edildi ve O-C grafiği oluşturuldu. Detaylar Bölüm 4. ARAŞTIRMA BULGULARI kısmında açıklandı.

[1] https://mast.stsci.edu/portal/Mashup/Clients/Mast/Portal.html
[2] https://github.com/Varnani/pywd2015-qt5

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Işık Eğrisi Analizi

Bir gökcisminin zamana karşılık elde edilen parlaklık grafiğine "ışık eğrisi" denir. Işık eğrileri, uygun modelleme ve analiz yöntemlerinin kullanılması ile çift yıldız sistemlerinin fiziksel ve geometrik özelliklerinin belirlenmesine yardımcı olur. Işık eğrilerinin analizi sonucunda, çift yıldız sistemlerinin bileşenlerinin kütleleri, yarıçapları, sıcaklıkları, ışınım güçleri, yörünge eğim açısı,kütle oranı gibi birçok temel astrofiziksel parametre elde edilebilir.

Işık eğrisi analizleri için kullanılan başlıca yöntemler arasında Fourier analizi, Lomb-Scargle (Lomb, 1976; Scargle, 1982) periyodogramı gibi zaman serisi verilerine analiz tekniklerinin yanı sıra Roche modeline (Carroll ve Ostlie, 2014) dayalı olarak üretilen sentetik ışık eğrilerinin modellenmesi yer almaktadır. Roche modeli, 1850 yılında Edouard Roche tarafından geliştirilmiş bir modeldir. Çift yıldızların evriminde küresel simetriden sapma ve gelgit etkilerini açıklamak için geliştirilen Roche modeli, sistemdeki kütle dağılımını ortak kütle merkezi etrafında tanımlanan potansiyeller yardımıyla ifade eder. Roche modeli, kütleçekim ve dönme potansiyellerinin birleşimiyle oluşan eşpotansiyel yüzeyler üzerinden yıldızların sınırlarını belirler. Bu yüzeylerden her bir bileşenin kendi kütleçekim etkisiyle çevresini saran yapıya "Roche lobu" adı verilir. Bir yıldız Roche lobunu doldurduğunda kütle (ışınım), bileşenler arasında bulunan Lagrance noktaları üzerinden diğer bileşene geçer. Özellikle birinci Lagrance Noktası (L_1) kütle transferinin gerçekleştiği en kritik bölgedir. Roche modeli, çift yıldızların morfolojik sınıflandırılmasında (ayrık, yarı-ayrık ve değen çiftler) temel belirleyici olarak kullanılmaktadır.

Işık eğrisi analiz yöntemlerinin gelişimi, 1900'lü yılların başlarına kadar uzanmaktadır. Bu dönemde, ışık eğrisi çözümlerinde sentetik ve analitik yöntemler ortaya atılmıştır. Sentetik yöntemler için; küresel model, elipsoid model ve eşpotansiyel yüzeyler modeli gibi fiziksel temelli modeller geliştirilmiştir. Bu yaklaşımların gelişimine katkı sağlayan önemli çalışmalardan bazıları Wood (1971), Lucy (1968-1973), Rucinski (1973) ve

Wilson-Devinney (1971-1973) tarafından geliştirilmiştir. Özellikle Wilson-Devinney yöntemi, çok sayıda temel ve fiziksel parametre içeren ayrıntılı modelleme yapabilmesi sebebiyle günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Çift yıldız sistemlerinin ışık ve tayf gözlemlerinden yola çıkarak fiziksel ve geometrik parametrelerini belirlemek amacıyla geliştirilmiş olan Wilson-Devinney (WD) yöntemi, ilk kez Robert E. Wilson ve Edward J. Devinney tarafından 1971 yılında ortaya atılmıştır. Bu yöntem literatürde özellikle ayrık (detached), yarı-ayrık (semi-detached) ve değen (contact) çift yıldız sistemlerinin ışık eğrisi analizlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Wilson-Devinney yöntemi, çift yıldız sistemini oluşturan bileşenlerin karşılıklı kütleçekimsel etkilerini, yüzey şekillerini ve ışınım özelliklerini Roche potansiyeli çerçevesinde modelleyerek sistemin ışık eğrisini kuramsal olarak üretir. Bu model, gözlemsel ışık eğrisi ile karşılaştırılarak iterasyon teknikleriyle sistemin fiziksel ve yörünge parametreleri (yörünge eğim açısı, i, etkin sıcaklık, T_{eff}, yarıçap, R, kütle oranı q, vb.) en uygun hale getirilir. İterasyon teknikleri kısmında, gözlemsel ve kuramsal ışık eğrileri arasındaki farklar, en küçük kareler (least squares) yöntemi esas alınarak iteratif biçimde azaltılır. Bu amaçla genellikle diferansiyel düzeltme algoritmaları (differential corrections) yöntemi kullanılır. Böylelikle parametreler küçük adımlarla denenerek modelin gözlemlerle en iyi uyumu sağlayan çözüme ulaşması sağlanır. Bileşen yıldızların ve sistemin genel geometrisinin Roche eşpotansiyelli yüzeylerle ifade edildiği bu model yardımıyla örten çift yıldızlara ilişkin parametreler modellenebilmektedir. Ayrıca, ışık eğrileri ile beraber dikine hız eğrilerinin de modellenmesine olanak tanımakta ve sisteme ilişkin parametrelerin doğrudan elde edilmesini sağlamaktadır. Fortran programlama dili ile yazılmış bir uygulama koduna sahiptir ve komut satırında çalışır. Program asıl olarak iki ayrı ana bölümden oluşmaktadır: LC (Light Curve) ve DC (Differantial Correction). LC, ışık eğrisi çözümünde bulunan parametrelere göre kuramsal ışık eğrisini üretir. DC, gözlenen ışık eğrisine ve başlangıç değerlerine göre, serbest bırakılan parametrelerin en olası değerleri için fark miktarını belirler ve hatalarıyla birlikte bu parametreleri verir. Bu modül, model tarafından oluşturulan kuramsal ışık eğrisi ile gözlemsel veri arasındaki farkı minimize etmek amacıyla iterasyona dayalı bir düzeltme algoritması uygular. Kullanıcının serbest bıraktığı parametreler, başlangıç değerlerinden itibaren en küçük

kareler yöntemine dayalı olarak değiştirilerek, her adımda ışık eğrisi parametreleri yeniden hesaplanır ve gözlemsel verilerle karşılaştırılır. Bu işlemler sonucunda, sistemin fiziksel ve yörünge parametreleri en iyi uyumu sağlayacak şekilde güncellenir. Ayrıca her parametre için elde edilen değerlerin yanında belirsizlikleri de hesaplanarak daha güvenilir bir çözüm elde edilir.

2.2 Dikine Hız Ölçüm Analizi

Yıldızların tayflarında gözlemlenen çizgi profilleri; yıldızın dönme hareketi, mikrotürbülans ve makrotürbülans gibi birçok fiziksel etkiden dolayı genişler. Bu çizgilerin nasıl ve ne ölçüde genişlediği, yıldız sisteminin dinamik yapısı hakkında önemli bilgiler barındırır. Bu bağlamda, tayfsal çizgi genişlemelerini analiz etmek için kullanılan yöntemlerden biri olan Broadening Function (BF) yani Çizgi Genişleme Fonksiyonu yöntemi, özellikle çoklu sistemlerde bileşenlerin ayırt edilmesini ve karakterize edilmesini mümkün kılmaktadır (Rucinski, 2012).

Broadening Function, gözlemlenen tayf ile yüksek çözünürlüklü refererans (şablon) tayflara çapraz korelasyon yöntemi ve genişletme fonksiyonları uygulanmasına dayanan bir yöntemdir. Bu yöntemde, gözlenen tayfın farklı hızlardaki bileşenleriyle nasıl şekillendiği analiz edilir. Başka bir deyişle, sabit bir şablon tayfın hangi hızlarda ve ne ölçüde katkı sağladığı ortaya konur. Bu genişlemiş fonksiyonlara Tekil Değer Ayrışımı (Singular Value Decomposition, SVD) adı verilen matematiksel bir yöntem uygulanır. Bunun sonucunda, x-ekseninde dikine hız, y-ekseninde genişleme fonksiyonlarının toplamından elde edilen bir fonksiyon (broadening function) olacak şekilde bir profil elde edilir. Elde edilen genişleme fonksiyonu, sistemdeki her bir bileşenin dikine hızlarını ayrı ayrı ortaya koyar ve bu sayede bileşenlerin tayf üzerindeki etkileri net bir şekilde gözlemlenebilir.

Broadening Function yönteminin en önemli avantajlarından biri, sonuçların doğrusal olmasıdır. Bu özellik, çoklu bileşenlerden oluşan sistemlerin tayfsal katkılarının birbirinden bağımsız olarak yorumlanmasına olanak tanır. Çizgi Genişleme Fonksiyonlarına (BF) Gauss eğrisi uyumlamaları yapılarak genişleme profillerinin

merkezi konumları elde edilir (bkz. Graczyk vd., 2015; Bölüm 3.2, Şekil 3.). Bu profillerinin merkezi konumları ise dikine hız değerlerini vermektedir. Ayrıca bu yöntemin çıktıları, yalnızca yıldız bileşenlerinin dikine hızlarını değil, aynı zamanda bu bileşenlerin tayf üzerindeki ışık katkılarını ve tayf çizgi profillerinin şekillerini de doğrudan verir. Bu sayede sistemdeki yıldızların parlaklıkları oranı, dönme hızları (*vsini*) ve eğer sisteme fiziksel olarak bağlı ilave bir bileşen varsa genişleme fonksiyonunda açıkça gözlemlenebilir.

2.3 Dönem Değişimi Analizi (O-C Analizi)

Çift yıldız sisteminin yörünge döneminin herhangi bir nedenle değişim göstermesi halinde gözlemlenen minimum zamanları öncesinde hesaplanan minimum zamanları ile uyumlu olarak çıkmayacaktır. Bir çift sistemin dönem değişiminin nedenini belirlemek için yaygın olarak O, gözlenen ve C, hesaplanan minimum zamanlarının farkı alınır, böylelikle zamana göre O-C farkının değişimi analiz edilir (Kreiner vd., 2001). Özetle O-C, herhangi bir ekstremum (minimum veya maksimum) zamanının gözlenen değeri ile, sabit bir dönem değeri kullanılarak hesaplanan kuramsal değeri arasındaki farktır.

O = Gözlemlerle tespit edilen ekstremum zamanı

$$C = T_0 + E' * P \text{ (gün)}$$

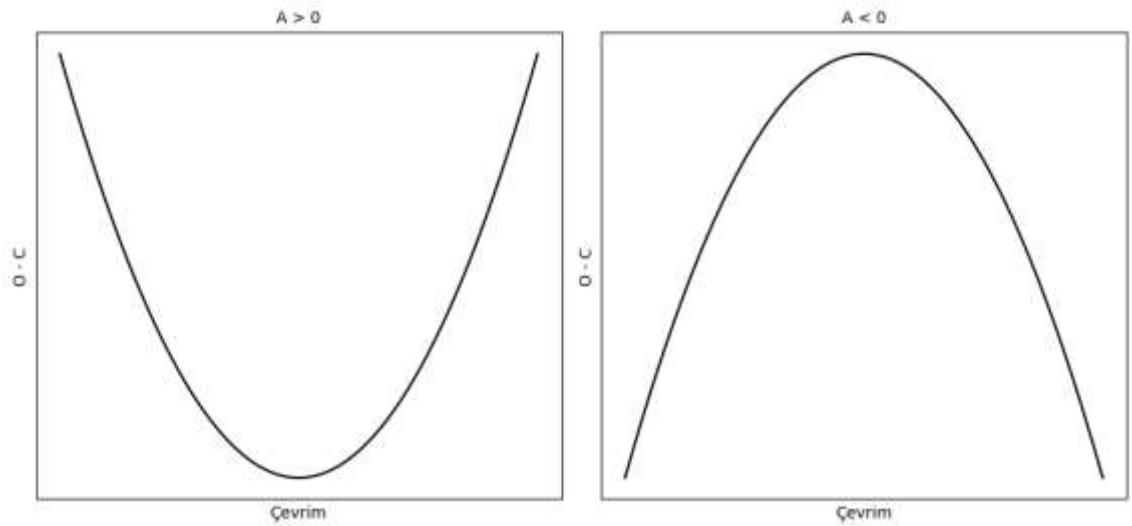
$$O\text{-}C = O - (T_0 + E' * P)$$

Burada, T_0 , herhangi bir referans minimum zamanı, E referans minimum zamanından sonra geçen çevrim sayısını ve P gün biriminde çiftin yörünge dönemini göstermektedir.

Çift yıldız sistemlerinde gözlemlenen dönem değişimleri, farklı fiziksel mekanizmalara bağlı olarak farklılıklar gösterir. Bu değişimlerin başlıca nedenleri arasında; bileşenler arasında korunumlu kütle aktarımı veya sistemden korunumsuz kütle kaybı, sistemin kütle merkezi etrafındaki hareketini etkileyen sisteme fiziksel olarak bağlı ilave bir

bileşenin varlığı, manyetik aktivite kökenli dönem değişimi, eksen dönmesi sayılabilir. Bu mekanizmaların her biri, sistemin evrimine ve dinamik yapısına ilişkin önemli bilgiler sunmakta olup, O-C analizleri yardımıyla nicel olarak incelenebilmektedir.

Bileşenler arası korunumlu kütle aktarımı veya sistemden korunumsuz kütle kaybı, yakın çift yıldızlarda büyük kütleli bileşenin Roche lobunu doldurmasıyla başlar (Selam, 1998). Sistemde bileşenler arası korunumlu kütle aktarımı durumunda O-C eğrisinde parabolik bir değişim ortaya çıkar ve bunun sonucunda eğer küçük kütleli bileşenden büyük kütleli bileşene bir kütle aktarımı oluyorsa sistemin yörünge dönemi arttığı için O-C eğrisi yukarı yönlü parabol benzeri bir eğri, eğer büyük kütleli bileşenden küçük kütleli bileşene bir kütle aktarımı oluyorsa da yörünge dönemi azaldığı için O-C eğrisi aşağı yönlü parabol benzeri bir eğri gösterir. Aşağıda verilen bir parabol denklemi (Denklem 2.1) ile modellenebilen bu dönem değişimindeki ikinci derece terimi bize parabolün kollarının yukarı mı yoksa aşağı mı bakacağını konusunda bilgi vermektedir ve aynı zamanda yıllık kütle aktarımı miktarını Güneş kütlesi biriminde verir. Şekil 2.1‘den de görüleceği üzere soldaki grafikte dönem değeri artıyor, sağdaki grafikte ise dönem değeri azalıyor demektir.



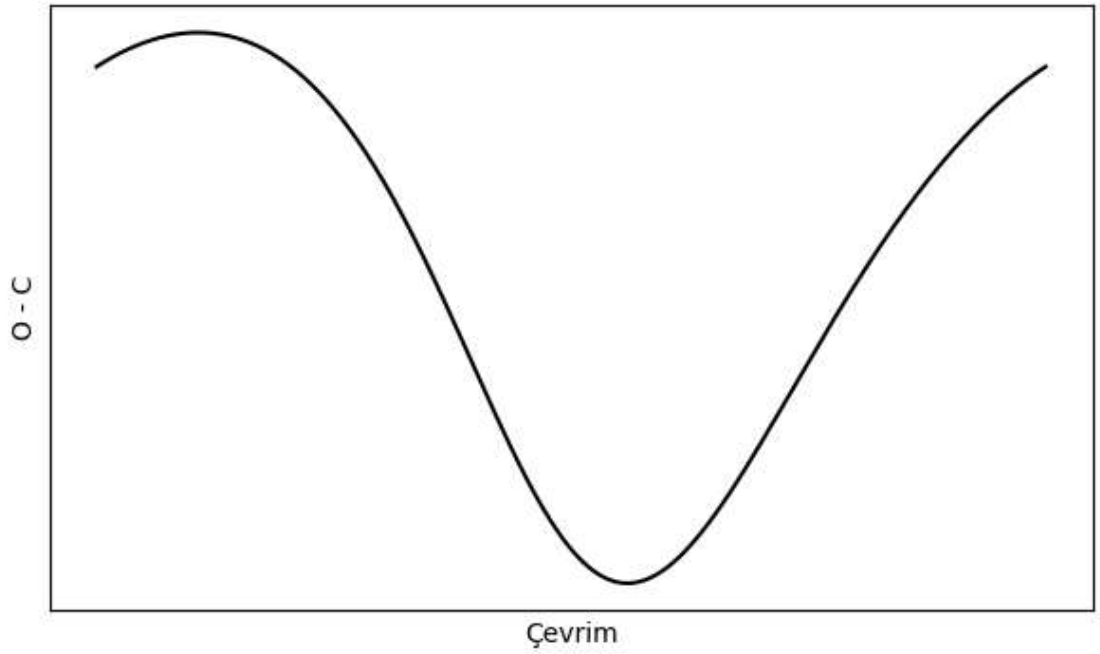
Şekil 2.1 Kütle aktarımı mekanizması için A > 0 ve A < 0 değerlerinin grafik üzerinde gösterimleri

Kütle aktarımı,

$$O - C = \Delta T_0 + \Delta P.E + A.E^2 \qquad (2.1)$$

denklemi ile ifade edilir. Burada ΔP, dönemdeki değişim miktarını (çevrim başına), ΔT_0, T_0 zamanının yanlışlığından kaynaklanan düzeltme, A, kütle aktarımı sonucunda dönemde meydana gelen değişimi temsil eden bir katsayıyı ifade eder.

Çift sisteme dinamik olarak bağlı ilave bir cismin varlığı, çift sisteme ait gözlenen minimum zamanlar arasındaki dönemin periyodik olarak değişmesine neden olur. Bunun nedeni, çift sistemin, üçlü sistemin ortak kütle merkezi etrafında yaptığı dolanma hareketinden kaynaklanmaktadır. Çift sistem üçlü sistemin ortak kütle merkezi etrafında hareketini yaparken gözlemciye yaklaşır ve uzaklaşır. Bunun sonucunda çift sistemin tutulma zamanları beklenenden daha önce ve daha sonra oluşmaya başlar. Çift sistemin, üçlü sistemin ortak kütle merkezi etrafındaki hareketi boyunca O-C değerlerinin zaman göre grafiği çizilirse bu değişim sinusoidal biçime sahip bir eğri olacaktır (Şekil 2.2). Işığın sonlu bir hıza sahip olmasının bir sonucu olarak tutulmalar arasındaki geçen süre sürekli değiştiği için bu etkiye aynı zamanda "Işık-Zaman Etkisi" denir (ing. light-time effect - LTE). Irwin (1952, 1959) bir O-C eğrisinde bu tür değişim gösteren sistemlerin ilgili bağıntılar ile nasıl modellenebileceğini göstermiştir (bkz. Denklem 2.2). Bu modelleme sayesinde ilave bileşene ait yörünge dönemi değeri (P_3), basıklık değeri (e_3), enberiden geçiş zamanı (t_{03}), enberinin boylamı (w_3), ilave cismin kütle (M_3) ve yörünge yarı-büyük eksen uzunluğu değeri (a_3) parametrelerini elde edebiliriz.



Şekil 2.2 Işık-zaman etkisi mekanizmasına bağlı olarak oluşan dönem değişimi

Işık-zaman etkisi,

$$O - C = \frac{A_{LTE}}{\sqrt{1 - e_3^2 \cos^2 w_3}} \left\{ \left[\frac{1 - e_3^2}{1 + e_3 \cos v} \sin(v + w_3) \right] + e_3 \sin w_3 \right\} \qquad (2.2)$$

denklemi ile ifade edilir. Burada A_{LTE}, O-C eğrisinde ışık-zaman etkisinin oluşturduğu sinusoidal eğrinin gün biriminde yarı genliği, e_3, ilave bileşenin basıklığı, w_3, ilave bileşenin enberi noktasının boylamı, v, gerçel anomali değerini ifade eder.

Soğuk yıldızlarda, konvektif dış katmana ve diferansiyel dönmenin etkisiyle yüzeylerinde manyetik alan kaynaklı Güneş lekeleri ve ilmek yapıları oluşur. Bu ilmek yapıları yıldızın dış katmanlarını genişletir ve yarıçapını artırır. Açısal momentumun korunumu gereği cismin yarıçapının artması dönme hızını yavaşlatır. Manyetik ilmekler kapandığında dış katmanlar tekrar eski haline döner ve sistemin dönme hızı yeniden artar. Bu durum dönme hızının frenlemesine (manyetik frenleme) neden olur ve böylece sistemin dönme döneminin sürekli değişmesine neden olur. Eğer ki çift sistem bileşenlerinden biri böyle bir manyetik etkinlik gösteriyorsa bunun etkisi çiftin yörünge

dönemine çevrimli bir değişim olarak yansımaktadır. Bu da, O-C eğrisinde kendisini sinuosidal bir yapı olarak gösterir.

Applegate (1992), manyetik aktivite kaynaklı yörünge dönemi değişimlerini çift yıldızların bileşenlerinden birinin manyetik aktivitesinden kaynaklı olduğunu öneren bir model sunmuştur. Bu modele ait denklem,

$$0 - \mathrm{C} = \mathrm{A}\,\mathrm{Sin}[2\pi\left(\frac{\mathrm{T} - \mathrm{T}_0}{\mathrm{P}}\right)]$$

ile verilir. *A*, sinusoidal değişimin genliği, *T*, minimum zaman verileri (HJD veya BJD), T_0, minimum orta zamanı (HJD veya BJD) ve *P*, yörünge dönemidir.

Bu modele göre O-C eğrisinde yörünge dönemi, P_{orb}, çevrimin dönemi, P_{sin} ve değişimin yarı-genliği, A_{sin} olmak üzere çevrim başına saniye biriminden dönem değişimi,

$$\Delta\mathrm{P} = \frac{2\pi P_{orb}}{P_{sin}}\mathrm{A}_{\mathrm{sin}}$$

ile hesaplanır. ΔP'lik bir dönem değişimi için gerekli olan açısal momentum transferi,

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

ile hesaplanır. Burada, *M* ve *R* sırasıyla manyetik aktif olan bileşenin kütlesi ve yarıçapı, *a*, bileşenler arası uzaklık, *G*, evrensel kütle çekim sabitidir. ΔJ'lik bir açısal momentum transferi için gereken enerji,

$$\Delta\mathrm{E} = \frac{3\Delta\mathrm{J}^2}{M_s R^2}$$

ile hesaplanır. Burada, M_s, manyetik aktif bileşenin kütlesinin 10'da 1'i, *R*, manyetik aktif bileşenin yarıçapıdır. Manyetik aktif yıldızın ışınım gücündeki değişim yani ışınım gücünün değişmesi için gereken enerji,

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

ile hesaplanır. Manyetik aktif yıldızın Gauss biriminde manyetik alan şiddeti,

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

ile hesaplanır. Manyetik aktif yıldızın kadir biriminde parlaklık değişimi ise,

$$\Delta m = -2.5 \log\left(\frac{L_{total}}{L_{total} + \Delta L}\right)$$

ile hesaplanır.

Dışmerkezli yörüngeye sahip çift sistemlerde, yörünge yarı büyük ekseninin bakış doğrultusuna göre kayması nedeniyle görülen değişime "eksen dönmesi" denir. Basıklık değeri yüksek olan sistemlerde birinci ve ikinci minimum zamanları O-C eğrilerinde 180° faz farkına sahip iki farklı sinusoidal eğri oluşturur (Bulut, 2019). Bu eğriler,

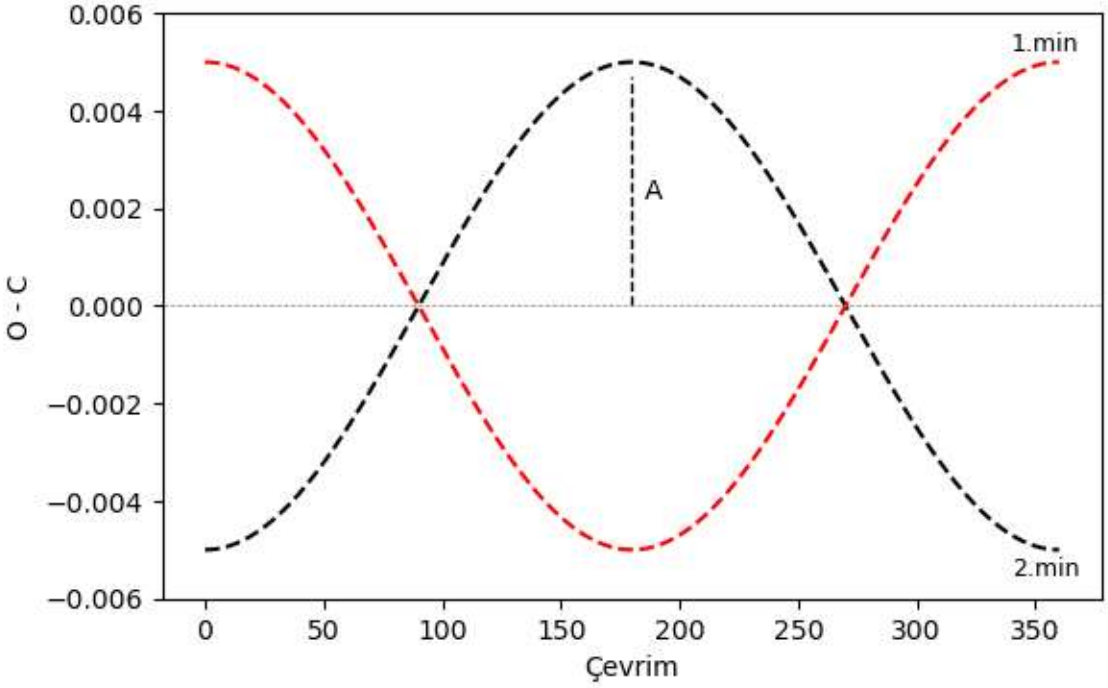
$$O - C = B \mp A \cos(w_O + \dot{w} \cdot E) \qquad (2.3)$$

denklemleri ile modellenmektedir. Burada, B, düşey eksendeki kaymayı temsil eden sabit, A, sinusoidal eğrinin yarı genliği, w_0, enberi noktasının başlangıç olarak seçilen t_0 anındaki boylamı, $\dot{w}$, birim zamanda eksen dönme miktarı ve E, çevrim sayısını göstermektedir. Dışmerkezli yörüngeye sahip çift sistemlerin dönem değişim analizlerinden, yıldız evrim modellerinin denetlenmesi için önemli bir parametre olan k_2 iç yapı sabiti hesaplanabilmektedir.

$$k_2 = \frac{1}{c_{21} + c_{22}} \frac{\dot{w}}{360°} \qquad (2.4)$$

denklemi ile ifade edilir (Claret ve Giménez, 2010). Burada c_{2x}, basıklık, kütle, yarıçap ve dönme hızına bağlı değişkenlerdir. Yapılan modellemenin ardından çift sistemin

yörüngesinin basıklığı (e), eksen dönmesinin dönemi (U) ve kavuşum dönemi (P_a) değerleri elde edilmektedir.



Şekil 2.3 Eksen dönmesi nedeniyle oluşan dönem değişimi

2.4 Kaynak Özetleri

TIC 142587827 (V450 Dra, HD 96971, GSC 04391-00491, $\alpha = 11^{sa}\ 11^{dk}\ 29^{sn}$, $\delta = +73°\ 06'\ 55''$) sistemi F5 tayf türüne sahip bir örten çift yıldız sistemi olup görsel parlaklığı $m_V = 8^m.82$ dir. Bu sistemin TESS[3] teleskobu ile yapılan gözlemler sonucu sıcaklığı 6696 K olarak belirlenmiştir (Prša, vd., 2022). Sistemin uzaklığı Gaia tarafından yaklaşık 151 pc olarak hesaplanmıştır.

Cannon A.J. vd. (1993), yıldızın görsel parlaklığını $8^m.8$ kadir olarak, tayf türünü ise F5 olarak elde etmiştir. Anton Paschke (2009), TIC 142587827 sistemi için 2 adet minimum zaman verisi elde etmiştir (HJD, 54931.452, 54935.411). Aynı zamanda bu minimum zaman verilere sisteme literatürde yer alan ilk minimum zaman verileridir.

[3] https://tessebs.villanova.edu/0142587827

Nichols vd. (2010), sistemin ilk defa ışık eğrisini elde etmiştir. Sistemin örten çift olduğunu ve yörünge dönemini 0.439402 gün olarak elde etmiştir. Ruiz-Dern vd. (2018), yıldızın paralaksını 6.95 *mas,* bir başka değişle çiftin uzaklığını 143.88 pc ve E(B-V) renk ölçeği değerini 0.006 kadir olarak elde etmiştir. Prsa vd. (2022), sistemin yörünge dönemini 0.4393982 gün, morfoloji katsayısını 0.887 (Matijevic vd., 2012) olarak elde etmiştir. Matijevic, ışık eğrilerinin morfolojik sınıflandırması için 2012 yılında bir morfoloji parametresi tanımlamıştır. Morfoloji parametresi, [0,1] arasında tanımlanır, burada 0, ayrık sistemler, 1 ise değen çiftlere karşılık gelmektedir. Mowlavi vd. (2023), sistemin örten bir çift olduğunu ve frekansını 2.28 $gün^{-1}$ olarak, bir başka değişle sistemin yörünge dönemini 0.4385965 gün olarak elde etmiştir. Xu Ding vd. (2025), sistemin kütle oranını 0.156 olarak elde etmiştir. Yani Guo vd. (2025), sistemin kütle oranını 0.147, yörünge eğim açısını 82°, ikinci bileşenin sıcaklığının birinci bileşene sıcaklığı oranını 0.99, ikinci bileşenin ışınım gücünün birinci bileşenin ışınım gücüne oranını oranını 0.213, değme derecesi katsayısını ise 0.67 olarak elde etmiştir.

TIC 82224114 (GSC 01974-00280, BD+28 1833, $\alpha = 10^{sa}\ 03^{dk}\ 44^{sn}$, $\delta = +28°\ 13'\ 57''$) sistemi G0 tayf türüne sahip bir örten çift yıldız sistemi olup görsel parlaklığı $m_V = 9^m.48$ kadirdir. Bu sistemin TESS teleskobu ile yapılan gözlemler sonucu çiftin sıcaklığı 5975 K olarak belirlenmiştir (Prša, vd., 2022). Sistemin uzaklığı Gaia tarafından yaklaşık 131 pc olarak belirlenmiştir.

Geske vd. (2006), TIC 82224114 sisteminin yörünge dönemini 0.376121 gün, uzaklığını 150 pc olarak elde etmiştir. Gettel vd. (2006), sistemin ışık eğrisini ilk kez elde etmiştir. Sistemin yörünge dönemini 0.376121 gün olarak elde etmiştir,. Kiraga (2012), yıldızın tayf türünü G5 olarak elde etmiş, sistemin değen bir çift olduğunu ve görsel parlaklığını $m_V = 9^m.4$ olarak elde etmiştir. Terrell vd. (2012), yıldızın E(B-V) yıldızlararası kızarma değerinin 0.037 olarak elde etmiştir. Prša vd. (2022), sistemin yörünge dönemini 0.3761241 gün, morfoloji katsayısını 0.781 (Matijevic vd., 2012) olarak elde etmiştir. Zhang vd. (2023), yıldızın tayf türünü G0 olarak sınıflandırmıştır. Bu çalışmada, yıldız aktivitesi incelenmiş ve bu aday yıldızın aktif bir yıldız olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, sistemin etkin sıcaklık değerini 5975 K olarak, ve yüzey çekim ivmesini (*logg*) 4.123 $cmsn^{-2}$ olarak elde etmiştir. Mowlawi vd. (2023), sistemin örten

çift olduğunu ve frekans analizi sonucunda sistemin frekansını 2.66 $gün^{-1}$ olarak başka bir değişle yörünge dönemini 0.3759398 gün olarak elde etmiştir. Xiong vd. (2024), sistemin yörünge dönenimi 0.376124124 gün, birinci ve ikinci bileşene ait etkin sıcaklık değerlerini sırasıyla 6319 K ve 6125 K olarak, birinci ve ikinci bileşene ait ışınım gücü değerlerini sırasıyla $log(L_1/L_\odot)$ = 0.106 ve $log(L_2/L_\odot)$ = 0.001 olarak, birinci ve ikinci bileşene ait yarıçap değerlerini sırasıyla 0.942 $R_\odot$ ve 0.887 $R_\odot$ olarak, birinci ve ikinci bileşene ait kütle değerlerini sırasıyla 0.597 $M_\odot$ ve 0.59 $M_\odot$ olarak elde etmiştir.

TIC 142587827 ve TIC 82224114 çift sistemleri literatürde eş zamanlı olarak tayfsal ve fotometrik çalışması bulunmayan çift sistemlerdir. Her iki adaya ait bazı fiziksel parametreler parlaklık ve uzak bilgisi yardımıyla belirlenmiş ve TESS[4] veri tabanında işlenmiştir. Her iki aday için belirlenen bu fiziksel parametreler Çizelge 2.1'de verildi.

Çizelge 2.1 TIC 142587827 ve TIC 82224114 yıldızlarına ait fiziksel parametreler

Yıldız	**Teff [*K*]**	**logg**	**R_1 ($R_\odot$)**	**M_1 ($M_\odot$)**	**Işınım gücü ($L_\odot$)**	**Uzaklık (pc)**
*TIC142587827	6696	4.1	1.8	1.42	5.8	151
*TIC 82224114	5975	4.1	1.5	1.1	2.6	131

* : Fiziksel parameterler ExoFOP (https://exofop.ipac.caltech.edu/tess/) veri tabanından elde edildi.

[4] https://tessebs.villanova.edu/0082224114

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Materyal

Bu tez çalışmasında incelenen yıldızlar, TESS uzay teleskobu ile gözlenmiş ve MAST[5] veri tabanında yer alan örten çift yıldızlar arasından seçildi. Adaylar aynı zamanda Ankara Üniversitesi Kreiken Rasathanesi için uygun gözlenebilirlik ve parlaklığa sahip olma durumuna göre de yeniden filtrelendi. Aday seçiminde kullanılan bir diğer kriter de adayların literatürde daha önce tayfsal gözlemleri henüz yapılmamış ve ayrıntılı ışık eğrisi ve/veya dikine hız analizi bulunmuyor olmasıydı. Bu kapsamda seçilen yıldızlara ait bilgiler aşağıdaki Çizelge 3.1'de verildi. Bu tez çalışmasının esas amacı TIC 142587827 ve TIC 82224114 adaylarının ışık eğrisi ve dikine hız analizlerini gerçekleştirerek adayların fiziksel ve mutlak parametrelerini belirlemektir. Çizelge 3.1'de "*" sembolü ile verilen adaylar herhangi bir olumsuz duruma karşı (hava koşulları veya teknik nedenler) yedek olarak seçilmiş adaylardır.

Çizelge 3.1 Seçilen örten çift yıldızlar

Yıldız	**Sağ Açıklık (sa:dk:sn)**	**Dik Açıklık (der:dk:sn)**	**Dönem (gün)**	**Parlaklık (V)**	**Tür**
TIC 142587827	11:11:29	+73:06:55	0.44	8.82	W UMa
TIC 82224114	10:03:44	+28:13:57	0.38	9.48	W UMa
*TIC 376963666	22:46:21	+67:42:22	1.25	10.41	W UMa
*TIC 314459000	21:16:29	+55:23:10	0.86	9.85	W UMa
*TIC 138543573	10:35:56	+63:35:32	1.16	8.11	W UMa

* : Yedek adaylar

[5] https://mast.stsci.edu/portal/Mashup/Clients/Mast/Portal.html

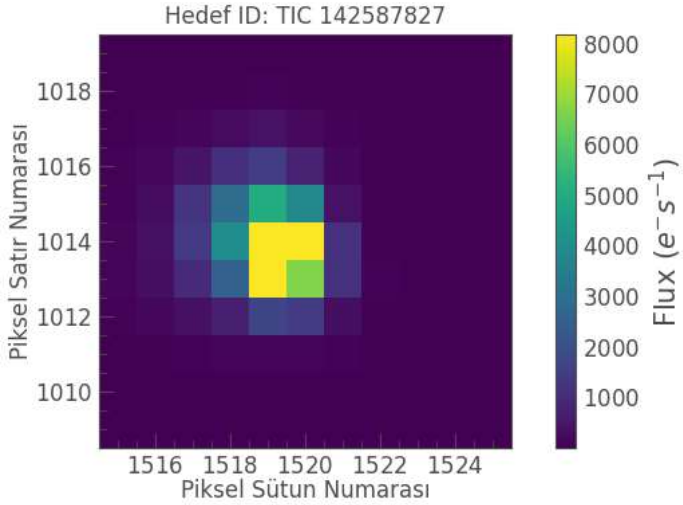
Adayların TESS ışık eğrileri, bu tez çalışması kapsamında Python‘da yazılmış özel kodlar yardımıyla MAST veri tabanından elde edildi. MAST veri tabanından sistemlere ait zaman, zaman hata değerleri, akı (PDCSAP Flux) ve akı hata (PDCSAP Flux Error) değerlerini içeren verilerin olduğu sütunlar çekildi. Böylelikle TIC 142587827 çift sisteminin 20, 21, 40, 47, 48, 60, 74 ve 75. çeyrekliklerine ait SPOC verileri kullanıldı. TIC 82224114 sisteminin ise 21. çeyrekliğine ait SPOC verisi kullanıldı. TIC 82224114 sistemi için çevrimli bir değişim olabileceği gerekçesiyle 21.sektördeki 1 çevrimine ait ışık eğrisi verisi elde edildi ve analizlerde kullanıldı. Sonrasında TESS veri tabanında yer alan minimum orta zamanı (T_0) ve yörünge dönemi (P) değerleri kullanılarak tüm ışık eğrileri evreye karşılık normalize akı olarak elde edildi.

TIC 142587827 ve TIC 82224114 yıldızlarının tayf gözlemleri, Ankara Üniversitesi Kreiken Rasathanesi‘nde bulunan T80 Prof. Dr. Berahitdin Albayrak Teleskobu‘na bağlı Whoppshel Tayfçekeri ile R ~ 15000 ve R ~ 30000 çözünürlüğe sahip 105 mikron ve 50 mikron fiber optik kablolar kullanılarak gerçekleştirildi. Gözlemlerde ayrıca kalibrasyon amaçlı flat, bias, dark ve ThAr görüntüleri de elde edildi. 2023-2025 yılları arasında yapılan gözlemlerden TIC 142587827 yıldızının toplam 18 adet tayf verisi ve TIC 82224114 yıldızının toplam 20 adet tayf verisi elde edildi. Aday yıldızların bazı tayf verileri düşük sinyal / gürültü oranı (SNR) nedeniyle analizler kapsamında çıkartılmıştır. Aday yıldızların gözlem zamanları, poz süreleri, SNR (sinyal / gürültü) değerleri ve veri sayıları Çizelge 3.2‘de yer almaktadır.

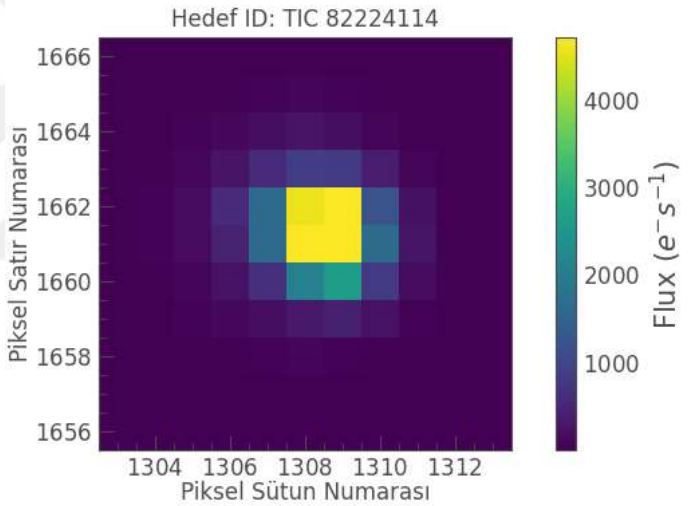
Çizelge 3.2 Aday yıldızların tayf gözlem tarihleri, poz süreleri, evreleri, SNR değerleri ve veri sayıları

Yıldız	Tarih	Poz süresi(sn)	Evre	SNR	Veri sayısı
TIC 142587827	2023/09/24	3600	0.8	65.43	1
	2023/09/25	3600	0.7	60.92	1
	2023/10/14	3600	0.6 - 0.9	49.38	4
	2024/06/03	3600	0.2 - 0.4	26.48	2
	2024/07/08	1800	0.7 - 0.9	29.47	6
	2024/08/08	3600	0.3 - 0.4	30.48	2
	2024/09/13	3600	0.1 - 0.2	28.04	2
TIC 82224114	2023/03/21	2700	0.6 - 0.9	46.05	4
	2023/05/02	3600	0.4 - 0.7	39.36	3
	2025/02/06	3600	0.0 - 0.2	23.83	3
	2025/02/26	3600	0.1 - 0.5	29.26	5
	2025/03/14	3600	0.6 - 0.9	30.03	5

TESS uzay teleskobu ile elde edilen görüntülerin piksel ölçekleri 21 yay-saniye/piksel'dir. Bu durumda da zaman zaman görüntüde yer alan ışık kaynağının içerisine başka bir kaynağın ışığı da girerek ışık eğrilerinin kirlenmesine neden olmaktadır. Bu nedenle tez çalışmasında incelenen TIC 142587827 ve TIC 82224114 yıldızlarının Target Pixel File (Hedef Piksel Dosyası) dosyaları da incelendi. Aşağıda Şekil 3.1'de ve Şekil 3.2'de görüleceği üzere her iki aday için ciddi bir kontaminasyon görülmemektedir.



Şekil 3.1 TIC 142587827 sistemine ait hedef piksel dosyası



Şekil 3.2 TIC 82224114 sistemine ait hedef piksel dosyası

3.2 Işık ve Dikine Hız Analizi

Tayfsal gözlem verilerinde IRAF[6] (Image Reduction and Analysis Facility) programı yardımıyla ilk olarak dark, bias, flat gibi kalibrasyon görüntüleri kullanılarak düzeltmeler yapıldı. Sonrasında ThAr lamba tayf verileri yardımıyla da tayfsal verilere dalgaboyu kalibrasyonu uygulandı. Dalgaboyu kalibrasyonu yapılan veriler üzerinden bu tez çalışması kapsamında IDL‘de yazılmış özel kodlar yardımıyla tayfın istenilen dalgaboyu aralığına (5000A - 5500A) karşılık gelen basamaklar (15 - 19. basamaklar) için normalizasyon işlemleri gerçekleştirildi. Sonrasında bu basamaklar birleştirilerek (combine) dalgaboyu, akı ve akı hatası sütunlarına sahip olan bir metin dosya formatına dönüştürüldü. Son olarak, bu veriler için IDL tabanlı bir kod yardımıyla Güneş Sistemi’ne indirgenmiş kütle merkezli hız düzeltmeleri yapıldı.

Aday yıldızların dikine hız ölçümlerini elde edebilmek için Çizgi Genişleme Fonksiyonlarını (Broadening Functions, BF) yöntemi kullanıldı. Ancak bu yöntem için gerekli referans yıldız tayfları ise Gaia FGK Bencmark Stars[7] kataloğundan adayların sıcaklıklarına bağlı olarak seçildi. Bütün ön-indirgeme işlemlerinden geçirilen ve normalize edilen tayfsal verilere Python‘da yazılmış özel kodlar yardımıyla Çizgi Genişleme Fonksiyonları (Broadening Functions, BF) uygulandı. Elde edilen Çizgi Genişleme Fonksiyonlarına da Gauss eğrisi uyumlamaları yapılarak her bir bileşene ait genişleme fonksiyonunun genliği, merkezi konumu ve genişliği hesaplandı. Böylelikle her bir bileşene ait dikine hız ölçüm değeri elde edilerek zamana göre dikine hız eğrileri oluşturuldu. Sonrasında elde edilen ışık eğrisi ve dikine hız değerleri Barycentrik Julian Date (Güneş Sistemi Kütle Merkezli Jülyen Günü) değerlerine sahip ışık elemanları (T_0 ve P) kullanılarak evrelendirildi. TIC 142587827 ve TIC 82224114 yıldızlarının ışık elemanları sırasıyla Denklem 3.1‘de ve Denklem 3.2‘de verildi.

---

[6] https://iraf-community.github.io/
[7] https://www.blancocuaresma.com/s/benchmarkstars

$$BJD_{MinI} = 2458842.583581\ (4) + 0^{d} \cdot 439398\ (8) \times E \qquad (3.1)$$

$$BJD_{MinI} = 2458870.695130 + 0^{d} \cdot 376124 \times E \qquad (3.2)$$

Son olarak, fotometrik ve tayfsal veriler yardımıyla örten çift sistemi bileşenlerinin fiziksel ve yörünge parametrelerini elde etmek için Wilson-Devinney (1971, 1979) yöntemini baz alarak ışık ve dikine hız eğrisi analizleri gerçekleştirildi. Bu analizler için PyWD2015 (Güzel ve Özdarcan, 2020) programı kullanıldı. PyWD2015 programı 1971-2014 yılları arasındaki Wilson-Devinney kodlarını dikkate alır. Her iki aday için analizde Mode-3 (Mod 3) seçeneği kullanıldı, bir başka değişle değen çift sistem yaklaşımı seçilerek gerçekleştirildi. Analizlerin gerçekleştirilebilmesi için ilk olarak literatür taramaları yapılarak TESS ve Gaia veri tabanında mevcut olan minimum orta zamanı değerleri (T_0), yörünge dönemleri (P) ve birinci bileşene ait etkin sıcaklık değerleri (T_1) alınarak programa sabit parametreler olarak tanıtıldı. Dikine hız eğrisinden kabaca kütle oranları (q) belirlendi ve analize başlangıç bir değer olarak girildi. TIC 142587827 sisteminin analizleri esnasında ikinci bileşene ait etkin sıcaklık değeri (T_2), yörünge yarı-büyük eksen uzunluğu (a), yörünge eğim açısı (i), birinci bileşene ait ışınım gücü (L_1), kütle oranı (q), evre kayması, uzay hızı (V_γ), kenar kararma sabitleri (x_1, x_2), birinci bileşenin yüzey potansiyeli (Ω_1) ve ilave bileşene ait ışınım gücü (L_3) parametreleri serbest bırakılarak fotometrik ve tayf verilerinin eş zamanlı olarak analizleri gerçekleştirildi (Bölüm 4.1, Şekil 4.1 ve Şekil 4.2, Çizelge 4.1). L_3 parametresi, BF grafiklerinde ilave bir cismin varlığını işaret eden ilave bir ışık kaynağı gözüktüğü için bu parametre serbest bırakılarak çözümler gerçekleştirildi. TIC 82224114 sisteminin analizleri esnasında ikinci bileşene ait etkin sıcaklık değeri (T_2), yörünge yarı-büyük eksen uzunluğu (a), yörünge eğim açısı (i), birinci bileşene ait ışınım gücü (L_1), ikinci bileşene ait ışınım gücü (L_2), kütle oranı (q), evre kayması, uzay hızı (V_γ), kenar kararma sabitleri, birinci bileşenin yüzey potansiyeli (Ω_1) parametreleri serbest bırakılarak ışık ve tayf verilerinin eş zamanlı olarak analizleri gerçekleştirildi (Bölüm 4.2, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5). Her iki adayın analizinde bolometrik albedo değerleri (A_1, A_2), yıldızların zarf yapısına göre belirlenmiş olup; radyatif zarfa sahip yıldızlar için 1.0, konvektif zarfa sahip yıldızlar için 0.5 olarak alınıp analizler bu doğrultuda gerçekleştirildi (Rucinski, 1969). Benzer şekilde, çekim kararma katsayıları

(g_1, g_2), radyatif zarfa sahip yıldızlar için 1.0 (Von Zeipel, 1924), daha soğuk konvektif katmana sahip yıldızlar için 0.32 (Lucy, 1967) değerleri sabit tutularak analizler gerçekleştirildi.

3.2.1 Dönem Değişimi Analizi (O-C Analizi)

Bu tez çalışmasında seçilen aday yıldızların yörünge döneminin herhangi bir nedenden dolayı değişip değişmediğini belirlemek ve aynı zamanda TIC 142587827 yıldızı için BF grafiklerinde görülen ilave bir cismin varlığına işaret eden ışık katkısı gözüktüğü için bir dönem analizi de gerçekleştirildi. İlk olarak sistemlere ait minimum zamanlar literatürde yer alan VarAstro[8] gibi çeşitli veri tabanlarından elde edildi, bununla birlikte söz konusu veri tabanlarında yer almayan ancak literatürde yayımlanmış olan minimum zaman verileri de farklı kaynaklardan taranarak toplandı. Bu kapsamda, BAV (Bundesdeutsche Arbeitsgemeinschaft für Veränderliche Sterne), OEJV (Open European Journal on Variable Stars) ve IBVS (Information Bulletin on Variable Stars) gibi kataloglar ve veri tabanları tek tek taranarak geçmiş yıllara ait tüm minimum zaman verileri dahil edildi.

Bu verilere ek olarak, TESS verileri kullanılarak yeni minimum zamanları da hesaplandı. Minimum zamanlar Python dili ile yazılmış Xtrema[9] adlı program kullanılarak Kwee-Van Woerden (1956) yöntemi ile hesaplandı. Böylece, sistemin hem geçmiş yıllara dayanan hem de güncel uzay teleskopları ile elde edilmiş minimum zaman verilerine ulaşıldı. MAST veri tabanından TIC 142587827 sistemi için 455 tane birinci minimum, 470 tane ikinci minimum zamanı hesaplandı. TIC 82224114 sistemi için 66 tane birinci minimum, 63 tane ikinci minimum zaman verisi hesaplandı. Böylelikle TIC 142587827 sistemi için toplamda 474 tane birinci minimum, 476 tane ikinci minimum verisi, TIC 82224114 sistemi için toplamda 66 tane birinci minimum, 63 tane ikinci minimum zaman verisi elde edildi.

---

[8] https://var.astro.cz/en/
[9] https://github.com/EnginBahar/Xtrema

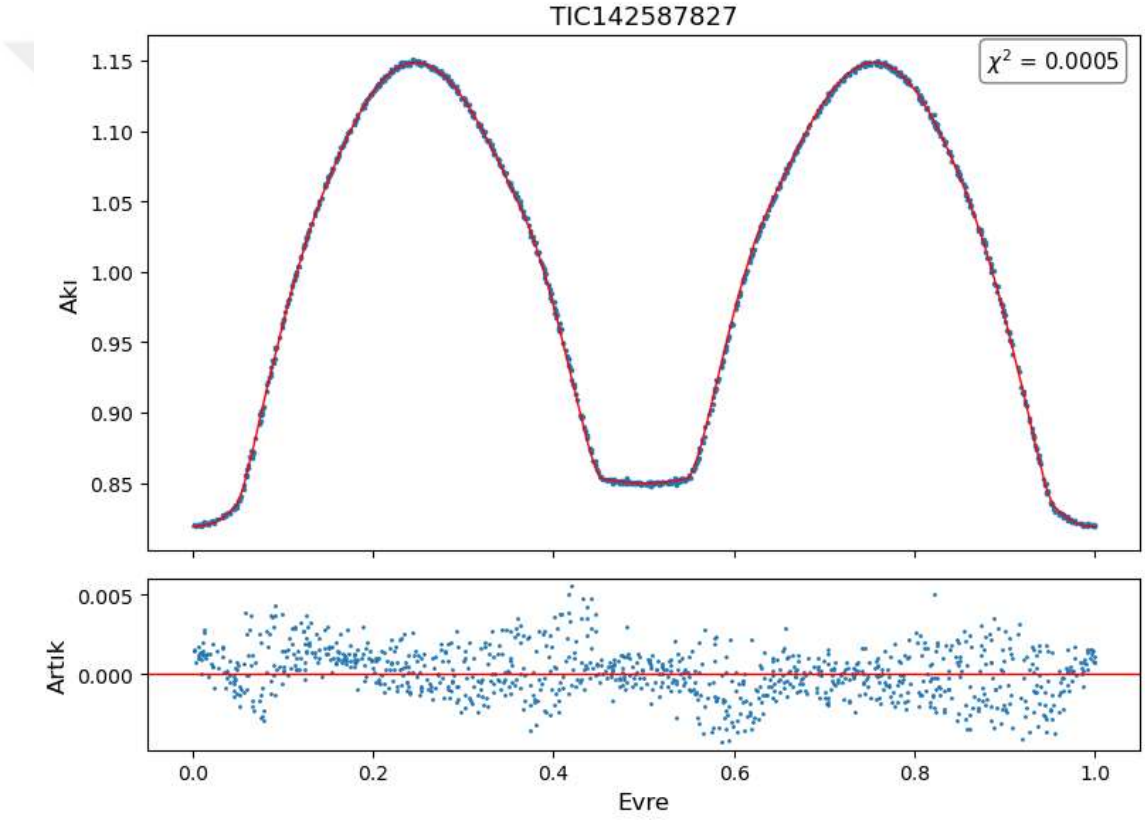
Bu tez çalışmasında, TIC 142587827 sisteminin dönem değişim analizi (O-C analizi) için Python dilinde yazılmış ve Markov Zinciri Monte Carlo yöntemi ile çalışan ve görsel arayüze sahip OCFit[10] (Gajdos vd., 2019, Gajdos 2023) programı kullanıldı. Örten çift yıldızların ve geçiş yapan ötegezegenlerin O-C diyagramlarını uyumlamak için 2015 yılında yazılmış, numpy (Harris vd., 2020) ve matplotlib (Hunter, 2007) gibi standart bilimsel paket kütüphanelerini kullanmaktadır. Genetik Algoritmalar (GA) ve Markov Zinciri Monte Carlo (MCMC) kullanmaktadır. OCFit programı, ışık-zaman etkisi (Irwin, 1952), eksen dönmesi hareketi (Giménez ve Bastero, 1995) ve bileşenler arası kütle aktarım etkilerini dikkate alarak (Agol vd., 2005) O-C diyagramlarını modelleyebilmektedir. Bu tez çalışmasında TIC 142587827 sistemi için kütle aktarım ve ışık zaman etkisini dikkate alan LiTE3Quad modeli seçildikten sonra T_0, P, $asini_3$, e_3, w_3, t_{03}, P_3 parametreleri başlangıç ve bitiş parametrelerine göre belirli adımlar ile serbest bırakılarak analizler yapıldı. Kuadratik terim (Q) katsayısı hesaba katılarak analizler yapıldı fakat dönem değişim analizinde (O-C analizi) ideal bir uyumlama elde edilemediği için 0.0 olarak sabitlendi ve analizler tekrar yapıldı. TIC 82224114 sisteminin dönem değişim analizini (O-C analizi) gerçekleştirmek için literatürde yer alan tüm minimum zamanlar toplandı ve O-C grafiği oluşturuldu. Sistemin elde edilen minimum zaman aralıkları çok kısa bir zaman aralığını kapsadığı için (~ 1 ay) anlamlı bir periyodik değişim ortaya çıkmadı ve bu nedenle herhangi bir dönem analizi gerçekleştirilemedi.

[10] https://github.com/pavolgaj/OCFit

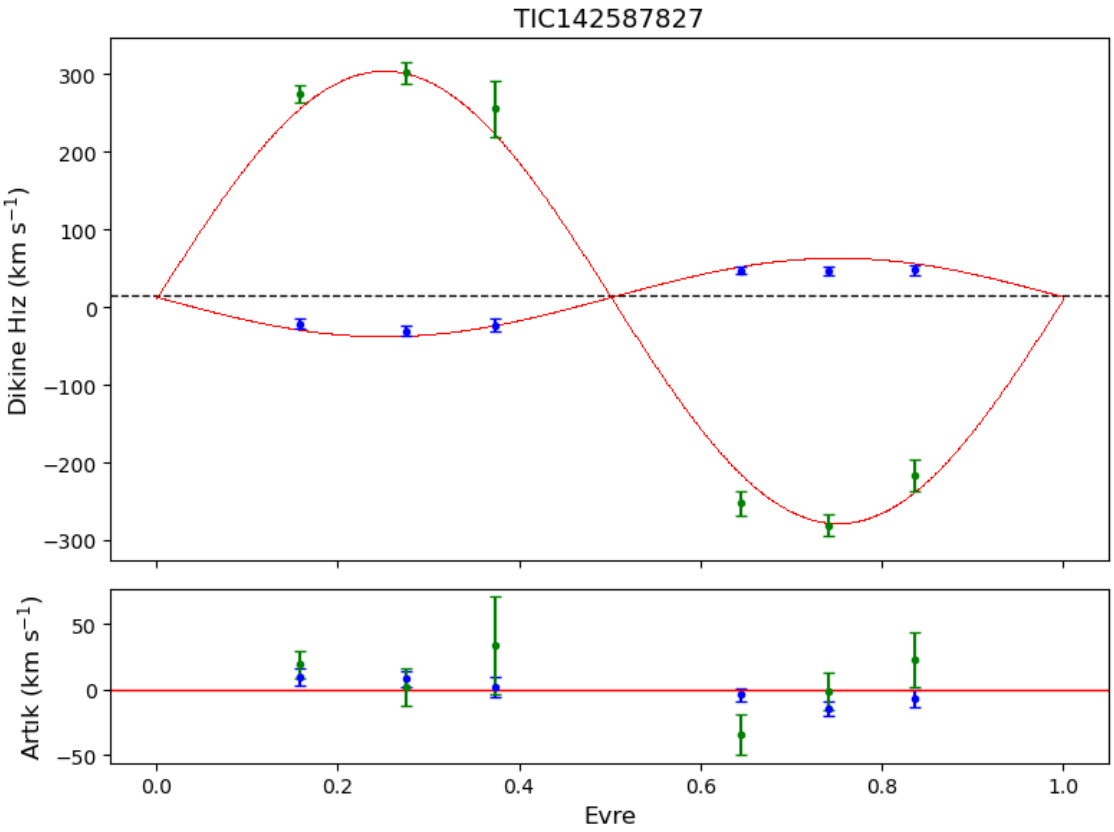
4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1 TIC 142587827

TIC 142587827 sisteminin ışık ve dikine hız eğrisi analizi PyWD2015 programı ile eş zamanlı olarak gerçekleştirildi. Bu analizler sonucunda elde edilen ışık ve dikine hız eğrileri modellerle birlikte Şekil 4.1‘de ve Şekil 4.2‘de, fiziksel ve mutlak parametreler ise Çizelge 4.1‘de verildi.



Şekil 4.1 TIC 142587827 sistemine ait ışık eğrisi (mavi nokta) ve en iyi model (kırmızı kesiksiz eğri). Alt panel gözlemsel veri ile model arasındaki farkları göstermektedir.



Şekil 4.2 TIC 142587827 sistemine ait dikine hız eğrisi (mavi nokta ve yeşil nokta, sırasıyla 1.bileşen ve 2.bileşen) ve en iyi model (kırmızı kesiksiz eğri). Alt panel gözlemsel veri ile model arasındaki farkları göstermektedir.

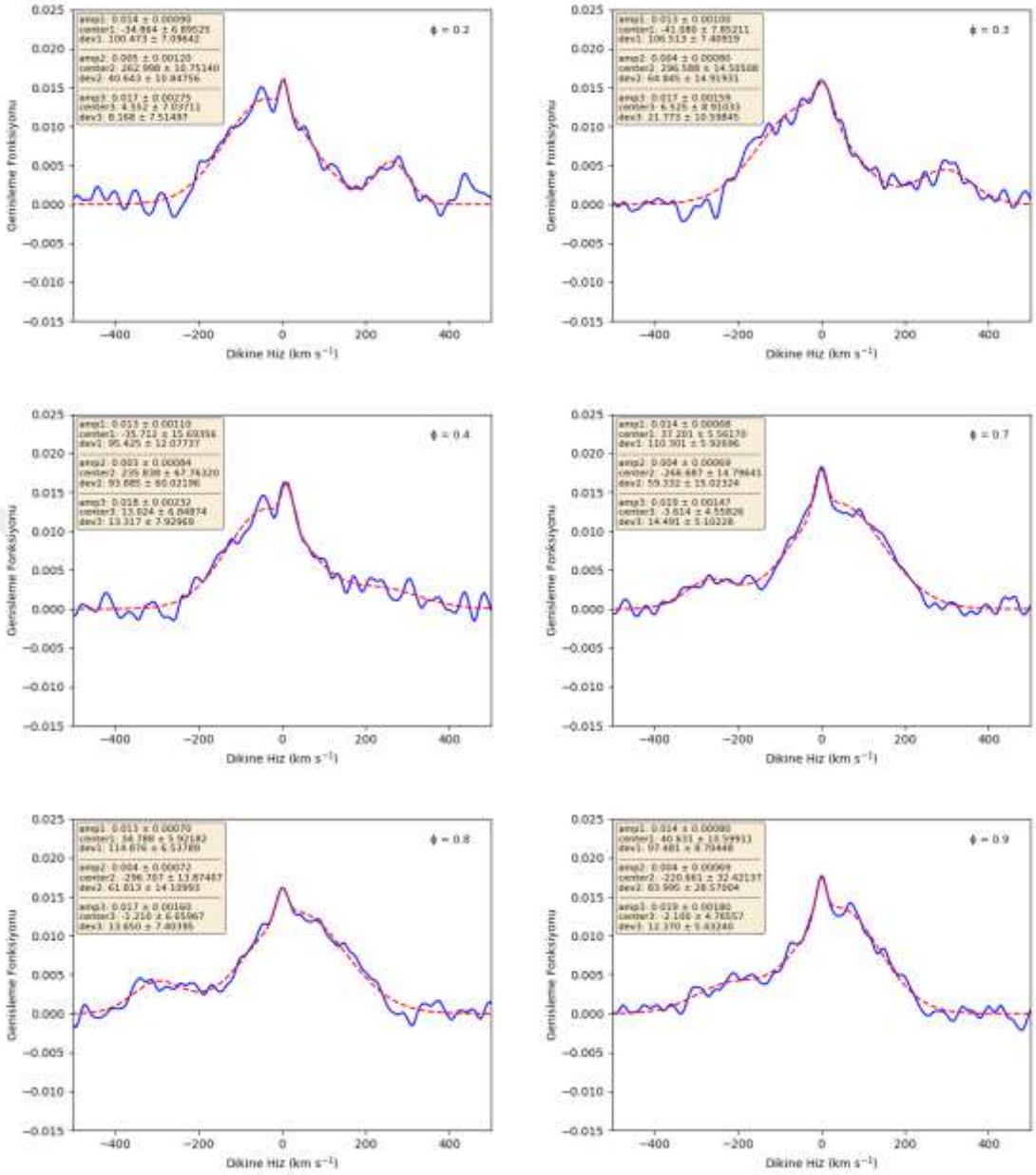
Çizelge 4.1 TIC 142587827 sisteminin ışık ve dikine hız eğrisinden elde edilen parametreler

Parametre	**Birim**	**Değer**	**Hata**
T_0	BJD - 2400000	58842.58	-
P	Gün	0.44	-
q (M_2/M_1)	-	0.17	0.0005
e	-	0	-
T_1	K	6696	-
T_2	K	6636	13
i	derece	86.5	0.07
a	AB	2.97	0.11
Evre kayması	-	0.001	3.2e-5
$\Omega 1=\Omega 2$	-	2.1	0.001
$V\gamma$	km sn^{-1}	11.45	3.6
$l_1/(l_1+l_2+l_3)$	-	0.769	-
$l_2/(l_1+l_2+l_3)$	-	0.191	-
$l_3/(l_1+l_2+l_3)$	-	0.04	-
x_1	-	0.35	0.005
x_2	-	0.45	0.01
K_1	km sn^{-1}	50.479	9.453
K_2	km sn^{-1}	291.247	25.391
f	-	0.62	-
$\chi 2$	-	0.0005	-

Çizelge 4.2 TIC 142587827 sisteminin mutlak parametreleri

Parametre	**Birim**	**Değer**	**Hata**
L_1	$L_\odot$	4.99	0.37
L_2	$L_\odot$	1.13	0.11
M_1	$M_\odot$	1.56	0.176
M_2	$M_\odot$	0.27	0.03
R_1	$R_\odot$	1.66	0.062
R_2	$R_\odot$	0.81	0.036
$log\ g_1$	cm sn^{-2}	4.2	0.017
$log\ g_2$	cm sn^{-2}	4.1	0.011

Çizgi Genişleme Fonksiyonları (BF) yöntemi sonucunda bileşenlerin ortak kütle merkezi etrafındaki dikine hızları da elde edildi. Şekil 4.3'te TIC 142587827 için verilen BF grafiklerinde, ilave bir bileşene ait bir ışık katkısı açıkça görünmektedir. Bu nedenle bu aday için PyWD2015 programında ışık ve dikine hız eğrisinin eş zamanlı analizi sırasında, ilave bileşene ait ışınım gücü parametresi (L_3) serbest bırakıldı. Şekilde ayrıca genişleme profillerine yapılan en iyi Gauss uyumlama fiti de kesikli kırmızı eğri ile gösterilmektedir. Her şeklin sol üst köşesinde ise birinci ve ikinci bileşen için Gauss uyumlamasına ait parametreler de verilmektedir.

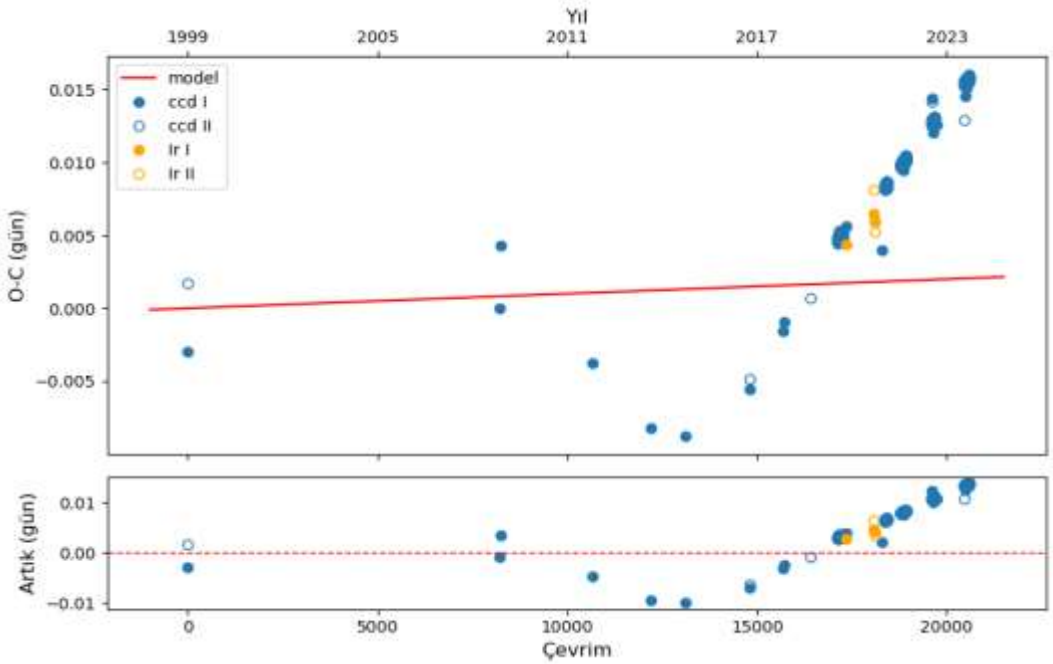


Şekil 4.3 TIC 142587827 sistemine ait genişleme fonksiyonları (mavi kesiksiz eğri) ve üzerlerine yapılan Gauss uyumlama profilleri (kırmızı kesikli eğri)

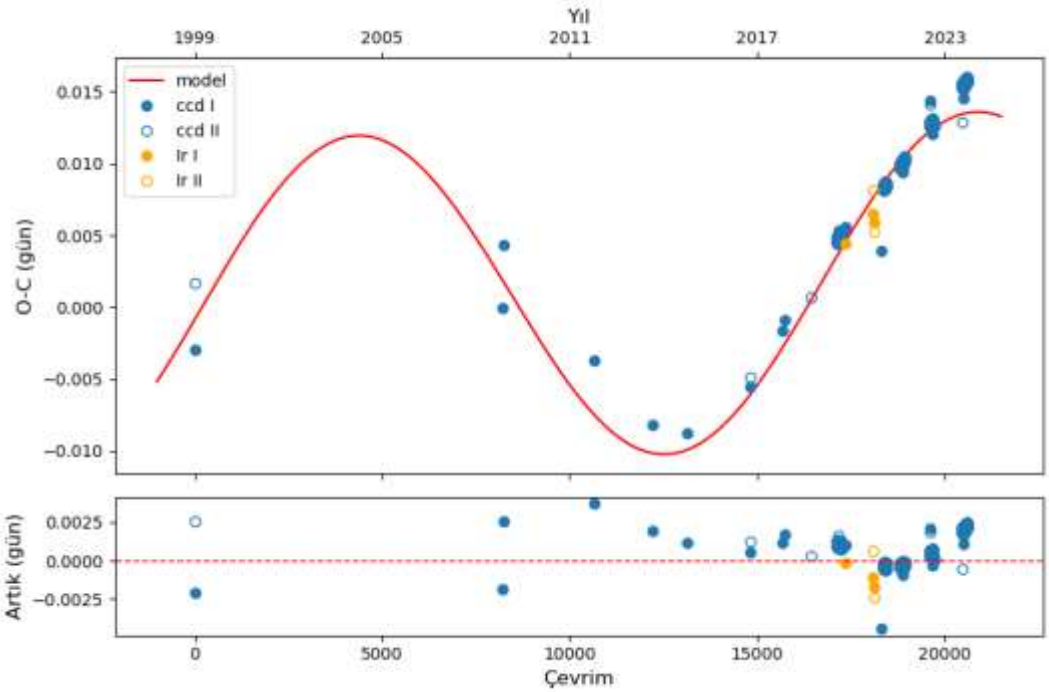
TIC 142587827 ait BF grafikleri incelendiğinde, ilave bir bileşene ait ışık katkısı da görülmektedir. İlave bileşenin sisteme fiziksel olarak bağlı olup olmadığını desteklemek için O-C dönem değişim analizi de gerçekleştirildi. Bu analiz sırasında ışık-zaman etkisi ve manyetik aktivite kaynaklı dönem değişim yaklaşımı altında iki varsayım yapıldı. O-C analizi, sisteme ait literatürdeki tüm minimum zamanlar ve TESS gözlemlerinden elde edilen yeni minimum zamanlar birlikte değerlendirilerek gerçekleştirildi. Bu

analizde öncelikle ışık elemanlarını düzeltmek amacıyla (T_0 ve P) bir doğru uyumlaması (lineer fit) yapıldı. Doğru uyumlamasından elde edilen artıklar incelendiğinde, önemli bir genliğe sahip sinusoidal bir değişim olduğu görüldü. Bu durumun iki farklı mekanizmadan kaynaklı olabileceği değerlendirildi: ışık-zaman etkisi ve manyetik aktivite kaynaklı dönem değişimi.

İlk olarak, manyetik aktivite kaynaklı dönem değişimi mekanizması kabulü altında Applegate (1992) kuramı temeline dayanarak sistemdeki dönem değişimi incelendi. Öncelikle ışık elemanları düzeltmek için bir lineer fit uyumlaması yapıldı (Şekil 4.4). Sonrasında bu lineer fitten olan artıklara Applegate mekanizmasını temel alan bir fit uyumlaması yapıldı (Şekil 4.5). Manyetik aktivite kaynaklı bu dönem değişimine ait O-C grafiği ve en iyi model yaklaşım Şekil 4.5'te ve elde edilen parametreler Çizelge 4.2'de verildi. Bu sonuçlara göre dönem değişiminin nedeni yaklaşık 16 yıllık bir çevrime ve 12 kG mertebesinde bir manyetik alan şiddetine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Manyetik aktivite kaynaklı fit uyumlaması sonrasında artıklarda önemli bir genliğe sahip herhangi bir periyodik değişim görülmedi.



Şekil 4.4 TIC 142587827 sisteminin tüm minimum zamanları kullanılarak elde edilen O-C grafiği ve doğrusal (lineer) model (noktalar gözlemsel minimum zamanlarını, kırmızı kesiksiz eğri ise modeli temsil etmektedir). Alt panel ise modelden olan artıkları göstermektedir.



Şekil 4.5 TIC 142587827 sisteminin tüm minimum zamanları kullanılarak elde edilen O-C grafiği ve manyetik aktivite kökenli model (noktalar gözlemsel minimum zamanlarını, kırmızı kesiksiz eğri ise en iyi modeli temsil etmektedir). Alt panel ise modelden olan artıkları göstermektedir

Çizelge 4.3 TIC 142587827'nin Applegate (1992) kuramına göre dönem değişim parametreleri

Parametre	**Birim**	**Değer**
Ps	yıl	20.42
ΔP	sn/çevrim	0.36788
ΔJ	g cm² sn⁻¹	-1.02×10^{46}
ΔE	erg	1.61×10^{41}
ΔL	erg sn⁻¹	7.8×10^{32}
B	Gauss	12455
Δm	Kadir	0.03159
χ2	-	0.004

Applegate kuramı, yakın çift yıldızlarda gözlenen yörünge dönemi değişimlerinin açıklanabilmesi için yıldızın açısal momentumumun büyük oranda yeniden dağıtılmasını ve bu süreçte oldukça yüksek bir enerji kullanımını öngörmektedir.

Ancak, modelin gerektirdiği kadar büyük dönüş hızı değişikliklerinin gerçek yıldızlarda gözlenmediği ve bu sürecin enerji ihtiyacının yıldızın üretebileceğinden çok daha fazla olduğu yapılan çalışmalar ile ortaya konmuştur. Yani, yıldızın farklı bölgelerinde bu kadar büyük bir dönüş farkı olmadığı ve gözlemlerle modelin uyumsuz olduğu gösterilmiştir. Bu nedenle, Applegate kuramının gözlemsel ve enerji açısından yetersiz kaldığı sonucuna varılmıştır (Lanza vd., 1998).

Buna karşılık, Lanza (2020) tarafından geliştirilen modelin yıldızın içindeki simetrik olmayan manyetik alanların etkisiyle, çok daha düşük enerji gereksinimiyle yörünge dönemi modülasyonunu açıklayabildiği ve gözlemsel bulgularla daha iyi örtüştüğü görülmüştür. Bu nedenle analiz kapsamında Applegate kuramının sınırlarını aşmak amacıyla Lanza'nın formülasyonları ile de hesaplamalar yapıldı. Bu hesaplamalar sonucu elde edilen değerler birinci ve ikinci bileşen olmak üzere sırasıyla ΔE_1 = -3.14679x10^{33} erg ve ΔE_2 = -1.04124x10^{35} erg olacak şekilde aşağıdaki bağıntı ile hesaplandı (Han vd. 2023).

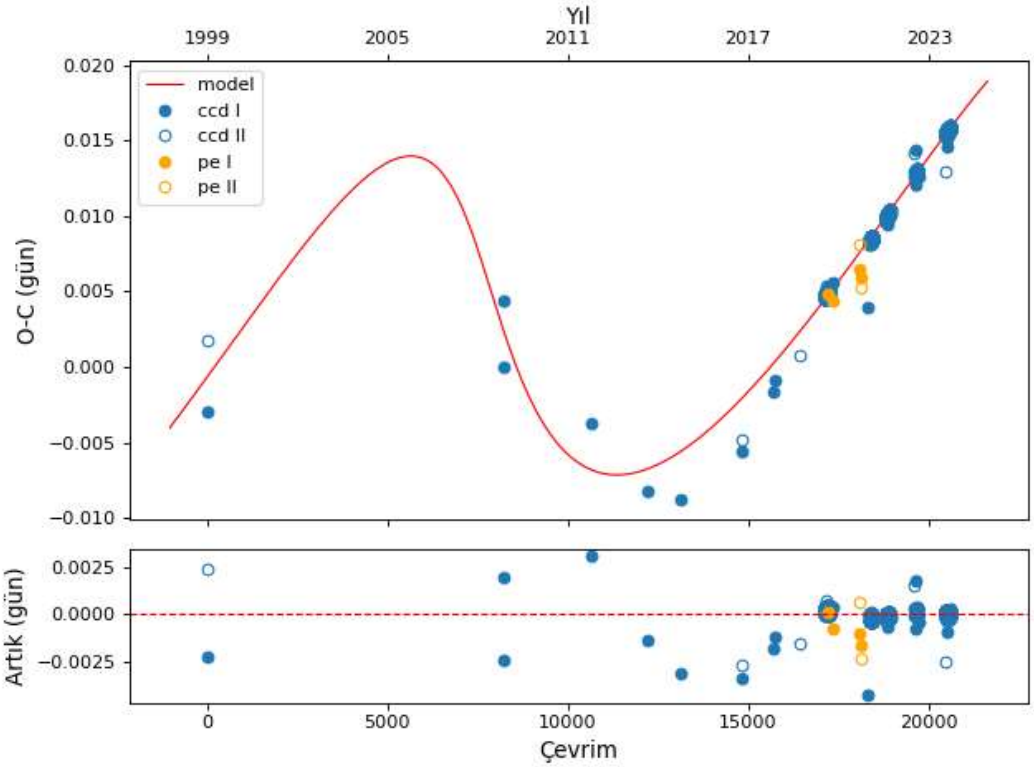
$$\Delta \mathrm{E} = -[m{r_o}^2 \Omega^2]\,\frac{\Delta \mathrm{T}}{3T}$$

Burada, m, çift sistemin indirgenmiş kütlesi ($m = M_1M_2/(M_1+M_2)$), r_0, yörünge yarıçapı, $\Omega=2\pi/P_{orb}$, açısal hız ve $\Delta t/T = \Delta P/P_{orb}$, dönem değişiminin göreli genliğidir. Bu formülasyonlar sonucunda, bileşenlerin ışınım zaman ölçeği $\Delta E_1/L_1$ = 0.05 yıl, $\Delta E_1/L_1$ = 0.22 yıl olarak hesaplandı. Manyetik olarak aktif ikinci bileşenin değeri sistemin gözlemlenen çevrimsel döngüsünden P_{sin} = 20.42 yıl değerinden daha küçüktür. Ek olarak bileşenlerin açısal momentum transferi için gereken enerjinin üretilen enerjiye oranı sırasıyla $\Delta E_1/E_1$ = 0.003, $\Delta E_2/E_2$ = 0.48 olarak hesaplandı. $\Delta E/E$ oranlarının 1'den küçük olması sebebiyle gözlemlenen çevrimsel yapının manyetik aktivite ile açıklanabileceği anlamına gelmektedir (Čeki vd. 2024).

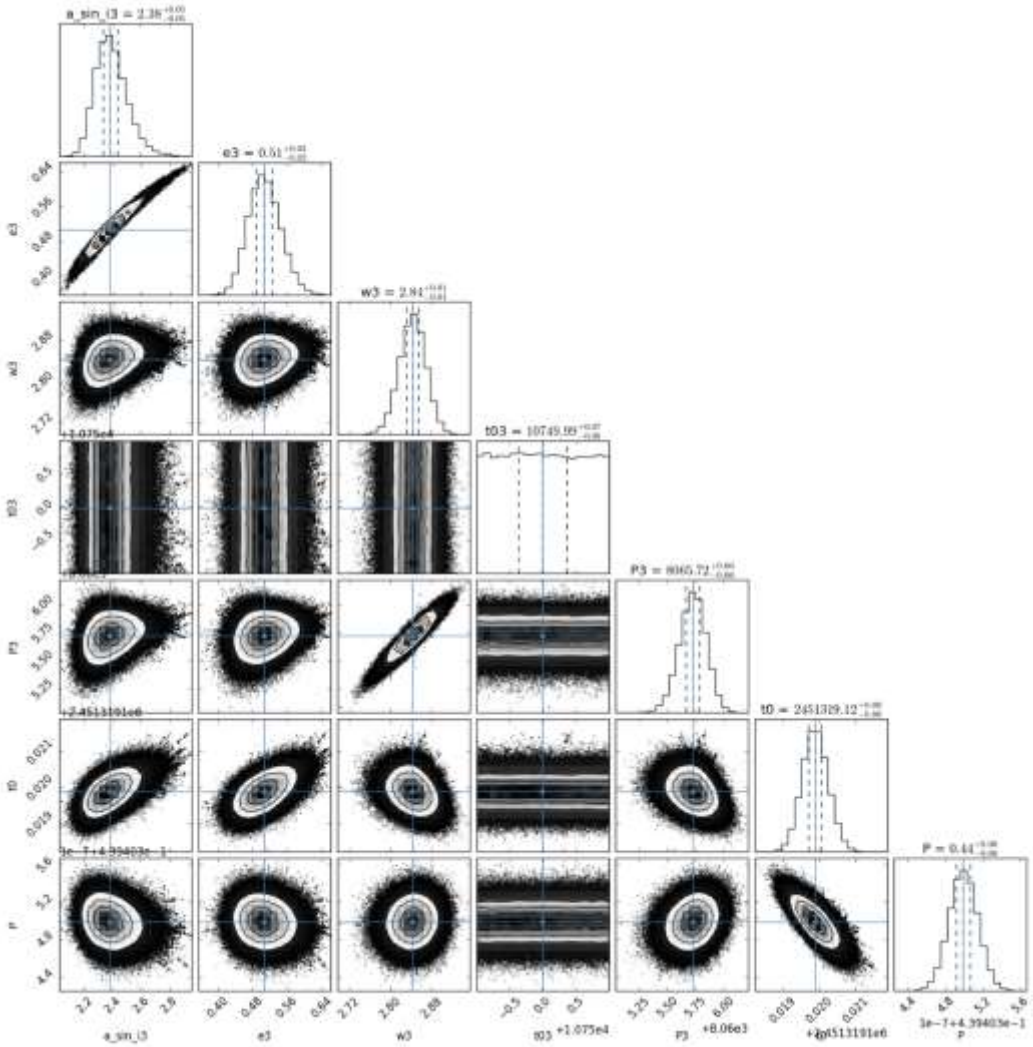
TIC 142587827 sisteminin ışık-zaman etkisini dikkate alan yaklaşımda ise OCFit programı kullanıldı ve programda LiTE3Quad modeli uygulanarak ilave bileşene ait parametreler elde edildi. Bu model ışık-zaman ve kütle aktarım etkilerini birlikte analiz

etmesine olanak tanır. OCFit programına ışık elemanları (T_0 ve P) ile birlikte, ışık ve dikine hız analizinden elde edilen birinci ve ikinci bileşene ait kütleler (M_1 ve M_2), yörünge eğim açısı (i) değerleri girdi parametreleri olarak programa girildi. Programda LiTE3Quad modeli seçildikten sonra T_0, P, $asini_3$, e_3, w_3, t_{03}, P_3 parametreleri belirli aralıklar tanımlanarak serbest bırakılarak analizler yapıldı.

Literatürde yayımlanmış olan minimum zaman verilerinin sayısının az olması sebebiyle (25 tane) TIC 142587827 sisteminin dönem değişim analizi 2 farklı yöntemle gerçekleştirildi. TESS verileri 2019 - 2024 yıllarını kapsamaktadır ve önceki yer tabanlı gözlemlerden elde edilen minimum zaman sayısından oldukça fazladır (950 adet minimum zamanının 925 tanesi TESS verisine aittir). Doğal olarak bu etki O-C modellemesinde en iyi uyumlamanın ağırlıklı olarak TESS verileri üzerinden geçmesine neden olmaktadır. Ayrıca, analizler esnasında CCD ve TESS minimum zaman verileri için ağırlıklandırma katsayısı 10 olarak alındı. Bu nedenle, ilk analizde tüm minimum zamanları kullanılarak bir analiz gerçekleştirildi. Bu yaklaşımla elde edilen en iyi model Şekil 4.6‘da, modelden olan artıklar alt panelde gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere uyumlanan model bazı minimum zaman verilerini düzgün temsil etmemektedir, bu da çözüm sonucunda elde ettiğimiz bazı parametreleri ($asini_3$, e_3, w_3) olumsuz etkilemektedir. Bu sebeple ikinci analize ihtiyaç duyulmuştur. İkinci analizde, TESS verilerinin 5 farklı çeyreklikteki tüm birinci ve ikinci minimum zamanlarının ortalamaları alınarak toplamda 10 nokta olacak şekilde analize dahil edildi. Bu analize dair O-C eğrisi ve uyumlanan model Şekil 4.8‘de ve o modelden olan artıklar alt panelde gösterilmiştir. Her iki yöntemle parametrelerin birbirleri ile olan ilişkisini gösteren köşe (corner) grafikleri Şekil 4.7‘de ve Şekil 4.9‘da gösterilmiştir. OCFit programı ile yapılan ışık-zaman etkisi mekanizması sonucunda elde edilen köşe (corner) grafikleri arasında bir korelasyon olduğu gözlemlenmiştir. İlave bileşene ait t03 ve P3 parametreler arasında dejenerasyon vardır. Bu durum, bu iki parametrenin birbirine bağlı şekilde değiştiğini ve modelin bu parametreler için tek bir çözüm üretemediğini göstermektedir. Her iki yaklaşım sonucunda elde edilen parametreler Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4‘de verilmiştir. TIC 142587827 sistemine fiziksel olarak bağlı ilave cismin kütlesi bulunurken ilave cismin yörüngesinin çift sistemin yörüngesiyle eş düzlemde olduğu varsayımı altında çözüm elde edildi.



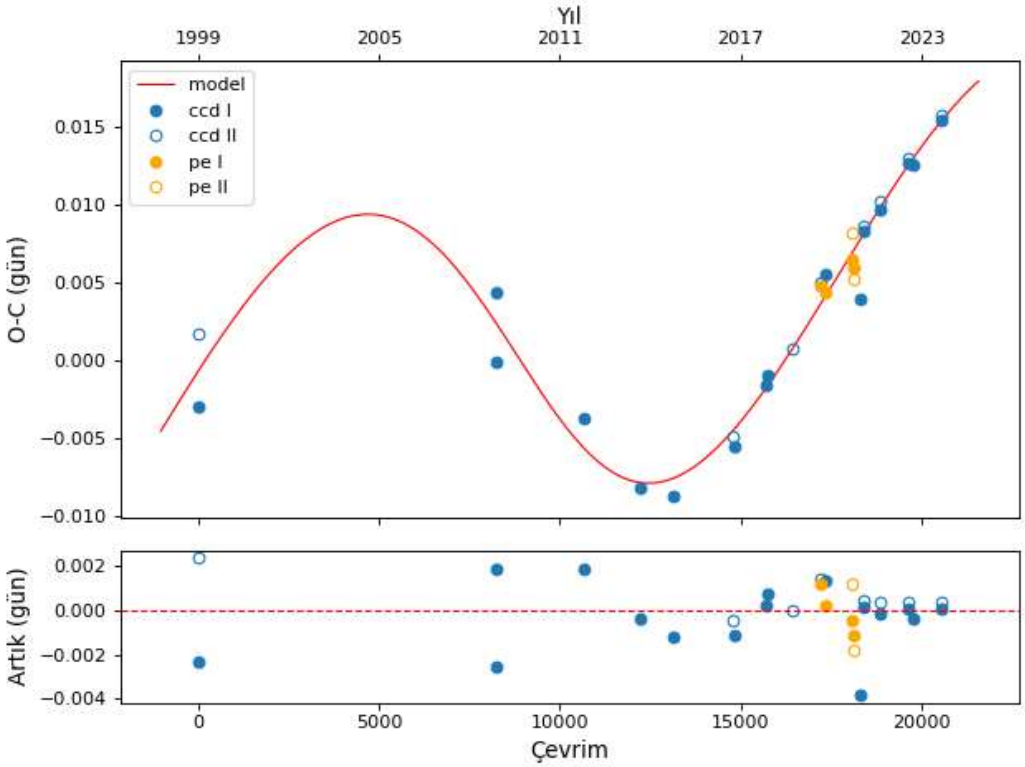
Şekil 4.6 TIC 142587827 sisteminin tüm minimum zamanları kullanılarak elde edilen O-C grafiği ve ışık-zaman etkisini gösteren model (noktalar gözlemsel minimum zamanlarını, kırmızı kesiksiz eğri ise en iyi modeli temsil etmektedir). Alt panel ise modelden arta kalan artıkları göstermektedir



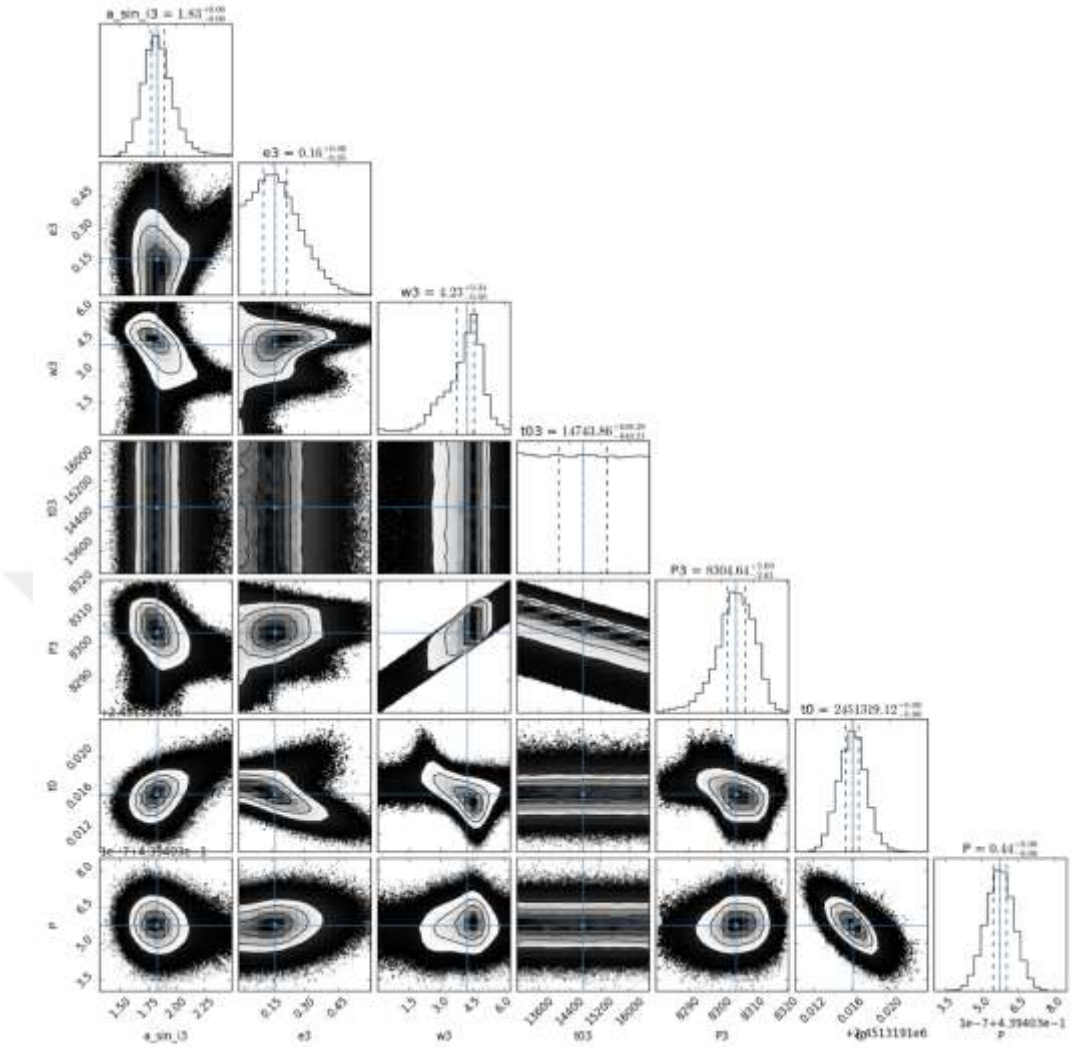
Şekil 4.7 TIC 142587827 sisteminin tüm minimum zamanları kullanılarak MCMC yöntemi ile elde edilen ışık-zaman etkisine ait köşe (corner) grafiği

Çizelge 4.4 TIC 142587827 sisteminin tüm minimum zamanları kullanılarak ışık-zaman etkisi mekanizmasına göre parametreleri

Parametre	**Birim**	**Değer**	**Hata**
P	gün	0.44	$1.5x10^{-8}$
P_3	gün	8065.72	0.12
P_3	yıl	22.1	0.0003
Q	gün	0.0	-
$asini_3$	AB	2.38	0.11
e_3		0.51	0.04
t_0	BJD	2451319.12	0.0003
t_{03}	BJD	10749.99	0.58
w_3	derece	162.86	1.47
A_3	saniye	1041.59	70.84
A_3	dakika	17.36	1.18
M_3	$M_\odot$	0.539	0.0467
M_3sini_3	$M_\odot$	0.538	0.0466
a	AB	10.5	1.3
a_{12}	AB	2.39	0.11
a_3	AB	8.096	1.2
$f(m_3)$	$M_\odot$	0.03	0.004
χ^2	-	0.0002	-



Şekil 4.8 TIC 142587827 sisteminin TESS minimum zamanlarının ortalaması alınarak elde edilen O-C grafiği ve ışık-zaman etkisini gösteren en iyi model (noktalar gözlemsel minimum zamanlarını, kırmızı kesiksiz eğri ise en iyi modeli temsil etmektedir). Alt panel ise modelden arta kalan artıkları göstermektedir



Şekil 4.9 TIC 142587827 sisteminin TESS minimum zamanlarının ortalaması alınması sonucunda MCMC yöntemi ile ışık-zaman etkisine ait köşe (corner) grafiği

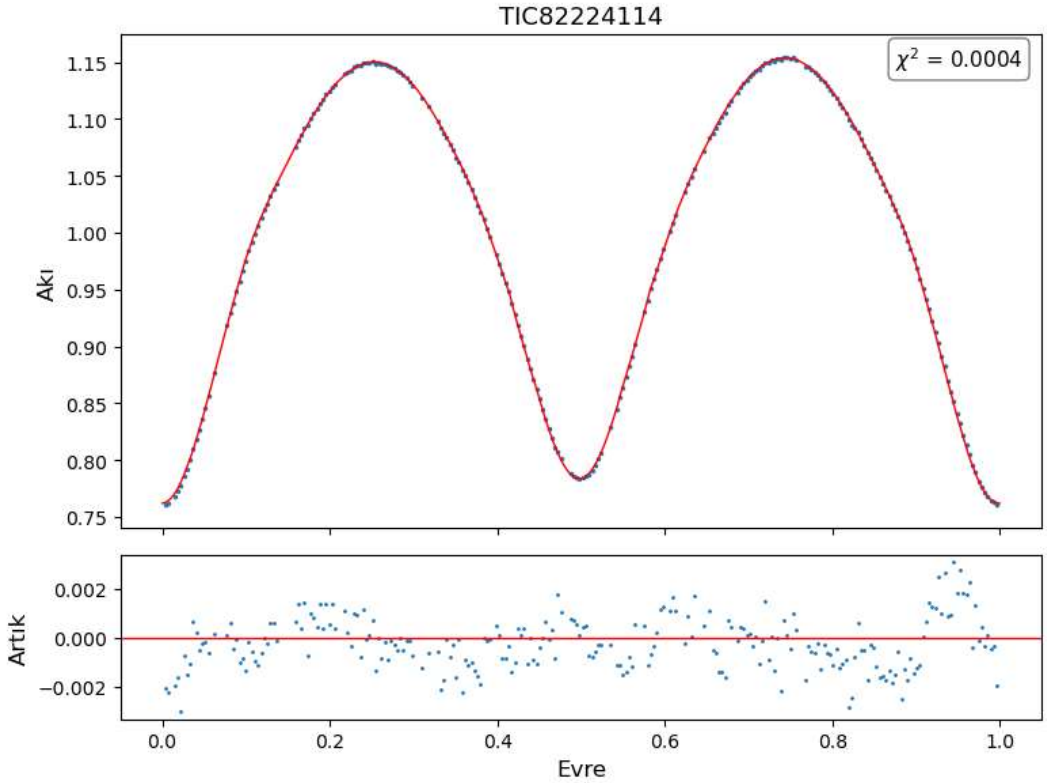
Çizelge 4.5 TIC 142587827 sisteminin TESS minimum zamanlarının ortalaması alınması sonucunda ışık-zaman etkisi mekanizmasına göre parametreleri

Parametre	**Birim**	**Değer**	**Hata**
P	gün	0.44	5.92×10^{-8}
P_3	gün	8316.25	5.84
P_3	yıl	22.8	0.016
Q	gün	0.0	-
$asini_3$	AB	1.92	0.14
e_3		0.16	0.11
t_0	BJD	2451319.12	0.001
t_{03}	BJD	14469.17	1010.96
w_3	derece	200.67	3.3
A_3	saniye	949.39	62.32
A_3	dakika	15.82	1.03
M_3	$M_\odot$	0.409	0.0396
M_3sini_3	$M_\odot$	0.408	0.0395
a	AB	10.50	1.47
a_{12}	AB	1.92	0.17
a_3	AB	8.58	1.36
$f(m_3)$	$M_\odot$	0.014	0.002
χ^2	-	0.0001	-

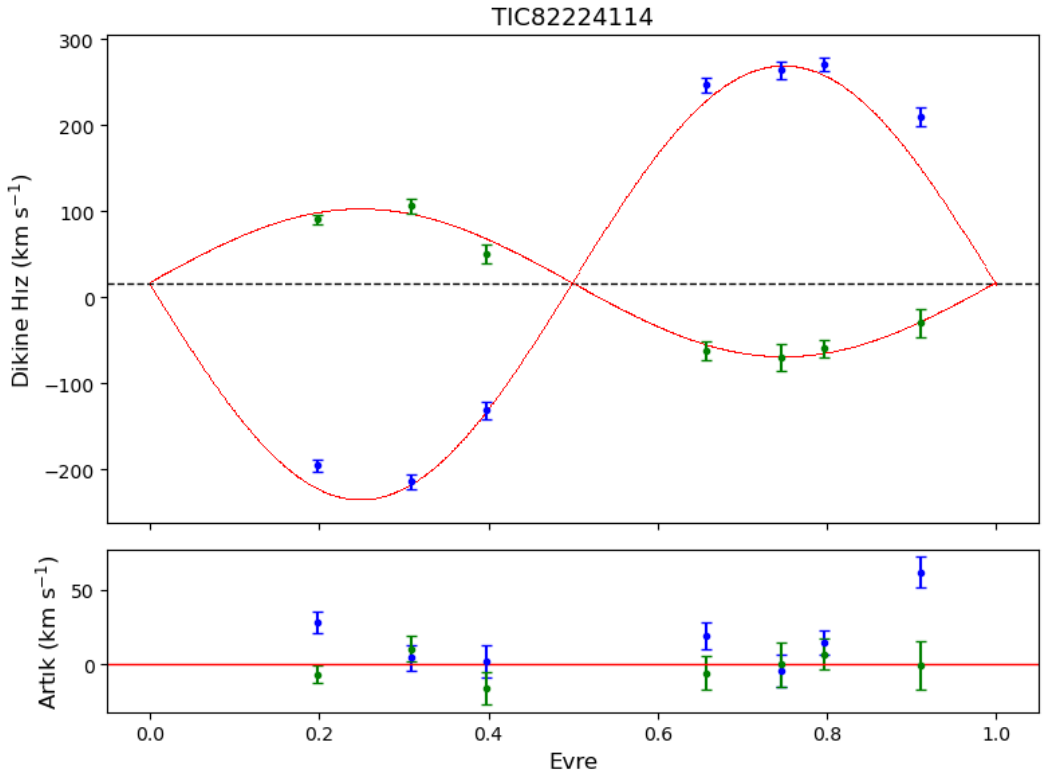
Her iki analiz sonucuna bakıldığında TESS minimum zamanlarının ortalaması alındığında ilave bileşene ait yörünge dönemi (P_3) 8065.72 gün'den 8316.25 gün'e artmıştır, basıklık (e_3) 0.51'den 0.17'ye azalmıştır, kütle (m_3) 0.539 $M_\odot$'den 0.409 $M_\odot$'e azalmıştır ve yarı-büyük eksen uzunluğu (a_3) 8.096 AB'den 8.58 AB'ye artmıştır. Bu parametreler arasındaki gözlenen değişimler, sistemin yörüngesine dair önemli farklar göstermekte olup, ikinci analizin yapılması gerekliliğini açıkça ortaya koymaktadır.

4.2 TIC 82224114

TIC 82224114 sisteminin PyWD2015 programı ile eş zamanlı olarak yapılan ışık ve dikine hız eğrisi analizi modellerle birlikte Şekil 4.8‘de ve Şekil 4.9‘de, çift sisteminin fiziksel ve yörünge parametreleri de Çizelge 4.5‘de verildi.



Şekil 4.10 TIC 82224114 sistemine ait ışık eğrisi (mavi nokta) ve en iyi model (kırmızı kesiksiz eğri). Alt panel gözlemsel veri ile model arasındaki farkları göstermektedir



Şekil 4.11 TIC 82224114 sistemine ait dikine hız eğrisi (yeşil nokta ve mavi nokta, sırasıyla 1.bileşen ve 2.bileşen) ve en iyi model (kırmızı kesiksiz eğri). Alt panel gözlemsel veri ile model arasındaki farkları göstermektedir

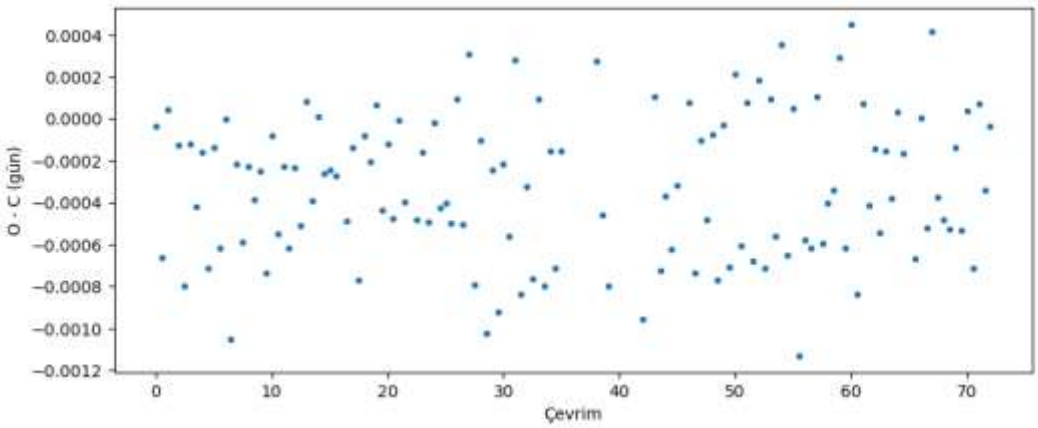
Çizelge 4.6 TIC 82224114 sisteminin ışık ve dikine hız eğrisinden elde edilen parametreler

Parametre	**Birim**	**Değer**	**Hata**
T_0	BJD - 2400000	58870.69	-
P	Gün	0.38	-
q (M_2/M_1)	-	2.93	0.002
e	-	0	-
T_1	K	6248	-
T_2	K	5354	47
i	derece	73.1	0.079
a	AB	2.62	0.08
Evre kayması	-	-0.001	4.5e-5
$\Omega 1=\Omega 2$	-	6.3	0.004
$V\gamma$	km sn^{-1}	15.7	2.83
$l_1/(l_1+l_2)$	-	0.29	-
$l_2/(l_1+l_2)$	-	0.71	-
x_1	-	0.42	0.02
x_2	-	0.33	0.01
K_1	km sn^{-1}	251.781	29.60743
K_2	km sn^{-1}	85.965	9.1031274
f	-	0.31	-
χ^2	-	0.0003	-

Çizelge 4.7 TIC 82224114 sisteminin mutlak parametreleri

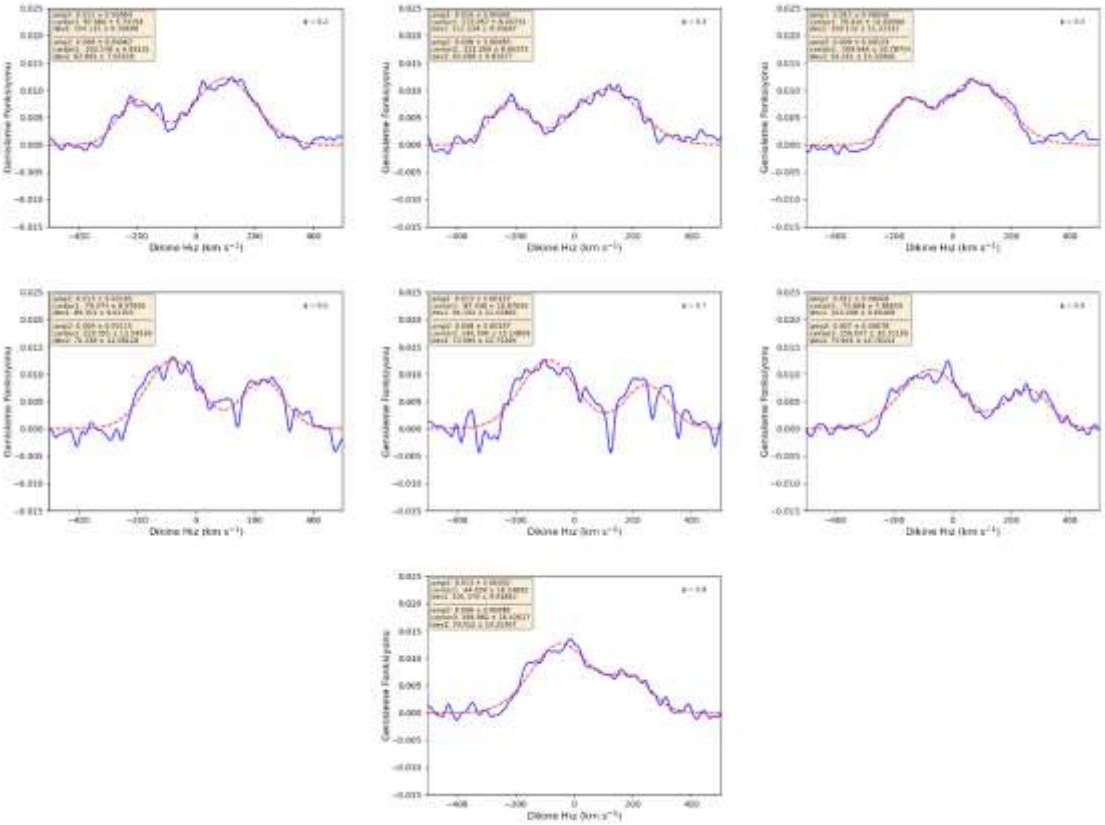
Parametre	**Birim**	**Değer**	**Hata**
L_1	$L_\odot$	0.88	0.05
L_2	$L_\odot$	1.61	0.15
M_1	$M_\odot$	0.44	0.04
M_2	$M_\odot$	1.28	0.12
R_1	$R_\odot$	0.8	0.025
R_2	$R_\odot$	1.3	0.04
$log\ g_1$	cm sn^{-2}	4.26	0.012
$log\ g_2$	cm sn^{-2}	4.32	0.013

TIC 142587827 sisteminde olduğu gibi TIC 82224114 çift sisteminin dönem değişimini irdeleyebilmek için literatürdeki tüm minimum zamanları toplandı ve Şekil 4.12'de de görülen O-C grafiği oluşturuldu. Bu çift sistemine ait tüm minimum zamanlar EKLER bölümünde verildi. TIC 82224114 çift sisteminin ~ 2 yıllık minimum zaman verisi mevcuttur. Ancak 48. sektördeki veriler varitabanından elde edilememektedir. Ayrıca, 48. sektördeki veriler elde edilse bile tüm minimum zamanlar ~ 2 yıllık bir zaman aralığını kapsayacağından O-C grafiğinde anlamlı bir periyodik değişim ortaya çıkmayacaktır ve bundan yola çıkarak herhangi bir dönem değişim analizi gerçekleştirilememiştir. Bu tez kapsamında aday yıldızın sadece fotometrik ve tayfsal analizleri PyWD2015 programı aracılığıyla gerçekleştirildi.



Şekil 4.12 TIC 82224114 sisteminin minimum zamanlarından elde edilen O-C grafiği

TIC 82224114 sistemi için Çizgi Genişleme Fonksiyonları (BF) yöntemi sonucunda bileşenlerin ortak kütle merkezi etrafındaki dikine hızları da elde edildi (Şekil 4.13). BF grafiklerinden elde edilen dikine hız değerleri evrelendirilip dikine hız eğri uyumlaması yapıldığında noktalar ile eğriler arasında 180° faz açısı farkı olduğu görüldü. Bu durum, sistemin W-türü bir W UMa sistem olduğunu desteklemektedir. Bu nedenle TIC 82224114 sisteminin ışık ve dikine hız analizi W türü W UMa yaklaşımı altında gerçekleştirildi.



Şekil 4.13 TIC 82224114 sistemine ait genişleme fonksiyonları (mavi kesiksiz eğri) ve üzerlerine yapılan Gauss uyumlama profilleri (kırmızı kesikli eğri)

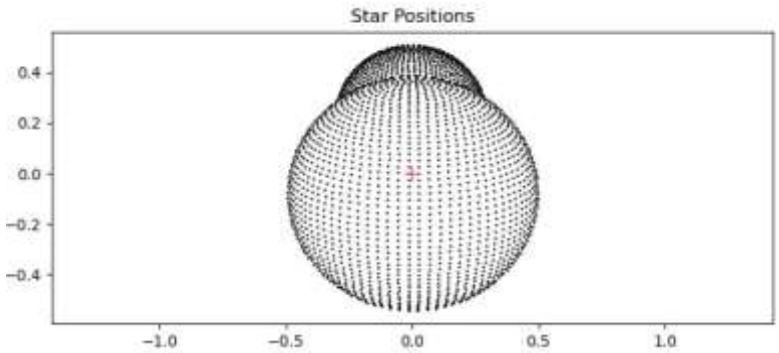
Işık eğrisine yapılan modelleme sonucunda, model ile gözlemsel verilerin tam uyuşmadığı, gözlemsel veriler ile model arasındaki artıkların sinusoidal bir değişim gösterdiği anlaşıldı. Bu değişimin, ikinci bileşenin daha soğuk bir bileşen olması nedeniyle yüzeyinde bir lekeden kaynaklı olabileceği değerlendirildi. Ek olarak Zhang vd. (2023) tarafından yapılan çalışmada, sistemin yüksek aktivite gösterdiği ortaya kondu. Bu nedenle ikinci bileşenin yüzeyine yaklaşık 10 derecelik açısal bir büyüklüğe sahip bir soğuk leke eklenerek ışık ve dikine hız analizi tekrar yapıldı ve böylece Şekil

4.10 ve Şekil 4.11'de görülen modeller elde edilmiş oldu. İkinci bileşene eklenen lekeye ait parametreler Çizelge 4.6'da verildi.

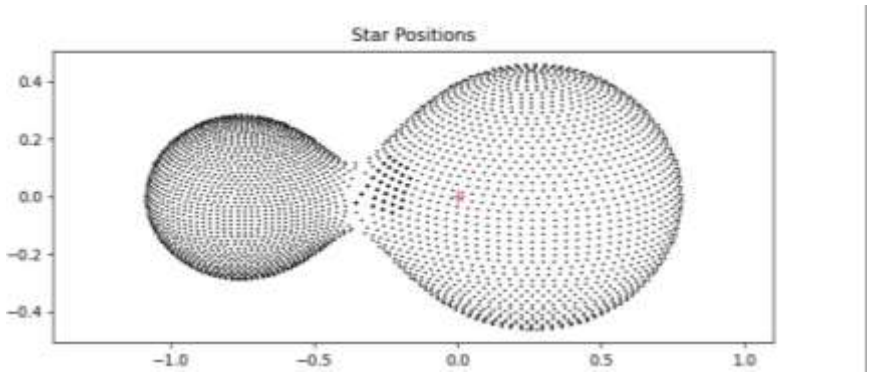
Çizelge 4.8 TIC 82224114 sisteminin ikinci bileşen üzerindeki leke parametreleri

Parametreleri	**Değer**
ϕ [°]	80.04
λ [°]	20.38
θ [°]	9.98
TF	0.95

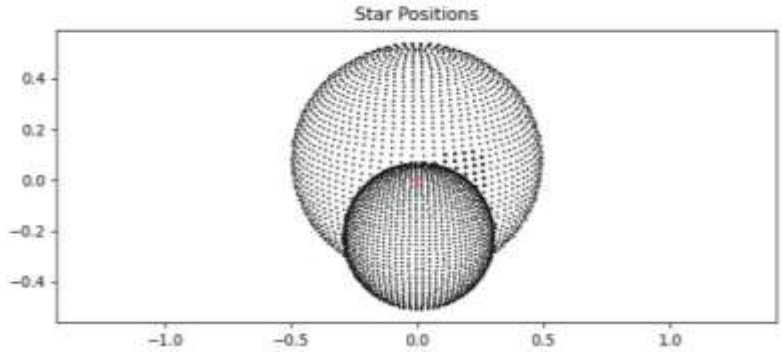
Çizelge 4.6'da sırasıyla ϕ, lekenin kutupsal enlemini, λ, lekenin boylamını, θ, lekenin açısal çapını, TF, lekenin yıldızın etkin sıcaklığına göre sıcaklık oranını göstermektedir. Lekenin farklı evrelerindeki (0.0, 0.25, 0.5, 0.75) Roche geometrisi ise Şekil 4.14'den Şekil 4.17'ye kadar sırasıyla verilmiştir.



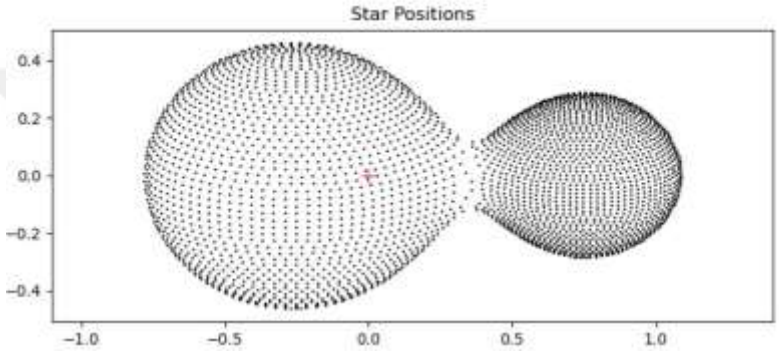
Şekil 4.14 TIC 82224114 sistemine ait 0.0 evresi için Roche geometrisi



Şekil 4.15 TIC 82224114 sistemine ait 0.25 evresi için Roche geometrisi ve lekenin en net görüldüğü evre



Şekil 4.16 TIC 82224114 sistemine ait 0.5 evresi için Roche geometrisi



Şekil 4.17 TIC 82224114 sistemine ait 0.75 evresi için Roche geometrisi

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında incelenen TIC 142587827 ve TIC 82224114 sistemlerinin dikine hız gözlemleri ilk kez Ankara Üniversitesi Kreiken Rasathanesi‘nde bulunan T80 Prof. Dr. Berahitdin Albayrak Teleskobu ve ona bağlı Whoppshel Tayfçekeri ile elde edildi. Fotometrik gözlemler ise TESS uzay teleskobunun (MAST) veri tabanından alındı. Elde edilen ışık eğrileri dikine hız eğrileri ile birlikte eş zamanlı olarak çözülerek sistemlerin fiziksel ve mutlak parametreleri belirlendi. Ayrıca, bu tez çalışması kapsamında ışık eğrisi ve dikine hız eğrisi analizleri sonucunda her iki bileşenin tayfsal kütle oranı ilk kez elde edildi. Bu çalışmaya göre TIC 142587827 sisteminin kütle oranı (q) 0.17 olarak, TIC 82224114 sisteminin kütle oranı (q) 2.93 olarak belirlendi. Analizler, TIC 142587827 sisteminin A-türü W UMa olduğunu, TIC 82224114 sisteminin ise W-türü W UMa olduğunu göstermektedir. TIC 82224114 sisteminin W-türü W UMa olduğu ilk kez bu tez çalışması kapsamında elde edilmiştir. TIC 142587827 sistemi için fotometrik ve dikine hız analizi sonucunda birinci ve ikinci bileşene ait kütle değerleri sırasıyla 1.56 $M_{\odot}$ ve 0.27 $M_{\odot}$ olarak, birinci ve ikinci bileşene ait yarıçap değerleri sırasıyla 1.69 $R_{\odot}$ ve 0.81 $R_{\odot}$ olarak elde edildi. TIC 82224114 sistemi için yapılan ışık ve dikine hız analizi ile birinci ve ikinci bileşene ait kütle değerleri sırasıyla 0.44 $M_{\odot}$ ve 1.28 $M_{\odot}$ olarak, birinci ve ikinci bileşene ait yarıçap değerleri sırasıyla 0.8 $R_{\odot}$ ve 1.3 $R_{\odot}$ olarak elde edildi. Bununla birlikte, TIC 82224114 sisteminin ışık eğrisi için en iyi modelleme ikinci bileşenin yüzeyinde soğuk bir leke varsayımı ile yapıldı. Bu sonuç, Zhang vd. (2023), sistemin yüksek manyetik aktivite gösterdiği sonucuyla uyumlu olduğu değerlendirilebilir. Ek olarak, Xiong vd. (2024), TIC 82224114 sistemi için yaptığı ışık eğrisi analizi ile elde edilen mutlak parametreler de karşılaştırıldı. Karşılaştırmaya ilişkin sonuçlar Çizelge 5.1‘de sunuldu.

Xiong vd. (2024), ışık eğrilerini elde etmek için TESS verilerini (SAP ve PDCSAP) kullanmış, Gaia verilerinden ise yıldızların sıcaklık, uzaklık ve sönümleme parametreleri elde edilmiş ve mutlaka parametreler bu veriler sayesinde hesaplanmıştır. Işık eğrilerini modellemek için Roche lobunu büyük kütleli bileşenin doldurduğu ve Roche lobunu küçük kütleli bileşenin doldurduğu durumu dikkate alan 2 farklı yaklaşımda bulunmuşlardır. Gözlemsel verilerin analizinde PHOEBE (Physics of

Eclipsing Binaries) programı ile sentetik ışık eğrileri oluşturmuşlardır. PHOEBE, Wilson-Devinney (WD) koduna dayalıdır ve modellemesinin temelinde Wilson-Devinney (WD) modeli yatar. Gözlemsel ışık eğrilerinden parametrelere dair bilgiler elde etmek için MCMC (Markov Chain Monte Carlo) yöntemi kullanmışlardır. Xiong vd. (2024), sadece fotometrik verilere dayalı yaptıkları çalışmada sistemleri yarı-ayrık sistemler olarak değerlendirmişlerdir. Ancak bu tez çalışmasında ise hem fotometrik veriler hem de tayfsal veriler kullanılmıştır. Bu nedenle bu çalışmada elde edilen sonuçların daha güvenilir olduklarını söyleyebiliriz.

Çizelge 5.1'den de görüleceği üzere bu çalışmada yapılan ışık ve dikine hız eğrisi sonucu elde edilen mutlak parametreler, Xiong vd. (2024) tarafından yapılan fotometrik çalışma sonucu elde ettiği mutlak parametreler ile farklılıklar göstermektedir. Bu durum, her iki çalışmada yapılan kuramsal farklılıklar ve Xiong vd. (2024) tarafından yapılan çalışmada tayfsal verilerin olmamasından kaynaklanmaktadır. Xiong vd. (2024) tarafından fotometrik çalışmada yıldızların yarı-ayrık sistemler olarak değerlendirilmesi de bu farklılıkları güçlendirmektedir çünkü bu tez çalışması kapsamında TIC 82224114 sisteminin W-türü W UMa olduğu sonucuna varılmıştır. Xiong vd. (2024) tarafından yapılan fotometrik çalışma için kullanılan TESS verileri ve Gaia verilerinden elde edilen parametreler benzerlik göstermektedir. Fakat tayfsal verilerin kullanılmaması bunun sonucunda eş-zamanlı çözümlemelerin yapılamaması sonucunda ilgili çalışmada elde edilen mutlak parametreler, bu tez çalışmasın kapsamında elde edilen mutlak parametreler ile farklılık göstermektedir. Bu nedenle birinci ve ikinci bileşene ait kütle, yarıçap, ışınım gücü ve sıcaklık değerleri her iki çalışmada farklı değerleri sahiptir.

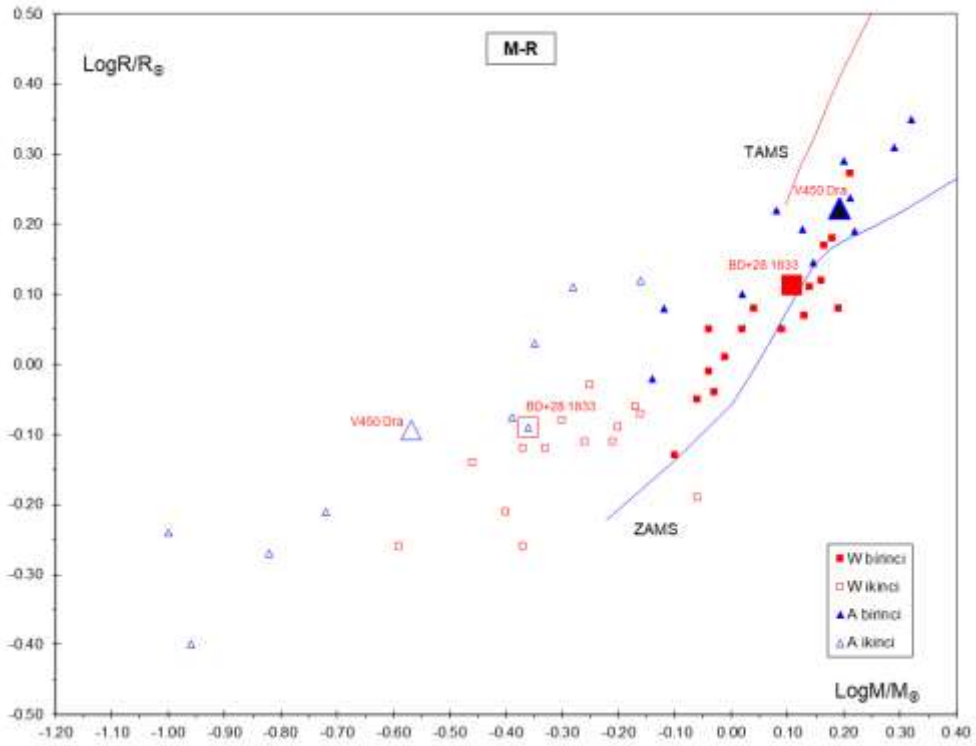
Çizelge 5.1 TIC 82224114 sisteminin ışık ve dikine hız eğrisinden elde edilen parametrelerin, Xiong vd. (2024) ile karşılaştırılması

Parametre	**Birim**	**Xiong vd. (2024)**	**Bu çalışma**
$q(M_2/M_1)$	-	0.988	2.93
T_1	K	6319	6248
T_2	K	6125	5737
L_1	$L_\odot$	1.276	0.88
L_2	$L_\odot$	1.002	1.61
R_1	$R_\odot$	0.942	0.8
R_2	$R_\odot$	0.887	1.3
M_1	$M_\odot$	0.597	0.44
M_2	$M_\odot$	0.59	1.28

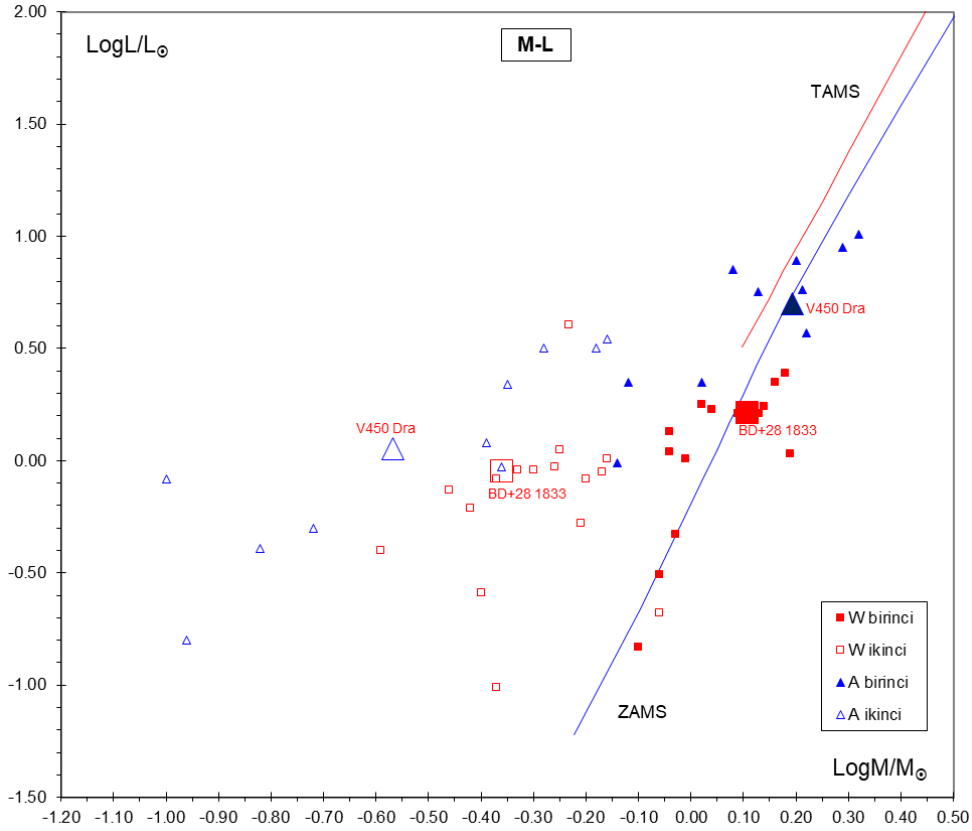
Bu tez çalışmasında ayrıca seçilen aday yıldızların yörünge döneminin herhangi bir nedenden dolayı değişip değişmediğini belirlemek için bir dönem değişim analizi (O-C analizi) de gerçekleştirildi. Işık-zaman etkisi mekanizmasını dikkate alarak, TIC 142587827 sistemi için, ilk olarak elde edilen TESS minimum zaman verilerinin tamamının kullanıldığı, ikinci olarak ise, TESS minimum zaman verilerinin 5 farklı çeyreklikteki tüm birinci ve ikinci minimum zamanlarının ortalamaları alınarak toplamda 10 nokta olarak alınması sonucu 2 farklı analiz gerçekleştirildi. İkinci yöntemdeki analiz sonucunda elde edilen parametrelerin gözlemsel verilerle daha uyumlu görülmektedir. İlk analizde fark kare değeri 0.0002 iken, ikinci analizde fark kare değeri 0.0001 olarak elde edildi. Bu değerler karşılaştırıldığında ikinci analizin daha uyumlu olduğunu desteklemektedir. İkinci analizin birinci analizden daha uyumlu olmasının sebebi elde edilen minimum zaman sayısından daha fazla sayıda TESS minimum zaman verisi kullanıldığında, modelleme esnasında OCFit programı ağırlığı bu noktalara daha fazla verdiğinden dolayı diğer minimum zamanları çok iyi temsil etmemektedir ve bunun sonucunda parametrelerin arasında ciddi farklar oluşmasına neden olmaktadır. Bu yüzden ikinci yöntemin birinci yöntemden daha gerçekçi olduğu düşünülmektedir.

Ayrıca dönem değişimi doğasının manyetik aktivite kökenli olabileceğini dikkate alarak bir dönem değişim analizi (O-C analizi) daha gerçekleştirildi. Bu analiz sonucunda aktif bileşenin manyetik alan şiddeti 12 kG ve manyetik çevrim dönemi 20.42 yıl olarak elde edildi. TIC 142587827 sistemi için tayfsal analizler esnasında kullanılan Çizgi Genişleme Fonksiyonları (Broadening Functions, BF) sonucunda elde edilen grafiklerde sisteme fiziksel olarak bağlı ilave bir cismin varlığına işaret eden ilave bir ışık kaynağı görüldü. Işık-zaman etkisi için 2 farklı analiz ile elde edilen fark karelere baktığımızda (sırasıyla 0.0002, 0.0001), manyetik aktivite için elde edilen fark kare değerinden (0.004) değerinden daha düşük çıktığından dolayı ve BF grafiklerinde ilave bir cismin varlığına işaret eden ek bir ışık kaynağı görüldüğü için ışık-zaman etkisi mekanizmasının dönem değişim karakteristiğini daha gerçekçi temsil etme ihtimali yüksektir. Gaia veri tabanında bulunan RUWE değeri 1.4'den büyükse bu sistemin öz hareketini değiştirir. Aday yıldızımızın (TIC 142587827, V450 Dra) Gaia veri tabanında bulunan RUWE değeri 3.82 olarak elde edildi. Gaia veri tabanında aday yıldızımızın ciddi bir öz hareket gösterdiği saptanmıştır. Bu nedenle dönem değişim analizi (O-C analizi) için ışık-zaman etkisi mekanizması sonucunda sisteme fiziksel olarak bağlı ilave bir bileşen olma ihtimali daha yüksektir. Ancak dönem değişim karakteristiğinin manyetik aktivite kaynaklı olabileceği de göz önünde bulundurulmaktadır. Bu nedenle bu sistem için gelecekte elde edilecek minimum zaman verileri büyük önem arz etmektedir ve dönem değişiminin doğasını daha net ortaya koyacaktır.

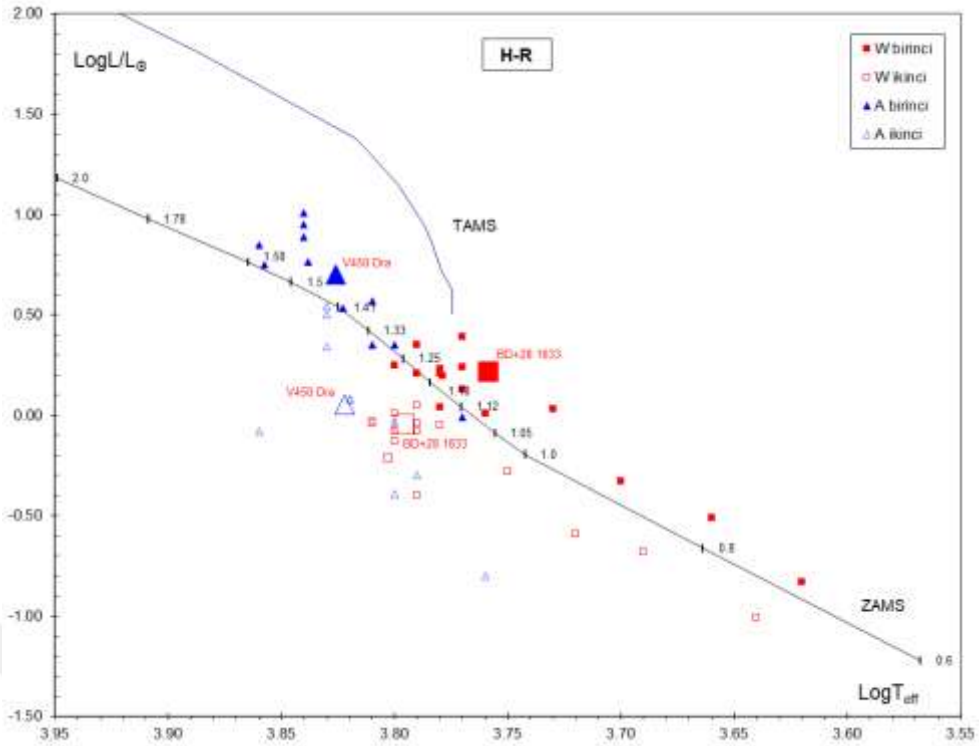
Bu tez çalışması kapsamında TIC 142587827 (ilk kez bu çalışmada) ve TIC 82224114 örten çift sistemlerinin mutlak parametreleri teorik kütle - yarıçap (M-R), kütle - ışınım gücü (M-L) ve H-R diyagramları üzerinde irdelendi ve evrimsel durumları tartışıldı. Literatürde mutlak parametreleri bilenen bazı A ve W türü W UMa'ların verileri de kullanılarak elde edilen kütle-yarıçap (M-R), kütle-ışınım gücü (M-L) ve H-R diyagramları sırasıyla Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de verildi. Diyagramlarda yer alan teorik "Sıfır Yaş Anakolu (ZAMS)" ve "Terminal Yaş Anakolu (TAMS)" değerleri Claret vd. (1995) oluşturduğu teorik evrim yolları tablolarından elde edildi.



Şekil 5.1 TIC 142587827 (V450 Dra) ve TIC 82224114 (BD+28 1833) sistemlerine ait bileşenlerin kütle-yarıçap (M-R) diyagramı üzerindeki konumları. Mavi kesiksiz eğri sıfır yaş anakolunu (ZAMS), kırmızı kesiksiz eğri son yaş anakolunu (TAMS) göstermektedir (Claret vd., 1995)



Şekil 5.2 TIC 142587827 (V450 Dra) ve TIC 82224114 (BD+28 1833) sistemlerine ait bileşenlerin kütle-ışınım gücü (M-L) diyagramı üzerindeki konumları. Mavi kesiksiz eğri sıfır yaş anakolunu (ZAMS), kırmızı kesiksiz eğri son yaş anakolunu (TAMS) göstermektedir (Claret vd., 1995)



Şekil 5.3 TIC 142587827 (V450 Dra) ve TIC 82224114 (BD+28 1833) sistemlerine ait bileşenlerin H-R diyagramı üzerindeki konumları. Mavi kesiksiz eğri sıfır yaş anakolunu (ZAMS), siyah kesiksiz eğri son yaş anakolunu (TAMS) göstermektedir (Claret vd., 1995)

Hilditch (1988)‘e göre kütle-yarıçap (M-R), kütle-ışınım gücü (M-L) ve H-R diyagramlarında konumlandırılan yıldızların incelenmesi, onların evrim durumları hakkında bilgiler verir. Üç diyagram kullanılsa da, elde edilen kütle ve yarıçaplar etkin sıcaklığa ve değen çiftler arasındaki ışınım gücü transferine bağlı olmadığından, kütle-yarıçap diyagramını tek tek yıldızların evrimsel durumunu temel alarak yorumlarda bulunmuştur. Bu tez kapsamında da irdelenen yıldızlar kütle-yarıçap (M-R) diyagramı üzerindeki konumundan hareketle yapılacak yorumlar diğer iki diyagram aracılığıyla elde edilerek evrimsel durum göz önünde bulundurularak yapılmıştır.

W-türü sistemlerin birinci bileşenleri anakol yıldızlarıdır, ZAMS üzerinde ve ZAMS-TAMS arasında anakol içinde dağılım göstermişlerdir. Bu dağılım belirli bir yaş ve/veya kimyasal bolluk aralığının göstergesi olabilir (Hilditch, 1988). W-türü sistemlere ait birkaç birinci bileşen, ikinci bileşene ışınım transferi sonucunda kütle-ışınım gücü (M-L) diyagramında ZAMS‘ın altında bulunmaktadır. Bu dağılıma göre,

BD+28 1833 (TIC 82224114) sisteminin birinci bileşeni de uyumlu gözükmektedir ve görece anakola yakın, evrimleşmemiş bir anakol yıldızı gibi gözükmektedir. f değme derecesine bakıldığında TIC 82224114 (BD+28 1833) sisteminin W-türü W UMa sistemler için beklenen değere yakın olduğu ve orta düzeyde evrimleşmiş olduğunu göstermektedir.

W-türü sistemlerin ikinci bileşenleri, kütle-yarıçap (M-R) diyagramında ZAMS kütlelerine göre beklenenden daha büyük yarıçaplara sahiptir. Patterson (1984)'un düşük kütleli anakol yıldızları için önerdiği kütle-yarıçap bağıntısına göre ($R\ \alpha\ M^{0.88}$) ikinci bileşenler 1.5 kat daha büyük yarıçapa sahiptirler. Kütle-ışınım gücü (M-L) diyagramında ikinci bileşenler daha fazla ışınım gücü göstemektedir. H-R diyagramında bu etki W-türü sistemlerin ikinci bileşenlerini ZAMS'ın altına ve daha yukarıdaki bölgelere taşımaktadır. Bu bağlamda, BD+28 1833 (TIC 82224114) sisteminin ikinci bileşeni W-türü sistemler için önerilen genellemelerle uyum içerisinde gözükmektedir.

Değen A-türü sistemlerin birinci bileşenleri, W-türü sistemlerin birinci bileşenlerine oranla TAMS'a daha yakında ve hatta TAMS'ın üzerinde yer almaktadır. Buradan A-türü sistemlerin, W-türü sistemlere kıyasla evrimde daha ileride olduğu sonucuna varılmaktadır (Lucy ve Wilson, 1979). Bu bağlamda V450 Dra (TIC 142587827) sisteminin birinci bileşeninin üç diyagramdaki konumuna bakarak henüz evrimde çok fazla ilerlememiş olduğu söylenebilir.

A-türü sistemlerin ikinci bileşenlerinin tümü, kütle-yarıçap (M-R) diyagramında beklenen ZAMS kütlelerine göre daha büyük yarıçaplara sahiptir. Patterson'un kütle-yarıçap bağıntısına göre bileşenlerin yarıçaplarında izlenen artış beklenenden yaklaşık 3 kat daha büyüktür. Bu bağıntıya göre kütle-ışınım gücü (M-L) diyagramında gösterdikleri ışınım gücü fazlalığı, W-türü sistemlerin ikinci bileşenlerine göre daha büyüktür. Bu etki H-R diyagramında A-türü sistemlerin ikinci bileşenlerini ZAMS'ın altında ve yukarıdaki bölgelere taşımaktadır. Bu ışınım artışının sebebi birinci bileşenden aldıkları fazla ışınım ile açıklanabilir. V450 Dra (TIC 142587827) sisteminin ikinci bileşeni bu açıklamalar altında sistemin A-türü W UMa bir sistem olduğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

Abt, H. A., & Levy, S. G. (1976). Multiplicity among solar-type stars. *The Astrophysical Journal Supplement Series, 30*, 273–305.

Agol, E., Steffen, J., Sari, R., & Clarkson, W. (2005). On detecting terrestrial planets with timing of giant planet transits. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 359(2), 567–579.

Applegate J.H., 1992, A Mechanism for Orbital Period Modulation in Close Binaries, ApJ, 385, 621

Bulut, A., & Bulut, İ. (2019). Basık yörüngeli erken B tipi örten çift sistemlerin eksen dönmesi analizi: V466 Car, V529 Car ve MN Tra. BAUN Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21(2), 539–545.

Cannon, A. J., & Pickering, E. C. (1918–1924). Henry Draper Catalogue and Extension. VizieR Online Data Catalog: III/135A. Harv. Ann. 91–100.

Carroll, W. B., Ostlie A. D. (2014). Close Binary Star Systems. An Introduction to Modern Astrophysics Second Edition, page 717-781.

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), 3582–3603.

Claret, A., & Giménez, 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 & Astrophysics, 609, A116.

Claret, A., & Giménez, A. (2010). The apsidal-motion test of stellar structure and evolution: An update. Astronomy & Astrophysics, 519, A57.

Ding, X., Ji, K., Song, Z., Tian, X., Wang, J., Wang, C., vd. (2025). Fundamental Parameters for Totally Eclipsing Contact Binaries Observed by TESS. The Astrophysical Journal, 988, 80.

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

Gajdoš, P., & Parimucha, S. (2019). New tool with GUI for fitting OC diagrams. Open EuropeanJournal on Variable Stars, 197, 71.

Geske, M. T., Gettel, S. J., & McKay, T. A. (2006). A ROSAT survey of contact binary stars. The Astronomical Journal, 131(2), 633–637.

Gettel, S. J., Geske, M. T., & McKay, T. A. (2006). A catalog of 1022 bright contact binary stars. The Astronomical Journal, 131(2), 621–632.

Giménez, A., & Bastero, M. (1995). A revision of the ephemeris-curve equations for eclipsing binaries with apsidal motion. Astrophysics and Space Science, 226(1), 99–107.

Graczyk, D., Maxted, P. F. L., Pietrzynski, G., Pilecki, B., Konorski, P., Gieren, W., Storm, J., Gallenne, A., Anderson, R. I., Suchomska, K., West, R. G., Pollacco, D., Faedi, F., & Pojmański, G. (2015). The Araucaria project. Precise physical parameters of the eclipsing binary IO Aquarii. Astronomy & Astrophysics, 581, A106.

Guo, Y., Li, K., Wang, L., Xia, Q., Gao, X., Xu, J., vd. (2025). The Investigation of 84 TESS Totally Eclipsing Contact Binaries. The Astronomical Journal, 170, 115.

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

Han, Z. T., Qian, S. B., Han, Q. W., Zang, L., Soonthornthum, B., Li, L. J., & 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), 63.

Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., ... & Oliphant, T. E. (2020). Array programming with NumPy. Nature, 585(7825), 357–362.

Herschel, W. (1802). Catalogue of 500 new nebulae, nebulous stars, planetary nebulae, and clusters of stars; With remarks on the construction of the heavens. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 92, 477–528.

Hilditch, R. W., King, D. J., & McFarlane, T. M. (1988). The evolutionary state of contact and near-contact binary stars. MNRAS, 231, 341–352.

Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. Computing in Science & Engineering, 9(3), 90–95.

Irwin, J. B. (1952). The determination of a light-time orbit. The Astrophysical Journal, 116, 211–224.

Irwin, J. B. (1959). Standard light-time curves. The Astronomical Journal, 64, 149–158.

Kiraga, M. (2012). ASAS photometry of ROSAT sources. I. Periodic variable stars coincident with bright sources from the ROSAT All Sky Survey. Acta Astronomica, 62, 67–95.

Kreiner, J. M., Kim, C.-H., & Nha, I.-S. (2001). An atlas of O–C diagrams of eclipsing binary stars. Cracow, Poland: Wydawnictwo Naukowe Akademii Pedagogicznej.

Kwee, K., & van Woerden, H. (1956). A method for computing accurately the epoch of minimum of an eclipsing variable. Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands, 12, 327.

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.

Lanza, A. F., Rodonò, M., & Rosner, R. (1998). Orbital period modulation and magnetic cycles in close binaries. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 296(4), 893–902.

Lomb, N. R. (1976). Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. Astrophysics and Space Science, 39(2), 447–462.

Lucy, L. B. (1967). Gravity-darkening for stars with convective envelopes. Zeitschrift für Astrophysik, 65, 89.

Lucy, L. B. (1968). The structure of contact binaries. The Astrophysical Journal, 151, 1123.

Lucy, L. B. (1973). The Common Convective Envelope Model for W Ursae Majoris Systems and the Analysis of their Light Curves. AP & SS, 22; 381L.

Lucy, L. B., & Wilson, R. E. (1979). Observational tests of theories of contact binaries. The Astrophysical Journal, 231, 502–513.

Matijević, G., Prša, A., Orosz, J. A., Welsh, W. F., Bloemen, S., & Barclay, T. (2012). Kepler eclipsing binary stars. III. Classification of Kepler eclipsing binary light curves with locally linear embedding. The Astronomical Journal, 143(5), 123.

Mowlavi, N., Holl, B., Lecoeur-Taïbi, I., Barblan, F., Kochoska, A., Prša, A., ... & Eyer, L. (2023). Gaia Data Release 3: The first Gaia catalogue of eclipsing-binary candidates. Astronomy & Astrophysics, 674, A16.

Nichols, J. S., Henden, A. A., Huenemoerder, D. P., Lauer, J. L., Martin, E., Morgan, D. L., & Sundheim, B. A. (2010). The Chandra variable guide star catalog. The Astrophysical Journal Supplement Series, 188(2), 473–487.

Paschke, A. (2009). A list of minima and maxima timings. Open European Journal on Variable Stars, October 2009.

Patterson, J. (1984). The evolution of cataclysmic and low-mass X-ray binaries. The Astrophysical Journal Supplement Series, 54, 443–493.

Prša, A., Kochoska, A., Conroy, K. E., Eisner, N., Hey, D. R., IJspeert, L., ... & Winn, J. N. (2022). TESS eclipsing binary stars. I. Short-cadence observations of 4584 eclipsing binaries in sectors 1–26. The Astrophysical Journal Supplement Series, 258(1).

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

Rucinski, S. M. (1973). The W UMa-type Systems as Contact Binaries. I. Two Methods of Geometrical Elements Determination. Degree of Contact AcA, 23; 79R.

Rucinski, S. M. (2012). The broadening functions technique. In M. T. Richards & I. Hubeny (Eds.), From interacting binaries to exoplanets: Essential modeling tools (IAU Symposium No. 282). Cambridge University Press.

Ruiz-Dern, L., Babusiaux, C., Arenou, F., Turon, C., & Lallement, R. (2018). Empirical photometric calibration of the Gaia red clump: Colours, effective temperature, and absolute magnitude? Astronomy & Astrophysics, 609, A116.

Scargle, J. D. (1982). Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. The Astrophysical Journal, 263, 835–853.

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

Southworth, J. (2020). Binary stars: A cheat sheet [Solar and stellar astrophysics (SSA)]. In C. Neiner, W. W. Weiss, D. Baade, R. E. Griffin, C. C. Lovekin, & A. F. J. Moffat (Eds.), Stars and their variability observed from space (p. 329).

Terrell, D., Gross, J., & Cooney, W. R., Jr. (2012). A BVRCIC survey of W Ursae Majoris binaries. The Astronomical Journal, 143(4), 99.

Von Zeipel, H. (1924). The radiative equilibrium of a rotating system of gaseous masses. MNRAS, 84, 665.

Wilson, R. E., & Devinney, E. J. (1971). Realization of Accurate Close-Binary Light Curves: Application to MR Cygni. The Astrophysical Journal, 166, 605–619.

Wilson, R. E., & Devinney, E. J. (1973). Fundamental data for contact binaries: RZ Comae Berenices, RZ Tauri, and AW Ursae Majoris, APJ, 182, 539.

Wilson, R.E. 1979. Eccentric Orbit Generalization and Simultaneous Solution of Binary Star Light and Velocity Curves. The Astrophysical Journal 234, 1054-1066.

Wood, D. B. (1971). An analytic model of eclipsing binary star systems. Astronomical Journal, 76(6), 701-710.

Xiong, J., Ding, X., Li, J., Ge, H., Cheng, Q., Ji, K., Han, Z., & Chen, X. (2024). The distribution of semidetached binaries. I. An efficient pipeline. The Astrophysical Journal Supplement Series, 270(1), 20.

Zhang, L., Su, T., Misra, P., Han, X. L., Meng, G., Pi, Q., & Yang, J. (2023). Stellar parameters and spectroscopic properties of TESS objects observed in the LAMOST low- and medium-resolution spectral survey. The Astrophysical Journal Supplement Series, 264(1), 17.

EK 1 TIC 82224114 SİSTEMİNE AİT MİNİMUM ZAMANLAR

1.minimumlar

BJD	Minimum Türü	Hata
2458870.70000000	1	0.0000639199
2458871.07129711	1	0.0000014521
2458871.44725195	1	0.0000587268
2458871.82338455	1	0.0001403337
2458872.19946727	1	0.0000713497
2458872.57561576	1	0.0001087222
2458872.95187353	1	0.0000634072
2458873.32778267	1	0.0001278246
2458873.70389419	1	0.0000192373
2458874.07999752	1	0.0000583548
2458874.45628954	1	0.0000413204
2458874.83226748	1	0.0000520828
2458875.20838575	1	0.0000301820
2458875.58482771	1	0.0001027931
2458875.96087531	1	0.0001531248
2458876.33674667	1	0.0000816039
2458877.08910448	1	0.0000317758
2458877.46528403	1	0.0001038449
2458877.84155542	1	0.0001292519
2458878.21749016	1	0.0000741424
2458878.59372897	1	0.0000193039
2458879.34582523	1	0.0000462468
2458879.72208937	1	0.0001159040
2458880.09782961	1	0.0000704435

BJD	Minimum Türü	Hata
2458880.47445024	1	0.0000396714
2458880.85079334	1	0.0001016247
2458881.22650529	1	0.0001891295
2458881.60248304	1	0.0000652601
2458881.97863702	1	0.0000666744
2458882.35525723	1	0.0001246522
2458882.73078132	1	0.0002015054
2458883.10732033	1	0.0001268491
2458883.48319544	1	0.0001231997
2458883.85931900	1	0.0000581297
2458884.98812179	1	0.0001366205
2458885.36317578	1	0.0001293090
2458886.49138793	1	0.0000191441
2458886.86857133	1	0.0001438215
2458887.24422266	1	0.0000814698
2458887.62040037	1	0.0000323399
2458887.99691751	1	0.0000892817
2458888.37286111	1	0.0001514955
2458888.74901561	1	0.0000858048
2458889.12518500	1	0.0001880103
2458889.50155201	1	0.0001026461
2458889.87753785	1	0.0001328798
2458890.25377160	1	0.0001772236
2458890.62980282	1	0.0001292050
2458891.00618752	1	0.0000224341
2458891.38200400	1	0.0000656552
2458891.75750444	1	0.0000653418

BJD	Minimum Türü	Hata
2458892.13431262	1	0.0001322171
2458892.50992502	1	0.0000684599
2458892.88674710	1	0.0001191389
2458893.26302993	1	0.0000382463
2458893.63877268	1	0.0000756098
2458894.01468159	1	0.0000491172
2458894.39079487	1	0.0000953346
2458894.76710460	1	0.0000413062
2458895.51932575	1	0.0001304621
2458895.89586366	1	0.0001509723
2458896.27109058	1	0.0001383034
2458896.64755904	1	0.0000855868
2458897.02385996	1	0.0001335998
2458897.40001368	1	0.0001700048
2458897.77603038	1	0.0001534467

2.minimumlar

BJD	Minimum Türü	Hata
2458870.88000000	2	0.0000451846
2458871.63464083	2	0.0000780423
2458872.01114540	2	0.0000434153
2458872.38697512	2	0.0001328180
2458872.76319676	2	0.0000165910
2458873.13888286	2	0.0000951014
2458873.51547441	2	0.0000942753
2458873.89179863	2	0.0000691658
2458874.26757560	2	0.0001105353

BJD	Minimum Türü	Hata
2458874.64388604	2	0.0000820909
2458875.01994193	2	0.0001663310
2458875.39617332	2	0.0001100285
2458875.77241466	2	0.0000928305
2458876.14866982	2	0.0001167289
2458876.52477953	2	0.0000885446
2458876.90069226	2	0.0000594464
2458877.27653460	2	0.0000409614
2458877.65322085	2	0.0001319294
2458878.02911540	2	0.0000580087
2458878.40519928	2	0.0000787746
2458878.78139972	2	0.0000781940
2458879.15744406	2	0.0000744487
2458879.53355232	2	0.0000557639
2458879.90974493	2	0.0001019227
2458880.28579715	2	0.0000032588
2458880.66191557	2	0.0000348464
2458881.03775163	2	0.0001255521
2458881.41364481	2	0.0000510040
2458881.78986781	2	0.0000811343
2458882.16635373	2	0.0000802613
2458882.54220166	2	0.0002763532
2458882.91840209	2	0.0000688178
2458883.29448906	2	0.0000295047
2458883.67070201	2	0.0000723303
2458885.17544995	2	0.0000406689
2458887.05580393	2	0.0000636837

BJD	Minimum Türü	Hata
2458887.43203220	2	0.0000511294
2458888.18416723	2	0.0001226650
2458888.56054583	2	0.0000921814
2458888.93638369	2	0.0001517126
2458889.31256990	2	0.0001703031
2458889.68879114	2	0.0000673068
2458890.06484610	2	0.0000784612
2458890.44093566	2	0.0001281286
2458890.81720914	2	0.0001356840
2458891.19324413	2	0.0001514067
2458891.56888994	2	0.0001276783
2458891.94552496	2	0.0000891806
2458892.32167553	2	0.0000640907
2458892.69805217	2	0.0000619635
2458893.07389887	2	0.0001547744
2458893.44980321	2	0.0000600466
2458893.82635303	2	0.0000980845
2458894.20234188	2	0.0000643150
2458894.57863257	2	0.0000866099
2458894.95497113	2	0.0001919853
2458895.33059457	2	0.0001434904
2458895.70686612	2	nan
2458896.08313370	2	0.0000850954
2458896.45910907	2	0.0000956093
2458896.83522603	2	0.0002147659
2458897.21116651	2	0.0002039381
2458897.58766408	2	nan