T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

DAG TELESKOBU İLE ÖTEGEZEGENLERİN DOĞRUDAN GÖRÜNTÜLENMESİ ÜZERİNE BİR ÖNGÖRÜ ÇALIŞMASI

Seda KAPTAN

Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı

Astronomi ve Uzay Bilimleri Programı

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Sinan ALİŞ

Eylül, 2025

İSTANBUL

Bu çalışma 03.09.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı Astronomi ve Uzay Bilimleri Programında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Dr. Öğr. Üyesi Sinan ALİŞ (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Özgür BAŞTÜRK
Ankara Üniversitesi
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Cahit YEŞİLYAPRAK
Atatürk Üniversitesi
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Tansel AK
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Dr. Öğr. Üyesi Özgecan ÖNAL TAŞ
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

- **İntihal Programı Beyanı**

20.04.2016 tarihli resmi gazetede yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

- **Proje Destekleri**

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FBA-2022-39121 numaralı ADEP projesi kapsamında ve Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından FBA-2023- 2698 numaralı ADEP projesiyle desteklenmiştir. Seda Kaptan TÜBİTAK 2211-A ve YÖK 100/2000 programları tarafından desteklenmiştir.

- **Tezden Üretilmiş Yayınların Künye Bilgileri**

[Kaptan, S., Aliş, S., Baştürk, Ö., 2025, DAG Teleskobu ile Ötegezegenlerin Doğrudan Görüntülenmesi Üzerine Bir Öngörü Çalışması, Turkish Journal of Astronomy & Astrophysics, Vol. 6, Sayı 2, Basım Aşamasında]

ÖNSÖZ

Roy ve diğ. (2023), doktora öğrencilerinin danışmanlarından beklediği ve onların başarılı bir tez tamamlama sürecini destekleyen dört temel davranış tanımlar: cesaretlendirme (*encouragement*), erişilebilirlik (*accessibility*), güvenilirlik (*dependability*) ve uzmanlık (*expertise*). Bu dört özelliğe sahip danışmanlarla çalışan öğrencilerin tez tamamlama oranlarının daha yüksek olduğunu belirtmektedirler.

Ve şimdi buradayız...

Doktora sürecim ve çalışmalarım boyunca bilgi ve deneyimini cömertçe paylaşan, motivasyonumun düştüğü, zorlandığım anlarda bile özgüvenimi tazeleyen, ben tezimi bitirmeyi amaçlamışken gelecekteki akademik adımlarımı düşünen, her zaman yapıcı yaklaşımıyla yolumu açan, maddi olanaklar yaratmak için çaba gösteren ve manevi tüm desteğini esirgemeyen değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Sinan Aliş'e, kendimi şanslı hissettirdiği için gönülden ve sonsuz teşekkür ederim.

Fahri danışmanım Prof. Dr. Özgür Baştürk'e; sorduğum her konuda, yalnızca yanıtlamakla kalmayıp konuyu en ince ayrıntısına kadar sabırla ve özveriyle anlattığı, bilgisi ve zamanı ile her daim destek olduğu için teşekkür ederim.

Kader ortaklarım; zorlukları ve başarıları birlikte paylaştığım, rekabetin en tatlı halini yaşadığım sevgili akademik yol arkadaşlarıma;

Her sorumu yanıtlayan, önemli tarihlerde nazikçe hatırlatmalarda bulunarak sürecin sağlıklı ilerlemesine katkı sağlayan Fen Bilimleri Enstitüsü Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü öğrenci işleri sorumlusu Sn. Selçuk Seray'a;

TÜBİTAK (BİDEB) 2211/A - Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı kapsamındaki burs desteği için TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı'na;

YÖK 100/2000 kapsamındaki burs desteği için Yükseköğretim Kurulu'na;

Her zaman yanımda olup mutluluğumu ve sıkıntılarımı paylaşan, yükümü hafifleten, desteğini her koşulda hissettiren değerli aileme;

Tez yazım sürecim ve çalışmalarım boyunca başımdan, yanımdan hiç ayrılmayan; bana en olmadık zamanlarda rahatsızlık vererek günlerin ve zamanın varlığını hatırlatan, güzel sesleriyle miyavlayıp uçuşan böcekleri avlarken beni de oyuna dahil edip hareket etmemi sağlayan, sağlığımı(!) kendilerince çok düşünen ailemin en yaramaz üyeleri, kedilerim Badi, Jöle ve Minnoş'a teşekkür ederim.

Son olarak; makale gönderme sürecinde, uykusuz geçen günlerden birinde, listelerimi tekrar tekrar kontrol etmekten yorgun düşmüşken... Vızıltısıyla kulağıma ötegezegenlerin adını fısıldayan, beni uykumdan kaldırıp listemi yeniden gözden geçirmeme vesile olan ve böylece hatamı ortaya çıkartan o sivrisineğe... Asla unutulmayacaksın.

"*Kozmosa çıkıyoruz, her şeye hazırız:*

Yalnızlığa, zorluğa, tükenişe, ölüme hazırız. Alçak gönüllülükten söylemeye dilimiz varmıyor ama, kendimize hayran hayran baktığımız oluyor. Ama çok, çok yazık! Birazcık yakından baktığımızda bütün o şevkin aslında düzmece olduğunu görüyoruz.

Aslında kozmosu ele geçirmek değil istediğimiz, yalnızca Yer'in sınırlarını kozmosun sınırlarına dek genişletmek. Filanca gezegen bizim gözümüzde Büyük Sahra gibi kıraç, öteki Kuzey Kutbu gibi buz tutmuş, başkası Amazon Havzası kadar bereketli olsa olsa. Yalnızca İnsan'ı arıyoruz biz, başka dünyalara gereksinimimiz yok.

Ayna gerek bize. Başka dünyaları ne yapacağımızı da bilmiyoruz. Tek bir dünya, kendi dünyamız, yetiyor bize. Ama olduğu gibi de kabul edemiyoruz onu. Bizimkinden üstün bir gezegen, üstün bir uygarlık arıyoruz, ama kendi geçmişimizin prototipi üzerinde gelişmiş olsun istiyoruz. Ve aynı zamanda yüz yüze gelmek istemediğimiz, kendimizi sakınmaya çalıştığımız bir şey var içimizde. Ama o hep içimizde kalıyor, çünkü Yer'den yola çıkarken bir ilk günahsızlık durumunda değiliz. Gerçeklikte nasılsak buraya öyle geliyoruz; sayfa çevrilip de gözlerimizin önüne serilince gerçeklik — kendi gerçekliğimizin sessizce geçiştirmeyi yeğlediğimiz yanı yani — artık sevmiyoruz onu."

— Stanislaw Lem, *Solaris* (1961)

Eylül, 2025 Seda KAPTAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **viii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xvi**
TABLO LİSTESİ ..... **xviii**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xxii**
ÖZET ..... **xxiii**
SUMMARY ..... **xxiv**
1. GİRİŞ **1**
2. GENEL KISIMLAR **4**
2.1. ÖTEGEZEGENLER 4
2.1.1. Ötegezegen Sınıfları 4
2.1.1.1. Dev Gezegenler 4
2.1.1.2. Karasal Gezegenler 5
2.1.2. Ötegezegenlerin Oluşumu ve Evrimi 11
2.2. ÖTEGEZEGEN KEŞİF YÖNTEMLERİ 27
2.2.1. Geçiş (Transit) Yöntemi 27
2.2.2. Dikine Hız Yöntemi 31
2.2.3. Kütleçekimsel Mikromercekleme Yöntemi 35
2.2.4. Astrometri 39
2.2.5. Zamanlama 41
2.2.5.1. Pulsar Zamanlaması 41
2.2.5.2. Tutulma Zamanındaki Değişimler (ETV) 44
2.2.5.3. Geçiş Zamanındaki Değişimler (TTV) 45
2.2.6. Doğrudan Görüntüleme 50
2.3. DOĞRUDAN GÖRÜNTÜLEME YÖNTEMİ 50
2.3.1. Nokta Yayılım Fonksiyonu (PSF) ve Açısal Çözünürlük 55
2.3.2. Yüksek Kontrastlı Görüntüleme Sistemleri 56

*2.3.2.1. Koronografl*ar 57
2.3.2.2. Aktif Optik 63
2.3.2.3. Adaptif Optik Sistemleri 64
2.3.3. Yüksek Kontrastlı Görüntüleme Metrikleri 68
2.3.4. Görüntü İşleme Teknikleri 75
2.3.4.1. PSF Modelleme ve Çıkarma 75
2.3.4.2. Açısal Diferansiyel Görüntüleme (Angular Differential Imaging - ADI) . 76
2.3.4.3. Tayfsal Diferansiyel Görüntüleme (Spectral Differential Imaging - SDI) 77
2.3.4.4. Referans Diferansiyel Görüntüleme (Reference Differential Imaging - RDI) 78
2.4. DOĞU ANADOLU GÖZLEMEVİ (DAG) TELESKOBU 82
3. MALZEME VE YÖNTEM 88
3.1. VERİTABANLARI 88
3.1.1. NASA Exoplanet Archive 88
3.1.2. Open Exoplanet Catalogue 90
3.1.3. Extrasolar Planet Encyclopedia 91
3.2. VERİTABANLARININ KARŞILAŞTIRILMASI 92
3.3. BARINAK YILDIZLARIN YAŞ TAHMİNİ 95
3.4. GEZEGEN SICAKLIKLARI 97
3.5. KONTRAST ORANLARININ BELİRLENMESİ 103
3.5.1. Akıların Elde Edilmesi 103
3.5.2. Doğrudan Görüntüleme Tekniği ile Keşfedilmiş Kontrol Örneklemi 107
4. BULGULAR 110
4.1. KONTRASTLARIN DAG/PLACID KONTRAST EĞRİSİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI 110
4.2. GÖZLEM LİMİTLERİ 112
4.3. DAG TELESKOBU İÇİN DOĞRUDAN GÖRÜNTÜLEME ADAYLARI 113
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 116
KAYNAKLAR 123
EKLER 142
EK 1. Bu çalışmada üretilen model çıktıları 142
EK 1.1. planetsynth Model Çıktıları ve BT-Settle ile üretilen gezegen akıları ve Kontrastları.....142
EK 1.2. planetsynth Model Çıktıları.....148

ÖZGEÇMİŞ 151

ŞEKİL LİSTESİ

Page No

8

Şekil 2.2 Chen ve Kipping (2017) çalışmasında, 316 cisim üzerinden elde edilen kütle – yarıçap ilişkisi. 9

Şekil 2.3 Bir gezegen öncülü disk yapısının gaz ve toz bileşenleri ile temel yapısal bölgelerinin şeması. Gaz bileşeni, gri tonlarla; katı maddeler ise büyük boyut ve renklerle gösterilmektedir. Sol tarafta saçılmış ışık, termal sürekli salınım ve moleküler çizgi salınım bölgelerinin yaklaşık konumları; sağ tarafta ise disk yapısı ve içeriğine ilişkin terminoloji yer almaktadır (Andrews, 2020). 12

Şekil 2.4 TW Hya diskinin farklı dalga boylarındaki gözlemlerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir: (a) Küçük toz tanelerinden saçılan = 1.6 m yakın kızılötesi ışık (van Boekel ve diğ., 2017), (b) çakıl boyutundaki taneciklerden yayılan = 0.9 mm termal sürekli salınım (Andrews ve diğ., 2016), (c) moleküler gazın dağılımını ortaya koyan CO J=3–2 çizgi salınımı (Huang ve diğ., 2018). Bu çoklu dalga boylu gözlemler, farklı fiziksel koşullara duyarlılıkları sayesinde disk morfolojisinin dalga boyuna bağlı olarak nasıl değiştiğini ortaya koymaktadır (Andrews, 2020). 12

Şekil 2.8 Solda, bir Dünya kütleli gezegenin protoplanet disk içinde bulunduğunda verdiği tepkiyi gösteren hidrodinamik simülasyon yer almaktadır. Gezegen merkezde spiral dalgalar üretmekte, bu dalgalar yörüngesine tork uygulayarak Tip I göçe neden olmakta, ancak kütlesi küçük olduğundan diskte boşluk açamamaktadır. Sağda ise bir Jüpiter kütleli gezegenin diske tepkisi gösterilmektedir. Gezegen merkezde yer almakta ve yüksek kütlesi sayesinde diskte halka şeklinde bir boşluk açarak hareketi diskin akışıyla birlikte gerçekleşmektedir; bu süreç Tip II göç olarak tanımlanmaktadır. Bununla birlikte dar spiral kollar aracılığıyla diskin iç ve dış bölgelerinden gezegene gaz akışı devam etmektedir (Chambers, 2009). 19

Şekil 2.9 Barınak yıldızına yakın ötegezegenlerin yarıçap ve yörünge dönemlerine göre dağılımı. Sıcak-Neptün çölü, yarıçap boşluğu ve sıcak-Jüpiter yığılması bölgeleri işaretlenmiştir. 21

Şekil 2.10 1, 2, 5 ve 10 M_J kütleler için sıcak başlangıç (kırmızı) ve soğuk başlangıç (mavi) başlangıç koşullarına göre etkin sıcaklık evrimi. Başlangıçta iki senaryo arasında büyük farklar görülmekte, ancak zamanla sıcaklık değerleri birbirine yaklaşmaktadır (Spiegel ve Burrows, 2012). 22

Şekil 2.11 Nihai kütlelere ulaştıktan sonra gezegenlerin kütle–yarıçap diyagramının zamana bağlı evrimi. Farklı paneller, 10 Myr, 50 Myr, 500 Myr ve 5 Gyr yaşlarındaki dağılımları göstermektedir. Renkler, gezegenlerdeki ağır element kesrini ($Z = M_Z/M$) temsil eder: turuncu ($\%Z \leq 1$), kırmızı ($\%1 < Z \leq 5$), yeşil ($\%5 < Z \leq 20$), mavi ($\%20 < Z \leq 40$), camgöbeği ($\%40 < Z \leq 60$), fuşya ($\%60 < Z \leq 80$), sarı ($\%80 < Z \leq 95$), kahverengi ($\%95 < Z \leq 99$) ve siyah ($\%Z > 99$). Düşey eksende zamanla yarıçap küçülmesi, yatay eksende ise kütleye bağlı yapısal farklar izlenmektedir. Erken evrede (10 Myr), kütle–yarıçap ilişkisi henüz belirginleşmemiştir ve aynı kütlede farklı yarıçaplara sahip gezegenler görülebilir. Zaman ilerledikçe (özellikle 50 Myr sonrası), eğri belirginleşerek düşük kütleli gezegenlerden itibaren artan yarıçap, yaklaşık 4 M_J civarında maksimuma ulaşır ve daha büyük kütlelerde dejenerasyon etkisiyle tekrar azalır Mordasini ve diğ. (2012a). 26

Şekil 2.12 Geçiş olayının şematik görüntüsü. Üst panelde Yörüngenin yukarıdan ve yandan görüntüsü, orta panelde geçiş olayı, alt panelde ise geçiş sırasındaki ışık eğrisi verilmiştir (Deeg ve Belmonte, 2018). 28

Şekil 2.13 Geçiş olayının şematik görünümü. Geçiş sırasında gezegen, yıldızın ışığının bir kısmını bloke eder. Geçişten sonra gezegenin daha parlak gündüz tarafı aşamalı olarak ortaya çıkar ve toplam akı yükselir. Gezegen yıldızın arkasından geçerken ikinci bir tutulma gerçekleşir ve akı tekrar düşer. Kesikli daireler 1. ve 4. temas noktalarını göstermektedir. Toplam geçiş süresi t_T 1-4 teması arasındayken t_F 2-3 arasındadır (Perryman, 2018). 28

Şekil 2.14 Geçiş yöntemine dayalı ötegezegen keşiflerinin yıllara göre kümülatif dağılımı. Uzay ve yer tabanlı başlıca projelerin (Kepler, K2, TESS vb.) devreye girmesiyle birlikte toplam keşif sayısında belirgin artışlar gözlenmiştir. Özellikle 2010–2013 yılları arasında Kepler görevinin etkisiyle hızlı bir yükseliş görülürken, 2018 sonrası dönemde TESS verileriyle keşifler daha düşük ivmeyle, ancak düzenli şekilde artmaya devam etmiştir. 31

Şekil 2.15 Doppler etkisinin şematik görünümü. 32

Şekil 2.16 Dikine hız yöntemiyle tespit edilmiş ötegezegenlerin kütleleri ($M \sin i$, Jüpiter kütlesi cinsinden) ile yörünge periyotları (gün cinsinden) arasındaki ilişki. Grafikte yeşil kareler mevcut ötegezegen gözlemlerini, mor çember içindeki harfler ise Güneş Sistemi gezegenlerini temsil etmektedir. Gezegen sınıfları (Perryman, 2018)'in değerlerine göre ayrılmıştır. Bu durum, dikine hız yönteminin duyarlılığı ile tespit eğilimlerini ortaya koymaktadır. 34

Şekil 2.17 Mikromercekleme olayının geometrik açıklamaları: (a) olayın geometrisi; (b) kaynak yıldızın mercek etrafındaki hareketiyle ortaya çıkan görüntü yer değiştirmeleri (Perryman, 2018). 36

Şekil 2.18 Noktasal bir kaynak ile tek bir merceğin sabit bağıl yatay hızla hareket ettiği varsayımı altında oluşan mikromercekleme ışık eğrileri. Köşedeki şematik gösterimde, kesikli çizgi Einstein yarıçapını temsil ederken, farklı $u = \theta_S/\theta_E$ oranlarına karşılık gelen kaynak yörüngeleri gösterilmiştir. Kaynağın mercek konumuna projeksiyon düzleminde yakın geçişi durumunda büyütme etkisi belirgin şekilde artar; u değeri küçüldükçe bu artış daha da hızlanır (Perryman, 2018). 37

Şekil 2.19 Mikromercekleme yöntemiyle keşfedilen ötegezegenlerin yörünge yarı - büyük eksene karşılık kütle dağılımları. 38

Şekil 2.20 Bir gezegenin, barınak yıldızının konumundaki değişimin astrometrik ölçümlerle tespiti. Hem gezegen hem de yıldız, ortak kütle merkezi etrafında döner; bu merkez, iki cisim arasındaki büyük kütle farkı nedeniyle genellikle yıldızın çok yakınında yer alır. Gezegenin kendisi doğrudan gözlemlenemese de, yıldızın gökyüzü düzlemindeki "yalpalama" hareketi doğrudan ölçülebilir. Bu ölçümde bir arka plan yıldızı konum referansı olarak kullanılır. 39

Şekil 2.21 PSR B1257+12 zamanlama artıklarının analizi. 430 MHz frekansında yapılan gözlemlerden elde edilen PSR B1257+12 zamanlama artıklarının üç farklı model için karşılaştırılması. Dolu daireler ve üçgenler sırasıyla Mark III ve PSPM alıcı sistemleriyle ölçülen TOA verilerini göstermektedir. Düz çizgi, her model için öngörülen TOA değişimlerini temsil etmektedir. (a) Gezegenler dahil edilmeden yapılan standart zamanlama modeline ait artıklar; sapmalar gezegen B ve C'nin Kepler yörüngesinden kaynaklanmaktadır. (b) Gezegen A, B ve C'nin Kepler yörüngeleri eklenmiş model artıklarında, varyasyonlar gezegen B ile C arasındaki karşılıklı kütleçekimsel etkileşimlerden kaynaklanmaktadır. (c) Standart pulsar parametreleri ile Kepler ve Kepler-dışı yörünge etkilerinin tamamının dahil edildiği modelden elde edilen artıklar (Konacki ve Wolszczan, 2003). 43

Şekil 2.22 CM Dra'nın ortalama $O-C$ değerleri, parabol uyumu, kesikli çizgi; ve sinüzoidal uyumu, düz çizgi ile gösterilmiştir (Deeg ve diğ., 2008). 45

Şekil 2.23 Bir zamanlama verisi örneği. Üst panel: gezegen geçişinin ölçülmüş orta zamanları ve en küçük kareler yöntemiyle geçirilmiş fit. Alt panel: Üstteki fitin artıklarından elde edilen O-C diyagramı (Agol ve Fabrycky, 2018) 46

Şekil 2.24 Kepler-9 b (mavi çarpı) ve c (kırmızı nokta) gezegenlerinin lineer efemerislerine kıyasla gözlenen geçiş zamanlarının karşılaştırılması (Holman ve diğ., 2010) 47

Şekil 2.25 Kepler-9b (solda) ve Kepler-9c (sağda) için ışık eğrileri. Her panelde, üst eğriler, farklı zamanlardaki geçişlerdir. Önemli yer değiştirmeler, gezegenler arasındaki yerçekimi etkileşimlerinin neden olduğu büyük TTV'lerden kaynaklanmaktadır. Her paneldeki alt eğri ölçülen geçiş sürelerini kullanarak ortak bir merkeze kaydırılan geçişleri gösterir (Holman ve diğ., 2010). 47

Şekil 2.26 Üretilmiş 2 uydulu gezegen datası ve 1 ve 2'li uydu fiti (Heller ve diğ., 2016) 48

Şekil 2.27 TTV yöntemi ile keşfedilen ötegezenlerin yarı-büyük eksene karşılık kütle dağılımları. 49

Şekil 2.28 Nokta yayılım fonksiyonu ve çözünürlük. (a) Odakta toplanmış ışığın oluşturduğu Airy deseni. (b) Airy diskinin kesiti (mavi) ve Gauss yaklaşımı (kırmızı). (c) Rayleigh kriterine göre ayrılmış iki nokta kaynağının toplam profili (mavi). (d) Gauss PSF'lerinin FWHM uzaklığında ayrılmış iki nokta kaynağının toplam profili (kırmızı) (Soliman ve diğ., 2017). 56

Şekil 2.29 On-axis yıldız ve off-axis gezegen için PSF kesitleri. Yıldızın parlak PSF'si, gezegenin 10^{-5} seviyesindeki sönük sinyalini maskelemektedir. Yüksek kontrastlı görüntüleme sistemleri, bu yıldız ışığını bastırarak gezegenin PSF'sini ortaya çıkarmayı hedefler. 57

Şekil 2.30 Koronagrafın temel optik yerleşimi. On-axis yıldız ışığı odak düzlemindeki maske tarafından bastırılırken, off-axis gezegen ışığı maske merkezine denk gelmez ve dedektörde gözlenebilir (Itoh ve diğ., 2023). 57

Şekil 2.31 Tipik bir Lyot koronografın optik şeması. Yıldız ve gezegenden gelen ışık sisteme girer ve görüntü düzlemindeki örtücü maske ile yıldızın parlak ışığı engellenir. Daha sonra kollimatör lens sayesinde teleskobun giriş açıklığının optik görüntüsü Lyot durdurucusu üzerine yansıtılır. Lyot durdurucusu, istenmeyen saçılmaları engelleyerek görüntünün kontrastını artırır. Son olarak ışık dedektöre odaklanır (Breckinridge ve diğ., 2018). 58

Şekil 2.32 Bir iç koronograf sisteminde dört optik düzlem: (1) giriş pupil düzlemi, (2) ilk görüntü düzlemi, (3) yeniden görüntülenen pupil düzlemi ve (4) yeniden görüntülenen ikinci görüntü düzlemi. A_i her düzleme ulaşan elektrik alan genliğini, M_i ise o düzlemdeki maskeyi temsil eder. FT ve FT^{-1} sırasıyla Fourier dönüşümü ve ters Fourier dönüşümünü ifade eder. Maske konumuna göre koronografın image plane veya pupil plane kategorisinde olduğu belirlenir(Traub ve Oppenheimer, 2010). 59

Şekil 2.33 Vorteks koronagrafın temel optik düzeni. Yıldızdan gelen Airy deseni önce vorteks faz maskesine odaklanır, ardından bir sonraki diyafram düzleminde yıldız ışığını bastırmak için uzamsal filtreleme uygulanır (Serabyn ve diğ., 2019). 61

Şekil 2.34 James Webb Uzay Teleskobu Miri koronografi (JWST-MIRI) çalışma prensibi. JWST-MIRI Lyot durdurucu ve küçük açısal ayrımlara ulaşabilmeyi sağlayan FQPM maske ile donatılmıştır (Hatzes ve Liseau, 2018). 61

Şekil 2.35 VLT teleskobunun aktif optik sistemi. Bu sistem VLT optiklerinin tam kontrolünü sağlar ve performansını tüm teleskop konumlarında optimize eder. Bu optimizasyon birincil aynanın (8.2m) şeklini değiştirerek ve aynı zamanda ikincil aynanın (1.1m) tepesindeki konumunu değiştirerek elde edilir. Yıldız görüntüsü "wavefront sensörü" tarafından kaydedilir ve analiz edilir; burada ayna desteklerini hareket ettirmek için karşılık gelen düzeltme sinyalleri üretilir. (European Southern Observatory, 2025)..... 65

Şekil 2.36 Adaptif optik sistemin şeması. Bir yıldızdan gelen ışık, uzay boşluğunda düzgün (düzgün fazlı) bir dalga cephesi olarak ilerler. Ancak Dünya atmosferine girdiğinde atmosferik türbülans bu dalga cephesini bozar. Bu nedenle, yeryüzündeki bir teleskopla çekilen yıldız görüntüsü, uzaydaki bir teleskopla çekilene kıyasla daha bulanık olur. Teleskop ile gözlem cihazı arasına yerleştirilen bir adaptif optik (AO) sistemi, atmosferik türbülansın neden olduğu bu bulanıklığı telafi edebilir ve net bir görüntü elde edilmesini sağlar. AO'nun sağladığı daha yüksek çözünürlük, hem ince ayrıntıların gözlemlenmesine hem de ışığı daha küçük ve yoğun bir tepeye topladığı için sönük cisimlerin tespitine yardımcı olur. 66

Şekil 2.37 Mevcut ve gelecek yüksek kontrastlı görüntüleme (HCI) sistemlerinin 5σ işlenmiş kontrast performansları. Eğriler gözlem dalga boyuna göre renk kodlanmış olup, düz çizgiler sahada ölçülmüş, kesikli çizgiler ise öngörülmüş performansı göstermektedir. Noktalar bilinen doğrudan görüntülenmiş gezegenleri (kırmızı kareler) ve model tahminlerini temsil etmektedir. Grafik, SPHERE/IFS–IRDIS, Gemini GPI, Magellan VisAO, JWST/NIRCam, HST/ACS–NICMOS–STIS gibi mevcut sistemleri; Roman CGI, HabEx ve ELT gibi gelecek görevleri içermektedir (Follette, 2023). 70

Şekil 2.38 Açısal diferansiyel görüntüleme örneği. İki farklı zamana ait gezegene ve kalan gürültüye karşılık gelen 2 pik noktası (biri negatif diğeri pozitif) sağdaki görüntüde verilmiştir (Cornia ve diğ., 2010)..... 77

Şekil 2.39 Farklı dalga boylarında alınan görüntülerde yıldızın PSF boyutu değiştiğinden, tüm kareler aynı ölçeğe getirilerek yıldız ve speckle desenleri sabitlenir. Bu ölçekleme sırasında gezegen görüntüde radyal olarak kayar. Kayma sayesinde gezegen içermeyen bir yıldız PSF modeli oluşturulur ve her kareden çıkarılır. Görüntüler orijinal ölçeğe döndürüldüğünde gezegen konumunda belirginleşir (Kiefer ve diğ., 2021). 78

Şekil 2.40 Reference Differential Imaging (RDI) sürecinin şematik gösterimi. Bu örnekte, Gemini Planet Imager (GPI) ile H-bandında gözlemlenen enkaz diski barındıran HR 4796A sistemine ait yaklaşık 40 dalga boyu kanalındaki veriler kullanılmıştır. (B) Aşamasında, hedef dışındaki yıldızlara ait, aynı gözlem modunda elde edilmiş referans görüntülerden oluşan bir kütüphane oluşturulmuştur. Bu yıldızlar, bilinen bir gezegen veya disk içermeyen sistemler olarak seçilmiştir. (C) Aşamasında, bu referans görüntüler ya basitçe (örneğin medyan ile) birleştirilerek tek bir ortalama PSF oluşturulmuş ya da her hedef görüntü için özel bir PSF modeli üretilmiştir. (D) Aşamasında, tahmin edilen PSF hedef görüntüden çıkarılarak yıldız ışığı bastırılmıştır. (E) Görüntüler, teleskop döndürücüsü kapalıyken alındığı için gökyüzündeki gerçek yönelimlerine hizalanmıştır. (F) Son olarak tüm hizalanmış görüntüler birleştirilerek nihai işlenmiş görüntü elde edilmiştir (Follette, 2023)..... 79

Şekil 2.41 MMT/Clio ile 3.3 μm'de alınan görüntü. (Sol panel) HR 8799c'nin tespitini daha net göstermek amacıyla geniş dinamik aralıkla sunulan görüntü. (Sağ panel) HR 8799b'nin marjinal tespitini daha iyi göstermek için daha dar dinamik aralıkla sunulan görüntü (Currie ve diğ., 2011)..... 80

Şekil 2.42 HIP 99770 b, SCExAO/CHARIS ile iki farklı tarihte (19 Mayıs 2021 ve 17 Ekim 2021) doğrudan görüntülenmiştir. Yıldızın halo ışığını bastırmak için uyarlanabilir yerel görüntü kombinasyonu algoritması (ALOCI), açısal diferansiyel görüntüleme (ADI) ve spektral diferansiyel görüntüleme (SDI) yöntemleri birlikte (ASDI) kullanılmıştır. İşlenmiş görüntülerde gezegen, beyaz daire ile; B panelinde yörüngesel hareket yönü beyaz ok ile; yıldızın konumu ise yıldız simgesi ile gösterilmektedir (Currie ve diğ., 2023b). 81

Şekil 2.43 HD 206893 B cisminin farklı veri işleme yöntemleri (PCA/ASDI, PCA/ADI, TLOCI/ADI) ile elde edilmiş görüntüleri. Görüntülere hem aletsal verimlilik (koronagraf geçirgenliği) hem de algoritmasal verimlilik düzeltmeleri uygulanmıştır (Galicher ve diğ., 2018)..... 82

Şekil 2.44 DAG teleskobunun montaj aşaması (ATASAM). 83

Şekil 2.45 DAG Nasmyth platformundaki bileşenlerin şematik yerleşimi (Tandon ve diğ., 2024). 83

Şekil 2.46 TROIA AO sisteminin H ve K bandındaki Strehl oranı performansı (Tandon ve diğ., 2024)..... 84

Şekil 2.47 PLACID, TROIA ve DIRAC'ın Nasmyth platformundaki yerleşimi (Kühn ve diğ., 2024) 84

Şekil 2.48 PLACID'in optik ışık yolu (Kühn ve diğ., 2024). 85

Şekil 2.49 SLM üzerinde programlanmış faz maskelerinin simülasyonları (Lin ve diğ., 2024b).. 86

Şekil 2.50 PLACID sistemine ait laboratuvar kontrast eğrileri (Kühn ve diğ., 2024). 87

Şekil 2.51 PLACID ve DIRAC sistemlerinin teknik özellikleri (Tandon ve diğ., 2024)..... 87

Şekil 3.1 Yıldız–gezegen kontrast oranı hesaplamalarına yönelik iş akış diyagramı. 89

Şekil 3.2 Kontrast eğrisinin nasıl okunacağını gösteren şematik bir diyagram. Belirli bir kontrast ve ayrıklıkta, bir gezegen eğrinin üzerinde yer alıyorsa tespit edilebilir. Elde edilen kontrast, merkez yıldızdan olan ayrıklığın bir fonksiyonudur ve küçük ayrıklıklarda yalnızca en parlak gezegenler tespit edilebilir (Follette, 2023). 90

Şekil 3.3 14 Her b sistemi için NASA Exoplanet Archive normal veri kataloğu (üst panel) ve birleşik veri seti (alt panel). 90

Şekil 3.4 Open Exoplanet Catalogue veritabanının arayüz görüntüsü. 91

Şekil 3.5 The Extrasolar Planets Encyclopedia veritabanının arayüzü (sol) ve veritabanında yer alan sistemlerden biri olan 14 Her b'nin hakkındaki ayrıntılı bilgiler (sağ)..... 92

Şekil 3.6 13.01.2023 tarihli veritabanlarında bulunan parametrelerin sayı yoğunluğu. 93

Şekil 3.7 Üç farklı katalog arasında aynı cisimler için sağ açıklık ($\Delta\alpha$) ve dikaçıklık ($\Delta\delta$) farklarının dağılımı gösterilmektedir. Üst panelde sağ açıklık, alt panelde ise dikaçıklık farkları yer almaktadır. Yatay eksende her bir cismin veri kümesindeki sıra numarası bulunurken, düşey eksenler koordinat farklarını derece cinsinden göstermektedir. Bu farklar, kataloglar arası koordinat tutarlılığını değerlendirmek amacıyla hesaplanmıştır. Belirgin şekilde farklılık gösteren dört sistem (Bkz. **Tablo 3.2**) grafikten çıkarılmıştır. Sağ açıklık için kataloglar arasında sistematik bir sapma gözlenmezken, dikaçıklık farklarında özellikle (OEC) verilerinde 2°'ye ulaşan farklılıklar tespit edilmiştir. 95

Şekil 3.8 NEA, OEC ve EEU veritabanlarında yer alan gezegenlerin dağılımını gösteren Venn diyagramı. Koordinatları eşleşip isimleri farklı olan cisimler birleştirilerek üç katalog arasındaki kesişimler belirlenmiştir. Ortak olan gezegen sayısı 454 olup, yalnızca NEA'da 41, yalnızca OEC'te 6 ve yalnızca EEU'da 85 cisim bulunmaktadır. İkili kesişimlerde ise NEA–OEC arasında 33, EEU–OEC arasında 25 ve NEA–EEU arasında 41 ortak gezegen yer almaktadır. 95

Şekil 3.9 astroARIADNE ile yaşları hesaplanmış cisimlerin literatür yaşlarıyla karşılaştırılması. 97

Şekil 3.10 Gözlemlenen gezegen yarıçapları (R_{obs}) ile bu çalışmada kullanılan *planetsynth* modeli aracılığıyla hesaplanan yarıçaplar (R_{model}) arasındaki ilişki. Her bir nokta bir gezegeni temsil etmektedir. Gezegenler, Çizelge **Tablo 3.5**'te tanımlanan kütle aralıklarına göre dört gruba ayrılmıştır: 1 M_J ve altındaki gezegenler mavi daire, 1–3 M_J aralığındakiler mor kare, 3–5 M_J aralığındakiler sarı üçgen ve 5 M_J üzerindekiler kırmızı elmas ile gösterilmiştir. Kesikli gri çizgi, gözlemlenen ve hesaplanan yarıçapların birebir eşleştiği doğrultuyu temsil etmektedir. Elde edilen $R^2 = 0.0747$ değerinin olası nedenleri Bölüm 3.4.'te tartışılmıştır. 102

Şekil 3.11 Gözlemsel gezegen yarıçapı ile *planetsynth* modeli tarafından hesaplanan yarıçap farkı (R_{obs} - R_{model}) ile gezegen kütlesi (M_J) arasındaki ilişki. Mavi simgeler gerçek kütlesi (Mass), kırmızı simgeler ise yalnızca minimum kütlesi (*Msini*) bilinen sistemleri temsil etmektedir. Siyah çerçeveli noktalar, yıldızdan gelen ışınım akısı $F_* > 2 \times 10^8\ ergs^{-1}cm^{-2}$ olan sistemlere karşılık gelir. Yatay kesikli çizgi, gözlemsel ve model yarıçaplarının eşit olduğu durumu belirtmektedir. Grafik, düşük kütleli sistemlerde modelin gözlemsel yarıçapları açıklamakta yetersiz kaldığını ve özellikle *Msini* kullanılan sistemlerde bu farkın daha belirgin olduğunu göstermektedir. 103

Şekil 3.12 Bu çalışmada hesaplanan 427 cismin evrim yolları. Paneller, yüzey çekim ivmesi ($\log g$), parlaklık ($\log L/L_\odot$), modelden üretilen yarıçap (R) ve etkin sıcaklığın (T_P) zamana ($\log t$, yıl) göre değişimini göstermektedir. Her çizgi bir gezegeni temsil etmektedir. 104

Şekil 3.13 κ And b (sol) ve 51 Eri b (sağ) gezegenleri için BT-Settl model spektrumlarının karşılaştırması. Siyah kesikli çizgi, gezegenin etkin sıcaklık (T_eff) ve yüzey çekim ivmesi ($\log g$) değerleri için elde edilen interpolasyon sonucunu göstermektedir. Renkli çizgiler, bu interpolasyona en yakın parametre kombinasyonlarına sahip ve interpolasyona girdi olarak kullanılan model spektrumlarını temsil etmektedir. Kırmızı gölgeli bölge, 1.46–1.80 μm aralığını (H-bandı, merkez $\lambda \approx 1.63$ μm) göstermektedir. 105

Şekil 3.14 Kontrol listesi ve bu çalışmada kullanılan model veritabanında ortak olarak yer alan sistemler için, literatürde bildirilen H-band görünür parlaklık değerleri ile bu çalışmada hesaplanan H-band görünür parlaklıkların karşılaştırması. Mavi daireler barınak yıldızları, kırmızı kareler ötegezegenleri temsil etmektedir. Siyah kesikli çizgi birebir doğrusu olup, model ile literatür verilerinin tutarlılığı için kılavuz olarak çizdirilmiştir.....109

Şekil 4.1 DAG Teleskobu için geliştirilen PLACID koronografının beklenen kontrast eğrileri ile ötegezegenlerin hesaplanan kontrast değerlerinin karşılaştırılması. Mavi renk, bu çalışmada elde edilen değerleri; kırmızı renk ise literatürde doğrudan görüntüleme ile tespit edilmiş kontrol cisimlerinin kontrast değerlerini göstermektedir. Her iki listede de yer alan ortak cisimler kare sembollerle belirtilmiştir ve bu cisimler için hem literatür verileri hem de bu çalışmanın sonuçları eğride yer almaktadır. DAG Teleskobu için 1 λ/D 85 mili-yaysaniyesine karşılık gelmektedir. 111

Şekil 4.2 DAG Teleskobunun teorik kontrast eğrisinin üzerinde kalan cisimlerin ekvatoral koordinatlarının gökküre üzerindeki projeksiyonu. DAG yerleşkesinde ideal gözlem koşullarını sağlayabilecek minimum yükseklik için (h= 30°) hesaplanan dikaçıklık sınırı, gözleme uygunluk kriteri olarak projeksiyona eklenmiştir (siyah kesikli çizgi). Mavi simgeler bu çalışmada hesaplanan sistemleri, kırmızı simgeler ise literatürden alınan sistemleri temsil etmektedir. Kontrast eğrisinde öngörülen 10 kat iyileştirme senaryosu altında gözlemlenebilir hale gelen sistemler ise, bu çalışma için yeşil, literatür verileri için mor simgelerle gösterilmiştir (Bkz. Bölüm 5.). 113

Şekil 5.1 Her sistem için alt–merkezi–üst yaş senaryolarında hesaplanan gözlemsel kontrastların ve *planetsynth* ile türetilen gezegen sıcaklığının (T_P) yaşlara göre dağılımı. Renkler, cisimleri; aynı renk grubundaki merkez noktalar ise hesaplanan en iyi yaş değerlerini temsil etmektedir.....117

Şekil 5.2 PLACID koronografının DAG Teleskobu için öngörülen performasının 10 kat iyileştirmesiyle elde edilecek kontrast eğrisi (kesikli çizgi) ile FQPM moduna ait kontrast eğrisi (düz kırmızı çizgi) arasında kalan sistemler. Yeşil renk bu çalışmada hesaplanan sistemleri, mor renk ise literatür verilerini temsil etmektedir. Her iki listede de yer alan ortak sistemler kare sembollerle gösterilmiştir. 119

Şekil 5.3 21 sistem için gezegen parametrelerinin (kütle, sıcaklık, yarıçap, uzaklık) sütun grafikleri. Kütle, 5 M_J; sıcaklık, 200 K; yarıçap, 0.25 R_J; uzaklık, 10 pc aralıklarla çizilmiştir. 120

Şekil 5.4 Doğrudan görüntüleme enstrümanlarının kontrast duyarlılıklarının karşılaştırması. Şekilde, mevcut sistemlerden Keck/NIRC2, VLT-SPHERE, GPI, JWST/NIRCam ve Hubble/ACS'nin yanı sıra, gelecek nesil teleskoplar için öngörülen TMT-PFI ve E-ELT/EPICS kontrast eğrileri gösterilmektedir. DAG Teleskobu için hesaplanan FQPM tabanlı teorik kontrast eğrisi (mavi) ve bunun 10 kat iyileştirilmiş senaryosu (açık yeşil) aynı grafiğe eklenmiştir. Doğrudan görüntülenmiş bazı dev ötegezegenlerin K-band kontrastları (turuncu noktalar) ve Güneş Sistemi gezegenlerinin 10 pc uzaklıktaki Güneş benzeri bir yıldız etrafındaki kontrastları (gri noktalar) karşılaştırma amacıyla grafikte yer almaktadır. Şekil, Dalcanton ve diğ. (2015) çalışmasından uyarlanmıştır. 121

Şekil 5.5 Uzaklık–ayrıklık (d–λ/D) düzleminde farklı yarı-büyük eksen değerleri (10–500 AB) için kırınımla sınırlı bir sistem için öngörülen limitler. Renk geçişi yarı-büyük eksen değerlerini göstermektedir. Bu tür simülasyon tabanlı analizlerin, DAG/PLACID sisteminin gözlem kapasitesini farklı fiziksel koşullar altında sınamak üzere gelecek çalışmalarda kullanılması planlanmaktadır. 122

TABLO LİSTESİ

Page No

Tablo 2.1 Ötegezegenlerin yarıçap ve kütleye göre sınıflandırılması (Perryman, 2018)..... 8

Tablo 2.2 Gezegen oluşum senaryoları: çekirdek biriktirme (ÇB) ve disk kararsızlığı (DK) için temel parametreler. Kaynaklar ayrı sütunda verilmiştir. 17

Tablo 2.3 Gözlemsel sistemler ve olası oluşum mekanizması. (ÇB: Çekirdek biriktirme, DK: Disk kararsızlığı, B: Belirsiz/iki yöntemle de açıklanamıyor) 18

Tablo 2.4 Uzak bir gözlemci için Güneş Sistemi gezegenlerinin geçiş özellikleri (Nikolov, 2011)..... 29

Tablo 2.5 Güneş Sistemi'ndeki gezegenlerin dikine hız verileri (Cochran ve Hatzes, 1996). 33

Tablo 2.6 $1M_{\odot}$ kütleli bir yıldız için, farklı yıldız uzaklığı d, gezegen kütlesi M_p ve yarı-büyük eksen a değerleri altında hesaplanan astrometrik sinyal (α) büyüklükleri (Perryman, 2018). 40

Tablo 2.7 Gezegen tespit yöntemleri, ölçülen ve türetilen parametreler ile avantaj ve dezavantajları..... 50

Tablo 2.8 Farklı yüksek kontrastlı görüntüleme sistemleri için tipik iç çalışma açıları (IWA). ... 70

Tablo 2.9 Yüksek kontrast görüntüleme sistemleri için teleskop ve aygıt özellikleri..... 74

Tablo 3.1 Veritabanlarındaki örnek ötegezegen isimlerinin karşılaştırılması. 93

Tablo 3.2 Üç katalogda ortak olarak bulunan dört sistemin koordinat farkları ve hangi katalogda belirgin bir sapma olduğu gösterilmektedir. Sağ açıklık ($\Delta\alpha$) ve dikaçıklık ($\Delta\delta$) farkları küçükse "-" ile belirtilmiştir. Her sistem için yalnızca anlamlı düzeyde fark gösteren katalog(lar) çizelgeye yansıtılmıştır. 94

Tablo 3.3 astroARIADNE model limitleri. 96

Tablo 3.4 astroARIADNE ile yaşı hesaplanmış yıldızlar. 98

Tablo 3.5 *planetsynth* için oluşturulan, gezegen kütlesi (M_J), toplam metal bolluğu (Z), atmosferik metal bolluğu (Z_e) ve yıldızdan gelen ışınım (F_*) aralıklarını kapsayan yaklaşık 45.000 sentetik gezegenden oluşan örneklem ile tanımlanan model limitleri (Müller ve Helled, 2021). 99

Tablo 3.6 Literatürde doğrudan görüntüleme yöntemiyle keşfedilmiş ve bu çalışmada kontrol listesi olarak kullanılan sistemlere ait gözlemsel parametreler. Tabloda gezegenin ve yıldızın H bandındaki parlaklıkları (M_H veya m_H) ile bu değerlerin türü (mutlak veya görünür) Parlaklık Türü sütununda belirtilmiştir. Yanında yıldız (*) simgesi bulunan değerler SIMBAD veritabanından alınmıştır. H değeri yıldız ve gezegen arasındaki parlaklık farkını, Kontrast sütunu ise bu farka karşılık gelen $10^{0.4\Delta H}$ oranını göstermektedir. Kontrast değerleri mümkünse literatürden doğrudan alınmış, aksi halde gezegen ve yıldız parlaklıkları kullanılarak hesaplanmıştır. 108

Tablo 4.1 PLACID sisteminin laboratuvar testlerinde elde edilen başlıca performans parametreleri (Kühn ve diğ., 2024). 110

Tablo 4.2 DAG Teleskobu için gözlemlenebilir aday ötegezegen sistemleri. İsimlerin yanında yer alan üst simgeler; sistemin bu çalışmada kullanılan model veri setinden elde edildiğini (M), kontrast iyileştirmesi sonrası gözlemlenebilir hale geldiğini (I) ve/veya açısal ayrıklığın 2 λ/D eşiğinin altında olduğunu (S) belirtmektedir. Üst simge bulunmayan sistemler ise literatürde doğrudan görüntüleme ile tespit edilmiş kontrol listesinde bulunan gezegenleri temsil etmektedir. Yalnızca bu çalışma ile ilk kez DAG teleskobuna aday gösterilen sistemler ise (*) simgesiyle belirtilmiştir (Bkz. Bölüm 5.). Liste oluşturulurken bu çalışmada kullanılan model hesaplamalarından elde edilen sonuçlara öncelik verilmiştir. Literatür verilerinin referanslarına **Tablo 3.6**'dan ulaşılabilir. 115

Tablo 5.1 Gezegen parametreleri ve alt/üst belirsizlik sınırlarına göre yeniden hesaplanan sıcaklık/kontrast değerleri. 116

Tablo 1.1 *planetsynth* ile bu çalışmada elde edilen model parametreleri ($T_{\rm eff}, Z, Z_e, R_J, \log g$) ve bu parametrelere karşılık gelen BT-Settl SED'lerinden hesaplanan yüzey akıları kullanılarak türetilen kontrast değerleri ile sistemlere ait H-band görünür ve mutlak parlaklıkları (gezegen: P, yıldız: S). 142

Tablo 1.2 Yüzey yerçekimi sınırı ($\log g < 3.5$) nedeniyle BT-Settl SED'leri ile akı ve kontrast hesaplaması yapılamayan gezegenlerin bu çalışmada *planetsynth* ile elde edilen model çıktıları. 148

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
AB	: Astronomik Birim
$R_\odot$	: Güneş yarıçapı
$M_\odot$	: Güneş kütlesi
R_J	: Jüpiter yarıçapı
M_J	: Jüpiter kütlesi
pc	: Parsek
K	: Kelvin
mas	: Miliyay-saniye
deg	: Derece
km/s	: Kilometre/saniye
μas	: Mikroyay-saniye
a	: Yarı-büyük eksen
b	: Impact factor
d	: Uzaklık
D	: Teleskop açıklık çapı
e	: Dışmerkezlik
i	: Yörünge eğim açısı
P	: Yörünge dönemi
K	: Radyal hız yarı-genliği
α	: Sağ açıklık (RA)
δ	: Dikaçıklık (Dec)
$\Delta\alpha$	: Sağ açıklık farkı
$\Delta\delta$	: Dikaçıklık farkı
ϕ	: Yer enlemi
λ/D	: Açısal çözünürlük
$\Delta\lambda$	: Dalga boyu farkı
ΔF	: Akı farkı
F_*	: Yıldızdan gelen toplam akı
F_p	: Gezegenin gözlenen akısı

F_s : Yıldızın gözlenen akısı

A_V : Görsel dalga boyundaki sönümleme

A_g : Geometrik albedo

A_i : i düzlemindeki elektrik alan genliğini

R_p : Gezegen yarıçapı

R_P : Gezegen yarıçapı

R_s : Yıldız yarıçapı

M_p : Gezegen kütlesi

M_S : Yıldız kütlesi

m_p : Gezegen kütlesi

m_s : Yıldız kütlesi

Z : Toplam (bulk) metal bolluğu

Z_e : Atmosferik metal bolluğu

T_{eff} : Etkin sıcaklık (K)

T_0 : Referans zaman (BJD)

T_e : Ekinoks zamanı

T_p : Gezegen sıcaklığı

L_P : Gezegenin parlaklığı

N_e : Elektron yoğunluğu

m_H : H-bandı görünür parlaklık

M_H : H-bandı mutlak parlaklık

M_{HP} : Gezegen H-band mutlak parlaklığı

M_{HS} : Yıldız H-band mutlak parlaklığı

m_{HP} : Gezegen H-band görünür parlaklığı

m_{HS} : Yıldız H-band görünür parlaklığı

M_i : i düzlemindeki koronograf maskesi

t_E : Einstein zamanı (gün)

t_F : Geçiş süresi (gün)

t_G : Geçiş giriş/çıkış süresi (gün)

t_T : Toplam geçiş süresi (gün)

Kısaltmalar **Açıklama**

ADI : Angular Differential Imaging

AO : Adaptive Optics

APLC : Apodized Pupil Lyot Coronagraph

BD : Bonner Durchmusterung yıldız kataloğu

CCD : Charge-Coupled Device

CFBDSIR : Canada-France Brown Dwarfs Survey – InfraRed

CFHTWIR : Canada-France-Hawaii Telescope Wide-field Infrared

CGI : Coronagraph Instrument

CHXR : Chamaeleon X-ray kaynakları kataloğu

DAG : Doğu Anadolu Gözlemevi

DI : Direct Imaging

DM : Deformable Mirror

EEU : Extrasolar Planets Encyclopaedia

ELT : Extremely Large Telescope

EPIC : Ecliptic Plane Input Catalog

ESO : European Southern Observatory

ESPRESSO : Echelle SPectrograph for Rocky Exoplanets and Stable Spectroscopic Observations

ETV : Eclipse Timing Variations

FQPM : Four-Quadrant Phase Mask

GALEX : Galaxy Evolution Explorer

GJ : Gliese–Jahreiß yıldız kataloğu

GPI : Gemini Planet Imager

HCI : High-Contrast Imaging

IWA : Inner Working Angle

JWST : James Webb Space Telescope

NEA : NASA Exoplanet Archive

OEC : Open Exoplanet Catalog

OGLE : Optical Gravitational Lensing Experiment

OWA : Outer Working Angle

PDI : Polarimetric Differential Imaging

PLACID : Programmable Liquid-crystal Adaptive Coronagraph for Infrared Discovery

PSF : Point Spread Function

RDI : Reference Differential Imaging

SED : Spectral Energy Distribution

SDI : Spectral Differential Imaging

SLM : Spatial Light Modulator

SPHERE : Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch
TESS : Transiting Exoplanet Survey Satellite
TROIA : Telescope Reconfigurable Optical Instrument for Adaptive optics
VLT : Very Large Telescope

ÖZET

DOKTORA TEZİ

DAG TELESKOBU İLE ÖTEGEZEGENLERİN DOĞRUDAN GÖRÜNTÜLENMESİ ÜZERİNE BİR ÖNGÖRÜ ÇALIŞMASI

Seda KAPTAN

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sinan ALİŞ

Doğu Anadolu Gözlemevi'nde kurulumu tamamlanmış olan 4 m'lik DAG Teleskobu, dünyada yalnızca birkaç teleskopta bulunan bir koronografla donatılmıştır. Doğrudan görüntüleme tekniği ile yapılacak gözlemler, teleskobun adaptif optik düzeltmesinin de katkısıyla yıldızların etrafında gezegen, kahverengi cüce veya yıldız bileşenlerinin belirlenmesine olanak tanıyacaktır. Bu çalışmada, bilinen ötegezegen sistemlerinden yörünge periyodu bir yıldan büyük olanlar için kontrast değerleri hesaplanmış ve DAG Teleskobu'nun kırınım sınırlı odağında çalışacak olan PLACID koronografıyla görüntülenebilecek sistemler belirlenmiştir. Hesaplamaların doğruluğu, literatürden derlenen doğrudan görüntülenmiş bir kontrol örneklemi ile test edilmiştir. Güvenilir ötegezegen veritabanlarından derlenen 685 sistemden 356'sı için gezegen/yıldız kontrast oranı hesaplanabilmiştir. Bu sistemlerden 21'inin DAG Teleskobu ile görüntülenebileceği belirlenmiş; diğer sistemler için de sıcaklık, görünür parlaklık ve kontrast değerlerini içeren, başka çalışmalarda kullanılabilecek referans bir veri seti oluşturulmuştur.

Eylül 2025, 178 sayfa.

Anahtar kelimeler: Ötegezegenler, yüksek kontrastlı görüntüleme.

SUMMARY

Ph.D. THESIS

A FEASIBILITY STUDY FOR DIRECT IMAGING OF EXOPLANETS WITH DAG TELESCOPE

Seda KAPTAN

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Sciences

Department of Enstitue

Supervisor: Assist. Prof. Sinan ALİŞ

The 4-meter DAG Telescope at the Eastern Anatolia Observatory is equipped with a coronagraph, a feature available on only a few telescopes worldwide. With the support of adaptive optics correction, the direct imaging technique will enable the detection of planets, brown dwarfs, and stellar companions. This study calculated contrast values for known exoplanet systems with orbital periods longer than one year and identified those that can be imaged with the PLACID coronagraph operating at the telescope's diffraction-limited focus. The calculations were verified using a control sample of directly imaged systems from the literature. Out of 685 systems from reliable exoplanet databases, contrast ratios were obtained for 356 systems. 21 of these are observable with the DAG Telescope. For the remaining systems, parameters such as temperature, apparent brightness, and contrast values were compiled into a reference dataset for future studies.

September 2025, 178 pages.

Keywords: Exoplanets, high contrast imaging.

1. GİRİŞ

Ötegezegenler, Güneş dışındaki yıldızların yörüngesinde dolanan, yıldızlardan daha düşük kütleye sahip ve kendi başlarına nükleer füzyon gerçekleştiremeyen gök cisimleri olarak tanımlanır (Perryman, 2018). İlk onaylı ötegezegen keşfi, Wolszczan ve Frail (1992) tarafından PSR B1257+12 pulsarı etrafında gerçekleştirilmiştir. Güneş benzeri bir yıldız etrafında keşfedilen ilk ötegezegen Mayor ve Queloz (1995) tarafından bulunan 51 Pegasi b olmuştur. Bu keşif, astronomide tamamen yeni bir araştırma alanının kapılarını açmıştır. O tarihten itibaren, Kepler ve TESS gibi uzay teleskopları ile sayısız yer tabanlı gözlem programı sayesinde binlerce ötegezegen keşfedilmiştir. Bu gezegenler, kütle, yarıçap, bileşim ve atmosferik özellikler bakımından geniş bir çeşitlilik sergilemekte; bu çeşitlilik, oluşum koşullarındaki farklılıklar ve yıldız–gezegen etkileşimleri ile şekillenmektedir (Seager, 2010; Burrows ve diğ., 1997).

Ötegezegen araştırmalarında kullanılan başlıca yöntemler arasında geçiş (transit) fotometrisi, radyal hız ölçümleri, mikromercekleme, astrometri ve doğrudan görüntüleme yer almaktadır. Geçiş yöntemi, gezegenin yıldızının önünden geçerken yıldız ışığında yarattığı periyodik azalmayı ölçerek yarıçapı belirlemekte ve radyal hız verileri ile birleştirildiğinde ise kütle–yoğunluk ilişkisi ortaya konmaktadır. Bu ve benzeri yöntemler, gezegenin varlığını dolaylı olarak tespit etmektedir. Ancak gezegenin varlığının kesin olarak ortaya konması ve fiziksel özelliklerinin ayrıntılı biçimde incelenebilmesi için, doğrudan görüntülenmesi büyük önem taşımaktadır (Fischer ve diğ., 2014; Bowler, 2016). Bu teknik, yörünge yarı-büyük ekseni genellikle 5 AB'den büyük, genç (100 Myr) ve parlak yıldızlara sahip sistemlerde en etkili sonuçları vermektedir. Yöntem, yalnızca gezegenin varlığını doğrulamakla kalmaz, aynı zamanda tayfsal gözlemler yoluyla atmosferik bileşim, sıcaklık ve bulut yapısı gibi fiziksel özellikleri doğrudan ortaya koyma imkanı sağlamaktadır.

Aletsel teknolojilerdeki ilerlemeler, ötegezegenlerin daha hassas ve ayrıntılı biçimde gözlenmesine olanak tanımaktadır. Yüksek kontrast görüntüleme teknikleri, adaptif optik sistemler ve özel koronagraf tasarımları sayesinde, ana yıldızdan çok daha sönük gezegenlerin tespitinde önemli mesafeler kat edilmiştir. Türkiye'de bu gelişmelere paralel olarak yürütülen en önemli projelerden biri, Doğu Anadolu Gözlemevi'dir (DAG).

Erzurum'daki Karakaya Tepesi'nde, 3170 metre rakımda inşa edilen 4 metre çaplı Ritchey–Chrétien tipi DAG teleskobu, adaptif optik sistemi TROIA, programlanabilir koronograf PLACID ve kızıl ötesi kamera DIRAC ile hem optik hem de yakın kızılötesi dalga boylarında gözlem yapabilecek kapasitededir (Yeşilyaprak ve Keskin, 2020). İki Nasmyth odak düzlemine sahip olan teleskop, atmosferik türbülansın azlığı ve yüksek rakım avantajı sayesinde yüksek çözünürlüklü gözlemler için elverişli bir ortam sunmaktadır.

Bu nitelikleri, DAG'ı yalnızca galaksi içi ve dışı gözlemler için değil, aynı zamanda doğrudan görüntüleme yöntemiyle ötegezegen araştırmaları açısından da güçlü bir aday haline getirmektedir. Ayrıca DAG, optik ve yakın kızılötesi astronomi alanlarında önemli bir teknoloji ve test laboratuvarı işlevi görmektedir. Bu kapsamda, adaptif optik sistem değerlendirmeleri (Güvenir, 2021), atmosferik görüş ölçümleri (Güney, 2020) ve koronograf aygıtı metriklerinin belirlenmesi ve simülasyonu (Öztürk Çetni, 2025) gibi teknik araştırmalar teleskobun enstrümental yeteneklerini geliştirmektedir. DAG'ın bilimsel kullanım alanlarına yönelik tamamlanmış diğer tezler arasında, cüce eliptik galaksilerin yıldızlararası popülasyonlarının incelenmesi (Şen Aydemir, 2019), düşük ışınım gücüne sahip aktif galaktik çekirdekler üzerine çalışmalar (İkiz, 2018) ve adaptif optik sistemin galaksi çalışmalarına etkisinin simülasyonlarla değerlendirilmesi (Fişek, 2025) yer almaktadır.

Bu tez çalışması, DAG teleskobunun ötegezegen gözlemlerindeki potansiyelini değerlendirmeyi amaçlayan bir ön araştırma niteliğindedir. Çalışmada, günümüze kadar keşfedilmiş ötegezegenlerin verileri kullanılarak, teleskopla gözlemlenebilirlikleri sayısal yöntemlerle test edilmiştir. Bu kapsamda, veritabanlarından toplanan fiziksel parametreler ışığında, gezegen sıcaklıkları *planetsynth*, yıldız yaşları ise *astroARIADNE* koduyla hesaplanmıştır. BT-Settl model atmosferlerinden elde edilen yüzey akıları kullanılarak H-band kontrast oranları (F_P/F_S) belirlenmiş ve bu değerler DAG teleskobunun kontrast eğrisi ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca yıldız ve gezegenler için mutlak ve görünür parlaklıklar hesaplanmış, bu çalışma kapsamında başka araştırmalarda da kullanılabilecek kapsamlı bir model parametre kataloğu oluşturulmuştur. Söz konusu katalog verileri **EK 1.**'de sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, teleskop aktif hale geldiğinde ve ilk ışığını aldıktan sonra hedeflenebilecek sistemler hakkında öngörüler sunmaktadır.

Bu tez beş ana bölümden oluşmaktadır. Bölüm 1.'de çalışmanın amacı, kapsamı ve

motivasyonu sunulmuştur. Bölüm 2.'de ötegezegenlerin genel özellikleri, keşif yöntemleri, doğrudan görüntüleme tekniği ve DAG teleskobunun teknik özellikleri ile potansiyel gözlem yetenekleri açıklanmıştır. Bölüm 3.'te kullanılan veritabanları, hesaplama araçları ve izlenen iş akışı ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bölüm 4.'te elde edilen sonuçlar ve DAG teleskobuyla gözlemlenebilecek ötegezegen adayları değerlendirilmiştir. Bölüm 5.'te çalışmanın bulguları özetlenmiş, katkıları tartışılmış ve gelecekte yapılabilecek araştırmalara yönelik öneriler verilmiştir.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. ÖTEGEZEGENLER

Ötegezegenler, Güneş dışındaki yıldızların yörüngesinde dolanan, yıldızlardan daha düşük kütleli ve kendi başlarına nükleer füzyon gerçekleştiremeyen gök cisimleridir (Perryman, 2018). Bu gezegenler geniş bir kütle ve bileşim aralığında yer alır; yapıları, parlaklıkları ve atmosferik özellikleri oldukça çeşitlidir. Bu çeşitlilik, gezegenlerin oluşum koşulları ve yıldızlarıyla olan etkileşimlerine bağlı olarak evrimsel süreçlerde de farklılık göstermektedir (Seager, 2010; Burrows ve diğ., 1997).

2.1.1. Ötegezegen Sınıfları

Ötegezegenler, fiziksel özelliklerine göre genellikle dört ana sınıfa ayrılır: Dünya benzerleri, süper-Dünyalar, gaz devleri ve buz devleri. Bu sınıflandırma, gezegenlerin kütle, yarıçap ve bileşim farklılıklarını temel alır. Ancak bu dört sınıf daha üst düzeyde iki ana kategori altında toplanabilir: karasal gezegenler (Dünya benzerleri ve süper-Dünyalar) ve dev gezegenler (gaz devleri ve buz devleri).

2.1.1.1. Dev Gezegenler

Dev gezegenler, Dünya'nın kütlesinin onlarca/binlerce katı kadar kütleye ve çok daha büyük boyutlara sahiptirler. Hacimlerinin büyük kısmı, oluşumlarını gerçekleştirdikleri öncül gezegen disklerinin ana bileşenleri olan hidrojen ve helyum tarafından doldurulmuştur. Güneş Sistemi'ndeki dev gezegenler, Güneş'e kıyasla ağır elementler açısından da oldukça zengindir. Bu durum, katı malzemenin oluşum süreçlerine katıldığını göstermektedir. Dev gezegenler, hem Güneş Sistemi'nin hem de var oldukları ötegezegen sistemlerinin kütlesinin büyük bölümünü oluşturmaktadırlar. Bu nedenle dev gezegenler, gezegen sistemlerinin yörüngesel mimarisini belirlemede ve muhtemelen karasal gezegenlerin bileşimlerini etkilemede başlıca aktörlerdir (D'Angelo ve Lissauer, 2018).

Gaz Devleri: Kütleleri 0.3–13 M_J aralığında olan bu gezegenler, yoğun hidrojen–helyum atmosferlerine sahiptir. Jüpiter ve Satürn benzeri bu gezegenler, büyük yarıçapları ve genç

yaşlarda sahip oldukları yüksek sıcaklıkları sayesinde doğrudan görüntüleme yöntemleriyle tespit edilebilmeleri açısından en uygun hedeflerdir. Bu tür gezegenlerin parlaklıkları yaşlarına ve atmosferik yapılarına bağlı olarak zamanla değişiklik göstermektedir. Burrows ve diğ. (1997), bu sınıfa ait gezegenlerin parlaklık evrimini açıklayan ilk detaylı kuramsal modelleri sunmuştur.

Buz Devleri: Neptün ve Uranüs benzeri yapıda olan buz devleri, iç yapılarında su, amonyak ve metan gibi maddeler barındıran, görece düşük kütleli gezegenlerdir. Atmosferleri genellikle hidrojen ve helyumdan oluşmaktadır. Bu sınıftaki gezegenlerin iç yapısı ve yarıçapı, yıldızdan gelen ışınımın da etkisiyle önemli ölçüde değişebilmektedir. Fortney ve diğ. (2007), farklı bileşimlere sahip gezegenler için yıldız ışınımının etkisini de içeren teorik yarıçap modelleri sunmuş ve özellikle su içeriği yüksek gezegenlerin, benzer kütleli kayalık gezegenlerden % 40–50 daha büyük yarıçaplara sahip olabileceğini göstermiştir. Sıcak Neptün sınıfına giren GJ 436 b, buz devlerinin iç yapısal çeşitliliğini gösteren önemli bir örnektir. Yapılan modellemeler, bu gezegenin büyük oranda kayalık bir çekirdeğe ve ince bir hidrojen–helyum zarfına sahip olduğunu, tamamen su ya da tamamen gaz yapısının ise olası olmadığını göstermektedir (Figueira ve diğ., 2009). Bu durum, buz devlerinin tek tip yapıdan ibaret olmadığını ve oluşum süreçlerine bağlı olarak önemli çeşitlilik gösterebileceğini ortaya koymaktadır.

2.1.1.2. Karasal Gezegenler

Karasal gezegenler, Dünya ölçeğinde kütlelere ve görece küçük boyutlara sahip, büyük ölçüde silikatlar ve metallerden oluşan gökcisimleridir. Kendi kütleçekimleri sayesinde küresel şekil alırlar ve üzerinde yürünebilecek katı yüzeylere sahiptirler. Atmosferleri bulunabilir ancak toplam kütleleri içinde gazların oranı ihmal edilebilir düzeydedir. Karasal gezegenler, yaşamın bilinen tek ev sahibi olmaları nedeniyle özel bir öneme sahiptir. Katı yüzeyleri, güneş ışığından yararlanabilmeleri ve yüzeyde sıvı su bulundurma potansiyelleri sayesinde, astrobiyolojik araştırmaların başlıca hedefleridir (Chambers, 2010).

Süper Dünya'lar: Süper-Dünya'lar, Dünya'dan daha büyük fakat Neptün'den daha küçük yarıçapa ve kütleye sahip, ötegezegen sınıflamaları içinde ara bir kategori olarak değerlendirilmektedir. Genellikle yaklaşık 1.5–4 $R_{\oplus}$ ve 2–10 $M_{\oplus}$ aralığında yer almaktadırlar (Chen ve Kipping, 2017).

Gözlemsel çalışmalar, süper-Dünya'ların Güneş benzeri yıldızların çevresinde oldukça yaygın olduğunu göstermektedir. 2–10 $M_{\oplus}$ kütle aralığında çok sayıda süper-Dünya keşfedilmiş olması, bu gezegenlerin evrende yaygın olduğu ve bu nedenle Güneş Sistemi'nin yapısının alışılmadık olduğu yönündeki görüşleri desteklemektedir (Chen ve Kipping, 2017; Swain ve diğ., 2024).

Süper-Dünya'ların oluşumuna ilişkin kuramsal yaklaşımlar, bu gezegenlerin kayalık çekirdeklerinin oluşumunu takiben, çevrelerindeki gaz diskinden önemli miktarda hidrojen ve helyum zarfı edindiklerini, ancak bu zarfların zamanla foto-buharlaşma, çarpışmalar ve çekirdek soğuması gibi süreçlerle kısmen ya da tamamen kaybedilebileceğini öngörmektedir (Schlichting, 2018).

Süper-Dünya'ların yapısı ve evrimi, onların yaşam barındırma potansiyelleri açısından da önemlidir. Valencia ve diğ. (2007), bu gezegenlerin tektonik aktivite gösterip göstermeyeceği sorusuna odaklanmış, farklı ısıl yapılar ve iç dinamikler altında yüzey koşullarının nasıl şekillenebileceğini tartışmıştır. Çalışmalar, Dünya'daki gibi aktif levha tektoniğinin, gezegenin büyüklüğüne ve içsel ısı üretimine bağlı olarak süper-Dünya'larda da meydana gelebileceğini öne sürmektedir.

Bu bağlamda, süper-Dünya'lar sadece yapısal çeşitlilikleriyle değil, aynı zamanda oluşum süreçleri, atmosfer evrimi ve yüzey koşullarıyla da gezegenbilim açısından önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır.

Dünya Benzeri: Dünya benzeri gezegenler, yapısal olarak kayasal bileşime sahip, boyut ve kütle bakımından Dünya'ya yakın olan ötegezegenlerdir. Bu gezegenler, özellikle yüzeylerinde sıvı suyun var olabileceği yaşanılabilir bölgede yer aldıklarında, yaşam arayışında en öncelikli adaylar olarak değerlendirilmektedir (Kasting ve diğ., 1993).

Dünya benzeri gezegenlerin keşfi ve yaşam arayışı Yaşanabilir Bölge (Habitable Zone - HZ) kavramını ortaya çıkartmıştır. HZ, yeterli atmosfer basıncına sahip bir gezegenin yüzeyinde suyun sıvı halde bulunabileceği yıldız etrafındaki bölge olarak tanımlanır (Hill ve diğ., 2022). Yaşanabilir bölgenin (HZ) iki sınırı vardır ve bunlar, gezegenin yansıtma oranı (albedo) ile merkezi yıldızın etkin sıcaklığı arasındaki ilişkiye bağlıdır. İç sınır, sera etkisinin kontrolden çıkarak yüzeydeki tüm suyun buharlaşmasına, ardından su buharının ışığın etkisiyle parçalanmasına ve açığa çıkan hidrojenin uzaya kaçmasına neden olduğu noktadır

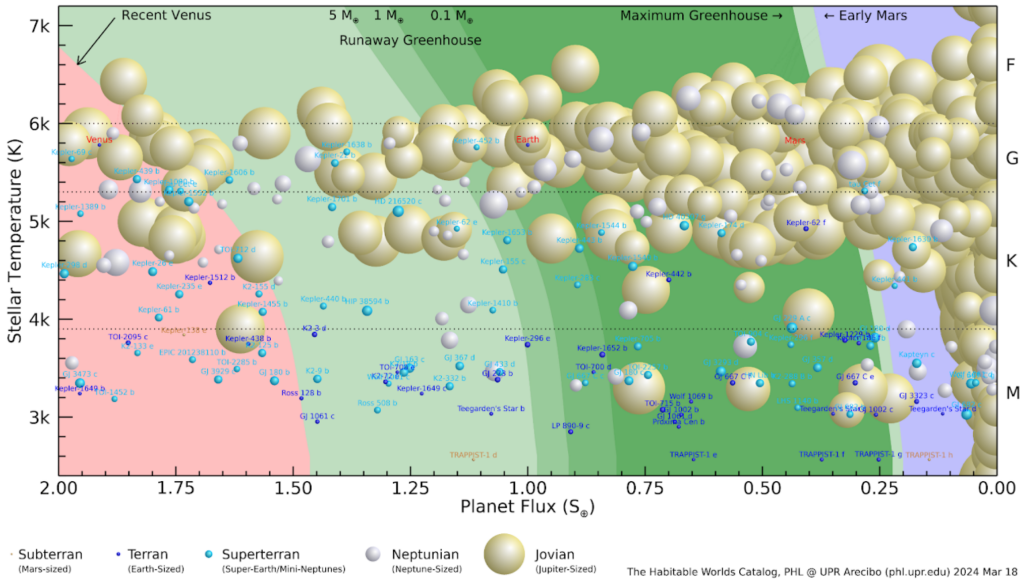
(kontrolsüz sera etkisi). Dış sınır ise, maksimum sera etkisinin bile atmosferdeki CO_2'nin yoğunlaşmasını engelleyemediği ve küresel ölçekte buzullaşmanın başladığı uzaklıktır (Kaltenegger ve Sasselov, 2011). Bu, HZ'nin dar anlamda yaşanabilir bölge (Conservative HZ – CHZ) tanımıdır. Bir de iyimser anlamda HZ (Optimistic HZ – OHZ) tanımı vardır. OHZ, Güneş Sistemi'nden elde edilen gözlemsel kanıtlara dayanmaktadır: İç sınır Günümüz Venüs'ü (Recent Venus) limitiyle (Venüs'ün en az 1 milyar yıldır yüzeyinde sıvı su bulunmaması), dış sınır ise Eski Mars (Early Mars) limitiyle (yaklaşık 3.8 milyar yıl önce Mars yüzeyinde sıvı suyun varlığına dair jeolojik kanıtlar) tanımlanır (Hill ve diğ., 2022).

Yaşanabilir bölge, yalnızca Dünya benzeri gezegenler için yaşam barındırma potansiyelini tanımlamaz; bu bölgedeki dev gezegenlerin uyduları da uygun koşullar altında yaşama ev sahipliği yapabilir. Bununla birlikte, yeraltında var olabilecek yaşam olasılığı bu tanıma dahil edilmez; çünkü böyle ortamlarda yaşanabilirliği uzaktan doğrulamaya imkan verecek atmosferik göstergeler bulunmamaktadır. Benzer şekilde, yaşamın farklı çözücülerde ortaya çıkma ihtimali de bu kapsamın dışındadır. Öte yandan, HZ içinde yer almak bir gezegenin kesin olarak yaşanabilir olduğu anlamına gelmemektedir. Suyun olmaması ya da biyolojik süreçlerin başlaması için gerekli kimyasal bileşenlerin eksikliği gibi birçok etken yaşanabilirliği sınırlayabilmektedir.

The Habitable Worlds Catalog (HWC) (Méndez, 2022), günümüzde bilinen beş binden fazla ötegezegen arasından yalnızca 70 tanesini potansiyel olarak yaşanabilir adaylar arasında göstermektedir. Bu gezegenlerden 29'u, yüzeyinde sıvı su barındırabilecek kayalık yapılı olmaları nedeniyle dar anlamda yaşanabilir bölge (CHZ) kapsamında değerlendirilmektedir. Geriye kalan 41 aday ise su dünyaları ya da mini-Neptünler olabileceğinden, yaşanabilirlik koşulları daha belirsizdir ve iyimser yaşanabilir bölge (OHZ) örneklemini oluşturmaktadır (**Şekil 2.1**).

Bu sınıflamalar, hem gözlemsel kütle-yarıçap verileri hem de iç yapı ve atmosfer modellemeleri temel alınarak oluşturulmuştur. Literatürde bu ayrımlar için çeşitli eşik değerler önerilmiş olup, Perryman (2018) tarafından yarıçap ve kütleye göre sınıflandırmalar **Tablo 2.1**'de verilmektedir.

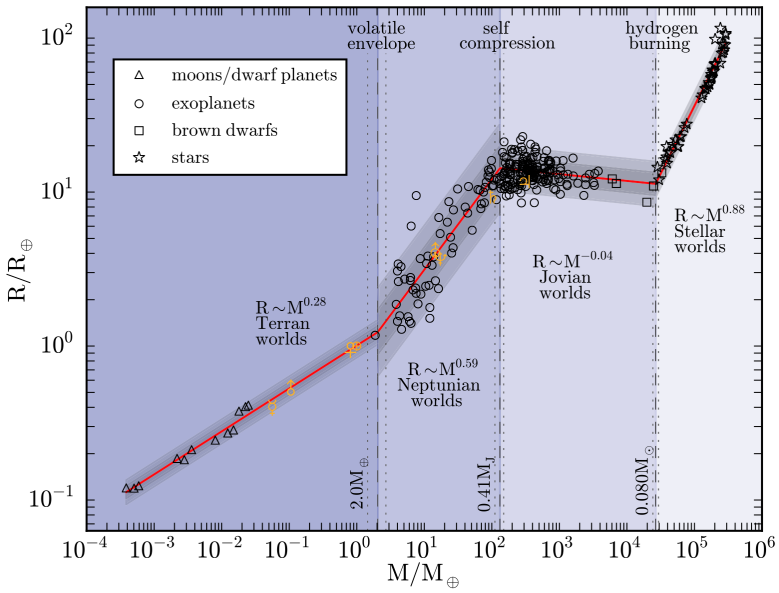
Perryman'ın gözlemsel ve kuramsal eşiklere dayanan sınıflamasına ek olarak, Chen ve Kipping (2017), 316 gezegenden oluşan bir örneklemde kütle–yarıçap (M–R) ilişkisini istatistiksel olarak incelemiş ve bu ilişkiye dayanarak dört sınıf tanımlamıştır: Terran, Neptün



Şekil 2.1: Yıldız etrafında yaşanabilir bölge (HZ). Koyu yeşil alan, dar anlamda yaşanabilir bölgeyi gösterirken; açık yeşil alan, iyimser yaşanabilir bölgeyi temsil etmektedir. Görselde yalnızca 10 $M_{\oplus}$'dan veya 2.5 $R_{\oplus}$'dan daha küçük gezegen adayları isimlendirilmiştir[1] .

Tablo 2.1: Ötegezegenlerin yarıçap ve kütleye göre sınıflandırılması (Perryman, 2018).

Yarıçapa Göre	**Aralık ($R_{\oplus}$)**
Dünya benzeri	< 1.25
Süper-Dünya benzeri	1.25 – 2
Neptün benzeri	2 – 6
Jüpiter benzeri	6 – 15
Kütleye Göre	**Aralık ($M_{\oplus}$ veya M_J)**
Alt-Dünya	10^{-8} – 0.1 $M_{\oplus}$
Dünya benzeri	0.1 – 2 $M_{\oplus}$
Süper-Dünya	2 – 10 $M_{\oplus}$
Neptünler	10 – 100 $M_{\oplus}$
Jüpiterler	100 – 10^3 $M_{\oplus}$
Kahverengi cüceler	13 M_J – 0.07 $M_{\odot}$
Yıldızsılar	0.07 – 1 $M_{\odot}$



Şekil 2.2: Chen ve Kipping (2017) çalışmasında, 316 cisim üzerinden elde edilen kütle – yarıçap ilişkisi.

benzeri, Jüpiter benzeri ve yıldızsal cisimler (**Şekil 2.2**).

Bu sınıflar, kütle–yarıçap verilerindeki yönelim değişiklikleri ve dağılım özelliklerine göre belirlenmiştir. Bu bağlamda, süper-Dünya olarak adlandırılan gezegenler, katı yapılı gezegenler ile gaz atmosferi taşıyan gezegenler arasında yer alan ara bir geçiş bölgesi olarak değerlendirilmektedir.

Bu sınıflandırma, fiziksel yapıdan ziyade, istatistiksel kümelenmelere dayanan tamamlayıcı bir bakış açısı sunmaktadır.

Kütle ve yarıçap temelli sınıflandırmalara ek olarak, gezegenlerin yıldızlarına olan uzaklıklarına bağlı olarak da bir sınıflandırma yapılabilir. Bu yaklaşımda gezegenler, yarı - büyük eksen uzunluklarına ve buna bağlı olarak aldıkları yıldız ışınımına göre “sıcak”, “ılıman” veya “soğuk” olarak gruplandırılır.

Gezegenin yıldızına olan yakınlığı, yalnızca yüzey sıcaklığını değil, aynı zamanda atmosferik yapısını, bileşimini ve hatta iç dinamiklerini doğrudan etkileyebilir. Özellikle kısa yarı - büyük eksene sahip, yıldıza yakın konumlanmış gezegenlerde yoğun yıldız ışınımı nedeniyle atmosfer kaybı gibi önemli evrimsel süreçler gözlemlenebilir. Bu nedenle, yörünge uzaklığına dayalı bu sınıflandırma, gezegenlerin fiziksel ve atmosferik özelliklerini anlamada tamamlayıcı bir rol oynar.

Sıcak (hot) gezegenler, genellikle yıldızlarına 0.1 AB'dan daha yakın yörüngelerde bulunur ve denge sıcaklıkları (T_{eq}) 1000 K'in üzerindedir. Bu kategoriye, sıcak Jüpiterler, sıcak Neptünler, ve çok-kısa periyotlu (ultra-short period, USP) kayalık gezegenler gibi alt türler dahildir. Özellikle USP gezegenler, 1 günün altında yörünge periyotlarına sahip olup, yarıçapları genellikle 2 $R_{\oplus}$'dan küçük, kaya yapılı cisimlerdir. Bu tür gezegenlerin oluşumunda içe doğru göç, yıldız ışınımına bağlı atmosferik buharlaşma ve manyetik etkileşim gibi süreçlerin rol oynadığı düşünülmektedir (Perna ve diğ., 2012; Hansen ve Murray, 2012; Winn ve diğ., 2018).

Ilık/Ilıman (warm) Gezegenler, yaklaşık 10–200 gün arasında yörünge dönemine ve 400–600 K arasında denge sıcaklığına sahiptirler. Bu gezegenler, sıcak gezegenlere kıyasla yıldızdan daha uzak oldukları için atmosferik buharlaşmadan daha az etkilenirler. Bu durum, ilk oluşum koşullarına daha yakın atmosferlerin incelenmesini mümkün kılar. Ilık gezegenler, gezegen oluşumu ve atmosfer evrimi modellerini sınamak için önemli örnekler sunar (Demangeon ve diğ., 2021; Grieves ve diğ., 2022).

Soğuk (cold) Gezegenler, yıldızlarından görece uzak yörüngelerde dolanan ve bu nedenle düşük denge sıcaklıklarına sahip büyük gezegenlerdir. Genellikle buz/donma hattından (snow/ice/frost line) sonra oluşurlar ve bu nedenle gaz devleri ile buz devleri sınıflarına girerler (Öberg ve diğ., 2011).

Buz hattı, öncül gezegen disklerinde sıcaklığın belirli bir uçucu bileşiğin gaz halinden katı hale geçmesine yetecek kadar düştüğü bölgeyi ifade etmektedir. Su, CO_2 ve CO gibi farklı uçucu moleküllerin her biri için ayrı buz hatları bulunur. Bu sınırlar gezegen oluşumunu etkilemektedir çünkü buz hattının dışında katı madde yoğunluğu artar, toz parçacıkları birikerek buzla kaplandığında daha kolay yapışır ve gezegenimsi (gezegenesimal) oluşumu hızlanır. Ayrıca bir gezegenin kimyasal bileşimi ve atmosferi, hangi buz hattının içinde veya dışında şekillendiğine bağlı olarak farklılık gösterir. Buz hatlarının gözlemsel olarak tespit edilmesi zordur. Özellikle suyun buz hattı yıldızlara çok yakın olduğu için doğrudan gözlenmesi güçtür. Su buz hattı $\sim$ 170 K sıcaklıkta oluşur ve Güneş Sistemi'nde günümüzde 2.7 AB civarında, yani asteroit kuşağında yer almaktadır. Buna karşılık, CO'nun buz hattı $\sim$ 17 K gibi çok daha düşük sıcaklıklarda meydana gelir ve Kuiper Kuşağı'nın bulunduğu 27–35 AB bölgesindedir (Martin ve Livio, 2014).

Yıldızlarından aldıkları düşük ışınım sebebiyle buz hattında bulunan gezegenlerin

atmosferlerin zaman içinde daha az değişime uğramaktadır. Bu sayede, soğuk gezegenlerin gözlemi sistemin erken dönem koşullarına dair bilgi sağlayabilmektedir (Madhusudhan ve diğ., 2014).

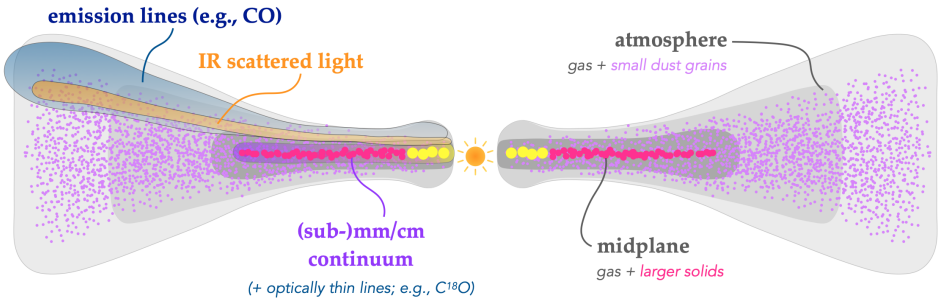
2.1.2. Ötegezegenlerin Oluşumu ve Evrimi

Ötegezegenlerin oluşumu ve evrimi, yıldız oluşum süreçleriyle doğrudan bağlantılı olup, büyük ölçüde gezegen öncülü (protoplanetaryal) disklerin fiziksel ve kimyasal özellikleri tarafından şekillenir. Bu diskler, genç yıldızların etrafında oluşan, çoğunluğu hidrojen ve helyum gazından, daha az bir kısmı ise metal ve tozdan meydana gelen yapılardır (Andrews, 2020). Diskin kütlesi, sıcaklık profili, metal bolluğu ve ömrü gibi temel parametreler, hangi tip gezegenlerin oluşabileceğini ve bu sürecin hangi zaman ölçeklerinde gerçekleşeceğini doğrudan belirler. Yüksek açısal çözünürlüklü ALMA gözlemleri, gezegen öncülü disklerin kütle ve yoğunluk dağılımlarının yıldızın kütlesi, yaşı ve içinde bulunduğu çevresel koşullarla yakından ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Milimetre-altı dalga boylarındaki veriler, disklerde halka, boşluk, spiral kollar ve asimetrik toz yoğunlaşmaları gibi küçük ölçekli alt yapılar bulunduğunu göstermektedir. Bu morfolojik yapılar genellikle yerel gaz basınç maksimumlarıyla ilişkilidir ve iki önemli olasılığa işaret eder: (i) gezegenimsilerin birikerek büyüdüğü aktif bölgeler veya (ii) halihazırda oluşmuş gezegenlerin dinamik etkileri.

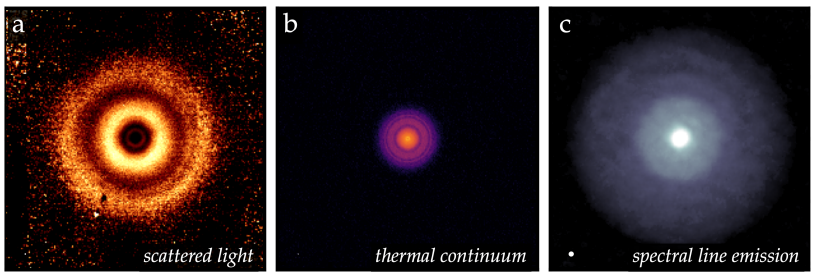
Şekil 2.3'te diskin gaz ve toz bileşenleri ile temel yapısal bölgeleri şematik bir kesit halinde sunulmakta, ayrıca saçılmış ışık, termal sürekli salınım ve moleküler çizgi salınım bölgeleri gösterilmektedir. **Şekil 2.4** ise TW HYa diskin farklı dalga boylarındaki gözlemleri karşılatırılarak, bu gözlemlerin farklı fiziksel koşullara olan duyarlılıklarının disk morfolojisini nasıl değiştirdiğini ortaya koymaktadır. Bu tür çoklu dalga boylu gözlemler, gezegen oluşum mekanizmalarının ve zaman ölçeklerinin anlaşılmasını sağlamaktadır.

Gezegen oluşumu süreci, gözlemsel bulguların ortaya koyduğu bu yapısal özellikler çerçevesinde, genel olarak iki ana teorik model altında incelenmektedir: çekirdek biriktirme (core accretion) (Safronov, 1969; Goldreich ve Ward, 1973; Hayashi ve diğ., 1985; Pollack ve diğ., 1996; Mordasini ve diğ., 2012a) ve disk kararsızlığı (disk instability) (Kuiper, 1951; Safronov, 1969; Boss, 1997).

Çekirdek biriktirme senaryosu, gezegenlerin oluşumunu açıklamak için en yaygın kabul



Şekil 2.3: Bir gezegen öncülü disk yapısının gaz ve toz bileşenleri ile temel yapısal bölgelerinin şeması. Gaz bileşeni, gri tonlarla; katı maddeler ise büyük boyut ve renklerle gösterilmektedir. Sol tarafta saçılmış ışık, termal sürekli salınım ve moleküler çizgi salınım bölgelerinin yaklaşık konumları; sağ tarafta ise disk yapısı ve içeriğine ilişkin terminoloji yer almaktadır (Andrews, 2020).



Şekil 2.4: TW Hya diskinin farklı dalga boylarındaki gözlemlerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir: (a) Küçük toz tanelerinden saçılan = 1.6 m yakın kızılötesi ışık (van Boekel ve diğ., 2017), (b) çakıl boyutundaki taneciklerden yayılan = 0.9 mm termal sürekli salınım (Andrews ve diğ., 2016), (c) moleküler gazın dağılımını ortaya koyan CO J=3–2 çizgi salınımı (Huang ve diğ., 2018). Bu çoklu dalga boylu gözlemler, farklı fiziksel koşullara duyarlılıkları sayesinde disk morfolojisinin dalga boyuna bağlı olarak nasıl değiştiğini ortaya koymaktadır (Andrews, 2020).

gören modellerden biridir. Bu modele göre gezegen oluşumu, protoplanet diskteki mikrometre boyutundaki toz tanelerinin elektrostatik kuvvetlerle birleşerek büyümesiyle başlar (Pollack ve diğ., 1996). Zamanla bu tozlar metre, kilometre ölçekli cisimlere (gezegenimsiler; planetesimals) dönüşür. Gezegenimsiler çarpışarak daha büyük kütleli çekirdekler oluşturur. Eğer bu çekirdekler yeterince büyürse ve diskte hala gaz mevcutsa, bu kez çekirdekler gazı yakalamaya başlar. Süreç üç ana evrede incelenir.

1. Evrede, gezegen çekirdeği, çevresindeki gezegenimsilerden çok hızlı bir şekilde katı madde biriktirir. Katı madde akış hızı, gaz akış hızına göre çok büyüktür. Bu dönemdeki hızlı büyüme, çekirdek büyüdükçe kütleçekimsel odaklama etkisinin artmasıyla daha da hızlanır ve bu süreç kontrolsüz büyüme (runaway growth) olarak bilinir. Büyüme, çekirdeğin besleme bölgesindeki tüm katı maddeyi tüketmesine kadar devam eder. Bu noktada çekirdek izolasyon kütlesine ulaşır:

$$M_{\mathrm{iso}} = C_1 \left(a^2 \sigma_{\mathrm{init}}\right)^{3/2} \tag{2.1}$$

Burada a, yarı-büyük eksen; σ_{init}, besleme bölgesindeki gezegenimsilerin başlangıç yüzey kütle yoğunluğu; C_1 ise 1.56×10^{25} g (σ_{init}'in birimi g/cm^2 ise)

Bu kütle, yörünge yarıçapına ve diskin yüzey kütle yoğunluğuna bağlıdır, dolayısıyla her sistemde ve her konumda farklı olabilir. Buz hattının dışında yüzey yoğunluğu daha yüksek olduğundan, M_{iso} genellikle daha büyüktür. Bu nedenle Jüpiter ve Satürn gibi dev gezegenlerin çekirdekleri, Dünya benzeri gezegenlere kıyasla çok daha hızlı oluşabilir. Bu evrede gaz akışı ihmal edilebilir seviyededir, çekirdek oluşurken zarf (envelope) neredeyse hiç büyümez.

Bu evrenin zaman ölçeği,

$$t_{\mathrm{ph1}} = \frac{C_2 M_{\mathrm{iso}}^{1/3}}{\left(\sigma_{\mathrm{init}} \Omega F_{\mathrm{g}}\right)} \tag{2.2}$$

ile verilir. Burada Ω, yörünge frekansı; F_g, kütleçekimsel tesir kesiti; C_2, tüm nicelikler cgs biriminde olduğunda 8.126'dır.

İzolasyon kütlesine ulaşıldığında 1. evre sona erer ve 2. evre başlar. Bu aşamada,

besleme bölgesindeki gezegenimsiler büyük ölçüde tükenmiş olduğundan, çekirdek artık katı maddeyi yalnızca yörünge göçüyle veya az sayıda yeni cismin gelmesiyle sınırlı biçimde alabilir. Çekirdek kütlesi izolasyon kütlesine ulaşmış olsa da gaz zarfı hala küçüktür. Zarfın soğuyup büzülmesi, katı madde çarpışmalarından kaynaklanan enerji akışıyla gecikir ve bu nedenle Kelvin–Helmholtz büzülmesi çok yavaş işler. Bu süreçte zarfın sıcaklığı artar, buz ve diğer uçucu maddeler buharlaşır. Pollack ve diğ. (1996) modeli, bu buharlaşma için iki sınır durumu ele alır: batış (sinking) senaryosunda buharlaşan malzeme zarfın derinlerine inerek metal bolluğunu artırır, batmayan (no sinking) senaryosunda ise zarf içinde karışarak dağılır. Bu süreç opasiteyi de etkilemektedir; zarfın yoğun bölgelerinde buharlaşan maddeler opaklığı artırarak büzülmeyi daha da yavaşlatabilir.

Bu evrenin zaman ölçeği,

$$E_{\rm tot} \simeq L \times t_{\rm ph2} \simeq \frac{G M_{\rm core}\, \Delta M_Z}{R_{\rm core}} \Rightarrow t_{\rm ph2} \propto \frac{M_{\rm iso}^{5/3}}{L} \tag{2.3}$$

ile verilir.

2. evreden 3. evreye geçiş, zarf kütlesi ile çekirdek kütlesinin eşitlendiği noktada gerçekleşir. Bu noktadan sonra zarfın büyümesi, çekirdekten yayılan enerji akışı ile zarfın radyatif soğuma kapasitesi arasındaki denge tarafından belirlenir.

Geçiş (crossover) noktasında (zarf kütlesi $\simeq$ çekirdek kütlesi) gaz akışı katı akışını açık ara geride bırakır ve hızlanarak artar. Zarf büyüdükçe çekim alanı güçlenir ve daha fazla gaz tutulur; bu pozitif geri besleme gaz birikim hızını katlayarak artırır. Bu aşamada büyüme neredeyse "kontrolsüz" hale gelir; gaz biriktirme hızı çok kısa sürelerde birkaç kat artabilir. Süreç, zarfın büzülüp yeni gaz alabilecek kadar hızlı soğumasına (radyatif soğuma ve büzülme hızına) ve diskin besleyebildiği gaz miktarına bağlıdır. Disk gazı tükendiğinde ya da tedarik sınırına ulaşıldığında biriktirme durur. Kontrolsüz gaz biriktirme aşamasına erken giren çekirdekler dev gezegenlere dönüşür, geç kalanlar ise gazı yakalayamadan kayalık/buzlu gezegen olarak kalır.

Disk kararsızlığı modeli, yeterince soğuk ve kütlece yoğun protoplanetaryal disklerin kendi kütleçekimleri altında kısa sürede ayrışarak dev gezegen kütleli yoğunlaşmalar

oluşturabileceğini öne sürmektedir (Boss, 1997). Bu mekanizma özellikle dış disk bölgelerinde (yaklaşık 30–100 AB uzaklıkta) etkili olabilmekte ve oluşum süresi çekirdek biriktirme modeline kıyasla çok daha kısa olmaktadır (10^3˘10^5 yıl) (Boley, 2009). Bu nedenle, kısa ömürlü disklerde dahi gaz devlerinin oluşmasına olanak tanıyabilmektedir. Doğrudan görüntüleme ile tespit edilen bazı genç ve uzak dev gezegenlerin (örneğin HR 8799 sistemi) özellikleri, bu mekanizmayla tutarlı bulunmuştur (Marois ve diğ., 2008).

Disk kararsızlığı modeli, genç ve kütleli öncül gezegen disklerinde, kütleçekimsel etkileşimlerin baskın hale gelerek gezegen oluşumunu tetiklediği hızlı bir mekanizmadır. Bu süreçte kararsızlık durumu, Toomre Q parametresi ile tanımlanmaktadır (Toomre, 1964):

$$Q = \frac{c_s \kappa}{\pi G \Sigma} \tag{2.4}$$

Burada c_s ses hızı, κ salınım frekansı (Kepler disklerinde $\kappa = \Omega$), Σ yüzey yoğunluğu ve G evrensel kütleçekim sabitidir. Kararsızlık genellikle $Q \lesssim 1$ olduğunda başlamaktadır.

Ancak ayrışma için yalnızca düşük Q yeterli değildir. Diskin, kazandığı ısının önemli bir kısmını hızla uzaklaştırabilmesi gerekmektedir. Bu durum soğuma parametresi β ile ifade edilmektedir (Gammie, 2001):

$$\beta = t_{\text{cool}}\,\Omega \tag{2.5}$$

Diskin küçük bir kesitinde yapılan yerel analizlerde, özgül ısılar oranı $\gamma = 2$ için kritik değer $\beta_{\text{crit}} \approx 3$ bulunmuştur (Gammie, 2001). Küresel simülasyonlar ise bu değerin $\beta_{\text{crit}} \approx 11$–$12$ civarında olabileceğini göstermektedir (Rice ve diğ., 2005). Ayrışmanın gerçekleşebilmesi için soğuma hızının yeterince yüksek olması, yani $\beta \lesssim \beta_{\text{crit}}$ koşulunun sağlanması gerekmektedir. Soğuma hızı bu eşiğin altına indiğinde disk ayrışarak yoğun gaz-öbekleri (clump) üretir. 2.1.2.'de farklı β değerleri için yerel ve küresel analiz modellerini çıktıları verilmektedir.

Disk kararsızlığı sonucu oluşan yapılar genellikle $0.1-12\,M_{\text{Jup}}$, bazı durumlarda ise $15-16\,M_{\text{Jup}}$'a kadar kütlelere ulaşabilmekte, yarıçapları ise $1-10^3\,R_{\text{Jup}}$ aralığında olabilmektedir. Küçük kütleli fragmanlar göç ve gelgit etkileriyle parçalanabilirken, daha masif olanlar diskten gaz çekerek büyüyebilmekte veya boşluk açarak göç hızlarını

yavaşlatabilmektedir. Bu süreçler, yalnızca $10^3 - 10^4$ yıl gibi kısa zaman ölçeklerinde gerçekleşerek dev gaz gezegenlerden kahverengi cüce kütlelerine kadar geniş bir aralıkta cisimlerin oluşumuna olanak tanımaktadır (Müller ve diğ., 2018; Boss ve Kanodia, 2023).

Tablo 2.2: Gezegen oluşum senaryoları: çekirdek biriktirme (ÇB) ve disk kararsızlığı (DK) için temel parametreler. Kaynaklar ayrı sütunda verilmiştir.

Parametre	**Çekirdek Biriktirme (CA)**	**Disk Kararsızlığı (DI)**	**Kaynaklar**
Oluşum Süresi	Yavaş: 10^6–10^7 yıl	Hızlı: 10^6 yıl (ayrışma/çöküş)	Pollack ve diğ. (1996); Movshovitz ve diğ. (2010); Boss (1997); Boley (2009); Kratter ve Lodato (2016)
Etkin Yörünge Uzaklığı	Genelde $\lesssim$ 30 AU (klasik çekirdek+gaz akrasyonu)	Genelde $\gtrsim$ 30–100 AU (soğuk/dış disk)	Ida ve Lin (2004); Boss (2011); Kratter ve Lodato (2016)
Disk Metal Bolluğu [Fe/H]	Yüksek [Fe/H] $\Rightarrow$ dev gezegen olasılığı artar	Metal bolluğuna duyarlılık daha zayıf; kütle/soğuma belirleyici	Fischer ve Valenti (2005); Boss (2002)
Gerekli Disk Kütle Oranı $M_{\rm disk}/M_\star$	Orta: ~ 0.02–0.06	Yüksek: ~ 0.1	Andrews ve diğ. (2013); Kratter ve Lodato (2016)
Tipik Gezegen Kütlesi	$\lesssim$ birkaç $M_{\rm Jup}$	2–> $10\,M_{\rm Jup}$ ve üzeri	Pollack ve diğ. (1996); Ida ve Lin (2004); Boss (2000); Mercer ve Stamatellos (2020)
Oluşum Mekanizması (özet)	Toz $\rightarrow$ planetesimal $\rightarrow$ çekirdek $\rightarrow$ gaz zarfı	Kütleçekimsel kararsızlık $\rightarrow$ doğrudan yoğunlaşma/ayrışma	Pollack ve diğ. (1996); Ida ve Lin (2004); Boss (1997); Boley (2009)
Disk Soğuma Koşulu	–	$\beta \equiv t_{\rm cool}\Omega \lesssim 3$–$11$	Gammie (2001); Rice ve diğ. (2005)
Yaş İlişkisi	Öncül gezegen diskinin ömrü boyunca	Çok genç ($\lesssim 1$ Myr) öncül disklerde daha olası	Mordasini ve diğ. (2008); Kratter ve Lodato (2016)

Tablo 2.3: Gözlemsel sistemler ve olası oluşum mekanizması. (ÇB: Çekirdek biriktirme, DK: Disk kararsızlığı, B: Belirsiz/iki yöntemle de açıklanamıyor)

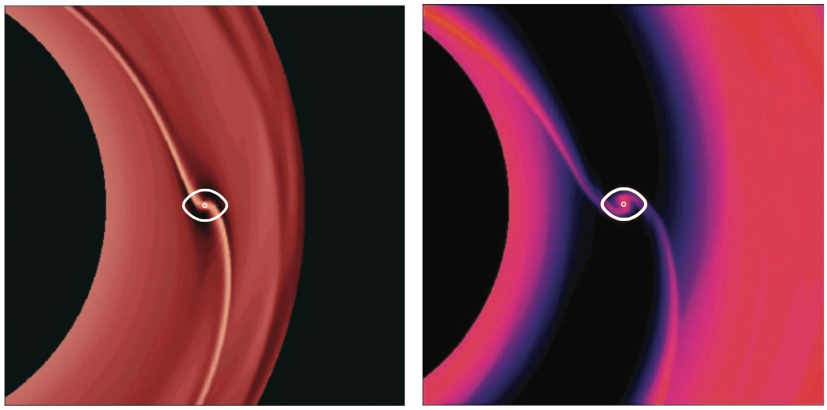
Sistem	Yıldız Tipi	Yaş (Myr)	[Fe/H]	$M_{\rm p}$	a (AU)	Olası Mek.	Kaynak
HR 8799 b,c,d,e	A5V	30–60	-0.47	5–10 $M_{\rm Jup}$	12–70	B	Marois ve diğ. (2008, 2010)
GJ 504 b	G0V	160	0.28	4 $M_{\rm Jup}$	43.5	ÇB	Kuzuhara ve diğ. (2013)
AB Aur b	Herbig Ae	1–5	–	9–12; $< 130 M_{\rm Jup}$	93.9	DK	Currie ve diğ. (2022)
TYC 8998-760-1 b,c	K3IV	16.7	–	14, 6 $M_{\rm Jup}$	162, 320	B	Bohn ve diğ. (2020a,b)
Kepler-11 (b–f)	G-type	–	0.0	2.3–13.5; $< 300 M_{\oplus}$	0.09–0.47	ÇB	Lissauer ve diğ. (2011)

Oluşan gezegen çekirdekleri, disk ile etkileşimleri sonucunda yörüngelerinde göçü (migration) yaşarlar. Gezegen göçü, bir gezegenin protoplanet diskiyle etkileşimi sonucunda yörüngesinin zamanla değişmesidir. Özellikle genç yıldızların etrafında oluşan gaz bakımından zengin diskler, gezegenlerin açısal momentumu üzerinde güçlü torklar üreterek bu süreci yönlendirir. Başlangıçta göç kavramı Güneş Sistemi için ikincil bir olgu olarak görülse de, yıldızlarına çok yakın yörüngelerde bulunan dev gezegenlerin keşfi —örneğin 51 Peg b— göçün gezegen sistemlerinin evriminde temel bir mekanizma olduğunu açıkça göstermiştir (Chambers, 2009; Lubow ve Ida, 2010).

Göç farklı kütle aralıklarındaki gezegenler için farklı biçimlerde gerçekleşir.

Düşük kütleli gezegenler, içinde bulundukları diskin yoğunluk yapısını kayda değer ölçüde değiştiremez; ancak kütleçekim etkileriyle diskte spiral yoğunluk dalgaları uyarırlar. İç ve dış disk tarafından uygulanan torklar simetrik olmadığı için gezegen üzerinde net bir tork oluşur. Yani diskten gelen kuvvetler tam dengelenmez ve bu dengesizliğin sonucu olarak gezegenin yörüngesi değişmeye başlar. Bu tork genellikle gezegenin yıldızına doğru göç etmesine yol açar. Bu süreç *Tip I* göç olarak adlandırılır ve hesaplamalara göre göç zaman ölçeği yaklaşık 10^5 yıl mertebesindedir. Bu süre, gaz devlerinin oluşum süresinden daha kısa olduğundan, Tip I göç gezegen oluşum modelleri için temel bir sorun oluşturur.

Yeterince yüksek kütleye sahip bir gezegen, etrafındaki gaz diski üzerinde güçlü torklar uygulayarak yörüngesi boyunca bir boşluk açabilir. Bu durumda gezegenin göçü artık diskin kendi evrimiyle birlikte gerçekleşir. Disk gazı yavaş yavaş yıldız yönünde akarken, gezegen



Şekil 2.8: Solda, bir Dünya kütleli gezegenin protoplanet disk içinde bulunduğunda verdiği tepkiyi gösteren hidrodinamik simülasyon yer almaktadır. Gezegen merkezde spiral dalgalar üretmekte, bu dalgalar yörüngesine tork uygulayarak Tip I göçe neden olmakta, ancak kütlesi küçük olduğundan diskte boşluk açamamaktadır. Sağda ise bir Jüpiter kütleli gezegenin diske tepkisi gösterilmektedir. Gezegen merkezde yer almakta ve yüksek kütlesi sayesinde diskte halka şeklinde bir boşluk açarak hareketi diskin akışıyla birlikte gerçekleşmektedir; bu süreç Tip II göç olarak tanımlanmaktadır. Bununla birlikte dar spiral kollar aracılığıyla diskin iç ve dış bölgelerinden gezegene gaz akışı devam etmektedir (Chambers, 2009).

de bu akışla beraber hareket eder. Dolayısıyla göç hızı, gezegenin kütlesinden çok diskin viskoz evrimine bağlıdır. Bu süreç *Tip II* göç olarak adlandırılır.

Orta kütleli gezegenler, özellikle Satürn kütlesi civarındaki cisimler, diskte daha karmaşık ve hızlı bir göç yaşayabilir. Bu durumda gezegen, çevresindeki gazla güçlü bir şekilde etkileşir ve kısa zaman ölçeklerinde hem içe hem de dışa doğru hareket edebilir. Bu göç tipi, görece ani ve yüksek hızlarıyla diğerlerinden ayrılır ve *Tip III* göç olarak tanımlanır (Chambers, 2009; Lubow ve Ida, 2010).

Şekil 2.8'de Tip I ve Tip II göçün simülasyon modelleri verilmektedir (Chambers, 2009).

Yörünge içe göç süreçleri ve yıldız radyasyonuna maruz kalma, özellikle küçük gezegenlerin atmosferlerinin evrimini etkileyerek gözlemsel dağılımlarda belirgin yapılar ortaya çıkarır. Bunlar yarıçap boşluğu (radius gap), sıcak-neptün çölü (hot-Neptune Desert) ve sıcak-Jüpiter yığılmasıdır (hot-Jupiter pile-up) (**Şekil 2.9**).

Yarıçap boşluğu , 1.5–2.0 $R_{\oplus}$ aralığında küçük gezegenlerin eksikliği ile kendini göstermektedir. Bu boşluk, gezegen atmosferlerinin foto-buharlaşma (photoevaporation) ve çekirdek soğuma süreçleriyle ilişkilendirilmektedir. Foto-buharlaşma modelleri, yıldızına yakın ve yoğun ışınım alan gezegenlerde, zarfında çok az gaz bulunanların atmosferlerini

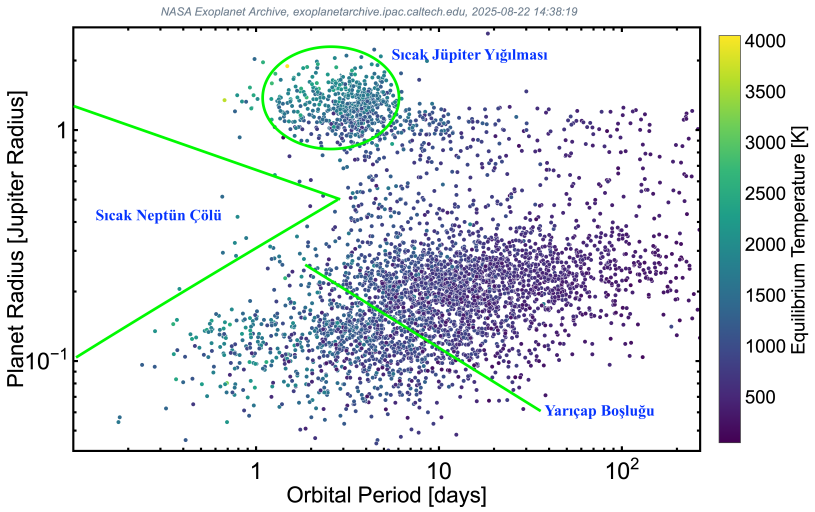
tamamen kaybederek kayalık çekirdeklere dönüştüğünü öngörmektedir. Bu süreç, küçük gezegenlerin yarıçap dağılımında görülen boşluğun doğal bir sonucu olarak değerlendirilmektedir (Fulton ve diğ., 2017).

Sıcak-Neptün çölü, yıldızlarına çok yakın yörüngelerde ($\leq$ 4 gün) Neptün boyutundaki gezegenlerin yok denecek kadar az bulunması durumudur. Bu bölge, üstte sıcak Jüpiterlerle, altta ise süper-Dünya ve alt-Neptünlerle sınırlıdır. Alt sınırın, düşük kütleli gezegenlerin atmosferlerinin yıldızdan gelen yüksek enerjili radyasyonla foto-buharlaşması sonucu ortaya çıktığı kabul edilmektedir. Üst sınır ise tek başına foto-buharlaşma ile açıklanamamaktadır. Yüksek eksantrisiteli göç ve ardından gelgit daireselleşmesi senaryolarıyla ilişkilendirilmektedir (Magliano ve diğ., 2024).

Doppler ve transit gözlemleri, Jüpiter büyüklüğündeki gezegenlerin yaklaşık 3 günlük yörüngelerde belirgin bir yoğunlaşma gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu grupta, bazı gezegenlerin ters yönlü (retrograde) yörüngelere sahip olduğu gözlenmektedir. Yapılan sayısal çalışmalar, bu yapının en iyi şekilde gezegen–gezegen saçılmalarıyla yüksek eksantrisiteye sürüklenen gezegenlerin gelgit daireselleşmesi sonucu açıklanabileceğini göstermektedir (Beaugé ve Nesvorný, 2012). Sıcak Jüpiter yığılması için önerilen bir diğer mekanizma Tip II göç sürecidir. Buna göre, dev gezegenlerin öncül gezegen diski içerisinde gezegen-disk etkileşimleri sonucu içe doğru göç ettikleri ve iç disk kenarında yıldızın manyetik alanı tarafından sınırlandırılarak durduruluğu varsayılmaktadır. Bu mekanizma, sıcak Jüpiterlerin $\sim$0.1 AB uzaklıkta kümelenmesini doğal biçimde açıklayabilmekte ama yörünge eğimi yüksek olan sıcak Jüpiterlerin varlığını ya da bu gezegenlerin yakınında neden çoğu zaman başka bir gezegenin bulunmadığını açıklamakta yetersiz kalmaktadır. Üçüncü model ise seküler etkileşimlerdir (secular interactions). Bu mekanizmada, yüksek eğimli bir yıldız ya da kahverengi cüce gibi üçüncü bir bileşen, gezegenin yörüngesini kararsız hale getirerek, onu yıldızına çok yakın bir periastrona sürükleyebilir. Bu süreç sonunda yine gelgit etkisiyle sıcak Jüpiter özellikleri kazanan bir gezegen elde edilebilmektedir (Zhou ve diğ., 2012).

Gezegenlerin oluşum mekanizmaları ve sonrasındaki göç süreçleri, günümüzde gözlenen çeşitli dağılımları açıklamaktadır. Ancak bu süreçlerin yanında, gezegenlerin iç yapıları ve parlaklık evrimleri için de başlangıç koşullarına bağlı olarak farklı senaryolar bulunmaktadır.

Gezegen iç yapı modelleri, oluşum aşamasındaki termal koşullara bağlı olarak *sıcak*

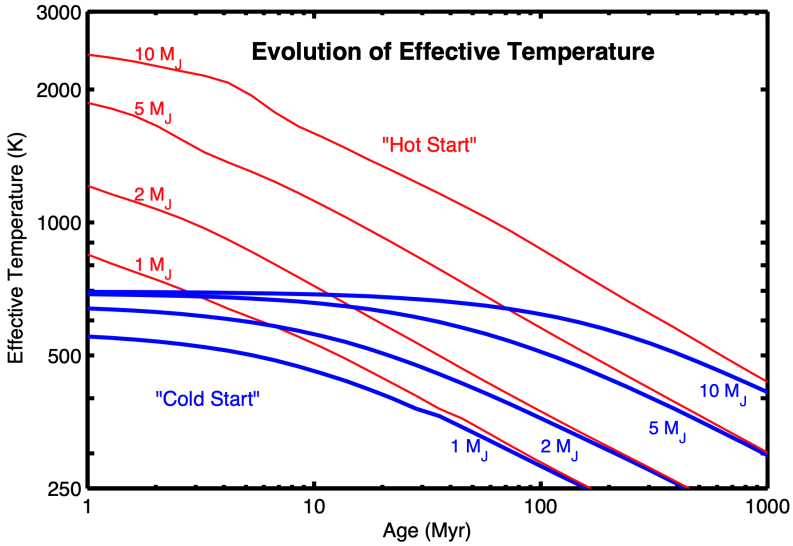


Şekil 2.9: Barınak yıldızına yakın ötegezegenlerin yarıçap ve yörünge dönemlerine göre dağılımı. Sıcak-Neptün çölü, yarıçap boşluğu ve sıcak-Jüpiter yığılması bölgeleri işaretlenmiştir.

başlangıç (hot start) ve *soğuk başlangıç* (cold start) senaryolarını öne sürmüştür. Sıcak başlangıç senaryosunda gezegen, yüksek entropili ve şişkin bir yapıya sahipken, soğuk başlangıçta oluşan gezegen daha kompakt ve düşük parlaklıklı olur. Bu ayrım, doğrudan görüntüleme ile gözlenen genç dev gezegenlerin parlaklıklarıyla sınanabilir.

Sıcak başlangıç senaryosunda gaz akresyonu sırasında açığa çıkan yerçekimsel enerji gezegenin içinde tutulmakta, bu durum gezegenin yüksek entropili, geniş yarıçaplı ve parlak bir yapıyla ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Aynı kütleye sahip soğuk başlangıç gezegenlerine kıyasla daha büyük yarıçap ve daha yüksek parlaklığa sahip olan sıcak başlangıç gezegenleri özellikle 1–5 M_J aralığında belirgin şekilde ayrışmaktadır. Ancak yüksek parlaklık hızlı bir soğuma sürecini tetiklemekte ve Kelvin–Helmholtz zaman ölçekleri ($\sim 10^5$–10^6 yıl) içinde iki senaryonun evrimsel izleri birbirine yaklaşmaktadır (Mordasini ve diğ., 2012b) (**Şekil 2.10**). Bu farklılıklar doğrudan görüntüleme gözlemlerinde H ve K bantlarında birkaç büyüklük mertebesinde ortaya çıkabilmektedir (Spiegel ve Burrows, 2012).

Soğuk başlangıç senaryosu ise gaz biriktirmesi sırasında ortaya çıkan enerjinin büyük ölçüde radyasyon yoluyla uzaya kaybolması üzerine kuruludur. Bu durumda gezegen düşük entropili, daha kompakt ve daha sönük bir yapıya sahip olmakta, yüksek kütleli gezegenler baştan itibaren düşük parlaklıklarla ortaya çıkarken düşük kütleli gezegenler başlangıçta görece daha parlak olabilmekte ancak kısa süre içinde hızla soğumaktadır. Bu



Şekil 2.10: 1, 2, 5 ve 10 M_J kütleler için sıcak başlangıç (kırmızı) ve soğuk başlangıç (mavi) başlangıç koşullarına göre etkin sıcaklık evrimi. Başlangıçta iki senaryo arasında büyük farklar görülmekte, ancak zamanla sıcaklık değerleri birbirine yaklaşmaktadır (Spiegel ve Burrows, 2012).

durum, "tersine parlaklık (luminosity inversion)" olarak adlandırılmıştır. Soğuk başlangıç gezegenler uzun süre boyunca sıcak başlangıç senaryosuna kıyasla daha küçük yarıçaplara ve düşük parlaklıklara sahip olmaktadır (Mordasini ve diğ., 2012b). Aynı kütleye sahip genç dev gezegenlerin parlaklıklarının başlangıç entropisine bağlı olarak geniş bir aralıkta değişebildiği görülmektedir (Spiegel ve Burrows, 2012). Sıcak başlangıç ve soğuk başlangıç senaryoları arasındaki bu keskin ayrımın gerçek gezegen oluşum süreçlerini yeterince yansıtmadığı düşünülmekte ve bu nedenle ılık başlangıç (warm start) kavramı ortaya konmuştur (Spiegel ve Burrows, 2012). Bu senaryoda gezegenler ne sıcak başlangıç kadar yüksek entropili ve parlak ne de soğuk başlangıç kadar düşük entropili ve sönük olmakta, bunun yerine ara entropi değerleriyle ortaya çıkabilmektedir. Ilık başlangıç yaklaşımı, genç dev gezegenlerin gözlenen parlaklık ve yarıçap dağılımlarının daha geniş bir aralıkta açıklanabilmesine imkan tanımaktadır. Farklı başlangıç entropileri için üretilen spektral ve fotometrik modeller bu senaryonun doğrudan görüntüleme gözlemleriyle sınanabileceğini göstermektedir.

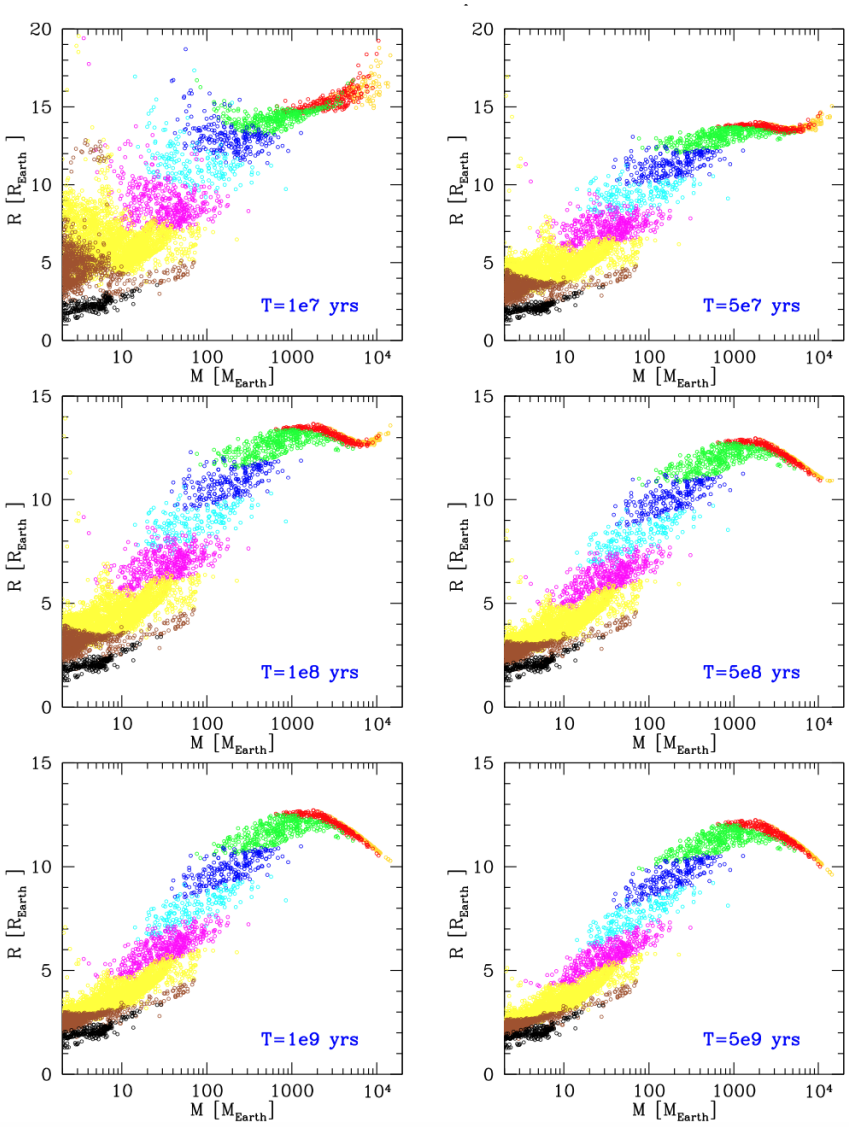
Gezegen içyapı ve atmosfer evrimi ayrıca *ohmik ısınma*, yıldızdan gelen *ışınım (irradiation)*, *metal bolluğu* ve *kütle* gibi parametrelere de duyarlı olmaktadır. Bu faktörler, özellikle gaz devlerinin uzun vadeli büzülme ve soğuma süreçlerini etkileyerek gözlemlenebilir özelliklerini belirlemektedir. Gezegenlerin termal evrimini etkileyen önemli

mekanizmalardan biri olan Ohmik ısınma (Ohmic heating), gezegenin içyapısında ya da atmosferinde oluşan elektrik akımlarının iletken ortamda dağılmasıyla ortaya çıkan bir ısınma süreci olmaktadır. Bu mekanizma, gezegenin iletkenlik profiline, iyonizasyon düzeyine, sıcaklığına ve varsa kalıcı manyetik alan varlığına bağlı olmaktadır. Özellikle sıcak Jüpiterlerin derin atmosferlerinde, zonal rüzgarların gezegenin dipolar manyetik alanını kesmesi sonucu elektrik akımları oluşabilmekte ve bu durum iç kısımlarda ısınmaya yol açabilmektedir. Bu tür bir ısınma, gezegenin şişkin kalmasına ve gözlemlenen büyük yarıçapların açıklanmasına katkı sağlamaktadır. Strugarek ve diğ. (2025), bu mekanizmanın yalnızca içyapıda değil, aynı zamanda üst atmosferde —özellikle iyonosferin üzerindeki $\sim$1 μbar basınç seviyesinden itibaren— de etkili olabildiğini göstermektedir. Gezegenin yörüngesi boyunca maruz kaldığı zamanla değişen yıldız manyetik alanları, özellikle eksantrik yörüngeli sistemlerde, elektrik alanları indükleyerek üst atmosferde akımlar oluşmasına neden olabilmektedir. Sıcak ötegezegenlerin bu üst katmanlarında, aşırı morötesi (Extreme Ultraviolet - EUV) radyasyonuna bağlı olarak yüksek sayıda serbest elektron bulunmakta, iletkenlik yüksek değerlere ulaşmakta ve böylece bu indüklenen akımlar önemli miktarda ısı üretebilmektedir. Yıldıza çok yakın konumlanan sıcak Jüpiterler ve Neptünler gibi gaz devleri, özellikle EUV dalga boylarında olmak üzere yoğun yıldız ışınımına maruz kalmaktadır. Bu yüksek enerjili ışınım, gezegenin üst atmosferindeki hidrojen atomlarını iyonize etmekte ve atmosfer gazını yaklaşık 10000 K sıcaklıklara kadar ısıtmaktadır. Sonuç olarak, bu enerji birikimi, hidrodinamik atmosfer kaçışıyla kendini göstermekte ve bir gezegen rüzgarı tetiklenmektedir. Oluşan bu rüzgar, özellikle düşük yoğunluklu ve küçük yarıçaplı gezegenlerde belirgin atmosfer kayıplarına yol açmakta ve gezegenin ilk dönemden kalma H/He zarfı tamamen uzaklaşabilmektedir. Bu süreç, geriye yalnızca daha yoğun ve katı yapılı çekirdeği kalan bir gezegen bırakmakta ve bu cisimlerin sıcak Süper-Dünya benzeri gezegenlere evrilmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, ışınıma bağlı atmosfer kaçışı zamanla gezegenin yapısal ve gözlemlenebilir özelliklerini köklü biçimde değiştirmekte, alt-Neptün popülasyonunun evrimine ve gözlemlenen yarıçap boşluğunun (*radius gap*) oluşumuna doğrudan katkıda bulunmaktadır (Salz ve diğ., 2015). Metal bolluğu (Z), bir gezegenin oluşum sürecini daha ilk andan itibaren şekillendiren temel parametrelerden biri olmaktadır. Yüksek metalikliğe sahip protoplanet disklerde, toz ve buz tanelerinden oluşan katı madde yoğunluğu fazla olmakta, bu durum gezegen çekirdeklerinin daha kısa zaman ölçeklerinde ve daha büyük kütlelerde oluşmasına olanak tanımaktadır. Özellikle çekirdek birikimi (*core accretion*) senaryosunda, bu hızlı çekirdek büyümesi gaz zarfının erken

dönemde yakalanmasını kolaylaştırmakta ve gaz devlerinin oluşma olasılığını artırmaktadır. Buna karşılık, düşük metalikliğe sahip disklerde katı madde miktarı sınırlı olmakta, çekirdek büyümesi yavaşlamakta ve gaz devleri yalnızca buz hattının ötesinde, yoğun buz içeriğinin katkısıyla oluşabilmektedir. Metal bolluğu yalnızca çekirdek oluşum hızını değil, aynı zamanda protoplanet diskin ömrünü de etkilemektedir. Metal bolluğunun yüksek olduğu ortamlarda artan toz miktarı, diski foto-buharlaşmaya karşı kısmen koruyarak gaz bileşeninin daha uzun süre korunmasını sağlamaktadır. Saf foto-buharlaşma modellerinde, disk ömrü ile metal bolluğu arasında yaklaşık $t_{\rm phot} \propto Z^{0.52}$ şeklinde pozitif bir ilişki bulunmuştur. Buna karşın, düşük metalikliğe sahip disklerde hem daha az katı madde bulunması hem de daha hızlı gaz kaybı, büyük kütleli gezegenlerin oluşum ihtimalini önemli ölçüde düşürmektedir (Ercolano ve Clarke, 2010). Sonuç olarak, metal bolluğu yüksek sistemlerde gaz devlerinin oluşma ve uzun vadeli evrim süreçlerinde başarı şansı daha yüksek olmakta, düşük olduğu ortamlarda ise süreç daha çok buz devleri veya kayalık gezegenlerin oluşumuyla sınırlı kalmaktadır. Gezegenlerdeki metal bolluğu (hidrojen ve helyumdan daha ağır elementlerin toplam oranı), iki farklı ölçekte ele alınabilmektedir: toplam metal bolluğu (Z, bulk metallicity), gezegenin tüm kütlesine göre metal oranını ifade etmekte; atmosfer metal bolluğu (Z_e, envelope metallicity) ise yalnızca zarf tabakasındaki metal oranını temsil etmektedir. Zarf oluşumu sırasında çekirdek biriktirme süreciyle atmosfere taşınan metaller, özellikle düşük kütleli gezegenlerde atmosfer metal bolluğunu yükseltmektedir. Kuramsal modeller, gezegen kütlesi arttıkça atmosferdeki metal oranının azaldığını ve bu kütle–metal bolluğu ilişkisinin Güneş Sistemi gaz devlerinin metan (CH) bolluklarıyla uyumlu olduğunu göstermektedir (Swain ve diğ., 2024). Ancak gözlemler, toplam metal bolluğu ile atmosfer metal bolluğunun her zaman aynı olmadığını; gezegen içyapısında dış atmosfer tabakaları ile derin katmanlar arasında bileşim gradyanlarının bulunabildiğini ortaya koymaktadır. Yüksek atmosfer metal bolluğu, opaklığı artırarak yıldız ışınımının soğurulmasını ve iç ısının tutulmasını güçlendirmekte, bu durum soğuma süresini uzatmakta ve gezegen yarıçapının uzun süre büyük kalmasına neden olmaktadır. Özellikle sıcak Jüpiterlerde bu etki, ışınıma bağlı atmosferik süreçlerle birleşerek termal evrimi önemli ölçüde değiştirmektedir. Gezegen kütlesi, yalnızca oluşum sürecinde değil, milyarlarca yıl süren termal evrim boyunca yarıçapın nasıl değiştiğini belirleyen temel parametrelerden biri olmaktadır. Mordasini ve diğ. (2012a) tarafından yapılan sentetik popülasyon simülasyonlarında, atmosfer kütle kaybı, gaz çıkışı, döteryum yanması ve özel şişirme mekanizmaları hesaba katılmadan, sabit kütleli gezegenlerin kütle–yarıçap diyagramındaki evrimi incelenmektedir (**Şekil 2.11**).

Erken yaşlarda ($\sim$ 10 Myr) bazı gezegenler hala çok büyük yarıçaplara sahip olmakta ve kütle–yarıçap ilişkisi ileriki evrelerden belirgin biçimde farklı olmaktadır. Özellikle dev gezegenlerde, aynı kütlede bile geniş bir yarıçap dağılımı görülmekte, bu durum oluşum aşamasındaki farklı başlangıç entropilerinin bir sonucu olmaktadır. Gaz akresyonunun yüksek hızlarda gerçekleştiği "sıcak başlangıç" senaryolarında, zayıf akresyon şokları nedeniyle eklenen gaz daha yüksek entropulu olmakta ve bu da gezegenin başlangıçta daha büyük yarıçapa sahip olmasına yol açmaktadır. Yaklaşık 50 Myr civarında günümüzde gözlenen karakteristik kütle–yarıçap eğrisi oluşmakta; düşük kütlelerde yarıçap küçük kalmakta, kütle arttıkça yaklaşık 4 M_J civarında bir maksimuma ulaşmakta ve daha yüksek kütlelerde iç yapıda elektron dejenerasyonunun artmasıyla yarıçap yeniden küçülmektedir. Bu evrimsel süreç, farklı kütlelerdeki gezegenlerin yarıçaplarının yaşa bağlı olarak nasıl değiştiğini ortaya koymakta ve gözlemsel verilerle karşılaştırmalara temel oluşturmaktadır.

Gelişen sentetik gezegen modelleri, gözlemlerle kuramsal senaryolar arasında bağ kurarak, çeşitli başlangıç koşullarının gezegen sistemleri üzerindeki etkisini istatistiksel olarak incelemeyi mümkün kılar. Bu modeller, gezegen oluşumunun sadece bireysel sistemler değil, aynı zamanda büyük ölçekli popülasyonlar bağlamında da anlaşılmasını hedefler. Bu kapsamda, Mordasini ve diğ. (2012a) farklı disk koşulları (örneğin disk kütlesi, metal bolluğu, disk ömrü) altında gezegenlerin oluşum ve evrim süreçlerini birleştirerek, geniş ölçekli gezegen popülasyonlarının temel özelliklerini istatistiksel olarak öngörmeyi amaçlar. Baraffe ve diğ. (2003), kahverengi cüceler ve ötegezegenlerin iç yapı ve termal evrimini termodinamik temellerle açıklamaktadır. (Müller ve Helled, 2021) gezegen kütlesi, toplam ve atmosfer metal bolluğu ile yıldızdan gelen ışınım gibi temel parametreleri kullanarak, gezegenin yarıçap, parlaklık, etkin sıcaklık ve yüzey yerçekimi gibi özelliklerinin zaman içindeki evrimini detaylı biçimde hesaplamışlardır ve Python tabanlı planetsynth adlı bir program geliştirmişlerdir. Fortney ve diğ. (2007, 2011), yıldızdan gelen ışınımın (irradiation) gezegen yarıçap evrimine etkisini ve farklı metal bolluklarında kütle–yarıçap ilişkilerini incelemiştir. Spiegel ve Burrows (2012), "sıcak başlangıç" ve "soğuk başlangıç" oluşum senaryolarının genç gezegenlerin parlaklık evrimine etkilerini karşılaştırmıştır. Marley ve diğ. (2007), genç dev gezegenlerin parlaklık ve spektrum evrimini öngören termal evrim modelleri geliştirmiştir. Guilera ve diğ. (2020) ise çekirdek büyümesi ve gaz zarfı kazanımında çakıl (pebble) ve gezegenimsi (planetesimal) biriktirmesini bir arada kullanan hibrit bir oluşum modeli geliştirmiştir.



Şekil 2.11: Nihai kütlelere ulaştıktan sonra gezegenlerin kütle–yarıçap diyagramının zamana bağlı evrimi. Farklı paneller, 10 Myr, 50 Myr, 500 Myr ve 5 Gyr yaşlarındaki dağılımları göstermektedir. Renkler, gezegenlerdeki ağır element kesrini ($Z = M_Z/M$) temsil eder: turuncu ($\%Z \leq 1$), kırmızı ($\%1 < Z \leq 5$), yeşil ($\%5 < Z \leq 20$), mavi ($\%20 < Z \leq 40$), camgöbeği ($\%40 < Z \leq 60$), fuşya ($\%60 < Z \leq 80$), sarı ($\%80 < Z \leq 95$), kahverengi ($\%95 < Z \leq 99$) ve siyah ($\%Z > 99$). Düşey eksende zamanla yarıçap küçülmesi, yatay eksende ise kütleye bağlı yapısal farklar izlenmektedir. Erken evrede (10 Myr), kütle–yarıçap ilişkisi henüz belirginleşmemiştir ve aynı kütlede farklı yarıçaplara sahip gezegenler görülebilir. Zaman ilerledikçe (özellikle 50 Myr sonrası), eğri belirginleşerek düşük kütleli gezegenlerden itibaren artan yarıçap, yaklaşık 4 M_J civarında maksimuma ulaşır ve daha büyük kütlelerde dejenerasyon etkisiyle tekrar azalır Mordasini ve diğ. (2012a).

Ida ve Lin (2004), gezegen çekirdeğinin planetesimal biriktirmesiyle büyümesi, gaz zarfının kazanımı ve yörünge göçünü aynı anda modelleyen, disk evrimi ve göç süreçlerini entegre eden bir çekirdek biriktirme senaryosu geliştirmiş; bu model, "gezegen çölü" (planet desert) öngörüsüyle bilinen ve gözlenen kütle–yarı büyük eksen dağılımlarını açıklayan CEA (Combined Evolution and Accretion) yaklaşımının temelini oluşturmuştur. Alibert ve diğ. (2005), çekirdek birikimi modelini gezegen göçü ve disk evrimi süreçleriyle birleştirerek CEA'nın çerçevesini geliştirmiştir. Atmosfer modelleme tarafında, ATMO (Tremblin ve diğ., 2015, 2017) kimyasal denge/dengesizlik süreçlerini, bulut oluşumunu ve tayf üretimini kapsar. PHOENIX / BT-Settl (Allard, 2014) geniş sıcaklık aralıklarında yıldızlar ve gezegenler için atmosfer ve tayf modellemesi sunar. Sonora-Bobcat (Marley ve diğ., 2021), kahverengi cüceler ve kendinden ışıtmalı gezegenler için en güncel atmosfer–tayf modellerindendir. Exo-REM (Baudino ve diğ., 2015), ötegezegenler ve kahverengi cüceler için geliştirilmiştir. PETITCODE (Mollière ve diğ., 2015) ise süper-Dünya'lardan çoklu Jüpiter kütleli gezegenlere kadar geniş bir aralıkta, açık ve bulutlu atmosferler için salma ve geçiş tayfı üretmektedir.

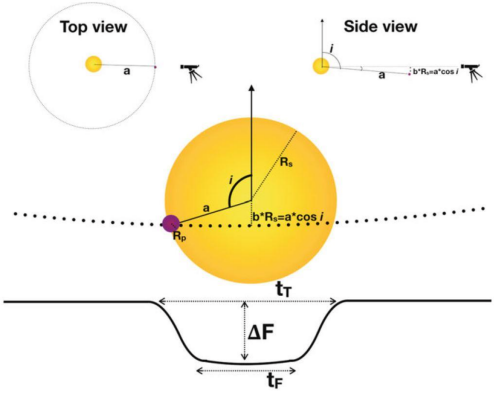
2.2. ÖTEGEZEGEN KEŞİF YÖNTEMLERİ

2.2.1. Geçiş (Transit) Yöntemi

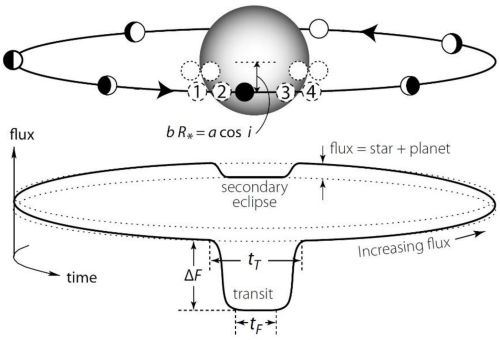
Ötegezegen bakış doğrultumuzda yıldızının önünden geçiyorsa yıldızdan aldığımız ışığın miktarında periyodik olarak azalma meydana gelir. Bu azalmalardan itibaren gezegenlerin yarıçapları bilinebilir. Dikine hız gözlemleri de varsa kütlelerinden itibaren yoğunlukları bulunabilir ve cismin kompozisyonu ile ilgili ilk tahminler yapılabilir. Geçiş olayının iki farklı şematik görüntüsü **Şekil 2.12** ve **Şekil 2.13**'te verilmiştir. Gezegenin yıldız önünden geçişi sırasında akı ΔF kadar azalır. Gezegenin göz ardı edilebilir akısı ve yıldız/gezegenin küresel şekilli olduğu varsayımıyla bu ΔF miktarı gezegen ve yıldızın alanlarının oranı olarak verilir:

$$\Delta F = \left(\frac{R_p}{R_s}\right)^2 = k^2 \tag{2.6}$$

Burada R_p gezegenin yarıçapı, R_s yıldız yarıçapı k ise yarıçap oranlarıdır. Geçiş olayının toplam süresi t_T ile verilir, gezegenin diskinin tamamının yıldız diski önünden olduğu süre



Şekil 2.12: Geçiş olayının şematik görüntüsü. Üst panelde Yörüngenin yukarıdan ve yandan görüntüsü, orta panelde geçiş olayı, alt panelde ise geçiş sırasındaki ışık eğrisi verilmiştir (Deeg ve Belmonte, 2018).



Şekil 2.13: Geçiş olayının şematik görünümü. Geçiş sırasında gezegen, yıldızın ışığının bir kısmını bloke eder. Geçişten sonra gezegenin daha parlak gündüz tarafı aşamalı olarak ortaya çıkar ve toplam akı yükselir. Gezegen yıldızın arkasından geçerken ikinci bir tutulma gerçekleşir ve akı tekrar düşer. Kesikli daireler 1. ve 4. temas noktalarını göstermektedir. Toplam geçiş süresi t_T 1-4 teması arasındayken t_F 2-3 arasındadır (Perryman, 2018).

ise t_F ile verilir. Geçiş sırasında gözlemcinin bakış açısına göre yıldız diskinin merkezine iz düşen en kısa mesafe impact parametresi ile verilir:

$$b = \frac{a\cos i}{R_s} \tag{2.7}$$

Birinci geçişin süresini ve profilini karakterize eden dört ana gözlemsel parametre vardır: Periyot (P), geçiş derinliği (ΔF), birinci ve dördüncü temas arasında geçen süre (t_T), ikinci ve üçüncü temas arasında geçen süre (t_F) (**Şekil 2.13**).

Geçiş yöntemi ile ötegezegen tespiti olayın süresine bağlıdır. $R_p \ll R_s \ll$ a için t_T geçiş

Tablo 2.4: Uzak bir gözlemci için Güneş Sistemi gezegenlerinin geçiş özellikleri (Nikolov, 2011).

Gezegen	Dönem [yr]	Olasılık	Tutulma Süresi [h]	Derinlik [mag]
Merkür	0.24	1.2×10^{-2}	8	1.2×10^{-5}
Venüs	0.62	6.4×10^{-3}	11	7.6×10^{-5}
Dünya	1.00	4.7×10^{-3}	13	8.4×10^{-5}
Mars	1.88	3.1×10^{-3}	16	2.4×10^{-5}
Jüpiter	11.86	8.9×10^{-4}	30	1.1×10^{-2}
Satürn	29.46	4.9×10^{-4}	40	7.5×10^{-3}
Uranüs	84.01	2.4×10^{-4}	57	1.3×10^{-3}
Neptün	164.79	1.5×10^{-4}	71	1.3×10^{-3}
Plüto	247.68	1.2×10^{-4}	81	2.7×10^{-6}

süresi aşağıdaki ilişki ile verilir:

$$t_T \approx \frac{P}{\pi}\sqrt{\left(\frac{R_s}{a}\right)^2 - \cos^2 i} \tag{2.8}$$

Ötegezegen sistemlerinin yörünge düzlemlerinin uzayda rastgele yönlendiği düşünülürse bunların bir kısmı ve sistemdeki bir veya daha fazla gezegen bakış doğrultumuzda konak yıldızının önünden geçebilecek düzlemlerde yer alabilir. Bir gezegenin geçiş ile gözlenebilme olasılığı gezegen yörüngesinin ve gezeggen-yıldız yarıçaplarının bir fonksiyonudur. $R_p \ll R_s$ olmak üzere geçiş olasılığı;

$$\Pr\left(\cos i < \frac{R_S}{a}\right) = \sim 0.0046 \left(\frac{R_S}{R_\odot}\right)\left(\frac{1AB}{a}\right) \tag{2.9}$$

ile ifade edilir (Fischer ve diğ., 2014; Bozza ve diğ., 2016).

Bahsedilen üç parametre (tutulma süresi, tutulma derinliği ve geçiş olasılığı) bir geçiş arama programının başarı şansını belirler. Uzak bir gözlemci için Güneş Sistemi gezegenlerinin geçiş özellikleri **Tablo 2.4**'te verilmiştir. Sayılar bir gezegen araştırmasında karşılaşılabilecek ana dezavantajı açıklamaktadır. Ötegezegenler için hiçbir bilgi mevcut değilse, binlerce yıldızın yüksek hassasiyetle uzun süre gözlenmesi gerekir (Nikolov, 2011).

Bu bağlamda, geçiş yöntemine dayalı ötegezegen tespitlerinde hem yer tabanlı hem de uzay tabanlı gözlem projeleri önemli roller üstlenmiştir. Yer tabanlı projeler arasında TrES (Alonso ve diğ., 2004), SuperWASP (Pollacco ve diğ., 2006), HATNet (Bakos ve diğ., 2004) ve TRAPPIST (Gillon ve diğ., 2011) gibi geniş alan taramaları öne çıkarken, bu projeler atmosferik etkiler nedeniyle sınırlı fotometrik hassasiyetle çalışırlar. Buna karşılık, CoRoT (Baglin ve diğ., 2006), Kepler (Borucki ve diğ., 2010) ve günümüzde aktif olan TESS (Ricker ve diğ., 2015) gibi uzay tabanlı teleskoplar daha uzun süreli ve kesintisiz gözlemlerle çok daha yüksek hassasiyet sağlar.

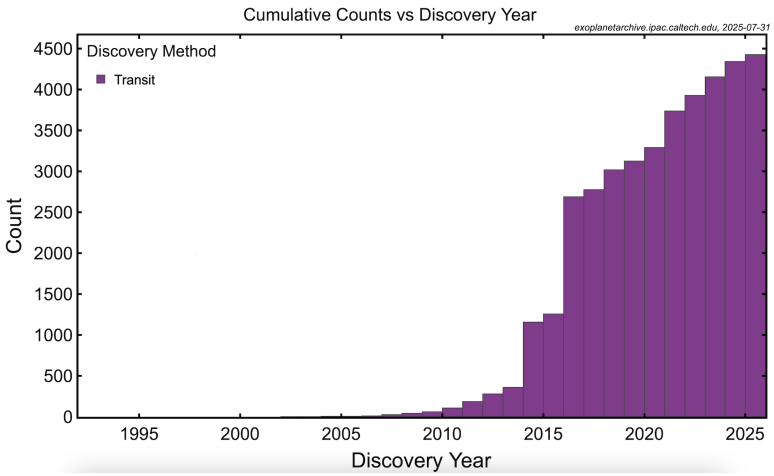
NASA'nın 2025 itibarıyla güncel verilerine göre, geçiş yöntemiyle keşfedilen ötegezegen sayısı 4427'dir[2] . Bu keşiflerin büyük bir kısmı Kepler ve TESS görevleri sayesinde elde edilmiştir. **Şekil 2.14**'te, geçiş yöntemiyle keşfedilen ötegezegen sayısının yıllara göre kümülatif dağılımı gösterilmektedir.

2000'li yılların başında, OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment) gibi mikromercekleme temelli projeler, geçiş tespiti amacı taşımamakla birlikte OGLE - TR - 56 gibi erken örneklerin keşfine katkı sağlamıştır (Udalski ve diğ., 2002; Torres ve diğ., 2003). Ancak sistematik geçiş taramaları esas olarak TrES, HATNet ve SuperWASP gibi projelerle başlamış ve bu projeler, sınırlı fotometrik hassasiyete rağmen ilk kısa yörünge dönemli dev gezegenleri ortaya çıkarmıştır.

2006 yılında fırlatılan ve 2007'de bilimsel keşiflerine başlayan CoRoT, ilk uzay tabanlı geçiş teleskopu olarak görev yapmış ve daha küçük yarıçaplı gezegenlerin keşfine olanak sağlamıştır. Ancak keşif sayılarında belirgin bir artış, esasen 2009'da fırlatılan Kepler uzay teleskopu ile yaşanmıştır. Kepler, sabit bir görüş alanında yaklaşık 200.000 yıldızı dört yıl boyunca kesintisiz olarak gözlemlemiş; bu sayede binlerce aday gezegen ve çok sayıda onaylanmış sistem tespit edilmiştir. 2010'ların başında yaşanan hızlı keşif artışı, doğrudan bu gözlemlerin sonucudur.

2013'te Kepler'in ikinci reaksiyon tekerleğinin arızalanması sonucu ana görev sona ermiş, ancak 2014'te "K2" adıyla yeniden yapılandırılmıştır (Howell ve diğ., 2014). K2, ekliptik düzlem üzerinde yaklaşık 80 günlük gözlem kampanyalarıyla farklı gökyüzü alanlarını izlemiş; bu görev kapsamında üretilen keşiflerin etkisi 2015–2017 yılları arasında yayınlanan sonuçlarla görünür hale gelmiştir.

[2] https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html



Şekil 2.14: Geçiş yöntemine dayalı ötegezegen keşiflerinin yıllara göre kümülatif dağılımı. Uzay ve yer tabanlı başlıca projelerin (Kepler, K2, TESS vb.) devreye girmesiyle birlikte toplam keşif sayısında belirgin artışlar gözlenmiştir. Özellikle 2010–2013 yılları arasında Kepler görevinin etkisiyle hızlı bir yükseliş görülürken, 2018 sonrası dönemde TESS verileriyle keşifler daha düşük ivmeyle, ancak düzenli şekilde artmaya devam etmiştir.

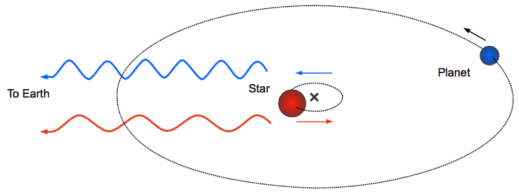
2018'de fırlatılan TESS, tüm gökyüzünü tarayarak kısa yörünge dönemli büyük gezegenlere odaklanır. Her bir sektörü yaklaşık 27 gün gözlemlemesi, önceki görevlerle örtüşen hedef alanlar ve uzun süren onay süreçleri nedeniyle keşif sayısı Kepler'deki kadar hızlı artmamıştır. Buna rağmen, keşifler düzenli şekilde artmaya devam etmektedir. Son yıllarda bu artışın daha düşük ivmeyle sürdüğü görülmektedir. Bu durum hem gözlem sürelerinin kısıtlılığı hem de işlenen veri miktarıyla ilişkilendirilebilir. Öte yandan, TESS verilerinden üretilmiş 6000'in üzerinde aday hala onay beklemektedir.

Sonuç olarak, geçiş yöntemiyle yapılan keşiflerin en yoğunlaştığı dönem Kepler görevine karşılık gelir. TESS gibi görevler bu süreci sürdürse de Kepler dönemindeki sıçramalar günümüze kadar tekrar edilmemiştir.

2.2.2. Dikine Hız Yöntemi

Dikine hız yöntemi, gezegenin yıldızla birlikte ortak kütle merkezine yaptığı kütleçekimsel etkiye dayanır. Bu etki, yıldızın hafif bir yalpalanma hareketi yapmasına neden olur. Yıldızın yaptığı bu hareket radyal doğrultuda gerçekleşiyorsa, yıldız tayfında periyodik Doppler kaymaları gözlemlenir (**Şekil 2.15**).

Bu kaymalar, yıldızın bize doğru yaklaşması veya bizden uzaklaşması durumlarında tayf



Şekil 2.15: Doppler etkisinin şematik görünümü.

çizgilerinin sırasıyla maviye ya da kırmızıya kayması şeklinde ortaya çıkar. Böylece yıldızın zaman içindeki hız değişimleri belirlenebilir. Eğer yıldız radyal doğrultuda hareket ediyorsa dalgaboyundaki kayma miktarı

$$\Delta\lambda = \lambda_{obs} - \lambda \tag{2.10}$$

ile verilir. Burada λ laboratuvar dalgaboyu, λ_{obs} gözlemde ölçülen dalgaboyudur.

Bu kayma miktarı dikine hız (V_r) ile ilişkilidir:

$$V_r = \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right) c \tag{2.11}$$

burada c, ışık hızıdır. Pozitif değerler kaynağın gözlemciden uzaklaştığını gösterir (Perryman, 2018).

Doppler yöntemi ile ölçülen hızlar, kütleçekimiyle oluştuğu için, daha büyük kütleli gezegenler yıldız üzerinde daha büyük hız genlikleri oluştururlar. Bu durum, yıldızın tayfında gözlemlenen radyal hız değişimlerinin genliğini doğrudan gezegenin kütlesine bağlar. Ayrıca, yıldıza daha yakın yörüngelerde bulunan gezegenler daha kısa sürede yörüngelerini tamamladıkları için, hem gözlem süresi açısından avantaj sağlar hem de uyguladıkları kuvvet daha büyük olacağından yalpalanma hareketi daha belirgin hale gelir (Fischer ve diğ., 2014).

Yıldızın bu yalpalanma hareketinin tayfsal gözlemlerle ölçülen bileşeni, yıldızın radyal hız yarı - genliği (K) olarak tanımlanır. Tek bir gezegenli dairesel bir yörünge varsayımı altında bu genlik, aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir:

$$K = \left(\frac{2\pi G}{P}\right)^{1/3} \frac{M_p \sin i}{(M_* + M_p)^{2/3}} \frac{1}{(1-e^2)^{1/2}} \tag{2.12}$$

Tablo 2.5: Güneş Sistemi'ndeki gezegenlerin dikine hız verileri (Cochran ve Hatzes, 1996).

Gezegen	M_p (M_J)	R (AB)	P (yıl)	$\Theta_\star$ at 10 pc (mas)	K (ms^{-1})
Merkür	1.74E-4	0.387	0.241	6.4E-6	0.008
Venüs	2.56E-3	0.723	0.615	1.8E-4	0.086
Dünya	3.15E-3	1.000	1.000	3.0E-4	0.089
Mars	3.38E-4	1.524	1.881	4.9E-5	0.008
Jüpiter	1.0	5.203	11.86	0.497	12.4
Satürn	0.299	9.54	29.46	0.273	2.75
Uranüs	0.046	19.18	84.01	0.084	0.297
Neptün	0.054	30.06	164.8	0.156	0.281
Plüto	6.3E-6	39.44	247.7	2.4E-5	3E-5

Burada K, yıldızın gözlenen radyal hız yarı-genliği; G, evrensel kütleçekim sabiti; P, gezegenin yörünge dönemi; M_p, gezegenin kütlesi; M_*, yıldızın kütlesi; i, yörüngenin eğim açısı ve e, yörüngenin dışmerkezliğidir.

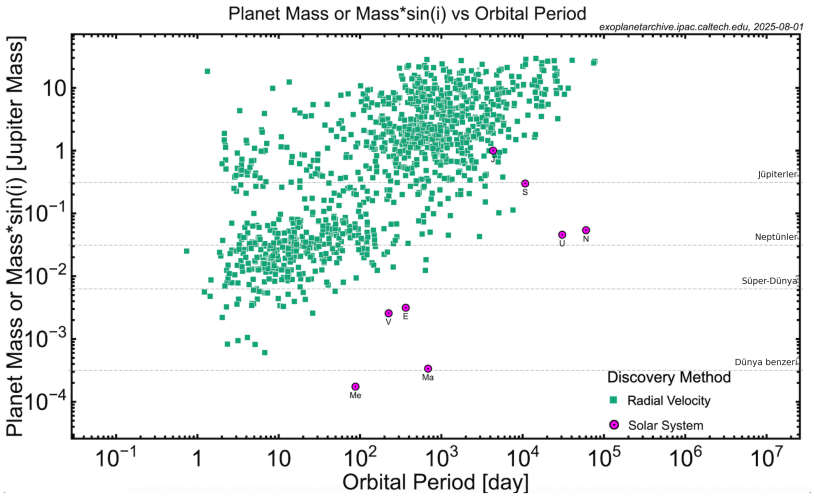
Denklem 2.12, gözlemlenebilir niceliklerle birlikte yıldız ve gezegenin kütlesine, yörünge eğim açısına (i) ve dışmerkezliğe (e) bağlıdır. Genellikle $M_p \ll M_*$ olduğu varsayımıyla sadeleştirilerek, *kütle fonksiyonu* (mass function) ifadesine ulaşılır:

$$f(m) = \frac{(M_p \sin i)^3}{(M_* + M_p)^2} = \frac{K^3 P (1-e^2)^{3/2}}{2\pi G} \tag{2.13}$$

Bu ifade, gözlemlenebilir büyüklükler (K, P, e) yardımıyla $M_p \sin i$'nin hesaplanmasına olanak tanır. Eğiklik açısı i doğrudan gözlemlenemediğinden, dikine hız yöntemiyle yalnızca *indirgenmiş kütle* olan $M_p \sin i$ elde edilebilir. Bu değer, gerçek kütlenin alt sınırını temsil eder (Bozza ve diğ., 2016).

Güneş Sistemi gezegenlerinin Güneş üzerinde oluşturduğu dikine hız değerleri, **Tablo 2.5**'te verilmektedir. Burada gezegen kütleleri (M_p), Güneş'e uzaklıkları (R) ve yörünge dönemlerine ek olarak, 10 parsek uzaklıktaki bir gözlemcinin algılayabileceği açısal ayrıklık (Θ_*) ve Güneş'in yörünge düzlemindeki hız genlikleri ($V_\star$) bulunmaktadır.

En yüksek genlik değerinin Jüpiter tarafından üretilmekte ve yaklaşık 12.4 m/s'lik bir hız değişimi ile Güneş üzerinde dikkate değer bir Doppler kaymasına neden olur. Dünya'nın oluşturduğu sinyal ise yalnızca 0.089 m/s düzeyindedir. Bu değer, günümüzün en hassas tayfölçerlerinin sınırına oldukça yakındır.



Şekil 2.16: Dikine hız yöntemiyle tespit edilmiş ötegezegenlerin kütleleri ($M \sin i$, Jüpiter kütlesi cinsinden) ile yörünge periyotları (gün cinsinden) arasındaki ilişki. Grafikte yeşil kareler mevcut ötegezegen gözlemlerini, mor çember içindeki harfler ise Güneş Sistemi gezegenlerini temsil etmektedir. Gezegen sınıfları (Perryman, 2018)'in değerlerine göre ayrılmıştır. Bu durum, dikine hız yönteminin duyarlılığı ile tespit eğilimlerini ortaya koymaktadır.

Günümüzde kullanılan yüksek çözünürlüklü tayfölçerler arasında ESPRESSO (Echelle SPectrograph for Rocky Exoplanets and Stable Spectroscopic Observations), 10 cm/s düzeyine kadar hassasiyet sunabilmektedir (Pepe ve diğ., 2021). Örneğin, HARPS tayfölçeri yaklaşık 1 m/s doğruluk sağlarken (Mayor ve diğ., 2003), ESPRESSO ile yapılan gözlemlerle teorik olarak Dünya benzeri ötegezegenlerin tespiti mümkün hale gelmektedir. Ancak yıldız yüzey aktivitesi, manyetik lekeler ve konveksiyon gibi astrofiziksel gürültüler (stellar jitter), bu sinyallerin doğrudan algılanmasını zorlaştırmaktadır (Fischer ve diğ., 2014). Bu nedenle, Dünya kütlesindeki gezegenlerin tespiti hala yüksek hassasiyetli cihazların uzun süreli ve ayrıntılı gözlemlerini gerektirmektedir.

Kütlesi büyük ve yıldıza daha yakın gezegenler, yıldız üzerinde daha belirgin hız salınımları oluşturmaktadır. Bu durum, dikine hız yönteminin özellikle sıcak Jüpiter gibi büyük kütleli ötegezegenleri tespit etmede etkili olmasını sağlar. Ancak, sıcak Jüpiterler kısa yörünge dönemlerine rağmen görece nadir görülen gezegenlerdir (**Şekil 2.16**). Bu nedenle, dikine hız gözlemlerinde daha uzak yörüngeli soğuk Jüpiterlerin oranı görece yüksek çıkmaktadır (Cumming ve diğ., 2008).

Şekil 2.16'da, (Perryman, 2018) tarafından tanımlanan kütle sınıflarına göre gezegenlerin ayrımı yatay kesikli çizgilerle gösterilmiştir. Bu sınıflandırma, gezegenlerin kütlelerine bağlı

olarak Dünya benzeri, Süper-Dünya, Neptün ve Jüpiter türleri şeklinde ayrılmasını sağlar. Dikine hız yöntemi, küçük kütleli gezegenlere olan duyarlılığını özellikle kısa yörünge dönemlerinde göstermektedir. Bu nedenle, düşük kütleli gezegenlerin tespiti genellikle kısa periyotlarla sınırlı kalırken, uzun periyotlu düşük kütleli sistemlerin tespiti mevcut teknolojiyle oldukça sınırlıdır.

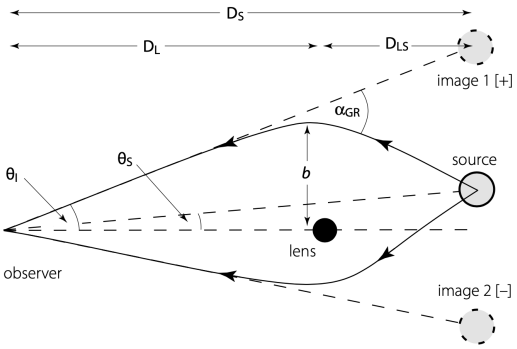
2.2.3. Kütleçekimsel Mikromercekleme Yöntemi

Mikromercekleme, Einstein'ın Genel Görelilik Kuramı'na göre kütlenin uzay-zamanı eğmesi sonucunda ortaya çıkan ışık sapmasına dayanır. Bir yıldız, arkasındaki daha uzak bir yıldızdan gelen ışığı kütleçekimiyle bükerek geçici bir parlaklık artışı oluşturduğunda mikromercekleme olayı meydana gelir. Eğer bu mercek yıldızın çevresinde bir gezegen varsa, gezegenin varlığı arka plan yıldızının parlaklığında kısa süreli bir sapma ile kendini gösterir. Bu yöntem, ışık yaymayan ya da gözlemlenemeyecek kadar sönük sistemlerin dahi tespitine olanak tanır. Mikromercekleme olaylarında oluşan görüntüler miliyay-saniye düzeyinde açısal ayrımlara sahiptir ve bu nedenle doğrudan gözlemlenemez; yalnızca kaynak yıldızın zamanla değişen parlaklığı izlenebilir. Olaylar tekrarlanmaz ve genellikle yıldızlararası özel hizalanmalarla ortaya çıkar. Bu durum, mikromercekleme olaylarını tespit etmeyi zorlaştırsa da, geniş alanlı CCD kameralar sayesinde günümüzde yaklaşık bir milyar yıldız sürekli gözlemlenmekte ve yılda yaklaşık 2000 mikromercekleme olayı saptanmaktadır. Bunların yalnızca çok az bir kısmı, mercek yıldızın gezegen barındırdığına işaret eden sinyaller üretmektedir (Tsapras, 2018).

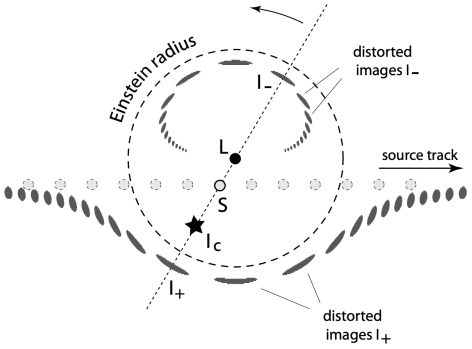
Şekil 2.17'de mikromercekleme olayının temel geometrisi sunulmuştur. Sol panelde (**Şekil 2.17**a), mercekleme etkisinin temelinde yatan ışık sapmasının açısal ilişkileri; sağ panelde (**Şekil 2.17**b) ise, bir kaynak yıldızın mercek cismi arkasından geçişi sırasında oluşan bozulmuş görüntülerin ve görüntü merkezinin zamanla nasıl bir hareket izlediği gösterilmektedir.

Mikromercekleme olaylarında temel büyüklük, Einstein yarıçapı θ_E'dir. Bu yarıçap, mercekleme geometrisinin ve mercek kütlesinin bir fonksiyonu olarak aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\theta_E = \left[\frac{4GM_{\text{Lens}}}{c^2} \cdot \frac{D_{\text{Yıldız}} - D_{\text{Lens}}}{D_{\text{Lens}} D_{\text{Yıldız}}} \right]^{1/2} \tag{2.14}$$



(a) Gözlemci ile kaynak arasındaki doğru doğrultudan θ_S açısıyla sapmış, D_L uzaklığındaki noktasal bir merceğin şematik gösterimi. Kaynaktan çıkan ışık, mercek sistmein kütleçekimi etkisiyle α_{GR} açısıyla sapar. Gözlemci, kaynağın aynı tarafında yer alan $\theta_I = b/D_L$ açısında bir görüntü ve karşı tarafında ikinci bir görüntü gözlemler.



(b) Astrometrik ve fotometrik mikromercekleme olayının şematik gösterimi. Arka plandaki kaynak yıldız (S), ön plandaki mercek (L) arkasından geçerken, oluşan bozulmuş görüntüler (I_+) ve bunların kütle merkezi (Ic), Einstein halkası etrafında eğri bir yol izler.

Şekil 2.17: Mikromercekleme olayının geometrik açıklamaları: (a) olayın geometrisi; (b) kaynak yıldızın mercek etrafındaki hareketiyle ortaya çıkan görüntü yer değiştirmeleri (Perryman, 2018).

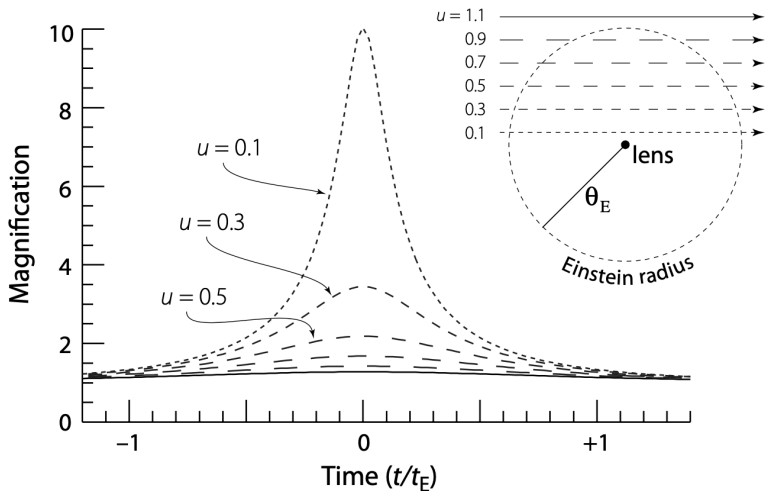
Burada M_{Lens}, merceğin (genellikle yıldızın) kütlesini; $D_{\text{Yıldız}}$, gözlemci ile kaynak yıldız arasındaki mesafeyi; D_{Lens}, gözlemci ile mercek arasındaki mesafeyi ve $D_{\text{Yıldız}} - D_{\text{Lens}}$ ifadesi ise mercek ile kaynak yıldız arasındaki mesafeyi ifade eder.

Einstein yarıçapı, gökyüzündeki açısal bir mesafeyi tanımlar ve mercekleme etkisinin uzamsal ölçeğini belirler. Mercekleme olayının süresi ise Einstein yarıçapının mercek ve kaynak arasındaki göreli açısal hıza bölünmesiyle elde edilir:

$$t_E = \frac{\theta_E}{\mu_{LY}} \tag{2.15}$$

Burada μ_{LY}, mercek ve kaynak arasındaki açısal göreli hareket hızıdır. Eğer mercek sisteminde bir gezegen varsa, bu gezegenin etkisi de gözlenebilir ve bu etkiyi karakterize eden zaman ölçeği şu şekilde verilir:

$$t_G = \sqrt{q}\, t_E \tag{2.16}$$

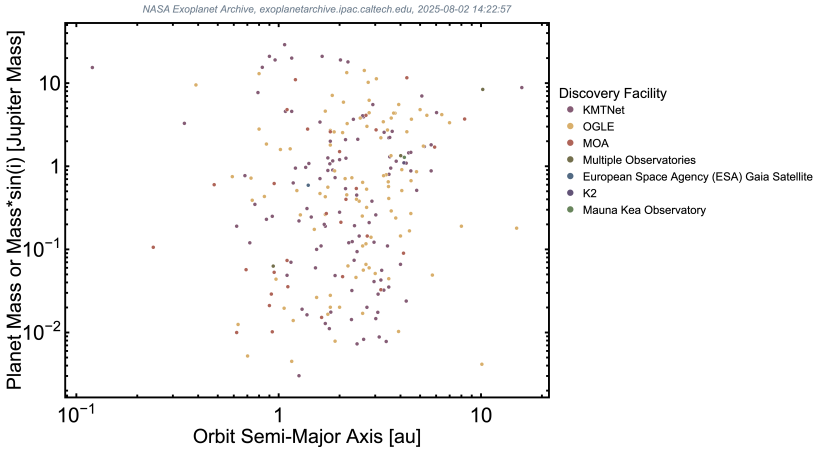


Şekil 2.18: Noktasal bir kaynak ile tek bir merceğin sabit bağıl yatay hızla hareket ettiği varsayımı altında oluşan mikromercekleme ışık eğrileri. Köşedeki şematik gösterimde, kesikli çizgi Einstein yarıçapını temsil ederken, farklı $u = \theta_S/\theta_E$ oranlarına karşılık gelen kaynak yörüngeleri gösterilmiştir. Kaynağın mercek konumuna projeksiyon düzleminde yakın geçişi durumunda büyütme etkisi belirgin şekilde artar; u değeri küçüldükçe bu artış daha da hızlanır (Perryman, 2018).

Burada q, gezegenin kütlesinin mercek yıldızına oranıdır. Gezegen, kaynak hizasına yakın geçtiğinde kısa süreli bir parlaklık anomalisi oluşturur ve bu etki mikromercekleme eğrisinde bir sapma olarak gözlenir.

Mikromercekleme olaylarında bir diğer önemli parametre "büyütme"dir (**Şekil 2.18**). Büyütme, oluşan görüntünün alanının kaynak yıldızın alanına oranı olarak tanımlanır. Ön plan (mercek) ve arka plan (kaynak) yıldızları arasındaki açısal ayrım θ_S olmak üzere, bu miktarın Einstein açısına (θ_E) oranı ile tanımlanan $u = \theta_S/\theta_E$ parametresi, büyütmenin zamana bağlı değişimini belirler.

Mikromercekleme yöntemi, bazı sınırlamalarına rağmen ötegezegen keşiflerinde önemli bir yere sahiptir. Her bir yıldız için gezegen kaynaklı mercekleme olayının olasılığı çok düşük olsa da ($\sim 10^{-8}$), günümüzde milyarlarca yıldızın düzenli izlenmesi sayesinde her yıl birkaç yeni gezegen bu yöntemle keşfedilmektedir. Bu olaylar genellikle tek seferliktir ve tekrar gözlemlenemez. Ayrıca, gezegenin etkisi Dünya benzeri kütlelerde yalnızca birkaç saat, Jüpiter benzerlerinde ise birkaç gün sürer. Bu nedenle, hızlı ve eşzamanlı gözlemler gerektirir. Mikromercekleme ile keşfedilen gezegenler genellikle uzak sistemlerde yer aldığından, detaylı takip çalışmaları zordur. Ancak, bu gezegenler özellikle buz hattı ve ötesindeki oluşum bölgeleri hakkında bilgiler sunar. Mikromercekleme, çok yakın (< 0.4

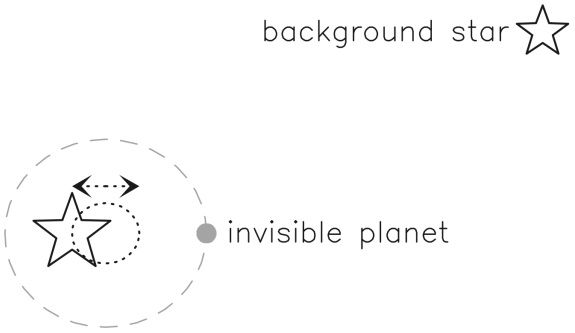


Şekil 2.19: Mikromercekleme yöntemiyle keşfedilen ötegezegenlerin yörünge yarı - büyük eksene karşılık kütle dağılımları.

AB) ya da çok uzak (>100 AB) yörüngelerde etkili olmasa da, bu aralık dışındaki bölgeler için oldukça duyarlıdır.

Yöntemin güçlü yönlerinden biri, gözlemlerin yakındaki yıldızlara veya belirli yıldız türlerine bağımlı olmamasıdır. Kahverengi cüceler, ana kol yıldızları, yıldız kalıntıları ya da serbest dolaşan (free-floating) gezegenler bile bu yöntemle tespit edilebilir. Üstelik, yıllar süren gözlemler gerekmeden yalnızca birkaç haftalık bir ışık eğrisi ile sistem hakkında bilgi edinmek mümkündür. Gözlemler büyük teleskoplara ihtiyaç duymaz; 1 metrelik teleskoplar ve hatta bazı amatör teleskoplar bile yeterlidir. Mikromercekleme, yer tabanlı gözlemlerle bile Dünya kütlesindeki gezegenlere hassasiyet gösterebilir. Tüm bu özellikleriyle, diğer yöntemlerin erişemediği uzak ve düşük kütleli gezegenlerin keşfinde etkili bir tekniktir (Tsapras, 2018).

Şekil 2.19'da mikromercekleme yöntemiyle keşfedilen ötegezegenlerin yörünge yarı - büyük eksene karşılık kütle dağılımları gösterilmektedir. NASA Exoplanet Archive verilerine göre, bu yöntemle günümüze kadar 247 gezegen keşfedilmiştir. Söz konusu keşiflerin büyük bir bölümü, uzun süredir bu alanda gözlem yapan OGLE (Udalski ve diğ., 1992), MOA (Sumi ve diğ., 2011) ve KMTNet (Kim ve diğ., 2016) projeleri tarafından gerçekleştirilmiştir. Keşiflerin büyük oranda 0.5–10 AB aralığındaki yörüngelerde ve Neptün ile Jüpiter kütleleri civarında yoğunlaşmaktadır. Bu durum, mikromercekleme yönteminin orta uzaklıklardaki gezegenlerin tespitinde etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.20: Bir gezegenin, barınak yıldızının konumundaki değişimin astrometrik ölçümlerle tespiti. Hem gezegen hem de yıldız, ortak kütle merkezi etrafında döner; bu merkez, iki cisim arasındaki büyük kütle farkı nedeniyle genellikle yıldızın çok yakınında yer alır. Gezegenin kendisi doğrudan gözlemlenemese de, yıldızın gökyüzü düzlemindeki "yalpalama" hareketi doğrudan ölçülebilir. Bu ölçümde bir arka plan yıldızı konum referansı olarak kullanılır.

2.2.4. Astrometri

Astrometri, bir yıldızın gökyüzündeki konumunun zaman içinde çok hassas şekilde izlenmesiyle ötegezegen keşfine olanak tanıyan bir tekniktir. Bir gezegen, yıldızıyla birlikte ortak kütle merkezi (barycenter) etrafında dönerken, yıldız da küçük bir yalpalama hareketi yapar (**Şekil 2.20**). Bu yalpalama hareketi, gökyüzü düzlemine yansıtıldığında bir elips şeklinde gözlemlenir ve bu harekete "astrometrik imza" adı verilir. Bu imzanın genliği, gezegenin kütlesi (M_p) ve yörünge yarıçapı (a) ile doğru; yıldızın kütlesi (M_*) ve uzaklığı (d) ile ters orantılıdır. Bu ilişki aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\alpha_{astrometrik} = \frac{M_p \cdot a}{M_* \cdot d} \tag{2.17}$$

Burada α yay-saniye (arcsec) cinsinden astrometrik genlik, a astronomik birim (AB), d ise parsek (pc) cinsinden uzaklıktır (Perryman, 2000).

Örneğin, Jüpiter'in Güneş çevresindeki etkisi 10 parsek uzaklıktan gözlemlendiğinde $\sim$1 miliyay-saniye (mas) büyüklüğündedir; Dünya benzeri bir gezegenin etkisi ise yalnızca 0.3 mikroyay-saniyedir (μas). Bu nedenle, Dünya benzeri gezegenlerin tespiti için astrometrik doğruluk düzeyinin μas seviyelerine ulaşması gerekmektedir. **Tablo 2.6**'da,

Tablo 2.6: $1M_{\odot}$ kütleli bir yıldız için, farklı yıldız uzaklığı d, gezegen kütlesi M_p ve yarı-büyük eksen a değerleri altında hesaplanan astrometrik sinyal (α) büyüklükleri (Perryman, 2018).

Gezegen Türü	d(pc)	M_p	a(AB)	α (μas)
Jupiter	10	$1M_J$	5	500.
"	100	"	"	50.
Hot Jupiter	10	$1M_J$	0.01	1.
"	100	"	"	0.1
Earth	10	$1M_{\oplus}$	1	0.3
"	100	"	"	0.03

farklı yıldız-gezegen sistemleri için astrometrik sinyalin büyüklüğü (α), yıldızın uzaklığı (d), gezegenin kütlesi (M_p) ve yörünge yarıçapına (a) bağlı olarak verilmiştir. Hesaplamalarda yıldızın Güneş kütlesinde ($1, M_{\odot}$) olduğu varsayılmıştır. Astrometrik gözlemler, özellikle bir yıldan uzun yörünge dönemli ve Güneş benzeri yıldızların yaşanabilir bölgelerinde yer alan gezegenler için oldukça etkilidir. Bu yönüyle kısa yörünge periyotlarına duyarlı olan dikine hız yöntemiyle birbirini tamamlamaktadır (Launhardt, 2009).

Astrometri yöntemi, yıldız tayfının karmaşık yapısından etkilenmediği için sıcak ve hızlı dönen yıldızlar etrafındaki gezegenlerin keşfi için de uygundur. Üstelik dikine hız yönteminden farklı olarak $\sin i$ belirsizliği içermez; bu sayede gezegenin gerçek kütlesi doğrudan belirlenebilmektedir. Ayrıca, çok gezegenli sistemlerde gezegenlerin göreli eğim açılarını belirlemek de mümkündür; bu, oluşum kuramları ve dinamik kararlılık analizleri açısından kritik bir avantajdır (Perryman, 2000).

Ancak bu yöntemin hassasiyeti; yıldız yüzeyindeki lekeler gibi parlaklık düzensizlikleri, atmosferik bozunumlar ve optik sistemdeki zamanla değişen bozulmalar nedeniyle kısıtlanmaktadır. Yine de yapılan çalışmalar, tipik bir Güneş-benzeri yıldızın 10 pc mesafeden bakıldığında oluşturduğu yalpalamanın yalnızca $\sim$0.07–0.09 μas olduğunu, yani yaşanabilir bölgedeki Dünya benzeri gezegenlerin oluşturduğu sinyallerin ($\sim$0.3 μas) üzerinde olduğunu göstermektedir (Bendek ve diğ., 2019). Bu da astrometrik gürültünün gezegen tespitinde temel bir engel oluşturmadığını ortaya koymaktadır.

Günümüzde, astrometri yöntemiyle keşfedilmiş ötegezegen sayısı oldukça sınırlıdır. NASA Exoplanet Archive verilerine göre astrometri yöntemi ile yalnızca 5 gezegen keşfedilmiştir. Ancak bu sayı, özellikle Gaia uzay teleskobunun katkılarıyla yakın gelecekte önemli

ölçüde artma potansiyeline sahiptir. Gaia, bir milyardan fazla yıldızın gökyüzündeki konumunu $\sim$20 μas düzeyinde doğrulukla ölçebilmektedir. Bu yüksek hassasiyet, özellikle uzun periyotlu, geniş yörüngeli ve yaşanabilir bölgede bulunan ötegezegenlerin keşfi için belirleyici bir avantaj sağlamaktadır. 2023 yılında yayımlanan Gaia Data Release 3 (DR3) ile, yalnızca astrometrik veriler kullanılarak 64 yeni ötegezegen adayı tanımlanmıştır (Feng, 2024). Bu adayların önemli bir kısmı, yörünge yarıçapı ve kütle açısından soğuk Jüpiterler sınıfına girmektedir ve doğrudan görüntüleme ya da radyal hız yöntemleriyle doğrulanmaya uygundur. Gaia'nın ilerleyen veri sürümleri olan DR4 ve DR5 ile birlikte hem bu adayların önemli bir bölümünün doğrulanması, hem de daha düşük kütleli gezegenlerin tespit edilmesi beklenmektedir. Perryman ve diğ. (2014), Gaia'nın yalnızca astrometrik yer değiştirme ölçümlerine dayanarak yaklaşık 21000 $\pm$ 6000 yüksek kütleli (1–15 M_J) gezegen keşfetmesini öngörmüş, görevin 10 yıla uzatılması durumunda bu sayının 70000 $\pm$ 20000'e kadar çıkabileceğini belirtmiştir.

2.2.5. Zamanlama

Ötegezegen tespitinde dolaylı yöntemler arasında yer alan zamanlama teknikleri, yıldız veya başka bir cisimdeki periyodik davranışlardaki küçük sapmaları izleyerek gezegen varlığını ortaya çıkarmayı amaçlamaktadır. Zamanlama yöntemini üç ana başlık altında incelemek mümkündür: pulsar zamanlaması, tutulma zamanındaki değişimler (Eclipsing Timing Variations - ETV) ve geçiş zamanındaki değişimler (Transit Timing Variations - TTV).

2.2.5.1. Pulsar Zamanlaması

Pulsar zamanlaması yöntemi, yoldaş bir cismin etkisiyle kütle merkezi etrafında hareket eden bir pulsarın radyo dalgalarındaki atımlarının gözlemciye ulaşma süresindeki değişimlerini ölçmeye dayanmaktadır. Milisaniye pulsarları, evrendeki en hassas doğal saatler arasında yer almakta ve Ay'dan daha düşük kütleye sahip cisimlerin bile neden olduğu son derece küçük zamanlama sapmaları tespit edilebilmektedir (Hermes, 2018). Pulsar atım varış zamanlarındaki (TOA) periyodik değişimler, yörüngede bulunan gezegen ya da başka bir yoldaşın varlığını ortaya koymakta; bu sapmalar, pulsarın kütle merkezi etrafındaki hareketine bağlı olarak ışığın yolculuk süresinde oluşan farklılıklardan kaynaklanmaktadır.

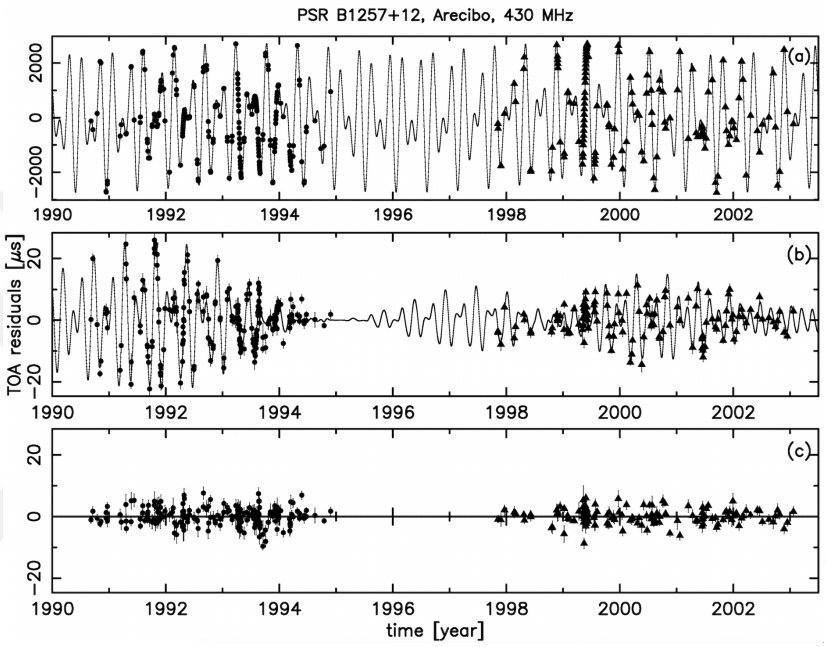
Temel zamanlama analizi, gözlenen TOA'ları modelleyen ayarlanabilir parametrelerden

oluşmaktadır. Bu model; Dünya ile pulsar arasındaki mesafede, Dünya'nın yörünge hareketi, pulsarın özdevinimi ve varsa ikili hareketinden kaynaklanan değişimleri, yıldızlararası ortamdan geçen sinyallerdeki dağılım gecikmesini ve gözlemevi ile pulsar çerçevelerindeki genel görelilik kaynaklı zaman genişlemesi etkilerini içermektedir. En büyük değişken gecikme terimi, Dünya'nın Güneş Sistemi kütle merkezine (SSB) göre hareketinden doğan Roemer gecikmesidir; bu etki yaklaşık 500 saniyeye kadar çıkabilmekte, ancak birçok pulsarda TOA ölçüm belirsizliği 1 mikrosaniyeden daha küçüktür. Bu gecikme, sayısal Güneş Sistemi efemerisleri ile düzeltilmektedir. Efemerislerin doğruluğu yalnızca pulsar zamanlaması açısından değil, uzay görevlerinde yönlendirme hesapları için de önem taşımaktadır (Champion ve diğ., 2010).

Bu yöntemin gücü, 1992 yılında keşfedilen ve aynı zamanda astronomi tarihinde doğrulanmış ilk ötegezegen sistemini temsil eden PSR B1257+12 ile ortaya konmuştur (Wolszczan ve Frail, 1992; Konacki ve Wolszczan, 2003). Bu pulsarın etrafında, kütleleri Dünya'ya yakın üç gezegen bulunmakta olup, bu keşif halen en düşük kütleli bilinen ötegezegen örneklerinden bazılarını temsil etmektedir. Ancak benzer sistemlere çok nadir rastlanmaktadır; günümüze kadar yalnızca sekiz pulsarın çevresinde gezegen kütleli cisimlerin varlığı doğrulanabilmiştir. Bunların bir kısmı, "elmas gezegen" olarak adlandırılan ultra düşük kütleli beyaz cüce kalıntılarıdır. Örnek sistemler arasında J1719−1438, J0636+5128, J1311−3430 ve J2322−2650 yer almaktadır (Nitu ve diğ., 2022).

Pulsar gezegenlerinin oluşumuna dair senaryolar üç ana grupta değerlendirilmektedir: (i) gezegenlerin normal bir yıldız etrafında oluşup daha sonra yıldızlararası çarpışma veya yakın etkileşimlerle pulsara yakalanması, (ii) süpernova sonrasında geri düşen maddenin oluşturduğu diskte ya da bozunmuş ikili yoldaşın kalıntılarında oluşum ve (iii) ikili milisaniye pulsar sistemlerinde yoldaşın tamamen veya kısmen buharlaşarak geriye kalan maddeden gezegen oluşması (Nitu ve diğ., 2022).

Yöntemin sağladığı hassasiyet yalnızca pulsar gezegenlerinin keşfiyle sınırlı değildir. Pulsar zamanlaması, Güneş Sistemi'nin kütle merkezine etki eden bilinmeyen büyük kütleli cisimlerin dolaylı tespitinde de kullanılabilmektedir. Eğer SSB'nin konumu hatalı modellenmişse, bu durum tüm pulsarların zamanlama verilerinde benzer yönlü ve uzun dönemli kaymalar olarak ortaya çıkmaktadır. Farklı yönlerdeki pulsarlardan elde edilen sinyallerin karşılaştırılması, sapmanın kaynağının pulsara mı yoksa Güneş Sistemi'ne mi



Şekil 2.21: PSR B1257+12 zamanlama artıklarının analizi. 430 MHz frekansında yapılan gözlemlerden elde edilen PSR B1257+12 zamanlama artıklarının üç farklı model için karşılaştırılması. Dolu daireler ve üçgenler sırasıyla Mark III ve PSPM alıcı sistemleriyle ölçülen TOA verilerini göstermektedir. Düz çizgi, her model için öngörülen TOA değişimlerini temsil etmektedir. (a) Gezegenler dahil edilmeden yapılan standart zamanlama modeline ait artıklar; sapmalar gezegen B ve C'nin Kepler yörüngesinden kaynaklanmaktadır. (b) Gezegen A, B ve C'nin Kepler yörüngeleri eklenmiş model artıklarında, varyasyonlar gezegen B ile C arasındaki karşılıklı kütleçekimsel etkileşimlerden kaynaklanmaktadır. (c) Standart pulsar parametreleri ile Kepler ve Kepler-dışı yörünge etkilerinin tamamının dahil edildiği modelden elde edilen artıklar (Konacki ve Wolszczan, 2003).

ait olduğunun anlaşılmasını sağlamaktadır (Champion ve diğ., 2010).

2.2.5.2. Tutulma Zamanındaki Değişimler (ETV)

Tutulma Zamanındaki Değişimler (Eclipse Timing Variations - ETV), örten çift yıldız sistemlerinde ölçülen tutulma zamanlarının, efemeris denklemi ile öngörülen zamanlardan sistematik olarak sapmasıdır. Temel olarak O – C farkı ile tanımlanır:

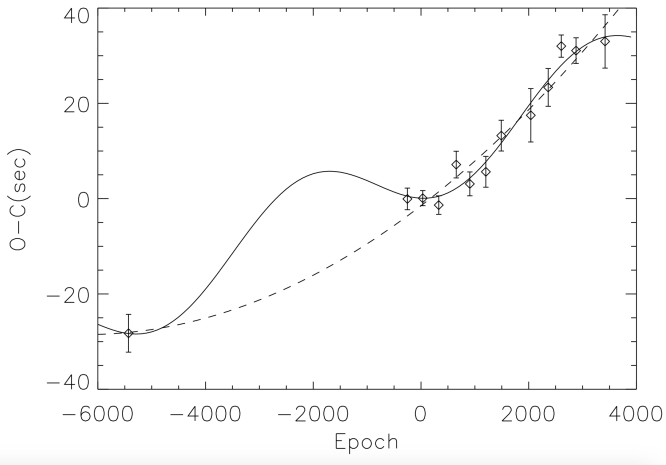
$$O - C = T_{obs} - T_{calc} \tag{2.18}$$

Burada efemeris aşağıdaki biçimde yazılır ve başlangıç epoku (T_0), yörünge dönemi (P) ve tutulma çevrim numarası (E) parametrelerine bağlıdır:

$$T_{calc}(E) = T_0 + P \times E \tag{2.19}$$

O–C farklarının zamana göre düzenli bir değişim göstermesi, sistemde üçüncü bir cismin varlığına işaret edebilir. Çift yıldızlarda üçüncü cisimler yörünge yapılarına göre üç sınıfa ayrılır: S-tip (gezegen bileşenlerden birinin etrafında dolanır), P-tip/çevre-çift (gezegen çift yıldızın tamamı etrafında dolanır) ve L-tip (sistemin Lagrange noktaları, L4/L5 civarı) (Dvorak, 1986).

O – C eğrisinde gözlenen değişim, sinüzoidal bir yapıya sahipse bu durum genellikle üçüncü bir cismin varlığıyla uyumludur. Sinüzoidal bileşenin genliği, üçüncü cismin kütlesi, yörünge periyodu ve yörünge eğikliği ile ilişkilidir. Ancak O – C desenleri her zaman tek bir fiziksel mekanizma ile açıklanamayabilir (Deeg ve diğ., 2008). Örneğin CM Draconis sisteminde hem periyodik (üçüncü cisim) hem de parabolik (yörünge periyodu değişimi) modeller gözlemleri benzer doğrulukta açıklamaktadır (**Şekil 2.22**). Bu durum, model seçiminin güvenilir olabilmesi için uzun zamana yayılan gözlemler ve yüksek zamanlama hassasiyetinin gerekli olduğunu göstermektedir. Ayrıca, kütle aktarımı, manyetik aktivite döngüleri veya diğer astrofiziksel süreçler de O–C'de benzer etkiler üretebilmektedir. Bu nedenle gezegen modelli açıklamalardan önce tüm olasılıkların göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

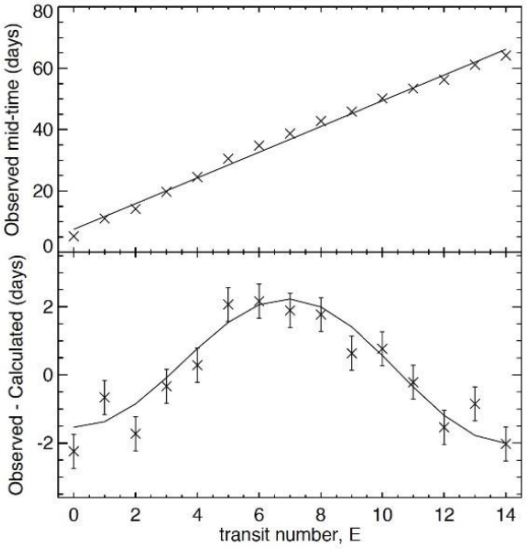


Şekil 2.22: CM Dra'nın ortalama $O-C$ değerleri, parabol uyumu, kesikli çizgi; ve sinüzoidal uyumu, düz çizgi ile gösterilmiştir (Deeg ve diğ., 2008).

2.2.5.3. Geçiş Zamanındaki Değişimler (TTV)

TTV (Transit Timing Variations - TTV) yöntemi uygulanış açısından ETV yöntemi ile aynıdır. Bu yöntem bilinen öte gezegenlerin geçişlerinin zamanlamasındaki değişikliklerin izlenmesine dayanır. Sistemdeki geçiş yapmayan gezegenler, geçiş gezegeniyle yaptığı kütleçekimsel etkileşimler sebebiyle oluşan geçiş zamanlaması değişiminden keşfedilebilir. TTV yöntemi, başka yollarla tespit edilemeyen düşük kütleli gezegenlere duyarlıdır. Bununla birlikte, TTV'lerden geçiş yapmayan gezegenlerin yörüngesel elementlerinin ve kütlesinin çıkarılması, diğer gezegen tespit yöntemlerinden daha zordur (Nesvorný, 2009). Gezegenin yörüngesinin neolabileceğine dair herhangi bir ipucu bulunmaz yani yörünge dairesel olarak varsayılamaz. Tek bir gözlem yörünge tespiti için yetersizdir. Bir dönem değişikliğini ölçmek için en az üç geçiş zamanı gereklidir. Yörünge konumları veya geçiş zamanları efemeris ile ifade edilir. Keplerian referans modelinden hareketle, pertürbasyonlar hareketlere veya zamanlama sapmalarına sebep olur. Özellikle anlık olarak yarı-büyük eksen (a), dış merkezlik (e) ve periastron boylamı (ω)'nın değişmesine neden olur. Yörünge periyodunun P sabit olacak şekilde efemeris

$$C = T_0 + P \times E \tag{2.20}$$



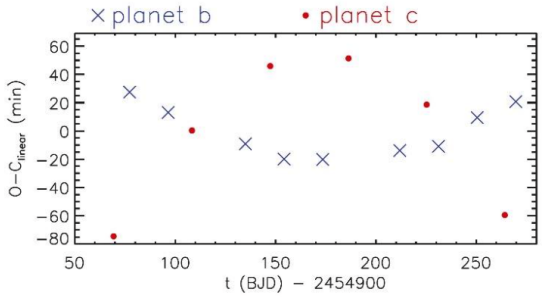
Şekil 2.23: Bir zamanlama verisi örneği. Üst panel: gezegen geçişinin ölçülmüş orta zamanları ve en küçük kareler yöntemiyle geçirilmiş fit. Alt panel: Üstteki fitin artıklarından elde edilen O-C diyagramı (Agol ve Fabrycky, 2018)

ile verilir. Burada E, epok (tamsayı olacak şekilde geçiş sayısı); T_0, E=0 numaralı geçiş zamanıdır; C ise sabit periyotlu modele dayanarak "hesaplanmış" anlamına gelir.

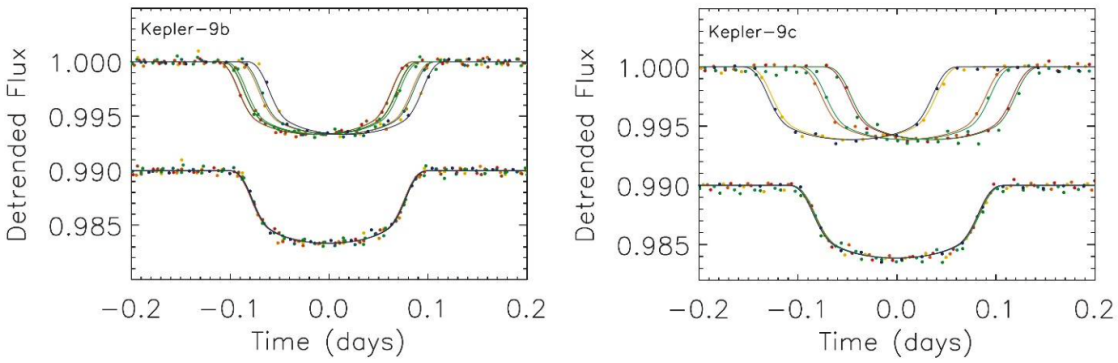
Gözlenen geçiş zamanları ise "O" ile gösterilir. Bu gösterim pertürbasyonun çizildiği O - C diyagramına götürür. WASP-47'nin zamanlamasından sonra modellenmiş ancak büyük ölçüde abartılı bir pertürbasyon ile öğretici bir versiyon, **Şekil 2.23**'de gösterilmektedir. Lineer modele göre geçiş 0-3 ve 11-14 arasında daha erken iken 4-10 arasında daha geçtir. Sabit geçiş periyodundaki bu sapmalar TTV olarak adlandırılırlar (Agol ve Fabrycky, 2018).

Holman ve diğ. (2010) Kepler-9 sisteminde Kepler-9b ve Kepler-9c gezegenlerinin TTV ve ışık eğrilerinden yola çıkarak bu sistemde yörünge periyodu 1.5925 gün olan Süper-Dünya boyutlu aday bir ötegezegenin izine rastlamışlardır. Kepler-9b ve Kepler-9c'nin **Şekil 2.24**'da TTV diyagramları, **Şekil 2.25**'da ışık eğrileri verilmiştir.

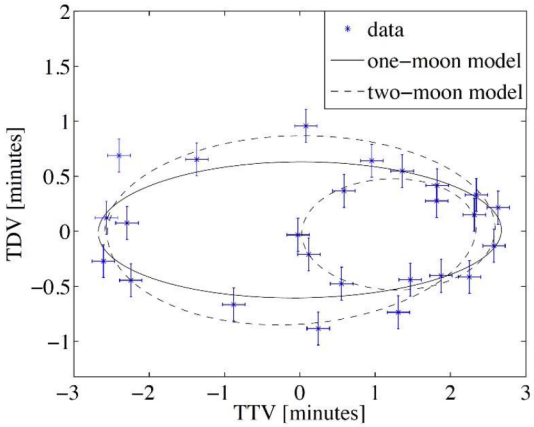
TTV, bir gezegenin yörüngesindeki kütleçekimsel etkiler veya ilave cisimler nedeniyle geçiş zamanlarında ortaya çıkan periyodik veya düzensiz sapmaları ölçerek, bu etkilere dair ipuçları verir. Ancak yalnızca zamanlama bilgisini kullanmak, sistemin geometrik özelliklerini tam olarak ortaya koymakta yetersiz kalabilir. Bu noktada, geçişin süresindeki değişimleri ifade eden TDV (Transit Süresindeki Değişimler - Transit Duration Variations) yöntemi devreye girer. TDV, TTV ile birlikte incelendiğinde, yalnızca kütle ve yörünge



Şekil 2.24: Kepler-9 b (mavi çarpı) ve c (kırmızı nokta) gezegenlerinin lineer efemerislerine kıyasla gözlenen geçiş zamanlarının karşılaştırılması (Holman ve diğ., 2010)



Şekil 2.25: Kepler-9b (solda) ve Kepler-9c (sağda) için ışık eğrileri. Her panelde, üst eğriler, farklı zamanlardaki geçişlerdir. Önemli yer değiştirmeler, gezegenler arasındaki yerçekimi etkileşimlerinin neden olduğu büyük TTV'lerden kaynaklanmaktadır. Her paneldeki alt eğri ölçülen geçiş sürelerini kullanarak ortak bir merkeze kaydırılan geçişleri gösterir (Holman ve diğ., 2010).



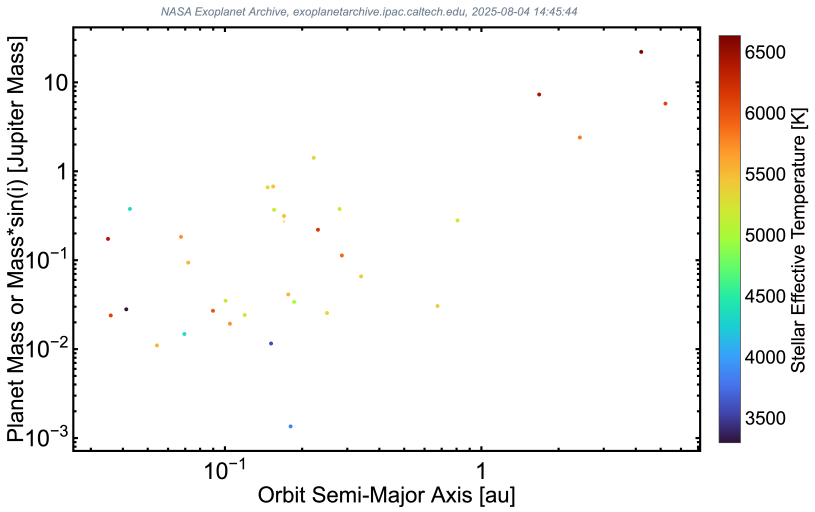
Şekil 2.26: Üretilmiş 2 uydulu gezegen datası ve 1 ve 2'li uydu fiti (Heller ve diğ., 2016)

periyodu değil, aynı zamanda yörüngenin eğikliği, yönelimi ve dinamik evrimi hakkında da ek bilgiler sunar.

Gezegen yörüngesi evrimleştikçe eğim ve dış merkezlik vektörlerindeki değişiklikler bir gezegenin geçiş süresinin değişmesine neden olabilir. Neredeyse dairesel yörüngeler için bu geçiş süresi değişimine eğim vektörü hakimdir. Bu vektöre kiriş uzunluğu da denir ve gezegenin yörüngesinin yıldızına iz düşürülmesiyle elde edilir ki bu da süreyi verir. Bu bir iz düşüm olduğu için gözlenen kiriş uzunluğu, yörüngenin eğiminin büyüklüğü ve çıkış düğümünün konumu ile belirlenir. TDV ayrı ayrı veya birleşik olarak bu iki etkinin değişimine bağlıdır (Van Laerhoven ve diğ., 2018).

Geçiş süresi ve zamanı değişimleri kullanılarak ötegezegen etrafındaki uyduları keşfetmek de mümkündür. Bir uyduya sahip gezegen için birbirini izleyen geçiş gözlemlerin alınması ile gezegenin gezegen-uydu kütle merkezine bağlı yörüngesinde yaptığı hareketler TTV - TDV diyagramlarında desenler oluşturur. Bu desenler 3 geçişten sonra belirlenebilir ve tamamı analitik olarak tahmin edilebilir. Ne kadar çok ölçüm yapılırsa TTV-TDV diyagramları o kadar elipse yaklaşır. Uydu sayısı artıkça desenler daha karmaşık hale gelirler. Heller ve diğ. (2016), 1-5 uydu için bu desenlerin modellemeleri üzerine çalışmışlardır. **Şekil 2.26**'da kendilerinin ürettikleri 2 uydulu gezegen verisi üzerinden geçirilen 1 ve 2 uydulu fitler verilmektedir.

Kepler misyonu sayesinde günümüzde bilinen süper-Dünya'ların büyük çoğunluğu transit yöntemi ile keşfedilmiş olup, bu yöntem gezegen yarıçaplarının genellikle % 10'dan daha düşük belirsizlikle ölçülmesini mümkün kılmaktadır. Bugüne kadar keşfedilen



Şekil 2.27: TTV yöntemi ile keşfedilen ötegezenlerin yarı-büyük eksene karşılık kütle dağılımları.

4000'den fazla süper-Dünya'dan yalnızca yaklaşık 100 tanesinin kütlesi yeterli doğrulukla belirlenebilmiştir. Süper-Dünya kütleleri, çoğunlukla geçiş zamanlama değişimleri (TTV) yöntemi ve radyal hız ölçümleri ile elde edilmiştir. TTV yöntemi, gözlemlenebilir kütleçekimsel etkileşimlerin varlığını gerektirdiğinden, bu teknik genellikle çok gezegenli sistemlerde uygulanabilmiştir. Çok gezegenli sistemler ayrıca oluşum süreçlerine dair tek gezegenli sistemlere kıyasla daha fazla ipucu sunduğundan, gözlemsel çalışmaların önemli bir kısmı bu sistemlere yoğunlaşmıştır (Schlichting, 2018).

NASA Exoplanet Archive verilerine göre TTV yöntemi ile keşfedilen ve kütlesi ölçülen gezegen sayısı 38'dir (**Şekil 2.27**). Bu gezegenlerin önemli bir bölümü süper-Dünya ve alt-Neptün kütle aralığında (~ 0.006–$0.1\ M_J$) yer almakta olup, daha yüksek kütleli örnekler ise azınlıktadır ve yörünge yarı-büyük eksenleri 0.03–1.5 AB arasında değişmektedir. Renk kodlaması, bu sistemlerin büyük çoğunluğunun 6500 K'nin altında etkin sıcaklığa sahip yıldızlar etrafında bulunduğunu göstermektedir. Bu durum, TTV'nin fiziksel bir kısıtı olmaktan çok, uzun süreli ve yüksek hassasiyetli fotometrik gözlemler yapan Kepler gibi görevlerin Güneş benzeri G tayf türündeki yıldızlara öncelik vermesiyle (Batalha ve diğ., 2010) açıklanabilir. Böylece TTV yöntemi, dikine hız (radial velocity) yöntemi için sinyalinin zayıf olduğu düşük kütleli gezegenlerde, kütle tayini için tamamlayıcı bir yöntem olarak öne çıkmaktadır (Agol ve Fabrycky, 2018).

Tablo 2.7: Gezegen tespit yöntemleri, ölçülen ve türetilen parametreler ile avantaj ve dezavantajları.

Metod	Doğrudan Ölçülen	Türetilen	Avantaj (A) / Dezavantaj (D)
Radyal Hız	$m_p \sin i / M_*$, P, e	m_p, a	**A:** Çok sayıda yıldız gözlenebilir **D:** Sistem gözlemciye yakın olmalı
Transit Fotometri	r_p/R_*, P, b	r_p, a, i	**A:** Binlerce yıldız aynı anda gözlenebilir **D:** Yanlış pozitif ihtimali
Doğrudan Görüntüleme	Açısal ayrılık, parlaklık farkı	m_p, a, P, T_p	**A:** Yörünge eğiminden bağımsız tespit **D:** Yüksek optik/termal stabilite gerektirir
Zamanlama	m_p/M_*, P, e	m_p, a	**A:** Uzak küçük gezegenler tespit edilebilir **D:** Az sayıda uygun hedef
Mikromerceklenme	$q = m_p/M_*$, s	m_p, a	**A:** Geniş yörüngeli gezegenler tespit edilebilir **D:** Tek seferlik olay
Astrometri	Yıldız konum değişimi, astrometrik sinyal	m_p, a, P, i	**A:** Gerçek gezegen kütlesi ve yörünge eğimi ölçülür **D:** Yüksek hassasiyet, uzun gözlem süresi, küçük gezegenlerde tespit zor

2.2.6. Doğrudan Görüntüleme

Doğrudan görüntüleme, bir yıldızın parlak ışığını bastırarak onun yakınındaki gezegenin doğrudan tespit edilmesine dayalı bir yöntemdir (Marois ve diğ., 2008; Lagrange ve diğ., 2010). Bu teknik, gezegenin yalnızca yörünge parametrelerini değil, aynı zamanda tayf analizi yoluyla atmosferik bileşimi, sıcaklığı ve hatta bulut yapısını inceleme imkanı sunar (Bowler, 2016). Yüksek açısal çözünürlük ve kontrast gereksinimleri nedeniyle adaptif optik sistemleri ve çeşitli koronagraf tasarımları ile birlikte uygulanır (**?**). Yöntem özellikle genç, geniş yörüngeli ve parlak dev gezegenler için uygundur, ancak yüksek kontrast gereksinimi hedef seçimini sınırlayan başlıca etkendir.

2.3. DOĞRUDAN GÖRÜNTÜLEME YÖNTEMİ

Doğrudan görüntüleme, ötegezegenlerin kendi termal ışımasını veya yansıttığı yıldız ışığını, ana yıldızın parlak ışığından ayırarak tespit etmeye dayanan bir tekniktir. Bu yöntem, gezegenin yörünge parametrelerinin yanı sıra, tayf analizi yoluyla atmosferik bileşim, sıcaklık, bulut yapısı ve yüzey–atmosfer etkileşimleri gibi fiziksel özelliklerini doğrudan belirleme imkanı sunar (Bowler, 2016).

Yöntem, özellikle yörünge yarı-büyük ekseni $a > 5$ AB olan, genç ($\lesssim 100$ Myr) ve hala

oluşum ısısını yayan dev gezegenler için uygundur (Marois ve diğ., 2008; Lagrange ve diğ., 2010). Bu tür gezegenler hem açısal olarak yıldızlarından daha uzak göründükleri hem de kendi içsel parlaklıkları daha yüksek olduğu için gözlemlenebilirlik açısından avantajlıdır. Bununla birlikte doğrudan görüntüleme, diğer tespit yöntemlerine kıyasla daha zordur; en büyük güçlük, gezegenin ışığını yıldızın ışığından ayırabilmektir.

Günümüze kadar gerçekleştirilen doğrudan görüntüleme gözlemleri, çoğunlukla gezegenin kendi termal emisyonunu kullanmıştır. Bu nedenle bugüne kadar tespit edilen gezegenlerin büyük bölümü genç ($\lesssim$ 50 Myr) ve görece sıcak ($T_{\rm eff} \gtrsim$ 800 K) cisimlerdir (Dalba ve diğ., 2015). Soğuk gaz devleri ($\sim$ 100 – 200 K), düşük parlaklıkları nedeniyle mevcut teknoloji ile doğrudan tespit edilememekte veya ayrıntılı karakterizasyonları yapılamamaktadır.

Bu yöntemin başarısı, iki temel gözlemsel gereksinimin karşılanmasına bağlıdır: *yüksek kontrast* ve *yüksek açısal çözünürlük* (**?**). Yüksek kontrast, gezegenin zayıf sinyalinin yıldızın parlak ışığında kaybolmaması için gereklidir. Yüksek açısal çözünürlük ise, gezegen ve yıldızın gökyüzündeki izdüşümlerinin birbirinden ayırt edilebilmesi anlamına gelir. Bu iki gereksinim, modern doğrudan görüntüleme çalışmalarının tasarımını ve hedef seçim stratejilerini belirleyen temel unsurlardır.

Doğrudan görüntüleme, ötegezegen araştırmalarında görece yeni bir yöntem olmakla birlikte, yüksek açısal çözünürlüklü görüntüleme tekniklerinin ve yüksek kontrastlı optik sistemlerin gelişmesiyle birlikte son on beş yılda önemli ilerlemeler kaydetmiştir (Oppenheimer ve Hinkley, 2009). İlk doğrudan görüntüleme girişimleri 1990'ların sonunda (Nakajima ve diğ., 1995) ve 2000'li yılların başında (Chauvin ve diğ., 2004) yapılmış, ancak o dönemin teknolojik sınırlamaları nedeniyle tespit edilen adayların çoğu doğrulanamamıştır. Bu erken dönem çalışmalar, özellikle genç kahverengi cüceler ve yıldız–kahverengi cüce ikililerinin tespitinde yoğunlaşmıştır.

Ötegezegenlerin doğrudan görüntülenmesinde çığır açan keşiflerden biri, HR 8799 sisteminin tespitidir. Marois ve diğ. (2008), Keck ve Gemini teleskoplarında adaptif optik sistemleri ve ileri görüntü işleme teknikleri kullanarak, A5 tayf tipindeki genç ($\sim$ 30 Myr) yıldızın etrafında üç dev gezegenin doğrudan görüntülerini elde etmişlerdir. Bu gezegenler, yıldızdan 24–68AB uzaklıklarda yer almakta ve kütlelerinin 7–10 M_J aralığında olduğu tahmin edilmektedir. HR 8799 sistemi, 2010 yılında yapılan ek gözlemlerle dördüncü gezegenin (HR 8799 e) keşfi ile daha da önem kazanmıştır (Marois ve diğ., 2010). Bu

keşif, çok gezegenli sistemlerin doğrudan görüntüleme ile tespit edilebileceğini göstermesi açısından önemli bir dönüm noktasıdır.

Bir diğer önemli keşif ise Beta Pictoris b'dir. Lagrange ve diğ. (2010), Beta Pictoris yıldızının etrafında yaklaşık 9 M_J kütleye ve 8–9 AB yörünge yarı-büyük eksenine sahip bir dev gezegeni doğrudan görüntülemişlerdir. Beta Pictoris sistemi, gezegenin yörüngesinin doğrudan gözlemlerle izlenebilmesi ve yıldızın genç yaşı ($\sim$ 20 Myr) sayesinde gezegen oluşum süreçlerine dair güçlü ipuçları sağlamaktadır.

Bu iki sistemin keşfi, doğrudan görüntüleme yönteminin genç ve sıcak dev gezegenleri tespit edebildiğini açıkça göstermiştir. Bununla birlikte, yöntem hala kontrast ve açısal çözünürlük sınırlamaları nedeniyle yalnızca belirli türde gezegenleri tespit edebilmektedir. Günümüzde doğrudan görüntüleme ile keşfedilen gezegenlerin çoğu halen genç (5 - 300 Myr), yaklaşık 5–13 M_J kütle aralığında ve 5–100 AB yörüngede yer almaktadır (Bowler, 2016). Bununla birlikte, JWST tarafından 2024 yılında doğrudan görüntülenen Epsilon Indi Ab gibi yaklaşık 275 K sıcaklık ve $\sim 6 M_J$ kütleye sahip gezegenlerin da bulunması, bu yöntemin erişim alanının arttığını göstermektedir (Matthews ve diğ., 2024).

Tarihsel gelişim süreci, teknolojik ilerlemelerle yakından bağlantılıdır. İlk keşiflerden bu yana adaptif optik sistemlerinin hassasiyeti artmış, yeni nesil koronagraflar geliştirilmiş ve görüntü işleme teknikleri sayesinde gürültü bastırma yetenekleri önemli ölçüde iyileştirilmiştir (**?**). Bu ilerlemeler, doğrudan görüntüleme yönteminin günümüzde daha düşük kütleli ve daha soğuk gezegenlere doğru genişlemesine olanak tanımaktadır.

Doğrudan görüntüleme gözlemlerinde bir gezegenin tespit edilebilirliğini belirleyen en kritik parametrelerden biri, gezegenin yıldızına göre gözlenen parlaklığıdır. Bu büyüklük genellikle kontrast oranı olarak tanımlanır ve şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{F_p}{F_\star} \tag{2.21}$$

Burada F_p gezegenin gözlenen akısı, $F_\star$ ise yıldızın gözlenen akısıdır. Bu oran, doğrudan görüntülemenin başarısı açısından belirleyici olup, hem gezegenin fiziksel özelliklerine hem de gözlem koşullarına bağlıdır (Bowler, 2016; **?**).

Parlaklık oranı; yıldızın tayf tipi, parlaklık sınıfı ve yaşı; gezegenin kütlesi, yarıçapı, bileşimi, atmosferik yapısı ve yaşı; gözlem dalga boyu; yıldız–gezegen fiziksel ayrıklığı; gezegenin

yörünge fazı ve atmosferin saçılma özellikleri gibi çok sayıda faktöre bağlıdır (Seager, 2010). Kontrast oranının büyüklüğü, gözlemde ihtiyaç duyulan yıldız ışığı bastırma seviyesini doğrudan belirler.

Tipik olarak bu oran çok küçüktür. Örneğin: - Güneş–Jüpiter sistemi için maksimum uzanımda $\frac{F_p}{F_\star} \sim 10^{-9}$, - Güneş–Dünya sistemi için ise $\frac{F_p}{F_\star} \sim 10^{-10}$ mertebesindedir (Traub ve Oppenheimer, 2010).

Yansıyan ışıkta kontrast oranı şu şekilde ifade edilir (Seager, 2010; Traub ve Oppenheimer, 2010):

$$\frac{F_p}{F_\star} \approx A_g \left(\frac{r_p}{a_p}\right)^2 \Phi(\alpha) \tag{2.22}$$

Burada A_g, gezegenin geometrik albedosu; r_p, gezegenin yarıçapı; a_p, yıldız–gezegen fiziksel ayrıklığı; $\Phi(\alpha)$, faz fonksiyonudur.

Faz fonksiyonu $\Phi(\alpha)$ maksimum uzanımda ($\alpha = 90^\circ$) yaklaşık 1'e yakın değer alır. Bu durumda kontrast oranı gezegenin fiziksel boyutlarına, yörünge uzaklığına ve albedosuna bağlı olarak belirlenir. Bu formül kullanıldığında, yukarıda verilen Jüpiter ve Dünya değerleri elde edilmektedir.

Bu değerler, görünür bölgede doğrudan görüntüleme için gerekli kontrastın mevcut teknolojiyle sağlanmasının son derece güç olduğunu göstermektedir. Bu nedenle yüksek kontrastlı sistemler, çoğunlukla kızılöte dalga boylarında genç ve kendinden ışıtmalı gezegenlerin tespitine odaklanmaktadır (Burrows ve diğ., 1997; Fortney ve diğ., 2008).

Genç ve kendinden ışıtmalı dev gezegenler, oluşum sürecinde kazandıkları kütleçekimsel potansiyel enerjiyi zamanla termal radyasyon olarak yayarlar. Kızılöte dalga boylarında yıldızın parlaklığı görünür bölgeye kıyasla daha düşük olduğu için, genç gezegenlerin yayımı gözlemlerde çok daha yüksek kontrast sağlar. Termal emisyon yapan bir ötegezegenin kontrast oranı gezegenin ve yıldızın yarıçapına, etkin sıcaklığına ve diğer özelliklerine bağlıdır (Currie ve diğ., 2022):

$$C_{IR,\lambda} \sim \frac{F_{\lambda,P}(T,X) r_p^2}{F_{\lambda,S}(T) r_S^2} \tag{2.23}$$

Burada $F_{\lambda,P}$(T,X), dalga boyunun bir fonksiyonu olarak gezegenden gelen termal akı;

$F_{\lambda,S}$(T), dalga boyunun bir fonksiyonu olarak yıldızdan gelen termal akı ve X, gezegenin bulutlar, kimya ve çekim gibi atmosferik yapısına bağlı bir etkendir.

Genç gezegenler ($\lesssim$ 100 Myr) genellikle $T_p \gtrsim 500$ K sıcaklıklara sahiptir ve bu sıcaklıklar, 1–5 μm dalga boylarında ölçülebilir kontrastlar oluşturur. Buna karşılık yaşlı ($\gtrsim$ 1 Gyr) gezegenlerde $T_p \lesssim 300$ K olduğunda, kontrast görünür ve yakın kızılöte bölgede çok daha düşüktür ve orta/uzak kızılöte gözlemleri gerektirir.

Yaklaşık olarak 1000 K sıcaklığa sahip genç Jüpiter benzeri bir gezegen için, 5 μm dalga boyunda kontrast oranı $\sim 4 \times 10^{-5}$ mertebesindedir. Bu değer, modern adaptif optik sistemlerinin (SPHERE, GPI, SCExAO) 5 μm civarındaki kontrast kapasiteleri ile uyumludur.

Doğrudan görüntüleme yönteminde en büyük teknik zorluk, gezegen ışığını baskın yıldız ışığından ayırmaktır. Bu nedenle, gözlemsel sistemlerin erişebileceği kontrast oranı, hangi tip gezegenlerin tespit edilebileceğini doğrudan belirler. Kontrast limiti; dalga boyuna, teleskopun açıklık çapına, optik sistem kalitesine, adaptif optik (AO) performansına, koronograf tasarımına ve veri işleme tekniklerine bağlıdır (**?**Currie ve diğ., 2022).

Görünür bölgede yansıyan ışık kontrastları ($\sim 10^{-9}$–10^{-10}), mevcut yer-tabanlı yüksek kontrastlı sistemlerin ulaşabileceği seviyelerin oldukça altındadır. Bu nedenle görünür bölge için doğrudan görüntüleme, daha çok uzay-tabanlı görevler (ör. *Roman Space Telescope*, *HabEx* konsepti) ile ilişkilendirilir (Kasdin ve diğ., 2020; Robinson ve diğ., 2016).

Kızılöte dalga boylarında ise genç ve kendinden ışıtmalı dev gezegenlerin kontrast oranı ($\sim 10^{-4}$–10^{-6}), modern adaptif optik ve koronograf sistemlerinin kapasitesi ile uyumludur. Mevcut en gelişmiş yer-tabanlı DI sistemlerinin kontrast limitleri tipik olarak şu şekildedir:

- SPHERE/VLT: Tipik 5σ kontrastı 0".5 ayrıklıkta $\sim 10^{-5}$, 0".1 civarında $\sim 10^{-4}$ seviyesindedir; parlak hedeflerde ve iyi koşullarda 10^{-6} seviyesine ulaşılabildiğine dair örnekler mevcuttur (Beuzit ve diğ., 2019).

- GPI/Gemini South: H bandında, 0".35 ayrıklıkta $\sim 10^{-6}$ kontrast (Macintosh ve diğ., 2014).

- SCExAO/Subaru: H bandında, 1-2 λ/D ayrıklıkta 10^{-6}–10^{-7} kontrast (koronograf tipine

ve gözlem koşullarına bağlı olarak) (Jovanovic ve diğ., 2015).

- Keck/NIRC2+AO: *H* bandında, 1" ayrıklıkta $\sim 10^{-5}$ kontrast (Bowler ve diğ., 2015).

Bu limitler, görünür tespitlerin zorluğunu, buna karşın kızılöte bölgede genç dev gezegenlerin görece daha erişilebilir olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla günümüzde doğrudan görüntüleme çalışmaları çoğunlukla kızılöte dalga boylarına odaklanmakta, görünür tespitler ise gelecekteki uzay teleskoplarının hedefi olarak değerlendirilmektedir.

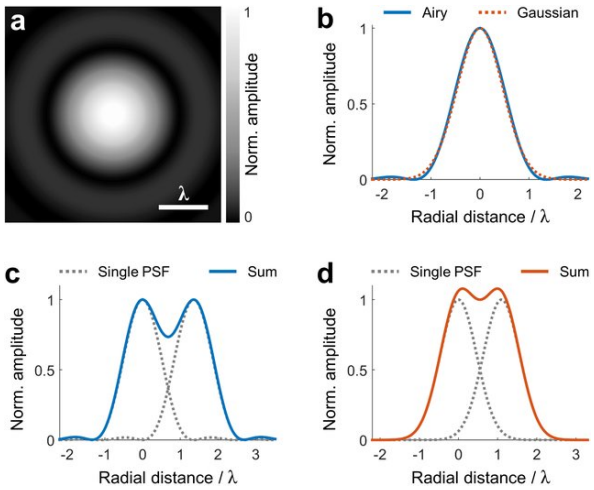
Quanz (2018), doğrudan görüntüleme yönteminin yalnızca genç ve dev gezegenler için değil, gelecekte Dünya benzeri gezegenler için de önemli olacağını belirtmektedir. Büyük ölçekli yer ve uzay teleskopları ile, Güneş benzeri yıldızların yaşanabilir bölgelerindeki kayalık gezegenlerin doğrudan görüntülenmesi ve atmosferlerindeki potansiyel biyoimzaların (O_2, O_3, CH_4 vb.) tespit edilmesi mümkün olabilecektir. Bu durum, doğrudan görüntülemeyi astrobiyoloji açısından stratejik bir konuma getirmektedir.

2.3.1. Nokta Yayılım Fonksiyonu (PSF) ve Açısal Çözünürlük

Teleskop ile gözlemlenen noktasal bir ışık kaynağı, ideal koşullarda bile görüntü düzleminde tek bir noktaya indirgenemez. Optik sistemdeki kırınım etkileri nedeniyle, ışık dalgaları teleskop açıklığı tarafından bükülür ve girişim desenleri oluşturur. Bu desen, merkezi parlak bir çekirdek ve onu çevreleyen halkalardan oluşur (**Şekil 2.28a**) ve *nokta yayılım fonksiyonu* (Point Spread Function, PSF) olarak adlandırılır. Kırınım sınırlı bir sistemde bu yapı Airy halkaları olarak bilinir. Teleskop açıklığı büyüdükçe kırınım etkisi azalır ve PSF daralır; ancak açıklık ne kadar büyük olursa olsun bu etki tamamen ortadan kalkmaz (Perryman, 2018).

Atmosferik türbülans ve optik aberasyonlar, PSF'nin ideal şeklinin bozulmasına ve genişlemesine neden olur. Adaptif optik sistemleri bu etkileri düzeltmeyi amaçlasa da, elde edilen görüntüde yıldız ışığının yayılması kaçınılmazdır. PSF'nin genişliği ve şekli, doğrudan görüntüleme gözlemlerinde parlak yıldızların çevresindeki sönük cisimlerin tespitini zorlaştıran temel faktörlerden biridir.

Kırınım sınırlı bir teleskobun teorik açısal çözünürlük sınırı, iki eşit parlaklıktaki yıldızın ayırt edilebileceği minimum açısal ayrımı tanımlar (**Şekil 2.28c**). Bu sınır Rayleigh kriteri



Şekil 2.28: Nokta yayılım fonksiyonu ve çözünürlük. (a) Odakta toplanmış ışığın oluşturduğu Airy deseni. (b) Airy diskinin kesiti (mavi) ve Gauss yaklaşımı (kırmızı). (c) Rayleigh kriterine göre ayrılmış iki nokta kaynağının toplam profili (mavi). (d) Gauss PSF'lerinin FWHM uzaklığında ayrılmış iki nokta kaynağının toplam profili (kırmızı) (Soliman ve diğ., 2017).

ile şu şekilde ifade edilir:

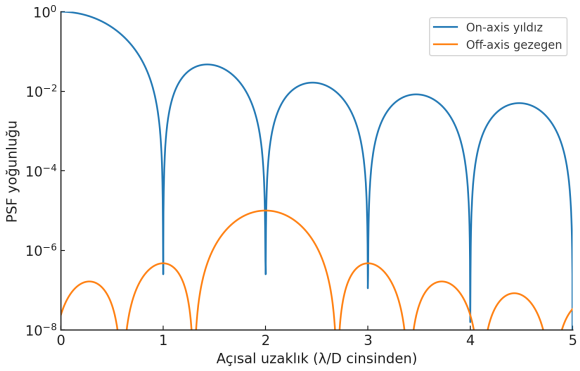
$$\theta_{\text{min}} = 1.22\frac{\lambda}{D} \tag{2.24}$$

Burada θ_{min} radyan cinsinden açısal çözünürlük, λ gözlem yapılan dalga boyu ve D teleskop açıklık çapıdır. Açısal çözünürlük sınırı teleskopun fiziksel parametreleri tarafından belirlenen temel bir limit olup, optik veya sayısal yöntemlerle iyileştirilemez.

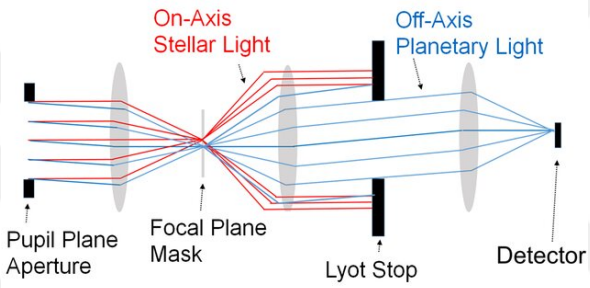
Doğrudan görüntüleme bağlamında, PSF yalnızca açısal çözünürlük sınırını belirlemekle kalmaz, aynı zamanda parlak yıldızların çevresinde sönük kaynakların tespitini güçleştiren bir ışık halosu oluşturur. Bu halo, hem difraksiyon halkalarını hem de optik sistemden ve atmosferden kaynaklanan speckle (benek) yapısını içerir. Küçük açısal ayrımlarda ($\lesssim 1''$) bu halo, gezegen sinyalini büyük ölçüde maskeleyebilir.

2.3.2. Yüksek Kontrastlı Görüntüleme Sistemleri

Yüksek kontrastlı görüntüleme, parlak bir yıldızın ışığını bastırarak çevresindeki çok daha sönük gezegenlerin doğrudan tespit edilmesini amaçlamaktadır. Yıldız, optik sistemin merkezinde konumlandığından (*on-axis*) güçlü bir PSF oluşturur. Buna karşılık gezegen, yıldızdan açısal olarak ayrıldığı için (*off-axis*) görüntü düzleminde merkezde oluşmaz ve çok daha düşük parlaklıktaki bir PSF ile gözlenir. Bu durum **Şekil 2.29** ve **Şekil 2.30**'da



Şekil 2.29: On-axis yıldız ve off-axis gezegen için PSF kesitleri. Yıldızın parlak PSF'si, gezegenin 10^{-5} seviyesindeki sönük sinyalini maskelemektedir. Yüksek kontrastlı görüntüleme sistemleri, bu yıldız ışığını bastırarak gezegenin PSF'sini ortaya çıkarmayı hedefler.



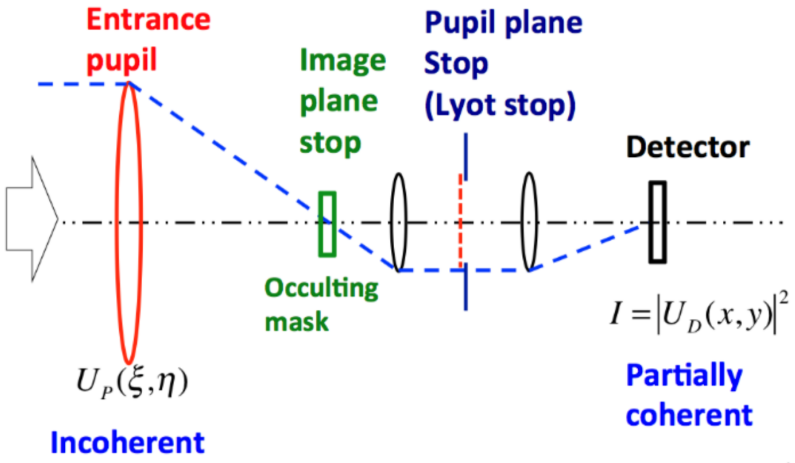
Şekil 2.30: Koronagrafın temel optik yerleşimi. On-axis yıldız ışığı odak düzlemindeki maske tarafından bastırılırken, off-axis gezegen ışığı maske merkezine denk gelmez ve dedektörde gözlenebilir (Itoh ve diğ., 2023).

şematik olarak gösterilmiştir.

Koronagraflar, Lyot durdurucuları ve faz maskeleri, yıldızın merkezdeki yoğun ışığını bastırmak için kullanılır. Atmosferden kaynaklanan dalga cephesi bozulmaları ise adaptif optik sistemleriyle düzeltilir. Bu optik ve sayısal teknikler bir araya geldiğinde, yıldız ışığı büyük ölçüde bastırılarak çevresindeki sönük yoldaşların görünür hale gelmesi sağlanmaktadır.

2.3.2.1. Koronograflar

Koronograflar, parlak yıldızların merkezinden gelen ışığını engelleyerek çevresindeki zayıf ışık kaynaklarının (örneğin ötegezegenler ve diskler) doğrudan görüntülenmesini mümkün kılan optik cihazlardır. Bu teknik, ilk olarak Bernard Lyot tarafından 1930'larda Güneş koronasını gözlemlemek amacıyla geliştirilmiş ve o tarihten beri optik tasarım ve uygulamalarda önemli gelişmeler kaydetmiştir (Lyot, 1939; Oppenheimer ve Hinkley, 2009).

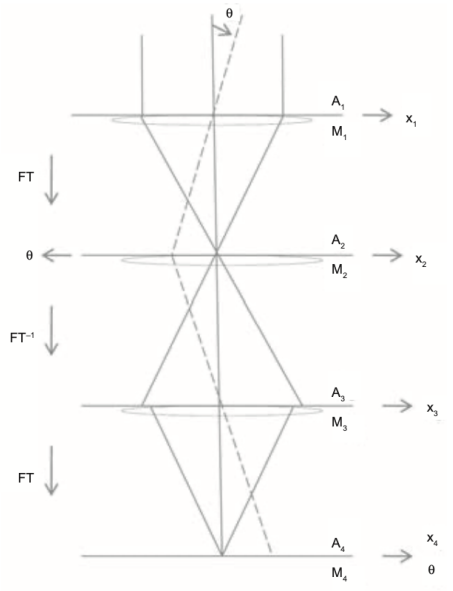


Şekil 2.31: Tipik bir Lyot koronografın optik şeması. Yıldız ve gezegenden gelen ışık sisteme girer ve görüntü düzlemindeki örtücü maske ile yıldızın parlak ışığı engellenir. Daha sonra kollimatör lens sayesinde teleskobun giriş açıklığının optik görüntüsü Lyot durdurucusu üzerine yansıtılır. Lyot durdurucusu, istenmeyen saçılmaları engelleyerek görüntünün kontrastını artırır. Son olarak ışık dedektöre odaklanır (Breckinridge ve diğ., 2018).

Koronografların temel amacı, yıldızdan gelen parlak ışığın teleskop optiklerinde oluşturduğu difraksiyon desenlerini ve saçılmış ışığı bastırarak, yakın çevresindeki sönük kaynakların görünürlüğünü artırmaktır. Temel olarak bir koronograf, odak düzleminde bir genlik veya faz maskesi ve ardından pupil düzleminde bir Lyot stopu kullanır (**Şekil 2.31**). Bu maskeler, yıldız ışığını fiziksel olarak engelleyerek veya faz değişiklikleri yaparak yıldız görüntüsünü azaltır ve yıldızın çevresindeki zayıf sinyalleri açığa çıkarır (Mawet ve diğ., 2012).

Farklı koronograf türleri arasında Lyot koronograf, faz maskesi koronograf, vortex koronograf ve apodize edilmiş pupil koronograf gibi tasarımlar bulunur. Her biri ışığı bastırma ve kontrast artırma konusunda farklı avantajlara sahiptir ve gözlem hedeflerine göre seçilir (Mawet ve diğ., 2012).

Koronograflar, optik sistem içerisindeki konumlarına göre iki ana gruba ayrılır: **image plane** (görüntü düzlemi) koronograflar ve **pupil plane** (pupil düzlemi) koronograflar. Image plane tasarımlarında, yıldız ışığını bastıran ana maske teleskopun odak düzlemine yerleştirilir; klasik Lyot koronograf, vortex koronograf ve çeşitli faz maskeleri bu gruba örnektir. Pupil plane tasarımlarında ise bastırma, teleskop açıklığının optik izdüşümünde (pupil düzlemi) yer alan maskelerle gerçekleştirilir; apodize edilmiş pupil ve shaped pupil koronograflar bu yaklaşıma örnektir. Modern sistemlerde çoğu zaman her iki düzlemde de maske kullanılarak



Şekil 2.32: Bir iç koronograf sisteminde dört optik düzlem: (1) giriş pupil düzlemi, (2) ilk görüntü düzlemi, (3) yeniden görüntülenen pupil düzlemi ve (4) yeniden görüntülenen ikinci görüntü düzlemi. A_i her düzleme ulaşan elektrik alan genliğini, M_i ise o düzlemdeki maskeyi temsil eder. FT ve FT^{-1} sırasıyla Fourier dönüşümü ve ters Fourier dönüşümünü ifade eder. Maske konumuna göre koronografın image plane veya pupil plane kategorisinde olduğu belirlenir(Traub ve Oppenheimer, 2010).

hibrit tasarımlar oluşturulur ve bastırma verimi artırılır.

Şekil **Şekil 2.32**'de bir iç koronograf sistemindeki dört temel optik düzlem gösterilmektedir (Traub ve Oppenheimer, 2010):

Düzlem 1 – Giriş pupil düzlemi: Teleskop açıklığının optik izdüşümüdür. Burada yer alan maske (M_1) ilk pupil stop olarak görev yapar.

Düzlem 2 – İlk odak düzlemi: Gökyüzü görüntüsünün oluştuğu düzlemdir. Konvansiyonel koronograflarda buradaki maske (M_2), yıldız görüntüsünün merkezini kapatan dikdörtgen ya da Gauss biçimli bir örtücü olabilir.

Düzlem 3 – Yeniden görüntülenen pupil düzlemi: Düzlem 2'deki maskeden geçen ışığın oluşturduğu pupil görüntüsüdür. Buradaki Lyot stop (M_3), difraksiyon halkalarının kenarlarını keserek yıldız ışığının sızıntısını azaltır.

Düzlem 4 – Yeniden odaklanmış ikinci görüntü düzlemi: Nihai gözlemin yapıldığı düzlemdir; dedektör burada yer alır ve M_4 dedektörün piksel dizisini temsil eder.

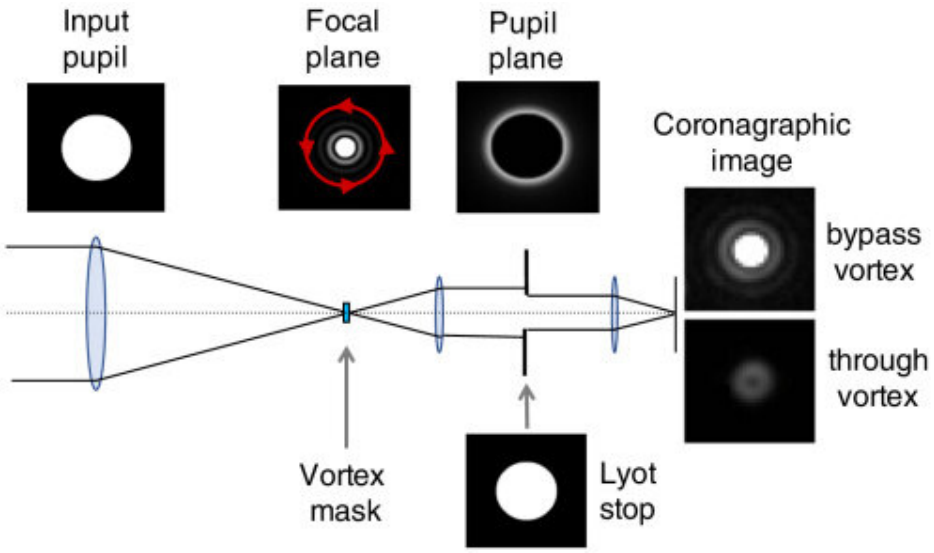
Optik sistemde her düzlemde bir mercek bulunur ve odaklama ilişkileri şu şekildedir: Düzlem 1'deki pupil, Düzlem 3'e yeniden görüntülenir; gökyüzü ise hem Düzlem 2'ye hem Düzlem 4'e odaklanır. Her düzleme gelen elektrik alan genliği A_i ile, o düzlemdeki maskenin çarpımı (M_iA_i) o noktadan sonraki iletilen alanı verir. Fourier dönüşümü (FT) ve ters dönüşüm (FT^{-1}), pupil ve görüntü düzlemleri arasındaki geçişi sağlar. Maskelerin hangi düzlemde yer aldığı, kullanılan koronografın tipini belirler: pupil plane koronografларda maske Düzlem 1 veya 3'te; image plane koronografларda ise Düzlem 2'de bulunur.

Koronografların performansı, bastırabildikleri maksimum kontrast, minimum çalışabilir açısal ayrım (inner working angle, IWA) ve ışık verimliliği (throughput) gibi ölçütlerle değerlendirilir. Bu parametreler, teleskopun optik kalitesi, adaptif optik sistemlerin etkinliği ve kullanılan koronograf tipine bağlı olarak değişir. Adaptif optik sistemlerin entegrasyonu, koronografların etkinliğini önemli ölçüde artırır ve gözlemlerdeki atmosferik ve optik bozulmaları minimize eder (Oppenheimer ve Hinkley, 2009).

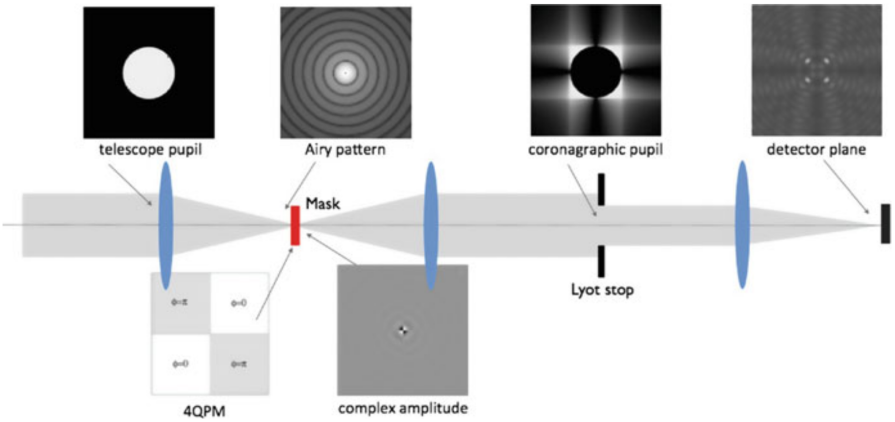
Görüntü Düzlemi Koronografları

Görüntü düzlemi koronografларda, yıldız ışığını bastıran ana optik eleman teleskopun odak düzlemine yerleştirilir (Mawet ve diğ., 2012). Bu düzlemdeki maskeler genlik modülasyonu (örtücü maske) veya faz modülasyonu (faz maskesi) ile çalışabilir. Klasik Lyot koronograf, merkez bölgesini örten genlik maskesi ile tipik bir örnektir (Lyot, 1939). Vortex koronograf ise odak düzleminde spiral faz maskesi kullanarak yıldız ışığını dağıtır ve pupil düzleminde bastırılmasını kolaylaştırır (Mawet ve diğ., 2005).

Faz maskeli koronografлar, örneğin Dört Köşeli Faz Maskesi (FQPM) (Rouan ve diğ., 2000) veya Zernike tabanlı maskeler (Mawet ve diğ., 2010), yıldız ışığının fazını kontrollü biçimde değiştirerek bastırma sağlar. Görüntü düzlemi tasarımlar, küçük iç çalışma açılarında (IWA) yüksek bastırma kapasitesi sunar ve geniş bant performansı özellikle faz maskesi tabanlı sistemlerde oldukça iyidir. Ancak, maskenin yıldız görüntüsüne hassas hizalanması gerekir ve bu sistemler adaptif optik kalitesine ve optik kusurlara oldukça duyarlıdır (Mawet ve diğ., 2012). **Şekil 2.34**'te James Webb Uzay Teleskobu Miri koronografı (JWST-MIRI) koronografının şeması verilmektedir. FQPM maskeler yıldızdan gelen ışığın fazını değiştirerek dalga cephesinde yıkıcı girişim oluşturarak ışığı maskelemektedir.



Şekil 2.33: Vorteks koronagrafın temel optik düzeni. Yıldızdan gelen Airy deseni önce vorteks faz maskesine odaklanır, ardından bir sonraki diyafram düzleminde yıldız ışığını bastırmak için uzamsal filtreleme uygulanır (Serabyn ve diğ., 2019).



Şekil 2.34: James Webb Uzay Teleskobu Miri koronografı (JWST-MIRI) çalışma prensibi. JWST-MIRI Lyot durdurucu ve küçük açısal ayrımlara ulaşabilmeyi sağlayan FQPM maske ile donatılmıştır (Hatzes ve Liseau, 2018).

Görüntü düzlemi prensibini kullanan sistemlerin başında, Avrupa Güney Gözlemevi'nin Çok Büyük Teleskopu'nda (VLT) yer alan SPHERE (Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch) gelmektedir. SPHERE, Apodized Lyot Coronagraph (ALC) tasarımını kullanarak parlak yıldızların çevresindeki ötegezegenleri ve toz disklerini gözlemlemektedir (Beuzit ve diğ., 2019). Gemini South teleskobunda çalışan Gemini Planet Imager (GPI) de benzer şekilde ALC yaklaşımıyla çalışır ve yüksek kontrast gözlemler için gelişmiş adaptif optik sistemleriyle entegre edilmiştir (Macintosh ve diğ., 2014). Subaru teleskobundaki SCExAO (Subaru Coronagraphic Extreme Adaptive Optics) sistemi ise vortex koronograf ve faz maskeli tasarımlar dahil olmak üzere birden fazla görüntü düzlemi maskesiyle çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır (Jovanovic ve diğ., 2015). NASA'nın yaklaşan uzay misyonu Roman Space Telescope'un Hybrid Lyot Coronagraph (HLC) tasarımı da görüntü düzlemi prensibini temel alır ve görünür dalga boylarında Dünya benzeri gezegenleri doğrudan görüntülemeyi hedefler.

Pupil Düzlemi Koronografları

Pupil düzlemi koronograflarda, bastırma maskesi giriş pupilinde veya yeniden görüntülenen pupil düzleminde yer alır (Mawet ve diğ., 2012). Bu yaklaşımda amaç, pupil iletim fonksiyonunu değiştirerek teleskopun nokta yayılım fonksiyonunu (PSF) gezegen konumlarında düşük olacak şekilde tasarlamaktır. Apodized Pupil Coronagraph, pupil boyunca iletimi kademeli olarak azaltarak difraksiyon etkilerini sınırlar (Guyon, 2003). Shaped Pupil Coronagraph ise iletim değerini yalnızca 0 veya 1 olarak tanımlayan, keskin kenarlı açıklık şekilleri kullanır; bu tasarım üretim toleransları açısından avantajlıdır ve Kasdin ve diğ. (2003) tarafından ayrıntılı olarak geliştirilmiştir. Pupil düzlemi tasarımlar, maske hizalama açısından görüntü düzlemi tasarımlarına göre daha esnektir, ancak genellikle daha büyük iç çalışma açılarına sahiptir. Apodize edilmiş maskeler yüksek kontrast sağlayabilse de, üretim hatalarına karşı hassasiyetleri sistem performansını sınırlayabilir.

Güncel örnekler arasında, NASA'nın Roman Space Telescope misyonu yer almaktadır. Roman, Hybrid Lyot Coronagraph (HLC) ile birlikte Shaped Pupil Coronagraph (SPC) tasarımını da taşıyarak hem görüntü düzlemi hem pupil düzlemi prensiplerini aynı platformda test edecektir (Kasdin ve diğ., 2020). SPC, geniş bant genişliklerinde yüksek kontrast sağlamak üzere pupil açıklığının şekillendirilmesiyle tasarlanmıştır ve segmentli

teleskop açıklıklarında da yüksek performans sergileyecek şekilde optimize edilmiştir.

Yer tabanlı sistemlerde pupil düzlemi prensibi genellikle hibrit tasarımlarda karşımıza çıkar. Örneğin SPHERE ve GPI, Apodized Lyot Coronagraph (ALC) kullanmakta olup, pupil apodizasyonu ile görüntü düzlemi maskesini birleştiren bir yaklaşım sergiler. Bu tür hibritler, pupil düzleminin hizalama tolerans avantajlarını görüntü düzleminin küçük IWA kapasitesi ile birleştirerek performans optimizasyonu sağlar.

Hibrit tasarımlara örnek olarak, N'Diaye ve diğ. (2018) tarafından geliştirilen Apodized Pupil Lyot Coronagraph (APLC) varyantı verilebilir. Bu tasarımda, geleneksel opak odak düzlemi maskesi yerine, opak bir nokta ile iki halkasal faz kaydırma bölgesini birleştiren hibrit bir maske kullanılmıştır. Amaç, iç çalışma açısını (IWA) küçültmek ve kontrast performansını artırmaktır. Hibrit odak düzlemi maskeleri kullanan bu yaklaşım, yalnızca mevcut koronograf maskesinin değiştirilmesiyle hem gelecekteki uzay misyonlarında (LUVOIR, HabEx) hem de GPI, SPHERE ve SCExAO gibi mevcut yer tabanlı sistemlerde uygulanabilecek esneklikte tasarlanmıştır. Bu sayede, mevcut optik düzeneklerde büyük bir değişiklik yapılmadan, performans artışı sağlanabilmektedir.

2.3.2.2. Aktif Optik

Teleskop aynaları, büyük açıklıklı optik sistemlerde mekanik dayanıklılığı sağlamak amacıyla geçmişte kalın ve yekpare (rijit) olarak üretilmiştir. Bu tasarım yaklaşımı, aynanın kendi ağırlığı altında şekil değiştirmesini önlese de, yapısal ağırlık nedeniyle pratik olarak yaklaşık 5 m çapında ayna üretiminde sınır oluşturmuştur (Noethe, 2002). ESO'nun 3.58 m açıklığa sahip New Technology Telescope (NTT) ile birlikte, daha ince ve dolayısıyla deforme olabilir birincil aynaların kullanıldığı yeni bir teknoloji geliştirilmiştir (Wilson, 1991). Bu tasarımda, aynanın şekli, teleskop yönünü değiştirdikçe yerçekimi kaynaklı deformasyonları ve termal genleşme etkilerini telafi edecek şekilde, optik yüzeyin arkasına yerleştirilmiş çok sayıda *aktüatör* tarafından kontrol edilmektedir. Aktüatörler, hassas konumlandırma yapabilen motorlu destek elemanlarıdır ve aynayı mikron mertebesinde iterek veya çekerek optik yüzeyin ideal şekline getirilmesini sağlar.

Aktif optik sistemleri, bir *wavefront* (dalga cephesi) sensöründen alınan verilerle kapalı çevrim (closed-loop) olarak çalışır. Bu sensör, teleskopun odak düzleminde elde edilen yıldız görüntüsünden dalga cephesi hatalarını analiz eder ve gerekli düzeltme sinyallerini

hesaplayarak aktüatörlere iletir. Böylece teleskop, gözlem sırasında sürekli olarak kendi optik performansını optimize edebilir (European Southern Observatory, 2025).

Bu teknoloji, ESO Very Large Telescope (VLT) gibi modern büyük teleskoplarda standart hale gelmiştir. VLT'nin dört adet 8.2 m çaplı birincil aynasının her biri, yaklaşık 22 ton ağırlığındadır ve yalnızca 17 cm kalınlığındadır. Bu ince aynaların şeklini koruyabilmek için her birinde yaklaşık 150 adet aktüatör kullanılır. Sistem, yalnızca birincil aynanın şeklini düzeltmekle kalmaz, aynı zamanda ikincil aynanın konumunu da aktif olarak ayarlayarak optik hizalamayı (alignment) en üst düzeye çıkarır. Bu sayede teleskop, farklı yönelimlerde ve değişen çevresel koşullar altında bile sabit optik kalite sağlayabilir (European Southern Observatory, 2025).

Aktif optik, düşük frekanslı (yavaş değişen) optik hataları düzeltmeyi hedefler. Bu yönüyle, atmosferik türbülansın neden olduğu hızlı dalga cephesi bozulmalarını düzelten *adaptif optik* sistemlerinden farklıdır. Adaptif optik, aktif optiğin sağladığı dengeli ve doğru hizalanmış optik yüzeyi temel alarak çalışmaktadır.

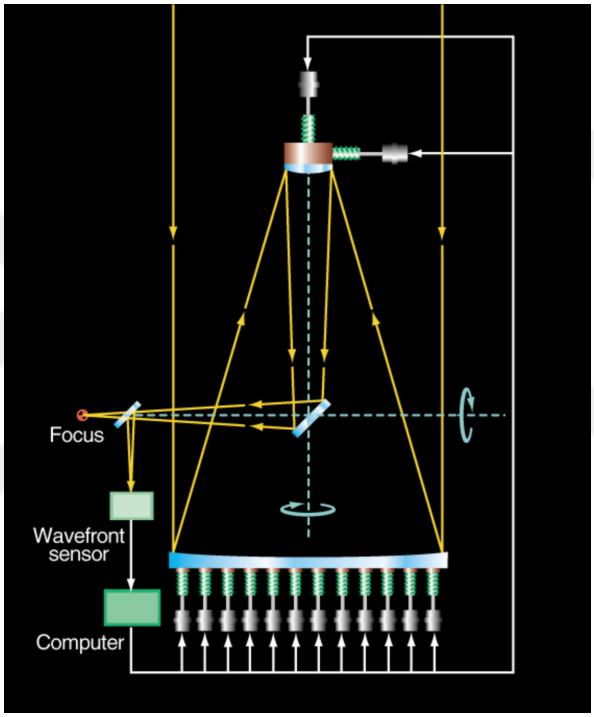
2.3.2.3. Adaptif Optik Sistemleri

Yer tabanlı teleskoplarla yapılan gözlemlerde, atmosferik türbülans ışığın kırılma indisini zamana ve konuma bağlı olarak değiştirir. Bu değişim, yıldız ışığının dalga cephesinde faz ve genlik bozulmalarına yol açarak görüntülerin bulanıklaşmasına neden olur. Adaptif optik (AO) sistemleri, bu hızlı değişimleri gerçek zamanlı olarak düzelterek, elde edilen görüntü kalitesini uzay teleskoplarındaki seviyelere yaklaştırmayı amaçlar (Roddier, 1999).

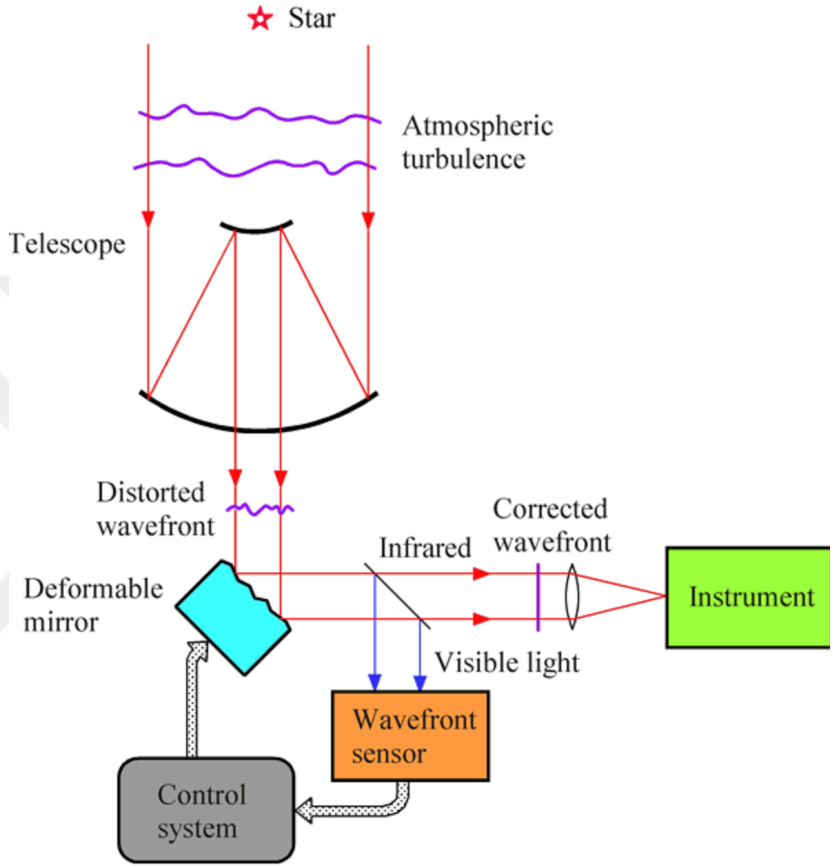
AO sistemleri, temel olarak üç ana bileşenden oluşur: bir dalga cephesi sensörü (WFS), deformasyon yapabilen bir ayna (deformable mirror – DM) ve gerçek zamanlı kontrol birimi. Dalga cephesi sensörü, hedefin veya bir referans kaynağın (rehber yıldız) dalga cephesi hatalarını ölçer. Bu bilgiler kontrol biriminde işlenir ve deformable mirror'a gerekli düzeltmeler gönderilir. Böylece atmosferin neden olduğu bozulmalar milisaniyeler mertebesinde telafi edilir (**Şekil 2.36**)[3] .

AO sistemleri, ölçüm için parlak ve hedefe yakın bir doğal rehber yıldız (Natural Guide Star – NGS) kullanabilir. Ancak gökyüzünde uygun parlaklıkta doğal rehber yıldızların bulunmaması durumunda, lazer rehber yıldız (Laser Guide Star – LGS) teknolojisi devreye

[3] Subaru Teleskop web sayfası: https://subarutelescope.org/en/about/instrument/ao36/index.html



Şekil 2.35: VLT teleskobunun aktif optik sistemi. Bu sistem VLT optiklerinin tam kontrolünü sağlar ve performansını tüm teleskop konumlarında optimize eder. Bu optimizasyon birincil aynanın (8.2m) şeklini değiştirerek ve aynı zamanda ikincil aynanın (1.1m) tepesindeki konumunu değiştirerek elde edilir. Yıldız görüntüsü "wavefront sensörü" tarafından kaydedilir ve analiz edilir; burada ayna desteklerini hareket ettirmek için karşılık gelen düzeltme sinyalleri üretilir. (European Southern Observatory, 2025).



Şekil 2.36: Adaptif optik sistemin şeması. Bir yıldızdan gelen ışık, uzay boşluğunda düzgün (düzgün fazlı) bir dalga cephesi olarak ilerler. Ancak Dünya atmosferine girdiğinde atmosferik türbülans bu dalga cephesini bozar. Bu nedenle, yeryüzündeki bir teleskopla çekilen yıldız görüntüsü, uzaydaki bir teleskopla çekilene kıyasla daha bulanık olur. Teleskop ile gözlem cihazı arasına yerleştirilen bir adaptif optik (AO) sistemi, atmosferik türbülansın neden olduğu bu bulanıklığı telafi edebilir ve net bir görüntü elde edilmesini sağlar. AO'nun sağladığı daha yüksek çözünürlük, hem ince ayrıntıların gözlemlenmesine hem de ışığı daha küçük ve yoğun bir tepeye topladığı için sönük cisimlerin tespitine yardımcı olur.

girer. LGS, teleskopun bulunduğu noktadan üst atmosfere (tipik olarak ∼90 km) güçlü bir lazer ışını gönderilerek oluşturulan yapay bir yıldızdır (Davies ve Kasper, 2012). LGS, dalga cephesi hatalarının büyük bölümünün ölçülmesini sağlasa da, atmosferin en alt tabakalarındaki bozulmalar için ek ölçüm gereklidir. Bu nedenle LGS sistemleri genellikle NGS ile birlikte kullanılır.

Atmosferik türbülansın etkisi, türbülans şiddetine, gözlem dalga boyuna ve hava koşullarına bağlıdır (Roddier, 1981). Modern AO sistemleri, saniyede yüzlerce ila binlerce kez ölçüm ve düzeltme yaparak, optik sistemin teorik çözünürlük sınırına ulaşan, yani teleskoptan elde edilebilecek en ideal görüntü olan kırınım sınırlı (*diffraction-limited*) görüntüyü sağlayabilir.

Yüksek kontrastlı görüntüleme bağlamında, adaptif optik performansı doğrudan koronograf performansını belirler. Dalga cephesindeki küçük hatalar bile, yıldız ışığının tam olarak bastırılamamasına ve görüntü düzleminde *speckle* adı verilen parazit yapıların oluşmasına neden olur. Bu nedenle, modern yüksek kontrastlı sistemlerde (SPHERE, GPI, SCExAO vb.) AO, hem yüksek düzeltme hızına hem de nanometre altı dalga cephesi hata seviyelerine ulaşacak şekilde tasarlanmıştır.

Klasik adaptif optik sistemleri, atmosferik türbülansın neden olduğu bozulmaları büyük ölçüde düzeltebilse de, yüksek kontrastlı doğrudan görüntüleme uygulamalarında istenen hassasiyete her zaman ulaşamaz. Özellikle, yıldızın parlak ışığını bastırarak yakın çevresindeki çok sönük ötegezegenleri tespit edebilmek için dalga cephesi hatalarının nanometre altı seviyelere indirilmesi gerekir. Extreme Adaptive Optics (ExAO) sistemleri, bu hedef doğrultusunda geliştirilmiş, daha yüksek düzeltme kapasitesine sahip AO tasarımlarıdır (Guyon, 2005).

ExAO sistemleri, deformable mirror üzerinde binlerce bağımsız kontrol noktası (aktüatör) ve kilohertz seviyesinde düzeltme hızları ile çalışarak, çok küçük açısal ayrımlarda difraksiyon sınırlı performans sağlar. Yüksek hassasiyetli dalga cephesi sensörleri (örneğin pyramid wavefront sensor), düşük ışık seviyelerinde dahi yüksek sinyal–gürültü oranı ile ölçüm yaparak kontrast performansını artırır. Ayrıca düşük gecikmeli (low-latency) kontrol sistemleri, yıldız ışığından kaynaklanan speckle desenlerinin etkin şekilde bastırılmasına katkı sağlar.

Günümüzde önde gelen ExAO sistemleri arasında SPHERE/VLT, GPI/Gemini South ve

SCExAO/Subaru bulunmaktadır. Bu sistemler, yüksek düzeltme kapasitelerini gelişmiş koronograflarla birleştirerek, 10^{-6}–10^{-7} mertebesinde kontrast değerlerine ve λ/D seviyesinde iç çalışma açılarına ulaşabilmektedir (Beuzit ve diğ., 2019; Macintosh ve diğ., 2014; Jovanovic ve diğ., 2015).

2.3.3. Yüksek Kontrastlı Görüntüleme Metrikleri

Yüksek kontrastlı doğrudan görüntüleme sistemlerinin performansı, yalnızca koronograf tasarımına değil, adaptif optik (AO/ExAO) sistemlerinin kapasitesine, gözlem dalga boyuna, teleskop optik kalitesine ve veri işleme yöntemlerine bağlıdır (Mawet ve diğ., 2012; **?**). Bu sistemlerin başarımını değerlendirmek için aşağıdaki metrikler kullanılır.

Strehl oranı, bir optik sistemin oluşturduğu nokta yayılım fonksiyonunun (PSF) tepe parlaklığının, aynı sistemin ideal (kırınım sınırlı) durumda üreteceği tepe parlaklığa oranı olarak tanımlanır:

$$S = \frac{I_{\text{peak, real}}}{I_{\text{peak, ideal}}}$$

Oranın 1'e yaklaşması, sistemin kırınım limitine daha yakın çalıştığını gösterir. Yüksek Strehl oranı, ışığın büyük bir kısmının PSF merkezinde toplanmasını sağlayarak, halo ve *speckle* kaynaklı saçılmaları azaltır. Bu durum, iç çalışma açısı küçük olan gözlemlerde kontrastı yükseltir; ayrıca koronografın yıldız ışığını bastırma verimini artırır ve fotometrik ile astrometrik ölçümlerin doğruluğunu iyileştirir (Roddier, 1999).

Strehl oranını yükseltmek amacıyla çeşitli teknik yaklaşımlar geliştirilmiştir. Milisaniye mertebesinde çalışan geri beslemeli kontrol sistemleri, atmosferik dalgalanmaların hızlı bileşenlerini düzelterek PSF keskinliğini korur. Şekillendirilebilir aynalardaki (deformable mirror) aktüatör sayısının artırılması, küçük ölçekli faz sapmalarının düzeltilmesini mümkün kılar. Dalga cephesi sensörlerinin çözünürlüğü ve duyarlılığı, düzeltme işleminin başarısını belirleyen önemli unsurlardır. Yeterince parlak ve hedefe yakın doğal rehber yıldızların seçimi, sinyal-gürültü oranını iyileştirir. Doğal rehber yıldız (NGS) ile lazer rehber yıldız (LGS) sistemlerinin birlikte kullanımı, daha geniş gökyüzü kapsaması ve daha kararlı düzeltmeler sağlar. Ayrıca, optik bileşenlerin termal ve mekanik stabilitesinin korunması, uzun süreli gözlemlerde performansın sürdürülebilirliği açısından önemlidir (Guyon, 2005; Davies ve Kasper, 2012).

Güncel sistemlerde Strehl oranları, yakın kızılöte gözlemlerde genellikle %90'ın üzerini hedeflemektedir. Örneğin, SPHERE/VLT sisteminde H bandında Strehl oranı $\sim$0.90–0.94, GPI/Gemini South için $\sim$0.88–0.92 ve SCExAO/Subaru sisteminde $\sim$0.93 düzeyinde değerler elde edilmiştir (Beuzit ve diğ., 2019; Macintosh ve diğ., 2014; Jovanovic ve diğ., 2015).

Kontrast, gezegen ve yıldızın gözlenen parlaklık oranı olarak tanımlanır:

$$C = \frac{F_p}{F_\star}$$

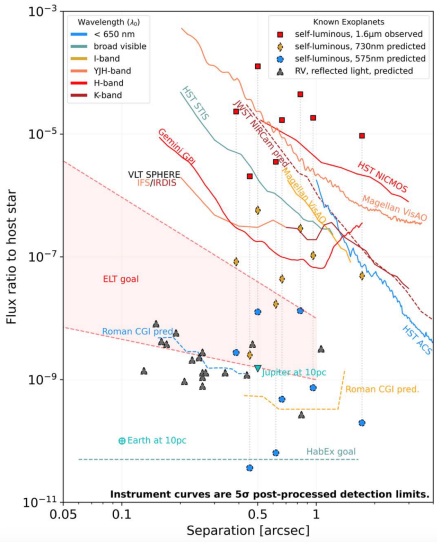
Burada F_p gezegenin, $F_\star$ ise yıldızın gözlenen akısıdır. Kontrast değeri genellikle açısal ayrıklığa (θ) bağlı olarak *kontrast eğrisi* şeklinde verilir. Bu eğri, farklı açısal uzaklıklarda teleskop–aygıt sisteminin ayırt edebileceği en düşük parlaklık oranını gösterir. Yüksek kontrast, yıldız ışığının baskın olduğu bölgelerde gezegen sinyalini ortaya çıkarabilmek için kritik öneme sahiptir ve özellikle küçük iç çalışma açılarına yakın gezegen tespitlerinde belirleyici rol oynar (Traub ve Oppenheimer, 2010).

Farklı yüksek kontrastlı görüntüleme sistemlerinin (SPHERE, GPI, JWST/NIRCam, HST vb.) erişebildiği kontrast sınırları ve bilinen doğrudan görüntülenmiş gezegenlerin konumları, **Şekil 2.37**'de karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.

İç çalışma açısı (IWA), bir koronografın yıldızdan itibaren etkili gözlem yapabildiği en küçük açısal ayrımı ifade eder ve genellikle λ/D cinsinden belirtilir. Küçük IWA, yıldıza yakın yörüngelerde bulunan gezegenlerin tespit edilebilmesi için kritik öneme sahiptir (Mawet ve diğ., 2012). IWA değeri küçüldükçe, sistem yaşanabilir bölgeye yakın gezegenleri gözlemleyebilir ve daha kompakt gezegen sistemlerinin karakterizasyonu mümkün hale gelir. Ancak IWA'nın azaltılması, optik tasarımın karmaşıklığını ve dalga cephesi düzeltme gereksinimlerini artırır.

Literatürde tipik IWA değerleri **Tablo 2.8**'de verilmektedir. Bu değerler, kullanılan koronograf tipine, gözlem dalga boyuna ve teleskop açıklık çapına bağlı olarak değişiklik gösterebilir.

Dış çalışma açısı (OWA), sistemin etkili olarak gözlem yapabildiği en büyük açısal ayrımı tanımlar. Bu sınırın ötesindeki bölgeler, sistemin optik tasarımındaki sınırlamalar veya dedektörün görüş alanı nedeniyle kapsanamaz. OWA değeri, büyük yörüngeli gezegenlerin



Şekil 2.37: Mevcut ve gelecek yüksek kontrastlı görüntüleme (HCI) sistemlerinin 5σ işlenmiş kontrast performansları. Eğriler gözlem dalga boyuna göre renk kodlanmış olup, düz çizgiler sahada ölçülmüş, kesikli çizgiler ise öngörülmüş performansı göstermektedir. Noktalar bilinen doğrudan görüntülenmiş gezegenleri (kırmızı kareler) ve model tahminlerini temsil etmektedir. Grafik, SPHERE/IFS–IRDIS, Gemini GPI, Magellan VisAO, JWST/NIRCam, HST/ACS–NICMOS–STIS gibi mevcut sistemleri; Roman CGI, HabEx ve ELT gibi gelecek görevleri içermektedir (Follette, 2023).

Tablo 2.8: Farklı yüksek kontrastlı görüntüleme sistemleri için tipik iç çalışma açıları (IWA).

Sistem	**IWA**	**Kaynak**
SPHERE/ALC (VLT)	$\sim$1–2 λ/D	Beuzit ve diğ. (2019)
GPI/ALC (Gemini South)	$\sim$2.8 λ/D	Macintosh ve diğ. (2014)
SCExAO vortex (Subaru)	$\sim$0.9–2.0 λ/D	Jovanovic ve diğ. (2015)
Roman CGI/HLC	$\sim$3.0 λ/D	Kasdin ve diğ. (2020)

veya geniş yapılı toz disklerinin gözlemlenebilmesi açısından önemlidir. Ayrıca çok gezegenli sistemlerde, OWA'nın büyük olması, daha dış gezegenlerin tespitini mümkün kılar.

OWA değeri, çoğunlukla sistemin optik tasarımına ve dedektör boyutuna bağlıdır; λ/D cinsinden ifade edilir. Örneğin, SPHERE/IRDIS için OWA yaklaşık 12–15 λ/D (Beuzit ve diğ., 2019), GPI için $\sim$10–12 λ/D (Macintosh ve diğ., 2014), SCExAO vortex sisteminde ise tasarıma bağlı olarak $\sim$15–20 λ/D (Jovanovic ve diğ., 2015) düzeyindedir. Roman CGI/HLC tasarımında OWA, gözlem bandına göre değişmekle birlikte $\sim$32 λ/D (1 μm) seviyesine ulaşabilmektedir (Kasdin ve diğ., 2020).

Verimlilik (Throughput), gezegen ışığının sisteme girişinden dedektöre ulaşmasına kadar geçen süreçte kaybolmayan kısmın yüzdesidir. Koronograf maskeleri, Lyot stop tasarımı, optik eleman sayısı ve kaplama özellikleri verimlilik değerini doğrudan etkiler. Yüksek verimlilik, foton sınırlı gözlemlerde sinyal–gürültü oranını (SNR) artırarak daha kısa entegrasyon sürelerinde hedef sinyalinin tespitini kolaylaştırır. Düşük verimlilik ise özellikle sönük gezegenlerin gözlemlerinde kontrast avantajını azaltabilir.

Verimlilik, kullanılan koronograf tipine ve dalga boyuna bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, SPHERE/IRDIS sisteminde tipik verimlilik 0.60–0.70 (Beuzit ve diğ., 2019), GPI'de 0.40–0.50 (Macintosh ve diğ., 2014), vortex koronograflarda ise 0.80 seviyelerine kadar çıkabilmektedir (Mawet ve diğ., 2012). Roman CGI/HLC tasarımında ise hedeflenen verimlilik, gözlem bandına bağlı olarak 0.40–0.60 aralığındadır (Kasdin ve diğ., 2020).

Bant genişliği (Bandwidth), koronograf ve adaptif optik (AO) sistemlerinin etkili olarak çalıştığı dalga boyu aralığını ifade eder. Geniş bantlı sistemler, hedef gezegenin tayfının çıkarılması, atmosfer bileşiminin belirlenmesi ve çok bantlı fotometri yapılabilmesi açısından avantaj sağlar. Ancak geniş bantlı çalışmak, özellikle faz maskeleri veya apodizasyon gibi dalga boyuna duyarlı optik elemanlarda tasarım gereksinimlerini zorlaştırır ve dalga boyuna bağlı faz hatalarının giderilmesini güçleştirir.

Tipik olarak yüksek kontrastlı görüntüleme sistemleri %10–20 bant genişliği ile çalışır. Örneğin, SPHERE/IFS modülü $\sim$%20'lik bir bant genişliğine sahiptir (Beuzit ve diğ., 2019), GPI'de H-band IFS gözlemleri için bant genişliği $\sim$%18'dir (Macintosh ve diğ., 2014). Roman CGI tasarımında, HLC ve SPC modları için bant genişlikleri sırasıyla %10 ve %15 olarak öngörülmüştür (Kasdin ve diğ., 2020).

Ham ve işlenmiş kontrast arasındaki fark, veri işleme yöntemlerinin performans üzerindeki etkisini gösterir. Ham kontrast (*raw contrast*), gözlem sonrası herhangi bir veri işleme tekniği uygulanmadan elde edilen bastırma seviyesidir. Bu değer, optik tasarım, adaptif optik düzeltme kalitesi ve sistem kararlılığı gibi faktörlerin doğrudan bir göstergesidir. İşlenmiş kontrast (*post-processed contrast*) ise gözlem sonrası gerçekleştirilen algoritmalar —örneğin açısal fark görüntüleme (ADI), spektral fark görüntüleme (SDI), referans yıldız çıkarımı (RDI) — kullanılarak yıldız ışığı kalıntılarının azaltılmasından sonra elde edilen nihai kontrast seviyesidir. Bu teknikler, özellikle *speckle* kaynaklı parazitlerin bastırılmasında önemli rol oynar ve küçük açısal ayrımlarda kontrast hassasiyetini büyük ölçüde artırabilir (Mawet ve diğ., 2012; Amara ve Quanz, 2012; Soummer ve diğ., 2012).

Yıldız ışığı bastırma oranı (raw suppression), post-processing işlemleri uygulanmadan önce, yalnızca adaptif optik ve koronograf sistemlerinin etkisiyle yıldız ışığının ne kadar azaltıldığını gösterir. Bu oran, sistemin doğrudan optik bastırma kapasitesini yansıtır ve genellikle kontrast eğrileriyle birlikte değerlendirilir. Bastırma oranı ne kadar yüksekse, gezegen sinyali parazitler arasında o kadar net ayırt edilebilir hale gelir. Bu metrik, özellikle farklı koronograf tasarımlarının performansını karşılaştırmak ve sistem iyileştirmelerini değerlendirmek için önemlidir (Mawet ve diğ., 2012).

Tip/tilt artık hatası, adaptif optik (AO) veya gelişmiş adaptif optik (ExAO) sistemleri tarafından düzeltilemeyen yönelim (*pointing*) sapmalarını tanımlar. Bu hata, özellikle küçük iç çalışma açılarına (IWA) yakın bölgelerde kontrast üzerinde önemli bir sınırlayıcı etkiye sahiptir. Düşük frekanslı bu sapmalar, genellikle atmosferik türbülansın yavaş bileşenlerinden kaynaklanır ve düzeltilemediklerinde yıldız ışığının tam olarak koronograf maskesine hizalanamamasına neden olur (Guyon, 2005; Traub ve Oppenheimer, 2010).

Dalga cephesi hatası (Wavefront Error – WFE), nanometre cinsinden ifade edilen ve sistemde kalan faz sapmalarını tanımlayan bir metriktir. WFE ile Strehl oranı arasında doğrudan bir ilişki bulunur; düşük WFE, daha yüksek Strehl oranı ve dolayısıyla daha iyi ışık bastırımı sağlar. WFE genellikle toplam RMS hatası olarak rapor edilir. ExAO sistemlerinde hedeflenen değerler genellikle 100 nm RMS altındadır (Macintosh ve diğ., 2014; Jovanovic ve diğ., 2015).

Tespit duyarlılığı (Detection sensitivity), belirli bir açısal ayrımda gözlenebilir en düşük parlaklık farkını (veya gezegen kütlesini) tanımlar. Bu metrik, doğrudan kontrast eğrilerinden

türetilir. Duyarlılığı artırmak, daha sönük ve daha düşük kütleli ötegezegenlerin keşfini mümkün kılar. Ayrıca, bu değer gözlemin dalga boyu, toplam entegrasyon süresi ve kullanılan veri işleme teknikleriyle de ilişkilidir (Oppenheimer ve Hinkley, 2009; Soummer ve diğ., 2012).

Astrometrik doğruluk, tespit edilen nesnelerin gökyüzündeki konumlarının ne kadar hassas ölçülebildiğini gösterir. Bu parametre, özellikle gezegen yörüngelerinin izlenmesi ve kütle tahminlerinin yapılabilmesi için gereklidir. ExAO sistemleri ve yüksek SNR'ye sahip veri işleme teknikleri sayesinde $\lesssim$1 mas düzeyinde doğruluklar mümkündür (Currie ve diğ., 2011; Lagrange ve diğ., 2010).

Fotometrik doğruluk, tespit edilen kaynakların parlaklık ölçümlerinin güvenilirliğini ifade eder. Bu metrik, gezegenin atmosfer bileşimi, faz etkileri ve albed, , o gibi fiziksel özelliklerinin belirlenebilmesi için yüksek hassasiyet gerektirir. Fotometrik hatalar, speckle kalıntıları ve kalibrasyon belirsizliklerinden etkilenebilir (Zurlo ve diğ., 2014; Maire ve diğ., 2016).

Tablo 2.9'da yüksek kontrastlı görüntüleme yapan farklı teleskop/aygıt kombinasyonları için teleskop açıklığı, koronograf türü, gözlem bantları, IFS (Integral Field Spectroscopy) bilgisi ve koronograf sistemlerinin başlıca metrikleri olan IWA, kontrast oranı, verimlilik, Strehl oranı verilmektedir.

Tablo 2.9: Yüksek kontrast görüntüleme sistemleri için teleskop ve aygıt özellikleri.

Teleskop / Aygıt	Açıklık (m)	Koronograf	Gözlem Dalgaboyu	IFS	IWA	Kontrast	Verimlilik	Strehl Oranı	Referans
VLT UT3 SPHERE	8.2	HW-4QPM / APO/ALC	Y, J, H, Ks	SPHERE-IFS (0.95 - 2.32 μm)	2 – 2.6 λ/D (maskeye bağlı)	$\sim 8 \times 10^{-5}$ @ 0".5 (H23)	> %20	% 90 (H)	Beuzit ve diğ. (2019)
Gemini South GPI	8.1	APLC	Y, J, H, K	GPI-IFS (1.0–2.5 μm)	2.8 λ/D	10^{-6} @ 0".75 (H); 10^{-5} @ 0".35 (H)	%19.5 (non - koronografik mod)	0.89 (H)	Macintosh ve diğ. (2014)
Subaru SCExAO	8.2	PIAA / Vortex	y, J, H	CHARIS (0.85–2.5 μm)	1.5 / 2 λ/D (PIAA / Vortex)	10^{-5} @ 1.5 λ/D	% 52.5 (H - band, koronografik mod)	%30 - 40 (H)	Jovanovic ve diğ. (2015)
Keck II KPIC	10.0	Vortex	y, J, H, K, L	—	0.5 - 2.0 λ/D	1.3×10^{-5} @ 90 mas	% 3 (K-band, tüm optik yol)	% 55 (K)	Jovanovic ve diğ. (2025)
LBT SHARK-NIR	2×8.4	Lyot / Pupil / 4QPM	Y, J, H	—	0.04" (H, 4qpm)	10^{-4} - 10^{-5} @ IWA	%95 (@ IWA)	> % 80 (H)	Esposito ve diğ. (2013); Vega-Pallauta (2024)
VLT UT4 ERIS / NIX	8.2	Vortex	L, M	SPIFFIER (1.0–2.5 μm)	~ 1 λ/D	$\sim 10^{-4}$ @ 2 λ/D	62% (L), 51% (@ IWA)	%95 (L)	Orban de Xivry ve diğ. (2024)
JWST MIRI	6.5	4QPM / Lyot	10 - 23 μm	NIRSpec / MRS (0.6 - 5.3 / 4.9 - 27.9 μm)	0".33 (4QPM, 10 μm)	10^{-5} - 10^{-6}	$\approx$ 62% (@ IWA)	> %90	Boccaletti ve diğ. (2022)
Palomar Hale Project 1640	5.1	APLC	J, H	P1640 IFS (1.06 - 1.78 μm)	~ 2.7 λ/D	$\sim 2 \times 10^{-5}$ @ 1" (H)	%80 (@ Lyot Stop)	$\sim$ %90 (80 - 90 nm)	Hinkley ve diğ. (2011)
DAG PLACID	4.0	Active SLM FPM	H, Ks	—	2 λ/D (H)	5.3×10^{-4} @ 5 λ/D (H)	> %22	%85 (H)	Kühn ve diğ. (2024); Tandon ve diğ. (2024)

2.3.4. Görüntü İşleme Teknikleri

Doğrudan görüntüleme gözlemlerinde, yıldızın parlak ışığı teleskop optikleri ve atmosferik türbülans nedeniyle saçılarak, görüntü düzleminde speckle (benek) adı verilen parazit yapılar oluşturur. Bu speckle desenleri, yıldız çevresinde düşük parlaklıktaki gezegen sinyalini maskeleyebilir. Yüksek kontrastlı görüntüleme sistemleri (koronograf, adaptif optik vb.) yıldız ışığını gözlem sırasında bastırsa da, çoğu durumda bu bastırma gezegenin tespit edilebilmesi için yeterli değildir. Bu nedenle gözlem sonrası veri işleme teknikleri kullanılarak speckle'ların ek olarak azaltılması gerekir (Lafrenière ve diğ., 2007; Soummer ve diğ., 2012).

Bu teknikler, genellikle yıldızın nokta dağılım fonksiyonunun (PSF) modellenmesi ve çıkarılması prensibine dayanır. Farklı gözlemsel stratejiler ve veri işleme algoritmaları, speckle desenlerinin zaman, dalga boyu veya uzaysal özelliklerinden yararlanarak yıldız ışığını daha etkin biçimde bastırmayı hedefler. Bu bölümde yaygın olarak kullanılan başlıca yöntemler verilmektedir.

2.3.4.1. PSF Modelleme ve Çıkarma

Nokta dağılım fonksiyonu (Point Spread Function, PSF), ideal koşullarda bir nokta kaynağın görüntü düzleminde oluşturduğu ışık dağılımını ifade eder. Teleskop optikleri, kırınım etkileri ve atmosferik türbülans gibi faktörler nedeniyle PSF, merkezi parlak çekirdek ve onu çevreleyen halkalar ile karmaşık speckle desenlerinden oluşur (Perryman, 2018). Doğrudan görüntüleme gözlemlerinde, bu yapı yıldızdan gelen ışığın büyük kısmını temsil eder ve düşük parlaklıktaki gezegen sinyallerinin üzerine binerek kontrastı sınırlar.

PSF modelleme, yıldızdan gelen bu hakim ışık dağılımının olabildiğince doğru bir şekilde tahmin edilmesi ve gözlem verisinden çıkarılması sürecidir. Başarılı bir PSF modellemesi, speckle desenlerinin önemli ölçüde bastırılmasını ve böylece gezegen sinyalinin daha belirgin hale gelmesini sağlar. Bu işlem, özellikle yıldızın yakın çevresinde yüksek kontrastın kritik olduğu durumlarda tespit hassasiyetini artırır (**?**).

PSF modelleme yöntemleri genel olarak, gözlemlerden elde edilen referans verilerin hedef görüntü ile karşılaştırılması ve uygun matematiksel tekniklerle en iyi eşleşmenin

bulunmasına dayanır. Referans veriler, aynı optik sistem altında ve benzer koşullarda alınmış görüntülerden sağlanır. Bu görüntüler, hedefteki gezegen sinyalinin karışmasını önleyecek şekilde seçilir veya işlenir.

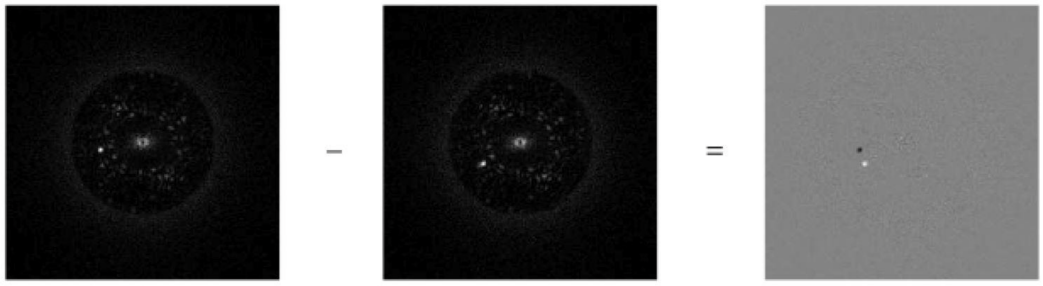
Modern yüksek kontrastlı görüntülemede, PSF modellemesinde yaygın olarak kullanılan algoritmalar arasında LOCI ve PCA/KLIP öne çıkar. LOCI (Locally Optimized Combination of Images), görüntü düzlemini küçük bölgelere ayırarak her bölge için en uygun referans kombinasyonunu en küçük kareler yöntemiyle belirler (Lafrenière ve diğ., 2007). Bu teknik, speckle bastırmada oldukça etkilidir ancak agresif ayarlarda hedef sinyalinin bir kısmının da çıkarılmasına yol açabilir. PCA/KLIP (Karhunen–Loève Image Projection) ise geniş bir referans veri kümesinden temel bileşenleri çıkarır ve hedef görüntüyü bu bileşenler üzerine projelendirerek PSF'yi yeniden oluşturur (Soummer ve diğ., 2012). LOCI'ye kıyasla daha küresel bir yaklaşım sunan PCA/KLIP, parametre seçiminde daha az hassasiyet gerektirir ve büyük veri setlerinde daha kararlı sonuçlar verebilir.

PSF modelleme ve çıkarma, yüksek kontrastlı doğrudan görüntülemenin temel veri işleme adımlarından biridir. Bu süreç, tek başına kullanılabileceği gibi, farklı gözlemsel stratejilerle birleştirildiğinde etkinliği daha da artar.

2.3.4.2. Açısal Diferansiyel Görüntüleme (Angular Differential Imaging - ADI)

Açısal diferansiyel görüntüleme (ADI), yıldızın parlak ışığından kaynaklanan speckle desenlerinin bastırılması amacıyla geliştirilen güçlü bir veri işleme tekniğidir (Marois ve diğ., 2006). Yer tabanlı gözlemlerde, alt-azimutal montajlı teleskoplarda sabit optik yönelim korunarak gece boyunca alanın gökyüzü rotasyonu gerçekleştirmesine izin verilir. Böylece, teleskopun sabit optik sistemi nedeniyle atmosferik ve optik kökenli speckle desenleri görüntü düzleminde sabit kalırken, yıldıza yakın yörüngelerdeki gezegen sinyali zamanla açısal olarak hareket eder. Bu farklılık, iki veya daha fazla anda alınan görüntüler arasında uygun çıkarım işlemleri uygulanarak speckle'ların bastırılması ve gezegen sinyalinin ortaya çıkarılması için kullanılır. **Şekil 2.38**'de bu sürece ait örnek bir gözlem gösterilmektedir.

ADI, speckle desenlerinin zamansal olarak sabit, gezegen sinyalinin ise dönüyor olması varsayımına dayanır. Bu teknikle yıldız ışığı büyük ölçüde bastırılabilir; geriye yalnızca gezegen sinyali ve rastgele gürültü kalır. Ancak atmosferik speckle'lar gibi kısa süreli ve



Şekil 2.38: Açısal diferansiyel görüntüleme örneği. İki farklı zamana ait gezegene ve kalan gürültüye karşılık gelen 2 pik noktası (biri negatif diğeri pozitif) sağdaki görüntüde verilmiştir (Cornia ve diğ., 2010).

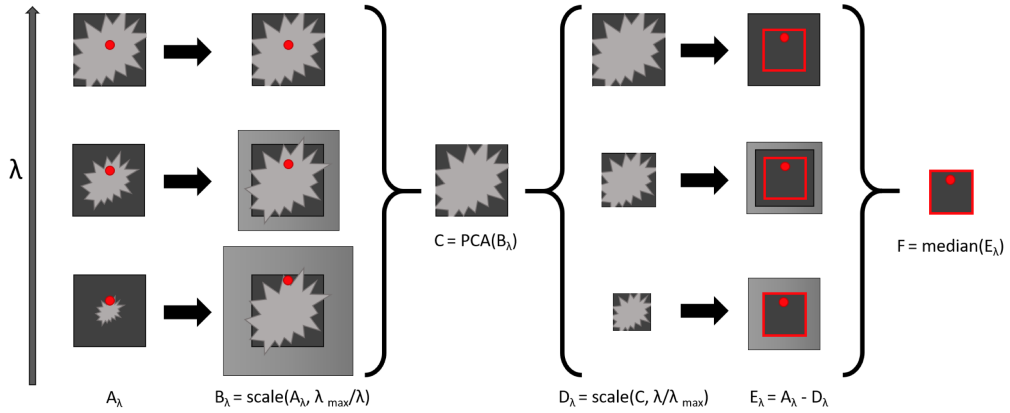
düşük uzamsal frekanslı yapılar ADI ile etkin şekilde bastırılamayabilir; bu sınırlama bazı durumlarda tespit duyarlılığını azaltabilir (Cornia ve diğ., 2010).

ADI gözlemleri genellikle bir dizi ardışık pozdan oluşur. Bu görüntüler hizalanır, merkez etrafında döndürülür ve ardından yıldız PSF'sinin modellenmesi ve çıkarılması amacıyla LOCI (Lafrenière ve diğ., 2007) veya KLIP (Soummer ve diğ., 2012) gibi algoritmalarla işlenir. ADI, küçük iç çalışma açılarına sahip sistemlerde speckle bastırma performansıyla yüksek kontrast elde edilmesini sağlar ve doğrudan görüntülemenin temel veri işleme tekniklerinden biridir.

2.3.4.3. Tayfsal Diferansiyel Görüntüleme (Spectral Differential Imaging - SDI)

Spektral diferansiyel görüntüleme ilk olarak Smith (1987) tarafından atmosferik benekleri (speckles) elimine etmek için önerilmiştir. Bu yöntemde iki görüntü aynı anda farklı dalgaboylarında kaydedilir ve teorik olarak özdeş benek deseni görüntüden daha sonra çıkarılabilir. Bu işlem sırasında yoldaş cismin de çıkarılmasını önlemek için gezegenin sönük ve parlak olduğu 2 moleküler band seçilir. Benekler ve yıldız PSFsi her iki görüntüde aynı yerde olacağı için görüntüden temizlenirken gezegenin sinyali çıkarma işleminden sonra kısmen korunacaktır (Rameau ve diğ., 2015).

SDI'nin en önemli avantajı, speckle desenlerinin farklı dalga boylarında neredeyse aynı yapıda kalmasıdır. Bu sayede teorik olarak, speckle'lar görüntüden etkili bir şekilde çıkarılabilir. Ancak bu işlem sırasında, gezegen sinyalinin de çıkarılmaması için dikkatli bant seçimi yapılmalıdır; aksi halde yoldaş cisim sinyali de fark görüntüsünde silinebilir (**Şekil 2.39**).



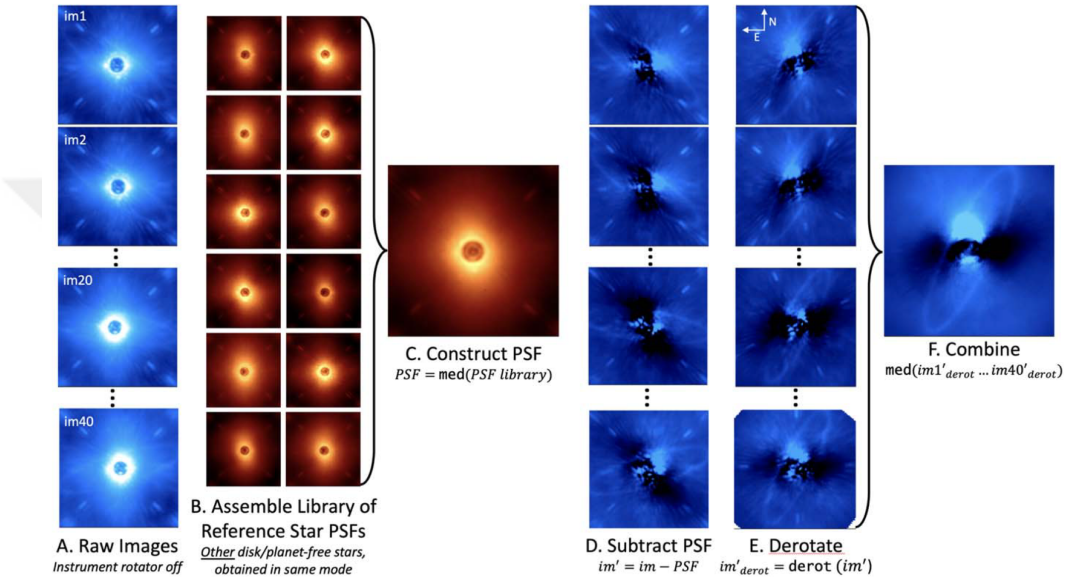
Şekil 2.39: Farklı dalga boylarında alınan görüntülerde yıldızın PSF boyutu değiştiğinden, tüm kareler aynı ölçeğe getirilerek yıldız ve speckle desenleri sabitlenir. Bu ölçekleme sırasında gezegen görüntüde radyal olarak kayar. Kayma sayesinde gezegen içermeyen bir yıldız PSF modeli oluşturulur ve her kareden çıkarılır. Görüntüler orijinal ölçeğe döndürüldüğünde gezegen konumunda belirginleşir (Kiefer ve diğ., 2021).

SDI yöntemi, entegre alan tayfölçerler (IFS) veya çift/dörtlü dar bant filtre sistemleri kullanılarak gerçekleştirilir. Özellikle metan (CH_4) absorpsiyonuna sahip soğuk gaz devlerinin tespiti için etkilidir ve ADI ile birlikte uygulandığında bastırma verimini artırır. Ancak atmosferik tayfsal değişimler ve optik yoldaki kırınımlar (dispersiyonlar), SDI verimliliğini sınırlayabilir.

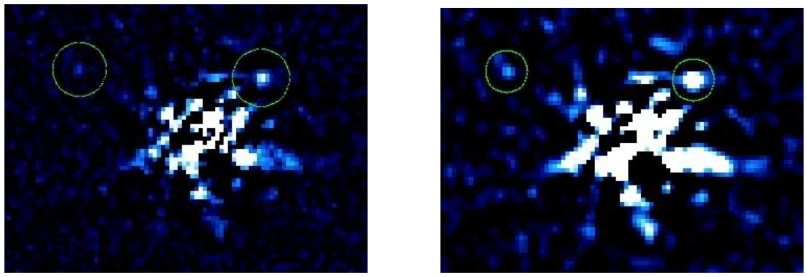
2.3.4.4. Referans Diferansiyel Görüntüleme (Reference Differential Imaging - RDI)

Referans diferansiyel görüntüleme (RDI), gözlem yapılan hedef yıldızın değil, başka yıldızların görüntülerini kullanarak hedef görüntüsünden yıldız ışığını çıkarmaya dayalı bir veri işleme tekniğidir. Bu yöntemde, hedef yıldızla benzer gözlem koşullarında alınmış referans yıldızların PSF'lerinden oluşan bir kütüphane oluşturulur. Hedefin gözlemi sırasında elde edilen görüntü, bu referans PSF'lerle karşılaştırılarak yıldız ışığı modele en iyi uyan referanslarla bastırılır. RDI'nin şematik gösterimi **Şekil 2.40**'ta verilmiştir.

RDI yöntemi özellikle iki durumda tercih edilir: (1) sistemin PSF'si oldukça kararlıysa —ki bu genellikle atmosferden etkilenmeyen uzay-teleskoplarında (örneğin HST) sağlanır; (2) hedef kaynak geniş ve simetrik yapılara sahipse —örneğin yıldız çevresindeki toz diskleri gibi. ADI gibi hedefin kendi görüntülerine dayalı agresif algoritmalar bu simetrik yapıları bastırabileceği için, RDI bu tür yapılar için daha koruyucu ve güvenilir bir alternatiftir.



Şekil 2.40: Reference Differential Imaging (RDI) sürecinin şematik gösterimi. Bu örnekte, Gemini Planet Imager (GPI) ile H-bandında gözlemlenen enkaz diski barındıran HR 4796A sistemine ait yaklaşık 40 dalga boyu kanalındaki veriler kullanılmıştır. (B) Aşamasında, hedef dışındaki yıldızlara ait, aynı gözlem modunda elde edilmiş referans görüntülerden oluşan bir kütüphane oluşturulmuştur. Bu yıldızlar, bilinen bir gezegen veya disk içermeyen sistemler olarak seçilmiştir. (C) Aşamasında, bu referans görüntüler ya basitçe (örneğin medyan ile) birleştirilerek tek bir ortalama PSF oluşturulmuş ya da her hedef görüntü için özel bir PSF modeli üretilmiştir. (D) Aşamasında, tahmin edilen PSF hedef görüntüden çıkarılarak yıldız ışığı bastırılmıştır. (E) Görüntüler, teleskop döndürücüsü kapalıyken alındığı için gökyüzündeki gerçek yönelimlerine hizalanmıştır. (F) Son olarak tüm hizalanmış görüntüler birleştirilerek nihai işlenmiş görüntü elde edilmiştir (Follette, 2023).

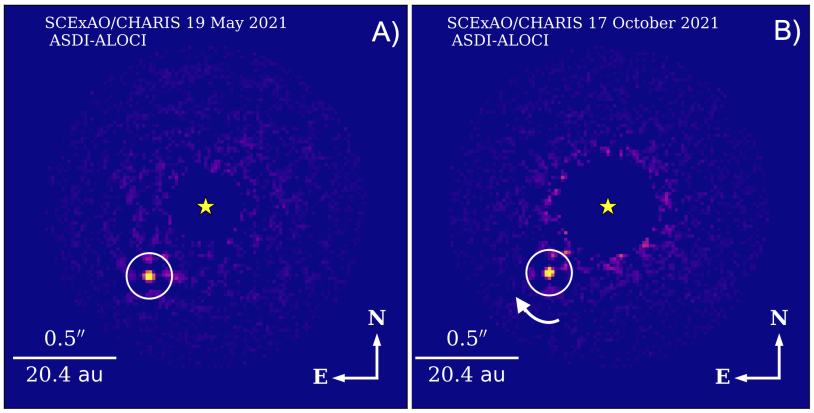


Şekil 2.41: MMT/Clio ile 3.3 μm'de alınan görüntü. (Sol panel) HR 8799c'nin tespitini daha net göstermek amacıyla geniş dinamik aralıkla sunulan görüntü. (Sağ panel) HR 8799b'nin marjinal tespitini daha iyi göstermek için daha dar dinamik aralıkla sunulan görüntü (Currie ve diğ., 2011).

Başarılı bir RDI işlemi için uygun referans yıldızların seçilmesi büyük önem taşır. Bu yıldızların: gökyüzündeki konumunun hedefe yakın olması (benzer hava kütlesi, benzer atmosferik koşullar), gözlem dalga boyunda benzer parlaklığa sahip olması (AO sistemlerinin benzer performans göstermesi için), benzer tayf tipine ve renge sahip olması (PSF yapılarının benzeşmesi için) gibi kriterleri sağlaması gerekir. Modern yüksek kontrast görüntüleme sistemleri, bu tür gözlemler için özel modlar da geliştirmiştir. Örneğin SPHERE ve MagAO-X gibi sistemlerde kullanılan "star-hopping" modları sayesinde, AO düzeltmesi bir hedef üzerinde geçici olarak durdurulup, teleskop hızlıca yakındaki bir referans yıldıza çevrilerek tekrar AO döngüsü başlatılabilir. Bu sayede her iki hedef için optik sistem aynı kararlılıkla çalışır ve PSF benzerliği en üst düzeye çıkarılır. RDI yöntemi, ADI ve SDI'ya kıyasla daha kısa gözlem sürelerinde uygulanabilir ve gezegen sinyalinin açısal veya tayfsal olarak değişmediği durumlarda da etkilidir. Ayrıca, agresif bastırma tekniklerinin neden olduğu sinyal kayıplarını en aza indirerek, yüksek fotometrik ve astrometrik doğruluk sunar. Bu yönüyle, özellikle geniş yapılar (diskler) ya da durağan gezegen sistemleri için önemli bir alternatif oluşturur (Follette, 2023).

Yüksek kontrast görüntüleme teknikleriyle (ADI, SDI, RDI, KLIP) işlenen görüntüler farklı dinamik aralıkları kullanılarak ölçeklendirilebilir. Bu, bilimsel ölçümleri değiştirmez ama hangi cismin daha belirgin görüleceğini etkilemektedir. **Şekil 2.41**'de HR 8799 sisteminin 3.3 μm'deki MMT/Clio görüntüsü verilmektedir (Currie ve diğ., 2011). Aynı gözlem verisi iki farklı dinamik aralıkta gösterilmiştir. Geniş dinamik aralıkta parlak gezegenler netleşirken, dar dinamik aralık ile daha sönük gezegenler daha belirgin hale gelmektedir.

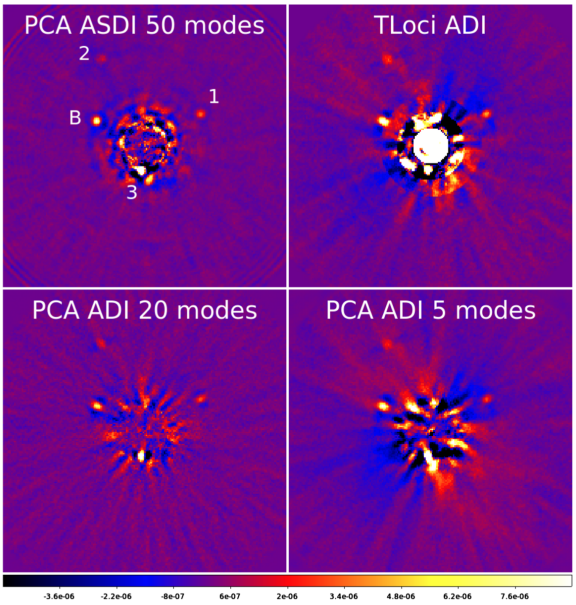
HIP 99770 sistemi, Subaru/SCExAO ve CHARIS ile yapılan çok bantlı gözlemler ile (1.16–2.37 μm) doğrudan görüntülenmiştir. 19 Mayıs ve 17 Ekim 2021 tarihlerinde elde



Şekil 2.42: HIP 99770 b, SCExAO/CHARIS ile iki farklı tarihte (19 Mayıs 2021 ve 17 Ekim 2021) doğrudan görüntülenmiştir. Yıldızın halo ışığını bastırmak için uyarlanabilir yerel görüntü kombinasyonu algoritması (ALOCI), açısal diferansiyel görüntüleme (ADI) ve spektral diferansiyel görüntüleme (SDI) yöntemleri birlikte (ASDI) kullanılmıştır. İşlenmiş görüntülerde gezegen, beyaz daire ile; B panelinde yörüngesel hareket yönü beyaz ok ile; yıldızın konumu ise yıldız simgesi ile gösterilmektedir (Currie ve diğ., 2023b).

edilen en kaliteli veri setlerinde, yıldızın halo ışığını bastırmak amacıyla uyarlanabilir yerel görüntü kombinasyonu algoritması (ALOCI - Adaptive, Locally- Optimized Combination of Images algorithm) ile açısal diferansiyel görüntüleme (ADI) ve spektral diferansiyel görüntüleme (SDI) yöntemleri bir arada (ASDI) uygulanmıştır (**Şekil 2.42**). Bu gelişmiş PSF çıkarma işlemleri sonucunda, yıldızın güneydoğusunda yaklaşık 0".43–0".44 uzaklıkta bulunan sönük kaynak (HIP 99770 b) net biçimde ortaya çıkarılmıştır. İşlenmiş görüntülerde gezegen, beyaz daire ile; B panelinde yörüngesel hareket yönü beyaz ok ile; yıldızın konumu ise yıldız simgesi ile gösterilmektedir (Currie ve diğ., 2023b).

Şekil 2.43'te, HD 206893 B cisminin farklı veri işleme yöntemleri (ADI, ASDI ve LOCI) ile işlenmiş IFS görüntülerinin karşılaştırması gösterilmektedir (Galicher ve diğ., 2018). Tüm görüntülere hem aletsel verimlilik (koronagraf geçirgenliği) hem de algoritmasal verimlilik düzeltmeleri uygulanmıştır. Algoritmasal düzeltmeler, sahte gezegen (fake planet) yöntemiyle yapılmaktadır (Lafrenière ve diğ., 2007). Ham verilere üç adet sahte gezegen eklenmiş, işleme algoritmaları sonrasında bu kaynakların sinyal kayıpları ölçülmüş ve gerçek veriler bu kayıp oranları kullanılarak düzeltilmiştir. Bu sayede, görüntü işleme kaynaklı gezegen ışık kaybı etkisi telafi edilerek gezegen fotometrisinin gerçeğe en yakın şekilde korunması sağlanmıştır.



Şekil 2.43: HD 206893 B cisminin farklı veri işleme yöntemleri (PCA/ASDI, PCA/ADI, TLOCI/ADI) ile elde edilmiş görüntüleri. Görüntülere hem aletsal verimlilik (koronagraf geçirgenliği) hem de algoritmasal verimlilik düzeltmeleri uygulanmıştır (Galicher ve diğ., 2018).

2.4. DOĞU ANADOLU GÖZLEMEVİ (DAG) TELESKOBU

Doğu Anadolu Gözlemevi (DAG), Türkiye'nin en büyük ve en gelişmiş optik-kızılötesi teleskop projesi olarak 3170 m yükseklikteki Karakaya Tepesi'nde konumlanmıştır. 4 metre çapındaki Ritchey–Chrétien tipi teleskop, hem optik hem de yakın-kızılötesi bantta gözlemler yapabilecek şekilde tasarlanmış olup iki Nasmyth odak düzlemine sahiptir. DAG teleskobu, atmosferik türbülansın az olduğu yüksek rakımı sayesinde yüksek çözünürlüklü gözlemler için benzersiz bir konum avantajına sahiptir (Yeşilyaprak ve Keskin, 2020).

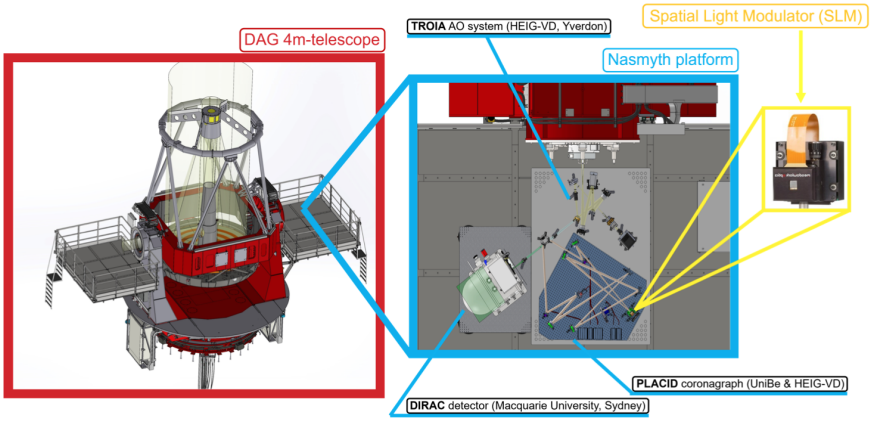
Teleskobun optik sistemi üç aynadan oluşur: 4 m çapında birincil ayna, konveks sekonder ayna ve düz katlanma aynası. Bu yapı, teleskobun iki farklı odakta eş zamanlı çalışmasını sağlar (**Şekil 2.44**). .

DAG gözlemevi, yalnızca teleskoptan ibaret olmayıp optik bileşenler, bilimsel aygıtlar ve ileri düzey adaptif optik (AO) sistemleriyle entegre bir altyapıya sahiptir. Nasmyth platformlarından birinde yer alan TROIA (TuRkish adaptive Optics system for Infrared Astronomy), DAG'ın yakın-kızılötesi gözlemleri için özel olarak geliştirilmiş bir extreme-AO sistemidir. Bu sistem, 468 aktüatöre sahip bir deformable mirror, piramit dalga önü sensörü (P-WFS) ve bir EMCCD kamera içerir (Tandon ve diğ., 2024; **?**). **Şekil 2.45**'te



Şekil 2.44: DAG teleskobunun montaj aşaması (ATASAM).

Nasmyth platformundaki bileşenlerin şematik yerleşimi verilmektedir.

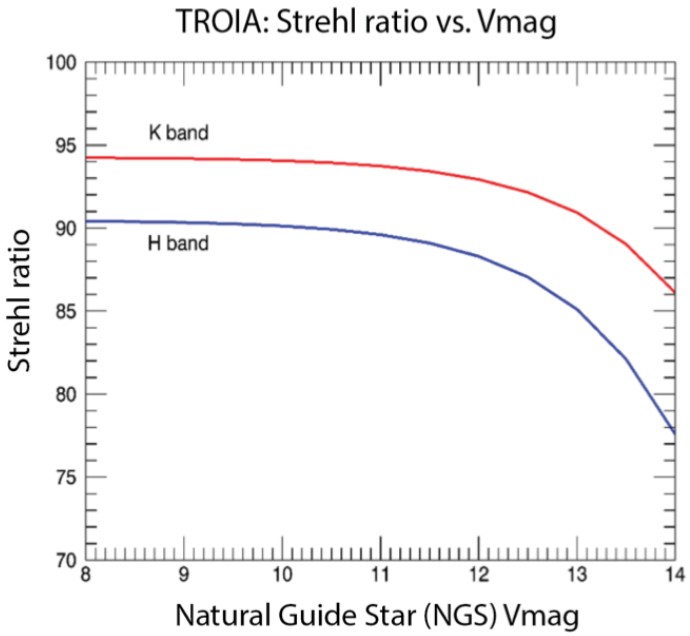


Şekil 2.45: DAG Nasmyth platformundaki bileşenlerin şematik yerleşimi (Tandon ve diğ., 2024).

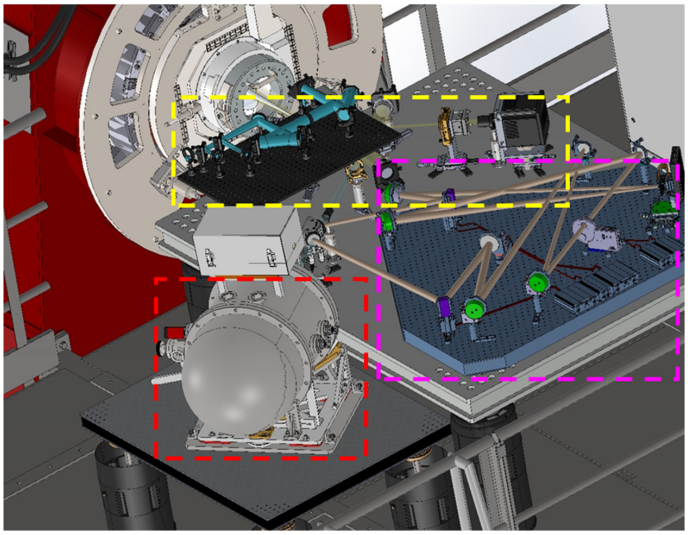
AO düzeltmesinden sonra TROIA sistemi, H-bandında %90'a, K-bandında %95'e varan Strehl oranları sunabilmektedir (**Şekil 2.46**).

TROIA'dan gelen düzeltilmiş ışık, DAG'ın en yenilikçi bileşeni olan PLACID sistemine yönlendirilir. PLACID (Programmable Liquid-crystal Active Coronagraphic Imager for the DAG Telescope), dünyadaki ilk aktif ve yazılım kontrollü faz maskeli koronagraf sistemidir (Kühn ve diğ., 2021).

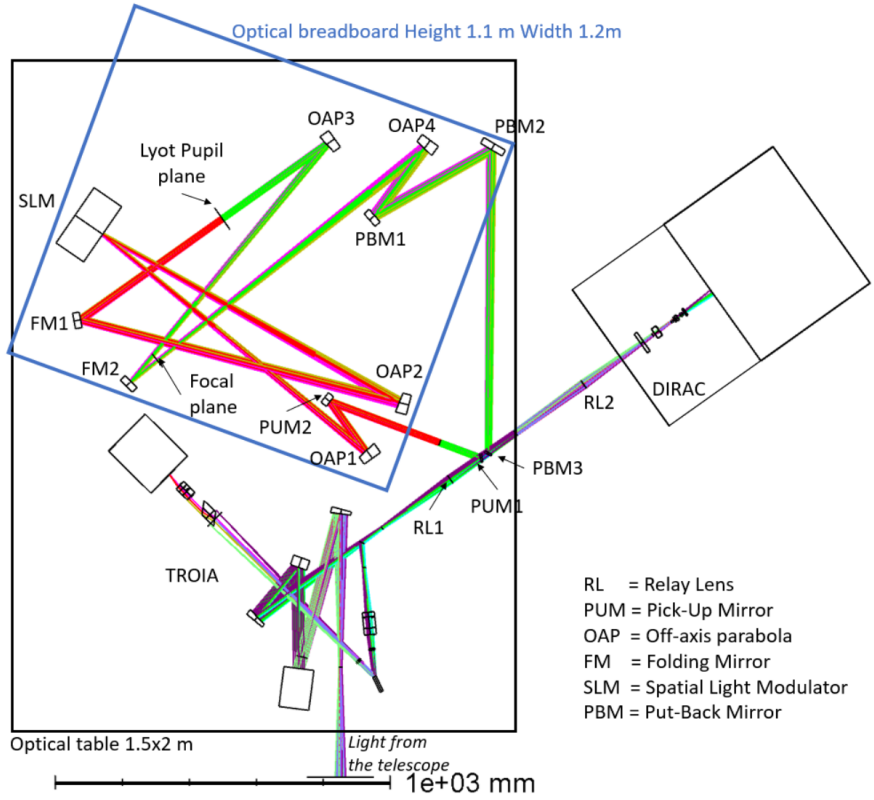
PLACID sisteminin fiziksel yerleşimi, DAG Nasmyth platformundaki diğer bileşenlerle birlikte **Şekil 2.47**'de gösterilmektedir (Kühn ve diğ., 2024).



Şekil 2.46: TROIA AO sisteminin H ve K bandındaki Strehl oranı performansı (Tandon ve diğ., 2024).



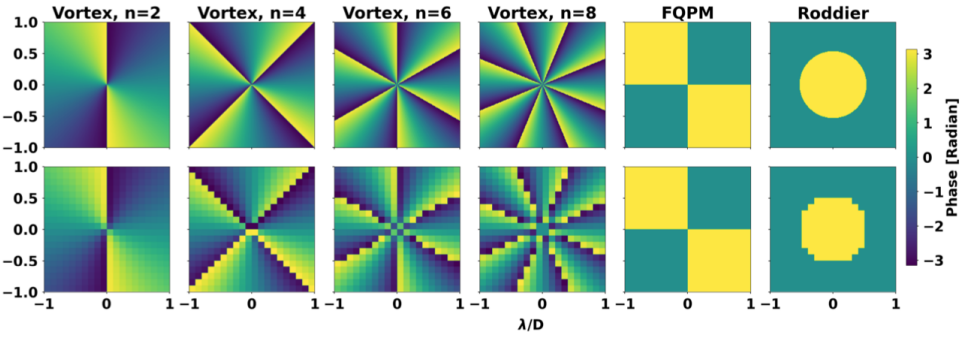
Şekil 2.47: PLACID, TROIA ve DIRAC'ın Nasmyth platformundaki yerleşimi (Kühn ve diğ., 2024) .



Şekil 2.48: PLACID'in optik ışık yolu (Kühn ve diğ., 2024).

PLACID sisteminde ışık, TROIA adaptif optik modülünden çıktıktan sonra bir dizi optik bileşenden geçerek koronagraf düzeneğine yönlendirilir. Bu bileşenler sırasıyla; ışığı yönlendiren katlama aynası (Folding Mirror, FM), ışık yolunu odaklayan aktarımıcı mercekler (Relay Lens, RL), ışık demetini yeniden şekillendiren eksen-dışı parabolik ayna (Off-Axis Parabola, OAP), faz maskelerinin dinamik olarak üretildiği uzaysal ışık modülatörü (Spatial Light Modulator, SLM) ve son aşamada artık yıldız ışığının bastırıldığı Lyot düzlemidir. **Şekil 2.48**'de, bu optik bileşenlerin sıralaması ve sistem içindeki konumları şematik olarak gösterilmektedir (Kühn ve diğ., 2024).

Doğu Anadolu Gözlemevi'ne (DAG) kurulacak olan PLACID (Liquid-crystal Active Coronagraphic Image for DAG Telescope) enstrümanı, sabit faz maskeleri yerine SLM (Spatial Light Modulator) tabanlı aktif faz maskesi teknolojisi kullanan ilk koronagraf sistemi olacaktır. Klasik koronagraflarda kullanılan sabit vortex faz maskeleri, dört-kadran faz maskeleri (FQPM) veya Roddier & Roddier maskeleri belirli koşullarda yüksek kontrast sağlasa da her maskenin kendine özgü avantaj ve sınırlamaları bulunmaktadır. Vortex maskelerinde yük (charge) sayısı arttıkça sistem dalga cephesi hatalarına karşı daha dayanıklı



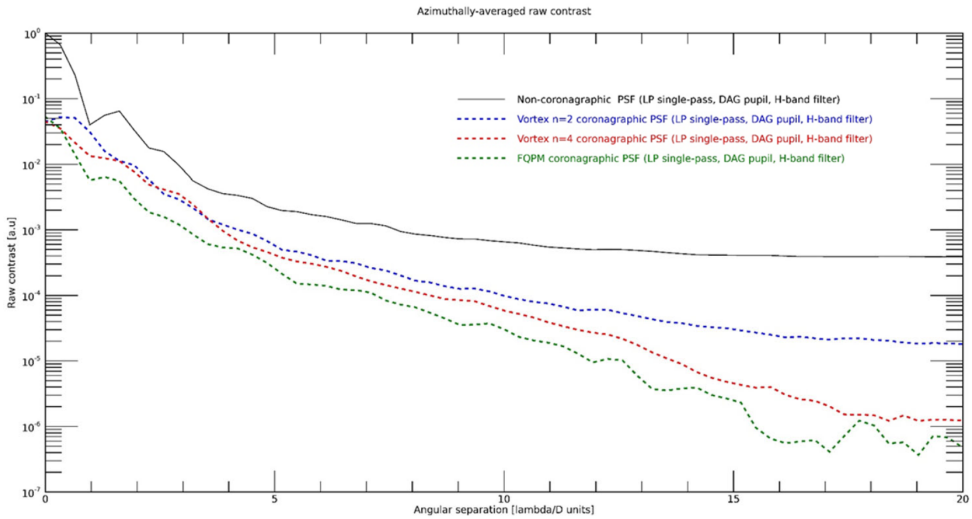
Şekil 2.49: SLM üzerinde programlanmış faz maskelerinin simülasyonları (Lin ve diğ., 2024b).

hale gelirken, daha düşük yük sayıları ise yıldızın çok yakınındaki yoldaşların daha yüksek verimlilik ile gözlenmesine imkan tanımaktadır. Bu nedenle farklı hedefler ve gözlem koşulları için tek bir sabit maske optimum çözüm sunmamaktadır. **Şekil 2.49**'da farklı maske türlerinin simülasyonları verilmektedir (Lin ve diğ., 2024b).

PLACID sisteminde kullanılacak LCOS-SLM (Liquid-Crystal on Silicon Spatial Light Modulator) teknolojisi, bu sınırlamaları aşmayı amaçlamaktadır. LCOS-SLM cihazları, doğrusal polarizasyona sahip gelen ışığın fazını piksel seviyesinde değiştirme yeteneğine sahiptir. Bu sayede her pikselde farklı faz gecikmeleri oluşturularak, istenilen tipte faz maskesi dinamik olarak programlanabilmektedir. Böylece aynı optik düzlem üzerinde fiziksel bir değişim gerektirmeden, vortex, FQPM veya yeni nesil maskeler sanal olarak oluşturulabilmektedir. DAG teleskobunda PLACID enstrümanıyla birlikte kullanılacak bu teknoloji, H–Ks bant aralığında çalışacak olup, gözlemler sırasında farklı maskelerin uzaktan seçilip uygulanabilmesini mümkün kılacaktır. Bu yaklaşım, hem gözlem koşullarına hem de hedef sistemin özelliklerine göre optimum maskenin gerçek zamanlı adaptasyonunu sağlayacak ve sabit faz maskelerine kıyasla önemli bir esneklik kazandıracaktır (Lin ve diğ., 2024b).

PLACID'in Python tabanlı yazılımı sayesinde, kullanıcılar motorize Lyot maskeleri kontrol edebilir, faz desenleri yükleyebilir ve gözlem koşullarına göre sistemi uyarlayabilir. Sistem, DAG Nasmyth platformundaki basınç ve sıcaklık kontrollü optik tabla üzerine monte edilmiştir.

PLACID, yalnızca doğrudan gezegen görüntüleme için değil, aynı zamanda yıldız çevresi disk morfolojisi, ikili yıldız analizleri ve koherent diferansiyel görüntüleme (CDI) gibi



Şekil 2.50: PLACID sistemine ait laboratuvar kontrast eğrileri (Kühn ve diğ., 2024).

Name	**PLACID**
Observing bands	H-band: 1.63 μm (Ks-band: 2.15 μm)
SLM specification	1920 x 1152 px, 8 bits
FoV	16" x 9.6"
λ/D at H-band	85 mas
Optical throughput	$> 22\%$
Name	**DIRAC**
Detector	Teledyne H1RG, 1024 x 1024 px
Wavelength range	900 - 2400 nm
Fill factor	100%
Minimum exposure time	$\sim$ 1 s
Read-out noise	$\sim$ 18 e^-
Read-out gain	1.8 e^-/ADU

Şekil 2.51: PLACID ve DIRAC sistemlerinin teknik özellikleri (Tandon ve diğ., 2024).

ileri teknikler için de uygundur. 2026 sonrası planlar, daha hızlı SLM panelleri ve eAPD kameralar ile zaman-temelli faz çeşitlendirme uygulamalarını içermektedir (Kühn ve diğ., 2024).

Teleskoba entegre edilme süreci devam eden PLACID'in performansı, İsviçre'deki laboratuvar testleri sırasında Strehl oranı 1 (% 100) ve atmosferik/optik dalga cephesi hataları olmadan, ideal koşullarda değerlendirilmiş ve sistemin kontrast duyarlılığı bu testlerden elde edilen değerler üzerinden öngörülmüştür Kühn ve diğ. (2024). DAG-PLACID sistemine ait kontrast eğrisi **Şekil 2.50**'de ve sistemin teknik özellikleri **Şekil 2.51**'de verilmektedir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Veri tabanlarından gerekli fiziksel parametrelerin derlenmesinin ardından, yıldız–gezegen kontrast oranlarını hesaplamak üzere **Şekil 3.1**'de özetlenen çok aşamalı bir iş akışı uygulanmıştır. Yörünge periyodu bir yıldan uzun olan sistemler arasından eksik verileri bulunanlar belirli eşiklere göre elenmiş, diğerleri tamamlayıcı hesaplamalara yönlendirilmiştir. Yaş tahmini için *astroARIADNE*, gezegen yarıçapı üzerinden metal bolluk örneklemesi için *planetsynth* kodu ile *emcee*, gezegen sıcaklığı için *planetsynth*, tayfsal akı hesaplamaları için ise BT-Settl modelleri kullanılmıştır. Her sistem için yüzey akılarından H-band kontrast oranı (F_P/F_S) hesaplanmıştır. Bu oranlar **Şekil 3.2** ile görselleştirilen yöntem kullanılarak DAG teleskobunun kontrast eğrisi ile karşılaştırılmış ve aday sistemler belirlenmiştir. Bu bölümde, iş akışındaki adımlar ve kullanılan hesaplama yöntemleri ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

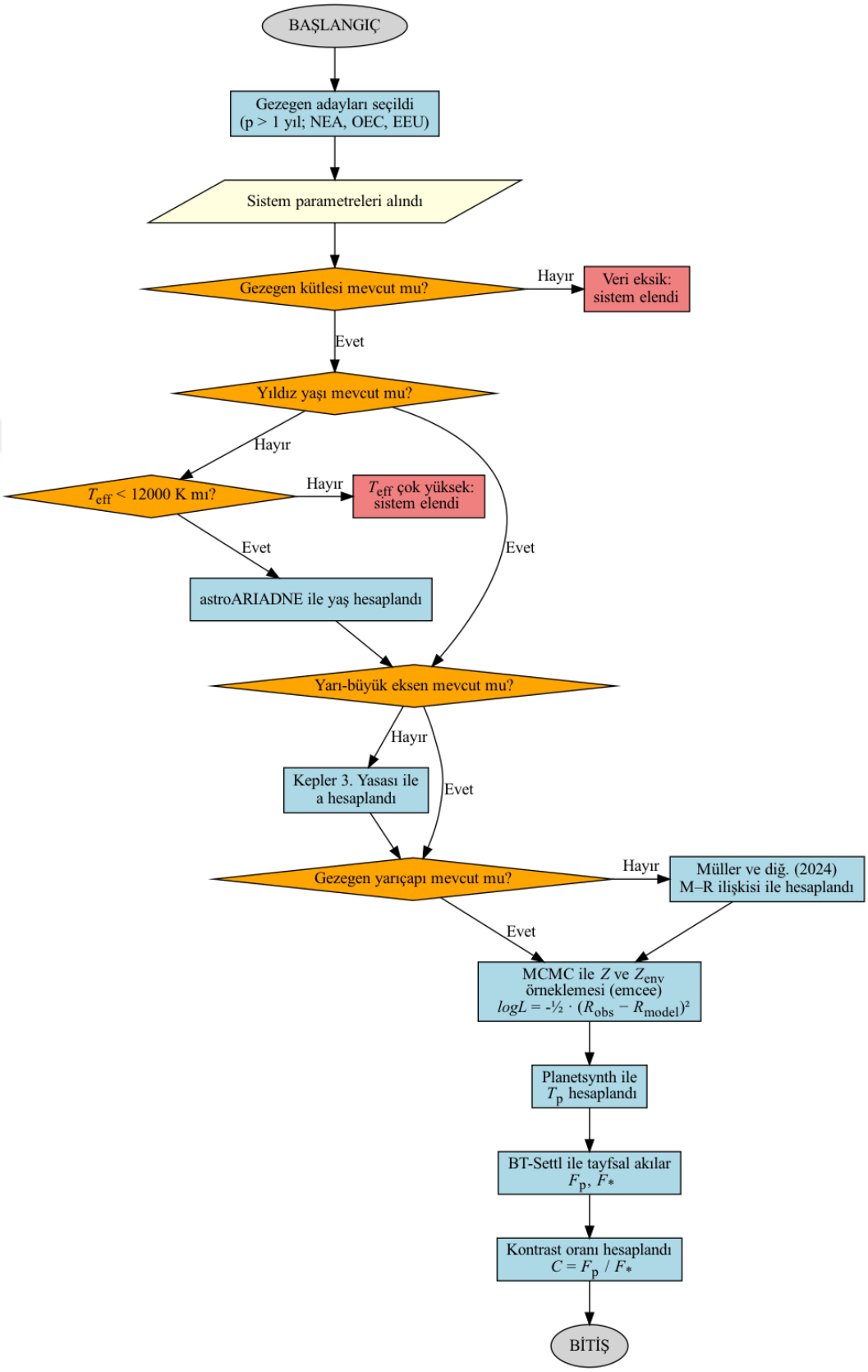
3.1. VERİTABANLARI

3.1.1. NASA Exoplanet Archive

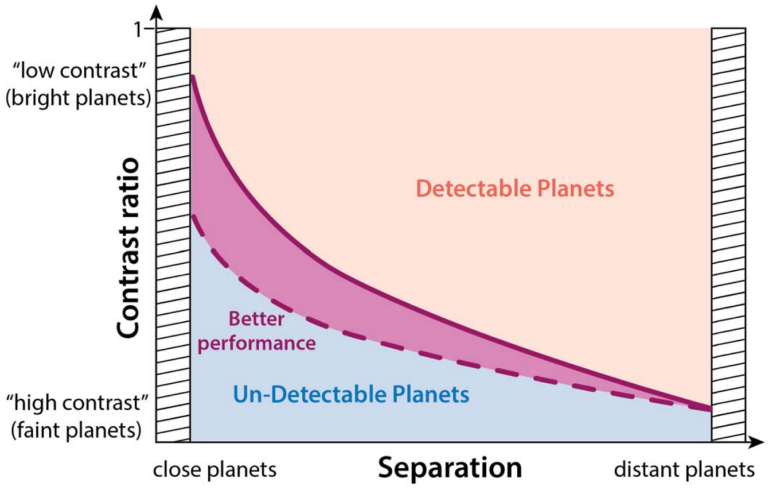
NASA Exoplanet Archive (NEA)[4] , ötegezegenler ve konak yıldızları hakkında astronomik verileri derleyen ve çapraz ilişkilendiren, aynı zamanda bu verilerle çalışmak için araçlar sunan çevrimiçi ötegezegen ve yıldız kataloğudur. Arşiv, ötegezegenlerin ve konak yıldızların aranması ve karakterize edilmesinde yer alan önemli halka açık veri setlerini toplamaya ve sunmaya adanmıştır. Bu veriler, yıldız parametrelerini (konum, büyüklük, sıcaklık vb.), ötegezegen parametrelerini (kütle ve yörünge parametreleri vb.) ve keşif/karakterizasyon verilerini (yayınlanmış radyal hız eğrileri, fotometrik ışık eğrileri, görüntüler, spektrumlar vb.) içerir (Ramirez ve diğ., 2013).

Bir ötegezegenin birden fazla çalışması olabilir, bu çalışmalarda verilen ötegezegen parametreleri arşiv veritabanında alt alta satırlar halinde sunulmaktadır. Arşiv, birden fazla çalışması olan sistemleri tek bir satırda sunmak için birleşik (composite) veri seti

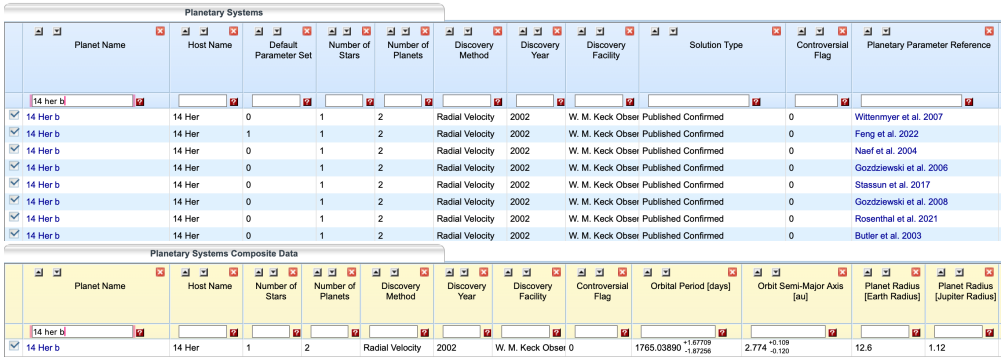
[4] https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu



Şekil 3.1: Yıldız–gezegen kontrast oranı hesaplamalarına yönelik iş akış diyagramı.



Şekil 3.2: Kontrast eğrisinin nasıl okunacağını gösteren şematik bir diyagram. Belirli bir kontrast ve ayrıklıkta, bir gezegen eğrinin üzerinde yer alıyorsa tespit edilebilir. Elde edilen kontrast, merkez yıldızdan olan ayrıklığın bir fonksiyonudur ve küçük ayrıklıklarda yalnızca en parlak gezegenler tespit edilebilir (Follette, 2023).



Planetary Systems

Planet Name	Host Name	Default Parameter Set	Number of Stars	Number of Planets	Discovery Method	Discovery Year	Discovery Facility	Solution Type	Controversial Flag	Planetary Parameter Reference
14 her b										
14 Her b	14 Her	0	1	2	Radial Velocity	2002	W. M. Keck Obser	Published Confirmed	0	Wittenmyer et al. 2007
14 Her b	14 Her	1	1	2	Radial Velocity	2002	W. M. Keck Obser	Published Confirmed	0	Feng et al. 2022
14 Her b	14 Her	0	1	2	Radial Velocity	2002	W. M. Keck Obser	Published Confirmed	0	Naef et al. 2004
14 Her b	14 Her	0	1	2	Radial Velocity	2002	W. M. Keck Obser	Published Confirmed	0	Gozdziewski et al. 2006
14 Her b	14 Her	0	1	2	Radial Velocity	2002	W. M. Keck Obser	Published Confirmed	0	Stassun et al. 2017
14 Her b	14 Her	0	1	2	Radial Velocity	2002	W. M. Keck Obser	Published Confirmed	0	Gozdziewski et al. 2008
14 Her b	14 Her	0	1	2	Radial Velocity	2002	W. M. Keck Obser	Published Confirmed	0	Rosenthal et al. 2021
14 Her b	14 Her	0	1	2	Radial Velocity	2002	W. M. Keck Obser	Published Confirmed	0	Butler et al. 2003

Planetary Systems Composite Data

Planet Name	Host Name	Number of Stars	Number of Planets	Discovery Method	Discovery Year	Discovery Facility	Controversial Flag	Orbital Period [days]	Orbit Semi-Major Axis [au]	Planet Radius [Earth Radius]	Planet Radius [Jupiter Radius]
14 her b											
14 Her b	14 Her	1	2	Radial Velocity	2002	W. M. Keck Obser	0	1765.03890 +1.67709 -1.87256	2.774 +0.109 -0.120	12.6	1.12

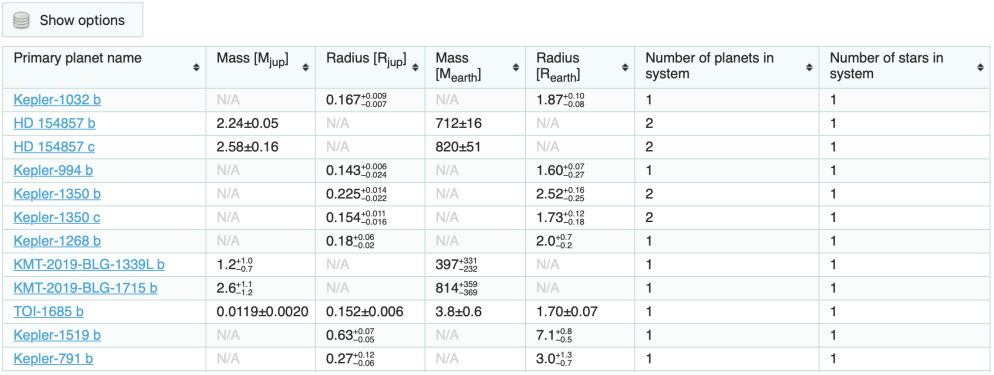
Şekil 3.3: 14 Her b sistemi için NASA Exoplanet Archive normal veri kataloğu (üst panel) ve birleşik veri seti (alt panel).

oluşturmuştur. **Şekil 3.3**'te 14 Her b ötegezegeni için bir örnek verilmiştir. 2003-2022 yılları arasında yapılmış 8 çalışma (üst panel), composite veride (alt panel) tek bir satıra indirgenmiştir. Bu seçim yapılırken tutarlılığı sağlamak için en fazla parametre setine sahip referans dikkate alınmaktadır.

3.1.2. Open Exoplanet Catalogue

Open Exoplanet Catalogue (OEC)[5] , açık kaynak felsefesiyle geliştirilen ve topluluk tarafından sürdürülen bir veritabanıdır. 2010 sonlarına doğru başlatılan veritabanında, ikili, üçlü vb. sistemlerde gezegenlerin yörüngesel özelliklerini tanımlayan p-tipi ve s-tipi

[5] https://www.openexoplanetcatalogue.com



Show options

Primary planet name	Mass [M_{jup}]	Radius [R_{jup}]	Mass [M_{earth}]	Radius [R_{earth}]	Number of planets in system	Number of stars in system
Kepler-1032 b	N/A	$0.167^{+0.009}_{-0.007}$	N/A	$1.87^{+0.10}_{-0.08}$	1	1
HD 154857 b	2.24±0.05	N/A	712±16	N/A	2	1
HD 154857 c	2.58±0.16	N/A	820±51	N/A	2	1
Kepler-994 b	N/A	$0.143^{+0.006}_{-0.024}$	N/A	$1.60^{+0.07}_{-0.27}$	1	1
Kepler-1350 b	N/A	$0.225^{+0.014}_{-0.022}$	N/A	$2.52^{+0.16}_{-0.25}$	2	1
Kepler-1350 c	N/A	$0.154^{+0.011}_{-0.016}$	N/A	$1.73^{+0.12}_{-0.18}$	2	1
Kepler-1268 b	N/A	$0.18^{+0.06}_{-0.02}$	N/A	$2.0^{+0.7}_{-0.2}$	1	1
KMT-2019-BLG-1339L b	$1.2^{+1.0}_{-0.7}$	N/A	397^{+331}_{-232}	N/A	1	1
KMT-2019-BLG-1715 b	$2.6^{+1.1}_{-1.2}$	N/A	814^{+359}_{-369}	N/A	1	1
TOI-1685 b	0.0119±0.0020	0.152±0.006	3.8±0.6	1.70±0.07	1	1
Kepler-1519 b	N/A	$0.63^{+0.07}_{-0.05}$	N/A	$7.1^{+0.8}_{-0.5}$	1	1
Kepler-791 b	N/A	$0.27^{+0.12}_{-0.06}$	N/A	$3.0^{+1.3}_{-0.7}$	1	1

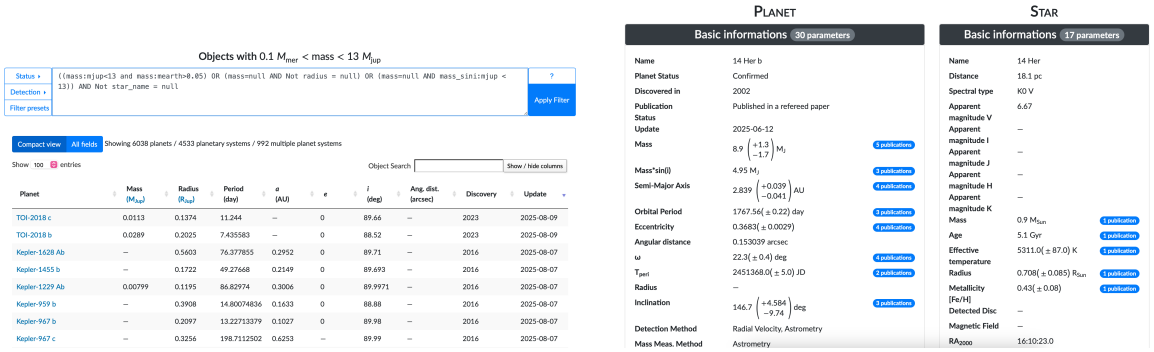
Şekil 3.4: Open Exoplanet Catalogue veritabanının arayüz görüntüsü.

özellikleri de gösterilmektedir. XML tabanlı yapısıyla esnek bir veri erişimi sağlar ve araştırmacıların katkıda bulunmasına olanak tanır, dinamik ve genişletilebilirdir. Veriler, gezegenlerin kütlesi, yarıçapı, yörünge parametreleri, keşif tarihleri gibi birçok bilgiyi içerir. Ayrıca sistem hiyerarşisini açıkça tanımlayabilmesi, çoklu gezegen sistemleri üzerinde çalışan araştırmacılar için önemli bir avantajdır (Rein, 2012). Kataloğun web sitesindeki arayüz görüntüsü **Şekil 3.4**'te verilmektedir.

3.1.3. Extrasolar Planet Encyclopedia

The Extrasolar Planets Encyclopedia (EEU) [6] , 1995'ten beri tüm ötegezegen faaliyetlerinin gelişimini sunmak ve araştırmacılar arasındaki iletişimi teşvik etmek ve kolaylaştırmak için tasarlanmıştır. En son haberleri listeler, çevrimiçi eğitim notlarına ve genel makalelere erişim sağlar. Şu anda ve gelecekteki yer ve uzay tabanlı gezegen tarama projelerinin ve toplantıların bir listesini verir. Bununla birlikte diğer sitelere de bağlantılar sağlar. Verileri doğrudan TOPCAT veya Aladin gibi Sanal Gözlemevi (VO) çizim ve analiz araçlarına aktarmak için bir arayüz sunmaktadır. Veritabanı, Exoplanet Encyclopedia'nın bir parçasıdır. Veritabanı sürekli güncellenmektedir ve listelenen ötegezegen parametreleri son yapılan çalışmalardan alınmaktadır (Schneider ve diğ., 2011). Veritabanının bir görüntüsü ve örnek olarak seçilen 14 Her b sistemi için daha ayrıntılı bilgilerin yer aldığı sayfanın görüntüsü **Şekil 3.5**'te verilmiştir.

[6] https://exoplanet.eu



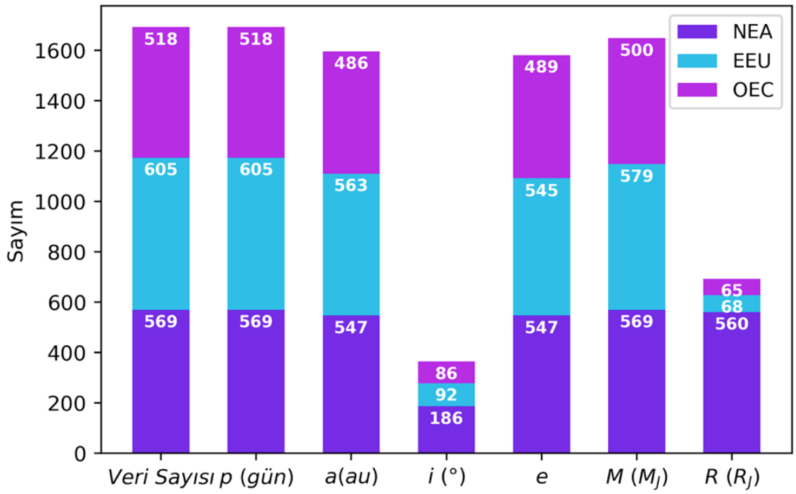
Şekil 3.5: The Extrasolar Planets Encyclopedia veritabanının arayüzü (sol) ve veritabanında yer alan sistemlerden biri olan 14 Her b'nin hakkındaki ayrıntılı bilgiler (sağ).

3.2. VERİTABANLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Bu çalışmada, günümüze kadar keşfedilen ötegezegenlerin DAG teleskobu ile gözlenebilirliğini belirlemek amacıyla, üç ana kaynaktan (NEA, OEC ve EEU) elde edilen ötegezegen verileri üzerinde analiz yapılmıştır. İlk olarak, her üç kaynaktan periyodu bir yıldan daha büyük olan ötegezegen verileri toplanmıştır. Gezegenlerin periyotlarının bir yıldan büyük seçilmesinin nedeni, doğrudan görüntüleme yöntemiyle gözlenebilen gezegenlerin yıldızlarına yakın olmamaları gerektiğidir. Yıldızına yakın gezegenler, yüksek sıcaklık ve parlaklık nedeniyle görüntülenmesi zor hale gelir, bu da gezegenin ışığının yıldızınkinden ayırt edilmesini engeller (Marois ve diğ., 2008). Bu sebeple, periyodu daha uzun olan gezegenler, yörüngelerinin daha geniş olması nedeniyle gözlem için daha uygun koşullar sunar.

13.01.2023 tarihli, yörünge dönemi 1 yıldan büyük olan gezegenler veritabanlarından seçilmiştir. Her veritabanında bulunan gezegenler ve bunlara ait parametrelerin varlığı farklılık göstermektedir (**Şekil 3.6**). Tüm gezegenleri içeren homojen bir liste oluşturulması için veritabanları arasında karşılaştırmalar yapılmıştır.

Veriler, her bir kaynağın sağladığı gezegen isimleri ve koordinat bilgileri doğrultusunda çapraz sorgulanmış ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bu adımda, farklı kataloglarda yer alan aynı gezegenlerin tutarlılığı sağlanmıştır. İlk aşamada, *Python* programlama dilinde kullanılan *pandas* kütüphanesinin *isin()* fonksiyonu aracılığıyla kataloglardaki gezegen adları karşılaştırılmış ve isim bazında 361 eşleşme tespit edilmiştir. Ancak kataloglar arasında adlandırma farklarının bulunması nedeniyle, yalnızca isim karşılaştırması yeterli olmamıştır (**Tablo 3.1**). Bu nedenle, koordinat verileri kullanılarak açısal uzaklık



Şekil 3.6: 13.01.2023 tarihli veritabanlarında bulunan parametrelerin sayı yoğunluğu.

NEA	EEU	OEC
CFBDSIR J145829+101343 b	CFBD 1458 B	CFBD 1458 b
GJ 1214 b	GJ 1214 b	Gliese 1214 b
TOI-1338 b	TOI-1338 b	TOI-1338 (AB) b
-	Kapteyn's b	Kapteyn b

Tablo 3.1: Veritabanlarındaki örnek ötegezegen isimlerinin karşılaştırılması.

hesaplamalarına gidilmiştir.

Karşılaştırmaların çalışma prensibi şu şekildedir:

- Her üç katalogta ortak ve ortak olmayan isimler belirlenir, ayrı dosyalarda tutulur. Aynı anda katalogların ikişerli karşılaştırmaları da yapılarak benzer/benzer olmayan listeler oluşturulur.

- Benzer olmayan dosyalar için koordinat karşılaştırması yapılır.

- Koordinatlar eşleştiğinde, isim hücresinin son karakteri (gezegen son indisleri: b, c, d, e, . . .) kontrol edilir.

- Koordinat ve son karakter eşleşiyorsa listeye new_name sütunu eklenir ve eşleşen cismin adı bu sütuna yazılır.

- Tüm kataloglar için öncelikli referans olarak NEA kullanılır; eşleşen cisimlerin isimleri NEA'ya göre güncellenir. NEA ile eşleşmeyenler için EEU kullanılır.

Tablo 3.2: Üç katalogda ortak olarak bulunan dört sistemin koordinat farkları ve hangi katalogda belirgin bir sapma olduğu gösterilmektedir. Sağ açıklık ($\Delta\alpha$) ve dikaçıklık ($\Delta\delta$) farkları küçükse "-" ile belirtilmiştir. Her sistem için yalnızca anlamlı düzeyde fark gösteren katalog(lar) çizelgeye yansıtılmıştır.

Cisim	$\Delta\alpha$ (°)	$\Delta\delta$ (°)	Katalog
HD 213472 b	–	7.999717	NEA
HIP 109384 b	0.275672	–	EEU
OGLE-2018-BLG-0740L b	141.481125	–	EEU
gam Psc b	30.003013	–	OEC

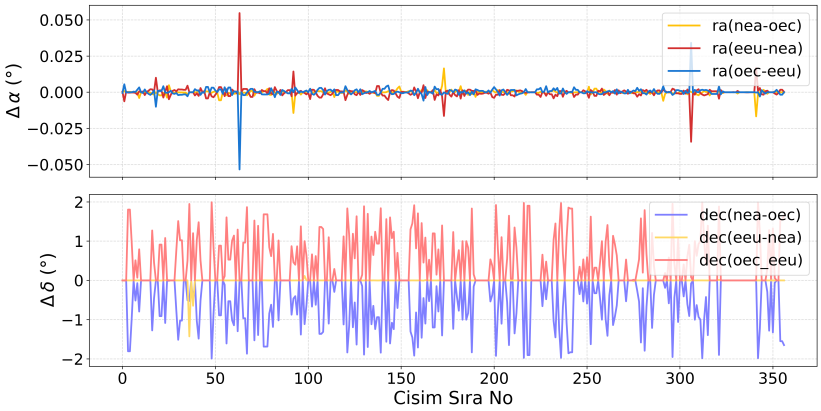
İki kataloğu çapraz sorgulamak için gökküresi üzerindeki iki cismin arasındaki açısal uzaklığı karşılaştırmamız gerekir. Sağaçıklık ve dikaçıklık koordinatları kullanılarak iki cisim arasındaki açısal uzaklık Haversin formülasyonuna göre şu şekilde bulunabilir:

$$d = 2arcsin\sqrt{sin^2\frac{|\delta_1-\delta_2|}{2} + cos\delta_1 cos\delta_2 sin^2\frac{|\alpha_1-\alpha_2|}{2}} \tag{3.1}$$

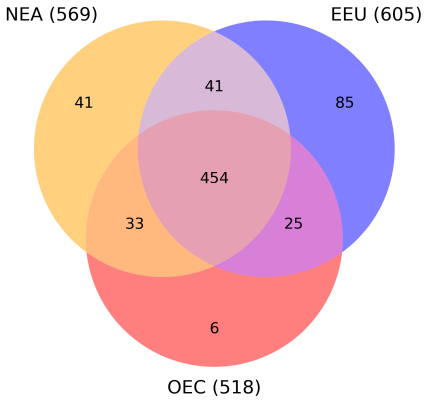
Bu denkleme göre, her bir gezegenin diğer kataloglardaki potansiyel eşleşmeleriyle olan açısal uzaklıkları hesaplanmış ve belirli bir eşik değerinin altında kalanlar geçerli eşleşmeler olarak kabul edilmiştir. Eşik değerinin belirlenmesinde, isimleri ortak olan cisimlerin koordinatları karşılaştırılmıştır. Üç katalogda yer alan bu ortak cisimler için koordinat farkları incelenmiş; Tablo **Tablo 3.2**'de sunulan dört sistem hariç, dikaçıklık (δ) farklarının ± 2 sağ açıklık (α) farklarının ise yaklaşık 200 yaysaniyesini geçmediği görülmüştür (**Şekil 3.7**).

Bu nedenle, karşılaştırılacak diğer cisimlerde de benzer farklılıkların olabileceği varsayılmış ve çapraz eşleştirme için 2 olarak bir limit (maksimum açısal uzaklık) belirlenmiştir.

Son olarak, her üç kaynaktan alınan veriler, gezegen isimleri ve koordinatları doğrultusunda tek bir liste halinde birleştirilmiştir. 685 adet cisimden oluşan bu liste, bu çalışmada gerçekleştirilen gözlenebilirlik analizi ve kontrast hesaplamaları için temel veri setini oluşturmuştur.



Şekil 3.7: Üç farklı katalog arasında aynı cisimler için sağ açıklık ($\Delta\alpha$) ve dikaçıklık ($\Delta\delta$) farklarının dağılımı gösterilmektedir. Üst panelde sağ açıklık, alt panelde ise dikaçıklık farkları yer almaktadır. Yatay eksende her bir cismin veri kümesindeki sıra numarası bulunurken, düşey eksenler koordinat farklarını derece cinsinden göstermektedir. Bu farklar, kataloglar arası koordinat tutarlılığını değerlendirmek amacıyla hesaplanmıştır. Belirgin şekilde farklılık gösteren dört sistem (Bkz. **Tablo 3.2**) grafikten çıkarılmıştır. Sağ açıklık için kataloglar arasında sistematik bir sapma gözlenmezken, dikaçıklık farklarında özellikle (OEC) verilerinde 2°'ye ulaşan farklılıklar tespit edilmiştir.



Şekil 3.8: NEA, OEC ve EEU veritabanlarında yer alan gezegenlerin dağılımını gösteren Venn diyagramı. Koordinatları eşleşip isimleri farklı olan cisimler birleştirilerek üç katalog arasındaki kesişimler belirlenmiştir. Ortak olan gezegen sayısı 454 olup, yalnızca NEA'da 41, yalnızca OEC'te 6 ve yalnızca EEU'da 85 cisim bulunmaktadır. İkili kesişimlerde ise NEA–OEC arasında 33, EEU–OEC arasında 25 ve NEA–EEU arasında 41 ortak gezegen yer almaktadır.

3.3. BARINAK YILDIZLARIN YAŞ TAHMİNİ

Gezegen sıcaklığı, yıldız yaşına bağlı olarak zamanla soğuma ve büzülme süreçlerinden etkilendiğinden, yıldız yaşı, sıcaklık modellemeleri açısından temel bir parametredir

(Arras ve Bildsten, 2006). Yıldızların yaşı doğrudan ölçülebilir bir nicelik olmadığından, modellerden yararlanarak yıldız sıcaklığı ve ışınım gücüne bağlı yaş tahmini yapılabilir.

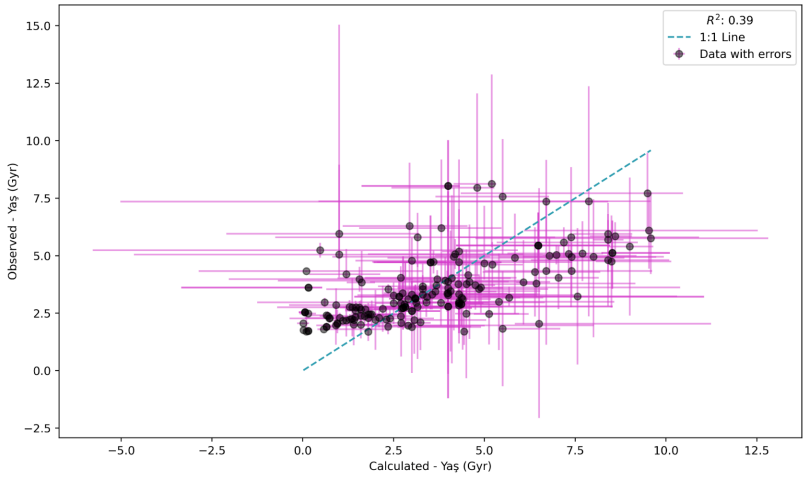
Bu amaçla, Vines ve Jenkins (2022) tarafından *Python* programlama dilinde geliştirilen astroARIADNE[7] kodu kullanılmıştır. Bu kod, etkin sıcaklık (T_{eff}), yüzey çekim ivmesi ($\log g$), metal bolluğu ([Fe/H]), sönümleme (A_V), uzaklık (d) ve yarıçap (R_*) gibi gözlemsel girdileri kullanarak geniş bant fotometrik verilerle uyumlu sentetik modeller üretmekte ve ardından, bu modellere en iyi uyan MIST izokronları (Dotter, 2016; Choi ve diğ., 2016) izokronları üzerinden yıldızın yaşı interpolasyon yoluyla tahmin etmektedir. Sentetik modelleri oluşturmak için PHOENIX v2 (Husser ve diğ., 2013), BT-Settl (Allard, 2014), BT-NextGen (Hauschildt ve Baron, 1999; Allard, 2014), BT-Cond (Allard, 2014), Castelli ve Kurucz (Castelli ve Kurucz, 2003) ve Kurucz (Kurucz, 1993) yıldız atmosfer modellerini ve geniş band (Johnson UBV; Tycho-2 $B_T V_T$; Cousins RI; 2MASS JHK$_s$; SDSS ugriz; AllWISE W1 ve W2; Gaia G, G_{RP} ve G_{BP}; PanSTARRS grizy;, GALEX NUV ve FUV; Spitzer/IRAC 3.6μ ve 4.5μ; Strömgren uvby; TESS; Kepler; NGTS) fotometrik ölçüm değerlerini kullanmaktadır. Ölçüm verileri, yıldız koordinatları ve Gaia numarası üzerinden fotometrik veritabanları araştırılarak toplanmaktadır. Kodda kullanılan atmosfer modelleri için belirli parametrelere göre limitler bulunmaktadır. Bu kısıtlar **Tablo 3.3**'te verilmektedir.

Tablo 3.3: astroARIADNE model limitleri.

Model	$T_{\rm eff}$	**log g**	**[Fe/H]**
Phoenix v2	[2300, 12000]	[0.0, 6.0]	[-2.0, 1.0]
BT-Settl	[2300, 12000]	[-0.5, 6.0]	[-1.0, 0.5]
BT-NextGen	[2300, 12000]	[-0.5, 6.0]	[-1.0, 0.5]
BT-Cond	[2300, 12000]	[-0.5, 6.0]	[-2.5, 0.5]
Castelli & Kurucz	[3500, 12000]	[0.0, 5.0]	[-2.5, 0.5]
Kurucz	[3500, 12000]	[0.0, 5.0]	[-1.0, 1.0]

Bir ön test olarak, kodunun güvenilirliğinin araştırılması için, kullandığımız listede yaşları bilinen cisimlerden 209 tanesinin yaş hesabı astroARIADNE ile yapılmıştır. Yaş hesabı, her bir yıldızın fotometrik verilerinin kalitesine, ve girdi parametreleri olarak kullanılan sıcaklık, yüzey çekim ivmesi (log g), metal bolluğu ([Fe/H]), yarıçap (R_S) parametreleri ve bu parametrelerin hatalarına bağlı olduğundan her bir çözüm kendine özgüdür. Yine de kodun verimliliği hakkında fikir sahibi olmak için, hesaplanan ve gözlenen yıldız yaşları

[7] https://github.com/jvines/*astroARIADNE*



Şekil 3.9: astroARIADNE ile yaşları hesaplanmış cisimlerin literatür yaşlarıyla karşılaştırılması.

için yapılan regresyon analizinde R^2= 0.39 değeri ile yaşlar arasında orta-zayıf korelasyon olduğu görülmüştür (**Şekil 3.9**).

Oluşturduğumuz listede yaşı bulunmayan sistemlerin yaş tahmini *astroARIADNE* ile yapılmıştır. Başlangıç parametreleri olarak veritabanlarından gelen yıldız sıcaklığı (T_{eff}), yüzey çekim ivmesi ($\log g$), metal bolluğu ([Fe/H]) ve yarıçap (R) bilgileri girilmiştir. 147 sistemden 137 tanesinin yaş tahmini *astroARIADNE* ile yapılabilmiştir (**Tablo 3.4**). Geriye kalan 10 sistemin yaş tahmini, fotometrik veri yetersizliği, Gaia veritabanında bilgilerinin bulunmaması, yıldızın literatürde yarıçap bilgisinin bulunmaması veya yıldız sıcaklığının *astroARIADNE* kodunun çalıştığı sıcaklık limitinin ($<$12000K) üzerinde olması sebebiyle yapılamamıştır.

3.4. GEZEGEN SICAKLIKLARI

Gezegen sıcaklıkları, yıldız evrim kodu *MESA*'nın (Paxton ve diğ., 2011) değiştirilmiş bir versiyonu olan planetsynth[8] kodu (Müller ve Helled, 2021) kullanılarak hesaplanmıştır. Bu kod yaşamlarına sıcak ve şişkin olarak başlayan dev gezegenlerin soğumasını ve büzülmesini hesaplamak için kullanılmaktadır ve 1-boyutlu hidrostatik denklemlerin çözümünü yaparak gezegen iç yapısının ve gözlenebilir nicelikler olan gezegen yarıçapının, parlaklığın ve etkin sıcaklığın evrimini hesaplamaktadır.

[8] https://github.com/tiny-hippo/*planetsynth*

Tablo 3.4: astroARIADNE ile yaşı hesaplanmış yıldızlar.

Yıldız İsmi	Yaş (Gyr)	Yıldız İsmi	Yaş (Gyr)	Yıldız İsmi	Yaş (Gyr)
GJ 9066	$2.71^{+4.68}_{-2.59}$	HD 125271	$0.03^{+0.00}_{-0.00}$	HD 43197	$5.17^{+1.08}_{-2.29}$
TYC 2187-512-1	$6.25^{+6.74}_{-5.39}$	HD 96992	$4.43^{+0.83}_{-2.33}$	HD 331093	$10.66^{+1.73}_{-1.81}$
BD+26 1888	$1.04^{+6.07}_{-0.98}$	81 Cet	$1.74^{+0.92}_{-0.57}$	HD 141399	$9.25^{+0.92}_{-1.01}$
HD 168863	$8.00^{+4.16}_{-6.16}$	gam Psc	$5.30^{+4.55}_{-1.61}$	HD 141399	$9.25^{+0.92}_{-1.01}$
HD 102843	$8.19^{+2.27}_{-2.14}$	HD 238914	$1.53^{+0.65}_{-0.21}$	HD 18015	$2.18^{+0.10}_{-0.09}$
HD 129445	$7.43^{+1.98}_{-2.22}$	TYC 3318-01333-1	$5.31^{+1.32}_{-3.63}$	HD 175167	$7.12^{+0.44}_{-0.50}$
HD 28254	$10.42^{+0.51}_{-0.89}$	HD 102272	$3.66^{+0.64}_{-0.39}$	HD 211810	$6.55^{+2.62}_{-2.03}$
KIC 9704149	$1.51^{+8.64}_{-1.22}$	HD 94834	$5.62^{+2.01}_{-1.59}$	HD 13167	$2.52^{+0.10}_{-0.10}$
HD 11505	$13.17^{+0.32}_{-1.89}$	HD 4917	$1.45^{+0.27}_{-0.35}$	KOI-4878	$10.04^{+2.14}_{-2.52}$
HD 87646 A	$5.55^{+0.74}_{-0.59}$	HD 86950	$1.38^{+0.18}_{-0.13}$	HD 109286	$3.41^{+1.47}_{-1.59}$
HD 88072	$3.36^{+2.55}_{-0.98}$	HD 222076	$5.07^{+2.60}_{-1.77}$	WASP-34	$5.60^{+2.23}_{-3.14}$
HD 80869	$3.14^{+0.43}_{-0.33}$	75 Cet	$1.10^{+0.24}_{-0.40}$	HD 110537	$8.16^{+3.08}_{-4.05}$
WASP-81	$11.89^{+1.60}_{-4.15}$	KIC 3526061	$3.11^{+1.83}_{-1.04}$	HD 95544	$3.90^{+0.15}_{-0.15}$
HD 11112	$6.80^{+0.50}_{-2.16}$	ups Leo	$1.92^{+1.12}_{-0.66}$	HD 213472	$8.31^{+1.68}_{-1.64}$
HD 25912	$2.78^{+2.18}_{-2.72}$	HD 69123	$1.85^{+0.48}_{-0.62}$	HD 181720	$13.41^{+0.08}_{-0.52}$
HD 217958	$5.70^{+1.77}_{-0.98}$	HIP 74890	$4.52^{+3.21}_{-1.78}$	HD 44219	$9.35^{+0.60}_{-0.59}$
KIC 10525077	$12.88^{+0.61}_{-3.27}$	eps Tau	$0.49^{+0.24}_{-0.03}$	Kepler-154	$5.49^{+2.00}_{-1.67}$
HD 8535	$3.63^{+0.46}_{-0.57}$	HD 125390	$6.20^{+1.86}_{-1.50}$	HD 136925	$11.67^{+1.68}_{-2.46}$
KIC 3558849	$1.33^{+0.48}_{-1.17}$	HIP 67851	$3.18^{+3.57}_{-1.18}$	HD 210193	$2.48^{+1.93}_{-1.49}$
HD 148156	$0.15^{+0.32}_{-0.12}$	EPIC 248847494	$3.81^{+2.77}_{-2.59}$	HD 6718	$3.87^{+1.90}_{-0.78}$
GJ 1148	$0.06^{+0.01}_{-0.01}$	HD 86065	$7.94^{+4.43}_{-3.85}$	HD 194490	$4.69^{+2.53}_{-3.49}$
GJ 179	$11.56^{+1.75}_{-11.31}$	HD 72490	$2.72^{+2.14}_{-0.68}$	KIC 9662267	$9.42^{+3.85}_{-3.75}$
GJ 273	$12.19^{+1.21}_{-9.40}$	HD 14787	$2.39^{+1.11}_{-0.70}$	HD 97037	$1.27^{+0.50}_{-0.38}$
GJ 273	$12.19^{+1.21}_{-9.40}$	WASP-53	$7.49^{+5.62}_{-1.95}$	HD 188641	$4.80^{+0.89}_{-1.76}$
GJ 687	$0.06^{+0.00}_{-0.00}$	HD 122562	$7.84^{+1.18}_{-0.58}$	HD 115954	$3.60^{+0.14}_{-0.14}$
GJ 433	$11.79^{+0.79}_{-0.54}$	HIP 67537	$1.15^{+0.09}_{-0.25}$	HD 27969	$4.15^{+0.43}_{-0.39}$
GJ 15 A	$4.03^{+8.74}_{-4.01}$	HD 135872	$2.58^{+0.92}_{-0.39}$	HD 12235	$3.18^{+0.50}_{-0.61}$
GJ 676 A	$12.45^{+1.03}_{-10.30}$	BD+63 1405	$13.09^{+0.41}_{-3.78}$	HD 80913	$0.01^{+0.00}_{-0.00}$
GJ 676 A	$12.45^{+1.03}_{-10.30}$	HD 115404 A	$5.47^{+0.06}_{-0.03}$	HD 26161	$4.46^{+2.05}_{-1.32}$
GJ 328	$0.06^{+0.00}_{-0.00}$	HIP 97233	$1.55^{+2.04}_{-0.30}$	KIC 5732155	$3.33^{+0.33}_{-0.26}$
HD 4760	$13.05^{+0.44}_{-3.10}$	HD 22532	$1.83^{+0.41}_{-0.29}$	HD 136118	$4.08^{+0.48}_{-0.57}$
BD+20 2457	$13.42^{+0.07}_{-0.52}$	2MASS J19434782+4014521	$3.67^{+8.27}_{-1.35}$	KIC 8012732	$3.60^{+3.24}_{-1.12}$
BD+20 2457	$13.42^{+0.07}_{-0.52}$	BD-00 4475	$13.09^{+0.40}_{-4.12}$	HD 62364	$3.79^{+0.09}_{-0.09}$
HD 13189	$5.59^{+0.54}_{-0.35}$	HD 64121	$1.54^{+0.46}_{-0.22}$	HD 62364	$3.79^{+0.09}_{-0.09}$
NGC 2682 Sand 978	$3.16^{+4.40}_{-0.82}$	HD 119445	$0.40^{+0.12}_{-0.03}$	KIC 5951458	$1.00^{+0.15}_{-0.10}$
BD+20 274	$13.49^{+0.00}_{-0.00}$	HD 203387	$0.59^{+0.20}_{-0.10}$	HD 5388	$4.60^{+0.33}_{-0.26}$
sig Per	$0.24^{+0.06}_{-0.06}$	HD 203387	$0.59^{+0.20}_{-0.10}$	HD 8673	$2.14^{+0.14}_{-0.60}$
BD+48 738	$0.71^{+0.05}_{-0.05}$	HD 80883	$11.46^{+2.03}_{-3.78}$	HD 156098	$1.54^{+0.69}_{-0.14}$
BD+02.3313	$12.94^{+0.55}_{-4.94}$	HIP 109384	$13.27^{+0.22}_{-1.75}$	KIC 10024862	$3.69^{+2.00}_{-1.30}$
eta Cet	$2.00^{+1.06}_{-0.65}$	HD 109988	$9.54^{+2.83}_{-3.51}$	KIC 7917485	$1.59^{+0.21}_{-0.25}$
eta Cet	$2.00^{+1.06}_{-0.65}$	KIC 10255705	$3.28^{+4.15}_{-1.09}$	KIC 5522786	$0.12^{+0.26}_{-0.09}$
BD+48 740	$0.53^{+0.07}_{-0.06}$	HD 190228	$4.56^{+0.52}_{-0.35}$	HD 9578	$1.94^{+1.48}_{-1.85}$
HIP 8541	$12.13^{+1.36}_{-4.33}$	HD 93351	$12.90^{+0.59}_{-5.76}$	HD 155233	$2.00^{+2.54}_{-0.51}$
HD 29985	$12.54^{+0.94}_{-12.50}$	KIC 12454613	$0.03^{+0.00}_{-0.00}$	HD 16905	$0.80^{+8.08}_{-0.74}$
HD 164604	$4.68^{+0.50}_{-0.36}$	GJ 2030	$6.13^{+0.78}_{-0.44}$	HIP 65891	$0.58^{+2.87}_{-0.58}$
HD 219134	$12.41^{+1.08}_{-3.78}$	HD 290327	$4.24^{+0.63}_{-2.56}$		

Tablo 3.5: *planetsynth* için oluşturulan, gezegen kütlesi (M_J), toplam metal bolluğu (Z), atmosferik metal bolluğu (Z_e) ve yıldızdan gelen ışınım (F_*) aralıklarını kapsayan yaklaşık 45.000 sentetik gezegenden oluşan örneklem ile tanımlanan model limitleri (Müller ve Helled, 2021).

$M\,[M_J]$	Z	Z_e	$F_*\,[\mathrm{erg/s/cm^2}]$
0.1 – 1	≤ 0.80	≤ 0.10	$10 - 10^9$
1 – 3	≤ 0.50	≤ 0.10	$10 - 10^9$
3 – 5	≤ 0.20	≤ 0.10	$10 - 10^9$
5 – 30	≤ 0.04	≤ 0.04	$10 - 10^9$

Evrim hesaplamalarında ağır elementleri kendi içinde tutarlı bir şekilde hesaba katmak için MESA'nın hal denklemlerinde (EoS) değişiklikler yapılmıştır. Hidrojen, helyum ve ağır elementlerin rastgele karışımlarından oluşan dev gezegenler için EoS uygun hale getirilmiştir. Bir gezegenin evrimi üzerinde EoS dışında, hem yıldız ışınımı hem de gezegen atmosferik metal bolluğu önemli etkiye sahiptir. Bu sebeple yıldız akısı (F_S) ve atmosferik metal bolluğu (Z_e) parametreleri modele dahil edilmiştir. Hesaplamalar, dev gezegenlerin başlangıçta büyük bir yarıçaptan, adyabatik olarak soğudukları sıcak başlangıçlı bir çekirdek yığılmasıyla oluştuğunu varsaymaktadır.

Modelleri oluşturmak için kullanılan dört parametre vardır: gezegen kütlesi (M), çekirdek (Z) ve atmosferik (Z_e) metal bolluğu ve gezegene ulaşan yıldız akısı (F_*). Bu parametrelerin her biri için tanımlanan aralıklar **Tablo 3.5**'te verilmektedir. Bu çizelge, yaklaşık 45000 gezegen modeliyle oluşturulan parametre uzayını ve *planetsynth* kodunun çalışabileceği fiziksel sınırları göstermektedir.

planetsynth içerisinde *synthesize()* ve *predict()* olmak üzere iki temel fonksiyon bulunmaktadır. *synthesize()* fonksiyonu, 10^7 ila 10^{10} yıl ($\log t$=7–10) arasındaki yaşlar için, her bir girdi parametre seti (M, Z, Z_e, $\log F_*$) üzerinden sentetik evrim yollarını kullanarak interpolasyon yapar. Bu işlem sonucunda, ilgili gezegenin yarıçapı (R [R_J]) ve ışınım gücü ($\log L$ [L_P]) değerlerinin zamana göre değişimi üretilir. Yıldız yaşı biliniyorsa, *predict()* fonksiyonu kullanılarak bu yaşa karşılık gelen gezegen model değerleri (R_P, L_P, T_P, $log\,g_P$) elde edilir.

planetsynth kodu gezegenin sıcaklığını (T_P), evrim yollarından üretilen ışınımgücü (L_P) ve

yarıçap (R_P) değerlerinden karacisim yaklaşımı ile hesaplamaktadır:

$$T_P^4 = L_P / 4\pi R_P^2 \tag{3.2}$$

Girdi parametre setinin ($M, Z, Z_e, logF_*$) kaynakları şu şekildedir: Gezegen kütlesi M [M_J]: gözlemlerden elde edilmiş ve veritabanlarından gelmektedir. Gelen yıldız akısı F_S: ışınımgücü ve akı fonksiyonları kodun içerisinde tanımlanmıştır.

$$L_* = 4\pi\sigma T_{eff} R_*^2 \tag{3.3}$$

burada R [cm], yıldız yarıçapı; T_{eff} [K], yıldız sıcaklığı; σ Stefan-Boltzmann sabitidir.

$$F_* = L_* / 4\pi a^2 \tag{3.4}$$

burada L, yıldızın ışınımgücü; a [cm], gezegen yarı-büyük eksenidir ve gözlemlerden elde edilmiştir.

Çekirdek ve atmosfer metal bollukları Z, Z_e değerleri bilinmemektedir. *planetsynth* kodunda bu değerler için kısıtlamalar getirilmiştir (**Tablo 3.5**). Tanımlanan bu limit değerler arasında, gözlemsel yarıçap ile modelden hesaplanan yarıçapın en iyi şekilde örtüşmesini sağlayan Z ve Z_e kombinasyonlarını belirlemek amacıyla, *emcee* yöntemi (Foreman-Mackey ve diğ., 2013) uygulanmıştır. Bu algoritmada, her biri parametre uzayının farklı bir noktasından başlatılan ve bu uzayda dolaşarak örnekleme yapan 32 adet yürüteç (walker) kullanılmıştır. Her yürüteç, ardışık 1000 adım (step) boyunca yeni parametre kombinasyonları önererek olasılık dağılımını örneklemiş ve toplamda 32 $\times$ 1000= 32.000 parametre örneği elde edilmiştir. Yürüteçler yeni noktaları, diğer yürüteçlerin konumlarını referans alarak önerdiğinden, algoritma parametre uzayını daha dengeli ve etkili biçimde tarayabilmektedir. Elde edilen en yüksek olasılığa sahip parametreler kullanılarak *planetsynth* kodu yeniden çalıştırılmış; böylece etkin sıcaklık (T_{eff}), ışınım gücü (L_P), yarıçap (R_P) ve yüzey çekim ivmesi ($\log g$) değerleri hesaplanmıştır.

planetsynth predict() fonksiyonunda sistem yarı-büyük ekseni kullanılmaktadır. Bu değerin bulunmadığı sistemler için Kepler'in üçüncü yasası $a = \sqrt[3]{M_S P^2}$ (Nikouravan, 2021) ile

yarı-büyük eksen hesaplanmıştır.

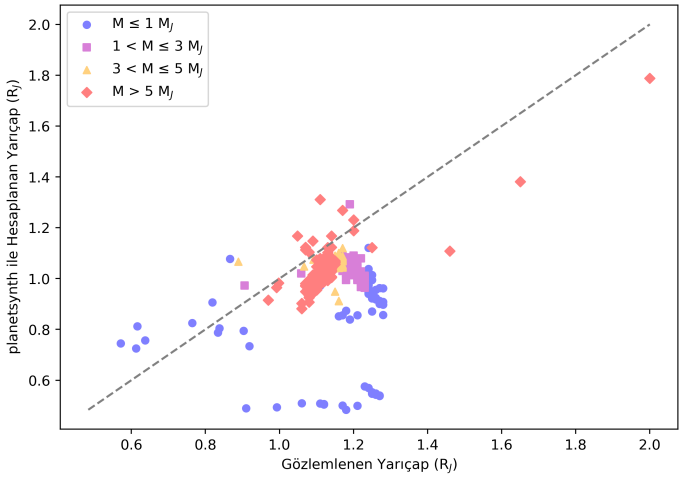
Bununla birlikte oluşturulan *emcee* algoritması gezegen gözlemsel yarıçaplarını dikkate almaktadır. Gezegen kütlesi değerleri olup yarıçap bilgisi bulunmayan 21 gezegen için Müller ve diğ. (2024)'nin ve Otegi ve diğ. (2020)'nin NEA veritabanına dayanan, kütle ve yarıçap parametreleri bulunan güncellenmiş PlanetS kataloğunu kullanarak gezegenler için oluşturduğu kütle-yarıçap (M-R) ilişkisi kullanılmıştır. Bu ilişki şu şekildedir:

$$R = \begin{cases} (1.02 \pm 0.03) M^{(0.27 \pm 0.04)} & M < (4.37 \pm 0.72) \\ (0.56 \pm 0.03) M^{(0.67 \pm 0.05)} & (4.37 \pm 0.72) < M < (127 \pm 7) \\ (18.6 \pm 6.7) M^{(-0.06 \pm 0.07)} & M > (127 \pm 7) \end{cases} \quad (3.5)$$

Bu ilişkiden yola çıkılarak çalışılan veri setindeki gezegenler için kütleye bağlı yarıçaplar hesaplanmıştır. Kullanılan veri setindeki kütlelerin birimi Jüpiter kütlesi (M_J) olduğundan kütle birimlerinin dönüşümü için 1 $M_\oplus$ = 0.00315 M_J, 1 $R_\oplus$ = 0.08924 R_J (Mamajek ve diğ., 2015) olarak alınmıştır.

emcee algoritması ile elde edilen en iyi Z ve Z_e değerleri kullanılarak hesaplanan yarıçaplar ile gözlemsel yarıçaplar karşılaştırılmıştır. **Şekil 3.10**, gözlenen yarıçap (R_{obs}) ile bu yöntemle elde edilen hesaplanmış yarıçap (R_{model}) değerleri karşılıklı olarak gösterilmiştir. Model ile gözlemsel yarıçaplar arasındaki uyumun sınırlı olduğu görülmektedir; hesaplanan R^2= 0.0747 değeri, modelin gözlemleri açıklamakta yetersiz kaldığını göstermektedir. Bu uyumsuzluğun nedenlerini anlamak amacıyla yarıçap farkı (R_{obs}-R_{model}), gezegenin kütlesine, kütlenin belirlenme yöntemine ve yıldızdan aldığı ışınım akısına göre analiz edilmiştir (**Şekil 3.11**). Özellikle düşük kütleli sistemlerde sapmalar daha belirgin şekilde ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte, yıldız yaşlarının belirsizliği de önemli bir etkendir. Yıldız yaşları çoğunlukla izokron uyumu yöntemiyle tahmin edilmekte olup, birkaç milyar yıla varabilen belirsizlikler içermektedir. Bu durum, özellikle genç sistemlerde gezegenin evrimsel büzülme süreci ve dolayısıyla yarıçapı üzerinde doğrudan etkili olabilir (Müller ve Helled, 2023). Yaş tahmin hataları, model tarafından hesaplanan yarıçap ile gözlenen değer arasındaki farkı büyütebilir.

Uyumsuzluğun bir diğer kaynağı ise, gezegenin yıldızdan aldığı ışınım olabilir. Hesaplanan

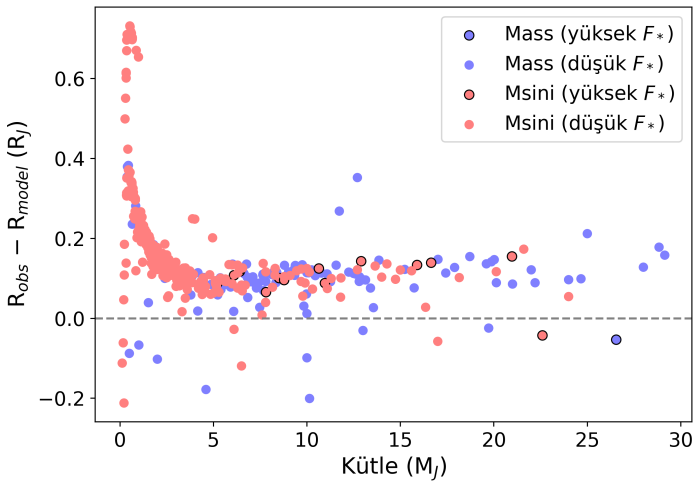


Şekil 3.10: Gözlemlenen gezegen yarıçapları (R_{obs}) ile bu çalışmada kullanılan *planetsynth* modeli aracılığıyla hesaplanan yarıçaplar (R_{model}) arasındaki ilişki. Her bir nokta bir gezegeni temsil etmektedir. Gezegenler, Çizelge **Tablo 3.5**'te tanımlanan kütle aralıklarına göre dört gruba ayrılmıştır: 1 M_J ve altındaki gezegenler mavi daire, 1–3 M_J aralığındakiler mor kare, 3–5 M_J aralığındakiler sarı üçgen ve 5 M_J üzerindekiler kırmızı elmas ile gösterilmiştir. Kesikli gri çizgi, gözlemlenen ve hesaplanan yarıçapların birebir eşleştiği doğrultuyu temsil etmektedir. Elde edilen $R^2 = 0.0747$ değerinin olası nedenleri Bölüm 3.4.'te tartışılmıştır.

yıldızdan gelen ışınım akısı $F_* = 2 \times 10^8\ ergs^{-1}cm^{-2}$ üzerinde olan sistemlerde, atmosferik genleşme gibi etkiler model tarafından hesaba katılmadığı için yarıçaplar olduğundan büyük bulunabilir. Gözlemsel çalışmalar, bu ışınım düzeylerinde gezegen yarıçaplarının yaklaşık 1.5 R_J'ye kadar çıkabileceğini göstermektedir (Miller ve Fortney, 2011; Thorngren ve Fortney, 2018). Bu durum, modelin yüksek ışınım altındaki gezegenlerde sistematik olarak daha küçük yarıçaplar üretmesine neden olabilir.

Ayrıca, birçok sistemde gezegen kütleleri doğrudan ölçülememekte, bunun yerine *msini* formuyla minimum kütle tahmini yapılmaktadır. Bu yöntem, sistemin yörünge eğikliği bilinmediğinde gerçekte olduğundan daha düşük bir kütle değeri kullanılmasına neden olabilir. *planetsynth* modeli, doğrudan kütle değeri gerektirdiğinden, *msini* ile elde edilen değerlerin kullanılması modelin yarıçapı olduğundan daha düşük tahmin etmesine neden olabilir. Bu da model-gözlem uyumsuzluğunu arttıran verinin çoğunluğunu kapsayan önemli bir belirsizlik kaynağıdır (**Şekil 3.11**).

planetsynth modeli, atmosferik genleşme veya foto-buharlaşma gibi bazı fiziksel süreçleri içermese de, bu çalışmada gezegenlerin etkin sıcaklıklarını (T_P) hesaplamak amacıyla kullanılmıştır. Gözlemsel olarak doğrudan ölçülemeyen bu parametre, modelin en iyi uyum



Şekil 3.11: Gözlemsel gezegen yarıçapı ile *planetsynth* modeli tarafından hesaplanan yarıçap farkı (R_{obs} - R_{model}) ile gezegen kütlesi (M_J) arasındaki ilişki. Mavi simgeler gerçek kütlesi (Mass), kırmızı simgeler ise yalnızca minimum kütlesi (*Msini*) bilinen sistemleri temsil etmektedir. Siyah çerçeveli noktalar, yıldızdan gelen ışınım akısı $F_* > 2 \times 10^8\ ergs^{-1}cm^{-2}$ olan sistemlere karşılık gelir. Yatay kesikli çizgi, gözlemsel ve model yarıçaplarının eşit olduğu durumu belirtmektedir. Grafik, düşük kütleli sistemlerde modelin gözlemsel yarıçapları açıklamakta yetersiz kaldığını ve özellikle *Msini* kullanılan sistemlerde bu farkın daha belirgin olduğunu göstermektedir.

sağlayan metal bolluğu (Z, Z_e) değerleri ile çalıştırılması sonucunda elde edilmiştir. Gezegen sıcaklıkları, özellikle doğrudan görüntüleme çalışmalarında yıldız–gezegen kontrast oranının belirlenmesinde en temel parametredir. **Şekil 3.12**, bu çalışmada analiz edilen 685 cismin *planetsynth* ile üretilen evrim yollarını göstermektedir.

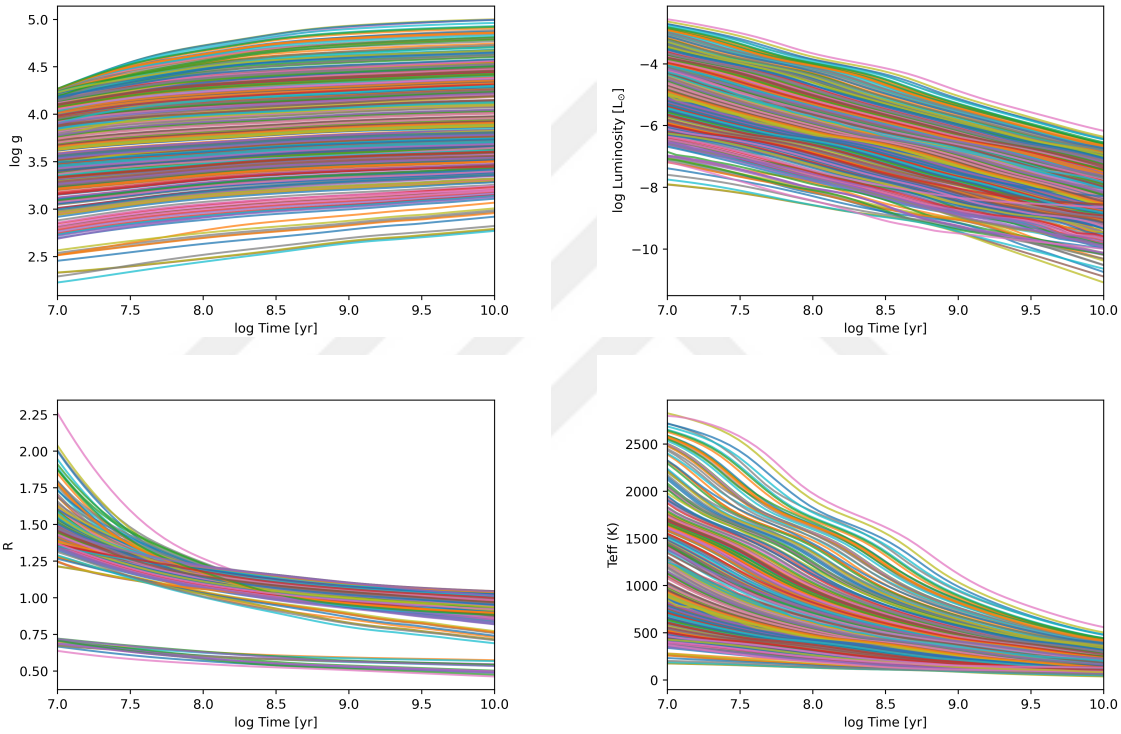
3.5. KONTRAST ORANLARININ BELİRLENMESİ

3.5.1. Akıların Elde Edilmesi

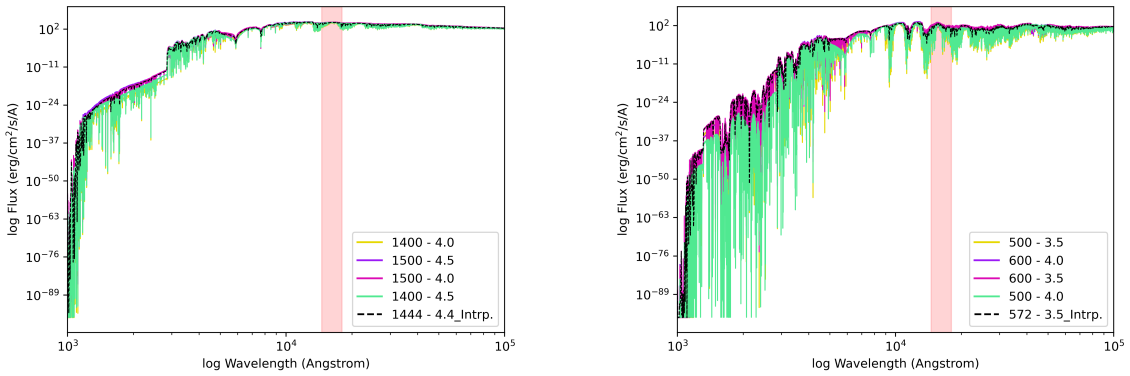
Gezegenlere ait akı değerlerinin türetilebilmesi için, *planetsynth* evrim modelinden elde edilen sıcaklıklar kullanılarak sentetik spektral enerji dağılım (SED) modelleri oluşturulmuştur. Bu amaçla, dev gezegenler, kahverengi cüceler ve yıldızlar için geliştirilmiş PHOENIX modellerine (Hauschildt ve Baron, 1999) dayanan BT-Settl sentetik model (Allard, 2014) verileri kullanılmıştır.

Model verileri, VOSA (Virtual Observatory SED Analyzer)[9] arayüzü üzerinden (Bayo

[9] https://svo2.cab.inta-csic.es/theory/vosa/



Şekil 3.12: Bu çalışmada hesaplanan 427 cismin evrim yolları. Paneller, yüzey çekim ivmesi ($\log g$), parlaklık ($\log L/L_{\odot}$), modelden üretilen yarıçap (R) ve etkin sıcaklığın ($T_{\rm P}$) zamana ($\log t$, yıl) göre değişimini göstermektedir. Her çizgi bir gezegeni temsil etmektedir.



Şekil 3.13: κ And b (sol) ve 51 Eri b (sağ) gezegenleri için BT-Settl model spektrumlarının karşılaştırması. Siyah kesikli çizgi, gezegenin etkin sıcaklık ($T_{\rm eff}$) ve yüzey çekim ivmesi ($\log g$) değerleri için elde edilen interpolasyon sonucunu göstermektedir. Renkli çizgiler, bu interpolasyona en yakın parametre kombinasyonlarına sahip ve interpolasyona girdi olarak kullanılan model spektrumlarını temsil etmektedir. Kırmızı gölgeli bölge, 1.46–1.80 μm aralığını (H-bandı, merkez $\lambda \approx 1.63$ μm) göstermektedir.

ve diğ., 2008) indirilmiştir. BT-Settl modeli, 400 K $\leq$ Teff $\leq$ 70000 K sıcaklık aralığı, -0.5 $\leq \log g \leq$ 6 yüzey yerçekimi ve -4.0 $\leq$ Z $\leq$ 0.5 metal bolluğu gibi geniş bir parametre uzayını kapsamaktadır. 2600 K'nin altındaki sıcaklıklar için modelde metal bolluğu varsayılan olarak 0.0 alınmıştır.

Her bir sistem için uygun SED, BT-Settl model gridleri arasında yapılan interpolasyon ile elde edilmiştir. Gezegenler için bu işlemde yalnızca sıcaklık ve $\log g$ parametreleri; yıldızlar için ise bunlara ek olarak metal bolluğu da dikkate alınmıştır. İnterpolasyon, Python'un SciPy kütüphanesinde yer alan *griddata* fonksiyonu aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Tercih edilen interpolasyon yöntemi lineer olup, lineer interpolasyonla sonuç alınamayan durumlarda *nearest* (en yakın komşu) algoritması kullanılmıştır.

İnterpolasyon ile elde edilen her bir spektrel enerji dağılımı üzerinden, sistemlerin H bandındaki toplam akı değeri hesaplanmıştır. Bu amaçla, 1.46–1.80 μm (H-bandı= 1.63 μm) aralığını kapsayan spektrel veriler üzerinde sayısal integrasyon uygulanmıştır. Akının dalgaboyuna göre değişimi dikkate alınarak, toplam akı Python'daki *numpy.trapz* fonksiyonu ile, trapez yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. İnterpolasyon için kullanılan SED'leri ve trapez yöntemi için verilen aralığı gösteren grafikler Kappa And b ve 51 Eri b gezegenleri için **Şekil 3.13**'te verilmektedir.

Hesaplanan akılardan itibaren kontrast oranı;

$$C_{IR,\lambda} \sim \frac{F_{\lambda,P}(T,X)r_p^2}{F_{\lambda,S}(T)r_S^2} \tag{3.6}$$

ile verilir. Burada $F_{\lambda,P}$(T,X), dalgaboyunun bir fonksiyonu olarak gezegenden gelen termal akı; $F_{\lambda,S}$(T), dalgaboyunun bir fonksiyonu olarak yıldızdan gelen termal akı ve X gezegenin bulutlar, kimya ve çekim gibi atmosferik yapısına bağlı bir etkeni belirtmektedir (Currie ve diğ., 2023a).

Veritabanlarından elde edilen sistemler arasından, *planetsynth* ile sıcaklık ve *astroARIADNE* ile yıldız yaşı hesaplamalarına uygun koşulları sağlayan toplam 427 sistem belirlenmiştir. Bu sistemlerden 356 tanesi için kontrast değerleri başarıyla hesaplanmıştır. Hesaplamalarda kullanılan *planetsynth* kodundan elde edilen model çıktıları ($T_{\rm eff}, Z, Z_e, R_J, \log g$), akılarla birlikte **Tablo 1.1**'de sunulmaktadır. Kalan 71 sistemde ise, yüzey çekim ivmesi değeri BT-Settl modellerinin geçerlilik sınırı olan $\log g < 3.5$ altında kaldığı için akı hesaplaması yapılamamış ve dolayısıyla kontrast oranları elde edilememiştir. Bu sistemlere ait *planetsynth* model çıktıları **Tablo 1.2**'de verilmektedir.

Vega, fotometrik sistemlerin geleneksel sıfır noktası olduğundan (Bessell ve diğ., 1998) ötegezegenlerin ve barınak yıldızlarının hesaplanan akılarının görünür parlaklığa çevrilmesinde kullanılmıştır. Bu dönüştürmede Vega'nın T_{eff}= 9500 K, uzaklık= 7.68 pc, $\log g$= 4.02, [Fe/H]= -0.56 dex (Beichman ve diğ., 2025), yarıçap (ekvatoral)= 2.73 $R\odot$ (Monnier ve diğ., 2012) değerleri kullanılarak BT-Settl spektrumu seçilmiştir.

Bu spektrumdan elde edilen yüzey akısı $F_{\lambda,Vega}^{yzey}$ gözlemsel akıya dönüştürülmek üzere yarıçap-mesafe ölçeğiyle çarpılmıştır:

$$F_{\lambda,Vega}^{Dnya} = F_{\lambda,Vega}^{yzey}\left(\frac{R_{Vega}}{d_{Vega}}\right)^2 \tag{3.7}$$

Elde edilen $F_{\lambda,Vega}^{Dnya}$ değeri H-bandı sıfır nokta akısı ($F_{0,H}$) olarak kabul edilmiştir.

Ardından, her sistem için interpolasyonla oluşturulan SED'den türetilen yüzey akıları $F_{\lambda,P}^{yzey}$ (ötegezegen) ve $F_{\lambda,S}^{yzey}$ (barınak yıldız) aynı şekilde dönüştürülmüş ve buradan itibaren H-bandı görünür parlaklıkları (m_H) Pogson bağıntısıyla ($m_H = -2.5 \times log(F_{\lambda}^{Dnya}/F_{0,H})$

hesaplanmıştır (**Tablo 1.1**, **Tablo 1.2**).

Böylece model gezegen ve yıldız akıları doğrudan literatürdeki gözlemsel H-bandı parlaklık değerleriyle karşılaştırılabilir hale gelmiştir.

Her sistem için açısal ayrıklık (θ) değeri, ötegezegenin yörünge yarı büyük ekseni a (AB) ve sistemin uzaklığı d (parsek) kullanılarak,

$$\theta\ (\text{arcsec}) = \frac{a\ (\text{AU})}{d\ (\text{pc})} \tag{3.8}$$

bağıntısıyla hesaplanmıştır. Hesaplanan yay saniyesi değerleri PLACID'in H-bandındaki 1 λ/D= 85 mas (**Tablo 4.1**) ölçeğine dönüştürülmüştür.

3.5.2. Doğrudan Görüntüleme Tekniği ile Keşfedilmiş Kontrol Örneklemi

Bu çalışmada, doğrudan görüntüleme yöntemiyle keşfedilmiş ötegezegen sistemlerinden oluşan ayrı bir liste oluşturulmuştur. Söz konusu sistemler, model hesaplamalarının tutarlılığını test etmek amacıyla kontrol örneklemi olarak değerlendirilmiştir. Bu örneklem, yalnızca doğrudan görüntüleme tekniğiyle tespit edilmiş gezegenleri içerecek şekilde veritabanlarından seçilmiştir.

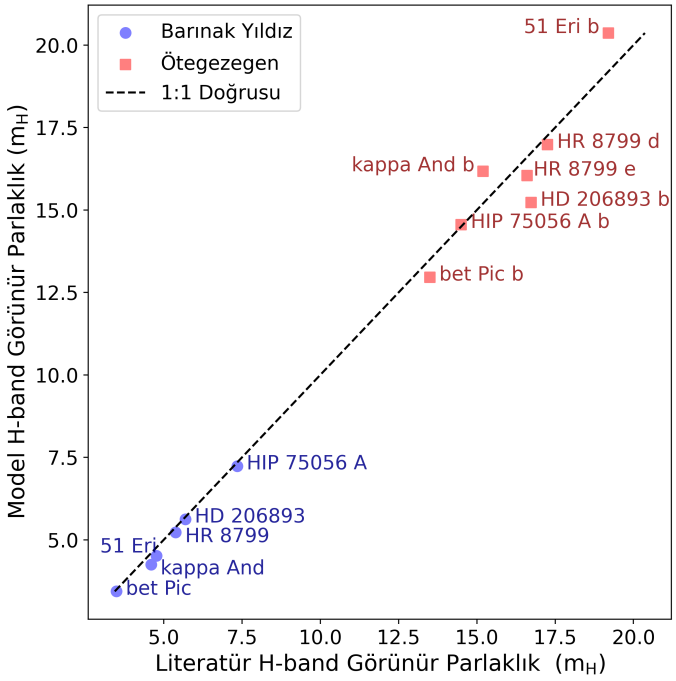
Her bir sistem için literatürde yer alan açısal ayrıklık (yaysaniyesi), H-bandı görünür/mutlak parlaklıkları (m_H/M_H) ve kontrast değerleri derlenmiş; kontrast değerleri bulunmayan sistemlerde kontrast, $F_p/F_s = 10^{-0.4(m_p - m_s)}$ ile hesaplanmış ve ilgili referans kaynaklarıyla birlikte **Tablo 3.6**'da sunulmuştur. Yanında yıldız (*) simgesi bulunan değerler SIMBAD[10] veritabanından alınmıştır. Bu örneklem, model hesaplamalarıyla gözlemsel verilerin karşılaştırılmasında temel referans olarak kullanılmakla birlikte kontrast karşılaştırmalarına da dahil edilmiştir.

Parametreleri modele uygun olan, hesaplamaları yapılmış ve kontrol örneklerinde aynı olan 8 sistemin literatür değerleri olan 7 tanesinin H-band görünür parlaklıkları karşılaştırılmıştır (**Şekil 3.14**). Hesaplanan değerler literatür ile tutarlılık göstermektedir.

[10] https://simbad.u-strasbg.fr/simbad/

Tablo 3.6: Literatürde doğrudan görüntüleme yöntemiyle keşfedilmiş ve bu çalışmada kontrol listesi olarak kullanılan sistemlere ait gözlemsel parametreler. Tabloda gezegenin ve yıldızın H bandındaki parlaklıkları (M_H veya m_H) ile bu değerlerin türü (mutlak veya görünür) Parlaklık Türü sütununda belirtilmiştir. Yanında yıldız (*) simgesi bulunan değerler SIMBAD veritabanından alınmıştır. H değeri yıldız ve gezegen arasındaki parlaklık farkını, Kontrast sütunu ise bu farka karşılık gelen $10^{0.4\Delta H}$ oranını göstermektedir. Kontrast değerleri mümkünse literatürden doğrudan alınmış, aksi halde gezegen ve yıldız parlaklıkları kullanılarak hesaplanmıştır.

Cisim	Açısal Ayrıklık (")	M_H/m_H Gezegen	M_H/m_H Yıldız	Parlaklık Türü	ΔH	Kontrast	Referans
Ross 458 c	0.10	17.01	5.79 *	$m_{UKIDISS}$	11.22	3.24×10^{-5}	Goldman ve diğ. (2010)
2MASS J04414489+2301513 b	0.10	15.62	13.94	m_{2MASS}	1.68	2.13×10^{-1}	Todorov ve diğ. (2010)
CFBDSIR J145829+101343 b	0.11	20.69	18.36	M_{MKO}	2.33	1.17×10^{-1}	Liu ve diğ. (2011)
HIP 75056 A b	0.12	14.50	7.35	m	7.15	1.38×10^{-3}	Wagner ve diğ. (2020)
2MASS J1119-1137 b	0.14	16.60	16.59	m_{MKO}	0.01	9.91×10^{-1}	Best ve diğ. (2017)
2MASS J00413538-5621127 B	0.14	12.53	11.75	m_{2MASS}	0.78	4.88×10^{-1}	Reiners ve diğ. (2010)
PDS 70 b	0.19	–	–		9.35	1.82×10^{-4}	Keppler ve diğ. (2018)
LHS 2397a B	0.20	14.22	11.26	m_{MKO}	2.96	6.55×10^{-2}	Dupuy ve diğ. (2009)
HD 984 b	0.22	12.60	6.17	m	6.43	2.68×10^{-3}	Johnson-Groh ve diğ. (2017)
HD 206893 b	0.27	13.68	2.64	M_{2MASS}	11.04	3.84×10^{-5}	Ward-Duong ve diğ. (2021)
AF Lep b	0.34	–	–		–	1.33×10^{-5}	De Rosa ve diğ. (2023)
HR 8799 e	0.35	13.53	2.31 *	M	11.23	3.23×10^{-5}	Esposito ve diğ. (2013)
PZ Tel b	0.36	11.87	6.49	m_{2MASS}	5.38	7.05×10^{-3}	Biller ve diğ. (2010)
51 Eri b	0.45	19.20	4.77	m	14.43	1.69×10^{-6}	Macintosh ve diğ. (2015)
bet Pic b	0.46	13.50	3.49	m	10.01	9.92×10^{-5}	Bonnefoy ve diğ. (2013)
HIP 99770 b	0.50	16.51	4.46	m	12.05	1.51×10^{-5}	Currie ve diğ. (2023b)
V 921 Sco b	0.54	16.93	5.92 *	m	11.01	3.94×10^{-5}	Ubeira Gabellini ve diğ. (2019)
2M0838+15 c	0.55	17.78	17.10	m_{2MASS}	0.68	5.35×10^{-1}	Radigan ve diğ. (2013)
2M0838+15 b	0.55	17.43	17.10	m_{2MASS}	0.33	7.38×10^{-1}	Radigan ve diğ. (2013)
HIP 63734 b	0.56	17.78	6.52	m	11.26	3.13×10^{-5}	Bonavita ve diğ. (2022)
AB Aur b	0.59	14.56	5.06	m	9.50	1.58×10^{-4}	Currie ve diğ. (2022) Oppenheimer ve diğ. (2008)
HR 2562 b	0.62	16.83	5.13 *	m	11.70	2.09×10^{-5}	Konopacky ve diğ. (2016)
HD 95086 b	0.62	19.57	6.87	m	12.70	8.32×10^{-6}	Meshkat ve diğ. (2013)
HR 8799 d	0.64	14.18	2.31 *	M	11.88	1.84×10^{-5}	Esposito ve diğ. (2013)
HD 33632 A b	0.75	16.00	5.17	m_{MKO}	10.83	4.66×10^{-5}	Currie ve diğ. (2020)
2MASS J12073346-3932539 b	0.78	18.09	12.39	m_{2MASS}	5.70	5.25×10^{-3}	Chauvin ve diğ. (2004)
HD 1160 b	0.78	9.57	7.01	M_{2MASS}	7.64	8.79×10^{-4}	Nielsen ve diğ. (2012)
WISEP J121756.91+162640.2 A b	0.80	20.51	18.31	M_{MKO}	2.20	1.32×10^{-1}	Liu ve diğ. (2012)
HIP 65426 b	0.83	12.76	1.62	M	11.14	3.50×10^{-5}	Chauvin ve diğ. (2017)
2M0437 b	0.92	18.05	15.62	m_{2MASS}	2.43	1.07×10^{-1}	Gaidos ve diğ. (2022)
HR 8799 c	0.92	13.90	2.31 *	M	11.60	2.31×10^{-5}	Esposito ve diğ. (2013)
YSES 2 b	1.06	18.85	8.48	m	10.37	7.11×10^{-5}	Bohn ve diğ. (2021)
kap And b	1.07	15.20	4.60	m_{2MASS}	10.60	5.75×10^{-5}	Carson ve diğ. (2013)
HII 1348 b	1.10	15.30	9.83	m_{2MASS}	5.47	6.52×10^{-3}	Geißler ve diğ. (2012)
ROXs 42 B b	1.17	15.91	9.02	m	6.89	1.75×10^{-3}	Kraus ve diğ. (2014)
HIP 64892 b	1.27	8.23	1.00	M	7.23	1.28×10^{-3}	Cheetham ve diğ. (2018)
CHXR 73 b	1.30	16.50	11.30	m	5.20	8.32×10^{-3}	Luhman ve diğ. (2006)
2MASS J11011926-7732383 B	1.44	13.45	12.57	m	0.88	4.45×10^{-1}	Luhman ve diğ. (2009)
2MASS J01225093-2439505 b	1.45	15.65	9.47	m_{MKO}	6.18	3.37×10^{-3}	Bowler ve diğ. (2013)
CFHTWIR-Oph 98 b	1.46	17.54	15.85	m_{WIRCAM}	1.69	2.11×10^{-1}	Fontanive ve diğ. (2020)
HD 19467 b	1.65	17.90	5.45	m	12.45	1.04×10^{-5}	Jensen-Clem ve diğ. (2016)



Şekil 3.14: Kontrol listesi ve bu çalışmada kullanılan model veritabanında ortak olarak yer alan sistemler için, literatürde bildirilen H-band görünür parlaklık değerleri ile bu çalışmada hesaplanan H-band görünür parlaklıkların karşılaştırması. Mavi daireler barınak yıldızları, kırmızı kareler ötegezegenleri temsil etmektedir. Siyah kesikli çizgi birebir doğrusu olup, model ile literatür verilerinin tutarlılığı için kılavuz olarak çizdirilmiştir.

Tablo 4.1: PLACID sisteminin laboratuvar testlerinde elde edilen başlıca performans parametreleri (Kühn ve diğ., 2024).

Parametre	**Değer**
Gözlem Dalgaboyu	H-bandı= 1.63 μm
λ/D (H-bandı)	85 mas
Kontrast @ $2\lambda/D$	$< 1.1 \times 10^{-2}$
Kontrast @ $5\lambda/D$	$< 5.3 \times 10^{-4}$
İç Çalışma Açısı (IWA)	$< 2\lambda/D$

4. BULGULAR

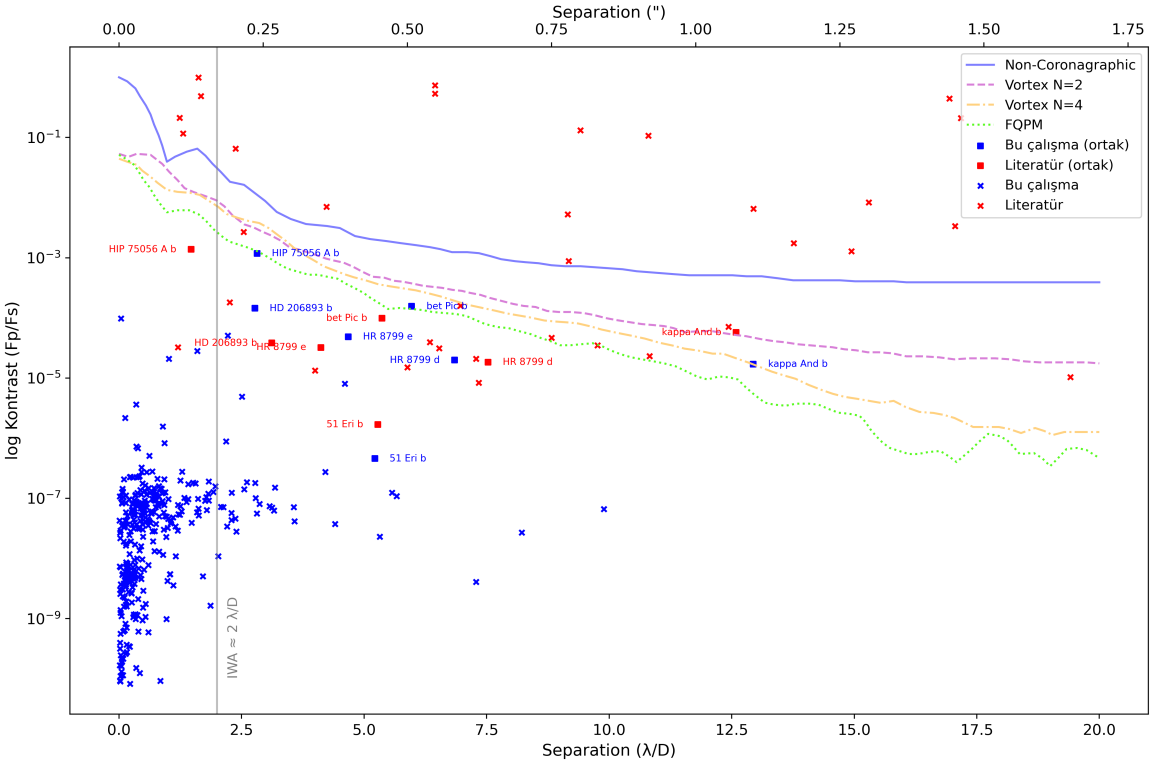
4.1. KONTRASTLARIN DAG/PLACID KONTRAST EĞRİSİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI

DAG Teleskobu'na doğrudan görüntüleme kapsamında kurulması planlanan PLACID (Programmable Liquid-crystal Active Coronagraphic Imager for DAG Telescope) detektörü, H-bandı dalga boyunda çalışan ve programlanabilir faz maskesi kullanabilen bir aktif koronagraf sistemidir (Kühn ve diğ., 2024). Teleskoba entegre edilme süreci devam eden PLACID'in performansı, İsviçre'deki laboratuvar testleri sırasında değerlendirilmiş ve sistemin kontrast duyarlılığı bu testlerden elde edilen değerler üzerinden öngörülmüştür.

Bu çalışma kapsamında, PLACID sistemine ait fabrika kabul testlerinde elde edilen kontrast eğrisi temel alınmıştır (Kühn ve diğ., 2024). Testlerde, vorteks türü faz maskesi (VC2) ile 2 λ/D açısal ayrımda $< 1.1 \times 10^{-2}$ ve 5 λ/D'de $< 5.3 \times 10^{-4}$ kontrast değerlerine ulaşılmıştır. Bu değerler, DAG'da hedeflenen bilimsel çıktılar için temel bir referans noktası oluşturmaktadır. İlgili kontrast performansları **Tablo 4.1**'de özetlenmiştir.

Bu eğri, Plot Digitizer[11] yazılımı aracılığıyla sayısallaştırılmış ve λ/D cinsinden açısal ayrıklığa göre logaritmik kontrast değerleri elde edilmiştir. Daha sonra bu eğriyle, modelden ve literatürden elde ettiğimiz gezegen–yıldız kontrast oranları karşılaştırılmıştır (**Şekil 4.1**). Böylece hem model hesaplamalarının gözlemsel sınırlar içinde kalıp kalmadığı, hem de DAG Teleskobunun potansiyel gözlemleri açısından uygunlukları değerlendirilmiştir.

[11] https://plotdigitizer.com



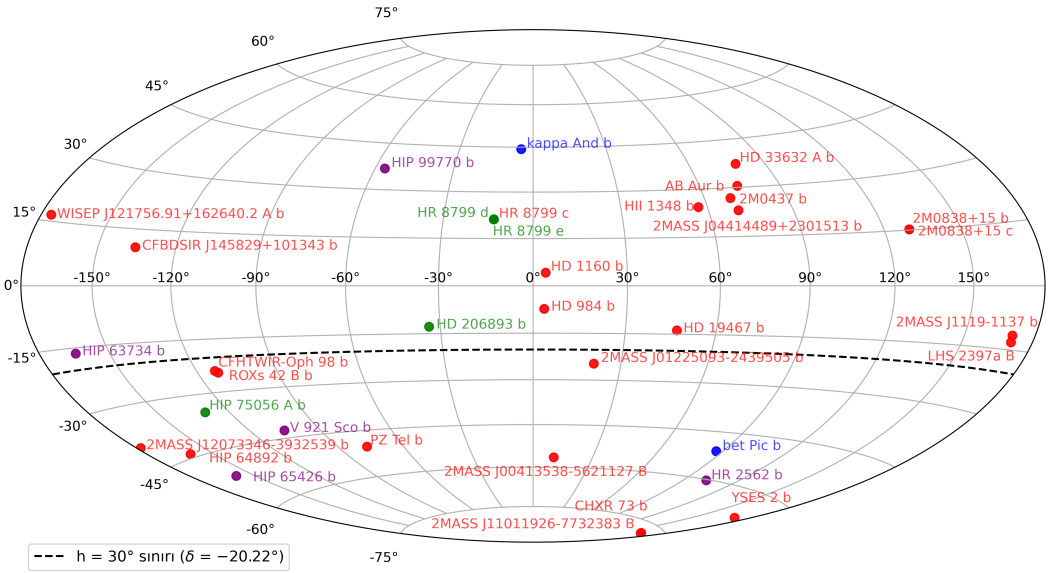
Şekil 4.1: DAG Teleskobu için geliştirilen PLACID koronografının beklenen kontrast eğrileri ile ötegezegenlerin hesaplanan kontrast değerlerinin karşılaştırılması. Mavi renk, bu çalışmada elde edilen değerleri; kırmızı renk ise literatürde doğrudan görüntüleme ile tespit edilmiş kontrol cisimlerinin kontrast değerlerini göstermektedir. Her iki listede de yer alan ortak cisimler kare sembollerle belirtilmiştir ve bu cisimler için hem literatür verileri hem de bu çalışmanın sonuçları eğride yer almaktadır. DAG Teleskobu için 1 λ/D 85 mili-yaysaniyesine karşılık gelmektedir.

4.2. GÖZLEM LİMİTLERİ

Bir gökcisminin belirli bir teleskopla gözlenip gözlenemeyeceğini belirleyen en temel kriter, cismin günün herhangi bir anında ufkun üzerine çıkıp çıkmadığıdır. Bu durum, cismin dikaçıklığı (δ) ile gözlem yerinin enlemi (ϕ) arasındaki ilişkiyle ifade edilir. Teorik olarak bir cisim dikaçıklığı $\delta > \phi - 90^\circ$ koşulunu sağlıyorsa, ufkun üzerine çıkabilir ve böylece gözlenebilir kabul edilebilir. Doğu Anadolu Gözlemevi'nin (DAG) enlemi[12] ϕ= 39°46' 50".22= +39°.78 olduğundan, bu sınır yaklaşık olarak $\delta_{min} = -50^\circ.22$ dikaçıklığa karşılık gelmektedir. Bu eşik, DAG'dan gözlenebilirlik açısından teorik alt limiti tanımlar. Bununla birlikte, profesyonel gözlemlerin yapılabilmesi için cismin belirli bir yüksekliğe ulaşması gerekir. Bu yükseklik bazı teleskoplar için mekanik sınırlarla ilgiliyken, bazen de yerleşke karakteristikleri belirleyici olabilir. DAG Teleskobu ve doğrudan görüntüleme özelinde bu sınırlar daha çok adaptif optik performansıyla belirlidir.

DAG Teleskobuyla ötegezegenlerin doğrudan görüntülenmesi, teleskobun TROIA adaptif optik sistemi ve PLACID koronografıyla birlikte çalışmasıyla mümkün olacaktır. PLACID, TROIA çalışmadan faydalı bir sonuç vermeyecektir. Tasarım olarak TROIA sistemi bir Extreme Adaptif Optik (ExAO) sistemidir (Keskin ve diğ., 2020, 2022). ExAO sistemlerinde AO performansı, yani Strehl oranı %80'in üzerinde olmalıdır (Guyon, 2018). Bu performansı etkileyen en önemli faktör atmosferdeki türbülansın şiddetidir. Astronomik görüş ölçüm yöntemleriyle yerleşkede sürekli ölçülecek türbülans profili sayesinde AO sisteminin ne zaman kullanılabileceği anlık olarak belirlenebilecektir (Balbay ve diğ., 2020; Tezcan ve Şatır, 2025). Cisimlerin zenit uzaklıkları ile atmosferdeki türbülans arasında bir ilişki vardır. Bu nedenle AO düzeltmesi uygulanacak gözlemlerin cisimler olabildiğince küçük zenit açılarında olması beklenir (Davies ve Kasper, 2012). Bunun için kesin bir limit olmamakla birlikte AO sisteminin çalışma karakteristikleri ile yerleşkedeki türbülans belirleyici olacaktır. Ancak her durumda, cisimlerin ufuktan yüksekliklerinin h>30olması beklenmelidir. Bu oldukça iyimser bir tahmin olmakla birlikte bu çalışmada şimdilik bu limit uygulanarak doğrudan görüntüleme için adaylar üst geçiş (meridyen) yükseklikleri $h > 90 - \phi + \delta$ koşulunu sağlayacak şekilde seçilmişlerdir. DAG enlemi ve belirtilen yükseklik koşulu dikkate alındığında bu cisimlerin dikaçıklıklarının $\delta \geq$ -20°.22 olması gerektiği görülür.

[12] https://atasam.atauni.edu.tr/yerleske$_k$*urumsal*



Şekil 4.2: DAG Teleskobunun teorik kontrast eğrisinin üzerinde kalan cisimlerin ekvatoral koordinatlarının gökküre üzerindeki projeksiyonu. DAG yerleşkesinde ideal gözlem koşullarını sağlayabilecek minimum yükseklik için (h = 30°) hesaplanan dikaçıklık sınırı, gözleme uygunluk kriteri olarak projeksiyona eklenmiştir (siyah kesikli çizgi). Mavi simgeler bu çalışmada hesaplanan sistemleri, kırmızı simgeler ise literatürden alınan sistemleri temsil etmektedir. Kontrast eğrisinde öngörülen 10 kat iyileştirme senaryosu altında gözlemlenebilir hale gelen sistemler ise, bu çalışma için yeşil, literatür verileri için mor simgelerle gösterilmiştir (Bkz. Bölüm 5.).

Buna göre, DAG Teleskobunun kontrast eğrisinin üzerinde kalan sistemler, gök küresi üzerindeki konumlarına göre haritalanmıştır (**Şekil 4.2**). Bu çalışmada hesaplanan sistemler mavi, literatürde doğrudan görüntüleme ile tespit edilmiş kontrol örneklemindeki sistemler ise kırmızı simgelerle gösterilmiştir. Ufuk üzerinde h$\geq$30° yükseklik koşulunu sağlayan sistemleri belirlemek amacıyla, bu sınırı temsil eden dikaçıklık çizgisi şekle eklenmiştir. Bu çizginin altında kalan sistemler, konumları gereği DAG Teleskobu ile gözlem için uygun adaylar arasında yer almamaktadır.

4.3. DAG TELESKOBU İÇİN DOĞRUDAN GÖRÜNTÜLEME ADAYLARI

Önceki bölümlerde, veritabanlarından derlenen sistemlere ait fiziksel parametreler kullanılarak yaş, sıcaklık, parlaklık ve yıldız–gezegen kontrast oranı gibi temel gözlemsel büyüklükler modellenmiştir. Elde edilen değerler, hem doğrudan görüntüleme ile keşfedilmiş sistemlerle (Bölüm 3.2) hem de DAG Teleskobuna entegre edilmesi planlanan PLACID sisteminin laboratuvar kontrast eğrisiyle karşılaştırılarak sistemlerin gözlenebilirlik

açısından uygunluğu değerlendirilmiştir. Bu kapsamda ilk olarak, model hesaplamalarıyla bu çalışmada elde edilen ve literatür kontrast oranları PLACID sistemine ait teorik kontrast limiti ile karşılaştırılmış ve yalnızca bu limitin üzerinde kalan sistemler dikkate alınmıştır. Ardından, her bir cismin gözlem sırasında DAG için en az h=30 yükseklikte ufkun üzerinde bulunma koşulu değerlendirilmiş, böylece gözlenebilirlik açısından geometrik kısıtlar belirlenmiştir.

Kontrast limitlerinin ve 30° yükseklik koşulunun dışında, gözlenebilirlik üzerinde etkili olabilecek üçüncü bir parametre olarak koronografın iç çalışma açısı (inner-working angle, IWA) dikkate alınmıştır. IWA, koronografın yıldız ışığını engelleyerek yakınındaki başka bir cismi belirleyebileceği en küçük açısal uzaklığı belirtir ve doğrudan görüntüleme tekniklerinde gözlem sınırını belirleyen temel bir faktördür (Guyon, 2018). PLACID sisteminin IWA değeri, laboratuvar testlerinde yaklaşık 2 λ/D olarak ölçülmüştür (Kühn ve diğ., 2024). Bu sınır, özellikle küçük yarı-büyük eksene sahip sistemlerin gözlenebilirliği üzerinde doğrudan etkili olmaktadır.

Bununla birlikte, yıldız–gezegen sistemlerinin açısal ayrımının gözlem anındaki yörünge konumuna bağlı olarak değişmesinin sonucunda bir sistem farklı zamanlarda IWA sınırının içinde ya da dışında yer alabilir (Maire ve diğ., 2021). Bu nedenle IWA, yalnızca bilgilendirici bir metrik olarak değerlendirilmiş; $\sim 2\,\lambda/D$ altındaki sistemler aday listesinden çıkarılmadan **Tablo 4.2** üzerinde işaretlenmiştir. DAG gözlemleri için uygun olabilecek ötegezegen adayları yine bu çizelgede sunulmaktadır.

Kontrast oranı hesaplanabilmiş 356 sistemin yalnızca 21 tanesi bahsedilen koşulları sağlayarak gözlemlenebilir nitelikte bulunmuştur. Bunların 4'ü, literatürde doğrudan görüntüleme ile keşfedilmiş ve aynı zamanda model veri setinde bulunduğu için fiziksel parametreleri bu çalışmada yeniden hesaplanmıştır. Beş sistem, ilk hesaplamalarda kontrast limitinin altında kalmasına rağmen Bölüm 5.'de öngörülen iyileştirmeler sonucunda kontrast limitlerinin üzerine çıkmıştır. Kalan 12 sistem ise literatürde doğrudan görüntüleme ile keşfedilmiş olup, model veri setinde bulunmadığı için fiziksel parametrelerine ilişkin herhangi bir hesaplama yapılmamış, bu sistemler için literatürde yer alan mevcut bilgiler kullanılmıştır. Yaklaşık 2 λ/D sınırının altında kalan 3 sistem bilgilendirme amacıyla işaretlenmiştir.

Böylece PLACID sisteminin kontrast sınırları dahilinde DAG teleskobu için aday olabilecek

Tablo 4.2: DAG Teleskobu için gözlemlenebilir aday ötegezegen sistemleri. İsimlerin yanında yer alan üst simgeler; sistemin bu çalışmada kullanılan model veri setinden elde edildiğini (M), kontrast iyileştirmesi sonrası gözlemlenebilir hale geldiğini (I) ve/veya açısal ayrıklığın 2 λ/D eşiğinin altında olduğunu (S) belirtmektedir. Üst simge bulunmayan sistemler ise literatürde doğrudan görüntüleme ile tespit edilmiş kontrol listesinde bulunan gezegenleri temsil etmektedir. Yalnızca bu çalışma ile ilk kez DAG teleskobuna aday gösterilen sistemler ise (*) simgesiyle belirtilmiştir (Bkz. Bölüm 5.). Liste oluşturulurken bu çalışmada kullanılan model hesaplamalarından elde edilen sonuçlara öncelik verilmiştir. Literatür verilerinin referanslarına **Tablo 3.6**'dan ulaşılabilir.

Sistem	RA (J2000)	Dec (J2000)	Açısal Ayrıklık (")	Kontrast
CFBDSIR J145829+101343 b^{S,*}	14:58:29.00	+10:13:43.00	0.10	1.17×10^{-1}
2MASS J04414489+2301513 b^{S,*}	04:41:44.91	+23:01:51.08	0.10	2.13×10^{-1}
2MASS J1119-1137 b^{S,*}	11:19:32.54	-11:37:46.70	0.10	9.91×10^{-1}
LHS 2397 A b *	11:21:49.17	-13:13:08.73	0.20	6.55×10^{-2}
HD 984 b	00:14:10.00	-07:11:57.00	0.22	2.68×10^{-3}
HD 206893 b^{M,I}	21:45:21.99	-12:47:00.07	0.24	1.44×10^{-4}
HR 8799 e^{M,I}	23:07:28.84	+21:08:02.54	0.40	4.84×10^{-5}
HIP 99770 b^{I}	20:14:32.12	+36:48:23.78	0.50	1.51×10^{-5}
2M 0838+15 c *	08:38:12.00	+15:11:16.00	0.50	5.35×10^{-1}
2M 0838+15 b *	08:38:12.00	+15:11:16.00	0.50	7.38×10^{-1}
HR 8799 d^{M,I}	23:07:28.84	+21:08:02.54	0.58	1.99×10^{-5}
HIP 63734 b^{I,*}	13:03:39.00	-16:20:11.00	0.60	3.13×10^{-5}
AB Aur b	04:55:45.85	+30:33:03.92	0.60	1.58×10^{-4}
HD 33632 A b *	05:13:17.00	+37:16:51.00	0.80	4.66×10^{-5}
HD 1160 b	00:15:57.00	+04:15:04.00	0.80	8.79×10^{-4}
WISEP J121756.91+162640.2 A b *	12:17:56.91	+16:26:40.20	0.80	1.32×10^{-1}
HR 8799 c	23:07:28.84	+21:08:02.54	0.90	2.31×10^{-5}
2M 0437 b *	04:37:21.73	+26:51:01.08	0.90	1.07×10^{-1}
HII 1348 b	03:47:18.00	+24:23:27.00	1.10	6.52×10^{-3}
HD 19467 b	03:07:19.00	-13:45:42.00	1.70	1.04×10^{-5}
Kappa And b^{M}	23:40:25.01	+44:20:02.04	2.00	1.70×10^{-5}

en uygun gözlem hedefleri belirlenmiştir.

Tablo 5.1: Gezegen parametreleri ve alt/üst belirsizlik sınırlarına göre yeniden hesaplanan sıcaklık/kontrast değerleri.

Cisim	M_p (M_J)	R_p (R_J)	d (pc)	Sıcaklık T_P(K)			Kontrast		
				Alt Sınır	Merkezi Yaş	Üst Sınır	Alt Sınır	Merkezi Yaş	Üst Sınır
gam Psc b	1.34	1.00	41.31	145.68	139.75	133.29	1.14×10^{-9}	1.14×10^{-9}	1.14×10^{-9}
HD 194490 b	11.26	1.02	80.23	492.15	341.95	320.46	3.25×10^{-7}	6.73×10^{-8}	6.73×10^{-8}
EPIC 248847494 b	13.00	1.01	551.89	536.04	364.50	358.35	1.62×10^{-7}	1.92×10^{-8}	1.92×10^{-8}
HIP 74890 b	2.40	0.99	78.66	172.96	177.00	127.63	3.78×10^{-9}	3.78×10^{-9}	3.78×10^{-9}
TYC 3318-01333-1 b	3.42	1.05	490.61	233.20	167.89	156.94	3.71×10^{-9}	3.71×10^{-9}	3.71×10^{-9}
HIP 67851 c	7.65	1.02	64.12	368.61	324.66	254.46	3.57×10^{-9}	3.57×10^{-9}	3.57×10^{-9}
HD 222076 b	1.56	1.02	91.15	134.83	122.84	113.35	7.87×10^{-9}	7.87×10^{-9}	7.87×10^{-9}
HD 129445 b	1.60	1.01	67.44	121.93	113.24	109.75	7.44×10^{-8}	7.44×10^{-8}	7.44×10^{-8}
HD 94834 b	1.26	0.99	98.16	119.42	112.24	108.26	7.87×10^{-9}	7.87×10^{-9}	7.87×10^{-9}

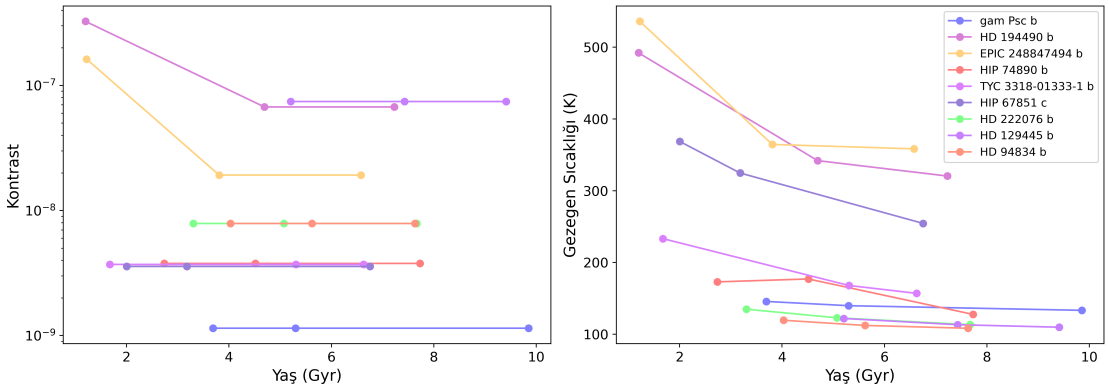
5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada bilinen ötegezegen sistemlerinden yörünge periyodu bir yıldan büyük olan sistemlerin kontrast değerleri hesaplanmış ve DAG Teleskobunun kırınım sınırlı odağında çalışacak olan PLACID koronografiyla görüntülenebilecek olan sistemler belirlenmiştir. Güvenilir ötegezegen kataloglarından derlenen 685 sistemden 356'sının gezegen/barınak yıldız kontrast oranı hesaplanabilmiştir. Bu 356 sistemin 339'u dikine hız, 9'u doğrudan görüntüleme ve 4'ü de zamanlama yöntemiyle keşfedilmiştir.

Kontrast hesaplamaları, gezegenlerin sıcaklıklarının ve dolayısıyla parlaklıklarının, sistem yaşları ve kütlelerine göre modellenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Kontrol örneği olarak seçilen sistemlerdeki kontrast oranları, DAG Teleskobuna kurulacak olan PLACID cihazının laboratuvar ortamında elde edilen kontrast eğrisi ile karşılaştırılmıştır. Böylece hem model sonuçlarının gözlemsel sınırlar içinde kalıp kalmadığı hem de DAG Teleskobunun benzer sistemleri doğrudan gözleyebilme potansiyeli değerlendirilmiştir.

Bölüm 3.5.'de verilen kontrast değerleri ve sıcaklıklar, yaştaki belirsizlik dikkate alınarak *planetsynth* kodunun çalıştığı yaş aralığı ($7 \leq \log t \leq 10$) içinde, en büyük ortalama yaş belirsizliğine sahip 9 sistem için yaşın alt ve üst sınırları için yeniden hesaplanmıştır. Her sistem için gezegen sıcaklığı (T_P) ve kontrast oranı alt sınır, merkezi ve üst sınır yaş senaryolarına göre üçlü bir set halinde elde edilmiştir (**Tablo 5.1**).

Şekil 5.1'de farklı yaş değerleri için gezegen sıcaklıklarında ve kontrasttaki değişimler



Şekil 5.1: Her sistem için alt–merkezi–üst yaş senaryolarında hesaplanan gözlemsel kontrastların ve *planetsynth* ile türetilen gezegen sıcaklığının (T_P) yaşlara göre dağılımı. Renkler, cisimleri; aynı renk grubundaki merkez noktalar ise hesaplanan en iyi yaş değerlerini temsil etmektedir.

gösterilmektedir. Buna göre, yaş aralıklarıyla yeniden hesaplanan kontrastlar genel olarak gerçek kontrastlarla benzerdir. Sistemlerin büyük çoğunluğunda yaş belirsizliği kontrast üzerinde anlamlı bir değişim üretmemektedir. Benzer biçimde, T_P değerleri de çoğu sistemde yaş senaryoları arasında sınırlı değişim göstermiştir. Bu genel eğilimin belirgin istisnaları yalnızca HD 194490 b ve EPIC 248847494 b'dir. Bu iki cismin sıcaklığı T_P yaş senaryosuna bağlı olarak $\sim$ 150 K değişim göstermekte ve bu durum kontrasta da etki etmektedir. Gözlenen T_P farkı, cisimlerin kütlelerinin örneklemin geri kalanına göre daha büyük olması ve buna bağlı olarak genç ve daha kütleli dev gezegenlerin daha yüksek etkin sıcaklığa sahip olmasıyla (Mordasini ve diğ., 2012b) açıklanabilir. Yeniden hesaplanan kontrast değerleri en fazla $\sim 10^{-7}$ değerlere ulaşmış ve PLACID'in hedef duyarlılığına erişememiştir. Dolayısıyla, yaş belirsizliği kontrastı etkileyebilse de analiz edilen örneklemde yaşın kontrasta etkisi genel olarak sınırlı kalmaktadır.

PLACID sisteminin farklı aşamalarda optimize edilmesiyle birlikte elde edilen kontrast değerlerinin 10 kata kadar iyileşme sağlanabileceği beklenmektedir (Tandon ve diğ., 2024). Bu potansiyel iyileştirme; teleskoba entegrasyon öncesi laboratuvar testleri, gözlem sırasındaki gerçek zamanlı düzeltmeler ve gözlem sonrasında uygulanan veri işleme tekniklerinin birlikte etkin biçimde kullanılmasıyla mümkün olabilmektedir.

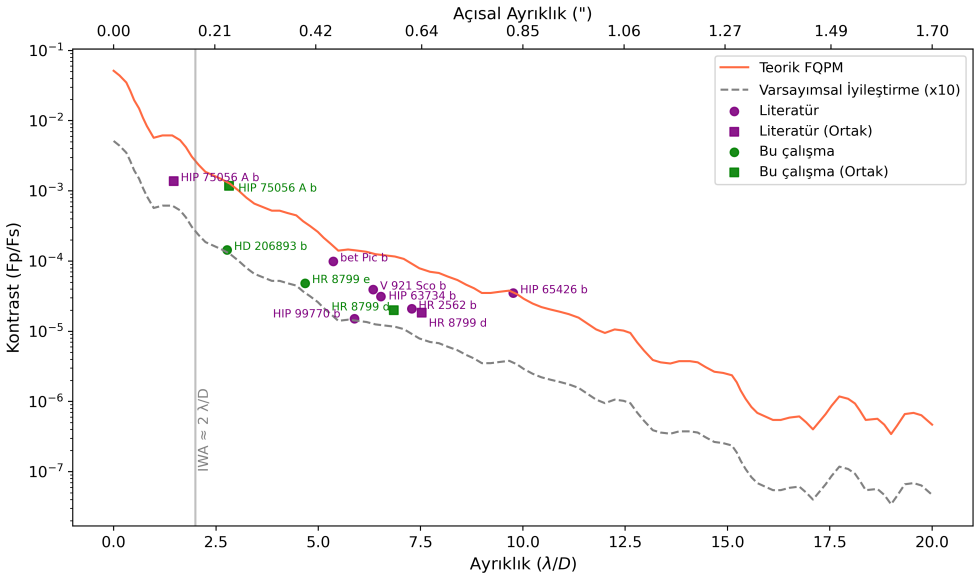
Literatürde farklı sistemlerde bu tür bütüncül yaklaşımlar sayesinde anlamlı kontrast artışları elde edildiği görülmektedir. Örneğin, Zernike faz maskesi kullanan ZELDA sistemi ile VLT/SPHERE üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar testlerinde, nanometrik düzeyde optik

sapmaların düzeltilmesiyle kontrastta yaklaşık 10 kat iyileşme sağlanabilmiştir (N'Diaye ve diğ., 2016). SCExAO test düzeneğinde uygulanan Electric Field Conjugation (EFC) ve Linear Dark Field Control (LDFC) teknikleri sayesinde, odak düzleminde karanlık bölge (*dark hole*) adı verilen yıldız ışığından arındırılmış bölgeler oluşturulmuş ve bu alanlardaki kontrastın kararlı biçimde korunması sağlanmıştır; bu sistemle laboratuvar ortamında $\sim 2 \times 10^{-7}$ kontrast seviyelerine ulaşılabilmiştir (Ahn ve diğ., 2023). Gözlemsel düzeyde, vorteks maskesi kullanan koronograf sistemleriyle yapılan çalışmalarda ise adaptif optik düzeltmeleri ve hizalama stratejileriyle kontrast performansının gözlem sırasında nasıl iyileştirilebildiği ortaya konmuştur (Kühn ve diğ., 2018). Ayrıca, gözlem sonrası uygulanan Angular Differential Imaging (ADI) gibi veri işleme teknikleri sayesinde, yıldız kaynaklı benek (speckle) desenlerinin bastırılarak gezegen sinyalinin daha görünür hale getirilebildiği ve sistemin doğrudan donanımına müdahale etmeksizin 20 ila 50 kat arası iyileştirmelerin mümkün olduğu gösterilmektedir (Marois ve diğ., 2006).

Bu doğrultuda, DAG/PLACID sisteminde öngörülen 10 katlık bir kontrast iyileştirmesiyle birlikte, doğrudan görüntüleme yoluyla gözlenebilme potansiyeli taşıyan bilinen ötegezegen sistemleri **Şekil 5.2**'de ve **Tablo 4.2**'de "S" simgesi ile sunulmaktadır. Gökküresi üzerindeki yerleri ise **Şekil 4.2**'de verilmiştir. Şekilde, bu çalışmada model hesaplamalar yoluyla kontrastı belirlenen cisimler yeşil simge ile gösterilmiştir.

Bu sistemler, DAG Teleskobu için daha önce önerilmiş hedeflerle (Tandon ve diğ., 2024) büyük ölçüde örtüşmektedir. Hem literatürde sunulan kontrast verileri hem de modelleme yoluyla hesaplanan fiziksel parametreler esas alınarak yapılan bu değerlendirme, önerilen adayların gözlenebilirliğine dair mevcut öngörüleri desteklemektedir. Tandon ve diğ. (2024) çalışmasında DAG/PLACID sistemi için öngörülen sistemlerden 11'i bu çalışmada da doğrudan görüntülenebilir olarak belirlenmiştir. Bunun dışında, 7 sistem Tandon ve diğ. (2024) çalışmasında, 10 sistem ise bu çalışmada (Bkz. **Tablo 4.2**) yine doğrudan görüntüleme gözlemleri için uygun aday olarak belirlenmiştir.

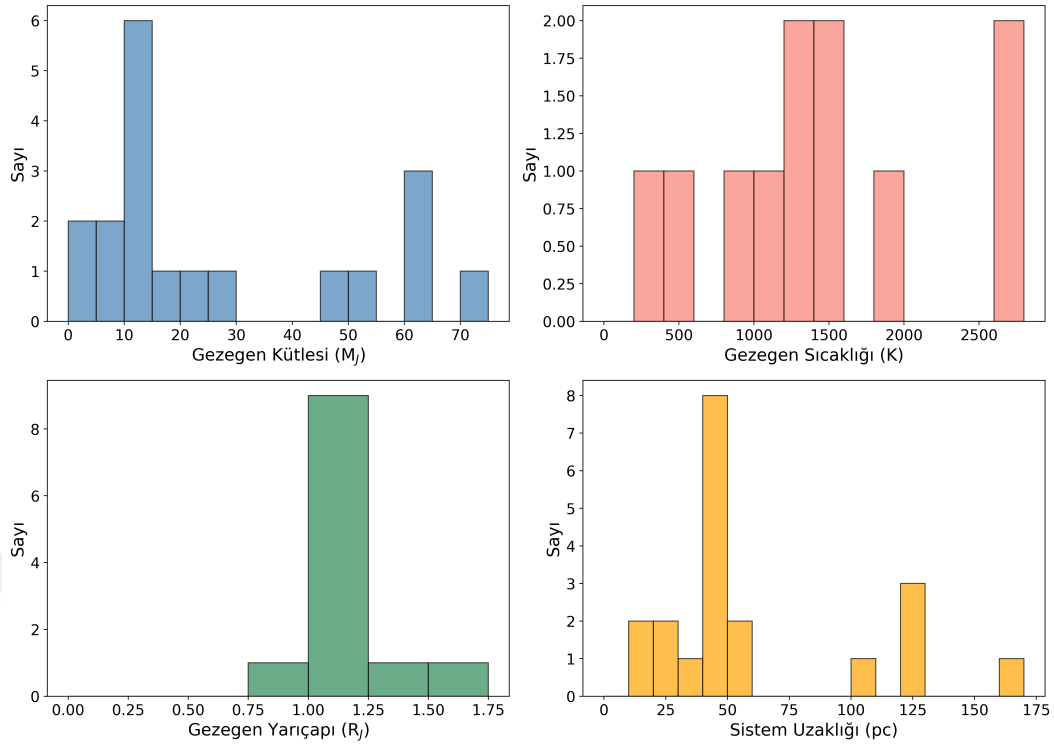
21 cisim için kütle, sıcaklık ve yarıçap ve uzaklık parametreleri için sütun grafikleri **Şekil 5.3**'te verilmektedir. 19 cismin kütle bilgisi mevcuttur ve bunların 9'u 13 M_J eşiğinin altında yer almakta olup gezegen kütleli adaylar arasında değerlendirilmektedir. Etkin sıcaklık bilgisi 11 sistem için bulunmakta olup bunların 2'si $\geq$ 2500 K düzeyindedir; bu sıcaklık rejimi, geç-M/erken-L tayf tipleriyle uyumlu kahverengi cüce özelliklerini



Şekil 5.2: PLACID koronografının DAG Teleskobu için öngörülen performasının 10 kat iyileştirmesiyle elde edilecek kontrast eğrisi (kesikli çizgi) ile FQPM moduna ait kontrast eğrisi (düz kırmızı çizgi) arasında kalan sistemler. Yeşil renk bu çalışmada hesaplanan sistemleri, mor renk ise literatür verilerini temsil etmektedir. Her iki listede de yer alan ortak sistemler kare sembollerle gösterilmiştir.

göstermektedir (Burgasser, 2007; Phan-Bao ve diğ., 2017). Yarıçap parametresi ise 12 sistem için mevcuttur ve değerler 0.93 - 1.58 R_J arasında değişmektedir. Uzaklık bilgisi ise 20 cisim için mevcut olup, sistemlerin çoğu 60 pc'ten daha yakındadır.

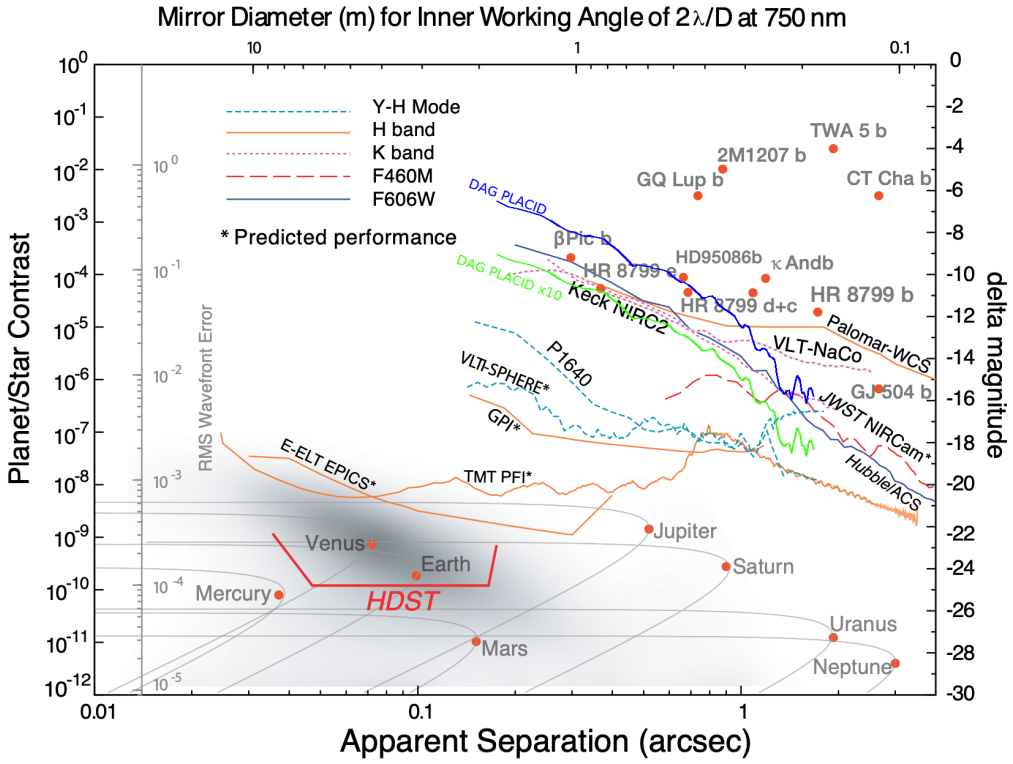
Doğrulanmış ötegezegenlerin sayısı 5000'i geçmiş olsa da, bunların büyük bir kısmı küçük periyotlu, yıldızına yakın gezegenlerdir. Bunun en temel nedeni, binlerce ötegezegenin Kepler, TESS ve yer-tabanlı teleskoplarla geçiş veya zamanlama yöntemleriyle keşfedilmiş olmasındandır. Yıldızına uzak dolayısıyla doğrudan görüntüleme için uygun hedeflerin sayısı birkaç yüz mertebesindedir ve bunlardan DAG ile görüntülenebilecek olanların sayısı bu çalışmada 21 olarak belirlenmiştir. Ancak, bu sonucun dikkatli yorumlanması gerekir. Bilinen sistemlerin görüntülenmesi başlangıçta yalnızca bir doğrulama ve performans karşılaştırması için önemli olacaktır. Halbuki, DAG Teleskobuyla yapılacak sistematik taramalar, çevresinde hiç gezegen veya üçüncü cisim olduğu bilinmeyen tek veya çoklu yıldız sistemlerinde bileşen keşfetme potansiyeli barındırmaktadır (Alis ve diğ., 2024; Lin ve diğ., 2024a; Tandon ve diğ., 2024; Tezcan ve diğ., 2025). Ayrıca, PLACID'in gerçek performansı yerleşkede yapılacak bilimsel test gözlemlerinde anlaşılacaktır ve laboratuvar öngörülerinin iyimser veya kötümser olduğu yönünde herhangi bir bulgu henüz elde edilmemiştir. PLACID'in bilimsel test gözlemleri sonrasında elde edilecek kontrast eğrisi



Şekil 5.3: 21 sistem için gezegen parametrelerinin (kütle, sıcaklık, yarıçap, uzaklık) sütun grafikleri. Kütle, 5 M_J; sıcaklık, 200 K; yarıçap, 0.25 R_J; uzaklık, 10 pc aralıklarla çizilmiştir.

ile bu çalışmanın sonuçları gözden geçirilebilir.

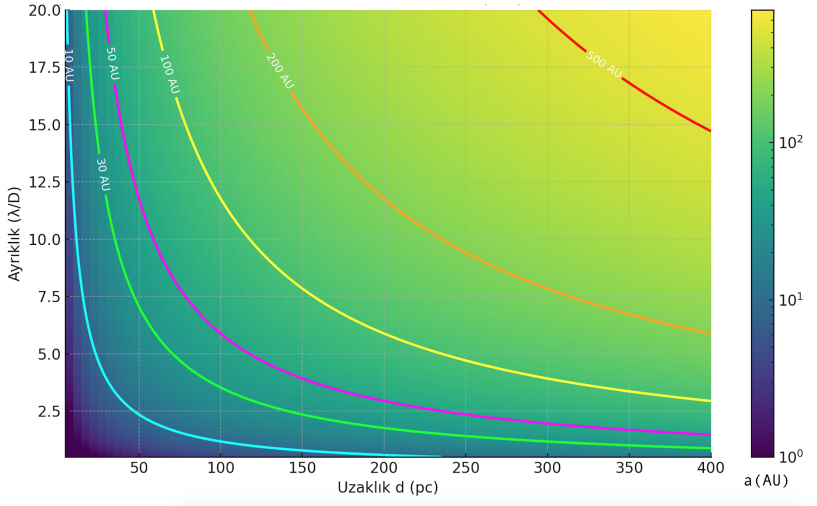
DAG/PLACID'in öngörülen kontrast duyarlılığı, güncel doğrudan görüntüleme aygıtlarının performansıyla uyumlu görünmektedir (**Şekil 5.4**). Güney yarımkürede VLT (SPHERE; Beuzit ve diğ. (2019)) ve Gemini-South (GPI; Macintosh ve diğ. (2015)) gibi tesisler bu alanda öncü rol üstlenirken, DAG'ın coğrafi konumu önemli bir avantaj yaratmaktadır. Erzurum'daki DAG Teleskobu yaklaşık +39°.78 enlemde bulunduğundan, 30° yükseklik sınırı altında $\sim$ -20° ile +90° dikaçıklık aralığına erişebilmektedir. Böylece güney yarımküredeki büyük teleskopların (VLT, Gemini-South) erişemediği +35° üzerindeki kuzey gökyüzü DAG tarafından gözlenebilmektedir. Benzer biçimde, Palomar (+33°.36) (Project 1640; Hinkley ve diğ. (2011)) ve LBT (+32°.70) (SHARK-NIR; Farinato ve diğ. (2018)) gibi kuzeydeki diğer teleskoplarla ortak bir kapsama alanı bulunmakla birlikte, DAG daha yüksek enlemde yer aldığından +50° üzerindeki hedefleri sirkompolar olarak yıl boyu gözleme imkanına sahiptir. Buna karşılık Keck II ve Subaru (+19°.83) (SCExAO; Jovanovic ve diğ. (2015)) daha düşük enlemlerinden dolayı +80° üzerindeki kutup bölgesine erişememektedir. Bu özellikleriyle DAG, kontrast performansında rakipleriyle benzer olsa



Şekil 5.4: Doğrudan görüntüleme enstrümanlarının kontrast duyarlılıklarının karşılaştırması. Şekilde, mevcut sistemlerden Keck/NIRC2, VLT-SPHERE, GPI, JWST/NIRCam ve Hubble/ACS'nin yanı sıra, gelecek nesil teleskoplar için öngörülen TMT-PFI ve E-ELT/EPICS kontrast eğrileri gösterilmektedir. DAG Teleskobu için hesaplanan FQPM tabanlı teorik kontrast eğrisi (mavi) ve bunun 10 kat iyileştirilmiş senaryosu (açık yeşil) aynı grafiğe eklenmiştir. Doğrudan görüntülenmiş bazı dev ötegezegenlerin K-band kontrastları (turuncu noktalar) ve Güneş Sistemi gezegenlerinin 10 pc uzaklıktaki Güneş benzeri bir yıldız etrafındaki kontrastları (gri noktalar) karşılaştırma amacıyla grafikte yer almaktadır. Şekil, Dalcanton ve diğ. (2015) çalışmasından uyarlanmıştır.

da gözlem bölgesi erişimi ve uzun süreli tarama projeleri açısından tamamlayıcı bir rol üstlenebilecek konumdadır.

Gelecek çalışmalar kapsamında, bu çalışmada kullanılan kodların parametre uzayındaki sınırlamaları nedeniyle incelenememiş sistemler için alternatif modelleme yaklaşımlarının değerlendirilmesi ve kullanılan yöntemin veri yolu (pipeline) haline getirilmesi planlanmaktadır. Ayrıca, DAG/PLACID sisteminin gözlem kapasitesini farklı fiziksel koşullar altında sınamak amacıyla sentetik gezegen sistemleri oluşturarak, simülasyon tabanlı analizlerin gerçekleştirilmesi de hedeflenmektedir. Bir ön çalışma olarak, **Şekil 5.5**'te uzaklık–ayrıklık düzleminde farklı yarı-büyük eksen değerleri için üretilen diyagram



Şekil 5.5: Uzaklık–ayrıklık (d–λ/D) düzleminde farklı yarı-büyük eksen değerleri (10–500 AB) için kırınımla sınırlı bir sistem için öngörülen limitler. Renk geçişi yarı-büyük eksen değerlerini göstermektedir. Bu tür simülasyon tabanlı analizlerin, DAG/PLACID sisteminin gözlem kapasitesini farklı fiziksel koşullar altında sınamak üzere gelecek çalışmalarda kullanılması planlanmaktadır.

verilmektedir. Bu görsel, DAG/PLACID sisteminin belirli uzaklıklardaki sistemlerde hangi yörünge ayrıklıklarına sahip gezegenleri ayırt edebileceğini göstermesi bakımından, gelecekte yapılacak sentetik popülasyon analizlerine yöntemsel bir örnek teşkil etmektedir. Bu doğrultuda elde edilecek bulguların, teleskobun hedef seçim süreçlerine katkı sağlaması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

Agol, E. ve Fabrycky, D. C. 2018. Transit-Timing and Duration Variations for the Discovery and Characterization of Exoplanets. In Deeg, H. J. ve Belmonte, J. A., editors, *Handbook of Exoplanets*, page 7. Springer International Publishing.

Ahn, K., Guyon, O., Lozi, J., Vievard, S., Deo, V. ve diğ. 2023. Combining EFC with spatial LDFC for high-contrast imaging on Subaru/SCExAO. *Astron. Astrophys.*, 673,A29.

Alibert, Y., Mordasini, C., Benz, W. ve Winisdoerffer, C. 2005. Models of giant planet formation with migration and disc evolution. *Astron. Astrophys.*, 434(1),343–353.

Alis, S., Kaptan, S., Baştürk, Ö. ve Yeşilyaprak, C. 2024. Towards Direct Imaging Studies of Exoplanets with DAG Telescope. In *EAS2024, European Astronomical Society Annual Meeting*, page 249.

Allard, F. 2014. The BT-Settl Model Atmospheres for Stars, Brown Dwarfs and Planets. In Booth, M., Matthews, B. C. ve Graham, J. R., editors, *Exploring the Formation and Evolution of Planetary Systems*, volume 299 of *IAU Symposium*, pages 271–272.

Alonso, R., Brown, T. M., Torres, G., Latham, D. W., Sozzetti, A. ve diğ. 2004. TrES-1: The Transiting Planet of a Bright K0 V Star. , 613(2),L153–L156.

Amara, A. ve Quanz, S. P. 2012. PYNPOINT: an image processing package for finding exoplanets. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 427(2),948–955.

Andrews, S. M. 2020. Observations of Protoplanetary Disk Structures. , 58,483–528.

Andrews, S. M., Rosenfeld, K. A., Kraus, A. L. ve Wilner, D. J. 2013. The Mass Dependence between Protoplanetary Disks and their Stellar Hosts. , 771(2),129.

Andrews, S. M., Wilner, D. J., Zhu, Z., Birnstiel, T., Carpenter, J. M. ve diğ. 2016. Ringed Substructure and a Gap at 1 au in the Nearest Protoplanetary Disk. , 820(2),L40.

Arras, P. ve Bildsten, L. 2006. Thermal Structure and Radius Evolution of Irradiated Gas Giant Planets. , 650(1),394–407.

Baglin, A., Auvergne, M., Boisnard, L., Lam-Trong, T., Barge, P. ve diğ. 2006. CoRoT: a high precision photometer for stellar ecolution and exoplanet finding. In *36th COSPAR Scientific Assembly*, volume 36, page 3749.

Bakos, G., Noyes, R. W., Kovács, G., Stanek, K. Z., Sasselov, D. D. ve diğ. 2004. Wide-Field Millimagnitude Photometry with the HAT: A Tool for Extrasolar Planet Detection. , 116(817),266–277.

Balbay, R., Tugrul Tezcan, C., Shaemoni Niaei, M., Satır, O. ve Yeşilyaprak, C. 2020. DAG-MAM: Eastern Anatolia Observatory Meteorological and Astronomical Monitoring System. In Pizzo, R., Deul, E. R., Mol, J. D., de Plaa, J. ve Verkouter, H., editors, *Astronomical Data Analysis Software and Systems XXIX*, volume 527 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 567.

Baraffe, I., Chabrier, G., Barman, T. S., Allard, F. ve Hauschildt, P. H. 2003. Evolutionary models for cool brown dwarfs and extrasolar giant planets. The case of HD 209458. *Astron. Astrophys.*, 402,701–712.

Batalha, N. M., Borucki, W. J., Koch, D. G., Bryson, S. T., Haas, M. R. ve diğ. 2010. Selection, Prioritization, and Characteristics of Kepler Target Stars. , 713(2),L109–L114.

Baudino, J. L., Bézard, B., Boccaletti, A., Bonnefoy, M., Lagrange, A. M. ve diğ. 2015. Interpreting the photometry and spectroscopy of directly imaged planets: a new atmospheric model applied to β Pictoris b and SPHERE observations. *Astron. Astrophys.*, 582,A83.

Bayo, A., Rodrigo, C., Barrado Y Navascués, D., Solano, E., Gutiérrez, R. ve diğ. 2008. VOSA: virtual observatory SED analyzer. An application to the Collinder 69 open cluster. *Astron. Astrophys.*, 492(1),277–287.

Beaugé, C. ve Nesvorný, D. 2012. Multiple-planet Scattering and the Origin of Hot Jupiters. , 751(2),119.

Beichman, C., Bryden, G., Llop-Sayson, J., Ygouf, M., Greenbaum, A. ve diğ. 2025. Searching for Planets Orbiting Vega with the James Webb Space Telescope. , 169(1),17.

Bendek, E., Belikov, R., Guyon, O., Currie, T., Hasegawa, Y. ve diğ. 2019. The value of astrometry for exoplanet science. , 51(3),354.

Bessell, M. S., Castelli, F. ve Plez, B. 1998. Model atmospheres broad-band colors, bolometric corrections and temperature calibrations for O - M stars. *Astron. Astrophys.*, 333,231–250.

Best, W. M. J., Liu, M. C., Dupuy, T. J. ve Magnier, E. A. 2017. The Young L Dwarf 2MASS J11193254-1137466 Is a Planetary-mass Binary. , 843(1),L4.

Beuzit, J. L., Vigan, A., Mouillet, D., Dohlen, K., Gratton, R. ve diğ. 2019. SPHERE: the exoplanet imager for the Very Large Telescope. *Astron. Astrophys.*, 631,A155.

Biller, B. A., Liu, M. C., Wahhaj, Z., Nielsen, E. L., Close, L. M. ve diğ. 2010. The Gemini NICI Planet-finding Campaign: Discovery of a Close Substellar Companion to the Young Debris Disk Star PZ Tel. , 720(1),L82–L87.

Boccaletti, A., Cossou, C., Baudoz, P., Lagage, P. O., Dicken, D. ve diğ. 2022. JWST/MIRI coronagraphic performances as measured on-sky. *Astron. Astrophys.*, 667,A165.

Bohn, A. J., Ginski, C., Kenworthy, M. A., Mamajek, E. E., Pecaut, M. J. ve diğ. 2021. Discovery of a directly imaged planet to the young solar analog YSES 2. *Astron. Astrophys.*, 648,A73.

Bohn, A. J., Kenworthy, M. A., Ginski, C., Manara, C. F., Pecaut, M. J. ve diğ. 2020a. The Young Suns Exoplanet Survey: Detection of a wide-orbit planetary-mass companion to a solar-type Sco-Cen member. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 492(1),431–443.

Bohn, A. J., Kenworthy, M. A., Ginski, C., Rieder, S., Mamajek, E. E. ve diğ. 2020b. Two Directly Imaged, Wide-orbit Giant Planets around the Young, Solar Analog TYC 8998-760-1. , 898(1),L16.

Boley, A. C. 2009. The Two Modes of Gas Giant Planet Formation. , 695(1),L53–L57.

Bonavita, M., Fontanive, C., Gratton, R., Mužić, K., Desidera, S. ve diğ. 2022. Results from The COPAINS Pilot Survey: four new BDs and a high companion detection rate for accelerating stars. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 513(4),5588–5605.

Bonnefoy, M., Boccaletti, A., Lagrange, A. M., Allard, F., Mordasini, C. ve diğ. 2013. The near-infrared spectral energy distribution of β Pictoris b. *Astron. Astrophys.*, 555,A107.

Borucki, W. J., Koch, D., Basri, G., Batalha, N., Brown, T. ve diğ. 2010. Kepler Planet-Detection Mission: Introduction and First Results. *Science*, 327(5968),977.

Boss, A. P. 1997. Giant planet formation by gravitational instability. *Science*, 276,1836–1839.

Boss, A. P. 2000. From Disks to Planets: An Overview (Invited Review). In Garzón, G., Eiroa, C., de Winter, D. ve Mahoney, T. J., editors, *Disks, Planetesimals, and Planets*, volume 219 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 7.

Boss, A. P. 2002. Stellar Metallicity and the Formation of Extrasolar Gas Giant Planets. , 567(2),L149–L153.

Boss, A. P. 2011. Formation of Giant Planets by Disk Instability on Wide Orbits Around Protostars with Varied Masses. , 731(1),74.

Boss, A. P. ve Kanodia, S. 2023. Forming Gas Giants around a Range of Protostellar M-dwarfs by Gas Disk Gravitational Instability. , 956(1),4.

Bowler, B. P. 2016. Imaging Extrasolar Giant Planets. , 128(968),102001.

Bowler, B. P., Liu, M. C., Shkolnik, E. L. ve Dupuy, T. J. 2013. Planets around Low-mass Stars. III. A Young Dusty L Dwarf Companion at the Deuterium-burning Limit. , 774(1),55.

Bowler, B. P., Liu, M. C., Shkolnik, E. L. ve Tamura, M. 2015. Planets around Low-mass Stars (PALMS). IV. The Outer Architecture of M Dwarf Planetary Systems. , 216(1),7.

Bozza, V., Mancini, L. ve Sozzetti, A., editors 2016. *Methods of Detecting Exoplanets*, volume 428 of *Astrophysics and Space Science Library*.

Breckinridge, J. B., Kupinski, M., Davis, J., Daugherty, B. ve Chipman, R. A. 2018. Terrestrial exoplanet coronagraph image quality polarization aberrations in Habex,#. In Lystrup, M., MacEwen, H. A., Fazio, G. G., Batalha, N., Siegler, N. ve diğ., editors, *Space Telescopes and Instrumentation 2018: Optical, Infrared, and Millimeter Wave*, volume 10698 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, page 106981D.

Burgasser, A. J. 2007. Binaries and the L Dwarf/T Dwarf Transition. , 659(1),655–674.

Burrows, A., Marley, M., Hubbard, W. B., Lunine, J. I., Guillot, T. ve diğ. 1997. A Nongray Theory of Extrasolar Giant Planets and Brown Dwarfs. , 491(2),856–875.

Carson, J., Thalmann, C., Janson, M., Kozakis, T., Bonnefoy, M. ve diğ. 2013. Direct Imaging Discovery of a "Super-Jupiter" around the Late B-type Star κ And. , 763(2),L32.

Castelli, F. ve Kurucz, R. L. 2003. New Grids of ATLAS9 Model Atmospheres. In Piskunov, N., Weiss, W. W. ve Gray, D. F., editors, *Modelling of Stellar Atmospheres*, volume 210 of *IAU Symposium*, page A20.

Chambers, J. 2010. Terrestrial Planet Formation. In Seager, S., editor, *Exoplanets*, pages 297–317. University of Arizona Press.

Chambers, J. E. 2009. Planetary Migration: What Does It Mean for Planet Formation? *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 37(1),321–344.

Champion, D. J., Hobbs, G. B., Manchester, R. N., Edwards, R. T., Backer, D. C. ve diğ. 2010. Measuring the Mass of Solar System Planets Using Pulsar Timing. , 720(2),L201–L205.

Chauvin, G., Desidera, S., Lagrange, A. M., Vigan, A., Gratton, R. ve diğ. 2017. Discovery of a warm, dusty giant planet around HIP 65426. *Astron. Astrophys.*, 605,L9.

Chauvin, G., Lagrange, A. M., Dumas, C., Zuckerman, B., Mouillet, D. ve diğ. 2004. A giant planet candidate near a young brown dwarf. Direct VLT/NACO observations using IR wavefront sensing. *Astron. Astrophys.*, 425,L29–L32.

Cheetham, A., Bonnefoy, M., Desidera, S., Langlois, M., Vigan, A. ve diğ. 2018. Discovery of a brown dwarf companion to the star HIP 64892. *Astron. Astrophys.*, 615,A160.

Chen, J. ve Kipping, D. 2017. Probabilistic Forecasting of the Masses and Radii of Other Worlds. , 834(1),17.

Choi, J., Dotter, A., Conroy, C., Cantiello, M., Paxton, B. ve diğ. 2016. Mesa Isochrones and Stellar Tracks (MIST). I. Solar-scaled Models. , 823(2),102.

Cochran, W. D. ve Hatzes, A. P. 1996. Radial Velocity Searches for Other Planetary Systems: Current Status and Future Prospects. , 241(1),43–60.

Cornia, A., Mugnier, L. M., Mouillet, D., Vigan, A., Eggenberger, A. ve diğ. 2010. Optimal method for exoplanet detection by spectral and angular differential imaging. In Ellerbroek, B. L., Hart, M., Hubin, N. ve Wizinowich, P. L., editors, *Adaptive Optics Systems II*, volume 7736 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, page 77361E.

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

Currie, T., Biller, B., Lagrange, A., Marois, C., Guyon, O. ve diğ. 2023a. Direct Imaging and Spectroscopy of Extrasolar Planets. In Inutsuka, S., Aikawa, Y., Muto, T., Tomida, K. ve Tamura, M., editors, *Protostars and Planets VII*, volume 534 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 799.

Currie, T., Brandt, G. M., Brandt, T. D., Lacy, B., Burrows, A. ve diğ. 2023b. Direct imaging and astrometric detection of a gas giant planet orbiting an accelerating star. *Science*, 380(6641),198–203.

Currie, T., Brandt, T. D., Kuzuhara, M., Chilcote, J., Guyon, O. ve diğ. 2020. SCExAO/CHARIS Direct Imaging Discovery of a 20 au Separation, Low-mass Ratio Brown Dwarf Companion to an Accelerating Sun-like Star. , 904(2),L25.

Currie, T., Burrows, A., Itoh, Y., Matsumura, S., Fukagawa, M. ve diğ. 2011. A Combined Subaru/VLT/MMT 1-5 μm Study of Planets Orbiting HR 8799: Implications for Atmospheric Properties, Masses, and Formation. , 729(2),128.

Currie, T., Lawson, K., Schneider, G., Lyra, W., Wisniewski, J. ve diğ. 2022. Images of embedded Jovian planet formation at a wide separation around AB Aurigae. *Nature Astronomy*, 6,751–759.

Dalba, P. A., Muirhead, P. S., Fortney, J. J., Hedman, M. M., Nicholson, P. D. ve diğ. 2015. The Transit Transmission Spectrum of a Cold Gas Giant Planet. , 814(2),154.

Dalcanton, J., Seager, S., Aigrain, S., Battel, S., Brandt, N. ve diğ. 2015. From Cosmic Birth to Living Earths: The Future of UVOIR Space Astronomy. *arXiv e-prints*, page arXiv:1507.04779.

D'Angelo, G. ve Lissauer, J. J. 2018. Formation of Giant Planets. In Deeg, H. J. ve Belmonte, J. A., editors, *Handbook of Exoplanets*, page 140. Springer International Publishing.

Davies, R. ve Kasper, M. 2012. Adaptive Optics for Astronomy. , 50,305–351.

De Rosa, R. J., Nielsen, E. L., Wahhaj, Z., Ruffio, J.-B., Kalas, P. G. ve diğ. 2023. Direct imaging discovery of a super-Jovian around the young Sun-like star AF Leporis. *Astron. Astrophys.*, 672,A94.

Deeg, H. J. ve Belmonte, J. A. 2018. *Handbook of Exoplanets*. Springer International Publishing AG.

Deeg, H. J., Ocaña, B., Kozhevnikov, V. P., Charbonneau, D., O'Donovan, F. T. ve diğ. 2008. Extrasolar planet detection by binary stellar eclipse timing: evidence for a third body around CM Draconis. *Astron. Astrophys.*, 480(2),563–571.

Demangeon, O. D. S., Zapatero Osorio, M. R., Alibert, Y., Barros, S. C. C., Adibekyan, V. ve diğ. 2021. Warm terrestrial planet with half the mass of Venus transiting a nearby star. *Astron. Astrophys.*, 653,A41.

Dotter, A. 2016. MESA Isochrones and Stellar Tracks (MIST) 0: Methods for the Construction of Stellar Isochrones. , 222(1),8.

Dupuy, T. J., Liu, M. C. ve Ireland, M. J. 2009. Keck Laser Guide Star Adaptive Optics Monitoring of the M8+L7 Binary LHS 2397aAB: First Dynamical Mass Benchmark at the L/T Transition. , 699(1),168–185.

Dvorak, R. 1986. Critical orbits in the elliptic restricted three-body problem. *Astron. Astrophys.*, 167,379–386.

Ercolano, B. ve Clarke, C. J. 2010. Metallicity, planet formation and disc lifetimes. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 402(4),2735–2743.

Esposito, S., Mesa, D., Skemer, A., Arcidiacono, C., Claudi, R. U. ve diğ. 2013. LBT observations of the HR 8799 planetary system. First detection of HR 8799e in H band. *Astron. Astrophys.*, 549,A52.

European Southern Observatory, 2025. Active optics technology. `https://www.eso.org/public/teles-instr/technology/active_optics/`. Erişim tarihi: 06 Ağustos 2025.

Farinato, J., Bacciotti, F., Baffa, C., Baruffolo, A., Bergomi, M. ve diğ. 2018. SHARK-NIR, the coronagraphic camera for LBT, moving toward construction. *arXiv e-prints*, page arXiv:1808.00364.

Feng, F. 2024. Astrometric detection of exoplanets. *arXiv e-prints*, page arXiv:2403.08226.

Figueira, P., Pont, F., Mordasini, C., Alibert, Y., Georgy, C. ve diğ. 2009. Bulk composition of the transiting hot Neptune around GJ 436. *Astron. Astrophys.*, 493(2),671–676.

Fischer, D. A., Howard, A. W., Laughlin, G. P., Macintosh, B., Mahadevan, S. ve diğ. 2014. Exoplanet Detection Techniques. In Beuther, H., Klessen, R. S., Dullemond, C. P. ve Henning, T., editors, *Protostars and Planets VI*, pages 715–737.

Fischer, D. A. ve Valenti, J. 2005. The Planet-Metallicity Correlation. , 622(2),1102–1117.

Fişek, S. 2025. *Doğu Anadolu Gözlemevi Adaptif Optik Sisteminin Galaksi Çalışmalarına Etkisinin Simülasyonlarla İncelenmesi*. PhD thesis, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye. Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sinan Aliş.

Follette, K. B. 2023. An Introduction to High Contrast Differential Imaging of Exoplanets and Disks. , 135(1051),093001.

Fontanive, C., Allers, K. N., Pantoja, B., Biller, B., Dubber, S. ve diğ. 2020. A Wide Planetary-mass Companion to a Young Low-mass Brown Dwarf in Ophiuchus. , 905(2),L14.

Foreman-Mackey, D., Hogg, D. W., Lang, D. ve Goodman, J. 2013. emcee: The MCMC Hammer. , 125(925),306.

Fortney, J. J., Ikoma, M., Nettelmann, N., Guillot, T. ve Marley, M. S. 2011. Self-consistent Model Atmospheres and the Cooling of the Solar System's Giant Planets. , 729(1),32.

Fortney, J. J., Marley, M. S. ve Barnes, J. W. 2007. Planetary Radii across Five Orders of Magnitude in Mass and Stellar Insolation: Application to Transits. , 659(2),1661–1672.

Fortney, J. J., Marley, M. S., Saumon, D. ve Lodders, K. 2008. Synthetic Spectra and Colors of Young Giant Planet Atmospheres: Effects of Initial Conditions and Atmospheric Metallicity. , 683(2),1104–1116.

Fulton, B. J., Petigura, E. A., Howard, A. W., Isaacson, H., Marcy, G. W. ve diğ. 2017. The California-Kepler Survey. III. A Gap in the Radius Distribution of Small Planets. , 154(3),109.

Gaidos, E., Hirano, T., Kraus, A. L., Kuzuhara, M., Zhang, Z. ve diğ. 2022. Zodiacal exoplanets in time (ZEIT) XII: a directly imaged planetary-mass companion to a young Taurus M dwarf star. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 512(1),583–601.

Galicher, R., Boccaletti, A., Mesa, D., Delorme, P., Gratton, R. ve diğ. 2018. Astrometric and photometric accuracies in high contrast imaging: The SPHERE speckle calibration tool (SpeCal). *Astron. Astrophys.*, 615,A92.

Gammie, C. F. 2001. Nonlinear Outcome of Gravitational Instability in Cooling, Gaseous Disks. , 553(1),174–183.

Geißler, K., Metchev, S. A., Pham, A., Larkin, J. E., McElwain, M. ve diğ. 2012. A Substellar Common Proper-motion Companion to the Pleiad H II 1348. , 746(1),44.

Gillon, M., Jehin, E., Magain, P., Chantry, V., Hutsemékers, D. ve diğ. 2011. TRAPPIST: a robotic telescope dedicated to the study of planetary systems. In *European Physical Journal Web of Conferences*, volume 11 of *European Physical Journal Web of Conferences*, page 06002. EDP.

Goldman, B., Marsat, S., Henning, T., Clemens, C. ve Greiner, J. 2010. A new benchmark T8-9 brown dwarf and a couple of new mid-T dwarfs from the UKIDSS DR5+ LAS. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 405(2),1140–1152.

Goldreich, P. ve Ward, W. R. 1973. The Formation of Planetesimals. , 183,1051–1062.

Grieves, N., Bouchy, F., Ulmer-Moll, S., Gill, S., Anderson, D. R. ve diğ. 2022. An old warm Jupiter orbiting the metal-poor G-dwarf TOI-5542. *Astron. Astrophys.*, 668,A29.

Guilera, O. M., Sándor, Z., Ronco, M. P., Venturini, J. ve Miller Bertolami, M. M. 2020. Giant planet formation at the pressure maxima of protoplanetary disks. II. A hybrid accretion scenario. *Astron. Astrophys.*, 642,A140.

Guyon, O. 2003. Phase-induced amplitude apodization of telescope pupils for extrasolar terrestrial planet imaging. *Astron. Astrophys.*, 404,379–387.

Guyon, O. 2005. Limits of Adaptive Optics for High-Contrast Imaging. , 629(1),592–614.

Guyon, O. 2018. Extreme Adaptive Optics. , 56,315–355.

Güney, Y. 2020. *Doğu Anadolu Gözlemevi Yerleşkesi Atmosferik Görüş Ölçümleri*. PhD thesis, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Astronomi ve Astrofizik Anabilim Dalı, Erzurum, Türkiye. Danışman: Prof. Dr. Cahit Yeşilyaprak.

Güvenir, F. 2021. Dag adaptif optik sisteminin performans değerlendirmesi. Master's thesis, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Astronomi ve Astrofizik Anabilim Dalı, Erzurum, Türkiye.

Hansen, B. M. S. ve Murray, N. 2012. Migration Then Assembly: Formation of Neptune-mass Planets inside 1 AU. , 751(2),158.

Hatzes, A. P. ve Liseau, R. 2018. Future Exoplanet Space Missions: Spectroscopy and Coronographic Imaging. In Deeg, H. J. ve Belmonte, J. A., editors, *Handbook of Exoplanets*, page 88. Springer International Publishing.

Hauschildt, P. H. ve Baron, E. 1999. Numerical solution of the expanding stellar atmosphere problem. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 109(1),41–63.

Hayashi, C., Nakazawa, K. ve Nakagawa, Y. 1985. Formation of the solar system. In Black, D. C. ve Matthews, M. S., editors, *Protostars and Planets II*, pages 1100–1153.

Heller, R., Hippke, M., Placek, B., Angerhausen, D. ve Agol, E. 2016. Predictable patterns in planetary transit timing variations and transit duration variations due to exomoons. *Astron. Astrophys.*, 591,A67.

Hermes, J. J. 2018. Timing by Stellar Pulsations as an Exoplanet Discovery Method. In Deeg, H. J. ve Belmonte, J. A., editors, *Handbook of Exoplanets*, page 6. Springer International Publishing.

Hill, M. L., Bott, K., Dalba, P. A., Fetherolf, T., Kane, S. R. ve diğ. 2022. A Catalog of Habitable Zone Exoplanets. In *Exoplanets in Our Backyard 2*, volume 2687 of *LPI Contributions*, page 3046.

Hinkley, S., Oppenheimer, B. R., Zimmerman, N., Brenner, D., Parry, I. R. ve diğ. 2011. A New High Contrast Imaging Program at Palomar Observatory. , 123(899),74.

Holman, M. J., Fabrycky, D. C., Ragozzine, D., Ford, E. B., Steffen, J. H. ve diğ. 2010. Kepler-9: A System of Multiple Planets Transiting a Sun-Like Star, Confirmed by Timing Variations. *Science*, 330(6000),51.

Howell, S. B., Sobeck, C., Haas, M., Still, M., Barclay, T. ve diğ. 2014. The K2 Mission: Characterization and Early Results. , 126(938),398.

Huang, J., Andrews, S. M., Cleeves, L. I., Öberg, K. I., Wilner, D. J. ve diğ. 2018. CO and Dust Properties in the TW Hya Disk from High-resolution ALMA Observations. , 852(2),122.

Husser, T. O., Wende-von Berg, S., Dreizler, S., Homeier, D., Reiners, A. ve diğ. 2013. A new extensive library of PHOENIX stellar atmospheres and synthetic spectra. *Astron. Astrophys.*, 553,A6.

Ida, S. ve Lin, D. N. C. 2004. Toward a Deterministic Model of Planetary Formation. I. A Desert in the Mass and Semimajor Axis Distributions of Extrasolar Planets. , 604(1),388–413.

Itoh, S., Matsuo, T., Ota, S., Hara, K., Ikeda, Y. ve diğ. 2023. Experimental Verification of a One-dimensional Diffraction-limit Coronagraph. , 135(1048),064502.

Jensen-Clem, R., Millar-Blanchaer, M., Mawet, D., Graham, J. R., Wallace, J. K. ve diğ. 2016. Point Source Polarimetry with the Gemini Planet Imager: Sensitivity Characterization with T5.5 Dwarf Companion HD 19467 B. , 820(2),111.

Johnson-Groh, M., Marois, C., De Rosa, R. J., Nielsen, E. L., Rameau, J. ve diğ. 2017. Integral Field Spectroscopy of the Low-mass Companion HD 984 B with the Gemini Planet Imager. , 153(4),190.

Jovanovic, N., Echeverri, D., Delorme, J.-R., Finnerty, L., Schofield, T. ve diğ. 2025. Technical description and performance of the phase II version of the Keck Planet Imager and Characterizer. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 11,015005.

Jovanovic, N., Martinache, F., Guyon, O., Clergeon, C., Singh, G. ve diğ. 2015. The Subaru Coronagraphic Extreme Adaptive Optics System: Enabling High-Contrast Imaging on Solar-System Scales. , 127(955),890.

Kaltenegger, L. ve Sasselov, D. 2011. Exploring the Habitable Zone for Kepler Planetary Candidates. , 736(2),L25.

Kasdin, N. J., Bailey, V. P., Mennesson, B., Zellem, R. T., Ygouf, M. ve diğ. 2020. The Nancy Grace Roman Space Telescope Coronagraph Instrument (CGI) technology demonstration. In Lystrup, M. ve Perrin, M. D., editors, *Space Telescopes and Instrumentation 2020: Optical, Infrared, and Millimeter Wave*, volume 11443 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, page 114431U.

Kasdin, N. J., Vanderbei, R. J., Spergel, D. N. ve Littman, M. G. 2003. Extrasolar Planet Finding via Optimal Apodized-Pupil and Shaped-Pupil Coronagraphs. , 582(2),1147–1161.

Kasting, J. F., Whitmire, D. P. ve Reynolds, R. T. 1993. Habitable Zones around Main Sequence Stars. , 101(1),108–128.

Keppler, M., Benisty, M., Müller, A., Henning, T., van Boekel, R. ve diğ. 2018. Discovery of a planetary-mass companion within the gap of the transition disk around PDS 70. *Astron. Astrophys.*, 617,A44.

Keskin, O., Jolissaint, L., Bouxin, A. ve Yesilyaprak, C. 2020. TROIA adaptive optics system for DAG Telescope. In Schreiber, L., Schmidt, D. ve Vernet, E., editors, *Adaptive Optics Systems VII*, volume 11448 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, page 114481P.

Keskin, O., Jolissaint, L., Bouxin, A. ve Yesilyaprak, C. 2022. TROIA adaptive optics system for DAG telescope: assembly and laboratory performance prior to on-sky assessment. In Schreiber, L., Schmidt, D. ve Vernet, E., editors, *Adaptive Optics Systems VIII*, volume 12185 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, page 121851W.

Kiefer, S., Bohn, A. J., Quanz, S. P., Kenworthy, M. ve Stolker, T. 2021. Spectral and angular differential imaging with SPHERE/IFS. Assessing the performance of various PCA-based approaches to PSF subtraction. *Astron. Astrophys.*, 652,A33.

Kim, S.-L., Lee, C.-U., Park, B.-G., Kim, D.-J., Cha, S.-M. ve diğ. 2016. KMTNET: A Network of 1.6 m Wide-Field Optical Telescopes Installed at Three Southern Observatories. *Journal of Korean Astronomical Society*, 49(1),37–44.

Konacki, M. ve Wolszczan, A. 2003. Masses and Orbital Inclinations of Planets in the PSR B1257+12 System. , 591(2),L147–L150.

Konopacky, Q. M., Rameau, J., Duchêne, G., Filippazzo, J. C., Giorla Godfrey, P. A. ve diğ. 2016. Discovery of a Substellar Companion to the Nearby Debris Disk Host HR 2562. , 829(1),L4.

Kratter, K. ve Lodato, G. 2016. Gravitational Instabilities in Circumstellar Disks. , 54,271–311.

Kraus, A. L., Ireland, M. J., Cieza, L. A., Hinkley, S., Dupuy, T. J. ve diğ. 2014. Three Wide Planetary-mass Companions to FW Tau, ROXs 12, and ROXs 42B. , 781(1),20.

Kühn, J., Daemgen, S., Wang, J., Morales, F., Bottom, M. ve diğ. 2018. High-contrast imaging of tight resolved binaries with two vector vortex coronagraphs in cascade with the Palomar SDC instrument. In Evans, C. J., Simard, L. ve Takami, H., editors, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VII*, volume 10702 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, page 1070242.

Kühn, J. G., Jolissaint, L., Baur, A., Lin, L., Potier, A. ve diğ. 2024. The Programmable Liquid-crystal Active Coronagraphic Imager for the DAG telescope (PLACID) instrument: On-site status update ahead of first light. *arXiv e-prints*, page arXiv:2408.10893.

Kühn, J. G., Jolissaint, L., Bouxin, A. ve Patapis, P. 2021. SLM-based Active Focal-Plane Coronagraphy: Status and future on-sky prospects. *arXiv e-prints*, page arXiv:2102.03201.

Kuiper, G. P. 1951. On the Evolution of the Protoplanets. *Proceedings of the National Academy of Science*, 37(7),383–393.

Kurucz, R. 1993. ATLAS9 Stellar Atmosphere Programs and 2 km/s grid. *Robert Kurucz CD-ROM*, 13.

Kuzuhara, M., Tamura, M., Kudo, T., Janson, M., Kandori, R. ve diğ. 2013. Direct Imaging of a Cold Jovian Exoplanet in Orbit around the Sun-like Star GJ 504. , 774(1),11.

Lafrenière, D., Marois, C., Doyon, R., Nadeau, D. ve Artigau, É. 2007. A New Algorithm for Point-Spread Function Subtraction in High-Contrast Imaging: A Demonstration with Angular Differential Imaging. , 660(1),770–780.

Lagrange, A. M., Bonnefoy, M., Chauvin, G., Apai, D., Ehrenreich, D. ve diğ. 2010. A Giant Planet Imaged in the Disk of the Young Star β Pictoris. *Science*, 329(5987),57.

Launhardt, R. 2009. Exoplanet search with astrometry. , 53(11-12),294–300.

Lin, L., Potier, A., Tandon, R., Jolissaint, L., Baur, A. ve diğ. 2024a. The Programmable Liquid-crystal Active Coronagraphic Imager for the DAG telescope (PLACID) instrument: simulations, discovery space and status update. In *European Planetary Science Congress*, pages EPSC2024–940.

Lin, L., Potier, A., Tandon, R. ve Kühn, J. 2024b. Future exoplanet direct imaging instruments: simulating spatial light modulator-based pixelated focal-plane coronagraphy. In Bryant, J. J., Motohara, K. ve Vernet, J. R. D., editors, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy X*, volume 13096 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, page 130963E.

Lissauer, J. J., Fabrycky, D. C., Ford, E. B., Borucki, W. J., Fressin, F. ve diğ. 2011. A closely packed system of low-mass, low-density planets transiting Kepler-11. , 470(7332),53–58.

Liu, M. C., Delorme, P., Dupuy, T. J., Bowler, B. P., Albert, L. ve diğ. 2011. CFBDSIR J1458+1013B: A Very Cold (>T10) Brown Dwarf in a Binary System. , 740(2),108.

Liu, M. C., Dupuy, T. J., Bowler, B. P., Leggett, S. K. ve Best, W. M. J. 2012. Two Extraordinary Substellar Binaries at the T/Y Transition and the Y-band Fluxes of the Coolest Brown Dwarfs. , 758(1),57.

Lubow, S. H. ve Ida, S. 2010. Planet Migration. *arXiv e-prints*, page arXiv:1004.4137.

Luhman, K. L., Mamajek, E. E., Allen, P. R., Muench, A. A. ve Finkbeiner, D. P. 2009. Discovery of a Wide Binary Brown Dwarf Born in Isolation. , 691(2),1265–1275.

Luhman, K. L., Wilson, J. C., Brandner, W., Skrutskie, M. F., Nelson, M. J. ve diğ. 2006. Discovery of a Young Substellar Companion in Chamaeleon. , 649(2),894–899.

Lyot, B. 1939. The study of the solar corona and prominences without eclipses (George Darwin Lecture, 1939). *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 99,580.

Macintosh, B., Graham, J. R., Barman, T., De Rosa, R. J., Konopacky, Q. ve diğ. 2015. Discovery and spectroscopy of the young jovian planet 51 Eri b with the Gemini Planet Imager. *Science*, 350(6256),64–67.

Macintosh, B., Graham, J. R., Ingraham, P., Konopacky, Q., Marois, C. ve diğ. 2014. First light of the Gemini Planet Imager. *Proceedings of the National Academy of Science*, 111(35),12661–12666.

Madhusudhan, N., Amin, M. A. ve Kennedy, G. M. 2014. Toward Chemical Constraints on Hot Jupiter Migration. , 794(1),L12.

Magliano, C., Covone, G., Corsaro, E., Inno, L., Cacciapuoti, L. ve diğ. 2024. Revisiting the conundrum of the sub-Jovian and Neptune desert: A new approach that incorporates stellar properties. *Astron. Astrophys.*, 692,A162.

Maire, A. L., Bonnefoy, M., Ginski, C., Vigan, A., Messina, S. ve diğ. 2016. First light of the VLT planet finder SPHERE. II. The physical properties and the architecture of the young systems PZ Telescopii and HD 1160 revisited. *Astron. Astrophys.*, 587,A56.

Maire, A. L., Chauvin, G., Vigan, A., Gratton, R., Langlois, M. ve diğ. 2021. High-precision Astrometric Studies in Direct Imaging with SPHERE. *The Messenger*, 183,7–12.

Mamajek, E. E., Prsa, A., Torres, G., Harmanec, P., Asplund, M. ve diğ. 2015. IAU 2015 Resolution B3 on Recommended Nominal Conversion Constants for Selected Solar and Planetary Properties. *arXiv e-prints*, page arXiv:1510.07674.

Marley, M. S., Fortney, J. J., Hubickyj, O., Bodenheimer, P. ve Lissauer, J. J. 2007. On the Luminosity of Young Jupiters. , 655(1),541–549.

Marley, M. S., Saumon, D., Visscher, C., Lupu, R., Freedman, R. ve diğ. 2021. The Sonora Brown Dwarf Atmosphere and Evolution Models. I. Model Description and Application to Cloudless Atmospheres in Rainout Chemical Equilibrium. , 920(2),85.

Marois, C., Lafrenière, D., Doyon, R., Macintosh, B. ve Nadeau, D. 2006. Angular Differential Imaging: A Powerful High-Contrast Imaging Technique. , 641(1),556–564.

Marois, C., Lafrenière, D., Macintosh, B. ve Doyon, R. 2008. Confidence Level and Sensitivity Limits in High-Contrast Imaging. , 673(1),647–656.

Marois, C., Zuckerman, B., Konopacky, Q. M., Macintosh, B. ve Barman, T. 2010. Images of a fourth planet orbiting HR 8799. , 468(7327),1080–1083.

Martin, R. G. ve Livio, M. 2014. On the Evolution of the CO Snow Line in Protoplanetary Disks. , 783(2),L28.

Matthews, E. C., Carter, A. L., Pathak, P., Morley, C. V., Phillips, M. W. ve diğ. 2024. A temperate super-Jupiter imaged with JWST in the mid-infrared. , 633(8031),789–792.

Mawet, D., Pueyo, L., Lawson, P., Mugnier, L., Traub, W. ve diğ. 2012. Review of small-angle coronagraphic techniques in the wake of ground-based second-generation adaptive optics systems. In Clampin, M. C., Fazio, G. G., MacEwen, H. A. ve Oschmann, J. M., editors, *Space Telescopes and Instrumentation 2012: Optical, Infrared, and Millimeter Wave*, volume 8442 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, page 844204.

Mawet, D., Riaud, P., Absil, O. ve Surdej, J. 2005. Annular Groove Phase Mask Coronagraph. , 633(2),1191–1200.

Mawet, D., Serabyn, E., Liewer, K., Burruss, R., Hickey, J. ve diğ. 2010. The Vector Vortex Coronagraph: Laboratory Results and First Light at Palomar Observatory. , 709(1),53–57.

Mayor, M., Pepe, F., Queloz, D., Bouchy, F., Rupprecht, G. ve diğ. 2003. Setting New Standards with HARPS. *The Messenger*, 114,20–24.

Mayor, M. ve Queloz, D. 1995. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. , 378(6555),355–359.

Méndez, A. 2022. The Planetary Habitability Laboratory (PHL). In *Advancing IDEA in Planetary Science*, volume 2679 of *LPI Contributions*, page 2037.

Mercer, A. ve Stamatellos, D. 2020. Planet formation around M dwarfs via disc instability. Fragmentation conditions and protoplanet properties. *Astron. Astrophys.*, 633,A116.

Meshkat, T., Bailey, V., Rameau, J., Bonnefoy, M., Boccaletti, A. ve diğ. 2013. Further Evidence of the Planetary Nature of HD 95086 b from Gemini/NICI H-band Data. , 775(2),L40.

Miller, N. ve Fortney, J. J. 2011. The Heavy-element Masses of Extrasolar Giant Planets, Revealed. , 736(2),L29.

Mollière, P., van Boekel, R., Dullemond, C., Henning, T. ve Mordasini, C. 2015. Model Atmospheres of Irradiated Exoplanets: The Influence of Stellar Parameters, Metallicity, and the C/O Ratio. , 813(1),47.

Monnier, J. D., Che, X., Zhao, M., Ekström, S., Maestro, V. ve diğ. 2012. Resolving Vega and the Inclination Controversy with CHARA/MIRC. , 761(1),L3.

Mordasini, C., Alibert, Y., Benz, W. ve Naef, D. 2008. Giant Planet Formation by Core Accretion. In Fischer, D., Rasio, F. A., Thorsett, S. E. ve Wolszczan, A., editors, *Extreme Solar Systems*, volume 398 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 235.

Mordasini, C., Alibert, Y., Georgy, C., Dittkrist, K. M., Klahr, H. ve diğ. 2012a. Characterization of exoplanets from their formation. II. The planetary mass-radius relationship. *Astron. Astrophys.*, 547,A112.

Mordasini, C., Alibert, Y., Klahr, H. ve Henning, T. 2012b. Characterization of exoplanets from their formation. I. Models of combined planet formation and evolution. *Astron. Astrophys.*, 547,A111.

Movshovitz, N., Bodenheimer, P., Podolak, M. ve Lissauer, J. J. 2010. Formation of Jupiter using opacities based on detailed grain physics. , 209(2),616–624.

Müller, S., Baron, J., Helled, R., Bouchy, F. ve Parc, L. 2024. The mass-radius relation of exoplanets revisited. *Astron. Astrophys.*, 686,A296.

Müller, S. ve Helled, R. 2021. Synthetic evolution tracks of giant planets. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 507(2),2094–2102.

Müller, S. ve Helled, R. 2023. Warm giant exoplanet characterisation: current state, challenges and outlook. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 10,1179000.

Müller, S., Helled, R. ve Mayer, L. 2018. On the Diversity in Mass and Orbital Radius of Giant Planets Formed via Disk Instability. , 854(2),112.

Nakajima, T., Oppenheimer, B. R., Kulkarni, S. R., Golimowski, D. A., Matthews, K. ve diğ. 1995. Discovery of a cool brown dwarf. , 378(6556),463–465.

N'Diaye, M., Fogarty, K., Soummer, R., Carlotti, A., Dohlen, K. ve diğ. 2018. Apodized Pupil Lyot coronagraphs with arbitrary aperture telescopes: novel designs using hybrid focal plane masks. In Lystrup, M., MacEwen, H. A., Fazio, G. G., Batalha, N., Siegler, N. ve diğ., editors, *Space Telescopes and Instrumentation 2018: Optical, Infrared, and Millimeter Wave*, volume 10698 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, page 106986A.

N'Diaye, M., Vigan, A., Dohlen, K., Sauvage, J. F., Caillat, A. ve diğ. 2016. Calibration of quasi-static aberrations in exoplanet direct-imaging instruments with a Zernike phase-mask sensor. II. Concept validation with ZELDA on VLT/SPHERE. *Astron. Astrophys.*, 592,A79.

Nesvorný, D. 2009. Transit Timing Variations for Eccentric and Inclined Exoplanets. , 701(2),1116–1122.

Niţu, I. C., Keith, M. J., Stappers, B. W., Lyne, A. G. ve Mickaliger, M. B. 2022. A search for planetary companions around 800 pulsars from the Jodrell Bank pulsar timing programme. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 512(2),2446–2459.

Nielsen, E. L., Liu, M. C., Wahhaj, Z., Biller, B. A., Hayward, T. L. ve diğ. 2012. The Gemini NICI Planet-Finding Campaign: Discovery of a Multiple System Orbiting the Young A Star HD 1160. , 750(1),53.

Nikolov, N. K. 2011. A Photometric Study of Transiting Extrasolar Planets. *PhD Thesis, Max Planck Enstitute for Astronomy*.

Nikouravan, B. 2021. Estimating Physical Properties of Confirmed Exoplanets: I. Calculation of essential planetary properties-Possible M-R cataloging of exoplanets. *International Journal of Fundamental Physical Sciences*, 11(1),17–29.

Noethe, L. 2002. Chapter 1 Active optics in modern large optical telescopes. *Progess in Optics*, 43,1–69.

Öberg, K. I., Murray-Clay, R. ve Bergin, E. A. 2011. The Effects of Snowlines on C/O in Planetary Atmospheres. , 743(1),L16.

Oppenheimer, B. R., Brenner, D., Hinkley, S., Zimmerman, N., Sivaramakrishnan, A. ve diğ. 2008. The Solar-System-Scale Disk around AB Aurigae. , 679(2),1574–1581.

Oppenheimer, B. R. ve Hinkley, S. 2009. High-Contrast Observations in Optical and Infrared Astronomy. , 47(1),253–289.

Orban de Xivry, G., Absil, O., De Rosa, R. J., Bonse, M. J., Dannert, F. ve diğ. 2024. The VLT/ERIS vortex coronagraph: design, pointing control, and on-sky performance. In Jackson, K. J., Schmidt, D. ve Vernet, E., editors, *Adaptive Optics Systems IX*, volume 13097 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, page 1309715.

Otegi, J. F., Bouchy, F. ve Helled, R. 2020. Revisited mass-radius relations for exoplanets below 120 $M_{\oplus}$. *Astron. Astrophys.*, 634,A43.

Paxton, B., Bildsten, L., Dotter, A., Herwig, F., Lesaffre, P. ve diğ. 2011. Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA). , 192(1),3.

Pepe, F., Cristiani, S., Rebolo, R., Santos, N. C., Dekker, H. ve diğ. 2021. ESPRESSO at VLT. On-sky performance and first results. *Astron. Astrophys.*, 645,A96.

Perna, R., Heng, K. ve Pont, F. 2012. The Effects of Irradiation on Hot Jovian Atmospheres: Heat Redistribution and Energy Dissipation. , 751(1),59.

Perryman, M. 2018. *The Exoplanet Handbook*. Cambridge University Press.

Perryman, M., Hartman, J., Bakos, G. Á. ve Lindegren, L. 2014. Astrometric Exoplanet Detection with Gaia. , 797(1),14.

Perryman, M. A. C. 2000. Extra-solar planets. *Reports on Progress in Physics*, 63(8),1209–1272.

Phan-Bao, N., Bessell, M. S., Nguyen-Thanh, D., Martín, E. L., Ho, P. T. P. ve diğ. 2017. Detection of lithium in nearby young late-M dwarfs. *Astron. Astrophys.*, 600,A19.

Pollacco, D. L., Skillen, I., Collier Cameron, A., Christian, D. J., Hellier, C. ve diğ. 2006. The WASP Project and the SuperWASP Cameras. , 118(848),1407–1418.

Pollack, J. B., Hubickyj, O., Bodenheimer, P., Lissauer, J. J., Podolak, M. ve diğ. 1996. Formation of the Giant Planets by Concurrent Accretion of Solids and Gas. , 124(1),62–85.

Quanz, S. P. 2018. Extrasolar planets, spring semester 2018, lecture notes. `http://www.schmid-group.ethz.ch/education/lectures/extrasolar-planets---fs2018.html`. ETH Zurich, Institut for Particle Physics and Astrophysics.

Radigan, J., Jayawardhana, R., Lafrenière, D., Dupuy, T. J., Liu, M. C. ve diğ. 2013. Discovery of a Visual T-dwarf Triple System and Binarity at the L/T Transition. , 778(1),36.

Rameau, J., Chauvin, G., Lagrange, A. M., Maire, A. L., Boccaletti, A. ve diğ. 2015. Detection limits with spectral differential imaging data. *Astron. Astrophys.*, 581,A80.

Ramirez, S., Akeson, R. L., Ciardi, D., Kane, S. R., Plavchan, P. ve diğ. 2013. The NASA Exoplanet Archive. In *American Astronomical Society Meeting Abstracts #221*, volume 221 of *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, page 334.01.

Rein, H. 2012. A proposal for community driven and decentralized astronomical databases and the Open Exoplanet Catalogue. *arXiv e-prints*, page arXiv:1211.7121.

Reiners, A., Seifahrt, A. ve Dreizler, S. 2010. Discovery of a nearby young brown dwarf binary candidate. *Astron. Astrophys.*, 513,L9.

Rice, W. K. M., Lodato, G. ve Armitage, P. J. 2005. Investigating fragmentation conditions in self-gravitating accretion discs. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 364(1),L56–L60.

Ricker, G. R., Winn, J. N., Vanderspek, R., Latham, D. W., Bakos, G. Á. ve diğ. 2015. Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS). *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 1,014003.

Robinson, T. D., Stapelfeldt, K. R. ve Marley, M. S. 2016. Characterizing Rocky and Gaseous Exoplanets with 2 m Class Space-based Coronagraphs. , 128(960),025003.

Roddier, F. 1981. The effects of atmospheric turbulence in optical astronomy. *Progess in Optics*, 19,281–376.

Roddier, F. 1999. *Adaptive optics in astronomy*. Cambridge University Press.

Rouan, D., Riaud, P., Boccaletti, A., Clénet, Y. ve Labeyrie, A. 2000. The Four-Quadrant Phase-Mask Coronagraph. I. Principle. , 112(777),1479–1486.

Roy, K., McGill, C. M. ve Bloom, J. L. 2023. Doctoral student perceptions of faculty advisors: Four supportive behaviors to promote doctoral completion. *NACADA Review: Academic Advising Praxis & Perspectives*, 4(1),27–38.

Safronov, V. S. 1969. *Evoliutsiia doplanetnogo oblaka.*

Salz, M., Schneider, P. C., Czesla, S. ve Schmitt, J. H. M. M. 2015. High-energy irradiation and mass loss rates of hot Jupiters in the solar neighborhood. *Astron. Astrophys.*, 576,A42.

Schlichting, H. E. 2018. Formation of Super-Earths. In Deeg, H. J. ve Belmonte, J. A., editors, *Handbook of Exoplanets*, page 141. Springer.

Schneider, J., Dedieu, C., Le Sidaner, P., Savalle, R. ve Zolotukhin, I. 2011. Defining and cataloging exoplanets: the exoplanet.eu database. *Astron. Astrophys.*, 532,A79.

Seager, S. 2010. *Exoplanet Atmospheres: Physical Processes*. Princeton University Press.

Serabyn, E., Prada, C. M., Chen, P. ve Mawet, D. 2019. Vector vortex coronagraphy for exoplanet detection with spatially variant diffractive waveplates. *Journal of the Optical Society of America B Optical Physics*, 36(5),D13.

Smith, W. H. 1987. Spectral differential imaging detection of planets about nearby stars. , 99,1344–1353.

Soliman, D., Ntziachristos, V., Westmeyer, G. ve Ziegler, S. 2017. *Augmented Microscopy: Development and Application of High-resolution Optoacoustic and Multimodal Imaging Techniques for Label-free Biological Observation*. Universitätsbibliothek der TU München.

Soummer, R., Pueyo, L. ve Larkin, J. 2012. Detection and Characterization of Exoplanets and Disks Using Projections on Karhunen-Loève Eigenimages. , 755(2),L28.

Spiegel, D. S. ve Burrows, A. 2012. Spectral and Photometric Diagnostics of Giant Planet Formation Scenarios. , 745(2),174.

Strugarek, A., García Muñoz, A., Brun, A. S. ve Paul, A. 2025. Ohmic heating in the upper atmosphere of hot exoplanets: The influence of a time-varying magnetic field. *Astron. Astrophys.*, 693,A220.

Sumi, T., Kamiya, K., Bennett, D. P., Bond, I. A., Abe, F. ve diğ. 2011. Unbound or distant planetary mass population detected by gravitational microlensing. , 473(7347),349–352.

Swain, M. R., Hasegawa, Y., Thorngren, D. P. ve Roudier, G. M. 2024. Planet Mass and Metallicity: The Exoplanets and Solar System Connection. , 220(6),61.

Tandon, R., Lin, L., Potier, A., Jolissaint, L., Baur, A. ve diğ. 2024. Discovery space and science with the PLACID stellar coronagraph. In Bryant, J. J., Motohara, K. ve Vernet, J. R. D., editors, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy X*, volume 13096 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, page 130963F.

Tezcan, C. T. ve Şatır, O. 2025. Atmosferik türbülans gözlemleri yazılımı: Atlas. *Turkish Journal of Astronomy and Astrophysics*, 6(Special Issue: UAK2024 Proc.),111–113.

Tezcan, F., Baştürk, Ö., Yeşilyaprak, C. ve Aliş, S. 2025. Direct imaging potential of outer companions of eclipsing binary stars with 4-meter telescope of the Eastern Anatolia Observatory (DAG). *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnate Pleso*, 55(3),512–516.

Thorngren, D. P. ve Fortney, J. J. 2018. Bayesian Analysis of Hot-Jupiter Radius Anomalies: Evidence for Ohmic Dissipation? , 155(5),214.

Todorov, K., Luhman, K. L. ve McLeod, K. K. 2010. Discovery of a Planetary-mass Companion to a Brown Dwarf in Taurus. , 714(1),L84–L88.

Toomre, A. 1964. On the gravitational stability of a disk of stars. , 139,1217–1238.

Torres, G., Konacki, M., Sasselov, D. D. ve Jha, S. 2003. The transiting planet OGLE-TR-56b. In *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, volume 203 of *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, page 17.09.

Traub, W. A. ve Oppenheimer, B. R. 2010. Direct Imaging of Exoplanets. In Seager, S., editor, *Exoplanets*, pages 111–156. University of Arizona Press.

Tremblin, P., Amundsen, D. S., Mourier, P., Baraffe, I., Chabrier, G. ve diğ. 2015. Fingering Convection and Cloudless Models for Cool Brown Dwarf Atmospheres. , 804(1),L17.

Tremblin, P., Chabrier, G., Mayne, N. J., Amundsen, D. S., Baraffe, I. ve diğ. 2017. Advection of Potential Temperature in the Atmosphere of Irradiated Exoplanets: A Robust Mechanism to Explain Radius Inflation. , 841(1),30.

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

Ubeira Gabellini, M. G., van den Ancker, M., Fedele, D., Lodato, G. ve Manara, C. F. 2019. A New Companion Candidate around the Herbig Star V921 Sco. *Research Notes of the American Astronomical Society*, 3(4),61.

Udalski, A., Szymanski, M., Kaluzny, J., Kubiak, M. ve Mateo, M. 1992. The Optical Gravitational Lensing Experiment. , 42,253–284.

Udalski, A., Zebrun, K., Szymanski, M., Kubiak, M., Soszynski, I. ve diğ. 2002. The Optical Gravitational Lensing Experiment. Search for Planetary and Low- Luminosity Object Transits in the Galactic Disk. Results of 2001 Campaign – Supplement. , 52,115–128.

Valencia, D., O'Connell, R. J. ve Sasselov, D. D. 2007. Inevitability of Plate Tectonics on Super-Earths. , 670(1),L45–L48.

van Boekel, R., Henning, T., Menu, J., de Boer, J., Langlois, M. ve diğ. 2017. Three Radial Gaps in the Disk of TW Hydrae Imaged with SPHERE. , 837(2),132.

Van Laerhoven, C., Boley, A. ve Granados Contreras, A. P. 2018. Transit Duration Variations in Multi-Planet Systems. In *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #50*, volume 50 of *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, page 410.08.

Vega-Pallauta, M. 2024. Detection capabilities of SHARK-NIR's high-contrast imager at the LBT. Poster presented at the 2024 Sagan Summer Workshop: Advances in Direct Imaging: From Young Jupiters to Habitable Earths. Poster #48.

Vines, J. I. ve Jenkins, J. S. 2022. ARIADNE: measuring accurate and precise stellar parameters through SED fitting. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 513(2),2719–2731.

Wagner, K., Apai, D., Kasper, M., McClure, M., Robberto, M. ve diğ. 2020. Direct Imaging Discovery of a Young Brown Dwarf Companion to an A2V Star. , 902(1),L6.

Ward-Duong, K., Patience, J., Follette, K., De Rosa, R. J., Rameau, J. ve diğ. 2021. Gemini Planet Imager Spectroscopy of the Dusty Substellar Companion HD 206893 B. , 161(1),5.

Wilson, R. N. 1991. Active optics and the New Technology Telescope (NTT): the key to improved optical quality at lower cost in large astronomical telescopes. *Contemporary Physics*, 32(3),157–172.

Winn, J. N., Sanchis-Ojeda, R. ve Rappaport, S. 2018. Kepler-78 and the Ultra-Short-Period planets. , 83,37–48.

Wolszczan, A. ve Frail, D. A. 1992. A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12. , 355(6356),145–147.

Yeşilyaprak, C. ve Keskin, O. 2020. Eastern Anatolia Observatory (DAG): the status in 2020. In Marshall, H. K., Spyromilio, J. ve Usuda, T., editors, *Ground-based and Airborne Telescopes VIII*, volume 11445 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, page 1144515.

Zhou, J.-L., Xie, J.-W., Liu, H.-G., Zhang, H. ve Sun, Y.-S. 2012. Forming different planetary systems. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 12(8),1081–1106.

Zurlo, A., Vigan, A., Mesa, D., Gratton, R., Moutou, C. ve diğ. 2014. Performance of the VLT Planet Finder SPHERE. I. Photometry and astrometry precision with IRDIS and IFS in laboratory. *Astron. Astrophys.*, 572,A85.

Çetni, D. 2025. *Doğu Anadolu Gözlemevi (DAG) teleskobu koronograf aygıtı metriklerinin belirlenmesi ve simülasyonu / Determination of metrics and simulation of coronagraph equipment for Eastern Anatolia Observatory (DAG) telescope*. PhD thesis, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Astronomi ve Astrofizik ABD. Danışman: Prof. Dr. Cahit Yeşilyaprak.

İkiz, T. 2018. Yerel evrende düşük işınım gücüne sahip aktif galaktik Çekirdekler. Master's thesis, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Astronomi ve Astrofizik Anabilim Dalı, Erzurum, Türkiye. Danışman: Doç. Dr. Cahit Yeşilyaprak.

Aydemir, 2019. Cüce eliptik galaksilerin yıldızlararası popülasyonu. Master's thesis, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Astronomi ve Astrofizik Anabilim Dalı, Erzurum, Türkiye. Danışman: Doç. Dr. Cahit Yeşilyaprak.

EKLER

EK 1. Bu çalışmada üretilen model çıktıları

EK 1.1. planetsynth Model Çıktıları ve BT-Settle ile üretilen gezegen akıları ve Kontrastları

Tablo 1.1: *planetsynth* ile bu çalışmada elde edilen model parametreleri ($T_{\rm eff}, Z, Z_e, R_J, \log g$) ve bu parametrelere karşılık gelen BT-Settl SED'lerinden hesaplanan yüzey akıları kullanılarak türetilen kontrast değerleri ile sistemlere ait H-band görünür ve mutlak parlaklıkları (gezegen: P, yıldız: S).

Cisim	T_{eff}	Z	Ze	R_J	$\log g$	Ayrıklık (")	Kontrast	d (pc)	m_{HP}	M_{HP}	m_{HS}	M_{HS}
HIP 75056 A b	2614.90	0.0400	0.0000	1.79	4.32	0.240	1.180×10^{-03}	125.21	14.56	9.07	7.24	1.75
HD 206893 b	1687.95	0.0400	0.0000	1.12	4.77	0.236	1.445×10^{-04}	40.76	15.23	12.18	5.63	2.58
HD 81817 b	1659.27	0.0400	0.0000	1.12	4.75	0.012	5.845×10^{-08}	269.13	19.64	12.49	1.56	-5.59
bet Pic b	1649.76	0.0400	0.0000	1.38	4.21	0.507	1.557×10^{-04}	19.74	12.96	11.48	3.44	1.96
HD 81817 c	1542.88	0.0400	0.0000	1.11	4.68	0.009	3.285×10^{-08}	269.13	19.74	12.59	1.03	-6.12
bet Pic c	1470.95	0.0400	0.0000	1.31	4.19	0.136	2.824×10^{-05}	19.74	14.28	12.80	2.91	1.43
kappa And b	1443.63	0.0400	0.0000	1.23	4.36	1.100	1.699×10^{-05}	50.00	16.18	12.68	4.25	0.76
CoRoT-20 c	1429.70	0.0400	0.0000	1.15	4.53	0.003	9.830×10^{-05}	844.06	22.53	12.90	12.52	2.88
HD 113337 c	1424.32	0.0400	0.0000	1.10	4.63	0.189	5.080×10^{-05}	36.18	15.73	12.93	4.99	2.20
HR 8799 e	1378.92	0.0400	0.0000	1.27	4.22	0.398	4.841×10^{-05}	41.24	16.04	12.96	5.25	2.18
HR 8799 d	1111.18	0.0400	0.0000	1.19	4.27	0.582	1.989×10^{-05}	41.24	16.98	13.90	5.23	2.15
nu Oph c	1029.63	0.0400	0.0000	0.97	4.84	0.128	1.824×10^{-07}	46.21	17.99	14.67	1.14	-2.18
HIP 21152 b	1005.34	0.0400	0.0000	0.97	4.83	0.392	8.087×10^{-06}	43.41	18.03	14.85	5.30	2.11
HD 206893 c	977.46	0.0400	0.0000	1.11	4.44	0.087	2.094×10^{-05}	40.76	17.33	14.27	5.63	2.58
nu Oph b	943.40	0.0400	0.0000	0.98	4.79	0.039	1.163×10^{-07}	46.21	18.48	15.16	1.14	-2.18
HD 97037 b	794.03	0.0342	0.0425	0.99	4.75	0.213	4.912×10^{-06}	32.41	18.64	16.09	5.37	2.82
HIP 97233 b	728.84	0.0232	0.0831	0.99	4.73	0.024	2.219×10^{-07}	102.28	21.60	16.55	4.97	-0.08
Kepler-448 c	727.79	0.0400	0.0000	0.95	4.81	0.011	2.173×10^{-06}	399.40	24.60	16.59	10.44	2.43
HD 14067 b	720.15	0.0400	0.0000	1.01	4.61	0.037	4.229×10^{-08}	142.02	22.37	16.60	3.93	-1.83
HD 180314 b	708.88	0.0400	0.0000	0.96	4.76	0.012	8.360×10^{-08}	122.36	22.19	16.75	4.50	-0.94
HD 70573 b	687.05	0.0400	0.0000	1.17	4.07	0.030	3.646×10^{-06}	59.18	20.84	16.98	7.24	3.38
HD 188641 b	685.91	0.0125	0.0572	0.90	4.98	0.186	8.875×10^{-07}	64.34	21.06	17.01	5.93	1.88
sig Per b	586.39	0.0132	0.0370	1.17	4.10	0.017	2.770×10^{-09}	108.30	23.21	18.04	1.82	-3.36
HD 125390 b	574.26	0.0400	0.0000	0.88	4.99	0.023	3.650×10^{-08}	153.65	24.09	18.16	5.50	-0.43
51 Eri b	571.78	0.0042	0.0042	1.29	3.50	0.444	4.584×10^{-07}	29.76	20.37	18.00	4.52	2.15
KIC 3526061 b	557.31	0.0302	0.0445	0.98	4.70	0.013	4.230×10^{-08}	401.23	26.24	18.22	7.80	-0.22
HD 214823 b	552.58	0.0400	0.0000	0.94	4.77	0.030	2.261×10^{-07}	101.37	23.31	18.28	6.69	1.66
11 UMi b	545.98	0.0400	0.0000	0.99	4.60	0.012	1.934×10^{-09}	125.32	23.83	18.34	2.04	-3.45
HD 139357 b	536.92	0.0400	0.0000	0.94	4.78	0.026	9.430×10^{-09}	112.09	23.72	18.47	3.66	-1.59
HD 96127 b	527.60	0.0400	0.0000	0.92	4.81	0.002	5.634×10^{-10}	587.66	27.46	18.61	4.34	-4.51
HD 158996 b	525.94	0.0400	0.0000	1.00	4.57	0.007	6.093×10^{-10}	283.66	25.87	18.61	2.83	-4.43
HD 110014 b	523.89	0.0400	0.0000	1.04	4.44	0.021	2.711×10^{-09}	100.76	23.65	18.64	2.23	-2.78
BD-13 2130 b	523.51	0.0400	0.0000	1.05	4.37	0.002	3.019×10^{-09}	925.21	28.49	18.65	7.19	-2.65
HD 221420 b	511.64	0.0400	0.0000	0.93	4.78	0.270	1.512×10^{-07}	31.14	21.37	18.91	4.32	1.86
HD 62364 b	511.32	0.0316	0.0404	0.98	4.68	0.358	2.738×10^{-07}	53.11	22.52	18.90	6.12	2.49
HD 122562 b	510.22	0.0004	0.0350	0.91	4.88	0.076	1.242×10^{-07}	53.80	22.82	19.17	5.56	1.90
HD 202206 c	508.53	0.0400	0.0000	0.95	4.72	0.052	5.100×10^{-07}	45.97	22.29	18.98	6.56	3.25
KIC 7917485 b	507.88	0.0210	0.0493	1.05	4.45	0.001	1.074×10^{-07}	1382.89	29.68	18.97	12.25	1.55
HD 8673 b	505.93	0.0011	0.0472	1.02	4.53	0.078	2.085×10^{-07}	37.86	21.90	19.01	5.20	2.30
Pr0211 c	496.49	0.0400	0.0000	1.08	4.25	0.030	7.264×10^{-07}	182.71	25.53	19.22	10.18	3.87

Çizelgenin devamı

Cisim	T_{eff}	Z	Ze	R_J	log g	Ayrıklık (")	Kontrast	d (pc)	m_HP	M_HP	m_HS	M_HS
18 Del b	478.52	0.0400	0.0000	1.04	4.40	0.034	6.843×10^{-09}	76.22	23.78	19.37	3.37	-1.04
iot Dra c	477.28	0.0400	0.0000	0.97	4.64	0.619	4.091×10^{-09}	31.33	21.87	19.39	0.90	-1.58
HD 86264 b	444.70	0.0400	0.0000	1.00	4.53	0.041	6.759×10^{-08}	67.81	23.92	19.77	6.00	1.84
HD 220074 b	443.46	0.0400	0.0000	0.95	4.69	0.005	1.955×10^{-10}	324.54	27.37	19.81	3.10	-4.46
HIP 65891 b	441.79	0.0161	0.0237	1.12	4.11	0.019	3.955×10^{-09}	150.29	25.75	19.86	4.74	-1.15
HD 204313 e	440.03	0.0400	0.0000	0.97	4.63	0.156	1.912×10^{-07}	47.79	23.26	19.86	6.46	3.07
HD 81040 b	437.76	0.0400	0.0000	1.08	4.19	0.058	2.789×10^{-07}	34.43	22.61	19.93	6.23	3.54
HD 240237 b	437.00	0.0400	0.0000	0.96	4.66	0.002	9.037×10^{-11}	933.38	29.76	19.91	4.65	-5.20
HD 68988 c	435.83	0.0400	0.0000	0.97	4.63	0.217	1.412×10^{-07}	60.84	23.85	19.93	6.73	2.81
HD 217850 b	435.46	0.0400	0.0000	0.91	4.84	0.069	1.595×10^{-07}	65.80	24.06	19.97	7.06	2.97
TOI-969 c	428.03	0.0400	0.0000	1.01	4.47	0.033	6.787×10^{-07}	77.26	24.48	20.04	9.06	4.62
HD 120084 b	423.38	0.0400	0.0000	1.06	4.26	0.042	2.927×10^{-09}	103.04	25.24	20.18	3.91	-1.16
WASP-34 c	418.70	0.0248	0.0461	0.98	4.61	0.133	1.770×10^{-07}	112.70	25.72	20.46	8.84	3.58
HD 136118 b	417.28	0.0163	0.0246	1.00	4.54	0.045	5.567×10^{-08}	51.44	23.83	20.27	5.69	2.13
iot Dra b	415.50	0.0400	0.0000	1.00	4.50	0.046	1.752×10^{-09}	31.33	22.79	20.31	0.90	-1.58
HD 219828 c	415.05	0.0400	0.0000	0.94	4.70	0.077	5.839×10^{-08}	73.11	24.68	20.36	6.59	2.27
HD 208527 b	414.00	0.0400	0.0000	1.02	4.40	0.007	1.144×10^{-10}	312.20	27.86	20.39	3.01	-4.47
HD 72659 c	411.92	0.0400	0.0000	0.93	4.76	0.269	6.287×10^{-08}	51.89	24.04	20.46	6.03	2.46
WASP-53 c	411.27	0.0145	0.0705	0.96	4.67	0.019	2.267×10^{-07}	201.34	27.18	20.66	10.56	4.04
HD 196067 b	405.97	0.0400	0.0000	0.99	4.53	0.126	3.927×10^{-08}	39.93	23.58	20.57	5.06	2.06
HD 102329 b	402.49	0.0400	0.0000	1.04	4.30	0.008	1.586×10^{-09}	217.11	27.40	20.72	5.40	-1.28
eps Tau b	401.80	0.0172	0.0752	1.12	4.20	0.041	9.391×10^{-10}	47.53	24.14	20.75	1.57	-1.82
HAT-P-13 c	397.18	0.0400	0.0000	0.96	4.61	0.005	3.513×10^{-08}	246.81	27.73	20.77	9.10	2.13
Kepler-419 c	396.20	0.0400	0.0000	1.05	4.24	0.002	2.668×10^{-08}	1011.36	30.92	20.89	11.98	1.96
HD 141937 b	393.28	0.0400	0.0000	1.02	4.39	0.045	8.386×10^{-08}	33.36	23.55	20.93	5.86	3.24
HD 22781 b	392.58	0.0400	0.0000	0.97	4.58	0.036	2.336×10^{-07}	32.60	23.34	20.77	6.76	4.19
bet Cnc b	391.97	0.0400	0.0200	1.05	4.27	0.019	8.267×10^{-11}	89.05	25.66	20.91	0.46	-4.29
HD 142 c	390.62	0.0400	0.0000	1.00	4.47	0.375	3.750×10^{-08}	26.19	23.02	20.93	4.46	2.37
HD 39091 b	390.54	0.0400	0.0000	0.98	4.52	0.181	7.124×10^{-08}	18.27	22.08	20.77	4.21	2.90
HATS-59 c	388.95	0.0400	0.0000	0.98	4.55	0.004	1.003×10^{-07}	642.88	29.81	20.77	12.31	3.27
HD 203387 c	387.69	0.0281	0.0995	1.10	4.21	0.082	9.804×10^{-10}	61.75	24.85	20.89	2.33	-1.63
gam1 Leo b	387.66	0.0400	0.0000	1.02	4.35	0.030	1.509×10^{-10}	39.89	23.92	20.91	-0.64	-3.64
HD 11977 b	385.19	0.0400	0.0000	1.06	4.19	0.028	1.190×10^{-09}	67.93	25.06	20.89	2.74	-1.42
IC 4651 9122 b	383.93	0.0400	0.0000	1.06	4.17	0.002	1.253×10^{-09}	859.32	30.55	20.88	8.29	-1.38
HD 38529 c	382.42	0.0400	0.0000	1.00	4.44	0.076	1.157×10^{-08}	42.35	24.07	20.93	4.23	1.09
HD 7449 b	380.20	0.0400	0.0000	1.03	4.32	0.063	9.166×10^{-08}	38.66	23.85	20.91	6.26	3.32
HD 66428 b	376.96	0.0400	0.0000	1.00	4.46	0.064	7.136×10^{-08}	53.28	24.57	20.93	6.70	3.07
HD 125612 d	371.86	0.0400	0.0000	1.04	4.26	0.069	8.363×10^{-08}	57.62	24.70	20.89	7.00	3.20
HD 30177 b	369.48	0.0400	0.0000	1.02	4.34	0.065	9.399×10^{-08}	55.59	24.64	20.91	7.07	3.35
HD 191806 b	368.85	0.0400	0.0000	1.01	4.38	0.042	4.378×10^{-08}	65.67	25.00	20.91	6.60	2.52
EPIC 248847494 b	364.50	0.0102	0.0729	1.01	4.52	0.008	1.919×10^{-08}	551.89	29.46	20.75	10.17	1.46
HD 33564 b	361.53	0.0400	0.0000	1.01	4.37	0.052	4.078×10^{-08}	20.95	22.52	20.91	4.05	2.44
Kepler-407 c	360.56	0.0053	0.0516	0.99	4.53	0.012	1.124×10^{-07}	338.37	28.42	20.77	11.04	3.40
eps CrB b	360.00	0.0400	0.0000	1.05	4.21	0.019	3.407×10^{-10}	69.87	25.12	20.89	1.45	-2.77
HD 217786 b	358.64	0.0400	0.0000	0.95	4.60	0.044	6.335×10^{-08}	55.48	24.49	20.77	6.50	2.77
Kepler-94 c	358.28	0.0193	0.0569	1.08	4.35	0.008	2.075×10^{-07}	191.90	27.35	20.93	10.64	4.23
HD 11506 d	357.34	0.0400	0.0000	1.03	4.28	0.239	5.587×10^{-08}	51.26	24.44	20.89	6.31	2.76
HD 156279 c	352.83	0.0400	0.0000	1.00	4.43	0.152	1.045×10^{-07}	36.19	23.73	20.93	6.27	3.48
HD 60292 b	351.21	0.0400	0.0000	1.05	4.20	0.005	2.142×10^{-10}	315.21	28.39	20.89	4.21	-3.28
HD 224538 b	351.08	0.0400	0.0000	1.04	4.24	0.030	3.683×10^{-08}	79.06	25.38	20.89	6.80	2.31
HD 95127 b	351.00	0.0400	0.0000	0.99	4.46	0.002	9.325×10^{-11}	676.58	30.08	20.93	5.01	-4.14
HD 238914 b	350.06	0.0400	0.0000	1.05	4.16	0.011	8.262×10^{-10}	519.45	29.45	20.88	6.75	-1.83
HD 106252 b	349.42	0.0400	0.0000	1.00	4.43	0.068	7.443×10^{-08}	38.19	23.84	20.93	6.02	3.11
HD 106270 b	349.09	0.0400	0.0000	0.99	4.43	0.036	1.362×10^{-08}	93.81	25.79	20.93	6.13	1.27
HD 23596 b	348.88	0.0400	0.0000	0.98	4.51	0.052	4.262×10^{-08}	52.00	24.33	20.75	5.90	2.32
HD 24064 b	343.99	0.0400	0.0000	0.96	4.57	0.004	1.314×10^{-10}	300.25	28.16	20.77	3.45	-3.93
HD 74156 c	342.07	0.0400	0.0000	1.01	4.38	0.064	3.763×10^{-08}	57.60	24.72	20.91	6.16	2.35
HD 194490 b	341.95	0.0289	0.0566	1.02	4.46	0.138	6.727×10^{-08}	80.23	25.46	20.93	7.52	3.00

Çizelgenin devamı

Cisim	T_{eff}	Z	Ze	R_J	log g	Ayrıklık (")	Kontrast	d (pc)	m_HP	M_HP	m_HS	M_HS
WASP-8 c	341.81	0.0400	0.0000	1.00	4.40	0.059	9.699×10^{-08}	89.96	25.68	20.91	8.15	3.38
HIP 67537 b	338.24	0.0384	0.0857	1.07	4.49	0.042	1.527×10^{-09}	116.05	26.28	20.95	4.24	-1.09
ups And d	336.91	0.0400	0.0000	0.99	4.44	0.187	3.408×10^{-08}	13.41	21.57	20.93	2.90	2.26
HD 25015 b	332.77	0.0400	0.0000	1.00	4.37	0.167	1.579×10^{-07}	37.43	23.78	20.91	6.78	3.91
HD 203387 b	331.84	0.0000	0.0000	1.12	3.87	0.029	9.814×10^{-10}	61.75	24.85	20.89	2.33	-1.63
HD 115954 b	328.65	0.0400	0.0000	1.01	4.33	0.057	6.041×10^{-08}	87.64	25.63	20.91	7.58	2.87
HD 183263 c	327.16	0.0400	0.0000	1.00	4.39	0.103	5.443×10^{-08}	54.20	24.58	20.91	6.42	2.75
HIP 67851 c	324.66	0.0400	0.0000	1.02	4.29	0.094	3.573×10^{-09}	64.12	24.93	20.89	3.81	-0.22
HD 169830 c	321.20	0.0400	0.0000	1.03	4.25	0.082	2.284×10^{-08}	37.60	23.77	20.89	4.67	1.79
81 Cet b	321.18	0.0030	0.0193	1.07	4.08	0.025	1.065×10^{-09}	101.26	25.90	20.88	3.47	-1.56
TYC 1422-614-1 c	318.69	0.0400	0.0000	0.99	4.44	0.002	2.570×10^{-09}	672.41	30.07	20.93	8.60	-0.54
14 Her b	317.63	0.0400	0.0000	1.01	4.32	0.155	1.195×10^{-07}	17.93	22.18	20.91	4.88	3.61
gam Cep b	312.37	0.0400	0.0000	0.99	4.40	0.145	5.053×10^{-09}	14.10	21.66	20.91	0.92	0.17
HD 98649 b	309.69	0.0400	0.0000	1.00	4.34	0.149	9.094×10^{-08}	42.17	24.04	20.91	6.44	3.31
HD 156098 c	308.97	0.0313	0.0549	1.08	4.07	0.172	1.092×10^{-08}	48.25	24.29	20.88	4.39	0.97
HD 38801 b	307.39	0.0400	0.0000	0.99	4.42	0.018	2.467×10^{-08}	91.43	25.74	20.93	6.72	1.91
HD 112640 b	300.74	0.0000	0.0000	1.09	4.05	0.005	1.155×10^{-10}	323.34	28.40	20.86	3.56	-3.99
HD 67087 c	296.98	0.0000	0.0000	1.09	4.03	0.050	3.554×10^{-08}	76.52	25.28	20.86	6.65	2.23
HD 181234 b	296.66	0.0400	0.0000	0.99	4.41	0.155	9.198×10^{-08}	47.75	24.31	20.91	6.72	3.32
bet UMi b	296.51	0.0400	0.0000	1.03	4.18	0.036	1.243×10^{-10}	38.77	23.82	20.88	-0.95	-3.89
HD 128311 c	295.92	0.0000	0.0000	1.10	3.92	0.107	1.984×10^{-07}	16.33	21.98	20.91	5.22	4.16
HD 99706 c	292.46	0.0061	0.0853	1.05	4.14	0.019	4.310×10^{-09}	146.60	26.71	20.88	5.79	-0.04
HD 111232 b	292.08	0.0400	0.0000	1.00	4.34	0.074	1.217×10^{-07}	28.96	23.22	20.91	5.94	3.63
HD 19615 b	291.55	0.0000	0.0000	1.02	4.34	0.004	1.615×10^{-10}	265.16	28.03	20.91	3.55	-3.57
HD 113996 b	289.67	0.0400	0.0000	1.03	4.20	0.014	2.784×10^{-10}	116.33	26.20	20.88	2.32	-3.01
HD 1690 b	288.39	0.0000	0.0000	1.02	4.35	0.002	3.176×10^{-10}	752.62	30.30	20.91	6.55	-2.83
HD 12235 c	287.19	0.0170	0.0570	1.05	4.38	0.699	2.705×10^{-08}	31.76	23.44	20.93	4.52	2.01
HD 111591 b	283.43	0.0000	0.0000	1.09	3.99	0.022	1.852×10^{-09}	114.17	26.22	20.93	4.39	-0.90
HD 203473 b	281.06	0.0400	0.0000	1.00	4.31	0.038	5.244×10^{-08}	72.64	25.22	20.91	7.02	2.71
HD 11506 b	279.78	0.0000	0.0000	1.07	4.10	0.055	5.689×10^{-08}	51.26	24.42	20.88	6.31	2.76
HD 95544 b	276.59	0.0400	0.0000	1.02	4.23	0.036	7.948×10^{-08}	87.80	25.61	20.89	7.86	3.15
HD 50554 b	275.82	0.2000	0.0000	0.95	4.16	0.075	9.069×10^{-08}	31.17	23.32	20.86	5.72	3.25
Kepler-129 d	273.29	0.0400	0.0000	1.00	4.35	0.010	3.407×10^{-08}	408.85	28.97	20.91	10.30	2.24
HD 219077 b	272.16	0.0400	0.0000	0.98	4.43	0.203	2.806×10^{-08}	29.19	23.26	20.93	4.38	2.05
HD 11112 b	268.29	0.0134	0.0338	1.02	4.29	0.304	4.163×10^{-08}	44.38	24.13	20.89	5.68	2.44
HD 171238 b	268.24	0.0400	0.0000	0.99	4.38	0.057	9.812×10^{-08}	44.81	24.17	20.91	6.65	3.39
HD 135872 b	266.72	0.0038	0.0654	1.06	4.14	0.051	7.797×10^{-09}	82.43	25.46	20.88	5.19	0.61
HD 80869 b	264.30	0.0000	0.0000	1.06	4.13	0.034	8.352×10^{-08}	85.40	25.53	20.88	7.84	3.18
HD 174205 b	263.99	0.0000	0.0000	1.08	3.98	0.007	2.171×10^{-10}	234.03	27.76	20.91	3.60	-3.25
HD 148164 c	263.81	0.0000	0.0000	1.07	4.08	0.080	5.038×10^{-08}	77.20	25.29	20.86	7.05	2.61
HD 111998 b	259.71	0.0000	0.0000	1.08	4.01	0.055	3.903×10^{-08}	33.22	23.46	20.86	4.94	2.33
BD+03 2562 b	258.81	0.0400	0.0000	1.01	4.22	0.001	1.686×10^{-10}	1070.63	31.04	20.89	6.61	-3.54
HD 86950 b	254.42	0.0000	0.0000	1.09	3.91	0.013	1.597×10^{-09}	209.84	27.52	20.91	5.53	-1.08
75 Cet b	250.04	0.0000	0.0000	1.09	3.82	0.025	1.161×10^{-09}	82.96	25.49	20.89	3.15	-1.44
alf Tau b	248.78	0.0400	0.0000	1.01	4.23	0.071	9.218×10^{-11}	20.43	22.45	20.89	-2.64	-4.19
WASP-41 c	248.71	0.0000	0.0000	1.09	3.85	0.007	1.306×10^{-07}	163.37	26.96	20.89	9.75	3.68
HD 13908 c	246.71	0.0000	0.0000	1.07	4.08	0.026	3.142×10^{-08}	79.55	25.36	20.86	6.60	2.10
HD 13189 b	245.95	0.0155	0.0855	1.02	4.44	0.003	1.109×10^{-10}	497.82	29.42	20.93	4.53	-3.95
HD 190228 b	244.37	0.0295	0.0359	1.04	4.12	0.038	1.605×10^{-08}	62.71	24.86	20.88	5.38	1.39
HD 25723 b	241.48	0.0035	0.0035	1.08	3.75	0.013	7.075×10^{-10}	114.82	26.17	20.87	3.30	-2.00
BD+48 740 b	241.47	0.0000	0.0000	1.09	3.58	0.003	1.391×10^{-09}	666.59	29.96	20.84	7.82	-1.30
HD 221287 b	238.83	0.0000	0.0000	1.09	3.84	0.022	6.435×10^{-08}	55.92	24.63	20.89	6.65	2.91
HD 27969 b	238.66	0.0562	0.0721	1.04	4.07	0.023	5.776×10^{-08}	67.93	25.02	20.86	6.92	2.76
HD 137496 c	237.78	0.0400	0.0000	0.99	4.31	0.008	3.780×10^{-08}	155.32	26.85	20.89	8.29	2.34
Kepler-56 d	235.86	0.0000	0.0000	1.05	4.13	0.002	7.127×10^{-09}	912.99	30.68	20.88	10.31	0.51
Kepler-539 c	235.74	0.0022	0.0022	1.08	3.74	0.008	1.053×10^{-07}	307.32	28.31	20.87	10.87	3.43
HD 16175 b	235.26	0.0000	0.0000	1.06	4.08	0.035	3.149×10^{-08}	59.86	24.74	20.86	5.99	2.10
HD 41004 A b	233.92	0.0036	0.0036	1.08	3.76	0.051	1.476×10^{-07}	36.69	23.70	20.87	6.62	3.80

Çizelgenin devamı

Cisim	T_{eff}	Z	Ze	R_J	log g	Ayrıklık (")	Kontrast	d (pc)	m_HP	M_HP	m_HS	M_HS
HD 147018 c	233.90	0.0400	0.0000	1.00	4.24	0.048	1.153×10^{-07}	40.43	23.93	20.89	6.58	3.55
HD 43197 c	232.57	0.0123	0.0743	1.03	4.29	0.137	9.779×10^{-08}	62.41	24.89	20.91	7.37	3.39
gam Lib c	232.33	0.0000	0.0000	1.07	4.02	0.046	1.070×10^{-09}	47.40	24.24	20.86	1.81	-1.57
HD 2039 b	232.27	0.0400	0.0000	1.01	4.22	0.026	6.465×10^{-08}	85.69	25.54	20.88	7.57	2.90
GJ 2030 c	231.85	0.0139	0.0980	1.01	4.52	0.452	2.309×10^{-08}	37.08	23.62	20.77	4.52	1.68
HD 213240 b	230.72	0.0000	0.0000	1.05	4.13	0.046	4.015×10^{-08}	40.87	23.93	20.88	5.44	2.38
HD 240210 b	229.67	0.0000	0.0000	1.05	4.10	0.003	2.477×10^{-10}	372.41	28.73	20.88	4.72	-3.14
HD 62509 b	229.10	0.0000	0.0000	1.08	3.71	0.159	1.643×10^{-09}	10.34	20.93	20.86	-1.03	-1.10
HD 196050 b	227.49	0.0000	0.0000	1.08	3.86	0.050	4.577×10^{-08}	50.67	24.42	20.89	6.07	2.54
HD 140901 c	227.21	0.0000	0.0000	1.05	4.10	0.481	1.091×10^{-07}	15.25	21.79	20.88	4.39	3.47
HD 95089 c	226.75	0.0000	0.0000	1.08	3.89	0.024	4.643×10^{-09}	136.96	26.58	20.89	5.74	0.06
HD 66141 b	226.30	0.0400	0.0000	1.01	4.20	0.018	3.470×10^{-10}	68.15	25.04	20.88	1.39	-2.77
HD 204313 b	225.29	0.0000	0.0000	1.07	4.06	0.067	8.083×10^{-08}	47.79	24.25	20.86	6.52	3.13
HD 40956 b	224.81	0.0024	0.0024	1.07	3.79	0.012	1.716×10^{-09}	116.59	26.21	20.87	4.29	-1.04
Kepler-88 d	223.23	0.0000	0.0000	1.08	3.84	0.006	1.259×10^{-07}	376.86	28.77	20.89	11.52	3.64
Kepler-1708 b	223.01	0.0000	0.0000	1.07	4.03	0.001	4.281×10^{-08}	1666.69	32.52	21.42	14.10	2.99
HD 75784 c	222.24	0.0000	0.0000	1.04	4.14	0.098	1.087×10^{-08}	85.43	25.53	20.88	5.62	0.97
eta Cet c	217.74	0.0000	0.0000	1.07	3.88	0.051	5.923×10^{-10}	38.00	23.94	21.04	0.87	-2.02
BD-17 63 b	217.55	0.0000	0.0000	1.06	4.08	0.039	2.739×10^{-07}	34.46	23.54	20.86	7.14	4.45
HD 55696 b	215.98	0.0000	0.0000	1.07	3.95	0.041	3.721×10^{-08}	77.97	25.37	20.91	6.80	2.34
HD 10697 b	215.75	0.0400	0.0000	1.00	4.20	0.062	2.866×10^{-08}	33.12	23.48	20.88	4.62	2.02
HD 70642 b	215.72	0.0034	0.0034	1.07	3.67	0.113	1.018×10^{-07}	29.28	23.19	20.86	5.71	3.38
HD 69123 b	214.39	0.0000	0.0000	1.07	3.84	0.033	2.111×10^{-09}	75.12	25.27	20.89	3.58	-0.80
HD 125612 b	213.88	0.0028	0.0028	1.07	3.84	0.023	8.062×10^{-08}	57.62	24.70	20.89	6.96	3.16
HD 92788 c	212.68	0.0000	0.0000	1.07	3.93	0.303	7.150×10^{-08}	34.65	23.61	20.91	5.75	3.05
HIP 56640 b	212.23	0.0400	0.0000	0.99	4.26	0.037	5.310×10^{-09}	122.32	26.33	20.89	5.64	0.21
HD 18742 b	212.00	0.0000	0.0000	1.07	3.89	0.011	4.542×10^{-09}	162.69	26.95	20.89	6.09	0.04
HD 47366 c	211.04	0.0020	0.0020	1.07	3.64	0.023	3.319×10^{-09}	84.36	25.47	20.84	4.27	-0.36
HD 175167 b	211.03	0.0097	0.0702	1.03	4.23	0.032	3.160×10^{-08}	71.09	25.15	20.89	6.40	2.14
HD 68402 b	210.28	0.0000	0.0000	1.07	3.85	0.028	8.655×10^{-08}	78.43	25.37	20.89	7.71	3.24
HD 152079 b	209.32	0.0014	0.0014	1.07	3.79	0.048	7.173×10^{-08}	87.89	25.59	20.87	7.73	3.01
HD 64121 b	209.24	0.0029	0.0029	1.06	3.78	0.012	3.987×10^{-09}	129.97	26.44	20.87	5.45	-0.12
HD 18015 b	208.51	0.0000	0.0000	1.07	3.87	0.031	1.004×10^{-08}	123.80	26.36	20.89	6.36	0.90
HD 28185 b	206.12	0.0400	0.0000	1.01	4.18	0.026	9.283×10^{-08}	39.38	23.85	20.88	6.27	3.29
HD 4732 c	205.30	0.0010	0.0010	1.07	3.74	0.084	4.251×10^{-09}	54.78	24.55	20.86	3.62	-0.07
HD 128311 b	204.96	0.0000	0.0000	1.07	3.61	0.066	2.124×10^{-07}	16.33	21.90	20.84	5.22	4.16
HD 13167 b	203.89	0.0000	0.0000	1.07	3.88	0.028	1.708×10^{-08}	148.93	26.76	20.89	7.34	1.47
HD 145934 b	203.11	0.0015	0.0015	1.07	3.75	0.021	2.618×10^{-09}	227.88	27.66	20.87	6.21	-0.58
HD 142245 b	202.65	0.0000	0.0000	1.07	3.85	0.029	5.525×10^{-09}	97.23	25.83	20.89	5.19	0.25
17 Sco b	201.52	0.0000	0.0000	1.06	4.01	0.012	2.614×10^{-10}	124.95	26.34	20.86	2.38	-3.10
HD 143361 b	201.32	0.0000	0.0000	1.07	3.91	0.029	1.154×10^{-07}	68.51	25.09	20.91	7.75	3.57
HD 181342 b	199.65	0.0029	0.0029	1.06	3.78	0.013	5.494×10^{-09}	120.39	26.28	20.87	5.63	0.22
HD 108863 b	197.41	0.0016	0.0016	1.06	3.75	0.008	3.817×10^{-09}	164.74	26.96	20.87	5.91	-0.17
HD 23079 b	196.55	0.0001	0.0001	1.07	3.78	0.048	8.103×10^{-08}	33.46	23.50	20.87	5.77	3.15
HD 132406 b	195.96	0.0000	0.0000	1.04	4.12	0.028	5.352×10^{-08}	70.78	25.13	20.88	6.95	2.70
HD 50499 c	194.55	0.0035	0.0035	1.06	3.84	0.195	4.337×10^{-08}	46.28	24.22	20.89	5.81	2.49
HD 142415 b	193.75	0.0000	0.0000	1.06	3.59	0.030	8.758×10^{-08}	35.53	23.59	20.84	5.95	3.19
eta Cet b	193.68	0.0030	0.0030	1.06	3.78	0.033	6.113×10^{-10}	38.00	23.91	21.01	0.87	-2.02
HD 87883 b	192.09	0.0000	0.0000	1.04	4.12	0.222	1.852×10^{-07}	18.29	22.19	20.88	5.36	4.04
HD 1502 b	191.47	0.0025	0.0025	1.06	3.81	0.007	5.589×10^{-09}	190.95	27.28	20.87	6.65	0.24
Kepler-454 c	190.85	0.0000	0.0000	1.06	4.03	0.006	8.542×10^{-08}	230.87	27.67	20.86	10.00	3.19
HD 102329 c	187.93	0.0571	0.0599	1.02	3.58	0.011	3.390×10^{-09}	217.11	27.50	20.82	6.33	-0.35
HD 22532 b	185.36	0.0000	0.0000	1.06	3.70	0.012	3.707×10^{-09}	161.18	26.89	20.86	5.82	-0.22
HD 109286 b	184.79	0.0083	0.0203	1.03	3.87	0.023	8.153×10^{-08}	55.42	24.61	20.89	6.89	3.17
HD 166724 b	184.35	0.0000	0.0000	1.06	3.92	0.120	1.717×10^{-07}	45.13	24.18	20.91	7.27	4.00
HD 1605 c	181.61	0.0000	0.0000	1.06	3.93	0.040	9.670×10^{-09}	88.80	25.65	20.91	5.62	0.88
HD 33844 b	179.43	0.0024	0.0024	1.05	3.68	0.015	4.402×10^{-09}	105.78	25.98	20.86	5.09	-0.03
HD 4917 b	178.22	0.0000	0.0000	1.05	3.59	0.006	5.361×10^{-09}	204.28	27.37	20.82	6.69	0.14

Çizelgenin devamı

Cisim	T_{eff}	Z	Ze	R_J	log g	Ayrıklık (")	Kontrast	d (pc)	m_HP	M_HP	m_HS	M_HS
KELT-6 c	177.15	0.0000	0.0000	1.06	3.95	0.010	3.588×10^{-08}	240.73	27.82	20.91	9.21	2.30
HIP 74890 b	177.00	0.0513	0.0924	0.99	3.81	0.027	3.777×10^{-09}	78.66	25.35	20.87	4.30	-0.18
HD 150706 b	176.77	0.0022	0.0022	1.05	3.81	0.237	1.007×10^{-07}	28.27	23.13	20.87	5.64	3.38
NGC 2682 Sand 978 b	176.07	0.0000	0.0000	1.05	3.72	0.002	3.974×10^{-10}	821.92	30.43	20.86	6.93	-2.65
HD 60532 c	174.77	0.0029	0.0029	1.05	3.78	0.062	1.327×10^{-08}	25.97	22.95	20.87	3.25	1.18
55 Cnc d	174.69	0.0000	0.0000	1.05	3.97	0.473	1.240×10^{-07}	12.59	21.41	20.91	4.15	3.65
HD 142022 A b	174.01	0.0000	0.0000	1.05	4.03	0.085	9.757×10^{-08}	34.28	23.53	20.86	6.00	3.33
HD 108341 b	172.02	0.0000	0.0000	1.05	3.92	0.041	1.776×10^{-07}	48.91	24.34	20.89	7.46	4.02
HD 29021 b	171.58	0.0000	0.0000	1.05	4.03	0.074	1.439×10^{-07}	30.99	23.31	20.86	6.21	3.75
HD 89307 b	171.00	0.0000	0.0000	1.05	3.70	0.102	7.797×10^{-08}	32.01	23.38	20.86	5.61	3.09
HD 5608 b	170.67	0.0000	0.0000	1.05	3.61	0.033	4.922×10^{-09}	58.11	24.66	20.84	3.89	0.07
HD 196885 A b	170.49	0.0020	0.0020	1.05	3.79	0.069	5.020×10^{-08}	34.17	23.54	20.87	5.29	2.63
HD 76920 b	170.38	0.0000	0.0000	1.05	3.97	0.006	2.352×10^{-09}	184.03	27.24	20.91	5.67	-0.66
HD 33844 c	168.88	0.0000	0.0000	1.05	3.62	0.021	4.647×10^{-09}	105.78	25.96	20.84	5.13	0.01
HD 28678 b	168.38	0.0000	0.0000	1.04	3.57	0.006	3.045×10^{-09}	189.91	27.21	20.82	5.92	-0.47
HD 75898 b	167.97	0.0023	0.0023	1.05	3.82	0.015	3.669×10^{-08}	78.05	25.34	20.87	6.75	2.29
TYC 3318-01333-1 b	167.89	0.0000	0.0000	1.05	3.91	0.003	3.711×10^{-09}	490.61	29.35	20.89	8.27	-0.18
HAT-P-44 c	167.13	0.2000	0.0000	0.91	4.10	0.005	1.264×10^{-07}	347.85	28.54	20.84	11.30	3.59
6 Lyn b	166.90	0.0025	0.0025	1.04	3.69	0.039	4.573×10^{-09}	54.66	24.54	20.86	3.70	0.01
42 Dra b	165.76	0.2000	0.0000	0.91	4.09	0.013	3.682×10^{-10}	90.65	25.62	20.84	2.04	-2.75
Kepler-1704 b	164.85	0.0000	0.0000	1.05	4.00	0.002	2.908×10^{-08}	835.46	30.63	21.02	11.79	2.18
HD 24040 b	163.60	0.0000	0.0000	1.05	3.97	0.106	5.369×10^{-08}	46.62	24.26	20.91	6.08	2.74
HD 153950 b	162.95	0.0036	0.0036	1.04	3.86	0.026	5.301×10^{-08}	48.45	24.32	20.89	6.13	2.70
HD 102272 c	162.70	0.0000	0.0000	1.05	3.79	0.004	1.098×10^{-09}	360.00	28.79	21.01	6.40	-1.39
HD 150010 b	161.27	0.0022	0.0022	1.04	3.77	0.010	6.381×10^{-10}	144.49	26.67	20.87	3.69	-2.11
24 Sex b	159.98	0.0033	0.0033	1.04	3.69	0.018	4.998×10^{-09}	72.07	25.15	20.86	4.39	0.10
HD 73267 b	159.80	0.0000	0.0000	1.05	4.00	0.044	1.332×10^{-07}	50.41	24.35	20.84	7.16	3.65
HD 167042 b	159.06	0.0000	0.0000	1.04	3.62	0.027	6.613×10^{-09}	49.66	24.32	20.84	3.87	0.39
HD 66428 c	158.55	0.0022	0.0022	1.04	3.77	0.177	7.198×10^{-08}	53.28	24.51	20.87	6.65	3.02
HD 206610 b	156.41	0.0000	0.0000	1.05	3.69	0.012	3.414×10^{-09}	147.19	26.70	20.86	5.53	-0.31
HD 37605 c	156.14	0.0000	0.0000	1.05	3.88	0.080	1.259×10^{-07}	46.79	24.24	20.89	6.99	3.64
HD 72659 b	153.50	0.0000	0.0000	1.05	3.91	0.090	4.224×10^{-08}	51.89	24.47	20.89	6.03	2.46
HD 82943 b	153.28	0.0000	0.0000	1.04	3.61	0.043	6.803×10^{-08}	27.59	23.04	20.84	5.12	2.92
Kepler-48 e	152.96	0.0000	0.0000	1.04	3.70	0.006	1.448×10^{-07}	306.74	28.29	20.86	11.19	3.76
Kepler-432 c	152.43	0.0025	0.0025	1.04	3.78	0.001	7.376×10^{-09}	848.02	30.52	20.87	10.19	0.54
HD 131496 b	152.03	0.0000	0.0000	1.04	3.64	0.015	6.597×10^{-09}	131.85	26.44	20.84	5.99	0.39
HD 72490 b	150.94	0.0000	0.0000	1.04	3.64	0.015	5.111×10^{-09}	126.34	26.35	20.84	5.62	0.11
BD+49 828 b	150.58	0.0000	0.0000	1.04	3.59	0.010	2.246×10^{-09}	442.04	29.05	20.82	7.43	-0.80
HD 147873 c	150.43	0.0000	0.0000	1.04	3.75	0.012	1.791×10^{-08}	109.06	26.04	20.86	6.68	1.49
HD 50499 b	149.96	0.0000	0.0000	1.04	3.60	0.083	4.966×10^{-08}	46.28	24.17	20.84	5.91	2.58
HD 290327 b	149.34	0.0026	0.0026	1.04	3.78	0.061	1.132×10^{-07}	56.43	24.63	20.87	7.27	3.51
HD 180902 b	146.89	0.0000	0.0000	1.04	3.62	0.013	7.284×10^{-09}	104.58	25.94	20.84	5.59	0.49
kap CrB b	146.46	0.0035	0.0035	1.03	3.70	0.088	5.437×10^{-09}	30.07	23.25	20.86	2.59	0.20
HD 136418 b	146.09	0.0000	0.0000	1.04	3.72	0.012	8.654×10^{-09}	105.17	25.97	20.86	5.81	0.70
HD 158038 b	145.92	0.0000	0.0000	1.03	3.58	0.016	6.530×10^{-09}	94.86	25.71	20.82	5.24	0.36
HD 132563 b	145.51	0.0000	0.0000	1.03	3.57	0.025	5.408×10^{-08}	105.16	25.93	20.82	7.76	2.65
HIP 114933 b	145.11	0.0031	0.0031	1.03	3.68	0.028	4.765×10^{-09}	101.77	25.88	20.84	5.07	0.03
HAT-P-17 c	144.87	0.0000	0.0000	1.04	3.92	0.061	1.478×10^{-07}	92.38	25.72	20.89	8.65	3.82
HD 183263 b	144.80	0.0000	0.0000	1.04	3.93	0.027	5.952×10^{-08}	54.20	24.56	20.89	6.50	2.83
HD 213472 b	144.05	0.0000	0.0000	1.04	3.93	0.202	4.623×10^{-08}	64.45	24.94	20.89	6.60	2.56
GJ 317 b	142.86	0.0032	0.0032	1.03	3.79	0.076	1.570×10^{-06}	15.20	21.78	20.87	7.27	6.36
HD 200964 b	141.01	0.0000	0.0000	1.03	3.60	0.022	5.282×10^{-09}	72.59	25.12	20.82	4.43	0.13
HD 212771 b	140.98	0.0022	0.0022	1.03	3.77	0.011	4.249×10^{-09}	111.16	26.10	20.87	5.18	-0.05
HD 98219 b	140.67	0.0034	0.0034	1.03	3.69	0.011	5.942×10^{-09}	113.70	26.12	20.84	5.55	0.27
HD 19994 b	140.33	0.0015	0.0015	1.02	3.54	0.058	2.840×10^{-08}	22.52	22.58	20.82	3.72	1.95
HD 95872 b	140.27	0.0000	0.0000	1.04	3.96	0.071	1.467×10^{-07}	72.22	25.21	20.91	8.12	3.83
HD 154857 c	139.91	0.0025	0.0025	1.03	3.80	0.084	3.229×10^{-08}	63.45	24.89	20.87	6.16	2.15
HD 65216 c	139.84	0.0000	0.0000	1.04	3.70	0.164	1.280×10^{-07}	35.12	23.58	20.86	6.35	3.62

Çizelgenin devamı

Cisim	T_{eff}	Z	Ze	R_J	log g	Ayrıklık (")	Kontrast	d (pc)	m_HP	M_HP	m_HS	M_HS
gam Psc b	139.75	0.0043	0.0043	1.00	3.55	0.032	1.143×10^{-09}	41.31	23.88	20.80	1.53	-1.55
HD 83443 c	139.59	0.0000	0.0000	1.03	3.57	0.196	1.239×10^{-07}	40.90	23.88	20.82	6.61	3.55
HIP 90988 b	139.24	0.0000	0.0000	1.04	3.71	0.014	8.238×10^{-09}	94.03	25.72	20.86	5.51	0.65
HD 217107 c	139.07	0.0007	0.0007	1.04	3.80	0.265	7.017×10^{-08}	20.06	22.39	20.87	4.50	2.99
HD 99706 b	138.85	0.0041	0.0041	1.01	3.50	0.014	4.411×10^{-09}	146.60	26.63	20.80	5.74	-0.09
HD 154857 b	138.58	0.0030	0.0030	1.03	3.78	0.020	1.932×10^{-08}	63.45	24.89	20.87	5.60	1.59
HD 216437 b	138.18	0.0000	0.0000	1.04	3.74	0.094	4.821×10^{-08}	26.69	22.99	20.86	4.70	2.56
HD 116029 b	137.62	0.0000	0.0000	1.03	3.55	0.013	5.627×10^{-09}	123.25	26.27	20.82	5.65	0.20
HD 5319 b	137.55	0.0000	0.0000	1.03	3.59	0.013	8.021×10^{-09}	121.41	26.24	20.82	6.00	0.58
HD 117207 b	134.64	0.0029	0.0029	1.03	3.69	0.117	8.685×10^{-08}	32.35	23.39	20.84	5.74	3.19
7 CMa b	134.30	0.0017	0.0017	1.03	3.67	0.089	5.483×10^{-09}	19.81	22.32	20.84	1.67	0.19
HD 95089 b	134.14	0.0041	0.0041	1.01	3.52	0.010	5.049×10^{-09}	136.96	26.49	20.80	5.74	0.06
47 UMa b	132.77	0.0031	0.0031	1.03	3.80	0.152	6.412×10^{-08}	13.80	21.57	20.87	3.59	2.89
psi1 Dra B b	132.33	0.0000	0.0000	1.03	3.58	0.195	5.706×10^{-08}	22.72	22.60	20.82	4.49	2.71
HIP 75092 b	132.32	0.0000	0.0000	1.03	3.65	0.025	6.318×10^{-09}	81.67	25.40	20.84	4.90	0.34
HD 164604 b	132.29	0.0034	0.0034	1.02	3.70	0.034	2.257×10^{-07}	39.36	23.83	20.86	7.22	4.24
HD 6718 b	131.36	0.0000	0.0000	1.03	3.62	0.069	1.082×10^{-07}	51.34	24.39	20.84	6.98	3.42
HD 79498 b	131.12	0.0041	0.0041	1.01	3.54	0.061	9.323×10^{-08}	48.95	24.25	20.80	6.68	3.23
HD 116029 c	130.86	0.0040	0.0040	1.01	3.52	0.016	6.157×10^{-09}	123.25	26.26	20.80	5.73	0.28
HD 30856 b	130.05	0.0000	0.0000	1.02	3.59	0.014	6.809×10^{-09}	131.20	26.41	20.82	5.99	0.40
HD 82886 b	129.66	0.0000	0.0000	1.03	3.76	0.012	4.469×10^{-09}	127.06	26.38	20.86	5.50	-0.02
HD 177830 b	129.64	0.0000	0.0000	1.03	3.63	0.018	1.183×10^{-08}	62.77	24.83	20.84	5.01	1.02
HAT-P-11 c	129.13	0.0000	0.0000	1.03	3.75	0.109	2.782×10^{-07}	37.76	23.74	20.86	7.35	4.47
HD 171028 b	128.24	0.0008	0.0008	1.03	3.81	0.012	1.640×10^{-08}	111.66	26.11	20.87	6.65	1.41
HD 42012 b	127.93	0.0000	0.0000	1.02	3.61	0.045	1.640×10^{-07}	36.80	23.65	20.82	6.69	3.86
HD 103891 b	127.00	0.0000	0.0000	1.02	3.56	0.059	1.932×10^{-08}	55.52	24.54	20.82	5.26	1.54
HD 200964 c	126.69	0.0040	0.0040	1.00	3.51	0.027	5.369×10^{-09}	72.59	25.11	20.80	4.43	0.13
HD 216435 b	126.44	0.0040	0.0040	1.00	3.52	0.078	3.022×10^{-08}	32.98	23.39	20.80	4.59	2.00
HD 98736 b	126.43	0.0000	0.0000	1.03	3.76	0.057	1.296×10^{-07}	32.45	23.41	20.86	6.19	3.64
HD 27631 b	126.11	0.0000	0.0000	1.02	3.58	0.064	1.209×10^{-07}	50.29	24.33	20.82	7.03	3.53
HD 48265 b	126.03	0.0000	0.0000	1.02	3.59	0.020	2.819×10^{-08}	90.54	25.60	20.82	6.73	1.95
HD 233832 b	124.64	0.0000	0.0000	1.02	3.65	0.048	2.713×10^{-07}	58.74	24.68	20.84	8.27	4.42
Kepler-1647 b	124.55	0.0000	0.0000	1.02	3.59	0.002	2.185×10^{-08}	1212.45	31.53	21.11	12.38	1.96
HD 159868 b	124.21	0.0000	0.0000	1.03	3.74	0.042	2.299×10^{-08}	55.85	24.59	20.86	5.50	1.76
HD 23127 b	124.10	0.0000	0.0000	1.02	3.59	0.025	4.447×10^{-08}	93.86	25.68	20.82	7.30	2.44
HD 222076 b	122.84	0.0000	0.0000	1.02	3.60	0.020	7.866×10^{-09}	91.15	25.62	20.82	5.36	0.56
HD 220773 b	122.79	0.0000	0.0000	1.02	3.57	0.098	3.412×10^{-08}	50.51	24.34	20.82	5.67	2.15
HD 133131 B b	122.02	0.0034	0.0034	1.02	3.80	0.120	9.697×10^{-08}	51.30	24.43	20.87	6.89	3.34
HD 4203 b	122.02	0.0000	0.0000	1.03	3.75	0.014	5.112×10^{-08}	81.38	25.41	20.86	7.18	2.63
HD 13931 b	121.23	0.0000	0.0000	1.03	3.74	0.109	6.111×10^{-08}	47.40	24.24	20.86	6.20	2.82
HD 12661 c	121.13	0.0000	0.0000	1.02	3.66	0.074	8.084×10^{-08}	37.85	23.73	20.84	6.00	3.11
HD 30562 b	120.96	0.0041	0.0041	1.00	3.51	0.089	3.872×10^{-08}	26.16	22.89	20.80	4.36	2.27
HD 163607 c	120.76	0.0000	0.0000	1.03	3.74	0.035	3.340×10^{-08}	67.79	25.01	20.86	6.32	2.17
HD 222155 b	120.48	0.0000	0.0000	1.03	3.73	0.102	2.901×10^{-08}	50.61	24.38	20.86	5.53	2.01
HD 4203 c	120.31	0.0000	0.0000	1.03	3.74	0.085	4.581×10^{-08}	81.38	25.41	20.86	7.06	2.51
HD 187123 c	120.11	0.0037	0.0037	1.01	3.71	0.106	7.394×10^{-08}	45.95	24.17	20.86	6.34	3.03
HD 73526 c	119.84	0.0000	0.0000	1.03	3.75	0.011	4.281×10^{-08}	97.24	25.80	20.86	7.37	2.44
HD 65216 b	119.77	0.0043	0.0043	1.00	3.54	0.037	1.376×10^{-07}	35.12	23.53	20.80	6.38	3.65
HD 4113 b	119.05	0.0000	0.0000	1.02	3.64	0.031	8.736×10^{-08}	41.87	23.95	20.84	6.30	3.19
HD 29399 b	118.29	0.0000	0.0000	1.02	3.61	0.043	6.530×10^{-09}	44.15	24.05	20.82	3.58	0.36
HD 190647 b	118.28	0.0037	0.0037	1.01	3.71	0.041	5.262×10^{-08}	54.47	24.54	20.86	6.34	2.66
HD 191939 f	118.14	0.0000	0.0000	1.02	3.72	0.060	1.240×10^{-07}	53.61	24.50	20.86	7.24	3.59
HD 20782 b	117.92	0.0000	0.0000	1.01	3.58	0.038	8.013×10^{-08}	35.99	23.60	20.82	5.86	3.08
HD 221585 b	117.59	0.0000	0.0000	1.02	3.62	0.041	3.027×10^{-08}	55.85	24.56	20.82	5.76	2.02
47 UMa d	116.90	0.0000	0.0000	1.02	3.62	0.841	6.632×10^{-08}	13.80	21.54	20.84	3.59	2.89
16 Cyg B b	116.58	0.0000	0.0000	1.02	3.66	0.079	7.788×10^{-08}	21.14	22.46	20.84	4.69	3.07
HD 20868 b	115.96	0.0041	0.0041	0.99	3.53	0.020	2.279×10^{-07}	47.72	24.20	20.80	7.59	4.20
WASP-47 c	115.52	0.0000	0.0000	1.01	3.61	0.005	8.201×10^{-08}	264.78	27.93	20.82	10.22	3.11

Çizelgenin devamı

Cisim	T_{eff}	Z	Ze	R_J	log g	Ayrıklık (")	Kontrast	d (pc)	m_HP	M_HP	m_HS	M_HS
HD 45350 b	114.75	0.0000	0.0000	1.02	3.66	0.041	6.582×10^{-08}	46.87	24.19	20.84	6.24	2.88
HD 188015 b	113.86	0.0000	0.0000	1.01	3.59	0.024	7.918×10^{-08}	50.67	24.34	20.82	6.59	3.07
HD 190360 b	113.44	0.0000	0.0000	1.02	3.66	0.244	8.041×10^{-08}	16.01	21.86	20.84	4.12	3.10
HD 129445 b	113.24	0.0000	0.0000	1.01	3.62	0.043	7.441×10^{-08}	67.44	24.96	20.82	7.14	3.00
HD 94834 b	112.24	0.0039	0.0039	0.99	3.53	0.028	7.869×10^{-09}	98.16	25.76	20.80	5.50	0.54
HD 108874 b	110.05	0.0000	0.0000	1.00	3.57	0.017	9.637×10^{-08}	59.52	24.69	20.82	7.15	3.28
HD 27442 b	109.98	0.0000	0.0000	1.00	3.61	0.070	1.303×10^{-08}	18.27	22.13	20.82	2.42	1.11
HD 133131 A b	107.59	0.0000	0.0000	0.99	3.58	0.028	1.110×10^{-07}	51.47	24.38	20.82	6.99	3.43
HD 37124 c	103.79	0.8000	0.0000	0.55	3.75	0.054	1.239×10^{-07}	31.66	23.25	20.75	5.99	3.48
HD 141399 d	103.49	0.0043	0.0043	0.97	3.52	0.056	5.608×10^{-08}	37.02	23.64	20.80	5.52	2.67
HD 108874 c	102.87	0.8000	0.0096	0.58	3.90	0.045	9.241×10^{-08}	59.52	24.66	20.78	7.07	3.20
HD 9174 b	102.81	0.0038	0.0038	0.96	3.50	0.027	3.949×10^{-08}	81.49	25.34	20.78	6.83	2.28
HD 17674 b	97.32	0.8000	0.0000	0.57	3.85	0.032	7.357×10^{-08}	44.43	24.01	20.77	6.17	2.93
HD 217958 b	95.64	0.8000	0.0000	0.55	3.72	0.061	5.904×10^{-08}	61.80	24.69	20.73	6.62	2.66
WASP-107 c	95.63	0.8000	0.0000	0.48	3.61	0.029	3.152×10^{-07}	63.68	24.89	20.87	8.64	4.62
HD 170469 b	93.70	0.8000	0.0000	0.55	3.76	0.037	6.852×10^{-08}	60.18	24.65	20.75	6.74	2.84
47 UMa c	92.02	0.8000	0.0275	0.54	3.69	0.261	7.428×10^{-08}	13.80	21.41	20.72	3.59	2.89
HD 114783 c	91.33	0.8000	0.0000	0.55	3.73	0.236	1.809×10^{-07}	21.06	22.35	20.73	5.49	3.88
HIP 57274 d	87.86	0.8000	0.0906	0.54	3.68	0.039	3.260×10^{-07}	25.86	22.78	20.72	6.56	4.50
HD 141399 e	87.06	0.8000	0.0000	0.55	3.77	0.135	5.887×10^{-08}	37.02	23.59	20.75	5.52	2.67
HD 44219 b	86.85	0.8000	0.0943	0.54	3.72	0.022	6.292×10^{-08}	52.91	24.35	20.73	6.35	2.73
HD 564 b	86.53	0.8000	0.0688	0.51	3.53	0.023	8.134×10^{-08}	51.17	24.53	20.99	6.81	3.26
TYC 2187-512-1 b	83.73	0.8000	0.0641	0.50	3.54	0.079	8.328×10^{-07}	15.47	21.94	20.99	6.74	5.79
HD 215497 c	82.67	0.7500	0.1000	0.51	3.53	0.032	1.232×10^{-07}	40.55	24.05	21.01	6.77	3.73
HD 102843 b	79.24	0.8000	0.0681	0.50	3.58	0.065	1.107×10^{-07}	62.76	24.88	20.89	7.49	3.50
HD 34445 g	78.63	0.8000	0.0400	0.50	3.60	0.138	5.184×10^{-08}	46.09	24.14	20.82	5.93	2.61

EK 1.2. planetsynth Model Çıktıları

Tablo 1.2: Yüzey yerçekimi sınırı ($\log g < 3.5$) nedeniyle BT-Settl SED'leri ile akı ve kontrast hesaplaması yapılamayan gezegenlerin bu çalışmada *planetsynth* ile elde edilen model çıktıları.

Cisim	T_{eff}	Z	Ze	R_J	log g
HD 148156 b	270.82	0.0164	0.0480	1.12	3.25
HD 147513 b	241.69	0.0042	0.0042	1.08	3.44
GJ 1148 c	186.25	0.0000	0.0000	1.08	2.69
BD+48 738 b	183.50	0.0000	0.0000	1.04	3.35
HD 114386 b	168.66	0.0032	0.0032	1.03	3.46
eps Eri b	158.98	0.0000	0.0000	1.01	3.23
gam Lib b	147.92	0.0000	0.0000	1.01	3.42
ups Leo b	143.13	0.0000	0.0000	0.96	3.16
HD 10647 b	140.45	0.0000	0.0000	1.01	3.38
GJ 649 b	133.22	0.0000	0.0000	0.97	2.96
HD 100777 b	131.86	0.0000	0.0000	1.01	3.43
HD 14787 b	131.14	0.0035	0.0035	1.00	3.47
HD 207832 c	129.82	0.0000	0.0000	0.99	3.29
HD 96992 b	128.46	0.0038	0.0038	0.99	3.49
HD 197037 b	124.04	0.0000	0.0000	0.99	3.33
HD 5319 c	121.95	0.0010	0.0010	1.00	3.45
HD 99109 b	121.67	0.0000	0.0000	0.96	3.10
HD 33142 c	120.18	0.0011	0.0011	0.99	3.38
24 Sex c	119.62	0.0000	0.0000	0.99	3.37
HD 187085 b	116.52	0.0000	0.0000	0.99	3.36
HD 220689 b	113.06	0.0038	0.0038	0.98	3.48
HD 1605 b	111.75	0.0000	0.0000	0.98	3.41

Çizelgenin devamı

Cisim	T_{eff}	Z	Ze	R_J	log g
7 CMa c	110.68	0.0000	0.0000	0.98	3.38
HD 113538 c	110.55	0.0000	0.0000	0.98	3.41
HD 31253 b	110.02	0.0003	0.0003	0.96	3.25
HD 4208 b	110.02	0.0000	0.0000	0.97	3.36
HD 25171 b	109.22	0.0000	0.0000	0.98	3.40
HD 156411 b	107.90	0.0145	0.0145	0.94	3.34
HD 8535 b	107.31	0.0148	0.0148	0.94	3.31
HD 73534 b	107.21	0.0037	0.0037	0.97	3.49
HD 114783 b	107.14	0.0036	0.0036	0.97	3.49
HD 210193 b	106.67	0.0148	0.0148	0.91	3.18
HD 184010 d	106.43	0.0147	0.0147	0.91	3.16
HD 37124 d	105.97	0.0148	0.0148	0.93	3.33
Kepler-167 e	105.66	0.0000	0.0000	0.97	3.45
HD 96167 b	105.51	0.0147	0.0147	0.93	3.34
HD 219415 b	105.32	0.0000	0.0000	0.97	3.45
Kepler-68 d	104.06	0.0000	0.0000	0.96	3.38
HD 32963 b	102.34	0.0147	0.0147	0.92	3.34
HD 184010 c	100.82	0.8000	0.0242	0.51	3.49
HD 211810 b	94.57	0.0000	0.0000	0.93	3.31
HD 34445 b	94.43	0.0005	0.0000	0.94	3.39
HD 134987 c	94.21	0.0000	0.0000	0.94	3.39
HIP 14810 d	93.38	0.0000	0.0000	0.92	3.27
Kepler-1654 b	92.21	0.0000	0.0000	0.91	3.21
HD 181433 c	91.55	0.0000	0.0000	0.92	3.30
HD 30669 b	90.54	0.0000	0.0000	0.90	3.19
HD 86226 b	90.40	0.0000	0.0000	0.90	3.17
HD 154345 b	89.49	0.0000	0.0000	0.94	3.39
HIP 41378 f	89.05	0.7500	0.1000	0.49	3.41
BD-11 4672 b	88.03	0.0000	0.0000	0.92	3.31
HD 105779 b	87.04	0.0000	0.0000	0.92	3.30
HD 11964 b	86.46	0.0000	0.0000	0.92	3.29
HD 181433 d	84.06	0.0000	0.0000	0.90	3.24
HD 113538 b	82.65	0.0000	0.0000	0.87	3.10
HD 114613 b	82.30	0.0300	0.0300	0.86	3.11
HD 7199 b	80.67	0.7500	0.1000	0.49	3.47
Kepler-1656 c	79.81	0.0000	0.0000	0.87	3.15
HD 3765 b	79.70	0.0000	0.0000	0.83	2.83
KIC 3558849 b	77.94	0.0000	0.0000	0.81	2.68
HD 126614 b	76.74	0.0006	0.0000	0.86	3.13
HD 47186 c	75.78	0.0000	0.0000	0.85	3.11
HD 133131 A c	73.77	0.0002	0.0000	0.86	3.18
Kepler-849 b	70.74	0.0400	0.0400	0.76	2.77
HD 164922 b	69.43	0.0000	0.0000	0.84	3.14
KIC 5437945 b	65.66	0.0400	0.0400	0.75	2.70
HD 10180 h	65.58	0.0000	0.0000	0.80	2.92
HD 24040 c	62.12	0.0000	0.0000	0.79	2.93
HD 126525 b	61.21	0.0910	0.0907	0.73	3.07
HD 204941 b	60.28	0.0000	0.0000	0.79	2.98
HD 34445 f	43.23	0.0000	0.0000	0.73	2.78

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Seda KAPTAN
Uyruğu	[X] T.C. [ ] Diğer:

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Fen Fakültesi
Bölümü	Astronomi ve Uzay Bilimleri
Mezuniyet Yılı	2011
Lisans	
Üniversite	Anadolu Üniversitesi
Fakülte	Açıköğretim Fakültesi
Bölümü	Felsefe
Mezuniyet Yılı	2020
Lisans	
Üniversite	Anadolu Üniversitesi
Fakülte	Açıköğretim Fakültesi
Bölümü	Yönetim Bilişim Sistemleri
Mezuniyet Yılı	2023

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri
Anabilim Dalı	Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı
Programı	Astronomi ve Uzay Bilimleri Programı
Mezuniyet Tarihi	2019

Doktora	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri
Anabilim Dalı	Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı
Programı	Astronomi ve Uzay Bilimleri Programı
Mezuniyet Tarihi	2025

Makale ve Bildiriler

Makaleler

Kaptan, S., Aliş, S., Baştürk, Ö., 2025, DAG Teleskobu ile Ötegezegenlerin Doğrudan Görüntülenmesi Üzerine Bir Öngörü Çalışması, Turkish Journal of Astronomy and Astrophysics, Vol. 6, Sayı 2, Basım Aşamasında

Yalçınkaya, S., Esmer, E. M., Baştürk, Ö., ve diğ., 2024, Looking for timing variations in the transits of 16 exoplanets, MNRAS, 530, 2475.

Maskoliūnas, M., Wyrzykowski, Ł., Howil, K., ve diğ., 2024, Lens Mass Estimate in the Galactic Disk Extreme Parallax Microlensing Event Gaia19dke, AcA, 74, 77.

Bildiriler

Alis, S., Kaptan, S., Baştürk, Ö., Yeşilyaprak, C., 2024, Towards Direct Imaging Studies of Exoplanets with DAG Telescope, EAS2024 European Astronomical Society Annual Meeting, 1-5 Temmuz 2024, Padova, Italy.

Baştürk, Ö., Esmer, E.M., Yalçinkaya, S., ve diğ., 2023, Zamanlama Yöntemiyle Ötegezegen Keşfi, TJAA, 4, 83.

Doğan, D.S., Çoban, G.Ç., Çelik, E., Kaptan, S., Kahraman Aliçavuş, F., 2023, Collecting The Update Parameters of Eclipsing Binaries with Delta Scuti Stars, TFD 39. Uluslararası Fizik Kongresi, 31 Ağustos - 04 Eylül 2023, Muğla Türkiye.

Kaptan ve Özkan, 2020, "QQ Boötes: First Photometric Investigation", TJAA, 1, 213 – 216, 19. Ulusal Astronomi Kongresi, 2-6 Şubat 2015, Ankara, Türkiye

Kaptan and Özkardeş, 2019, The Short-Period Eclipsing Binary 1SWASPJ173327.97+265547.9: Photometric Solution and Period Investigation, TFD 35. Uluslararası Fizik Kongresi, 4-8 Eylül 2019, Bodrum, Türkiye

Güver, T., Kaptan, S., Aliş, S., ve diğ., 2019, Istanbul University Observatory : IST60 as a Robotic Telescope, The Tenth OPTICON Gaia Science Alerts Workshop, 18 - 20 December 2019, Catania, Italy.

Güver, T., Aliş, S., Erol, A., ve diğ., 2018, Recent Developments at İstanbul University Observatory, TFD 34. Uluslararası Fizik Kongresi,5-9 Eylül 2018, Muğla, Türkiye.

Kitap Bölümleri

Özkardeş ve Kaptan, 2022, V1095 Her: TESS Görüş Alanındaki Olası Üçüncü Bileşenli Değen Çift Yıldız, Kitap Bölümü, Gece Kitaplığı Yayınevi, ISBN: 978-625-430-556-6

Özkardeş ve Kaptan, 2024, First Investigation of a W UMa Type Eclipsing Binary in The SuperWasp Archive: NSVS 6283621, Kitap Bölümü, Seruven Publishing, ISBN: 978-625-6319-08-0

Projeler

Evrimleşmiş Çift Yıldız Sistemleri Etrafında Ötegezegen Araştırması, 2023–2026, TÜBİTAK 1001 Araştırma Projesi (MFAG), 122F358, Bursiyer (Doktora)

Delta Scuti Yıldızlarının Zonklama Yapısının Çift Sistemler Yardımıyla İncelenmesi, 2021–2024, TÜBİTAK 1001 Araştırma Projesi (MFAG), 120F330, BİDEB Burslusu

SuperWASP Veritabanından Seçilen Bazı Kısa Dönemli Örten Çiftlerin Fotometrik İncelenmesi, 2019–2020, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projesi, Araştırmacı

Galaksi Kümelerinin Merkezi Galaksilerinin Evriminin Optik ve Yakın Kırmızıöte Bölgede İncelenmesi, 2018–2020, TÜBİTAK 1001 Araştırma Projesi (MFAG), 117F311, Bursiyer (Doktora)

2. Gökyüzü Buluşmaları, 2018, TÜBİTAK 4007 Bilim Şenlikleri Destekleme Programı, 118B810, Atölye Lideri

Zeytinburnu Bilim ve Kültür Şenliği, 2018, TÜBİTAK 4007 Bilim Şenlikleri Destekleme Programı, 118B756, Konuşmacı

İstanbul Üniversitesi Teleskoplarının Otomasyonu, 2017–2020, İstanbul Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projesi, Araştırmacı

Bazı W UMa Tipi Örten Çiftlerin Fotometrik Analizi, 2011–2019, İstanbul Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi (Tez Projesi), Araştırmacı

Burslar

TÜBİTAK 2211-A — Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı (Doktora)

YÖK 100/2000 — Doktora Burs Programı

TÜBİTAK 2214-A — Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı

TÜBİTAK 2250 — Lisansüstü Bursiyer Performans Programı

Erasmus+ Staj Hareketliliği Programı