T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

EL CVn TÜRÜ YILDIZLARIN ÖZELLİKLERİ VE EVRİMİ

Yüksek Lisans Tezi

Duygu ESENDEMİR

Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı

İzmir
2022

T.C.

EGE ÜNİVERSİTESİ

Fen Bilimleri Enstitüsü

EL CVn TÜRÜ YILDIZLARIN ÖZELLİKLERİ VE EVRİMİ

Duygu ESENDEMİR

Tez Danışmanı: Prof. Dr. M. Serdar EVREN

Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı

Astronomi ve Uzay Bilimleri Yüksek Lisans Programı

İzmir
2022

ÖZET

EL CVn TÜRÜ YILDIZLARIN ÖZELLİKLERİ VE EVRİMİ

ESENDEMİR, Duygu

Yüksek Lisans Tezi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. M. Serdar EVREN

18 Ocak 2022, 65 sayfa

EL CVn türü çift yıldızlar, A veya F tayf sınıfı bir anakol yıldızı ve düşük kütleli (~0.2 $M_{\odot}$) helyum beyaz cüce öncesi (pre-He WD) yıldız içeren örten çift yıldızlardır. Işık eğrilerinin genellikle tam tutulma gösterdikleri ve derin baş minimumlara sahip oldukları görülmektedir. EL CVn yıldızlarının evrimleri, yakın çiftlerdeki düşük kütleli yıldızlar arasında gerçekleşen uzun dönemli kararlı kütle aktarımıyla oluşmaktadırlar. EL CVn türü çift yıldız sistemlerinin, kararlı kütle aktarımı sonucunda oluştuğu önerildiği için, kütle aktarımının yörünge dönemine herhangi bir etkisinin olup olmadığını anlayabilmek adına EL CVn örten çift sisteminin dönem değişim analizi (O-C) çalışılmıştır.

EL CVn türü çift sistemlerinin olası alt türlerini bir arada inceleyebilmek için, yıldızların parametrelerine ve ışık eğrisi biçimlerine göre 50 adet EL CVn çift sisteminin gruplandırılması yapılmıştır. Bu tür sistemlerin ışık eğrilerinin görsel bakış açısıyla iki grup altında toplanabileceği açıkça kendini belli etmektedir. Grupları oluşturan sistemlerin parametrelerinde belirgin ayıraçların olup olmadığı da araştırılmıştır. Işık eğrilerine ve fiziksel parametrelerine göre elde edilen gruplardan birinci grubu "***geri B- tayf sınıfından yoldaş bileşenli grup***", ikinci grubu ise "***A-tayf sınıfından yoldaş bileşenli grup***" olarak isimlendirdik. Ayrıca bu çalışmada, EL CVn türü çift yıldız sistemleri, bu sistemlerin bileşenlerinden biri olan düşük kütleli helyum beyaz cücelerin özellikleri ve evrimi incelenmiştir. Astrofizik süreçleri hakkında daha fazla bilgi sahibi olunması amaçlanmıştır.

Anahtar söcükler : EL CVn, örten çift yıldızlar, anakol yıldızları, düşük kütleli helyum beyaz cüce yıldızlar, pre-He-WD, kütle aktarımı

ABSTRACT

PROPERTIES AND EVOLUTION OF EL CVn-TYPE STARS

ESENDEMİR, Duygu

MSc in Astronomy and Space Sciences

Supervisor: Prof. Dr. M. Serdar EVREN

January 18, 2022, 65 pages

EL CVn-type binary stars are eclipsing binary stars containing a spectral class A or F main sequence star and a low-mass (~0.2 $M_{\odot}$) helium pre-white dwarf (pre-He WD) star. It is seen that the light curves generally show total eclipse and have deep primary minima. The evolution of EL CVn stars is driven by long-term stable mass transfer between low-mass stars in close binary. Since it is suggested that EL CVn type binary star systems are formed as a result of stable mass transfer, the period analysis (O-C) of the EL CVn eclipsing binary system has been studied in order to understand whether the mass transfer has any effect on the orbital period.

In order to examine the possible subtypes of EL CVn binary systems together, 50 EL CVn binary systems were grouped according to the parameters of the stars and their light curve shapes. It is obvious that the light curves of such systems can be grouped under two groups from a visual point of view. It was also investigated whether there were significant reagents in the parameters of the systems forming the groups. Among the groups obtained according to the light curves and physical parameters, we named the first group as the "***early B-spectral class secondary component group***" and the second group as the "***A-spectral class secondary component group***". In addition, in this study, EL CVn type binary star systems, the properties and evolution of low-mass helium white dwarfs, one of the components of these systems, were investigated. It is aimed to have more information about astrophysics processes.

Keywords : EL CVn, eclipsing binary stars, main sequence stars, low-mass helium white dwarf stars, pre-He-WD, mass transfer

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının tüm aşamalarında yanımda olan, benden hiçbir bilgi birikimini esirgemeyen, lisans ve lisansüstü eğitim hayatım boyunca fikir ve düşünceleriyle her daim yoluma ışık tutan değerli danışman hocam Prof. Dr. M. Serdar EVREN'e bana kattığı tüm tecrübeler için saygı ve sevgi ile teşekkür ederim. Ayrıca bugünlere gelmemde çok büyük emekleri olan Ege Üniversitesi Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü'ndeki tüm hocalarıma da teşekkürü bir borç bilirim.

Astronomi ve uzaya olan merakımı her zaman destekleyen, en ümitsiz anlarımda bile elimden tutan, azmi ve çalışmalarıyla bana daima yol gösteren ablam ve dostum Devrim Pınar GÜRBÜZOĞLU'na, emeklerinin asla hakkını ödeyemeyeceğim ve hayatımda her anı mutlu ve güzel yaşayabilmeyi bana öğreten çok kıymetli annem ve arkadaşım Süreyya YENİCE'ye çok teşekkür ederim.

Aynı paydada buluştuğumuz, bilgilerini ve tecrübelerini daima sevgisi ve sabrıyla bana öğreten, tüm çalışmalarımda yanımda,önümde ve en önemlisi daima arkamda olan sevgili eşim, meslektaşım Murat ESENDEMİR'e ne kadar teşekkür etsem azdır.

Son olarak yanımda olan ve olmaya çalışan tüm aile bireylerime, arkadaşlarıma ve dostlarıma teşekkür ederim.

'*İnsanlık tarihinin ilk kırılma noktası varlığını ve evrendeki yerini sorgulaması ile başlamaktadır.*'

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iii

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vii

İÇİNDEKİLER DİZİNİ ix

ŞEKİLLER DİZİNİ xii

ÇİZELGELER DİZİNİ xv

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xvii

1. GİRİŞ 1

2. EL CVn TÜRÜ ÇİFT YILDIZLARIN GENEL ÖZELLİKLERİ 4

3. EL CVn TÜRÜ ÇİFT YILDIZLARIN OLUŞUM VE EVRİM SÜREÇLERİ 7

3.1 Ortak Zarf Evrimi 8

3.2 Kararlı Kütle Aktarımı 10

4. BİLEŞENLERİNE GÖRE BAZI EL CVn TÜRÜ ÇİFT YILDIZLAR 16

4.1 WASP 0247-25 17

4.2 WASP 1628+10 20

4.3 KIC 8113154 22

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

5. WASP, PALOMAR VE KEPLER GÖZLEMLERİ İLE BULUNAN EL CVn TÜRÜ ÇİFT YILDIZLAR 24

5.1 WASP Veri Tabanından Alınan EL CVn Türü Çift Yıldızlar..... 25

5.2 Palomar Veri Tabanından Alınan EL CVn Türü Çift Yıldızlar 26

5.3 Kepler Veri Tabanından Alınan EL CVn Türü Çift Yıldızlar..... 29

6. BULGULAR..... 33

6.1 Çift Yıldız Sistemlerinde Dönem Değişimi..... 34

6.2 EL CVn Yıldızının Işık Eğrisi ve O-C Çalışması..... 36

6.3 EL CVn Türü Çift Yıldızların Gruplandırılması 40

6.4 EL CVn Türü Çift Yıldızların H-R Diyagramındaki Konumları 49

7. TARTIŞMA VE SONUÇ..... 55

KAYNAKLAR DİZİNİ..... 59

ÖZGEÇMİŞ..... 65

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil Sayfa

3.1. Kütleleri m_1 ve m_2 olan yakın bir çift yıldız sisteminin Roche geometrisi.8

3.2. H-R diyagramında, kütleleri 1.0 ile 0.9 M_Θ arasında olan, farklı başlangıç yörünge dönemlerine sahip yıldızların evrim yolları.....12

3.3. Kararlı kütle aktarımından elde edilen M_{WD} – P ilişkisi…….13

3.4. H-R diyagramı üzerinde farklı başlangıç yörünge döneminlerine ait beyaz cücelerin iki evrim yolu……...15

4.1. WASP 1323+43 EL CVn türü çift yıldız sisteminin ışık eğrisi…..……..18

4.2. WASP 0247-25 EL CVn türü çift yıldız sisteminin ışık eğrisi 19

4.3. WASP 0247-25 EL CVn türü çift yıldız sisteminin H-R diyagramındaki konumu……...20

4.4. WASP 1628+10 EL CVn türü çift yıldız sisteminin ışık eğrisi……..21

4.5. KIC 8113154 EL CVn türü çift sisteminin ışık eğrisi.....23

5.1. Kepler Uydusu verileri ile elde edilen 7 tane EL CVn türü çift yıldız sisteminin ışık eğrisi.....32

6.1. (a) A katsayısı sıfırdan büyük, (b) A katsayısı sıfırdan küçük olan O-C değişimi 35

6.2. EL CVn türü örten çift yıldızının ortalama ışık eğrisi.....37

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil Sayfa

6.3. (a) EL CVn yıldızının O-C (I) dönem değişim grafiği, (b) EL CVn yıldızınının O-C (II) dönem değişimi……..……...40

6.4. 1. Grup PALOMAR EL CVn türü çift yıldızların ışık eğrileri.....43

6.5. 1. Grup WASP EL CVn türü çift yıldızların ışık eğrileri 44

6.6. 2. Grup PALOMAR EL CVn türü çift yıldızların ışık eğrileri 45

6.7. 2. Grup WASP EL CVn türü çift yıldızların ışık eğrileri.....45

6.8. Farklı gruplardaki EL CVn sistemlerinin bileşenlerinin sıcaklıklarının karşılaştırılması……..……..48

6.9. 1. ve 2. Grup EL CVn türü çift yıldızların kütle oranlarına göre bileşen yıldızların etkin sıcaklık farklarının ilişkisi……49

6.10. 1. Grup EL CVn türü çift yıldızların H-R diyagramındaki konumu 52

6.11. 2. Grup EL CVn türü çift yıldızların H-R diyagramındaki konumu 53

6.12. H-R diyagramı üzerinde DA beyaz cücelerin, helyum çekirdeğe sahip beyaz cücelerin ve EL CVn türü çift yıldızların baş ve yoldaş bileşenlerinin konumları.....53

6.13. Beyaz cücelerin ve EL CVn türü helyum beyaz cüce öncesi yıldızların etkin sıcaklık ve yüzey çekim ivmesi ilişkisi..……54

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge Sayfa

5.1. WASP veri tabanından elde edilen 17 tane EL CVn türü çift yıldız sisteminin dönem (gün), V parlaklık (mag) ve etkin sıcaklık (K) değerleri……..……..25

5.2. 36 tane EL CVn türü çift yıldız sisteminin fiziksel parametreleri.....27

5.3. 7 tane EL CVn türü çift yıldız sisteminin fiziksel parametreleri.....31

6.1. O-C dönem değişimi analizinde kullanılan veriler…….38

6.2. 1. Grup EL CVn türü çift yıldızların fiziksel parametreleri 46

6.3. 2. Grup EL CVn türü çift yıldızların fiziksel parametreleri 47

6.4. 1. Grup 24 tane EL CVn türü çift yıldızın etkin sıcaklık ve yüzey çekim ivmesi değerleri…….……..50

6.5. 2. Grup 12 tane EL CVn türü çift yıldızın etkin sıcaklık ve yüzey çekim ivmesi değerleri……...…51

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
$M_{\odot}$	Güneş'in kütlesi (1.99 x 10^{33} g)
M_{WD}	Beyaz cüce kütlesi
$R_{\odot}$	Güneş'in yarıçapı (6.96 × 10^5 km)
K	Kelvin
L	Işınım gücü
$L_{\odot}$	Güneş'in ışınım gücü (3.85 × 10^{33} $ergs^{-1}$)
P_b	Çatallanma dönemi
P_0	Başlangıç yörünge dönemi
q	Kütle oranı
Å	Ångstrom
p	Basınç modları
g	Çekim modları
T_e	Etkin sıcaklık
$log\ g$	Yüzey çekim ivmesi
ω	Enberi noktasının boylamı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Simgeler	Açıklama
E	Çevrim sayısı
P	Yörünge dönemi
T_0	Başlangıç zamanı
A	Kütle aktarım sonucu dönemdeki değişimi ifade eden katsayı

Kısaltmalar	Açıklama
EL CVn	EL Canum Venaticorum
W UMa	W Ursae Majoris
Pre-He-WD	Helyum beyaz cüce öncesi yıldız
WD	Beyaz cüce
DA	Hidrojen beyaz cüce
He-WD	Helyum beyaz cüce
WASP	Wide Angle Search for Planets

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Kısaltmalar	Açıklama
PALOMAR	Palomar Gözlemevi
CNO	Karbon-Azot-Oksijen
MSP	Milisaniye Atarcası
RGB	Kırmızı Dev Kolu
H-R	Hertzsprung – Russell
KIC	Kepler Input Catalog
KOI	Kepler Object of Interest
AAVSO	American Association of Variable Star Observers
HJD	Heliocentric Julian Day/Date
ZAMS	Zero Age Main Sequence
TAMS	Terminal Age Main Sequence
VLT	Very Large Telescope

1. GİRİŞ

Yıldızlar, yıldızlararası ortamda gaz ve toz bulutları içinde tek veya çoklu olarak oluşurlar. Gökyüzünde gördüğümüz yıldızların çoğu çoklu sistem üyesi olarak karşımıza çıkar. Çoklu yıldız sistemleri ise genelde çift veya daha fazla üyeden meydana gelirler. Çift yıldız sistemleri, astrofizik özellikler açısından tek yıldızlara göre daha kapsamlı bilgi sağlarlar. Çift yıldızların astrometrik ve gökada içi hareketlerinin ve konumlarının belirlenip gözlenmesi çok önemlidir. Yıldızlara ait kütle, yarıçap, toplam ışınım gücü gibi temel parametrelerin yanı sıra madde toplanması, disk oluşumu, kütle aktarımı ve yıldız rüzgârları gibi önemli astrofizik süreçlerin de incelenmesine olanak verir. Ayrıca çift yıldızlar üzerinde fotometrik ve tayfsal çalışmalar yaparak bileşenlerin belirlenebilen kütleleri ile yıldızların ve içinde bulundukları sistemin evrimi hakkında da bilgi edinilmektedir.

Çift sistemin yörünge düzleminin gözlemciye uygun bir açıda bulunması durumunda, bileşen yıldızların birbirlerini dönemli olarak örtmesi ile örtülen bileşenin sıcaklığına bağlı olarak ‘tutulma’ adı verilen parlaklık azalmaları ortaya çıkar. Bu parlaklık ya da ışık değişimlerinin ortaya çıktığı sistemlere ‘Örten Çift Sistemler’ denir. Sistemlerin ışık eğrilerinin biçimlerinden örten çift yıldız sistemleri içinde bir sınıflama yapılmaktadır. Yapılan fotometrik sınıflamada örten çift yıldızlar üç gruba ayrılmaktadır. Bunlar; Algol, Beta Lyrae ve W UMa türü sistemlerdir. Bu tez kapsamında incelenen EL CVn (EL Canum Venaticorum) türü yıldızlar, Algol türü örten çift yıldızlar sınıfında yer alırlar.

Algol türü örten çift sistemler, bileşen yıldızlardan genellikle her ikisinin de küresel şekilli olduğu veya yıldızlardan birinin küresellikten hafif sapmaya uğramış olduğu sistemlerdir. Sıcak bir anakol yıldızı ile soğuk bir dev veya altdevden oluşmuşlardır. Işık eğrilerine bakıldığında, tutulmalar dışında önemli parlaklık değişimlerinin olmadığı buna karşılık minimum derinlikleri arasında büyük farkların olduğu görülmektedir. Öyle ki, farklı dalgaboylarında bazen yan minimumların neredeyse hiç görülmediği bile gözlenmiştir.

Çalışmanın giriş kısmını oluşturan bu bölümde ilk olarak ana hatlarıyla EL CVn türü yıldızların astronomi literatüründeki yeri aktarılmakta ve ilk defa keşfedilmesinden bugüne kadarki süreç anlatılmaktadır. EL CVn türü örten çift yıldızlara ait ilk bilimsel çalışma Maxted et al., (2014a) tarafından ortaya konmuştur. Bu makalede A- veya F- tayf sınıfından bir anakol yıldızı ve düşük kütleli helyum beyaz cüce öncesi (pre-He-WD) bileşene sahip 17 adet çift yıldız sistemi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Yapılan makale taramalarında EL CVn türü yıldızların farklı özelliklere sahip bileşenlerinin incelendiği yayınlar da bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi, A2 tayf türünde bir anakol yıldızı ve yüksek frekanslı zonklamalar gösteren düşük kütleli helyum beyaz cüce öncesi bileşenlere sahip WASP 1628+10 çift yıldızını inceleyen çalışmadır (Maxted et al., 2014b). Bu sistem incelendiğinde, yoldaş bileşenin çok düşük kütleli helyum beyaz cüce öncesi ve zonklama gösteren nadir bir çift yıldız sistemi olduğu anlaşılmıştır. V1224 Cas çift yıldız sistemi ise, δ Scuti türü zonklayan baş yıldıza ve helyum beyaz cüce öncesi yoldaş yıldıza sahip EL CVn türü yıldızlardandır (Wang et al., 2018). EL CVn yıldızlarına ait farklı bileşenli sistemlerin ayrıntılı olarak incelenmesi tezin ilerleyen bölümlerinde sunulacaktır. Farklı bileşenlere sahip EL CVn türü çift yıldız sistemlerini incelemek farklı tür yıldızlar hakkındaki evrimi ve astrofiziksel boşlukları doldurmak bakımından önem taşımaktadır. Bu boşluklardan bir tanesi çok düşük kütleli helyum beyaz cüce öncesi yıldızların evrimi üzerinedir.

Düşük kütleli beyaz cüce yıldızlar ($M \leq 0.35\ M_{\odot}$), çift yıldız evriminin ürünüdür (Benvenuto and Althaus, 1998). Bu yıldızlar sıra dışı bir evrime sahip olup, daha büyük kütleli helyum beyaz cücelerden farklı evrimleştikleri beklenmektedir. Bu tür yıldızların çeşitli evrim süreçleri vardır. Yaygın olarak bir anakol yıldızından ya da kırmızı bir dev yıldızdan kütle aktarımı sonucu oluşmaktadırlar. Kütle aktarım aşamasının sonuna doğru kütle veren yıldızın yozlaşmış bir helyum çekirdeği oluşur. Bu yıldız "*soyulmuş kırmızı dev yıldız*" olarak adlandırılır ve bu yıldız helyumu tutuşturmak için yeterli kütleye sahip değildir. Ortaya çıkan beyaz cüce çok düşük bir kütleye sahip ve neredeyse tamamen helyumdan oluşmaktadır. Bu evrim aşamasına sahip olan yıldızlar helyum beyaz cüceler (He-WDs) olarak adlandırılırlar (Maxted et al., 2011).

Gözlenen yıldızlar içinde en parlak yıldız olan EL CVn bu türün ilk örneği olarak seçilmiştir. Tez kapsamı için araştırılan makalelerde (Maxted et al., 2014a; Maxted et al., 2014b; Chen et al., 2017) bu çift sistemler ve sistemlerdeki düşük kütleli helyum beyaz cüce oluşumu ve evrimi ayrıntılı olarak incelenmiştir. İncelemelerde genel olarak Wide Angle Search for Planets (WASP) ve Palomar Gözlemevi (PALOMAR) verileri kullanılmıştır. Kepler Uydusu verileri ile bulunan EL CVn türü yıldızlar da tez kapsamına alınsa da, ayrıntılı incelemeleri yapılmamıştır.

2. EL CVn TÜRÜ ÇİFT YILDIZLARIN GENEL ÖZELLİKLERİ

EL CVn türü çift yıldızlar A- veya F- tayf sınıfından bir anakol yıldızı (genel olarak A-) ve çok düşük kütleli helyum beyaz cüce öncesi bileşen içeren Algol türü örten çift yıldız sistemleri olarak tanımlanmışlardır (Roestel et al., 2018). Bileşen yıldızlardan biri hemen hemen sabit ışıtmalı yüksek etkin sıcaklıklara doğru evrimleşen düşük kütleli helyum beyaz cüce öncesi yıldızlardandır (pre-He-WD) (Maxted et al., 2014a). Yapılan gözlemler sonucunda bu tür yıldızların etkin sıcaklıklarının 9000 – 15000 K, görünür V parlaklıklarının ise 8-18 kadir aralığında olduğu saptanmıştır. Yörünge dönemleri yaklaşık olarak 0.7 ile 2.2 gün aralığındadır. EL CVn türü çift yıldızları üretebilecek olan ata yıldızların en olası kütle aralığı 1.15-1.35 $M_{\odot}$'tir. Bu tür cisimlerin ömrünün, azalan pre-He-WD kütlesi ile çarpıcı biçimde arttığı görülmektedir. Seçim etkileri dahil edildikten sonra en olası pre-He-WD kütlesinin 0.17 – 0.21 M⊙ aralığında olduğu belirtilmiştir. Bu durum, bu tür yıldızların yaşam süreleri ile pre-He-WD'lerin kütleleri arasında çok güçlü bir ilişki olma olasılığına işaret eder.

Gökada içinde bulunan, $P \leq 2.2$ gün için EL CVn türü çift yıldızların sayısının 2–5 x 10^6 olduğu tahmin edilmektedir. Bu da yerel yoğunluğun 4-10 x 10^{-10} pc^{-3} olduğunu göstermektedir. Bu nedenle gelecekte yapılacak olan gözlemlerle birçok düşük kütleli EL CVn türü yıldızın keşfedilmesi ve daha çok gökada içinde Öbek II yıldızlarının bulunduğu haloda da olabilecekleri beklenmektedir. Bu yıldızların şu an ki gözlemler sonucunda Samanyolu Gökadası içinde şişim bölgesi hariç tüm bileşenlerinde bu cisimlere rastlanabilir (Chen et al., 2017). EL CVn türü çift yıldızlar muhtemelen evrende yaygındır ve oluşumlarını ayrıntılarıyla incelemek ve Gökada'daki sayılarını tahmin etmek gerekmektedir.

EL CVn türü çift yıldızların karakteristik ışık eğrilerine uyan en iyi modeller, tam tutulma gösteren baş minimum ve parçalı tutulma gösteren yan minimum olanlardır. Baş minimum omuzlarındaki keskin iniş ve çıkışlar, tam tutulma biçiminde bir minimum düzlüğü ile kendini göstermektedir. Çoğu ışık eğrilerinin klasik Algol türü çift yıldızların ışık eğrilerine benzer eğriler sergiledikleri görülmüştür.

Hem bünyesel hem de geometrik etkiler nedeni ile değişim gösteren ışık eğrisi modelleri, astrofizik ve geometrik parametreler ile karşılaştırılmıştır. Işık eğrilerinin elde edildiği sistemlerdeki modellemelerde bileşenlerin genellikle yörünge dönemi ile eş dönme gerçekleştirdiği görülmüştür. Tez içeriğinde WASP ve PALOMAR verileri ile elde edilen ışık eğrilerinin biçimlerine göre gruplamalar yapılmıştır. Bu gruplamalar ve ayrıntıları tezin 6.Bölümünde sunulacaktır.

EL CVn türü çift yıldızların evrimi ve geleceği, literatürde tartışılan diğer önemli konular arasında yer almaktadır. EL CVn'lerin evrimleri üzerine yapılan çalışmalarda bu tür yıldızların yörünge dönemleri üç günden daha kısa çok yakın ana kol çiftlerinden oluştuğu bilinmektedir. Evrim çalışmalarında öncelikle iki ana oluşum mekanizması üzerinde durulmuştur. Bunlardan bir tanesi ortak zarf evrimi, diğeri ise uzun dönemli kararlı kütle aktarımı mekanizmasıdır. Evrim modellerine göre, EL CVn'ler yakın beyaz cücelerin çift evrim kuramları için özel ve önemlidir. Bunun nedeni, yakın çiftlerdeki çoğu beyaz cücenin ortak zarf evrimi yoluyla oluştuğu varsayılırken, bu sistemlerin ortak zarf evrimi yolu yerine yakın çiftlerdeki düşük kütleli yıldızlar arasında gerçekleşen uzun dönemli kararlı kütle aktarımı sonucunda oluştuğu şeklindedir (Maxted et al., 2014a).

Yeni yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen bilgiler farklı bir evrim sürecinin de bu tür yıldızları anlamak adına önemli olduğunu göstermektedir. Gözlemler sonucunda, bu tür yakın anakol çiftlerinin uzak bir üçüncü yıldıza ev sahipliği yaptığı olasılığı da ortaya çıkmaktadır. Bu da EL CVn türü yıldızların aslında üçlü sistemlerin iç çiftleri olabileceği sonucuna yol açar. Kütle aktarımının erken bir zaman diliminde başlamış olması çift yıldız sistemine ait yörünge dönemlerinin 3 günden daha kısa olması gerektiği anlamına gelir. Üç günün altındaki yörünge dönemlerine sahip hemen hemen tüm yakın anakol çiftlerinin, üçlü sistemlerin iç çiftleri olduğu bilinmektedir. Bu konu ile ilgili incelenen çalışmalarda 5 tane EL CVn yıldızı gözlenmiş ve beş sistemin tümünde çok güçlü yoldaş adaylar bulunmuştur (Lagos et al., 2020). EL CVn çiftlerinin ve üçüncü bileşenlerinin düşük kütleli beyaz cüce bileşeni olan çift yıldızlardan oluşan iç çiftlere sahip üçlü sistemlere dönüştükleri araştırmalar sonucunda elde edilmiştir. Bundan dolayı, EL CVn üçlü sistemleri çok yakın iç çift yıldızlara sahip anakol üçlüleri ile çok düşük kütleli beyaz cüceleri içeren sistemlerin bir alt grubu

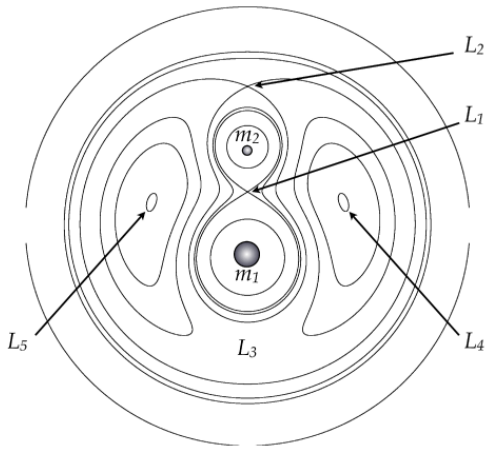
arasındaki bağlantıyı temsil etmektedir. EL CVn türü yıldızların oluşumuyla ilgili mevcut kuramlar doğruysa, bu sistemlerin bazılarının üçlü sistemler olduğu ve bu üçlü sistemlerde de bulunan iç çiftlerin aslında kararlı kütle aktarımını deneyimleyen çok yakın anakol bileşenlerinden meydana geldikleri sonucuna varılmaktadır (Lagos et al., 2020). Ortak zarf evrimi ve kararlı kütle aktarımı mekanizmaları tezin 3.Bölümünde ayrıntılı olarak ele alınacak olup, bu tez kapsamında üçlü sistemleri inceleyen evrim kuramı üzerinde durulmayacaktır.

3. EL CVn TÜRÜ ÇİFT YILDIZLARIN OLUŞUM VE EVRİM SÜREÇLERİ

Yıldızların yaşam süreleri aslında yıldızların evrimini tanımlamaktadır. Evrim süreci ise yıldızların yaşamları boyunca geçirdikleri aşamaları ifade eder. Yıldızın kütlesi ve kimyasal yapısı bu sürecin yolunu ve nasıl olacağını belirler. Bütün yıldızlar yaşam sürelerinin çoğunu anakol evresinde geçirirler. Anakol evresinde yıldızın çekirdeğindeki hidrojen, nükleer tepkimeler ile helyuma dönüşmektedir. Bu füzyon tepkimesinin oluşturduğu ışınım basıncı ile kütle çekimi birbirini dengeler, Hidrostatik denge olarak adlandırılan bu dengenin bozulması, çekirdekteki hidrojenin tükenmesi ile gerçekleşir. Hidrostatik denge bozulduktan sonra yıldız anakol evresinden ayrılır. Yıldızın sahip olduğu kütle, tüm evrim sürecinde etkili olduğu gibi anakoldan ayrıldıktan sonraki sürece de etki eder. Aslında burada yıldızın yaşamını belirleyen parametre, kütle olarak karşımıza çıkmaktadır ve *"Russell-Vogt Kuramı"* olarak adlandırılır (Gautschy, 2015). Örneğin, yaklaşık $M \leq 7\ M_{\odot}$ kütleli yıldızlar evrimlerinin sonuna doğru, merkezlerindeki nükleer tepkimeler sona ermeye başladığında, merkez bölgenin kendi kütle çekimi altında çökmesi ve dış katmanlarını uzaya fırlatmasıyla, yıldız beyaz cüceye dönüşür. $7\ M_{\odot}$'den daha büyük kütleli yıldızlarda ise süpernova patlaması sonrası kalıntı yıldız, nötron yıldızı veya kara deliğe dönüşme gibi evrim süreçleri gerçekleştirir.

Çift yıldızların evrimi ise, tek yıldızların evrim sürecinden farklı ilerler. Çift yıldızlar genel olarak birbirlerine olan yörüngedeki ayrıklıklarına göre üç gruba ayrılırlar. Bunlar; ayrık, yarı ayrık ve değen çift yıldızlar olarak adlandırılmışlardır. Bu sınıflandırmada, ayrık çiftler, iki bileşen yıldızın Roche yüzeylerini doldurmadığı sistemlerdir. Yarı ayrık çift yıldızlarda, bileşenlerden yalnız birinin Roche yüzeyini doldurduğu, değen çift sistemlerde ise her iki bileşenin de Roche yüzeyini doldurduğu görülmektedir. Çift sistemlerin birbirlerine olan yakınlığı evrim süreçleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yakın çiftlerin yıldız evrimi sürecinde etkili olduğu fikri 1941 yılında Otto Struve tarafından, β Lyrae'in tutulma gösterdiği sırada davranışlarını açıklamak için bileşenlerin arasında madde akışı olabileceğini önermesi ile başlar (Struve, 1941).

Çift yıldız sistemlerinde, bileşenlerin birbirlerine olan yakınlıklarından kaynaklı küresellikten sapmış ve çeşitli tedirginlik etkilerini ifade eden bir modele ihtiyaç duyulmuştur. Buna, Roche Modeli adı verilmektedir. Bileşenler birbirlerine yaklaştığında, yüzeyler kararsız hale gelmektedir. Bileşenlerin birbirlerine değmeyen yüzeyleri küresel şekillerini korurken, birbirlerine değen yüzeyleri küresellikten sapmaya başlar. Sonunda iki kütleyi saran yüzeyler birbirlerine, birinci Lagrange noktasında (L1) değerler. Bu noktada birbirine değen yüzeyler, sistemin bileşenlerinin *"Roche Yüzeyleri-Limitleri"* olarak adlandırılmaktadır. Buradaki limit, bir çift sistemdeki bileşenlerin ulaşabilecekleri maksimum hacimdir. Şekil 3.1'de gösterildiği gibi, L1, L2, L3, L4 ve L5 noktaları sistemdeki iki cismin birbirine uyguladığı çekim kuvvetinin dengede olduğu noktalardır ve bu noktalarda bulunan herhangi bir kütle, sistemdeki iki cisim üzerine düşmemektedir (Manzoori, 2011). Şekil 3.1'de eşpotansiyel yüzeyler ve Lagrange noktaları ile ifade edilen Roche geometrisi gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Kütleleri m_1 ve m_2 olan yakın bir çift yıldız sisteminin Roche geometrisi (Benacquista and Downing, 2013).

3.1 Ortak Zarf Evrimi

EL CVn türü çift sistemlerde, sistemin bileşenlerinden biri olan çok düşük kütleli helyum beyaz cücelerin ($M_{WD} < 0.4\ M_{\odot}$), sistemde kararlı kütle aktarımından ya da ortak zarf evrimi sonrası oluştukları bilinmektedir. Ortak zarf evrimi sürecinde, anakol yıldızlarından oluşan bir çift yıldız sisteminde, bileşeninden daha büyük kütleli yıldız anakoldan ayrıldığıktan sonra kabukta

gerçekleşen hidrojen yanmasından dolayı yavaş yavaş yarıçapı artar. Ardından Roche lobunu doldurur ve bileşen yıldızına kütle aktarımına başlar. Bu aşamada bileşenlerin başlangıç kütleleri kütle aktarımının süreci açısından çok önemlidir. Kütle aktaran yıldızdan uzaklaşan kütle, çift sistemin kütle merkezine yakın bir noktaya ilerler ve yavaş yavaş açısal momentum kaybedilir ($L = mvr$ eşitlikte L açısal mometum, m cismin kütlesi, v cismin hızı ve r dönüş ekseninin yarıçapı) Kaybedilmeye başlanan açısal momentum sistem tarafından korunmak istendiğinden, bileşenler arası ayrıklık artar ve buna bağlı olarak Roche lobu da büyür. Bu süreç içerisinde yıldızın yarıçapı artar, yıldız yeniden Roche lobunu doldurur. Bu evrim aşamalarının ardından kütle aktaran yıldız, beyaz cüce olur. Sonuç olarak çift yıldızın bileşenleri arasındaki uzaklık artmış olur ve bir anakol yıldızı ile beyaz cüce bileşene sahip bir çift sisteme dönüşür. Kütle aktaran yıldız, diğer bileşenden daha fazla kütleye sahip olduğunda, aktarılan madde sonucunda açısal momentum artar. Yörünge açısal momentumunun korunduğu varsayımı ile bileşenler arasındaki uzaklık azalır. Bu kararsız durumda kütle aktarımı daha fazla olmaya başlar. Aktarılan kütle taşarak, dış Roche lobunu da doldurur ve her iki bileşeni de içine alarak genişlemiş bir ortak zarf oluşturur (Rasio and Livio, 1996). Ortak zarf içerisinde zarf ve bileşen yıldızlar arasındaki hız farklılıkları, yörünge açısal momentumunun oluşan zarfa aktarılmasına neden olur. Bu durumda bileşenler birbirlerine yakın kalmaktadır; bu durum çift yıldız ile ortak zarfın etkileşmesi olarak adlandırılır. Bu durum her çift yıldız için geçerli olan bir evrim süreci değildir.

Helyum beyaz cüce öncesi bileşenlerin çok düşük kütleli olması nedeniyle EL CVn'lerin ortak zarf evrimi ile oluşmasının olası olmadığı yapılan gözlemler sonucunda belirtilmiştir (Chen et al., 2017). EL CVn'ler ortak zarf evrimi süreci ile oluşmuşlar ise, çok düşük kütleli çekirdeklere sahip devlerin, bu aşamada bileşeni ile birleşmesi gerekirdi. Gözlemler bu tarz bir birleşmenin olmadığını, bundan dolayı EL CVn türü çift sistemlerin yakın çiftlerdeki düşük kütleli yıldızların arasında gerçekleşen uzun dönemli bir kararlı kütle aktarımı ile üretildiğini gösterir (Chen et al., 2017).

3.2 Kararlı Kütle Aktarımı

Bir yıldız sistemi içerisinde açısal momentum kaybının yaşanması, kütle aktarımına neden olan en önemli etkendir. Açısal momentum kaybı ise manyetik frenleme ve/veya çekimsel ışınım ile olmaktadır (Podsiadlowski, 2014). Konvektif katmanı olan herhangi bir yıldız, yıldız rüzgârlarının, yıldızın dönmesine manyetik olarak bağlanması nedeniyle, açısal momentumunu kaybetme eğilimindedir. Konvektif katman burada önemlidir; çünkü sadece radyatif katmana veya sadece konvektif katmana sahip yıldızlarda manyetik alan ile birleşmiş bir rüzgâr üretmek için manyetik dinamo bulunmayabilir. Roche lobu dolan yıldızda oluşan yıldız rüzgârlarından dolayı madde atımı gerçekleşmeye başlar. Manyetik rüzgâr ile açısal momentum taşınır, atılan madde ile yıldızın momentumunda bir azalma olur ve bu madde, yıldızı saran manyetik alan çizgileri nedeniyle yıldızla birlikte döner. Manyetik frenleme adı verilen bu olay ile çok az kütle aktarımı gerçekleşir. Çekimsel ışınım söz konusu olduğunda ise, bileşenlerin birbirleri etrafında dolanması sonucunda uzay-zaman sürekliliğinde dönemsel bir bozulma gerçekleşir. Bu olay ile kütleçekimsel bir dalga, dış uzaya doğru yayılır. Bu dalga hem enerji hem de açısal momentum taşıdığından, çift sistemin açısal momentumunda bir kayıp meydana gelir. Taşıdıkları düşük enerji nedeniyle bu dalgaları belirlemek oldukça zordur. Bileşenlerin kütlelerine bağlı olarak yörünge dönemi 12 saatten az olan yakın çift sistemler için çekimsel ışınım çok önemlidir. Çekimsel ışınım sonucu oluşan kütle aktarımı çok azdır. İki durumda da kütle aktarımının az olmasına rağmen manyetik frenleme rolünün, çekimsel ışınıma göre daha fazla olduğu bilinir (Podsiadlowski, 2014).

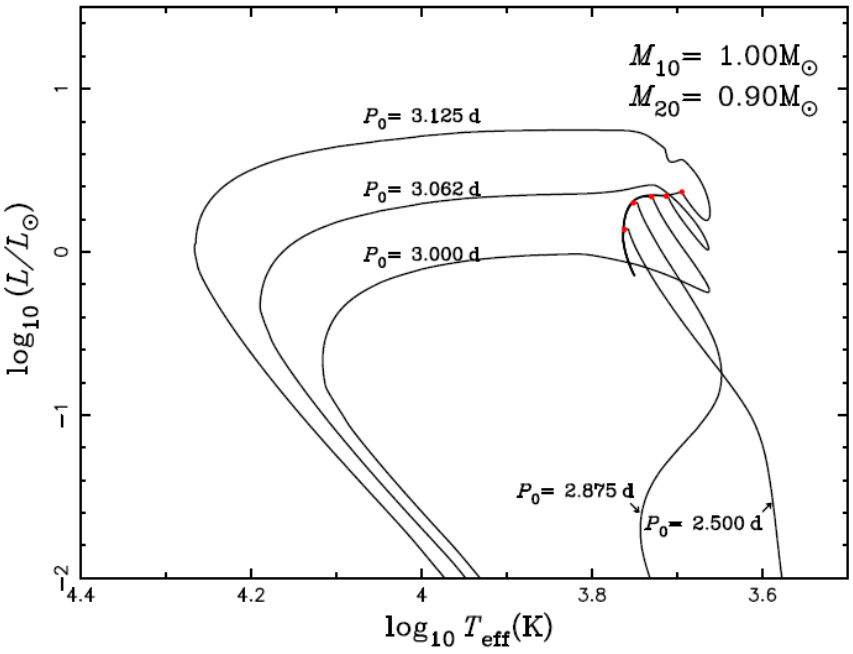
EL CVn türü çift sistemlerin bileşenlerinden biri olan helyum beyaz cücelerin, daha fazla kütleye sahip beyaz cücelerden farklı evrimleştikleri düşünülür (Iben and Livio, 1993). Bu tür yıldızları oluşturabilecek farklı evrim aşamaları bulunur. Bu evrim basamağında, madde aktaran yıldız, kütle aktarımı sonucunda yozlaşmış bir helyum çekirdeğe sahip olur. '*Soyulmuş kırmızı dev*' yıldız olarak adlandırılan bu yıldız, helyum flaş evresi için yeterli kütleye sahip değildir. Bundan dolayı oluşan beyaz cüce düşük kütleli ve tamamen helyumdan oluşur (Maxted et al., 2011; Wang et al., 2020). Kırmızı dev aşamasında kaybedilen kütlenin zaman ölçeği, yıldızın ısısal zaman ölçeğinden daha uzun olduğu durumda,

kütle aktarımı bittiği zaman yozlaşmış helyum çekirdeği saran kalın bir hidrojen tabakası olmaktadır. Kalın hidrojen zarfı, yıldızın toplam kütle ve kimyasal bileşimine bağlı olarak değişim gösterir (Nelson et al., 2004). Bu kalın tabaka CNO çevrimi ile kademeli olarak azalmaya başlar. Sonuç olarak bazı helyum beyaz cücelerin kalın hidrojen katmanı ile oluştuğu varsayımı kuvvetli bir hal alır (Maxted et al., 2013). *Soyulmuş kırmızı dev* yıldızların evrimini çalışmak, helyum beyaz cüce öncesi dönemi ayrıntılı olarak incelemek için bir fırsat sunar.

İncelenen makalelerde (Chen et al., 2017; Maxted et al., 2014a; Wang et al., 2020), EL CVn türü çift yıldız oluşumuna yol açan süreçler ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bu bağlamda, gözlemlerle sonuçların tutarlı olduğu birçok bulgu elde edilmiştir. EL CVn yıldızlarını oluşturabilecek ata yıldızların kütleleri, kararlı kütle aktarım süreci ve evrim yollarının belirlenmesi kapsamlı çalışmalar sonucunda ulaşılan önemli bilgilerdendir. Kabul gören en genel tanıma göre EL CVn türü çift yıldızlar, A- veya F- tayf sınıfından bir cüce yıldıza (1.05 – 2.9 $M_{\odot}$) (Wang et al., 2020) ve sabit ışıtma (L) evresinden sonra helyum beyaz cüce öncesi bir yıldıza sahip çift sistemler olarak tanımlanmışlardır. EL CVn türü çift sistemler Kepler alanında da bulunmuştur. Bunlar; KOI 74, KOI 81 (Kerkwijk et al., 2010), KIC 9164561, KIC 10727668'dir (Rappaport et al., 2015). Bunların dışında, kütleleri 0.2-0.3 $M_{\odot}$ değerlerinin altında son derece düşük kütleli olan beyaz cüceler, bazı milisaniye atarcaları (MSP) ve yozlaşmış çift sistemlerde de bulunmuştur.

EL CVn türü çift yıldızların oluşumundaki çok düşük kütleli çift yıldız evrimi incelendiğinde, *çatallanma dönemi* (bifurcation period - P_b) karşımıza çıkmaktadır (Pylyser and Savonije, 1988; Nelson et al., 2004). Çatallanma dönemi (Pb), Roche lobunun taşmasının henüz başladığı dönem olarak belirtilmiştir (Ma and Li, 2008). P_b döneminin değeri, yapılan birçok çalışmanın ve gözlemin ardından yaklaşık üç gün olarak belirlenmiştir (Chen et al., 2017). Çoğu EL CVn türü yıldızın potansiyel ataları, çatallanma döneminin hemen üzerinde yörünge dönemine sahiptir. Bu tür sistemleri oluşturabilecek kütle veren yıldızların başlangıç yörünge dönemlerinin, üç gün ve üzerinde olması gerekir. Üç günün üzerinde başlangıç yörünge dönemleri (P_0) ile başlayıp evrimine devam eden yıldızların, EL CVn türü çift yıldız sistemlerini oluşturduğu, modellerle ve

gözlemlerle tutarlıdır. P_0'ın tahmin edilen değeri, her bir çiftin başlangıç parametrelerine ve evrim süreci için geçerli modellerdeki varsayımlara bağlı olarak bulunmuştur. Şekil 3.2'de bileşen kütleleri neredeyse aynı olan (1.0 – 0.9 $M_\odot$) çiftlerdeki kütle veren yıldızların evrim yolları gösterilmiştir. Kütle aktaran yıldız (helyum beyaz cüce öncesi olan yıldızın atası), kırmızı dev kolu (RGB) evresindedir ya da bu evreye çok yakındır. Burada P_0 farklı olması, iki evrim yolunu karşımıza çıkarır. İlk durumda kütle aktaran yıldızın, çatallanma döneminden daha küçük bir P_0 ($P_0 \leq P_b$) değerine sahip evrim yolu anlatılmaktadır. Yıldız bu aşamada, anakolun alt kısmından doğrudan beyaz cüceye doğru evrimleşir. İkinci durumda P_0, kritik çatallanma döneminden daha uzun veya bu döneme çok yakın ($P_0 \geq P_b$) olduğunda sabit bir ışıtma evresinden geçerken sürekli azalan ışıtmaya doğru evrimleşir. Böyle bir döngünün sonunda kütle veren yıldız yozlaşmış bir kalıntı bırakır (Nelson et al., 2004).



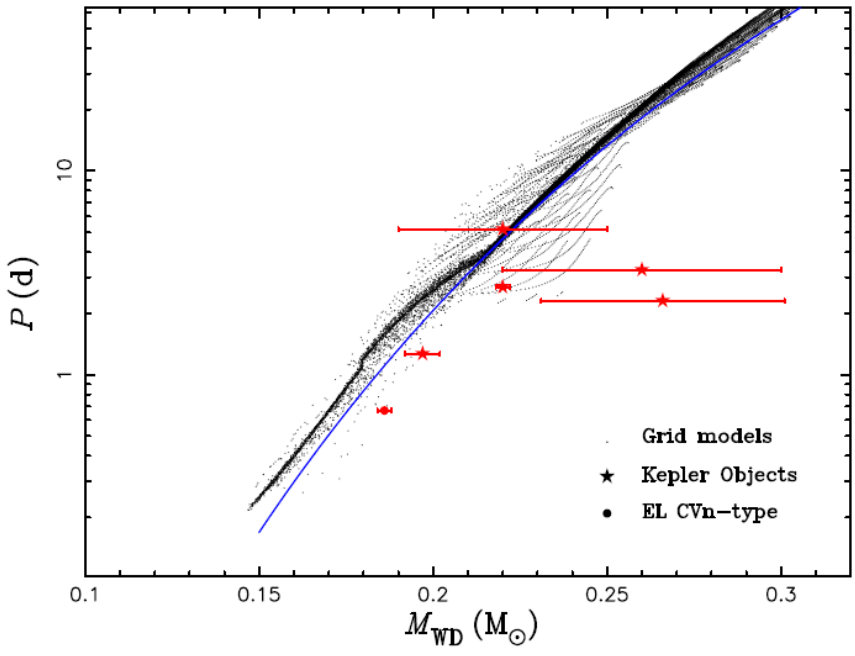
Şekil 3.2. H-R diyagramında, kütleleri 1.0 ile 0.9 $M_\odot$ arasında olan, farklı başlangıç yörünge dönemlerine sahip yıldızların evrim yolları (Chen et al., 2017).

Başlangıç yörünge dönemi, çatallanma döneminden büyük ($P_0 > P_b$) olan çiftler için güçlü bir M_{WD} – P ilişkisi bulunmaktadır. Burada M_{WD} kütle veren yıldızın kalan kütlesini, P ise son yörünge dönemini gösterir. Şekil 3.3'te kararlı

kütle aktarımından elde edilen M_{WD} – P ilişkisi anlatılır. "*Siyah noktalar"* hesaplanan tüm değerleri, "*içi dolu büyük siyah daireler"* EL CVn çift yıldızlarını ve "*yıldız*" sembolleri de Kepler cisimlerini temsil etmektedir. Şekilde, yozlaşmış çekirdeğe sahip kütle veren yıldızların neslinden gelen yıldızlar ile şekillenen dar bir bant görülmektedir. "*Siyah noktalar"* modellerden, "*düz mavi çizgi*" Lin'in (2011) elde ettiği 3.1 eşitliğinden hesaplanarak çizdirilmiştir (Chen et al., 2017).

$$P \cong \frac{4.6\times10^{6} M_{WD}^{9}}{\left(1+25M_{WD}^{3.5}+29M_{WD}^{6}\right)^{3/2}} \text{ (gün)} \qquad (3.1)$$

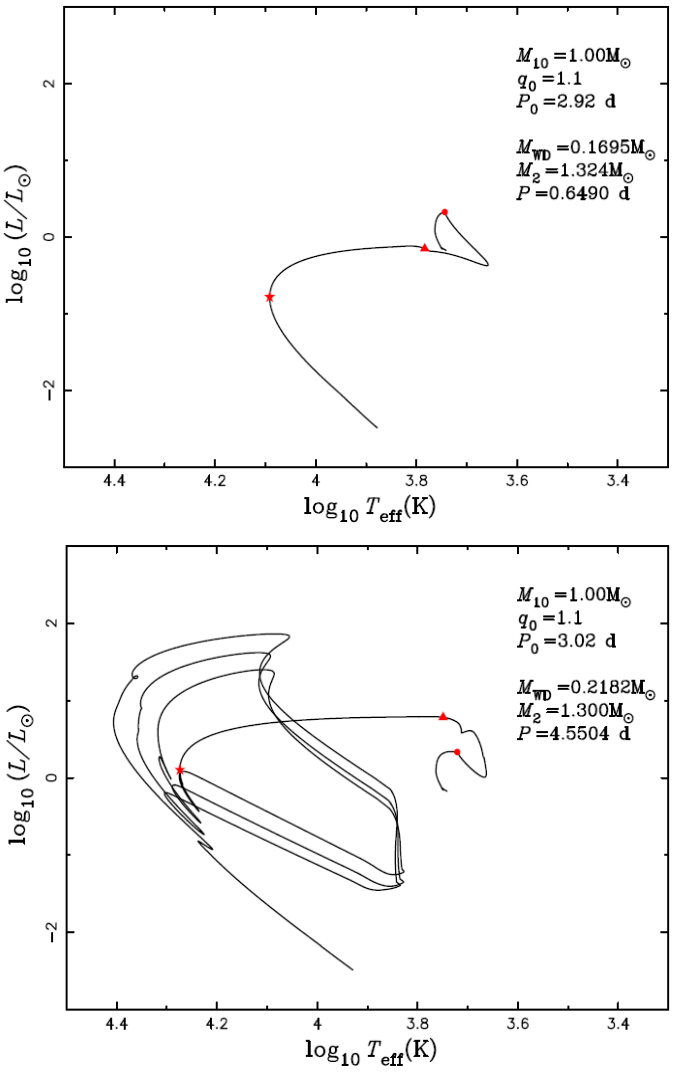
Beyaz cüceler kararlı kütle akarımı ile evrimleşiyorsa ve ata yıldızı yozlaşmış bir çekirdeğe sahipse, yıldızın son yörünge dönemi ve beyaz cüce kütlesi arasında sıkı bir ilişki bulunmaktadır. Şekil 3.3'te $M_{WD} \leq 0.22\ M_{\odot}$ değerleri için hat üzerinde bir şişkinlik görülmektedir. Bu kütle değerlerine sahip düşük kütleli yıldızların çekirdeklerinin, kütle aktarımı sonunda yozlaşmaması nedeniyle göreli olarak daha geniş bir yarıçapa sahip olmaları bu şişkinliğe neden olmaktadır.



Şekil 3.3. Kararlı kütle aktarımından elde edilen M_{WD} – P ilişkisi. "*Siyah noktalar"* hesaplanan tüm değerleri, "*içi dolu büyük daireler"* EL CVn çift yıldızlarını ve "*yıldız"* sembolleri de Kepler cisimlerini temsil etmektedir (Chen et al., 2017).

Şekil 3.4'te kütlelerinin hemen hemen aynı olduğu fakat farklı başlangıç yörünge dönemlerine sahip iki beyaz cücenin evrim yolu gösterilmiştir. Şeklin üst kısmında, 1.0 $M_\odot$ kütleli ve P_0 = 2.92 gün olan, kütle veren bir yıldız görülmektedir. Burada q_0 (M_2/M_1), sistemin kütle oranını temsil eder ve değeri 1.1'dir. P_0, çatallanma dönemine yakın (P_b ~ 3 gün) fakat bu dönemden daha küçük bir değere sahiptir. Kütle aktarımının başladığı yerden evrim yolunu takip ettiğimizde, yıldızın kırmızı dev koluna yükselemediği görülür. Kütle aktarımı bittiğinde yozlaşmamış bir çekirdek karşımıza çıkmaktadır. Sabit ışıtma evresinden sonra yıldız doğrudan beyaz cüce olmak üzere soğur ve oluşan beyaz cücenin kütlesi (M_{WD}) ~ 0.17 $M_\odot$'tir. Sistemdeki bileşen yıldızın kütlesi (M_2) 1.324 $M_\odot$ ve sistemin son yörünge dönemi (P) ~ 0.65 gündür. Şeklin alt kısmında, aynı kütleye (1.0 $M_\odot$) ve kütle oranına (q_0 = 1.1) sahip, P_0 = 3.02 gün olan bir yıldız vardır. Bu yıldıza ait P_0 değeri, çatallanma dönemine yakın (P_b ~ 3 gün) fakat bu dönemden daha büyük bir değere sahiptir. Böyle bir durumda, kütle aktarımı sırasında kütle veren yıldızın, kırmızı dev koluna doğru yükselen bir evrim yolunu izlediği görülmektedir. Yıldız, sabit ışıtma evresinde ilerledikten sonra, çekirdeği yozlaşmış bir beyaz cüceye dönüşmektedir. Oluşan beyaz cücenin kütlesi (M_{WD}) ~ 0.22 $M_\odot$, bileşen yıldızın kütlesi 1.30 $M_\odot$ ve sistemin son yörünge dönemi ~ 4.55 gün olarak bulunmuştur. Şekilde de görüldüğü gibi sabit ışıtma evresinden sonra yıldızın birkaç hidrojen kabuk parlaması yaşadığı ve bunun sonucunda da kalan yıldızın ışıtma değerinin az da olsa arttığı görülür.

Çalışmalarda genel olarak sabit ışıtma evresi ve sonrasına odaklanılmış, H kabuk parlamaları üzerinde yeterince durulmamıştır. Sonuç olarak, P_0 değeri P_b'den biraz daha fazla, kısa yörünge dönemleri ve çok düşük kütleleri olan çift sistemlerin, EL CVn türü çift yıldızları oluşturabileceği anlamına gelmektedir. Aynı şekilde ata yıldızların kütlesinin < 1.30 $M_\odot$ olduğu durumda, verici yıldızın anakolun bitiminden hemen sonra kütle aktarımına başladığı ve bunun sonunda yozlaşmış kalıntılar bırakabileceği çift sistemlerin EL CVn oluşumuna katkıda bulunabileceği görülür. Özetle, P ≤ 2.2 günden daha kısa yörünge dönemine sahip EL CVn'lerin oluşması için kütle aralığı 1.15 – 1.20 $M_\odot$ olması gerekmektedir.



Şekil 3.4. H-R diyagramı üzerinde farklı başlangıç yörünge dönemlerine ait beyaz cücelerin iki evrim yolu. "*Daireler"* kütle aktarımının başlangıcını, "*üçgenler*" kütle aktarımının sonunu ve *"yıldız"* sembolleri ise neredeyse sabit ışıtma evresinin sonunu temsil eder (Chen et al., 2017).

Yıldızın sabit ışıtma evresinde kalma süresi, helyum beyaz cüce öncesi yıldızın kütlesiyle güçlü bir ilişkiye sahiptir. Bu bağlamda, $M_{WD} \leq 0.21\ M_\odot$ için $t \propto M_{WD}^{-8}$ ve daha alt değerler için $t \propto M_{WD}^{-10.5}$'dur. Yazarların yapmış olduğu çalışmalara göre, $M_{WD} = 0.25\ M_\odot$ için, $t \sim 2\times10^7$ yıl, $M_{WD} = 0.2\ M_\odot$ için $t \sim 4\times10^8$ yıl, $M_{WD} = 0.15\ M_\odot$ içinse $t \sim 4\times10^9$ yıl olarak bulunmuştur. Eğer seçim etkisi de hesaba katılırsa gözlemlerle uyumlu oldukları söylenmektedir.

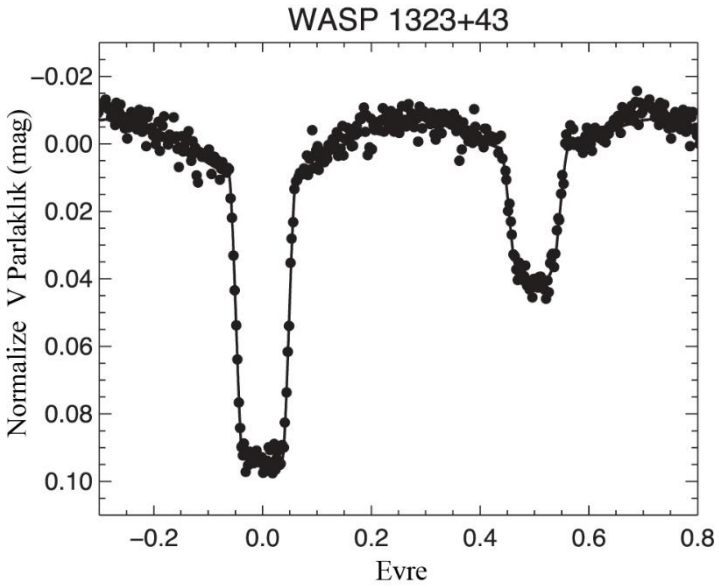
4. BİLEŞENLERİNE GÖRE BAZI EL CVn TÜRÜ ÇİFT YILDIZLAR

EL CVn türü çift yıldız sistemlerinin keşfinin hemen ardından ayrıntılı olarak çalışılması bu tür sistemlerin özelliklerini ve sisteme ait bileşenleri daha iyi anlamamıza olanak sağlamıştır. Keşfedildikleri zamandan itibaren hızla artan sayıları bu çift yıldız sistemlerini önemli hale getirmiş ve bu türü anlatan ilk makalede sadece 17 tane EL CVn türü çift yıldızdan söz edilmiştir (Maxted et al., 2014a). Yapılan gözlemler sayesinde saptanan bugünkü sayıları 70'e yaklaşmıştır. WASP verileri dışında, 7 benzer sistem daha Kepler araştırmaları ile keşfedilmiştir. Bunlar; KOI 74, KOI 81 (Kerkwijk et al., 2010); KIC 9164561, KIC 10727668 (Rappaport et al., 2015); KIC 8262223 (Guo et al., 2017); KIC 10989032 ve KIC 8087799'dur (Zhang et al., 2017). Bunların dışında PALOMAR gözlemevi verileri ile keşfedilen 36 tane çift sistem daha bulunmaktadır (Roestel et al., 2018).

Genel tanım itibari ile EL CVn türü çift yıldızlar, A- veya F- tayf sınıfından bir anakol yıldızından ve helyum beyaz cüce öncesi yoldaş bir bileşenden meydana gelirler (Wang et al., 2020). Sistemin baş bileşeni genellikle A- veya F- tayf sınıfından bir anakol yıldızıdır ve bu yıldızlar genel olarak kararsızlık kuşağında bulunan yıldızlar gibi zonklama özellikleri gösterir. Yoldaş bileşen ise *soyulmuş kırmızı dev* evresinin ardından helyum beyaz cüce öncesi bir bileşen olmasının yanı sıra bazı gözlemler ile bu yıldızların da zonklama yaptığı ortaya çıkmıştır (Maxted et al., 2014b). 4.Bölümde, EL CVn türü çift yıldızların ilk örneği olan 1SWASP J024743.37–251549.2 (WASP 0247-25) örten çift yıldız sisteminden ayrıntılı olarak söz edilecektir. Her iki bileşenin de zonklama yaptığı 1SWASP J162842.31+101416.7 (WASP 1628+10) ve δ Scuti / γ Dor (melez) türü KIC 8113154 çift sistemi gibi farklı özellikte bileşenlere sahip yıldızlardan oluşan 3 tane EL CVn türü çift yıldız sistemi ele alınacaktır. Bu sistemlerin bazı fiziksel parametreleri ve evrim süreçlerine ilişkin bazı temel bilgiler 4.Bölümde sunulacaktır.

4.1 WASP 0247-25

1SWASP J024743.37–251549.2 (WASP 0247-25) çift yıldız sisteminin bileşenlerinin özellikleri, WASP-South Gözlemevi'nin verileri kullanılarak ilk defa Maxted'in (2011) çalışmasında sunulmuştur. EL CVn türü çift yıldız sistemleri içinde ilk keşfedilen çift yıldız WASP 0247-25'tir. WASP 0247-25, baş bileşeni δ Scuti türü zonklamalar gösteren A- tayf sınıfından bir anakol yıldızı ve yoldaş bileşeni helyum beyaz cüce öncesi olan bir çift yıldız sistemidir. Yoldaş bileşen, sabit ışıtmada yüksek etkin sıcaklıklara doğru evrimleşen ve ardından neredeyse tamamen helyumdan oluşan çok düşük kütleli bir beyaz cücedir (Maxted et al., 2011). Bu sistemdeki daha düşük kütleli ve daha sıcak olan yıldız, evriminde ileri bir aşamadadır. Yapılan incelemelerde farklı türden bir ışık eğrisine sahip olan bu sistemin, çoklu zonklamalar gerçekleştiren yeni bir değişen yıldız türü olduğu bulunmuştur. Bu keşfin ardından, bu çift sisteme benzer ışık eğrilerine ve yörünge dönemi 0.7 ile 2.2 güne sahip yıldızlar aranmaya başlanmıştır. Baş minimumda tam tutulma gösteren, dik iniş ve çıkış kolları olan, tam tutulma esnasında düz bir tabana sahip, "*kutu*" görünümlü baş minimum ve daha sığ yan minimum türü ışık eğrileri taranmıştır. Yapılan gözlemler sonucunda, WASP fotometrik veri tabanı kullanılarak 17 tane EL CVn türü çift yıldız bulunmuştur (Maxted et al., 2014a). Bu grup içinde en parlak olan EL CVn (1SWASP J132357.01+433555.4) bu türe ismini veren sistem olmuştur. Bu türe ait yıldızların parlaklıkları $8 \leq V \leq 13$ kadir aralığındadır ve EL CVn'nin V parlaklığı ~9.42 kadirdir. Şekil 4.1'de bu türe ismini veren EL CVn'nin WASP veri tabanı kullanılarak elde edilen ışık eğrisi gösterilmiştir. Baş minimuma keskin giriş ve çıkış arasındaki tam tutulma tabanı EL CVn türü çift yıldızların tipik ışık eğrisini yansıtmaktadır ve bu aynı zamanda, bileşen yıldızların yarıçaplarının birbirinden farklı değerlere sahip olduğunu da ifade eder. Bu tür bir ışık eğrisi sıcak ve küçük bileşenin, daha büyük ve soğuk bir bileşen tarafından tutulduğunun göstergesidir. Bu tür çift sistemlerde, A- veya F-tayf sınıfından olan baş bileşenin ve helyum beyaz cüce öncesi yoldaşının kütleleri ayrı ayrı belirlenmektedir. WASP 0247-25 sisteminde, baş ve yoldaş bileşenin kütleleri sırasıyla 1.362 ± 0.007 $M_{\odot}$, 0.187 ± 0.002 $M_{\odot}$, yarıçapları 1.416 ± 0.005 $R_{\odot}$, 0.316 ± 0.002 $R_{\odot}$ olarak bulunmuştur. Etkin sıcaklıkları, baş bileşenin 7760 ± 200 K ve yoldaş bileşenin sıcaklığı 10590 ± 400 K'dir. Sistemin yörünge dönemi 0.668 gündür (Kim et al., 2021).

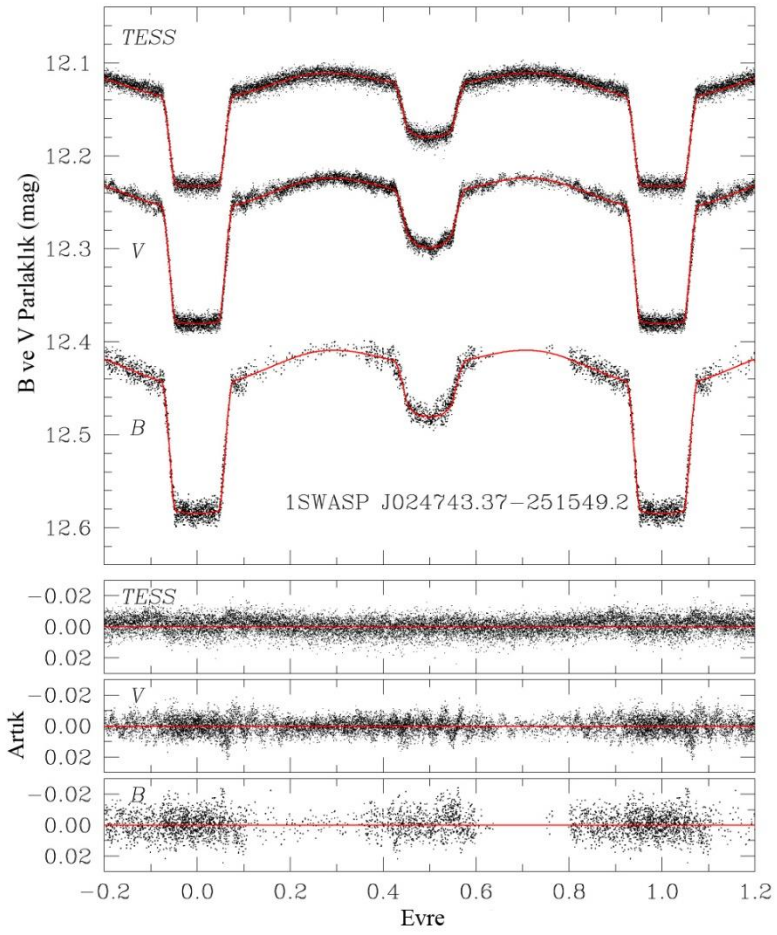


Şekil 4.1. WASP 1323+43 EL CVn türü çift yıldız sisteminin ışık eğrisi. (Maxted et al., 2014a)

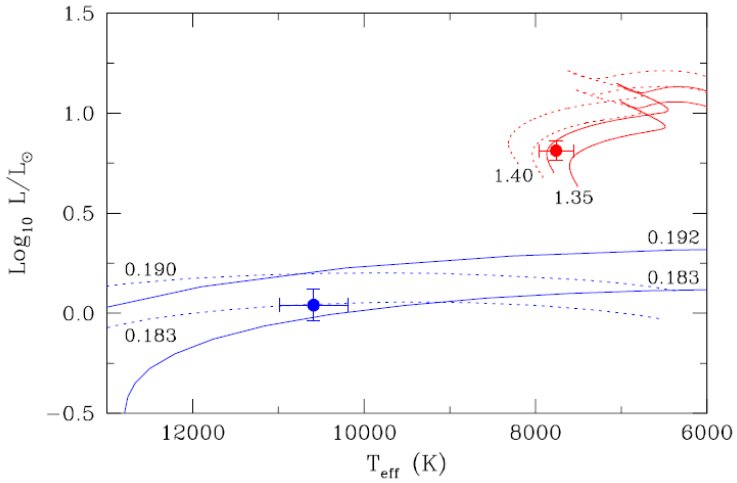
EL CVn türü çift sistemleri arasında ilk keşfedilen ve en iyi bilinen WASP 0247-25 parametrelerinin, kalın hidrojen zarfa sahip modeller ile eşleştiği görülmüştür. Bu sistemin yoldaş bileşeni olan WASP 0247-25B'nin helyum çekirdeğini saran 0.005 $M_{\odot}$'lik kalın hidrojen zarfı bulunmaktadır. Helyum beyaz cücelerin kalın hidrojen zarfıyla doğduğu varsayımı için güçlü gözlemsel veriler, Maxted'in (2013) bu konuyla ilgili çalışmalarını sunduğu makalesinde ortaya konmuştur. WASP 0247-25'in A- tayf sınıfında baş bileşeninin δ Scuti türü zonklamalara sahip olduğu fakat yoldaş bileşenin de ışık eğrisi analizlerinden günde 250 çevrime sahip radyal ve radyal olmayan zonklamalar gösterdiği görülmüştür. Bu sayede çoklu zonklamalara sahip yeni bir değişen yıldız türü olduğu bulunmuştur ve bu bağlamda astrosismolojiyi bu yıldızda incelemek önemli rol oynamaktadır. Fakat ışıkölçüm verilerinin sınırlı olması nedeniyle, bileşenlerin zonklamalarına ilişkin özellikler yeterince analiz edilememiştir.

Şekil 4.2'de, WASP 0247-25 sisteminin ışık eğrisi gösterilmektedir. Şeklin üst kısmında modellerle temsil edilen ışık eğrileri, alt kısımda ise gözlem verilerinden temsillerle elde edilen ışık eğrilerinin çıkarılmasından kalan artık veriler görülmektedir. EL CVn türü çift yıldızların ışık eğrilerinin formunun görüldüğü bu ışık eğrisinde, baş minimum tam olarak tanımlandığı şekliyle

görülmektedir. 0.25 ve 0.75 evredeki iki maksimum neredeyse simetriktir. Ayrıca daha sıcak yıldız nedeniyle oluşan yansıma etkisi, yan minimum etrafındaki parlama ile kendini belli etmektedir ve B bandında en iyi şekilde gözlenmektedir. Şekil 4.3'te ise WASP 0247'nin H-R diyagramındaki konumu gösterilmektedir. Şekilde güneş kütlesi biriminden farklı kütlelere sahip yıldızlar için kuramsal evrim yolları verilmiştir. "*Kırmızı çizgiler*" anakol yıldızlarının, "*mavi çizgiler*" çok düşük kütleli beyaz cücelerin evrim izleridir. Hata çubukları ile verilen "*kırmızı*" ve "*mavi içi dolu daireler*" sırasıyla baş ve yoldaş bileşenleri temsil eder.



Şekil 4.2. WASP 0247-25 EL CVn türü çift yıldız sisteminin ışık eğrisi (Kim et al., 2021).



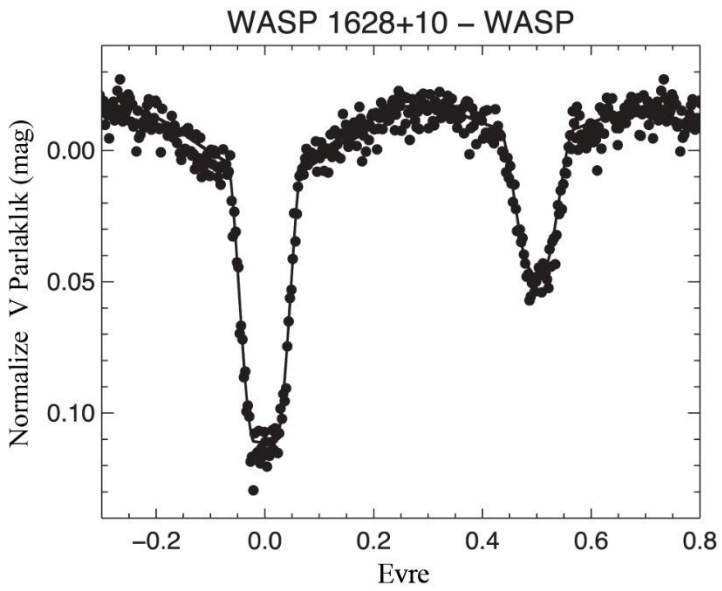
Şekil 4.3. WASP 0247-25 EL CVn türü çift yıldız sisteminin H-R diyagramındaki konumu (Kim et al., 2021).

4.2 WASP 1628+10

1SWASP J162842.31+101416.7 (WASP 1628+10) WASP gözlemleri ile keşfedilen EL CVn türü çift yıldız sistemidir. Bileşenlerinden baş yıldız A2 tayf türünde bir anakol yıldızıdır (WASP 1628+10 A). Yoldaş bileşen ise *soyulmuş kırmızı dev* bir yıldızın kalıntısı olan helyum beyaz cüce öncesi bir yıldızdır (WASP 1628+10 B). Işıkölçüm çalışmaları ile bu sistemde bulunan bileşenlerin kütleleri, yarıçapları ve parlaklıkları belirlenmiştir. Yoldaş bileşenin, daha önceki gözlemlerle bulunan ve modellenen *soyulmuş kırmızı dev* yıldızlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Yoldaş bileşen, çok düşük kütleli bir beyaz cüce olmadan önce, sabit ışıtmada yüksek etkin sıcaklıklara doğru evrimleşen, neredeyse tamamen helyumdan oluşan bir yıldızdır ve bu tür yıldızların gözlemlerine az rastlanılmaktadır. WASP 1628+10 çift yıldız sisteminin dikine hızı ve Gaia paralaksı kullanılarak, öz hareketi ve yörüngesi bulunmuştur. Bunun sonucunda bu çift sistemin ince disk yıldızlarının bulunduğu bölgede olduğu ortaya çıkmıştır.

WASP 1628+10 çift yıldız sisteminin, baş bileşeni A2 tayf türünde bir anakol yıldızıdır. Kütlesi 1.36 ± 0.05 $M_{\odot}$, yarıçapı 1.57 ± 0.02 $R_{\odot}$, sıcaklığı 7500 ± 200 K'dir. Yoldaş bileşenin kütlesi 0.14 ± 0.02 $M_{\odot}$, yarıçapı 0.35 ± 0.01 $R_{\odot}$ ve sıcaklığı 9200 ± 600 K'dir. Işıkölçüm çalışmaları sonucunda elde edilen ışık eğrisi Şekil 4.4'te gösterilmiştir (Maxted et al., 2014b). 0.0 evresindeki baş

minimum sıcak bileşen olan WASP 1628+10 B'nin, daha soğuk bileşen olan WASP 1628+10 A tarafından tutulmasına karşılık gelmektedir. Bileşenlerin farklı sıcaklıklara ve yarıçaplara sahip olmaları ışık eğrisindeki minimum derinliklerinin farklı genliklerde ve biçimlerde olmasına neden olmaktadır. EL CVn yıldızlarının tipik ışık eğrilerinin Algol türü örten çift yıldızların ışık eğrilerine benzer şekillerde olduğu bilinmektedir. Işık eğrileri, daha derin bir baş minimum, keskin giriş-çıkış omuzlarına sahip ve parçalı tutulmadan dolayı daha yuvarlak biçimli bir yan minimum ile karakterize edilmiştir (Chen et al., 2017). Bu sistemin ışık eğrilerinin tutulmalar dışında kalan kısmının Algol türü ışık eğrilerine göre daha elipsoidal bir yapı sergilediği görülür. Evriminin sabit ışıtma evresinin başlangıcındayken, helyum beyaz cüce öncesi yıldız, bileşenine yakın değerlerde yarıçapa ve etkin sıcaklığa sahip olmaktadır. Böyle bir sistemin ışık eğrisi, temas eden bileşenlere ait bir çift sistemin, W UMa (W Ursae Majoris) türü ışık eğrisine benzer bir yapıda tutulma gösterir (Rucinski, 1993).



Şekil 4.4. WASP 1628+10 EL CVn türü çift yıldız sisteminin ışık eğrisi (Maxted et al., 2014a).

Bu yıldızın ışık eğrilerinde kısa dönemli zonklamalar tespit edilmiştir. Bu durumu incelemek adına sistemin fiziksel parametreleri de kullanılarak kuramsal ışık eğrileri hesaplanmıştır. Orijinal ışık eğrilerinden, kuramsal eğrinin çıkarılması ile kalan değişimler zonklama ışık eğrisini verir. Bu analizden giderek çift sistemin

baş bileşeninin δ Scuti türü zonklamalar yaptığı görülmüştür. Çeşitli frekanslarda değişkenlik gösteren zonklamalar saptanmış ve frekansının günde 40 çevrim civarında olduğu bulunmuştur. Çalışmalar devam ettikçe farklı bir zonklama çevrimi keşfedilmiştir. Bu çevrimin frekans sayısı günde 114-129 aralığındadır. Bu tarz bir zonklama döneminin yoldaş bileşenden kaynaklandığını doğrulamak adına baş minimumun ayrıntılı ışıkölçümünün yapılması uygun görülmüştür (Lou, 2020).

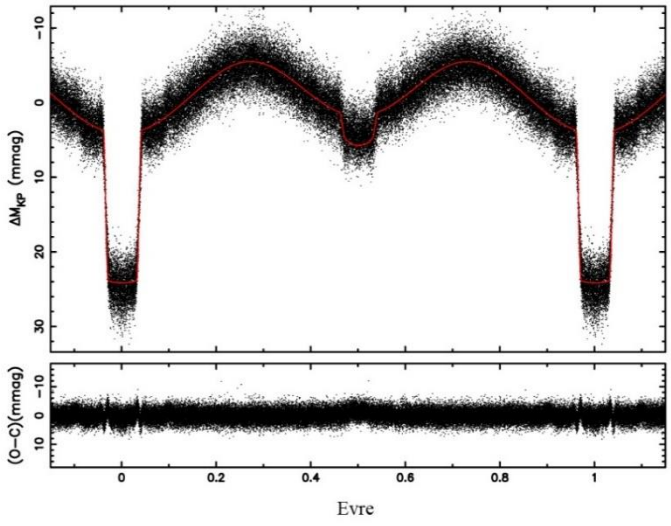
4.3 KIC 8113154

Kepler verileri ile EL CVn türü KIC 8113154 çift yıldız sisteminin keşfi ve sistemin bileşenleri bu kısımda anlatılacaktır. Sistemin baş bileşeni F- tayf sınıfından δ Scuti / γ Dor (melez) türü zonklama özelliklerine sahip bir yıldızdır. Düşük kütleli helyum beyaz cüce öncesi yıldız sistemin yoldaş bileşenidir. δ Scuti ve γ Dor türü zonklayan yıldızlar, geri tür A- tayf sınıfından, erken tür F- tayf sınıfına kadar olan anakol yıldızlarıdır (Bouabid et al., 2009). H-R diyagramında, EL CVn çift yıldızları ile bu yıldızlar aynı bölgede yer almaktadırlar. EL CVn türleri içinden F-tayf sınıfından δ Scuti – γ Dor türü zonklamalar yapan melez bir keşif ilk defa bu çift sistem ile sunulmaktadır (Zhang et al., 2019). Bugüne kadar yapılan çalışmalarda zonklama özelliklerine sahip 9 tane EL CVn türü çift sistem keşfedilmiştir. Bu yıldızlar arasında 6 çift sistemin δ Scuti türü zonklamalar gösterdiği (Maxted et al., 2014a; Faigler et al., 2015; Guo et al., 2017; Zhang et al., 2017; Wang et al., 2018), 3 çift sistemin ise zonklamalarının düşük kütleli helyum beyaz cüce öncesi bileşenlerden kaynaklandığı bulunmuştur (Maxted et al., 2013; Maxted et al., 2014b; Zhang et al., 2017). Yapılan çalışmalarda ve gözlemlerde EL CVn türleri içinde, γ Dor türünde bileşene sahip bir sisteme rastlanılmamıştır.

Bu çift sistem için araştırmalar, 4 yıllık Kepler verileri kullanılarak yapılmıştır. KIC 8113154 EL CVn türü çift yıldız sisteminde zonklamaların, F- tayf sınıfından baş bileşene ait olduğu yapılan analizler ile belirlenmiştir. δ Scuti / γ Dor (melez) olarak adlandırılan baş bileşenin, düşük derecede p modunda (basınç) ve yüksek derecede g modunda (çekim) zonklamalar yaptığı görülmüştür. Farklı salınım modları yıldızın içindeki farklı derinliklerle ilgilidir ve yıldızın katmanları hakkında bilgiler verir. Yıldızda g modunda yapılan zonklamalar, yıldızların iç yapısını keşfetmek adına çok önemlidir (Hoyman ve Çakırlı., 2020).

Bu zonklamalar araştırılarak KIC 8113154 çift sistemindeki baş bileşenin çekirdeğinin ve zarfının farklı dönüşlere sahip olduğu görülmüştür.

Zhang (2019) tarafından yapılan ışıkölçüm ve evrim modellerine göre bu çift sistemin fiziksel parametreleri elde edilmiştir. Bu çalışmada KIC 8113154 sisteminin yörünge dönemi 2.587 gün olarak bulunmuştur. F- tayf sınıfından zonklama yapan baş bileşenin etkin sıcaklığı 7119 K (varsayılan değer) ve helyum beyaz cüce öncesi yıldız olan yoldaş bileşenin etkin sıcaklığı ise 15490 ± 120 K'dir. Bileşenlerin kütleleri ve yarıçapları sırasıyla 1.65 ± 10 $M_{\odot}$, 0.26 ± 0.02 $M_{\odot}$ ve 2.38 ± 0.05 $R_{\odot}$, 0.13 ± 0.01 $R_{\odot}$'tir. Şekil 4.5'te KIC 8113154'ün ışık eğrisi gösterilmektedir (Zhang et al., 2019). "*Siyah noktalar*" gözlenen ışık eğrisini, "*kırmızı eğri*" ise çift yıldızların ışık eğrilerini modellemek için yapılan kuramsal eğriyi temsil etmektedir. Şekilde gözlenen verilerden hesaplanan verilerin çıkarılması ile elde edilen (O-C) artık verileri bulunmaktadır. Işık eğrisi, EL CVn türü çift sistemlerin ışık eğrileri ile uyuşmaktadır ve "*kutu*" şeklinde baş minimum ve sığ yan minimum karakteristik ışık eğrisine en iyi örneklerdendir. Sıcak bileşenden kaynaklı yansıma etkisi, ışık eğrisinde tutulmalar dışındaki elipsoidal yapı ile görülmektedir.



Şekil 4.5. KIC 8113154 EL CVn türü çift sisteminin ışık eğrisi. "*Siyah"* noktalar birbirine simetrik olan ışık eğrisini, "*kırmızı eğri*" çift modeller için yapılan kuramsal eğriyi temsil etmektedir (Zhang et al., 2019).

5. WASP, PALOMAR ve KEPLER GÖZLEMLERİ İLE BULUNAN EL CVn TÜRÜ ÇİFT YILDIZLAR

Tez kapsamına ilişkin araştırılan çalışmalar içerisinde, EL CVn türü örten çift yıldızların incelenebilmesi için farklı gözlemevlerinin verilerinden yararlanıldığı görülmüştür. Bu çalışmalarda (Maxted et al., 2014a; Roestel et al., 2018; Chen et al., 2017; Wang et al., 2020), ışık eğrilerinin elde edilmesinden yıldızların fiziksel parametrelerinin belirlenmesine, modellemelerden çıkan sonuçlar ile çift sistemlerde bulunan bileşenlerin evrim yollarına kadar birçok araştırma yapılmıştır. WASP, 2004 yılından itibaren La Palma ve Güney Afrika'da bulunan teleskoplarla, ana hedef olarak ötegezegen araştırmalarını geniş alan taramalarıyla otomatik olarak yapan bir projedir (Butters et al., 2010). 1948-1993 yılları arasında dünyanın en büyük teleskobuna sahip olan Palomar Gözlemevi, ABD'nin San Diego yakınlarında bulunan bir araştırma merkezidir. Palomar Gözlemevi'nde aktif olarak kullanılan üç teleskop bulunur. Geniş alan gökyüzü taraması yöntemiyle uzak ve sönük gökadalar ile tek ve çoklu yıldız sistemleri ayrıntılı olarak incelenmektedir. Kepler Uydusu görevi ise NASA'nın keşif programı çerçevesinde fırlatılmış bir uzay teleskobudur. Bu teleskop ile Gökada'nın farklı bölgeleri taranarak ötegezegen keşifleri yapılmıştır. Kepler Uzay Teleskobu gökadamız içinde yaşanabilir bölgelerdeki güneş benzeri yıldızları ve etrafındaki gezegenleri araştırmıştır. Gezegenlerin yapılarının incelemesinin yanında, çoklu yıldız sistemlerini de araştıran Kepler Uzay Teleskobu, bu sayede farklı yıldızların da incelenmesine olanak sağlamıştır.

Bu tez çalışmasında, WASP ve PALOMAR verileri kullanılarak keşfedilen EL CVn türü yıldızlar ve ışık eğrileri incelenmiştir. Farklı makalelerdeki Kepler veri tabanı kullanılarak çalışılan EL CVn türü çift yıldızlarına bu bölüm içinde çok az yer verilecektir. Kepler verileri ile elde edilen ışık eğrileri ve yıldızların fiziksel parametreleri tez kapsamındaki çalışmalar için yeterli olmamıştır. Yıldızların H-R diyagramı üzerinde konumlarının belirlenmesi, ışık eğrilerine ilişkin gruplamalar ve O-C analizi gibi ayrıntılı incelemeler bu yıldızları kapsamamaktadır.

5.1 WASP Veri Tabanından Alınan EL CVn Türü Çift Yıldızlar

WASP veri tabanı ile elde edilen 1SWASP J024743.37−251549.2, EL CVn türü örten çift yıldız sistemlerinin öncüsü olarak tanıtılmıştır. Maxted (2011) tarafından yapılan araştırmada, bu sistemin ışık eğrisine benzer özelliklere sahip ışık eğrileri WASP veri tabanının bir kısmı üzerinde taranmıştır. Bulunan 17 tane helyum beyaz cüce öncesi bileşene sahip EL CVn türü çift sistem, Maxted'in (2014a) makalesinde ele alınmıştır.

Bu bölüm içerisinde, 17 tane EL CVn türü yıldızın fiziksel parametreleri ve ışık eğrileri sunulacaktır. Çizelge 5.1'de 17 tane EL CVn çift yıldızının WASP kodları, sistemlerin yörünge dönemleri, V parlaklık değerleri, baş ve yoldaş bileşenlerin etkin sıcaklıkları hatalarıyla birlikte verilmiştir. Sistemde *"A"* olarak gösterilen yıldız baş bileşeni, *"B"* ise yoldaş bileşeni temsil eder. Verilen değerlerin gözlemlerle ve modellemelerle uyum içinde olduğu sonucuna varılmıştır (Maxted et al., 2014a).

Çizelge 5.1. WASP veri tabanından elde edilen 17 tane EL CVn türü çift yıldız sisteminin dönem (gün), V parlaklık (mag) ve etkin sıcaklık (K) değerleri (Maxted et al., 2014a).

1SWASP Kodları	Dönem (gün)	Parlaklık (V) (mag)	Etkin Sıcaklık (K) (A)	Etkin Sıcaklık (K) (B)
J013129.76+280336.5	1.882	10.9	9500 ± 700	10500 ± 2000
J034623.68−215819.5	0.928	9.6	7400 ± 200	9950 ± 400
J035838.33−311638.3	2.189	11.4	7600 ± 300	12000 ± 2000
J084356.46−113327.5	0.793	10.7	6900 ± 150	9300 ± 200
J084558.78+530209.8	0.844	12.9	8000 ± 400	15000 ± 1800
J093957.74−191941.2	1.073	12.1	7150 ± 250	10150 ± 100
J100927.98+200519.4	1.395	12.3	8600 ± 400	10800 ± 700
J102122.83−284139.6	0.901	11.1	7300 ± 300	9800 ± 500
J132357.01+433555.4	0.795	9.4	8250 ± 350	12000 ± 900
J142951.60−244327.4	2.173	10.8	7150 ± 200	9700 ± 300
J162545.15−043027.9	1.526	10.4	9500 ± 500	11500 ± 1500
J162842.31+101416.7	0.720	12.9	7200 ± 300	9200 ± 250
J181417.43+481117.0	1.798	10.7	8000 ± 300	12500 ± 1800
J204746.49+043602.0	1.563	11.8	8300 ± 500	9000 ± 1700
J210129.26−062214.9	1.290	11.5	9000 ± 200	13500 ± 1000
J224905.95−693401.8	1.162	12.5	7400 ± 200	8800 ± 100
J232812.74−395523.3	0.768	13.3	7500 ± 450	9400 ± 450

WASP 0247-25'in ışık eğrisine benzer, örten çift sistemler aranmış ve 17 tane EL CVn türü çift yıldız bulunmuştur. Bunlardan 16 tanesi yeni keşif olarak raporlanmıştır. Yıldızların bileşenlerinden birinin A/F tayf sınıfından bir anakol yıldızı olduğu ve diğer bileşenlerin ise helyum beyaz cüce öncesi yıldızlara sahip olduğu raporlanmıştır. Keşfedilen sistemlerin yörünge dönemleri 0.72 ve 2.19 gün aralığındadır. EL CVn çift yıldızlarının ışık eğrilerinde, baş minimum "*kutu*" şekilli görünümdedir. Genellikle dik inişlerin ardından tam tutulma gösteren ve dik bir çıkış ile karakterize edilen ışık eğrileri vardır. Yan minimumlar ise genellikle daha sığ parçalı tutulma olmaktadır.

Daha sıcak ve küçük olan yoldaş bileşenin, baş bileşen tarafından örtülmesi ile tam tutulma gösteren ışık eğrileri görülmektedir. Biçimleri ise Algol türü çift sistemlerin ışık eğrilerine benzemektedir (Maxted et al., 2014a). Işık eğrilerinde minimum derinliklerinin farklı olduğu durumlar, bileşenler arasında sıcaklık farkı olduğunu göstermektedir. Fakat bu sonuca doğrudan varmadan önce bileşenlerin yarıçap bilgilerine de ihtiyaç duyulmaktadır. Maxted (2014a) çalışmasında, WASP 1628+10'un WASP ve PIRATE gözlemleri ile elde edilen iki ışık eğrisi bulunmaktadır. EL CVn çift yıldızlarına göre daha sönük olmasından dolayı farklı iki teleskop ile yıldızın verileri karşılaştırılmış, ışık eğrilerinin birbirleri ile uyum içinde olduğu görülmüştür. Ayrıca 17 yıldızdan biri olan WASP 0131+28 çift sistemine ait ışık eğrisinde minimum derinlikleri birbirine çok yakındır. Bu çift sistem ile ilgili incelenen güncel makalede, WASP 0131+28'de çiftin sıcaklıkları sırasıyla 10000 ± 200 K ve 11186 ± 235 K'dir. Baş bileşenin yarıçapı 1.824 ± 0.006 $R_{\odot}$ ve yoldaş bileşenin yarıçapı 0.528 ± 0.003 $R_{\odot}$ olarak verilmiştir (Lee et al., 2020). Çift sistemin bileşenlerinin sıcaklık değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.

5.2 PALOMAR Veri Tabanından Alınan EL CVn Türü Çift Yıldızlar

Palomar Gözlemevi'nde bulunan teleskoplar ile farklı yıldızlara ait ışık eğrileri, R (6516 Å) ve g' (4641 Å) filtreleri kullanılarak 2008 yılından 2016 yılına kadar elde edilen verilerle modellenmiştir. Ardından 1000 adet yıldızın ışık değişimleri görsel olarak incelenmiş ve yapılan analizler sonucunda 36 tane EL

CVn türü çift yıldız bulunmuştur (Roestel et al., 2018). Bulunan yeni sistemlerin yörünge dönemleri 0.46 ve 3.8 gün aralığındadır. R ve g' parlaklıkları ise ~14 ve 16 kadir aralığında bir değişim göstermektedir. Elde edilen helyum beyaz cüce öncesi yıldızların yarıçapları 0.3 – 0.7 R_Θ ve etkin sıcaklıkları 8000 – 17000 K aralığındadır. Roestel'in (2018) sonuçlarının yıldız evrim modelleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Fakat 0.12 – 0.28 M_Θ aralığında olan kütle değerleri beklenenden daha farklı çıkmıştır.

Çizelge 5.2'de 36 tane EL CVn türü çift yıldızın dönem, kütle, yarıçap ve etkin sıcaklık bilgileri hata değerleri ile verilmiştir. Bazı yıldızların parametreleri hesaplanırken dikine hız ölçümünden yararlanılmıştır ve bu yıldızlar "*RV*" üst simge ile belirtilmiştir. Çizelgede baş yıldızlar "*1*" yoldaş yıldızlar "*2*" ile temsil edilmektedir. A- ve F- tayf sınıfından baş yıldızların kütleleri 1.3 ve 2.4 M_Θ, yarıçapları 1.15 ve 2.7 R_Θ, etkin sıcaklıkları ise 6600 – 10000 K aralığındadır. Bu değerler anakol yıldızlarının fiziksel parametreleri ile tutarlı bir sonuç sergilemektedir (Chen et al., 2017).

Çizelge 5.2. 36 tane EL CVn türü çift sisteminin fiziksel parametreleri (Roestel et al., 2018).

Palomar Kodları	**Dönem (gün)**	**Kütle (M_Θ) (1)**	**Kütle (M_Θ) (2)**	**Yarıçap (R_Θ) (1)**	**Yarıçap (R_Θ) (2)**	**Etkin Sıcaklık (K) (1)**	**Etkin Sıcaklık (K) (2)**
1600y^{RV}	1.183892	1.62 ± 0.04	0.17 ± 0.01	2.41 ± 0.07	0.46 ± 0.02	6930 ± 100	8900 ± 110
1600ad^{RV}	1.084045	1.76 ± 0.04	0.23 ± 0.01	1.83 ± 0.05	0.35 ± 0.02	8050 ± 120	10490 ± 200
1700do	3.050758	2.40 ± 0.06	0.81 ± 0.25	2.34 ± 0.13	0.33 ± 0.03	9890 ± 90	17100 ± 1400
1600aa	0.693456	1.67 ± 0.05	0.50 ± 0.09	1.67 ± 0.04	0.55 ± 0.02	7880 ± 190	9300 ± 400
1601p^{RV}	1.221589	1.82 ± 0.06	0.14 ± 0.02	1.65 ± 0.14	0.34 ± 0.04	8600 ± 160	11700 ± 500
1501bh^{RV}	0.620414	1.30 ± 0.04	0.12 ± 0.01	1.23 ± 0.07	0.20 ± 0.01	6870 ± 110	11100 ± 400
1601q	1.251506	1.85 ± 0.08	0.30 ± 0.18	1.93 ± 0.15	0.46 ± 0.04	8300 ± 200	10700 ± 700
1601cl^{RV}	0.891735	2.02 ± 0.06	0.28 ± 0.01	2.44 ± 0.07	0.52 ± 0.02	8290 ± 200	10100 ± 300
1402de	0.618969	1.61 ± 0.04	0.36 ± 0.13	1.56 ± 0.07	0.45 ± 0.02	7860 ± 150	9300 ± 300
1607aa	0.846312	1.85 ± 0.05	0.30 ± 0.07	1.81 ± 0.08	0.38 ± 0.02	8470 ± 160	10300 ± 300
1607v	0.719836	1.58 ± 0.06	0.20 ± 0.05	1.83 ± 0.16	0.16 ± 0.03	7260 ± 120	10900 ± 500
1607t^{RV}	0.875951	1.40 ± 0.05	0.16 ± 0.01	1.87 ± 0.05	0.38 ± 0.01	6600 ± 140	8600 ± 200
1607ab^{RV}	0.773099	1.40 ± 0.03	0.19 ± 0.01	1.45 ± 0.05	0.32 ± 0.01	6980 ± 100	8810 ± 80
1608ab	0.610172	1.50 ± 0.06	0.11 ± 0.10	1.39 ± 0.04	0.52 ± 0.02	7400 ± 200	7900 ± 400
1612al	0.636926	1.38 ± 0.08	0.16 ± 0.09	1.16 ± 0.05	0.37 ± 0.02	7280 ± 110	10300 ± 300
1512bf^{RV}	0.607434	1.39 ± 0.02	0.17 ± 0.01	1.53 ± 0.02	0.32 ± 0.01	6910 ± 90	9740 ± 180
1613s	1.142070	1.83 ± 0.08	0.17 ± 0.05	2.72 ± 0.30	0.25 ± 0.05	7350 ± 140	13700 ± 800

Çizelge 5.2. devam

Palomar Kodları	Dönem (gün)	Kütle ($M_\odot$) (1)	Kütle ($M_\odot$) (2)	Yarıçap ($R_\odot$) (1)	Yarıçap ($R_\odot$) (2)	Etkin Sıcaklık (K) (1)	Etkin Sıcaklık (K) (2)
1613u	0.564490	1.52 ± 0.02	0.27 ± 0.04	1.65 ± 0.04	0.37 ± 0.01	7340 ± 70	9690 ± 160
1615ag	0.680690	1.52 ± 0.05	0.27 ± 0.07	1.63 ± 0.05	0.32 ± 0.02	7370 ± 200	10200 ± 400
1615v	0.559405	1.39 ± 0.03	0.13 ± 0.03	1.50 ± 0.04	0.33 ± 0.01	6920 ± 120	9400 ± 300
1515ay	0.464287	1.33 ± 0.03	0.15 ± 0.04	1.30 ± 0.02	0.46 ± 0.01	6800 ± 100	7930 ± 150
1615w	1.440715	1.61 ± 0.05	0.24 ± 0.05	2.59 ± 0.14	0.40 ± 0.03	6690 ± 110	10300 ± 200
1615ao	0.895452	1.64 ± 0.05	0.41 ± 0.12	1.82 ± 0.05	0.64 ± 0.03	7580 ± 170	8700 ± 160
1615u	0.777735	1.50 ± 0.09	0.24 ± 0.10	1.27 ± 0.14	0.16 ± 0.02	7400 ± 200	12200 ± 600
1616cr	0.564969	1.40 ± 0.03	0.07 ± 0.02	1.36 ± 0.02	0.46 ± 0.01	7060 ± 120	8000 ± 170
1617n[RV]	2.336778	1.80 ± 0.04	0.18 ± 0.02	2.41 ± 0.12	0.38 ± 0.03	7500 ± 110	11600 ± 400
1617m[RV]	3.772900	1.68 ± 0.06	0.14 ± 0.03	2.57 ± 0.08	0.69 ± 0.03	6990 ± 190	9320 ± 190
1619l[RV]	1.159999	1.56 ± 0.05	0.17 ± 0.01	2.13 ± 0.14	0.34 ± 0.04	6870 ± 120	9200 ± 150
1521ct	1.172496	1.82 ± 0.06	0.36 ± 0.29	1.72 ± 0.11	0.56 ± 0.04	8520 ± 190	9800 ± 300
1621ax	1.018152	1.69 ± 0.06	0.30 ± 0.07	2.14 ± 0.14	0.17 ± 0.03	7350 ± 170	11800 ± 700
1521cm[RV]	0.685477	1.49 ± 0.02	0.21 ± 0.01	1.49 ± 0.03	0.43 ± 0.01	7290 ± 70	9240 ± 90
1622by	0.748668	1.69 ± 0.07	0.31 ± 0.07	1.84 ± 0.07	0.33 ± 0.02	7700 ± 300	11100 ± 1400
1522cc	0.571785	1.40 ± 0.04	0.26 ± 0.04	1.62 ± 0.05	0.27 ± 0.01	6860 ± 120	9570 ± 190
1622aa	0.766129	1.60 ± 0.08	0.16 ± 0.05	1.74 ± 0.10	0.26 ± 0.03	7500 ± 300	10900 ± 1300
1622bt	0.688416	1.65 ± 0.06	0.29 ± 0.04	1.74 ± 0.05	0.29 ± 0.01	7700 ± 200	12200 ± 1000
1723aj	1.108806	1.57 ± 0.05	0.18 ± 0.03	2.51 ± 0.07	0.23 ± 0.02	6640 ± 130	11000 ± 400

Çizelge 5.2'de verilen yoldaş bileşenlerin sıcaklıkları 7900 – 17000 K aralığındadır. Elde edilen sistem parametrelerinden görülmektedir ki yoldaş yıldız olan helyum beyaz cüceler, A- ve F- tayf sınıfından olan baş bileşenlerden daha sıcaktırlar. Düşük kütleli beyaz cüce bileşenli çift yıldız evrim modellerine yönelik kuramsal modeller geliştirmek için, helyum beyaz cüce öncesi yıldızları incelemek ve çalışmak, bu konulardaki modelleri teste tabi tutmak adına önem taşımaktadır. Roestel (2018) makalesinde, Palomar verileri kullanılarak elde edilen 36 sistemin ışık eğrisine yer verilmiştir. Bu çalışmada R ve g' filtreleri için geniş bir veri seti kullanılmıştır. R filtresi için ~250 milyon, g' filtresi için ~50 milyon gökcismi verisi incelenmiştir. R ve g' için 16 kadirden daha parlak olan yıldızlar seçilmiş, tutulmaların göründüğü çift sistemler aranmıştır. Daha önce EL CVn türü çift sistemlerin karakteristik ışık eğrilerine benzer ışık eğrilerine sahip yıldızlar üzerinde durulmuştur. Sistemlere ait kütle oranları elde edilen ışık eğrilerinden bulunmuştur. Bulunan değerler 0.08 – 0.2 aralığındadır. 36 tane çift sistem içinde "1700do" yıldızının kütle oranı 0.33 gibi aykırı bir değere sahiptir ve verilen kütle oranı beklenen aralığın içinde bulunmamaktadır. Bazı çift yıldızların ışık

eğrilerinde, yüksek derecede saçılmalar görülmüştür fakat saçılmaların nedenleri üzerinde durulmamıştır. Ayrıca EL CVn türü çift yıldızların bazı bileşenlerinin sahip olduğu zonklama ilgili bilgiler teknik yetersizlikler nedeniyle Palomar verilerinden elde edilememiştir. Daha fazla fotometrik çalışma ve çalışmalara ilişkin analizler yapılması gerektiği üzerinde durulmuştur.

5.3 Kepler Veri Tabanından Alınan EL CVn Türü Çift Yıldızlar

Bu tez kapsamında, Kepler verileri ile elde edilen EL CVn türü çift yıldızlarından, 7 adet ele alınmıştır. 4. kısım içinde ele alınan KIC 8113154 EL CVn türü çift sistemine bu bölümde tekrar değinilmeyecektir. KIC 6889235 (KOI 74) ve KIC 8823868 (KOI 81) (Kerkwijk et al., 2010), KIC 9164561 ve KIC 10727668 (Rappaport et al., 2015) çift yıldızları, incelendikleri çalışmalar içinde EL CVn türü çift yıldızlar olarak adlandırılmamışlardır. Maxted, ilk defa EL CVn türü çift sistemlere 2014 yılında yayınladığı makalede değinmiştir (Maxted et al., 2014a). Yukarıda verilen dört çift sistemin EL CVn türü yıldızlar grubuna ait olduğunu daha sonraki yazarlar ifade etmiştir (Chen et al., 2017).

KIC 6889235 (KOI 74) ve KIC 8823868 (KOI 81) Kepler'in ilk keşifleri arasında yer almaktadır. Her iki sistem de düşük kütleli beyaz cüce bileşene sahiptir. Düşük ışıtma değerine sahip yoldaş yıldızların (KIC 6889235 $L_1/L_\odot = 25.6 \pm 2.4$, $L_2/L_\odot = 0.05 \pm 0.02$; KIC 8823868 $L_1/L_\odot = 77.3 \pm 9.6$, $L_2/L_\odot = 0.9 \pm 0.4$), baş bileşenlerinden daha sıcak olduğu görülmüştür (Kerkwijk et al., 2010). Verilen makale içinde yıldızların dikine hız ölçümlerinden ve tayf türlerinden yola çıkılarak çift sistemlerin bileşenlerinin kütleleri bulunmuştur. Beyaz cücelerin, baş yıldızlara göre daha hızlı evrimleştikleri ifade edilmiştir. Bundan dolayı beyaz cücelerin başlangıç kütlelerinin, A1V tayf türünden baş bileşenin kütlesine göre daha büyük olduğu sonucuna varılmıştır. Sistemlerin evrimleri ile ilgili olarak kararlı kütle aktarımı süreci üzerinde durulmuştur.

KIC 9164561 ve KIC 10727668 EL CVn türü çift yıldızlardır. Her iki sistemin de baş yıldızları A-tayf sınıfından bir anakol yıldızıdır. Yoldaş bileşenler ise *soyulmuş kırmızı dev* evresinin ardından düşük kütleli helyum beyaz cüceye dönüşen yıldızlardan oluşmaktadır. Yapılan gözlemler sonucunda KIC 9164561

çift sistemine ait, yörünge dönemi 8-14 yıl aralığında değişen üçüncü bir bileşenin var olduğu saptanmıştır. Üçüncü bileşen kütlesinin $\leq 0.8\ M_{\odot}$ ile sınırlı olduğu belirtilmiştir (Rappaport et al., 2015).

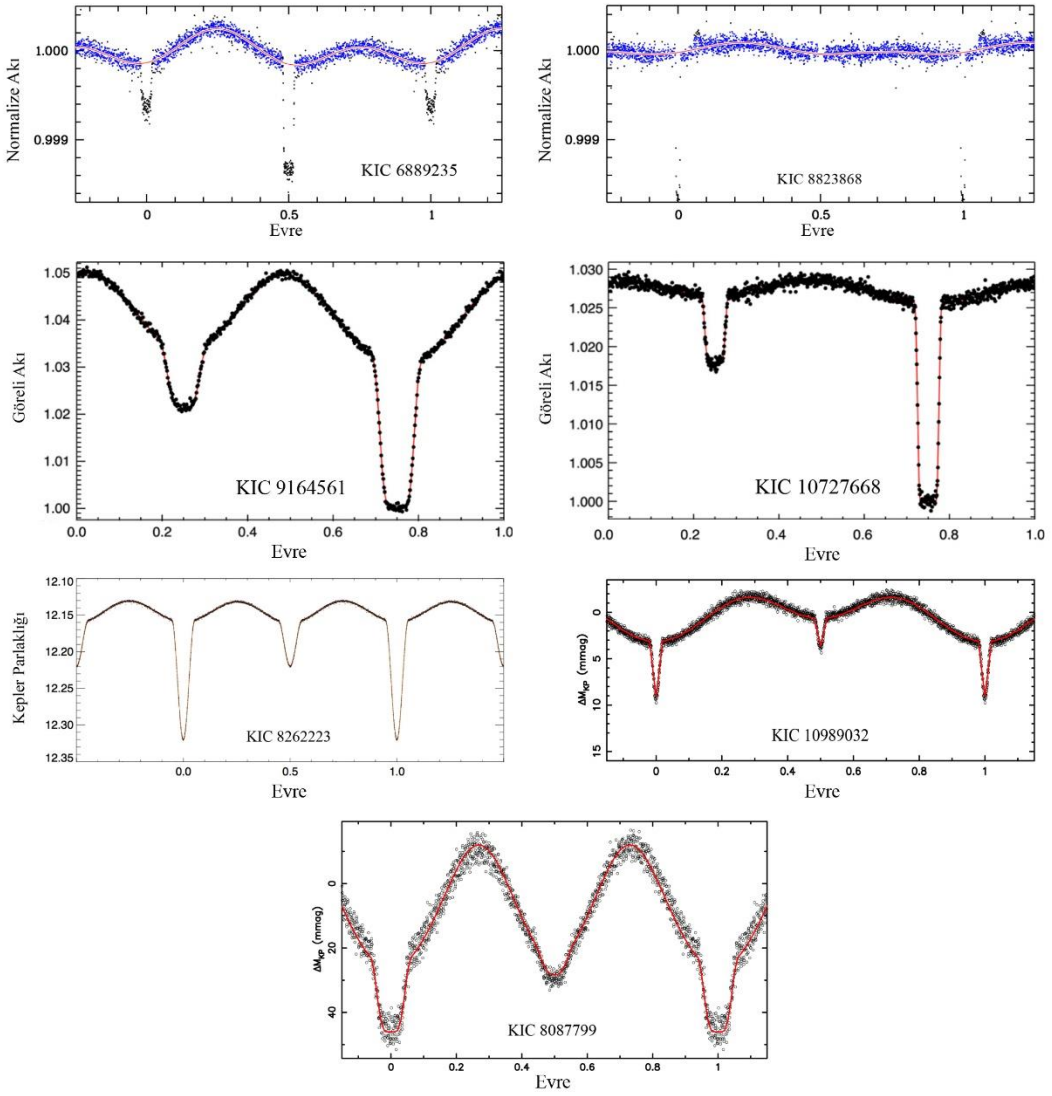
KIC 826223 çift sistemi, δ Scuti türü baş bileşenden ve çok düşük kütleli helyum beyaz cüce öncesi yoldaş bileşenden oluşmuştur. Işık eğrisi analizlerinden, sistemin baş bileşeninin dikine ve dikine olmayan zonklamalar yaptığı görülür. Bu sistemin evriminin ilerleyen dönemlerinde bir EL CVn türü çift yıldızına dönüşebileceği öngörülmektedir. KIC 826223 için yapılan kuramsal modellemelerin, EL CVn türü çift sistemlere ait fiziksel parametreler ve evrim açısından elde edilmiş veriler ile uyum içinde olduğu görülmüştür. KIC 826223 çift sistemindeki beyaz cüce olan yoldaş bileşenin, kararlı kütle aktarımını henüz yeni tamamladığı tahmin edilmektedir (Guo et al., 2017). Bu tür zonklayan bir bileşen ve düşük kütleli beyaz cüce içeren sistemler üzerinde çalışmak, çok düşük kütleli ve yakın çift sistemlerin evrimini anlamak adına önem taşımaktadır.

KIC 10989032 ve KIC 8087799 çift yıldız sistemleri de δ Scuti türü baş yıldızlara ve düşük kütleli beyaz cüce yoldaş bileşenlere sahip EL CVn türü çift sistemlerdir. KIC 10989032, yarı-ayrık Algol türü bir çift sistemdir. Her iki sistem çoklu zonklama özellikleri göstermektedir (Zhang et al., 2017). Çizelge 5.3'te Kepler verileri ile elde edilmiş 7 tane EL CVn türü çift yıldız sisteminin fiziksel parametreleri listelenmiştir. Çalışmalardan alınan verilerde, ilk dört sistemin değerleri hatalarıyla verilmektedir. Diğer üç sistemin hata değerleri bulunmamaktadır. Sistemdeki bileşenlere ait tayfsal ve ışıkölçüm verilerindeki yetersizliklerden kaynaklı hata değerlerinin olmadığı belirtilmiştir.

Çizelge 5.3. 7 tane EL CVn türü çift yıldız sisteminin fiziksel parametreleri (Kerkwijk et al., 2010; Rappaport et al., 2015; Guo et al., 2017 and Zhang et al., 2017).

Kepler Kodları	Dönem (gün)	Kütle ($M_\odot$) (1)	Kütle ($M_\odot$) (2)	Yarıçap ($R_\odot$) (1)	Yarıçap ($R_\odot$) (2)	Etkin Sıcaklık (K) (1)	Etkin Sıcaklık (K) (2)
KIC 6889235	5.188750	2.22 ± 0.14	0.22 ± 0.03	1.90 ± 0.04	0.04 ± 0.01	9400 ± 150	13000 ± 1000
KIC 8823868	23.87760	2.71 ± 0.19	0.25 ± 0.03	2.93 ± 0.14	0.12 ± 0.01	10000 ± 150	17000 ± 1300
KIC 9164561	1.267040	2.02 ± 0.06	0.19 ± 0.01	2.54 ± 0.03	0.28 ± 0.01	7870 ± 120	10410 ± 200
KIC 10727668	2.305897	2.22 ± 0.10	0.27 ± 0.04	1.69 ± 0.04	0.15 ± 0.01	9696 ± 300	14110 ± 440
KIC 8262223	1.613014	1.94	0.20	1.67	1.31	9128	6849
KIC 10989032	2.305097	2.64	0.24	2.68	0.51	8630	10286
KIC 8087799	0.777735	2.20	0.16	2.75	0.21	8092	13347

Şekil 5.1'de 7 tane EL CVn türü çift yıldız sisteminin ışık eğrileri görülmektedir. KIC 6889235 sisteminde, "*mavi noktalar*" tutulma ve geçiş zamanları dışında kalan gözlemsel verileri, "*kırmızı çizgi*" mavi noktalar üzerinden geçirilen en iyi eğriyi temsil eder. KIC 9164561 ve KIC 10727668 çift yıldız sistemlerinin ışık eğrileri sırasıyla, 1.267040 ve 2.305897 günlük yörünge dönemleri için elde edilmiştir ve geçirilen kırmızı eğriler modellerle uyumludur (Rappaport et al., 2015). KIC 8262223'ün elde edilen ışık eğrisi üzerinden yapılan analizler sonucunda, günde 60 zonklama döngüsüne sahip olduğu ve δ Scuti türü zonklamanın baş yıldızdan kaynaklandığı ortaya çıkmıştır (Guo et al. 2017). KIC 10989032 sisteminin ışık eğrisinin HW Vir yarı-ayrık Algol türü çift yıldız sisteminin ışık eğrisine benzer olduğu belirtilmiştir. Işık eğrisindeki dar tutulma biçimi, kısa yörünge dönemine bağlı olarak düşük kütleli bir bileşenin varlığını belirtir. Tutulmalar dışı görülen sinüs benzeri değişim, daha sıcak bileşenden dolayı oluşan yansıma etkisinden kaynaklanmaktadır. KIC 8087799'un ışık eğrisi analizinden, KIC 10989032 çift sisteminde olduğu gibi, baş bileşenden kaynaklanan δ Scuti türü zonklamalar görülmüştür (Zhang et al. 2017).



Şekil 5.1. Kepler uydusu verileri ile elde edilen 7 tane EL CVn türü çift yıldız sisteminin ışık eğrisi (Kerkwijk et al., 2010; Rappaport et al., 2015; Guo et al., 2017; Zhang et al., 2017).

6. BULGULAR

Bu bölüm içerisinde, EL CVn türü çift yıldız sistemlerine ilişkin çalışmalarımızdan elde edilen bulgular açıklamalarıyla birlikte sunulacaktır. Bölüm 6.1'de çift yıldız sistemlerindeki dönem değişimlerinin genel açıklaması, bölüm 6.2'de EL CVn'nin ışık eğrisi ve O-C çalışması, bölüm 6.3'te EL CVn türü çift yıldızların ışık eğrilerinin gruplandırılması ve bölüm 6.4'te ise EL CVn türü yıldızların H-R diyagramındaki konumları ayrıntılı olarak anlatılacaktır. Çalışmamızın başlangıcında, bu yıldız sistemlerinin varlığını ortaya koyan ve yaptığı çalışmaları bilimsel makalelerde kaleme alan P.T.F. Maxted ile veri paylaşımı üzerine bir yazışma yapılmıştır (Maxted, 2021, yazılı görüşme). Maxted tarafından bizimle paylaşılan ve WASP üzerinden elde edilen verilerle, ayrıntıları Bölüm 6.1'de söz edilen EL CVn yıldızına ait ışık eğrisi çizdirilmiştir.

EL CVn türü çift yıldız sistemleri, kararlı kütle aktarımı sonucunda oluştuğu önerildiği için, kütle aktarımının yörünge dönemine herhangi bir etkisinin olup olmadığı yapılacak dönem değişim analizleriyle saptanabilir. Bu analiz için EL CVn sisteminin ışık eğrilerinin tutulma gösteren evrelerine ilişkin parlaklık değişimleri zamana karşı grafiklendirilmiş, baş ve yan minimum zamanları PERANSO programı[1] kullanılarak dönem değişim analizi çalışılmıştır.

Çalışmamızın diğer bir aşamasında, 50 tane EL CVn çift sisteminin gruplandırılması yapılmıştır. Bu tür sistemlerin ışık eğrilerinin görsel bakış açısıyla iki grup altında toplanabileceği açıkça kendini belli etmektedir. Gerekli gruplandırma işlemi yapıldıktan sonra bu grupları oluşturan sistemlerin parametrelerinde belirgin ayıraçların olup olmadığı araştırılmıştır. Benzer gruplama çalışmalarının yakın zaman içinde yapılıp yapılmadığı araştırılarak neredeyse tüm EL CVn türü yıldızların aynı çalışma içinde bir bütün olarak ayrıntılı incelenmediği görülmüştür.

[1] www.cbabelgium.com/peranso/

Makalelerden alınan etkin sıcaklık ve yüzey çekim ivmesi parametreleri ile 36 tane EL CVn çift yıldızının konumunun H-R diyagramı üzerinde noktalanması çalışmanın son kısmını oluşturmaktadır. Çift sistemlere ait bileşenlerin H-R diyagramında bulundukları yerler, özellikle helyum beyaz cüce yıldızlarının konumları belirlenmiştir. Çünkü çok düşük kütleli beyaz cüceler için yapılan araştırmalarda, bu tür yıldızların evrimini anlamak sürekli karşılaşılan önemli bir konu olmaktadır. Helyum ve karbon çekirdeğe sahip beyaz cüceler ve DA beyaz cücelerinin parametreleri araştırılarak bazı grafikler elde edilmiştir. Bu grafikler üzerine EL CVn bileşenlerinden biri olan helyum beyaz cücelerin konumları noktalanmış ve diğer beyaz cüce türlerinin konumları ile karşılaştırılmıştır.

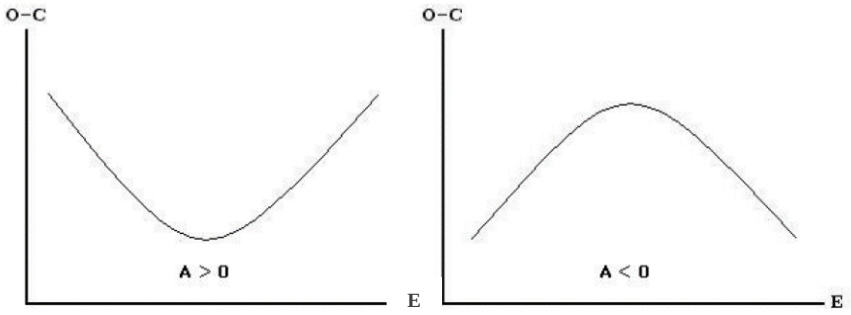
6.1 Çift Yıldız Sistemlerinde Dönem Değişimi

Çift yıldız sistemlerinde, farklı etkenlerden kaynaklanan nedenlerden dolayı yörünge dönemleri değişim gösterebilir. Bu dönem değişiminin nedenini belirlemek için yapılan çalışmalar O-C dönem değişim analizi olarak adlandırılır. "O" gözlenen minimum zamanını, "C" ise daha önceden hesaplanmış bir dönem kullanılarak elde edilen minimum zamanını temsil eder. Bu iki değerin farkının (O-C) alınıp zamana göre değişim grafiğinin elde edilmesine O-C dönem değişim grafiği denilir. Yörünge döneminde herhangi bir nedenden dolayı değişim meydana geldiğinde, bu iki değer birbiriyle çakışmaz. Sistemin yörünge döneminde bir değişim yoksa O-C değeri sıfıra eşit olur. O-C grafiğindeki eğri yörünge dönemindeki değişimin nedenine bağlı olarak, farklı değişim biçimlerinde kendini göstermektedir. Çift yıldızlardaki yörünge döneminin değişmesine neden olan etkenler aşağıdaki gibi kısaca sıralanabilir:

- Bileşenler arası korunumlu kütle aktarımı veya korunumsuz kütle kaybı
- Sisteme fiziksel olarak bağlı bulunan üçüncü cisim etkisi
- Bileşenlerin manyetik etkinliği
- Eksen dönmesi

Korunumlu kütle aktarımı veya korunumsuz kütle kaybı olan sistemlerde, bileşenler arası değişen uzaklıktan dolayı yörünge döneminde de bir değişim meydana gelir. Korunumlu kütle aktarımı olan sistemlerde, O–C grafiğindeki

eğride parabolik bir değişim görülür. Gözlenen minimum zamanı: $O = T_0' + P_0 \cdot E + A \cdot E^2$ ve hesaplanan minimum zamanı: $C = T_0 + P \cdot E$ olmak üzere, $O - C = (T_0' - T_0) + (P_0 - P) \cdot E + A \cdot E^2 = \Delta T_0 + \Delta P \cdot E + A \cdot E^2$ bağıntısı ile gösterilir. "*A*" dönemde meydana gelen değişimi ifade eden katsayıyı, "ΔP" dönemdeki değişim miktarını, "ΔT_0" ise T_0 zamanının doğru saptanamamasından kaynaklanan düzeltmeyi temsil eder. A katsayısının sıfırdan büyük olduğu durumda, kütle aktarımı küçük kütleli yıldızdan büyük kütleli yıldıza, A katsayısının sıfırdan küçük olduğu durumda ise, kütle aktarımı büyük kütleli yıldızdan küçük kütleli yıldıza doğru gerçekleşir. Şekil 6.1 (a) ve (b)'de korunumlu kütle aktarımının görüldüğü sistemlerin O-C grafiği gösterilmektedir. A katsayısının sıfırdan büyük olduğu durumda sistemin yörünge dönemi düzenli artmakta, A katsayısının sıfırdan küçük olduğu durumda ise yörünge dönemi düzenli olarak azalmaktadır.



(a) (b)

Şekil 6.1. (a) A katsayısı sıfırdan büyük, (b) A katsayısı sıfırdan küçük olan O-C değişimi.

Sistemin yörünge dönemi değişimine neden olan bir diğer etken de sistemde bulunan üçüncü cismin varlığıdır. Gözlemciye göre sistemin göreli konum ve uzaklığına etki eden üçüncü cismin, değişime katkısı ışık – zaman etkisi olarak da bilinmektedir. Üçüncü cismin varlığında sistemde değişen yörünge dönemi değil, çift sistemdeki minimumlar arası süredir. Minimumlar arası değişen süre, sistemin yörünge döneminde bir değişim oluyormuş gibi görünmesine neden olmaktadır (Pribulla et al., 2005). Buradaki değişimin nedeni çift sistemin, üçlü sistemin ortak kütle merkezi etrafındaki hareketidir. Yapılan O–C dönem değişim analizinden, sisteme dinamik ve fiziksel olarak bağlı üçüncü bir cismin bulunması durumunda O-C grafiğindeki eğri sinüs biçimli olmaktadır.

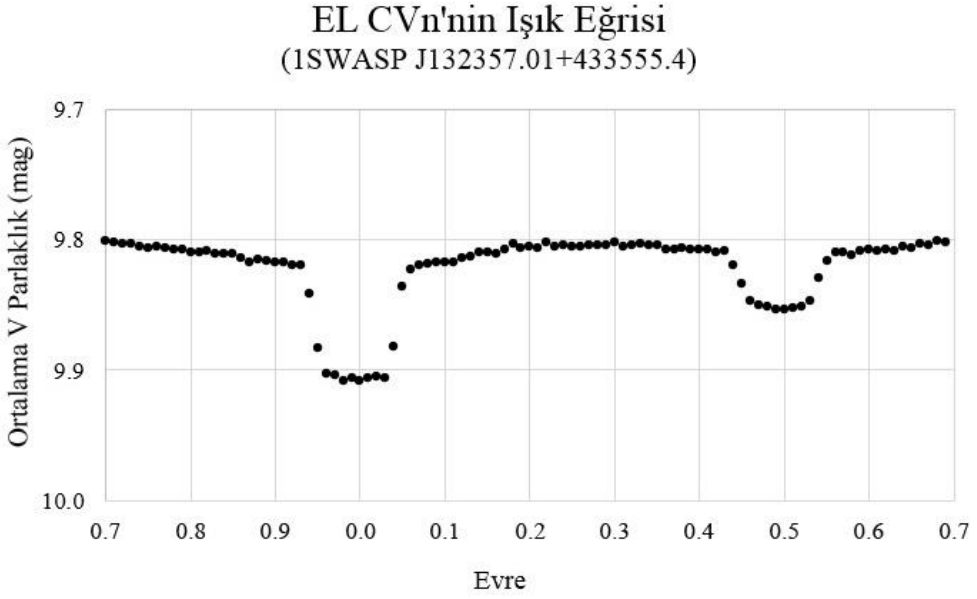
O-C grafiğindeki karakteristik değişimlerin bir diğer nedeni ise çift sistemin bileşenlerinin manyetik etkinliğe sahip olmasından kaynaklanır. Genellikle aktif yıldızlar üzerinde oluşan manyetik alanların etkisiyle yıldızın dönme ve dolanma dönemleri değişebilir. Bileşenler birbirine çok yakın ise, dönme-dolanma kilitlenmesinden dolayı bu dönem değişimi, yörünge dönemine etki eder. Bu etki bazen kendisini O-C değişiminde sinüs benzeri veya daha farklı bir biçim olarak gösterir.

Çift sistemlerin döneminde değişime neden olan diğer bir etken ise eksen dönmesidir. Yörünge yarı büyük eksen doğrultusunun, gözlemcinin bakış doğrultusuna göre değişmesinden kaynaklanır. Eksen dönmesi olan sistemlerde ω açısının zamanla değişimi ile ışık eğrisinde değişimler meydana gelir ve bu etki ile minimumlar arasındaki dönemde bir değişim oluşturur. Dış merkezli yörüngeye sahip sistemlerde görülür. Eksen dönmesi döneminin belirlenebilmesi için çok uzun süreli gözlem verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Eksen dönmesine ait O-C grafiklerinde oluşan sinüs eğrileri simetrik ve aynı genlik değerine sahiptir (Shakura, 1985). Bunların dışında, O-C grafiğindeki eğrinin farklı biçimlerde olması ışık ögelerinin (T_0 ve/veya P) hatalı alınmasından kaynaklanabilir. Sadece dönemin veya T_0 değerinin ya da her iki değerin birden hatalı olduğu durumlar olabilir. Burada gerçek dönem değişiminin olmadığından söz edilebilir. Böyle bir durumda bu değerler üzerinde ΔT_0 ve ΔP düzeltmesi yapılmaktadır.

6.2 EL CVn Yıldızının Işık Eğrisi ve O-C Çalışması

EL CVn türü çift yıldızların kararlı kütle aktarımı ile oluştukları bilinir. EL CVn türü yıldızlar, genelde anakol veya kırmızı dev yıldızından, bileşen yıldızına kütle aktarımı ile oluştuğu düşünülen sistemlerdir. Kararlı kütle aktarım sürecini belirlemek ve bundan yola çıkarak evrim süreçleri hakkında bilgi edinmek açısından EL CVn türü çift yıldızların oluşum süreçleri ayrıntılı incelenir. Kütle aktarım sürecinde veya daha sonraki zamanlarda sistemin yörünge döneminde bir değişim olup olmadığı ise O-C dönem değişim analizi ile belirlenir. Bölüm 6.1'de söz edildiği üzere, zamanla dönemdeki bu değişimin farklı nedenlerden kaynaklandığı bilinir.

EL CVn (1SWASP J132357.01+433555.4) Algol türü ışık eğrisine sahip bir örten çift yıldız sistemidir. Olası kararlı kütle aktarımının çiftin yörünge dönemine etkisinin olup olmadığını incelemek için, O-C dönem analizini çalıştık. Önceki yıllara ilişkin kaynak taramalarımızda EL CVn yıldızına ait O-C çalışmasının yapılmadığını gördük. EL CVn yıldızlarının evrim sürecinde kütle aktarımının olması, sistemin yörünge döneminde bir değişiklik olup olmadığı sorusunu akıllara getirir. Elde edilecek O-C grafiğindeki parabolik bir eğri, kütle aktarımından kaynaklı dönem değişimi olduğunu belirtecektir. O-C grafiğini elde edebilmek için, öncelikle EL CVn yıldızının WASP ve Maxted'ten alınan fotometrik gözlem verileri ile Şekil 6.2'de gösterilen ortalama ışık eğrisi oluşturulmuştur. Işık eğrisinin biçimi, klasik Algol türü örten çift yıldızlara ait ışık eğrisinin özelliklerini gösterir. Işık eğrisini elde etmek için EL CVn yıldızına ait Maxted'in (2014a) makalesinden alınan T_0 = 2454230.5558 ve P = 0^g.795629 ışık ögeleri ile evre hesabı yapılmıştır. Elde edilen ışık eğrisinde, %1'lik evre aralıklarıyla parlaklık ortalamaları alınmış ve evreye göre ortalama parlaklığın çizdirildiği ışık eğrisi elde edilmiştir (Şekil 6.2). Baş ve yan minimum derinliklerinin farkı, sistemde bulunan bileşenlerin sıcaklıkları hakkında yorum yapabilmemizi sağlar. EL CVn yıldızının etkin sıcaklıkları sırasıyla baş bileşen 8250 ± 350 K, yoldaş bileşen 12000 ± 900 K'dir.



Şekil 6.2. EL CVn örten çift yıldızının ortalama ışık eğrisi.

O-C dönem değişim analizinde kullanılacak minimum zamanlarının saptanması için ışık eğrisinin baş ve yan minimum evre aralıklarına denk gelen gözlem gecelerindeki parlaklık değişimi zamana göre tek tek çizdirilmiş ve PERANSO programı kullanılarak minimum zamanları hesaplanmıştır. Gözlemlerden giderek hesaplanan minimum zamanları (O), bunların yıl kesri cinsinden değerleri, eşitlik 6.1'de verilen ışık ögelerine göre hesaplanan minimum zamanları (C) ve E çevrim sayıları Çizelge 6.1'de toplu olarak listelenmiştir.

$$HJD\ (Min\ I)\ =\ 2454230.5558\ +\ 0^{g}.795629 \times E \qquad (6.1)$$

Çizelge 6.1'de, bu tez çalışmasında hesaplanan minimum zamanlarının yanı sıra farklı kaynaklardan alınan minimum zamanları da aynı çizelgede toplu olarak verilmiştir. Bu çizelgede O-C (I) değerleri de listelenmiş ve bu değerler, E çevrim sayılarına göre çizdirilerek Şekil 6.3 (a)'da gösterilmiştir. Farklı kaynaklarda yayımlanan minimum zamanları alınarak hesaplanan O-C değerleri farklı sembollerle temsil edilerek gösterilmiştir. "*mavi daireler*" WASP verilerini[2], "*kırmızı kareler*" AAVSO verilerini[3], "*yeşil üçgenler*" Wang'ın (2020) makalesinden alınan verileri temsil etmektedir.

Çizelge 6.1. O-C dönem değişimi analizinde kullanılan veriler. Çizelgede ilk sütundan itibaren, HJD gözlenen minimum zamanları, minimum zamanlarının yıl değerleri, E çevrim sayıları, O-C (I) ve O-C (II) değerleri ve her birinin kaynakları listelenmiştir.

Minimum Zamanları (HJD 2400000+)	**Yıl**	**E**	**O-C (I) (gün)**	**O-C (II) (gün)**	**Kaynak**
54142.643540	2007.1968	-110.5	0.004744	0.005510	Bu çalışması
54159.744170	2007.2433	-89.0	-0.000649	0.000147	
54161.734571	2007.2555	-86.5	0.000680	0.001479	
54163.720934	2007.2610	-84.0	-0.002030	-0.001227	
54167.701665	2007.2719	-79.0	0.000556	0.001366	
54171.678378	2007.2829	-74.0	-0.000876	-0.000059	
54189.579901	2007.3321	-51.5	-0.001006	-0.000157	
54191.570284	2007.3361	-49.0	0.000305	0.001157	

[2] https://wasp.cerit-sc.cz/search
[3] https://www.aavso.org/bob-nelsons-o-c-files

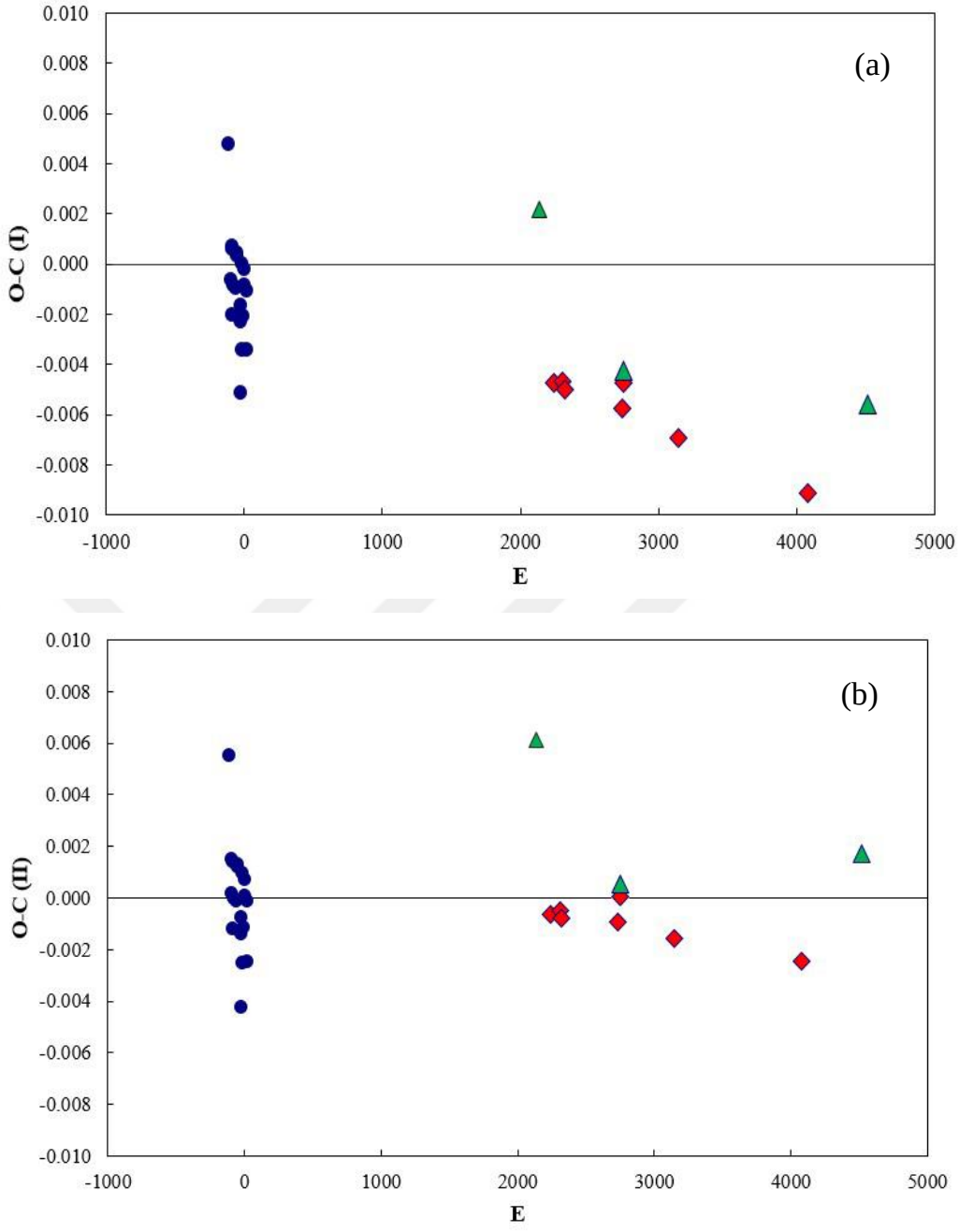
Çizelge 6.1. devam

Minimum Zamanları (HJD 2400000+)	Yıl	E	O-C (I) (gün)	O-C (II) (gün)	Kaynak
54195.548530	2007.3470	-44.0	0.000406	0.001265	
54212.652488	2007.3936	-22.5	-0.001660	-0.000770	
54214.640914	2007.3990	-20.0	-0.002306	-0.001413	
54216.627153	2007.4045	-17.5	-0.005139	-0.004243	
54222.599514	2007.4221	-10.0	0.000004	0.000912	
54224.585146	2007.4276	-7.5	-0.003437	-0.002525	
54230.553710	2007.4440	0.0	-0.002090	-0.001168	
54232.544630	2007.4495	2.5	-0.000243	0.000683	
54236.522153	2007.4605	7.5	-0.000865	0.000068	
54250.445411	2007.4961	25.0	-0.001114	-0.000157	
54252.432133	2007.5015	27.5	-0.003464	-0.002504	
56014.351290	2012.3239	2242.0	-0.004728	0.000634	AAVSO
56066.465030	2012.4659	2307.5	-0.004688	0.000501	
56076.410100	2012.4933	2320.0	-0.004980	0.000776	
56407.391000	2013.3990	2736.0	-0.005744	0.000951	
56418.530800	2013.4331	2750.0	-0.004750	0.000063	
56730.415200	2014.2856	3142.0	-0.006918	-0.001551	
57476.713000	2016.3294	4080.0	-0.009120	-0.002425	
55931.612800	2012.0970	2138.0	0.002198	0.006145	Wang et al. (2020)
56418.531300	2013.4331	2750.0	-0.004250	0.000563	
57822.019500	2017.2746	4514.0	0.005606	0.001703	

Sistemin kütle aktarımını ortaya koyabilecek anlamlı bir dönem değişiminin hesaplanabilmesi için 2007-2017 yılları arasını kapsayan gözlem aralığı kısa olduğundan, minimum zamanlarının E çevrim sayısına karşılık gelen değişimine doğrusal fit temsili yapılmış ve yalnız ışık ögeleri üzerindeki düzeltmeler elde edilmiştir. Bu temsil sonucunda hatalarıyla birlikte hesaplanan yeni ışık ögeleri 6.2 eşitliğindeki gibi elde edilmiş ve

$$HJD\ (Min\ I) = \underset{\pm 5}{2454230.5549} + \underset{\pm 3}{0^{g}.7956276} \times E \qquad (6.2)$$

düzeltilmiş bu ögeler kullanılarak hesaplanan O-C (II) farklarının çevrim sayılarına göre değişimi Şekil 6.3 (b)'de gösterilmiştir.



Şekil 6.3. (a) EL CVn yıldızının O-C (I) dönem değişim grafiği, (b) EL CVn yıldızının O-C (II) dönem değişim grafiği.

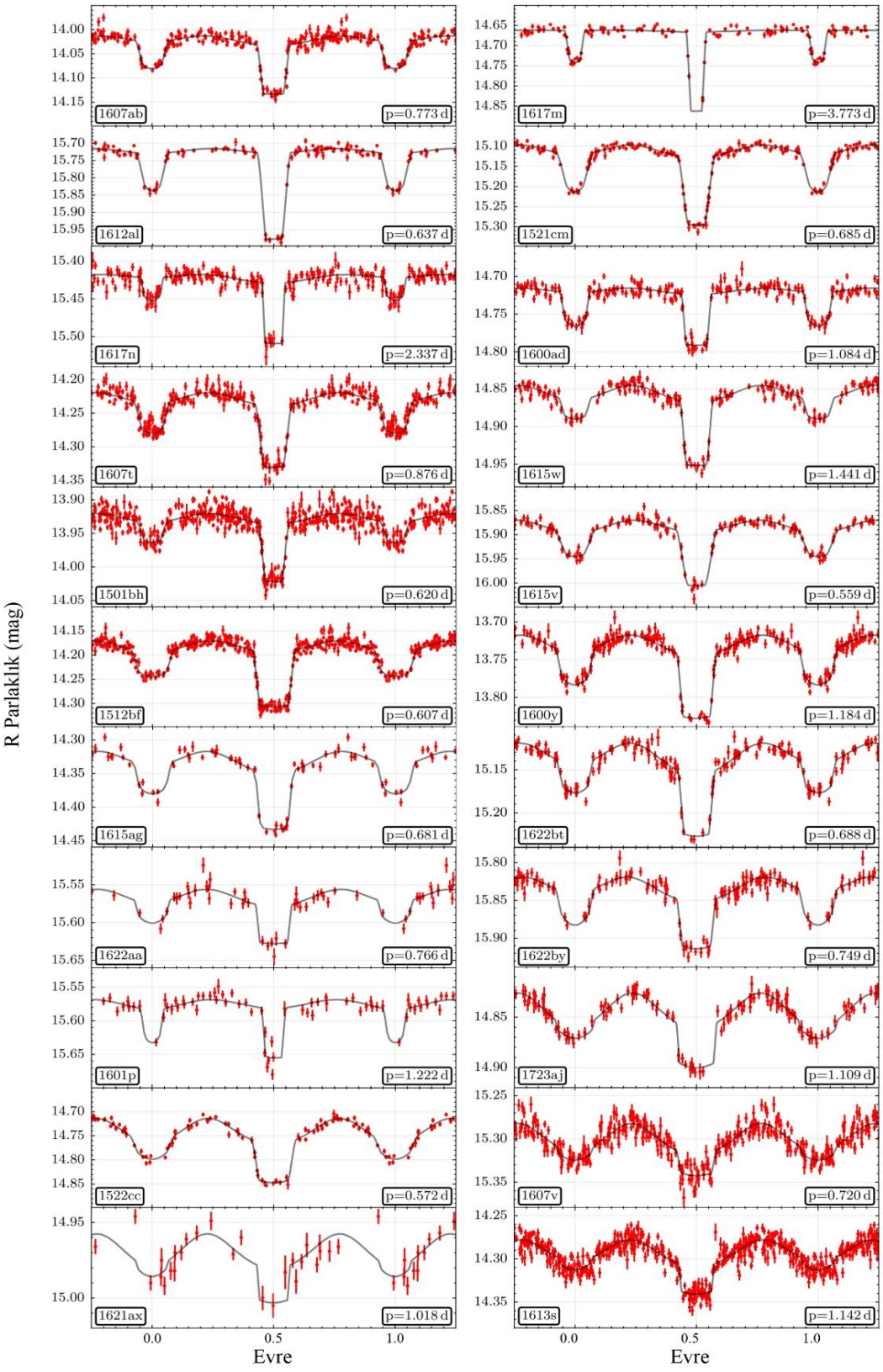
6.3 EL CVn Türü Çift Yıldızların Gruplandırılması

Zamanla keşfedilen farklı tür örten çift yıldız sayılarının artmasından dolayı, yıldızlara ilişkin katalogların oluşturulması gerektiği düşünülmüş ve yıldızlar sınıflandırılıp, hatta bu sınıflara uygun alt sınıflar oluşturulmuştur. Bunlar içerisinde örten çift yıldızlar için başlangıçta ışık değişiminin biçimi dikkate

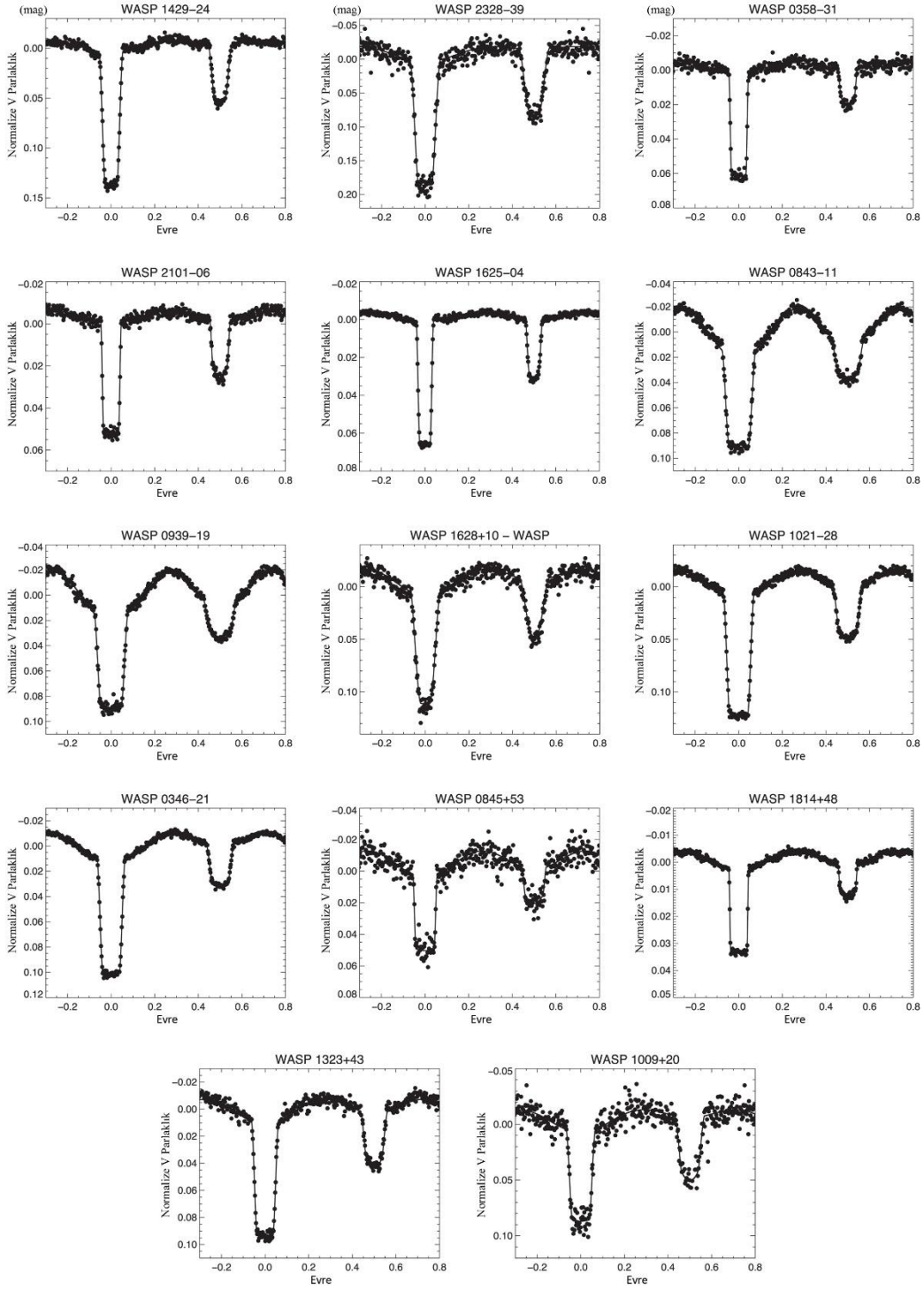
alınarak basit bir sınıflandırma yöntemi kullanılmıştır ve ışık eğrisinin biçimine göre yapılan sınıflandırma şekli günümüzde halen kullanılmaktadır. Bu sınıflandırma yöntemini örnek alarak, EL CVn türü çift sistemlerinin olası alt türlerini bir arada inceleyebilmek için, bileşen yıldızların parametrelerine ve benzer ışık eğrisi biçimlerine göre bir gruplandırma yaptık. Gruplandırma ilk olarak ışık eğrilerinin biçimlerine göre görsel bakış açısıyla yapılmıştır. EL CVn çift sistemlerinin ışık eğrilerinin biçimi genel olarak Algol türü çift yıldız sistemlerinin ışık eğrilerine benzemektedir. Algol türü sistemler, küresel şekilli veya çok az şekil bozulmasına uğrayan bileşenlere sahiptir; ayrık veya yarı-ayrık sistemlerdir. Bileşen yıldızların küreselliğinin bozulmasına ilişkin parlaklık değişimleri ışık eğrilerinin biçiminde görülebilmektedir. Tutulmalar dışındaki ışık değişimleri genellikle sabit olur; düz maksimumlara sahip ve minimum derinlikleri arasındaki farklar fazladır. Bileşenlerin şekil bozulmalarının daha ileri düzeyde olduğu yıldızlar, Beta Lyrae türü sistemler olarak adlandırılırlar. Yakınlık etkisinden doğan şekil bozulmaları, sisteme ait ışık eğrisinin biçiminde sürekli bir değişime neden olur. Değen çiftler olarak adlandırılan W UMa türü sistemlerde ise, küresellikten büyük ölçüde sapma görülür. Bileşenlerin yörünge dönemlerinin çok kısa olması ve küreselliğin bozulması, karakteristik ışık eğrilerinin biçiminde tutulmalar dışında sürekli ışık değişimlerine neden olur. Genellikle ortak zarf içinde olan bileşenlerin, tutulma derinlikleri birbirine oldukça yakındır.

Işık eğrilerinin biçimlerine göre yapılan gruplamada, temel olarak Algol ve Beta Lyrae türü çift yıldızların ışık eğrilerinin biçimleri göz önüne alınmıştır. Yaptığımız gruplandırma 50 tane EL CVn çift yıldız sistemini kapsamaktadır. Işık eğrilerinin biçimlerine göre görsel olarak yapılan gruplamanın ardından, yıldızların etkin sıcaklık, kütle, yarıçap, kütle oranları, yüzey çekim ivmesi değerleri tek tek incelenmiş, bu parametreler üzerinden çeşitli grafikler elde edilmiştir. Grafiklerde yıldızların birbirlerinden çok ayrık olmayan yakın iki farklı bölgede yoğunlaştıkları görülmüştür. Işık eğrilerinin biçimlerine göre incelenen yıldızların oluşturulan grafiklerinde net olarak iki gruba ayrıldığı dikkat çekicidir. Her bir grup için bileşenlerin etkin sıcaklıklarının birbirlerine göre çizdirildiği, kütle oranlarının etkin sıcaklık farklarına göre ve logaritmik etkin sıcaklık ile logaritmik yüzey çekim ivmelerine göre çizdirilen grafikler bölüm içerisinde ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

Birinci grup Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'te gösterilmiştir. Şekil 6.4'te PALOMAR gözlemleri ile elde edilmiş benzer ışık eğrilerine sahip 22 tane EL CVn türü yıldız (kısaca PALOMAR EL CVn), Şekil 6.5'te WASP gözlemleri ile elde edilmiş 14 tane EL CVn türü yıldız (kısaca WASP EL CVn) bulunmaktadır. Her iki şekilde bulunan ışık eğrilerinin tutulmalar dışı, hemen hemen sabit ışık değişimlerine sahiptir. Görülen değişimler yansıma ve basıklık etkisinden kaynaklanabilmektedir. Ayrıca tam tutulma olarak görünen baş minimumların yanı sıra, farklı derinliklere sahip tutulmalar görülmektedir. Bileşen yıldızlardan birinin sıcaklığının çok düşük olmasından kaynaklı yan minimum çok sığ olabilir. Çift sistemlerde çekim etkisi nedeniyle küresellikten sapmaya başlayan bileşen yıldızlarda armudi bir görüntü oluşur. Kendi ekseni etrafında dönen yıldızın görünen kesit alanında sürekli değişim gözlenir. Bu da sistemin ışık eğrisinde 0.25 ve 0.75 evrede kendisini gösterir (Örneğin Şekil 6.4 ve 6.5'te gösterilen 1607v, 1613s, WASP 0939-19 yıldızlarında olduğu gibi). Bazı yıldızlara ait veri sayısının az olması nedeniyle ışık eğrilerinin biçimi tam olarak yorumlanmaya elverişli değildir. (Örnek olarak Şekil 6.4'te verilen 1622aa, 1621ax çift sistemlerinin ışık eğrileri gibi.)



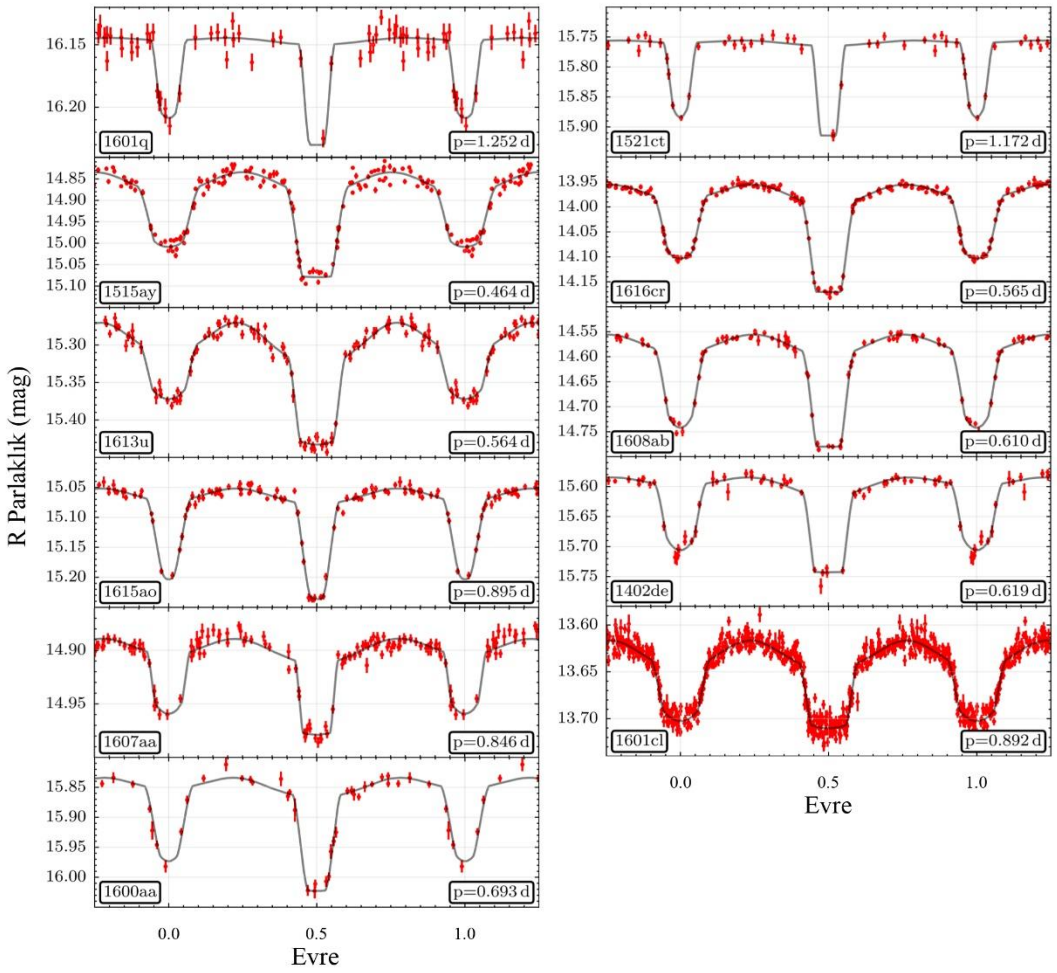
Şekil 6.4. 1. Grup PALOMAR EL CVn türü çift yıldızların ışık eğrileri (Roestel et al., 2018)



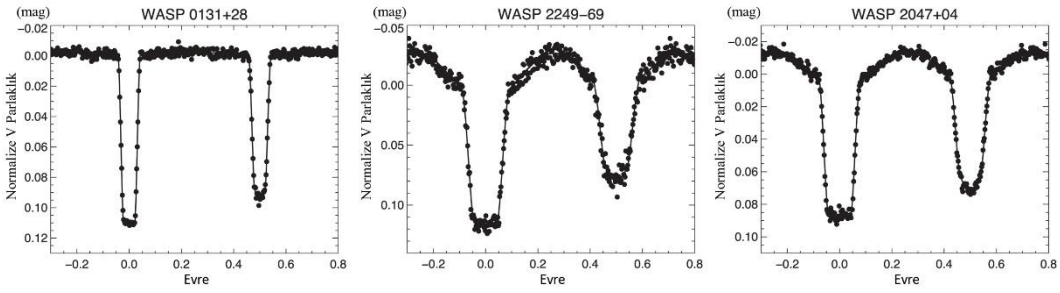
Şekil 6.5. 1. Grup WASP EL CVn türü çift yıldızların ışık eğrileri (Maxted et al., 2014a).

Şekil 6.6 ve Şekil 6.7'de ikinci grup EL CVn türü yıldızlar gösterilmiştir. Şekil 6.6'da 11 tane PALOMAR EL CVn türü çift sistemi, Şekil 6.7'de 3 tane WASP EL CVn türü çift sistemi bulunmaktadır. Bu iki şekildeki ışık eğrilerine

bakıldığında, minimum derinlikleri birbirine yakın olan çift yıldız sistemleri görülmektedir. Bu grup içinde bulunan bileşen yıldızların sıcaklıkları birbirine yakın değerlerdedir.



Şekil 6.6. 2. Grup PALOMAR EL CVn türü çift yıldızların ışık eğrileri (Roestel et al., 2018).



Şekil 6.7. 2. Grup WASP EL CVn türü çift yıldızların ışık eğrileri (Maxted et al., 2014a).

Çizelge 6.2. 1. Grup EL CVn türü çift yıldızların fiziksel parametreleri (Roestel et al., 2018; Maxted et al., 2014a).

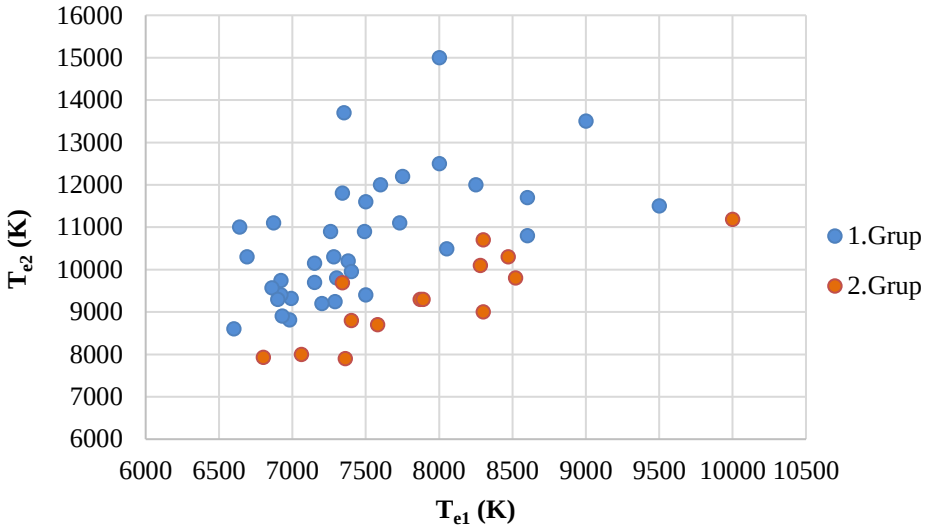
Yıldız	T_{e1} (K)	T_{e2} (K)	ΔT (K)	$q = M_2/M_1$	P (gün)	M_1 ($M_\odot$)	M_2 ($M_\odot$)	R_1 ($R_\odot$)	R_2 ($R_\odot$)	R_2/R_1
1607ab	6980	8810	1830	0.1357	0.773	1.40	0.19	1.45	0.32	0.22
1617m	6990	9320	2330	0.0833	3.773	1.68	0.14	2.57	0.69	0.27
1612al	7280	10300	3020	0.1159	0.637	1.38	0.16	1.16	0.37	0.32
1521cm	7290	9240	1950	0.1409	0.685	1.49	0.21	1.49	0.43	0.29
1617n	7500	11600	4100	0.1000	2.337	1.80	0.18	2.41	0.38	0.16
1600ad	8050	10490	2440	0.1307	1.084	1.76	0.23	1.83	0.35	0.19
1607t	6600	8600	2000	0.1143	0.876	1.40	0.16	1.87	0.38	0.20
1615w	6690	10300	3610	0.1491	1.441	1.61	0.24	2.59	0.40	0.15
1501bh	6870	11100	4230	0.0923	0.621	1.30	0.12	1.23	0.20	0.16
1615v	6920	9400	2480	0.0935	0.559	1.39	0.13	1.50	0.33	0.22
1512bf	6920	9740	2820	0.1223	0.607	1.39	0.17	1.53	0.32	0.21
1600y	6930	8900	1970	0.1049	1.184	1.63	0.17	2.41	0.46	0.19
1615ag	7380	10200	2820	0.1776	0.681	1.52	0.27	1.63	0.32	0.20
1622bt	7750	12200	4450	0.1758	0.688	1.65	0.29	1.74	0.29	0.17
1622aa	7490	10900	3410	0.1000	0.766	1.60	0.16	1.74	0.26	0.15
1622by	7730	11100	3370	0.1834	0.749	1.69	0.31	1.84	0.33	0.18
1601p	8600	11700	3100	0.0769	1.222	1.82	0.14	1.65	0.34	0.21
1723aj	6640	11000	4360	0.1146	1.109	1.57	0.18	2.51	0.23	0.09
1522cc	6860	9570	2710	0.1857	0.572	1.40	0.26	1.62	0.27	0.17
1607v	7260	10900	3640	0.1266	0.721	1.58	0.20	1.83	0.16	0.09
1621ax	7340	11800	4460	0.1775	1.018	1.69	0.30	2.14	0.17	0.08
1613s	7350	13700	6350	0.0929	1.142	1.83	0.17	2.72	0.25	0.09

Yıldız	T_{e1} (K)	T_{e2} (K)	ΔT (K)	$q = M_2/M_1$	P (gün)	R_2/R_1
WASP 1429-24	7150	9700	2550	0.1400	2.173	0.23
WASP 2328-39	7500	9400	1900	0.2520	0.768	0.33
WASP 0358-31	7600	12000	4400	0.1190	2.189	0.13
WASP 2101-06	9000	13500	4500	0.1300	1.291	0.15
WASP 1625-04	9500	11500	2000	0.1260	1.526	0.17
WASP 0843-11	6900	9300	2400	0.1760	0.793	0.16
WASP 0939-19	7150	10150	3000	0.1440	1.073	0.15
WASP 1628+10	7200	9200	2000	0.0970	0.721	0.23
WASP 1021-28	7300	9800	2500	0.1430	0.901	0.21
WASP 0346-21	7400	9950	2550	0.1650	0.928	0.17
WASP 0845+53	8000	15000	7000	0.2190	0.844	0.13
WASP 1814+48	8000	12500	4500	0.1340	1.798	0.10
WASP 1323+43	8250	12000	3750	0.1920	1.563	0.18
WASP 1009+20	8600	10800	2200	0.1350	1.395	0.22

Çizelge 6.3. 2. Grup EL CVn türü çift yıldızların fiziksel parametreleri (Roestel et al., 2018; Maxted et al., 2014a).

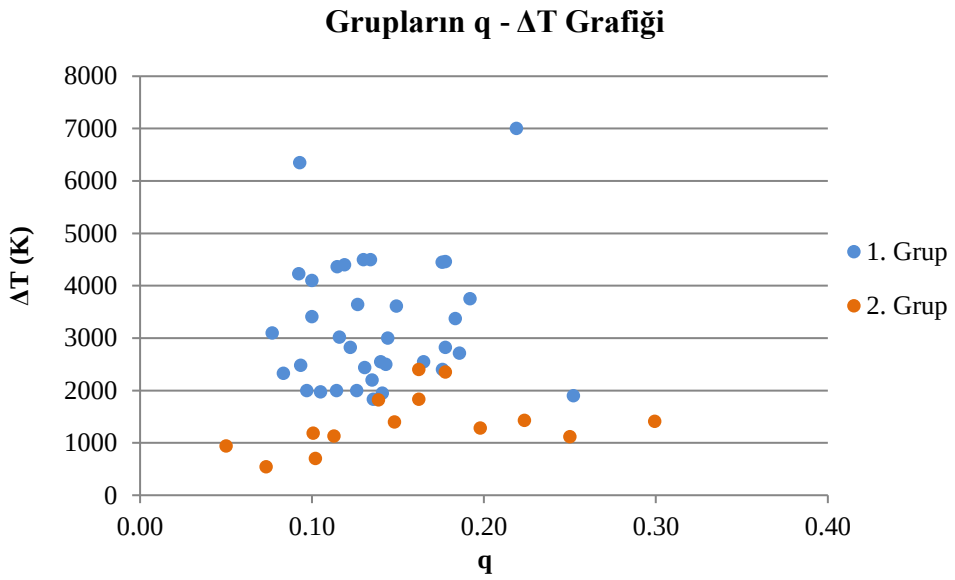
Yıldız	T_{e1} (K)	T_{e2} (K)	ΔT (K)	$q = M_2/M_1$	P (gün)	M_1 ($M_\odot$)	M_2 ($M_\odot$)	R_1 ($R_\odot$)	R_2 ($R_\odot$)	R_2/R_1
1601q	8300	10700	2400	0.1622	1.252	1.85	0.30	1.93	0.46	0.24
1521ct	8520	9800	1280	0.1978	1.172	1.82	0.36	1.72	0.56	0.33
1515ay	6800	7930	1130	0.1128	0.464	1.33	0.15	1.30	0.46	0.35
1616cr	7060	8000	940	0.0500	0.565	1.40	0.07	1.36	0.46	0.34
1613u	7340	9690	2350	0.1776	0.564	1.52	0.27	1.65	0.37	0.22
1608ab	7360	7900	540	0.0733	0.611	1.50	0.11	1.39	0.52	0.37
1615ao	7580	8700	1120	0.2500	0.895	1.64	0.41	1.82	0.64	0.35
1402de	7870	9300	1430	0.2236	0.619	1.61	0.36	1.56	0.45	0.29
1600aa	7890	9300	1410	0.2994	0.693	1.67	0.50	1.67	0.55	0.33
1601cl	8280	10100	1820	0.1386	0.892	2.02	0.28	2.44	0.52	0.21
1607aa	8470	10300	1830	0.1622	0.846	1.85	0.30	1.81	0.38	0.21
WASP 0131+28	10000	11186	1186	0.1007	1.882	1.97	0.20	1.82	0.53	0.29
WASP 2249-69	7400	8800	1400	0.1480	1.162					0.25
WASP 2047+04	8300	9000	700	0.1020	1.563					0.24

Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3'te sırasıyla birinci ve ikinci gruba ait EL CVn türü çift yıldızların bileşenlerinin etkin sıcaklıkları, sıcaklık farkları (ΔT), kütle oranları (q), yörünge dönemleri, güneş kütlesi biriminden sırasıyla ayrı ayrı kütleleri (M_1, M_2) ve yarıçapları (R_1, R_2), yarıçap oranları (R_1/R_2) gibi fiziksel parametreleri verilmiştir. Işık eğrilerinin biçimine göre ayrılan iki grubun ortak olarak bulunan fiziksel parametreleri incelenmiş, bu parametrelere göre bazı grafikler elde edilmiştir. Her iki gruba ait bileşen yıldızların etkin sıcaklık değerleri Şekil 6.8'de aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. "*Mavi daireler*" birinci grubu, "*turuncu daireler*" ikinci grubu temsil etmektedir. Birinci grup EL CVn çift yıldızlarının baş bileşenlerinin (T_{e1}) sıcaklıkları 6600 ile 9500 K, yoldaş bileşenlerinin (T_{e2}) sıcaklıkları ise 8600 ile 15000 K aralığındadır. İkinci grup EL CVn çift yıldızlarına bakıldığında ise baş bileşenlerin sıcaklıkları 6800 ile 10000 K, yoldaş bileşenlerin sıcaklıkları 7930 ile 11186 K değerleri arasındadır. Baş bileşenlerin sıcaklık değerlerinin birinci ve ikinci grupta farklılık gösterdiği, ama belirgin farklılığın yoldaş bileşenlerden kaynaklandığı görülmektedir. Şekilde grup yıldızlarına ait parametrelerin benzer değer aralıklar doğrultusunda bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Birinci grup yıldızların yoldaş bileşenlerinin etkin sıcaklık değerlerinin ikinci grup yıldızların değerlerinden daha yüksek olmasından dolayı, grafikte birinci gruba ait mavi noktaların daha üst kısımda toplandığı görülür. Genel olarak bakıldığında EL CVn çift yıldızlarının yoldaş bileşenlerinin belirgin biçimde farklı değerlere sahip olması, bu tür bir sınıflamada farklılıklar görmemize neden olmaktadır.



Şekil 6.8. Farklı gruplardaki EL CVn sistemlerinin bileşenlerinin sıcaklıklarının karşılaştırılması. T_1, baş bileşenlerin; T_2, yoldaş bileşenlerin etkin sıcaklık değerleridir.

Şekil 6.9'da her iki grubun kütle oranlarına ($q = m_2/m_1$) göre bileşen yıldızların sıcaklık değerlerinin farkı ($\Delta T = T_2-T_1$) gösterilmiştir. Birinci grubun q değerlerine bakıldığında, ikinci grubun q değerlerine göre daha dar bir aralık içinde dağılım gösterdiği görülmektedir. Birinci grubun bileşenlerinin kütleleri, ikinci grubun kütlelerine oranla göreli olarak daha büyük kütle farkına sahip olduğu sonucu çıkmaktadır. Aynı şekilde ΔT değerlerine bakıldığında, birinci grupta olan bileşen yıldızların sıcaklık farkları daha geniş bir aralıkta dağılım gösterir. İkinci grup bileşen yıldızları ise birbirlerine daha yakın sıcaklık değerlerine sahiptir. Bu sonuç ışık eğrilerinin biçimlerinde minimum derinliklerinin birbirine yakın olması ile kendisini açıkça gösterir.



Şekil 6.9. 1. ve 2. Grup EL CVn türü çift yıldızların kütle oranlarına göre bileşen yıldızların etkin sıcaklık farklarının ilişkisi

6.4 EL CVn Türü Çift Yıldızların H-R diyagramındaki Konumları

Hertzsprung-Russell diyagramı (H-R diyagramı), genel olarak yıldızların yaşam döngülerinin ifade edildiği bir alan olarak da kabul edilebilir ve yıldız astrofiziği açısından çok önemlidir. Yıldızların sıcaklık, tayf türü veya renk ölçeklerine karşılık toplam ışınım gücü veya salt parlaklık değerlerine göre konumlarını gösterir. Bir yıldızın H-R diyagramındaki yeri biliniyorsa, toplam ışınım gücü, etkin sıcaklığı, salt parlaklığı, tayf türü, kütlesi ve yarıçapı gibi fiziksel parametreleri de biliniyor demektir ve aynı zamanda bu parametreler arasındaki ilişkiyi de gösteren bir diyagramdır. Yıldıza ait tayf türünün ve etkin sıcaklığının biliniyor olması aynı zamanda yıldızın rengi hakkında bilgi verir. Ayrıca yıldızın yaşamını nasıl geçireceği, H-R diyagramındaki farklı parametrelere sahip yıldızların evrim yolları ile belirlenebilmektedir.

H-R diyagramı, evrende gözlemsel keşfedilen her yeni yıldız ile daha da gelişmektedir. Evrimlerinin henüz tam bilinemediği yıldız türleri keşfedildikçe, bu diyagramdaki boşluklar da dolmaya devam eder. EL CVn türü çift yıldızların keşfi, özellikle çok düşük kütleli helyum beyaz cücelerin evrimini anlamaya çalışmak adına önemli bir adım olmuştur. Düşük kütleli beyaz cüceler, evrimlerinin sonlarına

doğru yüksek sıcaklık ve yüzey çekim ivmesine sahip olurlar. EL CVn çift sistemlerinin oluşumunda bileşenler arasında korunumlu kütle aktarımı olmaktadır. Evrim sürecinde bileşenlerden *soyulmuş kırmızı dev*, madde aktarımı sonunda çok düşük kütleli, yüksek etkin sıcaklıkta ve helyumdan oluşan bir beyaz cüceye dönüşmektedir. Bu süreç içinde helyum beyaz cüce öncesi yıldızların ve A- veya F- tayf sınıfından anakol yıldızlarının H-R diyagramı üzerinde nerede bulundukları incelenmiştir. Yıldızların etkin sıcaklık ve yüzey çekim ivmesi değerleri astrofiziksel açıdan önem taşımaktadır. Yıldıza ait bu parametreler, yıldız atmosferindeki fiziksel koşulları tanımlamakla birlikte yıldızın kütle, yarıçap, ışıtma gücü gibi fiziksel özellikleriyle de doğrudan ilişki içindedir. Yüzey çekimi, yıldız atmosfer basıncının bir ölçüsüdür ve örten çift sistemlerde doğrudan ölçümler olasıdır (Smalley, 2005). Bu iki önemli parametreyle oluşturulan grafik ile yıldızların H-R diyagramı üzerinde bulundukları yerler belirlenebilmektedir. H-R diyagramı için oluşturulan ışık eğrilerinin biçimlerine ve fiziksel parametrelerine göre ayrılan iki EL CVn türü çift yıldız grubuna ait T_e, log T_e ve log g değerleri çizelge 6.4 ve çizelge 6.5'te verilmiştir. Çizelge 6.4'de birinci grup olarak adlandırılan 24 tane EL CVn türü çift sistem, çizelge 6.5'te ikinci grup olarak adlandırılan 12 tane EL CVn türü çift sistem bulunmaktadır. Ele alınan yıldızlar PALOMAR ve WASP verilerine aittir. Çalışmalarda bulunan Kepler yıldızlarının ve bazı WASP/PALOMAR yıldızlarının H-R diyagramında yerlerini belirtmek adına log g değerleri bulunmadığından H-R diyagramına dahil edilmediler. Makalelerden alınan yıldızlara ait verilerde etkin sıcaklık değerlerinin logaritmaları olmadığından, bu değerler hesaplanarak çizelgeye eklenmiştir.

Çizelge 6.4. 1. Grup 24 tane EL CVn türü çift yıldızın etkin sıcaklık ve yüzey çekim ivmesi değerleri (Maxted et al., 2014a; Roestel et al., 2018).

Yıldız	**T_{e1}(K)**	**log T_{e1}**	**log g_1**	**T_{e2}(K)**	**log T_{e2}**	**log g_2**
1600y	6930	3.84	3.88	8900	3.94	4.33
1600ad	8050	3.90	4.16	10490	4.02	4.72
1601p	8600	3.93	4.26	11700	4.06	4.54
1501bh	6870	3.83	4.38	11100	4.04	4.91
1607t	6600	3.81	4.04	8600	3.93	4.48
1607ab	6980	3.84	4.26	8810	3.94	4.71
1612al	7280	3.86	4.45	10300	4.00	4.50

Çizelge 6.4. devam

Yıldız	T_{e1}(K)	log T_{e1}	log g_1	T_{e2}(K)	log T_{e2}	log g_2
1512bf	6910	3.83	4.21	9740	3.98	4.65
1615ag	7370	3.86	4.20	10200	4.00	4.87
1615v	6920	3.84	4.23	9400	3.97	4.54
1615w	6690	3.82	3.82	10300	4.01	4.63
1617n	7500	3.87	3.93	11600	4.06	4.55
1617m	6990	3.84	3.84	9320	3.96	3.89
1521cm	7290	3.86	4.27	9240	3.96	4.49
1622by	7700	3.88	4.13	11100	4.04	4.88
1522cc	6860	3.83	4.17	9570	3.98	4.99
1622aa	7500	3.87	4.16	10900	4.03	4.85
1622bt	7700	3.88	4.18	12200	4.08	4.97
1723aj	6640	3.82	3.84	11000	4.04	4.98
WASP1323+43	8159	3.91	4.26	11636	4.06	4.77
WASP1628+10	7500	3.87	4.18	8650	3.93	4.49
1521ax	7350	3.86	3.83	13700	4.13	4.88
1607v	7260	3.86	4.11	10900	4.03	5.32
1613s	7350	3.86	4.00	11800	4.07	5.48

Çizelge 6.5. 2. Grup 12 tane EL CVn türü çift yıldızın etkin sıcaklık ve yüzey çekim ivmesi değerleri (Maxted et al., 2014a; Roestel et al., 2018).

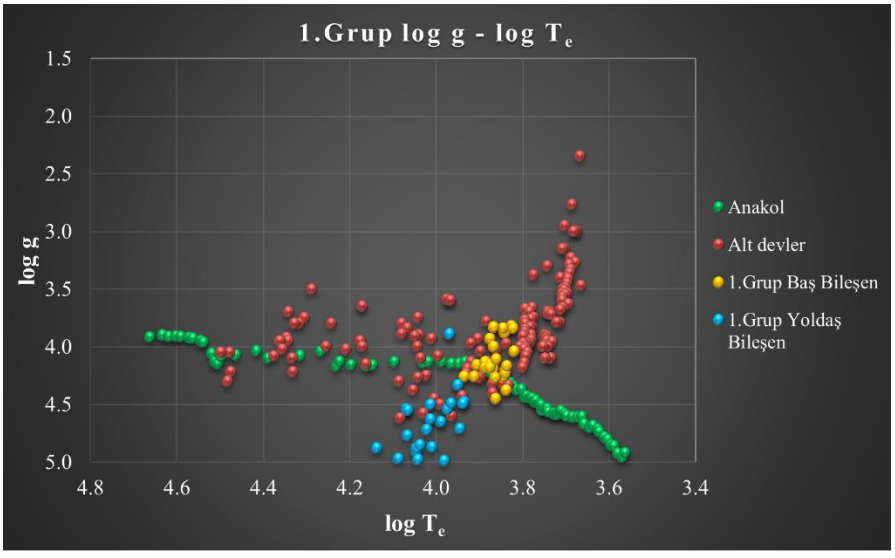
Yıldız adı	T_{e1}(K)	log T_{e1}	log g_1	T_{e2}(K)	log T_{e2}	log g_2
1600aa	7880	3.90	4.21	9300	3.97	4.67
1601q	8300	3.92	4.13	10700	4.03	4.58
16001cl	8290	3.92	3.97	10100	4.00	4.45
1402de	7860	3.90	4.27	9300	3.97	4.69
1607aa	8470	3.93	4.19	10300	4.01	4.76
6800ab	7400	3.87	4.32	7900	3.90	4.04
1613u	7340	3.87	4.19	9690	3.99	4.73
1515ay	6800	3.83	4.33	7930	3.90	4.27
1615ao	7580	3.88	4.13	8700	3.94	4.43
1616cr	7060	3.85	4.32	8000	3.90	3.93
1521ct	8520	3.93	4.23	9800	3.99	4.50
WASP0131+28	10000	4.00	4.21	11186	4.05	4.29

Şekil 6.10 ve Şekil 6.11'de Mamajek (2022)'den[4] alınan model ZAMS verileri de noktalanmıştır. Bu verilerle birlikte EL CVn türü birinci ve ikinci grup için baş ve yoldaş bileşen yıldızların log T_e ve log g değerleri kullanılarak H-R diyagramı oluşturulmuştur.

[4]http://www.pas.rochester.edu/~emamajek/EEM_dwarf_UBVIJHK_colors_Teff.txt

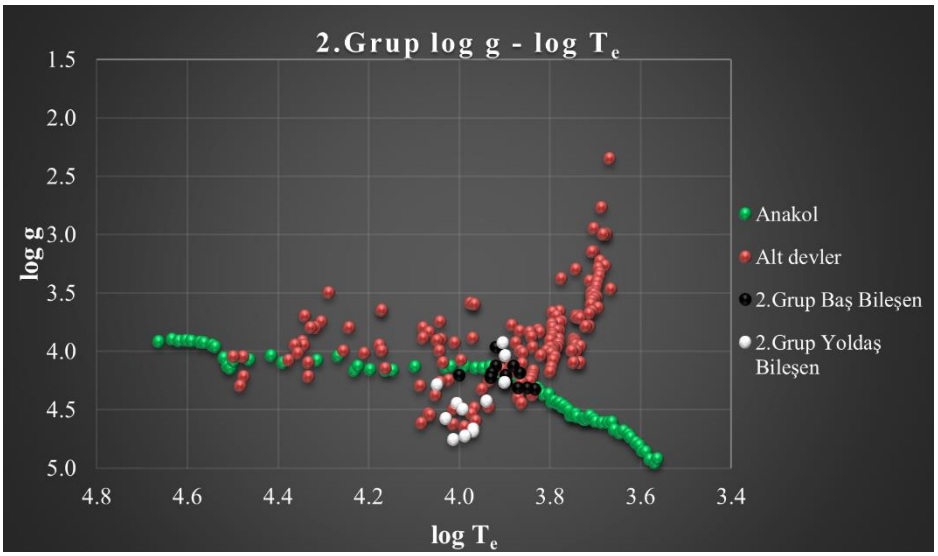
Şekil 6.10'da "*yeşil daireler*" anakol yıldızlarını, "*kırmızı daireler*" altdevleri, "*sarı daireler*" birinci gruba ait EL CVn türü yıldızlardan baş bileşenleri, "*mavi daireler*" yoldaş bileşenleri temsil ederken, Şekil 6.11'de "*yeşil daireler*" anakol yıldızlarını, "*kırmızı daireler*" altdevleri, "*siyah daireler*" ikinci gruba ait EL CVn türü çift yıldızların baş bileşenlerini ve "*beyaz daireler*" yoldaş bileşenleri temsil etmektedir.

Her iki şekilde de EL CVn türü yıldızların baş bileşenlerinin anakol ve altdevler bölgesinde, yoldaş bileşen olan helyum beyaz cücelerinin ise anakolun altında bulunan beyaz cücelerin üst bölgesinde toplandığı görülmektedir. Bazı yoldaş yıldızlar anakolun üzerindedir. Bu yıldızlar anakol sonrası evrimlerine yeni başlamış olabilirler. A- veya F- tayf sınıfı baş bileşenlerden bazıları ise zonklama özelliğine sahip δ Scuti türü yıldızlar olduğu için H-R diyagramında kararsızlık kuşağının içinde bulunurlar. Şekil 6.12'de klasik H-R diyagramı üzerinde DA (hidrojen bakımından zengin atmosferle karakterize edilir) beyaz cücelerin, helyum çekirdekli beyaz cücelerin ve EL CVn türü çift yıldızların baş ve yoldaş bileşenlerinin konumları işaretlenmiştir. Yapılan işaretlemede yıldızların fiziksel parametrelerinden yararlanılmıştır. DA ve helyum çekirdekli beyaz cücelerin verileri VizieR'in sayfasından[5] alınmıştır.

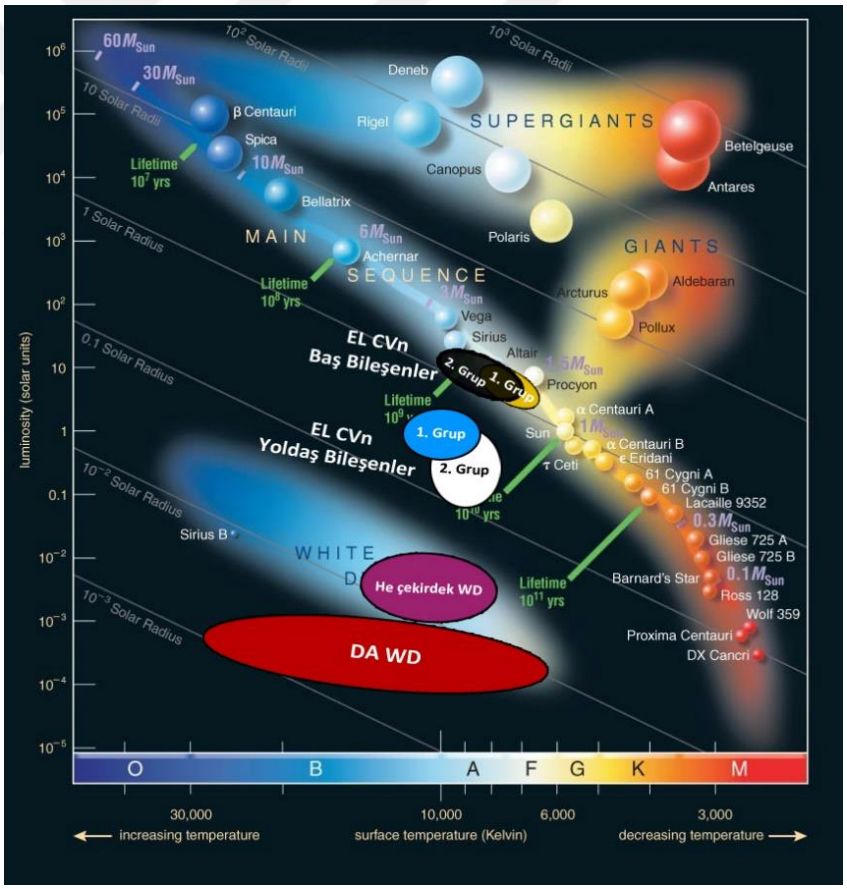


Şekil 6.10. 1. Grup EL CVn türü çift yıldızların H-R diyagramındaki konumu. Model sıfır yaş anakolu (ZAMS) Mamajek (2022)'den alınmıştır.

[5] https://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=III/129/

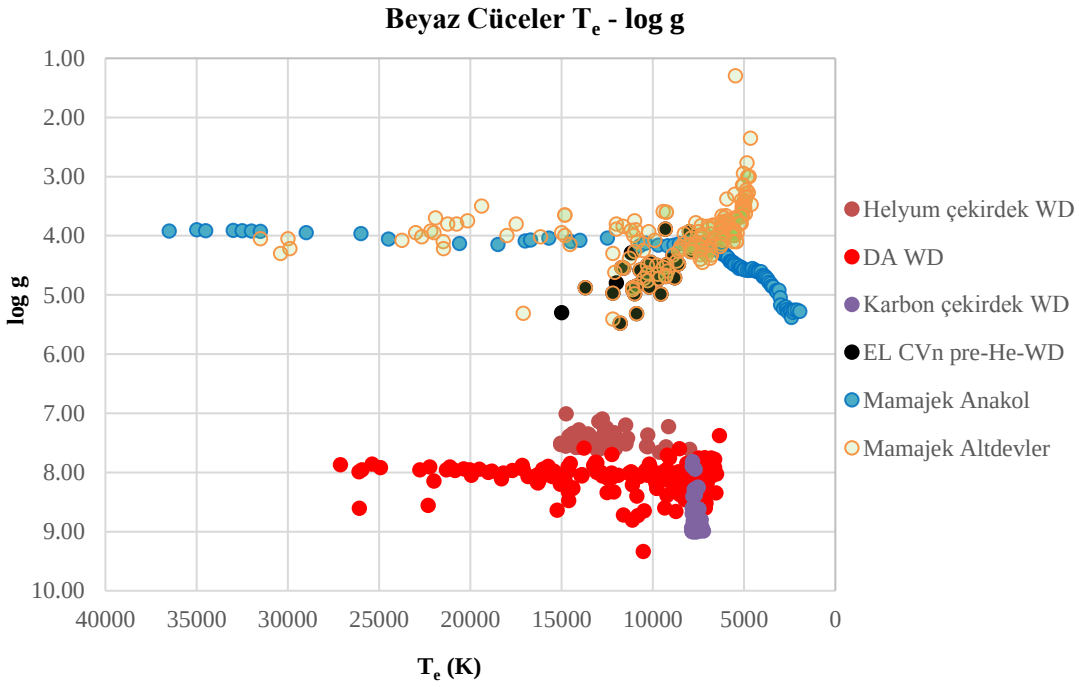


Şekil 6.11. 2. Grup EL CVn türü çift yıldızların H-R diyagramındaki konumu. Model sıfır yaş anakolu (ZAMS) Mamajek (2022)'den alınmıştır.



Şekil 6.12. H-R diyagramı üzerinde DA beyaz cücelerin, helyum çekirdeğe sahip beyaz cücelerin ve EL CVn türü çift yıldızların baş ve yoldaş bileşenlerinin konumları.

EL CVn türü çift yıldız sistemlerine ait helyum beyaz cüce öncesi yoldaş bileşenlerin, farklı özelliklere sahip beyaz cüceler ile log g ve T_e değerlerine göre konumları Şekil 6.13'te gösterilmiştir. Şekilde model anakol ve altdevler verileri de bulunmaktadır. "*Pembe daireler*" helyum çekirdekli beyaz cüceleri, "*sarı daireler*" DA beyaz cüceleri, "*mor daireler*" karbon çekirdekli beyaz cüceleri, "*siyah daireler*" EL CVn çift yıldızlarına ait helyum beyaz cüce öncesi yıldızları, "*mavi daireler*" anakolu ve "*içi boş kırmızı daireler*" altdevleri temsil etmektedir. Karbon, helyum çekirdekli ve DA beyaz cücelerinin neredeyse aynı bölgede toplandıkları, log g değerlerinin 7.00 ile 9.00 arasında değiştiği görülmektedir. EL CVn türü düşük kütleli helyum beyaz cüce öncesi yıldızlar ise anakolun alt kısmında, belirgin şekilde diğer beyaz cücelerden ayrı bir bölgede toplanmıştır. Log g değerleri ~4.00 ile 5.00, etkin sıcaklıkları ise ~7500 ile 15000 K aralığındadır.



Şekil 6.13. Beyaz cücelerin ve EL CVn türü helyum beyaz cüce öncesi yıldızların etkin sıcaklık ve yüzey çekim ivmesi ilişkisi.

7. TARTIŞMA VE SONUÇ

EL CVn türü çift yıldız sistemlerinin bileşenleri genel olarak A- veya F- tayf sınıfından bir anakol yıldızı ve düşük kütleli bir helyum beyaz cücedir. Bu sistemler ışık eğrilerinin biçimlerine göre Algol türü örten çift sistemler sınıfına dahil edilirler (Roestel et al., 2018). Yapılan gözlemler sonucunda EL CVn türü çift yıldızların, Samanyolu Gökadası'nda ince disk, kalın disk ve haloda yoğunlaşan Öbek II yıldızlarının olduğu bölgede bulundukları bilinmektedir (Chen et al., 2017). Dönemlerinin 2.2 günden daha az olduğu ve son yıllarda yapılan gözlemlerle artan sayılarından dolayı evrende yaygın olarak bulundukları düşünülmektedir. Lagos'a (2020) göre, daha uzun yörünge dönemlerine sahip EL CVn türü yıldız gözlenmemiştir ancak az sayıda da olsa var oldukları tahmin edilmektedir.

EL CVn türü yıldızların ayrıntılı çalışabilmek için oluşum ve evrim süreçleri hakkında bilgi sahibi olmak gerekir. Bundan dolayı evrimlerinin nasıl gerçekleştiğini anlamak için ortak zarf evrimi ve kararlı kütle aktarım mekanizmaları üzerinden modeller yapılmıştır. Bölüm 3'te, EL CVn türü yıldızların ortak zarf evrim süreciyle oluşup oluşmadığı durumu incelenmiştir. Modellerden yola çıkılarak, EL CVn türü çift sistemlerinde bulunan helyum beyaz cüce öncesi yıldızların çok düşük kütleli olması nedeniyle, bu yıldızların evrimlerinin ilerleyen süreçlerinde baş yıldız ile birleşmesi gerektiği düşünülmektedir. Araştırmalarda böyle bir birleşme henüz gözlenmediğinden EL CVn'lerin ortak zarf evrimi ile oluşmasının olası olmadığı belirtilmiştir (Chen et al., 2017). EL CVn türü çift sistemler, yakın çiftlerdeki düşük kütleli yıldızlar arasında gerçekleşen uzun dönemli kararlı kütle aktarımı ile oluşmaktadır (Chen et al., 2017). Bours (2014) ve Parsons'a (2014) göre olması gerekenden daha düşük kütle oranına sahip EL CVn türü yıldızlar, kütle aktarım sürecinin ardından çok düşük kütleli beyaz cüceden oluşan iki yozlaşmış yıldıza dönüşebilir ve bundan dolayı bu tür EL CVn türü yıldızlar, yozlaşmış çok düşük kütleli çift beyaz cücelerin ataları olabilir.

Yapılan yeni çalışmalarda, yörünge dönemi 3 günün altında olan yakın çift sistemlerde üçüncü bileşenlerin varlığına rastlanmıştır. Gözlemler sonucunda yörünge dönemi çok kısa olan EL CVn türü çift yıldızlarının bir üçüncü yoldaşlarının olabileceği belirtilmiştir. Lagos'un (2020) çalışmalarına göre, EL

CVn türü sistemlerin hiyerarşik üçlülerin iç çiftleri olduğu ve aslında kararlı kütle aktarımını deneyimleyen çok yakın çiftlerden geldikleri sonucuna varılmıştır. SPHERE / IRDIS (Çok Büyük Teleskop – VLT, üzerinde bulunan cihaz) cihazı ile birbirine çok yakın çift yıldızların parlak ışığının engellenmesi yöntemiyle 5 tane EL CVn türü yıldız gözlemi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarla EL CVn türü üçlü sistemlerin, çok yakın iç çift yıldızlara sahip anakol üçlüleri ile çok düşük kütleli beyaz cüceler içeren alt sistem popülasyonu arasında bir bağlantı bulunmuştur (Lagos et al., 2020). İlerleyen dönemlerde yapılacak gözlemler sonucunda üçlü EL CVn türü sistemlerin sayısının artması beklenmektedir. Maxted tarafından keşfedilen önceki EL CVn türü çift sistemlerin içinde de bu tür üçlü sistemlerin olması olası görünmektedir.

EL CVn türü çift sistemlerin bileşenlerinden olan çok düşük kütleli yıldızların oluşumlarında, çatallanma dönemi üzerinde durulmuştur. Yaklaşık üç gün olarak belirlenen P_b dönemi, bu tür yıldızların evrimi için yapılan modellemelerde kritik bir değer olmuştur. EL CVn türü çift sistemleri oluşturabilecek kütle veren yıldızların başlangıç yörünge dönemlerinin, üç gün ve üzerinde olması gerekmektedir. Üç günün üzerinde P_0 ile başlayıp evrimine devam eden yıldızların, EL CVn türü çift yıldız sistemlerini oluşturması, modellerle ve gözlemlerle tutarlıdır. Özellikle, yapılan bu çalışmalar çok düşük kütleli beyaz cücelerin evrimindeki boşlukları doldurabilmek adına oldukça önemlidir (Chen et al., 2017; Hong et al., 2021).

Tez kapsamında yapılan kaynak taramalarında EL CVn yıldızına ait O-C dönem değişim analizi yapılmadığı görülmüştür. Buradan yola çıkarak WASP veri tabanından ve Maxted'ten alınan verilerle ortalama ışık eğrisi oluşturduk. PERANSO programı ile minimum zamanlarını hesaplayıp, O-C dönem değişim analizi yaptık. Döneminde bir değişim olup olmadığı, eğer var ise bunun neden kaynaklandığını bulmak adına yapılan bu çalışmada veri sayısının yeterli zaman aralığına dağılımının az olmasından dolayı anlamlı bir sonuç elde edemedik. Buna rağmen sadece ışık ögeleri üzerinde düzeltmeler yaptık. İlerleyen gözlem dönemleri boyunca elde edilecek yeni minimum zamanlarının, bu çalışmaya eklenmesi durumunda, kütle aktarımına ve olası sonuçlarına ilişkin ipuçlarına rastlanabilecektir.

EL CVn türü çift yıldız sistemleri içinde en parlak yıldız olan EL CVn (1SWASP J132357.01+433555.4), bu türe ismini veren öncü yıldız olmuştur (Maxted et al. 2014a). 1SWASP J024743.37−251549.2 ise keşfedilen ilk EL CVn türü yıldızdır. WASP gözlemlerinin verileriyle oluşturulan 1SWASP J024743.37−251549.2 yıldızının ışık eğrisi ise bu türün karakteristik ışık eğrisini vermektedir (Maxted et al., 2011). WASP ve PALOMAR gözlemlerinde R, g' ve V filtreleri kullanılarak bu sistemin ışık eğrisine benzer özelliklere sahip 53 tane EL CVn türü yıldızın ışık eğrileri elde edilmiştir.

Işık eğrilerinin biçimlerine göre sınıflandırılan 50 tane EL CVn çift yıldızı birinci ve ikinci grup olarak isimlendirmiştir (Bölüm 6.3). Gruplarda bulunan yıldızların fiziksel parametreleri ile elde edilen grafiklerin, ışık eğrilerinin biçimlerine göre yapılan gruplama ile tutarlı sonuçlar sergilediği görülmüştür. Yıldızların farklı iki grup olarak ayrılmasındaki en temel neden, yoldaş bileşen olan düşük kütleli ve bileşenine göre oldukça sıcak olan helyum beyaz cücelerdir. Yıldızların etkin sıcaklık değerlerinin ortalamalarını alarak, birinci ve ikinci grubun ortalama sıcaklıklarının hangi tayf türüne denk geldiğini belirledik. Hesaplamalarımıza göre birinci grup olarak adlandırılan EL CVn türü çift yıldızların baş bileşenlerinin etkin sıcaklık ortalaması ~ 7450 K, ikinci grup EL CVn türü çift yıldızların baş bileşenlerinin etkin sıcaklık ortalaması ~7950 K'dir. Bu sıcaklık değerlerine denk gelen tayf türlerine bakarak birinci grubun genel olarak ~ A9 tayf türünden, ikinci grubun ise ~ A6 tayf türünden olduğunu gördük. İki grup için baş bileşenlerin ortalama sıcaklık farkları yaklaşık 500 K'dir. Yoldaş bileşenleri ele aldığımızda, birinci grup yoldaş bileşenlerin ortalama etkin sıcaklık değerini ~ 10700 K, ikinci grubun ortalama etkin sıcaklık değerini ise ~ 9350 K olarak hesapladık. Bu sıcaklık değerlerini tayf türleri ile karşılaştırdığımızda birinci grup yoldaş yıldızların ~ B9 tayf türünde, ikinci grubun ~ A1 tayf türünde bulunduğunu gördük. Gruplar için yoldaş bileşenlerin ortalama sıcaklık farkları ise yaklaşık 1350 K'dir. Buradan yola çıkarak birinci grup ve ikinci grup baş bileşenlerin arasındaki sıcaklık farkının tayf türlerindeki farklılığa göre daha az bir değere sahip olduğu, yoldaş bileşenlerin sıcaklık farklarının ise arada sadece tek tayf sınıfı bulunmasına rağmen daha yüksek bir değerde çıktığı görülmektedir. Geri tayf sınıflarına doğru gidildikçe tayf sınıflarının alt türlerindeki değişim oldukça hassas olmaktadır. Bir basamak alt türdeki sıcaklık değişimi birkaç yüz Kelvin

olabilirken, bu durum ön tayf sınıflarındaki bir tayf türünün değişiminde birkaç bin Kelvin'e karşılık gelmektedir. Ayrıca bulunan bu ortalama etkin sıcaklık değerlerindeki fark ışık eğrilerinin biçimine doğrudan yansımaktadır. Tayf türlerine karşılık gelen sıcaklık değerleri Kuzey Iowa Üniversitesi'nin web sayfasından alınmıştır (Kuzey Iowa Üniversitesi, 2021). Tayf türlerindeki farklılıklardan yola çıkarak, birinci grubun "***geri B- tayf sınıfından yoldaş bileşenli grup***", ikinci grubun ise "***A-tayf sınıfından yoldaş bileşenli grup***" olarak adlandırılmasının daha uygun olacağına karar verdik. Veri tabanlarının taranması ve gözlemler ile elde edilecek yeni EL CVn türü çift yıldızlar ile bu gruplama daha geniş bir aralığı kapsayabilecek ve belki de farklı tür gruplar ortaya çıkabilecektir.

36 tane EL CVn türü çift yıldızın H-R diyagramında konumlarının belirlenmesi, çalışmanın son kısmı oluşturmuştur. Yapılan bu çalışmada, makaleler içinde verilen EL CVn türü çift yıldızların aynı grafik üzerinde (Şekil 6.10, Şekil 6.11) birlikte gösterilmesi amaçlanmıştır. Model verilerinin ve 36 tane EL CVn türü çift yıldızın log T_e ve log g değerlerine göre çizilen grafiklerde, EL CVn türü baş bileşenlerin anakol ve altdevler bölgesinde, yoldaş bileşen olan çok düşük kütleli helyum beyaz cüce öncesi yıldızların ise DA, helyum ve karbon beyaz cücelerinin üst bölgesinde toplandığı görülmüştür. Ortaya çıkan bu sonuç makalelerde bulunan H-R diyagramı ve evrim modelleriyle uyumludur (Chen et al., 2017; Kim et al., 2021). İki grup halinde bulunan yıldızların H-R diyagramı üzerinde konumlandırılması sonucunda (Şekil 6.12), birinci ve ikinci grup baş ve yoldaş bileşenler birbirlerine yakın bölgelerde toplanmaktadır. Her iki grupta da bulunan bazı yoldaş yıldızların ZAMS ve TAMS arasında kaldığı ve henüz WD boyutlarına büzülmediği görülür. Yıldızların H-R diyagramı üzerindeki konumları, evrim sürecinde hangi basamakta bulunduklarına dair yorum yapabilmeyi sağlamaktadır.

Sonuç olarak yapılan bu tez çalışması, 50 tane EL CVn türü örten çift yıldızın bir arada incelenmesine olanak sağlamıştır. Yapılan gruplamanın daha geniş bir aralığı temsil etmesi için, ilerleyen dönemlerdeki araştırma ve gözlemlerle elde edilecek yeni EL CVn türü çift yıldızlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca EL CVn yıldızına ait dönem değişimi çalışmasının anlamlı bir sonuca ulaşabilmesi için daha çok gözlem verisi gerekmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- **Benacquista, M. J. and Downing, J. M. B.,** 2013, Relativistic Binaries in Globular Clusters, *Living Rev. Relativity,* 16,4pp

- **Benvenuto, O.G. and Althaus. L.G.,** 1998, Evolution of helium white dwarfs with hydrogen envelopes, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 293,177-188pp

- **Bouabid, M. P., Montalbán, J., Miglio, A., Dupret, M. A., Grigahcène, A. and Noels, A.,** 2009, Hybrid g Doradus/d Scuti Stars: Comparison Between Observations and Theory, American Institute of Physics, 1170,477

- **Bours, M. C. P., Marsh, T. R., Parsons, S. G., Copperwheat, C. M., Dhillon, V. S., et al.,** 2014, Precise parameters for both white dwarfs in the eclipsing binary CSS 41177, *MNRAS*, 438, 3399–3408pp

- **Butters, O. W., West, R. G., Anderson, D. R., Cameron, A. C., Clarkson, et al.,** 2010, The first WASP public data release, *A&A*, 520, L10

- **Chen, X., Maxted, P. F. L., Li J. And Han, Z.,** 2017, The formation of EL CVn-type binaries, MNRAS, 467, 1874–1889pp

- **Faigler, S., Kull, I., Mazeh, F., Latham, D. W. and Bloemen, S.,** 2015, Beer Analysis of Kepler and CoRoT Light Curves. IV. Discovery of Four New Low-Mass White Dwarf Companions in the Kepler Data, *ApJ*, 815:26 (14p)

- **Gautschy, A.,** 2015, The Theorem That Was None - I. Early History

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- **Guo, Z., Gies, D. R., Matson1, R. A., Hernández, A. G., Han, Z. and Chen, X.,** 2017, KIC 8262223: A Post-mass Transfer Eclipsing Binary Consisting of a Delta Scuti Pulsator and a Helium White Dwarf Precursor, *ApJ*, 837:114 (12p)

- **Hong, K., Jae Woo Lee, J. W., Koo, J. R., Park, J. H., Rittipruk, P. et al.,** 2021, The Pre-He White Dwarfs in Eclipsing Binaries. II. WASP 0843–11, *AJ*, 161:137 (9p)

- **Hoyman, B. and Çakırlı, Ö.,** 2020, Zonklayan Bileşenli Çift Yıldızların Evrimi, TJAA, cilt 1 sayı 2, 517-519s

- **Iben and Livio,** 1993, Common Envelopes in Binary Star Evolution, *ASP*, 105: 1373-1406p

- **Kerkwijk, M.H., Rappaport, S. A., Breton, R. P., Justham, S., Podsiadlowski, P., et al.,** 2010, Observations Of Doppler Boosting In Kepler Light Curves, *ApJ*, 715:51–58pp

- **Kim, S. L., Lee, J. W., Lee, C. U., Lee, Y., Lee, D. J, et al.,** 2021, Pulsation and Rotation of the EL CVn-type Eclipsing Binary 1SWASP J024743.37-251549.2, AJ, 162:5, 11pp

- **Lagos, F., Schreiber, M. R., Parsons , S. G., Gansicke, B. T. and Godoy, N.,** 2020, Most EL CVn systems are inner binaries of hierarchical triples, MNRAS, 499, L121–L125

- **Lee, J. W., Koo, J. R., Hong, K. and Park, J. H.,** 2020, The Pre-He White Dwarfs in Eclipsing Binaries. I. WASP 0131+28, *AJ*, 160(1):49

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- **Lin, J., Rappaport, S., Podsiadlowski, Ph., Nelson, L., Paxton, B., et al.,** 2011, Lmxb and Imxb Evolution: I. The Binary Radio Pulsar PSR J614-2230, *ApJ*, 732:70 (8p)

- **Lou, Y.,** 2020, Photometric Study And Kinematics Of The EL CVn Type Eclipsing Binary: WASP 1628+10, *NewAR*, 78 (2020) 101363

- **Ma, B. and Li, X.D.,** 2008, The Bifurcation Periods In Low-Mass X-Ray Binaries: The Effect Of Magnetic Braking And Mass Loss, *ApJ*, 691:1611–1617pp

- **Manzoori, D.,** 2011, Mass Transfer and, And Effects Of Magnetic Fields On The Mass Transfer In Close Binary System, IntechOpen Press, UK, 163-174pp

- **Maxted, P. F. L., Anderson, D. R., Burleigh, M. R., Collier Cameron, A., Heber, et al.,** 2011, Discovery of a stripped red giant core in a bright eclipsing binary system, *MNRAS*, 418, 1156-1164pp

- **Maxted. P. F. L., Serenelli, A. M., Miglio, A., Marsh, T. R., Heber, U., et al.,** 2013, Multi-Periodic Pulsations Of a Stripped Red-Giant Star In An Eclipsing Binary System, 2013, *Nature*, 498, 463–465pp

- **Maxted, P. F. L., Bloemen, S., Heber, U., et al.,** 2014a, EL CVn-type binaries – discovery of 17 helium white dwarf precursors in bright eclipsing binary star systems**,** *MNRAS*, 437, 1681–1697pp

- **Maxted, P. F. L., Serenelli, A. M., Marsh, T. R., Catal´an, S., Mahtani, D. P., et al.,** 2014b, WASP 1628+10 – an EL CVn-type binary with a very low mass stripped red giant star and multiperiodic pulsations**,** *MNRAS*, 444, 208-216pp

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- **Nelson, L. A., Dubeau, E. and MacCannell, K. A.,** 2004, Evolutionary Properties Of Helium-Rich, Degenerate Dwarfs In Binaries, *ApJ*, 616:1124–1147pp

- **Parsons, S. G., Marsh, T. R., Bours, M. C. P., Littlefair, S. P. Copperwheat, C. M., et al.,** 2014, Timing variations in the secondary eclipse of NN Ser, *MNRAS*, 438, L91–L95

- **Podsiadlowski, P.,** 2014, The Evolution of Binary Systems, Cambridge University Press, UK, 45-88pp

- **Pribulla, T., Chochol, D. and Tremko, J.,** The Light-Time E®ect in Short-period Eclipsing Binaries, 2005, ASP Conference Series, Vol. 335, 2005

- **Pylyser, E. and Savonije, G. J.,** (1988), Evolution of Low-Mass Close Binary System With a Compact Mass Acreting Component, *A&A*, 191, 57-70pp

- **Rappaport, S., Nelson, L., Levine, A., Sanchis-Ojeda, R., Gandolfi, D., et al.,** 2015, Discovery Of Two New Thermally Bloated Low-Mass White Dwarfs Among The Kepler Binaries, *ApJ*, 803:82 (13p)

- **Rasio, F. and Livio, M.,** 1996, On The Formation and Evolution Of Common Envelope Systems, *ApJ*, 471:366-376pp

- **Roestel, J., Kupfer, T., Ruiz-Carmona, R., Groot, P. J., Prince, T. A., et al., 2**018, Discovery of 36 eclipsing EL CVn binaries found by the Palomar Transient Factory, *MNRAS, 475,* 2560–2590pp

- **Rucinski, S. M.,** 1993, A Simple Description of Light Curves of W UMa System, *ASP*, 105: 1433-1440pp

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- **Shakura, N. I.,** 1985, On The Apsidal Motion in Binary Stars, *Pis'ma Astron. Zh.* 11, 536 – 541 pp

- **Smalley, B.,** 2005, *T*eff and log *g* Determinations, Mem. S.A.It. Suppl. Vol. 8, 130

- **Struve, O.,** 1941, The Mystery Of β Lyrae, *AJP*, Vol. 9, No. 2, 63-80pp

- **Wang, K., Luo, C., Zhang, X., Zhang, B., Deng, L. and Luo, Z.,** 2018, V1224 Cas: An EL CVn-type Eclipsing Binary Consisting of a Helium White Dwarf Precursor and a Delta Scuti Pulsator, AJ, 156:187 (7p)

- **Wang, L., Gies, D. R., Lester, K. V., Guo, Z., Matson, R. A., et al.,** 2020, The Pre-He White Dwarf in the Post-mass Transfer Binary EL CVn, *AJ*, 159:4 (11p)

- **Zhang, X. B., Fu, J. N., Liu, N., Luo, C. Q. and Ren, A. B.,** 2017, Low-mass Pre-He White Dwarf Stars in Kepler Eclipsing Binaries with Multi-periodic Pulsations, *ApJ*, 850:125 (8p)

- **Zhang, X. B., Wang, K., Chen, X. H., Luo, C. Q. and Zhang, C. G.,** 2019, Discovery and Seismic Analysis of an EL CVn-type Binary with Hybrid δ Sct-γ Dor Pulsations, *ApJ,* 884:165 (9p)

İNTERNET KAYNAKLARI

- Peranso, "Light Curve and Period Analysis Softare" https://www.cbabelgium.com/peranso/index.html (Erişim tarihi: 16 Kasım 2019).

- Mamajek, E., 2022, Version 2021.03.02, "A Modern Mean Dwarf Stellar Color and Effective Temperature Sequence" http://www.pas.rochester.edu/~emamajek/EEM_dwarf_UBVIJHK_colors_Teff.txt

- University of Strasbourg, "Spectroscopically Identified White Dwarf", https://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=III/129 (Erişim Tarihi: 10 Ağustos 2021).

- AAVSO, "Bob Nelson's Database of Eclipsing Binary O-C Files", https://www.aavso.org/bob-nelsons-o-c-files (Erişim tarihi: 30 Mayıs 2020)

- WASP, "SuperWASP – found objects", https://wasp.cerit-sc.cz/search?objid=EL+CVn&ra=&dec=&radius=1.0&radiusUnit=deg&magmin=&magmax=&limit=10&ptsmin=1 (Erişim tarihi: 7 Haziran 2020)

- University of Northern Iowa, "Spectral type characteristics", https://sites.uni.edu/morgans/astro/course/Notes/section2/spectraltemps.html (Erişim Tarihi: 15 Kasım 2021)

ÖZGEÇMİŞ

Duygu ESENDEMİR, ilk - orta ve lise eğitimini başarıyla bitirmiştir. 2005 yılında **Dokuz Eylül Üniversitesi İzmir Meslek Yüksekokulu'nda Gemoloji** (Değerli Taş ve Takı Tasarım) Bölümü'ne başlamıştır. Sektörde kuyum ve değerli taş (pırlanta, elmas) üzerine çalışırken sağlık sorunları nedeni ile eğitimine devam edememiştir. 2013 yılında en büyük hayali olan **Ege Üniversitesi Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü'nde** lisans eğitimine başlamıştır. 2018 yılında bölümden mezun oldup, aynı sene **Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde** Yüksek Lisans eğitimine başlamıştır. 2018 yılında evlenmiştir. Bu alandaki çalışmalarına hayatı boyunca devam etmek istemektedir.