



**YILDIZ SİSTEMLERİNDE ZAMAN  
DEĞİŞİMİ YÖNTEMİ İLE  
3. CİSİM ARAŞTIRILMASI**

**Hüseyin ER**

**Tez Danışmanı  
Dr. Öğr. Üyesi İlham NASIROĞLU  
Doktora Tezi  
Astronomi ve Astrofizik Ana Bilim Dalı  
2023  
(Her hakkı saklıdır.)**

T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ASTRONOMİ VE ASTROFİZİK ANA BİLİM DALI

**YILDIZ SİSTEMLERİNDE ZAMAN DEĞİŞİMİ YÖNTEMİ İLE 3. CİSİM  
ARAŞTIRILMASI**

(Investigation of 3rd Body in Stellar Systems by Timing Variation Method)

DOKTORA TEZİ

Hüseyin ER

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İlham NASIROĞLU

Erzurum  
Eylül, 2023

T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

YILDIZ SİSTEMLERİNDE ZAMAN DEĞİŞİMİ YÖNTEMİ İLE 3. CİSİM  
ARAŞTIRILMASI

Dr. Öğr. Üyesi İlham NASIROĞLU danışmanlığında, Hüseyin ER tarafından hazırlanan bu çalışma, 25/09/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Astronomi ve Astrofizik Anabilim Dalı, Astronomi ve Astrofizik Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Cahit YEŞİLYAPRAK <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Dr. Öğr. Üyesi İlham NASIROĞLU <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. İbrahim KÜÇÜK <i>Erciyes Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Bekir GÜRBULAK <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Nazlı KARAMAN <i>Adıyaman Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır

Enstitü Yönetim  
Kurulunun .../.../.... tarih  
ve ..... sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

**Prof.Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN**

**Enstitü Müdürü**

Aslı ıslak imzalıdır

## ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak Dr. Öğr. Üyesi İlham NASIROĞLU danışmanlığında sunulan “Yıldız Sistemlerinde Zaman Değişimi Yöntemi ile 3. Cisim Araştırılması” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	9	30
Kuramsal Temeller	9	30
Materyal ve Yöntem	6	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	10	20
Sonuç ve Öneriler	2	20
Tezin Geneli	10	25

*Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.*

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Hüseyin ER	Dr. Öğr. Üyesi İlham NASIROĞLU
9.10.2023	9.10.2023
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

\* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun .../.../... tarih ve ..... sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

Enstitü Yönetim Kurulunun .../.../... tarih ve ..... sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

## TEŞEKKÜR

Tez çalıőmamın baőlangıcından sonuna kadar her tŸrlŸ yardım ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrŸbelerinden yararlandığım tez danıőmanım Sayın Dr. Őęr. Ÿyesi İlham NASIROğLU'na ve Dr. Őęr. Ÿyesi Aykut ŐZDŐNMEZ'e sonsuz teőekkŸr ve saygılarımı sunarım.

Çalıőmam boyunca desteklerini esirgemeyen AtatŸrk Ÿniversitesi Astronomi ve Uzay Bilimleri BŸlŸm Başkanı Sayın Prof. Dr. Cahit YEŞİLYAPRAK, Dr. Őęr. Ÿyesi Nazlı KARAMAN, arkadaőım Sayın Arő. Gör. Ahmet POLATOğLU, doktora Őęrencisi Burak Batuhan GŸRBULAK, yŸksek lisans Őęrencileri İmam Can ŐZKESEN ve Muhammet Emir KENGER'e teőekkŸrŸ bir borç bilirim.

Bu tezin hazırlanması için gerekli verilerin toplanmasında gŸzlem zamanı tahsis eden TŸBİTAK Ulusal GŸzlemevi (TUG T100-631, TUG T100-1333 ve TUG T100-1874 no'lu gŸzlem projeleri), Adıyaman Ÿniversitesi GŸzlemevi (ADYU60 teleskobu, Er et al. 2021) ve AtatŸrk Ÿniversitesi Astrofizik Araştırma ve Uygulama Merkezi (ATASAM) yŸnetimine ve personellerine çok teőekkŸr ederim.

Ve her Őeyimi borçlu olduğum annem, babam ve kıymetli aileme varlıkları ve destekleri için sonsuz teőekkŸrler.

HŸseyin ER

## ÖZET

### DOKTORA TEZİ

## YILDIZ SİSTEMLERİNDE ZAMAN DEĞİŞİMİ YÖNTEMİ İLE 3. CİSİM ARAŞTIRILMASI

Hüseyin ER

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İlham NASIROĞLU

**Amaç:** Zamanlama yöntemi kullanılarak örtülme gösteren bazı yakın çift yıldız sistemlerinin ve geçiş yöntemi ile gezegen barındırdığı doğrulanmış yıldız-gezegen sistemlerinin yörünge dönem değişiminin araştırılması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, incelenen sistemlerin örtülme/geçiş ışık eğrileri elde edilmiş, ışık eğrilerinden elde edilen yeni örtülme/geçiş zamanları literatürdeki zamanlar ile birleştirilerek güncel O–C diyagramları oluşturulmuştur. Güncel O–C diyagramlarından incelenen kaynakların yörünge dönemlerinde bir değişim olup olmadığı tespit edilerek var ise bu değişime neden olan etkenler araştırılmış (3. cisim veya diğer fiziksel etkenler) ve yörünge kararlılığı test edilmiş, yok ise sistemlerin fiziksel parametreleri güncellenmiştir.

**Yöntem:** Zamanlama yöntemi, ortak bir kütle merkezi etrafında yörünge hareketi yapan iki bileşenin örtülme zamanlarındaki değişimin incelenmesine dayanır. İncelenen sistemlerin fotometrik gözlemleri yapılarak ışık eğrilerinden örtülme/geçiş ortası zamanlar elde edildi. Çalışma kapsamında elde edilen örtülme/geçiş ortası zamanlar, literatürdeki zamanlar ile birleştirilerek sistemlerin güncel O–C diyagramları oluşturuldu. Güncel O–C diyagramlarından yararlanılarak sistemlerin yörünge dönemlerinde bir değişimin olup olmadığı araştırıldı.

**Bulgular:** İncelenen yakın çift yıldız sistemleri NY Vir ve NN Ser’in yörünge dönemlerinde görülen değişimlerin sistem etrafında dolanan ilave cisimlerden kaynaklandığı düşünülmüştür. Ancak sistemlerde görülen bu değişimlere diğer bir fiziksel etken olan manyetik aktivitenin de katkı sağlayabileceği sonucuna varılmıştır. Yıldız-gezegen sistemleri WASP-10 ve WASP-11 için elde edilen fiziksel parametrelerin genel olarak literatürle uyumlu olduğu görülmüştür. Geçiş zaman değişimlerinde ise ilave bir cisimi işaret eden güçlü bir TTV sinyaline rastlanmamıştır.

**Sonuç:** Örtülme/geçiş zamanlarında görülen değişimler ilk olarak ilave cisimlerden kaynaklandığı düşünülse de yıldız lekeleri, manyetik etkinlik veya kütle transferi gibi farklı mekanizmalardan da kaynaklanabilmektedir. Bu nedenle ikili sistem etrafında ilave bir cismin varlığından belirgin bir şekilde bahsedebilmek için LTT/TTV sinyalinin zamanla tekrarlayan olması ve uzun dönemli bir gözlemsel veri setine sahip olması gereklidir. Buna rağmen incelenen sistemlerin bazılarında (NY Vir ve NN Ser) ilave cisimlere ait güçlü kanıtlar bulunmuştur. Henüz bir değişim tespit edilemeyen sistemler için sistematik ve uzun dönemli gözlemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Çift yıldız sistemi, Yıldız-gezegen sistemi, Zamanlama, Geçiş, LTT, TTV

Eylül 2023, 116 sayfa

## ABSTRACT

### DOCTORAL DISSERTATION

#### INVESTIGATION OF 3RD BODY IN STELLAR SYSTEMS BY TIMING VARIATION METHOD

Hüseyin ER

**Supervisor: Asst. Prof. Dr. İlham NASIROĞLU**

**Purpose:** It is aimed to investigate the orbital period variation of some close binary star systems showing eclipse using timing method and star-planet systems confirmed to contain planets by transit method. The eclipse/transit light curves of the examined systems were obtained, and the new mid-eclipse/transit times obtained from these light curves were combined with the times in the literature to form the updated O–C diagrams. By determining whether there is a variation in the orbital period of the systems examined from the updated O–C diagrams, the factors causing this variation, if any, were investigated (3rd body or other physical factors) and the orbit stability was tested, if not, the physical parameters of the systems were updated.

**Method:** The timing method is based on the study of the variation in the mid-eclipse/transit times of two components orbiting around a common center of mass. By performed photometric observations of the examined systems, the mid- eclipse/transit times were obtained from the light curves. The mid- eclipse/transit times obtained by the study were combined with the times in the literature to form the updated O–C diagrams of the systems. It was investigated whether there is a variation in the orbital period of the systems by using the updated O–C diagrams.

**Findings:** The variations observed in the orbital period of the studied close binary star systems NY Vir and NN Ser were thought to be caused by additional body orbiting the system. However, it was concluded that magnetic activity, which is another physical effect, may also contribute to these variations in the systems. The physical parameters obtained for the star-planet systems WASP-10 and WASP-11 were generally found to be compatible with the literature. However, a strong TTV signal indicating an additional object was not found in the transit time variations.

**Results:** Although the variations in the mid-eclipse/transit times are thought to be due to additional bodys, they can also be caused by different mechanisms such as star spots, magnetic activity or mass transfer. Therefore, in order to be able to clearly mention the existence of an additional body around the binary system, the LTT/TTV signal must be repetitive over time and have a long-term observational data set. However, strong evidence of additional bodys was found in some of the systems studied (NY Vir and NN Ser). Systematic and long-term observations are needed for systems where no change has been detected yet.

**Keywords:** Binary System, Star-planet system, Timing, Transit, LTT, TTV

**Eylül 2023, 116 pages**

## İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI .....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ .....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ .....	xii
GİRİŞ .....	1
KURAMSAL TEMELLER .....	6
Çift Yıldız Sistemleri .....	6
Ortak Zarf Sonrası Yıldızlar ve Kataklistik Değişenler .....	8
Kepler Yasaları .....	10
Kepler'in İkinci Yasası ve Açısal Momentum Korunumu .....	10
Kepler'in Üçüncü Yasası .....	11
İki Cisim Problemi .....	12
Yörünge Şekli .....	14
Yörünge Parametreleri .....	16
Ötegezegenler .....	17
Ötegezegen Keşif Yöntemleri .....	20
Dikine hız (radial velocity) yöntemi .....	20
Geçiş (transit) yöntemi .....	20
Doğrudan görüntüleme (imaging) yöntemi .....	21
Kütle çekimsel mikromercek (microlensing) yöntemi.....	21
Konum-ölçüm (Astrometry) Yöntemi .....	21
Zamanlama (timing) yöntemi .....	21
Ötegezegenlerin Özellikleri .....	22
Ötegezegenlerin Yaşanabilirliği .....	25
Gezegenler için Yaşanabilir Bölge (Habitable Zone; HZ) .....	26
İkili sistemlerde Dinamik Kararlılık ve Gezegen Oluşumu .....	28
Dinamik Kararlılık .....	28
Gezegen Oluşumu .....	30

MATERYAL ve YÖNTEM .....	32
Materyal .....	32
İncelenen kaynaklar.....	32
Yöntem.....	34
Seçilen kaynakların gözlenmesi ve verilerin indirilmesi .....	34
Çift yıldız sistemlerinde örtülme zamanlarının hesaplanması.....	35
Yıldız-gezegen sistemlerinin geçiş ortası zamanlarının elde edilmesi .....	36
Işık – zaman etkisi ile yörünge dönem değişiminin belirlenmesi .....	38
Yıldız sistemlerinde diğer yörünge dönem değişim modelleri.....	41
Yörünge dönem değişimine etki eden faktörler .....	42
Model parametrelerinin belirlenmesi .....	45
Yörünge kararlılık testleri .....	47
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....	48
NY Vir.....	48
NN Ser.....	60
WASP-10 ve WASP-11 .....	69
SONUÇ .....	80
KAYNAKLAR.....	82
EKLER.....	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>
ÖZGEÇMİŞ.....	98

## TABLÖLAR DİZİNİ

<b>Tablo 1.</b> NY Vir Sisteminin Minimum Zamanları, Hataları ve Referansları .....	51
<b>Tablo 2.</b> GA'dan Elde Edilen Başlangıç Parametreleri .....	55
<b>Tablo 3.</b> NY Vir'in En Uygun Sistem Parametreleri .....	56
<b>Tablo 4.</b> NN Ser'in Minimum Zamanları, Hataları ve Referansları .....	62
<b>Tablo 5.</b> Veri Seti A ve B Kullanılarak Model I İçin Elde Edilen Sistem Parametreleri .....	64
<b>Tablo 6.</b> Veri Seti A ve B Kullanılarak Model II İçin Elde Edilen Sistem Parametreleri .....	64
<b>Tablo 7.</b> Gözlem Bilgisi .....	70
<b>Tablo 8.</b> WASP-10 b'nin Sistem Parametreleri.....	73
<b>Tablo 9.</b> WASP-11 b'nin Sistem Parametreleri.....	73
<b>Tablo 10.</b> WASP-10'nun Geçiş Ortası Zamanları.....	74
<b>Tablo 11.</b> WASP-11'nun Geçiş Ortası Zamanları.....	75

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Çift yıldız sisteminin şematik gösterimi .....	6
Şekil 2. Örtün çift yıldız sisteminin şematik gösterimi.....	7
Şekil 3. Örtün çift sistemlerinin farklı (EA, EB, EW) türlerinin temsili ışık eğrileri .....	8
Şekil 4. Kataklistmik Değişenlerin temsili gösterimi .....	9
Şekil 5. Kepler'in ikinci yasası olan eşit alanlar yasasının temsili gösterimi .....	10
Şekil 6. Güneş etrafında dolanan Ms kütleli bir gezegenin şematik gösterimi .....	11
Şekil 7. Bir çift yıldız sisteminin koordinat düzlemindeki şematik gösterimi .....	12
Şekil 8. Merkezinde bir yıldız olan eliptik yörüngenin şematik gösterimi .....	15
Şekil 9. İkili sistemin yörünge geometrisi .....	16
Şekil 10. Yıllara ve keşif yöntemlerine göre ötegezegenlerin keşif sayısı.....	18
Şekil 11. Keşfedilen ötegezegen sayısının kütleye göre dağılımı.....	23
Şekil 12. Keşfedilen ötegezegenlerin kütle ve yörünge uzunlukları arasındaki ilişki .....	24
Şekil 13. Keşfedilen ötegezegenlerin kütle ve yarıçap arasındaki ilişki .....	24
Şekil 14. Haghighipour & Kaltenegger (2013) tarafından belirlenen Kepler-453 sisteminin bir HZ örneği .....	27
Şekil 15. İkili sistem etrafında dolanan bir gezegenin S-tipi ve P-tipi yörüngelerinin şematik gösterimi.....	29
Şekil 16. Gezegen oluşumunun dört aşamasının şematik gösterimi.....	31
Şekil 17. Çoklu açıklık yarıçapları ile ilişkili aletsel parlaklık ve SNR dağılım grafiği. Farklı renkler, TUG T100 teleskobuyla elde edilen 12.03.2020 tarihinde NY Vir kaynağı için alınmış ışık eğrisinin farklı bir bölümünü temsil etmektedir. Dikey kesikli çizgi ise, $1.4 \times \text{FWHM}$ olan açıklık değerini temsil etmektedir. ....	35
Şekil 18. Geçiş gösteren yıldız-gezegen sistemine ait ışık eğrisinin temsili gösterimi .....	37
Şekil 19. İkili sistemin gökyüzü düzlemindeki temsili gösterimi .....	39
Şekil 20. Gezegene oranla leke boyutuna bağlı olarak ışık eğrilerindeki akı değişimi için örneklem. Yukarıdan aşağı doğru lekenin gezegene oranla boyutu azalmaktadır. Yeşil düz çizgi ise leke ile gezegenin boyutlarının eşit olduğu modeli göstermektedir. ....	44
Şekil 21. TUG T100 ve ADYU60 teleskoplarından elde edilen NY Vir'in ışık eğrileri. Işık eğrileri "Yöntem" bölümünde bahsedildiği gibi modifiye edilmiş bir Gauss profili ile fit edildi. Gözlemlerin tarihleri ve kullanılan teleskoplar her bir ışık eğrisi üzerinde belirtildi. I ve II gibi Roma rakamları, aynı gün içindeki toplam örtülme sirasını tanımlar. Hesaplanan RMS değerleri, Kadir (Magnitude) birimindedir. ....	50

- Şekil 22.** Üst Panel: NY Vir'in  $O - C$  diyagramıdır. Burada, TUG-T100 ve ADYU60, siyah dolgulu ve mavi dolgulu daireler ile gösterildi. Literatürdeki tüm veriler ise farklı renklerde verildi ve karşılık gelen kısaltmalarla gösterildi. Kısaltmalar; K98, K11, C12, Q12, K14, WASP-L14, L14, B18, P18 ve S19 şeklindedir. Bu çalışma kapsamında elde edilen model siyah çizgi ile gösterildi. Gölge gri alan, MCMC posteriorundan rastgele seçilen 1000 parametre örneğinden hesaplanan  $\pm 3\sigma$  posterior yayılımını temsil eder. Literatürde verilen NY Vir'in sistem parametreleri kullanılarak diğer LTT modelleri yeniden oluşturuldu. Kırmızı, yeşil noktalı ve mavi noktalı çizgiler sırasıyla, Song et al. (2019) tarafından uygulanan kuadratik efemeris ve LTT etkisini, Lee et al. (2014) tarafından uygulanan iki LTT etkisini ve Qian et al. (2012) tarafından uygulanan kuadratik efemerise ek olarak bir LTT etkisini göstermektedir. Alt Panel: Bu çalışma kapsamında kullanılan modelden kalan  $O - C$  zamanlarındaki artıkları gösterir. Artıkların rms değeri, 8.4 s olarak hesaplandı. .... 53
- Şekil 23.**  $O-C$  modelinden çıkarılan serbest parametrelerin sonsal olasılık dağılımlarının 1D ve 2D grafikleri. Grafik, corner.py kullanılarak elde edildi ..... 57
- Şekil 24.** TUG T100 teleskobundan 18 Şubat 2023'teki gözleminden elde edilen örnek NN Ser ışık eğrisi. Işık eğrisinin giriş ve çıkış kolu ayrı ayrı Boltzmann fonksiyonu ile fit edildi. Işık eğrisinin minimum zamanı ise "X" ile gösterildi. .... 61
- Şekil 25.** Veri seti A ve B kullanılarak NN Ser'in  $O-C$  diyagramı ve Model I ve II için onları artıkları. Siyah düz çizgi, en iyi modeli gösterirken renkli kesikli çizgiler LTT terimlerini ve kuadratik efemerisi temsil eder. Gri gölgeli alan ise MCMC sonucunda rastgele seçilmiş 1000 parametre örneğinden  $\pm 3\sigma$  olasılık dağılımını göstermektedir. .... 63
- Şekil 26.** MEGNO yüzey haritaları, bir dizi eksentrisiteyi ve yarı ana eksenini kapsayan veri kümesi B'den iki gezegenli (Model II) çözüm parametreleri kullanılarak 100 Myr süreyle üretildi. Spesifik olarak, analiz (a) 3. cisim, dış gezegen ve (b) 4. cisim, iç gezegen için elde edildi. Haritadaki beyaz noktalar, karşılık gelen hatalarıyla birlikte en uygun model parametrelerini temsil eder. .... 67
- Şekil 27.** 500 örneklem parametre çözümü için sistem konfigürasyonlarındaki gezegenlerin yarı ana eksenini ve eksentrisitesini. Renk çubuğu, her eşleştirilmiş değerin kararlılık zaman ölçeğini gösterir. .... 68
- Şekil 28.** TUG-T100 gözlemlerinden elde edilen WASP-10 b'nin yeni geçiş ışık eğrileri. Üst panel geçiş ışık eğrisi gösterirken alt panel modelin artıklarını göstermektedir. .... 71

<b>Şekil 29.</b> TUG-T100 gözlemlerinden elde edilen WASP-11 b'nin yeni geçiş ışık eğrileri. Tanımlamalar, Şekil 28 ile aynıdır. ....	72
<b>Şekil 30.</b> WASP-10 b'nin O-C diyagramı. Gri daireler, literatürdeki geçiş ortası zamanları temsil etmektedir. Kırmızı daireler ise çalışma kapsamında elde edilen zamanları göstermektedir. ....	77
<b>Şekil 31.</b> WASP-10 b'nin O-C zamanları için Lomb-Scargle periyot analizi. Kesikli gri çizgi, ortalama Nyquist frekansını temsil eder. ....	78
<b>Şekil 32.</b> WASP-11 b'nin O-C diyagramı. Renklendirme, Şekil 30 ile aynıdır. ....	79
<b>Şekil 33.</b> WASP-11 b'nin O-C zamanları için Lomb-Scargle periyot analizi. Kesikli gri çizgi, ortalama Nyquist frekansını temsil eder. ....	79



## KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

$a$	: Çift yıldız sisteminde yarı büyük eksen (bileşenler arası uzaklık)
$c$	: Işık hızı
$E$	: Eksentrisite anomalisi
$e_i$	: Eksentrisite
$G$	: Evrensel çekim sabiti
$K$	: LTT etkisinin yarı genliği
$L$	: Örtülmenin çevrim numarasını
$M$	: Kütle
$M_{Jup}$	: Jüpiter kütlesi ( $\sim 1.90 \times 10^{27}$ kg)
$M_{\odot}$	: Güneş kütlesi ( $\sim 1.99 \times 10^{30}$ kg)
$P_0$	: Çift yıldız sisteminin yörünge dönemi
$R$	: Yıldız yarıçapı
$T_0$	: Örtülmenin referans minimum zamanını
$\tau$	: LTT sinyali
$\Delta t$	: $t$ değerindeki değişme miktarı
$w$	: Perihelin argümanı
CCD	: Charge Coupled Device
PCEBs	: Post-Common Envelope Binary Stars
CV	: Cataclysmic Variable
CE	: Common Envelope
sdB	: subdwarf star with spectral type B
sdOB	: OB subdwarf
LTT	: Light Travel Time Effect
TTV	: Transit Time Variation
O-C	: Observed – Calculated
dM	: M dwarf
ADYU60	: Adıyaman Üniversitesi Gözlemevi Teleskopu
TUG	: TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi
AB	: Astronomik Birim (Dünya ile Güneş arasındaki mesafe: $1.5 \times 10^{11}$ m)
EA	: Eclipsing Algol
EB	: Eclipsing $\beta$ Lyra
EW	: Eclipsing W Uma
PreCV	: Pre-Cataclysmic Variable

CNe	: Classical Novae
DNe	: Dwarf Novae
RNe	: Recurrent Novae
NL	: Nova Like
SNe	: Supernovae
HARPS	: The High Accuracy Radial Velocity Planetary Search Project
APPS	: The Anglo-Australian Planet Search
WASP	: Wide Angle Search for Planets
HATNet	: Hungarian Automated Telescopes Network
TESS	: Transiting Exoplanet Survey Satellite
CoRoT	: Convection, Rotation and planetary Transits
VLT	: Very Large Telescope
CNES	: Centre National D'etudes Spatiales (Fransız Uzay Ajansı)
ESA	: European Space Agency (Avrupa Uzay Ajansı)
Parsek	: Parsec = $\sim 3.26$ ışık yılı = $\sim 3 \times 10^{16}$ m
BJD	: Barycentric Julian Date
CBP	: Circumbinary Planet
ESO	: European Southern Observatory
DAG	: Doğu Anadolu Gözlemevi, Erzurum
JD	: Julian Date
NSVS	: North Sky Variability Survey
SARA	: South-eastern Association for Research in Astronomy

## GİRİŞ

Evrende başka Dünya'ların da var olma düşüncesi her zaman insanların zihnini meşgul etmiş ve her kültürden insan, evrendeki yerini anlamaya çalışmıştır. Asırlarca “Dünya ve Güneş Sistemi'nin kökeni nedir? Güneş dışında diğer yıldızların etrafında başka Dünya'lar var mı? Varsa bu gezegenler yaşama elverişli mi?” gibi sorular hep merak konusu olmuştur (Benjamin 2017). Bu merakın temeli, o zaman ki gökbilimcilerin uzak yıldızların Güneş'e benzediğini ve bu sebeple o yıldızların etrafında da başka Dünya'ları barındırabileceği düşüncesinden kaynaklanmaktadır. Elbette o yıllardaki teknoloji ile diğer yıldızların etrafında başka gezegenlerin olup olmadığı, bu gezegen sistemlerinin Güneş Sistemi'ndekilere benzeyip benzemediği veya yaşama elverişli olup olmadığı bilinmiyordu (Mason 2008).

Bu soruların cevabı ancak 20. yüzyılın sonlarında teknolojinin ve gözlem araçlarının gelişmesiyle birlikte gezegenlerin yörüngelerinde dolandıkları yıldızlar üzerindeki etkilerinin ölçülmesine dayanan ötegezegen keşif yöntemleri ile başladı. Bu yöntemler, başlıca dikine hız, geçiş, doğrudan görüntüleme, kütle çekimsel mikromercek ve konum ölçüm yöntemidir. Bu yöntemler ile Haziran 2022'ye kadar 5386 gezegen (3978 tekli, 858 çoklu) keşfi yapılmıştır (Anonim 2022a). Bu gezegenlerden yalnızca 129'u doğrudan görüntüleme yöntemiyle keşfedilmiş olup geri kalanının keşfi dolaylı yöntemler ile yapılmıştır. Keşiflerin büyük bir kısmı dolaylı yöntemler ile yapılmış olsa da ötegezegenlerin yapısı, doğası, atmosferlerinin bileşimi ve yörüngelerinin şekli gibi birçok bilgiye ulaşılması mümkündür. Ötegezegenlerin oluşumunu, evrimini ve bileşimini anlamak, astrofiziğin birçok alanı ile iç içe olmayı ve disiplinlerarası çalışmayı gerektirmektedir. Bu nedenle Güneş dışı yıldızların etrafında dolanan gezegenleri tespit etmek ve onları karakterize etmek, sadece ötegezegen alanını değil onunla birlikte astronomi ve astrofizikteki diğer alanları da yakından ilgilendirmektedir.

Yeni keşfedilen ötegezegenlerin özellikleri, birbirlerine veya Güneş Sistemi'ndeki gezegenlere göre çok farklı özelliklere sahip olabilmektedir. Bu farklılıkların ortadan kaldırılması için Uluslararası Astronomi Birliği'nin Working Group on Extrasolar Planets (Anonim 2022b) ekibi tarafından Güneş dışı gezegenler için bazı gerekli kriterler belirlenmiş ve bu kriterler aşağıdaki gibi listelenmiştir (Krejcova 2013);

- Yıldızların veya yıldız kalıntılarının yörüngesinde dolanan döteryumun yanma sınırı olan kütle altındaki kütleyle sahip cisimler gezegen olarak tanımlanabilir (13 Jüpiter kütlelerinden ( $M_{Jup}$ ) daha küçük kütleyle sahip olmak).

- Kütleleri döteryum yanma sınırı olan ( $13 M_{Jup}$ 'den daha büyük kütleyle sahip yıldız-altı cisimler, nasıl oluştuklarına ve nerede bulduklarına bakılmaksızın “kahverengi cüce” olarak sınıflandırılır.
- Kütleleri döteryum yanma sınırı olan kütlelerin altında olan genç yıldız kümelerinde serbest bir şekilde dolanan nesnelere “gezegen” olarak değil, “alt-kahverengi cüce” olarak isimlendirilir.

Wolszczan ve Frail (1992) tarafından yapılan bir araştırma ile PSR 1257+12'nin yörüngesinde gezegen büyüklüğünde bir cismin var olduğunun bildirilmesi Güneş Sistemi'nin dışındaki ilk gezegen keşfi olarak kabul edilmiştir. Daha sonraki detaylı incelemelerin ardından bu sistemde ikinci ve üçüncü gezegenin de olduğu keşfedilmiştir (Wolszczan, 1994; 1996). Bu keşiften kısa bir süre sonra, Güneş benzeri bir yıldız etrafında dolanan Jüpiter benzeri 51 Pegasi b ötegezegeni keşfedilmiş (Mayor & Queloz, 1995) ve bu keşif Güneş benzeri bir yıldız etrafında tespit edilen ilk ötegezegen olduğu için 2019 yılında Nobel Fizik ödülüne layık görülmüştür (Anonim, 2022c). Bu keşifler, uluslararası projeler ile yeni yöntem ve teknolojilerin geliştirilmesine öncülük etmiştir. Ötegezegen keşiflerindeki bu ilerleme, CCD (Charge Coupled Device) kameraların ve kararlı yüksek çözünürlüklü spektroskopinin geliştirilmesiyle birlikte gözlem tekniklerindeki çeşitli iyileştirmelerin ve ötegezegenleri tespit etmek için kullanılan yöntemlerin gelişmesiyle artan ilginin bir sonucudur (Odonlade 2010).

Keşfedilen ötegezegenlerin çoğu genç anakol yıldızların yörüngesinde tespit edilirken çok daha azı evrimleşmiş yıldızların etrafında bulundu. Ötegezegenlerin keşfi, “Yıldızları çevreleyen maddeden oluşum süreci” ve “Yıldızların etrafında dolanırken evrim süreçleri” gibi temel konulara da açıklık getirmektedir. Ayrıca ötegezegenlerin keşfi ile yıldız-yıldız ve yıldız-gezegen sistemlerindeki karmaşık olan gezegen evrimleri hakkında birçok soruya da açıklık getirmektedir. Geçmişte, özellikle PCEB (Post-Common Envelope Binary Stars: Ortak Zarf Sonrası Çift Yıldızlar) ve CV'ler (Cataclysmic Variables: Katakliksmik Değişenler) gibi yakın çift yıldız sistemlerinin yörüngesinde dolanan cisimlere ait birkaç keşif duyurulmuştur (Wolf 2021). Örneğin; RR Cae (Qian et al. 2012), DE CVn (Han et al. 2018), HW Vir (Beuermann et al. 2012a), ve HS 0705+6700 (Beuermann et al. 2012b; Qian et al. 2013). Ayrıca bu sistemlerin dışında, dev yıldızlar (Dollinger et al. 2011), pulsasyon yapan yıldızlar (Cameron et al. 2010; Herrero et al. 2011) ve kahverengi cüceler (Chauvin et al. 2005; Han et al. 2013) gibi farklı gök cisimlerinin etrafında da aynı şekilde gezegenler tespit edilmesi oldukça ilginç ve önemli bir durumdur. Ek olarak, günümüzde hem beyaz cüce tarafından yığılan maddenin gözlemlerinden (Gansicke et al. 2012) hem de beyaz cüceler üzerine yapılan zamanlama çalışmalarından (Lee et al. 2009; Beuermann et al. 2010, 2012b; Potter et al. 2011; Marsh et al.

2013) artık beyaz cücelerin etrafında dolanan gezegenlere ait kanıtlar mevcuttur (Parsons et al. 2014). Bu nedenle bu tür sistemlerdeki gezegenlerin keşfi, sistemlerin doğasını ve evrimini daha net anlayabilmek için önemlidir.

Son birkaç yılda, ortak zarf sonrası çift yıldız sistemlerinde gezegen araştırmaları ilgi çeken bir alan haline gelmiştir. Bunun nedeni, bu tür çift yıldız sistemleri evrim süresince ortak zarf (Common Envelope, CE) gibi özel bir aşamadan geçmesidir. Ayrıntıları ve çeşitli olası sonuçları hakkında birçok araştırma olmasına rağmen bu süreç henüz net bir şekilde anlaşılammıştır. Ancak astronomik gözlemler sonucunda sistemde, baş yıldızın bir sıcak alt cüce B (sdB) veya beyaz cüce (OB yıldız çekirdeği) (baş yıldız) ve bileşen yıldızın ise düşük kütleli bir anakol yıldızı veya kahverengi cüceden oluştuğu bilinmektedir. Bu tür sistemlerin fotometrik örtülme ışık eğrileri de oldukça belirgin olduğu için sisteme ait bazı astrofiziksel parametreler yüksek hassasiyetle belirlenebilir olup evrimini ve sonraki sistem davranışlarını anlamak için özellikle değerlidir (Lohr et al. 2014). Ayrıca bu tür çalışmaların bir diğer amacı ise ötegezegenlerden Dünya benzeri bir gezegen var mı? Dünya gibi karasal mı, yoksa Jüpiter gibi bir gaz devi mi? Sıcak mı, soğuk mu? Atmosferi var mı? Varsa, yaşam oluşturabilecek su, metan ve oksijen gibi molekülleri içeriyor mu? gibi sorulara da cevap bulmaktır (Warner, 1995; Hellier, 2001; Beuermann vd., 2012a,b; Horner vd., 2012; Hecht, 2016). Dolayısıyla ötegezegen araştırmaları yıldızların yörüngesindeki gezegenlerin oluşumu ve evrimi sürecine yeni bir bakış açısı getirmektedir. Bu nedenle yıldız-yıldız ve yıldız-gezegen sistemlerinde gezegen araştırmaları hem gezegenin hem de bağlı oldukları sistemlerin doğasını ve evrim süreçlerini anlayabilmek için önemlidir.

Ötegezegen keşif yöntemleri arasında en dikkat çekici olan yöntem, hem tek yıldız ('geçiş yöntemi' ile tespit edilen yıldız-gezegen sistemleri) hem de örtülme gösteren çift yıldız sistemlerine uygulanabilen "zamanlama" yöntemidir. Sistemdeki örtülme zamanlarına dayanan ve ışık-zaman etkisi (LTT) olarak yorumlanan bu yöntem, O-C (observed – calculated; gözlenen – hesaplanan) diyagramlarında sinüzoidal ya da yarı-sinüzoidal gibi değişimler aranarak yörünge dönem değişimlerinin tespiti için kullanılmaktadır. İkili sistemlerde yörünge dönem değişimini incelemek için ışık-zaman etkisini kullanmanın başlıca avantajları;

- 1) Gerekli fotoelektrik veya CCD detektörlere sahip olan küçük çaplı (50-60 cm'lik) teleskoplar kullanılabilir.
- 2) Örtün çift yıldız sistemlerinin sayısının fazla olması (geçiş gösteren sistemler için bu durum biraz daha azdır. Ancak gün geçtikçe geçiş gösteren sistemlerinde sayısı artmaktadır.)

- 3) Seçilmiş çift sistemlerin örtülme zamanları birkaç saniyeye varan doğrulukla belirlenebilir.

Örtülme zamanlarının incelenmesi 18. yüzyılın sonlarından itibaren başlamış olup yüksek kuantum verimliliğine sahip modern gözlemlerin kullanılmasıyla doğrulukları önemli ölçüde artmıştır. Zamanlama yöntemi, yeterince uzun gözlemsel veriye sahip çift yıldız sistemleri etrafında dev gezegenler veya kahverengi cüceler gibi sistem etrafında dolanan ilave cisimleri tespit etme imkânı sunmaktadır (Lee et al. 2009; Pribulla et al. 2012). Ayrıca geçiş gösterdiği bilinen yıldız-gezegen sistemlerindeki geçiş zamanı değişimleri de analiz edilerek sistem etrafında dolanan ilave gezegenler veya uydular bulmak mümkündür (Doyle & Deeg 2004; Holman 2005; Lee 2014). Bu nedenle yörünge dönem değişimi, HW Vir sistemlerinde (Lee et al. 2009; Almeida et al. 2013), dA + dM örten çiftlerde (Parsons et al. 2010; Beuermann et al. 2011; Qian et al. 2012), kataklismik değişenlerde (Dai et al. 2010) ve RS CVn (Liao & Qian 2010) ve geçiş gösteren yıldız gezegen (Maciejewski et al. 2011; Mancini et al. 2017; Chakrabarty and Sengupta 2019; Sonbas et al. 2022) sistemleri gibi ikili sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu türden sistemlerin etrafında dolanan ve gözlenemeyen ötegezegen veya kahverengi cüceler gibi üçüncü cisimlerden kaynaklanabilen bu değişimler yıldız sisteminin yörünge evrimi hakkında önemli bilgiler vermektedir (Horner vd. 2013). Ayrıca yörünge dönem değişimi, ikili sistemdeki Applegate mekanizması olarak da bilinen aktif bileşenin manyetik döngüsü, apsidal hareketi, kütle transferi, manyetik frenleme yoluyla açıl momentum kaybı, yıldız lekeleri gibi diğer fiziksel etkileri de araştırmak için kullanılmaktadır (Applegate 1992; Claret & Gimenez 2010; Parsons et al. 2010; Schreiber et al. 2010; Zorotovic & Schreiber 2013; Bours et al. 2016; Mancini et al. 2017; Almeida et al. 2019; Burdge et al. 2019; Almeida et al. 2020). Bu fiziksel etkilerin bazıları ikili sistemlerin yörünge periyodunda bir azalma veya artışa neden olurken, manyetik döngü, apsidal hareketi ve ilave bir cismin varlığı ise periyodik bir değişime neden olmaktadır (Almeida et al. 2020). Bu son üç etki birbirleriyle benzer özelliklere sahiptir ve bu nedenle ayırt edilmesi zordur. Bu etkileri birbirinden ayırt edebilmek için sistemlere ait uzun gözlemsel verinin elde edilmesi gerekmektedir.

Bu tez kapsamında “zamanlama” yöntemi kullanılarak çift yıldız sistemlerinde ve geçiş gösterdiği bilinen yıldız-gezegen sistemlerinin yörünge dönem değişimlerinin araştırılması amaçlanmıştır. Tez kapsamında seçilen kaynaklar kısa yörünge dönemlerine sahip olduklarından (çift yıldızlar için  $P < 10$  saat ve yıldız-gezegen sistemleri için  $P < 5$  gün) bir gözlem sezonu içerisinde çok fazla örtülme gözleyebilme avantajını sağlayabilmektedir. Ayrıca

bu tür kaynakların ışık eğrilerinin hassas bir şekilde elde edilmesi de önemlidir. Bu nedenle çalışma kapsamında derin örtülmeler gösteren kaynaklar seçilmiştir. Böylece uzun zaman aralığında dağılmış çok sayıda gözlem verisine ulaşılması mümkün olacaktır. Seçilen kaynakların fotometrik gözlemlerinde çift yıldız sistemleri için ADYU60 (sadece NY Vir için, Er et al. 2021) ve TUG T100 Teleskopları kullanılırken, yıldız-gezegen sistemleri için sadece TUG T100 Teleskobu kullanılmıştır.

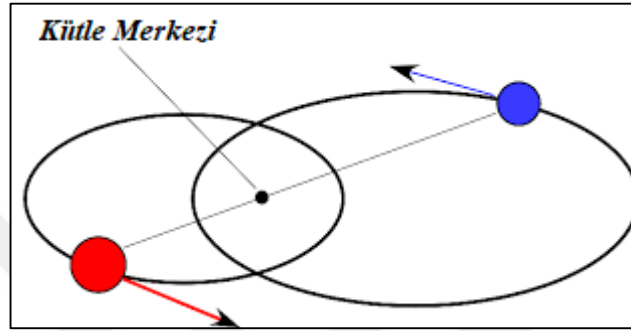
Gözlenen kaynakların CCD veri indirgeme işlemleri, Python (ccdproc, Astropy, Numpy, matplotlib, photutils ve LMFIT) paketleri (Craig et al. 2017, Astropy Collaboration et al. 2013, Harris et al. 2020, Hunter et al. 2007, Bradley et al. 2020, Newille et al. 2014) ve/veya AstroImageJ (AIJ, Collins et al. 2017a) yazılımları kullanılarak yapılmıştır. Verilerin indirgeme işlemi tamamlandıktan sonra fark ışık ölçümü (differential photometry) ile sistemlere ait örtülme ışık eğrileri elde edilmiş ve bu ışık eğrileri uygun fonksiyonlar ile fit edilerek tutulma zamanları hesaplanmış ve O-C diyagramları oluşturulmuştur.

Yörünge dönem değişimlerinin incelenmesi için O-C diyagramları uygun fonksiyonlar ile modellenerek dönem değişimine neden olan herhangi bir ışık-zaman etkisinin olup olmadığı incelenmiştir. Bu değişimler, ışık-zaman etkisinin dışında diğer fiziksel etkilerden de kaynaklı olabileceğinden dolayı sistemlerin yörünge dönem değişimleri incelenirken bu etkilerde incelenmiştir. İncelenen sistemlerin bazılarında görülen yörünge dönem değişiminin ışık-zaman etkisinden mi veya diğer fiziksel etkilerden mi kaynaklı olup olmadığını daha net bir şekilde anlayabilmek için sistemler için uzun zamanlı gözlemsel veriye ihtiyaç duyulur.

## KURAMSAL TEMELLER

### Çift Yıldız Sistemleri

Yıldızların çoğu, iki veya daha fazla yıldızın ortak bir kütle merkezi etrafında Kepler yasalarına göre yörünge hareketi yapan sistemlerden oluşmaktadır (Binnendijk 1970; Postnov and Yungelson 2014). Bu sistemler çift yıldız sistemleri olarak adlandırılmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Çift yıldız sisteminin şematik gösterimi (Anonim 2022d)

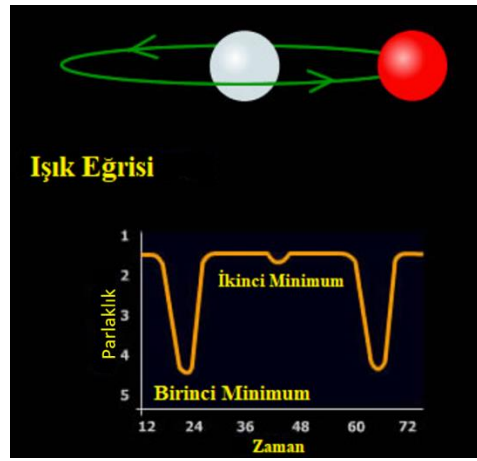
Çift yıldız sistemleri gözlemsel olarak keşfedilme yöntemlerine göre genellikle Görsel, Astronomik, Tayfsal ve Örtünme çift yıldızlar olarak dört grupta sınıflandırılır.

*i) Görsel Çift Yıldızlar;* Bileşenler, birbirlerinden 10 ile 100 AB (Astronomik Birim) kadar uzak mesafelerde bulunan ve aralarında etkileşim olmayan sistemlerdir. Bu sistemler, gökyüzü düzleminde iki ayrı bileşen olarak görülmektedir (Karttunen 2007; Mobberley 2009).

*ii) Astronomik Çift Yıldızlar;* Bileşenlerden sadece parlak olanının gözlemlenebildiği diğer bileşenin ise parlak yıldıza uyguladığı kütle çekimsel etki ile varlığının tespit edildiği sistemlerdir (Good 2003; Percy 2007).

*iii) Tayfsal Çift Yıldızlar;* Bileşenler birbirlerine çok yakın olduğu için tek bir yıldız gibi görülmelerine rağmen tayfsal olarak incelendiğinde iki veya daha fazla bileşenden oluştuğu tespit edilen sistemlerdir (Karttunen 2007).

*iv) Örtünme Çift Yıldızlar;* Bileşenler, birbirleri etrafında yörünge hareketi yaparken biri diğerinin önünden geçmesi (örtülme) durumunda sistemin toplam ışınım gücünde bir miktar azalma meydana gelir (Şekil 2). Bu durum bileşenlerin birbirlerinin önünden her geçişi sırasında periyodik olarak tekrarlanır.



**Şekil 2.** Örtün çift yıldız sisteminin şematik gösterimi (Anonim 2022e)

Bu sisteme ait ışık eğrileri incelendiğinde farklı derinliklere sahip birinci ve ikinci minimum olarak adlandırılan iki örtülmenin olduğu görülür. Birinci minimum, parlak yıldızın önünden sönük yıldızın geçmesiyle meydana gelirken ikinci minimum ise sönük yıldızın önünden parlak yıldızın geçmesiyle oluşmaktadır (Svechnikov 1969; Svechnikov & Snezhko 1974; Malkov et al. 2006; Karttunen 2007; Percy 2007). Ayrıca, örtün çift yıldızlar da kendi içerisinde ışık eğrilerinin şekillerine göre aşağıdaki gibi sınıflandırılır;

➤ *Algol Türü Sistemler (EA);*

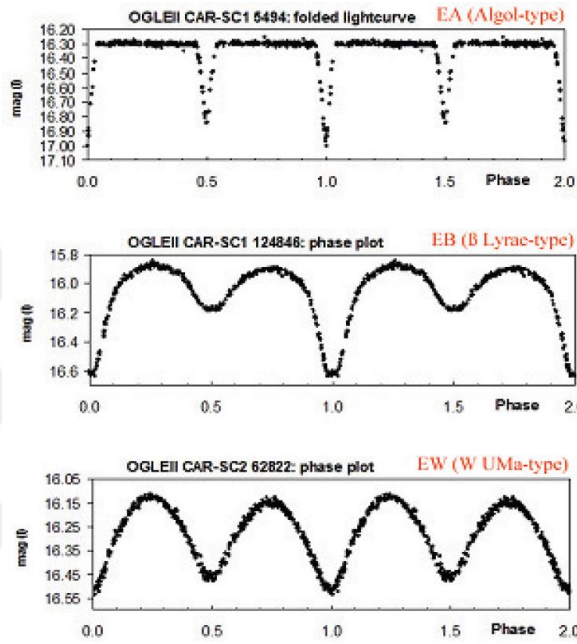
Bu tür sistemler, bileşenler arasındaki mesafe fazla olduğundan bileşenler çok fazla şekil bozulmasına uğramamıştır. Algol türü sistemlerde bileşenlerden biri anakol yıldızı olup diğeri ise evrimleşmiş ve Roche lobunu doldurmuş olup diğere bileşene madde aktarmaktadır. Bu sistemlerin ışık eğrileri (Şekil 3) incelendiğinde örtülmeler dışında önemli bir değişimin olmadığı ve bileşenlerin parlaklık farkından dolayı iki farklı derinlikte örtülmenin olduğu görülür (Andronov 2012; Chen and Reuning 1966; Nelson & Eggleton 2001; Malkov et al. 2006; Karttunen 2007).

➤  *$\beta$  Lyrae Türü Sistemler (EB);*

$\beta$  Lyrae Türü sistemler, bileşenlerden biri Roche lobunu doldurarak diğere bileşene madde aktaran sistemlerdir. Bu sistemlerde, bileşenler birbirlerine yakın olduğundan bileşenlerden birinde veya ikisinde de şekilsel bozulmalar (küresellikten uzaklaşma) meydana gelmektedir. Bu nedenle ışık eğrilerine (Şekil 3) bakıldığında örtülmeler dışında da değişimler görülmektedir. Ayrıca ışık eğrilerinde görülen örtülmelerin farklı derinliklere sahip olmasının nedeni bileşenler arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanır (Svechnikov 1969; Linnel 2002; Malkov et al. 2006; Karttunen 2007).

➤ *W Uma Türü Sistemler (EW);*

W Uma türü sistemler, benzer sıcaklıklarda, birbirine yakın ve her iki ikisi de Roche lobunu doldurmuş bileşenlerden oluşmaktadır. Bu sistemdeki bileşenlerin birbirlerine yakın olmasından dolayı bileşenler fazlasıyla şekil bozulmasına uğramış olup ışık eğrilerinde de (Şekil 3) örtülme dışında sürekli bir değişim görülmektedir. Ayrıca sistemdeki bileşenler birbirlerine yakın sıcaklığa sahip oldukları için ışık eğrilerinde görülen örtülmelerin derinlikleri de hemen hemen aynıdır (Svechnikov & Snezhko 1974; Binnendijk 1977; Malkov et al. 2006; Karttunen 2007).

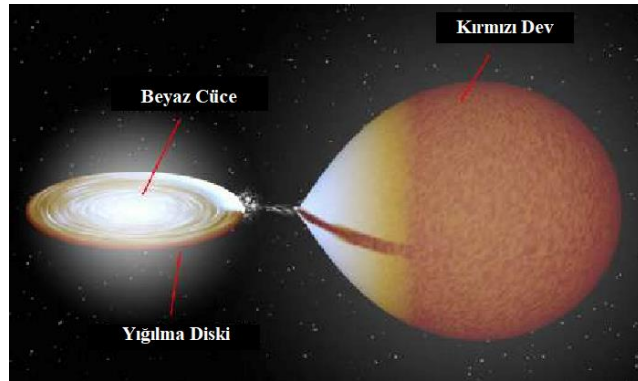


**Şekil 3.** Örtün çift sistemlerinin farklı (EA, EB, EW) türlerinin temsili ışık eğrileri (Szymanski 2005; Hümmereich and Bernhard 2012; Hümmereich, Bernhard and Srdoc 2013)

### **Ortak Zarf Sonrası Yıldızlar ve Kataklişik Değişenler**

Ortak zarf (Common-Envelope; CE) aşamasından geçecek olan çift yıldız sistemleri, eşit olmayan kütleyle sahip iki anakol yıldızından oluşan ayırık ikililerdir. Çift yıldızların evrim teorisine göre başlangıçta anakol yıldızı olan iki bileşenden büyük kütleli olan birincil yıldız, evrimleşerek kırmızı veya asimptotik dev kol aşamasına geçerek genişler. Bu sırada genişleyen bileşen, Roche lobunu doldurarak taşmaya ve düşük kütleli diğer bileşene (ikincil yıldız) madde aktarımına başlar. Birincil yıldızdan aktarılan kararsız madde aktarımı ile düşük kütleli bileşenin Roche lobu bir süre sonra dolar ve her iki bileşeni çevreleyen ortak bir zarf oluşur. Bu evre yaklaşık  $10^3$  yıl sürer ve “ortak zarf” evresi olarak adlandırılır. Ortak zarf evresi sonrasında bileşenlerden biri beyaz cüceye (başyıldız) veya sıcak alt-cüce yıldız dönüşürken diğer bileşen yıldız ise anakol yıldızı olarak kalır. Böylece, Kataklişik Değişenlerin (Cataclysmic Variables; CV's) atası olduğu ve daha yoğun olan Ortak Zarf Sonrası Çift Yıldız

(PCEB) sistemine dönüşür. Ortak zarf aşamasından sonra ikincil bileşen başlangıçta termal dengenin dışında olup bu nedenle aynı kütleyle sahip anakol yıldızlarından daha büyük yarıçaplara sahiptir. Yığılmış maddeden oluşan konvektif zarfın termal bir zaman ölçeğinden sonra, ikincil termal dengeye genişleyecektir. Bu evreden sonra, ikincil yıldız olan anakol yıldızı Roche lobunu doldurarak beyaz cüceye doğru madde aktarımını başlatarak sistemin bir ön-kataklismik değişene (PreCV's) doğru evrimleşme sürecini başlatır. PreCV'ler, yıldız rüzgârı üzerinden manyetik frenleme ve kütle çekimi radyasyonu ile sistemin açısal momentum kaybı nedeniyle sonunda CV olacak olan ayrıık ikili sistemlerdir. Büyük CE evriminin ikinci aşamasını (PreCV's aşaması), kütleli ikincil bileşene ve uzun yörünge dönemine sahip bazı PCEB'ler geçebilir. CE evriminin iki aşamasından geçen sistemlerin evrimi, yörünge parametrelerine bağlı olup ya ikinci CE aşaması sırasında birleşebilir ya da çift beyaz cüce sistemleri olarak sonuçlanabilir. Bu evrelerden sonra ki aşama olan Kataklismik değişen ise bir beyaz cüce (baş yıldız) ve Roche lobunu doldurarak ona madde aktaran küçük kütleli bir bileşenden (yoldaş yıldız) oluşan yarı ayrıık çift yıldız sistemleridir. Bu sistemdeki beyaz cüce manyetik değilse, yığılan madde bir yığılma diski aracılığıyla beyaz cüce üzerine daireler çizerek aktarılırken beyaz cüce güçlü bir manyetik alana sahip ise biriken madde alan çizgileri boyunca beyaz cücenin manyetik kutuplarının yakınındaki yüzey üzerine düşer. Ayrıca, CV'lerdeki bileşenler birbirlerine yakın olduğu için aralarındaki kütle çekimsel etki fazladır. Bu nedenle sistemin yapısı, Şekil 4'te yer alan görseldeki hâle dönüşür.



**Şekil 4.** Kataklismik Değişenlerin temsili gösterimi (Anonim 2022f)

Ayrıca CV'ler kendi içinde de Klasik Novalar (CNe), Cüce Novalar (DNe), Tekrarlayan Novalar (RNe), Simbiyotik Yıldızlar (Z And), Nova-Benzeri Sistemler (NLs) ve Süpernovalar (SNe) gibi alt sınıflara ayrılmaktadır (Paczynski 1976; Iben & Livio 1993; Sarna et al. 1995; Warner 1995; Hellier 2001; Schreiber and Gansicke 2003; Smith 2007).

## Kepler Yasaları

Kepler, Tycho Brahe'nin gözlemlerinden deneysel olarak Güneş Sisteminde bulunan gezegenlerin hareketlerini açıklayan üç gezegensel hareket yasasını geliştirdi. Bu yasalar;

- 1) Bütün gezegenler, odak noktalarının birinde Güneş'in bulunduğu bir eliptik yörünge üzerinde dolanırlar.
- 2) Güneşten herhangi bir gezegene çizilen yarıçap vektörü, eşit zaman aralıklarında eşit alanlar tarar.
- 3) Herhangi bir gezegenin yörüngesel periyodunun karesi, eliptik yörüngesinin büyük ekseninin yarısının küpüyle orantılıdır.  $(P/yr)^2 = (a/AU)^3$

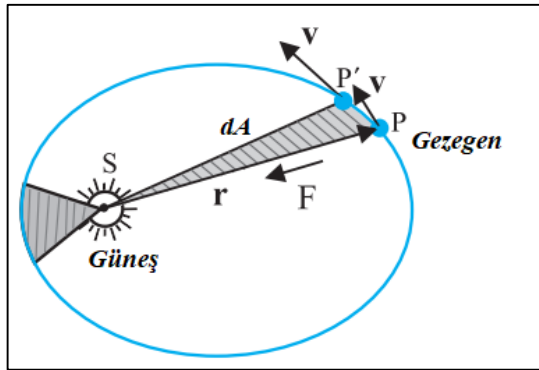
### Kepler'in İkinci Yasası ve Açısal Momentum Korunumu

Güneş'in çevresinde eliptik bir yörüngede dolanan  $m$  kütleli bir gezegen sistemi, görsel olarak Şekil 5'te gösterilmiştir. Gezegenin üzerine etki eden çekim kuvveti yarıçap vektörü boyunca olup yönü Güneş'e doğrudur. Güneş'in gezegene uyguladığı çekim kuvvetinin yönü ile  $r$  uzaklığının yönü aynı olduğu için aralarındaki açı sıfırdır. Bu nedenle sistemdeki net tork da sıfıra eşit olacaktır.

$$\tau = Fr \sin\theta = 0 \quad (1)$$

Buradan yola çıkarak Güneş'in gezegene uygulamış olduğu kütle çekim kuvveti, gezegen üzerinde bir tork (döndürme momenti) oluşturmamaktadır. Bu sebeple gezegenin  $L$  açısal momentumu sabittir.

$$L = r \times p = r \times M_p v = M_p r \times v = \text{sabit} \quad (2)$$



Şekil 5. Kepler'in ikinci yasası olan eşit alanlar yasasının temsili gösterimi (Anonim 2022g)

Şekil 5'te bir  $r$  yarıçap vektörü, bir  $dt$  zamanında  $dA$  alanını taramakta ve bu taranan alan  $r$  ve  $dr$  vektörlerinin oluşturduğu paralelkenarın yarısına denk gelmektedir ( $|r \times dr|$ ). Böylece gezegeni bir  $dt$  zamanındaki yer değiştirmesi  $dr = v dt$  olacağından,

$$dA = \frac{1}{2} |r \times dr| = \frac{1}{2} |r \times v dt| = \frac{L}{2M_p} dt \quad (3)$$

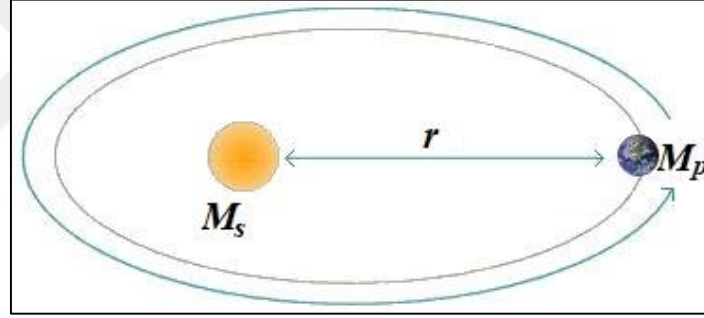
taranan alan elde edilir. Denklem 3'ten;

$$\frac{dA}{dt} = \frac{L}{2M_p} = \text{sabit} \quad (4)$$

olarak elde edilir. Böylece hem  $L$  hem de  $M_p$  sabit olduğundan Güneş'ten herhangi bir gezegene çizilen yarıçap vektörü, eşit zamanlarda eşit alanlar tarar sonucuna varılır. Başka bir ifadeyle gezegen Güneş'e yakın yörüngelerde dolarken hızlı, daha uzak yörüngelerde dolarken daha yavaş hareket eder (Harwit 2006; Kachelrieß 2011; Crossfield et al. 2019; Serway & Beichner 2000).

### Kepler'in Üçüncü Yasası

Kütlesi  $M_s$  olan Güneş'in etrafında dolanan  $M_p$  kütleli bir gezegenin yörünge hareketi Şekil 6'da gösterilmektedir.



**Şekil 6.** Güneş etrafında dolanan  $M_s$  kütleli bir gezegenin şematik gösterimi (Anonim 2022h)

Gezegenin üzerine Güneş tarafından uygulanan kütle çekim kuvvetinden yola çıkarak gezegen için Newton'un ikinci yasası olan  $\sum F = ma$  uygulanabilir ve

$$\frac{GM_s M_p}{r^2} = \frac{M_p v^2}{r} \quad (5)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikteki yörüngesel hız ( $v$ ) yerine  $2\pi r/P$  yazılarak eşitlikte yörünge periyodu ile ilişki kurulur. Böylece,

$$\frac{GM_s}{r^2} = \frac{\left(\frac{2\pi r}{P}\right)^2}{r} \quad (6)$$

eşitliğine ulaşılır. Denklem 6'dan yörünge periyodu;

$$P^2 = \left(\frac{4\pi^2}{GM_s}\right) r^3 = K_s r^3 \quad (7)$$

olarak elde edilir. Denklem 7’de  $K_s$  sabit olup Kepler’in üçüncü yasaının matematiksel gösterimidir (Harwit 2006; Kachelrieß 2011; Crossfield et al. 2019; Serway & Beichner 2000).

### İki Cisim Problemi

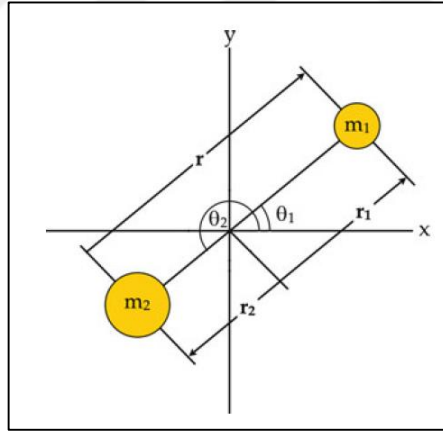
Çift yıldızların veya yıldız-gezegen sistemlerinin yörünge dönem değişimlerini modelleyebilmek için öncelikle yörünge parametrelerinin bilinmesi gereklidir. Yörünge parametreleri ise ikili sistemler için temel oluşturan iki cisim problemi ile belirlenebilir. Sistemdeki bileşenler noktasal kaynak olarak kabul edilir ve yalnızca Newton’un kütle çekim kuvveti dikkate alınır. Merkezi bir kuvvet düşünüldüğünde, ikili bir sistemin yörünge hareketi;

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 + \frac{Gm_1m_2}{|r_2 - r_1|} \quad (8)$$

ile ifade edilebilen Lagrange’dan bulunur. Burada  $m_i$ ,  $v_i$  ve  $r_i$ ,  $i$ . cismin kütle, hız ve konum vektörünü temsil etmektedir.  $G$  ise Newton’un kütle çekimsel sabitidir. Şekil 7’deki gibi bir koordinat sistemi seçilerek;

$$m_1r_1 + m_2r_2 = 0 \quad (9)$$

toplam lineer momentumun korunumunu ifade eden eşitlik elde edilir.



Şekil 7. Bir çift yıldız sisteminin koordinat düzlemindeki şematik gösterimi (Benacquista 2013)

Daha sonra, Denklem 9 kullanılarak,

$$m_1r_1 = m_2r_2 \quad (10)$$

ifadesine ulaşılır. Ayrıca,

$$r = r_1 + r_2 \quad (11)$$

olarak tanımlanır. Denklem 9 ve 10,  $r_1$  ve  $r_2$ ’yi  $r$  cinsinden çözümleyebilmek için kullanılır.

$$r_1 = \frac{m_2}{M}r \quad 12$$

$$r_2 = \frac{m_1}{M} r \quad 13$$

Burada  $M = m_1 + m_2$ 'dir. Ayrıca,  $\theta_1 = \theta_2 - \pi = \theta$  eşitliği bulunur (Şekil 7). Yörüngelerin bir düzlemde olduğu varsayılırsa,

$$v_1^2 = \dot{r}_1^2 + r_1^2 \dot{\theta}_1^2 = \left(\frac{m_2}{M}\right)^2 (\dot{r}^2 + r^2 \dot{\theta}^2) \quad 14$$

$$v_2^2 = \dot{r}_2^2 + r_2^2 \dot{\theta}_2^2 = \left(\frac{m_1}{M}\right)^2 (\dot{r}^2 + r^2 \dot{\theta}^2) \quad 15$$

ve böylece,

$$\begin{aligned} \mathcal{L} &= \frac{1}{2} \frac{m_1 m_2^2}{M^2} (\dot{r}^2 + r^2 \dot{\theta}^2) + \frac{1}{2} \frac{m_2 m_1^2}{M^2} (\dot{r}^2 + r^2 \dot{\theta}^2) \\ &\quad + \frac{G m_1 m_2}{r} \\ &= \frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{M} \dot{r}^2 + \frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{M} r^2 \dot{\theta}^2 \\ &\quad + \frac{G m_1 m_2 M}{M r} \\ &= \frac{1}{2} \mu \dot{r}^2 + \frac{1}{2} \mu r^2 \dot{\theta}^2 + \frac{G \mu M}{r} \end{aligned} \quad 16$$

sonucuna ulaşılır.  $\mathcal{L}$ ,  $\theta$ 'dan bağımsız olduğundan,

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} \rightarrow \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}} = \text{sabit} \quad 17$$

eşitliği ifade edilir. Böylece,

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}} = \mu r^2 \dot{\theta} = J = \text{açısal momentum} \quad 18$$

ulaşılır. Ayrıca toplam enerji korunacağından dolayı,

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 - \frac{G m_1 m_2}{r} = \frac{1}{2} \mu (\dot{r}^2 + r^2 \dot{\theta}^2) - \frac{G \mu M}{r} = C \quad 19$$

sistemin toplam enerjisi Denklem 19'daki gibi ifade edilebilir. Burada, Denklem 18 kullanılarak, toplam enerji, sadece  $r$ 'ye bağlı bir denklem haline dönüştürülebilir.

$$\dot{\theta} = \frac{J}{\mu r^2} \rightarrow \dot{\theta}^2 = \frac{J^2}{\mu^2 r^4} \quad 20$$

Böylece enerji denklemi;

$$C = \frac{1}{2} \mu \dot{r}^2 + \frac{1}{2} \frac{J^2}{\mu r^2} - \frac{G\mu M}{r} \quad 21$$

ile tanımlanır (Harwit 2006; Kachelrieß 2011; Benacquista 2013; Masuda 2014; Crossfield et al. 2019).

### Yörünge Şekli

Denklem 21'den yörünge yarıçapının zamana bağımlılığı ve ardından Denklem 18 kullanılarak yörünge açısının zamana bağımlılığı elde edilir. Ancak bu eşitlikler ikili sistemlerin gözlemlerinden doğrudan yörüngeyi büyük ölçüde doğrulukla belirleyebilmek için yeterli değildir. Bu nedenle Denklem 21 ve bazı değişkenler kullanılarak yörüngeyi belirlemek için ilk olarak  $u = 1/r$  ifadesi tanımlanır. Böylece,

$$\frac{du}{d\theta} = u' = -\frac{1}{r^2} \frac{dr}{d\theta} \rightarrow \frac{dr}{d\theta} = -r^2 u' \quad 22$$

ifadesine ulaşılır. Daha sonra,

$$\dot{r} = \frac{dr}{d\theta} \dot{\theta} = -r^2 u' \frac{J}{\mu r^2} = -\frac{J}{\mu} u' \quad 23$$

elde edilir. Burada  $\dot{\theta}$  ifadesi, Denklem 20'den gelmektedir. Ardından, Denklem 23'ün, Denklem 21 ile değiştirilmesiyle,

$$\frac{J^2}{2\mu} u'^2 + \frac{J^2}{2\mu} u^2 - G\mu M u = C \quad 24$$

bağlantısına ulaşılır. Bu ifadeden sonra  $\ell = J^2/G\mu^2 M$  ve  $J^2/\mu = GM\mu\ell$  şeklinde iki değişken tanımlanır. Böylece  $C$  ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\frac{1}{2} GM\mu\ell u'^2 + \frac{1}{2} GM\mu\ell u^2 - GM\mu u = C \quad 25$$

Son olarak Denklem 25,  $GM\mu/2\ell$  ifadesine bölünüp eşitliğin her iki tarafına 1 değeri eklenir ve

$$\ell^2 u'^2 + \ell^2 u^2 - 2\ell u + 1 = \frac{2C\ell}{GM\mu} + 1 \quad 26$$

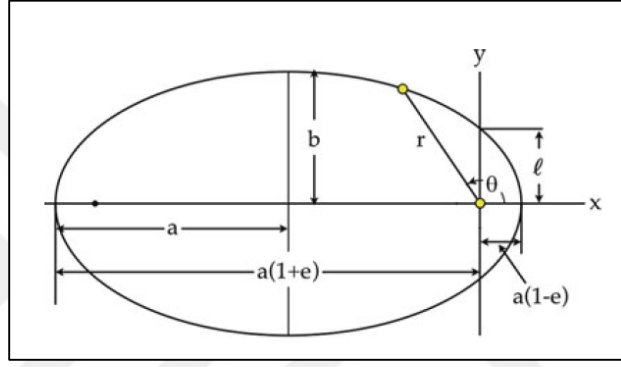
ifadesine ulaşılır. Daha sonra,

$$e^2 = \frac{2C\ell}{GM\mu} + 1 \quad \text{ve } x = \ell u - 1 \quad 27$$

olarak tanımlanır. Bu eşitlikler ve Şekil 8 doğrultusunda, bir elipsin parametrik denklemini;

$$r = \frac{\ell}{(1 + e \cos \theta)} \quad 28$$

ile elde edilir.



**Şekil 8.** Merkezinde bir yıldız olan eliptik yörüngenin şematik gösterimi (Benacquista 2013)

Bu durumda, göreceli yörüngenin şekli, merkezde bir cisim olacak şekilde  $\theta = 0'$  da en yakın yaklaşım noktasında bir elipstir. Böylece,

$$r_{min} = r(0) = \frac{\ell}{1 + e} \quad 29$$

$$r_{max} = r(\pi) = \frac{\ell}{1 - e} \quad 30$$

Bu ifadeler kullanılarak,

$$a = \frac{1}{2}(r_{min} + r_{max}) = \frac{\ell}{1 - e^2} \rightarrow \ell = a(1 - e^2) \quad 31$$

Böylece, Periastron ve apastron parametreleri yarı ana eksen cinsinden aşağıdaki gibi;

$$r_{min} = a(1 - e) \quad 32$$

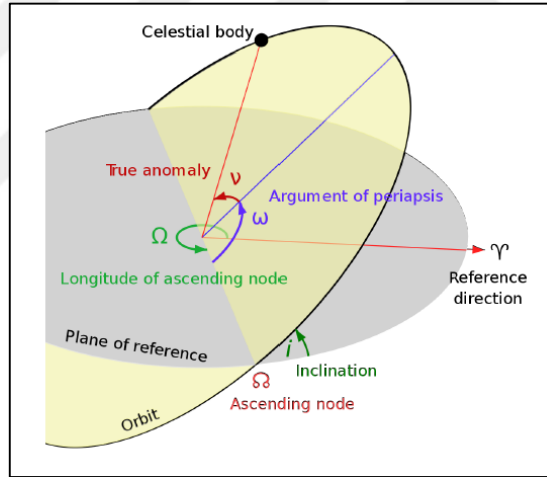
$$r_{max} = a(1 + e)$$

33

elde edilebilir. Burada  $e$ , eliptik yörüngenin eksentrisitesini temsil etmekte olup yörüngenin şekline bağlı olarak değer almaktadır. Toplam enerji negatif ise, eksentrisite  $0 \leq e < 1$  arasında yer alır ve elips veya dairesel bir yörüngeyi temsil eder [ $e = 0$  (*daire*),  $0 < e < 1$  (*elips*)]. Toplam enerji sıfıra eşit olduğunda,  $e = 1$  eşit olur ve yörünge parabolüdür. Son olarak, toplam enerji pozitif olduğu durumda ise  $e > 1$  olur ve yörünge hiperboldür (Harwit 2006; Kachelrieß 2011; Benacquista 2013; Masuda 2014; Crossfield et al. 2019).

### Yörünge Parametreleri

Üç boyutlu yörüngede dolanan iki cisim için her bir cismin konumunu ve hızını tanımlayan yörünge parametreleri vardır. Bu yörünge parametreleri, yörünge periyodu ( $P$ ), yarı ana eksen uzunluğu ( $a$ ), yörünge eksentrisitesi ( $e$ ), yörünge eğimi ( $i$ ), düğüm boylamı ( $\Omega$ ) ve pericenter argümenti ( $\omega$ )'dir (Şekil 9). Yörünge parametrelerinden  $P$ , zaman ile ilişkili iken  $a$  ve  $e$  elipsin şekliyle ilişkilidir.  $i$ ,  $\Omega$ ,  $\omega$  ise elipsin yönünü tanımlar (Crossfield et al. 2019).



Şekil 9. İkili sistemin yörünge geometrisi (Crossfield et al. 2019)

*i) Yörünge Periyodu (The orbital period, P);* İkili sistemin birbirlerinin etrafında tam bir tur dönmesi için geçen süreyi tanımlar.

*ii) Yarı ana eksen uzunluğu (Semi-maxor axis, a);* Ana ekseninin yarısı olarak tanımlanır ve yarı ana eksen uzunluğu olarak adlandırılır.

*iii) Eksentrisite (Eccentricity, e);* İkili sistemlerde önemli bir yörünge parametresi olan eksentrisite yörüngenin şeklini belirler. Dairesel yörüngeler için eksentrisite sıfır iken eliptik yörüngelerde 0 ile 1 arasında değerlere sahiptir. Ayrıca eksentrisite 1'e eşit olduğu durumda yörünge parabol iken 1'den büyük olduğu durumlarda ise hiperboldür.

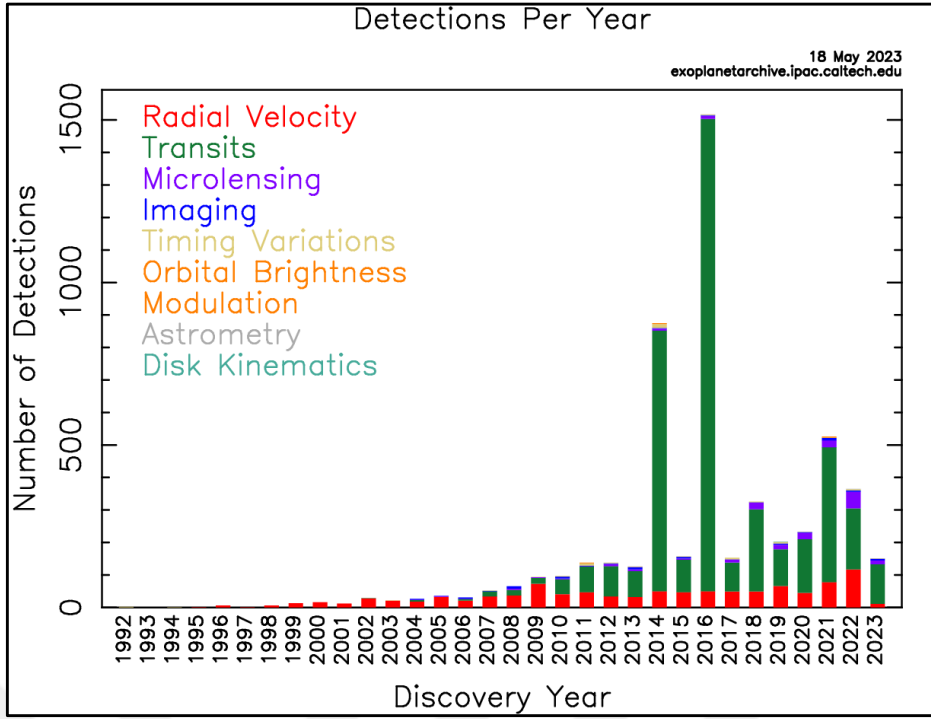
**iv) Yörünge eğimi (Inclination,  $i$ );** İkili bir sistemin üçüncü bir yörünge parametresi, yörünge düzlemi ile Dünya'nın ekvator düzlemi arasındaki açı olarak tanımlanan yörünge eğimi olup  $0^\circ$  ile  $180^\circ$  arasında değerler alır. Yörünge eğimi  $0^\circ$  olması halinde doğrudan ekvator üzerinde kalan bir yörünge olup ekvator yörüngesi olarak adlandırılırken  $90^\circ$  bir eğim kuzey ve güney kutupların üzerinden geçer ve kutup yörüngesi olarak adlandırılır.

**v) Dügüm boylamı (the longitude of the ascending node,  $\Omega$ );** Dünya'nın ekvator düzlemi üzerinde, referans yönü ile dügüm noktası arasındaki ölçülen açı olarak tanımlanır.

**vi) Perihelin Argümanı (The argument of perigee ( $\omega$ );** Bir referans yönü ile gezegenin en yakın yaklaşma noktasının yönü arasındaki açı olarak tanımlanır.

## Ötegezegenler

Ötegezegen araştırmaları, Güneş sistemimiz dışındaki dış gezegenleri tespit etmek ve Dünya benzeri bir gezegen bulmak için yeni yöntemler geliştirmeye ve mevcut yöntemleri iyileştirmeye odaklanan bir astronomi alanıdır. Güneş'imiz dışındaki yıldızların yörüngesinde veya serbest halde dolanan Güneş sistemimiz dışındaki gezegenler "ötegezegen" olarak adlandırılır. Ötegezegenler, bir yıldız veya yıldız kalıntısının etrafında yörünge hareketi yapan ve Jüpiter kütesinin 13 katından daha küçük olan (büyük ise;  $13 M_{\text{Jüpiter}} < \text{Kahverengi Cüce} < 84 M_{\text{Jüpiter}}$ ) gezegenler olarak tanımlanmıştır (Boss vd., 2007; Ridpath 2012; Essack 2017). Ötegezegenlerin keşfi, etrafında dolandığı yıldızının parlak ışığı altında doğrudan gözlenmesi zor olduğundan dolayı büyük bir çoğunluğu Geçiş, Dikine Hız, Zamanlama, Kütle Çekimsel Mikromercek ve Konum-ölçüm gibi dolaylı gözlem yöntemleriyle yapılır. Doğrudan görüntüleme yöntemi ise doğrudan ötegezegen keşfinin yapılabildiği tek yöntemdir. Ötegezegen keşiflerinde bu yöntemler kullanılarak řu ana kadar 3978 tekli ve 858 çoklu gezegen sistemi olmak üzere toplamda 5386 gezegen keşfedilmiştir (Anonim 2022a). Ötegezegen keşiflerinde kullanılan yöntem ile yıllara göre keşfedilen ötegezegenlerin sayısı Şekil 10'daki histogram grafiğinde verilmiştir.



Şekil 10. Yıllara ve keşif yöntemlerine göre ötegezegenlerin keşif sayısı (Anonim 2022j)

İlk ötegezegen keşif çalışmalarına 1938 yılında çevresinde ötegezegen olabileceği düşünülen bir yıldızın gökyüzündeki konumunun zamana göre değişimi incelenerek (Konumölçüm yöntemi) başlanmıştır (van deKamp 1943). Güneş sistemi dışında ilk güvenilir ötegezegen keşfi ise, 1992 yılında pulsar zamanlamasındaki değişimler incelenerek PSR 1257+12 milisaniye atarcasının etrafında dolanan gezegenin varlığıyla tespit edilmiştir (Wolszczan and Frail 1992). Bu sistemin gözlemlerinin takibiyle sistem etrafında dolanan ikinci ve üçüncü gezegenlerinin varlığı da ortaya çıkarılmış olup hatta olası dördüncü bir gezegenin de olabileceği düşünülmüştür (Wolszczan 1994; Wolszczan 1997). Bu keşiften hemen sonra, Dikine hız yöntemi kullanılarak ilk kez Güneş benzeri bir yıldız olan 51 Pegasi yıldızının etrafında  $0.41 M_{\text{jup}}$  kütleyle sahip bir gezegenin varlığı tespit edilmiştir (Mayor and Queloz 1995). Diğer dikine hız araştırmaları ile öncesinde 51 Pegasi yıldızının dikine hız değişimlerini incelenmiş olsa da büyük boyuttaki gezegenlerin ana yıldızına bu kadar yakın bir konumda oluşamayacaklarının düşüncesiyle dikkate alınmamıştır (Wuchterl, 1994; Marcy & Butler, 1995). Bu keşiften yaklaşık üç yıl sonra ise, Marcy et al. (1998) tarafından dikine hız yöntemi kullanılarak M tayf türüne sahip bir yıldızın yörüngesinde dolanan  $2.1 M_{\text{jup}}$  kütleyle sahip Gliese 876 b gezegeni keşfedilmiştir (Marcy et al. 1998). Dikine hız yöntemiyle ötegezegen keşif çalışmaları devam ederken Mazeh et al. (2000) tarafından yine dikine hız yöntemiyle G0V yıldızı HD 209458 etrafında sıcak bir Jüpiter'in olabileceği düşünülmüştür. Sonrasında bu sistemin fotometrik gözlemleri Charbonneau et al. 2000 ve Henry et al. 2000 tarafından eş zamanlı olarak gerçekleştirilmiş ve yıldızın parlaklığında, gezegenin dikine hız

yörüngesiyle uyumlu bir düşüş olduğu görülmüştür. Böylece, Geçiş yöntemi kullanılarak ilk kez bir yıldız etrafında dolandığı tespit edilen “HD 209458 b” ötegezegeninin keşfi duyurulmuştur (Charbonneau et al. 2000; Henry et al. 2000; Brown *et al.* 2001).

Keşiflerle birlikte dikine hız ve geçiş yöntemi, ötegezegen araştırmaları için önemli bir hale gelmiş olup bu alanda birçok projenin başlamasına neden olmuştur. Bu projelerden yer tabanlı gözlemlere dikine hız için HARPS (the High Accuracy Radial Velocity Planetary Search Project, Mayor et al. 2009) ve APPS (the Anglo-Australian Planet Search, Wittenmyer et al. 2012) gibi projeler öncülük ederken geçiş için WASP (Wide Angle Search for Planets (Pollacco et al. 2006; Collier et al. 2007) ve HATNet (Hungarian-made Automated Telescopes Network, Bakos et al. 2004; Howard et al. 2012) gibi projeler öncülük etmektedir. Ayrıca Geçiş yöntemi kullanılarak yapılan ötegezegen keşiflerine, uzay tabanlı gözlemlerinden biri olan NASA’nın KEPLER (Koch et al. 2007; Huang et al. 2019) uydusu, NASA’nın TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite; Swayne et al. 2020; Ridden-Harper et al. 2020) uydusu ve Fransız Uzay Ajansı (CNES) ile Avrupa Uzay Ajansı (ESA) iş birliğinde uzaya gönderilen CoRoT (Convection, Rotation and planetary Transits; Raetz et al. 2002; Baglin et al. 2007) uydusu büyük katkı sağlamaktadır. Dikine hız ve Geçiş araştırmalarına paralel olarak, uzay ve yer tabanlı teleskoplar kullanılarak ötegezegen sistemlerini doğrudan görüntülemeye yönelik birçok girişim yapılmıştır. Bu yöntem son zamanlarda meyvelerini vermeye başlamış olup teknolojiye bağımlıdır. Bu nedenle doğrudan görüntüleme ile ötegezegen keşif sayısı azdır. Bu yöntem ile ilk kez 2M1207 kahverengi cüce yıldızının yörüngesinde bir gezegenin varlığı düşünülmüş olup (Chauvin et al. 2004) daha sonrasında yapılan detaylı araştırmalar ile gezegenin varlığı doğrulanmıştır (Chauvin et al. 2005). Diğer bir yöntem olan Konum-ölçüm yöntemiyle gerçekleştirilen ilk keşif ise 1.5 Mjup kütleyle sahip HD 176051 b ötegezegenidir (Mutterspaugh et al. 2010).

Dikine hız ve geçiş yöntemi ile birçok gezegen keşfi yapılmış olsa da bu yöntemlerin çift yıldız sistemlerinin etrafındaki gezegenlerin varlığını tespitinde dikine hız değişimleri gezegenlerden kaynaklanan küçük salınımları algılayamaması ve bu sistemlerin etrafında dolanan gezegenleri incelemek için geçişi gözlemlene olasılığının çok düşük olması gibi bazı zorlukların olduğu görülmüştür. Bu nedenle çift yıldız sistemleri etrafındaki gezegenlerin keşfi için sistemin yörünge dönem değişimini inceleyen zamanlama yöntemi kullanılmaktadır. Zamanlama yöntemi ile ilk kez HW Vir çift yıldız sistemi etrafında gezegen olabileceği düşünülmüştür (Lee et al. 2009). Bu yöntem kullanılarak yapılan sonraki çalışmalarda NN Ser (Beuermann vd., 2010; Parsons et al. 2010; Hardy et al. 2016), DP Leo (Qian vd., 2010; Beuermann et al. 2011), Kepler 16 (Doyle et al. 2011), NY Vir (Qian et al. 2012; Lee et al.

2014; Song et al. 2019; Er et al. 2021), NSVS 14256825 (Almeida et al., 2013; Nasiroglu et al., 2017; Zhu et al., 2019); V471 Tau (Hardy et al. 2015); UZ Leo (Lee and Park, 2018); GK Vir (Almeida et al. 2020) ve V470 Cam (Sale et al. 2020) gibi sistemlerin etrafında dolanan 3. cisimlerin varlığından bahsedilmiştir.

Zamanlama yöntemi sadece çift yıldız sistemlerinde kullanılmamakta olup geçiş gösteren yıldız-gezegen sistemlerinin etrafında da ilave bir cismin var olup olmadığı için de kullanılmaktadır. Yıldız-gezegen sistemlerinin yörünge dönem değişimleri birçok araştırmacı tarafından incelenmekte olup OGLE-TR-132b (Adams et al. 2011), Wasp-10 (Maciejewski et al., 2011), Wasp-52b (Mancini et al., 2017), TrES-3 (Manaday et al., 2020) ve Wasp-12 (Öztürk and Erdem, 2019), XO-6b (Garai et al. 2020) gibi çalışmalar örnek olarak verilebilir. Tüm bu bulgular sonucunda başta dikine hız ve geçiş yöntemi olmak üzere diğer yöntemlerle birlikte ötegezegen çalışmaları birçok araştırmacı tarafından devam etmektedir (Lee et al. 2014; Baluev et al. 2015; Collins et al. 2017b; Mancini et al. 2017; Nasiroglu et al. 2017; Song et al. 2019; Almeida et al. 2020; Sonbas et al. 2022).

## **Ötegezegen Keşif Yöntemleri**

### **Dikine hız (radial velocity) yöntemi**

Bir yıldızın dikine hızı, tayf çizgilerindeki Doppler kaymalarından belirlenmekte olup bu yöntem de Doppler etkisine dayanmaktadır. Ötegezegene sahip bir yıldız, gezegen ile ortak kütle merkezi etrafında yörünge hareketi yaparken gezegenin neden olduğu kütle çekimsel etki nedeniyle yıldızın yalpalanmasına ve bu hareket sırasında yıldız tayf çizgilerinin maviye veya kırmızıya kaymasına neden olur. Bu olay Doppler olayı olarak bilinmekte olup yıldız bize yaklaşırken gelen ışık maviye uzaklaşırken kırmızıya kayar. Yıldızın dikine hızındaki bu değişimler tayföçerler ile incelenerek yıldız etrafında ilave bir cismin varlığının araştırılması için kullanılmaktadır (Mayor and Frei 2003; Odunlade 2010; O'Donovan 2008; Dotson et al. 2010; Bozza et al. 2016; Perryman 2018).

### **Geçiş (transit) yöntemi**

Son yıllarda en başarılı yöntemlerden biri olan geçiş yöntemi ile bir gezegenin bağlı olduğu yıldızın önünden geçişi tespit edilmekte ve bu olaya geçiş (transit) denilmektedir. Bir gezegen bağlı olduğu yıldızın önünden geçerken örtülmeden dolayı yıldızın parlaklığında periyodik olarak bir miktar azalma meydana gelir. Yıldızın ışık ölçümüne dayanan bu yöntem ile yıldız etrafında dolanan bir gezegenin varlığı araştırılmaktadır. Ancak bu geçişin sağlanabilmesi için yörünge düzleminin gözlemciye göre belirli koşullar ile hizalanması

gerekmektedir (Mayor and Frei 2003; Moutou and Pont 2005; Santos 2008; O'Donovan 2008; Odunlade 2010; Perez 2015; Bozza et al. 2016).

### **Doğrudan görüntüleme (imaging) yöntemi**

Bu yöntem, gezegenin doğrudan görüntülemeye dayalı bir yöntem olduğundan ötegezegen keşfi için kullanılan en zor yöntemlerden biridir. Yıldız etrafında dolanan gezegeni görüntüleyebilmek için yıldızdan gelen ışığı koronagraf gibi bazı teknikler ile maskelemek gerekmektedir. Ayrıca gezegenler yıldızlardan çok daha sönük olduğundan, bu yöntem ile genellikle dev (Jüpiter'den daha büyük) ve küçük yıldızların yörüngesinde dolanan sıcak gezegenler tespit edilmektedir (Mayor and Frei 2003; Odunlade 2010; Perez 2015).

### **Kütle çekimsel mikromercek (microlensing) yöntemi**

Farklı uzaklıklarda bulunan iki yıldızın bakış doğrultumuz ile aynı hizada bulunmasına mikromercekleme olayı denilmektedir. Böyle bir durumda, arkaandaki yıldızdan gelen ışık bize yakın olan yıldızın kütle çekim alanına girmesiyle yıldız ışığı üzerinde bir merceklenme etkisi oluşturur ve iki yıldızın toplam ışık şiddetinde önce bir artma daha sonra da bir azalma meydana gelir. Bu esnada bize yakın yıldızın etrafında dolanan bir gezegen var ise onunda kütle çekim etkisi bu merceklemeye ilave bir katkı oluşturacaktır (Wright and Gaudi 2012; Perez 2015; Bozza et al. 2016).

### **Konum-ölçüm (Astrometry) Yöntemi**

Bu yöntem, günümüzde artık ötegezegen keşifleri için çok fazla tercih edilmemektedir. Ötegezegenine sahip bir yıldızın, gezegen ile ortak bir kütle merkezi etrafında yörünge hareketi yaparken gezegenin yıldızına uyguladığı kütle çekim etkisi sonucu ile yıldızın gökyüzü düzlemindeki hareketlerinde küçük değişimler görülür. Bu değişimler incelenerek yıldız etrafında bir gezegen olup olmadığı araştırılmaktadır (Wright and Gaudi 2012; Perryman 2018)

### **Zamanlama (timing) yöntemi**

Bu yöntem ile 1992 yılında PSR 1257+12 milisaniye atarcasının etrafında bir gezegenin varlığı tespit edilmiş ve bu keşif tüm ötegezegen keşifleri için öncü olmuştur (Wolszczan and Frail 1992). Zamanlama yöntemi ilk zamanlarda, bir süpernova kalıntısı olan nötron yıldızlarının yapmış olduğu elektromanyetik ışımının frekanslarındaki periyodik değişimleri tespit etmek amacıyla kullanılmıştır (Odunlade 2010). Ancak gelişen teknikler ve teknoloji ile çift yıldız sistemleri (Lee et al. 2014; Song et al. 2019; Er et al. 2021) ve geçiş gösteren yıldız-gezegen sistemleri (Mancini et al., 2017; Garai et al. 2020) gibi farklı sistemler üzerine de uygulanmıştır. Zamanlama yöntemi, ikili sistem etrafında dolanan ilave bir cisim var ise sisteme uyguladığı kütle çekim etkisi nedeniyle sistemin ışığının gözlemciye daha erken veya

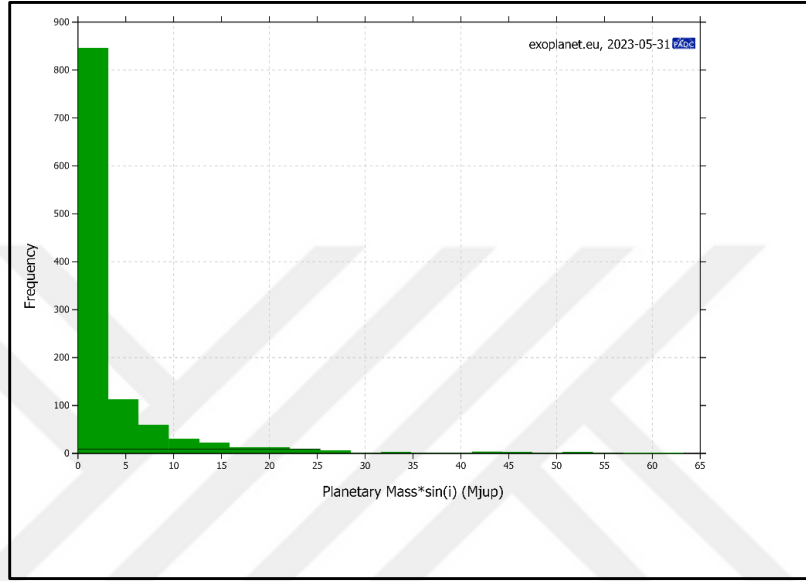
daha geç gelmesinin incelenmesine dayanan ışık-zaman etkisi olgusundan yola çıkarak ortak bir kütle merkezi etrafında yörünge hareketi yapan iki bileşenin örtülme zamanlarındaki değişimin incelenmesine dayanır. Bu değişimler, ikili sistemlerin gözlenen (Observed) ve hesaplanan (Calculated) örtülme zamanları arasındaki farkların (O–C) doğrusal fonksiyonla fit edilmesiyle tespit edilir ve bu tür ikili sistemlerin yörüngesinde dolanan 3. cisimlerin tespit etmek için de kullanılabilir (Doyle et al. 2011; Horner et al. 2013; Marsh et al. 2014; Nasiroglu et al. 2017).

İkili sistemlerin etrafında dolanan gezegenleri, sistemin büyük dikine hız değişimine sahip olduğu için dikine hız yöntemiyle hassas bir şekilde tespit etmek oldukça zordur. Aynı şekilde geçiş yöntemiyle bu tür sistemlerin etrafında dolanan gezegenleri tespit etmek geçiş gösterme olasılığının düşük olması nedeniyle de düşük bir ihtimaldir. Ancak zamanlama yöntemindeki ışık-zaman etkisinden (çift yıldızlar için LTT; Light Travel Effect / yıldız-gezegen sistemleri için TTV; Transit Time Variation) yola çıkarak LTT/TTV sinyalinin yarıgenlik değeri ( $K$ ), Kepler yasasına göre ikili sistemdeki ilave cismin kütlesi ve periyodu ile orantılı olduğundan dikine hız ve geçiş gibi diğer keşif yöntemlerinin tersine ikili sistemler etrafında gezegen araştırmaları için bu yöntem daha hassas sonuçlar vermektedir (Pribulla et al., 2012). Ayrıca birçok araştırmacı tarafından geçiş gösteren yıldız-gezegen ve çift yıldız sistemlerinin etrafında dolanan ilave cisimlerin varlığı düşünülse de bu tür sistemlerin yörünge dönem değişimine neden olan örtülme zamanlarında ki değişimlerin yıldız-gezegen sistemleri için yıldız lekeleri (Tregloan-Reed et al. 2015; Mancini et al., 2017), Gelgit Değişimi (Tidal Variation), Manyetik etkinlik (Applegate, 1992; Tian 2009, Völschow et al. 2016), çift yıldız sistemleri için ise kütle transferi/kaybı, manyetik frenleme ile açısal momentum kaybı (Applegate, 1992; Lee et al. 2009; Beuermann et al., 2010; Qian et al., 2010; Parsons et al., 2010; Almeida, Jablonski & Rodrigues, 2013; Almeida et al., 2020) gibi farklı mekanizmalardan kaynaklanıyor olabileceği düşünülmektedir. Yörünge dönem değişimlerinin nedeni birçok sistem için literatürde hala açık bir konu olup sorunu çözenin olası bir yolu üçüncü cisimlerin veya diğer fiziksel etkilerin kanıtlarını aramaktır (Hardy et al., 2015; Bonavita et al., 2016; Bours et al., 2016; Völschow et al., 2016; Pulley et al., 2018; Marchioni et al., 2018). Bu nedenle ikili sistemler etrafında gezegen varlığından net bir şekilde bahsedebilmek için LTT/TTV sinyalinin zamanla tekrarlayan olması ve gözlemsel verinin değişimdeki en uzun periyodunun en az iki tam çevrimini kapsamaması gereklidir.

### **Ötegezegenlerin Özellikleri**

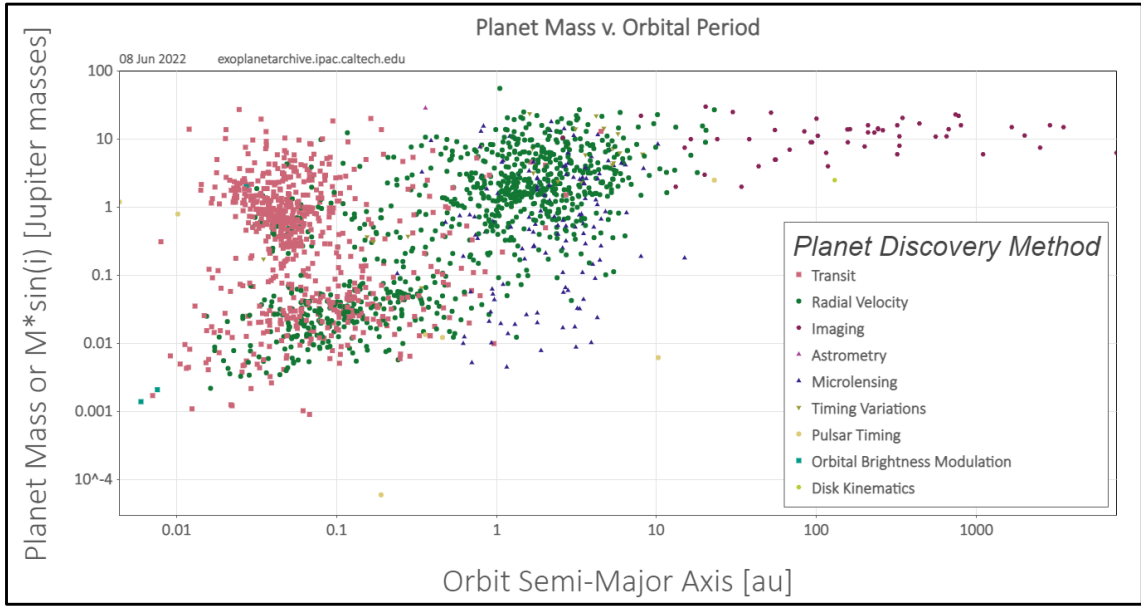
Cameron (2002) ve Marcy et al. (2003) gibi birçok araştırmacı tarafından gezegenlerin kütle ve yörünge parametre dağılımlarını içeren birçok istatistiksel çalışma yapılmış ve bu

çalışmalar sonucunda ötegezegenlere ait birçok bilgiye ulaşılmıştır. Örneğin, dikine hız yöntemiyle gezegene ait minimum kütle ( $M_p \sin i$ ) elde edilirken Jorissen et al. (2001) tarafından yapılan istatistiksel çalışma ile  $M_p \sin i$  dağılımının genel kütle ( $M_p$ ) dağılımına çok yakın olduğu gösterilmiştir. Böylece dikine hız ile elde edilen  $M_p \sin i$  parametresi ile gezegenin genel kütlesine istatistiksel olarak ulaşılabilir. Bununla birlikte keşfedilen gezegenlerin çoğu Şekil 11’de görüldüğü gibi yaklaşık  $M_p \sin i < 10 M_J$  kütlesine sahiptir. Ancak daha küçük kütleli gezegenlerin sayısı da gelişen teknik ve teknoloji ile artmaktadır.

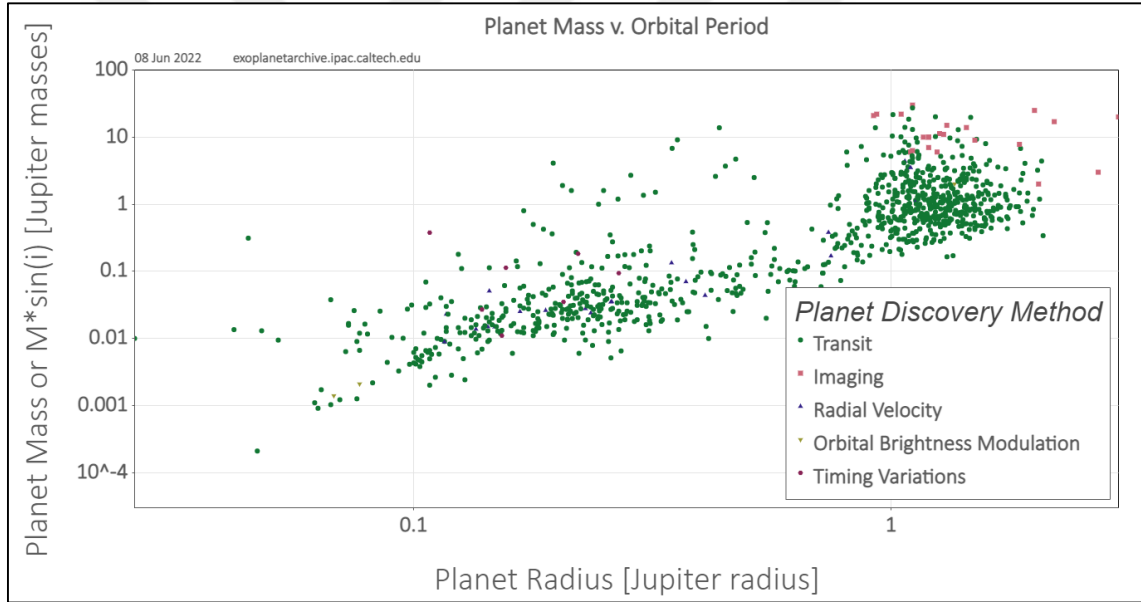


Şekil 11. Keşfedilen ötegezegen sayısının kütleyle göre dağılımı (Anonim 2022a)

Şekil 12 ve 13, keşfedilen gezegenlerin kütle, yarıçapı ve yörünge uzunlukları arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Şekil 12’de farklı yöntemlerle keşfedilen ötegezegenlerin kütle ve yörünge uzunluğu arasındaki ilişki dikkat çekmektedir. Geçiş (Transit) yöntemiyle keşfedilen gezegenler, yıldız ve gezegenin birbirine yakın olması durumunda geçiş olasılığı yüksek olduğundan bağlı oldukları yıldızla çoğunlukla  $\leq 0.2$  AU’ dan daha küçük yörüngelerde tespit edilmiştir (Mason 2008).



**Şekil 12.** Keşfedilen ötegezegenlerin kütle ve yörünge uzunlukları arasındaki ilişki (Anonim 2022k)



**Şekil 13.** Keşfedilen ötegezegenlerin kütle ve yarıçap arasındaki ilişki (Anonim 2022k)

Diğer taraftan doğrudan görüntüleme yöntemiyle keşfedilmiş ötegezegenler ise geçiş yönteminin aksine çoğunlukla  $\geq 10$  AU'dan daha uzak yörüngelerde tespit edilmiştir. Bunun nedeni ise, yıldızın yakın yörüngelerde dolanan gezegenlerin yıldızın parlak ışığı altında tespit edilememesinden kaynaklıdır. Yıldızın daha uzak yörüngelerde dolanan ötegezegenlerin tespiti, doğrudan görüntüleme ile daha olasıdır. Ayrıca  $\geq 10$  AU'dan daha uzak yörüngelerde tespit edilen ötegezegenlerin sayısının düşük olması, bu tür gezegenlerin bağlı oldukları yıldızlarının yörüngesine girmesi için gereken sürenin daha uzun olmasından kaynaklıdır. Geçiş ve doğrudan görüntülemenin dışındaki diğer ötegezegen keşif yöntemlerinde ise genellikle keşfedilen gezegenler 0.2 AU ile 10 AU arasında yörünge uzunluklarına sahiptir. Dikine hız

yöntemiyle keşfedilmiş ötegezegenlerin büyük bir çoğunluğu Jüpiter'in kütesine benzer veya ondan daha büyüktür. Bunun sebebi ise, büyük kütleli gezegenlerin bağlı olduğu yıldızına uyguladıkları kütle çekimsel etkinin tespit edilme olasılığının daha yüksek olmasıdır. Diğer ötegezegen keşif yöntemleriyle tespit edilmiş gezegenler içinde durum benzerdir. Genellikle keşfedilmiş ötegezegenlerin kütleleri  $0.01 M_{Jup}$  ile  $10 M_{Jup}$  arasındadır. Burada dikkat çekici diğer bir husus ise zamanlama yöntemi ile  $0.1 M_{Jup}$ 'den daha küçük kütleyle sahip ötegezegenlerin keşfedilmesidir. Zamanlama yöntemi, çok daha düşük kütleyle sahip ötegezegenleri tespit etmeye olanak sağlamaktadır. Ayrıca, keşfedilen ötegezegenlerin kütle ve yarıçap dağılımı Şekil 13'de gösterilmiştir. Bilinen ötegezegenlerin büyük bir çoğunluğu  $0.1 R_J$  ile  $1.5 R_J$  arasında yarıçapa sahiptir. Burada, yörünge uzunluğuyla benzer şekilde doğrudan görüntüleme ile keşfedilen gezegenler ya Jüpiter benzeri ya da Jüpiter'den büyük yarıçaplara sahiptir.

### **Ötegezegenlerin Yaşanabilirliği**

Ötegezegen keşfinin itici gücünün ve popülerliğinin en önemli nedeni Dünya'nın yanı sıra "Yaşanabilir" kabul edilen başka bir gezegen bulma ilgisi olmuştur. Yaşamın varlığı için birçok koşul gereklidir. Bir gezegende yaşamın var olabilmesi için gerekli koşullardan biri, gezegenin yüzeyinde sıvı suyun bulunmasıdır. Sıvı suyun sürekli olarak gezegenin yüzeyinde kalabilmesi için gezegenin yüzey sıcaklığı suyun donma noktası ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ile kaynama noktası ( $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) arasında olmalıdır. Ayrıca gezegende sera etkisi görülmemesi için gezegenin yüzey sıcaklığının üst limiti, suyun kaynama noktasından daha düşük olmalıdır. Diğer yandan oldukça yoğun bir atmosferi ve büyük miktarda sıvı suyu yüzeyinde koruyabilmek için gezegen, yeterince güçlü bir yerçekimine sahip bir kütlede olmalıdır. Aksi takdirde hem atmosferini hem de yüzeyindeki sıvıyı koruyamayacaktır (Madhusudhan et al. 2016). Gezegenin kütesinin çok büyük olması durumunda ise kabuğunun yüksek basıncı ile sera etkisi oluşturarak suyun sıvı halde kalmasını önleyecek bir  $\text{H}_2\text{-He}$  zarfı oluşacaktır (Selsis et al. 2007; Venturini et al. 2015). Her iki durumda ele alındığında yaşanabilir bir gezegenin karasal bir gezegen olması ve kütesinin yaklaşık  $0.5 M_{Dünya}$  ile  $10 M_{Dünya}$  aralığında olması gereklidir (Selsis et al. 2007; Madhusudhan et al. 2016). Yukarıdaki iki koşul esas alınarak, bir ötegezegenin belirli bir özelliğini Dünya'nın özelliklerine göre ölçmeye çalışan ve 0.0 ile 1.0 arasında değişen bir Dünya Benzerlik İndeksi (ESI) önerilmiştir (Schulze-Makuch et al. 2011). Burada gezegenin indeks puanı 1'e ne kadar yakınsa Dünya'ya olan benzerliği artmaktadır. Ayrıca indeks puanı 0.80'den daha büyük gezegenler Dünya benzeri olarak sınıflandırılmaktadır. Güneş sistemimiz dışında 0.80 ve üzerinde indeks puanına sahip TRAPPIST-1e (0.95), Gliese 581 g (0.94), Proxima Centauri b (0.87) ve Kepler-442b (0.84) gibi birçok gezegen keşfedilmiştir (Anonim 2022m). G1 581c,

Udry et al. (2007) tarafından yaşanabilir olduğu düşünölen ilk ötegezegen olarak duyurulmuş olmasına rağmen sonra ki ışınımsal-konvektif modeli içeren simölasyonlar ile yüzeyinde sıvı suyu barındıramayacak kadar sıcak olduğu gösterilmiştir (Selsis et al. 2007; Hu and Ding 2011). Daha sonra, G1 581d gezegeni yaşanabilir bir süper Dünya olarak kabul edilmiş ve muhtemelen yaşanabilirliği yoğun araştırmalara konu olan ilk ötegezegen olmuştur (Udry et al. 2007; Selsis et al. 2007; Von Bloh et al. 2007). Tüm bu durumlar göz önüne alındığında ötegezegenlerin yaşanabilir olduğunu belirlemek için henüz yeterli gözlemsel kanıt olmadığından yaşanabilir bölge içerisindeki ötegezegenlere muhtemelen yaşamı destekleyecek potansiyele sahip gezegenler olarak bakılabilir. Örneğin, Venüs, yüzey sıcaklığına göre yaşamı destekleyemeyecek olmasına rağmen yaşanabilir bölge içerisinde. Diğer yandan Sagan & Salpeter (1976) tarafından Jüpiter'in (veya ona benzer bir gezegenin) atmosferinde yaşamı destekleyebileceğini ortaya atarak yaşamın sadece atmosferi olan karasal gezegenler dışında da olabileceği fikri önerildi.

### **Gezegenler için Yaşanabilir Bölge (Habitable Zone; HZ)**

Güneş sistemimizdeki gezegenlerde ve ötegezegenlerde yaşam arayışı insanlık için önemli bir yere sahiptir. Yaşanabilir bölge ise karasal bir gezegenin yüzeyinde kalıcı olarak sıvı suyu barındırabileceği ve yaşamı destekleyebilecek bir bölge olarak tanımlanır. Bu bölge, CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-N<sub>2</sub>'den oluşan bir atmosfere sahip gezegenin yüzeyindeki suyun ne tamamının buz halde olacağı ne de tamamen buharlaşacağı bir alan olarak düşünülebilir ve böyle bir bölge yaşanabilir bölge (Habitable Zone; HZ) olarak adlandırılır (Huang 1960; Hart 1978; Kasting, Whitmire & Reynolds 1993; Underwood, Jones & Sleep 2003; Selsis et al. 2007; Kaltenegger & Sasselov 2011; Barbosa et al. 2020). Sürekli yaşanabilir bölge ise (Continuous Habitable Zone; CHZ), bir yıldızın etrafında belirli bir süre boyunca yaşanabilir kalan bölgedir (Kasting et al. 2014).

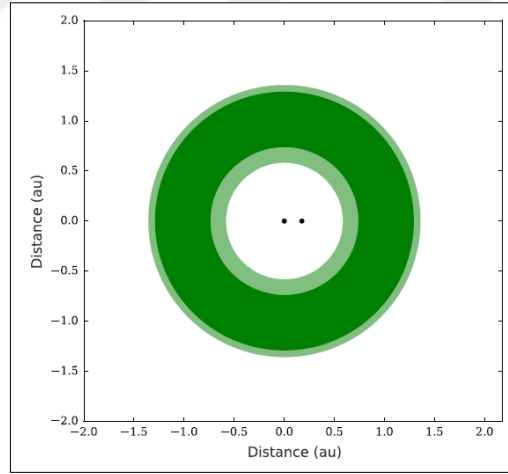
HZ, ilk olarak Shapley (1953) tarafından yıldız etrafında, gezegenin yüzeyinde sıvı suyun bulunabileceği bir bölge olarak önerildi. Ardından 1960 yılında "yaşanabilir bölge" terimi ilk kez Huang (1960) tarafından gezegenlerde yaşanabilirlik ve dünya dışı yaşam arasındaki ilişki ile bağdaştırıldı. Daha sonraki çalışmalar ile yaşanabilir bölge, atmosferik bileşimler ve yıldız radyasyon spektrumları gibi HZ'nin genişliğini etkileyen çeşitli faktörleri içeren tek boyutlu ışınımsal-konvektif modeller ile daha net olarak sınırlandırılmış ve tanımlanmıştır (Kasting, Whitmire & Reynolds 1993; Kopparapu 2013; Madhusudhan et al. 2016). Kasting, Whitmire & Reynolds (1993)'ün tek boyutlu HZ iklim modeline göre yaşanabilir bölgenin iç yarıçapı;

$$R_{HZ,iç} = 0.75 \sqrt{\frac{L_{yıldız}}{L_{güneş}}} \quad 34$$

ile verilir. Yaşanabilir bölgenin dış yarıçapı ise,

$$R_{HZ,dış} = 1.77 \sqrt{\frac{L_{yıldız}}{L_{güneş}}} \quad 35$$

bağıntısı ile hesaplanabilir. Burada  $L_{yıldız}$  ve  $L_{güneş}$  sırasıyla yıldızın ve Güneş'in akısıdır. Buradaki Denklem 34 ve 35 kullanılarak Kasting, Whitmire & Reynolds (1993) tarafından Güneş Sistemimizdeki HZ'nin iç ve dış kenarlarını sırasıyla yaklaşık 0.95 ve 1.37 AU olarak bulunmuştur. Böylece, Güneş Sistemimizdeki yaşanabilir bölgenin genişliği yaklaşık 0.42 AU'ya denk gelmekte ve Güneş Sistemimizdeki dört karasal gezegende bu bölge içerisinde bulunmaktadır. Ardından yaşanabilir bölge için birçok araştırmacı Kasting, Whitmire & Reynolds (1993), Selsis et. al (2007) ya da Kopparapu et. al (2013) tarafından modeller duyurulmuştur. Haghhighipour & Kaltenegger (2013) ve Müller & Haghhighipour (2014) tarafından ikili sistemler için de yaşanabilir bölge sınırlarını tahmin eden bir genelleştirilmiş bir model bildirildi.



**Şekil 14.** Haghhighipour & Kaltenegger (2013) tarafından belirlenen Kepler-453 sisteminin bir HZ örneği (Barbosa et al. 2020)

Şekil 14'de ortak bir kütle merkezi etrafında yörünge hareketi yapan ikili bir sistem ele alınmış ve onun etrafındaki yaşanabilir bölge belirlenmiştir. Kepler-453 sistemi için belirlenen yaşanabilir bölge Haghhighipour & Kaltenegger (2013) ve Müller & Haghhighipour (2014) tarafından bildirilen modelleri içeren interaktif bir web sitesi ile elde edilmiştir (Barbosa et al. 2020; Anonim 2022n). Yaşanabilir bölge koyu yeşil renk ile gösterilirken genişletilmiş yaşanabilir bölge açık yeşil ile gösterilmiştir.

## İkili sistemlerde Dinamik Kararlılık ve Gezegen Oluşumu

Dinamik, akışkan veya parçacıklardan oluşan sistemlerinin hareketini tanımlamaya yönelik tüm yöntemleri içeren genel bir terimdir. Parçacık olarak kabul edilen Gezegen sistemlerinin hareketleri, gezegenlerin konum ve hızlarını zamanın bir fonksiyonunu olarak geliştirilmiş denklemler ile çözümlenir. Bu durum, gezegenin evrimini de tahmin etmektedir. Evrim, hareketi belirli bir zaman ölçeğinde tekrar eden (periyodik) veya tekrar etmeyen (kaotik) durumlarda olabilir. Ötegezegen keşifleri ile Güneş sistemimizdeki gezegenler arasında daha önce hiç rastlanılmamış yeni dinamik davranış örneklerine ulaşılmıştır. Ayrıca bu keşifler ile Güneş sistemimizdeki gezegenler arasındaki benzerlik veya farklılıklar incelenmektedir (Mason 2008; Benjamin 2017; Perryman 2018; Deeg 2018)

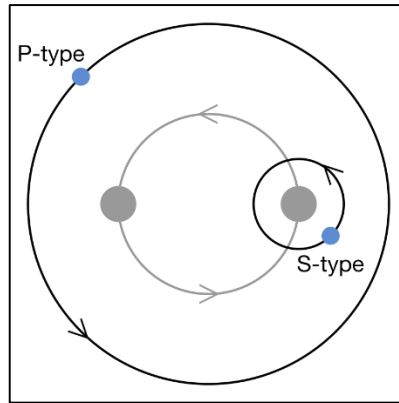
### Dinamik Kararlılık

Bir sistemin yarı ana eksen uzunluğu, eksantrisitesi ve yörünge eğimi gibi yörünge parametreleri, genellikle sistemin dinamik olarak kararlı olup olmadığını belirler. Yörünge parametrelerindeki küçük değişimler üstel (exponansiyel) olarak ilerlemeyip sinüzoidal olarak değişiyor ise sistemin kararlı olduğu anlamına gelebilir. Kararsızlık, sistem üzerindeki kuvvetlerin (sistemdeki bileşenler arasındaki kütle çekim kuvvetleri) bu parametrelerin üzerinde zaman içerisinde büyük değişimlere neden olarak bileşenlerden birinin sistemden fırlamasına veya diğer bileşenler ile çarpışmasına neden olduğunda ortaya çıkmaktadır.

Harrington (1977) tarafından bir sistemin yarı ana eksen ve eksantrisitesi seküler bir değişikliğe uğramaz ise sistem kararlı olarak değerlendirildi. Diğer bir yönden Szebehely (1980) ve Szebehely & McKenzie (1981) tarafından çift yıldızların içinde ve çevresinde bir gezegenin kararlılığını belirlemek için hareketin integralleri ve sıfır hız eğrileri dikkate alındı. Szebehely (1984) tarafından ise yapılan bir araştırma sonucunda çok cisimli sistemlerde bir bileşenin kararlılığı için 50 farklı tanım listelendi. Dinamik kararlılık kavramı, yukarıda belirtildiği gibi çözümlenmesi basit olmakla birlikte Harrington (1977), Szebehely (1980) ve Szebehely & McKenzie (1981), Szebehely (1984), Rein & Spiege 2014, Quarles & Lissauer (2016) ve Lam & Kipping (2018) gibi birçok araştırmacı tarafından farklı tanımlanmıştır. Ancak günümüzde “bir cisim yörüngede dolandığı süre boyunca, diğer bileşenler ile çarpışmaz ve bağlı olduğu yıldızın kütle çekim alanından ayrılmaz ise kararlıdır” tanımı en çok kabul gören kararlılık tanımıdır (Mason 2008; Benjamin 2017; Perryman 2018; Deeg 2018).

İkili sistemlerin yörüngesinde dolanan bir gezegenin yörünge kararlılığının araştırılması için üç cisimli bir sistemin dinamik evriminin ayrıntılı bir analizi gereklidir. Böyle bir analiz, gezegenin yörünge tipi ile ilişkilidir. Bir gezegen, Şekil 15’de görüldüğü gibi birincil veya

ikincil yıldız etrafında döndüğü bir iç yörüngede (S-tipi) veya tüm ikili sistem etrafında döndüğü bir dış yörünge (P-tipi) olmak üzere üç farklı yörüngeye sahip olabilir (Szebehely 1980; Dvorak 1982; Mason 2008).



**Şekil 15.** İkili sistem etrafında dolanan bir gezegenin S-tipi ve P-tipi yörüngelerinin şematik gösterimi (Anonim 2022o)

**S-tipi Yörüngelerin Kararlılığı;** “Dinamik Kararlılık” bölümünde bahsedildiği gibi bir gezegenin yarı ana eksen ve eksantrisitesi, gezegen sistemin kütle çekim alanından ayrılacak veya sistemdeki diğer bileşenler ile çarpışacak kadar değişen sistemler kararsız olmaktadır. Bu durum göz önüne alındığında S-tipi bir yörüngedeki bir gezegen için kararsızlığın başlıca nedeni sistemdeki ikincil yıldızın kütle çekim kuvvetinin büyüklüğüdür. Gezegen, ikincil yıldızdan çok uzak bir mesafede yani bağlı olduğu yıldızına daha yakın bir yörüngede dolamıyor ise ikincil yıldızın kütle çekiminden daha az etkilenecek olup dinamik durumunu daha uzun bir süre sürdürebileceği anlamına gelir (Harrington, 1977). Sistemdeki ikincil yıldızın tedirginlik etkisi, kütlelerine ve ikili sistemin yarı ana eksen uzunluğu ve eksantrisitesine göre değiştiğinden gezegenin yörüngesinin kararsız olacağı gezegen-yıldız uzaklığı için bir sınır belirlenebilir. Rabl & Dvorak (1988) ve Holman & Wiegert (1999) tarafından S-tipi yörüngedeki bir gezegenin kritik yarı ana eksen ( $a_c$ ) uzunluğu;

$$\begin{aligned}
 a_c/a_b = & (0.464 \pm 0.006) + (-0.380 \pm 0.010)\mu + (-0.631 \pm 0.034)e_b \\
 & + (0.586 \pm 0.061)\mu e_b + (0.150 \pm 0.041)e_b^2 \\
 & + (-0.198 \pm 0.047)\mu e_b^2
 \end{aligned} \tag{36}$$

fonksiyonu ile ifade edilmiştir. Burada;  $\mu = M_1/(M_1 + M_2)$ ,  $a_b$  ve  $e_b$  ise sırasıyla ikili sistemin yarı ana eksen uzunluğu ve eksantrisitedir. Denklem 36’daki  $\pm$  işaretler, kritik yarı ana eksen uzunluğunun ( $a_c$ ) alt ve üst değerleri tanımlamakta olup kararlı ve kararsız sistemlerden oluşan bir geçiş bölgesini tanımlar (Rabl & Dvorak, 1988; Holman & Wiegert, 1999; Benest, 1988, 1989, 1993, 1996; Wiegert & Holman, 1997; Dvorak et al. 2003, 2004; Musielak et al. 2005; Mason 2008).

**P-tipi Yörüngelerin Kararlılığı;** İkili sistemlerin etrafında P-tipi yörüngelerde dolanan gezegenlerin de kararlılık testleri birçok araştırmacı tarafından çalışılmış olup (Ziglin, 1975; Szebehely & McKenzie, 1981; Dvorak, 1984, 1986; Dvorak, Froeschl'e, & Froeschl'e, 1989; Kubala, Black & Szebehely, 1993; Holman & Wiegert, 1999; Broucke, 2001; Pilat-Lohinger, Funk & Dvorak, 2003; Musielak et al., 2005; Mason 2008) S-tipi yörüngelere benzer şekilde, P-tipi bir gezegenin kararlı olabilmesi için sistemdeki bileşenlerin pertürbatif (tedirgin) etkilerinden etkilenmemesi için onlardan güvenli bir uzaklıkta bulunması gereklidir. Bu durum, ikili sistemin kütle merkezinden uzak mesafelerde bulunan gezegenlerin kararlı olma olasılığı daha yüksek anlamına gelmektedir. Ancak bu mesafenin çok büyük olması da galaktik ve diğer yıldızların pertürbasyonları nedeniyle yörüngeyi kararsız hale getirebilir. P-tipi bir gezegenin yörüngesi, gezegenin yarı ana eksen uzunluğu;

$$a_c/a_b = (1.60 \pm 0.04) + (5.10 \pm 0.05)e_b + (4.12 \pm 0.09)\mu + (-2.22 \pm 0.11)e_b^2 + (-4.27 \pm 0.17)\mu e_b + (-5.09 \pm 0.11)\mu^2 + (4.61 \pm 0.36)e_b^2\mu^2 \quad 37$$

ile verilen kritik değerden daha büyük kaldığı sürece kararlı olacaktır. Denklem 36'ya benzer şekilde, Denklem 37'de P-tipi bir gezegenin yörüngesinin kesinlikle kararsız olacağı bir alt sınırı ve ötesinde gezegenin yörüngesinin kararlı olacağı bir üst sınırı olan bir geçiş bölgesini temsil eder (Dvorak, 1984, 1986; Dvorak, Froeschle, & Froeschle, 1989; Holman & Wiegert, 1999; Mason 2008).

### **Gezegen Oluşumu**

Gezegenlerin oluşum teorisi, Swedenborg (1743), Kant (1755) ve Laplace (1796) tarafından yıldızların oluşum teorisi için düşünülen "Bulutlu" hipotezine dayanmaktadır (Benjamin 2017; Perryman 2018). Bu hipotez ile gezegenlerin, moleküler bulutlarda yıldız oluşumuyla başladığına ve gezegen oluşumunun, yıldız oluşum sürecinin bir parçası olduğu evrensel olarak bilinmektedir (Armitage, 2011; Winn & Fabrycky 2015; Hartmann et al., 2016; Williams & Cieza, 2011; Nittler & Ciesla, 2016). Yıldızlar etrafındaki yığılma disklerinin teorik olarak anlaşılması (Hoyle, 1960; Balbus & Hawley, 1991), genç yıldızların etrafında öngezegen (protoplanetary) disklerinin gözlenmesi (Partnership et al. 2015) ve Güneş Sistemimizdeki gezegenlerin oluşumunun Güneş'in oluşumu ile aynı yaşta olduğunun tespiti (Patterson, 1956; Scott, 2007; Houdek & Gough, 2011) gibi araştırmalar gezegen oluşumunun, yıldız oluşumu ile aynı süreçte gerçekleştiğini doğrulamaktadır (Benjamin 2017).

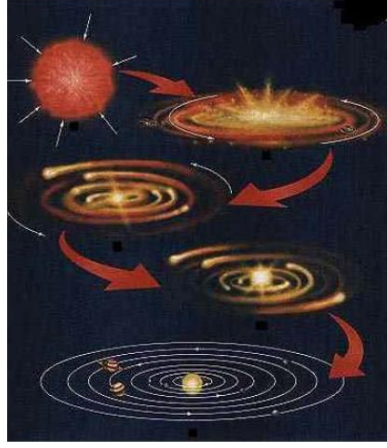


Fig. 9.11. The four stages of planet formation.

**Şekil 16.** Gezegen oluşumunun dört aşamasının şematik gösterimi (Benjamin 2017)

Doğrudan önyıldızın üzerine düşmeyen toz ve gaz parçacıkları, gezegen oluşumunun sonraki aşamaları için ortam sağlayan uzun ömürlü bir madde diski oluşturur. Genel olarak, Şekil 16'da görüldüğü gibi gezegen oluşumunun dört aşamadan geçtiği düşünülmektedir. Gezegenimsiler, ilk olarak bir gezegen öncesi diskte toz parçacıklarının yığılması ve bunları santimetre boyutlu nesnelere büyümesiyle oluşur. Daha sonra santimetre boyutundaki parçacıklar, kilometre boyutundaki cisimler (kaya vb.) ile çarpışarak büyümeye devam eder. Ardından, çarpışmalar sonucunda birkaç gezegen embriyosu halinde meydana gelir. Son olarak bu meydana gelen gezegensel embriyolar, karasal boyuttaki nesnelere ile çarpışarak evrimine devam eder (Kokubo & Ida, 1998, 2000; Chambers 2006; Mason 2008; Benjamin 2017; Deeg 2018). Erken dönemde yüksek kütleyle  $\geq 1M_{Dünya}$  ulaşan embriyolar, büyük miktarda gaza sahip olan diskten sıızan gaz ile gaz devleri haline de gelebilir (Lewis, 1974; Stevenson & Lunine, 1988).

## MATERYAL ve YÖNTEM

### Materyal

Zamanlama yöntemi, son zamanlarda hem örtülme gösteren çift yıldız sistemlerine hem de geçiş yöntemi ile gezegen barındırdığı doğrulanmış yıldız-gezegen sistemlerine uygulanabilir olduğundan ötegezegen keşiflerinde en dikkat çekici yöntemlerden biri olmuştur. Örtülme zamanlarına dayanan bu yöntem ile sistemlerin O–C diyagramları modellenerek sistemlerin yörünge dönem değişimleri incelenmektedir. Böylece sistem etrafında dolanan ilave bir cismin (3. cismin) varlığı araştırılabilmektedir.

Bu çalışma kapsamında bazı kısa dönemli geçiş gösteren yıldız-gezegen sistemleri ile örten çift yıldız sistemlerinin fotometrik gözlemleri yapılarak örtülme ışık eğrileri elde edilerek ışık eğrilerinden yeni örtülme zamanları belirlendi. Belirlenen yeni örtülme zamanları ile incelenen kaynakların O–C diyagramı oluşturularak yörünge döneminde herhangi bir değişimin olup olmadığı zamanlama yöntemi kullanılarak araştırıldı ve bu değişimlerin neden olabileceği düşünülen fiziksel etkenler tartışıldı.

İncelenen kaynaklar, yörünge dönem değişimleri üzerine hipotezleri kesinlik kazanmamış adaylardan oluşmaktadır. Çalışma kapsamında incelenen kaynaklar, gözlem sezonu içerisinde birçok minimum zamanı elde edebilmek açısından çift yıldızlar için  $P < 10$  saat ve yıldız-gezegen sistemleri için  $P < 5$  gün gibi kısa yörünge dönemli olacak şekilde seçilmiştir. Ayrıca incelenen kaynaklar seçilirken, minimum zamanların hassas bir şekilde tespit edilebilmesi için kaynakların keskin ve derin örtülmelere sahip olması göz önünde bulundurulmuştur.

### İncelenen kaynaklar

*i) NY Vir;* İlk olarak Palomar-Green Survey ile keşfedildi (Green, Schmidt & Liebert 1986). Daha sonra, Kilkenny et al. (1998) tarafından pulsasyon gösteren ve geç bir cüce M5 tipi çok sıcak bir alt cüce B (sdB) bileşenini içeren yaklaşık 0.11010174 günlük bir yörünge periyoduna sahip bir HW Vir tipi örten ikili olarak tanımlandı ve etkin sıcaklığı  $T_1 = 33000 K$  ve  $T_2 = 33000 K$ , bağıl yarıçapları  $r_1 = 0.19$  ve  $r_2 = 0.205$ , yörünge eğimi  $i = 81^\circ$  ve kütle oranını  $q = 0.3$  olarak bildirildi. Ayrıca NY Vir sistemindeki sdB bileşenin pulsasyon özellikleri de hem fotometrik hem de spektroskopik olarak birçok araştırmacı tarafından

incelenmiştir (Kilkenny et al. 1998; 2000, Hu et al. 2007, Vuckovic et al. 2007; 2009 ve Van Grootel et al. 2013).

**ii) NN Ser;** NN Ser, 16.5 kadir parlaklığına ve yaklaşık 3.2 saatlik kısa bir periyoda sahip sıcak bir beyaz cüce ( $0,535 M_{\odot}$ ) ve M cüce ( $0,111 M_{\odot}$ ) bileşenlerinden oluşan yakın çift yıldız sistemidir (Haefner 1989; Wood&Marsh 1991; Catalan et al. 1994; Qian et al. 2009; Parsons et al. 2010a; Bours et al. 2016). NN Ser ilk olarak Haefner (1989) tarafından araştırıldı ve bir pre-kataklismik çift yıldız sistemi olduğu bildirildi. Spektroskopik gözlemler ile Woods & Marsh (1991) tarafından sistem parametreleri belirlenmiş olup daha sonra Catalan et al. (1994) tarafından iyileştirilmiştir.

**iii) WASP-10 b;** Geçiş gösteren sıcak Jüpiter WASP-10 b, ilk kez Christian et al. (2009) tarafından SUPERWASP (Pollacco et al. 2006) araştırma projesi ile keşfedilen bir ötegezegendir. Gezegenin başlangıçta kütle ve yarıçapı  $2.96_{-0.17}^{+0.22} M_{Jup}$  ve  $1.28_{-0.09}^{+0.08} R_{Jup}$  olarak bulundu. Ardından Johnson et al. (2009) tarafından 2.2 m'lik bir teleskop kullanılarak yüksek hassasiyetli bir ışık eğrisi ile gezegenin parametreleri yeniden belirlenerek gezegenin kütle ve yarıçapı,  $3.15_{-0.11}^{+0.13} M_{Jup}$  ve  $1.080 \pm 0.020 R_{Jup}$  olarak hesaplandı. Gezegen için hesaplanan yarıçap, dev gezegenler için uygulanan modellerin tahmin ettiğinden daha büyük olduğu görüldü. Gezegenin bağlı olduğu yıldız ( $V = 12.7 mag$ ) ise Pegasus takımyıldızında Güneş'ten  $90 \pm 20 pc$  uzaklıkta bulunan,  $4675 \pm 100 K$  etkin sıcaklığa ve  $0.75_{-0.03}^{+0.04} M_{Sun}$  kütleyle sahip bir K5 cücesidir (Christian et al. 2009, Johnson et al. 2009, Maciejewski et al. 2011b). Ayrıca sistemin geçiş sırasındaki ışık eğrisinde yüzde 3'lük gibi büyük bir düşüş olduğundan bu sistemin fotometrik takibi nispeten kolaydır (Southworth 2010). Bu nedenle WASP-10 sistemi hem fotometrik hem de spektroskopik olarak birçok araştırmacı tarafından araştırılmaktadır (Christian et al. 2009, Johnson et al. 2009, Krejcová et al. 2010, Dittmann et al. 2010, Southworth 2010, Maciejewski et al. 2011a; 2011b, Sada et al. 2012, Husnoo et al. 2012, Barros et al. 2013, Knutson et al. 2014, Cruz et al. 2015, Kammer et al. 2015, Sada and Ramon-Fox 2016, Salz et al. 2016, Hagey et al. 2022)

**iv) WASP-11 b (HAT-P- 10 b);** Sıcak Jüpiter olan WASP-11 b/HAT-P-10 b sisteminin keşfi, WASP (West et al. 2009) ve HATNet (Bakos et al. 2009) ekipleri tarafından neredeyse aynı anda duyuruldu. Bakos et al. (2009) tarafından bu ötegezegenin kütlesi ve yarıçapı,  $0.487 \pm 0.018 M_{JUP}$  ve  $1.0005_{-0.0027}^{+0.0320} R_{JUP}$  olarak hesaplanırken West et al. (2009) tarafından  $0.53 \pm 0.07 M_{JUP}$  kütleli ve  $0.91_{-0.03}^{+0.06} R_{JUP}$  yarıçaplı olarak bulundu. Gezegen bağlı olduğu yıldız ise 11.89 kadir (V) parlaklığına sahip K3V yıldızlıdır ( $0.8 M_{JUP}$  ve  $0.8 R_{JUP}$ )(Wang et al. 2014; Mancini et al. 2015). Yörünge periyodu 3.7 gün olan WASP-10 b gezegeni, geçiş

gözlemlerinde bugüne kadar keşfedilen en düşük kütleli ( $0.46 \pm 0.03 M_{Jup}$ ) geçiş yapan ötegezegen olarak dikkat çekmektedir.

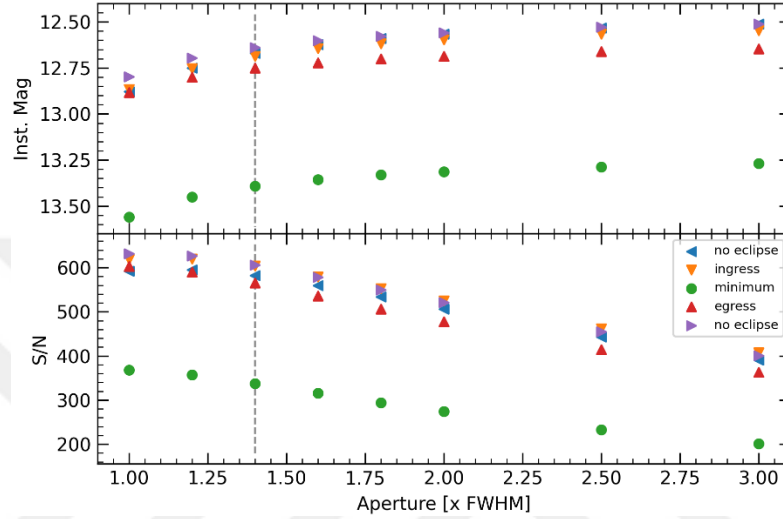
## Yöntem

### Seçilen kaynakların gözlenmesi ve verilerin indirilmesi

İncelenen kaynakların fotometrik gözlemleri, TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi bünyesindeki  $0.31 \text{ arcsec piksel}^{-1}$  piksel ölçeğine ve  $21.5 \times 21.5 \text{ arcmin}$  (açı dakikası) görüş alanına sahip SI100 CCD kameranın takılı olduğu  $100 \text{ cm}$ 'lik T100 teleskopu ve Adıyaman Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarına bağlı gözlemevi bünyesindeki  $0.67 \text{ arcsec piksel}^{-1}$  piksel ölçeğine ve  $11.4 \times 11.4 \text{ arcmin}$  görüş alanına sahip Andor iKon-M934 CCD kameranın bağlı olduğu  $60 \text{ cm}$ 'lik ADYU60 teleskopu ile gerçekleştirildi (*ADYU60 teleskobu, bu çalışma kapsamında Er et al. 2021'de yayınlanan NY Vir kaynağının verileri için kullanılmıştır. Bu veriler, 114F460 nolu TÜBİTAK projesi kapsamında 2021 yılına kadar alınmıştır*). Seçilen kaynakların gözlemlerinin tamamı filtresiz ve R bandında gerçekleştirildi. Verilerin hassas bir şekilde alınabilmesi için gözlemlerin özellikle Yeniay dönemlerinde (karanlık gecelerde) yapılması son derece önemlidir. Bu nedenle gözlem zamanları genellikle karanlık gecelere göre planlandı. Ayrıca örtülme ışık eğrilerinden minimum zamanlar hassas bir şekilde hesaplanabilmesi için incelenen kaynakların parlaklıkları kullanılan teleskopların limitlerine göre seçildi. İncelenen kaynakların parlaklığına bağlı olarak yeterli foton sayısına ve uygun zaman çözünürlüğüne sahip olabilmek için 5-15 sn poz süresi ile gözlemler yapıldı. Geçiş gösteren yıldız-gezegen sistemlerinde ise aynı şekilde kaynakların parlaklığına göre T100 teleskopu için 60 ile 120 sn'lik poz süresi verilerek yapıldı. Ayrıca yıldız-gezegen sistemleri için gözlem sırasında olası doyumluk durumlarında ise de-focus (odak bozma) tekniği uygulandı. İncelenen kaynaklar için gözlemler sırasında hava koşullarına bağlı olarak yaklaşık 80 ile 1200 aralığında sinyal gürültü oranı (SNR, Signal-to-Noise Ratio) elde edildi. Gözlemler sırasında görüş (seeing) değeri, T100 için  $0.8 \text{ arcsec}$  ile  $1.1 \text{ arcsec}$  (açı saniye) iken ADYU60 için  $1.7 \text{ arcsec}$  ile  $3.1 \text{ arcsec}$  aralığındadır. Bu görüş ve SNR değerleri, yapılan gözlemlerin (özellikle T100) yüksek kalitede olduğunu göstermektedir.

Veri indirgeme işlemi için standart indirgeme ve fotometri, Python (ccdproc, Astropy, Numpy, Matplot, photutils ve LMFIT) paketleri ve/veya AstroImageJ yazılımları kullanılarak yapıldı (Craig et al. 2017, Astropy Collaboration et al. 2013, Harris et al. 2020, Hunter et al. 2007, Bradley et al. 2020, Newille et al. 2014, AIJ, Collins et al. 2017a). Gözlemlerden elde edilen tüm verilere Bias, Dark, Flat ve Kozmik Işın düzeltmeleri uygulanarak standart CCD indirilmesi yapıldı. T100 ve ADYU60 teleskoplarına bağlı olan Andor CCD'ler için Dark (Kara Akım Gürültüsü) üretimi ihmal edilebilir seviyede olduğu için gözlemsel verilerden Dark

çıkarmı yapılmazken geçiş gösteren yıldızların gözlemsel verilerden poz süresinin uzunluğu nedeniyle Dark çıkarmı yapıldı. CCD indirgemesinden sonra, çift yıldız sistemleri için fark ışık ölçümünü (diferansiyel fotometri) elde edebilmek için Python paketleri kullanılırken yıldız-gezegen sistemleri için AstroImageJ (AIJ, Collins et al. 2017a) yazılımı kullanıldı. Diferansiyel fotometri analizi süresince karşılaştırma yıldızı (standart yıldız) olarak kaynağa konum olarak olabildiğince yakın benzer parlaklıkta ve renkte, akısında değişim olmayan yıldızlar seçildi.



**Şekil 17.** Çoklu açıklık yarıçapları ile ilişkili aletsel parlaklık ve SNR dağılım grafiği. Farklı renkler, TUG T100 teleskobuyla elde edilen 12.03.2020 tarihinde NY Vir kaynağı için alınmış ışık eğrisinin farklı bir bölümünü temsil etmektedir. Dikey kesikli çizgi ise, 1.4 x FWHM olan açıklık değerini temsil etmektedir.

Ayrıca karşılaştırma yıldızının akısında herhangi bir değişim olup olmadığını görebilmek için başka bir yıldızla da karşılaştırıldı. Diğer yandan en uygun açıklık yarıçapını (aperture radius) belirleyebilmek için  $1 \times \text{FWHM}$  (yarı maksimumda tam genişlik) ile  $3 \times \text{FWHM}$  arasında farklı açıklık yarıçapları test edildi. Şekil 17’de örtülmenin olmadığı (no eclipse), ingress (iniş kolu), egress (çıkış kolu) ve örtülmenin tam ortası (minimum) içeren ışık eğrisinin farklı bölümleri için açıklık yarıçaplarıyla ile aletsel parlaklığı ve sinyal gürültü oranı arasındaki ilişki gösterildi. Aletsel parlaklık 1.8 x FWHM ile 3 x FWHM arasında değişmemektedir. Işık eğrisinin farklı bölümlerinde ve farklı gecelerdeki tüm eğilimler benzer olduğu için açıklık yarıçapı, tüm verilerin ortalamasına yakın 1.4 x FWHM olarak belirlendi.

### Çift yıldız sistemlerinde örtülme zamanlarının hesaplanması

Elde edilen ışık eğrilerinden O–C diyagramını oluşturabilmek için kullanılacak olan örtülme zamanları (minimum zamanlar), örtülme ışık eğrilerinin şekline göre Gauss, Sigmoid, polinom gibi bazı fonksiyonlar ile fit edilmesi sonucunda hesaplanmaktadır. Bu çalışmada incelenen örten çift yıldız sisteminin ışık eğrileri, Ters Gauss fonksiyonunu ile bir polinomun

çarpılmasında oluşan geliştirilmiş bir Gauss profili (NY Vir için; Şekil E1) ve Boltzman fonksiyonu (NN Ser için; Şekil E4) ile fit edilerek minimum zamanlar hesaplandı. Bu geliştirilmiş Gauss eşitliği;

$$G(\tau) = P(\tau) \min(1, G(\tau)) \quad 38$$

$$G(\tau) = p_2 - p_3 \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{|\tau|}{p_4} \right)^{p_5} \right] \quad 39$$

$$P(\tau) = p_6 + p_7 \tau + p_8 \tau^2 \quad 40$$

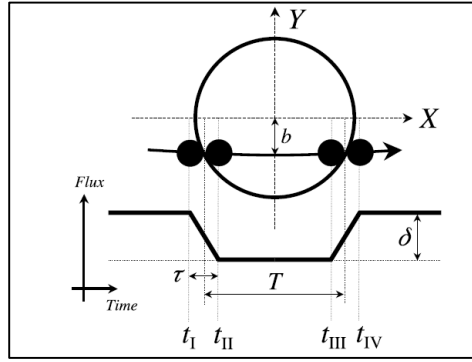
şeklinde ifade edilebilir (Beuerman et al., 2012). Burada,  $\tau = t - p_1$  ve  $p_i, i = 1 \dots 8$  ise eşitlik içerisindeki fit parametrelerini temsil etmektedir. Diğer taraftan NN Ser'in ışık eğrilerinin fit edilmesi için kullanılan Boltzmann fonksiyonu ise;

$$y = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(x-x_0)/dx}} + A_2 \quad 41$$

'dir. Bu geliştirilmiş Gauss modeli ve Boltzmann fonksiyonları ile iki çift yıldız sistemine ait ışık eğrileri fit edilerek sistemlere ait minimum zamanlar elde edilir. Elde edilen minimum zamanlar, Eastman et al. 2010'da yer alan prosedür kullanılarak Julian Date (JD)'den Barycentric Julian Date (BJD)'e dönüştürüldü.

### **Yıldız-gezegen sistemlerinin geçiş ortası zamanlarının elde edilmesi**

Geçiş olayının gözlemi, yıldızın ve gezegenin boyutları ve gezegenin gökyüzü düzlemine göre yörünge eğimi gibi bazı parametreler ile ilişkilidir. Geçiş ışık eğrisinin elde edilmesiyle birlikte sisteme ait birçok fiziksel parametreye de ulaşılır. Bu parametreler arasındaki Geçiş ortası zamanı (örtülme zamanı) sistem etrafında olabilecek ilave gezegenlerin veya uyduların varlığını işaret edebilir. Bu nedenle bu tür sistemlerin örtülme zamanlarının incelenmesi yeni gezegenleri keşfetmenin de önemli bir yoludur. Bu tür sistemlerin örtülme zamanı, sistemin ışık eğrisinin temel geometrisi ele alınarak hesaplanabilir.



**Şekil 18.** Geçiş gösteren yıldız-gezegen sistemine ait ışık eğrisinin temsili gösterimi (Winn 2010a).

Şekil 18’de,  $\delta$ , geçiş derinliği olarak tanımlanır ve

$$\delta = \frac{F_{no\ transit} - F_{transit}}{F_{no\ transit}} = \left(\frac{R_p}{R_*}\right)^2 \quad 42$$

ile formülize edilir (Seager and Mallen-Ornelas 2003). Denklem 42’de  $F_{no\ transit}$  geçişin olmadığı zamandaki akıyı temsil ederken  $F_{transit}$  ise geçişin olduğu andaki akıyı temsil etmektedir.  $R_*$  ve  $R_p$  ise sırasıyla yıldızın ve gezegenin yarıçaplarını ifade eder. Diğer bir parametre olan  $b$  ise,

$$= \frac{a \cos i}{R_*} \quad 43$$

ile tanımlanan edilen etki parametresidir. Burada  $i$ , yörünge eğimidir. Şekil 18’de  $\tau$ , geçiş sırasındaki iniş ve çıkış zamanını temsil eder ( $\tau_{inisiş} = t_{II} - t_I$  ve  $\tau_{çıkış} = t_{IV} - t_{III}$ ).  $T$  ise örtülmenin ilk başladığı zaman ( $T_{total} = t_{IV} - t_I$ ) ile örtülmenin tam gerçekleştiği zamanı ( $T_{full} = t_{III} - t_{II}$ ) ifade eder (Winn 2010a). Son olarak buradaki parametreler kullanılarak gezegenin bağlı olduğu yıldızın önünden geçmeye başladığı andan bitirdiği ana kadar olan geçiş süresinin ortasına karşılık gelen zaman ise örtülme zamanı (geçiş ortası zamanı;  $T_0$ ) olarak ifade edilmekte olup

$$T_0 = \frac{t_{iv} - t_I}{2} \quad 44$$

ile hesaplanabilir (Moutou and Pont 2006).

Geçiş gösteren yıldız-gezegen sistemlerinin sistem parametrelerini ve belirsizliklerini belirlemek için, geçiş ışığı eğrileri ve radyal hız verilerini kullanarak Markov Chain Monte Carlo (MCMC) yöntemini uygulayan EXOFAST yazılımı (Eastman, Gaudi, & Agol 2013) kullanıldı. EXOFAST, sistemlere ait bazı fiziksel parametreleri (etkin sıcaklık, metalik gibi) ve radyal hız verilerini kullanarak geçiş ışık eğrilerini çözümlenmesini sağlar. EXOFAST

programı parametrelerin hesabı için Monte Carlo Markov Zinciri (MCMC) kullanır. Markov Zinciri Monte Carlo (MCMC) yöntemi son zamanlarda ötegezegen araştırmalarında standart bir araç olarak kullanılmaktadır (Winn et al. 2010b). Monte Carlo algoritması tekrarlı şekilde parametreler için rastgele değerler üretir ve yeni üretilecek değerlerin bir önceki değerlerden bağımsız olmasını sağlar. Ayrıca EXOFAST, bu rastgele üretilen bağımsız parametrelerin veri dahilinde ne kadar olası olduğunu gösteren olasılıklar oluşturur (Eastman, Gaudi, & Agol 2013). Ayrıca çift yıldız sistemlerinde olduğu  $O - C$  diyagramında kullanılacak olan örtülme zamanları JD'den BJD'ye dönüştürüldü (Eastman et al. 2010).

### **Işık – zaman etkisi ile yörünge dönem değişiminin belirlenmesi**

İncelenen çift yıldız ve geçiş gösteren yıldız-gezegen sistemlerinin yörünge dönemlerinde değişim olup olmadığına bakmak için kaynakların örtülme zamanları Denklem 45'deki doğrusal efemeris ile fit edilir.

$$T_c = T_0 + E \times P_0 \quad 45$$

Burada,  $E$ , örtülmenin çevrim sayısı olup  $T_c$ ,  $E$  çevrimi için örtülme zamanı iken  $T_0$  ise  $E = 0$ 'a karşılık gelen örtülme zamanını ifade eder.  $P_0$  ise sistemin yörünge periyodudur (Hilditch 2001, Gozdziewski et al. 2012; 2015, Nasiroglu 2017, Gajdos and Parimucha 2018, Er 2021). Bu tür sistemlerde, gözlemlerden belirlenen örtülme zamanları, hesaplanan örtülme zamanlarından genellikle farklılıklar görülür. Bu farklılıklar sistemde yörüngesel dönem değişimine (O–C) neden olan LTT/TTV etkisinden veya diğer fiziksel etkenlerden kaynaklıdır. Eğer, bu değişimin kaynağı LTT/TTV etkisi ise bu etki sistem üzerinde tekrarlayan olması gereklidir. Bu nedenle bu tür değişimlerin araştırılması için O–C diyagramı, doğrusal efemeris ve ışık zaman etkisini içeren;

$$O - C = T_0 - T_c = \tau \quad 46$$

fonksiyonu ile modellenir. Burada  $\tau$ , LTT/TTV sinyalini temsil etmekte olup N-cisim modeli için kullanılmaktadır. Ayrıca O–C diyagramında doğrusal değişime ek olarak parabolik bir değişim de var ise o zaman O–C diyagramı Denklem 46'ya  $\beta E^2$  terimi eklenerek Denklem 47'deki gibi kuadratik efemeris içeren fonksiyon ile modellenir.

$$O - C = T_0 - T_c = \beta E^2 + \tau \quad 47$$

Burada  $\beta$ ,  $P\dot{P}/2$  tarafından verilen ikinci dereceden terim olup  $\dot{P}$  ise efemeris zamanıyla ilgili periyodun türevidir ( $dP/dt$ ). Bu  $\beta$  terimi kütle transferi gibi diğer fiziksel etkilerin

araştırılması için kullanılmaktadır (Hilditch 2001, Gozdziwski et al. 2012; 2015, Nasiroglu 2017, Gajdos and Parimucha 2018, Er et al. 2021).

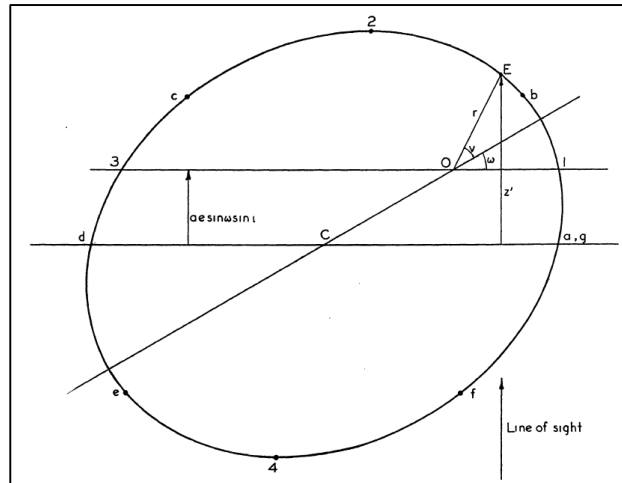
O–C diyagramı doğrusal efemeris veya kuadratik efemeris ile modellendikten sonra sistemin yörünge döneminde çevrimsel yapıya sahip bir değişim olduğu ortaya çıkar ise bu değişimler *N-cisim modeli* ile fit edilerek sistemde 3. cismin varlığı tartışılır. Bu nedenle yörünge değişiminin çevrimsel bir yapıya sahip olup olmadığını ve fiziksel kaynağını doğru bir şekilde saptayabilmek için gözlemsel verilerin hassas bir şekilde elde edilmesi ve geniş bir zaman aralığını kapsaması gerekmektedir. İkili sisteminin yörünge döneminde değişim olarak ortaya çıkan  $\tau$  sinyalinin iki cisim problemi şeklinde ele alıp Kepler yörünge modeli ile incelenebilir (Irwin 1952). Bu model adım adım genel hatlarıyla aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\tau = \left(\frac{z'}{c}\right) = \frac{r \sin i \sin(v + \omega) + a e \sin \omega \sin i}{c} \quad 48$$

Burada,

$$r \sin i \sin(v + \omega) = z \quad 49$$

$z$ , sistemdeki tüm bileşenlerin ortak kütle merkezinden geçen ve bakış doğrultumuza dik olan teğet düzleminden örten ikilinin kütle merkezine olan uzaklığı iken  $z'$  ise örten ikilinin eliptik yörüngesinin merkezinden geçen (sistemdeki tüm bileşenlerin ortak kütle merkezine yakın) ve bakış doğrultumuza dik olan başka paralel bir düzleme olan uzaklığı olarak tanımlanır (Irwin 1952).



**Şekil 19.** İkili sistemin gökyüzü düzlemindeki temsili gösterimi (Irwin 1952)

Bu iki referans düzlemi;  $\omega$ ,  $0^\circ$  veya  $180^\circ$  ise ya da yörünge dairesel ise çakışacaktır. İkili sistemin periyodunda görülen değişimler genellikle LTT/TTV'den kaynaklandığı düşünülür. Böyle bir durumda ilave cismin (3. cismin) periyoduna karşılık gelen bir periyot ile

ikilinin doğrusal efemerisinde periyodik değişimler görülür. Irwin (1952) tarafından LTT/TTV'nin neden olduğu O-C diyagramındaki değişimler için Denklem 50'deki gibi ifade edilebilen analitik bir formül belirlendi.

$$\tau = K \frac{1}{\sqrt{(1 - e^2 \cos^2 \omega)}} \left[ \frac{1 - e^2}{(1 + e \cos v)} \sin(v + \omega) + e \sin \omega \right] \quad 50$$

$\tau$  ve  $K$  gün, yarı ana eksen uzunluğu  $a$  ise km cinsindedir. Burada  $e$  ve  $\omega$ , sırasıyla üçüncü cismin yörünge eğimi (eksentrisite) ve pericenterin uzunluğudur (perihelin argümanı). Diğer yörünge parametresi  $v$  ise gerçek anomalidir. Üçüncü cismin periyodu ( $P$ ) ve pericenter passage zamanı ( $t_0$ );

$$\tan \frac{1}{2} E = \left( \frac{1 - e}{1 + e} \right)^{\frac{1}{2}} \tan \frac{1}{2} v \quad 51$$

$$\frac{t - T}{P} = \frac{M}{2\pi} = \frac{E - e \sin E}{2\pi} \quad 52$$

Denklem 51 ve 52'deki Kepler denklemleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Gerçek anomaliyi ( $v$ ) hesaplayabilmek için Odell and Gooding (1986) tarafından verilen;

$$M + e \sin M / (1 - 2e \cos M + e^2)^{1/2} \quad 53$$

fonksiyon kullanılarak hesaplanır. Denklem 50, sistemdeki başka bir cisim(ler) için basitçe genişletilebilir. LTT/TTV sinyalinin yarı-genlik değeri  $K$ ,

$$K = \frac{1}{2} (\tau_{max} - \tau_{min}) = \frac{a \sin i \sqrt{(1 - e^2 \cos^2 \omega)}}{c} \quad 54$$

olarak ifade edilir. Burada  $c$ , ışık hızıdır. Daha sonra fitlerden elde edilen parametrelerden yola çıkarak incelenen dönem değişimlerinin kaynağının ne olduğu tartışılır. LTT/TTV sinyalinden yola çıkarak dönem değişimleri için uygun bir N-cisim optimizasyon modeli uyguladıktan sonra kütle-fonksiyonu da elde edilebilir (Irwin 1952, Odell and Gooding 1986, Hilditch 2001, Gozdziewski et al. 2012; 2015, Nasiroglu 2017, Gajdos and Parimucha 2018, Er 2021).

$$f(M_3) = \frac{(M_3 \sin i_3)^3}{M^2} = \frac{4\pi^2 (a_{12} \sin i_3)^3}{GP_3^2} \quad 55$$

Burada *asini* cismin yörüngesinin yarı-büyük eksen uzunluğu, *i* referans düzlemi ile 3. cismin gerçek yörüngesi arasındaki açı, *M* sistemin toplam kütlesi ( $M_1+M_2+M_3$ ) ve  $M_3$  ise 3. cismin kütlesidir.

### Yıldız sistemlerinde diğer yörünge dönem değişim modelleri

İkili sistemlerin yörünge dönem değişimleri genel olarak “Işık – Zaman Etkisi ile Yörünge Dönem Değişiminin Belirlenmesi” bölümünde açıklanan standart iki cisim problemlerini esas alan ve Irwin 1952 tarafından ortaya atılan denklem kümesi ile incelenmektedir. Bu amaç doğrultusunda temel olan denklem kümesi (Denklem 50) içerisine farklı parametreler eklenerek astrofiziksel modeller geliştirilebilir. Bununla ilgili birçok araştırmacı tarafından farklı modeller uygulanmaktadır (Irwin 1952; Koch 1960; 1978, Gehlich 1972, Kaluzny 1983, Pan and Cao 1998, Yakut 2003, Szalai et al. 2007; Gozdziewski et al. 2012, 2015; Lee et al. 2014; Song et al. 2019). Bunlardan en basiti denklem kümesi içerisine birden fazla cismin LTT/TTV etkisinin eklenmesidir.

$$O - C = T_O - T_C = \tau_1 + \tau_2 \dots + \tau_i \quad 56$$

$$O - C = T_O - T_C = \beta L^2 + \tau_1 + \tau_2 \dots + \tau_i \quad 57$$

Burada LTT/TTV terimi ( $\tau$ ), genellikle Denklem 50 ile ifade edilmektedir. Ancak  $\tau$  formülü,

$$\tau = K \left( \sin\omega (\cos E(t) - e) + \sqrt{1 - e^2} \cos\omega \sin E(t) \right) \quad 58$$

ile geliştirmiş ve uyarlanmış şekilde de kullanılmaktadır (Gozdziewski et al. 2012; Marsh et al. 2014). Denklem 58 içerisinde yer alan terimler Denklem 50’de detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Ayrıca, geçiş gösteren yıldız-gezegen sistemlerinin etrafında dolanan ilave gezegenlerin varlığının tespiti için de Agol et al. (2005) tarafından iki farklı model düşünüldü. İlk model, küçük bir yörüngeye sahip iç gezegenden kaynaklanan değişimleri tespit etmek için kullanılmaktadır (Denklem 59).

$$\tau = -P \frac{\mu_3 r_3 \cos(v + \omega_3) \sqrt{1 - e^2}}{2\pi a (1 - e \sin\omega)} \quad 59$$

Burada  $P$ ,  $a$ ,  $e$ ,  $v$ , ve  $\omega$  sırasıyla, geçiş gösteren gezegenin periyodu, yarı ana eksen uzunluğu, eksentrisite, gerçek anomalisi ve pericenter uzunluğudur. Diğer parametreler  $r_3$ ,  $\omega_3$  ve  $\mu_3$  ise sırasıyla 3. cismin yörünge yarıçapı, pericenter uzunluğu ve indirgenmiş kütlesidir ( $\mu_3 \equiv M_3/M$ ). İç gezegenin neden olduğu O–C diyagramındaki değişimlerin yarı genliği  $K$ ,

$$K_3 = P \frac{\mu_3 r_3 \cos \sqrt{1 - e^2}}{2\pi a(1 - e \sin \omega)} \quad 60$$

ile hesaplanır. İkinci model ise, büyük bir yörüngeye sahip dış gezegenin neden olduğu değişimleri tespit etmek için kullanılmaktadır (Denklem 61).

$$\tau = \frac{\mu_3}{2\pi(1 - \mu_3)} \frac{P^2}{P_3} (1 - e_3^2)^{-3/2} (v_3 - l_3 + e_3 \sin v_3) \quad 61$$

Burada  $P_3$ ,  $e_3$ ,  $v_3$  ve  $l_3$  sırasıyla 3. cismin periyodu, eksantrisitesi, gerçek anomalisi ve mean anomalisidir. Dış gezegenin neden olduğu O – C diyagramındaki değişimlerin yarı genliği ise,

$$K_3 \approx \frac{\mu_3}{2\pi(1 - \mu_3)} \frac{P^2}{P_3} (1 - e_3^2)^{-3/2} 2 \left[ \arctan \frac{e_3}{1 + \sqrt{1 - e_3^2}} + e_3 \right] \quad 62$$

ile hesaplanır (Agol et al. 2005; Gajdos and Parimucha 2018).

### **Yörünge dönem değişimine etki eden faktörler**

Yıldız sistemlerinde, Irwin (1952) tarafından ifade edilen 3. cisimden kaynaklı örtülme zaman değişimlerinin yanı sıra Güneş lekeleri ile benzer olan yıldız lekelerin varlığı, çift yıldız sisteminde kütle ve/veya açısal momentum kaybı ve bileşen yıldızların manyetik etkinliği gibi bazı fiziksel süreçler ayrıca yörünge dönem değişimlerine neden olabilirler (Applegate 1992; Andronov et al. 2003; Vogel et al. 2008; Godziewski et al. 2012; Mancini et al. 2017). İlave cisim etkisi dışında O–C diyagramında görülebilecek değişimlere neden olan diğer fiziksel etkenler ise aşağıdaki gibi özetlenebilir.

*i) Apsidal Motion;* Apsidal hareketi, çift yıldız sisteminde gel-git olayının neden olduğu kütleçekimsel kuadrapol (dörtlü) moment nedeniyle yörünge yalpalanmasıdır. Bu hareket sistemin yörünge dönem değişimine katkı sağlayabilir ve sistemin O–C diyagramında sinüzoidal şekilde görülür. O–C diyagramındaki değişimlerin yarı genliği,

$$K \approx \frac{Pe}{\pi} \quad 63$$

ise apsidal hareketin periyodu;

$$U = P \left( \frac{2\pi}{\dot{\omega}} - 1 \right) \quad 64$$

ile ifade edilir. Ayrıca küçük yörünge eksantrisitesi, örtülme zamanlamasını yaklaşık olarak,

$$\Delta t \approx \frac{2}{\pi} P_{bin} \cos(\omega) \quad 65$$

oranında etkiler (Lee et al. 2014, Gajdos and Parimucha 2018, Sale et al. 2020, Mai & Mutel 2022, Pullet et al. 2022).

**ii) Açısal Momentum Kaybı;** Çift yıldız sistemlerinde (PCE ve WD) açısal momentum kaybı, genellikle kütleçekimsel radyasyona veya manyetik frenlemeyle ilişkilidir. Açısal momentum kaybı ile sistemin periyodundaki azalma ile zamanla sistemdeki bileşenler birbirlerine yaklaşır. Bu durum, sistemin  $O - C$  diyagramında negatif katsayılı kuadratik terim şeklinde görülür. Açısal momentum kaybı ile tahmin edilen sistemin periyodundaki kademeli azalma, yarı-döngüsel bir şekilde olmadığı için genel periyodik yörünge dönem değişimi açıklanamamaktadır (Pulley et al. 2022).

**iii) Applegate Mekanizması;** Çift yıldız sisteminde görülen çevrimsel yörünge dönem değişimi, daha az kütleli bileşenin manyetik etkinliği ile meydana gelebilir. Bu durum genellikle *Applegate mekanizması* olarak adlandırılır (Applegate 1992, Lanza et al 1998).

Bu tür sistemlerde Applegate mekanizmasının varlığının araştırılması için öncelikle çift yıldız sistemin yörünge dönemine göre periyot değişimi hesaplanır. (Denklem 66)

$$\frac{\Delta P}{P_{bin}} = 4\pi \frac{K}{P_{mod}} \quad 66$$

Yörünge periyot modülasyonunu elde etmek için gereken dört kutuplu periyot değişimi ( $\Delta Q$ ),

$$\frac{\Delta P}{P_{bin}} = -9 \frac{\Delta Q}{M_{bin} a_{bin}^2} \quad 67$$

ile elde edilir. Applegate mekanizmasının olabilmesi için gereken enerji ile gözlemlenen örtülme zamanı değişimleri arasındaki ilişki;

$$\frac{\Delta E}{E_{sec}} = 0.233 \left( \frac{M_{sec}}{M_{sun}} \right)^3 \left( \frac{R_{sec}}{R_{sun}} \right)^{-10} \left( \frac{T_{sec}}{6000 K} \right)^{-4} \left( \frac{a_{bin}}{R_{sun}} \right)^4 \left( \frac{\Delta P}{s} \right)^2 \left( \frac{P_{mod}}{yr} \right)^{-1} \quad 68$$

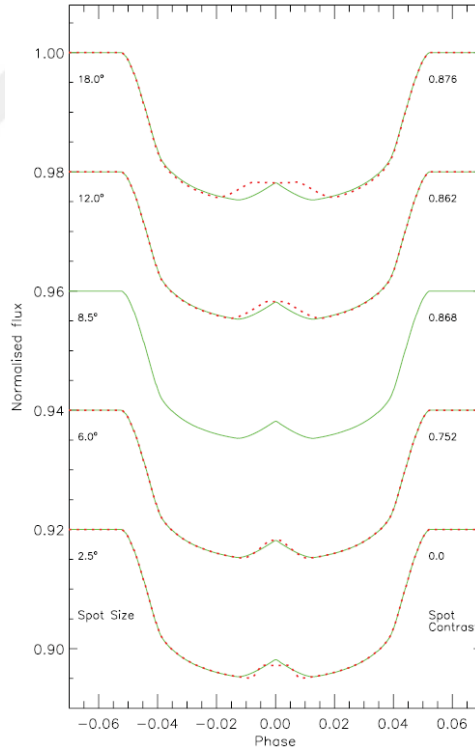
ile ifade edilir (Applegate 1992; Tian et al. 2009; Völschow et al. 2016). Applegate modeline göre enerji tutarsızlığı  $\Delta E_{min} \ll E_{sec}$  koşulu altında gerçekleşebilir. Manyetik etkinlik,  $E_{min}/E_{sec}$  'in 1'den küçük olması durumunda meydana gelebilir.  $E_{min}/E_{sec}$  'nin 1'e yakın veya çok büyük olması durumunda sistemlerdeki yörünge dönem değişimlerini manyetik etkinlik ile açıklamak yetersizdir.

**iv) Kütle Aktarımı;** Çift yıldız sistemlerinin yörünge dönem değişimlerine neden olan diğer bir fiziksel etki ise kütle aktarımıdır. Böyle bir durumda sistemin  $O - C$  diyagramında parabolik bir değişim görülür. Kütle aktarımı, sistemdeki bir bileşenin kaybettiği madde diğer bileşen tarafından kazanılması olayı olup;

$$\dot{M} = \frac{\dot{P}}{3P} \frac{M_1 M_2}{(M_1 - M_2)} (M_{sun}/yıl) \quad 69$$

ile kütle aktarımı hesaplanır. Burada  $\dot{M}$  Güneş kütlesi cinsinden kütle aktarım oranını ifade ederken  $\dot{P}$  ise sistemdeki dönem değişimini ifade etmektedir (Rovithis-Livaniou, 2005).

**v) Güneş Lekesi;** Yıldız-gezegen sistemlerinde  $O-C$  değişimlerine bazen yıldızda meydana gelen yıldız lekeleri neden olmaktadır. Manyetik etkinliklerin bir sonucu olarak yıldız yüzeyinde görülen daha soğuk bölgeler “yıldız lekeleri” olarak adlandırılmaktadır. Lekelere sahip bir yıldızın önünden geçen gezegen, yıldızın fotosferinin bir bölümünü kapatarak maske görevi görür. Geçiş sırasında leke bölgesinin örtülmesiyle geçiş ışık eğrisinin bir bölümünde yıldız aktivitelerinden kaynaklanabilen çıkıntılar (değişimler) görülebilmektedir (Şekil 20).



**Şekil 20.** Gezegene oranla leke boyutuna bağlı olarak ışık eğrilerindeki akı değişimi için örneklem. Yukarıdan aşağı doğru lekenin gezegene oranla boyutu azalmaktadır. Yeşil düz çizgi ise leke ile gezegenin boyutlarının eşit olduğu modeli göstermektedir (bkz. Tregloan-Reed et al. 2013).

Yıldız diskinin görünür kısmında bir yıldız lekesi var olduğunda, alınan akıyı  $\Delta F_{spot}$  miktarında azaltır. Daha sonra gezegen, bağlı olduğu yıldızın önünden geçtiğinde, gezegen

yıldız akısını  $\Delta F_{planet}$  kadar engeller. Geçişin derinliği, gezegen ve yıldızın alanlarının oranına bağlı olup yıldız lekesi ve kenar kararması olmadığı durumda yarıçap oranı;

$$\left(\frac{R_p}{R_s}\right)^2 = \frac{\Delta F_{planet}}{F} \quad 70$$

ile hesaplanır. Burada  $R_p$  ve  $R_s$ , sırasıyla gezegen ve yıldızın yarıçaplarıdır. Yıldız lekesinin olması durumunda ise  $\Delta F_{spot}$  kadar yıldız akısında bir azalma meydana gelir ve yarıçap oranı;

$$a \left(\frac{R_p}{R_s}\right)^2 = \frac{\Delta F_{planet}}{(F - \Delta F_{spot})} \quad 71$$

ile hesaplanır. Burada  $a$ , lekeli ve lekесiz durumlarda geçiş derinliklerinin oranıdır (Tregloan-Reed et al. 2013).

### **Model parametrelerinin belirlenmesi**

En uygun model parametrelerini elde etmek için en küçük karelerin toplamının yinelemeli minimizasyonuna dayanan birçok klasik sayısal yöntem (örneğin Levenberg-Marquardt algoritması veya Simplex yöntemi) kullanılır. Bu algoritmalar birçok programlama dilinde basitçe uygulanabilir olup veri analizi ve çözümü nispeten hızlı bulunabilir. Ancak LTT/TTV modelleri gibi çok sayıda serbest parametre barındıran modellerde tipik yöntemlerle parametrelerin belirlenmesi parametrelerin koverjansı ve olasılık dağılımları gibi parametre dejenerasyonunu dikkate alan kaliteli sonuçlar vermez (Örn; Transtrum et al. 2010; Gozdziewski et al. 2015; Nasiroglu et al. 2017; Gajdos and Parimucha 2018; Song et al 2019; Er et al. 2021). Bunun için Markov-Chain Monte Carlo yöntemi daha uygundur. Ancak bu yöntem, başlangıçta girilen tahmini parametrelere kuvvetli bir şekilde bağlıdır.

Başlangıç parametrelerini belirlemek/tahmin edebilmek için genellikle Genetik algoritmalar (GA) yöntemi kullanılır (Charbonneau 1995). Genetik Algoritmalar, klasik optimizasyon yöntemleri kullanılarak çözülemeyen optimizasyon problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır (Charbonneau 1995; Weise, 2011). GA'nın temel şeması biyolojik evrimden esinlenmiştir. Biyolojik evrime benzer şekilde, GA yöntemi yeni nesil bireyler oluşturularak, gelecek nesilde bireyleri değiştiren çapraz geçiş ve mutasyonların etkisi birbiri arasında karşılaştırmayı içerir. GA kullanarak verileri fit yaparken, bireyler modelin fit parametrelerinin değerlerinden oluşur. Geçiş, ebeveyn neslinde iki birey arasında bazı parametrelerin değerlerini değiştirerek gerçekleştirilir. Mutasyonlar, bir Gauss dağılımından rastgele bir değer ekleyerek parametrenin değiştirilmesine neden olur. Her bir bireyin gözlemler ile karşılaştırması ile ölçülen Ki-kare değerlerine göre de en uygun (yani en küçük Ki-kare

değerini veren birey) parametre uzayını ortaya çıkarır. Kısaca, GA algoritması çok boyutlu parametre uzayının verimli ve duyarlı bir şekilde gözlemler ile uyumlu makul çözümlerini arar (Gajdos and Parimucha 2018).

GA ile verilerin modellenmesinin asıl avantajı, model parametrelerin başlangıç değerlerinin şart olmamasıdır. Sadece hangi parametreler için hangi aralıkların kullanılması bilgisi gereklidir. Bizim durumumuzda, basitçe ikili sistemlerin fiziğinden veya doğrudan O–C diyagramından, parametre uzayının geniş sınırları belirlenebilir. GA tarafından incelenen parametrelerin aralığı örneğin genlik için 1-1800 saniye, periyot için 1000-36000 gün, dış merkezlik için 0 ile 0.99 verilebilir. Uygulama, hesaplama açısından çok yoğun değildir. Ayrıca Monte Carlo yöntemine göre nispeten kısa bir zaman alır. Ancak, GA yöntemi ile parametre hataları hakkında herhangi bir bilgiye ulaşılamaz. GA ile türetilmiş çözüm setleri daha sonra Levenberg-Marquardt yöntemiyle indirgenir. Birçok kez tekrarlanan bu prosedür gözlemlerle tutarlı olan büyük çözüm istatistiklerinin karşılaştırılmasıyla yapılır. Özetle, en küçük Ki-kare değerini veren çözüm seti, MCMC için başlangıç parametre uzayı olarak kabul edilir (Charbonneau 1995; Sharma 2017; Gajdos and Parimucha 2018).

Hataların belirlenmesi ve parametrelerin birbiri arasındaki dejenerasyon MCMC bağlantısı kullanılarak çözülebilir. Monte Carlo, istatistik yapabilmek için en çok kullanılan stokastik (olasılıksal) optimizasyon yöntemlerinden biridir. Temel fikir, uniform dağılımdan parametreler için rastgele değerler üretmek ve incelenen modelin en olası parametreleri yakınsayarak gerekli dağılımları ve olası durumları elde etmektir. Bunun için Markov Chains algoritması kullanılır. (Brooks vd, 2011; Sharma 2017; Gajdos and Parimucha 2018). MCMC yöntemi, durumların normal dağılımına yakınsar. Tüm parametrelerin belirsizlikleri bu son dağılımdan kolaylıkla tahmin edilebilir. MCMC yönteminde O–C’deki değişimi ifade etmek için olasılık fonksiyonuna ihtiyaç vardır. Bu fonksiyon,

$$\log \zeta = -\frac{1}{2} \chi^2 - \frac{1}{2} \sum_i \log \sigma_i^2 - \frac{1}{2} N \log(2\pi) \quad 72$$

şeklinindedir. Buradaki  $\chi^2$  (ki-kare) fonksiyonu, her gözlemsel verinin model ile farkına ve gözlemlerin belirsizliğine bağlıdır (Gozdziewski et al. 2015).

$$\chi^2(D, \xi) = \sum_i^N \frac{[O(D) - C(\xi)]_i^2}{\sigma_i^2} \quad 73$$

Model parametre vektörü kullanılan modeldeki parametre uzayını kapsar. Örneğin, sadece 3. cisim için  $\xi \equiv (K, P, e, \omega, \tau, P_{sys}, t_0, \sigma_f)$ 'dir.  $N$  kullanılan veri setinin ölçüm numarasını nitelendirir. Burada verilen logaritmik olasılık fonksiyonu  $\xi$ 'nin daha genel biçimidir. MCMC ile aynı zamanda, gözlemsel ham belirsizlikleri  $\sigma_i$  ölçeklendiren  $\sigma_f$  serbest parametresinin belirlenmesini de mümkün kılar. Böylece  $\sigma_{i,t}^2 \rightarrow \sigma_i^2 + \sigma_f^2$  kullanılarak  $\chi_v^2 \equiv \chi^2 / (N - \dim\xi) \sim 1$  sonucuna ulaşılır (burada  $\dim\xi$  serbest parametre sayısıdır). MCMC yöntemi, yukarıdaki N-cisim modelleri ve olasılık fonksiyonları kullanılarak, *emcee* (Foreman-Mackey et al. 2013) MCMC örnekleme yazılımı ile çalıştırılır. MCMC yöntemi, GA'nın aksine, model parametrelerin hatalarının tahminini verir. Ancak MCMC'nin uygulanabilmesi için model parametrelerin başlangıç değerlerinin bilinmesi gereklidir. Bu nedenle, MCMC'yi kullanmadan önce GA fit yöntemi kullanılır. MCMC yöntemi, hesaplama açısından çok yoğun olup GA ile modelleme işleminden yaklaşık beş kat daha uzun sürmektedir (modelin aynı sayıda hesaplamasıyla). GA'nın kullanılmasıyla başlangıç parametreleri duyarlı bir şekilde tahmin edilerek MCMC yöntemi ile de bu parametrelerin olasılık dağılımlarına ulaşılır. Ayrıca parametrelerin birbiri arasındaki kovaryansı gözlemlenebilir. MCMC'nin en önemli çıktısı bu dağılımları entegre halde gösteren corner diyagramıdır (Foreman-Mackey 2016). Corner diyagramı parametrelerin 1-D ve 2-D boyutlu olasılık dağılımlarını gösterir (Örn. Nasiroglu et al. 2017, Er et al. 2021). Dağılımların tek bir merkez odaklı ve homojen olması parametre uzayının ne kadar duyarlı ölçüldüğünü ve parametreler arası dejenerasyonun olmadığını gösterir.

### **Yörünge kararlılık testleri**

Yörünge kararlılık testlerinin amacı, sistemlerin yörüngelerinin beklenen ömürlerine kıyasla bir süre sabit olup olmadığını araştırmaktır. Yıldız-gezegen sistemleri gibi çok bileşenli sistemlerin yörünge kararlılığını incelemek için "WHFast" entegratörleri (Rein & Tamayo 2015) ile REBOUND'un (Rein & Liu 2012) python paketindeki Mean Exponential Growth Factor of Nearby Orbits (MEGNO, Cincotta & Simó 2000) yazılımı kullanıldı. REBOUND, kütleçekim etkisi altındaki gezegen ve yıldızlar gibi gök cisimlerin hareketini simüle etmek için N-cisim entegrasyonunu kullanır. Öte yandan WHFast, bir birincil cismin ve Kepler yörüngelerinde daha küçük pertürbasyonların olduğu sistemlere uygulandığında en etkili olan Wisdom-Holman entegratörünün özel bir uygulamasıdır. Bu yazılım, MEGNO değeri ve belirlenmiş bir süre boyunca belirtilen yörünge parametrelerindeki değişim gibi iki önemli sonuç sunar. MEGNO  $\langle Y \rangle$ , yörüngelerin kararlı ya da kararsız olduğunu işaret eder.  $\langle Y \rangle, \leq 2$  ise sistem başlangıç durumları için kararlı iken  $\langle Y \rangle \gg 2$  için yörüngelerin kararsız olduğu anlamına gelir.

## ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

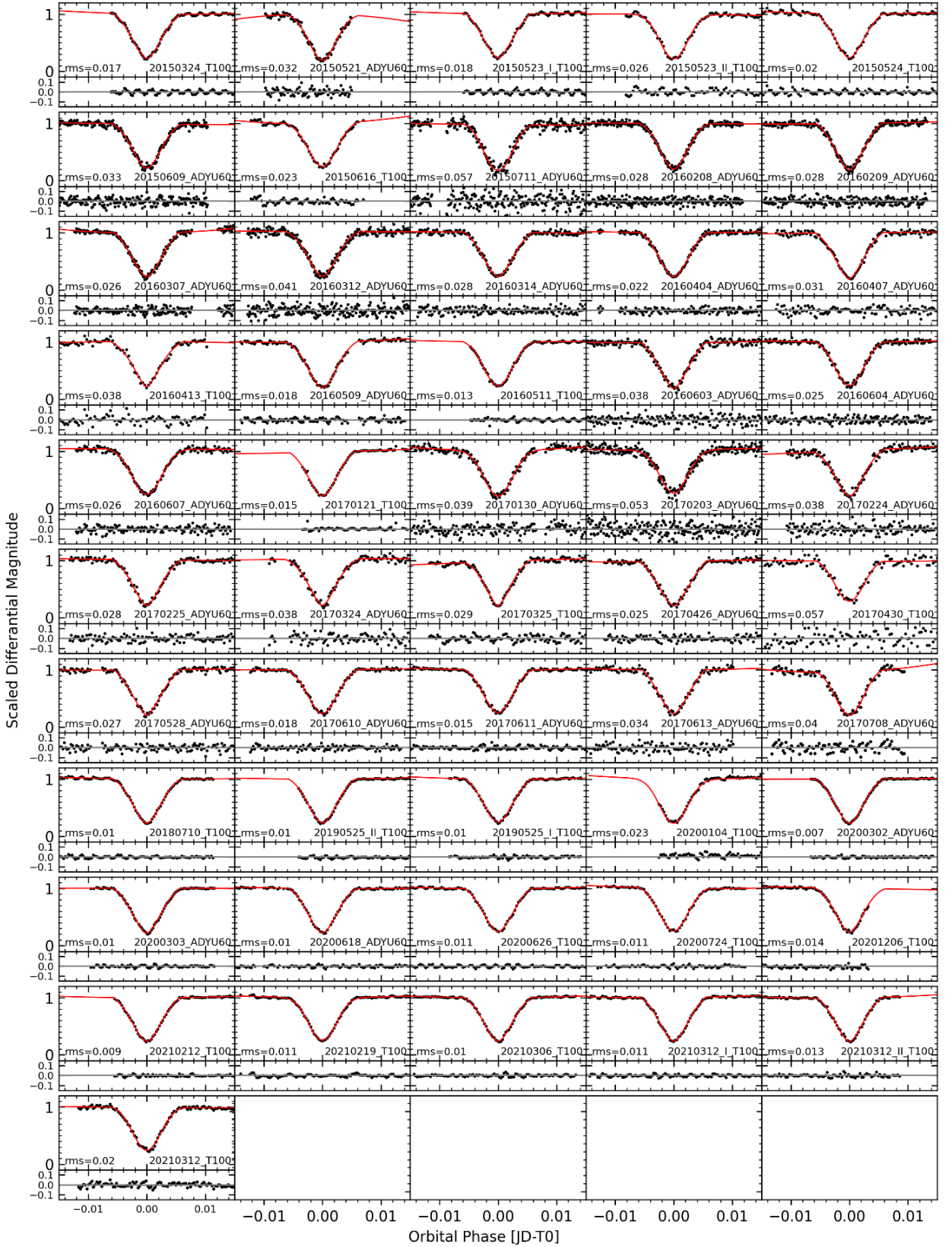
Bu çalışma kapsamında, çift yıldız (NY Vir ve NN Ser) ve geçiş gösteren yıldız-gezegen (WASP-10 b ve WASP-11 b) sistemlerinin fotometrik gözlemleri yapılarak ışık eğrileri elde edilmiştir. Işık eğrileri uygun fonksiyonlar ile modellenerek minimum zamanları hesaplanmış ve her bir kaynağın güncel O–C diyagramı oluşturulmuştur. Oluşturulan O–C diyagramları, literatürde mevcut veya yeni fonksiyonlar ile modellenerek sistemin yörünge dönem değişimi incelenmiştir. Bazı kaynaklarda görülen yörünge dönem değişimi, LTT etkisi veya diğer fiziksel mekanizmalar ile açıklanabilirken bazı kaynaklarda yörünge dönem değişimine rastlanılmamıştır. Kaynaklara ait bulgu ve tartışma, her bir kaynağın alt başlığı altında verilmiştir.

### NY Vir

NY Vir'in yörünge dönem değişimi, birçok araştırmacı tarafından incelendi. Yörünge periyodundaki ilk önemli değişim Kilkenny (2011) tarafından  $-11.2 \times 10^{-13}$  yörünge başına gün azalma oranı ile rapor edildi. Daha sonra Çamurdan et al. (2011) tarafından kuadratik terim kullanılarak sistemin açısal momentum kaybını işaret eden azalan bir yörünge periyodu ( $dP/dt = -4.09 \times 10^{-8} d yr^{-1}$ ) olduğu bildirildi. Kısa bir süre sonra, Qian et al. (2012) tarafından kuadratik modele üçüncü cismin varlığını temsil eden sinüzoidal bir terim eklenerek, periyodu 7.9 yıl ve yarı genliği 6.1 sn olan küçük genlikli çevrimsel bir değişim tespit edildi ( $M_3sini = 2.3 \pm 0.3 M_{Jup}$ ). Ardından Lee et al. (2014) tarafından 39 yeni minimum zaman ile bu sistemin O–C diyagramı iki gezegen modeli ile modellenerek periyotları  $P_3 = 8.2 yıl$  ve  $P_4 = 27 yıl$ , yarı genlikleri  $K_3 = 6.9 s$  ve  $K_4 = 27.3 s$  ve minimum kütleleri  $M_3sini = 2.8 M_{Jup}$  ve  $M_4sini = 4.5 M_{Jup}$  olarak bulundu. Böylece mevcut modellerin yeni gözlemler ile uyumlu olmadığı belirlendi. Son zamanlarda, Pulley et al. (2018) tarafından NY Vir'in O – C diyagramında önceki çalışmalardan farklı bir eğilime sahip yeni minimum zamanlar yayınlandı. Son olarak Song et al. (2019) tarafından, 24 Ocak 2018 ve 18 Nisan 2018 tarihleri arasında 18 yeni minimum zamanı yayınlandı. Son veriler ile Song et al. (2019) tarafından NY Vir'in O – C diyagramı, kuadratik terim ( $dP/dt = 2.83 \pm 0.28 \times 10^{-12} s s^{-1}$ ) ve iki gezegeni içeren bir çözüm ile modellenerek yörünge periyotları  $P_3 = 8.64 \pm 0.17 yıl$  ile  $P_4 = 24.09 \pm 0.65 yıl$  ve minimum kütleleri  $M_3sini = 2.66 \pm 0.36 M_{Jup}$  ile  $M_4sini = 5.54 \pm 0.28 M_{Jup}$  olan iki gezegenin varlığı önerildi.

Bu çalışma kapsamında NY Vir için TUG T100 ve ADYU60 teleskopları ile yapılan gözlemlerden 51 yeni örtülme ışık eğrisi elde edildi. Şekil 21’de verilen NY Vir’in ışık eğrileri geliştirilmiş bir Gauss profili ile fit edilerek 51 yeni ışık eğrisinin minimum zamanları bulundu (Er et al. 2021). Ayrıca ışık eğrilerinin fit sonuçları için her bir ışık eğrisinin RMS değeri (root mean squares; karelerinin ortalamasının karekökü) hesaplandı. En yüksek RMS değeri 0,057 kadir, ortalama RMS değeri ise 0,024 kadir olarak bulundu. RMS değerleri, gözlemsel ışık eğrilerinin fit sonuçlarının güvenilir olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, NY Vir için önceki çalışmaların çoğunda ışık eğrileri hakkında fazla bir bilgi bulunmadığı için literatürdeki minimum zaman ölçümlerinin doğruluğundan emin olunamamaktadır. Bu nedenle, LTT modellemesi sırasında genel eğilimin üç standart sapmanın üstünde farklılık gösteren birkaç aykırı değer kaldırıldı.





**Şekil 21.** TUG T100 ve ADYU60 teleskoplarından elde edilen NY Vir'in ışık eğrileri. Işık eğrileri “Yöntem” bölümünde bahsedildiği gibi modifiye edilmiş bir Gauss profili ile fit edildi. Gözlemlerin tarihleri ve kullanılan teleskoplar her bir ışık eğrisi üzerinde belirtildi. I ve II gibi Roma rakamları, aynı gün içindeki toplam örtülme sırasını tanımlar. Hesaplanan RMS değerleri, Kadir (Magnitude) birimindedir (Er et al. 2021).

Diğer taraftan sdB bileşeninden kaynaklı olan pulsasyon etkisi, bazı ışık eğrilerinin artıklarında açıkça görülmektedir (Örneğin; 20210306\_T100, 20210312\_I\_T100). Bu nedenle çalışma kapsamında en iyi 17 ışık eğrisinin (yani  $rms \leq 0.015$  kadar) artıkları üzerine Lomb–Scargle periyot analizi uygulandı ve 170 ile 186 s arasında bir titreşim periyodunu gösteren orta düzeyde sinyaller bulundu. Ancak ışık eğrilerinin dördü yanlış alarm limitine yaklaşmış çok zayıf sinyalleri göstermektedir. Ayrıca Vuckovic et al. (2016) tarafından bu sistem için yapılan ayrıntılı bir ışık eğrisi analizi ile sistemin birincil tutulması sırasında titreşimin genliklerinin daha zayıf olduğu gösterildi. Bu nedenle titreşimden kaynaklanan zaman kaymasının büyüklüğü bilinmediği için, bu titreşimin minimum zamanları üzerindeki etkisi analizler sırasında ihmal edildi.

NY Vir için elde edilen yeni minimum zamanlar ile daha önce Kilkenny et al. (1998, 2000, 2011, 2014), Çamurdan et al. (2012), Qian et al. (2012), Lee et al. (2014), Lohr et al. (2014), Pulley et al. (2018), Baştürk & Esmer (2018), and Song et al. (2019) tarafından yayınlanmış minimum zamanlar birleştirilerek tüm zamanlar Tablo 1’de listelendi.

**Tablo 1.** NY Vir Sisteminin Minimum Zamanları, Hataları ve Referansları

<b>Literatür</b>		
<b>BJD</b>	<b>Hata</b>	<b>Referans</b>
2450223.36202800	0.000040	Kilkenny et al. (1998)
2450223.46315800	0.000020	Kilkenny et al. (1998)
2450224.37222800	0.000030	Kilkenny et al. (1998)
...	...	...
<b>Bu Çalışma</b>		
<b>BJD</b>	<b>Hata</b>	<b>Referans</b>
2457106.59016795	0.000020	Bu çalışma (TUG T100)
2457164.27030104	0.000039	Bu çalışma (ADYU60)
2457166.29063049	0.000025	Bu çalışma (TUG T100)
2457166.39160512	0.000032	Bu çalışma (TUG T100)
...	...	...

\*Tablonun tamamı Er et al. (2021)’de paylaşılmıştır.

Tablo 1’deki minimum zamanları üzerine aşağıdaki gibi Song et al. (2019)’a benzer birkaç düzenleme yapıldı.

*i)* Kilkenny et al. (2000)’de yer alan minimum zamanların belirsizlikleri paylaşılmadığı için tüm hatalar 0.00005 gün olarak kabul edildi.

*ii)* Çamurdan et al. (2012), Qian et al. (2012), Lee et al. (2014) ve Baştürk & Esmer (2018) tarafından yayınlanan bazı minimum zamanlar, O–C diyagramının genel eğilim ile uyumlu

olmayıp 3 standart sapmanın üzerinde yer almaktadır. Bu nedenle LTT modellemesi sırasında, uyumlu olmayan 31 minimum zaman kullanılmadı. Yine de Tablo 1’de tüm literatür veriler listelendi ve modelleme için hangi minimum zamanın kullanılıp kullanılmadığı belirtildi (Er et al. 2021).

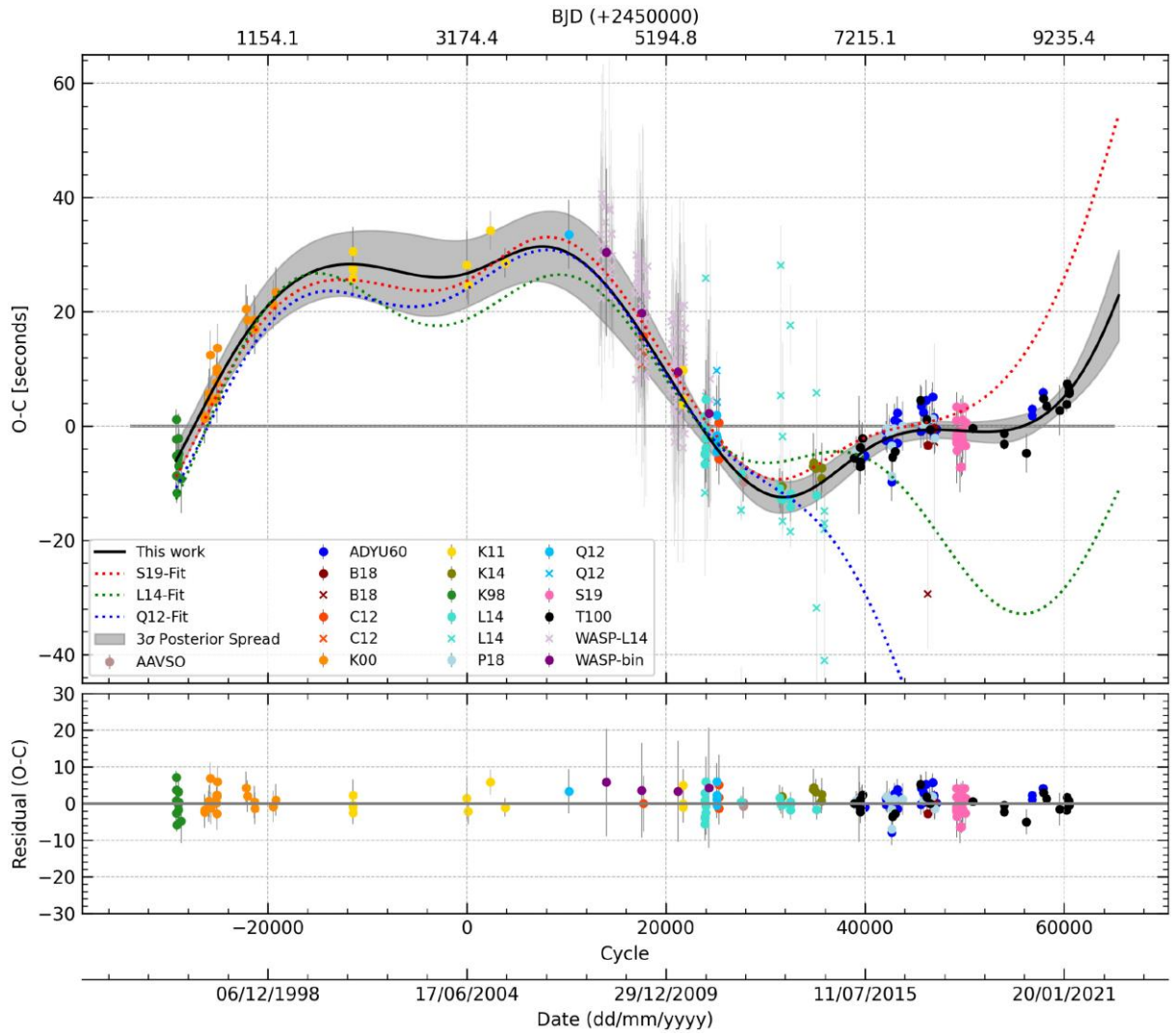
iii) Lohr et al. (2014) tarafından verilen WASP gözlemlerinin 145 minimum zamanı Tablo 1’e eklendi. Ancak bu veriler zamana göre dört grupta birleştirildi (binning). Modelleme sırasında ise WASP gözlemlerinin yalnızca binlenmiş dört minimum zamanı kullanıldı.

iv) Son olarak Tablo 1 içerisine, Song et al. (2019)’da yer alan American Association of Variable Star Observers (AAVSO) (<https://www.aavso.org/>)’dan hesaplanan minimum zamanlar eklendi.

Böylece, O–C diyagramının modellenmesi sırasında, literatürdeki veriler için yapılan birkaç değişikliğinden sonra elde edilen 197 minimum zamanın 166’sı (Binlenmiş 4 WASP verisi de dahil olmak üzere) kullanıldı. Tablo 1’deki minimum zamanlar kullanarak Denklem 45’deki doğrusal efemeris denkleminde çift yıldız sisteminin başlangıç efemeris zamanı ve yörünge periyodu;

$$T_{eph}(L) = T_0 + L \times P_{bin} = BJD\ 2453174.442636(12) + E \times 0.1010159686(3)$$

olarak bulundu. Burada, doğrusal efemeris ( $T_{eph}$ ), BJD’deki minimum zaman iken,  $T_0$ , çevrim sayısının sıfır olduğu minimum zaman için başlangıç efemerisidir.  $P_{bin}$  ise çift yıldız sisteminin yörünge periyodudur. Böylece, Şekil 22’de gösterildiği gibi O–C diyagramı elde edildi.



**Şekil 22.** Üst Panel: NY Vir'in  $O - C$  diyagramıdır. Burada, TUG-T100 ve ADYU60, siyah dolgulu ve mavi dolgulu daireler ile gösterildi. Literatürdeki tüm veriler ise farklı renklerde verildi ve karşılık gelen kısaltmalarla gösterildi. Kısaltmalar; K98 (Kilkenny et al. 1998), K00 (Kilkenny et al. 2000), K11 (Kilkenny 2011), C12 (Camurdan et al. 2012), Q12 (Qian et al. 2012), K14 (Kilkenny 2014), WASP-L14 (Lohr et al. 2014), L14 (Lee et al. 2014), B18 (Basturk & Esmer 2018), P18 (Pulley et al. 2018) ve S19 (Song et al. 2019) şeklindedir. Bu çalışma kapsamında elde edilen model siyah çizgi ile gösterildi. Gölge gri alan, MCMC posteriorundan rastgele seçilen 1000 parametre örneğinden hesaplanan  $\pm 3\sigma$  posterior yayılımını temsil eder. Literatürde verilen NY Vir'in sistem parametreleri kullanılarak diğer LTT modelleri yeniden oluşturuldu. Kırmızı, yeşil noktalı ve mavi noktalı çizgiler sırasıyla, Song et al. (2019) tarafından uygulanan kuadratik efemeris ve LTT etkisini, Lee et al. (2014) tarafından uygulanan iki LTT etkisini ve Qian et al. (2012) tarafından uygulanan kuadratik efemerise ek olarak bir LTT etkisini göstermektedir. Alt Panel: Bu çalışma kapsamında kullanılan modelden kalan  $O - C$  zamanlarındaki artıkları gösterir. Artıkların rms değeri, 8.4 s olarak hesaplandı (Er et al. 2021)

NY Vir'in  $O - C$  diyagramında, ilave cisim/ler ile açıklanabilecek çevrimsel bir değişim görülmektedir (Şekil 22). Bu değişim, daha önce Qian et al. (2012) tarafından kuadratik efemeris (ikinci dereceden terim) ve bir gezegen modeli ile açıklanırken, Lee et al. (2014) tarafından ise iki gezegenli doğrusal efemeris içeren bir model ile açıklandı. Son zamanlarda, Song et al. (2019) tarafından ise yeni gözlemsel veriler eklenerek  $O - C$  diyagramı, kuadratik efemeris ve iki gezegen ile modellendi. Çalışma kapsamında,  $O - C$  diyagramındaki değişimi açıklamak için literatürdeki tüm modeller parametreleriyle birlikte test edildi (Şekil 22). Ancak

elde edilen yeni veriler, minimum zamanlarının yayınlanmış listesini genişlettiğinden, bu sistemin O–C davranışını açıklayan (Örn: Qian et al. 2012; Lee et al. 2014; Song et al. 2019) önceki LTT modelleri, son O–C verileriyle uyumlu olmadığı görüldü. Bu nedenle çalışma kapsamında sistem parametrelerini güncellemek için iki gezegenli ikinci dereceden efemerisi içeren model olan Denklem 74 kullanıldı (Song et al. 2019).

$$O - C = \beta E^2 + \tau_1(E) + \tau_2(E) \quad 74$$

Burada  $\beta$ ,  $P\dot{P}/2$  tarafından verilen kuadratik terimdir.  $\dot{P}$  ise efemeris zamanla ilgili periyodun türevidir. Birinci ve ikinci gezegen ( $\tau_{1,2}$ ) varlığının araştırılması için LTT terimi olarak,

$$\tau_{1,2} = K_i \frac{1}{\sqrt{(1 - e_i^2 \cos^2 \omega_i)}} \left[ \frac{1 - e_i^2}{(1 + e_i \cos v_i)} \sin(v_i + \omega_i) + e_i \sin \omega_i \right] \quad 75$$

ifadesi kullanıldı.  $O - C$  diyagramındaki  $i$ . gezegenin pertürbasyonu ile ortaya çıkan LTT sinyalinin yarı genliği ise;

$$K_i = \frac{a_{12} \sin i_i \sqrt{(1 - e_i^2 \cos^2 \omega_i)}}{c} \quad 76$$

'dır. Burada yer alan parametreler "Yöntem" bölümünde detaylı bir şekilde açıklanmıştır. O–C diyagramını modellemek için, kuadratik efemeris ve iki gezegenin LTT etkilerini içeren 11 serbest parametrelili ( $dP/dt, a_{12} \sin i_{3,4}, e_{3,4}, t_{03,04}, P_{3,4}$ ) model kullanıldı. LTT gibi birçok serbest parametreye sahip modellerde tipik yöntemlerle parametrelerin belirlenmesi, parametre dejenerasyonu, parametrelerin kovaryansı ve olasılık dağılımlarını dikkate alan kaliteli sonuçlar vermemektedir. Bu nedenle O–C diyagramlarındaki değişimin araştırılması için Markov Chain Monte Carlo (MCMC) yönteminin kullanılması daha uygundur (örneğin; Gozdziewski et al. 2015; Nasiroglu et al. 2017).

O–C değişimi, Denklem 77'de verilen model ile ifade edebilmek için olasılık fonksiyonu  $\mathcal{L}$  uygun hale getirildi.

$$\ln \mathcal{L} = -\frac{1}{2} \sum_i^N \frac{(O - C)_i^2}{\sigma_i^2 + \sigma_f^2} - \sum_i^N \ln \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_f^2} - N \ln \sqrt{2\pi} \quad 77$$

Burada  $(O - C)_i$ , gözlenen  $i$ . minimum zamanının Denklem 74 ile hesaplanandan sapmasını ifade eder.  $\sigma_i$  ise gözlenen  $i$ . minimum zamanın ölçüm belirsizlikleridir. Şimdiye kadar, minimum zamanların belirsizlikleri elde edilirken sistematik belirsizlikler dikkate alınmamıştır. Ancak modelleme sırasında sistematik belirsizlikler de dikkate alınmalıdır. Bu

nedenle,  $\sigma_i$  sistematik belirsizlikleri içermediğinden olasılık fonksiyonuna, serbest bir parametre ( $\sigma_f$ ) dahil edildi.  $\sigma_f$ ,  $\sigma_i$  ile benzer gün birimlerine sahiptir.

MCMC algoritması ile dinamik modelin optimizasyonunun genel amacı, sonsal olasılık dağılımında (posterior probability distribution) verilen örnek sayısından serbest model parametrelerinin uzayını araştırmaktır. Posteriorları örneklemek için, MCMC emcee paketi kullanıldı (Goodman & Weare 2010; Foreman-Mackey et al. 2013). MCMC güçlü bir şekilde başlangıç parametrelerine bağlıdır. Bu nedenle MCMC'nin başlangıç parametrelerini belirlemek için Charbonneau (1995)'daki genetik algoritmasına (GA) benzer bir metodoloji kullanıldı. GA çalıştırılırken uygulanan serbest parametrelerin aralıkları ve GA'dan elde edilen başlangıç değerleri Tablo 2'de listelenmektedir.

**Tablo 2.** GA'dan Elde Edilen Başlangıç Parametreleri

Parametreler	Birimler	Aralıklar	Değerler
$dP/dt$	$s s^{-1}$	$[10^{-14}, 10^{-11}]$	$2.33 \times 10^{-12}$
$a_{12} \sin i_3$	au	$[0, 0.1]^*$	0.0188
$a_{12} \sin i_4$	au	$[0, 0.1]^*$	0.0631
$e_3$		$[0, 0.9]$	0.077
$e_4$		$[0, 0.9]$	0.094
$\omega_3$	derece	$[0, 360]$	318
$\omega_4$	derece	$[0, 360]$	347
$t_{03}$	BJD	$\geq 2449000$	2456488
$t_{04}$	BJD	$\geq 2449000$	2450453
$P_3$	yr	$\geq 0$	8.93
$P_4$	yr	$\geq 0$	26.03
$\sigma_f$	s	$\geq 0$	1.64

\* $K_{3,4} \leq 50$  s varsayılarak hesaplanan maksimum değer (bkz. Şekil 22)

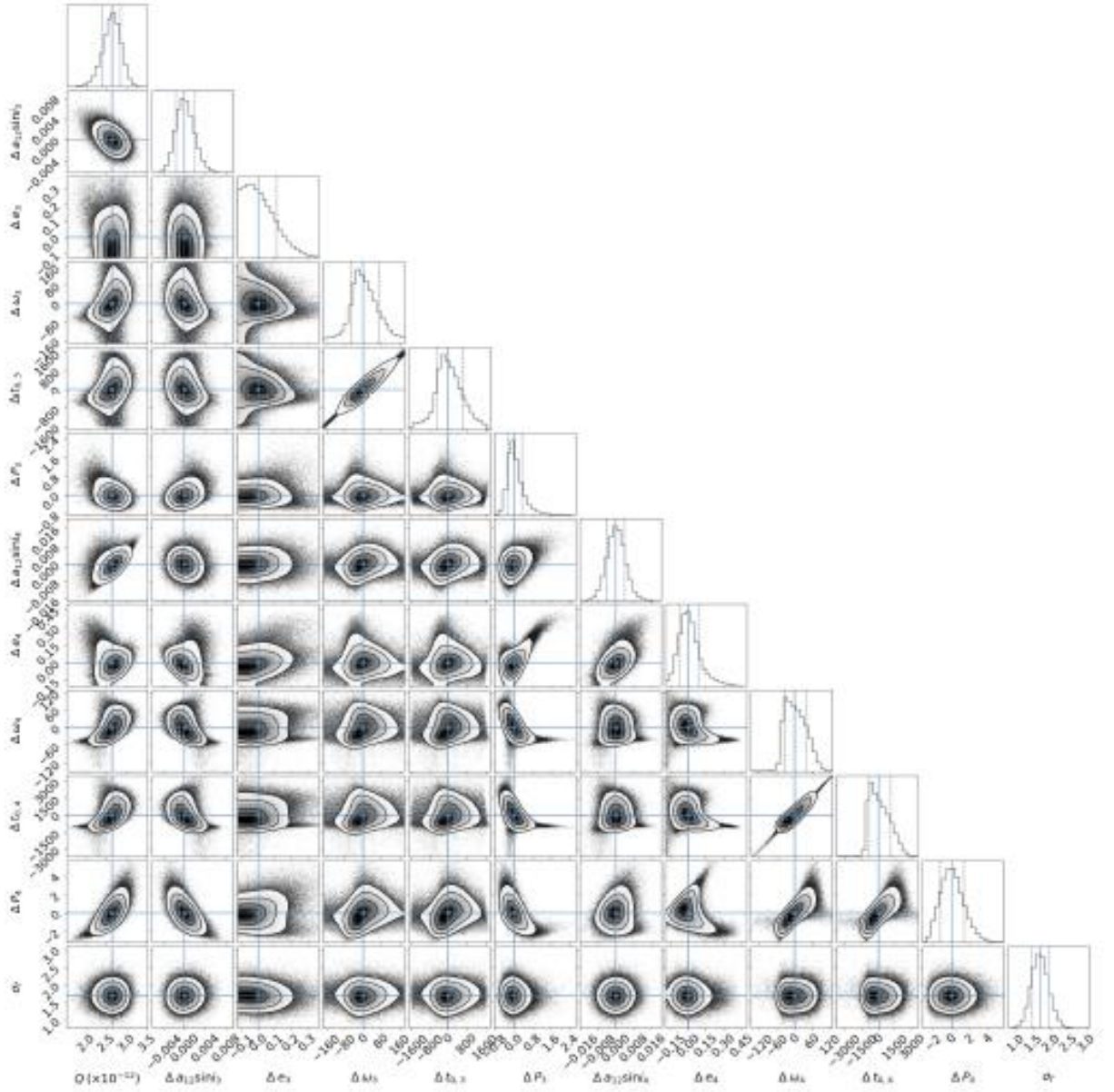
Tablo 2'deki başlangıç değerleri kullanılarak, 512 başlangıç koşulu (her bir adımda ki rastgele değişen; walker) için başlangıçları örneklemek üzere MCMC çalıştırıldı ve bu walkerlar 100.000 (her bir serbest parametrenin adım sayısı; step) örneklemede test edildi. MCMC örnekleycisinden, güvenilir bir tahmin gösteren 0,5 kabul oranı için, 50.000'den daha kısa örnekleme nispeten güvenilir sonuçlar verirken daha uzun örnekleme (100.000 üzeri) fazla olarak kabul edilebilir (Detaylı olarak bkz. Foreman-Mackey et al. 2013). Böylece,  $\mathcal{L}$ 'yi maksimize ederek en uygun sistem parametreleri elde edildi (Tablo 3).

**Tablo 3.** NY Vir'in En Uygun Sistem Parametreleri

Parametre	Birim	Lee et al. (2014)	Song et al. (2019)	Bu çalışma
<b>Çift Yıldız Sistemi</b>				
$T_0$	BJD	2453174.442699(91)	2453174.442647(13)	2453174.442636(12)
$P_0$	gün	0.1010159668(43)	0.1010159677(4)	0.1010159686(3)w
$dP/dt$	s s <sup>-1</sup>	-	$2.83(0.25) \times 10^{-12}$	$2.64_{-0.24}^{+0.21} \times 10^{-12}$
<b>Birinci Gezegen</b>				
$a_{12} \sin i_3$	au	$0.0153 \pm 0.0220$	$0.0151 \pm 0.0082^*$	$0.0161_{-0.0016}^{+0.0018}$
$e_3$		-	$0.15 \pm 0.08$	$0.12_{-0.12}^{+0.12}$
$\omega_3$	deg	$346 \pm 15$	$348 \pm 6$	$351_{-52}^{+69}$
$t_{0,3}$	BJD	2453472(141)	2453472	$2456762_{-479}^{+628}$
$P_3$	yr	$8.18 \pm 0.18$	$8.64 \pm 0.17$	$8.97_{-0.24}^{+0.36}$
$K_3$	sn	$6.9 \pm 1.0$	$7.6 \pm 0.7$	$7.9_{-0.8}^{+1.0}$
$M_3 \sin i_3$	M <sub>Jup</sub>	$2.78 \pm 0.19$	$2.66 \pm 0.26$	$2.74_{-0.34}^{+0.37}$
<b>İkinci Gezegen</b>				
$a_{12} \sin i_4$	au	$0.0550 \pm 0.0160$	$0.0625 \pm 0.0047^*$	$0.0686_{-0.0039}^{+0.0041}$
$e_4$		$0.44 \pm 0.17$	$0.15 \pm 0.01$	$0.19_{-0.07}^{+0.09}$
$\omega_4$	deg	$333 \pm 15$	$320 \pm 4$	$398_{-34}^{+42}$
$t_{0,4}$	BJD	2450031(497)	2450031	$2451694_{-787}^{+1108}$
$P_4$	yr	$27.0 \pm 0.37$	$24.09 \pm 0.65$	$27.2_{-1.2}^{+1.3}$
$K_4$	sn	$27.3 \pm 8.2$	$31.4 \pm 1.1$	$33.8_{-2.9}^{+2.4}$
$M_4 \sin i_4$	M <sub>Jup</sub>	$4.49 \pm 0.72$	$5.54 \pm 0.20$	$5.59_{-0.49}^{+0.51}$

\*Song et al. (2019)'daki bilgiler kullanılarak hesaplandı (Er et al. 2021).

Ayrıca MCMC tarafından örneklenen sistem parametrelerinin 1D ve 2D olasılık dağılımları, Şekil 23'deki grafikte gösterilmektedir. MCMC'nin en küçük kareler yönteminden daha belirgin sonucu, Şekil 23'te gösterildiği gibi modeldeki serbest parametrelerin 1D ve 2D olasılık dağılımlarıdır. Parametreler arasındaki tüm kovaryansları gösterdiğinden dolayı bu dağılımlar önemlidir. Tüm 1D dağılımlar, tek güçlü tepe noktaları gösterirken, örneklemeler, tek bir çözüm etrafında nispeten tekdüze 2D dağılımlara sahiptir. Ayrıca parametre uzayında sapma veya dejenerasyon olmadığı da görülmektedir. Ancak  $e_3$ ; 0.00 ile 0.24,  $\omega_3$ ;  $286^\circ$  ile  $461^\circ$  ve  $t_{0,3,4}$ ;  $\sim 1600$  ve  $2000$  gün gibi bazı parametreler üzerindeki çözümler geniş aralıklara dağılır. Bu belirsizlikler, özellikle 2013 öncesi gözlem eksikliğinden kaynaklanmaktadır. MCMC örneklerinden rastgele seçilen 1000 modelden hesaplanan  $\pm 3\sigma$  posterior yayılımında da görülebilmektedir (Şekil 22). Belirsizlikleri azaltmak için, daha fazla gözlem içeren tam bir döngüye ihtiyaç vardır.



**Şekil 23.** O–C modelinden çıkarılan serbest parametrelerin sonsal olasılık dağılımlarının 1D ve 2D grafikleri. Grafik, corner.py kullanılarak elde edildi (Foreman-Mackey et al. 2013, Er et al. 2021)

Ayrıca O–C zamanlarının artıklarının RMS değeri 8,4 s olarak hesaplandı. Benzer tarihler için O–C artıkları 8 s'ye kadar dağıldığından, RMS değeri gözlemsel verilerin belirsizlikleriyle uyumludur ( $O - C$  diyagramına bkz). Ek olarak, MCMC örnekleme ile model göz önüne alındığında 2.8 s'lik ortalama gözlemsel belirsizliklere benzeyen gözlemlerin sistematik hata tabanı için nispeten düşük  $\sigma_f = 1.7 \pm 0.2$  s ortaya koymaktadır. Böylece, modelin mevcut gözlemlerle istatistiksel olarak uyumlu olduğu görülür. Ancak, O–C'deki RMS saçılımı ve ortalama toplam hatanın (gözlemsel ve sistematik, 4,5 s), LTT'den kaynaklı ( $K_3 = 7.9$  s) yörünge gecikmesine oldukça benzer olduğuna dikkat edilmeli olup iki gezegen modelinin önemi konusunda hafif bir şüphe uyandırmaktadır. İlerleyen kısımlarında, NY Vir'in O–C zamanlarını açıklamak için başka bir mekanizmanın da var olabileceği tartışılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında yapılan son gözlemler, bu çalışmaların öngörüsüyle tutarlı olmasa da elde edilen sonuçlar ile literatürdeki iki gezegen modelini dikkate alan çalışmalar ile karşılaştırıldı (Tablo 3). Hesaplanan sistem parametrelerinin neredeyse tamamı hatalar dahilinde olup literatürde elde edilenlerle nispeten uyum içindedir (bakınız Tablo 3). NY Vir ‘in O–C diyagramının eğilimi ikinci döngüye doğru yükseldiğinden ikinci gezegen için sistem parametrelerinin (özellikle  $\omega_4, t_{0,4}, P_4$ ) yeniden güncellenmesi gereklidir. Bu durum Song et al. (2019) tarafından Mart 2019’da başlaması gerektiği tahmin edilse de Mart 2020 gibi başlamıştır. Öte yandan Lee et al. (2014) tarafından iki gezegenli modellerinde ikinci dereceden etki hesaba katılmadı. Song et al. (2019) tarafından ise gezegenin sabitlenmiş farklı yörünge eksantriklikleri ( $e_3, e_4$ ) ve Lee’de verilen gezegenlerin perisantre geçiş süreleri ( $t_{0,3}, t_{0,4}$ ) kullanıldı. Ancak bu çalışma kapsamında kullanılan modeldeki 11 sistem parametresinin hepsi serbest bırakıldı. Bu nedenle literatür ile bu çalışma kapsamında elde edilen eksentrisite ve pericenter geçiş zamanlarının karşılaştırılması uygun olmayacaktır. Ayrıca literatürde daha önce elde edilen sonuçların hatalarının nispeten bu çalışma kapsamından daha küçük olmasının sebebi ise modelleme de MCMC yönteminden kaynaklanmaktadır. MCMC yöntemi, en küçük kareler yöntemine kıyasla çok sayıda örnek kullanarak daha geniş aralıklarda daha fazla sayıda serbest parametre aradığından, daha güvenilir sonuçları temsil eden daha büyük belirsizlikler oluşturmaktadır. Tüm bu istatistiksel sonuçlar ele alındığında, LTT modeli istatistiksel olarak verilerle tutarlı olsa da belirsizlikleri azaltmak ve varsayımsal gezegenler için modeli kanıtlamak için O–C zamanlarının tam döngüsünden oluşan daha fazla gözleme ihtiyaç duyulur.

LTT sinyalinin büyüklüğünü gösteren çift yıldızın öngörülen yarı ana eksen uzunluğu ( $a_{12} \sin i_{3,4} = 0.016$  ve  $0.07 au$ ) olarak bulunurken LTT sinyalinin eğriliğiyle ilişkili olan pericenter uzunluğu ( $\omega_3 = 351^\circ$  ve  $\omega_4 = 398^\circ$ ) ve eksentritik ( $e_3 = 0.12$  ve  $e_4 = 0.19$ ) olarak hesaplandı. Bu değerler, sırasıyla birinci ve ikinci aday gezegenlerden kaynaklanan LTT sinyallerinin küçük ( $K_3 = 7.9 s$ ) ve büyük ( $K_4 = 33.8 s$ ) yarı genliğini göstermektedir. Bu sonuçlar önceki çalışmalar ile uyumludur (Lee et al. 2014, Song et al. 2019). Bununla birlikte nispeten yüksek kütleli gezegenlerin birbirine yakın olduğu görülmekte ( $\sim 4 au$ ) olup bu yakınlık, ek yörünge değişimlerine neden olabilir. Bu durum NY Vir’in gelecekteki çalışmalarında dikkate alınmalıdır. Ayrıca ilave gezegen parametreleri, Tablo 3’teki ilgili parametreler kullanılarak da hesaplanabilir. Bu nedenle “Yöntem” bölümünde yer alan kütle fonksiyonu (Denklem 55) ile sistemde düşünülen ilave cisimlerin kütleleri hesaplanabilir. Böylece, bu çalışma kapsamında, Vuckovic et al. (2007)’deki NY Vir sistemi için verilen

toplam kütle ( $M_{total} = \sim 0.59 M_{sun}$ ) kullanılarak gezegenlerin minimum kütleleri  $M_3 = 2.74 M_{Jup}$  ve  $M_4 = 5.59 M_{Jup}$  olarak hesaplandı (Er et al. 2021)

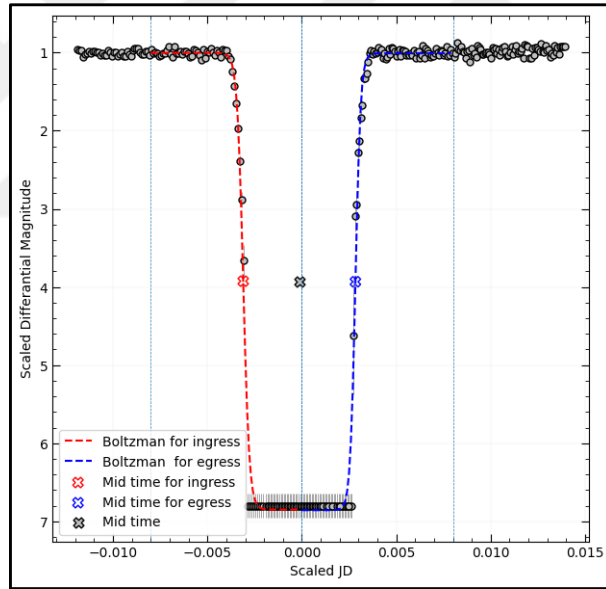
Çift yıldız sistemlerindeki yörünge dönem değişimi, açısal momentum kaybı/kazancı (Andronov, Pinsonneault & Sills 2003; Schwarz et al. 2009), manyetik aktivite (Applegate 1992; Lanza, Rodono & Rosner 1998) ve kütle transferi (Rovithis-Livaniou 2006) gibi N-cisim dışındaki etkenlerden de kaynaklanabilir. NY Vir durumunda, yörünge periyodu değişimi Çamurdan et al. (2012) tarafından açısal momentum kaybı ile açıklandı. Ardından, bu değişimin Qian et al. (2012) ve Lee et al. (2014) tarafından momentum kaybıyla açıklanamayacağı ve bunun yerine bir ve iki gezegensel etkiden kaynaklanabileceği bildirildi. Son olarak Song et al (2019) tarafından yörünge dönem değişimi, açısal momentum kazancına ( $dP/dt$  pozitif) ek olarak sistemin yörüngesinde dolanan üçüncü ve/veya dördüncü cisimlerden kaynaklandığı düşünüldü. Bu çalışmada NY Vir için açısal momentum kazancına ( $\frac{dP}{dt} = 2.64 \times 10^{-12} s s^{-1}$ ) ek olarak iki gezegensel etkiden kaynaklanan yörünge dönem değişimini açıklayan model,  $O - C$  diyagramı ile oldukça uyumludur. Bir süre sonra bu sistem için periyot değişim eğilimi artıştan azalışa doğru ( $dP/dt$  pozitiften negatife) değişir ise sistemde bir manyetik döngünün varlığı ortaya çıkarılabilir. Bu nedenle çalışma kapsamında, yörünge dönem değişimine neden olabilecek etkenlerden biri olan Applegate mekanizması incelendi (Applegate 1992; Lanza et al. 1998). Çift yıldız sistemindeki daha az kütleli bileşenin manyetik aktivitesinden kaynaklı olan Applegate modeline göre, açısal momentum transferi  $\Delta E_{min} \ll E_{sec}$  koşulu ile gerçekleşebilir (Applegate 1992; Tian, Xiang & Tao 2009). Völschow et al. (2016) tarafından NY Vir için Applegate modeli incelendi ve  $E_{min}/E_{sec} = 5.6$  enerji tutarsızlığının 1'den büyük olması nedeniyle manyetik aktivitenin yörünge dönem değişimini açıklamak için yetersiz olduğu bildirildi. NY Vir sistemi için Völschow et al. (2016)'da verilen parametreler ile bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ( $K_4 = 33.8 s$  ve  $P_4 = 27.2$ ) kullanılarak,  $E_{min}/E_{sec} = 1.1$  olarak hesaplandı. Elde edilen değer 1'e yakın olduğu için bu sistemdeki yörünge dönem değişimine neden olan ek etkinin manyetik aktiviteden kaynaklanabileceği göz ardı edilmemelidir. Ek olarak her yıldızın kendi Roche lobu içinde olan PCEB'lerde kütle aktarımı olmadığından, bu sistemdeki yörünge dönem değişiminin nedeninin kütle kaybından dolayı olmadığı kabul edildi (Paczynski 1976; Zorotovic & Schreiber 2013). Çalışma kapsamında,  $O - C$  eğiliminin yukarı yönlü olacağı öngörülmekte olup artışın ne kadar devam edeceğinin belirlenmesi önemli de bir konudur. Bu nedenle NY Vir'in yapısını ve doğasının daha iyi anlaşılabilmesine yol açabilecek parametrelerin belirsizliği sınırlayabilmek için yeni gözlemlere ihtiyaç duyulur. Şimdilik, iki gezegen modeli istatistiksel olarak uyumlu görünse de bu gezegenlerin varlığı hâlâ varsayımsal olarak kalmaktadır (Er et al. 2021).

## NN Ser

Örten bir sistem olduğu keşfedildikten sonra bugüne kadar yörünge dönem değişimi birçok araştırmacı tarafından incelendi (Haefner et al. 2004; Brinkworth et al. 2006; Beuermann et al. 2010, 2013). Haefner (1989) ilk olarak örten çift yıldız sistemi NN Ser'in yörünge periyodu değişimini inceledi ve 2004'te yörünge parametrelerini güncelledi (Haefner et al. 2004). Daha sonra Brinkworth et al. (2006) tarafından, sistemdeki dönem değişiminin, manyetik frenleme üzerinden açısal momentum kaybının neden olabileceği fakat Applegate mekanizmasıyla açıklanamayacağı rapor edildi. Yörünge periyodundaki değişim, yerçekimi radyasyonu veya manyetik frenleme yerine, çoğunlukla bir veya iki gezegenin varlığının katkıda bulunduğu ışık-zaman yolculuğu (LTT) ile açıklandı (Chen 2009; Qian et al. 2009; Beuermann et al. 2010; Beuermann, Dreizler, & Hessman 2013; Mustill et al. 2013; Bours et al. 2016). Beuermann et al. (2013) tarafından O-C diyagramına 69 yeni tutulma zamanı eklenerek NN Ser sisteminin yörünge dönem değişimi yeniden incelendi ve ikili gezegen modelinin dinamik olarak kararlılık gösterdiği rapor edildi. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda gezegenlerin periyotları sırasıyla 7.65 ile 15.47 yıl, sistemden uzaklıkları 3.4 ile 5.4 AB ve minimum kütleleri ise  $1.7 M_{Jup}$  ve  $7 M_{Jup}$  olarak hesaplandı. Bu sonuçların aksine, Mustill et al. (2013) tarafından NN Ser sisteminin evrimi tartışılarak daha önce önerilen gezegen sistemlerinin dinamik olarak kararsız olduğu ve dönem değişiminin henüz tam olarak bilinmeyen başka bir nedenden kaynaklanıyor olabileceği rapor edildi. Bu konuda yapılan daha sonraki çalışma da ise Marsh et al. (2014) tarafından ikili gezegen modeli yeniden incelenerek Beuermann et al. (2013) tarafından elde edilen parametreleri ve iki gezegenin varlığını destekleyen sonuçlar rapor edildi. Daha sonra Parsons et al. (2014) tarafından 16 yeni ikincil tutulma zamanı ile yörünge dönem değişiminde sinüzoidal bir değişime neden olabilecek apsidal devinim araştırıldı. İkincil tutulma zamanları ile birincil tutulma zamanları benzer bir eğilim gösterdiği bildirildi ve değişimin apsidal hareketinden kaynaklanamayacağı rapor edildi. Ancak önceki araştırmacılar tarafından sistem etrafında dolandığı düşünülen iki gezegenin keşfi için daha somut kanıtlara ihtiyaç olduğu belirtildi. 2 yıl sonra, Hardy et al. (2016) tarafından NN Ser sistemi etrafında toz diskinin varlığı üzerine bir araştırma yapıldı ve toz diskinin olduğuna dair kanıtlar bulundu. Bu toz diskinin doğrudan gezegenlere ait kanıtlar sunamayacağını ancak gezegenlerin var olma ihtimalini güçlendireceği bildirildi. Kısa bir süre sonra, Bours et al. (2016) tarafından NN Ser'inde yer aldığı 67 kısa dönemli WD çift sisteminin uzun dönemli bir çalışması bildirildi. Bu araştırmacılar tarafından NN Ser sisteminin yörünge dönem değişimi incelendi ve iki gezegen hipotezinin uyduğu rapor edildi. Ancak O-C diyagramı modellenirken daha iyi bir sonuç alabilmek için kuadratik bir terime ihtiyaç olduğu

belirtili. Son olarak, Pulley et al. (2022) tarafından, literatürdeki beklentilerin aksine, özellikle 2017'den sonraki gözlemlerde O–C diyagramında bir sapma olduğu bildirildi.

Bu çalışmada, NN Ser'in yeni fotometrik gözlemleri, 25.02.2017 ile 18.02.2023 tarihleri arasında TUG T100 teleskobu kullanılarak gerçekleştirildi. Gözlemler sırasında CCD'nin binning 2x2 ile birlikte sub-array modu (300x300 piksel boyutu) kullanılarak okuma süresi 2-3 saniyeye kadar düşürüldü. Böylece, ışık eğrilerinin zaman çözünürlüğü artırıldı. Diğer taraftan sistemin parlaklığı örtülme sırasında yaklaşık 5.8 kadir kadar yükselerek teleskop limitini aştığı için ışık eğrisinin taban kısımları gözlemlenemedi. Bu nedenle ışık eğrilerinin taban parlaklığı, tutulmanın dışındaki parlaklığın medyan büyüklüklerinden 5.8 kadir daha düşük olarak sabitlendi. Taban parlaklıklarının hataları, örtülmenin dışındaki hataların medyan değerlerine 3 standart sapma eklenerek elde edilen değer kabul edildi. Işık eğrilerinden tutulma zamanlarını belirleyebilmek için, ışık eğrilerinin giriş ve çıkış kolları Boltzmann fonksiyonu ile fit edildi. Şekil 24'de gösterildiği gibi fit edilen giriş ve çıkış kolunun orta zaman değerlerinin ortası, ışık eğrisinin minimum zamanı olarak kabul edildi.



**Şekil 24.** TUG T100 teleskobundan 18 Şubat 2023'teki gözleminden elde edilen örnek NN Ser ışık eğrisi. Işık eğrisinin giriş ve çıkış kolu ayrı ayrı Boltzmann fonksiyonu ile fit edildi. Işık eğrisinin minimum zamanı ise “X” ile gösterildi (Ozdonmez et al. 2023, yayın aşamasında)

36 ışık eğrisinden 6'sı giriş veya çıkış kolu olmadan eksik bir şekilde gözlemlendi. Bu nedenle ışık eğrilerinin minimum zamanını hesaplayabilmek için öncelikle tam ışık eğrilerinin giriş ve çıkış kolundaki orta zamanları arasındaki ortalama boşluk süresi ( $4,42 \pm 0,035$  dk) hesaplandı. Daha sonra, eksik olan ışık eğrilerinin minimum zamanları, boşluk süresinin yarısının orta giriş süresine eklenmesi veya orta çıkış süresinden çıkarılmasıyla hesaplandı. Bu çalışma kapsamında elde edilen yeni minimum zamanlar ve literatürde toplanan zamanlar Tablo

1'de listelenmiştir. Eksik ışık eğrilerinden elde edilen tutulma orta zamanları “T100-h” olarak ifade edilmektedir.

**Tablo 4.** NN Ser’in Minimum Zamanları, Hataları ve Referansları

<b>Literatür</b>		
<b>BJD</b>	<b>Hata</b>	<b>Referans<sup>a</sup></b>
2447344.52466350	0.0003500000	Haefner (1989)
2447703.54574360	0.0000020000	Haefner et al. (2004)
2447703.67583260	0.0000060000	Haefner et al. (2004)
2447704.71645960	0.0000030000	Wood and Marsh (1991)
2447705.62702260	0.0000030000	Wood and Marsh (1991)
....	....	....
<b>Bu çalışma</b>		
2457809.60266607	0.0000175797	
2457838.48054469	0.0000175218	
2457838.61058472	0.0000173452	
2457874.38266016	0.0000208317	
2457940.33338586	0.0000191666	
...	...	

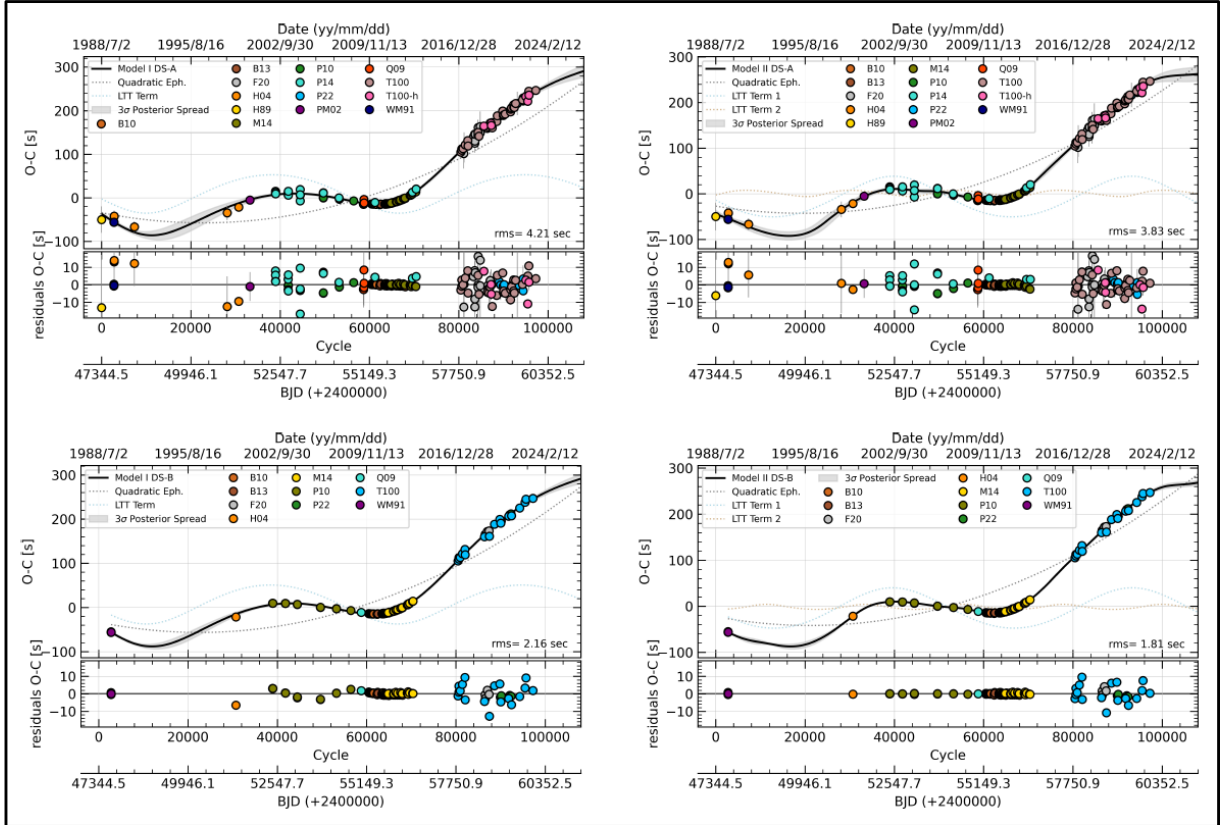
Tüm minimum zamanların listesi Ozdonmez et al. (2023; yayın aşamasındadır)<sup>a</sup>de paylaşılmıştır. <sup>a</sup> Haefner (1989), Haefner et al. (2004), Wood & Marsh (1991), Pigulski & Michalska (2002), Qian et al. (2009), Parsons et al. (2010b), Beuermann et al. (2010), Beuermann, Dreizler, & Hessman (2013), Parsons et al. (2014), Marsh et al. (2014), Faillance et al. (2020), Pulley et al. (2022)

Tablo 4’de 2017 ile 2023 yılları arasındaki bu çalışma kapsamında elde edilen 36 yeni minimum zamanı dahil olmak üzere 223 minimum zamanı sunulmaktadır. Literatürde, Beuermann et al. (2010) tarafından daha önceki ışık eğrilerinin bazıları, yeniden analiz edilerek birkaç minimum zaman düzeltildi. Bu nedenle 2010’dan önceki minimum zamanlar için Beuermann et al. (2010) tarafından paylaşılan zamanlar kullanıldı. Diğer taraftan Parsons et al. (2014) tarafından bildirilen minimum zamanlar, ikincil tutulmaya ait zamanlar olup bu zamanların apsidal devinimden çok fazla etkilenmediğinden O–C’nin genel eğiliminden önemli ölçüde farklılık göstermemektedir. Ancak Bours et al. (2016) tarafından bu zamanların O–C diyagramının modellenmesi sırasında kullanılmadığı görülmektedir. Ayrıca Bours et al. (2016) tarafından kullanılan minimum zamanlar yayınlanmadı. Son olarak, analiz sırasında literatürde hatası olmayan minimum zamanların hataları, zamanlar içerisindeki en büyük hata olan ~ 30 s olarak kabul edildi. Böylece yörünge dönem değişiminin araştırılması için Tablo 4’deki gibi bir veri seti hazırlandı. Ancak literatürde ve bu çalışmada toplanan zamanlama verileri tek tip olmadığı için O–C diyagramı modellemesinde iki veri seti ele alındı. Birinci olan veri seti A, literatürde bugüne kadar mevcut olan tüm zamanları kapsarken (223 minimum zamanı) ikinci olan veri seti B’de ise veri seti A’dan hataları 2 sn’den büyük olan zamanların ve ikinci tutulma

ortası zamanların çıkartılmış halinden oluşmaktadır (97 minimum zamanı). Veri seti A için doğrusal efemeris parametreleri;

$$T_{eph}(L) = T_0 + E \times P_{bin} = BJD\ 2447344.525240(44) + 0.1300801259(8) \quad 78$$

Veri seti B için elde edilen doğrusal efemeris parametreleri, Denklem 78'deki parametre değerlerine benzerdir. Veri seti A ve B'nin her ikisi de doğrusal efemeris kullanılarak oluşturulan Şekil 25'deki O-C diyagramlarında gösterilmektedir.



**Şekil 25.** Veri seti A ve B kullanılarak NN Ser'in O-C diyagramı ve Model I ve II için onları artıkları. Siyah düz çizgi, en iyi modeli gösterirken renkli kesikli çizgiler LTT terimlerini ve kuadratik efemerisi temsil eder. Gri gölgeli alan ise MCMC sonucunda rastgele seçilmiş 1000 parametre örneğinden  $\pm 3\sigma$  olasılık dağılımını göstermektedir (Ozdonmez et al. 2023; yayın aşamasında)

Yörünge dönem değişimdeki varsayımsal cisimlerin varlığını inceleyebilmek için Model I ve II olmak üzere iki model kullanıldı. Model I, tek bir gezegen sistemi için kuadratik terimle ve tek LTT terimden oluşan;

$$T_{eph}(L) = T_0 + L \times P_{bin} + \beta L^2 + \tau_1(L) \quad 79$$

ile tanımlanır. Model II ise Model I'e ek olarak ikinci bir LTT terimini daha içermektedir. (Örneğin; Model I +  $\tau_2$ ). Burada  $\tau_{1,2}$ , NY Vir'den farklı olarak Gozdziewski et al. (2012) tarafından geliştirilmiş LTT terimini ifade etmekte ve

$$\tau_i = K_i \left( \sin \omega_i (\cos E_i(t) - e_i) + \sqrt{1 - e_i^2} \cos \omega_i \sin E_i(t) \right) \quad 80$$

‘dir. Burada yer alan terimler, genetik algoritma ve MCMC ile ilgili detaylar ‘‘Yöntem’’ kısmında verilmiştir. Model I ve II için elde edilen en iyi fit parametreleri sırasıyla Tablo 5 ve 6’ta verilmiştir.

**Tablo 5.** Veri Seti A ve B Kullanılarak Model I İçin Elde Edilen Sistem Parametreleri

Parametreler	Birim	Veri seti A için Model I	Veri seti B için Model I
$T_0$	BJD	2447344.524845(31)	2447344.524856(19)
$P_0$	gün	0.1300801024(12)	0.1300801023(8)
$\beta$	$10^{-13}$ gün	$5.18 \pm 0.10$	$5.23 \pm 0.07$
$K_3$	sn	$44.09 \pm 0.33$	$44.14 \pm 0.23$
$P_3$	yıl	$20.18^{+0.25}_{-0.23}$	$20.06^{+0.15}_{-0.14}$
$t_{0,3}$	BJD	$2456020^{+108}_{-98}$	$2456152^{+106}_{-96}$
$a_3 \sin i_3$	au	$6.43 \pm 0.35$	$6.41 \pm 0.31$
$e_3$		$0.20 \pm 0.03$	$0.15 \pm 0.02$
$\omega_3$	derece	$-89.56 \pm 0.04$	$-84.09 \pm 0.52$
$M_3 \sin i_3$	$M_{\text{Jup}}$	$9.43 \pm 0.47$	$9.47 \pm 0.42$
$\sigma_f$	sn	$2.80^{+0.18}_{-0.16}$	$1.52^{+0.12}_{-0.11}$

\* Ozdonmez et al. (2023; yayın aşamasında)

**Tablo 6.** Veri Seti A ve B Kullanılarak Model II İçin Elde Edilen Sistem Parametreleri

Parametreler	Birim	Veri seti A için Model II	Veri seti B için Model II
$T_0$	BJD	2447344.524927 (35)	2447344.524984(18)
$P_0$	gün	0.1300801073(12)	0.1300801043(4)
$\beta$	$10^{-13}$ gün	$4.79 \pm 0.09$	$5.07 \pm 0.04$
$K_3$	sn	$44.52^{+0.61}_{-0.56}$	$43.83^{+0.27}_{-0.20}$
$P_3$	yıl	$19.02 \pm 0.19$	$19.13^{+0.06}_{-0.05}$
$t_{0,3}$	BJD	$2459591^{+238}_{-281}$	$2459297^{+157}_{-184}$
$a_3 \sin i_3$	au	$6.19 \pm 0.40$	$6.21 \pm 0.30$
$e_3$		$0.14 \pm 0.06$	$0.089 \pm 0.03$
$\omega_3$	derece	$-82.36 \pm 1.77$	$77.25 \pm 1.66$
$M_3 \sin i_3$	$M_{\text{Jup}}$	$9.91 \pm 0.59$	$9.71 \pm 0.41$
$K_4$	sn	$7.13^{+1.63}_{-1.41}$	$5.47 \pm 0.40$
$P_4$	yıl	$8.33 \pm 0.24$	$7.89 \pm 0.14$
$t_{0,4}$	BJD	$2453469^{+199}_{-226}$	$2454563 \pm 58$
$a_4 \sin i_4$	au	$3.57 \pm 3.56$	$3.45 \pm 0.81$
$e_4$		$0.30 \pm 0.13$	$0.24 \pm 0.03$
$\omega_4$	derece	$-24.01 \pm 46.37$	$86.68 \pm 0.60$
$M_4 \sin i_4$	$M_{\text{Jup}}$	$2.76 \pm 1.46$	$2.19 \pm 0.49$
$\sigma_f$	sn	$2.48^{+0.16}_{-0.15}$	$0.19^{+0.03}_{-0.03}$

\* Ozdonmez et al. (2023; yayın aşamasında)

Bu sonuçlar, modellerdeki cisimlerin kütlelerinden dolayı hepsinin Jovian tipi gezegenler olduğunu göstermektedir. Ayrıca 1D ve 2D olasılık dağılımları neredeyse tüm modeller için benzer bir dağılım gösterdiğinden yalnızca Model I için veri seti A ve Model II için veri seti B'nin 1D ve 2D grafikleri Ekler bölümdeki Şekil E3 ve E4'te verilmiştir.

Denklem 78'deki doğrusal efemeris formülü kullanılarak,  $T_0 = 2447344.525240$  ve  $P_{bin} = 0.1300801259$  olarak belirlendi. NN Ser'in başlangıç efemerisi, Beuermann et al. (2013) tarafından verilen eferimes ile aynı döngüyü vermektedir. Ayrıca, her iki veri seti içinde çift yıldız sisteminin yörünge periyotları arasında önemli bir fark yoktur. Ancak bu efemerise göre O-C diyagramının (Şekil 25) modellenmesinde ikinci dereceden bir terimin kullanılması gerekliliği vardır (Marsh et al. 2014; Bours et al. 2016; Pulley et al. 2022 tarafından bildirildiği gibi). Literatürde beklenenin aksine (Pulley et al. 2022), özellikle 2016'dan bu yana yapılan son gözlemler, O-C diyagramında gözlenen değişimleri açıklayan önceki tüm modellerle bir uyumsuzluk göstermektedir (Qian et al. 2009; Beuermann et al. 2010; Beuermann et al. 2013; Marsh et al. 2014; Bours et al. 2016). Böylece, çalışma kapsamında MCMC yöntemi kullanılarak, ikinci dereceden bir efemeris ve olası LTT sinyallerini dikkate alan model ile güncel O-C diyagramı modellendi. Sistemdeki 3. cismin LTT sinyalinin literatürden daha büyük kütleli bir gezegenden kaynaklandığını buldu. Bu nedenle, model parametrelerinin birçoğu beklenildiği gibi önceki çalışmalardan farklılık göstermektedir. Veri seti A ve B kullanılarak tek gezegenli sistemin (yani Model I) çözümünden elde edilen her iki sistem parametresi birbiriyle uyumludur. Veri setleri A-B için minimum zamanların ortalama hataları sırasıyla 2.58 ve 0.52 saniyedir. Model I için A veri seti yerine Veri seti B'nin kullanılması sistematik belirsizliği 2,80 saniyeden 1,52 saniyeye düşürür. Veri seti A'dan elde edilen model I için kök ortalama kare (RMS) değeri 4,21 saniye iken, veri seti B için kullanılan model I'nin RMS değeri 2,16 saniye olarak hesaplanmıştır. Veri seti B'den büyük hatalara sahip veriler çıkarıldığı için hem zamanlama verilerinin ortalama hatası hem de modelden saçılan verilerin sayısı azalır, bu da sistematik belirsizlik ve RMS değerinde bir miktar azalmaya neden olur (Tablo 2 ve 3). Bu nedenle varsayımsal tek gezegen sisteminin çözümü için kullanılan veri setinin, sonuçlar üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı sonucuna varılabilir. Ancak bu sonuç, iki gezegen sisteminin (yani Model II) parametre çözümü için aşağıdaki nedenlerden dolayı geçerli değildir.

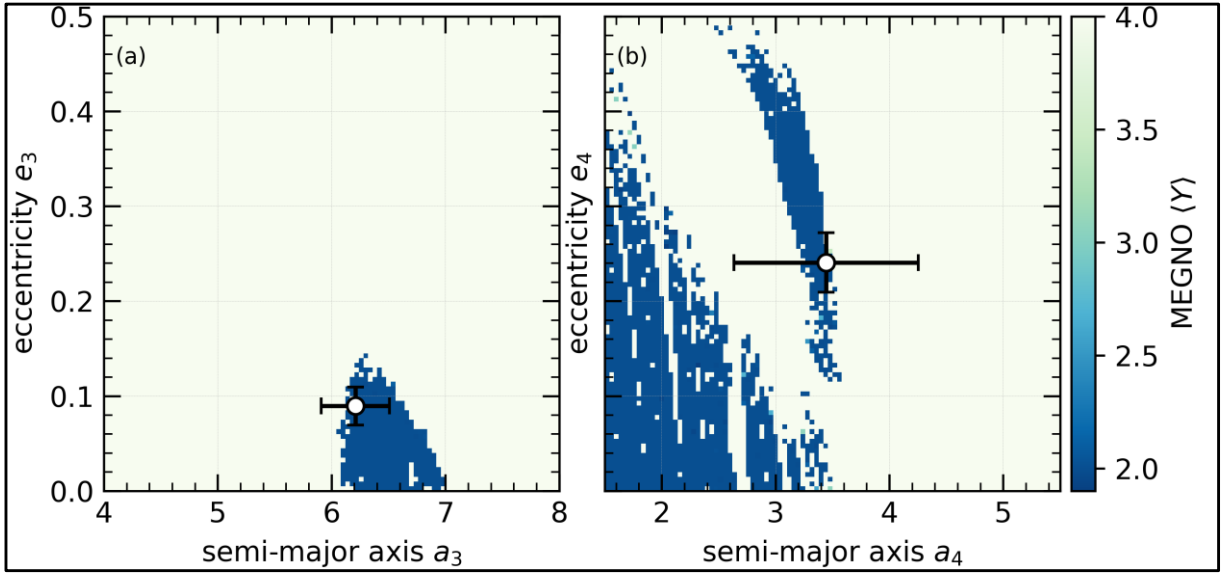
- a) A veri seti ile Model II için sistem parametreleri, değerlerine yakın büyük hatalara sahiptir.
- b) 4. gezegenin LTT teriminin yarı genliği, özellikle A veri seti kullanırken, O-C diyagramındaki artıklardan (yani zamanlama verilerinin yayılmasından) önemli ölçüde daha küçüktür ve zamanlama verilerinin ortalama hatalarına yakındır. O-C diyagramı Model I ve II

ile modellendikten sonra kalan artıkların dağılımları veri seti A için yaklaşık 20 s iken veri seti B için yaklaşık 10 sn'dir. Dolayısıyla *i.* gezegenin LTT teriminin yarı genliği, kullanılan veri setinin artıklarındaki bu yayılımından ne kadar küçük olursa, karşılık gelen LTT sinyali üzerinde daha büyük belirsizliğe neden olacaktır.

c) Hem RMS değeri hem de sistematik belirsizlik, özellikle A veri seti için 4. cisim temsil eden ek LTT terimi eklenmesiyle önemli ölçüde azalmaz. Bu problemler, iki gezegenli sistemin parametre çözümü için Veri Seti B kullanıldığında daha az belirgindir. Bu nedenle 4. cismin LTT sinyalinin varlığı sadece veri seti B ile aranmalıdır.

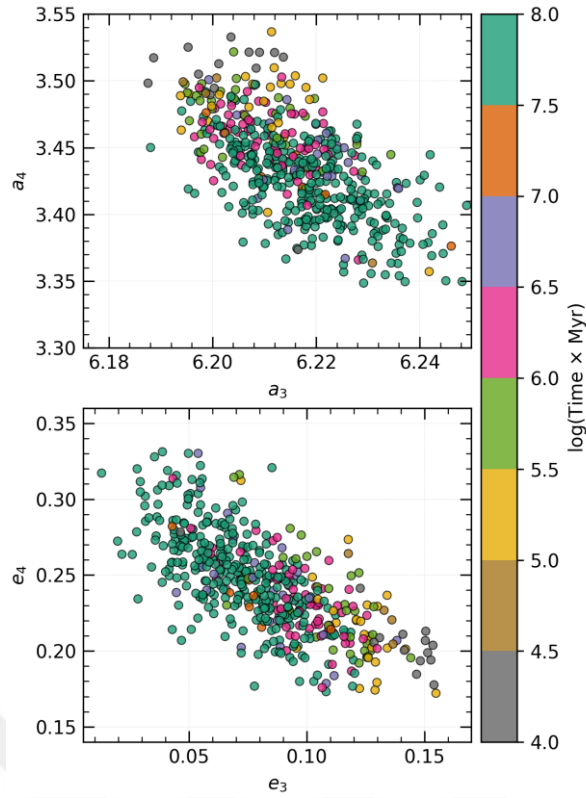
Veri seti B için Model II, NN Ser'in yörünge periyodu değişimini açıklayan en iyi istatistiksel sonuçları üretmektedir. Yalnızca istatistiksel sonuçlar ile bir sonuca varmak astrofiziksel bir hataya neden olabilir. Çünkü yörüngeler küçük zaman ölçeklerinde oldukça kararsız olabilir ve/veya diğer birkaç fiziksel mekanizma (apsidal devinim, manyetik frenleme, kütleçekimsel radyasyon) zamanlama değişimine katkıda bulunabilir.

İlk olarak, NN Ser yaklaşık 1 milyon yıl önce ortak zarf aşamasından, ön-kataklismik bir çift yıldız sistemine evrildiği düşünülmektedir (Wood & Marsh 1991). Sistemin evrimi boyunca 1-100 Myr'lik bir zaman dilimi içinde önemli yapısal değişikliklere uğrayacağı göz önüne alındığında, sistemin yörünge kararlılığının değişmesi de muhtemeldir. Bu nedenle 100 milyon yıl için kararlı yörüngeler oluşturmak bu sistem için fazlasıyla yeterlidir. Sistemin yörünge kararlılığı analizi ile tek gezegen sistemi tüm evrimsel zaman ölçeği (100 Myr) boyunca kararlıdır. Bununla birlikte sisteme ikinci bir gezegen dahil edildiğinde ise, bileşenler arasındaki etkileşimler daha kaotik hale gelir ve rezonans terimlerini güçlendirir. Analizlerde, iki gezegenli sistemin parametrelerinde yapılan küçük değişikliklerin bile yörünge kararlılığını bozabileceği belirlendi. Örneğin, A veri setinden Model II için elde edilen parametrelerde yörünge kararlılığın olmadığı ve iç gezegenin 2000 yıl içinde sistemden çıkmasıyla sonuçlandırıldığı tespit edildi. Öte yandan, B veri seti için model II'den elde edilen en uygun parametreler kullanılarak oluşturulan yörünge konfigürasyonunun 100 Milyon yıl için kararlı olduğu belirlendi (Şekil 26).



**Şekil 26.** MEGNO yüzey haritaları, bir dizi eksentrisiteyi ve yarı ana eksenini kapsayan veri kümesi B'den iki gezegenli (Model II) çözüm parametreleri kullanılarak 100 Milyon yıl süreyle üretildi. Spesifik olarak, analiz (a) 3. cisim, dış gezegen ve (b) 4. cisim, iç gezegen için elde edildi. Haritadaki beyaz noktalar, karşılık gelen hatalarıyla birlikte en uygun model parametrelerini temsil eder (Ozdönmez et al. 2023; yayın aşamasında)

Ayrıca, 500 örneklem parametre çözümü için dinamik simülasyonların sonuçları, 79 sistem konfigürasyonunda, en az bir bileşenin 1 milyon yıl içinde diğer bileşenler ile çarpıştığını veya sistemden kaçtığını göstermektedir. Benzer şekilde, örneklem parametreleri ile sistem konfigürasyonlarının 77, 15 ve 9'unda yörüngeler sırasıyla 1-5 Milyon yıl, 5-10 Milyon yıl ve 10-50 milyon yıl aralığında kararsız hale gelerek en az bir bileşenle çarpışır veya kaçır. Bununla birlikte, posterior parametre çözümlerinin 320'sinde yörüngeler, 50 milyon yıldan daha uzun bir zaman çizelgesi için sabit kalır. 500 parametre çözümü için sistem konfigürasyonundaki gezegenlerin hem yarı ana ekseninin hem de eksentrisite dağılımı, kararlılık zaman çizelgesi dikkate alınarak Şekil 27'te gösterilmektedir.



**Şekil 27.** 500 örneklem parametre çözümü için sistem konfigürasyonlarındaki gezegenlerin yarı ana eksen ve eksantrisitesi. Renk çubuğu, her eşleştirilmiş değerin kararlılık zaman ölçeğini gösterir (Ozdonmez et al. 2023; yayın aşamasında)

Rastgele seçilen 500 parametre çözümü arasındaki yörünge konfigürasyonlarının %16'sı daha kararsız yörüngeler sergiler. Bu kararsızlık, yüksek rezonans terimlerine atfedilir ve sonuçta en az bir gezegenin, özellikle iç gezegenin 1 Milyon yıllık bir aralık içinde sistemden çarpışmasına veya kaçmasına yol açar. Bu tür olaylar genellikle gezegenlerin birbirine yakın olduğu ve dış gezegenin daha büyük eksantrisiteye sahip olduğu yörünge konfigürasyonlarında meydana gelir. Ters senaryolarda ise, kararlılık zaman ölçeği artar ve yörünge konfigürasyonlarının %18'i için, yörünge kararlılığı yalnızca 1 ila 10 Milyon yıl arasında değişen bir süre boyunca korunur. Ek olarak, parametre çözümlerinin %66'sı kullanılarak oluşturulmuş iki gezegenli bir sistem, 10-100 Milyon yıl gibi önemli ölçüde daha uzun bir kullanım ömrü boyunca kararlı kalır. Bu sonuçlar, iki gezegenli bir sistem için elde edilen Şekil 26'daki MEGNO yüzey haritasıyla da tutarlıdır. 100 Milyon yıl için türetilen MEGNO haritasındaki parametrelerin ilgili hata aralıkları içinde değiştirilmesi, gezegen yörüngelerinin kararlıdan kararsıza geçmesine neden olabilir. O-C diyagramına yeni bir gözlem verisinin eklenmesi, küçük farklılıklar ile yeni bir parametre çözümünün elde edilmesine neden olabilir. Bu durum, çeşitli zaman ölçeklerinde kararlı yörüngelerin olasılığını önemli ölçüde değiştirir. Sonuç olarak kararlı yörüngelere sahip iki gezegenli bir sistem oluşturmak ve parametreleri daha geniş aralıklarda serbest bırakarak O-C diyagramını açıklamak için bir sorun haline gelmektedir.

O–C diyagramındaki periyodik değişimin zaman ölçeği, aslında hangi mekanizmanın var olabileceğine dair bir ipucu sağlamaktadır. Örneğin, manyetik frenleme ve kütleçekimsel radyasyon,  $10^8$ – $10^9$  yıl gibi uzun zaman ölçeklerinde meydana gelirken Applegate mekanizması veya LTT etkisi birkaç yıldan 10 yıllara kadar daha kısa zaman ölçeklerinde görülebilir (Bours et al. 2016). NN Ser'in O - C'deki periyodik değişimin zaman ölçeğinin yaklaşık 25 yıldan az olduğu göz önüne alındığında, mevcut gözlemler aracılığıyla O–C'den manyetik frenleme ve kütleçekimsel radyasyonunu tespit etmek pek olası değildir. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında, açısal momentum transferinin veya manyetik aktivitenin varsayımsal bir sinyal üretmek için aktif bir rolü olup olmadığını araştırmak için, Applegate mekanizması incelendi.  $\Delta E_{min}/E_{min}$ , veri seti A ve B için 3. cisme ait LTT sinyalinin parametreleri kullanılarak sırasıyla 3.80 ve 3.88 olarak hesaplandı. Diğer taraftan, 4. cismin  $\Delta E_{min}/E_{min}$  değerleri ise 1.41 ve 0.98 olarak belirlendi. Applegate mekanizmasını desteklemek için, enerji tutarsızlığı gerekli enerjiden daha az olmalıdır (yani,  $\Delta E_{min}/E_{sec} \ll 1$ ). Bu nedenle sonuçlar göz önüne alındığında Applegate mekanizmasını yalnızca 4. cisme atfedilebilir. Bu sonuçlar, ikinci bir gezegenin varlığı konusunda şüphe uyandırarak, LTT sinyalinden ziyade Applegate mekanizmasının var olabileceğini düşündürmektedir. Son olası etki olan apsidal hareket için, Parsons et al. (2014) tarafından NN Ser'nin ikincil tutulması ile elde edilen zamanlama verilerinin, birincil tutulma zamanları ile aynı eğilimi izlediğini bildirildi. Böylece, NN Ser'in yörünge dönem değişiminde görülen değişimin apsidal devinimden kaynaklanamayacağı sonucuna varıldı (Ozdonmez et al. 2023; yayın aşamasında)

### **WASP-10 ve WASP-11**

Geçiş gösteren sıcak Jüpiter WASP-10 b, ilk kez Christian et al. (2009) tarafından SUPERWASP (Pollacco et al. 2006) araştırma projesi ile keşfedildi ve kütle ve yarıçapı  $M_P = 2.96 M_{Jup}$  ve  $R_P = 1.28 R_{Jup}$  olarak bulundu. Ardından, Johnson et al. (2009) tarafından 2.2 m bir teleskop kullanılarak gezegene ait parametreler  $M_P = 3.15 M_{Jup}$  ve  $R_P = 1.080 R_{Jup}$  olarak güncellendi. WASP-10 sisteminin ışık eğrisinde yüzde 3'lük bir düşüş olduğu için fotometrik takibi nispeten kolay olup bu nedenle bu sistem birçok araştırmacı tarafından incelenmektedir (Christian et al. 2009; Johnson et al. 2009; Dittmann et al. 2010; Southworth 2010; Maciejewski et al. 2011a,b; Sada et al. 2012; Barros et al. 2013; Cruz et al. 2015; Kammer et al. 2015; Salz et al. 2016; Hagey, Edwards, & Boley 2022). WASP-10 b'nin geçiş zaman değişimi (TTV) ise ilk kez Maciejewski et al. (2011a) tarafından bir sinüs dalgası ve doğrusal efemeristen oluşan ilave bir cisim modeli ile incelendi sistem etrafında yörünge periyodu 5.23 gün ve kütlesi  $0.1 M_{Jup}$  olan ilave bir cismin varlığı bildirildi. Daha sonra Sada et al. (2012) tarafından elde edilen iki yeni geçiş ortası zamanı ile sistemin yörünge dönem değişimi

incelendi ve Maciejewski et al. (2011a) tarafından öne sürülen ilave bir cismin olabileceği iddiasını doğrulanacak kadar sisteme ait yeterli ve kaliteli verinin bulunmadığı belirtildi. Son olarak, Barros et al. (2013) tarafından sistemin yörünge dönem değişimi, sistemin etrafında dolanan ilave gezegenin varlığının tespiti için doğrusal bir efemeris ve bir sinüs dalgası içeren bir fonksiyonla modellendi. Uygulanan model ile Maciejewski et al. (2011a) tarafından bildirilen ilave cisme ait herhangi bir kanıtın bulunamadığı bildirildi.

Diğer bir geçiş gösteren sıcak Jüpiter WASP-11 b'nin keşfi ise WASP (West et al. 2009) ve HATNet (Bakos et al. 2009) araştırma projeleri tarafından neredeyse eş zamanlı olarak bildirildi. WASP-11 b'nin kütle ve yarıçapı Bakos et al. (2009) tarafından  $M_P = 0.487 M_{Jup}$  ve  $R_P = 1.0005 R_{Jup}$  olarak hesaplanırken West et al. (2009) tarafından  $M_P = 0.53 M_{Jup}$  ve  $R_P = 0.91 R_{Jup}$  olarak belirlendi. Ayrıca Sada et al. (2012) tarafından bu sistemin geçiş dönem değişimi incelendi ve yörünge periyodu  $P = 3.7224793$  gün olarak bulundu. Daha sonra Wang et al. (2014) tarafından yeni geçiş ortası zamanları elde edilerek geçiş zaman değişimi incelendi ve dikkate değer bir TTV sinyali tespit edilemedi. Son olarak, sistemin geçiş zaman değişimi Mancini et al. (2015) tarafından incelemiş olup sistemde geçiş zamanlarında gözlemlenen belirsizliklerin istatistiksel olarak ilave bir nesne veya yıldız aktivitesinden kaynaklanabileceği bildirildi.

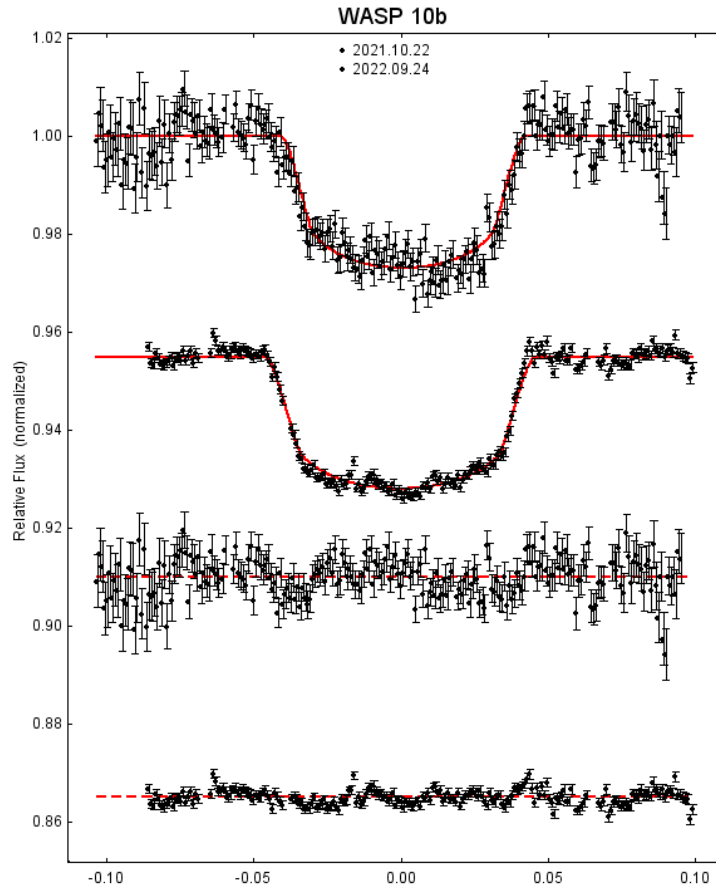
Bu çalışmada, 21CT100-1874 nolu gözlem projesi kapsamında TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'ndeki T100 teleskobu kullanılarak WASP-10 b ve WASP-11 b'nin toplamda dört geçiş gözlemi yapıldı (Er et al. 2023; yayın aşamasında). Gözlemler, homojen ışık eğrileri elde edebilmek için geçişin tüm aşamalarında 60 ve 120 s sabit poz süresi verilerek gerçekleştirildi. Ayrıca daha iyi fotometrik sonuçlar için yıldız-gezegen sistemlerinin gözlemlerinde yaygın olarak kullanılan odak bozma tekniği de uygulandı. Gözlemlere ait bilgiler Tablo 7'de sunulmaktadır.

**Tablo 7.** Gözlem Bilgisi

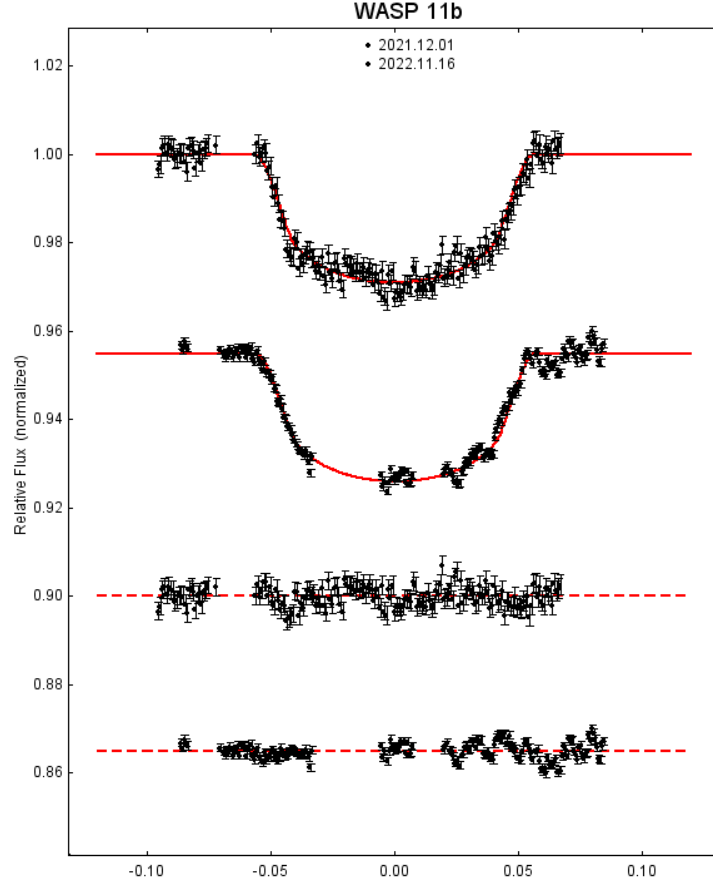
Tarih	Kaynak	Filtre	Poz Süresi (s)	$\chi^2/dof$
22.10.2021	WASP-10 b	R	60	1.98
24.09.2022	WASP-10 b	R	60	2.10
02.12.2021	WASP-11 b	R	120	1.54
16.11.2022	WASP-11 b	R	120	5.81

CCD veri indirgeme ve fark fotometrisi, geçiş gösteren sistemlerde yaygın olarak kullanılan AstroImageJ (Collins et al. 2017a) yazılımı ile gerçekleştirildi. Fark fotometrisi sırasında karşılaştırma yıldızı, kaynaklara benzer parlaklığa sahip yıldızlardan seçildi. Geçiş

modellemesinin artıklarını azaltmak için optimum açıklık yarıçapı  $1.2 \times \text{FWHM}$  olarak kabul edildi. WASP-10 b için en uygun ışık eğrilerini elde edebilmek için, AIJ'nin Fitting modülünden beş detrend parametresi (airmass, time, total comparison star counts, x-centroid ve y-centroid) kullanıldı. Ancak WASP-11'in fit işlemi sırasında yalnızca airmass detrend parametresinin kullanılması daha iyi istatistiksel sonuçlar vermiştir. JD'den BJD'ye dönüşüm, AIJ'deki zaman dönüştürücü modülüyle yapıldı. WASP-10 ve WASP-11'nin geçiş ışık eğrileri Şekil 28 ve 29'da gösterilmiştir. Dört geçiş ışık eğrisi için de indirgenmiş  $X^2$  değerleri hesaplanmıştır. İndirgenmiş minimum  $X^2$  değeri 1.54 iken maksimum değeri 5.81'dir. Gözlemler sırasındaki olumsuz hava koşullarının geçiş ışık eğrilerini önemli ölçüde etkilediği ve elde edilen verilerde büyük miktarlarda saçılmalara neden olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle, 16 Kasım 2022'de WASP-11 b'nin geçiş ışık eğrisi, olumsuz hava koşulları nedeniyle büyük bir indirgenmiş  $X^2$  değerine sahiptir (bkz. Şekil 29).



**Şekil 28.** TUG-T100 gözlemlerinden elde edilen WASP-10 b'nin yeni geçiş ışık eğrileri. Üst panel geçiş ışık eğrisi gösterirken alt panel modelin artıklarını göstermektedir (Er et al. 2023; yayın aşamasında)



**Şekil 29.** TUG-T100 gözlemlerinden elde edilen WASP-11 b'nin yeni geçiş ışık eğrileri. Tanımlamalar, Şekil 28 ile aynıdır (Er et al. 2023; yayın aşamasında)

Elde edilen geçiş ışık eğrilerinden WASP-10 b ve WASP-11 b'nin fiziksel parametrelerini ve onların belirsizliklerini belirlemek için Markov Chain Monte Carlo (MCMC) yöntemini kullanan EXOFAST programı (Eastman, Gaudi and Agol 2013) kullanıldı. Geçiş ışık eğrilerinin modellenme sürecinde, EXOFAST programı sistemlerin radyal hız verilerine ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle WASP-10 ve WASP-11 sistemlerinin radyal hız verileri, sırasıyla Christian et al. (2009) ve West et al. (2009)'dan temin edildi. Ayrıca EXOFAST için gerekli olan başlangıç parametreleri için, Christian et al. (2009) ve West et al. (2009) tarafından belirlenen değerler alındı. Wasp-11b'nin eksentiritesi, diğer parametrelerde olduğu gibi serbest bir parametre olarak ele alındığında, parametreler için tutarlı bir çözüm üretememiştir. Modelleme sırasında güvenilir bir sonsal dağılım elde etmek için eksentirikliği ( $e$ ) sıfıra eşit kabul edildi. WASP-10 b ve WASP-11 b'nin sistem parametrelerinin medyan değerleri ve  $1\sigma$ 'deki belirsizlikleri Tablo 8 ve 9'da sunulmaktadır.

**Tablo 8.** WASP-10 b'nin Sistem Parametreleri

Parametreler (Birim)	Bu çalışma	Christian et al. (2009)	Johnson et al. (2009)	Maciejewski et al. (2011)	Barros et al. (2013)
<b>Geçiş Parametreleri</b>					
$P$ (gün)	3.0927170 $\pm 0.0000060$	3.0927636 $^{+0.0000094}_{-0.0000210}$	3.0927616 $\pm 0.0000112$	...	...
$i$ (°)	89.44 $^{+0.39}_{-0.58}$	86.90 $^{+0.60}_{-0.50}$	88.49 $^{+0.22}_{-0.17}$	89.50 $^{+0.40}_{-0.90}$	88.66 $^{+0.12}_{-0.12}$
$b$	0.079 $^{+0.080}_{-0.054}$	0.568 $^{+0.054}_{-0.084}$	0.299 $^{+0.029}_{-0.043}$	0.100 $^{+0.080}_{-0.180}$	0.277 $^{+0.021}_{-0.025}$
<b>Yıldız Parametreleri</b>					
$M_*$ ( $M_{güneş}$ )	0.734 $^{+0.054}_{-0.051}$	0.703 $^{+0.068}_{-0.080}$	0.750 $^{+0.040}_{-0.028}$	...	0.730 $\pm$ 0.1
$R_*$ ( $R_{güneş}$ )	0.786 $^{+0.039}_{-0.040}$	0.775 $^{+0.043}_{-0.040}$	0.698 $\pm$ 0.012	0.670 $^{+0.030}_{-0.020}$	0.678 $^{+0.028}_{-0.032}$
$\rho_*$ ( $\rho_{güneş}$ )	2.131 $^{+0.300}_{-0.241}$	1.510 $^{+0.250}_{-0.200}$	3.099 $\pm$ 0.088	82.480 $^{+0.260}_{-0.170}$	2.359 $^{+0.053}_{-0.047}$
$\log(g_*)$ (cgs)	4.513 $^{+0.039}_{-0.036}$	4.510 $^{+0.060}_{-0.050}$	4.627 $^{+0.0101}_{-0.0093}$	4.660 $^{+0.060}_{-0.040}$	...
$T_{eff}$ (K)	4723 $^{+99}_{-98}$	...	4675 $\pm$ 100	...	...
<b>Gezegen Parametreleri</b>					
$M_p$ ( $M_{Jup}$ )	2.683 $^{+0.129}_{-0.135}$	2.960 $^{+0.220}_{-0.170}$	3.150 $^{+0.130}_{-0.110}$	...	3.14 $\pm$ 0.27
$R_p$ ( $R_{Jup}$ )	1.140 $^{+0.060}_{-0.059}$	1.280 $^{+0.077}_{-0.091}$	1.080 $\pm$ 0.020	1.030 $^{+0.070}_{-0.030}$	1.039 $^{+0.043}_{-0.049}$
$\rho_p$ ( $\rho_{Jup}$ )	2.243 $^{+0.345}_{-0.273}$	1.430 $^{+0.310}_{-0.290}$	3.110 $\pm$ 0.200	2.940 $^{+0.460}_{-0.250}$	2.810 $^{+0.440}_{-0.330}$
$\log(g_p)$ (cgs)	3.708 $^{+0.041}_{-0.036}$	3.620 $\pm$ 0.060	3.828 $\pm$ 0.012	3.880 $^{+0.040}_{-0.010}$	...
$T_{eq}$ (K)	1042 $^{+30}_{-31}$	1119 $^{+26}_{-28}$	1370 $\pm$ 50	950 $^{+0.30}_{-0.26}$	...
<b>Diğer Yörünge Parametreleri</b>					
$e$	0.282 $^{+0.030}_{-0.028}$	0.059 $^{+0.014}_{-0.004}$	0.051	$\equiv 0$	$\equiv 0$
$a$ (au)	0.0375 $^{+0.0009}_{-0.0009}$	0.0369 $^{+0.0012}_{-0.0014}$	0.0378 $^{+0.0007}_{-0.0005}$	...	0.0375 $\pm 0.0017$
$\omega_*$ (°)	139.693 $^{+16.563}_{-17.297}$	167.132 $^{+12.720}_{-14.037}$	153	...	...

\* (Er et al. 2023; yayın aşamasında)

**Tablo 9.** WASP-11 b'nin Sistem Parametreleri

Parametreler (Birim)	Bu çalışma	West et al. (2009)	Bakos et al. (2009)	Wang et al. (2014)	Mancini et al. (2015)
<b>Geçiş Parametreleri</b>					
$P$ (gün)	3.722464 $\pm 0.000006$	3.722465 $^{+0.000006}_{-0.000008}$	3.7224747 $\pm 0.0000065$	3.72247669 $\pm 0.00000181$	3.72247967 $\pm 0.00000045$
$i$ (°)	89.62 $^{+0.26}_{-0.36}$	89.80 $^{+0.20}_{-0.80}$	88.60 $^{+0.50}_{-0.40}$	89.14 $^{+0.50}_{-0.47}$	89.03 $\pm$ 0.34
$b$	0.081 $^{+0.075}_{-0.055}$	0.054 $^{+0.168}_{-0.050}$	0.282 $^{+0.067}_{-0.095}$	0.185 $^{+0.094}_{-0.107}$	...
<b>Yıldız Parametreleri</b>					
$M_*$ ( $M_{güneş}$ )	0.757 $^{+0.054}_{-0.052}$	0.770 $^{+0.100}_{-0.080}$	0.830 $\pm 0.030$	0.862 $\pm$ 0.014	...
$R_*$ ( $R_{güneş}$ )	0.761 $^{+0.023}_{-0.022}$	0.740 $^{+0.040}_{-0.030}$	0.790 $\pm 0.020$	0.784 $^{+0.018}_{-0.011}$	0.806 $^{+0.038}_{-0.013}$
$\rho_*$ ( $\rho_{güneş}$ )	2.429 $^{+0.120}_{-0.121}$	...	...	1.789 $^{+0.072}_{-0.116}$	1.748 $\pm$ 0.074
$\log(g_*)$ (cgs)	4.555 $^{+0.018}_{-0.017}$	4.450 $\pm$ 0.200	4.560 $\pm 0.020$	...	4.569 $^{+0.018}_{-0.002}$
$T_{eff}$ (K)	4792 $^{+99}_{-100}$	4800 $\pm$ 100	4980 $\pm$ 60	...	4900 $\pm$ 65

**Tablo 9.** (Devamı)

<b>Gezegen Parametreleri</b>					
$M_P(M_{Jup})$	$0.523^{+0.042}_{-0.039}$	$0.530 \pm 0.070$	$0.487 \pm 0.018$	$0.526 \pm 0.019$	$0.492^{+0.023}_{-0.005}$
$R_P(R_{Jup})$	$1.115^{+0.035}_{-0.034}$	$0.910^{+0.060}_{-0.030}$	$1.005^{+0.032}_{-0.027}$	$0.999^{+0.029}_{-0.018}$	$0.990^{+0.022}_{-0.005}$
$\rho_P(\rho_{Jup})$	$0.468^{+0.044}_{-0.041}$	$0.690^{+0.070}_{-0.110}$	$0.594 \pm 0.052$	$0.526^{+0.035}_{-0.046}$	$0.475^{+0.026}_{-0.002}$
$\log(g_p)$ (cgs)	$3.02^{+0.03}_{-0.03}$	$3.16^{+0.04}_{-0.05}$	$3.08 \pm 0.03$	...	...
$T_{eq}(K)$	$973^{+21}_{-20}$	$960 \pm 70$	$1020 \pm 17$	$1006.5^{+16.4}_{-14.6}$	$992 \pm 14$
<b>Diğer Yörünge Parametreleri</b>					
$e$	$\equiv 0$	$\equiv 0$	$\equiv 0$	$\equiv 0$	$\equiv 0$
$a$ (au)	$0.0428^{+0.0009}_{-0.0010}$	$0.0430 \pm 0.0020$	$0.0435 \pm 0.0006$	$0.0447 \pm 0.0002$	...

\* (Er et al. 2023; yayın aşamasında)

Diğer taraftan çalışma kapsamında sistemlerin geçiş zaman değişimleri (TTV) incelendi. TTV etkisinin varlığı, geçiş ortası zamanlardan elde edilen O–C diyagramında periyodik sinüzoidal bir sinyal olarak kendini göstermektedir. Geçiş zaman değişimlerine, TTV etkisi dışında manyetik aktivite (Mancini et al. 2015, Tregloan-Reed & Unda-Sanzana 2021) ve gelgit (Yee et al. 2020, Maciejewski et al. 2021) gibi mekanizmalarda neden olabilir. Bu etkiler birkaç yıllık kısa zaman ölçeklerinde tespit edilebilir. Söz konusu sistemlerin O–C diyagramının zaman ölçekleri 10 yılın üzerinde olduğu için bu tür etkilerin varlığının tespiti mümkündür. Jüpiter benzeri bir gezegenin neden olduğu yörünge periyodu değişimi nispeten küçük ve etkisi birkaç on saniye ölçeğindedir. Bu etkenlerin varlığının araştırılması için literatürde ve ETD'deki (Exoplanet Transit Database, Poddany, Brat & Pejcha 2010) yayınlanmış geçiş ortası zamanlar ile bu çalışma kapsamında elde edilen zamanlar toplandı. ETD'deki gözlemsel veriler, 1 ile 5 arasında değişen bir kalite indeksine sahiptir. Bu çalışmada sadece 1-3 kalite indeksine sahip veriler kullanıldı. 1-3 kalite indeksi aralığında olmasına rağmen hataları verilmeyen ETD verileri ve O–C diyagramının genel eğiliminden önemli ölçüde sapma gösteren literatürdeki veriler bu çalışmaya dahil edilmedi. WASP-10 b ve WASP-11 b'nin tüm geçiş ortası zamanları Tablo 10 ve 11'de verilmiştir.

**Tablo 10.** WASP-10'nun Geçiş Ortası Zamanları

<b>Literatür</b>		
<b>BJD</b>	<b>Hata</b>	<b>Referans</b>
2454345.486300	0.00061	Christian et al. (2009)
2454357.858790	0.00042	ETD
2454388.786020	0.00042	Christian et al. (2009)
...	...	...

**Tablo 10.** (Devamı)

<b>TUG-T100</b>		
<b>BJD</b>	<b>Hata</b>	<b>Referans</b>
2459510.344320	0.00045	Bu çalışma
2459847.449144	0.00020	Bu çalışma

\*Tablonun tamamı (Er et al. 2023; yayın aşamasında) verilmiştir.

\*\* Christian et al. (2009), Johnson et al. (2009), Dittmann et al. (2010), Krejčová, Budaj, & Krushevska (2010), Maciejewski et al. (2011a), Maciejewski et al. (2011b), Sada et al. (2012), Barros et al. (2013), Sada & Ramón-Fox (2016), ETD: Poddaný, Brát, & Pejcha (2010).

**Tablo 11.** WASP-11'nun Geçiş Ortası Zamanları

<b>Literatür</b>		
<b>BJD</b>	<b>Hata</b>	<b>Referans</b>
2454729.906540	0.00029	Bakos et al. (2009)
2454729.907080	0.00030	ETD
2454748.520370	0.00310	ETD
...	...	...
<b>TUG-T100</b>		
<b>BJD</b>	<b>Hata</b>	<b>Referans</b>
2459550.518515	0.00045	Bu çalışma
2459900.428327	0.00031	Bu çalışma

\* Tablonun tamamı (Er et al. 2023; yayın aşamasında) verilmiştir.

\*\* Bakos et al. (2009), Sada et al. (2012), Wang et al. (2014), Mancini et al. (2015), (ETD; Poddaný, Brát, & Pejcha 2010)

WASP-10 b için geçiş ortası zamanların ortalama hatası 60 s iken WASP-11 b'nin 46 s'dir. Tablo 10 ve 11'deki geçiş ortası zamanlar kullanılarak Denklem 45'deki doğrusal efemeris formülü ile her bir sistem için doğrusal efemeris parametreleri belirlendi ve bu parametrelerden her bir sistemin O–C diyagramları oluşturuldu. O–C zamanlarında herhangi bir periyodik değişiminin olup olmadığı araştırılması için Lomb-Scargle periodogram (Lomb 1976) analizi yapıldı. Periyot analizinde, ortalama Nyquist frekansı (Veras & Fuller 2019), maksimum frekans ile ilişkilidir. Bu nedenle, periyot analizi sırasında frekansı sınırlamak için ortalama Nyquist frekansı belirlendi.

#### *i) WASP-10 b'nin sistem parametreleri*

EXOFAST ile elde edilip Tablo 8'de sunulan yeni sistem parametreleri, etki faktörünün ( $b$ ) ve eksantrisite ( $e$ )'nin dışında hata sınırları içerisinde literatür ile uyumludur. Güncellenmiş sistem parametrelerinden yıldızın kütle ve yarıçapı,  $M_* = 0.73 M_{Güneş}$  ve  $R_* = 0.79 R_{Güneş}$  olarak bulundu. Belirlenen yıldızın kütle ve yarıçapı, Christian et al. (2009) ve Johnson et al. (2009) tarafından hesaplanan değerlere çok yakındır. Kütle ve yarıçapın literatürle olan uyumu, geçiş ışık eğrilerinin modellenmesinde kullanılan yöntemlerin güvenilir olduğunu göstermektedir. Güncellenmiş gezegenin yarıçap değeri ( $R_p = 1.14 R_{Jup}$ ), Maciejewski et al.

(2011b) ve Barros et al. (2013)'deki gibi Christian et al. (2009)'dan ziyade Johnson et al. (2009)'un bulduğu değere daha yakın bulundu. Önceki araştırmacılar tarafından WASP-10 b için yıldız lekelerine bağlı gezegen yarıçapında farklılıklar bildirildi. Yıldız lekelerinin varlığı, etkin yıldız disk alanının azalması neden olmakta ve gezegen yarıçapının farklı hesaplanmasına yol açabilir (Czesla et al. 2009; Maciejewski et al. 2011b; Barros et al. 2013). Bu kapsamda WASP-10'nin yüzeyinde yıldız lekelerinin varlığı dair kanıtlar bildirilmesine ((Maciejewski et al. 2011b; Barros et al. 2013; Sada & Ramón-Fox 2016) rağmen bu çalışma kapsamında elde edilen geçiş ışık eğrilerinde yüksek saçılmalardan dolayı açık bir yıldız lekesi belirlenemedi. Bu durumun yıldız lekesi etkisini maskeleyen ışık eğrilerindeki yüksek saçılma veya bazı dönemlerde önemli bir etkiye sahipken bazılarında ise daha düşük etkiye sahip olan yıldız aktivitesi gibi birkaç nedeni olabilir (Bai 2003; Tregloan- Reed, Southworth,&Tappert 2013; Tregloan-Reed&Unda-Sanzana 2021). Şekil 28'de görüldüğü gibi, olumsuz hava koşullarından dolayı bazı geçiş ışık eğrilerinde yüksek saçılmalar olduğu için ilk neden daha olasıdır. Elde edilen etki faktörü ( $b$ )'nin Christian et al. (2009) ve Johnson et al. (2009)'dan daha küçük olduğu, Maciejewski et al. (2011b) ise benzer olduğu görüldü. Etki faktörü üç sistem parametresine ( $a$ ,  $R_*$  ve  $i$ ) bağlı olduğundan, bu parametrelerdeki küçük değişikliklerin etki faktörünün değeri üzerinde önemli bir etkisi olmaktadır. Yıldız lekelerinden veya hava koşullarından kaynaklanan ışık eğrilerindeki saçılmalar nedeniyle geçiş derinliği yanlış belirlenebilir ve bunun sonucunda bazı parametreler farklı hesaplanabilir. Son olarak bazı araştırmacılar tarafından WASP-10 b sistemin yörüngesinin dairesel ( $e = 0$ ) varsayımı altında sistem parametreleri belirlendi. Ancak, bu çalışma kapsamında eksentrisite dahil tüm parametreler serbest bırakılarak sistem parametreleri belirlenmiştir. Bu nedenle bazı parametrelerin literatürden bir miktar farklı olması beklenen bir durumdur (Er et al. 2023; yayın aşamasında).

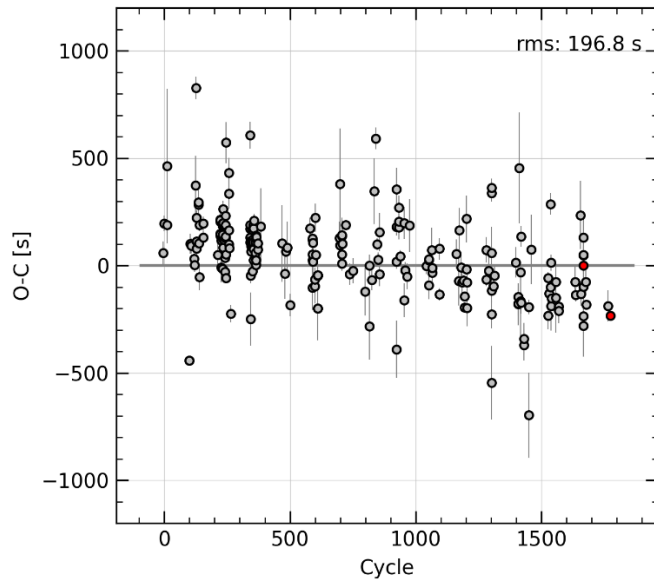
## ***ii) WASP-11 b'nin sistem parametreleri***

Bir önceki bölümde anlatıldığı gibi yeni geçiş ışık eğrilerinden WASP-11 b'nin sistem parametreleri güncellendi. Yıldızın güncel kütle ve yarıçapı,  $M_* = 0.76 M_{Güneş}$  ve  $R_* = 0.76 R_{Güneş}$  olarak belirlendi. Bu değerler, West et al. (2009) ve Bakos et al. (2009)'un bulduğu değerler ile uyumludur. Gezegenin yeni kütle, yarıçap ve etkin sıcaklığı, sırasıyla  $M_p = 0.52 M_{Jup}$ ,  $R_p = 1.11 R_{Jup}$  ve  $T_{eq} = 974 (K)$  olarak bulundu. Gezegenin yeni bulunan kütlesi West et al. (2009) tarafından bulunan değer ile benzerken yarıçap Bakos et al. (2009) ile uyumludur. Etkin sıcaklık ise onların değerlerinin arasındadır.  $R_*$ ,  $a$  ve  $i$  ile ilişkili olan etki faktörü ( $b$ ) ise West et al. (2009)'un değerine yakındır. Diğer bir yörünge parametresi olan eksentrisite ( $e$ ), literatürde sistem parametreleri hesaplanırken "0" olarak kabul edilmiştir. Bu

nedenle çalışma kapsamında da geçiş ışık eğrilerinin modellenmesi sırasında “0” olarak kabul edildi. Ayrıca Southworth (2010), iki keşif çalışmasının bulgularını incelemiş ve sistematik hataların varlığını keşfetmeye yönelik en etkili yaklaşımlardan birinin, aynı kaynaktan gelen birden fazla bağımsız çalışmayı karşılaştırmak olduğu sonucuna varmıştır. İki keşif çalışması ele alındığında genel olarak sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Ancak gezegenin yarıçap oranı ve yıldızın sıcaklığında bir farklılık bulunmaktadır. Yıldızın yeni sıcaklığı ( $T_{eff}$ ) ve bileşenlerin yarıçap oranı ( $R_p/R_*$ ), 973 K ve 0.15067 olarak bulundu. Yeni  $T_{eff}$ , West et al. (2009) ile uyumlu iken bileşenlerin yeni yarıçap oranı, Bakos et al. (2009)’unkine çok yakındır. Bir önceki bölümde açıklandığı gibi yıldızın ve gezegenin yarıçap değerleri geçiş ışık eğrisinin derinliğine bağlı olup yıldız lekeleri gibi etkenlerden etkilenebilir. Bu nedenle yarıçap oranının sistematik bir hata ile hesaplanması  $R_p$ ,  $\log(g_p)$  ve  $\rho_p$  gibi bazı parametrelerin küçük değişimler ile belirlenmesi neden olabilir. Yıldız lekelerinden kaynaklı olabileceği düşünülen bu sistematik hataları düzeltmek için yıldız lekelerinin varlığı araştırıldı ancak olumsuz hava koşullarından dolayı ışık eğrilerinde meydana gelen yüksek saçılmalar nedeniyle yıldız lekeleri net bir şekilde tanımlanamadı. Son olarak çalışma kapsamında güncellenen birçok parametrenin literatürde elde edilen değerler ile uyumlu olduğu görülmektedir (Er et al. 2023; yayın aşamasında).

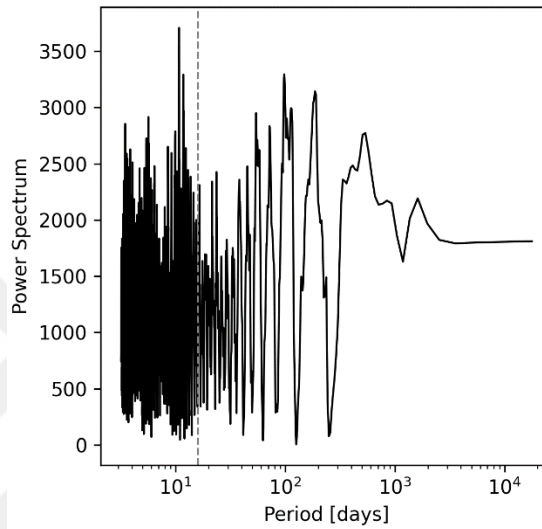
### iii) WASP-10 b’nin geçiş zaman değişimi (TTV)

Tablo 10’deki geçiş zaman değişimleri kullanılarak WASP-10 b’nin doğrusal efemeris parametreleri hesaplandı. Geçiş ortası zamanların doğrusal efemerisin RMS (root mean square) değeri 197 s olarak belirlendi. WASP-10 b’nin güncel O–C diyagramı Şekil 30’da gösterilmiştir.



**Şekil 30.** WASP-10 b’nin O–C diyagramı. Gri daireler, literatürdeki geçiş ortası zamanları temsil etmektedir. Kırmızı daireler ise çalışma kapsamında elde edilen zamanları göstermektedir (Er et al. 2023; yayın aşamasında).

WASP-10 b'nin geçiş zaman değişimi, sistem etrafında bir gezegenin var olabileceğini bildiren Maciejewski et al (2011a) tarafından incelendi. Bu nedenle, geçiş ortası zamanlar hem doğrusal hem de kuadratik efemeris ile fit edildi. Ancak, Şekil 30'de grldği gibi O–C diyagramında dikkate değer bir parabolik veya sinüzoidal bir değişim görülmedi. Ayrıca, WASP-10 b'nin geçiş zaman değişimini irdelemek için O–C zamanları zerine Lomb-Scargle periyot analizi yapıldı. Ortalama Nyquist frekansı altındaki sinyaller ile tespit edilen sinyaller benzer gte bulundu. Bu nedenle, Şekil 31'de grldği gibi, periyot analizi ile ilave cismi destekleyen güçlü bir sinyal tespit edilemedi.



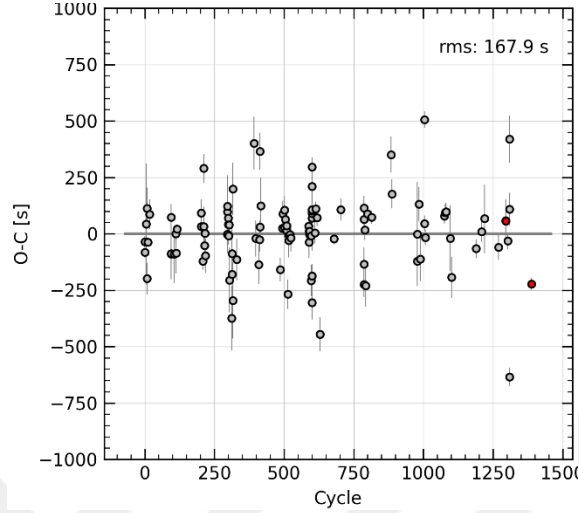
**Şekil 31.** WASP-10 b'nin O–C zamanları için Lomb-Scargle periyot analizi. Kesikli gri çizgi, ortalama Nyquist frekansını temsil eder (Er et al. 2023; yayın aşamasında).

Bu durum, Barros et al. (2013) ve Sada & Ramon-Fox (2016) tarafından bildirilen bulguları desteklemektedir. WASP-10'da yıldız lekelerinin varlığı önceki çalışmalardan bilinmektedir (Maciejewski et al. 2011a,b; Barros et al. 2013; Sada & Ramn-Fox 2016). Yıldız lekeleri, geçiş ışık eğrisinin giriş ve çıkış kollarının doğal yapısını bozarak geçiş ortası zamanının farklı hesaplanmasına yol açabilir (Cruz et al. 2015). Maciejewski et al. (2011a) tarafından önerilen geçiş zaman değişime, ilave bir gezegenden ziyade yıldız lekeleri etkisi neden olabilir. Bu nedenle, WASP-10 b'nin uzun dönemli gözlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Er et al. 2023; yayın aşamasında).

#### *iv) WASP-11 b'nin geçiş zaman değişimi (TTV)*

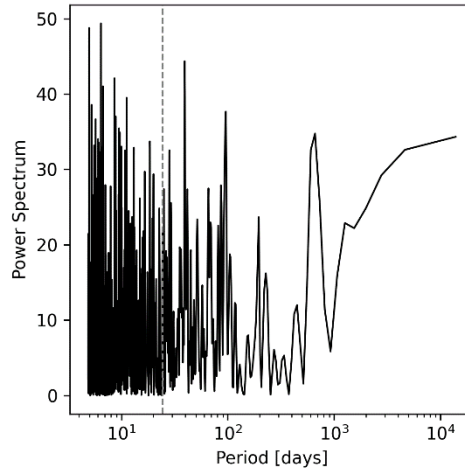
Doğrusal efemeris formülü ile geçiş ortası zamanları fit ederek güncellenmiş başlangıç efemerisi ve yörünge periyodu,  $T_0 = 2454729.90748467(39)$  ve  $P_{bin} = 3.72247906(36)$  olarak hesaplandı. RMS değeri ise 168 s olarak bulundu. WASP-11 b'nin güncel O–C diyagramı Şekil 32'de gösterilmiştir. Daha nceki çalışmalarda, WASP-11'nin etrafında istatistiksel olarak var olabileceği dşnlen ilave gezegene ait bir bulguya bu çalışma

kapsamında rastlanılmamıştır (Wang et al. 2014; Mancini et al. 2015). RMS değeri veya sistematik belirsizlikler gibi istatistiksel sonuçlar, sistemin doğrudan yörüngesinde dönen bir gezegenin varlığını açıklamak için yeterli değildir.



**Şekil 32.** WASP-11 b'nin O-C diyagramı. Renklendirme, Şekil 30 ile aynıdır (Er et al. 2023; yayın aşamasında).

Sistemin geçiş zamanında bir değişimin olup olmadığını test etmek için Lomb-Scargle periyot analizi gerçekleştirildi. Şekil 33'de görüldüğü gibi periyot analizinde ilave bir gezegeni destekleyen güçlü bir sinyal belirlenemedi.



**Şekil 33.** WASP-11 b'nin O-C zamanları için Lomb-Scargle periyot analizi. Kesikli gri çizgi, ortalama Nyquist frekansını temsil eder (Er et al. 2023; yayın aşamasında).

## SONUÇ

Çalışma kapsamında incelenen örten çift yıldız sistemleri (NY Vir ve NN Ser) ve yıldız-gezegen sistemlerinin (WASP-10 b ve WASP-11 b) ışık eğrileri elde edilerek literatüre tutulma ortası zamanları kazandırılmış ve sistemlerin literatürdeki O–C diyagramlarının kapsadığı zaman aralığı genişletilmiştir. Oluşturulan O–C diyagramlarından sistemlerin yörünge dönemlerinde bir değişim olup olmadığı incelenmiştir. Yörünge dönemlerinde değişime rastlanan sistemlerde ise değişime neden olan mekanizmalar araştırılmıştır.

NY Vir sisteminin yörünge dönem değişimi birçok araştırmacı tarafından incelenerek farklı modeller ile açıklanmaya çalışılmıştır. Çalışma kapsamında, 2015 ile 2021 yılları arasında elde edilen 51 yeni tutulma zamanı ile O–C diyagramının zaman aralığı yaklaşık 3 yıl uzatılarak sistemin yörünge dönem değişimi yeniden incelendi. O–C diyagramında görülen periyot değişimini açıklamak için literatürde daha önce uygulanan tüm modeller parametreleriyle birlikte test edildi. Ancak elde edilen yeni veriler, önceki çalışmaların tahminlerinden farklı olarak O–C diyagramında yeni bir eğilim göstermektedir. Güncel O–C diyagramı, en iyi istatistiksel sonucu veren iki gezegenli ikinci dereceden terimi içeren model ile fit edildi. Uygulanan model istatistiksel olarak güncel O–C ile uyumlu olsa da O–C’deki RMS saçılımı ve ortalama toplam hata (4.5 s), LTT’nin genliğine ( $K_3 = 7.9 s$ ) yakın değerlerde olduğu için iki gezegen modelinin önemi konusunda bir şüphe uyandırmaktadır. Bu nedenle yörünge dönem değişimine neden olabilecek diğer bir etken olan Applegate mekanizması incelendi (Applegate 1992; Lanza et al. 1998). NY Vir sistemi için çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ile  $E_{min}/E_{sec} = 1.1$  olarak hesaplandı. Elde edilen değer 1’e yakın olmasından dolayı sistemde görülen periyot değişimine manyetik aktivitenin de katkı sağlayabileceği sonucuna varıldı. Ayrıca, NY Vir’in O–C zamanlarının eğiliminin yukarı yönlü olacağı öngörülmekte olup artışın ne kadar devam edeceği önemli bir konudur. Bu nedenle yörünge periyodundaki değişimlere neden olan mekanizmanın daha iyi anlaşılabilmesi için değişimin en az bir tam döngüsünü O–C diyagramında gösterecek yeni gözlem verilerine ihtiyaç vardır. Güncel O–C diyagramı ile iki gezegen modeli istatistiksel olarak uyumlu görünse de gezegenlerin varlığı bir hipotez olarak kalmaktadır (Er et al. 2021).

Birçok araştırmacı tarafından NN Ser sistemin O–C diyagramında gözlenen değişimler farklı model ile tartışılarak bu değişime neden olan etkinin sistemde var olan ilave cisimlerden kaynaklandığı bildirildi (Beuermann et al. 2013, Marsh et al. 2014). Bu kapsamda, NN Ser

sisteminin 2017 ile 2023 yılları arasında elde edilen 36 yeni tutulma zamanını ile O–C diyagramı 25 yıla kadar genişletildi. Literatürde ve bu çalışmada elde edilen zamanlar tek tip olmadığı için O–C modellemesi sırasında A ve B (sınırlandırılmış veri) olmak üzere iki veri seti ele alındı. Oluşturulan güncel O–C diyagramları, bir veya iki gezegen terimlerini içeren fonksiyonlar ile modellendi. Böylece MCMC yöntemi ile sistem parametreleri elde edildi ve varsayımsal gezegen sistemleri oluşturuldu. Sistemdeki 3. cismin LTT sinyalinin  $M_3 = 9.4 M_{Jup}$  kütleli bir gezegenden kaynaklanabileceği belirlendi. Dinamik kararlılık simülasyonundan ise bir gezegenli sistemin 100 Myr için kararlı yörüngelere sahip olduğu bulundu. Diğer yandan dördüncü cismin LTT sinyalinin yarı genliği, zamanlama verilerinin hem artık hem de sistematik belirsizlik değerlerine yakındır. Bu durum, dördüncü cismin zayıf LTT sinyalinin varlığına şüphe uyandırmaktadır. İki gezegenli sistemin yörünge kararlılığı, kullanılan parametrelere büyük ölçüde bağlı olup yalnızca verileri sınırlayarak küçük bir parametre aralığı için 100 Milyon yıl sabit kalmaktadır. Bu nedenle LTT etkisinin yanı sıra yörünge değişimini açıklamak için alternatif mekanizmaların olasılığı araştırıldı. Bu doğrultuda, bu tür sistemlerin yörünge dönem değişimlerinde aktif rol oynayan manyetik aktivite incelendi ve 4. cismin (iç gezegenin) LTT sinyalinin manyetik aktiviteden kaynaklı olabileceği de sonucuna varıldı. Çalışma kapsamında uygulanan modellere göre özellikle Model II (iki gezegenli) için 2024-2025'te O–C diyagramında küçük bir düşüşün başlaması öngörülmektedir. Modellerin tahminlerini doğrulamak için önümüzdeki zamanlarda daha fazla gözlemsel veriye ihtiyaç duyulmaktadır (Ozdonmez et al. 2023; yayın aşamasında).

Geçiş gösteren iki sıcak Jüpiter WASP-10 ve WASP-11'in TÜBİTAK Ulusal gözlemevindeki 1 metrelik teleskop kullanılarak yeni geçiş gözlemleri gerçekleştirildi. Yeni geçiş ışık eğrilerinden sistemlerin fiziksel parametreleri güncelledi. Güncellenen parametreler genel olarak literatür ile uyumlu bulundu. Literatürdeki ve çalışma kapsamında elde edilen yayınlanmış geçiş ortası zamanlar kullanılarak sistemlerin doğrusal efemeris parametreleri güncellendi. WASP-10 b ve WASP-11 b için geçiş ortası zamanlar üzerindeki doğrusal efemerisin RMS değerleri sırasıyla 197 s ve 168 s olarak bulundu. Sistemlerin geçiş zaman değişimlerinin araştırılması için her bir sistem için O–C diyagramları oluşturuldu. Ancak her iki sistemin O–C diyagramında sinüzoidal veya parabolik bir değişime rastlanılmadı. Ayrıca sistemlerin O–C zamanları üzerine Lomb-Scargle periyot analizi yapıldı. Her iki sistemde de ilave bir cismin varlığını işaret eden güçlü bir sinyale rastlanılmadı. Manyetik aktivite veya gelgit etkisi gibi geçiş zaman değişimine neden olabilecek diğer mekanizmalar, ışık eğrilerindeki yüksek saçılma ve O–C diyagramında ikinci dereceden bir değişimin olmaması nedeniyle incelenemedi. Bu sonuçlar ile daha sistematik ve uzun gözlemler yapılmadıkça sistemler etrafında ilave cisim/lerin olmadığı varsayılabilir (Er et al. 2023; yayın aşamasında).

## KAYNAKLAR

- Adams, E.R. et al. 2011. Transit Timing Variation Analysis Of Ogle-Tr-132b With Seven New Transits\*. The Astrophysical Journal, 728:125
- Agol, E., et al. 2005, On detecting terrestrial planets with timing of giant planet transits. MNRAS, 359, 567
- ALMA Partnership, Brogan, C. L., Perez, L. M., Hunter, T. R., Dent, W. R. F. et al., 2015. The 2014 ALMA Long Baseline Campaign: First Results from High Angular Resolution Observations toward the HL Tau Region. ApJ, 808, L3
- Almeida L. A. et al., 2019. Orbital Period Variation of KIC 10544976: Applegate Mechanism versus Light Travel Time Effect. AJ, 157, 150
- Almeida L. A. et al., 2020. Eclipse timing variation of GKVir: evidence of a possible Jupiter-like planet in a circumbinary orbit. MNRAS, 497, 4022-4029
- Almeida, L.A., Jablonski, F., Rodrigues, C.V., 2013. Two Possible Circumbinary Planets in the Eclipsing Post-common Envelope System NSVS 14256825. The Astrophysical Journal, Volume 766(1), 11, 5
- Andronov, I. L., 2012. Phenomenological Modeling of the light curves of algol-type eclipsing binary stars. Astrophysics, 55(4), 536–550
- Andronov, N., Pinsonneault, M., Sills, A., 2003. Cataclysmic Variables: an empirical angular momentum loss prescription from open cluster data. The Astrophysical Journal, 582(1), 358–368
- Anonim 2022c, The Nobel Prize. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2019/press-release/> Son erişim tarihi: 01.06.2023
- Anonim 2022d; <https://astronomy.stackexchange.com/questions/34334/semi-major-axis-in-a-binary-star-system> Erişim Tarihi: 01.07.2022
- Anonim 2022e; <https://www.space.fm/astronomy/starsgalaxies/eclipsingbinarylightcurve.html> Erişim Tarihi: 01.07.2022
- Anonim 2022f, <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Evolution-of-Cataclysmic-Variables-Knigge/76002204a0f0392d091ddb2267b3460d73d71c82/figure/1>. Erişim Tarihi: 01.07.2022
- Anonim 2022g; <https://byjus.com/jee-questions/what-is-the-formula-for-kepler-second-law/> Erişim Tarihi: 01.07.2022
- Anonim 2022h; [https://www.wvu.edu/astro101/a101\\_kepler.shtml](https://www.wvu.edu/astro101/a101_kepler.shtml) Erişim Tarihi: 01.07.2022
- Anonim 2022j, <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/exoplanetplots/#confirmed>. Erişim Tarihi: 01.07.2022
- Anonim 2022k, <https://filtergraph.com/nea/default/index/4965075> Erişim Tarihi: 01.07.2022
- Anonim 2022m, <https://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog>. Erişim Tarihi: 01.07.2022
- Anonim 2022n; <http://astro.twam.info/hz/> Erişim Tarihi: 01.07.2022
- Anonim, 2022a. [www.exoplanet.eu/catalog/](http://www.exoplanet.eu/catalog/). Erişim Tarihi: 01.06.2023
- Anonim, 2022b. <http://www.dtm.ciw.edu/users/boss/definition.html>. Erişim Tarihi: 01.06.2023

- Anonim2022o.[https://en.wikipedia.org/wiki/Habitability\\_of\\_binary\\_star\\_systems#/media/File:Planets\\_in\\_binary\\_star\\_systems\\_-\\_P\\_and\\_S-type.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Habitability_of_binary_star_systems#/media/File:Planets_in_binary_star_systems_-_P_and_S-type.svg). Erişim Tarihi: 01.07.2022
- Applegate, J. H., 1992. A mechanism for orbital period modulation in close binaries. *Astrophysical Journal*, 385, 621–629
- Armitage, P. J., 2011. Dynamics of Protoplanetary Disks. *ARA&A*, 49, 195, 236
- Astropy Collaboration, Robitaille T. P., Tollerud E. J., Greenfield P., Droettboom M., Bray E., Aldcroft T., et al., 2013. *A&A*, 558, A33
- Baglin, A. et al. 2007. The CoRoT mission and its scientific objectives. *AIP Conference Proceedings*, 895, 201-209
- Bai T., 2003. Periodicities in Solar Flare Occurrence: Analysis of Cycles 19-23. *ApJ*, 591, 406.
- Bakos et al. 2004. Wide-Field Millimagitude Photometry with the HAT: A Tool for Extrasolar Planet Detection. *The Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. 116, 81, 266-77
- Bakos, G.A., et al., 2009. HAT-P-10b: A Light And Moderately Hot Jupiter Transiting A K Dwarf. *AJ*, 696, 1950-1955
- Balbus, S. A. & Hawley, J. F., 1991. A powerful local shear instability in weakly magnetized disks. I - Linear analysis. II - Nonlinear evolution. *ApJ*, 376, 214-233
- Baluev, R.V et al. 2015. Benchmarking the power of amateur observatories for TTV exoplanets detection. *MNRAS* 450, 3101–3113
- Barbosa, G.O. et al. 2020. Earth-size planet formation in the habitable zone of circumbinary stars. *MNRAS* 494, 1045–1057
- Barros S. C. C., Boué G., Gibson N. P., Pollacco D. L., Santerne A., Keenan F. P., Skillen I., et al., 2013. Transit timing variations in WASP-10b induced by stellar activity. *MNRAS*, 430, 3032
- Baştürk, Ö., Esmer E. M., 2018. Orbital Period Variations in the NY Vir System, Revisited in the Light of New Data. *Open Astron.*, 27, 14
- Benacquista, M., 2013. *An Introduction to the Evolution of Single and Binary Stars*. Springer, UK
- Benest, D. 1988, Planetary Orbits in the Elliptic Restricted Problem. I-The Alpha Centauri System, *Astron. Astrophys.*, 206, 143
- Benest, D. 1989, Planetary Orbits in the Elliptic Restricted Problem. II-The Sirius System, *Astron. Astrophys.*, 223, 361
- Benest, D. 1993, Stable Planetary Orbits Around One Component in Nearby Binary Stars. II, *Celest. Mech.*, 56, 45
- Benest, D. 1996, Planetary Orbits in the Elliptic Restricted Problem. III. The  $\eta$  Coronae Borealis System, *Astron. Astrophys.*, 314, 983
- Benjamin J. S. Pope, 2017. *Observing Bright Stars and their Planets from the Earth and from Space*. Phd thesis, University of Oxford, UK.
- Beuermann K. et al., 2010. Two planets orbiting the recently formed post-common envelope binary NN Serpentis. *A&A*, 521, L60
- Beuermann K. et al., 2012. The quest for companions to post-common envelope binaries II. NSVS14256825 and HS0705+6700. *A&A*, 540, A8

- Beuermann K., Dreizler S., Hessman F. V., 2013. The quest for companions to post-common envelope binaries IV. The 2:1 mean-motion resonance of the planets orbiting NN Serpentis. *A&A*, 555, A133
- Beuermann, K. et al. 2011. The giant planet orbiting the cataclysmic binary DP Leonis. *Astronomy and Astrophysics*, 526, A53, 5
- Beuermann, K., Dreizler, S., Hessman, F. V., & Deller, J. 2012a. The quest for companions to post-common envelope binaries III. A reexamination of HW Virginis. *A&A*, 543, A138
- Binnendijk, L., 1970. The orbital elements of W Ursae Majoris systems. *Vistas in Astronomy*, 12(1) 217–256
- Binnendijk, L., 1977. Synthetic light curves for contact binaries. *Vistas in Astronomy*, 21(4), 359–391
- Bonavita, M. et al. 2016. SPOTS: The Search for Planets Orbiting Two Stars II. First constraints on the frequency of sub-stellar companions on wide circumbinary orbits. *A&A*, 593, 38, 22
- Boss, A.P., Butler, R.P., Hubbard, W.B., Ianna, P.A., 2007. Working Group on Extrasolar Planets. *IAU Transactions Reports on Astronomy 2002–2005* Edited by Engyold, O., 26(A), 183–186
- Bours, M. C. P., et al., 2016. Long-term eclipse timing of white dwarf binaries: an observational hint of a magnetic mechanism at work. *MNRAS*, 460, 4, 3873
- Bozza, V. et al. 2016. *Methods of Detecting Exoplanets*. Switzerland, Springer
- Bradley L., Sipőcz B., Robitaille T., Tollerud E., Vinícius Z., Deil C., Barbary K., et al., 2020, *zndo*
- Brinkworth C. S., Marsh T. R., Dhillon V. S., Knigge C., 2006. Detection of a period decrease in NN Ser with ULTRACAM: evidence for strong magnetic braking or an unseen companion. *MNRAS*, 365, 287
- Brooks, S., Gelman, A., Jones, G.L. & Meng, X., 2011. *Handbook of Markov Chain Monte Carlo*. Chapman & Hall/CRC, New York.
- Brown, T.M., Charbonneau, D., Gilliland, R.L, Noyes, R.W., Burrows, Adam., 2001. Hubble Space Telescope Time-Series Photometry of the Transiting Planet of HD 209458. *The Astrophysical Journal*, 552(2), 699–709.
- Burdge K. B. et al., 2019. General relativistic orbital decay in a seven-minute-orbital-period eclipsing binary system. *Nature*, 571, 528
- Cameron, C.A. 2002. What are hot Jupiters made of?. *Astron. & Geophys.*, 43, 4.21
- Cameron, C.A. et al., 2010. Line-profile tomography of exoplanet transits – II. A gas-giant planet transiting a rapidly rotating A5 star\*. *MNRAS*, 407, 507
- Catalan M. S., Davey S. C., Sarna M. J., Smith R. C., Wood J. H., 1994. A Spectroscopic and Evolutionary Study of the Pre-Cataclysmic Variable Nn-Serpentis. *MNRAS*, 269, 879
- Chakrabarty, A., and Sengupta, S., 2019. Precise Photometric Transit Follow-up Observations of Five Close-in Exoplanets: Update on Their Physical Properties. *The Astronomical Journal*, 158:39, 17
- Chambers, J., 2006. A semi-analytic model for oligarchic growth. *Icarus*, 180, 496-513.
- Charbonneau P., 1995. Genetic Algorithms in Astronomy and Astrophysics. *ApJS*, 101, 309
- Charbonneau, D., Brown, M.T., Latham, D.W. and Mayor, M., 2000. Detection of Planetary Transits Across a Sun-Like Star. *The Astrophysical Journal*, 529(1), 45–48

- Chauvin, G., Lagrange, A.M., Dumas, C., Zuckerman, B. et al., 2004. A giant planet candidate near a young brown dwarf. Direct VLT/NACO observations using IR wavefront sensing, *Astronomy and Astrophysics*, 425, 29–32
- Chauvin, G., Lagrange, A.M., Dumas, C., Zuckerman, B. et al., 2005. Giant planet companion to 2MASSW J1207334-393254. *Astronomy and Astrophysics*, 438, 25–284
- Chen W.-C., 2009. Can angular momentum loss cause the period change of NN Serpentis?. *A&A*, 499, L1.
- Chen, K. Y. and Reuning, E. G., 1966. Infrared Photometry of Beta Persei. *Astronomical Journal*, 71(4), 283
- Christian, D.J., et al. 2009. WASP-10b: a 3M<sub>J</sub>, gas-giant planet transiting a late-type K star. *MNRAS*, 392, 1585-1590
- Cincotta P. M., Simó C., 2000. Simple tools to study global dynamics in non-axisymmetric galactic potentials – I. *A&AS*, 147, 205
- Claret A., Gimenez A., 2010. The apsidal-motion test of stellar structure and evolution: an update. *A&A*, 519, A57
- Collier, C.A., Bouchy, F., Hebrard, G., Maxted, P. et al., 2007. WASP-1b and WASP-2b: two new transiting exoplanets detected with SuperWASP and SOPHIE. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 375(3), 951–957
- Collins, K.A. et al. 2017b. Transit Timing Variation Measurements Of Wasp-12b And Qatar-1b: No Evidence Of Additional Planets. *The Astronomical Journal*, 153:78, 14
- Collins, Karen A., Kielkopf, John F., Stassun, Keivan G. and Hessman, Frederic V., 2017a. AstroImageJ: Image Processing and Photometric Extraction for Ultra-Precise Astronomical Light Curves. *The Astronomical Journal*, 153(2), 77
- Craig M., Crawford S., Seifert M., Robitaille T., Sipocz B., Walawender J., Vinícius Z., et al., 2017, zndo
- Crossfield, I.J.M., et al. 2019. 8.901 Lecture Notes. Erişim Linki: [http://www.mit.edu/~iancross/8901\\_2019A/coursenotes\\_v2.pdf](http://www.mit.edu/~iancross/8901_2019A/coursenotes_v2.pdf). Erişim Tarihi: 01.07.2022
- Cruz P., Barrado D., Lillo-Box J., Diaz M., Birkby J., López-Morales M., Hodgkin S., et al., 2015. Detection of the secondary eclipse of WASP-10b in the Ks-band. *A&A*, 574, A103
- Czesla S., Huber K. F., Wolter U., Schröter S., Schmitt J. H. M. M., 2009. How stellar activity affects the size estimates of extrasolar planets. *A&A*, 505, 1277
- Çamurdan C. M., Zengin Çamurdan D., C. İbanoğlu, 2012. Photometric observations and orbital period variations of HS 0705 + 6700 and NY Vir. *New Astron.*, 17, 325
- Dai, Z.-B., Qian, S.-B., Fernández Lajús, E., & Baume, G. L. 2010. Orbital period analyses for two cataclysmic variables: UZ Fornacis and V348 Puppis inside the period gap. *MNRAS*, 409, 1195
- Deeg, H.J. 2018. *Handbook of Exoplanets*. Springer. Switzerland
- Dittmann J. A., Close L. M., Scuderi L. J., Morris M. D., 2010. Transit Observations of the WASP-10 System. *ApJ*, 717, 235
- Dotson, R., S. Seager, et al. *Exoplanets*. University of Arizona Press, 2010.
- Doyle L. R., Deeg H.-J., 2004, in Norris R., Stootman F., eds, *Proc. IAU Symp. 213, Bioastronomy 2002: Life Among the Stars*. Astron. Soc. Pac., San Francisco, p. 80

- Doyle, L. R., Carter, J. A., Fabrycky, Daniel C. et al., 2011. Kepler-16: A Transiting Circumbinary Planet. *Science*, 333(6049), 1602–1606
- Döllinger M. P. et al., 2011. in Schuh S., Drechsel H., Heber U., eds. *AIP Conf. Ser. Vol. 1331, Planetary Systems Beyond the Main Sequence*. Am. Inst. Phys., New York, p. 79
- Dvorak, R. 1982. *Osterr. Akad. d. Wiss., Math-Nat. Klassen* 191, 423
- Dvorak, R. 1984. Numerical Experiments on Planetary Orbits in Double Stars. *Celest. Mech.*, 34, 369
- Dvorak, R. 1986. Critical Orbits in the Elliptic Restricted Three-Body Problem. *Astron. Astrophys.*, 167, 379
- Dvorak, R., Froeschle, Ch. & Froeschle, Ci. 1989. Stability of Outer Planetary Orbits (P-Types) in Binaries. *Astron. Astrophys.*, 226, 335
- Dvorak, R., Pilat-Lohinger, E., Bois, E., Funk, B., Freistetter, F. & Kiseleva- Eggleton, L. 2004. Planets in Double Stars: the  $\gamma$  Cephei System. *RevMexAA (Series de Conferencias)*, 21, 222
- Dvorak, R., Pilat-Lohinger, E., Funk, B. & Freistetter, F. 2003. Planets in Habitable Zones: A Study of the Binary Gamma Cephei. *Astron. Astrophys.*, 398, L1
- Eastman J., Siverd R., Gaudi B. S., 2010. Achieving Better Than 1 Minute Accuracy in the Heliocentric and Barycentric Julian Dates. *PASP*, 122, 935
- Eastman, J., Gaudi, B. Scott and Agol, E., 2013. EXOFAST: A Fast Exoplanetary Fitting Suite in IDL. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 125(923), 83.
- Er, Huseyin et al. 2021. New observations of the eclipsing binary system NY Vir and its candidate circumbinary planets. *MNRAS* 507, 809–817.
- Essack, Z. 2017. Searching for Exoplanets Using the Transit Method. University of KwaZulu-Natal. Yüksesk Lisans
- Faillance G., Pulley D., Mallett J., Watkins A., Sharp I., Mai X., 2020. Eclipse time variations & the continued search for companions to short-period eclipsing binary systems. *JBAA*, 130, 357
- Foreman-Mackey D., 2016. corner.py: Scatterplot matrices in Python. *J. Open Source Softw.*, 1, 24
- Foreman-Mackey, D., et al., 2013. emcee: The MCMC Hammer. *Publications of The Astronomical Society of The Pacific*, 125, 306–312.
- Gajdos, P. and Parimucha, S. 2018. New Tool With Gui For Fitting O–C Diagrams. *Open European Journal On Variable Stars*. <http://var.astro.cz/oejv>.
- Gansicke B. T., Koester D., Farihi J., Girven J., Parsons S. G., Breedt E., 2012. The chemical diversity of exo-terrestrial planetary debris around white dwarfs. *MNRAS*, 424, 333
- Garai, Z. et al. 2020. Periodic transit timing variations and refined system parameters of the exoplanet XO-6b. *MNRAS*, 491, 2760–2769.
- Good, G. A., 2003. *Observing Variable Stars*. Springer, 274s, Londra
- Goodman J., Weare J., 2010. Ensemble samplers with affine invariance. *Commun. Appl. Math. Comput. Sci.*, 5, 65
- Gozdziewski, K., Nasiroglu, I., Slowikowska, A., Beuermann, K. et al., 2012. On the HU Aquarii planetary system hypothesis. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 425(2), 2, 930–949.

- Gozdziewski, K., Slowikowska, A., Dimitrov, D., Krzeszowski, K. et al. 2015. The HU Aqr planetary system hypothesis revisited. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 448(2), 1118–1136
- Green R. F., Schmidt M., Liebert J., 1986. The Palomar-Green catalog of ultraviolet-excess stellar objects. *ApJS*, 61, 305
- Haefner R., 1989. A short periodic precataclysmic binary with very deep eclipses. *A&A*, 213, L15
- Haefner R., Fiedler A., Butler K., Barwig H., 2004. Refined system parameters for the precataclysmic binary NN Serpentis. *A&A*, 428, 181
- Hagey, S.R., et al., 2022. Evidence of Long-term Period Variations in the Exoplanet Transit Database (ETD). *AJ*, 164, 220
- Haghighipour N., Kaltenegger L., 2013. Calculating The Habitable Zone Of Binary Star Systems. II. P-Type Binaries. *ApJ*, 777, 166
- Han C. et al., 2013. Microlensing Discovery of a Tight, Low-Mass-Ratio Planetary-Mass Object Around An Old Field Brown Dwarf. *ApJ*, 778, 38
- Han, Z. T., Qian, S. B., Zhu, L. Y., et al. 2018. DE CVn: An Eclipsing Post-common Envelope Binary with a Circumbinary Disk and a Giant Planet. *ApJ*, 868, 53
- Hardy, A. et al. 2015. The First Science Results from Sphere: Disproving the Predicted Brown Dwarf Around V471 Tau. *The Astrophysical Journal Letters*. 800, 2, 24(6)
- Hardy, A. et al. 2016. The detection of dust around NN Ser. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 459(4), 4518-4526.
- Harrington, R. S. 1977. Planetary Orbits in Binary Stars. *Astron. J.*, 82, 753
- Harris C. R., Millman K. J., van der Walt S. J., Gommers R., Virtanen P., Cournapeau D., Wieser E., et al., 2020. Array programming with NumPy. *Nature*, 585, 357.
- Hart M. H., 1978. The evolution of the atmosphere of the earth. *Icarus*, 33, 23
- Hartmann, L., Herczeg, G. & Calvet, N., 2016. Accretion onto Pre-Main-Sequence Stars. *ARA&A*, 54, 135, 180.
- Harwit, M. 2006. *Astrophysical Concepts*. Springer, USA.
- Hecht, J., 2016. The truth about exoplanets. *Nature*, 530(7590), 272-274.
- Hellier, C., 2001. *Cataclysmic Variable Stars*. Springer-Praxis, 210s, UK
- Henry, G. W., Marcy, G. W., Butler, R. P., & Vogt, S. S. 2000. A Transiting "51 Peg-like" Planet. *ApJ*, 529, L41
- Herrero E., Morales J. C., Ribas I., Naves R., 2011. WASP-33: the first  $\delta$  Scuti exoplanet host star. *A&A*, 526, L10
- Hilditch, R.W., 2001. *An Introduction to Close Binary Stars*. Cambridge University Press, 381s, ABD
- Holman M. J., 2005. The Use of Transit Timing to Detect Extrasolar Planets with Masses as Small as Earth. *Science*, 307, 1288
- Holman, M. J. & Wiegert, P. A. 1999. Long-Term Stability of Planets in Binary Systems. *Astron. J.*, 117, 621
- Horner, J., Wittenmyer, R. A., Hinse, T. C., Marshall, J. P., Mustill, A. J., Tinney, C. G., 2013. A detailed dynamical investigation of the proposed QS Virginis planetary system. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 435(3), 2033–2039

- Horner, J., Wittenmyer, R. A., Hinse, T. C., Tinney, C. G., 2012. A detailed investigation of the proposed NN Serpentis planetary system. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 425(1), 749–756
- Houdek, G. & Gough, D. O., 2011. On the seismic age and heavy-element abundance of the Sun. *MNRAS*, 418, 1217-1230
- Howard, A.W., Bakos, G.A., Hartman, J., Torres, G. et al., 2012. HAT-P-17b,c: A Transiting, Eccentric, Hot Saturn and a Long-period, Cold Jupiter. *The Astrophysical Journal*, 749(2), 134
- Hoyle, F., 1960. The Origin of the Solar Nebula. *QJRAS*, 1, 28
- Hu H., Nelemans G., Østensen R., Aerts C., Vuckovic M., Groot P. J., 2007. An evolutionary study of the pulsating subdwarf B eclipsing binary PG 1336–018 (NY Virginis). *A&A*, 473, 569
- Hu, Y. and Ding, F. 2011. Radiative constraints on the habitability of exoplanets Gliese 581c and Gliese 581d. *Astron. Astrophys.* 526, 135.
- Huang, Q.Y. et al. 2019. Transitmodelling of selected Kepler systems. *Astrophys Space Sci.* 364:33
- Huang, S.S. 1960. Life-supporting regions in the vicinity of binary systems, in *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, pp. 106–114
- Hunter J. D., 2007. Matplotlib: A 2D Graphics Environment. *CSE*, 9, 90
- Husnoo, N., et al. 2012. Observational constraints on tidal effects using orbital eccentricities. *MNRAS*, 422, 3151-3177
- Hümmerich, S.; Bernhard, K., 2012. *Peremennye Zvezdy Prilozhenie*, 12, 11
- Hümmerich, S., Bernhard, K. and Srdoc, G. 2013. Twenty New W Ursae Majoris-type Eclipsing Binaries from the Catalina Sky Survey. *VS*
- Iben I., J, Livio M., 1993. Common Envelopes In Binary Star Evolution. *PASP*, 105, 1373
- Irwin, J.B. 1952. The Determination of a Light-Time Orbit. *ApJ*. 116, 211I
- Johnson J. A., Winn J. N., Cabrera N. E., Carter J. A., 2009. A Smaller Radius for The Transiting Exoplanet WASP-10b. *ApJL*, 692, L100
- Jorissen, A., M. Mayor & S. Udry 2001. The distribution of exoplanet masses. *A&A*, 379, 992
- Kachelrieß, M. 2011. A Concise Introduction to Astrophysics. Erişim Linki: <https://www.scribd.com/doc/117111029/A-Concise-Introduction-to-Astrophysics>  
Erişim Tarihi: 01.07.2022
- Kaltenegger L., Sasselov D., 2011. Exploring The Habitable Zone For Kepler Planetary Candidates. *ApJ*, 736, L25
- Kammer J. A., Knutson H. A., Line M. R., Fortney J. J., Deming D., Burrows A., Cowan N. B., et al., 2015. Spitzer Secondary Eclipse Observations of Five Cool Gas Giant Planets And Empirical Trends In Cool Planet Emission Spectra. *ApJ*, 810, 118
- Kant, I., 1755. *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels*. Works. Fischer. URL <https://books.google.co.uk/books?id=nCcaAQAAMAAJ>.
- Karttunen, H., Kröger, P., Oja, H., Poutanen, M., Donner, K. J., 2007. *Fundamental Astronomy*. Springer, 510s, New York
- Kasting J. F., Whitmire D. P., Reynolds R. T., 1993. Habitable Zones around Main Sequence Stars. *Icarus*, 101, 108

- Kasting, J.F., R. Kopparapu, R.M. Ramirez, and C. E. Harman. 2014. Remote life- detection criteria, habitable zone boundaries, and the frequency of earth- like planets around mand late k stars. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(35):12641,12646
- Kilkenny D., 2011. The orbital periods of AA Dor and NY Vir. *MNRAS*, 412, 487
- Kilkenny D., 2014. The orbital periods of three sdB eclipsing binary systems. *MNRAS*, 445, 4247
- Kilkenny D., Keuris S., Marang F., Roberts G., vanWyk F., OglozaW., 2000. On the orbital periods of three close binaries with hot subdwarf primaries. *Observatory*, 120, 48
- Kilkenny D., O'Donoghue D., Koen C., Lynas-Gray A. E., vanWyk F., 1998. The EC 14026 stars - VIII. PG 1336-018: a pulsating sdB star in an HWVir-type eclipsing binary. *MNRAS*, 296, 329
- Knutson, H.A., et al., 2014. Friends Of Hot Jupiters. I. A Radial Velocity Search For Massive, Long-Period Companions To Close-In Gas Giant Planets. *AJ*, 785, 126
- Koch, D. et al. 2007. *The Kepler Mission and Eclipsing Binaries*. Proceedings of IAU Symposium #240. Cambridge University Press. 236-243
- Kokubo, E. & Ida, S., 1998. Oligarchic Growth of Protoplanets. *Icarus*, 131, 171-178
- Kokubo, E. & Ida, S., 2000. Formation of Protoplanets from Planetesimals in the Solar Nebula. *Icarus*, 143, 15-27
- Kopparapu, R.K., 2013. A revised estimate of the occurrence rate of terrestrial planets in the habitable zones around Kepler m-dwarfs. *Astrophys. J. Lett.* 767(1), 8
- Krejcová, T. 2013. *Transiting extrasolar planets and star-planet interaction*. Phd, Masaryk University, Slovakia
- Krejcová, T., Budaj, J., & Krushevska, V. 2010. *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 40, 77
- Lam, C. and Kipping, D. 2018. A machine learns to predict the stability of circumbinary planets. *MNRAS* 476, 5692–5697
- Lanza, A. F., Rodono, M., Rosner, R., 1998. Orbital period modulation and magnetic cycles in close binaries. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 296(4), 893–902
- Laplace, P.-S., 1796. *Exposition du systeme du monde*. Works. Fischer. URL; <http://books.google.com/books?id=f7Kv2iFUNJoC&hl>.
- Lee, J. W., Kim, S. L., Kim, C. H., Koch, R. H., Lee, C. U., Kim, H. I., Park, J. H., 2009. The sdB+M Eclipsing System HW Virginis and its Circumbinary Planets. *The Astronomical Journal*, 137(2), 3181–3190
- Lee, J.W. and Park, J.H. 2018. Physical Nature and Orbital Behavior of the Eclipsing System UZ Leonis. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. 130, 034201, 10
- Lee, J.W., et al., 2014. The pulsating sdB+M eclipsing system NY Virginis and its circumbinary planets. *MNRAS*, 445, 2331–2339
- Lewis, J. S., 1974. The temperature gradient in the solar nebula. *Science*, 186, 440-443
- Liao, W.-P., & Qian, S.-B. 2010. The most plausible explanation of the cyclic period changes in close binaries: the case of the RS CVn-type binary WW Dra. *MNRAS*, 405, 1930
- Linnel, A. P. 2002. The anomalous ultraviolet light curves and IUE spectra of  $\beta$  Lyrae revisited. *MNRAS*, 334, 963

- Lohr, M. E., 2014. Period and amplitude variations in post-common-envelope eclipsing binaries observed with SuperWASP\*. *A&A*, 566, 128, 10
- Lomb N. R., 1976. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Ap&SS*, 39, 447
- Maciejewski G., Dimitrov D., Neuhäuser R., Tetzlaff N., Niedzielski A., Raetz S., Chen W. P., et al., 2011a. Transit timing variation and activity in the WASP-10 planetary system. *MNRAS*, 411, 1204
- Maciejewski G., Fernández M., Aceituno F., Ramos J. L., Dimitrov D., Donchev Z., Ohlert J., 2021. Revisiting TrES-5 b: departure from a linear ephemeris instead of short-period transit timing variation. *A&A*, 656, A88
- Maciejewski G., Raetz S., Nettelmann N., Seeliger M., Adam C., Nowak G., Neuhäuser R., 2011b. Analysis of new high-precision transit light curves of WASP-10 b: starspot occultations, small planetary radius, and high metallicity. *A&A*, 535, A7
- Madhusudhan, N. et al. 2016. Exoplanetary Atmospheres—Chemistry, Formation Conditions, and Habitability. *Space Sci Rev.* 205:285–348
- Mai X., Mutel R. L., 2022. Orbital Stability of Proposed NY Virginis Exoplanets. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 513, 2478–2490
- Malkov, O. Y. et al. 2006. A catalogue of eclipsing variables\*,\*\*. *A&A*, 446, 785–789
- Mancini L., Esposito M., Covino E., Raia G., Southworth J., Tregloan-Reed J., Biazzo K., et al., 2015. The GAPS Programme with HARPS-N at TNG. VIII. Observations of the Rossiter-McLaughlin effect and characterisation of the transiting planetary systems HAT-P-36 and WASP-11/HAT-P-10. *A&A*, 579, A136
- Mancini, L., et al. 2017. Orbital alignment and star-spot properties in the WASP-52 planetary system. *MNRAS*, 465, 843–857.
- Mannaday, V.K. et al. 2020. Probing Transit Timing Variation and its Possible Origin with Twelve New Transits of TrES-3b. *arXiv:2006.00599v1*
- Marchioni, L., et al., 2018. The Mystery of the Invisible Brown Dwarf Companion to the Eclipsing Binary V471 Tauri – Analysis of 45-years of Eclipse timings including K2. *Research Notes of the AAS*, 2, 3
- Marcy, G.W. and Butler, R.P. 1995. The Planet around 51 Pegasi. *American Astronomical Society(187th AAS Meeting)*, 27, 1379
- Marcy, G.W. et al. 2003, Properties of extrasolar planets. In: *Scientific Frontiers in Research on Extrasolar planets*, vol 294, ed by D. Deming & S. Seager (ASP Conference Series), pp 1-16
- Marcy, G.W., Butler, R.P., Vogt, S.S., Fischer, D. and Lissauer, J.J., 1998. A Planetary Companion to a Nearby M4 Dwarf, Gliese 876. *The Astrophysical Journal*, 505(2), 147–149
- Marsh T. R. et al., 2013. The planets around NN Ser: still there. *MNRAS*, preprint (arXiv:1310.1391)
- Marsh, T. R., Parsons, S. G., Bours, M. C. P., Littlefair, S. P., Copperwheat, C. M., Dhillon, V. S., Breedt, E., Cáceres, C., Sreieber, M. R., 2014. The planets around NN Serpentis: still there. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 437(1), 475–488
- Mason, J.W. 2008. *Exoplanets Detection, Formation, Properties, Habitability*. Springer, UK
- Mason, John W., 2008. *Exoplanets: Detection, Formation, Properties, Habitability*. Springer Praxis Books. Praxis Publishing Ltd, Chichester, UK.

- Masuda, K. 2014. Characterization of Multi-transiting Planetary Systems with Transit Timing Variations. Master Thesis, University of Tokyo.
- Mayor, M. and Frei, P.Y., 2003. *New Worlds in the Cosmos The Discovery of Exoplanets*. Cambridge University Press, 248s, UK
- Mayor, M. and Queloz, D., 1995. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, 378(6555), 355–359
- Mayor, M., Bonfils, X., Forveille, T., Delfosse, X. et al., 2009. The HARPS search for southern extra-solar planets. XVIII. An Earth-mass planet in the GJ 581 planetary system. *Astronomy and Astrophysics*, 507(1), 487–494
- Mazeh, T., Naef, D., Torres, G., Latham, D.W. et al., 2000. The Spectroscopic Orbit of the Planetary Companion Transiting HD 209458. *The Astrophysical Journal*, 532(1), 55–58
- Mobberley, M., 2009. *Cataclysmic Cosmic Events and How to Observe Them*. Springer, 238s, New York
- Moutou, C. and Pont, F. 2005. Detection and characterization of extrasolar planets: the transit method. *Formation planétaire et exoplanètes*, Ecole CNRS de Goutelas XXVIII.
- Moutou, C. and Pont, F., 2006. Detection and characterization of extrasolar planets: the transit method. *Ecole de Goutelas*, 28, 55-79
- Musielak, Z. E., Cuntz, M., Marshall, E. A. & Stuit, T. D. 2005, Stability of Planetary Orbits in Binary Systems, *Astron. Astrophys.*, 434, 355
- Mustill A. J., Marshall J. P., Villaver E., Veras D., Davis P. J., Horner J., Wittenmyer R. A., 2013. Main-sequence progenitor configurations of the NN Ser candidate circumbinary planetary system are dynamically unstable. *MNRAS*, 436, 2515
- Muterspaugh, M. W., Lane, B. F., Kulkarni, S. R., Konacki, M. et al., 2010. The Phases Differential Astrometry Data Archive. V. Candidate Substellar Companions to Binary Systems. *The Astronomical Journal*, 140(6), 1657–1671
- Müller, T.W.A and Haghighipour, N. 2014. Calculating The Habitable Zones Of Multiple Star Systems With A New Interactive Web Site\*. *ApJ* 782 26.
- Nasiroglu, I., Gozdziewski, K., Slowikowska, A., Krzeszowski, K., Zejmo, M., Zola, S., Er, H. et al., 2017. Is There a Circumbinary Planet around NSVS 14256825?. *The Astronomical Journal*, 153(3), 11
- Nelson, C. A., & Eggleton, P. P. 2001. A Complete Survey of Case A Binary Evolution with Comparison to Observed Algol-type Systems. *ApJ*, 552, 664
- Newville M., Stensitzki T., Allen D. B., Ingargiola A., 2014, *zndo*
- Nittler, L. R. & Ciesla, F., 2016. *Astrophysics with Extraterrestrial Materials*. *ARA&A*, 54, 53, 93.
- O'Donovan, F.T. 2008. *The Detection and Exploration of Planets from the Trans-atlantic Exoplanet Survey*. California Institute of Technology Pasadena, California. *Doktora Tezi*
- Odell, A.W. and Gooding, R.H. 1986. Procedures for Solving Kepler's Equation. *Celestial Mechanics*. 38, 4, 307-334.
- Odunlade, A., P., E., A., 2010. *Transiting exoplanets: characterisation in the presence of stellar activity*. PhD, University of Exeter, UK.

- Öztürk, O. and Erdem, A. 2019. New photometric analysis of five exoplanets: CoRoT-2b, HAT-P-12b, TrES-2b, WASP-12b, and WASP-52b. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 486, Issue 2, p.2290-2307.
- Paczynski, B., ed. Eggleton, P., Mitton, S. and Whelan, J., 1976. *The Structure and Evolution of Close Binary Systems*. Springer Netherlands, 75s, Hollanda
- Parsons S. G., Marsh T. R., Copperwheat C. M., Dhillon V. S., Littlefair S. P., Hickman R. D. G., Maxted P. F. L., et al., 2010b, *MNRAS*, 407, 2362. doi:10.1111/j.1365-2966.2010.17063.x
- Parsons, S. G., 2014. Timing variations in the secondary eclipse of NN Ser. *MNRAS*, 438, L91–L95
- Parsons, S. G., Marsh, T. R., Copperwheat, C. M., Dhillon, V. S., Littlefair, S. P., Gansicke, B. T., Hickman, R., 2010a. Precise mass and radius values for the white dwarf and low mass M dwarf in the pre-cataclysmic binary NN Serpentis. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 402(4), 2591–2608
- Patterson, C., 1956. Age of meteorites and the earth. *Geochimica et Cosmochimica. Acta*, 10, 230-237.
- Percy, J. R., 2007. *Understanding Variable Stars*. Cambridge University Press, 350s, Kanada
- Perez, A.P. 2015. Exoplanet potential from single-transit detection: The CHEOPS-TESS synergy. Barcelona University, Yüksek lisans
- Perryman, M. 2018. *The Exoplanet Handbook, Second Edition*, Cambridge University Press, UK
- Poddany S., Brát L., Pejcha O., 2010. Exoplanet Transit Database. Reduction and processing of the photometric data of exoplanet transits. *NewA*, 15, 297.
- Pollacco et al. 2006. The WASP Project and the SuperWASP Cameras. *The Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. 118, 848, 1407-1418.
- Postnov, K. A, and Yungelson, L. R., 2014. *The Evolution of Compact Binary Star Systems*, arXiv, arXiv:1403.4754
- Potter S. B. et al., 2011. Possible detection of two giant extrasolar planets orbiting the eclipsing polar UZ Fornacis. *MNRAS*, 416, 2202
- Pribulla, T., Vanko, M., Ammler-von, M., Andreev, M. et al., 2012. The Dwarf project: Eclipsing binaries - precise clocks to discover exoplanets. *Astronomische Nachrichten*, 333(8), 754
- Pulley D., Sharp I. D., Mallett J., von Harrach S., 2022. Eclipse timing variations in post-common envelope binaries: Are they a reliable indicator of circumbinary companions?. *MNRAS*, 514, 5725. doi:10.1093/mnras/stac1676
- Pulley, D., et al., 2018. The quest for stable circumbinary companions to post-common envelope sdB eclipsing binaries. Does the observational evidence support their existence?. *Astronomy & Astrophysics*. 611, 48, 13
- Qian S.-B., Dai Z.-B., Liao W.-P., Zhu L.-Y., Liu L., Zhao E. G., 2009. A Substellar Companion to The White Dwarf–Red Dwarf Eclipsing Binary NN Ser. *ApJL*, 706, L96
- Qian, S. B., Shi, G., Zola, S., et al. 2013. A search for substellar objects orbiting the sdB eclipsing binary HS 0705+6700. *MNRAS*, 436, 1408-1414
- Qian, S.B., et al. 2012. Circumbinary Planets Orbiting the Rapidly Pulsating Subdwarf B-type Binary NY Vir. *The Astrophysical Journal Letters*, 745, 2, L23, 5

- Qian, S.B., Liao, W.P., Zhu, L.Y., Dai, Z.B., 2010. Detection of a Giant Extrasolar Planet Orbiting the Eclipsing Polar DP Leo. *The Astrophysical Journal Letters*, 708(1), 66–68
- Quarles, B. and Lissauer, J.J. 2016. Long-Term Stability Of Planets In The A Centauri System. *The Astronomical Journal*, 151:111 (12pp)
- Rabl, G. & Dvorak, R. 1988, Satellite-Type Planetary Orbits in Double Stars – A Numerical Approach, *Astron. Astrophys.*, 191, 385
- Raetz, St. et al. 2002. Transit analysis of the CoRoT-5, CoRoT-8, CoRoT-12, CoRoT-18, CoRoT-20, and CoRoT-27 systems with combined ground- and space-based photometry. arXiv:1812.01536v1
- Rein H., Liu S.-F., 2012. REBOUND: an open-source multi-purpose N-body code for collisional dynamics. *A&A*, 537, A128.
- Rein H., Tamayo D., 2015. WHFAST: a fast and unbiased implementation of a symplectic Wisdom–Holman integrator for long-term gravitational simulations. *MNRAS*, 452, 376.
- Rein, H. and Spiege, D.S. 2014. IAS15: A fast, adaptive, high-order integrator for gravitational dynamics, accurate to machine precision over a billion orbits. arXiv:1409.4779v2
- Ribas, I., et al. 2002. Astrometric And Light-Travel Time Orbits To Detect Low-Mass Companions: A Case Study Of The Eclipsing System R Canis Majoris. *The Astronomical Journal*, 123:2033–2041.
- Ridden-Harper, A. et al. 2020. TESS Observations of the Hot Jupiter Exoplanet XO-6b: No Evidence of Transit Timing Variations. arXiv:2009.10781v1
- Ridpath, I. 2012. *A dictionary of astronomy*. Oxford University Press, UK
- Rovithis-Livaniou H., 2005. Period Changes of Close Binary Systems. In: Drechsel H., Zejda M. (eds) *Zdeněk Kopal's Binary Star Legacy*. Springer, Dordrecht
- Rovithis-Livaniou H., 2006. *Publ. Astron. Obs. Belgr.*, 80, 107
- Sada, P.V. and Ramon-Foz, F.G., 2016. Exoplanet Transits Registered at the Universidad de Monterrey Observatory. I. HAT-P-12b, HAT-P-13b, HAT-P-16b, HAT-P-23b, and WASP-10b *PASP*, 128, 960
- Sada, P.V., et al. 2012. Extrasolar Planet Transits Observed at Kitt Peak National Observatory. *PASP*, 124, 212-229
- Sagan, C. & Salpeter, E. E., 1976. Particles, environments, and possible ecologies in the Jovian atmosphere. *ApJS*, 32, 737, 755.
- Sale, O. et al. 2020. Eclipse time variations in the post-common envelope binary V470 Cam. *MNRAS*, 499, 3071–3084
- Salz M., Schneider P. C., Czesla S., Schmitt J. H. M. M., 2016. Energy-limited escape revised The transition from strong planetary winds to stable thermospheres. *A&A*, 585, L2.
- Santos, N.C., 2008. Extra-solar planets: Detection methods and results. *New Astronomy Reviews*, 52(2–5), 154–166
- Sarna, M. J., et al. 1995. Are som pre-cataclysmic variables also post-cataclysmic variables?. *MRAS*. 276, 1336-1340
- Schreiber M. R. et al., 2010. Post common envelope binaries from SDSS\* VIII. Evidence for disrupted magnetic braking *A&A*, 513, L7
- Schreiber, M.R. and Gansicke, B.T., 2003. The age, life expectancy, and space density of Post Common Envelope Binaries. *Astronomy and Astrophysics*, 406, 305–321

- Schulze-Makuch, D., A. Méndez, A.G. Fairén, P. Von Paris, C. Turse, G. Boyer, A.F. Davila, M.R.d.S. António, D. Catling, L.N. Irwin. 2011. A two-tiered approach to assessing the habitability of exoplanets. *Astrobiology* 11(10), 1041–1052
- SchwarzR., Schwope A. D., Vogel J., DhillonV. S., Marsh T.R., Copperwheat C., Littlefair S. P., Kanbach G., 2009. Hunting high and low: XMM monitoring of the eclipsing polar HU Aquarii. *A&A*, 496, 833
- Scott, E. R. D., 2007. Chondrites and the Protoplanetary Disk. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35, 577-620.
- Seager, S. and Mallen-Ornelas, G. 2003. A Unique Solution of Planet and Star Parameters from an Extrasolar Planet Transit Light Curve. *Astroph. J.*, 585, 1038-1055.
- Selsis, F., J. Kasting, B. Levrard, J. Paillet, I. Ribas, X. Delfosse. 2007. Habitable planets around the star Gliese 581?. *Astron. Astrophys*, 476(3), 1373–1387
- Serway, Raymond, A. & Robert, J. Beichner, 2000. *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*. Saunders College Publishing, 5th Edition.
- Shapley, H. 1953. *Climatic Change: Evidence, Causes, and Effects*. Harward University Press, UK
- Sharma, S. 2017. Markov Chain Monte Carlo Methods for Bayesian Data Analysis in Astronomy. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 55, 49
- Smith, R. C., 2007. Cataclysmic Variables. arXiv, arXiv:astro-ph/0701654
- Sonbas, E. et al. 2022. Probing Transit Timing Variations of three hot Jupiters: HATP-36b, HATP-56b, and WASP-52b. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 509, 4, 5102-5116.
- Song, S. et al. 2019. An Updated Model for Circumbinary Planets Orbiting the sdB Binary NY Virginis. *The Astronomical Journal*, 157, 184, 6
- Southworth, J. 2010. Homogeneous studies of transiting extrasolar planets – III. Additional planets and stellar models. *MNRAS*, 408, 1689-1713
- Stevenson, D. J. & Lunine, J. I., 1988. Rapid formation of Jupiter by di use redistribution of water vapor in the solar nebula. *Icarus*, 75, 146-155.
- Svechnikov, M. A. 1969. Catalogue of orbital elements, masses and luminosities of close binary stars (Sverdlovsk: Publ. Ural University), Ser. *Astronomia*, issue 5, N 88
- Svechnikov, M. A., & Snezhko, L. I. 1974. in *Evidences of nonstationarity and stellar evolution*, ed. A. A. Boyarchuk, & Yu. N. Efremov (Moscow, Nauka), 181
- Swayne, M.I. et al. 2020. The TESS light curve of the eccentric eclipsing binary 1SWASP J011351.29+314909.7 – no evidence for a very hot M-dwarf companion. arXiv:2007.04653v2
- Swedenborg, E., 1743. *The principia or The first principles of natural things: to which are added the minor principia*. London: The Swedenborg Society.
- Szebehely, V. & McKenzie, R. 1981. Stability of Outer Planetary Systems. *Celest. Mech.*, 23, 3
- Szebehely, V. 1980. Stability of Planetary Orbits in Binary Systems. *Celest. Mech.*, 22, 7
- Szebehely, V. 1984. Review of Concepts of Stability. *Celest. Mech.*, 34, 49
- Szymanski, M. K. 2005. The Optical Gravitational Lensing Experiment. Internet Access to the. *ACTA ASTRONOMICA*. 55, 43-57

- Tian, Y.P. et al. 2009. Period investigation of two RS CVn-type binary stars: RU Cancri and AW Herculis. *Astrophys Space Sci.* 319, 119-124
- Transtrum, M. K., et al. 2010. Why are Nonlinear Fits to Data so Challenging?. *Phys. Rev. Lett.* 104, 060201
- Tregloan-Ree, J. et al. 2013. Transits and starspots in the WASP-19 planetary system. *MNRAS* 428, 3671–3679
- Tregloan-Reed J., Unda-Sanzana E., 2021. Simulations of starspot anomalies within TESS exoplanetary transit light curves. *A&A*, 649, A130.
- Tregloan-Reed, J. et al. 2015. Transits and starspots in the WASP-6 planetary system. *MNRAS* 450, 1760–1769
- Udry, S., X. Bonfils, X. Delfosse, T. Forveille, M. Mayor, C. Perrier, F. Bouchy, C. Lovis, F. Pepe, D. Queloz, et al. 2007. The HARPS search for southern extra-solar planets. *Astron. Astrophys.* 469, 43–47
- Underwood D. R., Jones B. W., Sleep P. N., 2003. The evolution of habitable zones during stellar lifetimes and its implications on the search for extraterrestrial life. *Int. J. Astrobiol.*, 2, 289
- Van de Kamp, P., 1943. The Astrometric Study of Unseen Companions to Near-by Stars. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 55(327), 263
- Van Grootel V., Charpinet S., Brassard P., Fontaine G., Green E. M., 2013. Third generation stellar models for asteroseismology of hot B subdwarf stars A test of accuracy with the pulsating eclipsing binary PG 1336–018. *A&A*, 553, A97
- Venturini, J., Y. Alibert, W. Benz, M. Ikoma. 2015. Critical core mass for enriched envelopes: The role of H<sub>2</sub>O condensation. *Astron. Astrophys.* 576, 114
- Veras D., Fuller J., 2019. Tidal circularization of gaseous planets orbiting white dwarfs. *MNRAS*, 489, 2941
- Vogel, J., Schwöpe, A., Schwarz, R., Kanbach, G., Dhillon, V. S., Marsh, T. R., 2008. On the orbital period of the magnetic cataclysmic variable HU Aquarii. *HIGH TIME RESOLUTION ASTROPHYSICS: The Universe at Sub-Second Timescales*. AIP Conference Proceedings, 984, 264–267
- Von Bloh, W., C. Bounama, M. Cuntz, S. Franck. 2007. The habitability of super-earths in Gliese 581. *Astron. Astrophys*, 476(3), 1365–1371
- Völschow, M. et al. 2016. Eclipsing time variations in close binary systems: Planetary hypothesis vs. Applegate mechanism. *A&A*, 587, A34
- Vuckovic M., Aerts C., Ostensen R., Nelemans G., Hu H., Jeffery C. S., Dhillon V. S., Marsh T. R., 2007. The binary properties of the pulsating subdwarf B eclipsing binary PG 1336-018 (NY Virginis). *A&A*, 471, 605
- Vuckovic M., Østensen R. H., Aerts C., Telting J. H., Heber U., Oreiro R., 2009. Interpreting the line-profile variations of subdwarf B pulsators: the case of PG 1336-018 (NY Virginis). *A&A*, 505, 239
- Wang, X.B., et al., 2014. The Refined Physical Properties Of Transiting Exoplanetary System WASP-11/HAT-P-10. *AJ*, 147, 92
- Warner, B., 1995. *Cataclysmic Variable Stars*. Cambridge University Press, 592s, UK
- Weise, T. 2011. *Global Optimization Algorithms – Theory and Application –*. 3rd ed. <http://www.it-weise.de/projects/book.pdf>

- West R. G., Collier Cameron A., Hebb L., Joshi Y. C., Pollacco D., Simpson E., Skillen I., et al., 2009. The sub-Jupiter mass transiting exoplanet WASP-11b. *A&A*, 502, 395
- Wiegert, P. A. & Holman, M. J. 1997. The Stability of Planets in the Alpha Centauri System. *Astrophys. J.*, 113, 1445
- Williams, J. P. & Cieza, L. A., 2011. Protoplanetary Disks and Their Evolution. *ARA&A*, 49, 67, 117
- Winn J. N., Johnson J. A., Howard A. W., Marcy G. W., Bakos G. Á., Hartman J., Torres G., et al., 2010b. The HAT-P-13 Exoplanetary System: Evidence For Spin–Orbit Alignment And a Third Companion. *ApJ*, 718, 575
- Winn, J. N. & Fabrycky, D. C., 2015. The Occurrence and Architecture of Exoplanetary Systems. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 53(1), 409, 447.
- Winn, J.N. 2010a. Transits and Occultations. arXiv:1001.2010v5
- Wittenmyer, R.A., Horner, J., Tuomi, M., Salter, G.S. et al., 2012. The Anglo-Australian Planet Search. XXII. Two New Multi-planet Systems. *The Astrophysical Journal*, 753(2), 12
- Wolf, M. et al., 2021. Possible substellar companions in dwarf eclipsing binaries: ? SDSS J143547.87+373338.5, NSVS 7826147, and NSVS 14256825. ArXiv, arXiv: 2101.08475v1
- Wolszczan, A. 1994. Toward Planets around Neutron Stars. *Astrophysics and Space Science*, 212(1-2), 67-75.
- Wolszczan, A. 1997. Searches for Planets Around Neutron Stars. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. 68(1), 13-25.
- Wolszczan, A. and Frail, D.A., 1992. A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12. *Nature*, 355, 145–147
- Wolszczan, A., 1994. Confirmation of Earth-Mass Planets Orbiting the Millisecond Pulsar PSR B1257 + 12. *Science*, 264(5158), 538-542.
- Wolszczan, A., 1996. Further Observations of the Planets Pulsar. *IAU Colloq. 160: Pulsars: Problems and Progress*, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 105, 91, Sydney, Australia.
- Wood J. H., Marsh T. R., 1991. IUE Spectra of the Eclipsing Binary NN Serpentis. *ApJ*, 381, 551
- Wright, J. T. and Gaudi, B.S., 2012., *Exoplanet Detection Methods, Part 2, Planets, Stars, and Stellar Systems*, Ed: Oswalt, T., Springer, Netherlands, 1–60
- Wuchterl, G. 1994. Giant planet formation. *Earth, Moon, and Planets*, 67(1-3), 51-65
- Yee S. W., Winn J. N., Knutson H. A., Patra K. C., Vissapragada S., Zhang M. M., Holman M. J., et al., 2020. Searching for orbital decay in a heartbeat star system KIC 3766353. *ApJL*, 888, L5.
- Zhu, L.Y., et al. 2019. A Close-in Substellar Object Orbiting the sdOB-type Eclipsing-Binary System NSVS14256825. arXiv:1904.11664v3.
- Zorotovic M., Schreiber M. R., 2013. Origin of apparent period variations in eclipsing post-common-envelope binaries. *Origin of apparent period variations in eclipsing post-common-envelope binaries*. *A&A*, 549, A95

<b>Adı Soyadı</b>	:	Hüseyin ER
<b>Adres</b>	:	
<b>E-mail</b>	:	
<b>Eğitim</b>		
<b>Lisans</b>	:	Atatürk Üniversitesi, Fizik
<b>Yüksek lisans</b>	:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Astronomi ve Astrofizik Anabilim Dalı
<b>Doktora</b>	:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Astronomi ve Astrofizik Anabilim Dalı
<b>Yayınlar</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Valtonen, M. J. et al., 2016.</b> Primary Black Hole Spin in OJ 287 As Determined by The General Relativity Centenary Flare. <i>The Astrophysical Journal</i>, 819:L37 (6pp)</li> <li>- <b>Zola, S. et al., 2016.</b> A Search for QPOs in the Blazar OJ287: Preliminary Results from the 2015/2016 Observing Campaign. <i>Galaxies</i>, 4, 41</li> <li>- <b>Nasiroglu, I. et al., 2017.</b> Is There a Circumbinary Planet around NSVS 14256825?. <i>The Astronomical Journal</i>, 153:137 (11pp)</li> <li>- <b>Valtonen, M. et al., 2017.</b> Polarization and Spectral Energy Distribution in OJ 287 during the 2016/17 Outbursts. <i>Galaxies</i>, 5, 83.</li> <li>- <b>Dey, L. et al., 2018.</b> Authenticating the Presence of a Relativistic Massive Black Hole Binary in OJ 287 Using Its General Relativity Centenary Flare: Improved Orbital Parameters. <i>The Astrophysical Journal</i>, 866:11 (20pp)</li> <li>- <b>Goyal, A. et al., 2018.</b> Stochastic Modeling of Multiwavelength Variability of the Classical BL Lac Object OJ287 on Timescales Ranging from Decades to Hours. <i>The Astrophysical Journal</i>, 863:175 (20pp)</li> <li>- <b>Er, H. et al., 2021.</b> New observations of the eclipsing binary system NY Vir and its candidate circumbinary planets. <i>MNRAS</i>, 507, 809-817</li> <li>- <b>Sonbas, E. et al., 2022.</b> Probing Transit Timing Variations of three hot Jupiters: HATP-36b, HATP-56b, and WASP-52b. <i>MNRAS</i>, 509, 5102-5116</li> <li>- <b>Ozdonmez, A., Er, H. and Nasiroglu, I. 2023.</b> Investigation on the Orbital Period Variations of NN Ser: Implications for the Hypothetical Planets, the Applegate Mechanism and the Orbital Stability. <i>MNRAS</i>, Yayın Aşamasında; Kabul edildi.</li> <li>- <b>Er, H. et al., 2023.</b> Investigation on Transit Observations of the WASP-10 and WASP-11 systems. <i>New Astronomy</i>, Yayın Aşamasında; Kabul edildi.</li> </ul>		

## ÖZGEÇMİŞ

