



T.C.

**ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

FİZİK ANABİLİM DALI

**ÖTEGEZEĞENLİ YILDIZLARIN KİNEMATİK
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GAMZE BENDEŞ

Tez Danışmanı

PROF. DR. FARUK SOYDUGAN

ÇANAKKALE – 2023



T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

**ÖTEGEZEĞENLİ YILDIZLARIN KİNEMATİK
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GAMZE BENDEŞ

Tez Danışmanı
PROF. DR. FARUK SOYDUGAN

Bu çalışma, TÜBİTAK kurumu tarafından desteklenmiştir.

Proje No: 122R053

ÇANAKKALE – 2023

ETİK BEYAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Gamze BENDEŞ

21/07/2023

TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleştirilmesinde, çalışmam boyunca benden bir an olsun yardımlarını esirgemeyen, değerli katkılarını her daim benimle paylaşan ve gelişmemde bana yardımcı olan saygı değer danışman hocam Prof. Dr. Faruk Soyduğan'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Beni bu günlere getiren, yaptığım işi her zaman anlamasalar da beni koşulsuz destekleyen, zorluklarımda yanımda olan, sevinçlerimi benimle paylaşan sevgili annem Gülsüm Bendeş ve babam Savaş Bendeş'e ve bu hayatta bana kardeş olmanın ne demek olduğunu hissettiren ve her zaman mutlaka yanımda olan kardeşlerim Ecem Bendeş ve Hasan Bendeş'e teşekkür ederim.

Hayatımda varlığıyla bana ilham olan, çalışma şekli ve özverisiyle bana kendi çalışmalarım için örnek olan, karşılaştığım tüm zorluklarda, sıkıntılı durumlarda yanımda olan ve beni destekleyen, en önemlisi de sevincimi, mutluluğumu ve başarıyı paylaşan Çağlar Çoban'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca yaptığım çalışmalarda bana her zaman yardımcı olan ve değerli bilgilerini benimle paylaşan, tez çalışmamdaki bazı noktalarda katkısı bulunan saygı değer hocam Prof. Dr. Selçuk Bilir'e teşekkür ederim.

Yüksek lisansa başladığımdan bu yana aldığım dersler ve derslerin dışında bana katkısı bulunan Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fizik Bölümü'nün değerli hocalarına çok teşekkür ederim.

Hayattaki duruşu, bir işi yapma şekli ve bakış açısıyla beni etkileyen, bana her zaman inandığını hissettiren sevgili Dr. H. Tuğça Şener hocama ve bununla birlikte gelişmemde çok büyük katkısı olan Bilim Adımları'nın değerli üyelerine çok teşekkür ederim.

Aynı çalışma ortamını paylaştığım ve kendi çalışma özveriyle bana örnek olan, bilgilerini her zaman benimle sakınmadan paylaşan sevgili Simge Özer'e teşekkür ederim.

Yüksek lisans sürecimin büyük çoğunluğuna şahit olan, beni genelde zor sorularıyla zorlayan ama destekleyici tarafını her zaman bolca gösteren Merve Savran'a teşekkür ederim.

Beni, yaşamımdaki tüm alanlarda koşulsuz destekleyen arkadaşlarım Bilgesu Musaoğlu ve Melike Doğan'a teşekkür ederim.

Yanımda olduğunu her zaman hissettiren, yaptığım veya yapamadığım her şeyde beni destekleyen arkadaşım Gizem Gündüz'e teşekkür ederim.

Hazırlanan bu yüksek lisans tezi TÜBİTAK tarafından 122R053 No'lu proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a ve tüm proje ekibine teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak fikirleriyle ve ilkeleriyle yolumuzu aydınlatan, bu ülkede kadın olarak varolabilmemizin yolunu kendi ileri görüşlülüğü ile sağlamış olan ve benim de bugün bilimsel çalışmalar yapabilmemin önünü açmış olan Mustafa Kemal ATATÜRK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Gamze BENDEŞ
Çanakkale, Temmuz 2023

ÖZET

ÖTEGEZEĞENLİ YILDIZLARIN KİNEMATİK İNCELENMESİ

Gamze BENDEŞ

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Faruk SOYDUGAN

21/07/2023, 86

Bu tez çalışmasında, onaylanmış gezegenlere sahip 1440 barınak yıldızın kinematik özellikleri, Galaktik popülasyon ayrımları belirlenmiş ve gezegen sınıflarına göre barınak yıldızların parametre dağılımları araştırılmıştır. Ayrıca barınak yıldızların hesaplanan kinematik yaşları ile literatürdeki eş-yaşları karşılaştırılmıştır. Yıldız-gezegen sistemlerinin açısal momentum dağılımları ve yaş ile değişimleri incelenerek yorumlanmıştır. Yapılan kinematik inceleme sonunda barınak yıldızların %92,2'sinin ince diskte, %3,5'inin kalın diskte ve yaklaşık %1 kadarının Hercules akışında olduğu tespit edilmiştir. İnce disk barınak yıldızlarının grup kinematik yaşları $2,88 \pm 0,43$ Gyıl, kalın disk barınak yıldızlarının ise $12,03 \pm 0,61$ Gyıl olarak belirlenmiştir. Gezegen yarıçapına göre yapılan sınıflamada, gezegen yarıçapı yaklaşık $9 R_{\oplus}$ olduğunda barınak yıldız metal bolluğunun en büyük değerine ulaştığı görülmüştür. Gezegen kütesine göre inceleme yapıldığında ise gezegen kütesi yaklaşık $90 M_{\oplus}$ civarında olduğunda yıldızın metal bolluğunun en büyük değerine ulaştığı belirlenmiştir. Barınak yıldızlarının toplam uzay hızının gezegen yarıçapı ve kütesiyle birlikte azaldığı tespit edilmiştir. Buna karşın özellikle Dünya, süper-Dünya ve Neptün boyutundaki barınak yıldızlarının uzay hız disperisyonları birbirine yakın değerlerde elde edildi ve dolayısıyla bu gruptaki yıldızların yaşları da birbirine yakın değerlerde bulundu (ilgili gruplar için sırasıyla $4,17 \pm 0,40$ Gyıl, $4,31 \pm 0,53$ Gyıl, $4,32 \pm 0,54$ Gyıl). Jüpiter boyutlu gezegenlerin barınak yıldızlarının grup kinematik yaşı $3,23 \pm 0,32$ Gyıl olarak elde edilirken çok büyük yarıçaplı gezegenlere sahip olanların yaşı ise $1,77 \pm 0,18$ Gyıl olarak hesaplandı. Hem yarıçap hem de kütle dikkate alınarak yapılan sınıflamada çok-büyük boyutlu/kütleli gezegenli yıldızların en genç yıldızlar oldukları belirlenmiştir. Oluşum ve evrim

araştırmalarında önemli parametrelerden olan yıldız-gezegen sistemlerinin toplam açısai momentumunun yaşla birlikte azaldığı ancak 4-4,5 Gyıl yaş değerlerinden sonra toplam açısai momentumun çok daha düşük hızla azaldığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yıldızlar: kinematik – Yıldızlar: Barınak yıldızlar - Gezegen sistemleri – Ötegezegenler



ABSTRACT

KINEMATIC INVESTIGATION OF EXOPLANET HOST STARS

Gamze BENDEŞ

Çanakkale Onsekiz Mart University

School of Graduate Studies

Master of Science Thesis in Physics

Advisor: Prof. Dr. Faruk SOYDUGAN

21/07/2023, 86

In this thesis, the kinematic properties and Galactic population separations of 1440 host stars with confirmed planets were determined and the parameter distributions of the host stars according to planet classes were investigated. In addition, the calculated kinematic ages of the host stars and the isochrone ages in the literature were compared. The angular momentum distributions of star-planet systems and their changes with age are analysed and interpreted. As a result of the kinematic analysis, it was determined that 92.2% of the host stars were in the thin disk, 3.5% in the thick disk and about 1% in the Hercules flow. The group kinematic ages of the thin disk host stars were determined as 2.88 ± 0.43 Gyıl, and the thick disk host stars as 12.03 ± 0.61 Gyıl. In the classification made by planetary radius, it was observed that the host star metal abundance reached its maximum value when the planetary radius was about $9 R_{\oplus}$. When the planetary mass is examined, it has been determined that the metal abundance of the star reaches its maximum value when the planetary mass is around $90 M_{\oplus}$. It has been found that the total space velocity of host stars decreases with planet radius and mass. On the other hand, the space velocity dispersions of especially Earth, super-Earth and Neptune-sized host stars were found to be close to each other and therefore the ages of the stars in this group were found to be close to each other (4.17 ± 0.40 Gyr, 4.31 ± 0.53 Gyr, 4.32 ± 0.54 Gyr for the respective groups, respectively). The group kinematic age of the host stars of Jupiter-sized planets was calculated as 3.23 ± 0.32 Gyıl, while the age of the stars, which have the planets with very large radii ones was calculated as 1.77 ± 0.18 Gyıl. In the classification made by considering both radius and mass, it is determined that the stars of very-large size/massive planets are the youngest stars. It has

been determined that the total angular momentum of star-planet systems, which is one of the important parameters in formation and evolution studies, decreases with age, but after 4-4.5 Gyr age values, the total angular momentum decreases at a much lower rate.

Keywords: Stars: kinematic – Stars: Host stars - Planetary systems - Exoplanets



İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ETİK BEYAN.....	i
TEŞEKKÜR.....	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	x
TABLolar DİZİNİ.....	xiv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xv

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

1

İKİNCİ BÖLÜM

KURAMSAL ÇERÇEVE/ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

9

2.1. Barınak Yıldızların Özellikleri	9
2.2. Gökadanın Yapısı	14
2.2.1. Gökada Diski	15
2.2.2. Halo	17
2.3. Barınak Yıldızların Kinematığı	18

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

ARAŞTIRMA YÖNTEMİ/MATERYAL YÖNTEM

21

3.1. Veri	21
3.1.1. Gaia Uzay Teleskobu	21
3.1.2. Barınak Yıldızların Seçimi ve Verinin Derlenmesi	26
3.1.3. Derlenen Veriye Genel Bir Bakış	31
3.2. Yöntem	34
3.2.1 Barınak Yıldızların Uzay Hızlarının Hesaplanması	34

3.2.2. Barınak Yıldızların Popülasyon Ayrımı	39
3.2.3. Dinamik Yörünge Parametrelerinin Belirlenmesi	42
3.2.4. Kinematik Yaş Hesabı	43
3.2.5. Gezegen Sistemlerinin Açısal Momentum Hesabı	46
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM	
ARAŞTIRMA BULGULARI	
4.1. Barınak Yıldızların Uzay Hız Dağılımları ve Popülasyon Ayrımları	49
4.2. Gezegen Yarıçap ve Kütlesine Göre Kinematik Özellikler	58
4.3. Açısal Momentum Dağılımları	67
4.4. Barınak Yıldızların Yaşları	71
BEŞİNCİ BÖLÜM	
SONUÇ ve ÖNERİLER	
KAYNAKÇA	87

SİMGELER VE KISALTMALAR

Gaia	Global Astrometric Interferometer for Astrophysics
IAU	Uluslararası Astronomi Birliği (International Astronomical Union)
M_{gezegen}	Gezegen Kütlesi
$M_{\text{yıldız}}$	Yıldız Kütlesi
M_{\odot}	Güneş Kütlesi
HUT	Hubble Uzay Teleskobu
KUT	Kepler Uzay Teleskobu
M_J	Jüpiter kütlesi
TESS	Transiting Exoplanet Survey Satellite
JWUT	James Webb Uzay Teleskobu
ESA	Avrupa Uzay Ajansı (European Space Agency)
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NASA EA	NASA Ötegezegen Arşivi (Exoplanet Archive)
K2	Kepler görevi
$\langle v \rangle$	Ortalama hız
σ	Hız dispersiyonu
σ_z	Hız dispersiyonunun Z bileşeni
[Fe/H]	Demir bolluğu
U	Gökada merkezi doğrultusundaki uzay hız bileşeni
V	Gökada dönme yönündeki uzay hız bileşeni
W	Galaktik Kuzey Kutbu yönündeki uzay hız bileşeni
V_{tot}	Toplam uzay hız bileşeni
CCD	Charge-coupled device
BP	Mavi fotometre
RP	Kırmızı fotometre
AF	Astrometrik alanda astrometri
RVS	Dikine hız spektrometresi
WFS	Dalga önü algılama
BAM	Temel açı izleme
SM	Gök haritalayıcısı
SED	Tayfsal enerji dağılımı

DR1	Gaia ilk veri sürümü
DR2	Gaia ikinci veri sürümü
EDR3	Gaia üçüncü veri sürümünün erken sürümü
DR3	Gaia üçüncü veri sürümü
DPAC	Gaia Veri İşleme ve Analiz Konsorsiyumu
G_{RVS}	RVS'nin ölçüm yaptığı dalga boyu aralığındaki Gaia büyüklüğü
PSCD	Planetary Systems Composite Data
RV	Dikine hız (Radial Velocity)
Gmag	G bandındaki ortalama büyüklük
BPmag	BP bandındaki ortalama büyüklük
RPmag	RP bandındaki ortalama büyüklük
STA	Tek geçiş analizi
MTA	Çoklu geçiş analizi
T_{eff}	Yıldızın etkin yüzey sıcaklığı
log g	Logaritmik çekim ivmesi
G_{BP}	Gaia BP bandındaki parlaklık
G_{RP}	Gaia RP bandındaki parlaklık
M_p	Gezegen kütlesi
e	Yörünge basıklığı
pc	Parsek
$v \sin i$	Yıldızın yörünge eğikliğine (i) bağlı dönme hızı
$M_p \sin i$	Gezegenin yörünge eğikliğine (i) bağlı kütlesi
KGK	Kuzey Galaktik kutbu
α_{KGK}	Kuzey Galaktik kutbunun boylam açısı
δ_{KGK}	Kuzey Galaktik kutbunun enlem açısı
θ_0	Kuzey gök kutbunun konum açısı
α	Ekvatorial koordinatlardaki boylam
δ	Ekvatorial koordinatlardaki enlem
l	Galaktik boylam
b	Galaktik enlem
$\mu_\alpha \cos \delta, \mu_\delta$	Öz hareket bileşenleri
ϖ	Trigonometrik paralaks
γ	Dikine hız

d	Uzaklık
HR	Hertzsprung-Russell
v_t	Gökadanın diferansiyel dönmesinden kaynaklanan teğet hız
A,B	Oort sabitleri
r	Güneş'in yıldıza olan uzaklığı
LSR	Yerel durağanlık standardı
U_{\odot}	Güneşin LSR'ye göre hızının U bileşeni
V_{\odot}	Güneşin LSR'ye göre hızının V bileşeni
W_{\odot}	Güneşin LSR'ye göre hızının W bileşeni
u_{\odot}	Güneşin özgül hızı
U_{LSR}	LSR'ye göre düzeltilmiş U uzay hız bileşeni
V_{LSR}	LSR'ye göre düzeltilmiş V uzay hız bileşeni
W_{LSR}	LSR'ye göre düzeltilmiş W uzay hız bileşeni
$\sigma_{(u,v,w)}$	Karakteristik hız dağılımları
U_{asm}	Gökada merkezi doğrultusundaki asimetric sürüklenme
V_{asm}	Gökada dönme doğrultusundaki asimetric sürüklenme
k	Normalizasyon katsayısı
TD	İnce disk bulunma olasılığı
D	Kalın diskte bulunma olasılığı
H	Haloda bulunma olasılığı
Herc	Hercules akışında bulunma olasılığı
Z_{max}	Galaktik yörüngenin Z yönünde ulaşabileceği en büyük uzaklık
R_{ap}	Galaktik yörüngenin apogalaktik uzunluğu
R_{peri}	Galaktik yörüngenin perigalaktik uzunluğu
e_p	Yörüngenin Galaktik düzlem üzerindeki basıklığı
T_p	Yörünge dolanım periyodu
T_r	Yörünge salınım periyodu
τ	Kinematik yaş
u	Özgül hız
C_v	Difüzyon katsayısı
γ_v	Difüzyon mekanizmasına bağlı sabit
T_γ	Difüzyon sabitinin bozunma zamanı
L_p	Gezegenin yörünge açısai momentumu

G	Evrensel kütle çekim sabiti
M_*	Yıldız kütlesi
a	Yörüngenin yarı büyük eksen uzunluğu
J_*	Yıldızın dönme açısal momentumu
R_*	Yıldızın yarıçapı
I_*	Yıldızın eylemsizlik momenti
l_p	Gezegenin özgül açısal momentumu
l_*	Yıldızın özgül açısal momentumu
l_{sistem}	Sistemin özgül açısal momentumu



TABLULAR DİZİNİ

Tablo No	Tablo Adı	Sayfa No
Tablo 1	Gökada bileşenlerinin temel özellikleri. Burada M bileşen içerisindeki toplam kütle, H yükseklik ölçeğini, σ_z hız dispersiyonunun Z bileşenini ve $[Fe/H]$ metal bolluğunu ifade eder (Schneider, 2015).	15
Tablo 2	Güneş komşuluğundaki yıldız popülasyonları ve Hercules akışı için kinematik parametreler (Bensby vd., 2014).	40
Tablo 3	Yıldızların Gökadadaki popülasyon sınıflaması için kullanılan kriterler (Bensby vd., 2003, 2014).	41
Tablo 4	Z_{max} değerine göre popülasyon ayrımı.	53
Tablo 5	Popülasyon ayrımı yapılmış barınak yıldızlar için kinematik ve dinamik yörünge parametrelerine ait özellikler.	57
Tablo 6	Gezegen yarıçapına göre belirlenen sınıflama (Borucki vd. 2011).	59
Tablo 7	1060 anakol barınak yıldızı için gezegen yarıçapına göre oluşturulan gruplar içerisindeki barınak yıldızların kinematik ve dinamik yörünge parametrelerine ait özellikler.	63
Tablo 8	970 ince disk barınak yıldızı için gezegen yarıçapına göre oluşturulan gruplar içerisindeki barınak yıldızların kinematik ve dinamik yörünge parametrelerine ait özellikler.	63
Tablo 9	Gezegen kütlelerine göre belirlenen sınıflama (Stevens ve Gaudi, 2013).	65
Tablo 10	320 anakol barınak yıldızı için gezegen kütlelerine göre oluşturulan gruplar içerisindeki barınak yıldızların kinematik ve dinamik yörünge parametrelerine ait özellikler.	66
Tablo 11	Gezegen yarıçaplarına göre oluşturulan gruplar için kinematik yaş ve eş-yaş değerleri.	73
Tablo 12	Gezegen kütlelerine göre oluşturulan gruplar için kinematik yaş ve eş-yaş değerleri.	74
Tablo 13	1440 anakol barınak yıldızı için gezegen sayısına göre oluşturulan gruplar içerisindeki barınak yıldızların kinematik ve dinamik yörünge parametrelerine ait özellikler.	84

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Şekil Adı	Sayfa No
Şekil 1	NASA EA'dan 29.06.2023 tarihi itibariyle elde edilen onaylanmış barınak yıldızların yıllar içindeki keşiflerinin, keşif yöntemlerine göre, kümülatif dağılımı.	3
Şekil 2	NASA EA'dan 29.06.2023 tarihi itibariyle elde edilen gezegen yörünge periyoduna karşılık gezegen kütlelerinin dağılımı. Gezegen keşif yöntemleri farklı renklerle gösterilmiştir.	4
Şekil 3	LHS 1478 yıldızına ait geçiş ışık eğrisi.	5
Şekil 4	17 Sco yıldızına ait dikine hız eğrisi.	6
Şekil 5	Gökadada bulunan üç farklı tayf türünden yıldız (G-K-M) için yaşanabilir bölge karşılaştırması.	7
Şekil 6	Kepler, K2 ve TESS barınak yıldızların etkin sıcaklık yarıçap dağılımları (Berger vd., 2023).	12
Şekil 7	Kepler, K2 ve TESS barınak yıldızları için barınak yıldız kütlelerinin ve yaşlarının histogram dağılımları (Berger vd., 2023).	13
Şekil 8	Gökadanın yapısı için şematik bir görsel.	15
Şekil 9	<i>Gaia</i> uydusunun koruyucu çadır olmadan şematik görünümü (ESA).	23
Şekil 10	<i>Gaia</i> 'nın odak düzlemi montajının şematik görünümü (de Bruijne vd., 2010).	24
Şekil 11	PARSEC evrim yolları kullanılarak anakol ve evrimleşmiş yıldız olarak sınıflanan barınak yıldızlar.	29
Şekil 12	Barınak yıldızların HR diyagramındaki konumları. Renkler [Fe/H] değerlerine karşılık gelmektedir.	31
Şekil 13	Barınak yıldızlarının Güneş'ten olan uzaklıklarına ait histogram.	32
Şekil 14	Barınak yıldızların Galaktik ve ekvatorial koordinatlardaki konumları. Yıldızlar [Fe/H] değerine göre renklendirilmiştir.	32
Şekil 15	Barınak yıldızların <i>Gaia</i> DR3 trigonometrik paralaks değerlerine karşılık görelî paralaks hatalarının dağılımı.	33

Şekil 16	Anakol barınak yıldızları için (a) dikine hız ve (b) dikine hız hatalarına ait histogramlar.	33
Şekil 17	Uzay hızının üç boyutlu hız bileşenleri U , V ve W hızlarının gökada içerisindeki doğrultularının gösterimi.	34
Şekil 18	Temsili bir barınak yıldızının Galaktik koordinat Sistemindeki (l, b) temsili gösterimi.	35
Şekil 19	Bir yıldızın öz hareket bileşenlerinin temsili gösterimi.	36
Şekil 20	Çalışmada kullanılan 1440 barınak yıldızının uzay hız bileşenlerine ait $(U_{LSR}, V_{LSR}, W_{LSR})$ histogramlar.	49
Şekil 21	Barınak yıldızların uzay hız bileşenlerine ait hataların $(U_{LSR, hata}, V_{LSR, hata}, W_{LSR, hata})$ histogramları.	50
Şekil 22	Barınak yıldızların XYZ kartezyen koordinatlardaki konumları. Üstteki grafik XY-düzlemini, alttaki grafik XZ-düzlemini gösterir. $(X,Y,Z) = (0,0,0)$ koordinatları Güneş'in konumuna karşılık gelmektedir.	50
Şekil 23	Uzay hız bileşenlerinin 2-boyutlu dağılımları. (a) $U_{LSR} - V_{LSR}$, (b) $V_{LSR} - W_{LSR}$ ve (c) $W_{LSR} - U_{LSR}$ düzlemlerinde.	51
Şekil 24	Barınak yıldızlar için Bensby vd. (2003) kriterlerine göre oluşturulan popülasyon ayrımlarının Toomre diyagramı üzerindeki konumları.	52
Şekil 25	Barınak yıldızlar için Bensby vd. (2014) kriterlerine göre oluşturulan popülasyon ayrımlarının Toomre diyagramı üzerindeki konumları.	53
Şekil 26	Barınak yıldızların Z_{max} değerlerinin histogramı.	54
Şekil 27	Barınak yıldızlar için Galaktik yörünge parametrelerine göre oluşturulan popülasyon ayrımlarının Toomre diyagramı üzerindeki konumları.	54
Şekil 28	Barınak yıldızların Bensby03 kriterlerine göre yapılan popülasyon ayrımlarının Toomre diyagramlarında gösterimi. Yıldızlar Z_{max} değerine göre renklendirilmiştir.	56
Şekil 29	Barınak yıldızların Bensby14 kriterlerine yapılan popülasyon ayrımlarının Toomre diyagramlarında gösterimi. Yıldızlar Z_{max} değerine göre renklendirilmiştir.	56

Şekil 30	Barınak yıldızların V_{tot} , $[Fe/H]$, e_p ve Z_{max} değerlerinin TD/D oranı ile değişimi. Grafikler üzerindeki kesikli gri çizgi $TD/D = 0.5$ değerine karşılık gelir ve ince disk ile kalın diskin ayrımını temsil eder.	58
Şekil 31	Tek gezegenli barınak yıldızların gezegenlerinin yarıçap dağılımları. Üstteki grafik gezegen yarıçaplarının histogram dağılımını, alttaki grafik TD/D oranının gezegen yarıçapları ile değişimini gösterir. Grafikteki kesikli gri çizgi $TD/D = 0.5$ sınırını gösterir.	59
Şekil 32	Gezegen yarıçapına göre yapılan sınıflandırmanın Toomre diyagramları üzerindeki konumları. (a) 1060 barınak yıldız. (b) Dünya, (c) Süper-Dünya, (d) Neptün, (e) Jüpiter ve (f) çok-büyük boyutlu gezegenlerin barınak yıldızları.	60
Şekil 33	Barınak yıldızların V_{tot} , $[Fe/H]$, e_p ve Z_{max} parametrelerinin gezegen yarıçapları ile değişimi.	61
Şekil 34	Barınak yıldızların ve yıldız-gezegen sistemlerinin bazı parametrelerinin gezegen yarıçaplarıyla değişimleri. Grafik üzerindeki kesikli gri çizgiler gezegen yarıçap sınıflamasının sınırlarını belirtir. Buna göre; bölge (1) Dünya, bölge (2) Süper-Dünya, bölge (3) Neptün, bölge (4) Jüpiter ve bölge (5) çok-büyük boyutlu gezegenleri gösterir.	62
Şekil 35	Gezegen yarıçaplarına göre elde edilen gruplar içerisindeki barınak yıldızların $[Fe/H]$ histogramları.	64
Şekil 36	Tek gezegenli barınak yıldızların gezegenlerinin kütlelerinin histogram dağılımları (üst panel). Alt panelde TD/D oranının gezegen kütlesi ile değişimini gösterilmektedir. Grafikteki kesikli gri çizgi $TD/D = 0.5$ çizgisine karşılık gelmektedir.	65
Şekil 37	Tek gezegenli barınak yıldızların ve yıldız-gezegen sistemlerinin bazı parametrelerinin gezegen kütlelerine göre değişimleri. Grafik üzerindeki kesikli gri çizgiler gezegen kütle sınıflamasının sınırlarını belirtir. Buna göre; bölge (1) Dünya/süper-Dünya, bölge (2) Neptün, bölge (3) Jüpiter ve bölge (4) süper-Jüpiter kütleli gezegenleri gösterir.	67
Şekil 38	Gezegenlerin kütlelerine karşılık yörünge açısal momentumlarının değişimini. Kesikli gri çizgi bu dağılıma ilişkin doğrusal temsili gösterir. Grafikteki turuncu renkli üçgen Jüpiter'i mavi renkli üçgen Dünya'yı gösterir. Semboller gezegenlerin yörüngesine göre boyutlandırılmıştır.	68

Şekil 39	Barınak yıldızların dönme hızlarına (v_{sin}) karşılık dönme açısal momentumlarının değişimi. Kesikli gri çizgi bu dağılıma ilişkin doğrusal temsili gösterir. Sarı renkli yıldız Güneş'i temsil etmektedir.	69
Şekil 40	Barınak yıldızların kütlesi ile sistemin toplam açısal momentum değişimi. Kesikli çizgi bu dağılıma ilişkin doğrusal temsili gösterir. Turuncu üçgen sadece Güneş ve Jüpiter'den meydana gelen bir sistemi ve mavi üçgen sadece Güneş ve Dünya'dan meydana gelen bir sistemi temsil eder.	70
Şekil 41	Barınak yıldızların (1108 barınak yıldızdan oluşan grup için) Berger vd. (2023) çalışmasından derlenen eş-yaşlarının histogramı.	71
Şekil 42	Barınak yıldızlar için eş-yaş ve kinematik yaş karşılaştırması.	72
Şekil 43	Barınak yıldızların yaşlarının gezegen yarıçapıyla değişimi. Gri noktalar barınak yıldızlar için eş-yaşı temsil eder ve bordo renkli noktalar ise grubun kinematik yaşını gösterir. Burada bölge (1) Dünya, bölge (2) süper-Dünya, bölge (3) Neptün ve bölge (4) Jüpiter boyutlu gezegen sınıfını temsil eder.	73
Şekil 44	Barınak yıldızların yaşlarının gezegen kütlesiyle değişimi. Gri noktalar barınak yıldızlar için eş-yaşı temsil eder ve bordo renkli noktalar ise grubun kinematik yaşını gösterir. Burada bölge (1) Neptün, bölge (2) Jüpiter ve bölge (3) süper-Jüpiter kütleli gezegenlerin barınak yıldızlarını gösterir.	75
Şekil 45	Yıldız-gezegen sistemlerinin toplam açısal momentumlarının eş-yaş ile değişimi.	75
Şekil 46	Gezegen yarıçapına karşılık barınak yıldızların metal bolluğu dağılımı. Grafikteki her nokta eşit sayıda gezegen içerir ve barınak yıldızlar 10 gruba bölünmüştür.	80
Şekil 47	Gezegen kütlesine karşılık barınak yıldızların metal bolluğu değişimi. Grafikteki her nokta eşit sayıda yıldız-gezegen içerir.	81
Şekil 48	Gezegen sayısına göre barınak yıldızların Toomre diyagramlarında konumları. En soldaki grafik gezegen sayısı 1 olan barınak yıldızlarını, ortadaki grafik gezegen sayısı 2 olan barınak yıldızlarını ve en sağdaki grafik gezegen sayısı ≥ 3 olan barınak yıldızlarını gösterir. Yıldızlar $[\text{Fe}/\text{H}]$ değerine göre renklendirilmiştir.	83
Şekil 49	Yıldız-gezegen sistemlerinin toplam açısal momentumlarının yıldızların eş- yaşlarıyla değişimi. Grafikteki yıldız örnek sayısı 10 parçaya ayrılmış ve her grup için toplam açısal momentumun ve eş-yaşın medyanı hesaplanarak grafiğe noktalanmıştır.	84

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

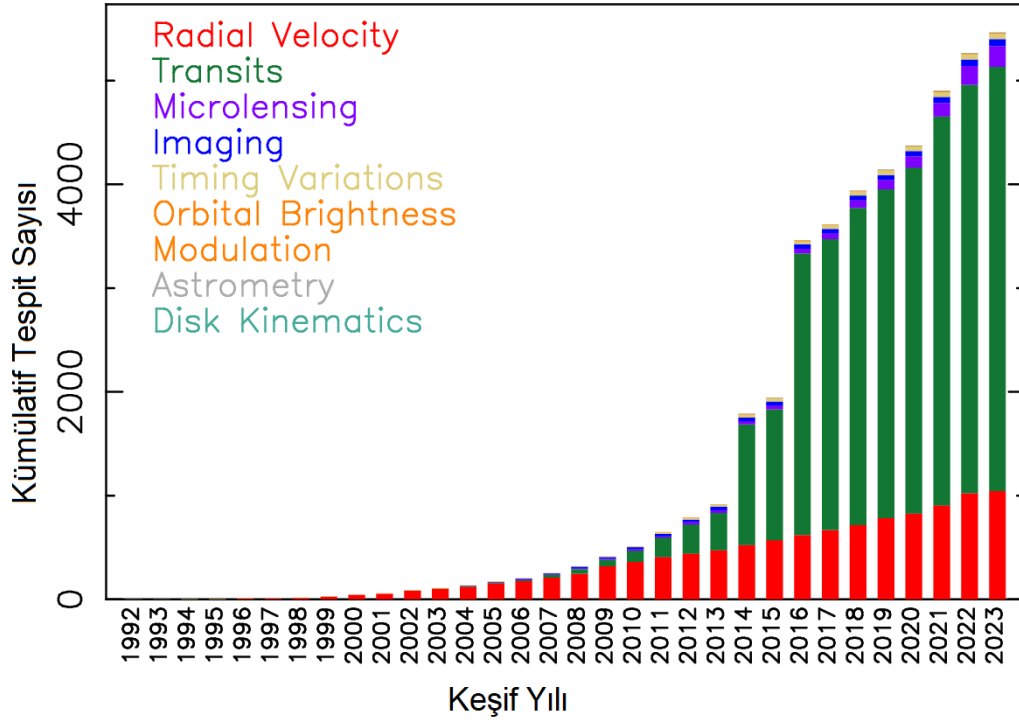
İnsanlığın en çok merak ettiği ve ilgiyle takip ettiği konulardan biri Dünya dışı ortamlarda yaşam arayışlarıdır. Gökbilimin farklı disiplinlerle buluştuğu bu araştırma alanında en somut adımlardan biri ötegezegen keşifleriyle birlikte atıldı. “Ötegezegen (exoplanet)” ifadesi Güneş sisteminin dışındaki gezegenleri tanımlamak için kullanılır. Güneş sistemindeki gök cisimlerinin gezegen olarak tanımlanması için Uluslararası Astronomi Birliği (IAU, International Astronomical Union) tarafından 2006 yılında belirlenen bazı koşullar bulunur; (i) Güneş’in etrafında yörünge hareketi yapmak, (ii) kendi kütle çekimi sayesinde hidrostatik dengeyi sağlayarak neredeyse küresel bir şekil alacak kütleyle sahip olmak, (3) yörüngesi üzerinde bulunan cisimleri temizlemiş olmak. Bu tanımlamalar Güneş Sistemi’ndeki cisimlerle beraber keşfedilen bir ötegezegenin gezegen olması için de gereklidir ancak yeterli değildir.

Ötegezegenleri keşfetmek için yapılan araştırmaların çoğu Güneş benzeri yıldızlar etrafında gezegen aramaya odaklanmıştır. Ötegezegenler henüz keşfedilmeden önce yıldız-gezegen sistemlerinin Güneş Sistemi’ne benzeyebileceği düşünülüyordu. Güneş benzeri bir yıldız olan 51 Pegasi’nin etrafında keşfedilen ilk ötegezegen olan 51 Pegasi b’nin (Mayor ve Queloz, 1995) belirlenmesi ve ötegezegen keşiflerinin hızla artması, keşfedilen gezegenlerin farklı özelliklerde olabileceği ve ötegezegen sistemlerinin Güneş Sistemi’nden ayrışabileceği gerçeğini ortaya çıkardı. Örneğin Güneş Sistemi’nde bulunmayan sıcak-Jüpiterler, alt-Neptünler ve çok-büyük boyutlu ötegezegenler keşfedildi. Böylece bilim insanlarının gezegen sistemlerine bakışında değişimler meydana gelmeye başladı.

Günümüzde hala ötegezegenin tanımı konusunda tartışmalar olsa bile gezegen sistemlerini anlamak için onların sınırlarını belirlemek hala önemlidir. Bu bağlamda yakın bir zamanda IAU, gezegen olmak için en üst sınırı belirleyen bir kütle oranı tanımlamıştır (Des Etangs ve Lissauer, 2022). Bu sınırlayıcı kütle oranı gezegen kütlelerinin merkezi cismin kütlelerine oranını ($M_{\text{gezegen}}/M_{\text{yıldız}}$) ifade eder ve sınırlayıcı kütle oranı 1/25’ten küçük olduğunda cisim gezegen olarak tanımlanır. Ayrıca sınırlayıcı kütle oranına uyan bir cisim kahverengi cüce veya bir yıldızın kalıntıları etrafında yörünge hareketi yapıyorsa bu cisim

gezegen olarak kabul edilir. Bu sınırlayıcı kütlelerin üzerindeki cisimler ise kahverengi cüceler olarak tanımlanır. Ayrıca gezegen olma üst sınırı genellikle $13 M_J$ olarak kullanılır (Des Etangs ve Lissauer, 2022) ve bu kütlelerden büyük kütleli cisimler (kütle üst sınırı $0,08 M_{\odot}$ olmak üzere) kahverengi cüce sınıfına girer. İlerleyen zamanlarda yeni keşiflerle gezegen tanımına farklı kriterler de eklenebileceği düşünülebilir.

Ötegezegen sayılarının son 20-30 yılda çok hızlı bir şekilde artmasını sağlayan en önemli gelişme teknolojik ilerlemelerle birlikte uzaya gönderilen teleskopların sayısındaki artıştır. Ötegezegenler konusunda bilgimizi önemli ölçüde artırmayı sağlayan ilk teleskop 1990 yılında uzaya fırlatılan Hubble Uzay Teleskobu'dur (HUT). HUT, yüksek çözünürlüklü görüntüler sağlayarak yıldızların etrafındaki bazı ötegezegenleri doğrudan gözleme imkânı sağladı. Örneğin yakın zamanda bir kahverengi cüce etrafında keşfedilen CFHTWIR-Oph 98 b gezegeni HUT kullanılarak tespit edilmiştir (Fontanive vd., 2020). Başka bir kahverengi cüce etrafında $5-10 M_J$ kütlelerinde olduğu düşünülen bir gezegen, HUT ve Gemini Gözlemevi'nin gözlemleriyle tespit edilmiştir (Todorov vd., 2010). Bundan sonra gelen en önemli uzay görevlerinden biri olan Kepler Uzay Teleskobu (KUT) ise 2009 yılında uzaya fırlatılmış ve geçiş yöntemiyle ötegezegenleri keşfetmek için tasarlanmıştır. KUT, görev süresi boyunca çok sayıda ötegezegenin keşfedilmesini sağlamış ve ötegezegenler konusundaki bakış açısını büyük ölçüde değiştirmiştir. Öyle ki potansiyel olarak yaşanabilir bölgelerde bulunan kayaç gezegenleri, Jüpiter benzeri gaz devlerini ve süper-Dünyalar gibi çok çeşitli gezegen türlerinin keşfedilmesine olanak sağlamıştır. Sonrasında ise TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite), 2018 yılında uzaya fırlatılmıştır. TESS, KUT'a benzer şekilde geçiş yöntemiyle ötegezegen keşfetmek için ve KUT'dan farklı olarak gökyüzünün neredeyse tamamına yakını tarayarak yüksek çözünürlüklü fotometrik veri sağlaması amacıyla tasarlanmıştır. TESS özellikle Güneş Sistemi dışında bulunan ve potansiyel olarak yaşanabilir bölgelerde konumlanmış ötegezegenleri keşfetme konusunda önemli bir gelişme sağlamıştır. Son olarak optik ve alıcı teknolojilerinde en üst seviye kullanılarak tasarlanmış olan James Webb Uzay Teleskobu (JWUT) 2021 yılında uzaya fırlatılmıştır. JWUT, özellikle yakın kızıl öte dalga boylarında gezegen oluşumlarını ve onların atmosferlerini detaylı bir şekilde incelemek ve gezegenlerin yaşanabilirlik potansiyellerini araştırmak için farklı gözlem tekniklerinin kullanılacağı (fotometri, doğrudan görüntüleme, tayf) optik sistemlere sahiptir.

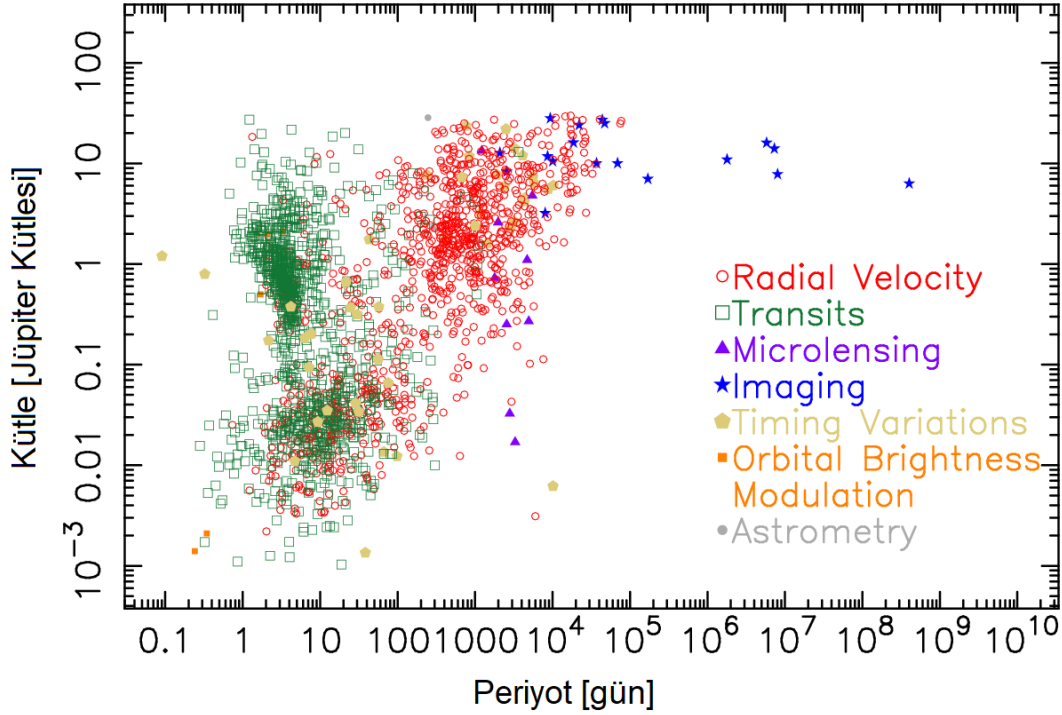


Şekil 1. NASA EA'dan 29.06.2023 tarihi itibariyle elde edilen onaylanmış barınak yıldızların yıllar içindeki keşiflerinin, keşif yöntemlerine göre, kümülatif dağılımı.¹

NASA Exoplanet Archive (EA) veri tabanına bakıldığında onaylanmış barınak yıldızların sayısının neredeyse 5500'e ulaştığı görülebilir. Şekil 1, onaylanmış barınak yıldızların yıllar içinde keşiflerle artan sayısını göstermektedir. Şekil 2 ise gezegen periyoduna karşılık gezegen kütlelerinin dağılımını ortaya koymaktadır. Şekil 2 incelendiğinde özellikle iki keşif yöntemi dikkat çeker. Bunlardan biri dikine hız (radial velocity) yöntemi, diğeri ise geçiş (transits) yöntemidir. Bu iki yöntem en çok gezegen keşfinin yapıldığı yöntemlerdir. NASA EA'da bulunan onaylanmış yıldızların yaklaşık %75'i geçiş, %19'u dikine hız yöntemi ve geri kalan kısım da diğer yöntemlerle keşfedilmiştir. Geçiş yöntemiyle, geniş bir kütle aralığında gezegen tespitinde bulunabilirken gezegen yörünge periyodu bakımından gözlemsel teknik itibariyle daha kısa yörünge periyoduna sahip gezegenleri keşfetme eğiliminin ortaya çıktığı görülmektedir. Bu durum çoğunlukla geçiş yapan bir gezegenin tespit edilmesi için yıldızının önünden geçmesi gerekliliğinden kaynaklanır ve yörünge periyodu ne kadar kısa olursa gezegen yıldızının önünden o kadar sık aralıklarla geçiş yapabilir. Dikine hız yöntemiyle keşfedilen gezegenler

¹ NASA Exoplanet Archive - <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/exoplanetplots/>

ise görece daha büyük kütleli olma eğilimindedirler. Keşif yöntemlerinin kendine has bu teknik sınırlılık ve özelliklerinin tespit edilen gezegenler için bir seçim etkisi yarattığı ve keşiflerin yanlılık içerdiği söylenebilir.

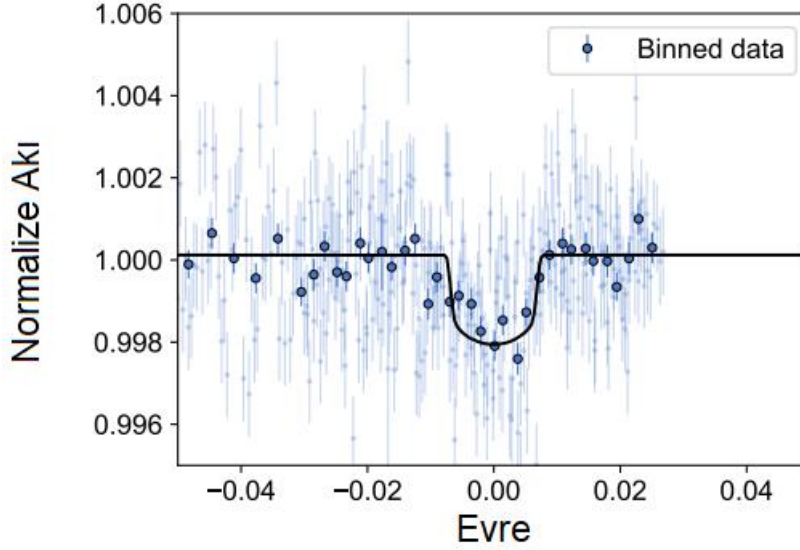


Şekil 2. NASA EA'dan 29.06.2023 tarihi itibarıyla elde edilen gezegen yörünge periyoduna karşılık gezegen kütlelerinin dağılımı. Gezegen keşif yöntemleri farklı renklerle gösterilmiştir.²

Geçiş yöntemi, bir gezegen, gözlemcinin bakış doğrultusunda yıldızının önünden geçiş yaptığında sistemin toplam ışığında meydana gelen azalmanın tespit edilmesine dayanır. Yıldızın gözlemi sırasında belirlenen bu parlaklık azalması ölçülerek gezegen tespitleri gerçekleştirilir. Bu yöntemde yapılan gezegen keşifleri için, periyoda bağlı olarak zamana yayılmış büyük miktarda veri toplanması gerekebilir ve bir yıldızın parlaklığındaki değişim, sürekli takip edilerek tekrarlayan parlaklık azalmaları aranır. Bu nedenle geçiş yöntemiyle yapılan keşifler büyük çoğunlukla takip gözlemlerinin gerçekleşmesiyle yapılır. Bu da şu anda büyük çoğunlukla kısa yörünge periyoduna sahip gezegenlerin keşfediliyor

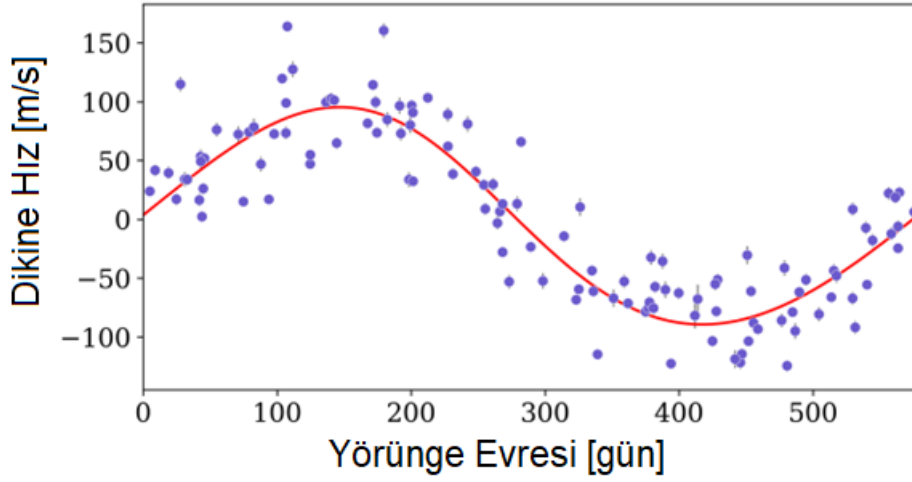
² NASA Exoplanet Archive - <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/exoplanetplots/>

olmasını açıklar. Şekil 3, LHS 1478 yıldızına ait ışık eğrisini gösterir ve grafikte yıldız akısında meydana gelen azalma gezegenden kaynaklanır. Böylece LHS 1478 yıldızının etrafında süper-Dünya sınıfından bir gezegen keşfedilmiştir (Soto vd., 2021).



Şekil 3. LHS 1478 yıldızına ait geçiş ışık eğrisi.

Bir gezegen-yıldız sisteminde yıldızın kütesinin büyük olmasından dolayı gezegen yıldızın etrafında bir yörünge hareketi yapıyormuş gibi görünür. Aslında yıldız ve gezegen ortak kütle merkezi etrafında bir hareket yaparlar ve yıldızın hareketi daha çok bir salınım hareketine benzer. Gezegenin varlığından kaynaklanan bu periyodik salınım hareketi yıldızın dikine hız değişimlerinden tespit edilebilir. Bu yolla yapılan keşif yöntemine “dikine hız yöntemi” denir. Bir gezegen yıldızını kütle çekimsel olarak ne kadar etkileyebiliyorsa bu etki yıldızın ölçülebilen dikine hızına o kadar yansır ve bu nedenle dikine hız yöntemi daha büyük kütleli gaz devlerini keşfetmeye duyarlıdır. Örneğin Şekil 4, 17 Sco yıldızına ait bir dikine hız eğrisini göstermektedir ve bu dikine hız değişimleri belirlenerek yaklaşık $4 M_J$ kütesindeki bir gezegen keşfedilmiştir (Pinto vd., 2020).

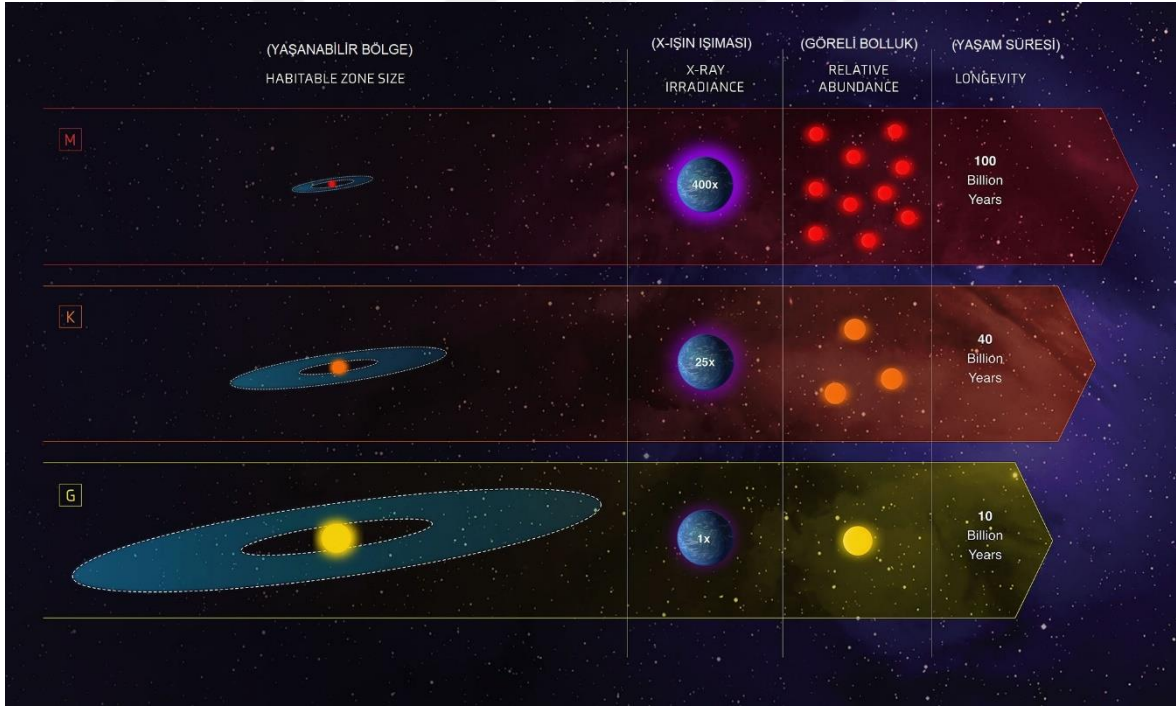


Şekil 4. 17 Sco yıldızına ait dikine hız eğrisi.

Gezegen araştırmalarında en öne çıkan konulardan biri yaşanabilir bölgede Dünya benzeri gezegen keşfedilmesidir. Bu durum yıldızlar için yaşanabilir bölge tanımlanmasını önemli hale getirir. Yaşanabilir bölge bir yıldızın etrafında suyun sıvı halde var olabileceği ve yaşamın potansiyel olarak gelişebileceği bir bölgeyi ifade eder. Bu bölge, yıldızın çevresindeki gezegenlerin konumuna ve yıldızın özelliklerine bağlı olarak değişir. Bu nedenle, farklı yıldızlar için, yaşanabilir bölge sınırları farklılık gösterir. Yaşanabilir bölgenin yıldızla uzaklığı, yıldızın ışınım gücüne ve sıcaklığına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Yıldızın ışınım gücüne bağlı olarak, yaşanabilir bölge yıldızdan daha uzakta (sıcak yıldızlar için) veya yıldızla daha yakın (soğuk yıldızlar için) konumlanabilir (Şekil 5).

Bir gezegenin yaşanabilir bölgede olabilmesi, uygun bir yörüngede bulunmasıyla da ilişkilidir. Yıldızla çok yakın olması durumunda su buharı oluşabilirken, çok uzak olması durumunda ise su donabilir. Ayrıca, gezegenin yörünge eğimi ve dönüş süresi de yaşanabilirliği etkileyebilir. Bunun yanında, gezegenin atmosferik özellikleri ve yıldızın manyetik aktivitesi gibi durumlar da yaşanabilirlik şartlarını ortadan kaldırabilir. Ancak burada bir gezegen için yaşanabilir bölge tanımlamaya geldiğinde durum büyük çoğunlukla yıldızın özelliklerine bağlıdır. Yapılan çalışmalar, yaşanabilir bölgesinde en çok gezegen keşfedilen yıldız türünün M-tayf türündeki yıldızlar olduğunu göstermiş ve M tayf türünden yıldızların G tayf türündekilere kıyasla daha fazla dünya boyutunda gezegen barındırdığı rapor edilmiştir (Dressing ve Charbonneau, 2013; Robertson vd., 2020; Singla ve Sengupta,

2023; Tuchow ve Wright, 2023). Bu tayf türündeki yıldızlar Güneş'ten daha küçük kütleli ve daha soğuktur. Ayrıca M tayf türünden yıldızların anakoldaki yaşam ömürleri G ve K tayf türünden yıldızlara göre çok daha uzundur (Şekil 5) ve bundan dolayı yaşanabilir bölgede bulunan gezegenlerini incelemek, ilgi çekici bir konu haline gelmiştir (Singla ve Sengupta, 2023). Şekil 5 incelendiğinde M tayf türünden yıldızların etrafındaki yaşanabilir bölgenin yıldızına daha yakın bir bölge içinde bulunduğu görülmektedir. Bu da yaşanabilir bölgedeki gezegenlerinin daha hızlı keşfedilmesini sağlar, yani burada bir seçim etkisi olabilir (Robertson vd., 2020). Bununla birlikte M tayf türünden yıldızların yaşanabilir bölgelerinin yıldızına yakın ve dar olmasından dolayı bu bölgedeki gezegenler güçlü radyasyona ve parlamalara maruz kalabilir (Singla ve Sengupta, 2023).



Şekil 5. Gökadada bulunan üç farklı tayf türünden yıldız (G-K-M) için yaşanabilir bölge karşılaştırması.³

Keşif yöntemlerine bakıldığında gezegenin belirlenebilmesi büyük ölçüde yıldızın gözlenmesine bağlıdır. Yaşanabilir bölge araştırmaları ise benzer şekilde yıldızın özellikleriyle ilişkilidir. Sonuç olarak, gezegen keşiflerinde ve incelemelerinde bir gezegen

³ https://exoplanets.nasa.gov/search-for-life/habitable-zone/#otp_what_is_the_habitable_zone?

yıldızından ayrı düşünülemez ve mutlaka yıldızıyla birlikte incelenmelidir. Gezegenli yıldızlar literatürde “barınak yıldızlar (host stars)” olarak bilinirler ve bu çalışma içerisinde de gezegenli yıldızlar için bu ifade kullanılacaktır. Gezegenin yıldızına olan bu bağımlılığın dolaylı barınak yıldızların özelliklerinin iyi bilinmesi ve iyi bir şekilde karakterize edilmesi gerekir. Ayrıca barınak yıldızların özellikleri gezegen oluşumu ve zaman içerisindeki evrim süreçleri hakkında önemli bilgiler sağlayabilir. Bu bağlamda “hangi yıldızların etrafında ötegezegen bulunur?” veya “barınak yıldızların karakteristik özellikleri nelerdir?” gibi sorular önemli hale gelir.

Ötegezegenli sistemlerin oluşum ve evrim süreçlerinin iyi bir şekilde anlaşılabilmesi için öncelikle barınak yıldızların iyi bir şekilde tanımlanması gerekir. Bu yıldız-gezegen sistemleri araştırılırken barınak yıldızların Galaktik bağlamda incelenmesi gezegenlerin oluşum ve evrim süreçleri hakkında bazı önemli bilgiler sağlayabilir. Bu bağlamda “Gökadanın hangi bölgelerinde gezegen bulunur?”, “Gökadanın farklı bölgelerinde bulunan barınak yıldızların karakteristiği nasıl olur?”, “gezegenlerin buldukları Galaktik ortama bağımlılıkları nelerdir?” gibi sorular sorulabilir. Bu amaçla da barınak yıldızların Gökada içerisindeki karakteristiğinin ve özelliklerinin incelenmesi önemlidir. Barınak yıldızların Galaktik kinematiklerinin araştırılması, bu yıldızların Gökada içerisindeki hareketlerinin anlaşılmasına imkan vermekle birlikte yıldızların oluştukları yer, kimyasal yapıları ve evrimleri ile ilgili bilgilerin elde edilmesini sağlar. Bu nedenle, bu tez çalışmasının da amacı olmak üzere, barınak yıldızların kinematik olarak incelenmesi ve beraberinde sistemlerin açısal momentum davranışlarının araştırılması, barınak yıldızlarla beraber gezegen sistemlerinin hem yapısal özellikleri hem de evrimsel süreçleri hakkında bilgi verme potansiyeli taşımaktadır.

İKİNCİ BÖLÜM

KURAMSAL ÇERÇEVE/ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Barınak Yıldızların Özellikleri

Barınak yıldızların incelenmesi ve fiziksel parametrelerinin belirlenmesi, ötegezegen özelliklerinin ortaya çıkarılması, ötegezegen sistemlerinin oluşum ve evrimlerinin araştırılması açısından oldukça önemlidir. Ötegezegen keşfetmek için yaygın olarak kullanılan iki yöntem, dikine hız (radial velocity) ve geçiş (transit) yöntemidir. Bu iki yöntem gibi ötegezegen keşfetmek için kullanılan yöntemlerin büyük çoğunluğu, barınak yıldızların gözlemlerinden gezegen tespit etmeye dayandığından ötegezegenlerin ve ötegezegen sistemlerinin belirlenen parametrelerinin duyarlılığı, barınak yıldızlarının özelliklerinin duyarlı bir şekilde belirlenmesine bağlıdır. Bunun yanında ötegezegen sistemlerinin oluşumu, evrimi ve kararlılığı barınak yıldız özelliklerinden (yaş, kimyasal bolluk, yarıçap, sıcaklık gibi) oldukça etkilenir ve bundan dolayı da barınak yıldızların özelliklerini duyarlı bir şekilde belirlemek ve karakterize etmek gezegen sistemlerinin temel parametreleri yanında yapı ve evrimlerinin anlaşılması açısından da anahtar araştırma alanlarından biridir (van Belle ve von Braun, 2009).

Yapılan araştırmalara göre barınak yıldızların büyük çoğunluğunun anakol yıldızlarından oluştuğu ve daha az sayıda da olsa evrimleşmiş yıldızlar etrafında da ötegezegenler bulunduğu görülmektedir (Stassun vd., 2017; Simpson vd., 2023). Gezegenleri bulunan barınak yıldızlarının özellikleri incelendiğinde, büyük çoğunluğunun FGKM tayf türündeki yıldızlardan oluştuğu görülebilir (örn; Berger vd., 2023; Simpson vd., 2023). Bu tayf türü aralığında, barınak yıldızlarının G türü anakol yıldızları civarında, özellikle Güneş'e benzer özellikler gösteren yıldızlar daha baskın olmak üzere, yoğunlaştığı görülebilir. Bu istatistiki dağılımda seçim etkisinin olduğu da unutulmamalıdır; çünkü keşiflerin büyük bölümünde verileri kullanılan Kepler Uzay Teleskobunun taradığı gökyüzü alanı (Çalgı ve Kuğu takımı yıldızlarının bulunduğu bölge⁴), çoğunlukla Güneş türü ve daha soğuk yıldızların yoğun olduğu bir bölgedir (Brown vd., 2011).

⁴ <https://archive.stsci.edu/missions-and-data/kepler>

Etkin sıcaklık, yıldızın yapı ve evrim süreçlerinin araştırılması için kullanılan temel parametrelerden biridir. Ayrıca, etkin sıcaklığın duyarlı olarak belirlenmesi yıldızın kimyasal bolluğunun da hassas belirlenmesi açısından oldukça önemlidir. Yıldız atmosferlerinde metal bolluğu yıldızın yapısal özelliklerinin anlaşılması yanında oluşum ve evrim süreçlerinin anlaşılmasında da önemli bir yer tutar ve gezegeni olan barınak yıldızlarda bu parametre ve farklı parametrelerle olan ilişkileri sıklıkla incelenir. Özellikle gezegeni olan yıldızlar ile gezegeni olmayan yıldızlar arasındaki metal bollukları incelenerek ötegezegenler ile barınak yıldızların metal bolluğu arasında bir ilişki olup olmadığını değerlendiren ve sonuçları gezegen oluşum ve evrim süreçleriyle karşılaştıran çok sayıda araştırma bulunmaktadır (Santos vd., 2004c; Fischer ve Valenti, 2005; Luck ve Heiter, 2006; Sousa vd., 2008).

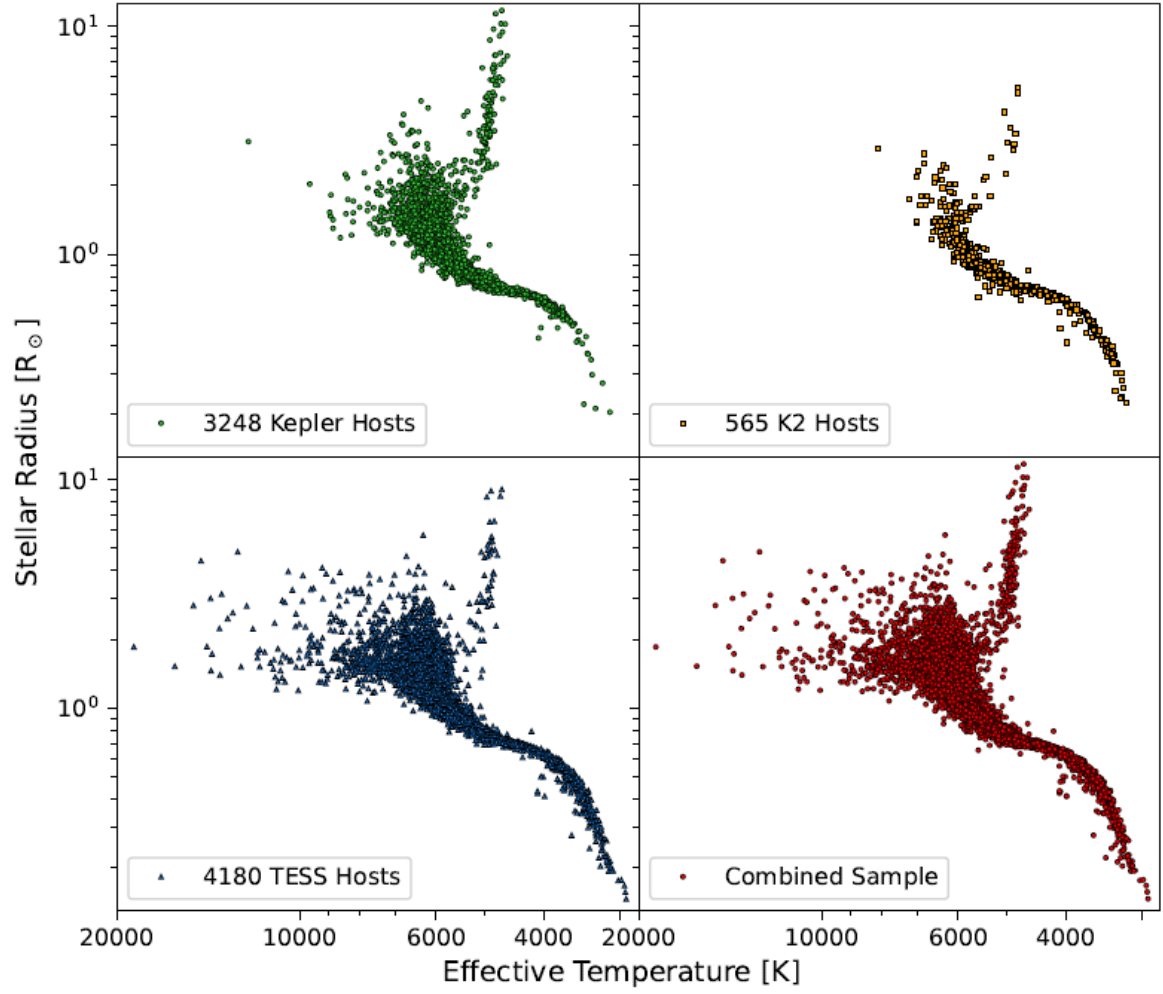
Luck ve Heiter (2006), 55 barınak yıldız ile 216 gezegeni olmayan yıldız karşılaştırmış ve barınak yıldızların metal bolluğu açısından genel olarak daha zengin olduğunu belirtmişlerdir. Etkin sıcaklık için ($B-V$) renk indeksi ve $[Fe/H]$ değerinden oluşan bir kalibrasyon sunan Sousa vd. (2008), metal bolluğu ve gezegen ilişkisini araştırmış ve Jüpiter benzeri gezegenlerin metal olarak zengin barınak yıldızların etrafında bulunduğunu, bunun yanında Neptün benzeri gezegenlerde böyle bir belirgin ayırım görülmediğini tespit etmişlerdir. Evrimleşmiş barınak yıldızlar için de kimyasal bollukların incelendiği çalışmalar bulunmaktadır. Jofré vd. (2015) tarafından yapılan araştırmada, gezegeni olan 86 evrimleşmiş barınak yıldız ile gezegeni olmayan 137 yıldız arasında karşılaştırma yapılmış ve evrimleşmiş barınak yıldızların metal bolluğunun yaklaşık 0.16 dex daha zengin olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmaları desteleyen başka bir araştırmada, Kepler Uzay Teleskobu verisiyle keşfedilen barınak yıldızların metal bolluğunun gezegensiz yıldızlara göre daha zengin olduğu tespit edilmiştir (Schlaufman ve Laughlin, 2011).

Yıldız yarıçaplarının doğrudan ölçülmesi bir çok yıldız için çok mümkün değildir. Yıldızların yarıçapları (çift yıldızlar ve bazı sismik değişen yıldızlar dışında) çoğunlukla teorik evrim modelleri kullanılarak tahmin edilebilir. Yarıçap belirlemek için kullanılan yöntemler genellikle Stefan-Boltzman yasasını temel alır ve dolayısıyla etkin sıcaklığın doğru belirlenmeleri yarıçap tahminleri için oldukça önemli hale gelir. Yıldızların yarıçap ve etkin sıcaklığı, ötegezegenlerin bulunduğu ortamı karakterize etmeye yardımcı olan en

önemli parametrelerdendir (van Belle ve von Braun, 2009). Geçiş yapan bir gezegenin varlığında örtme gerçekleşiyorsa gözlenebilen ışık değişimlerinin analizinden yalnızca yıldızın boyutunun gezegenin boyutuna oranı veya kesirsel yarıçaplar belirlenebilir. Özellikle ışık eğrisi ve dikine hız verilerini eş-zamanlı çözülmesiyle yarıçaplar daha duyarlı olarak bulunabilir ancak çoğunlukla yıldız ve gezegenin yarıçapını birbirinden ayırmak oldukça zor olabilir. Yıldızların çoğunluğu için kütle ve yaş parametrelerinin belirlenmesi de kolay değildir. Barınak yıldızlarında kütle, çift yıldızlarda kullanılan yöntemlere benzer olarak, geçiş ışık eğrileri ve dikine hız verisinin analizinden elde edilebilir. Bunun dışında kullanılan yöntemler olsa da (örneğin sismik kütle ve yaş), yıldızların çoğunluğunda olduğu gibi, barınak yıldızların kütle ve yaş belirlenmesinde kuramsal evrim modelleri ve eş-yaş eğrileri kullanılmaktadır (Mortier vd., 2013; Stassun vd., 2017; Berger vd., 2018, 2020, 2023).

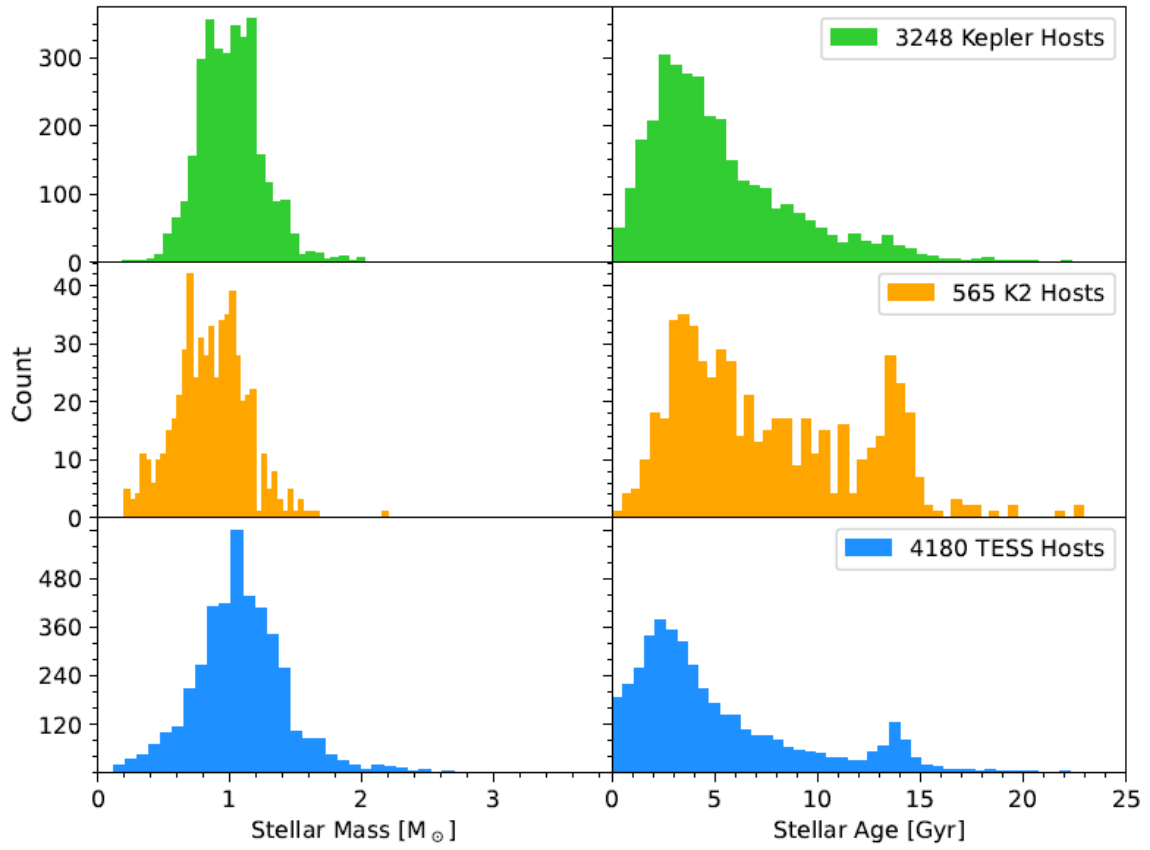
Güncel araştırmalardan biri olan Berger vd. (2023) çalışmasında, Kepler, K2 ve TESS barınak ve aday barınak yıldızları için etkin sıcaklık, yüzey çekim ivmesi, kütle, yarıçap, parlaklık, yaş ve uzaklık gibi parametrelerini içeren homojen bir veri tabanı da sunulmuştur. Şekil 6, bu çalışmadaki barınak yıldızlar için etkin sıcaklığa karşılık yıldız yarıçaplarının dağılımını göstermektedir. Buna göre Kepler barınak yıldızlarının büyük çoğunluğu Güneş benzeri yıldızlardan oluşmaktadır ancak bu dağılımda seçim etkisinin olduğu unutulmamalıdır. K2'deki kaynakların seçim farklılığına bağlı olarak K2 barınak yıldızlarının kütlesi Kepler barınak yıldızlarından daha küçük görünmektedir.

Berger vd. (2023) çalışmasında barınak yıldızlarının kütle ve yaş verilerinin dağılımı Şekil 7'de görüldüğü gibidir. Şekle göre kütle ve yaş aralıkları Kepler, K2 ve TESS barınak yıldızları için farklılıklar göstermektedir. Farklı uzay misyonu verileri için barınak yıldızlarının büyük çoğunlukla Güneş benzeri yıldızlardan meydana geldiği görülmekle beraber K2 ve TESS barınak yıldızlarının yaş dağılımlarının büyük yaşlara doğru yayıldığı ve 13 Gyl civarında ikinci bir maksimum oluştuğu görülmektedir (Şekil 7).



Şekil 6. Kepler, K2 ve TESS barınak yıldızların etkin sıcaklık yarıçap dağılımları (Berger vd., 2023).

Barınak yıldız yaşlarını doğru ve duyarlı olarak belirlemek ötegezegen evrimini anlayabilmek için oldukça önemlidir (Soderblom, 2010; Mann vd., 2017; David vd., 2021). Barınak yıldız yaşları, çoğunlukla eş-yaş yöntemi ile tahmin edilir (örn; Berger vd., 2023). Bunun yanında barınak yıldız yaşının astrosismoloji (Silva Aguirre vd., 2015) ve yıldızın dönme hızının kullanıldığı jirokronoloji yöntemiyle (Gaidos vd., 2023) belirlendiği araştırmalar da bulunmaktadır. Aynı zamanda yıldızlar için, eğer astrometrik ve dikine hız verisi bulunuyorsa, kinematik yöntem kullanılarak grup yaşları da tahmin edilebilir. Barınak yıldızlar için kinematik yaş, Bölüm 2.3'te daha detaylı olarak ele alınacaktır.



Şekil 7. Kepler, K2 ve TESS barınak yıldızları için barınak yıldız kütlelerinin ve yaşlarının histogram dağılımları (Berger vd., 2023).

Gezegen sistemlerinin oluşum ve evrimini araştırmanın diğer bir yolu da gezegen sistemlerinin açısal momentumlarının incelenmesine dayanır. Zaman içerisinde sistemdeki açısal momentumun nasıl değiştiği sistemin nasıl evrimleştiği konusunda anlamlı sonuçlar doğurabilir ve bu durum sistemdeki yıldız ve gezegen etkileşimlerinden kaynaklanabilir. Örneğin Scholz (2013) tarafından yapılan bir çalışmada, merkezi yıldız ile ön-gezegen diski arasındaki dinamik etkileşimlerin, ilk birkaç milyon yıl süresince, merkezi yıldızın dönme hızını etkilediği ifade edilir. Yıldızın dönme hızının zamanla değişimi yine sistemin evrimiyle ilişkilendirilebilir. Bu kapsamda yapılan bir çalışmada, Sibony vd. (2022), gezegenli yıldızların gezegensiz yıldızlara göre ortalama olarak daha yavaş döndükleri sonucuna ulaşmışlardır. Aynı zamanda sistemdeki açısal momentum ve kütlelerin farklı şekillerde dağılıyor olmasının genellikle ön-gezegen diski aşamasında gerçekleşen açısal momentum aktarım süreçlerinden kaynaklandığı ifade edilmiştir (Williams ve Cieza, 2011). Gurumath vd. (2019) ötegezegenler ve barınak yıldızlar arasındaki açısal momentum

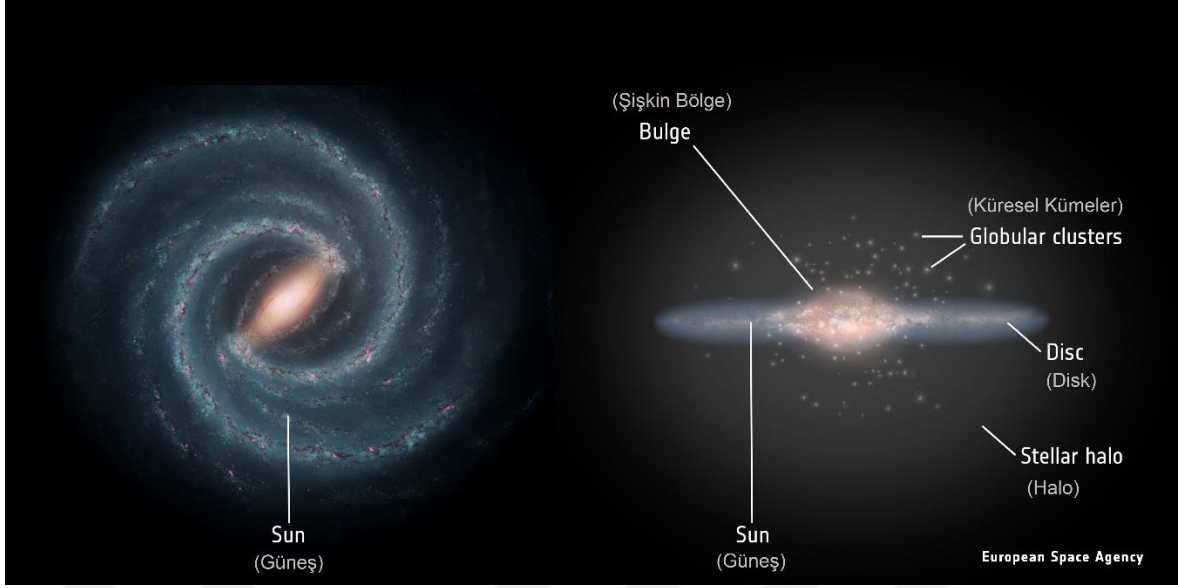
dağılımını araştırmak için yaptıkları çalışmada, gezegen yörünge açısal momentumuyla gezegen kütleleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymuşlar ve bu bağlılığın tekli ve çoklu gezegen sistemlerinde birbirinden farklı olduğunu ifade etmişlerdir. Ötegezegenli sistemlerde özgül açısal momentum (özgül açısal momentum, açısal momentumun kütleyle bölünmüş halini ifade eder; daha fazla detay için Bölüm 3.2.5) dağılımlarının ele alındığı çalışmalar da bulunmaktadır (Armstrong vd., 2007; Berget ve Durrance, 2010). Bunların dışında yıldız-gezegen sistemlerinde toplam açısal momentumun, barınak yıldızın yaşı arttığa azaldığını rapor eden araştırmalar da yayınlanmıştır (örneğin; Jiang vd., 2022).

2.2. Gökadanın Yapısı

Bu çalışmada, barınak yıldızların kinematik özellikleri inceleneceğinden ve bu özellikler de Gökadamız içinde buldukları konuma sıkıca bağlı olduğundan öncelikle Samanyolu'nun bazı temel özellikleri üzerinde durulmuştur.

Genel olarak Samanyolu Gökadasının yapısı disk, halo ve merkezi şişkin bölgeden meydana gelir. Disk yapısı gökadanın gece gökyüzünde görünen kısmıdır ve diğer benzer gökadalarda olduğu gibi spiral kolları bulunur. Halo, disk yapısını çevreleyen neredeyse küresel bir yapıya sahip bir bileşendir. şişkin bölge ise gökadanın merkezi bölgesini ifade etmek için kullanılır. Çeşitli kaynaklarda farklı verilebilen değerleri olsa da Güneş'in Gökada merkezine olan uzaklığı genel olarak yaklaşık 8-8,5 kpc civarındadır (Majewski, 1993). Gökadanın genel yapısı Şekil 8'deki gibi olup bileşenlerin genel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Gökadanın farklı bileşenlerindeki (ince disk, kalın disk, halo vs.) yıldızlar, kimyasal bolluk, yaş, yükseklik ölçeği, yörünge ve hız dispersiyonu gibi parametreler bakımından birbirlerinden farklılıklar gösterirler. Bu farklılıkların incelenmesi gökada bağlamında oluşum ve evrim süreçlerinin anlaşılması açısından oldukça önemlidir.



Şekil 8. Gökadanın yapısı için şematik bir görsel.⁵

Tablo 1.

Gökada bileşenlerinin temel özellikleri. Burada M bileşen içerisindeki toplam kütleyi, H yükseklik ölçeğini, σ_z hız dispersiyonunun Z bileşenini ve $[Fe/H]$ metal bolluğunu ifade eder (Schneider, 2015).

	İnce disk	Kalın disk	Halo
M ($10^{10}M_{\odot}$)	6	0,2 – 0,4	0,1
H (kpc)	0,325	1,5	3
σ_z (km s^{-1})	20	40	100
$[Fe/H]$ (dex)	$[-0,5; +0,3]$	$[-1,6; -0,4]$	$[-4,5; -0,5]$

2.2.1. Gökada Diski

Gece gökyüzüne bakıldığında bir bant yapısı olarak görünen kısım Samanyolu'nun diskinde yer alan Güneş Sistemi'nin yakın konumlanmış kolların bir parçasıdır. Gökada içerisinde özellikle Güneş çevresinde yapılan araştırmalar sonucunda disk yapısında birbirinden farklılaşan bileşenlerin olduğu anlaşılmıştır. Bu bileşenler yükseklik ölçeği kullanılarak ayrılabilir. Yükseklik ölçeğinin belirlenebilmesi için de gökada düzleminin dik

⁵ https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2016/09/Anatomy_of_the_Milky_Way

doğrultusundaki yıldız sayı yoğunluğu hesaplanır. Gökada diski genel olarak üç bileşene ayrılabilir. Bunlar; genç ince disk, yaşlı ince disk ve kalın disklerdir. Yapılan çalışmalarda bu disk yapıları için farklı yükseklik ölçeklerinin verildiği görülebilir; çünkü bu ayrımlar her zaman çok net bir şekilde belli değildir. Örneğin Wang vd. (2018) ince diskin yükseklik ölçeğini 220-450 pc, kalın diskin yükseklik ölçeğini ise 700-1200 pc civarında vermişlerdir. Stinson vd. (2013) kalın disk için yaklaşık 1,5 kpc'lik bir yükseklik ölçek değerini önerir. Schneider (2015) ise ince disk, kalın disk ve halo için Tablo 1'deki yükseklik ölçeklerini verir. Bunun yanında Gökada içerisinde moleküler gaz bölgeleri bulunur ve merkezi moleküler bölgedeki moleküler gazın ortalama yoğunluğu Gökada diskine kıyasla birkaç kat daha fazladır (Barnes vd., 2017). Bu bölge genellikle yeni yıldızların oluşumuyla ilişkilendirilir (Krumholz vd., 2009). Ayrıca yükseklik ölçeği ile disk yoğunluğu arasında bir ilişki bulunur (Jurić vd, 2008) ve yükseklik ölçeği arttıkça disk yoğunluğunda bir azalma meydana gelirken (Schneider, 2015) yıldızların yaşında ise bir artış meydana gelir (Bovy vd., 2012). Yani yükseklik ölçeği kalın diske göre daha küçük olan ince disk, içerisinde daha genç yıldızları barındırır. Güneş, Gökada düzleminden yaklaşık 27 pc uzaklıkta bulunmakta olup (Antoja vd., 2018) bir ince disk yıldızıdır. Bu çalışmadaki Güneş'in Gökada düzleminden olan uzaklık tahmini, gökada merkezine olan uzaklığının 8,34 kpc ve gökadada merkezi etrafındaki dolanma hızının 240 km s^{-1} olduğu varsayımına dayanır (Antoja vd., 2018).

Gökada diski içerisindeki yıldızlar genellikle gökada kütle merkezi etrafında dairesel yörüngelerde hareket ederler. Örneğin Güneş çevresindeki yıldızların yörünge hızı yaklaşık 220 km s^{-1} 'dir. Ancak bu yörüngeler tam olarak dairesel değildir ve yıldızlar hareketleri sırasında değişken hız bileşenlerine sahip olurlar. Bu hız bileşenlerinin dağılımı, yıldızların hız dispersiyonlarıyla ilişkilidir. Hız dispersiyonu (σ), hızların ortalama hızdan $\langle v \rangle$ ne kadar saptığının bir ölçüsünü ifade eder ve hız dispersiyonu ne kadar büyükse rastgele hızların dağılımı da o kadar büyük olur. İnce diskteki yıldızların hız dispersiyonları daha küçük iken kalın disk yıldızlarının hız dispersiyonları daha büyük olur (Haywood vd. 2013).

Gökada diskine dik doğrultudaki yani Z doğrultusundaki rastgele hızların dağılımı gökada diskinin yükseklik ölçeğini oluşturan etkendir. Gökada diskine dik doğrultuda bulunan hız dispersiyonunun Z bileşeni (σ_z) ne kadar büyükse, yükseklik ölçeği o kadar

büyük olur. Ayrıca hız dispersiyonlarının ve yükseklik ölçeğinin doğrudan yıldız yaşı ile ilişkisi vardır. Ancak verilen değerler yapılan çalışmaya göre farklılıklar içerebilir. Örneğin Agertz ve Kravtson (2015) Samanyolu Gökadasındaki genç yıldızların hız dispersiyonunu $0-20 \text{ km s}^{-1}$ olarak verirken Stinson vd. (2013), yaşlı yıldızların hız dispersiyonunun ince diskten %50 daha fazla olduğunu ve yaklaşık 50 km s^{-1} olduğunu ifade etmiştir.

İnce disk ve kalın disk yıldızları kimyasal bolluk bakımından da birbirlerinden ayrılırlar. Clark vd. (2021) çalışmasında kalın disk yıldızlarının ince disk yıldızlarına kıyasla daha fakir demir bolluğuna sahip olduğunu belirtir. Bunun yanında ince disk yıldızları Güneş'e yakın α -bolluklarına sahip daha genç yıldızlarla karakterize edilirken, kalın disk yıldızları genel olarak daha büyük α -bolluklarına sahip yıldızlardan meydana gelir (Clarke vd., 2019).

2.2.2. Halo

Disk yapısını çevreleyen ve neredeyse küresel bir yapıda olan halo, içerisinde alan yıldızlarını ve küresel kümeleri barındırır. Buradaki alan yıldızlarının Gökada düzlemine dik doğrultusundaki hız dispersiyonu yüksektir ve bu da yükseklik ölçeğinin oldukça büyük değerlerde ($\sim 3 \text{ kpc}$) olduğunu gösterir. Küresel kümeler ise yaklaşık $20-50 \text{ pc}$ yarıçaplı bir bölgede bulunan yüzbinlerce yıldızdan oluşan bir topluluğu ifade eder. Bu kümelerde bulunan yıldızlar kütle çekimi etkisiyle bir arada tutulurlar ve aynı kütle çekimi alanında yörünge hareketi yaparlar.

Haloda bulunan yıldızlar genel olarak metal bolluğu açısından disk yıldızlarına göre daha fakir olan yıldızlardır. Ancak bu yıldızların demir bolluğu kendi içerisinde geniş bir değer aralığı gösterebilir ve gökadanın farklı bölgelerinde farklı değerler ortaya çıkabilir. Ayrıca haloda bulunan yıldızların hız dağılımı halo içindeki konumlarına ve çalışılan popülasyona bağlı olarak değişkenlik gösterebilir.

2.3. Barınak Yıldızların Kinematığı

Gökada bağlamında barınak yıldızları incelemek, keşfedilen ötegezegenlerin gökada içerisinde nasıl bir dağılım sergilediğinin araştırılması açısından oldukça önemli bir yer tutar. Yapılan kinematik incelemeler büyük çoğunlukla yıldızın kimyasal bolluklarıyla birlikte değerlendirilir. Bunun en önemli sebebi kimyasal bolluğun yıldızların oluşum ve evrim süreçleri hakkında önemli bilgiler verebilmesi ve gökada içerisinde bulunduğu yer ile doğrudan ilişkili olmasından kaynaklanır. Aynı zamanda gezegenli yıldızların kimyasal bolluğunun gezegensiz yıldızlardan farklılıklar gösterdiğine (Fischer ve Valenti, 2005; Gilli vd., 2006; Neves vd., 2009) ilişkin çalışmalar da bu konuyu ilgi çekici yapmaktadır. Ayrıca kinematik incelemeler bağlamında yıldız gruplarının kinematik yaşlarının hesaplanması ve değerlendirmeler yapılması barınak yıldızların ve gezegen sistemlerinin evrimlerini farklı gruplar üzerinden anlayabilmek için önemlidir. Aynı zamanda kinematik yaşın diğer yaş hesaplama yöntemlerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması anlamlı sonuçlar elde etmeye yardımcı olabilir (örn; Chen vd, 2021b; Berger vd., 2023). Chen ve Zhao (2002), barınak yıldızların kinematik olarak incelenmesinde ilk analizlerden birini sunmaktadır ve 51 barınak yıldız için kütle, yaş ve kinematik özellikleri belirleyerek elde edilen sonuçları metal bolluğu ile birlikte değerlendirmişlerdir. Ancak kinematik incelemelerde duyarlı astrometrik ve dikine hız verisine sahip daha fazla sayıda yıldız örneği ile çalışmak daha anlamlı sonuçlar verebilir.

Gezegen oluşum oranı, gezegenlerin nasıl oluştuğu ve nasıl evrimleştiği konusundaki teorilerin belirlenmesinde rol oynayabilir (Bashi ve Zucker, 2019). Örneğin yapılan bazı çalışmalar (Santos vd., 2004; Fischer ve Valenti, 2005) metal bolluğu açısından zengin yıldızların büyük gaz devi gezegenleri barındırma olasılığının daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bu da gezegen oluşumuyla metal içeriği arasında bir ilişki olduğunu gösterebilir (Bashi ve Zucker, 2019). Bu bağlamda Bashi ve Zucker (2019) yaptıkları çalışmada demir bolluğu ve toplam uzay hızının bir fonksiyonu olarak Kepler yıldızlarının küçük yarıçaplı yakın gezegenlerinin oluşum oranını araştırmışlardır. Bunun için hem gezegene sahip hem de gezegeni olmayan yıldızların olduğu bir örnek kullanmışlardır. Beklenildiği gibi [Fe/H] oranı büyük yıldızların, gezegen oluşum oranı yüksek ($f \sim 1.1$) olarak bulunmuş bunun yanında demir bolluğu açısından fakir yıldızların, toplam uzay hızı

yüksek olduğunda ($V_{\text{tot}} > 90 \text{ km s}^{-1}$) gezegen oluşum oranının yüksek olduğu ($f \sim 1.2$) görülmüştür. Yani demir bolluğu bakımında zengin ve toplam uzay hızı küçük olan yıldızların gezegen oluşum oranı ile demir bolluğu bakımından fakir ve toplam uzay hızı yüksek olan yıldızların gezegen oluşum oranı benzer çıkmıştır. Demir bolluğu açısından fakir ancak yüksek hızlı olan yıldızlarda α -element bolluğu daha yüksek çıkmış ve bu yıldızlardaki yüksek gezegen oluşum oranının α -element bolluğundan kaynaklanabileceği düşünülmüştür.

Barınak yıldızları kinematik bağlamda inceleyen diğer bir çalışma Carrillo vd. (2020) tarafından sunulmuştur. Bu çalışmada TESS Aday Hedef Listesindeki (TESS Candidate Target List) yıldızlar için kimyasal bolluk ve kinematik incelemeler yapılmıştır. Bu çalışmadaki yıldızların büyük çoğunluğu ince diskte bulunurken çok küçük bir kısmının kalın diskte ($\sim \%4$) ve haloda ($\%1$ 'den küçük) bulunduğu tespit edilmiştir. Winter vd. (2021) tarafından yapılan araştırmada ise konum-hız faz uzayında barınak yıldızlar incelenerek gezegen sistemlerinin oluşum ve evrimlerinin ortama bağımlılıkları araştırılmış, sonuç olarak da gezegenlerin buldukları oluşum ve evrim ortamıyla ilişkisinin bulunduğu tespit edilmiştir. Mustill vd. (2022) çalışmasında sıcak-Jüpiterler içeren barınak yıldızlar için kinematik hesaplamalar kullanılarak faz-uzay yoğunlukları oluşturulmuş ve yıldızların yerel faz uzay yoğunluğu ile Yerel Durağanlık Standardına (LSR) göre özgül hızları (peculiar velocity) arasında bir ilişki olup olmadığı araştırılmıştır. Sonuç olarak, faz uzay yoğunluğu ile yıldızların özgül hızları arasında ters bir ilişki olduğunu belirlemişlerdir. Buradan yoğun bölgedeki yıldızların genellikle daha düşük bir hıza sahip oldukları (yani kinematik olarak soğuk oldukları) sonucu ortaya çıkmıştır.

Chen vd. (2021b), Kepler yıldızlarının kinematik özelliklerini (Galaktik konumlar, hızlar ve popülasyon türleri) belirlemişlerdir. Aynı zamanda yıldızların kinematik yaşlarını elde ederek bu yaşları asterosismoloji, jirokronoloji ve eş-yaş yöntemleriyle elde edilen yaşlarla kıyaslamışlardır. Kıyasladıkları bu yaşların birbiriyle genel olarak uyumlu olduğu sonucuna varmışlardır. Aynı çalışmada, gezegeni olan ve olmayan yıldızlar incelenmiş ve gezegeni olan barınak yıldızlarının özellikle gezegen sayısı arttıkça Galaktik hız (V_{tot}) ve kalın/ince disk oranı (TD/D) bağlamında farklılıklar gösterdiği tespit edilmiştir. Gezegen sayısı arttıkça ($N_P \geq 3$, burada N_P barınak yıldızın sahip olduğu gezegen sayısı gösterir) ince

disk yıldızlarının oranının arttığını bunun yanında gezegen sayısı arttıkça kinematik yaşın küçüldüğü bulunmuştur.



ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

ARAŞTIRMA YÖNTEMİ/MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 . Veri

3.1.1. Gaia Uzay Teleskobu

Yıldızların uzay hızlarının hesaplanabilmesi ve dolayısıyla kinematik olarak incelenebilmesi için onların dikine hızlarının (çift veya çoklu sistem ise kütle merkezinin dikine hızının) ve astrometrik parametrelerinin bilinmesi gerekir. Astrometri, astronominin bir alt disiplindir ve gök cisimlerinin değişen konumlarının doğru bir şekilde ölçümü ve incelenmesiyle ilgilenir. Astrometrik parametreler yıldızın konumunu, öz hareket bileşenlerini ve uzaklık verilerini içerir. Bu parametrelerin hassas olarak belirlenmesi uzay hızlarının doğruluğunu ve hassasiyetini doğrudan etkiler ve kinematik sonuçların değerlendirilmesi açısından oldukça önemlidir. *Gaia*, *Hipparcos* görevinin ardından Avrupa Uzay Ajansı'nın (The European Space Agency, ESA) bir sonraki astrometri görevi olarak planlanmış (de Bruijne, 2012) ve yıldızların konumlarını, uzaklıklarını ve öz hareketlerini duyarlı bir şekilde ölçmek için tasarlanmıştır (Prusti vd., 2016).

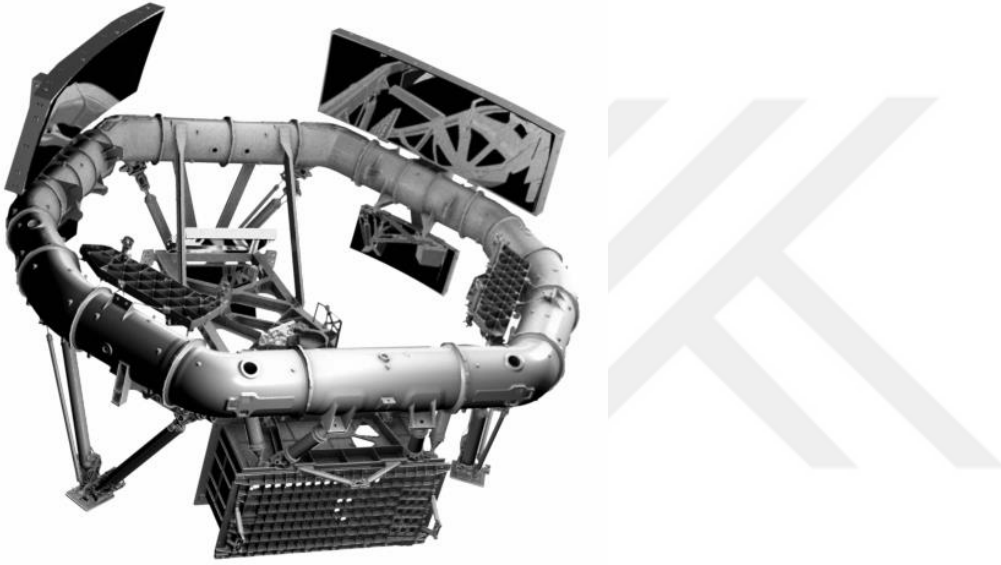
Gaia uzay aracının görevi, gökyüzündeki gök cisimlerini tarayarak Samanyolu'nun en büyük ve en hassas üç boyutlu bir haritasını oluşturmaktır. Bu görev ilk olarak 1993 yılında Lennart Lindegren ve Michael Perryman tarafından önerilmiş ve sonrasında Perryman vd. (2001)'de görevin amaçları ve uzay aracının tasarım çerçevesi açıklanmıştır. Bu çalışmaya göre *Gaia*'nın bilimsel hedefi, Samanyolu'nun yaklaşık %1'ine karşılık gelen 1 milyar yıldızın niceliksel sayımını yaparak Gökada'nın kökenini ve tarihini açıklığa kavuşturmasıdır. Ayrıca *Gaia* tasarımının bilimsel hedeflerinde ise, astrometrinin yanında fotometri ve tayfsal veri ile bunların bazı temel analizleri yer alır (Perryman vd. 2001). *Gaia*'nın açılımı, "Global Astrometric Interferometer for Astrophysics" yani "Astrofizik için Küresel Astrometrik İnterferometre" dir. Tasarımının ilk aşamasında interferometrik bir teleskop olarak planlanmış ancak sonrasında doğrudan görüntüleme temelli olarak değiştirilmiştir. *Gaia*, ESA tarafından 2013 yılında uzaya fırlatılmış, devreye alma ve performans doğrulama işlemlerinin ardından 2014 yılında 5 yıllık olarak belirlenen görevine başlamıştır (Prusti vd., 2016).

Gaia uzay aracı, gökyüzünü sürekli olarak taramak için birbirinden 106,5 derecelik açıyla ayrılmış, birbiriyle özdeş ve 1,45 m × 0,50 m açıklığı olan iki teleskop içerir. Yani *Gaia* bu iki teleskop sayesinde, tarama alanı boyunca gökyüzünde sabit bir açıyla ayrılmış iki görüş alanına sahiptir. Bu teleskoplardan elde edilen veriler Samanyolu Gökadası'nın üç boyutlu haritasını oluşturmak için her iki teleskop için de ortak olan odak düzleminde birleştirilir (Prusti vd., 2016). *Gaia*'nın ölçüm prensibi, ESA'nın astrometri konusundaki öncü görevi olan *Hipparcos* (Perryman vd. 1989) tarafından başarıyla kullanılan küresel astrometri kavramından oluşturulmuştur (Prusti vd., 2016). Turon vd. (2010) çalışmasında prensipleri açıklanan tarama uzay astrometrisi (scanning space astrometry), *Gaia*'nın ölçüm prensibini ortaya koyar ve temelde her iki teleskop tarafından gözlemlenen yıldızların geçiş zamanı farklarının açısal ölçümlere dönüştürülmesine dayanır. Böylece *Gaia*'nın kullandığı astrometri mutlak paralaks değerini verir (daha detaylı bilgi için; Turon vd., 2010) ve bunun yanında elde edilen dikine hız ve fotometrik veri gözlenen gök cisimlerinin kinematik ve astrofiziksel bazı parametrelerinin belirlenmesi için gerekli veri tabanını sağlar (Prusti vd., 2016).

Gaia uzay aracı, Şekil 9'da gösterildiği gibi, yük modülü (payload module) olarak adlandırılan bir yapı üzerine inşa edilmiştir. Yük modülü içerisinde, iki özdeş teleskop yer alır. Bunların dışında yük modülü asıl olarak üç bilim işlevini yani astrometri, fotometri ve tayf işlevlerini destekleyen tek bir entegre olarak tasarlanan odak düzlemi tasarımına uygun olarak yapılmıştır (Prusti vd., 2016).

Her iki teleskop için de ortak olan odak düzlemi (Şekil 10), 106 CCD (charge-coupled device) dedektörden meydana gelir ve odak düzleminin temel olarak beş ana işlevi bulunur. Bunlardan üçü bilim işlevi olarak adlandırılan astrometrik alanda astrometri (astrometry in astrometric field, AF), mavi ve kırmızı dalgalı boylarına duyarlı fotometreler (blue and red photometers – *BP* and *RP*) kullanılarak elde edilen düşük çözünürlüklü spektro-fotometri (low-resolution spectro-photometry) ve dikine hız spektrometresi kullanılarak elde edilen tayftır (Radial Velocity Spectrometer, RVS). Diğer işlevler ise dalga önü algılama (wave-front sensing, WFS) ve temel açı izlemeyi (basic angle monitoring, BAM) içeren metroloji işlevi ile gök haritalayıcısında (sky mapper, SM) nesne belirlenmesi işlevleridir (Prusti vd., 2016).

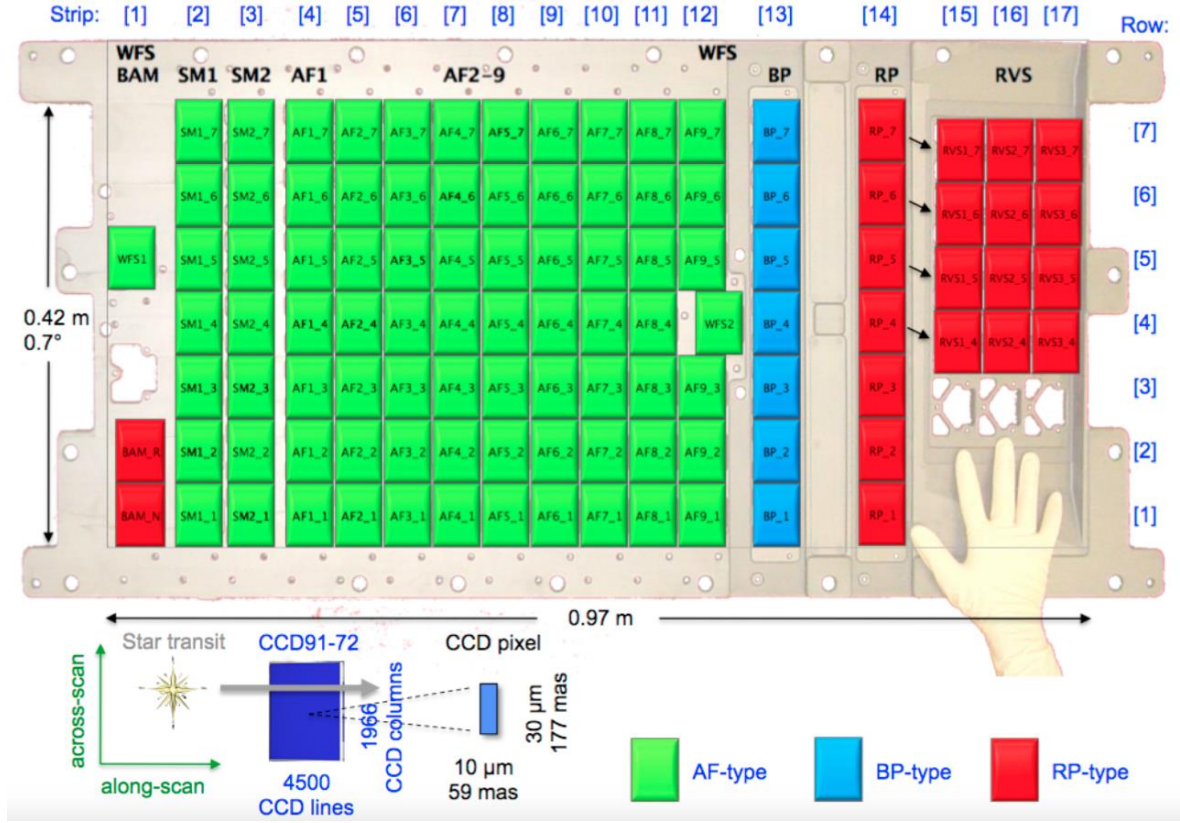
Gaia'nın odak düzleminde bulunan iki adet dalga ön yüzeyi sensörü (wave-front sensor, WFS; Vosteen vd., 2009), teleskopların performansını izleyerek gerektiğinde onları hizalar ve görüntülerin netleştirilmesini sağlar. Diğer yandan *Gaia*'nın sahip olduğu iki görüş arasındaki temel açının sabit olması veya mikro açı saniyesi mertebesinde takip edilerek ortaya çıkan farkların düzeltilmesi gerekir (Prusti vd., 2016).



Şekil 9. Gaia uydusunun koruyucu çadır olmadan şematik görünümü (ESA).

Astrometrik ölçüm yapan dedektörler, dalga boyu 330 – 1050 nm aralığında olan filtresiz, beyaz ışıkta (*G*-bandı, *Gaia*'nın fotometrik bandı) görüntü oluşur (Carrasco vd., 2016). *Gaia*, herhangi bir kataloğa dayalı olarak değil 20. kadir parlaklığa kadar olan gök cisimlerini tarayarak alanına giren cisimlerin ölçümlerini yapar. Fotometrik ölçüm yapan aygıt, tespit edilen nesnelere için tayfsal enerji dağılımını (Spectral Energy Distribution, SED) ortaya çıkaran araçtır ve ışığı dağıtan iki prizma fotometre aracılığıyla ışık ölçüm işlevini gerçekleştirir. Biri mavi diğeri kırmızı olan fotometreler için sırasıyla *BP* ve *RP* olarak adlandırılan dağıtıcılar 330 – 680 nm ile 640 – 1050 nm dalga boyu aralığında çalışırlar. Tayfsal alet, dikine hız spektrometresi (radial-velocity spectrometer, RVS) olarak bilinir. RVS, 845 – 872 nm dalga boyu aralığında ölçüm yapar ve bu aralık özellikle FGK yıldızları

için hidrojenin Paschen serisini kapsadığından, bu veriler üzerinden dikine hızlar ölçülebilir (Prusti vd., 2016).



Şekil 10. Gaia'nın odak düzlemi montajının şematik görünümü (de Bruijne vd., 2010).

Tayfsal ve fotometrik aygıtlar, gökyüzündeki cisimleri tespit etmek için aynı gökyüzü haritalayıcısını ve halihazırda bölüm içerisinde bahsedildiği gibi aynı teleskoplar ile aynı odak düzlemini kullandıklarından her iki alet de astrometrik alet ile oldukça iyi bir şekilde çalışır (Prusti vd., 2016).

Gaia'nın 5 yıllık olarak planlanan görevi 2019'un temmuz ayında sona ermiş daha sonra bu görev 2025 sonuna kadar uzatılmıştır (Vallenari vd., 2023). *Gaia*'nın göreve başlamasından itibaren belirli dönemlerde *Gaia* veri sürümleri yayınlanmıştır: 2016'da ilk veri sürümü (data release 1, DR1) (*Gaia* İşbirliği, 2016), 2018'de ikinci veri sürümü (data release 2, DR2) (*Gaia* İşbirliği, 2018), 2021'de üçüncü veri sürümünün erken sürümü (early data release 3, EDR3) (*Gaia* İşbirliği, 2021) ve son olarak 2022'de üçüncü veri sürümü (data

release 3, DR3) (*Gaia* İşbirliği, 2023) kullanıma açılmıştır. DR1, 20,7 kadirde daha parlak olan 1 milyardan fazla kaynak için astrometrik ve fotometrik verileri sağlar (Brown vd., 2016). DR2, 21 kadirde daha parlak yıldızlar için astrometrik ve fotometrik verileri sağlamanın yanında DR1'den farklı olarak bir alt grup örnek için dikine hız değerlerini de sunmaktadır (Brown vd., 2018).

DR3 yayınlanmadan önce 2021'de yayınlanan EDR3, *Gaia*'nın ilk 34 ayı boyunca yaptığı gözlemlere ve elde edilen verilerin *Gaia* Veri İşleme ve Analiz Konsorsiyumu (Data Processing and Analysis Consortium, DPAC; detaylara *Gaia* İşbirliği 2016 çalışmasından bakılabilir) tarafından işlenmesine dayanır ve 1,8 milyar kaynak için astrometrik ve fotometrik bilgileri sağlar (Brown vd., 2021). EDR3'te dikine hızlar elde edilmemiş bunun yerine 7 milyon kaynak için *Gaia* DR2'de bulunan dikine hızlar bu yayına eklenmiştir (Fabricius vd., 2021).

Gaia'nın son veri yayını olan DR3, EDR3'ün astrometri ve geniş bant fotometri verisinin aynısını içerir (Vallenari vd., 2023). Bunun yanında *Gaia* DR3 ek olarak birleştirilmiş dikine hız (combined radial velocity) değerlerinin ikinci sürümünü içerir (Katz vd., 2022). *Gaia* EDR3'te, 1,8 milyar kaynak için *G* bandındaki görünür parlaklıklar ve konumlar, 1,5 milyar kaynak için paralaks, öz hareket ve renk değerleri ($G_{BP} - G_{RP}$) yayınlanmış (Brown vd., 2021) ve dolayısıyla bunlar doğrudan DR3'e eklenmiştir (Brown vd., 2022). Sonuç olarak, DR3 ile 585 milyon kaynak için beş astrometrik parametrenin (konumlar, trigonometrik paralaks ve öz hareket bileşenleri) yanında 33,8 milyon kaynak için dikine hızlar kullanıma açılmıştır (Vallenari vd., 2023).

Gaia DR2, 22 aylık gözlem verilerine dayanan, etkin sıcaklığı $3500 < T_{\text{eff}} < 6900$ K ve parlaklığı $G_{RVS} < 12$ kadir olan yıldızlar için dikine hızları vermiştir (Brown vd., 2018). *Gaia* DR3 ile ise 34 aylık gözlem verileri yardımıyla etkin sıcaklığı $3100 < T_{\text{eff}} < 14500$ K ve $G_{RVS} < 14$ kadir olan yıldızlar için dikine hızlar kullanıma açılmıştır. Görüldüğü gibi *Gaia* DR3, DR2'den sayı bakımında oldukça üstün bir veri bütünü sağlar ve niceliksel üstünlüğünün yanında *Gaia* DR3 için RVS'de bazı iyileştirmeler de uygulanmıştır (Vallenari vd., 2023). *Gaia* DR3'te parlak yani $G_{RVS} < 12$ kadir olan yıldızların birleşik dikine hızı DR2

ile aynı şekilde yani ölçülen epok dikine hız zaman serisinin medyanı hesaplanarak bulunur (Katz vd., 2022). Bu şekilde elde edilen dikine hızlar sinyal-gürültü oranı (signal-to-noise ratio, S/N) düşük olduğu zaman çok verimli olmaz. *Gaia* DR3'te, RVS penceresi içine giren geçiş tayflarının yakındaki ışık kaynakları tarafından kirlenmesini engellemek için bir ayırıştırma işlemi (deblending procedure) uygulandı ve böylece S/N artırılmış oldu (Vallenari vd., 2023). Sönük yani $12 < G_{RVS} < 14$ kadir olan yıldızların birleşik dikine hızları ise çapraz-korelasyon fonksiyonlarının ortalamasının hesaplanmasıyla elde edildi (Katz vd., 2022). Sönük yıldızların olduğu bu aralıkta, geliştirilmiş bir kaçak-ışık-düzeltilme (stray-light-procedure) işlemi uygulandı ve bu şekilde sönük yıldızlar için de iyileştirme yapılmış oldu (Vallenari vd., 2023). Kaçak ışık düzeltilmesi, ölçüm yapılan aletin tayfsal kaçak ışığından dolayı meydana gelen ölçüm hatalarını düzeltmek için kullanılan bir yöntemdir (Zong vd., 2006).

Astrometrik parametrelerin belirsizliği, *Gaia* veri sürümleri yayınlandıkça daha iyi bir hale gelmiştir (Vallenari vd., 2022). Sonuç olarak *Gaia* uzay teleskobu ve DR3 kataloğu, kinematik çalışma için gerekli olan astrometrik parametreleri yüksek bir hassasiyetle sağlar ve yapılan geliştirmelerle birlikte önemli sayıda kaynak için hassas dikine hızları sunar. Bu tez çalışmasında da *Gaia* DR3 veri tabanı kullanılmıştır.

3.1.2. Barınak Yıldızların Seçimi ve Verinin Derlenmesi

NASA Exoplanet Archive (EA), ötegezegenler ve barınak yıldızlar için astronomik verileri ve bilgileri derleyen, bunları ilişkilendiren ve çeşitli araçlar sağlayan çevrimiçi ötegezegen ve barınak yıldız kataloğu sunan bir veri tabanıdır. Bu veri tabanı içerisinde hem onaylanmış (confirmed) hem de aday (candidate) gezegenleri ve barınak yıldızları içeren tablolar bulunur. Literatürde aday gezegenleri de barındıran barınak yıldızlar ile ilgili çalışmalar (örn; Carrillo vd., 2020; Chen vd., 2021b) bulunsa da bu çalışmada özellikle onaylanmış gezegenleri barındıran barınak yıldızlar tercih edilmiştir. Bunun için öncelikle NASA EA'da bulunan "Planetary Systems Composite Data (PSCD)" alt veri tabanı kullanıldı (erişim tarihi; 21 Kasım 2022). Bu tabloda 5211 (onaylanmış) gezegen ve 3898 barınak yıldız bulunmaktadır. Astronomi çalışmaları için geliştirilmiş Python paketi olan Astropy (Robitaille vd., 2013; Price-Whelan vd., 2018, 2022) ve veri tabanlarından

çevrimiçi olarak veri elde etmeye izin veren, Astropy’ya bağlı bir Python paketi olan Astroquery (Ginsburg vd., 2019) kullanılarak *Gaia* DR3’ten ekvatorial koordinatlar (α , δ), galaktik koordinatlar (l , b), öz hareket bileşenleri ($\mu_\alpha \cos \delta$, μ_δ), trigonometrik paralaks (ϖ) ve kütle merkezinin dikine hız (γ) değerleri elde edilerek bir barınak yıldız kataloğu oluşturuldu. Astrometrik parametreler ve dikine hız dışında *Gaia* DR3’ten G , G_{BP} , G_{RP} , $G_{BP}-G_{RP}$ değerleri ve *Gaia* DR2’de bulunan RV değerleri oluşturulan veri tabanına dahil edildi.

Gaia DR3’te birleşik dikine hızların belirlenmesi için Tek Geçiş Analizi (Single Transit Analysis, STA) ve Çoklu Geçiş Analizi (Multiple Transit Analysis, MTA)’nden meydana gelen ve ölçüm işleminde son aşama olan STAMTA iş akışı uygulanır (Katz vd., 2022). STA öncelikle çift çizgili tayfları belirler ve her bileşen için bir dikine hız değeri türetir (Katz vd., 2022). Bu türetilen dikine hızlar ise *Gaia*’nın tek-olmayan-yıldız (non-single-star) işleminde kullanılır (Katz vd., 2022) ancak bunlar *Gaia* DR3 ana kataloğunda (Part1. Main source) değil *Gaia* DR3 tek-olmayan-yıldız kataloğunda (Part 3. Non-single-stars) yayınlanır (Damerджи vd., basım aşamasında). Çoklu yıldız sistemleri içerisinde bulunan barınak yıldızları “non-single-stars” kataloğunda aratıldığında bu yıldızlara ait dikine hız verileri bulunamamıştır. Bu nedenle bu yıldızlar tez çalışması içerisinde kullanılmamış ve çoklu yıldız sisteminde bulunan 352 barınak yıldız veri tabanından çıkarılmıştır. Böylece veri tabanında 3546 adet tekli barınak yıldız yer aldı.

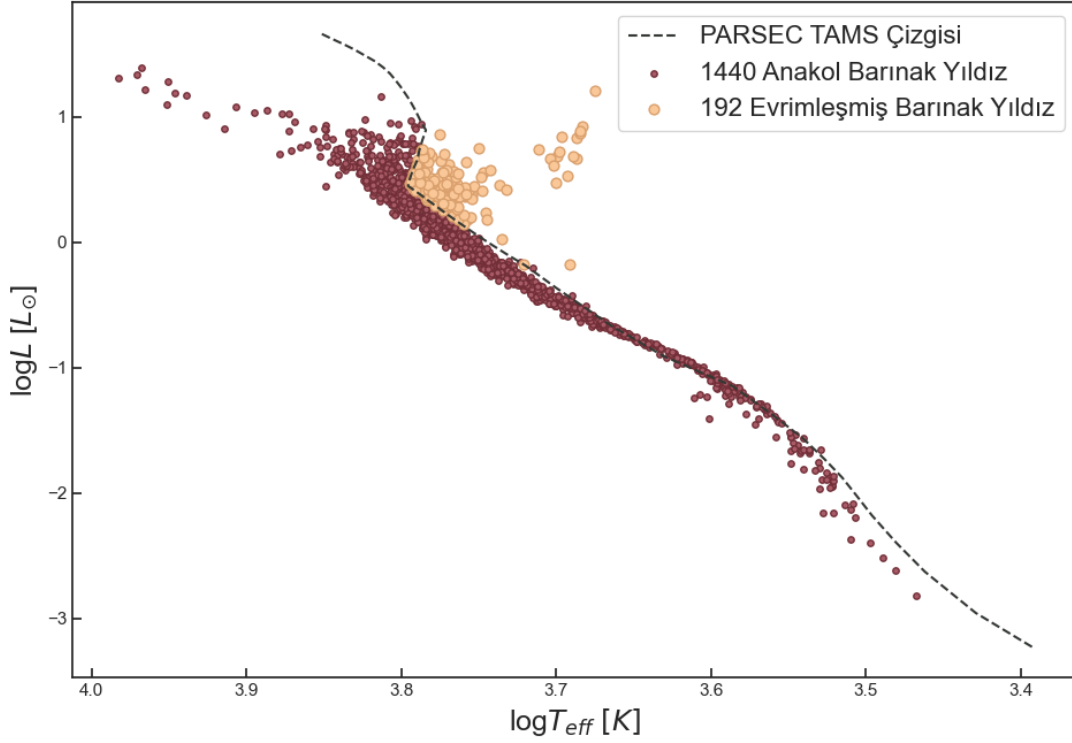
Kinematik hesaplamaların yapılabilmesi için öncelikli olarak yıldızların koordinat, trigonometrik paralaks ve öz hareket verilerinin eksiksiz olması gerekir. Ancak her barınak yıldız için bu parametreler eksiksiz bir şekilde bulunamayabilir. Bunun için eksik verisi bulunan yıldızlar istatistik dışı bırakıldığında, barınak yıldız sayısı 3338 olarak belirlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında kinematik inceleme yapmak ve bunların sonuçlarını tartışmak için homojen bir veri seti oluşturma önceliği benimsendi. Bu nedenle astrometrik parametreler ve dikine hız değerleri için geniş bir parametre bütünlüğü sağlayan *Gaia* DR3, veri tabanı tercih edildi. Barınak yıldızlar için kinematik inceleme yaparken barınak yıldızların ve gezegenlerin fiziksel parametrelerinin bilinmesi ve sonuçların fiziksel

parametrelerle birlikte değerlendirilmesi önemlidir. Bu bağlamda barınak yıldızlar ve gezegenler için fiziksel parametreler (Berger vd., 2023) çalışmasından elde edildi. Bu çalışma, *Kepler*, *K2* ve *TESS*'te bulunan barınak yıldızları içeren, 7993 yıldız ve 9324 gezegen için fiziksel parametreleri sağlayan ilk homojen kataloğu sunar ki bu durum, bu tez çalışmasındaki homojen veri üzerinden inceleme yapma düşüncesiyle doğrudan uyuşur.

Yıldız parametrelerinin homojen olarak belirlenmesinin önemini vurgulayan Berger vd. (2023), barınak yıldızlar için T_{eff} , $\log g$, kütle, yarıçap, ışınım gücü, yoğunluk, yaş, uzaklık parametrelerini, gezegenler için yarıçap, yarı-büyük eksen uzunlukları ve gelen ışık akıları (bu parametre ötegezegenin yıldızından aldığı enerjiyi ifade eder) listelemektedir. Yıldız parametreleri, *Gaia* DR3'ten elde edilen G_{BP} ve G_{RP} parlaklıklar, trigonometrik paralaks, $[\text{Fe}/\text{H}]$ (spektrofotometrik metal bolluğu) ve ölçülen konumlar kullanılarak "isoclassify" (Huber vd. 2017; Berger vd. 2020a) yöntemiyle türetilmiştir. Lindegren vd. (2021b), *Gaia* EDR3'teki (dolayısıyla DR3'teki) trigonometrik paralaksların yanlışlık içerdiğini belirtmiş ve kesin bir çözüm olmasa da trigonometrik paralakslar (Lindegren vd., 2021a) için düzeltme önermiştir. Berger vd. (2023), *Gaia* DR3'teki trigonometrik paralakslar için bu çalışmada önerilen sıfır noktası düzeltmesini (Lindegren ve diğ. 2021b) kullanmıştır. Ayrıca Berger vd. (2023), tayfsal metal bolluğu değerlerinin sistemik hatalar gösterdiğini (Andrae vd., 2023) belirtmiş ve The California-Kepler Survey (CKS; Petigura vd., 2017) metal bolluklarını, kıyaslama yapmak için kullanarak tayfsal metal bolluklarına düzeltmeler uygulamıştır. Son olarak da elde edilen barınak yıldız parametreleri, temel ve kesin kısıtlamalar kullanan interferometri ve astrosismoloji gibi çalışmalarla karşılaştırılarak elde edilen değerlerin uyumlu olduğu görülmüştür. Berger vd. (2023) çalışmasında sunulan veriler (Tablo 2 ve Tablo 4), EA'dan elde edilen 3338 barınak yıldız içeren veri tabanı ile eşleştirilerek yıldız ve gezegen özellikleri barınak yıldız tablosuna eklenmiştir. Bu eşleştirme sonucunda 2446 barınak yıldız için veriler hazırlanmış oldu. *Gaia* teleskobu dikine hız değerini belirli değerler aralığında ($Gaia$ DR3 için $3100 < T_{\text{eff}} < 14500$ K ve $G_{\text{RVs}} < 14$ kadir) olan yıldızlar için ölçtüğünden dikine hızın eksik olduğu barınak yıldızlar bulunmaktadır. Bundan dolayı *Gaia* DR3'te RV verisi eksik olan yıldızlar veri tabanından çıkarıldığında 1632 barınak yıldız elde edildi. Son olarak da PARSEC yıldız evrim yolları (Bressan vd., 2012) kullanılarak 192 dev yıldız listeden çıkarılarak 1440 anakol barınak yıldız kinematik

incelemeleri yapmak için hazır hale getirildi. PARSEC evrim yolları kullanılarak yapılan anakol yıldızlarının ayırımı Şekil 11’de görülebilir.



Şekil 11. PARSEC evrim yolları kullanılarak anakol ve evrimleşmiş yıldız olarak sınıflanan barınak yıldızlar.

NASA EA’dan elde edilen barınak yıldız verileri ve Berger vd. (2023) kataloglarından elde edilen verilerle eşleştirilerek bu çalışma içerisinde incelemelerin yapılacağı 1440 barınak yıldız veri tabanı oluşturuldu. Ancak Berger vd. (2023) her ne kadar homojen bir veri sağlasa ve bu çalışmada homojen veri kullanımı vurgulansa da bazı incelemelerde ve hesaplamalarda Berger vd. (2023)’den elde edilen gezegen parametreleri yetersiz kalmıştır. Özellikle açısal momentum hesaplamaları ve gezegen kütlelerine göre barınak yıldızların incelenmesi söz konusu olduğunda (Bölüm 4) gezegen kütlelerine ihtiyaç duyulmuştur. Bölüm 3.2.5’te bahsedildiği gibi gezegenin yörünge açısal momentumunun hesaplanabilmesi için kütle değerinin ve yörünge basınlığı değerinin bilinmesi gerektiği görülür. Aynı zamanda yıldızın dönme açısal momentumunun hesaplanabilmesi için de yıldızın dönme hızı verisine ihtiyaç duyulur. Berger vd. (2023) çalışması bu parametreleri

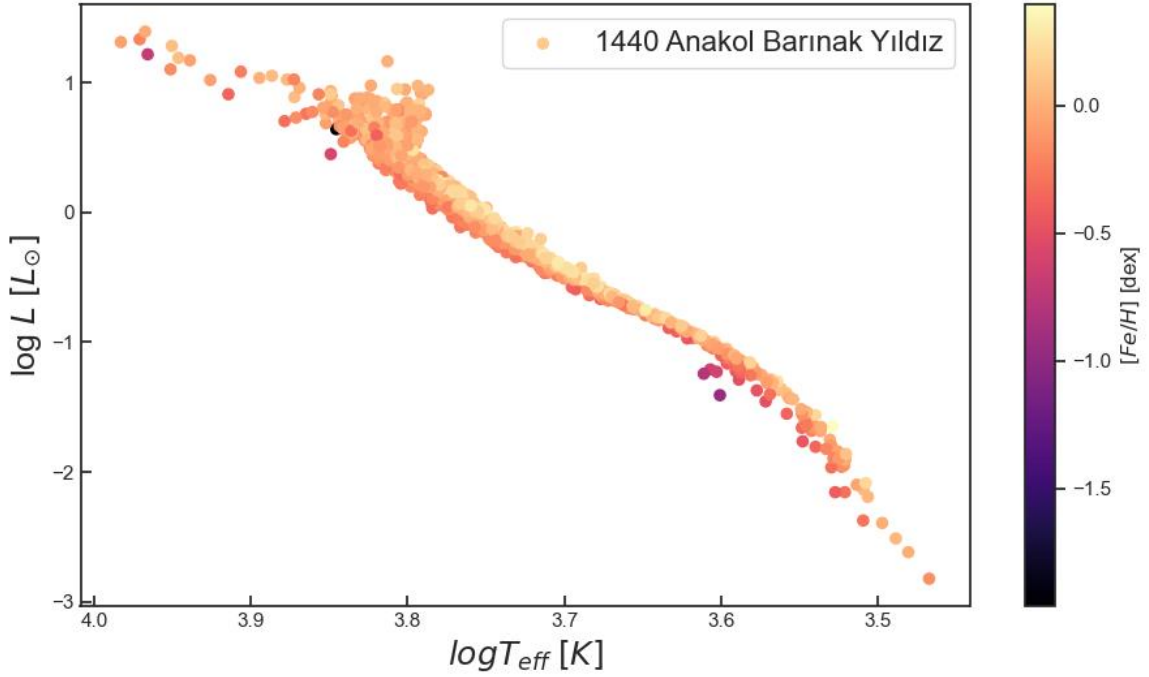
yani gezegen kütlesi (M_p), yörünge basıklığı (e) ve yıldızın dönme hızını (v_{sini}) içermemektedir. Bu nedenle, bu eksik parametrelerin tamamlanması için NASA EA'da bulunan "Planetary Systems" tablosundan yararlanılmıştır. Bu tablo her gezegen için yapılan çalışmalardan derlenen parametre setlerini içerir ve her gezegen için NASA EA'nın belirlediği bir "varsayılan" parametre seti bulunur. Bu varsayılan parametre setleri barınak yıldız ve ötegezegen parametreleri için birbiriyle en iyi uyum sağlayan değerler belirlenerek oluşturulmuştur. NASA EA'dan elde edilen parametre setleri bu çalışma içerisindeki homojen veri elde etme tutumuna tam olarak uymasa da gezegen ve yıldız parametreleri için belirlenen bu varsayılan değerler kullanılarak uyumlu bir veri elde etmek amaçlanmıştır.

Bu doğrultuda öncelikle NASA EA'dan M_p , e ve v_{sini} değerleri indirilerek gezegen kütlesi eksik olan sistemler veri tabanından çıkarıldı. Çalışmalarda gezegen kütleleri ya doğrudan hiçbir parametreye bağlı olmadan (M_p) elde edilebilir ya da gezegenin yörünge eğikliğine bağlı olarak ($M_p \sin i$) elde edilebilir. Yörünge eksen eğikliğine bağlı olarak elde edilen kütlelerle hesaplanan açısal momentumlar da bir parametreye bağlı olarak hesaplanmış olduğundan $M_p \sin i$ olarak verilen gezegen kütleleri de bu çalışma içerisinde kullanılmamıştır. Açısal momentum hesaplamalarında kullanılacak eksiksiz gezegen kütlesi içeren veri tabanında 448 barınak yıldız bulunmaktadır.

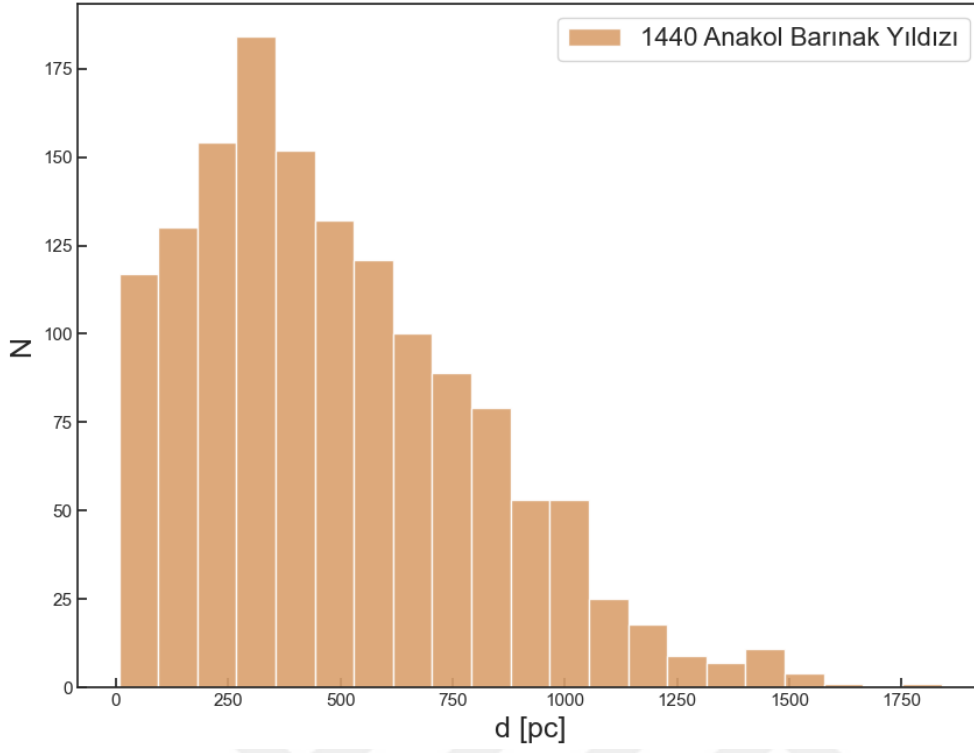
Bu çalışma içerisindeki açısal momentum hesaplamaları tek gezegenli sistemler üzerinden yapılmıştır ve bu nedenle birden fazla gezegeni olan sistemler de örnek grubu içerisinde çıkarılarak 323 barınak yıldız ve gezegen içeren veri tabanı elde edilmiştir. $13 M_j$ kütlelerinden büyük gezegenler kahverengi cüce sınıfına girer (Stevens ve Gaudi 2013) ve $13 M_j$ den büyük kütlesi olan üç gezegen-yıldız sistemi de hesaplamalarda kullanılmamıştır. Son olarak e ve v_{sini} değerleri eksiksiz olacak şekilde yeniden düzenlendiğinde 185 tek gezegenli barınak yıldız içeren örnek grubu elde edilir ve açısal momentum hesaplamaları için bu örnek grubu kullanılmıştır.

3.1.3. Derlenen Veriye Genel Bir Bakış

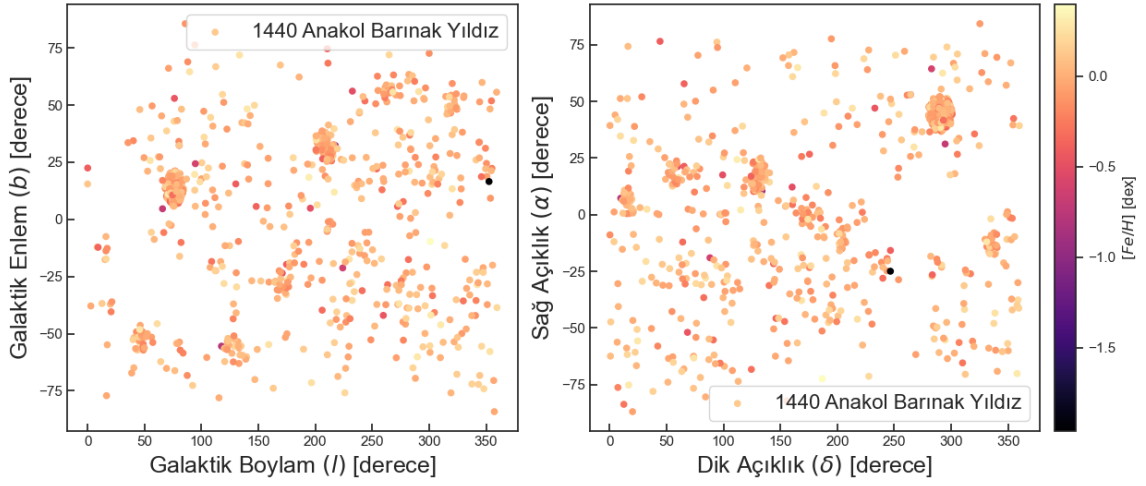
Kinematik incelemeler için derlenen anakol barınak yıldızlarının Hertzsprung-Russell (HR) diyagramındaki dağılımı Şekil 12'den görülebilir. Aynı şekilde barınak yıldızların $[Fe/H]$ dağılımları da yer almaktadır. Şekil 12, Güneş civarında yoğunlaşmayı göstermekle beraber metal bolluğunun da Güneş ile çoğunlukla uyumlu anakol yıldız ağırlıklı bir örneği (seçim etkisinin de etkisiyle) göstermektedir. Bu çalışmadaki barınak yıldız örneği Şekil 13'ten de görülebileceği gibi çoğunlukla 1500 pc uzaklığa kadar dağılmış durumdadır. Şekil 14 ise barınak yıldızların Gökada içerisindeki konumlarını göstermektedir. Şekil 15'te ise barınak yıldızların paralaks dağılımını yer almaktadır. Bu grafiğe göre anakol barınak yıldızlarının çoğu için göreceli paralaks hatası %2'den daha küçüktür. Şekil 16'da hesaplamalarda kullanılacak örneğin dikine hız değerlerinin ve onların hatalarının dağılımlarına ilişkin histogramlar görülebilir. Şekil 16'dan analizleri yapılacak barınak yıldızların dikine hız değerlerinin büyük çoğunluğunun -50 km s^{-1} ile $+50 \text{ km s}^{-1}$ aralığında yer aldığı ve dikine hız hatalarının da neredeyse tamamının 8 km s^{-1} 'den daha küçük olduğu ifade edilebilir.



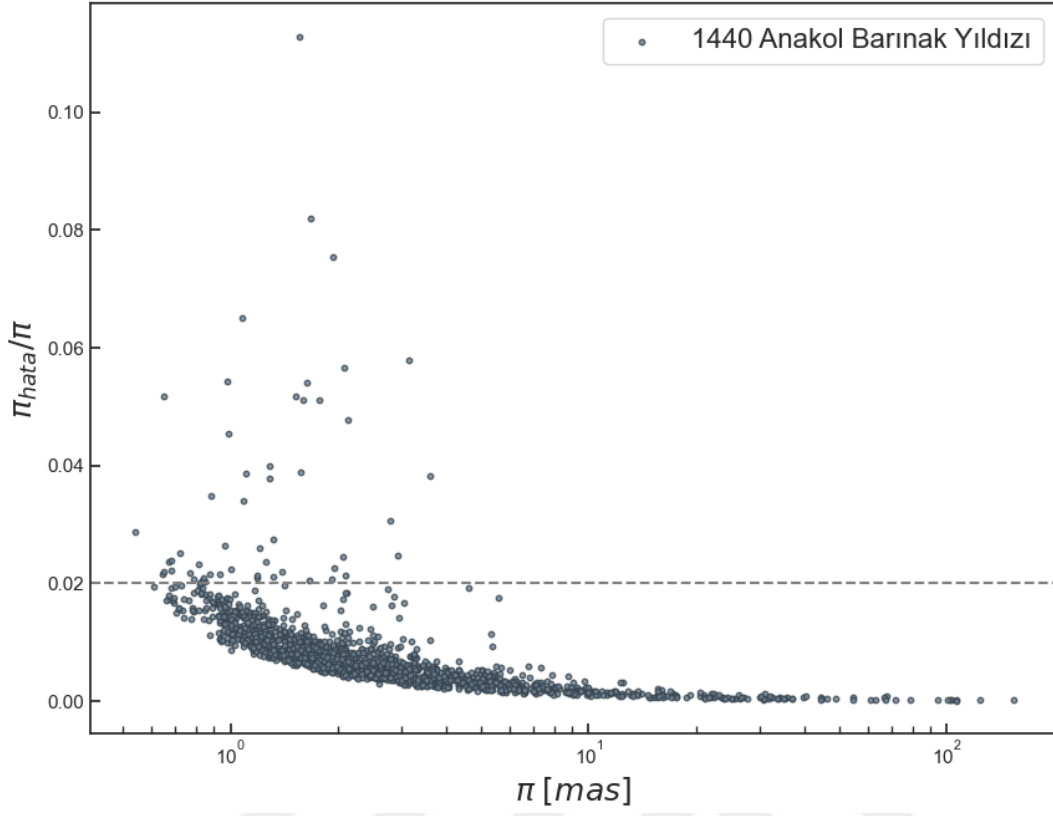
Şekil 12. Barınak yıldızların HR diyagramındaki konumları. Renkler $[Fe/H]$ değerlerine karşılık gelmektedir.



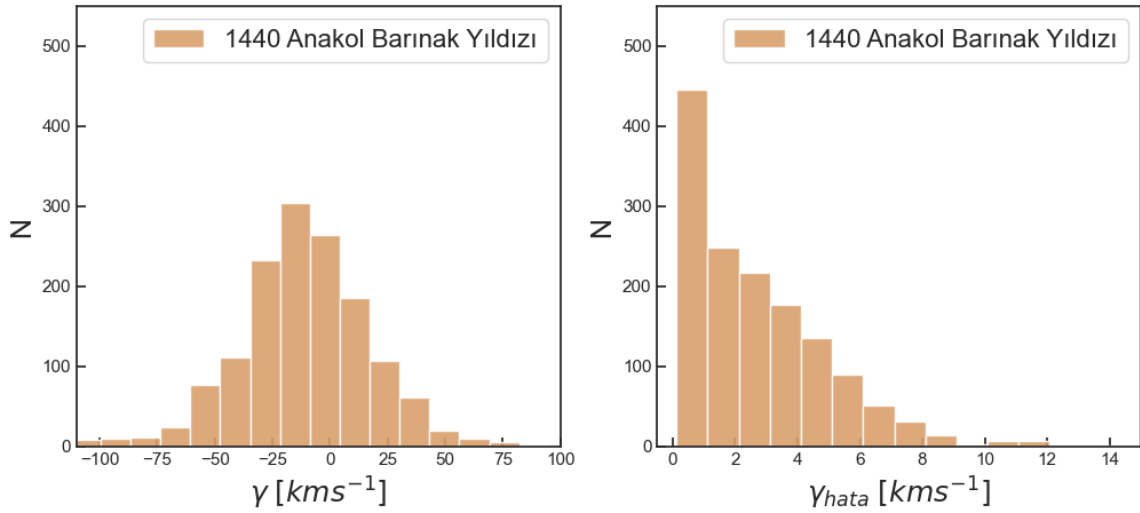
Şekil 13. Barınak yıldızlarının Güneş'ten olan uzaklıklarına ait histogram.



Şekil 14. Barınak yıldızların Galaktik ve ekvatorial koordinatlardaki konumları. Yıldızlar [Fe/H] değerine göre renklendirilmiştir.



Şekil 15. Barınak yıldızların *Gaia* DR3 trigonometrik paralaks değerlerine karşılık görelî paralaks hatalarının dağılımı.

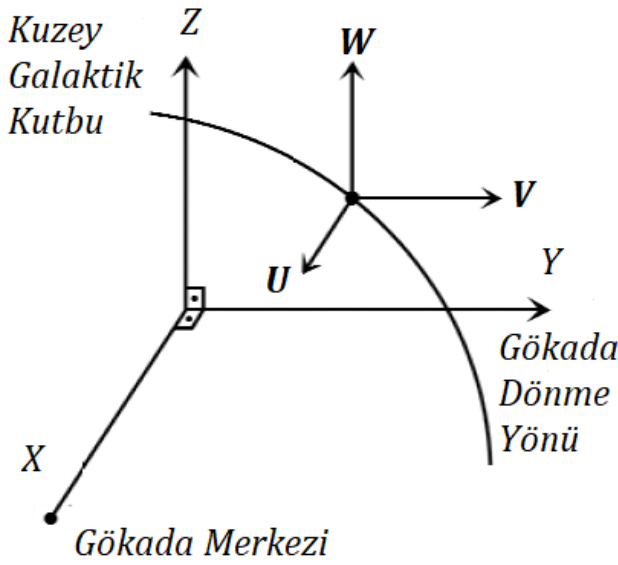


Şekil 16. Anadol barınak yıldızları için (a) dikine hız ve (b) dikine hız hatalarına ait histogramlar.

3.2. Yöntem

3.2.1. Barınak Yıldızların Uzay Hızlarının Hesaplanması

Yıldızların kinematik olarak incelenebilmesi için öncelikle uzay hız bileşenleri yani U , V , W hızlarının hesaplanması gerekir. U , V ve W uzay hız bileşenleri, sırasıyla, Gökada merkezi, Gökada dönme doğrultusu ve Kuzey Galaktik Kutbu (KGK) doğrultusundaki hız bileşenlerini ifade eder (Şekil 17).

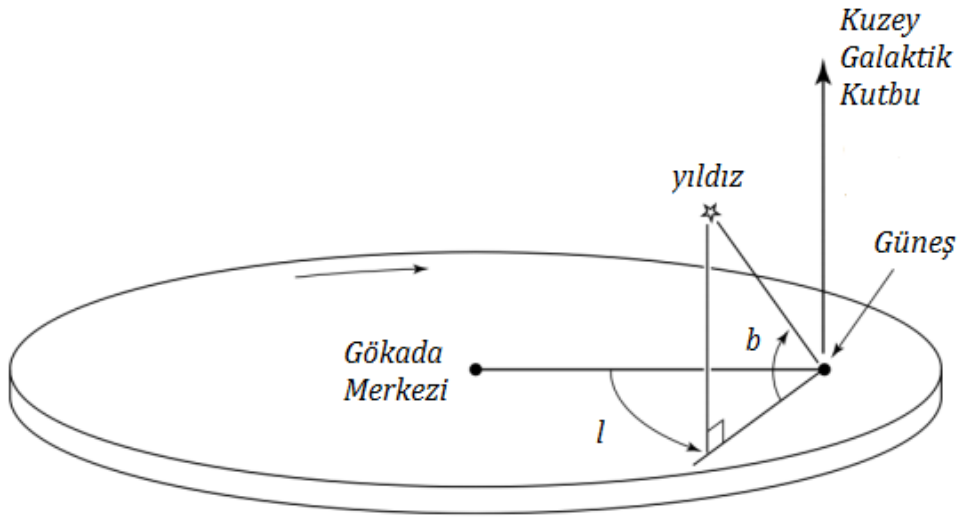


Şekil 17. Uzay hızının üç boyutlu hız bileşenleri U , V ve W hızlarının gökada içerisindeki doğrultularının gösterimi.

NASA EA'dan elde edilen barınak yıldızlar için bu hız bileşenlerinin ve hatalarının hesaplanmasında Johnson ve Soderblom (1987) algoritması kullanılırken dönüşüm matrisleri için Blaauw vd. (1960) tarafından tanımlanan Galaktik koordinat sistemi kullanıldı. Galaktik koordinat sistemi (Blaauw vd. 1960) üç açıyla tanımlanır: Bunlardan ikisi Johnson ve Soderblom (1987) tarafından $\alpha_{\text{KGK}} \equiv 12^{\text{h}}49^{\text{m}} = 192^{\circ},25$ (boylam) ve $\delta_{\text{KGK}} \equiv 27^{\circ},4$ (enlem) koordinatlarıyla verilen Kuzey Galaktik Kutbu'nun ekvatorial konumu, diğer açı ise yine Johnson ve Soderblom (1987)'de $\theta_0 = 123^{\circ}$ olarak tanımlanan, $l = 0^{\circ}$ Galaktik boylamından ve Kuzey Galaktik Kutbu'ndan geçen büyük yarım daireye göre Kuzey Gök Kutbu'nun konum açısıdır. Hesaplamalar için Bölüm 3.1'de bahsedildiği

gibi *Gaia*'nın DR3 veri tabanı kullanılarak elde edilen ve derlenen Galaktik koordinatlar (l , b), J2000 epoğuna karşılık gelen ekvatorial koordinatlar (α , δ), trigonometrik paralaks (ϖ), öz hareket bileşenleri ($\mu_\alpha \cos \delta$, μ_δ) ve dikine hız (γ) değerleri kullanılmıştır. Ekvatorial koordinatlarla galaktik koordinatlar arasındaki geçiş, aşağıda gösterilen matris dönüşümü ile gerçekleştirilir;

$$\begin{bmatrix} \cos b \cos l \\ \cos b \sin l \\ \sin b \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} \cos \delta \cos \alpha \\ \cos \delta \sin \alpha \\ \sin \delta \end{bmatrix} \quad (3.1)$$



Şekil 18. Temsili bir barınak yıldızının Galaktik koordinat Sistemindeki (l , b) temsili gösterimi.⁶

$$T = \begin{bmatrix} +\cos\theta_0 & +\sin\theta_0 & 0 \\ +\sin\theta_0 & -\cos\theta_0 & 0 \\ 0 & 0 & +1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin\delta_{KGK} & 0 & +\cos\delta_{KGK} \\ 0 & -1 & 0 \\ +\cos\delta_{KGK} & 0 & +\sin\delta_{KGK} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} +\cos\alpha_{KGK} & +\sin\alpha_{KGK} & 0 \\ +\sin\alpha_{KGK} & -\cos\alpha_{KGK} & 0 \\ 0 & 0 & +1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

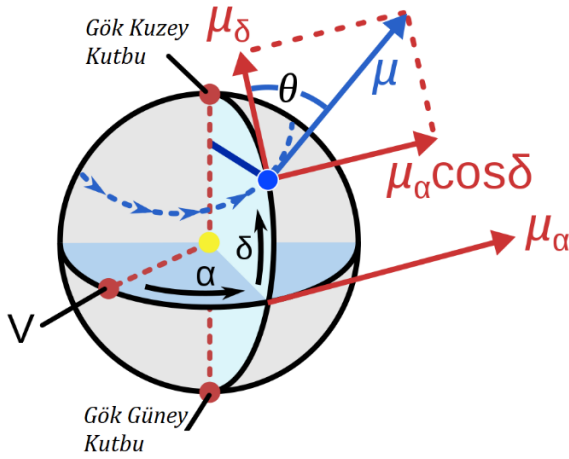
Ayrıca Johnson ve Soderblom (1987)'da bir koordinat matrisi (A) tanımlanır;

⁶ <http://reports.ias.ac.in/report/13699/astrometric-analysis-of-m67-open-cluster-using-gaia-dr2>

$$\begin{aligned}
A &\equiv \begin{bmatrix} +\cos\alpha \cos\delta & -\sin\alpha & -\cos\alpha \sin\delta \\ +\sin\alpha \cos\delta & +\cos\alpha & -\sin\alpha \sin\delta \\ +\sin\delta & 0 & +\cos\delta \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & -\cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\delta & 0 & -\sin\delta \\ 0 & -1 & 0 \\ -\sin\delta & 0 & -\cos\delta \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Uzay hız bileşenleri ise aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} \gamma \\ k\mu_\alpha/\varpi \\ k\mu_\delta/\varpi \end{bmatrix} \tag{3.4}$$



Şekil 19. Bir yıldızın öz hareket bileşenlerinin temsili gösterimi.⁷

Bir yıldızın zaman içerisinde konumunda meydana gelen değişimi ifade eden harekete (bu hareket Şekil 19'da görülebilir) öz hareket (μ) denir. $\mu_\alpha \cos\delta$ ve μ_δ öz hareket bileşenleridir. Öz hareket, yıldızın yılda yaptığı hareket cinsinden (yay saniye/yıl) ölçülür. Denklem 3.4'teki γ , yıldızın dikine hızıdır. Hesaplanan hız bileşenlerinin belirsizliğinin de

⁷ <http://reports.ias.ac.in/report/13699/astrometric-analysis-of-m67-open-cluster-using-gaia-dr2>

belirlenmesi gerekir ve herhangi bir fonksiyonun belirsizliği aşağıdaki gibi Denklem 3.5 hesaplanır;

$$\sigma_{F(x,y,z)}^2 = \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 \quad (3.5)$$

Hız bileşenlerinin belirsizliğinin hesaplanmasında koordinatların hatasız olduğu varsayılır. Sonuç olarak U , V , W hız bileşenlerindeki belirsizlikler, yıldızın öz hareket bileşenlerinin ($\mu_\alpha \cos \delta$, μ_δ), paralaksının (ϖ) ve dikine hızının (γ) ölçümündeki hatalardan kaynaklanır. Buna göre hatalar aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$\begin{bmatrix} \sigma_U^2 \\ \sigma_V^2 \\ \sigma_W^2 \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} \sigma_\gamma^2 \\ (k/\varpi)^2 [\sigma_{\mu_\alpha}^2 + (\mu_\alpha \sigma_\varpi/\varpi)^2] \\ (k/\varpi)^2 [\sigma_{\mu_\delta}^2 + (\mu_\delta \sigma_\varpi/\varpi)^2] \end{bmatrix} + 2\mu_\alpha \mu_\delta k^2 \sigma_\varpi^2 / \varpi^4 \begin{bmatrix} b_{12} b_{13} \\ b_{22} b_{23} \\ b_{32} b_{33} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Burada B matrisinin her bir elemanının karesi alınarak ($c_{ij} = b_{ij}^2$) C matrisi oluşturulur.

Bu çalışmada yukarıdaki matris dönüşümleriyle verilen hesaplamalar, bir Python paketi olan PyAstronomi kullanılarak (Czesla vd., 2019) yapıldı ve uzay hız bileşenleri (U , V , W) hesaplandı. PyAstronomi, astronomik verilerin analizi ve modellenmesi için çeşitli araçlar sağlayan açık kaynaklı bir Python paketidir. Bunun için ekvatorial koordinatlar (α , δ), öz hareket bileşenleri ($\mu_\alpha \cos \delta$, μ_δ), trigonometrik paralaks (ϖ) ve dikine hız (γ) değerleri giriş parametresi olarak girilerek (burada belirtilen giriş parametreleri denklem 3.4'ün sağ tarafındaki parametrelerdir) barınak yıldızlar için uzay hız bileşenleri elde edildi.

Uzay hız bileşenleri hesaplandıktan sonra Gökada içerisindeki gerçek hareketleri elde edebilmek için bazı düzeltmelerin yapılması gerekir. Bunlar; diferansiyel dönme düzeltmesi ve Yerel Durağanlık Standardı düzeltmesidir.

Gökada içerisinde bulunan yıldızlar Gökada kütle merkezi etrafında bir yörünge hareketi yaparlar. Ancak Gökadanın dönüşü katı bir cismin dönüşünden farklıdır ve Gökada merkezinden itibaren yıldızların açısal hızları azalır. Bu da Gökadanın diferansiyel dönmesine sebep olur. Astronomide yapılan gözlemlerin çoğu Güneş civarındaki yıldızlar için yapıldığından dolayı Güneş'ten uzaklaştıkça, Galaktik koordinatlara bağlı olarak, Güneş'e göre hesaplanan uzay hızları hatalar içerir. Diferansiyel dönme düzeltmesi, Gökadanın dönme hızındaki farklılıkları ortadan kaldırarak gerçek uzay hızlarının belirlenmesini ve dolayısıyla daha doğru sonuçlar elde edilmesini sağlar. Diferansiyel dönme, Gökada düzleminde meydana gelen bir etki olduğundan W hız bileşeni (Kuzey Galaktik Kutbu doğrultusundaki bileşen, Şekil 17) bu düzeltmeden etkilenmez, U ve V hız bileşenleri için düzeltmeler hesaplanarak uygulanır. Diferansiyel dönme düzeltmesi için hesaplamalar aşağıdaki gibi yapılır;

$$dU = \gamma \cos l - v_t \sin l \quad (3.7)$$

$$dV = \gamma \sin l - v_t \cos l \quad (3.8)$$

Burada dU ve dV , U ve V hız bileşenlerine uygulanacak diferansiyel dönme düzeltmelerini ifade eder. Diferansiyel dönme düzeltmesi için hesaplanan dU ve dV 'nin uzay hız bileşenlerinden çıkarılması gerekir. v_t Gökadanın diferansiyel dönmesinden kaynaklanan teğet hız, l Galaktik boylamdır. Görüldüğü gibi diferansiyel hız bileşenleri Gökadanın dönmesinden kaynaklanan dikine hız ve teğet hız bileşenlerinden meydana gelir ve bu dikine hız ve teğet hız bileşenleri aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$\gamma = A d \sin 2 l \quad (3.9)$$

$$v_t = d(A \cos 2l + B) \quad (3.10)$$

$$A = (14.8 \mp 0.8) \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1} \quad (3.11)$$

$$B = (-12.4 \mp 0.6) \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1} \quad (3.12)$$

Yukarıda verilen değerlere sahip A ve B , Oort sabitleridir. Burada r , Güneş'in yıldız olan uzaklığını ve $d = r \cos b$ yıldızın Galaktik düzlemdeki izdüşüm uzaklığını ifade eder. b ise yıldızın Galaktik enlemini gösterir.

Hesaplanan uzay hız bileşenlerinin (U, V, W) ölçülebilir parametreler yani ekvatorial koordinatlar, paralaks, öz hareket bileşenleri ve dikine hız kullanarak hesaplandığına dikkat etmek gerekir. Ölçülen parametreler Güneş'e göre yapılan gözlemlerden elde edildiğinden, yapılan bu yerel ölçümlerin Galaktik koordinat sistemiyle ilişkilendirilmesi gerekir. Bunun için Güneş'in hareketini ve Gökadanın ortalama dönüşünü açıklayan bir Yerel Durağanlık Standardı (Local Standard of Rest, LSR) belirlenir ve LSR, Gökada içindeki yıldızların gerçek hareketlerini belirlemek için kullanılan bir referans çerçevesini gösterir. Gökadanın çekim potansiyelindeki dairesel bir yörüngede ve Güneş'in bulunduğu konumda bulunan bir yıldızın durağanlık çerçevesi olarak tanımlanan LSR'nin belirlenebilmesi için öncelikli olarak Güneş'in özgül hareketinin (peculiar motion, u_{\odot}) belirlenmesi gerekir (Coşkunoğlu vd., 2011). Güneş'in özgül hızı, LSR'ye göre olan hızı ifade eder ve u_{\odot} ile gösterilir. Sonuç olarak ölçümlerin Güneş'e göre yapılmasından kaynaklı olarak uzay hız bileşenlerinin düzeltilmesi gerekir ve bunun için hesaplanan uzay hız bileşenlerinden (U, V, W) Güneş'in özgül hız bileşenlerinin ($U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot}$) çıkarılarak LSR'ye göre düzeltilmiş hız bileşenleri ($U_{\text{LSR}}, V_{\text{LSR}}, W_{\text{LSR}}$) elde edilir. Bu düzeltmeyi uygulamak için Coşkunoğlu vd.'nin (2011) verdiği Güneş'in LSR'ye göre hız bileşenleri olan $U_{\odot} = 8.50 \text{ km s}^{-1}$, $V_{\odot} = 13.50 \text{ km s}^{-1}$, $W_{\odot} = 6.49 \text{ km s}^{-1}$ değerleri kullanıldı.

3.2.2. Barınak Yıldızların Popülasyon Ayrımı

Gökada diskinin farklı kinematik özelliklere (kimyasal bolluk, yaş gibi) sahip farklı yıldız popülasyonu içerdiği uzun süredir bilinen bir gerçektir (Bensby vd., 2003). Bu nedenle de barınak yıldızları Gökada bağlamında incelemek için onların Gökada içerisinde hangi popülasyonda (ince disk, kalın disk, halo) olduğunun belirlenmesi gerekir. Barınak yıldızların Gökada içerisindeki popülasyon ayrımını yapmak için Bensby vd. (2003, 2014) tarafından verildiği gibi yaygın olarak kullanılan kinematik yaklaşım benimsendi. Bu

yaklaşım farklı popülasyonlardaki hız bileşenlerinin aşağıdaki gibi bir Gaussyan dağılım gösterdiğini varsayar;

$$f(U, V, W) = k * \exp\left(-\frac{(U_{LSR} - U_{asm})^2}{2\sigma_U^2} - \frac{(V_{LSR} - V_{asm})^2}{2\sigma_V^2} - \frac{W_{LSR}^2}{2\sigma_W^2}\right) \quad (3.13)$$

$$k = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}\sigma_U\sigma_V\sigma_W} \quad (3.14)$$

Burada k normalizasyon katsayısıdır ve σ_U , σ_V ve σ_W karakteristik hız dağılımlarını ifade eder. V_{asm} ve U_{asm} ise asimetrik sürüklenmedir. Bundan sonra iki farklı popülasyon arasındaki göreceli olasılıklar belirlenir;

$$\left. \begin{aligned} \frac{TD}{D} &= \frac{X_{TD} f_{TD}}{X_D f_D} \\ \frac{TD}{H} &= \frac{X_{TD} f_{TD}}{X_H f_H} \\ \frac{Herc}{D} &= \frac{X_{Herc} f_{Herc}}{X_D f_D} \\ \frac{Herc}{TD} &= \frac{X_{Herc} f_{Herc}}{X_{TD} f_{TD}} \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

Burada TD , ince disk; D , kalın disk; H , halo ve $Herc$ ise Hercules akışını temsil eder. Burada X , Gökada düzleminde belirli bir popülasyon için verilen normalizasyon kesridir.

Tablo 2

Güneş komşuluğundaki yıldız popülasyonları ve Hercules akışı için kinematik parametreler (Bensby vd., 2014).

	σ_U	σ_V	σ_W	U_{asm}	V_{asm}	X
				[km s ⁻¹]		
İnce disk	35	20	16	0	-15	0,85
Kalın disk	67	38	35	0	-46	0,09
Halo	160	90	90	0	-220	0,0015
Hercules	26	9	17	-40	-50	0,06

Bensby vd. (2003, 2014) Güneş komşuluğundaki yıldız popülasyonları için Tablo 2’de yer alan parametrik verileri vermişlerdir. Tabloda verilen sınırlamalar kullanılarak farklı popülasyonlar arasındaki göreceli olasılıklar belirlenebilir. Ancak Bensby vd. (2003, 2014) çalışmalarında belirlenmiş olan karakteristikler Güneş komşuluğundaki yıldızlar için hesaplanmıştır. Buna karşın bu çalışmada incelenen barınak yıldızların mesafesi Güneş komşuluğundan daha uzaklara (Bölüm 3.1.3’te belirtildiği gibi, 1.5 kpc’e kadar) dağılmış durumdadır. Hız elipsoidlerinin Galaktik konumlarla birlikte değiştiği gösterildiğinden (Williams vd., 2013) Güneş komşuluğunun daha dışına doğru yayılan barınak yıldızlar için Chen vd. (2021a), Tablo 2’de verilen parametreleri ince disk ve kalın disk için yeniden ele alarak güncellemişlerdir. Bu güncellemenin sonucunda Bensby vd.’nin (2014) verdiği değerlerle bir karşılaştırma yapıldığında parametreler arasında çok büyük farklar olmadığı, parametrelerin büyük ölçüde benzer olduğu görülmüş ve yapılan güncellemenin Güneş komşuluğuna indirgenebileceği gösterilmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada Bensby vd. (2014) çalışmasında verilmiş ve Tablo 3’te gösterilen sınırlamalar kullanılmıştır.

Popülasyon ayrımı yapılırken göreceli olasılıklar için bazı kriterler kullanılır. Bu çalışmada Bensby vd. (2003) ve Bensby vd. (2014) (Bensby03 ve Bensby14) kriterleri kullanılmıştır (Tablo 2). Tabloda da görüldüğü üzere bu çalışmada popülasyon ayrımı için iki farklı kriter dikkate alınmıştır. Yapılan bu iki farklı ayrım arasındaki karşılaştırmaya bulgular kısmında (Bölüm 4.1) değinilecektir.

Tablo 3

Yıldızların Gökadadaki popülasyon sınıflaması için kullanılan kriterler (Bensby vd., 2003, 2014).

	Bensby vd. (2003)	Bensby vd. (2014)
İnce disk	$\frac{TD}{D} < 1$	$\frac{TD}{D} < 0.5 \ \& \ \frac{Herc}{D} < 0.5$
Kalın disk	$1 < \frac{TD}{D} < 100$	$\frac{TD}{D} > 2 \ \& \ \frac{TD}{H} > 1 \ \& \ \frac{Herc}{TD} < 0.5$
Halo	$\frac{TD}{D} > 100$	$\frac{TD}{D} > 2 \ \& \ \frac{TD}{H} < 1 \ \& \ \frac{Herc}{TD} < 0.5$
Hercules		$\frac{Herc}{D} > 1 \ \& \ \frac{Herc}{TD} > 1$

3.2.3. Dinamik Yörünge Parametrelerinin Belirlenmesi

Gökadaki yıldızların yörünge parametrelerinin hesaplanmasında Gökada kütle çekim potansiyeline ihtiyaç duyulur. Gökada içerisinde yer alan yıldızların kütleçekim potansiyelini hesaplamak için teorik olarak tüm yıldızların noktasal kütle potansiyellerinin hesaplanarak birleştirilmesi gerekir ancak tipik bir Gökada içerisinde bulunan yaklaşık 10^{11} yıldız için teker teker hesaplama yapmak mümkün değildir (Binney ve Tremaine, 2008). Böyle bir hesaplama yerine yıldızların kütle yoğunluğu düzleştirilerek yani yıldızlar homojen bir şekilde dağıtılarak modelleme yapılır. Sonuç olarak, yıldızların ayrı ayrı potansiyel etkilerinin hesaplanması yerine yıldızların toplam kütle yoğunluğu homojen bir şekilde dağılmış olarak belirlenir ve bu şekilde hesaplamalar daha basit ve uygulanabilir hale gelir. Yıldızların dinamik yörünge parametrelerinin belirlenmesi için bu şekilde oluşturulan modeller kullanılır.

Gökada dinamiğinde kullanılan çeşitli gökada potansiyelleri bulunur ve çalışma amacına bağlı olarak gökada için kullanılan potansiyeller değişkenlik gösterebilir. Bu çalışmada barınak yıldızların dinamik yörünge parametrelerini belirlemek için bir Python paketi olan Galpy kullanılmıştır (Bovy, 2015). Galpy, Gökada içerisindeki yıldızların ve diğer dinamik nesnelerin yörüngelerini hesaplamak için kütleçekim potansiyellerini barındıran bir Galaktik dinamik yazılım aracıdır. İçerisinde bulunan temel potansiyellerin yanında kullanıcı tarafından belirtilen potansiyelleri karakterize etmek için de bir dizi işlev içerir (Bovy, 2015). Bu çalışmada galpy.potential modülü içerisinde bulunan MWPotential2014 potansiyel modeli kullanılmıştır. Bu model, Gökadanın çekim potansiyeli için gerçekçi bir model gerektiği durumlarda kullanılmak üzere tasarlanmış ve basit, kullanımı kolay bir model sunmayı amaçlar (Bovy, 2015). Bu Gökada potansiyeli hesabında Güneş'in gökada merkezine olan uzaklığı $R_0 = 8$ kpc ve Güneş'in dairesel hızı $V_0 = 220 \text{ km s}^{-1}$ (Bovy vd., 2012) olarak kullanılmıştır. Bu potansiyel için belirlenen diğer kriterler ve özellikler, detaylı olarak Bovy (2015) çalışmasından incelenebilir.

Yörünge hesaplamaları için ekvatorial koordinatlar (α, δ) , uzaklık (d) , öz hareket bileşenleri $(\mu_\alpha \cos \delta, \mu_\delta)$ dikine hız (γ) girdi parametreleri olarak girilerek barınak yıldızlar için

dinamik yörünge parametreleri elde edilmiştir. Galpy kullanılarak hesaplanan dinamik yörünge parametreleri: yörünge maksimum Z yüksekliği (Z_{\max}), yörünge apogalaktik uzunluğu (R_{ap}), yörünge perigalaktik uzunluğu (R_{peri}), yörünge yataydaki basıklığı (e_p), yörünge dolanım periyodu (T_p) ve yörünge salınım periyodu (T_r)'dur.

3.2.4. Kinematik Yaş Hesabı

Barınak yıldızların veya ötegezegenli sistemlerin oluşum ve evriminden bahsederken yıldızların yaşının göz ardı edilmesi mümkün değildir. Sonuçta yıldızlarda ve gezegen sistemlerinde gerçekleşen süreçler zaman içerisinde meydana gelir. Bir yıldızın yaşı doğrudan ölçülebilir bir parametre değildir ve çeşitli yöntemlerle yaş tahmin edilebilir. Bu yöntemlerden biri de yıldız grupları için kullanılan kinematik yöntemdir. Kinematik yaş yıldızların tek tek yaşlarının belirlenmesi için kullanılabilen bir yöntem değildir ve ancak yıldız gruplarına uygulanır (Soderblom, 2010). Bu yaş, yıldızların hız dispersiyonuyla ilişkilidir. Yıldızların uzay hız dispersiyonlarının (σ_v) yaş (τ) ile arttığı iyi bilinir ve hız ile yaş ilişkisi farklı araştırmalarda incelenen bir konudur (Parenago, 1950; Wielen, 1977; Holmberg vd., 2009; Chen vd., 2021a).

Wielen'in (1977) bahsettiği gibi yıldızların hızlarında yaşla birlikte bir artma meydana gelir ve bu artış, gökadanın değişken bir kütle çekim alanına sahip olmasından kaynaklanır. Bu düzensiz kütle çekim alanının yıldızların yörüngeleri üzerindeki etkisi, hız uzayında bir difüzyon süreci olarak açıklanır. Hız-yaş ilişkisi ise iki cisim etkileşimine dayanan bu difüzyon sürecinin yıldız yaşı ile ilişkilendirilmesi sonucunda belirlenir.

Bir yıldızın hızı, yörünge değişimleri ve düzensiz pertürbasyonlar ile değişir. Yörünge değişimleri burada ihmal edilerek hız dispersiyonunun zamanla nasıl değiştiğini anlamak için "kuvvetten bağımsız difüzyon" adı verilen bir sürece odaklanılır (Wielen, 1977). Buna bağlı olarak hız dispersiyonunun zamanla nasıl değiştiğini açıklamak için bir difüzyon katsayısı belirlenir ve yıldızın uzay hızı bu difüzyon katsayısı ile tanımlanır (Wielen, 1977);

$$d(v^2) = C_v dt \quad (3.16)$$

C_v 'nin sabit olduğu durumda aşağıdaki denklem elde edilir;

$$v^2 = v_0^2 + C_v \tau \quad (3.17)$$

Burada v_0 oluşum zamanındaki başlangıç hızı, v şu anda istatistiksel olarak beklenen hız ve τ yıldızın şu anki yaşını ifade eder. Aynı yaşta olan bir grup yıldız için ortalama alınarak aşağıdaki denklem elde edilir;

$$\sigma_v = (\sigma_{v,0}^2 + C_v \tau)^{1/2} \quad (3.18)$$

σ_v yıldız grubunun şu andaki hız dispersiyonu, $\sigma_{v,0}$ sıfır yaşındaki hız dispersiyonunu ifade eder ve $\sigma_{v,0} = 10 \text{ km s}^{-1}$ olarak kabul edilir (Wielen, 1977).

Yıldızların özgül hızı (v) arttıkça, yıldızlar ve diğer kütleler arasındaki kütle çekimi etkileşimlerine bağlı olarak yayılma katsayısının (C_v) genel olarak azaldığı bilinmektedir (Spitzer ve Schwarzschild, 1953; Chandrasekhar, 1960; Hénon, 1973). Bu durum, yıldızların hızlarının etkileşime girdikleri kütlelerin hızlarından daha büyük olduğu durumlarda geçerlidir ve difüzyon katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$C_v = \frac{\gamma_v}{v} \quad (3.19)$$

Burada γ_v difüzyon mekanizmasına bağlı bir sabiti ifade eder. Denklem 3.16 ve 3.19 kullanılarak aşağıdaki denklem elde edilir;

$$v^3 = v_0^3 + \frac{3}{2} \gamma_v \tau \quad (3.20)$$

Burada amaç artık yaş (τ) ile hız dispersiyonu ($\sigma_v(\tau)$) arasındaki ilişkiyi türetmektir ve bunun için v^2 'nin, başlangıç hızlarının dağılımı olan v_0 üzerinden integrali alınır. Bu dağılımın iyi bilinmemesi ve difüzyon katsayısının (Denklem 3.19) küçük hızlar için zayıf bir yaklaşım olması nedeniyle, tüm yıldızların $v_0 = \sigma_{v,0}$ ile başladığı varsayılarak aşağıdaki denklem elde edilir;

$$\sigma_v = (\sigma_{v,0}^3 + \frac{3}{2} \gamma_v \tau)^{1/3} \quad (3.21)$$

Burada Wielen (1977), büyük yaşlarda (yaklaşık 3×10^9 yıl yaşından sonra) gözlenen hızların Denklem 3.21 tarafından izin verilenden daha hızlı bir şekilde arttığını ifade eder. Bu da Denklem 3.19'da sabit olan γ_v 'nin zamanla değişebileceğinin göstergesi olabilir ve γ_v 'nin zamanla (t) azaldığı varsayımıyla aşağıdaki denklem elde edilir;

$$\gamma_v(t) = \gamma_{v,p} \times \exp\left(-\frac{(t - t_p)}{T_\gamma}\right) \quad (3.22)$$

Burada $\gamma_{v,p}$, γ_v 'nin şu andaki değerini ifade eden bir sabittir. T_γ , γ_v 'nin bozunma zamanıdır ve değeri $5 \cdot 10^9$ yıldır. Sonuç olarak $v_0 \sim \sigma_{v,0}$ olduğu varsayılarak ve Denklem 3.16, 3.19, 3.22 kullanılarak yaş ile hız dispersiyonu arasındaki ilişki aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\sigma_v^3 = \sigma_{v,0}^3 + \frac{3}{2} \gamma_{v,p} T_\gamma \left[\exp\left(\frac{\tau}{T_\gamma}\right) - 1 \right] \quad (3.23)$$

Buradaki $\gamma_{v,p}$ değeri zaman içerisinde daha hassas bir şekilde belirlenerek Wielen'in (1977) verdiği değerden farklı olarak ($\gamma_{v,p} = 1.0915 \times 10^{-5} \text{ km s}^{-1}$) kullanılmıştır (Cox 2000). Katsayılar ($\sigma_{v,0}, \gamma_{v,p}, T_\gamma$) yerine konulduğunda denklemin son hali aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\sigma_v^3 = 1000 + 81862.5 \left[\exp\left(\frac{\tau}{5 \times 10^9}\right) - 1 \right] \quad (3.24)$$

Burada elde edilen kinematik yaşın (τ) birimi yıldır. Verilen Denklem 3.24'ten kinematik yaşı elde edebilmek için öncelikle hız dispersiyonunun belirlenmesi gerekir. Hız dispersiyonu, bir grup yıldız için hesaplanır ve grubun yerel ortalama hızındaki sapmanın bir ölçüsünü ifade eder. Yıldızların özgül hızı v 'nin yerel ortalama hıza göre ne kadar saçıldığı aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$\sigma_v = \left(\frac{\sum_i (v_i - \langle v \rangle)^2}{N} \right)^{1/2} \quad (3.25)$$

Burada σ_v kinematik yaş hesaplamak için oluşturulan yıldız grubunun hız dispersiyonu, v grup içerisindeki yıldızların özgül hızı yani LSR'ye göre olan uzay hızı ve $\langle v \rangle$ özgül hızların ortalamasıdır. N ise grup içerisindeki yıldız sayısını ifade eder. Bölüm içerisinde nasıl hesaplandığı açıklanan LSR'ye göre olan uzay hız bileşenlerinden v hızı türetilir;

$$v = (U_{LSR}^2 + V_{LSR}^2 + W_{LSR}^2)^{1/2} \quad (3.26)$$

3.2.5. Gezegen Sistemlerinin Açısal Momentum Hesabı

Açısal momentum, bir cismin dönme hareketinin ölçüsüdür ve yıldızların hareketlerindeki dönme etkisini ifade eder. Bu çalışma içerisinde ötegezegen sistemleri için (tek gezegenli tek yıldızlı sistemler için) açısal momentum hesaplamaları yapılmıştır. Bir gezegen sisteminin toplam açısal momentumu, gezegenin yörünge açısal momentumu ve

yıldızın dönme açısal momentumundan meydana gelir. Sistemin sahip olduğu gezegenin dönme açısal momentumu ise genellikle ihmal edilir (Jiang vd., 2022). Gezegenin açısal momentumunun hesaplanması için Berget ve Durrance'in (2010) verdiği aşağıdaki denklem kullanılmıştır;

$$L_p = M_p \sqrt{GM_* a (1 - e^2)} \quad (3.27)$$

Burada L_p gezegenin yörünge açısal momentumunu ifade eder. M_p gezegenin kütlesi, G evrensel kütle çekim sabiti, M_* yıldızın kütlesi, a yarı büyük eksen uzunluğu ve e yörünge basıklığıdır. Yıldızın dönme açısal momentumu ise aşağıdaki denklemle hesaplanır;

$$J_* = \left(\frac{v \sin i}{R_*} \right) I_* \quad (3.28)$$

Buradaki J_* yıldızın dönme açısal momentumunu ifade eder. $v \sin i$ yıldızın dönme eksen eğikliğine (i) bağlı dönme hızı, R_* yıldızın yarıçapı ve I_* eylemsizlik momentidir. Eylemsizlik momenti aşağıdaki denklemde olduğu gibi ifade edilir;

$$I_* = \frac{2}{5} M_* R_*^2 \quad (3.29)$$

Buradaki $2/5$ katsayısı, yıldızın düzgün bir katı cisim olduğu varsayımından gelir. Sistemin toplam açısal momentumu ise gezegenin yörünge açısal momentumu ve yıldızın dönme açısal momentumunun toplanmasıyla ($L_{tot} = L_p + J_*$) elde edilir (Gurumath ve diğ. 2019). Kütle başına açısal momentumu ifade eden özgül açısal momentum hesaplamaları ise aşağıda verildiği gibi açısal momentumların kütleyle bölünmesiyle elde edilir;

$$\begin{aligned}
 l_p &= \frac{L_p}{M_p} \\
 l_\star &= \frac{J_\star}{M_\star} \\
 l_{sistem} &= \frac{L_{tot}}{M_p + M_\star}
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} l_p \\ l_\star \\ l_{sistem} \end{aligned}} \right\} \quad (3.30)$$

Yukarıda da görülebileceği gibi özgül açısal momentum gezegen ve yıldız için ayrı ayrı hesaplanabilir veya sistemin toplam açısal momentumunun sistemdeki toplam kütleyle bölünmesiyle sistemin özgül açısal momentumu elde edilebilir.

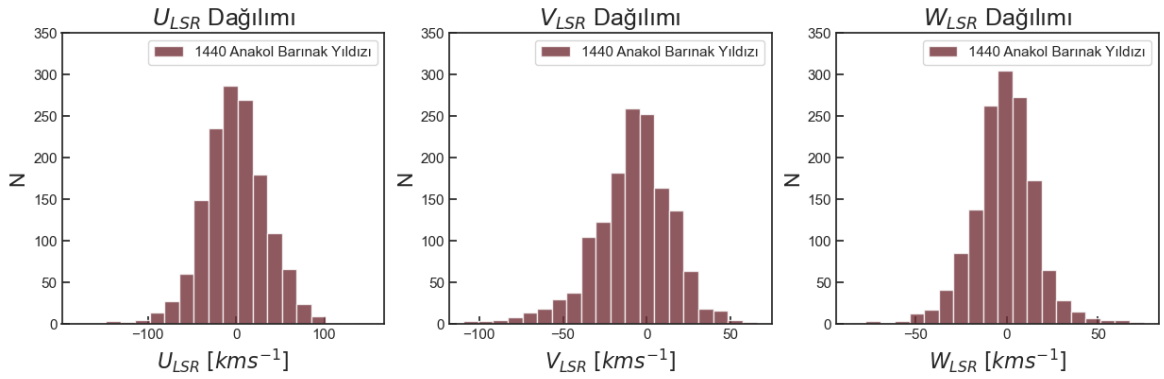


DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

ARAŞTIRMA BULGULARI

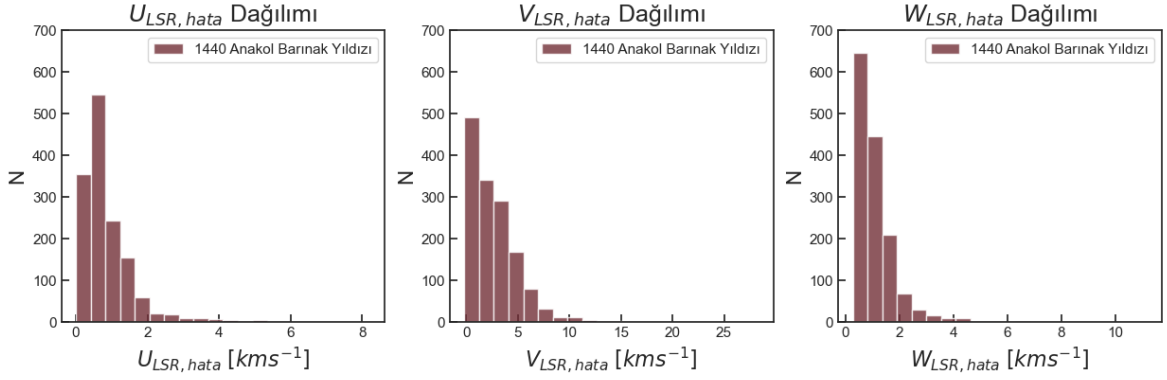
4.1. Barınak Yıldızların Uzak Hız Dağılımları ve Popülasyon Ayrımları

NASA EA'dan derlenen 1440 anakol barınak yıldızının veri tabanı bu bölümdeki analizlerde kullanılacaktır. Bölüm 3.2.1'deki uzak hızlarının hesaplanmasına ilişkin yöntem kullanılarak ilgili örneğin uzak hız bileşenleri (U , V , W) hesaplandı ve aynı zamanda diferansiyel dönme ve LSR düzeltmesi uygulanarak düzeltilmiş uzak hız bileşenleri (U_{LSR} , V_{LSR} , W_{LSR}) elde edildi. Hesaplanan uzak hız bileşenlerinin histogram dağılımları Şekil 20'de gösterilmektedir. Şekilden görülebileceği gibi uzak hız bileşenleri Gaussian bir dağılım gösterirler. Yıldızların öz hareket bileşenlerinin, trigonometrik paralakslarının ve dikine hızlarının ölçümünden kaynaklanan uzak hız bileşenlerinin hatası ise Denklem 3.6'dan hesaplanmıştır. Bu uzak hız hatalarının histogram dağılımları ise Şekil 21'den görülebilir.

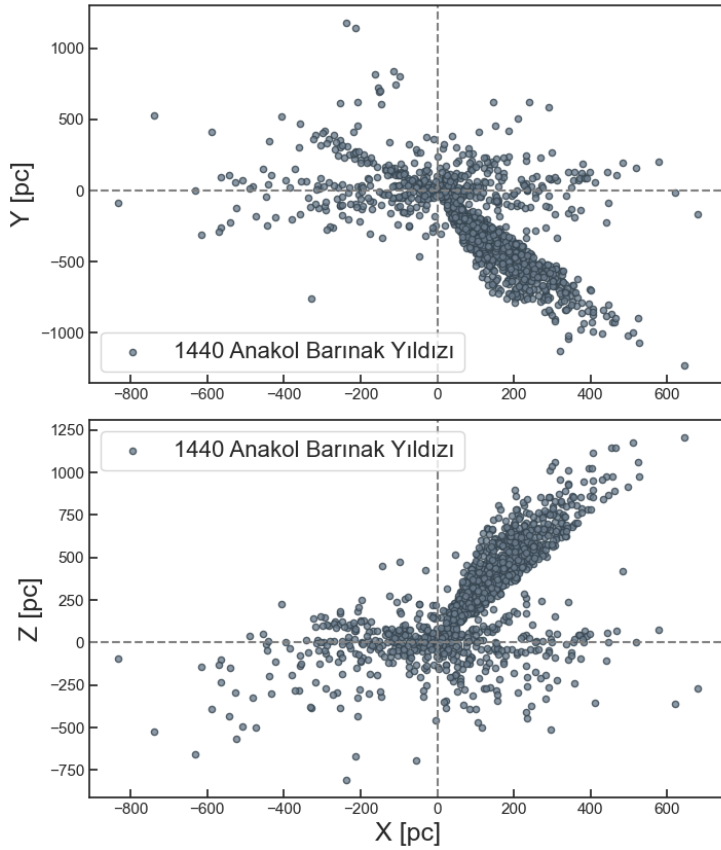


Şekil 20. Araştırmada kullanılan 1440 barınak yıldızının uzak hız bileşenlerine ait (U_{LSR} , V_{LSR} , W_{LSR}) histogramlar.

Barınak yıldızların Gökada içerisinde ekvatorial ve Galaktik koordinatlarındaki konumları Bölüm 3.1.3'te verilmişti. Yıldızların ekvatorial koordinatları ve uzaklıkları kullanılarak elde edilen Güneş merkezli XYZ kartezyan koordinatlardaki konumlar Şekil 22'de gösterilmiştir. Şekilden görülebileceği gibi barınak yıldızlar merkezi Güneş olan ve yaklaşık 1 kpc yarıçaplı bir alanın içinde yer alırlar. Bu durum ötegezegen keşiflerinin Güneş komşuluğunun ötesine doğru uzanmaya başladığının da bir göstergesidir.

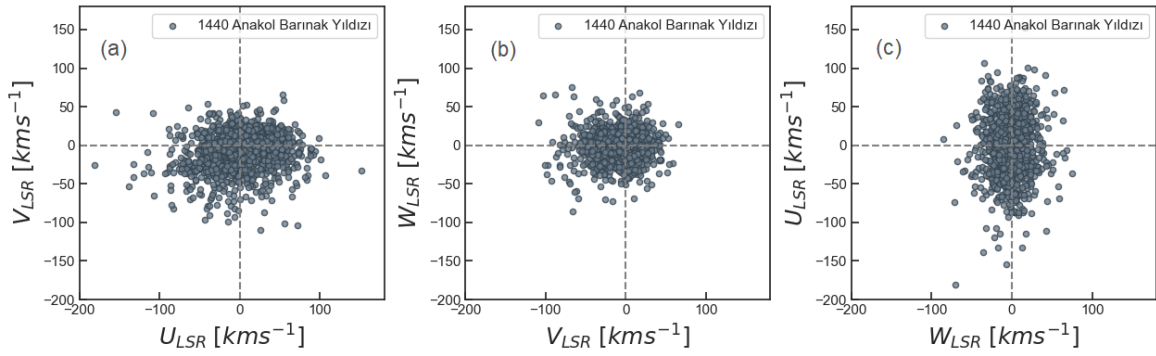


Şekil 21. Barınak yıldızların uzay hız bileşenlerine ait hataların ($U_{LSR, hata}$, $V_{LSR, hata}$, $W_{LSR, hata}$) histogramları.



Şekil 22. Barınak yıldızların XYZ kartezyen koordinatlardaki konumları. Üstteki grafik XY-düzlemini, alttaki grafik XZ-düzlemini gösterir. $(X,Y,Z) = (0,0,0)$ koordinatları Güneş'in konumuna karşılık gelmektedir.

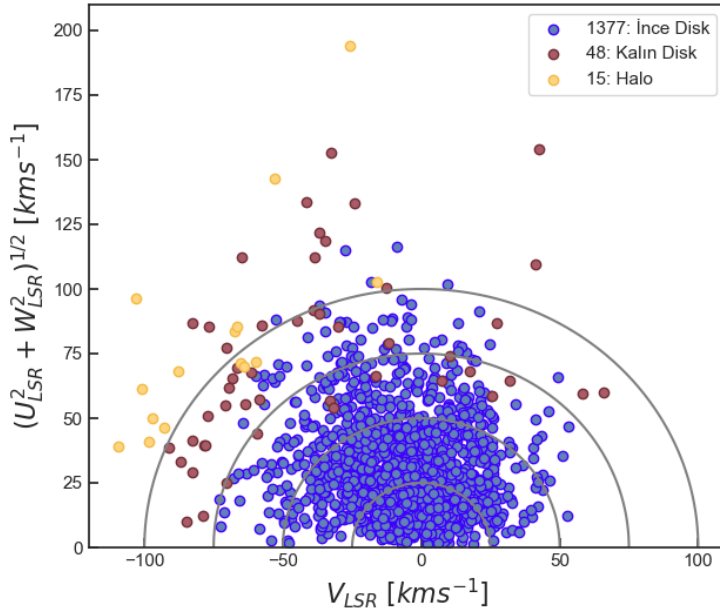
Şekil 23, uzay hız bileşenlerinin 2-boyutlu hız dağılımlarını gösterir. Dağılımlara bakıldığında U_{LSR} uzay hız bileşeni yani Gökada merkezi doğrultusundaki hız bileşeninin $[-100, +100]$ km s^{-1} aralığında, V_{LSR} uzay hız bileşeni yani Gökada dönme doğrultusundaki hız bileşeninin $[-100, +50]$ km s^{-1} aralığında ve W_{LSR} uzay hız bileşeni yani Galaktik kuzey kutbu doğrultusundaki hız bileşeninin $[-50, +50]$ km s^{-1} aralığında bir dağılım gösterdiği görülür.



Şekil 23. Uzay hız bileşenlerinin 2-boyutlu dağılımları. (a) $U_{LSR} - V_{LSR}$, (b) $V_{LSR} - W_{LSR}$ ve (c) $W_{LSR} - U_{LSR}$ düzlemlerinde.

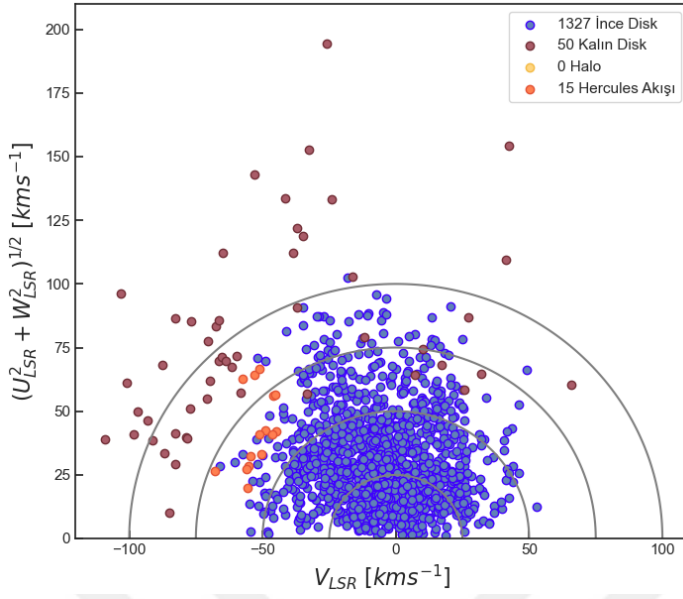
Elde edilen uzay hız bileşenleri, barınak yıldızları gökada bağlamında incelerken yapılacak incelemelerin ve hesaplamaların temelini oluşturur. Uzay hız bileşenleri hesaplandıktan sonra barınak yıldızların popülasyon ayrımları, Bölüm 3.2.2’de aktarıldığı gibi, Bensby03 ile Bensby14 tarafından verilen iki yöntem kullanılarak belirlendi. Bunun yanında Bölüm 3.2.3’de bahsedilen yörünge parametreleri ile belirlenen popülasyon ayrımları da tez çalışması içerisinde kullanılmıştır. Popülasyon ayrımları yıldızların bir bileşende bulunma olasılığının başka bir bileşende bulunma olasılığına oranı belirlenerek ve belirli kriterler kullanılarak yapılır. Bu çalışmada Tablo 2 (Bölüm 3.2.2)’de verilmiş olan sınırlamalar kullanıldı. Bu sınırlamalar büyük çoğunlukla TD/D oranı yani kalın diskte bulunma olasılığının ince diskte bulunma olasılığına oranı üzerinden belirlenir. Bensby03 ince disk ve kalın disk ayrımı için $TD/D = 1$ değerini verirken Bensby14, ince disk için $TD/D < 0,5$ ve kalın disk için $TD/D > 2$ kriterlerini önerir.

Bensby03'e göre yapılan popülasyon ayrımı Şekil 24'te verilmiştir. Bu kriterlere göre barınak yıldızların büyük bir çoğunluğunun (% 95,6) ince disk yıldızı olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, kalın diskteki yıldız sayısı 48, halodaki yıldız sayısı da 15 olarak belirlenmiştir. Bensby14'e göre yapılan popülasyon ayrımı ise Şekil 25'de gösterilmektedir. Bu kriterlere göre barınak yıldızların büyük bir çoğunluğunun (% 92,15) ince disk yıldızı olduğu ve kalın diskteki yıldız sayısının sadece 50 olduğu belirlenmiştir. Ek olarak halo popülasyonuna ait barınak yıldız bulunmadığı bunun yerine Hercules akışında 15 barınak yıldız bulunduğu gösterilmiştir.



Şekil 24. Barınak yıldızlar için Bensby vd. (2003) kriterlerine göre oluşturulan popülasyon ayrımlarının Toomre diyagramı üzerindeki konumları.

Bensby03 kriterlerine göre yapılan sınıflamada haloda barınak yıldız olduğu tespit edilirken Bensby14 kriterlerine göre halo popülasyonunda herhangi bir yıldız tespit edilmemiştir. Bölüm 2.2.1'de de bahsedildiği gibi Gökada içerisindeki ince disk ve kalın disk gibi bileşenler arasındaki ayrım her zaman kesin değildir ve popülasyon ayrımları için çalışmalarda farklı kriterler/sınırlamalar kullanılabilir.



Şekil 25. Barınak yıldızlar için Bensby vd. (2014) kriterlerine göre oluşturulan popülasyon ayrımlarının Toomre diyagramı üzerindeki konumları.

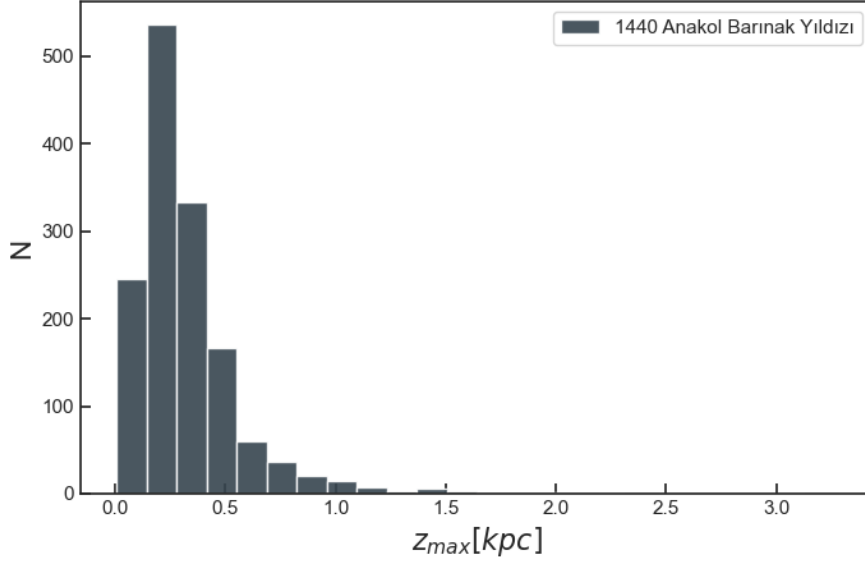
Galaktik yörünge parametrelerinden biri olan Z_{max} değeri bir yıldızın Galaktik yörüngesinin maksimum Z yüksekliğini yani Gökada düzleminden dik doğrultuda çıkabileceği en büyük yüksekliği ifade eder. Barınak yıldızlar için hesaplanan Z_{max} değerlerinin histogram dağılımı Şekil 26’de gösterilmiştir. Bu çalışmadaki barınak yıldızlar içerisinde en büyük Z_{max} değerinin 3,27 kpc olduğu görülür ve 3 kpc’den büyük Z_{max} değerine sahip sadece bir yıldız bulunmaktadır. Şekil 26’ye bakıldığında ise Z_{max} ’ın yaklaşık 1,0 – 1,5 kpc’e kadar ulaştığı görülebilir. Bu değerlere bakılarak barınak yıldızlarının halo popülasyonunda bulunmaması beklenen bir sonuçtur. Galaktik yörünge parametrelerinden Z_{max} değerine göre barınak yıldızların popülasyon ayrımı aşağıdaki değer aralıkları kullanılarak yapılmıştır (Tablo 4, Güçtekin vd., 2019);

Tablo 4

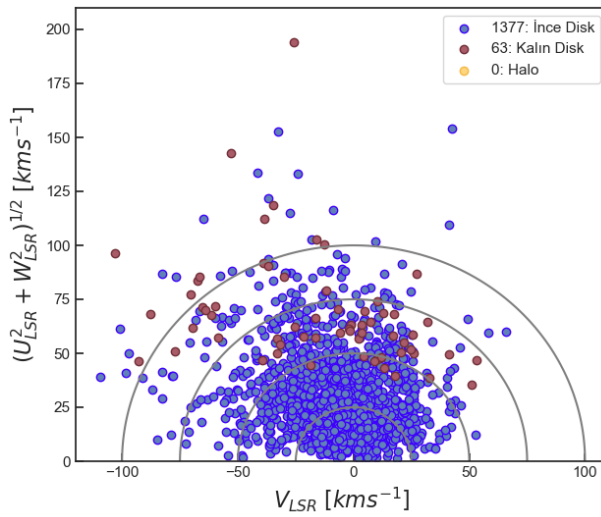
Z_{max} değerine göre popülasyon ayrımı.

$z_{max} < 825 pc$	İnce Disk
$825 pc < z_{max} < 5 kpc$	Kalın Disk
$z_{max} > 5 kpc$	Halo

Verilen bu sınırlamalara göre popülasyon ayrımı yapıldığında 1377 yıldızın ince disk, 63 yıldızın kalın disk popülasyonuna ait olduğu ve halo popülasyonuna ait hiçbir yıldız bulunmadığı belirlenmiştir. Galaktik yörünge parametrelerine göre yapılan popülasyon ayrımı Şekil 27’deki Toomre diyagramında görülebilir.



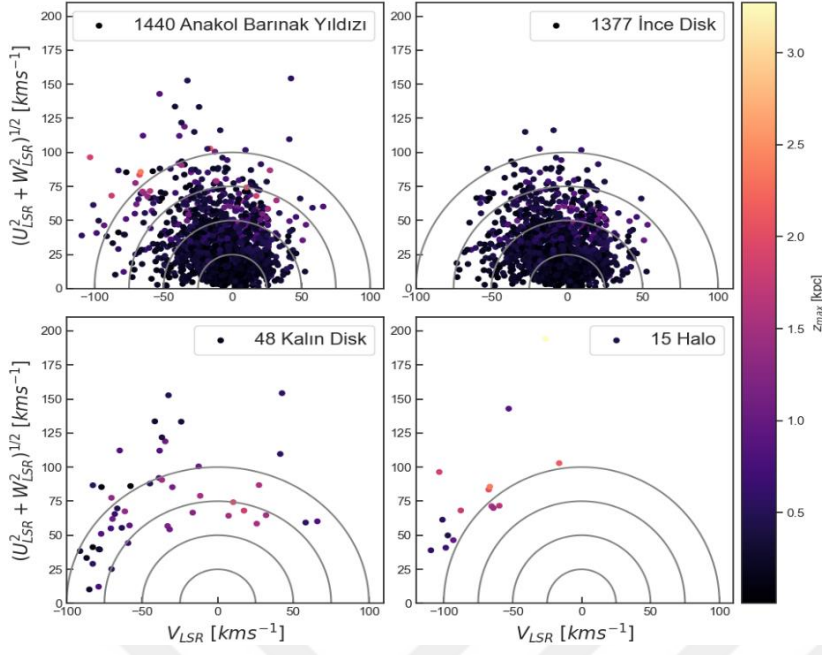
Şekil 26. Barınak yıldızların Z_{max} değerlerinin histogramı.



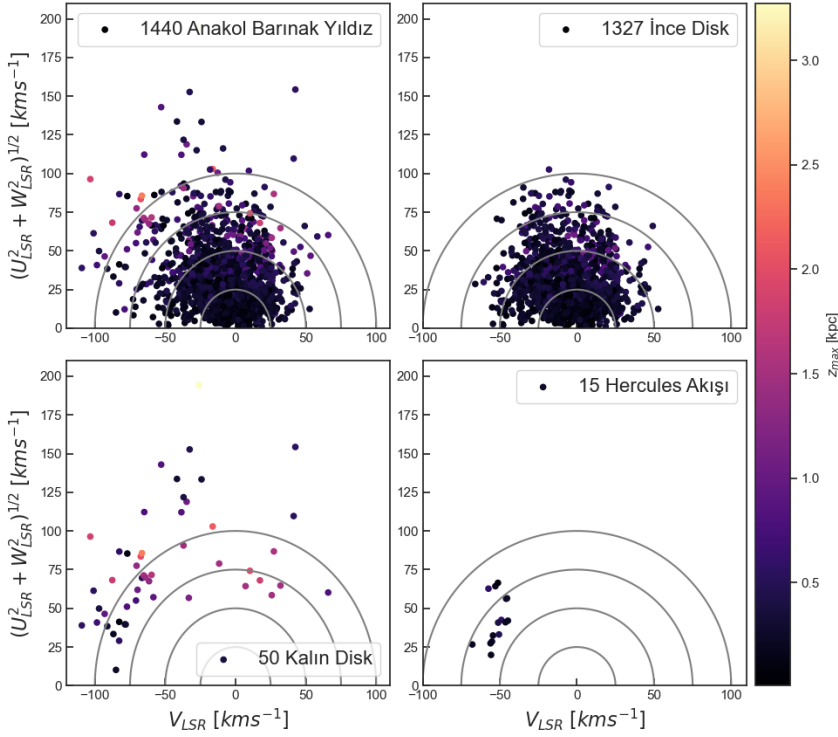
Şekil 27. Barınak yıldızlar için Galaktik yörünge parametrelerine göre oluşturulan popülasyon ayrımlarının Toomre diyagramı üzerindeki konumları.

Barınak yıldızların popülasyon ayrımı için kullanılan üç yöntemden ikisi yani Bensby14 kriterleri ve Z_{max} değerine göre yapılan ayırım birbiriyle daha uyumlu görünmektedir. Bensby03 kriterlerine göre yapılan popülasyon ayrımının farkı Şekil 28 ve Şekil 29'da daha açık bir şekilde görülebilir. Bensby03 ve Bensby14 yöntemlerine göre gerçekleştirilen popülasyon ayrımları, sırasıyla, Şekil 28 ve Şekil 29'da Z_{max} verilerine göre renklendirilmiştir. Şekil 28'de halo yıldızları olarak belirlenmiş yıldızların Z_{max} değerlerinin haloya göre oldukça küçük değerlerde olduğu görülür. Ayrıca bu çalışmadaki yıldızların gezegenli yıldızlar oldukları düşünüldüğünde haloda yıldız bulunmamış olması da oluşum açısından açıklanabilir bir durum olabilir.

Sonuç olarak, barınak yıldızların popülasyon ayrımları için Bensby14 kriterleri benimsenmiş ve bundan sonra popülasyon ayrımından bahsedildiğinde bu kriterlerin dikkate alındığı hatırlanmalıdır. Ek olarak yapılan bu popülasyon ayrımında TD/D oranı 0,5-2 arasında olan bölge Bensby14 çalışmasında arada-kalan yıldızlar olarak belirlenmiştir ve bu çalışmada barınak yıldızlar içerisinde 37 arada-kalan yıldız bulunur. Ancak bu çalışmadaki amaç, ince disk ve kalın disk arasındaki farkları araştırmaktan ziyade gezegen özelliklerine göre barınak yıldızların kinematik olarak nasıl farklılaştığını incelemektir. Ayrıca toplam barınak yıldızlar içerisinde kalın diskte bulunan yıldız oranı %3,47, Hercules akışında bulunan yıldız oranı %1,04 ve arada-kalan yıldız oranı %2,57 olarak belirlenmiştir. Bu nedenle gezegenli yıldızların çok büyük bir kısmı ince diskte bulunur ve ağırlık ince disk yıldızlarındadır. Sonuç olarak bu çalışma Hercules akışı veya arada-kalan yıldızlar açısından bir inceleme sunmaz.



Şekil 28. Barınak yıldızların Bensby03 kriterlerine göre yapılan popülasyon ayrımlarının Toomre diyagramlarında gösterimi. Yıldızlar Z_{\max} değerine göre renklendirilmiştir.



Şekil 29. Barınak yıldızların Bensby14 kriterlerine yapılan popülasyon ayrımlarının Toomre diyagramlarında gösterimi. Yıldızlar Z_{\max} değerine göre renklendirilmiştir.

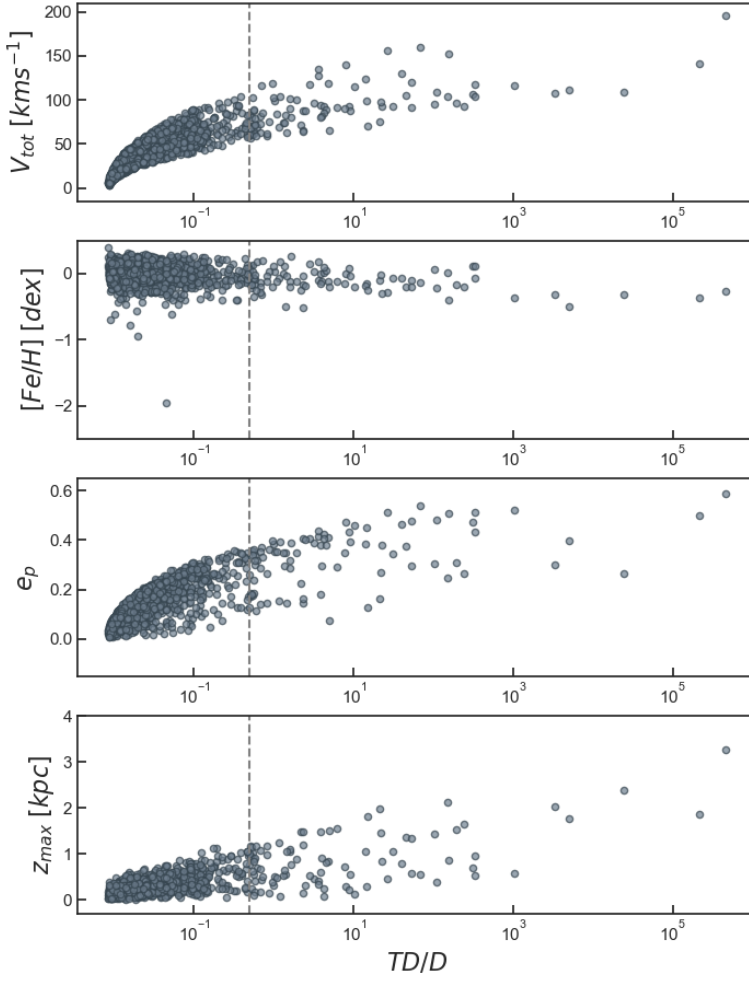
Yukarıda söz edilen popülasyon ayrımları TD/D oranı temel alarak yapılmıştır. Dolayısıyla TD/D 'nin Tablo 5'de verilen parametrelerle doğrudan bir ilişkisi olması beklenir. Şekil 30, bu dağılımları gösteren grafikleri içerir ve dağılımlara bakıldığında TD/D oranı arttıkça V_{tot} , e_p ve Z_{max} 'ın arttığı, $[Fe/H]$ oranında ise ince disk ve kalın disk arasında bir farklılık olduğu görülmektedir. Bu değerlerdeki farklılıklar Tablo 5'den detaylı olarak incelenebilir. Tablo 5, yapılan popülasyon ayrımına göre barınak yıldızların genel özelliklerini belirtir. Tabloya göre ince disk yıldızlarının kalın disktekilere göre demir bolluğunun daha zengin olduğu, yörünge basıklığının ve yörünge maksimum yüksekliğinin beklendiği üzere daha küçük olduğu açıkça görülebilir. Ayrıca ince disk yıldızlarının hız dispersiyonları da kalın disk yıldızlarına göre daha azdır ve dolayısıyla ince disk barınak yıldızlarının kinematik yaşı da daha genç (2,88 Gyl) olarak bulunmuştur. V_{tot} , e_p ve Z_{max} ve $[Fe/H]$ parametrelerinin medyanları hesaplanarak kullanılmış ve hız dispersiyonu ile kinematik yaş Bölüm 3.2.4'de verilen deklemlerle hesaplanmıştır.

Tablo 5

Popülasyon ayrımı yapılmış barınak yıldızlar için kinematik ve dinamik yörünge parametrelerine ait özellikler.⁸

	Tüm Anakol Yıldızları	İnce Disk % 92,15	Kalın Disk % 3,47
N_s	1440	1327	50
N_p	2022	1868	63
V_{tot} (km s ⁻¹)	34,92±2,66	32,97±2,65	98,38±3,02
σ_{tot} (km s ⁻¹)	45,92±2,65	40,16±2,60	93,89±4,19
$[Fe/H]$ (dex)	-0,013±0,137	-0,009±0,137	-0,139±0,135
e_p	0,127	0,120	0,395
Z_{max} (kpc)	0,261	0,252	0,849
$Yaş_{kin}$ (Gyl)	3,87±0,47	2,88±0,43	12,03±0,61

⁸ Not: Tabloda N_s yıldız sayısını, N_p gezegen sayısını gösterir. V_{tot} uzay hız bileşenlerinin elde edilen toplam hızı, σ_{tot} grup içerisindeki hız dispersiyonu, $[Fe/H]$ demir bolluğu, e_p galaktik yörünge basıklığı, Z_{max} Galaktik yörünge maksimum yüksekliği ve $Yaş_{kin}$ grubun kinematik yaşıdır.



Şekil 30. Barınak yıldızların V_{tot} , $[\text{Fe}/\text{H}]$, e_p ve Z_{max} değerlerinin TD/D oranı ile değişimi. Grafikler üzerindeki kesikli gri çizgi $TD/D = 0.5$ değerine karşılık gelir ve ince disk ile kalın diskin ayrımını temsil eder.

4.2. Gezegen Yarıçap ve Kütlesine Göre Kinematik Özellikler

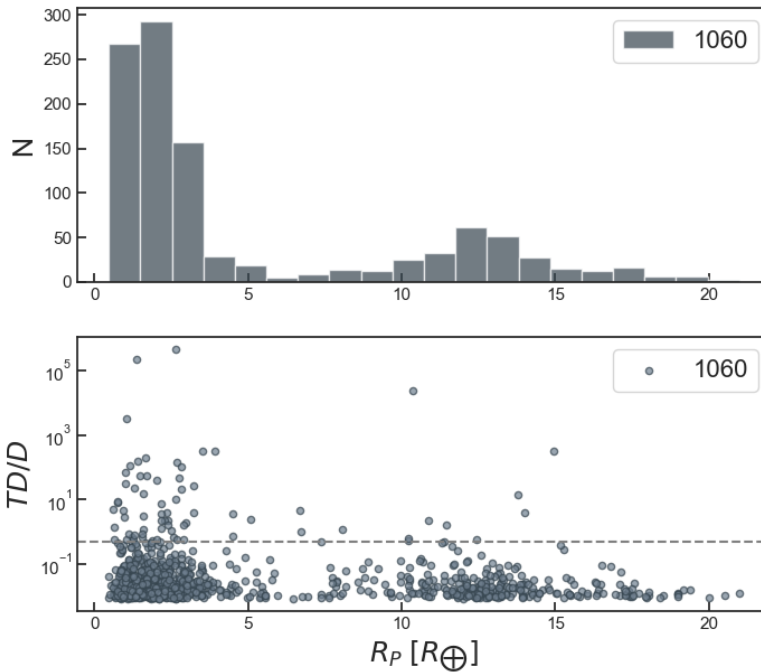
Barınak yıldızlar araştırılırken sahip oldukları gezegenlerinin özelliklerine göre gruplandırılarak incelenmeleri önemli hale gelir. Bu çalışmada barınak yıldızlar, gezegenlerinin kütle ve yarıçaplarına göre bir gruplandırma yapılarak değerlendirilmiştir. 1440 barınak yıldız içerisinde tek gezegeni olan 1061 barınak yıldız seçilmiştir. Borucki vd. (2011), $22,4 R_{\oplus}$ 'dan sonra gezegenleri sınıflandırmamıştır ve bu çalışmada 1061 yıldız içerisinde $22,4 R_{\oplus}$ 'dan büyük yarıçaplı ($29,96 R_{\oplus}$) gezegeni olan sadece bir yıldız bulunur. Bu gezegen veri grubundan çıkarılarak incelemelere 1060 yıldız üzerinden devam edilmiştir.

Gezegen yarıçapları Berger vd. (2023) çalışmasından alınmıştır. Gezegenlerin yarıçaplarına ilişkin dağılım Şekil 31’den görülebilir. Grafikteki yarıçap dağılımları incelendiğinde yarıçapların yaklaşık 0-22 R_{\oplus} aralığında bir dağılım gösterdiği ve özellikle $< 5 R_{\oplus}$ ile yaklaşık 10-15 R_{\oplus} aralıklarında daha fazla bir yoğunlaşma olduğu görülebilir. Gezegen sınıflandırması için kullanılan yarıçap aralıkları, Tablo 6’de gösterilen Borucki vd. (2011) çalışmasından alınarak kullanıldı ve elde edilen gezegen sınıflamasına ait sayılar yine Tablo 6’da gösterilmiştir.

Tablo 6.

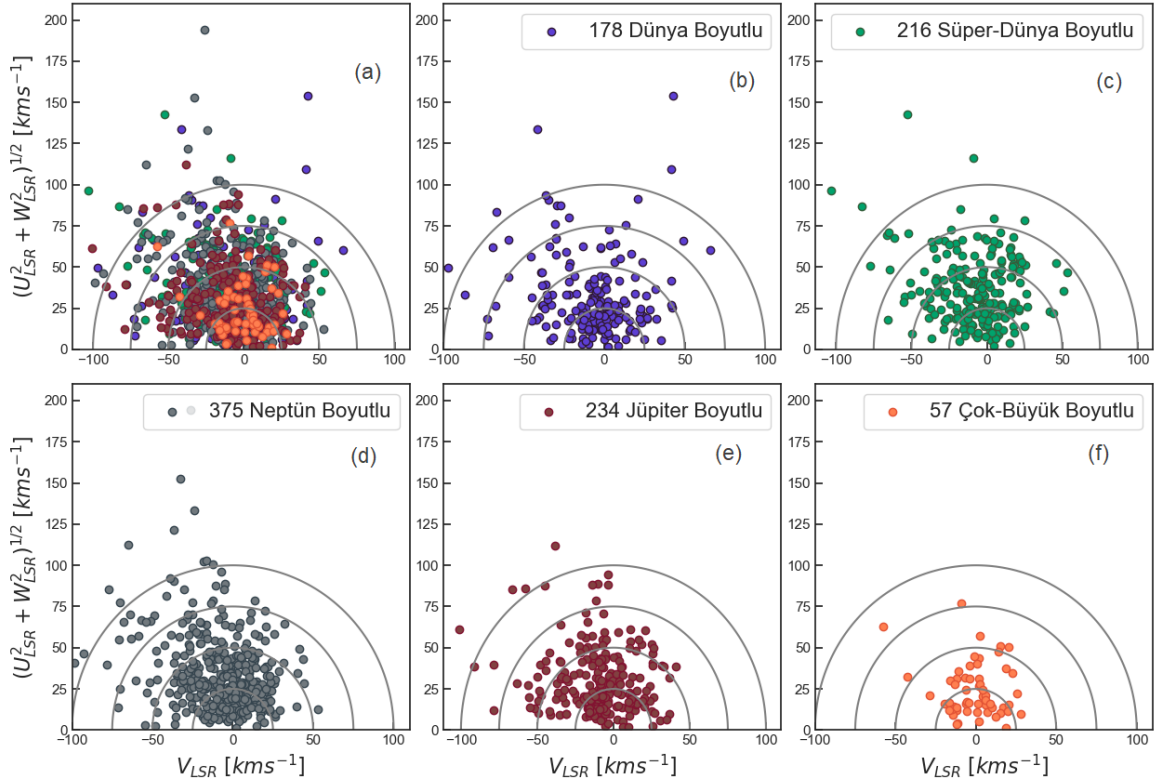
Gezegen yarıçapına göre belirlenen sınıflama (Borucki vd. 2011).

Sınıflandırma	Gezegen Yarıçapı (R_{\oplus})	Yıldız Sayısı (N_s)	İnce Disk (%)
Dünya boyutlu	$R_p \leq 1,25$	178	90,45
Süper-Dünya boyutlu	$1,25 < R_p \leq 2$	216	90,28
Neptün boyutlu	$2 < R_p \leq 6$	375	90,93
Jüpiter boyutlu	$6 < R_p \leq 15$	234	92,74
Çok-Büyük boyutlu	$15 < R_p \leq 22,4$	57	98,25

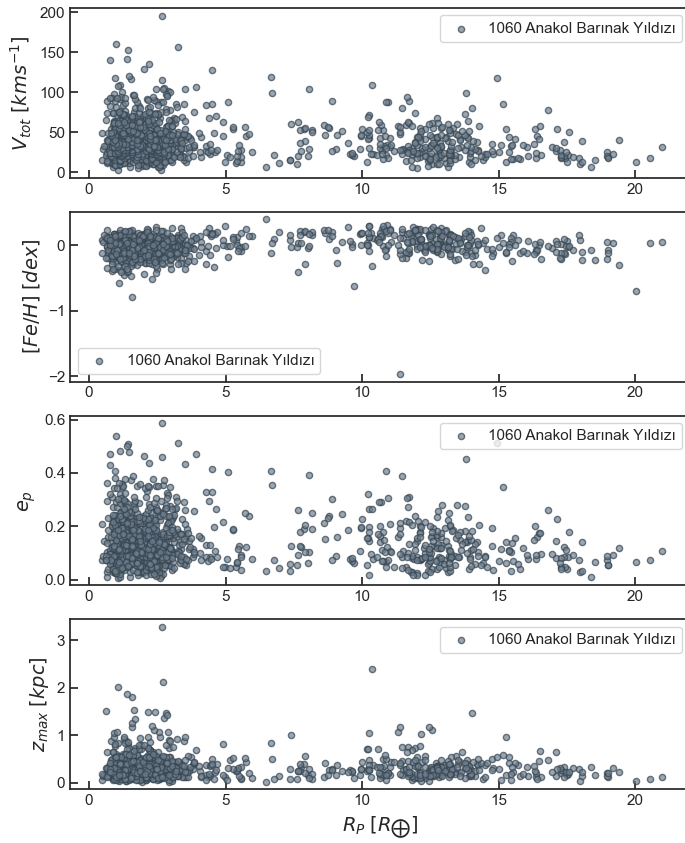


Şekil 31. Tek gezegenli barınak yıldızların gezegenlerinin yarıçap dağılımları. Üstteki grafik gezegen yarıçaplarının histogram dağılımını, alttaki grafik TD/D oranının gezegen yarıçapları ile değişimini gösterir. Grafikteki kesikli gri çizgi $TD/D = 0.5$ sınırını gösterir.

Şekil 32’de gezegen sınıflaması yapıldıktan sonra barınak yıldızların Toomre diyagramı üzerindeki dağılımları görülebilir. Tablo 6’dan görülebileceği gibi yarıçap sınıflamasına göre oluşturulan gruplardaki yıldızların büyük bir çoğunluğu (\geq %90) ince disk popülasyonuna üyedir. İnce disk ve kalın disk ayrımı yapılmadan 1060 barınak yıldız için oluşturulan gezegen yarıçapına karşılık V_{tot} , $[\text{Fe}/\text{H}]$, e_p ve Z_{max} parametrelerinin dağılımı ise Şekil 33’de gösterilmiştir. Grafiklere bakıldığında V_{tot} , e_p ve Z_{max} değerlerinin gezegen yarıçapının artmasıyla birlikte azalma eğiliminde olduğu görülebilir. Her gezegen sınıfı içerisindeki sayılar birbirine eşit değildir. Özellikle çok-büyük boyutlu gezegenlerin sayısı 57 olarak (Tablo 6) belirlenmiştir ve gruplar içerisindeki sayıların birbirinden farklı olması bazı yanlışlıklar içerebilir. Ancak parametre değişimlerinde yarıçapın artmasıyla birlikte belirli bir eğilim olduğu genel olarak görülmektedir.



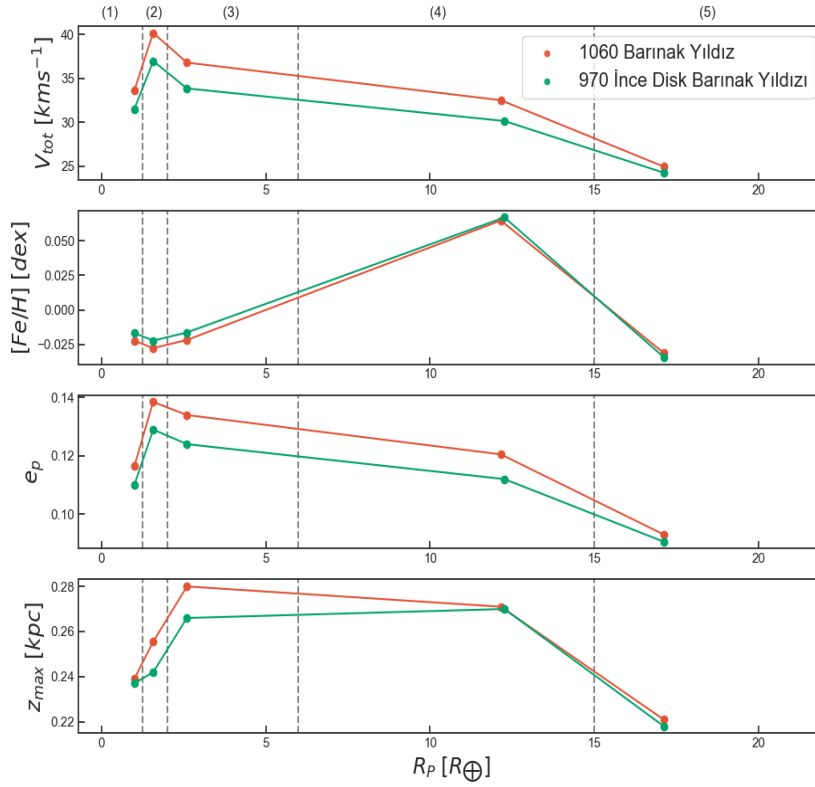
Şekil 32. Gezegen yarıçapına göre yapılan sınıflandırmanın Toomre diyagramları üzerindeki konumları. (a) 1060 barınak yıldız. (b) Dünya, (c) Süper-Dünya, (d) Neptün, (e) Jüpiter ve (f) çok-büyük boyutlu gezegenlerin barınak yıldızları.



Şekil 33. Barınak yıldızların V_{tot} , $[\text{Fe}/\text{H}]$, e_p ve Z_{max} parametrelerinin gezegen yarıçapları ile değişimi.

Tek gezegenli 1060 barınak yıldız parametreleri ile ince disk popülasyonuna üye 970 barınak yıldızın parametreleri arasında bir kıyaslama yapılabilir ve sadece ince disk barınak yıldızlarının tüm barınak yıldızlardan (1060 tek gezegenli yıldızlar) ne kadar farklılaştığına bakılabilir. Buna göre gezegenlerin yarıçap sınıflamasıyla elde edilen her grup içerisindeki yıldızların medyan değerleri hesaplanarak bir kıyaslama yapılmıştır. Buna ilişkin grafikler Şekil 34’te gösterilmiştir. Şekil 34’e bakıldığında özellikle $[\text{Fe}/\text{H}]$ değerlerinde tüm barınak yıldızlar ile ince disk yıldızları arasında çok büyük bir fark olmadığı görülebilir (bakınız Tablo 8 ve Tablo 9). Tablo 8, tüm barınak yıldızlar; Tablo 9 ise ince disk barınak yıldızlar için yapılan gezegen sınıflamasını ve bu sınıflamaya ait barınak yıldızların parametrelerinin medyan değerlerini gösterir. Hız dispersiyonu ve kinematik yaş ise Bölüm 3.2.4’te verilen denklemler kullanılarak hesaplanmıştır. Tablolara bakıldığında e_p ve Z_{max} değerlerinin büyük ölçüde birbirine yakın olduğu görülebilir. Toplam hız ve dolayısıyla kinematik yaş birbirinden farklılaşmış gibi olsa da hata sınırları düşünüldüğünde çok büyük bir fark ortaya

çıkamaz. Bundan dolayı gezegen yarıçapına göre barınak yıldızlar incelenirken ince disk ve kalın disk ayrımı yapılmadan barınak yıldızlar incelenmiştir.



Şekil 34. Barınak yıldızların ve yıldız-gezegen sistemlerinin bazı parametrelerinin gezegen yarıçaplarıyla değişimleri. Grafik üzerindeki kesikli gri çizgiler gezegen yarıçap sınıflamasının sınırlarını belirtir. Buna göre; bölge (1) Dünya, bölge (2) Süper-Dünya, bölge (3) Neptün, bölge (4) Jüpiter ve bölge (5) çok-büyük boyutlu gezegenleri gösterir.

Şekil 34'te görülen eğilimlere ve Tablo 7'de verilmiş olan değerlere bakıldığında her parametre için düzenli bir eğilim görülmez. Örneğin $[Fe/H]$ oranı Jüpiter boyutlu gezegenlerde en yüksek değerinde olurken çok-büyük boyutlu gezegenlerde belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Toplam hız değeri en yüksek çıkan yıldızlar Dünya boyutlu ve süper-Dünya boyutlu gezegenlere sahip barınak yıldızlar için elde edilmiş ve bunu destekler şekilde kinematik yaş diğer gruplara göre daha yüksek olarak belirlenmiştir. Çok-büyük boyutlu gezegen grubundaki barınak yıldızların toplam hızı diğer gruplara göre daha düşük olarak belirlenmiş ve yine bunu destekler bir şekilde kinematik yaş bu grup için en küçük yaş olarak hesaplanmıştır. Başka bir deyişle yarıçapı çok büyük olan gezegenlere sahip

yıldızlar en genç olarak tespit edilmiş ancak bu grup içerisindeki barınak yıldızların $[Fe/H]$ oranının diğer gruplara göre daha düşük çıkmıştır. Gezegenlerin yarıçaplarına göre barınak yıldızların $[Fe/H]$ değerlerinin histogram dağılımları ise Şekil 35’de verilmiştir.

Tablo 7

1060 anakol barınak yıldızı için gezegen yarıçapına göre oluşturulan gruplar içerisindeki barınak yıldızların kinematik ve dinamik yörünge parametrelerine ait özellikler.⁹

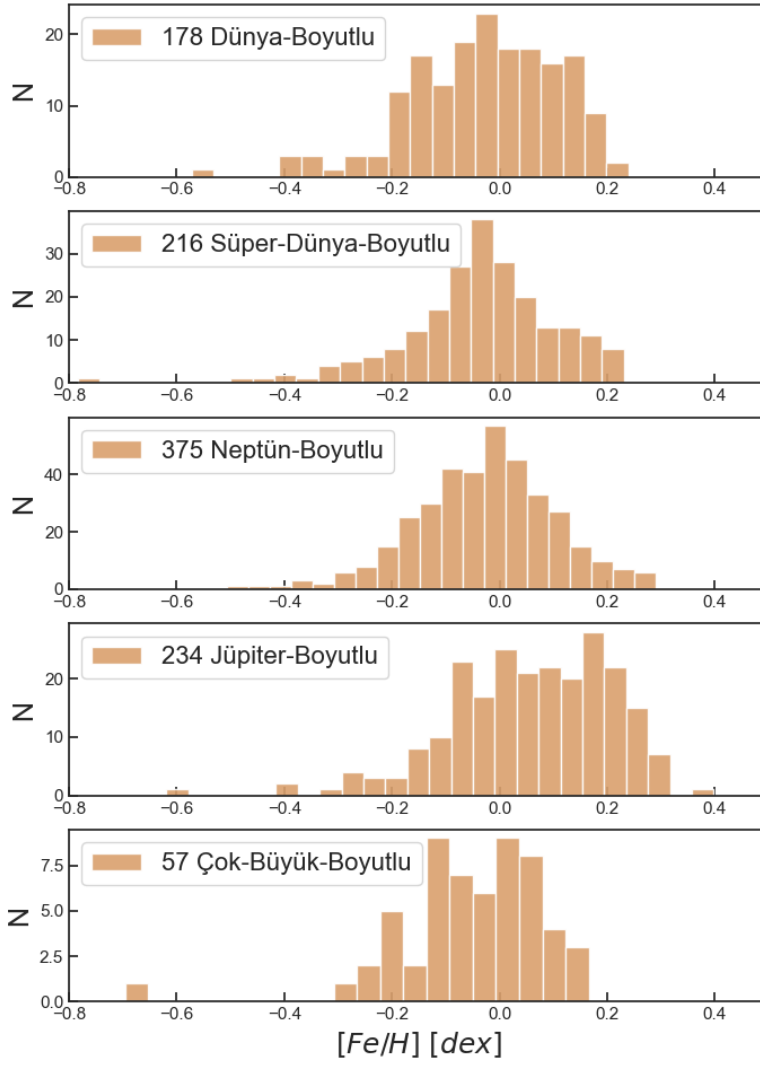
	Dünya < $1,25R_{\oplus}$	Süper-Dünya $1,25R_{\oplus} - 2R_{\oplus}$	Neptün $2R_{\oplus} - 6R_{\oplus}$	Jüpiter $6R_{\oplus} - 15R_{\oplus}$	Çok-Büyük $15R_{\oplus} - 22R_{\oplus}$
N_s	178	216	375	234	57
M_* (M_{\odot})	$0,94 \pm 0,05$	$0,94 \pm 0,05$	$0,96 \pm 0,05$	$1,03 \pm 0,05$	$1,33 \pm 0,06$
R_* (R_{\odot})	$0,91 \pm 0,03$	$0,91 \pm 0,03$	$0,94 \pm 0,03$	$1,03 \pm 0,04$	$1,59 \pm 0,07$
$[Fe/H]$ (dex)	$-0,02 \pm 0,14$	$-0,03 \pm 0,14$	$-0,02 \pm 0,14$	$0,06 \pm 0,14$	$-0,03 \pm 0,15$
V_{tot} ($km\ s^{-1}$)	$33,62 \pm 2,94$	$40,16 \pm 3,24$	$36,79 \pm 2,99$	$32,51 \pm 1,76$	$24,96 \pm 1,39$
σ_{tot} ($km\ s^{-1}$)	$47,66 \pm 2,23$	$48,34 \pm 2,93$	$48,41 \pm 3,01$	$42,22 \pm 1,87$	$32,95 \pm 1,26$
e_p	0,117	0,139	0,134	0,121	0,093
Z_{max} (kpc)	0,239	0,256	0,280	0,271	0,221
Ya_{kin} (Gyıl)	$4,17 \pm 0,40$	$4,31 \pm 0,53$	$4,32 \pm 0,54$	$3,23 \pm 0,32$	$1,77 \pm 0,18$

Tablo 8

970 ince disk barınak yıldızı için gezegen yarıçapına göre oluşturulan gruplar içerisindeki barınak yıldızların kinematik ve dinamik yörünge parametrelerine ait özellikler.⁹

	Dünya < $1,25R_{\oplus}$	Süper-Dünya $1,25R_{\oplus} - 2R_{\oplus}$	Neptün $2R_{\oplus} - 6R_{\oplus}$	Jüpiter $6R_{\oplus} - 15R_{\oplus}$	Çok-Büyük $15R_{\oplus} - 22R_{\oplus}$
N_s	161	195	341	217	56
M_* (M_{\odot})	$0,94 \pm 0,05$	$0,94 \pm 0,05$	$0,96 \pm 0,05$	$1,05 \pm 0,05$	$1,32 \pm 0,06$
R_* (R_{\odot})	$0,92 \pm 0,03$	$0,91 \pm 0,03$	$0,94 \pm 0,03$	$1,05 \pm 0,04$	$1,57 \pm 0,07$
$[Fe/H]$ (dex)	$-0,02 \pm 0,14$	$-0,02 \pm 0,14$	$-0,02 \pm 0,14$	$0,07 \pm 0,14$	$-0,03 \pm 0,15$
V_{tot} ($km\ s^{-1}$)	$31,49 \pm 2,99$	$36,96 \pm 3,20$	$33,85 \pm 2,99$	$30,14 \pm 1,69$	$24,26 \pm 1,38$
σ_{tot} ($km\ s^{-1}$)	$40,11 \pm 2,25$	$42,40 \pm 2,51$	$40,79 \pm 3,03$	$37,69 \pm 1,88$	$31,31 \pm 1,26$
e_p	0,110	0,129	0,124	0,112	0,091
Z_{max} (kpc)	0,239	0,242	0,266	0,270	0,218
Ya_{kin} (Gyıl)	$2,87 \pm 0,37$	$3,26 \pm 0,43$	$2,99 \pm 0,51$	$2,48 \pm 0,30$	$1,55 \pm 0,17$

⁹ Not: ~~Not~~-Tabloda N_s yıldız sayısını, N_p gezegen sayısını gösterir. V_{tot} uzay hız bileşenlerinin elde edilen toplam hızı, σ_{tot} grup içerisindeki hız dispersiyonu, $[Fe/H]$ demir bolluğu, e_p galaktik yörünge basıklığı, Z_{max} Galaktik yörünge maksimum yüksekliği ve Ya_{kin} grubun kinematik yaşıdır.



Şekil 35. Gezegen yarıçaplarına göre elde edilen gruplar içerisindeki bariç yıldızların $[Fe/H]$ histogramları.

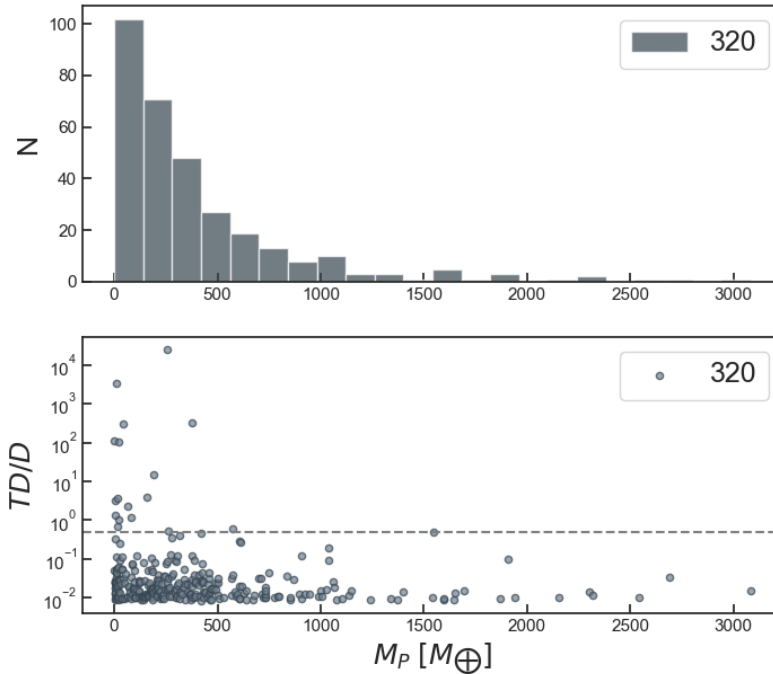
Gezegenlerin yarıçap sınıflamasının yanında gezegenlerin kütle aralıklarına göre bariç yıldız gruplarına ayrılarak parametre dağılımları elde edilmiştir. Ancak Berger vd. (2023) gezegenler için kütle değerlerini belirlememiş bu nedenle gezegen kütleleri Bölüm 3.1.2’de anlatıldığı gibi NASA EA’dan derlenmiştir. Bu dağılımlarda gezegen kütlesi eksiksiz olan 448 bariç yıldız kullanılmıştır. Bu örnek içerisinde kütlesi bilinen tek gezegenli bariç yıldız ayrıldığında örnek 323’e kadar inmiştir. Gezegen kütlesine göre yapılan sınıflama için Stevens ve Gaudi (2013) tarafından verilen kütle değer aralıkları kullanılmıştır. Buna ilişkin kütle değerleri Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9

Gezegen kütlelerine göre belirlenen sınıflama (Stevens ve Gaudi, 2013).

Sınıflandırma	Gezegen Kütleleri	Yıldız Sayısı (N_s)	İnce Disk (%)
Dünya/Süper Dünyalar	$0.1 M_{\oplus} - 10 M_{\oplus}$	29	86.21
Neptünler	$10 M_{\oplus} - 100 M_{\oplus}$	55	83.64
Jüpiterler	$100 M_{\oplus} - 10^3 M_{\oplus}$	205	95.61
Süper Jüpiterler	$10^3 M_{\oplus} - 13 M_J$	31	96.77

Tablo 9'dan da görülebileceği gibi gezegen kütlesi için maksimum sınır $13 M_J$ olarak belirlenmiştir. $13 M_J$ 'den daha büyük kütleyle sahip olan cisimler kahverengi cüce sınıfına dahildir (Stevens vd., 2013). Bu nedenle bu çalışmadaki $13 M_J$ kütlelerinden büyük olan barınak yıldızları çıkarılarak 320 tek gezegenli barınak yıldız elde edilmiştir. Bu barınak yıldızların kütle dağılımları Şekil 36'de gösterilmiştir. Şekilden örnek grubu içerisindeki barınak yıldızların yaklaşık $10^3 M_{\oplus}$ kütlelerine kadar olan kısımda yoğunluk gösterdiği görülebilir.



Şekil 36. Tek gezegenli barınak yıldızların gezegen kütlelerinin histogram dağılımları (üst panel). Alt panelde TD/D oranının gezegen kütlesi ile değişimini gösterilmektedir. Grafikteki kesikli gri çizgi $TD/D = 0.5$ çizgisine karşılık gelmektedir.

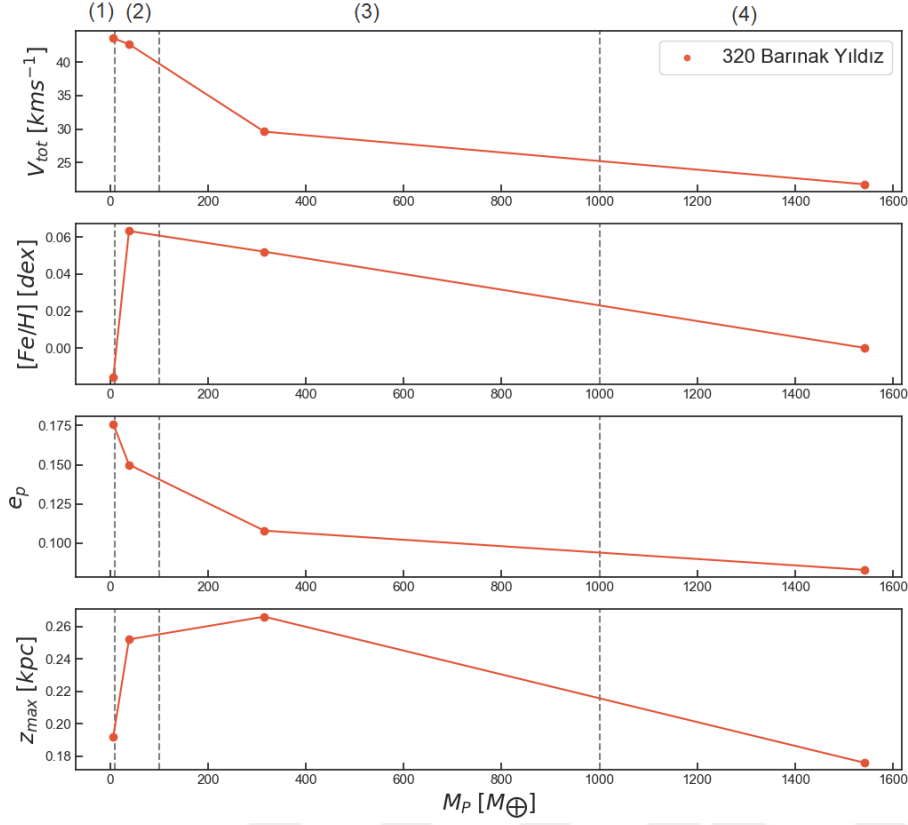
Şekil 37, Tablo 9’da gösterilen gezegen kütle sınıflamasına göre gruplandırılan barınak yıldızların parametrelerinin (V_{tot} , $[\text{Fe}/\text{H}]$, e_p ve Z_{max}) değişimini gösterir. V_{tot} ve e_p parametrelerinin değişiminin Şekil 34’te verilen dağılımlara benzediği görülür. Sadece e_p değeri Şekil 34’te Dünya boyutlu gezegenlerden süper-Dünya boyutlu gezegenlere doğru önce bir artış sonrasında bir düşüş meydana gelmiş, Şekil 37’de böyle bir eğilim görünmez. Bunun nedeni barınak yıldızların kütle değeri bilinen gezegenlerinin az sayıda olması ve dolayısıyla özellikle Dünya ve süper-Dünya kütlelerindeki gezegenlerin sayısının azlığı olabilir (Tablo 9). Şekil 37’deki en belirgin değişim Neptün kütleli gezegenlerin yıldızlarındaki $[\text{Fe}/\text{H}]$ oranının en büyük değerde çıkması olarak kendini gösterir ve buradaki maksimum değerden sonra Jüpiter kütleli gezegenlerin barınak yıldızlarına doğru bir düşüş meydana gelir. Bu değişim yine Şekil 34’te verilen $[\text{Fe}/\text{H}]$ değişimine benzerdir ancak Şekil 34’teki değişim maksimum nokta Jüpiter boyutlu gezegenlerde oluşurken Şekil 37’de Neptün kütleli gezegenlerin barınak yıldızlarından maksimum değer ortaya çıkmıştır.

Tablo 10

320 anakol barınak yıldızı için gezegen kütlelerine göre oluşturulan gruplar içerisindeki barınak yıldızların kinematik ve dinamik yörünge parametrelerine ait özellikler.¹⁰

	Dünya/Süper-Dünya $0,1M_{\oplus} - 10M_{\oplus}$	Neptün $10M_{\oplus} - 100M_{\oplus}$	Jüpiter $10^2M_{\oplus} - 10^3M_{\oplus}$	Süper-Jüpiter $10^3M_{\oplus} - 13M_J$
N_*	29	55	205	31
R_p (R_{\oplus})	1,72	5,56	13,01	12,57
M_* (M_{\odot})	$0,79 \pm 0,04$	$0,84 \pm 0,04$	$1,09 \pm 0,05$	$1,30 \pm 0,07$
R_* (R_{\odot})	$0,76 \pm 0,03$	$0,81 \pm 0,03$	$1,13 \pm 0,04$	$1,49 \pm 0,06$
$[\text{Fe}/\text{H}]$ (dex)	$-0,016 \pm 0,136$	$0,063 \pm 0,132$	$0,052 \pm 0,137$	$0,00 \pm 0,14$
V_{tot} (km s^{-1})	$43,56 \pm 0,84$	$42,67 \pm 1,11$	$29,61 \pm 1,50$	$21,76 \pm 1,50$
σ_{tot} (km s^{-1})	$53,79 \pm 3,30$	$51,98 \pm 1,25$	$38,90 \pm 1,56$	$34,53 \pm 2,04$
e_p	0,176	0,150	0,108	0,083
Z_{max} (kpc)	0,192	0,252	0,266	0,218
Y_{kin}	$5,30 \pm 0,61$	$4,97 \pm 0,23$	$2,67 \pm 0,25$	$2,00 \pm 0,30$

¹⁰ Not: Tabloda N_s yıldız sayısını, N_p gezegen sayısını gösterir. V_{tot} uzay hız bileşenlerinin elde edilen toplam hızı, σ_{tot} grup içerisindeki hız dispersiyonu, $[\text{Fe}/\text{H}]$ demir bolluğu, e_p galaktik yörünge basıklığı, Z_{max} Galaktik yörünge maksimum yüksekliği ve Y_{kin} grubun kinematik yaşıdır.



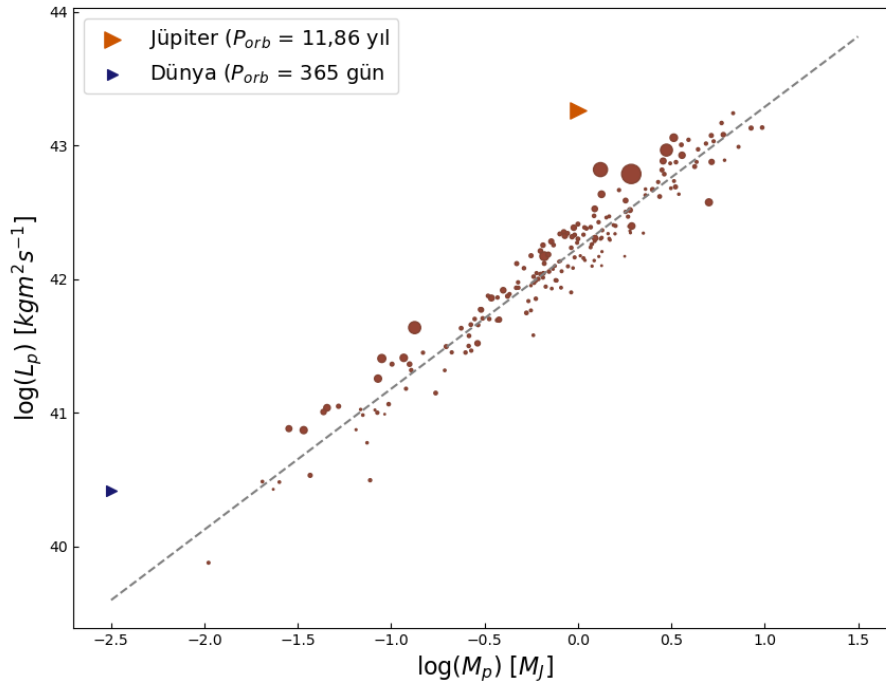
Şekil 37. Tek gezegenli barınak yıldızların ve yıldız-gezegen sistemlerinin bazı parametrelerinin gezegen kütlelerine göre değişimleri. Grafik üzerindeki kesikli gri çizgiler gezegen kütle sınıflamasının sınırlarını belirtir. Buna göre; bölge (1) Dünya/süper-Dünya, bölge (2) Neptün, bölge (3) Jüpiter ve bölge (4) süper-Jüpiter kütleli gezegenleri gösterir.

4.3. Açısal Momentum Dağılımları

Açısal momentum hesaplamaları yapılırken Bölüm 3.1.2’de bahsedildiği gibi NASA EA ile birlikte derlenen 185 tek gezegenli barınak yıldız-gezegen sistemi kullanılmış ve Bölüm 3.2.5’te verilen açısal momentum hesaplamalarına ilişkin denklemler kullanılarak dağılımlar elde edilmiştir. Şekil 38’deki grafik gezegen kütlelerine karşılık gezegenin yörünge açısal momentum değişimini gösterir ve grafik üzerinde dağılıma ilişkin oluşturulan doğrusal temsil bulunur. Gezegen yörünge açısal momentumunun gezegenin kütlelerine olan bağımlılığı beklenen bir sonuçtur ve Gurumath vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada benzer bir ilişki elde edilmiştir. Şekil 38’de verilen doğrusal temsile ait eşitlik Gurumath vd.’nin (2019) elde ettiğinden biraz daha farklı olacak şekilde aşağıdaki gibi elde edilmiştir;

$$\log L_p = 1.06(2)\log M_p + 42.33(1) \quad (4.1)$$

Oluşturulan doğrusal temsile ait $R^2 = 0.94$ olarak elde edilmiştir. Belirlenen kuramsal denkleme karşılık gelen temsille verinin iyi bir uyum gösterdiği söylenebilir. Grafiğe bakıldığında oluşturulan doğrusal temsilden ayrılan noktalar olduğu görülebilir ve sembollerin gezegenlerin yörünge periyoduna göre boyutlandırıldığı göz önüne alındığında teorik çizgiden uzak kalan gezegenlerin yörüngesinin büyük olduğu görülür. Aynı zamanda yaklaşık 11 yıllık bir yörünge periyoduna sahip olan Jüpiter'in grafik üzerindeki konumuna bakıldığında yörünge büyüklüğünün yörünge açısal momentum açısından ne kadar önemli olduğu açıkça görülebilir.



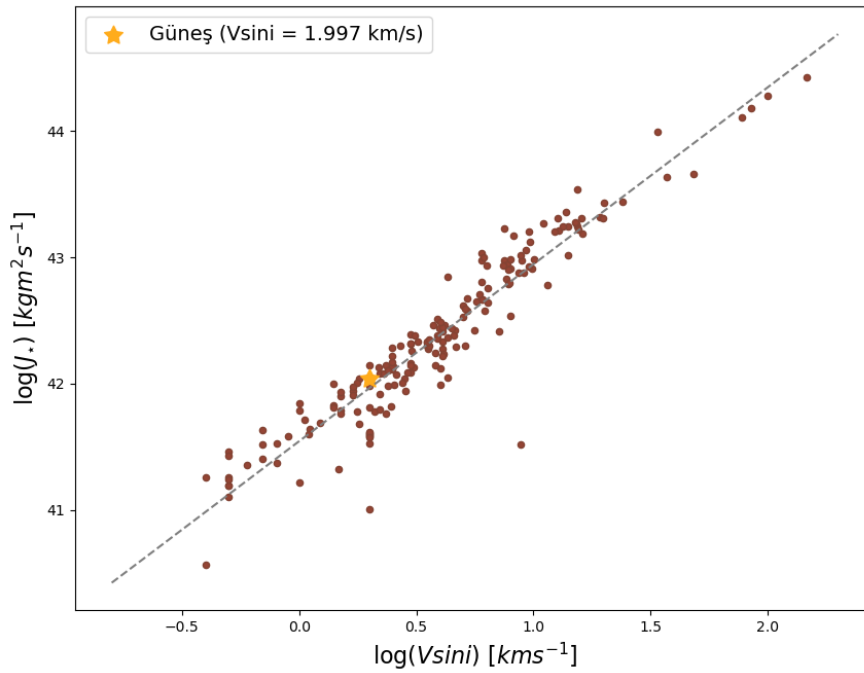
Şekil 38. Gezegenlerin kütlelerine karşılık yörünge açısal momentumlarının değişimini. Kesikli gri çizgi bu dağılıma ilişkin doğrusal temsili gösterir. Grafikteki turuncu renkli üçgen Jüpiter'i mavi renkli üçgen Dünya'yı gösterir. Semboller gezegenlerin yörüngesine göre boyutlandırılmıştır.

Barınak yıldızların dönme açısal momentumunun yıldız kütlelerine bağımlılığını incelediğinde farklı kütle aralıklarında açısal momentumun kütleyle bağımlılığının farklı

olduğu görülmüştür. Yıldızın dönme açısal momentumunun dönme hızına bağımlılığının ise daha fazla olduğu görülür. Buna ilişkin grafik Şekil 39'den görülebilir. Grafik üzerinde gri kesikli çizgi ile dağılıma ilişkin oluşturulan doğrusal temsil gösterilmiş ve bu doğrusal temsile ait denklem aşağıdaki gibi elde edilmiştir;

$$\log J_{\star} = 1.40(20)\log (v \sin i) + 41.65(2) \quad (4.3)$$

Elde edilen doğrusal temsile ait $R^2 = 0.9$ olarak elde edilmiş ve gözlem verisiyle kuramsal temsilin uyumlu olduğu görülmüştür.



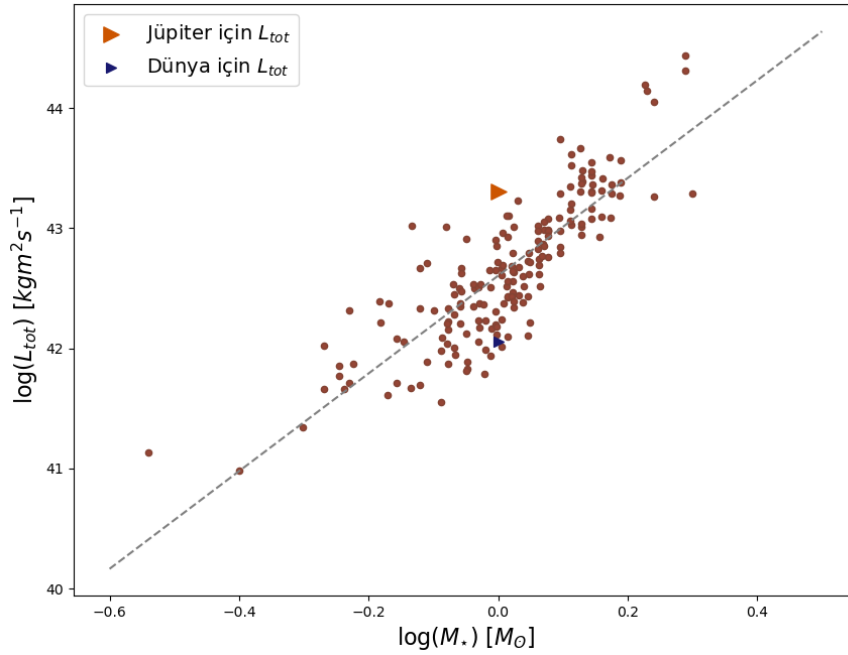
Şekil 39. Barınak yıldızların dönme hızlarına ($v \sin i$) karşılık dönme açısal momentumlarının değişimi. Kesikli gri çizgi bu dağılıma ilişkin doğrusal temsili gösterir. Sarı renkli yıldız Güneş'i temsil etmektedir.

Gezegenin yörünge açısal momentumu ve yıldızın dönme açısal momentumu elde edildikten sonra sistemin toplam açısal momentumu hesaplanabilir. Toplam açısal momentum Bölüm 3.2.5'te bahsedildiği gibi gezegenin yörünge açısal momentumu ile

yıldızın dönme açısai momentumunun toplanmasıyla elde edilir. Şekil 40, sistemin toplam açısai momentumunun yıldızın kütlesiyle olan değişimini gösterir. Grafikte verilen turuncu renkli üçgen, sadece Güneş ve Jüpiter'den oluşan bir sistem olsaydı bu sistemin elde edilen toplam açısai momentumunu ve mavi renkli üçgen, sadece Güneş ve Dünya'dan oluşan bir sistem olsaydı bu sistemin elde edilen toplam açısai momentumunu temsil eder. Buradaki grafik oluşturulurken genel dağılımdan daha aykırı bir noktada bulunan K2-25 yıldızı örnek grubundan çıkarılmış ve bu şekilde grafikte kesikli gri çizgi ile gösterilen doğrusal temsil elde edilmiştir. Elde edilen doğrusal temsil;

$$\log L_{tot} = 4.06(20)\log M_{\star} + 42.57(2) \quad (4.4)$$

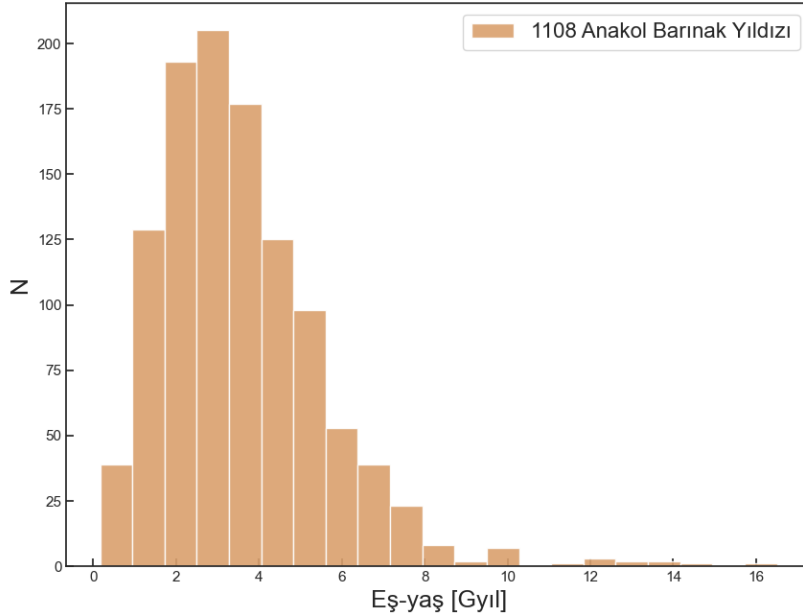
Elde edilen doğrusal temsile ait $R^2 = 0.71$ olarak elde edilmiştir.



Şekil 40. Barınak yıldızların kütlesi ile sistemin toplam açısai momentum değişimi. Kesikli çizgi bu dağılıma ilişkin doğrusal temsili gösterir. Turuncu üçgen sadece Güneş ve Jüpiter'den meydana gelen bir sistemi ve mavi üçgen sadece Güneş ve Dünya'dan meydana gelen bir sistemi temsil eder.

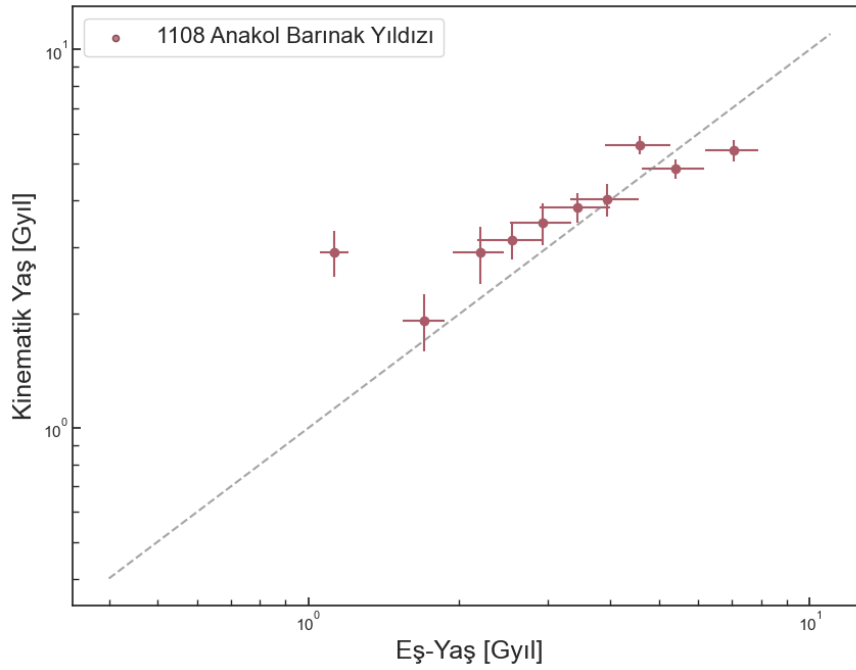
4.4. Barınak Yıldızların Yaşları

Bu çalışmada kinematik yaş, Bölüm 3.2.4'te sunulduğu gibi barınak yıldızlar için gruplar belirlenerek hesaplandı. Gezegenlerin kütle ve yarıçaplarına göre oluşturulan grup yaşları hesaplanmadan önce kinematik yaş ile eş-yaşın karşılaştırılması yapıldı. Bunun için Berger vd. (2023) çalışmasında verilmiş olan eş-yaşlar kullanıldı. Kinematik yaşlar 1440 barınak yıldız için hesaplandı ve Berger vd. (2023) çalışmasında bu yıldızlar için belirlenen eş-yaşlarla karşılaştırıldı. Ancak Berger vd. (2023) barınak yıldız parametreleri için oluşturdukları tabloda etkin sıcaklığı 5000 K'den küçük olan yıldızların eş-yaşlarının duyarlı olmadığını belirtmişlerdir. Bu nedenle kinematik ve eş-yaş arasındaki ilişki incelenirken sıcaklığı 5000 K'den küçük olan yıldızlar (332 barınak yıldız) örnek grubundan çıkarılmış ve karşılaştırmada 1108 barınak yıldız kullanılmıştır. Elde edilen barınak yıldızların eş-yaşlarının histogram dağılımları Şekil 41'de verilmiştir. Şekil 41'den görülebileceği gibi barınak yıldızların yaşları büyük ölçüde 8 Gyıl yaşına kadar bir dağılım gösterir ancak az sayıda olsa da 8 Gyıl'dan daha yaşlı yıldızların da olduğu görülür. Örnek grubu içerisindeki en genç yıldız 0.165 Gyıl yaşına sahip WASP-178 yıldızdır.



Şekil 41. Barınak yıldızların (1108 barınak yıldızdan oluşan grup için) Berger vd. (2023) çalışmasından derlenen eş-yaşlarının histogramı.

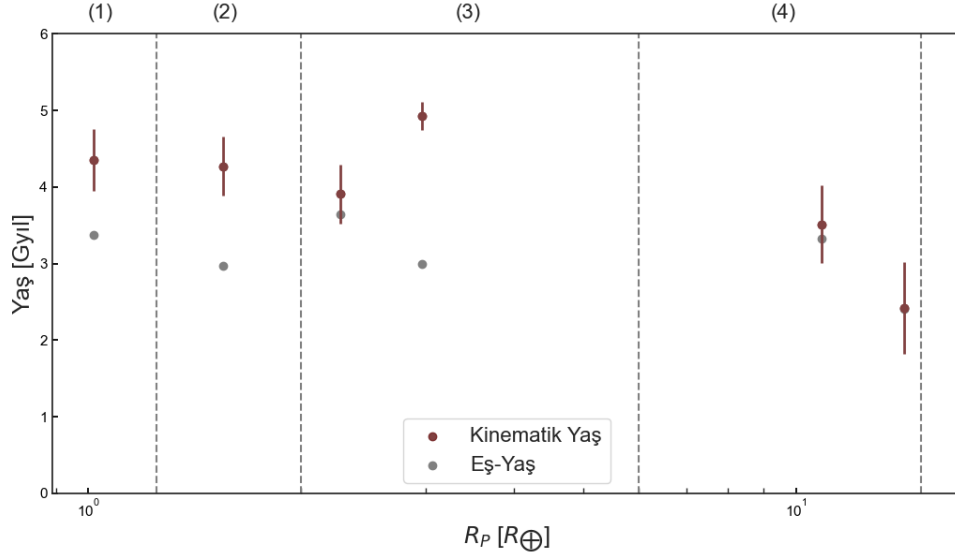
Barınak yıldızların kinematik yaşını hesaplamak için veriler öncelikle eş-yaşa göre küçükten büyüğe sıralanmış ve sıralamadan sonra barınak yıldızlar için neredeyse eşit sayıda (her grupta 110 veya 111 yıldız bulunur) 10 grup belirlenerek kinematik grup yaşları ve hataları hesaplanmıştır. Aynı zamanda her grup içerisindeki eş-yaşların ve hatalarının da medyanları hesaplanarak kullanılmıştır. Buna göre kinematik yaşın eş-yaş ile değişimi Şekil 42’de verilmiştir. Grafiğe bakıldığında ve hata çubukları da göz önüne alındığında, en küçük yaşa karşılık gelen grup hariç, kinematik yaş ile eş-yaşlar genel olarak uyumlu bir dağılım sergiler.



Şekil 42. Barınak yıldızlar için eş-yaş ve kinematik yaş karşılaştırması.

Gezegen özelliklerinin yaşa göre nasıl bir değişim gösterdiğini incelemek için gezegen kütle ve yarıçapına göre gruplar oluşturulmuştur. Öncelikle yaşın gezegen yarıçapıyla değişimi incelemenmiş ve bunun için Berger vd. (2023) çalışmasında eş-yaş değerleri problemlili yıldızlar örnek grubundan çıkarılarak kinematik yaş ve eş-yaş için eşit sayıda (830 barınak yıldız) örnek grubu kullanılmıştır. 830 barınak yıldız neredeyse eşit sayıda yıldız içerecek şekilde (her grupta 138 veya 139 yıldız bulunur) 6 gruba bölünerek grupların kinematik yaşları hesaplanmıştır. Aynı zamanda grup içerisindeki eş-yaşlar ve gezegen yarıçaplarının medyanları bulunmuştur. Buna ilişkin grafik Şekil 43’te verilmiştir.

Şekil incelendiğinde özellikle 4. bölgedeki yani Jüpiter ve daha büyük boyuttaki gezegenlerin barınak yıldızlarının, yaşlarının küçük boyutlu gezegenlere göre daha küçük olduğu (eş-yaş ve kinematik yaş uyumlu görünmekte) açıkça görülmektedir.



Şekil 43. Barınak yıldızların yaşlarının gezegen yarıçapıyla değişimi. Gri noktalar barınak yıldızlar için eş-yaşı temsil eder ve bordo renkli noktalar ise grubun kinematik yaşını gösterir. Burada bölge (1) Dünya, bölge (2) süper-Dünya, bölge (3) Neptün ve bölge (4) Jüpiter boyutlu gezegen sınıfını temsil eder.

Tablo 11

Gezegen yarıçaplarına göre oluşturulan gruplar için kinematik yaş ve eş-yaş değerleri.¹¹

	N_s	$R_p (R_{\oplus})$	$Yaş_{kin} (Gyıl)$	$Yaş_{eş} (Gyıl)$
1. Grup	138	1,02	4,35±0,39	3,38±3,19
2. Grup	138	1,55	4,37±0,41	2,97±2,86
3. Grup	138	2,27	3,91±0,41	3,64±3,65
4. Grup	138	2,97	4,93±0,66	2,99±2,85
5. Grup	139	10,88	3,51±0,31	3,33±3,22
6. Grup	139	14,21	2,43±0,5	2,41±1,41

¹¹ Tablodaki R_p değeri grup içerisindeki gezegenlerin yarıçaplarının medyan değerleridir. Kinematik yaş grup yaşları hesaplanarak elde edilmiştir ve eş-yaşlar grup içerisindeki yıldızların medyanları hesaplanarak elde edilmiştir.

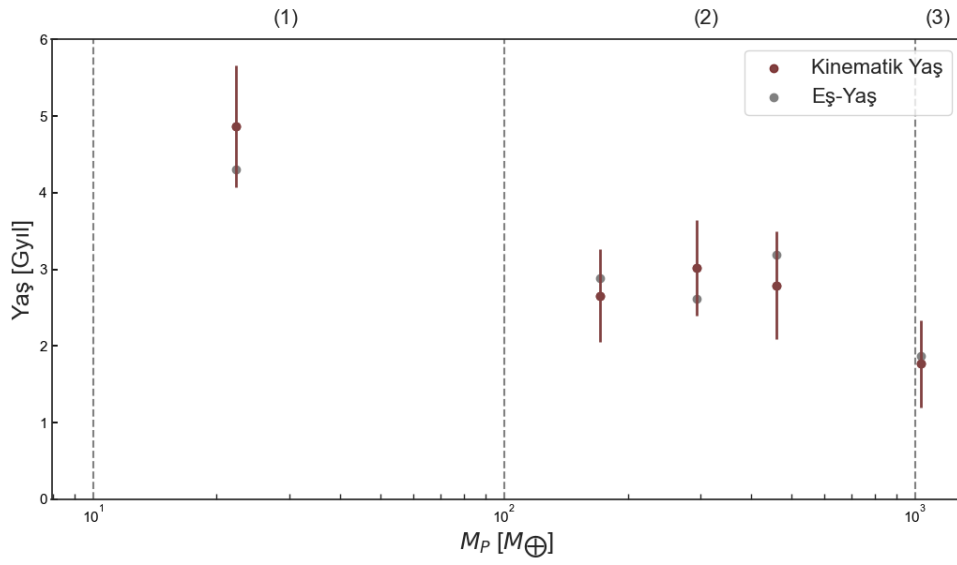
Barınak yıldız yaşının gezegen kütlesiyle değişiminin incelenmesi için de benzer aşamalar uygulandı. Gezegen kütlesi bilinen ve kütle sınıflamasına göre gruplara ayrılan yıldız sayısı Bölüm 4.2’den bilindiği gibi 320’ydi. Gezegen yarıçapının hem kinematik yaş ve hem de eş-yaş ile değişimini birlikte incelemek için Berger vd.’nin (2023) ifade ettiği duyarlı olmayan yaşlara sahip barınak yıldızlar çıkarılarak toplam 261 barınak yıldız için yaş değişimi incelendi. Elde edilen barınak yıldızlarından neredeyse birbirine eşit sayıda (Tablo 12’de sayılar görülebilir) 5 grup oluşturularak kinematik grup yaşları ve eş-yaşların medyan değerleri hesaplandı. Buna göre oluşturulan grafik Şekil 44’te verilmiştir. Bölge (1) Neptün kütleindeki gezegenlere ait bölgeyi gösterir ancak bu bölgedeki grup içerisinde Dünya/süper-Dünya ve Neptün kütleindeki gezegenlerin yıldızları bulunur. Dünya/süper-Dünya kütleindeki gezegenler için sayının az olmasından dolayı (15 barınak yıldız) bu sınıflamadaki yıldızlar, yaş hesaplaması için, Neptün kütleindeki gezegen sınıflaması içerisine dahil edilmiştir. Gezegen kütlesi bulunan yıldız sayısı görülebileceği gibi gezegen yarıçapları için elde edilen yıldız sayısına göre oldukça azdır ve bilinen kütlesi olan gezegenler daha çok büyük kütleli gezegenlere doğru bir yoğunluk gösterir (Tablo 9). Bu nedenle Şekil 44’e bakıldığında bölge (2) ve (3)’teki kinematik grup yaşlarının eş-yaşlar ile oldukça uyumlu olduğu görülür ki bu sonuç Şekil 43 ile oldukça uyumludur. Bunun yanında bölge (1)’de bulunan grup için de kinematik yaş ve eş-yaş değerleri büyük ölçüde uyumlu görünür ancak kinematik yaş eş-yaşa göre daha büyük olarak elde edilmiştir. Aynı zamanda Şekil 44’te, büyük kütleli gezegenlerin yaşlarının açıkça küçük olduğu ve en genç barınak yıldızların büyük kütleli gezegenlerin yıldızları olduğu görülür.

Tablo 12

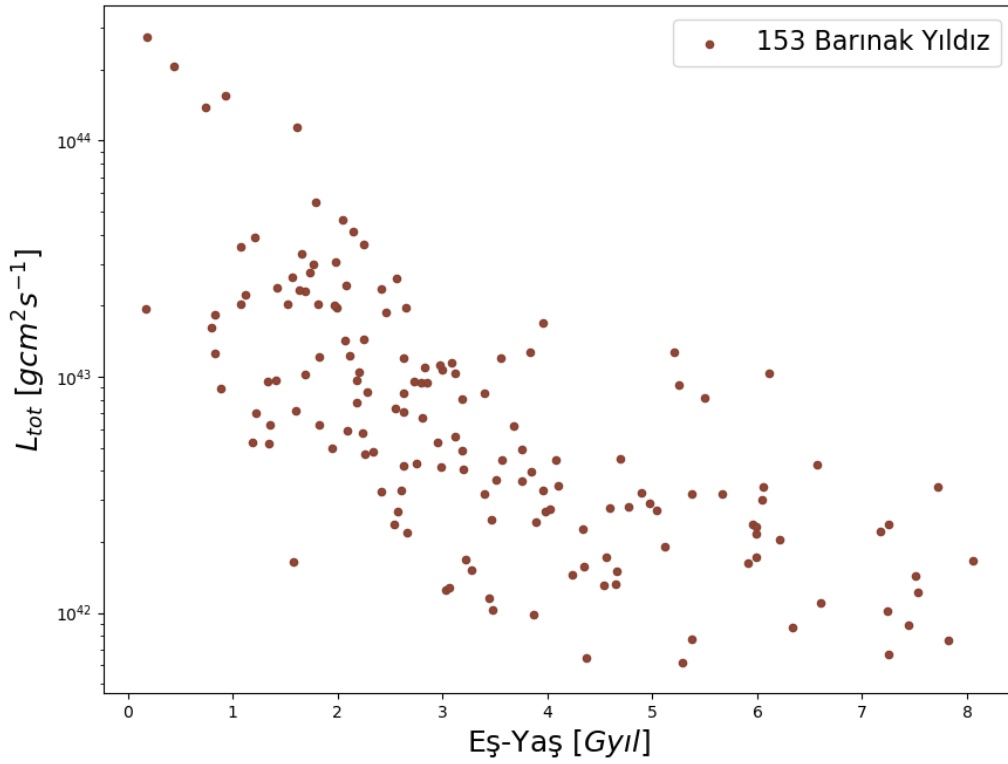
Gezegen kütlelerine göre oluşturulan gruplar için kinematik yaş ve eş-yaş değerleri.¹²

	N_s	$M_p (M_{\oplus})$	$Yaş_{kin} (Gyıl)$	$Yaş_{eş} (Gyıl)$
1. Grup	46	22,32	4,87±0,16	4,30±4,36
2. Grup	53	171,63	2,66±0,25	2,89±2,46
3. Grup	54	294,15	3,02±0,24	2,61±2,05
4. Grup	54	459,26	2,79±0,20	3,19±3,16
5. Grup	54	1031,36	1,77±0,27	1,87±1,09

¹² Not: Tablodaki M_p değeri grup içerisindeki gezegenlerin kütlelerinin medyan değerleridir. Kinematik yaş grup yaşları hesaplanarak elde edilmiştir ve eş-yaşlar grup içerisindeki yıldızların medyanları hesaplanarak elde edilmiştir.



Şekil 44. Barınak yıldızların yaşlarının gezegen kütlesiyle değişimi. Gri noktalar barınak yıldızlar için eş-yaşları temsil eder ve bordo renkli noktalar ise grubun kinematik yaşını gösterir. Burada bölge (1) Neptün, bölge (2) Jüpiter ve bölge (3) süper-Jüpiter kütleli gezegenlerin barınak yıldızlarını gösterir.



Şekil 45. Yıldız-gezegen sistemlerinin toplam açısal momentumlarının eş-yaş ile değişimi.

Bölüm 4.3'te dağılımı verilen toplam açısal momentumun yaş ile ilişkisini belirlemek için eş-yaşlar kullanıldı. Bölüm 4.3'e bakılırsa açısal momentum hesaplamaları 185 barınak yıldız üzerinden yapılmıştır ancak burada Berger vd. (2023) çalışmasındaki duyarlı olmayan yaşlar çıkarıldığında 154 barınak yıldız elde edilmiştir. Ayrıca grafikteki genel eğilime uymayan ve yaşı 12,58 Gyıl olan WASP-105 yıldızı çıkarılmış ve 153 barınak yıldız ile üzerinden toplam açısal momentum değişimi incelenmiştir. Elde edilen 153 barınak yıldız için eş-yaşa karşılık toplam açısal momentum değişimi Şekil 45'de olduğu gibi elde edilmiştir. Grafiğe bakıldığında yaklaşık 4-4,5 Gyıl yaşına kadar yıldız yaşlandıkça açısal momentumunda da bir azalma olduğu, bu yaştan sonra yıldız yaşlandıkça açısal momentum değişiminin çok daha az olduğu görülebilir.



BEŞİNCİ BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada 1440 anakol barınak yıldızının kinematik özellikleri, sahip oldukları gezegenlerin bazı temel özelliklerinin yaşla değişimi ve yıldız-gezegen sistemlerinin açısal momentum dağılımları araştırılarak sunulmuştur. Literatürde çoğunlukla aday gezegenler üzerinden yürütülen çalışmaların mevcut olmasından dolayı yıldız-gezegen sistemlerini daha güvenilir ve homojen veri setiyle inceleyebilmek için aday gezegenli sistemler tercih edilmedi ve yalnızca onaylanmış gezegenlerin barınak yıldızları üzerinden bir araştırma yapılması tercih edildi. Kinematik incelemeler açısından astrometrik parametrelerin ve dikine hızın hassas bir şekilde kullanılması önemlidir ve bu amaçla *Gaia* uydusunun DR3 veri sürümü astrometrik ve dikine hız veri kaynağı olarak kullanıldı. *Gaia*'nın bu parametreleri hassas bir şekilde sağlayabiliyor olması, hesaplanan uzay hızlarına ve kinematik incelemeye doğrudan yansır. Bundan dolayı *Gaia* DR3'ten sağlanan parametrelerdeki hassasiyet bu çalışma için kritik öneme sahiptir. Bunun yanında kullanılan barınak yıldız ve gezegen parametreleri için özellikle homojen veri kullanma yaklaşımı benimsendi ki sonuçların olabildiğince duyarlı bir şekilde değerlendirilebilmesi açısından bu tercih önemliydi.

Onaylanmış gezegenlere sahip barınak yıldızlar için yapılan bu çalışma, barınak yıldızlar, ötegezegenler ve gezegen sistemlerinin oluşum ve evrimleri açısından önemli noktalara dokunması ve bu alanda boşluk olduğu düşünülen konulara katkı sağlaması amacıyla planlandı. Özet olarak bu çalışmanın barınak yıldızlar için özellikle kinematik açıdan bir değerlendirme sunması ve gezegen sistemlerine farklı bir bakış sağlayacak fikirlere yol açması ve bilgiler sunması amaçlanmıştır.

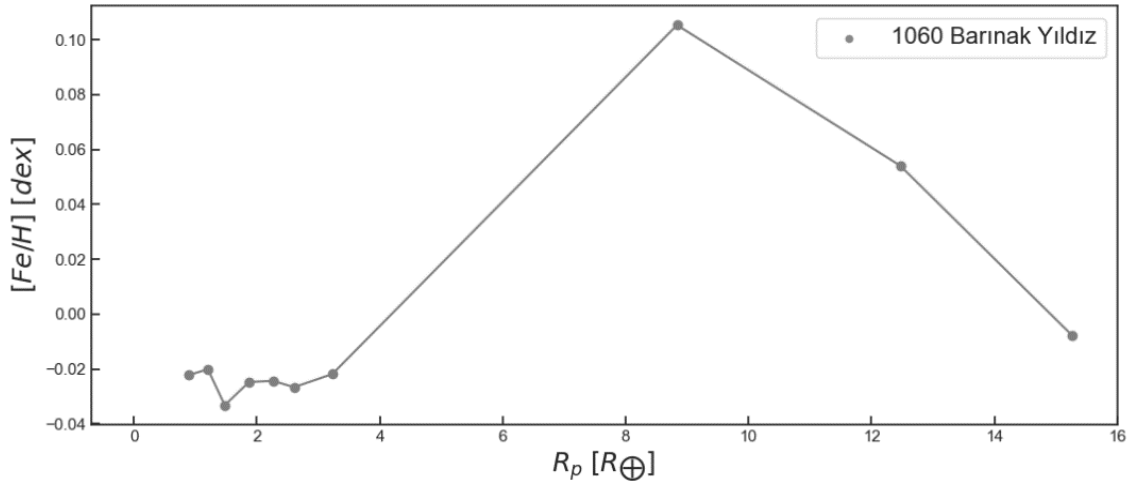
Gaia DR3'ün astrometrik parametrelerinin kullanılmasıyla birlikte beklenildiği gibi hedef barınak yıldızlarının uzay hız bileşenleri hassas bir şekilde hesaplandı. 1440 barınak yıldızının popülasyon ayrımı için Bensby14 kriterleri kullanıldı. Bunun başlıca nedeni Bensby14 kriterlerine göre yapılan popülasyon ayrımının Galaktik yörünge parametrelerinden Z_{\max} değeri kullanılarak yapılan popülasyon ayrımı ile daha uyumlu

olmasıydı. 1327 ince disk barınak yıldızının 1307 tanesinin galaktik yörünge parametrelerine göre belirlenen ince disk yıldızıyla eşleştiği (%98.5 oranında) görüldü. Yapılan popülasyon ayırımına göre barınak yıldızlarının %92,2'sinin ince disk, %3,5'inin kalın disk popülasyonuna ait olduğu ve yaklaşık %1 kadarının Hercules akışında bulunduğu tespit edildi (burada Bensby14 yöntemine göre arada-kalan yıldızlar olarak tanımlanan yıldızlar ve tanımlanamayan yıldızlar bulunur, bu nedenle ince disk, kalın disk ve Hercules akışının toplamı %100 olmaz). Örneğimiz içinde halo popülasyonunda bulunan barınak yıldız tespit edilmemiştir. TESS Aday Hedef Listesi'ndeki (TESS Candidate Target List) barınak yıldızların kinematik incelemesini yapan Carrillo vd. (2020), bu çalışmada bulunan sonuca benzer şekilde barınak yıldızların büyük çoğunluğunun ince disk popülasyonunda, %4 kadarının kalın disk popülasyonunda bulunduğunu ve %1'den daha azının halo popülasyonunda bulunduğunu tespit etmiştir. Barınak yıldızların kinematikini araştıran Chen vd. (2021b) de benzer sonuçlar elde etmiş ve bizim elde ettiğimiz sonuca benzer şekilde halo popülasyonunda barınak yıldız olmadığını rapor etmiştir. Yaptığımız popülasyon ayırımlarına göre, ince disk yıldızlarının kinematik yaşının $2,88 \pm 0,43$ Gyıl, kalın disk yıldızlarının kinematik yaşının $12,03 \pm 0,61$ Gyıl olduğunu tespit ettik. Elde ettiğimiz bu sonucun, Chen vd. (2021b) çalışmasında verilen sonuçlarla (ince disk için $2,49 \pm 0,21$ Gyıl; kalın disk için $9,83 \pm 1.12$ Gyıl) uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Tespit edilen kalın disk popülasyonunda ve Hercules akışında bulunan barınak yıldız sayıları (sırasıyla 50 ve 15) kinematik bir inceleme yapmaya uygun değildir. Şekil 34, gezegen yarıçapına göre sınıflandırılan gezegenler üzerinden barınak yıldızların V_{tot} , $[Fe/H]$, e_p ve Z_{max} değerlerinin değişimini gösterir. Şekil 34, hem popülasyon ayırımı yapılmadan kullanılan 1060 barınak yıldızının hem de 970 ince disk barınak yıldızının dağılımını gösterir (gezegen yarıçapına göre bir sınıflama yapıldığı için tek gezegeni olan barınak yıldızlar kullanıldı ve dolayısıyla yıldız sayıları azalmış oldu). Bu grafiğe ilişkin parametre değerlerinin olduğu Tablo 7 ve Tablo 8'a bakıldığında kalın disk yıldızlarının etkisinin çok fazla olmadığı veya ihmal edilebilir düzeyde olduğu görülebilir. Kalın disk yıldızlarının sayılarının az olmasından dolayı bu çalışmada ince disk ve kalın disk yıldız karşılaştırmalarına yönelik bir çalışma yürütülmedi ve daha çok gezegen sınıflamaları üzerinden incelemeler yapıldı. Gezegenlerin yarıçaplarına göre yapılan sınıflamaya göre Dünya-boyutlu, süper-Dünya-boyutlu, Neptün-boyutlu, Jüpiter-boyutlu ve çok-büyük-

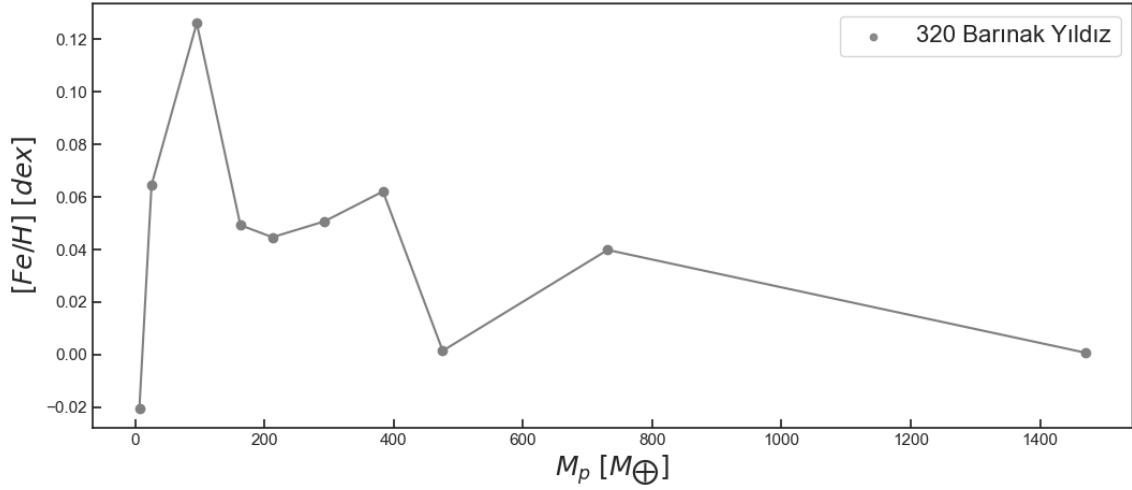
boyutlu gezegenlerin yıldızlarının sırasıyla %90,45, %90,28, %90,93, %92,74 ve %98,25'inin ince disk popülasyonunda olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan çalışmalara göre en genel haliyle gezegeni olan yıldızların metal bolluğunun gezegeni olmayan yıldızlara göre daha zengin olduğu uzun süredir bilinen bir sonuçtur (Fischer ve Valenti, 2005). Bunun yanında dev gezegenlere sahip barınak yıldızlarının metal bolluğunun daha zengin olma eğiliminde olduğu biliniyordu (Santos vd., 2001; Fischer ve Valenti, 2005; Johnson vd., 2010). Ancak son zamanlarda yapılan çalışmalarla özellikle belirli bir gezegen kütesinden sonra barınak yıldız metal bolluğunun daha fakir olduğuna yönelik sonuçlar elde edildi (Santos vd., 2017; Narang vd., 2018; Petigura vd., 2018; Schlaufman, 2018; Swastik vd., 2021). Narang vd. (2018), gezegen kütesiyle metal bolluğunun açıkça arttığını ancak belli bir kütle değerinden sonra ($\sim 4 M_j$ veya $1200 M_{\oplus}$) barınak yıldızın metal bolluğunda bir azalma olduğunu tespit ettiler. Benzer bir sonucu gezegen yarıçapı üzerinden de elde etmişlerdir. Yaptığımız bu çalışmada Tablo 7'ye bakıldığında gezegen boyutuna göre metal bolluğunun arttığı ve Jüpiter boyutundaki gezegenlerin yıldızlarında en büyük değerini aldıktan sonra çok-büyük boyutlu gezegenlerin yıldızlarına doğru bir azalma meydana geldiği görülebilir. Şekil 46, gezegen yarıçapına göre (10 eşit sayılı grup için) barınak yıldızların metal bolluğu değişimini gösterir. Buradan barınak yıldız metal bolluğunun yaklaşık $9 R_{\oplus}$ boyutunda maksimum değerine ulaştığı görülebilir ve bu sonuç Narang vd., (2018) çalışmasıyla uyumludur. Petigura vd., (2018) ise biraz daha farklı bir sonuç elde ederek barınak yıldızların metal bolluğunun yaklaşık $6 R_{\oplus}$ boyutunda maksimum değerine ulaştıktan sonra bir düşüş olduğunu tespit etmişlerdir.



Şekil 46. Gezegen yarıçapına karşılık barınak yıldızların metal bolluğu dağılımı. Grafikteki her nokta eşit sayıda gezegen içerir ve barınak yıldızlar 10 gruba bölünmüştür.

Tablo 10'a bakıldığında gezegen kütesinin artmasıyla metal bolluğunun arttığı ve Neptün-Jüpiter kütleli gezegenlerin barınak yıldızlarının en büyük değeri aldığı görülebilir. Şekil 47'de ise gezegen kütesine karşılık (eşit sayılı 10 grup için) barınak yıldızların metal bolluğu değişimi verilmiştir. Bu grafiğe göre metal bolluğunun yaklaşık $90 M_{\oplus}$ değerinde en büyük değerine ulaştığı görülebilir. Narang vd. (2018) yaptıkları çalışmada yaklaşık $4 M_J$ kütesinde bir maksimum gerçekleştiğini elde etmişlerdir. Bu sonuç bizim elde ettiğimiz sonuç ile oldukça farklıdır. Bu farklılık kullanılan örnek sayılarıyla da ilişkili olabilir çünkü bu çalışmada 320 onaylanmış barınak yıldızını kullanılırken (gezegen kütle sınıflaması için) Narang vd. (2018), Kepler aday gezegenlerini de kullandıklarından çok daha büyük bir örnek grubuyla (2142 anakol yıldızı) çalışmışlardır. Ancak buna karşın metal bolluğunun çok büyük boyutlu veya çok büyük kütleli gezegenlere sahip barınak yıldızlarında bir düşüş gösterdiği ortak olarak ifade edilen bir sonuçtur.



Şekil 47. Gezegen kütlesine karşılık barınak yıldızların metal bolluğu değişimi. Grafikteki her nokta eşit sayıda yıldız-gezegen içerir.

Önceki çalışmalar Jüpiter benzeri gezegenlerin yıldızlarının metal bolluğunun zengin olarak elde edildiğini göstermesinin yanında düşük kütleli veya boyuta sahip gezegenlerin barınak yıldızlarının metal bolluğunun geniş bir aralığa dağıldığını ortaya koymuştur (Buchhave vd., 2012; Petigura vd., 2018). Bu çalışmadaki örnek grubu için Şekil 35’deki histogram dağılımlarına bakılırsa Dünya-boyutlu, süper-Dünya-boyutlu, Neptün-boyutlu ve Jüpiter-boyutlu gezegenlerin barınak yıldızlarının demir bolluğunun daha geniş bir aralıkta dağılım gösterdiği, bunun yanında çok-büyük-boyutlu gezegenleri olan barınak yıldızlarının metal bolluğunun ise diğerlerine göre daha dar bir aralıkta dağılım gösterdiği ifade edilebilir. Ayrıca Kutra vd. (2021), süper-Dünya ve alt-Neptünleri (1-4 R_{\oplus} aralığı) içeren Kepler gezegenlerinin yarıçaplarının barınak yıldızın metal bolluğundan bağımsız olduğunu belirlemişlerdir. Yaptığımız bu çalışmada da Şekil 34 ve Tablo 7’ye bakılırsa Dünya, süper-Dünya ve Neptün boyutundaki gezegenlerin yıldızlarının metal bolluğunda yarıçap değişimiyle dikkate değer bir metal bolluğu değişimi olmadığı görülür.

Bölüm 4.3’te gezegen sistemlerine ait açısal momentum dağılımları elde edilmiş ve yıldız kütlesi ve dönme hızı ile açısal momentumlar arasında ilişkiler elde edilmiştir. Buna göre gezegen kütlesi ile gezegenin yörünge açısal momentumu arasında $L_p \sim M_p^{1.06(2)}$, yıldızın dönme hızıyla dönem açısal momentumu arasında $J_{\star} \sim v \sin i^{1.40(20)}$ ve yıldızın kütlesi ile sistemin toplam açısal momentumu arasında $L_{tot} \sim M_{\star}^{4.06(20)}$ bağıntısı olduğu

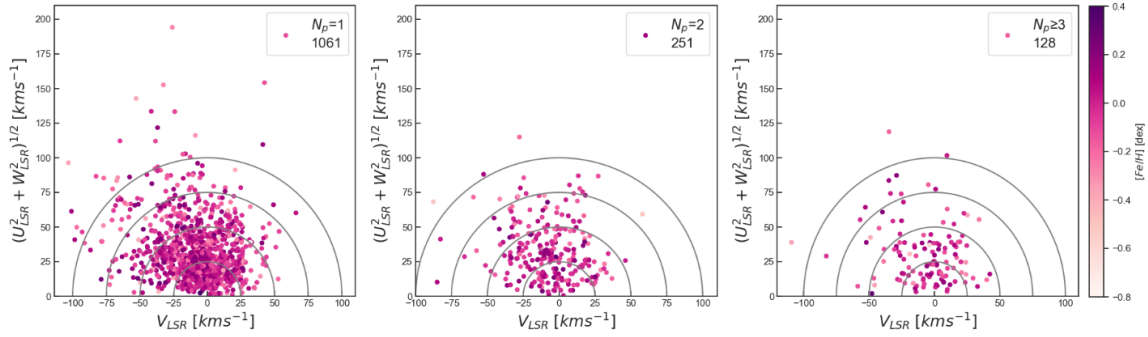
belirlendi. Gurumath vd. (2019) yaptıkları araştırmada bu çalışmadaki sonuçlara benzer sonuçlar elde ederek $L_p \sim M_p^{1.26(5)}$ ve $L_{tot} \sim M_*^{3.97(31)}$ bağıntılarını belirlemişlerdir.

Kinematik yaşla farklı gezegen parametrelerinin değişimlerine değinmeden önce kinematik yaşın başka yöntemlerle elde edilen bir yaş ile karşılaştırılması önemlidir. Şekil 42’de bu çalışmada hesaplanan kinematik yaşlarla Berger vd.’den (2023) elde edilen eş-yaşlar karşılaştırmış ve en genç sistemler dışında iki farklı yöntemle elde edilen yaşlar arasında iyi bir uyum olduğu görülmüştür. Chen vd. (2021b) ise elde ettikleri kinematik yaşları başka yaşlar ile (eş-yaş, astrosismik yaş ve jirokronoloji yaşı) karşılaştırmış ve kinematik yaşın bu çalışmadakine benzer şekilde diğer yaşlarla uyumulu olduğu ancak küçük yaşlarda uyumsuzlukların olduğunu rapor etmişlerdir.

Gezegen yarıçapına göre yapılan gruptaki toplam uzay hız değişimine bakıldığında (Şekil 34 ve Tablo 7) artan yarıçap ile birlikte toplam uzay hızının azaldığı görülür. Buna karşın süper-Dünya boyutundaki gezegenlerin toplam uzay hızının diğerlerine göre en büyük uzay hızına sahip olduğu ($40,16 \text{ km s}^{-1}$) görülebilir. Bunun yanında uzay hızının hataları da göz önüne alındığında süper-Dünya ve Neptün boyutundaki gezegenlere sahip yıldızların uzay hızları birbirine çok yakın olarak belirlenmiştir. Bu iki grubun hız dispersiyonları da birbirine çok yakındır ve dolayısıyla kinematik yaşları da birbirine çok yakın olarak bulunmuştur (sırasıyla $4,31 \pm 0,53 \text{ Gyıl}$ ve $4,32 \pm 0,54 \text{ Gyıl}$). Şekil 24’e bakıldığında ise genel olarak Dünya, süper-Dünya ve Neptün boyutlu gezegenlerin yıldızları yakın yaşlarda bulunmuş ve Jüpiter ile çok-büyük boyutlu gezegenlerin yıldızları daha genç olarak (sırasıyla $3,23 \pm 0,32 \text{ Gyıl}$ ve $1,77 \pm 0,18 \text{ Gyıl}$) hesaplanmıştır. Benzer bir durum gezegen kütesine göre yapılan gruplamalarda da görülebilir ancak küçük kütlelerdeki gezegenlerin için örnek sayısının az olduğu unutulmamalıdır. Şekil 44’e bakıldığında küçük kütleli gezegenlerin Jüpiter ve süper-Jüpiter kütleli gezegenlere sahip yıldızlara göre daha yaşlı oldukları görülebilir ancak sayının artmasıyla bu sonuç daha anlamlı hale gelebilir.

Swastik vd. (2022) yaptıkları çalışmada büyük kütleli gezegenlerin yıldızlarının küçük kütleli gezegenlere sahip yıldızlara göre daha genç oldukları sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca α -element bolluğu dağılımlarına bakarak en az bir düşük kütleli ve bir

büyük kütleli gezegen barındıran çoklu gezegen sistemlerinin daha genç olma eğiliminde olabileceklerini rapor etmişlerdir. Tablo 13'te tek gezegeni olan, iki gezegeni olan, üç ve üçten fazla gezegeni olan yıldızlar için bazı parametreler belirlenmiştir. Buna göre çok büyük bir fark olmasa da gezegen sayısı arttıkça yıldız yaşının azaldığı görülebilir. Aynı zamanda gezegen sayısı arttıkça metal bolluğunun azaldığı da Tablo 13'ten görülebilir. Şekil 48, gezegen sayılarına göre ayrılan barınak yıldızlarının Toomre diyagramındaki konumlarını gösterir. Buna göre metal bolluğu dağılımının birbirine yakın olduğu görülebilir. Ancak tek gezegeni olan barınak yıldız sayısı, birden daha fazla gezegeni olan barınak yıldızlarına göre daha fazla sayıdadır ve bu durum bir yanlılık içeriyor olabilir. Chen vd. (2021b), bu çalışmadaki sonuca benzer şekilde kinematik yaşın gezegen sayısı ile birlikte azaldığı sonucunu elde etmişlerdir. Gezegen sayısına göre demir bolluğu değerine bakıldığında ise bu çalışmadaki sonuçtan farklı bir sonuç elde edildiği görülür. Chen vd. (2021b), iki gezegeni olan barınak yıldızlarının metal bolluğunun daha zengin olduğunu ve ikiden fazla gezegeni olan barınak yıldızlarının ise metal bolluğunun azaldığı sonucunu elde etmişlerdir.

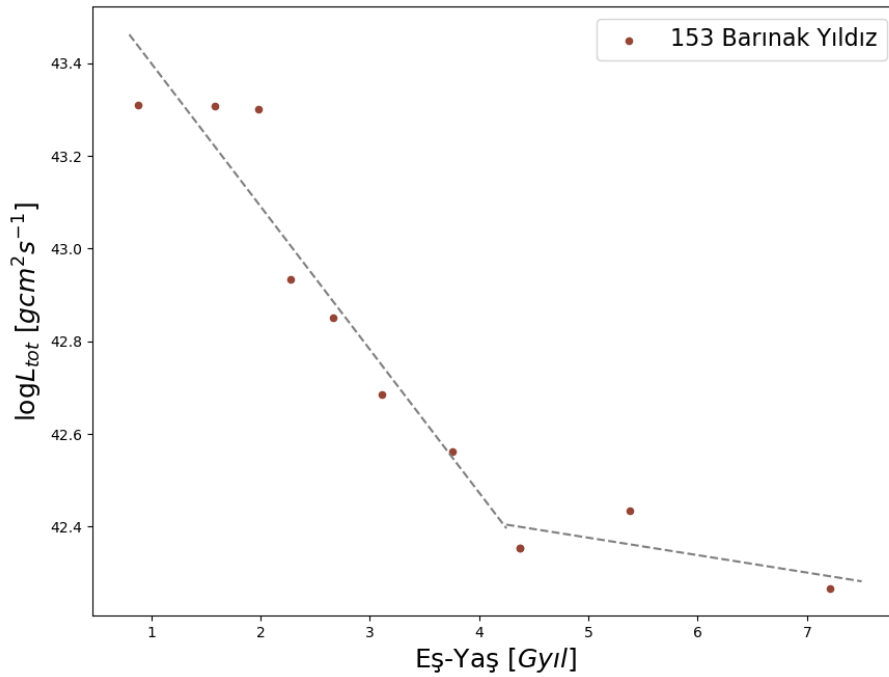


Şekil 48. Gezegen sayısına göre barınak yıldızların Toomre diyagramlarında konumları. En soldaki grafik gezegen sayısı bir olan barınak yıldızlarını, ortadaki grafik gezegen sayısı iki olan barınak yıldızlarını ve en sağdaki grafik gezegen sayısı ≥ 3 olan barınak yıldızlarını gösterir. Yıldızlar $[Fe/H]$ değerine göre renklendirilmiştir.

Tablo 13

1440 anakol barınak yıldızı için gezegen sayısına göre oluşturulan gruplar içerisindeki barınak yıldızların kinematik ve dinamik yörünge parametrelerine ait özellikler.¹³

	Tümü	$N_p = 1$	$N_p = 2$	$N_p \geq 3$
N_*	1440	1061	251	128
M_* (M_\odot)	$0,97 \pm 0,05$	$0,99 \pm 0,05$	$0,94 \pm 0,05$	$0,89 \pm 0,05$
R_* (R_\odot)	$0,95 \pm 0,03$	$0,97 \pm 0,03$	$0,91 \pm 0,03$	$0,87 \pm 0,03$
[Fe/H]	$-0,01 \pm 0,14$	$-0,01 \pm 0,14$	$-0,015 \pm 0,136$	$-0,026 \pm 0,137$
V_{tot} (km s^{-1})	$34,92 \pm 2,66$	$34,71 \pm 2,62$	$37,10 \pm 2,82$	$34,17 \pm 2,67$
σ_{tot} (km s^{-1})	$45,92 \pm 2,65$	$46,34 \pm 2,69$	$44,87 \pm 2,59$	$44,64 \pm 2,42$
e_p	0,127	0,126	0,131	0,124
Z_{max} (kpc)	0,261	0,264	0,261	0,270
Ya_{kin} (Gyl)	$3,87 \pm 0,47$	$3,95 \pm 0,48$	$3,69 \pm 0,46$	$3,65 \pm 0,43$



Şekil 49. Yıldız-gezegen sistemlerinin toplam açısal momentumlarının yıldızların eş-yaşlarıyla değişimi. Grafikteki yıldız örnek sayısı 10 parçaya ayrılmış ve her grup için toplam açısal momentumun ve eş-yaşın medyanı hesaplanarak grafiğe noktalanmıştır.

¹³ Not: Tabloda N_s yıldız sayısını, N_p gezegen sayısını gösterir. V_{tot} uzay hız bileşenlerinin elde edilen toplam hızı, σ_{tot} grup içerisindeki hız dispersiyonu, [Fe/H] demir bolluğu, e_p galaktik yörünge basıncı, Z_{max} Galaktik yörünge maksimum yüksekliği ve Ya_{kin} grubun kinematik yaşıdır.

Bu çalışmada gezegen sistemlerinin toplam açısal momentumlarının yıldızın izokron yaşıyla değişimi de incelenmiştir. Genel bir eğilim olarak yaşın artmasıyla birlikte toplam açısal momentumun azaldığı görülebilir. Şekil 49, toplam açısal momentumun yaş ile değişimini göstermektedir. Şekil 5.4'e bakıldığında birbirinden ayrılan iki bölge görülür. Yaklaşık 4 – 4.5 Gyıl'a kadar yaşın artmasıyla toplam açısal momentumun çok hızlı bir şekilde azaldığı yaklaşık 4 – 4.5 Gyıl'dan sonra açısal momentumun çok daha az değişim gösterdiği açıkça izlenebilir. Burada örnek sayısının az olmasından dolayı kinematik grup yaşının hesaplanmasının anlamlı olmayabileceği düşünülmüş ve kinematik yaş ile izokron yaşının da genel olarak uyumlu bir sonuç sergilemesinden dolayı toplam açısal momentum değişimi izokron yaşıyla ele alınmıştır.

Özellikle Jüpiter boyutlu/kütleli gezegenlere sahip barınak yıldızların metal bolluğunun daha yüksek olma eğiliminde olduğu, daha düşük boyutlu/kütleli gezegenlerin metal bolluğunun ise geniş bir aralıkta dağılım gösterdiği, düşük kütleli gezegenlerin barınak yıldızlarının metal bolluğundan bağımsız dağılım gösterme eğiliminde olduğu bu çalışmada elde edilen sonuçlardandır. Ayrıca çok büyük kütleli gezegene sahip barınak yıldızlarının ise metal bolluğunda azalma eğilimi olduğu görülmektedir. Buradan da anlaşılabilceği gibi gezegen oluşumunun sadece metal bolluğu üzerinden değerlendirilmesi eksik bir bakış açısı yaratabilir. Bu bağlamda Bashi ve Zucker (2020)'in yaptıkları çalışmada gezegenlerin oluşum oranlarını galaktik bağlamda değerlendirmek için barınak yıldızları toplam uzay hızı ve metal bolluğu düzleminde incelemişler ve incelemelerinde α -element bolluğunu da kullanmışlardır. Ayrıca α -element bolluğunu kullanarak inceleme yapan başka çalışmalar da vardır (örneğin Chen vd., 2021b; Swastik vd., 2022). Ancak bu çalışmalar büyük çoğunlukla aday gezegen barınak yıldızları üzerinden yapılmıştır. Bu nedenle bu tür çalışmaların daha fazla sayıda onaylanmış barınak yıldızları üzerinden incelenmesi önemli olabilir.

Gezegenli yıldızları buldukları galaktik ortam ile ilişkisini inceleyen araştırmalar da yapılmaya başlanmıştır (Bashi ve Zucker, 2020; Mustill vd., 2021; Winter vd., 2020). Ayrıca Zink vd. (2023) çalışmasında galaktik yörüngenin salınım genliği (Z_{\max}) ile gezegen oluşumu arasında bir bağlantı olduğundan ve bu durumun demir bolluğu ile de ilişkili olabileceğinden bahsedilmiştir. Ancak buradaki ilişkiyi sadece demir bolluğu ile açıklamanın yeterli olmadığını belirtmişler. Bu çalışmada da Z_{\max} ile oluşabilecek bir

bağlantı bulunabilir mi diye incelmeler yapılmış ama açık bir kanıt bulunamamıştır. Bu nedenle Z_{\max} parametresiyle, yıldız-gezegen sistemlerinin bazı parametre değişimlerini daha fazla sayıda daha geniş parametre aralığında bir örnek incelemek gerekebilir.

Bu çalışmada ve literatürdeki araştırma sonuçlarından anlaşıldığı gibi küçük kütleli (Dünyalar, süper-Dünyalar), Jüpiter benzeri ve çok-büyük kütleli (süper-Jüpiterlerin) gezegenlerin oluşum ve evrim süreçlerinin farklı olabileceği düşünülmektedir. Bu bağlamda en dikkat çekici grup daha az metal bolluğuna ve daha küçük yaşa sahip yıldızların etrafında tespit edilen çok-büyük kütleli (süper-Jüpiterler ve çok büyük boyutlu gezegenler) gezegenlerdir. Literatürde de metalce fakir yıldızların etrafında keşfedilen süper-Jüpiterlere ait çalışmalar bulunmaktadır (Barbato vd., 2019; Alves vd., 2022). Bu tür gezegenler üzerine daha fazla örnekle detaylı çalışmalar yapmak, yıldız-gezegen sistemlerinin oluşum ve evrimlerini anlamak açısından önemlidir.

Yıldız-gezegen sistemlerinin sayılarının gittikçe artması ve gittikçe farklı parametre aralıklarında barınak yıldız ve gezegenlere sahip olunması nedeniyle, yıldız-gezegen sistemlerin kinematiğinin detaylıca incelenmesi, aynı özelliklerdeki gezegensiz yıldızlarla karşılaştırılması, yıldız-gezegen sistemlerinin gökada içindeki oluşum yerlerinin belirlenmesi, açısal momentum dağılımlarının ve değişimlerinin ayrıntılı araştırılarak oluşum ve evrim senaryolarıyla birlikte değerlendirilmesi ileride yapılacak çalışmalara örnek olarak gösterilebilir.

KAYNAKÇA

- Agertz, O., ve Kravtsov, A. V. (2015). “*On the interplay between star formation and feedback in galaxy formation simulations*”. The Astrophysical Journal, 804(1), 18.
- Alves, D. R., Jenkins, J. S., Vines, J. I., Nielsen, L. D., Gill, S., Acton, J. S., ... ve Osborn, A. (2022). “*NGTS-21b: an inflated Super-Jupiter orbiting a metal-poor K dwarf*”. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 517(3), 4447-4457.
- Andrae, R., Fouesneau, M., Sordo, R., Bailer-Jones, C. A. L., Dharmawardena, T. E., Rybizki, J., ... ve Zorec, J. (2023). “*Gaia Data Release 3: Analysis of the Gaia BP/RP spectra using the General Stellar Parameterizer from Photometry*”. Astronomy and Astrophysics, 674, A27.
- Antoja, T., Helmi, A., Romero-Gómez, M., Katz, D., Babusiaux, C., Drimmel, R., ... ve Soubiran, C. (2018). “*A dynamically young and perturbed Milky Way disk*”. Nature, 561(7723), 360-362.
- Armstrong, J. C., Larson, S. L., ve Zollinger, R. R. (2007). “*Specific Angular Momentum of Extrasolar Planetary Systems*”. arXiv preprint arXiv:0708.1771.
- Barbato, D., Sozzetti, A., Biazzo, K., Malavolta, L., Santos, N. C., Damasso, M., ... ve Pedani, M. (2019). “*The GAPS Programme with HARPS-N at TNG-XVIII. Two new giant planets around the metal-poor stars HD 220197 and HD 233832*”. Astronomy and Astrophysics, 621, A110.
- Barnes, A. T., Longmore, S. N., Battersby, C., Bally, J., Kruijssen, J. M. D., Henshaw, J. D., ve Walker, D. L. (2017). “*Star formation rates and efficiencies in the Galactic Centre*”. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 469(2), 2263-2285.
- Bashi, D., ve Zucker, S. (2019). “*Small Planets in the Galactic Context: Host Star Kinematics, Iron, and Alpha-element Enhancement*”. The Astronomical Journal, 158(2), 61.
- Bensby, T., Feltzing, S., ve Lundström, I. (2003). “*Elemental abundance trends in the Galactic thin and thick disks as traced by nearby F and G dwarf stars*”. Astronomy and Astrophysics, 410(2), 527-551.

- Bensby, T., Feltzing, S., ve Oey, M. S. (2014). “*Exploring the Milky Way stellar disk-A detailed elemental abundance study of 714 F and G dwarf stars in the solar neighbourhood*”. *Astronomy and Astrophysics*, 562, A71.
- Berger, T. A., Howard, A. W., ve Boesgaard, A. M. (2018). “*Identifying Young Kepler Planet Host Stars from Keck–HIRES Spectra of Lithium*”. *The Astrophysical Journal*, 855(2), 115.
- Berger, T. A., Huber, D., Gaidos, E., van Saders, J. L., ve Weiss, L. M. (2020). “*The Gaia–Kepler stellar properties catalog. II. Planet radius demographics as a function of stellar mass and age*”. *The Astronomical Journal*, 160(3), 108.
- Berger, T. A., Huber, D., Van Saders, J. L., Gaidos, E., Tayar, J., ve Kraus, A. L. (2020a). “*The Gaia–Kepler Stellar Properties Catalog. I. Homogeneous fundamental properties for 186,301 Kepler stars*”. *The Astronomical Journal*, 159(6), 280.
- Berger, T. A., Schlieder, J. E., ve Huber, D. (2023). “*The Gaia-Kepler-TESS-Host Stellar Properties Catalog: Uniform Physical Parameters for 7993 Host Stars and 9324 Planets*”. arXiv preprint arXiv:2301.11338.
- Berget, D. J., ve Durrance, S. T. (2010). “*Angular Momentum in Extrasolar Planetary Systems*”. *Journal of the Southeastern Association for Research in Astronomy*, vol. 3, 32.
- Binney, J., ve Tremaine, S. (2011). “*Galactic dynamics (Vol. 20)*”. Princeton university press.
- Blaauw, A., Gum, C. S., Pawsey, J. L., ve Westerhout, G. (1960). “*The new IAU system of galactic coordinates (1958 revision)*”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 121(2), 123-131.
- Borucki, W. J., Koch, D. G., Basri, G., Batalha, N., Brown, T. M., Bryson, S. T., ... ve Still, M. (2011). “*Characteristics of planetary candidates observed by Kepler. II. Analysis of the first four months of data*”. *The Astrophysical Journal*, 736(1), 19.
- Bovy, J. (2015). “*galpy: A python Library for Galactic Dynamics*”. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 216(2), 29.

- Bovy, J., Prieto, C. A., Beers, T. C., Bizyaev, D., Da Costa, L. N., Cunha, K., ... ve Zasowski, G. (2012). “*The Milky Way's circular-velocity curve between 4 and 14 kpc from APOGEE data*”. The Astrophysical Journal, 759(2), 131.
- Bovy, J., Rix, H. W., ve Hogg, D. W. (2012). “*The Milky Way has no distinct thick disk*”. The Astrophysical Journal, 751(2), 131.
- Bressan, A., Marigo, P., Girardi, L., Salasnich, B., Dal Cero, C., Rubele, S., ve Nanni, A. (2012). “*PARSEC: stellar tracks and isochrones with the PAdova and TRieste Stellar Evolution Code*”. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 427(1), 127-145.
- Brown, A. G. A., Vallenari, A., Prusti, T. J. D. B. J. H., De Bruijne, J. H. J., Babusiaux, C., Bailer-Jones, C. A. L., ... ve Bertone, S. (2018). “*Gaia data release 2-summary of the contents and survey properties*”. Astronomy and Astrophysics, 616, A1.
- Brown, A. G., Vallenari, A., Prusti, T., De Bruijne, J. H. J., Babusiaux, C., Biermann, M., ... ve Bauchet, N. (2021). “*Gaia early data release 3-summary of the contents and survey properties*”. Astronomy and Astrophysics, 649, A1.
- Brown, A. G., Vallenari, A., Prusti, T., De Bruijne, J. H. J., Mignard, F., Drimmel, R., ... ve García, A. B. (2016). “*Gaia data release 1-summary of the astrometric, photometric, and survey properties*”. Astronomy and Astrophysics, 595, A2.
- Brown, T. M., Latham, D. W., Everett, M. E., ve Esquerdo, G. A. (2011). “*Kepler input catalog: photometric calibration and stellar classification*”. The Astronomical Journal, 142(4), 112.
- Buchhave, L. A., Latham, D. W., Johansen, A., Bizzarro, M., Torres, G., Rowe, J. F., ... ve Quinn, S. N. (2012). “*An abundance of small exoplanets around stars with a wide range of metallicities*”. Nature, 486(7403), 375-377.
- Carrasco, J. M., Evans, D. W., Montegriffo, P., Jordi, C., van Leeuwen, F., Riello, M., ... ve Balaguer-Núñez, L. (2016). “*Gaia Data Release 1-Principles of the photometric calibration of the G band*”. Astronomy and Astrophysics, 595, A7.
- Carrillo, A., Hawkins, K., Bowler, B. P., Cochran, W., ve Vanderburg, A. (2020). “*Know thy star, know thy planet: chemo-kinematically characterizing TESS targets*”. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 491(3), 4365-4381.

- Chandrasekhar, S. (1960). *“Principles of stellar Dynamics”*. New York: Dover, 1960, Enlarged ed.
- Chen, D. C., Xie, J. W., Zhou, J. L., Dong, S., Liu, C., Wang, H. F., ... ve Zheng, Z. (2021a). *“Planets across space and time (PAST). I. Characterizing the memberships of Galactic components and stellar ages: revisiting the kinematic methods and applying to planet host stars”*. The Astrophysical Journal, 909(2), 115.
- Chen, D. C., Yang, J. Y., Xie, J. W., Zhou, J. L., Dong, S., Zheng, Z., ... ve Luo, A. (2021b). *“Planets Across Space and Time (PAST). II. Catalog and Analyses of the LAMOST–Gaia–Kepler Stellar Kinematic Properties”*. The Astronomical Journal, 162(3), 100.
- Chen, Y. Q., ve Zhao, G. (2002). *“Planet Host Stars: Mass, Age and Kinematics”*. Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics, 2(2), 151.
- Clark, J. T., Wright, D. J., Wittenmyer, R. A., Horner, J., Hinkel, N. R., Clerté, M., ... ve Nordlander, T. (2021). *“The GALAH Survey: improving our understanding of confirmed and candidate planetary systems with large stellar surveys”*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 510(2), 2041-2060.
- Clarke, A. J., Debattista, V. P., Nidever, D. L., Loebman, S. R., Simons, R. C., Kassin, S., ... ve Popescu, C. C. (2019). *“The imprint of clump formation at high redshift–I. A disc α -abundance dichotomy”*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 484(3), 3476-3490.
- Coşkunoglu, B., Ak, S., Bilir, S., Karaali, S., Yaz, E., Gilmore, G., ... ve Zwitter, T. (2011). *“Local stellar kinematics from RAVE data–I. Local standard of rest”*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 412(2), 1237-1245.
- Cox, A. N. (Ed.). (2000). *“Allen’s astrophysical quantities”*. Allen's astrophysical quantities, 4th ed. Publisher: New York: AIP Press; Springer, 2000.
- Czesla, S., Schröter, S., Schneider, C. P., Huber, K. F., Pfeifer, F., Andreasen, D. T., ve Zechmeister, M. (2019). *“PyA: Python astronomy-related packages”*. Astrophysics Source Code Library, ascl-1906.
- David, T. J., Contardo, G., Sandoval, A., Angus, R., Lu, Y. L., Bedell, M., ... ve Petigura, E. A. (2021). *“Evolution of the Exoplanet Size Distribution: Forming Large Super-Earths Over Billions of Years”*. The Astronomical Journal, 161(6), 265.

- De Bruijne, J. H. J. (2012). “*Science performance of Gaia, ESA’s space-astrometry mission*”. *Astrophysics and Space Science*, 341, 31-41.
- De Bruijne, J., Kohley, R., ve Prusti, T. (2010). “*Gaia: 1,000 million stars with 100 CCD detectors*”. In *Space Telescopes and Instrumentation 2010: Optical, Infrared, and Millimeter Wave* (Vol. 7731, pp. 395-409). SPIE.
- Des Etangs, A. L., ve Lissauer, J. J. (2022). “*The IAU working definition of an exoplanet*”. *New Astronomy Reviews*, 94, 101641.
- Dressing, C. D., ve Charbonneau, D. (2013). “*The occurrence rate of small planets around small stars*”. *The Astrophysical Journal*, 767(1), 95.
- Fabrizius, C., Luri, X., Arenou, F., Babusiaux, C., Helmi, A., Muraveva, T., ... ve Weiler, M. (2021). “*Gaia Early Data Release 3-Catalogue validation*”. *Astronomy and Astrophysics*, 649, A5.
- Fischer, D. A., ve Valenti, J. (2005). “*The planet-metallicity correlation*”. *The Astrophysical Journal*, 622(2), 1102.
- Fontanive, C., Allers, K. N., Pantoja, B., Biller, B., Dubber, S., Zhang, Z., ... ve Albert, L. (2020). “*A wide planetary-mass companion to a young low-mass brown dwarf in Ophiuchus*”. *The Astrophysical Journal Letters*, 905(2), L14.
- Gaidos, E., Claytor, Z., Dungee, R., Ali, A., ve Feiden, G. A. (2023). “*The TIME Table: rotation and ages of cool exoplanet host stars*”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 520(4), 5283-5304.
- Gilli, G., Israelian, G., Ecu villon, A., Santos, N. C., ve Mayor, M. (2006). “*Abundances of refractory elements in the atmospheres of stars with extrasolar planets*”. *Astronomy and Astrophysics*, 449(2), 723-736.
- Ginsburg, A., Sipócz, B. M., Brasseur, C. E., Cowperthwaite, P. S., Craig, M. W., Deil, C., ... ve Woillez, J. (2019). “*Astroquery: an astronomical web-querying package in Python*”. *The Astronomical Journal*, 157(3), 98.
- Gurumath, S. R., Hiremath, K. M., ve Ramasubramanian, V. (2019). “*Angular momentum of stars and their planets*”. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 131(995), 014401.

- Güçtekin, S. T., Bilir, S., Karaali, S., Plevne, O., ve Ak, S. (2019). “*Vertical and radial metallicity gradients in high latitude galactic fields with SDSS*”. *Advances in Space Research*, 63(3), 1360-1373.
- Haywood, M., Di Matteo, P., Lehnert, M. D., Katz, D., ve Gómez, A. (2013). “*The age structure of stellar populations in the solar vicinity-Clues of a two-phase formation history of the Milky Way disk*”. *Astronomy and Astrophysics*, 560, A109.
- Hénon, M. (1973). “*Collisional dynamics in spherical stellar systems*”. In Saas-Fee Advanced Course 3: dynamical structure and evolution of stellar systems (p. 183).
- Holmberg, J., Nordström, B., ve Andersen, J. (2009). “*The Geneva-Copenhagen survey of the solar neighbourhood-III. Improved distances, ages, and kinematics*”. *Astronomy and Astrophysics*, 501(3), 941-947.
- Huber, D. (2017). “*Isoclassify: V1.2*”. Zenodo, doi, 10.
- Jiang, J. H., Burn, R., Ji, X., Fahy, K. A., ve Eggenberger, P. (2022). “*Angular momentum distributions for observed and modeled exoplanetary systems*”. *The Astrophysical Journal*, 924(2), 118.
- Jofré, E., Petrucci, R., Saffe, C., Saker, L., de la Villarmois, E. A., Chavero, C., ... ve Mauas, P. J. D. (2015). “*Stellar parameters and chemical abundances of 223 evolved stars with and without planets*”. *Astronomy and Astrophysics*, 574, A50.
- Johnson, D. R., ve 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.
- Johnson, J. A., Aller, K. M., Howard, A. W., ve Crepp, J. R. (2010). “*Giant planet occurrence in the stellar mass-metallicity plane*”. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 122(894), 905.
- Jurić, M., Ivezić, Ž., Brooks, A., Lupton, R. H., Schlegel, D., Finkbeiner, D., ... ve York, D. G. (2008). “*The Milky Way tomography with SDSS. I. Stellar number density distribution*”. *The Astrophysical Journal*, 673(2), 864.

- Katz, D., Sartoretti, P., Guerrier, A., Panuzzo, P., Seabroke, G. M., Thévenin, F., ... ve Viala, Y. (2022). “*Gaia Data Release 3 Properties and validation of the radial velocities*”. *Astronomy and Astrophysics*, 674, A5.
- Krumholz, M. R., McKee, C. F., ve Tumlinson, J. (2009). “*The star formation law in atomic and molecular gas*”. *The Astrophysical Journal*, 699(1), 850.
- Kutra, T., Wu, Y., ve Qian, Y. (2021). “*Super-Earths and Sub-Neptunes Are Insensitive to Stellar Metallicity*”. *The Astronomical Journal*, 162(2), 69.
- Lindegren, L., Bastian, U., Biermann, M., Bombrun, A., De Torres, A., Gerlach, E., ... ve Van Leeuwen, F. (2021b). “*Gaia Early Data Release 3-Parallax bias versus magnitude, colour, and position*”. *Astronomy and Astrophysics*, 649, A4.
- Lindegren, L., Klioner, S. A., Hernández, J., Bombrun, A., Ramos-Lerate, M., Steidelmüller, H., ... ve Vecchiato, A. (2021a). “*Gaia early data release 3-the astrometric solution*”. *Astronomy and Astrophysics*, 649, A2.
- Luck, R. E., ve Heiter, U. (2006). “*Dwarfs in the local Region*”. *The Astronomical Journal*, 131(6), 3069.
- Majewski, S. R. (1993). “*Galactic structure surveys and the evolution of the Milky Way*”. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 31(1), 575-638.
- Mann, A., Gaidos, E., Newton, E. R., Rizzuto, A. C., Vanderburg, A., Mace, G. N., ve Kraus, A. L. (2017). “*The Zodiacal Exoplanets in Time (ZEIT) Survey*”. In *American Astronomical Society Meeting Abstracts# 229* (Vol. 229, pp. 104-06).
- Mayor, M., ve Queloz, D. (1995). “*A Jupiter-mass companion to a solar-type star*”. *Nature*, 378(6555), 355-359.
- Mortier, A., Santos, N. C., Sousa, S. G., Fernandes, J. M., Adibekyan, V. Z., Mena, E. D., ... ve Israelian, G. (2013). “*New and updated stellar parameters for 90 transit hosts-The effect of the surface gravity*”. *Astronomy and Astrophysics*, 558, A106.
- Mustill, A. J., Lambrechts, M., ve Davies, M. B. (2022). “*Hot Jupiters, cold kinematics-High phase space densities of host stars reflect an age bias*”. *Astronomy and Astrophysics*, 658, A199.

- Narang, M., Manoj, P., Furlan, E., Mordasini, C., Henning, T., Mathew, B., ... ve Sivarani, T. (2018). “*Properties and Occurrence Rates for Kepler Exoplanet Candidates as a Function of Host Star Metallicity from the DR25 Catalog*”. The Astronomical Journal, 156(5), 221.
- Neves, V., Santos, N. C., Sousa, S. G., Correia, A. C. M., ve Israelian, G. (2009). “*Chemical abundances of 451 stars from the HARPS GTO planet search program-Thin disc, thick disc, and planets*”. Astronomy and Astrophysics, 497(2), 563-581.
- Parenago, P. P. (1950). “*Über die Massen von Bedeckungsveränderlichen mit bekannter Radialgeschwindigkeit nur des Hauptsterns*”. Astronomicheskii Zhurnal, 27, 41-47.
- Perryman, M. A. C. (1989). “*Hipparcos: astrometry from space*”. Nature, 340(6229), 111-116.
- Perryman, M. A. C., de Boer, K. S., Gilmore, G., Høg, E., Lattanzi, M. G., Lindgren, L., ... ve De Zeeuw, P. T. (2001). “*GAIA: Composition, formation and evolution of the Galaxy*”. Astronomy and Astrophysics, 369(1), 339-363.
- Petigura, E. A., Howard, A. W., Marcy, G. W., Johnson, J. A., Isaacson, H., Cargile, P. A., ... ve Crossfield, I. J. (2017). “*The California-Kepler Survey. I. High-resolution spectroscopy of 1305 stars hosting Kepler transiting planets*”. The Astronomical Journal, 154(3), 107.
- Petigura, E. A., Marcy, G. W., Winn, J. N., Weiss, L. M., Fulton, B. J., Howard, A. W., ... ve Johnson, J. A. (2018). “*The California-Kepler survey. IV. Metal-rich stars host a greater diversity of planets*”. The Astronomical Journal, 155(2), 89.
- Pinto, M. T., Reffert, S., Quirrenbach, A., Stock, S., Trifonov, T., ve Mitchell, D. S. (2020). “*Precise radial velocities of giant stars-XIV. Evidence of planetary companions around HD 25723, 17 Sco, 3 Cnc, and 44 UMa*”. Astronomy and Astrophysics, 644, A1.
- Price-Whelan, A. M., Lim, P. L., Earl, N., Starkman, N., Bradley, L., Shupe, D. L., ... ve Astropy Collaboration. (2022). “*The Astropy Project: sustaining and growing a community-oriented open-source project and the latest major release (v5. 0) of the core package*”. The Astrophysical Journal, 935(2), 167.

- Price-Whelan, A. M., Sipőcz, B. M., Günther, H. M., Lim, P. L., Crawford, S. M., Conseil, S., ... ve Astropy Coordination Committee. (2018). “*The astropy project: building an open-science project and status of the v2. 0 core package*”. The Astronomical Journal, 156(3), 123.
- Prusti, T., De Bruijne, J. H. J., Brown, A. G., Vallenari, A., Babusiaux, C., Bailer-Jones, C. A. L., ... ve y Navascués, D. B. (2016). “*The Gaia mission*”. Astronomy and Astrophysics, 595, A1.
- Robertson, P., Stefansson, G., Mahadevan, S., Endl, M., Cochran, W. D., Beard, C., ... ve Wright, J. T. (2020). “*Persistent Starspot Signals on M Dwarfs: Multiwavelength Doppler Observations with the Habitable-zone Planet Finder and Keck/HIRES*”. The Astrophysical Journal, 897(2), 125.
- Robitaille, T. P., Tollerud, E. J., Greenfield, P., Droettboom, M., Bray, E., Aldcroft, T., ... ve Streicher, O. (2013). “*Astropy: A community Python package for astronomy*”. Astronomy and Astrophysics, 558, A33.
- Santos, N. C., Adibekyan, V., Figueira, P., Andreasen, D. T., Barros, S. C. C., Delgado-Mena, E., ... ve Ferreira, A. C. S. (2017). “*Observational evidence for two distinct giant planet populations*”. Astronomy and Astrophysics, 603, A30.
- Santos, N. C., Israelian, G., ve Mayor, M. (2001). “*The metal-rich nature of stars with planets*”. Astronomy and Astrophysics, 373(3), 1019-1031.
- Santos, N. C., Israelian, G., ve Mayor, M. (2004). “*Spectroscopic [Fe/H] for 98 extra-solar planet-host stars-Exploring the probability of planet formation*”. Astronomy and Astrophysics, 415(3), 1153-1166.
- Santos, N. C., Israelian, G., ve Mayor, M. (2004c). “*Spectroscopic [Fe/H] for 98 extra-solar planet-host stars-Exploring the probability of planet formation*”. Astronomy and Astrophysics, 415(3), 1153-1166.
- Schlaufman, K. C. (2018). “*Evidence of an upper bound on the masses of planets and its implications for giant planet formation*”. The Astrophysical Journal, 853(1), 37.
- Schlaufman, K. C., ve Laughlin, G. (2011). “*Kepler exoplanet candidate host stars are preferentially metal rich*”. The Astrophysical Journal, 738(2), 177.

- Schneider, P. (2015). “*Extragalactic astronomy and cosmology: an introduction (Vol. 146)*”. Berlin: Springer Berlin Heidelberg. OCLC: 892967180. ISBN: 3-642-54083-X.
- Scholz, A. (2013). “*Angular momentum and disk evolution in very low mass systems*”. *Memorie della Societa Astronomica Italiana*, 84, 4.
- Sibony, Y., Helled, R., ve Feldmann, R. (2022). “*The rotation of planet-hosting stars*”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 513(2), 2057-2075.
- Silva Aguirre, V., Davies, G. R., Basu, S., Christensen-Dalsgaard, J., Creevey, O., Metcalfe, T. S., ... ve Lundkvist, M. S. (2015). “*Ages and fundamental properties of Kepler exoplanet host stars from asteroseismology*”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 452(2), 2127-2148.
- Simpson, E. R., Fetherolf, T., Kane, S. R., Pepper, J., Mocnik, T., ve Dalba, P. A. (2023). “*Variability of Known Exoplanet Host Stars Observed by TESS*”. arXiv preprint arXiv:2305.09687.
- Singla, M., ve Sengupta, S. (2023). “*New models of reflection spectra for terrestrial exoplanets: Present and prebiotic Earth orbiting around stars of different spectral types*”. *New Astronomy*, 102, 102024.
- Soderblom, D. R. (2010). “*The ages of stars*”. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 48, 581-629.
- Soto, M. G., Anglada-Escudé, G., Dreizler, S., Molaverdikhani, K., Kemmer, J., Rodríguez-López, C., ... ve Watanabe, D. (2021). “*Mass and density of the transiting hot and rocky super-Earth LHS 1478 b (TOI-1640 b)*”. *Astronomy and Astrophysics*, 649, A144.
- Sousa, S. G., Santos, N. C., Mayor, M., Udry, S., Casagrande, L., Israelian, G., ... ve Monteiro, M. J. P. F. G. (2008). “*Spectroscopic parameters for 451 stars in the harps gto planet search program-stellar [Fe/H] and the frequency of exo-neptunes*”. *Astronomy and Astrophysics*, 487(1), 373-381.
- Spitzer Jr, L., ve Schwarzschild, M. (1953). “*The possible influence of interstellar clouds on stellar velocities. I*”. *Astrophysical Journal*, 118, 106.

- Stassun, K. G., Collins, K. A., ve Gaudi, B. S. (2017). “*Accurate empirical radii and masses of planets and their host stars with Gaia parallaxes*”. The Astronomical Journal, 153(3), 136.
- Stevens, D. J., ve Gaudi, B. S. (2013). “*A posteriori transit probabilities*”. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 125(930), 933.
- Stevens, D. J., ve Gaudi, B. S. (2013). “*A posteriori transit probabilities*”. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 125(930), 933.
- Stinson, G. S., Bovy, J., Rix, H. W., Brook, C., Roškar, R., Dalcanton, J. J., ... ve Quinn, T. R. (2013). “*MaGICC thick disc–I. Comparing a simulated disc formed with stellar feedback to the Milky Way*”. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 436(1), 625-634.
- Swastik, C., Banyal, R. K., Narang, M., Manoj, P., Sivarani, T., Rajaguru, S. P., ... ve Banerjee, B. (2022). “*Galactic chemical evolution of exoplanet hosting stars: Are high-mass planetary systems young?*”. The Astronomical Journal, 164(2), 60.
- Swastik, C., Banyal, R. K., Narang, M., Manoj, P., Sivarani, T., Reddy, B. E., ve Rajaguru, S. P. (2021). “*Host star metallicity of directly imaged wide-orbit planets: implications for planet formation*”. The Astronomical Journal, 161(3), 114.
- Todorov, K., Luhman, K. L., ve McLeod, K. K. (2010). “*Discovery of a Planetary-mass Companion to a Brown Dwarf in Taurus*”. The Astrophysical Journal Letters, 714(1), L84.
- Tuchow, N. W., ve Wright, J. T. (2023). “*The Abundance of Belatedly Habitable Planets and Ambiguities in Definitions of the Continuously Habitable Zone*”. The Astrophysical Journal, 944(1), 71.
- Turon, C., Meynadier, F., Arenou, F., Lindegren, L., ve Bastian, U. (2010). “*Basic principles of scanning space astrometry*”. European Astronomical Society Publications Series, 45, 109-114.
- Vallenari, A., Brown, A. G. A., Prusti, T., de Bruijne, J. H. J., Arenou, F., Babusiaux, C., ... ve Bianchi, L. (2023). “*Gaia Data Release 3-Summary of the content and survey properties*”. Astronomy and Astrophysics, 674, A1.

- Van Belle, G. T., ve Von Braun, K. (2009). “*Directly determined linear radii and effective temperatures of exoplanet host stars*”. *The Astrophysical Journal*, 694(2), 1085.
- Vosteen, L. L. A., Draaisma, F., Van Werkhoven, W. P., Van Riel, L. J. M., Mol, M. H., ve den Ouden, G. (2009, September). “*Wavefront sensor for the ESA-GAIA mission*”. In *Astronomical and Space Optical Systems* (Vol. 7439, pp. 316-325). SPIE.
- Wang, H. F., Liu, C., Xu, Y., Wan, J. C., ve Deng, L. (2018). “*Mapping the Milky Way with LAMOST–III. Complicated spatial structure in the outer disc*”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 478(3), 3367-3379.
- Wielen, R. (1977). “*The diffusion of stellar orbits derived from the observed age-dependence of the velocity dispersion*”. *Astronomy and Astrophysics*, 60, 263-275.
- Williams, J. P., ve Cieza, L. A. (2011). “*Protoplanetary disks and their evolution*”. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 49, 67-117.
- Williams, M. E., Steinmetz, M., Binney, J., Siebert, A., Enke, H., Famaey, B., ... ve Zwitter, T. (2013). “*The wobbly Galaxy: kinematics north and south with RAVE red-clump giants*”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 436(1), 101-121.
- Winter, A. J., Kruijssen, J. D., Longmore, S. N., ve Chevance, M. (2020). “*Publisher Correction: Stellar clustering shapes the architecture of planetary systems*”. *Nature*, 590(7844), E14-E14.
- Zink, J. K., Hardegree-Ullman, K. K., Christiansen, J. L., Petigura, E. A., Boley, K. M., Bhure, S., ... ve MacDougall, M. G. (2023). “*Scaling K2. VI. Reduced Small-planet Occurrence in High-galactic-amplitude Stars*”. *The Astronomical Journal*, 165(6), 262.
- Zong, Y., Brown, S. W., Johnson, B. C., Lykke, K. R., ve Ohno, Y. (2006). “*Simple spectral stray light correction method for array spectroradiometers*”. *Applied Optics*, 45(6), 1111-1.

