TÜBİTAK

Seçilmiş Ötegezegen Sistemlerinin Temel Parametrelerinin Yeniden Belirlenmesi

Program Kodu: 3001

Proje No: 116F350

Proje Yürütücüsü:
Doç. Dr. Özgür BAŞTÜRK

Araştırmacı:
Doç. Dr. Taner TANRIVERDİ

Bursiyerler:
Selçuk YALÇINKAYA
Burak KETEN

Mayıs 2019
ANKARA

ÖNSÖZ

Bilimin en önemli hedeflerinden biri evrende insanın yalnız olup olmadığını öğrenmektir. Antik çağlardan bugüne felsefe ve bilim bu sorunun cevabını arayagelmiştir. Günümüzde ulaşılan bilgi birikimi ve teknolojjk düzeyle ancak mümkün olan başka yıldızların etrafında da gezegen keşfetmiş olma başarısı, bilimin bu en önemli sorularından birine cevap bulmak konusunda araştırmacıları cesaretlendirmiştir.

Henüz sadece yaşam olduğundan emin olduğumuz tek yer olan Dünya'ya benzer koşullara sahip gezegenlerde hayat olabileceğini düşünsek ve bu noktadan hareket ederek Dünya'ya kütle ve yarıçapça benzer; Güneş-benzeri bir yıldızın etrafında, üzerinde sıvı suyun varolabileceği koşullara sahip bir gezegen arıyor olsak da, bu türden sadece birkaç gezegen keşfedilmiş durumda ve bunların da atmosfer barındırıp barındırmadıkları dahi bilinmiyor. Ancak bu sırada, bilimin bir başka önemli sorusuna cevap bulmaya yaklaşmış olabiliriz: "Güneş Sistemimiz ve diğer yıldızların etrafındaki gezegen sistemleri nasıl oluştular ve bugünkü hallerine zaman içinde nasıl evrildiler?

Bulunma kolaylıkları nedeniyle keşfedilen ötegezegenlerin önemli bir bölümünü teşkil eden, yıldızlarına yakın ve bu nedenle sıcak, dev gaz gezegenlerin varlığı bu sorunun cevaplanmasının önündeki en önemli sorunlardan biri olarak durmaktadır. Bu gezegenler bulundukları yerlerde oluşmuş olabilirler mi ya da bulundukları yerlerde oluşmadılarsa, yıldızlarına bu kadar yakın konumlara nasıl geldiler? Yıldızlarına bu kadar yakınken kalın atmosferlerini nasıl muhafaza ettiler? Bu sorulara geniş bir örnek uzayı üzerinden cevap vermeden önce yapılması gereken öncelikle bu örnek uzayını yanlılıklardan arındırılmış ve parametreleri doğru belirlenmiş örneklerden oluşan bir örnek uzayı haline getirmektir. Bu projenin motivasyonu bu çabaya, hedef olarak seçilen ötegezegenlerin parametrelerinin yüksek duyarlılıkla belirlenmesiyle katkı sunmak ve gökbilimin en hızlı gelişen bu alanında genç Türk araştırmacı adaylarının uzmanlık kazanmalarını sağlamaktır.

15 Mart 2017 – 15 Mart 2019 tarihleri arasında 24 ay süreyle 2 araştırmacı ve yüksek lisans tezlerini bu alanda sürdüren 2 bursiyer öğrencinin yoğun çalışmasıyla sürdürülen 116F350 numaralı bu TÜBİTAK-3001 Başlangıç Araştırma-Geliştirme Projesi, işbu sonuç raporuyla sona ermektedir. Projeden elde edilen birikim 24 ay süresince proje kapsamında bursiyer olarak TÜBİTAK tarafından desteklenen yüksek lisans öğrencilerinin yüksek lisans tezlerin altyapısını teşkil etmiş, 3 uluslararası, 2 ulusal toplantı yayınının yanı sıra proje ekibi tarafından Science Citation Index (SCI) kapsamında taranan saygın bilimsel dergilere gönderilmek üzere hazırlanan yayınlara da aktarılmıştır. TÜBİTAK'a projemize verdiği destek için teşekkürü bir borç biliriz.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ i

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ iv

ŞEKİLLER DİZİNİ vii

TABLOLAR DİZİNİ xi

ÖZET xii

ABSTRACT xiv

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ÖZETİ 5

2.1. HAT-P-19b Ötegezegenine İlişkin Literatür Özeti 8

2.2. WASP-52b Ötegezegenine İlişkin Literatür Özeti 10

2.3. XO-3b Ötegezegenine İlişkin Literatür Özeti 14

2.4. HAT-P-20b Ötegezegenine İlişkin Literatür Özeti 19

3. GEREÇ ve YÖNTEM 25

3.1. Fotometrik Gözlemler ve Işık Eğrilerinin Oluşturulması 25

3.1.1. Odak-dışı Fotometrik Gözlemler 26

3.1.2. Fotometrik Gözlemlerin Önindirgemesi ve Normalizasyonu 27

3.1.3. Fotometrik Analiz Yöntemi ve Işık Eğrilerinin Modellenmesi 31

3.2. Tayfsal Gözlemler ve Tayfların Analize Hazır Hale Getirilmesi 35

3.2.1. HAT-P-19'un Tayfsal Gözlemleri 35

3.2.2. WASP-52'nin Tayfsal Gözlemleri 36

3.2.3. XO-3'ün Tayfsal Gözlemleri 37

3.2.4. HAT-P-20'nin Tayfsal Gözlemleri 37

3.2.5. Tayfların Süreklilik Seviyesine Normalizasyonu 40

3.2.6. Tayfların Analize Hazır Hale Getirilmesi 45

3.3. Tayfsal Analiz Yöntemi 46

3.3.1. Tayflardaki Hız Alanlarının Belirlenmesi 46

3.3.2. Yüzey Çekim İvmesi (log g) Hesabı 50

3.3.3. Etkin Sıcaklık (Tetkin) ve Metal Bolluğu ([Fe / H]) Hesabı 53

4. BULGULAR 54

4.1. Tayfsal Analiz Bulguları 54

4.1.1. Tayfsal Uyumlamaların Başarısı 57

4.1.2. Bazı Elementlerin Kimyasal Bollukları 68

4.2. Bütün Verinin Birlikte Modellenmesi (ing. Global Modeling) 69

4.2.1. HAT-P-19b Modeli 71

4.2.2. WASP-52b Modeli 75

4.2.3. HAT-P-20b Modeli 79

4.2.4. XO-3b Modeli 83

5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA 88

5.1. HAT-P-19 Sistemi 88

5.2. WASP-52 Sistemi 93

5.3. HAT-P-20 Sistemi 98

5.4. XO-3 Sistemi 100

5.5. Yorumlar ve Öneriler 104

5.6. Proje Çıktıları 109

6. KAYNAKLAR 111

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

δ	Geçiş derinliği
λ	Dalgaboyu
ρ_*	Yıldızın ortalama yoğunluğu
ρ_p	Gezegenin ortalama yoğunluğu
σ	Standart sapma
τ	Geçiş profiline giriş (ingress) ve çıkış (egress) zamanları
ω	Enberinin boylamı
a	Yörünge yarı-büyük eksen uzunluğu
AB	Astronomi Birimi 1.496×10^8 km (Yer-Güneş arası ortalama uzaklık)
A_v	V bandı sönümleme katsayısı
B	Bessel B bandı parlaklığı
b	Etki parametresi
BJD	Güneş sisteminin kütle merkezine indirgenmiş Julyen günü
BJD-TDB	Güneş sisteminin kütle merkezine indirgenmiş dinamik Julyen günü
d	Uzaklık (parsek)
E	Dışmerkezli anomali
e	Yörünge dışmerkezliği
EW	Eşdeğer genişlik
FWHM	Yarı yükseklikteki tam genişlik
G	Evrensel çekim sabiti, $6{,}67259\ 10^{-11}$ N $m^2 kg^{-2}$
Gyr	Milyar yıl (gigayıl)
gSDSS	SDSS g bandı parlaklığı
H2M	2MASS H bandı parlaklığı
HIRES	High Resolution Echelle Spectrometer tayfçekeri
HJD	Güneş merkezine indirgenmiş Jülyen günü
IDL	Veri analizi için özelleştirilmiş bir programlama dili (ing. Interactive Data Language)
I	Bessel I bandı parlaklığı
i	Bir gezegen ya da çift yıldız bileşenin yörünge eğim açısı
iSDSS	SDSS i bandı parlaklığı
JD	Jülyen günü
J2M	2MASS J bandı parlaklığı

K	Kelvin
K	Dikine hız yarı genliği
k	Gezegenin yıldız yarıçapına oranı (R_p / R_*)
K2M	2MASS K bandı parlaklığı
log *g*	Yüzey çekim ivmesi
log R'_{HK}	Bir manyetik etkinlik belirteci
log A	Kimyasal bolluk
L	Yıldızın ışınım gücü
M_J	Jüpiter kütlesi, 1.8986 x 1030 g veya 0.0009546 M□
$M_\oplus$	Yer kütlesi (5.9742 x 1027 g)
$M_\odot$	Güneş kütlesi (1.99 x 1033 g)
M_p	Gezegenin kütlesi
$M_p$sini	Minimum kütle
M_*	Yıldızın Kütlesi
m	Parametre olarak görünen parlaklık, birim larak kadir (parlaklık birimi)
mmag	milikadir (1 kadir parlaklığın binde biri)
m/s	metre/saniye
m_V	Görünen görsel parlaklık
M_p / M_*	Gezegen-Yıldız kütle oranı
P	Yörünge dönemi
P_{rot}	Dönme dönemi
R	Bessel R bandı parlaklığı
R	Yarıçap
R	Tayfsal çözünürlük
RV	Dikine hız
rms	Ortalama karekök
rSDSS	SDSS r bandı parlaklığı
$R_\odot$	Güneş yarıçapı, 6.96 x 10^5 km
R_*	Yıldızın yarıçapı ($R_\odot$)
R_p	Gezegen yarıçapı
R_p / R_*	Gezegen-Yıldız yarıçap oranı
SED	Tayfsal Enerji Dağılımı (ing. Spectral Energy Distribution)

SOPHIE	Spectrographe pour l'Observation des Phénomènes des Intérieurs stellaires et des Exoplanètes
S/N	Sinyal/Gürültü oranı
T_{etkin}	Etkin sıcaklık
T_o	Geçiş ortası zamanı
T_{cond}	Yoğunlaşma sıcaklığı
T_{denge}	Gezegenin eşdeğer sıcaklığı
TUG	Tübitak Ulusal Gözlemevi
T100	1 metre birincil ayna çaplı Türk teleskobu
T_{14}	Toplam geçiş süresi
UT	Evrensel zaman
uSDSS	SDSS u bandı parlaklığı
VALD	Viyana Atomik Çizgi Veritabanı
V	Bessel V bandı parlaklığı
WISE1	WISE1 parlaklığı
WISE2	WISE2 parlaklığı
WISE3	WISE3 parlaklığı
WISE4	WISE4 parlaklığı
[Fe/H]	Metal bolluğu
$[Fe/H]_0$	Başlangıç metal bolluğu değeri

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Kepler ve CoRoT Uzay Teleskoplarıyla keşfedilen ötegezgenlerin barınak yıldızlarının V bandı görsel parlaklıkları histogramı……..…….6

Şekil 2.2. Güneş ve benzeri yıldızların metal bolluklarının yoğunlaşma sıcaklığı ile ilişkisi.....7

Şekil 2.3. HAT-P-19'un fotometrik takip gözlemleri sonucu elde edilen ışık eğrileri ve uyumlanan modeller……10

Şekil 2.4. WASP-52'nin geçiş ışk eğrisi, dikine hız gözlemleri ve modellerden artıklar (H13)..13

Şekil 2.5. XO-3 yıldızının takip gözlemleri ile elde edilmiş geçiş ışık eğrisi……..…….15

Şekil 2.6. XO-3 dikine hız gözlemleri ve uygulanan en iyi uyumlama ile artıkları…..……..16

Şekil 2.7. XO-3b'nin FLWO Teleskobu z bandı geçiş gözlemleri……..……..16

Şekil 2.8. Teibe teleskobu kullanılarak yapılmış XO-3b geçiş gözlemi……17

Şekil 2.9. HAT-P-20'nin FLWO teleksobu ile elde edilen geçiş ışık eğrisi ve modeli……..19

Şekil 2.10. HAT-P-20'nin Keck / HIRES dikine hız gözlemleri ve yörünge uyumlaması……....21

Şekil 2.11. HAT-P-20b Asiago geçiş gözlemleri……..21

Şekil 2.12. HAT-P-20b'nin geçiş zamanları değişimi (TTV) diyagramı……..……..22

Şekil 2.13. HAT-P-20'nin fotometrik gözlemleri ve literatürden elde edilen ışık eğrileri ..……..23

Şekil 2.14. HAT-P-20'nin geçiş ortası zamanlarının değişimi (TTV) diyagramı……..23

Şekil 2.15. HAT-P-20b'nin iki farklı teleskopla elde edilen geçiş ışık eğrileri……..…….24

Şekil 3.1. HAT-P-19'un içinde bulunduğu T100 tarafından gözlenen alan……..……....28

Şekil 3.2. HAT-P-19b'nin parametre belirlemek üzere kullanılan T100 geçiş ışık eğrileri…….28

Şekil 3.3. HAT-P-19b'nin parametre belirlemek üzere kullanılmayan T100 geçiş ışık eğrileri..29

Şekil 3.4. WASP-52'nin içinde bulunduğu T100 tarafından gözlenen alan……..…29

Şekil 3.5. WASP-52b'nin tamami modellemede kullanılan T100 geçiş ışık eğrileri……30

Şekil 3.6. XO-3'ün içinde bulunduğu T100 tarafından gözlenen alan……...30

Şekil 3.7. XO-3'ün T100 geçiş gözlemleri……31

Şekil 3.8. HAT-P-20'nin içinde bulunduğu T100 tarafından gözlenen alan……..……31

Şekil 3.9. HAT-P-20'nin T100 geçiş gözlemleri……32

Şekil 3.10. Geçiş geometrisi……...33

Şekil 3.11. HAT-P-19'un Keck / HIRES arşiv tayfı……...38

Şekil 3.12. WASP-52'nin SOPHIE arşiv tayfı……..……38

Şekil 3.13. XO-3'ün Keck/HIRES arşiv tayfı……39

Şekil 3.14. XO-3'ün SOPHIE arşiv tayfı…… ……...39

Şekil 3.15. HAT-P-20 analizleri için kullanılan Keck-HIRES tayfı……40

Şekil 3.16. HAT-P-19'un arşivden çekilmiş tayfının rastgele seçilmiş bir basamağı……..40

Şekil 3.17. WASP-52'nin arşivden çekilmiş ham tayfı……41

Şekil 3.18. WASP-52 tayfında sürekliliği belirlemek için kullanılan sentetik tayf……42

Şekil 3.19. HAT-P-19'un normalize tayfı……..42

Şekil 3.20. WASP-52'nin farklı bir dalgaboyu aralığındaki normalize tayfı……..43

Şekil 3.21. XO-3 SOPHIE tayfının normalizasyon öncesi ve sonrası karşılaştırması……43

Şekil 3.22. HAT-P-20'nin Keck tayfının normalizasyon öncesi ve sonrası karşılaştırması…..44

Şekil 3.23. HAT-P-20 yıldızının sentetik tayfa göre uzay hızının belirlenerek çıkarılması……45

Şekil 3.24. HAT-P-19'un tayflarının normalizasyon ve tellürik çizgi çıkarma işlemleri öncesi ve sonrası karşılaştırması……46

Şekil 3.25. Tüm çizgiler kullanılarak elde edilen T_{etkin} değerinin blend çizgiler elenerek elde edilen değerle ile karşılaştırılması……..…….……..49

Şekil 3.26. Eşdeğer genişliğe (EW) karşılık bolluk (log A) değerleri arasındaki korelasyon…50

Şekil 3.27. Yüzey çekim ivmesi dıışındaki parametreleri aynı üç farklı sentetik tayfın karşılaştırması……52

Şekil 4.1. HAT-P-19'un gözlemsel tayfına yapılan en iyi sentetik tayf uyumlaması -1……58

Şekil 4.2. HAT-P-19'un gözlemsel tayfına yapılan en iyi sentetik tayf uyumlaması -2..……59

Şekil 4.3 HAT-P-19'un gözlemsel tayfına yapılan en iyi sentetik tayf uyumlaması -3……60

Şekil 4.4. WASP-52'nin gözlemsel tayfına yapılan en iyi sentetik tayf uyumlaması - 1…….61

Şekil 4.5. WASP-52'nin gözlemsel tayfına yapılan en iyi sentetik tayf uyumlaması – 2…..…61

Şekil 4.6. WASP-52'nin gözlemsel tayfına yapılan en iyi sentetik tayf uyumlaması – 3…..…62

Şekil 4.7. XO-3'ün gözlemsel tayfına yapılan en iyi sentetik tayf uyumlaması – 1…….……63

Şekil 4.8. XO-3'ün gözlemsel tayfına yapılan en iyi sentetik tayf uyumlaması – 2……..64

Şekil 4.9. XO-3'ün gözlemsel tayfına yapılan en iyi sentetik tayf uyumlaması – 3……..65

Şekil 4.10. HAT-P-20'nin gözlemsel tayfına yapılan en iyi sentetik tayf uyumlaması – 1...…….66

Şekil 4.11. HAT-P-20'nin gözlemsel tayfına yapılan en iyi sentetik tayf uyumlaması – 2...…….67

Şekil 4.12. HAT-P-19'un farklı gecelerdeki ışık eğrilerinin modelleri ……...71

Şekil 4.13. HAT-P-19'un tüm ışık eğrisi ve modellerinin üstüste çizdirilmiş hali……..72

Şekil 4.14. HAT-P-19'un çeşitli dalgaboylarındaki parlaklıklarına yapılan SED modeli…..……...72

Şekil 4.15. MIST eş yaş eğrileri ile HAT-P-19 yıldızının yaş hesabı……74

Şekil 4.16. HAT-P-19 sistem parametrelerinin kovaryanslarını gösteren köşe grafiği…...……75

Şekil 4.17. WASP-52'nin farklı gecelerdeki ışık eğrilerinin modelleri ……...76

Şekil 4.18. WASP-52'nin çeşitli dalgaboylarındaki parlaklıklarına yapılan SED modeli……....78

Şekil 4.19. MIST eş yaş eğrileri ile WASP-52 yıldızının yaş hesabı……78

Şekil 4.20. WASP-52 sistem parametrelerinin kovaryanslarını gösteren köşe grafiği…...……79

Şekil 4.21. HAT-P-20'nin farklı gecelerdeki ışık eğrilerinin modelleri ……..80

Şekil 4.22. HAT-P-20'nin tüm ışık eğrisi ve modellerinin üstüste çizdirilmiş hali……..……..80

Şekil 4.23. HAT-P-20'nin çeşitli dalgaboylarındaki parlaklıklarına yapılan SED modeli…..…..81

Şekil 4.24. MIST eş yaş eğrileri ile HAT-P-20 yıldızının yaş hesabı……81

Şekil 4.25. HAT-P-20 sistem parametrelerinin kovaryanslarını gösteren köşe grafiği…...……83

Şekil 4.26. XO-3'ün farklı gecelerdeki ışık eğrilerinin modelleri ……..……..84

Şekil 4.27. XO-3'ün tüm ışık eğrisi ve modellerinin üstüste çizdirilmiş hali……...…….84

Şekil 4.28. XO-3'ün çeşitli dalgaboylarındaki parlaklıklarına yapılan SED modeli……..85

Şekil 4.29. MIST eş yaş eğrileri ile XO-3 yıldızının yaş hesabı……85

Şekil 4.30. XO-3 sistem parametrelerinin kovaryanslarını gösteren köşe grafiği…...……87

Şekil 5.1. HAT-P-19 için yaş parametrisinin ardıl olasılık dağılımı……91

Şekil 5.2. HAT-P-19 için yıldız kütlesinin ardıl olasılık dağılımı……91

Şekil 5.3. HAT-P-19b gezegen kütlesinin ardıl olasılık dağılımı……92

Şekil 5.4. Bazı elementler için kimyasal bolluk, gezegen barındırma potansiyeli ilişkisi……92

Şekil 5.5. WASP-52 yıldızı için yaş parametrisinin ardıl olasılık dağılımı……96

Şekil 5.6. WASP-52b gezegeni için yarıçapın ardıl olasılık dağılımı……..97

Şekil 5.7. WASP-52b gezegeni için ortalama yoğunluğun ardıl olasılık dağılımı……..97

Şekil 5.8. HAT-P-20b ötegezegeni için ortalama yoğunuğun ardıl olasılık dağılımı…….100

Şekil 5.9. XO-3b gezegeni için yoğunluğun ardıl olasılık dağılımı……..103

Şekil 5.10. XO-3b gezegeni için kütlenin ardıl olasılık dağılımı……..103

Şekil 5.11. XO-3 yıldızı için yaşın ardıl olasılık dağılımı……103

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. WASP-52 sisteminin parametreleri……12

Tablo 2.2. Üç ayrı çalışmada verilen XO-3b gezegen ve yörünge parametreleri……..17

Tablo 2.3. XO-3 yıldızının üç ayrı çalışma tarafından elde edilen atmosfer parametreleri…..18

Tablo 2.4. HAT-P-20 yıldızının parametreleri……..20

Tablo 2.5. HAT-P-20b için üç ayrı çalışmada gezegen ve yörünge parametreleri……24

Tablo 3.1. Fotometrik gözlemlerin özeti……25

Tablo 3.2. Proje yıldızlarının tayf arşivlerinde erişilen yüksek çözünürlüklü tayfları……36

Tablo 3.3. Yıldızların atmosfer parametrelerini hesaplamak için kullanılan tayflar……37

Tablo 3.4. HAT-P-19'un farklı kalibrasyonlarla hesaplanan makrotürbülans değerleri……..47

Tablo 3.5. Tayfta blend çizgiler ile tüm çizgilerin kullanmasıyla elde edilen parametreler arası farklar……49

Tablo 4.1. HAT-P-19 Yıldızının Temel Atmosfer Parametreleri……55

Tablo 4.2. WASP-52 Yıldızının Temel Atmosfer Parametreleri……55

Tablo 4.3. XO-3 Yıldızının Temel Atmosfer Parametreleri……56

Tablo 4.4. HAT-P-20 Yıldızının Temel Atmosfer Parametreleri……57

Tablo 4.5. Proje yıldızları için bazı elementlerin kimyasal bolluk değerleri……68

Tablo 4.6. Proje yıldızlarının farklı filtrelerdeki parlaklık değerleri……69

Tablo 4.7. HAT-P-19'un global modelinden elde edilen parametreleri……73

Tablo 4.8. WASP-52'nin global modelinden elde edilen parametreleri……..…..77

Tablo 4.9. HAT-P-20'nin global modelinden elde edilen parametreleri……..……82

Tablo 4.10. XO-3'ün global modelinden elde edilen parametreleri……..……..86

Tablo 5.1. HAT-P-19'un en önemli parametrelerinin literatürle karşılaştırılması……90

Tablo 5.2. WASP-52'nin en önemli parametrelerinin literatürle karşılaştırılması……95

Tablo 5.3. HAT-P-20'nin en önemli parametrelerinin literatürle karşılaştırılması……99

Tablo 5.4. XO-3'ün en önemli parametrelerinin literatürle karşılaştırılması……..101

Tablo 5.5. Proje çıktı bilgileri……109

ÖZET

1990'ların başında Güneş'ten başka yıldızların etrafında ilk gezegenlerin keşfedilmesiyle (Wolszczan ve Frail 1992, Mayor ve Queloz 1995) başlayan ötegezegen çalışmaları çok kısa sürede kamuoyları ve bilim çevrelerinin de ilgisiyle astronominin en çok yatırım yapılan, uluslararası rekabetin de en üst düzeyde yaşandığı, en aktif çalışma alanlarından biri haline gelmiştir. Ötegezegen çalışmalarının bugünkü en temel motivasyonlarından biri gezegen sistemlerinin nasıl oluştuğunu anlamak ve bugüne kadar keşfedilen ötegezegenlerle, gezegen sistemi oluşum kuramlarının öngördükleri arasında ortaya çıkan aykırılıkları açıklamaktır. Son yirmibeş yılda keşfedilmiş olan ve sayıları 4000'i aşan ötegezegenlerin (http://exoplanet.eu) çeşitliliği (kütle, yarıçap, yörünge büyüklük, eğim, dönem ve dış merkezlilikleri) oldukça şaşırtıcıdır. Özellikle yıldızına çok yakın, kısa yörünge dönemli, bulundukları yörüngede oluşması beklenmeyecek dev gaz gezegenler, (sıcak Jüpiter ve Satürn türü gezegenler), mevcut gezegen oluşum kuramları (merkezi yığılma kuramı: Pollack vd. 1996, disk kararsızlığı kuramı: Boss 1997) temelinde bütünsel bir yaklaşımla ele alınamamış cisimlerdir.

Oluşum kuramlarının gözlemsel testi, farklı türlerden çok sayıda ötegezegen keşfi ile örnek uzayının genişletilmesi sonucunda mümkündür. Yapılacak istatistiksel değerlendirmeler ancak o zaman sağlıklı olacaktır. Bu nedenle ötegezegen keşfine yönelik çalışmalar tüm hızıyla sürmekte, yer ve uzay tabanlı arama çalışmaları için büyük yatırımlar yapılmaktadır. Her bir keşfin istatiksel katkısı hem yer benzeri bir gezegen bulmak, hem de gezegen çeşitliliğinin nedenlerini anlamak ve oluşum kuramlarını güncellemek açısından büyük önem taşımaktadır. Keşfedilen gezegenlerin parametrelerini (kütle, çap, yörünge elemanları) doğru belirleyerek literatüre sunmak bu bağlamda kritik önem arz etmektedir. Zira doğru belirlenmemiş, hata payı yüksek parametrelere dayandırılacak değerlendirmeler de eksik ya da yanlış olacaktır. HAT-Net (Bakos vd. 2004), Super-WASP (Pollacco vd. 2006), XO (McCullough vd. 2004), TrES (Alonso vd. 2004), KELT (Pepper vd. 2004), Qatar (Alsubai vd. 2013) gibi geçiş tekniğiyle ötegezegen arayan yer tabanlı araştırmalarla keşfedilen gezegenlerin keşiflerinden, duyurulmalarına kadar geçen kısa süre içerisinde yeterli sayı ve duyarlılıkta geçiş ışık eğrilerinin elde edilmesi ve ayrıntılı tayfsal analizlerinin gerçekleştirilmesi mümkün olamayabilmektedir. Ayrıca keşif duyurularının yapıldığı makalelerde barınak yıldıza (ing. host star) ilişkin mutlak parametrelere ulaşmak üzere başvurulan modeller de zaman içerisinde güncellenmekte ve yeni üretilen modellerde yıldızın dönmesi, metal bolluğu, manyetik etkinliği gibi pek çok özelliği daha gerçekçi bir biçimde yerini almaktadır (Ekström vd. 2012, Mowlavi vd. 2012, Choi vd. 2016).

Bu amaç ve hedefler doğrultusunda seçilen HAT-P-19b, WASP-52b, XO-3b ve HAT-P-20b ötegezegenlerin yüksek duyarlılıklı geçiş ışık eğrileri TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'ndeki T100 teleskobunda, bu proje kapsamında sürdürülen "Ötegezegen geçişi kaynaklı ışık değişimlerinin yüksek duyarlılıklı ölçümü" başlıklı gözlem projelerinde elde edilmiştir. Bu gözlemlerde istenen ışık ölçüm duyarlılığına ulaşabilmek üzere teleskobun odak-dışı çalıştırılması tekniği (ing. defocusing technique, Southworth vd. 2009, Baştürk vd. 2015) takip edilmiş, bu şekilde milikadir ve altı düzeyde (rms ≤ 0.001 mag) bir duyarlılığa inmek mümkün olmuştur. Duyarlı ışık ölçüm gözlemleri gezegen ile önünden geçiş yaptığı barınak yıldızının göreli büyüklüklerinin yüksek duyarlılıkla hesaplanmasını sağlamaktadır. Mutlak büyüklüklere geçmek için ise dikine hız gözlemlerine ve barınak yıldıza ilişkin parametrelere ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu proje için seçilen ötegezegenlerin dikine hız gözlemleri literatürde mevcuttur. Ancak barınak yıldıza ilişkin atmosfer parametrelerini (etkin sıcaklık, ışınım gücü) ve bu parametreler ile modern yıldız evrim modellerini kullanarak yıldıza ilişkin mutlak parametreleri (kütle, yarıçap, yüzey çekim ivmesi) elde etmek üzere söz konusu sistemlerin yüksek çözünürlük ve sinyal/gürültü oranına sahip, açık veritabanlarında yer alan arşiv tayfsal verilerinin ayrıntılı analizi bu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak bu proje bağlamında seçilen ötegezegenlere ilişkin parametreler ışık eğrilerinin, gezegen kaynaklı dikine hız değişiminin yarı genliğinin, tayfsal analizler sonucu elde edilen temel atmosfer parametrelerinin ve yıldızların tayfsal enerji dağılımlarının birlikte analiziyle elde edilmiştir. Fotometrik ve spektroskopik gözlemleri kaliteli ve yeterli sayıda olan HAT-P-19, HAT-P-20 ve WASP-52 yıldızlarına kütle çekimle bağlı sıcak Jüpiter ve Satürn türü ötegezegenlerin parametreleri yüksek bir duyarlılıkla, çözümlerde yerel minimumlara sıkışmadan global bir minimuma yakınsamayı sağlayan modern istatistiksel tekniklerin (Monte-Carlo Markov Chain, MCMC) ve tüm verinin birlikte bu bağlamda analizini sağlayan modern bilgisayar kodları (Exofast-v2, Eastmann 2017 ve kendi geliştirdiğimiz yardımcı kodlar) kullanılarak hesap edilmiştir. Çalışmadan elde ettiğimiz tecrübeyle ve yüksek hesap gücü sağlayan süper bilgisayarların yardımıyla, iterasyon ve bağımsız zincir sayısını arttırarak ve daha kompleks algoritmalar (ing. parallel tempering gibi) kullanarak duyarlılığı daha da arttırma konusundaki çalışmalarımız sürmektedir. XO-3 yıldızına ilişkin analizlerimiz ise şu ana kadar üzerinde çalıştığımız tayflarda karşılaştığımız problemler nedeniyle yıldız parametrelerini türetmekte başarısız olmuş durumdadır. Bu nedenle bu yıldıza bağlı ötegezegen parametrelerinin belirlenmesinde literatürde yapılmış çalışmalarla belirlenen yıldız parametreleri (Tsantaki vd. 2014) esas alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: yıldızlar: temel parametreler, ötegezegenler, geçiş, odak dışı ışık ölçüm

ABSTRACT

Exoplanet studies have become a major field of research in astronomy shortly after the first discoveries of planets orbiting stars other than the Sun in the early nineties (Wolszczan & Frail 1992, Mayor & Queloz 1995), arousing considerable public and scientific interest, which lead to a high-level international competition and significant investment. One of the fundamental motivations of these efforts is to understand how planetary systems form and to explain the discrepancies between the properties of the observed exoplanets and the ones that the current theories predict. The diversity of exoplanet systems, numbers of which exceeded 4000 in last twenty five years since the discovery of the first, is surprising in terms of planetary masses, radii, semi-major axes, orbital inclinations, periods and eccentries. In particular, planets with very short orbital periods (hot Jupiters and Saturns) cannot be explained in the framework of current planet formation theories (for core accretion mechanism see Pollack et al. 1996, for disk instability theory see Boss 1997) consistently.

The observational test of planet formation theories is only possible with the discoveries of many planets with diverse properties forming a large sample space. Hence the efforts towards the discovery of planets have been going on from the space and the ground with sophisticated instruments, for which there has been significant investment. The statistical contribution of each planet matters in this regard in finding Earth-size planets, understanding the diversity of planetary systems, and updating our formation theories. The accuracy and precision of the parameters (masses, radii, orbital elements) of discovered planets are crucial because statistical inferences depending on inaccurate and/or imprecise parameters would be misleading and unsatisfactory. Obtaining transit light curves with sufficient numbers and precision and performing detailed spectroscopic analyses are not always possible in the short time between the discovery of new exoplanets and the announcement of them for ground-based surveys, such as HAT-Net (Bakos et al. 2008), Super-WASP (Collier-Cameron et al.2007), XO (McCullough et al. 2006), TrES (Alonso et al. 2004), Qatar (Alsubai et al. 2011), and KELT (Pepper et al. 2004). In addition, stellar models used in discovery papers to derive the absolute parameters of host stars are updated continuously, and the effects of stellar rotation, metallicity, and magnetic activity are being included more and more realistically in these models (Ekström et al. 2012, Mowlavi et al. 2012, Choi et al. 2016).

From this perspective, we aimed at deriving the fundamental parameters of four exoplanets, HAT-P-19b, WASP-52b, XO-3b, and HAT-P-20b. We have obtained precise transit light curves of these plaents with the 1 m Turkish telescope, T100, located in TÜBİTAK National Observatory of Turkey (TUG) within a number of observational projects under the title “Precise Observations of Exoplanet Transits”.

We made use of the well-established telescope defocusing technique (Southworth et al. 2009, Baştürk et al. 2015) to achieve the required precision in this kind of work and reached sub-milimagnitude precision (RMS < 0.001 mag) in most of our successful observations. Precise photometric observations of the transits are used in computing the relative sizes of the planets with respect to their host stars, i.e. the ratio of the radii of the planet-star duo. In order to derive the absolute parameters, radial velocity observations and accurate stellar parameters are needed.

Precise radial velocity measurements have already been published for the systems in our sample, and hence there are high resolution and high Signal-to-Noise spectra in public archives. However, further spectroscopic analyses are required to determine the atmospheric parameters (effective temperatures, luminosities) of the host stars, and to derive their absolute physical parameters, e.g. masses, radii, surface gravities by making use of modern stellar evolution models. We analysed the existing high-quality spectra of these systems in the archives of the used facilities to derive the fundamental atmospheric parameters of the stars, hosting the planets that we studied within this project.

Consequently, transit light curves of the targets have been analysed, together with the semi-amplitude of the radial velocity induced by the orbital motions of the planets, atmospheric parameters of the host stars, and their spectral energy distributions to derive the parameters of the selected exoplanets. We have obtained these parameters in high precision for HAT-P-19b, HAT-P-20b, and WASP-52, for which we had sufficient number of high-quality photometric and spectroscopic observations. In our solutions, we employed Monte-Carlo Markov Chains (MCMC) to randomly select a set of parameter values for the prior distributions of these parameters that we have provided based on our preliminary analyses based on least square minimization algorithm, and to converge global solutions by avoiding local minima in the parameter space. We have made use of a state-of-the-art computer program (Exofast-v2, Eastmann 2017), which enabled us to analyse our data within this perspective and provided the posterior probability distributions of the parameters of the solutions. From the experienced we accumulated within this project, we continue our work to increase the precision of our solutions by allocating super-computer facilities in order to increase the number of iterations, threads, and independent chains as well as to employ more complicated algorithms such as parallel tempering, which require high efficiency computing. Our spectroscopic analyses for XO-3 failed due to the low-quality of the spectra that we had access to, which is why we have made use of the atmospheric parameters previously determined by other authors (Tsantaki et al. 2014) in the literature.

Keywords: stars: fundamental parameters, exoplanets, transits, defocused photometry

1. GİRİŞ

Ötegezegen keşfi (Mayor ve Queloz 1995), 20. yüzyıl gözlemsel astronomisinin ulaştığı en büyük başarılarından biridir. Bugüne kadar sayıları 4000'i aşan gezegen keşfi yapıldı (The Extrasolar Planets Encyclopedia: http://exoplanet.eu). Yaklaşık 25 yıl süren bu çabalar bizi artık keşfedilen gezegenler üzerinden istatistiksel değerlendirmeler, çıkarımlar, popülasyon sentezleri ve genellemeler yapma noktasına getirdi (Ida & Lin 2004a,b, 2005, 2008a, 2008b, 2010, Thommes vd. 2008, Mordasini vd. 2009a,b, 2012, Miguel ve Brunini 2008, 2009, Alibert vd. 2011, Ida vd. 2013, Batalha 2014). Araştırmacılar gezegen oluşum kuramlarını bu gözlemsel sonuçlar ışığında yeniden gözden geçirmeye başladılar (Hellary ve Nelson 2012, Forgan ve Rice 2013, Hasegawa ve Pudritz 2013, Galvagni ve Mayer 2014, Benz vd. 2014, Alibert vd. 2013). Özellikle teorik beklentilerle uyumlu olmayan gözlemsel bulgular (yıldızlarına çok yakın, kısa yörünge dönemli gaz gezegenler, büyük yörünge dış merkezlilikleri, dönme-dolanma eksenleri hizalanmamış sistemler gibi) araştırmacıları şaşırtmaya ve teorik öngörülerini yeniden değerlendirmek konusunda onları teşvik etmeye devam ediyor.

Bütün bu çalışmalardan çıkan ilgi çekici bir sonuç, kısa yörünge dönemleri ve neden oldukları ışık değişim genliğinin büyük olması nedeniyle keşiflerinin kolay olması kaynaklı yanlılıklar çıkarıldığında sayıca fazla olmasalar da (tüm ötegezegenlerin yaklaşık %1'i), standart gezegen oluşum teorileriyle açıklamakta zorlanılan kütlece oldukça benzer olduğu halde yarıçapça Jüpiter'den çok daha geniş (inflated) dev gaz gezegenlerin varlığıdır. Bu gezegenlerin bu kadar büyük bir yarıçapa sahip olmasının nedeni yıldızlarına yakınlıklarına bağlansa (Miller ve Fortney 2011, Demory ve Seager 2011) ve her ne kadar geçmişte bazı açıklamalar yapılmaya çalışılmış olsa da (Bodenheimer vd. 2003, Guillot ve Showman 2002, Chabrier ve Baraffe 2007, Batygin vd. 2011) bu olgunun hangi mekanizmayla gerçekleştiği halen aktif bir araştırma konusudur (Mordasini 2013). Bu gezegenlerin büyük çoğunluğu yarıbüyük eksen uzunlukları 0.1 Astronomi Birimi (AB) civarında olan ve geçiş yöntemiyle keşfedilmiş gezegenlerdir. Yer tabanlı gezegen araştırmalarıyla keşfedilen gezegenlerin büyük çoğunluğu da bu bölgede yer almaktadır.

Bu noktada özellikle yer tabanlı gezegen araştırmalarında keşfedilen gezegenlerin kütle ve yarıçap gibi parametrelerinin doğru ve duyarlı olarak belirlenmesinin önemini vurgulamak gereklidir. Zira teorik gezegen formasyonu ve evrimi modellerine dayalı olarak geliştirilen sentetik gezegen popülasyonları ile gözlemsel popülasyonlara dair sonuçların karşılaştırılmasına dayanan popülasyon sentezi tekniği, gezegen sistemlerinin oluşumu ve evrimini anlamaya yönelik olarak en sık takip edilen yöntemlerden biridir (Mordasini vd. 2008, 2009a, 2009b, 2010, 2012, 2013, Howard vd. 2012, Fressin vd. 2013). Gözlemsel verinin hassas alınmış ve analizlerinin sağlıklı yapılmış olması bu anlamda büyük önem arz eder. Zira

teorik ve gözlemsel gezegen popülasyonlarının karşılaştırılmasına dayalı bu modern istatistiksel çalışmalar, gözlemsel sonuçlara önemli ölçüde bağlılık gösterir. Ayrıca gezegen keşfinden tanımlanmalarına (ing. characterization) doğru geçtiğimiz bu dönemde (Fortney ve Marley 2007, Seager ve Deming 2010) gezegen karakterizasyonuna yönelik çalışmalar da bu değerlendirmelere dayalı olarak yapılmaktadır

Dev gaz gezegenlerin oluşumu üzerine yapılan çalışmalar, birbiriyle çelişen iki oluşum teorisi çerçevesinde sürmektedir: merkezi yığılma teorisi (Pollack vd. 1996) ve disk kararsızlığı teorisi (Boss 1997). Bu iki teori, gezegenlerin çekirdek kütleleri ve yarıçapları üzerinde farklı öngörülerde bulunmaktadır. Fortney ve Marley (2007) tarafından yapılan çalışma 1 Jüpiter kütlesine sahip ve 25 Dünya kütlesi büyüklüğünde bir çekirdeği bulunan bir gezegenin, çekirdeği bulunmayan bir gezegene oranla %5 daha büyük bir çapa sahip olacağını öngörmüştür. Söz konusu büyüklük farkının, küçük kütleli gezegenler için daha büyük (0.3 Jüpiter kütlesi için %15), büyük kütleli gezegenler için ise daha küçük olduğu (3 Jüpiter kütlesi için %2-3) olduğu düşünülmektedir. Bu nedenlerle, duyarlı gözlemlerle kütle ve yarıçap ölçümlerinin gerçekleştirilmesi dev gaz gezegen oluşumunun ve bu gezegenlerin yapılarının anlaşılması açısından büyük önem taşımaktadır. Gözlemler, en azından bu iki oluşum senaryosunun birden etkin olarak çalışmakta olduğunu göstermektedir. Rossiter-McLaughlin etkisini (Fabrycky ve Winn 2009) ve yörünge dışmerkezliliğinin dağılımını belirlemeye dönük çalışmalar (Ribas ve Miralda-Escudé 2007, Shen ve Turner 2007, Kane vd. 2012), farklı gezegen popülasyonlarının var olduğunu gösteren kanıtlar ortaya koymuştur. Bu nedenle istatistiksel olarak anlamlı sayıda örnek içeren, bir geçiş yapan gezegenler uzayının çalışılması, popülasyon karakteristiklerinin ve oluşum senaryolarının göreli etkinliklerinin belirlenmesi anlamında bir zorunluluk olarak önümüzde durmaktadır.

Ötegezegenleri, barınak yıldızlarının önünden geçerken sistemden alınan toplam ışıkta neden oldukları düşmeyi tespit ederek keşfetmeye dayanan yönteme geçiş yöntemi denir. HAT-Net (Bakos vd. 2004), Super-WASP (Pollacco vd. 2006), XO (McCullough vd. 2004), TrES (Alonso vd. 2004), KELT (Pepper vd. 2004), Qatar (Alsubai vd. 2013) gibi yer tabanlı tarama sistemlerinin yanı sıra Kepler (Borucki vd. 2010) ve CoRoT (Barge vd. 2007) gibi uzay teleskoplarıyla yapılan taramalar sonucunda bugüne kadar sayıları 3000'e yaklaşan (10 Mart 2019 itibarı ile 472 gezegen sisteminde toplam 2844, http://exoplanet.eu), dikine hız yöntemiyle onaylanmış gezegen ve toplamda 5000'i aşan sayıda aday keşfi yapılmıştır. Bu açıdan bakıldığında keşif yöntemleri arasında en verimli olanın geçiş yöntemi olduğunu ileri sürmek mümkündür.

Geçiş yöntemi gezegen keşfi açısından verimli bir yöntem olmasının yanı sıra başka birkaç açıdan da önemlidir. Öncelikle yöntem doğası itibarı ile sıcak Jüpiterlere duyarlıdır. Bu

tür gezegenlerin yıldızlarına yakın ve büyük olmaları nedeniyle geçiş sırasında sistemden alınan ışıkta daha büyük bir düşmeye (transit derinliğine) neden oldukları ve yörünge dönemleri de kısa olduğu ($P_{yörünge}$ < 3 gün) için keşfedilmeleri daha kolaydır. Bu seçim etkisi nedeniyle keşfedilen gezegenlerin büyük bölümünü sıcak Jüpiterler oluşturmaktadır. Parametreleri doğru ve duyarlı olarak belirlenmiş olmak kaydıyla geçiş tekniğiyle keşfedilmiş örneklerden oluşan bir popülasyon bu tür cisimleri çalışmak için son derece elverişli olacaktır. Yer tabanlı gözlemler fotometrik duyarlılıkları sınırlı olduğu için, neden oldukları geçiş ışık değişim genliklerinin büyük olması dolayısıyla, sıcak Jüpiter'leri çalışmak için diğer popülasyonlarca fazlaca "kirletilmemiş" bir örnek uzayı sunarlar.

Keşif sayısı ve hızı giderek artan ötegezegenlere ilişkin fiziksel parametrelerin doğru / duyarlı tayini, bu gezegenlerin içinde yer aldığı bir örnek uzayına dayandırılacak istatistiksel değerlendirmelerin ve kuramsal testlerin doğruluğu ve güvenilirliğine önemli katkı sağlayacaktır. Özellikle yer tabanlı gezegen araştırma projelerinde yapılan bir keşfin bir an önce duyurulmak istenmesi, fotometrik takip gözlemlerinin yeterli sayı ve kalitede olmaması, detaylı spektroskopik analizlerin yapılamaması gibi nedenlerle keşif makalelerinde verilen sistem parametrelerinin güvenilirliği ve hassasiyeti tartışmalı olabilmektedir. Bu proje odak dışı fotometrik gözlem tekniği ile tarafımızca elde edilen duyarlı fotometrik ve arşivlerdeki yüksek kaliteli tayfsal gözlemlerin detaylı, güncel ve modern teknikler kullanılarak analizi ile ötegezegen-barınak yıldız ikilisine ilişkin parametreleri yüksek duyarlılık ve doğrulukla yeniden belirleyerek, literatüre sunmayı hedeflemektedir. Milikadir düzeyinde bir fotometrik duyarlılığın $R_{gezegen}$ / $R_{yıldız}$ oranına yansıması %1-3 arasında olmaktadır (Torres vd. 2008, Southworth 2008). Duyarlı tayfların analizlerinden elde edilecek temel yıldız parametreleri (sıcaklık ve yüzey çekim ivmesi) ile kimyasal bolluk analizi sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi sonucu ulaşılacak yaş ve yarıçap değerleri $R_{yıldız}$ üzerinde de bir miktar daha iyileştirme getirecektir.

Bu noktadan hareketle geçişleri sırasındaki ışık değişimlerini TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi (TUG)'nin 1 metre birincil ayna çaplı T100 teleskobunu odak dışı ışık ölçüm (ing. defocus photometry) tekniğiyle yüksek fotometrik duyarlılıkta gerçekleştirdiğimiz gözlemlerle elde ettiğimiz HAT-P-19b, WASP-52b, XO-3b ve HAT-P-20b ötegezegenlerinin parametreleri bu proje kapsamında gerçekleştirilen analizlerle tekrar elde edilmiştir. Yıldızların temel atmosfer parametrelerini elde etmek üzere 10 m'lik Keck Teleskobu'na bağlı High Resolution Echelle Spectrometer (HIRES) tayfçekeri ile elde edilmiş yüksek çözünürlüklü (R ~55000) ve Observatoire Haute-Provence (OHP) Gözlemevi'ndeki 1.93 metre birincil ayna çaplı teleskoba bağlı SOPHIE tayfçekeri ile alınmış yüksek çözünürlüklü (R ~40000) arşiv tayfları yeniden analiz edilmiştir. Bu analizlerden elde edilen yıldız atmosfer parametreleri, geçiş ışık eğrisi modellerinde gelinen en son aşama ürünü Exofast-v2 (Eastmann 2017) paketinde, öncül girdi

parametreleri olarak kullanılmış ve duyarlılığı yüksek tüm ışık eğrileri ile yıldızların tayfsal enerji dağılımlarına ilişkin parametreler toplu bir biçimde bu program kullanılarak analiz edilmiştir. Çözümlerde, denenen parametre setlerinin parametreler için verilen dağılımlardan rastgele seçilmesini ve yerel minimumlara (ing. local minima) sıkışmadan global bir minimuma yakınsamayı sağlayan modern istatistiksel teknikleri (Monte-Carlo Markov Chain, MCMC) ve tüm verinin birlikte bu bağlamda analizini sağlayan modern bilgisayar kodları (Exofast-v2, Eastmann 2017 ve kendi geliştirdiğimiz yardımcı betikler) kullanılarak hesap edilmiştir. Çalışmadan elde edilen tecrübeyle ve yüksek hesap gücü sağlayan süper bilgisayarların yardımıyla, iterasyon ve bağımsız zincir sayısını arttırarak ve daha kompleks algoritmalar (ing. parallel tempering gibi) kullanarak duyarlılığı daha da arttırma konusundaki çalışmalar sürmektedir. Bu analizlerin sonucunda projenin hedef yıldızlarına ilişkin parametreler, XO-3 tayfsal analizlerinde karşılaşılan sorunlar nedeniyle istisna teşkil etmek üzere, yüksek duyarlılık (ing. precision) ve doğrulukla (ing. accuracy) elde edilmiştir. Sonuç olarak proje kapsamında analiz edilen tüm ötegezegenler ve barınak yıldızları için temel parametreler %1-3 duyarlılık düzeyinde elde edilmiş ve pek çok parametre için literatürdeki en duyarlı sonuçlara ulaşılmıştır.

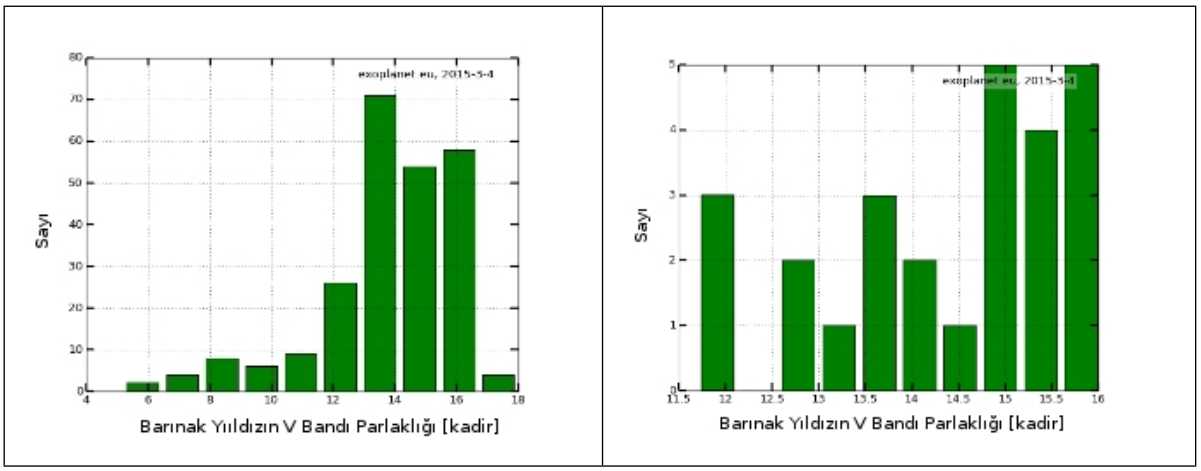
2. LİTERATÜR ÖZETİ

Ötegezegenleri, barınak yıldızlarının önünden geçerken sistemden alınan toplam ışıkta neden oldukları düşmeyi tespit ederek keşfetmeye dayanan yönteme geçiş yöntemi denir. HAT-Net (Bakos vd. 2004), Super-WASP (Pollacco vd. 2006), XO (McCullough vd. 2004), TrES (Alonso vd. 2004), KELT (Pepper vd. 2004), Qatar (Alsubai vd. 2013) gibi yer tabanlı tarama sistemlerinin yanı sıra Kepler (Borucki vd. 2010) , CoRoT (Barge vd. 2007), TESS (Ricker vd. 2015) ve PLATO (Catala vd. 2008) gibi uzay teleskoplarıyla yapılan taramalar sonucunda bugüne kadar sayıları 4000'i aşan (1 Mays 2019 itibarı ile 3033 gezegen sisteminde toplam 4058, http://exoplanet.eu), başta dikine hız yöntemi olmak üzere çeşitli yöntemlerle onaylanmış gezegen ve 5000'i aşan sayıda aday keşfi yapılmıştır.

Bugüne kadar keşfedilen ötegezegenlerin büyük bölümü (2000'den daha fazlası) Kepler uzay teleskobu ile yapılan keşifleridir. Kalan diğer gezegenlerin büyük bölümü (yaklaşık 600 kadarı) ise özellikle Avrupa Güney Gözlemevi'nin (ing. European Southern Observatory, ESO) La Silla / Şili'deki 3.6 metrelik teleskobuna bağlı son derece hassas (10 cm/s mertebesinde, Lovis vd. 2008) dikine hız ölçümleri gerçekleştirebilen HARPS (ing. High Accuracy Radial velocity Planet Searcher) cihazıyla keşfedilen gezegenlerdir. Kepler Uzay Teleskobu 2009-2013 yılları arasında 4 yıl süreyle 150 000'den fazla yıldızın etrafında geçiş (transit) yöntemiyle gezegen aramış, belirli bir alana yönlenmesini sağlayan tekerleklerin bozulmasıyla ekliptik düzlemi civarındaki yıldızların etrafında aynı yöntemle gezegen aranan ikincil bir arama yöntemine (K2) geçilmek zorunda kalınmıştır, Yöntemin doğası gereği, geçiş ışık eğrisi analizinden ancak göreli büyüklükleri elde etmek mümkün olabilmektedir. Kepler Uzay Teleskobu'nun hedef cisimlerinin büyük bir bölümünün sönük olmaları nedeniyle (Şekil 2.1) duyarlı ve yüksek sinyal / gürültü oranına sahip tayflarını almak ve bu tayflar üzerinden dikine hız ölçümü yapmak, barınak yıldızın atmosfer parametrelerini belirlemek ve istenen elementlerin kimyasal bolluklarını belirlemek mümkün olamayabilmektedir. Dolayısı ile Kepler keşiflerinden büyük bir kısmı (3000'den fazla, Mulllally vd. 2015) dikine hız gözlemleri ile kesinleştirilemediği için hala aday statülerini korumaktadır. Durum CoRoT Uzay Teleskobu için de benzerdir. Bugüne kadar CoRoT ile keşfi yapılan toplam 32 ötegezegen bulunmakta olup (http:/exopanet., bunların da büyük çoğunluğu sönük yıldızlar etrafında keşfedilmiştir (Şekil 2.1). Daha parlak yıldızları etrafında gezegen arayan TESS Uzay Teleskobu ise henüz çalışmaya başlamış ve bugüne kadar sadece 9 ötegezegenin keşfini gerçekleştirmiştir.

Yer tabanlı araştırmalarda (HAT-Net, Super-WASP, XO, TrES, Qatar, KELT gibi) keşfedilen gezegenler ise araştırmaların görece parlak yıldızlar çevresinde yapılıyor olması nedeniyle atmosferin koyduğu limitlere rağmen duyarlı fotometrik ve spektroskopik gözlemlerinin gerçekleştirilebilmesi nedeniyle hala büyük önem arz etmektedir. Ayrıca yer

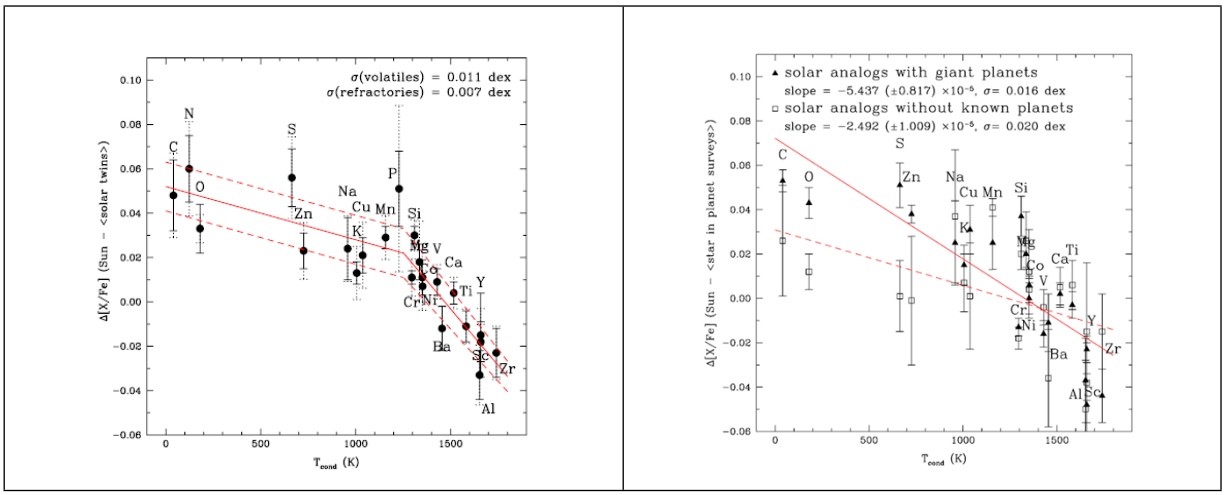
tabanlı tarama çalışmalarında keşfedilen gezegenlerin yüksek hassasiyetle belirlenen parametreleri uzay görevlerinin kapsamlarının belirlenmesi ve hedef seçiminde de önemi rol oynamaktadır. Buna karşın az sayıda gezegen için duyarlı fotometrik ve tayfsal gözlemler neticesinde güvenilir parametreler elde edilebilmiş durumdadır. Bu sayının arttırılması, gözlemsel sonuçlara bağlı olarak yapılacak istatistiksel değerlendirmelerin ve kuramsal çalışmaların da daha sağlam temellere oturtulmasını sağlayacaktır.



Şekil 2.1. Kepler ve CoRoT Uzay Teleskoplarıyla keşfedilen ötegezgenlerin barınak yıldızlarının V bandı görsel parlaklıkları. Histogramı oluşturmak için veriler http://exoplanet.eu'dan alınmıştır ve 4 Mart 2015 tarihi itibarı ile günceldir. Keşiflerin büyük çoğunluğunun yerden spektroskopik takip gözlemleri güç olan sönük yıldızlar etrafında yapıldığı görülmektedir.

Kütle, yarıçap ve barınak yıldıza uzaklık parametrelerinin yanı sıra barınak yıldızın atmosfer parametreleri ve kimyasal kompozisyonu da ötegezegen sistemlerini anlayabilmek açısından kritik önem arz eder. Zira "yıldızı tanımak, gezegeni tanımaktır". Metalce zengin cüce yıldızlar ve alt devlerin etrafında gezegen bulunma olasılığının da yüksek olduğu yerleşmiş bir olgudur (Gonzalez 1997, Fischer ve Valenti 2005, Udry ve Santos 2007, Johnson vd. 2010). Bu durumun dev yıldızlar için de geçerli olduğu kesin değildir (Pasquini vd. 2007, Hekker ve Meléndez 2007, Takeda vd. 2008, Liu vd. 2014). Gezegen oluşumunun yıldızın kimyasal bolluğuna etkisi ise daha az bilinen bir husustur (Liu vd. 2014). Geçiş yöntemiyle özellikle yer tabanlı araştırmalarda keşfedilen gezegenlerin büyük bölümünü oluşturan yıldızlarına yakın dev gaz gezegenlerden (sıcak Jüpterler) en az bir tane içermeyen yıldızların, kimyasal kompozisyonca Güneş'e daha çok benzediği değerlendirmesi yapılmaktadır (Meléndez vd. 2009). Bu durum "sıcak Jüpiter" barındıran sistemlerde karasal gezegenlerin oluşmuyor olabileceği şeklinde yorumlanabilir. Meléndez vd. (2009)'nin bu çalışması sonuçları bakımından önemli, öncü bir çalışma niteliğindedir. Çalışma 11 Güneş-ikizi (G2 tayf türünden anakol yıldızı) ve 10 Güneş-analoğu yıldızın (geç F tayf türünden erken K tayf türüne kadar geniş bir aralığı içine alan Güneş-benzeri yıldızlar olarak adlandırılan grup içerisinde G0-G5

tayf türü aralığında yer alan anakol yıldızları) yüksek çözünürlüklü tayfsal gözlemlerine dayanmaktadır. Şekil 2.2'de gezegen barındıran Güneş-analoğu yıldızlar ile barındırmayanlar arasındaki kimyasal bolluk farklılıkları görülmektedir. Burada karşılaştırma Güneş kimyasal kompozisyonundaki bir gaz için %50 yoğunlaşma sıcaklığına (T_{cond}) karşılık verilmiştir. Uçucu elementler düşük yoğunlaşma sıcaklığında (T_{cond}) yoğunlaşırken, ısıya dayanıklı elementler (ing. refractory elements) daha yüksek sıcaklıklarda yoğunlaşır. Gezegen barındıran Güneş-analoğu yıldızlar, Güneş-ikizi yıldızların gösterdiğine çok benzer (Şekil 2.2) şekilde T_{cond} ile güçlü bir bağlılık gösterirken, gezegen içermeyen yıldızlarda bu bağlılık çok daha zayıftır. Söz konusu korelasyon her ne kadar güçlü (r^2 = 0.83) görünse de küçük bir örnek uzayına dayanmaktadır. Bu örnek uzayındaki yıldızların ancak küçük bir bölümü (5 tanesi) gezegen sahibidir. Bu önemli ilişkinin geliştirilebilmesi ve geçerliliğinin ortaya konabilmesi için kimyasal bollluk analizleri gerçekleştirilmiş barınak yıldızına yakın dev gaz gezegen içeren daha geniş bir örnek uzayına ihtiyaç duyulmaktadır. Sonuç olarak bu ilişkinin geniş bir örnek uzayında doğrulanması durumunda sıcak Jüpiter içeren gezegenlerde (ki yer tabanlı gözlemlerde keşfedilen gezegenlerin çoğu bunlardır) karasal gezegen oluşma olasılığının düşük olduğu ve gezegen oluşumunun barınak yıldızın kimyasal yapısı üzerinde etkisinin bulunduğu gibi önemli sonuçlara ulaşılmış olacaktır.



Şekil 2.2. Güneş ve benzeri yıldızların metal bolluklarının yoğunlaşma sıcaklığı ile ilişkisi. Güneş'teki [X/Fe] bolluğuyla Güneş-ikizi (sol panel, a) ve Güneş-analoğu (sağ panel), b) yıldızlardaki ortalama [X/Fe] bolluğu arasındaki farkların %50 yoğunlaşma sıcaklığı (T_{cond}) ile değişimi (Meléndez vd. 2009) gösterilmektedir.

Bu motivasyondan hareketle 15 Mart 2017 tarihinde başlayan, o tarihe kadar literatüre çıkmış ışık eğrilerinin kalitelerinin düşük olması, fotometrik ve tayfsal analizlerinin birden fazla yönteme başvurularak, homojen olmayan bir şekilde ve gezegen araştırma projelerinin arasındaki yüksek rekabet nedeniyle hızlı yapılıp yayınlandığı gerekçeleriyle seçilmiş dört ötegezegen (HAT-P-19b, WASP-52b, XO-3b, HAT-P-20b) ve barınak yıldızlarının parametrelerinin yeniden belirlenmesine yöntelik çalışmamız 15 Mart 2019 tarihi itibarı ile

sonuçlanmıştır. Bu tarih itibarı ile analizleri tamamlanan bu gezegenlere ilişkin bugüne kadar biriken literatüre ilişkin özet bilgi her bir gezegen için ayrı bir alt başlık altında aşağıda sunulmuştur.

2.1. HAT-P-19b Ötegezegenine İlişkin Literatür Özeti

HAT-P-19b ötegezegeni HAT-Net (Bakos vd. 2004) otomatik teleskobuyla keşfedilmiştir (Hartman vd. 2011, kısaca H11). Düşük yoğunluklu gezegen, metalce zengin ([Fe/H] ≥ 0) bir barınak yıldızı etrafında dolanmaktadır. HAT-P-19 yıldızından alınan ışıkta 4.0088 gün dönemle gerçekleşen ve gezegen geçişiyle uyumlu, 22 milikadir düzeyinde bir azalma saptanmıştır. Akıdaki bu azalma her 4.01 günde bir ~2.84 saat süreyle sabit kalmaktadır.

Sistemin ışık değişimini daha iyi anlamak için FLWO (1.2m) teleskopuyla 4 gecelik yüksek duyarlılıklı fotometrik takip gözlemleri yapılmıştır. Ancak bu ışık eğrilerinin 3 tanesinde değişken hava koşulları nedeniyle büyük boşluklar bulunmakta, tam olan ışık eğrisinde ise yaklaşık 15 milikadir saçılma görülmektedir (Şekil 2.3).

Sistemin tayfsal karakteristiklerini anlamaya yönelik düşük çözünürlüklü tayfsal gözlemleri (ing. reconnaissance spectroscopy), Whipple Gözlemevi / Arizona, ABD'deki 1.5m çaplı teleskoba bağlı Hardvard-Smithsonian Astrofizik Merkezi (Cfa) tayfçekeri (DS; Latham 1992) ve Tillinghast yansıtmalı eşel tayfçekeri (TRES; Füresz 2008) ile La Palma, İspanya'da bulunan 2.5 m çaplı Nordik Optik Teleskobu'na (NOT; Djupvik ve Andersen 2010) bağlı fiberle beslenen, eşel tayfçeker (FIES; Frandsen ve Lindber 1999) ile düşük sinyal/gürültü oranlarında (S/N) gerçekleştirilmiştir (H11).

Yıldızın dikine hız değişimini karakterize etmek ve yıldız parametrelerini daha hassas bir şekilde bulmak için yüksek çözünürlüklü ve yüksek S/N oranına sahip tayfsal gözlemler Keck Teleskobu'na bağlı HIRES (R=55000) tayfçekeri ile yapılmıştır. Hassas dikine hız ölçümü hesaplama amaçlı yapılan gözlemler, iyodin gaz hücresi (I_2) kullanılarak yapılmıştır (H11). Keck / HIRES gözlemlerinden elde edilen veriler, Spectroscopy Made Easy analiz paketi (SME; Valenti ve Piskunov 1996) ile Valenti ve Fischer (2005)'in atomik çizgi veri tabanı kullanılarak analiz edilmiş ve yıldızın atmosfer parametreleri elde edilmiştir (H11). Yıldız evrimi modelleri için hesaplamalar Yonsei-Yale (YY; Yi v.d. 2001) eş yaş eğrileri (izokron) kullanılarak yapılmıştır. Bu modeller sonucu; T_{etkin} = 4990 ± 130 K, log g = 4.53 ± 0.06, [Fe/H] = +0.23 ± 0.08, ve dönme hızı v sini = 0.7 ± 0.5 kms^{-1} değerleri bulunmuştur (H11). Özellikle elde edilen yüksek metal bolluğu, HAT-P-19b gibi Satürn kütlesinde gezegenler için belirlenen gezegenin çekirdek kütlesi ile barınak yıldızın metal bolluğu arasındaki korelasyonla uyuşmaması açısından önemli görünmektedir.

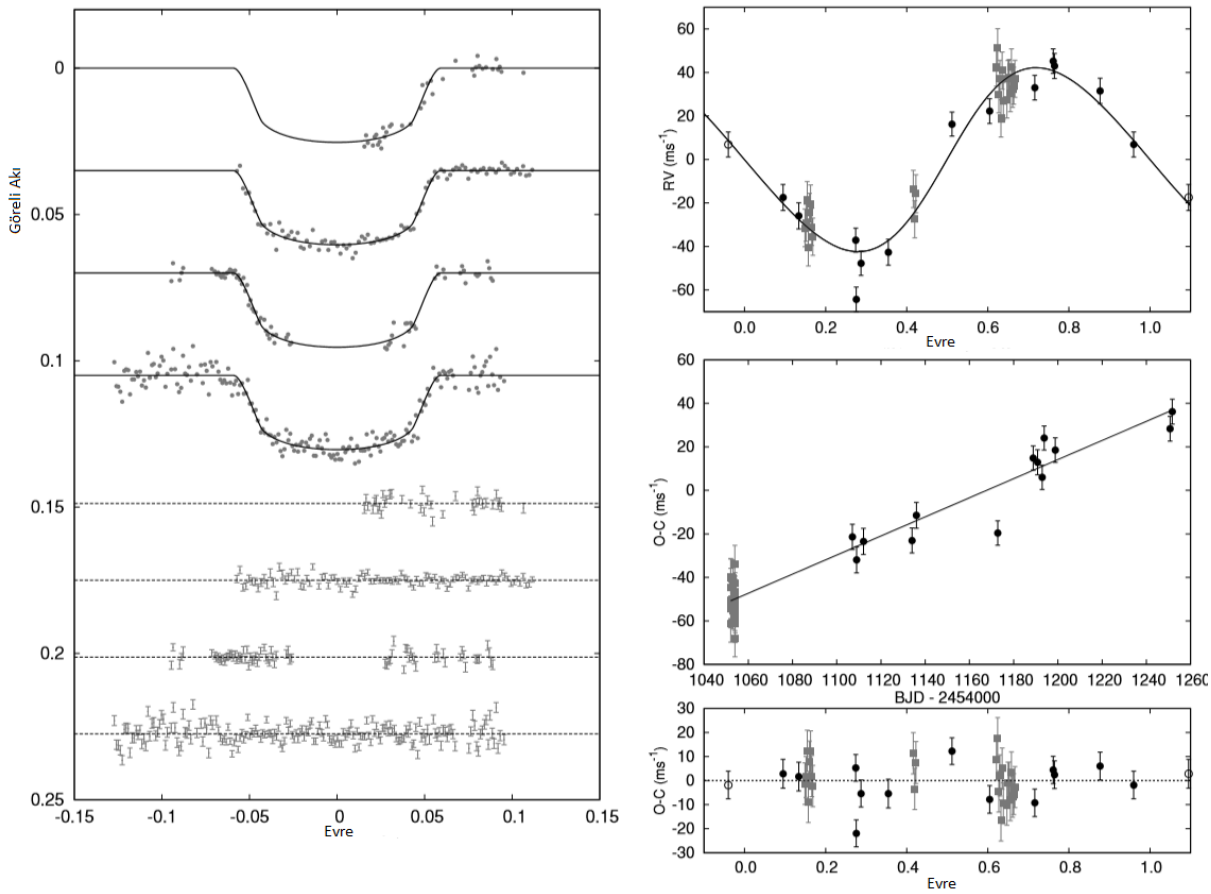
Takip gözlemlerinden elde edilen ışık eğrileri, kenar kararması için Mandel ve Agol (2002)'deki analitik formüller baz alınarak modellenmiştir. Kenar kararma katsayıları Claret (2004)'deki tablolar yardımıyla interpole edilmiştir (H11).

Dikine hız ve fotometrik gözlemler global parametreleri elde etmek üzere Bakos v.d. (2010)'de verildiği şekilde birlikte analiz edilmiştir (H11). Parametre uzayındaki X2 değeri downhill simplex metodu (AMOEBA; Press vd. 1992) ve klasik lineer en küçük kareler yöntemi birlikte kullanılarak minimize edilmiştir. Global parametrelerin üzerindeki belirsizlikler Markov Chain Monte-Carlo metodu (MCMC; Ford 2006) kullanılarak hesaplanmıştır.

HAT-P-19'un dikine hızına yapılan artıklarda lineer bir değişim görülmektedir (Şekil 2.3). Bu trend sistemde olası bir 3. cisimden kaynaklanıyor olabilir. Bu nedenle Seeliger vd. (2015) University Observatory Jena (0.6 m) teleskobuyla 3, CA DLR (Calar Alto Astronomical Observatory, 1.23 m) teleskobuyla 1 gecelik gözlemler yapmışlar ve elde edilen ışık eğrilerini Mandel ve Agol (2002)'de anlatılan yöntemle modellemişlerdir. Ancak dönem değişimi analizinden 3. cisme ait bir bulguya rastlamamışlardır.

HAT-P-19 ayrıca STELLA (1.2 m) teleskobuyla fotometrik değişiminin takibi amacıyla 300 gün boyunca gözlenmiş ve leke kaynaklı dönme modülasyonlarından yıldızın kendi etrafında dönme dönemi P = 35.5 ± 2.5 gün olarak bulunmuştur (Mallonn vd. 2015). Yıldız yüzeyindeki parlak dağılımı düzensizliklerinin dönme ile modülasyonundan kaynaklı olarak yorumlanabilecek bu değişimin genliği ise Johnson-V bandı için 4.7 ± 0.5 milikadir, Johnson-I bandı için ise 3.0 ± 0.4 milikadir olarak bulunmuştur. 2012 yılında HAT-Net teleskobuyla elde edilen gözlem verilerinde dönme modülasyonu kaynaklı fotometrik bu değişimin genliği V ve I filtresi için sırasıyla 6.3 ± 0.6 ve 4.6 ± 0.5 milikadir, dönemi P = 38.6 ± 4.4 gün olarak bulunmuştur. Yıldızın sıcaklığı ve dönme hızı kullanılarak HAT-P-19'un jirokronolojik yaşı 5.5 (+1.8 / -1.3) milyar yıl olarak hesaplanmıştır (Mallonn vd. 2015).

Maciejewski vd. (2018) HAT-P-19 b'nin 2 geçiş gözlemini Torun (0.6 m) teleskobuyla gerçekleştirilmişlerdir. Elde edilen ışık eğrileri Transit Analysis Package (TAP, Gazak vd. 2012) koduyla modellenip, geçiş orta zamanları hesaplanmıştır. Geçiş orta zamanları kullanılarak, sistemin ışık elemanları T_0 = 2455091.53501 ± 0.00015 [BJD-TDB], P = 4.00878332 ± 0.00000059 [gün] olarak güncellenmiştir.



Şekil 2.3. Sol panel: HAT-P-19'un fotometrik takip gözlemleri sonucu elde edilen ışık eğrileri (gri nokta) ve uyumlanan modeller (düz çizgi) (H11). Altında ise modelden artıklar bulunmaktadır. Sağ panel: HAT-P-19'un dikine hız gözlemleri (Keck / HIRES siyah nokta, Subaru / HDS gri nokta) ve en iyi uyan Kepleryan yörünge modeli (düz çizgi) (H11). Sağ orta panelde modelden artıklardaki lineer trend görülmektedir. Altta ise lineer fit ve Kepleryan yörünge modelinden artıklar bulunmaktadır (H11).

2.2. WASP-52b Ötegezegenine İlişkin Literatür Özeti

WASP-52b ötegezegeni, geçiş yöntemiyle gezegen arayan ve gökyüzünde geniş alan gören superWASP (Pollaco vd. 2006) tarama teleskop sistemi içerisindeki SuperWASP-North teleskobu ile keşfedilmiştir (Hébrard vd. 2013 kısaca H13).

Yıldızdaki gezegen geçişi kaynaklı dönemli ışık değişimi SuperWasp-North ile onaylandıktan sonra dikine hız gözlemleri Fransa'da bulunan Haute-Provence gözlemevinde (Bouchy vd. 2009) 1.93 metre çapına sahip teleskoba bağlı SOPHIE tayfçekeri ile yüksek verim (ing. High Efficiency, R=40000) ve yüksek çözünürlük modunda (ing High Resolution, R=75000) ve 1.2 metre çapa sahip Euler-Swiss teleskobuna bağlı CORALIE (R=50000) tayfçekeri ile yapılmıştır (Şekil 4.2., H13).

Sistemdeki tayfsal (dikine hız) ve fotometrik değişimlerin geçiş yapan bir gezegen kaynaklı olduğu sonucuna varıldıktan sonra gezegenin parametrelerini hassas bir şekilde belirleyebilmek için daha büyük teleskoplarla ışıkölçüm gözlemleri yapılmıştır. Bu teleskoplar; JGT: 0.94 metrelik James Gregory Telescope, FTS: 2 metrelik Faulkes Telescope South, EULERCAM: 1.2 metrelik Euler Swiss Telescope, BUSCA: Calar Alto Gözlemevindeki 2.2 metrelik teleskoplardır (H13).

Yıldızın parametreleri SOPHIE (yüksek verim modu) ile dikine hız ölçümü yapılmak üzere alınan tayfların geçiş harici kısımlarından elde edilmiştir. Bu işlem için Gillion vd (2009)'de anlatılan yöntem kullanılmıştır. Yıldızın etkin sıcaklığını belirlemek üzere Hα çizgisi kullanılmıştır. Yüzey çekim ivmesi (log g_*), Ca I'in 6162 Å ve 6439 Å çizgileri (Bruntt vd. 2010a) ve Na I D, Mg I b çizgileri kullanılarak belirlenmiştir. Tayf türü ise Gray (2008)'deki tablodan yıldızın etkin sıcaklığı kullanılarak çıkarılmıştır. Element bollukları bazı çizgilerin eşdeğer genişliklerinden, mikrotürbülans ξ_t değeri ise Fe-I çizgilerinden Magain (1984)'de anlatılan yöntemle ölçülmüştür (H13).

Yıldızın dönme hızının izdüşümü (v sini$_*$), bazı Fe I çizgilerinden hesaplanmıştır. Elde edilen değerlerle çapraz-korelasyon fonksiyonu ile elde edilen değerlerin uyuştuğu görülmüştür. Makrotürbülans v_{mac} değerleri Gray (2008) ve Bruntt vd. (2010b)'deki tablolar kullanılarak çıkarılmıştır. Çizgilerin aletsel yarı yükseklikteki tam genişlikleri 6300 Å civarındaki tellürik çizgilerden 0.15 ± 001 Å olarak ölçülmüştür. Yıldızın yaşı Barnes (2007)'de anlatılan yaş-dönme hızı ilişkisinden bulunmuştur. Yıldızın tayfında şiddetli kromosferik Ca II H&K çizgilerindeki salma bileşenleri yıldızın aktif olduğunu göstermektedir. logR'_{HK} indeksi Boisse vd. (2010)'daki kalibrasyon kullanılarak hesaplanmıştır (H13).

Yıldızın super-WASP ve EulerCam teleskoplarıyla yapılan gözlemlerinde geçiş haricinde de ışık değişimi gösterdiği tespit edilmiştir. Bu ışık eğrilerinin iteratif sinüs uyumlaması ile periyodogramı (Maxted 2011) elde edilmiştir. Analiz sonucu yıldızın dönme döneminin Prot = 11.8 ± 3.3 gün olduğu saptanmıştır (H13).

Dikine hız verileri Kepleryan yörünge, ışıkölçüm verileri ise Mandel ve Agol (2002) (geçiş ışık eğrilerinde leke veya faküla benzeri yapıların oluşturabileceği yapılar görülmektedir ancak modele dahil edilmemiştir) algoritmaları kullanılarak modellenmiştir. Geçiş ışıkölçümü gözlemleri modellenirken Claret (2004)'deki tablodan lineer olmayan kenar kararma yasasına ait 4 kenar kararma sabiti kullanılmıştır. Dikine hız verileri ile ışıkölçüm verileri, Collier Cameron vd. (2007b) ve Pollaco vd. (2008)'de detaylı olarak anlatılan Markov-Chain Monte Carlo (MCMC) yöntemi ile modellenmiştir. Modeldeki serbest parametreler; geçiş ortası zamanı T0, yörünge dönemi P, gezegenin yarıçapının yıldızınkine oranı R_g / R_*, toplam geçiş süresi t_T, etki parametresi b, yörünge basıklığı e, yörünge enberisinin boylamı ω, dikine hız yarı genliği K_1,

her bir dikine hız verisinden bulunan sistemin yörünge hızı γ_n'dir (her bir veri seti için n=1,2,3…). Önemli bir yörünge basıklığı saptanmadığından yörünge çembersel kabul edilmiştir. Işıkölçüm verilerinden elde edilen yıldız yoğunluğu ρ_*, T_{etkin} ve [Fe/H] kullanılarak yıldızın kütlesi M_* ve R_* elde edilmiştir (Torres vd. 2010). Gezegenin kütlesi M_g ve yarıçapı R_*, K_1 ve R_g / R_* kullanılarak hesaplanmıştır. Model sonucu hesaplanan parametreler; Yıldızın yüzey çekim ivmesi log g_* (barınak yıldızlar için geçiş modelinden bulunan değer tayftan bulunandan daha isabetlidir), yarıbüyük eksen uzunluğu a, yörüngenin eğimi i, gezegenin denge sıcaklığı T_{denge} 'dir (gezegenin karacisim olduğu ve gece-gündüz tarafı arasında sıcaklık farkı olmadığı varsayılmıştır) (H13). Sisteme ilişkin tüm bu parametreler toplu olarak Tablo 2.1'de verillmiştir.

Tablo 2.1. WASP-52 sisteminin parametreleri (Hébrard vd. 2013)

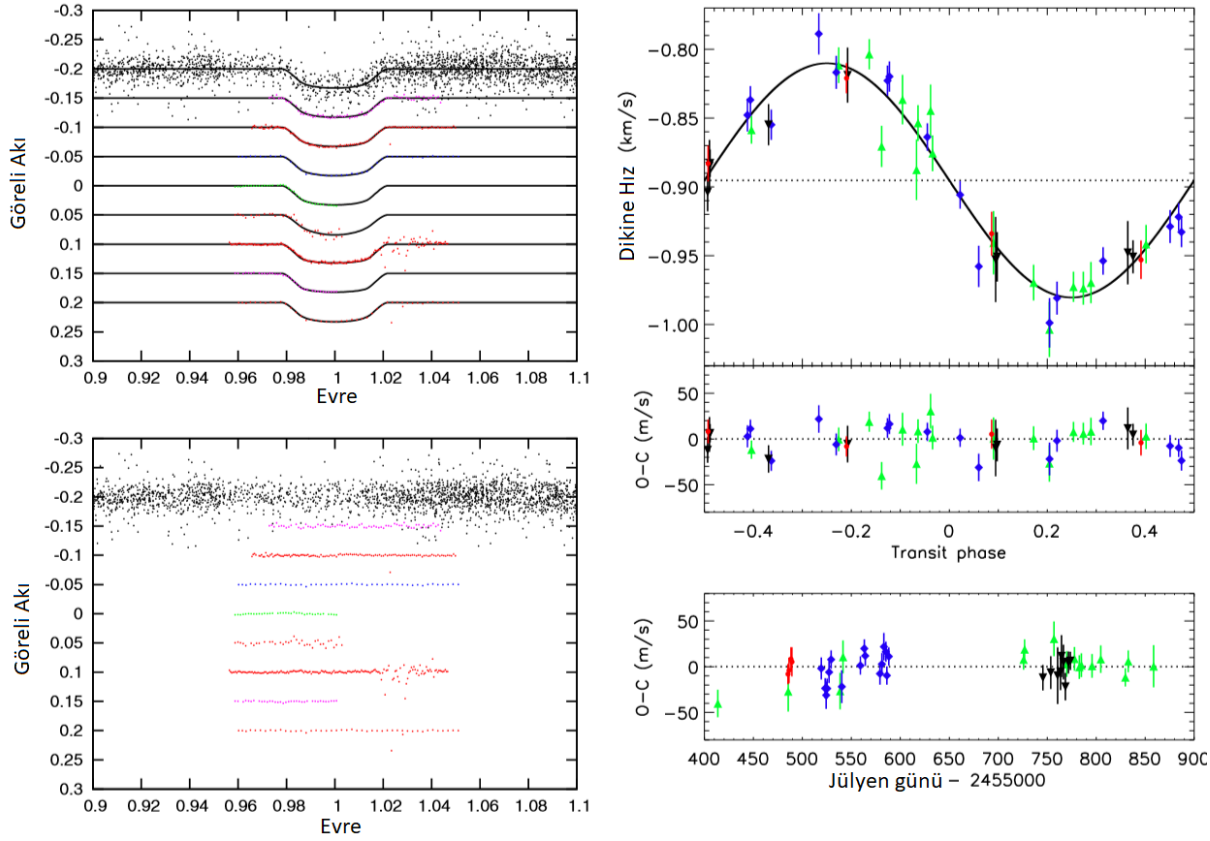
Parametreler	Hébrard vd. (2013)
P (gün)	1.7497798 ± 0.0000012
T_c (HJD)	2455793. 68143 ± 0.00009
τ (Geçiş Süresi, gün)	0.0754 ± 0.0005
b (Etki Parametresi)	0.60 ± 0.02
$(R_g / R_*)^2$	0.0271 ± 0.0004
(R_* / a)	0.1355 ± 0.0020
i (°)	83.35 ± 0.20
a (AB)	0.0272 ± 0.0003
M_g (M_{jup})	12.5 ± 1.9
R_g (R_{jup})	1.5 ± 0.2
log g_* (cgs)	4.582 ± 0.014
M_* ($M_{Güneş}$)	0.87 ± 0.03
R_* ($R_{Güneş}$)	0.79 ± 0.02
ρ_* ($\rho_{Güneş}$)	1.76 ± 0.08

Mancini vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, orta büyüklükte teleskoplarla (1.23-2.2m) yüksek hassasiyete sahip geçiş ışık eğrileri elde edilmiştir. Bu ışık eğrileri, literatürden toplanılan ışık eğrileri ile beraber anaiz edilip sistemin fiziksel ve yörünge parametreleri tekrar hesaplanmıştır. Ayrıca ışık eğrilerinde leke kaynaklı değişimler saptanıp, bu lekelerin büyüklükleri, kontrastı ve fotosfer üzerindeki pozisyonu belirlenmiştir. Lekelerin pozisyonu sayesinde yıldızın dönme ekseni ile gezegenin yörünge ekseni arasındaki açı ψ = 20° ± 50° olarak bulunmuştur.

Mancini vd. (2017) ışık eğrilerini modellerken PRISM ve GEMC (Tregloan-Reed vd. 2013,2015) kodlarını kullanmıştır. Bu kodların beraber kullanılmasının avantajı, hem geçişi hem de leke kaynaklı ışık değişimini aynı anda modelleyebilmesidir. Çembersel lekeleri

modellerken kullanılan parametreler; lekenin boylamı φ, mutlak enlemi Θ, açısal yarıçapı rleke ve lekenin kontrastı ρ_{spot}'dur. Geçişin geometrik parametreleri ise; toplam yarıçapların yörünge yarıbüyük eksen uzunluğuna oranı r_*+r_g ($r_*= R_* / a$ ve $r_g= R_g / a$), gezegen ve yıldızın yarıçapları oranı R_g / R_*, yörünge eğim açısı i, yörünge dönemi P, geçişin orta zamanı T_0, 2. dereceden (ing: quadratic) kenar kararma yasasının sabitleri u_a ve v_a'dır. Modelleme işlemi yapılırken yıldızda sadece tek bir leke olduğu varsayılmıştır.

Işık eğrilerindeki anomaliden emin olmak için geçiş, 24 Temmuz 2014 tarihinde 2 farklı teleskopla gözlenmiş ve modelden elde edilen leke parametreleri birbiriyle tutarlı bulunmuştur. 43 güne yayılan, 2014 Temmuz-Eylül arasındaki geçiş gözlemlerin dördünde birbirine benzer lekeler gözlenmiştir.



Şekil 2.4. WASP-52'nin geçiş ışık eğrileri (sol üst), dikine hız gözlemleri (sağ üst) ve modellerden artıklar (sağ alt) (H13). Işık eğrileri kronolojik olarak yukarıdaki ilk gözlem olacak şekilde çizdirilmiştir. Sağdaki panellerde ise dikine hız verilerine (sağ üst) uyumlanan Kepleryan yörünge modeli ve modelden artıklar (sağ alt) bulunmaktadır. Kırmızı ve mavi noktalar SOPHIE HE, siyah üçgenler SOPHIE HR, yeşil oklar ise CORALIE tayfçekerleriyle alınmıştır (H13).

Eğer birden fazla geçiş gözleminde aynı leke yapısı görülmüş ise lekenin olduğu boylamın dönme hızı hesaplanabilir (Mancini vd. 2014). WASP-52 yıldızı için dönme dönemi $P_{dönme}$ = 11.8 ± 3.3 gün (Hébrard vd 2013) olarak hesaplanmıştır. Ayrıca yıldızın dönme

ekseniyle yörünge düzlemi arasındaki açının izdüşümü $\lambda = 24^{+17}_{-9}$ (Hébrard vd 2013) bulunduğundan WASP-52 b'nin prograd bir yörüngede dolandığı anlaşılmıştır. 43.2° ± 4°9 boylamında $P_{dönme}$ = 15.53 ± 1.96 gün, 45.2° ± 3° boylamında $P_{dönme}$= 15.1 ± 1.27 gün, 44.9° ± 2°9 boylamında ise $P_{dönme}$ = 13.44 ± 1.09 gün olarak hesaplanmış, yıldızın diferansiyel dönmesine ilişkin bir değerlendirme böylelikle yapılabilmiştir. Aynı lekenin 3 geçiş gözleminde görülmesiyle izdüşüm açısı (λ) yerine yıldızın dönme ekseniyle yörünge düzlemi arasındaki açı (ψ) bulunabilir (Nutzman vd. 2011). Bu yöntemle ψ = 20° ± 50° olarak hesaplanmıştır.

Daha sonra yapılan çalışmalarda WASP-52b ötegezegeninin atmosferinde sodyum bulutlarının bulunduğuna dair kanıtlar (Chen vd. 2017, Kirk vd. 2017, Louden vd. 2017) ve WASP-52 b ötegezegeninin geçiş kaynaklı ışık değişimindeki anomalinin faküla benzeri yapılardan kaynaklanıyor olabileceği bulunmuştur (Kirk vd. 2017).

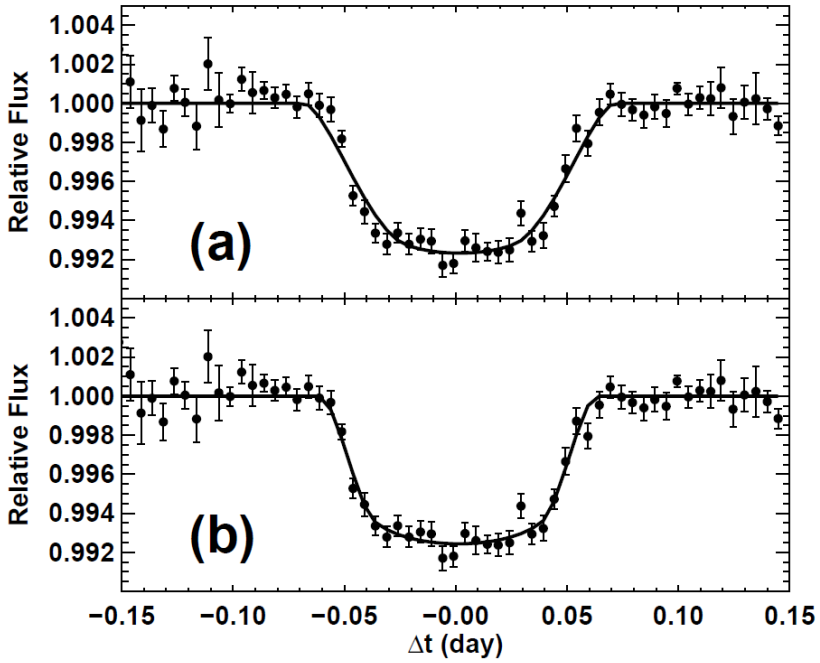
2.3. XO-3b Ötegezegenine İlişkin Literatür Özeti

XO-3b ötegezegeni XO projesinin üçüncü keşfedilen cismidir ve 2007 yılında keşfedilmiştir (Krull vd. 2008, kısaca K08). Kısa yörünge dönemine (P ~ 3.19 gün) ve yüsek dış merkezliğe (e ~ 0.26) sahip, sıcak-Jüpiter türü bir gezegendir. Barınak yıldızı olan XO-3 (GSC 3727-1064) ise F5 tayf türünden bir anakol yıldızıdır. İlk geçiş gözlemleri XO projesi kapsamında gözlenmiş olup XO kameraları ile 2003 yılında 4, 2004 yılında 3 geçiş gözlemi yapılmıştır. Farklı fotometrik bantlardaki 3 geçiş gözlemi kullanılarak yörünge dönemi 3.1915426 ± 0.00014 gün bulunmuştur. Adams vd. (2013) tarafından yıldızın yakın komşuluğunda ötegezegen harici barınak yıldızdan gelen sinyali etkileyebilecek olası başka bir kaynağın varlığı araştırılmış ve bulunamamıştır.

Yörünge parametrelerini ve barınak yıldızın temel atmosfer parametrelerini belirlemek üzere tayfsal gözlemleri yapılmıştır (K08). Gözlemler için 10 m'lik Hobby-Eberly Teleskobu (HET) ve 2.7 m'lik Harlan J Smith (HJS) teleskopları kullanılmıştır. Her iki teleskoba bağlı tayfçekerlerin çözünürlükleri 60000'dir.

Dikine hız gözlemleri (Şekil 2.6) ile geçiş yapan cismin gezegen kütlesi limitleri dahilinde olduğu kesinleştirilmiş, ortay (bisektör) analizleri yapılmış ve dikine hız değişimi ile aralarında korelasyon olmadığı gözlemiştir. Bu sonuç, dikine hızdaki değişimin yıldızın manyetik aktivitesi kaynaklı olmadığını, yıldızın ötegezegenle ortak kütle merkezi etrafındaki yörünge hareketi kaynaklı olduğunu göstermiştir. Tayfsal analizler için Spectroscopy made easy (SME) yazılımı (Valenti ve Piskunov 1996) kullanılmıştır. İlk keşfedildiğinde XO-3 yıldızının uzaklığı bilinmediği için 3 farklı uzaklık değerine göre parametreler bulunmuştur. Eş yaş eğrisi üzerinden en uygun uzaklık 260 parsek olarak belirlenmiştir. Bu durumda elde edilen barınak yıldız parametreleri 1.41 $M_{\odot}$, 2.13 $R_{\odot}$ ve yaşı 2.69 Gyr (milyar yıl) olarak bulunmuş,

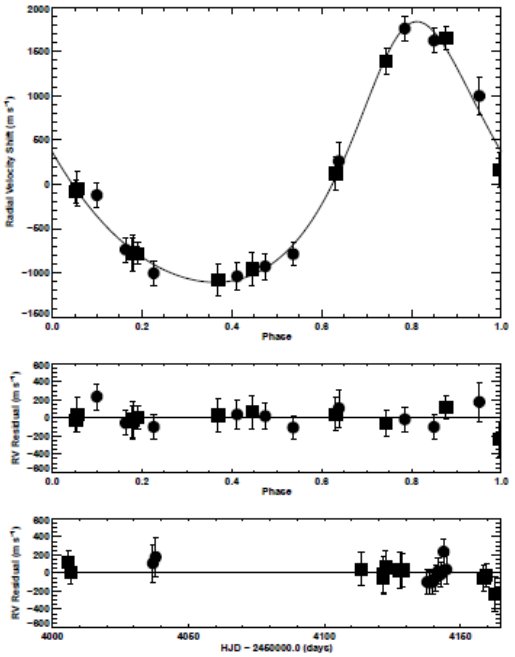
bu değerlere en iyi uyumlama olarak yüzey çekim ivmesi log g = 3.95 cm/s^2 olarak bulunmuştur. Işık eğrisi analizlerinde tayfdan elde edilen parametreler kullanılmış, gezegen ve yörünge parametrelerini belirlemek için elde edilen en iyi takip ışık eğrilerini (Şekil 2.5) modellemek üzere Mandel ve Agol (2002) geçiş modeli kullanılmıştır (K08).



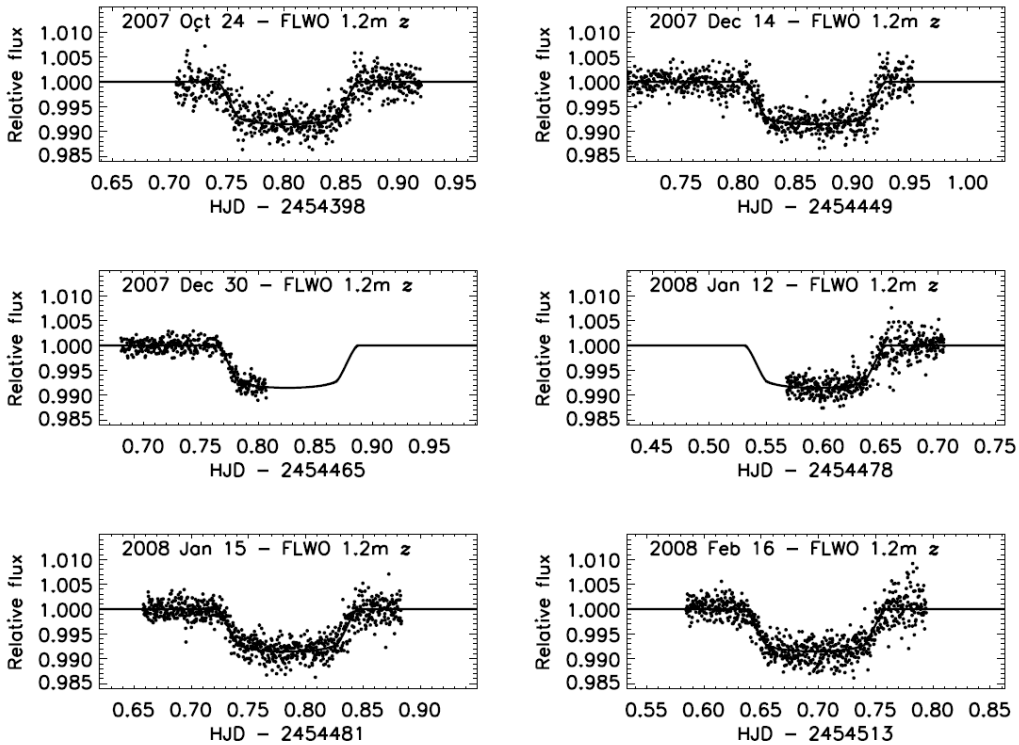
Şekil 2.5. XO-3 yıldızının takip gözlemleri ile elde edilmiş geçiş ışık eğrisi (Krull vd. 2008). Üst panel (a) ışık eğrisi, eş yaş eğrisi ve tayfsal analizlerden elde edilen yıldız kütle ve yarıçap değerlerine sabitlenerek yapılan uyumlamayı, alt panel (b) en küçük □2 elde etmek üzere kütle ve yarıçap değerlerini serbest bırakarak yapılan ışık eğrisi uyumlamasını göstermektedir.

Gezegen ve sistem parametreleri üzerine takip eden yıllarda değerleri daha hassas belirlemek adına başka çalışmalar da yapılmıştır. Winn vd. (2008) tarafından 0.4m Vermillion Cliffs Gözlemevi (V.Cliffs), 0.5m WISE, 0.6m Esteve Duran Gözlemevi (E.Duran), 1.2m Fred L.Wipple Gözlemevi (FLWO) teleskopları kullanılarak geçiş gözlemleri yapılmıştır (Şekil 2.7). Barınak yıldızın temel parametreleri için (T_{etkin}, v sini, [Fe/H]) K08 ile elde edilen değerleri kullanılmıştır. Winn vd. (2008) kendi gözlemleriyle eld ettikleri ışık eğrilerinin analizleri için Mandel ve Agol (2002) geçiş modelini kullanmış ve MCMC (Markov Chain Monte Carlo) algoritması ile en iyi çözümü verene kadar analizi sürdürmüşlerdir.

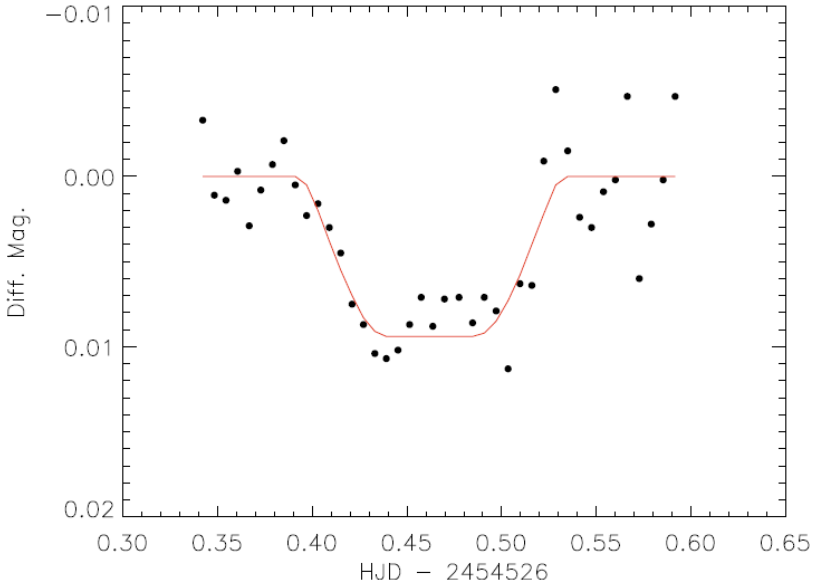
Hébrard vd. (2008) Observatoire de Haute Provence Gözlemevi'nin 1.93 m'lik teleskobuna bağlı SOPHIE tayfçekerini kullanarak sistemin yeni tayfsal gözlemlerini gerçekleştirmişler, takip fotometrisi için de 30 cm ayna çaplı Teide teleskobu ile bir gecelik geçiş gözlemi yapılmıştır (Şekil 2.8).



Şekil 2.6. XO-3 dikine hız gözlemleri ve uygulanan en iyi uyumlama ile artıkları. ■ : HET ile alınmış gözlemler, ● : HJS ile alınmış dikine hız gözlemleri (Krull vd. 2008).



Şekil 2.7. XO-3b'nin FLWO Teleskobu z bandı geçiş gözlemleri (Winn vd. 2008)



Şekil 2.8. Teibe teleskobu kullanılarak yapılmış XO-3b geçiş gözlemi (Herbard vd. 2008)

Hébrard vd. (2008) çalışmalarında yıldız yarıçapı için K08 tarafından verilen yarıçap dağılımını kullanmışlar; analizlerini kendi tayfsal ve fotometrik verilerini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Orta ve düşük kalitedeki fotometrik gözlemler sonucu elde edilen ışık eğrilerinin kullanıldığı bu üç çalışmada XO-3b ötegezegeni için elde edilen parametreler Tablo 2.2'de özetlenmiştir.

Tablo 2.2. Üç ayrı çalışmada verilen XO-3b gezegen ve yörünge parametreleri

Parametreler	Krull vd. (2008)	Winn vd. (2008)	Hébrard vd. (2008)
P (gün)	3.1915426 ± 0.00014	3.1915239 ± 0.0000068	3.19161 ± 0.00014
T_c (HJD)	2454025.3967 ± 0.0038	24254449.86816 ± 0.00023	2454494.549 ± 0.014
e	0.260 ± 0.017	0.260 ± 0.017	0.287 ± 0.005
ω (º)	-15.4 ± 6.6	345.8 ± 7.3	-11.3 ± 1.5
K (ms^{-1})	1471 ± 48	1463 ± 53	1503 ± 0.010
R_g / R_*	0.092 ± 0.004	0.09057 ± 0.00057	
i (º)	79.32 ± 1.36	84.20 ± 0.54	82.5 ± 1.5
a (AU)	0.0476 ± 0.0005	0.045	-
m_g (M_{jup})	13.25 ± 0.64	11.79 ± 0.59	12.5 ± 1.9
R_g (R_{jup})	1.95 ± 0.16	1.217 ± 0.073	1.5 ± 0.2

Tsantaki vd. (2014) XO-3 yıldızının parametrelerini tekrardan belirlemek üzere Hébrard vd. (2008) temelde dikine hız ve Rossiter-McLaughlin etkisini çalışmak üzere SOPHIE tayfçekeri ile elde edilen tayfsal gözlemleri kullanmışlardır. Tayfların analizi için SME programından yararlanılmış ve eşdeğer genişlik yerine sentetik tayf kullanılarak yıldız parametreleri elde edilmiştir Aynı çalışmada ayrıca elde edilen yıldız parametreleri kullanılarak

literatürdeki fotometrik veriler tekrar analiz edilmiştir. Işık eğrilerine uyumlama için Mandel ve Agol (2002) modeli ve Levenberg-Marquardt (LM) algoritması kullanılmıştır. Işık eğrisinden geçiş süresi $T_{geçiş}$ = $0.1043^{+0.0010}_{-0.0008}$ gün , yıldız yoğunluğu ρ* = 0.649 ± 0.060 gcm^{-3} , gezegenle yıldızın yarıçapları oranı 0.0915 $0.1043^{+0.0006}_{-0.0007}$ olarak bulunmuştur. Hobby-Eberly (HET), Harlan J. Smith (HJS) teleskoplarına bağlı tayfçekerler (K08), Keck / HIRES tayfçekeri (Winn vd. 2008) ve SOPHIE tayfçekeri (Tsantaki vd. 2014) ile elde edilen tayfllar üzerinden belirlenen yıldız parametreleri Tablo 2.3'te özetlenmiştir.

Tablo 2.3. XO-3 yıldızının üç ayrı çalışma tarafından elde edilen atmosfer parametreleri

Parametreler	Krull v.d (2008)	Winn v.d (2008)	Tsantaki v.d (2014)
T_{etkin} (K)	6429 ± 50	-	6781 ± 44
log g (cgs)	3.95 ± 0.062	4.244 ± 0.041	4.23 ± 0.15
[Fe/H] (dex)	-0.177 ± 0.027	-	-0.08 ± 0.04
v sini	18.54 ± 0.17	-	18.77 ± 0.29
Kütle (M_o)	1.41 ± 0.08	1.213 ± 0.066	1.41 ± 0.08
Yarıçap (R_o)	2.13 ± 0.21	1.377 ± 0.083	1.49 ± 0.08

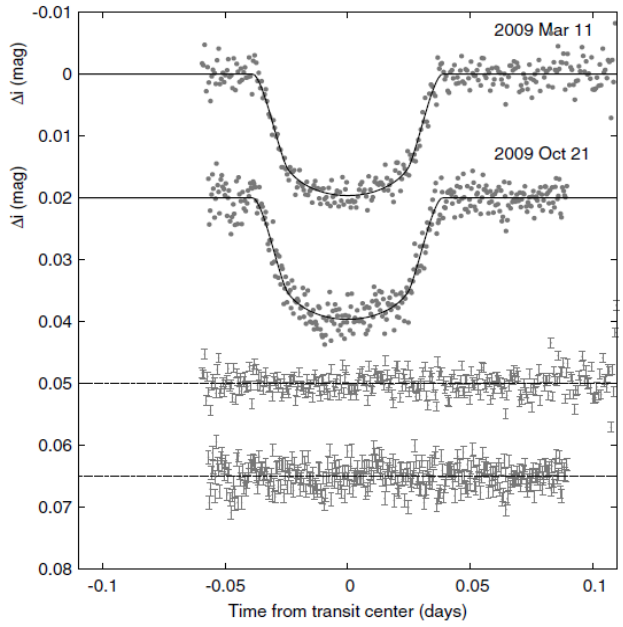
Hébrard vd. (2008) çalışmalarında SOPHIE gözlemlerinden elde edilen dikine hızlardan XO-3b için Rossiter-McLauglin etkisini (RM) de çalışmışlardır. Modelleme için Ohta (2005) tarafından verilen analitik formülden yararlanılmıştır. Yıldızın dönme ekseninin gözlemcinin bakış doğrultusuna dik düzlem üzerine izdüşümü ile ötegezegenin dolanma düzlemi arasındaki açı λ = 70° ± 15° olarak edilmiştir. Winn vd. (2009) ise Keck teleskobuna bağlı HIRES tayfçekeri ile yaptıkları tayfsal gözlemlerden aynı açıyı λ = 37°.3 ± 3°.7 olarak bulmuştur. Hirano vd. 2011 ise Subaru teleskobuna bağlı yüksek çözünürlüklü tayfsal gözlemlerle benzer bir sonuca (λ = 37°.0 ± 3°.0) ulaşmışlardır.

Machalek vd. (2010) XO-3b ötegezegenin atmosferini çalışmak üzere Spitzer Teleskobu ile kızılötede spektrofotometrik gözlemler gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri geçiş ve örtülme gözlemlerini modellemek için Mandel ve Agol (2002) modelini kullanmışlardır. Yıldız ve gezegen parametreleri için Winn vd. (2008) tarafından belirlenen parametreler kullanılmış, geçiş / örtme derinlikleri, geçiş / örtme zamanlarının ortası için 10^5 MCMC iterasyonu gerçekleştirmişlerdir. Örtme (ing. occultation) derinlikleri sırasıyla 3.6 μm'de 0.101% ± 0.004%, 4.5 μm'de 0.143 % ± 0.006%, 5.8 μm'de 0.134 % ± 0.049, 8.0 μm'de 0.150% ± 0.036% olarak bulunmuş, ayrıca elde edilen geçiş ve örteme zamanlarının ortası ile i = 84°.20 ± 0°.54 ve ω = 345°.8 ± 7°.3 değerleri (Winn v.d 2008) kullanılarak yörünge dış merkezliği tekrar hesaplanmıştır (e = 0.277 ± 0.009). Hesaplanan bu dış merkezlik değerinden hareketle tedirginlik etkisine bağlı ısınma parametresinin değeri $Q_g < 10^6$ olarak bulunmuştur. Wong vd. (2014) aynı gözlemlerden ötegezegenin gündüz tarafı ile gece tarafı arasında parlaklık farkı

varsa bile bu farkın %5'ten küçük olduğunu bulmuşlardır, bu da gezegenin albedosunun oldukça düşük olduğu şeklinde yorumlanmıştır.

2.4. HAT-P-20b Ötegezegenine İlişkin Literatür Özeti

HAT-P-20b ötegezegeni, The Hungarian-made Automated Telescope Network (HAT-Net) ağına bağlı teleskoplarca 2010 yılında keşfedilmiş kısa yörünge dönemine sahip yoğun bir gezegendir (Bakos vd. 2011, BA11). Barınak yıldızı HAT-P-20 (GSC 1910-00239) K7 tayf türünden bir yıldızdır. Gezegen parametrelerini modellerden daha iyi bir şekilde belirlemek için daha hassas ışık eğrileri gereklidir. Bu sebeple HAT-P-20'nin hassas fotometrik takip gözlemleri için Fred Lawrence Whipple gözlemevindeki (FLWO) 1.2 m'lik teleskop kullanılmıştır (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. HAT-P-20'nin FLWO teleksobu ile elde edilen geçiş ışık eğrisi ve modeli. FLWO 1.2 m ayna çaplı bir teleskop olup gözlemler 11 Mart-21 Ekim 2009 tarihlerinde yapılmştır (Bakos vd. 2011).

Bakos vd. (2011) HAT-P-20'nin barınak yıldızına ilişkin temel parametrelerinin yaklaşık değerlerini bulmak için düşük ve orta çözünürlüklü tayfları (ing. reconnaissance spectroscopy) FLWO teleskobuna bağlı çözünürlüğü 35000 olan Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (CfA) Digital Speedometer (DS) ve 2.5 m'lik Nordic Optical Teleskobuna bağlı çözünürlüğü 46000 olan Fiber-fed Echelle Spectrograph (FIES) tayfçekerler kullanılarak elde etmişlerdir.

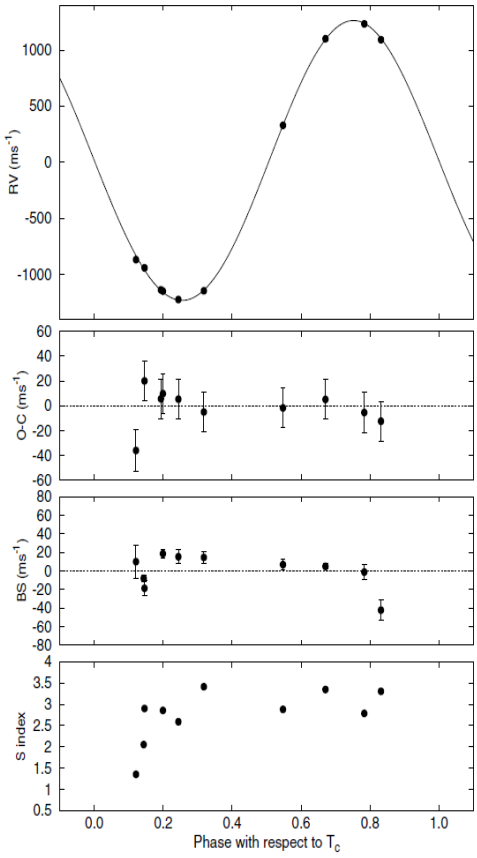
Bakos vd. (2011) barınak yıldızın atmosfer parametrelerini duyarlı olarak elde etmek üzere yüksek çözünürlüklü tayfl gözlemler için Hawai'de bulunan Keck teleskobuna bağlı çözünürlüğü 55000 olan High Resolution Echelle Spectrometer (HIRES) tayfçekerini

kullanmışlardır. Aynı tayfçekerle dikine hız gözlemlerini gerçekleştirmek üzere, daha hassas dikine hız değerleri elde edebilmek için iyodin hücresi kullanmışlardır. Elde edilen dikine hız grafiği ve artıkları Şekil 2.10'da verilmiştir. Yıldız parametreleri elde etmek için analizlerde ise iyodin hücresi kullanılmadan alınan tayflar tercih edilmiş, Spectroscopy Made Easy (SME) programından yararlanılmıştır. Bu analizlerden HAT-P-20 yıldızının etkin sıcaklığı T_{etkin} = 4626 ± 104 K, yüzey çekim ivmesi log g = 4.80 ± 0.1 (cgs) metal bolluğu [Fe/H] = +0.31 ± 0.08, yıldızın dönme hızının gözlemcinin bakış doğrultusundaki bileşeni v sini = 3.1 ± 0.5 kms^{-1} olarak elde edilmiştir (BA11). Dikine hız ve ışık eğrisi gözlemleri, tayflardan elde edilen yıldıza ilişkin atmosfer parametreleri ile birllkte analiz edilerek (ing. Global Modeling of the Data) Markov Chain Monte Carlo (MCMC) yaklaşımı ile modellenmiştir. MCMC analizinden elde edilen değerlerin nihai olasılık dağılımları (ing. posterior distribution), örneğin yıldız yarıçapına ölçeklendirilmiş yıldız yarıçapı (a / R_*) değeri için elde edilen olasılık dağılımı, yıldız evrimi modelleriyle birlikte kullanılarak daha tutarlı temel parametrelere ulaşmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 2.4'te özetlenmektedir.

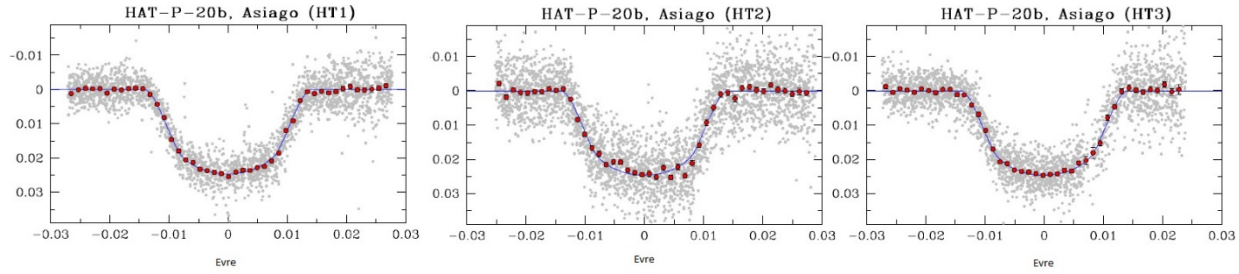
Tablo 2.4. HAT-P-20 yıldızının parametreleri (Bakos vd. 2011)

Parametreler	HAT-P-20
Taysal özellikleri	
T_{eff} (K)	4595 ± 80
[Fe/H]	+0.35 ± 0.08
vsini (kms^{-1})	2.1 ± 0.5
v_{mac} (kms^{-1})	2.21
v_{mic} (kms^{-1})	0.85
Y_{RV} (kms^{-1})	-18.81 ± 0.68
Temel parametreler	
$M_{yıldız}$ ($M_{güneş}$)	0.756 ± 0.028
$R_{yıldız}$ ($R_{güneş}$)	0.694 ± 0.021
log g (cgs)	4.63 ± 0.02
$L_{yıldız}$ ($L_{güneş}$)	0.19 ± 0.02
M_v (mag)	7.07 ± 0.17
Yaş (Milyar yıl)	$6.7^{+5.7}_{-3.8}$
Uzaklık (parsek)	70 ± 3

Granata vd. (2014) 1.82'mlik Asiago Copernico teleskobu ile aldıkları yeni ışık eğrilerini (Şekil 2.11), BA11'deki ışık eğrilerini ve amatör gözlemcilerin Exoplanet Transit Database (ETD) üzerinden paylaştıkları ışık eğrilerini kullanarak HAT-P-20b'nin geçiş ortası zaman değişimini (ing. Transit Time Variation, TTV) irdelemişlerdir.

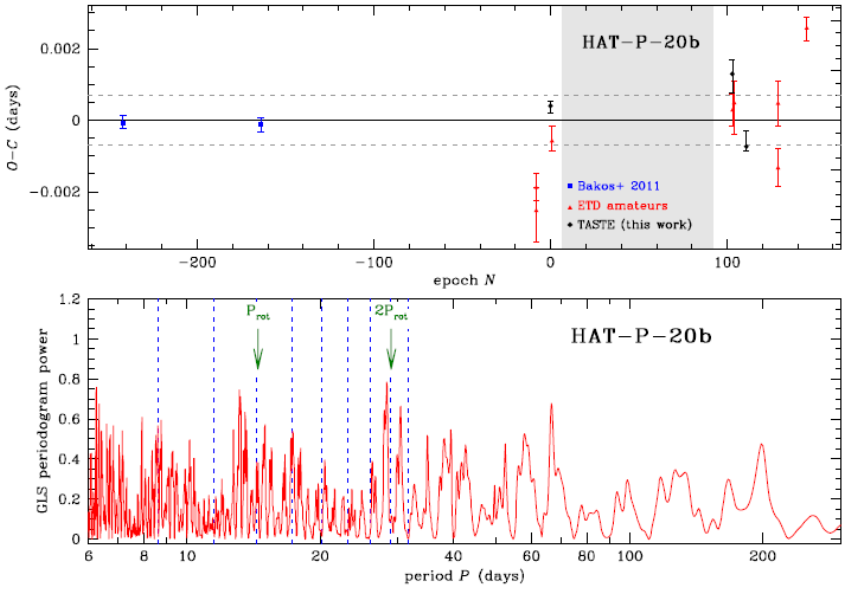


Şekil 2.10. HAT-P-20'nin Keck / HIRES dikine hız gözlemleri ve yörünge uyumlaması (üst panel) (rms = 16 ms^{-1}). Bu hızlarda bir değişimin olup olmadığının irdelendiği O-C grafiği üstten ikinci panelde, ortayın kapladığı hız alanının (ing. bisector span) zamanla değişimi üçüncü panelde, kromosferik aktiviteyi gösteren S indeksinin zamanla değişimi alt panelde verilmiştir (Bakos vd. 2011).



Şekil 2.11. HAT-P-20b Asiago geçiş gözlemleri. Gri ile gösterilen noktalar birleştirilmemiş Asiago gözlem verileri, kırmızı ile gösterilen 2 dakikalık aralıkla birleştirilmiş gözlem verileri (Granata vd. 2014).

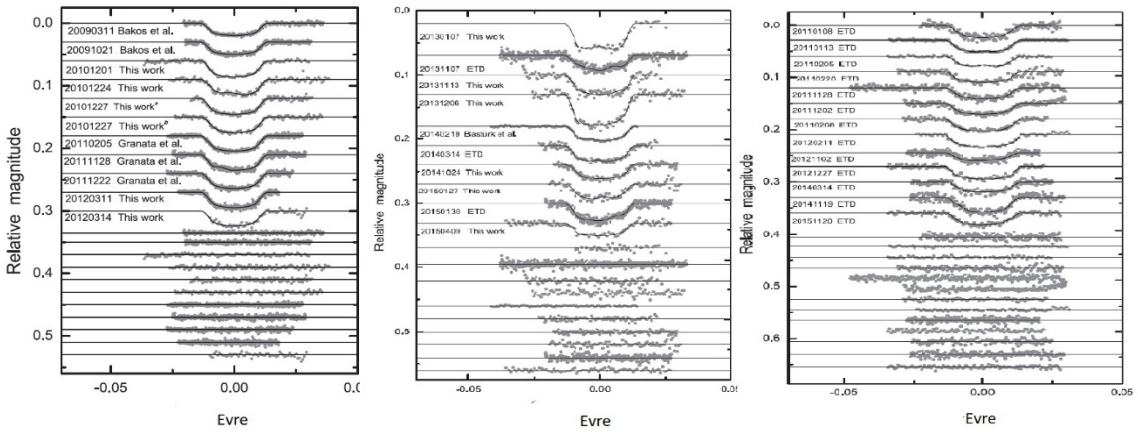
Granata vd. (2014) elde ettikleri O-C diyagramının frekans analizinde tespit ettikleri iki zayıf dönemliliğin (Şekil 2.12) sistemin kütle çekimi ile bağlı üçüncü bir cisim ya da manyetik etkinlikten kaynaklanabileceğini önermişlerdir.



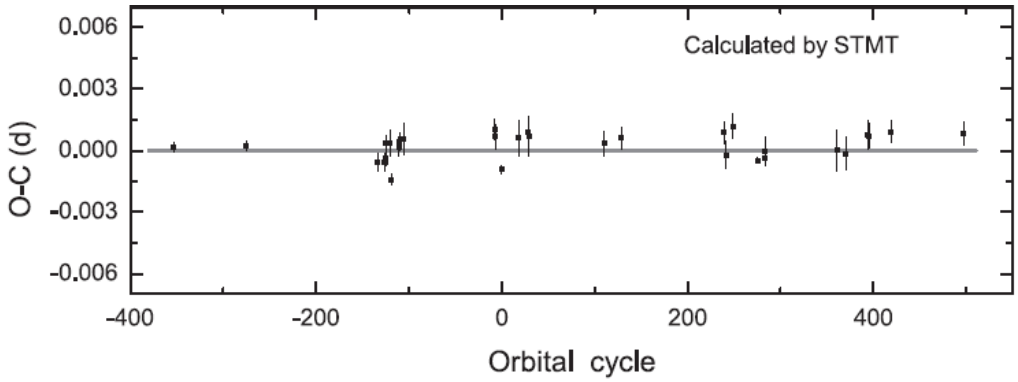
Şekil 2.12. HAT-P-20b'nin geçiş zamanları değişimi (TTV) diyagramı (üst panel). Altta Lomb-Scargle periodogramı görülmektedir (Granata vd. 2014).

Sun vd. (2017) Yunnan Gözlemevi / Güney Kore'de bulunan sırasyıla 1 m ve 2.4 m'lik, YO-1m ve YO-2.4m teleskopları, 0.5 m'lik Ho Koon Nature Education cum Astronomical Centre (HKNEAC-0.5m) teleskobu ve 0.3 m'lik Observatori Cal'Ou (OCIO) teleskoplarını kullanarak yaptıkları geçiş gözlemleri (Şekil 2.13) ile geçiş parametrelerini ve geçiş ortası zamanlarını elde etmişlerdir (Tablo 2.5). Elde ettikleri ışık eğrileri ile literatürden topladıkları ışık eğrilerinin geçiş ortası zamanlarından hareketle geçiş zamanları değişimi analizi yapmışlar ve gözlenen geçiş zamanları değişimini yıldızın manyetik etkinliğine atfetmişlerdir. Ayrıca HAT-Net ve WASP ışık eğrilerinde manyetik aktivite ya da zonklama kökenli uzun dönemli değişimlerin olup olmadığını denetlemişlerdir. Sonuç olarak her iki veri setinde de görsel bölgede değişim gözlenmiştir. Bunun temel nedeni olarak uzunca bir süre HAT-P-20 yıldızının belirli bir boylamına sabitlenmiş fotosferik lekelerin dönme ile modülasyonu kaynaklı ışık eğrisi asimetrileri gösterilmiştir. Bu durum kromosferik aktiviteye duyarlı Call H&K salma çizgileri ve X-ışını salma çizgilerinin şiddetlerinin değişimi ile tutarlı bir durum sergilemektedir (Bakos vd. 2011). Granata vd. (2014) de yıldızın kromosferik aktivitesi incelemek için Keck/HIRES tayflarındaki Call H&K çizgilerini çalışmışlar ve bu çizgilerde güçlü salma profilleri görmüşlerdir.

Sun vd. (2017) Spot And Transit Modeling Tool (STMT) bilgisayar kodu ile yaptıkları TTV analizleri doğrultusunda HAT-P-20b'nin geçiş sürelerinde başka bir cismin kütleçekimi kaynaklı dönemsel bir değişim bulamamışlardır (Şekil 2.14).

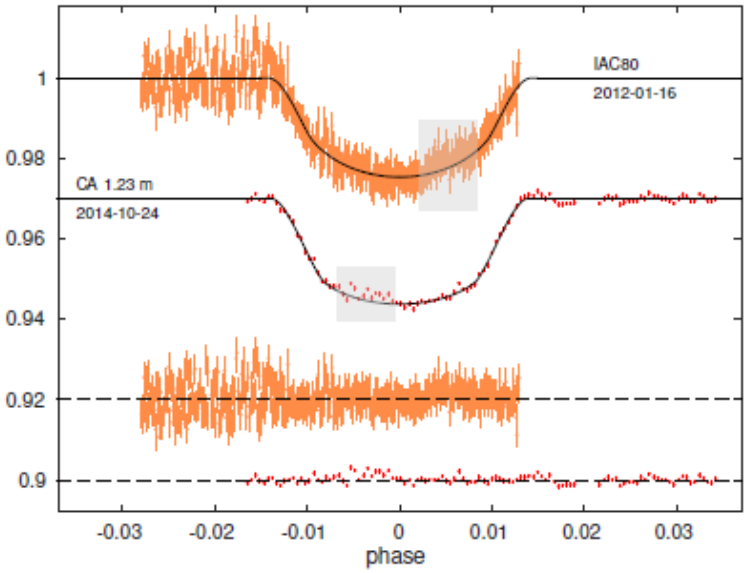


Şekil 2.13. HAT-P-20'nin fotometrik gözlemleri ve literatürden elde edilen ışık eğrileri (üst panel). Spot and Transit Modeling Tool (STMT) uyumlamasının artıkları her grafiğin altında verilmiştir (Sun vd. 2017).



Şekil 2.14. HAT-P-20'nin geçiş ortası zamanlarının değişimi (TTV) diyagramı (Sun vd. 2017).

Esposito vd. (2017) sistemin Rossiter-McLaughlin etkisini (RME) gözlemek üzere Telescopio Nazionale Galileo (TNG) teleskobuna bağlı yüksek çözünürlüklü tayfçekeri kullanmışlardır. Geçiş sırasında elde edilen dikine hıza yapılan en iyi RM uyumlaması sonucu $v \sin i_* = 1.85 \pm 0.27$ kms^{-1} olarak bulunmuştur. Barınak yıldızın gözlemcinin bakış doğrultusuna dik düzlem üzerine izdiüşümü ile gezegenin yörünge düzleminin ekseni arasındaki açı $\lambda = -8°.0 \pm 6°.9$ derece olarak bulunmuştur. Granata vd. (2014) tarafından $P_{dönme} = 14.48 \pm 0.02$ olarak verilen yıldızın dönme dönemini kulllanarak yıldızın dönme ekseni ile gezegenin yörünge düzlemine dik eksen arasındaki açı değeri olan $\psi = 36^{+10}_{-12}$ derece olarak bulunmuştur. Esposito vd. (2017) ayrıca 16 Ocak 2012'da IAC80 teleskobunu kullanarak R bandında ve 24 ekim 2014'te ise Calar Alto Gözlemevi'ndeki 1.23m Zeiss Teleskobu'nu kulanarak I bandında iki gecelik fotometrik veri elde edilmiştir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. HAT-P-20b'nin iki farklı teleskopla elde edilen geçiş ışık eğrileri. Gözlemler iki farklı teleskopla iki ayrı gecede, iki ayrı bantta elde edilmiştir. Şeffaf mavi bloklar: olası leke geçişlerini göstermektedir (Esposito vd. 2017).

Her iki fotometrik gecenin analizlerinden elde edilen R_p / R_* değerleri Granata vd. (2014) tarafından bulananlara göre oldukça farklıdır. Farklı gecelerde, farklı fotometrik bantlarda, farklı leke gruplarının gözlenmesinden dolayı farklı derinlikler elde edilmiş olabilir. Gezegenin kütle değeri 7.22 ± 0.36 M_J olarak bulunmuştur. Ölçülen yarıçap değerinin literatüre göre daha düşük çıkması, gezegen yoğunluğu (ρ_p = 8.31 ± 0.38 gcm^{-3}) değerinin Bakos vd. (2011) tarafından verilene göre (ρ_p = 13.78 ± 0.38 gcm^{-3}) daha düşük çıkmasını da açıklayabilir. Bugüne kadar yapılan tüm ışık eğrisi analizlerinden elde edilen sonuçlar Tablo 2.5'te özetlenmiştir.

Tablo 2.5. HAT-P-20b için üç ayrı çalışmada gezegen ve yörünge parametreleri

Parametreler	**Bakos vd. (2011)**	**Sun vd. (2017)**	**Esposito vd. (2017)**
K (ms^{-1})	1246 ± 8.1	1247 ± 6.3	1249.5 ± 1.2
ϒ (kms^{-1})	-18.81 ± 0.68	-38 ± 36	-18.087 ± 0.7
e	0.015 ± 0.005	0.0136	0.0172 ± 0.0016
w (°)	317 ± 130	330	342.7 ± 7.3
i (°)	86.8 ± 0.2	86.3 ± 0.1	86.88 ± 0.31
a (AB)	0.0361 ± 0.0005	0.03671 ± 0.00027	0.3593 ± 0.00029
M_*	0.756 ± 0.028	0.798 ± 0.018	0.742 ± 0.042
R_*	0.694 ± 0.021	0.744 ± 0.011	0.6796 ± 0.0054
$P_{dönme}$ (gün)	-	1.94 ± 0.07	2.36 ± 0.16
M_g	7.246 ± 0.187	7.59 ± 0.12	7.22 ± 0.36
R_g	0.867 ± 0.033	0.952 ± 0.017	1.025 ± 0.053
ρ_g (gcm^{-3})	13.78 ± 1.50	8.80	8.31 ± 0.38
T_{denge} (K)	970 ± 23	996 ± 19	964 ± 10

3. GEREÇ ve YÖNTEM

3.1. Fotometrik Gözlemler ve Işık Eğrilerinin Oluşturulması

Proje kapsamındaki tüm ötegezegenlerin (HAT-P-19b, WASP-52b, HAT-P-20b, XO-3b) parametrelerini elde etmek üzere analiz edilen tüm geçiş gözlemleri TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'nde (TUG) konuşlandırılmış 1 metre birncil ayna çaplı T100 teleskobu ile gerçekleştirilmiştir. Fotometrik gözlemlere ilişkin özet bilgiler Tablo 3.1'dee bulunmaktadır.

Tablo 3.1. Fotometrik gözlemlerin özeti

Yıldız	Tarih	Poz Süresi (s)	Filtre (Bessel)	Saçılma (milikadir)
HAT-P-19	28/07/2014	120	R	1.4
	21/08/2014	120	R	1.5
	14/09/2015	120	R	2.5
	04/10/2015	120	R	6.0
	05/11/2015	120	R	4.2
	18/12/2016	120	R	5.0
WASP-52	29/07/2016	100	R	3.0
	29/07/2016	100	V	3.0
	26/08/2016	100	B	3.0
	26/10/2018	100	R	3.0
XO-3	14/01/2013	150	R	0.5
	07/09/2013	120	R	4.8
	23/09/2013	150	R	0.8
	20/02/2014	120	R	4.1
	14/10/2016	150	R	6.3
	30/10/2016	150	R	8.3
HAT-P-20	19/02/2014	120	R	0.7
	19/11/2014	120	R	2.7
	15/12/2014	120	R	0.7
	30/10/2015	90	R	2.3
	22/11/2015	120	R	1.3
	20/09/2016	120	R	6.5

HAT-P-19b'nin 4 Ekim 2015 ve 18 Aralık 2016 tarihlerinde yapılan geçiş gözlemleri kötü hava şartları sebebiyle çok fazla saçılmaya sahiptir. Bu düzeydeki saçılma ışık eğrisi üzerinde normalizasyon seviyesinin saptanmasını güçleştirdiğinden geçiş derinliği beklenenden çok daha sığ görünmektedir. 28 Temmuz 2014, 21 Ağustos 2014, 14 Eylül 2015 ve 5 Kasım 2015 gecelerinde elde edilen verilerin AstroImageJ programıyla modellenmesinden (Collins vd. 2017) elde edilen ve doğrudan geçiş derinliğinden ölçülen $(R_g/R)^2$ değerlerinin ortalaması 0.0202 iken 4 Ekim 2015 ve 18 Aralık 2016 tarihlerinde alınan veriler için bu değerler sırasıyla 0.0192 ve 0.0170 çıkmaktadır. Bu nedenle bu gözlemsel veriler, sonuçlara yanlılık getirebilecekleri endişesiyle ışık eğrisi analizlerinde değerlendirmeye alınmamıştır ancak geçiş zamanı değişimi (Transit Timing Variations, TTV) analizlerinde kullanılmıştır.

3.1.1. Odak-dışı Fotometrik Gözlemler

Yerden yapılan Geçiş Yapan Ötegezegen (ing. Transiting Exoplanet, TEP) gözlemlerinde bazı zorluklar vardır. Bu zorlukların kaynaklarından bazıları gözlem boyunca değişen atmosferik etkiler, sintilasyon, teleskobun takip sorunları, foton gürültüsü, dedektörün satürasyonu (doyma) ve düz alan düzeltmesinden gelen hatalardır. Projenin, gezegen parametrelerinin yeniden belirlenmesi amacına yönelik gözlemleri bu hataları minimize amacı ve bu şekilde yüksek ışıkölçüm duyarlılığı elde etmek üzere odakdışı gözlem tekniği (Southworth vd. 2009, Baştürk vd. 2015) ile gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda teknik, projenin temel fotometrik gözlem yöntemidir. Yöntemin temel yaklaşımı; göreli olarak uzun integrasyon zamanı kullanarak sistemden gelen ışığı CCD üzerinde fazla sayıda piksele yaymaktır.

Yıldızdan CCD dedektöre çok küçük zaman aralıklarında gelen fotonların sayısı çok fazla değişmekte hatta hiç foton gelmeme ihtimali bulunmaktadır. Ayrıca yıldızdan gelen bir fotonun CCD'ye ulaşması diğer bir fotonu etkilememektedir. Bu yüzden foton toplama olayı bir Poisson olayıdır ve foton istatistiği Poisson dağılımı gösterir (Southworth vd. 2009). Bu durum kısa poz süreleri ile alınmış görüntülerde sayım değerlerinin bir görüntüden diğerine çok fazla değişmesine yol açmaktadır. Bu da ışık eğrisindeki noktaların ortalamadan çok fazla saçılmasına yol açar. Nitekim bir Poisson dağılımında standart sapma, ortalama değerin karekköküne eşittir. Bu saçılma foton gürültüsü olarak da bilinir. Ancak foton toplama olayı için belirlenen süre (integrasyon ya da poz süresi) uzatıldığında gelen fotonların dağılımı ortalama değer etrafında daha küçük bir saçılmaya sahip normal (Gaussyen) dağılım gösterir (Baştürk vd. 2015, 2016, Keten 2018).

Ayrıca yöntemle, noktanıın dağılma fonksiyonunun (ing. Point Spread Function, PSF) yarı yükseklikteki tam genişliğini (ing. Full Width at Half Maximum, FWHM) minimize etmenin amaçlandığı standart bir gözleme kıyasla düz alan düzeltmesinden (ing. flat fielding) gelen

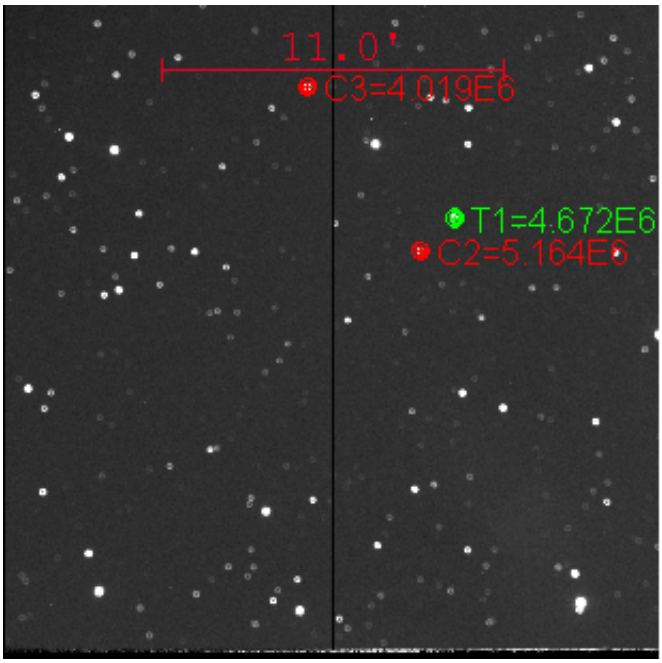
hata da bir mertebe azaltılır. Ölçüm daha fazla sayıda pikseli içine alan bir açıklık içinden yapılacağından ortalamadan çok fazla sapan piksellerdeki bilgi kaybı ihmal edilebilir düzeyde olacaktır. Aynı sebeple gece boyunca gerçekleşen atmosferik görüşteki değişikliklerden daha az etkilenilir. PSF'nin FWHM'si göreli olarak büyük olduğundan ani FWHM artışı/azalışı gözlemi daha az etkileyecektir. Bu nedenle uzun integrasyon zamanı ve geniş PSF kullanıldığında, daha fazla sayıda pikselden, daha uzun zaman aralığı için ölçülen gökyüzü değeri standart bir gözleme göre daha fazla olur. Ancak geniş bir alandan ölçülen sinyal, gürültüyü domine edeceği için S/N yükselir. Yöntemin bir başka avantajı, özellikle T100'ün dedektörü gibi çok sayıda piksel içeren (4096 x 4096) dedektörlerden ölçüm yapıldığı için okuma süresinin (ing. readout time) uzun olmasından kaynaklanan "ölü zamanın" toplam gözlem süresi içerisindeki oranının azaltılmasını sağlamasıdır. Örneğin standart gözlem yönteminde 5 saniye poz süresi ile gözlenen bir kaynak için dedektörden 45 saniyelik okuma süresi nedeniyle bir görüntü için harcanın 50 saniyenin ancak %10'u foton toplamak üzere kullanılırken, aynı kaynağın odak dışı olarak 45 saniye gözlenmesi durumunda, harcanan sürenin yarısı foton toplamak için kullanılmış olur.

3.1.2. Fotometrik Gözlemlerin Önindirgemesi ve Normalizasyonu:

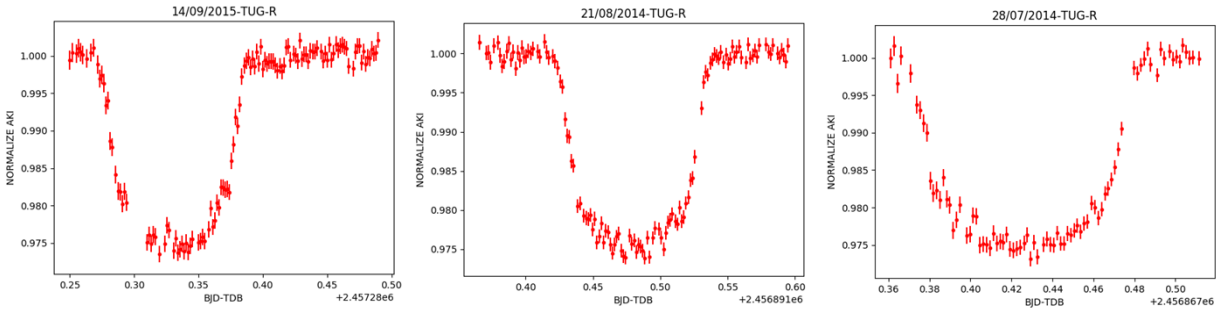
Fotometrik veriler AstroImageJ (Collins v.d. 2017) yazılımı kullanılarak dedektör kaynaklı istenmeyen etkilerden arındırılmış (Dark, Bias, Flat düzeltmesi), poz süresinin ortaları için hava kütleleri (ing. Airmass) hesaplanmış, Jülyen günü (JD) olarak görüntü başlıklarına (ing. header) kaydedilen gözlem zamanları dinamik Barisentrik Jülyen gününe (BJD-TDB) dönüştürülmüştür. Her bir gözlem için 5 ile 10 arasında karaakım (ing. Dark) görüntüsü (yıldız gözlemleri ile aynı poz süresinde) ve her bir pikselde kalan elektronların neden olduğu yanlılığı gidermek üzere Bias görüntüleri alınmış, bu görüntülerin medyanları alınarak Master Dark ve Master Bias isimli birer medyan kalibrasyon görüntüsü oluşturulmuştur. Tüm gözlem gecelerinin başında ve sonundaki alacakaranlık sırasında gökyüzünden gözlem yapılan filtreler kullanılarak en az 5 adet Flat görüntüsü alınmış ve bu görüntülerin medyanı alınarak Master Flat isimli medyan düz alan görüntüleri oluşturulmuştur. HAT-P-19 (m_R = $12^m.80$) ve WASP-52 (m_R = $12^m.03$) için, poz süreleriyle geçiş süresini dengeli tutabilmek ve böylece geçiş boyunca model için yeterli sayıda nokta alabilmek amacıyla 2x2 piksel birleştirme (ing. binning) yapılmış, Daha parlak olan HAT-P-20 (m_R = $11^m.00$) ve XO-3 (m_R = $9^m.83$) için ise piksel birleştirmeye ihtiyaç duyulmamıştır. HAT-P-19 için örnek bir görüntü Şekil 3.1'de verilmektedir.

Dedektör kaynaklı istenmeyen etkilerin arındırılmasını müetakip, fark ışıkölçüm (diferansiyel fotometri) için uygun, parlaklıkları ve renkleri hedef yıldıza olabildiğince yakın mukayese yıldızları kullanılarak grup açıklık fotometrisi (ing. ensemble aperture photometry) (Honeycutt 1992) tekniği ile ışık eğrileri oluşturulmuştur. Işık eğrileri oluşturulurken geçiş

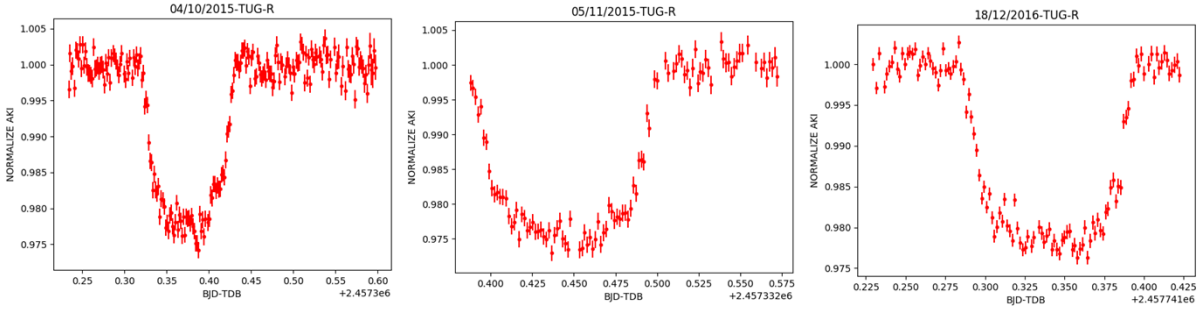
dışında kalan bölgelerden hava kütlesinin değişimini temsil eden lineer ifadeler bulunmuş ve tüm ışık eğrisi bu doğrulara bölünmüştür (ing. airmass detrending). Verilerin modellenmeye hazır hare getirilmesi için geçişin başladığı ve bittiği bölgeler kullanılarak normalizasyon seviyleri belirlenmiş ve tüm göreli akılar bu seviyelerdeki ortalama göreli akıya bölünerek 1'e normalize edilmiştir. Grup açıklık ışıkölçümü, hava kütlesi kaynaklı lineer sönümleme etkisinin giderilmesi ve normalizasyon işlemleri için de yine AstroImageJ (Collins v.d. 2017) yazılımı kullanılmıştır. HAT-P-19b (Şekil 3.2 ve Şekil 3.3), WASP-52b (Şekil 3.5), XO-3b (Şekil 3.7) ve HAT-P-20b (Şekil 3.9) geçişleri için T100 ile elde edilen ışık eğrileri sunulmuştur.



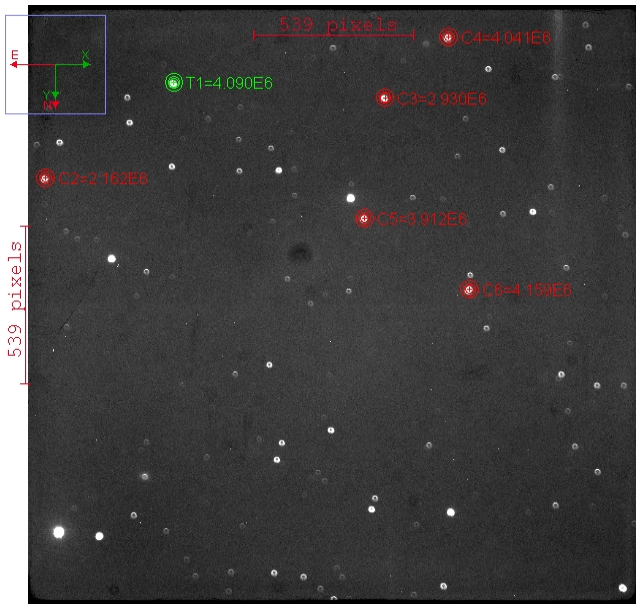
Şekil 3.1. HAT-P-19'un içinde bulunduğu T100 tarafından gözlenen alan. HAT-P-19, T1 (yeşil), mukayese yıldızları GSC 02283-01197 ve 2MASS 00382684+3446556 kırmızı ile gösterilmektedir. T100 taraıfndan görülen alana ilişkin ölçek yaydakikası cinsinden görüntünün en üzerinde verilmiştir.



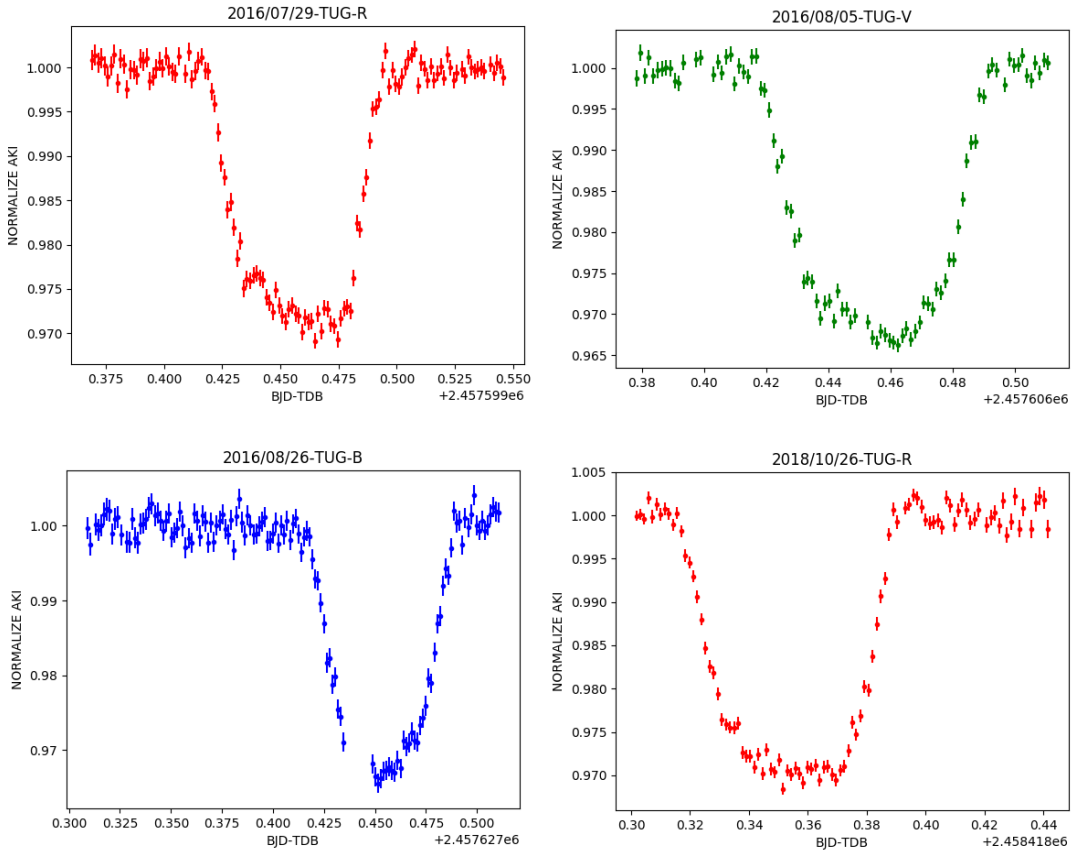
Şekil 3.2. HAT-P-19b'nin parametre belirlemek üzere kullanılan T100 geçiş ışık eğrileri



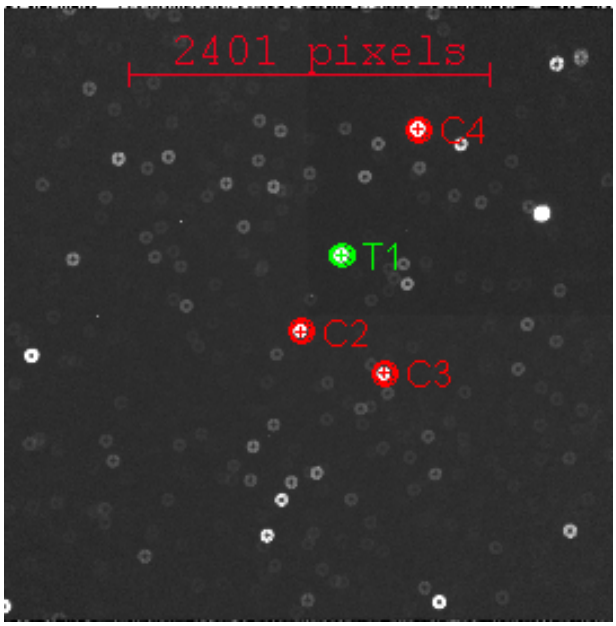
Şekil 3.3. HAT-P-19b'nin parametre belirlemek üzere kullanılan T100 geçiş ışık eğrileri. Bu veri setleri geçiş zamanı değişimi analizinde kullanılmıştır.



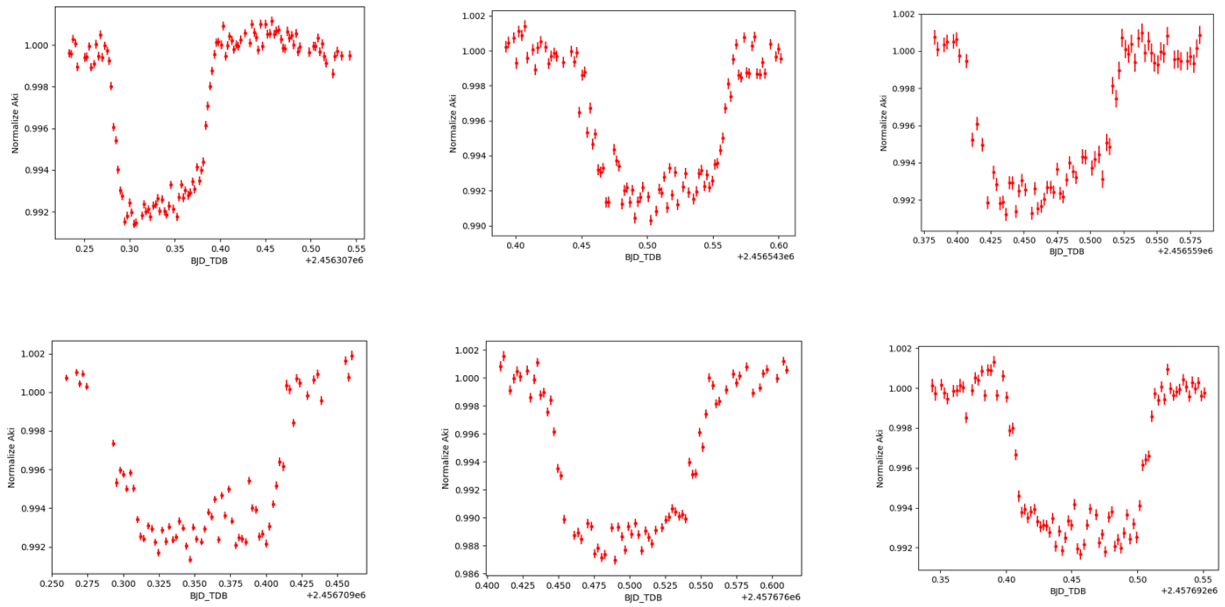
Şekil 3.4. WASP-52'nin içinde bulunduğu T100 tarafından gözlenen alan. WASP-52 T1 (yeşil), mukayese yıldızları C2: 2MASS 23141672+0842169, C3: TYC 1161-1249-1, C4: TYC 1161-938-1, C5 TYC 1161-890-1, C6 23131711+0838268 kırmızı ile gösterilmektedir. Yaydakikası cinsinden ölçeklendirme Şekil 3.1'de verildiği gibidir. Bu yüzden bu şekilde ölçeklendirme piksel sayısı olarak gösterilmektedir.



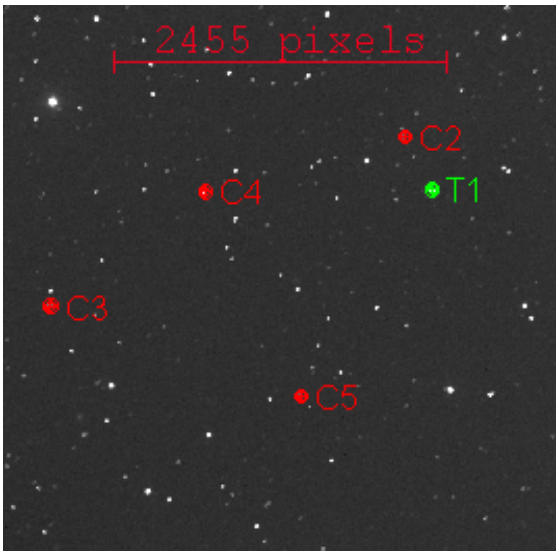
Şekil 3.5. WASP-52b'nin tamami modellemede kullanılan T100 geçiş ışık eğrileri.



Şekil 3.6. XO-3'ün içinde bulunduğu T100 tarafından gözlenen alan. XO-3 yıldızı T1 (yeşil) ile mukayese yıldızları C2 (2MASS 04220323+5751381), C3 (2MASS 04214163+5753064) ve C4 (2MASS 04213311+5744423) (kırmızı).



Şekil 3.7. XO-3'ün T100 ile geçiş gözlemleri. Soldan saga sırasıyla (üst panel) 14 Ocak 2013, 7 Eylül 2013, 23 Eylül 2013, (alt panel) 20 Şubat 2014, 14 Ekim 2016 ve 30 Ekim 2016 tarihlerinde alınmış ışık eğrileri. Bu ışık eğrilerinden saçılması en küçük ve giriş / çıkış zamanları elde edilmiş olan 14 Ocak 2013 ile 14 Ekim 2016 gözlemleri temel parametrelerin belirlenmesinde kullanılmıştır.

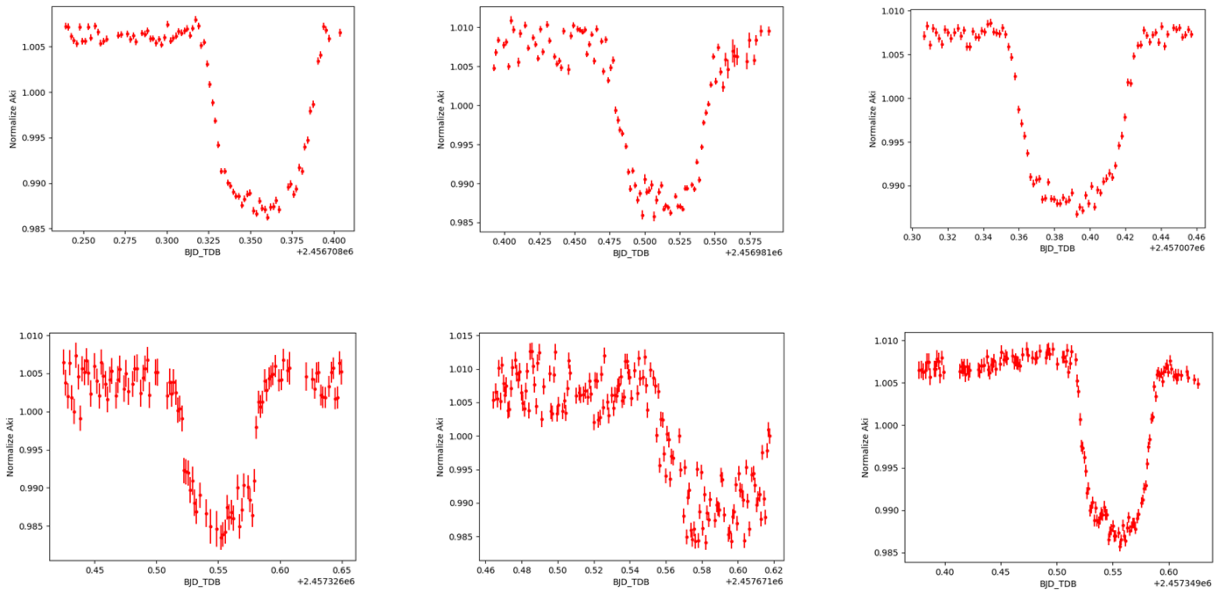


Şekil 3.8. HAT-P-20'nin içinde bulunduğu T100 tarafından gözlenen alan. HAT-P-20 yıldızı T1 (yeşil) ile mukayese yıldızları C2 (2MASS 07274451+2418097), C3 (2MASS 07281796+2420157), C4 (2MASS 07280187+2428038) ve C5 (2MASS 07284393+2424382) (kırmızı).

3.1.3. Işık Eğrilerinin Modellenmesi

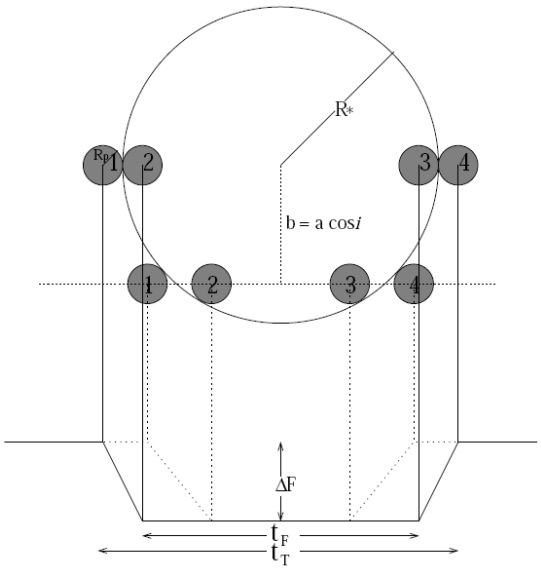
Literatürde geçiş modeli yapabilmek için bir çok yazılım paketi mevcuttur (Yalçınkaya 2018). Bu modellerin çoğu Mandel ve Agol (2002, kısaca MA2002) algoritmasını

uygulamaktadır. Bir kısmı ise analitik geçiş modeli ile beraber sadece uzay teleskopları ile ulaşılabilecek hassasiyette görülebilecek etkileri modelleyebilmek üzere yazılmıştır. Hem MA2002 algoritmasını kullanmasından hem de detaylı model seçenekleri sağlaması açısından ve kullanım kolaylığından dolayı (Yalçınkaya 2018) ön sonuçların elde edilmesi için EXOFAST (Eastman 2013) kodu seçilmiştir. Programın iki versiyonu bulunmaktadır. İlki internet tarayıcısı üzerinden fotometrik verinin yüklenmesiyle çalışmaktadır (https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/cgi-bin/ExoFAST/nph-exofast). Ancak bu versiyon veriyi modellerken Levenberg-Marquartd (LM) (Levenberg 1944; Marquardt 1963) en küçük kareler minimizasyonu yöntemini kullanmaktadır. Masaüstü versiyonu ise Monte Carlo & Markov Chain (MCMC) yöntemiyle ki-kare minimizasyonunu kullanmakta, bu şekilde çözümlerden yerel minmumlardan kaçınılabilmektedir. Masaüstü versiyonu paramtrelerin değerleri ve üzerlerindeki belirsizliği daha hassas ve doğru bir biçimde hesaplamaktadır ancak modelleme işlemi uzun sürebilmektedir.



Şekil 3.9. HAT-P-20'nin T100 ile geçiş gözlemleri. Soldan sağa sırasıyla (üst panel) 19 Şubat 2014, 19 Kasım 2014, 15 Aralık 2014, (alt panel) 30 Ekim 2015, 9 Ekim 2016 ve 22 Kasım 2015 tarihlerinde alınmış ışık eğrileri. Bu ışık eğrilerinden saçılması en küçük ve giriş / çıkış zamanları elde edilmiş olan 15 Aralık 2014 ile 22 Kasım 2015 gözlemleri temel parametrelerin belirlenmesinde kullanılmıştır.

Bir geçiş ışık eğrisinden (Şekil 3.10) doğrudan ölçülebilen nicelikler, görünen disklerin kontakt (teğet) anları (t_1, t_2, t_3, t_4), geçişin toplam süresi (t_T), gezegen diskinin tamamının yıldız diski önünde kaldığı süre (t_2-t_3 arası: t_F) ve ışık değişimidir (ΔF). Geçiş sırasında gezegenin konumuna bağlı ışık değişimi (ışık eğrisi) ve ilgili nicelikler Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Geçiş geometrisi.

Sistemden gelen akı F = ($4\pi R^2\sigma T^4$) / ($4\pi d^2$) (σ: Boltzmann sabiti, T: yıldızın etkin sıcaklığı, d: yıldızın gözlemciye uzaklığı, R yıldızın yarıçapını temsil etmektedir) olduğundan geçiş esnasındaki ışık değişiminin genliği;

$$\Delta F = \frac{F_{geçişyokken} - F_{geçiş}}{F_{geçişyokken}} = \left(\frac{R_g}{R_*}\right)^2$$

olmaktadır. Geçişin süresine ve derinliğe bağlı diğer bir diğer parametre ise;

$$\frac{a}{R_*} = \frac{\sqrt{(1-\Delta F)^2 - b^2}}{\sin^2\left(\frac{t_F n}{P}\right)}$$

formülü ile verilmektedir. Etki parametresi ve a/R_* değerleri ile yörünge eğim açısı;

$$i = \cos^{-1}\left(b\frac{R_*}{a}\right)$$

formülü ile bulunabilir. (3) denklemindeki a/R_* parametresi (yıldızın yarıçapına ölçekli yörünge büyüklüğü) Keplerin 3. (harmonik) yasasındaki denklemde yerine konulduğunda yıldızın ortalama yoğunluğu;

$$\frac{M_*}{\frac{4}{3}n R^3} = \rho_* = \frac{3n}{GP^2}\left(\frac{\sqrt{(1-\Delta F)^2 - b^2}}{\sin^2\left(\frac{t_F n}{P}\right)}\right)^3$$

formülü ile bulunabilmektedir. Ancak yukarıdaki denklemler gezegenin yörüngesinin çembersel olduğu varsayımı altında yapılmıştır. Eliptik yörüngelerde yörünge yarıbüyük eksen uzunluğu a için;

$$a \qquad \frac{a\left(1-e^2\right)}{1+esin\,\omega}$$

dönüşümü yapılmalıdır. Yukarıdaki denklemlerden görüleceği gibi bir geçişin dönemi bilindiği ve gözlemsel ışık eğrilerine yapılan geçiş modellerine girdi parametresi olarak sağlandığında, yörünge eğim açısı i, yıldız yarıçapına ölçeklendirilmiş yarıbüyük eksen uzunluğu a/R_*, gezegenin yarıçapının barınak yıldızınkine oranı R_g / R_* ve yıldızın ortalama yoğunluğu ρ_* bulunabilinmektedir.

Atmosfer parametrelerinin hesaplanması ve ışık eğrilerinin modellenmesi için en az saçılmaya sahip WASP-52 (26 Ağustos 2018) ve HAT-P-19'un (21 Ağustos 2014) birer ışık eğrileri Exofast-v1 internet tarayıcı versiyonu ile öncelikle modellenmiş, bu modellerden elde edilen a / R_* değerleri ile Torres (2010)'daki yöntem birleştirilerek yıldızların yüzey çekim ivmeleri (log g) için öncü dağılımlar (ing. priors), bu dağılımların ortalama değeri ve ortalama değerin standart sapmaları bulunmuştur.

T100 ile elde edilen geçiş ışık eğrileri, dikine hız gözlemlerinden elde edilen parametreler (dikine hız genliği K, enbernini boylamı ω, gezegen yörüngesinin eksantritesi e, gezegenin yörünge eğimine bağlı gezegen kütlesi $m_g$sini), barınak yıldızın atmosfer parametreleri (T_{etkin} ve [Fe/H]) ve Gaia DR2 (Gaia topluluğu işbirliği vd. 2016, Gaia topluluğu işbirliği vd. 2018b) paralaks parametrelerinin beraber modellenmesi (ing: Global Modeling) Exofast-v2 (Eastman 2017) programıyla gerçekleştirilmiştir. Bu işlemlere ilişkin detaylı bilgi 4. Sonuçlar bölümünde verilmiştir.

Tüm parametrelerin beraber modellenmesi sırasında sistemin dikine hızlarını tekrar modellemek yerine HAT-P-19, WASP-52, XO-3 ve HAT-P-20 için bu modellerden elde edilen K, e, ω değerleri sırasıyla Hartman vd. (2011), Hébrard vd. (2013), Krull vd. (2008) ve Bakos vd. (2010)'dan alınmıştır. Çünkü günümüzde dikine hızları modellemek için bu çalışmalarda kullanılan yöntemden daha gelişmiş ve daha uygun bir model bulunmamaktadır.

3.2. Tayfsal Gözlemler ve Tayfların Analize Hazır Hale Getirilmesi

Bu çalışmada HAT-P-19 ve HAT-P-20 yıldızlarının 10 metre birincil ayna çaplı Keck Teleskobu'na bağlı yüksek çözünürlüklü (R ~ 55000) High Resolution Echelle Spectrometer (HIRES) tayfçekeri ile alınmış yüksek çözünürlüklü birer tayfı, WASP-52 ve XO-3 yıldızlarının ise Observatoire Haute-Provence (OHP) Gözlemevi'ndeki 1.93 metre birincil ayna çaplı teleskoba bağlı SOPHIE tayfçekeri ile alınmış yüksek çözünürlüklü (R ~40000) birer tayfı, sırasıyla (https://koa.ipac.caltech.edu/cgi-bin/KOA/nph-KOAlogin) ve SOPHIE http://atlas.obs-hp.fr/sophie/) arşivlerinden çekilip ilk analiz tarihilerinden bu yana gelişen tayfsal analiz teknikleri kullanılarak tekrar analiz edilmiş, bu analizler sonucunda temel atmosfer parametreleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar geçiş yapan bu ötegezegenlere ilişkin temel parametrelerin belirlenmesinde kullanılabileceği gibi yıldız parametreleriyle ötegezegen parametreleri arasında araştırılan korelasyonlara da girdi sağlayabilir. Tablo 3.2'de proje kapsamında çalışılan tüm yıldızların literatüre girmiş ve varlığından haberdar olunan tüm tayfsal gözlemleri yer almaktadır.

3.2.1. HAT-P-19'un Tayfsal Gözlemleri

HATT-P-19'un Harvard Smithsonian Gözlemevi'ndeki (CfA) 1.5 metre aynı çaplı teleskoba bağlı DS (Digital Speedometer) ve TRES (Tillinghast Reflector Echelle Spectrograph) ile 2.5 metre ayna çaplı Nordic Optical Teleskobu'na (NOT) bağlı FIES (FIbre-fed Echelle Spectrograph) tayfçekerleriyle alınan tayfları düşük S/N oranına sahiptir ve keşif yayınında da sadece dikine hızları elde ederek geçiş yapan cismin gezegen kütle limitleri dahilinde olup olmadığını belirlemek için kullanılmıştır. Buna karşılık 8.2 m çaplı Subaru Teleskobu'na bağlı High-Dispersion Spectrograph (HDS) ve 10 m çaplı Keck teleskobuna bağlı High Resolution Echelle Spectrometer (HIRES) tayfları yüksek çözünürlük ve yüksek S/N oranına sahiptir. Ancak HDS tayflarının dalgaboyu aralığı görece çok dar (~1000 A°), Keck / HIRES verilerine göre düşük S/N oranına sahip ve temel amaç yine HAT-P-19'un dikine hızını hassas bir şekilde ölçmek olduğundan Keck / HIRES tayflarının kullanılması tercih edilmiştir. Bu tayfların da büyük bir bölümü yine barınak yıldızın dikine hızını hassas bir şekilde ölçme amacıyla iyodin hücresinden geçirilerek yapılmıştır. Bu nedenle bu tayflar iyodin çizgilerince domine edildiğinden analizlerde kullanılmamıştır. Keck / HIRES ile iyodin hücresi kullanılmadan alınan sdece bir adet tayf bulunmaktadır. Hartman vd. (2001)'de (H11) de tayfsal analiz için sadece bu tayf kullanılmıştır. Bu nedenlerden dolayı HAT-P-19'un tayfsal analizinde sadece bu tayf kullanılmıştır. Kullanılan tayfa ilişkin bilgiler Tablo 3.3'te, üzerinde hiçbir işlem yapılmamış tek boyutlu tayf ise Şekil 3.11'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Proje yıldızlarının tayf arşivlerinde erişilen yüksek çözünürlüklü tayfları

Yıldız / Tayfçeker	Amaç / Tür	Tarih	R	Tayf sayısı
HAT-P-19				
DS	Dikine Hız (I_2)	Aralık 2008 – Şubat 2009	44000	3
FIES	Dikine Hız (I_2)	Ocak – Ekim 2009	67000	7
TRES	Dikine Hız (I_2)	4 Eylül 2009	30000	1
Keck / HIRES	Dikine Hız (I_2)	Ekim 2009 – Şubat 2010	55000	12
Keck / HIRES	Yıldız parametreleri	23 Şubat 2010	55000	1
Subaru / HDS	Dikine Hız (I_2)	8 – 10 Ağustos 2009	160000	26
WASP-52				
SOPHIE/HE	Yıldız parametreleri	Ekim – Aralık 2010	40000	9
SOPHIE/HR	Dikine Hız (I_2)	Ekim – Aralık 2010	75000	20
CORALIE	Dikine Hız (I_2)	Ağustos 2010 – Ekim 2011	60000	16
XO-3				
SOPHIE/HE	Yıldız parametreleri	Ekim 2011 – Aralık 2012	40000	6
SOPHIE/HR	Dikine Hız (I_2)	Ekim 2011 – Aralık 2012	75000	43
Keck / HIRES	Dikine Hız (I_2)	Ağustos 2010 – Ekim 2011	55000	54
Keck / HIRES	Yıldız parametreleri	2 Şubat 2009	55000	1
HAT-P-20				
SOPHIE/HE	Yıldız parametreleri	Aralık 2011 – Şubat 2012	40000	3
SOPHIE/HR	Dikine Hız (I_2)	Aralık 2011 – Şubat 2012	75000	15
Keck / HIRES	Dikine Hız (I_2)	Nisan 2009 – Şubat 2015	55000	49
Keck / HIRES	Yıldız parametreleri	Nisan 2009 – Şubat 2015	55000	6

3.2.2. WASP-52'nin Tayfsal Gözlemleri

WASP-52'nin tayfsal olarak gözlendiği SOPHIE tayfçekeri temel olarak iki modda çalıştırılmaktadır: 1) Yüksek S/N oranının hedeflendiği HE (ing. high efficiency) modu, 2) Yüksek dikine hız hassasiyetinin hedeflendiği HR (ing. high radial velocity precision) modu. WASP-52'nin dikine hızını ölçme amacıyla alınan SOPHIE / HR ve CORALIE tayçekeriyle elde edilen tayfları yüksek çözünürlükte olmasına karşın çok düşük S/N oranına sahiptir. Çünkü hedef yüksek dikine hız hassasiyetidir. Bu nedenle sadece SOPHIE / HE tayflarını kullanmak, tayfsal analiz sonuçlarının daha güvenilir olmasını sağlamaktadır. Ancak SOPHIE/HE tayfları, altı tanesi hariç ay ışığına çok fazla maruz kalmıştır. Bu 6 tayftan 5'i çok düşük S/N oranına

sahiptir ve bazıları geçiş esnasında alınmıştır. Her ne kadar düşük bir olasılık olsa da geçiş esnasında alınan tayfta gezegen atmosferinin soğurucu etkileri ve Rossiter / McLaughlin etkisi analiz sonucunu etkileyebilir endişesiyle en yüksek S/N oranına sahip ve geçişten hemen sonra alınan (gezegenin sadece gece tarafının göründüğü) SOPHIE / HE tayfı analizde kullanılmıştır. Analizde kullanılan SOPHIE / HE tayfına ilişkin bilgiler Tablo 3.3'te, üzerinde hiçbir işlem yapılmamış tek boyutlu (dalgaboyuna karşılık aletsel akı) tayflar Şekil 3.12'de yer almaktadır.

Tablo 3.3. Yıldızların atmosfer parametrelerini hesaplamak için kullanılan tayflar

Yıldız	Tayfçeker	Tarih	S/N	Dalgaboyu Aralığı (A°)	Poz Süresi (Saniye)	R
HAT-P-19	Keck / HIRES	23/02/2010	137	3360-8100	1380	55000
WASP-52	SOPHIE / HE	28/11/2010	71	3800-7000	1800	40000
XO-3	Keck / HIRES	02/02/2009	125	3360-8100	500	55000
XO-3	SOPHIE / HE	13/10/2012	50	3800-7000	900	40000
HAT-P-20	Keck / HIRES	23/02/2010	150	3360-8100	1380	55000

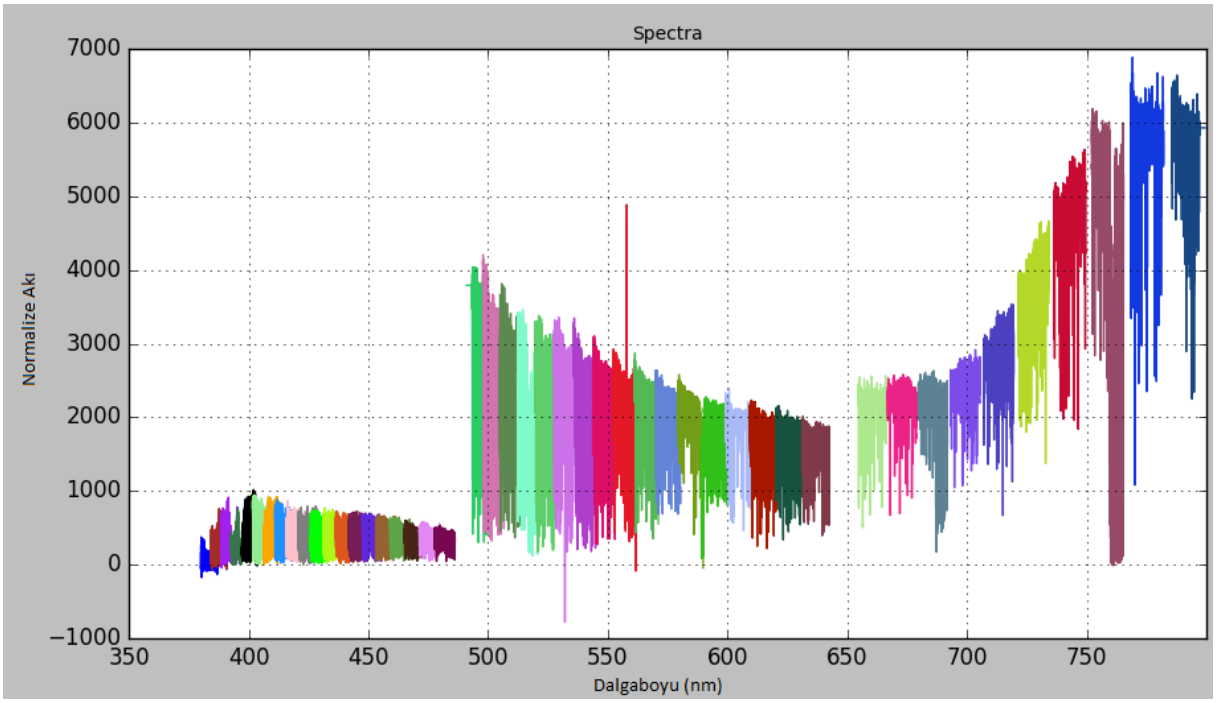
3.2.3. XO-3'ün Tayfsal Gözlemleri

XO-3 yılıdızının Observatoire de Haute-Provence Gözlemevi (OHP), Keck Teleskobu ve Subaru teleskobu veritabanlarında yüksek çözünürlüklü tayfları bulunmaktadır. Veritabanlarında bulunan tayflardan büyük bir bölümü hassas dikine hız verisi (Subaru gözlemleri Rossiter-McLaughlin etksini gözlemek için yapılmıştır) elde etmek için iyodin hücresi kullanılarak alındığından iyodin çizgileri barındırır (Tablo 3.2). Bu nedenle, XO-3 atmosfer parametreleri hesabı için iyodin çizgisi barındırmayan, 2 Şubat 2009 tarihinde Keck teleskobuna bağlı High Resolution Echelle Spectrometer (HIRES) tayfçekeri ile alınmış, tüm önindirgeme işlemlerinden geçirilmiş, dalgaboyu kalibrasyonu yapılmış tek boyutlu tayf (Şekil 3.13) ve Observatoire de Haute-Provence Gözlemevi'ndeki (OHP) 1.93 m birincil ayna çaplı teleskoba bağlı SOPHIE tayfçekeri ile 13 Mart 2012 tarihinde alınmış tayf (Şekil 3.14) kullanılabileceğine karar verilmiştir. Çalışmada kullanılan tayflar ve özellikleri Tablo 3.3'te sunulmaktadır.

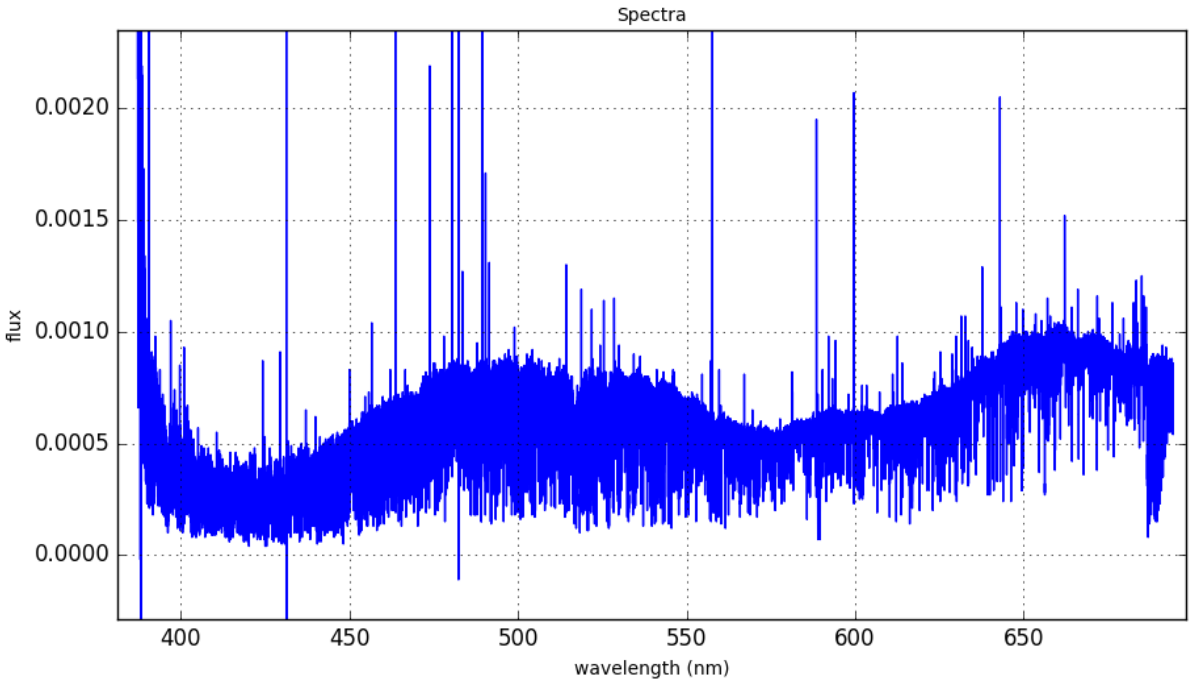
3.2.4. HAT-P-20'nin Tayfsal Gözlemleri

HAT-P-20 yıldızının tayfsal analizleri için Very Large Telescope (VLT) teleskobuna bağlı Keck-HIRES tayfçekeriyle 3 Mayıs 2009 tarihinde elde edilmiş iyodin çizgisi

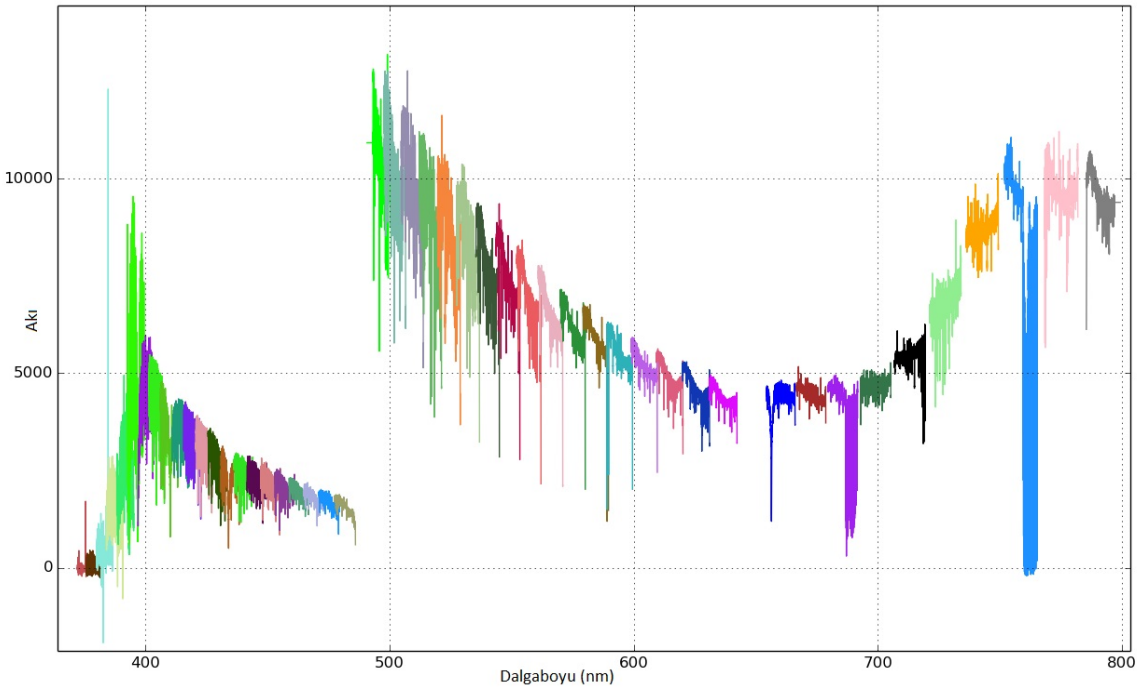
barındırmayan önindirgeme işlemlerinden geçirilmiş, dalgaboyu kalibrasyonu yapılmış ortalama 55000 çözünürlüğe sahip tayf kullanılmıştır (Şekil 3.15).



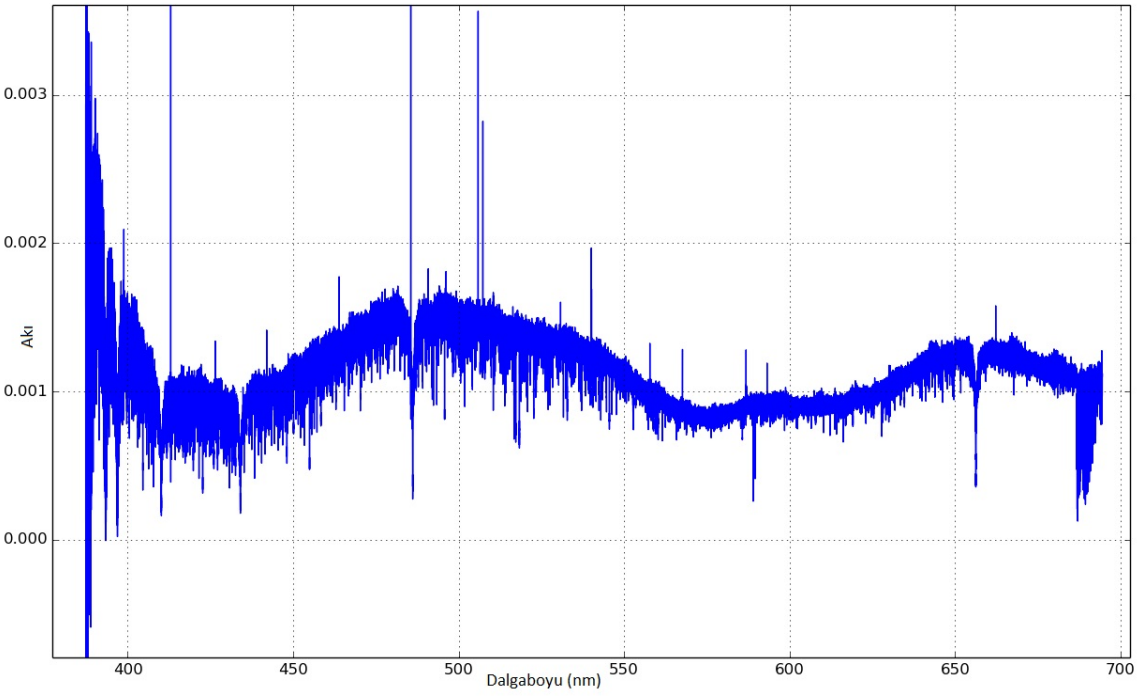
Şekil 3.11. HAT-P-19'un Keck / HIRES arşiv tayfı. 23 Şubat 2010'ta alınmış bu tayf sadece indirgenip, dalgaboyu kalibrasyonu yapılmştır. Her bir basamak farklı renklerle gösterilmiştir. Keck / HIRES için 3 farklı CCD kamera kullanılmaktadır ve bu CCD'ler tayfın mavi, yeşil ve kırmızı bölgelerinden ölçüm yapmaktadır. Tayf ölçümü yapılamayan 650 nm ve 490 nm etrafında 2 farklı bölge bulunmaktadır.



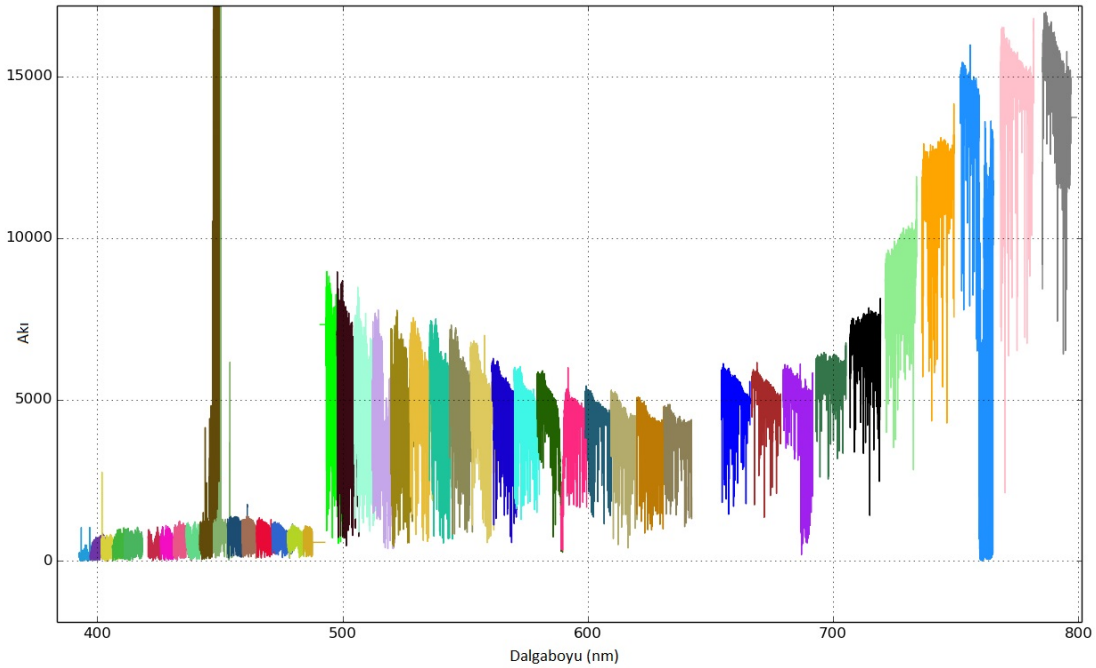
Şekil 3.12. WASP-52'nin SOPHIE tayfı. 28 Kasım 2010'da alınmış bu echelle tayf, sadece bir boyuta indirgenmiş, basamakları birleştirilmiş ve dalgaboyu kalibrasyonu yapılmıştır.



Şekil 3.13. XO-3 Keck/HIRES arşiv tayfı. 2 Şubat 2009'da alınan bu tayf üzerindeki her renk bir echelle basamağına (ing. order) karşılık gelmektedir.



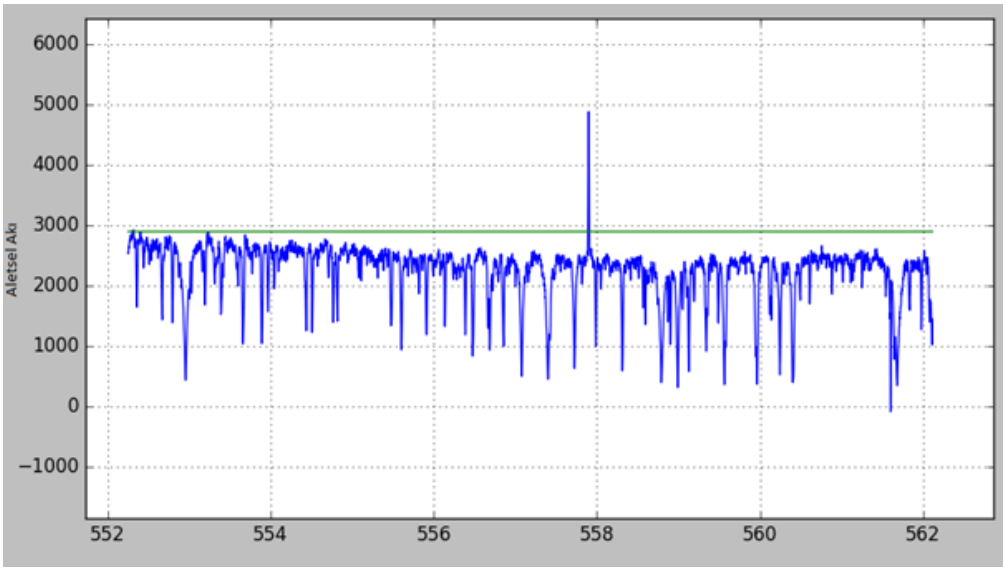
Şekil 3.14. XO-3 SOPHIE arşi tayfı. 13 Ekim 2012'de iyodin hücresi kullanmadan alınmış bu tayf sadece bir boyuta indirgenip, dalgaboyu kalibrasyonu yapılmış ham tayftır.



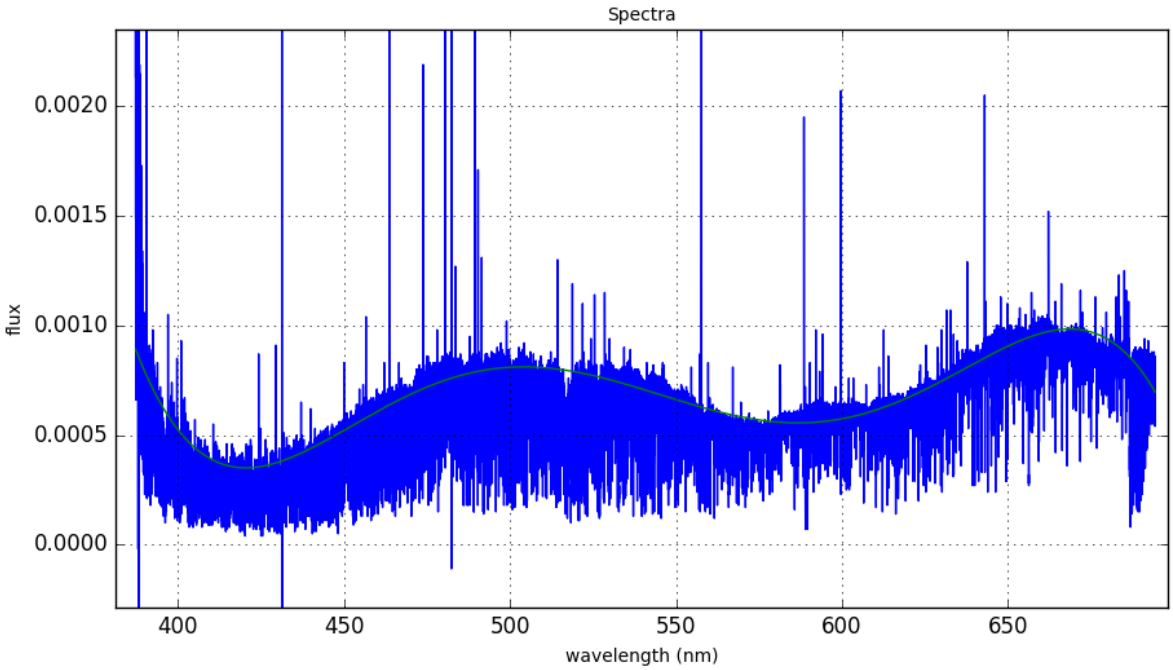
Şekil 3.15. HAT-P-20 Keck-HIRES arşiv tayfı. 3 Mayıs 2009'da elde edilen bu tayf üzerindeki her bir renk farklı bir echelle basamağı (ing. order) temsil etmektedir.

3.2.5. Tayfların Süreklilik Seviyesine Normalizasyonu

Arşivlerden çekilen tayfları öncelikle normalizasyona hazır hale getirebilmek için kabaca belirlenen süreklilik seviyeleri 1'e yakın bir değere getirilmiştir. Bu amaçla Keck / HIRES tayfları (HAT-P-19 ve HAT-P20) her bir basamağı eğimi sıfır olan lineer birer denkleme, SOPHIE / HE tayfları (XO-3 ve WASP-52') tayfları ise beşinci dereceden birer polinoma bölünmüştür (Şekil 3.16).

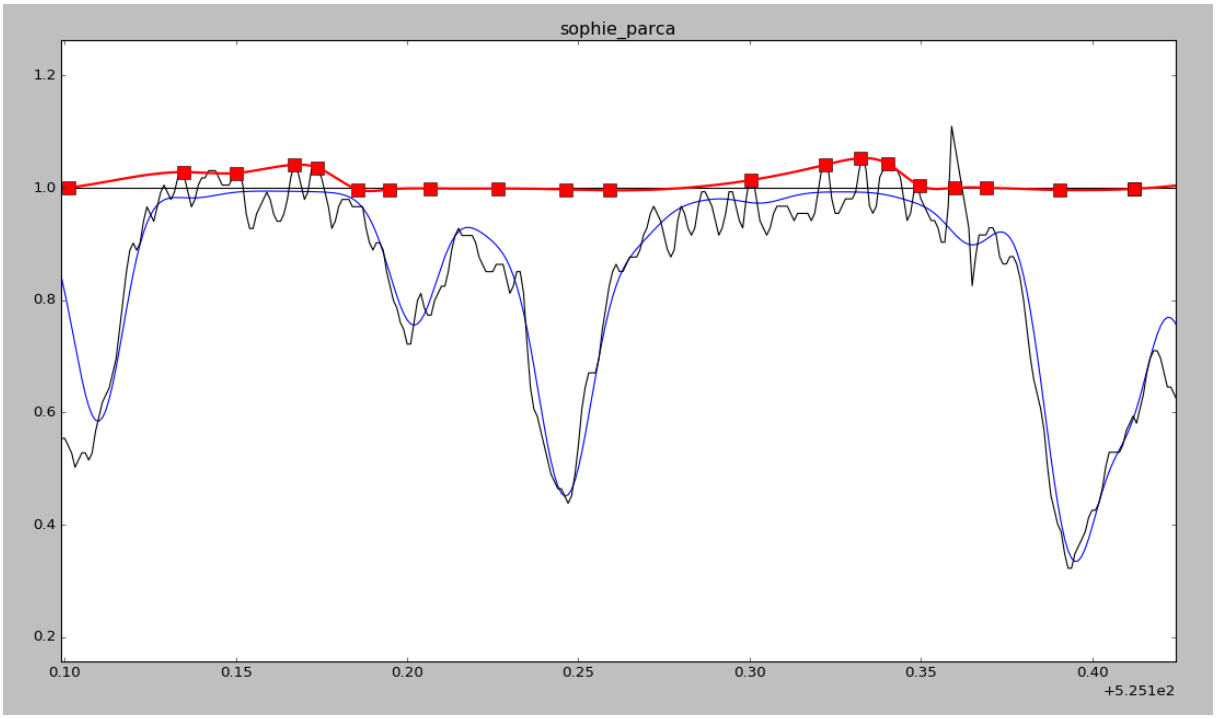


Şekil 3.16. HAT-P-19'un arşivden çekilmiş tayfının rastgele seçilmiş bir basamağı (mavi) ve bu basamağın süreklilik seviyesini 1'e getirmek için bölünen doğru (yeşil).

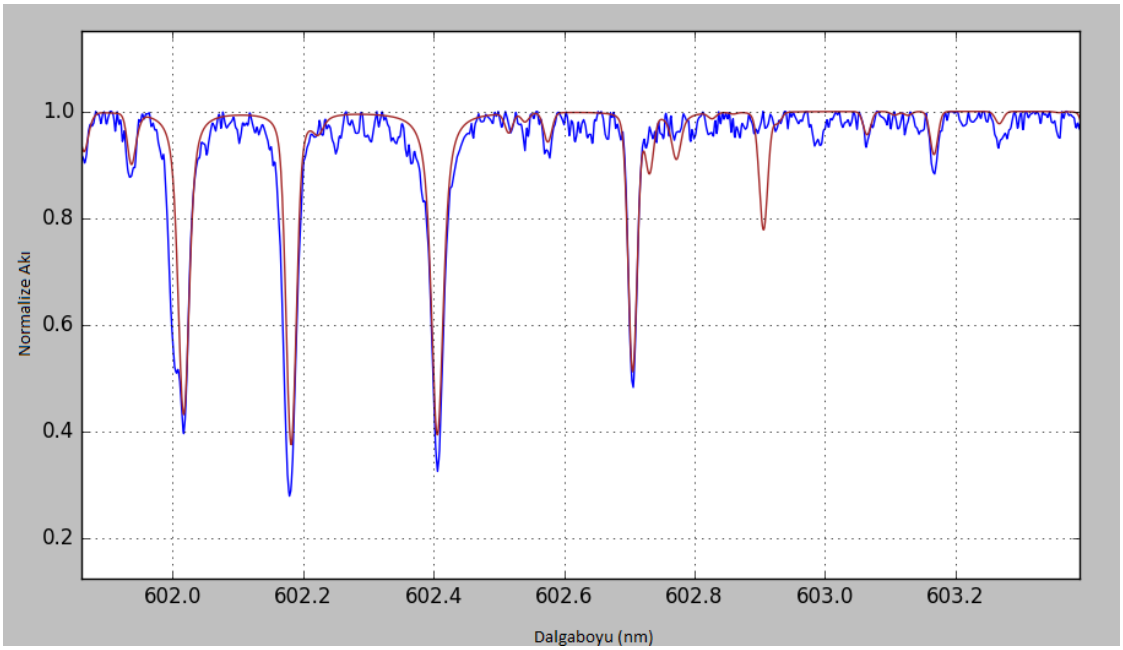


Şekil 3.17. WASP-52'nin arşivden çekilmiş ham tayfının (mavi) süreklilik seviyesini 1 civarına getirmek için tayfın bölündüğü 5. dereceden polinom (yeşil).

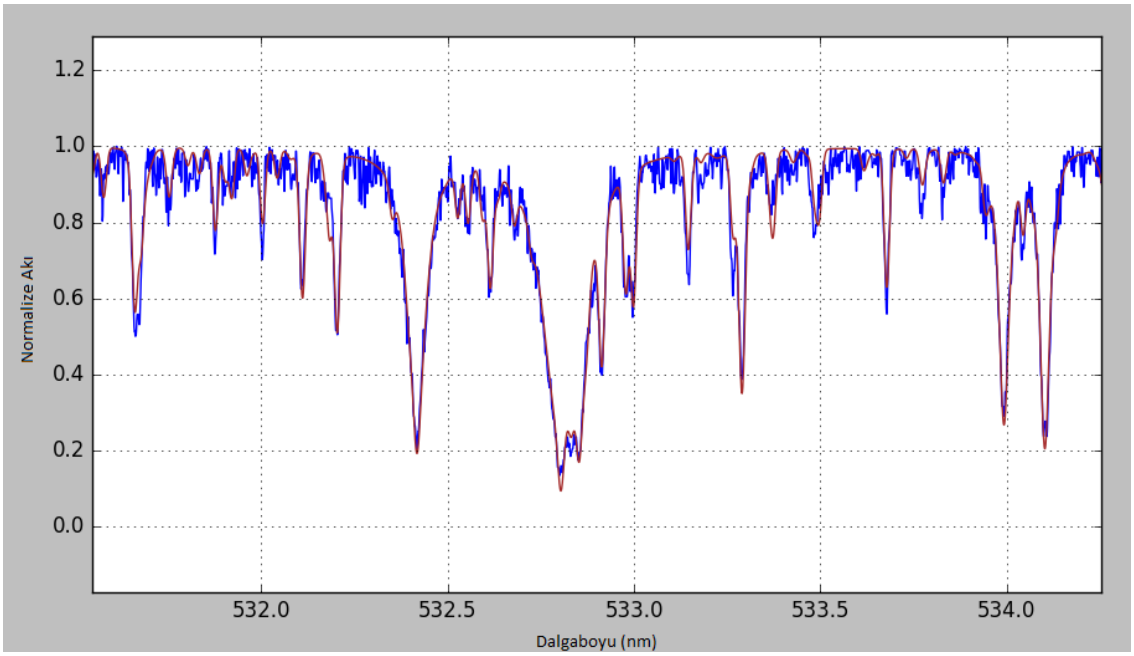
Soğuk yıldızların tayflarında çok sayıda ve birbirine çok yakın tayfsal çizginin varlığı sürekliliğin saptanmasını önemli ölçüde zorlaştırmaktadır. Bu nedenle öncelikle iSpec tayfsal analiz programına (Blanco-Cuaresma vd. 2014) gömülü olarak bulunan Synthe kodu (Kurucz vd. 1993), ATLAS9 Castelli model atmosferi (Castelli ve Kuruzc 2004), Güneş bolluğu değerleri için Asplund (2009) tarafından verilen değerler ile Vienna Atomic Line Database (VALD, Piskunov vd. 1995, Kupka vd. 2000, Rybichikova vd. 2015) çizgi listesi ve öncü parametreler (ing. priors) için ise keşif makalelerindeki atmosfer parametreleri ile birlikte kullanılarak tüm yıldızlar için birer sentetik tayf oluşturulmuştur. Sentetik tayflardan sürekliliğin nereden geçmesi gerektiği referans alınarak (sentetik ve yıldız tayfı arasındaki çizgi şiddetinin çok farklı olduğu durumlarda çizginin şiddetine göre etrafındaki sürekliliği de aşağı çekeceği dikkate alınmıştır) yıldızların tayflarında sürekliliğin geçmesi beklenen noktalar manuel olarak işaretlenmiştir (Şekil 3.18). Daha sonra işaretlenen bu noktaları düğüm kabul eden kübik spline fonksiyonları oluşturularak yıldızların tayfları bu fonksiyonlara bölünmek suretiyle normalize edilmiştir. Normalizasyon işlemi için bu çalışma için tarafımızca Python dili ile yazılmış bir kod kullanılmıştır. Normalizasyon işlemi sonrası HAT-P-19 için elde edilen tayf ve normalizasyon için sürekliliğin geçtiği noktaları belirlemek üzere kullanılan sentetik tayf Şekil 3.19'de görülmektedir. WASP-52 için aynı şekil farklı bir dalgaboyu bölgesi için Şekil 3.20'de verilmiştir.



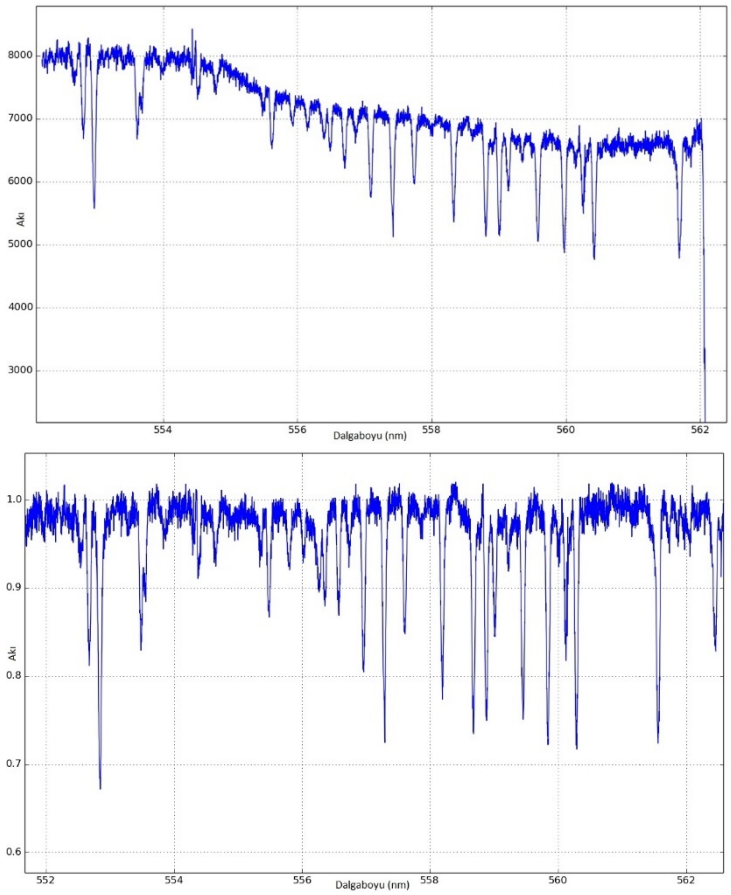
Şekil 3.18. WASP-52 tayfında sürekliliği belirlemek için kullanılan sentetik tayf (siyah). WASP-52'nin başlangıç parametreleri ile oluşturulan bu tayf, gözlemsel tayfta (mavi) sürekliliğin hangi noktalardan geçtiğini belirlemek üzere sadece görsel bir referans anlamında kullanılmıştır. Görsel olarak işaretlenen düğüm noktaları kırmızı nokta, bu noktalardan geçen spline fonksiyonu kırmızı sürekli çizgi ile gösterilmektedir. Aynı işlem benzer şekilde HAT-P-19'un tayflarına da uygulanmıştır.



Şekil 3.19. HAT-P-19'un normalize tayfı (mavi) ve normalizasyonda kullanılan sentetik tayf (kahverengi) gösterilmektedir.

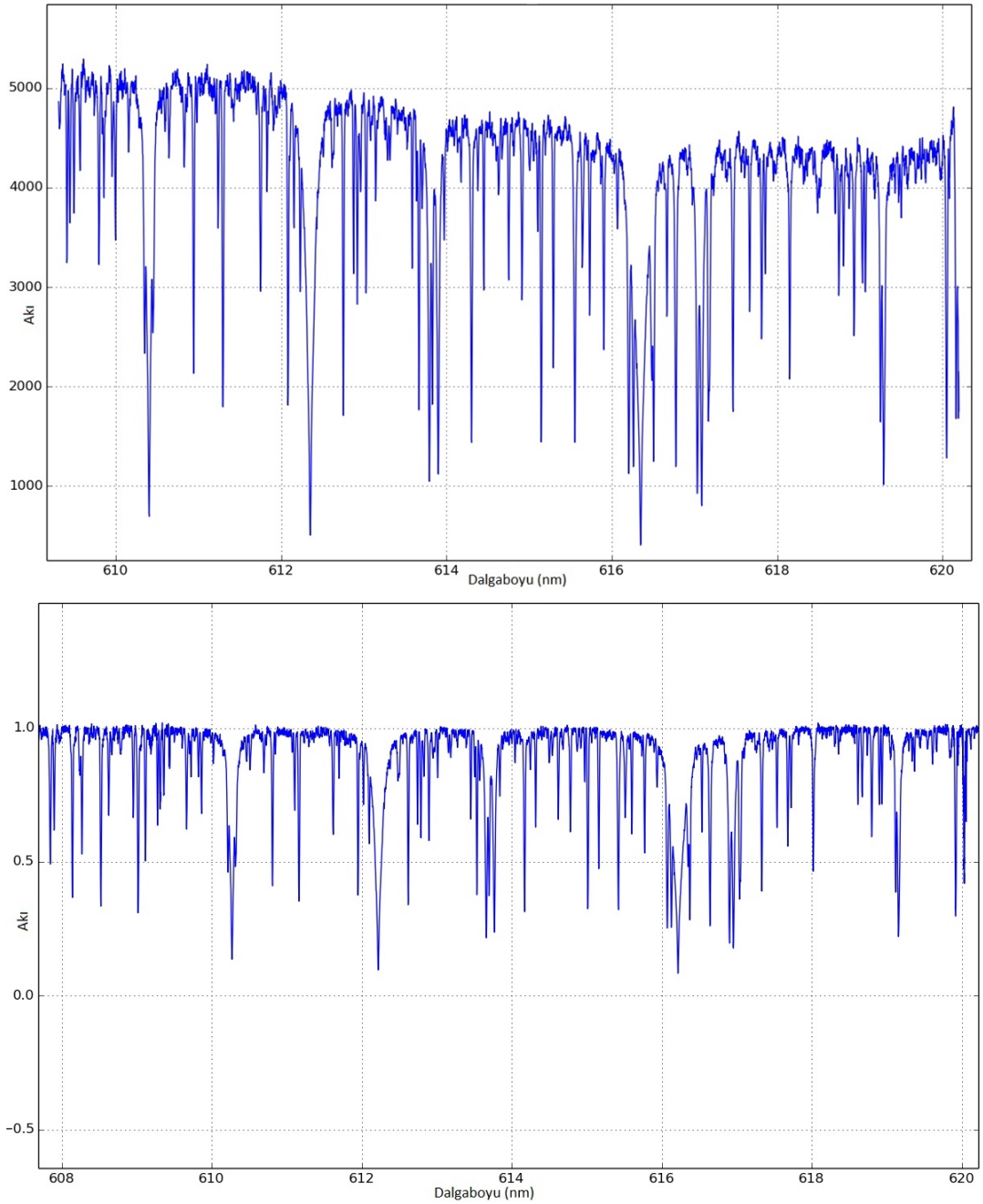


Şekil 3.20. Şekil 3.19'un aynısı ancak HAT-P-19 yerine WASP-52'nin farklı bir dalgaboyu aralığı gösterilmektedir.



Şekil 3.21. XO-3 SOPHIE tayfının normalizasyon öncesi (üst panel) ve sonrası (alt panel) karşılaştırması

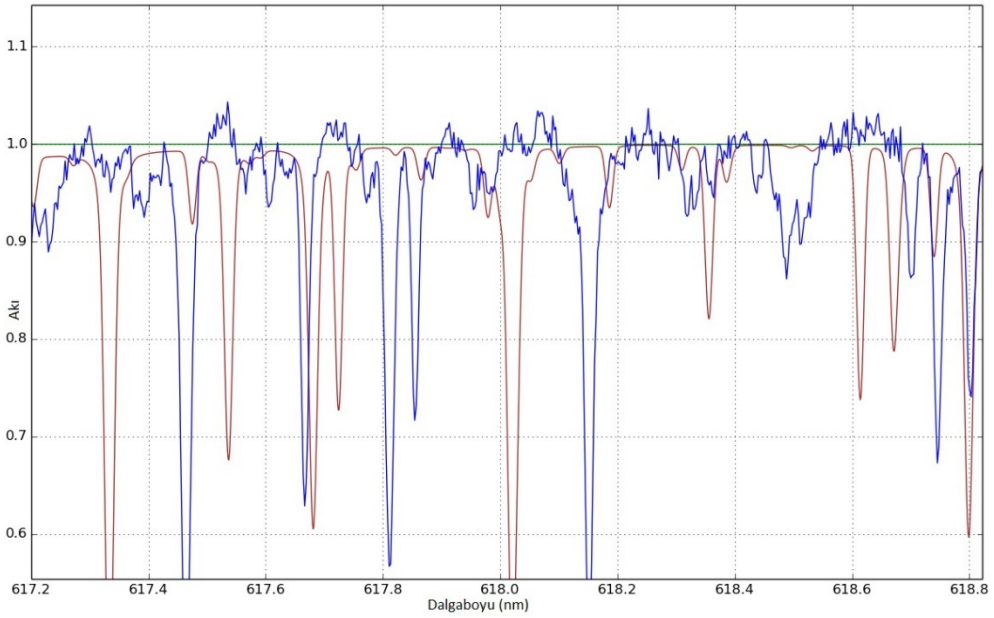
XO-3 yıldızının normalizasyon işlemi öncesi ve sonrası tayfları Şekil 3.21'de, HAT-P-20 yıldızı için yine normalizasyon işlemi öncesi ve sonrası tayfları Şekil 3.22'de verilmektedir. HAT-P-20 yıldızının Keck / HIRES tayfları üzerindeki kozmik ışın düzeltmesi ve tellürik çizgilerin ayıklanması gibi işlemler normalizasyon sonrasında yapıldığı için tayflarda bu yapılar gözlenirken, XO-3'ün SOPHIE tayfları, tayfçeker verisini indirgemek için kullanılan yazılım (ing. pipeline) bu işlemleri zaten gerçekleştirdiği için bu yapılara rastlanmamaktadır.



Şekil 3.22. HAT-P-20'nin Keck tayfının normalizasyon öncesi (üst panel) ve sonrası (alt panel) karşılaştırması

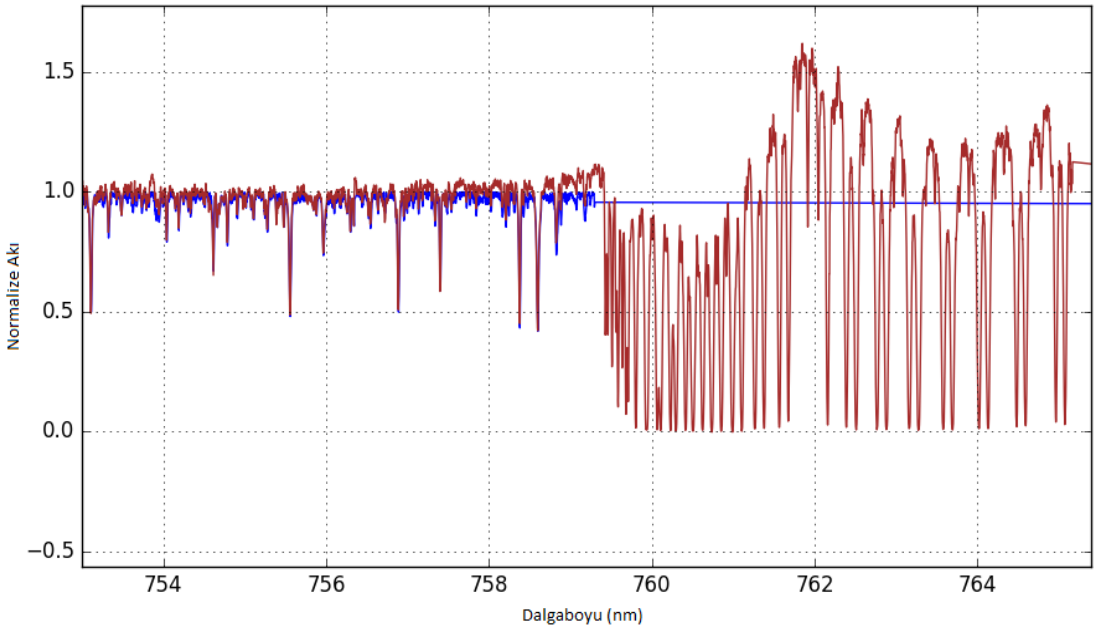
3.2.6. Tayfların Analize Hazır Hale Getirilmesi

HAT-P-19 ve HAT-P-20 tayflarının her bir basamağı iSpec (Blanco-Cuaresma vd. 2014) programının kaynak kodlarında bulunan ancak arayüzünde bulunmayan bir fonksiyonla (arayüzde bulunan fonksiyon tayfın tamamını, hesaplanan tek bir hız değerine göre kaydırmaktadır) 50 Angström aralıklar alınarak sentetik tayf yardımıyla sistemin dikine hızı ve dünyanın dönüş hızı gibi etkilerden arındırılmak üzere dalgaboyu ekseninde kaydırılmıştır (Şekil 3.23). Bu işlem normalizasyondan hem önce, hem de sonra yapılmıştır. XO-3 ve WASP-52'nin tayfları ise SOPHIE arşivinden bu etkiden arındırılmış şekilde çekilmiştir.



Şekil 3.23. HAT-P-20 Yıldızının sentetik tayfa göre uzay hızının belirlenerek çıkarılması

Tayfları analize hazır hale getirmek için kozmik ışından etkilenen bölgeler, tellürik çizgilerin olduğu bölgeler ve çok düşük S/N oranına sahip bölgeler atılmıştır. Bu işlemler için iSpec programının sırasıyla "clean cosmic rays" ve "remove Telluric regions" fonksiyonları kullanılmıştır. Düşük S/N oranına sahip olduğundan atılan bölgeler sadece HAT-P-19 ve HAT-P-20'nin Keck / HIRES tayflarındaki mavi bölgeleridir ve iSpec'te bulunan "wavelength range reduction" fonksiyonuyla 3350 – 4950 Angström arasında kalan bölge çıkarılmıştır. Kozmik ışınların giderilmesi ve tellürik çizgilerin ayıklanması işlemleri tayfın normalizasyonundan sonra yapılmıştır ancak XO-3 ve WASP-52'nin SOPHIE tayfları tellürik çizgilerden arındırılmış olarak arşivden çekilmiştir. Analizde kullanılan tüm tayfların S/N oranı ölçümleri çeşitli (ve soğuk yıldızlarla çalışıldığı için dar) dalgaboyu bölge aralıklarından iSpec programının "Estimate SNR" fonksiyonu kullanılarak yapılmış ve bu ölçümlerin ortalamaları alınmıştır.



Şekil 3.24. HAT-P-19'un tayflarının normalizasyon ve tellürik çizgi çıkarma işlemleri öncesi (kahverengi) ve sonrası (mavi) karşılaştırması.

3.3. Tayfsal Analiz Yöntemi

Etkin sıcaklığı $T_{etkin} \leq 5000$ K olan yıldızlarda parametre belirlemek için sık kullanılan demir (Fe-I ve Fe-II) çizgilerinin eşdeğer genişliklerine dayanan yöntem, çizgi örtüşmesinin (ing. line blending) çizgilerin ayırt edilmesini zorlaştırmasından dolayı uygun bir yöntem olarak görülmemektedir (Tsantaki vd 2013). Yoğun çizgi örtüşmesi eşdeğer genişliğin yanlış ölçülmesine ve parametrelerin yanlış hesaplanmasına yol açmaktadır (Tsantaki vd. 2013). Tsantaki vd. (2013) 5000 K ve daha sıcak yıldızlar için blend veya zayıf çizgilerin kullanılmasının T_{etkin}, log g ve [Fe/H] değerlerini çok az etkilediğini göstermiştir (Şekil 3.25 ve Tablo 3.5). Bu nedenle atmosfer parametrelerini hesaplamak için sentetik yıldız tayfı çakıştırması yöntemi kullanılmıştır. Yıldızın tayfında bulunan ve normalize tayfta derinliği (merkezi derinlik) 0.03-1 arasındaki olan tüm Fe I ve Fe II çizgileri kullanılmıştır. Ancak iSpec programı analize başlamadan önce seçilen çizgilere sentetik çizgi uyumlaması yapıp iyi uyuşmayanları filtrelemektedir.

3.3.1. Tayflardaki Hız Alanlarının Belirlenmesi

İzdüşümsel dönme hızı (v sini), makrotürbülans hızına (v_{mac}) yakın olan yıldızlarda, dönme hızıyla makrotürbülansın tayfsal çizgileri benzer şekilde genişlettiği varsayımı altında (Brewer vd. 2016), v sini değeri sıfıra sabitlenerek $v_{genişleme}$ = v sini + v_{mac} değeri bulunduktan sonra makrotürbülansın bu tür yıldızlar için kalibrasyonlardan alınan (Valenti ve Fischer 2005, Gilmore vd. 2012, Brewer vd. 2016) değeri (v_{mac}) yerine konularak v sini değeri elde edilebilir.

Tablo 3.4'te HAT-P-19 yıldızı için literatürdeki yeni tarihli kalibrasyonlar kulllanılarak elde eidlen makrotürbülans hızı değerleri görülmektedir. Bu çalışmadaki v_{mac} değerleri ise iSpec kaynak kodlarında bulunan ve Gaia-ESO tarama gözlemlerine dayanarak oluşturulmuş (Gilmore vd. 2012) emprik kalibrasyon denklemleri kulllanılarak hesaplanmıştır. Hız alanlarının tayfsal çizgilerde neden olduğu genişletme miktarları belirlenirken öncelikle yüzey sıcaklığı (T_{etkin}), yüzey çekim ivmesi (log g) ve metal bolluğu ([Fe / H]) değerleri literatürdeki değerlerine; v_{mac} değeri ise sıfıra sabitlenip, öncül (ing. preliminary) mikrotürbülans hızı (v_{mic}) ve $v_{genişleme}$ değerleri bulunmuştur.

Tablo 3.4. HAT-P-19'un farklı kalibrasyonlarla hesaplanan makrotürbülans değerleri

Kalibrasyon	v_{mac} (km/s)
Valenti & Fischer (2005)[1]	2.8
Brewer vd. (2016)[2]	1.8
Gilmore vd. (2012)[3,*]	2.87, 3.35

[1] v_{mac} = 3.98 + (T_{etkin} - 5770) / 650 km/s (Valenti & Fischer 2005)

[2] v_{mac} = 2.202 + e^(0.0019 (T_{etkin} - 5777)) + 1.3 km/s (Brewer vd. 2016)

[3, *] Etkin sıcaklığı 5000 K'den düşük ve yüksek yıldızlar için v_{mac} hesabı farklı bir denklemle yapılmaktadır. Hat-P-19'un etkin sıcaklığı tam bu değer civarında olduğu için iki değer de verilmiştir. İlk değer (2.87) 5000 K'den soğuk yıldızlar için, ikinci değer (3.35) ise 5000 K'den sıcak yıldızlar için hesaplanmıştır.

Tablo 3.4'te sunulan bu değerler arasındaki farklar, bizi makrotürbülansın bağımsız bir ölçümünü yapmaya yönlendirmiştir. Soğuk bir yıldız atmosferinin derin katmanlarında oluşan zayıf çizgiler, dönmeden ziyade büyük ölçekli türbülans hareketlerine duyarlı olarak kabul edilir. Bu çizgilerden yapılan ölçümlerden elde edilen genişleme değerleri ~3 km/s'lik bir makrotürbülans değerine karşılık gelmektedir. Gilmore vd. (2012) tarafından iki ayrı sıcaklık aralığı için verilen kalibrasyonlar, T_{etkin} = 5000 K'de bir süreksizliğe sahiptir. 5000 K'den daha soğuk ve daha sıcak yıldızlar için aynı parametrelerle hesaplanan makrotürbülans değerlerinin (sırasıyla 2.87 ve 3.35 km/s) ortalaması da 3.1 km/s'ye karşılık gelmektedir. Gilmore vd. (2012) tarafından aşağıdaki denklemlerle verilen kalibrasyonlar ayrıca mikrotürbülansı (v_{mic}) hesaplamak için de kullanılmıştır. Ancak HAT-P-19 için mikrotürbülans, bu denklemle hesaplanan değere (v_{mic} = 0.79 km/s) çok yakın olan, fakat eşdeğer genişliğin bolluktan bağımsız hale geldiği ve söz konusu grafikte saçılmanın en az olduğu hız değerinden belirlenmiş (v_{mic} = 0.80 km/s) ve analizde bu değere sabitlenmiştir.

T_0 = 5500 ve g_0 = 4 olmak üzere;

T_{etkin} > 5000 K için:

$$v_{mac} = 3 \times (1.15 + 7 \times 10^{-4} \times (T_{etkin} - T_0) + 1.2 \times 10^{-6} \times (T_{etkin} - T_0)^2 - 0.13 \times (\log g - g_0) + 0.13 \times (\log g - g_0)^2 - 0.37 \times [Fe/H] - 0.07 \times [Fe/H]^2)$$

v_{mic} = 1.05 + 2.51 x 10^{-4} x (T_{etkin} - T_0) + 1.5 x 10^{-7} x (T_{etkin} - T_0) ^{2} – 0.14 x (log -g_0) – 0.005 x (log g - g_0)^2 + 0.05 x [Fe/H] + 0.01 x [Fe/H]

T_{etkin} < 5000 K için:

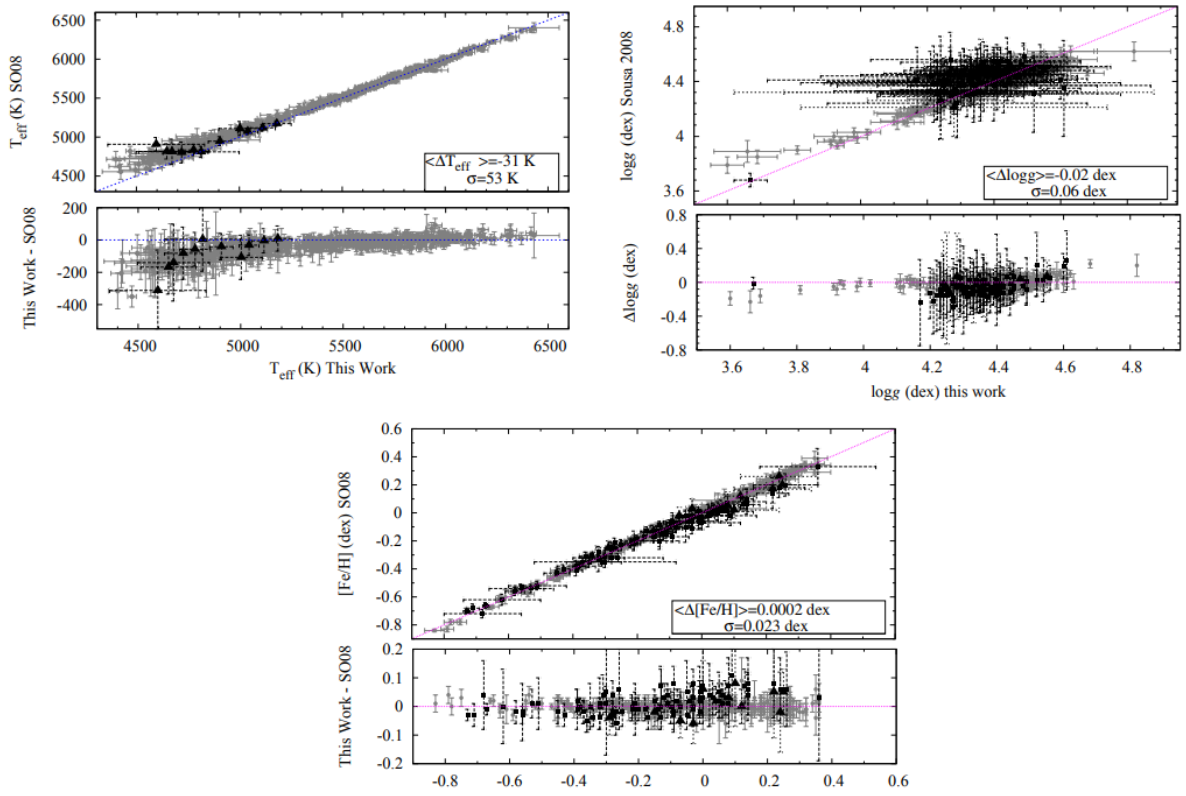
v_{mac} = 3x (1.15 + 2 x 10^{-4} x (T_{etkin} - T_0) + 3.95 x 10^{-7} x (T_{etkin} - T_0)^2 - 0.13 x (log g - g_0) + 0.13 x (log g - g_0)^2

v_{mic} = 1.05 + 2.51 x 10^{-4} x (5000 - T_0) + 1.5 x 10^{-7} x (5000 - T_0) ^{2} – 0.14 x (log -g_0) – 0.005 x (log g - g_0)^2 + 0.05 x [Fe/H] + 0.01 x [Fe/H]^2

Makrotürbülans değerleri v_{mac}, Doyle vd. (2014) tarafndan makrotürbülant hareketlere hassas olduğu öne sürülen çizgilerden de ayrıca ölçülmüştür. Daha sonra v_{mac} değeri zayıf, orta ve güçlü çizgilerden de ayrı ayrı ölçülmüştür. Elde edilen v_{mac} değerlerinin ölçülen çizgilerin şiddetine göre oldukça değiştiği görülmüştür. Atmosfer parametrelerinin hesaplanmasında kullanılacak çizgiler ise hem zayıf hem orta hem de güçlü çizgilerden oluşmaktadır. Bu nedenle sentetik tayf çakıştırma yönteminde bu parametrenin serbest bırakılması da denenmiştir. Ancak en güvenilir sonuçların tamamı anakol yıldızları olan hedef yıldızların sıcaklık, yüzey çekim ivmeleri ve metal yoğunluklarına uygun kalibrasyonlar kullanıldığına elde edildiği sonucuna varılmıştır.

HAT-P-19 yıldızının tayfsal analizinde tercih, bağımsız olarak zayıf çizgilerden ölçülen 3.0 km/s'lik makrotürbülans hızını sabit olarak kullanmak yönünde oluşmuştur. Makrotürbülans, izdüşümsel dönme hızından ayrılamadığı; geçiş ışık eğrilerinin analizinde de gezegen parametrelerinin belirlenmesinde doğrudan etkili olmadığı için bu değerin seçilmiş olmasının nihai parametreler üzerinde bir etkisinin olmayacağı değerlendirmesi yapılmıştır.

HAT-P-19 için büyüme eğrisi üzerinden, diğer yıldızlar için Gilmore vd. (2012) tarafından verilen kalibrasyon denklemleri kullanılarak bulunan mikrotürbülans (v_{mic}), makrotürbülans (v_{mac}) ve toplam genişlemeden ($v_{genişleme}$) makrotürbülans çıkarılarak hesaplanan izdüşümsel dönme hızı (v sini) değeri sabit tutularak yıldızların atmosfer parametreleri elde edilmiştir. Bu şekilde elde edilen parametreler literatürdeki değerlerle uyuşmaktadır ve bu yöntem ön analiz olarak kabul edilmiştir.



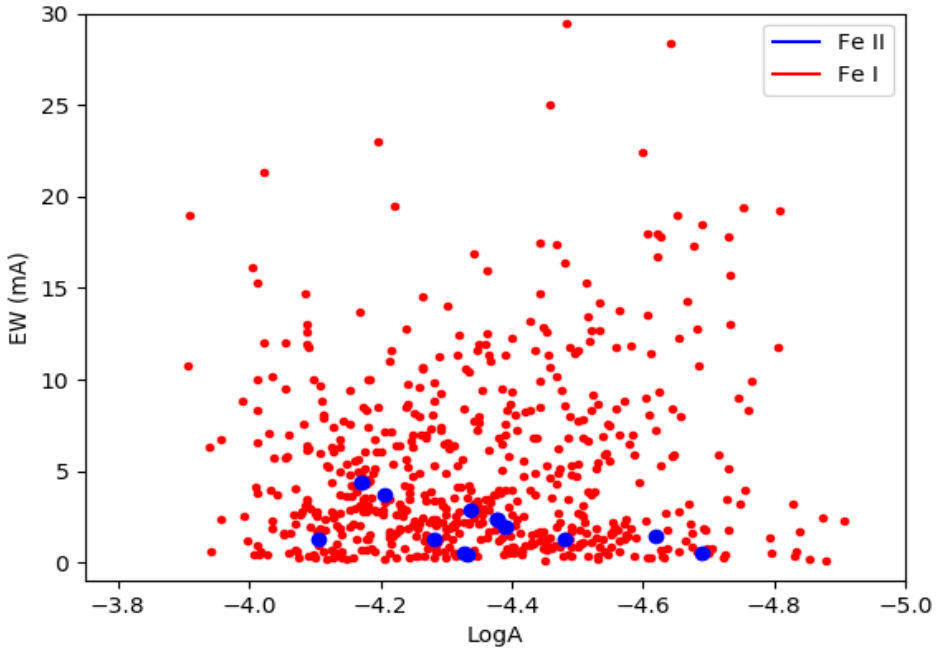
Şekil 3.25. Tüm çizgiler kullanılarak elde edilen Tetkin değerinin blend çizgiler elenerek elde edilen değerle ile karşılaştırılması. Sol üst panel: Blend olmamış demir çizgilerini seçip hesaplanan T_{etkin} değerine karşılık tüm çizgiler seçilerek hesaplanan T_{etkin} grafiği bulunmaktadır. Bu verilere yapılan lineer fitten artıklar grafiğin altında gösterilmektedir. Sağ üst ve alttaki paneller sol üsttekinin aynısı ancak log g ve demir bolluğu [Fe / H] için yapılmıştır (Tsantaki vd. 2013).

Tablo 3.5. Tayfta blend çizgiler ile tüm çizgilerin kullanmasıyla elde edilen parametreler arası farklar (Tsantaki vd. 2013)

Örnek yıldızlar	ΔT_{etkin} [K]	Δ log g [dex]	Δ [Fe / H] [dex]
Tüm yıldızlar	-31 ± 3	-0.023 ± 0.003	0.0002 ± 0.0011
T_{etkin} < 5000 K	-106 ± 6	-0.07 ± 0.01	0.0127 ± 0.0011

Mikrotürbülans değeri v_{mic}, 611 adet Fe-I çizgisinin Image Reduction and Analysis Facility (IRAF) paketi tasklarından splot ile ölçülen eşdeğer genişliklerinin, farklı v_{mic} değerlerine göre hesaplanan bolluk değerlerine bağlılığının en az olduğu (standart sapmasının en az olduğu) değer olarak kabul edilmiştir. Yöntem literatürde mikrotürbülans hızlarını belirlemek üzere sıklıkla takip edilen bir yöntemdir (Tanrıverdi ve Baştürk 2016). Bu şekilde elde edilen değer (v_{mic} = 0.80 km/s) örnek olarak seçilen HAT-P-19 için keşif makalesinde (H11) verilen değere, tarafımızca yapılan ve 2. Gelişme Raporu'nda sunulan ön analizde bulunan değere ((v_{mic} = 0.79 km/s) ve kalibrasyonlardan elde edillen değerlere çok yakındır

(v_{mic} = 0.8 km/s). Bu durum bir bir sonraki adımda log g hesaplanırken yapılan T_{etkin} ve [Fe/H] değerlerinin önemli ölçüde değişmeyeceği varsayımını da güçlendirmektedir.



Şekil 3.26. Eşdeğer genişliğe (EW) karşılık bolluk (log A) değerleri arasındaki korelasyonu minimum yapan v_{mic} değeri için EW – log A grafiği. Fe I (611 çizgi) bolluk değerleri kırmızı, Fe II (15 çizgi) değerleri mavi ile gösterilmiştir.

Mikrotürbülans değeri HAT-P-19 için eşdeğer genişlik ölçümleri üzerinden yapılan analizde soğuk yıldızlar için verilen kalibrasyonlar kullanılarak hesaplanan değerlere çok yakın çıktığından diğer yıldızlar için v_{mic}'in kalibrasyonlardan (Gilmore vd. 2012) elde edilen değerleri kullanılmıştır. Bu yıldızlar için T_{etkin} değeri iyonizasyon dengesi kullanılarak ayrıca hesaplanmamıştır. Buna ek olarak XO-3 ve WASP-52'nin analizde kullanılan SOPHIE tayfları, HAT-P-19'a göre hem daha düşük çözünürlüğe, hem de daha düşük S/N'ye sahiptir. Bu nedenle eşdeğer genişliğe dayalı analizlerin güvenilir sonuç vermeyebileceği değerlendirmesi yapılmıştır.

3.3.2. Yüzey Çekim İvmesi (log g) Hesabı

Geçiş modelinden elde edilen yılıdz yarıçapına ölçeklendirilmiş yörünge büyüklüğü olarak isimlendirilen (a / R_*) parametrenin değeri kullanılarak yıldızın ortalama yoğunluk değeri hesaplanabilir (Yalçınkaya 2018, Hartman vd. 2011). Buradan elde edilen yıldızın kütle (M_*) - yarıçap (R_*) bağıntısı, tayftan elde edilen yüzey çekim ivmesi (log g) üzerinden belirlenen M_* - R_* bağıntısına göre çok daha güvenilirdir (Hébrard vd. 2013, H13). Çünkü log g'nin tayf çizgilerine etkisini yıldızların tayfından saptamak, özellikle soğuk yıldızlar söz konusunda olduğunda, oldukça zor ve sonuçları da tartışmalıdır (H11, H13). Şekil 3.27'de tüm atmosfer

parametreleri aynı olup farklı log g değerlerine sahip 3 sentetik tayf gösterilmektedir. Bu 3 farklı tayfın arasındaki kontrast çok az olsa da görülebilmektedir. Ancak söz konusu gerçek bir yıldız tayfı olduğunda çözümün hassasiyeti buna izin vermemektedir. Yüzey çekim ivmesindeki (log g) küçük bir değişim, yıldızın mutlak parametrelerini (M_* ve R_*) çok fazla etkilemektedir. Dolayısıyla gezegenin mutlak parametrelerine etkisi büyüktür. Bu noktadan hareketle, bu çalışmada tayfsal analiz öncesi en az saçılmaya sahip ışık eğrilerinden tüm yıldızlara ilişkin ortalama yoğunluk (ρ_*) değerleri, Exofast (Eastman 2013) programının web arayüzü de (http://astroutils.astronomy.ohio-state.edu/exofast/exofast.shtml) olan v1 versiyonu ve Levenberg-Marquartd (Levenberg 1944; Marquartd 1963) algoritması kullanılarak hesaplanmıştır. Daha sonra ön analiz sonuçlarının literatürdeki değerlere yakın çıkmasından dolayı nihai analiz sonrası elde edilecek T_{etkin} ve [Fe/H] değerlerinin önemli miktarda değişmeyeceği varsayımı altında, aşağıdaki ifadelerle Torres (2010) tarafından verilen bağıntılar

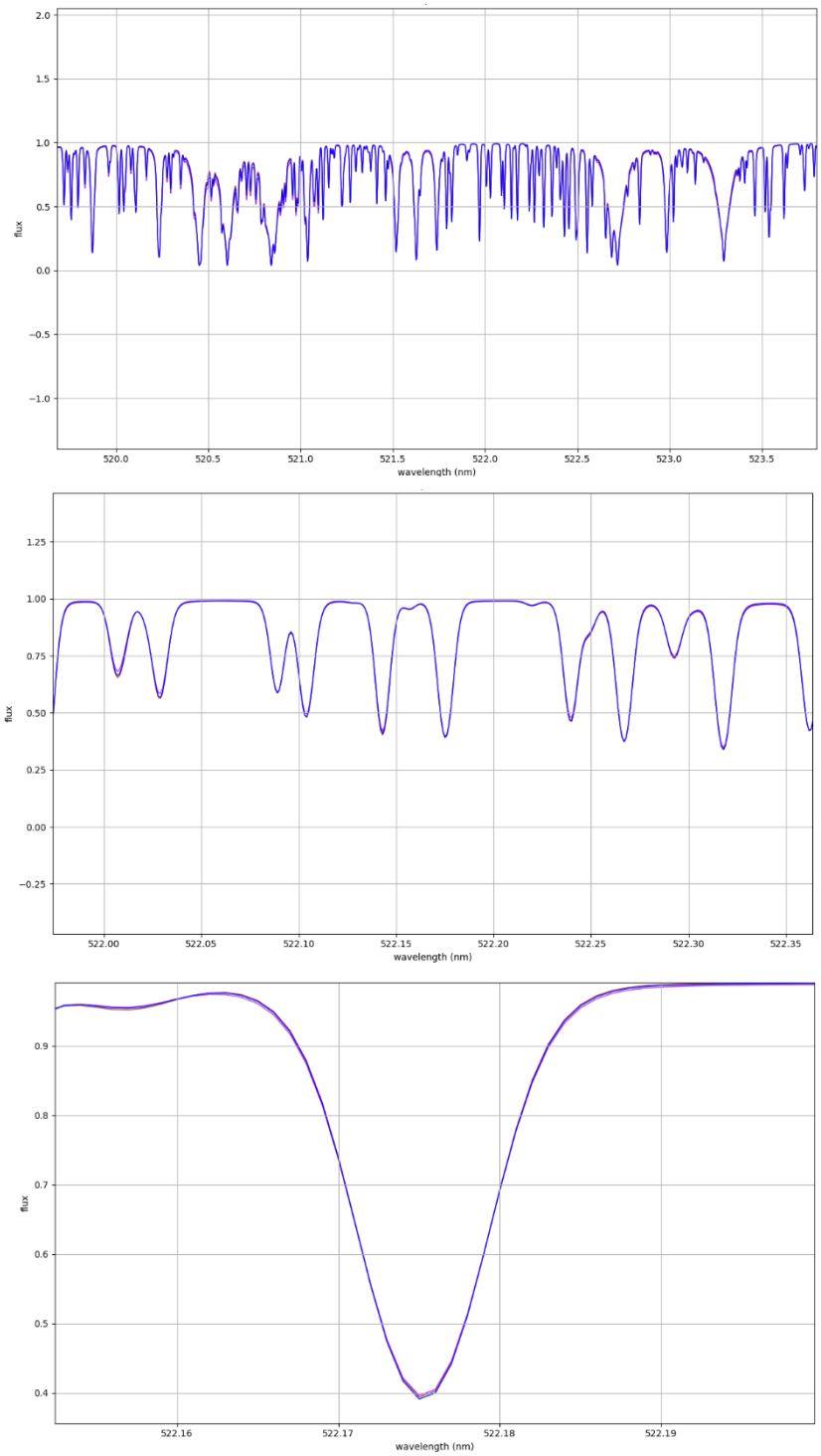
a = [1.5689, 1.3787, 0.4243, 1.139, -0.14250, 0.01969, 0.10100]
b = [2.4427, 0.6679, 0.1771, 0.705, -0.21415, 0.02306, 0.04173]
katsayı vektörleri olmak üzere;

$X = \log(T_{etkin}) - 4.$

$\log(M_*/M_\odot) = a[0] + a[1]X + a[2]X^2 + a[3]X^3 + a[4]\ \log g^2 + a[5]\ \log g^3 + a[6]\ [Fe/H]$

$\log(R_*/R_\odot) = b[0] + b[1]X + b[2]X^2 + b[3]X^3 + b[4\ ]\log g^2 + b[5]\ \log g^3 + b[6]\ [Fe/H]$

kullanılarak ve T_{etkin} ve [Fe/H] değerleri ön analiz sonucu çıkan değerlere sabitlenip, log g değeri değiştirilerek elde edilen kütle ve yarıçap değerlerinden hesaplanan yıldız yoğunluğu (ρ_*) değeri, geçiş modelinden elde edilen ρ_* değerine 1/1000 isabetle yakınsayacak şekilde birer yüzey çekim ivmesi (log g) değeri hesaplanmıştır. Bu işlem Python dilinde tarafımızca yazılan basit bir kod ile yapılmıştır.



Şekil 3.27. Yüzey çekim ivmesi dışındaki parametreleri aynı üç farklı sentetik tayfın karşılaştırması. R=300000 çözünürlüklü sentetiklerin oluşturulması için Synthe kodu, ATLAS9 model atmosferi, Asplund (2009) güneş bolluğu ve VALD veritabanı kullanılmıştır. Tayflar oluşturulurken H11'deki HAT-P-19'un atmosfer parametreleri kullanılmıştır. Tek fark, mavi, kırmızı ve pembe ile gösterilen tayfların yüzey çekim ivmesi (log g) değerlerinin sırasıyla 4.5, 4.6 ve 4.4 olmasıdır. Yukarıdan aşağıya doğru aynı bölge gittikçe yakınlaştırılmıştır.

3.3.3. Etkin Sıcaklık (T_{etkin}) ve Metal Bolluğu ([Fe / H]) Hesabı

T_{etkin} değeri HAT-P-19 için Fe I – Fe II iyonizasyon dengesinden de hesaplanmış ve 4815 K olarak bulunmuştur. Ancak yıldızın soğuk olmasından dolayı (T_{etkin} ~ 5000 K) tayfında çok fazla Fe II çizgisi bulunmamaktadır ve bu nedenle analizde sadece 15 Fe II çizgisi kullanılabilmiştir. Ayrıca soğuk yıldızlardaki çizgi örtüşmeleri eşdeğer genişlik ölçümleri üzerindeki belirsizliği de önemli ölçüde arttırmaktadır. Bu nedenlerle, bu yöntemle hesaplanan sıcaklık değerinin güvenilirliği, sentetik tayf çakıştırma yöntemine göre daha az olabilmektedir. Bu nedenle eşdeğer genişlik ölçümlerine ve iyonizasyon dengesine dayalı analizler diğer yıldızlar için yapılmamış, tüm analizler için sentetik tayf çakıştırmanın gezegen barıdırıan bu türden soğuk yıldızlar için daha iyi sonuç verdiği değerlendirmesi yapılmıştır.

Geçiş modeli ve Torres (2010) tarafından verilen bağıntılar ile elde edilen log g, eşdeğer genişlik – bolluk değerlerine dayalı olarak hesaplanan v_{mic} değeri sabit tutularak sentetik tayf çakıştırma yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemle makrotürbülans (v_{mac}) ile yıldızın dönme hızının izdüşümü (v sini) birbirinden ayrılamamaktadır. Ancak bu durum gezegenin mutlak parametrelerine etki etmemektedir. Zira tayfsal parametreler ile geçiş parametrelerinin beraber modellenmesinde sadece Teff ve [Fe/H] değeri kullanılmaktadır. v sini değeri çizgilerin eşdeğer genişliğini değiştirmediğinden ve v_{mac} ile ayırt edilemediğinden bu iki parametre T_{etkin} ve [Fe/H] değerlerini değiştirmeyip sadece çakıştırılan sentetik tayfın uyum kalitesini etkilemektedir.

4. BULGULAR

4.1. Tayfsal Analiz Bulguları

Sonuç olarak istenmeyen tüm etkilerden arındırılan ve süreklilik seviyelerine normalize edilen tayfların analizinden yıldız atmosfer parametrelerinin elde edilmesinde sentetik tayf çakıştırma yöntemi tercih edilmiştir. Analiz program olarak kullanılan iSpec yazılımı (Blanco-Cuaresma vd. 2014) sentetik tayf çakıştırma işlemini en küçük kareler yöntemiyle gerçekleştirmektedir. iSpec ile denenen ve en iyi uyum aranan sentetik tayfların oluşturulmasında algoritma için başarım kendini ispat etmiş Synthe kodu (Kuruzc vd. 1993), model atmosfer için ATLAS9 Castelli model atmosferi (Castelli ve Kuruzc 2004), Güneş bolluğu değerleri için Asplund (2009) tarafından verilen değerler ile Vienna Atomic Line Database (VALD, Piskunov vd. 1995, Kupka vd. 2000, Rybichikova vd. 2015) çizgi listesi kullanılmıştır.

Yıldızların atmosfer parametrelerine bir yaklaştırma amacıyla yapılan ön analizlerde yıldızın etkin sıcaklığı (T_{etkin}),, metalisite ([Fe / H]) ve izdüşümsel dönme hızıyla makrotürbülansın toplamı olarak tanımlanan genişleme hızı ($v_{genişleme} = v_{mac} + v \sin i$) gibi parametreler serbest bırakılmıştır. T_{etkin} ve [Fe/H] değerleri ön analiz sonucu çıkan değerlerine sabitlenip, log g değeri değiştirilerek elde edilen kütle ve yarıçap değerlerinden hesaplanan yıldız yoğunluğu (ρ_*) değeri, geçiş modelinden elde edilen ρ_* değerine 1/1000 isabetle yakınsayacak şekilde birer yüzey çekim ivmesi (log g) değeri hesaplanmıştır. Nihai analizde yüzey çekim ivmesi bu değere sabitlenmiştir.

Mikrotürbülans hızı HAT-P-19 için eşdeğer genişliğin bolluktan bağımsıız ve saçılmasının da en az olduğu genişleme değerinden belirlenir ve mikrotürbülans bu hıza sabitlenirken, bu şekilde belirlenen mikrotürbülans hızlarının (v_{mic}) literatürde verilen kalibrasyonlar üzerinden belirlenen hızlardan istatistiksel anlamlı bir farkı bulunmadığı gerekçesiyle diğer yıldızlar için kalibrasyonlar kullanılarak belirlenen mikrotürbülans hızlarının uyumlama sırasında sabitlenmesi tercih edilmiştir. iSpec yazılımında çizgiyi benzer şekilde genişlettikleri gerekçesiyle makrotürbülans ve izdüşümsel dönme hızlarını (v_{mac} ve v sini) tek bir parametre adı altında ($v_{genişleme}$) girmenin olanağı yoktur. Bu nedenle bu parametrelerden biri 0'a sabitlenerek elde edilen değer $v_{genişleme}$ olarak belirlenmiş, kalibrasyonlardan elde edilen makrotürbülans değeri (v_{mac}) bu değerden çıkarılmak suretiyle de izdüşümsel dönme hızı (v sini) değerleri elde edilmiştir. Yıldız atmosfer parametrelerinin elde edilen değerleri tüm yıldızlar için literatürde elde edilen değerler ile karşılaştırmalı olarak Tablo 4.1 ve Tablo 4.4 arasında sunulmaktadır. HAT-P-19 için eşdeğer genişlik yöntemi ve iyonizasyon dengesi kullanılarak elde edilen parametreler ve bu parametrelerin öncü parametreler olarak kullanılmasıyla iSpec analizinden elde edlien değerler ayırca ön analiz sütununda verilmiştir.

Tablo 4.1. HAT-P-19 Yıldızının Temel Atmosfer Parametreleri

Parametre	Hartman vd. (2011)	Brewer vd. (2016)	Ön Analiz (Bu Çalışma)	Nihai Sonuçlar (Bu çalışma)
T_{eff} (K)	4990 ± 130	4951	4988 ± 54 (4815 [b])	4991 ± 50
log g (cgs)	4.54 ± 0.05	4.44	4.55 ± 0.07	4.53[c]
[Fe/H] (dex)	0.23 ± 0.08	0.29	0.23 ± 0.05	0.24 ± 0.05
v sin*i* (km/s)	0.7 ± 0.5	1.8	1.41 ± 0.87 (1.58)[a]	0.88 ± 1.09
v_{mac} (km/s)	2.81	1.8	2.82 ± 0.59 (1.8)[a]	3.00
v_{mic} (km/s)	0.85	0.85	0.79 ± 0.15 [b]	0.80

[a] Parantez içindeki değerlerden v_{mac} Brewer vd. 2016'daki kalibrasyondan, vsini ise $v_{genişleme}$'den v_{mac} çıkarılarak hesaplanmıştır.
[b] Fe I – Fe II iyonizasyon dengesi kullanılarak hesaplanmıştır.
[c] Fotometrik analiz sonucu bulunan yıldız yoğunluğu (ρ_*) ve Torres (2010) bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır.

WASP-52'nin atmosfer parametreleri HAT-P-19'a yakın olduğundan, HAT-P-19'un analizinde edinilen tecrübe ile, makro ve mikrtürbülans hızları (sırasıyla v_{mac} ve v_{mic}) Gilmore vd. (2012) tarafından verilen kalibrasyonla hesaplanmıştır. Makrotürbülans ve mikrotürbülans, Gilmore vd. (2012) tarafından T_{etkin} > 5000 K için verilen denklemlerde T_{etkin} ve [Fe/H] için Hébrard vd. (2013) tarafından verilen değerler, log g için ise EXOFAST-v1 öncül (ing. preliminary) geçiş modeli ile elde edlilen ρ_* ile Torres (2010) tarafından verilen bağıntıdan hesaplanan ρ_* değerinin birbiriyle en iyi uyuştuğu yüzey çekim ivmesi değeri yerine konularak hesaplanmıştır. Bu şekilde hesaplanan log g değeri ise tıpkı HAT-P-19 analizinde olduğu gibi tayfsal analizde sabit tutulmuştur.

Tablo 4.2. WASP-52 Yıldızının Temel Atmosfer Parametreleri

Parametre	Hébrard vd. (2013)	Andreasen vd. (2017)	Nihai Sonuçlar (Bu çalışma)
T_{eff} (K)	5000 ± 100	5197 ± 83	5062 ± 42
log g (cgs)	4.5 ± 0.1	4.55 ± 0.3 4.47 ± 0.3	4.57
[Fe/H] (dex)	0.03 ± 0.12	0.15 ± 0.05	0.07 ± 0.04
v sin*i* (km/s)	3.6 ± 0.9	-	4.19 ± 0.54
v_{mac} (km/s)	0.7 ± 0.3	-	3.10
v_{mic} (km/s)	0.9 ± 0.1	1.16 ± 0.14	0.88

XO-3 yıldızının analizlerinde karşılaşılan temel problem Keck / HIRES tayfının yer yer oldukça düşük kaliteye sahip olmasıdır. Bazı dalgaboyu bölgelerinden ölçüm yapmanın olanağı dahi yoktur. Bu bölgeler bu nedenle analizden çıkarıldığında ise tayf çakıştırma yöntemi yüksek hatalarla (etkin sıcaklıkta 1000 K'in üzerinde) sonuçlanmaktadır. Farklı çizgi listeleri (kendi oluşturduğumuz listeler dahil olmak üzere), kodlar (Synthe, SME) ve atmosfer modelleri (Kurucz 1993, Kurucz ve Castelli 2008, MOOG (Sousa ve Andreasen 2018)) denenmiş olsa da sonuçlarda bir iyileşme görülmemiştir. Bu nedenlerle XO-3 yıldızıın tayfsal analizleri için Keck / HIRES tayfları yerine SOPHIE tayfları kullanılmıştır. Ancak SOPHIE tayflarının da S/N oranı yıldız parametrelerini yüksek duyarlılıkla hesaplamak için yeterli değildir. Literatürde verilen parametrelerin (Tsantaki vd. 2014) bu tayflar kullanılarak hesaplandığı belirtilmiş olsa ve analizlerimiz bu sonuçlarla karşılaştırıldığında (Tablo 4.3) parametre değerleri arasında büyük farklar görülmese de hataları arasındaki farklar çarpıcıdır. XO-3 yıldızının Subaru tayflarını elde etmek için yaptığımız girişim de Mart 2019 itibarı ile başarıya ulaşmış değildir. Bu nedenle XO-3b ötegezegeninin fotometrik geçiş gözlemlerinin analizlerinde kendi analizlerimiz sonucu ulaştığımız parametrelerin değerleri yerine Tsantaki vd. (2014) tarafından elde edilen atmosfer parametrelerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Bu parametre setinin XO-3 yıldızının keşif makalesinde (Krull vd. 2008) belirlenen parametrelere tercih edilmesinin nedeni daha detaylı tayfsal analizler içermesi ve en önemlisi yüzey çekim ivmesinin daha gerçekçi olarak ~4.2 m/s^2 civarında elde edilmiş olmasıdır. Ayrıca yıldızın Tsantaki vd. (2014) tarafından belirlenen etkin sıcaklığı da her ne kadar üzerindeki belirsizlik çok büyük olsa da bizim analizimizin sonuçlarına daha yakındır.

Tablo 4.3. XO-3 Yıldızının Temel Atmosfer Parametreleri

Parametre	**Krull vd. (2008)**	**Tsantaki vd. (2014)**	**Nihai Sonuçlar (Bu çalışma)**
T_{eff} (K)	6429 ± 50	6781 ± 44	6817 ± 225
log g (cgs)	3.95 ± 0.062	4.23 ± 0.15	4.28 ± 0.48
[Fe/H] (dex)	-0.177 ± 0.027	-0.08 ± 0.04	0.27 ± 0.11
v sin*i* (km/s)	18.54 ± 0.17	18.77 ± 0.29	22.55 ± 2.73
v_{mac} (km/s)	-	-	11.70
v_{mic} (km/s)	-	-	1.58

HAT-P-20 yıldızının temel parametrelerinden etkin sıcaklık, yüzey çekim ivmesi ve metal bolluğu değerleri literatürdeki değerlerine yakın ve daha küçük belirsizlikler dahilinde bulunmuştur. Ancak çizgi genişletme faktörlerinde büyük olasılıkla takip edilen farklı yöntem gereği dönme hızı, makrotürbülans ve mikrotürbülans değerleri arasında önemli farklar görünmektedir. Bu farklar HAT-P-20b ötegezegeninin geçiş ışık eğrilerinin analizi üzerinde etkisi olacak farklar değildir. Ancak bu yıldız için de eşdeğer genişlik ve bolluk ölçümleri yapılarak, bu parametrenin bolluktan bağımsız hale geldiği hız değeri mikrotürbülans değeri olarak belirlenip, iSpec ile yapılacak analizlerde mikrotürbülans değerinin bu hıza sabitlenmesi denenebilir.

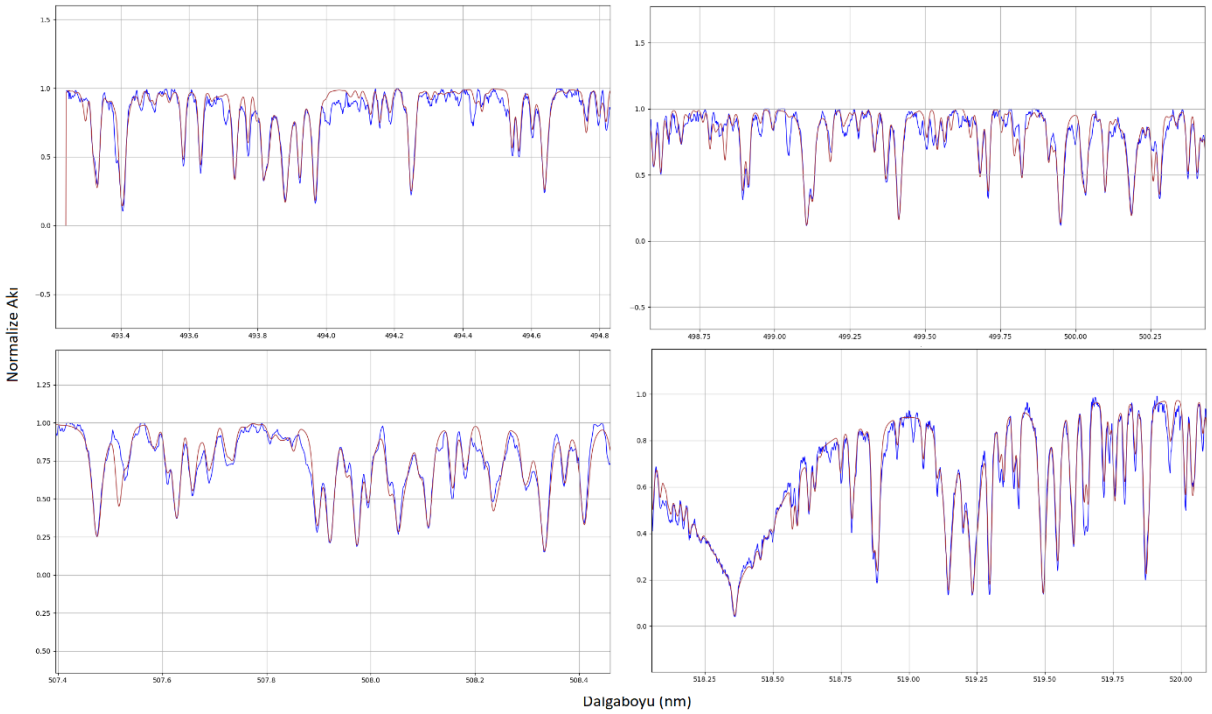
Tablo 4.4. HAT-P-20 Yıldızının Temel Atmosfer Parametreleri

Parametre	**Bakos vd. (2011)**	**Esposito vd. (2017)**	**Nihai Sonuçlar (Bu çalışma)**
T_{eff} (K)	4595 ± 80	4595 ± 45	4596 ± 40
log g (cgs)	4.63 ± 0.02	4.52 ± 0.09	4.67 ± 0.03
[Fe/H] (dex)	0.35 ± 0.08	0.22 ± 0.09	0.26 ± 0.08
v sin*i* (km/s)	2.1 ± 0.05	2.0 ± 0.5	2.90 ± 1.10
v_{mac} (km/s)	2.21	2.17	1.53
v_{mic} (km/s)	0.85	0.74 ± 0.27	0.98

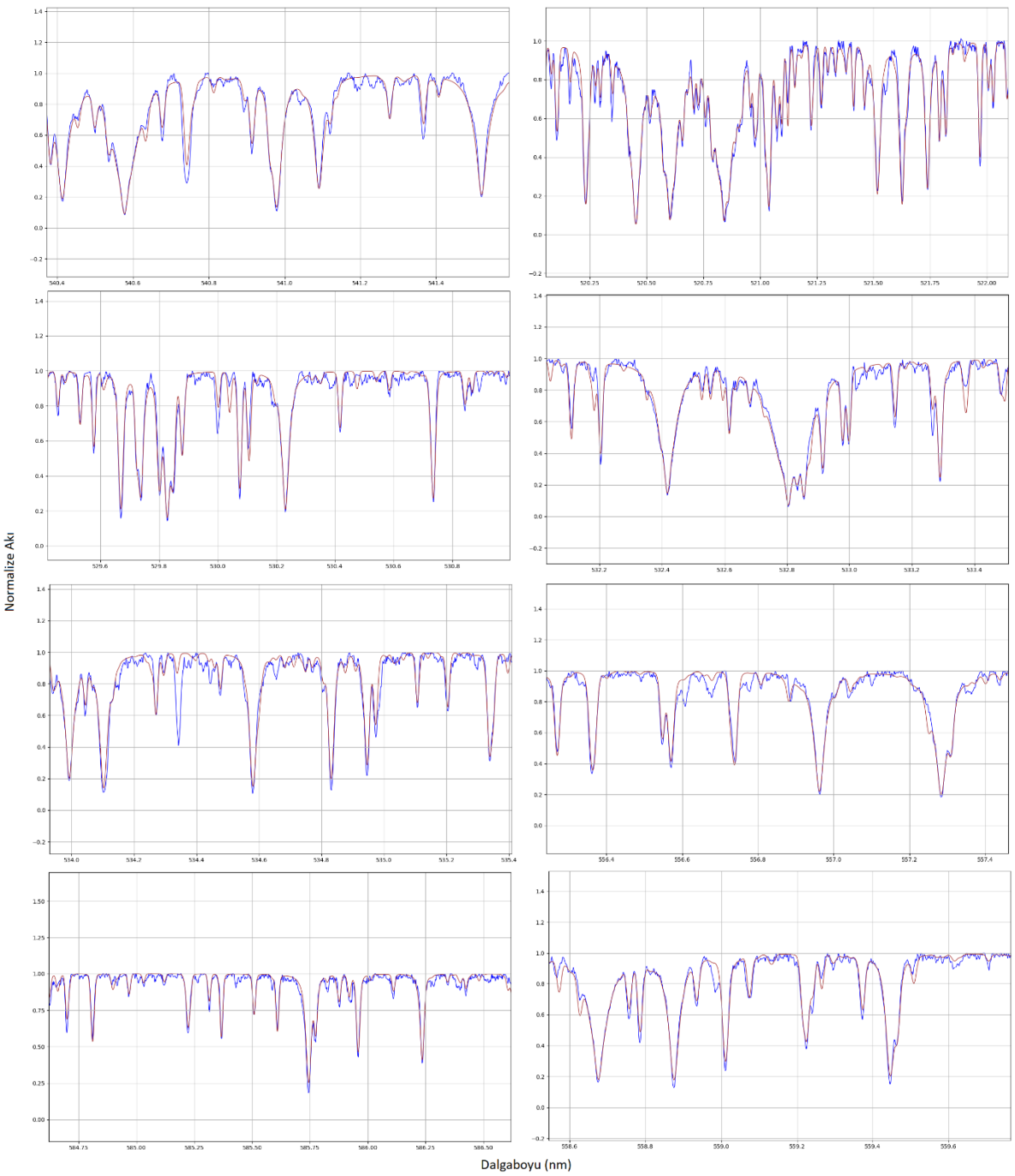
4.1.1. Tayfsal Uyumlamanın Başarısı

Tayfların sentetik tayf çakıştırma yöntemiyle analizinde iSpec yazılımı en küçük kareler yöntemini (Levenberg-Marquardt algoritmasını kullanarak) temel almaktadır. Uyumlamanın başarısı istatistiksel olarak X^2 parametresi (ya da onun serbestlik derecesi ile bölümünden elde edilecek indirgenmiş X^2 parametresi) ile ifade edilebilirse de bu parametreyi kullanmanın bir anlamı yoktur. Zira, X^2 parametresi aynı very setine yapılan serbestlik dereceleri eşit birden fazla modeli birbirleriyle karşılatşırmak için faydalıdır. Bunun dışında kullanılması araştırıcıyı ya da okuyucuyu yanlış yönlendirebilir. Bu nedenle yıldız atmosfer parametrelerinin elde edilmesi sırasında nihai sonuca gidilirken yapılan ara modellerde X^2 parametresi değerleri denetlenmiş olsa da asıl başarım görsel olarak gözlem tayflar ile model arasındaki uyumda ve elde edilen parametrelerin yıldızın doğasına uygunluğunda aranmıştır. Sonuç olarak uyumlanan tayfların başarımı görsel olarak tüm yıldızlarımız için Şekil 4.1 ve Şekil 4.11 arasındaki tayflar ve uyumlamaları bağlamında daha iyi değerlendirilebilir görüşündeyiz. Yine

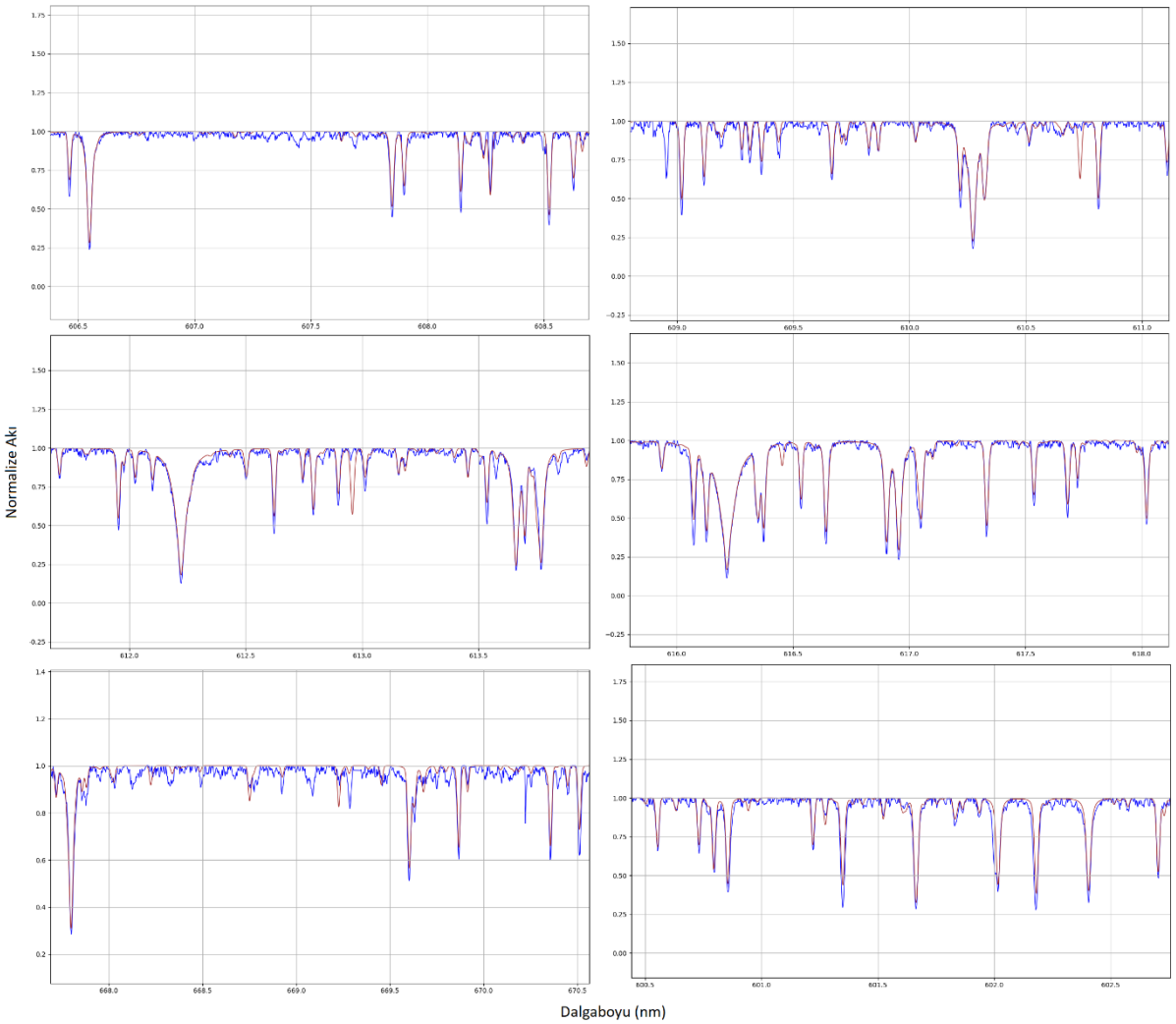
de iSpec programının yaptığı uyumlama için verdiği istatistiksel parametreler, HAT-P-19'un için X^2 = 141.68, indirgenmiş X^2 = 0.0028, uyumlamadan fark kareler toplamı (ing. root mean squared, RMS) 0.0526'dır.



Şekil 4.1. HAT-P-19'un gözlemsel tayfına yapılan en iyi sentetik tayf uyumlaması – 1. HAT-P-19'un normalize tayfı (mavi) ve sentetik tayf çakıştırma yöntemiyle atmosfer parametreleri elde edilen sentetik tayfın (kırmızı) mavi bölgelerinden bazı dalgaboyu aralıkları gösterilmektedir.



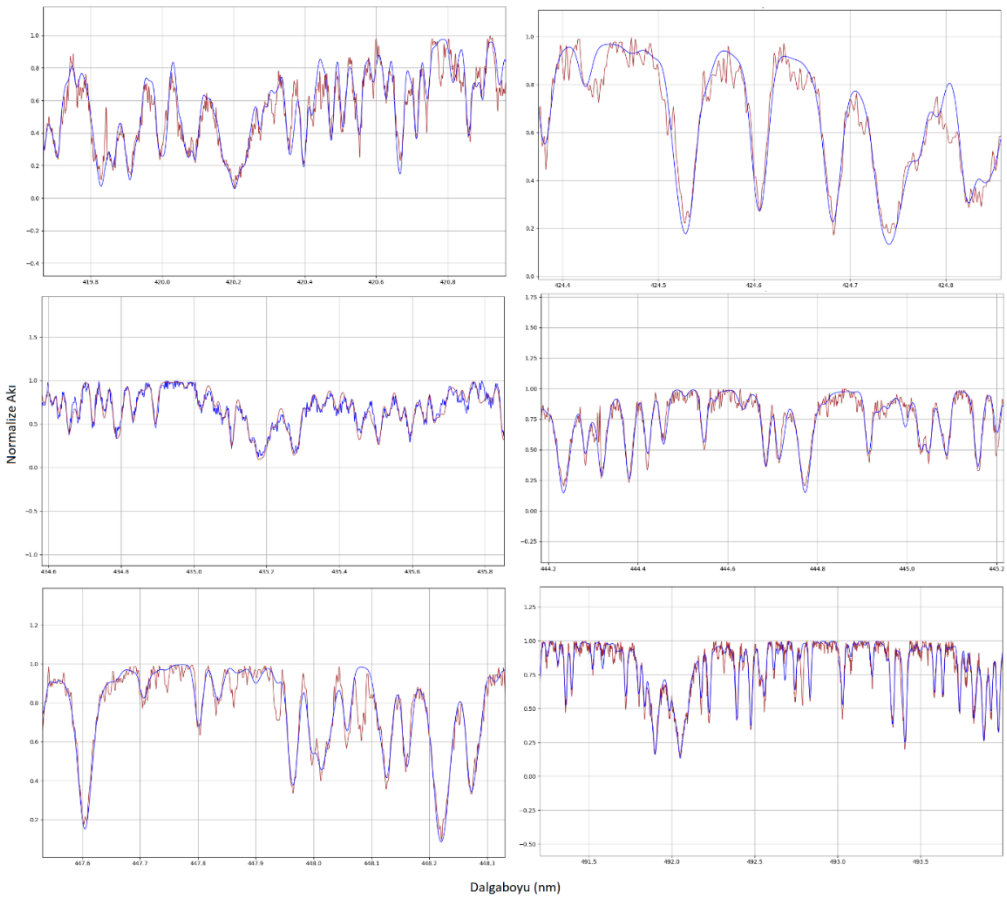
Şekil 4.2. HAT-P-19'un gözlemsel tayfına yapılan en iyi sentetik tayf uyumlaması – 2. HAT-P-19 Keck / HIRES (mavi) ve bu çalışmada yapılan uyumlaması. Görsel bölgenin ortasına yakın bazı dalgaboyu aralıkları gösterilmektedir.



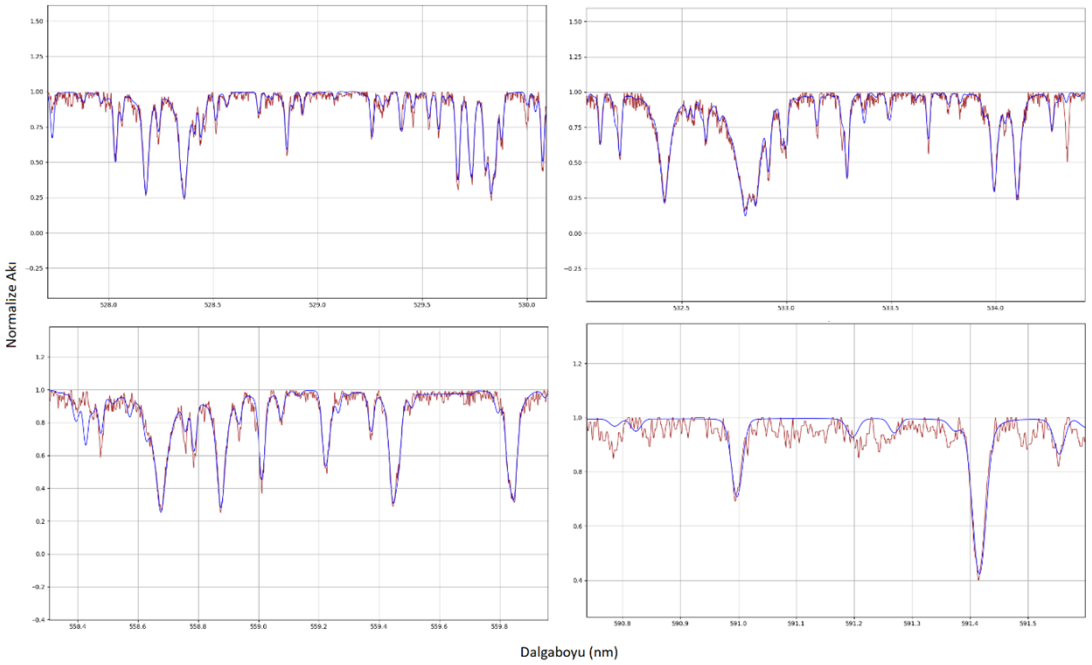
Şekil 4.3. HAT-P-19'un gözlemsel tayfına yapılan en iyi sentetik tayf uyumlaması – 3. HAT-P-19 Keck / HIRES (mavi) ve bu çalışmada yapılan uyumlaması. Görsel bölgenin uzun dalgaboylarında kırmızı bölgedeki dalgaboyu aralıkları gösterilmektedir.

Görüldüğü üzere model atmosfer uyumlaması HAT-P-19 için başarılı sonuç vermiş ve bu nedenle elde edilen parametreler de geçiş ışık eğrilerinin analizden kullanılmak için hazır ve güvenilirdir.

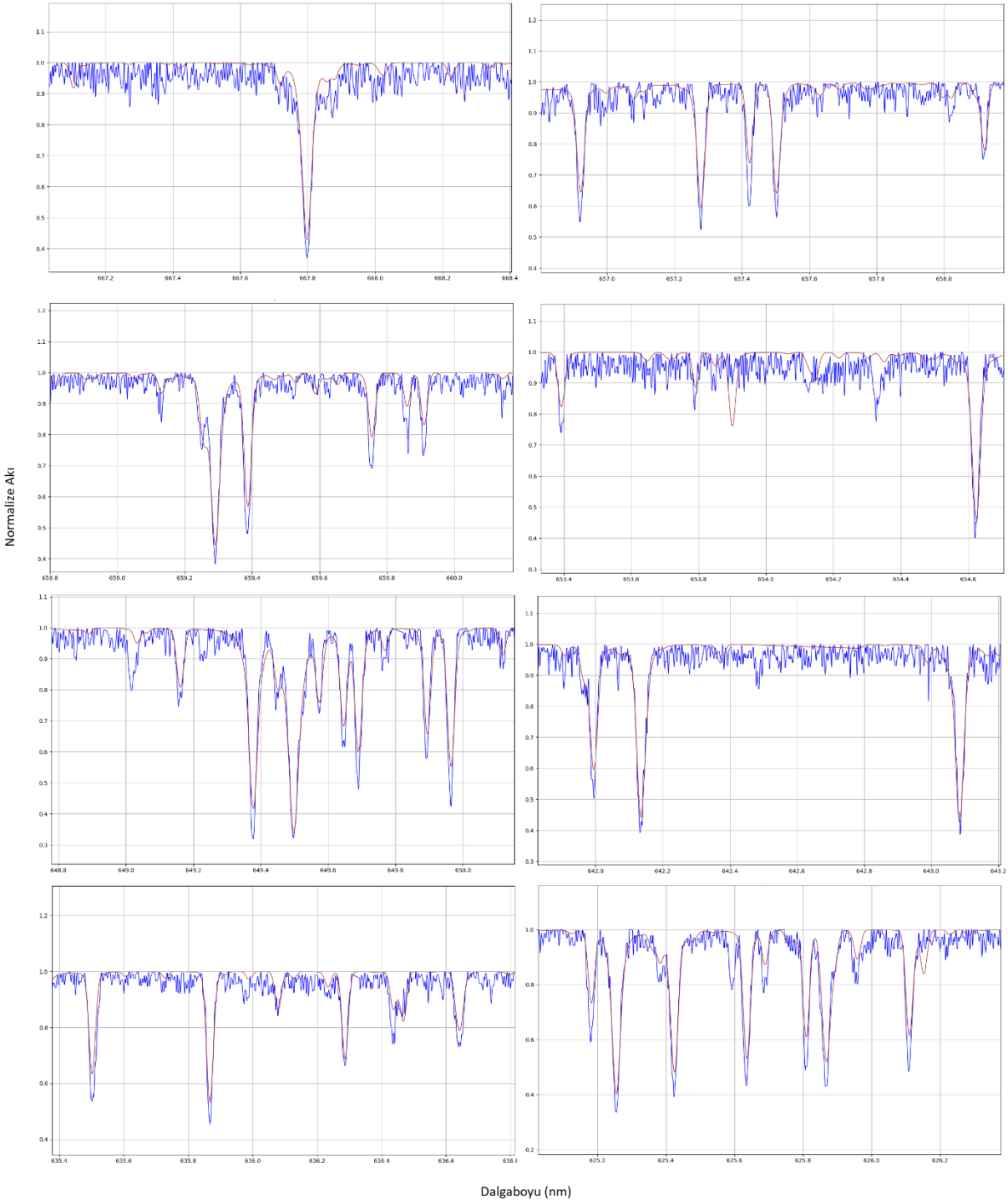
WASP-52 için yapılan uyumlamaların da başarımlarının yüksek olduğu değerlendirilmiştir (Şekil 4.4 – Şekil 4.6). Aynı şekilde bu parametre setinin de geçiş ışık eğrilerinin analizinde girdi parametresi olarak kullanılmasında bir sakınca görülmemiş ve güvenilir oldukları değerlendirmesi yapılmıştır. iSpec programının yaptığı en iyi sentetik uyumlama için verdiği istatistiksel parametreler, WASP-52 için X^2 = 306.50, indirgenmiş X^2 = 0.0040, uyumlamadan fark kareler toplamı (ing. root mean squared, RMS) 0.0630'dur.



Şekil 4.4. WASP-52'nin gözlemsel tayfına yapılan en iyi sentetik tayf uyumlaması – 1. WASP-52'nin normalize tayfı (mavi) ve sentetik tayf çakıştırma yöntemiyle atmosfer parametreleri elde edilen sentetik tayfı (kırmızı). Tayfların maviye yakın bazı kısa dalgaboyu aralıkları gösterilmektedir.



Şekil 4.5. WASP-52'nin gözlemsel tayfına yapılan en iyi sentetik tayf uyumlaması – 2. WASP-52'nin normalize tayfı (mavi) ve sentetik tayf çakıştırma yöntemiyle atmosfer parametreleri elde edilen sentetik tayfı (kırmızı). Tayfların görsel bölgenin ortasına denk gelen bazı dalgaboyu aralıkları gösterilmektedir.

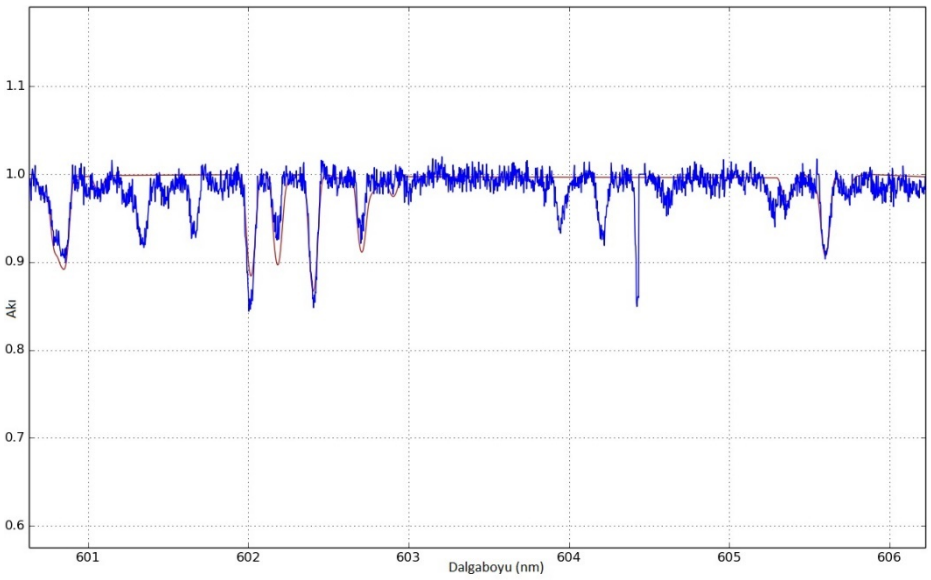


Şekil 4.6. WASP-52'nin gözlemsel tayfına yapılan en iyi sentetik tayf uyumlaması – 3. WASP-52'nin normalize tayfı (mavi) ve sentetik tayf çakıştırma yöntemiyle atmosfer parametreleri elde edilen sentetik tayfı (kırmızı). Tayfların kırımızıya yakın bazı uzun dalgaboyu aralıkları gösterilmektedir.

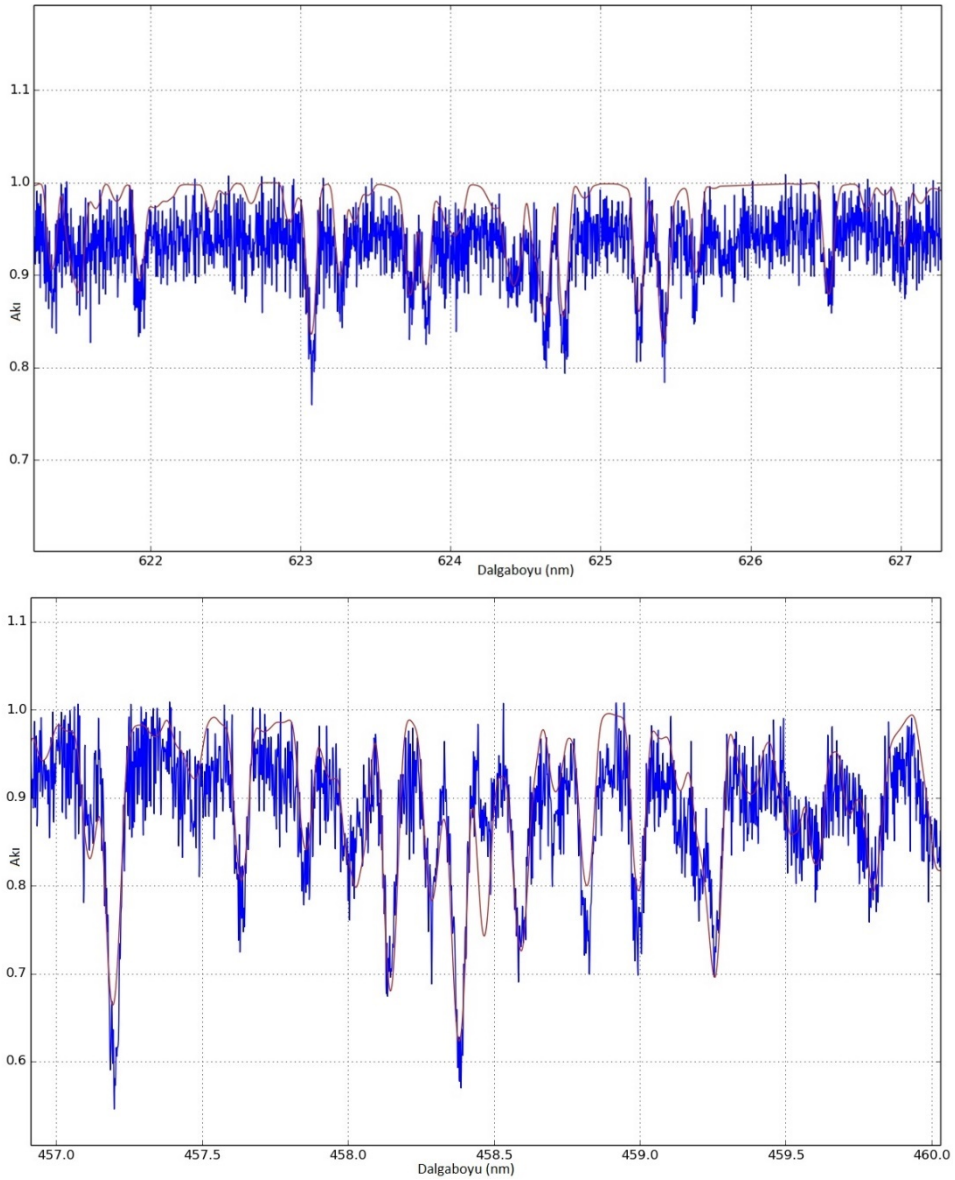
XO-3 yıldızının Keck / HIRES tayflarının gözlemsel nedenlerle problemli, SNR'si çok düşük ve hatalar bulunan dalgaboyu aralıklarının analizden çıkarılması sonrası yapılan uyumlamalar Şekil 4.7'de verilmektedir. Uyumlamaların genel başarımı için iSpec tarafından verilen X^2 = 3482.59, indirgenmiş X^2 = 0.0500 ve RMS = 0.0214 uyumlamanın başarısına dair

bir fikir vermemektedir. Görsel incelemelerden her ne kadar bazı dalgaboyu bölgelerinde uyumlamalar başarılı görünse ve bu nedenle elde edilen parametrelerin değerleri literatürde verilen değerlere yakın olsa da üzerlerindeki belirsizlikler büyük olduğu için bu tayfların kullanılmamasına ve analizlerden çıkarılmasına karar verilmiştir.

SOPHIE tayflarının da S/N oranının yetersiz kalması analizde ulaşılan sonuçlar üzerindeki hataların yine büyük çıkması (> 200 K) sonucunu doğurmuştur. Uyumlamadaki başarımın yüksek olması (X^2 = 57.98, indirgenmiş X^2 = 0.0021, RMS = 0.0459) (Şekil 4.8 ve Şekil 4.9) aynı tayfları kullanarak çok daha küçük belirsizliklerle parametre tayini yapan Tsantaki vd. (2014) tarafından yapılan çalışmanın kullandığı kod (Spectroscopy Made Easy, SME, Valenti & Piskunov 2005) kaynaklı olduğunu düşündürmüş, ancak iSpec içinden algoritması çalıştırılabilen bu kodla yapılan analiz de daha iyi sonuç vermemiştir. Bu durumda tek etken farklı çizgi listelerinin kullanılmış olması olabilir. Elde edilen metal bolluğu değerleri arasındaki görece büyük fark (Bu çalışma: [Fe / H] = 0.27, Tsantaki vd. (2014): [Fe / H] = -0.08) bu görüşü desteklemektedir. Çizgi listeleri konusunda yaptığımız tüm denemeler sonucunda bu konuda ilerleme kaydedilemediği için XO-3 için geçiş ışık eğrisi analizleri için tayfsal parametrelerin öncül değerleri (ing. priors) ve hataları Tsantaki vd. (2014) 'den alınarak kullanılmıştır. Bu değerler Tablo 4.3'te görülebileceği gibi tarafımızca ulaşılan merkezi değerlerden (Bu çalışma: T_{etkin} = 6817 K, log g = 4.28, Tsantaki vd. (2014): T_{etkin} = 6781 K, log g = 4.23) çok uzak olmayıp, sadece üzerindeki belirsizlikler daha küçüktür.

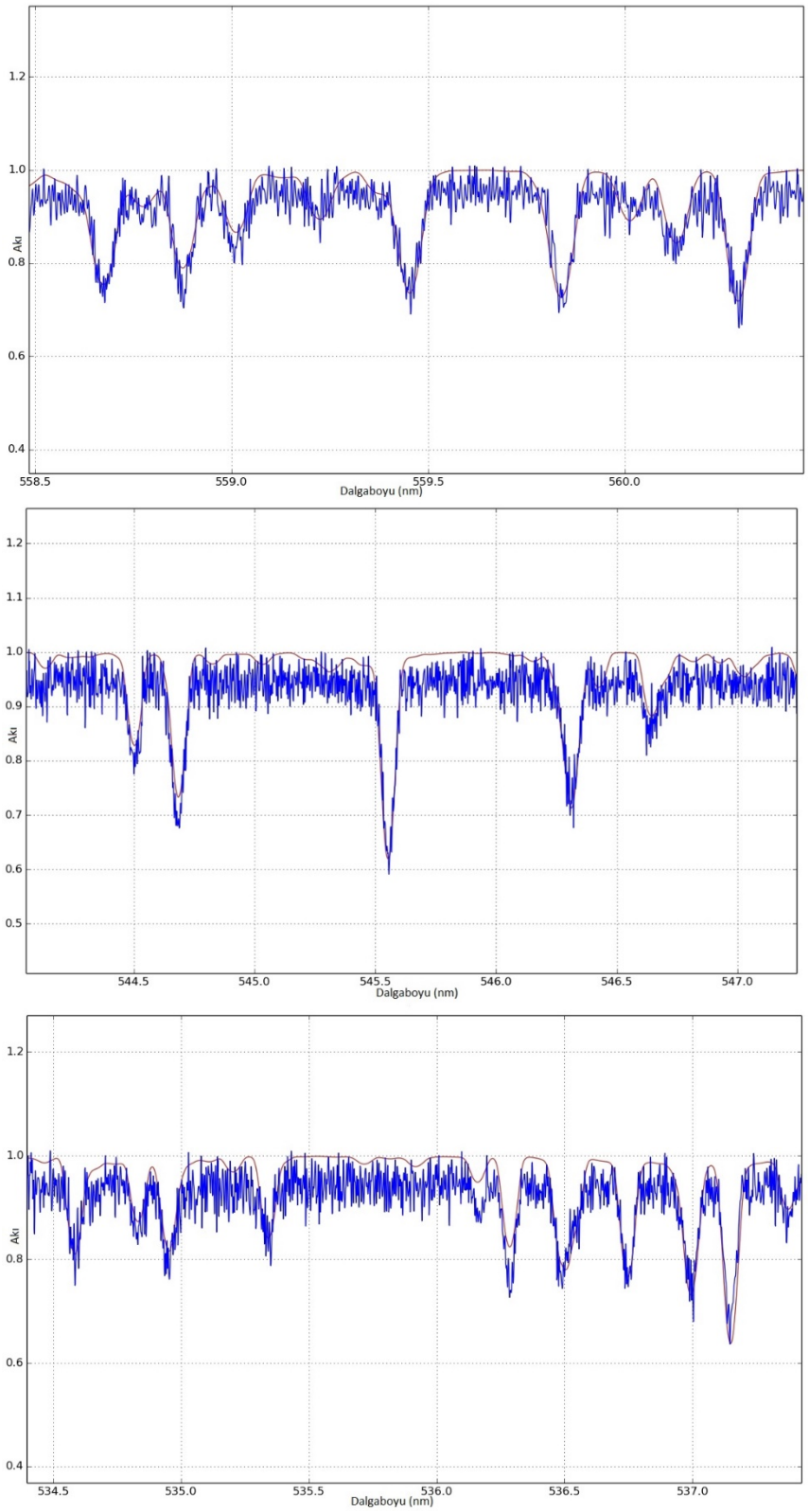


Şekil 4.7. XO-3'ün Keck / HIRES gözlemsel tayfına yapılan en iyi sentetik tayf uyumlaması. XO-3'ün normalize Keck / HIRES tayfı (mavi) ve sentetik tayf çakıştırma yöntemiyle uyumlanan sentetik tayfı (kırmızı) incelendiğinde sadece 5 Angströmlük kısa bir dalgaboyu aralığında dahi uyumlanamayan çizgiler olduğu görülmektedir.

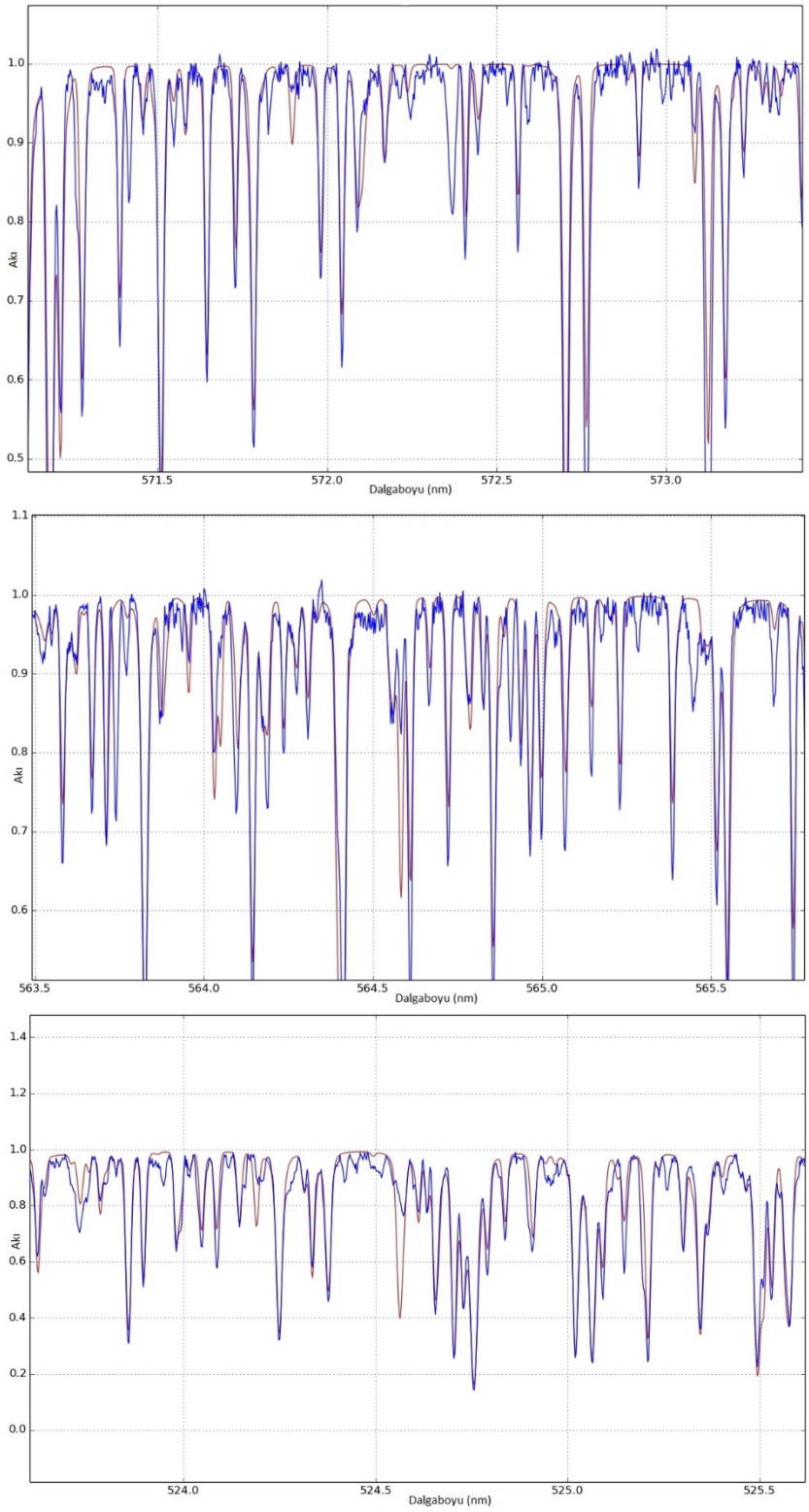


Şekil 4.8. **.** XO-3'ün SOPHIE gözlemsel tayfına yapılan en iyi sentetik tayf uyumlaması – 1. XO-3'ün normalize SOPHIE tayfı (mavi) ve sentetik tayf çakıştırma yöntemiyle uyumlanan sentetik tayfı (kırmızı).

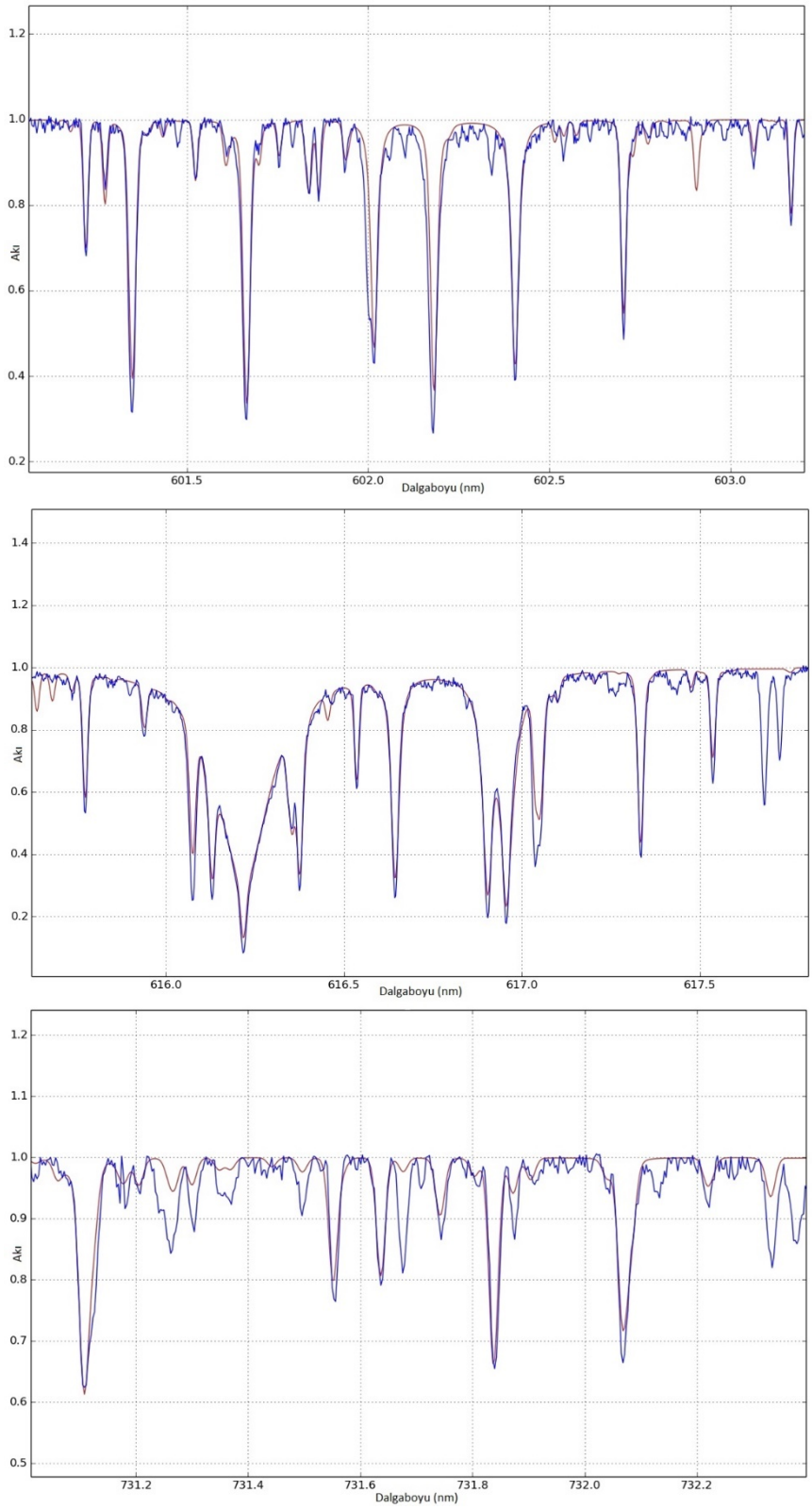
HAT-P-20'nin tayflarına iSpec ile yapılan model atmosfer uyumlamalarının başarısı kendini bu uyumlamalardan elde edilen parametreler ve üzerindeki belirsizliklerde de (Tablo 4.4) kendini göstermiştir. Ayrıca uyumlamalara ilişkin başarım için verilen istatistikler de (X^2 = 43.56, indirgenmiş X^2 = 0.0026, RMS = 0.0508) tatmin edicidir. Bu nedenlerle, elde parametrelerin geçiş ışık eğrisi analizlerinde öncü parametreler olarak kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 4.9. XO-3'ün SOPHIE gözlemsel tayfına yapılan en iyi sentetik tayf uyumlaması – 2. XO-3'ün daha geniş bir dalgaobyu bölgesindeki normalize SOPHIE tayfı (mavi) ve sentetik tayf çakıştırma yöntemiyle uyumlanan sentetik tayfı (kırmızı).



Şekil 4.10. HAT-P-20'nin gözlemsel tayfına yapılan en iyi sentetik tayf uyumlaması – 1. HAT-P-20'nin görsel bölgesinin ortasına karşılık gelen bazı dalgaboyu bölgelerindeki normalize Keck / HIRES tayfı (mavi) ve sentetik tayf çakıştırma yöntemiyle uyumlanan sentetik tayfı (kırmızı).



Şekil 4.11. HAT-P-20'nin gözlemsel tayfına yapılan en iyi sentetik tayf uyumlaması – 2HAT-P-20'nin görsel bölgenin kırmızı tarafına karşılık gelen bazı dalgaboyu bölgelerindeki normalize Keck / HIRES tayfı (mavi) ve sentetik tayf çakıştırma yöntemiyle uyumlanan sentetik tayfı (kırmızı).

4.1.2. Bazı Elementlerin Kimyasal Bollukları

Tüm yıldızların atmosfer parametreleri hesaplandıktan sonra bazı alfa elementlerin ve literatürde sıklıkla parametreler arası korelasyon araştırmalarında kullanılan elementlerin bollukları, temel parametre hesabında kullanılan yöntemle aynı şekilde ve aynı tayflar üzerinden hesaplanmıştır. Bu amaçla iSpec programında (Blanco-Cuaresma vd. 2014) bulunan Synthe (Kurucz vd. 1993), MOOG (Sneden vd. 2012) ve SME (Valenti vd. 1996) kodları, Guneş bolluğu için (Asplund vd. 2009), model atmosfer olarak Atlas-9 (Castelli & Kuruzc 2004) ve çizgi listesi için de VALD veritabanı kullanılmıştır. Bu noktada, her yıldız için temel atmosfer parametrelerin elde edildiği yaklaşımın (kod, model atmosfer ve çizgi listesi) sabit tutularak, istikrarlı bir analiz yapılmasına önem gösterilmiştir. iSpec programının son versiyonunda (v2019) kimyasal bolluk hesabı "Determine Parameters" menüsündeki "Determine Chemical Abundances with Synthesis" seçeneği ile yapılmaktadır. Literatürde gezegen sistemlerinin oluşumu ve evrmini anlamaya yönelik çalışmalara girdi sağlamak üzere sıklıkla kullanılan bazı elementlere ilişkin bu çalışmada elde kimyasal bolluklar ve hataları Tablo 4.5'te sunulmuştur.

Tablo 4.5. Proje yıldızları için bazı elementlerin kimyasal bolluk değerleri

Element	HAT-P-20	WASP-52	HAT-P-19	XO-3
[Na / H] (dex)	0.14 ± 0.10	0.00 ± 0.23	0.46 ± 0.20	-0.15 ± 0.90
[Mg / H] (dex)	0.32 ± 0.36	0.16 ± 0.06	0.27 ± 0.07	0.25 ± 0.74
[Al / H] (dex)	-0.12 ± 0.43	0.66 ± 0.21	0.47 ± 0.40	1.13 ± 2.80
[Si / H] (dex)	-0.05 ± 1.03	0.17 ± 0.12	0.20 ± 0.21	0.17 ± 0.07
[Cr / H] (dex)	0.14 ± 0.48	0.12 ± 0.13	0.17 ± 0.25	0.16 ± 0.34
[Ca / H] (dex)	0.03 ± 1.05	0.25 ± 0.12	0.32 ± 0.37	0.59 ± 0.53
[Ti / H] (dex)	0.20 ± 0.35	0.05 ± 0.16	0.24 ± 0.21	0.42 ± 0.42
[Mn / H] (dex)	0.56 ± 1.28	0.21 ± 0.16	-0.51 ± 1.24	0.16 ± 0.79
[Ni / H] (dex)	0.23 ± 0.76	0.05 ± 0.22	0.23 ± 0.34	-0.07 ± 0.48
[Sc / H] (dex)	0.50 ± 0.61	0.11 ± 0.48	0.32 ± 0.58	0.36 ± 1.38

4.2. Bütün Verinin Birlikte Modellenmesi (ing. Global Modeling)

Işık eğrisi, dikine hız ve barınak yıldızların atmosfer parametrelerinin beraber modellenmesi EXOFAST-v2 (Eastman 2017) programı ile yapılmıştır. EXOFAST-v2, çeşitli dalgaboylarındaki parlaklığı bilinen barınak yıldız için tayfsal enerji dağılımı (ing. Spectral Energy Distribution, SED) analizi yaparak yıldızın bolometrik akısını (F_{bol}), Gaia paralaks değeri (yıldızın uzaklığı d, $L = F_{bol}\ 4\ \pi\ d^2$) ile ışınım gücünü, tayfsal analizden elde edilen T_{etkin} değeriyle de R_* değerini ($L = 4\ \pi\ R_*^2\ \sigma\ T^4$) hassas bir şekilde hesaplayabilmektedir. SED analizi için öncelikle tüm yıldızların 2MASS, SDSS, WISE ve AAVSO kataloglarından ilgili bantlardaki parlaklıkları çekilmiştir. Bu değerler Tablo 4.6'da verilmiştir. Analizde sönümleme katsayısı A_V'nin değeri serbest bırakılmış, ancak bakış doğrultusunda maksimum izin verilen sönümleme değeri Schlegel vd. (1988) tarafından verilen değere sabitlenmiştir.

Tablo 4.6. Proje yıldızlarının farklı filtrelerdeki parlaklık değerleri

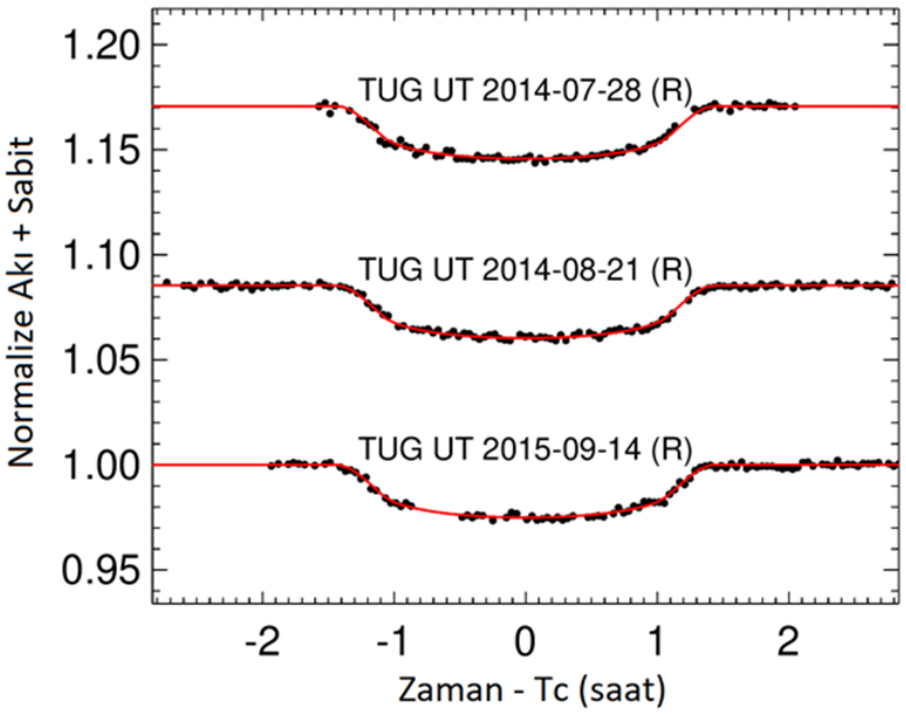
Filtre	HAT-P-20	WASP-52	HAT-P-19	XO-3
J_{2MASS}	9.276 ±0.022	10.588 ± 0.022	11.095 ± 0.02	9.013 ± 0.029
H_{2MASS}	8.743 ± 0.021	10.186 ± 0.028	10.644 ± 0.022	8.845 ± 0.018
K_{2MASS}	8.601 ± 0.019	10.086 ± 0.025	10.546 ± 0.019	8.791 ± 0.019
WISE1	8.559 ± 0.028	10.011 ± 0.023	10.495 ± 0.022	8.754 ± 0.023
WISE2	8.648 ± 0.022	10.094 ± 0.021	10.557 ± 0.02	8.765 ± 0.02
WISE3	8.515 ± 0.03	9.983 ± 0.061	10.561 ± 0.091	8.736 ± 0.025
WISE4	8.063 ± 0.362	-	-	
B	12.576 ± 0.01	13.045 ± 0.006	-	10.446 ± 0.025
V	11.346 ± 0.03	12.22 ± 0.001	-	10.058 ± 0.02
R	10.866 ± 0.02	-	-	-
I	10.378 ± 0.02	-	-	-
u_{SDSS}	-	15.239 ± 0.006	-	-
g_{SDSS}	-	12.864 ± 0.006	-	9.731 ± 0.02
r_{SDSS}	-	11.980 ± 0.006	-	10.103 ± 0.02
i_{SDSS}	-	11.797 ± 0.006	-	10.129 ± 0.02
BT	-	-	-	10.355 ± 0.02
VT	-	-	-	9.904 ± 0.02

MCMC analizinde barınak yıldız parametrelerinin (T_{etkin}, [Fe / H]) Gaussyen (normal) öncül dağılımları için (ing. prior distributions) merkezi değer olarak tayfsal analizden elde edilen (XO-3 hariç) değerler, dağılımların yarı-yükseklikteki tam genişlikleri için ise bu değerlerin hataları kullanılmıştır. Dikine hız parametrelerine ilişkin öncül dağılımların merkezi değerleri (dikine hız yarı-genliği (K), yörünge dönemi (P), dış merkezli yörüngeler için dışmerkezlilik (e)

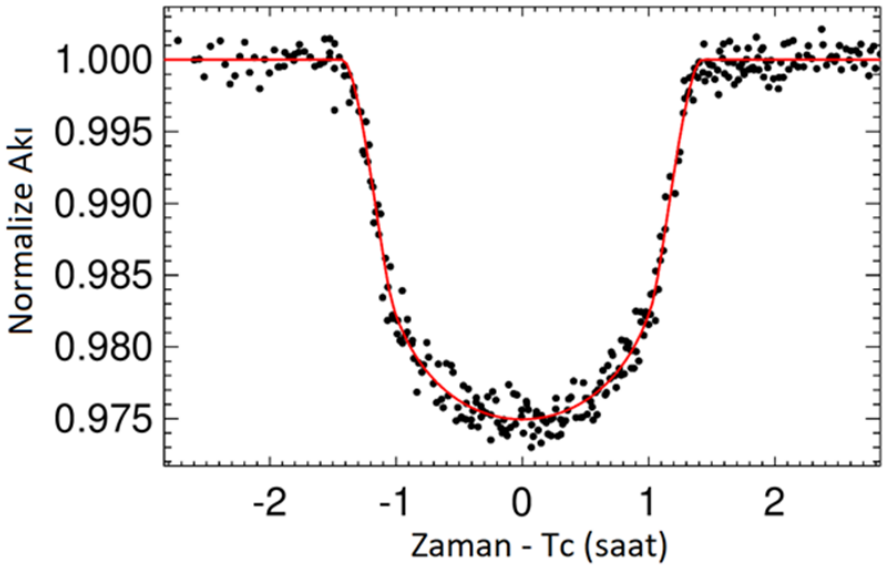
ve enberinin argümanı (ω)) ve genişlikleri, literatürde dikine hızlara yapılmış en iyi yörünge modelinin merkezi değerlerine ve hatalarına eşitlenmiştir. Böylece herhangi bir parametrenin herhangi bir değerinin ne kadar olası olduğu öncül dağılımla (prior) belirlenmiş ve programa girdi parametresi olarak sağlanmıştır. EXOFAST-v2 MCMC analizinde Metropolis-Hastings algoritmasını temel aldığı için bir geçiş fonksiyonuyla seçilen adımlarda rastgele seçtiği çeşitli parametre setlerinin ne kadar olası olduklarını hesaplar. Daha sonra seçilen bir parametre seti (i) ile bir sonrakinin (i+1) olasılığının oranını ($P(x_{i+1}) / P(x_i)$) karşılaştırır. Eğer bu oran 1'den büyükse x_{i+1} seti tercih eder, değilse 0 ile 1 arasında rastgele (random(0,1)) ürettiği bir sayıyla $\min(1, P(x_{i+1}) / P(x_i))$ değerini karşılaştırır. Üretilen sayı küçükse x_{i+1} seti, değilse x_i seti seçilir. Bu her zaman en olası parametre setinin bir sonraki adımda tercih edileceği anlamına gelmez, sadece o parametre setinin tercih edilme olasılığının en fazla olduğunu gösterir. Bu karşılaştırma istenen sayıda tekrarlanmak üzere programa "niter" (ing. number of iterations) parametresiyle girilir. Bu şekilde rastgele, ancak olasılıkları da göz önünde bulundurarak parametre uzayını tarayan EXOFAST-v2 tüm çözümlerin ne kadar olası olduğunu belirler ve yerel bir minimumda sıkışıp kalmaz. EXOFAST-v2, çözümler sırasında Markov zincirinin denge dağılımına erişene kadar ulaşıtğı (ing. burn-in period) parametre setlerini atar. Denge dağılımına ulaştıktan sonra kaç parametre setinden birinin alınacağı ise "nthin" parametresiyle verilir. Bu parametre rastgele üretilen, ardışık parametre setlerinin birbirlerinden tam olarak bağımsız olmadığı için, bağımsız setlerin incelenmesine yardımcı olur. Ardışık settler arasındaki bağımlılıktan, her n (örn. n = 50) parametre setinden biri alındığı için kaçınılmış olunur. İsteğe göre tüm adımlar tamamlandıktan ya da adımlar arası varyans, parametre dağılımlarının varyansından küçük olduğunda (German-Rubin istatisitği ile kontrol edilir) işlemler durdurulur, tüm parametreler için histogramlar oluşturur ve her parametreye ilişkin histogramda en çok tekrarlanan değer, ilgili parametrenin en olası değeridir. Histogramın ifade ettiği dağılım, ardıl dağılım (ing. posteriror distribution) olarak kabul edilir. Bu dağılımın standart sapması ise en olası değer üzerindeki hata olarak kabul edilebilir. Analiz ettiğimiz tüm sistemler için Tablo-4.7 ve Tablo-4.10 arasında verilen parametreler ve üzerindeki belirsizlikler bu şekilde modern bir istatistik yaklaşımı olan MCMC ile Bayesian istatistik paradigması dahilinde üretilmiştir. Modellemeler her bir yıldız için toplamda 10^6 "dan fazla Monte Carlo Markov Chain (MCMC) adımıyla gerçekleştirilmiştir. Ancak her 50 adımın sonunda sadece bir parametre seti seçilmiştir. Tüm işlemler 200 farklı parametre seti ile aynı anda uygulanmıştır (ing. random walkers), iterasyon sayısı ise 15000 ile 50000 arasında seçilmekle birlikte adımlar arası varyans, parametre dağılımlarının varyansından küçük olduğunda programın çalışması durdurulmuştur.

4.2.1. HAT-P-19b Modeli

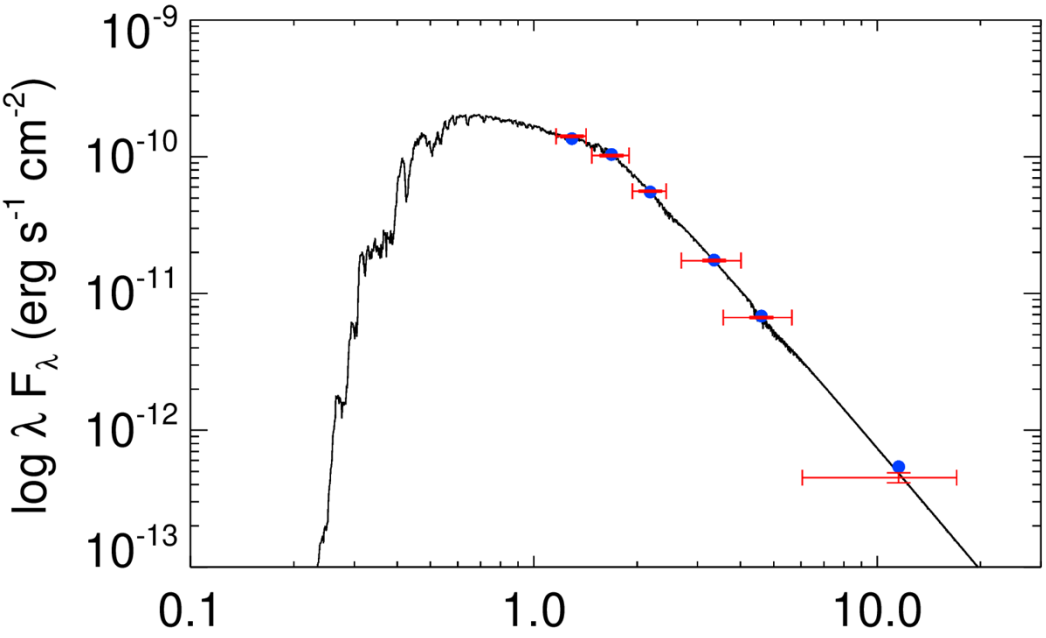
HAT-P-19b'nin TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'nin (TUG) Bakırlıtepe / Antalya mevkinde 2500 m'de konuşlandırılmış 1 m ayna çaplı T100 teleskobuyla 28 Temmuz 2014, 21 Ağustos 2014 ve 14 Eylül 2015 tarihinde elde edilen Bessel-R bandı ışık eğrileri, Keck / HIRES tayflarının tarafımızca yapılan analizlerinden elde edilen atmosfer parametreleri (Tablo 4.1), Hartman vd. (2011) tarafından verilen ve dikine hız modelinden elde edilen dikine hız yarı-genliği ve tarafımızca açık veritabanlarından toplanan çeşitli bantlardaki parlaklıkları (Tablo 4.5) birlikte analiz edildiğinde Tablo 4.7'de verilen sonuçlara ulaşılmıştır. Tüm ışık eğrilerine EXOFAST-v2 tarafından yapılan modeller Şekil 4.12'de, bu üç ışık eğrisinin geçiş zaman ortası 0'a gelecek şekilde kaydırılıp birleştirilmesiyle oluşturulmuş ışık eğrisine yapılan model ise Şekil 4.13'te verilmiştir. Literatürden toplanan çeşitli bantlardaki parlaklıklara global modelin yaptığı uyumlama Şekil 4.14'te, barınak yıldızın MIST (MESA Isochrones & Stellar Tracks, Dotter 2016) eş yaş eğrileri (izokron) üzerindeki konumu ise Şekil 15'te sunulmaktadır. Tüm parametreler arasındaki lineer ilişkinin derecesini (kovaryans) gösteren köşe grafiği (ing. corner plot) Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.12. HAT-P-19'un farklı gecelerdeki ışık eğrilerinin modelleri. HAT-P-19'un ışık eğrileri (siyah nokta) üzerine EXOFASTv2 ile yapılan geçiş modelleri (kırmızı) gösterilmektedir.



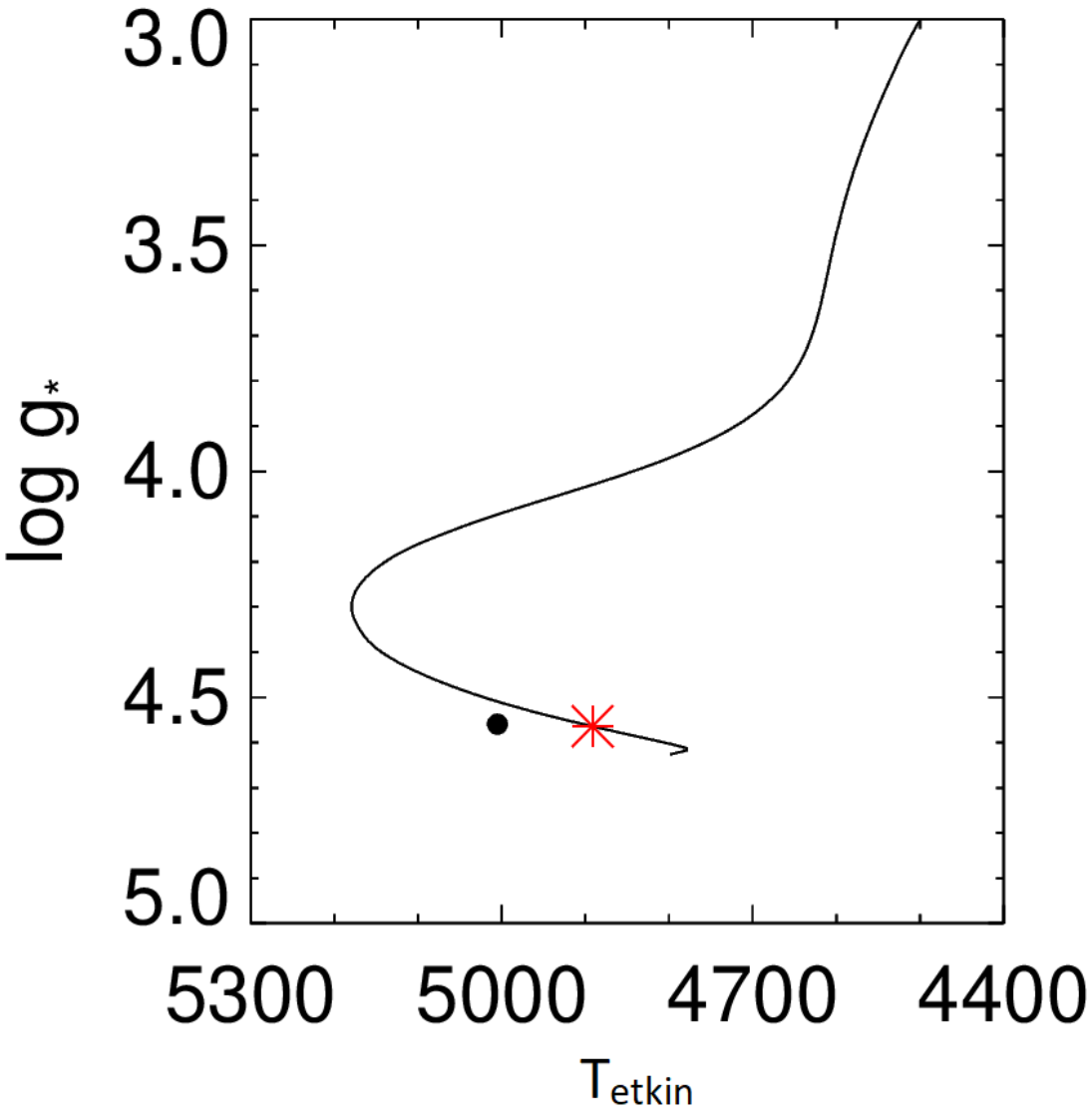
Şekil 4.13. HAT-P-19'un tüm ışık eğrisi ve modellerinin üstüste çizdirilmiş hali. HAT-P-19'un analizde kullanılan 4 ışık eğrisinin geçiş ortası 0'a gelecek şekilde zamanda kaydırılarak üst üste çizdirilmiş hali (siyah nokta) üzerine geçiş parametrelerinin hesaplandığı model (kırmızı) gösterilmektedir.



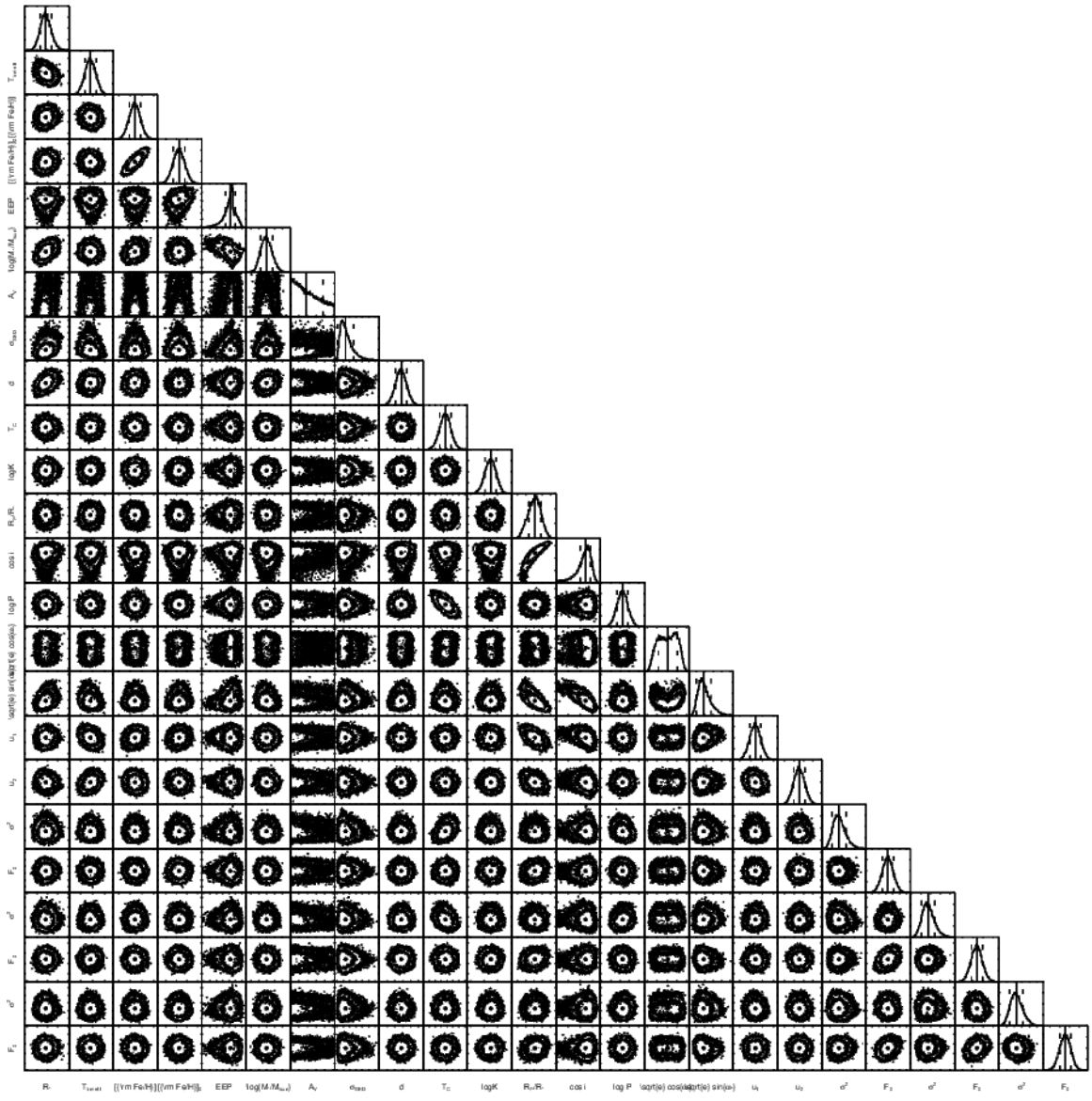
Şekil 4.14. HAT-P-19'un çeşitli dalgaboylarındaki parlaklıklarına yapılan SED modeli. HAT-P-19'un tayfsal enerji dağılımı. Literatürden elde edilen çeşitli dalgaboylarındaki parlaklıklarına EXOFAST-v2 tarafından yapılan model (sürekli eğri), modelden elde edilen integre akılar (mavi), bu akılara karşılık gelen gözlem değerleri ve hataları (kırmızı) verilmiştir.

Tablo 4.7. HAT-P-19'un global modelinden elde edilen yıldız ve gezegen parametreleri. Keşif yayınındaki (Hartman vd. (2011), H11) değerlerle karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

HAT-P-19	Parametre	En Olası Değer	H11
Yıldız Parametreleri			
M_*	Kütle ($M_\odot$)	$0.831^{+0.029}_{-0.026}$	0.842 ± 0.042
R_*	Yarıçap ($R_\odot$)	$0.797^{+0.011}_{-0.010}$	0.820 ± 0.048
L_*	Işınım gücü ($L_\odot$)	$0.353^{+0.010}_{-0.014}$	0.37
ρ_*	Ortalama Yoğunluk (cgs)	$2.315^{+0.096}_{-0.094}$	-
$\log g$	Yüzey çekim ivmesi (cgs)	$4.555^{+0.015}_{-0.014}$	4.54 ± 0.05
T_{etkin}	Etkin Sıcaklık (K)	4981^{+46}_{-45}	4990 ± 130
[Fe/H]	Metal Bolluğu (dex)	$+0.24^{+0.049}_{-0.049}$	$+0.23 \pm 0.08$
$[Fe/H]_0$	Başlangıç metal bolluğu (dex)	$+0.225^{+0.055}_{-0.055}$	-
Yaş	Yaş (milyar yıl)	$7.3^{+4.0}_{-4.1}$	8.8 ± 5.2
A_v	Yıldızlararası Sönümleme (kadir)	$0.092^{+0.098}_{-0.066}$	-
σ_{SED}	SED fotometrik hata ölçeği	$2.36^{+1.3}_{-0.72}$	-
p	Paralaks (miliyaysaniyesi)	$4.913^{+0.034}_{-0.035}$	-
d	Uzaklık (parsek)	$203.6^{+1.4}_{-1.4}$	215 ± 15
Gezegen Parametreleri			
P	Yörünge dönemi (gün)	$4.0087746^{+0.0000028}_{-0.0000028}$	$4.008778\ (6)$
a	Yarıbüyük eksen uzunluğu (AB)	$0.04644^{+0.00054}_{-0.00049}$	0.0466 ± 0.0008
i	Yörünge eğim açısı (°)	$88.61^{+0.39}_{-0.24}$	88.2 ± 0.4
ω	Enberinin argümanı (°)	275^{+46}_{-51}	256 ± 77
e	Yörüngenin dış merkezliliği	$0.077^{+0.031}_{-0.030}$	0.067 ± 0.042
a/R_*	Yarıçapa ölçekli yörünge büyüklüğü	$12.53^{+0.17}_{-0.17}$	12.24 ± 0.67
R_p/R_*	Yarıçaplar oranı	$0.1422^{+0.0015}_{-0.0017}$	0.1418 ± 0.0020
R_p	Yarıçap (R_J)	$1.103^{+0.020}_{-0.019}$	1.132 ± 0.072
M_p	Kütle (M_J)	$0.290^{+0.016}_{-0.015}$	0.292 ± 0.018
ρ_p	Ortalama Yoğunluk (cgs)	$0.268^{+0.020}_{-0.018}$	0.25 ± 0.04
K	Dikine hız yarı genliği (m/s)	$42.1^{+2.1}_{-2.0}$	42.0 ± 2.1
$M_P \sin i$	Minimum kütle (M_J)	$0.290^{+0.016}_{-0.015}$	-
M_P/M_*	Kütle oranı	$0.000333^{+0.000017}_{-0.000016}$	-
T_{denge}	Denge Sıcaklığı *K)	$995.1^{+9.6}_{-9.5}$	1010 ± 42
Geçiş Parametreleri			
δ	Geçiş derinliği (oran)	$0.02022^{+0.00042}_{-0.00047}$	-
b	Etki parametresi	$0.320^{+0.062}_{-0.097}$	0.404
τ	Giriş (ingress) zaman ölçeği (gün)	$0.01624^{+0.00096}_{-0.0010}$	0.0172 ± 0.0014
$T_{1\text{-}4}$	Geçiş süresi (gün)	$0.11829^{+0.00087}_{-0.00090}$	-
u_1	Lineer kenar kararma sabiti	$0.570^{+0.024}_{-0.024}$	-
u_2	Kuadratik kenar kararma sabiti	$0.178^{+0.024}_{-0.029}$	-



Şekil 4.15. MIST eş yaş eğrileri ile HAT-P-19 yıldızının yaş hesabı. Siyah düz çizgi eş yaş eğrisi modeli, siyah nokta yıldızın konumunu, kırmızı ise yıldızın modeldeki yerini göstermektedir.

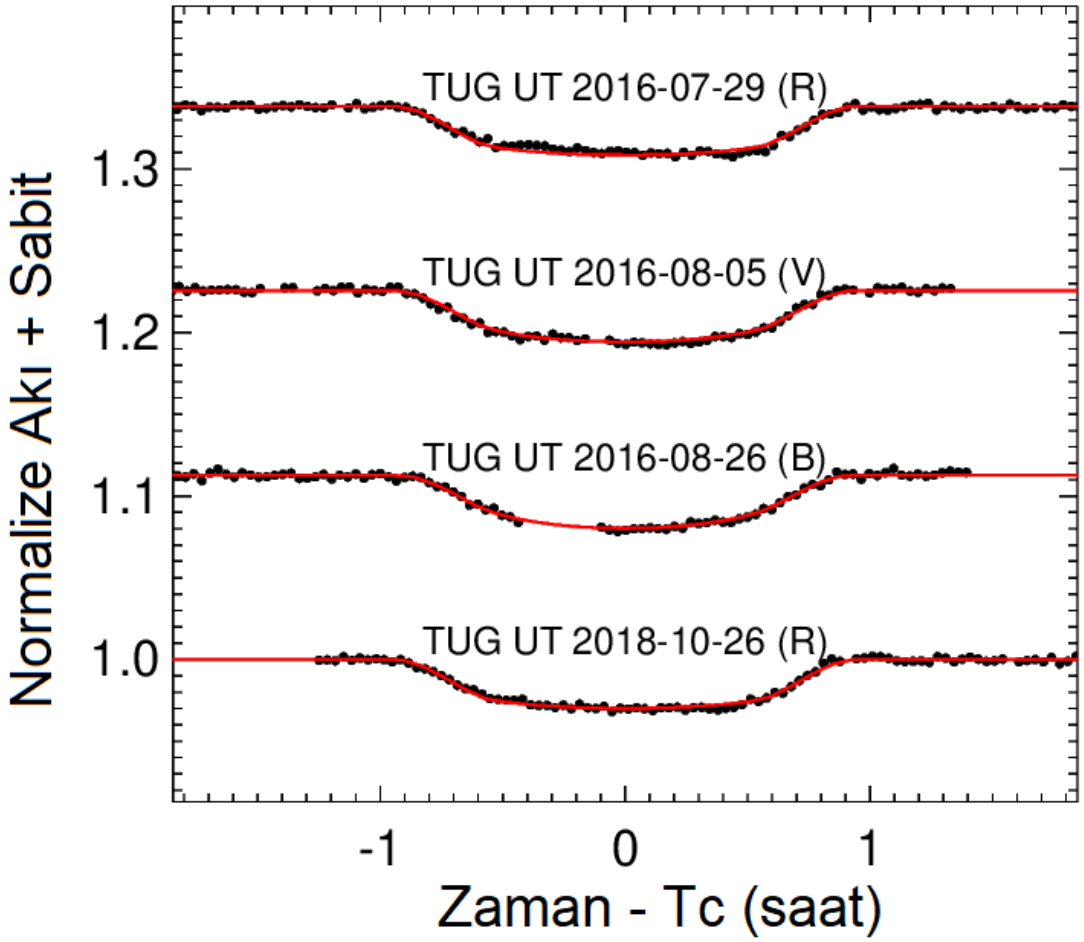


Şekil 4.16. HAT-P-19 sistem parametrelerinin kovaryanslarını gösteren köşe grafiği (ing. corner plot).

4.2.2. WASP-52b Modeli

WASP-52b'nin T100 teleskobuyla çeşitli tarhilerde Bessel-R bandında alınmış duyarlı ışık eğrileri elimizde bulunmaktadır ve Şekil 3.5'te verilmiştir. Ancak WASP-52 yıldızının yüzeyindeki manyetik etkinlik kaynaklı soğuk lekelerin dönme ile modülasyonu sonucu ışık eğrileri üzerinde asimetriler gözlenmektedir. Gezegen, geçişi sırasında yıldızın yüzeyinde bulunan bu tür leke veya faküla benzeri yapıları örtebilir. Bu durum ışık eğrisinden belirlenen parametreler üzerinde etkili olabliir (Mancini vd. 2017). Buna karşın ışık eğrileri farklı bantlarda alınmıştır ve lekenin neden olduğu asimetri açıkça minimum çukurunun solunda görünmektedir. Işık eğrilerinin farklı bantlarda alınmış olmasına karşın fotometrik hassasiyetin uzay teleskobu seviyesinde olmaması, gezegen atmosferi kaynaklı derinlik farklarının

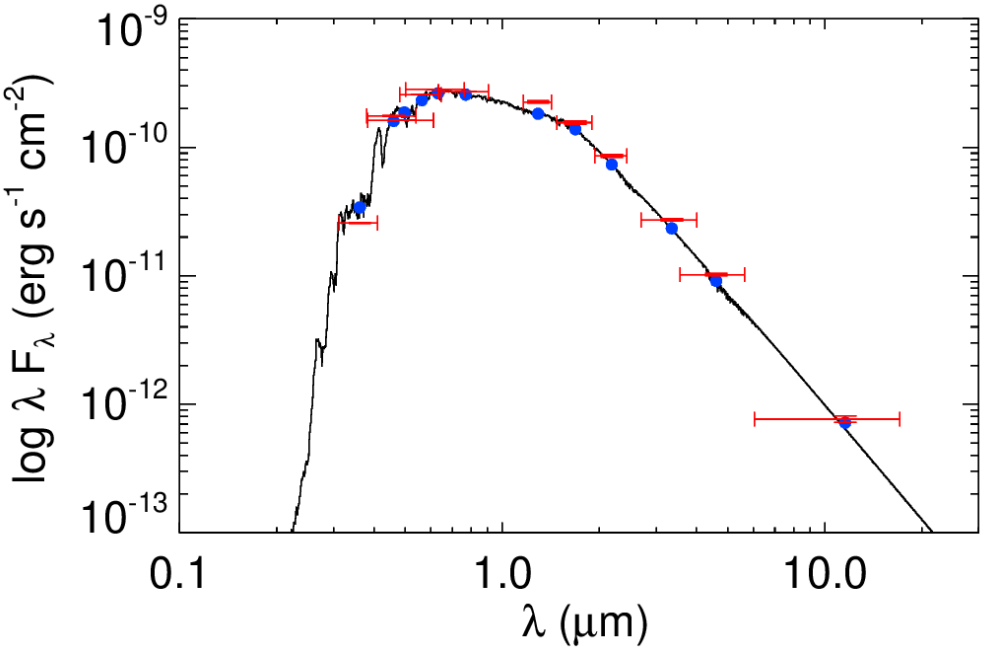
gözlenememesine neden olduğundan ışık eğrilerinn derinlikleri benzerdir ve hepsinin birlikte modellenmesi daha güvenilir bir sonuç verir. Bu nedenlerle tüm bu ışık eğrileri (Tablo 4.1), Hébrard vd. (2013) tarafından verilen ve dikine hız modelinden elde edilen dikine hız yarı-genliği ve tarafımızca açık veritabanlarından toplanan çeşitli bantlardaki parlaklıkları (Tablo 4.5) birlikte analiz edildiğinde Tablo 4.8'de verilen sonuçlara ulaşılmıştır. Işık eğrisi modeli Şekil 4.17'de, literatürden toplanan çeşitli bantlardaki parlaklıklara global modelin yaptığı uyumlama Şekil 4.18'de, barınak yıldızın MIST eş yaş eğrileri (izokron) üzerindeki konumu ise Şekil 4.19'da sunulmaktadır. Tüm parametreler arasındaki lineer ilişkinin derecesini (kovaryans) gösteren köşe grafiği (ing. corner plot) ise Şekil 4.20'de verilmiştir.



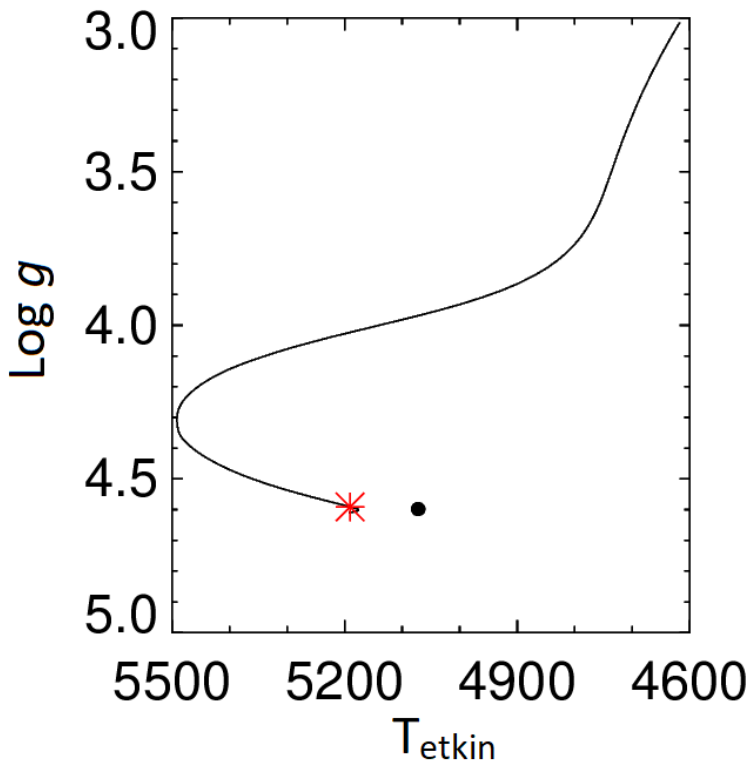
Şekil 4.17. WASP-52'nin farklı gecelerdeki ışık eğrilerinin modelleri. WASP-52'nin 29 Temmuz 2016, 5 Ağustos 2016, 26 Ağustos 2016 ve 26 Ekim 2016 tarihli TUG T100 sırasıyla Bessel R, V, B ve R bandı ışık eğrileri (siyah nokta) üzerine EXOFAST-v2 ile yapılan geçiş modelleri (kırmızı) gösterilmektedir.

Tablo 4.8. WASP-52b'nin global modelinden elde edilen parametreleri. Keşif yayınındaki (Hébrard vd. (2013), H13) değerlerle karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

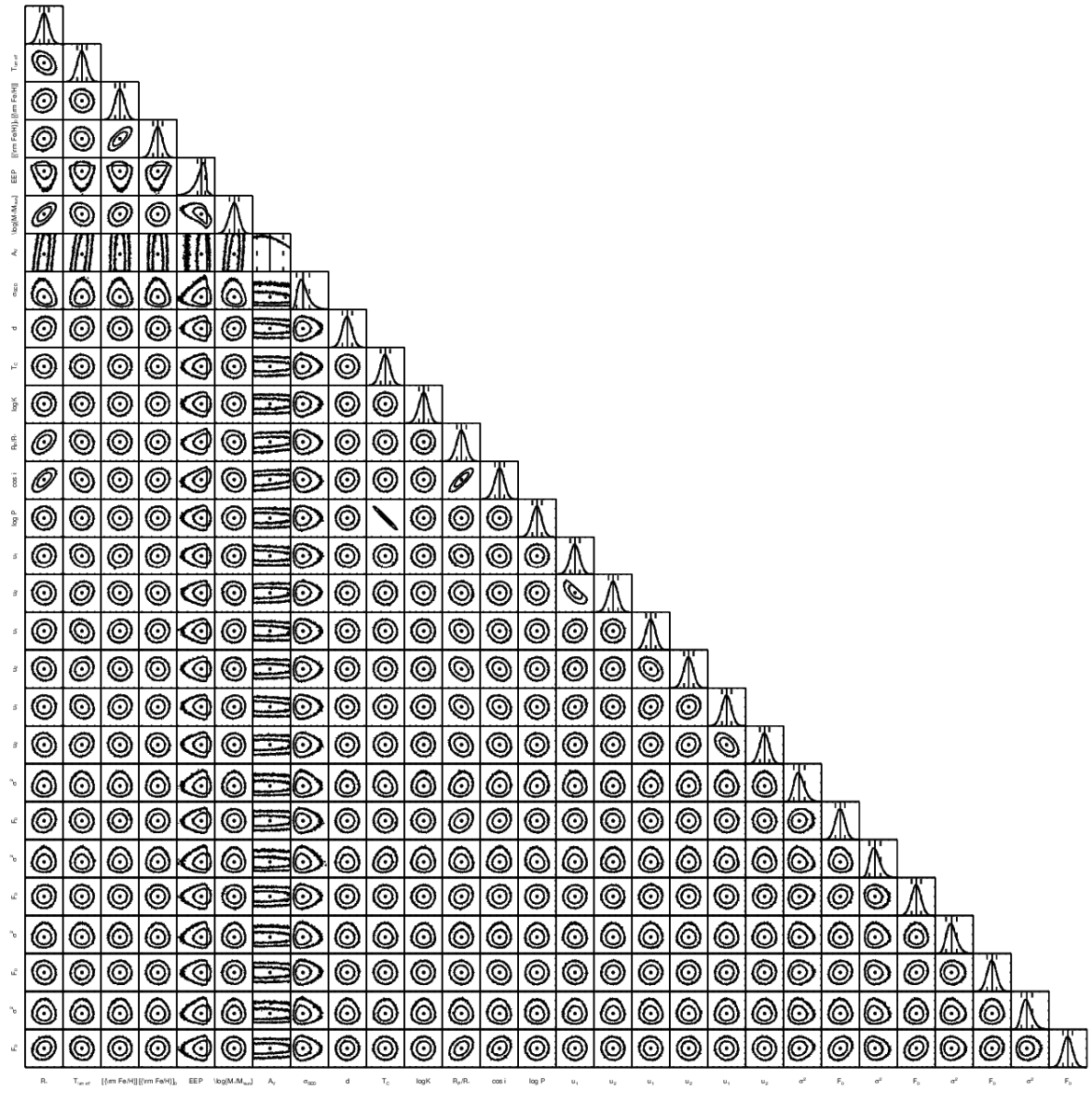
WASP-52	Parametre	En Olası Değer	H13
Yıldız Parametreleri			
M_*	Kütle ($M_\odot$)	$0.842^{+0.033}_{-0.034}$	0.87 ± 0.03
R_*	Yarıçap ($R_\odot$)	$0.772^{+0.013}_{-0.014}$	0.79 ± 0.02
L_*	Işınım gücü ($L_\odot$)	$0.353^{+0.012}_{-0.012}$	-
ρ_*	Ortalama Yoğunluk (cgs)	$2.58^{+0.11}_{-0.10}$	1.76 ± 0.08
log *g*	Yüzey çekim ivmesi (cgs)	$4.588^{+0.014}_{-0.014}$	4.5 ± 0.1
T_{etkin}	Etkin Sıcaklık (K)	5066^{+31}_{-31}	5000 ± 100
[Fe/H]	Metal Bolluğu (dex)	$+0.081^{+0.040}_{-0.040}$	0.03 ± 0.12
$[Fe/H]_0$	Başlangıç metal bolluğu (dex)	$+0.064^{+0.049}_{-0.049}$	-
Yaş	Yaş (milyar yıl)	$3.1^{+2.2}_{-3.7}$	$0.4^{+0.2}_{-0.3}$
A_v	Yıldızlararası Sönümleme (kadir)	$0.048^{+0.032}_{-0.036}$	-
σ_{SED}	SED fotometrik hata ölçeği	73^{+21}_{-15}	-
p	Paralaks (miliyaysaniyesi)	$5.703^{+0.042}_{-0.043}$	-
d	Uzaklık (parsek)	$175.3^{+1.3}_{-1.3}$	140 ± 20
Gezegen Parametreleri			
P	Yörünge dönemi (gün)	$1.74978085^{+0.00000042}_{-0.00000042}$	$1.7497798\ (12)$
a	Yarıbüyük eksen uzunluğu (AB)	$0.02683^{+0.00035}_{-0.00036}$	0.0272 ± 0.0003
i	Yörünge eğim açısı (°)	$85.86^{+0.21}_{-0.20}$	85.35 ± 0.20
ω	Enberinin argümanı (°)	-	-
e	Yörüngenin dış merkezliliği	0.0	0.0
a/R_*	Yarıçapa ölçekli yörünge büyüklüğü	$7.477^{+0.1}_{-0.1}$	7.3801
R_p/R_*	Yarıçaplar oranı	$0.1633^{+0.0012}_{-0.0012}$	0.1646 ± 0.002
R_p	Yarıçap (R_J)	$1.226^{+0.027}_{-0.027}$	1.27 ± 0.03
M_p	Kütle (M_J)	$0.446^{+0.020}_{-0.020}$	0.46 ± 0.02
ρ_p	Ortalama Yoğunluk (cgs)	$0.300^{+0.020}_{-0.021}$	0.22 ± 0.02
K	Dikine hız yarı genliği (m/s)	$84.2^{+3.2}_{-3.0}$	-
$M_P sin i$	Minimum kütle (M_J)	$0.445^{+0.020}_{-0.020}$	-
M_P/M_*	Kütle oranı	$0.000506^{+0.000019}_{-0.000019}$	-
T_{denge}	Denge Sıcaklığı *K)	1310^{+10}_{-10}	1315 ± 35
Geçiş Parametreleri			
δ	Geçiş derinliği (oran)	$0.02665^{+0.00039}_{-0.00039}$	-
b	Etki parametresi	$0.540^{+0.019}_{-0.021}$	0.60 ± 0.02
τ	Giriş (ingress) zaman ölçeği (gün)	$0.01470^{+0.00053}_{-0.00052}$	-
$T_{1\text{-}4}$	Geçiş süresi (gün)	$0.11829^{+0.00087}_{-0.00090}$	0.0754 ± 0.0005
$u_{1,R}$	R bandı Lineer kenar kararma sabiti	$0.486^{+0.029}_{-0.030}$	-
$u_{2,R}$	Kuadratik kenar kararma sabiti (R)	$0.157^{+0.033}_{-0.033}$	-



Şekil 4.18. WASP-52'nin çeşitli dalgaboylarındaki parlaklıklarına yapılan SED modeli. Literatürden elde edilen çeşitli dalgaboylarındaki parlaklıklarına EXOFAST-v2 tarafından yapılan model (sürekli eğri), modelden elde edilen integre akılar (mavi), bu akılara karşılık gelen gözlem değerleri ve hataları (kırmızı) verilmiştir.



Şekil 4.19. MIST eş yaş eğrileri ile WASP-52 yıldızının yaş hesabı. Siyah düz çizgi eş yaş eğrisi modeli, siyah nokta yıldızın konumunu, kırmızı ise yıldızın modeldeki yerini göstermektedir.

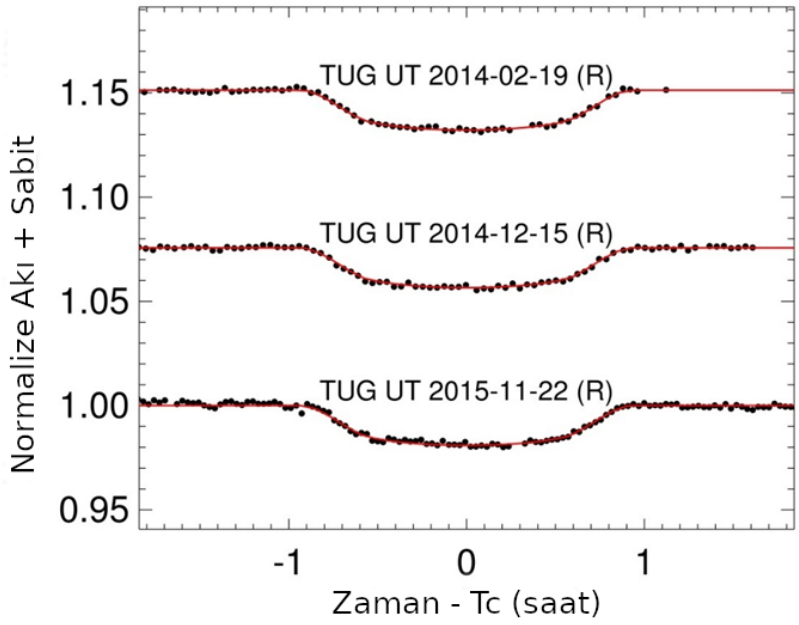


Şekil 4.20. WASP-52 sistem parametrelerinin kovaryanslarını gösteren köşe grafiği (ing. corner plot).

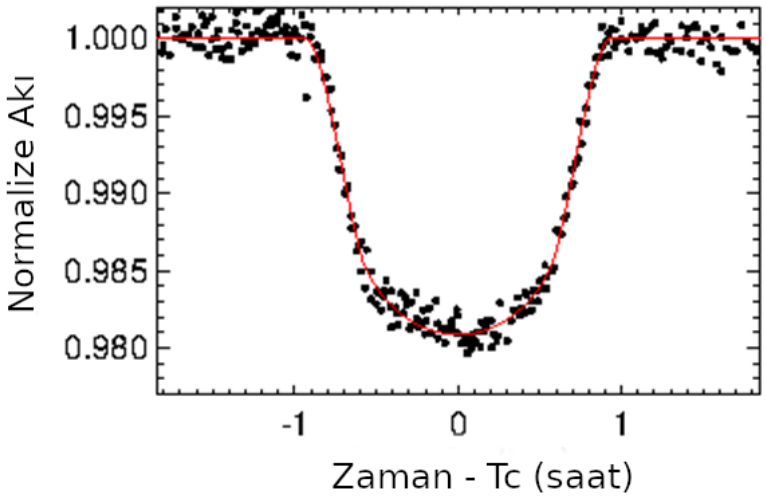
4.2.3. HAT-P-20b Modeli

HAT-P-20b'nin T100 teleskobuyla çeşitli tarhilerde Bessel-R bandında alınmış duyarlı ışık eğrileri elimizde bulunmaktadır ve Şekil 3.9'da verilmiştir. Tıpkı WASP-52'de olduğu gibi HAT-P-20'de yüzey parlaklık dağılımı anomalilerinin ışık eğrileri üzerindeki etkisi belirgindir. Bu etkinin minimum olduğu 15 Aralık 2014 tarihli ışık eğrisi Bakos vd. (2011) tarafından verilen ve dikine hız modelinden elde edilen dikine hız yarı-genliği ve tarafımızca açık veritabanlarından toplanan çeşitli bantlardaki parlaklıkları (Tablo 4.5) ile birlikte modellenmiş, Tablo 4.9'da verilen sonuçlara ulaşılmıştır. Işık eğrisi modeli Şekil 4.21'de, literatürden toplanan çeşitli bantlardaki parlaklıklara global modelin yaptığı uyumlama Şekil 4.22'de,

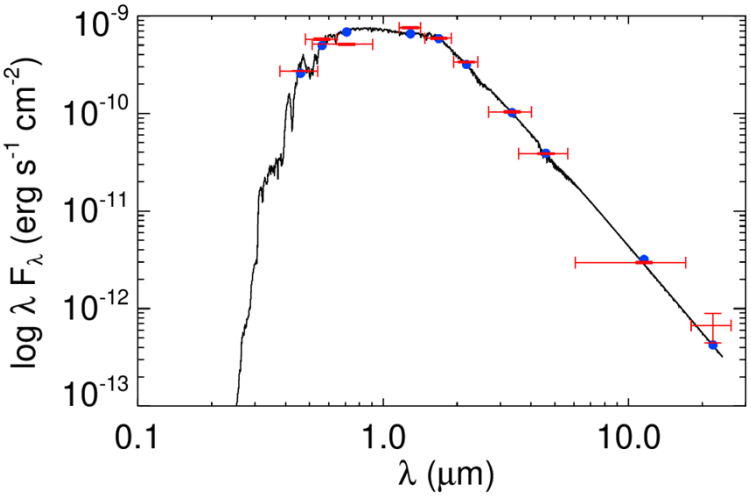
barınak yıldızın MIST eş yaş eğrileri (izokron) üzerindeki konumu ise Şekil 4.23'te sunulmaktadır. Tüm parametreler arasındaki lineer ilişkinin derecesini (kovaryans) gösteren köşe grafiği (ing. corner plot) ise Şekil 4.24'te verilmiştir.



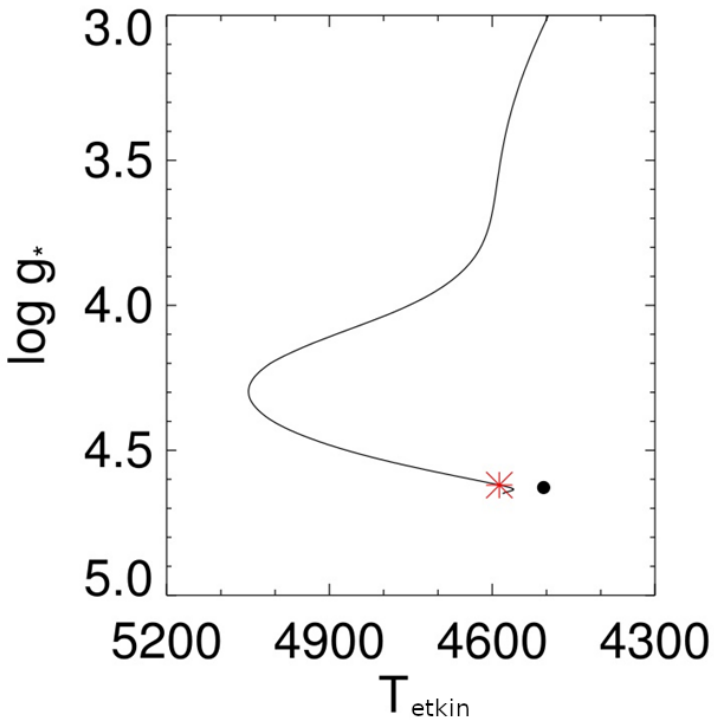
Şekil 4.21. HAT-P-20'nin farklı gecelerdeki ışık eğrilerinin modelleri. HAT-P-20'nin 19 Şubat 2014, 15 Aralık 2014 ve 22 Kasım 2015 tarihli TUG T100 Bessel-R bandı ışık eğrileri (siyah nokta) üzerine EXOFAST-v2 ile yapılan geçiş modeli (kırmızı) gösterilmektedir.



Şekil 4.22. HAT-P-20'nin tüm ışık eğrisi ve modellerinin üstüste çizdirilmiş hali. HAT-P-20'nin analizde kullanılan 4 ışık eğrisinin geçiş ortası 0'a gelecek şekilde zamanda kaydırılarak üst üste çizdirilmiş hali (siyah nokta) üzerine geçiş parametrelerinin hesaplandığı model (kırmızı) gösterilmektedir.



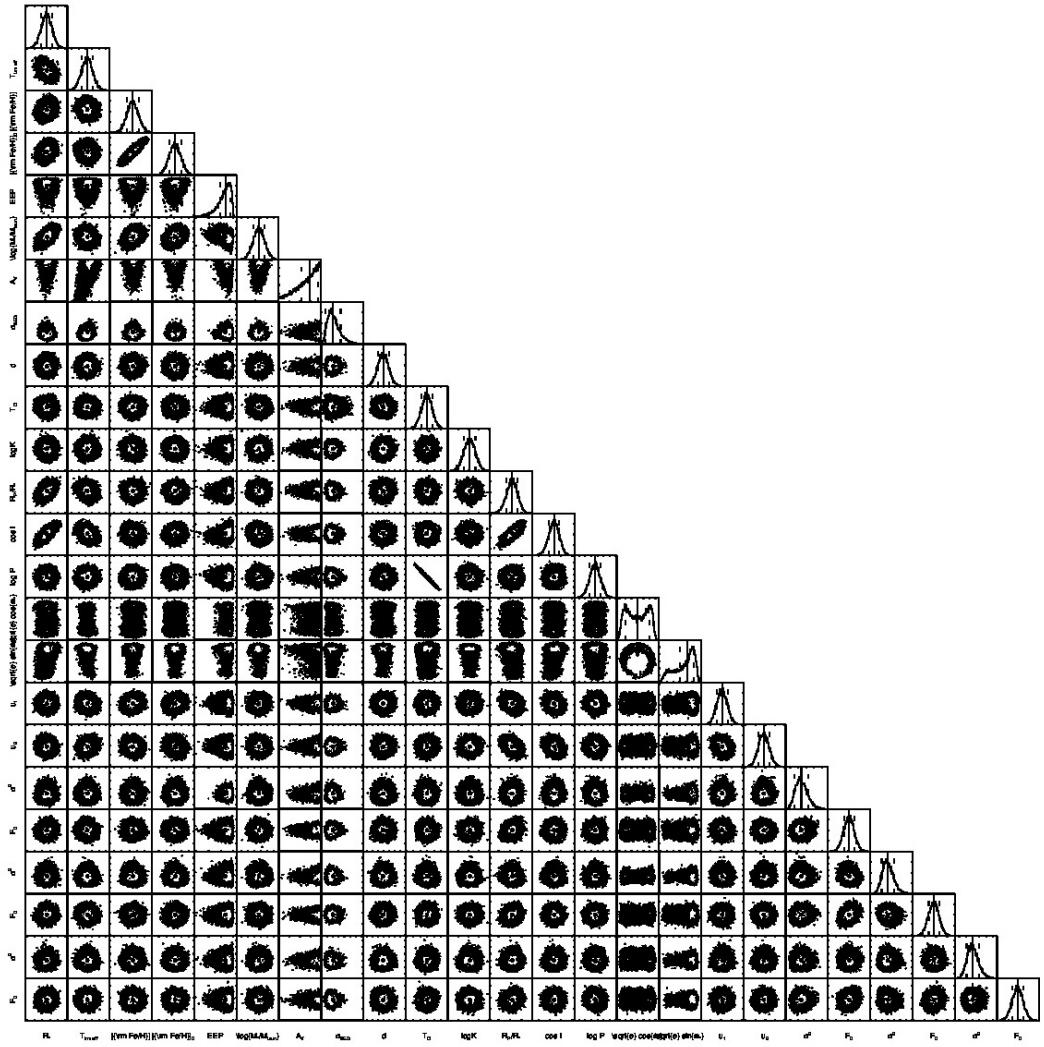
Şekil 4.23. HAT-P-20'nin çeşitli dalgaboylarındaki parlaklıklarına yapılan SED modeli. Mavi noktalar modelden elde edilen integre akılar, kırmızı noktalar ise bunlara karşılık gelen gözlem değerlerini göstermektedir.



Şekil 4.24. MIST eş yaş eğrileri ile HAT-P-20 yıldızının yaş hesabı. Siyah düz çizgi eş yaş eğrisi modeli, siyah nokta yıldızın konumunu, kırmızı ise yıldızın modeldeki yerini göstermektedir.

Tablo 4.9. HAT-P-20'nin global modelinden elde edilen yıldız ve gezegen parametreleri. Keşif yayınındaki (Bakos vd. 2011) değerlerle karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

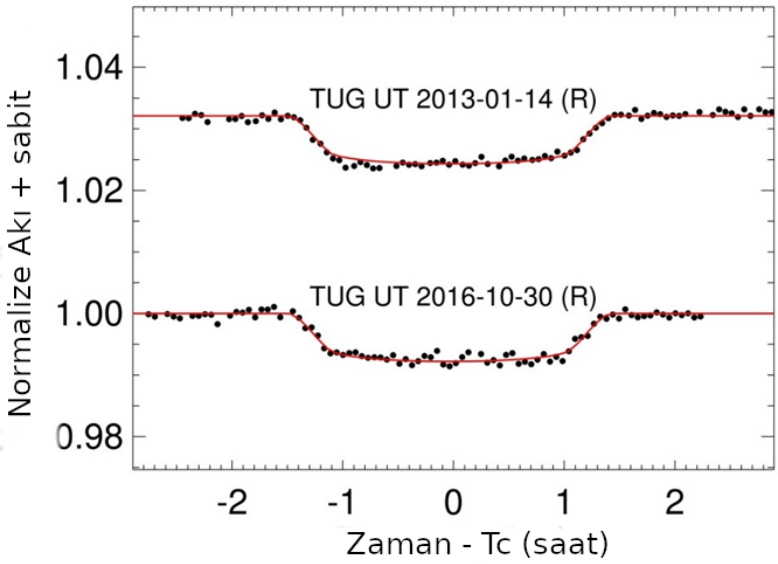
HAT-P-20	Parametre	En Olası Değer	Bakos vd.
Yıldız Parametreleri			
M_*	Kütle ($M_\odot$)	$0.749^{+0.031}_{-0.029}$	0.756 ± 0.028
R_*	Yarıçap ($R_\odot$)	$0.692^{+0.014}_{-0.014}$	0.694 ± 0.021
L_*	Işınım gücü ($L_\odot$)	$0.179^{+0.0078}_{-0.008}$	0.19 ± 0.02
ρ_*	Ortalama Yoğunluk (cgs)	$3.19^{+0.17}_{-0.15}$	-
log *g*	Yüzey çekim ivmesi (cgs)	$4.633^{+0.016}_{-0.016}$	4.63 ± 0.02
T_{etkin}	Etkin Sıcaklık (K)	4514^{+41}_{-42}	4595 ± 80
[Fe/H]	Metal Bolluğu (dex)	$+0.244^{+0.079}_{-0.076}$	$+0.35 \pm 0.08$
$[Fe/H]_0$	Başlangıç metal bolluğu (dex)	$+0.215^{+0.079}_{-0.076}$	-
Yaş	Yaş (milyar yıl)	$4.4^{+4.8}_{-3.1}$	$6.7^{+5.7}_{-3.8}$
A_v	Yıldızlararası Sönümleme (kadir)	$0.144^{+0.039}_{-0.067}$	-
σ_{SED}	SED fotometrik hata ölçeği	$8.1^{+2.6}_{-1.7}$	-
p	Paralaks (miliyaysaniyesi)	$14.046^{+0.04}_{-0.039}$	-
d	Uzaklık (parsek)	$71.19^{+0.2}_{-0.2}$	70 ± 3
Gezegen Parametreleri			
P	Yörünge dönemi (gün)	$2.875318^{+0.0000012}_{-0.0000012}$	2.875317 ± 0.0000
a	Yarıbüyük eksen uzunluğu (AB)	$0.03605^{+0.00049}_{-0.00047}$	0.0361 ± 0.0005
i	Yörünge eğim açısı (°)	$86.74^{+0.14}_{-0.13}$	86.8 ± 0.2
ω	Enberinin argümanı (°)	86^{+86}_{-90}	317 ± 130
e	Yörüngenin dış merkezliliği	$0.0151^{+0.005}_{-0.005}$	0.015 ± 0.005
a/R_*	Yarıçapa ölçekli yörünge büyüklüğü	$11.21^{+0.19}_{-0.18}$	11.17 ± 0.29
R_p/R_*	Yarıçaplar oranı	$0.13238^{+0.00097}_{-0.00097}$	0.1284 ± 0.0016
R_p	Yarıçap (R_J)	$0.891^{+0.022}_{-0.022}$	0.867 ± 0.033
M_p	Kütle (M_J)	$7.25^{+0.02}_{-0.02}$	7.246 ± 0.187
ρ_p	Ortalama Yoğunluk (cgs)	$12.7^{+0.9}_{-0.8}$	13.78 ± 1.5
K	Dikine hız yarı genliği (m/s)	$1246.3^{+8.1}_{-8.3}$	1246.0 ± 8.1
$M_P sin i$	Minimum kütle (M_J)	$7.24^{+0.2}_{-0.19}$	-
M_P/M_*	Kütle oranı	$0.00923^{+0.00014}_{-0.00014}$	-
T_{denge}	Denge Sıcaklığı *K)	$953.4^{+9.3}_{-9.8}$	970 ± 23
Geçiş Parametreleri			
δ	Geçiş derinliği (oran)	$0.01752^{+0.00026}_{-0.00026}$	-
b	Etki parametresi	$0.635^{+0.016}_{-0.018}$	$0.631^{+0.025}_{-0.028}$
τ	Giriş (ingress) zaman ölçeği (gün)	$0.01412^{+0.00059}_{-0.00059}$	0.0137 ± 0.0009
T_{1-4}	Geçiş süresi (gün)	$0.07638^{+0.00052}_{-0.00005}$	0.0770 ± 0.0008
u_1	Lineer kenar kararma sabiti	$0.606^{+0.026}_{-0.027}$	-
u_2	Kuadratik kenar kararma sabiti	$0.092^{+0.028}_{-0.027}$	-



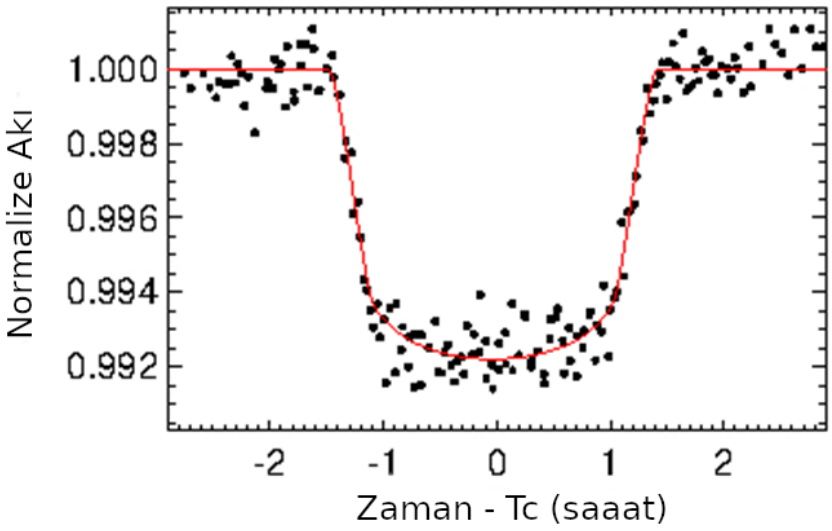
Şekil 4.25. HAT-P-20 sistem parametrelerinin kovaryanslarını gösteren köşe grafiği (ing. corner plot)

4.2.4. XO-3b Modeli

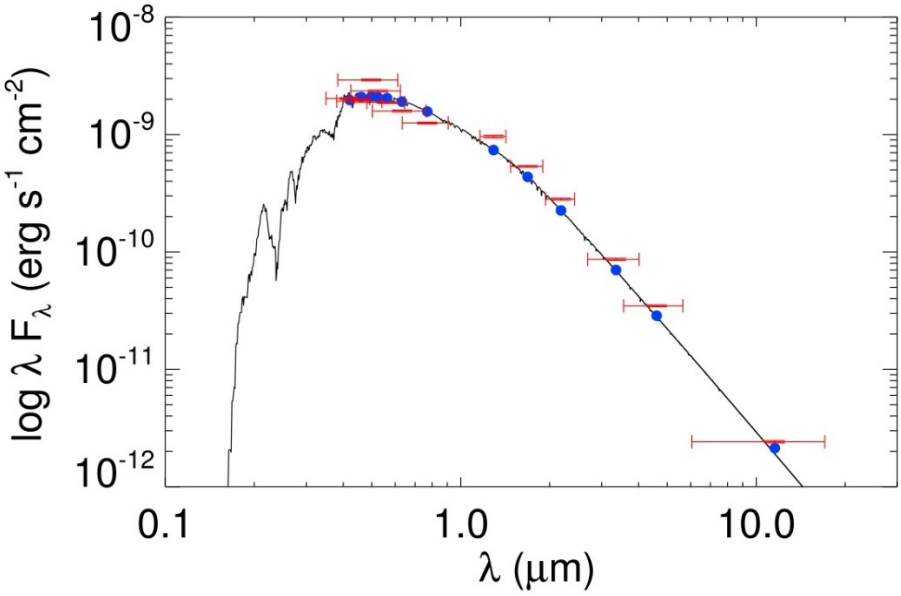
XO-3b'nin en yüksek yüksek fotometrik kaliteyle (RMS < 1 mmag) T100 teleskobuyla 14 Ocak 2013 ve 30 Ekim 2016 tarihli ışık eğrileri, Krull vd. (2008) tarafından verilen ve dikine hız modelinden elde edilen dikine hız yarı-genliği, elimizdeki tayfsal verinin yetersizliği nedeniyle Tsantaki vd. (2014)'den aldığımız yıldız atmosfer parametreleri ve tarafımızca açık veritabanlarından toplanan çeşitli bantlardaki parlaklıkları (Tablo 4.5) ile birlikte modellenmiş, Tablo 4.10'da verilen sonuçlara ulaşılmıştır. Işık eğrisi modeli her iki ışık eğrisi için ayrı ayırı Şekil 4.25'te, birlikte Şekil 4.26'da; literatürden toplanan çeşitli bantlardaki parlaklıklara global modelin yaptığı uyumlama Şekil 4.27'de, barınak yıldızın MIST eş yaş eğrileri (izokron) üzerindeki konumu ise Şekil 4.28'de sunulmaktadır. Tüm parametreler arasındaki lineer ilişkinin derecesini (kovaryans) gösteren köşe grafiği (ing. corner plot) ise Şekil 4.29'da verilmiştir.



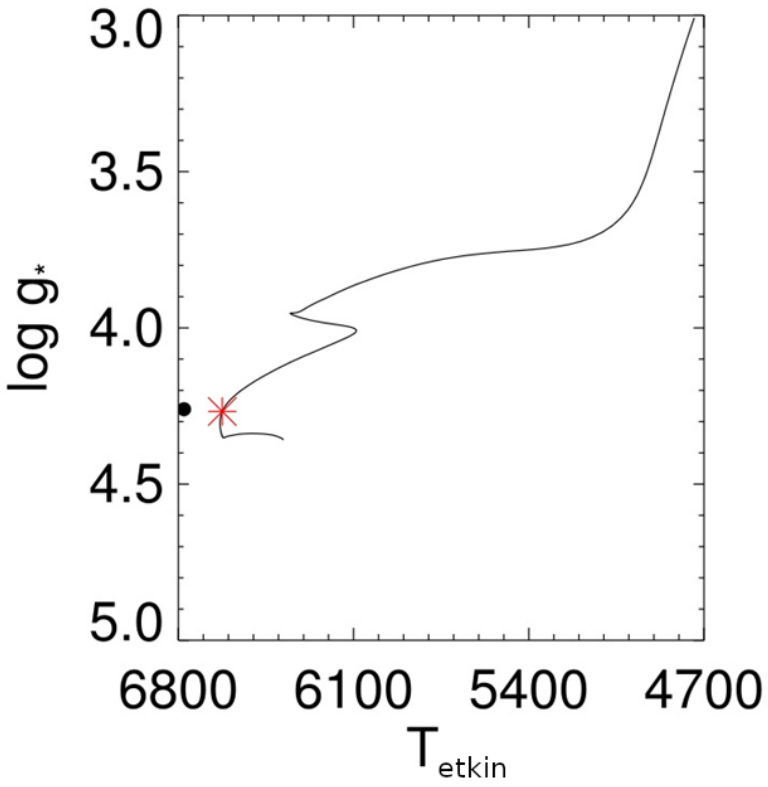
Şekil 4.26. XO-3'ün farklı gecelerdeki ışık eğrilerinin modelleri. XO-3'ün 14 Ocak 2013 tarihli TUG T100 Bessel-R bandı ışık eğrisi (siyah nokta) üzerine EXOFAST-v2 ile yapılan geçiş modeli (kırmızı) gösterilmektedir.



Şekil 4.27. XO-3'ün tüm ışık eğrisi ve modellerinin üstüste çizdirilmiş hali. XO-3b'nin analizde kullanılan 2 ışık eğrisinin geçiş ortası 0'a gelecek şekilde zamanda kaydırılarak üst üste çizdirilmiş hali (siyah nokta) üzerine geçiş parametrelerinin hesaplandığı model (kırmızı) gösterilmektedir.



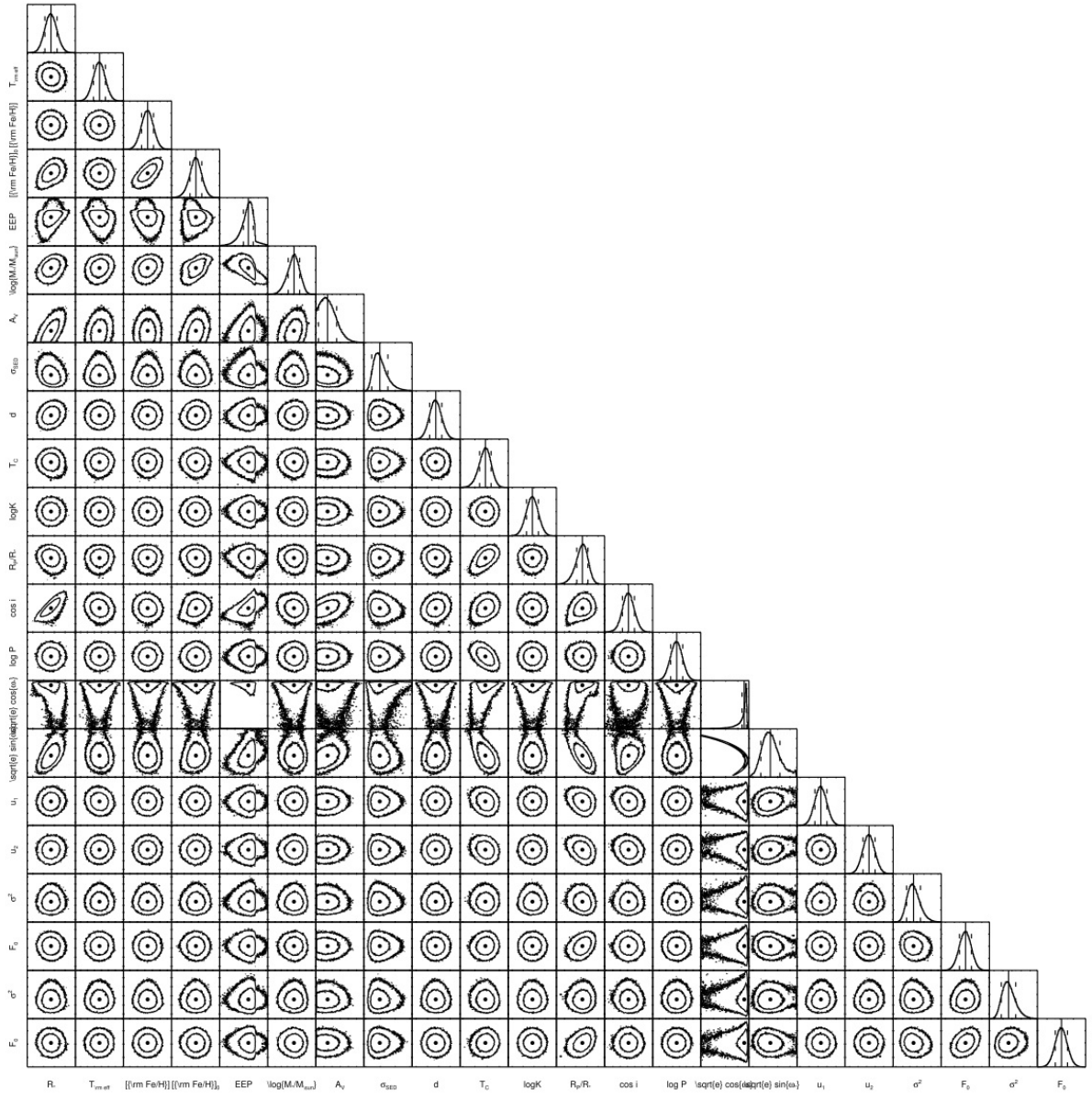
Şekil 4.28. XO-3'ün çeşitli dalgaboylarındaki parlaklıklarına yapılan SED modeli. Mavi noktalar modelden elde edilen integre akılar, kırmızı noktalar ise bunlara karşılık gelen gözlem değerlerini göstermektedir.



Şekil 4.29. MIST eş yaş eğrileri ile XO-3 yıldızının yaş hesabı. Siyah düz çizgi eş yaş eğrisi modeli, siyah nokta yıldızın konumunu, kırmızı ise yıldızın modeldeki yerini göstermektedir.

Tablo 4.10. XO-3'ün global modelinden elde edilen parametreleri

XO-3	Parametre	En Olası Değer	Krull vd. (2008)
Yıldız Parametreleri			
M_*	Kütle ($M_\odot$)	$1.385^{+0.061}_{-0.067}$	1.41 ± 0.08
R_*	Yarıçap ($R_\odot$)	$1.469^{+0.057}_{-0.055}$	2.13 ± 0.21
L_*	Işınım gücü ($L_\odot$)	$4.12^{+0.34}_{-0.31}$	-
ρ_*	Ortalama Yoğunluk (cgs)	$0.616^{+0.071}_{-0.065}$	-
log *g*	Yüzey çekim ivmesi (cgs)	$4.246^{+0.032}_{-0.034}$	3.95 ± 0.062
T_{etkin}	Etkin Sıcaklık (K)	6786^{+43}_{-43}	6429 ± 50
[Fe/H]	Metal Bolluğu (dex)	$-0.082^{+0.04}_{-0.04}$	$+0.35 \pm 0.08$
$[Fe/H]_0$	Başlangıç metal bolluğu (dex)	$0.082^{+0.042}_{-0.043}$	-
Yaş	Yaş (milyar yıl)	$1.13^{+0.69}_{-0.53}$	2.69
A_v	Yıldızlararası Sönümleme (kadir)	$0.144^{+0.11}_{-0.091}$	-
σ_{SED}	SED fotometrik hata ölçeği	$9.8^{+2.7}_{-1.9}$	-
p	Paralaks (miliyaysaniyesi)	$4.68^{+0.058}_{-0.058}$	-
d	Uzaklık (parsek)	$213.7^{+2.7}_{-2.6}$	260 ± 23
Gezegen Parametreleri			
P	Yörünge dönemi (gün)	$3.191528^{+0.0000013}_{-0.0000013}$	3.1915426 ± 0.000
a	Yarıbüyük eksen uzunluğu (AB)	$0.04743^{+0.00069}_{-0.00077}$	0.0476 ± 0.0005
i	Yörünge eğim açısı (°)	$84.18^{+0.47}_{-0.48}$	79.32 ± 1.36
ω	Enberinin argümanı (°)	8^{+17}_{-13}	-15.4 ± 6.6
e	Yörüngenin dış merkezliliği	$0.2883^{+0.0025}_{-0.0025}$	0.260 ± 0.017
a/R_*	Yarıçapa ölçekli yörünge büyüklüğü	$6.94^{+0.26}_{-0.25}$	-
R_p/R_*	Yarıçaplar oranı	$0.08518^{+0.00099}_{-0.0012}$	0.92 ± 0.04
R_p	Yarıçap (R_J)	$1.216^{+0.047}_{-0.046}$	1.95 ± 0.16
M_p	Kütle (M_J)	$13.02^{+0.39}_{-0.42}$	13.25 ± 0.64
ρ_p	Ortalama Yoğunluk (cgs)	$8.97^{+1}_{-0.92}$	-
K	Dikine hız yarı genliği (m/s)	$1493.8^{+9.6}_{-9.6}$	1471 ± 48
$M_P sin i$	Minimum kütle (M_J)	$12.95^{+0.39}_{-0.42}$	13.02 ± 0.64
M_P/M_*	Kütle oranı	$0.00897^{+0.00016}_{-0.00014}$	-
T_{denge}	Denge Sıcaklığı *K)	1820^{+34}_{-33}	-
Geçiş Parametreleri			
δ	Geçiş derinliği (oran)	$0.00725^{+0.00017}_{-0.0002}$	-
b	Etki parametresi	$0.627^{+0.045}_{-0.068}$	-
τ	Giriş (ingress) zaman ölçeği (gün)	$0.0149^{+0.0018}_{-0.0019}$	-
T_{1-4}	Geçiş süresi (gün)	$0.1199^{+0.0016}_{-0.0017}$	-
u_1	Lineer kenar kararma sabiti	$0.216^{+0.034}_{-0.033}$	-
u_2	Kuadratik kenar kararma sabiti	$0.314^{+0.035}_{-0.035}$	-



Şekil 4.30. XO-3 sistem parametrelerinin kovaryanslarını gösteren köşe grafiği (ing. corner plot).

5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Proje ele alınan tüm ötegezegenlerin ve bu ötegezegenlerin barınak yıldızlarının yeniden belirlenmesi hedefelenen temel parametrelerine, yüksek duyarlılıklı ışık ölçüm gözlemleri ve arşiv tayfsal verilerinin modern yaklaşımlar ve en yeni analiz programları ile analizi sonucunda ulaşılmıştır. Aşağıda elde edilen bu parametreler ve hataları, literatürle karşılaştırlmalı olarak verilmiş ve bu karşılaştırmalar sonucu ulaşılan sonuçlar yorumlanmıştır.

5.1. HAT-P-19 Sistemi

HAT-P-19 sistemi için belirlenen parametrelerin büyük bölümü literature çıkmış en güncel ve hassas değerler olacak düzeydedir. Söz konusu sistemdeki gezegen için sadece keşif yayınında (Hartman vd. 2011, kısaca H11) ilgili parametreler belirlenmiş olup, bu yayında kullanılan ışık eğrilerinin (Şekil 2.3) kalitesi tarafımızca TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'nde (TUG) konuşlandırılmış 1 m çaplı T100 teleskobunun odak dışı çalıştırılmasıyla elde edilmiş olan ışık eğrilerinin (Şekil 3.2) kalitesinin önemli ölçüde altındadır. Keşif yayınında verilen (H11) ışık eğrilerinin sadece biri tüm geçişi kapsamakta, onda da geçiş çıkışı (ing. egress) sonrası az sayıda nokta bulunmaktadır. Tarafımızca sadece geçiş zamanlarını elde etmek üzere kullanılmış olan ve parametre tayini için yapılan analizlere dahil edilmeyen T100 ışık eğrileri (Şekil 3.3) H11 tarafından parametre belirlemek üzere kullanılan ışık eğrilerine kıyasla çok daha kalitelidir. Işık ölçüm gözlemleri arasındaki bu kalite farkının sonuçlara yansıdığı değerlendirmesi yapılabilir.

Her iki çalışmanın da tayfsal verisi aynıdır (yüsek çözünürlük ve S/N oranında alınmış bir Keck / HIRES tayfı) ve her ne kadar farklı kodlar, yazılımlar ve birebir aynı olmayan çizgi listeleri kullanılmış olsa da benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Tayfsal analizden elde edilen temel parametreler, keşif makalesine ek olarak sweet-Cat projesi kapsamında Brewer vd. (2016) tarafından da elde edilmiş ve tarafımızca elde edilen sonuçlarla Tablo-4.1'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Sonuçlar sıcaklık, yüzey çekim ivmesi ve metal bolluğu gibi doğrudan global modeli etkileyen parametreler söz konusu olduğunda neredeyse aynı olup, tarafımızca elde edilen sonuçlar üzerindeki belirsizlikler daha küçüktür. Bu noktadaki temel farkın kullanılan kodların güncelliğinin yanı sıra daha detaylı analizlerin tarafımızca yapılmış olmasıdır. Işık eğrisi analizinden elde edilen yüzey çekim ivmesi çok daha güvenilir olduğundan (H11), Brewer vd. (2016)'dan farklı olarak bu değer tayflardan değil ışık eğrisi analizinden alınarak sabitlenmiştir. Zira bu tür soğuk cücelerde tayftan elde edilen yüzey çekim ivmesi üzerindeki belirsizlikler de büyüktür.

Hız alanlarını (v sini, v_{mac}, v_{mic}) detaylı çalışabilmek için ise HAT-P-19 örnek sistem olarak seçilmiş, atmosferin farklı derinliklerinde oluşan zayıf, orta şiddetli ve tüm şiddetteki

çizgilerden oluşturulmuş pek çok farklı çizgi grubuyla makrotürbülans (v_{mac}) hesaplanmıştır. Sonuç olarak atmosferin derin katmanlarında oluşan zayıf çizgilerden hesaplanan v_{mac} = 3.0 km/s değeri kullanılmıştır. Bu değer H11 tarafından elde edilen v_{mac} = 2.81 km/s değerine çok yakın olup, Brewer vd. (2016) tarafından tayfsal uyumlama sırasında serbest bırakılarak elde edilen 1.8 km/s değerinden önemli ölçüde farklıdır. Ancak birim optik derinlikten büyük (makrotürbülant) hareketlerin yıldızın dönme hızının gözlemcinin bakış doğrultusundaki izdüşüm doğrultusundaki bileşeni (v sini) ile çizgiyi benzer şekilde genişletmesi nedeniyle, toplam genişlemeyi değerlendirmek ve karşılaştırmak daha doğru olacaktır. Brewer vd. (2016) toplam genişlemeyi ($v_{genişleme}$ = v sini + v_{mac}) 3.6 km/s bulurken, H11 aynı değeri 3.66 olarak elde etmiştir. Söz konusu değer tarafımızca 3.88 km/s olarak elde edilmiştir. Mikrotürbülans hızları literatürde yer alan her iki çalışmada da söz konusu parametrenin bu sıcaklıktaki yıldızlar için teorik değerine (v_{mic} = 0.85 km/s) sabitlenirken; tarafımızca bu parametre seçilen çizgilerin eş değer genişliklerinin bolluktan bağımsız hale geldiği ve saçılmanın da minimum olduğu genişleme değerinden belirlenmiştir (v_{mic} = 0.80 km/s). Bu detaylı analiz sonucu elde edilen değerin teorik değerden çok uzak olmadığı ve bu değerle birilkte tüm genişlemenin her üç çalışmada da sonuç olarak yakın bulunduğu değerlendirmesi yapılmıştır.

Tüm verinin birlikte değerlendirildiği global model sonucunda elde edilen parametreler şu ana kadar bu parametrelerin elde edildiği tek yayın olan keşif yayınıyla karşılaştırmalı olarak Tablo 4.6'da tüm parametreler için sunulmuştur. Ancak bu bölümde özet olarak Tablo 5.1'de bu karşılaştırma bir kez daha sunulmaktadır. Tabloda verilen atmosfer parametrelerin nihai tayfsal analizde elde edilen parametrelerden (Tablo 4.1) çok az da olsa farklı olmasının sebebi eşyaş (izokron) eğrileri ve log g'nin global modell sırasında, bu parametrelerin hata sınırları dahllinde bir miktar değiştirilmesinden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak tarafımızca elde edilen parametrelerin hatalarının daha duyarlı olmalarının nedenleri aşağıdaki şekilde değerlendirilebilir.

1. Bu projenin fotometrik verisi H11'deki ışık ölçülerine göre önemli ölçüde daha kalitelidir. Bu kaliteye ulaşılmış olmasında odak dışı gözlem tekniğinin kullanılmış olması, foton gürültüsü, düz alan düzeltmesinden gelen gürültü ve sintilasiyon gürültüsü gibi gürültü kaynaklarının etkisini bir mertebe azaltması açısından önemli rol oynamıştır.

2. Tarafımızca analizlerde kullanılan uzaklık verisi Gaia tarafından elde edilen son derece hassas bir uzaklık verisidir (d = 203 ± 1.4 pc). H11 ise çalışmanın yapıldığı tarihte bu düzeyde bir uzaklık hassasiyetine sahip olunmadığı için üzerinde 15 pc belirsizlik bulunan daha büyük bir uzaklık değeri (d = 215 ± 15 pc) üzerinden hesaplamalarını yapmak zorunda kalmışlardır. Uzaklık, tayfsal enerji dağılımı üzerinden ışınım gücünün belirlenmesi, dolasıyla ışınım gücü bağıntısı üzerinden belirlenen yıldız yarıçapı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

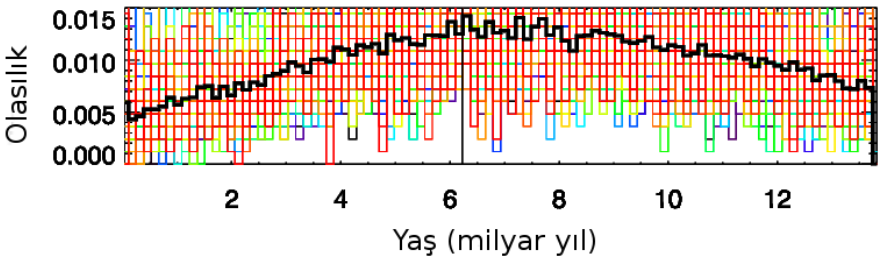
Bir geçiş ışık eğrisi analizinden elde edilen en temel parametre ise gezegenle yıldızın yarıçapları oranıdır ve gezegen yarıçapı, yıldız yarıçapına bağlı olarak elde edilebilmektedir. Bu nedenlerle elde edilen gezegen yarıçapının gerek doğruluğununun, gerekse de duyarlılığının H11'de elde edilenden daha iyi olduğu değerlendirmesi yapılabilir.

Tablo 5.1. HAT-P-19'un en önemli parametrelerinin literatürle karşılaştırılması

HAT-P-19	Parametre	Bu Çalışma	H11
Yıldız Parametreleri			
M_*	Kütle ($M_\odot$)	$0.831^{+0.029}_{-0.026}$	0.842 ± 0.042
R_*	Yarıçap ($R_\odot$)	$0.797^{+0.011}_{-0.010}$	0.820 ± 0.048
ρ_*	Ortalama Yoğunluk (cgs)	$2.315^{+0.096}_{-0.094}$	-
log *g*	Yüzey çekim ivmesi cgs)	$4.555^{+0.015}_{-0.014}$	4.54 ± 0.05
Yaş	Yaş (Myıl)	$7.3^{+4.0}_{-4.1}$	8.8 ± 5.2
d	Uzaklık (Parsek)	$203.6^{+1.4}_{-1.4}$	215 ± 15
Gezegen Parametreleri			
R_P	Yarıçap (R_J)	$1.103^{+0.020}_{-0.019}$	1.132 ± 0.072
M_P	Kütle (M_J)	$0.290^{+0.016}_{-0.015}$	0.292 ± 0.018
T_{denge}	Denge Sıcaklığı (K)	$995.1^{+9.6}_{-9.5}$	1010 ± 42
ρ_P	Yoğunluk (cgs)	$0.268^{+0.020}_{-0.018}$	0.25 ± 0.04
a	Yarıbüyük eksen uzunluğu (AB)	$0.04644^{+0.00054}_{-0.00049}$	0.0466 ± 0.0008
Geçiş Parametreleri			
i	Yörünge eğim açısı (°)	$88.61^{+0.39}_{-0.24}$	88.2 ± 0.4
R_P/R_*	Yarıçaplar oranı	$0.1422^{+0.0015}_{-0.0017}$	0.1418 ± 0.0020
a/R_*	Yarıçapa ölçekli yörünge büyüklüğü	$12.53^{+0.17}_{-0.17}$	12.24 ± 0.67

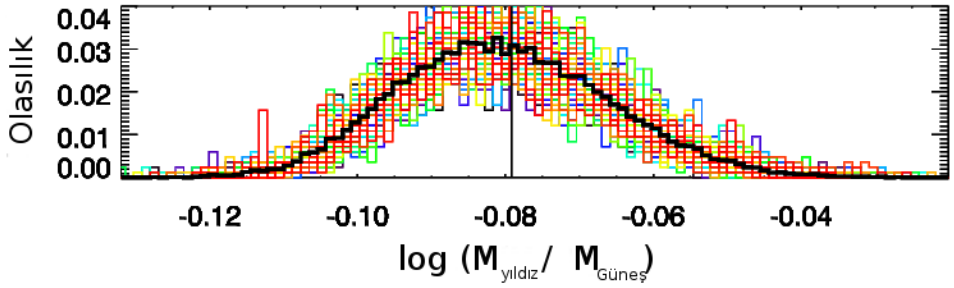
3. Tarafımızca tüm verinin birlikte değerlendirildiği analizlerde kullanılan Exofast-v2 kodu, ışık eğrisi, dikine hız verisi, yıldız atmosfer parametreleri ve yıldızın farklı bantlardaki parlaklıklarını bir arada değerlendirebilmekte; tüm modeli gerek yıldız parametreleri, gerek gezegen parametreleri, gerek uzaklık, gerekse de ışınım gücü parametrelerini dikkate alarak Bayesian istatistik yaklaşımıyla Monte Carlo Markov Zinciri (MCMC) yöntemiyle gerçekleştirebilen en modern yazılımdır. Tablo 4.7 ve Tablo 5.1'de sunulan nihai parametreler, her bir parametre için elde edilen dağılımların en olası değerleri ile bu dağılımların standart sapmalaıdır. Dağılımlar simetriden uzak olduğunda hata değerleri negatif ve pozitif yönlerde bu nedenle farklı olabilmektedir. Örnek olarak üzerinde en büyük belirsizliğin bulunduğu yıldızın yaşı parametresi verilebilir. Bu parametre tarafımızca en güncel yıldız yapı ve evrim modeli olarak literatürde sıkça kullanılan MESA yıldız modellerine dayalı olarak oluşturulan MIST (Mesa Isochrones and Stellar Tracks, Dotter 2016) izokronları üzerinden hesap edilmiştir; değeri 7.3 milyar yıl, üzerindeki belirsizlik ise +4.0 / -4.1 milyar yıldır. Soğuk cüce

yıldızlar söz konusu olduğunda yıldızın anakol üzerindeki konumu evrimi süresince fazlaca değişmediğinden belirsizliğin büyük olması gayet doğal görünür. Aynı parametre H11 tarafından 8.8 milyar yıl, üzerindeki belirsizlik 5.2 milyar yıl olarak verilmiştir. Bu nedenle yaş parametresinin olasılık dağılımı (Şekil 5.1) saçılması fazla, asimetrik bir dağılım olarak görülmektedir.



Şekil 5.1. HAT-P-19 için yaş parametrisinin ardıl olasılık dağılımı (ing. posterior probability distribution). Kesiksiz siyah eğri dağılıma ilişkin histogramı, renkler farklı yürüyücüleri (ing. random walkers), dik doğru başlangıç değerinin konumunu göstermektedir. Tablo 5.1'de verilen yaş bu dağılımın en olası değeri, belirsizliği ise standart sapması üzerinden verilmektedir.

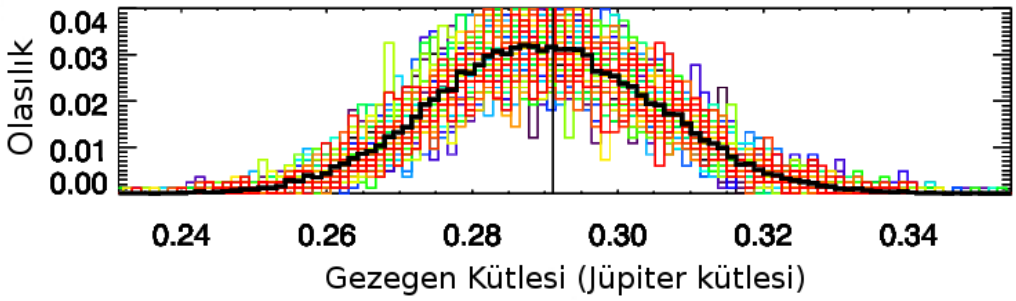
Buna karşılık ışık eğrisinden yüksek duyarlılıkla belirlenen yıldızın ortalama yoğunluğu ile global modelden tayin edilen yıldız yarıçapı üzerinden belirlenen yıldız kütlesinin ardıl olasılık dağılımının en olası değer etrafında daha simetrik olduğu görülmektedir (Şekil 5.2). Gezegen kütlesine ilişkin olarak elde edilen ardıl olasılık dağılımı da benzer şekilde simetrik bir dağılımdır (Şekil 5.3).



Şekil 5.2. HAT-P-19 için yıldız kütlesinin ardıl olasılık dağılımı. Şeklin parametrelerine ilişkin açıklama Şekil 5.1'de verilmiştir.

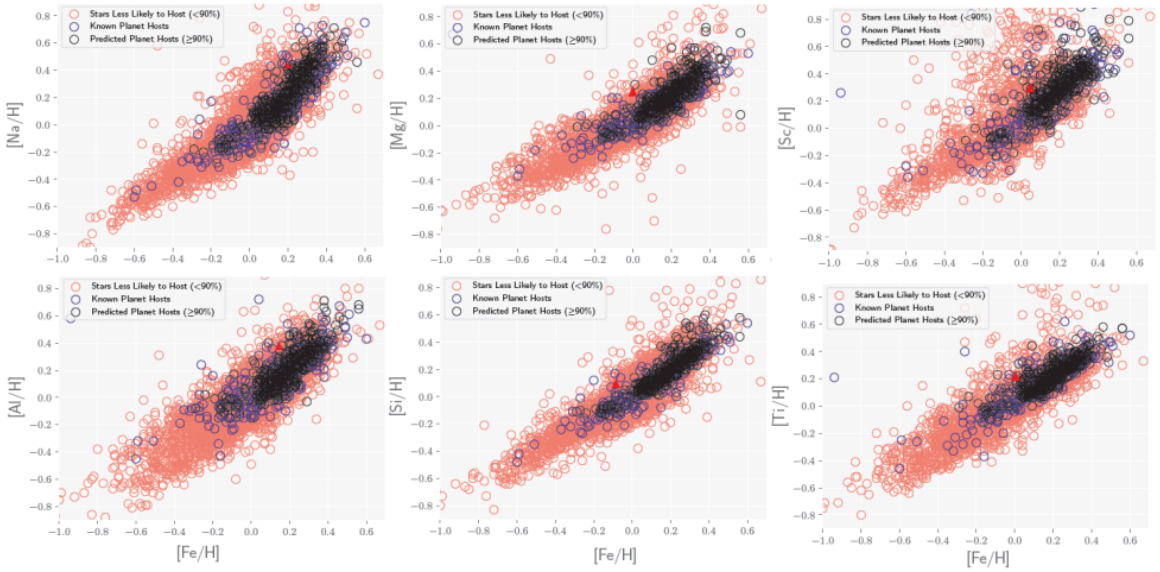
Dağılımlara ve Şekil 4.17'de verilen köşe grafiğine bakılarak yapılabilecek en önemli eleştiri, ardıl olasılık dağılımlarının ve buna bağlı olarak parametreler arası korelasyon grafiklerinin saçılmasının yüksek olduğu olabilir. Ancak bu durumun nedeni adım sayısının çok fazla arttırılamıyor oluşudur. Zira "niter" parametresiyle Exofast-v2'ye girilen adım sayısı proje

kapsamında alınan modern işlemcilere (8. nesil i7, 16 GB RAM) sahip bilgisayarlarda dahi 15000'in üzerine çıkarıldığında program günlerce çalışmakta ancak ürettiği dağılım ve sonuçları hafızasında tutup yazamadığı için hata vererek sonlanmaktadır. Zor yoldan tecrübe ederek öğrenilen bu durum nedeniyle adım sayısını (niter) küçük tutarken, saklanan dağılımların sayısını azaltmanın (nthin parametresinin sayısal değerini yükselterek) daha iyi sonuçlar vereceği görülmüştür. Bu durum nihai parametreler (dağılımın en olası değeri) üzerindeki belirsizliği (en olası değerin standart sapması) azaltmakta ancak dağılımların saçılmasını fazlaca değiştirmemektedir. Hedef parametre değerinin üzerindeki belirsizliğin duyarlı olması olduğu için bu durumun kritik önem arz etmediği değerlendirmesi yapılmaktadır. Bu nedenlerle elde edilen sonuçlar SCI kapsamındaki dergilerde yayınlanabilir niteliktedir.



Şekil 5.3. HAT-P-19b gezegen kütlesinin ardıl olasılık dağılımı. Şeklin parametrelerine ilişkin açıklama Şekil 5.1'de verilmiştir.

HAT-P-19'un tayfsal analizinden elde edilen bazı elementlere ilişkin kimyasal bollluklar (Tablo 4.5) Hinkel vd. (2018) tarafından verilen korelasyonlarda yerine konduğunda yıldızın gezegen barındırma potansiyelinin olduğu açıkça görülmektedir (Şekil 5.4). Dolayısı ile ulaşılan sonuçlar bazı elementlerin metal bollukları ile gezegen barındırmaları arasında bir korelasyon olabileceğine dair görüşü de desteklemektedir. Bu noktada bu çalışma kapsamında hesaplanan kimyasal bolluklar üzerinde büyük belirsizlikler olduğu eleştirisi yapılabilir. Bu özellikle bazı elementler için haklı bir eleştiridir. Ancak sadece bulunan değere ve hatasına bakarak yorum yapmak yanıltıcı olabilir. HAT-P-19 yıldızında mangan bolluğu [Mn / H] = 0.56 ± 1.28 dex, kalsiyum bolluğu [Ca / H] = 0.23 ± 0.76 olarak bulunmuştur. Her iki değerde de hata merkezi değerin 2 katının üstündedir. Buna karşılık her iki element için önemli sayılabilecek kadar dar bir aralıkta (Mn için [-0.28, 1.84], Ca için [-0.53, 0.99] %67.8'lik güvenilirlik aralıkları) ilk çalışmalar için kötü sonuçlar değildir. Bu noktada kullandığımız sentetik tayf çakıştırma yönteminin, tek tek çizgi örtüşmesinden en az etkilendiği ve S/N oranı yüksek olduğu için seçilen çizgilerin eşdeğer genişliğini ölçmeye dayanan yönteme göre dezavantajlıdır. Dolayısı ile elde edilen değerler henüz yayın kalitesinde olmayıp, üzerinde daha detaylı analizleri gerektirmektedir.



Şekil 5.4. Bazı elementler için kimyasal bolluk, gezegen barındırma potansiyeli ilişkisi. Mor çemberler ötegezegen barındıran yıldızları, siyah ve turuncu ¸cemberler ise henüz etraflarında ötegezegen keşfedilmemiş yıldızları göstermektedir. Mor ile gösterilen yıldızların parametreleri yapay zekaya öğretilerek siyah ile g¨osterilen yıldızların ötegezegen barındırma ihtimali yüksek turuncu ile gösterilen yıldızlarda ise düşük olarak hesaplanmıştır (Hinkel vd. 2018). Kırmızı üçgenler ise bu çalışmada HAT-P-19 için elde edilen değerlere dayanılarak belirlenen konumunu göstermektedir.

Sonuç olarak HAT-P-19b, Tetkin ~ 5000 K sıcaklıklı K tayf türünden, metalce zengin ([Fe / H] ~ 0.24 dex), anakol ömrünün yarısına yaklaşmış bir cüce yıldız etrafında; kısa (4.00 gün) dönemli, neredeyse çembersel bir yörüngede dolanan sıcak-Satürn (0.98 $M_{Satürn}$, T_{denge} ~ 1000 K) türü, yoğunluğu itibarı ile onun dahi yarı yoğunluğunda bir gezegendir. Bu derece "şişmiş" (ing. inflated) bir atmosfere sahip (R ~1.1 R_J) bir gezegenin şu an gözlendiği yerde oluşmuş olma olasılığının çok zayıf, sistemin daha dışında bir yerlerde oluşmuş ve içeri doğru "göçmüş" olma olasılığının yüksek olduğunu (Mordasini vd. 2009) belirtmek gerekir. Ayrıca HAT-P-19b Satürn kütlesi civarındaki gezegenler için belirlenen gezegenin çekirdek kütlesi ile barınak yıldızın metal bolluğu arasındaki korelasyonla uyuşmaması açısından önemli bir örnektir. Bu bollukta bir yıldızın etrafında daha büyük bir çekirdeğe ve bu büyüklükte bir çekirdeğin de oluşum sırasında öngezegen diskinden (ing. protoplanetary disc) hızla toplaması (ing. runaway accretion) beklenen gaz kütlesi ile birkaç Jüpiter kütlesine yükselmesi beklenirdi.

5.2. WASP-52 Sistemi

WASP-52 sistemi için de belirlenen parametrelerin büyük bölümü literature çıkmış en güncel ve hassas değerler olacak düzeydedir. Yine WASP-52'nin keşif yayınında (Hébrard vd. 2011, kısaca H13) yayınlanmış ışık eğrilerinin (Şekil 2.4) kalitesi tarafımızca T100 teleskobunun odak dışı çalıştırılmasıyla farklı bantlarda elde edilmiş olan ışık eğrilerinin (Şekil

3.2) kalitesinin önemli ölçüde altındadır. WASP-52'nin Bessel B, V ve R bantlarında ışık eğrilerinin alınmasındaki amaç ışık eğrisi üzerindeki leke kaynaklı asimetrilerin dalgaboyuyla değişimine bakarak leke büyüklük, sıcaklık faktörü ve yıldız diski üzerindeki konumlarını saptamak; bu bilgiden ve zamanla leke konumlarının değişiminden hareketle yıldızın dönme ekseniyle, gezegenin yörünge düzleminin arasındaki açı (Ψ) hakkında kestirimde bulunmaktır (Mancini vd. 2017). Bu açıyı bulmak, gezegen oluşum senaryolarına girdi sağlamak açısından kritiktir. Zira Güneş Sistemi'nin oluşumunu açıklamakta başarılı olan merkezi yığılma modeli (Pollack vd. 1996) bu açının küçük olacağı tahmininde bulunurken; ki Güneş Sistemi'ndeki tüm gezegenler bu açı 0 ile 7 derece arasındadır, disk kararsızlığı bu açı için kısıt koymaz (Boss 1997). Ötegezegen sistemleri arasında her iki kuramın beklentilerine uyan örnekler bulunmaktadır. WASP-52 sistemi için bu açı Mancini vd. (2017) tarafından $\psi = 20° \pm 50°$ olarak bulunmuştur. Üzerindeki belirsizliğin büyüklüğü nedeniyle WASP-52b'nin hangi kurama uygun davrandığını belirlemek zordur. Kirk vd. (2016) söz konusu ışık eğrisi asimetrilerinin leke değil faküla kaynaklı olduklarını iddia etmiş olsalar da, sadece fakülayla yapılan modellerde elde edilen ışık eğrisi derinliklerinden hesaplanan R_p / R_* 'ın modelleriyle uyumlu olmasından hareket etmiş olmaları bu açıklamaya şüpheyle yaklaşılmasına neden olmaktadır.

Ancak, 8 gün arayla alınan (iki yörünge dönemi) 29 Temmuz ve 5 Ağustos 2016 tarihli ışık eğrilerinde leke hemen yıldız ve gezegen disklerinin içten teğet olduğu t_{II} kontakt anı öncesinde gözlenebilirken; 26 Ağustos 2016'da B bandında gözlem yapıldığı sırada ve tam t_{II} anında ortaya çıkan bulutlar nedeniyle leke gözlenememiş; iki ay sonra 26 Ekim 2016'da R bandında yapılan gözlemde ise leke kendini benzer bir yerde gösterse de bu kez asimetri yok denecek kadar azdır. Bu sayıda gözlemden bu konuda bir sonuca varmak mümkün olmasa da farklı bantlarda yapılmış gözlemlerin birlikte modellenmesi yine de denenmiştir. Buradaki amaç leke kaynaklı asimetrinin ve farklı bantlar kullanılmış olmasının ışık eğrisi analizini nasıl etkileyeceğini emprik olarak görmektir. Sonuçlar sadece R bandında yapılan gözlemlerle yapılan denemelerden elde edilen sonuçlara kıyasla daha duyarlı olduğundan analizin korunmasına ve tüm gözlemler kullanılarak parametrelerin elde edilmesine karar verilmiştir.

WASP-52 için literatürde parametre bulmaya yönelik tek çalışma keşif yayını olan H13'ten ibaret değildir. Ayrıca Kirk vd. (2016) (kısaca K16) gerek leke, gerek faküla kullanarak yaptıkları ışık eğrisi analizlerinden elde ettikleri sistem parametrelerini, Mancini vd. (2017) (kısaca M17) o güne kadar sisteme ilişkin en hassas ışık eğrileri üzerinde leke modeli de yaparak ulaştıkları sonuçları sunmuşlardır. Her iki çalışmada da lekelerin (ya da fakülaların) ışık eğrisi genliğini değiştirebildikleri; bu nedenle de parametrelerin yanlış ya da büyük belirsizlikler dahilinde bulunmasına yol açabilecekleri noktasında uyarılar yapılmıştır. Aralarında 2 yıldan fazla bir süre bulunan

T100 Bessel R bandı gözlemlerinde elde edilen iki ışık eğrisinden birinde bu asimetriler net gözlense (Şekil 3.5, 29 Temmuz 2016) de diğeride hiç gözlenmediği (Şekil 3.5, 26 Ekim 2016) ancak geçiş ortası derinliğinin her iki ışık eğrisinde de aynı olduğu (δ = 0.03) görülmüştür. Diğer ışık eğrilerlinde böyle bir karşılaştırma olanağı yoktur, zira farklı bantlarda (Bessel B ve V) alınmıştır. Tüm bu çalışmalarda alınan sonuçlar, bu çalışmada elde edilen sonuçlarla karşılaştırmalı olarak özet bir şekilde Tablo 5.2'de sunulmuştur. Sistem son olarak Öztürk ve Erdem (2019) (kısaca ÖE19) tarafından yine TUG T100 teleskobuyla kendileri tarafından elde edilen ışık eğrileri analiz edilerek çalışılmış ve parametreleri türetilmiştir.

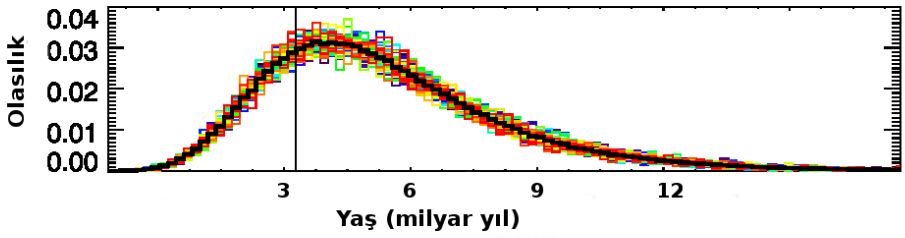
Tablo 5.2. WASP-52'nin en önemli parametrelerinin literatürle karşılaştırılması

WASP-52	H13	M17	K16	ÖE19	Bu çalışma
Yıldız Parametreleri					
M_* (M_*)	0.87 ± 0.03	0.804 ± 0.050	-	-	$0.842^{+0.033}_{-0.034}$
R_* (R_*)	0.79 ± 0.02	0.786 ± 0.016	-	-	$0.772^{+0.013}_{-0.014}$
ρ_* (cgs)	2.48 ± 0.11	2.33 ± 0.13	-	-	$2.58^{+0.11}_{-0.10}$
log *g* (cgs)	4.5 ± 0.1	4.553	-	-	$4.588^{+0.014}_{-0.014}$
Yaş (10^9 yıl)	$0.4^{+0.2}_{-0.3}$	$9.4^{+43}_{-4.7}$	-	-	$3.1^{+2.2}_{-3.7}$
d (pc)	140 ± 20	-	-	-	$175.3^{+1.3}_{-1.3}$
Gezegen Parametreleri					
R_P (R_J)	1.27 ± 0.03	1.253 ± 0.027	1.34 ± 0.04	1.223 ± 0.062	$1.226^{+0.027}_{-0.027}$
M_P (M_J)	0.46 ± 0.02	0.434 ± 0.024	0.38 ± 0.02	-	$0.446^{+0.020}_{-0.020}$
T_{denge} (K)	1315 ± 35	1315 ± 26	-	1309 ± 17	1310^{+10}_{-10}
ρ_P (g cm^{-3})	0.22 ± 0.02	0.2061 ± 0.0091	0.383 ± 0.024	-	$0.300^{+0.020}_{-0.021}$
a (AB)	0.0272 ± 0.0003	0.02643 ± 0.00055	-	-	$0.02683^{+0.00035}_{-0.00036}$
Geçiş Parametreleri					
i (°)	85.35 ± 0.20	85.15 ± 0.06	84.62 ± 0.07	85.24 ± 0.84	$85.86^{+0.21}_{-0.20}$
R_P/R_*	0.1646 ± 0.002	0.16378 ± 0.00050	0.1749 ± 0.0223	0.159 ± 0.004	$0.1633^{+0.0012}_{-0.0012}$
a/R_*	7.3801	-	6.988 ± 0.0009	7.299 ± 0.005	$7.477^{+0.1}_{-0.1}$

Sonuç olarak tarafımızca elde edilen parametrelerin çok büyük bir bölümü literatürde verilen tüm değerlerden daha büyük duyarlılğa sahiptir. Sadece Mancini vd. (2017) tarafından verilen parametreler duyarlılık bakımından bu çalışmada verilenlere karşılaştırılabilir düzeydedir. Bu farkın temel nedeni yine bu projenin fotometrik verisinin T100 gibi 2500 m yükseklikte, iyi gözlem koşullarına sahip bir yerde konuşlandırılmış, kaliteli optiğe sahip bir teleskopla odak dışı alınması nedeniyle diğer çalışmalardakilerden daha kaliteli olmasıdır. Öne çıkan bir diğer fark, yaş hesabındadır. Yıldızın manyetik etkinliğinin zamanla azalmasına (manyetik frenleme) dayalı olarak (gyrochronology) H13 tarafından ~400 milyon yıl olarak

verilen bu değer, M17 tarafından ise izokron çakıştırma yöntemiyle 9.4 milyar yıl olarak bulunmuştur. Halen aktif olduğu hem Ca II H&K çizgilerindeki salma bileşenlerinin şiddetinden, hem de yüzey lekelerinin neden olduğu şiddetli asimetrilerden kolaylıkla görülmekle birlikte, yıldızın ~ 400 miliyon yıllık bir yaştan beklenecek düzeyde bir parlama (ing. flare) etkinliğine sahip olduğu gözlenmemiştir. Her ne kadar bu çalışmada kullanılan teknik M17 ile aynı olsa da (izokron çakıştırma), Gaia ile elde edilen doğruluğu ve duyarlılığı yüksek ve M17'nın kullandığı uzaklığa kıyasla 35 parsek daha büyük bir uzaklık değerinin kullanılmış olması ve yıldız evrim modeli olarak da MESA evrim yollarına dayanan MIST izokronlarının kullanılması yaş için bu çalışmada yıldızın aktivite doğası ile daha uyumlu bir yaş değerine (3.1 milyar yıl) ulaşılmış olmasına neden olmuş olabilir. Bir başka kritik farklılık gezegenin yoğunluk değerinde görülmektedir. Tarafımızca elde edilen 0.300 g/cm^3 değeri; H13 ve M17 tarafından elde edilen ~0.20 g/cm^3 değerine oranla %50 daha yüksektir ve yine yıldızın parametreleri ve gezegenin uzaklığı değerlendirildiğinde daha gerçekçi bir değerdir.

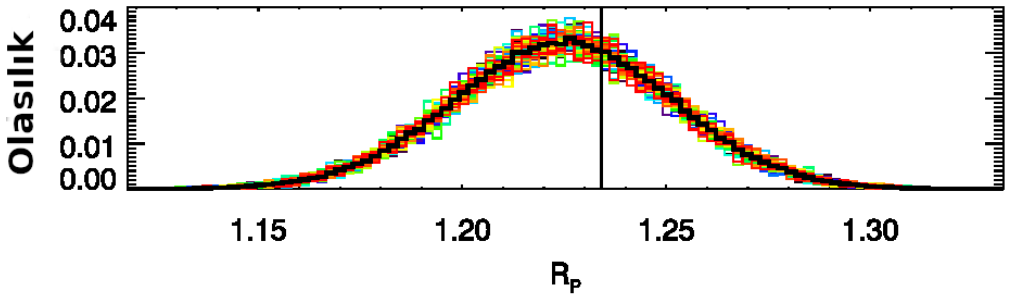
WASP-52 için elde edilen parametrelerin ardıl olasılk dağılımlarının üzerindeki saçılma HAT-P-19 le karşılaştırıldğında çok daha azdır. Bunun temel nedeni German-Rubin istatistiğinin verilen adım sayısı tamamlanmadan önce limit değer 1.01'in altına inmesi, yani adımlar arası varyansın, verinin iç varyansından daha küçük hale 15000 adım tamamlanmadan gelmiş olmasıdır. Bu durumu incelemek ve diğer çalışmalarda (H13 ve M17) elde edilen parametrelerle arada en büyük farkın bulunduğu parametreye ilişkin ulaşılan sonucu değerlendirmek için yaşın ardıl olasılık dağılımına (ing. posterior probability distribution) bakmakta fayda vardır (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. WASP-52 yıldızı için yaş parametrisinin ardıl olasılık dağılımı (ing. posterior probability distribution). Kesiksiz siyah eğri dağılıma ilişkin histogramı, renkler farklı yürüyücüleri (ing. random walkers), dik doğru başlangıç değerinin konumunu göstermektedir. Tablo 5.2'de verilen yaş (3.1 milyar yıl) bu dağılımın en olası değeri, belirsizliği ise standart sapması üzerinden verilmektedir.

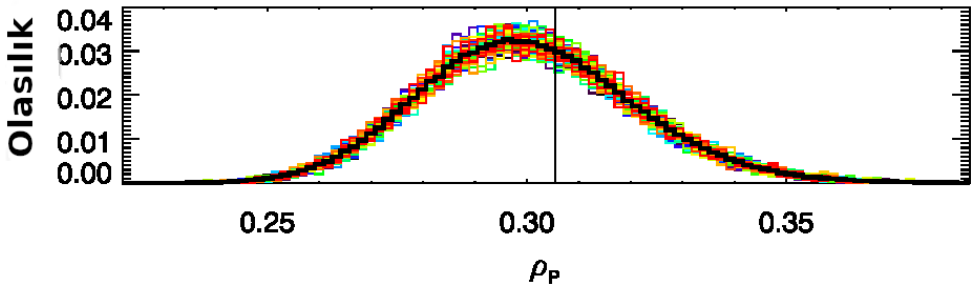
Yıldızın yaşı için elde edilen ardıl olasılık dağılımı genç yaşlara doğru yanlıdır. Dağılımın saçılmasının çok daha az olmasını yıldızın genç olmasına ilişkin kanıtlara (sıcaklık, yarıçap, ışınım gücü ve kütle parametreleri) bağlamak mümkündür. Yıldız evriminde biraz

daha ilerlemiş olsa benzer bir dağılım elde edilemeyebilirdi, zira söz konusu parametreler üzerindeki dejenerasyon büyürdü. MCMC'nin sonucunda ulaşılan dağılımların sağlıklı olduğu gezegen yarıçapına ilişkin dağılımdan da görülebilir. Bu kez dağılım simetriktir ve en olası değer, başlangıç değerinden önemli miktarda küçük bulunmuştur. Bu durum MCMC'nin Levenberg-Marquardt algoritmasına göre yerel minimumlardan kaçmak ve global minimum bulmak konusunda çok daha başarılı olduğunu açıkça göstermektedir. Zira başlangıç parametresi aynı ışık eğrilerine Levenberg-Marquardt algoritmasıyla Exofast-v1 kulllanılarak yapılan uyumlamadan alınmıştır.



Şekil 5.6. WASP-52b gezegeni için yarıçapın ardıl olasılık dağılımı.

Literatürde bulunan sonuçlarla arada önemli fark (~ %50) görülen bir diğer parametre ise gezegenin yoğunluğudur. Yoğunluk parametresinin ardıl dağılımına bakıldığında, saçılmasının az ve simetrik olduğu, en olası değerin olasılığının da oldukça yüksek olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 5.7. WASP-52b gezegeni için ortalama yoğunluğun ardıl olasılık dağılımı.

Elde edilen tüm bu sonuçlar literatür için daha duyarlı bir güncelleme olacaktır. Ancak, yüzey lekeleri barındıran bu yıldızın lekelerin geçiş sırasında gözlemcinin bakış doğrultusunda olması nedeniyle asimetrelere yol açtığı durumlarda elde edilen ışık eğrilerinin leke modellemesi de yapabilen Phoebe-2 gibi bilgisayar kodlarıyla analiz edilmesi planlanmıştır ve

bu konudaki çalışmalar sürmektedir. Phoebe-2, Exofast-v2'den farklı olarak sadece fiziksel model üreten bir Python modülü yapısındadır. Çok sayıda modelin Bayesian istatistik paradigması kullanılarak MCMC yöntemiyle üretilmesi ve karşılaştırmasına dayalı bir analiz kullanıcının Python programlama dilinin olanaklarını kullanabilme becerisine bağlıdır. Bu konulardaki elde edilen deneyimle bu çalışmalarda son aşamaya gelinmiş ancak projenin sonuçlandığı tarih itibarı ile bir leke modeli elde edilememiştir. Bunda söz konusu hesapların çok uzun sürmesi ve bazı analizlerin günlerce çalıştıktan sonra sonuç vermemiş olmasının önemli rolü olmuştur. Ancak lekesiz modellerle ulaşılan bulgulara ilişkin duyarlılık ve dağılımların sağlıklı olduğu da açıktır.

Nihayetinde bu bulgulardan hareketle, WASP-52b'nin Tetkin ~ 5050 K sıcaklıklı K tayf türünden, Güneş-benzeri metal bolluğuna sahip ([Fe / H] ~ 0.08 dex), görece genç (~ 3 milyar yıl) ve bu nedenle manyetik olarak aktif; kısa (1.77 gün) dönemli, çembersel bir yörüngede dolanan Jüpiter'in yarı kütlesinde (~0.45 M_J) sıcak-Jüpiter (Tdenge ~ 1300 K) türü, yine oldukça "şişmiş" (ing. highly inflated) bir atmosfere sahip (R ~1.26 RJ) bir gezegen olduğu değerlendirilebilir. Sıcak Jüpiter türü gezegenlerin daha çok Güneş'ten metalce zengin yıldızların etrafında gözleniyor olmasına ilişkin bulgulara (Gonzalez 1997, Fischer ve Valenti 2005, Udry ve Santos 2007, Johnson vd. 2010) aykırı bir örnek olması ve aktif bir yıldızın etrafında bulunması nedeniyle önemli bir örnektir. Bu bağlamda, yıldız aktivitesinin gezegenle arasında bir ilişki olup olmadığını anlamaya yönelik çalışmalar ve aktif yıldızların etrafında bu derece geniş atmosferlerin nasıl bulunabileceğini anlamaya yönelik gezegen atmosferi ile gezegen oluşum senaryoları çalışmaları açısından da WASP-52b önemli bir örnek olup; yıldızının parlaklığı itibarı ile James Webb Uzay Teleskobu (JWST) tarafından atmosferinin incelenmesi hedeflenen ötegezegenler listesi içerisinde yer almaktadır.

5.3. HAT-P-20 Sistemi

HAT-P-20 sistemi bu proje kapsamında çalışılan diğer sistemlere göre daha çok gözlenmiş ve parametreleri görece duyarlı ışk eğrileri (Şekil 2.9, 2.11, 2.13, 2.15) üzerinden çeşitli çalışmalarla elde edimiştir (Bakos vd. 2011 (B11), Sun vd. 2017 (S17), Esposito vd. 2017 (E17)). Bunda sistemin geçiş zamanları değişimi (TTV) göstermesinin payı büyüktür. Ancak öz konusu bu değişimin sisteme kütle çekimle bağlı bir bileşen kaynaklı ışık zaman etkisinden değil, manyetik etkinlik kaynaklı ışık eğrisi asimetrilerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Tablo 5.3'te söz konusu çalışmalarda HAT-P-20 yıldızı ve HAT-P-20b ötegezegenine ilişkin olarak söz konusu çalışmalarda ve bu proje kapsamında elde edilen en önemli parametreler karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

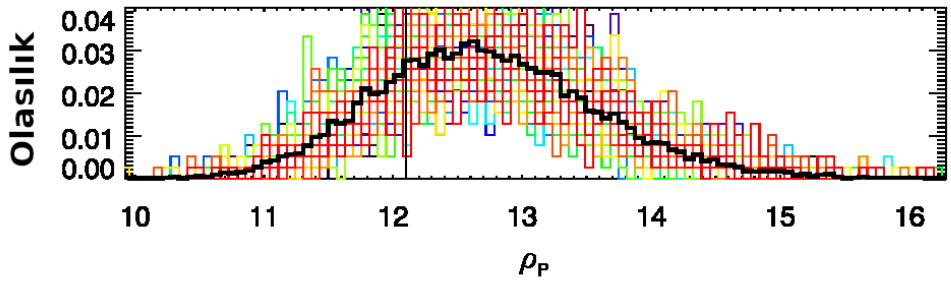
Yıldız parametrelerine bakıldığında tüm bu çalışmaların, bu proje kapsamında yapılan çalışmayla ulaştığı sonuçlar benzerdir. Bakos vd. (2011) tarafından kullanılan uzaklık değeri Gaia paralaksından elde edilen değere (~ 70 parsek) çok yakın olduğundan yarıçapa ilişkin bir farklılık gözlenmemektedir. Gezegen parametreleri açısından en kritik fark ise Esposito vd. (2017) tarafından elde edilen sonuçlardaki büyük farklılıklardır. Söz konusu çalışmada kullanılan ışık eğrilerinden biri tüm geçişi kapsamamaktadır ve duyarlılığı düşüktür. İkinci ışık eğrisi duyarlı olmasına karşın, asıl problem bu iki ışık eğrisi arasındaki derinlik farkıdır. E17, bu farkı ve geçiş ışık eğrileri üzerindeki belirgin olmayan asimetrileri manyetik etkinlik kaynaklı yüzey parlaklık dağılımı anomalilerine yormuşlardır. Yıldızın Ca II H&K çizgilerindeki şiddetli salma yapıları yıldızın aktif olduğunu kesinleştirse de kanımızca bu ışık eğrileri üzerinden yapılan değerlendirmenin gerçekçi olmadığı yönündedir. Işık eğrisi derinliğini bu oranda değiştirecek bir leke grubu mümkün olmakla birliklte, diğer gözlemlerin hiçbirinde bu düzeyde gözlenmeyen derinlik farklarının gözlemsel problemler (aletsel problemler, Yer atmosferi kaynaklı problemler, veri indirgeme problemleri gibi) kaynaklı olması daha muhtemeldir.

Tablo 5.3. HAT-P-20'nin en önemli parametrelerinin literatürle karşılaştırılması

HAT-P-20	B11	S17	E17	Bu Çalışma
Yıldız Parametreleri				
M_* (M_*)	0.756 ± 0.028	0.798 ± 0.018	0688 ± 0.037	$0.749^{+0.031}_{-0.029}$
R_* (R_*)	0.694 ± 0.021	0.744 ± 0.011	0.6506 ± 0.0054	$0.692^{+0.014}_{-0.014}$
ρ_* (g cm^{-3})	-	1.94 ± 0.07	2.526 ± 0.080	$3.19^{+0.17}_{-0.15}$
log *g* (cgs)	4.63 ± 0.02	-	4.50 ± 0.20	$4.633^{+0.016}_{-0.016}$
Yaş (10^9 yıl)	$6.7^{+5.7}_{-3.8}$	-	-	$4.4^{+4.8}_{-3.1}$
d (pc)	70 ± 3	-	-	$71.19^{+0.2}_{-0.2}$
Gezegen Parametreleri				
R_P (R_J)	0.867 ± 0.033	0.952 ± 0.017	1.006 ± 0.017	$0.891^{+0.022}_{-0.022}$
M_P (M_J)	7.246 ± 0.187	7.59 ± 0.12	1.998 ± 0.079	$7.25^{+0.2}_{-0.2}$
T_{denge} (K)	970 ± 23	996 ± 19	1426.7 ± 8.5	$953.4^{+9.3}_{-9.8}$
ρ_P (g cm^{-3})	13.78 ± 1.50	$8.80^{+0.46}_{-0.43}$	2.43 ± 0.14	$12.7^{+0.9}_{-0.8}$
a (AB)	0.0361 ± 0.0005	0.03671 ± 0.00027	0.01504 ± 0.00029	$0.03605^{+0.00049}_{-0.00047}$
Işık Eğrisi Parametreleri				
i (°)	86.8 ± 0.2	86.3 ± 0.1	82.109 ± 0.088	$86.74^{+0.14}_{-0.13}$
R_P/R_*	0.1284 ± 0.0016	-	0.1588 ± 0.0040	$0.13238^{+0.00097}_{-0.00097}$
a/R_*	11.17 ± 0.29	-	4.97 ± 0.14	$11.21^{+0.19}_{-0.18}$

Esposito vd. (2017) tarafından yapılan çalışma bu nedenle dışarıda bırakılarak gezegen parametrelerine bakıldığında en büyü farklılığın gezegen yoğunluğunda olduğu

görülmektedir. Her ne kadar kütle ve yarıçap bir çalışmadan diğerine önemli ölçüde değişiyor görünmese de yoğunluklar arasındaki fark, hata payları da dikkate alındığında incelemeye değerdir. Bakos vd. (2011) yoğunluk için ~ 13.8 g/cm^3 gibi yüksek bir değer bulurken, Sun vd. (2017) ise 8.8 g/cm^3 değerini bulmuştur. Bu çalışmada elde edilen gezegen yoğunluğunun ardıl olasılık dağılımı incelendiğinde (Şekil 5.8) bu değerlerin benzer veriler ışığında olasılıklarının düşük olduğu değerlendirmesi yapılabilir. Ortalama yoğunluğun ~ 13.8 g/cm^3 civarında olma olasılığı önemsenecek düzeyde ise de, 8.8 g/cm^3 civarında olma olasılığı, bu çalışmanın sonuçlarına göre çok az görünmektedir.



Şekil 5.8. HAT-P-20b ötegezegeni için ortalama yoğunuğun ardıl olasılık dağılımı.

Dağılımın saçılması, MCMC'nin iterasyonlar boyunca German-Rubin istatistiğinin limit değerin (1.01) altına inmemesi nedeniyle, tüm iterasyonlar tamamlanana kadar parametre uzayında benzer değerlerin etrafında geniş bir çap dahilinde "yürümesinden" kaynaklanmaktadır. Ancak en olası değerin hatası (0.15 – 0.17 g/cm^3) bu saçılmadan çok etkilenmeyebilmektedir.

Sonuç olarak HAT-P-20b, proje yıldızları arasındaki en soğuk (Tetkin ~ 4500 K), metalce zengin ([Fe / H] ~ 0.25 dex), bu tayf türü için anakol ömrünü henüz yarılamamış (~4 – 6 milyar yıl) bir yıldızın etrafında; kısa (2.55 gün) dönemli, çembersel bir yörüngede dolanan kütleli (~ 13 M_J) bir sıcak-Jüpiter (T_{denge} ~ 950 K) türü bir gezegen olarak değerlendirilebilir. WASP-52b ve XO-3b'nin tersine ve HAT-P-19b'ye benzer bir şekilde sıcak-Jüpiter türü gezegenlerin daha çok Güneş'ten metalce zengin yıldızların etrafında gözleniyor olmasına ilişkin bulgulara (Gonzalez 1997, Fischer ve Valenti 2005, Udry ve Santos 2007, Johnson vd. 2010) uyan bir örnek olması ve tıpkı XO-3b gibi en yoğun (gümüşten yoğun) gezegenlerden biri olması açısından da önemli ve ilginçtir.

5.4. XO-3 Sistemi

XO-3 parametrelerinin de duyarlılıkları kabul edilebilir bir seviyede olmasına karşın yıldız parametrelerinin bu proje kapsamında yapılan tayfsal analizler sonucu elde edilmemiş

olması, nihai sonuçlara güvenimizi azaltmaktadır. XO-3'ün yüksek çözünürlüklü ve kaliteli tayfsal verisini başka açık veritabanlarında araştırma ve bu tür verilere ulaşamamız halinde yurt dışındaki teleskoplara bu cismi gözlemek üzere gözlem projeleri yazmak plan dahilindedir. Projenin de B planı içinde yer alan bu plandan Keck ve SOPHIE tayflarının incelenmesi için harcanan çok uzun süre de dikkate alınarak vazgeçilmiştir. Subaru Teleskobu'na bağlı HJS tayfçekeriyle alınan tayflara erişim için ise çalışmalar sürmektedir. Bu bağlamda Türkiye'de görece parlak ($9^m.73$) bir yıldızın dahi yüksek çözünürlüklü (R > 40000) tayfını alabilecek bir teleskop-tayfçeker düzeneğinin bulunmayışı büyük bir eksiklik olarak değerlendirilmektedir.

XO-3 sistemine ilişkin global modelleme tayfsal analizde karşılaşılan güçlükler sonucu, yıldızın atmosfer parametrelerinin merkezi değerlerinin literatürle tutarlı olmalarına karşın üzerlerindeki belirsizliklerin büyük olması nedeniyle atmosfer parametreleri, literatürde en güvenilir ve duyarlı sonuçların verildiği Tsantaki vd. (2014) tarafından ypaılan çalışmadan alınmış, yıldızın dikine hız, çeşitli bantlardaki parlaklık verileri ve T100 ışık eğrileri ile birlikte modellenmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar keşif makalesiyle (Krull vd. 2008, kısaca K08) karşılaştırmalı olarak Tablo 4.10'da sunulmuştur. Ancak literatürde yapılan diğer çalışmada (Winn vd. 2008, kısaca W08) elde edilen sonuçlar da en önemli parametreler göz önünde bulundurularak Tablo 5.3'te özetlenmektedir.

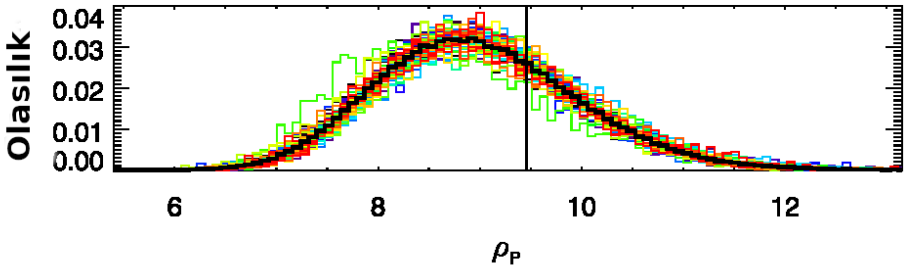
Tablo 5.4. XO-3'ün en önemli parametrelerinin literatürle karşılaştırılması

XO-3	K08	W08	Bu Çalışma
Yıldız Parametreleri			
M_* (M_*)	1.41 ± 0.08	1.213 ± 0.066	$1.385^{+0.061}_{-0.067}$
R_* (R_*)	2.13 ± 0.21	1.377 ± 0.083	$1.469^{+0.057}_{-0.055}$
ρ_* (g cm^{-3})	-	0.650 ± 0.086	$0.616^{+0.071}_{-0.065}$
log *g* (cgs)	3.95	4.244 ± 0.041	$4.246^{+0.032}_{-0.034}$
Yaş (10^9 yıl)	2.69	$2.82^{+0.58}_{-0.82}$	$1.13^{+0.69}_{-0.53}$
d (pc)	260	174 ± 18	$213.7^{+2.7}_{-1.9}$
Gezegen Parametreleri			
R_P (R_J)	1.95 ± 0.16	1.217 ± 0.073	$1.216^{+0.047}_{-0.046}$
M_P (M_J)	13.25 ± 0.64	11.79 ± 0.59	$13.02^{+0.39}_{-0.42}$
T_{denge} (K)	-	1710 ± 46	1820^{+34}_{-33}
ρ_P (g cm^{-3})	4.38 ± 0.03	$8.1^{+1.7}_{-1.3}$	$8.97^{+1}_{-0.92}$
a (AB)	0.0476 ± 0.0005	0.03671 ± 0.00027	$0.04743^{+0.00069}_{-0.00077}$
Geçiş Parametreleri			
i (°)	79.32 ± 1.36	84.2 ± 0.54	$84.18^{+0.47}_{-0.48}$
R_P/R_*	0.092 ± 0.040	0.09057 ± 0.00057	$0.08518^{+0.00099}_{-0.0012}$
a/R_*	11.17±0.29	7.07 ± 0.31	$6.94^{+0.26}_{-0.25}$

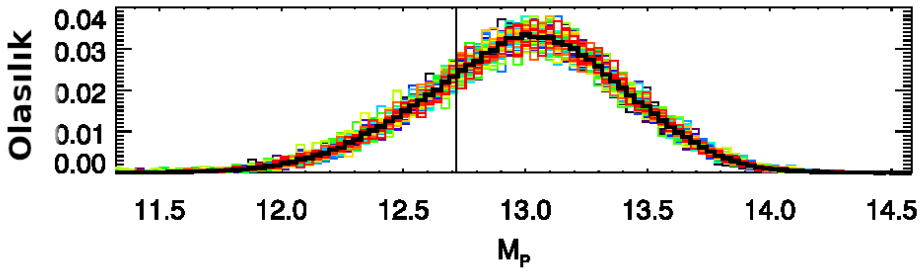
XO-3 için bu proje kapsamında elde edilen parametreler de tıpkı diğer geçiş yapan ötegezegenlerde olduğu gibi geçiş ışık eğrilerinin yüksek duyarlılıkla alınmış olması nedeniyle literatürden çoğu parametre için daha duyarlıdır. Keşif makalesinde (K08) kullanılan ışık eğrileri T1000 ışık eğrileriyle karşılaştırılabilir duyarlılıkta olsa da elde edilen parametrelerin bir bölümü oldukça problemli görünmektedir. Öncelikle K08 yörünge eğim açısını çok küçük bulmuştur. Aynı şekilde gezegen yarıçapı da neredeyse %50 fazla tahmin edimiştir. Bunun nedeni her iki ışık eğrisinin derinliğinin (δ ~ 0.8) (Şekil 2.5) 6 kez Bessel-R bandında gözlediğimiz (Şekil 3.7) derinliklerden (δ ~ 0.9) daha az olmasıdır. Bu derece sığ bir minimumun birkaç kez gözlenerek emin olunmasında fayda vardır. W08 tarafından elde edilen ışık eğrilerindeki derinlik ise (Şekil 2.7) ise T100 ışık eğrilerindeki derinliğe yakın olduğu görülmektedir. Ancak bu çalışmada kullanılan FLWO teleskobuyla alınmış ışık eğrilerinin de saçılması fazla, fotometrik kalitesi yetersiz, bazıları ise geçişin ancak yarısını kapsamaktadır. Her ne kadar tayfsal analizlerde şu ana kadar istenen sonuçlara ulaşılamamış olsa da bu sonuçları yayınlamakta ve şu ana kadar yapılan iki çalışma arasında çelişen bu durumu W08 çalışması lehine güncellemekte fayda vardır. Özellikle gezegen yoğunluğu açısından bu durum kritik önem arz etmektedir.

Tablo 5.4'te verilen karşılaştırmada her şeyden önce kullanılan uzaklık değerleri arasındaki büyük farka dikkat etmekte fayda vardır. K08, Gaia paralaksından elde edilen yaklaşk 215 parseklik uzaklıktan 45 parsek daha büyük; W08 ise 40 parsek daha küçük değerler üzerinden temel parametreleri (özellikle yıldız yarıçapı) elde etmiştir. Bu durum K08 tarafından yıldız için bulunan oldukça büyük yarıçapta ($R = 2.13\ R_{Güneş}$) kendini açıkça göstermektedir. W08 de yarıçapı bir miktar küçük tahmin etmiştir ($R = 1.38\ R_{Güneş}$). Bu durum farklı ışık eğrisi derinliklerinden elde edilen yarıçap oranları (R_p / R_*) ile birleşince, gezegen yarıçapı konusunda çalışmalar arasında önemli farkların bulunmasına neden olmuştur. Her üç çalışma da gezegen kütlesi için kahverengi cüce alt limitine yakın ($M \sim 13\ M_J$) bir kütle elde etmiştir. Dolayısı ile temel fark bu ötegezegene özel olarak çok kritik bir parametre olan gezegen yoğunluğunda gözlenmektedir. K08 bu değeri 4.38 g/cm^3 gibi düşük bir değer olarak elde etmişken, WO8 8.1 g/cm^3 bulmuştur. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ise 8.97 g/cm^3 gibi yüksek bir değere işaret etmektedir. Bu sonuç kritiktir. Zira cisim kütle anlamında kahverengi cüce sınırındadır, bir sıcak-Jüpiter gezegen için oldukça büyük olan bu yoğunluk değeri, kahverengi cüce modelleri değerlendirildiğinde (> 70 g/cm^3) ise küçüktür. Bu noktadan hareketle cisim bir geçiş cismi olarak görülebilir ve bu bakımdan da önemlidir. Gezegen yoğunluğu (Şekil 5.9) ve kütlesinin (Şekil 5.10) ardıl dağılımlarına bakıldığında saçılmanın az ve dağılımların sağlıklı oldukları açıkça görülmektedir.

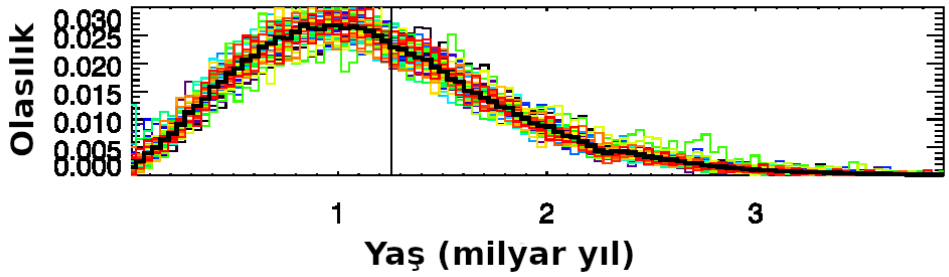
Bir başka kritik parametre ise yıldızın yaşıdır. Sıcak bir yıldız olan XO-3'ün yaşı, her üç çalışmada yine farklı uzaklık değerleri kullanılarak elde edilen temel parametreler üzerinden yapılan eş yaş eğrisi (izokron) çakıştırması yöntemiyle elde edilmiş olduğu için sonuçlar karşılaştırılabilir değildir. Sıcak bir yıldız olduğu için, yıldızın evrimi sırasındaki parametrelerinin değişimi daha radikaldir ve bu nedenle parametrelerden hareketle hesaplanan yaşın üzerindeki hata da daha soğuk yıldızlara nispeten küçüktür. W08'de yaşın hatası, 800 milyon yıl, bu çalışmada 700 miliyon yıldan küçük bulunmuştur. Oysa ki yaş değerleri sırasıyla 2.82 ve 1.13 milyar yıl olarak belirlenmiştir. Bu nedenle yıldız yaşının ardıl dağılımına da bakıp (Şekil 5.9) bu çalışmadaki sonuçlara göre 2.6 - 3 milyar yıl arası bir yaşın ne kadar olası olduğunu değerlendirmekte fayda vardır.



Şekil 5.9. XO-3b gezegeni için yoğunluğun ardıl olasılık dağılımı.



Şekil 5.10. XO-3b gezegeni için kütlenin ardıl olasılık dağılımı.



Şekil 5.11. XO-3 yıldızı için yaşın ardıl olasılık dağılımı.

XO-3 için yaşın olasılık dağılıımında (Şekil 5.11) genç yaşlara gözlenen yanlılık, yıldız parametreleri kaynaklıdır. Bu çalışmanın en önemli farkı, hassas ışık eğrileri üzerinden analiz yapılmış olması kadar, temel parametreler için Gaia paralaksı üzerinden oldukça yüksek duyarlılıkla hesaplanan uzaklığın kullanılmış olmasıdır. Gaia Uzay Teleskobu'nun XO-3'ün parlaklığı (m_v = 9.73) göz önüne alındığındaki astrometrik duyarlılığı 20 mikroyaysaniyesi seviyesindedir (Gaia çalışma grubu 2016). Bu nedenle hem yıldız çapı, hem de bu çap kullanılarak ışınım gücü bağıntısından elde edilen yaş parametresi üzerinde bu çalışmanın yalnızca daha duyarlı değil, aynı zamanda daha doğru sonuçlara ulaşıldığı değerlendirmesi yapılabilir. Dağılımda 2.6 – 3 milyar yıl arası bir yaş, olasılığın daha az olduğu kuyruk tarafında kalmaktadır.

Sonuç olarak XO-3b, sıcak (Tetkin ~ 6800 K), metalce Güneş'e oranla bir miktar fakir ([Fe / H] ~ -0.08 dex), görece genç (~ 1.13 milyar yıl) bir yıldızın etrafında dolanan; kısa (3.19 gün) dönemli, çembersel bir yörüngede dolanan kahverengi cüce alt kütle limitine yakın (~ 13 M_J) bir sıcak-Jüpiter (Tdenge ~ 1800 K) türü bir gezegen olarak değerlendirilebilir. Tıpkı WASP-52 gibi sıcak-Jüpiter türü gezegenlerin daha çok Güneş'ten metalce zengin yıldızların etrafında gözleniyor olmasına ilişkin bulgulara (Gonzalez 1997, Fischer ve Valenti 2005, Udry ve Santos 2007, Johnson vd. 2010) aykırı bir örnek olması ve en yoğun (gümüşe yakın yoğunlukta) gezegenlerden biri olması açısından da önemli ve ilginçtir. Bu bağlamda, gezegen oluşum teorisi ve popülasyon çalışmaları açısından XO-3b çok önemli bir örnek olup; yıldızının parlaklığı itibarı ile de James Webb Uzay Teleskobu (JWST) tarafından atmosferinin incelenmesi hedeflenen ötegezegenler listesi içerisinde en ön sıralarda yer almaktadır. Bu nedenle tarafımızca literatüre kazandırılacak olan bu parametrelerin de önemli yer tutabileceği düşünülmektedir.

5.5. Yorumlar ve Öneriler

Ötegezegenlerin geçiş takip gözlemleri parametrelerinin hassas elde edilebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu rapordan da açıkça görülebileceği gibi, geçiş yöntemiyle keşfedilen bir ötegezegenin keşfinden duyurulmasına kadar geçen kısa sürede, geçiş yöntemiyle gezegen arayan projeler arasındaki rekabet nedeniyle, analizleri detaylı bir şeklilde yapılamamakta, bu sebeple parametreleri doğruluğu ve duyarlılığı yetersiz bir şekilde belirlenebilmektedir. Bu amaçla keşfedilen gezegenlerin yüksek fotometrik duyarlılıklı gözlemlerine ihityaç duyulmaktadır. TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'nin (TUG) 2500 m rakımda, Bakırlıtepe / Antalya yerleşkesinde konuşlandırılmış bulunan 1 metre birincil ayna çaplı T100 teleskobu, iyi görüş koşullarına sahip konumu ve yüksek optik kalitesi ile bu tür takip gözlemleri için ideal bir gözlem aracıdır. Önümüzdeki yıllar ötegezegen keşiflerinin TESS, PLATO gibi uzay teleskopları ve yerden ötegezegen arayan projelerle birlikte giderek artacağı; gezegen

keşfinden, keşfedilen gezegenlerin parametrelerinin doğru ve duyarlı olarak belirlenmelerinin (karakterizasyonlarının) daha önemli hale geleceği bir dönemi beraberinde getirecektir. T100'ün bu anlamdaki potansiyeli özellikle uluslararası toplantılar ve SCI kapsamında taranan, yüksek etki çarpanlı dergilerdeki yayınlar ile tanıtılmalı ve gezegen arayan projelerle takip ortaklıkları kurulmaya gayret edilmelidir.

Bu projenin temel gözlem yöntemi olarak belirlenen odak dışı ışık ölçüm (ing. defocused photometry), kısa poz sürelerinde gürültüyü domine eden foton gürültüsünün etkisini, poz sürelerinin uzatılmasıyla azaltabilmesini sağlamasının yanı sıra düz alan düzeltmesinden (ing. flat fielding) kaynaklanan gürültüyü de bir mertebe azaltabilmektedir. Ayrıca atmosferik sintilasyon etkisi de uzun poz sürelerinde integrasyon yapıldığı için azalmaktadır. Bu proje kapsamında, açık ve görüşün ortalama civarında (~ 2") seyrettiği tüm gecelerde elde edilen ışık eğrileri, temel parametrelerin yüksek duyarlılıkla belirlenebileceği niteliktedir. Nokta başına ışık ölçüm hatasının milikadir seviyesine düşürülebildiği, RMS hatasının 0.6 milikadir seviyeye kadar indirilebildiği ve ortalama 2 milikadir seviyesinde olduğu bu yöntem sayesinde derinliği %0.1'den büyük tüm geçişler yüksek duyarlılıkla gözlenebilir. Bu projede kazanılan deneyimden hareketle, sadece ötegezegen geçişlerinde değil, zaman çözünürlüğünden feragat edilebilen parlak yıldızların (T100 için $m < 13^m$) tüm ışık ölçüm gözlemlerinde odak dışı ışık ölçüm yöntemini şiddetle öneririz. Yöntemde dikkat edilmesi gereken en önemli husus, geçiş süresi dahlinde duyarlı sonuçlara ulaşılabilecek bir model yapılabilmesi için en az 50 – 60 arasında görüntünün elde edilebileceği bir poz süresinin öncelikle belirlenmesidir. Bu poz süresi bu proje yıldızları için parlaklık ve gözlem koşullarına bağlı olarak 60 saniye (HAT-P-20) ile 150 saniye (XO-3) arasında değişmiştir. Daha sonra piksel başına sayımlar 40000 ADU'yu geçmeyecek şekilde teleksop odak dışına alınır. Odak dışı görüntü boyutu maksimum sayımların 20000 – 40000 ADU arasında kalacağı şekilde ayarlanır. Bu sırada cismin ufuk yüksekliği, Ay'a yakınlığı, görüşün düzeyi ve gökyüzünün parlaklığı gibi parametreler de dikkate alınmalıdır. Gerektiğinde 2x2 piksel birleştirme kullanılabilir. Bu durumda dahi odak dışı ışık ölçüm tekniği geleneksel tekniğe göre daha iyi sonuç vermektedir. Ancak hızlı değişen, zaman çözünürlüğüne ihtiyaç duyulan gözlemlerde ya da (T100 için 14 kadirden) sönük yıldızların gözlemlerinde odak dışı ışık ölçüm uygulanmaz. Ayrıca gözlenen yıldıza çok yakın parlak bir yıldızın bulunmaması da hedef yıldızın nokta dağılım fonksiyonunun net elde edilebilmesi açısından önemlidir. T100 gördüğü geniş alan dahilinde çok sayıda mukayese yıldızının aynı anda gözlenebilmesine imkan vermesi açısından bu yöntem için ideal bir gözlem aracıdır.

Gözlemlere geçiş başlangıcından (ing. ingress) en az 1 saat önce başlanmalı, gözlem geçiş sonundan (ing. egress) en az 1 saat sonra sonlandırılmalıdır. Geçiş profilinin sağı ve

solundaki “düzlüklerden” mümkün olduğunca çok nokta alınmaldıır. Bu modelin hassasiyetini önemli ölçüde arttıracak ve geçiş sürelerinin belirlenmesini duyarlı hale getirecektir.

Gözlemlerin önindirgemesi ve açıklık fotometrisi ile ışık eğrlerinin elde edilmesinde herhangi bir yazılım paketi kullanılabilir. Ancak söz konusu paketin yıldız görüntülerinden akı merkezini centroid gibi bir algoritma ile kendisinin bulmasını engelleyen bir seçeneğin olmasına dikkat edlimelidir. KELT ötegezegen araştırma projesi için geliştirilen AstroImageJ (Collins vd. 2017) yazılımı bu anlamda idealdir.

Gözlem zamanları mutlaka GPS ya da bir zaman sunucusu ile koordine edilerek hassas tutulmalı ve mutlaka Yer-Güneş ikilisinin kütle merkezine indirgenmiş dinamik zaman biriminde kaydedilmeli ya da bu birime (BJD-TDB) dönüştürülmelidir. AstroImageJ başlıklardaki bilgileri kullanarak bu dönüşümü otomatik olarak da yapabilmektedir. Özellikle geçiş zamanlarının değişimi ile gezegen arayan projeler için zamanın doğru / hassas ve mümkünse bu birimde, değilse birimi özel olarak belirtilerek (UT, UTC, JD, HJD, BJD-UTC gibi) tutulması kriitk önem arz eder.

AstroImageJ ayrıca en küçük kareler yöntemiyle basit bir uyumlama (fit) olanağı da sağlayarak elde edilen ışık eğrisinin özellikle derinliğini denetleme olanağı sağlar. Bu bileşeni kullanarak ya da Exofast-v1’in masaüstü ya da web arayüzlü versiyonlarından birini kullanarak gözlenen ışık eğrisinin ön bir modeli (ing. preliminary model) elde edilir. Bu parametrelerin başlangıç değerleri keşif makalelerinden alınabilir.

Tayfsal parametrelerin, zaman ve olanak varsa, araştırmacı tarafından elde edilmesinde fayda vardır. Özellikle yüksek çözünürlüklü ve yüksek S/N oranı dahilinde barınak yıldızın tayflarının alınması mümkünse; bu hem bağımsız bir analiz yapmak, hem de parametreleri daha duıyarlı belirlemek açısından çok önemli olacaktır. Bu noktada tayfsal analiz için pek çok yazılım bulunmakla birlilkte bu projenin tayfsal analizlerinde kullanılan iSpec (Blanco-Cuaresma vd. 2014) yazılıımının oldukça pratik ve detaylı analiz olanağı sağladğını vurgulamak isteriz. Dokümantasyonu bir miktar zayıf olmakla birlikte yazılımın kullanımı ve öğrenilmesi son derece kolaydır.

Tayfsal parametrelerin elde edilmesinde mikrotürbülans, makrotürbülans ve dönme hızı gibi hız alanlarının tespiti önem taşır. Her bir hız alanın ayrı ayrı çok duyarlı ve doğru belirlenmesinden çok toplam genişlemenin doğru belirlenmesi daha büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla mikrotürbülans ve makrotürbülans hızlarını tayin etmek üzere, Gilmore vd. (2012) tarafından farklı sıcaklık grupları için verilen kalibrasyonlar kullanılabileceği gibi, zayıf çizglerden makrotürbülans; eşdeğer genişliğin bolluktan bağımsız hale geldiği değerden mikrotürbülans belirlenebilir. Gezegen barındıran soğuk yıldızlarda dönme hızları genellikle

düşük, çizgi örtüşmesi de önemli ölçüde etkilidir. Bu nedenle eşdeğer genişliğe dayanan yöntemler yerine sentetik çakıştırma yönteminin parametre belirlemede tercihi önerilir. Ayrıca bu tür yıldızlarda sıcaklık gereği iyonize demir çizgisine fazla rastlanmadığından, iyonizasyon dengesinden etkin sıcaklık belirleme yöntemi de iyi çalışmamaktadır.

Yıldızın dikine hızını belirlemek üzere alınmış yüksek çözünürlüklü tayfları varsa, bu tayflardan büyük bir bölümü yüksek hız hassasiyeti için iyodin gaz hücresiyle alınmış olabilir. İyodin hücresinin çizgileri yıldız çizgileri üzerine bindiğinden analizi imkansız hale getirir. Her ne kadar bu çizgileri temizlemeye yönelik çalışmalar varsa da bunlar genellikle sadece baze aletlere spesifik olarak yürütülmektedir. Ancak dikine hız gözlemlerini gerçekleştiren gruplar parametre tayini için mutlaka iyodin hücresi kullanılmayan tayflar da almaktadırlar. Bu tayflar atmosfer parametreleririnin belirlenmesi için kullanılabilir. Yine de Türkiye'nin bu tür takip gözlemlerinin yapılabileceği yüksek çözünürlüklü yıldız tayfı almaya yönelik 2.5-4 metre sınıfında bir teleskoba bağlı tayfçekerinin bulunmayışı takip potansiyeli açısından önemli bir eksiklik olarak not edilmelidir.

Tayfsal veriler için öncelikle yüksek çözünürlüklü iyi bilinen tayfçekerlerin (HARPS, Keck / HIRES, Subaru, SOPHIE, ELODIE, FIES, UVES, FEROS) arşivleri araştırılmalı, ancak mevcut tayflardan daha iyisi alınabilecekse ya da arşiv tayflarından şüphe duyuluyorsa yeni gözemler yapılmalıdır. Elde dikine hız verisi varsa, bunu kullanmakta fayda vardır. Analiz programına dikine hız verileri doğrudan sağlanabileceği gibi, dikine hızın değişim genliği de sağlanabilir. Dikine hız modelleri basit Fourrier analizine dayandığı için bu genliği belirlemek konusunda son derece başarılıdır.

Yıldızın ışınım gücünü belirlemek üzere mümkün olduğunca çok bantta parlaklığı literatürden toplanmalıdır. Bu konuda bu proje kapsamında toplanan parlaklıklarda özellikle kısa dalgaboyundaki parlaklıkların büyük eksikliği duyulmuştur. Mümkün olduğunca geniş bir dalgaboyu aralığından güvenilir parlaklık verisinin bulunması, yıldızın tayfsal enerji dağılımının belirlenmesi açısından kritiktir. Uzaklık değeri ve hatası Gaia paralaksından hesap edilerek; analiz programına ışık eğrileri, yıdızın temel atmosfer parametreleri ve dikine hız verisi ya da değişim genliği ile birlikte girdi parametresi olarak sağlanır.

Exofast-v2 tüm bu girdi parametrelerini ve hatalarını öncül dağılımların (ing. prior) merkezi değeri ve standart sapması olarak kabul ederek, eldeki verinin herhangi bir model bağlamında türetilme olasılığını hesaplayan (ing. likelihood function) ve Metropolis-Hastings algoritmasına dayalı olarak Markov Chain Monte Carlo (MCMC) yöntemiyle iki farklı parametre setini olasılıkları temelinde karşılaştırarak ilerleyen ve binlerce adımda bu karşılaştırmaları yaparak parametrelerin ardıl dağılımlarını (ing. posterior) belirleyen modern bir global model

programıdır. Program açık kaynak kodludur ancak lisanslı Interactive Data Language (IDL) yazılım geliştirme dilinde yazılmıştır. Çalışması için IDL'in ücretsiz sürümleri ya da GDL gibi açık kaynak kodlu bir varyantı da yeterlidir.

Exofast-v2'deki yüzey parlaklık anomalileri (leke ya da fakülalar) kaynaklı asimetriler modellenememektedir. Bu amaçla geometirk model Exofast-v2 ile arandıktan sonra bir leke modeli programı (SOAP gibi) ya da bir başka ışık eğrisi analiz programı (Phoebe, Phoebe-2, Wilson-Devinney, JKTeBOP) kullanılabilir. Bu tür bir ışık eğrisi programı da tüm analiz için kullanılabilir. Adı geçen kodları MCMC yöntemiyle Bayes istatistik paradigması dahilinde kullanmak üzere ek kodlar ve betikler geliştirmek mümkündür. Phoebe-2 (Conroy 2018) Python programlama dilinde geliştirilmiş bir Python modülü olduğu için bu anlamda esnekliği itibarı ile öne çıkmaktadır. Exofast-v2 ile elde edilecek geometirk modelin parametreleri Phoebe-2'ye sağlandıktan sonra leke parametreleri (enlem, boylam, büyüklük ve sıcaklık faktörü) serbest bırakılarak ve emcee ya da pymc3 gibi bir MCMC modülü fonksiyonlarının yardımıyla MCMC yöntemi dahilinde ya da LMFIT modülü ile en küçük kareler yöntemi kullanılarak leke modeli yapılabilr.

Ancak gerek Phoebe-2 gerekse de EXOFAST-v2 Monte-Carlo Markov Chain (MCMC) analizlerine dayandıkları için yüksek hesaplama gücüne şiddetle ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle EXOFAST-v2, günlerce hesaplamaları sürdürdükten sonra başta uyarı vermediği halde, RAM yetersizliği gibi nedenlerle hata verebilmektedir. Neredeyse tüm analizlerimizde yaşadığımız bu durum, ancak bağımsız çalışan zincir sayısını ve iterasyonları azaltmak ya da parallel tempering gibi kompleks algortmaları kullanmamak yoluyla aşılabilmektedir. Ancak bu da saçılmalar üzerindeki belirsizlikleri malesef arttırmaktadır. Nihai parametreler üzerindeki belirsizlikler de bu saçılmalardan bir miktar etkilenebilmektedir. TÜBİTAK'ın TRUBA platformuyla sunduğu küme bilgisayar hizmetlerine üye olunarak erişim sağlanmış durumdadır. Ancak EXOFAST-v2'nin gerek lisanslı ve ücretli bir yazılım geliştirme ortamı olan IDL dili üzerinde çalışması, gerekse de birden fazla işlemcide parallel çalışmak için kodlanmamış olması kodun küme bilgisayarlarda çalışmasını zorlaştırmaktadır. IDL'in ücretsiz, ancak kısıtlı bazı versiyon ya da GDL gibi varyantları kullanılarak bu sorun giderilmeye çalışılmışsa da sonuca projenin kapandığı şu ana kadar ulaşılabilmiş değildir. Bu amaçla kodun yazarı Jason Eastman ile sık sık iletişim kurulmuş, yardımları alınmış, ama yine de proje süresi içerisnde bu konuda başarıya ulaşılamamıştır. Bu yöndeki çalışmalar sürmektedir. Exofast-v2 ile geçiş modeli yapmak isteyecek araştırmacılara önerimiz, öncelikle işlemcisi hızlı (mümkünse 9. nesil i7), yüksek önbelleğe sahip (32 GB) ve mutlaka sold state disk (SSD) üzerinde çalışan bilgisayarları tercih etmeleridir. İterasyon sayısı (niter) sisteme göre 15000 – 50000 arasında verilebilir. 50 ile 100 adımdan sadece biri (nthin) alınarak RAM

üzerindeki yük azaltılabilr. Işık eğrilerinin sayısı en iyileri seçilerek, ortalama ışık eğrileri kullanılarak, nokta sayısından feragat edilerek azaltılabilir. 3 ile 4, yüksek duyarlılıklı ve zaman çözünürlüğü odak dışı gözlem tekniği gereği yüksek olmayan ışık eğrisinin analizi iyi bir sistem üzerinde 4-5 gün arasında modellenebilmektedir. Işık eğrileri ne kadar duyarlı ve kararlı, sayıları ne kadar az ve seyrek, başlangıç parametreleri ne kadar gerçekçi ve üzerlerindeki belirsizlikler ne kadar küçükse o kadar hızlı, doğru ve duyarlı sonuçlara ulaşılabilir.

5.6. Proje Çıktıları

2013 Ocak ayında TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'nin 2500 m rakımda, Bakırlıtepe / Antalya yerleşkesinde konuşlandırılmış bulunan 1 metre birincil ayna çaplı T100 teleskobunun odak dışı çalıştırılması prensibine dayalı olarak başlayan ötegezegen geçiş eğrilerinin duyarlı takip gözlemleri 2013'ten bu yana çeşitli proje başlıkları altında sürmektedir. 15 Mart 2017 tarihinde bu projenin 116F350 proje numarası ile TÜBİTAK tarafından 3001 Ar-Ge projesi kapsamında desteklenmesiyle hız kazanan projenin sonuçları her şeyden önce T100'ün takip gözlemleri açısından potansiyelini açıkça ortaya koymuştur.

Gözlemler ve analizler ile bazı tayfsal verilerin elde edilmesinde yaşanan tüm olumsuzluklara karşın projenin başarıyla tamamlandığı ve sonuçlarının SCI kapsamındaki dergilerde yayınlanabilir olduğu görüşündeyiz. Bu amaçla öncelikle HAT-P-19'un analizleri yayına hazırlanmaktadır. Sistemin literatürdeki tüm ışık eğrilerinin de T100 gözlemleri ile birlikte değerlendirilerek geçiş zamanları değişimi (TTV) analizinin de bulunacağı makale çalışması son aşamasına gelmiş durumdadır ve yüksek etki çarpanlı bir bilimsel dergiye gönderilecektir. Daha sonra XO-3'ün yayınlanması planlanmıştır. Ancak tayfsal analizin tarafımızca yapılması hedefinden vazgeçilmemesi adına Subaru arşivinden tayfsal veriyi kullanıma sunmaları beklenmektedir. Bu konuda başarısız olunması durumunda XO-3 bu çalışmadaki analiz sonuçlarına dayalı olarak yayına hazırlanacaktır. WASP-52 için Phoebe-2 kodu ile leke modeline yönelik çalışmalar sürmektedir. Bu tür bir modelin TRUBA sunucularında yapılabileceği düşünülmektedir. Sistemin geometrik parametreleri ile Phoebe-2 modelini üreten bir kod yazılmış, leke parametrelerinin olasılık dağılımlarını MCMC yöntemiyle hesaplayan bir kod üzerinde de halen çalışılmaktadır. HAT-P-20 için ise geçiş zamanları değişimi analizine şiddetle ihityaç duyulmaktadır. Bu konuda da deneyim edinen grubumuz, manyetik etkinlik kaynaklı olduğu bu değişimleri de kısa zaman içerisinde analiz edip, bu porjede elde edilen sonuçlarla birlikte yayınlamayı planlamıştır.

Ayrıca bu sonuçlar, 2 yıl boyunca proje kapsamında aldıkları yüksek lisans burslarıyla desteklenen yüksek lisans öğrencileri Burak Keten ve Selçuk Yalçınkaya'nın Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı'nda 2018-2019

Bahar dönemi sonunda savunacakları yüksek lisans tezleriyle daha detaylı olarak sunulacak, proje kapsamında yapılan tüm yayın ve tezlerde TÜBİTAK'a bu projeye verdiği destek için teşekkür edilecektir.

Şu ana kadar projenin ulaştığı ön sonuçlar ve gözlem yöntemine ilişkin genel bir değerlendirme 1-2 Mart 2018 tarihleri arasında Yıldız Teknik Üniversitesi / İstanbul 'da International Occultation and Timing Associations / Middle East Branch tarafından düzenlenen "8th Workshop on Occultation & Eclipses" isimli çalıştayda proje çalışanlarınca sözlü tam metinli bildiri (Baştürk 2018) ve poster (Yalçınkaya 2018, Keten 2018b) bildirileri ile sunulmuştur. Ayrıca proje yıldızlarının bazı tayfsal analizleri 3-7 Eylül 2018 tarihleri arasında Kayseri'de düzenlenen 21. Ulusal Astronomi Kongresi'nde proje bursiyerlerince kısa sözlü bildiri olarak sunulmuştur. Tablo 5.5'te proje çıktıları özetlenmiştir.

Tablo 5.5. Proje çıktı bilgileri

Yayın Türü	Hazırlık Aşamasında (adet)	Hakem Sürecinde (adet)	Kabul edildi (adet)	Yayınlandı (adet)
SCI kapsamında bilimsel makale	4	-	-	-
Uluslararası sözlü / tam metinli bildiri	-	-	-	1
Uluslararası poster bildiri	-	-	-	-
Ulusal sözlü / kısa bildiri	-	-	2	-

Projemize verdiği destek için TÜBİTAK'a ve çeşitli başlıklar ve proje numaraları altındaki gözlem projelerimize verdikleri gözlemsel destek nedeniyle TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'ne teşekkürü bir borç biliriz.

6. KAYNAKLAR

Adams, E.R., Dupree, A.K., Kulesa, C., McCarthy, D. 2013. “Adaptive Optics Images. II. 12 Kepler Objects of Interest and 15 Confirmed Transiting Planets, The Astronomical Journal, Volume 146, Issue 1, article id. 9, 5

Alibert, Y., Mordasini, C., Benz, W. 2011. “Extrasolar planet population synthesis. III. Formation of planets around stars of different masses”, Astronomy and Astrophysics, 526, A63

Alibert, Y., Carron, F., Fortier, A., Pfyffer, S., vd. 2013. “Theoretical models of planetary system formation: mass vs. semi-major axis”, Astronomy & Astrophysics, 558, A109

Alonso, R., Brown, T. M., Torres, G., Latham, D. W., Sozzetti, A., Mandushev, G., Belmonte, J. A., Charbonneau, D., Deeg, H. J., Dunham, E. W., O'Donovan, F. T., Stefanik, R. P. 2004. “TrES-1: The Transiting Planet of a Bright K0 V Star”, The Astrophysical Journal, 613, L153

Alsubai, K. A., Parley, N. R., Bramich, D. M., Horne, K., Collier Cameron, A., West, R. G., Sorensen, P. M., Pollacco, D., Smith, J. C., Fors, O. 2013, “The Qatar Exoplanet Survey”, Acta Astronomica, 63, 465

Andreasen, D. T., Sousa, S. G., Tsantaki, M., Teixeira, G. D. C., Mortier, A., Santos, N. C., Suárez-Andrés, L., Delgado-Mena, E., Ferreira, A. C. S., 2017. “SWEET-Cat update and FASMA. A new minimization procedure for stellar parameters using high-quality spectra”, Astronomy & Astrophysics, Volume 600, id.A69, 12 pp

Asplund, M., Grevesse, N., Sauval, A.J., ve Scott, P. 2009. “The Chemical Composition of the Sun”, Annual Review of Astronomy & Astrophysics, vol. 47, Issue 1, pp.481-522

Bakos, G., Noyes, R. W., Kovács, G., Stanek, K. Z., Sasselov, D. D., Domsa, I. 2004. “Wide-Field Millimagnitude Photometry with the HAT: A Tool for Extrasolar Planet Detection”, The Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 116, 266

Bakos, G., Hartman, J., Torres, G. 2011. “HAT-P-20b-HAT-P-23b: Four Massive Transiting Extrasolar Planets” The Astrophysical Journal, 742, 116

Barge, P., Alonso, R., Deleuil, M., vd. 2007, “Starting the first transit survey from space with the CoRoT satellite”, European Planetary Science Congress 2007, Proceedings of a conference held between 20-24 August, 2007 in Potsdam, Germany. Online at http://meetings.copernicus.org/epsc2007, p.562

Barnes, S. A. 2007. “Ages for Illustrative Field Stars Using Gyrochronology: Viability, Limitations, and Errors”, The Astrophysical Journal, 669, 1167

Baştürk, Ö., Hinse, T. C., Özavcı, İ., Tezcan, C. T., Şenavcı, H. V., Burdanov, A., Y&örükoğlu, O., Orhan, R., Selam, S. O. 2014. “High precision defocused observations of planetary transits”, Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso, 43, 402

Baştürk, Ö.,Hinse, T.C., Özavcı,İ, Yörükoğlu, O., vd. 2015. “Defocused Observations of Selected Exoplanet Transits with T100 in TÜB˙ITAK National Observatory of Turkey (TUG) “, Living Together: Host Stars, Planets, and Binaries Conference, September 8-12, 2015, Litomysl, Czech Republic, ASP Conference Series, 496, 370

Boisse, I., Eggenberger, A., Santos, N. C., vd. 2010. “The SOPHIE search for northern extrasolar planets. III. A Jupiter-mass companion around HD 109246”, Astronomy and Astrophysics, 523, A88

Batalha, N. 2014. “Exploring exoplanet populations with NASA's Kepler Mission”, Proceedings of the National Academy of Sciences, 111, 12647

Batygin, K., Stevenson, D. J., Bodenheimer, P. H. 2011. “Evolution of Ohmically Heated Hot Jupiters”, The Astrophysical Journal, 738, 1

Benz, W,, Ida, S., Alibert, Y., Lin, D., Mordasini, C. 2014. “Planet Population Synthesis”, Protostars and Planets VI, Henrik Beuther, Ralf S. Klessen, Cornelis P. Dullemond, and Thomas Henning (eds.), University of Arizona Press, Tucson,.p69

Blanco-Cuaresma, S., Soubiran, C., Heiter, U., Jofre, P., 2014, “Determining stellar atmospheric parameters and chemical abundances of FGK stars with iSpec” Astronomy & Astrophysics, Volume 569, id.A111, 14 pp

Bodenheimer, P., Laughlin, G., Lin, D. N. C. 2003. “On the Radii of Extrasolar Giant Planets”, The Astrophysical Journal, 592, 555

Borucki, W. J., Koch, D., Basri, G., vd. 2010. “Kepler Planet-Detection Mission: Introduction and First Results”, Science, 327, 977

Boss, A.P. 1997. “Giant planet formation by gravitational instability”, Science, 276, 1836

Bouchy, F., Hébrard, G., Udry, S., vd. 2009. “The SOPHIE search for northern extrasolar planets . I. A companion around HD 16760 with mass close to the planet/brown-dwarf transition”, Astronomy and Astrophysics, 505, 2, 853

Brewer, J., Fischer, D.A., Valenti, J.A., Piskunov, N. 2016. “VizieR Online Data Catalog: Extended abundance analysis of cool stars”, ApJS, 225, 32

Bruntt, H., Bedding, T. R., Quirion, P.-O., Lo Curto, G., Carrier, F., Smalley, B., Dall, T. H., Arentoft, T., Bazot, M., Butler, R. P. 2010. “Accurate fundamental parameters for 23 bright solar-type stars”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 405, 1907

Bruntt, H., Deleuil, M., Fridlund, M., Alonso, R., Bouchy, F., Hatzes, A., Mayor, M., Moutou, C., Queloz, D. 2010. “Improved stellar parameters of CoRoT-7. A star hosting two super Earths”, Astronomy and Astrophysics, 519, A51

Castelli, F., Kurucz, R.L. 2004, “New Grids of ATLAS9 Model Atmospheres” Modelling of Stellar Atmospheres” the Astronomical Society of the Pacific, 2003., 20

Catala, Claude, PLATO Consortium. 2008, “PLATO: PLAnetary Transits and Oscillations of stars, Journal of Physics: Conference Series, 118, 012040

Chabrier, Gi., Baraffe, I. 2007. “Heat Transport in Giant (Exo)planets: A New Perspective”, The Astrophysical Journal, 661, L81

Chen, G., Pallé, E., Nortmann, L., Murgas, F., Parviainen, H., Nowak, G. 2017. “The GTC exoplanet transit spectroscopy survey. VI. Detection of sodium in WASP-52b's cloudy atmosphere”, Astronomy & Astrophysics, 600, L11

Choi, J., Dotter, A., Conroy, C., vd. 2016. “Mesa Isochrones and Stellar Tracks (MIST). I. Solar-scaled Models”, The Astrophysical Journal, 823, 102

Claret, A. 2004. “A new non-linear limb-darkening law for LTE stellar atmosphere models III. Sloan filters: Calculations for -5.0 ≤ log [M/H] ≤ +1, 2000 K ≤ Teff ≤ 50 000 K at several surface gravities”, Astronomy and Astrophysics, 428, 1001

Collier Cameron, A., Wilson, D. M., West, R. G., vd. 2007. “Efficient identification of exoplanetary transit candidates from SuperWASP light curves”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 380, 1230

Collins, Karen A., Kielkopf, John F., Stassun, Keivan G., Hessman, Frederic V. 2017. “AstroImageJ: Image Processing and Photometric Extraction for Ultra-precise Astronomical Light Curves”, The Astronomical Journal, 153, 77, 13

Demory, B. O., Seager, S. 2011. “Lack of Inflated Radii for Kepler Giant Planet Candidates Receiving Modest Stellar Irradiation”, The Astrophysical Journal Supplement, 197, 12

Djupvik, A. A., Andersen, J. 2010. “The Nordic Optical Telescope”, Highlights of Spanish Astrophysics V, Astrophysics and Space Science Proceedings, ISBN 978-3-642-11249-2. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, p. 211

Dotter, A. 2016. “MESA Isochrones and Stellar Tracks (MIST) 0: Methods for the Construction of Stellar Isochrones”, The Astrophysical Journal Supplement Series, 222, 1, 8

Doyle, A. P., Davies, G. R., Smalley, B., Chaplin, W. J., Elsworth, Y. 2014. “Determining stellar macroturbulence using asteroseismic rotational velocities from Kepler”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 444, 3592

Eastman, J., Gaudi, B. S., Agol, E. 2013. “EXOFAST: A Fast Exoplanetary Fitting Suite in IDL”, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 125, 923, 84

Eastman, J. 2017. “EXOFASTv2: Generalized publication-quality exoplanet modeling code”, Astrophysics Source Code Library, record ascl:1710.003

Ekström, S., Georgy, C, Eggenberger, P., vd. 2012. “Grids of stellar models with rotation. I. Models from 0.8 to 120 M⊙ at solar metallicity (Z = 0.014)”, ., Astronomy & Astrophysics, 537, A146

Esposito, M., Covino, E., Desidera, S. 2017. “The GAPS Programme with HARPS-N at TNG. XIII. The orbital obliquity of three close-in massive planets hosted by dwarf K-type stars: WASP-43, HAT-P-20 and Qatar-2” Astronomy & Astrophysics, Volume 601, id.A53, 16 pp

Fabrycky, D. C., Winn, J. N. 2009. “Exoplanetary Spin-Orbit Alignment: Results from the Ensemble of Rossiter-McLaughlin Observations”, The Astrophysical Journal, 696, 1230

Fischer, D. A., Valenti, J. 2005. “The Planet-Metallicity Correlation”, The Astrophysical Journal, 622, 1102

Ford, Eric B. 2006. “Improving the Efficiency of Markov Chain Monte Carlo for Analyzing the Orbits of Extrasolar Planets”, The Astrophysical Journal, 642, 505

Forgan, D., Rice, K. 2013. “Towards a population synthesis model of objects formed by self-gravitating disc fragmentation and tidal downsizing”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 432, 3168

Fortney, J. J., Marley, M. S. 2007. “Analysis of Spitzer Spectra of Irradiated Planets: Evidence for Water Vapor?”, The Astrophysical Journal, 666, L45

Frandsen, S., & Lindberg, B. 1999, in Astrophysics with the NOT, ed. H. Karttunen & V. Piirola (Piikkio, Finland: Univ. Turku, Tuorla Observatory), 71

Fressin, F., Torres, G., Charbonneau, D., Bryson, S. T., Christiansen, J., Dressing, C. D., Jenkins, J. M., Walkowicz, L. M., Batalha, N. M. 2013. “The False Positive Rate of Kepler and the Occurrence of Planets”, The Astrophysical Journal, 766, 81

Fürész, G., Szentgyorgyi, A. H., Meibom, S. 2008. “Precision of Radial Velocity Surveys using Multiobject Spectrographs — Experiences with Hectochelle”, Precision Spectroscopy in Astrophysics, Proceedings of the ESO/Lisbon/Aveiro Conference held in Aveiro, Portugal, 11-15 September 2006. Edited by N.C. Santos, L. Pasquini, A.C.M. Correia, and M. Romanielleo. Garching, Germany, 2008 pp. 287-290

Gaia Collaboration, 2016. “The Gaia mission”, Astronomy and Astrophysics, 595 pp, A1

Gaia Collaboration, A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, C. Babusiaux and C. A. L. Bailer-Jones, 2018b. “Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties”, Astronomy & Astrophysics, Volume 616, id.A1, 22 pp

Galvagni, M., Mayer, L. 2014. “Early evolution of clumps formed via gravitational instability in protoplanetary discs: precursors of Hot Jupiters?”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 437, 2909

Garai, Z., Pribulla, T., Hambalek, L., “Affordable echelle spectroscopy of the eccentric HAT-P-2, WASP-14, and XO-3 planetary systems with a sub-meter-class telescope” Astronomische Nachrichten, Volume 338, Issue 1, pp. 35-48

Gazak, J. Z., Johnson, J. A., Tonry, J., Dragomir, D., Eastman, J., Mann, A. W., Agol, E. 2012. “Transit Analysis Package: An IDL Graphical User Interface for Exoplanet Transit Photometry”, Advances in Astronomy, vol. 2012, id. 697967

Gilmore, G., Randich, S., Asplund, M., Binney, J., Bonifacio, P., Drew, J., Feltzing, S., Ferguson, A., Jeffries, R., Micela, G. ve diğer 266 ortak yazar, 2012. “The Gaia-ESO Public Spectroscopic Survey”, The Messenger, 147, 25

Gonzalez, G. 1997. “The stellar metallicity-giant planet connection”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 285, 403

Granta, V., Nascimbeni, V., Piotto, G. 2014. “TASTE IV: Refining ephemeris and orbital parameters for HAT-P-20b and WASP-1b” Astronomische Nachrichten, Vol.335, Issue 8, p.797

Gray, D. F. 2008. “The observation and analysis of stellar photospheres”, 3rd edn., Cambridge University Press), 507

Guillot, T., Showman, A. P. 2002. “Evolution of “51 Pegasus b-like" planets”, Astronomy and Astrophysics, 385, 156

Hartman, J. D., Bakos, G. Á., Sato, B., vd. 2011. “HAT-P-18b and HAT-P-19b: Two Low-density Saturn-mass Planets Transiting Metal-rich K Stars”, The Astrophysical Journal, 726, 52

Hasegawa, Y., Pudritz, R. E. 2013. “Planetary Populations in the Mass-Period Diagram: A Statistical Treatment of Exoplanet Formation and the Role of Planet Traps”, The Astrophysical Journal, 778, 78

Hébrard, G., Bouchy, F., Pont, F., vd. 2008. “Misaligned Spin-Orbit in the XO-3 Planetary System”, Astronomy and Astrophysics, 488, 2, 763

Hébrard, G., Collier Cameron, A., Brown, vd. 2013. “WASP-52b, WASP-58b, WASP-59b, and WASP-60b: Four new transiting close-in giant planets”, Astronomy and Astrophysics, 549, A134

Hekker, S., Meléndez, J. 2007. “Precise radial velocities of giant stars. III. Spectroscopic stellar parameters”, Astronomy and Astrophysics, 475, 1003

Hellary, P., Nelson, R. P. 2012. “Global models of planetary system formation in radiatively-inefficient protoplanetary discs”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 419, 2737

Hinkel, N., Unterborn. C., Galvez. R. 2018, “A Recommendation Algorithm to Predict Giant Exoplanet Host Stars Using Stellar Elemental Abundances” eprint arXiv:1805.12144

Hirano, Teruyuki., Narita, Norio., Sato, Bun’ei., “Further Observations of the Tilted Planet XO-3: A New Determination of Spin-Orbit Misalignment, and Limits on Differential Rotation” Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 63, Issue 6, p.L57-L61

Honeycutt, R. K. 1992. “CCD ensemble photometry on an inhomogeneous set of exposures”, Astronomical Society of the Pacific, 104, 676, 435

Howard, A. W., Marcy, G. W., Bryson, S. T., vd. 2012. “Planet Occurrence within 0.25 AU of Solar-type Stars from Kepler”, The Astrophysical Journal Supplement, 201, 15

Ida, S., Lin, D. N. C. 2004a. “Toward a Deterministic Model of Planetary Formation. I. A Desert in the Mass and Semimajor Axis Distributions of Extrasolar Planets”, The Astrophysical Journal, 604, 388

Ida, Shigeru, Lin, D. N. C. 2004b. “Toward a Deterministic Model of Planetary Formation. II. The Formation and Retention of Gas Giant Planets around Stars with a Range of Metallicities”, The Astrophysical Journal, 616, 567

Ida, Shigeru, Lin, D. N. C. 2005. “Toward a Deterministic Model of Planetary Formation. III. Mass Distribution of Short-Period Planets around Stars of Various Masses”, The Astrophysical Journal, 626, 1045

Ida, Shigeru, Lin, D. N. C. 2008a. “Toward a Deterministic Model of Planetary Formation. IV. Effects of Type I Migration”, The Astrophysical Journal, 673, 487

Ida, Shigeru, Lin, D. N. C. 2008b. “Toward a Deterministic Model of Planetary Formation. V. Accumulation Near the Ice Line and Super-Earths”, The Astrophysical Journal, 685, 384

Ida, Shigeru, Lin, D. N. C. 2010. “Toward a Deterministic Model of Planetary Formation. VI. Dynamical Interaction and Coagulation of Multiple Rocky Embryos and Super-Earth Systems around Solar-type Stars”, The Astrophysical Journal, 719, 810

Ida, S., Lin, D. N. C., Nagasawa, M. 2013. “Toward a Deterministic Model of Planetary Formation. VII. Eccentricity Distribution of Gas Giants”, The Astrophysical Journal, 775, 42

Johnson, J.A., Aller, K. M., Howard, A. W., Crepp, J. R. 2010. “Giant Planet Occurrence in the Stellar Mass-Metallicity Plane”, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 122, 905

Kane, S. R., Ciardi, D. R., Gelino, D. M., von Braun, K. 2012. “The exoplanet eccentricity distribution from Kepler planet candidates”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 425, 757

Keten, B., 2018. “Ötegezegen Geçişlerinin Odak Dışı Gözlemleri”, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Semineri

Kirk, J., Wheatley, P. J., Louden, T., Littlefair, S. P., Copperwheat, C. M., Armstrong, D. J., Marsh, T. R., Dhillon, V. S. 2017. “Transmission spectroscopy of the inflated exoplanet WASP-52b, and evidence for a bright region on the stellar surface”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 631, 2922

Krull, C.H., McCullogh, P.R., Burke, C.J., 2008. “XO-3b: A Massive Planet in an Eccentric Orbit Transiting an F5 V Star” The Astrophysical Journal, Volume 677, Number 1

Kupka, F. G., Ryabchikova, T. A., Piskunov, N. E., Stempels, H. C., Weiss, W. W. 2000. “VALD-2 -- The New Vienna Atomic Line Database”, Baltic Astronomy, 9, 590

Kurucz, R. 1993. “SYNTHE Spectrum Synthesis Programs and Line Data”, SYNTHE Spectrum Synthesis Programs and Line Data. Kurucz CD-ROM No. 18. Cambridge, Mass.: Smithsonian Astrophysical Observatory, 1993.

Levenberg, K., 1944. “A method for the solution of certain non-linear problems in least squares”, Quarterly of Applied Mathematics 2 (1944), 164-168

Liu, K., Bi, S.-L., Li, T.-D., Liu, Z.-E., Tian, Z.-J., Ge, Z.-S. 2014. “Precise determination of fundamental parameters of six exoplanet host stars and their planets”, Research in Astronomy and Astrophysics, 14, 1447

Louden, Tom, Wheatley, Peter J., Irwin, Patrick G. J., Kirk, James, Skillen, Ian, 2017. “A precise optical transmission spectrum of the inflated exoplanet WASP-52b”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 470, 742

Lovis, C., Mayor, M., Pepe, F., Queloz, D., Udry, S. 2008. “Pushing Down the Limits of RV Precision with HARPS”, ASP Conference Series, 398, 455

Machalek, Pavel., Greene, Tom., McCullough, Peter R. 2010. “Thermal Emission and Tidal Heating of the Heavy and Eccentric Planet XO-3b” The Astrophysical Journal, Volume 711, Issue 1, pp. 111-118

Maciejewski, G., Stangret, M., Ohlert, J., Basaran, C. S., Maciejczak, J., Puciata-Mroczynska, M., Boulanger, E. 2018. “New transit timing observations for GJ 436 b, HAT-P-3 b, HAT-P-19 b, WASP-3 b, and XO-2 b”, Information Bulletin on Variable Stars, 6243, 1

Marquardt, W. M., 1963. “An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters”, Society for Industrial and Applied Mathematics, Vol 11, No 2

Magain, P. 1984 “A comment on systematic errors in determinations of microturbulent velocities”, Astronomy and Astrophysics, 134, 189

Mallonn, M., von Essen, C., Weingrill, J., Strassmeier, K. G., Ribas, I., Carroll, T. A., Herrero, E., Granzer, T., Claret, A., Schwope, A. 2015. “Transmission spectroscopy of the inflated exo-Saturn HAT-P-19b”, Astronomy & Astrophysics, 580, A60

Mancini, L., Southworth, J., Ciceri, S., Tregloan-Reed, J., Crossfield, I., Nikolov, N., Bruni, I., Zambelli, R., Henning, Th. 2014. “VizieR Online Data Catalog: Light curves of Qatar-2 transit events (Mancini+, 2014)”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 443, 2391

Mancini, L., Southworth, J., Raia, G., vd. 2017. “Orbital alignment and star-spot properties in the WASP-52 planetary system”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 465, 843

Mandel, K., Agol, E. 2002 “Analytic Light Curves for Planetary Transit Searches” The Astrophysical Journal, Volume 580, Issue 2, pp

Maxted, P. F. L., Anderson, D. R., Collier Cameron, A., vd. 2011. “WASP-41b: A Transiting Hot Jupiter Planet Orbiting a Magnetically Active G8V Star”, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 123, 547

Mayor, M., Queloz, D. 1995. “A Jupiter-mass companion to a solar-type star”, Nature, 378, 355

McCullough, P. R., Stys, J., Valenti, J., Fleming, S., Janes, K., Heasley, J. 2004. “The XO Project to Find Transiting Hot Jupiters: The First Year's Data”, American Astronomical Society Meeting 205, Bulletin of the American Astronomical Society, 36, 1566

Meléndez, J., Asplund, M., Gustafsson, B., Yong, D. 2009. “The Peculiar Solar Composition and Its Possible Relation to Planet Formation”, The Astrophysical Journal Letters, 704, L66

Miguel, Y., Brunini, A. 2008. “Core instability models of giant planet accretion and the planetary desert”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 387, 463

Miguel, Y., Brunini, A. 2009. “Core instability models of giant planet accretion - II. Forming planetary systems”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 392, 391

Miller, N., Fortney, J. J. 2011. “he Heavy-element Masses of Extrasolar Giant Planets, Revealed”, The Astrophysical Journal Letters, 736, L29

Mordasini, C., Alibert, Y., Benz, W. 2009a. “Extrasolar planet population synthesis. I. Method, formation tracks, and mass-distance distribution”, Astronomy and Astrophysics, 501, 1139

Mordasini, C., Alibert, Y., Benz, W. 2009b. “Extrasolar planet population synthesis. II. Statistical comparison with observations”, Astronomy and Astrophysics, 501, 1161

Mordasini, C., Alibert, Y., Benz, W., Klahr, H., Henning, T. 2012. “Extrasolar planet population synthesis. IV. Correlations with disk metallicity, mass, and lifetime”, Astronomy and Astrophysics, 541, A97

Mordasini, C. 2013. “Luminosity of young Jupiters revisited. Massive cores make hot planets”, Astronomy & Astrophysics, 558, 113

Mowlavi, N., Eggenberger, P., Meynet, G., Ekström, S., Georgy, C., Maeder, A., Charbonnel, C., Eyer, L. 2012. “Stellar mass and age determinations. I. Grids of stellar models from Z = 0.006 to 0.04 and M = 0.5 to 3.5 M_{solar}“, Astronomy & Astrophysics, 541, A41

Mullally, F., Coughlin, J. L., Thompson, S. E. 2015. “Planetary Candidates Observed by Kepler. VI. Planet Sample from Q1--Q16 (47 Months)”, The Astrophysical Journal Supplement Series, 217, 31

Nutzman, Philip A., Fabrycky, Daniel C., Fortney, Jonathan J. 2011. “Using Star Spots to Measure the Spin-orbit Alignment of Transiting Planets “, The Astrophysical Journal Letters, 740, L10

Pasquini, L., Döllinger, M. P., Weiss, A., Girardi, L., Chavero, C., Hatzes, A. P., da Silva, L., Setiawan, J. 2007. “Evolved stars suggest an external origin of the enhanced metallicity in planet-hosting stars”, Astronomy and Astrophysics, 473, 979

Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., & Flannery, B. P. 1992, Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing (2nd ed., Cambridge: Cambridge Univ. Press)

Pepper, J., Gould, A., Depoy, D. L., 2004. “KELT: The Kilodegree Extremely Little Telescope”, THE SEARCH FOR OTHER WORLDS: Fourteenth Astrophysics Conference. AIP Conference Proceedings, 713, 185

Piskunov, N. E., Kupka, F., Ryabchikova, T. A., Weiss, W. W., Jeffery, C. S. 1995. “VALD: The Vienna Atomic Line Data Base”, Astronomy and Astrophysics Supplement, 112, 525

Pollacco, D. L., Skillen, I., Collier Cameron, A., vd. 2006. “The WASP Project and the SuperWASP Cameras”, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 118: 1407–1418

Pollack, J. B., Hubickyj, O., Bodenheimer, P., Lissauer, J. J., Podolak, M., Greenzweig, Y. 1996. “Formation of the Giant Planets by Concurrent Accretion of Solids and Gas”, Icarus, 124, 62

Ribas, I., Miralda-Escudé, J. 2007. “The eccentricity-mass distribution of exoplanets: signatures of different formation mechanisms?”, Astronomy and Astrophysics, 464,.779

Ricker, George R., Winn, Joshua N., Vanderspek, R., vd. 2015, “Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS)”, Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 1, 014003

Ryabchikova, T., Piskunov, N., Kurucz, R. L., Stempels, H. C., Heiter, U., Pakhomov, Y., Barklem, P. S. 2015. “A major upgrade of the VALD database”, Physica Scripta, 90, 054005

Schlegel, David J., Finkbeiner, Douglas P., Davis, M., 1998. “Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds”, The Astrophysical Journal, Volume 500, Issue 2, pp. 525-553

Seager, S., Deming, D. 2010. “Exoplanet Atmospheres”, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 48, 631

Shen, Yue, Turner, E. L. 2007. “On the Eccentricity Distribution of Exoplanets from Radial Velocity Surveys”, The Astrophysical Journal, 685, 553

Sousa, Sérgio G., Andreasen, Daniel T., 2018. “Tutorial: Measuring Stellar Atmospheric Parameters with ARES+MOOG”, Asteroseismology and Exoplanets: Listening to the Stars and Searching for New Worlds, Astrophysics and Space Science Proceedings, Volume 49. ISBN 978-3-319-59314-2. Springer International Publishing AG, 2018, p. 275

Southworth, J., Hinse, T. C., Jørgensen, U. G., vd. 2009. “High-precision photometry by telescope defocusing - I. The transiting planetary system WASP-5”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 396, 1023

Sun, Leilei., Gu, Shenghong., Wang, Xiaobin. 2017. “Refined System Parameters and TTV Study of Transiting Exoplanetary System HAT-P-20” The Astronomical Journal, Volume 153, Issue 1, article id. 28, 11 pp

Tanrıverdi, T.; Başẗurk, Ö., 2016. “Abundance analysis of the supergiant stars HD 80057 and HD 80404 based on their UVES Spectra”, New Astronomy, Volume 47, p. 46-56

Takeda, Y., Sato, B., Murata, D. 2008. “Stellar Parameters and Elemental Abundances of Late-G Giants”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 60, 781

Thommes, E.W., Matsumura, S., Rasio, F. A. 2008. “Gas Disks to Gas Giants: Simulating the Birth of Planetary Systems”, 321, 814

Tsantaki, M., Sousa, S. G., Adibekyan, V. Zh., Santos, N. C., Mortier, A., Israelian, G. 2013. “Deriving precise parameters for cool solar-type stars. Optimizing the iron line list”, Astronomy & Astrophysics, 555, A150, 11

Torres, G., Andersen, J., Giménez, A., 2010. “Accurate masses and radii of normal stars: modern results and applications”, The Astronomy and Astrophysics Review, 18, 67

Tsantaki, M., Sousa, S.G., Santos, N.C. 2014. “Spectroscopic parameters for solar-type stars with moderate-to-high rotation. New parameters for ten planet hosts” Astronomy & Astrophysics, Volume 570, id.A80, 14 pp

Tregloan-Reed, Jeremy, Southworth, John, Tappert, C. 2013. “Transits and starspots in the WASP-19 planetary system”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 428, 3671

Tregloan-Reed, Jeremy, Southworth, John, Burgdorf, M., vd. 2015. “Transits and starspots in the WASP-6 planetary system”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 450, 1760

Udry, S., Santos, N. C. 2007. “Statistical Properties of Exoplanets”, Annual Review of Astronomy & Astrophysics, 45, 397

Valenti, J.A., Piskunov, N. 1996. “Spectroscopy made easy: A new tool for fitting observations with synthetic spectra” Astronomy and Astrophysics Supplement, v.118, p.595-603

Winn, Joshua N., Johnson, John Asher., Fabrycky, Daniel. 2008. “On the Spin-Orbit Misalignment of the XO-3 Exoplanetary System” The Astrophysical Journal, Volume 700, Issue 1, pp. 302-308

Winn, J. N., Holman, M. J., Torres, G., vd. 2008. “The Transit Light Curve Project. IX. Evidence for a Smaller Radius of the Exoplanet XO-3b” The Astrophysical Journal, Volume 683, Issue 2, pp. 1076-1084

Wolszczan, A., Frail, D. A. 1992. “A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12”, Nature, 355, 145

Wong, Ian., Knutson, Heather A., Cowan, Nicolas B., Lewis, Nikole K. 2014. “Constraints on the Atmospheric Circulation and Variability of the Eccentric Hot Jupiter XO-3b” The Astrophysical Journal, Volume 794, Issue 2, article id. 134, 12 pp

Yalçınkaya, S., 2018. “Ötegezegen Geçiş Işık Eğrisi Modelleri”, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Semineri

Yi, Sukyoung, Demarque, Pierre, Kim, Yong-Cheol, Lee, Young-Wook, Ree, Chang H., Lejeune, Thibault, Barnes, S. 2001. “Toward Better Age Estimates for Stellar Populations: The Y^2 Isochrones for Solar Mixture”, The Astrophysical Journal Supplement Series, 136, 417

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Dr. Öğr. Üyesi ÖZGÜR BAŞTÜRK
Proje No:	116F350
Proje Başlığı:	Seçilmiş Ötegezegen Sistemlerinin Temel Parametrelerinin Yeniden Belirlenmesi
Proje Türü:	3001 - Başlangıç AR-GE
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	TANER TANRIVERDİ
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ANKARA Ü. FEN F. ASTRONOMİ VE UZAY BİLİMLERİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/03/2017 - 15/03/2019
Onaylanan Bütçe:	89480.0
Harcanan Bütçe:	57642.33
Öz:	Ötezegenler, Güneş?ten başka yıldızlara kütle çekimle bağlı gezegenlere verilen isimdir. Teknolojik imkanların ve bilgi birikiminin gelişimi neticesinde ilk ötegezegen keşifleri 1990?lı yılların başlarında yapılabilmiştir. İlk keşiflerden bu yana geçen yaklaşık 25 senede sayıları 4000?ü aşan ötegezegen keşfedilmiştir. Keşfedilen ötegezegenler külte, yarıçap, yoğunluk, yörünge dönemi ve dış merkezliliği gibi temel parametreler bakımından büyük bir çeşitlilik göstermektedir. Mevcut gezegen oluşum senaryoları bu çeşitlilik için bütünsel bir açıklama getirememektedir. Keşif yöntemlerinin yanlılıkları nedeniyle çok sayıda örneği keşfedilmiş olan sıcak-Jüpiter ve sıcak-Satürnler, gezegen sistemlerinin oluşum ve dinamiği kuramlarının önünde önemli bir problem olarak durmaktadırlar. Yıldızlarına çok yakın, Satürn kütlesinden, kahverengi cüce kütle limitine (~ 13 Jüpiter kütlesi) kadar kütleye sahip bu dev gaz gezegenler, barınak yıldızları tarafından şiddetle ışıtılmakta ve ısıtılmaktadırlar. Bu nedenle yarıçapları genişlemiş ve büyük bölümünün yoğunlukları düşüktür. Ancak yoğunluğu önemli ölçüde yüksek örnekler de bulunmaktadır. Bu tür cisimlerin bulundukları yerlerde oluşmuş olmaları olası görünmemekle birlikte sistemin iç taraflarına zaman içinde göç ettikleri düşünülmektedir. Kuramsal çalışmalar ancak parametreleri doğru ve duyarlı olarak belirlenmiş bir örnek uzayına dayalı olarak ilerlediğinde bütünsel bir açıklamaya ulaşabilirler. Ancak ötegezegenlerin keşifleri ile duyurulmaları arasında geçen çok kısa sürede, rekabet nedeniyle detaylı analiz ve gözlemler yapılamayabilmektedir. Bu nedenle literatürde bu türden yeterli sayıda duyarlı ışık eğrisi gözlemi bulunmayan ve detaylı analizlerin yapılamadığı ötegezegen sistemlerinin takip gözlemlerinin yapılarak, temel parametrelerinin güncel yöntemlerle yeniden elde edilmesi önem arz etmektedir. Bu noktadan hareketle bu proje bağlamında seçilen ötegezegenlere ilişkin temel parametreler; Türkiye?nin gözlem olanakları kullanılarak elde edilen ışık eğrilerinin, gezegen kaynaklı dikine hız değişiminin yarı genliğinin, arşiv tayflarınını analizi sonucu elde edilen temel atmosfer parametrelerinin ve yıldızların tayfsal enerji dağılımlarının birlikte analiziyle elde edilmiştir. Proje bağlamında seçilen sıcak-Jüpiter ve sıcak-Satürn türü ötegezegenlerin (HAT-P-19b, HAT-P-20b, WASP-52b, XO-3b) parametreleri yüksek bir duyarlılıkla, çözümlerde yerel minimumlara sıkışmadan global bir minimuma yakınsamayı sağlayan modern istatistiksel tekniklerin (Monte-Carlo Markov Chain, MCMC) ve tüm verinin birlikte bu bağlamda analizini sağlayan modern bilgisayar kodları (Exofast-v2, Eastmann 2017 ve kendi geliştirdiğimiz yardımcı kodlar) kullanılarak hesap edilmiştir. Sonuçlar literatüre çıkan en duyarlı ve detaylı modern analiz sonuçları olarak yerini alabilecek düzeydedir. Ayrıca proje kapsamında desteklenen ve yüksek lisans tezlerini bu konuda savunmak üzere hazırlanan yüksek lisans öğrencileri yoluyla ülkenin gökbilimini bu hızla gelişen alanındaki yetişmiş insan kaynağına katkı sağlanması da amaçlanmıştır.
Anahtar Kelimeler:	yıldızlar: temel parametreler, ötegezegenler, geçiş, odak dışı ışık ölçüm
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

TÜBİTAK

Projeden Yapılan Yayınlar:	1- 5 Years of Defocused Observations of Exoplanet Transits withT100: Timing Perspective (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 2- 5 Years of Defocused Observations of Exoplanet Transits withT100: Timing Perspective (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 3- Transit Timing Variations of XO-3b (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum), 4- Transit Timing Variations of HAT-P-19b (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum),

TÜBİTAK