

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SEÇİLMİŞ SICAK JÜPİTER TÜRÜ ÖTEGEZEĞENLERİN
YÖRÜNGE DÖNEMLERİNİN KISALMASININ ARAŞTIRILMASI

Ahmet Cem KUTLUAY

ASTRONOMİ VE UZAY BİLİMLERİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2025

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SEÇİLMİŞ SICAK JÜPİTER TÜRÜ ÖTEGEZEĞENLERİN YÖRÜNGE DÖNEMLERİNİN KISALMASININ ARAŞTIRILMASI

Ahmet Cem KUTLUAY

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Özgür BAŞTÜRK
Eş danışman: Prof. Dr. Adrian BARKER

Bu çalışmada, dört adet sıcak Jüpiter sistemi—HATS-18, Kepler-1658, WASP-4 ve WASP-12—için gelgit etkileşimleri dolayısıyla yörünge küçülmesi, geçiş zamanlaması değişimleri (TTV) analizi ve gelgit enerji yayılım modelleri kullanılarak araştırılmıştır. WASP-4b, HATS-18b ve WASP-12b ötegezegenleri için geçiş ortası zamanları, hem tarafımızca gerçekleştirilen gözlemlerden hem de çeşitli literatür kaynaklarından elde edilmiştir. Bu kapsamda HATS-18b ve WASP-12b için 2, WASP-4b için ise 34 yeni fotometrik gözlem elde edilmiştir. Kepler-1658b'nin analizi ise yalnızca arşiv verileri kullanılarak yapılmıştır. Kepler-1658b ve HATS-18b ötegezegenlerinde istatistiksel olarak anlamlı bir yörünge küçülmesi tespit edilmemiştir. Buna karşılık, WASP-4b ve WASP-12b için yörünge küçülmesine dair güçlü kanıtlar elde edilmiştir. WASP-4b için yörünge dönemi değişim oranı $dP_{\text{yör}}/dt = -5.70 \pm 0.22$ ms/yıl, WASP-12b için ise $dP_{\text{yör}}/dt = -29.3 \pm 0.4$ ms/yıl olarak ölçülmüştür. Buna karşılık gelen yıldızın indirgenmiş gelgit kalite faktörleri sırasıyla $Q'_* = (7.9 \pm 0.2) \times 10^4$ ve $Q'_* = (1.7 \pm 0.4) \times 10^5$ olarak hesaplanmış, bu da her iki sistemde de etkin şekilde gerçekleşen gelgit etkileşmesine işaret etmektedir. Bulguların yorumlanabilmesi amacıyla, MESA kodu ile yıldız evrim modelleri oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar, atalet dalgaları (IW) ve içsel kütleçekim dalgaları yoluyla gerçekleşen yayılımın Kepler-1658b'de gözlenen kuadratik eğilimi açıklayabileceğini göstermektedir. Ayrıca, içsel kütleçekim dalgaları WASP-4b ve WASP-12b sistemlerinde gözlenen yörünge küçülmesi oranları ile uyumludur. Bu sebeple bu tür dalgaların sıcak Jüpiterlerin yörünge evriminde önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir.

Haziran 2025, 128 sayfa

Anahtar Kelimeler: ötegezegenler, fotometri, gezegen geçişleri, yörünge küçülmesi, tedirginlik etkileşimleri, geçiş zamanları değişimi, gezegenler: WASP-12b, WASP-4b, HATS-18b, KOI-4b

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF ORBITAL DECAY IN SELECTED HOT JUPITERS

Ahmet Cem KUTLUAY

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

Supervisor: Prof.Dr. Özgür BAŞTÜRK
Co-supervisor: Prof. Dr. Adrian BARKER

In this study, the orbital decay potential of four hot Jupiter systems—HATS-18, Kepler-1658, WASP-4, and WASP-12—was investigated using transit timing variation (TTV) analysis and tidal dissipation models. For WASP-4b, HATS-18b, and WASP-12b, transit mid-times were compiled from both our own observations and various literature sources, resulting in 2 new observations for HATS-18b, 2 for WASP-12b, and 34 for WASP-4b. The analysis of Kepler-1658b was performed solely using archival data. No statistically significant orbital decay was detected for Kepler-1658b and HATS-18b, as the data do not favor models with non-zero period derivatives. In contrast, clear evidence of orbital decay was found for WASP-4b and WASP-12b. The rate of orbital period change was measured as $dP/dt = -5.70 \pm 0.22$ ms/year for WASP-4b and $dP/dt = -29.3 \pm 0.4$ ms/year for WASP-12b. The corresponding stellar tidal quality factors were estimated to be $Q'_* = (7.9 \pm 0.2) \times 10^4$ and $Q'_* = (1.7 \pm 0.4) \times 10^5$, respectively, indicating efficient tidal dissipation in both systems. To interpret these findings, stellar evolution models were computed using MESA. The results suggest that dissipation via inertial waves and internal gravity waves can explain the median quadratic trend in Kepler-1658b. Furthermore, the consistency between internal gravity wave dissipation models and the observed period decay in WASP-4b and WASP-12b suggests that internal wave-driven tidal dissipation plays a significant role in the orbital evolution of close-in giant planets.

June 2025, 129 pages

Key Words: exoplanets, photometry, transits, orbital decay, tidal interactions, transit timing variations (TTV), planets: WASP-12b, WASP-4b, HATS-18b, KOI-4b

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans sürecim boyunca yalnızca akademik sürecime değil, düşünsel gelişime de yön veren; bilgi birikimi, deneyimi ve yol gösterici yaklaşımıyla beni her aşamada destekleyen, rehberliğiyle bu çalışmanın şekillenmesinde belirleyici rol oynayan tez danışmanım Prof. Dr. Özgür Baştürk'e en derin teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimi boyunca katkı ve desteğini esirgemeyen Prof. Dr. Selim Osman Selam'a; bütün bu yolculuk sırasında bilgi ve deneyimini benimle cömertçe paylaşan, yapıcı desteğiyle bu yolculukta büyük emeği olan Arş. Gör. Selçuk Yalçınkaya'ya; bu çalışmaya önemli katkılar sağlayan değerli eş danışmanım Prof. Dr. Adrian J. Barker'a minnettarım.

Hayatımın her anında yanımda olan, sevgisi ve desteğiyle beni her zaman güçlendiren annem Tomris Kutluay'a ve hatırasını soyadım gibi ölene kadar yanımda taşıyacağım merhum babam Ertan Kutluay'a derin şükranlarımı sunuyorum.

Bu süreçte beni en çok gören, duyan ve dinleyen, bu çalışmanın somutlaşması için bana en büyük motivasyonu veren sevgili Hunda Ergül'e teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, TÜBİTAK tarafından 2210-A Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı ve 123F293 numaralı TÜBİTAK-1001 projesi kapsamında desteklenmiştir. Kendilerine destekleri için teşekkür ederim.

Bu çalışma kapsamında, 24BT100-2148 no'lu proje ile T100 teleskobunu kullanma imkânı sağlayan TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'ne ve 25BT80.01 no'lu proje ile T80 teleskobunun kullanımına olanak tanıyan Ankara Üniversitesi Kreiken Gözlemevi'ne değerli katkıları için teşekkür ederim.

Ahmet Cem KUTLUAY
Ankara, Haziran 2025

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	6
2.1 Gelgit Etkileşmeleri	6
2.2 Gelgit Etkileşmelerinde Enerji Yayılım Mekanizmaları	12
2.2.1 Denge gelgitleri	12
2.2.2 Atalet dalgaları	14
2.2.3 İçsel kütleçekim dalgaları	15
3. KAYNAK ÖZETLERİ	18
3.1 HATS-18b	18
3.2 Kepler-1658b (KOI-4b).	20
3.3 WASP-4b.	24
3.4 WASP-12b.	27
4. MATERYAL VE YÖNTEM	32
4.1 Cisimlerin Seçilmesi	32
4.2 Geçiş Işık Eğrilerinin Elde Edilmesi	35
4.3 Yer-tabanlı Fotometrik Gözlemler	36
4.4 Gözlemlerin İndirgenmesi ve Normalizasyonu.	39
4.4.1 Yer-tabanlı fotometrik gözlemler	39
4.4.2 ETD, TESS, Kepler ve literatür verileri	43
4.5 Işık Eğrilerinin Modellenmesi.	44
4.6 Işık Eğrilerinin Seçilmesi	46
4.7 Geçiş Zamanları Değişimi Analizi	49
4.8 Gelgit Etkilerinin Modellenmesi	52
5. BULGULAR	54
5.1 HATS-18b	56
5.2 Kepler-1658b.	59
5.3 WASP-4b.	66
5.4 WASP-12b.	71
6. TARTIŞMA VE SONUÇ	77
KAYNAKLAR	91
EKLER	113
ÖZGEÇMİŞ	128

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A	Gelgitin genliği
B_{kl}	Kuadratik ve lineer modeller için Bayes faktörü
B_{ek}	Eksen dönmesi ve kuadratik modeller için Bayes faktörü
B_{el}	Eksen dönmesi ve lineer modeller için Bayes faktörü
CO	Karbon monoksit
d	Yıldız ve gezegen arası uzaklık
D_ν	Viskozite kaynaklı enerji yayılımı
E	Çevrim
e	Yörünge dışmerkezliği
G	Evrensel kütleçekim sabiti, $6.67259 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2\text{kg}^{-2}$
i	Yörünge eğimi
k	Love sayısı
k_{2p}	Gezegenin ikinci dereceden Love sayısı
k_{2*}	Yıldızın ikinci dereceden Love sayısı
K	Kelvin
km/s	kilometre/saniye
L_o	Yörünge açısal momentumu
L_s	Yıldızın dönme açısal momentumu
$m \sin i$	Minimum kütle
M_*	Yıldızın kütlesi
M_c	İkinci gezegenin kütlesi
M_p	Gezegen kütlesi
$M_\odot$	Güneş kütlesi, $1.99 \times 10^{33} \text{ g}$
M_{crit}	İçsel kütleçekim dalgaları için kritik kütle
$M_{\text{jüp}}$	Jüpiter kütlesi, $1.8986 \times 10^{30} \text{ g}$ ya da $0.0009546 M_\odot$
$ms/yıl$	milisaniye/yıl
P_{rot}	Yıldızın dönme dönemi
P_{tide}	Gelgit dönemi
$P_{\text{yör}}$	Gezegenin yörünge dönemi
Q	Gelgit kalite faktörü
Q'_*	Yıldızın indirgenmiş gelgit kalite faktörü
Q'_{IW}	Atalet dalgalarına ait gelgit kalite faktörü
Q'_{IGW}	İçsel kütleçekim dalgalarına ait gelgit kalite faktörü
$Q'_{\text{eq}}, Q'_{\text{EQ}}$	Denge gelgitlerine ait gelgit kalite faktörü
r	Yarıçap
R_*	Yıldızın yarıçapı
$R_\odot$	Güneşin yarıçapı, $6.96 \times 10^5 \text{ km}$
$R_{\text{jüp}}$	Jüpiter yarıçapı, $7.1492 \times 10^4 \text{ km}$
δ	Geçiş derinliği
δR	Gelgit şişiminin yarıçapı
ρ	Yoğunluk
ρ_*	Yıldızın ortalama yoğunluğu
ψ	Yıldızın dönme eksenini ile yörünge düzlemi arasındaki açı
ψ_p	Pertürbasyon potansiyeli
$[Fe/H]$	Metal bolluğu; Güneş metal bolluğu cinsinden

σ	Standart sapma
T_0	Geçiş ortası zamanı
T_{eff}	Etkin sıcaklık
T_{eq}	Denge sıcaklığı
t_{ms}	Yıldızın anakol ömrü
t_{diss}	Gelgit etkileşmelerinde enerji yayılımı karakteristik zaman ölçeği
τ	Yörünge küçülmesi karakteristik zaman ölçeği
ω	Enberinin boyları
ω_{tide}	Gelgit frekansı
$\dot{P}$	Yörünge döneminin zamana karşı değişimi
$\dot{v}_r$	Yıldızın radyal doğrultudaki ivmesi
α	Gelgit açısı
Γ	Tork
λ	Yıldızın dönme eksenini ile yörünge düzlemi arasındaki açının izdüşümü
Ω_o	Gezegenin yörünge frekansı
Ω_s	Yıldızın dönme frekansı
q	Yıldız ve gezegen kütle oranı, M_p/M_*

Kısaltmalar

AB	Astronomi Birimi, 1.49×10^8 km (Yer-Güneş arası ortalama uzaklık)
ADU	Analog to Digital Unit
AIC	Akaike Information Criteria
AO	Adaptif Optik
AUKR	Ankara Üniversitesi Kreiken Gözlemevi
BIC	Bayesian Information Criteria
BJD	Güneş sisteminin kütle merkezine indirgenmiş Julyen günü
CCD	Charged-coupled device
CHEOPS	CHAracterising ExOPlanets Satellite
CoRoT	Convection, Rotation and planetary Transits
DEC	Dik açıklık
EQ	Denge gelgitleri
ESO	European Southern Observatory
ETD	Exoplanet Transit Database
FIES	Fiber-fed Echelle Spectrograph
HARPS	High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher
HATSouth	Hungarian Automated Telescope South
HIRES	High Resolution Echelle Spectrometer
IGW	İçsel kütleçekim dalgaları
IW	Atalet dalgaları
JD	Jülyen Günü
JWST	James Webb Space Telescope
MAST	Mikulski Archive for Space Telescopes
MCMC	Monte Carlo Markov Chain
MESA	Modules for Experiments in Stellar Astrophysics
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NWL	Dalga özelliği olmayan
O-C	Observed minus Calculated

PARSEC	PAdova and TRieste Stellar Evolution Code
PLATO	PLAnetary Transits and Oscillations of stars
PNR	Fotometrik Gürültü Oranı
POET	Planetary Orbital Evolution due to Tides
RA	Sağ açıklık
RV	Dikine hız
SDSS	Sloan Digital Sky Survey
SOPHIE	Spectrographe pour l’Observation Stellaire et Planétaire
TDB	Barisentrık Dinamik Zaman
TESS	Transiting Exoplanet Survey Satellite
TRAPPIST	TRAnsiting Planets and Planetesimals Small Telescope
TTV	Transit Timing Variations
TUG	TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi
UTC	Eşgüdümlü Evrensel Zaman
WASP	Wide Angle Search for Planets
WKB	Wentzel–Kramers–Brillouin
WNL	Weakly Non-Linear

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1	Sıcak Jüpiter popülasyonu için yörünge dönemine karşılık gezegen kütlesi	2
Şekil 1.2	Sıcak Jüpiter grubuna ait yörünge dönemine karşılık yörünge dışmerkezliği dağılımı	3
Şekil 1.3	Sıcak Jüpiter barınak yıldızlarının kütlelerinin gezegenin yörünge dönemine göre dağılımı	4
Şekil 2.1	Gelgit etkileşimi sonucunda A cisminin fiziksel yapısında meydana gelen değişim (gelgit şişimi) için Biazzo vd. (2022)'den uyarlanan illüstrasyon.	7
Şekil 2.2	Gelgit etkileşimleri modeline ilişkin akışkan referans düzlemi.	10
Şekil 2.3	$1M_{\odot}$ kütleli bir barınak yıldızına ait denge gelgitleri için Barker (2020)'den alınan yaşa bağlı Q' değerleri.	13
Şekil 2.4	Atalet dalgalarına ait Q' değerlerinin yaşa ve kütleyle bağlı değişimi.	15
Şekil 2.5	İçsel kütleçekim dalgalarına ait Q' değerlerinin barınak yıldız kütle-sine ve yaşına bağlı değişimi.	17
Şekil 3.1	HATS-18b'nin literatürde bildirilen TTV diyagramları	20
Şekil 3.2	Kepler-1658b sistemine ait TTV diyagramı.	22
Şekil 3.3	WASP-4b'ye ait TTV diyagramları.	25
Şekil 3.4	WASP-12B ve WASP-12C bileşenlerine ait görüntü ve astrometrik ölçümler.	29
Şekil 4.1	Yörünge küçülmesinin üstel katlanmalı zaman ölçeği (τ_a) ve dönme-dolanma senkronizasyon zaman ölçeği ($\tau_{\omega*}$) parametrelerinin yörünge dönemine karşı dağılımı.	34
Şekil 4.2	WASP-12'nin ve mukayese yıldızlarının içinde bulunduğu T80 tarafın-dan gözlenen alan.	38
Şekil 4.3	WASP-12'nin ve mukayese yıldızlarının içinde bulunduğu T100 tarafın-dan gözlenen alan.	38
Şekil 4.4	Farklı teleskoplar ve filtrelerle gerçekleştirilen WASP-12b geçiş gözlem-lerine ait ışık eğrileri.	40
Şekil 4.5	El Sauce Gözlemevindeki HATS-18b'nin geçiş gözlemlerine ait ışık eğrileri.	42
Şekil 5.1	HATS-18b'nin lineer ve kuadratik modeller uyumlanmış TTV di-yagramı.	57
Şekil 5.2	HATS-18b'nin eksen dönmesi modeli uyumlanmış TTV diyagramı.	59
Şekil 5.3	Kepler-1658b'nin lineer ve kuadratik modeller uyumlanmış TTV diyagramı	61
Şekil 5.4	Kepler-1658b'nin TTV diyagramına ilişkin Lomb-Scargle analizleri	63
Şekil 5.5	Kepler-1658'e ait denge gelgitlerinin gelgit kalite faktörünün (Q'_{eq}) yaşa göre değişimi.	64
Şekil 5.6	Kepler-1658'e ait atalet dalgalarının gelgit kalite faktörünün (Q'_{IW}) yaşa göre değişimi.	64
Şekil 5.7	Kepler-1658'e ait içsel kütleçekim dalgalarının gelgit kalite fak-törünün (Q'_{IGW}) yaşa göre değişimi.	65

Şekil 5.8	Kepler-1658'e ait içsel kütleçekim dalgalarının uyarılması için gereken kritik kütlenin (M_{crit}) yaşa göre değişimi.	65
Şekil 5.9	WASP-4b'nin lineer ve kuadratik modeller uyumlanmış TTV diyagramı.	68
Şekil 5.10	WASP-4b'nin eksen dönmesi modeli uyumlanmış TTV diyagramı.	69
Şekil 5.11	WASP-4'e ait içsel kütleçekim dalgalarının gelgit kalite faktörünün (Q'_{IGW}) yaşa göre değişimi.	70
Şekil 5.12	WASP-4'e ait içsel kütleçekim dalgalarının uyarılması için gereken kritik kütlenin (M_{crit}) yaşa göre değişimi.	70
Şekil 5.13	WASP-4'e ait denge gelgitlerinin gelgit kalite faktörünün (Q'_{EQ}) yaşa göre değişimi	71
Şekil 5.14	WASP-12b'nin lineer ve kuadratik modeller uyumlanmış TTV diyagramı.	72
Şekil 5.15	WASP-12b'nin eksen dönmesi modeli uyumlanmış TTV diyagramı.	74
Şekil 5.16	WASP-12'ye ait içsel kütleçekim dalgalarının gelgit kalite faktörünün (Q'_{IGW}) yaşa göre değişimi	75
Şekil 5.17	WASP-12'ye ait içsel kütleçekim dalgalarının uyarılması için gereken kritik kütlenin (M_{crit}) yaşa göre değişimi.	75
Şekil 5.18	WASP-12'ye ait denge gelgitlerinin gelgit kalite faktörünün (Q'_{eq}) yaşa göre değişimi	76
Şekil 6.1	HATS-18b'nin mevcut lineer efemerisinden beklenen sapma.	79
Şekil 6.2	Kepler-1658'in sıcaklığının (T_{eff}) yaşa göre değişimi.	83
Şekil 6.3	WASP-4'ün sıcaklığının (T_{eff}) yaşa göre değişimi.	85
Şekil 6.4	WASP-12'nin sıcaklığının (T_{eff}) yaşa göre değişimi.	88

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1	WASP-12b'nin yörünge küçülmesi analizine ilişkin literatür sonuçları.	31
Çizelge 4.1	Farklı kaynaklardan elde edilen ışıık eğrisi verisi sayıları.	36
Çizelge 4.2	Bu çalışmada analiz edilen sistemlere ait TESS sektörleri ile gözlem aralıkları.	36
Çizelge 4.3	ESO La Silla Gözlemevi'ndeki 1.54m Danimarka Teleskobu ile yapılan WASP-4b gözlemlerine ilişkin bilgiler	41
Çizelge 4.4	El Sauce Gözlemevi'ndeki CDK20 teleskobu ve ESO La Silla Gözlemevi'ndeki TRAPPIST-South teleskobu ile gerçekleştirilen WASP-4b ve HATS-18b geçiş gözlemlerine ait özet bilgiler	43
Çizelge 4.5	EXOFAST modellerinde kullanılan başlangıç parametre değerleri.	45
Çizelge 4.6	TTV analizi için seçilen ışıık eğrisi miktarları.	48
Çizelge 5.1	Tez çalışmasına dahil edilen sistemlerin mutlak parametreleri	56
Çizelge 5.2	HATS-18b'nin TTV diyagramına uyumlanan model sonuçları.	58
Çizelge 5.3	Kepler-1658b'nin TTV diyagramına uyumlanan model sonuçları.	62
Çizelge 5.4	WASP-4b'nin TTV diyagramına uyumlanan model sonuçları.	67
Çizelge 5.5	WASP-12b'nin TTV diyagramına uyumlanan model sonuçları.	73
Çizelge 6.1	Tez çalışmasına dahil edilen ötegezegen sistemleri için τ_a ve τ_{ω_*} değerleri.	77

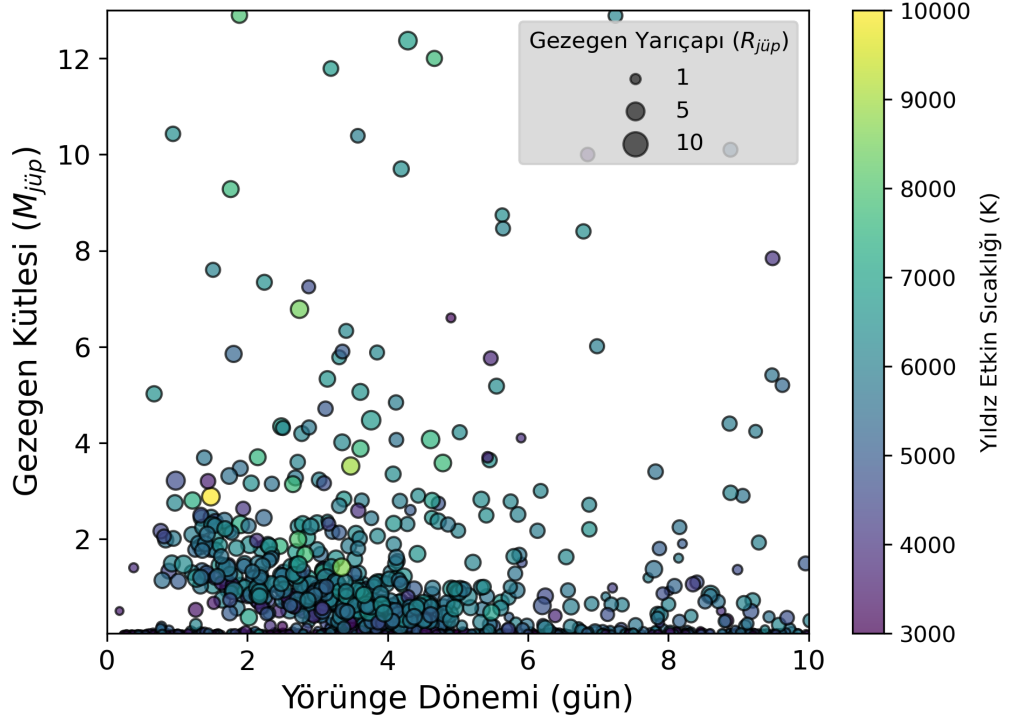
1. GİRİŞ

Ötegezegen çalışmaları, 1992 yılında bir pulsarın etrafında keşfedilen ilk ötegezegenin (PSR B1257+12; Wolszczan ve Frail, 1992) ardından hem teorik yaklaşımların hem de gözlemsel tekniklerin gelişimiyle birlikte astronominin en hızlı büyüyen alt dallarından biri haline gelmiştir. Bu keşiften bu yana geçen sürede, yıldız-gezegen sistemlerinin oluşumu ve evrimine dair kuramsal modellerin gelişimi ve ötegezegen örneklerinin her geçen gün büyümesi sayesinde, bu sistemlerin fiziksel yapılarını detaylı biçimde incelemek ve zaman içerisinde yörünge dönemi, dışmerkezlilik, yörünge eğikliği gibi yörünge parametrelerinde ve barınak yıldızın dönme dönemi gibi barınak yıldızla ilişkin parametrelerde meydana gelen değişimleri takip etmek mümkün olmuştur.

4 Nisan 2025 itibariyle Encyclopaedia of Exoplanetary Systems¹ verilerine göre, keşfi onaylanmış 7442 ötegezegenin 773'ünü sıcak Jüpiter türü gezegenler oluşturmaktadır. Bu sayı, gezegen keşfi açısından en verimli iki yöntem olan geçiş ve dikine hız (ing. radial velocity, RV) yönteminin bu tür gezegenleri bulmakta daha başarılı olması nedeniyle örneklerin yaklaşık olarak %10'unu oluşturmaktadır ve gelecekte PLATO, TESS gibi uzay teleskoplarının da katkısıyla birlikte tüm ötegezegen grubunun yaklaşık olarak %1'ini oluşturduğu tahmin edilen (Howard vd. 2012, Santerne vd. 2012) sıcak Jüpiterlerin tüm gezegen popülasyonu içindeki yüzdesine giderek yaklaşması beklenmektedir.

Sıcak Jüpiterler, Jüpiter kütlelerinin üçte birinden büyük ancak kahverengi cüce sınırı olan 13 Jüpiter kütlelerini ($0.33M_{\text{jüp}} < M_p < 13M_{\text{jüp}}$) aşmayan gezegenler olarak tanımlanır (Deeg ve Belmonte 2018). Bu gezegenler, genellikle 10 günden kısa yörünge dönemlerine sahiptirler ($P_{\text{yör}} < 10$ gün; Wang 2015) ve Kepler'in üçüncü yasasından yola çıkarak bu gezegen türünün barınak yıldızlarına kabaca 0.05 AB'den daha yakın olduğu söylenebilir. Kısa yörünge dönemleri ve büyük yarıçapları sebe-

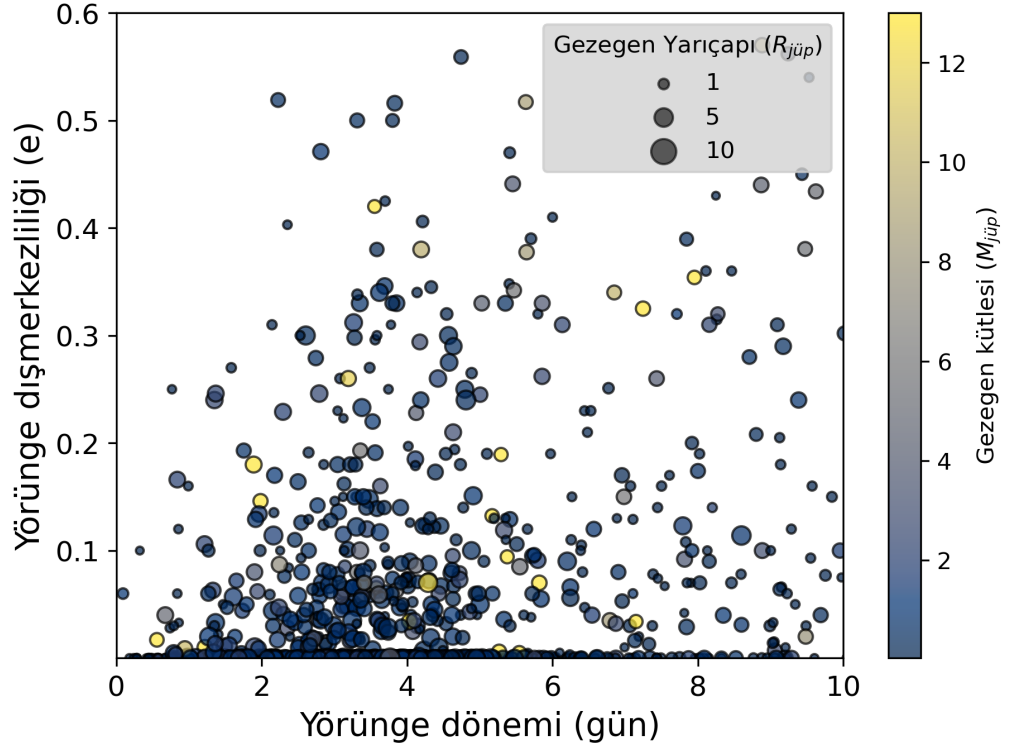
¹<https://exoplanet.eu/catalog/>



Şekil 1.1 Sıcak Jüpiter popülasyonu için yörünge dönemine karşılık gezegen kütlesi Exoplanet.eu 04/04/2025 tarihli verilerine dayanmaktadır (Schneider vd. 2011).

biyle geçişlerinin gözlenmesi daha olası olduğu için, bu grubun içerisinde bulunduğu fiziksel mekanizmaları incelemek için örneklem her geçen gün artmaktadır (Deeg ve Belmonte 2018).

Sıcak Jüpiter grubu gezegenler için yörünge dönemi-kütle ilişkisi Şekil 1.1’de gösterilmiştir. Sıcak Jüpiterler popülasyonunun büyük bir bölümü, $P_{\text{yör}} < 5$ gün olan yörüngelerde dolanmaktadır ve bu durumda sıcak Jüpiter ve barınak yıldızı arasındaki kütle çekim etkileri oldukça yüksek olacaktır. Bu etkilerden en çok etkilenen parametrelerden birisi yörünge daireselliğidir, zira bu etkiler sonucunda yörünge daireselleşme zaman ölçeği (ing. circularization timescale) çok küçük olduğundan birçok sıcak Jüpiter yörüngesinin daireselleşmesi ($e \rightarrow 0$) beklenir (Penev 2024). Bu bağlamda, söz konusu sistemlerdeki gelgit etkileşimlerinin taşıdığı önem dikkat çekmekte ve sıcak Jüpiter evriminin ayrıntılı şekilde araştırılması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

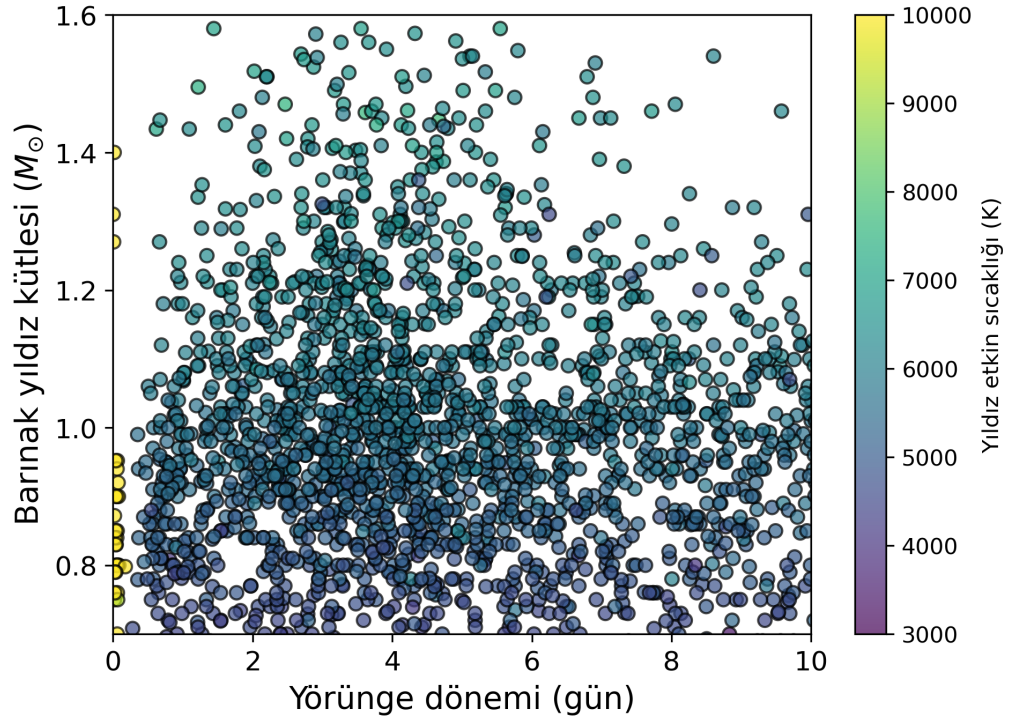


Şekil 1.2 Sıcak Jüpiter grubuna ait yörünge dönemine karşılık yörünge dışmerkezliği dağılımı

Exoplanet.eu 04/04/2025 tarihli verilerine dayanmaktadır (Schneider vd. 2011).

Sıcak Jüpiterlerin kütle çekimsel olarak bağlı oldukları yıldızlara bakıldığında, 773 sıcak Jüpiter arasından 391'i Güneş-benzeri ($0.8M_{\odot} < M_{*} < 1.2M_{\odot}$; Kippenhahn vd. 2013) barınak yıldızların etrafında dolandığı görülür (Şekil 1.3). Ayrıca, Hamer ve Schlaufman (2019), sıcak Jüpiter barınak yıldızlarının galaktik hız dağılımının benzer alan yıldızlarına kıyasla belirgin şekilde daha dar olduğunu göstermiştir. Bu durum, sıcak Jüpiter barınak yıldızlarının ortalama olarak daha genç yıldızlar olduğunu düşündürmektedir; çünkü düşük hız dağılımı, genç yıldız popülasyonlarıyla ilişkilidir. Bu araştırmada analiz edilen sıcak Jüpiter sistemlerinde, barınak yıldızların kütlesi 0.8 ile $1.3M_{\odot}$ arasında değişmektedir ve bu barınak yıldızların anakol evriminin sonunda ya da alt-dev evresine geçmiş olması beklenmektedir, zira bu sistemlerde karşılaşılan gelgit etkileşimleri, özellikle konvektif ve radyatif bölgelerdeki fiziksel süreçlerle doğrudan bağlantılıdır.

Sıcak Jüpiterlerin evrimi süresince gelgit etkileşimleri belirleyici bir rol oynar. Bu etkileşimler, gezegenin barınak yıldızına yakınlığı nedeniyle hem yıldızın hem de gezegenin iç yapılarında enerji değişimine yol açarak yörünge ve dönme parametrelerinde zamana bağlı değişimlere neden olabilir. Özellikle yıldızın konvektif ve radyatif bölgelerinde meydana gelen etkiler, sistemdeki açısal momentumun yıldızdan gezegene (ya da tam tersi) transferine katkıda bulunur ve gezegenin yörüngesinde küçülme (ing. orbital decay; Zahn 1977, Hut 1980, Terquem vd. 1998, Barker 2011), yörünge dışmerkezliğinde azalma ya da dönme-dolanma kilitlenmesine (senkronizasyonuna) yönelik evrimsel süreçleri tetikleyebilir. Bu nedenle, sıcak Jüpiterlerin mevcut yörünge yapılarını anlayabilmek ve gelecekteki evrimlerini öngörebilmek adına yörünge dönemi değişimi analizlerinin iyi tanımlanmış bir ötegezegen örneklemi üzerinden gerçekleştirilmesi ve gelgit mekanizmalarının etkili bir şekilde modellenmesi büyük önem taşımaktadır (Winn 2019).



Şekil 1.3 Sıcak Jüpiter barınak yıldızlarının kütlelerinin gezegenin yörünge dönemine göre dağılımı

Exoplanet.eu 04/04/2025 tarihli verilerine dayanmaktadır (Schneider vd. 2011).

Sıcak Jüpiterlerin yörünge küçülmesi sonucunda barınak yıldızları tarafından "yutulmalarına" dair doğrudan gözlemsel bir kanıt yakın zamanda Lau vd. (2025) tarafından sunulmuştur. Araştırmacılar, ZTF SLRN-2020 adlı sistemin James Webb Uzay Teleskobu (JWST) ile yapılan gözlemlerini raporlamışlardır. Bu sistemde, büyük olasılıkla bir sıcak Jüpiter yörüngesinin gelgit etkileşimleri sonucunda spiral çizerek yıldızının üzerine çökmesi sonucu gerçekleşen sönük bir "kırmızı nova" olayı yaşanmıştır. Orta-kızılöte bölge tayflarında CO ve PH₃ gibi moleküllere ait emisyonların yanı sıra sıcak ve soğuk olmak üzere iki farklı toz bileşeni tespit edilmiştir. Bu özellikler, gezegenin parçalanmasının ardından oluşan kalıntılara işaret etmektedir. Bu olay, gelgit etkileşimlerinin dev gezegenlerin içe doğru göçünü ve sonunda Güneş benzeri yıldızlar tarafından yok edilmesini tetikleyebileceğine dair en güçlü kanıtlardan biri olarak öne çıkmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında HATS-18b, Kepler-1658b, WASP-4b ve WASP-12b ötegezegenlerinin gelgit etkileşimlerine bağlı yörünge küçülmesi potansiyeli, gözlemsel veriler ve teorik modeller aracılığıyla araştırılmıştır. İlk olarak ilgili ötegezegenlere ait farklı kaynaklardan geçiş gözlemleri elde edilmiştir. Bu geçiş gözlemlerinin fotometrik analizi AstroImageJ (Collins vd. 2017a) ile yapılmıştır ve sonrasında normalize edilmiş ve hava kütlesi etkisinden arındırılmış ışık eğrileri EXOFAST modelleme aracının (Eastman vd. 2013) internet versiyonu kullanılarak modellenmiştir. Bu modellerden elde edilen geçiş ortası zamanı ve belirsizlikleri kullanılarak TTV diyagramları oluşturulmuş ve bu diyagramlara uyumlanan sabit yörünge dönemi ve değişen yörünge dönemi modelleri aracılığıyla yörünge dönemi değişiminin olasılığı incelenmiştir. Olası yörünge dönemi değişimlerinin yıldız evrimi ve gelgit etkisi modelleri ile karşılaştırılması için Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA) v24.03.1 (Paxton vd. 2011, 2013, 2015, 2018, 2019) kullanılarak yıldız iç yapısına ait parametreler yıldız evriminin farklı safhaları için belirlenmiştir ve bu parametreler aracılığıyla gelgit etkileşiminin verimliliği farklı mekanizmalar için yaşa bağlı fonksiyonlar halinde hesaplanmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Gelgit Etkileşimleri

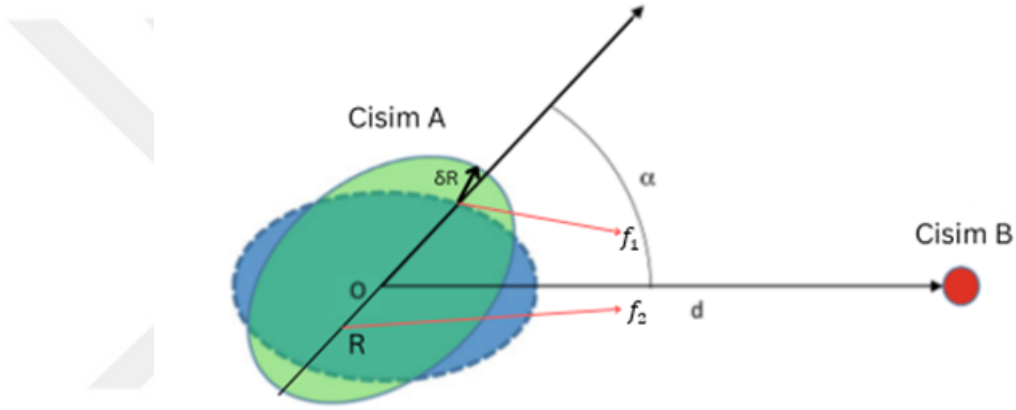
Çift yıldız ya da yıldız-gezegen gibi ikili sistemlerin denge durumu, belirli fiziki koşullara dayanır. Hut (1980) çalışmasında bu koşulları şu şekilde tanımlamıştır:

- i) Eş-düzlemsellik: Barınak yıldızın ekvator düzlemi ile gezegenin yörünge düzleminin paralel olması durumudur. Bu olgu yörünge eğimi (i) ya da eksen eğikliği (λ, ψ) parametreleri ile belirlenebilir. Eş-düzlemsel yörüngeler hizalı (ing. aligned) yörüngeler olarak da bilinir.
- ii) Çembersellik: Yörünge'nin çembersel olması durumudur ($e = 0$).
- iii) Eş-dönme: Bileşenlerin dönme dönemlerinin (P_{rot}) dolanma dönemlerine ($P_{yör}$) eşit olması; başka bir deyiş ile, sistemin dönme-dolanma kilitlenmesinde olması durumudur.

Bu üç koşuldan bir tanesinin ya da fazlasının sağlanmadığı senaryolarda, ikili sistem zaman içerisinde pertürbasyona uğrar ve bu pertürbasyon denge durumunu sağlamaya yöneliktir (Ogilvie 2014). İkili sistemin denge durumunda olup olmadığını anlamak için, yıldızın dönme açısal momentumu ve gezegenin yörünge açısal momentumundan faydalanılabilir. Eğer toplam açısal momentumun en az dörtte üçünü yörünge açısal momentumu oluşturmuyorsa ($L_o < 3L_s$), sistem stabil değildir (Hut 1980, Ogilvie 2014, Penev 2024).

Gelgit etkileşiminin fiziksel yapısını daha iyi anlamak adına problemin en başına dönmek gerekmektedir. Gelgitler iki adet nokta kaynağın birbirine uyguladığı kütleçekim kuvveti üzerinden düşünülecek olursa, bu problem klasik bir “iki cisim problemi” dışında başka bir şey ifade etmemektedir. Fakat, söz konusu ikili bir sıcak Jüpiter ve Güneş benzeri bir barınak yıldızdan oluşuyorsa, bileşenlerin farklı noktalarındaki kütle çekim kuvvetleri arasındaki fark sistemdeki cisimleri nokta kaynak kabul edemeyecek kadar büyük olmalıdır ve cisimlerin yörünge hareketi süresince bu kuvvet

sıcak Jüpiterin (Şekil 2.1’de B cismi) ve barınak yıldızın (Şekil 2.1’de A cismi) fiziksel yapısında değişikliğe sebep olmalıdır, zira sıcak Jüpiter ve barınak yıldız, akışkan yapıya sahip cisimler olduklarından, aralarındaki çekim kuvveti nedeniyle fiziksel olarak deformasyona uğrayacaktır. Gelgit etkileşimleri, en genel haliyle sistemin denge durumunda olup olmamasına bağlı olarak, bu çekim kuvvetlerindeki farklılıklardan kaynaklanır (Biazzo vd. 2022). Ay-Dünya arasındaki çekim etkilerinden kaynaklı Dünya’nın akışkan yüzeyinin uğradığı periyodik deformasyon, bahsedilen etkinin en bilinen örneklerinden birisidir.



Şekil 2.1 Gelgit etkileşimi sonucunda A cisminin fiziksel yapısında meydana gelen değişim (gelgit şişimi) için Biazzo vd. (2022)’den uyarlanan illüstrasyon.

Problemin kolaylığı açısından, başlangıçta sadece barınak yıldızın (Şekil 2.1’de A cismi) sonlu hacme sahip olan R yarıçaplı bir cisim olduğu varsayılın. Bu durumda, B’nin A’ya uyguladığı kütle çekim kuvveti, A üzerindeki noktalar ile B arasındaki mesafeye bağlı olarak değişir. Ancak, bu kuvvetin uygulanması sırasında bir yandan da A’nın dönme hareketi ve B’nin yörünge hareketi devam etmektedir. Bundan dolayı, toplam kütle çekim kuvveti, A’nın yüzeyi ve iç kısmında eşit olmayacaktır. A’nın akışkan bir madde olduğunu varsayarsak, yörünge hareketi boyunca A üzerinde farklı büyüklüklerde uygulanan bu kütle çekim kuvveti, A’nın şeklinde bir değişikliğe yol açacaktır. Bu değişiklik, Ay-Dünya örneğinden de bilindiği gibi, A’nın yakın ve uzak taraflarında yarı-hidrostatik bir şişme olarak tanımlanabilir

(Şekil 2.1). Bu şişmeye "gelgit şişimi" denir. Çembersel yörünge ($e = 0$) ve dönme-dolanma hizalanması ($\lambda = 0$) varsayıldığında, gelgit şişimine ait yarıçap ve kütle, Denklem 2.1 ve 2.2 aracılığıyla hesaplanabilir.

$$\frac{\delta R}{R} \approx \frac{\frac{GM_B R}{d^3}}{\frac{GM_A}{R^2}} = \frac{M_B}{M_A} \left(\frac{R}{d} \right)^3 \quad (2.1)$$

$$\delta M_A \approx \frac{\delta R}{R} M_A \quad (2.2)$$

Oluşan gelgit şişimi, $P_{yör} = P_{rot}$ olduğu senaryoda yörünge hareketi boyunca cisimlerin merkezlerini birleştiren OB çizgisi üzerinde yer alırdı. Ancak, $P_{yör} \neq P_{rot}$ olduğunda;

- i) $P_{yör} < P_{rot}$ için gelgit şişimi OB çizgisinin ilerisinde oluşur.
- ii) $P_{yör} > P_{rot}$ için gelgit şişimi OB çizgisinin gerisinde oluşur.

İki senaryoda da gelgit şişimleri ile OB arasında bir α açısı oluşur ve bu açığa gelgit açısı ismi verilir. Zayıf sürtünme yaklaşımı ($\delta R \ll R$) kabulü altında (Alexander 1973), gelgit açısı Denklem 2.3 ile verilir.

$$\alpha = \frac{\Omega_s - \Omega_o}{t_{diss}} \cdot \frac{R^3}{GM_A} \quad (2.3)$$

Oluşan bu gelgit açısı, her iki cismin birbirlerine dönük yüzleri arasındaki büyüklüğü ile birbirlerine uzak yüzleri arasındaki kütle çekim kuvvetinin farkından kaynaklı olarak A cismi üzerinde bir tork oluşturur (Denklem 2.4) ve A'nın açısal momentumu bu sebeple değişir. Eğer ki oluşan bu tork A cisminin açısal momentumunu arttırmaya yönelik ise ($\Gamma = dL/dt > 0$), toplam açısal momentumun korunumu gereği A'nın dönmesine B'nin yörünge hareketinden açısal momentum transfer edilir. Bu transfer sonucunda, B cisminin açısal momentumu azalmalıdır ve bu da yine açısal momentumun korunumu gereği B cisminin daha küçük bir yörüngede hareket

etmesini gerektirir. Bütün bu sürece yörünge küçülmesi (ing. orbital decay) adı verilir. Yörünge küçülmesi sonucunda ya iki cisim evrim sürecinin bir noktasında dönme-dolanma kitlenmesi altına girer ve yörünge Hut (1980)'de belirtilen koşulları sağlayarak denge durumuna ulaşır, ya da gezegen (B cismi) barınak yıldızının (A cismi) Roche limitinin içine girip gelgit etkileri sebebiyle fiziksel bütünlüğünü kaybedinceye dek bu süreç devam eder. Bu süreç boyunca A cisminin dönme hızının da artması beklenir. Öte yandan, A'ya uygulanan tork negatif olduğu durumda da ($\Gamma = dL/dt < 0$), A'nın dönmesinden B'nin yörüngesine açısal momentum transferi gerçekleşir ve sonucunda da B daha büyük bir yörüngede hareket etmeye zorlanır (ing. orbital growth).

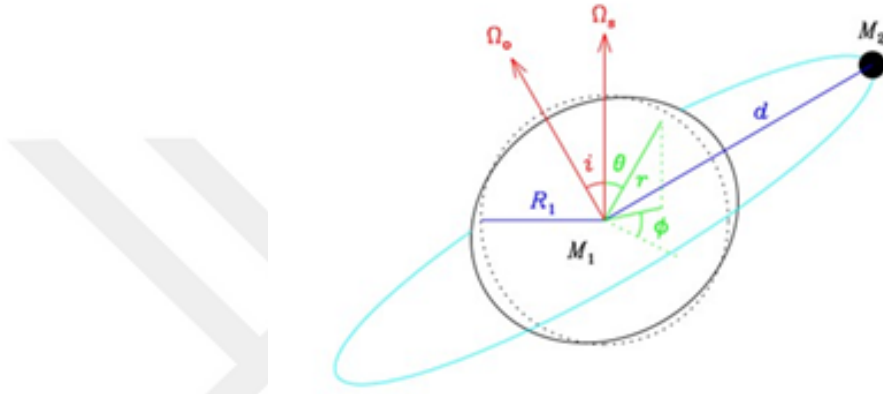
$$\Gamma = -\frac{GM_B}{R} \left(\frac{R}{d}\right)^6 \sin \alpha = -\frac{(\Omega_s - \Omega_o)}{t_{\text{diss}}} q^2 M_A R^2 \left(\frac{R}{d}\right)^6 \quad (2.4)$$

Burada not edilmesi gereken bir konu, cisimlere etkiyen gelgit kuvvetleri uzaklığın kübü ile ters orantılı iken ($\propto d^{-3}$), torkun cisimler arasındaki uzaklığa yüksek bir mertebeden bağlı olmasıdır ($\propto d^{-6}$). Özellikle yörünge küçülmesi adayı sıcak Jüpiter sistemlerini belirlerken, cisimler arası uzaklık (eksantrik yörüngeler için yarı-büyük eksen uzunluğu da denebilir) bir aday belirleme kriteri olarak kullanılabilir.

Buraya kadar yapılan tanım ve yaklaşımlar, sıcak Jüpiter'in çembersel bir yörüngede hareket ettiği ve sistemde dönme-dolanma hizalanmasının sağlandığı varsayımlarına dayanmaktadır. Ancak, dışmerkezlik ve yörünge eğimi gibi parametrelerin de dikkate alınabilmesi için, bu denge koşullarının bozulduğu durumları kapsayan daha genel bir çözüm gereklidir. Bu bağlamda, barınak yıldız A'nın merkezinde tanımlanan yeni bir küresel referans sisteminde, gelgit kuvvetlerinin B cismi üzerinde oluşturduğu gelgit potansiyeli Denklem 2.5 ile ifade edilir (Biazzo vd. 2022).

$$\Psi(r, \theta, \phi, t) = \text{Re} \left(\sum_{l=2}^{\infty} \sum_{m=0}^l \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{GM_p}{a^2} A_{l,m,n}(e, i) \left(\frac{r}{a}\right)^l Y_l^m(\theta, \phi) e^{-in\Omega_0 t} \right) \quad (2.5)$$

Denklem 2.5 ile verilen gelgit potansiyelinde $A_{l,m,n}(e, i)$ dışmerkezliğe ve yörünge eğimine bağlı katsayıyı, $Y_l^m(\theta, \phi)$ potansiyelin küresel harmoniklerini ve $e^{(-in\Omega_0 t)}$ gelgit potansiyelinin zamana bağlılığını ve periyodikliğini gösteren terimlerdir. Küresel harmoniklerin derecesi l , hangi gelgit türünün etkileşimde baskın olduğunu gösterir. Sıcak Jüpiter ve Güneş benzeri barmak yıldız ikilileri için, gelgit potansiyelinin en baskın terimi $l = m = n = 2$ olduğundadır ve bu terim asenkron gelgit (ing. asynchronous tide) türünü temsil eder (Barker 2011; Ogilvie 2014).



Şekil 2.2 Gelgit etkileşimleri modeline ilişkin akışkan referans düzlemi.

M_1 barmak yıldız kütleini, M_2 sıcak Jüpiter kütleini temsil etmektedir (Ogilvie 2014)

Gelgit potansiyeli, yıldızın konvektif ya da radyatif bölgelerinde iç sürtünme ve türbülans viskozitesi yoluyla enerji yayılımına sebep olur. Gelgit etkileşimleri sonucu ortaya çıkan enerjinin ne kadarının yıldızın iç bölgelerinde depolanıp ne kadarının dışarı yayıldığı ile ilgili bilgi tedirginlik (gelgit) kalite parametresi (ing. tidal quality parameter) ile Denklem 2.6 kullanılarak elde edilir (Feynman 1963, Murray ve Dermott 1999, Barker 2011).

$$Q = 2\pi E_0 \left(\oint -\dot{E} dt \right)^{-1} \quad (2.6)$$

Denklemde E_0 bir yörünge dönemi boyunca depolanan maksimum enerjiyi, $\oint -\dot{E} dt$ ise bir yörünge dönemi boyunca gelgit kuvvetleri sebebiyle kaybedilen enerjiyi vermektedir. Gelgit kalite faktörü, bir cismin iç yapısında gelgit kuvvetleri karşısındaki

enerji kaybının yıldızın çevrim boyunca barındırdığı toplam enerjiye oranını ölçen bir parametredir. Burada not edilmesi gereken bir husus, gelgit kalite faktörünün tersine bir ölçek olmasıdır. Yüksek (düşük) Q değerleri, enerji kaybının az (fazla) olduğunu ve dolayısıyla gelgit etkileşiminin göreceli bir şekilde daha az (fazla) efektif gerçekleştiğine işaret eder. Gelgit kalite faktörü aynı zamanda gelgit torkunun miktarıyla, dolayısıyla gelgit açısı ile de ilişkilidir (Denklem 2.4 ve Denklem 2.7). Yüksek gelgit açısı, düşük Q değerlerini ifade eder.

$$\sin \alpha \approx Q^{-1} \quad (2.7)$$

Gelgit kalite faktörü tek başına sistemin yörüngesel evrimini açıklamak için yeterli değildir. Gelgit etkileşimleri dolayısıyla sistemin enerji miktarının ne kadar değiştiğinin yanı sıra, cisimlerin uğradığı deformasyon miktarıyla ilgili bilgi veren, gelgit kalite faktörünün literatürde de daha çok kullanılan bir versiyonu indirgenmiş tedirginlik kalite faktörü (ing. modified tidal quality factor) olarak isimlendirilir¹ (Denklem 2.8). Ayrıca, barınak yıldızına ait indirgenmiş tedirginlik kalite faktörü gözlemsel parametreler ile de elde edilebilmektedir (Denklem 2.9) (Goldreich ve Soter 1966, Maciejewski vd. 2016, Patra vd. 2017).

$$Q' = \frac{3Q}{2k} \quad (2.8)$$

$$Q'_* = -\frac{27}{2}\pi \left(\frac{M_p}{M_*}\right) \left(\frac{a}{R_*}\right)^{-5} \left(\frac{dP_{yör}}{dE}\right)^{-1} P_{yör} \quad (2.9)$$

Denklem 2.9'da yalnızca yıldızdaki enerji yayılımı dikkate alınmıştır, çünkü gezegenin dönme açısal momentumu, yıldızinkine göre birkaç mertebe daha düşüktür ve bu nedenle yörünge evrimine anlamlı katkı sağlamaz. Ayrıca yıldız, gezegenden çok daha büyük kütle ve yarıçapa sahip olduğundan açısal momentumu da fazladır. Sonuç olarak, Şekil 1.2'de görüldüğü üzere sıcak Jüpiterlerin çoğu çembersel yörüngelerde dolanmakta olup, bu sistemlerde yalnızca yıldızın gelgit etkisiyle yaydığı

¹Çalışmanın geri kalanında kullanılan tüm *gelgit kalite faktörü* ifadeleri, bu versiyonu belirtmektedir.

enerji dönme-dolanma özelliklerinde değişikliğe yol açabilir (Penev vd. 2018).

Sıcak Jüpiter türü gezegenler için gelgit etkileşimleri sebebiyle gerçekleşen yörünge küçülmesi senaryosunda, barınak yıldız evriminin anakol safhasındayken $Q'_* \approx 10^5$ olarak öngörülmektedir. (Jackson 2008, Penev vd. 2018). Bir diğer öngörü, sıcak Jüpiterlerin gelgit etkileşimleri sonucunda yörünge küçülmesine maruz kalarak barınak yıldız evriminin anakol safhasının sonundayken yok olacağıdır. Bu senaryo, $Q'_* > 10^5$ olmasını gerektirir (Hamer ve Schlaufman 2019).

2.2 Gelgit Etkileşimlerinde Enerji Yayılım Mekanizmaları

Gelgit kuvveti sebebiyle ortaya çıkan enerji barınak yıldızın konvektif ya da radyatif bölgelerinde iki farklı mekanizma ile yayılır.

- i) Denge gelgitleri (ing. equilibrium tide)
- ii) Dinamik gelgitler (ing. dynamical tide)

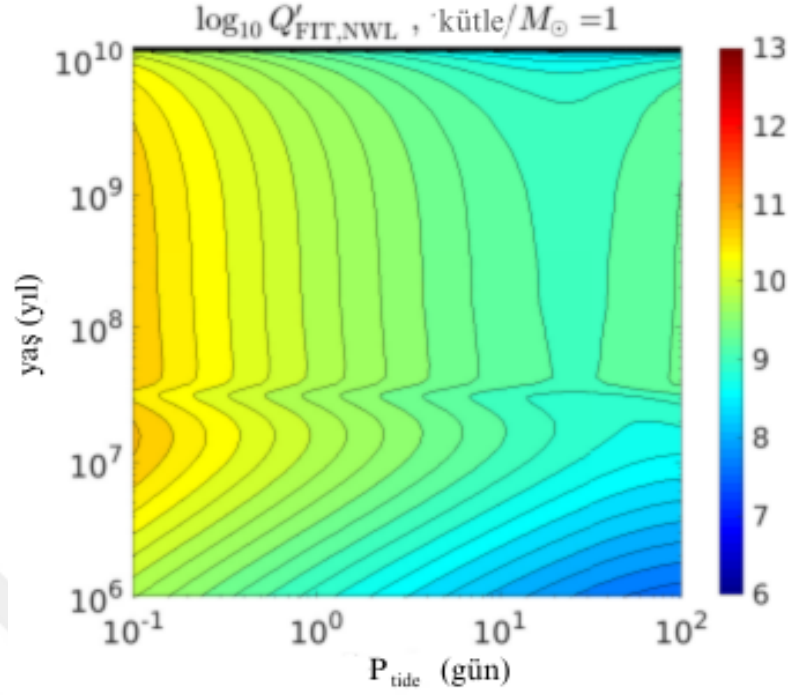
2.2.1 Denge gelgitleri

Denge gelgitleri, gelgit torku sebebiyle barınak yıldızın yüzeyinde oluşan bir yarı-hidrostatik (ing. quasi-hydrostatic) şişme olarak tanımlanabilir. Bu gelgit türü, Dünya-Ay ikilisi arasındaki gelgit etkileşmelerinden oldukça iyi bilinmektedir. Denge gelgitleri dalga benzeri olmayan bir davranış sergiler ve barınak yıldızın konvektif katmanında türbülanslı konveksiyon ile etkileşim yoluyla, ya da eliptik kararsızlık gibi doğrusal olmayan etkiler yoluyla enerji yayılımını tetikler.

Denge gelgitlerine ait konum ve hız vektörlerine ulaşmak için akışkanlar dinamiğinde kütle korunumundan yararlanılır (Denklem 2.10) ve konveksiyon katmanındaki te-dirgin edilen madde için ortaya çıkan pertürbasyon denklemi çözülebilir (Terquem vd. 1998, Ogilvie 2013, Barker 2020).

$$\nabla \cdot (\rho \nabla X) = \frac{d\rho}{dp} \rho (\phi'_e + \psi_p) = \rho'_e \quad (2.10)$$

12



Şekil 2.3 $1M_{\odot}$ kütleli bir barınak yıldızına ait denge gelgitleri için Barker (2020)'den alınan yaşa bağlı Q' değerleri.

Konvektif bölgede oluşan denge gelgitleri için türbülanslı konveksiyon, maddenin üzerinde viskozite işlevi görür ve buradan ortaya çıkan enerjinin büyük bir kısmı bu yolla yayılır. Denge gelgitine bağlı tedirginlik kalite faktörü Denklem 2.11 ile verilebilir.

$$\frac{1}{Q'_{eq}} = \frac{16\pi G}{3(2\ell + 1)R^{2\ell+1} |A|^2} \cdot \frac{D_{\nu}}{|\omega_{tide}|} \quad (2.11)$$

Sıcak Jüpiter türü gezegenlerin anakol barınak yıldızları için, $Q'_{eq} \sim 10^{10}$ olarak hesaplanmıştır (Barker 2020). Buna ek olarak, Penev ve Sasselov (2011)'un bulguları da sayısal olarak olmasa da bu bulgularla uyumludur ($0.8 - 1.4M_{\odot}$ için $Q'_{eq} \sim 10^8 - 3 \times 10^9$). Hesaplanan Q'_{eq} değerleri, sıcak Jüpiterler için 10^{11} yıldan uzun bir yörünge küçülmesi zaman ölçeğine tekabül etmektedir. Barınak yıldızın anakol ömrü göz önüne alındığında ($1M_{\odot}$ için $t_{ms} \sim 10^{10}$ yıl) denge gelgitlerinin barınak yıldızın anakol ömrü boyunca zayıf etkinliğe sahip olduğunu ve yörünge küçülmesinde baskın mekanizma olamayacağını söylemek mümkündür. Sıcak Jüpiterler için hesaplanan

Q' aralığı ile Q'_{eq} değerleri arasında 10^5 mertebesinde bir oran olması bu mekanizmanın özellikle barınak yıldız anakol evresinde ise etkinliğinin zayıf olduğunu belirtmektedir. Öte yandan, barınak yıldız alt-dev evresine geçtikten sonra, denge gelgitleri daha efektif hale gelir ve $Q'_{eq} \sim 10^6 - 10^7$ seviyelerine ulaşır.

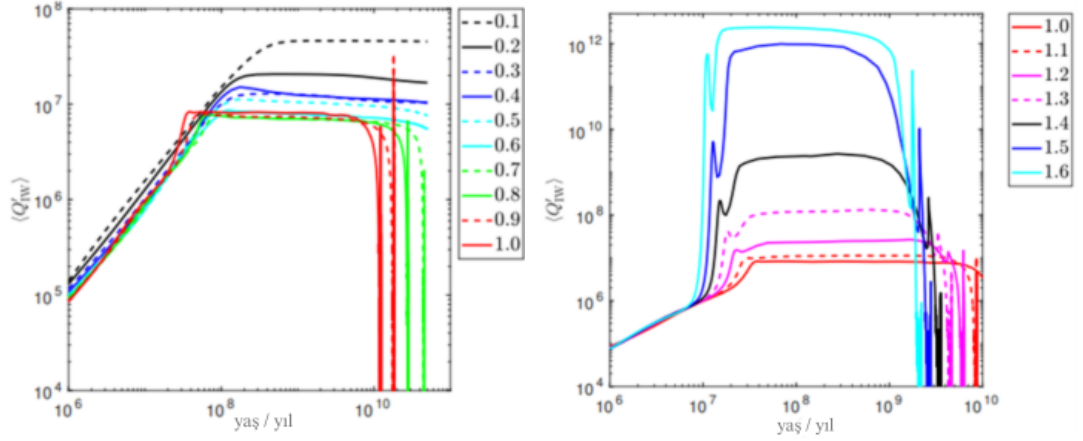
2.2.2 Atalet dalgaları

Bir dinamik gelgit türü olan atalet dalgaları (ing. inertial waves), düşük kütleli ya da dev evresindeki yıldızlar için önemli bir mekanizmadır (Astoul ve Barker 2023). Bu dalgalar, $\omega_{\text{tide}} \leq 2\Omega$ (ya da eşdeğer olarak $P_{\text{rot}} < 2P_{\text{tide}}$) koşulu sağlandığında gelgit kuvvetleri tarafından tetiklenir (Ogilvie ve Lin 2004, 2007; Astoul ve Barker 2023). Ancak, bu koşul şu an bilinen çoğu sıcak Jüpiter sistemleri için sağlanmamaktadır (örnek: WASP-12). Atalet dalgalarına ait Q'_{IW} değeri yıldız iç yapı modelleri kullanılarak elde edilebilir (Denklem 2.12). Buna ek olarak, $M_* \leq 1.1M_{\odot}$ için anakol safhasında olan barınak yıldızlarda Ogilvie (2013) tarafından tanımlanan ortalama frekans yaklaşımı ile yalnızca yıldızın dönme dönemi kullanılarak atalet dalgalarına ait Q'_{IW} için yaklaşık bir değer bulunabilir (Denklem 2.13) (Barker 2020).

$$\frac{1}{Q'_{IW}} = \frac{32\pi^2 G}{3(2\ell + 1)R^{2\ell+1} |A|^2} (E_{\ell} + E_{\ell-1} + E_{\ell+1}) \quad (2.12)$$

$$\langle Q'_{IW} \rangle \approx 10^7 \left(\frac{P_{\text{rot}}}{10 \text{ gün}} \right)^2 \quad (2.13)$$

Atalet dalgalarına bağlı gelgit kalite faktörü, barınak yıldızın evrimsel durumuna ve kütesine bağlıdır (Şekil 2.4). Anakol öncesi ve alt-dev evresinde, $0.1 - 1.6M_{\odot}$ için $Q'_{IW} \lesssim 10^7$, anakol süresince ise $Q'_{IW} \gtrsim 10^7$ olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, atalet dalgaları sıcak Jüpiter türü gezegenlerin yörünge küçülmesi için anakol süresince etkin bir mekanizma değildir; ancak barınak yıldız alt-dev evresine geçtikten sonra, konvektif zarfın ve yıldız yarıçapının kayda değer ölçüde büyümesiyle etkin hale gelebilir (Barker 2020).



Şekil 2.4 Atalet dalgalarına ait Q' değerlerinin yaşa ve kütleyle bağlı değişimi.

Renkler farklı kütlelere bağlı modeli belirtmektedir. Barker (2020)'den alınmıştır.

2.2.3 İçsel kütleçekim dalgaları

Gelgit kuvvetlerinin neden olduğu enerji yayılımına katkıda bulunan bir diğer mekanizma da içsel kütleçekim dalgalarıdır (IGW, ing. internal gravity waves). Bu dalgalar, yıldızın radyatif ve konvektif bölgeleri arasındaki sınırdaki dönme hareketi ve Coriolis kuvvetinin etkisiyle oluşur ve g-modunda salınımlar şeklinde yıldızın merkezine doğru ilerler (Zahn 1977, Barker 2011). Dalga, merkez yönünde ilerledikçe salınım yapabileceği alan daralır; bu da dalga kırılmasına ve sonuçta sönmüleneren enerjinin dışa doğru yayılmasına yol açar. Bu sönmülendirme, esas olarak radyatif difüzyon yoluyla gerçekleşir. Eğer dalgalar tamamen sönmülendiyse (ing. fully damped), o zaman IGW'ye ilişkin gelgit kalite faktörü Denklem 2.14 ile ifade edilir (Barker ve Ogilvie 2010; Barker 2011). Dalga kırılmasının gerçekleşmesi için, gezegen kütesinin belli bir sınırdan üstünde olması gerekir (Denklem 2.15).

$$Q'_{\text{IGW}} \approx 1.5 \times 10^5 \left(\frac{g_{\odot}}{g} \right) \left(\frac{M_*}{M_{\odot}} \right)^2 \left(\frac{R_{\odot}}{R_*} \right) \left(\frac{P_{\text{tide}}}{0.5 \text{ gün}} \right)^{8/3} \approx 10^5 \left(\frac{P_{\text{yör}}}{1 \text{ gün}} \right)^{8/3} \quad (2.14)$$

$$M_{\text{crit}} \approx 3.3 M_{\text{jüp}} \left(\frac{G_{\odot}}{G} \right)^{1/2} \left(\frac{C_{\odot}}{C} \right)^{5/2} \quad (2.15)$$

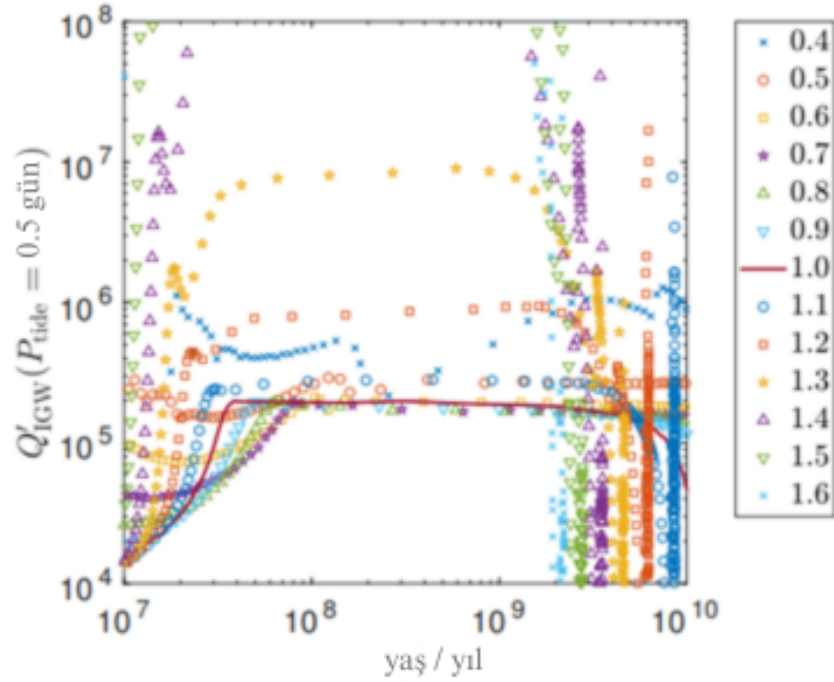
Denklem-2.14'te verilen P_{tide} gelgitin dönemine ve $\mathcal{G} = \sigma_c^2 \rho_c r_c^5 \left| \frac{dN^2}{d \ln r} \right|_{r=r_c}^{-1/3}$ yıldızın radyatif ve konvektif bölgeleri arasındaki geçiş bölgesinin özelliklerine bağlı bir parametreye tekabül etmektedir (Barker 2020). Burada not edilmesi gereken önemli bir husus, konvektif çekirdeğe sahip yıldızlarda (F yıldızları gibi), yıldızın merkezi bölgeleri artık kararlı bir şekilde katmanlaşmaz (ing. stably stratified) ve IGW bahsedilen bu rejim için desteklenmez. Gezegenin dalga kırılması ile enerji yayıp yaymayacağı kriteri, WKB yaklaşımı ile belirlenir (Denklem 2.16).

$$|\xi_{d,r} k_r| = \sqrt{\frac{[l(l+1)]^{3/2} N F}{\rho r^5 \omega^4}} \gtrsim 1 \quad (2.16)$$

Bu denklemde $F = \frac{3^{2/3}}{8\pi} \frac{[\Gamma(1/3)]^2}{(l(l+1))^{4/3}} G \frac{|A|^2}{\omega_{\text{dyn}}^4} |\omega|^{11/3}$ dalga enerjisi akı büyüklüğünü, N Brunt-Väisälä frekansını vermektedir. Bu yaklaşım, Denklem 2.15'in uygulanmadığı konvektif çekirdeğe sahip yıldızlar için dalga kırılmasının o yıldızın merkezi bölgelerinde beklenip beklenmeyeceği bilgisini bize verir.

Enerjinin sönümlenip tamamen dışarı yayılmasına ilişkin alternatif bir mekanizma da $1.2 - 1.6 M_{\odot}$ kütle aralığındaki F türünden yıldızlar için verilmiştir. Bu mekanizmada, yıldızın konvektif çekirdeğinin dinamo etkisiyle yüksek manyetik alana sahip olmasından dolayı çekirdeğe doğru salınan IGW'ler manyetik dalgalara dönüşebilir (ing. magnetic wave conversion) (Duguid vd. 2024). Manyetik dalga dönüşümü sonrası yayılan enerji için tedirginlik kalite faktörü, Denklem 2.14 kullanılarak tekrardan hesaplanabilir.

Sıcak Jüpiter sistemleri için (Şekil 2.5'e göre $P_{\text{tide}} = 0.5$ gün), barınak yıldızın ($0.4 - 1.6 M_{\odot}$) anakol öncesi evrim safhasında $Q'_{\text{IGW}} \leq 10^5$, anakol sırasında $Q'_{\text{IGW}} \sim 10^5$ ve anakol sonrasında tekrar $Q'_{\text{IGW}} \leq 10^5$ olduğu, Şekil 2.5'teki modeller tarafından gösterilmiştir. Buna göre, güneş benzeri yıldızlarda içsel kütleçekim dalgalarının gözlemsel olarak beklenen mertebede efektif olduğu görülebilir.



Şekil 2.5 İçsel kütleçekim dalgalarına ait Q' değerlerinin barınak yıldız kütesine ve yaşına bağlı değişimi.

Farklı renk ve şekildeki modeller, farklı kütleleri temsil etmektedir ve lejant içerisinde gösterilmektedir (Barker 2020).

IGW mekanizmasının sıcak Jüpiterler için yörünge küçülmesinde özellikle barınak yıldız anakol ömrünün sonunda iken etkin olduğu ve sıcak Jüpiterin bu mekanizma sebebiyle barınak yıldızının Roche limitini geçerek parçalanması ve barınak yıldızıyla birleşmesi öngörülmektedir (Patra vd. 2017; Hamer ve Schlaufman 2019, 2020; Mustill vd. 2021; Weinberg vd. 2024; Penev vd. 2024). Barınak yıldız anakol ömrünün sonuna gelip alt-dev safhasına geçtiğinde, $\mathcal{G}$ değerinde 2-3 mertebede azalma ve yarıçap R_* değerinde 1 mertebeye kadar çıkabilen artış sebebiyle, $Q'_{IGW} \sim 10^0 - 10^1$ gibi çok etkin değerlere yaklaşabilir ve bu değerler kısa-dönemli gezegenlerin barınak yıldız anakol ömrünün sonuna doğru yaklaşırken yok olma senaryosunu açıklayabilmektedir (Sun vd. 2018, Barker 2020).

3. KAYNAK ÖZETLERİ

3.1 HATS-18b

HATS-18b ötegezegeni, HATSouth teleskop ağı (Bakos vd. 2013) ile keşfedilmiş olup, keşfi Penev vd. (2016) tarafından rapor edilmiştir. Güneş benzeri GV tayf türü bir yıldızın ($M_* = 1.037 \pm 0.047 M_\odot$, $R_* = 1.020^{+0.057}_{-0.031} R_\odot$, $T_{\text{eff}} = 5600 \pm 120$ K) etrafında dolanan bu sıcak Jüpiter, oldukça kısa bir yörünge dönemine ($P_{\text{yör}} = 0.8378$ gün) sahiptir. Fiziksel özellikleri ($M_p = 1.980 \pm 0.077 M_{\text{jüp}}$, $R_p = 1.337^{+0.102}_{-0.049} R_{\text{jüp}}$) ile gelgit etkileşmelerine bağlı yörünge küçülmesinin gözlenmesi açısından uygun bir aday olduğu değerlendirilmektedir.

Penev vd. (2016), HATS-18'in dönme dönemini $P_{\text{rot}} = 9.8 \pm 0.4$ gün ($v \sin i = 6.23 \pm 0.47$ km/s) olarak hesaplamıştır. Güneş-benzeri bu yıldızın yaşı 4.2 ± 2.2 Milyar yıl olarak tahmin edilmiş ve bu değer Güneş'in yaşına (~ 4.6 Milyar yıl, Guenther 1989) yakındır. Bu nedenle, HATS-18'in dönme döneminin Güneş'in dönme dönemine (ekvatorunda $P_{\text{rot}} \approx 25$ gün; Beck 2000) veya benzer yaşta yıldızlar içeren M67 açık kümesindeki yıldızların dönme dönemine ($P_{\text{rot}} \approx 30$ gün; Barnes vd. 2016) yakın olması beklenmektedir. Ancak gözlemler, HATS-18'in dönme döneminin, 600 Milyon yıl yaş civarındaki Güneş-benzeri yıldızlarınkiyle (M37, Hartman vd. 2009; Praesepe, Agüeros vd. 2011) benzer olduğunu göstermiştir. HATS-18'in beklenenden daha hızlı dönmesinin temel nedeni olarak, gelgit etkileşimleri yoluyla yörünge-den yıldıza aktarılan açısal momentumun yıldızın dönme dönemini kısaltması gösterilmiştir. Bu bağlamda, HATS-18b gelgit etkileri sebebiyle yörünge küçülmesinin araştırılması için önemli bir aday haline gelmiştir.

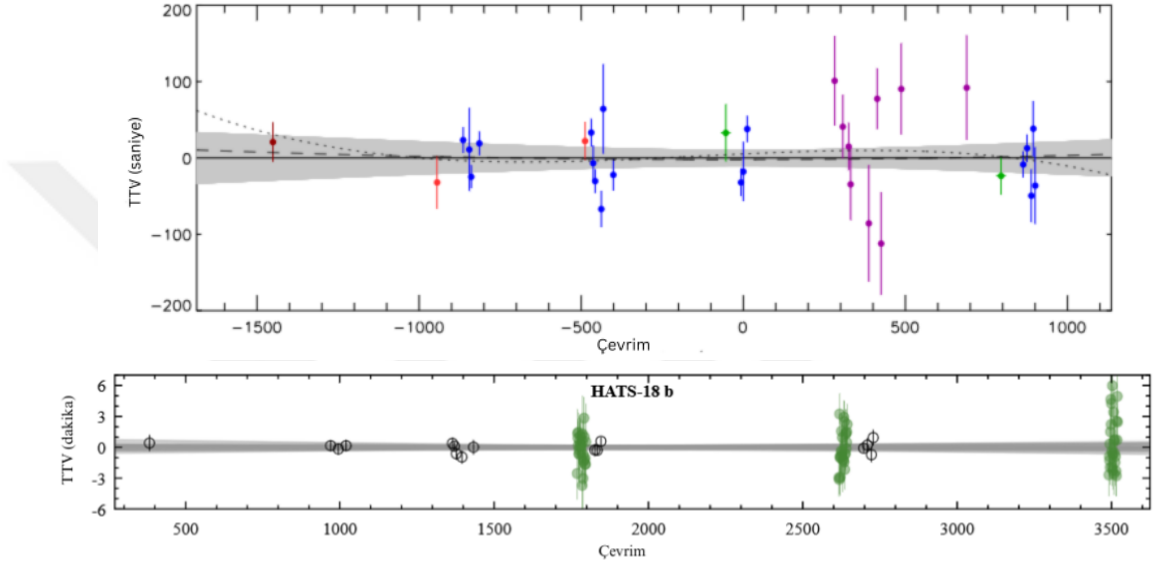
Sonrasında, HATS-18 sistemindeki gelgit etkileşimlerinin verimliliği, *Planetary Orbital Evolution due to Tides (POET)* (Penev vd. 2014) kodu kullanılarak analiz edilmiştir (Penev vd. 2018). Yapılan analizde, $\log_{10} Q'_* = 7.18^{+0.205}_{-0.173}$ olarak bulunmuştur. Elde edilen bu değer, Hansen (2012) tarafından anakol evrimindeki barınak yıldızlar için önerilen $7 < \log_{10} Q'_* < 9$ aralığıyla ve Penev vd. (2012) tarafından

önerilen $\log_{10} Q'_* > 7$ sınırıyla uyumludur.

Yapılan bu iki çalışma, HATS-18' sisteminde gelgit etkileşmelerinden kaynaklı yörünge dönemi değişimini tespit etme gerekliliğini doğurmuştur. Southworth vd. (2022), TESS'in 10. ve 36. Sektörlerinden elde edilen geçiş ışık eğrilerini, Penev vd. (2016) ve Patra vd. (2020) tarafından yayımlanan 3 adet geçiş ışık eğrisini, La Silla Gözlemevi'nde konuşlandırılmış Danish 1.54m teleskobuyla elde edilen 20 geçiş ışık eğrisini; ayrıca Deep Sky Chile'de konuşlandırılmış Yves Jongen teleskobundan elde edilen toplam 9 adet geçiş ışık eğrisini, HATS-18b'nin TTV analizini yapmak üzere kullanmıştır. Yapılan TTV analizi sonucunda, sabit yörünge dönemli lineer model ve seküler değişen yörünge dönemli kuadratik model veriyi benzer istatistiksel parametrelerle temsil etmektedir ($\Delta \text{BIC} = \text{BIC}_{lin} - \text{BIC}_{kuad} = -3.3$). Southworth vd. (2022), kuadratik model sonucunda yörünge dönemi değişimini $dP_{yör}/dE = (0.6 \pm 1.7) \times 10^{-10}$ gün/çevrim olarak bulmuştur. Bu sonuç, yörünge döneminin arttığını göstermektedir. Ancak bu sonuç Denklem 2.9 ile Q'_* hesaplamak için kullanılırsa sonuç negatif çıkacağı için, yazarlar bulunan değerin 3σ alt sınırını $((dP_{yör}/dE)_{lim} = -4.5 \times 10^{-10}$ gün/çevrim) esas alarak $Q'_* > 10^{5.11 \pm 0.04}$ bulmuştur. Bu sonuç, Ogilvie ve Lin (2007), Jackson vd. (2008) ve Penev vd. (2012) tarafından önerilen gelgit kalite faktörü sınırlarıyla uyumludur. Ayrıca, MESA kullanılarak yıldızın iç yapısına ait parametrelerin radyal profilleri yaşa bağlı fonksiyonlar halinde elde edilmiştir. Barker (2020)'de verilen formülasyon kullanılarak gelgit etkisi modellerinde de benzer bir sonuca ulaşılmış; eğer HATS-18'in gelgit etkileri sonucunda radyatif/konvektif bölge sınırında içsel çekim dalgaları uyarılıp çekirdek bölgesine doğru ilerleyerek kırılıyorsa, $Q'_* \sim 1.2 \times 10^5$ olması gerektiği öngörülmüştür.

Benzer bir çalışma Maciejewski vd. (2024) tarafından TESS 63. Sektör verisinin toplam veri kümesine katılması ile yapılmıştır. Bu çalışmada yine lineer ve kuadratik modeller arasında istatistiksel olarak büyük bir fark ortaya çıkmamıştır ($\Delta \text{BIC} = \text{BIC}_{lin} - \text{BIC}_{kuad} = 4.3$; $\Delta \chi^2 = \chi^2_{kuad} - \chi^2_{lin} = 0.3$). Kuadratik model sonucunda olası yörünge dönemi değişimi $dP_{yör}/dE = (1.4 \pm 2.4) \times 10^{-10}$ gün/çevrim olarak bulunmuştur ve Southworth vd. (2022) gibi bu analizin de sonucunda eğer yörünge

dönemi değişimi modeli TTV verisini gerçekten temsil ediyorsa, bunun sonucunda yörünge döneminin artması gerektiği tespit edilmiştir. Bu çalışma tarafından gelgit kalite faktörü için de benzer bir yaklaşım sergilenmiştir ve elde edilen gelgit kalite faktörü, $Q'_* > 3.5^{+0.5}_{-0.7} \times 10^5$ olarak bulunmuştur. MESA modelleri kullanılarak yapılan teorik hesaplamalar sonucunda yukarıda tarif edilen dalga kırılmasına ait koşullar sağlandığı takdirde $Q'_* < 2.6 \times 10^5$ olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 3.1 HATS-18b'nin literatürde bildirilen TTV diyagramları

Üst panel: Southworth vd. (2022) tarafından sunulan TTV diyagramı. Mavi noktalar Danish 1.54m teleskobuyla, mor noktalar Jongen teleskobuyla, yeşil noktalar ise TESS verileriyle ölçülen geçiş zamanlarını göstermektedir. Açık ve koyu kırmızı noktalar, literatürdeki önceki gözlemleri temsil etmektedir.

Alt panel: Maciejewski vd. (2024) tarafından yayınlanan TTV diyagramı. Yeşil noktalar TESS verilerine, içi boş siyah noktalar ise literatürde bildirilen geçiş zamanlarına karşılık gelmektedir.

3.2 Kepler-1658b (KOI-4b)

Kepler-1658 etrafında ilk olarak ötegezegen keşfi Brown vd. (2011) ile önerilmiş, ancak bu keşif onaylanana kadar geçen sürede, çeşitli araştırmalar boyunca bulgular gezegenin yanlış pozitif (ing. false positive) ve aday cisim (ing. possible candidate)

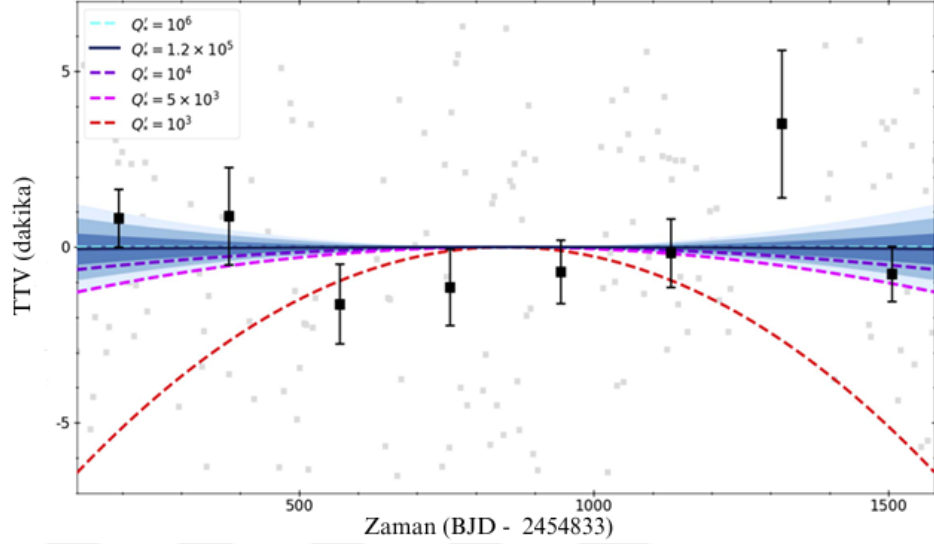
sınıflandırmaları arasında gidip gelmesine sebep olmuştur (Borucki vd. 2011, Burke vd. 2014, Thompson vd. 2018). Bu belirsizliğin temelinde, sistemin ışık eğrilerinde gözlenen derin ikinci minimum profili yatmaktadır. Son olarak, Chontos vd. (2019) Kepler geçiş ışık eğrilerini ve FIES RV verilerini, asterosismoloji analizleri sonucu elde ettiği yıldız parametreleriyle birlikte modelleyerek Kepler görevindeki ilk gezegen keşfini¹ doğrulamıştır.

Kepler-1658b gibi bir sıcak Jüpiter ötegezegen popülasyonu içerisinde çok yaygın değildir, zira gelgit evriminden dolayı sıcak Jüpiterlerin barınak yıldızın anakol evriminin sonundayken ya da alt-dev evriminin başındayken yok olması beklenmektedir (Levrard vd. 2009, Schlaufman ve Winn 2013). Alt-dev evresindeki F5 tayf türünden bir yıldızın ($M_* = 1.447 \pm 0.058 M_\odot$, $R_* = 2.891^{+0.130}_{-0.106} R_\odot$, $T_{\text{eff}} = 6216 \pm 78$ K; Chontos vd. 2019) etrafında dolanan bu sıcak Jüpiterin $M_p = 5.73 \pm 0.45 M_{\text{jüp}}$, $R_p = 1.07 R_{\text{jüp}}$ (Chontos vd. 2019), yörünge döneminin ($P_{\text{yör}} = 3.85$ gün; Chontos vd. 2019) ve barınak yıldızın dönme döneminin ($P_{\text{rot}} = 4.4 \pm 0.4$ gün; Chontos vd. 2019) oldukça yakın olması sebebiyle barınak yıldızıyla dönme-dolanma kilitlenmesine girmiş olma ihtimali de mevcuttur. Bu bağlamda, Kepler-1658b'nin yörünge döneminin değişiminin analiz, ve gelgit etkilerinin hangi mertebede sürdüğünün anlaşılması, yıldız-gezegen etkileşmelerinin gezegen evrimine olan etkilerinin saptanması açısından önemlidir (Vissapragada vd. 2022, Barker vd. 2024).

Chontos vd. (2019), Kepler uzun poz süreli (ing. long cadence) ışık eğrilerini kullanarak olası yörünge dönemi değişimini hesaplamıştır ve TTV diyagramına (Şekil 3.2) farklı Q'_* değerleri için kuadratik modeller uyumlamıştır. $Q'_* = 1.2 \times 10^5$ modelini kullanarak $\dot{P}_{\text{yör}} = -16.8 \pm 141.25$ ms/yıl bulmuştur. Bu yörünge dönemi değişimi, $\tau = P_{\text{yör}}/|\dot{P}_{\text{yör}}| = 20$ milyon yıl düzeyinde bir yörünge küçülmesi zaman ölçeğine tekabül etmektedir. Schlaufman ve Winn (2013), barınak yıldızın alt-dev safhasına geldiğinde daha çok enerji yaydığını ve bunun sonucunda bu safhada $Q'_* \sim 10^2 - 10^3$ olabileceğini önermişlerdir. Chontos vd. (2019) bu önermeden ve uyumlanan diğer

¹Kepler uzay aracı Mart 2009'da uzaya gönderildiğinde, Kepler alanına dahil 3 sistem için zaten ötegezegen keşifleri yapılmıştı (O'Donovan vd. 2006, Pál vd. 2008, Bakos vd. 2010).

modellerden hesaplanan yörünge dönemi değişimi hesaplarından da faydalanarak çalışmasının sonunda $Q'_* > 4.826 \times 10^3$ olması gerektiğini bulmuştur.



Şekil 3.2 Kepler-1658b sistemine ait TTV diyagramı.

Gri noktalar, Kepler uzun poz süreli verilerini; siyah kutular ise bu verilerin $P_{\text{yör}} = 3.85$ gün kullanılarak ayrılmış segmentlerinin orta noktalarını göstermektedir (Chontos vd. 2019).

Bu çalışmayı takiben, Vissapragada vd. (2022), veri kümesine TESS 41, 54 ve 55. sektörlerini ekleyerek yörünge dönemi değişimini araştırmıştır. Yaptığı yörünge dönemi değişimi analizinde dönem değişimini $\dot{P}_{\text{yör}} = -131^{+20}_{-22}$ ms/yıl bulmuştur. Bu yörünge dönemi değişiminin sebebi olarak yıldızın bakış doğrultusu boyunca ivmelenmesi (ing. line-of-sight acceleration), eksen dönmesi ve gelgit etkileşimleri senaryoları incelenmiştir. Görüş doğrultusu boyunca ivmelenme senaryosunu Chontos vd. (2019)'dan alınan RV verilerini kullanarak incelemiştir ve $\dot{v}_r = +0.047 \pm 0.068$ ms^{-1} gün^{-1} bulmuştur. Bu bulgular ışığında TTV analizindeki yörünge dönemi değişimi sinyalinin bu senaryo kaynaklı olamayacağı kanısına varılmıştır. Diğer bir senaryo olan eksen dönmesi için $d\omega/dE = 15\pi k_{2p}(M_*/M_p)(R_p/a)^5 \approx (8.9^{+2.6}_{-2.1}) \times 10^{-7}$ rad/çevrim k_{2p} bulunmuştur. Beklenen dönme miktarı için $k_{2p} \sim 10^3$ olması gerekmektedir. Ancak bu sonuç fiziksel değildir, çünkü Love sayısı 0 – 1.5 arasında değerler almaktadır (Russell 1928, Sterne 1939). Evrimleşen yıldızların etrafın-

daki sıcak Jüpiterler için, yıldızla ait gelgit şişimlerinin önemli olmasından dolayı (Ragozzine ve Wolf 2009), yıldızın gelgit şişiminden kaynaklı eksen dönmesi de incelenmiştir ve $d\omega/dE = 15\pi k_{2*}(M_*/M_p)(R_*/a)^5 \approx (1.70^{+0.45}_{-0.35}) \times 10^{-4}$ rad/çevrim) k_{2*} bulunmuştur. Bu sonucun eksen dönmesi senaryosunu sağlaması için $k_{2*} \approx 4$ olmasını gerekmektedir ve tekrardan fiziksel değildir. Bu sebeplerden ötürü, eksen dönmesi senaryosu, TTV analizinde tespit edilen yörünge dönemi değişimini temsil etmemektedir. Son olarak, aynı çalışmada gelgit etkilerinden kaynaklı yörünge dönemi değişimi olasılığı test edilmiştir ve bu analizin sonucunda yıldızla ait gelgit kalite faktörü $Q'_* = 2.50^{+0.85}_{-0.62} \times 10^4$ olarak bulunmuştur. Bu bulgular, Chontos vd. (2019)'un önerdiği alt limit ile uyumludur ve Barker (2020)'nin içsel kütleçekim dalgaları ve atalet dalgaları için uyumlanan modellere uymaktadır. Konvektif bölgede uyarılan atalet dalgaları, hızlı dönen bu yıldız için daha efektiftir (Ogilvie ve Lin 2007) ve Vissapragada vd. (2022)'ye göre de yörünge küçülmesinde etkin mekanizma olarak önerilmektedir.

Kepler-1658b'nin yörünge küçülmesi karakteristiği ve gelgit etkileşimlerindeki enerji yayılım mekanizmaları en güncel haliyle Barker vd. (2024)'de verilmiştir. Bu çalışmada, PARSEC (Bressan vd. 2012, Tang vd. 2014) modelleri kullanılarak kütle, sıcaklık ve metal bolluğuna ilişkin sınır değerler elde edilmiştir ($M_* \in 1.62, 1.65 M_\odot$, $Z = 0.0072, 0.01, 0.113$). Ardından, bu değerler MESA girdisi olarak kullanılmıştır ve MESA evrim modellerinin çıktıları olan yıldız iç yapısına ait parametreler (örn. kütleçekim ivmesi, yoğunluk, basınç alanları, konvektif hız, karışım uzunluğu, Brunt-Väisälä frekansı) yaşa bağlı fonksiyonlar halinde elde edilmiştir. Son aşamada, bu parametreler ile tekrardan Barker (2020)'deki formülasyon kullanılarak farklı mekanizmalara (Bölüm 2.2) ait Q'_* değerlerinin yıldızın evrim statüsüne ve yaşına göre nasıl değiştiği analiz edilmiştir. Bu analizin sonucunda, Kepler-1658'in konvektif bölgesinde uyarılan atalet dalgalarının gelgit etkileşimindeki en etkin mekanizma olduğu tespit edilmiştir. Ancak bu mekanizmanın ömrü oluşturulan modellerde 10-100 yıl arasındadır. Son olarak, Vissapragada vd. (2022)'de bulunan aksine, Barker vd. (2024) gezegenin gelgit şişiminden kaynaklı eksen dönmesinin $k_{2p} > 0.26$ olduğunda olası bir senaryo olduğunu öne sürmüştür.

Sonuç olarak, Kepler-1658 sistemindeki barınak yıldız ve sıcak Jüpiter için, temel parametreler de dahil olmak üzere henüz tam bir uzlaşıya varılabilmiş değildir. Mevcut çalışmaların önerdiği motivasyonlar ve vardığı sonuçlar, bu sisteme ilişkin daha çok fotometrik ve tayf gözleminin olmasını, sistemdeki olası gelgit etkilerinin daha iyi anlaşılması için gelgit etkisi modellerinin yeni veriler ışığında tekrardan ele alınmasını gerektirmektedir.

3.3 WASP-4b

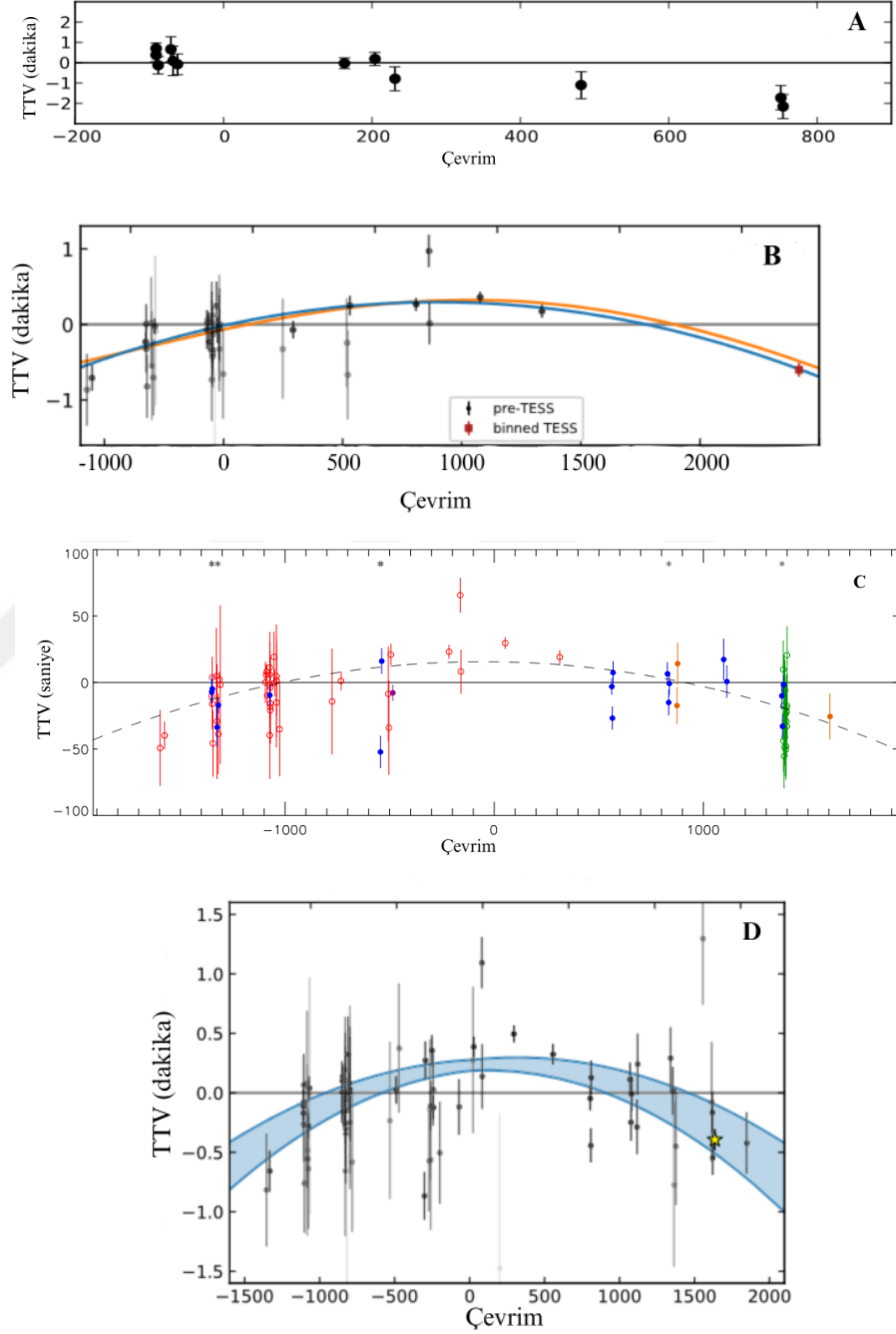
WASP-4b ötegezegeni SuperWASP (Wilson vd. 2008) projesi ile keşfedilmiştir. Kısa yörünge dönemi ($P_{\text{yör}} \approx 1.34$ gün; Southworth vd. 2009, Bouma vd. 2019) ve barınak yıldız özellikleri ($M_* = 0.89M_{\odot}$, $R_* = 0.92R_{\odot}$; Bonomo vd. 2017) nedeniyle WASP-4b gelgit etkilerini test etmek için sıcak Jüpiter popülasyonu içerisinde önemli bir yere sahiptir.

Hoyer vd. (2013) gezegenin keşfinden itibaren yapılan geçiş gözlemlerine (Wilson vd. 2008, Gillon vd. 2009, Winn vd. 2009, Southworth vd. 2009, Dragomir vd. 2011, Sanchis-Ojeda vd. 2011, Nikolov vd. 2012) dayanan ilk TTV analizini gerçekleştirmiştir (Şekil 3.3, A) ve bu analizin sonucunda herhangi bir yörünge dönemi değişimi sinyali rastlanmamıştır.

6 yıl sonra Bouma vd. (2019) TTV diyagramını en iyi temsil eden kuadratik denkleme göre $\dot{P}_{\text{yör}} = -12.6 \pm 1.2$ ms/yıl bulmuştur (Şekil 3.3, B). Bu değişim miktarı, $Q'_* = (2.9 \pm 0.3) \times 10^4$ gibi bir gelgit kalite faktörüne denk gelmektedir.

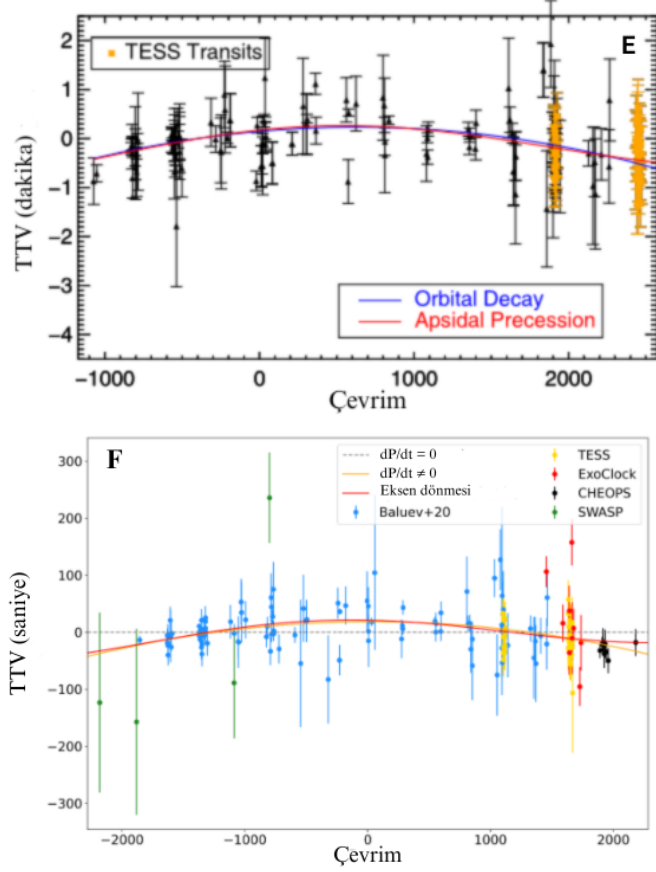
Bouma vd. (2019), bulduğu bu yörünge dönemi değişimi miktarına sebep olabilecek manyetik çevrim, eksen dönmesi ve ışık-zaman etkisi senaryolarını test etmiştir ve bu senaryoların ölçülen yörünge dönemi değişimini temsil etmediği sonucuna varmıştır. Bouma vd. (2020), Bouma vd. (2019)'u takiben, mevcut geçiş ışık eğrisi veri tabanına Keck Gözlemevi'ndeki HIRES ile alınmış RV verileriyle katkıda bulunmuş

ve gözlenen yörünge dönemi değişiminin, barınak yıldızın bakış doğrultusu boyunca ivmelenmesinden kaynaklanabileceğini öne sürmüştür.



Şekil 3.3 WASP-4b'ye ait TTV diyagramları.

(A) Hoyer vd. (2013), (B) Bouma vd. (2019), (C) Southworth vd. (2019), (D) Bouma vd. (2020)



WASP-4b'ye ait TTV diyagramları (devam)

(E) Turner vd. (2022), (F) Harre vd. (2023)

RV verilerine göre, $v_r = 0.0422 \pm 0.068 \text{ ms}^{-1} \text{ gün}^{-1}$ olarak ölçülmüştür ve bu değer TTV diyagramında $\dot{P}_{\text{yör}} = -5.9 \text{ ms/yıl}$ olarak karşılık bulmuştur. Bu değer, ölçülen yörünge dönemiyle karşılaştırıldığında, WASP-4b sistemindeki seküler yörünge dönemi değişimini açıklayabilecek düzeydedir.

Baluev vd. (2020) sisteme ait CORALIE ve HARPS ile elde edilen RV gözlemlerini analiz etmiş ve Bouma vd. (2020)'nin önerdiği ivmelenme senaryosunu reddetmiştir. Bu çalışmada yörünge küçülmesinin en olası nedeninin gelgit etkisi olduğu sonucuna varılmıştır, zira ölçülen dışmerkezliğin $e = 0$ (Bouma vd. 2019) olması, eksen dönmesi senaryosu geçersiz kılmaktadır. Yörünge küçülmesi senaryosu kapsamında, Baluev vd. (2020) yıldızın gelgit kalite faktörünü $Q'_* = 6.0^{+2.5}_{-1.5} \times 10^4$ olarak ölçmüştür.

Bu çalışmaları takiben, Turner vd. (2022) çalışma tarihine dek yapılmış RV gözlemlerini bir araya getirmiş ve analiz etmiştir. Çembersel yörüngeye dayanan bu RV modellerinden yola çıkarak bakış doğrultusu boyunca kütle merkezinin ivmelendiği olasılığını reddetmiş ve sistemde üçüncü bir cismin olabileceği argümanını ortaya koymuştur. Modellere göre, üçüncü cismin kütlesi 6.82 AB uzaklıkta ($P_{\text{yör}} = 7001.0$ gün) $M_c = 5.47M_{\text{jüp}}$ olmalıdır. Bu üçüncü cisim, TTV analizinde tespit edilen yörünge dönemi değişim sinyalini desteklememektedir, çünkü o uzaklıkta ve kütledeki bir cisimden kaynaklı pertürbasyon ~ 2 s kadardır. Sonuç olarak, yazarlar yörünge küçülmesinin TTV verisini en iyi temsil eden senaryo olduğuna karar vermiştir ve bu analiz sonucunda $\dot{P}_{\text{yör}} = -7.33 \pm 0.71$ ms/yıl bulmuşlardır. Buradan yola çıkarak gelgit kalite faktörünü $Q'_* = (5.1 \pm 0.9) \times 10^4$ olarak ölçmüşlerdir. Bu değer, barınak yıldızın anakol safhasını terk ettiğine işaret etmektedir.

Harre vd. (2023) CHEOPS ile yapılmış 8 adet yeni ışık eğrisiyle birlikte TTV analizini tekrarlamıştır ve önceki çalışmalarda olduğu gibi yörünge küçülmesinin istatistiksel olarak TTV verisini daha iyi temsil ettiği sonucuna varmıştır. Analizin sonucu olarak $dP_{\text{yör}}/dE = (-2.62 \pm 0.49) \times 10^{-10}$ gün/çevrim gibi bir yörünge dönemi değişimi bulmuştur, bu değişim $Q'_* = (5.7 \pm 1.0) \times 10^4$ gibi bir gelgit kalite faktörüne karşılık gelmektedir.

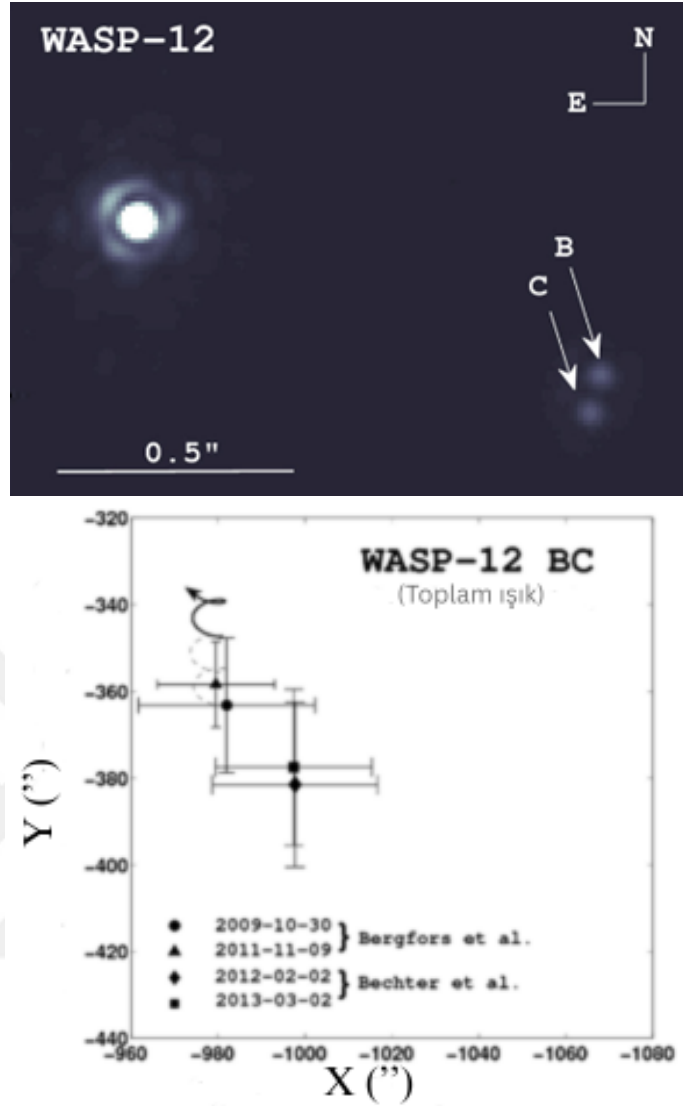
3.4 WASP-12b

İlk olarak Kanarya Adalarında konuşlandırılan SuperWASP-N aygıtıyla geçiş fotometrisi yoluyla gözlenen WASP-12b, keşfi yapıldığı tarihte bilinen en sıcak ve en büyük yarıçaplı ötegezegendi ($R_p = 1.79R_{\text{jüp}}$, $T_{eq} = 2516$ K ; Hebb vd. 2009). G0 tipi evrimleşmekte olan bir yıldızın ($M_* = 1.434M_{\odot}$, $R_* = 1.65R_{\odot}$; Collins vd. 2017b) etrafında dolanan bu gezegen, $1.41M_{\text{jüp}}$ kütlesi ve 1.09 günlük yörünge dönemi ile keşif tarihinden itibaren gelgit etkilerinin çalışılması için önemli bir laboratuvar olmuştur ve literatürde ilgi çekmiştir (Matsumura vd. 2010, Hansen 2010, Barker ve Ogilvie 2010). WASP-12b'nin yarıçapı modellerin tahmin ettiğinden (Bodenheimer vd. 2003, Fortney vd. 2007) oldukça büyüktür ve bu durum gelgit ısın-

ması (ing. tidal heating) ile açıklanabilir. Ancak bu mekanizmanın etkili olabilmesi için WASP-12b'nin yörüngesinin eksantrik ($e > 0$) olması gerekir (Li vd. 2010). Nitekim ilk gözlemler, WASP-12b'nin yörüngesinin dışmerkezliğini $e = 0.049 \pm 0.015$ olarak rapor etmiştir. Her ne kadar yarıçapın genişlemiş olma senaryosu için açıklayıcı bir değer olsa da WASP-12b gibi kısa yörünge dönemine sahip ötegezegenlerin yörüngelerinin gelgit etkilerinden dolayı çemberselleşmiş olması gerekmektedir (Goldreich ve Soter 1966). Bu bağlamda WASP-12b'nin yörünge geometrisinin doğru bir biçimde belirlenmesi oldukça önemlidir.

Campo vd. (2011), Spitzer teleskobu ile elde edilen veriler aracılığıyla WASP-12b'nin ikinci minimum ışık eğrisini analiz etmiş ve bu analiz sonucunda eksantrik bir yörüngeye rastlamamıştır. Elde edilen veriler, sistemin dairesel bir yörüngeye sahip olduğunu desteklemektedir. Bu sonuçların ardından, Husnoo vd. (2011) Fransa'daki 1.93 metrelik teleskoba bağlı SOPHIE spektrografi ile WASP-12'ye dair yeni tayf gözlemleri gerçekleştirmiştir. Bu çalışmalar da gezegenin yörüngesinin dairesel olduğunu doğrulamış ve yörünge döneminde gözlenen olası değişimlerin dışmerkezlik kaynaklı olamayacağını öne sürmüştür.

Bergfors vd. (2013) WASP-12'nin $1.047'' \pm 0''.021$ uzağında bir cisim daha tespit etmiştir. Ardından Crossfield vd. (2012) bu cismin yakın-kızılöte (NIR) tayfını incelemiştir ve bu cismin M-tayf türünden bir cüce yıldız olabileceğini öngörmüştür. Bu çalışmaları takiben WASP-12 "Friends of hot Jupiters" programı kapsamında Keck II AO (Wizinowich vd. 2000) ile gözlenmiştir ve bu gözlemlerin ışığında WASP-12'nin hiyerarşik üçlü sistem üyesi olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Bechter vd. 2014). Bu bulgular, daha sonra Ngo vd. (2015) ile doğrulanmıştır. Collins vd. (2017b) keşfi yapılan bu iki adet yeni bileşenin ~ 300 AB uzaklıkta olmasından dolayı WASP-12b'nin yörünge dinamiğine etkilerinin yok sayılabilecek mertebede olduğunu belirtmiştir. Bu iki bileşenin yaratabileceği potansiyel pertürbasyonlar, sonraki çalışmalarda da (Maciejewski vd. 2016, Patra vd. 2017, Yee vd. 2020, Kutluay vd. 2023, Adams vd. 2024, Alvarado vd. 2024) dikkate alınmamıştır.



Şekil 3.4 WASP-12B ve WASP-12C bileşenlerine ait görüntü ve astrometrik ölçümler.

Üst Panel: WASP-12B ve WASP-12C'nin Keck AO ile alınmış yüksek çözünürlüklü görüntüleri.

Alt Panel: WASP-12 BC ikilisinin yıllar içindeki açısal ayrılık ve konum açısı ölçümleri. Bechter vd. (2014)'ten uyarlanmıştır.

Maciejewski vd. (2013) 61 adet ışık eğrisinin kullanarak hem sistemin geçiş eferisini güncellemiş hem de olası yörünge dönemi değişimlerini farklı senaryolar altında incelemiştir. Buna göre WASP-12b sistemdeki tek gezegen olmayabilir, zira TTV analizine uyumlanan periyodik model ve RV verileri eksantrik bir yörüngede dönen ($e = 0.284 \pm 0.002$) 3.6 gün yörünge dönemine sahip bir üçüncü cismi ($m \sin i =$

$0.098 \pm 0.009 M_{\text{jüp}}$) işaret etmektedir.

Maciejewski vd. (2016) 31 adet yeni geçiş ışık eğrisi ile TTV analizini tekrarlamıştır. Bu analizin sonucunda WASP-12b'nin gelgit etkileri altında yörünge küçülmesi altında olduğu tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada $dP_{\text{yör}}/dE = (-8.9 \pm 1.4) \times 10^{-10}$ gün/çevrim bulunmuştur ve bu yörünge dönemi değişimi $Q'_* \approx 2.5 \times 10^5$ gibi bir gelgit kalite faktörüne karşılık gelmektedir. Bulunan bu sonuç Essick ve Weinberg (2016)'nın anakol evresindeki barınak yıldızlar için önerdiği $Q'_* = 4.3 \times 10^5$ değeriyle 1σ içerisinde uyumludur. Ek olarak, $L_{\text{tot}}/L_{\text{crit}} \approx 0.5$ bulunmuştur ve bu değer gezegenin yıldızla doğru göçünü işaret etmektedir (Ogilvie 2014). Sonradan yapılan çalışmalar (Patra vd. 2017, Maciejewski vd. 2018, Öztürk ve Erdem 2019, Yee vd. 2020, Turner vd. 2021, Wong vd. 2022, Kutluay vd. 2023, Adams vd. 2024, Leonardi vd. 2024, Alvarado vd. 2024) gelgit etkileri sebebiyle yörüngenin küçüldüğünü ve yörünge döneminin azaldığını doğrulamıştır. Bu çalışmalara ilişkin bulgular Çizelge 2.1'de verilmektedir.

Weinberg vd. (2017), WASP-12b'nin yörünge küçülmesine ilişkin gözlemsel bulguları teorik çerçevede değerlendirmek amacıyla, barınak yıldızın evrimini MESA modelleri kullanarak simüle etmiş ve bu modellerden elde edilen çıktılarla gelgit etkilerini yıldızın evrimsel safhasına bağlı olarak incelemiştir. Modeller $1.20 - 1.35 M_{\odot}$, $0 \leq [Fe/H] \leq 0.3$ değerleri için elde edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, gözlemsel olarak öngörülen $Q'_* \sim 10^5$, dinamik gelgitlerin barınak yıldız alt-dev evrim safhasındayken uyarılmasıyla açıklanabilmektedir. Ayrıca, sistemin anakol ömrünün yaklaşık %0.1'lik bir kısmında, gezegenin içsel kütleçekim dalgalarının yıldızın konvektif çekirdeği yakınlarında ($r < 0.001 R_*$) kırılarak etkin bir şekilde enerjiyi dağıttığı ve bu mekanizmanın gezegenin içeriye doğru göçünü hızlandırdığı öne sürülmektedir. Sonradan bu çalışma Bailey ve Goodman (2019) ve Barker (2020) ile doğrulanmıştır.

Çizelge 3.1 WASP-12b'nin yörünge küçülmesi analizine ilişkin literatür sonuçları.

Kaynak	$\frac{dP_{\text{yör}}}{dE} (\times 10^{-10})$ (gün/çevrim)	$\frac{dP_{\text{yör}}}{dt}$ (ms/yıl)	$Q'_* (\times 10^5)$	τ (Milyon yıl)
Patra vd. (2017)	-10.2 ± 1.1	-29 ± 3	≈ 2.5	3.2
Maciejewski vd. (2018)	-9.67 ± 0.73		1.82 ± 0.32	
Öztürk ve Erdem (2019)	-8.62 ± 0.79		1.76 ± 0.16	
Yee.vd. (2020)	-10.04 ± 0.69		1.8	$3.25^{+0.24}_{-0.21}$
Turner vd. (2021)	-9.45 ± 0.47	-32.53 ± 1.62	1.39 ± 0.15	2.90 ± 0.14
Wong vd. (2022)	-10.31 ± 0.33	-29.81 ± 0.94	1.5 ± 0.11	3.16 ± 0.10
Kutluay vd. (2023)	-10.73 ± 0.33	-31.03 ± 0.94	1.72 ± 0.39	3.04 ± 0.09
Leonardi vd. (2024)	-10.63 ± 0.93	-30.72 ± 2.67	2.13 ± 0.18	3.07 ± 0.26
Adams vd. (2024)	-10.31 ± 0.56	-29.8 ± 1.6	1.6	3.2
Alvarado vd. (2024)	-9.37 ± 0.33	-29 ± 2	1.6 ± 0.1	

4. MATERİYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasının öncelikli hedeflerinden biri, gelgit etkileşimlerinden kaynaklanan yörünge küçülmesini Geçiş Zamanlaması Değişimi (TTV) yöntemiyle araştırmaktır. Olası bir yörünge dönemi değişimi, gelgit teorisi kapsamında test edilmeden önce, yıldızın gelgit kalite faktörü Q'_* için Denklem 2.9 kullanılarak bir öngörü yapılabilir ve bu sayede gözlemsel veriler ile teorik modeller arasında bir karşılaştırma zemini oluşturulur. Böyle bir analizin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için, uzun bir zaman aralığına yayılmış ve yüksek hassasiyetli geçiş ışık eğrilerine ihtiyaç duyulmaktadır (Winn 2019).

TTV yöntemiyle elde edilen Q'_* değeri, yıldız iç yapısına bağlı farklı gelgit enerji yayılım mekanizmalarının öngörülerıyla karşılaştırılmalıdır. Bu amaçla, yıldızın iç yapısını modelleyen MESA modelleri kullanılarak, denge gelgitleri, atalet dalgaları ve içsel kütleçekim dalgaları gibi farklı gelgit mekanizmalarının etkisi altında beklenen Q'_* değerleri hesaplanabilir. Böylece, gözlemsel sonuçlarla teorik modellerin uyumu test edilerek, sistemin evrimi hakkında daha güçlü çıkarımlar yapılabilir.

4.1 Cisimlerin Seçilmesi

Bu tez çalışmasında, ötegezegen sistemlerinde yörünge küçülmesi olgusunun altında yatan fiziksel süreçlerin anlaşılmasına yönelik olarak, söz konusu davranışta belirleyici rol oynayan başlıca sistem parametreleri detaylı biçimde ele alınmıştır. Barınak yıldızın ve yörünge üzerindeki gezegenin kütleleri (M_* , M_p), yıldız yarıçapı (R_*), gezegenin yörüngesinin yarı-büyük eksen uzunluğu (a), dışmerkezlilik (e) ve yörünge dönemi ($P_{\text{yör}}$) gibi temel parametreler, yalnızca sistemin mevcut dinamik durumunu karakterize etmekle kalmayıp, aynı zamanda yıldız-gezegen etkileşimlerinin uzun vadeli evrimi hakkında da önemli ipuçları sunmaktadır.

Bu bağlamda, yıldız ve gezegen arasındaki gelgit etkileşmelerinin büyüklüğünü ve

zaman içindeki etkilerini değerlendirebilmek amacıyla iki adet boyutsuz metrik kullanılmıştır: yörünge küçülmesinin üstel katlanmalı zaman ölçeği (τ_a) ve yıldızın dönme hareketinin gezegenin yörünge hareketiyle senkronize olma zaman ölçeği (τ_{ω_*}). Bu metrikler, Siverd vd. (2012) ve Baştürk vd. (2023) tarafından sırasıyla Denklem 4.1 ve 4.2 ile verildiği şekilde tanımlanmıştır

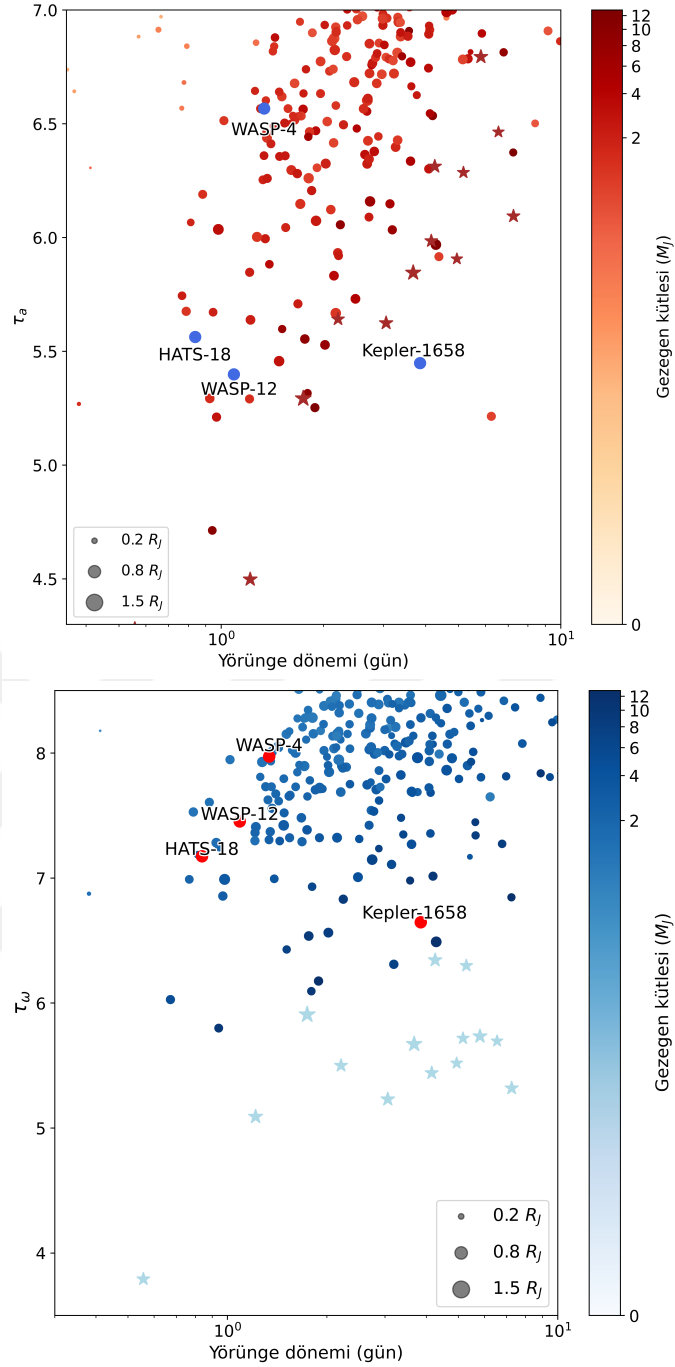
$$\tau_a \equiv \left(\frac{M_*}{M_p} \right) \left(\frac{a}{R_*} \right)^5 \quad (4.1)$$

$$\tau_{\omega_*} \equiv \left(\frac{M_*}{M_p} \right)^2 \left(\frac{a}{R_*} \right)^3 \quad (4.2)$$

Söz konusu metrikler, gelgit evriminin mutlak zaman ölçeklerini belirlemek amacıyla enerji yayılım mekanizmaları ile doğrudan ilişkili olmayan ancak sistemin yapısal ve gözlenebilir parametrelerini içeren boyutsuz ölçeklerdir. Böylelikle, gelgit etkileşimlerinin göreceli kuvveti, karmaşık fiziksel süreçlerin varsayımlarına bağımlı olmaksızın değerlendirilebilmektedir. Özellikle geçişi gözlenebilen ötegezegen sistemlerinde, τ_a ve τ_{ω_*} metriklerinin bileşenleri olan M_p/M_* ve a/R_* oranları, diğer fiziksel parametrelere kıyasla daha yüksek doğrulukla belirlenebilmektedir. Bu oranlar sırasıyla, dikine hız yarı-genliği (K) ve geçiş süresi ile yörünge dönemi oranı üzerinden güvenilir biçimde elde edilebilmektedir (Winn 2010).

Nitekim, sabit zaman gecikmesi varsayımı (Goldreich ve Soter 1966; Hut 1981) ve enerji yayılımının yıldızın içinde gerçekleştiği, sistemin çembersel ve hizalı yörüngede olduğu kabulüyle, yörünge küçülmesine ait karakteristik zaman ölçeği $\tau_{\text{decay}} \equiv a/|\dot{a}| = (12\pi)^{-1} Q'_* \tau_a P_{\text{yör}}$ olarak ifade edilir. Benzer şekilde, $\tau_{\text{synch}} \equiv \omega_*/|\dot{\omega}_*| = Q'_* \tau_{\omega_*} P_{\text{yör}}$ şeklinde verilir (Matsumura vd. 2010). Bu çerçevede, gelgit enerji yayılımının ayrıntılı fiziksel süreçlerine girmeden, Denklem 4.1 ve 4.2 aracılığıyla yörünge küçülmesi açısından ideal aday sistemler belirlenebilir. NASA Exoplanet Archive¹ veritabanından alınan gezegen kataloğu üzerindeki dağılımları ve seçilen adayların bu parametreler uzayındaki konumları Şekil 4.1'de gösterilmektedir.

¹<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>



Şekil 4.1 Yörünge küçülmesinin üstel katlanmalı zaman ölçeği (τ_a) ve dönme-dolanma senkronizasyon zaman ölçeği (τ_{ω_*}) parametrelerinin yörünge dönemine karşı dağılımı.

Tez çalışması kapsamında seçilmiş aday cisimler şekil üzerinde gösterilmiştir. Yuvarlak şekiller kütlesi $13 M_{Jüp}$ 'den küçük olan gezegenleri, yıldızlar ise kütlesi bu limitten büyük olan kahverengi cüceleri göstermektedir. Renk skalası gezegen kütlesini ve boyutları da gezegen yarıçapını temsil etmektedir. Veri NASA Exoplanet Archive'dan alınmıştır.

4.2 Geçiş Işık Eğrilerinin Elde Edilmesi

Bu çalışma kapsamında, HATS-18b, Kepler-1658b, WASP-4b ve WASP-12b adlı dört sıcak Jüpiter'e ait geçiş ışık eğrileri aşağıda belirtilen kaynaklardan elde edilmiştir:

i) *Exoplanet Transit Database (ETD)*: Variable Star and Exoplanet Section of Czech Astronomical Society tarafından amatör ve profesyonel gözlemcilerin katkılarıyla oluşturulan, dünya genelindeki küçük ve orta ölçekli teleskoplardan elde edilen geçiş ışık eğrilerini ve bu ışık eğrilerinin modellenmesiyle elde edilen geçiş zamanlarını içeren herkese açık bir veritabanıdır². Özellikle uzun zaman aralığına yayılan ve literatürde daha az yer bulan geçiş gözlemlerinin takibi açısından değerlidir. Bu çalışmada ETD verileri, WASP-12, HATS-18b ve WASP-4b için geçmiş yıllara ait geçiş ışık eğrilerinin toplanmasında kullanılmıştır.

ii) *Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS)* ve *Kepler uzay teleskoplarının veritabanları*: Kepler, Güneş benzeri yıldızların etrafındaki ötegezegenleri geçiş yöntemiyle tespit etmek amacıyla 2009 yılında NASA tarafından fırlatılmıştır (Borucki vd. 2010). Onun ardından gelen TESS ise 2018 yılında fırlatılmış ve tüm gökyüzünü tarayarak Dünya'ya yakın parlak yıldızların etrafındaki ötegezegenleri aramayı hedeflemiştir (Ricker vd. 2015). İlgili uzay teleskoplarına ait geçiş ışık eğrileri, Mikulski Archive for Space Telescopes (MAST) arşivinden³ elde edilmiştir. Bu çalışmada ışık eğrileri analiz edilen TESS sektörleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

iii) *Literatür çalışmaları*: Önceki akademik yayınlarda yayınlanmış geçiş ışık eğrileri ve geçiş zamanı ölçümleri, özellikle ETD veya uzay teleskoplarının verileriyle örtüşmeyen zamanlardaki gözlemler için tamamlayıcı nitelik taşır. Bu çalışmalara ait veriler NASA Astrophysical Data System⁴ portalı üzerinden ilgili yayınlara gidilerek eğer yayınla birlikte geçiş ışık eğrisi verileri sağlandıysa elde edilmiştir. Sağlan-

²<https://var.astro.cz/en>

³<https://mast.stsci.edu/portal/Mashup/Clients/Mast/Portal.html>

⁴<https://ui.adsabs.harvard.edu/classic-form/>

madığı senaryoda, yayın yazarlarıyla iletişime geçilerek gerekli bilgiler ve geçiş ışık eğrisi verisi temin edilmeye çalışılmıştır. Yazara ulaşılamayan durumlarda ise, çalışmanın sürekliliğini sağlamak amacıyla ilgili yayınlarda sunulan geçiş zamanları doğrudan kullanılmıştır.

Söz konusu geçiş ışık eğrilerine ait sayısal veriler Çizelge 4.1’de sunulmuştur.

Çizelge 4.1 Farklı kaynaklardan elde edilen ışık eğrisi verisi sayıları.

Cisim	ETD	Kepler	TESS	Literatür	Bu çalışma	Toplam
HATS-18	4	0	104	30	2	140
Kepler-1658	0	308	22	2	0	332
WASP-4	41	0	61	37	34	173
WASP-12	83	0	116	78	2	279
Toplam						924

Çizelge 4.2 Bu çalışmada analiz edilen sistemlere ait TESS sektörleri ile gözlem aralıkları.

Sistem	Sektör No.	Gözlem aralığı
HATS-18	10, 36, 63, 90	Nisan 2019 – Mart 2025
Kepler-1658	41, 54, 55, 74, 75, 81, 82	Ağustos 2021 – Ağustos 2024
WASP-4	2, 28, 29, 69	Eylül 2018 – Eylül 2023
WASP-12	20, 43, 44, 46, 71, 72	Ocak 2020 – Kasım 2023

4.3 Yer-tabanlı Fotometrik Gözlemler

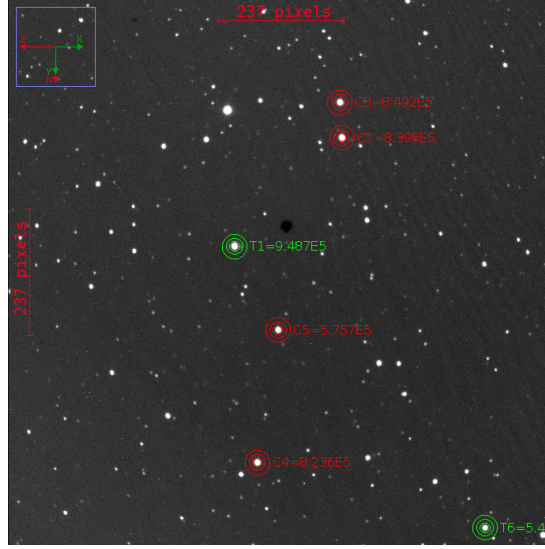
Farklı kaynaklardan elde edilen geçiş ışık eğrilerine ek olarak, yer-tabanlı teleskopların kullanılması ile geçiş ışık eğrisi veri kümesine yeni gözlemler kazandırılmıştır.

i) *Ankara Üniversitesi Kreiken Gözlemevi (AUKR) T80 Prof. Dr. Berahitdin Albayrak Teleskobu*: WASP-12b’nin geçişi, 3 Mart 2025 tarihinde Ankara Üniversitesi Kreiken Gözlemevi’nde bulunan T80 Prof. Dr. Berahitdin Albayrak Teleskobu ile

gözlemlenmiştir. Ritchey–Chrétien optik tasarıma sahip teleskop, 80 cm çapında bir birincil aynaya ve $f/7$ odak oranına sahiptir. Teleskop, $13 \mu\text{m}$ piksel boyutuna sahip, 1024×1024 çözünürlüklü, arkadan aydınlatmalı bir CCD kamera ile donatılmış olup; bu sistem ile $11.84' \times 11.84'$ boyutlarında bir görüş alanı ve yaklaşık $53.4''/\text{mm}$ görüntü ölçeği elde edilmektedir. Gözlem SDSS- i' filtresi ile odaklı bir şekilde 75 saniyelik poz süresiyle gerçekleştirilmiştir. Toplamda 222 poz alınmış olup, gözlenen alan Şekil 4.2’te verilmiştir.

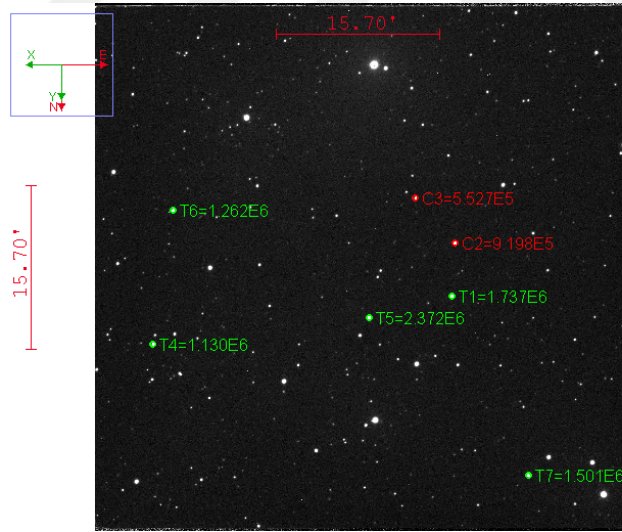
ii) *TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi T100 Teleskobu*: WASP-12b’nin geçişi 2 Şubat 2025 tarihinde Antalya Bakırlıtepe’de bulunan TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi’ne (TUG) ait T100 teleskobu ile gerçekleştirilmiştir. TUG T100 teleskobu 100 cm birincil ayna çapına ve $f/10$ odak oranına sahiptir. Gözlem sırasında SI 1100 CCD kamera kullanılmıştır. Bu kamera, 4096×4037 piksel çözünürlüğe sahiptir. Piksel boyutu 15 mikron olup piksel ölçeği $0.31''/\text{piksel}$ ’dir. Görüş alanı (FoV) yaklaşık $21.5' \times 21.5'$ düzeyindedir. Kamera soğutması Cryo-tiger ile -100°C civarındadır. Binning seçenekleri 1×1 , 2×2 , 3×3 ve 4×4 olarak sunulmaktadır. Gözlem 1×1 binning ile gerçekleştirilmiştir. Dinamik aralığı 16-bit olup, bu da maksimum 65536 ADU (2^{16}) değerine karşılık gelmektedir. Gözlem SDSS- g' filtresi kullanılarak ve 120 saniyelik poz süresiyle gerçekleştirilmiştir. Gözlenen alan Şekil 4.3’de verilmiştir.

iii) *ESO La Silla, 1.54m Danimarka Teleskobu*: 2019 ve 2021 yılları arasında WASP-4b’nin 28 adet geçişi, Şili’deki La Silla Gözlemevi’nde bulunan 1.54m Danimarka (Danish) Teleskobu ile gözlenmiştir. Gözlemler, Southworth vd. (2019) çalışmasında açıklanan yöntemle aynı şekilde gerçekleştirilerek veri homojenliği en üst düzeye çıkarılmaya çalışılmıştır. Bu bağlamda, gözlemler DFOSC (Danish Faint Object Spectrograph and Camera) kullanılarak görüntüleme modunda yapılmış, teleskop odak dışı bırakılarak fotometrik hassasiyet artırılmış, CCD’nin yalnızca belirli bir bölgesi okunarak okuma süresi azaltılmış, ancak pikseller birleştirilmemiştir. Poz süreleri genellikle 100 saniye olarak seçilmiş, bazı durumlarda satürasyonu önlemek için bu süre kısaltılmıştır. Gözlemler yüksek geçirgenlik sağlayan Bessell R filtresi ile gerçekleştirilmiştir. Gözlemlere ilişkin ek bilgiler (tarih, başlangıç/bitiş saati, poz



Şekil 4.2 WASP-12'nin ve mukayese yıldızlarının içinde bulunduğu T80 tarafından gözlenen alan.

WASP-12 (T1) yeşil, mukayese yıldızları TYC 1891-324-1 (C2), TYC 1891-38-1 (C3), TYC 1891-876-1 (C4) ve 2MASS J06303188+2942273 (C5) kırmızı ile gösterilmektedir. HD 258119 (T6) fotometrik analizde kullanılmamıştır.



Şekil 4.3 WASP-12'nin ve mukayese yıldızlarının içinde bulunduğu T100 tarafından gözlenen alan.

WASP-12 (T1) yeşil, mukayese yıldızı 2MASS J06303188+2942273 (C2) kırmızı ile gösterilmektedir. Diğer bir mukayese yıldızı C3 SIMBAD veri tabanında isimlidir. T4, T5, T6 ve T7 ile gösterilen yıldızlar, fotometrik analizde kullanılmamıştır.

sayısı, okuma süresi, hava kütlesi) Çizelge 4.3’de verilmiştir.

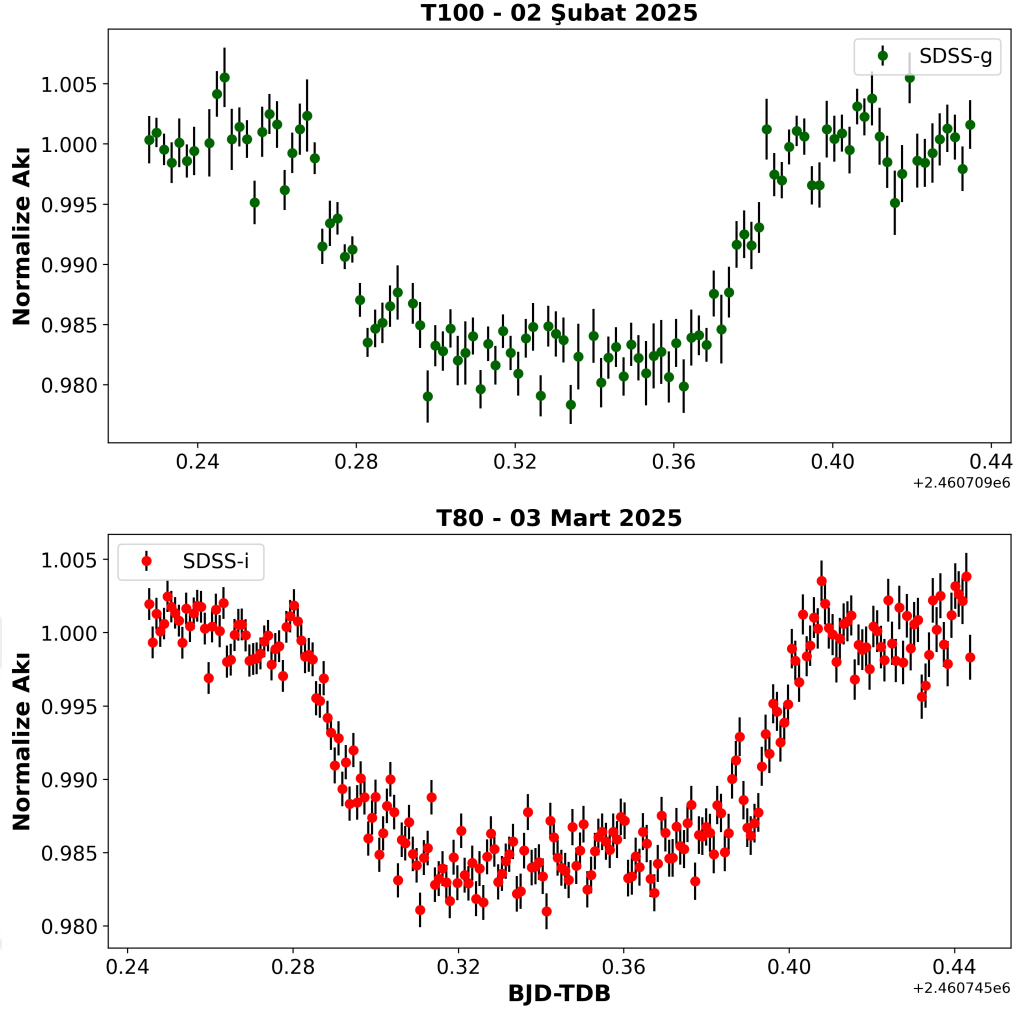
iv) *TRAPPIST-South Teleskobu*: TRAPPIST-South (TRAnsiting Planets and Planetsimals Small Telescope, Jehin vd. 2011; Gillon vd. 2011), Şili’deki ESO-La Silla Gözlemevi’nde bulunan 60 cm çapında bir Ritchey-Chretien teleskobudur. Teleskop, 2K×2K FLI Proline CCD kamera ile donatılmıştır ve bu kameranın görüş alanı 22’×22’ olup, piksel ölçeği 0.65"/piksel’dir. 23 Ağustos 2024 ve 27 Ağustos 2024 tarihlerinde, TRAPPIST-South teleskobu ile WASP-4b’nin iki tam geçiş gözlemi gerçekleştirilmiştir. Bu gözlemler, Sloan-z’ filtresi kullanılarak ve 40 saniyelik poz süresi ile yapılmıştır. Gözlemlere ilişkin ek bilgiler Çizelge 4.4’de verilmiştir.

v) *El Sauce Gözlemevi*: Fransa’daki Baronnie Provençales Gözlemevi’nden uzak-tan erişimle kontrol edilebilen Şili’deki El Sauce Gözlemevi’ne ait CDK20 teleskobu, ekvatoryal montaja sahip olup, yüksek çözünürlüklü Moravian G4 16K CCD kamerasıyla donatılmıştır. Bu teleskop aracılığıyla 08 Mayıs 2024 ve 29 Mayıs 2024 tarihlerinde HATS-18b’nin iki adet, 14 Temmuz 2024, 18 Temmuz 2024, 27 Ağustos 2024 ve 3 Eylül 2024 tarihlerinde WASP-4b’nin dört adet geçiş gözlemi elde edilmiştir. WASP-4b’ye ait gözlemler Bessell R ve L filtresinde gerçekleştirilirken, HATS-18b’ye ait gözlemler sadece L filtresinde gerçekleştirilmiştir. Gözlemlere ait diğer detaylar Çizelge 4.4’de verilmiştir.

4.4 Gözlemlerin İndirgenmesi ve Normalizasyonu

4.4.1 Yer-tabanlı fotometrik gözlemler

i) *T80 ve T100 gözlemleri*: AUKR T80 ve TUG T100 gözlemlerinden elde edilen fotometrik veriler, AstroImageJ (Collins vd. 2017a) programı kullanılarak öncelikle aletsel etkilerden arındırılmış (dark, bias, flat düzeltmesi), hava-kütleleri tüm pozların ortası için Denklem 4.3 kullanılarak hesaplanmış ve gözlem zamanları Jülyen gününden (JD) dinamik Barisentrik Jülyen gününe (BJD-TDB) dönüştürülmüştür.



Şekil 4.4 Farklı teleskoplar ve filtrelerle gerçekleştirilen WASP-12b geçiş gözlemlerine ait ışık eğrileri.

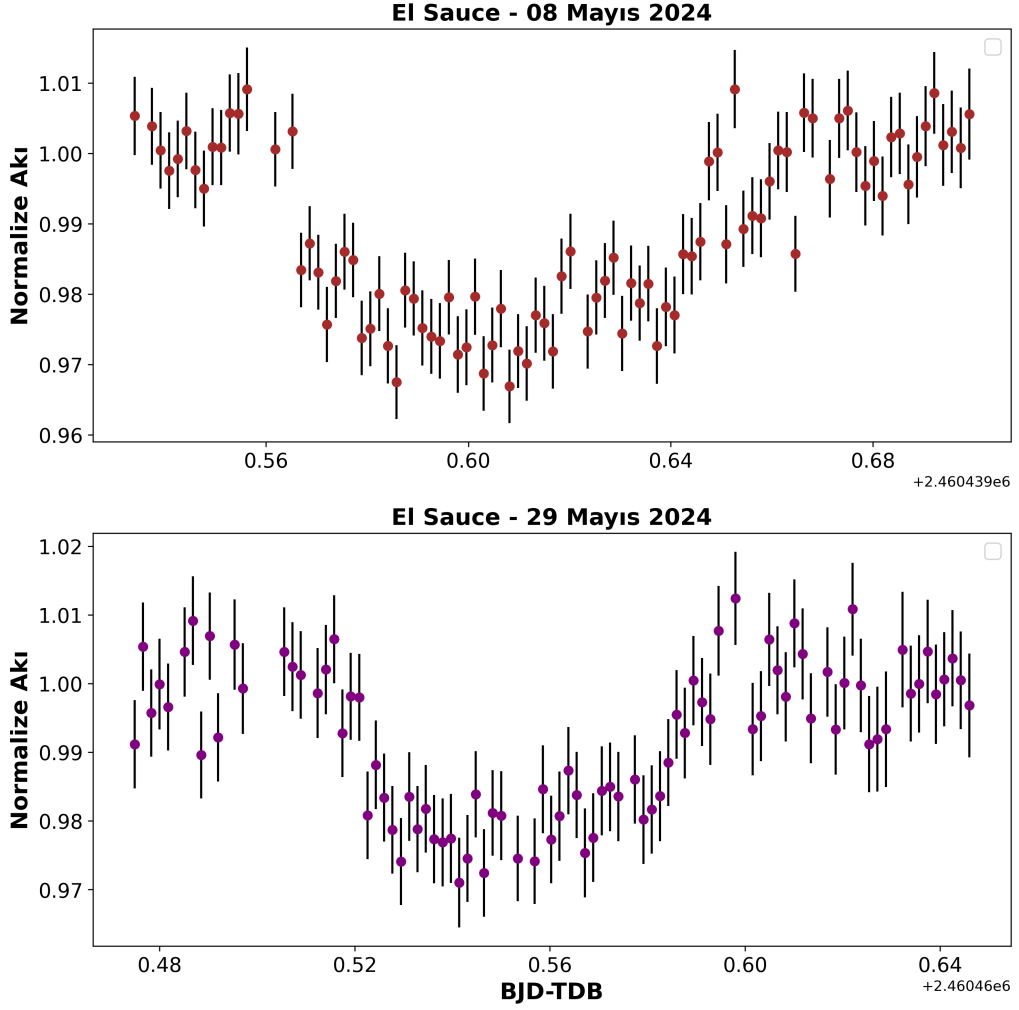
$$\begin{aligned}
 X = & \sec z - 0.0018167(\sec z - 1) - 0.002875(\sec z - 1)^2 \\
 & - 0.0008083(\sec z - 1)^3
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

Bu teleskop ile elde edilen 2 gözlem için de 5'er adet Dark (poz süresi ile aynı sürede), Bias (0 saniye poz sürelili) ve Flat (1 ila 5 saniye arasında) görüntüsü alınmış, bu görüntülerin medyanları alınarak aletsel etkiler giderilmiştir. Ardından, diferansiyel fotometri (Honeycutt 1992) tekniği ile ışıkölçümlerinin yapılması için parlaklıkları ve renkleri hedef yıldıza (WASP-12) olabildiğince yakın ve gözlem süresi boyunca hassas ölçümler yapılabilmiş mukayese yıldızlar (Şekil 4.2 ve 4.3) seçilmiştir. Işık eğrilerinin bir sonraki aşamada EXOFAST ile modellenmesi için normalize olması

Çizelge 4.3 ESO La Silla Gözlemevi’ndeki 1.54m Danimarka Teleskobu ile yapılan WASP-4b gözlemlerine ilişkin bilgiler

$N_{\text{gözlem}}$, toplam poz sayısını; T_{poz} , poz süresini; T_{ara} , pozlar arası okuma süresini; “Filtre” sütunu ise kullanılan fotometrik filtreyi ifade etmektedir.

Gözlem Tarihi (yy/aa/gg)	Başlangıç Saati (UT)	Bitiş Saati (UT)	$N_{\text{gözlem}}$	T_{poz} (s)	T_{ara} (s)	Filtre	Hava Kütlesi
2019/07/17	03:16	07:38	136	100	13	R	2.12 → 1.02 → 1.05
2019/07/25	04:00	07:57	126	100	13	R	1.56 → 1.02
2019/07/29	02:25	07:13	101	100	14	R	1.47 → 1.02
2019/08/02	04:46	08:44	124	100	14	R	1.23 → 1.02 → 1.25
2019/08/06	04:41	08:57	134	100	14	R	1.21 → 1.02 → 1.23
2019/08/10	04:58	09:14	133	100	14	R	1.12 → 1.02 → 1.15
2019/08/14	05:48	09:45	124	100–90	14	R	1.05 → 1.02 → 1.27
2019/08/18	05:46	09:59	134	100	13	R	1.04 → 1.02 → 1.38
2019/08/22	05:35	10:21	136	100	14	R	1.03 → 1.02 → 1.57
2019/08/26	06:31	09:47	103	100	14	R	1.03 → 1.67
2019/08/30	06:01	10:00	115	100	13	R	1.03 → 1.02 → 1.76
2021/08/07	05:17	08:21	101	100–60	16	R	1.11 → 1.02 → 1.11
2021/09/15	00:22	04:32	132	100	13	R	1.64 → 1.02
2021/09/19	00:49	04:27	107	100	14	R	1.40 → 1.02
2021/09/23	01:35	05:30	116	100	14	R	1.17 → 1.02 → 1.18
2021/09/27	01:48	05:19	110	100	15	R	1.13 → 1.02 → 1.08
2021/10/05	01:54	06:14	164	100–80	15	R	1.07 → 1.02 → 1.25
2021/10/13	01:45	06:59	161	100	14	R	1.05 → 1.02 → 1.61
2021/10/17	03:25	07:12	107	100	28	R	1.04 → 1.83
2022/09/22	01:57	05:00	107	100–80	14	R	1.15 → 1.02 → 1.04
2022/10/12	03:02	07:02	118	100–120	14	R	1.02 → 1.60
2023/08/05	04:26	09:00	142	100	16	R	1.26 → 1.02 → 1.09
2023/08/13	05:41	09:44	124	100	15	R	1.06 → 1.02 → 1.26
2023/08/17	06:09	09:32	108	100	15	R	1.03 → 1.02 → 1.37
2023/09/29	02:03	05:41	113	100	14	R	1.10 → 1.02 → 1.14
2024/07/26	04:18	07:36	101	100	17	R	1.43 → 1.03
2024/07/30	02:58	08:45	180	100–90	14	R	1.87 → 1.02 → 1.05
2024/09/27	01:45	05:43	112	100–80	14	R	1.14 → 1.02 → 1.11



Şekil 4.5 El Sauce Gözlemevindeki HATS-18b'nin geçiş gözlemlerine ait ışık eğrileri.

gerekmektedir. Bu bağlamda, ışık eğrilerinin geçiş başlangıç ve bitiş noktaları tespit edilmiştir ve geçiş dışı akı miktarına göre ışık eğrileri 1'e normalize edilmiştir. Bu işlemlerin sonunda, Şekil 4.4'de görülen ışık eğrileri elde edilmiştir.

ii) *1.54m Danimarka Teleskobu gözlemleri:* ESO La Silla Gözlemevi'ndeki 1.54m Danimarka Teleskobu ile yapılan gözlemler sonucunda elde edilen fotometrik veriler, ışıkölçümleri gerçekleştirmek için NASA ASTROLIB⁵ kütüphanesinde yer alan DAOPHOT (Stetson 1987) yazılımındaki APER rutinini kullanan IDL⁶ tabanlı DEFOT yazılımı (Southworth vd. 2014) kullanılarak indirgenmiştir. Bias ve flat alanlarının

⁵<https://asd.gsfc.nasa.gov/archive/idlastro/>

⁶<https://www.ittvis.com/idl/>

Çizelge 4.4 El Sauce Gözlemevi'ndeki CDK20 teleskobu ve ESO La Silla Gözlem-evi'ndeki TRAPPIST-South teleskobu ile gerçekleştirilen WASP-4b ve HATS-18b ge-çiş gözlemlerine ait özet bilgiler

Gözlem Tarihi (yy/aa/gg)	Başlangıç Saati (UT)	Bitiş Saati (UT)	$N_{\text{gözlem}}$	T_{poz} (s)	T_{ara} (s)	Filtre	Hava Kütlesi
WASP-4b – El Sauce							
2024/07/14	04:04	07:29	84	120	20	L	1.78 → 1.05
2024/07/18	03:11	07:50	115	120	20	L	2.16 → 1.02
2024/08/27	06:43	10:14	81	120	20	R	1.04 → 1.69
2024/09/03	00:43	03:55	60	120	20	R	1.77 → 1.07
WASP-4b – TRAPPIST-South							
2024/08/23	06:02	10:24	309	40	11	z'	1.03 → 1.63
2024/08/27	06:00	10:24	313	40	11	z'	1.03 → 1.74
HATS-18b – El Sauce							
2024/05/08	00:42	04:39	92	120	20	L	1.00 → 1.44
2024/05/29	23:24	03:25	86	120	20	L	1.00 → 1.50

$N_{\text{gözlem}}$, toplam poz sayısını; T_{poz} , poz süresini; T_{ara} , pozlar arası okuma süresini; "Filtre" sütunu kullanılan gözlem filtresini ifade etmektedir.

kalibrasyonları yapılmıştır, ancak kullanılmamıştır çünkü ana etkileri, ortaya çıkan ışık eğrilerinin yayılmasını arttırmaktır. Her bir ge-çiş gözlemi için, hedef yıldızın parlaklığından mukayese yıldızının parlaklığı çıkarılarak ışık eğrisi oluşturulmuştur. Bu teleskop ile elde edilen tüm ışık eğrileri EK-1'de sunulmuştur.

iii) *El Sauce gözlemleri*: El Sauce Gözlemevi'ndeki CDK20 teleskobuyla elde edilen ge-çiş gözlemleri, C-MUNIPACK (Hroch 2014) yazılım paketinin MUNIWIN pro-gramıyla indirgenmiş ve normalize edilmiştir. JD-UTC formatında kaydedilen gö-zlem zamanları, gözlemevinin konumu ile cismin ekvatoryal koordinatları esas alı-narak BJD-TDB sistemine dönüştürülmüştür. Hava kütlesi hesabında T80 ve T100 verilerinde olduğu gibi Denklem 4.3 kullanılmıştır. WASP-4b'ye ait ışık eğrileri EK-1'de, HATS-18b'ye ait ışık eğrileri ise Şekil 4.5'de verilmiştir.

4.4.2 ETD, TESS, Kepler ve literatür verileri

ETD ve literatür kaynaklarından toplanan ışık eğrilerinin zaman birimleri BJD-TDB formatında değilse, gözlemin yapıldığı konum (coğrafi enlem, boylam ve yük-

seklik) ile yıldızın konum bilgileri (sağ açıklık ve dik açıklık; RA ve DEC) kullanılarak bir Python kodu yardımıyla BJD-TDB'ye dönüştürülmüştür. Bu hesaplama sırasında, Denklem 4.3 kullanılarak hava kütlesi hesaplanmıştır. Ardından, tıpkı T80 ve T100 verilerinde olduğu gibi, AstroImageJ kullanılarak ışık eğrilerine hava kütlesi düzeltmesi uygulanmış ve geçiş dışı akıya göre ışık eğrileri 1'e normalize edilmiştir.

TESS ve Kepler gözlemleri için, Mikulski Archive for Space Telescopes (MAST) üzerinden iki dakikalık ışık eğrileri indirilmiştir. TESS verileri, Science Processing Operations Center (SPOC) yazılımı (Jenkins vd. 2016) tarafından işlenmiş olup; basit açıklık fotometrisi (ing. simple aperture photometry, SAP) akı değerleri (SAP-Flux) ile gezegen sinyali maksimize etmeye yönelik işlemler sonucu elde edilen presearch data conditioning (PDCSAP-Flux) ve yıldız değişkenliği kaynaklı etkilerin de minimize edilmeye çalışılmasıyla elde edilen data validation time series (DVT) türü ışık eğrilerini içermektedir (Jenkins vd. 2010). Bu çalışma kapsamında, DVT ışık eğrileri Python'ın LIGHTKURVE⁷ kütüphanesi (Lightkurve Collaboration 2018) kullanılarak işlenmiş; hava kütlesi etkisinden arındırılmış ve geçiş dışı ışık akısına göre normalize edilmiş hallerine dönüştürülerek analiz için kullanıma hazır hale getirilmiştir. Hassas geçiş zamanı ölçümlerinin yapılabilmesi amacıyla, elde edilen ışık eğrileri referans efemeris elemanları (T_0 , $P_{\text{yör}}$) kullanılarak her biri yalnızca tek bir geçişi içerecek şekilde bölünmüş ve modellenenebilir ışık eğrileri haline getirilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında verisi elde edilen TESS Sektörlerine ilişkin bilgiler Çizelge 4.2'de verilmiştir.

4.5 Işık Eğrilerinin Modellenmesi

Bu tez çalışması kapsamında elde edilen toplam hava kütlesi etkisinden arındırılmış ve maksimum ışık seviyesine normalize edilmiş 924 ışık eğrisi, EXOFAST-V1⁸ (Eastman vd. 2013, 2019) yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Atmosferik parametreler için yıldızlara ait öncül dağılımların (ing. prior distribution) merkezleri ve

⁷<https://lightkurve.github.io/lightkurve/>

⁸<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/cgi-bin/ExoFAST/nph-exofast>

genişlikleri, NASA Exoplanet Archive veritabanından otomatik olarak seçilmiş ve bu değerler Gaussyen öncül dağılımlar (ing. Gaussian priors) olarak belirlenmiştir. Gezegenlerin yörünge dönemleri ise sabit değerler olarak alınmıştır. Kenar kararım katsayıları için ise, yıldızların atmosferik parametreleri ve gözlenen geçiş bantları temel alınarak Claret ve Bloemen (2011) çalışmasından otomatik olarak düzgün dağılımlı öncüller elde edilmiştir. Her bir model için, yazılımın sunduğu bant (filtre) seçeneklerinden uygun bant seçilmiş, TESS gözlemleri için Bessell-I bandı, filtresiz alınan (ing. clear) gözlemler için neredeyse tüm görsel bölgeyi kaplayan, çok geniş bir geçirgenlik eğrisine sahip CoRoT bandı seçilmiştir. Bu çalışmaya dahil sistemler için modellemelerde kullanılan başlangıç değerleri ve belirsizlikleri Çizelge 4.5’de verilmiştir. ETD, TESS ve literatür verileri için EXOFAST modellerinden elde edilen minimum zamanlar ve belirsizlikleri, EK-2’de her bir sistem için ayrı tablolar halinde verilmektedir.

Çizelge 4.5 EXOFAST modellerinde kullanılan başlangıç parametre değerleri.

	HATS-18b	Kepler-1658b	WASP-4b	WASP-12b
R_p/R_*	0.132	0.0369	0.152	0.117
i [°]	85.29	76.52	89.03	81.80
a/R_*	3.658	4.04	5.451	3.000
$\log g$ [cgs]	—	3.673	4.47	4.11
T_{eff} [K]	5600 ± 120	6216 ± 78	5400 ± 90	6265 ± 50
[Fe/H]	0.28 ± 0.08	-0.18 ± 0.01	-0.03 ± 0.09	0.30 ± 0.10
$P_{\text{yör}}$ (gün)	0.83784	3.84937	1.33823	1.09142
e	—	0.0628	0	0
ω [°]	—	352.27	—	—
K [m/s]	415.2	580.83	241.1	—
RV Değişim Oranı	0	0	0	0

4.6 Işık Eğrilerinin Seçilmesi

Elde edilen tüm ışık eğrileri, TTV analizinin hassas bir şekilde gerçekleştirilebilmesi amacıyla nicel kriterler doğrultusunda değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, yalnızca geçiş zamanlarını doğru biçimde temsil eden ve sistematik hatalardan arındırılmış ışık eğrileri örnekleme dahil edilmiştir. Işık eğrisi kalitesinin homojenleştirilmesi, uzun zaman aralıklarına yayılan verilerle yapılan yörünge evrimi analizlerinin güvenilirliği açısından kritik önem taşımaktadır (Winn 2019).

Bu istatistiksel eleme yöntemi, literatür, açık veri tabanları (ETD, TESS) ve bu çalışmadaki yeni gözlemlerden elde edilen ışık eğrilerini içeren geniş bir veri kümesiyle, WASP-4b ve WASP-1b2 sıcak Jüpiterlerine uygulanmıştır. Bu iki sistem için yeterli sayıda gözlem bulunduğundan, geçiş zamanlarının hassasiyetini artırmak amacıyla detaylı bir filtreleme süreci yürütülmüştür. Buna karşılık, HATS-18b ve Kepler-1658b sıcak Jüpiterleri için yalnızca literatürde ve uzay teleskoplarının arşivlerinde yayınlanmış sınırlı bir zaman aralığına dağılmış yüksek kaliteli ışık eğrisi mevcut olduğundan, bu sistemlerde ışık eğrisi seçimi için benzer bir istatistiksel eleme yöntemi tercih edilmemiştir.

Işık eğrilerinin değerlendirilmesinde aşağıdaki üç temel ölçüt kullanılmıştır:

1. *Fotometrik Gürültü Oranı* (ing. *Photometric Noise Rate, PNR*): Fotometrik gürültü oranı, bir ışık eğrisinin geçiş olayını ne kadar iyi örnekleyebildiğini anlamak için kullanılan önemli bir nicel ölçüttür. PNR değeri, Denklem 4.4 ile tanımlandığı şekilde hesaplanır (Fulton vd. 2011):

$$\text{PNR} = \frac{\sigma_{\text{res}}}{\sqrt{N}} \times 10^3 \text{ [ppt]} \quad (4.4)$$

Burada σ_{res} model uyumlaması sonrasında elde edilen ışık eğrisi artıklarının standart sapmasını temsil eder. N geçiş süresi boyunca elde edilen veri noktası sayısını belirtir. 10^3 çarpanı ise, hesaplanan değer binde bir (ing. parts-per-thousand, ppt) cinsinden ifade edilmesini sağlar. PNR, özünde korele olmayan ve Gaussyen

dağılması beklenen (beyaz) gürültünün bir ölçütüdür.

Bu çalışmada, geçiş sinyalinin belirginliği açısından aşağıdaki kriter uygulanmıştır:

$$\text{PNR (ppt)} > \delta \quad (4.5)$$

Yani PNR değeri, geçiş derinliği δ 'dan büyükse, o ışık eğrisi geçişi örneklemede yetersiz kaldığı için elenmiştir.

2. Zamanla İlişkili Kırmızı Gürültü Faktörü (β Faktörü): β faktörü, ışık eğrilerindeki zamanla korele (ilişkili) sistematik hataların (kırmızı gürültü) varlığını tespit etmek için kullanılır. Bu yöntem Pont et al. (2006) çalışmasından uyarlanmıştır. Farklı zaman aralıklarında birleştirme (binning) yapılmış artıkların standart sapması, beyaz gürültü varsayımı altındaki sapmadan sistematik biçimde büyükse, bu durum kırmızı gürültünün göstergesidir. β değeri şu şekilde tanımlanır:

$$\beta = \frac{\sigma_N}{\sigma_1/\sqrt{N}} \quad (4.6)$$

Burada σ_1 , birleştirme öncesi artıkların standart sapmasını; σ_N ise N veri noktasını içeren birleştirilmiş artıkların standart sapmasını ifade eder.

Bu analizde $\beta > 2.5$ olan ışık eğrileri, zamanla korelasyon içeren sistematik hatalar nedeniyle analiz dışı bırakılmıştır.

3. Geçiş Derinliği için 3σ Testi: İki sistem için de geçiş derinliği (δ) değerlerinin dağılımı incelenmiş ve ortalamanın $\pm 3\sigma$ dışındaki ışık eğrileri aykırı kabul edilmiştir. Bu durumda, bir ışık eğrisi, geçiş derinliği δ_i için aşağıdaki eşitsizliği sağlıyorsa elenmiştir:

$$|\delta_i - \bar{\delta}| > 3\sigma_\delta \quad (4.7)$$

$\bar{\delta}$, geçiş derinliklerinin ortalamasını; σ_δ ise geçiş derinliği dağılımının standart sapmasını ifade etmektedir. Bu kriter, gözlemsel sistematiklerden veya yetersiz model-

lemeden kaynaklanan söz konusu sistem için fiziksel olmayan parametre değerlerine karşılık gelen geçiş derinliklerinin elimine edilmesi için kullanılmıştır.

WASP-4b için 41 ETD, 61 TESS, 37 literatür ve 34 bu çalışma dahilinde gözlem olmak üzere toplam 173 ışık eğrisi değerlendirilmiştir (Çizelge 4.1). Uygulanan seçim kriterleri sonucunda 5 ETD, 7 literatür ve 5 yeni gözleme ait ışık eğrisi eliminasyona tabi tutulmuş ve toplamda 154 ışık eğrisi TTV analizi için kullanılabilir bulunmuştur. Seçim kriterlerinin yanı sıra, literatürden 2 ışık eğrisi daha veri kümesinden çıkartılmıştır. Bu ışık eğrileri, Winn vd. (2009) çalışmasına ait olup zaman ölçeğinin UTC mi yoksa TDB mi olduğu belirtilmediği ve aynı gözlemlerin Sanchis-Ojeda vd. (2011) çalışmasında da yer aldığı tespit edildiği için analiz dışında bırakılmıştır.

WASP-12b için ise 83 ETD, 116 TESS, 78 literatür ve bu çalışma dahilinde elde edilmiş 2 gözlem olmak üzere toplam 279 ışık eğrisi değerlendirilmiştir. Bu ışık eğrilerinden 34 ETD, 3 TESS ve 9 literatür ışık eğrisi seçim kriterlerini karşılamadığı gerekçesiyle elenmiş ve 233 ışık eğrisi analizde kullanılmak üzere seçilmiştir. TTV analizi öncesi son kez revize edilmiş tüm ışık eğrilerinin sayısı Çizelge 4.6'da verilmektedir.

Çizelge 4.6 TTV analizi için seçilen ışık eğrisi miktarları.

Cisim	ETD	Kepler	TESS	Literatür	Bu çalışma	Toplam
HATS-18	4	0	104	30	2	144
Kepler-1658	0	308	22	2	0	332
WASP-4	36*	0	61	28*	29*	154*
WASP-12	49*	0	113*	69*	2	233*
Toplam						863*

*Kriterler sonrası güncellenmiştir.

4.7 Geçiş Zamanları Değişimi Analizi

Geçiş yapan en az bir gezegene sahip yıldız sistemlerinde, çeşitli fiziksel süreçler (örn. yörünge küçülmesi, barınak yıldızdaki manyetik aktivite çevrimi, ışık-zaman etkisi, ilave cisimler kaynaklı gravitasyonel çekim etkileri ve eksen dönmesi) nedeniyle geçiş zamanlarında doğrudan sapmalar meydana gelebilir veya bu tür sapmalar varmış gibi gözlemlenebilir. Bu tür sapmaları belirleyebilmek amacıyla, ölçülen geçiş ortası zamanlarının (ing. observed, O), belirli bir referans geçiş zamana (T_0) ve sabit bir yörünge dönemine ($P_{yör}$) dayalı olarak hesaplanan teorik geçiş zamanlarıyla (ing. calculated; Denklem 4.8) karşılaştırılması gerekmektedir. Eğer sistemde herhangi bir dinamik değişim söz konusu değilse, gözlemsel ve hesaplanan zamanlar arasındaki fark (O-C) ölçüm belirsizlikleri içinde sıfır ile uyumlu olmalıdır. Bu farkların zamana veya çevrime bağlı olarak incelendiği O-C diyagramları, geçiş zamanlaması değişimleri (TTV) analizinin temelini oluşturmaktadır. Bu analizlerde, belirli bir referans geçiş zamanı esas alınarak her bir yörünge dönüşü bir çevrim (ing. epoch, E) olarak tanımlanır ve bu çevrim numarasına karşılık gelen beklenen geçiş zamanı, Denklem 4.8'de verilen lineer efemeris formülü aracılığıyla hesaplanır.

$$T_{lin}(E) = T_0 + P_{yör} \times E \quad (4.8)$$

Lineer efemeris ile hesaplanan geçiş ortası zamanları (C) ile gözlemsel olarak elde edilen geçiş ortası zamanları (O) arasındaki farkların, zamana ya da daha doğru bir ifade ile yörünge çevrim sayısına (epoch) karşılık grafiğe dökülmesiyle O-C (ing. Observed minus Calculated) diyagramı oluşturulur. Geçiş zamanlaması değişimlerinin incelenmesinde yaygın olarak kullanılan bu diyagram, sistemde yörünge döneminin sabit kaldığı ve dışarıdan etkilerin bulunmadığı varsayımı altında, yatay (eğimi sıfır olan) bir doğruyla temsil edilmelidir. Ancak, başlangıç olarak seçilen efemeris parametrelerindeki belirsizlikler zamanla kümülatif etki yaratabilir ve bu da diyagramın orijinden sapmış, fakat hâlâ doğrusal bir eğilim gösteren bir yapı almasına yol açabilir. Bu durumda, O-C verilerine doğrusal bir model uyumlanarak yeni bir yörünge dönemi (eğim) ve güncellenmiş referans geçiş zamanı (y eksenini kesişimi) elde edilir. Bu işleme "lineer efemeris düzeltmesi" adı verilir. Öte yandan, sistemde

seküler bir yörünge periyodu değişimi mevcutsa, O-C eğrisine ikinci dereceden bir polinom (kuadratik model) uyumlanır, zira O-C grafiğinin türevi yörünge dönemi değişimini vereceğinden sabit hızla gerçekleşecek (seküler) bir yörünge değişimi, O-C eğrisinde ikinci dereceden bir polinomla ifade edilebilecek (parabolik) bir değişime karşılık gelir. Bu durumda, parabolün ikinci dereceden teriminin katsayısı, yörünge dönemi değişiminin nicel olarak hesaplanmasında kullanılır (Denklem 4.9).

$$T_{kuad}(E) = T_0 + P_{yör} \times E + \frac{1}{2} \frac{dP_{yör}}{dE} \times E^2 \quad (4.9)$$

Elde edilen TTV (ya da O-C) diyagramına Denklem 4.8 ve 4.9 ile uyumlanan denklemler, sırasıyla sabit yörünge dönemi ve değişen yörünge dönemi senaryolarını temsil etmektedir.

Bu modellere ek olarak, yörünge'nin çembersel olmadığı ($e > 0$) durumlar için eksen dönmesi senaryosu da Denklem 4.10 kullanılarak test edilebilir.

$$T_{aps}(E) = T_0 + P_s E - \frac{eP_a}{\pi} \cos \omega(E) \quad (4.10)$$

Bu denklemde, P_s yıldızıl (ing. sidereal) yörünge dönemini, e yörünge dışmerkezliğini, P_a anomalistik yörünge dönemini ve ω enberinin argümanını belirtmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında yukarıda belirtilen modellerin TTV verisine uyumlanması için olasılıkçı bir yaklaşım takip edilmiştir. Model parametrelerinin sonlu öncül dağılımlarından örnekleme işlemi için Monte Carlo Markov Chain (MCMC) algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma, her biri belirli sayıda iterasyon içeren birden fazla zincirin yürütülmesine dayanır. Her iterasyonda, o anki parametre setiyle oluşturulan modelin gözlemlerle ne ölçüde uyum sağladığı değerlendirilmektedir. İlk aşamadaki belirli sayıda iterasyon “ısınma” (ing. burn-in) dönemi olarak adlandırılır ve bu kısımdaki örnekler ardıl dağılımın (ing. posterior distribution) hesaplanmasında dikkate alınmaz. Böylece, gözlemlerle en iyi uyumu sağlayan parametre örneklerine ulaşılır. Bu süreçte, modellerin gözlemlerle olan uyumunu değerlendirmek

için kullanılan olabilirlik fonksiyonunun (ing. likelihood function) hesaplanmasında ve öncül dağılımlardan örnekleme yapılmasında Python'ın PYMC (Allen vd. 2013, Abril-Pla vd. 2023) kütüphanesi kullanılmıştır.

Bu senaryolar için uyumlanan modellerin istatistiksel olarak veriyi ne kadar iyi temsil ettiği χ^2_ν , Bayesian Information Criterion (BIC; Schwarz 1978, Liddle 2007) ve Akaike Information Criterion (AIC; Akaike 1974) parametrelerinin karşılaştırılması ile belirlenir.

$$\chi^2_\nu = \frac{1}{N-p} \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i^{\text{obs}} - y_i^{\text{model}}}{\sigma_i} \right)^2 \quad (4.11)$$

Bu denklemde N , toplam gözlem sayısını ve p modeldeki serbest parametre sayısını temsil eder. y_i^{obs} , i 'inci gözleme ait gözlemsel değeri, y_i^{model} , aynı gözlem için modelin tahmin ettiği değeri ve σ_i ise o gözleme ait ölçüm hatasını (standart sapma) gösterir. Bu formül, modelin gözlemsel verilerle uyumunu serbestlik derecesine göre normalize ederek değerlendirmeyi sağlar. Buna ek olarak, AIC ve BIC sırasıyla Denklem 4.12 ve 4.13 ile belirlenir.

$$\text{AIC} = \chi^2_\nu + 2k \quad (4.12)$$

$$\text{BIC} = \chi^2_\nu + k \cdot \ln(n) \quad (4.13)$$

Burada k serbest parametre sayısını (lineer için $k = 2$, kuadratik için $k = 3$ ve eksen dönmesi için $k = 5$), n elde edilen geçiş zamanı veri sayısını temsil etmektedir. Her model için hesaplanan χ^2_ν değerleri arasından 1'e en yakın olanın, BIC ve AIC değerleri arasından ise, en düşük değere sahip olan modelin veriyi daha iyi temsil ettiği söylenebilir (Hastie vd. 2016).

TTV analizinin son aşamasında, geçiş zamanlarının kuadratik modele uydurulmasıyla elde edilen ikinci dereceden katsayıların medyanı $\left(\frac{1}{2} \frac{dP_{\text{yör}}}{dE} \right)$, yörüngedeki uzun vadeli yörünge dönemi değişimini nicel olarak ifade eder ve bu terim yıldızın gelgit kalite faktörünün hesaplanmasında (bkz. Denklem 2.9) doğrudan kullanılır.

4.8 Gelgit Etkilerinin Modellenmesi

TTV analizine uyumlanan kuadratik model aracılığıyla hesaplanan gelgit kalite faktörünün barınak yıldızın iç yapı modelleriyle ve gelgit etkileşim modelleriyle örtüşüp örtüşmediğini araştırmak için, bu çalışmada ilk olarak Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA) (Paxton vd. 2011, 2013, 2015, 2018, 2019) kullanılarak barınak yıldızın anakol öncesi evrim safhasından alt-dev evrim safhasına değin modellenmesi yapılmıştır. MESA, yıldızların yapısını ve zaman içindeki evrimini modellemek amacıyla geliştirilmiş açık kaynaklı bir yazılımdır⁹. Yıldız içindeki fiziksel süreçleri (örneğin enerji üretimi, ısı taşınımı, kütle kaybı) ayrıntılı şekilde hesaplayarak, farklı kütle ve yapıya sahip yıldızların evrimsel izlerini incelemeye olanak tanır. Bu çalışmada kullanılacak MESA koduna örnek EK-3'te verilmektedir.

Bu tez çalışmasında, yıldız-gezegen sistemlerinde gelgit enerji yayılım mekanizmalarının evrimsel süreç içindeki rolünü incelemek amacıyla Zahn (1975, 1977), Ogilvie (2014) ve Barker (2020) tarafından sunulan formülasyon takip edilerek farklı gelgit enerji yayılım mekanizmalarına karşılık gelen indirgenmiş gelgit kalite faktörü (Q'_*) değerlerinin zamanla nasıl değiştiği araştırılmıştır. Bu amaçla, Denklem 2.11, 2.12 ve 2.14 kullanılarak denge ve dinamik gelgit modelleri uygulanmıştır. Hesaplamalar, MESA (Modules for Experiments in Stellar Astrophysics) ile oluşturulan yıldız evrimi modellerinin çıktıları kullanılarak MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir.

MESA modelleri aracılığıyla, yıldızın zamana bağlı olarak değişen temel yapısal özellikleri olan yarıçap R_* , ortalama yoğunluk ρ_* ve içsel yapı parametreleri (yerçekimi ivmesi, yoğunluk ve basınç profilleri, konvektif hız, karışım uzunluğu ve Brunt-Väisälä frekansı) elde edilmiştir. Bu parametreler, hem konvektif bölgelerdeki denge gelgiti ve atalet dalgalarının yayılımını hem de radyatif bölgelerdeki içsel kütleçekim dalgalarının neden olduğu enerji yayılımını hesaplamak için kullanılacaktır. Böylece,

⁹<https://docs.mesastar.org/en/latest/>

yıldızın farklı evrimsel safhalarında bu mekanizmaların etkinliği değeriendirilecek ve söz konusu enerji yayılım süreçlerinin geçiş zamanlamaları, yıldız kütleşi ve yaşı ile nasıl ilişkili olduğu araştırılmıştır. Elde edilen $Q'_\star$ değeri, gözlemsel geçiş zamanlaması verileri ve yıldız-gezegen parametreleri ile karşılaştırılarak, gelgit etkileşimlerinin gözlemlerle ne ölçüde tutarlı olduğu ve bu mekanizmaların yıldız-gezegen sistemlerinin evrimindeki potansiyel rolü tartışılacaktır.



5. BULGULAR

Bu tez çalışması kapsamında WASP-12b'nin ve HATS-18b'nin 2 adet, WASP-4b'nin ise 35 adet yeni geçiş gözlemi elde edilmiştir. WASP-4b ve HATS-18b'nin gözlemlerine ilişkin bilgiler Çizelge 4.3 ve 4.4'de tablolar halinde verilmiş olup, WASP-12b'nin gözlemlerine ilişkin bilgiler Bölüm 4.3'te verilmiştir. Gözlemlerden elde edilen ışık eğrileri WASP-12b, HATS-18b ve WASP-4b için sırasıyla Şekil 4.4, 4.5 ve EK-1'de verilmektedir.

Yer tabanlı teleskoplardan yapılan geçiş gözlemleri, açık veritabanları ve uzay teleskoplarından elde edilen veriler (eleme sürecinin ardından) ile birlikte HATS-18b'nin yaklaşık 9.5 yıla, Kepler-1658b'nin 15 yıla, WASP-4b'nin 17 yıla ve WASP-12b'nin 15 yıla yayılmış toplam 863 geçiş gözlemi verisi elde edilmiştir (Çizelge 4.6). Elde edilen veriler ilk olarak AstroImageJ ile hava kütlesi etkisinden ve varsa aletsel etkilerden arındırılmış, geçiş dışı ışık akısına göre normalize edilmiştir ve sonuç olarak normalize ışık eğrileri elde edilmiştir. Işık eğrileri, EXOFASTv1 geçiş modelleme aracının internet versiyonu kullanılarak Çizelge 4.5'de belirtilen başlangıç parametre değerleri ile modellenmiştir. Bu modellerin sonucunda elde edilen geçiş ortası minimum zamanları ve belirsizlikleri EK-2'de verilmiştir.

Ardından, çalışma dahilindeki 4 adet sıcak Jüpiter sisteminin potansiyel yörünge dönemi değişimini araştırmak amacıyla TTV diyagramları oluşturulmuş ve bu diyagramlara sırasıyla yörünge dönemi değişiminin olmadığı lineer model (Denklem 4.8) ve yörünge döneminin seküler değişimine karşılık gelen kuadratik model (Denklem 4.9) Python'un MCMC algoritmasını kullanan PYMC v5 (PyMC-Devs 2024) kütüphanesi kullanılarak uyumlanmıştır. Model parametreleri için Gauss öncüllerinden örnekleme yapmak amacıyla Python'daki LMFIT¹ kütüphanesi kullanılmıştır. Bu öncüller, parametrelerin doğrusal olmayan en küçük kareler (ing. non-linear least squares) yöntemiyle elde edilen değerler etrafında, parametrelerin belirsizliklerinin

¹<https://zenodo.org/records/15014437>

ise ilgili Gaussyen öncüllerin standart sapma değerleri olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Örnekleme işlemi 16 bağımsız Markov zinciri oluşturularak ve toplamda 5000 iterasyon ile gerçekleştirilmiş olup, iterasyonların ilk 500'ü ısınma dönemi olarak kullanılmıştır ve parametrelerin dağılımını belirleyen örnekleme dahil edilmemiştir.

Elde edilen lineer ve kuadratik modeller sırasıyla χ^2_ν , AIC ve BIC parametrelerinin hesaplanıp karşılaştırılmasıyla değerlendirilmiş ve her bir sistem için Bayes faktörü $B_{k\ell} = e^{-\Delta\text{BIC}/2}$ (Masson 2011) hesaplanarak kuadratik modelin lineer modele göre tercih edilebilirliği belirlenmiştir. Kuadratik modelin veriyi daha iyi temsil ettiği durumlarda, ikinci dereceden bu modelin kuadratik teriminin katsayısının medyan değeri ($\propto dP_{\text{yör}}/dE$) kullanılarak Denklem 2.9 aracılığıyla barınak yıldızın gelgit kalite faktörü hesaplanmıştır ve yörünge dönemi değişimine sebep olan gelgit etkileşmelerinin hangi mertebede efektif olduğu ilk olarak gözlemsel veri yardımıyla hesaplanmıştır.

Çalışmanın son aşaması olarak, elde edilen gelgit kalite faktörü Bölüm 2.2'de formülasyonu verilen gelgit enerji yayılım mekanizmalarına ilişkin modellerle karşılaştırılmıştır. Bunun için ilk olarak yıldızın çeşitli kütle ve metal bolluğu değerleri ve MIST Güneş-benzeri yıldız modelleri kullanılarak MESA girdi (ing. inlist) dosyası oluşturulmuş (EK-3), ardından yıldızın anakol öncesi evrim safhasından alt-dev evrim safhasına dek yıldızın iç yapısına dair gelgit modellerinde kullanılacak parametreler 10^8 yıllık zaman aralıkları ile 1 boyutlu profiller halinde elde edilmiştir. Ardından elde edilen MESA yıldız evrim modeli çıktıları ve MATLAB R2024b² versiyonu kullanılarak Barker (2020)'deki formülasyon takip edilmiştir ve sırasıyla denge gelgitlerine, atalet dalgalarına ve içsel kütleçekim dalgalarına ait Q'_* değerleri yaşa bağlı fonksiyonlar halinde elde edilmiştir. Elde edilen yaşa bağlı değişim, gözlemsel bulgularla karşılaştırılmış ve bu çerçevede yorumlanmıştır.

İlgili araştırma bulguları, tüm gezegenler için Bölüm 5.1'den 5.4'e kadar paylaşı-

²<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

Çizelge 5.1 Tez çalışmasına dahil edilen sistemlerin mutlak parametreleri

Parametre	HATS-18 ¹	Kepler-1658 ^{2,6}	WASP-4 ^{3,4}	WASP-12 ^{4,5}
Yıldız Parametreleri				
T_{eff} (K)	5600 ± 120	6216 ± 78	5422^{+71}_{-70}	6300^{+130}_{-140}
R_* ($R_{\odot}$)	$1.02^{+0.057}_{-0.031}$	$2.891^{+0.130}_{-0.106}$	$0.895^{+0.017}_{-0.015}$	$1.657^{+0.046}_{-0.044}$
M_* ($M_{\odot}$)	1.037 ± 0.047	1.447 ± 0.058	$0.858^{+0.053}_{-0.040}$	$1.434^{+0.110}_{-0.090}$
[Fe/H] (dex)	0.280 ± 0.080	-0.18 ± 0.10	$-0.06^{+0.014}_{-0.013}$	$0.33^{+0.14}_{-0.17}$
$v \sin i$ (km/s)	6.23 ± 0.47	33.95 ± 0.97	$2.2^{+0.6}_{-1.0}$	2.2 ± 1.5
Yaş ($\times 10^9$ yıl)	4.2 ± 2.2		$9.5^{+2.8}_{-3.6}$	$2.00^{+0.70}_{-2.00}$
ρ_* (g/cm ³)	$1.37^{+0.12}_{-0.23}$	$0.1130^{+0.0063}_{-0.0060}$	$1.695^{+0.033}_{-0.037}$	$0.446^{+0.015}_{-0.014}$
Tayf Türü	G V	F5 IV	G	F9
P_{rot} (gün)	9.8 ± 0.4	4.4 ± 0.4	22.2 ± 3.3^4	
Gezegen Parametreleri				
P (gün)	0.83784340(47)	3.8493727(8)	1.338230994(84)	1.09142030(14)
a/R_*	$3.71^{+0.11}_{-0.22}$	$4.04^{+0.18}_{-0.17}$	$5.411^{+0.053}_{-0.050}$	$3.039^{+0.034}_{-0.033}$
T_{eq} (K)	2060 ± 59		1653 ± 12	2580^{+58}_{-62}
b	$0.29^{+0.15}_{-0.11}$	$0.9471^{+0.0025}_{-0.0032}$	$0.184^{+0.048}_{-0.079}$	$0.351^{+0.030}_{-0.034}$
M_p (M_{jup})	1.980 ± 0.077	$5.88^{+0.47}_{-0.46}$	$1.164^{+0.048}_{-0.037}$	$1.470^{+0.076}_{-0.069}$
i (°)	$85.5^{+1.9}_{-2.8}$	$76.52^{+0.058}_{-0.059}$	$88.05^{+0.85}_{-0.53}$	$83.37^{+0.72}_{-0.64}$
ρ (g/cm ³)	$1.02^{+0.13}_{-0.20}$	$6.36^{+1.07}_{-0.91}$	$0.61^{+0.30}_{-0.18}$	$0.266^{+0.015}_{-0.014}$
R_p (R_{jup})	$1.337^{+0.102}_{-0.049}$	1.07 ± 0.05	$1.321^{+0.026}_{-0.023}$	$1.900^{+0.057}_{-0.055}$
a (AB)	0.01761 ± 0.00027	0.0544 ± 0.0007	$0.02261^{+0.00036}_{-0.00027}$	$0.02340^{+0.00056}_{-0.00050}$
e	< 0.166	$0.0628^{+0.0197}_{-0.0185}$	0	0
T_{14} (saat)	1.893 ± 0.020	2.6	2.16648 ± 0.00576	2.99 ± 0.1

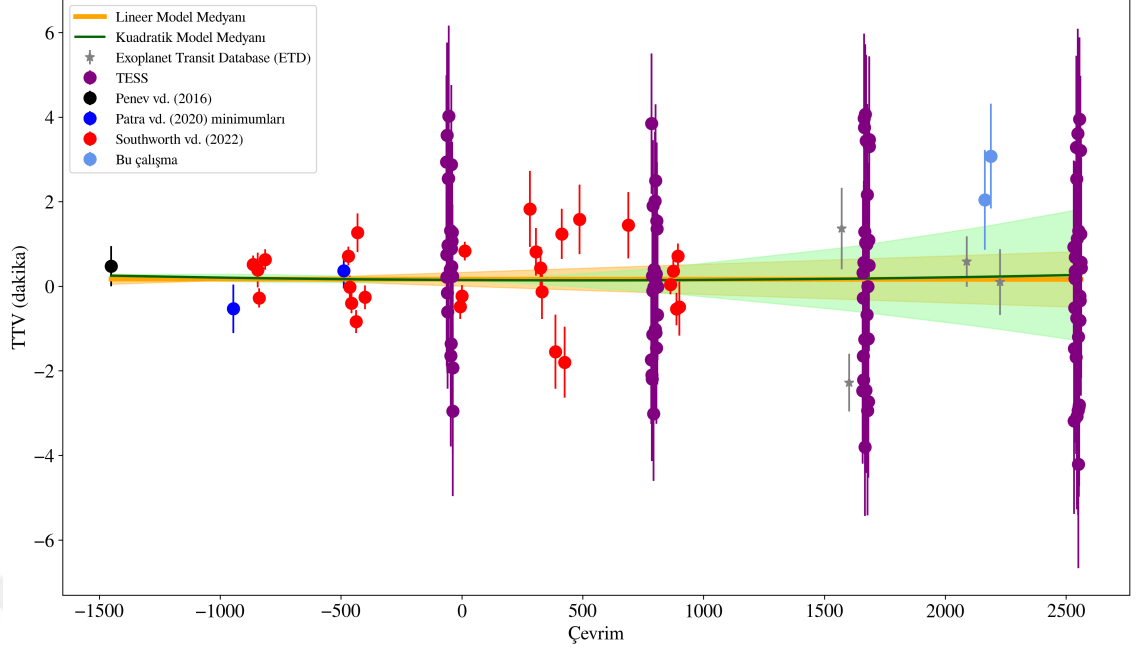
¹Penev vd. (2016), ²Chontos vd. (2019), ³Baştürk vd. (2025), ⁴Bonomo vd. (2017), ⁵Collins vd. (2017b), ⁶Barker vd. (2024)

maktadır. Çalışma boyunca kullanılan yıldız ve gezegen parametreleri, Çizelge 5.1 ile verilmektedir.

5.1 HATS-18b

Bu analizde başlangıç olarak, Southworth vd. (2022) tarafından verilen lineer efemeris, $T(E) = 2458626.511225(71) + 0.83784382(11) \times E$ kullanılmıştır ancak bu efemeris özelinde Bölüm 4.7’de de ifade edildiği gibi lineer efemerisin belirsizliklerinden kaynaklı bir kümülatif etki görülmektedir. Bu sebeple lineer efemerisin Denklem 4.8 kullanılarak düzeltilmesi gerekmektedir. Yapılan düzeltmeler sonucunda, sonraki çalışmalarda kullanılmak üzere lineer efemeris

$$T(E) = 2458626.51102(45) + 0.83784340(47) \times E \quad (5.1)$$



Şekil 5.1 HATS-18b’nin lineer ve kuadratik modeller uyumlanmış TTV diyagramı. Lineer efemeris $T(E) = 2458626.511225(71) + 0.83784382(11) \times E$ olarak kullanılmıştır. Turuncu ve yeşil çizgiler sırasıyla lineer model ve kuadratik model medyanını, etrafındaki yeşil veturuncu gölgemsi bölgeler medyanın 3σ civarını göstermektedir.

şeklinde güncellenmiştir. Başlangıçtaki lineer efemeris kullanılarak elde edilen TTV diyagramı Şekil 5.1’de verilmektedir.

HATS-18b’nin TTV diyagramına Denklem 4.8 ve 4.9 kullanılarak uyumlanan lineer ve kuadratik modeller Şekil 5.1’de gösterilmekte, sonuçlar ise önceki literatürle birlikte Çizelge 5.2’de verilmektedir. Elde edilen model medyanlarına göre $\Delta\chi^2_\nu = 0.06$ ve $\Delta\text{BIC} = 8.84$ bulunmuştur. Lineer model bu bulgular ışığında TTV verisini istatistiksel olarak daha iyi temsil etmektedir. İki model karşılaştırıldığında Bayes faktörü $B_{k\ell} = e^{8.84/2} = 83.2$ olarak hesaplanmaktadır.

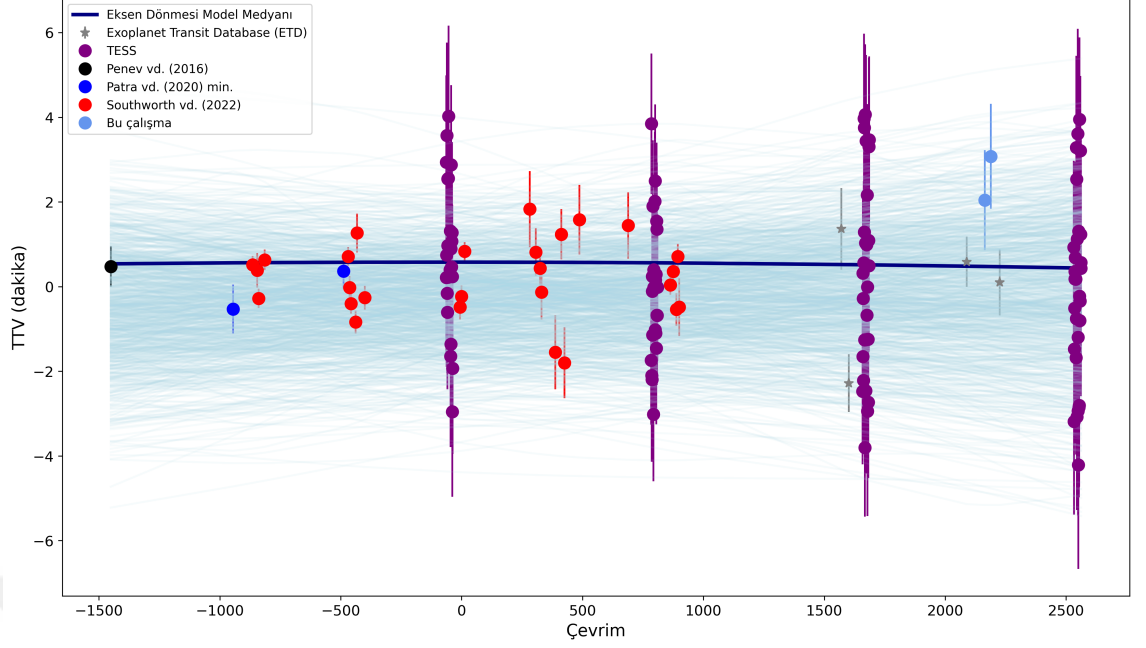
Kuadratik model medyanına göre $\frac{1}{2} \frac{dP_{\text{yör}}}{dE}$ sıfırdan büyüktür ve büyüyen bir yörüngeye işaret etmektedir. Ancak bu değer doğrudan Denklem 2.9’de kullanıldığında negatif Q'_* sonucu verir ki bu tanım gereği mümkün değildir (Southworth vd. 2022). Bu nedenle başkatsayının 3σ alt limiti alınmış ve $a_1^{\text{lim}} = -0.79 \times 10^{-10}$ elde edilmiştir. Bu limit, Çizelge 5.1’deki mutlak parametrelerle birlikte Denklem 2.9’de kullanılarak

Çizelge 5.2 HATS-18b'nin TTV diyagramına uyumlanan model sonuçları.

Parametre	Bu Çalışma	Southworth vd. (2022)	Maciejewski vd. (2024)
Lineer Model ($m \times E + n$)			
$P_{\text{yör}}$ (gün)	0.8378438187(45)	0.83784382(11)	0.83784378(10)
T_0 (BJD _{TDB} - 2400000)	58626.511346(37)	58626.51123(7)	57089.90564(22)
Eğim ($m \times 10^{-8}$)	$-0.13^{+4.48}_{-4.45}$	-	-
Kesişim ($n \times 10^{-5}$)	$1.15^{+3.75}_{-3.72}$	-	-
χ^2_ν	1.68	1.79	-
AIC	74.69	61.3	-
BIC	80.55	64.2	91
Kuadratik Model ($a \times E^2 + b \times E + c$)			
$P_{\text{yör}}$ (gün)	0.8378437961(52)	0.83784382(11)	0.83784349(52)
T_0 (BJD _{TDB} - 2400000)	58626.511327(114)	58626.51120(10)	57089.90590(51)
Kuadratik terim ($a \times 10^{-10}$)	0.20 ± 0.33	0.6 ± 1.7	1.4 ± 2.4
Lineer terim ($b \times 10^{-8}$)	$-1.95^{+5.36}_{-5.41}$	-	-
Kesişim ($c \times 10^{-5}$)	$10.14^{+0.06}_{-0.15}$	-	-
χ^2_ν	1.69	-	-
AIC	76.5	63.1	-
BIC	85.36	67.5	95.3
Eksen Dönmesi Modeli			
Dışmerkezlilik (e)	$0.00108^{+0.00075}_{-0.00144}$		
Enberinin Argümanı (ω [°])	$3.18018^{+2.19122}_{-1.93891}$		
ωdE (°/çevrim)	$0.00032^{+0.00048}_{-0.00059}$		
Eğim ($m_0 \times 10^{-8}$)	$0.142^{+9.921}_{-10.677}$		
Kesişim ($n_0 \times 10^{-4}$)	$1.13^{+2.46}_{-2.00}$		
χ^2_ν	2.08		
AIC	288.97		
BIC	303.64		

$Q'_* > 10^{5.76 \pm 0.13}$ alt sınırını vermektedir. Bu bulgu literatürdeki sonuçlarla karşılaştırma amaçlı $Q'_* > (5.75^{+2.01}_{-1.48}) \times 10^5$ şeklinde de ifade edilebilir. Belirsizlik; M_* , M_p , $P_{\text{yör}}$, a ve R_* parametrelerinin belirsizliklerinden kaynaklanmaktadır.

Lineer ve kuadratik modellerin istatistiksel olarak kuvvetli sonuçlar vermemesi ve Penev vd. (2016)'nın gezegen parametrelerine ilişkin sunduğu çözümde dışmerkezliliği $e = 0$ olarak vermemiş olması, eksen dönmesi senaryosunun da olası yörünge dönemi değişimi için bir seçenek olduğunu işaret etmektedir. Bu durumda, HATS-18b'nin TTV diyagramına Denklem 4.10 kullanılarak yine olasılıkçı bir yaklaşım ile eksen dönmesi modelleri uyumlanmıştır. Model uyumlanırken Denklem 4.10'un 5 farklı bağımsız değişken içermesinden dolayı 50000 adım, bu adımlardan 2000i ısınma



Şekil 5.2 HATS-18b'nin eksen dönmesi modeli uyumlanmış TTV diyagramı.

Modelin medyanı koyu mavi renk ile, tüm MCMC adımları açık mavi renk ile gösterilmektedir.

dönemi olarak seçilmiştir. Uyumlanan modele ilişkin TTV diyagramı Şekil 5.2'de, model sonuçları Çizelge 5.2'de gösterilmektedir. Kuadratik modele göre eksen dönmesi modelinin Bayes faktörü yaklaşık olarak $B_{ek} = \exp(-\Delta\text{BIC}/2) = e^{-218.28/2} \approx 10^{-48} \approx 0$ düzeyindedir. Benzer şekilde, lineer modele göre eksen dönmesi için Bayes faktörü $B_{el} = e^{-223.09/2} \approx 10^{-49} \approx 0$ olmaktadır. Bu durum, eksen dönmesi modelinin veriyi açıklamada diğer modellere kıyasla yetersiz kaldığını ortaya koymaktadır.

5.2 Kepler-1658b

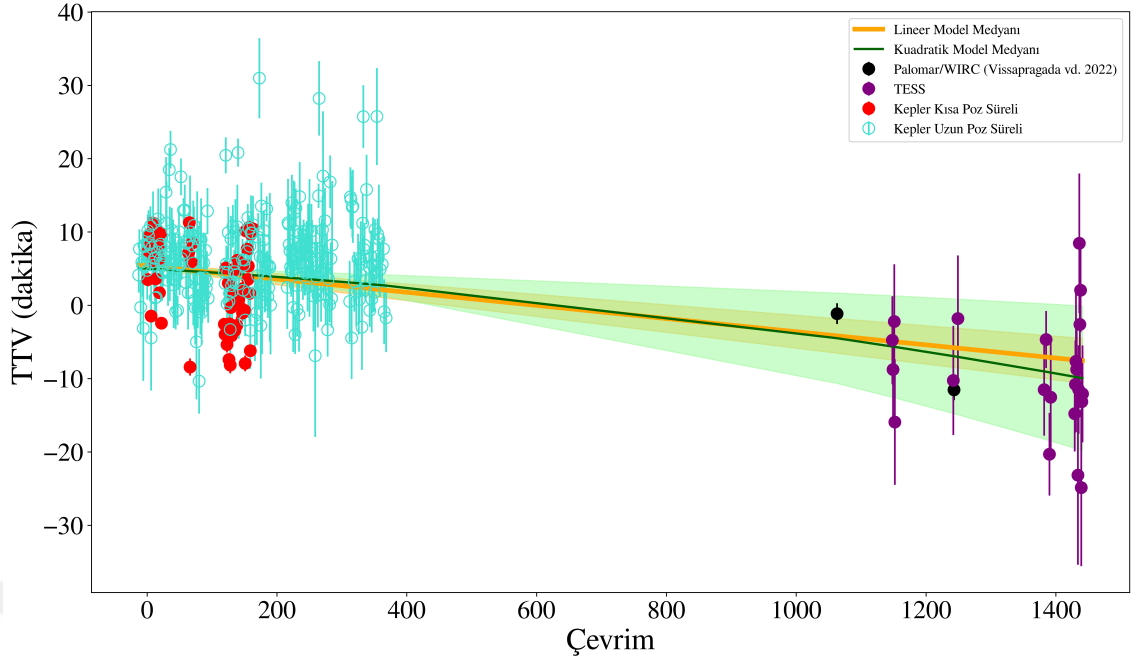
Kepler-1658b (KOI-4b)'nin lineer efemerisi literatürde Chontos vd. (2019) tarafından verilen $T(E) = 2455005.924100(169) + 3.849372784(804) \times E$ olarak belirlenmiştir. Bu efemerisin TTV verisinde zaman içerisindeki kümülatif etki Denklem 4.8 kullanılarak düzeltilmiştir ve lineer efemeris

$$T(E) = 2455005.927827(91) + 3.84936655(42) \times E \quad (5.2)$$

şeklinde güncellenmiştir. TTV diyagramı Şekil 5.3’de gösterilmektedir.

Kepler-1658b’nin TTV diyagramına uyumlanan lineer ve kuadratik modellere (Denklem 4.8 ve 4.9) ilişkin sonuçlar Çizelge 5.3 ile verilmekte, modeller Şekil 5.3’de gösterilmektedir. Bu modeller için $\Delta\chi^2_\nu = \chi^2_{\nu_{kuad}} - \chi^2_{\nu_{lin}} = 0.002$ ve $\Delta\text{BIC} = \text{BIC}_{kuad} - \text{BIC}_{lin} = 4.73$ bulunmuştur. Bu farka karşılık gelen Bayes faktörü $B_{kl} = e^{-4.73/2} \approx 0.094$ olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, lineer modelin kuadratiğe göre veriyi istatistiksel olarak daha iyi temsil ettiğini göstermektedir, fakat aradaki fark lineer modelin tamamen tercih edilebilir olduğunu söylemek için yeterli değildir (Kass ve Raftery 1995). Her her iki model için de $\chi^2_\nu \gg 1$ olması, gözlenen geçiş zamanlamalarının yalnızca lineer ya da kuadratik bir efemeris modeliyle tam olarak açıklanamadığını göstermektedir. Yörünge küçülmesini tanımlayan kuadratik modelde elde edilen başkatsayı, $\frac{1}{2} \frac{dP}{dE} = -26.50^{+6.56}_{-6.46} \times 10^{-10}$ gün/çevrim olarak bulunup, $dP_{\text{yör}}/dt = -150 \pm 40$ ms/yıl gibi bir değişime karşılık gelmektedir. Yörünge küçülmesinin karakteristik zaman ölçeği, cismin yıldızının üzerine düşmesi için geçen süredir ve Kepler-1658b için $\tau = P/|\dot{P}| = (2.2 \pm 0.6) \times 10^6$ yıl olarak bulunmuştur. Bu katsayı kullanılarak sistemdeki yıldızın gelgit kalite faktörü $Q'_* = (1.1 \pm 0.4) \times 10^5$ olarak bulunmuştur.

TTV verisini temsil eden lineer ve kuadratik modeller arasında istatistiksel olarak belirgin bir ayrımın bulunmaması, sistemde ek bir bileşenin varlığı ya da eksen dönmesi gibi alternatif senaryoların da göz önünde bulundurulması gerektiğini göstermektedir. Çizelge 5.1’de Kepler-1658b’nin yörüngesi için $e = 0.0628^{+0.0197}_{-0.0185}$ hesaplanmıştır ve bu durumda eksen dönmesi senaryosu mümkün olmaktadır. Ancak, Bölüm 3.2’te belirtildiği gibi, veriye uyumlanacak en iyi model $k_{2p} \sim 10^3$ ya da $k_{2*} \sim 4$ olmasını gerektirmektedir (Vissapragada vd. 2022) ki; bu da fiziksel olarak mümkün değildir (Sterne 1939). Bu bulguların ışığında, bu çalışma dahilinde Kepler-1658b’nin TTV modeline eksen dönmesi modeli uyumlanmamıştır. Bu senaryolara ek olarak, TTV sinyalinin çevrimsel süreçlere (manyetik aktivite, üçüncü cisim gibi) bağlı olabileceği de düşünülerek, Python’ın Astropy kütüphanesine ait LombScargle



Şekil 5.3 Kepler-1658b'nin lineer ve kuadratik modeller uyumlanmış TTV diyagramı. Lineer efemeris $T(E) = 2455005.924100(169) + 3.849372784(804) \times E$ olarak kullanılmıştır. Turuncu ve yeşil çizgiler sırasıyla lineer model ve kuadratik model medyanını, etrafındaki turuncu ve gölgemsi bölgeler medyanın 3σ civarını göstermektedir.

³ modülü kullanılarak TTV verisine Lomb-Scargle periyodogramı analizi yapılmıştır. Analiz sırasında $P_{\text{yör}} = 3.85$ günlük yörünge döneminin dahil edilmemesi için 5 gün ila 1500 gün arası dönemlilik incelenmiştir. Bu analizin sonucunda verinin tamamında ~ 330 günlük ve ~ 15 günlük iki tepe noktası elde edilmiştir. TTV verisi bulunan tepe noktalarına göre evrelendirildiğinde TTV diyagramında dönemliliğe rastlanmamaktadır. İlgili sonuçlar Şekil 5.4'de görülmektedir.

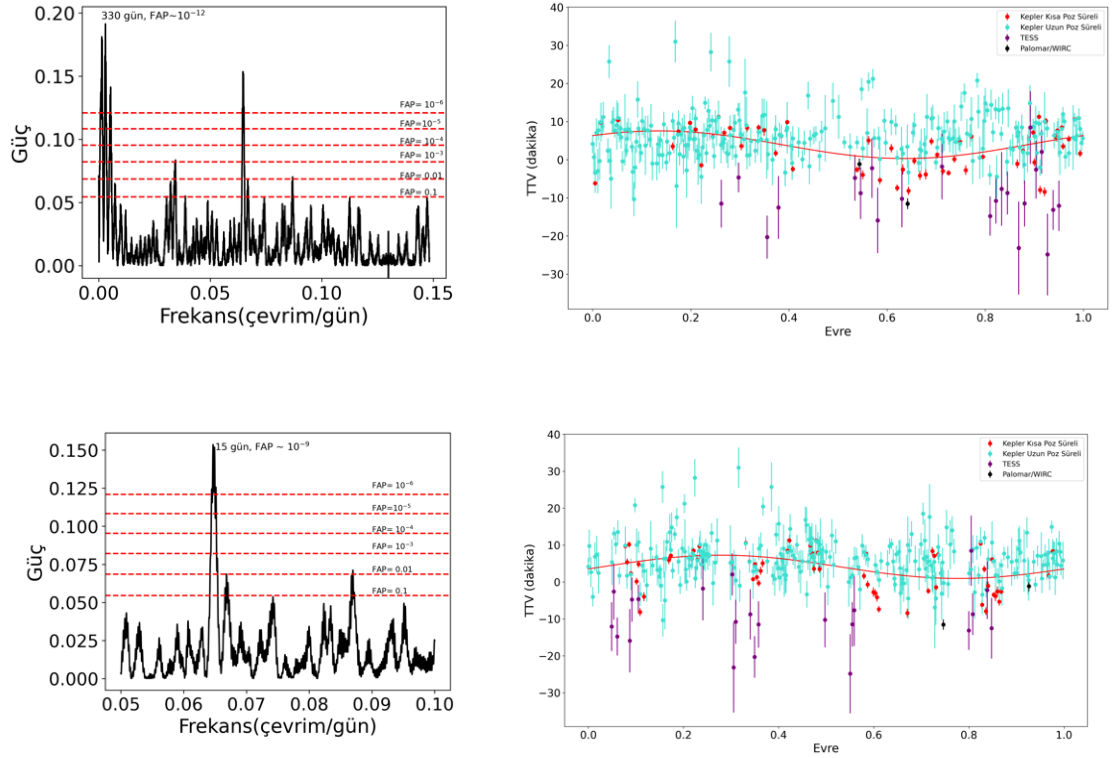
TTV analizinden elde edilen Q'_* değerinin gelgit kuramlarıyla ne kadar uyumlu olduğunu test etmek amacıyla, öncelikle MESA kullanılarak Kepler-1658 yıldızının evrimsel modelleri oluşturulmuştur. Chontos vd. (2019), yıldızın kütleini ve metal bolluğunu $M_* = 1.447 \pm 0.058 M_\odot$ ve $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.18 \pm 0.10$ olarak raporlamıştır. Öte yandan, Barker vd. (2024), Kepler-1658 için önerdiği PARSEC modellerinde $M_* \in \{1.62, 1.65\} M_\odot$ ve $Z \in \{0.0072, 0.01, 0.0113\}$ değerlerini kullanmaktadır. Bu çalışma kapsamında, dört farklı kütle ($M_* \in \{1.447, 1.6\} M_\odot$) ve metal bolluğu

³<https://docs.astropy.org/en/latest/timeseries/lombscargle.html>

Çizelge 5.3 Kepler-1658b'nin TTV diyagramına uyumlanan model sonuçları.

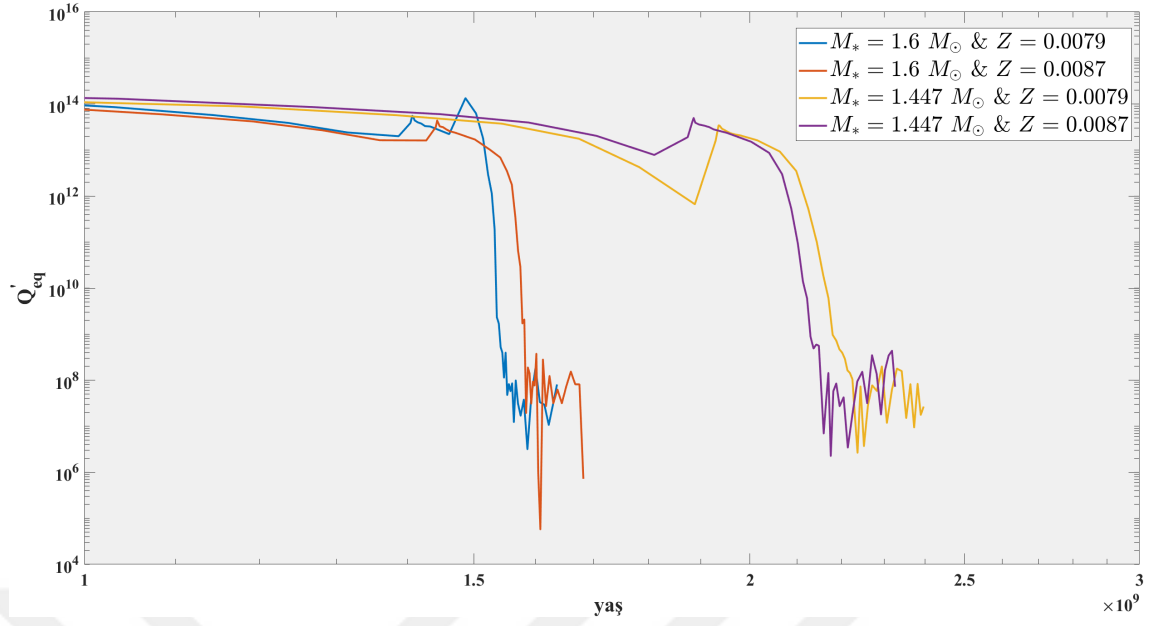
Parametre	Bu Çalışma
Lineer Model ($m \times E + n$)	
$P_{\text{yör}}$ (gün)	3.84936655(42)
T_0 (BJD _{TDB} - 2400000)	55005.927827(95)
Eğim ($m \times 10^{-6}$)	$6.229^{+0.425}_{-0.428}$
Kesişim ($n \times 10^{-4}$)	37.27 ± 0.91
χ^2_ν	8.6267
AIC	717.40
BIC	725.01
Kuadratik Model ($a \times E^2 + b \times E + c$)	
$P_{\text{yör}}$ (gün)	3.84936938(62)
T_0 (BJD _{TDB} - 2400000)	55005.927576(14)
Kuadratik terim ($a \times 10^{-10}$)	$-26.415^{+6.454}_{-6.439}$
Lineer terim ($b \times 10^{-6}$)	$-3.395^{+0.629}_{-0.623}$
Kesişim ($c \times 10^{-5}$)	$34.76^{+0.14}_{-0.17}$
χ^2_ν	8.6247
AIC	718.32
BIC	729.74

($Z \in \{0.0079, 0.0087\}$) kombinasyonu için evrimsel modeller üretilmiştir. Oluşturulan bu modeller, Barker (2020)'de tanımlanan ve Bölüm 2'de özetlenen teorik çerçeve etrafında; denge gelgitleri, atalet dalgaları ve içsel kütleçekim dalgaları olmak üzere üç farklı mekanizma için yaşa bağlı Q'_* değerlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Elde edilen bu gelgit kalite faktörleri yaşa bağlı fonksiyonlar halinde sırasıyla Şekil 5.5, 5.6 ve 5.7'de gösterilmektedir. Bunun yanı sıra, içsel kütleçekim dalgalarının uyarılması için gerekli kritik kütle miktarının barınak yıldız yaşına bağlı değişimi Şekil 5.8'de verilmektedir. Denge gelgitleri, tüm modeller için yıldız alt-dev safhasına geçtiğinde yaklaşık $Q'_{\text{EQ}} \sim 10^7$ mertebesinde ve gözlenen Q'_* değeriyle aralarında yaklaşık 100 kat fark vardır. Bu sebeple bu mekanizmanın gözlenen gelgit etkilerinde efektif olmadığı söylenebilir. Öte yandan, atalet dalgaları ve içsel kütleçekim dalgaları için aynı durum söz konusu değildir. Atalet dalgaları için elde edilen Q'_{IW} değerleri, gözlenen $Q'_* = 1.1 \pm 2.0 \times 10^5$ ile kıyaslandığında 3σ içinde uyumluluk göstermektedir. Özellikle $1.447M_\odot$ kütleli modellerde, yaklaşık 2.3 milyar yıl civarında $Q'_{\text{IW}} \sim 10^4$ mertebesinde seyrederken; $1.6M_\odot$ kütleli modellerde bu değer yaklaşık 1.6 milyar yıl civarında $Q'_{\text{IW}} \sim 10^5$ seviyesine ulaşmaktadır. Benzer şekilde, içsel kütleçekim dalgalarının etkisi de gözlenen gelgit kalite

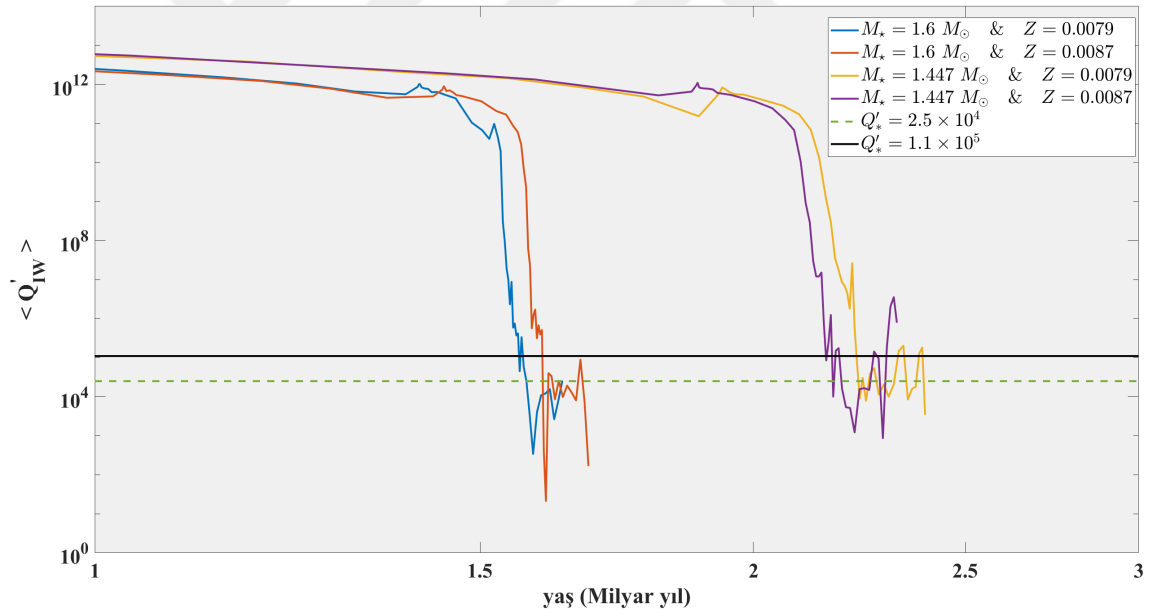


Şekil 5.4 Kepler-1658b'nin TTV diyagramına ilişkin Lomb-Scargle analizleri
 Sol Üst: Frekans analizinde bulunan 330 günlük tepe noktası. Sağ Üst: 330 günlük dönemliliğe ait evrelendirilmiş TTV diyagramı. Sol Alt: Frekans analizinde bulunan 15 günlük tepe noktası. Sağ Alt: 15 günlük dönemliliğe ait evrelendirilmiş TTV diyagramı.

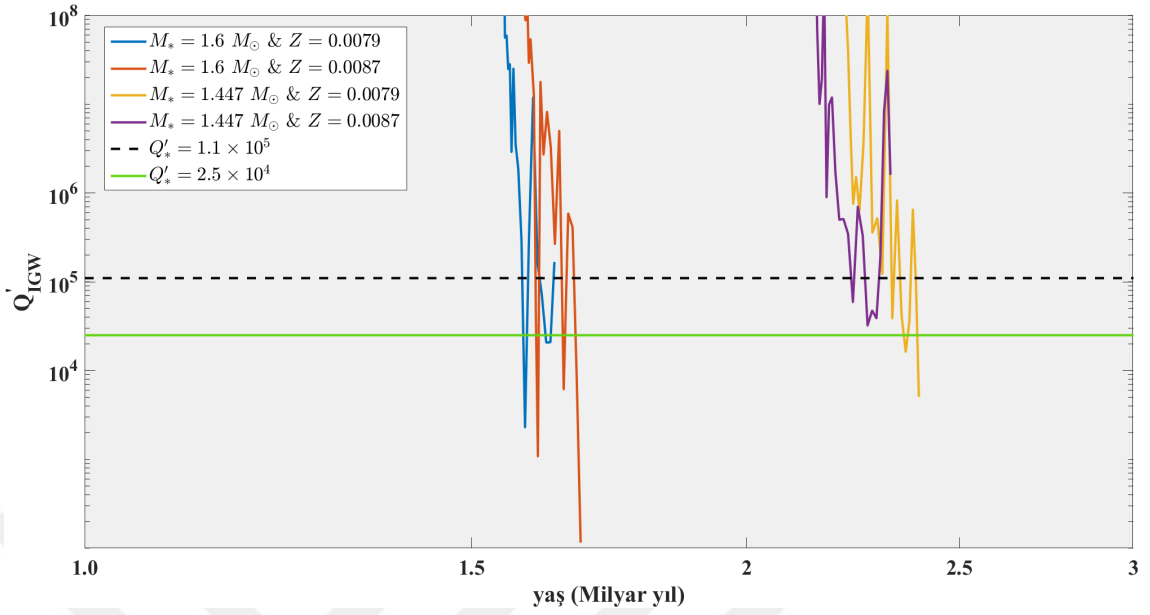
faktörü ile 3σ içinde tutarlılık göstermektedir. $1.447, M_{\odot}$ kütleli modellerde, yaklaşık 2.3 milyar yıl civarında $Q'_{\text{IGW}} \sim 10^5$ seviyelerine ulaşırken; $1.6, M_{\odot}$ modellerde ise yaklaşık 1.6 milyar yıl civarında Q'_{IGW} benzer biçimde $\sim 10^5$ mertebesinde olmaktadır. Ayrıca, içsel kütleçekim dalgalarının uyarılması için gereken M_{crit} , tüm modeller için $\sim 10^{-2} M_{\text{jüp}}$ ($\ll 1.447 M_{\text{jüp}}$) civarındadır, buradan da içsel kütleçekim dalgalarının efektif bir şekilde uyarılabileceğini ve enerji yayılımına katkıda bulunabileceğini söylemek mümkündür.



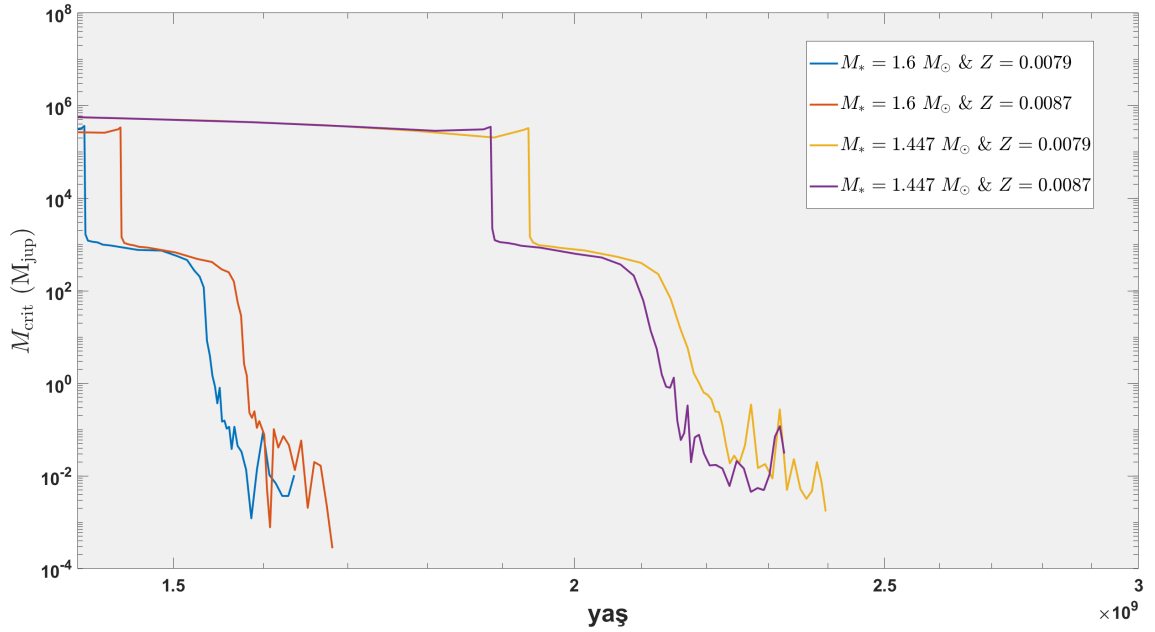
Şekil 5.5 Kepler-1658'e ait denge gelgitlerinin gelgit kalite faktörünün (Q'_{eq}) yaşa göre değişimi.



Şekil 5.6 Kepler-1658'e ait atalet dalgalarının gelgit kalite faktörünün (Q'_{IW}) yaşa göre değişimi.



Şekil 5.7 Kepler-1658'e ait içsel kütleçekim dalgalarının gelgit kalite faktörünün (Q'_{IGW}) yaşa göre değişimi.



Şekil 5.8 Kepler-1658'e ait içsel kütleçekim dalgalarının uyarılması için gereken kritik kütle (M_{crit}) yaşa göre değişimi.

5.3 WASP-4b

Bu cisme ait TTV analizi için; Çizelge 4.6’da belirtilen 154 adet geçiş ortası minimum zamanına ek olarak, literatürde raporlanmış ancak ışık eğrilerine ulaşamadığı için yeniden analiz edilememiş 58 adet geçiş ortası minimum zamanı da analizde kullanılmıştır. Elde edilen tüm geçiş ortası minimum zamanları EK-2’de verilmektedir. Sonuç olarak, WASP-4b’nin TTV analizinde toplam 212 geçiş ortası minimum zamanı bulunmaktadır. TTV analizini gerçekleştirirken Southworth vd. (2019) tarafından verilen $T(E) = 2456505.748953(20) + 1.338231429(80) \times E$ şeklindeki lineer efemeris referans olarak kullanılmıştır. Lineer efemeris TTV diyagramına uyumlanan lineer model sonucunda

$$T(E) = 2456505.748943(9) + 1.338231265(6) \times E \quad (5.3)$$

şeklinde güncellenmiştir. Olası yörünge dönemi değişimini araştırmak adına TTV diyagramına sırasıyla lineer model, kuadratik model ve eksen dönmesi modeli uygulanmıştır. Bouma vd. (2019)’un dışmerkezlilik için verdiği çözüm $e = 0$ olsa da, Knutson vd. (2014) tarafından önerilen $e = 0.00340^{+0.00740}_{-0.00260}$ çözümü dikkate alınarak, WASP-4b’nin TTV diyagramına Denklem 4.10 kullanılarak eksen dönmesi modeli de uyumlanmıştır. Tıpkı HATS-18b’nin eksen dönmesi modelinde olduğu gibi, 2000’i ısınma dönemi olarak belirlenen toplam 50000 adımlık bir MCMC uyumlaması elde edilmiştir. Toplamda 3 modele ilişkin sonuçlar literatürdeki geçmiş çalışmalarla birlikte Çizelge 5.4’de verilmekte olup, tüm modeller TTV diyagramı ile birlikte Şekil 5.9 ve 5.10’de gösterilmektedir.

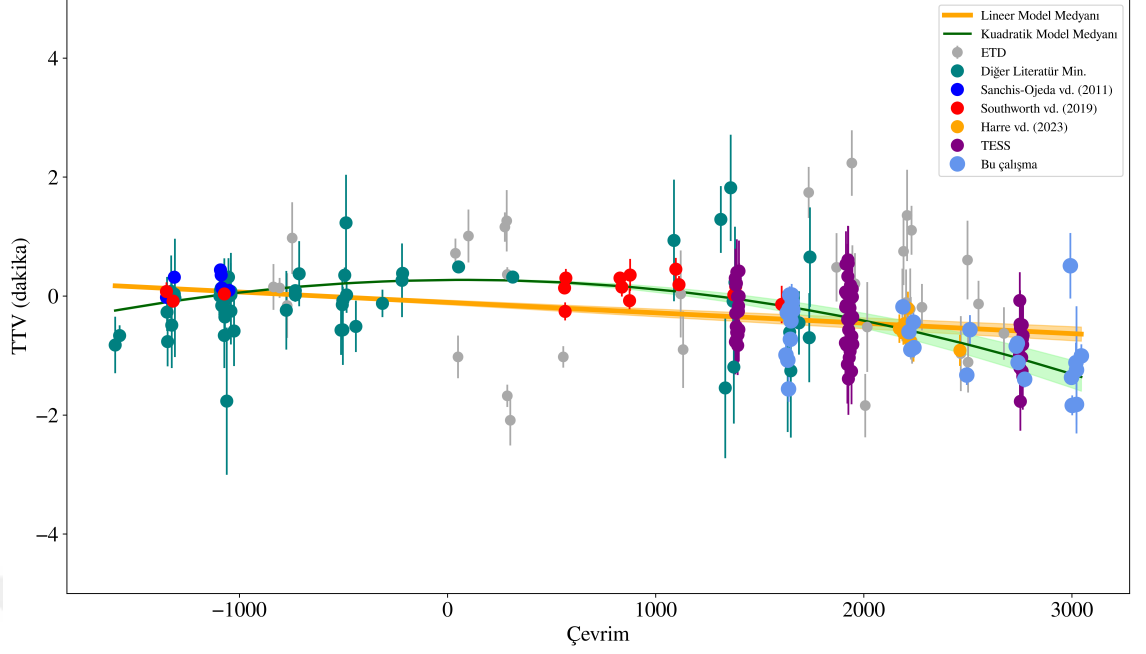
Yapılan analiz sonucunda lineer ve kuadratik modeller karşılaştırıldığında, $\Delta\text{BIC} = -70.73$ ve $\Delta\chi^2_\nu = -2.06$ olarak bulunmuştur. Bu farklara göre, ΔBIC değeri kullanılarak hesaplanan Bayes faktörü $B_{k\ell} = e^{-\Delta\text{BIC}/2} = 1.72 \times 10^{15}$ olup, kuadratik modelin lineer modele kıyasla güçlü bir şekilde desteklendiğini göstermektedir. Benzer bir karşılaştırma lineer model ve eksen dönmesi modeli için veya kuadratik model ve eksen dönmesi için yapılabilir. Lineer model ile eksen dönmesi modeli karşılaştırıldığında, $\Delta\text{BIC} = \text{BIC}_{\text{ed}} - \text{BIC}_{\text{lin}} = 2526.43 - 427.30 = 2099.13$ ve

Çizelge 5.4 WASP-4b'nin TTV diyagramına uyumlanan model sonuçları.

Parametre	Bu Çalışma	Turner vd. (2022)	Bouma vd. (2019) ^a
Lineer Model ($m \times E + n$)			
$P_{\text{yör}}$ (gün)	1.338231265(6)	1.338231392(14)	1.338231429(26)
T_0 (BJD _{TDB} - 2400000)	56505.748943(9)	55804.515677	56180.558712(24)
Eğim ($m \times 10^{-7}$)	$-1.214^{+0.061}_{-0.060}$		
Kesişim ($n \times 10^{-5}$)	$-7.454^{+0.876}_{-0.858}$		
χ^2_ν	7.00	2.14	3.0
AIC	420.56		
BIC	427.30	396.78	
Kuadratik Model ($a \times E^2 + b \times E + c$)			
$P_{\text{yör}}$ (gün)	1.338231265(64)	1.338231587(22)	1.338231502(24)
T_0 (BJD _{TDB} - 2400000)	56505.748943(89)	55804.515781(18)	56180.558872(31)
Kuadratik terim ($a \times 10^{-10}$)	$-0.986^{+0.380}_{-0.373}$	-3.11 ± 0.30	-2.74 ± 40
Lineer terim ($b \times 10^{-8}$)	$1.886^{+0.725}_{-0.741}$		
Kesişim ($c \times 10^{-5}$)	$18.8^{+0.16}_{-0.15}$		
χ^2_ν	4.94	1.51	2.03
AIC	346.46		
BIC	356.57	291.93	
Eksen Dönmesi Modeli			
Dışmerkezlik (e)	$0.00223^{+0.00073}_{-0.00077}$	0.00090(51)	
Enberinin Argümanı (ω [°])	$2.37441^{+0.23408}_{-0.29146}$	154.7 ± 20.6	
ωdE (°/çevrim)	$5.06724^{+0.75121}_{-1.20972} \times 10^{-4}$	0.0011 ± 0.00037	
Eğim ($m_0 \times 10^{-7}$)	$-3.34078^{+1.15881}_{-1.00313}$		
Kesişim ($n_0 \times 10^{-4}$)	$4.75452^{+3.10856}_{-2.2465}$		
χ^2_ν	11.85	1.47	
AIC	2509.55		
BIC	2526.43	296.39	

^a Bu çalışmada BIC değerleri doğrudan verilmemiş olup, $\Delta\text{BIC} = \text{BIC}_{\text{kuad}} - \text{BIC}_{\text{lin}} = -89.0$ olarak verilmiştir.

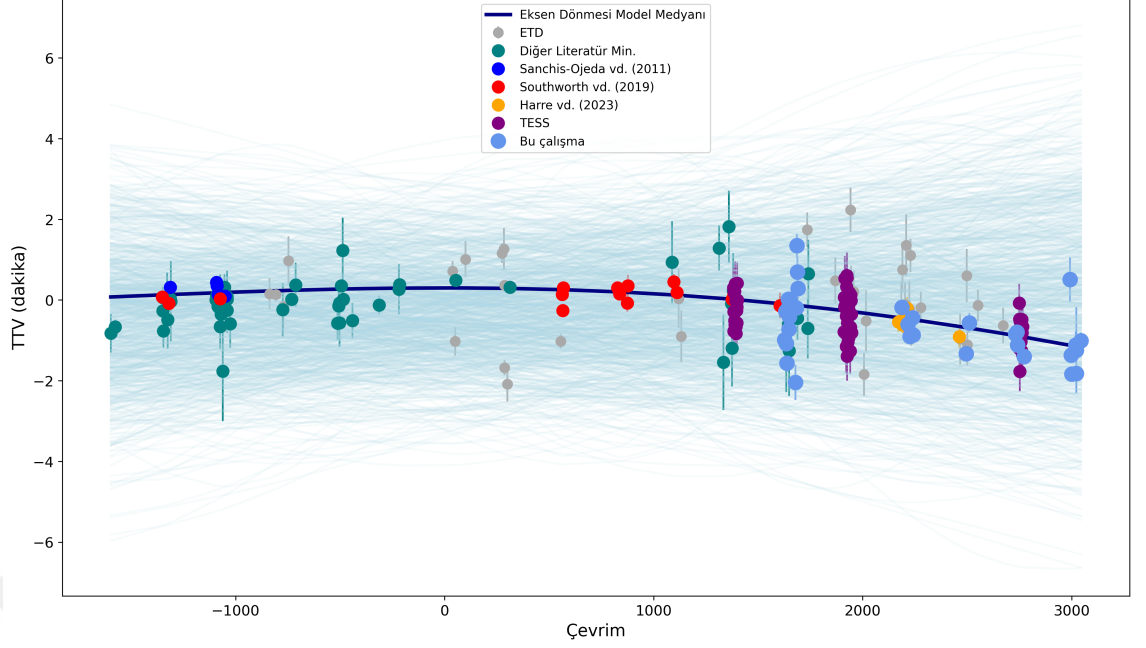
$\Delta\chi^2_\nu = \chi^2_{\nu,\text{ed}} - \chi^2_{\nu,\text{lin}} = 11.85 - 7.00 = 4.85$ olarak elde edilmiştir. Bu farklara göre, Bayes faktörü $B_{el} = e^{-\Delta\text{BIC}/2} = e^{-1049.565} \approx 0$ şeklinde hesaplanmakta olup, eksen dönmesi modeli lineer modele kıyasla açık biçimde reddedilmektedir. Benzer şekilde, kuadratik model ile eksen dönmesi modeli karşılaştırıldığında, $\Delta\text{BIC} = \text{BIC}_{\text{ed}} - \text{BIC}_{\text{kuad}} = 2526.43 - 356.57 = 2169.86$ ve $\Delta\chi^2_\nu = \chi^2_{\nu,\text{ed}} - \chi^2_{\nu,\text{kuad}} = 11.85 - 4.94 = 6.91$ bulunmuştur. Bu durumda Bayes faktörü $B_{ek} = e^{-\Delta\text{BIC}/2} = e^{-1084.93} \approx 0$ olarak hesaplanmakta olup, kuadratik modelin eksen dönmesi modeline göre baskın biçimde desteklendiği görülmektedir. Sonuç olarak, kuadratik model TTV verisini diğer iki modele kıyasla daha iyi temsil etmektedir ve yörüngenin $-1.970^{+0.761}_{-0.746} \times 10^{-10}$ gün/çevrim hızla küçüldüğünü göstermektedir. Kuadratik modelin ikinci dereceli



Şekil 5.9 WASP-4b'nin lineer ve kuadratik modeller uyumlanmış TTV diyagramı. Turuncu ve yeşil çizgiler sırasıyla lineer model ve kuadratik model medyanını, etrafındaki turuncu ve yeşil gölgemsi bölgeler medyanın 3σ civarını göstermektedir.

teriminin katsayısından elde edilen bu değer, $dP_{\text{yör}}/dt = -5.70 \pm 0.22$ ms/yıl hızla gerçekleşen bir yörünge dönemi değişimine karşılık gelmektedir. Bu değişime göre yörünge küçülmesi karakteristik zaman ölçeği ise $\tau = (2.03 \pm 0.08) \times 10^7$ yıl olarak ölçülmüştür. Denklem 2.9 sonucunda da yıldız gelgit kalite faktörü $Q'_* = (7.9 \pm 1.2) \times 10^4$ bulunmuştur.

Yörünge küçülmesini temsil eden kuadratik modelin, TTV diyagramını istatistiksel olarak daha iyi açıkladığının belirlenmesinin ardından, elde edilen bulguların teorik modellerle karşılaştırılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu bağlamda, WASP-4'ün evrim modelleri MESA ile 7 farklı kütle ve metal bolluğu ($M_* \in \{0.899, 0.858, 0.911, 0.943, 0.945\} M_\odot$ & $Z \in \{0.012, 0.02, 0.022, 0.0243, 0.0249\}$) kombinasyonu kullanılarak oluşturulmuştur. Ardından, Bölüm 4.8'te tarif edildiği üzere yıldız evrim modellerinden elde edilen yıldız parametrelerinin radyal profilleri, gelgit enerji yayılım mekanizmalarının barınak yıldızın yaşına bağlı değişimini hesaplamak üzere kullanılmıştır. Barınak yıldızın dönme periyodu ve gezegenin yörünge dönemi karşılaştırıldığında ($P_{\text{rot}} \approx 22$ gün ve $P_{\text{yör}} \approx 1.4$ gün ; Çizelge 5.1) bu sistem için atalet



Şekil 5.10 WASP-4b'nin eksen dönmesi modeli uyumlanmış TTV diyagramı.

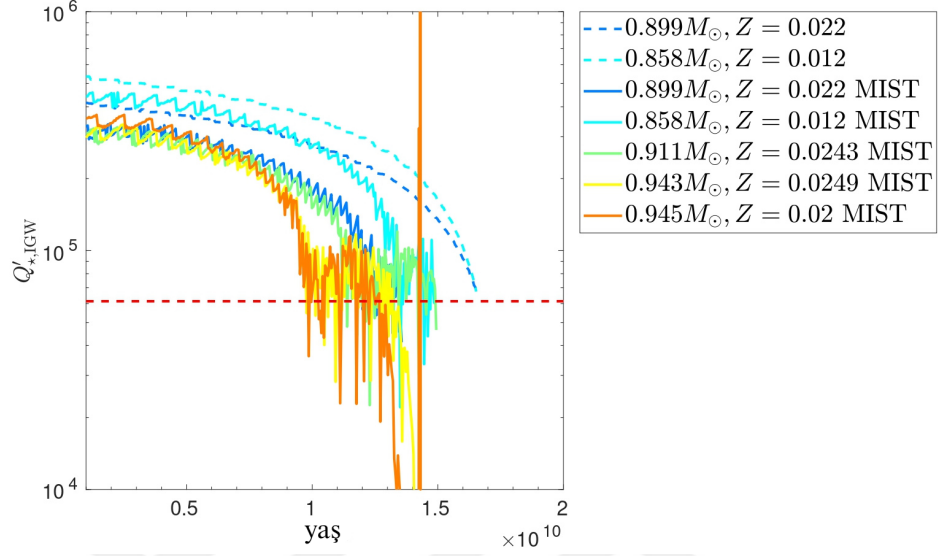
Modelin medyanı koyu mavi renk ile, tüm MCMC adımları açık mavi renk ile gösterilmektedir.

dalgalarının konvektif bölgede uyarılması beklenmez, zira atalet dalgalarının efektif bir biçimde uyarılması için gerekli koşullar sağlanamamaktadır ($P_{rot} < 2P_{tide}$; Bölüm 2.2.2, Ogilvie 2013).

Atalet dalgalarının efektif bir biçimde uyarılması için barınak yıldızın dönme döneminin kabaca 2.67 günden daha kısa olması gerekmektedir. Bu sebeple, atalet dalgalarının gelgit kalite faktörünün yaşa bağlı değişimi bu cisim için incelenmemiştir. Öte yandan, Şekil 5.12 göz önüne alındığında, WASP-4'ün tahmin edilen yaşı için ($9.5_{-3.6}^{+2.8} \times 10^9$ yıl; Çizelge 5.1) $M_{crit} \approx 1M_{jüp}$ civarındadır, bu sebeple WASP-4 için içsel kütleçekim dalgalarının efektif bir şekilde uyarılması beklenebilir. Şekil 5.11'ye bakıldığında, aynı yaş civarında $Q'_{IGW} \approx 10^4 - 10^5$ mertebesinde ve bu da gözlemsel olarak bulunan $Q'_* = (7.9 \pm 1.2) \times 10^4$ ile 3σ aralığında uyumludur.

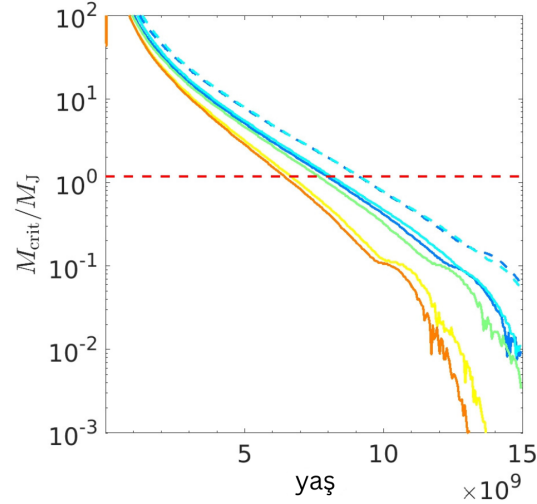
Denge gelgitlerine göz atıldığında, WASP-4'ün gözlenen yaşı civarında ($\sim 9.5 \times 10^9$ yıl) denge gelgitlerine ait gelgit kalite faktörünün $Q'_{EQ} \approx 10^{10}$ mertebesinde olduğu görülmektedir (Şekil 5.13). Bu değer ile gözlenen $Q' \lesssim 10^5$ seviyesi arasında 100,000

kat fark vardır. Bu da mevcut yaşta denge gelgitlerinin WASP-4 sistemindeki gözlenen yörünge küçülmesinde etkin bir mekanizma olamayacağını göstermektedir.



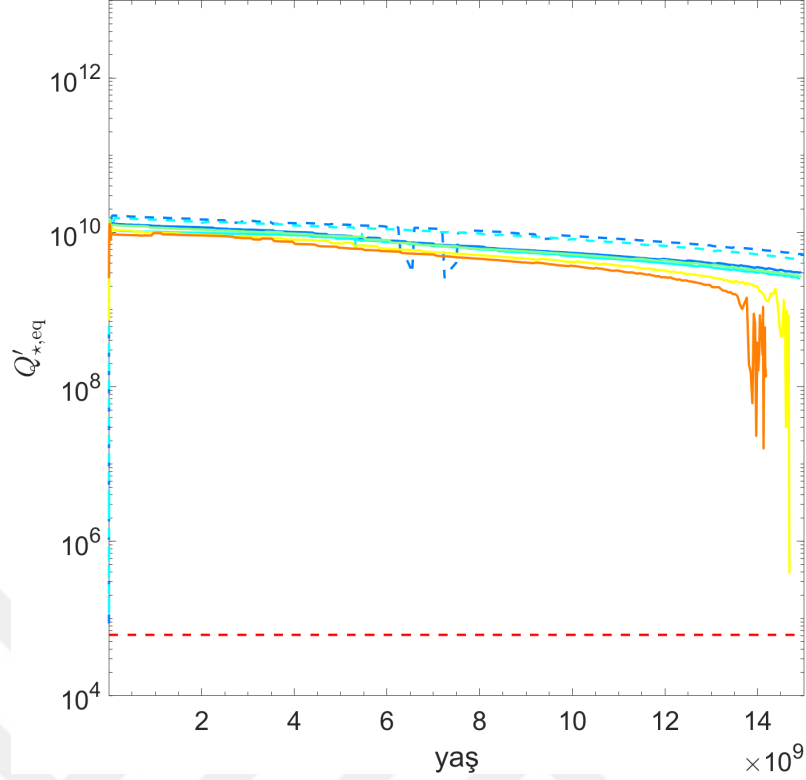
Şekil 5.11 WASP-4'e ait içsel kütleçekim dalgalarının gelgit kalite faktörünün (Q'_{IGW}) yaşa göre değişimi.

Kırmızı kesikli çizgiler gözlemsel olarak bulunan $Q'_* = 8 \times 10^4$ seviyesini göstermektedir.



Şekil 5.12 WASP-4'e ait içsel kütleçekim dalgalarının uyarılması için gereken kritik kütlenin (M_{crit}) yaşa göre değişimi.

Renklerin temsil ettiği modeller, Şekil 5.11 ile aynıdır. M_J Jüpiter kütlesini temsil etmektedir. Kırmızı kesik çizgiler $1 M_J$ seviyesini göstermektedir.



Şekil 5.13 WASP-4'e ait denge gelgitlerinin gelgit kalite faktörünün (Q'_{EQ}) yaşa göre değişimi

Renklerin temsil ettiği modeller, Şekil 5.11 ile aynıdır. Kırmızı kesik çizgiler, gözlemsel olarak elde edilen $Q'_* \approx 8 \times 10^4$ seviyesini göstermektedir.

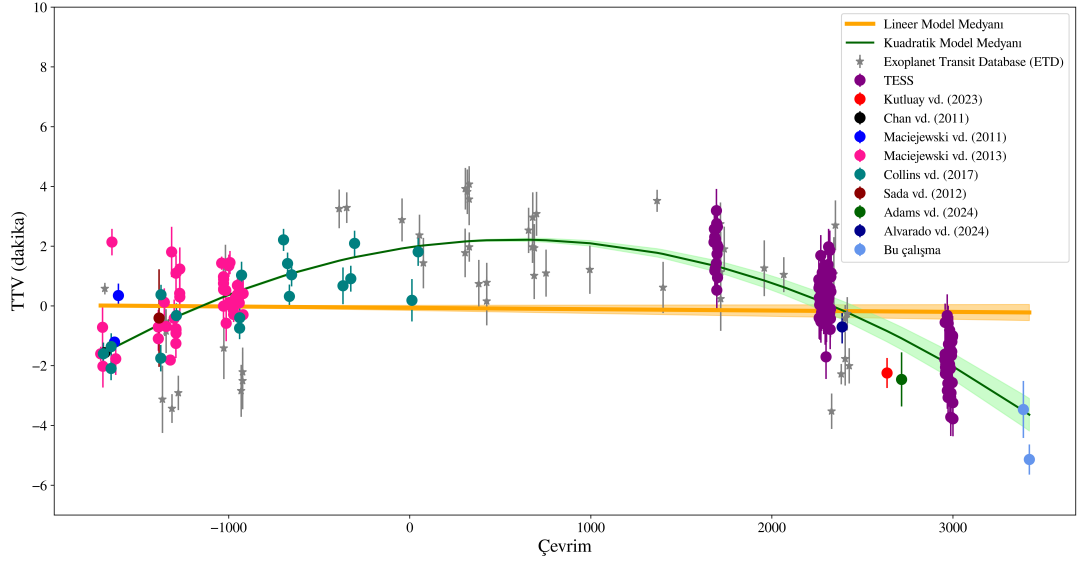
5.4 WASP-12b

Bu cisme ait TTV analizinde Ivshina ve Winn (2022)'de verilen lineer efemeris $T(E) = 2457010.512173(70) + 1.091419108(55) \times E$ kullanılmıştır. TTV diyagramının kümülatif etkiden arındırılması için Denklem 4.8 kullanılmıştır ve lineer efemeris

$$T(E) = 2457010.5116847(66) + 1.091418764(41) \times E \quad (5.4)$$

şeklinde güncellenmiştir. Düzeltelen efemeris kullanılarak oluşturulan TTV diyagramı Şekil 5.14 ile gösterilmektedir.

WASP-12 özelinde TTV diyagramına sırasıyla lineer, kuadratik ve eksen dönmesi modelleri uyumlanmıştır. WASP-12b'nin yörüngesi literatürdeki bazı çalışmalarda



Şekil 5.14 WASP-12b'nin lineer ve kuadratik modeller uyumlanmış TTV diyagramı. Turuncu ve yeşil çizgiler sırasıyla lineer model ve kuadratik model medyanını, etrafındaki turuncu ve yeşil gölgemsi bölgeler medyanın 3σ civarını göstermektedir.

çembersel olarak bulunmuştur ($e = 0$) (Campo vd. 2011, Husnoo vd. 2011) ve bu durumda olası yörünge dönemi değişiminin eksen dönmesi kaynaklı olması mümkün değildir (Bowler 2010). Ancak Bonomo vd. (2017)'nin bulmuş olduğu $e < 0.02$ çözümünden kaynaklı eksen dönmesi olasılığı bu çalışma dahilinde test edilmiştir. $\chi^2_\nu = 18.68$ ve $BIC=4286.59$ sonuçlarıyla diğer modellere kıyasla bu modelin veriyi kuvvetli istatistiksel parametrelerle temsil ettiği söylenememektedir. Eksen dönmesine ilişkin tüm modeller Şekil 5.15'de verilmektedir.

Yapılan TTV analizi sonucunda lineer ve kuadratik modeller karşılaştırıldığında (Çizelge 5.5), $\Delta BIC = -186.25$, $\Delta AIC = -189.7$ ve $\Delta\chi^2_\nu = -5.02$ olarak bulunmuştur. ΔBIC değeri kullanılarak hesaplanan Bayes faktörü $B_{k\ell} = e^{-\Delta BIC/2} = 1.27 \times 10^{40}$ olup, kuadratik modelin lineer modele kıyasla güçlü bir şekilde desteklendiğini göstermektedir. Kuadratik modelin medyanına ait başkatsayıya göre yörünge dönemi -1.0×10^{-9} gün/çevrim gibi bir hızla küçülmektedir ve bu değişim -29.3 ± 0.4 ms/yıl yörünge dönemi değişimine karşılık gelmektedir. Bu değişime göre yörünge küçülmesi karakteristik zaman ölçeği $\tau = (3.21 \pm 0.04) \times 10^6$ yıl olarak ölçülmüştür. Son olarak, TTV analizine uyumlanan kuadratik modelin medyanının başkatsayısı

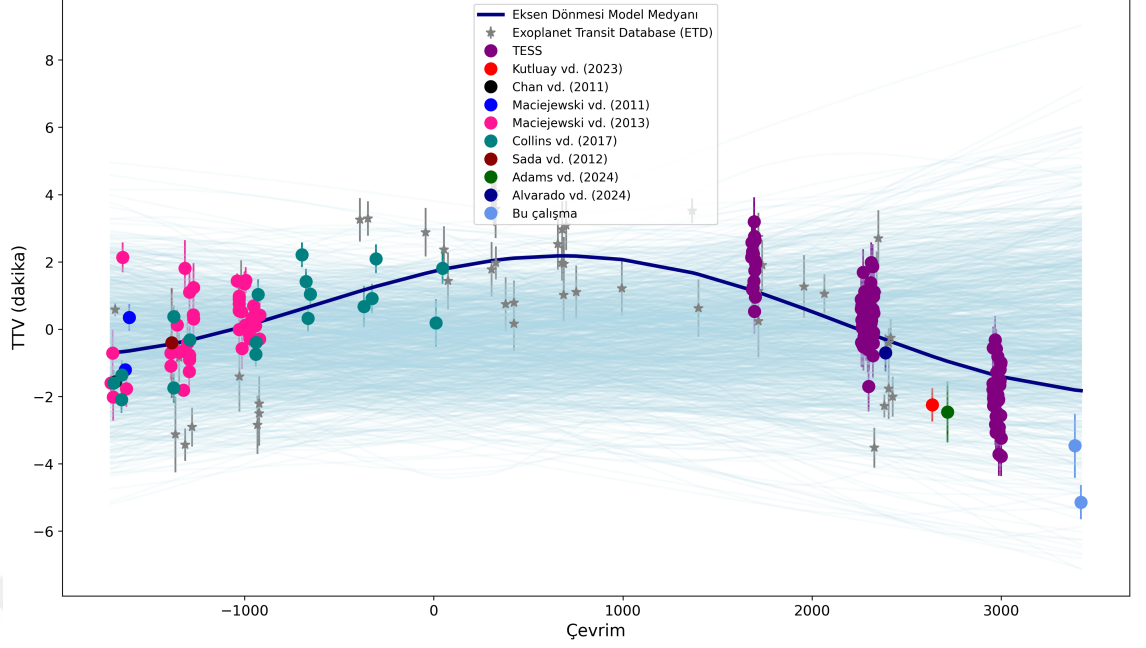
Çizelge 5.5 WASP-12b’nin TTV diyagramına uyumlanan model sonuçları.

Parametre	Bu çalışma	Adams vd. (2024) ^a	Turner vd. (2021)
Lineer Model ($m \times E + n$)			
$P_{\text{yör}}$ (gün)	1.0914187332(23)	1.09141892(5)	1.091419426(22)
T_0 (BJD _{TDB} - 2400000)	57010.511640(19)	57800.69944(8)	56305.455519(26)
Eğim ($m \times 10^{-7}$)	$-31.427^{+12.37}_{-12.27}$	—	—
Kesişim ($n \times 10^{-5}$)	$4.51^{+1.96}_{-1.95}$	—	—
χ^2_ν	9.69	—	3.16
AIC	531.22	—	—
BIC	538.12	—	586.47
Kuadratik Model ($a \times E^2 + b \times E + c$)			
$P_{\text{yör}}$ (gün)	1.091419364(14)	1.09141858(4)	1.091420090(41)
T_0 (BJD _{TDB} - 2400000)	57010.513047(18)	57800.70032(7)	56305.455795(38)
Kuadratik terim ($a \times 10^{-10}$)	$-5.076^{+0.064}_{-0.062}$	-10.31 ± 0.56	-9.45 ± 0.47
Lineer terim ($b \times 10^{-8}$)	$59.95^{+1.43}_{-1.45}$	—	—
Kesişim ($c \times 10^{-5}$)	$136.22^{+0.018}_{-0.019}$	—	—
χ^2_ν	4.27	—	1.03
AIC	341.52	—	—
BIC	351.87	—	204.3
Eksen Dönmesi Modeli			
Dışmerkezlik (e)	$0.003491^{+1.425 \times 10^{-5}}_{-6.540 \times 10^{-6}}$	—	0.00363 ± 0.00025
Enberinin Argümanı (ω [°])	2.281 ± 0.041	—	140.23 ± 4.41
ωdE (°/çevrim)	$113^{+2.55}_{-2.52} \times 10^{-5}$	—	0.0552 ± 0.0023
Eğim ($m_0 \times 10^{-7}$)	$-1.10^{+0.232}_{-0.234}$	—	—
Kesişim ($n_0 \times 10^{-4}$)	$4.23^{+0.480}_{-0.459}$	—	—
χ^2_ν	18.68	—	1.15
AIC	4269.33	—	—
BIC	4286.59	—	238.72

^a Bu çalışmada BIC değerleri doğrudan verilmemiş olup, $\Delta\text{BIC} = \text{BIC}_{\text{kuad}} - \text{BIC}_{\text{lin}} = -830.8$ olarak verilmiştir.

Denklem 2.9’e Çizelge 5.1’deki yıldız ve gezegen parametreleri ile birlikte kullanılarak yıldızın gelgit kalite faktörü $Q_* = (1.7 \pm 0.4) \times 10^5$ olarak hesaplanmıştır.

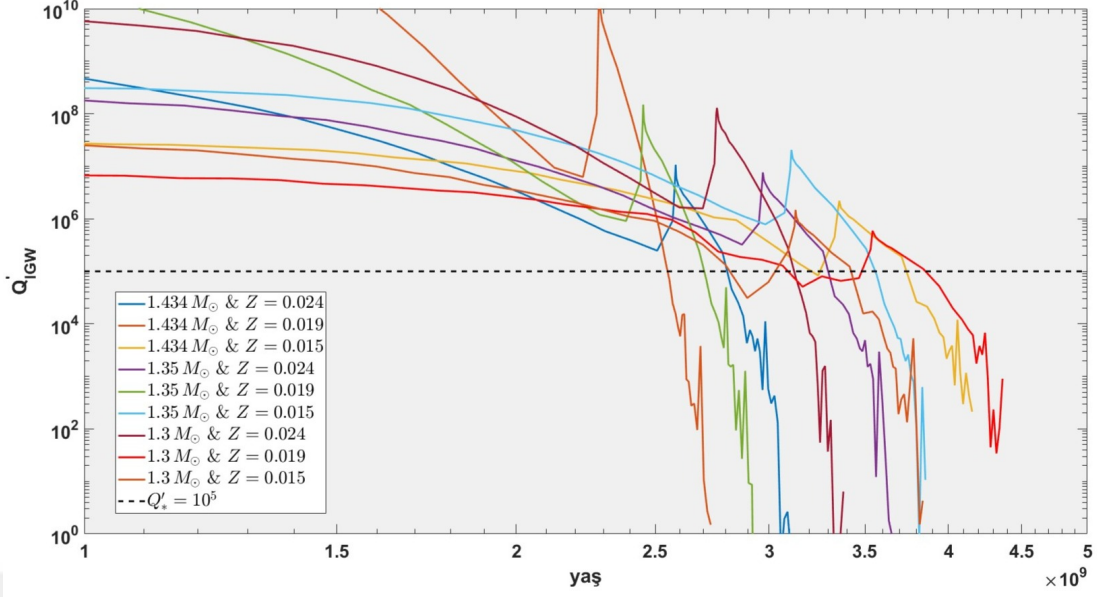
Bu sistem özelinde yörünge küçülmesi modelinin TTV diyagramını istatistiksel olarak daha iyi temsil ettiğinin belirlenmesi, ilgili bulguların barınak yıldız ve gezegen arasındaki gelgit etkileşmelerinin teorik olarak modellenmesi ve gözlemsel verilerle karşılaştırılmasını gerektirir. Bu bağlamda, ilk olarak WASP-12’nin evrim modelleri toplamda 9 farklı kütle ve metal bolluğu ($M_* \in \{1.30, 1.35, 1.434\} M_\odot$ & $Z \in \{0.015, 0.019, 0.024\}$) kombinasyonu kullanılarak oluşturulmuş ve yıldızın iç yapısıyla ilişkili parametreler (Bölüm 4.8) yaşa bağlı olarak elde edilmiştir. Ardın-



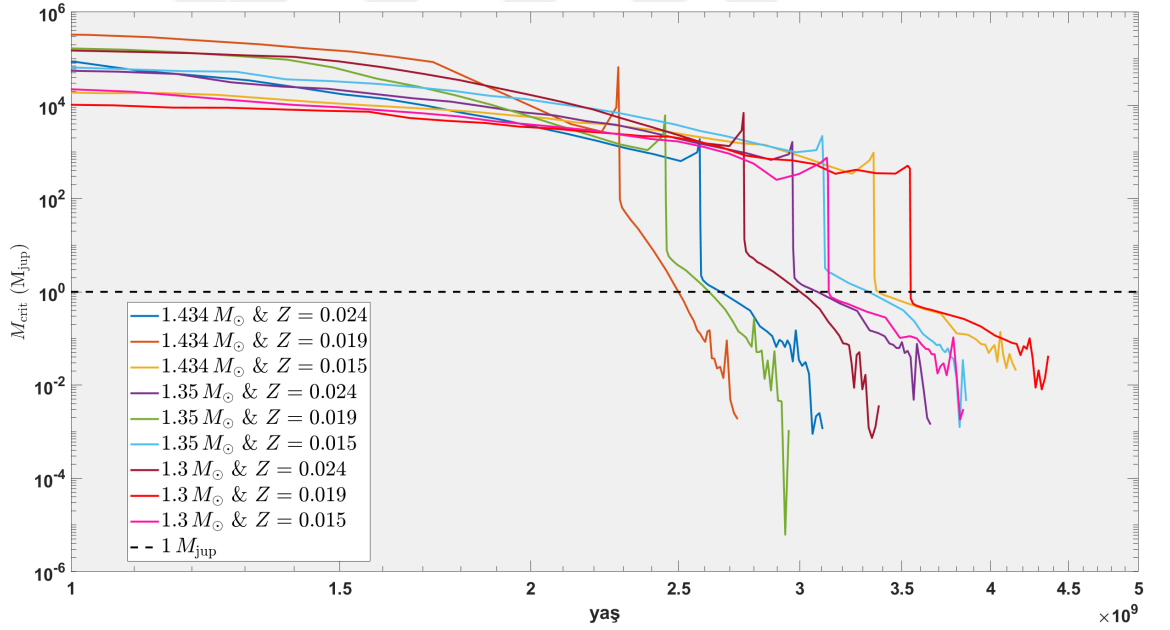
Şekil 5.15 WASP-12b'nin eksen dönmesi modeli uyumlanmış TTV diyagramı. Modelin medyanı koyu mavi renk ile, tüm MCMC adımları açık mavi renk ile gösterilmektedir.

dan, Bölüm 2.2'te ve Barker (2020)'de verilen gelgit etkilerinin farklı enerji yayılım mekanizmalarına ilişkin formülasyon MATLAB betikleriyle takip edilmiş ve Q'_* değerleri denge gelgitleri ile içsel kütleçekim dalgaları için yaşa bağlı olarak elde edilmiştir. Atalet dalgalarına ilişkin modeller oluşturulmamıştır çünkü WASP-12'nin dönme dönemi ile WASP-12b'nin yörünge dönemi ($P_{\text{rot}} = 2\pi R_*/v \sin i = 37.93$ gün ve $P_{\text{yör}} \sim 1.1$ gün; Çizelge 5.1) dikkate alındığında, bu sistem için atalet dalgalarının konvektif bölgede etkin biçimde uyarılması beklenmez çünkü atalet dalgalarının uyarılması için gerekli koşul ($P_{\text{rot}} < 2P_{\text{tide}}$; Bölüm 2.2.2) sağlanmamaktadır.

Denge gelgitlerine göz atıldığında, WASP-12'nin gözlenen yaşı civarında ($2.0^{+0.7}_{-2.0} \times 10^9$ yıl; Collins vd. 2017b, $(3.05 \pm 0.32) \times 10^9$ yıl ; Leonardi vd. 2024) denge gelgitlerine ait kalite faktörünün $Q'_{\text{EQ}} \approx 10^9$ mertebesinde olduğu görülmektedir (Şekil 5.18). Bu değer ile gözlenen $Q'_* = (1.7 \pm 0.4) \times 10^5$ seviyesi arasında 10,000 ila 100,000 kat fark oluşmaktadır. Buradan da, mevcut yaşta denge gelgitlerinin WASP-12'de gözlenen yörünge küçülmesinde etkin bir mekanizma olmadığını göstermektedir.

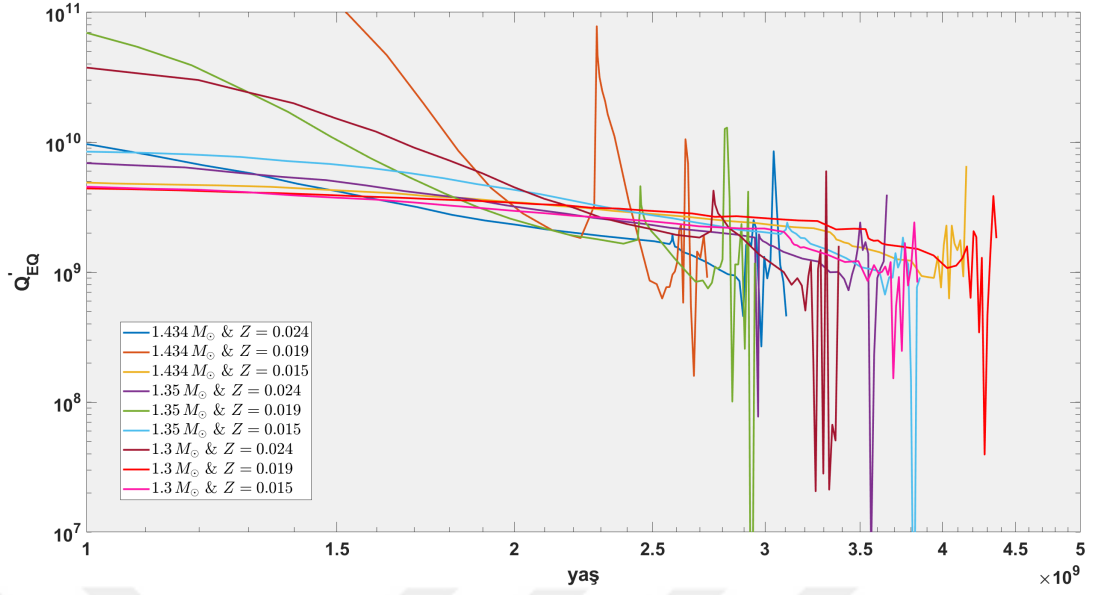


Şekil 5.16 WASP-12'ye ait içsel kütleçekim dalgalarının gelgit kalite faktörünün (Q'_{IGW}) yaşa göre değişimi



Şekil 5.17 WASP-12'ye ait içsel kütleçekim dalgalarının uyarılması için gereken kritik kütleinin (M_{crit}) yaşa göre değişimi.

Şekil 5.17 dikkate alındığında, WASP-12'nin kütleinin içsel kütleçekim dalgalarının uyarılması için gereken eşiği tüm modellerde sağladığı söylenebilir. Düşük kütleli modellerde bu eşik 2.7×10^9 yıl civarında, yüksek kütleli modellerde ise 4.5×10^9 yıl civarında sağlanmaktadır. Bu yaşlar için Şekil 5.16'ya bakıldığında $Q'_{\text{IGW}} \sim 10^5$



Şekil 5.18 WASP-12'ye ait denge gelgitlerinin gelgit kalite faktörünün (Q'_{eq}) yaşa göre değişimi

mertebeinde olduğu görülmektedir. İçsel kütleçekim dalgası modelleriyle gözlemsel gelgit kalite faktörü 1σ içinde uyum göstermektedir. Bu bulgular, WASP-12b'nin değişen yörünge döneminin yalnızca gelgit etkileşimleriyle açıklanabildiğini değil, ayrıca bu etkileşimlerden kaynaklanan enerjinin yıldızın konvektif/radyatif sınırında uyarılan içsel kütleçekim dalgalarıyla taşındığını da desteklemektedir.

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında ilk olarak gelgit etkilerinden kaynaklı olası yörünge küçülmesinin incelenmesi için Bölüm 4.1’de verilen metodoloji kullanılarak; HATS-18b, Kepler-1658b, WASP-4b ve WASP-12b sıcak Jüpiterleri seçilmiştir. Seçim kriterleri olan yörünge küçülmesinin üstel katlanmalı zaman ölçeği (τ_a) ve dönmedolanma senkronizasyon zaman ölçeği (τ_{ω_*}) tez çalışmasına dahil edilen 4 cisim için Çizelge 6.1’de verilmektedir. Bu cisimlerin olası yörünge dönemi değişiklikleri, ilk olarak ışık eğrilerinden elde edilen geçiş ortası minimum zamanlarının bir araya getirilmesi ve yıllara yayılmış bir TTV analizinin yapılması ile araştırılmıştır. Ardından ilgili gözlemsel bulguların yıldız evrimi ve gelgit etkileşmesi modelleriyle örtüşüp örtüşmediğini test etmek amacıyla öncelikle MESA kullanılarak barınak yıldızın bir boyutlu evrim modelleri elde edilmiştir. Evrim modellerinden hesaplanan yaşa bağlı radyal profiller daha sonra gelgit etkileşmesi modellerini oluşturmak için kullanılmıştır. Buradaki tek istisna, gelgit etkisi modellerinin HATS-18 için hazırlanmıyor oluşudur, zira yıldızın temel parametreleri Penev vd. (2016)’nın ardından kapsamlı bir şekilde güncellenmemiştir. Bu parametrelerden yararlanarak Southworth vd. (2022) ve Maciejewski vd. (2024) ilgili MESA modellerini hazırlamıştır. Bu bağlamda, aynı parametreleri kullanarak modellemeyi gerçekleştirme ihtiyacı doğmamıştır. Sonuç olarak, HATS-18 özelinde ilgili TTV bulguları geçmiş modeller ile karşılaştırılmış, diğer cisimler için gelgit etkileri yeni temel parametreler (Çizelge 5.1) ışığında farklı kütle ve metal bollukları ile modellenmiştir (Bölüm 5).

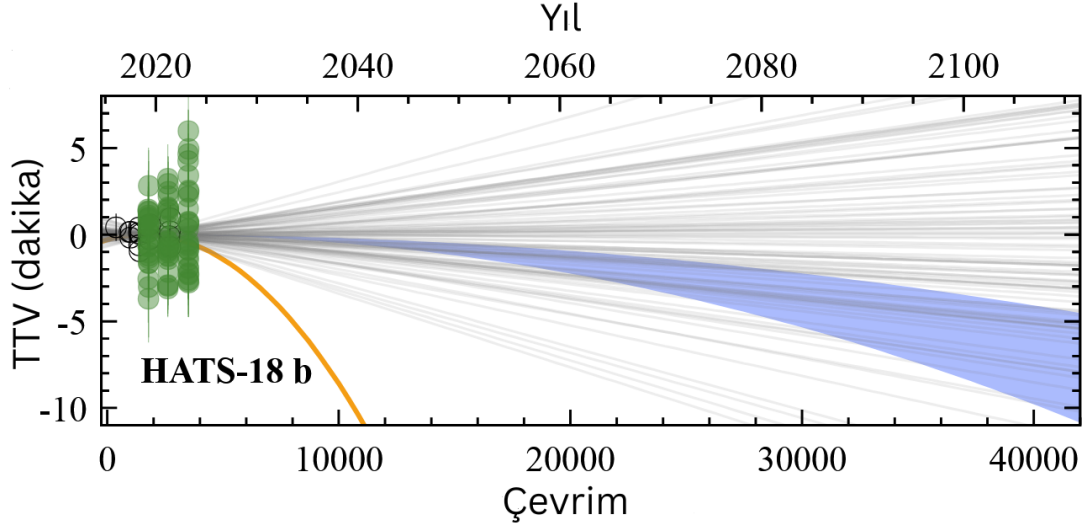
Çizelge 6.1 Tez çalışmasına dahil edilen ötegezegen sistemleri için τ_a ve τ_{ω_*} değerleri.

Cisim	τ_a	τ_{ω_*}
HATS-18	5.563	7.175
Kepler-1658	5.448	6.646
WASP-4	6.567	7.973
WASP-12	5.399	7.453

HATS-18: Gezegen ve yıldız parametreleri göz önüne alındığında ($M_* = 1.037 \pm$

$0.047M_{\odot}$, $R_* = 1.20^{+0.057}_{-0.031}R_{\odot}$, $M_p = 1.980 \pm 0.077M_{\text{jüp}}$, $R_p = 1.337^{+0.102}_{-0.049}R_{\text{jüp}}$ ve $P_{\text{yör}} \approx 0.84$ gün) keşfedildiği günden itibaren (Penev vd. 2016) gelgit etkilerinin çalışılması için değerli bir aday olarak değerlendirilmiştir. Buna ek olarak, HATS-18'in yaşı ve dönme dönemi karşılaştırıldığında ($P_{\text{rot}} = 9.8 \pm 0.4$ gün ve $(4.2 \pm 2.2) \times 10^9$ yıl) barınak yıldız ve gezegen arasındaki açısal momentum transferinden kaynaklı HATS-18'in gelgit hızlanması (ing. tidal spin-up) yaşamış olabileceği belirtilmiştir. Bu bilgiler ışığında, HATS-18b'nin olası yörünge dönemi değişimi ilk olarak TTV analizine uyumlanan lineer, kuadratik modeller ve eksen dönmesi modeli aracılığıyla araştırılmıştır. Literatürde cisme ait son güncel bulgular Maciejewski vd. (2024) tarafından verilmiş olup, son olarak TESS 63. sektörünü (Mart 2023) veri kümesine dahil etmiştir. Bu tez çalışması, yer-tabanlı iki adet geçiş gözlemi (Mayıs 2024; Çizelge 4.4) ve TESS 90. sektör (Mart 2025) geçiş gözlemlerini de veri kümesi içine alarak mevcut örnekleme ~ 2 yıl genişletmektedir. Bu bağlamda, toplam ~ 10 yılı kapsayan minimum zaman ölçümleri ile TTV diyagramı oluşturulmuştur. Yapılan TTV analizi sonucunda (Şekil 5.1, 5.2 ve Çizelge 5.2) HATS-18b'nin yörünge dönemi değişimine ilişkin güçlü bir istatistiksel sonuç elde edilememiştir. Lineer ve kuadratik model arasındaki $\Delta\chi^2_{\nu} = 0.06$ $\Delta\text{BIC}=8.84$ farkı, iki modelin mevcut veri kümesi altında birbirinden yeterince ayrılmadığını göstermektedir. Bu önermeyi iki model için hesaplanan Bayes faktörü $B_{kl} = 83.2$ desteklemektedir. Bu çalışma dahilindeki TTV bulguları beklenildiği düzeydedir, zira Southworth vd. (2022) $\Delta\text{BIC}=3.2$ ve Maciejewski vd. (2024) $\Delta\text{BIC}=4.3$ bularak modeller arasında istatistiksel olarak ayırt edilebilecek bir fark olmadığını ortaya koymuştur. Buna ek olarak Maciejewski vd. (2024) geçiş ortası zamanlarının yıllar içinde kümülatif olarak nasıl değişebileceğine ilişkin tahminleri Şekil 6.1 ile ortaya koymaktadır. Buna göre, 2110 ve 2160 yılları arasında gelgit kuvvetleri nedeniyle lineer efemeristen ~ 10 dakikalık bir kaymanın gözlenebilme olasılığı mevcuttur.

HATS-18b'nin TTV diyagramına uyumlanan kuadratik model aracılığıyla barınak yıldızın gelgit kalite faktörüne ilişkin bilgi edinmek de mümkün olmuştur. Bu çalışmada elde edilen kuadratik modelin medyanına göre HATS-18b'nin yörünge dönemi $(0.40 \pm 0.66) \times 10^{-10}$ gün/çevrim oranında artmaktadır. Bu değer Denklem 2.9'de



Şekil 6.1 HATS-18b'nin mevcut linear efemerisinden beklenen sapma.

Linear efemeris $T(E) = 2457089.90564(22) + 0.83784378(10) \times E$ olarak verilmektedir. Hardal rengi model Weinberg vd. (2024) tarafından elde edilen $Q'_{*,\text{NWL}} \approx 5.5 \times 10^5$ değeriyle WNL etkileri yoluyla gerçekleşen enerjinin yayılımını göstermektedir. Mavi alan, Penev vd. (2016) tarafından yapılan jirokronolojik analizinin öngörülerini temsil etmektedir ve burada Q'_* 1.0×10^7 (alt sınır) ile 2.4×10^7 (üst sınır) arasında değişmektedir. Grafik Maciejewski vd. (2024)'den alınmıştır.

doğrudan kullanıldığında negatif bir Q'_* değeri elde edilecektir. Ancak tanım gereği $Q'_* > 0$ olması gerektiğinden, kuadratik modelin baş katsayısının 3σ alt limiti kullanılmış ve $a_1^{\text{lim}} = -0.79 \times 10^{-10}$ elde edilmiştir. Bu değer kullanılarak gelgit kalite faktörü için $Q'_* > (5.75^{+2.01}_{-1.48}) \times 10^5$ sınırı elde edilmiştir. Bu sınır Barker (2020) tarafından öne sürülen $Q'_{\text{IGW}} \sim 1.1 \times 10^5$ değeri ile 3σ içinde uyumludur. Ayrıca, Barker (2020) HATS-18b'nin radyatif/konvektif sınırında içsel kütleçekim dalgalarının uyarılması için barınak yıldızın 4.6×10^9 yaşındayken kritik gezegen kütlelerinin $M_{\text{crit}} \sim 1.7 M_{\text{Jüp}}$ olması gerektiğini önermiştir. Bu hesaplamalar doğrultusunda, dalga kırılması senaryosunun HATS-18 sistemi için geçerli olması beklenmektedir. Gelgit kalite faktörüne ilişkin sınır değeri, literatürdeki diğer çalışmalarla da karşılaştırılmıştır. Southworth vd. (2022) gözlemsel olarak $Q'_* > 1.29^{+0.12}_{-0.11} \times 10^5$ bulmuştur. Devamında, HATS-18 sisteminin yıldız evrim modeli oluşturulurken yıldız kütleleri olarak $M_* = 1.05, M_\odot$ ve metal bolluğu olarak $Z = 0.03$ değerleri

esas alınmıştır ve dalga kırılması için kritik kütle (M_{crit}), 10^{10} yıla kadar hesaplanmıştır. Buna göre, barınak yıldız 3.5×10^9 yıldan genç iken beklenmemektedir. Barınak yıldız 3.5×10^9 yıldan yaşlı iken, dalga kırılması $Q'_* \approx 1.2 \times 10^5$ ile beklenmektedir. Bu bulgu, tez çalışmasında elde edilen değer ile 3σ içinde uyumludur. Southworth vd. (2022)'nin çalışmasının ardından Maciejewski vd. (2024) gözlemsel sınır olarak $Q'_* > 3.5^{+0.5}_{-0.7} \times 10^5$ önermiş, teorik olarak ise hem dalga kırılması yaklaşımıyla $Q'_* \leq 2.6 \times 10^5$, hem de zayıf lineer olmayan dalgalar (ing. weakly non-linear, WNL) yaklaşımıyla $Q'_* \sim 5.5 \times 10^5$ önermiştir. Öte yandan, Penev vd. (2018), gelgit kaynaklı dönme hızlanması (ing. tidal spin-up) senaryosu kapsamında $Q'_* \sim (1.0 - 2.4) \times 10^7$ aralığında değerler öngörmektedir. Bu bağlamda, HATS-18b için elde edilen sınır değeri hem teorik hem gözlemsel modellerin büyük kısmıyla 3σ içerisinde uyumlu görünmektedir. Ancak Penev vd. (2018) tarafından öne sürülen yüksek Q'_* değerleri ile karşılaştırıldığında, bu çalışma sonuçları üst limit olarak yaklaşık 100 kat daha etkin bir gelgit etkisi olabileceğini öne sürmektedir.

Kepler-1658(KOI-4): Kepler göreviyle keşfedilen ilk ötegezegen adayı olmasına rağmen (Borucki vd. 2011), Kepler-1658 sistemine ait yıldız ve gezegen parametreleri ancak 8 yıl sonra doğrulanabilmiştir (Chontos vd. 2019). Bu sistem, doğrulandığı günden itibaren evrimleşmiş yıldızı ($M_* = 1.447 \pm 0.058 M_{\odot}$, $R_* = 2.891^{+0.130}_{-0.106} R_{\odot}$ ve $P_{\text{rot}} = 4.4 \pm 0.4$ gün; Chontos vd. 2019) ve kısa yörünge dönemine sahip sıcak Jüpiteri ($M_p = 5.88^{+0.47}_{-0.46} M_{\text{jüp}}$ ve $P_{\text{yör}} \approx 3.85$ gün; Chontos vd. 2019) ile gelgit etkileşimleri açısından dikkat çekici bir örnek sunmaktadır. Özellikle alt dev evresindeki yıldızların gelgit etkileri sebebiyle nadir olmasının düşünülmesinden dolayı (Levrard vd. 2009, Schlaufman ve Winn 2013) bu sistem gelgit etkilerinin oldukça etkin olduğu alt dev safhası (Ogilvie ve Lin 2004, 2007) için çok önemli bir laboratuvar haline gelmektedir. Geçiş derinliğinin oldukça düşük ($\delta < 0.1$) ve etki parametresinin oldukça büyük olmasından ($b \sim 0.95$) dolayı, bu cisme dair gözlemler bu çalışma kapsamında gerçekleştirilememiş ve bu cisme ilişkin analiz neredeyse tamamen TESS ve Kepler ışık eğrisi verileri aracılığıyla yürütülmüştür. Buna karşın, TTV analizi kapsamında en güncel çalışma olan Vissapragada vd. (2022)'nin üstüne bu çalışmada TESS 74, 75, 81 ve 82. sektörleri eklenmiştir ve veri kümesi ~ 2 yıl genişletilmiştir.

Kepler-1658b için oluşturulan TTV diyagramına sırasıyla lineer ve kuadratik modeller uyumlanmış ve bu modeller istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. İki model arasındaki $\Delta\chi^2_\nu = 0.36$ ve $\Delta\text{BIC} = 4.72$ değerleri, aralarında çok güçlü bir istatistiksel fark olmadığını göstermektedir. Ancak lineer model, veriyi kuadratik modele kıyasla daha iyi temsil etmektedir. Öte yandan, her iki model için de $\chi^2_\nu \gg 1$ olması, modellerin mutlak anlamda TTV diyagramını yeterince iyi açıklayamadığını ortaya koymaktadır (Bevington ve Robinson 2003, Andrae vd. 2010). Kuadratik modelin medyanının başkatsayısına $(-26.50^{+6.56}_{-6.46} \times 10^{-10}$ gün/çevrim; Çizelge 5.3) göre, Kepler-1658b'nin yörünge dönemi -150 ± 40 ms/yıl değişime sahiptir. Bu bulgu Chontos vd. (2019)'un önerdiği $dP_{\text{yör}}/dt < -24$ ms/yıl ve Vissapragada vd. (2022)'nin TTV analizi sonucu ulaştığı $dP_{\text{yör}}/dt = -131^{+20}_{-22}$ ms/yıl değeriyle 1σ içinde uyumludur. Kuadratik model medyanının başkatsayısı kullanılarak gelgit kalite faktörü $(1.1 \pm 0.4) \times 10^5$ olarak hesaplanmıştır. Literatürde yapılan çalışmalar ile karşılaştırıldığında sonuç beklenenden yaklaşık 2 ila 5 kat daha fazladır, zira Vissapragada vd. (2022) $Q'_* = 2.5^{+0.85}_{-0.62} \times 10^4$ olarak ölçerken Milholland vd. (2025) $Q'_* \approx 10^{6.5}(P_{\text{tide}}/\text{gün})^{-3}$ formülünü kullanarak $Q'_* \approx 1.4 \times 10^4$ öngörmüştür. Bu bağlamda, bu çalışmada elde edilen değerler geçmiş çalışmalar ile 3σ içerisinde uyumlu olmaktadır.

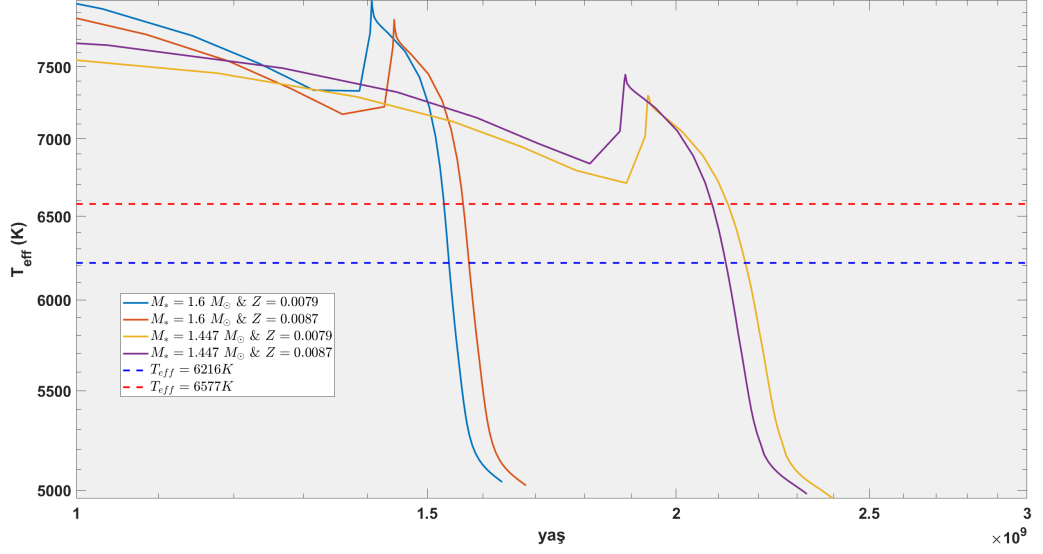
Gözlenen olası yörünge dönemi değişimini açıklayacak diğer senaryolar eksen dönmesi ya da üçüncü bir cismin varlığı olabilir. Vissapragada vd. (2022) eksen dönmesi model sonuçlarına göre gereken dönme oranını $d\omega/dE \approx 7 \times 10^{-4}$ rad/çevrim (bir diğer ifadeyle $4^\circ/\text{yıl}$) olarak ölçmüştür. Eğer eksen dönmesi gezegende oluşan gelgit şişiminden kaynaklı ise, $d\omega/dE = 15\pi k_{2p}(M_*/M_p)(R_p/a)^5 \approx (8.9^{+2.6}_{-2.1}) \times 10^{-7}$ rad/çevrim k_{2p} olmalıdır. Bu sonuçların gözlenen dönme oranı ile örtüşmesi için gezegenin Love sayısı $k_{2p} \sim 10^3$ olmalıdır. Ancak, Love sayısı tanımı gereği 0 ila 1.5 arasında değerler aldığından, bu sonuçlar fiziksel olarak doğru değildir. Öte yandan, eksen dönmesi yıldızın gelgit şişiminden kaynaklı ise $d\omega/dE = 15\pi k_{2*}(M_*/M_p)(R_*/a)^5 \approx (1.70^{+0.45}_{-0.35}) \times 10^{-4}$ rad/çevrim olmalıdır. Bu formülasyonun bulgularla eşleşmesi için $k_{2*} \sim 4$ olmalıdır ve yine Love sayısının tanımı gereği bu mümkün

değildir. Sonuç olarak, Vissapragada vd. (2022)'ye göre eksen dönmesi Kepler-1658b'nin olası yörünge dönemi değişimi için geçerli bir açıklama olmamaktadır.

Kepler-1658'i ilginç kılan sadece TTV analizi ile bu cismin gelgit kalite faktörünün ne kadar hassas elde edilebileceğinden ziyade, teorik gelgit modellerinden elde edilecek bulgular ışığında bu analizin ne kadar anlam kazanacağıdır. Chontos vd. (2019) her ne kadar Çizelge 5.1'de verildiği gibi bütüncül bir biçimde yıldız ve gezegen parametrelerini elde etmiş olsa da, o tarihten itibaren fotometrik ve spektroskopik veriler ışığında yıldız ve gezegen parametreleri güncellenmemiştir. Barker vd. (2024) PARSEC yıldız evrim modelleri aracılığı ile Kepler-1658'in Gaia parametreleri ile örtüşen izokronlarını kullanmıştır en yakın izokron 1.8×10^9 yaşında $M_* = 1.62M_\odot$, $T_{\text{eff}} = 6628$ K ve $\log g = 3.64$ vermektedir. Bir diğer izokron ise 1.7×10^9 yaşında $M_* = 1.65M_\odot$, $T_{\text{eff}} = 6577$ K ve $\log g = 3.63$ değerlerini vermektedir. Bütün bu bulgular dikkate alındığında, bu tez çalışması kapsamında Kepler-1658'in yıldız evrim modelleri hesaplanan maksimum ve minimum kütle ve metal bolluğu için 4 farklı kombinasyon halinde elde edilmiştir. Kütle değerleri; $M_* \in \{1.447, 1.6\} M_\odot$ ve metal bolluğu $[\text{Fe}/\text{H}] \in \{-0.18, -0.14\}$ ¹ (Chontos vd. 2019, Gaia Collaboration 2022) olarak belirlenmiştir. MESA ile elde edilen yıldız evrim modelleri kullanılarak Şekil 5.5, 5.6 ve 5.7 ile verilen farklı gelgit enerji yayılım mekanizmalarına ilişkin gelgit kalite faktörleri yıldızın yaşına bağlı fonksiyonlar halinde elde edilmiştir.

Şekil 5.5 özelinde, yüksek kütleli ($M_* = 1.6M_\odot$) modeller $\approx 1.6 \times 10^9$ yıl civarında ve düşük kütleli ($M_* = 1.447M_\odot$) modeller $\approx 2.2 \times 10^9$ yıl civarında, yani yıldız alt dev safhasında iken (Şekil 6.2' göre ve yıldızın sıcaklığı $T_{\text{eff}} = 6216$ K) $Q'_{\text{EQ}} \sim 10^7$ değerine sahiptir. Bu değer gözlenen ve literatürde raporlanan $Q'_* \sim 10^4 - 10^5$ seviyesinden 100 kat daha fazladır. Bu bulgular, Barker vd. (2024)'ın bulduğu $Q'_{\text{EQ}} \geq 10^7$ ile tüm modeller için uyumludur. Sonuç olarak, denge gelgitleri (EQ) gözlemsel olarak elde edilen Q'_* değerini açıklayamamaktadır.

¹Asplund vd. (2009)'da verilen Güneş metal bolluğu $Z=0.012$ kullanılarak, metal bollukları $Z = Z_\odot \times 10^{[\text{Fe}/\text{H}]}$ formülü ile hesaplanmıştır.



Şekil 6.2 Kepler-1658’in sıcaklığının (T_{eff}) yaşa göre değişimi.

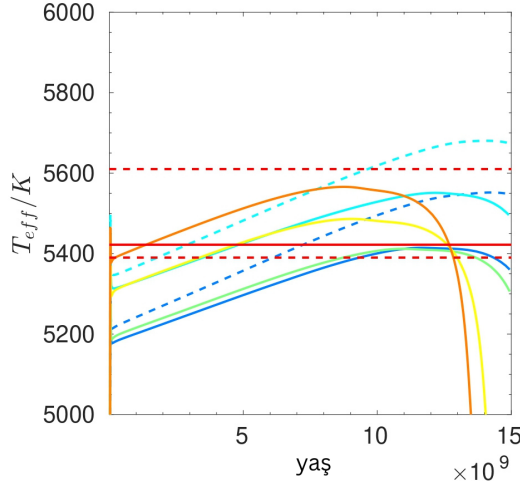
Öte yandan, atalet dalgaları (IW) alt dev safhasında iken $\langle Q'_{IW} \rangle \approx 10^4 - 10^5$ değerlerini sağlamaktadır. Bu değerler, gözlemsel olarak bulunan $Q'_* = 1.1 \pm 0.4 \times 10^5$ değeriyle 3σ içinde ve Vissapragada vd. (2022)'nin gözlemsel olarak bulduğu $Q'_* = 2.5 \times 10^4$ değeriyle 2σ uyumludur. Nitekim, Vissapragada vd. (2022) ve Barker (2020), yıldızın alt-dev safhasında iken konvektif bölgede atalet dalgalarının efektif bir biçimde uyarılabileceğini ve TTV analizinden tespit edilen yörünge dönemi değişimini açıklayabileceğini öne sürmüştür. Yıldızın dönme dönemi ($P_{\text{rot}} \sim 4.4$ gün) ve gezegenin yörünge dönemi ($P_{\text{yör}} = 3.85$ gün) düşünüldüğünde, Bölüm 2.2.2'de belirtilen atalet dalgalarının efektif biçimde uyarılma koşulunun sağlandığı ve bu cisimdeki -varsa- yörünge küçülmesini açıklayabileceğini söylemek mümkündür.

Bu mekanizmaya ek olarak, bu çalışma dahilinde Kepler-1658'de içsel kütleçekim dalgalarının (IGW) da efektif bir biçimde uyarılabileceği görülmektedir. Şekil 5.8'e göre, radyatif/konvektif bölge sınırında IGW uyarılması için $M_{\text{crit}} \approx 10^{-2} M_{\text{jüp}}$ olmalıdır. Gezegenin kütlesi ($M_p = 5.88 M_{\text{jüp}}$) bu koşulu sağlamaktadır ve bu sebeple bu cisim için IGW'lerin efektif bir biçimde uyarılması beklenmektedir. Barker vd. (2024) de kritik kütle değeri için $M_{\text{crit}} \approx 10^{-1} - 10^{-2} M_{\text{jüp}}$ öngörmektedir. Şekil 5.7 dikkate alındığında, düşük kütleli modeller için yıldız $\sim 1.6 \times 10^9$ yıl civarındayken $Q'_{\text{IGW}} \approx 10^5 - 10^6$ arasında olduğu, yüksek kütleli modeller için $Q'_{\text{IGW}} \approx 10^7 - 10^8$ olduğu görülmektedir. Daha yüksek kütleli modeller

gözlenen Q'_* değerini açıklamazken, daha düşük kütleli modeller için IGW modelleri toplam enerji yayılımına efektif bir biçimde katkı sağlar. Barker vd. (2024) yıldızın $M_* \in \{1.62, 1.65\} M_\odot$ kütleli modellerini oluşturmuş ve aynı yaşlar için $Q_{\text{IGW}} \gtrsim 10^8$ elde etmiştir. Nitekim, Barker (2020) yine aynı kütle değerleri için $Q_{\text{IGW}} \sim 10^8$ önermiştir. Bu bağlamda, IGW modellerinden elde edilen sonuçlar gözlemsel bulguları açıklamak için yeterlidir. Chontos vd. (2019)'un hesapladığı yıldız ve gezegen parametreleri doğrultusunda hazırlanan modeller gözlenen Q'_* değerini açıklarken, Barker vd. (2024)'ün bulmuş olduğu yıldız ve gezegen parametreleri ile oluşturulan modeller gözlenen değeri açıklayamamaktadır. Bu modellerin nihai olarak gözlenen Q'_* değerini açıklayıp açıklamadığının belirlenmesi için sisteme ait temel yıldız ve gezegen parametrelerinin güncellenmesi ve modellerin tekrar oluşturulması gerekmektedir.

WASP-4: Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1 incelendiğinde, *WASP-4* tez çalışmasına dahil edilen diğer 3 sistem kadar kuvvetli bir yörünge küçülmesi adayı değildir. Ancak son yıllarda yapılan çalışmalar (Bouma vd. 2019, Baluev vd. 2020, Turner vd. 2022, Harre vd. 2023) ve sistem parametreleri ($M_* = 0.858^{+0.053}_{-0.040} M_\odot$, $R_* = 0.895^{+0.017}_{-0.015} R_\odot$, $M_p = 1.164^{+0.048}_{-0.037} M_{\text{jüp}}$, $a = 0.02261^{+0.00036}_{-0.00027}$ AB ve $P_{\text{yör}} \approx 1.38$ gün) göz önüne alındığında, bu cismin gelgit etkileşimleri altında yörünge küçülmesi olasılığını gözlemsel ve teorik bulgular ışığında çalışmak, gelgit teorilerinin örneklemine geliştirmek adına elzem görülmüştür.

Literatürde *WASP-4b*'nin yörünge küçülmesi olasılığını TTV analizi ile inceleyen en güncel çalışmalardan birisi olan Harre vd. (2023) son olarak Eylül 2020'de gözlenen TESS 29. sektörü ve 8 adet CHEOPS gözlemiyle birlikte ~ 2000 . çevrime dek geçiş ortası minimum zamanlarını elde etmiştir. Bu çalışma, TESS 69. sektör verilerini ve Bölüm 4.3'de açıklanan 29 adet (seçim kriterlerinin ardından) geçiş gözlemini de veri kümesine ekleyerek örneklemi yaklaşık 3 yıl genişletmiş ve örneklem zaman içerisinde sürekliliğini arttırmıştır. Bu bağlamda, toplam ~ 17 yıla yayılan bir geçiş ortası zamanı örneklemi ile TTV analizi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.3 WASP-4’ün sıcaklığının (T_{eff}) yaşa göre değişimi.

Renklerin temsil ettiği modeller, Şekil 5.11 ile aynıdır. Kırmızı çizgi $T_{\text{eff}} = 5422$ K değerini göstermektedir. Kırmızı kesikli çizgiler, Çizelge 5.1’de verilen sıcaklık değerinin 3σ alt ve üst limitlerini belirtmektedir.

TTV analizi sonucunda, $\Delta\text{BIC} = -70.73$ ve $\Delta\chi^2_\nu = -2.06$ ile yörünge küçülmesi (kuadratik) modelinin TTV verisini sabit yörünge dönemi (lineer) modelinden daha iyi temsil ettiği bulunmuştur. Kuadratik model başkatsayısının medyanına göre WASP-4b’nin yörünge dönemi $dP_{\text{yör}}/dt = -5.7 \pm 2.2$ ms/yıl oranında değişmektedir ve bu değişime karşılık gelen yörünge küçülmesi karakteristik zaman ölçeği $\tau = 2.03 \pm 0.08 \times 10^7$ yıl olmaktadır. Bouma vd. (2019)’un $\Delta\text{BIC} = -89.0$, Turner vd. (2022)’nin $\Delta\text{BIC} = -104.85$ ve Harre vd. (2023)’ün $\Delta\text{BIC} = -94.89$ ile kuadratik modelin veriyi daha iyi temsil ettiğini bulmuştur. Bu bağlamda, çalışma bulgularının literatür ile uyumlu olduğu söylenebilir. Kuadratik model medyanının başkatsayısı kullanılarak yıldızın gelgit kalite faktörü $Q'_* = (7.9 \pm 1.2) \times 10^4$ bulunmuştur. Bu değer, Bouma vd. (2019)’un hesapladığı $Q'_* = 2.9 \times 10^4$ ile 5σ , Baluev vd. (2020)’nin hesapladığı $Q'_* = 6.0 \times 10^4$ ile 2σ , Turner vd. (2022)’nin hesapladığı $Q'_* = 5.11 \times 10^4$ ile 3σ ve Harre vd. (2023)’ün hesapladığı $Q'_* = 5.7 \times 10^4$ ile 2σ içerisinde uyumludur. Gözlemsel bulguların yanı sıra, Barker (2020)’nin $0.9M_\odot$ için oluşturduğu IGW modelleri $\sim 5 - 10 \times 10^9$ yıl aralığında $Q'_{\text{IGW}} \approx 10^4 - 10^5$ ön görmektedir. Bu tahmin, WASP-4’ün kütlesi, yaşı ve gözlemsel olarak hesaplanan Q'_* düşünüldüğünde WASP-4b’nin yörüngesinin küçülmesinde içsel kütleçekim dal-

galarının efektif bir biçimde rol oynama ihtimalini ortaya koymaktadır. Güneş benzeri yıldızlar ($0.8 - 1.3M_{\odot}$) etrafında dönen sıcak Jüpiterler için yıldız anakol evresindeyken $Q'_* \sim 10^5 - 10^{10}$ tahmin edilmektedir (Ogilvie 2014, Essick ve Weinberg 2016, Collier Cameron ve Jardine 2018, Ma ve Fuller 2021). WASP-4'ün yaşı ($9.5^{+2.8}_{-3.6} \times 10^9$ yıl), metal bolluğu ($[\text{Fe}/\text{H}] = -0.06$) ve sıcaklık profili (Şekil 6.3) göz önüne alındığında, WASP-4'ün gözlenen Q'_* değerinin anakol safhasının sonlarında mümkün olduğu söylenebilir. Bu olasılığı incelemek adına bu çalışmada 7 farklı kütle ve metal bolluğu ($M_* \in \{0.899, 0.858, 0.911, 0.943, 0.945\} M_{\odot}$ & $Z \in \{0.012, 0.02, 0.022, 0.0243, 0.0249\}$) kombinasyonu ile gelgit modelleri oluşturularak yıldızın beklenen yaşında hangi mekanizma ile ne mertebede enerjinin yayıldığı araştırılmıştır. WASP-4 özelinde ($P_{\text{rot}} = 22.2$ gün ve $P_{\text{yör}} = 1.38$ gün) atalet dalgaları efektif bir enerji yayılım mekanizması olamayacağı için modellemelere dahil edilmemiştir.

Yapılan modeller sonucunda, denge gelgitleri (Şekil 5.13) barınak yıldız 1×10^9 yaşından 10^{10} yaşına gelinceye dek (anakol evresinde de denebilir) $Q'_{\text{EQ}} \sim 10^9 - 10^{10}$ mertebesinde olmaktadır. yıldızın belirlenen yaşı civarında ise ($9.5^{+2.8}_{-3.6} \times 10^9$ yıl) için $Q'_{\text{EQ}} \approx 10^{10}$ bulunmuştur. Gözlenen $Q'_* = (7.9 \pm 1.2) \times 10^4$ ile karşılaştırıldığında, bu değer çok daha az efektif bir enerji yayılımı işaret etmektedir ve TTV analizi sonucu bulunan Q'_* değerini açıklamak için yeterli değildir.

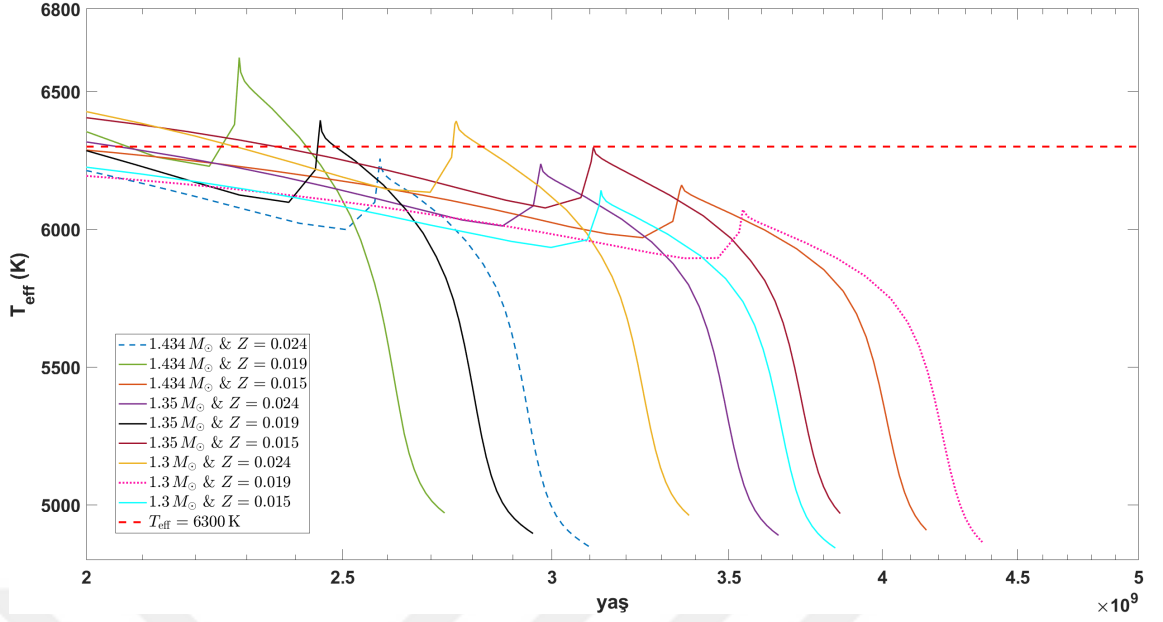
Öte yandan, yıldızın yaşı civarında içsel kütleçekim dalgalarının uyarılması için gerekli kritik kütle miktarı $M_{\text{crit}} \approx 10^{-1} M_{\text{jüp}}$ olarak bulunmuştur (Şekil 5.12). Barker (2020) WASP-4'ün 7×10^9 yıldan daha yaşlı olursa dalga kırılması sonucu içsel kütleçekim dalgalarının uyarılmasının beklenebileceğini öne sürmüştür. Bu bulgu, Baştürk vd. (2025)'in hesaplamış olduğu yıldız yaşı (Çizelge 5.1) ile uyumludur. Bu bilgiler ışığında, WASP-4'ün radyatif/konvektif sınırında içsel kütleçekim dalgalarının efektif bir biçimde uyarılması ve gözlenen 10^4 mertebesindeki Q'_* değerini açıklaması beklenmektedir. Şekil 5.11 incelenecek olursa, $1 - 1.5 \times 10^{10}$ yıl aralığında $0.899M_{\odot}$ & $Z = 0.022$ ve $0.858M_{\odot}$ & $Z = 0.012$ modelleri dışında tüm modeller WASP-4'ün hesaplanan yaşı civarında $Q'_{\text{IGW}} \approx 8 \times 10^4$ vermektedir. Bu sonuçlar

ışığında WASP-4b'nin gözlenen yörünge dönemi değişimini yörünge küçülmesi senaryosu açıklayabilmektedir.

WASP-12: İlk olarak Maciejewski vd. (2016)'nın WASP-12b'nin yörünge değişimini -2.56 ± 0.40 s/yıl ölçmesinin ardından, WASP-12 sistemi özellikle gelgit teorilerinin Güneş benzeri yıldızlar için test edilmesi için çok önemli bir örnek haline gelmiştir. Takip eden çalışmalar (Çizelge 3.1) daha sonra veri kümesinin büyümesiyle hem bu bulguyu doğrulamış, hem de ölçüm hassasiyetini daha uzun yıllara yayılan TTV verisiyle arttırmıştır. Bu çalışma veri kümesine son çalışmaların ardından (Alvarado vd. 2024, Adams vd. 2024) elde edilen iki adet yeni gözlemi ekleyerek veri kümesini yaklaşık 1.5 yıl genişletmiştir.

Bu çalışma dahilinde 233 minimum zamanın bir araya getirilmesiyle gerçekleştirilen TTV analizi sonucunda $\Delta\text{BIC} = \text{BIC}_{\text{kuad}} - \text{BIC}_{\text{lin}} = -186.25$ bulunmuş ve bu fark $B_{kl} = 1.27 \times 10^{40}$ gibi bir Bayes faktörüne karşılık gelerek yörünge küçülmesi modelinin lineer modele kıyasla yüksek mertebede seçilebilir olduğu bir kez daha doğrulanmıştır. Eksen dönmesi modeli, sahip olduğu $\text{BIC} = 4286.59$ değeriyle diğer modellere kıyasla veriyi temsil etmekte yeterli değildir. Kuadratik model sonucunda WASP-12b'nin yörünge dönemi çevrim başına -1.0×10^{-9} gün değişmekte olup, bu değer yılda -29.3 ± 0.4 ms yörünge dönemi azalmasına karşılık gelmektedir. Bu çalışmanın bu cisme ait nihai sonucu olarak, WASP-12b'nin yörüngesinin yaklaşık 3.2 Milyon yıl ($\tau = 3.21 \times 10^6$ yıl) sonra yıldızın ışıyım gücüne karşı koyamayacak ve fiziksel bütünlüğünü kaybedecek kadar küçülmesi beklenmektedir.

Gelgit etkileşmelerinin ne mertebede etkin olduğunu belirleyebilmek adına gelgit kalite faktörü aynı yöntemle elde edilmiş ve $Q'_* = (1.7 \pm 0.4) \times 10^5$ bulunmuştur. Bu bulgu, Jackson vd. (2008)'nin öngördüğü $Q'_* = 10^5 - 10^{6.5}$ aralığının alt sınırına oldukça yakındır. Öte yandan, Hamer ve Schlaufman (2019)'un sıcak Jüpiterlerin barınak yıldızları anakol süresinde ve anakol sonunda iken gelgit etkileşmelerine maruz kalmalarından dolayı bu iki evrim safhası için $Q'_* \lesssim 10^7$ tahmin etmiştir. Çalışma bulguları, teorik olarak çizilen bu sınırların içinde kalmaktadır. WASP-



Şekil 6.4 WASP-12'nin sıcaklığının (T_{eff}) yaşa göre değişimi.

12b'ye ait geçmiş çalışmalar ile karşılaştırıldığında ise (Çizelge 3.1), bu çalışma kapsamında bulunan Q'_* değeri Patra vd. (2017)'nin bulmuş olduğu $Q'_* = 2.5 \times 10^5$ hariç (2σ) tüm geçmiş bulgular ile 1σ içinde uyumludur.

Weinberg vd. (2017) gözlemsel olarak bulunan yörünge dönemi değişiminin ardından gelgit enerji yayılımlarının barınak yıldızda nasıl gerçekleşebileceğini incelemiş ve o tarihlerde hesaplanan (Maciejewski vd. 2016, Patra vd. 2017) $Q'_* \approx 2.5 \times 10^5$ değerinin gelgit modelleriyle ancak barınak yıldız alt-dev safhasındaysa uyumlu olabileceğini öne sürmüştür. Gözlenen değer 3×10^9 yıl civarında içsel kütleçekim dalgaları ile açıklanabilmekte ve WASP-12b'nin yıldız alt-dev evresine gelene kadar nasıl hayatta kaldığını açıklayabilmektedir. Bu önerme daha sonradan Bailey ve Goodman (2019) tarafından doğrulanmıştır. Barker (2020) dalga kırılmalarının daha düşük kütleli ($1.2M_{\odot}$) modellerin alt-dev evresinde beklendiğini, yüksek kütleli ($1.43M_{\odot}$) modellerde tahmin edilen $Q'_{\text{IGW}} > 10^6$ sınırının WASP-12b'de ölçülen etkinliği açıklayamadığını bulmuştur.

Bu tez çalışması kapsamında gözlemsel olarak elde edilen $Q'_* = (1.7 \pm 0.4) \times 10^5$ değerinin gelgit enerji yayılım modelleri ile karşılaştırılması ve literatür çalışmaları-

rında ön plana çıkan WASP-12'nin alt-dev olması önermesinin test edilmesi adına toplamda 9 farklı kütle ve metal bolluğu ($M_* \in \{1.30, 1.35, 1.434\}M_\odot$ & $Z \in \{0.015, 0.019, 0.024\}$) kombinasyonu için bu gelgit kalite faktörü farklı mekanizmalar için yaşa bağlı fonksiyonlar halinde elde edilmiştir. Şekil 6.4'e bakıldığında, daha yüksek kütleli modeller ($M_p = 1.434M_\odot$) için sıcaklık Collins vd. (2017b)'nin ölçtüğü 6300 K seviyesinden daha düşük bir seviyede iken barınak yıldız alt-dev geçiş aşamasını tamamlarken, daha düşük kütleli modeller ($M_p = 1.30 - 1.35M_\odot$) gözlenen sıcaklıklar ile uyumlu bir davranış sergilemektedir. Bu bulgu Barker (2020)'nin daha düşük kütleli modellerin gözlemsel bulgularla (T_{eff} ve Q'_*) daha uyumlu olduğu savını doğrulamaktadır.

WASP-12 özelinde, tıpkı WASP-4 örneğinde olduğu gibi atalet dalgalarının konvektif katmanda uyarılması beklenmez zira barınak yıldız gezegenin yörünge dönemi ($P_{yör} = 1.09$ gün) ile karşılaştırıldığında oldukça uzun bir dönme dönemine ($P_{rot} = 37.93$ gün; Çizelge 5.1) sahiptir. Denge gelgitlerinin barınak yıldızın yaşına göre değişimine bakıldığında (Şekil 5.18) tüm modeller için anakol safhasında $Q'_{EQ} \sim 10^{10}$, yıldız alt-dev safhasına geçtikten sonra tüm modeller için bu değer en düşük $\sim 10^7$ seviyelerinde ölçülmüştür. Bu bilgiler ışığında, WASP-12b'de gözlenen yörünge küçülmesinde denge gelgitleri etkin bir mekanizma değildir ve olması beklenmemektedir (Barker 2020).

Öte yandan içsel kütleçekim dalgaları benzer bir sonuç vermemiştir. Şekil 5.16 ve 6.4 dikkate alındığında, WASP-12 alt-dev safhasında iken $Q'_{IGW} \approx 10^5$ değerlerini tüm modeller için vermektedir. Bazı modeller için ($M_* = 1.434M_\odot$) bu etkinlik kısa süreli (~ 100 yıl) olsa da daha düşük kütleli ($M_* = 1.3M_\odot$) için bu meritede efektif gelgit etkileşimleri 1×10^8 yıl kadar sürebilmektedir. Bu bağlamda, içsel kütleçekim dalgalarının WASP-12b'nin gözlenen yörünge küçülmesini açıklayabildiğini söylemek mümkündür. WASP-12'nin Çizelge 5.1'de belirtilen kütlesi $1.434M_\odot$ tüm evrim modellerinde yıldız alt-dev safhasındayken radyatif/konvektif sınırdaki içsel kütleçekim dalgalarını uyarmak için yeterlidir. Ancak Şekil 5.17 göz önüne alındığında, alt-dev safhasının her anı için bu durum sağlanmayabilir. Fakat

bu durumda F-türü yıldızlar için "manyetik çevrim" mekanizması WASP-12'de görülen $Q'_{\text{IGW}} \sim 10^5$ seviyelerini açıklayabilmektedir (Duguid vd. 2024, Bölüm 2.2.3).



- Abril-Pla O, Andreani V, Carroll C, Dong L, Fonnesbeck CJ, Kochurov M, Kumar R, Lao J, Luhmann CC, Martin OA, Osthege M, Vieira R, Wiecki T, Zinkov R. 2023. *PyMC: a modern, and comprehensive probabilistic programming framework in Python*. PeerJ Computer Science 9:e1516 <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1516>
- Adams, Elisabeth R. and Jackson, Brian and Sickafoose, Amanda A. and Morgenthaler, Jeffrey P. and Worters, Hannah and Stubbers, Hailey and Carlson, Dallan and Bhure, Sakhee and Dekeyser, Stijn and Huang, Chelsea X. and Weinberg, Nevin N. 2024. *Doomed Worlds. I. No New Evidence for Orbital Decay in a Long-term Survey of 43 Ultrahot Jupiters*. The Planetary Science Journal, Volume 5, Issue 7, id.163, 29 pp.
- Agüeros, Marcel A. and Covey, Kevin R. and Lemonias, Jenna J. and Law, Nicholas M. and Kraus, Adam and Batalha, Natasha and Bloom, Joshua S. and Cenko, S. Bradley and Kasliwal, Mansi M. and Kulkarni, Shrinivas R. and Nugent, Peter E. and Ofek, Eran O. and Poznanski, Dovi and Quimby, Robert M. 2011. *The Factory and the Beehive. I. Rotation Periods for Low-mass Stars in Praesepe*, The Astrophysical Journal, Volume 740, Issue 2, article id. 110, 12 pp.
- Akaike, H. 1974. *A New Look at the Statistical Model Identification*. IEEE Trans. Autom. Control, Volume AC-19, p. 716-723
- Allen, A. and DuPrie, K. and Berriman, B. and Hanisch, R. J. and Mink, J. and Teuben, P. J. 2013. *Astrophysics Source Code Library*. Astronomical Data Analysis Software and Systems XXII. Proceedings of a Conference held at University of Illinois, Champaign, Illinois, USA 4-8 November 2012. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2013, p.387
- Alexander, M. E. 1973. *The Weak Friction Approximation and Tidal Evolution in Close Binary Systems*, Astrophysics and Space Science, Volume 23, Issue 2, pp. 459-510.
- Alvarado, Efrain and Bostow, Kate B. and Patra, Kishore C. and Jacobus, Cooper H. and Baer-Way, Raphael A. and Jennings, Connor F. and Pichay, Neil R. and deGraw, Asia A. and Vidal, Edgar P. and Chander, Vidhi and Altunin, Ivan A. and Brendel, Victoria M. and Ehrich, Kingsley E. and Sunseri, James D. and May, Michael B. and Punjabi, Druv H. and Gendreau-Distler, Eli A. and Risin, Sophia and Brink, Thomas G. and Zheng, WeiKang and Filippenko, Alexei V. 2024. *Searching for tidal orbital decay in hot Jupiters*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 534, Issue 1, pp.800-813.
- Andrae, Rene and Schulze-Hartung, Tim and Melchior, Peter. 2010. *Dos and don'ts of reduced chi-squared*. eprint arXiv:1012.3754

- Asplund, Martin and Grevesse, Nicolas and Sauval, A. Jacques and Scott, Pat. 2009. *The Chemical Composition of the Sun*. Annual Review of Astronomy & Astrophysics, vol. 47, Issue 1, pp.481-522
- Astoul, Aurélie and Barker, Adrian J. 2023. *Tidally Excited Inertial Waves in Stars and Planets: Exploring the Frequency-dependent and Averaged Dissipation with Nonlinear Simulations*, The Astrophysical Journal Letters, Volume 955, Issue 1, id.L23, 10 pp.
- Astropy Collaboration and Price-Whelan, Adrian M. and Lim, Pey Lian and Earl, Nicholas and Starkman, Nathaniel and Bradley, Larry and Shupe, David L. and Patil, Aarya A. and Corrales, Lia and Brasseur, C. E. and Nöthe, Maximilian and Donath, Axel and Tollerud, Erik and Morris, Brett M. and Ginsburg, Adam and Vaher, Eero and Weaver, Benjamin A. and Tocknell, James and Jamieson, William and van Kerkwijk, Marten H. and Robitaille, Thomas P. and Merry, Bruce and Bachetti, Matteo and Günther, H. Moritz and Aldcroft, Thomas L. and Alvarado-Montes, Jaime A. and Archibald, Anne M. and Bódi, Attila and Bapat, Shreyas and Barentsen, Geert and Bazán, Juanjo and Biswas, Manish and Boquien, Médéric and Burke, D. J. and Cara, Daria and Cara, Mihai and Conroy, Kyle E. and Conseil, Simon and Craig, Matthew W. and Cross, Robert M. and Cruz, Kelle L. and D'Eugenio, Francesco and Dencheva, Nadia and Devillepoix, Hadrien A. R. and Dietrich, Jörg P. and Eigenbrot, Arthur Davis and Erben, Thomas and Ferreira, Leonardo and Foreman-Mackey, Daniel and Fox, Ryan and Freij, Nabil and Garg, Suyog and Geda, Robel and Glattly, Lauren and Gondhalekar, Yash and Gordon, Karl D. and Grant, David and Greenfield, Perry and Groener, Austen M. and Guest, Steve and Gurovich, Sebastian and Handberg, Rasmus and Hart, Akeem and Hatfield-Dodds, Zac and Homeier, Derek and Hosseinzadeh, Grifin and Jenness, Tim and Jones, Craig K. and Joseph, Prajwel and Kalmbach, J. Bryce and Karamahmetoglu, Emir and Kałuszyński, Mikołaj and Kelley, Michael S. P. and Kern, Nicholas and Kerzendorf, Wolfgang E. and Koch, Eric W. and Kulumani, Shankar and Lee, Antony and Ly, Chun and Ma, Zhiyuan and MacBride, Conor and Maljaars, Jakob M. and Muna, Demitri and Murphy, N. A. and Norman, Henrik and O'Steen, Richard and Oman, Kyle A. and Pacifici, Camilla and Pascual, Sergio and Pascual-Granado, J. and Patil, Rohit R. and Perren, Gabriel I. and Pickering, Timothy E. and Rastogi, Tanuj and Roulston, Benjamin R. and Ryan, Daniel F. and Rykoff, Eli S. and Sabater, Jose and Sakurikar, Parikshit and Salgado, Jesús and Sanghi, Aniket and Saunders, Nicholas and Savchenko, Volodymyr and Schwardt, Ludwig and Seifert-Eckert, Michael and Shih, Albert Y. and Jain, Anany Shrey and Shukla, Gyanendra and Sick, Jonathan and Simpson, Chris and Singanamalla, Sudheesh and Singer, Leo P. and Singhal, Jaladh and Sinha, Manodeep and Sipőcz, Brigitta M. and Spitler, Lee R. and Stansby, David and Streicher, Ole and Šumak, Jani and Swinbank, John D. and Taranu, Dan S. and Tewary, Nikita and Tremblay, Grant R. and de Val-Borro, Miguel and Van Kooten, Samuel J. and Vasović, Zlatan and Verma, Shreshth and de Miranda Cardoso, José Vinícius and Williams, Peter K. G. and Wilson, Tom J. and

- Winkel, Benjamin and Wood-Vasey, W. M. and Xue, Rui and Yoachim, Peter and Zhang, Chen and Zonca, Andrea and Astropy Project Contributors. 2022. *The Astropy Project: Sustaining and Growing a Community-oriented Open-source Project and the Latest Major Release (v5.0) of the Core Package*. The Astrophysical Journal, Volume 935, Issue 2, id.167, 20 pp.
- Bailey, Avery and Goodman, Jeremy. 2019. *Understanding WASP-12b*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 482, Issue 2, p.1872-1882
- Bakos, G. Á. and Torres, G. and Pál, A. and Hartman, J. and Kovács, Géza and Noyes, R. W. and Latham, D. W. and Sasselov, D. D. and Sipőcz, B. and Esquerdo, G. A. and Fischer, D. A. and Johnson, J. A. and Marcy, G. W. and Butler, R. P. and Isaacson, H. and Howard, A. and Vogt, S. and Kovács, Gábor and Fernandez, J. and Moór, A. and Stefanik, R. P. and Lázár, J. and Papp, I. and Sári, P. 2010. *HAT-P-11b: A Super-Neptune Planet Transiting a Bright K Star in the Kepler Field*, The Astrophysical Journal, Volume 710, Issue 2, pp. 1724-1745.
- Bakos, G. Á. and Csubry, Z. and Penev, K. and Bayliss, D. and Jordán, A. and Afonso, C. and Hartman, J. D. and Henning, T. and Kovács, G. and Noyes, R. W. and Béky, B. and Suc, V. and Csák, B. and Rabus, M. and Lázár, J. and Papp, I. and Sári, P. and Conroy, P. and Zhou, G. and Sackett, P. D. and Schmidt, B. and Mancini, L. and Sasselov, D. D. and Ueltzhoeffer, K. 2013. *HATSouth: A Global Network of Fully Automated Identical Wide-Field Telescopes*, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Volume 125, Issue 924, pp. 154.
- Baluev, R. V. and Sokov, E. N. and Hoyer, S. and Huitson, C. and da Silva, José A. R. S. and Evans, P. and Sokova, I. A. and Knight, C. R. and Shaidulin, V. Sh. 2020. *WASP-4 transit timing variation from a comprehensive set of 129 transits*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, Volume 496, Issue 1, pp.L11-L15
- Barker, Adrian J. and Ogilvie, Gordon I. 2010. *On internal wave breaking and tidal dissipation near the centre of a solar-type star*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 404, Issue 4, pp. 1849-1868.
- Barker, Adrian John. *Tidal interactions between planets and stars*, PhD Thesis, University of Cambridge, 2011
- Barker, A. J. 2020. *Tidal dissipation in evolving low-mass and solar-type stars with predictions for planetary orbital decay*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 498, Issue 2, pp.2270-2294.
- Barker, Adrian J. and Efroimsky, Michael and Makarov, Valeri V. and Veras, Dimitri, 2024. *On the orbital decay of the gas giant Kepler-1658b*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 527, Issue 3, pp.5131-5139.

- Barnes, Sydney A. and Weingrill, Joerg and Fritzewski, Dario and Strassmeier, Klaus G. and Platais, Imants, 2016. *Rotation Periods for Cool Stars in the 4 Gyr old Open Cluster M67, The Solar-Stellar Connection, and the Applicability of Gyrochronology to at least Solar Age*, The Astrophysical Journal, Volume 823, Issue 1, article id. 16, 16 pp.
- Baştürk, Ö. and Southworth, J. and Yalçinkaya, S. and Mancini, L. and Esmer, E. M. and Tekin, M. and Tezcan, F. and Evans, D. F. and Tezcan, C. T. and Bruni, I. and Yeşilyaprak, C. 2023. *Transit timing variation analysis of the low-mass brown dwarf KELT-1 b*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 521, Issue 1, pp.1200-1209
- Baştürk, O., Kutluay, A. C., Barker, A., Yalçinkaya, S., Southworth, J., Barkaoui, K., Wünsche, A., Burgdorf, M. J., Timmermans, M., Jehin, E., Figuera Jaimes, R., Hinse, T. C., Duru, B., Hitchcock, J., Longa-Peña, P., Rahvar, S., Sajadian, S., Bretton, M., Tregloan-Reed, J., Selam, S. O., Gillon, M., Bonavita, M., D'Ago, G., Dominik, M., Jørgensen, U. G., Snodgrass, C., Spyros, P. 2025. *The Orbit of WASP-4b is in Decay*. eprint arXiv:2506.15022.
- Bechter, Eric B. and Crepp, Justin R. and Ngo, Henry and Knutson, Heather A. and Batygin, Konstantin and Hinkley, Sasha and Muirhead, Philip S. and Johnson, John Asher and Howard, Andrew W. and Montet, Benjamin T. and Matthews, Christopher T. and Morton, Timothy D. 2014. *WASP-12b and HAT-P-8b are Members of Triple Star Systems*. The Astrophysical Journal, Volume 788, Issue 1, article id. 2, 6 pp.
- Beck, John G. 2000. *A comparison of differential rotation measurements - (Invited Review)*, Solar Physics, v. 191, Issue 1, p. 47-70.
- Bergfors, C. and Brandner, W. and Daemgen, S. and Biller, B. and Hippler, S. and Janson, M. and Kudryavtseva, N. and Geißler, K. and Henning, T. and Köhler, R. 2013. *Stellar companions to exoplanet host stars: Lucky Imaging of transiting planet hosts*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 428, Issue 1, p.182-189
- Bevington, Philip R. and Robinson, D. Keith. 2003. *Data reduction and error analysis for the physical sciences*. 3rd ed., by Philip R. Bevington, and Keith D. Robinson. Boston, MA: McGraw-Hill, ISBN 0-07-247227-8, 2003.
- Biazzo, K. and Bozza, V. and Mancini, L. and Sozzetti, A. 2022. *The Demographics of Close-In Planets*, ISBN: 978-3-030-88123-8. Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 143-234.
- Bodenheimer, Peter and Laughlin, Gregory and Lin, Douglas N. C. 2003. *On the Radii of Extrasolar Giant Planets*. The Astrophysical Journal, Volume 592, Issue 1, pp. 555-563.

Bonomo, A. S. and Desidera, S. and Benatti, S. and Borsa, F. and Crespi, S. and Damasso, M. and Lanza, A. F. and Sozzetti, A. and Lodato, G. and Marzari, F. and Boccato, C. and Claudi, R. U. and Cosentino, R. and Covino, E. and Gratton, R. and Maggio, A. and Micela, G. and Molinari, E. and Pagano, I. and Piotto, G. and Poretti, E. and Smareglia, R. and Affer, L. and Biazzo, K. and Bignamini, A. and Esposito, M. and Giacobbe, P. and Hébrard, G. and Malavolta, L. and Maldonado, J. and Mancini, L. and Martinez Fiorenzano, A. and Masiero, S. and Nascimbeni, V. and Pedani, M. and Rainer, M. and Scandariato, G. 2017. *The GAPS Programme with HARPS-N at TNG . XIV. Investigating giant planet migration history via improved eccentricity and mass determination for 231 transiting planets*. *Astronomy & Astrophysics*, Volume 602, id.A107, 16 pp.

Borucki, William J. and Koch, David and Basri, Gibor and Batalha, Natalie and Brown, Timothy and Caldwell, Douglas and Caldwell, John and Christensen-Dalsgaard, Jørgen and Cochran, William D. and DeVore, Edna and Dunham, Edward W. and Dupree, Andrea K. and Gautier, Thomas N. and Geary, John C. and Gilliland, Ronald and Gould, Alan and Howell, Steve B. and Jenkins, Jon M. and Kondo, Yoji and Latham, David W. and Marcy, Geoffrey W. and Meibom, Søren and Kjeldsen, Hans and Lissauer, Jack J. and Monet, David G. and Morrison, David and Sasselov, Dimitar and Tarter, Jill and Boss, Alan and Brownlee, Don and Owen, Toby and Buzasi, Derek and Charbonneau, David and Doyle, Lurance and Fortney, Jonathan and Ford, Eric B. and Holman, Matthew J. and Seager, Sara and Steffen, Jason H. and Welsh, William F. and Rowe, Jason and Anderson, Howard and Buchhave, Lars and Ciardi, David and Walkowicz, Lucianne and Sherry, William and Horch, Elliott and Isaacson, Howard and Everett, Mark E. and Fischer, Debra and Torres, Guillermo and Johnson, John Asher and Endl, Michael and MacQueen, Phillip and Bryson, Stephen T. and Dotson, Jessie and Haas, Michael and Kolodziejczak, Jeffrey and Van Cleve, Jeffrey and Chandrasekaran, Hema and Twicken, Joseph D. and Quintana, Elisa V. and Clarke, Bruce D. and Allen, Christopher and Li, Jie and Wu, Haley and Tenenbaum, Peter and Verner, Ekaterina and Bruhweiler, Frederick and Barnes, Jason and Prsa, Andrej. 2010. *Kepler Planet-Detection Mission: Introduction and First Results*. *Science*, Volume 327, Issue 5968, pp. 977

Borucki, William J. and Koch, David G. and Basri, Gibor and Batalha, Natalie and Brown, Timothy M. and Bryson, Stephen T. and Caldwell, Douglas and Christensen-Dalsgaard, Jørgen and Cochran, William D. and DeVore, Edna and Dunham, Edward W. and Gautier, III, Thomas N. and Geary, John C. and Gilliland, Ronald and Gould, Alan and Howell, Steve B. and Jenkins, Jon M. and Latham, David W. and Lissauer, Jack J. and Marcy, Geoffrey W. and Rowe, Jason and Sasselov, Dimitar and Boss, Alan and Charbonneau, David and Ciardi, David and Doyle, Lurance and Dupree, Andrea K. and Ford, Eric B. and Fortney, Jonathan and Holman, Matthew J. and Seager, Sara and Steffen, Jason H. and Tarter, Jill and Welsh, William F. and Allen, Christopher and Buchhave, Lars A. and Christiansen, Jessie L. and Clarke, Bruce D. and

- Das, Santanu and Désert, Jean-Michel and Endl, Michael and Fabrycky, Daniel and Fressin, Francois and Haas, Michael and Horch, Elliott and Howard, Andrew and Isaacson, Howard and Kjeldsen, Hans and Kolodziejczak, Jeffery and Kulesa, Craig and Li, Jie and Lucas, Philip W. and Machalek, Pavel and McCarthy, Donald and MacQueen, Phillip and Meibom, Søren and Miquel, Thibaut and Prsa, Andrej and Quinn, Samuel N. and Quintana, Elisa V. and Ragozzine, Darin and Sherry, William and Shporer, Avi and Tenenbaum, Peter and Torres, Guillermo and Twicken, Joseph D. and Van Cleve, Jeffrey and Walkowicz, Lucianne and Witteborn, Fred C. and Still, Martin, 2011. *Characteristics of Planetary Candidates Observed by Kepler. II. Analysis of the First Four Months of Data*, The Astrophysical Journal, Volume 736, Issue 1, article id. 19, 22 pp.
- Bouma, L. G. and Winn, J. N. and Baxter, C. and Bhatti, W. and Dai, F. and Daylan, T. and Désert, J. -M. and Hill, M. L. and Kane, S. R. and Stassun, K. G. and Villaseñor, J. and Ricker, G. R. and Vanderspek, R. and Latham, D. W. and Seager, S. and Jenkins, J. M. and Berta-Thompson, Z. and Colón, K. and Fausnaugh, M. and Glidden, Ana and Guerrero, N. and Rodriguez, J. E. and Twicken, J. D. and Wohler, B. 2019. *WASP-4b Arrived Early for the TESS Mission*. The Astronomical Journal, Volume 157, Issue 6, article id. 217, 16 pp.
- Bouma, L. G. and Winn, J. N. and Howard, A. W. and Howell, S. B. and Isaacson, H. and Knutson, H. and Matson, R. A. 2020. *WASP-4 Is Accelerating toward the Earth*. The Astrophysical Journal Letters, Volume 893, Issue 2, id.L29, 9 pp.
- Bressan, Alessandro and Marigo, Paola and Girardi, Léo. and Salasnich, Bernardo and Dal Cero, Claudia and Rubele, Stefano and Nanni, Ambra, 2012. *PARSEC: stellar tracks and isochrones with the PAdova and TRieste Stellar Evolution Code*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 427, Issue 1, pp. 127-145.
- Brown, Timothy M. and Latham, David W. and Everett, Mark E. and Esquerdo, Gilbert A. 2011. *Kepler Input Catalog: Photometric Calibration and Stellar Classification*, The Astronomical Journal, Volume 142, Issue 4, article id. 112, 18 pp.
- Burke, Christopher J. and Bryson, Stephen T. and Mullally, F. and Rowe, Jason F. and Christiansen, Jessie L. and Thompson, Susan E. and Coughlin, Jeffrey L. and Haas, Michael R. and Batalha, Natalie M. and Caldwell, Douglas A. and Jenkins, Jon M. and Still, Martin and Barclay, Thomas and Borucki, William J. and Chaplin, William J. and Ciardi, David R. and Clarke, Bruce D. and Cochran, William D. and Demory, Brice-Olivier and Esquerdo, Gilbert A. and Gautier, III, Thomas N. and Gilliland, Ronald L. and Girouard, Forrest R. and Havel, Mathieu and Henze, Christopher E. and Howell, Steve B. and Huber, Daniel and Latham, David W. and Li, Jie and Morehead, Robert C. and Morton, Timothy D. and Pepper, Joshua and Quintana, Elisa and

- Ragozzine, Darin and Seader, Shawn E. and Shah, Yash and Shporer, Avi and Tenenbaum, Peter and Twicken, Joseph D. and Wolfgang, Angie, 2014. *Planetary Candidates Observed by Kepler IV: Planet Sample from Q1-Q8 (22 Months)*, The Astrophysical Journal Supplement, Volume 210, Issue 2, article id. 19, 12 pp.
- Campo, Christopher J. and Harrington, Joseph and Hardy, Ryan A. and Stevenson, Kevin B. and Nymeyer, Sarah and Ragozzine, Darin and Lust, Nate B. and Anderson, David R. and Collier-Cameron, Andrew and Blecic, Jasmina and Britt, Christopher B. T. and Bowman, William C. and Wheatley, Peter J. and Lored, Thomas J. and Deming, Drake and Hebb, Leslie and Hellier, Coel and Maxted, Pierre F. L. and Pollaco, Don and West, Richard G. 2011. *On the Orbit of Exoplanet WASP-12b*. The Astrophysical Journal, Volume 727, Issue 2, article id. 125, 12 pp.
- Chontos, Ashley and Huber, Daniel and Latham, David W. and Bieryla, Allyson and Van Eylen, Vincent and Bedding, Timothy R. and Berger, Travis and Buchhave, Lars A. and Campante, Tiago L. and Chaplin, William J. and Colman, Isabel L. and Coughlin, Jeff L. and Davies, Guy and Hirano, Teruyuki and Howard, Andrew W. and Isaacson, Howard, 2019. *The Curious Case of KOI 4: Confirming Kepler's First Exoplanet Detection*, The Astronomical Journal, Volume 157, Issue 5, article id. 192, 14 pp. (2019)
- Claret, A. and Bloemen, S. 2011. *Gravity and limb-darkening coefficients for the Kepler, CoRoT, Spitzer, uvby, UBVRIJHK, and Sloan photometric systems*. Astronomy & Astrophysics, Volume 529, id.A75, 5 pp.
- Collier Cameron, Andrew and Jardine, Moira. 2018. *Hierarchical Bayesian calibration of tidal orbit decay rates among hot Jupiters*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 476, Issue 2, p.2542-2555
- Collins, Karen A. and Kielkopf, John F. and Stassun, Keivan G. and Hessman, Fred-eric V., 2017. *AstroImageJ: Image Processing and Photometric Extraction for Ultra-precise Astronomical Light Curves*, The Astronomical Journal, Volume 153, Issue 2, article id. 77, 13 pp.
- Collins, Karen A. and Kielkopf, John F. and Stassun, Keivan G. 2017. *Transit Timing Variation Measurements of WASP-12b and Qatar-1b: No Evidence Of Additional Planets*. The Astronomical Journal, Volume 153, Issue 2, article id. 78, 14 pp.
- Crossfield, Ian J. M. and Hansen, Brad M. S. and Barman, Travis. 2012. *Ground-based, Near-infrared Exospectroscopy. II. Tentative Detection of Emission from the Extremely Hot Jupiter WASP-12b*. The Astrophysical Journal, Volume 746, Issue 1, article id. 46, 17 pp.
- Deeg, Hans J. and Belmonte, Juan Antonio *Handbook of Exoplanets*, ISBN 978-3-319-55332-0. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018

- Dragomir, Diana and Kane, Stephen R. and Pilyavsky, Genady and Mahadevan, Suvrath and Ciardi, David R. and Gazak, J. Zachary and Gelino, Dawn M. and Payne, Alan and Rabus, Markus and Ramirez, Solange V. and von Braun, Kaspar and Wright, Jason T. and Wyatt, Pamela. 2011. *TERMS Photometry of Known Transiting Exoplanets*. The Astronomical Journal, Volume 142, Issue 4, article id. 115, 9 pp.
- Duguid, Craig D. and de Vries, Nils B. and Lecoanet, Daniel and Barker, Adrian J. 2024. *An Efficient Tidal Dissipation Mechanism via Stellar Magnetic Fields*, The Astrophysical Journal Letters, Volume 966, Issue 1, id.L14, 7 pp.
- Eastman, Jason and Gaudi, B. Scott and Agol, Eric, 2013. *EXOFAST: A Fast Exoplanetary Fitting Suite in IDL*, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Volume 125, Issue 923, pp. 83.
- Eastman, Jason D. and Rodriguez, Joseph E. and Agol, Eric and Stassun, Keivan G. and Beatty, Thomas G. and Vanderburg, Andrew and Gaudi, B. Scott and Collins, Karen A. and Luger, Rodrigo, 2019. *EXOFASTv2: A public, generalized, publication-quality exoplanet modeling code*. eprint arXiv:1907.09480.
- Essick, Reed and Weinberg, Nevin N. 2016. *Orbital Decay of Hot Jupiters Due to Nonlinear Tidal Dissipation within Solar-type Hosts*. The Astrophysical Journal, Volume 816, Issue 1, article id. 18, 21 pp.
- Feynman, Richard P. 1963. *Feynman lectures on physics - Volume 1*, Reading, Ma.: Addison-Wesley, 1963, edited by Feynman, Richard P.; Leighton, Robert B.; Sands, Matthew.
- Fortney, J. J. and Marley, M. S. and Barnes, J. W. 2007. *Planetary Radii across Five Orders of Magnitude in Mass and Stellar Insolation: Application to Transits*. The Astrophysical Journal, Volume 659, Issue 2, pp. 1661-1672.
- Fulton, Benjamin J., Shporer, Avi; Winn, Joshua N., Holman, Matthew J., Pál, András; Gazak, J. Zachary. 2011. *Long-term Transit Timing Monitoring and Refined Light Curve Parameters of HAT-P-13b*. The Astronomical Journal, 142, 3, 84
- Gaia Collaboration. 2022. *Gaia Data Release 3. Summary of the content and survey properties*. Astronomy & Astrophysics, Volume 674, id.A1, 22 pp.
- Gillon, M. and Smalley, B. and Hebb, L. and Anderson, D. R. and Triaud, A. H. M. J. and Hellier, C. and Maxted, P. F. L. and Queloz, D. and Wilson, D. M. 2009. *Improved parameters for the transiting hot Jupiters WASP-4b and WASP-5b*. Astronomy and Astrophysics, Volume 496, Issue 1, 2009, pp.259-267
- Gillon, M. and Jehin, E. and Magain, P. and Chantry, V. and Hutsemékers, D. and Manfroid, J. and Queloz, D. and Udry, S. 2011. *TRAPPIST: a robotic telescope dedicated to the study of planetary systems*. Detection and Dynamics of Transiting Exoplanets, St. Michel l'Observatoire, France, Edited by F. Bouchy; R. Díaz; C. Moutou; EPJ Web of Conferences, Volume 11, id.06002

- Goldreich, Peter and Soter, Steven, 1966. *Q in the Solar System*, Icarus, Volume 5, Issue 1, p. 375-389.
- Guenther, D. B. 1989. *Age of the Sun*, Astrophysical Journal v.339, p.1156.
- Hamer, Jacob H. and Schlaufman, Kevin C. 2019. *Hot Jupiters Are Destroyed by Tides While Their Host Stars Are on the Main Sequence*, The Astronomical Journal, Volume 158, Issue 5, article id. 190, 9 pp.
- Hamer, Jacob H. and Schlaufman, Kevin C. 2020. *Ultra-short-period Planets Are Stable against Tidal Inspiral*, The Astronomical Journal, Volume 160, Issue 3, id.138, 8 pp.
- Hansen, Brad M. S. 2010. *Calibration of Equilibrium Tide Theory for Extrasolar Planet Systems*. The Astrophysical Journal, Volume 723, Issue 1, pp. 285-299
- Hansen, Brad M. S. 2012. *Calibration of Equilibrium Tide Theory for Extrasolar Planet Systems. II*, The Astrophysical Journal, Volume 757, Issue 1, article id. 6, 21 pp.
- Harre, J. -V. and Smith, A. M. S. and Barros, S. C. C. and Boué, G. and Csizmadia, Sz. and Ehrenreich, D. and Florén, H. -G. and Fortier, A. and Maxted, P. F. L. and Hooton, M. J. and Akinsanmi, B. and Serrano, L. M. and Rosário, N. M. and Demory, B. -O. and Jones, K. and Laskar, J. and Adibekyan, V. and Alibert, Y. and Alonso, R. and Anderson, D. R. and Anglada, G. and Asquier, J. and Bárczy, T. and Barrado y Navascues, D. and Baumjohann, W. and Beck, M. and Beck, T. and Benz, W. and Billot, N. and Biondi, F. and Bonfanti, A. and Bonfils, X. and Brandeker, A. and Broeg, C. and Cabrera, J. and Cessa, V. and Charnoz, S. and Collier Cameron, A. and Davies, M. B. and Deleuil, M. and Delrez, L. and Demangeon, O. D. S. and Erikson, A. and Fossati, L. and Fridlund, M. and Gandolfi, D. and Gillon, M. and Güdel, M. and Hellier, C. and Heng, K. and Hoyer, S. and Isaak, K. G. and Kiss, L. L. and Lecavelier des Etangs, A. and Lendl, M. and Lovis, C. and Luntzer, A. and Magrin, D. and Nascimbeni, V. and Olofsson, G. and Ottensamer, R. and Pagano, I. and Pallé, E. and Persson, C. M. and Peter, G. and Piotto, G. and Pollacco, D. and Queloz, D. and Ragazzoni, R. and Rando, N. and Rauer, H. and Ribas, I. and Ricker, G. R. and Salmon, S. and Santos, N. C. and Scandariato, G. and Seager, S. and Ségransan, D. and Simon, A. E. and Sousa, S. G. and Steller, M. and Szabó, Gy. M. and Thomas, N. and Udry, S. and Ulmer, B. and Van Grootel, V. and Walton, N. A. and Wilson, T. G. and Winn, J. N. and Wohler, B. 2023. *Examining the orbital decay targets KELT-9 b, KELT-16 b, and WASP-4b, and the transit-timing variations of HD 97658 b*. Astronomy & Astrophysics, Volume 669, id.A124, 17 pp.
- Hartman, J. D. and Gaudi, B. S. and Pinsonneault, M. H. and Stanek, K. Z. and Holman, M. J. and McLeod, B. A. and Meibom, S. and Barranco, J. A. and Kalirai, J. S. 2009. *Deep MMT Transit Survey of the Open Cluster M37. III. Stellar Rotation at 550 Myr*, The Astrophysical Journal, Volume 691, Issue 1, pp. 342-364.

- Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J. 2016. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction (Second Edition)*. New York, NY: Springer.
- Hebb, L. and Collier-Cameron, A. and Loeillet, B. and Pollacco, D. and Hébrard, G. and Street, R. A. and Bouchy, F. and Stempels, H. C. and Moutou, C. and Simpson, E. and Udry, S. and Joshi, Y. C. and West, R. G. and Skillen, I. and Wilson, D. M. and McDonald, I. and Gibson, N. P. and Aigrain, S. and Anderson, D. R. and Benn, C. R. and Christian, D. J. and Enoch, B. and Haswell, C. A. and Hellier, C. and Horne, K. and Irwin, J. and Lister, T. A. and Maxted, P. and Mayor, M. and Norton, A. J. and Parley, N. and Pont, F. and Queloz, D. and Smalley, B. and Wheatley, P. J. 2009. *WASP-12b: The Hottest Transiting Extrasolar Planet Yet Discovered*. The Astrophysical Journal, Volume 693, Issue 2, pp. 1920-1928
- Hroch, Filip, 2014. *Munipack: General astronomical image processing software*. Astrophysics Source Code Library, record ascl:1402.006
- Honeycutt, R. K. 1992. *CCD Ensemble Photometry on an Inhomogeneous Set of Exposures*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, v.104, p.435
- Howard, Andrew W. and Marcy, Geoffrey W. and Bryson, Stephen T. and Jenkins, Jon M. and Rowe, Jason F. and Batalha, Natalie M. and Borucki, William J. and Koch, David G. and Dunham, Edward W. and Gautier, III, Thomas N. and Van Cleve, Jeffrey and Cochran, William D. and Latham, David W. and Lissauer, Jack J. and Torres, Guillermo and Brown, Timothy M. and Gilliland, Ronald L. and Buchhave, Lars A. and Caldwell, Douglas A. and Christensen-Dalsgaard, Jørgen and Ciardi, David and Fressin, Francois and Haas, Michael R. and Howell, Steve B. and Kjeldsen, Hans and Seager, Sara and Rogers, Leslie and Sasselov, Dimitar D. and Steffen, Jason H. and Basri, Gibor S. and Charbonneau, David and Christiansen, Jessie and Clarke, Bruce and Dupree, Andrea and Fabrycky, Daniel C. and Fischer, Debra A. and Ford, Eric B. and Fortney, Jonathan J. and Tarter, Jill and Girouard, Forrest R. and Holman, Matthew J. and Johnson, John Asher and Klaus, Todd C. and Machalek, Pavel and Moorhead, Althea V. and Morehead, Robert C. and Ragozzine, Darin and Tenenbaum, Peter and Twicken, Joseph D. and Quinn, Samuel N. and Isaacson, Howard and Shporer, Avi and Lucas, Philip W. and Walkowicz, Lucianne M. and Welsh, William F. and Boss, Alan and Devore, Edna and Gould, Alan and Smith, Jeffrey C. and Morris, Robert L. and Prsa, Andrej and Morton, Timothy D. and Still, Martin and Thompson, Susan E. and Mullally, Fergal and Endl, Michael and MacQueen, Phillip J. 2012. *Planet Occurrence within 0.25 AU of Solar-type Stars from Kepler*, The Astrophysical Journal Supplement, Volume 201, Issue 2, article id. 15, 20 pp.
- Hoyer, S. and López-Morales, M. and Rojo, P. and Nascimbeni, V. and Hidalgo, S. and Astudillo-Defru, N. and Concha, F. and Contreras, Y. and Servajean, E. and Hinse, T. C. 2013. *TraMoS project - III. Improved physical parameters, timing analysis and starspot modelling of the WASP-4b exoplanet system from*

- 38 transit observations. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 434, Issue 1, p.46-58
- Husnoo, Nawal and Pont, Frédéric and Hébrard, Guillaume and Simpson, Elaine and Mazeh, Tsevi and Bouchy, François and Moutou, Claire and Arnold, Luc and Boisse, Isabelle and Díaz, Rodrigo F. and Eggenberger, Anne and Shporer, Avi. 2011. *Orbital eccentricity of WASP-12 and WASP-14 from new radial velocity monitoring with SOPHIE*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 413, Issue 4, pp. 2500-2508.
- Hut, P. 1980. *Stability of tidal equilibrium*, Astronomy and Astrophysics, vol. 92, no. 1-2, p. 167-170.
- Hut, P. 1981. *Tidal evolution in close binary systems*. Astronomy and Astrophysics, Vol. 99, p. 126-140
- Ivshina, Ekaterina S. and Winn, Joshua N. 2022. *TESS Transit Timing of Hundreds of Hot Jupiters*. The Astrophysical Journal Supplement Series, Volume 259, Issue 2, id.62, 19 pp.
- Jackson, Brian and Greenberg, Richard and Barnes, Rory, 2008. *Tidal Evolution of Close-in Extrasolar Planets*, The Astrophysical Journal, Volume 678, Issue 2, pp. 1396-1406.
- Jehin, E. and Gillon, M. and Queloz, D. and Magain, P. and Manfroid, J. and Chantry, V. and Lendl, M. and Hutsemékers, D. and Udry, S. 2011. *TRAP-PIST: TRAnsiting Planets and Planetesimals Small Telescope*. The Messenger, vol. 145, p. 2-6.
- Jenkins, Jon M. and Caldwell, Douglas A. and Chandrasekaran, Hema and Twicken, Joseph D. and Bryson, Stephen T. and Quintana, Elisa V. and Clarke, Bruce D. and Li, Jie and Allen, Christopher and Tenenbaum, Peter and Wu, Hayley and Klaus, Todd C. and Middour, Christopher K. and Cote, Miles T. and McCauliff, Sean and Girouard, Forrest R. and Gunter, Jay P. and Wohler, Bill and Sommers, Jeneen and Hall, Jennifer R. and Uddin, AKM K. and Wu, Michael S. and Bhavsar, Paresh A. and Van Cleve, Jeffrey and Pletcher, David L. and Dotson, Jessie A. and Haas, Michael R. and Gilliland, Ronald L. and Koch, David G. and Borucki, William J. 2010. *Overview of the Kepler Science Processing Pipeline*. The Astrophysical Journal Letters, Volume 713, Issue 2, pp. L87-L91
- Jenkins, Jon M. and Twicken, Joseph D. and McCauliff, Sean and Campbell, Jennifer and Sanderfer, Dwight and Lung, David and Mansouri-Samani, Masoud and Girouard, Forrest and Tenenbaum, Peter and Klaus, Todd and Smith, Jeffrey C. and Caldwell, Douglas A. and Chacon, A. D. and Henze, Christopher and Heiges, Cory and Latham, David W. and Morgan, Edward and Swade, Daryl and Rinehart, Stephen and Vanderspek, Roland. 2016. *The TESS science processing operations center*. Proceedings of the SPIE, Volume 9913, id. 99133E 20 pp.

- kassraftery1995 Kass, R. E., & Raftery, A. E. 1995. *Bayes Factors*. Journal of the American Statistical Association, 90(430), 773–795.
- Kippenhahn, Rudolf and Weigert, Alfred and Weiss, Achim, 2013. *Stellar Structure and Evolution*, ISBN: 978-3-642-30304-3. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- Kutluay, Ahmet Cem and Basturk, Ozgur and Yalçinkaya, Selçuk and Saguner Rambaldi, Tenay and Yerli, Sinan Kaan. 2023. *Updated Orbital Decay Rate of WASP-12 with New Data from TESS and Ground-based Observations*. Turkish Journal of Astronomy and Astrophysics, vol.4, no.2, p.10-22.
- Lau, Ryan M. and Jencson, Jacob E. and Salyk, Colette and De, Kishalay and Fox, Ori D. and Hankins, Matthew J. and Kasliwal, Mansi M. and Keyes, Charles D. and Macleod, Morgan and Ressler, Michael E. and Rose, Sam, 2025. *Revealing a Main-sequence Star that Consumed a Planet with JWST*, The Astrophysical Journal, Volume 983, Issue 2, id.87, 17 pp.
- Leonardi, P. and Nascimbeni, V. and Granata, V. and Malavolta, L. and Borsato, L. and Biazzo, K. and Lanza, A. F. and Desidera, S. and Piotto, G. and Nardiello, D. and Damasso, M. and Cunial, A. and Bedin, L. R., 2024. *TASTE. V. A new ground-based investigation of orbital decay in the ultra-hot Jupiter WASP-12b*. Astronomy & Astrophysics, Volume 686, id.A84, 14 pp.
- Levrard, B. and Winisdoerffer, C. and Chabrier, G. 2009. *Falling Transiting Extrasolar Giant Planets*, The Astrophysical Journal Letters, Volume 692, Issue 1, pp. L9-L13.
- Li, Shu-Lin and Miller, N. and Lin, Douglas N. C. and Fortney, Jonathan J. 2010. *WASP-12b as a prolate, inflated and disrupting planet from tidal dissipation*. Nature, Volume 463, Issue 7284, pp. 1054-1056
- Liddle, Andrew R. 2007. *Information criteria for astrophysical model selection*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, Volume 377, Issue 1, pp. L74-L78.
- Lightkurve Collaboration and Cardoso, José Vinícius de Miranda and Hedges, Christina and Gully-Santiago, Michael and Saunders, Nicholas and Cody, Ann Marie and Barclay, Thomas and Hall, Oliver and Sagar, Sheila and Turtelboom, Emma and Zhang, Johnny and Tzanidakis, Andy and Mighell, Ken and Coughlin, Jeff and Bell, Keaton and Berta-Thompson, Zach and Williams, Peter and Dotson, Jessie and Barentsen, Geert. 2018. *Lightkurve: Kepler and TESS time series analysis in Python*. Astrophysics Source Code Library, record ascl:1812.013
- Ma, Linhao and Fuller, Jim. 2021. *Orbital Decay of Short-period Exoplanets via Tidal Resonance Locking*. The Astrophysical Journal, Volume 918, Issue 1, id.16, 16 pp.

- Maciejewski, G. and Dimitrov, D. and Seeliger, M. and Raetz, St. and Bukowiecki, Ł. and Kitze, M. and Errmann, R. and Nowak, G. and Niedzielski, A. and Popov, V. and Marka, C. and Goździewski, K. and Neuhäuser, R. and Ohlert, J. and Hinse, T. C. and Lee, J. W. and Lee, C. -U. and Yoon, J. -N. and Berndt, A. and Gilbert, H. and Ginski, Ch. and Hohle, M. M. and Mugrauer, M. and Röhl, T. and Schmidt, T. O. B. and Tetzlaff, N. and Mancini, L. and Southworth, J. and Dall’Ora, M. and Ciceri, S. and Zambelli, R. and Corfini, G. and Takahashi, H. and Tachihara, K. and Benkő, J. M. and Sárneczky, K. and Szabo, Gy. M. and Varga, T. N. and Vaňko, M. and Joshi, Y. C. and Chen, W. P. 2013. *Multi-site campaign for transit timing variations of WASP-12 b: possible detection of a long-period signal of planetary origin*. *Astronomy & Astrophysics*, Volume 551, id.A108, 16 pp.
- Maciejewski, G. and Dimitrov, D. and Fernández, M. and Sota, A. and Nowak, G. and Ohlert, J. and Nikolov, G. and Bukowiecki, Ł. and Hinse, T. C. and Pallé, E. and Tingley, B. and Kjurkchieva, D. and Lee, J. W. and Lee, C. -U. 2016. *Departure from the constant-period ephemeris for the transiting exoplanet WASP-12*, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 588, id.L6, 6 pp.
- Maciejewski, G. and Fernández, M. and Aceituno, F. and Martín-Ruiz, S. and Ohlert, J. and Dimitrov, D. and Szyszka, K. and von Essen, C. and Mugrauer, M. and Bischoff, R. and Michel, K. -U. and Mallonn, M. and Stangret, M. and Moździerski, D. 2018. *Planet-Star Interactions with Precise Transit Timing. I. The Refined Orbital Decay Rate for WASP-12 b and Initial Constraints for HAT-P-23 b, KELT-1 b, KELT-16 b, WASP-33 b and WASP-103 b*. *Acta Astronomica*, vol 68, no 4, p. 371-401.
- Maciejewski, G. and Golonka, J. and Fernández, M. and Ohlert, J. and Casanova, V. and Pérez Medialdea, D. 2024. *Planet-star interactions with precise transit timing: IV. Probing the regime of dynamical tides for GK host stars*, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 692, id.A35, 15 pp.
- Masson, M.E.J. 2011. *A tutorial on a practical Bayesian alternative to null-hypothesis significance testing*. *Behavior Research Methods*. Volume 43, p. 679-690
- Matsumura, Soko and Peale, Stanton J. and Rasio, Frederic A. 2010. *Tidal Evolution of Close-in Planets*. *The Astrophysical Journal*, Volume 725, Issue 2, pp. 1995-2016
- Millholland, Sarah C. and MacLeod, Morgan and Xiao, Felicia. 2025. *Empirical Constraints on Tidal Dissipation in Exoplanet Host Stars*.
- Murray, Carl D. and Dermott, Stanley F. 1999. *Solar System Dynamics*, ISBN 0521575974. <http://www.cambridge.org/us/catalogue/catalogue.asp?isbn=0521575974> Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1999.

- Mustill, Alexander James and Lambrechts, Michiel and Davies, Melvyn B. 2021. *Hot Jupiters, Cold Kinematics*, Plato Mission Conference 2021. Presentations and posters of the online PLATO Mission Conference 2021, id.7.
- Nikolov, N. and Henning, Th. and Koppenhoefer, J. and Lendl, M. and Maciejewski, G. and Greiner, J. 2012. *WASP-4b transit observations with GROND*. Astronomy & Astrophysics, Volume 539, id.A159, 8 pp.
- Ngo, Henry and Knutson, Heather A. and Hinkley, Sasha and Crepp, Justin R. and Bechter, Eric B. and Batygin, Konstantin and Howard, Andrew W. and Johnson, John A. and Morton, Timothy D. and Muirhead, Philip S. 2015. *Friends of Hot Jupiters. II. No Correspondence between Hot-jupiter Spin-Orbit Misalignment and the Incidence of Directly Imaged Stellar Companions*. The Astrophysical Journal, Volume 800, Issue 2, article id. 138, 22 pp.
- O'Donovan, Francis T. and Charbonneau, David and Mandushev, Georgi and Dunham, Edward W. and Latham, David W. and Torres, Guillermo and Sozzetti, Alessandro and Brown, Timothy M. and Trauger, John T. and Belmonte, Juan A. and Rabus, Markus and Almenara, José M. and Alonso, Roi and Deeg, Hans J. and Esquerdo, Gilbert A. and Falco, Emilio E. and Hillenbrand, Lynne A. and Roussanova, Anna and Stefanik, Robert P. and Winn, Joshua N. 2006. *TrES-2: The First Transiting Planet in the Kepler Field*, The Astrophysical Journal, Volume 651, Issue 1, pp. L61-L64.
- Ogilvie, G. I. and Lin, D. N. C. 2004. *Tidal Dissipation in Rotating Giant Planets*, The Astrophysical Journal, Volume 610, Issue 1, pp. 477-509.
- Ogilvie, G. I. and Lin, D. N. C. 2007. *Tidal Dissipation in Rotating Solar-Type Stars*, The Astrophysical Journal, Volume 661, Issue 2, pp. 1180-1191.
- Ogilvie, Gordon I. 2013. *Tides in rotating barotropic fluid bodies: the contribution of inertial waves and the role of internal structure*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 429, Issue 1, p.613-632
- Ogilvie, Gordon I. 2014 *Tidal Dissipation in Stars and Giant Planets*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, vol. 52, p.171-210.
- Öztürk, Oğuz and Erdem, Ahmet, 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.
- Pál, A. and Bakos, G. Á. and Torres, G. and Noyes, R. W. and Latham, D. W. and Kovács, Géza and Marcy, G. W. and Fischer, D. A. and Butler, R. P. and Sasselov, D. D. and Sipőcz, B. and Esquerdo, G. A. and Kovács, Gábor and Stefanik, R. and Lázár, J. and Papp, I. and Sári, P. 2008. *HAT-P-7b: An Extremely Hot Massive Planet Transiting a Bright Star in the Kepler Field*, The Astrophysical Journal, Volume 680, Issue 2, pp. 1450-1456.

- Patra, Kishore C. and Winn, Joshua N. and Holman, Matthew J. and Yu, Liang and Deming, Drake and Dai, Fei, 2017. *The Apparently Decaying Orbit of WASP-12b*, The Astronomical Journal, Volume 154, Issue 1, article id. 4, 10 pp.
- Patra, Kishore C. and Winn, Joshua N. and Holman, Matthew J. and Gillon, Michael and Burdanov, Artem and Jehin, Emmanuel and Delrez, Laetitia and Pozuelos, Francisco J. and Barkaoui, Khalid and Benkhaldoun, Zouhair and Narita, Norio and Fukui, Akihiko and Kusakabe, Nobuhiko and Kawauchi, Kiyoe and Terada, Yuka and Bouma, L. G. and Weinberg, Nevin N. and Broome, Madelyn, 2020. *The Continuing Search for Evidence of Tidal Orbital Decay of Hot Jupiters*, The Astronomical Journal, Volume 159, Issue 4, id.150, 15 pp.
- Paxton, Bill and Bildsten, Lars and Dotter, Aaron and Herwig, Falk and Lesaffre, Pierre and Timmes, Frank, 2011. *Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA)*, The Astrophysical Journal Supplement, Volume 192, Issue 1, article id. 3, 35 pp.
- Paxton, Bill and Cantiello, Matteo and Arras, Phil and Bildsten, Lars and Brown, Edward F. and Dotter, Aaron and Mankovich, Christopher and Montgomery, M. H. and Stello, Dennis and Timmes, F. X. and Townsend, Richard, 2013 *Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA): Planets, Oscillations, Rotation, and Massive Stars*, The Astrophysical Journal Supplement, Volume 208, Issue 1, article id. 4, 42 pp.
- Paxton, Bill and Marchant, Pablo and Schwab, Josiah and Bauer, Evan B. and Bildsten, Lars and Cantiello, Matteo and Dessart, Luc and Farmer, R. and Hu, H. and Langer, N. and Townsend, R. H. D. and Townsley, Dean M. and Timmes, F. X. 2015. *Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA): Binaries, Pulsations, and Explosions*, The Astrophysical Journal Supplement Series, Volume 220, Issue 1, article id. 15, 44 pp.
- Paxton, Bill and Schwab, Josiah and Bauer, Evan B. and Bildsten, Lars and Blinnikov, Sergei and Duffell, Paul and Farmer, R. and Goldberg, Jared A. and Marchant, Pablo and Sorokina, Elena and Thoul, Anne and Townsend, Richard H. D. and Timmes, F. X. 2018. *Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA): Convective Boundaries, Element Diffusion, and Massive Star Explosions*, The Astrophysical Journal Supplement Series, Volume 234, Issue 2, article id. 34, 50 pp.
- Paxton, Bill and Smolec, R. and Schwab, Josiah and Gautschy, A. and Bildsten, Lars and Cantiello, Matteo and Dotter, Aaron and Farmer, R. and Goldberg, Jared A. and Jermyn, Adam S. and Kanbur, S. M. and Marchant, Pablo and Thoul, Anne and Townsend, Richard H. D. and Wolf, William M. and Zhang, Michael and Timmes, F. X. 2019. *Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA): Pulsating Variable Stars, Rotation, Convective Boundaries, and Energy Conservation*, The Astrophysical Journal Supplement Series, Volume 243, Issue 1, article id. 10, 44 pp.

- Penev, Kaloyan and Sasselov, Dimitar, 2011. *Tidal Evolution of Close-in Extrasolar Planets: High Stellar Q from New Theoretical Models*, The Astrophysical Journal, Volume 731, Issue 1, article id. 67, 5 pp.
- Penev, Kaloyan and Jackson, Brian and Spada, Federico and Thom, Nicole, 2012. *Constraining Tidal Dissipation in Stars from the Destruction Rates of Exoplanets*, The Astrophysical Journal, Volume 751, Issue 2, article id. 96, 9 pp.
- Penev, Kaloyan and Zhang, Michael and Jackson, Brian, 2014. *POET: A Model for Planetary Orbital Evolution Due to Tides on Evolving Stars*, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Volume 126, Issue 940, pp. 553
- Penev, K. and Hartman, J. D. and Bakos, G. Á. and Ciceri, S. and Brahm, R. and Bayliss, D. and Bento, J. and Jordán, A. and Csubry, Z. and Bhatti, W. and de Val-Borro, M. and Espinoza, N. and Zhou, G. and Mancini, L. and Rabus, M. and Suc, V. and Henning, T. and Schmidt, B. and Noyes, R. W. and Lázár, J. and Papp, I. and Sári, P. 2016. *HATS-18b: An Extreme Short-period Massive Transiting Planet Spinning Up Its Star*, The Astronomical Journal, Volume 152, Issue 5, article id. 127, 11 pp.
- Penev, Kaloyan and Bouma, L. G. and Winn, Joshua N. and Hartman, Joel D. 2018. *Empirical Tidal Dissipation in Exoplanet Hosts From Tidal Spin-up*, The Astronomical Journal, Volume 155, Issue 4, article id. 165, 9 pp.
- Penev, K. 2024. *Main-sequence exoplanet systems: tidal evolution*, eprint arXiv:2403.07716
- Poddaný, Stanislav and Brát, Luboš and Pejcha, Ondřej, 2010. *Exoplanet Transit Database. Reduction and processing of the photometric data of exoplanet transits*, New Astronomy, Volume 15, Issue 3, p. 297-301.
- Pont, Frédéric and Zucker, Shay and Queloz, Didier, 2006. *The effect of red noise on planetary transit detection*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 373, Issue 1, pp. 231-242.
- PyMC-Devs. 2024. *PyMC*. Zenodo.
- Ragozzine, Darin and Wolf, Aaron S. 2009. *Probing the Interiors of very Hot Jupiters Using Transit Light Curves*, The Astrophysical Journal, Volume 698, Issue 2, pp. 1778-1794.
- . Ricker, G.R. , Joshua N. Winn, Roland Vanderspek, David W. Latham, Gáspár Á. Bakos, Jacob L. Bean, Zachory K. Berta-Thompson, Timothy M. Brown, Lars Buchhave, Nathaniel R. Butler, R. Paul Butler, William J. Chaplin, David B. Charbonneau, Jørgen Christensen-Dalsgaard, Mark Clampin, Drake Deming, John P. Doty, Nathan De Lee, Courtney Dressing, Edward W. Dunham, Michael Endl, François Fressin, Jian Ge, Thomas Henning, Matthew J. Holman, Andrew W. Howard, Shigeru Ida, Jon M. Jenkins, Garrett Jernigan, John Asher Johnson, Lisa Kaltenegger, Nobuyuki Kawai, Hans Kjeldsen, Gregory

- Laughlin, Alan M. Levine, Douglas Lin, Jack J. Lissauer, Phillip MacQueen, Geoffrey Marcy, Peter R. McCullough, Timothy D. Morton, Norio Narita, Martin Paegert, Enric Pallé, Francesco Pepe, Joshua Pepper, Andreas Quirrenbach, Stephen A. Rinehart, Dimitar Sasselov, Bun'ei Sato, Sara Seager, Alessandro Sozzetti, Keivan G. Stassun, Peter Sullivan, Andrew Szentgyorgyi, Guillermo Torres, Stephane Udry, Joel Villaseñor. 2015. *Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS)*. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, Volume 1, id. 014003
- Russell, H.N. , 1928. *On the Advance of Periastron in Eclipsing Binaries*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 88, Issue 8, June 1928, Pages 641–643.
- Sanchis-Ojeda, Roberto and Winn, Joshua N. and Holman, Matthew J. and Carter, Joshua A. and Osip, David J. and Fuentes, Cesar I. 2011. *Starspots and Spin-orbit Alignment in the WASP-4 Exoplanetary System*. The Astrophysical Journal, Volume 733, Issue 2, article id. 127, 9 pp.
- Santerne, A. and Díaz, R. F. and Moutou, C. and Bouchy, F. and Hébrard, G. and Almenara, J. -M. and Bonomo, A. S. and Deleuil, M. and Santos, N. C. 2012. *SOPHIE velocimetry of Kepler transit candidates. VII. A false-positive rate of 35% for Kepler close-in giant candidates*, Astronomy & Astrophysics, Volume 545, id.A76, 16 pp.
- Schlaufman, Kevin C. and Winn, Joshua N. 2013. *Evidence for the Tidal Destruction of Hot Jupiters by Subgiant Stars*, The Astrophysical Journal, Volume 772, Issue 2, article id. 143, 12 pp.
- Schneider, J. and Dedieu, C. and Le Sidaner, P. and Savalle, R. and Zolotukhin, I. 2011. *Defining and cataloging exoplanets: the exoplanet.eu database*. Astronomy & Astrophysics, Volume 532, id.A79, 11 pp.
- Schwarz, Gideon, 1978. *Estimating the Dimension of a Model*. Annals of Statistics, Vol. 6, No. 2, p. 461-464
- Sivver, Robert J. and Beatty, Thomas G. and Pepper, Joshua and Eastman, Jason D. and Collins, Karen and Bieryla, Allyson and Latham, David W. and Buchhave, Lars A. and Jensen, Eric L. N. and Crepp, Justin R. and Street, Rachel and Stassun, Keivan G. and Gaudi, B. Scott and Berlind, Perry and Calkins, Michael L. and DePoy, D. L. and Esquerdo, Gilbert A. and Fulton, Benjamin J. and Fűrész, Gábor and Geary, John C. and Gould, Andrew and Hebb, Leslie and Kielkopf, John F. and Marshall, Jennifer L. and Pogge, Richard and Stanek, K. Z. and Stefanik, Robert P. and Szentgyorgyi, Andrew H. and Trueblood, Mark and Trueblood, Patricia and Stutz, Amelia M. and van Saders, Jennifer L. 2012. *KELT-1b: A Strongly Irradiated, Highly Inflated, Short Period, 27 Jupiter-mass Companion Transiting a Mid-F Star*. The Astrophysical Journal, Volume 761, Issue 2, article id. 123, 27 pp.

- Southworth, John and Hinse, T. C. and Burgdorf, M. J. and Dominik, M. and Hornstrup, A. and Jørgensen, U. G. and Liebig, C. and Ricci, D. and Thöne, C. C. and Anguita, T. and Bozza, V. and Novati, S. Calchi and Harpsøe, K. and Mancini, L. and Masi, G. and Mathiasen, M. and Rahvar, S. and Scarpetta, G. and Snodgrass, C. and Surdej, J. and Zub, M. 2009. *High-precision photometry by telescope defocussing - II. The transiting planetary system WASP-4**. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 399, Issue 1, pp. 287-294.
- Southworth, John and Hinse, T. C. and Burgdorf, M. and Calchi Novati, S. and Dominik, M. and Galianni, P. and Gerner, T. and Giannini, E. and Gu, S. -H. and Hundertmark, M. and Jørgensen, U. G. and Juncher, D. and Kerins, E. and Mancini, L. and Rabus, M. and Ricci, D. and Schäfer, S. and Skottfelt, J. and Tregloan-Reed, J. and Wang, X. -B. and Wertz, O. and Alsubai, K. A. and Andersen, J. M. and Bozza, V. and Bramich, D. M. and Browne, P. and Ciceri, S. and D'Ago, G. and Damerdj, Y. and Diehl, C. and Dodds, P. and Elyiv, A. and Fang, X. -S. and Finet, F. and Figuera Jaimes, R. and Hardis, S. and Harpsøe, K. and Jessen-Hansen, J. and Kains, N. and Kjeldsen, H. and Korhonen, H. and Liebig, C. and Lund, M. N. and Lundkvist, M. and Mathiasen, M. and Penny, M. T. and Popovas, A. and Prof., S. and Rahvar, S. and Sahu, K. and Scarpetta, G. and Schmidt, R. W. and Schönebeck, F. and Snodgrass, C. and Street, R. A. and Surdej, J. and Tsapras, Y. and Vilela, C., 2014. *High-precision photometry by telescope defocussing - VI. WASP-24, WASP-25 and WASP-26*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 444, Issue 1, p.776-789.
- Southworth, John and Dominik, M. and Jørgensen, U. G. and Andersen, M. I. and Bozza, V. and Burgdorf, M. J. and D'Ago, G. and Dib, S. and Figuera Jaimes, R. and Fujii, Y. I. and Gill, S. and Haikala, L. K. and Hinse, T. C. and Hundertmark, M. and Khalouei, E. and Korhonen, H. and Longa-Peña, P. and Mancini, L. and Peixinho, N. and Rabus, M. and Rahvar, S. and Sajadian, S. and Skottfelt, J. and Snodgrass, C. and Spyrtos, P. and Tregloan-Reed, J. and Unda-Sanzana, E. and von Essen, C. 2019. *Transit timing variations in the WASP-4 planetary system*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 490, Issue 3, p.4230-4236
- Southworth, John and Barker, A. J. and Hinse, T. C. and Jongen, Y. and Dominik, M. and Jørgensen, U. G. and Longa-Peña, P. and Sajadian, S. and Snodgrass, C. and Tregloan-Reed, J. and Bach-Møller, N. and Bonavita, M. and Bozza, V. and Burgdorf, M. J. and Figuera Jaimes, R. and Helling, Ch and Hitchcock, J. A. and Hundertmark, M. and Khalouei, E. and Korhonen, H. and Mancini, L. and Peixinho, N. and Rahvar, S. and Rabus, M. and Skottfelt, J. and Spyrtos, P. 2022. *A search for transit timing variations in the HATS-18 planetary system*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 515, Issue 3, pp.3212-3223
- Sterne, T. E. 1939. *Apsidal Motion in Binary Stars*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 99, Issue 5, March 1939, Pages 451–462.

- Stetson, Peter B. 1987. *DAOPHOT: A Computer Program for Crowded-Field Stellar Photometry*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, v.99, p.191
- Sun, M. and Arras, P. and Weinberg, N. N. and Troup, N. W. and Majewski, S. R. 2018. *Orbital decay in binaries containing post-main-sequence stars*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 481, Issue 3, p.4077-4092.
- Tang, Jing and Bressan, Alessandro and Rosenfield, Philip and Slemmer, Alessandra and Marigo, Paola and Girardi, Léo and Bianchi, Luciana, 2014. *New PARSEC evolutionary tracks of massive stars at low metallicity: testing canonical stellar evolution in nearby star-forming dwarf galaxies*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 445, Issue 4, p.4287-4305.
- Terquem, C. and Papaloizou, J. C. B. and Nelson, R. P. and Lin, D. N. C. 1998. *On the Tidal Interaction of a Solar-Type Star with an Orbiting Companion: Excitation of g-Mode Oscillation and Orbital Evolution*, The Astrophysical Journal, Volume 502, Issue 2, pp. 788-801.
- Thompson, Susan E. and Coughlin, Jeffrey L. and Hoffman, Kelsey and Mullally, Fergal and Christiansen, Jessie L. and Burke, Christopher J. and Bryson, Steve and Batalha, Natalie and Haas, Michael R. and Catanzarite, Joseph and Rowe, Jason F. and Barentsen, Geert and Caldwell, Douglas A. and Clarke, Bruce D. and Jenkins, Jon M. and Li, Jie and Latham, David W. and Lissauer, Jack J. and Mathur, Savita and Morris, Robert L. and Seader, Shawn E. and Smith, Jeffrey C. and Klaus, Todd C. and Twicken, Joseph D. and Van Cleve, Jeffrey E. and Wohler, Bill and Akeson, Rachel and Ciardi, David R. and Cochran, William D. and Henze, Christopher E. and Howell, Steve B. and Huber, Daniel and Prša, Andrej and Ramírez, Solange V. and Morton, Timothy D. and Barclay, Thomas and Campbell, Jennifer R. and Chaplin, William J. and Charbonneau, David and Christensen-Dalsgaard, Jørgen and Dotson, Jessie L. and Doyle, Laurance and Dunham, Edward W. and Dupree, Andrea K. and Ford, Eric B. and Geary, John C. and Girouard, Forrest R. and Isaacson, Howard and Kjeldsen, Hans and Quintana, Elisa V. and Ragozzine, Darin and Shabram, Megan and Shporer, Avi and Silva Aguirre, Victor and Steffen, Jason H. and Still, Martin and Tenenbaum, Peter and Welsh, William F. and Wolfgang, Angie and Zamudio, Khadeejah A. and Koch, David G. and Borucki, William J. 2018. *Planetary Candidates Observed by Kepler. VIII. A Fully Automated Catalog with Measured Completeness and Reliability Based on Data Release 25*, The Astrophysical Journal Supplement Series, Volume 235, Issue 2, article id. 38, 49 pp.
- Turner, Jake D. and Ridden-Harper, Andrew and Jayawardhana, Ray, 2021. *Decaying Orbit of the Hot Jupiter WASP-12b: Confirmation with TESS Observations*. The Astronomical Journal, Volume 161, Issue 2, id.72, 12 pp.
- Turner, Jake D. and Flagg, Laura and Ridden-Harper, Andrew and Jayawardhana, Ray. 2022. *Characterizing the WASP-4 System with TESS and Radial Velocity*

- Data: Constraints on the Cause of the Hot Jupiter's Changing Orbit and Evidence of an Outer Planet.* The Astronomical Journal, Volume 163, Issue 6, id.281, 27 pp.
- Vissapragada, Shreyas and Chontos, Ashley and Greklek-McKeon, Michael and Knutson, Heather A. and Dai, Fei and Pérez González, Jorge and Grunblatt, Sam and Huber, Daniel and Saunders, Nicholas, 2022. *The Possible Tidal Demise of Kepler's First Planetary System*, The Astrophysical Journal Letters, Volume 941, Issue 2, id.L31, 8 pp.
- Wang, Ji and Fischer, Debra A. and Horch, Elliott P. and Huang, Xu. 2015. *On the Occurrence Rate of Hot Jupiters in Different Stellar Environments.* The Astrophysical Journal, Volume 799, Issue 2, article id. 229, 7 pp.
- Weinberg, Nevin N. and Sun, Meng and Arras, Phil and Essick, Reed. 2017 *Tidal Dissipation in WASP-12.* The Astrophysical Journal Letters, Volume 849, Issue 1, article id. L11, 6 pp.
- Weinberg, Nevin N. and Davachi, Niyousha and Essick, Reed and Yu, Hang and Arras, Phil and Belland, Brent, 2024. *Orbital Decay of Hot Jupiters due to Weakly Nonlinear Tidal Dissipation*, The Astrophysical Journal, Volume 960, Issue 1, id.50, 18 pp.
- Wilson, D. M. and Gillon, M. and Hellier, C. and Maxted, P. F. L. and Pepe, F. and Queloz, D. and Anderson, D. R. and Collier Cameron, A. and Smalley, B. and Lister, T. A. and Bentley, S. J. and Blecha, A. and Christian, D. J. and Enoch, B. and Haswell, C. A. and Hebb, L. and Horne, K. and Irwin, J. and Joshi, Y. C. and Kane, S. R. and Marmier, M. and Mayor, M. and Parley, N. and Pollacco, D. and Pont, F. and Ryans, R. and Segransan, D. and Skillen, I. and Street, R. A. and Udry, S. and West, R. G. and Wheatley, P. J. 2008. *WASP-4b: A 12th Magnitude Transiting Hot Jupiter in the Southern Hemisphere.* The Astrophysical Journal Letters, Volume 675, Issue 2, pp. L113
- Winn, Joshua N. and Holman, Matthew J. and Carter, Joshua A. and Torres, Guillermo and Osip, David J. and Beatty, Thomas. 2009. *The Transit Light Curve Project. XI. Submillimagnitude Photometry of Two Transits of the Bloated Planet WASP-4b.* The Astronomical Journal, Volume 137, Issue 4, pp. 3826-3833
- Winn, J. N. *Exoplanet Transits and Occultations.* Exoplanets, edited by S. Seager. Published by University of Arizona Press, Tucson, AZ, 2010, 526 pp. ISBN 978-0-8165-2945-2., p.55-77
- Winn, Joshua, 2019. *Observations of Tidal Orbital Decay of Hot Jupiters*, American Astronomical Society, Extreme Solar Systems 4, id. 201.04. Bulletin of the American Astronomical Society, Vol. 51, No. 6
- Wizinowich, P. and Acton, D. S. and Shelton, C. and Stomski, P. and Gathright, J. and Ho, K. and Lupton, W. and Tsubota, K. and Lai, O. and Max, C.

- and Brase, J. and An, J. and Avicola, K. and Olivier, S. and Gavel, D. and Macintosh, B. and Ghez, A. and Larkin, J. 2000. *First Light Adaptive Optics Images from the Keck II Telescope: A New Era of High Angular Resolution Imagery*. The Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Volume 112, Issue 769, pp. 315-319.
- Wolszczan, A. and Frail, D. A. 1992. *A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12*, Nature, Volume 355, Issue 6356, pp. 145-147.
- Wong, Ian and Shporer, Avi and Vissapragada, Shreyas and Greklek-McKeon, Michael and Knutson, Heather A. and Winn, Joshua N. and Benneke, Björn, 2022. TESS Revisits WASP-12: Updated Orbital Decay Rate and Constraints on Atmospheric Variability. The Astronomical Journal, Volume 163, Issue 4, id.175, 16 pp.
- Yee, Samuel W. and Winn, Joshua N. and Knutson, Heather A. and Patra, Kishore C. and Vissapragada, Shreyas and Zhang, 2020. *The Orbit of WASP-12b Is Decaying*. The Astrophysical Journal Letters, Volume 888, Issue 1, article id. L5, 11 pp.
- Zahn, J. -P. 1975. *The dynamical tide in close binaries*. Astronomy and Astrophysics, Vol. 41, p. 329-344
- Zahn, J. -P. 1977. *Tidal friction in close binary systems.*, Astronomy and Astrophysics, Vol. 57, p. 383 - 394

EKLER

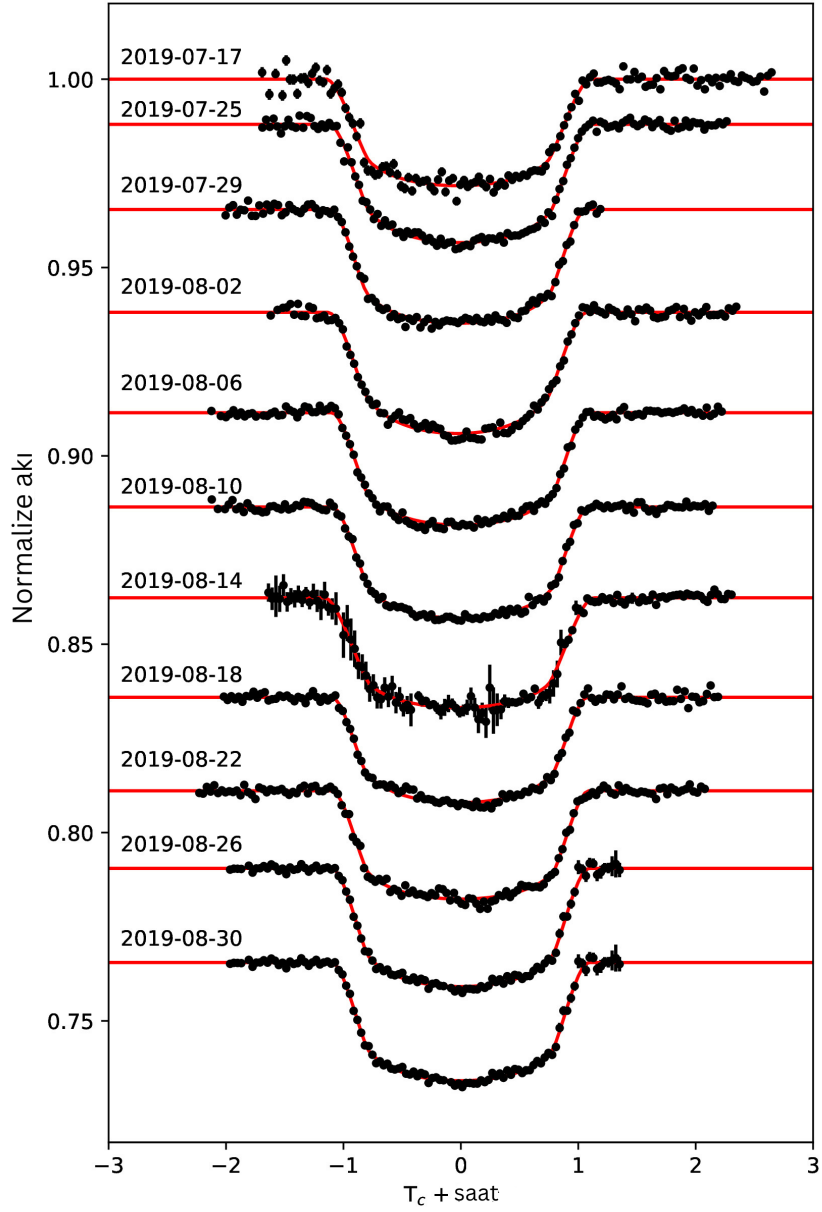
EK 1 WASP-4b'nin bu çalışma kapsamında gözlenen geçişleri

EK 2 EXOFAST modellerinden elde edilen minimum zamanlar ve hataları

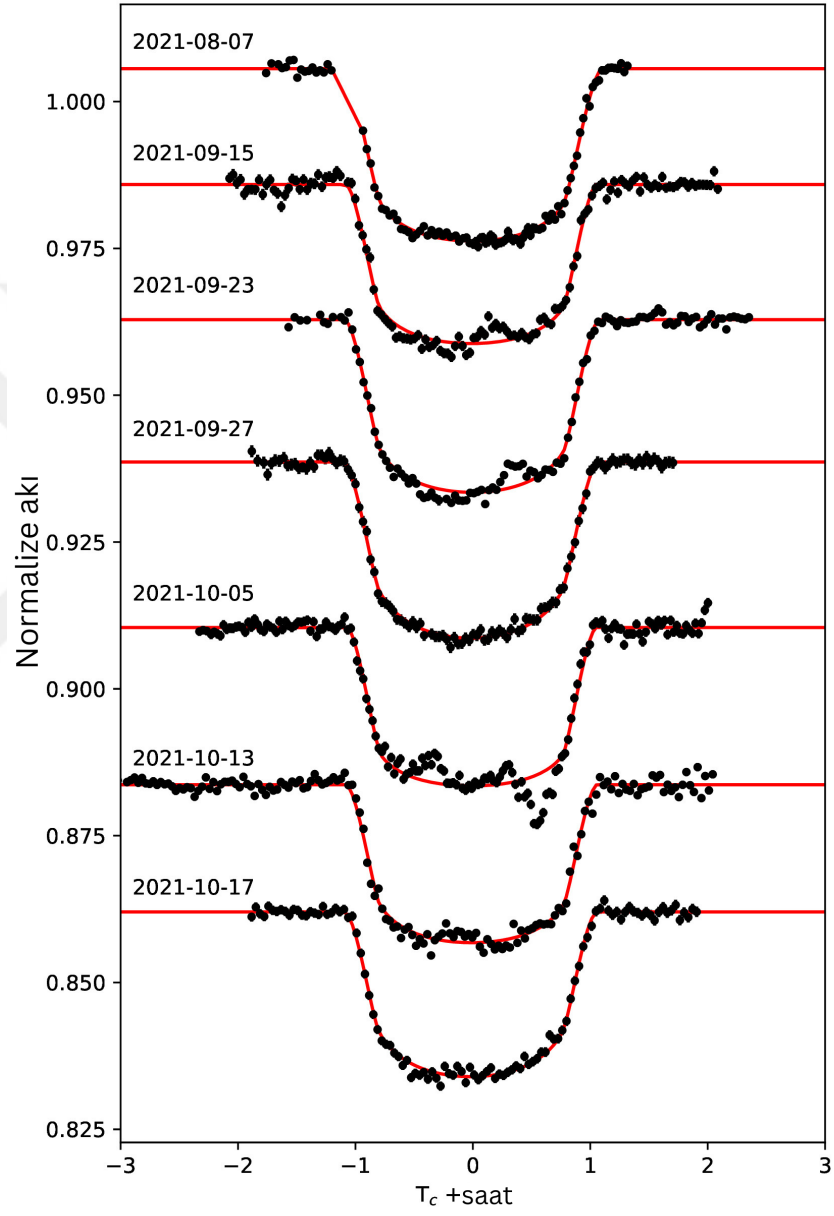
EK 3 Bu çalışmada kullanılan MESA kodu

EKLER

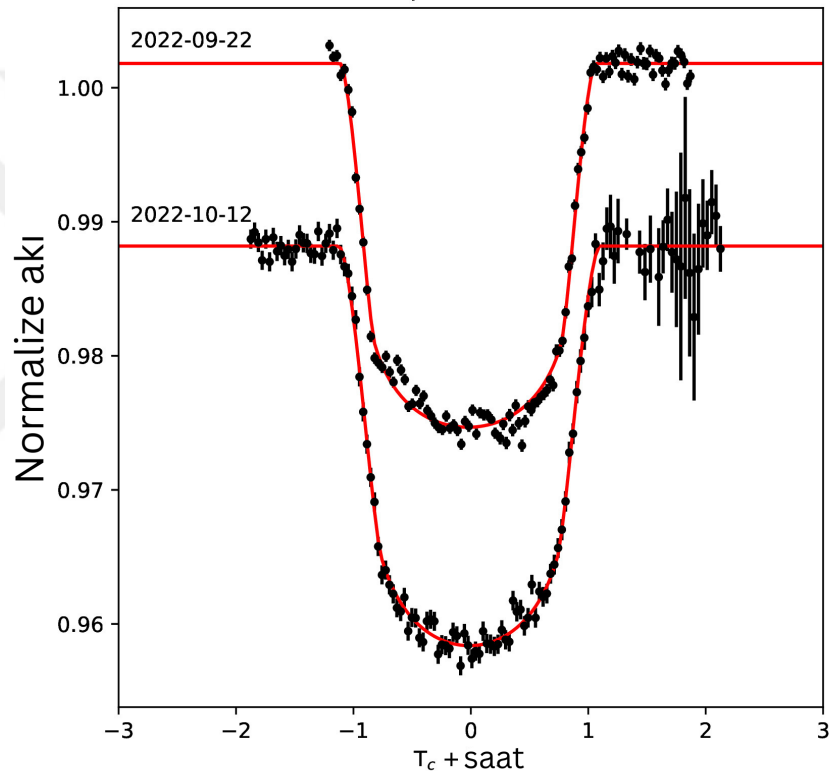
EK 1 WASP-4b'nin bu çalışma kapsamında gözlenen geçişleri



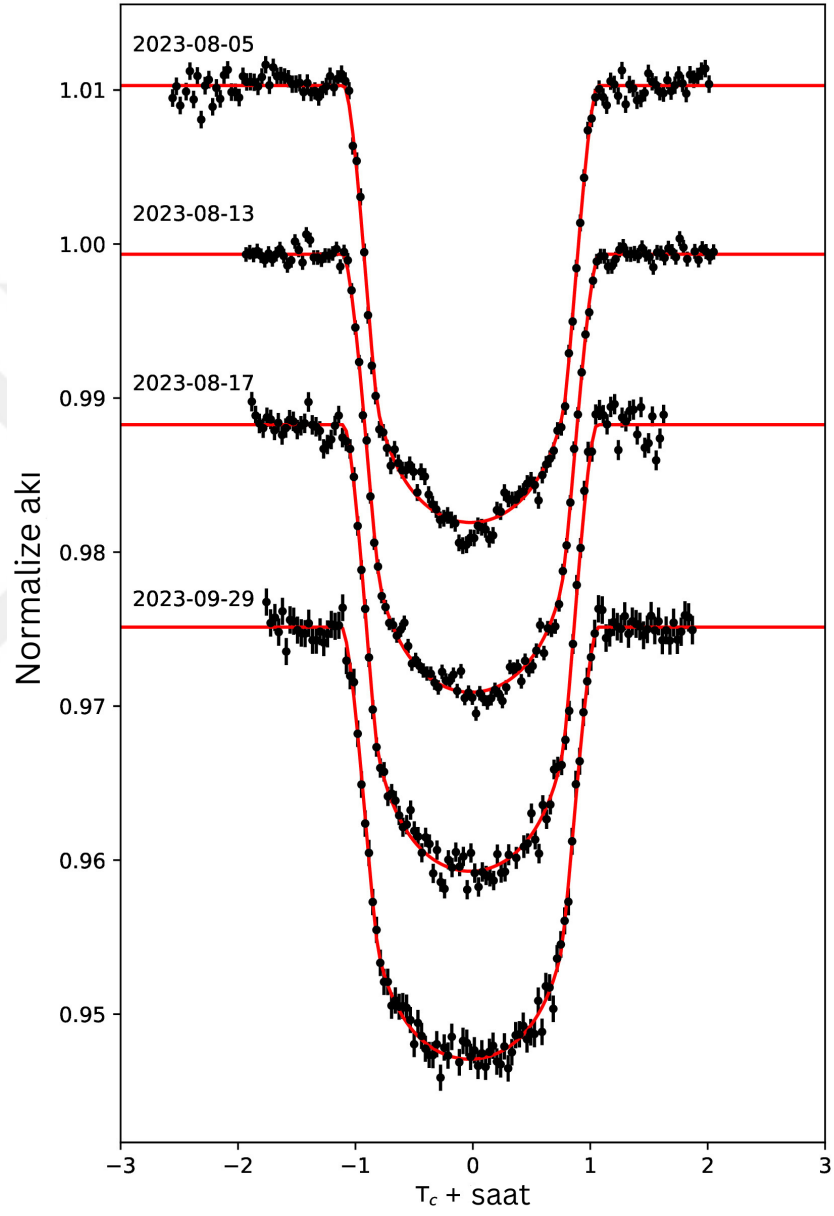
2019 Temmuz–Ağustos aylarına ait geçiş gözlemleri.



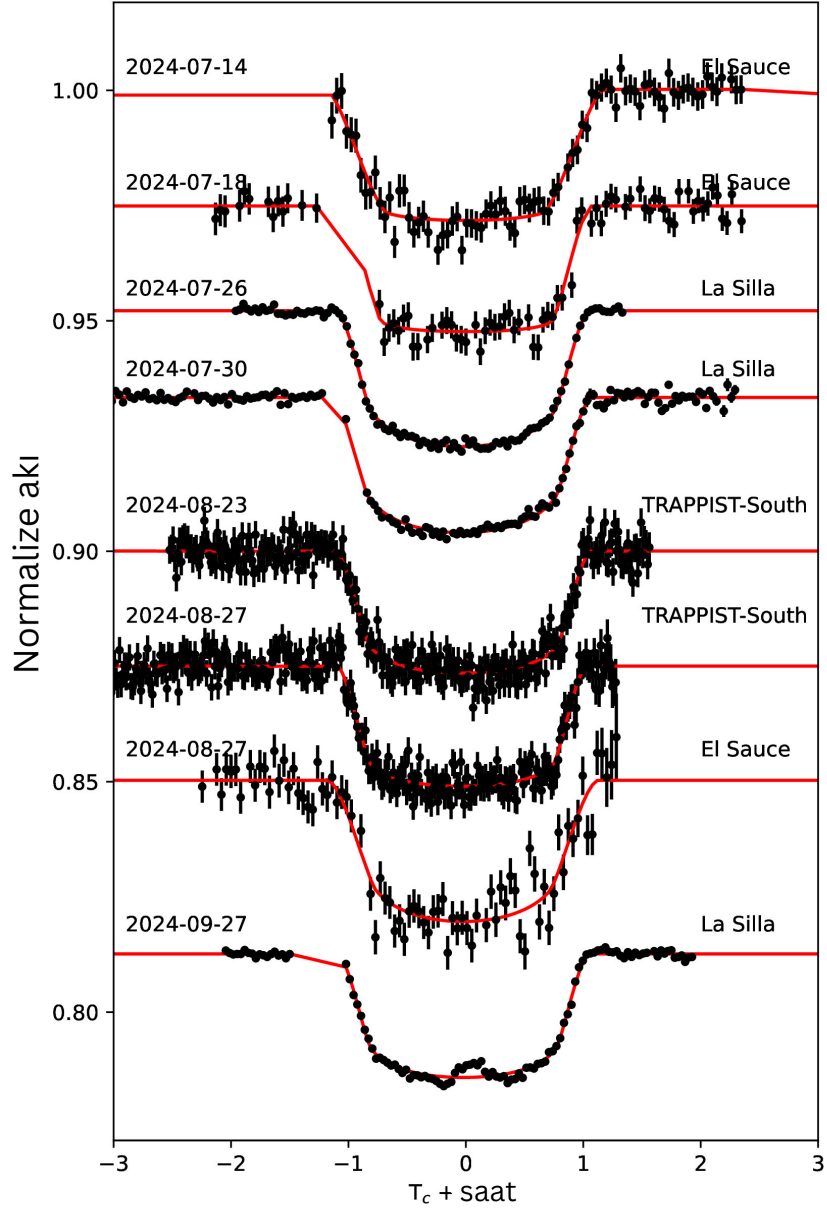
2021 Ağustos-Ekim aylarına ait geçiş gözlemleri.



2022 Eylül–Ekim aylarına ait geçiş gözlemleri.



2023 Ağustos-Eylül aylarına ait geçiş gözlemleri.



2024 Temmuz–Eylül aylarına ait geçiş gözlemleri.

EK-2 EXOFAST modellerinden elde edilen minimum zamanlar ve hataları. Filtre sütununda EXOFAST modelinde kullanılan filtreler verilmiştir.

Kaynak	BJD-TDB	σ	Filtre	Kaynak	BJD-TDB	σ	Filtre
Palomar/WIRC	2459097.806585	0.00099120824	J	Kepler Kısa Süreli	2455579.484477	0.000671578	I
Palomar/WIRC	2459790.686471	0.00097836671	J	Kepler Kısa Süreli	2455583.329544	0.000720064	I
TESS	2459425.000753	0.004172643	I	Kepler Kısa Süreli	2455587.173894	0.000749613	I
TESS	2459428.847344	0.004743877	I	Kepler Kısa Süreli	2455591.035821	0.000555184	I
TESS	2459436.550647	0.005419331	I	Kepler Kısa Süreli	2455598.732833	0.000659806	I
TESS	2459440.390492	0.005945613	I	Kepler Kısa Süreli	2455602.579329	0.000627645	I
TESS	2459786.837981	0.005175520	I	Kepler Kısa Süreli	2455606.429982	0.000701304	I
TESS	2459813.789458	0.005978218	I	Kepler Kısa Süreli	2455610.282995	0.000505226	I
TESS	2460325.749297	0.004347774	I	Kepler Kısa Süreli	2455614.126136	0.000633079	I
TESS	2460337.302174	0.002699474	I	Kepler Kısa Süreli	2455617.970079	0.000740021	I
TESS	2460356.538166	0.003918566	I	Kepler Kısa Süreli	2455621.830485	0.000858930	I
TESS	2460364.242315	0.005710848	I	Kepler Kısa Süreli	2455633.379104	0.000696053	I
Kepler Kısa Süreli	2455009.775916	0.000685185	I	Kepler Uzun Süreli	2454959.736992	0.001839511	I
Kepler Kısa Süreli	2455013.628021	0.000678780	I	Kepler Uzun Süreli	2454955.885131	0.001674666	I
Kepler Kısa Süreli	2455017.477986	0.000556549	I	Kepler Uzun Süreli	2454994.379688	0.001473311	I
Kepler Kısa Süreli	2455021.328321	0.000549211	I	Kepler Uzun Süreli	2454990.532187	0.001544942	I
Kepler Kısa Süreli	2455025.176470	0.000545450	I	Kepler Uzun Süreli	2454986.682933	0.001312069	I
Kepler Kısa Süreli	2455029.019327	0.000735896	I	Kepler Uzun Süreli	2454982.825685	0.004972873	I
Kepler Kısa Süreli	2455036.723305	0.000585500	I	Kepler Uzun Süreli	2454978.982304	0.002985796	I
Kepler Kısa Süreli	2455040.576257	0.000543713	I	Kepler Uzun Süreli	2454975.133214	0.002087622	I
Kepler Kısa Süreli	2455044.422763	0.000727895	I	Kepler Uzun Süreli	2454967.430193	0.002453165	I
Kepler Kısa Süreli	2455048.273002	0.000887722	I	Kepler Uzun Süreli	2455005.927415	0.002774739	I
Kepler Kısa Süreli	2455055.968447	0.000783206	I	Kepler Uzun Süreli	2455009.780550	0.001506542	I
Kepler Kısa Süreli	2455059.821138	0.000753974	I	Kepler Uzun Süreli	2455013.629446	0.002401257	I
Kepler Kısa Süreli	2455067.519950	0.000512262	I	Kepler Uzun Süreli	2455017.477960	0.002503734	I
Kepler Kısa Süreli	2455071.368837	0.001044313	I	Kepler Uzun Süreli	2455021.327508	0.002616470	I
Kepler Kısa Süreli	2455079.063383	0.000589064	I	Kepler Uzun Süreli	2455025.178480	0.001872686	I
Kepler Kısa Süreli	2455082.915894	0.000677867	I	Kepler Uzun Süreli	2455029.017242	0.004973494	I
Kepler Kısa Süreli	2455086.767777	0.001238784	I	Kepler Uzun Süreli	2455032.875160	0.002121190	I
Kepler Kısa Süreli	2455090.608610	0.000538043	I	Kepler Uzun Süreli	2455036.723190	0.001983898	I
Kepler Kısa Süreli	2455252.288934	0.000761538	I	Kepler Uzun Süreli	2455040.576194	0.003041095	I
Kepler Kısa Süreli	2455256.141164	0.000708399	I	Kepler Uzun Süreli	2455044.421625	0.001988614	I
Kepler Kısa Süreli	2455259.976860	0.000813481	I	Kepler Uzun Süreli	2455048.271652	0.003631835	I
Kepler Kısa Süreli	2455267.685573	0.000762084	I	Kepler Uzun Süreli	2455052.117275	0.001869574	I
Kepler Kısa Süreli	2455271.536705	0.000726882	I	Kepler Uzun Süreli	2455055.970473	0.001284789	I
Kepler Kısa Süreli	2455463.997677	0.000531806	I	Kepler Uzun Süreli	2455059.816080	0.002505527	I
Kepler Kısa Süreli	2455467.846080	0.000837815	I	Kepler Uzun Süreli	2455067.519116	0.000944224	I
Kepler Kısa Süreli	2455471.701740	0.000777408	I	Kepler Uzun Süreli	2455071.371625	0.002879265	I
Kepler Kısa Süreli	2455479.393244	0.000755222	I	Kepler Uzun Süreli	2455079.067757	0.002564838	I
Kepler Kısa Süreli	2455487.097805	0.000773276	I	Kepler Uzun Süreli	2455082.915918	0.002043382	I
Kepler Kısa Süreli	2455490.939941	0.000606966	I	Kepler Uzun Süreli	2455086.766731	0.004722630	I
Kepler Kısa Süreli	2455494.792689	0.000915947	I	Kepler Uzun Süreli	2455090.614189	0.002229711	I
Kepler Kısa Süreli	2455498.638155	0.000773338	I	Kepler Uzun Süreli	2455094.462850	0.002744259	I
Kepler Kısa Süreli	2455502.492985	0.000630568	I	Kepler Uzun Süreli	2455098.312126	0.002248267	I
Kepler Kısa Süreli	2455506.339676	0.000825382	I	Kepler Uzun Süreli	2455102.162254	0.001558784	I
Kepler Kısa Süreli	2455510.189262	0.000920318	I	Kepler Uzun Süreli	2455106.012512	0.001433039	I
Kepler Kısa Süreli	2455514.044673	0.000673334	I	Kepler Uzun Süreli	2455109.862318	0.001918906	I
Kepler Kısa Süreli	2455517.891623	0.000688441	I	Kepler Uzun Süreli	2455117.566628	0.003319971	I
Kepler Kısa Süreli	2455521.737993	0.000681289	I	Kepler Uzun Süreli	2455121.413083	0.003996088	I
Kepler Kısa Süreli	2455525.587033	0.000487512	I	Kepler Uzun Süreli	2455125.257830	0.001115996	I
Kepler Kısa Süreli	2455529.438922	0.000667192	I	Kepler Uzun Süreli	2455129.106401	0.002423701	I
Kepler Kısa Süreli	2455533.291519	0.000545761	I	Kepler Uzun Süreli	2455136.815629	0.002041106	I
Kepler Kısa Süreli	2455537.135637	0.000868049	I	Kepler Uzun Süreli	2455140.657021	0.004474073	I
Kepler Kısa Süreli	2455540.991187	0.000879383	I	Kepler Uzun Süreli	2455144.516274	0.001775546	I

EXOFAST model sonuçları: Kepler-1658b

Kaynak	BJD-TDB	σ	Filtre	Kaynak	BJD-TDB	σ	Filtre
Kepler Uzun Süreli	2455163.750313	0.004076432	I	Kepler Uzun Süreli	2455506.344435	0.001601032	I
Kepler Uzun Süreli	2455167.600153	0.003948549	I	Kepler Uzun Süreli	2455510.193246	0.003037148	I
Kepler Uzun Süreli	2455171.452076	0.001915783	I	Kepler Uzun Süreli	2455514.048810	0.002015163	I
Kepler Uzun Süreli	2455175.295916	0.001687994	I	Kepler Uzun Süreli	2455517.892919	0.001604381	I
Kepler Uzun Süreli	2455179.148714	0.002953110	I	Kepler Uzun Süreli	2455521.743260	0.002018255	I
Kepler Uzun Süreli	2455186.844149	0.001380601	I	Kepler Uzun Süreli	2455525.593369	0.001212437	I
Kepler Uzun Süreli	2455190.697829	0.002358463	I	Kepler Uzun Süreli	2455529.445778	0.003074964	I
Kepler Uzun Süreli	2455194.550346	0.001875193	I	Kepler Uzun Süreli	2455533.291089	0.001562058	I
Kepler Uzun Süreli	2455198.396668	0.002958958	I	Kepler Uzun Süreli	2455540.994355	0.003979717	I
Kepler Uzun Süreli	2455202.245939	0.002132754	I	Kepler Uzun Süreli	2455544.850749	0.001335938	I
Kepler Uzun Süreli	2455206.103658	0.001741728	I	Kepler Uzun Süreli	2455548.687709	0.005222352	I
Kepler Uzun Süreli	2455209.945292	0.002016188	I	Kepler Uzun Süreli	2455571.786224	0.001979495	I
Kepler Uzun Süreli	2455221.497973	0.001157671	I	Kepler Uzun Süreli	2455575.632698	0.00295935	I
Kepler Uzun Süreli	2455225.343344	0.001825090	I	Kepler Uzun Süreli	2455579.484444	0.002026837	I
Kepler Uzun Süreli	2455229.196747	0.002414862	I	Kepler Uzun Süreli	2455583.334302	0.001519801	I
Kepler Uzun Süreli	2455236.888620	0.001540378	I	Kepler Uzun Süreli	2455587.177999	0.001532347	I
Kepler Uzun Süreli	2455240.741706	0.001289477	I	Kepler Uzun Süreli	2455598.732608	0.00189298	I
Kepler Uzun Süreli	2455244.591118	0.002323553	I	Kepler Uzun Süreli	2455602.585193	0.001289532	I
Kepler Uzun Süreli	2455248.435777	0.003478837	I	Kepler Uzun Süreli	2455606.427448	0.002422021	I
Kepler Uzun Süreli	2455252.290008	0.001451827	I	Kepler Uzun Süreli	2455610.282916	0.001223515	I
Kepler Uzun Süreli	2455256.139898	0.002341942	I	Kepler Uzun Süreli	2455614.130606	0.001377421	I
Kepler Uzun Süreli	2455259.989670	0.005331438	I	Kepler Uzun Süreli	2455617.971996	0.003651362	I
Kepler Uzun Süreli	2455271.536444	0.002513503	I	Kepler Uzun Süreli	2455621.830614	0.003546021	I
Kepler Uzun Süreli	2455279.233586	0.005903156	I	Kepler Uzun Süreli	2455629.529349	0.002105872	I
Kepler Uzun Süreli	2455283.086517	0.001777082	I	Kepler Uzun Süreli	2455633.379495	0.002732667	I
Kepler Uzun Süreli	2455286.928800	0.002715913	I	Kepler Uzun Süreli	2455644.918594	0.003888963	I
Kepler Uzun Süreli	2455290.777463	0.003477794	I	Kepler Uzun Süreli	2455648.770608	0.001654246	I
Kepler Uzun Süreli	2455298.472980	0.005448827	I	Kepler Uzun Süreli	2455656.467428	0.003071808	I
Kepler Uzun Süreli	2455302.332112	0.004491963	I	Kepler Uzun Süreli	2455660.320295	0.001620648	I
Kepler Uzun Süreli	2455306.174879	0.001858949	I	Kepler Uzun Süreli	2455664.173304	0.002274841	I
Kepler Uzun Süreli	2455310.030105	0.001993502	I	Kepler Uzun Süreli	2455668.017427	0.001638396	I
Kepler Uzun Süreli	2455313.866740	0.003071762	I	Kepler Uzun Süreli	2455671.887106	0.003797018	I
Kepler Uzun Süreli	2455317.725810	0.003131871	I	Kepler Uzun Süreli	2455675.719595	0.00182919	I
Kepler Uzun Süreli	2455321.575277	0.005380900	I	Kepler Uzun Süreli	2455679.562420	0.00500919	I
Kepler Uzun Süreli	2455325.428259	0.003919428	I	Kepler Uzun Süreli	2455683.423116	0.00221891	I
Kepler Uzun Süreli	2455329.270741	0.00305449	I	Kepler Uzun Süreli	2455687.263386	0.00491451	I
Kepler Uzun Süreli	2455333.121642	0.002546088	I	Kepler Uzun Süreli	2455691.116940	0.00218294	I
Kepler Uzun Süreli	2455340.823567	0.002858526	I	Kepler Uzun Süreli	2455694.968007	0.002619327	I
Kepler Uzun Süreli	2455344.669909	0.002030222	I	Kepler Uzun Süreli	2455698.818289	0.001906034	I
Kepler Uzun Süreli	2455348.520894	0.002063483	I	Kepler Uzun Süreli	2455702.663267	0.003345347	I
Kepler Uzun Süreli	2455352.372873	0.00163209	I	Kepler Uzun Süreli	2455706.511235	0.001861804	I
Kepler Uzun Süreli	2455356.218673	0.001141911	I	Kepler Uzun Süreli	2455710.361705	0.002417917	I
Kepler Uzun Süreli	2455360.068644	0.002877156	I	Kepler Uzun Süreli	2455714.217837	0.001175162	I
Kepler Uzun Süreli	2455363.924699	0.002184666	I	Kepler Uzun Süreli	2455718.061790	0.001446325	I
Kepler Uzun Süreli	2455367.765809	0.002322236	I	Kepler Uzun Süreli	2455721.908282	0.002031841	I
Kepler Uzun Süreli	2455464.002603	0.001214854	I	Kepler Uzun Süreli	2455725.758452	0.002215804	I
Kepler Uzun Süreli	2455467.850903	0.00223408	I	Kepler Uzun Süreli	2455729.609931	0.004286088	I
Kepler Uzun Süreli	2455471.712419	0.001710479	I	Kepler Uzun Süreli	2455733.459163	0.007051779	I
Kepler Uzun Süreli	2455475.551515	0.001716157	I	Kepler Uzun Süreli	2455737.304939	0.004656369	I
Kepler Uzun Süreli	2455479.397089	0.003594289	I	Kepler Uzun Süreli	2455837.390317	0.003923004	I
Kepler Uzun Süreli	2455483.249440	0.002365975	I	Kepler Uzun Süreli	2455841.245819	0.004164098	I
Kepler Uzun Süreli	2455487.102590	0.002432269	I	Kepler Uzun Süreli	2455845.095033	0.002339215	I
Kepler Uzun Süreli	2455490.945454	0.001351169	I	Kepler Uzun Süreli	2455848.942500	0.002390076	I
Kepler Uzun Süreli	2455494.795580	0.001450769	I	Kepler Uzun Süreli	2455852.791256	0.003542538	I
Kepler Uzun Süreli	2455498.641532	0.002254657	I	Kepler Uzun Süreli	2455856.639131	0.002294896	I
Kepler Uzun Süreli	2455502.499505	0.002171571	I	Kepler Uzun Süreli	2455860.488104	0.002417277	I
Kepler Kısa Süreli	2455548.686191	0.001085714	I	Kepler Uzun Süreli	2455148.354808	0.002066858	I
Kepler Kısa Süreli	2455571.781176	0.000794166	I	Kepler Uzun Süreli	2455152.207397	0.002105217	I
Kepler Kısa Süreli	2455575.632882	0.000758094	I	Kepler Uzun Süreli	2455159.905338	0.001800302	I

EXOFAST model sonuçları: Kepler-1658b (devam)

Kaynak	BJD-TDB	σ	Filtre	Kaynak	BJD-TDB	σ	Filtre
Kepler Uzun Süreli	2455864.343946	0.002663328	I	Kepler Uzun Süreli	2456210.788052	0.002801085	I
Kepler Uzun Süreli	2455868.188373	0.002689482	I	Kepler Uzun Süreli	2456214.637160	0.00278193	I
Kepler Uzun Süreli	2455872.032782	0.004216463	I	Kepler Uzun Süreli	2456218.473440	0.003889311	I
Kepler Uzun Süreli	2455875.891107	0.003065684	I	Kepler Uzun Süreli	2456222.335204	0.002883436	I
Kepler Uzun Süreli	2455879.738782	0.004610909	I	Kepler Uzun Süreli	2456226.184646	0.003462508	I
Kepler Uzun Süreli	2455883.578325	0.001834893	I	Kepler Uzun Süreli	2456233.876266	0.002839326	I
Kepler Uzun Süreli	2455887.439677	0.001824972	I	Kepler Uzun Süreli	2456245.423393	0.003255109	I
Kepler Uzun Süreli	2455891.284552	0.001333116	I	Kepler Uzun Süreli	2456256.974676	0.002358743	I
Kepler Uzun Süreli	2455895.128845	0.002596126	I	Kepler Uzun Süreli	2456260.820956	0.004106433	I
Kepler Uzun Süreli	2455898.980439	0.002830767	I	Kepler Uzun Süreli	2456264.669561	0.002248242	I
Kepler Uzun Süreli	2455902.832976	0.001989294	I	Kepler Uzun Süreli	2456272.372126	0.003577382	I
Kepler Uzun Süreli	2455906.676443	0.003501888	I	Kepler Uzun Süreli	2456276.221034	0.001300487	I
Kepler Uzun Süreli	2455910.536995	0.003281655	I	Kepler Uzun Süreli	2456280.064435	0.004051206	I
Kepler Uzun Süreli	2455914.382867	0.003024185	I	Kepler Uzun Süreli	2456283.923648	0.002778882	I
Kepler Uzun Süreli	2455918.230217	0.002448948	I	Kepler Uzun Süreli	2456287.783118	0.002974525	I
Kepler Uzun Süreli	2455922.080517	0.001580979	I	Kepler Uzun Süreli	2456291.619903	0.001241926	I
Kepler Uzun Süreli	2455929.777631	0.003542935	I	Kepler Uzun Süreli	2456295.469678	0.002116748	I
Kepler Uzun Süreli	2455933.629940	0.001109315	I	Kepler Uzun Süreli	2456299.315028	0.00115597	I
Kepler Uzun Süreli	2455941.325366	0.00274509	I	Kepler Uzun Süreli	2456303.165079	0.000965111	I
Kepler Uzun Süreli	2455945.174125	0.001794783	I	Kepler Uzun Süreli	2456307.023072	0.003296753	I
Kepler Uzun Süreli	2455949.025372	0.002592446	I	Kepler Uzun Süreli	2456322.413178	0.001473923	I
Kepler Uzun Süreli	2455952.875907	0.001883674	I	Kepler Uzun Süreli	2456326.258485	0.001534598	I
Kepler Uzun Süreli	2455956.720832	0.002228559	I	Kepler Uzun Süreli	2456333.962321	0.002487024	I
Kepler Uzun Süreli	2455960.575776	0.002394193	I	Kepler Uzun Süreli	2456337.807666	0.003163425	I
Kepler Uzun Süreli	2455964.422639	0.001577628	I	Kepler Uzun Süreli	2456341.660323	0.002254564	I
Kepler Uzun Süreli	2455968.272738	0.00652622	I	Kepler Uzun Süreli	2456345.509657	0.004498101	I
Kepler Uzun Süreli	2455972.121726	0.001697686	I	Kepler Uzun Süreli	2456353.205778	0.00178961	I
Kepler Uzun Süreli	2455975.969335	0.002007138	I	Kepler Uzun Süreli	2456357.061116	0.001004834	I
Kepler Uzun Süreli	2455979.822464	0.002565458	I	Kepler Uzun Süreli	2456364.755826	0.001847289	I
Kepler Uzun Süreli	2455983.670129	0.002742125	I	Kepler Uzun Süreli	2456368.619955	0.004597494	I
Kepler Uzun Süreli	2455991.364417	0.003352357	I	Kepler Uzun Süreli	2456372.458193	0.001473712	I
Kepler Uzun Süreli	2456002.906877	0.007681953	I	Kepler Uzun Süreli	2456376.305477	0.002070874	I
Kepler Uzun Süreli	2456006.766437	0.002213519	I	Kepler Uzun Süreli	2456380.156464	0.005152045	I
Kepler Uzun Süreli	2456010.613084	0.002533892	I	Kepler Uzun Süreli	2456387.852351	0.002604724	I
Kepler Uzun Süreli	2456014.463503	0.002192321	I	Kepler Uzun Süreli	2456399.400935	0.002348931	I
Kepler Uzun Süreli	2456018.310071	0.003012863	I	Kepler Uzun Süreli	2456407.101144	0.001275505	I
Kepler Uzun Süreli	2456022.168887	0.001150656	I	Kepler Uzun Süreli	2456410.944556	0.003068101	I
Kepler Uzun Süreli	2456026.027489	0.003528053	I	Kepler Uzun Süreli	2456422.492092	0.003236223	I
Kepler Uzun Süreli	2456029.862308	0.002592948	I				
Kepler Uzun Süreli	2456033.709799	0.001379073	I				
Kepler Uzun Süreli	2456037.557045	0.002580228	I				
Kepler Uzun Süreli	2456041.410814	0.002761926	I				
Kepler Uzun Süreli	2456045.261910	0.003184212	I				
Kepler Uzun Süreli	2456049.116370	0.006140815	I				
Kepler Uzun Süreli	2456052.956887	0.002417242	I				
Kepler Uzun Süreli	2456060.660253	0.003101661	I				
Kepler Uzun Süreli	2456064.502630	0.002896702	I				
Kepler Uzun Süreli	2456072.204889	0.002252058	I				
Kepler Uzun Süreli	2456076.047403	0.002514972	I				
Kepler Uzun Süreli	2456079.901642	0.002605731	I				
Kepler Uzun Süreli	2456087.597928	0.00169086	I				
Kepler Uzun Süreli	2456091.458923	0.002496635	I				
Kepler Uzun Süreli	2456095.301013	0.00153591	I				
Kepler Uzun Süreli	2456099.146626	0.002770317	I				
Kepler Uzun Süreli	2456103.001068	0.00605841	I				
Kepler Uzun Süreli	2456206.928778	0.003849782	I				

EXOFAST model sonuçları: Kepler-1658b (devam)

Kaynak	BJD-TDB	σ	Filtre	Kaynak	BJD-TDB	σ	Filtre
ETD	2458862.785220	0.0006361545	CoRoT	TESS	2459303.488570	0.001145287	I
ETD	2458883.730529	0.0003842360	CoRoT	TESS	2459304.326410	0.001097951	I
ETD	2458903.838150	0.0004423664	CoRoT	TESS	2459305.164712	0.001204504	I
ETD	2458950.756425	0.0006148671	CoRoT	TESS	2460015.654567	0.001196126	I
ETD	2458972.542307	0.0004149489	CoRoT	TESS	2460016.494347	0.001267829	I
ETD	2458982.594291	0.0005845421	CoRoT	TESS	2460017.330824	0.001152639	I
ETD	2459034.542973	0.0005712802	CoRoT	TESS	2460018.169620	0.001228385	I
ETD	2459203.787357	0.0005468414	CoRoT	TESS	2460019.006123	0.001186502	I
TESS	2458572.891267	0.001422419	I	TESS	2460019.845894	0.001336464	I
TESS	2458573.727220	0.001343299	I	TESS	2460020.686105	0.001387781	I
TESS	2458574.565431	0.001835776	I	TESS	2460021.523797	0.001220403	I
TESS	2458575.405237	0.001523532	I	TESS	2460022.359928	0.001523421	I
TESS	2458576.240493	0.001314499	I	TESS	2460023.196005	0.001289055	I
TESS	2458577.078022	0.001260712	I	TESS	2460024.032081	0.001132492	I
TESS	2458577.916961	0.001359139	I	TESS	2460024.875391	0.001148296	I
TESS	2458578.755900	0.001424087	I	TESS	2460025.711123	0.001357132	I
TESS	2458579.592131	0.001189303	I	TESS	2460026.546547	0.001358104	I
TESS	2458580.431594	0.001311676	I	TESS	2460027.367432	0.001534875	I
TESS	2458581.270457	0.001488292	I	TESS	2460028.226330	0.001409437	I
TESS	2458586.295004	0.001401124	I	TESS	2460029.060914	0.001093397	I
TESS	2458587.133486	0.001461109	I	TESS	2460029.900316	0.001375525	I
TESS	2458587.969272	0.001488625	I	TESS	2460030.737006	0.001068446	I
TESS	2458588.807315	0.001173547	I	TESS	2460031.576820	0.001488874	I
TESS	2458589.646721	0.001377918	I	TESS	2460032.411116	0.001719882	I
TESS	2458590.485942	0.001309721	I	TESS	2460033.250996	0.001186502	I
TESS	2458591.322113	0.001264401	I	TESS	2460034.925828	0.001373849	I
TESS	2458592.160375	0.001518538	I	TESS	2460035.762639	0.001247291	I
TESS	2458592.998362	0.001483704	I	TESS	2460036.603137	0.001268605	I
TESS	2458593.835486	0.001178975	I	TESS	2460037.440566	0.001411021	I
TESS	2458594.671112	0.001394657	I	TESS	2460038.280361	0.00145679	I
TESS	2458595.509668	0.001406609	I	TESS	2460039.118320	0.001368072	I
TESS	2459282.538813	0.001536631	I	Penev vd. (2016)	2457410.800176	0.000331733	i'
TESS	2459283.379577	0.001056239	I	Southworth vd. (2022)	2457902.614529	0.00014517874	R
TESS	2459284.221299	0.0011533001	I	Southworth vd. (2022)	2457918.533469	0.00028448175	R
TESS	2459285.055016	0.001413859	I	Southworth vd. (2022)	2457923.560071	0.00015794681	R
TESS	2459285.892794	0.001020673	I	Southworth vd. (2022)	2457944.506800	0.00016819794	R
TESS	2459286.732327	0.001195788	I	Southworth vd. (2022)	2458233.562974	0.00015444198	R
TESS	2459287.569926	0.001219711	I	Southworth vd. (2022)	2458238.589528	0.00018843692	R
TESS	2459288.407053	0.001159186	I	Southworth vd. (2022)	2458243.616324	0.00016410944	R
TESS	2459289.247009	0.001082025	I	Southworth vd. (2022)	2458259.535056	0.00018945593	R
TESS	2459290.083697	0.001027180	I	Southworth vd. (2022)	2458264.563579	0.00031904110	R
TESS	2459290.919285	0.001101113	I	Southworth vd. (2022)	2458290.535676	0.00019665502	R
TESS	2459291.759209	0.001109854	I	Southworth vd. (2022)	2458620.645986	0.00020048692	R
TESS	2459292.597342	0.001107441	I	TESS	2460747.932426	0.0014214212	I
TESS	2459295.949840	0.001138854	I	TESS	2460748.767415	0.0015293982	I
TESS	2459296.785577	0.001353288	I	TESS	2460749.606444	0.0015422413	I
TESS	2459297.625866	0.001253909	I	TESS	2460750.444960	0.0015356614	I
TESS	2459298.462080	0.001182983	I	TESS	2460751.283286	0.0014960136	I
TESS	2459299.299052	0.001149105	I	TESS	2460752.121250	0.0013252924	I
TESS	2459300.137864	0.001045064	I	TESS	2460752.959320	0.0015754875	I
TESS	2459300.974493	0.001248101	I	TESS	2460754.634652	0.0014624903	I
TESS	2459301.814421	0.001290994	I	TESS	2460755.471213	0.0015901365	I
TESS	2459302.652136	0.001093267	I	TESS	2460756.312503	0.0015015111	I
TESS	2460757.147539	0.0014043479	I	TESS	2460757.987670	0.001441951	I
TESS	2460758.821615	0.0015293395	I	TESS	2460759.662376	0.0014708712	I
TESS	2460761.339789	0.0017214057	I	TESS	2460762.173087	0.001716105	I
TESS	2460763.012141	0.0014765575	I	TESS	2460763.847890	0.0017047024	I
TESS	2460764.689569	0.0011901028	I	TESS	2460765.524521	0.0014742822	I
TESS	2460766.362400	0.0013356612	I	TESS	2460767.204933	0.0013438905	I
TESS	2460768.039875	0.0012958723	I	TESS	2460768.877318	0.0011512419	I
TESS	2460769.715485	0.001238961	I	TESS	2460770.555796	0.0012253334	I
TESS	2460771.392268	0.0013977062	I	TESS	2460772.229650	0.0021960438	I
TESS	2460773.067399	0.0018061492	I				

Kaynak	BJD-TDB	σ	Filtre	Kaynak	BJD-TDB	σ	Filtre
ETD	2455385.649354	0.0002675717	R	TESS	2458376.596376	0.000350053	I
ETD	2455425.796285	0.0001166734	I	TESS	2458377.934331	0.000372668	I
ETD	2455473.972411	0.0003775267	CoRoT	TESS	2458379.273245	0.000356449	I
ETD	2455506.090753	0.0004185778	CoRoT	TESS	2458379.942074	0.000386236	I
ETD	2456556.602246	0.0001731441	CoRoT	TESS	2459063.108667	0.000396937	I
ETD	2456572.659814	0.0002487404	R	TESS	2459064.447493	0.000414947	I
ETD	2456639.572797	0.0003086415	R	TESS	2459065.785548	0.000445383	I
ETD	2456873.763402	0.0001715902	CoRoT	TESS	2459067.124281	0.000383724	I
ETD	2456885.807558	0.0003588729	CoRoT	TESS	2459068.462033	0.000458163	I
ETD	2456889.820209	0.0001298351	I	TESS	2459069.800402	0.000441515	I
ETD	2456889.821626	0.0000837528	CoRoT	TESS	2459071.138030	0.000443223	I
ETD	2456908.555164	0.0002943907	CoRoT	TESS	2459076.490730	0.000456145	I
ETD	2457249.804918	0.0001256172	I	TESS	2459077.829486	0.000396937	I
ETD	2458004.568178	0.000507632	R	TESS	2459079.168221	0.000379192	I
ETD	2458020.626306	0.0004469444	CoRoT	TESS	2459080.506645	0.000396839	I
ETD	2458827.581692	0.0002978588	CoRoT	TESS	2459081.844837	0.000433677	I
ETD	2459006.903829	0.0003992019	V	TESS	2459083.181719	0.000420077	I
ETD	2459104.595941	0.0003828936	R	TESS	2459084.520523	0.000442666	I
ETD	2459108.609065	0.000609764	R	TESS	2459088.534893	0.000328070	I
ETD	2459124.668003	0.0003568858	R	Southworth vd. (2019)	2457261.849532	0.00010523654	R
ETD	2459191.578153	0.0003698608	R	Southworth vd. (2019)	2457265.864615	0.00010724082	R
ETD	2459203.623153	0.0005251421	R	Southworth vd. (2019)	2457613.804787	7.37E-05	R
ETD	2459429.784522	0.0004240861	R	Southworth vd. (2019)	2457621.833913	0.00010541166	R
ETD	2459437.814537	0.0003941847	R	Southworth vd. (2019)	2457625.848765	0.0001123588	R
ETD	2459453.872716	0.0003861435	CoRoT	Southworth vd. (2019)	2457973.789144	0.00013247744	R
ETD	2459460.564890	0.0005327106	R	Southworth vd. (2019)	2457993.862435	0.00010027951	R
ETD	2459480.637270	0.0004712857	CoRoT	Southworth vd. (2019)	2458345.817182	9.15E-05	R
ETD	2459484.651739	0.0003646592	R	Southworth vd. (2019)	2458349.831616	0.00012583352	R
ETD	2459488.667577	0.0002857336	CoRoT	Southworth vd. (2019)	2458357.861365	8.40E-05	R
ETD	2459492.680982	0.0002683993	CoRoT	Southworth vd. (2019)	2458556.706756	7.25E-05	r
ETD	2459555.578250	0.0002707803	CoRoT	Southworth vd. (2019)	2457675.363168	0.00014482431	R
ETD	2459805.826986	0.0004377213	CoRoT	Southworth vd. (2019)	2457679.378162	0.00018779031	R
ETD	2459848.651483	0.0004593554	CoRoT	Southworth vd. (2019)	2458653.610299	0.0002184379	R
ETD	2459852.664985	0.0003538669	CoRoT	Sanchis-Ojeda vd. 2011	2454697.798278	6.17E-05	z
ETD	2459919.577236	0.0002709254	CoRoT	Sanchis-Ojeda vd. 2011	2454748.651307	3.43E-05	z
ETD	2460082.841126	0.0003061371	CoRoT	Sanchis-Ojeda vd. 2011	2455045.738769	3.81E-05	z
ETD	2459931.619698	0.0005463175	CoRoT	Sanchis-Ojeda vd. 2011	2455049.753403	3.90E-05	z
ETD	2460185.884900	0.0003232171	CoRoT	Sanchis-Ojeda vd. 2011	2455053.767947	4.70E-05	z
ETD	2459112.622099	0.0005219143	CoRoT	Sanchis-Ojeda vd. 2011	2455100.606019	4.76E-05	z
ETD	2459480.637155	0.0004718825	CoRoT	Harre vd. (2023)	2459502.048511	0.00015405485	R
ETD	2459832.590514	0.0006387471	CoRoT	Harre vd. (2023)	2459800.474098	0.00018126776	R
TESS	2458355.184997	0.000343674	I	Harre vd. (2023)	2459411.049006	0.00016628468	R
TESS	2458356.522484	0.000377633	I	Harre vd. (2023)	2459436.475352	0.00013670864	R
TESS	2458357.861048	0.000317164	I	Harre vd. (2023)	2459444.504849	0.00015833325	R
TESS	2458359.199613	0.000321655	I	Harre vd. (2023)	2459465.916732	0.00019399263	R
TESS	2458360.537197	0.000349262	I	Harre vd. (2023)	2459480.636898	0.00016102415	R
TESS	2458361.875589	0.000303791	I	Southworth vd. (2019)	2455785.780764	0.0001282305	R
TESS	2458363.214325	0.000337317	I	Southworth vd. (2019)	2457257.835112	6.98E-05	R
TESS	2458364.551983	0.000360954	I	Southworth vd. (2019)	2454697.798346	0.00010692229	R
TESS	2458365.890918	0.000385054	I	Southworth vd. (2019)	2454701.813064	0.000117089	R
TESS	2458369.905327	0.000353366	I	Southworth vd. (2019)	2454740.621639	7.51E-05	R
TESS	2458371.242988	0.000344743	I	Southworth vd. (2019)	2455069.826654	0.00011724651	R
TESS	2458372.581346	0.000384835	I	Southworth vd. (2019)	2455777.750583	0.00013312054	R
TESS	2458373.919871	0.000379654	I				
TESS	2458375.258080	0.000326577	I				

EXOFAST model sonuçları: WASP-4b

Kaynak	BJD-TDB	σ	Filtre	Kaynak	BJD-TDB	σ
TESS	2459089.873878	0.000347682	I	Wilson et al. (2008)	2454368.592790	0.00033
TESS	2459091.211794	0.000346872	I	Gillon et al. (2009)	2454396.695760	0.00012
TESS	2459092.550167	0.000363407	I	Hoyer et al. (2013)	2454701.812800	0.00022
TESS	2459093.887893	0.000362761	I	Hoyer et al. (2013)	2454701.813030	0.00018
TESS	2459095.226764	0.000359042	I	Hoyer et al. (2013)	2454705.827150	0.00029
TESS	2459096.565126	0.000367547	I	Hoyer et al. (2013)	2454728.577670	0.00042
TESS	2459097.903216	0.000368065	I	Hoyer et al. (2013)	2454732.591970	0.0005
TESS	2459103.255278	0.000383276	I	Hoyer et al. (2013)	2454748.651110	0.00007
TESS	2459104.593919	0.000337091	I	Hoyer et al. (2013)	2454752.665760	0.00069
TESS	2459105.932604	0.000324148	I	Hoyer et al. (2013)	2455041.723770	0.00018
TESS	2459107.270936	0.000318158	I	Hoyer et al. (2013)	2455045.738530	0.00008
TESS	2459108.609073	0.000374937	I	Hoyer et al. (2013)	2455049.753250	0.00007
TESS	2459109.947071	0.000363892	I	Hoyer et al. (2013)	2455053.767740	0.00009
TESS	2459111.284982	0.000379732	I	Nikolov et al. (2012)	2455069.826170	0.00038
TESS	2460183.208232	0.000324024	I	Nikolov et al. (2012)	2455069.826610	0.00029
TESS	2460184.547099	0.000331503	I	Nikolov et al. (2012)	2455069.826700	0.00028
TESS	2460185.884544	0.000362417	I	Nikolov et al. (2012)	2455069.826760	0.00031
TESS	2460187.223286	0.000394670	I	Nikolov et al. (2012)	2455073.841080	0.00029
TESS	2460188.560616	0.000342576	I	Nikolov et al. (2012)	2455073.841110	0.00023
TESS	2460189.899706	0.000372289	I	Nikolov et al. (2012)	2455073.841140	0.00018
TESS	2460196.590518	0.000327053	I	Nikolov et al. (2012)	2455073.841280	0.00026
TESS	2460197.928941	0.000327192	I	Dragomir et al. (2011)	2455085.884180	0.00086
TESS	2460199.266822	0.000326373	I	Hoyer et al. (2013)	2455096.591480	0.00022
TESS	2460200.605592	0.000320141	I	Southworth et al. (2011)	2455100.605950	0.00012
TESS	2460201.943658	0.000355729	I	Nikolov et al. (2012)	2455112.649860	0.00039
TESS	2460203.281824	0.000364799	I	Nikolov et al. (2012)	2455112.650050	0.00049
TESS	2460204.619686	0.000388710	I	Nikolov et al. (2012)	2455112.650050	0.00031
TESS	2460205.958394	0.000373729	I	Nikolov et al. (2012)	2455112.650090	0.00033
				Hoyer et al. (2013)	2455132.723100	0.00041
				Hoyer et al. (2013)	2455468.619430	0.00046
				Ranjan et al. (2014)	2455526.163560	0.00008
				Baluev et al. (2020)	2455551.590205	0.00038
				Baluev et al. (2020)	2455820.574064	0.00029
				Baluev et al. (2020)	2455828.603750	0.00041
				Hoyer et al. (2013)	2455832.618150	0.00041
				Baluev et al. (2020)	2455832.618492	0.00016
				Huitson et al. (2017)	2455844.662871	0.00009
				Baluev et al. (2020)	2455852.692871	0.00056
				Baluev et al. (2020)	2455856.706724	0.00021
				Baluev et al. (2020)	2455915.588539	0.0003
				Baluev et al. (2020)	2456086.882430	0.00016
				Baluev et al. (2020)	2456212.676454	0.00043
				Huitson et al. (2017)	2456216.691229	0.00006
				Huitson et al. (2017)	2456576.675559	0.00005
				Huitson et al. (2017)	2456924.615612	0.00006
				Baluev et al. (2020)	2457961.745397	0.00071
				Baluev et al. (2020)	2458262.847714	0.00039
				Baluev et al. (2020)	2458290.948607	0.00082
				Baluev et al. (2020)	2458325.744960	0.00062
				Baluev et al. (2020)	2458341.802413	0.00036
				Baluev et al. (2020)	2458345.816340	0.00066
				Baluev et al. (2020)	2458353.846717	0.00065
				Southworth et al. (2019)	2458653.610100	0.00018
				Baluev et al. (2020)	2458692.418351	0.00083
				Baluev et al. (2020)	2458705.801002	0.00049
				Baluev et al. (2020)	2458712.491707	0.00078
				Baluev et al. (2020)	2458764.683292	0.00037
				Baluev et al. (2020)	2458831.594691	0.00052
				Baluev et al. (2020)	2458835.610326	0.00058

(sol) EXOFAST model sonuçları: WASP-4b, (sağ) WASP-4b'nin literatürden alınan minimum zamanları

Kaynak	BJD-TDB	σ	Filtre	Kaynak	BJD-TDB	σ	Filtre
ETD	2455172.562888	0.0001347313	V	ETD	2458883.388345	0.0005656367	CoRoT
ETD	2455519.631482	0.0007825872	R	ETD	2458884.477868	0.0007422236	I
ETD	2455532.730313	0.0003349144	CoRoT	ETD	2458884.478492	0.0009347929	I
ETD	2455541.461441	0.0005097237	CoRoT	ETD	2458906.307400	0.0005227777	R
ETD	2455577.476462	0.0003352864	CoRoT	ETD	2458930.330181	0.0006018705	R
ETD	2455577.476853	0.0006697054	R	ETD	2459147.510503	0.0006495022	R
ETD	2455600.399705	0.0005134643	CoRoT	ETD	2459171.523158	0.0006743217	CoRoT
ETD	2455615.676483	0.0004005397	I	ETD	2459183.526714	0.0006176248	V
ETD	2455889.623632	0.0007197225	CoRoT	ETD	2459196.624569	0.0005217855	R
ETD	2455899.448275	0.0005290545	CoRoT	ETD	2459265.383580	0.0004046699	R
ETD	2455936.551307	0.0014900924	R	ETD	2459553.514960	0.0004110581	R
ETD	2455982.396164	0.0015234339	V	ETD	2459565.522704	0.0005884268	R
ETD	2455994.398841	0.0006045961	CoRoT	ETD	2459566.615172	0.0008574575	R
ETD	2456003.130426	0.0006621090	R	ETD	2459576.439075	0.0005781110	R
ETD	2456003.130629	0.0005693646	V	ETD	2459611.361016	0.0002362983	R
ETD	2456304.368343	0.0005753922	CoRoT	ETD	2459635.372586	0.0006219618	R
ETD	2456584.860623	0.0004503138	CoRoT	ETD	2459635.373527	0.0003057812	R
ETD	2456630.700239	0.0003558430	CoRoT	ETD	2459636.465251	0.0003895106	R
ETD	2456639.433038	0.0005889406	CoRoT	ETD	2459647.379239	0.0003859405	CoRoT
ETD	2456641.608734	0.0009828584	CoRoT	ETD	2459659.383634	0.0004111139	R
ETD	2456722.372800	0.0008129106	R	ETD	2459958.433062	0.0003668692	CoRoT
ETD	2456734.383133	0.0011168902	CoRoT	ETD	2459970.441764	0.0004250645	CoRoT
ETD	2456734.389285	0.0006271824	V	ETD	2459994.448747	0.0004361697	CoRoT
ETD	2456963.582677	0.0005006056	CoRoT	ETD	2459981.354871	0.0006412504	CoRoT
ETD	2457033.433636	0.0002972191	V	ETD	2460317.510150	0.0005522557	r
ETD	2457069.449942	0.0004777427	CoRoT	ETD	2460317.506288	0.0004158315	R
ETD	2457092.369089	0.0005865246	R	ETD	2458863.743177	0.0005732204	CoRoT
ETD	2457344.487060	0.0005656189	CoRoT	ETD	2460674.403430	0.0007470274	i
ETD	2457345.579970	0.0004847193	CoRoT	ETD	2460678.762793	0.0012936689	CoRoT
ETD	2457357.585505	0.0005179041	CoRoT	TESS	2458844.096692	0.00049540361	I
ETD	2457357.587790	0.0005279786	CoRoT	TESS	2458845.187957	0.00048180112	I
ETD	2457368.499518	0.0006008010	CoRoT	TESS	2458846.279835	0.00048259208	I
ETD	2457368.499868	0.0004209166	CoRoT	TESS	2458847.370981	0.00048426449	I
ETD	2457369.589827	0.0003409101	CoRoT	TESS	2458848.462485	0.00046781794	I
ETD	2457426.342749	0.0005550436	CoRoT	TESS	2458849.553122	0.0004717019	I
ETD	2457474.364772	0.0005624765	CoRoT	TESS	2458850.645223	0.00045744376	I
ETD	2457474.365203	0.0004601975	CoRoT	TESS	2458851.736009	0.00050059869	I
ETD	2457668.637369	0.0007665793	CoRoT	TESS	2458852.828337	0.00041634711	I
ETD	2457726.484151	0.0005274304	R	TESS	2458853.919533	0.00046562619	I
ETD	2457750.494975	0.0003675462	CoRoT	TESS	2458858.284643	0.00055127472	I
ETD	2457751.587084	0.0005823540	CoRoT	TESS	2458859.377287	0.00050552209	I
ETD	2457757.043760	0.0003827669	R	TESS	2458860.468404	0.00044858376	I
ETD	2457760.317080	0.0005431414	CoRoT	TESS	2458861.558276	0.00046310746	I
ETD	2457761.409142	0.0005568517	CoRoT	TESS	2458862.650537	0.00048840382	I
ETD	2457774.506961	0.0005109979	CoRoT	TESS	2458863.742166	0.00053756448	I
ETD	2457809.431160	0.0005709554	CoRoT	TESS	2458864.834006	0.00043186085	I
ETD	2457832.350777	0.0005458487	CoRoT	TESS	2458865.924245	0.00042267147	I
ETD	2458096.474198	0.0005617323	CoRoT	TESS	2458867.016356	0.0005088068	I
ETD	2458396.617172	0.0006943350	CoRoT	TESS	2458868.107799	0.00047878919	I
ETD	2458455.556845	0.0009482127	R	TESS	2459476.027289	0.00044611349	I
ETD	2458489.387657	0.0011513425	CoRoT	TESS	2459477.118514	0.00046182277	I
ETD	2458501.392161	0.0002564787	R	TESS	2459478.209235	0.00048889969	I
ETD	2458513.401793	0.0007533295	R	TESS	2459479.301121	0.00043708329	I
ETD	2458537.406967	0.0005938874	R	TESS	2459480.392833	0.00045585344	I
ETD	2458883.388190	0.0004990226	CoRoT	TESS	2459481.483794	0.00046496648	I

EXOFAST model sonuçları: WASP-12b

Kaynak	BJD-TDB	σ	Filtre	Kaynak	BJD-TDB	σ	Filtre
TESS	2459482.574878	0.00048099246	I	TESS	2460240.018386	0.00041739254	I
TESS	2459483.667157	0.00044333311	I	TESS	2460241.109870	0.0004526567	I
TESS	2459484.758141	0.00045191458	I	TESS	2460242.201142	0.0004944535	I
TESS	2459488.033454	0.00047297004	I	TESS	2460243.292597	0.00044412954	I
TESS	2459489.123334	0.00048805679	I	TESS	2460244.383993	0.00047380533	I
TESS	2459490.215393	0.00041412175	I	TESS	2460245.475782	0.00054535677	I
TESS	2459491.306520	0.00045713561	I	TESS	2460249.842357	0.00049111154	I
TESS	2459492.398435	0.00042565278	I	TESS	2460250.932030	0.00042432534	I
TESS	2459493.489230	0.00043644263	I	TESS	2460252.023886	0.00041542082	I
TESS	2459494.581304	0.00046583763	I	TESS	2460253.116825	0.00052418321	I
TESS	2459495.672643	0.00045984243	I	TESS	2460254.206455	0.00045872072	I
TESS	2459496.764407	0.00047928386	I	TESS	2460255.297544	0.00042544523	I
TESS	2459497.855337	0.0004978744	I	TESS	2460256.390685	0.0004134317	I
TESS	2459502.220997	0.00041747023	I	TESS	2460257.481621	0.00051547046	I
TESS	2459503.312851	0.00044850912	I	TESS	2460258.572770	0.00045811296	I
TESS	2459504.403562	0.00042563671	I	TESS	2460262.937871	0.00047796852	I
TESS	2459505.494859	0.0005324653	I	TESS	2460264.029666	0.00043245227	I
TESS	2459506.586329	0.00046807366	I	TESS	2460265.121877	0.00041664387	I
TESS	2459507.678071	0.00047147983	I	TESS	2460266.211721	0.0004404956	I
TESS	2459508.769936	0.0004558675	I	TESS	2460267.303814	0.00043712973	I
TESS	2459509.860678	0.00045340335	I	TESS	2460268.395702	0.00038121873	I
TESS	2459510.952238	0.00049258687	I	TESS	2460269.486667	0.00044545245	I
TESS	2459514.225912	0.00048365134	I	TESS	2460270.577415	0.00043927119	I
TESS	2459515.317421	0.00050257145	I	TESS	2460271.668371	0.00044161248	I
TESS	2459516.409020	0.00047652264	I	TESS	2460272.760351	0.00042494132	I
TESS	2459517.501106	0.00053612959	I	TESS	2460276.035477	0.0004935771	I
TESS	2459518.592534	0.00047356141	I	TESS	2460277.126986	0.00044293288	I
TESS	2459519.682242	0.00051514981	I	TESS	2460278.218634	0.00042405644	I
TESS	2459520.775233	0.00043540286	I	TESS	2460280.400521	0.00043376779	I
TESS	2459521.866261	0.0004320403	I	TESS	2460281.493001	0.00039370559	I
TESS	2459522.957303	0.00046212504	I	TESS	2460282.584449	0.0004580108	I
TESS	2459524.049699	0.00042685725	I	TESS	2460283.674311	0.00040631451	I
TESS	2459526.232430	0.00051302815	I	TESS	2460284.765355	0.00040638347	I
TESS	2459527.323601	0.00044447508	I	Chan vd. (2011)	2454840.768775	0.00028818482	i
TESS	2459528.415230	0.00049101922	I	Chan vd. (2011)	2455172.561399	0.00012022449	V
TESS	2459529.506669	0.00050317911	I	Hebb vd. (2009)	2454508.976100	0.00020	CoRoT
TESS	2459530.598457	0.00049006501	I	Maciejewski vd. (2011)	2455230.406841	0.00012392723	R
TESS	2459531.689992	0.00046251739	I	Maciejewski vd. (2011)	2455254.419134	0.00027916520	R
TESS	2459532.780569	0.00044033805	I	Maciejewski vd. (2013)	2455920.185274	0.00025801119	R
TESS	2459533.872027	0.00045730201	I	Maciejewski vd. (2013)	2455566.563402	0.00011269846	R
TESS	2459534.964662	0.00041824334	I	Maciejewski vd. (2013)	2455600.398109	0.00013706603	R
TESS	2459536.054890	0.00046922117	I	Maciejewski vd. (2013)	2455601.489504	0.00015086379	R
TESS	2459537.146897	0.00043641757	I	Maciejewski vd. (2013)	2455876.528583	0.00015384862	R
TESS	2459540.420320	0.00047940023	I	Maciejewski vd. (2013)	2455946.378294	0.00018859365	R
TESS	2459541.511636	0.00041134368	I	Maciejewski vd. (2013)	2455947.469793	0.00016535669	R
TESS	2459542.604512	0.00045940793	I	Maciejewski vd. (2013)	2455948.561029	0.00017722940	R
TESS	2459543.695047	0.0004330709	I	Maciejewski vd. (2013)	2455970.389863	0.00012130445	R
TESS	2459544.785512	0.00045892702	I	Maciejewski vd. (2013)	2455971.481498	0.00015553004	R
TESS	2459545.877181	0.00043398382	I	Maciejewski vd. (2013)	2455982.395280	0.00014021010	R
TESS	2459546.968826	0.00043300059	I	Maciejewski vd. (2013)	2455983.486919	0.00014906743	R
TESS	2459548.060986	0.00051846544	I	Maciejewski vd. (2013)	2455215.129301	0.00030910288	R
TESS	2459549.152063	0.00042613561	I	Maciejewski vd. (2013)	2455601.489427	0.00033149730	R
TESS	2459550.243920	0.000526486	I	Maciejewski vd. (2013)	2455623.318728	0.00032883326	R
TESS	2460235.652888	0.00042675878	I	Maciejewski vd. (2013)	2455624.410064	0.00042879617	R
TESS	2460236.744433	0.00051847232	I	Maciejewski vd. (2013)	2455887.442454	0.00029176705	R
TESS	2460237.836588	0.00043878514	I	Maciejewski vd. (2013)	2455888.533592	0.00028435457	R
TESS	2460238.926814	0.00048250291	I	Maciejewski vd. (2013)	2455589.483693	0.00051321317	R

EXOFAST model sonuçları: WASP-12b (devam)

Kaynak	BJD-TDB	σ	Filtre	Cisim	Teleskop	BJD-TDB	σ
Maciejewski vd. (2013)	2455901.630580	0.00043826180	R	HATS-18	CDK20	2460439.606675	0.000820863
Maciejewski vd. (2013)	2455903.812656	0.00041878344	R	HATS-18	CDK20	2460460.553488	0.000861162
Maciejewski vd. (2013)	2455926.733860	0.00026968202	R	WASP-4	CDK20	2460509.737743	0.000382676
Maciejewski vd. (2013)	2455147.458742	0.00016429827	R	WASP-4	TRAPPIST	2460545.868861	0.000232086
Maciejewski vd. (2013)	2455238.046382	0.00037537338	R	WASP-4	CDK20	2460549.883470	0.000742105
Maciejewski vd. (2013)	2455888.533815	0.00014785658	R	WASP-4	TRAPPIST	2460549.883067	0.000233957
Maciejewski vd. (2013)	2455890.716409	0.00012269452	R	WASP-4	CDK20	2460505.722311	0.000875573
Maciejewski vd. (2013)	2455959.475603	0.00009267431	R	WASP-4	Danish 1.54m	2458681.712570	0.000227792
Maciejewski vd. (2013)	2455158.373545	0.00049723600	R	WASP-4	Danish 1.54m	2458689.742452	0.000129371
Maciejewski vd. (2013)	2455159.463211	0.00051404042	R	WASP-4	Danish 1.54m	2458693.756591	0.000129779
Maciejewski vd. (2013)	2455160.555478	0.00049569959	R	WASP-4	Danish 1.54m	2458697.770949	0.000150416
Maciejewski vd. (2013)	2455494.530530	0.00039893980	R	WASP-4	Danish 1.54m	2458701.786576	0.000115579
Maciejewski vd. (2013)	2455575.297265	0.00058434563	R	WASP-4	Danish 1.54m	2458705.801435	0.000100492
Maciejewski vd. (2013)	2455530.547926	0.00032309552	R	WASP-4	Danish 1.54m	2458709.815612	0.000245878
Maciejewski vd. (2013)	2455542.552971	0.00012302307	R	WASP-4	Danish 1.54m	2458713.830522	0.000133257
Maciejewski vd. (2013)	2455887.442302	0.00013739039	R	WASP-4	Danish 1.54m	2458717.845518	0.000129579
Maciejewski vd. (2013)	2455888.533573	0.00022610089	R	WASP-4	Danish 1.54m	2458721.860126	0.000104518
Maciejewski vd. (2013)	2455923.458675	0.00009861251	R	WASP-4	Danish 1.54m	2458725.874729	0.0000938
Maciejewski vd. (2013)	2456005.314798	0.00012105256	R	WASP-4	Danish 1.54m	2459433.799194	0.0000906
Maciejewski vd. (2013)	2455265.328194	0.00056569875	R	WASP-4	Danish 1.54m	2459472.607615	0.000165928
Maciejewski vd. (2013)	2455600.398111	0.00038617150	R	WASP-4	Danish 1.54m	2459480.637256	0.000150969
Maciejewski vd. (2013)	2455624.410713	0.00050219019	R	WASP-4	Danish 1.54m	2459484.651489	0.0000940
Maciejewski vd. (2013)	2455494.530259	0.00028051129	R	WASP-4	Danish 1.54m	2459492.681123	0.000157299
Maciejewski vd. (2013)	2455590.575584	0.00043619427	R	WASP-4	Danish 1.54m	2459500.710587	0.000156191
Maciejewski vd. (2013)	2455600.397770	0.00034089466	R	WASP-4	Danish 1.54m	2459504.724984	0.000115638
Maciejewski vd. (2013)	2455601.490822	0.00041502078	R	WASP-4	Danish 1.54m	2459844.635446	0.00011518
Maciejewski vd. (2013)	2455887.441771	0.00033159693	R	WASP-4	Danish 1.54m	2459864.709448	0.000169448
Maciejewski vd. (2013)	2456006.406709	0.00030541300	R	WASP-4	Danish 1.54m	2460161.796633	0.0000943
Collins vd. (2017)	2455140.908712	0.00038728857	r	WASP-4	Danish 1.54m	2460169.826054	0.0000701
Collins vd. (2017)	2455163.830024	0.00025947352	r	WASP-4	Danish 1.54m	2460173.840525	0.00010845
Collins vd. (2017)	2455210.761196	0.00031141580	g	WASP-4	Danish 1.54m	2460216.663735	0.0000954
Collins vd. (2017)	2455209.669269	0.00027154017	r	WASP-4	Danish 1.54m	2460517.765829	0.0000831
Collins vd. (2017)	2455509.809670	0.00030716553	r	WASP-4	Danish 1.54m	2460521.780196	0.000116337
Collins vd. (2017)	2455510.902563	0.00023184657	r	WASP-4	Danish 1.54m	2460580.662956	0.000135
Collins vd. (2017)	2455984.577531	0.00025781763	r	WASP-12	TUG T100	2460709.327472	0.000663685
Collins vd. (2017)	2455985.669190	0.00030176938	r	WASP-12	AUKR T80	2460745.343128	0.000350459
Collins vd. (2017)	2455996.584369	0.00031179239	r				
Collins vd. (2017)	2456249.794341	0.00025625452	r				
Collins vd. (2017)	2456273.805005	0.00025575108	r				
Collins vd. (2017)	2456284.718428	0.00027618179	r				
Collins vd. (2017)	2456297.815956	0.00026930189	r				
Collins vd. (2017)	2456319.643530	0.00034820665	r				
Collins vd. (2017)	2456607.778629	0.00042732300	V				
Collins vd. (2017)	2457012.694585	0.00043529942	r				
Collins vd. (2017)	2457059.627293	0.00044104412	r				
Collins vd. (2017)	2457060.718206	0.00032577952	r				
Collins vd. (2017)	2455603.672674	0.00028424353	r				
Collins vd. (2017)	2455903.814008	0.00023675420	I				
Collins vd. (2017)	2456654.709800	0.00030100412	r				
Collins vd. (2017)	2456677.630415	0.00029505565	r				
Collins vd. (2017)	2457023.608842	0.00049246658	r				
Sada vd. (2012)	2455498.896414	0.00113472380	z				
Adams vd. (2024)	2459880.943571	0.00066193114	R				
Adams vd. (2024)	2459974.803342	0.00062789601	R				
Alvarado vd. (2024)	2459616.819206	0.00038360850	R				

(sol) EXOFAST model sonuçları: WASP-12b (devam). (sağ) Bu tez çalışmasında yapılan gözlemler için EXOFAST model sonuçları

EK 3 Bu çalışmada kullanılan MESA kodu

Kullanılan `inlist` dosyası aşağıda sunulmuştur. Belirli bir yıldız modeli elde edilebilmesi amacıyla `initial_mass` ve `initial_z` parametreleri gerekli şekilde düzenlenmiş, ardından modelleme süreci yıldızın anakol evresinden ayrıldığı zamana denk gelecek şekilde, uygun bir zamanda manuel olarak sonlandırılmıştır.

```
&star_job

  create_pre_main_sequence_model = .true.
/ !End of star_job namelist

&controls

! starting specifications

  initial_mass = 1.0
  initial_z = 0.02d0
  MLT_option = 'Henyey'
  max_age = 5.0d10
  max_years_for_timestep = 1.0d8
  use_dedt_form_of_energy_eqn = .true.
  use_gold_tolerances = .true.
  mesh_delta_coeff = 0.3
  when_to_stop_rtol = 1d-6
  when_to_stop_atol = 1d-6
/ ! end of controls namelist
```