



T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇİFT VE ÜÇ YILDIZLI GEZEĞEN SİSTEMLERİNİN
MİMARİSİNİN İNCELENMESİ

Taylan Umutcan KASAR

Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı

Astronomi ve Uzay Bilimleri Programı

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Özgecan ÖNAL TAŞ

Nisan, 2025

İSTANBUL

Bu çalışma 22.04.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı Astronomi ve Uzay Bilimleri Programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Dr. Öğr. Üyesi Özgecan ÖNAL TAŞ (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Selçuk BİLİR
Üniversite
Fakülte

Prof. Dr. Esin SİPAHİ KILIÇ
Üniversite
Fakülte

- **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 aboneliği olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

- **Proje Destekleri**

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Bu tez numaralı proje ile tarafından desteklenmiştir.

- **Tezden Üretilmiş Yayınların Künye Bilgileri**

[]

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, çok büyük emeği olan danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Özgecan ÖNAL TAŞ'a ve tez süresince benden desteğini esirgemeyen arkadaşım Serkan YILDIZ'a, annem Meral KASAR, babam Erol KASAR ve kardeşim Deniz KASAR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Nisan, 2025

Taylan Umutcan KASAR



İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ	ix
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
SUMMARY	1
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR	3
2.1. ÖTEGEZEĞEN ARAŞTIRMALARININ BUGÜNKÜ DURUMU	3
2.1.1. Ötegezegen Nedir?	3
2.2. ÖTEGEZEĞEN TÜRLERİ	5
2.2.1. Yer-Benzeri Gezegenler	7
2.2.2. Süper Yer-Benzeri Gezegenler	8
2.2.3. Neptün-Benzeri Gezegenler	9
2.2.4. Jüpiter-Benzeri Gezegenler	10
2.3. ÖTEGEZEĞEN GÖZLEM YÖNTEMLERİ	10
2.3.1. Doğrudan Yöntemler	12
2.3.2. Dolaylı Yöntemler	13
2.3.3. Hibrit Yöntemler	14
2.4. ÖTEGEZEĞEN OLUŞUMU	16
2.4.1. Tek Yıldızlarda Gezegen Oluşumu	16
2.4.2. Çift Yıldızlarda Ötegezegen Oluşumu	20
2.4.3. Çoklu Yıldız Sistemlerinde Ötegezegenler ve Rezonansları	23
2.5. NASA ÖTEGEZEĞEN ARŞİVİ	25
3. MALZEME VE YÖNTEM	27

3.1. ÖTEGEZEĞEN TÜRLERİNİN BELİRLENMESİ	27
3.2. ÖTEGEZEĞEN SİSTEMİ MİMARİSİNİN BELİRLENMESİ	27
4. BULGULAR	30
4.1. ÖTEGEZEĞEN VERİLERİNİN SEÇİMİ	30
4.2. ÖTEGEZEĞENLERİN YILDIZLARI	31
4.3. ÖTEGEZEĞEN TÜRLERİNİN DAĞILIMI	34
4.4. ÇİFT YILDIZLI ÖTEGEZEĞEN SİSTEMLERİNİN MİMARİSİ	39
4.4.1. Artan Gezegen Mimarisi	39
4.4.2. Azalan Gezegen Mimarisi	43
4.4.3. Karma Gezegen Mimarisi	44
4.4.4. Tektip Gezegen Mimarisi	45
4.5. ÜÇ YILDIZLI ÖTEGEZEĞEN SİSTEMLERİNİN MİMARİSİ	50
4.5.1. Artan Gezegen Mimarisi	51
4.5.2. Azalan Gezegen Mimarisi	51
4.5.3. Tektip Gezegen Mimarisi	53
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	56
5.1. ÇİFT YILDIZLI ÖTEGEZEĞEN SİSTEMLERİNİN MİMARİSİ	56
5.2. ÜÇ YILDIZLI ÖTEGEZEĞEN SİSTEMLERİNİN MİMARİSİ	57
KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	67

ŞEKİL LİSTESİ

Page No

Şekil 2.1: Gözlenen ötegezegenlerin kütle-yarıçap diyagramındaki dağılımları. Güneş Sistemi gezegenlerinden Venüs, Yer, Uranüs, Neptün, Satürn ve Jüpiter'in diyagram üzerindeki konumları da gezegenlerin kendi fotoğraflarıyla sembolize edilmiştir (Adibekyan, 2019)....	5
Şekil 2.2: 2024 itibariyle gözlenen ötegezegenlerin aile portresi.....	6
Şekil 2.3: Bir Ötegezegenin Geçiş Simülasyonu (NASA, 2021)	7
Şekil 2.4: Gezegen yarıçapının yıldızdan gelen akıya göre değişimlerinin görüldüğü ötegezegen sınıflandırması.	8
Şekil 2.5: Mini Neptün türü gezegenler ile Süper Yer benzeri gezegenler arasındaki geçiş.	9
Şekil 2.6: Yer ve uzay tabanlı ötegezegen gözlemleyen teleskoplar ve gözlemevlerinin şematik gösterimi (Tripathi, 2024)	11
Şekil 2.7: Genç Yıldız Nesnelерinin aşamalarının gösterimi	16
Şekil 2.8: Ötegezegenlerde Yörünge Tipleri	21
Şekil 3.1: Dört farklı gezegen mimarisi: tektip, karma, azalan ve artan.	29
Şekil 4.1: Çalışmada incelenen yıldızların göksel ekvatorial ve Galaktik koordinat düzlemlerindeki dağılımları.....	31
Şekil 4.2: Gaia DR3 trigonometrik paralaksları bilinen yıldızların uzaklık histogramı.	32
Şekil 4.3: Yıldızların helyosentrik koordinat bileşelerindeki dağılımları. Üst panel tepeden $Y \times X$ düzlemi ve alt panel kenardan $Z \times X$. Güneş'in konumunda kesişen Galaktik düzlemi ve Galaktik kutup doğrultusunu siyah kesikli çizgilerle temsil edilmiştir.	33
Şekil 4.4: Gezegen türlerinin histogramı. Üst panel tüm örnek, orta panel çift yıldız sistemleri ve alt panel üçlü yıldız sistemlerinde gözlenen gezegen türlerinin frekans dağılımını göstermektedir. J, S, N, T, M, m ve sT gezegen türlerini temsil etmektedir.....	35
Şekil 4.5: Gezegen keşif yöntemlerinin histogramı. Üst panel tüm örnek, orta panel çift yıldız sistemleri ve alt panel üçlü yıldız sistemlerinde kullanılmış gezegen keşif yöntemlerinin frekans dağılımını göstermektedir.....	37
Şekil 4.6: Çift yıldız sistemlerinde Artan mimarideki gezegen sistemleri.	39
Şekil 4.7: Artan Gezegen Mimarisi sistem çeşitleri	42
Şekil 4.8: Çift yıldız sistemlerinde Azalan mimarideki gezegen sistemleri.	43
Şekil 4.9: Azalan Gezegen Mimarisine sahip sistemlerdeki gezegen dağılımları	44

Şekil 4.10: Çift yıldız sistemlerinde Karma mimarideki gezegen sistemleri.....	45
Şekil 4.11: Karma Gezegen Mimarisine sahip sistemlerdeki gezegen dağılımları	46
Şekil 4.12: Çift yıldız sistemlerinde Tektip mimarideki gezegen sistemleri.	47
Şekil 4.13: Tektip Gezegen Mimarisine sahip sistemlerdeki gezegen dağılımları	50
Şekil 4.14: Artan Gezegen Mimarisine sahip sistemlerdeki gezegen dağılımları	52
Şekil 4.15: Üçlü yıldız sistemlerinde Artan mimarideki gezegen sistemleri.	52
Şekil 4.16: Üçlü yıldız sistemlerinde Azalan mimarideki gezegen sistemleri.	53
Şekil 4.17: Üçlü yıldız sistemlerinde Azalan mimarideki gezegen sistemleri.	53
Şekil 4.18: Üçlü yıldız sistemlerinde Tektip mimarideki gezegen sistemleri.	54
Şekil 4.19: Tektip Gezegen Mimarisine sahip sistemlerdeki gezegen dağılımları	55

TABLO LİSTESİ

	Page No
Tablo 3.1: Arecibo Güneş Sistemi gezegenleri ve ötegezegen sınıflandırması için kütle ve yarıçap sınırları	27
Tablo 4.1: Çalışmada kullanılan ötegezegenlerin yıldız sistemi türüne göre dağılımı.	30
Tablo 4.2: Artan mimarideki ötegezegen sistemlerinin tayf türü, kütle, sistemde gözlenen ilk gezegenin yarı-büyük eksen uzunluğu (YBU), sistemde gözlenen ilk gaz yapılı gezegen için YBU ve sistemdeki gezegen dizilimi.	40
Tablo 4.3: Tektip mimarideki J türü ötegezegenlere sahip yıldızların tayf türleri ve metal bollukları.	48
Tablo 4.4: Tektip mimarideki sT, T ve S türü ötegezegenlere sahip yıldızların tayf türleri ve toplam gezegen kütleleri	49

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
R_{\odot}	: Güneş yarıçapı
K	: Kelvin derece sıcaklık
N_e	: Elektron sayı yoğunluğu
Å	: Angström
G	: Evrensel çekim sabiti
G_{RVS}	: RVS'den gelen G bandı parlaklığı
M_J	: Jüpiter Kütlesi
M_J	: Jüpiter Kütlesi
M_J	: Jeans kütlesi
'	: Yay dakikası
''	: Yay saniyesi
°	: Derece
γ	: Radyal hız
ϖ	: Gaia trigonometrik paralaksı
Σ	: Yerel görünür yüzey yoğunluğu
θ_0	: Durum açısı
[Fe/H]	: Metal ya da demir bolluğu
[Fe/H]	: d
[Fe/H]	: v
[Fe/H]	: g
[α /Fe]	: Alfa element bolluğu
~	: Yaklaşık sembolü
≈	: Yaklaşık eşittir sembolü
α	: Rektasansyon (sağ açıklık)
$\alpha_{K GK}$: Galaktik kutbun rektasansyonu
$\alpha_{K GK}$: Galaktik kutbun rektasansyonu
δ	: Deklinasyon (dik açıklık)
$\delta_{K GK}$: Galaktik kutbun deklinasyonu
A, B	: Oort sabiti

a_d	: Galaktik diskin uzunluk ölçęęi
b	: Galaktik enlem
b_d	: Galaktik diskin yükseklik ölçęęi
Ca	: Kalsiyum elementi
d	: Yıldızların Güneş'e uzaklığı
d_p	: Yıldızın Galaktik düzlem üzerindeki izdüşüm uzaklığı
dU	: U uzay hızı bileşenine uygulanan diferansiyel dönme düzeltmesi
dV	: V uzay hızı bileşenine uygulanan diferansiyel dönme düzeltmesi
e	: Galaktik düzlemindeki yörünge basıklığı
Fe	: Demir elementi
F_Z	: Güneş çemberinin dikey kuvveti
$\Phi_{(R_{gc}, Z)}$: İnce disk potansiyeli
Φ_{disk}	: Disk bileşeninin Galaktik potansiyeli
Φ_{halo}	: Halo bileşeninin Galaktik potansiyeli
γ_{hata}	: Radyal hız hatası
G	: Evrensel çekim sabiti
G	: Gaia G beyaz ışık parlaklığı
G_{BP}	: Gaia G mavi ışık fotometrik parlaklığı
G_{RP}	: Gaia G kırmızı ışık fotometrik parlaklığı
G_{RVS}	: Gaia radyal hız spektrometresi için G fotometrik parlaklığı
H	: Hidrojen elementi
K	: Kelvin
K	: Uzay hızı hesabında kullanılan bir sabit
K	: Potasyum elementi
l	: Galaktik boylam
L	: Açısal momentum
L_X	: Açısal momentumun x-eksenindeki bileşeni
L_Y	: Açısal momentumun y-eksenindeki bileşeni
L_Z	: Açısal momentumun z-eksenindeki bileşeni
$\log g$: Logaritmik yüzey çekim ivmesi
$\log T_{eff}$: Logaritmik etkin sıcaklık
μ	: Özhareket
$\mu_\alpha \cos \delta$: Rektasansyondaki özhareket bileşeni
μ_δ	: Deklinasyondaki özhareket bileşeni
M_d	: Disk kütlesi

<i>Mg</i>	: Magnezyum elementi
<i>M_☉</i>	: Güneş'in kütlesi
<i>M_r</i>	: Galaksinin toplam kütlesi
<i>M_s</i>	: Sferoidin kütlesi
<i>M_{yer}</i>	: Yer Kütlesi
<i>N</i>	: Yıldız sayısı
<i>Na</i>	: Sodyum elementi
<i>Ne</i>	: Neon elementi
<i>O</i>	: Oksijen elementi
<i>r_s</i>	: Sferoidin yarıçapı
<i>R</i>	: Galaksi merkezinden radyal uzaklık
<i>R_{apo}</i>	: ApoGalaktik uzaklık
<i>R_d</i>	: Miyamoto-Nagai modelindeki disk uzunluk değeri
<i>R_{peri}</i>	: PeriGalaktik uzaklık
<i>R_{gc}</i>	: Galaksi merkezine olan uzaklık
<i>R_o</i>	: Güneş'in Galaksi merkezine uzaklığı
<i>R_{yer}</i>	: Yer Yarıçapı
<i>ρ_{DM}</i>	: Yerel karanlık madde yoğunluğu
<i>σ</i>	: Dispersiyon
<i>σ_b</i>	: Baade penceresindeki hız dispersiyonu
<i>σ_u, σ_v, σ_w, σ_s</i>	: U, V, W uzay hız bileşenleriyle S toplam uzay hız dispersiyonları
<i>σ_̄/̄</i>	: Rölatif paralaks hatası
<i>S</i>	: Toplam uzay hızı
<i>S_{hata}</i>	: Toplam uzay hızı hatası
<i>SBb</i>	: Çubuklu spiral galaksi
<i>T_{eff}</i>	: Etkin sıcaklık
<i>U</i>	: Galaksi merkezine doğru olan uzay hızı bileşeni
<i>U_{LSR}</i>	: LSR düzeltmeli U uzay hızı bileşeni
<i>U_{hata}</i>	: U uzay hızı bileşenindeki hata
<i>V_{asym}</i>	: Asimetrik sürüklenme hızı
<i>V_{hata}</i>	: V uzay hızı bileşenindeki hata
<i>V_{LSR}</i>	: LSR düzeltmeli V uzay hızı bileşenleri
<i>V_o</i>	: Güneş'in Galaksi merkezi etrafında dönme hızı
<i>V_{rot}</i>	: Dönme hızı
<i>V_T</i>	: Teğet hızı

<i>W</i>	: Galaktik düzleme dik doğrultudaki uzay hızı bileşeni
<i>W_{hata}</i>	: W uzay hızı bileşenindeki hata
<i>W_{LSR}</i>	: LSR düzeltmeli W uzay hızı bileşenleri
<i>X</i>	: Galaksi merkezine doğru ölçülen konum vektörü
<i>Y</i>	: Galaksinin dönme doğrultusundaki konum vektörü
<i>Z</i>	: Galaksi düzlemine dik uzaklık
<i>z</i>	: Kırmızıya kayma
<i>z</i>	: Yıldızın Galaktik düzlemden bugünkü dik uzaklığı
<i>z_m</i>	: Bir yıldızın Galaktik düzlemden ulaşabileceği en büyük dik uzaklık

Kısaltmalar	Açıklama
<i>A</i>	: Asteroid-benzeri gezegen türü
<i>AB</i>	: Astronomi Birimi
<i>ALMA</i>	: Atacama Large Millimeter/submillimeter Array
<i>ARIEL</i>	: Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey
<i>ASTERIA</i>	: Arcsecond Space Telescope Enabling Research In Astrophysics
<i>Caltech</i>	: Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü
<i>CHEOPS</i>	: CHaracterising ExOPlanets Satellite
<i>CoRoT</i>	: Convection, Rotation and planetary Transits
<i>CUTE</i>	: Colorado Ultraviolet Transit Experiment
<i>dex</i>	: Deksa-eksponansiyel
<i>ESA</i>	: Avrupa Uzay Ajansı (İng. European Space Agency)
<i>Gaia</i>	: Global Astrometric Interferometer for Astrophysics
<i>GMM</i>	: Gaussyen Karışım Modeli
<i>Gyl</i>	: Milyar yıl
<i>HST</i>	: Hubble Uzay Teleskobu (İng. Hubble Space Telescope)
<i>IAU</i>	: Uluslararası Astronomi Birliği (ing. International Astronomical Union)
<i>J</i>	: Jüpiter benzeri gezegen türü
<i>JWST</i>	: James Webb Teleskobu (ing. James Webb Space Telescope)
<i>KGK</i>	: Kuzey Gök Kutbu
<i>km/s</i>	: Kilometre bölü saniye
<i>KOI</i>	: Kepler İlgi Nesneleri
<i>kpc</i>	: Kilo parsek
<i>LSR</i>	: Yerel Durağanlık Standardı (İng. Local Standard of Rest)
<i>m</i>	: Merkür benzeri gezegen türü

<i>M</i>	: Mini Neptün gezegen türü
<i>mas</i>	: Milyay saniyesi
<i>MINERVA</i>	: The MINiature Exoplanet Radial Velocity Array
<i>MK</i>	: Morgan-Keenan Sınıflandırması
<i>MOST</i>	: The Microvariability and Oscillations of Stars/Microvariabilité et Oscillations STellaire
<i>N</i>	: Neptün-benzeri gezegen türü
<i>NASA</i>	: National Aeronautics and Space Administration
<i>NExScI</i>	: NASA Ötegezegen Bilim Enstitüsü
<i>pc</i>	: Parsek
<i>PLATO</i>	: PLAnetary Transits and Oscillations of stars
<i>RV</i>	: Radyal Hız
<i>S</i>	: Süper Yer gezegen türü
<i>SN</i>	: Sinyal / Gürültü oranı
<i>SPARCS</i>	: Star-Planet Activity Research CubeSat
<i>SPHERE</i>	: Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch
<i>sT</i>	: Küçük Yer-benzeri gezegen türü
<i>STIPs</i>	: Sıkı bir şekilde paketlenmiş iç gezegen sistemleri
<i>T</i>	: Yer-benzeri gezegen türü
<i>TCE</i>	: Tüm Kepler Eşik Geçiş Olayları (İng. Kepler Threshold-Crossing Events)
<i>TESS</i>	: Transiting Exoplanet Survey Satellite
<i>TRAPPIST</i>	: Transiting Planets and Planetesimals Small Telescope
<i>TOPCAT</i>	: Tool for OPERations of Catalogues And Tables
<i>YBU</i>	: Yarı-Büyük Eksen Uzunluğu

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇİFT VE ÜÇ YILDIZLI GEZEĞEN SİSTEMLERİNİN MİMARİSİNİN İNCELENMESİ

Taylan Umutcan KASAR

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Özgecan ÖNAL TAŞ

Bu yüksek lisans tez çalışmasında iki ve üç yıldızlı sistemlerde gözlemlenen ötegezegen sistemlerinin mimarisi araştırılmıştır. Bu amaçla NASA Ötegezegen Arşivi'ndeki Gezegen Sistemleri Kataloğundan çeşitli özelliklerine göre seçilen çift ve üçlü yıldız sistemlerinde gözlenen gezegenlerin kütle ve yarıçaplarına göre türleri belirlenerek gezegen yörüngelerinin yıldızlarına olan yarı-büyük eksen uzunluklarına göre sıralanmasıyla sistemdeki gezegen türünün yıldızdan uzaklaştıkça gösterdiği değişim araştırılmıştır. Araştırmada en az iki gezegeni olan çift ve üçlü yıldız sistemlerine ait mimariler ayrı ayrı ele alınmıştır. Genel olarak, gezegen türü kaynaklı kütle değişimi dört tür sistem mimarisi olmasını mümkün kılmıştır. Bunlar kütlece artan, kütlece azalan, karma ve tektip. Çift sistemlerde dört tür için de örnekler mevcuttur. Tektip mimariler çift yıldız sistemlerindeki en baskın mimari türüdür. Üçlü yıldız sistemlerinde yine tektip Mimari öne çıkmakta ve bu sistemlerin küçük bir kısmı artan ve azalan mimariye sahiptir. Karma mimari ise eldeki örneklem içerisinde yoktur. Bu da gezegen oluşum sürecini etkileyen faktörlerin (uçucular, buzlar, hidrojenli bileşikler ve metallerin durumu, gezegen oluşum sürecinde meydana gelen elastik olmayan çarpışmaların etkileri, gaz ve toz rezervuarı, yörüngeler arası göç vb.) tek yıldızlardaki gezegen oluşum ve evrimine göre önemli farklılıklar içerebileceğine işaret etmektedir.

Nisan 2025, 65 sayfa.

Anahtar kelimeler: Yıldızlar, Ötegezegen.

SUMMARY

M.Sc. THESIS

INVESTIGATING THE ARCHITECTURE OF BINARY AND TRIPLE STAR EXOPLANETARY SYSTEMS

Taylan Umutcan KASAR

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Sciences

Astronomy and Space Sciences

Supervisor: Asst. Prof. Özgecan ÖNAL TAŞ

In this master's thesis, the exoplanet architecture system of binary and triple star systems were investigated by using the Catalogue of Planetary Systems in the NASA Exoplanet Archive. Planet types within any system were determined according to their mass and radius, and then the change of the planet type were analyzed according to distance from the star was investigated by ordering the planetary orbits according to the semi-major axis distances to their stars. In the study, the architectures of binary and triple star systems with at least two planets were considered and investigated separately. In general, the change in mass due to the type of planet has made it possible to have four types of system architectures. These are mass increasing, mass decreasing, mixed and uniform. There are examples of all four types in binary systems. Uniform architectures are the most dominant type of architecture in binary systems. In triple star systems, uniform architectures are again predominant and a small fraction of these systems have ascending and descending architectures. Mixed architectures are absent in the present sample. This indicates that the factors affecting the planet formation process (volatiles, ices, hydrogen compounds and metals, the effects of inelastic collisions during planet formation, gas and dust reservoir, inter-orbital migration, etc.) may have significant differences compared to planet formation and evolution in single stars.

Nisan 2025, 65 pages.

Keywords: star, exoplanet.

1. GİRİŞ

Ötegezegenler ilk keşfedildikleri 1992 yılından itibaren astronomide yeni bir araştırma alanı oluşmuştur. Alexander Wolszczan ve Dale Flail PSR B1 257+12 Pulsar'ının etrafında dolanan iki kaya gezegeni keşfetmişlerdir. 1995 yılında ise Didier Queloz ve Michel Mayor tarafından bir anakol yıldızı olan Pegası 51'in etrafında Jüpiter'in yarı boyutunda bir ötegezegen keşfedilmiştir. 1999'da ise daha sonra en çok ötegezegen keşfedilen yöntem olan transit geçiş yöntemi ile HD 209458 b ötegezegeni keşfedilmiştir.

Ötegezegen keşfetme yöntemleri anlaşıldıkça bu işe uygun uydular ve uzay teleskopları da yapılmaya başlanmış ve 2003'ten itibaren ötegezegen keşifleri hız kazanmaya başlamıştır. 2003 yılında uzaya fırlatılan MOST yıldızlardaki parlaklık değişimini ölçmek üzere tasarlanmıştır ve ötegezegenlerin bulunmasına rol oynamıştır. Spitzer Uzay Teleskobu da 2003 yılında kızılötesi dalgaboyunda gözlemler ile ötegezegen araştırmalarına katkı sağlamaya başlamıştır. 2006 yılında CoRoT uydusu fırlatılmış ve ilk ötegezegen keşfini 2007 yılında yapmıştır. 2009 yılında Kepler Uzay Teleskobu fırlatılmış ve 2013 yılına kadar 1000'den fazla ötegezegen keşfedilmesini sağlamıştır. 2018 yılında TESS fırlatılmış ve transit geçiş yönemi ile küçük kaya gezegenlerden dev gezegenlere kadar keşifler yapmaya başlamıştır. 2021 yılında ise kızılötesi gözlem yapacak olan JWST fırlatılmıştır. Gezegen sistemlerinin oluşumu konusunda ve gezegen atmosferleri ile ilgili detaylı bilgiler edinmemizi sağlaması beklenmektedir.

İlk ötegezegen keşfinden itibaren geçen 30 yıllık süre içerisinde 2022 yılında 5000 ötegezegen keşfi sınırı aşılmıştır. Galaksimizin bize yakın bölgelerinde keşfedilen ötegezegen sayısını, yıldızların oluşumu ve evrimi ile birlikte istatistiksel olarak değerlendirildiğinde her üç yıldızdan birinde ötegezegen olduğu düşünülmektedir.

Güneş Sistemi gibi tek yıldızlı sistemler haricinde çift yıldızlı ve çoklu yıldızlı sistemlerde de ötegezegenler keşfedilmiştir. Bugüne kadar keşfedilen ötegezegenlerin yaklaşık üçte biri çift yıldızlı ve çoklu yıldız sistemlerindedir. Tek yıldızlı sistemlere göre biraz farklı olan çoklu yıldız sistemlerindeki ötegezegenlerin oluşum süreçleri ve yörüngeleri araştırılmaktadır.

Bir çok yıldız sisteminde birden fazla ötegezegen gözlemlenmiş, daha da önemlisi Güneş

Sistemimizde varolan gezegen sınıflandırmasına uymayan süper yer benzeri ve sıcak jüpiterler gibi yeni gezegen türleri bulunmuştur. Güneş Sistemimizde varolmayan bu yeni gezegen türlerinin kütleleri ve atmosferleri bilinse bile gerçek doğaları belirsizlik içindedir.

Hertzsprung-Russell diyagramı ile yıldızlar sınıflandırılmakta ve evrimleri takip edilebilmektedir. Ancak yakın zamana kadar, tespit edilen ötegezegen sayısının az olması ötegezegen sınıflandırmasını zorlaştıran etmenlerin başında gelmekteydi. Günümüzde ise 5000'den fazla ötegezegen tespit edilmiş olması genel sınıflandırma çalışmaları yapmamıza olanak sağlamaktadır. Farklı sınıflandırma türleri de kullanılabilirlik ancak bu çalışmada literatürde en yaygın kullanılan, Arecibo Gezegenel Yaşanabilirlik Laboratuvarı'nın öne sürdüğü kütleyle dayalı gezegen sınıflandırması tercih edilmiştir. Bu gezegen sınıflandırmasında merkür-benzeri, küçük yer benzeri, yer benzeri, süper yer benzeri, neptün benzeri ve jüpiter benzeri kategorileri vardır.

Bu çalışmada çift ve üçlü yıldız sistemlerine bakılmaktadır ve bu yıldız sistemlerinin etrafında yörüngelenen en az iki veya daha fazla gezegenden oluşan sistemlerin mimarisi araştırılmaktadır. NASA ötegezegen arşivinden ve Hypatia veri kataloğundan alınan ötegezegenler ve yıldızlarıyla ilgili veriler kullanılmıştır. Yıldızların uzay hızı bileşenleri, dispersiyonları ve galaktik yörünge parametreleri hesaplanmıştır. Daha sonra ötegezegenlerin türleri ve sistem mimarileri belirlenmiştir.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. ÖTEGEZEĞEN ARAŞTIRMALARININ BUGÜNKÜ DURUMU

2.1.1. Ötegezegen Nedir?

Güneş Sistemi dışında bulunan gezegenler ötegezegen olarak adlandırılır. Bir ötegezegen gerek bir merkezi büyük kütleli bir cismin çekim alanında olabilir, gerekse belli bir çekim alanının dışına çıkmış serbest bir şekilde yıldızlararası uzayda hareket edebilir. Bu durumdaki gezegenlere *başıboş* gezegen adı verilmiştir. Geleneksel anlamda alışkın olduğumuz ötegezegenler bir yıldız etrafında belli bir yörüngeye yerleşmiş gök cisimleri olup yıldızın oluşumuyla aynı zamanlarda yıldızı çevreleyen madde diski içersisibde meydana geldiği düşünülen yapılardır. Son 40 yılda ötegezegen araştırmaları alanında büyük miktarda veri toplanmış ve büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu veriler göstermiştir ki ötegezegenler sadece Güneş gibi G tayf türünden anakol yıldızlarının değil, hem farklı tayf türlerindeki gök cisimleri hem de farklı ışımaya gücü sınıflarındaki nesnelere etrafında gözlenirler. Herhangi bir dev molekül bulutunda yıldız oluşumunun çoğunlukla çoklu olarak meydana geldiği ve zamanla yıldızların birbirlerinden ayrıldıkları ya da bütün olarak evrimleşmeye devam ettikleri görülmüştür. Bunun sonucunda yıldızların önemli bir kısmının tek değil çift ya da çoklu yıldız sistemi oluşturacak şekilde ortak kütle çekim alanlarına sahip olduğuna işaret etmektedir. Bu nedenle ötegezegenler sadece tekil yıldızların değil, gerek bileşenler arasında büyük mesafeler olan çift ve çoklu yıldız sistemi üyelerinde gerekse birden fazla sistem bileşeni yıldız sistemlerinin etrafında dolanan cisimler olarak karşımıza çıkarlar. Dahası ilk ötegezegen gözlemleri 1992 yılında PSR B1257+12 olarak bilinen ,bir pulsar etrafında keşfedilmiştir (Wolszczan ve Frail, 1992). Bunun anlamı ötegezegenlerin ölmüş yıldız çekirdekleri olarak bilinen kompakt sistemlerde de gözlenebileceğidir. Keşfedilmesi doğrulanmış ötegezegen sayısı şu günlerde 5896'dur ve çok yakında doğrulanmış ötegezegen sayısı 6,000 eşliğini geçecektir. Bu sayıya ek olarak doğrulanmayı bekleyen 10,000'e yakın ötegezegen gözlemi de yapılmıştır. Kısa vadede ötegezegen örneğinde meydana gelecek bu gelişmeler on yıllar mertebesinde yapılacak olan yeni nesil araştırma ve keşif projeleriyle elde edilecek bulgularla yeniden şekillenecektir.

Uluslararası Astronomi Birliği (IAU) tarafından kullanılan gezegen teriminin resmi tanımı yalnızca Güneş Sistemi'ni kapsamaktadır bu nedenle ötegezegenler için geçerli değildir¹ IAU Güneş Dışı Gezegenler Çalışma Grubu, 2001 yılında *gezegen* tanımının *ötegezegen* için de uygun olması için bir bildiri yayınlamış ve 2003 yılına gelindiğinde bu tanım değiştirilmiştir².

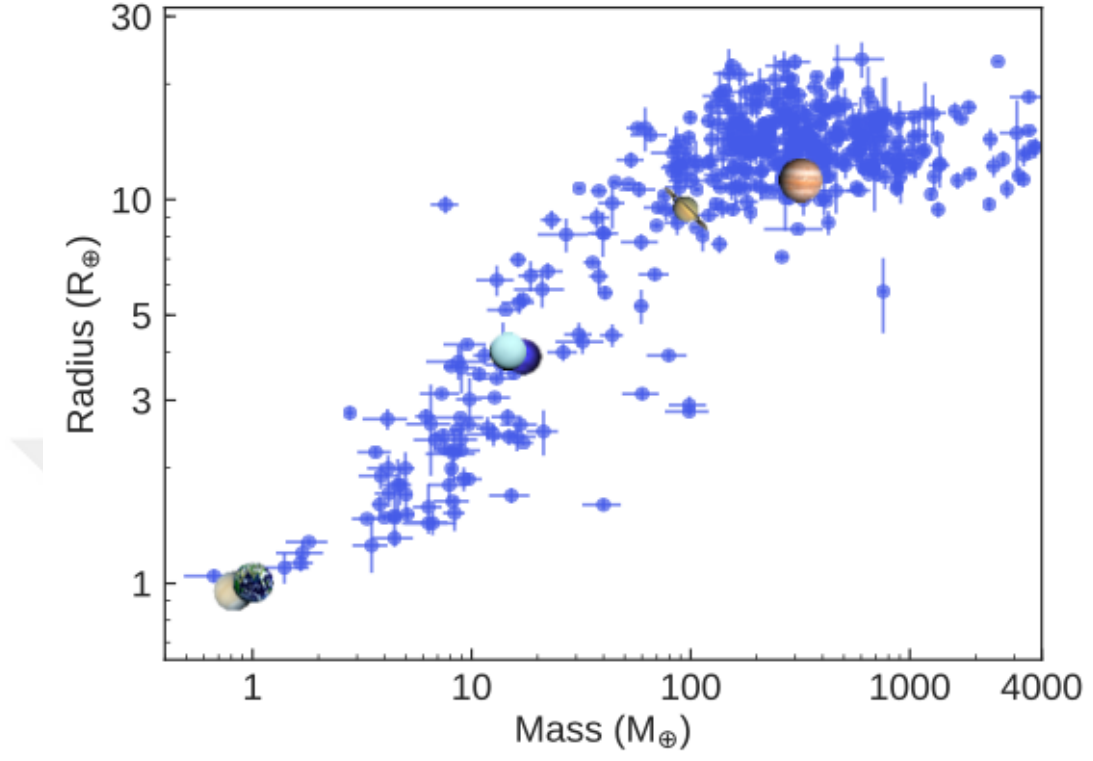
IAU'ya göre bir ötegezegen aşağıdaki kriterlere göre tanımlanmıştır:

(i) Yıldızların veya yıldız kalıntılarının yörüngesinde dönen, döteryumun termonükleer füzyonu için sınır kütleinin altında gerçek kütlelere sahip nesnelere (Güneş metal bolluğunda olan nesnelere için şu anda 13 Jüpiter kütlesi olarak hesaplanmaktadır) "gezegen"dir (nasıl oluştuklarına bakılmaksızın). Güneş Sistemi'nin dışındaki bir nesnenin gezegen olarak kabul edilmesi için gereken minimum kütle/boyut, Güneş Sistemi'nde kullanılan ile aynı olmalıdır. (ii) Döteryumun termonükleer füzyonu için sınırlayıcı kütleinin üzerinde gerçek kütlelere sahip yıldızlardan küçük cisimler, nasıl oluştuğu veya nerede buldukları önemli olmaksızın "kahverengi cüceler"dir. Genç yıldız kümelerinde döteryumun termonükleer füzyonu için sınırlayıcı kütleinin altında kütlelere sahip serbestçe yüzen nesnelere *gezegen* değil, *küçük kahverengi cüceler*dir.

(i) Yıldızların, kahverengi cücelerinin veya yıldız kalıntılarının yörüngesinde dönen ve merkezi nesnenin $L4/L5$ kararsız bölgelerinde olmayan, merkezi cisimle kütle oranı $M/M_{merkezi} < 2/(25 + \sqrt{621})$ koşulunu sağlayan ve döteryumun termonükleer füzyonunun başladığı sınır kütleiden daha az kütleli nesnelere *gezegendir*. Gezegenin nasıl oluştuğunun bir önemi yoktur. Döteryumun termonükleer füzyonunun Güneş metal bolluğuna sahip nesnelere için sınır değeri $13M_{jupiter}$ olarak hesaplanmaktadır. (ii) Güneş Sistemi'nin dışında bulunan bir cismin gezegen olarak kabul edilebilmesi için gereken en küçük kütle ve boyut oranı, Güneş Sistemi gezegenleri için kabul ettiğimiz kütle ve boyut oranıyla aynı olmalıdır. Yani ötegezegenler de çevrelerini temizleyebilecek kadar kütleyle sahip olmalıdır.

¹ <https://www.iau.org/news/pressreleases/detail/iau0603/>

² <https://w.astro.berkeley.edu/basri/defineplanet/IAU-WGExSP.htm>

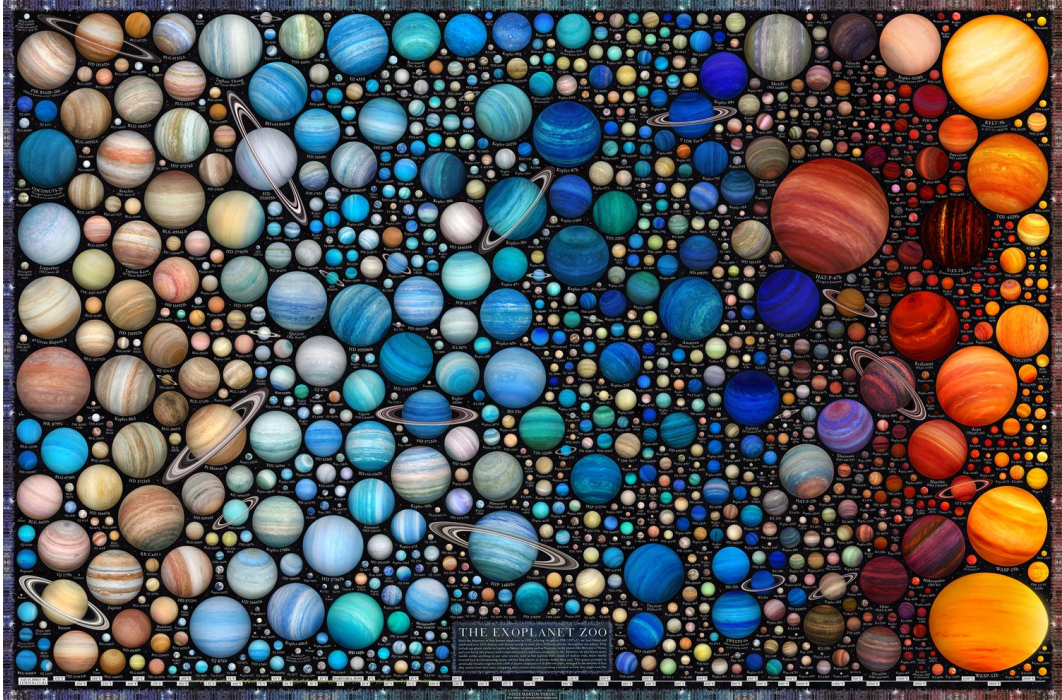


Şekil 2.1: Gözlenen ötegezegenlerin kütle-yarıçap diyagramındaki dağılımları. Güneş Sistemi gezegenlerinden Venüs, Yer, Uranüs, Neptün, Satürn ve Jüpiter'in diyagram üzerindeki konumları da gezegenlerin kendi fotoğraflarıyla sembolize edilmiştir (Adibekyan, 2019)

2.2. ÖTEGEZEĞEN TÜRLERİ

Ötegezegen araştırmalarının sağlıklı bir şekilde sürdürülebilmesi için gözlenen gezegenlerin sınıflandırılması önemli bir gereksinimdir. Öncelikle bu gözlemlerin değerlendirilmesinde Güneş Sistemi'nde gözlenen karasal, buzlu ve gazlı gezegenler dikkate alınmıştır. Karasal yapılı ötegezegenler için Merkür, Mars, Venüs ve Yer, buz yapılı ötegezegenler için Uranüs ve Neptün ve gaz yapılı ötegezegenler için Satürn ve Jüpiter. Güneş Sistemi gezegenlerinin kütle, yarıçap, yörünge periyodu ve yarı-büyük eksen uzunluğu gibi başlıca fiziksel parametreleri için Merkür, Yer, Neptün ve Jüpiter'in başı çektiği kategoriler oluşturulmuştur. Özellikle ilk ayırt edici özellik olarak bu gezegenlerin kütle ve yarıçapları baz alınmıştır. Zaman içerisinde yapılan gözlemlerle gittikçe büyüyen veri tabanları kullanarak gezegenlerin kütle-yarıçap diyagramları oluşturulmuş ve bu şablona Güneş Sistemi gezegenleri de yerleştirilmiştir (bkz. Şekil 2.1). Bu tür diyagramların

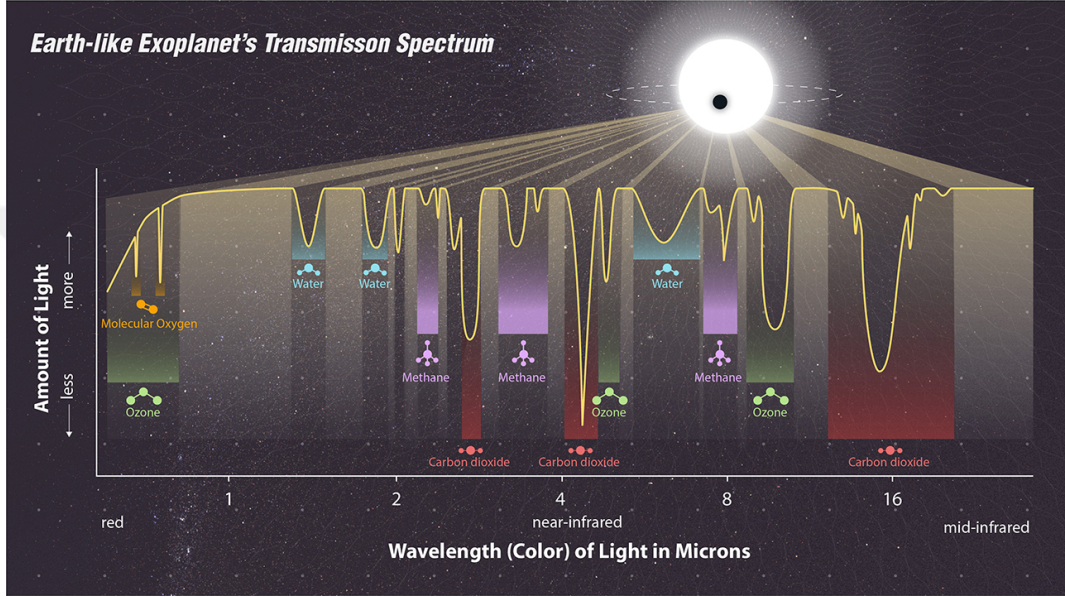
incelenmesiyle gezegen türlerinin Güneş Sistemimizdeki büyüklüklerle sınırlı kalmadığı, bununla beraber gezegenlerimizin kütle ve yarıçap uzayındaki ana eğilimle uyumlu oldukları tespit edilmiştir. Genel olarak, gezegenler üç bölgede toplanmışlardır ve bu gruplar birbirlerinden yarıçapın artışıyla belirgin olarak ayrılır. Diyagramın sol alt köşesi karasal, orta kısımları Neptün-benzeri H-bileşikli gaz gezegenler ve sağ üst kısım da Jüpiter benzeri gaz devlerinin kümelenedikleri bölgelerdir. Gözlemsel yanlışlıklardan dolayı karasal gezegenlerin sayısı az olsa da gezegenlerin yığılımları belirgindir.



Şekil 2.2: 2024 itibariyle gözlenen ötegezegenlerin aile portresi.

Literatürde en yaygın kullanılan gezegen sınıflandırma yöntemi Arecibo Gezegenel Yaşanabilirlik Laboratuvarı'nın öne sürdüğü Güneş Sistemi gezegenleri ve ötegezegenler için kütleye dayalı gezegen sınıflandırma sistemidir. Bu sisteme göre gezegenler kütle aralıklarına göre en küçük kategoride asteroit benzeri ile başlayan merkür-benzeri, küçük yer-benzeri, yer-benzeri, süper yer-benzeri, neptün-benzeri ve jüpiter-benzeri kategorilerine ayrılır. Bu ayırım yapılırken mini Neptün kategorisi oluşturulmamıştır. Bugün kütle ve yarıçapa dayalı bu ayırımın çok kaba bir kategorizasyon olduğu bilinmektedir. Bu sınıflandırmanın geliştirilmesi için gezegenlere dair kimyasal bilgilerin, başka bir deyişle gezegen atmosferinin tayfsal ölçümünün gerekliliği yönünde bir ortak fikir olmuştur. Ötegezegen bizim görüş doğrultumuzda yıldızın önünden geçiş yapıyorsa, yıldızdan

çıkın fotonlar ötegezegenin atmosferinden geçtikleri için spektroskopik yöntemler ile atmosferlerinin bileşenleri öğrenilebilir. Şekil 2.3'de böyle bir geçişin simülasyonu görülebilir. Her element kendine özgü bir dalgaboyu örüntüsüne sahiptir ve spektroskopi ile atmosfer bileşenleri JWST gibi teleskoplar ile öğrenilebilir. Şekil 2.2'de 2024 yılı itibariyle türleri belirlenen tüm ötegezegenlerin toplu bir portresi görülmektedir.



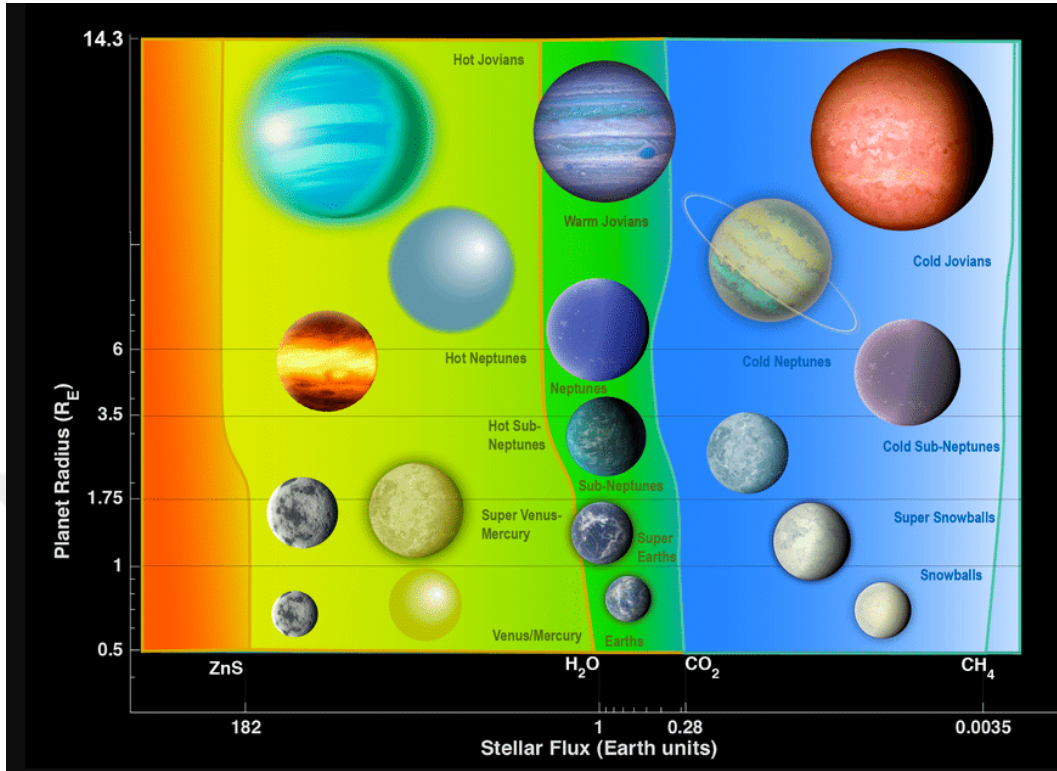
Şekil 2.3: Bir Ötegezegenin Geçiş Simülasyonu (NASA, 2021)

Gezegenlerin sınıflandırılması aktif olarak çalışılan bir konu olup henüz net olarak sınırlar çizilmemiştir. Gözlemlerimize göre Güneş Sistemi'nde hiç görmediğimiz kategorilerde gezegenler gözlemlenmiştir. Örneğin mini-neptünler, sıcak-jüpiterler... Bu ve benzeri olasılıklar dikkate alındığında Şekil 2.4'teki gibi bir sınıflandırma çerçevesi de literatüre sunulmuştur.

2.2.1. Yer-Benzeri Gezegenler

Kaya, silikat, su ve karbondan oluşan karasal gezegenlerin boyutu Yer'in çapının yarısı ile iki katı arasındadır. Daha büyük, Yer'in en az iki katı kütleyle sahip olan ötegezegenler süper-yerler olarak sınıflandırılır.

Kütellerinin büyük bir bölümü kaya ve demirden oluşmaktadır. Yüzeyleri katı veya sıvı olabilir. Atmosferleri de olabilir ancak bu tanımlayıcı bir özellik değildir. Yer'in boyut aralığında, ana yıldızlarından sıvı su barındıracak doğru mesafede kayalık gezegenler



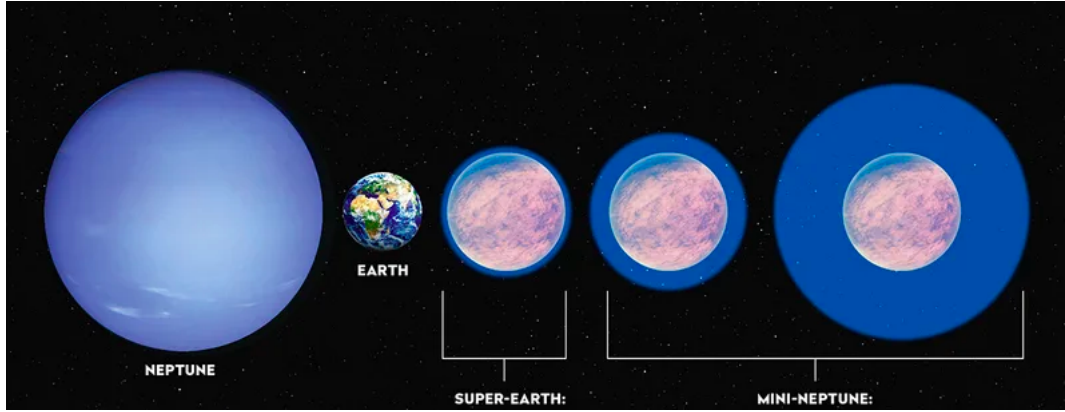
Şekil 2.4: Gezegen yarıçapının yıldızdan gelen akıya göre değişimlerinin görüldüğü ötegezegen sınıflandırması.

bulunmuştur. Bu özellikler yaşanabilir bir gezegeni garanti etmese de bu gezegenlerin gerçekten atmosfere veya okyanusa sahip olup olmadığını henüz tam olarak söyleyemeyiz.

2017'de NASA, TRAPPIST-1 yıldızının yaşanabilir bölgesinde yer-benzeri gezegenler buldu. Bu yıldızın yedi gezegenin de yüzeyinde su bulunma potansiyeli vardır. Şubat 2018'de bu gezegenlere daha yakından bakıldığında bazılarının Yer okyanuslarından çok daha fazla su barındırabileceği, yıldızlarına en yakın olan gezegenler için atmosferik su buharı, diğerleri için sıvı su, en uzak olanlar için ise buz şeklinde olabileceği öne sürüldü. Bu araştırma ile TRAPPIST-1 sistemi bizim Güneş Sistemimiz dışındaki en detaylı bilinen gezegen sistemi olmuştur.

2.2.2. Süper Yer-Benzeri Gezegenler

Yer'den büyük ancak Neptün'den daha küçük ve hafif olan süper yer-benzeri gezegenler Güneş Sistemimizdeki gezegenlere benzemeyen bir gezegen sınıfıdır. Bileşenleri gaz veya kayadan oluşabilir; gaz ve kaya kombinasyonundan oluşma ihtimali de mümkündür.



Şekil 2.5: Mini Neptün türü gezegenler ile Süper Yer benzeri gezegenler arasındaki geçiş.

Güneş Sistemimizde benzer bir gezegen türü olmadığı için bu gezegenlerin gerçekte nasıl oldukları, yapıları belirsizdir. Ancak şimdiye kadar keşfedilen ötegezegenler arasında yaygındırlar.

Yer'den iki kat daha büyük çapa ve 10 kata kadar fazla kütleyle sahip olabilirler. Bu sınıfın üst sınırında bulunan ötegezegenlere alt-neptün veya mini-neptün de denilmektedir.

Bu ötegezegenlerde ne kadar kütleden sonra kayalık yüzeyin kaybedildiğini bilemiyoruz. Ancak Yer'in kütlelerinin 3-10 katı aralığında, su gezegenleri, kartopu gezegenleri veya Neptün gibi büyük ölçüde yoğun gazdan oluşan gezegenler dahil olmak üzere çok çeşitli gezegensel bileşimlerde olabilirler.

2.2.3. Neptün-Benzeri Gezegenler

Güneş Sistemimizdeki Neptün ve Uranüs ile yakın boyutta olan neptün-benzeri gezegenlerin çekirdekleri kaya veya daha ağır metallere oluşmaktadır. Atmosferleri ise hidrojen ve helyum ağırlıklıdır.

Ötegezegenlerin yapısında hangi bileşenlerin olduğunu bulmak zor olabilir. Ötegezegenin bulunduğu sistemdeki yıldızın ışığı ötegezegenin atmosferinden geçerek gözlem yapılan teleskopa gelirse, fotonların ötegezegenin atmosferinden geçerken atom ve moleküller ile etkileşime girip belirli dalga boylarında soğrulması, teleskoptaki spektroskop ile tespit edilebilir ve bu bilgi analiz edilerek ötegezegenin atmosferi hakkında bilgi sahibi olunabilir. NASA'nın Geçiş Yapan Gezegen Araştırma Uydusu (TESS), atmosferik bileşimler

sağlayabilen takip spektroskopik gözlemlerine olanak sağlayacak kadar parlak yıldızların geçişini sağlayan, Neptün'den daha küçük gezegenleri keşfetmek için tasarlanmıştır.

Neptün-benzeri ötegezegenler genellikle atmosferdeki moleküllerin imzasını gizleyen, ışığın geçmesini engelleyen kalın bulutlara sahiptir. 2021'de fırlatılan James Webb Uzay Teleskobu, gezegen dışı atmosferlere dair şimdiye kadarki en iyi bakışlarımızı sağlıyor.

2.2.4. Jüpiter-Benzeri Gezegenler

Gaz devleri, çoğunlukla helyum ve hidrojenle oluşan büyük ötegezegenlerdir. Sert bir yüzeyleri bulunmaz; bunun yerine katı bir çekirdeğin üzerinde dönen yoğun gaz tabakalarından oluşur. Bu gezegenler, Jüpiter'den çok daha büyük olabilirler ve kendi yıldızlarına olan uzaklıkları Güneş Sistemimizdeki en yakın gezegenden daha yakın olabilir.

Sıcak Jüpiterler, ötegezegen keşiflerinde bulunan ilk gezegen türlerinden biridir. Jüpiter gibi gaz devleri olmalarına rağmen, yıldızlarına son derece yakın yörüngede hareket ederler ve bu nedenle yüzey sıcaklıkları binlerce dereceyi bulabilir. Bu büyük gezegenler, yıldızları etrafında çok yakın yörüngelerde hareket ettikleri için yıldızlarında belirgin bir yalpalama etkisi yaratırlar. Bu hareket, yıldızların spektrumlarında ölçülebilir bir kaymaya neden olur ve tespit edilmelerini kolaylaştırır. Radyal hız yöntemi, ötegezegenlerin keşfinin erken dönemlerinde Sıcak Jüpiterlerin bulunmasında büyük bir rol oynamıştır.

Gaz devleri yıldızlarına olağanüstü yakın görünüşleriyle dikkat çeker. Bazısı sadece 18 saat gibi kısa bir sürede yıldızlarını turlayabilir. Güneş Sistemimizde bu türden bir gezegen bulunmaz; bizim sistemimizde yıldıza en yakın gezegenler genellikle kayalık yapıdadır ve çok daha uzak yörüngelerde bulunurlar.

2.3. ÖTEGEZEĞEN GÖZLEM YÖNTEMLERİ

Ötegezegen çalışmaları yer ve uzay tabanlı teleskoplarla yürütülmektedir. Şekil 2.6'da bu çalışmalara katkı veren başlıca gözlemlerine yer verilmiştir. Görselde yer tabanlı gözlemlerin öncü merkezleri olarak Keck Gözlemevi, WYN teleskobu, Large Binocular Teleskobu, SMARTS ve MINERVA gösterilirken, bu süreci ilerleten başlıca uzay tabanlı NASA görevleri Hubble Uzay ve Spitzer Uzay Teleskopları başta olmak üzere Kepler/K2,



Şekil 2.6: Yer ve uzay tabanlı ötegezegen gözlemleyen teleskoplar ve gözlemlerinin şematik gösterimi (Tripathi, 2024)

TESS, JWST teleskopları hali hazırda ötegezegen verilerinin ana sağlayıcılarıdır. Bir diğer önemli görev serisi ESA'nın iş-ortaklığı kurularak gerçekleştirdiği CoRoT, Gaia, CHEOPS, PLATO ve ARIEL misyonlarıdır. Son olarak NASA'nın Küp/Küçük uydu görev listesinde ASTERIA, CUTE, SPARCS ve Pandora projeleri yer almaktadır (Tripathi, 2024).

İlk keşiflerden bugüne ötegezegen keşif ve inceleme yöntemleri gelişmiş ve çeşitlenmiştir. Her bir yöntemin gelişiminin alt yapısı teknolojik olarak ilerlememizin bir uzantısıdır. Bunun doğal bir sonucu ne yazık ki ötegezegen keşif gözlemlerimizde belirli tür gezegenlerin ana yıldızın özelliğine de bağlı olarak daha fazla bir sıklıkla gözlemlenmesine yol açmıştır. Özellikle büyük hacimli, büyük kütleli ya da yüzey yansıtıcılığı yüksek gezegenler keşifler sıralamasında daha ön sıralarda karşımıza çıkmıştır. Bu yanlılığın etkileri uzun yıllar azalarak devam edecektir. Bu nedenle çalışmamızdaki sonuçların da bu durumdan etkileneceği düşünülmektedir.

2.3.1. Doğrudan Yöntemler

Ötegezegenin atmosfer bileşenleri ile ilgili bilgi edinmemizi sağlayan diferansiyel spektrofotometri doğrudan yöntemlerden biridir. Büyük teleskoplar kullanılmasını gerektiren bu yöntemde ötegezegenin yıldızın önünden geçişi esnasında elde edilen spektral veriler yıldızın geçişten önceki ve sonraki spektral verileriyle karşılaştırılır. Bu yöntem HST gözlemleri kullanılarak ilk kez HD 209458 b'nin atmosferinde sodyumun (soğurma çizgileriyle) varlığını (Charbonneau ve diğ., 2002) ve Spitzer uzay aracı kullanılarak HD 189733 b'nin atmosferinde su ve metanın varlığını keşfetmek için uygulanmıştır (Tinetti ve diğ., 2007; Swain ve diğ., 2008). Ötegezegen atmosferlerinin kimyasal bileşimi hakkında çok sayıda ilginç veri elde edilmiştir.

Yıldızın ışığını bir şekilde dışlayan zayıf bir gezegen sinyalinin ayırmak için kullanılan koronografi, polarimetri ve sıfırlama interferometresi teknikleri de doğrudan yöntemlerdir. Koronografi yönteminde merkezdeki parlak nesneden, yıldızdan, gelen ışık engellenerek ötegezegen görülür. Güneş teleskoplarında kullanılan koronografı farklı *externally occulted coronagraph*, harici bir şekilde konumlandırılmış koronograf, kullanılmaktadır.

Sıfırlama interferometresinde (*nulling interferometry*) yıldızdan eş zamanlı olarak iki teleskopa gelen ışınlar teleskoplardan birinden yarım dalga boyu gecikmeli olarak geçirildikten sonra minimumları örtüşecek şekilde birleştirildiği için, yıldızdan gelen ışık sönümlenir. Ötegezegenen gelen ışınlar ise yıldızdan gelene oranla açı yaptıkları için gecikmeye uğrar. Yarım dalga boyu gecikme ötegezegenen gelen ışınları güçlendirir ve böylece ötegezegen gözlemlenebilir.

Yıldızlardan gelen ışık polarize değildir ve her yöne saçılmaktadır. Ancak ışığı yansıtan toz parçacıkları, gezegen oluşum diskleri ve ötegezegenler gibi nesnelere gelen ışığı saçılmaya uğrattıkları için polarize olarak yansıtırlar. Polarimetri vasıtasıyla yıldızın polarize olmayan ışığı ile ötegezegenin polarize olmayan ışığı birbirinden ayrılabilir. Polarize sinyalin beklenen oranı 10^5 'ten fazla değildir.

2.3.2. Dolaylı Yöntemler

Dolaylı yöntemler şunlardır: Astrometri, bir yıldızın gökyüzü düzleminde gezegen(ler)in varlığından kaynaklanan küçük salınımlarının ölçümü; Radyal hız yöntemi, bir yıldızın tayf çizgilerindeki kaymalardan radyal hızındaki periyodik değişimlerin ölçümü; pulsar zamanlaması, pulsarlardan gelen radyo sinyallerinin zaman içindeki değişimlerinin ölçümü; ve mikromercekleme, kütleçekimsel merceklenme olaylarını gözlemlerken yıldızların görüntülerindeki özelliklerin ölçümü yer alır.

Astrometri tarihsel olarak ötegezegenleri keşfetmeye yönelik girişimlerde bulunan dolaylı yöntemler arasında ilkidir. Bir yıldız sistemi ortak kütle merkezi etrafında hareket eder. Yıldızın etrafında gezegenler varsa, yıldızın gökyüzündeki izdüşümünde çok küçük de olsa periyodik olarak salınımlar gözlemlenir. Bu yöntemin gezegen keşifleri konusunda çok uzun bir geçmişi olmasına rağmen, şimdiye kadar hiçbirinin bağımsız olarak doğrulanmadığını belirtmek gerekir. Bununla birlikte, oldukça yakın bir zamanda, 2018'de, Gaia Uzay Teleskobundan gelen verilere dayanarak, daha önce doğrudan gözlemlerle keşfedilen β Pic b gezegeninin kütesinin ölçümünü iyileştirilmesini sağladı (Snellen ve Brown, 2018). Jüpiter'in varlığı nedeniyle Güneş'in kütle merkezine göre konumundaki değişimler, eğer Güneş 10 pc'lik bir mesafeden gözlemleniyorsa, bir yayın bir milisaniyesinden (0.001 yay saniyesi) daha az olacaktır; HST astrometrisinin doğruluğu ~ 0.1 yay saniyesidir. Bu yöntemle ötegezegenin kütesinin hesaplanması, yörüngesinin gözlem doğrultusuna göre eğiminden etkilenmediği için umut vericidir. Gaia Uzay Teleskobunun bu yöntem ile bir çok dev gezegen keşfetmesi beklenmektedir.

Doppler Spektroskopisi adıyla da bilinen RV yöntemi yıldızın radyal hızındaki periyodik değişimi ölçerek ötegezegenin bulunmasını sağlar. Gezegenin yörüngesi daireselse ve ana yıldızın kütesi yaklaşık olarak Güneş'inkine eşitse, RV yönteminin temel formülü çok basittir:

$$m_p \sin i = 0.035 P^{1/3} \Delta V$$

Burada m_p gezegenin kütesi (Jüpiter kütle birimi cinsinden), P gözlemlenen dönem (birimi yıl) ve ΔV yıldızın radyal hızının değişiminin yarı genliğidir (birimi $m s^{-1}$) ve i yörünge düzlemi ile gökyüzü düzlemi arasındaki açıdır (bkz., örneğin, [(Perryman, 2011), Eşitlik

(2.29)]). Görünüşe göre $i = 0$ ise etki gözlemlenemez.

Formülden anlaşılacağı gibi, Yer'in Güneş üzerinde yarattığı periyodik salınım maksimum 10 cm s^{-1} olabilmektedir. Günümüzdeki ölçüm aletlerinin çözünürlüğü ise en iyi durumda yaklaşık 50 cm s^{-1} 'dir. Dolayısıyla, güneş tipi bir yıldızın etrafında yaşamın potansiyel olarak var olduğu bölgede bulunan karasal tipte bir gezegen günümüzde RV yöntemiyle tespit edilemez. Ancak bir anakol yıldızının yörüngesinde dolanan ve Sıcak Jüpiter sınıfında olan 51 Peg b (Mayor ve Queloz, 1995), bu yöntemle keşfedilmiştir.

Pulsarların hızlı dönüşleri sırasında ortaya çıkardıkları elektromanyetik ışımaya atımları bir atom saatinden çok daha dakiktir. Bilinen pulsarlarda dönüş hızına göre birkaç milisaniyeden birkaç saniyeye kadar periyodik ışımaya atımları vardır. Pulsar eğer bir ortak kütle etrafında dönüyorsa bu elektromanyetik ışımaya atımlarında periyodik olarak ufak zamanlama değişimleri olur. Etrafındaki ötegezegenler oldukça hassas bir biçimde tespit edilebilir. Pulsar zamanlama yöntemi denilen bu teknikle Yer'in kütlelerinin 10 katı kadar daha az kütleli ötegezegenler keşfetmek mümkündür.

Mikromerceklenme yöntemi, bakış doğrultumuzda bir yıldızın başka bir yıldızın önünden geçtiği sırada, arka planda kalan yıldızın ışında gerçekleşen değişimi dikkate alır. Arka plandaki yıldız genellikle parlaktır, önünden geçen yıldızın yarattığı kütleçekimsel etki bir mercek görevi görür ve arka plandaki yıldızın parlaklığında artışa neden olur. Geçiş yapan yıldızın etrafında ötegezegen dolanıyorsa, bu ötegezegen merceklenme etkisini artırır parlaklık artışında ikincil bir tepe gözlemlenir. Yapılan gözlemler fotometriktir. Ötegezegenleri bu yöntemle tespit etmek için Optik Kütleçekimsel Merceklenme Deneyi (OGLE - Optical Gravitational Lensing Experiment) ve Astrofizikte Mikromerceklenme Gözlemleri (MOA - Microlensing Observations in Astrophysics) projeleri ile galaksinin şişkin bölgesi yönünde ve Macellan Bulutları yönünde bir çok yıldız izlenmektedir. Bu yöntem ile Yer kütlelerindeki ötegezegenler keşfedilebilmektedir. Ancak keşif için gerekli gözlem süresi birkaç günden bir aya kadar sürebilir.

2.3.3. Hibrit Yöntemler

Transit geçiş yöntemi, Venüs ve Merkür'ün Güneş diskinin önünden geçişinin gözlemlenmesine benzerdir. Güneş'ten gelen ışık akısı Venüs geçişi sırasında %0,01 oranında azalmaktadır. Gözlem doğrultumuzda yıldızın önünden geçiş yapmakta olan bir

ötegezegenin de yıldızın ışık akısında benzer bir düşüş gerçekleştirilmesi beklenmektedir. Geçiş yönteminin ilk kez 1952 yılında ünlü Struve astronomi hanedanının bir üyesi olan Otto Struve tarafından ötegezegenlerin araştırılması için (bir gezegenin diskinden geçişi nedeniyle bir yıldızın periyodik olarak kararması gözlemlerinde) önerilmiş olması ilgi çekicidir. HD 209458 yıldızının yörüngesinde daha önce radyal hız (RV) yöntemiyle keşfedilen bir ötegezegeni Charbonneau ve diğ. (2000) yıldızın ışık eğrisini analiz ederek transit geçiş yöntemiyle bulmuşlardır.

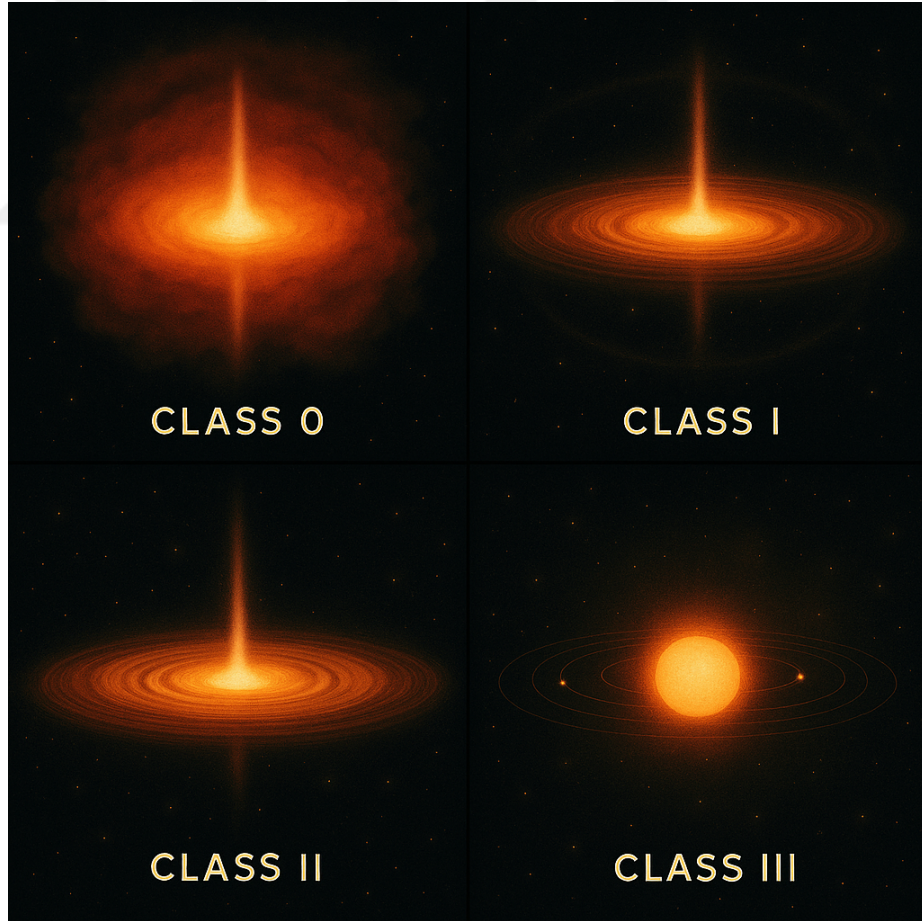
Transit Geçiş Varyasyonu (TTV - Transit Timing Variation) birden fazla ötegezegenin bir yıldızın yörüngesinde dolandığı durumlarda kullanılabilen bir yöntemdir. Bir çok ötegezegenin yörünge periyodu sabittir ve transit geçişi belirli zaman aralıklarında gerçekleşir. Ancak bazı ötegezegenlerin yörünge periyotları değişkenlik göstermektedir. Bu değişkenlik, yıldızın yörüngesinde olan ancak gözlem doğrultumuzda transit geçiş yapmayan başka bir ötegezegenin transit geçiş yapan ötegezegen ile kütle çekimsel olarak etkileşmesi sonucu gerçekleşir. Bu etkileşim diğer ötegezegeni keşfetmemizin yanısıra, ötegezegenlerin kütlelerini de belirlememize olanak sağlar. Ancak bu yörünge varyasyonlarının yıldız ile transit geçiş yapan ötegezegen arasındaki gelgit etkisinden kaynaklanma ihtimalini de göz önünde bulundurmamız gerekir. TTV yöntemi diğer yöntemlerle keşfedilmesi oldukça zor olan düşük kütleli ötegezegenleri keşfetmemize olanak sağlar. TTV yöntemi, geçiş sürelerinin değişkenliğinin analizine dayanır.

Teorik çalışmalar (Agol ve diğ., 2005; Holman ve Murray, 2005) TTV-simülasyonunun transit geçiş yapan gezegenlerin kütleleri ve yörünge elemanları hakkında neredeyse tam bilgi elde edilmesini sağladığını göstermiştir. (Lissauer ve diğ., 2011) transit geçiş yapan birkaç ötegezegenine sahip yıldız sistemleri için simülasyon yapmıştır. Transit geçişin olduğu bir yıldız sisteminde geçiş gezegeninin TTV sinyalinin analiz edilmesiyle ilk kez Nesvorný ve diğ. (2012) transit geçiş yapmayan bir ötegezegen keşfetmiştir. Böylece, ünlü bir gezegen bilimci olan A. Morbidelli'nin ifadesine göre "TTV analizi, Le Verrier'nin Uranüs'ün hareketindeki anormallikleri analiz ederek Neptün'ün varlığını ve konumunu tahmin ettiği gök mekaniğinin o parlak dönemini yeniden canlandırmaktadır. Şimdi, Le Verrier'in 'mucizesi' rutin bir şekilde ortaya çıkmaktadır."

2.4. ÖTEGEZEĞEN OLUŞUMU

2.4.1. Tek Yıldızlarda Gezegen Oluşumu

Yıldızlararası ortamdaki moleküler bulutlar sıcak iyonize bölgelerin bulutu bozmasıyla ve kütleli yıldızlardan gelen güçlü yıldız rüzgarları ile veya süpernova şoklarının uyarılmasıyla kümelenebilir, kütleçekimsel çökme ile yıldız oluşumlarını başlatırlar. Çökme sırasında görünür bölgede opak olan topraklar oluşturmaya başlayan moleküler bulutunda bu yıldız oluşum bölgeleri kırmızıöte ve radyo dalgalarında çalışılmaktadır. Yıldızimsı topraklar (starless core) yıldız oluşum süresinin ilk aşamasıdır ve bunu ilkel yıldızsal toprak (protostellar core) takip etmektedir. İlkel yıldızsal toprağın, genç yıldız nesnelere olarak da bilinen (YSO - Young Stellar Objects) yıldız oluşum aşamasının ilk hali olan Sınıf 0'a denk gelen aşaması gözlemlenmemektedir.



Şekil 2.7: Genç Yıldız Nesnelere'nin aşamalarının gösterimi

YSO'lar spektral enerji dağılımı (SED) grafiğindeki eğime göre sınıflandırılırlar ve SED eğimi yığılma diskinin yapısına göre değişmektedir. Sınıf 0'da kaynağın etrafı gaz ve toz ile çevrilidir ve bu madde merkezdeki ilkel yıldızla doğru çökmeye başlar. İlkel yıldız giden madde merkezde jetler ile dışarıya püskürtülmektedir. Zarfın kütesinin ilkel yıldızın kütesinden daha çok olduğu bu evrede 10^4 yıl kadar sürer. Ortalama sıcaklık ise 30K'dır.

YSO Sınıf I evresindeyken (bkz. Şekil 2.7) etrafındaki madde azaldığı için merkezdeki ilkel yıldız görünür hale gelmeye başlar. İlkel yıldızın dönüş hızının artmasıyla etrafında optikçe kalın bir disk oluşur. Bu nedenle SED'lerinde yıldız ve disk bileşeni ayrı ayrı görülür. Ortalama 10^5 yıl içinde Sınıf I evresi biter.

Sınıf II'de disk içindeki cisim daha net görülmeye başlar (bkz. Şekil 2.7). Evrimsel olarak ikiye ayrılmaktadır. Diskinin SED'i düz olanlar ilkel yıldız evresinin sonudur, Sınıf Düz olarak da adlandırılırlar. Sınıf II'de zarf yoktur, içe düşen madde bitmiştir ve jetlere rastlanmaz. Diski optikçe incedir ve bu diskin SED'deki kırmızıöte fazlalığı Sınıf Düz'e oranla daha azdır. T Tauri olarak da bilinen bu evrenin yaşı 10^6 kadardır. Gezegen oluşumu ile ilgili gözlemler ve araştırmalar çoğunlukla Sınıf II YSO'ların ilkel gezegen diskleri (Protoplanetary Disc) üzerinden yapılmaktadır.

Sınıf III'te geç tip YSO'dur ve yıldız artık anakol üzerine gelmeye başlamıştır. ilkel gezegen diski kaybolmaya başlar (bkz. Şekil 2.7) ve SED bir yıldızın kara cisim ışıması gibi olur. Sınıf III evresi 10^7 yıl içinde tamamlanır.

Yıldız sistemlerinin oluştuğu moleküler bulutsular 0.1-1pc boyutlarında olabilirler ve yıldız kümelerine ev sahipliği yaparlar. Hidrojen ve Helyum'un ağırlıklı bulunduğu moleküler bulutlarında Karbon, Oksijen ve Azot'un yanında karbonu içeren birçok organik moleküller ve bu elementleri içeren kompleks bileşikler de vardır. Bulutsu önceki yıldızlardan kalan ve süpernova patlamaları sonucu oluşan demirden daha ağır elementleri de içerir.

Güneş Sistemi'ne benzer gezegen sistemleri, gaz ve toz disklerinin maddesinden fizikokimyasal ve dinamik evrim süreciyle oluşur. Yıldız oluşum bölgelerinin yüksek uzaysal çözünürlüğe sahip modern gözlemlerinde önyıldızların ve genç anakol yıldızları etrafındaki ~ 50 -100 AB çapında olan disklerin özellikleri ortaya konmuştur.

Sınıf II'de ortaya çıkan T Tauri yıldızının tayfının gözlemi sonucunda ilkel gezegen diskinden merkeze doğru toplam kütle akışı yani yığılma hızı da tahmin edilebilir. Yığılma

hızı birçok yıldız için yılda ortalama $\sim 10^{-9} - 10^{-7}$ Güneş kütlesi aralığındadır. ALMA radyo teleskopu (Miura ve diğ., 2017; Sakai ve diğ., 2017) kullanılarak Boğa takımı yıldızının bulutlarında gözlemlenen kükürt içeren bileşiklerin moleküler çizgileri, T Tauri aşamasında diske düşen maddenin izleyicileri olarak kullanılır.

Ötegezegen sistemlerinin oluşum sürecini en başından itibaren alırsak; yıldızlararası moleküler bulutu belirli noktalarda kütle çekim ve rüzgarlar etkisiyle toplanmaya başlayıp çökmektedir. Yıldızimsı topraklar ve ilkel yıldız oluşurken etrafını çevreleyen zarf ilkel yıldızla doğru çökmeye başlar. Yıldız merkezde hızlanarak dönmeye başladıkça ve zarf dağıldıkça ilkel gezegen diski oluşur. Gaz ve tozdan oluşan bu ilkel gezegen diskinde kümelenmelerin olduğu yerde gezegenimsiler (planetesimals) oluşmaya başlar. Gezegenimsiler zamanla kütle çekimsel olarak etraflarını etkileyip yörüngelerindeki maddeleri temizlemeye başladıklarında gezegenler oluşmaya başlar. Bu süreç içinde diskin parçalanıp ufak katı cisimler ve gezegenimsilerin oluşması çeşitli dinamik süreçler ile ilgilidir. Hidrodinamik ve kütle çekimsel kararsızlıklar, rezonanslar ve gelgit etkileşimleri gezegenlerin oluşumunda rol oynar. (Armitage, 2007; Contopoulos, 2002; Marov, 2005; Safronov, 1972).

İlkel gezegen disklerinin varlığına dair ilk dolaylı kanıt 10^5 ila 10^7 yaş aralığındaki genç değişen T Tauri yıldızlarında kızılötesi fazlalıkların gözlemlenmesiydi (Mendoza V., 1966). Bu gözlem kızılötesi ve milimetre-altı bölgelerde doğrudan görüntüler elde edilmeden önce yapılmıştır. Günümüzde ise YSO'lar tüm dalgaboylarında gözlemlenmektedir. Kızılötesi, milimetre-altı ve milimetre tayflarında yapılan gözlemlerin analizleri yüzlerce T Tauri yıldızının etrafında ilkel gezegen disklerinin Kepler dönüşünü ortaya çıkarmıştır. Vega (α Lyrae) gibi Güneş'ten daha büyük kütleli yıldızların etrafında da ilkel gezegen diskleri bulunmuştur. Yaşı $\leq 10^6$ yıl olan çoğu yıldızın etrafında ve yaşı $\leq 10^7$ yıl olan yıldızların yaklaşık %20 - 30'unun etrafında gaz ve toz diskleri bulunmuştur. İlkel gezegen disklerinin $\sim 0.01 - 0.2$ güneş kütlesinde ve 10 - 100 AB çapında olduğu gözlemlenmiştir. Güneş Sistemi ile karşılaştıracak olursak ilkel gezegen diskleri Neptün yörüngesinden (30 AB) öteye uzanabilmektedir. Genç bir kırmızı cüce olan TW Hydrae yıldızının etrafındaki ilkel gezegen diskinde bazı boşluklar farkedildi ve bunun yörüngesini temizlemekte olan genç bir gezegene ait olduğu düşünülmektedir. TW Hydrae b gezegeni henüz doğrulanmış değil, aday gezegen statüsündedir. UX Ori sisteminde disk yandan gözlemlenmiştir (Grinin, 1988; Grinin ve diğ., 1991), β Pic ise eğimli yörüngede bir gezegene sahip disk gözleminin ilk

örneğidir (Burrows ve diğ., 1995; Heap ve diğ., 2000).

İlkel gezegen disklerinin kimyasal yapısı gaz ve toz emisyonlarının yüksek açışal çözünlürlükle kızılötesi ve milimetre-altı spekral ölçümler yapımasıyla anlaşılmıştır. Çoğunlukla hidrojen ve helyum'dan oluşan diskin %2'si tozlardan oluşmaktadır. Hidrojen ve Helyum oranı kütle olarak %70,5 ile %27,5 veya parçacık sayısına göre 10 hidrojen'e karşılık bir helyum'dur. Hidrojen içeren moleküller ise %0,5 ila %1,5 arasında değişmektedir.

Yıldızları çevreleyen madde disklerinin ve gezegen sistemlerinin oluşumunun incelenmesindeki muazzam ilerleme, özellikle ALMA (Atacama Büyük Milimetre Dizisi) adlı yer tabanlı radyo teleskopları ağı tarafından milimetre dalga boylarında gerçekleştirilen yapı, bileşim ve dinamiklerinin gözlemlenmesiyle, ALMA ile Yıldız Oluşumunun Çözülmesi ve Önyıldız İnterferometrik Çizgi Araştırması (PILS) programları kapsamındaki araştırmalarla yönlendirilmiştir (ALMA Ortaklığı, 2015; Bjerkele ve diğ., 2016; Bjerkele, 2018; Jorgensen, 2018).

Kepler Uzay Teleskobu ise galaksinin oldukça ufak bir alanını içeren, gökyüzünde Lyra ve Cygnus takımyıldızlarının olduğu bölgede gözlem yapmasına rağmen binlerce ötegezegen keşfiyle büyük bir katkıda bulunmuştur. Yıldızına çok yakın yörüngede dolanan Sıcak Jüpiterler ve Yer gibi düşük kütleli ötegezegenler de dahil olmak üzere çeşitli konfigürasyonlar içeren ötegezegen sistemler bulunmuştur. İlkel gezegen disklerinin oluşumu ve evrimiyle ilgili fiziksel ve kimyasal mekanizmalar için de matematiksel modellemeler önemli katkılar sağlamıştır. Disk ortamının ısısal ve dinamik evriminin yanı sıra, içindeki ilkel katı cisimlerin oluşumu ve büyümesi gibi süreçler matematiksel modeller ve simülasyonlar ile anlaşılmaktadır.

Tek yıldızlı gezegen sistemlerinde karasal gezegenler de dahil olmak üzere gezegenlerin oluşumuna bir dizi derinlemesine sayısal-deneysel çalışma ayrılmıştır (Armitage, 2007b; Estrada ve diğ., 2016; Marov ve Rusol, 2015; Raymond ve diğ., 2006; Raymond ve diğ., 2006b; Raymond ve diğ., 2007; Wada ve diğ., 2009). Ancak hâlâ pek çok sorun çözülememiş durumda ve çeşitli yıldız sınıflarındaki gezegen sistemlerinin oluşumunu yönlendiren temel mekanizmalar, bunların kararlılıkları ve evrimsel yolları hakkındaki pek çok soruya henüz yanıt bulunabilmiş değildir.

2.4.2. Çift Yıldızlarda Ötegezegen Oluşumu

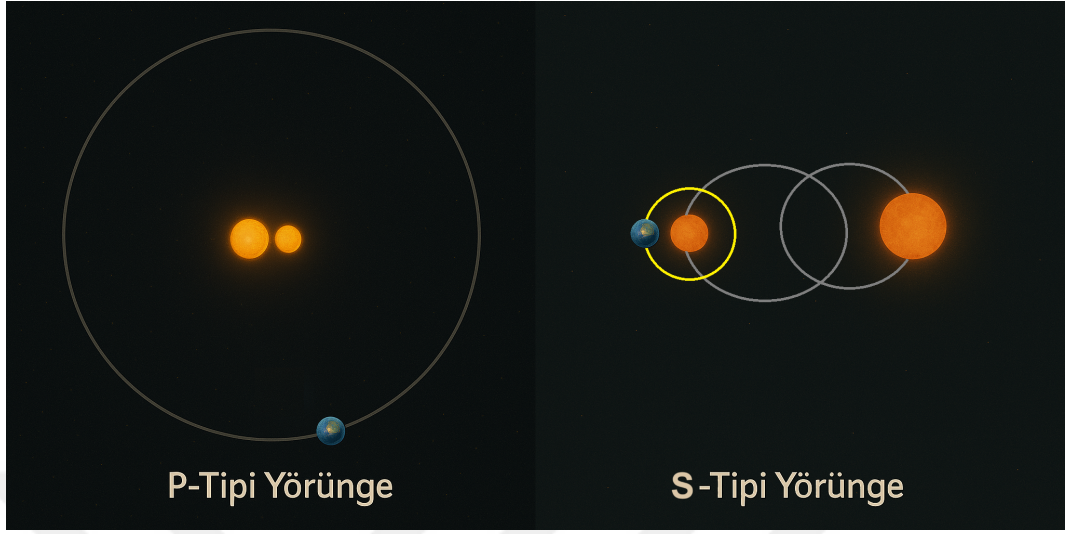
Çift ve çoklu yıldız sistemlerinde bir gezegenin oluşumunun fiziksel mekanizması büyük olasılıkla tek yıldızlar için düşünülenlerden pek farklı değildir. Fakat çift yıldız sistemlerinde gezegenin oluşumu için olasılıkları ve koşulları incelemek önemlidir. Daha dinamik olan bu sistemlerde kararlılığın nasıl olduğu ön plana çıkmaktadır.

Yeterince hızlı (10^4 yıl) bir çöküşten önce veya bu süreçte, bir moleküler bulutun dönen bir parçası, tek bir yıldız oluşturan merkezi en yoğun kısmını (çekirdek) koruyabilir veya evrimi sırasında çift veya çoklu bir yıldızla yol açan ayrı parçalara ayrılabilir. Manyetik alan ilkel yıldız nesnelere parçalanmasına karşı kararlı olmasını sağlayacak önemli bir faktördür. Hidrostatik denge durumuna ulaşan ve moleküler bulut parçasının kalan maddesinin üzerinde toplanarak kütleli kademeli olarak azaltan, hızla çöken önyıldızın etrafında bir gaz ve toz diski oluşmaktadır. Tekil yıldızların etrafındaki gaz ve toz diskleri, çift yıldızlar etrafındaki disklerle çok ortak özelliğe sahiptir. Gözlemlenen anakol yıldızlarının yarısından fazlası çift ve çoklu yıldız sistemlerindedir (Duquennoy ve Mayor, 1991; Mathieu ve diğ., 2000).

Günümüzde ikili ve çoklu yıldız sistemlerinde bir çok gezegen keşfedilmiştir. Ancak çoklu yıldız sistemlerinde gezegen yörüngelerinin kararlılığı ile ilgili çalışmalara 1980'lerin başında D. Benest öncülük etmiştir. R. Dvorak ise 1986 yılında üç cisim problemi ile ilgili olarak stabil hareket için üç adet periyodik benzeri yörünge tanımlamıştır. Bu yörüngelerden iki tanesini çoklu yıldız sistemlerinin ötegezegenlerinde görmekteyiz. (bkz. Şekil 2.8)

P-tipi yörüngelerde ötegezegen ortada bulunan çift yıldızın etrafındaki bir yörüngede dönmektedir. Burada P harfi Planet'in (Gezegen) kısaltması olarak kullanılmıştır, dış yörünge veya çift sistem çevresi de denmektedir. Ötegezegenlerin az bir kısmı bu yörüngede keşfedilmiştir.

S-tipi yörünge ise çoklu yıldız sisteminde gezegenin sadece bir yıldızın yörüngesinde dolandığı sistemdir. S harfi Satellite'in (Uydu) kısaltmasıdır. Yani sistemin etrafında değil de tek bir yıldızın etrafında dolandığı için uyduya benzetilmiştir. Buna iç yörünge de denebilir. Çoklu yıldız sistemlerinde keşfedilen ötegezegenlerin büyük bir çoğunluğu bu yörünge tipine sahiptir. Kepler uzay teleskobu gözlem yapmaya başlamadan önce çift yıldız sistemlerinde çoğu S-tipi yörüngeye sahip olan ~ 50 ötegezegen bilinmekteydi.



Şekil 2.8: Ötegezegenlerde Yörünge Tipleri

Dvorak'ın üçüncü olarak tanımladığı L-tipi yörünge L4-L5 lagrange noktalarında librasyon yapan bir yörüngedir. Böyle bir yörüngeye sahip ötegezegen keşfedilmemiştir. Çift yıldız sistemlerinde gezegen oluşum senaryoları ve gözlemlenen gezegen dinamikleri (genellikle 'istikrar sınırında'), özellikle çift yıldız sistemleriyle ilişkili olarak teorik olarak zorlayıcıdır (Meschiari, 2012; Paardekooper ve diğ., 2012).

Çift yıldız sistemlerinde S-tipi yörüngeye sahip ötegezegenlerde Lidov-Kozai etkisinin ötegezegenlerin dinamik evriminde rol oynayabileceği düşünülmektedir. Dış yörüngedeki yıldızın kütleçekim etkisiyle bu salınımlar meydana gelir (Shevchenko, 2017). 16 Cyg ve HD 196885 çift yıldızlarının etrafındaki S-tipi yörüngeye sahip ötegezegenlerin yörünge dinamiklerini araştıran Melnikov (2016), 16 Cyg'deki 2.2 yıl yörünge periyoduna sahip ötegezegenin dinamiklerinin 30 bin yıldan fazla *Lyapunov zamanında* neredeyse düzenli olduğunu ortaya koymuştur. Lidov-Kozai rezonansına yakın olan HD 196885 sisteminde (Satyal ve diğ., 2014) ise HD 196885 b ötegezegeninin yörünge parametreleri için en olası Lyapunov zamanları hesaplanmış, HD 196885 b'nin yörünge dinamiklerinin neredeyse düzenli olduğu görülmüş, hareket Lidov-Kozai rezonansının ayrılma çizgisinden uzak bir bölgede gerçekleşirse ötegezegenin yörünge periyodu 3.7 yıl olduğunda Lyapunov zamanının 50 bin yıldan fazla olduğu bulunmuştur. Popova ve Shevchenko (2012)'de yürütülen çalışmada, bu sistemde ötegezegenin duyurulan keşfinden önce bile, Alpha Centauri çift sistemindeki varsayımsal ötegezegenlerin yörünge parametrelerinin uzayındaki kararlı hareket alanlarının belirlenmesi sağlanmıştır. Keşfedilen ötegezegen kararlılık

bölgesinde bulunmaktadır. Kepler-16 çift yıldız sisteminde yıldızlar arası 0.22 AB mesafe vardır. Kepler-16 A'nın çevresinde dolanan Kepler-16b ötegezegeni ise 0.7 AB mesafededir ve kaos bölgesine oldukça yakındır. Yörünge parametreleri kararsız bölgededir ancak Kepler-16b gezegeni stabildir. Çünkü yörüngesi merkezi çift ile 1-1/2 rezonansına yakındır. Bu durum Güneş Sistemi'nde Neptün ile 3/2 rezonansında olan Plüton'un stabil olmasına benzemektedir. Yörünge rezonanslarının kararlılık diyagramlarındaki kaos ve düzen sınırlarına etkisi vardır.

Çift yıldız etrafında dönen gezegen sisteminin nasıl oluştuğu ilgi çeken bir konudur. Planetesimal yığılma modeline dayanan modern hesaplamalara göre, tercih edilen senaryo, gezegen çekirdeğinin ilkel gezegen diskinin dış bölgelerinde (yığılma koşullarının elverişli olduğu yerlerde) oluştuğu ve daha sonra içeri doğru göç ettiği senaryodur. Göç, daha sonra, merkezdeki çiftin oluşturduğu iç disk boşluğunun sınırında durur (Meschiari, 2012; Paardekooper ve diğ., 2012; Pierens ve Nelson, 2007). Boşluk, kabaca çift etrafındaki yörüngeler için kaos bölgesine karşılık gelir. Çift yıldız etrafında dönen gezegenlerin yerinde oluşumu (in situ) prensipte mümkün olsada, planetesimal yığılması için elverişsiz koşullar nedeniyle daha az olasıdır. Bu koşullar, gezegenimsilerin yüksek çarpışma hızları ve bunların nispeten düşük yoğunluğu gibi faktörleri içerir.

Uzun periyotlu çift yıldız sistemini çevreleyen ötegezegen sistemlerinin yörünge evrimi oldukça ilgi çekicidir. Shevchenko (2018) çalışmasında bu sistemlerinin, yörüngelerinin içsel zorunlu yörünge basınlığından kaynaklanan evrensel gelgit bozunmasına maruz kaldığı gösterilmiştir. Böyle sistemlerdeki ötegezegenler, yörüngelerinin yavaşça daralması nedeniyle kaotik bölgeye girdiklerinde ana sistemden serbest kalırlar. Bu etki, nispeten küçük zaman ölçeklerinde (Evrenin yaşından çok daha küçük zaman dilimlerinde) yeterince yakın çift yıldızlarda (Beş günden daha kısa periyotlara sahip) çift yıldız sistemi etrafındaki gezegenlerin gözlemlenen yokluğunu (en azından kısmen) açıklayabilir.

Gözlemsel olarak bu etki şöyle olabilir: Bu mekanizma bu tarz ötegezegenlerin tek kaynağı ise serbest gezegenlerin büyük bir çoğunluğu Süper-Yer sınıfında olabilir. Eğer yıldız sisteminin kütlesi az ise, çift yıldız sisteminde gezegen eksikliği görülebilir. Çift yıldız sisteminde ana yıldız ne kadar küçükse eksiklik o kadar fazla olur. Bir çift yıldızın etrafında yörüngede dolanan bir parçacık sistemini ele alırsak başlangıçta dairesel hareket yapan parçacığın yörünge basınlığı zamanla periyodik olarak bozulur. (Demidova ve Shevchenko,

2015; Moriwaki ve Nakagawa, 2004). Çift yıldız sistemleri etrafındaki ötegezegenlerin doğal bir gelgit ve ısınma mekanizmasını sağlar. (Shevchenko, 2017b). Başlangıçta dairesel yörüngede bulunan parçacığın yörüngesi zamanla daralır ve merkezde bulunan çift yıldızın etrafında bulunan kaotik bölgeye girer, ardından sistemi terkeder. (Shevchenko, 2015).

Shevchenko (2017b)'de ilk olarak öne sürüldüğü gibi, gezegenin kaçıışı nihayetinde gezegenin kendisinin değil, çiftin ana yıldızın yörünge evrimi nedeniyle gerçekleşebilir (yıldız kütlelerinin kaybı ve karşılıklı gelgitler nedeniyle). Özellikle, çift yıldızın yörüngesi, erken bir evrim aşamasında, dönen yıldızlardan açısal momentumun gelgit transferi nedeniyle genişleyebilir ve bu durum, gelgit senkronizasyonu (dönme-yörünge rezonansı 1:1) durumuna ulaşana kadar devam eder. Fleming ve diğ. (2018)'e göre, çift yıldız sistemi etrafındaki kaotik bölgenin boyutu bu anda maksimumdur.

Yakın çift yıldızların, çift yıldız sistemi etrafında dönen gezegenlerle birlikte bulunmamasının, gezegenlerin circumbinary kaotik bölgesine girmeleri nedeniyle yörüngelerinin kararsızlaşmasıyla da açıklanabileceği unutulmamalıdır (Fleming ve diğ., 2018). Ancak, Fleming ve diğ. (2018)'te ele alınan kaçış mekanizması, Shevchenko (2018)'de incelenen mekanizmadan farklıdır. Shevchenko (2018) senaryosunda, gezegenin yörüngesi yavaşça daralırken, kaotik bölgenin boyutu sabit kalır.

Gelgit durumunda (Fleming ve diğ., 2018) bunun tam tersi gerçekleşmektedir. Dönmekte olan yıldızın gelgitsel açısal momentum transferi nedeniyle kaotik bölge genişler. Ötegezegenin yörüngesinde yarı büyük eksen sabit kalır. Şunu belirtmek gerekir ki, gelgit senaryosu (Fleming ve diğ., 2018), ana yıldızın evriminde erken bir aşamayı (anakola ulaşmadan önce) ifade ederken, Shevchenko (2018) senaryosu çok daha uzun zaman ölçeklerinde işler ve dolayısıyla, çoktan evrimleşmiş gezegenlerin kaçışını sağlama kapasitesine sahiptir.

2.4.3. Çoklu Yıldız Sistemlerinde Ötegezegenler ve Rezonansları

Şimdiye kadar keşfedilen ötegezegenlerin üçte bir kadarı çoklu yıldız sistemlerinde bulunmuştur (Rein, 2012). Çok ötegezegenli sistemlerdeki yörünge rezonansları yaygın bir olgudur; bu, rezonans argümanlarının zaman davranışına ilişkin hesaplamalarla doğrulanmıştır. 2/1 ortalama hareket rezonansına sahip iyi bilinen sistemler Gliese 876 ve HD 82943'tür; rezonansı 3/1 olan bir sisteme örnek olarak ise 55 Cancri verilebilir. Gliese

876 sisteminde 4:2:1 yörünge periyodu oranı vardır (Martí ve diğ., 2013). Bu yörünge periyodu oranı Jüpiter'in Galilei uydularının Laplace rezonansı ile aynıdır. Ayrıca yakın zamanda 'yoğun şekilde dizilmiş' rezonanslı çok gezegenli sistem Kepler-223 keşfedilmiştir ve ortalama hareket rezonansı 8:6:4:3'ü göstermektedir (Lissauer ve diğ., 2011).

Çift yıldızlı bir sistem olan 55 Cancri'de G8 tayf türünden bir sarı cüce olan 55 Cnc yıldızının yörüngesinde beş tane gezegen vardır. Bu gezegenlerin kütleleri 0.034 ile 3.84 M_J arasında, yörünge periyotları ise 2.8 ile 5200 gün arasında değişmektedir. 55 Cnc b ve 55 Cnc c ötegezegenleri arasında 3/1 rezonans vardır. Yoğun paketleme aşamasından uzak olduğu için bu yıldız sisteminde daha fazla gezegen olabilir (Raymond ve diğ., 2008).

Upsilon Andromedae yıldız sisteminde yıldızlar arasında 750 AB mesafe vardır. F8 tayf sınıfında bir sarı cücenin etrafında 0.68 M_J , 1.91 M_J ve 4.1 M_J kütlelere sahip ötegezegenler sırasıyla 4.6, 241 ve 1276 günlük yörünge periyotlarına sahiptir. ups And c ve ups And d ötegezegenleri 11/2 rezonansına yakındır ve sistem kararlıdır. Kepler-16 çift yıldız sisteminin ötegezegenlerinin rezonanslarıyla benzerdir.

Bir sarı cüce olan Kepler 11 yıldızının yörüngesinde altı tane ötegezegen vardır. Bu ötegezegenlerin yörüngeleri birbirlerine oldukça yakın olmasına rağmen kararlıdır. Yörüngeleri sırasıyla 10.3, 13, 22.7, 32, 46.7 ve 118.4 gündür. En dıştaki ötegezegenin yörüngesi Merkür'ün yörüngesinden sadece biraz daha büyüktür. Bu ötegezegenler birbirleriyle rezonansa girmedikleri gibi oldukça da kararlı yörüngeye sahiptirler. Tipik olmayan bir dizilimdir. (Lissauer ve diğ., 2011b) Yıldızın yakın olan en içteki iki gezegen 5/4 rezonansına yakındır ve bu sistemin transit geçiş yapmayan başka ötegezegenleri olması da muhtemeldir.

Kepler-223 yıldız sisteminde G5V tayf tipli bir sarı cücenin yörüngesinde transit geçiş yapan dört tane ötegezegen vardır. Bu ötegezegenlerin yarıçapları transit geçiş sırasında bulunmuştur ve hepsi de süper-Yer sınıfındadır. Yörünge periyotları ise sırasıyla 7.4, 9.8, 14.8 ve 19.7 gündür; dolayısıyla gezegenler 8:6:4:3 rezonansına yakındır ve şu anda bilinen yoğun paketlenmiş bir rezonans sisteminin en belirgin örneğini oluşturmaktadırlar (Lissauer ve diğ., 2011).

Dış etkenlerden etkilenen bir ötegezegenin dış merkezliği yüksek bir yörüngesi varsa, rezonant bir doğaya sahip olan Lidov-Kozai etkisi çok ötegezegenli ve yıldızlı sistemlerde

dinamik mimarinin oluşumunda belirleyici role sahip olabilir (Shevchenko, 2017). Süper-Yer ve mini-Neptün'lerden oluşan < 200 gün periyotlarına sahip bir çok kompakt ötegezegen sistemi keşfedilmiştir. Sıkı bir şekilde paketlenmiş iç gezegenlere sahip bu sistemlerde ikinci bir yıldızın varlığı muhtemeldir.

2.5. NASA ÖTEGEZEĞEN ARŞİVİ

NASA Ötegezegen Arşivi³, NASA'nın ötegezegen komünitesindeki astronomları desteklemek için finanse ettiği bir çevrimiçi veritabanı ve araç setidir. Caltech'teki NASA Ötegezegen Bilim Enstitüsü (NExSci) tarafından geliştirilmekte ve işletilmektedir. Bu arşivde yayınlanmış bütün ötegezegenler özellikleriyle birlikte interaktif bir tablo halinde bulunabilir.

Veri seti Kepler ötegezegen adayları, veri onaylama raporları, hedef yıldızların parametreleri, Kepler ve CoRoT görevlerinden ışık eğrileri ile SuperWASP ve KELT gibi yer tabanlı gökyüzü araştırmalarını, literatürden spektral ve radyal hız ölçümlerini de içermektedir; toplamda 2,9 milyondan fazla ışık eğrisi içerir. Transit efemeris tahmincisi, ışık eğrisi görüntüleme ve normalizasyonu için program, periyodogram ve ışık faz eğrisi için araçlar da sunmaktadır.

Ötegezegenlerin ve yıldızlarının bulunması ile nitelendirilmesinde rol oynayan halka açık verilerin toplanması ve sunulmasına adanmıştır. Pozisyon, büyüklük ve sıcaklık gibi yıldız parametreleri; kütle ve yörünge gibi ötegezegen parametreleri; radyal hız eğrileri, fotometrik ışık eğrileri, görüntüler ve spektrumlar gibi keşif/nitelendirme verileri içerir. Bu verilerin içerikleri de açıklanmıştır. Arşiv verileri ve arçları hakkında kapsamlı belgeleri de sağlar.

Arşivdeki verilerin hepsi belirlenmiş bir astronom ekibi tarafından incelenip orijinal literatür referansına bağlanmaktadır. Verilerde bir yıldızla göre veya yıldız ve gezegen özelliklerine göre arama yapılabilmektedir. Veriler arşivdeki interaktif tablo ile sıralanıp filtrelenebilmektedir. Sık erişilen veri kümelerine de doğrudan erişim sunar. Bu veri kümeleri; Bilinen tüm gezegenlerin ve konakların listesi, Tüm Kepler İlgili Nesnelere (KOI'ler) listesi, Tüm Kepler Eşik Geçiş Olayları (TCE'ler) listesi.

³ <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/intro.html>

NASA Ötegezegen Arşivi kapsamında Web etkileşimli çizim araçlarının yanı sıra altı adet veri kataloğu bulunmaktadır.

- Gezegen Sistemleri Kataloğu
- Gezegen Sistemleri Kompozit Kataloğu0
- Ana Yıldızlar Kataloğu
- Atmosferik Spektroskopi Veri Tabanı
- Geçiş Yapan Gezegenler Veri Tabanı
- Ötegezegen Takip Gözlemi Programı

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. ÖTEGEZEĞEN TÜRLERİNİN BELİRLENMESİ

Bu yüksek lisans tez çalışmasında gezegenlerin türlerinin belirlenmesinde Arecibo Planetary Habitability Laboratory'nin⁴ kütleye dayalı olarak literatüre kazandırdığı gezegen türü belirleme sistematığı kullanılmıştır. Bu sistematığe göre gezegenler öncelikli olarak kütle aralıklarına ayrılmıştır (bkz. Tablo 3.1):

Tablo 3.1'de sütunlar soldan sağa doğru gezegen tipi, Yer cinsinden gezegen kütlesi, Yer cinsinden gezegen yarıçapı ve bu çalışmada kullanılacak olan gezegen adı kısaltmaları listelenmiştir. Tabloda verilen yarıçap aralıkları yaklaşık değerler olup gezegen yarıçapının kimyasal yapı hakkında önemli bilgileri barındırdığı düşünülmektedir.

Tablo 3.1: Arecibo Güneş Sistemi gezegenleri ve ötegezegen sınıflandırması için kütle ve yarıçap sınırları

Gezegen Türü	Kütle (M_{Yer})	Yarıçap (R_{Yer})	Kısaltma
Asteroid-benzeri	0-0.00001	0-0.03	A
Merkür-benzeri	0.00001-0.1	0.03-0.7	m
Küçük Yer-benzeri	0.1-0.5	0.5-1.2	sT
Yer-benzeri	0.5-2	0.8-1.9	T
Süper Yer	2-10	1.3-3.3	S
Mini Neptün	2-10	1.9-3.5	M
Neptün-benzeri	10-50	2.1-5.7	N
Jüpiter-benzeri	>50	3.5-27	J

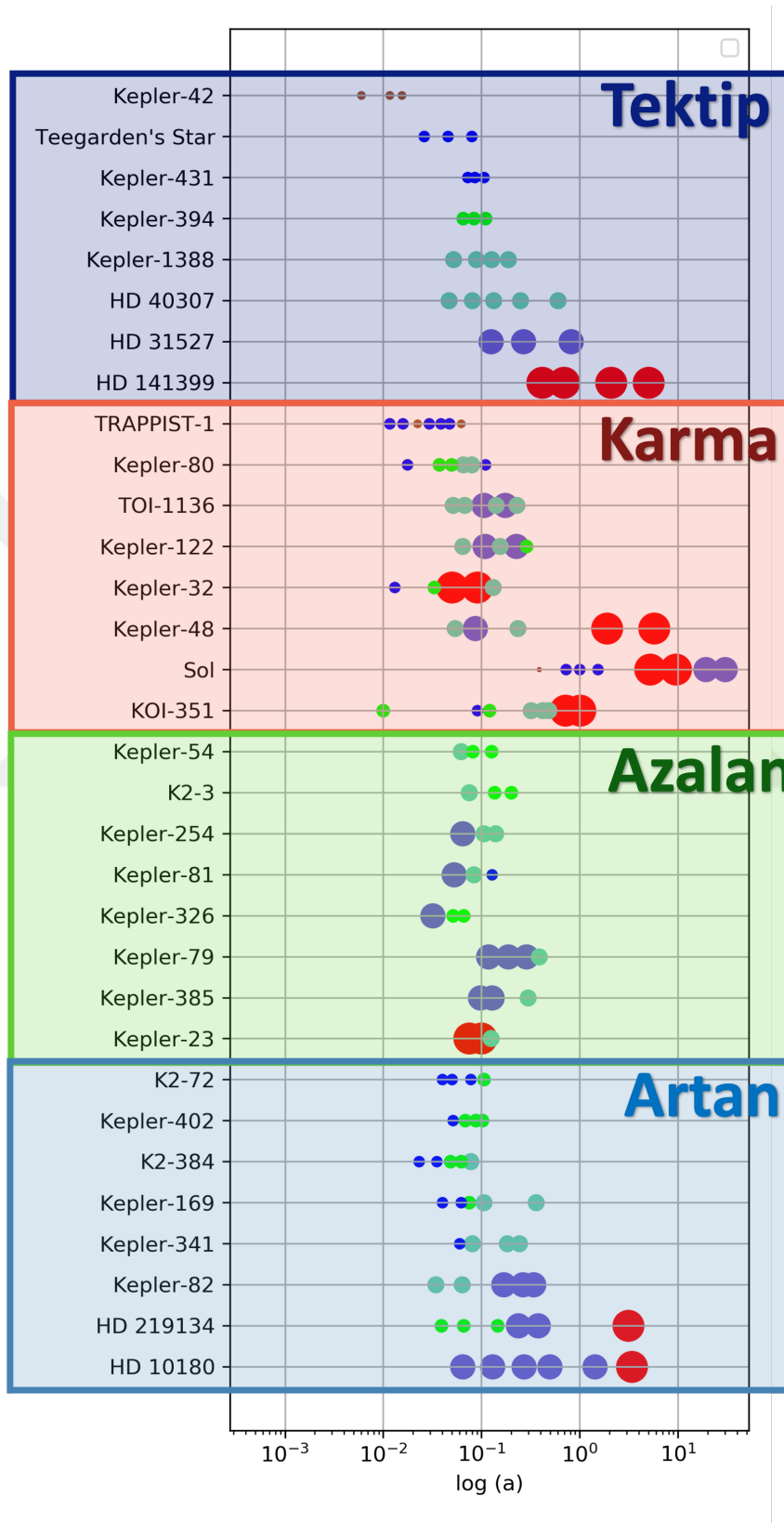
3.2. ÖTEGEZEĞEN SİSTEMİ MİMARİSİNİN BELİRLENMESİ

Ötegezegen sistemi mimarisinin belirlenmesinde gezegenlerin yıldızdan uzaklaştıkça gezegen türünün değişimleri dikkate alınmıştır. Bu değişim sistem gezegenlerinin salt kütlelerini bu şekilde dikkate almayarak beraberinde sistemdeki maddenin dağılımına dair önemli ipuçları sunar. Genel olarak gezegen türünün değişimiyle karşımıza dört dizilim

⁴ PHL@UPR Arecibo A Mass Classification for Both Solar and Exoplanets
<https://phl.upr.edu/library/labnotes/a-mass-classification-for-both-solar-and-extrasolar-planets>

çıkmaktadır. Bunlar sistemdeki tüm gezegenlerin aynı sınıfta olduğu tektip sistemler, sistemdeki gezegen tür kütlelerinin içten dışa doğru azaldığı azalan sistemler ya da arttığı artan sistemler ya da gezegen dizilimlerinin rastgeleleştiği karma sistemler olarak kategorize edilebilir (bkz. Şekil 3.1). Tek yıldızlar etrafındaki gezegen sistemlerini çalışan Önal Taş ve diğ. (2025) dört sistem mimarisi için ortaya koydukları çeşitli örnekler Şekil 3.1'de görülmektedir.





Şekil 3.1: Dört farklı gezegen mimarisi: tektip, karma, azalan ve artan.

4. BULGULAR

4.1. ÖTEGEZEĞEN VERİLERİNİN SEÇİMİ

Bu yüksek lisans tez çalışmasında çift ve üçlü yıldız sistemlerinin etrafında yörüngelenen en az iki ve daha fazla gezegenden oluşan sistemlerdeki gezegen dizilimleri incelenerek gezegen sistemi mimarisi araştırılmaktadır. Çalışmada NASA Gezegen Sistemleri Kataloğu kullanılarak (i) default parameter=1, olan nesnelere seçilmiştir. Burada default parameter olarak daha güvenilir veriler önerilmektedir. Bu seçimle her bir gezegene ait tek bir veri seti seçilmiştir. Bu ilk adımdan sonra başlangıçta 38,047 olan satır sayısı 5,811 satıra azalmıştır. Bunun ardından (ii) $N_{st} \geq 2$ olan yani yıldız sayısı iki ve daha fazla olan gezegenler süzülüş ve geriye 530 tekil gezegen sayısı sonucu alınmıştır. Son olarak bu örneğe (iii) $N_{pl} \geq 2$ koşulu yani sistemdeki gezegen sayısı iki ve daha fazla koşulu uygulandığında 223 gezegenden oluşan alt-örneğe ulaşılmıştır. Bu 223 gezegenden TOI 1634, UZ For b ve UZ For c sistemlerine ait kütle ve yarıçap bilgisinin olmamasından dolayı alt örnekten çıkarılmışlardır. Böylece geriye 220 gezegen kalmıştır. Yapılan sistem analizinde 220 ötegezegenin 188'i çift yıldız sisteminde ve 32'si üçlü yıldız sistemine üye bulunmuştur. Bu ötegezegen sayıları yıldız sistemi cinsinden değerlendirildiğinde 73 çift yıldız ve 10 üçlü yıldız sistemine karşı gelmektedir. Tablo 4.1'de gezegen ve yıldız sayılarının detaylı dağılımı verilmiştir:

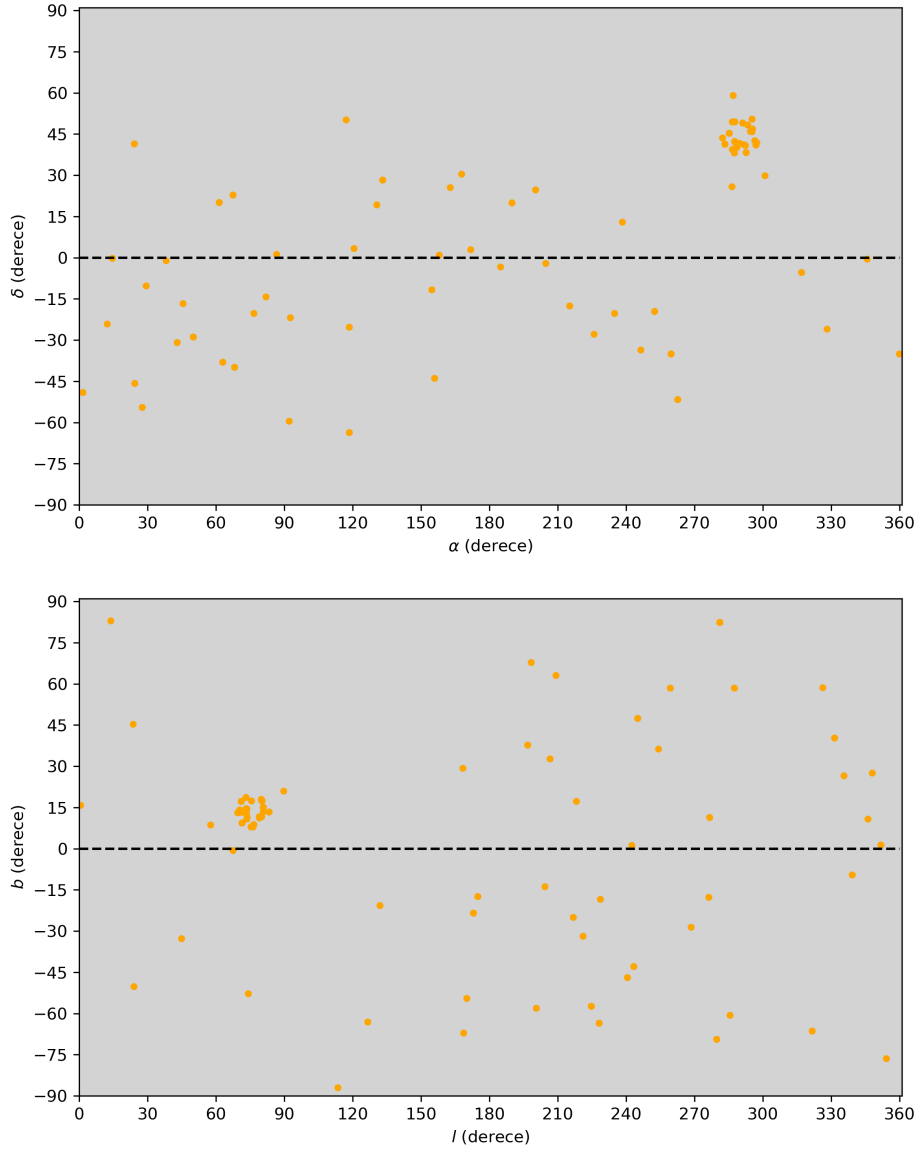
Tablo 4.1: Çalışmada kullanılan ötegezegenlerin yıldız sistemi türüne göre dağılımı.

İkili Sistem		Üçlü Sistem	
$N_{pl} = 2$	$N_{pl} > 2$	$N_{pl} = 2$	$N_{pl} > 2$
38 sistem	35 sistem	7 sistem	3 sistem

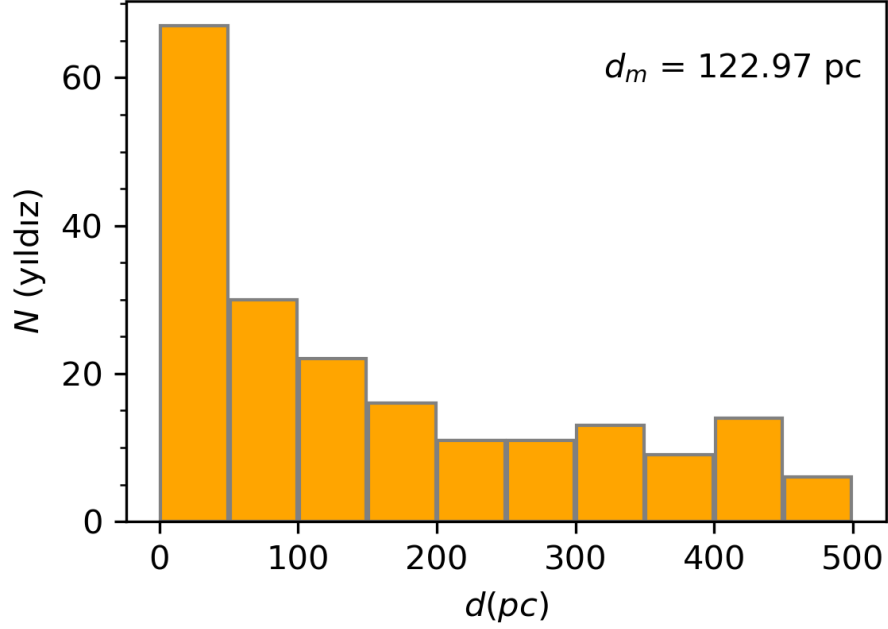
Ötegezegenleri barındıran bu yıldızların etkin sıcaklık, log g, kütle, yarıçap ve metal bollukları da NASA Gezegen Sistemleri Kataloğundan alınmış, bu verilerin eksik olduğu yıldızlar için ise NASA Exoplanet Archive kullanılarak veriler tamamlanmıştır.

4.2. ÖTEGEZEĞENLERİN YILDIZLARI

Bu yüksek lisans tez çalışmasında kullanılan veriler 212 ötegezegen ve bu ötegezegenleri barındıran 75 yıldızın etrafında konumlanmıştır. Söz konusu 75 yıldızın göksel ekvatorial koordinatlardaki (α, δ) ve Galaktik (l, b) koordinatlardaki dağılımları sırasıyla Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



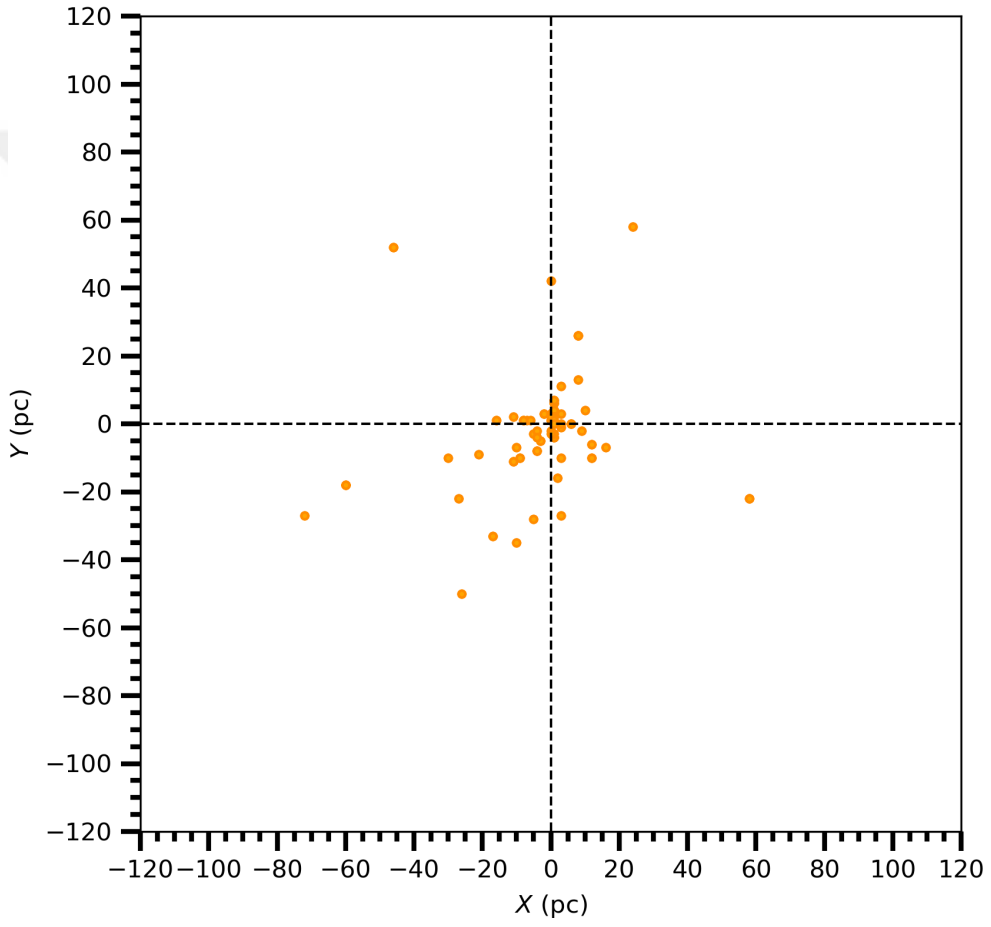
Şekil 4.1: Çalışmada incelenen yıldızların göksel ekvatorial ve Galaktik koordinat düzlemlerindeki dağılımları.



Şekil 4.2: Gaia DR3 trigonometrik paralaksları bilinen yıldızların uzaklık histogramı.

Yıldızların ekvatorial koordinatlardaki dağılımına bakıldığında ± 75 derece deklinasyon kuşağı içerisinde yer aldıkları görülmektedir. Kepler gözlem alanının olduğu bölge şeklin sağ üst kısmında bir kümelenme olarak görülmektedir. Yıldızların Galaktik koordinatlarına bakıldığında tüm Galaktik çeyreklerde ve enlem aralıklarında yer aldıkları dikkati çekmektedir. Hatta Galaktik düzlem üzerinde iki yıldız dördüncü çeyrekte görülmüştür. Kepler alanı yine Galaktik düzleme yakın ikinci çeyrekte görülen bir kümelenme olarak görülmektedir.

Çalışmadaki yıldızların uzaklık histogramı Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Yapılan analizlere göre yıldızların uzaklıkları 1000 pc mesafelere uzanmakla beraber ana dağılım 500 pc içerisinde tamamlanmaktadır. Bu da yıldızların Güneş komşuluğu içerisinde yer aldığını gösterir. Örneğin medyan uzaklık değeri 123.97 pc ve dağılımın standart sapması 197.85 pc olarak hesaplanmıştır. Yıldızların helyosentrik uzaklık bileşenleri olan X , Y ve Z uzaklıklarına göre dağılımları Şekil 4.3'te iki panel halinde gösterilmiştir.



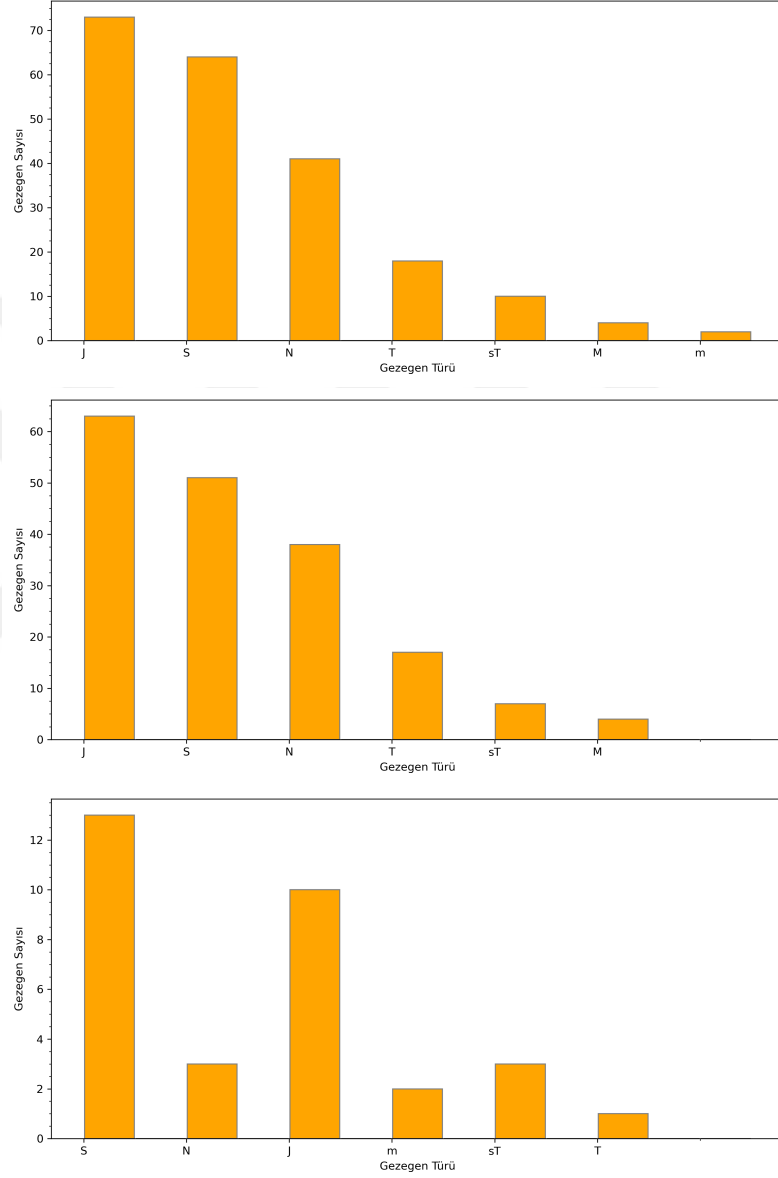
Şekil 4.3: Yıldızların helyosentrik koordinat bileşelerindeki dağılımları. Üst panel tepeden $Y \times X$ düzlemi ve alt panel kenardan $Z \times X$. Güneş'in konumunda kesişen Galaktik düzlemi ve Galaktik kutup doğrultusunu siyah kesikli çizgilerle temsil edilmiştir.

4.3. ÖTEGEZEĞEN TÜRLERİNİN DAĞILIMI

NASA Ötegezegen veri tabanından alınan Gezegen Sistemleri kataloğundan seçilen ötegezegenlerin ($N = 224$ gezegen) % 33'ünün kütle (M), % 57'sinin yarıçapları (R) ve % 85'inin yarı-büyük eksen uzunluk (a) değerleri hazır olarak bulunuyordu. Bununla beraber, eksik değerler NASA Eyes on Exoplanets uygulamasının veri tabanından çekilerek tamamlanmıştır. Bu uygulama söz konusu gezegenlerin literatürde var olan diğer ölçümlerini dikkate almaktadır. Böylelikle başlangıçtaki örneğin % 95'inin kütle, yarıçap ve yarı-büyük eksen uzunluğu değeri elde edilmiştir. Bu toplamda 212 gezegen etmiştir.

Çalışmada ötegezegen türleri Bölüm 3.1'de anlatılan sistematik kullanılarak kütle ve yarıçapa bağlı olarak Merkür-benzeri (m), küçük Yer-benzeri (sT), Yer-benzeri (T), Süper Yer (S), Mini Neptün (M), Neptün-benzeri (N) ve Jüpiter-benzeri (J) kategorilerinde belirlenmiştir. Bu gezegen türlerinin dağılım histogramı Şekil 4.7'nin üst panelinde gösterilmiştir. Bu histograma bakıldığında incelenen örnekte %34.4 ile J türü, %30.1 ile S türü ve %19.3 ile T türü gezegenler baskındır. Diğer gezegenlerin katkısı %16.2'dir. Yıldızların çift ve üçlü sistemleri olması durumu dikkate alınarak gezegen türlerinin dağılımları ise Şekil 4.4'ün orta ve alt panellerinde gösterilmiştir. Şekil 4.4'ün orta paneli incelendiğinde çift sistemlere üye 181 gezegen bulunmuştur. Bu gezegenlerin %35.2'si J türü, %28'i S ve %20.9'u N türü olarak tespit edilmiştir. Geriye kalan gezegenler arasında %9.3 oranla 17 T türü yani yer benzeri gezegen ve %3.8'lik bir oranla sT türü oldukça küçük yer benzeri gezegenler de çift sistemlerin etrafında tespit edilmiştir. Şekil 4.4'ün alt paneli incelendiğinde üçlü yıldız sistemlerine üye ötegezegenlerin ($N = 33$ gezegen) tür dağılımı %39.4 ile S türü karasal gezegenler ve %30.3 ile J türü gaz devleri baskındır. Bu tip yıldızların etrafında dolanan Merkür benzeri iki gezegen tespit edilmiştir. Her iki gezegen de Kepler-444 sisteminde yer almaktadır. Bu sistem K0 tayf türünden oldukça yaşlı ($\tau = 11.2$ Gyl; Wall (2015)) turuncu bir anakol yıldızı etrafında dolanan beş gezegenden ibarettir. Sistemin diğer gezegenleri de sT türü yani küçük Yer benzeri gezegenlerdir. Sistemdeki tüm bu gezegenlerin yıldızlarına olan uzaklıkları 0.04 ile 0.08 AB kadardır. Bu yıldızdan 23.55 AB uzaklıkta diğer iki yıldız aralarında 0.3 AB mesafe ile duran M tayf türünden anakol yıldızlarıdır (Zhang ve diğ., 2023). Bu yıldızların etrafında bir gezegen olup olmadığı henüz bilinmemektedir.

Ötegezegen türlerinin genel olarak özellikleri incelendiğinde gezegen kütlelerinin $0.037 <$



Şekil 4.4: Gezegen türlerinin histogramı. Üst panel tüm örnek, orta panel çift yıldız sistemleri ve alt panel üçlü yıldız sistemlerinde gözlenen gezegen türlerinin frekans dağılımını göstermektedir. J, S, N, T, M, m ve sT gezegen türlerini temsil etmektedir.

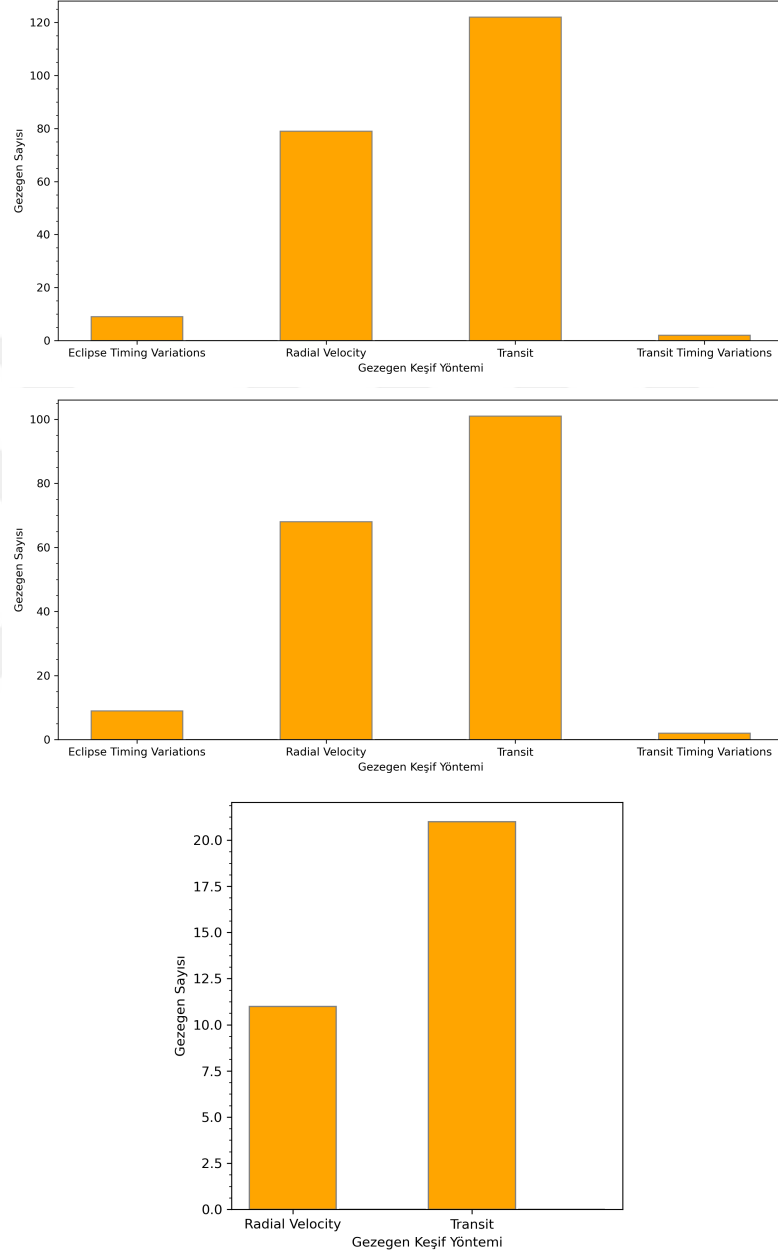
$M(M_{yer}) < 6321$ aralığında, yarıçapların $0.4 < R(R_{yer}) < 14.34$ aralığında, yarı-büyük eksen uzunluklarının $0.02 < a(AB) < 9.8$ ve yörünge periyotlarının da $0.65 < P(gn) < 14,000$ aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Bu değerlere bakıldığında çift ve üçlü yıldız sistemlerinde bulunan gezegenlerin genel özelliklerinin oldukça geniş bir değişim içerisinde olduğu söylenebilir. Yıldızına çok yakın, dolayısıyla yörüngesini çok kısa bir sürede tamamlayan gezegenler ile yıldızına Satürn kadar uzak ancak ondan bir miktar daha uzun sürede yörünge dolanımını tamamlayan gezegenler olduğu söylenebilir. Örneğimizdeki yıldızların yarı-büyük eksen uzunlukları bakımından durumunu Güneş Sistemi ölçeğine taşıyacak olursak örnekteki gezegenlerin % 70'i yıldızına Güneş Sistemi'nin en içteki gezegeni Merkür'den daha içte konumlanmıştır. Bu örneğin de %65'i $a \leq 0.12$ AB mesafeye yığılmış haldedir. Bu durumun gözlem tekniklerimizden kaynaklanan seçim etkilerinin bir sonucu olduğu düşünülmektedir. Çalışmada kullanılan örneğin gözlem yöntemlerine göre değişimi Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

Buna göre çalışmada dört ana keşif yöntemi öne çıkmaktadır. Bunlar geçiş, radyal hız, geçiş zamanlama değişimi ve tutulma zamanlama değişimi yöntemleridir. Baskın olan yöntem geçiş ve radyal hız yöntemleridir. Geçiş ve tutulma zamanlama değişimi yöntemleri yalnızca çift sistem gözlemlerinde ve oldukça düşük bir katkı vermektedir. Detaylı inceleme yapıldığında bu yöntemlerin altı ötegezegen sisteminde bulunan 11 gezegenin keşfinde uygulandığı görülmüştür. Geçiş zamanlama değişimi yöntemiyle Kepler-411⁵ bileşenleri arasında 533 AB mesafe olan bir KV-MV tayf türü yıldız çifti olup KV tayf türü etrafındaki dört gezegenden yalnızca bir tanesi bu yöntemle keşfedilmiştir. Keşfedilen gezegen yıldızına 0.186 AB mesafede olan bir N türü gezegendir. Gezegenin dengelenme sıcaklığı $T_{denge} = 503$ K olarak hesaplanmıştır. WASP 18⁶ sistemi bileşenleri arasında 3518 AB mesafe olan bir FV-MV tayf türü yıldız çiftidir. Sistemdeki iki gezegen de FV tayf türünden yıldız etrafında dolanmaktadır. Bu gezegenlerden yalnızca biri yıldızından 0.035 AB mesafedeki J türü bir gezegendir. Konumu itibarıyla bu gezegen sıcak Jüpiter türünden bir gezegen olup kütlesi $55 M_{Yer}$ kadardır.

Tutulma zamanlama değişim yöntemiyle incelenen yıldız sistemlerine bakıldığında bu yöntemin uygulandığı sistemler ilginç niteliklere sahip bulunmuştur. Söz konusu dört yıldız

⁵ <https://en.wikipedia.org/wiki/Kepler-411>

⁶ <https://en.wikipedia.org/wiki/WASP-18>



Şekil 4.5: Gezegen keşif yöntemlerinin histogramı. Üst panel tüm örnek, orta panel çift yıldız sistemleri ve alt panel üçlü yıldız sistemlerinde kullanılmış gezegen keşif yöntemlerinin frekans dağılımını göstermektedir.

sistemi HU Aqr, NN Ser, NY Vir ve Kepler-451 sistemleridir. HU Aqr⁷ yıldız çifti AM Herculis türünden bir kataklismik değişen yıldız sistemidir; yani bir beyaz cüce ve bir kırmızı cüce yıldızdan oluşur. NN Ser⁸ yıldız çifti birbiri etrafında 0.13 günde dolanan bir beyaz cüce-kırmızı cüce sistemidir. NY Vir sistemi⁹ ve Kepler-451 sistemlerinde ise bir B alt cücesi ile M cücesinden oluşan ve bileşenler arası mesafesi 0.016 AB olan bir çift sistemdir. Her bir sistemde keşfedilen gezegenler J türü gezegenler olup Kepler 451 sistemi haricindekiler yıldızlarından $3 < a(AB) < 9$ aralığında bulunan gaz devleridir. Bununla birlikte Kepler-451'in üç gezegeninden ikisi sıcak Jüpiterlerdir. Yıldızlarına 0.92 ve 0.188 AB mesafededirler. Üçüncü gezegen Kepler 451 sistemine 1.97 AB uzaklıkta soğuk bir gaz devidir. Kepler 451c ve Kepler 451d gezegenlerinin keşfi ülkemiz araştırmacıları tarafından TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'ndeki 1m'lik T100 teleskobuyla yapılan fotometrik gözlemlerle keşfedilmişlerdir (Esmer ve diğ., 2022). Bu yöntemle keşfedilen gezegenlerin yörüngelerinin şekli P-tipidir; yani sistemdeki tüm yıldızların etrafında dolanırlar.

Geçiş ve radyal hız yöntemleriyle keşfedilen 201 gezegenin 33'ü üçlü geriye kalan 168'i çift sistemlere üyedir. Genel olarak bu sistemlere bakıldığında çoğunlukla bileşenleri arasında büyük mesafeler olan geniş çift sistemler olarak karşımıza çıkmaktadırlar. Her bir yıldızın etrafında gezegenler olabileceği gibi sistemdeki yıldızlardan birinin etrafında dolanan gezegenler keşfedilmiştir. Bileşenler arasındaki ayrıklık GJ 229 yıldız sistemindeki gibi $a = 28.93$ AB olabileceği gibi HD38529 sistemindeki gibi $a = 12,042$ AB'ye kadar uzanabilir. Bununla beraber örnekteki 75 yıldızdan yalnızca 33'ünün bileşenleri arasındaki mesafe literatür çalışmalarında verilmiştir. Bu yöntemlerle tespit edilen gezegenlerin bağlı buldukları ana yıldızların etkin sıcaklık ve yüzey çekim ivme değerleri değerlendirildiğinde yıldızlar F, G, K ve M tayf türlerindeki anakol, alt dev ve dev olabilecekleri tespit edilmiştir. Bu genel duruma istisna olarak V1298 Tau yıldızı bir T Tauri aşamasındaki bir ilkel yıldız olsa da kızılötesi artık emisyonunun spektrel enerji dağılımında gözlemlenmemiş olması bu yıldızın T Tauri ile ilkel yıldız evreleri arasındaki geçiş sürecinde olduğuna işaret eder. Bu sistem dört gezegeni bulunan bir üçlü yıldız sistemidir. Gezegenli olan V1298 Tau yıldızı bir çift sistem ile ortak çekim alanını paylaşmaktadır. Bu sistemde tespit edilen gezegenlerin hepsi yıldızlarından $6 < a < 10.5$ AB uzaklıktaki J türü gaz devleridir.

⁷ <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/overview/HU%20Aqr>

⁸ <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/overview/NN%20Ser>

⁹ <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/overview/NY%20Vir>

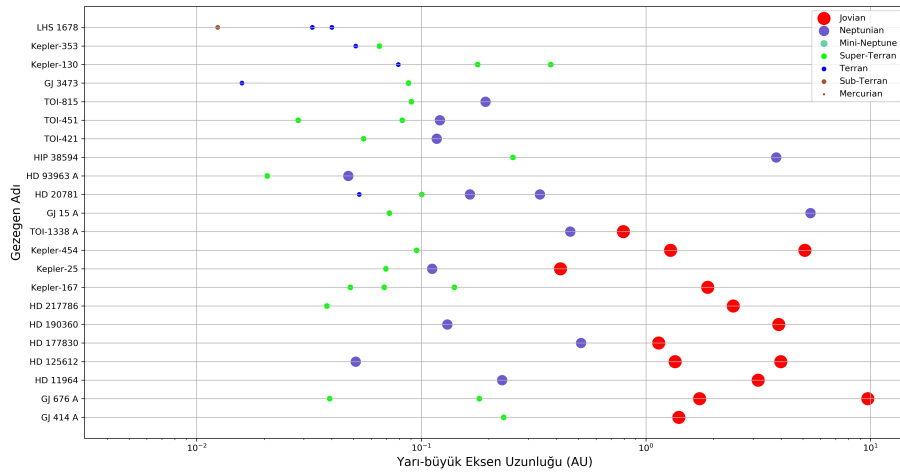
Gezegen türlerinin yıldız tayf türlerine göre dağılımlarına bakıldığında en çok K tayf türü yıldızların etrafında (53) gezegenler tespit edilmiştir. Bu gezegenlerin 38'i çift, 15'i üçlü yıldız sistemlerine üyedir. G tayf türü yıldızların etrafında keşfedilen 37 ötegezegenin tamamı çift sistemlerdedir. K2-290 üçlü yıldız sisteminin iki gezegeni dışında 17 gezegen F tayf türünden yıldızların etrafında görülmüştür. M tayf türü yıldızların etrafında 15 adet çift sistem ve altı adet üçlü sistem üyesi gezegen tespit edilmiştir.

4.4. ÇİFT YILDIZLI ÖTEGEZEĞEN SİSTEMLERİNİN MİMARİSİ

Bir çift yıldız sistemindeki ötegezegenin sınıfını Bölüm 3.3'te verilen Tablo 3.1'i kullanarak belirledikten sonra Bölüm 3.4'teki sistematik ile gezegen sistemlerinin mimari yapıları belirlenmiştir. Buna göre tüm örnekteki çift yıldız sistemleri değerlendirildiğinde karşımıza dört mimari türü de çıkmıştır: artan, azalan, karma ve tektip gezegene mimarileri.

4.4.1. Artan Gezegen Mimarisi

Merkezi yıldızdan uzaklaştıkça gezegen türünün ait olduğu sınıfın gittikçe daha üst kütleli gruba geçmesiyle tanımlanan Artan sınıfı gezegen sistemleri Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6: Çift yıldız sistemlerinde Artan mimarideki gezegen sistemleri.

Şekil incelendiğinde sT'den T türüne, T'den S'ye, S'den N'ye ve N'den J'ye doğru ardışık

geçişler olduğu gibi sistemdeki gezegen sayısının artışıyla da ilişkili olarak T-S-N, S-J, geçişleri de dikkati çekmektedir. Bu şekilde görülen durum merkezi yıldız ile ilkel gezegen diskinin evrimleşip sistem olgunlaşana kadar maruz kaldıkları süreçlerin karmaşıklığını ve sistemlerin birbirleri arasındaki benzerlik ve farklılıkları ortaya koymaktadır.

Artan sistemlerdeki gezegenlerin çekimsel olarak bağlı oldukları yıldızların aynı tayf türü içerisindeki kütle değişimleri incelenmiştir. Buna göre gezegenlerin özellikleri Tablo 4.2’de gösterilmektedir.

Tablo 4.2: Artan mimarideki ötegezegen sistemlerinin tayf türü, kütle, sistemde gözlenen ilk gezegenin yarı-büyük eksen uzunluğu (YBU), sistemde gözlenen ilk gaz yapılı gezegen için YBU ve sistemdeki gezegen dizilimi.

Yıldız Adı	Tayf Türü	Kütlesi (M_{\odot})	İlk gezegen YBU(AB)	Gaz Gezegen YBU (AB)	Gezegen Dizilimi	Dönme Periyodu (gün)
LHS1678	MV	0.35	0.012	-	sTTT	66
GJ3473	MV	0.36	0.016	-	TS	15.5
GJ15A	MV	0.40	0.072	5.4	SN	20.68
HIP 38594	MV	0.61	0.256	3.8	SN	60.7
GJ 676A	MV	0.63	0.039	1.74	SSJJ	41.2
Kepler 167	KV	0.77	0.048	1.88	SSSJ	
TOI-815	KV	0.78	0.090	0.193	SN	
GJ 414 A	KV	0.65	0.232	1.4	SJ	
HD 177830	KIV	1.48	0.514	0.514	NJ	
HD 20781	GV	0.24	0.053	0.165	TSNN	
TOI-421	GV	0.83	0.055	0.117	SN	
TOI-451	GV	0.95	0.028	0.121	SSN	
Kepler-130	GV	1.02	0.079	-	TSS	
Kepler-454	GV	1.03	0.095	0.095	SJJ	
HD 125612	GV	1.09	0.051	0.051	NJJ	
HD 93963 A	GV	1.11	0.021	0.047	SN	
HD 11964	GV	1.12	0.229	0.229	NJ	
HD 217786	FV	1.02	0.038	2.446	SJ	
TOI-1338 A	FV	1.09	0.461	0.794	NJ	
Kepler-25	FV	1.26	0.070	0.112	SNJ	

M tayf türünden yıldızlara bakıldığında Artan mimarideki bu yıldızların sahip oldukları kütle ile sistemde tespit edilen ilk gezegenin yıldız etrafındaki yörüngesinin yarı-büyük eksen uzunluğu (YBU) arasında bir ilişki yakalanmıştır. MV tayf türündeki Artan mimarili sistemlerde GJ 676A yıldızı dışında kütle arttıkça sistemlerde tespit edilen en içteki gezegenin de konumları bir miktar büyümüştür. Yıldızların etrafında tespit edilen gezegenler arasında varsa karasaldan gaz yapıya geçiş ise Tablo 4.2’de verilmiştir. Buna göre LHS

1678 ve GJ 3473 sistemlerinde henüz gaz yapılı bir gezegen görülememiştir ya da sistemde yoktur. Geriye kalan üç yıldız sisteminde de iç gezegenler S türü karasal gezegenler ve sonrasında GJ 15A ve HIP 38594 sistemlerinde N türü bir gaz/buz gezegeni gelirken GJ 676A'da iki S türü gezegenin üzerine iki de Jüpiter benzeri gaz gezegen bulunmuştur. Her üç sistemde de gaz dev gezegenler Güneş Sistemi gaz devlerinin gözleendiği sınırın altında mesafelere konuşlanmıştır.

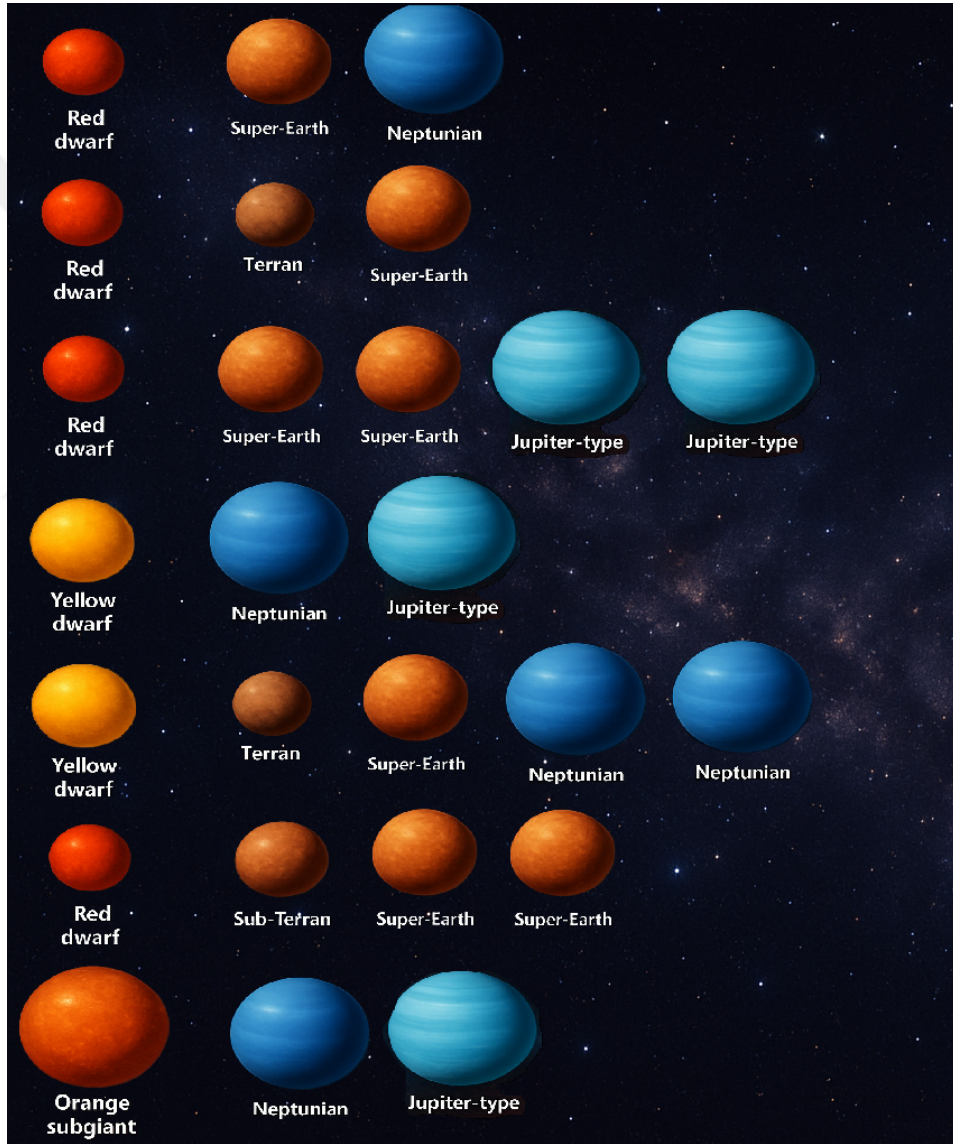
K tayf türünden yıldızlara bakıldığında Artan mimarideki bu yıldızların artan kütleleri ile ilk gezegenin YBU'su arasında yine bir ilişki yakalanmıştır. Burada yalnızca HD 177830 yıldızı altdev aşamasındaki bir yıldızdır. Muhtemelen bu yıldız F tayf türünden bir anakol yıldızının evrimleşmiş halidir. Sistemde yalnızca gaz devi iki gezegen tespit edilmiştir. Bu tayf türü yıldızların etrafında en az bir S türü Yer'e kıyasla oldukça büyük karasal gezegen ve ardından gaz devi sınıflarından gezegenler geldiği görülmüştür. Bunlar arasında TOI-815 yıldızının gaz devi gezegeni N türü olup yıldızına oldukça yakın konuşlanmıştır. Öyle ki bu mesafe Merkür ile Güneş arasındaki mesafenin yarısı kadardır. Bu gaz devi oldukça sıcak bir gezegen olabilir.

G tayf türünden yıldızlara bakıldığında Artan mimarideki bu yıldızların artan kütleleri ile ilk gezegenin konumu ilişkisi gözlemlenen tüm yıldızlar için tutarlı değildir. Bunun nedeni gözlem tekniklerinin bu yıldızlara çok yakın olan yıldızları gözlemleyebilmemizi engellemesi olarak düşünülebilir. G tayf türü yıldızların etrafındaki gaz devi yıldızların başlangıç konumları 0.047'den başlıyor ve 0.229'a kadar uzanıyor. Buradan görüyoruz ki Artan mimarideki G tayf türü anakol yıldızlarının etrafındaki gaz devi gezegenler yıldızlarına çok yakın olduğunda gözlenebilmiştir. Örnekteki bu yıldızlara Merkür'ün Güneş'e olduğundan çok yakında olan sıcak gaz devleri eşlik etmektedir. Bu yıldızlardan yalnızca Kepler-454 sisteminde gözlenen üç gezegenden ilki yıldızına çok yakın (0.095 AB) karasal bir gezegenken sistemde gözlenen iki J türündeki gaz devi gezegenden biri 1.5 ve diğeri 5 AB mesafeye uzanabilmiştir .

F tayf türünden yıldızlara bakıldığında Artan mimarideki bu yıldızların artan kütleleri ile ilk gezegenin konumu ilişkisi de G tayf türünde olduğu gibi uyumsuzluk içerisindedir. Gezegen sisteminde gözlenen ilk gaz devi gezegenin konumları incelendiğinde HD 217786 yıldızının etrafında soğuk bir J türü gaz devi gezegen olduğu görülse de Artan mimarideki diğeri iki gezegenin etrafında hem N türü hem de J türü gezegenlerin sıcak olacakları konumda

oldukları tespit edilmiştir.

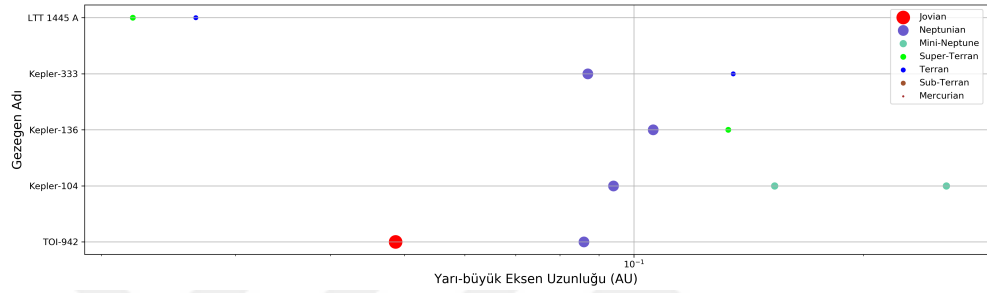
Artan gezegen mimarisine sahip sistemlerde yıldızlar incelendiğinde ise metal bolluklarının azalan sistemlere ve karma sistemlere göre daha fazla olduğu görülmektedir. Yıldızlar azalan sistemlere ve tek tip sistemlere göre daha yaşlı, gezegenler ise azalan sistemlere ve karma sistemlere göre daha uzakta bulunmaktadır. Artan gezegen mimarisine sahip sistemlerdeki gezegen dağılımları şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7: Artan Gezegen Mimarisi sistem çeşitleri

4.4.2. Azalan Gezegen Mimarisi

Merkezi yıldızdan uzaklaştıkça gezegen türünün ait olduğu sınıfın gittikçe daha alt kütleli gruba geçmesiyle tanımlanan Azalan sınıf gezegen sistemleri Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Çift yıldız sistemler içerisinde Azalan mimariye sahip yalnızca iki yıldız ve bu yıldızlarla



Şekil 4.8: Çift yıldız sistemlerinde Azalan mimarideki gezegen sistemleri.

ilişkili beş gezegen tespit edilmiştir. Tüm gezegenler yıldızlarından $0.094 \leq a(AB) \leq 0.26$ uzaklık aralığında yer almaktadır. Sistemlerden biri F tayf türünden bir anakol yıldızı olan Kepler-136’dır. Sistemde gezegenler N-S şeklinde sıralanmış olup aralarında yalnızca 0.027 AB mesafe bulunmaktadır. Bu sistemde yıldızın yakınında sıcak Neptün benzeri bir gaz devi gezegen vardır. Aslında bu bakımdan yalnızca kütle ve yarıçap bakımından Neptün’e benzediğini, konum ve muhtemelen sıcaklık, atmosferik yapı ve bunlarla ilişkili diğer parametreler açısından Neptün’e hiç benzememektedir. Sistemdeki diğer gezegen bir süper Yer türü gezegendir. Yıldızına uzaklığı bakımından böyle bir gezegen açısından konum gezegenin yüzeyinde yüksek sıcaklık olabileceğine işaret etmektedir. F tayf türü yıldızlar G, K ve M tayf türü yıldızlara kıyasla oldukça yüksek oranda mor ötesi ışınım yayımlarlar. Bu da çok yakınlarındaki gezegenlerin gerek atmosferi gerekse hayat oluşturma potansiyeli açısından önemli bir sorundur. Azalan mimarinin görüldüğü diğer gezegen G tayf türünden bir anakol yıldızı olan Kepler-104’tür. Sistemdeki gezegen dizilimi N-M-M şeklindedir. Gözlenen üç gezegen de gazca yoğun yapıli gezegenlerdir.

Azalan gezegen mimarisine sahip sistemlerdeki yıldızlarda ise metal bolluğu diğer sistemlere çift yıldızlı sistemlere göre daha düşüktür. Yıldızları artan sistemlere ve karma sistemlere göre daha gençtir. Yıldızların yüzey çekim ivmeleri ise diğer sistem tiplerine göre daha fazladır. Azalan sistemlerdeki gezegenler yıldızlarına diğer sistem türlerine göre daha

yakında bulunmaktadır. Şekil 4.9'da azalan gezegen mimarisine sahip sistemlerdeki gezegen dağılımları gösterilmiştir.

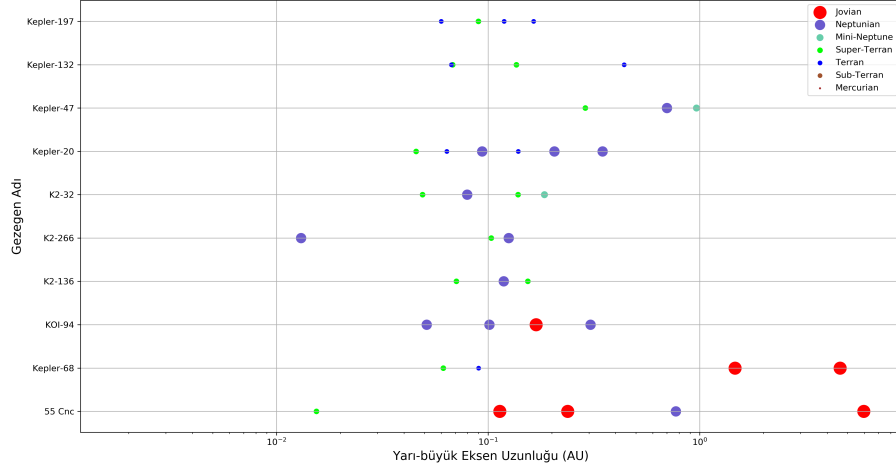


Şekil 4.9: Azalan Gezegen Mimarisine sahip sistemlerdeki gezegen dağılımları

4.4.3. Karma Gezegen Mimarisi

Merkezi yıldızdan uzaklaştıkça gezegen türünün ait olduğu sınıfın karmaşık kütleli olmasıyla tanımlanan Karma sınıf gezegen sistemleri Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Karma mimarideki sistemler üç ve daha fazla sayıdaki gezegenleri içeren sistemlerdir.

Örneğimizde 1 AB'nin ötesine yalnızca J türü gezegenler geçmiştir. Bu gezegenler konum olarak Jüpiter ve Satürn benzeri uzaklıklarda gözlenen soğuk gaz devleridir. Genel olarak bakıldığında Güneş Sistemi'nde görülen gezegen çeşitliliğine ek olarak önemli miktarda S türü karasal gezegenler dikkati çekmektedir. Gezegenlerin bu türden sıralanmalarındaki ana etkenin gezegen sisteminin oluşum süreçlerinde yaşanan yörüngeler arası göçlerin bu tür sistemlerde yaşandığı düşünülmektedir. Gezegenlerin özellikle 1 AB'den küçük uzaklıklarda bulunması ve örnek içerisindeki gezegenlerin en çok karmaşa yaşadıkları bölgenin 0.1 AB civarında dağılmış olduğu görülmektedir. Bir ilkel gezegen diskinin yapısı düşünüldüğünde ilk 0.1 AB lik kısım iç gezegen diski olarak tanımlanır. Bu kısımda yer alan gezegenlerin



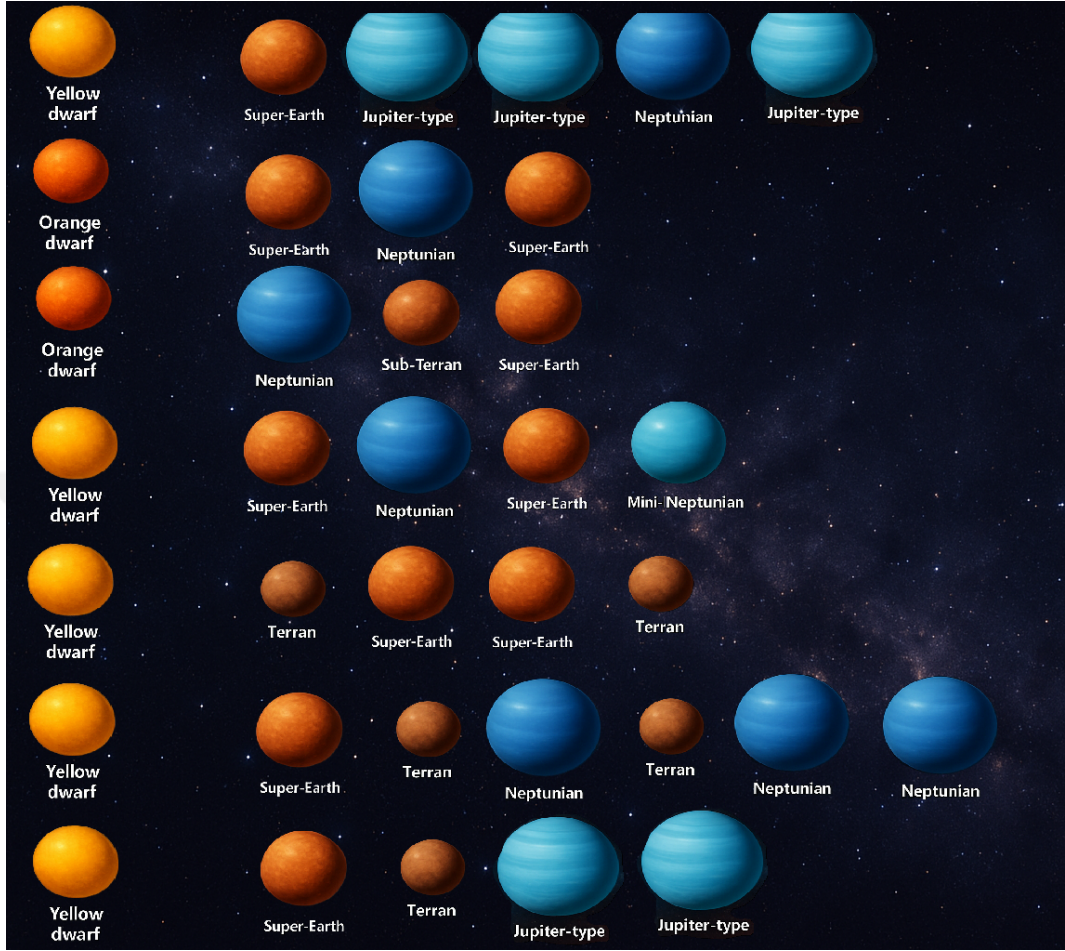
Şekil 4.10: Çift yıldız sistemlerinde Karma mimarideki gezegen sistemleri.

yörüngelerini tamamlama hızları da çok yüksektir. Gezegen türlerinin karasal-gaz-karasal gibi bir değişim göstermesi yaşanan göç süreçlerinin bir sonucudur.

Karma sistemlerin en önemli özelliği bu sistemlerdeki yıldızların oldukça yaşlı olmasıdır. Örneğimizdeki yıldızlardan birinin yaşı bilinmemektedir (K2-266b). Örnekte geriye kalan yıldızların biri ilkel yıldız olup yaşı 650 milyon yıldır. Bu T Tauri yıldızı dışında kalan gezegen sistemi yıldızlarının yaşları 3.16 ile 8.6 Gyl arasında değişmekte yıldızların tayf türleri ise F9.5 ile K6 aralığında ve ışınma gücü sınıfları anakoldur. Metal bolluğu aralığı ise $-0.28 \leq [Fe/H] \text{ (dex)} \leq 0.32$ 'dir. Karma sistemlerde yıldızlar azalan sistemler ve tek tip sistemlere göre daha yaşlıdır ve gezegenler yıldıza daha yakında bulunmaktadır. Şekil 4.11'de karma sistemlerdeki gezegen dağılımları görülebilir.

4.4.4. Tektip Gezegen Mimarisi

Merkezi yıldızdan uzaklaştıkça gezegen türünün kütle sınıfının değişmemesiyle tanımlanan Tektip sınıfı gezegen sistemleri Şekil 4.12'te gösterilmiştir. Tek tip gezegen mimarisi çift sistemlerde görülen en yaygın ikinci mimari türüdür. Mini-Neptün kategorisindeki gezegenlerin henüz gözlemlenmediği bu alt-örnekte küçük Yer benzeri sT türü gezegen sistemlerinden Jüpiter benzeri (sıcak ya da soğuk) gezegen sistemleri dikkati çekmektedir. Özellikle J türü gezegenlerin diğer türlere göre daha çok görülmesinin sebebi gözlemsel

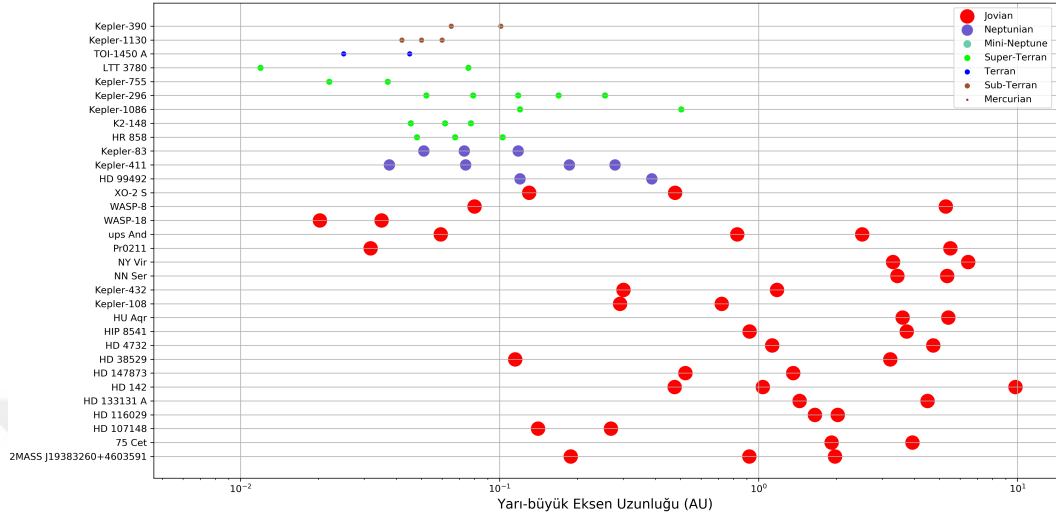


Şekil 4.11: Karma Gezegen Mimarisine sahip sistemlerdeki gezegen dağılımları

yanlılıklardan kaynaklanmaktadır.

Şekil 4.12’de görülen 42 J türü gezegenin 11 tanesi Merkür’ün konumundan (0.389 AB) daha içte bulunmaktadır. Bu bölgeye Bölge-1’in kısaltması olan B1 adını verdik. Bu gezegenlerin kütleleri incelendiğinde en içteki gezegen WASP-18b’nin yıldızından 0.02 AB mesafede bulunan $10.2M_{jupiter}$ kütleli bir gezegen olduğu tespit edilmiştir. Bir diğer gezegen olan HD 107148b’nin kütlesi ise bu mesafedeki diğer gezegenler arasında $19.9M_{jupiter}$ kütlesine sahiptir. Yıldızından uzaklığı 0.14 AB’dir. Geriye kalan bu iç kısımdaki J türü gezegenlerin kütle aralığı $0.2 < M(M_{jupiter}) < 5.4$ ’dir. 0.389 AB ile Jüpiter’in konumu olan 4.3 AB aralığında bulunan J türü gezegenler Bölge-2’de yani B2’de bulunurlar. Bu bölgede 23 gezegen yer almaktadır.

Yedi gezegen ise Jüpiter ile Satürn arasındaki mesafede tespit edilmiştir. gezegenlerin



Şekil 4.12: Çift yıldız sistemlerinde Tektip mimarideki gezegen sistemleri.

kütlelerine bakıldığında $0.4 < M(M_{jüpiter}) < 9.5$ arasında değişmektedirler. Bir gezegen (HD 142c) de Satürn ile hemen hemen aynı noktadadır. Bu gezegenin kütlesi de $10.9M_{jüpiter}$ kadardır.

Tablo 4.3'te J türü yıldızların tayf türleri, metal bollukları ve Güneş Sistemi gezegenlerinin bulunduğu konumlara göre tanımlanmış B bölgelerine göre listelenmiştir. Sıcak Jüpiter türünde olması muhtemel olan bu gezegenlerin F, G ve erken K tayf türünden anakol yıldızlarının etrafında dolandıkları görülmektedir. Ayrıca bu gezegenlerden bazıları F ve K tayf türünden alt dev yıldızlarla ilgilidir. Bu yıldızlar arasında yalnızca Kepler-451 yıldızı F tayf türünden bir altcücedir. Alt cüceler oluşum olarak yaşlı cisimler olup muhtemel kökenlerinin kompakt bileşenli çift sistemlerde meydana gelen birleşme olayları oldukları düşünülmektedir.

Neptün benzeri olan N türü gezegenler Şekil 4.2'de $0.0375 < a (AU) < 0.387$ yarı-büyük eksen uzunluğu aralığında yer almaktadırlar. Bu gezegenler ikisi de K tayf türünden anakol yıldızı olan Kepler-411 (dört gezegen) ve Kepler-83 (üç gezegen) etrafında dolanırlar. Yıldızların metal bollukları, sırasıyla, -0.23 ve 0.05 dex'tir. Konumsal olarak bu türden gaz devlerinin Güneş Sistemi'nin Neptün'ünden çok daha sıcak olmaları beklenir. Bununla beraber Kepler-83 K8 ve Kepler-411 K2 tayf türünden anakol yıldızları olup çapları kıyasla

Tablo 4.3: Tektip mimarideki J türü ötegezegenlere sahip yıldızların tayf türleri ve metal bollukları.

Yıldız Adı	Tayf Türü	[Fe/H] (dex)	YBU Bölgeleri
HD 38529	GV	0.33	B1-B1
XO-2 S	GV	0.33	B1-B1
WASP-8	FV	0.11	B1-B1
NN Ser	FV	0.11	B1-B1
WASP-18	FVI	-0.092	B1-B1-B2
Pr0211	FVI	-0.092	B1-B1-B2
WASP-18	FVI	-0.092	B1-B1-B2
HD 147873	GV	-0.03	B1-B2
Kepler-108	GV	-0.03	B1-B2
ups And	FV	0.3	B1-B2
Kepler-451	FV	0.3	B1-B2
HD 116029	FIV	0.96	B1-B2
75 Cet	FIV	0.96	B1-B2
Kepler-451	KIV	-0.07	B1-B2
HD 116029	KIV	-0.07	B1-B2
NY Vir	KV	0.98	B1-B2
HD 142	KV	0.98	B1-B2
75 Cet	FV	0.19	B1-B2-B2
HD 133131 A	FV	0.19	B1-B2-B2
HD 4732	FV	0.19	B1-B2-B2
Kepler-432	GIV	0.59	B1-B2-B3
HD 142	GIV	0.59	B1-B2-B3
XO-2 S	GIV	0.59	B1-B2-B3
HU Aqr	KV	0.18	B1-B3
HIP 8541	KV	0.18	B1-B3
HU Aqr	GV	0.29	B1-B3
Pr0211	GV	0.29	B1-B3
ups And	GIII	0.1	B2-B2
WASP-8	GIII	0.1	B2-B2
HD 107148	KV	0.26	B2-B2
Kepler-451	KV	0.26	B2-B2
HD 107148	GV	0.93	B2-B3
Kepler-108	GV	0.93	B2-B3
HIP 8541	KIV	0.53	B2-B3
HD 142	KIV	0.53	B2-B3
HD 4732	KIII	-0.15	B2-B3
Kepler-432	KIII	-0.15	B2-B3
HD 147873	D+M4	9	B2-B3
HD 133131 A	D+M4	9	B2-B3
ups And	DAO1+M4	0.11	B2-B3
HD 38529	DAO1+M4	0.11	B2-B3
NY Vir	sdBVII	0.14	B2-B3
NN Ser	sdBVII	0.14	B2-B3

Tablo 4.4: Tektip mimarideki sT, T ve S türü ötegezegenlere sahip yıldızların tayf türleri ve toplam gezegen kütleleri

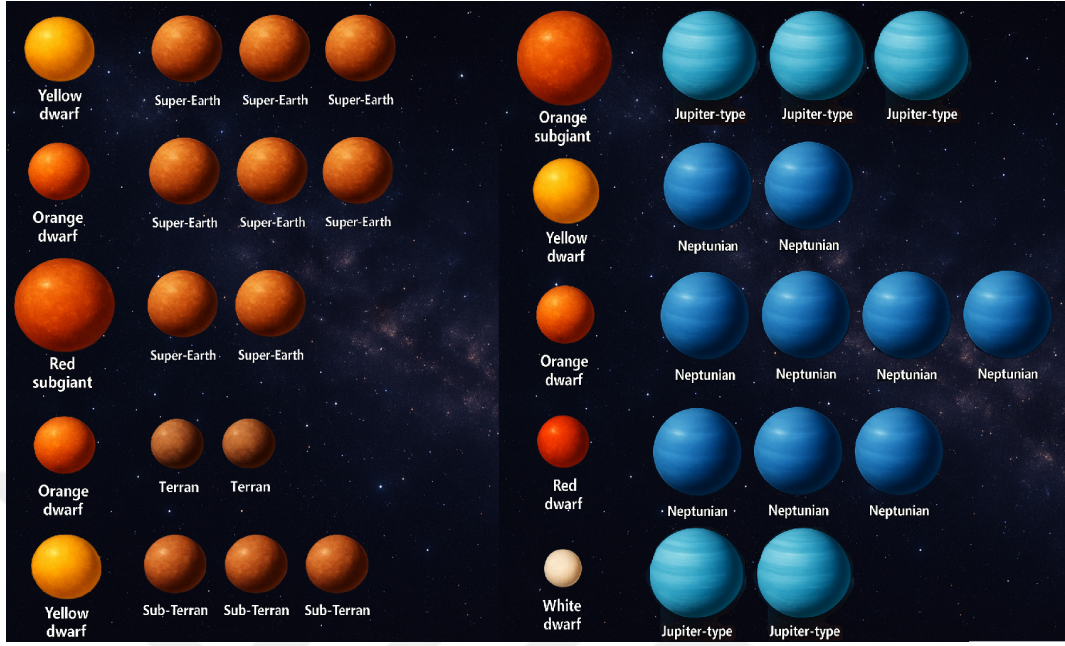
Yıldız Adı	Tayf Türü	[Fe/H] (dex)	Gezegen Türü
Kepler-1130	GV	-0.05	sT
Kepler-390	KV	-0.07	sT
TOI-1450 A	FV	-0.14	T
HR 858	KV	-0.11	S
K2-148	KV	-0.07	S
Kepler-1086	MV	0.06	S
Kepler-296	MV	0.33	S
Kepler-755	KV	-0.02	S
LTT 3780	MV	0.06	S

0.68 ve 0.73 kat Güneş'imizden küçüktür. Bu tayf türleri için ışıma güçleri sırasıyla %90 ve %58 daha düşüktür

Şekil 4.12'de altı yıldızın etrafında tespit edilmiş S türü yani Süper Yer benzeri gezegenlerden oluşan sistemler dikkati çekmektedir. Bu sistemlerdeki gezegenlerin yarı-büyük eksen uzunlukları $0.02 \leq a(AB) \leq 0.5$ arasında değişmektedir. Bu gezegenler Venüs'ün 0.72 AB konumundan oldukça içeride kalan karasal gezegenlerdir. Kütleleri $2 < M(M_{yer}) < 9$ aralığındadır. Yer benzeri tek karasal gezegen sistemi TOI-1450 A yıldızında görülmektedir. Bu sistemde gezegenler yıldızından 0.025 ve 0.045 AB uzaklıkta görülmüştür. TOI 1450A yıldızı M3V tayf türünden soğuk bir yıldızdır. Bu tayf türünden yıldızların yaşanabilir bölgeleri $0.1 < a(AB) < 0.17$ aralığındadır; yani bu gezegenler yıldızlarına yakın sıcak gezegenler olabilirler. Ayrıca, her iki gezegenin dengelenme sıcaklıkları sırasıyla 722 ve 533 K'dir

Küçük karasal gezegenler olan sT tayf türünden tektip gezegen sistemleri bir G9V tayf türünden Kepler-1130 ve diğeri K1V tayf türünden Kepler-390 yıldızında gözlemlenmiştir. Yıldızların metal bollukları birbirine yakın ve rölatif olarak fakirdir. Bu iki yıldızın yaş bilgisi literatürde bulunmaktadır. Buna göre Kepler-1130 yıldızı 1.58 Gyıl ve Kepler-390 yıldızı 3.24 Gyıl yaşındadır. Yaşları arasında iki kat fark olan bu iki yıldızın benzerlik gösteren özellikleri dikkate alındığında her ikisinde de küçük Yer-benzeri gezegenlerin keşfedilmiş olması ve yaşlı sistemde gezegenlerin daha uzak bir konuma yerleşmiş olması arasında bir ilişki bulunabilir.

Tek tip sistemlerin metal bolluğu diğer sistemlere göre daha fazladır ve yıldızları daha



Şekil 4.13: Tektip Gezegen Mimarisine sahip sistemlerdeki gezegen dağılımları

gençtir. Gezegenlerin uzaklıkları karşılaştırıldığında ise azalan sistemler ve karma sistemlere göre yıldızlarına daha uzakta konumlandıkları görülmektedir. Şekil 4.13'te tek tip sistem gezegen dağılımları görülebilir.

4.5. ÜÇ YILDIZLI ÖTEGEZEĞEN SİSTEMLERİNİN MİMARİSİ

Üçlü bir yıldız sistemindeki ötegezegenin sınıfını Bölüm 3.3'te verilen Tablo 3.1'i kullanarak belirledikten sonra Bölüm 3.4'teki sistematik ile gezegen sistemlerinin mimari yapıları belirlenmiştir. Buna göre tüm örnekteki üçlü yıldız sistemleri değerlendirildiğinde karşımıza ikisi baskın üç mimari türü çıkmıştır: artan, azalan ve tektip gezegene mimarileri. Çift yıldız sistemlerinden farklı olarak üçlü yıldız sistemlerinde gözlenen gezegen sayısı dolayısıyla bu gezegenlerin bağlı olduğu yıldızların sayısı azdır. Gezegen sistemlerini gruplandırdığımızda Artan mimarideki yıldız sayısı üç, azalan mimarideki yıldız sayısı iki ve tektip mimarideki yıldız sayısı altıdır. Karma mimariye sahip bir sistem seçtiğimiz özellikteki veriler arasında bulunmamaktadır.

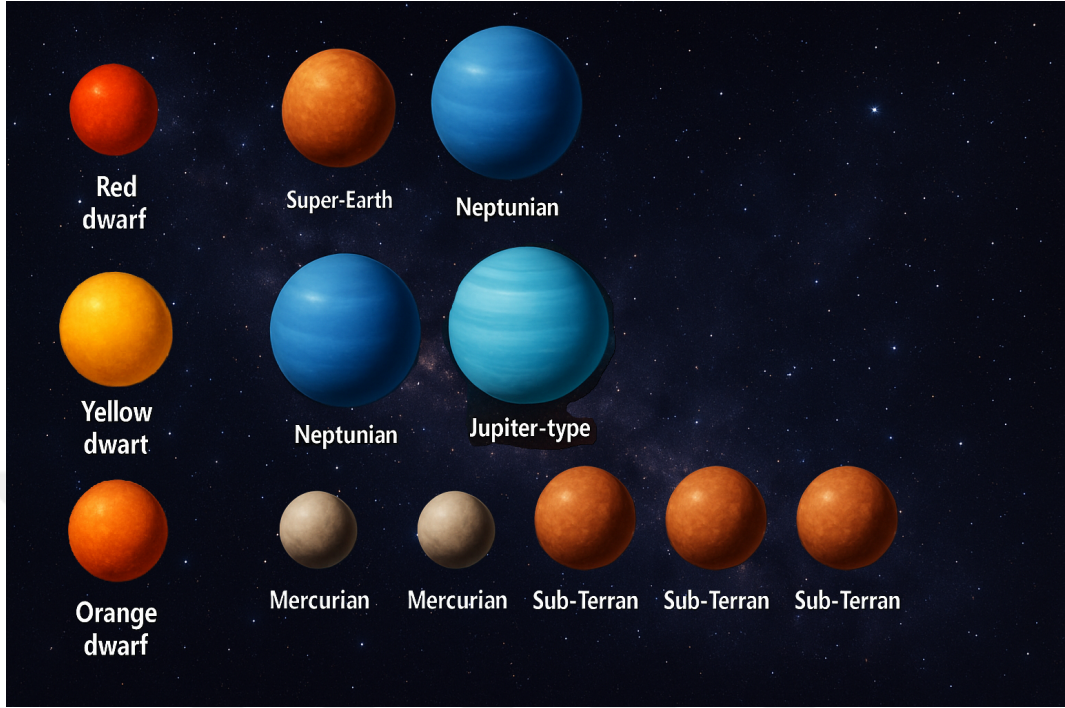
4.5.1. Artan Gezegen Mimarisi

Artan mimariye sahip üç yıldız etrafında gözlenen dokuz gezegen tespit edilmiştir. Şekil 4.15'te üçlü yıldız sistemlerinde artan mimarideki gezegen sistemleri görülebilir. KV tayf türünden bir anakol yıldızı olan Kepler-444 kendisine 52.2 AB uzakta olan MV tayf türündeki diğer iki yıldızla ortak çekim alanını paylaşmaktadır. Kepler-444 B ve Kepler-444 C hakkında literatür veri tabanlarında çok az veri ve bilgi bulunmaktadır. Kepler-444'te ikisi Merkür benzeri m türü ve üçü Yer'den küçük sT türü olmak üzere beş gezegene sahiptir. Gezegenler hem yıldızlarına hem de birbirlerine oldukça yakındırlar. En içteki gezegen $a = 0.042$ AB ve en dıştaki gezegen $a = 0.081$ AB mesafede konuşlanmıştır. Gezegenlerin dengelenme sıcaklıkları bilinmemektedir. Kepler-444 11.23 Gyıl yaşındadır ve -0.55 dex metal bolluğuna sahiptir. Diğer iki gezegenli yıldızdan biri GJ 229'dur. GJ 229, M tayf türünden bir anakol yıldızı olup 28.93 AB uzaklıktaki T7 ve T8 tayf türlerindeki iki kahverengi cüce ile ortak kütle merkezini paylaşır. Bu sistemde biri S ($a = 0.2$ AB) ve diğeri N ($a = 1.09$ AB) türünden iki farklı kimyada yani bir karasal diğeri bir gaz devi gezegen vardır. GJ 229 0.4 Gyıl yaşındadır ve -0.02 dex metal bolluğuna sahiptir. Yapısında N ve J türü gaz devleri içeren K2-290 yıldızı G tayf türünden bir anakol yıldızıdır. K2-290B, K2-290'a yakın olan bileşendir ($d_{BA} = 113$ AB) ve tam olarak çözümlenememiştir. Tayf türü KV olan K2-290 C diğer K2-290'a ($d_{CA} = 2467$ AB) uzaklıkta ve ortak kütle merkezinde yer almaktadır. K2-290 yıldızı -0.06 dex metal bolluğuna sahiptir ve 4 Gyıl yaşındadır.

Artan mimarili üç yıldız kimya ve yaş bakımından kıyaslandığında karasal beş gezegene sahip Kepler-444 sistemi 11.23 Gyıl yaşında oldukça yaşlı ve oturmuş bir sistem olarak karşımıza çıkıyor. K tayf türü yıldızların anakol ömürlerinin 70 Gyıl mertebesinde oldukları hesaplanmıştır. K tayf türü yıldızların G'lere kıyasla daha az morötesi ve diğer iyonize edici ışınım yayınlaması ve bu uzun anakol ömürleri bu yıldızlar civarındaki yer benzeri gezegen araştırmaları ve potansiyel yaşam araştırmaları için önemli birer kaynak kılmaktadır.

4.5.2. Azalan Gezegen Mimarisi

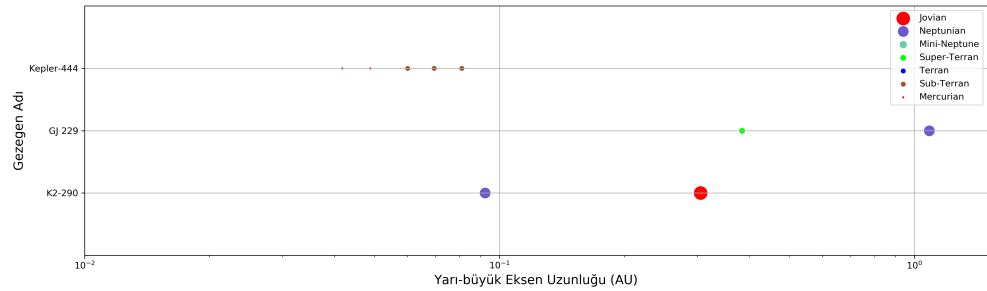
Üçlü yıldız sistemlerine üye olup Azalan mimariye sahip iki yıldız sistemi görülmüştür. Şekil 4.16'da üçlü yıldız sistemlerindeki azalan mimariye sahip gezegen sistemleri görülebilir. LT1445 A ve TOI-942 yıldızları etrafında toplam dört gezegen tespit edilmiştir. LTT 1445 A



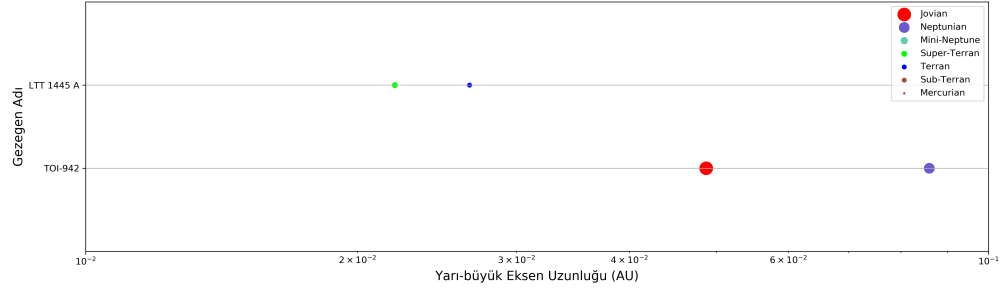
Şekil 4.14: Artan Gezegen Mimarisine sahip sistemlerdeki gezegen dağılımları

yıldız M3.5 spektral tipindedir ve -0.34 dex metal bolluğuna sahiptir. Yörüngesinde tespit edilen iki ötegezegen de karasaldır. Yıldızına oldukça yakın yörüngelere sahip bu gezegenler 0.022 AB ve 0.026612 AB yörüngelerinde hareket etmektedirler.

TOI-942 yıldızı ise K2.5 tayf türünden oldukça genç bir yıldızdır. Yaşı 0.53 Gyl olan bu yıldızın metal bolluğu -0.166 dex'dir. Etrafındaki gezegenlerden biri 0.048 AB yakınlıkta Jüpiter benzeri bir gezegendir. Diğer gezegen ise 0.085 AB yakınlıkta Neptün benzeri gezegendir. TOI-942 yıldızının sistem uzanımı daha fazladır. Azalan gezegen mimarisindeki

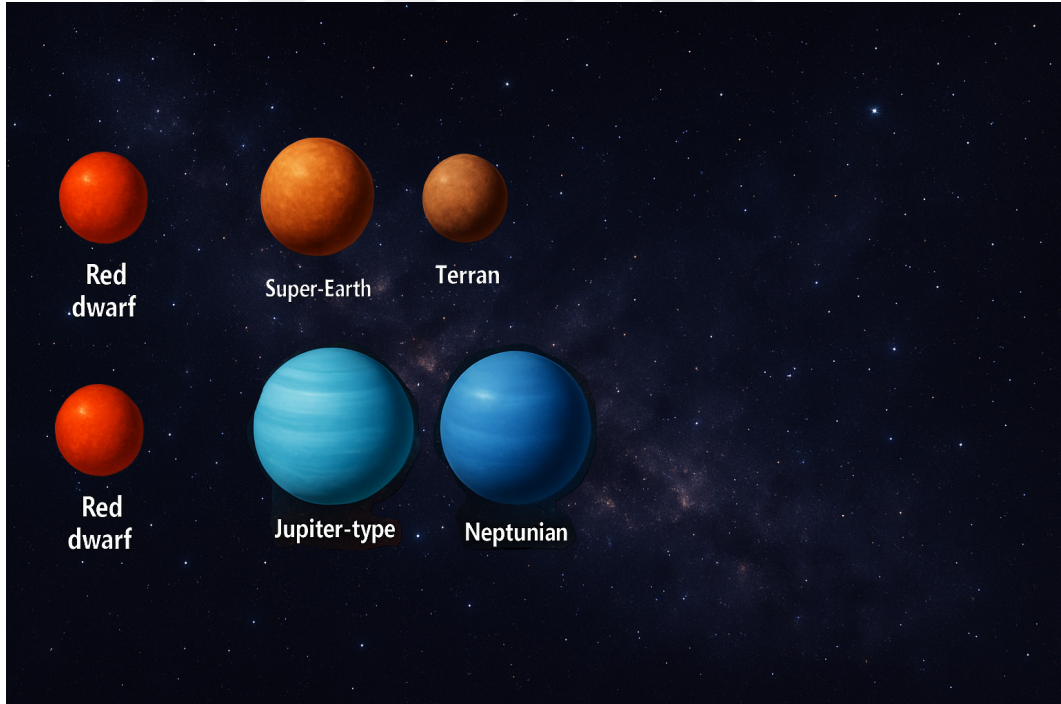


Şekil 4.15: Üçlü yıldız sistemlerinde Artan mimarideki gezegen sistemleri.



Şekil 4.16: Üçlü yıldız sistemlerinde Azalan mimarideki gezegen sistemleri.

bu iki yıldızın da yüzey çekim ivmeleri diğer sistem tiplerine göre daha fazladır ve gezegenleri yıldızlara daha yakındır. Metal bollukları da daha düşüktür. TOI-942 oldukça genç bir yıldız ancak LTT 1445 A'nın yaşı bilinmediği için ve örnek sayısı az olduğu için üçlü sistemlerde bunların sistem mimarisine etkisini bilemiyoruz.

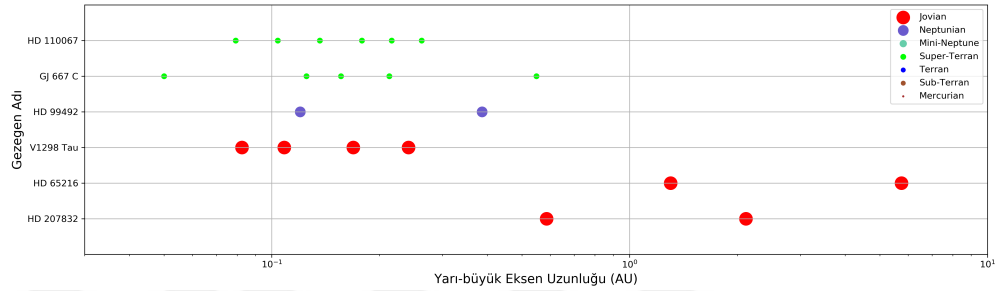


Şekil 4.17: Üçlü yıldız sistemlerinde Azalan mimarideki gezegen sistemleri.

4.5.3. Tektip Gezegen Mimarisi

Üçlü yıldız sistemlerinde S-Tipi yörüngede merkezi yıldızdan uzaklaştıkça kütle sınıfı değişmeyen tek tip gezegenli yıldız sistemleri en çok görülen sistemlerdir. Şekil 4.18'de

bu sistemler gösterilmiştir. Çoklu gezegen sistemine sahip 10 tane üçlü yıldız sistemi içinde beş sistemde tek tip mimari görülmektedir ve bu sistemlerden iki tanesi sadece kaya gezegenlerden oluşmakta, diğer üç sistem ise sadece gaz devlerinden oluşmaktadır. Yıldızları diğer sistemlere göre biraz daha genç olan bu sistemlerde gezegenler G, K ve M tayf türü yıldızların etrafında dolanmaktadır.

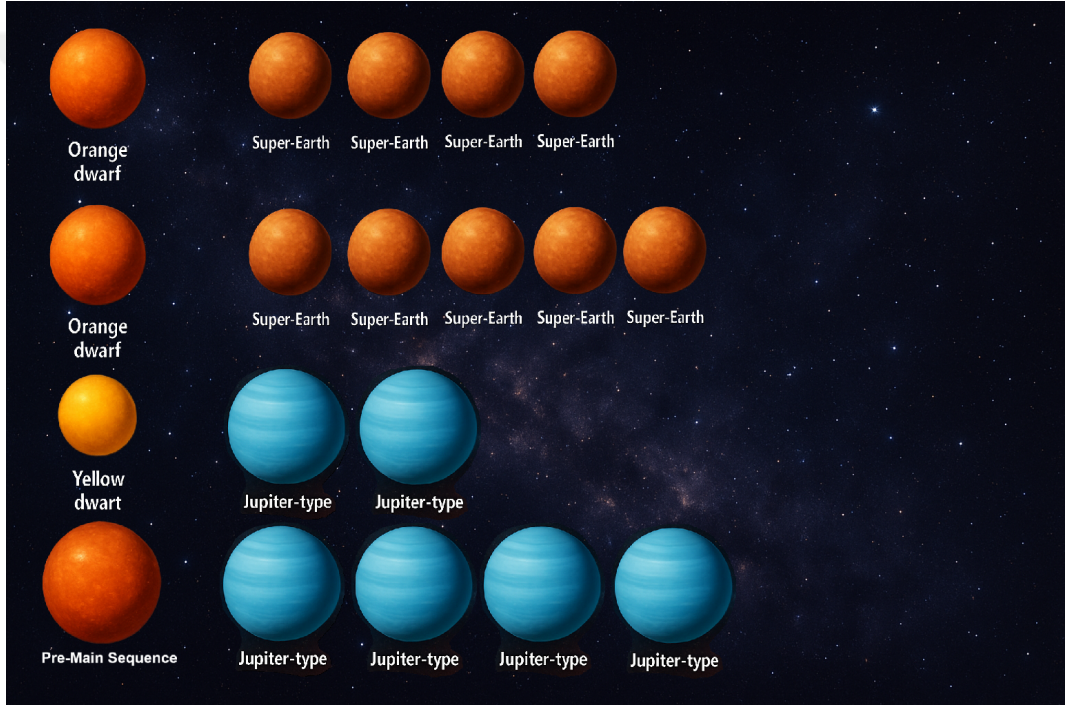


Şekil 4.18: Üçlü yıldız sistemlerinde Tektip mimarideki gezegen sistemleri.

HD 110067 yıldızının olduğu sistemdeki diğer yıldızların özellikleri bilinmemektedir. HD 110067 ise K0V tipi bir yıldızdır ve -0.2 dex metal bolluğu vardır. 8.1 Gyr yaşındaki bu yıldızın yörüngesinde altı adet Süper Yer-benzeri gezegen dolanmaktadır. Yörüngeleri yıldızın oldukça yakın olduğu için sistem uzanımı (0.26 AB) azdır. 5266 K sıcaklığında, 0.8 Güneş kütlesine sahip K sınıfı bu yıldızın 0.21 AB ve 0.26 AB uzaklıktaki dış iki gezegeni yıldızın yaşanabilir bölgesine oldukça yakındır. Bu gezegenlerin atmosferlerinin spektroskopik yöntemlerle incelenmesi önemlidir. GJ 667 C yıldızı M tipi genç (2 Gyr) bir yıldızdır ve 0.33 Güneş kütlesine sahiptir. Etrafında beş adet Süper Yer-benzeri gezegen bulunmaktadır. En içteki gezegeni 0.05 AB uzaklıkta en dış gezegeni ise 0.55 AB uzaklıktadır. HD 110067 sistemine göre sistem uzanımı daha fazladır ancak bütün gezegenleri de Merkür'ün Güneş'e olduğundan daha yakındadır. Bu yıldızın metal bolluğu 0.59 dex ile diğer sistemlere göre fazladır. BU üçlü yıldız sisteminde GJ 667 A ve GJ 667 B yıldızları birbirlerine 12.6 AB gibi yakın bir mesafede bulunurken gezegenlerin tespit edildiği GJ 667 C yıldızı diğer iki yıldızdan 230 AB uzaklıkta bulunmaktadır. 3350 K sıcaklıkta olan GJ 667 C'den gezegenlere düşen morötesi ışın miktarı azdır. HD 207832 ve HD 65216 yıldızları G tipidir ve Jüpiter benzeri ikişer gezegen yörüngelerinde dolanmaktadır. HD 207832 1.36 Gyr yaşındadır ve sistem uzanımı 2.11 AB'dir. HD 65216 ise 4 Gyr yaşındadır ve dıştaki gezegeni 5.75 AB'de bulunur, sistem uzanımı fazla olan sistemlerden biridir. Bu iki sistem içinde HD 65216 yıldızının bir gezegeni 1.3 AB uzaklığı

ile yıldızın yaşanabilir bölgesinin içinde kalmaktadır.

V1298 Tau yıldızının olduğu üçlü sisteminde iki tane G tipi yıldız olmasına rağmen ötegezegenler V1298 Tau değişen yıldızının etrafında bulunmuştur. V1298 Tau yıldızı 0.02 Gyr yaşında bir ilkel yıldızdır ve geçiş sürecindedir. Kızılötesi artık emisyonu SED’da gözlemlenmemiştir. Etrafındaki gezegenler ise Jüpiter benzer 4 adet gaz devidir. 0.08 AB ile 0.24 AB arasında bulunan bu gezegenlerin sistem uzanımı diğer sistemlere göre oldukça azdır. Henüz oluşum aşamasında olan bu sistemde bu gaz devlerinin yörünge göçü yapmaları muhtemeldir.



Şekil 4.19: Tektip Gezenen Mimarisine sahip sistemlerdeki gezegen dağılımları

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu yüksek lisans tez çalışmasında çift ve üçlü yıldız sistemlerinde gözlemlenen iki ve daha fazla gezegen içeren sistemlerin mimarileri belirlenerek gezegen dizillimlerinin gezegen oluşum süreçleri ve çift/üçlü yıldız sisteminin özellikleri bakımından nasıl etkilendikleri incelenmiştir. Çalışmada özellikle örneklem bakımından çok daha sayıda gezegen içeren çift yıldız sistemleri merkeze alınmıştır.

5.1. ÇİFT YILDIZLI ÖTEGEZEĞEN SİSTEMLERİNİN MİMARİSİ

Çift yıldızlı ötegezegenlerin tıpkı tek yıldızlarda olduğu gibi dört mimari tipini gösterdiklerini tespit ettik. Her ne kadar dört mimari tip görülse de baskın olan mimari Tektip mimaridir. Çift sistemlerde ayrıca Artan ve Karma mimari de belirgin bir varlık göstermektedir. Yıldızların yaş ve metal bolluklarının sistem mimarisine etkileri de ayrıca değerlendirilmiştir. Tektip mimarideki sistemlerin yıldızları daha geniş bir yaş ve ışıma gücü sınıfı aralığında yer almaktadır. Yıldız yaşları anakolda 0.6 ile 9.7 Gyl aralığında görülmekte metal bollukları ise -0.2 ile 0.93 dex aralığında görülmüştür. Bu örnekler içerisinde özellikle en yaşlı sistemin (HD133131 A) metal bolluğu da çok zengindir ($[Fe/H]=0.93$ dex). Metalce en fakir örnek ise 3 Gyl yaşındaki Kepler-83 yıldızdır. Karma sistemlerin en önemli özellikleri rölatif olarak yaşlı sistemlerden oluşmasıdır. Bir yıldız sistemindeki gezegenler tiplerinin dizilişlerindeki değişimin de sistemdeki taş ve gaz yapılı gezegenlerin gösterdiği dağılıma dair önemli ipuçları sunmuştur.

Gezegenlerin türlerine göre dağılımlarına bakıldığında tektip sistemler J gezegenleri, artan mimaride S gezegenleri baskın, azalan mimaride N gezegenleri ve karma mimaride de S gezegenleri baskın olarak görülmüştür. Bununla beraber sistemleri taş yapılı ve gaz yapılı gezegen baskınlığı bakımından analiz edecek olursak karşımıza çıkan tablo şu şekilde değişmektedir.

Küçük karasal gezegenler olan sT tayf türünden tektip gezegen sistemleri bir G9V tayf türünden Kepler-1130 ve diğeri K1V tayf türünden Kepler-390 yıldızında gözlemlenmiştir.

Yıldızların metal bollukları birbirine yakın ve rölatif olarak fakirdir. Bu iki yıldızın yaş bilgisi literatürde bulunmaktadır. Buna göre Kepler-1130 yıldızı 1.58 Gyıl ve Kepler-390 yıldızı 3.24 Gyıl yaşındadır. Yaşları arasında iki kat fark olan bu iki yıldızın benzerlik gösteren özellikleri dikkate alındığında her ikisinde de küçük Yer-benzeri gezegenlerin keşfedilmiş olması ve yaşlı sistemde gezegenlerin daha uzak bir konuma yerleşmiş olması arasında bir ilişki bulunabilir. Erken tip yıldızlarda sadece kaya tipinden oluşan gezegen sistemi görülememiştir, bu gözlemsel yanlılıktan kaynaklanmaktadır. Çoğunlukla gaz gezegenlerinin gözlemlenmiş olması da yine gözlemsel yanlılıktan kaynaklanmaktadır.

Artan mimarilerde M ve K tayf türü yıldızların kütleleri arttıkça ilk gezegenlerinin YBU'su da büyümektedir. Ancak G ve F tayf türü yıldızların kütleleri ile gezegenlerin konumununun ilişkisi tutarlı değildir. Gezegen sisteminin oluşum sürecindeki yaşanan yörüngesel arası göçlerin ise karma mimarideki sistemlerde yaşandığı düşünülmektedir. Tek tip gezegen mimarisinin en çok görülen ikinci sistem tipi olması ise gözlemsel yanlılıktan kaynaklanmaktadır.

5.2. ÜÇ YILDIZLI ÖTEGEZEĞEN SİSTEMLERİNİN MİMARİSİ

Üçlü yıldız sistemlerinin sayısı çift sistemlere kıyasla oldukça az bulunmuştur. Bu az sayıdaki yıldızlar arasında en baskın olan mimari Tektip mimarisi olmuştur. Az sayıda Artan ve Azalan mimarisine uyan nesne varken Karma mimarisde nesne üçlü yıldız sistemlerinde tespit edilememiştir. Merkür benzeri gezegenler üçlü sistemlerde görülmektedir ancak mini-neptün'ler henüz üçlü sistemlerde tespit edilememiştir.

Üçlü sistemlerde baskın olan tektip mimariye uyan yıldızlar kendi içlerinde değerlendirildiğinde bu sistemlerdeki farklı yaş, farklı tayf türü ve farklı evrim aşamasındaki yıldızlara bakıldığında önemli korelasyonlar tespit edilmiştir. Üçlü sistemlerde yıldızların metal bollukları çift sistemlere göre biraz daha az bulunmuştur. Çift sistemler ve üçlü sistemler arasında yıldız yaşlarında ise ciddi bir farklılık yoktur. Üçlü sistemlerde yıldızların yüzey çekim ivmelerinin daha fazla olduğu görülmüştür. Yıldıza en uzak olan gezegenin yörüngesi ikili sistemlerdeki yörüngelere göre yıldıza daha yakındır yani üçlü sistemlerde sistem uzanımı daha azdır. Üçlü yıldız sistemlerinde gezegenler S-Tipi yörüngede bir yıldızın etrafında dolanmaktadır ve diğer yıldızların kütleçekim etkileri gezegenlerin yıldızdan daha uzakta stabil bir yörüngede kalmasını engelliyor olabilir.

Sonuç olarak, bu yüksek lisans tez çalışmasında çift yıldız ve üçlü yıldız sistemlerinin mimarileri analiz edilmiş ve dört mimari sınıfı bulunmuştur. Çift sistemlerde en çok baskın olan sınıf tek tip mimaridir, üçlü yıldız sistemlerinde de en çok baskın olan sınıf tek tip mimaridir. Üçlü yıldız sistemlerinde karma mimari tipi gözlemlenmemiştir. Fakat bu mimari tipleri gözlemsel yanlılık nedeniyle daha detaylı analizlere ihtiyaç duymaktadır.



KAYNAKLAR

- Adibekyan, V., 2019, Heavy Metal Rules. I. Exoplanet Incidence and Metallicity, *Geosciences*, 9, 105.
- Agol, E., Steffen, J., Sari, R., Clarkson, W., 2005, On detecting terrestrial planets with timing of giant planet transits, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 359, 567–579.
- Allen, C.W., 1947, Interpretation of Electron Densities From Corona Brightness, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 107, 426.
- ALMA Partnership, Brogan, C.L., Pérez, L.M., Hunter, T.R., Dent, W.R.F., Hales, A.S., et al., 2014, The 2014 ALMA Long Baseline Campaign: First Results from High Angular Resolution Observations toward the HL Tau Region, *The Astrophysical Journal* 808.
- Arech, A.V., Mesadi, T., Koshel, R.J., 2007, *Field Guide to Illumination*, SPIE field guides, Volume 11, SPIE
- Armitage, P. J., 2007, Massive Planet Migration: Theoretical Predictions and Comparison with Observations, *The Astrophysical Journal*, 665, 1381–1390.
- Armitage, P. J., 2007, Lecture notes on the formation and early evolution of planetary systems, *arXiv e-prints* doi:10.48550/arXiv.astro-ph/0701485
- Berdyugina, S. V., Berdyugin A. V., Fluri, D. M., Piirola, V., 2008, First Detection of Polarized Scattered Light from an Exoplanetary Atmosphere, *The Astrophysical Journal*, 673, L83.
- Bjerkeli, P., van der Wiel, M. H. D., Harsono, D., Ramsey, J. P., Jørgensen, J. K., 2016, Resolved images of a protostellar outflow driven by an extended disk wind, *Nature*, 540, 406–409.
- Bjerkeli, P., 2018, XXXth General Assembly of the Intern, Astronomical Union, Vienna, Austria, August 20-31.
- Bovy, J., Tremaine, S., 2012a, On the Local Dark Matter Density, *The Astrophysical Journal*, 756, article id. 89, 6.
- Bovy, J., Allende Prieto, C., Beers, T. C., ve diğ., 2012b, The Milky Way's Circular-Velocity Curve between 4 and 14 kpc from APOGEE Data, *The Astrophysical Journal*, 759, article id. 131, 20.
- Bovy, J., Rix, H., 2013, A Direct Dynamical Measurement of the Milky Way's Disk Surface Density Profile, Disk Scale Length, and Dark Matter Profile at $4 \text{ kpc} < R < 9 \text{ kpc}$, *The Astrophysical Journal*, 779, article id. 115, 30.

- Bovy, J., 2015, Galpy: A Python Library for Galactic Dynamics, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 216, article id. 29, 27.
- Burrows, C. J., Krist, J. E., Stapelfeldt, K. R., WFPC2 Investigation Definition Team, 1995, HST Observations of the Beta Pictoris Circumstellar Disk, *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, 27, 1329
- Butler, R. P. Marcy, G.W., Fischer, D.A., Brown, T.M., Contos, A.R., Korzennik, S.G., ve diğ., 1999, Evidence for Multiple Companions to υ Andromedae, *The Astrophysical Journal*, 526, 916–927.
- Charbonneau, D., Brown, T. M., Latham, D. W., Mayor, M., 2000., Detection of Planetary Transits Across a Sun-like Star, *The Astrophysical Journal*, 529, L45–L48.
- Charbonneau, D., Brown, T. M., Noyes, R. W., Gilliland, R. L., 2002, Detection of an Extrasolar Planet Atmosphere, *The Astrophysical Journal*, 568, 377–384
- Charbonneau, D., ve diğ., 2007, *Protostars and Planets V*, University of Arizona Press, ISBN: 9780816526543
- Clemens, D. P., 1985, Massachusetts-Stony Brook Galactic Plane CO Survey-The Galactic Disk Rotation Curve, *The Astrophysical Journal*, 295, 422-428.
- Contopoulos, G., 2002, *Order and Chaos in Dynamical Astronomy*, Springer, Berlin, ISBN: 978-3-540-43360-6.
- Coşkunoğlu, B., Ak, S., Bilir, S., ve diğ., 2011, Local Stellar Kinematics from RAVE Data - I. Local Standard of Rest, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 759, 1237-1245.
- Demidova, T. V., Shevchenko, I. I., 2015, Spiral Patterns in Planetesimal Circumbinary Disks, *The Astrophysical Journal*, 805, 38.
- Dorofeeva, V.A., Makalkin, A.B., 2004, Evolyutsiya Rannei Solnechnoi Sistemy. Kosmokhimiicheskie i Fizicheskie Aspekty (Evolution of the Early Solar System. Cosmochemical and Physical Aspects) (Moscow: URSS, 2004)
- Doyle, L. R. Carter, J.A., Fabrycky, D.C., Slawson, R.W., Howell, S.B., Winn, J.N., ve diğ., 2011, Kepler-16: A Transiting Circumbinary Planet, *Science*, 333, 1602
- Duquennoy, A., Mayor, M., 1991, Multiplicity among Solar Type Stars in the Solar Neighbourhood - Part Two - Distribution of the Orbital Elements in an Unbiased Sample, *Astronomy and Astrophysics*, 248, 485.
- Esmer, E. M., Baştürk, Ö., Selam, S. O., Aliş, S., 2022, Detection of two additional circumbinary planets around Kepler-451, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 511, 5207-5216.
- Estrada, P. R., Cuzzi, J. N., Morgan, D. A., 2016, Global Modeling of Nebulae with Particle Growth, Drift, and Evaporation Fronts. I. Methodology and Typical Results, *The Astrophysical Journal*, 818, 200.

- Ferdinand, H., Driffield., V.C., 1890, *The Journal of the Society of Chemical Industry*, No. 5, Vol IX.
- Fleming, D. P., Barnes, R., Graham, D. E., Luger, R., Quinn, T. R., 2018, On the Lack of Circumbinary Planets Orbiting Isolated Binary Stars, *The Astrophysical Journal*, 858, 86.
- Gaia İşbirliği, Prusti, T., de Bruijne, J. H. J., Brown, A. G. A., ve diğ., 2016, The Gaia Mission, *Astronomy & Astrophysics*, 595, id.A1, 36.
- Gaia İşbirliği, Smart, R. L., Sarro, L. M., Rybizki, J., ve diğ., 2021, VizieR Online Data Catalog: Gaia EDR3 (Gaia Collaboration, 2020), VizieR On-line Data Catalog: I/350.
- Gaia İşbirliği, 2023, Gaia Data Release 3: Summary of the Content and Survey Properties, *Astronomy & Astrophysics*, 674, Article 1.
- Grinin, V. P., 1988, On the Blue Emission Visible during Deep Minima of Young Irregular Variables, *Soviet Astronomy Letters*, 14, 27.
- Grinin, V. P., Kiselev, N. N., Minikulov, N. K., Chernova, G. P., Voshchinnikov, N. V., 1991, The investigations of 'zodiacal light' of isolated AE-Herbig stars with non-periodic Algol-type minima, *Astrophysics and Space Science*, 186, 283–298.
- Heap, S.R., Lindler, D.J., Lanz, T.M., Cornett, R.H., Hubeny, I., Maran, S.P., Woodgate, B., 2000, Space Telescope Imaging Spectrograph Coronagraphic Observations of β Pictoris, *The Astrophysical Journal*, 539, 435–444.
- Hinkel, N. R., Timmes, F. X., Young, P. A., Pagano, M. D., Turnbull, M. C., 2014, Stellar Abundances in the Solar Neighborhood: The Hypatia Catalog, *The Astronomical Journal*, 148, 54.
- Holman, M. J., Murray, N. W., 2005, The Use of Transit Timing to Detect Terrestrial-Mass Extrasolar Planets, *Science*, 307, 1288–1291.
- Johnson, D. R. H., Soderblom, D. R., 1987, Calculating Galactic Space Velocities and Their Uncertainties, with an Application to the Ursa Major Group, *The Astronomical Journal*, 93, 864-867.
- Jorgensen, J.K., 2018, XXXth General Assembly of the Intern, Astronomical Union, Vienna, Austria, August 20-31,
- Lissauer J. J., Ragozzine D., Fabrycky D. C., Steffen J. H., Ford E. B., Jenkins J. M., Shporer A., ve diğ., 2011, Architecture and Dynamics of Kepler's Candidate Multiple Transiting Planet Systems, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 197.
- Lissauer, J. J. Fabrycky, D.C., Ford, E.B., Borucki, W.J., Fressin, F., Marcy, G.W., ve diğ., 2011, A closely packed system of low-mass, low-density planets transiting Kepler-11, *Nature*, 470, 53–58.
- Mardling, R.A., 2008, *Resonance, Chaos and Stability: The Three-Body Problem in Astrophysics*, The Cambridge N-Body Lectures, In: Aarseth, S.J., Tout, C.A., Mardling, R.A. (ed.), Chapter 3, Springer, Dordrecht, ISBN: 978-1-4020-8431-7.

- Martí, J. G., Giuppone, C. A., Beaugé, C. 2013., Dynamical analysis of the Gliese-876 Laplace resonance, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 433, 928–934.
- Marov, M. Y., 2005, CONFERENCES AND SYMPOSIA: Small bodies in the solar system and some problems in cosmogony, *Physics Uspekhi*, 48, 638–647.
- Marov, M. Y., Rusol, A. V., 2015, Gas-Dust Protoplanetary Disc: Modeling Collisional Interaction of Primordial Bodies, *Journal of Modern Physics*, 6, 181–193.
- Mathieu, R.D., ve diğ., 2000, *Protostars and Planets IV*, University of Arizona Press, p. 703
- Mayor, M., Queloz, D., 1995, A Jupiter-mass companion to a solar-type star, *Nature*, 378, 355–359.
- McClure-Griffiths, N. M., Dickey, J. M., 2007, Milky Way Kinematics. I. Measurements at the Subcentral Point of the Fourth Quadrant, *The Astrophysical Journal*, 671, 427–438.
- Melnikov, A. V., 2016, On the chaotic orbital dynamics of the planet in the system 16 Cyg, *Astronomy Letters*, 42, 115–125.
- Meschiari, S., 2012, Circumbinary Planet Formation in the Kepler-16 System. I. N-body Simulations, *The Astrophysical Journal*, 752.
- Mendoza V., E. E., 1966, Infrared Photometry of T Tauri Stars and Related Objects, *The Astrophysical Journal*, 143, 1010.
- Michtchenko, T. A., Malhotra, R., 2004, Secular dynamics of the three-body problem: application to the ν Andromedae planetary system, *Icarus*, 168, 237–248.
- Mihalas, D., Binney, J., 1981, *Galactic Astronomy: Structure and Kinematics /2nd Edition/*, San Francisco, CA, W. H. Freeman and Co., 608.
- Miura, H., Yamamoto, T., Nomura, H., Nakamoto, T., Tanaka, K. K., Tanaka, H., Nagasawa, M., 2017, Comprehensive Study of Thermal Desorption of Grain-surface Species by Accretion Shocks around Protostars, *The Astrophysical Journal*, 839.
- Miyamoto, M., Nagai, R., 1975, Three-dimensional Models for the Distribution of Mass in Galaxies, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 27, 533–543.
- Moriwaki, K., Nakagawa, Y., 2004, A Planetesimal Accretion Zone in a Circumbinary Disk, *The Astrophysical Journal*, 609, 1065–1070.
- Navarro, Julio F., Frenk, Carlos S., White, Simon D. M., 1996, The Structure of Cold Dark Matter Halos, *The Astrophysical Journal*, 462, 563–575.
- Nesvorný, D., Kipping, D. M., Buchhave, L. A., Bakos, G. Á., Hartman, J., Schmitt, A. R., 2012, The Detection and Characterization of a Nontransiting Planet by Transit Timing Variations, *Science*, 336, 1133.
- Orosz, J. A. Welsh, W.F., Carter, J.A., Fabrycky, D.C., Cochran, W.D., Endl, M., ve diğ., 2012, Kepler-47: A Transiting Circumbinary Multiplanet System, *Science*, 337, 1511.

- Orosz, J. A., Welsh, W.F., Carter, J.A., Brugamyer, E., Buchhave, L.A., Cochran, W.D., ve diğ., 2012, The Neptune-sized Circumbinary Planet Kepler-38b, *The Astrophysical Journal*, 758. doi:10.1088/0004-637X/758/2/87
- Önal Taş, Ö., Başara, S., İyisan, S., Köse, A., Ulutaş, A., 2025, Ötegezegen Sistemlerinin Sınıflandırılması, *Ulusal Astronomi Kongresi 2024*, 2-7 Eylül 2024, İstanbul Üniversitesi (Bildiri Kitabı - Yayın Aşamasında)
- Paardekooper, S.-J., Leinhardt, Z. M., Thébault, P., Baruteau, C., 2012, How Not to Build Tatooine: The Difficulty of In Situ Formation of Circumbinary Planets Kepler 16b, Kepler 34b, and Kepler 35b, *The Astrophysical Journal*, 754.
- Perryman, M., 2011, *The Exoplanet Handbook*, Cambridge University Press, ISBN: 9780511994852
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Vincent, M., 2011, Scikit-learn: Machine Learning in Python, *Journal of Machine Learning Research*, 12.
- Pierens, A., Nelson, R. P., 2007, On the migration of protoplanets embedded in circumbinary disks, *Astronomy & Astrophysics*, 472, 993–1001.
- Popova, E. A., Shevchenko, I. I., 2012, Planetary dynamics in the system α Centauri: The stability diagrams, *Astronomy Letters*, 38, 581–588.
- Popova, E. A., Shevchenko, I. I., 2013, Kepler-16b: Safe in a Resonance Cell, *The Astrophysical Journal*, 769, 152.
- Popova, E. A., Shevchenko, I. I., 2016, On the stability of circumbinary planetary systems, *Astronomy Letters*, 42, 474–481.
- Rab, Ch., 2018, XXXth General Assembly of the International Astronomical Union, Proceedings of the XXXth General Assembly of the International Astronomical Union, August 20-31, 2018, Vienna, Austria.
- Raymond, S. N., Barnes, R., Kaib, N. A., 2006, Predicting Planets in Known Extrasolar Planetary Systems. III. Forming Terrestrial Planets, *The Astrophysical Journal*, 644, 1223–1231.
- Raymond, S. N., Quinn, T., Lunine, J. I., 2006, High-resolution simulations of the final assembly of Earth-like planets I. Terrestrial accretion and dynamics, *Icarus*, 183, 265–282.
- Raymond, S. N., Scalo, J., Meadows, V. S., 2007, A Decreased Probability of Habitable Planet Formation around Low-Mass Stars, *The Astrophysical Journal*, 669, 606–614.
- Raymond, S. N., Barnes, R., Gorelick, N., 2008, A Dynamical Perspective on Additional Planets in 55 Cancri, *The Astrophysical Journal*, 689, 478–491.
- Rein, H., 2012, Period ratios in multiplanetary systems discovered by Kepler are consistent with planet migration, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 427, L21–L24.

- Sakai, N., Oya, Y., Higuchi, A. E., Aikawa, Y., Hanawa, T., Ceccarelli, C., Lefloch, B., ve diğ., 2017, Vertical structure of the transition zone from infalling rotating envelope to disc in the Class 0 protostar, IRAS 04368+2557, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 467, L76–L80.
- Shevchenko, I. I., 2015, Chaotic Zones around Gravitating Binaries, *The Astrophysical Journal*, 799.
- Shevchenko, I. I., 2017, *The Lidov-Kozai Effect — Applications in Exoplanet Research and Dynamical Astronomy*, Springer, Berlin.
- Shevchenko, I. I., 2017, Habitability Properties of Circumbinary Planets, *The Astronomical Journal*, 153, 273.
- Shevchenko, I. I., 2018, Tidal Decay of Circumbinary Planetary Systems, *The Astronomical Journal* 156, 52.
- Snellen, I. A. G., Brown, A. G. A., 2018, The mass of the young planet Beta Pictoris b through the astrometric motion of its host star, *Nature Astronomy*, 2, 883–886.
- Tinetti, G., Vidal-Madjar, A., Liang M.-C., Beaulieu, J.-P., Yung, Y., Carey S., Barber, R. J ve diğ., 2007, Water vapour in the atmosphere of a transiting extrasolar planet, *Nature*, 448, 169–171
- Tripathi, A., 2024, Communicating Exoplanet Exploration Through NASA Eyes, *The 32nd International Astronomical Union (IAU) General Assembly (IAUGA 2024)*, 6–15 August 2024, Capetown, South Africa, poster id. 2188.
- Safronov, V.S., 1972, Evolution of the Protoplanetary Cloud and Formation of the Earth and the Planets (Jerusalem:Israel Program for Scientific Translations, 1972); Translated from Russian: Evolyutsiya Doplatnetnogo Oblaka i Obrazovanie Zemli i Planet (Moscow: Nauka, 1969)
- Satyaj, S., Hinse, T. C., Quarles, B., Noyola, J. P., 2014, Chaotic dynamics of the planet in HD 196885 AB, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 443, 1310–1318.
- Swain, M. R., Vasisht, G., Tinetti, G., 2008, The presence of methane in the atmosphere of an extrasolar planet, *Nature*, 452, 329–331
- Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., Yamamoto, T., 2009, Collisional Growth Conditions for Dust Aggregates, *The Astrophysical Journal*, 702, 1490–1501.
- Wall, M., 2015, Found! 5 Ancient Alien Planets Nearly As Old As the Universe, *Space.com*, 27 January 2015.
- Welsh, W. F. Orosz, J.A., Carter, J.A., Fabrycky, D.C., Ford, E.B., Lissauer, J.J., ve diğ., 2012, Transiting circumbinary planets Kepler-34 b and Kepler-35 b, *Nature*, 481, 475–479.
- Wolszczan, A., Frail, D. A., 1992, A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12, *Nature*, 355, 145–147.

Wolszczan, A., 1994, Confirmation of Earth-Mass Planets Orbiting the Millisecond Pulsar PSR B1257+12, *Science*, 264, 538–542.

Zhang, Z., et al., 2023, The McDonald Accelerating Stars Survey: Architecture of the Ancient Five-planet Host System Kepler-444, *The Astronomical Journal*, 165, 73.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Taylan Umutcan KASAR
Doğum Yeri	
Doğum Tarihi	
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
E-Posta Adresi	
Web Adresi	

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Fen Fakültesi
Bölümü	Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü
Mezuniyet Yılı	2021

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	2025