

T.C.

ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜNEŞ SİSTEMİ DIŞINDAKİ YILDIZLAR ETRAFINDA GEZEGEN ARAŞTIRMALARI: ÖTEGEZEGENLER VE ÖZELLİKLERİ

Murat Emre YILDI

Fizik Anabilim Dalı

ÇANAKKALE

T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜNEŞ SİSTEMİ DIŞINDAKİ YILDIZLAR ETRAFINDA GEZEGEN ARAŞTIRMALARI: ÖTEGEZEGENLER VE ÖZELLİKLERİ

Murat Emre YILDI
Fizik Anabilim Dalı

Tezin Sunulduğu Tarih: **26/08/2019**

Tez Danışmanı:
Prof. Dr. Faruk SOYDUGAN

ÇANAKKALE

Murat Emre YILDI tarafından Prof. Dr. Faruk SOYDUGAN yönetiminde hazırlanan ve **26/08/2019** tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan "**Güneş Sistemi Dışındaki Yıldızlar Etrafında Gezegen Araştırmaları: Ötegezegenler ve Özellikleri**" başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Fizik Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ

Prof. Dr. İsmail TARHAN ……

Başkan

Prof. Dr. Faruk SOYDUGAN ……

Üye

Prof. Dr. M. Can AKAN ……

Üye

Prof.Dr. Levent GENÇ

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

Sıra No:……

İNTİHAL (AŞIRMA) BEYAN SAYFASI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belirttiğimi beyan ederim.

Murat Emre YILDI

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen, her daim yardımcı olan danışman hocam Prof. Dr. Faruk SOYDUGAN'a, analizler ve görselleştirme konusunda destek olan Dr. Çağlar PÜSKÜLLÜ'ye ve Dr. Fahri ALİÇAVUŞ'a, araştırmalarım süresince destek veren eşim Merve İŞLER YILDI'ya ve hayatımın her aşamasında yanımda olan aileme çok teşekkür ederim.

Murat Emre YILDI

Çanakkale, Ağustos 2019

SİMGELER VE KISALTMALAR

M_j	Jüpiter'in kütlesi: 1,90x10^{27} kg
R_j	Jüpiter'in yarıçapı: 7,15x10^{7} m
M_g	Gezegen kütlesi
R_g	Gezegen yarıçapı
$M_\odot$	Güneş'in kütlesi: 1,99x10^{30} kg
$R_\odot$	Güneş'in yarıçapı: 6,69x10^{8} m
$R_\oplus$	Dünya'nın Yarıçapı: 6,37x10^{6} m
$M_\star$	Yıldız kütlesi
$R_\star$	Yıldız yarıçapı
T_e	Yıldızın etkin sıcaklığı
T_{eq}	Gezegenin denge sıcaklığı
e	Yörüngenin dış merkezliliği
i	Yörüngenin eğimi
[Fe/H]	Demir'in Hidrojen bolluğuna oranı
P	Yörünge dönemi
a	Yörüngenin yarı-büyük ekseninin uzunluğu
b	Geçişin etki parametresi
u	Lineer kenar kararma katsayısı
ρ_j	Jüpiter'in yoğunluğu
$\rho_\star$	Yıldız yoğunluğu
ρ_g	Gezegen yoğunluğu
pc	Parsek
$log\ g$	Logaritmik yüzey çekim ivmesi
ΔF	Işık akısı değişimi
BJD	Barisentrik Jülyen günü
VLT	Çok Geniş Teleskop (İng. Very Large Telescope)
TTV	Geçiş Zamanı Değişimi
NASA	Amerikan Ulusal Uzay Ajansı
HST	Hubble Uzay Teleskobu
TESS	Ötegezegen Araştırma Uydusu (İng. Transiting Exoplanet Survey Satallite)

ESPRESSO	Echelle Spectrograph for Rocky Exoplanet and Stable Spectroscopic Observation
OGLE	Optical Gravitational Lensing Experiment
O-C	Gözlenen - Hesaplanan
χ^2	ki-kare
CCD	Charge Coupled Device
K	Kelvin derece
T_{eq}	Denge sıcaklığı
t_t	Toplam geçiş süresi
t_f	Gezegenin tüm diskinin yıldızın önünde olduğu süre

ÖZET

GÜNEŞ SİSTEMİ DIŞINDAKİ YILDIZLAR ETRAFINDA GEZEGEN ARAŞTIRMALARI: ÖTEGEZEGENLER VE ÖZELLİKLERİ

Murat Emre YILDI
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi
Danışman : Prof. Dr. Faruk SOYDUGAN
26/08/2019, 67

Bu çalışmada, Kepler uzay teleskobu ile gözlenmiş üç ötegezegenli yıldız sisteminin (Kepler-7, Kepler-426 ve Kepler-435) geçiş ışık eğrilerinin analizleri yapıldı. Her bir sistem için seçilen üç farklı tarih aralığında yapılmış geçiş gözlemleri ayrı ayrı analiz edildi ve bulunan sonuçların ağırlıklı ortalamaları alınarak geçiş model parametreleri hesaplandı. Ötegezegenlerin yıldızlarına ait bilgiler literatürden derlenerek, çalışılan gezegenlerin bazı temel parametreleri (kütle, yarıçap, yoğunluk vb.) hesaplanarak tartışıldı. Kepler-7b ve Kepler-426b ötegezegenlerinin oldukça sıcak, şişmiş Satürn benzeri olduğu, Kepler-435b'nin ise şişmiş, sıcak Jüpiter sınıfında olduğu görülmüştür. Ayrıca çalışma kapsamında, ötegezegenlerin ve yıldızlarının bazı parametrelerinin istatistik dağılımları oluşturularak yorumlanmıştır. Ötegezegenli yıldızların çoğunun anakol bandında yer aldıkları ve önemli bölümünün kütle ve yarıçapının Güneş'e benzer olduğu görülmektedir. Keşfedilen ötegezegenlerin yarısından fazlasının kütlesinin 1 Mj'den büyük olduğu ve yoğunluklarının ise çoğunlukla 2 g/cm^3'ten küçük olduğu ortaya çıkmıştır. Ötegezegenlerin denge sıcaklıklarının dağılımından, yarısından fazlasının 1000 K'den büyük sıcaklıkta olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar sözcükler: Ötegezegen, Geçiş Işık Eğrisi, Gezegen-Yıldız Sistemleri, Sıcak Jüpiterler

ABSTRACT

PLANET RESEARCH AROUND OTHER STARS BEYOND OUR SOLAR SYSTEM: EXOPLANETS AND THEIR PROPERTIES

Murat Emre YILDI
Çanakkale Onsekiz Mart University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Master of Science Thesis in Physics Science
Advisor : Prof. Dr. Faruk SOYDUGAN
26/08/2019, 67

In this study, the transit light curves of three exoplanet star system (Kepler-7, Kepler-425 and Kepler-435) observed with Kepler space telescope were analyzed. Transit observations made on three different date intervals selected for each system were analyzed separately and the transit model parameters were calculated by taking the weighted average of the results. The information about the stars of exoplanets was compiled from the literature and some basic parameters (mass, radius, density, etc.) of the planets studied were discussed. The exoplanets of Kepler-7b and Kepler-426b were quite hot, swollen Saturn-like, and Kepler-435b was swollen, hot Jupiter. In addition, the statistical distributions of some parameters of exoplanets and their stars were formed and interpreted within the scope of the study. It is seen that most of the exoplanet stars are in the main-sequence band and the mass and radius of the major part are similar to the Sun. It was seen that more than half of the discovered exoplanets had a mass greater than 1 Mj and their densities were usually less than 2 g/cm^3. The distribution of equilibrium temperatures of the exoplanets has shown that more than half of them are at temperatures greater than 1000 K.

Keywords: Exoplanets, Transit Light Curve, Planet-Star Systems, Hot Jupiters

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ SINAVI SONUÇ FORMU ii
İNTİHAL (AŞIRMA) BEYAN SAYFASI iii
TEŞEKKÜR iv
SİMGELER VE KISALTMALAR v
ÖZET vii
ABSTRACT viii
ŞEKİLLER DİZİNİ xi
ÇİZELGELER DİZİNİ xiv
BÖLÜM 1
GİRİŞ 1
1.1. Ötegezegenlerin Bazı Genel Bilgileri ve Tarihçeye Bakış 2
1.2. Ötegezegenlerin Sınıflandırılması 5
BÖLÜM 2
ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 8
2.1. Keşif Yöntemleri ve Tarihsel İnceleme 8
2.1.1. Görüntüleme Yöntemi 8
2.1.2. Dikine Hız Değişimleri 10
2.1.3. Geçiş Işık Eğrileri 14
2.1.4. Astronometri 18
2.1.5. Pulsar zamanları 20
2.1.6. Kütle Çekimsel Mercekleme 22
BÖLÜM 3
MATERYAL VE YÖNTEM 25
3.1. Kepler Gözlemleri 25
3.2. Yıldız-Ötegezegen Sistemlerinin Işık Eğrilerinin Analizleri 28
BÖLÜM 4
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA 33
4.1.Seçilen Sistemlerin Geçiş Işık Eğrilerinin Çözümleri 33
4.1.1.Kepler-7b 33
4.1.2. Kepler-426b 36
4.1.3. Kepler-435b 39
4.2. Ötegezegenli Yıldızların Bazı Temel Parametrelerinin Dağılımları 41
4.2.1. Kütle 41

4.2.2. Yarıçap……..…...……...……....42
4.2.3. Yüzey Çekim İvmesi……...43
4.2.4. Etkin Sıcaklık……..44
4.2.5. Uzaklık……46
4.3. Ötegezegenlerin Bazı Temel Parametre Dağılımları 46
4.3.1. Kütle……....47
4.3.2. Yörünge Dönemi.....47
4.3.3. Yörünge Basıklığı……...…….....…….…..……...48
4.3.4. Yarıçap.....49
4.3.5. Denge Sıcaklığı.....50
4.3.6. Yoğunluk.....51
BÖLÜM 5
SONUÇ VE ÖNERİLER..... 53
KAYNAKLAR 59
ÖZGEÇMİŞ I

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Kütle tabanlı ötegezegen sınıflaması (http://phl.upr.edu).....6
Şekil 1.2. Ötegezegenlerin ortalama sıcaklıklarını göre yapılan sınıflama……7
Şekil 2.1. Ötegezegenlerin yıllara göre farklı yöntemler kullanılarak ulaşılan keşif sayıları (https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu).....8
Şekil 2.2. Doğrudan görüntüleme yöntemi ile fotoğraflanmış gezegenler (saat yönünde yukarıdan aşağıya doğru) HR 8799 bcde (Marois ve ark. 2008), Fomalhaut b (Kalas ve ark., 2008), GJ 504 b (Kuzuhara ve ark., 2013), Dh 95086 b (Rameau ve ark., 2013), ROXs 42Bb (Curries ve ark., 2014) ve beta Pic b (Lagrange ve ark., 2010).……..……...10
Şekil 2.3. Güneş benzeri yıldız olan HD 32963 nin dikine hız değişimlerini gösteren grafik şekildeki gibidir. Veriler elde edilirken Keck-I teleskopu ve HIRES spektrometrisi kullanıldı, doppler kayması kaydedilerken sürekli kullanılan yöntem olan gözlenen yıldızın ışığından gelen iyot absorbsiyon spektrumları toplanarak oluşturulmuştur. (Roman ve ark., 2015)……..13
Şekil 2.4. M türü yıldızlarda farklı leke parametreleri üzerinden lekelerin ortaya çıkaracağı parlaklık (V-bandı) değişimine karşılık dikine hız dalgalanmalarının simülasyonu. Yeşil semboller gelişigüzel yerleşmiş lekeleri, kahverengi sembolleraktif enlemlerde bulunan lekeleri, açık ve koyu maviler ise ayrılmış, farklı leke alanlarına karşılık gelmektedir (Andersen ve Korhonen, 2015)…..14
Şekil 2.5. Bir ötegezegenin G ve M tayf türü olan ve anakolda bulunan yıldızının önünden geçerken oluşturduğu geçiş sentetik ışık eğrilerinin şekilsel değişimi (http://www.cfa.harvard.edu/~avanderb/tutorial/tutorial.htlm).....15
Şekil 2.6. Liverpool Teleskobuna bağlı RISE alıcı kamerası kullanılarak, 2009 yılında yapılan gözlemlerde elde edilen, HAT-P-3 sistemine ait yedi geçiş eğirisi gösterilmektedir. Işık eğrilerinin modellemesi, Markov-Chain Monte Carlo yaklaşımı ile yapılarak yıldız gezegen sistemini en iyi temsil eden geçiş parametreleri belirlenmiş ve şekildeki kuramsal sürekli eğriler elde edilmiştir.(Gibson ve ark., 2009)…….....……..15
Şekil 2.7. KOI-784.01' in geçiş zamanlarının çevrimsel değişimi ve TTV analizi ile sonucu oluşturulmuş kuramsal (sürekli eğri) temsili (Kane ve ark., 2019)……...17
Şekil 2.8. Kepler -1625b sisteminin Kepler ve Hubble Uzay Teleskobu (HST) tarafından elde edile geçiş gözlem verileri (noktalar) ve öteuydu eklenerek elde edilen model (sürekli) eğrileri (Teachey ve Kipping, 2018)……18
Şekil 2.9. Beta Pictoris yıldızının etrafındaki gezegeni nedeniyle çizdiği yalpamala hareketiyle (kahverengi), gökada kütle merkezi etrafındaki hareketinin (kesikli çizgi) bileşimi. Bu çizim dört yıllık ölçümlere dayalı olup ayrıca Dünya'nın Güneş etrafındaki yıllık hareketini de içermektedir (http://sci.esa.int/gaia/58798-astrometric-measurements-to-detect-exoplanets/).....20
Şekil 2.10. NY Virginis örten çift sisteminin O-C diyagramı ve O-C değişimlerinin (mavi noktalar) iki ötegezegenin neden olduğu ışık-zaman etkileriyle (siyah sürekli eğri) temsiliyle kuramsal eğriden olan farklar (Song ve ark., 2019)……21
Şekil 2.11. Gözlenen kaynağın önündeki yıldızın oluşturduğu kütle-çekim alanı nedeniyle parlama (sol panel) ve öndeki yıldızın etrafında dolanan ötegezegenin oluşturduğu mercekleme nedeniyle ortaya çıkan ani parlama (sağ panel) gösterilmektedir (https://exoplanets.nasa.gov/resources/53/extrasolar-planet-detected-by-gravitational-microlensing/.....22

Şekil 2.12. Farklı yöntemlerle keşfedilen ötegezegenlerin uzaklık-kütle dağılımları (Tsapras, 2018)……..23
Şekil 2.13. OGLE-2005-BLG-390 kaynağı ve etrafındaki ötegezegenin oluşturduğu mikro-mercekleme etkisi. Farklı renklerdeki ölçümler, farklı teleskoplarla yapılan gözlemlere karşılık gelmektedir (Beaulieu ve ark., 2006)…..... 24
Şekil 3.1. Kepler Uzay teleskobu (http://www.kepler.arc.nasa.gov/downloading.html).... 26
Şekil 3.2. Kepler uzay teleskobunun gökyüzünde gözlem yaptığı ve ötegezegen keşfi için taradığı bölge, 42 CCD kameraya da karşılık gelen küçük dikdörtgenlerle gösterilmiştir (https://www.nasa.gov/pdf/189566main_Kepler_Mission.pdf).....26
Şekil 3.3. Aralık 2017 itibariyle Kepler uzay teleskobu verileriyle ve diğer araştırmalarda keşfedilen ötegezegenlerin yörünge dönemlerine karşı yarıçaplarının dağılımı (https://www.nasa.gov/content/kepler-multimedia)..... 27
Şekil 3.4. 1995-2018 yılları arasında farklı keşif yöntemlerinin oransal etkinliği gösterilmektedir (Deeg ve Alonso, 2018)……..... 28
Şekil 3.5. Yıldızının önünden geçen bir ötegezegenin geçiş geometrisi. Yörüngenin üstten ve yandan görünüşü verilmiştir. En altta ise geçiş sırasındaki akı (F) değişim grafiği gösterilmektedir (Deeg ve Alonso, 2018) 29
Şekil 3.6. WINKEPLER yazılımı ile modellenmiş KOI 13.01 yıldız-ötegezegen sisteminin geçiş ışık eğrisi (Rhodes ve Budding, 2014) ……..... 31
Şekil 4.1. Kepler-7b'nin üç farklı tarihi için gözlemsel ve kuramsal ışık eğrilerinin karşılaştırılması. a şekilinde 09.04.2013 – 11.05.2013, b şeklinde 13.01.2013 – 08.04.2013, c şeklinde ise 12.10.2012 – 11.01.2013 tarihleri arasındaki gözlem verileri kullanılmıştır.. 36
Şekil 4.2. Kepler-426 ötegezegenli yıldızını dikine hız değişimleri (Hebrard ve ark. 2014). 37
Şekil 4.3. Kepler-426b'nin üç farklı tarih için gözlemsel ve kuramsal geçiş ışık eğrilerinin karşılaştırılması. a şeklinde 24.06.2010 – 22.09.2010, b şeklinde 13.05.2009 – 15.06.2009, c şeklinde ise 18.09.2009 – 16.12.2009 tarihleri arasındaki gözlem verileri kullanılmıştır.. 38
Şekil 4.4. Kepler-435'nin dikine hız değişimi, yörünge çözümünden elde edilmilş kuramsal (sürekli eğri) temsili ve fark dağılımı (Almenara ve ark., 2015)..... 39
Şekil 4.5. Kepler-435b'nin gözlemsel ve kuramsal geçiş ışık eğrilerinin karşılaştırılması. a şeklinde 13.05.2009 – 15.06.2009, b şeklinde 21.03.2010 – 23.06.2013, c şeklinde ise 24.06.2010 – 22.09.2010 tarihleri arasındaki gözlem verileri alınmıştır.....40
Şekil 4.6. Ötegezegenli yıldızların kütle dağılımları..... 42
Şekil 4.7. Ötegezegenli yıldızların yarıçap dağılımları 43
Şekil 4.8. Ötegezegenli yıldızların yüzey çekim ivmelerinin (log g; cm/s2 biriminde) dağılımları..... 44
Şekil 4.9. Ötegezegenli yıldızların etkin sıcaklık (Te) dağılımları. 45
Şekil 4.10. Yıldız-ötegezegen sistemlerinin uzaklık (d<1000 pc olanlar için) dağılımları. 46
Şekil 4.11. Kütleleri 5 Mj'den küçük olan ötegezegenlerin kütle dağılımları..... 47
Şekil 4.12. Yörünge dönemi 50 günden küçük olan ötegezegenlerin dönem dağılımları... 48
Şekil 4.13. Ötegezegenlerin yörünge basıklığının dağılımı..... 49
Şekil 4.14. Ötegezegenlerin yarıçap (R<2 Rj için) dağılımları. 50
Şekil 4.15. Ötegezegenlerin denge sıcaklıklarının dağılımları. 51
Şekil 4.16. Ötegezegenlerin yoğunluk dağılımları..... 52
Şekil 5.1. Ötegezegenlerin, 25 Temmuz 2019 tarihi itibariyle, kümülatif keşif sayıları (https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/). 54

Şekil 5.2. Bazı ötegezegenlerin kütle-yarıçap dağılımları ve gezegen sınıflamaları (https://www.nap.edu/catalog/25187/exoplanet-science-strategy). 56

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 3.1. WINFITTER yazılımının model üretirken kullandığı parametre listesi ve anlamları (https://michaelrhodesbyu.weebly.com/astronomy.html).....32
Çizelge 4.1. Seçilen ötegezegenli sistemlerin analiz edilen geçiş ışık eğrilerinin zaman aralıkları……34
Çizelge 4.2. Kepler-7'nin geçiş eğrisi analizinde WINFITTER uygulaması için kullanılan girdi parametreleri…….....34
Çizelge 4.3. Kepler-7b'nin geçiş ışık eğrilerinin analiz sonuçları……...35
Çizelge 4.4. Kepler-7b, Kepler-426 ve Kepler-435 sisteminin yıldız ve gezegeninin bazı temel parametreleri. Yıldızların parametreleri NASA Ötegezegen Arşivi'den alınmıştır…….....37
Çizelge 4.5. Kepler-426b'nin geçiş ışık eğrilerinin analiz sonuçları…….....38
Çizelge 4.6. Kepler-435b'nin geçiş ışık eğrilerinin analiz sonuçları…….....40
Çizelge 4.7. Farklı tür gezegenler için yoğunluk aralıkları (Odrzywolek ve Rafelski, 2016)…….....51
Çizelge 5.1. Çalışılan ötegezegenler için hesaplanan bazı temel parametreler.....55

BÖLÜM 1
GİRİŞ

İnsanlığın cevabını en çok merak ettiği sorulardan biri Güneş Sistemi dışında yaşamın var olup olmadığıdır. Bu sorunun cevabının bulunmasında, Güneş Sistemi dışında benzer ve/veya farklı yıldız-gezegen sistemlerin varlığının keşfedilmesi önemli yer tutar. 30 yıl öncesine kadar sistemimiz dışında gezegen keşfi yapılamamıştı. Bunun en büyük nedenlerinden biri, çok büyük uzaklıkların yanında, yıldız ışığına göre gezegenlerden yansıyan ışığın çok çok zayıf olması ve bu nedenle ölçülememesidir. Artan teknoloji ve yüksek duyarlıklı alıcılar sayesinde Güneş Sistemi dışında yer alan ve dilimizde "ötegezegen" olarak adlandırılan cismin ilk keşfi 1990'lı yılların başında yapıldı. Bu tarihten günümüze kadar özellikle de son on yıl içinde, hassas uydu verilerinin de eklenmesi ile keşfedilen ötegezegen sayıları binlerle ifade edilmeye başlandı. Ötegezegen sayısının artışı ile beraber yıldız-gezegen oluşumlarına ilişkin beklenmeyen durumlarla karşılaşıldı.

Güneş Sistemi oluşumu, bulut çökmesi sonucu başlayan ve yıldız ile gezegen oluşumları ile devam eden bir süreçtir. Bizim sistemimiz incelendiğinde, yıldızlara yakın bölgelerde kayaç gezegenlere rastlanırken gaz gezegenlerin yıldızdan uzak bölgelerde yer aldığı görülür. Ek olarak, gezegenler yıldız etrafında çember veya çembere yakın yörüngelerde hemen hemen aynı düzlemde yörünge hareketleri yaparlar ve Güneş'ten yaklaşık 30 AB'den daha uzak bölgelerde gezegene rastlanılmaz. Ancak, bu bilgilerin aksine, hızlan artan keşiflerle birlikte, Güneş Sistemi oluşum modeli ile açıklanamayacak kadar çok sayıda gezegenli sistem bulundu. Böylece, gezegen sistemlerinin oluşum süreçleri farklı veri setleri ile sorgulanmaya ve yeni modeller geliştirilmeye başlandı. Bu tür araştırmalarda, keşfedilen gezegen sayıları arttıkça onların temel parametre dağılımlarının yıldızları ile birlikte incelenmesi de önem kazanmaktadır. Ötezegenlerin yörünge parametre istatistiklerinden, fiziksel ve geometrik parametre dağılımlarına, yıldızlarının salt parametrelerinden metal bolluklarının değişimine kadar geniş yelpazeye dayanacak analizler, ötegezegen ve hatta yaşam arayışlarını içeren çalışmalarda dikkate alınacak incelemeler olarak değerlendirilebilir.

Özellikle son 20 yıldır ivmelenen ötegezegen araştırmaları konusunda her yeni araştırma, değerlendirme, inceleme ve yorumlama, hızla artan veri birikimi nedeniyle ilerki çalışmalara yön verecek düzeyde olabilir. Bu tez çalışmasının da amaçlarından biri, hızla artan ötegezegen çalışmalarının güncel bir bakış altında uygulama, değerlendirme ve tartışmalarla incelenmesi olarak ortaya konulabilir.

1.1. Ötegezegenlerin Bazı Genel Bilgileri ve Tarihçeye Bakış

Dünya dışı yaşam arayışlarında en önemli ilerlemelerden biri olarak ötezegezen keşif ve incelemeleri gösterilebilir. Güneş Sistemi dışındaki gezegenler için keşifler ile birlikte "ötegezegen (exoplanet)" tanımı literatürde yer bulmuş ve Uluslararası Astronomi Birliği (IAU)" tarafından son olarak 2003 yılında yapılan düzenlemelerle belirli kriterler kapsamında bu tanım şekillenmiştir. Buna göre; ötezegenler yıldız veya yıldız kalıntıları etrafında yörünge hareketi yapan ve kütleleri Döteryum füzyon tepkimelerinin oluşma kütlesinin altında kütle değerlerine sahip (13 M_J olarak hesaplanmaktadır) cisimler olarak adlandırılmıştır. M.Ö. 300 yılında Epicurus'un Heredotus'a yazdığı mektupta, Dünya'ya benzeyen ve benzemeyen sayısız dünyalar olduğundan söz edilmesine karşın, ötegezegenlerin var olduğu çok uzun yıllar önce öngörülsede, ilk keşif 1992 yılında bir milisaniye pulsarı (PSR1257+12) etrafında bir ötegezegen için duyurulmuştur (Wolszccan ve Frail 1992). 1995 yılında ise, M. Mayor ve D. Queloz tarafından, ilk kez normal bir anakol yıldızı olan 51 Pegasi etrafında 0.47 M_J değerinde kütleye sahip bir gezegen keşfi yapıldı (Mayor ve Queloz, 1995). Bu tarihten bu yana, bugün itibariyle keşfedilen ötegezegen sayısı 4000'i aşmış durumdadır. Kepler'den sonra TESS uydusunun da keşifleri duyurulmaya başlandığından, bu sayının hızla artacağı öngörülmektedir.

Güneş Sistemi dışında yaşam arayışlarında en önemli basamaklardan biri de yaşamın meydana gelebileceği gezegenlerin varlığının araştırması olarak söylenebilir. Ötegezegen olarak adlandırılan gezegenlerin ilk anılmaya başlandığından bugüne kadar yaklaşık 100 yıldan fazla zaman geçti. Özellikle 1995 yılından itibaren artan çalışmalarla çok sayıda gezegen buluşu gerçekleştirildi. Sayısı bugünlerde 4000'i aşan ötegezegen sayısı ve belirlenen bazı parametreleri, onların Güneş Sistemi ve gezegenleri ile karşılaştırılmaları, benzerlik ve farklılıklarının tartışılması için önemli veritabanlarının oluşturulmasına yol açmıştır. Özellikle Kepler ve TESS uyduları tarafından yapılan oldukça duyarlı gözlemler ile kısa sürede fazla sayıda ötegezegen keşfedilmiş ve keşfedilmeye devam etmektedir. Yaşam arayışlarında en büyük ilerlemenin bu çerçevede olması, aynı zamanda ötegezegen araştırmalarının Güneş Sistemi'nin oluşumu, gelişimi ve evrimi ile ilgili önemli bilgiler taşıması bu çalışmanın önemini oldukça arttırmaktadır. Son yıllarda COROT, Kepler ve TESS gibi yüksek maliyetli uyduların bu alanda da araştırmalar yapması ve aynı zamanda yer üzerinde çok önemli teleskop ve alıcıların ötegezegen araştırmalarında yer alması konunun önemini başka bir açıdan ortaya koymaktadır.

Son yılların tartışmasız en popüler ve hızlı gelişen alanlarından birisi de ötegezegen çalışmalarıdır. Ötegezegeni Güneş sistemi'nin dışındaki bir yıldızın etrafında dolanan

gezegenlere verilen isimdir. Kendi yıldızları yanında oldukça sönük olan ötegezegenlerin doğrudan gözlenmesi çok zordur fakat yıldızının etrafında meydana getirdiği dolaylı değişiklikler sonucu varlıkları ortaya konulabilir. Ötegezegenler 19. yüzyılda astronomların araştırma konusu olmuştur. O dönemdeki astronomlar ötegezegenlerin ne kadar yaygın olduklarını ya da neye benzeyebilecekleri konusunda herhangi bir bilgiye sahip değildiler. Yer gözlemleriyle gezegen arama çalışmaları 1950'li yılların öncesinde başlamış olup ilk kullanılan yöntemler, bugün de yoğun kullanılan yıldızın, gezegenle oluşturdukları kütle merkezi etrafındaki hareketi sırasında ortaya çıkacak hız değişimlerinin belirlenmesine dayanmaktaydı. Yaklaşık 40 yıl devam eden ve çoğunlukla dikine hız değişimlerinin araştırılmasına dayanan araştırmalarda izlenen yöntem doğru olsa da teknolojik sınırlamalar ve veri analizinde yaşanan yetersizlikler genellikle m/s mertebesindeki değişimlerin ölçülmesinin önündeki önemli engellerdi. İlk ötegezegen kaynaklı dikine hız değişimi 1988 yılında Gama Cephei'nin gözlemlerinde elde edildiyse de, bu yıldızın etrafında 1.6 Jüpiter kütleli gezegen olduğu ancak 2003 yılında onaylandı (Hatzes ve ark., 2003). İlk ötegezegen keşfi (aslında üç ötegezegenli system) 1992 yılında, Dünya'dan 1000 ışık yılı uzaktaki, PSR1257+12 pulsarının etrafında radio astronomlar A. Wolszczan ve D. Frail tarafından keşfedildi (Wolszczan ve Frail, 1992). Bu gözlem tanımlanan ilk ötegezegen keşfi olmakla beraber doğası dolayısıyla olması beklenen ötegezegen kategorisinde yer almamaktadır. Çünkü, pulsarlar gibi küçük boyutlu, ölmüş yıldızların etrafında bulunabilecek gezegenlerin ya pulsarı oluşturan süpernova patlamasının kalıntılarının yeniden bir araya gelerek oluşturduğu ya da süpernovanın yıkıcı etkisinden kurtulan dev gezegenlerin taşlaşmış çekirdeklerinin daha yakın bir yörüngeye yerleşmiş halleri olabileceği düşünülmektedir. Anakol yıldızı etrafındaki ilk ötegezegen keşfi ise, 51 Peg yıldızının gözlemlerinden elde edilen dikine hız değişimleri kullanılarak, 1995 yılında gerçekleştirildi. Keşfedilen ötegezegen 51 Pegasi b olarak adlandırılmıştır. Güneş benzeri 51 Peg yıldızının etrafındaki ötegezegenin dört gün döneme sahip olduğu ve kütlesinin Jüpiter'in kütlesinin yarısı kadar olduğu belirlendi (Mayor ve Queloz, 1995). 51 Peg b ötegezegeni, yıldızına yakın dolanması, denge sıcaklığının büyük olması ve boyutunun Jüpiter'e yakın olması nedeniyle "sıcak Jüpiter" olarak adlandırılmıştır.

İlk ötegezegen olarak keşfedilip doğrulanan 51 Pegasi b nin keşfinden sadece 4 yıl sonra ilk ötegezegen sistemi olan ve çoklu gezegenleri de içeren 3 lü sistem olan *υ* And (Butler ve ark., 1999) dikine hız bileşeni yöntemi ile keşfedildi. Sonraki ikinci keşif 47 UMa etrafında dolanan gezegen (Fischer ve ark., 2002a) ve GJ 876 ın etrafında dolanan rezonans çifti gezegenlerin keşfi (Marcy ve ark., 2001) iki düzineden fazla sistemlerin keşif

habercisiydi. 200 pc deki ana yıldızları bilinen ötegezegenlerin %14'ünün çoklu gezegen sistemi olduğu bilinmektedir ve diğer %14'ü ise uzun süreli dikine hız değişim eğilimleri şeklinde çoklu sistem olduğuna dair kayda değer ipuçları göstermektedir (Wright ve ark., 2009).

Upsilon Andromedae çift yıldız sisteminin etrafında üç adet Jüpiter benzeri gezegen keşfedilmiştir ve keşif bugüne kadar bir ana kol yıldızı etrafında en çok gezegen bulunduran sistemdir (Butler ve ark., 1997).

Ötegezegen keşifleri, yer dışı yaşam olasılığının artmasıyla şiddetlenmiştir. Özellikle Kepler gözlemlerinden gelen keşifler ve şu anda devam eden TESS uydu verileriyle yapılan keşiflerle "yaşam bölgesinde" yer alan ötegezegenlerin sayısı 50'yi aşmıştır.

Bu yeni astronomi alanındaki çalışmalar iki ana süreç üzerine kurulmuştur. (i) yeni gezegen keşfetmek, bilinen gezegenlerle ilgili yeni gözlemler yapmak. (ii) ötegezegenlerin, ötegezegen sistemlerinin fiziksel ve dinamiksel süreçleri üzerinde çalışmak ve gezegenin yıldızıyla etkileşimlerini anlamak. Bu iki süreç üzerinde çalışabilmek için gezegenin karakteristiği ve yıldızı hakkında kesin bilgilere ve bu bilgilerle hazırlanmış iyi, kapsamlı kataloglara ihtiyaç vardır (Schneider ve ark., 2011). Son yirmi yılda kataloğumuzda bildiğimiz gezegen sayısı kendi güneş sistemimizde 8 gezegenden, farklı teknikler sayesinde binin üzerinde ötegezegen keşfiyle her geçen gün artmaktadır. (örneğin; Mayor ve Queloz, 1995; Charbonneau ve ark., 2000; Marois ve ark., 2008). Ötegezegenler en genç yıldızlardan son ana kol yıldızlarına ve alt güneşlerden orta kütleli yıldızların etrafında bulunabiliyorlar. (Kraus ve Ireland, 2012; Currie ve ark., 2014; Sato ve ark., 2003; Johnson ve ark., 2010). İstatistiksel çalışmalar ötegezegenlerin oluşumlarının ortak olduğunu ve yaklaşık yarısının güneş benzeri gezegenlerin yakınında olduğunu gösteriyor. (Howard ve ark., 2013). Keşfedilen ötegezegenler sayesinde dünyanın yapısıyla güneş sistemindeki gezegenlerin yapısının uyumluluk gösterdiğine dair önemli ipuçları sağlanmıştır.

Ötegezegenlerin nüfus sayımı büyük oranda tamamlanamadığı için bilgi eksiğimiz sürüyor. Keşfedilen gezegenlerin yüksek çoğunluğu Dünya dan büyük ve yörünge periyotu 100 günden az, daha seyrek rastlanılan grup ise geniş ayrılıkta büyük kütleli gezegenler olmak üzere büyük sınırlamalara sahibiz (Howard ve ark., 2012; Nielsen ve ark., 2013). Buna rağmen diğer tip gezegen sistemleri tamamen keşfedilmedi (bir kaç astronomik birimin ötesindeki gezegenler ve dünyanın yarıçapından küçük gezegenler) buna ek olarak ötegezegenlerin fiziksel özellikleri hakkında (yoğunluk, atmosfer özelliği, gezegen iç yapısı) bilgilerimiz oldukça zayıf ve bir çok durumdan dolayı kısıtlı. (Howard ve ark., 2013). Öyle ki 2005 yılına gelindiğinde keşif yapılan gezegen sayısı 183 iken 2010 yılı sonunda bu sayı

553'e, Ekim 2015 itibariyle 1970'e, Temmuz 2019'da ise 4010'a kadar yükselmiştir.

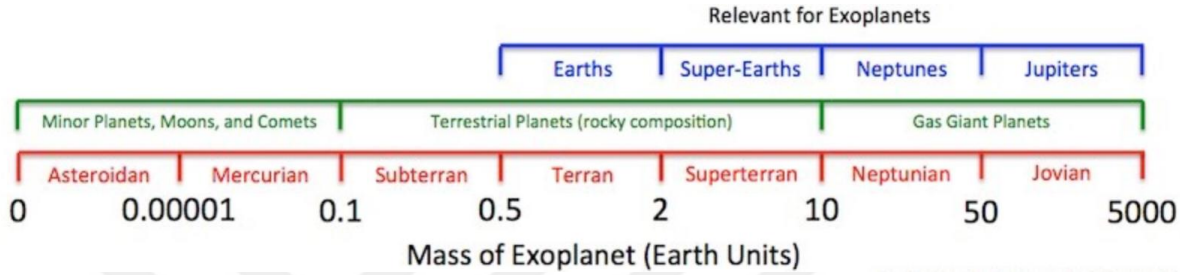
1.2. Ötegezegenlerin Sınıflandırılması

Güneş sistemi dışındaki gezegenler olarak adlandırılan ötegezegenler, bir yıldız ya da yıldız kalıntısı çevresinde dolanan kütlesi 13 Jüpiter kütlesinden küçük olan gök cisimlerine denir (Boss, 2007). Keşfedilen cismin ötegezegen olma kriteri ise; bir yıldız ya da yıldız sistemi etrafında dolanmalı, başka bir gezegen etrafında dolanmamalı, kütle çekiminin etkisiyle küresel yapıda olmalı ve yörüngesi başka cisimlerden temizlenmiş olmalıdır.

Bilim insanları, yıldızları sınıflamak için parlaklıklarına ve renklerine göre HR diyagramını oluşturmuşlardır. Bunun gibi gezegenlerin sınıflandırılmasında henüz böyle bir diyagram tam olarak yapılamamıştır. Kendi Güneş sistemimizde Güneş'e yakın kayaç gezegenler (Merkür, Venüs, Dünya, Mars ve astreoidler), gaz devleri (Jupiter ve Satürn), buz devleri (Uranüs ve Neptün) olmak üzere keşfedilen ötegezegenler de bu şekilde sınıflanmaya başlanmıştır (Lineweaver ve Robles, 2006).

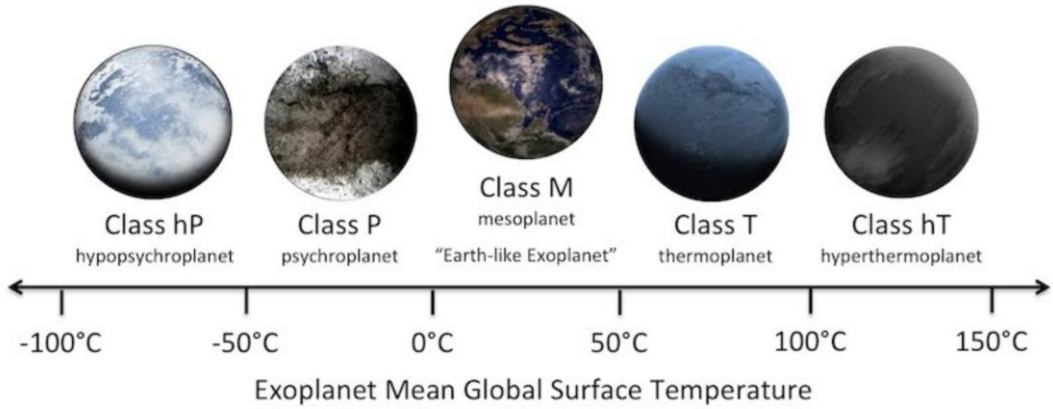
Ötegezegenlerin keşifleri arttıkça ve özellikle temel bazı parametreleri belirlendikçe sınıflama için kriterler ortaya konmaya başlandı. İlk karşılaştırma Güneş Sistemi gezegenleriyle olduğundan, özellikle kütle ve boyut kriteri üzerinden sınıflandırmalar geliştirildi. Keşfedilen ötegezegenlerin genellikle Jüpiter kütle ve boyutunda olması ve Yer benzeri gezegen bulma hedefi, sınıflandırma için Jüpiter ve Yer'i ön karşılaştırma parametreleri arasına yerleştirdi. Burada öncelikle kütle tabanlı sınıflandırmaya yer verilecektir. Bu kapsamda farklı araştırmacılar tarafından verilen sınıflandırmalarda ana sınıflar aynı olmak üzere ara sınıflarda farklılıklar görülmektedir (örneğin; Stern ve Levison, 2002; Lineweaer ve Robles, 2006). Burada, hem Güneş Sistemi gezegenleri veya berigezegenler hem de ötegezegenler için kullanılan ve "Gezegen Yaşanabilirlik Laboratuarı" tarafından hazırlanan ve "Yaşam Olasılığı Olan Ötegezegenler Kataloğu" temel alınarak yapılan, kütle kriterine göre sınıflama üzerinde durulmaktadır (http://phl.upr.edu). Kütlenin belirlenmesi için dikine hız değişimleri ve geçiş ışık eğri analizlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle tüm ötegezegenleri bu sınıfa yerleştirmek olası değildir. Şekil 1.1'den görüleceği üzere burada yedi sınıf (Asteroidan, Mercurian, Subterran, Terran, Superterran, Neptunian, Jovian) yer almaktadır. Bu alt sınıflar, üç ana sınıfta (Küçük gezegenler-doğal uydular-kuyruklu yıldızlar, kayaç yer benzeri gezegenler, gaz dev gezegenler) toplanmaktadır. Bu sınıflamalarda, özellikle gezegenler bölümü Yer, Süper-Yer, Neptünler ve Jüpiterler olarak da Güneş Sistemi gezegenleriyle ilişkilendirilmektedir. Son yıllardaki keşiflerde, kütlenin yanına sıcaklık parametresi de

getirilerek, sıcak Neptünler veya sıcak Jüpiterler gibi sınıflar da literatürde yer almaktadır. Sınıflamada, mini Yer, Yer benzeri ve Süper Yer sınıflamalarındaki sayı gittikçe artmakta olup "yaşam bölgesinde" olma olasılıkları yüksek ve kayaç gezegenler olduklarından, ilgi daha çok bu türler üzerinedir. Haziran 2019 itibariyle bu üç türde keşfedilen gezegen sayısı 50'yi aşmıştır (http://phl.upr.edu). Ancak, yıldız-gezegen sistemlerinin oluşum ve değişimlerinin anlaşılması için Neptün ve Jüpiter benzeri gezegenlerin de araştırılması önem kazandığından bu sınıflardaki araştırmalar da önemini korumaktadır.



Şekil 1.1 Kütle tabanlı ötegezegen sınıflaması (http://phl.upr.edu)

Yaşanabilir gezegen araştırmalarında gezegenin sıcaklığı da önemli parametrelerden olduğundan, bir sınıflama da ötegezegenin ortalama sıcaklığına göre yapılmıştır (http://phl.upr.edu). Şekil 1.2'de görüleceği üzere, ^{o}C üzerinden yapılan sınıflamada beş sınıf yer almaktadır (Class hP, P, M, T ve hT). Burada, "class M", yer benzeri yüzey sıcaklığına sahip gezegenler için verilen bir adlandırma olup "mesoplanet" sınıfı olarak geçmektedir. TESS uydusunun da hedeflerinde öncelikli olan bu gezegen sınıflarına ilgi artmakta olup, sıcaklık ve albedo belirlenmesi üzerine yeni gözlem ve analizler geliştirildikçe bu tür sınıflamalarda da yenilenmeler olacaktır.



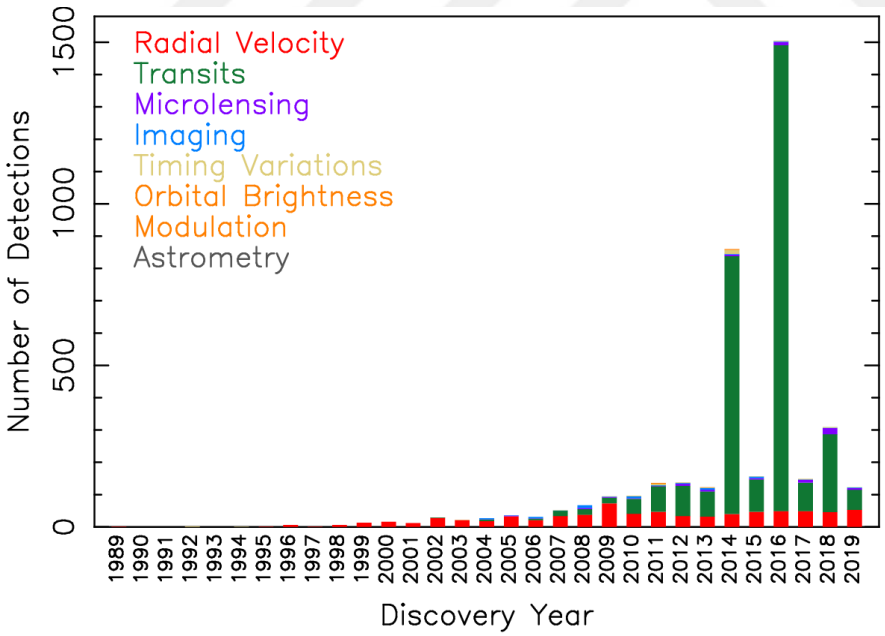
Şekil 1.2. Ötegezegenlerin ortalama sıcaklıklarına göre yapılan sınıflama (http://phl.upr.edu)

Ötegezegenlerin kütle ve yarıçapları belirlendiğinde, onların yoğunlukları kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Yoğunluk değerleri de onların kayaç veya gaz olup olmadıklarını ortaya koymaktadır. Odrzywolek ve Rafelski (2016), yoğunluğu temel alarak ötegezegenleri üç ana sınıfa ayırmıştır. İlk sınıf gaz, dev gezegenler olup Jüpiter, Satürn ve Uranüs benzeri özelliklere sahiptirler ve yoğunluk değerleri ağırlıklı olarak 0,7 g/cm^3 değerine yakın değerlerde elde edilmektedir. Bu gezegenlerin yoğunluk aralıkları ise 0,3-2,1 g/cm^3 arasında yer almaktadır. Kayaç gezegenler ise 3,6-13,4 g/cm^3 arasında yoğunluk değerlerine sahiptirler ve çoğunluğu Şekil 1.1'deki süper Yer türü gezegenlerdir. Son sınıf ise, "yozlaşmış" sınıf olarak adlandırılmış olup yoğunlukları 25-34 g/cm^3 aralığında bulunmaktadır ve bu nesneler kahverengi cücelerle eşleşmektedir.

BÖLÜM 2
ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Keşif Yöntemleri ve Tarihsel İnceleme

Ötegezegenlerin keşifleri yaklaşık 29 yıldır devam etmekte olup bu alanda yapılan çalışmalar, keşfedilme yöntemleri üzerinden takip edilebilir. Ötegezegen keşiflerinde her ne kadar geçiş ve dikine hız yöntemi ön sırada gelse de teknolojik gelişmeler ve uydu teleskop katkılarının artması, farklı yöntemleri de gündeme getirmiştir. Şekil 2.1'de yıllara göre farklı yöntemler kullanılarak yapılan ötegezegen keşif sayıları da özellikle Kepler uydu teleskobunun etkisini (2014 ve 2016 yıllarındaki keşifler) açıkça ortaya koymaktadır. Bunun yanında, mikro-mercekleme, farklı kaynaklar için zaman gecikmesi ölçümleriyle yapılan keşifler ve etkisi görülmeye başlanan Gaia astrometrik verileri, önümüzdeki yıllar için farklı özelliklerdeki ötegezenlerin keşiflerine yol açacaktır. Şu ana kadar ötegezegenlerin yaklaşık %77'si geçiş ışık eğrileriyle, %19'u dikine hız değişimleri, %2'si mikro-mercekleme yöntemleriyle keşfedilmiştir. Aşağıda ötegezegen keşiflerinde ve araştırmalarında yakalanan boyut, keşif yöntemleri üzerinden ele alınacaktır.



Şekil 2.1. Ötegezegenlerin yıllara göre farklı yöntemler kullanılarak ulaşılan keşif sayıları (https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu)

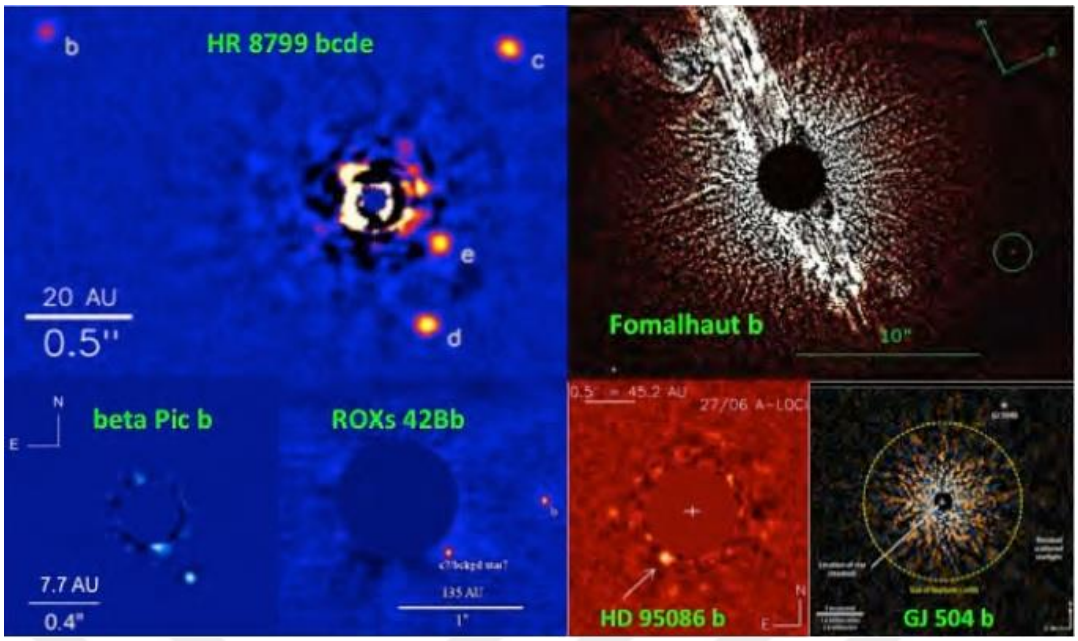
2.1.1. Görüntüleme Yöntemi

Gezegenler, enerji üretmediklerinden, yıldızlarından gelen ışığı yansıtırlar ve az miktarda da ısısal enerjileri uzaya yayılır. Güçlü yıldız ışıkları nedeniyle, ötegezegenlerin

doğrudan gözlenerek keşfedilmesi en zor yöntemlerden biridir. Bu nedenle, doğrudan görüntüleme tekniğinde, genellikle yapılmak istenen, yıldız ışığının kapatılması (koronograf benzeri aletler yardımıyla) yöntemi kullanılmaya çalışılır. Bunun yanında, bazı yıldız-gezegen sistemlerinde kızılöte bölgede yıldız ışığının toplam ışığa katkısı azaldığından, ötegezegenin görüntülenmesi olasıdır. Başka bir durum da, çok soğuk yıldızlar veya kahverengi cüceler etrafında, akı katkısı göreli olarak biraz artacak olan ötegezegenlerin görülme olasılığının artmasıdır. Örneğin, bir kahverengi cüce etrafında dolanan bir ötegezegen, hem doğrudan görüntülenerek hem de tayfsal gözlemlerle keşfedildi (Chauvin ve ark., 2004). Yakın gelecekte, gelişmiş koronograflarla Yer tabanlı büyük teleskoplarla özellikle kızılöte bölgede daha fazla ötegezegenin görüntüleneceği düşünülmektedir.

Doğrudan görüntüleme yöntemi ise yıldızından uzak ve genç gezegenler üzerinde (dikine hız ve transit yöntemine göre) çalışmamızı sağlar, şu ana kadar görüntülenen gezegenlerin büyük bir miktarı ~ 30-150 AB uzaklıkta güneşin kütlesinde daha büyük kütleli yıldızların etrafında dolanan kütleleri ~ 5-10 M_J arasında değişen gezegenlerdir. Büyük çoğunlukla bu gezegenler kendi yaydıkları termal ışınlarla keşfedilmiştir, sadece bir gezegen (ya da etrafındaki diskin) yansıttığı ışık sayesinde (Fomalhautb; Kalas ve ark., 2008) ve buna ek olarak sadece bir çoklu gezegen sistemi (HR 8799; Marois ve ark., 2008) şimdiye kadar keşfedildi. Son yıllardaki araştırmalarda görüntülenmiş birkaç ötegezegen görüntüsü Şekil 2.2'de görülebilir.

Yakın kızılötesi fotometrisi göstermektedir ki genç gezegenler yaşlı gezegenlere göre daha tozlu yada bulutlu olmaktadır, fakat aynı etkin sıcaklıktaki alan kahverengi cücelerde bu durum karşıtlık göstermektedir. (örneğin; Bowler ve ark., 2010; Currie ve ark., 2011). Yakın kızılötesinde alınan tayf da açıkça gösterir ki bu gibi düşük çekim etkisi olan kahverengi cücelere göre genç gezegen fotosferinde kalın yoğunlaşmış bulutlara ve zengin dengeye ulaşmamış karbon atomunun oluşmasına neden olur. (örneğin; Marley ve ark., 2012; Skemer ve ark., 2012, 2013). Yüksek spektral çözünürlükteki ötegezegen görüntüleri; HR 8799c deki benzer karbon ve oksijen bolluğu gezegenin oluşum süreci ile ilgili ipuçları vermektedir (Konopacky ve ark., 2013) ayrıca β Picb nin dönme periyodunu elde etmemizi sağlamaktadır (Snellen ve ark., 2014) ve GSC 06214, 00210 gezegeninin etrafında sürekli olarak gerçekleşen yığılma diskinin varlığı vurgulanmaktadır (Bowler ve ark., 2011).



Şekil 2.2. Doğrudan görüntüleme yöntemi ile fotoğraflanmış gezegenler (saat yönünde yukarıdan aşağıya doğru) HR 8799 bcde (Marois ve ark., 2008), Fomalhaut b (Kalas ve ark., 2008), GJ 504 b (Kuzuhara ve ark., 2013), HD 95086 b (Rameau ve ark., 2013), ROXs 42Bb (Currie ve ark., 2014) ve beta Pic b (Lagrange ve ark., 2010)

2.1.2. Dikine Hız Değişimleri

İlk ötegezegen yıldızının yalpalama hareketi sonucu keşfedilmiştir. Kütleli iki nesne birbirleri etrafında yörünge hareketi yaparken aslında iki cismin oluşturduğu bir kütle merkezi etrafında hareket ederler. Örnek olarak Güneş sistemimizde Jüpiter ve Satürn'ün kütleleri Güneşin yalpalama hareketi oluşturması için yeterlidir. Tüm gezegenlerin Güneşte oluşturduğu yalpalama hareketinin dikine hız genliği yaklaşık 13 m/s 'yeye karşılık gelirken sadece sistemimizin tek gezegeni Jüpiter olsaydı bu değer yaklaşık 12 m/s olacaktı (Marcy ve Butler, 1997).

Çok uzaktaki bir yıldız hakkındaki birçok bilgi, yıldızların fotometrik ve tayfsal gözlemlerinin analizinden elde edilebilir. Bir yıldızın etrafında bir ötegezegen varsa ve ortak kütle merkezi etrafında hareket ediyorlarsa, yıldızın dikine hız değişimleri ölçülebilir. Doppler etkisiyle tayf çizgilerindeki kaymalardan dikine hızlar belirlenir ve bu hızların değişimleri yörünge özelliklerini yansıtır. Aynı zamanda, yörünge hareketi yapan cisimlerin yörünge eğim açısına (i) bağlı olarak kütle fonksiyonları hesaplanabilir. Ancak gezegenin kütlesi yıldızına göre çok küçük olduğundan, tayf çizgi kaymaları ve buna bağlı olarak dikine hız değişimlerinin genliği çok küçük (genellikle m/s mertebesinde) olmaktadır. Bu nedenle, dikine hızlardan yapılacak keşiflerde büyük teleskoplara bağlı yüksek çözümleme

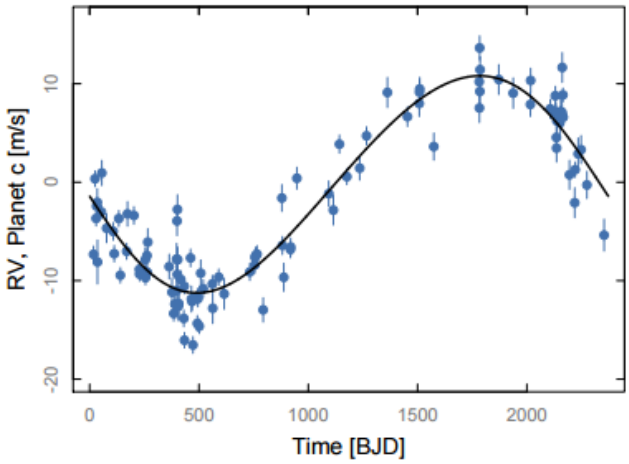
gücündeki tayfçekerlerle yüksek S/G (sinyalin gürültüye oranı) değerlerindeki tayflara ihtiyaç duyulur. Yörünge çözümlerinden, yörünge yarı-büyük eksen uzunluğu ve kütlenin, yörünge eğimine bağlı değerleri olan $a \sin i$ ve $m \sin^3 i$ değerleri bulunmaktadır. Eğer yörünge eğimi, geçiş ışık eğri analizlerinden elde edilemediyse, ancak büyük eğim açılarında (90 dereceye yakın), dikine hız değişimlerinin analizlerinden bu parametrelerin gerçek değerlerine yakın sonuçlar elde edilebilir. Ötegezegen çalışmalarında, kütle ve yoğunluk gezegenin temel özellikleri açısından oldukça önemli olduğundan, dikine hız değişimlerinin yanında geçiş eğrilerinin de analizi önem kazanmaktadır. Dikine hız değişimlerinin analizlerinden daha çok, denge sıcaklıkları daha büyük olan Jüpiter sınıfındaki cisimler keşfedilir. Bu cisimler yıldızına yakın, kütlesi Jüpiter büyüklüğünde ve daha büyük gaz cisimler olarak tanımlanır. Yıldızına yakın ve kütleleri de büyük olduklarından tayf çekerlerde dikine hız değişimleri kolayca saptanabilir. Bu nedenle, dikine hız analizlerinden keşfedilen gezegenlerin çok önemli bölümü yıldızına yakın yörüngelerde dolanan, kısa dönemli, sıcak ve Jüpiter kütleli gezegenler olarak karşımıza çıkmaktadır.

Echelle türü tayfçekerle dikine hız ölçümlerindeki hassasiyet 0,1 m/s seviyelerine yaklaşmaktadır. Güneş benzeri yıldız etrafındaki yaşanabilir bölgede Dünya kütleli gezegen keşfedebilmek için bu hassasiyette ölçümlere ihtiyaç vardır. Bu gibi araştırmaların sürdürülebilmesi için optik ve kızılötesi echelle tayfçekeri, TMT (Thiry Meter Telescope - Otuz Metrelik Teleskop) teleskobunda kullanılmak üzere yapılmaktadır. Bu sayede komşu yıldız sistemlerinde Dünya kütleli gezegenlerin nüfus sayımının tamamlanması için olanak sağlanacaktır. Bu gibi sistemlerden toplanan verilerle doğrudan görüntüleme yöntemi sayesinde devam eden ötegezegenin atmosferini karakterize etme programlarına önemli örnekler sağlanacaktır. Kepler Teleskopu 2009 da atıldığında ötegezegen sistemleri keşfinde baskın olan yöntem dikine hız yöntemiydi. 400'den fazla sistem 1995 ve 2009 tarihleri arasında bu yolla keşfedildi veya ötegezegen olduğu onaylandı (http://exoplanets.eu). Bu keşifler sırasında ilk on yıl içinde dikine hız ölçüm hassasiyeti 3-10 m/s den 1m/s'ye kadar geliştirildi.

Dikine hız yönteminde tayf türü FKG olan ana kol yıldızları etrafında dolanan ötegezegenleri bulmaya odaklanılmıştır. Ana yıldızın hızında kütle çekiminden meydana gelen tedirginlik, ötegezegenlerin kütlesiyle doğru orantılı fakat yörünge uzaklığıyla ters orantılı olduğundan, Kepler uydu gözlemleriyle birlikte, kısa sürede azımsanmayacak sayıda sıcak Jüpiter keşfinin yapılmasına neden olmuştur. Ötegezegen keşifleri devam ederken bazı önemli fiziksel özelliklere daha fazla önem verilmeye başlanıldı. Göze çarpan en iyi örnekler; gezegenlerin oluşumu ve yıldızının metalik bolluğu arasındaki korelasyon (Fisher

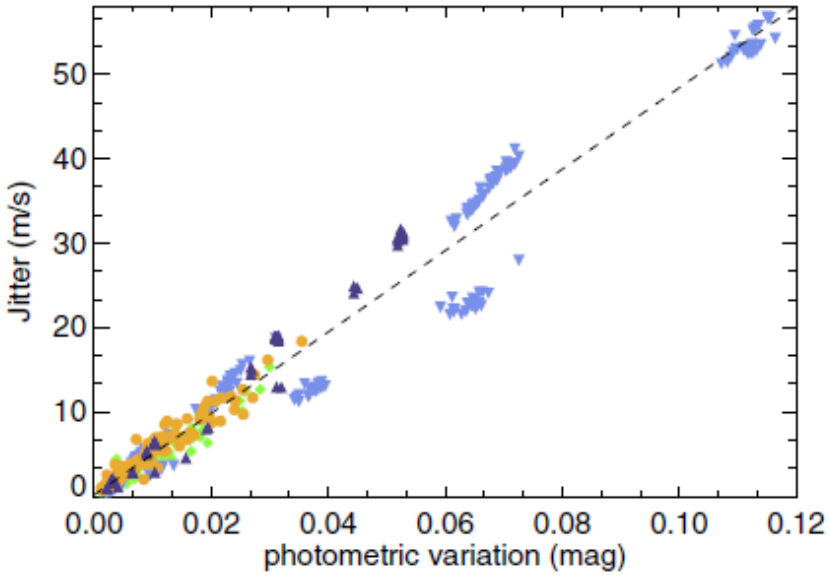
ve Valenti, 2005; Johnson ve ark., 2010), yörünge dönemi 3 gün olan gezegenlerin dağılımındaki yayılım (Cumming ve ark., 2008), yörünge dönemi daha büyük ve daha küçük kütleli gezegenlerin keşiflerinin kademeli artması (Cumming ve ark., 2008) olarak söylenebilir. Dikine hız çalışmalarında, HD 69830 gibi (üç Neptün kütleli ve asteroid kuşağına sahip) karmaşık gezegen sistemlerinin keşfine öncelik verilmektedir (Lovis ve ark., 2006; Beichman ve ark., 2005). Dünya büyüklüğündeki gezegenlerin büyük çoğunluğunun M tayf türünde cüce yıldızların etrafında yaşanabilir bölgede dolandığı hesaplanmıştır (Dressing ve Charbonneau, 2013; Kopparapu, 2013; Bonfils ve ark., 2013). Dikine hız yöntemi için küçük kütleli yıldızlar önemli bir yere sahiptir çünkü küçük kütleli M tayf türündeki cüce yıldızların etrafında dolanan küçük yörünge dönemine sahip yaşanabilir bölgede bulunan gezegenlerin oluşturduğu dikine hız bileşeninin genliği büyük olduğundan, ötegezegenin keşfedilmesini kolaylaştırır (Fischer ve ark., 2015).

Süregelen dikine hız çalışmalarında yakın yıldızlara odaklanılmış ve donanımsal olarak dikine hız veri analiz tekniklerinde gelişmeler sayesinde hassasiyet yaklaşık 1 m/s'nin altına çekilmiştir. Keck/HIRES, Lick/APF, Magellan/PFS (tümü iyot pili kullanıyor) ve ESO/HARPS-N gibi yüksek çözünürlüklü tayf çekerler sayesinde optik bölgede dikine hız ölçümleri birkaç m/s'lik hassasiyetle yapılabilir hale getirildi (bakınız Şekil 2.3). Uygun koşullar altında gözlemciler 70 cm/s'lik tek ölçüm hassasiyetine dahi ulaştılar (Lovis ve ark., 2008). Dikine hız ölçümlerinde; F ve G yıldızlarının kendi yapılarına özgü "dikine hız gürültüsü" gibi nedenlerden dolayı çalışmalarda kısıtlamalarla karşılaşıldı. Daha fazla ilerlemek için kalibrasyon kaynaklarında teknolojik gelişmeler gerekmektedir (Lovis ve ark., 2006; Undry ve Mayor, 2008; Osterman ve ark., 2007). Dikine hız ölçümlerinde hassasiyetin cm/s mertebesinde olması hedeflenen echelle spektroskopisi ESPRESSO (Echelle Spectrograph for Rocky Exoplanet and Stable Spectroscopic Observation-Kayaç Gezegenlerin Keşfi ve Kararlı Tayf Gözlemleri için Echelle Tayfçeker) VLT'ye (Very Large Telescope) yerleştirilmek üzere hazırlanmaktadır (Pepe ve ark., 2013). Farklı çözümleme güçlerinde, sönük yıldızların da hedefe alınacağı (16^{m}'den daha sönük yıldızlar) tayfçekerin en yüksek çözümleme gücünün yaklaşık olarak R=190.000 ve dikine hız ölçümlerinin hassasiyeti de birkaç m/s mertebesinde olacağı düşünülmektedir (http://www.eso.org/sci/facilities/paranal/instruments/espresso/overview.html).



Şekil 2.3. Güneş benzeri yıldız olan HD 32963'nin dikine hız değişimlerini gösteren grafik şekildeki gibidir. Veriler elde edilirken Keck-I teleskopu ve HIRES tayfçekeri kullanıldı (Roman ve ark., 2015)

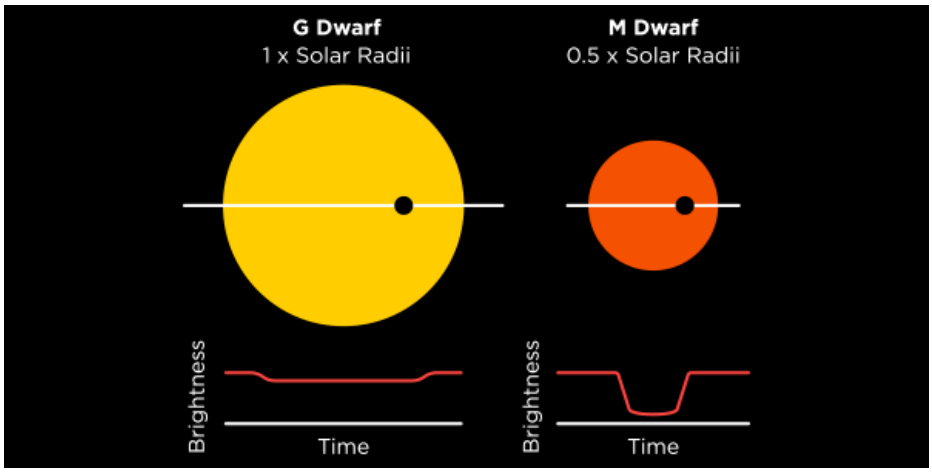
En yeni tayfçekerler 0,1 m/s'lik hassasiyetle yakın yıldızlar için ölçüm yapabilecek seviyede olmasına rağmen hala yüksek duyarlıklı ölçümler yapılmasıyla ilgili güçlükler bulunmaktadır. Bunun nedeni, yıldızların doğasından ortaya çıkan ve "dikine hız gürültüsü" olarak adlandırılan, özellikle ışıkkürelerindeki leke, bulgurlanma ve sismik dalgaların oluşturduğu bozucu etkilerdir. Örneğin genç yıldız TW Hydra'nın dikine hız değişimlerinin gezegen kaynaklı olduğu düşünülmesine rağmen ayrıntılı analizler, bu değişimlerin yıldız ışıkküresindeki soğuk lekeden kaynaklandığını ortaya koymuştur (Huelamo ve ark., 2008). Diğer taraftan yakın zamanda keşfedilen Alpha Cen Bb'nin de dikine hız değişimleri, farklı sinyallerle gürültü biçimde ölçülmüştü (Dumusque ve ark., 2012). Güçlü manyetik aktivite gösterebilen M tayf türündeki yıldızlarda leke nedeniyle oluşan dikine hız dalgalanmaları (RV jitter), parlaklık değişimleri 0^m,1'e ulaştığında 40 m/s değerlerine yaklaşmaktadır (bakınız Şekil 2.4; Andersen ve Korhonen, 2015). Bu da, bu etkileri arındırmadığımızda, özellikle küçük kütleli yer benzeri gezegenleri bulmada önemli problemler yaşanacağını ortaya koymaktadır. Bundan dolayı uzun süreli gözlemlerle kısmen yıldız titreşiminden (stellar jitter) dolayı oluşan kısıtlamaların üstesinden gelinebilir. İleriki yıllarda genç yıldızların dikine hız çalışmalarında hem optik hem de kızılötesi bölgede ölçümler toplanarak yıldız lekelerinin oluşturduğu "dikine hız bozulmaları" arındırılarak, gezegen kaynaklı hız değişimleri çok daha duyarlı elde edilebilir (örneğin; Crockett ve ark., 2012).



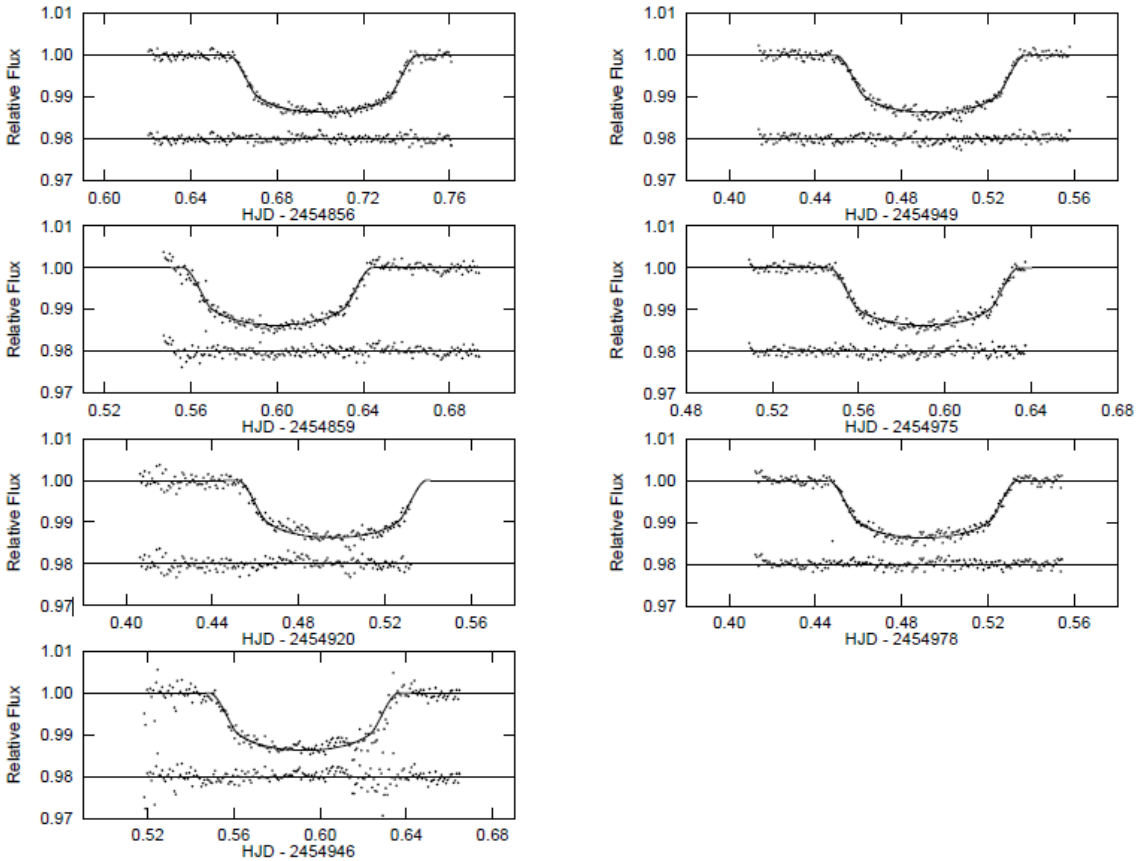
Şekil 2.4. M türü yıldızlarda farklı leke parametreleri üzerinden lekelerin ortaya çıkaracağı parlaklık (V-bandı) değişimine karşılık dikine hız dalgalanmalarının simülasyonu. Yeşil semboller gelişigüzel yerleşmiş lekeleri, kahverengi semboller aktif enlemlerde bulunan lekeleri, açık ve koyu maviler ise ayrılmış, farklı leke alanlarına karşılık gelmektedir (Andersen ve Korhonen, 2015)

2.1.3. Geçiş Işık Eğrileri

İlk olarak Borucki ve ark. (1992) tarafından önerilen geçiş (transit) yöntemi, gezegen ortak kütle merkezi etrafında dolanırken yıldızın önünden geçtiği sırada gözlenen toplam ışıktaki azalmanın belirlenmesine dayanır (bakınız Şekil 2.5). 0,64 Jüpiter kütlesindeki bir gezegen yıldızının önünden geçerken, yıldızının parlaklığını 0.0011 kadir düşürür, bu da yıldız parlaklığında çok küçük bir düşüş demek (Mayor ve Frei, 2003). Gezegenin neden olduğu ışık azalması, gezegen yörünge hareketi kararlı olarak sürdürdüğünden, dönemli olarak gözlenir (örneğin HAT-P-3'ün geçiş ışık eğrileri: Şekil 2.6). Brown (1990) tarafından önerilen yöntemde de uzay teleskoplarına yerleştirilecek ve yıldız ışığını örtecek koronograf benzeri bir aletle (Güneş gözlemlerinde de kullanılmaktadır), gezegenin doğrudan görüntülenmesi de amaçlanmaktadır. Ancak, bu yöntem geçiş gözlemlerinden farklı olarak ötegezegenin doğrudan görüntülenmesi için geliştirilmektedir.



Şekil 2.5. Bir ötegezegenin G ve M tayf türü olan ve anakolda bulunan yıldızının önünden geçerken oluşturduğu geçişin sentetik ışık eğrilerinin şekilsel değişiminin grafiği (https://www.cfa.harvard.edu/~avanderb/tutorial/tutorial.html)



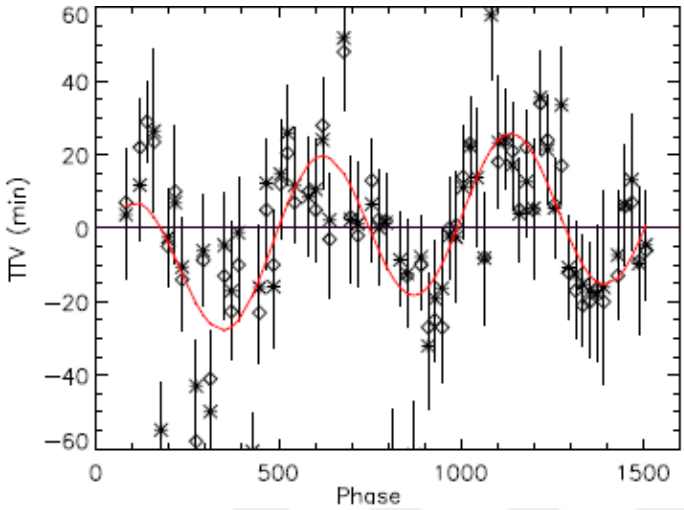
Şekil 2.6. Liverpool Teleskobuna bağlı RISE alıcı kamerası kullanılarak, 2009 yılında yapılan gözlemlerden elde edilen, HAT-P-3 sistemine ait yedi geçiş ışık eğrisi gösterilmektedir. Işık eğrilerinin modellenmesi, Markov-Chain Monte Carlo yaklaşımı ile yapılarak yıldız-gezegen sistemini en iyi temsil eden geçiş parametreleri belirlenmiş ve şekildeki kuramsal sürekli eğriler elde edilmiştir (Gibson ve ark., 2009)

Geçiş yöntemiyle ilk keşfedilen gezegen gaz devi HD209458b'dir (Henry ve ark., 2000; Charbonneau ve ark., 2000). Geçiş yöntemi, ötegezegen araştırmalarında ve keşiflerinde önemli atılım yapılmasını sağlamıştır. Kepler uydu gözlemleri sayesinde geçiş yöntemi ile binlerce gezegen keşfedilmiştir (Rowe ve ark., 2015). Bu keşifler, gezegen boyutlarının geniş bir yelpaze üzerinde gezegen oluşum oranlarını da tahmin edilebilecek şekilde olduğunu ortaya koymaktadır (Borucki ver ark., 2011; Youdin, 2011; Howard ve ark., 2012; Fresin ve ark., 2013; Dong ve Zhu, 2013; Morton ve Swift, 2014). Bunun yanında, yaşanabilir gezegenlerin oluşabileceğine dair tahminler yürütülmüş ve "olası yaşam barındırabilecek gezegenler bölgeleri" tanımlanmıştır (Traub, 2012; Dressing ve Charbonneau 2013; Petigura ve ark., 2013; Kopparapu, 2013; Foreman-Mackey ve ark., 2014; Dressing ve Charbonneau, 2015). Geçiş gözlemlerinin analizinden temel bazı fiziksel ve geometrik parametrelerin yanında, gezegenlerin atmosfer sıcaklığı ve bileşimine ilişkin bilgiler rapor edilmeye başlanmıştır (örneğin; Seager ve Sasselov, 2000; Charbonneau, 2002; Des Etangs ve ark., 2008; Sing ve ark., 2011; Fraine ve ark., 2014). Planlanan veya kullanılmakta olan uydu teleskop gözlemleriyle (TESS, JWST, ve PLATO gibi) binlerce ötegezegenin geçiş ışık eğrileri elde edilerek gezegen oluşumu, evrimi, atmosfer yapıları ve yaşanılabilirlik ile ilgili bilgilerimiz daha da artacaktır (Kreidberg, 2015).

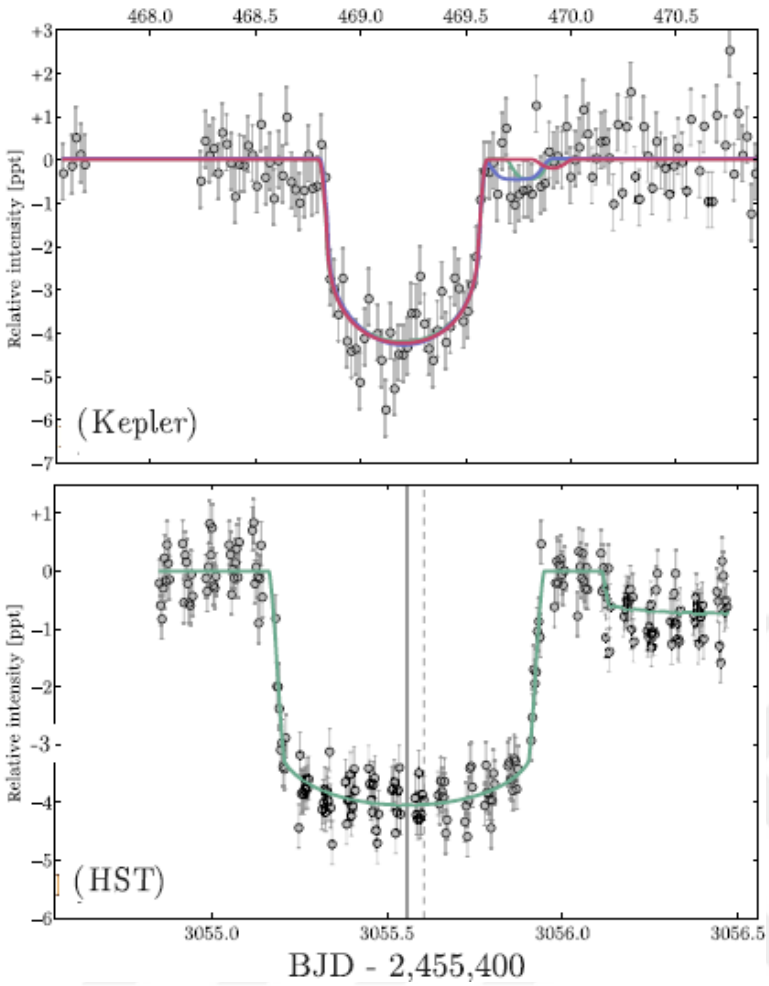
Geçiş gözlemleriyle, gezegenlerin bazı temel parametreleri elde edilse de mutlak parametrelerine tam olarak ulaşmak mümkün değildir. Geçiş ışık eğrilerinin analizinden elde edilen yarıçapları oranından, ötegezegenin yarıçapı, yıldızın bilinen yarıçapı kullanılarak, hesaplanabilir. Ancak gezegen kütlesinin belirlenmesi çok daha zordur çünkü kütle farkı çok büyüktür ve sadece geçiş eğrisinden duyarlı bir kütle oranı değeri elde edilememektedir. Bundan dolayı tayfsal gözlemlerden elde edilen dikine hız verilerinin fotometrik geçiş ışık eğrileriyle beraber analiz edilmesiyle ötegezegenin kütlesi ve yarıçapı belirlenebilir ve böylece bu iki temel parametreden gezegenin yoğunluğunu da hesaplamak mümkün olur. Ötegezegen geçişi sırasında yıldızın ışığı gezegenin atmosferinden geçerek gözlemciye ulaştığından buradan ötegezegenin atmosferi hakkında çalışmalar yapılabilir. Bu şekilde alınan tayfta atom ve moleküllerin soğurma çizgileri saptanıp ve ötegezegen atmosferinin kimyasal bileşimi hakkında bilgi alınabilmektedir.

Son yıllarda, özellikle Kepler uzay teleskobu sayesinde fotometrik duyarlılığın mmag seviyesine ulaşmasıyla, geçiş ışık eğrileri kullanılarak iki önemli alanda adım atılmıştır. Bunlardan biri, geçiş tutulma zamanlarının değişimlerinin (TTV) analizleriyle, yıldızlar etrafında çoklu gezegen araştırmalarıdır. Çift yıldızlarda da sıklıkla kullanılan yöntem, daha ileri analiz teknikleriyle, çoklu gezegen keşiflerinde etkin kullanılmaya başlanmıştır. KOI-

784.01 için TTV analizi ile elde edilen ve ikinci bir gezegenin varlığına işaret eden geçiş zamanlarının dönemli değişimi Şekil 2.7'de görülebilir (Kane ve ark., 2019). Bu yöntem, ilerleyen bölümde, zamanlama ile keşiflerde ele alınmıştır. Diğer önemli bir adım ise, geçiş ışık eğri analizlerinden öteuydulara ilişkin kanıtlar olduğunu öne süren çalışmaların yayınlanmasıdır (örneğin; Şekil 2.8.).



Şekil 2.7. KOI-784.01'in geçiş zamanlarının çevrimsel değişimi ve TTV analizi ile sonucu oluşturulmuş kuramsal (sürekli eğri) temsili (Kane ve ark., 2019)



Şekil 2.8. Kepler -1625b sisteminin Kepler ve Hubble Uzay Teleskobu (HST) tarafından elde edile geçiş gözlem verileri (noktalar) ve öteuydu eklenerek elde edilen model (sürekli) eğrileri (Teachey ve Kipping, 2018)

2.1.4. Astrometri (Konum Ölçümü)

Bu yöntem dikine hız yöntemine benzemektedir. Astrometrik gözlemlerle yıldızın konumunda, ona bağlı bilinmeyen bir bileşeni nedeniyle, ortaya çıkan küçük sapmalarla keşfedilmeye çalışılır. Yıldızın konumundaki değişimler, gezegenle oluşturdukları ortak kütle merkezi etrafındaki hareketinden kaynaklanır. Astrometri yöntemi, ötegezegen araştırmalarında kısıtlı kullanım alanına sahiptir fakat diğer yöntemlere göre tamamlayıcıdır (Gatewood, 1976; Black ve Scargle, 1982; Sozetti, 2005). Ayrıca astrometri yöntemi büyük yörüngeli gezegenler için en hassas yöntemdir, çünkü kütle merkezinin yer değiştirme genliği yörünge dönemiyle artar, bununla beraber keşfedilen gezegenin dönemi bir kaç yıl sürebilir (Fisher ve ark., 2015). Yıllarca hassas konum ölçümlerinin yapılması gerektiğinden bu yöntemle uzun dönemli gezegen keşifleri oldukça zordur.

Bu yöntemle konum ölçümü yapılan yıldız-gezegen sistemlerinde, $M_\star$ ve M_g sırasıyla yıldız ve gezegen kütleleri ve $a_\star$ ve a_g ise yörüngelerinin büyüklükleri veya yarı-büyük eksenlerinin uzunluklarını gösterirse;

$$M_\star . a_\star = M_g . a_g \quad (1.1)$$

diğer taraftan $a = a_\star + a_g$ olmak üzere (1.1.a)

$$a_\star = \frac{M_g}{M_g + M_\star} a \quad (1.2)$$

ifadeleri 3. Kepler yasasıyla birleştirilirse, yörünge dönemi için

$$p^2 = \frac{a^3}{M_g + M_\star} \quad (1.3)$$

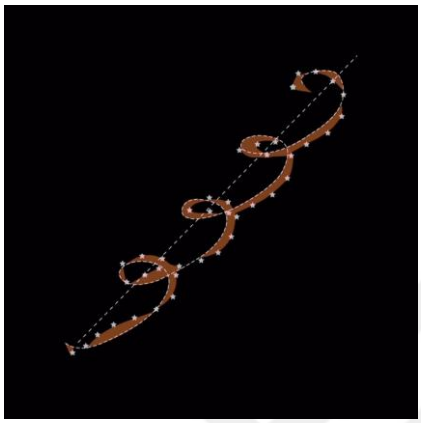
denklemi yazılabilir ve bu ifade kullanılarak çift yıldızlarda kütle belirlenebilmektedir. Ancak, gezegen doğrudan gözlenemediğinden sadece yıldıza ilişkim $a_\star$ ve P yörünge parametreleri bilinebilir. Gezegenin yıldızının sistemin ortak kütle merkezi etrafındaki yörüngesinin aslında bize görünen yörüngesi veya yörüngesinin gökyüzündeki izdüşümünün genellikle elipse karşılık gelir ve bu yörüngenin yarı-büyük ekseni

$$\alpha = \frac{M_g . a}{M_\star . d} \quad (1.4)$$

eşitliği ile hesaplanabilir (Perryman 2000). Bu denklemde, d sistemin uzaklığını parsek biriminde gösterirken α açısal yarı-büyük eksen uzunluğunun açısal büyüklüğüne karşılık gelir. Dolayısıyla, ölçülebilen parametreler cinsinden yazılan denklem sayesinde M_g gezegen kütlesi belirlenebilir.

Bir yıldızın gezegen nedeniyle uzayda yapacağı yörünge hareketine, yıldızın gökada kütle merkezi etrafındaki büyük yörüngesindeki harekette eklenince, astrometrik ölçümleri bu iki bileşik hareketi ortaya çıkarır. Şekil 2.9'da dört yıl boyunca astrometrik ölçümleri yapılmış Beta Pictoris yıldızın bu iki hareketi, Dünya'nın Güneş etrafındaki hareketini de

içerecek şekilde, resmedilmiştir. Bu yörünge, 1990 ve 1991 yılı ölçümleri içeren Hipparcos uydu verileriyle, 2014 ve 2016 yılında Gaia uydusunun astrometrik verilerinin eklenmesiyle ortaya çıkarılmıştır (Snellen ve Brown, 2018). Aynı çalışmadaki astrometik yörünge sayesinde, aynı yıldızın etrafındaki Beta Pictoris b'nin Jüpiter'in 13 katı kütlede olduğu bulundu. Ayrıca, belirlenen gezegenin bugüne kadar keşfedilen en genç gezegenlerden biri olduğu ve yaşının yaklaşık 20 milyon yıl olduğu ortaya çıkarıldı.



Şekil 2.9. Beta Pictoris yıldızının etrafındaki gezegeni nedeniyle çizdiği yalpamala hareketiyle (kahverengi), gökada kütle merkezi etrafındaki hareketinin (kesikli çizgi) bileşimi. Bu çizim dört yıllık ölçümlere dayalı olup ayrıca Dünya'nın Güneş etrafındaki yıllık hareketini de içermektedir (http://sci.esa.int/gaia/58798-astrometric-measurements-to-detect-exoplanets/)

2.1.5. Pulsar Zamanları/Zaman Gecikmesi Ölçümü

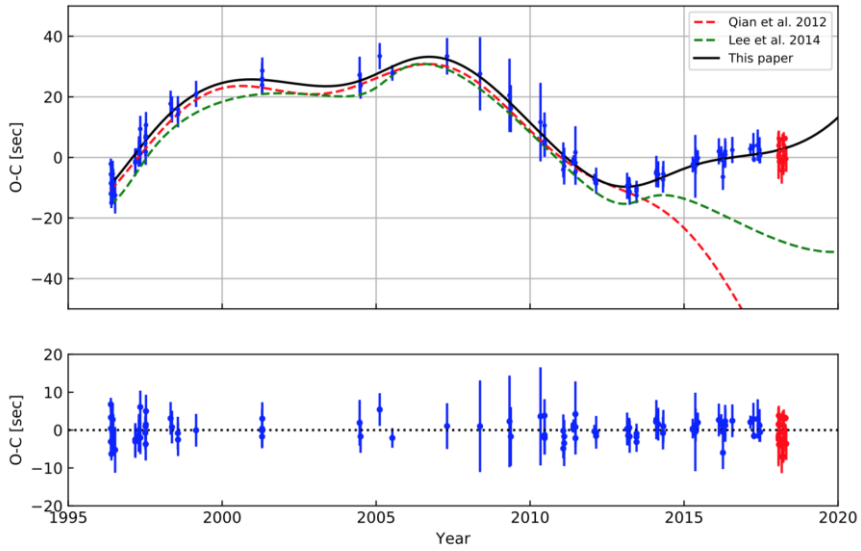
Pulsar zamanlaması yöntemi ile bir pulsar çevresinde dolanan gezegenler keşfedilebilir. Pulsarlar, ölmüş yıldız çekirdeklerinin sinyal gönderen türüdür. Elektromanyetik ışımanın gönderildiği uzay konisi bizim bakış doğrultumuza karşılık gelirse, pulsar veya atarca deniz feneri gibi uzaya pulslar gönderir ve biz de bu ışımayı genellikle radyo bölgede gözleyebiliriz. Eğer bir pulsarın etrafında gezegen varsa, onun uzaya yaydığı ışığın frekans değerlerinde değişimler ortaya çıkar. Oldukça hassas ölçülebilen bu değişimler de gezegen keşfini getirebilir.

İlk ötegezegen mili saniye pulsarı olan PSR 1257+12 etrafında bulunmuştur (Wolszczan ve Frail, 1992). Pulsarların dönme hızları milisaniye veya saniye mertebesinde olup bu dönemler atomik saate benzer hassasiyetle ölçülmektedir. Bu nedenle, farklı bir etki bu dönemi değiştirirse, bu değişim kolaylıkla tespit edilebilir. Bu nedenle, etrafında gezegen olan pulsar, ortak kütle merkezi etrafındaki küçük salınımı nedeniyle gözlemciye yaklaşıp

uzaklaşma hareketi yapacağından pulsarın gönderdiği sinyal zamanlarında düzenli değişimler görülebilmektedir. Bu nedenle, hassas ölçülebilen puls zaman değişimleri Dünya'nın onda biri kütleye sahip gezegenlerin keşfine olanak sağlamaktadır. Bundan sonra, "NASA Ötegezegen Arşivi" veritabanına göre, pulsar zamanlama yöntemi ile toplamda altı ötegezegen keşfedilmiştir (https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/).

Örten çiftlerde de (O-C) yöntemi olarak bilinen, gözlenen ve hesaplanan minimum zamanlarının farklarına dayanan yöntem de çiftler etrafında çok sayıda üçüncü bileşenin keşfedilmesini sağlamıştır. Pulsar zamanlarındaki değişimin kaynağı gibi burada da ilave cismin neden olduğu ışık-zaman etkisinin neden olduğu dönemli (O-C) değişimleri belirlenir ve böylece üçüncü cisim ile yörüngesinin özellikleri de belirlenebilmektedir. Örneğin, NY Virginis çift sistemi etrafında, tutulma zamanlarının takibiyle iki ötegezegen belirlenmiştir. Song ve ark. (2019) tarafından çalışmada (O-C) yöntemiyle bu iki ötegezegenin kütlesi 2.7 ve 5.5 Jüpiter olarak hesaplanmıştır (Şekil 2.10). Aynı yöntemle, tutulma zamanları değişimlerinin çift yıldızlarda izlenmesiyle 11 adet ötegezegen keşfi yapılmıştır.

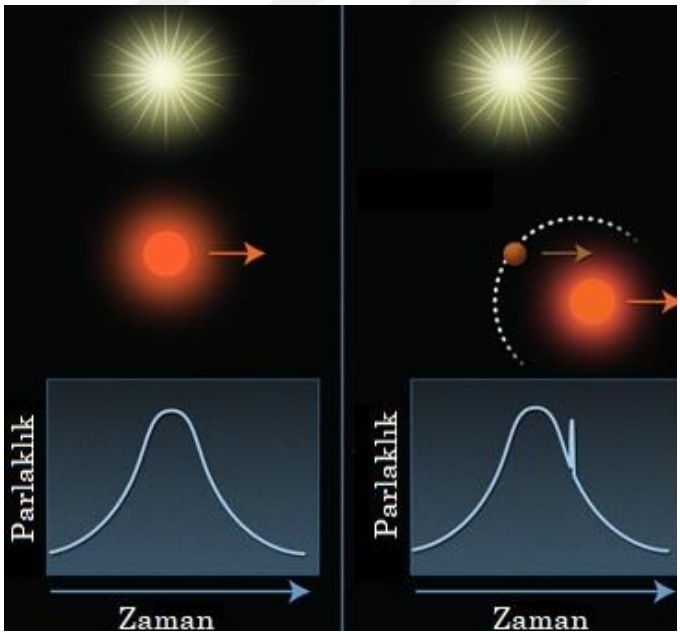
Bunun yanında, ötegezegen geçiş ışık eğrilerinin zamanlarını değişimini temel alan ve yine zaman ölçümüne dayanan TTV yöntemiyle keşfedilen ek ötegezegen sayısı ise 17'ye ulaşmıştır. Temelde tümü aynı yöntemle zaman değişimlerini esas alan üç yöntemle toplam 34 ötegezegen keşfedilmiş olup duyarlı tutulma ve geçiş zamanlarını gözlenip toplanmasıyla bu sayı ilerleyen dönemde artacaktır.



Şekil 2.10. NY Virginis örten çift sisteminin O-C diyagramı ve O-C değişimlerinin (mavi noktalar) iki ötegezegenin neden olduğu ışık-zaman etkileriyle (siyah sürekli eğri) temsiliyle kuramsal eğriden olan farklar (Song ve ark., 2019)

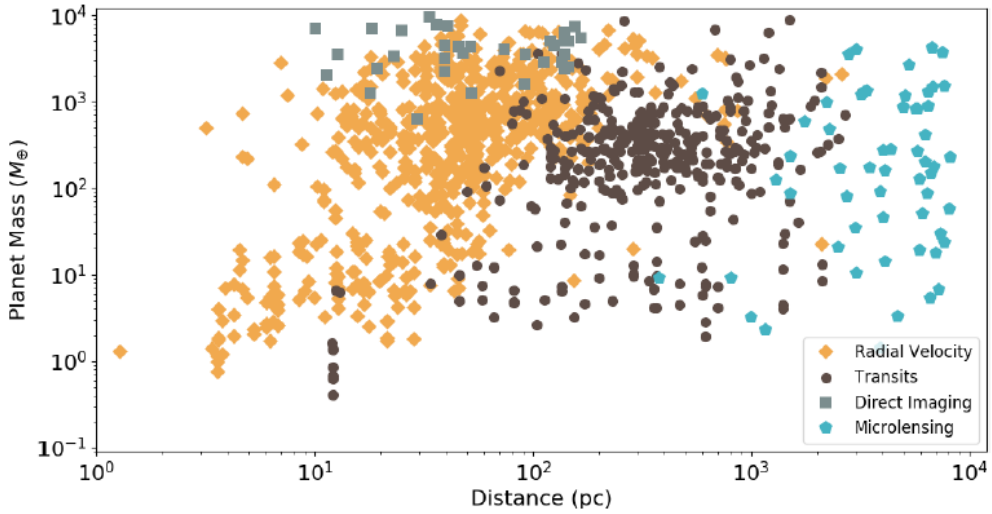
2.1.6. Kütle Çekimsel Mercekleme

Büyük kütleli bir cisim, oluşturduğu kütle çekim alanı nedeniyle, kendisinden uzakta olan cismin ışık yolunda değişimlere neden olur. Özellikle yoğun çekim alanları veya uzay-zaman bozulmaları mercek etkisi yapar veya daha uzaktaki cisimin daha büyük ve çoklu görüntülerini ortaya çıkarır. Işığın yolu değiştiğinden, daha uzaktaki cisimler bu etki nedeniyle farklı konumlarda ve çoklu olarak gözlenebilirler. Çekimsel mercekleme durumu yıldızların önüne geçen gökadalar, gezegenler veya karadelikler gibi gök cisimlerinin etkisiyle oluşabilir. Gözlediğimiz kaynak yıldız ışığı ani olarak artma gösterirse, bunun nedeni bizim bakış doğrultumuzda yıldızın önünden geçen başka bir cisim (gezegen, gökada, kara delik vb.) olabilir. Gözlenen cisimler, mercekleme etkisi ile parlak olmanın dışında, çoklu görünebilirler. Bu nedenle hedef cisim hem parlak hem de çoklu görünüşüne göre, önünde merceklemeyi oluşturan cismin özellikleri ortaya çıkarılmaya çalışılır. Gözlenen hedefteki cismin önünde, kütle-çekim alanı oluşturan bir yıldız ve onun etrafında dolanan bir gezegen varsa, yıldız daha büyük şiddette ve zaman aralığında parlama etkisi ortaya çıkarırken, etrafındaki gezegen de anlık parlaklık artışı ile mercekleme etkisine katkı verir (bknz Şekil 2.11).



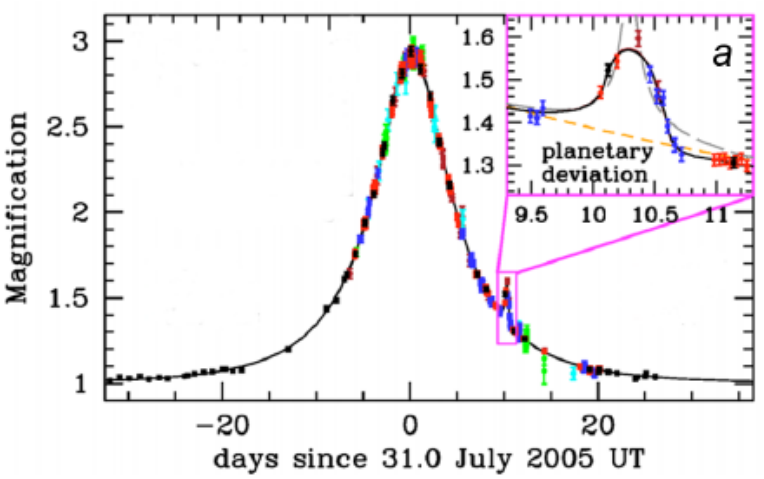
Şekil 2.11. Gözlenen kaynağın önündeki yıldızın oluşturduğu kütle-çekim alanı nedeniyle parlama (sol panel) ve öndeki yıldızın etrafında dolanan ötegezegenin oluşturduğu mercekleme nedeniyle ortaya çıkan ani parlama (sağ panel) gösterilmektedir (https://exoplanets.nasa.gov/resources/53/extrasolar-planet-detected-by-gravitational-microlensing/)

OGLE ve MOA araştırmaların tarafından kütle çekimsel metoduyla 2003 yılında ilk keşfedilen OGLE-2003-BLG-235/MOA-2003-BLG-53Lb 2,6 M_{Jup} kütleli bir gezegendir (Bond, 2004). Kütle çekimsel yöntemle keşfedilen gezegenlerin büyük bir kısmı Jovian gezegenleri denilen büyük kütleli gezegenlere benzemektedir, aynı zamanda keşfedilen gezegenlerin ana yıldızları, evrende yaygın olarak rastlanılan M tayf türünde cüce yıldız olmaları beklenmektedir. Bu etkinin gözlenebildiği ötegezegenler genellikle kpc mesafesinde uzaklıklardadır. Bu nedenle, mikro-mercekleme yöntemi özellikle uzak ötegezegenlerin keşiflerinde önemli yer tutmaktadır. Şekil 2.12'de farklı yöntemlerle keşfedilen gezegenlerin uzaklık-kütle dağılımları verilmektedir (Tsapras, 2018). Bu şekilden, mikro-mercekleme yöntemi ile keşfedilen ötegezegenlerin neredeyse tamamının 1 kpc'ten daha uzakta olduğu görülmektedir.



Şekil 2.12. Farklı yöntemlerle keşfedilen ötegezegenlerin uzaklık-kütle dağılımları (Tsapras, 2018)

NASA Ötegezegen Arşivi'nde mikro-mercekleme yöntemi ile keşfedilmiş ötegezegen sayısı 77'ye ulaşmış olup en uzak keşif 8,2 kpc'teki OGLE-2015-BLG-0051L kaynağının etrafındaki ötegezegenle 2015 yılında gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle keşiflerin önemli bölümü OGLE (Optical gravitational lensing experiment) taraması ile gerçekleştirilmiştir. Bu tür keşiflere önemli bir örnek olarak soğuk süper Dünya olarak sınıflandırılan ve M yıldızı (OGLE-2005-BLG-390) etrafında keşfedilen ötegezegen verilebilir. Keşfedildiği tarihte en küçük kütleli gezegen olup (5,5 Dünya kütlesi), yüzey sıcaklığı sadece 50 K olarak tahmin edilmiştir (Beaulieu ve ark., 2006). Bu yıldız ve gezegeninin oluşturduğu mikro-mercekleme etkisi, Şekil 2.13'te gösterilmektedir.



Şekil 2.13. OGLE-2005-BLG-390 kaynağı ve etrafındaki ötegezegenin oluşturduğu mikro-mercekleme etkisi. Farklı renklerdeki ölçümler, farklı teleskoplarla yapılan gözlemlere karşılık gelmektedir (Beaulieu ve ark., 2006)

BÖLÜM 3
MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada materyal olarak, analizlerde kullanılan verilere ilişkin açıklamalar sunulacaktır. Yöntem bölümünde ise, geçiş ışık eğrilerinin analizlerinde nasıl bir yol izleneceği ve kullanılan yazılım özellikleri sunulacaktır.

3.1 Kepler Gözlemleri

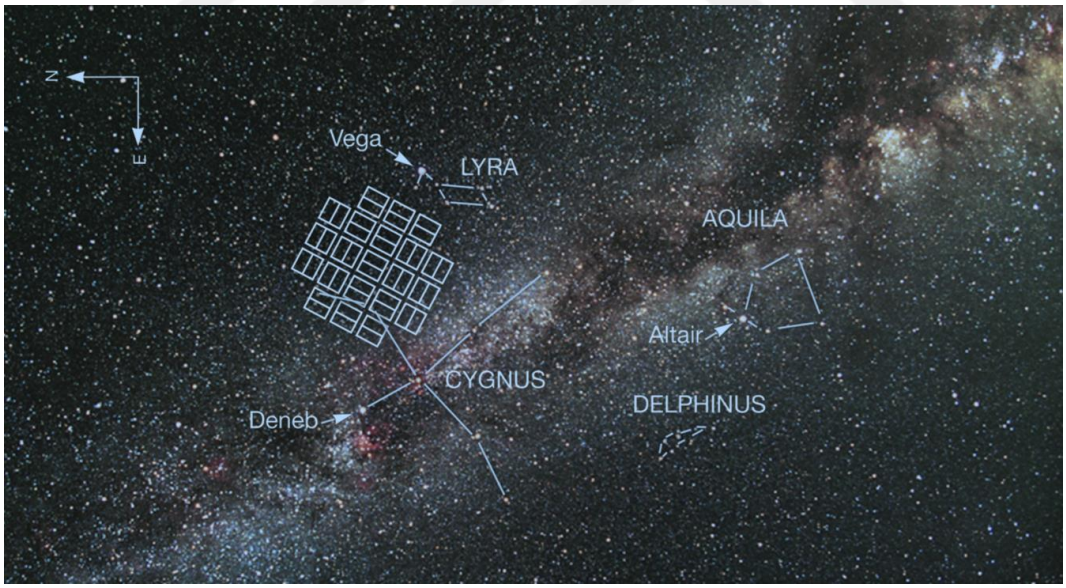
Yürütülen çalışma kapsamında seçilen ötegezegenli yıldız sistemlerinin geçiş ışık eğrileri, Kepler uzay teleskobu verileri kullanılarak oluşturulacağı için, bu bölümde ilgili uydu görevi ve verilerinin özellikleri ile ilgili bilgi verilecektir.

Kepler uzay aracı, Nasa tarafından gökadamızın etrafında dolanan güneş sistemi dışındaki Dünya benzeri gezegenleri ışıkölçer yardımıyla araştırma ve algılama amaçlı tasarlanmıştır (Şekil 3.1). Asıl amacı gezegenlerin yapısının ve çeşitliliklerinin dağılımlarını bulmak olan Kepler uydusu; yaşanabilir bölgedeki, Dünya benzeri gezegenlerin büyük gezegenlere göre oranını saptamak ve bu gezegenlerinin büyüklüğünü, şekillerini ve yörünge durumlarının dağılımlarını belirlemek için planlanmıştır. Çoklu yıldız sistemlerinde kaç tane gezegen bulunabileceğini öğrenmek, kısa dönemli büyük kütleli gezegenlerin kütlelerini, parlaklıklarını, boyutlarını ve yoğunluklarını saptamak ve gezegenlerin sahip olduğu yıldızlarının özelliklerini incelemek gibi hedeflere ulaşabilmek için, 6 Mart 2009 tarihinde uzaya fırlatılmıştır. Yaklaşık 3 yıl görev yapması gereken Kepler uydusu 9,5 yıl boyunca veri üretmeye devam etmiştir. Kepler uzay teleskobuyla, esas olarak Dünya benzeri gezegenler keşfedilmesi amaçlandıysa da, elde edilen fotometrik verilerle çoğunlukla Jüpiter büyüklüğünde büyük kütle ve boyutlu gezegenler keşfedilmiştir.

Kepler uzay teleskobu gökyüzünde sadece belirli bir bölge doğrultusunda ötegezegen araştırması yapmış olup seçilen doğrultu, gökadamızın Cygnus spiral kolu yakınındadır (Şekil 3.2). Uydu üzerine 0,95 metre açıklığa sahip Schmidt türü bir teleskop yerleştirilmiştir. Fotometrik gözlemlerde kullanılmak üzere teleskoba bağlı 42 adet 50x25mm boyutunda 2200x1024 piksel çözünürlüğe sahip CCD kamera kullanılmıştır (https://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/main/index.html). Görev yaptığı sürece, yaklaşık 530 bin yıldız gözlemiş ve aldığı verilerden 2662 ötegezegen keşfedilmiştir. Aldığı verilerle üretilen makale sayısı üç bine yakındır.



Şekil.3.1. Kepler Uzay teleskobu (http://www.kepler.arc.nasa.gov/downloading.html)

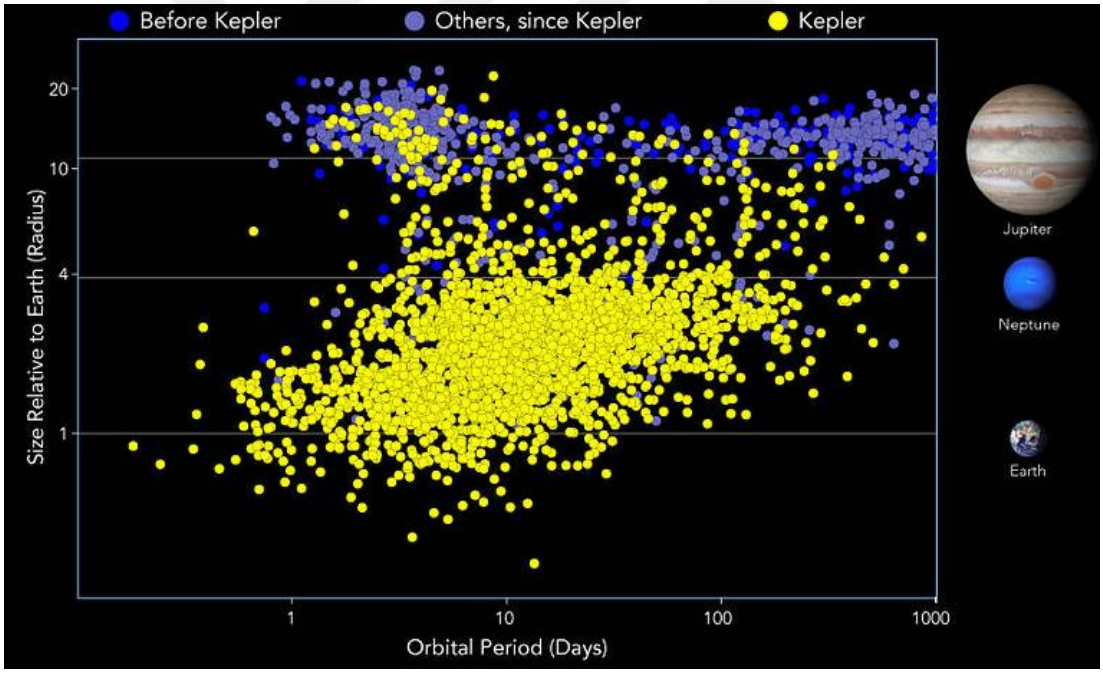


Şekil 3.2. Kepler uzay teleskobunun gökyüzünde gözlem yaptığı ve ötegezegen keşfi için taradığı bölge, 42 CCD kameraya da karşılık gelen küçük dikdörtgenlerle gösterilmiştir (https://www.nasa.gov/pdf/189566main_Kepler_Mission.pdf)

Kepler uydu teleskobun, geçiş yöntemi ile ötegezegen keşfini amaçlamaktadır. Alıcının geçirgen dalgaboyu 4000 Å ile 8500 Å arasındadır. Elde edilen CCD görüntüleri her ay Dünya'ya iletilmiş ve önindirgeme ve akı dönüşümleri yapılarak belirli süre sonra

araştırmacıların kullanımına açılmıştır. Geçiş yöntemiyle çok sayıda ötegezegen keşfi yaparken, bunun yanında çok sayıda değişen yıldız keşfi yapılarak bugüne kadar ulaşılabilen en duyarlı fotometrik veri üretimi sağlamıştır. Arızalandığı Mayıs 2013 sonuna kadar 150.000'den fazla anakol yıldızı etrafında ötegezegen araştırması yapmış ve yaklaşık 2350 ötegezegenin geçiş ışık eğrileriyle keşfedilmesini sağlamıştır. Sağladığı katkı, Şekil 3.3'ten açıkça görülebilir. Ayrıca, bu gezegenlerin fiziksel ve geometrik özelliklerinin bulunması için de önemli veri kaynağı olmuştur. Bu kadar yüksek sayıda keşif yapmasının en büyük nedeni, ulaştığı yüksek fotometrik duyarlılık (1 mmag'ın altına inmiştir) seviyesidir.

Kepler uydusu arızalandıktan sonra, yeni planlama ile K2 göreviyle Mayıs 2013'ten 2018 yılının sonuna kadar, kısıtlı da olsa, veri üretmeye devam etmiştir. Bu aşamadan sonra, farklı nesneleri (yıldızlar ağırlıklı olmak üzere) bilimsel kampanyalar düzenlenerek gözleyen Kepler uydusu, arızalı modda olmasına karşın, 382 ötegezegen keşfine daha imza atmıştır.



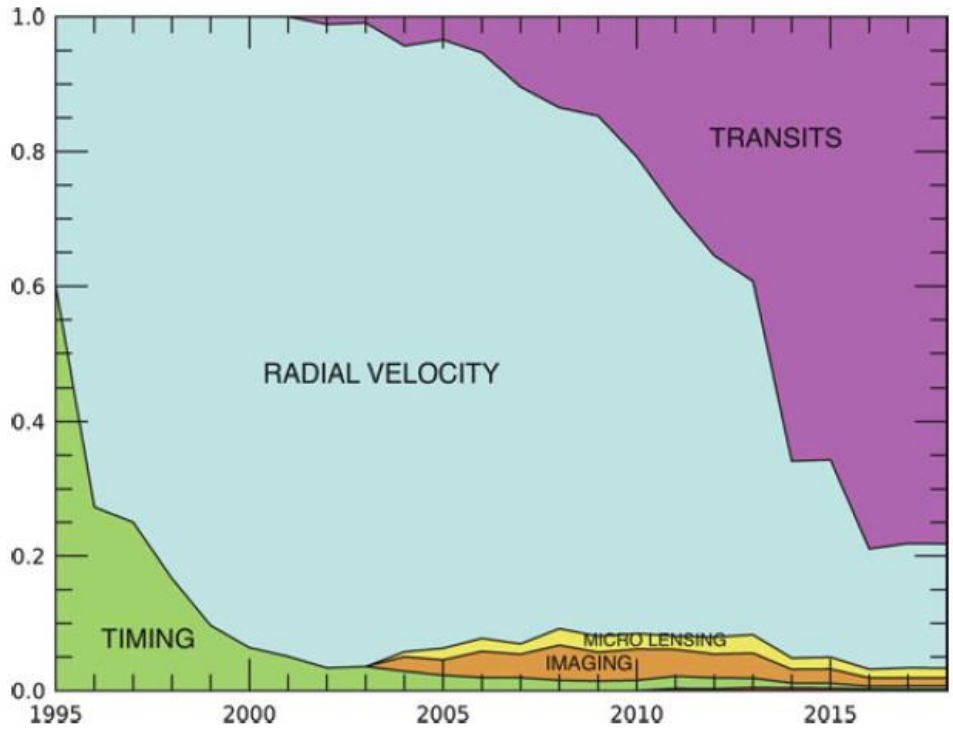
Şekil 3.3. Aralık 2017 itibariyle Kepler uzay teleskobu verileriyle ve diğer araştırmalarda keşfedilen ötegezegenlerin yörünge dönemlerine karşı yarıçaplarının dağılımı (https://www.nasa.gov/content/kepler-multimedia)

Bu çalışmada kullanılan veriler, Kepler uzay teleskobu gözlemlerinden oluşturulmuş açık veri arşivinden derlenmiştir. Seçilen ötegezegenli yıldız sistemlerinin geçiş ışık eğrilerini oluşturmak üzere, Kepler fotometrik verilerini içeren MAST açık veri arşivinden

(https://mast.stsci.edu/portal/Mashup/Clients/Mast/Portal.html) ilgili kaynağın fits formatındaki verileri indirilerek analize hazır hale getirilmiştir. Seçilen her bir yıldız-ötegezegen sistemi için üç farklı tarihteki geçiş ışık eğrileri oluşturularak WINFITTER yazılımıyla ayrı ayrı analiz için derlenmiştir.

3.2 Yıldız-Ötegezegen Sistemlerinin Işık Eğrilerinin Analizleri

Çift yıldız sistemlerinde olduğu gibi yıldızın önünden geçen gezegenlerin neden olduğu ışık akısındaki değişimler geçiş ışık eğrilerinin oluşmasına neden olur. Geçiş yöntemiyle ilk keşfin 2000 yılında (HD 209458b ötegezegeni) yapılmasından bugüne kadar geçiş yöntemi en etkin kullanılan keşif araçlarından olmuştur. Şekil 3.4'ten de görüleceği üzere, 2018 yılına gelindiğinde tüm ötegezegenlerin yarısından fazlasının geçiş yöntemiyle keşfedildiği görülebilir.



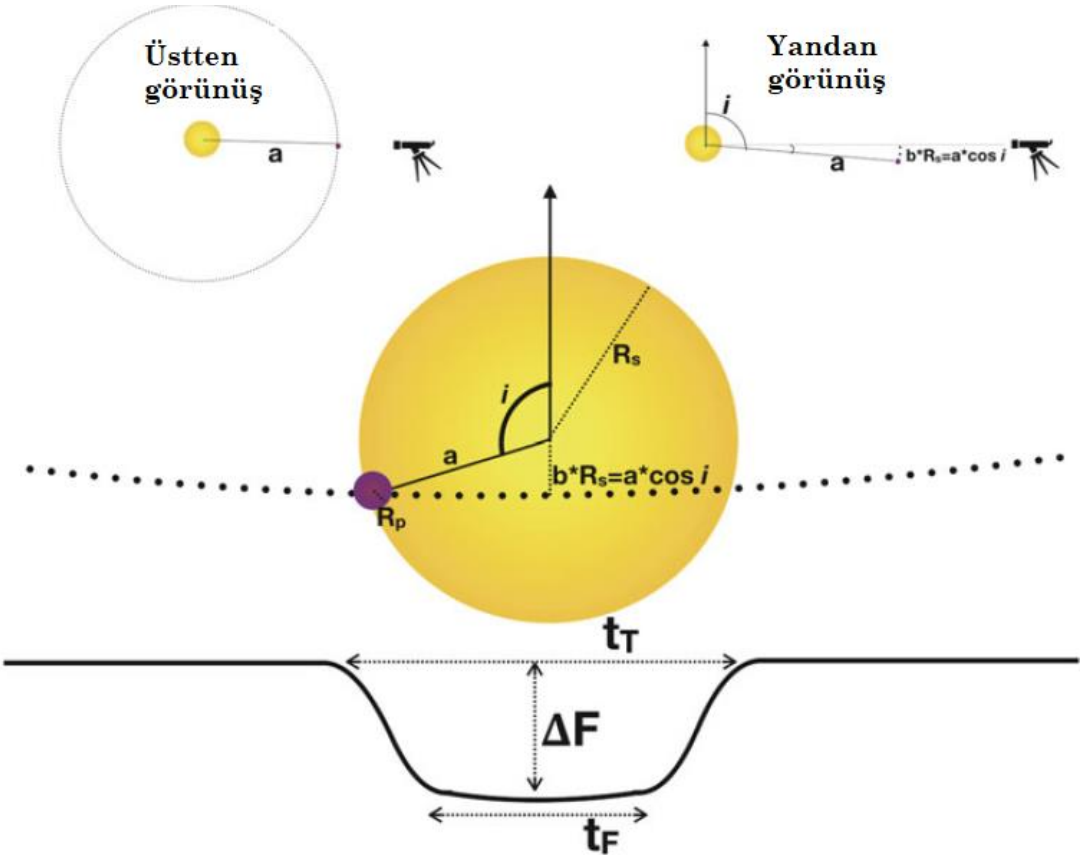
Şekil 3.4. 1995-2018 yılları arasında farklı keşif yöntemlerinin oransal etkinliği gösterilmektedir (Deeg ve Alonso, 2018)

Geçiş yönteminin temel geometrik ve fiziksel açıklaması aşağıdaki gibi verilebilir: Şekil 3.5.'teki geometri, geçişi açıklamak için kullanılabilir. Gezegen yıldızın önünden geçerken, yıldızın akısından ΔF kadar değişim olur. Gezegenden gelen akı ihmail edilirse,

ΔF değeri doğrudan gezegen (R_g) ve yıldızın ($R_\star$) yarıçapları oranına (k) bağlı olarak yazılabilir:

$$\Delta F \approx \left(\frac{R_g}{R_\star}\right)^2 = k^2 \tag{3.1}$$

Toplam geçiş süresi t_T ile gösterilirse, t_F ise gezegenin tüm diskinin yıldızın önünde olduğu süreye, başka deyişle geçiş eğrisinin ortasındaki akının çok değişmediğinde geçen süre (ikinci ve üçüncü değme noktaları arasında geçen süre) olarak verilebilir (Deeg ve Alonso, 2018).



Şekil 3.5. Yıldızının önünden geçen bir ötegezegenin geçiş geometrisi. Yörüngenin üstten ve yandan görünüşü verilmiştir. En altta ise geçiş sırasındaki akı (F) değişim grafiği gösterilmektedir (Deeg ve Alonso, 2018)

Seager ve Mallen-Ornelas (2003), yukarıda tanımlanan gözlemden çıkarılabilen parametrelerle yörünge parametreleri arasında analitik bir eşitlik elde etti. Etki parametresi

b, geçiş sırasında yıldız diskinin merkezinden olan en küçük izdüşüm uzaklığını göstermek üzere aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$b = \frac{a}{R_s}\cos i = \left\{ \frac{(1-k)^2 - \left[\frac{sin^2\left(\frac{t_F\pi}{P}\right)}{sin^2\left(\frac{t_T\pi}{P}\right)}\right](1+k)^2}{cos^2(\frac{t_F\pi}{P})/cos^2(\frac{t_T\pi}{P})} \right\}^{1/2} \tag{3.2}$$

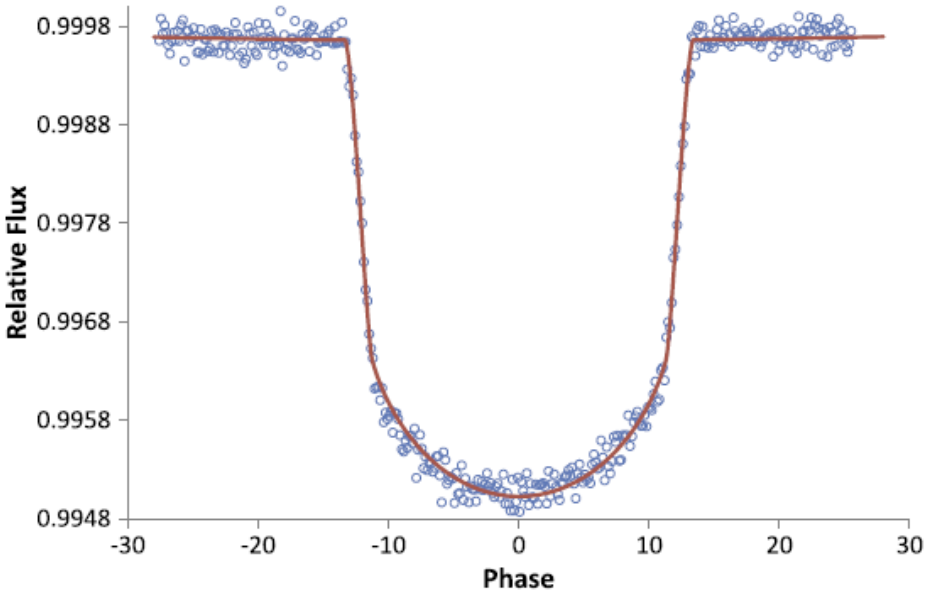
Bu denklemde, a yörüngenin yarı-büyük eksen uzunluğunu, i yörünge eğim açısını ve P yörünge dönemini göstermektedir. Aynı denklem düzenlenirse, yörünge yarı-büyük eksen uzunluğunun (a), yıldız yarıçapına oranı için aşağıdaki eşitlik elde edilebilir:

$$\frac{a}{R_s} = \frac{1}{\tan\left(\frac{t_T\pi}{P}\right)}\sqrt{(1+k)^2 - b^2} \tag{3.3}$$

Yukarıda yazılan eşitlikler yardımıyla, geçişe ilişkin temel parametreler Mandel ve Agol (2002) veya Gimenez (2006) tarafından verilen ek formüller de kullanılarak belirlenebilir. Bu hesaplamalarda, geçiş sürelerinin duyarlı belirlenebilmesi için, yıldızın özelliklerine göre en uygun kenar kararma katsayılarının kullanılması önemli olacaktır (Winn, 2010).

Bu çalışmada, yukarıda geometrisi verilen, seçilen yıldız-ötegezegen sistemlerinin farklı geçiş ışık eğrilerinin analizinde, literatürde farklı uygulamaları yer alan, WINFITTER yazılımı (https://michaelrhodesbyu.weebly.com/astronomy.html) kullanılmıştır. Bu yazılımın Kepler verisi için uyarlanan versiyonu WINKEPLER adıyla kullanılmaktadır. Bu algoritmayla geçiş ışık eğrisi modellenen KOI13.01 sisteminin gözlem verisiyle hesaplanan kuramsal veri Şekil 3.6'da gösterilmiştir (Rhodes ve Budding, 2014).

WINFITTER yazılımı, çift yıldızların ışık eğrilerinin analizleri yanında yıldız-ötegezegen sistemlerinin de geçiş eğrilerinin çözülmesinde kullanılabilmektedir. Uygulama, Budding ve Najim (1980) tarafından χ^2 minimizasyon algoritmasını esas alarak geliştirilmiş ve daha sonra Budding ve Zeilik (1987) tarafından düzenlenmiştir.



Şekil 3.6. WINKEPLER yazılımı ile modellenmiş KOI 13.01 yıldız-ötegezegen sisteminin geçiş ışık eğrisi (Rhodes ve Budding, 2014)

Temel fiziksel ve geometrik parametreleri (örneğin dönem, yarı-büyük eksen uzunluğu, yörünge eğimi, göreli ışıtmalar vb.) alarak ve değiştirerek model üreten yazılım, üretilen kuramsal modelleri gözlenen ışık eğrileriyle karşılaştırarak en uyumlu modele χ^2 değerleri minimum değere geldiğinde ulaşmaktadır. Algoritma, Hessian eğrilik matrislerini (Bevington 1969; Budding ve Demircan,2007) kullanmaktadır. Yazılım ek olarak, yakınlık (yansıma, basıklık) ve ilişkili diğer etkilere (kenar kararması, çekim kararması, Doppler "beaming" vb.) ilişkin yaklaşımları da dikkate alıp detaylı modeller üretebilmektedir (örneğin; Rhodes ve Budding, 2014; Püsküllü ve ark., 2017).

Bu çalışmada, WINFITTER yazılımı, seçilen adayların Kepler geçiş eğrilerinin analizinde kullanılmıştır. Yazılımda modelin bağlı olduğu parametre listesi Çizelge 3.1'de verilmiştir. Programa girdi değişkenlerinden üç tanesini k (yoldaş bileşenin baş bileşene oranı), r_1 (kesirsel yarıçap) ve i (yörünge eğikliği) yaklaşık olarak, yukarıda verilen eşitliklerden de görüleceği üzere, geçiş ışık eğrisinin geometrisinden hesaplamaktadır. Yazılımda, ötegezegenli sistemlerde kritik öneme sahip olan kenar kararma katsayılarıda, duyarlı fotometrik verisi olması durumunda (Kepler verisi gibi) serbest parametre olarak kullanılmaktadır.

Çizelge 3.1. WINFITTER yazılımının model üretirken kullandığı parametre listesi ve anlamları (https://michaelrhodesbyu.weebly.com/astronomy.html)

Parametre	**Açıklaması**
U	Işık eğrisinin süreklilik seviyesi
$\mathbf{L_1}$	Baş bileşenin kesirsel ışınımı
$\mathbf{k= r_2/r_1}$	Yarıçaplar oranı
$\mathbf{U_1}$	Baş bileşenin doğrusal kenar kararma katsayısı
$\mathbf{U_2}$	Yoldaş bileşenin doğrusal kenar kararma katsayısı (ötegezegen)
$\Delta\,\boldsymbol{\varphi_0}$	Evre kayması (derece cinsinden)
$\mathbf{r_1}$	Baş bileşenin kesirsel yarıçapı (R_1/a : yarıçapın yarı büyük eksene oranı)
i	Yörünge eğimi
e	Yörünge dışmerkezliliği
$\mathbf{M_0}$	Dışmerkezlilik durumunda evre başlangıcında ortalama ayrıklık
$\mathbf{L_c = L_2}$	Soğuk bileşenin kesirsel ışınımı
$\mathbf{q=m_2/m_1}$	Kütle oranı
$\boldsymbol{\tau_1}$	Baş bileşenin çekim kararma katsayısı
$\boldsymbol{\tau_2}$	Yoldaş bileşenin çekim kararma katsayısı
$\mathbf{E_1}$	Baş bileşenin yansıma katsayısı
$\mathbf{E_2}$	Soğuk bileşenin yansıma katsayısı

BÖLÜM 4
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Seçilen Sistemlerin Geçiş Işık Eğrilerinin Çözümleri

Tez çalışmasında, geçiş ışık eğrilerinin analizi için, üç tane yıldız-ötegezegen sistemi (Kepler-7b, Kepler-426b ve Kepler-435b) seçilmiştir. Her bir sistemin üç farklı tarihte gözlenen geçişlerinin uydu fotometrik verileri, MAST veri tabanından (https://archive.stsci.edu/prepds/kepler_hlsp/) derlenerek analize hazır hale getirilmiş ve ayrı ayrı analiz edilmiştir. Öncelikle herbir sistem için tarihçe bilgileri verilecek, daha sonra elde edilen bulgular ve tartışmaları sunulacaktır.

4.1.1. Kepler-7b

KOI-97.01 veya Kepler-7 (KIC 5780885) yıldız-ötegezegen sistemindeki gezegen, 2010 yılında Kepler geçiş gözlemlerinin analiziyle keşfedilmiştir. 4,8 gün yörünge dönemine sahip Kepler-7b, V=13,04 kadir parlaklığında alt-dev G yıldızı etrafında dolanan sıcak Jüpiter türü gezegendir (Latham ve ark., 2010). Ötegezegenli sistemin en ayrıntılı fotometrik çalışması, Kepler verilerine dayanılarak Latham ve ark. (2010) tarafından yapılmış olup gezegenin fiziksel ve geometrik parametreleri belirlenerek (kütle ve yarıçapına göre) düşük yoğunluklu olduğu rapor edilmiştir. Ötegezegenin yüksek albedo değeri, atmosferindeki olası bulutlardaki Rayleigh saçılmasıyla açıklanmaya çalışılmıştır (Demory ve ark., 2011). Geçiş ışık eğrileri ve kenar kararma katsayılarıyla ilgili başka bir çalışma da Gostev (2011) tarafından yapılmıştır. Esteves ve ark. (2015) tarafından da geçiş eğrileri analiz edilmiş ve Latham ve ark. (2010)'a göre farklı sonuçlar elde edilmiştir. Johnson ve ark. (2017) tarafından yapılan tayfsal araştırma da içeren çalışmada, yıldız (sıcaklık, yüzey çekim ivmesi, metal bolluğu, kütle, yarıçap vb.) ve gezegenin (dönem, yarıçap ve denge sıcaklığı) bazı fiziksel ve geometrik parametreleri hassas biçimde verilmiştir.

Kepler-7 sisteminin bu çalışmada üç farklı zaman aralığında (Ekim 2012-Mayıs 2013) elde edilmiş geçiş ışık eğrileri analiz edilmiştir (bakınız Çizelge 4.1). Analizde, yöntem bölümünde ayrıntıları aktarılan, WINFITTER yazılımı kullanılmıştır. Geçiş ışık eğrisi, NASA Ötegezegen Arşivi (https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/)'nde verilen ışık elemanlarına göre evrelendirilip akılar normalize edilerek çözüme hazır hale getirilmiştir. Kepler-7 sisteminin analizinde, yazılımın girdi parametreleri Çizelge 4.2'de listelenmiştir. Bu parametre listesi hazırlanırken, bu çalışmada analiz edilen diğer iki

ötegezegenli sistem de dahil olmak üzere, NASA Ötegezegen Arşivi ve Güneş Sistemi Dışı Gezegenler Ansiklopedisi olarak (The Extrasolar Planets Encyclopedia) veri tabanı kullanılmıştır.

Çizelge 4.1. Seçilen ötegezegenli sistemlerin analiz edilen geçiş ışık eğrilerinin zaman aralıkları

Sistem	Veri Çeyrek No	BJD (2454833+) Zaman aralığı
Kepler-7b	15	1373 – 1471
	16	1472 – 1557
	17	1559 – 1591
Kepler-426b	01	131 – 164
	03	260 – 349
	06	539 – 629
Kepler-435b	01	131 – 164
	05	443 – 538
	06	539 – 629

Çizelge 4.2. Kepler-7'nin geçiş eğrisi analizinde WINFITTER uygulaması için kullanılan girdi parametreleri

Parametre	**Değerler**
U	1.0000000
L_1	1.0000000
k= r_2/r_1	0.0815860
U_1	0.6585000
U_2	0.0000000
$\Delta \varphi_0$	0.7046679
r_1	0.1352814
i (radyan)	1.4866712
e	0.0000000
M_0	0.0000000
$L_c = L_2$	0.0000000
$q=m_2/m_1$	0.0003210
τ_1	5933.0000
τ_2	1586.0000
E_1	6000.0000
E_2	0.3200207

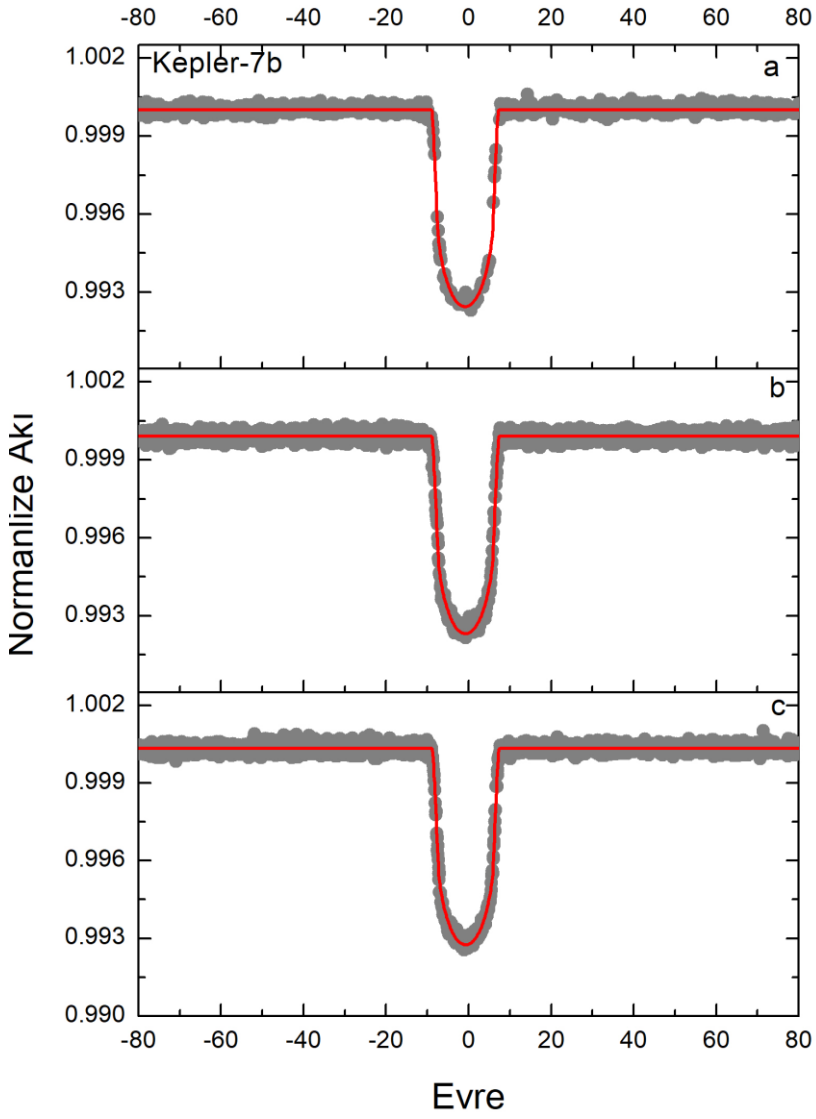
Kepler-7b ötegezegeninin yıldızının önünden geçerken oluşturduğu üç farklı tarihteki geçiş ışık eğrilerinin analiz sonuçları Çizelge 4.3'te verilmiştir. Veri duyarlıklarına bağlı

olarak geçiş parametrelerinde küçük farklılıklar görülebilir. Bu nedenle, ağırlık ortalama olarak sistemin geçiş özellikleri çizelgenin son satırında görülebilir. Üç farklı geçiş eğrisi için de geçiş parametreleri, birbirine yakın değerlerde elde edilmiştir. Bu analiz sırasında kütle oranı (q) değeri 0.000321 olarak NASA Ötegezegen Arşivi'den alınmış ve analiz sırasında sabit tutulmuştur. Doğrusal yaklaşımla kenar kararma katsayısı u=0.66 olarak kabul edilmiştir (Rhodes ve Budding, 2018). Geçiş ışık eğrilerinin kuramsal modellerle uyumu ise Şekil 4.3'te görülebilir. Şekildeki kuramsal eğriler, geçiş eğrilerinin analizlerinden bulunan parametrelerin ağırlıklı ortalamaları kullanılarak hesaplanmıştır. Kepler-7b için ayrıntılı geçiş analizleri Latham ve ark. (2010) ve Demory ve ark. (2011) tarafından yapılmış olup analizler bu çalışmadan farklı tarihlerde elde edilmiş geçiş eğrilerini kapsamaktadır. Geometrik parametrelerde önemli farklılık olmasa da çözüm sonuçları Demory ve ark. (2011) çalışmasıyla daha uyumlu bulunmuştur.

Çizelge 4.3'te verilen geçiş analiz sonuçları, sistemin (özellikle yıldızın) temel bilinen parametreleriyle birleştirilerek temel astrofizik eşitlikler yardımıyla Kepler-7b sistemini oluşturan yıldız ve gezegeninin bazı önemli parametreleri de hesaplanarak Çizelge 4.4'te listelenmiştir. Çizelgeden görüleceği üzere, ötegezegenin yarıçap 1.63 R_j ve kütlesi 0.43 M_j olduğundan, düşük yoğunluklu (0.13 ρ_j), yıldızına yakın olması nedeniyle, şişmiş sıcak bir ötegezegen olduğu söylenebilir. Yıldızının ise, Güneş atmosfer sıcaklığında olmasına karşın, daha büyük kütle ve yarıçapa sahip yaklaşık 3.5 milyar yıl yaşında, G tayf türünde, bir alt-dev yıldız olduğu anlaşılmaktadır (Latham ve ark., 2010).

Çizelge 4.3. Kepler-7b'nin geçiş ışık eğrilerinin analiz sonuçları

Geçiş No.	$\Delta\varphi_o$	$\Delta\varphi_o$ (hatası)	r_1	r_1 (hatası)	k	k (hatası)	r_2	r_2 (hatası)	i (°)	i (hatası)
1	0,840	0,017	0,1462	0,00014	0,08073	0,00016	0,01180	0,00002	85,88	0,029
2	0,755	0,011	0,1507	0,00008	0,08169	0,00010	0,01231	0,00002	85,34	0,015
3	0,703	0,009	0,1487	0,00008	0,08133	0,00009	0,01209	0,00001	85,55	0,014
Ağ.Ort:	**0.781**	**0.012**	**0,1480**	**0,00009**	**0,0811**	**0,00011**	**0,0120**	**0,000016**	**85,66**	**0,019**

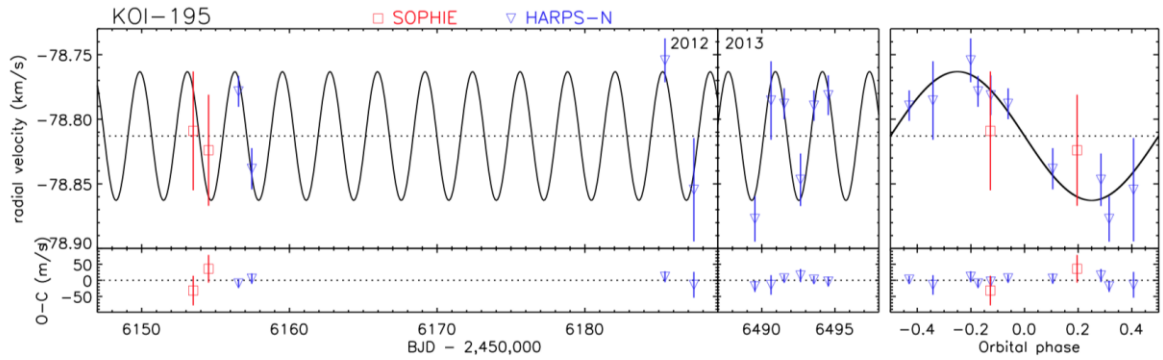


Şekil 4.1. Kepler-7b'nin üç farklı tarihi için gözlemsel ve kuramsal ışık eğrilerinin karşılaştırılması. a şeklinde 09.04.2013 – 11.05.2013, b şeklinde 13.01.2013 – 08.04.2013, c şeklinde ise 12.10.2012 – 11.01.2013 tarihleri arasındaki gözlem verileri kullanılmıştır

4.1.2. Kepler-426b

KOI-195 veya Kepler-426 sistemi, Kepler uydu verilerinden 2014 yılında keşfedilmiştir. Ötegezegenli sistemin ilk ve tek geçiş ışık eğrisi analizleri Hebrard ve ark. (2014) tarafından gerçekleştirilmiştir. Yıldızın Kepler parlaklığı Kp=14,84 kadirken, görsel parlaklığı V=15,07 kadirdir. Hebrard ve ark. (2014) tarafından yıldızın dikine hız değişimleri de SOPHIE ve HARPS tayfçekerlerinden alınan tayflardan çıkarılmıştır (bakınız Şekil 4.2). Aynı çalışmada, dikine hız genliği 50 m/s olarak bulunmuştur. Güneş'e çok yakın özelliklerdeki (G1V) yıldızın metalce fakir ([Fe/H]=-0.21) olduğu belirlenmiştir. Kepler-426 yıldızı ile ilgili son ayrıntılı çalışma Bonomo ve ark. (2017) tarafından yapılmış olup bu

çalışmada metal zengin ([Fe/H]=-0.21) olduğuna ilişkin bilgi verilmişken yıldızın yaşı da 6 milyar yıl olarak tahmin edilmiştir. Gezegenli sistemin Hebrard ve ark. (2014) dışında ayrıntılı geçiş analizi bulunmamaktadır.



Şekil 4.2. Kepler-426 ötegezegenli yıldızının dikine hız değişimleri (Hebrard ve ark. 2014)

Çizelge 4.4. Kepler-7, Kepler-426 ve Kepler-435 sisteminin yıldız ve gezegeninin bazı temel parametreleri. Yıldızların parametreleri NASA Ötegezegen Arşivi'den alınmıştır

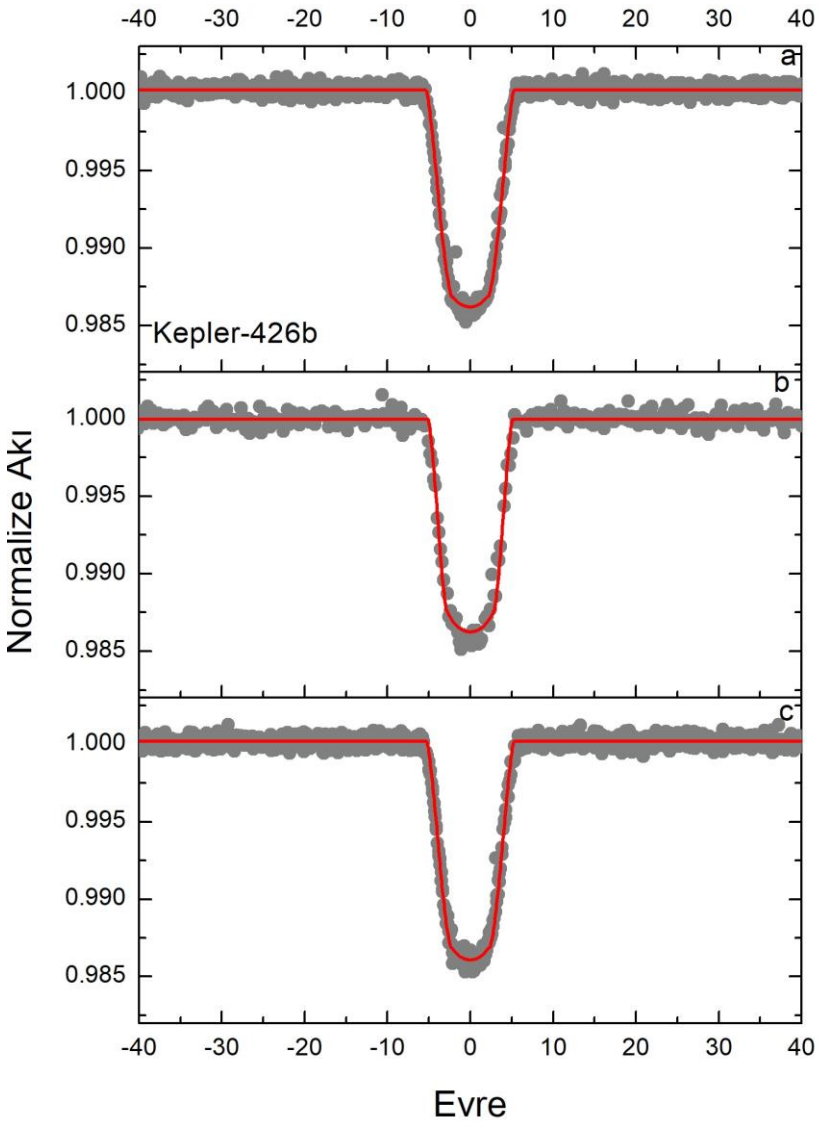
Yıldız	**Kepler-7b**	**Kepler-426b**	**Kepler-435b**
$M_\star$ ($M_\odot$)	1,37	0,87	1,33
$R_\star$ ($R_\odot$)	2,02	0,92	3,21
$\rho_\star$ ($\rho_\odot$)	0,23	1,17	0,05
log $g_\star$ (cgs)	3,98	4.48	3,50
T_e (K)	5933	5535	6230
Ötegezegen			
M_g (M_J)	0,43	0,34	0,84
R_g (R_J)	1,63	1,07	1,76
ρ_g (ρ_J)	0,13	0,41	0,23
log g_g (cgs)	2,63	2,92	2,89
T_{eq} (K)	1641	1779	1729

Kepler-426b için, bu çalışma kapsamında, Mayıs 2009 – Eylül 2010 tarihleri arasında Kepler uydusu ile gözlenmiş üç farklı geçiş eğrisi derlenerek yöntem bölümünde verildiği şekliyle WINFITTER yazılımıya analiz edilmiştir. Analiz sırasında kütle oranı, q=0.0003565 olarak sabit tutulmuştur (NASA Ötegezegen Arşivi). Kenar kararma katsayısı ise u=0,43 olarak kullanılmıştır (Rhodes ve Budding, 2018). Üç geçiş eğrisinden elde edilen

parametreler ve onların ağırlıklı ortalamaları hata değerleriyle birlikte Çizelge 4.5'te sunulmuştur. Geçiş eğrileri ile oluşturulan kuramsal modellerin (parametrelerin ağırlıklı ortalama değerlerine göre) karşılaştırılması Şekil 4.3'te görülebilir.

Çizelge 4.5. Kepler-426b'nin geçiş ışık eğrilerinin analiz sonuçları

Veri No.	$\Delta\varphi_o$	$\Delta\varphi_o$ (hatası)	r_1	r_1 (hatası)	k	k (hatası)	r_2	r_2 (hatası)	i (°)	i (hatası)
1	0,0395	0,0490	0,1148	0,00049	0,12075	0,00095	0,01386	0,00046	84,76	0,033
2	0,0318	0,0728	0,0885	0,00090	0,11401	0,00171	0,01008	0,00081	86,92	0,338
3	0,0012	0,0571	0,1018	0,00083	0,11862	0,00103	0,01207	0,00020	86,10	0,053
Ağ.Ort:	**0,0241**	**0,059**	**0,0992**	**0,00072**	**0,1170**	**0,00122**	**0,0115**	**0,00047**	**86,64**	**0,142**

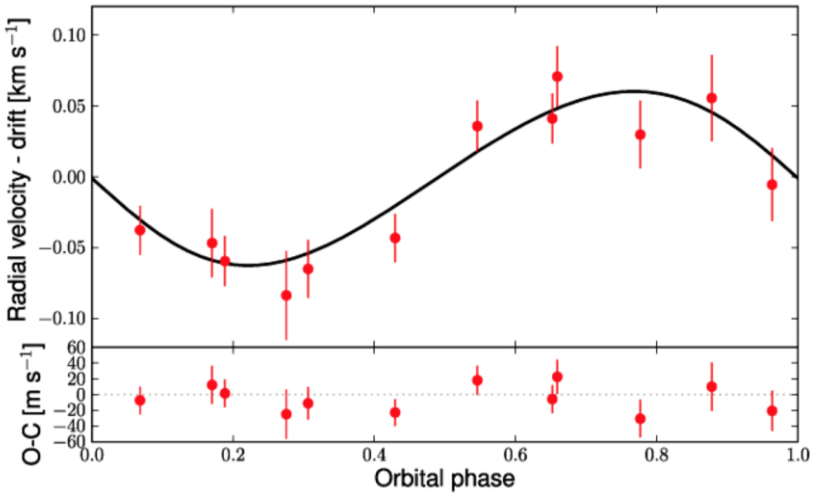


Şekil 4.3. Kepler-426b'nin üç farklı tarih için gözlemsel ve kuramsal geçiş ışık eğrilerinin karşılaştırılması. a şeklinde 24.06.2010 – 22.09.2010, b şeklinde 13.05.2009 – 15.06.2009, c şeklinde ise 18.09.2009 – 16.12.2009 tarihleri arasındaki gözlem verileri kullanılmıştır

Kepler 426b'nin geçiş etki parametresi (b) ise 0,69 olarak hesalanmış olup Hebrard ve ark. (2014) tarafından bulunan b=0,72 değerine oldukça yakındır. Yarıçapla oranı da hata mertebesinde Hebrard ve ark. (2014) tarafından elde edilene yakındır. Literatürle hemen hemen aynı değerde bulunan gezegenin yıldıza olan uzaklığı a=0,041 AB'dir ve buna bağlı sıcaklığı 1779 K olarak hesaplanmıştır. Ötegezegenin kütlesi 0,39 Mj ve yarıçapı ise 1,07 Rj olarak bulunmuştur (Çizelge 4.4). Kütlesi, Satürn'ün 1,1 katı olup gezegen, sıcak Satürn olarak tanımlanabilir.

4.1.3. Kepler-435b

KOI-680b (Kepler-435b, KIC 7529266b) sisteminin ötegezegeni, Santerne ve ark. (2012) tarafından, yıldızının dikine hız değişimleriyle keşfedilmiştir. Dikine hız değişimleri ve Kepler geçiş gözlemlerinin Q1-Q15 çeyrekleri arasındaki verileri, Almenara ve ark. (2015) tarafından ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu çalışma dışında, sistemle ilgili ayrıntılı bir çalışma rapor edilmemiştir. Almenara ve ark. (2015)'in çalışmasında, sistemin R=40000 çözümleme gücündeki SOPHIE tayfları incelenerek dikine hız değişimi çıkarılmıştır (Şekil 4.4). Aynı çalışmada dikine hız genliği 64 m/s olarak ölçülmüştür. Yıldızın kütlesi 1,54 $M_{\odot}$ ve yarıçapı 3,21 $R_{\odot}$ iken yüzey çekim ivmesi alt-dev yıldıza karşılık log g =3,61 olarak belirlenmiştir. Kepler-435 yıldızının yaşı ise 2,25 milyar yıl metal bolluğu ise [Fe/H] = -0,18 olarak tahmin edilmiştir (Almenara ve ark., 2015).



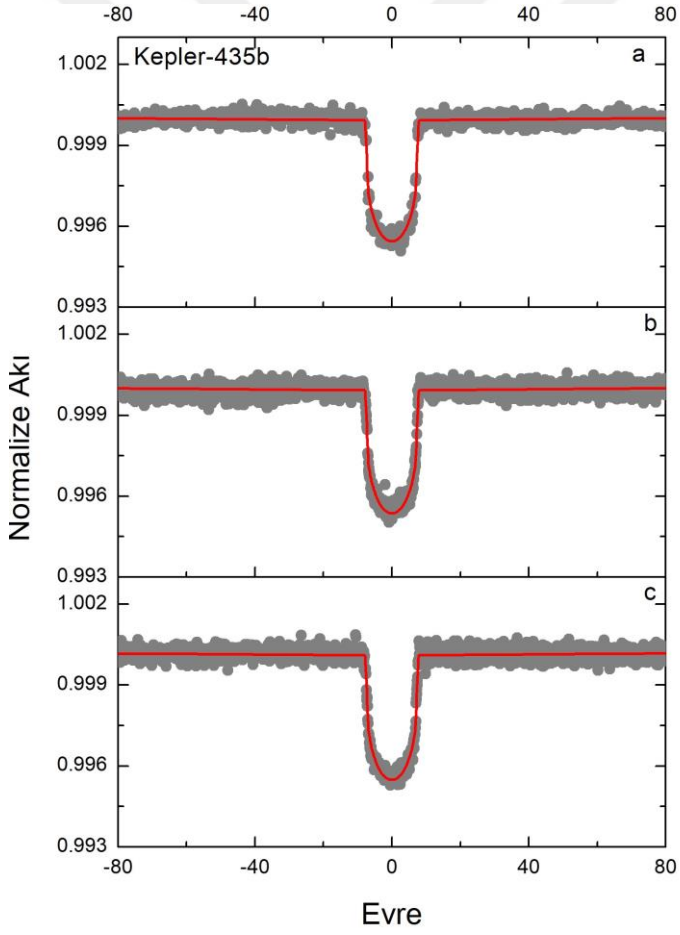
Şekil 4.4. Kepler-435'nin dikine hız değişimi, yörünge çözümünden elde edilmiş kuramsal (sürekli eğri) temsili ve fark dağılımı (Almenara ve ark., 2015)

Kepler-435b ötegezegeni için seçilen üç farklı tarihte Kepler uydusu tarafından gözlenmiş geçiş ışık eğrileri, diğer sistemlere benzer olarak WINFITTER yazılımıyla ayrı

ayrı analiz edilmiştir. Analizde doğrusal kenar kararma katsayısı u=0,659 alınırken (Rhodes ve Budding, 2018), kütle oranı ise q=0.00052 (Almenara ve ark., 2015) olarak sabit alınmıştır. Geçiş eğrisi analizlerinden elde edilen parametreler ve hataları, ağırlık ortalamalarla birlikte Çizelge 4.6'da listelenmiştir. Kepler geçiş ışık eğrileriyle, bu çalışmada elde edilen kuramsal parametrelerle oluşturulmuş model eğrilerin karşılaştırılması ise Şekil 4.5'te görülebilir.

Çizelge 4.6. Kepler-435b'nin geçiş ışık eğrilerinin analiz sonuçları

Veri No.	$\Delta\varphi_o$	$\Delta\varphi_o$ (hatası)	r_1	r_1 (hatası)	k	k (hatası)	r_2	r_2 (hatası)	i (°)	i (hatası)
1	0,0047	0,0282	0,1394	0,00016	0,06077	0,00018	0,00847	0,00002	86,97	0,062
2	0,0090	0,0118	0,1411	0,00007	0,06151	0,00009	0,00867	0,00002	86,67	0,025
3	0,0217	0,0130	0,1385	0,00008	0,06160	0,00010	0,00853	0,00002	87,01	0,029
Ağ.Ort:	**0,0098**	**0,0147**	**0,1395**	**0,00010**	**0,06117**	**0,00012**	**0,00855**	**0,00002**	**86,91**	**0,038**



Şekil 4.5. Kepler-435b'nin gözlemsel ve kuramsal geçiş ışık eğrilerinin karşılaştırılması. a şeklinde 13.05.2009 – 15.06.2009, b şeklinde 21.03.2010 – 23.06.2013, c şeklinde ise 24.06.2010 – 22.09.2010 tarihleri arasındaki gözlem verileri alınmıştır

Kepler-435b'nin bu çalışmada elde edilen geçiş parametreleriyle, Almenara ve ark. (2015) çalışmasıyla karşılaştırıldığında, parametrelerin hata mertebesinde uyumlu olduğu görülmektedir. Geçiş etki parametresi b, bu çalışmada 0,39 hesaplanırken Almenara ve ark. (2015) tarafından 0,45 bulunmuştur. Yarıçaplar oranı k, her iki çalışmada da çok yakın değerde (0,061 – 0,064) belirlenmiştir. Ötegezegen yıldızına sadece 0,095 AB uzaklıktadır. Kepler-435b'nin denge sıcaklığı 1729 K hesaplanmış olup kütle (0,84 Mj) ve yarıçap (1,76 Rj) değerlerine bakıldığında gezegen, düşük yoğunluklu, sıcak ve şişmiş bir Jüpiter olarak sınıflandırılacak bir ötegezegendir.

4.2. Ötegezegenli Yıldızların Bazı Temel Parametrelerinin Dağılımları

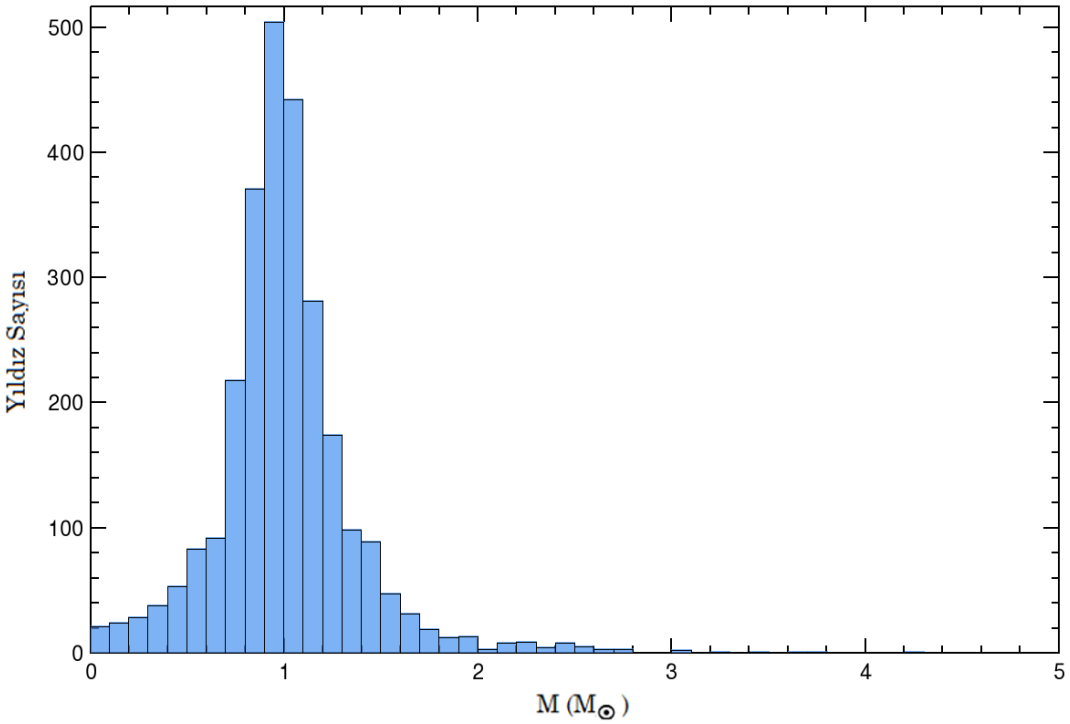
Gezegen araştırmalarında, öncelikli bilinmesi gerekenler, o gezegenlerinin temel parametreleridir. Gezegenlerin oluşumu, gelişimi ve temel parametreleri, yıldızının özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle bu çalışmada, bugüne kadar keşfedilen ötegezegenlerinin yıldızlarının belirlenen parametrelerinin dağılımları, güncel veri tabanı NASA Ötegezegen Arşivi (https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu) kullanılarak incelenmiştir. Yıldızların tamamının her parametresi belirlenemediğinden her parametre için dağılımda kullanılacak sayılar farklıdır.

4.2.1. Kütle

Yıldızların yaşamlarını çözmeye çalışırken bilinmesi gereken en önmeli ve öncelikli parametre onların kütleleridir çünkü yaşamları başlangıç kütlelerine yaşamı boyunca kaybedecekleri kütleye bağlı olarak değişir. Gezegenlerin oluşum ve yaşamları da yıldızlarının kütlesine bağlı değişiklik gösterebilir. 4015 doğrulanmış ötegezegen olduğu halde çoklu gezegenler ve kütlesi bilinmeyenler çıkarıldığında 2695 ötegezegenin kütle dağılımı verilebilir. Histogram biçimindeki dağılım 0,1-5 $M_\odot$ aralığı için Şekil 4.6'da oluşturulmuştur.

Ötegezen keşiflerin önemli bölümü Kepler uydu teleskobuyla yapılmıştır. Kepler'in taradığı alan, gökada kollarının birinin olduğu Cygnus-Lyra takımyıldızlarının bir bölümüne karşılık gelmektedir. Bu bölgenin seçilmesinin en önemli nedenlerinden biri, bu alanda çok sayıda Güneş benzeri yıldız bulunmasıdır. Bu nedenle, seçim etkisinin sonucu olarak, ötegezegenli yıldızların önemli bölümününde, Güneş benzeri olması beklenebilir. Şekil 4.6'daki dağılımda, Gauss dağılımına benzer olarak, bunu yansıtmakta olup ötegezegenli yıldızların ortalama kütle değeri de yaklaşık 0,95 $M_\odot$ değerine karşılık gelmektedir. Kütlesi 5 $M_\odot$ değerinden büyük gezegenli yıldız sadece 6 adet bulunmuşken 2 $M_\odot$'den büyük

olanların sayısı ise 54 olduğu görülebilir. 1782 ötegezegenli yıldız, başka bir deyişle tüm yıldızların %66'sı, 0,8-1,2 $M_\odot$ kütle aralığındadır. Büyük kütleli yıldızlara sahip ötegezegenlerin keşfinde ve araştırılmasında zorluklar vardır, bu tip yıldızların ışıma şiddetleri büyük olduğundan geçiş anında yıldızın ışığındaki değişme çok az olur ayrıca büyük kütleli B ve A tayf türündeki yıldızlar zonklama nedeniyle yüksek genlikli ışık şiddeti değişimi gösterirler. Bu gibi etkiler büyük kütleli yıldızların gezegenleri hakkında çalışma yapmamızı zorlaştırmaktadır. Ötegezegenli yıldızlar içinde en küçük kütle değeri ise, 0,0094 $M_\odot$ olarak çekimsel merceklemeyle keşfedilmiş bir ötegezegen MOA-2015-BLG-337b'nin yıldızıdır.

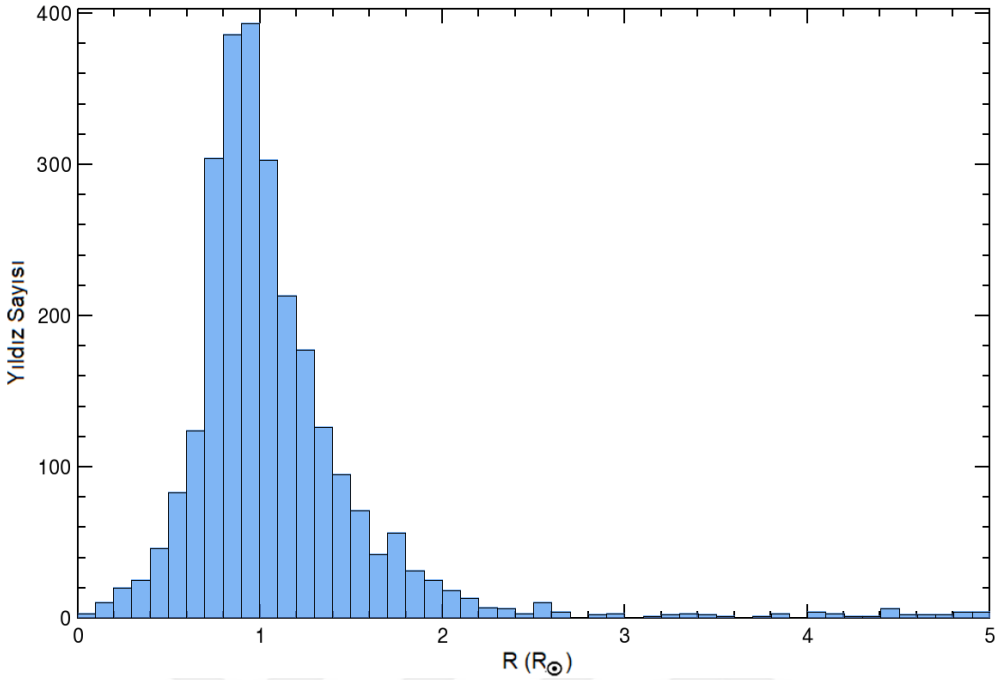


Şekil 4.6. Ötegezegenli yıldızların kütle dağılımları

4.2.2. Yarıçap

Yıldız evriminin önemli göstergelerinden biri de yarıçaptır. Yıldızlar, enerji üretimine başladıklarından itibaren yakıtları azaldıkça yarıçaplarını değiştirirler. Hidrojen yakılması sırasında, anakol evresinde, bu değişim çok büyük olmasa da veya çok uzun zaman ölçeğine yayılsada, anakol sonrası yarıçap değişimi hızlıdır. Yarıçap değişimleri, varsa yıldızların etrafındaki, gezegenlerin durumunu da etkileyecektir. Bu nedenlerle, ötegezegenli 2751 yıldızın yarıçap dağılımları incelenmiştir. Bu sistemlerde, geçiş ışık eğrileri ve dikine hız değişimi elde edildiğinden kütle ve yarıçaplar duyarlı elde edilebilmektedir. Yarıçapı

ölçülebilen yıldızların, yarıçap dağılımları 0-5 $R_\odot$ için, Şekil 4.7'de gösterilmektedir.

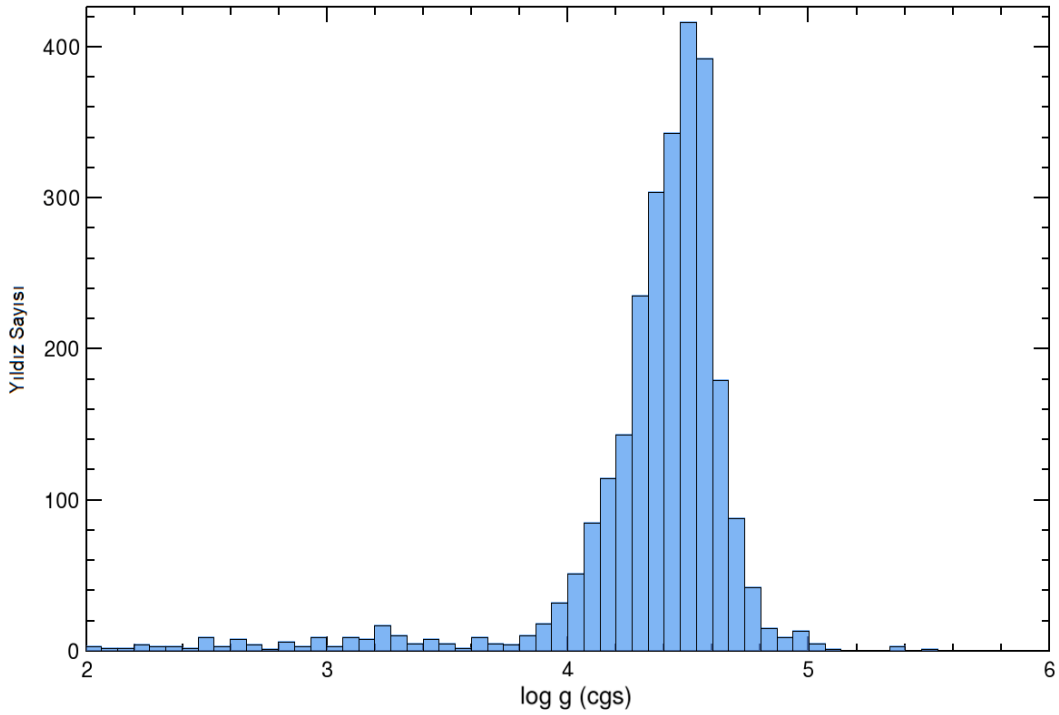


Şekil 4.7. Ötegezegenli yıldızların yarıçap dağılımları

Seçim etkisini de dikkate alarak, Güneş yarıçapı etrafında bir dağılım ortaya çıkmıştır (Şekil 4.7). Ortalama 1 $R_\odot$ değerine çok yakın olsa da 10 $R_\odot$'ten büyük 70 yıldızın olması dikkat çekicidir. Yıldızların önemli bölümünün Güneş kütlesinde olması ve büyük kütleli yıldızın çok olmasına karşın $R>5R_\odot$ olanların sayısının 112 (yaklaşık %4) olması, aralarında anakol evrimini tamamlamış yıldızların var olduğunu göstermektedir.

4.2.3. Yüzey Çekim İvmesi

Kütle ve yarıçaplarının etkin rol oynadığı ancak yarıçapa bağlılığı daha fazla olan yüzey çekim ivmei (log g), yıldızların evrimlerinin açıklanmasında kullanılanılan parametrelerdendir. İki boyutlu tayfsal sınıflamanın bir boyutu olan ışınım gücü sınıflamasının da fiziksel karşılığını oluşturmaktadır. Ayrıca, çift yıldız gibi davranan ve dikine hız değişimleriyle geçiş eğrileri elde edilebilen yıldız-ötegezegen sistemlerinde duyarlı bulunabilen parametrelerden biri log g'dir. Bu nedenlerle, ötegezegenli yıldızların log g dağılımları, onların evrim süreçleriyle ilgili bilgi vereceğinden önem taşır. Bu çalışmada hem kütle hem de yarıçapı bilinen ve dolayısıyla log g değeri hesaplanabilmiş ve 2668 adet yıldızın log g dağılımı oluşturularak Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Ötegezegenli yıldızların yüzey çekim ivmelerinin (log g; cm/s^2 biriminde) dağılımları

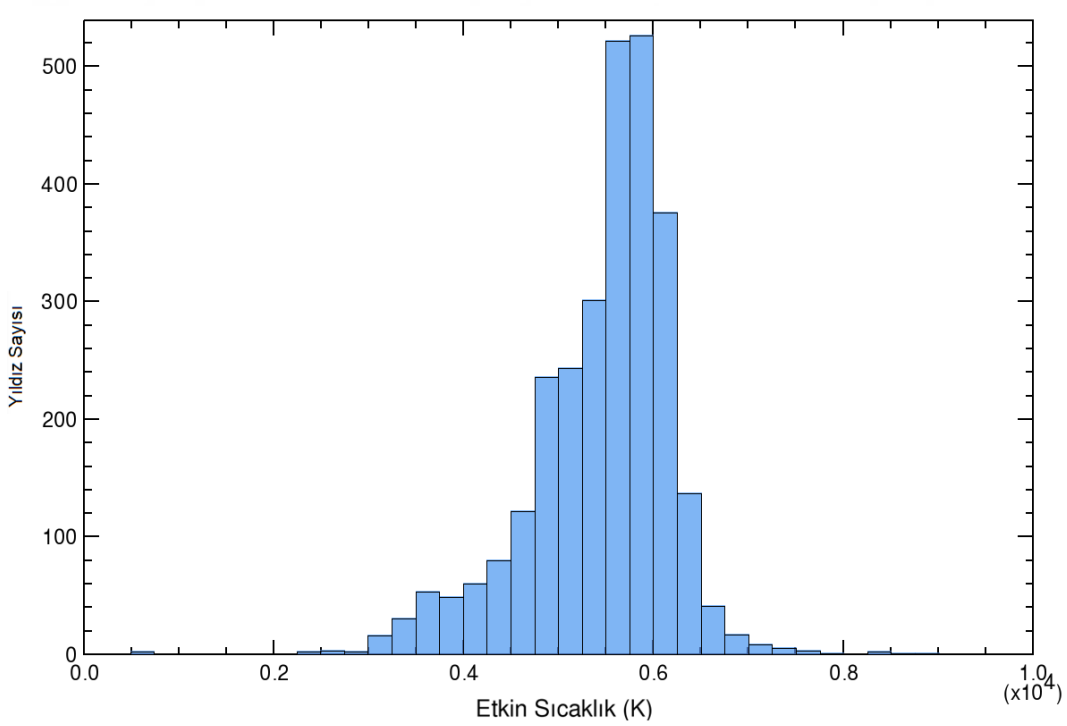
Anakol ve yakınındaki yıldızlar için yaklaşık olarak log g >4,0 olduğundan, ötegezegenli yıldızların çok büyük bölümünün (%92) anakol veya yakınında olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 4.8). Yıldızların yaklaşık %47'nin log g değeri 4,4-4,6 aralığına girmektedir. Bu da yıldızların önemli bölümünün Güneş'in log g değeri (4,43) civarında değerler aldığını ortaya koymaktadır. Dev sınıfına girebilecek 20 kadar sistemin olduğu anlaşılsa da bazı verilerin (özellikle log g değeri 2'den küçük olanların bazıları) NASA Ötegezegen Arşivi'nde hatalı yer aldığı anlaşılmıştır.

4.2.4. Etkin Sıcaklık

Yıldızları tanımlamada ve sınıflamada kullanılan en öncelikli parametre onların etkin sıcaklıklarıdır. Uzaya yaydıkları enerji ve atmosfer özelliklerini, sıcaklık bilinmeden ayrıntılı incelemek çok olası değildir. Ötegezegenli sistemlerde de, yıldızların etrafında oluşan gezegenlerin oluşum süreçleri ve yıldızından alacakları enerjinin hesaplanabilmesi için yıldızların etkin sıcaklıklarına (T_e) ihtiyaç duyulur.

Bu çalışma kapsamında, çoğunluğu yüksek çözümleme gücünde alınmış tayflardan ölçülmüş olan, 2848 ötegezegegenli yıldızın etkin sıcaklık dağılımları oluşturulmuştur (Şekil 4.9). Dağılım 10.000 K'de kesilmiştir çünkü bu sıcaklıktan büyük yıldız sayısı sadece

9’dur. Ötegezegenli yıldızların %86’sı 4500-6500 K aralığında olup sıcaklık dağılımının tepe noktası, seçim etkisi de içinde olmak üzere, Güneş sıcaklığı civarındadır. Gezegeni olan yıldızların çok büyük bölümünün (yaklaşık %98) 3000-7000 K aralığında F, G, K ve erken M yıldızlarından oluştuğu anlaşılmaktadır. Bu dağılımda, taranan bölgede soğuk, Güneş benzeri yıldızın çok fazla olmasının etkisi olsa da gökadamızda da bu tür dağılımı beklememiz, yıldız evrimi açısından, kaçınılmaz görünmektedir. Soğuk yıldızların yaşam sürelerinin uzun olması ve sıcak yıldızların gezegenleri etrafında oluşturmayacak ve/veya yaşatmayacak derecede enerjik, dinamik olmaları ve kalabalık yıldız alanlarında bulunmaları, farklı gökyüzü taramalarında da benzer dağılımlara görebileceğimizi ortaya koymaktadır.

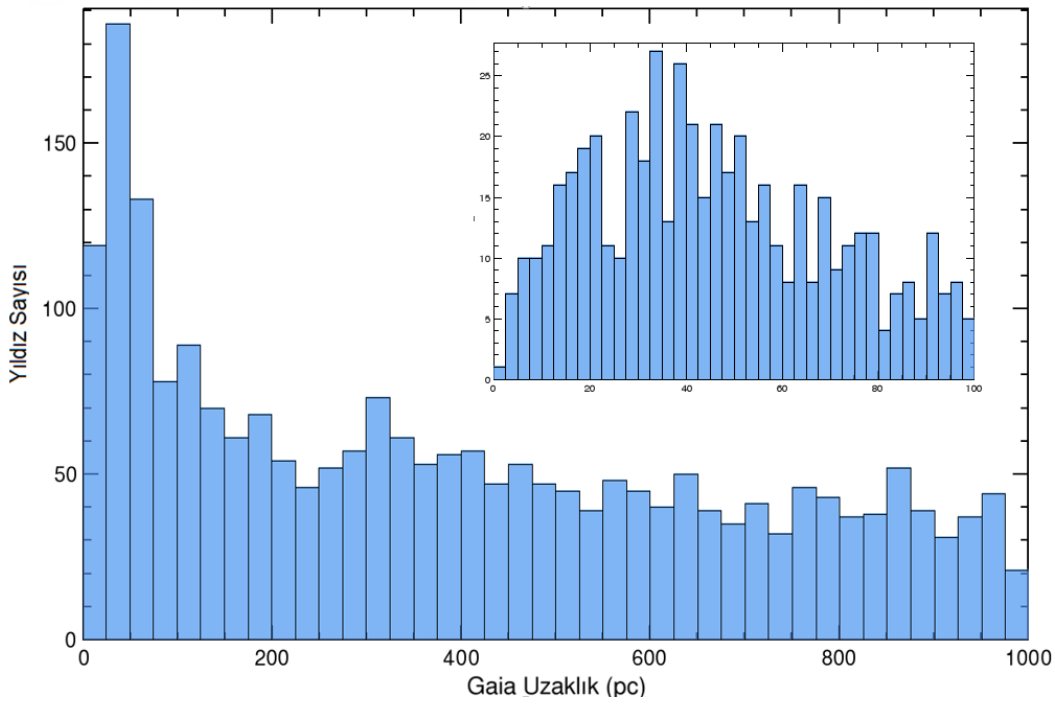


Şekil 4.9. Ötegezegenli yıldızların etkin sıcaklık (T_e) dağılımları

4.2.5. Uzaklık

Son yıllarda astronominin en problemli alanlarından biri olan uzaklık (d) ölçümü ile ilgili önemli aşamalar kaydedildi. 1990’lı yıllara damga vuran Hipparcos astrometrik verileri ve paralaks ölçümlerinden sonra, Gaia uydusunun 2018 ve 2019 astrometrik veri yayılımlarıyla birlikte milyonlarca yıldız için çok duyarlı öz hareket ve paralaks değerleri ulaşılabilir oldu (Gaia Collaboration, 2018). Neredeyse 1000 pc uzaklıklara kadar trigonometrik paralakstan gelen hatalar yüzde birkaç pc’e karşılık gelecek düzeyde iyileşti.

Bu durum yıldızların gökada dağılımları, kinematik ve dinamik özelliklerinin çıkarılması yanında farklı yollarla belirlenen temel parametrelerinin de denetlenmesi için olanak sağladı. Ötegezegenli yıldızların Nasa Ötegezegen Arşivi'nde 2851 adet Gaia uzaklık verisinin dağılımı, ötegezegenlerinin de uzaklıklarına karşılık gelmek üzere, Şekil 4.10'da oluşturuldu. d>1000 pc olan sistemler, toplamın sadece %18'ini oluşturduğundan dağılım 1000 pc uzaklığa kadar oluşturuldu. Uzaklıkları 2 kpc'ten büyük olanların oranı ise sadece %2 civarında. Şekil 4.10'daki dağılımda 10 pc'ten yakın (başka deyişle d<32.6 ışık yılı) ötegezegenlerin sayısı 28 olarak görülüyor. Dünya'ya yakın ötegezegen içeren yıldız sayısı, özellikle, Kepler uydu taramalarıyla, önemli derecede artmış olup TESS uydusu keşifleriyle bu sayının çok daha fazla artacağı beklenmektedir.



Şekil 4.10. Yıldız-ötegezegen sistemlerinin uzaklık (d<1000 pc olanlar için) dağılımları. İkinci panelde d<100 pc için uzaklık dağılımı ayrıca verilmiştir

4.3. Ötegezegenlerin Bazı Temel Parametrelerinin Dağılımları

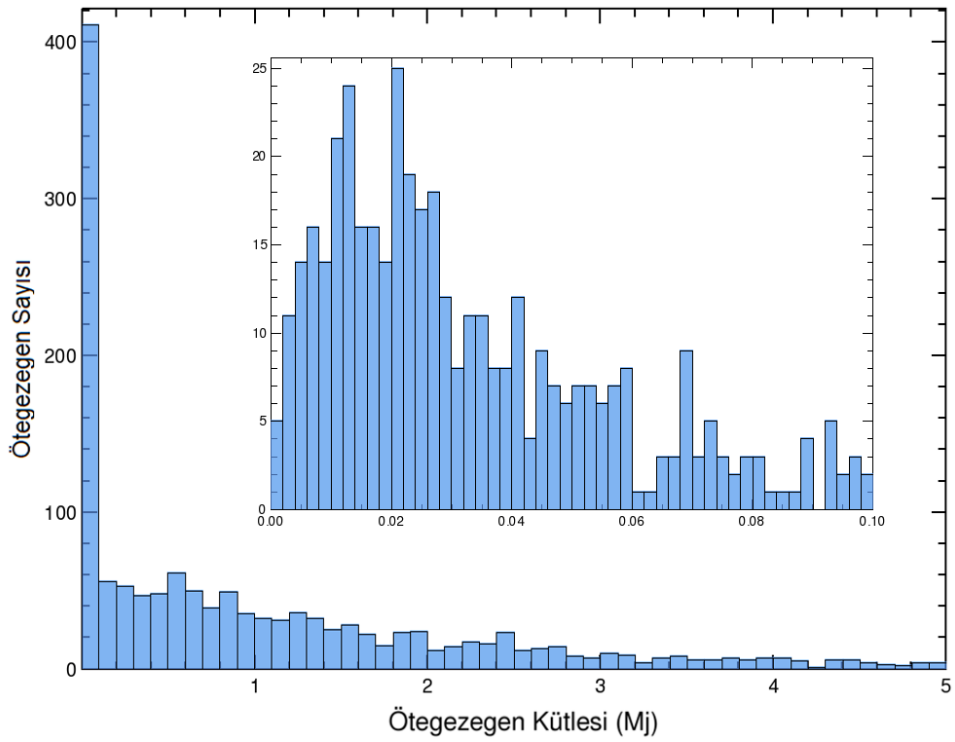
NASA Ötegezegen Arşivi'nde 28 Temmuz 2019 tarihi itibariyle 4025 onaylanmış ötegezegen yer almaktadır. Bu gezegenlerin temel parametre dağılımları, özellikle dikine hız değişimleri ve geçiş ışık eğrileri elde edilebilen sistemler için büyük ölçüde ölçülebilmiştir. Eğer ek olarak, yıldızların yüksek çözümleme gücünde tayfları alınıp atmosfer parametreleri de elde edilebilmişse, bu çıktılar ötegezegenlerin çok daha iyi anlaşılmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada, istatistik çıkarılabilecek ötegezegen sayısına ulaşıldığından

onların bazı temel parametre dağılımları çıkarılmıştır.

4.3.1. Kütle

Ötegezegenlerin kütleleri, onların sınıflandırılmalarında öncelikli parametredir. Sıklıkla kullanılan sınıflamaya göre 13 Jüpiter kütlesinden küçük kütleli cisimler gezegen sınıfına girmektedir. Yıldızının dikine hız değişimi ve duyarlı geçiş eğrileri elde edilenlerin büyük ölçüde kütle tahminleri yapılabilmiştir.

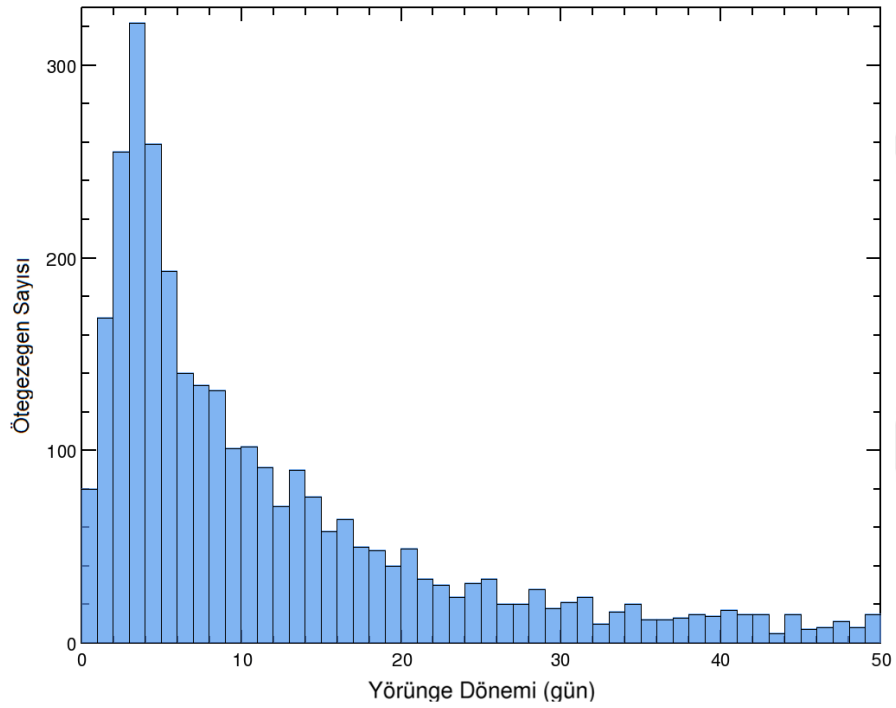
NASA Ötegezegen Arşivi'nde kütle veya kütle fonksiyonu bilinen ötegezegen sayısı 1601'dır. Bu ötegezegenlerin kütle dağılımları Şekil 4.11'de gösterilmektedir. Dağılım M<5 Mj için verilmiştir çünkü kütlesi 5 Mj'den büyük olan ötegezegenlerin toplamın %13'ü kadardır. Kütlesi 20 Mj değerinden büyük olanların sayısı sadece 25 iken, 13 Mj'den büyük olanların sayısı 59 olarak ortaya çıkmaktadır. 1 Mj'den küçük kütleli olanlar ise 847 olup toplam sayısının %53'ünü oluşturmaktadır. Kütlesi, Dünya kütlesinden küçük olanların sayısı ise sadece 9'dur. Bugüne kadar en büyük kütleli ötegezegen veya kahverengi cücenin kütlesi ise yaklaşık 56 Mj olarak hesaplanmıştır. Bugüne kadar, onaylanmış ötegezegenlerin yaklaşık %40'ının kütlesi veya kütle fonksiyonu belirlenebilmiştir.



Şekil 4.11. Kütleleri 5 Mj'den küçük olan ötegezegenlerin kütle dağılımları. İç panelde ise kütlesi 0,1 Mj değerinden küçük olan gezegenlerin dağılımı görülebilir

4.3.2. Yörünge Dönemi

Ötegezegenlerin yörünge dönemleri, dikine hız değişimleri veya geçiş eğrilerinden kolaylıkla ve duyarlı biçimde belirlenebilir. Bu nedenle, keşfedilen ötegezegenlerden önemli bölümünün (%97) hassas biçimde yörünge dönemleri ölçülebilmiştir. Yörünge dönemi küçük olan büyük kütleli ötegezegenlerin keşifleri teknik açıdan daha yüksek olasılıklı olduğundan, dönem dağılımında seçim etkisi nedeniyle, kısa dönemlilerin sayısı oldukça fazladır. Dağılımın daha açık görülmesi için Şekil 4.12'de dönemi 50 günden küçük olanların dağılımları gösterilmiştir ki bunların sayısı 3016'dır.



Şekil 4.12. Yörünge dönemi 50 günden küçük olan ötegezegenlerin dönem dağılımları

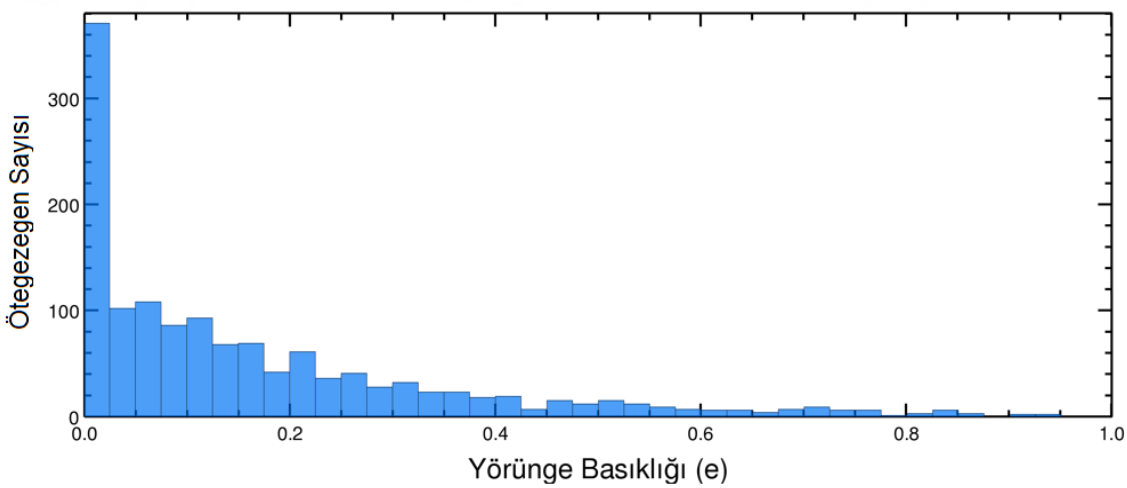
Ötegezegenlerin yörünge dönemlerine bakıldığında, 10 yıldan büyük döneme sahip yıldızına oldukça uzak olanların sayısı 64 iken, dönemi 1 yıldan büyük olanların sayısı ise 431 (%11) olarak görülmektedir. Toplam sayının %82'si ise 100 günden küçük döneme sahiptir. Yıldızına oldukça yakın olan ve dönemi 1 günden küçük olanların sayısı ise 91'dir. Dünya benzeri yıl mertabesinde dönemi olanları keşfetmek için daha uzun süreli ve duyarlı tarama gözlemlerine ihtiyaç vardır. Yer tabanlı gözlemler ve TESS uydu verileriyle bu tür ötegezegenlerin de keşifleri artacaktır.

4.3.3. Yörünge Basıklığı

Gezegen yörüngelerinin önemli parametrelerinden biri de yörüngenin biçimini veren basıklık (e) parametresidir. Keşfedilen ötegezegenlerin önemli bölümü yıldızına yakın ve

kısa yörünge dönemine sahip olduklarından çoğunlukla çember yörüngeye sahip olması beklenebilir.

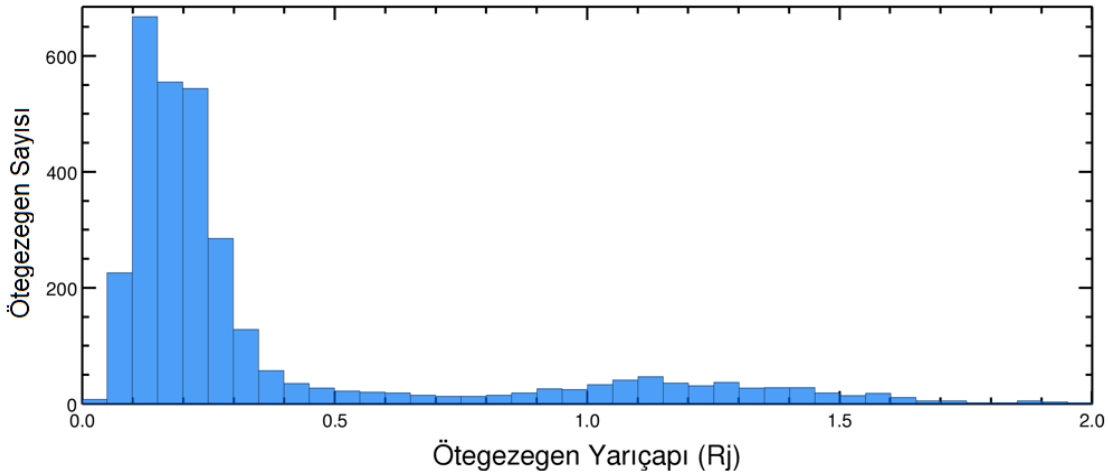
NASA Ötegezegen Arşivi'nde basıklık ölçümü olan ötegezegen sayısı 1372'dir. Bunların dağılımları, Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Beklenenin aksine ölçümü olan ötegezegenlerin sadece %21'i çember yörüngede dolanmaktadır. Ancak %50'ye yakınının basıklık değeri 0.1'den küçük olarak bulunmuştur. Basıklığı büyük olanlara bakıldığında e>0,5 olan 100 kadar ötegezegen belirlenmiştir. Yıldızına yaklaşma ve uzaklaşma yapacağından, yüksek basıklığa sahip olanların izlenmesi farklı sonuçlar çıkarabilir. Bu nedenle, farklı gözlem teknikleri ve süzgeçlerle bu tür gezegenlerin takip gözlemleri önem kazanmaktadır.



Şekil 4.13. Ötegezegenlerin yörünge basıklığının dağılımı

4.3.4. Yarıçap

Gezegenlerin yarıçapları (R_g) kütleleriyle birlikte onların yoğunluklarını ve dolayısıyla sınıflamalarını yapmak için önemli parametrelerdendir. Yıldız-ötegezegen sisteminin yörünge çözümü yapılmışsa ve geçiş ışık eğrisi parametreleri elde edilmişse, yıldız ve gezegeninin yarıçapı elde edilebilmektedir. Bu çalışmada, 3137 sistemin yarıçap dağılımları çıkarılmış ve Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Yarıçap dağılımları incelendiğinde, R_g>2 Rj olanların sayısı sadece 7 olduğundan Şekil 4.14'te üst sınır 2 Rj olarak alınmıştır. Şekilden görüleceği üzere, ötegezegenlerin önemli bölümünün (%81) yarıçap 0,5 Rj'den küçüktür. Küçük bir çıkış olsa da, Şekil 4.14'teki ikinci bir pik ise yaklaşık 1,1 Rj civarındadır. Dünya yarıçapından küçük ötegezegenlerin sayısının ise 162 olduğu görülmektedir.

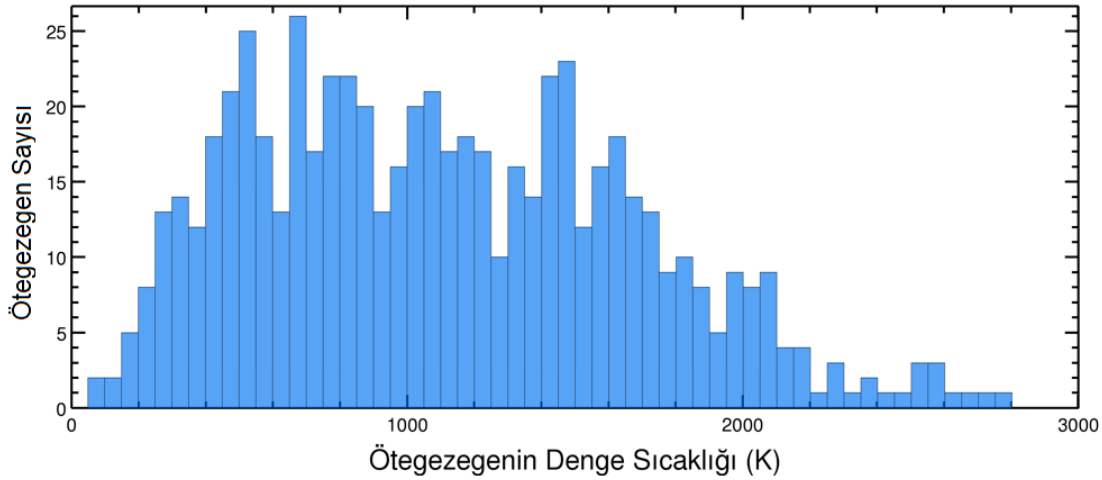


Şekil 4.14. Ötegezegenlerin yarıçap (R<2 Rj için) dağılımları

4.3.5. Denge Sıcaklığı

Ötegezegenlerin albedolarına, yıldızlarının etkin sıcaklığına ve yıldızlarına olan uzaklıklarına bağlı olarak tanımlanan sıcaklığa, denge sıcaklığı (T_{eq}) adı verilir (bakınız: http://www.mpia.de/homes/ppvi/chapter/madhusudhan.pdf). Gezegenin ısısal dengede olduğu varsayılarak hesaplanır. Dünya için bu değer -13 ^{o}C'ye karşılık gelmektedir. Ancak sera etkisiyle Dünya üzerindeki ortalama sıcaklık açıklanabilmektedir. Ötegezegenler için de sıklıkla denge sıcaklığı, temel parametrelerden biri olarak kullanılmaktadır.

Uzaklık ve albedo bilgisi gerektiğinden sadece 644 ötegezegen için denge sıcaklığı hesaplanabilmiştir. Ötegezegenlerin denge sıcaklıklarının dağılımları, Şekil 4.15'te verilmektedir. Sadece bir gezegen 3000 K'ten büyük sıcaklık değerine sahip olduğundan, şekilde sınır değer 3000 K olarak alınmıştır. Yaklaşık olarak en soğuk M cücelerinin sıcaklığı olan 2500 K'den sıcak olan ötegezegen sayısı 11'dir. Ötegezegenlerin yaklaşık yarısının 1000 K'den daha düşük sıcaklığa sahip olduğu görülebilir. 500 K'den büyük sıcaklığa sahip olanlar ise toplamın %85'ini oluşturmaktadır. Bu durum, ötegezegenlerin kütle ve yarıçaplarıyla birlikte değerlendirildiğinde çok sayıda sıcak Jüpiter sınıfı ötegezegenin keşfedildiği bu dağılımdan da açıkça görülebilir.



Şekil 4.15. Ötegezegenlerin denge sıcaklıklarının dağılımları

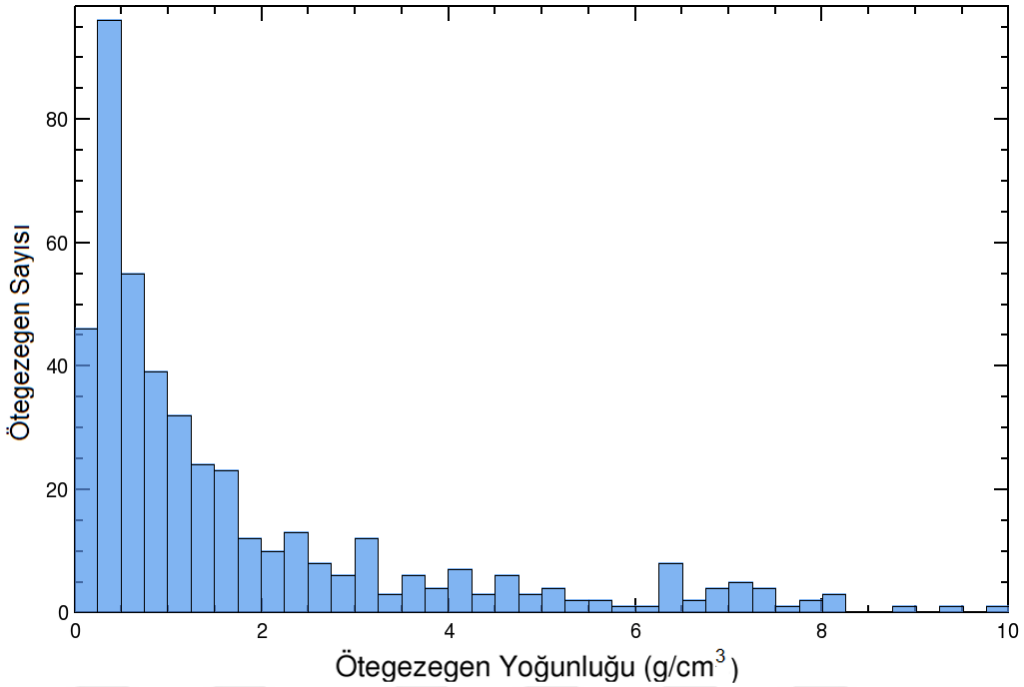
4.3.6. Yoğunluk

Ötegezegenlerin ana sınıflaması gaz ve kayaç olarak yapılmaktadır. Bunun için yoğunluk bilgisine ihtiyaç duyulur. Çizelge 4.7'de gezegenler için yoğunluğa göre yapılan temel bir sınıflama yer almaktadır. Buna göre ötegezegenlerin gaz ve kayaç sınıfa ait olup olmadıkları söylenebilir.

Çizelge 4.7. Farklı tür gezegenler için yoğunluk aralıkları (Odrzywolek ve Rafelski, 2016)

Sınıf	Yoğunluk (g/cm^3)
Buz-Gaz	0,3 - 2,1
Kayaç-Demir	3,6 - 13,4
Dejenere	>30

Bu çalışmada, NASA Ötegezegen Arşivi'nde yoğunluk verisi olan 473 ötegezegenin yoğunluk dağılımı Şekil 4.16'da görülebilir. Şekilde yoğunluk sınırı 10 g/cm^3 olarak alınmıştır çünkü bu değerden daha büyük yoğunluğa sahip ötegezegenlerin sayısı sadece 23'tür. Çizelge 4.7'deki aralıklar dikkate alınarak, keşfedilen gezegenlerin yaklaşık yarısının gaz (Satürn, Jüpiter benzeri), yaklaşık 50 adedinin ise kayaç gezegen olabileceği görülmektedir.



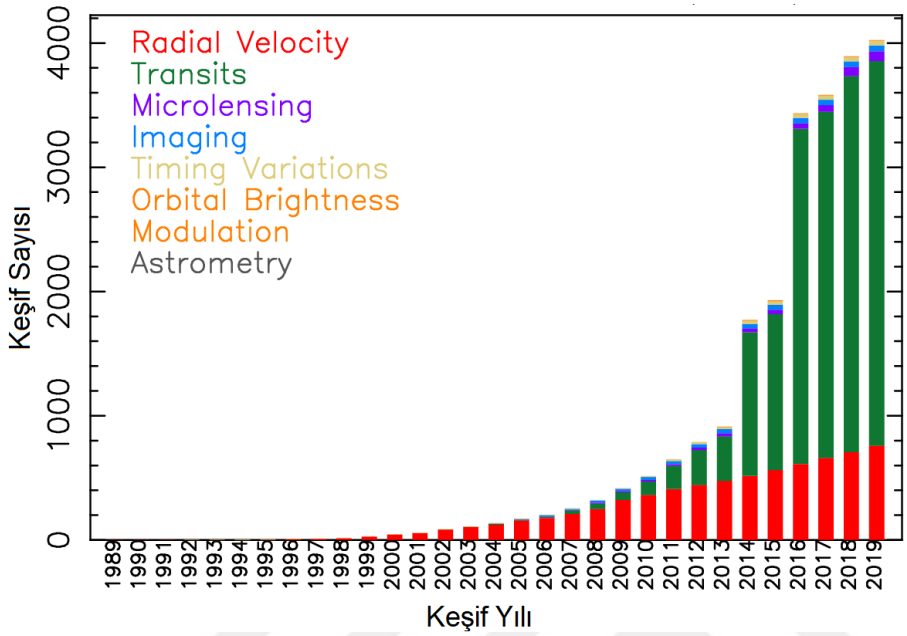
Şekil 4.16. Ötegezegenlerin yoğunluk dağılımları

BÖLÜM 5
SONUÇ VE ÖNERİLER

Ötegezegen araştırmaları yaklaşık 30 yıldır devam etmesine karşın son 10 yıldır ivmelenme göstermiştir. Özellikle 2009 yılında Kepler uydusunun fırlatılmasından itibaren gelen keşifler, bu alanda önemli ilerlemelerin önünü açmıştır. Özellikle Dünya benzeri yaşam olasılığı bulunan gezegen aramak için planlanan Kepler uydusu sayesinde, doğal olarak, büyük çoğunlukla, Jüpiter benzeri gaz devleri ötegezegenlerin keşfi gerçekleştirilmiştir. CoRoT uydusu gezegen araştırmalarına az da olsa katkıda bulunsada, yaptığı keşif ve verisi kullanılarak üretilen araştırmalar sınırlı seviyede kalmıştır. Gezegen araştırmalarında en önemli keşif ve katkılar Kepler uydu teleskobu verilerinin analizinden üretilmiştir. 2012 yılına kadar sorunsuz çalışan Kepler uydusu, arızalansa da daha sınırlı bir görevle (K2) veri üretmeye devam etmiş ve 2018 yılında veri üretimi sona ermiştir. Yaptığı gökyüzü taramalarında ürettiği verilerle 2662 adet (tüm keşfedilen ötegezegenlerin %66'sı) ötegezegen keşfi gerçekleştirilmiştir (exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/). 4025'e ulaşan ötegezegenlerin keşif sayılarının yıllara göre kümülatif dağılımı Şekil 5.1.de gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere, 2010 yılından itibaren Kepler uydu katkısı ağırlıklı olmak üzere, geçiş gözlemleriyle keşif sayısı önemli miktarda artış göstermiştir. Sayıları az da olsa, uzak ötegezegen keşifleri için önemli olan çekimsel mercekleme ile keşifler de bu alana katkı sunmaktadır. Yıldızların ötegezegenler nedeniyle gösterdikleri dikine hız değişimlerinden gelen keşiflerde, sönük yıldızların yüksek S/N (sinyalin gürültüye oranı) ve çözümleme gücündeki tayflar alınmaya başlandığından artma göstermektedir. Bu yöntemle gelen keşifler ve elde edilen veriler, özellikle gezegenlerin duyarlı yörünge çözümleri ve kütle fonksiyonlarının belirlenmesinde anahtar rol oynamaktadır.

Özellikle geçiş gözlemleriyle ötegezegen keşfi için planlanan, 18 Nisan 2018 yılında uzaya gönderilen ve 7 Ağustos 2018 tarihinde ilk gökyüzü görüntüsü alınan TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) uydusu neredeyse bir yıldır veri üretmeye devam etmektedir. Kepler'e göre çok daha geniş bir gökyüzü (Kepler'den 400 kat büyük alan tarayacaktır) taraması yapmakta olan TESS'in verileriyle çok daha fazla keşfin gelmesi beklenmektedir. Sadece keşif sayısı değil, farklı tür yıldızların etrafında ötegezegen araştırmalarının yanında daha fazla sayıda kayaç gezegenin keşfedilmesi öngörülmektedir. NASA Ötegezegen Arşivi'nde TESS verileriyle keşfedilen ötegezegen sayısı, Temmuz 2019 itibariyle, 24 ve onay bekleyen keşif ise 993 olarak verilmektedir. Ayrıca, TESS uzay

teleskobunun üreteceği veriler ve bu verilerle yapılacak araştırmalar, 2021 yılında uzaya gönderilmesi planlanan James Webb Uzay Teleskobu (JWST veya Webb) için de önemli bir kaynak oluşturacaktır.



Şekil 5.1. Ötegezegenlerin, 25 Temmuz 2019 tarihi itibariyle, kümülatif keşif sayıları (https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/)

Bu çalışmada, öncelikle, ötegezegen araştırmalarda gelinen seviye, keşif yöntemleri üzerinden tarihsel bir bakış altında sunulmuştur. Daha sonra, seçilen üç Kepler ötegezegenli yıldızın (Kepler-7b, Kepler-426b ve Kepler-435b) geçiş eğrilerilerinin analizleri yapılarak, geçiş parametreleri ve buna bağlı olarak bazı temel parametreleri hesaplanmıştır. Tüm ötegezegenler için üç farklı tarihte Kepler uzay teleskobuyla elde edilmiş geçiş verileri derlenerek, çift yıldızların ışık ve dikine hız veri analizlerinde de kullanılan ve literatürde test edilmiş WINFITTER yazılımıyla analiz edilmiştir. Sistemlere ilişkin sonuç geçiş parametreleri ise, üç farklı tarih aralığındaki geçiş eğrilerinden elde edilen parametrelerinin ağırlıklı ortalamalarıyla bulunmuş ve bu değerler, temel parametre hesabında kullanılmıştır.

Kepler-7b ötegezegeninin yıldızı yaklaşık Güneş etkin sıcaklığında olup, Güneş'e göre az da olsa metalce zengin bulunmuştur (Esteves ve ark., 2015). Bu çalışmada gerçekleştirilen geçiş eğrisi analizleri sonucunda, gezegenin yarıçapının yıldızının yarıçapına oranı k=0,081 olarak belirlenmiştir. Geçiş eğrisi çember yörünge varsayımıyla analiz edilmiş ve yörüngenin eğimi yaklaşık 85,7 derece olarak bulunmuştur. Geçiş parametreleri ve literatürden alınan yıldız özellikleri kullanılarak Kepler-7b ötegezegeninin temel bazı

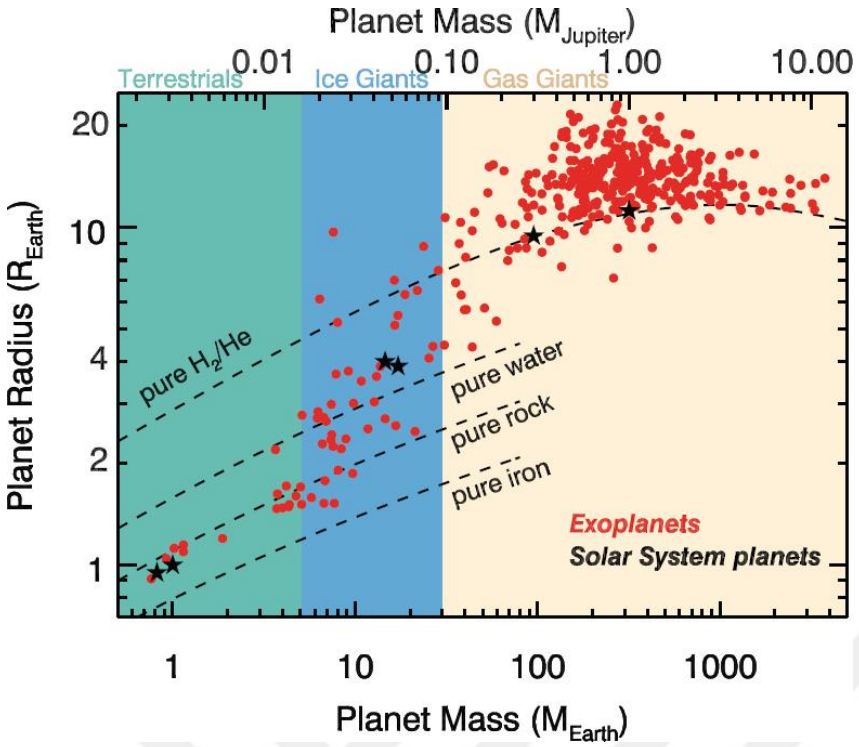
parametreleri hesaplanarak Çizelge 5.1'de listelenmiştir. Ötegezegen 0,44 Mj kütlesinde (Satürn kütlesine daha yakın) olmasına karşın yıldızına sadece 0,06 AB uzaklıkta olduğundan 1641 K denge sıcaklığındadır. Yarıçapının da 1,63 Rj bulunması ancak daha sıcak ve düşük yoğunluklu şişmiş bir gaz devi bir ötegezegen olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 5.1. Çalışılan ötegezegenler için hesaplanan bazı temel parametreler.

Gezegen	M_g (M_J)	R_g (R_J)	ρ_g (g/cm^3)	log g_g (cgs)	T_g (K)
[1] Kepler-7b	0,44 ± 0,04	1,63 ± 0,01	0,13 ± 0,01	2,63 ± 0,04	1641 ± 25
[2] Kepler-426b	0,34 ± 0,08	1,09 ± 0,03	0,26 ± 0,06	3,47 ± 0,02	1779 ± 35
[3] Kepler-435b	0,84 ± 0,15	1,99 ± 0,18	0,13 ± 0,04	2,72 ± 0,11	1729 ± 10

Gezegenlerin parametreleri: [1]Esteves ve ark. (2015), [2] J.M. Almenara ve ark. (2015), [3]Hebrard ve ark. (2018)

Kepler-426b ötegezegeni, 5725 K sıcaklıklı bir anakol G yıldızı etrafında yaklaşık 3,22 gün dönemle dolanmaktadır. Literatürde tek ayrıntılı geçiş analizleri Hebrard ve ark. (2014) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, üç farklı geçiş analizi sonucu geçiş etki parametresi b=0,69 olarak hesaplanmıştır. Gezegenin yörünge eğimi 86,6 derece bulunmuşken, yarıçaplar oranı ise k=0,117 olarak hesaplanmştır. Elde edilen geçiş parametreleri Hebrard ve ark. (2014) ile uyumludur. Ötegezegenin yarıçapı Jüpiter'e çok yakın çıkmışken, kütlesi Satürn ile benzerdir (Çizelge 5.1). Kepler-426b, denge sıcaklığı (1779 K) dikkate alındığında sıcak Satürn türü bir ötegezegen olarak ortaya çıkmaktadır. Yıldızına oldukça yakın olması nedeniyle bu tür yüksek denge sıcaklığı ortaya çıkmaktadır. Yoğunluk değeri de sıcak bir gaz devi olduğunu desteklemektedir. Kepler-426b'nin bazı ötegezegenlerin kütle-yarıçap dağılımları ve sınıflarını gösteren Şekil 5.2'deki konumu da gaz devlerinin bulunduğu yoğun bölgeye (şeklin üst-orta bölümü) karşılık gelmektedir.



Şekil 5.2. Bazı ötegezegenlerin kütle-yarıçap dağılımları ve gezegen sınıflamaları (https://www.nap.edu/catalog/25187/exoplanet-science-strategy)

Bu çalışmada, analizleri gerçekleştirilen Kepler-435b ötegezegeni ise, 6161 K sıcaklıktaki bir alt-dev yıldızın etrafında yaklaşık 8,6 gün dönemle dolanmaktadır (Almenara ve ark., 2015). Geçiş ışık eğrisi analizlerinden etki parametresi *b*=0,39 olarak hesaplanmış olup yörünge eğikliği ise 86,9 derece bulunmuştur. Yıldızına sadece 0,095 AB uzaklıkta bulunan ötegezegenin denge sıcaklığı da buna bağlı olarak 1729 K hesaplanmıştır (Çizelge 5.1). Kepler-435b'nin yoğunluk (0,13 g/cm^3), kütle ve yarıçap değerleri dikkate alındığında şişmiş, sıcak bir Jüpiter sınıfı ötegezegen olduğu söylenebilir. Çalışılan diğer iki ötegezegen gibi Kepler-435b de olası yaşam bölgesinden uzakta, yıldızına oldukça yakın bir gaz gezegendir.

Bugüne kadar keşfedilen gezegenlerin yarısından fazlasının Kepler uydu teleskobunun verilerinin analizinden ortaya çıktığı bilinmektedir. Kepler uzay teleskobu, özellikle Güneş türü yıldızların yoğun olduğu küçük denilebilecek bir alanda tarama yaptığından, keşfedilen ötegezegenlerin yıldızlarının önemli bölümünün Güneş türü olması beklenen durumdur. Ancak yine de 4000 sayısını geçmiş ötegezegenlerin ve yıldızlarının istatistik dağılımları farklı bilgiler taşımaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada hem ötegezegenlerin hem de yıldızlarının bazı temel parametrelerinin dağılımları incelenmiştir.

Ötegezegenli yıldızların kütle ve yarıçap dağılımlarında en büyük yığılma Güneş kütle ve yarıçapı civarındadır. Bu yıldızların, %66'sı, 0,8-1,2 $M_{\odot}$ kütle aralığındadır. Kütlesi, 5 $M_{\odot}$ değerinden büyük olan gezegenli yıldız sadece 6 adet olması, seçim etkisinin yanında, büyük kütleli yıldızlar etrafında gezegen oluşma ihtimalinin daha düşük olduğunu hem de büyük ışıtmaları nedeniyle gezegen varsa da keşiflerinin zor olacağını ortaya koymaktadır. Yarıçap dağılımında da benzer bir sonuç ortaya çıkmıştır. Yıldızların sadece %4'ü 5 $R_{\odot}$ değerinden daha büyük yarıçapa sahiptir. Yıldızların evrim durumlarının göstergesi olan yüzey çekim ivmesi (log g) dağılımları incelendiğinde, %92'den fazlasının anakol veya yakınında yer aldığı, yıldızların %47'sinin ise (log g) değerinin ise 4,4-4,6 aralığında yani Güneş'e çok yakın (log g) değerlerde olduğu görülmektedir. Gezegenli yıldızların etkin sıcaklıkları, uzaya ve dolayısıyla gezegene gönderdikleri akı için en önemli parametre olduğundan önemlidir. Etkin sıcaklık dağılımları, bu yıldızların %98'inin 3000-7000 K aralığında olduğunu göstermiştir. Yıldızların temel parametre değerlerinin kontrolü için oldukça önemli olan uzaklıklar, Gaia ölçümleri sayesinde neredeyse tüm ötegezegenli yıldızlar için, oldukça duyarlı olarak bilinmektedir. Ötegezegen içeren yıldızların yaklaşık %82'sinin 1000 pc'ten daha yakında olduğu görülmüştür. 10 pc'ten daha yakın mesafede ise yaklaşık 28 kadar gezegen vardır.

Ötegezegenlerin özelliklerinin anlaşılmasında ve sınıflandırılmasında kütle, yarıçap, yoğunluk ve denge sıcaklığı gibi parametreler önem kazanmaktadır. Ötegezegenlerin kütle dağılımları incelendiğinde, yaklaşık yarısının 1 Mj kütlesinden küçük veya büyük olduğu görülmektedir. Dünya kütlesinden küçük olan ve olasılıkla kayaç gezegenler ise sadece 9 adettir. Ötegezegenlerin önemli bölümünün (yaklaşık %81) yarıçaplarının 0,5 Rj değerinden küçük olduğu görülmektedir. Yoğunluk dağılımları ise, kayaç gezegenlerin 50 kadar olduğunu göstermektedir. Yoğunluğu bilinenlerden yaklaşık yarısının ise 2 g/cm^3 değerinden daha düşük yoğunluğa sahip olduğu (dev gaz gezegenler) söylenebilir. Ötegezegenlerin yörünge özelliklerine bakıldığında, keşfedilenlerin %82'sinin 100 günden daha kısa dolanma dönemlerine sahip olduğu görülmüştür. Ötegezegenlerin yaklaşık %21'i çember yörüngede dolanırken, 100 kadar yüksek basıklığa (e>0,5) sahip yörüngede hareket eden ötegezegen keşfedilmiştir. Ötegezegenlerin denge sıcaklık dağılımları, Güneş Sistemi gezegenlerinden oldukça farklıdır. Önemli bölümünün yıldızına yakın bulunması nedeniyle, denge sıcaklıkları genellikle büyüktür. Keşfedilen ötegezegenlerin yaklaşık yarısının denge sıcaklığı 1000 K'den büyük bulunmuştur.

Ötegezegen keşiflerinde gelinen noktada, çok sayıda sıcak Jüpiter, Satürn ve Neptün türü gezegenin özellikleri bilinmekle beraber Dünya benzeri boyutlarda olan ve olası yaşam

bölgesine düşen ötegezegen 50 kadardır. TESS uydusu ile Dünya benzeri olası yaşam bölgesinde yer alan ötegezegen sayısı artacaktır. Güneş'ten farklı özelliklerdeki yıldızlarda (sıcak, çok soğuk, çift yıldızlar vb.) daha fazla ve çeşitli gezegen keşfi, onların oluşum ve özelliklerinin anlaşılmasını sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Almenara J. M., Damiani C., Bouchy F., Havel M., Bruno G., Hébrard G., Diaz R. F., Deleuil M., Barros S. C. C., Boisse I., Bonomo A. S., Montagnier G., Santerne A., 2015. SOPHIE velocimetry of Kepler Transit Candidates. XV. KOI-614b, KOI-206b, and KOI-680b: A Massive Warm Jupiter Orbiting A G0 Metallic Dwarf and Two Highly Inflated Planets with a Distant Companion Around Evolved F-type Stars. Astronomy & Astrophysics 575: A71.

Andersen J. M., Korhonen H., 2015. Royal Astronomy Society. 448 (4): 3053-3069.

Andrej Odrzywolek and Johann Rafelski 2016. Classification of Exoplanets According to Density. Acta Physica Polonica B 49 (11): 1917-1922.

Beaulieu J. P., Bennett D. P., Fouqué P., Williams A., Dominik M., Jørgensen U. G., Kubas D., Cassan A., Coutures C., Greenhill J., Hill K., Menzies J., Sackett P. D., Albrow M., Brillant S., Caldwell J. A. R., Calitz J. J., Cook K. H., Corrales E., Desort, M. Dieters S. Dominis D., Donatowicz J., Hoffman M., Kane S., Marquette J. B., Martin R., Meintjes P., Pollard K., Sahu K., Vinter C., Wambsganss J., Woller K., Horne K., Steele I., Bramich D. M., Burgdorf M., Snodgrass C., Bode M., Udalski A., Szymański M. K., Kubiak M., Więckowski T., Pietrzyński G., Soszyński I., Szewczyk O., Wyrzykowski Ł., Paczyński B., Abe F., Bond I. A., Britton T. R., Gilmore A. C., Hearnshaw J. B., Itow Y., Kamiya K., Kilmartin P. M., Korpela A. V., Masuda K., Matsubara Y., Motomura M., Muraki Y., Nakamura S., Okada C., Ohnishi K., Rattenbury N. J., Sako T., Sato S., Sasaki M., Sekiguchi T., Sullivan D. J., Tristram P. J., Yock P. C. M., Yoshioka T., 2006. Discovery of a cool planet of 5.5 Earth Masses Through Gravitational Microlensing. Nature 439 (7075): 437-440.

Beichman C. A., Bryden G., Gautier T. N., Stapelfeldt K. R., Werner M. W., Misselt K., Rieke G., Stansberry J., Trilling D., 2005. An Excess Due to Small Grains around the Nearby K0 V Star HD 69830: Asteroid or Cometary Debris. The Astrophysical Journal 626 (2): 1061-1069.

Bevington P. R., 1969. McGraw-Hill, Data Reduction and Error Analysis for The Physical Sciences. 98-111.

Bond I., 2004. High Resolution Follow-up Observations of The Microlensing Event OGLE

2003-BLG-235/MOA 2003-BLG-53. HTS Proposal ID 10426 13.

Bonfils X., Lo Curto G., Correia A. C. M., Laskar J., Udry S., Delfosse X., Forveille T., Astudillo-Defru N., Benz W., Bouchy F., Gillon M., Hébrard G., Lovis C., Mayor M., Moutou C., Naef D., Neves V., Pepe F., Perrier C., Queloz D., Santos N. C., Ségransan D., 2013. The HARPS Search for Southern Extra-solar Planets. XXXIV. A Planetary System Around The Nearby M Dwarf GJ 163, with a Super-Earth Possibly in The Habitable Zone. Astronomy & Astrophysics 556: 16.

Bonomo A. S., Desidera S., Benatti S., Borsa F., Crespi S., Damasso M., Lanza A. F., Sozzetti A., Lodato G., Marzari F., Boccato C., Claudi R. U., Cosentino R., Covino E., Gratton R., Maggio A., Micela G., Molinari E., Pagano I. Piotto G., Poretti E., Smareglia R., Affer L., Biazzo K., Bignamini A., Esposito M., Giacobbe P., Hébrard G., Malavolta L., Maldonado J., Mancini L., Martinez Fiorenzano A., Masiero S., Nascimbeni V., Pedani M., Rainer M., Scandariato G., 2017. The GAPS Programme with HARPS-N at TNG. XIV. Investigating Giant Planet Migration History via İmproved Eccentricity and Mass Determination for 231 Transiting Planets. Astronomy & Astrophysics 602: 16.

Boss A. P., 2007. Testing Disk Instability Models for Giant Planet Formation. American Astronomical Society 39: 145.

Bowler B. P., Brendan P., Lui M. C., Kraus A. L., Mann A. W., Ireland M. J., 2011. A Disk around the Planetary-mass Companion GSC 06214-00210 b: Clues About the Formation of Gas Giants on Wide Orbits. The Astrophysical Journal 743 (2): 14.

Budding E., Demircan O., 2007. Introduction to Astronomical Photometry. Cambridge University Press 16: 434.

Budding E., Najim N. N., 1980. The System Vv-Orionis and the Consistency of Photometric Analysis of Eclipsing Binary Lightcurves. Astrophysics and Space Science 72 (2): 369-396.

Butler R. P., Marcy G. W., Fischer D. A., Brown T. M., Contos A. R., Korzennik S. G., Nisenson P., Noyes R. W., 1999. Extra-solar Planets. The Astrophysical Journal 526 (2): 916-927.

Charbonneau D., Brown T. M., Latham D. W., Mayor M., 2000. Detection of Planetary

Transits Across a Sun-like Star. The Astrophysical Journal 529 (1): L45-L48.

Chauvin G., Lagrange A. M., Dumas C., Zuckerman B., Mouillet D., Song I., Beuzit J. L., Lowrance P., 2004. A Giant Planet Candidate Near a Young Brown Dwarf. Direct VLT/NACO Observations Using IR Wavefront Wensing. Astronomy and Astrophysics 425: L29-L32.

Crockett C., Mahmud N., Prato L., Johns-Krull Christopher M., Jaffe D. T., Hartigan P., Beichman C. A., 2012. The Astrophysical Journal 761 (2): 17.

Cumming A., Butler R. P., Marcy G. W., Vogt S. S., Wright J. T., Fischer, D. A., 2008. The Keck Planet Search: Detectability and the Minimum Mass and Orbital Period Distribution of Extrasolar Planets. Publications of the Astronomical Society of the Pasific 120 (867): 531.

Currie T., Daemgen S., Debes J., Lafreniere D., Itoh Y., Jayawardhana R., Ratzka T., Correia S., 2013. Direct Imaging and Spectroscopy of a Candidate Companion Below/Near the Deuterium-Burning Limit In The Young Binary Star System, ROXs 42B. The Astrophysical Journal Letters 780 (2): L30.

Deeg H. J., Alonso R., 2018. Transit Photometry as an Exoplanet Discovery Method. Hand of Exoplanets. 633-657.

Demory B.O., Seager S., Madhusudhan N., Kjeldsen H., Christensen-Dalsgaard, J., Gillon, M., Rowe J. F., Welsh W. F., Adams E. R., Dupree A., McCarthy D., Kulesa C., Borucki W. J., Koch D. G., 2011. The High Albedo of the Hot Jupiter Kepler-7 b. The Astrophysical Journal Letters 735 (1): L12.

Dressing C., Charbonneau D., (15-20, July 2013). Inferring the Rate of Planet Occurrence by Injecting and Detecting Transits in the Kepler Light Curves of M Dwarfs. Retrieved June 20, 2019, from http://www.mpia.de/homes/ppvi/posters/2K049.pdf.

Dumusque X., Pepe F., Lovis C., Ségransan D., Sahlmann J., Benz, W., Bouchy F., Mayor M., Queloz D., Santos N., Udry S., 2012. An Earth-mass Planet Orbiting α Centauri B. Nature 491 (7423): 207-211.

Esteves L. J., De Mooij, E. J. W., Jayawardhana, R., 2015. Changing Phases of Alien Worlds: Probing Atmospheres of Kepler Planets with High-precision Photometry. The Astrophysical Journal 804 (2): 28.

European Space Agency (n.d.). Astrometric Measurements to Detect Exoplanets. Retrieved July 7, 2019, from https://sci.esa.int/web/gaia/-/58798-astrometric-measurements-to-detect-exoplanets.

Fischer D. A., Marcy G. W., Butler R. P., Laughlin G., Vogt S. S., 2002. A Second Planet Orbiting 47 Ursae Majoris. The Astrophysical Journal 564 (2): 1028-1034.

Gimenez A., 2006. Equations for the Analysis of The Light Curves of Extra-solar Planetary Transits. Astronomy and Astrophysics 450 (3): 1231-1237.

Gibson N. P., Pollacco D. L., Barros S., Benn C., Christian D., Hrudkova M., Joshi Y. C., Keenan F. P., Simpson E. K., Skillen I., Steele A., Todd I., 2010. A Transit Timing Analysis of Seven RISE Light Curves of The Exoplanet System HAT-P-3 Royal Astronomical Society 401 (3): 1917-1923.

Gostev N. Y., 2011. Light Curve Analysis for Eclipsing Systems with Exoplanets. The Systems Kepler-5b, Kepler-6b, and Kepler-7b. Astronomy Reports 55 (7): 649-659.

Hatzes A P., Cochran W. D., Endl M., McArthur B., Paulson D. B., Walker G. A. H., Campbell B., Yang S., 2003. A Planetary Companion to γ Cephei A. The Astrophysical Journal 599 (2): 1383-1394.

Hébrard G., Santerne A., Montagnier G., Bruno G., Deleuil M., Havel M., Almenara, J. M., Damiani C., Barros S. C. C., Bonomo A. S., Bouchy F., Díaz R. F., Moutou C., 2014. Characterization of The Four New Transiting Planets KOI-188b, KOI-195b, KOI-192b, and KOI-830b. Astronomy & Astrophysics 572: 14.

Henry G. W., Marcy G. W., Butler R. P., Vogt S. S., 2000. A Transiting “51 Peg-like” Planet. The Astrophysical Journal 529 (1): L41-L44.

Howard A. W., Sanchis-Ojeda R., Marcy G. W., Johnson J., Winn J. N., Isaacson H., Fischer D. A., Fulton B. J., Sinukoff E., Fortney J. J., 2013. A Rocky Composition for an Earth-sized Exoplanet. Nature 503 (7476): 381-384.

Huélamo N., Figueira P., Bonfils X., Santos N. C., Pepe F., Gillon M., Azevedo R., Barman T., Fernández M., di Folco E., Guenther E. W., Lovis C., Melo C. H. F., Queloz D., Udry S., 2008. TW Hydrae: Evidence of Stellar Spots Instead of a Hot Jupiter. Astronomy and Astrophysics 489 (2): L9-L13.

Johnson J. A., Petigura E. A., Fulton B. J., Marcy G. W., Howard A. W., Isaacson H., Hebb L., Cargile P. A., Morton T. D., Weiss L. M., Winn J. N., Rogers L. A., Sinukoff E., Hirsch L. A., 2017. The California-Kepler Survey. II. Precise Physical Properties of 2025 Kepler Planets and Their Host Stars. The Astronomical Journal 154 (3): 9.

Kalas P., Graham J. R., Chiang E., Fitzgerald M. P., Clampin M., Kite E. S., Stapelfeldt K., Marois C., Krist J., 2008. Optical Images of an Exosolar Planet 25 Light-Years from Earth. Science 322 (5906): 1345.

Kane M., Ragozzine D., Flowers X., Holczer T., Mazeh, T., Relles H. M., 2019. Visual Analysis and Demographics of Kepler Transit Timing Variations. The Astronomical Journal 157 (5): 15.

Konopacky Q. M., Barman T. S., Macintosh B. A., Marois C., 2013. Detection of Carbon Monoxide and Water Absorption Lines in an Exoplanet Atmosphere. Science 339 (6126): 1398-1401.

Kopparapu R. K., Ramirez R., Kasting J. F., Eymet V., Robinson T. D., Mahadevan S., Terrien R., C., Domagal-Goldman, S., Meadows V., Deshpande R., 2013. Erratum: "Habitable Zones Around Main-sequence Stars: New Estimates". The Astrophysical Journal 770 (1): 3.

Kreidberg, L., 2015. Batman: Basic Transit Model cAlculatioN in Python. The Astronomical Society of the Pacific 127 (957): 1161.

Kuzuhara M., Tamura M., Kudo T., Janson M., Kandori R., Brandt T. D., Thalmann C., Spiegel D., Biller B., Carson J., Hori Y., Suzuki R., Burrows A., Henning T., Turner E. L., McElwain M. W., Moro-Martín A., Suenaga T., Takahashi Y. H., Kwon J. Lucas P., Abe L., Brandner W., Egner S., Feldt, M., Fujiwara H., Goto, M., Grady C. A., Guyon O., Hashimoto J., Hayano Y., Hayashi M., Hayashi S. S., Hodapp K. W., Ishii M., Iye M., Knapp G. R., Matsuo T., Mayama S., Miyama S., Morino J. I., Nishikawa J., Nishimura T., Kotani T., Kusakabe N., Pyo T. S., Serabyn E., Suto H., Takami M., Takato N., Terada H., Tomono D., Watanabe M., Wisniewski J. P., Yamada T., Takami H., Usuda T., 2013. Direct Imaging of a Cold Jovian Exoplanet in Orbit around Sun-like Star GJ 504. The Astrophysical Journal 774 (1): 11-18.

Lagrange A.M., Bonnefoy M., Boccaletti A., Chauvin G., Apai D., Ehrenreich D., Mouillet

D., Gratadour D., Lacour S., Kasper M., 2010. Observation of beta Pictoris b. Science 329 (5987): 57-59.

Lineweaver C. H., Robles J., 2006. The Ranfe of Geochemistries of Terrestirial Planets in The Universe. Geochimica et Cosmochimica Acta 70 (18): 360-360.

Lovis C., Mayor M., Pepe F., Queloz D., Udry S., 2008. Pushing Down the Limits of the Radial Velocity Technique, Precision Spectroscopy in Astrophysics, 181-184.

Madhusudhan N., Knutson K., Fortney J., Barman T., (n.d.). Exoplanetary Atmospheres. Retrieved June 19, 2019, from http://www.mpia.de/homes/ppvi/chapter/madhusudhan.pdf.

Marcy G. W., Butler R. P., 1997. The Status of Extrasolar Planets. American Astronomical Society 29: 1316.

Marcy G W., Butler R. P., Fischer D., Vogt S. S., Lissauer J J., Rivera E. J., 2001. A Pair of Resonant Planets Orbiting GJ 876. The Astrophysical Journal 556 (1): 296-301.

Marley M. S., Saumon D., Cushing M., Ackerman A. S., Fortney J. J., Freedman R., 2012. Masses, Radii, and Cloud Properties of the HR 8799 Planets. The Astrophysical Journal 754 (2): 17.

Marois C., Macintosh B., Barman T., Zuckerman B., Song I., Patience J., Lafrenière D., Doyon R., 2008. Direct Imaging of Multiple Planets Orbiting the Star HR 8799. Science 322 (5906): 1348.

Mayor M., Queloz D., 1995. A Jupiter-mass Companion to a Solar-type Star. Nature 378 (6555): 355-359.

Mandel K., Agol E., 2002. Analytic Light Curves for Planetary Transit Searches. The Astrophysical Journal 580 (2): L171-L175.

Méndez A., Planetary Habitability Laboratory University of Puerto Rico Arecibo 30 July 2019, from http://phl.upr.edu.

Number of Detection, (19 July 2019). Retrieved July 19, 2019, from https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu.

NASA, (n.d.). Kepler Space Telescope. Retrieved June 9, 2019, from

http://www.kepler.arc.nasa.gov/downloading.html.

NASA, (n.d.). Exoplanets Discoveries. Retrieved June 11, 2019, from https://www.nasa.gov/content/kepler-multimedia.

National Academies of Sciences, Physics and Astronomy; Commitee, 2018. Exoplanet Science Strategy. Retrieved June 5, 2019, from https://www.nap.edu/catalog/25187/exoplanet-science-strategy.

Osterman S., Diddams S., Beasley M., Froning C., Hollberg L., MacQueen P., Mbele V., Weiner A., 2007. A proposed laser frequency comb-based wavelength reference for high-resolution spectroscopy. Techniques and Instrumentation for Detection of Exoplanets III. 6693: 9.

Pepe F., Cristiani S., Rebolo R., Santos N. C., Dekker H., Mégevand D., Zerbi F. M., Cabral A., Molaro P., Di Marcantonio P., Abreu M., Affolter M., Aliverti M., Allende Prieto C., Amate M., Avila G., Baldini V., Bristow P., Broeg C., Cirami R., Coelho J., Conconi P., Coretti I., Cupani G., D'Odorico V., De Caprio V., Delabre B., Dorn R., Figueira P., Fragoso A., Galeotta S., Genolet L., Gomes R., González H. J. I., Hughes I., Iwert O., Kerber F., Landoni M., Lizon J. -L., Lovis C., Maire C., Mannetta M., Martins C., Monteiro M. A., Oliveira A., Poretti E., Rasilla J. L., Riva M., Santana Tschudi S., Santos P., Sosnowska D., Sousa S., Spanò P., Tenegi F., Toso G., Vanzella E., Viel M., Zapatero Osorio M. R., 2013. ESPRESSO — An Echelle SPectrograph for Rocky Exoplanets Search and Stable Spectroscopic Observations. The Messenger 153: 6-16.

Perryman M., 2000. Modern Astrometry. Astrophysics and Space Science Library 246: 277-298.

Püsküllü Ç., Soydugan F., Erdem A., Budding E., 2017. Photometric Investigation of Hot Exoplanets: TrES-3b and Qatar-1b. New Astronomy 55: 39-47.

Rameau J., Chauvin G., Lagrange A. M., Meshkat T., Boccaletti A., Quanz S. P., Currie T., Mwat D., Girard J. H., Bonnefoy M., Kenworthy M., 2013. Confirmation of The Planet Around HD 95086 by Direct Imaging. The Astrophysical Journal Letters 779 (2): L26.

Rhodes M. D., Budding E., 2014. Analysis of selected Kepler Mission Planetary Light

Curves. Astrophysics and Space Science 351 (2): 451-471.

Rhodes M. D., (n.d.). Winfitter parametres. Retrieved May 15, 2018, from https://michaelrhodesbyu.weebly.com/astronomy.html.

Schneider J., Dedieu C., Le Sidaner P., Savalle R., Zolotukhin I., 2011. Defining and Cataloging Exoplanets: The Exoplanet.eu Database. Astronomy & Astrophysics 532: 11.

Seager S., Kuchner M., Hier-Majumder C. A., Militzer B., 2007. Mass – Radius Relationships for Solid Exoplanets. The Astronomical Journal 669 (2): 1279-1297.

Seager S., Mallen-Ornelas G., 2003. A Unique Solution of Planet and Star Parameters from an Extrasolar Planet Transit Light Curve. The Astrophysical Journal 585 (2): 1038-1055.

Seager S., Sasselov D. D., 2000. Theoretical Transmission Spectra During Extrasolar Giant Planet Transits. The Astrophysical Journal 537 (2): 916-921.

Snellen I., Bernhard B., Remco de K., Matteo B., Jayne B., Henriette S., 2014. The Fast Spin – Rotation of Young Extrasolar Planet. Nature 509: 63-65.

Song S., Mai X., Mutel R. L., Pulley D., Faillace G, Watkins A., 2019. An Updated Model for Circumbinary Planets Orbiting the sdB Binary NY Virginis. The Astronomical Journal 157 (5): 6.

Stern S. A., Levison H. F., 2002. Regarding The Criteria for Planethood and Proposed Planetary Classification Schemes. Astronomical Society of the Pacific. 205-213.

Teachey A., Kipping D. M., (October 3, 2018). Evidence for a Large Exomoon Orbiting Kepler-1625b. Retrieved April 7, 2019, from https://www.researchgate.net/publication/328057642_Evidence_for_a_Large_Exomoon_Orbiting_Kepler-1625b.

Traub W. A., 2012. Terrestrial, Habitable Exoplanet Projection from Kepler. American Astronomical Society DPS meeting 44.

Tsapras Y., 2018. Microlensing Searches for Exoplanets. Geosciences 8 (10): 365.

Udry S., Mayor M., Santos N. C., 2003. Statistical Properties of Exoplanets. I. The Period

distribution: Constraints fort he Migration Scenario. Astronomy and Astrophysics 407: 369-376.

Valenti J. A., Fischer D. A., 2005. Spectroscopic Properties of Cool Stars (SPOCS). I. 1040 F, G, and K Dwarfs from Keck, Lick, and AAT Planet Search Programs. The Astrophysical Journal Supplement Series 159 (1): 141-166.

Vanderburg A., (n.d.). Transit Light Curve Tutorial. Retrieved July 8, 2019, from https://www.cfa.harvard.edu/~avanderb/tutorial/tutorial.html

Winn J. N., (12 January 2010). Transit and Occultations. Retrieved June 10, 2019, from https://arxiv.org/pdf/1001.2010v1.pdf.

Wolszczan A., Frail D. A., 1992. A Planetary System Around The Millisecond Pulsar PSR1257 + 12. Nature 355 (6356): 145-147.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Murat Emre YILDI

Doğum Yeri : BİTLİS

Doğum Tarihi: 28.03.1985

EĞİTİM DURUMU

Lisans Öğrenimi : Selçuk Üniversitesi Eğitim Fakültesi Fizik Öğretmenliği (2004-2009)

Yüksek Lisans Öğrenimi : Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı

Bildiği Yabancı Diller: İngilizce

BİLİMSEL FAALİYETLERİ

a) Yayınlar -SCI -Diğer : -

b) Bildiriler -Uluslararası –Ulusal : -

c) Katıldığı Projeler : -

İŞ DENEYİMİ

Çalıştığı Kurumlar ve Yıl: Milli Eğitim Bakanlığı, (2011 – devam ediyor)

İLETİŞİM

E-posta Adresi: emreyld@gmail.com