T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Yüksek Lisans Tezi

GÜNEŞ CİVARINDAN SEÇİLMİŞ G TAYF TÜRÜ YILDIZLARIN KÖKENİ

Deniz Cennet DURSUN

Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı

Astronomi ve Uzay Bilimleri Programı

DANIŞMAN
Prof. Dr. Selçuk BİLİR

Aralık, 2023

İSTANBUL

Bu çalışma, 22.12.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı, Astronomi ve Uzay Bilimleri Programında ..... olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Prof. Dr. Selçuk BİLİR(Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Serap AK
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Timur ŞAHİN
Akdeniz Üniversitesi
Fen Fakültesi

İntihal Programı Beyanı

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

Proje Destekleri

Bu tez, 121F265 numaralı TUBİTAK projesi ile desteklenmiştir.

Tezden Üretilmiş Yayınların Künye Bilgileri

ÖNSÖZ

Beni her zaman cesaretlendiren aileme, hayatıma anlam katan eşime, bilgeliğiyle yolumu aydınlatan danışmanıma ve içtenlikle yanımda duran tüm çalışma arkadaşlarıma minnettarlığımı ifade etmek istiyorum.

Öncelikle, bana her zaman anlayış ile yaklaşan ve güçlü desteğiyle yanımda olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım. En büyük destekçim sevgili eşim Mehmet Zahit Çınar ile yaşadığımız anılarımız bu süreci daha anlamlı kıldı. Desteğiniz ve varlığınız benim için en büyük motivasyon kaynağı oldu.

Danışman hocam sayın Prof. Dr. Selçuk Bilir'in bilgeliği ve rehberliği sayesinde bu tezi tamamladım. Metodolojik yaklaşımı ve deneyimlerinin sentezi, yüksek lisans tezimin kalitesine doğrudan yansımıştır.

Galaktik yapı çalışma grubuyla süreç boyunca destek ve dayanışma içinde olmak, gerçek bir aile gibi hissettirdi. TÜBİTAK projesi çerçevesinde sunmuş olduğu destek ve bilimsel yönlendirmelerinden dolayı Prof. Dr. Timur Şahin'e ve aydınlatıcı perspektifleri ve katkılarıyla tez çalışmamın teknik zenginliğini arttıran Dr. Olcay Plevne'ye ayrıca teşekkür ederim.

Yüksek lisans öğrenimimi TÜBİTAK-BİDEB 2210/A Yurt İçi Genel Yüksek Lisans Burs Programıyla destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na ve Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı'na teşekkürlerimi sunarım.

Bu yüksek lisans tezi, sizlerin değerli katkılarıyla şekillendi. Her birinize teşekkür ediyorum, hayatımın bu önemli döneminde yanımda olduğunuz için minnettarım.

Bu tezin, büyük ailemin en küçük bireyi Atlas Dursun'un bilime olan hevesine ilham olması dileğiyle.

Aralık 2023 Deniz Cennet DURSUN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **vii**
TABLO LİSTESİ ..... **xi**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xiii**
ÖZET ..... **xvi**
SUMMARY ..... **xvii**
1. GİRİŞ **1**
2. GENEL KISIMLAR **12**
2.1 ERKEN EVRENDE İLK YILDIZLAR 12
2.2. GALAKTİK YILDIZ POPÜLASYONLARI 15
2.3. GÜNEŞ CİVARININ KİMYASAL EVRİMİ 21
2.4. METALCE FAKİR YILDIZLAR VE KÖKENLERİ 24
2.5. *GAIA* UYDUSUNUN GÖREVİ 29
2.6. TEZ ÇALIŞMASINDAKİ YILDIZLARIN LİTERATÜR ÖZETİ 34
2.6.1 HD 22879 34
2.6.2 HD 144579 35
2.6.3 HD 188510 37
2.6.4 HD 201891 38
3. MALZEME VE YÖNTEM **40**
3.1. VERİ 41
3.1.1. Tayfsal Veri 41
3.1.2. Fotometrik ve Astrometrik Veriler 44
3.2. YILDIZLARIN TAYFSAL ENERJİ DAĞILIMI (SED) 45
3.3 TAYFSAL ANALİZ 48
3.3.1. Yıldız Tayfı ve Süreklilik 48
3.3.2. Çizgi Teşhisi ve Eşdeğer Genişlik Ölçümü 53
3.3.3. Model Atmosfer Parametre ve Element Bolluklarının Tayini 58
3.4. YAŞ TAYİNİ 61
3.5. KİNEMATİK ANALİZ 63

3.8. YILDIZLARIN KÖKENLERİNİN BELİRLENMESİ 75
4. BULGULAR 77
4.1. TAYFSAL ENERJİ DAĞILIMI (SED) 77
4.2. ASTROMETRİK VE FOTOMETRİK ANALİZLER 90
4.3. TAYFSAL ANALİZ 96
4.4. KİNEMATİK ANALİZ 103
4.5. GALAKTİK YÖRÜNGE PARAMETRELERİ 105
4.6. YILDIZLARIN POPÜLASYON TÜRLERİ 107
4.7. YILDIZLARIN KÖKENLERİ 109
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 115
5.1. FARKLI YÖNTEMLERDEN ELDE EDİLEN VERİLERİN İRDELENMESİ 116
5.1.1 Yıldızların Temel Astrofizik ve Model Atmosfer Parametreleri 117
5.2 LİTERATÜR KARŞILAŞTIRMASI 119
5.3 YILDIZLARIN POPÜLASYON TÜRLERİ 123
5.4 YILDIZLARIN GALAKTİK KÖKENLERİ 127
KAYNAKLAR 133
ÖZGEÇMİŞ 152

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: Evrenin, Büyük Patlamadan sonra geçirdiği evrim aşamaları. 3

Şekil 1.2: Kozmik enflasyon sırasında oluşan kütleçekimi dalgalarının oluşturduğu B-modlarının görüntüsü (Astronomy: Roen Kelly, after Wayne Hu). 4

Şekil 1.3: Evrendeki madde ve enerjinin dağılımı. 5

Şekil 1.4: Farklı sıcaklık ve ışıma gücü sınıfındaki yıldızların HR diyagramı. 8

Şekil 1.5: Elementleri oluşum kaynaklarına göre düzenlenmiş periyodik cetvel (NASA/AASNova). 10

Şekil 2.1: Evrende şimdiye kadar keşfedilen en uzak nesne GRB 090423'ün temsili görüntüsü (ESO/Roquette, A). 14

Şekil 2.2: Samanyolu'nun şişkin bölge, disk ve halo bileşenleri (NASA / JPL Caltech / R.Hurt / SSC) 17

Şekil 2.3: Güneş merkezli 650 parsek yarıçap mesafedeki Güneş civarı (Galaxy Map). 22

Şekil 2.4: *Gaia* Uzay Teleskobu temsili görüntüsü (ESA, 2019). 30

Şekil 2.5: *Gaia* uydusunun gözünden Samanyolu (ESA/Gaia/DPAC, CC BY-SA 3.0 IGO). 31

Şekil 2.6: Sayılar ile Gaia veri sürümü 3 (ESA/Gaia/DPAC). 32

Şekil 2.7: *Gaia* DR3 kataloğunda radyal hız ölçümü yapılan 33,812,183 yıldızın radyal hız histogramı (üst panel) ve bu nesnelerin Galaktik koordinat sistemi üzerindeki konumları (alt panel). Şeklin orta alt kısmında parlak sarı renk ile görülen bölgeler LMC ve SMC galaksilerine aittir. Galaksi merkezi doğrultusunda sönük dik yönde görülen yapı Sagittarius cüce galaksisine aittir (Katz ve diğ., 2023). 33

Şekil 2.8: Kırmızı daireyle işaretlenen HD 22879'un ekvatoral koordinat sistemindeki konumu (sol panel) ve HD 22879'un literatüre kazandırılan makalelerin sayı histogramı (sağ panel). 34

Şekil 2.9: Kırmızı daireyle işaretlenen HD 144579'un ekvatoral koordinat sistemindeki konumu (sol panel) ve yıldızın literatüre kazandırılan makalelerin sayı histogramı (sağ panel). 36

Şekil 2.10: Kırmızı daireyle işaretlenen HD 188510'un ekvatoral koordinat sistemindeki konumu (sol panel) ve yıldızın literatüre kazandırılan makalelerin sayı histogramı (sağ panel). 37

Şekil 2.11: Kırmızı daireyle işaretlenen HD 201891'in ekvatoral koordinat sistemindeki konumu (sol panel) ve yıldızın literatüre kazandırılan makalelerin sayı histogramı (sağ panel). 39

Şekil 3.1: Kanada-Fransa-Hawaii Teleskobu (CFHT; sol) ve Pic du Midi Gözlemevi (sağ). 42

Şekil 3.2: PolarBase yıldızlarının ekvatoral koordinat sistemindeki konumları. Renkler yıldız sayı yoğunluğuna göre oluşturulmuştur. 43

Şekil 3.3: Metalce ultra fakir SPLUS J2104−0049'un NOIRLab'ında 12 farklı filtre ile alınan görüntüleri. Grafikte renkler her filtreden görülen salma dalgaboyunu temsil etmektedir. Yıldızın tayfı Gemini Çok Nesneli Tayfçeker (GMOS) ile alınmıştır. Daire sembolü dar band ve kare sembolü geniş band filtreler ile yapılan ölçümlerdir (Placco/NOIRLab/NSF/AURA). 46

Şekil 3.4: Farklı kütlelerdeki yıldızların iç yapılarındaki enerji taşıma yöntemleri. 52

Şekil 3.5: HD 201891 yıldızının süreklilik düzeltilmesi yapılmamış (üst panel) ve süreklilik düzeltmesi yapılmış tayfı (alt panel). 53

Şekil 3.6: Bir tayfsal çizgiye uygulanan Gauss, Lorentz ve Voigt profillerine örnekler. 56

Şekil 3.7: Tez yıldızlarının tayfsal analiz sürecini gösteren akış diyagramı. 60

Şekil 3.8: da Silva ve diğ.'nin (2006) PARAM ara yüzüyle HD 50778 yıldızı için hesapladığı temel parametreler ve olasılık dağılımları. 63

Şekil 3.9: Bir yıldızın teğet hızı, radyal hızı ve uzay hızını gösteren temsili şekil. 64

Şekil 3.10: Galaksi merkezi etrafında bir yörüngede hareket eden yıldızın U, V, W uzay hızı bileşenlerinin gösterimi. 66

Şekil 3.11: Galaktik koordinat sisteminin gök küresindeki gösterimi. 67

Şekil 4.1: HD 22879 yıldızının SED dağılımı ve bu dağılıma en iyi uyum gösteren Castelli ve Kurucz'un (2003) model atmosferi. 78

Şekil 4.2: HD 22879 yıldızının SED profiliyle en iyi uyum gösteren Castelli ve Kurucz'un (2003) model atmosferleri ve diğer temel astrofizik parametreler. Dağılımlara fit edilen en olası değerler yıldızın temel parametreleri olarak kabul edilmiştir. 79

Şekil 4.3: Markov Zinciri Monte Carlo (MZMC) yöntemiyle HD 22879 yıldızının model atmosfer ve temel astrofizik parametrelerindeki hatalarının belirlenmesinde kullanılan olasılık dağılımları. Kesikli çizgiler ve merkezlerinde yer alan kırmızı kare sembolü parametrelerin en olası değerlerini ifade etmektedir. 80

Şekil 4.4: HD 144579 yıldızının SED dağılımı ve bu dağılıma en iyi uyum gösteren PHOENIX v2 model atmosferi. 81

Şekil 4.5: HD 144579 yıldızının SED profiliyle en iyi uyum gösteren PHONENIX v2 model atmosfer parametreleri ve diğer temel astrofizik parametreler. Dağılımlara fit edilen en olası değerler yıldızın temel parametreleri olarak kabul edilmiştir. 82

Şekil 4.6: Markov Zinciri Monte Carlo (MZMC) yöntemiyle HD 144579 yıldızının model atmosfer ve temel astrofizik parametrelerindeki hatalarının belirlenmesinde kullanılan olasılık dağılımları. Kesikli çizgiler ve merkezlerinde yer alan kırmızı kare sembolü parametrelerin en olası değerlerini ifade etmektedir. 83

Şekil 4.7: HD 188510 yıldızının SED dağılımı ve bu dağılımı en iyi uyum gösteren Castelli ve Kurucz'un model atmosferi. 84

Şekil 4.8: HD 188510 yıldızının SED profiliyle en iyi uyum gösteren Castelli ve Kurucz'un (2003) model atmosferleri ve diğer temel astrofizik parametreler. Dağılımlara fit edilen en olası değerler yıldızın temel parametreleri olarak kabul edilmiştir. 85

Şekil 4.9: Markov Zinciri Monte Carlo (MZMC) yöntemiyle HD 188510 yıldızının model atmosfer ve temel astrofizik parametrelerindeki hatalarının belirlenmesinde kullanılan olasılık dağılımları. Kesikli çizgiler ve merkezlerinde yer alan kırmızı kare sembolü parametrelerin en olası değerlerini ifade etmektedir. 86

Şekil 4.10: HD 201891 yıldızının SED dağılımı ve bu dağılımı en iyi uyum gösteren PHONENIX v2 model atmosferi. 87

Şekil 4.11: HD 201891 yıldızının SED profiliyle en iyi uyum gösteren Castelli ve Kurucz'un (2003) model atmosferleri ve diğer temel astrofizik parametreler. Dağılımlara fit edilen en olası değerler yıldızın temel parametreleri olarak kabul edilmiştir. 88

Şekil 4.12: Markov Zinciri Monte Carlo (MZMC) yöntemiyle HD 201891 yıldızının model atmosfer ve temel astrofizik parametrelerindeki hatalarının belirlenmesinde kullanılan olasılık dağılımları. Kesikli çizgiler ve merkezlerinde yer alan kırmızı kare sembolü parametrelerin en olası değerlerini ifade etmektedir. 89

Şekil 4.13: Tez kapsamında incelenen dört yıldızın $M_G \times (G_{BP}\text{-}G_{RP})_0$ düzlemi üzerindeki konumları (kırmızı nokta) ve yıldızların metal bolluklarına göre oluşturulmuş 1 – 13 Gyıl aralığındaki PARSEC eş-yaş eğrileri. Yıldızların detaylandırılmış konumları panellerin sol alt köşelerinde yer almaktadır. 95

Şekil 4.14: Tez yıldızlarının MOOG yardımıyla model atmosfer parametrelerinin tayininde kullanılan alt seviye uyartılma potansiyeli, indirgenmiş eşdeğer genişlik fonksiyonu ve çizgilerin dalgaboyları. En küçük kareler yöntemi kullanılarak yapılan uydurmaları mavi kesikli çizgi, nötral demir çizgilerini pembe noktalar ve iyonize demir çizgilerini ise mavi noktalar temsil etmektedir. 99

Şekil 4.15: Tez kapsamında incelenen dört yıldızın kiel diyagramları. PARAM arayüzü ile hesaplanan olası yaşlar kırmızı çizgiyle, yaş hataları kesikli gri çizgiler ve gri kutular ise eş-yaş eğrilerinin yaşlarını göstermektedir. 102

Şekil 4.16: Tez yıldızlarının Toomre diyagramı üzerindeki konumları. Yıldızlar uzay hızı hatalarına göre renklendirilmiştir. Üst panelde bulunan renk ölçeği toplam uzay hızındaki hataları göstermektedir. Şekildeki kırmızı eğriler 50 km/sn'lik hız değerlerini, gri bölge içindeki kesikli çizgi S_{LSR}= -230 km/sn'lik hızı ifade etmektedir (Lina ve Tongyan, 2022). 105

Şekil 4.17: Tez yıldızlarının Galaksi merkezi etrafındaki yörüngeleri. Sol paneller *Y-X* düzlemindeki sağ paneller *Z-X* düzlemindeki hareketleri göstermektedir. Panellerdeki kırmızı yıldız sembolleri yıldızların bugünkü konumunu göstermektedir. 107

Şekil 4.18: Tez yıldızlarının Galaksi merkezi etrafındaki yörüngeleri. Panellerdeki kırmızı yıldız sembolleri yıldızların bugünkü konumunu göstermektedir. 109

Şekil 4.19: Tez kapsamında incelenen dört yıldızın, Samanyolu'ndaki küresel kümeler ile konum ve hız bakımından karşılaşma olasılık değerleri. Maviden kırmızıya doğru olan renk paleti olasılıkların yüzdesini ifade etmektedir. 111

Şekil 4.20: HD 22879 ve HD 144579'un en yüksek olasılıklı üye olduğu beş küresel küme için hesaplanan Galaktik *X-Y* ve *X-Z* düzlemleri üzerindeki Galaktik yörüngeleri. Mavi çizgi yıldızların, gri çizgiler küresel kümelerin yörüngelerini göstermektedir. 112

Şekil 4.21: HD 188510 ve HD 201891'in en yüksek olasılıklı üye olduğu beş küresel küme için hesaplanan Galaktik *X-Y* ve *X-Z* düzlemleri üzerindeki Galaktik yörüngeleri. Mavi çizgi yıldızların, gri çizgiler küresel kümelerin yörüngelerini göstermektedir. 113

Şekil 5.1: Tez kapsamında incelenen yıldızların Vosviewer programı kullanılarak görselleştirilmiş literatürdeki anahtar kelime ağı. 121

Şekil 5.2: Tez kapsamında incelenen yıldızların üç farklı yöntem ile elde edilen model atmosfer değerlerinin literatür değerleriyle karşılaştırılması. Kırmızı yıldız sembolü fotometrik ve astrometrik analiz, yeşil daire sembolü literatür değerlerini, mavi üçgen sembolü SED analizi, sarı artı değerleri tayfsal analiz ile tayin edilen değerleri göstermektedir. 123

Şekil 5.3: Tez kapsamında incelenen yıldızların (sarı üçgen sembolü) kimyasal popülasyon ayrımı. Üst panel [Mg/Fe] bolluğu ve alt panel [Si/Fe] bolluğunu göstermektedir. Bensby ve diğ.'nin (2014) ince disk yıldızlarını mavi daire sembolü, kalın disk yıldızlarını yeşil yıldız sembolü ve halo yıldızlarını ise kırmızı kare sembolü göstermektedir. 126

Şekil 5.4: Önal-Taş ve diğ.'nin (2018) Galaktik merkez, şişkin bölge, eş dönme rezonansı (CR), dış Lindblad yarıçapı (OLR) (Dehnen, 2000) ve Güneş'in konumunu (R_0 = 8 kpc) gösteren bir Galaktik şema. Ayrıca, MW ve MWBS potansiyel modellerine bağlı kalarak, farklı renkler ile temsil edilen iki Z_{max} aralığı ($0 < Z_{max} \leq 0.5$ ve $0.5 < Z_{max} \leq 1$ kpc) içindeki belirli metal bolluğu değişimini göstermektedir. Mavi yıldız sembolü tez kapsamında incelenen üç yıldızı temsil etmektedir. 132

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Samanyolu'ndaki yıldız popülasyonları ve temel özellikleri. 16

Tablo 2.2: Yıldız türlerine göre metal bolluğu değerleri (Beers ve Christlieb, 2005)..... 26

Tablo 2.3: *Gaia* DR3 veri tabanındaki nesnelerin astrometrik ve fotometrik ölçülmelerine ait belirsizliklerini *G* görünen parlaklığına göre değişimi..... 33

Tablo 3.1: Tez kapsamında incelenen dört yıldızın Polarbase kütüphanesinden alınmış tayf verileri. 43

Tablo 3.2: Tez kapsamında literatürden seçilen dört yıldızın *Gaia* DR3 veri tabanındaki astrometrik ve tayfsal verileri. 44

Tablo 3.3: ARIADNE programında kullanılan atmosfer modelleri ve parametre aralıkları (Vines ve Jenkins, 2022). 48

Tablo 3.4: Tez yıldızlarının çizgi teşhisinde kullanılan Fe I ve Fe II çizgileri. 57

Tablo 3.5: *MWPotential2014* modelinde kullanılan Samanyolu galaksisine ait parametreler. 71

Tablo 4.1: Tez yıldızlarının SED yöntemiyle elde edilen astrofizik parametreleri. 87

Tablo 4.2: Tez kapsamında incelenen dört yıldızın UBV fotometrik verileri, *V* bandındaki sönükleşme değerleri (A_V) ve Çelebi ve diğ.'nin (2019) fotometrik metal bolluğu bağıntısıyla hesaplanmış fotometrik metal bollukları ([Fe/H]). 91

Tablo 4.3: Tez kapsamında incelenen dört yıldızın *Gaia* DR3 fotometrik (G, G_{BP} ve G_{RP}) ve astrometrik verileri (ϖ), G bandındaki sönükleşme değerleri (A_G) ve hesaplanmış G bandı mutlak parlaklıkları (M_G) ve kızarmadan arındırılmış renkleri ($(G_{BP}\text{-}G_{RP})_0$). 92

Tablo 4.4: Tez kapsamında incelenen yıldızların $M_G \times (G_{BP}\text{-}G_{RP})_0$ verileriyle PARSEC eş-yaş eğrilerinin karşılaştırılmasından hesaplanan model atmosfer (T_{eff}, log g) ve temel astrofizik parametreleri (M, R ve L). 94

Tablo 4.5: Tez kapsamında HD 22879 ve HD 144579 yıldızları için hesaplanan bolluk oranları ve çizgi sayıları. 98

Tablo 4.6: Tez kapsamında HD 188510 ve HD 201891 yıldızları için hesaplanan bolluk oranları ve çizgi sayıları. 98

Tablo 4.7: Tez yıldızlarının hesaplanmış model atmosfer ve temel astrofizik parametreleri. 99

Tablo 4.8: Tez çalışması kapsamında HD 22879 ve HD 144579'un PolarBase tayflarından hesaplan çizgi sayılarıyla birlikte element bollukları ve Asplund ve diğ.'nin (2019) Güneş için hesapladıkları element bollukları. 100

Tablo 4.9: Tez çalışması kapsamında HD 22879 ve HD 144579'un PolarBase tayflarından hesaplan çizgi sayılarıyla birlikte element bollukları ve Aspulund ve diğ.'nin (2019) Güneş için hesapladıkları element bollukları. 101

Tablo 4.10: Tez kapsamında incelenen dört yıldızın uzay hız bileşenleri ve hataları. 104

Tablo 4.11: Dört yıldızın MWPotential2014 potansiyelleri altında hesaplanmış Galaktik yörünge parametreleri. 106

Tablo 5.1: Tez kapsamında incelenen dört yıldızın üç farklı yöntem ile elde edilen model atmosfer parametreleri, kütle, yarıçap ve yaş değerleri. SED: Tayfsal enerji dağılımı, FA: Fotometrik ve astrometrik analiz, T: Tayfsal analiz ve Lit: Literatür verileri..... 122

Tablo 5.2: Tez kapsamında incelenen yıldızların konumsal, kinematik, dinamik yörünge ve kimyasal özelliklerini içeren parametreler ve popülasyon türleri. 125

Tablo 5.3: Lucey ve diğ.'nin (2022) Galaktik popülasyon türlerinin belirlenmesinde kullandığı kriterler ve parametre aralıkları. 128

Tablo 5.4: Tez kapsamında incelenen dört yıldızın küresel kümelerden ayrılma senaryosuyla en olası beş kümenin Galaktik koordinatları (l, b), konum ($P(\theta)$), hız ($P(v)$) ile ve bunların birleşiminden ($P(\text{orijin}|\theta,v)$) hesaplanan olasılık değerleri, Galaktik düzlemden ayrılabilecekleri en büyük uzaklık (Z_{max}), demir ([Fe/H]) ile magnezyum ([Mg/Fe]) bollukları ve yaşları (t) ve popülasyon türleri (ŞB: Şişkin bölge, H: Halo, D: Disk). Tablonun son sütunun verilen kaynaklar iki referans olarak gösterilmiştir. [Fe/H] bolluğu ve yaşı içerirken, ikinci referans [Mg/Fe] bolluğunu ifade eder. 129

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
Å	: Angstrom
A_v	: V bandındaki sönükleşme
⊙	: Güneş
ξ	: Mikrotürbülans hız değeri
b	: Galaktik boylam
c	: Işık hızı
e	: Basıklık
g	: Yüzey çekim ivmesi
***G*, G_{BP} ve G_{RP}**	: *Gaia* filtreleri
Gyıl	: Milyar yıl
H	: Yükseklik ölçeği
K	: Kelvin
kpc	: Kiloparsek
km	: Kilometre
$L_\odot$	: Güneş'in ışıma gücü
L	: Işıma gücü
l	: Galaktik enlem
logε(X)	: Logaritmik (mutlak) bolluk
M_G	: Mutlak parlaklık
pc	: Parsek
π	: Paralaks
R	: Tayfsal çözünürlük
$R_\odot$	: Güneş'in yarıçapı
R_a	: Galaksi merkezine en uzak mesafe
R_p	: Galaksi merkezine en yakın mesafe
R_0	: Güneş'in Galaksi merkezine uzaklığı
R_{GC}	: Galaksi merkezine olan uzaklık
M	: Kütle
$M_\odot$	: Güneş'in kütlesi
m	: Metre

cm : Santimetre

mas : Mili yay saniyesi

Myıl : Milyon yıl

nm : Nanometre

sn : Saniye

T_{eff} : Etkin sıcaklık

τ : Yaş

X : Galaksi merkezi doğrultusundaki konum vektörü

Y : Galaksi'nin dönme doğrultusundaki konum vektörü

Z : Galaksi düzlemine dik doğrultudaki konum vektörü

z : Ağır element bolluğu

Z_{max} : Galaktik düzlemden en büyük dik uzaklık

° : Derece

μm : Mikrometre

ϖ : Trigonometrik paralaks

σ_{ϖ}/ϖ : Rölatif paralaks hatası

Kısaltmalar **Açıklama**

2MASS : Two Micron All-Sky Survey

AB : Astronomik Birim

BHB : Mavi yatay kol yıldızı

CCD : Charge Coupled Device

DR : Data Release

EDR : Early Data Release

ELS : Eggen, Lynden-Bell ve Sandage

Gaia : Global Astrometric Interferometer for Astrophysics

Hipparcos : HIgh Precision PARallax COllecting Satellite

HR : Hertzsprung-Russell

LSR : Yerel durağanlık noktası

L.E.P. : Düşük seviyeli eksitasyon potansiyeli

LAMOST : The Large Sky Area Multi-Object Fibre Spectroscopic Telescope

LIME : Line Measurement for Echelle Spectra

PARSEC : Padova And Trieste Stellar Evolution Code

Pop : Popülasyon

RHB : Kırmızı yatay kol yıldızı

RAVE : RAdial Velocity Experiment

R.W. : İndirgenmiş eşdeğer genişlik

Python : Python Programlama Dili

SED : Tayfsal enerji dağılımı

SDSS : Sloan Digital Sky Survey

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜNEŞ CİVARINDAN SEÇİLMİŞ G TAYF TÜRÜ YILDIZLARIN KÖKENİ

Deniz Cennet DURSUN

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Selçuk BİLİR

Tez kapsamında Güneş civarından seçilen metalce fakir dört G tayf türü anakol yıldızı üç farklı yöntem ile incelenerek yıldızların temel astrofizik parametreleri tayin edilmiş ve Galaktik kökenleri araştırılmıştır. Seçilen dört yıldızın yüksek çözünürlüklü tayfları PolarBase veri tabanından, fotometrik ve astrometrik verileri de *Gaia* DR3 kataloğundan alınmıştır. Yıldızların model atmosfer parametreleriyle temel astrofizik parametreleri tayfsal enerji dağılımı (SED) yöntemi, fotometrik ve astrometrik yöntem ve tayfsal analiz yöntemiyle belirlenmiştir. Yıldızların Galaktik popülasyon sınıflarının tespiti ve Galaktik kökenlerinin araştırmaları için kinematik ve dinamik yörünge parametreleri hesaplanmıştır. Farklı yöntemler ile eş zamanlı gerçekleştirilen analizlerde yıldızların Galaktik popülasyonlarının farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Metalce fakir dört yıldızın Galaktik köken araştırılmasında tez kapsamında kullanılan konum ve hıza dayalı kinematik analizler HD 22879, HD 144579 ve HD 201891'in Samanyolu'nun şişkin bölgesindeki küresel kümelerden ayrıldığını ve Galaksi çubuğunun neden olduğu pertürbasyon etkileriyle Güneş civarına kadar ulaştıklarını göstermiştir. HD 188510'un ise halo küresel kümesinden ayrılma ihtimalinin olabileceği tespit edilmiştir.

Aralık 2023, 152 sayfa.

Anahtar kelimeler: Galaksi: Güneş Civarı, Yıldız: Metalce Fakir

SUMMARY

M.Sc. THESIS

ORIGIN OF SELECTED G-TYPE STARS FROM SOLAR NEIGHBOURHOOD

Deniz Cennet DURSUN

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Sciences

Department of Astronomy and Space Sciences

Supervisor : Prof. Dr. Selçuk BİLİR

Within the framework of the thesis, by examined selected four metal-poor G spectral type main sequence stars from the solar neighborhood via three different methods, the fundamental astrophysical parameters of the stars were determined and their Galactic origins were investigated. High-resolution spectra of the four selected stars were taken from the PolarBase database whereas photometric and astrometric data were taken from the *Gaia* DR3 catalogue. Spectral energy distribution (SED), photometric-astrometric and spectral analysis methods were used to determine the model atmosphere and fundamental astrophysical parameters of stars. In order to investigate the Galactic origins and determine the Galactic populations of stars, kinematic and dynamic orbital parameters were calculated. It was determined that Galactic star populations are different through simultaneous analyses performed with different methods. Position and velocity-based kinematic analyses used within the scope of the thesis to investigate the Galactic origin of four metal-poor stars have shown that HD 22879, HD 144579 and HD 201891 separated from the globular clusters in the bulge region of the Milky Way and reached the Solar neighborhood with the perturbation effects caused by the bar of the Milky Way. It has been determined that HD 188510 may be separated from the globular cluster in the halo region.

December 2023, 152 pages.

Keywords: Galaxy: Solar Neighborhood, Star: Metal Poor

1. GİRİŞ

Gece gökyüzüne bir bakış, insana güçlü bir değişmeyen evren hissi vermektedir. Galaksimizin kapsamlı ve tutarlı bir görünümünü oluşturmak modern astronominin en büyük zorluklarından biridir. Samanyolu galaksisi, gözlemlenebilir evrendeki milyarlarca galaksi arasından en iyi incelenebilen galaksidir. Bunun sebebi, diğer galaksilerdeki her bir yıldızın temel astrofizik parametreleri ve kinematik özelliklerinin hassas ve detaylı ölçümlerinin yapılamamasıdır. Dolayısıyla, gizemli evrenin izini sürmeye başlamak için öncelikle Samanyolu'ndan başlayarak tüm dalgaboylarında, tüm gök cisimlerinin tek tek ele alınması ve daha sonra yakın galaksiler ile yola devam edilerek, büyük çerçeveye ufak adımlar ile ulaşılması gerekmektedir. Uzaktaki gök cisimlerinin incelemenin tek yolu, yaydığı ışığın gözlenmesi ve bu gözlemler sonucunda uygun fiziksel yapıların ortaya konması ve bunun kuramsal modeller ile açıklanmasıyla mümkündür.

Birkaç yıldızı inceleyerek bütün evrenin öyküsüne ulaşmak yeterli değildir. Evren hayal edilebilenden fazlasını, yani çok sayıda yıldız içermektedir. Ancak burada seçilen birkaç yıldızın yardımıyla oluşturulabilecek hikâye, evren hakkında anlatılabilecek en muazzam öykülerden biridir. Birkaç yıldızdan oluşturulacak böyle bir senaryo bütün olarak ele alındığında, evrenin olası hikayelerinden biri ortaya çıkabilir. Bazı yıldızlar ile evrenin ilk anlarına bir bakış atılabilirken, bazı yıldızlarla da evrenin geleceği hakkında öngörüde bulunmak mümkündür. Ancak evrenin öyküsünde insanlığın da parmak izleri bulunmaktadır. Yıldızlar, toplumlara ait kültürleri ve düşünceleri etkilemiştir. Gökyüzü, insanoğlunu var olduğundan beri her zaman merak uyandıran büyüsünün etkisi altına almıştır.

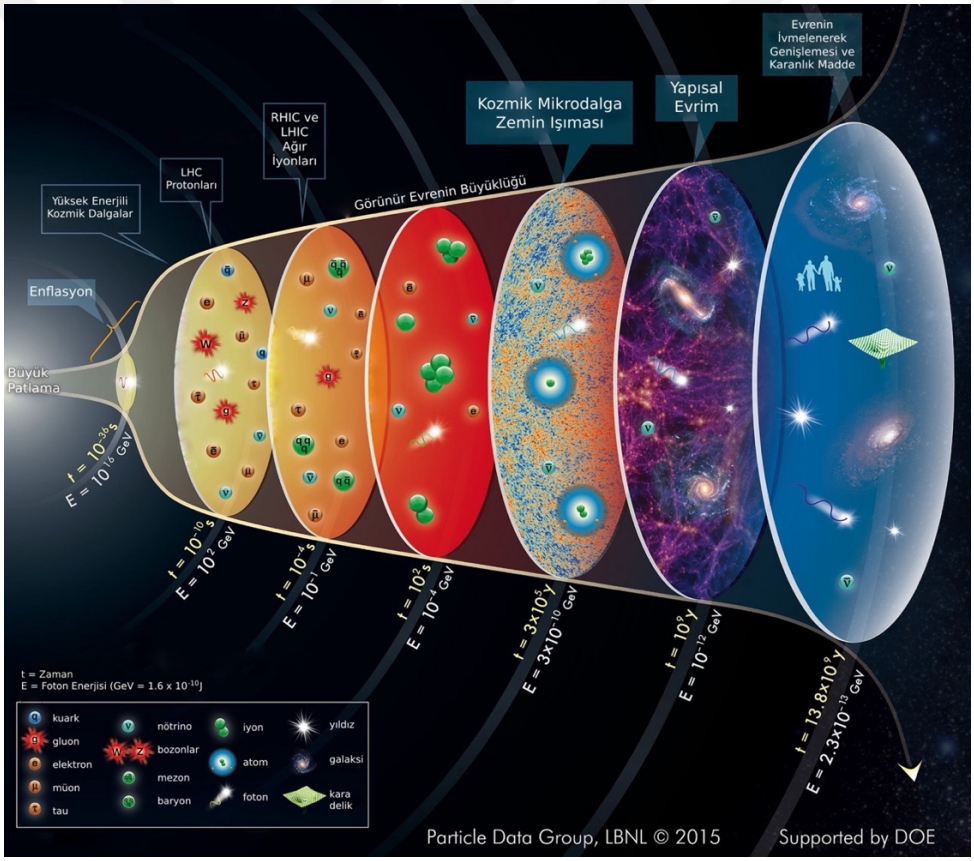
Eski zamanlardan günümüze kadar, evren ile ilgili ufkumuzu genişleten tüm bilim insanları bu hayranlık uyandırıcı öyküde rol almıştır. Isaac Newton ve Albert Einstein gibi ünlü bilim insanlarının yanı sıra neredeyse ismi tarihin tozlu sayfalarına karışmış, evrenin büyüklüğünü hayal etmemize yardımcı olan Henrietta Swan Leavitt, galaksilerarası maddeleri araştıran Amina Helmi, gökyüzündeki yıldız sayısına açıklık getiren Dorrit Hoffleit ve yıldızların oluşumuna dair keşifler yapan Cecila Payne gibi bilim insanları da bu öykünün anlaşılmasında

büyük görev üstlenmiştir. Bu tezde isimleri geçen ve bu alanda çalışmış tüm bilim insanları, gökyüzüne hayranlık duyulmasını sağlamalarının yanı sıra, anlaşılmasını da katkıda bulunmuştur. Yıldızların ışığı, her şeyin nasıl başladığına ait izler barındırmaktadır. Yıldızlar üzerine yapılan çalışmalar, "Evrende yalnız mıyız?" ve "Evrendeki geleceğimiz neye benzeyebilir?" gibi soruların yanıtını bulmak için katkı sağlamaktadır. Astronomlar, insanlığın henüz Dünya'ya ayak izi bırakmadığı dönemin de ötesine yolculuk etme lüksüne sahiptirler. Uzak galaksilerden yayılan ışığın Dünya'ya ulaşması, ışık hızının sınırları gözetildiğinde milyonlarca hatta milyarlarca yıl almaktadır. Bu nedenle, günümüzde uzak yaşlı galaksilerin oluşum ve evrimleri doğrudan geçmişte oldukları gibi gözlenebilmektedir. Bu yaklaşım, bir galaksinin uzaklığına bağlı olarak, özelliklerini ortaya koymak ve ayrıntılı olarak incelemenin zorluğuyla sınırlıdır. Benzer şekilde, uzak ve sönük galaksilerden alınan fotometrik ve tayfsal verilerinin çözünürlükleri de sınırlıdır. Öyle ki, çoğu zaman araştırmacılar bütün bir galaksiyi incelemek için sadece tek bir tayfa sahiptir. Uzak galaksilere alternatif olarak, Samanyolu'ndaki yaşlı yıldızlar gözlenerek geçmişten gelen bilgiler kolaylıkla elde edilmektedir. Yıldızların kimyası, kinematiği ve uzay dağılımlarına ilişkin gözlemsel veriler birleştirilerek, doğum yerlerindeki şartlar incelenmektedir. Bu sayede, Samanyolu galaksisinin oluştuğu günden bugüne kadar geçen evrim sürecinin bir şeması ortaya çıkmaktadır. Galaktik arkeoloji, bilinen arkeolojiden farksızdır. Arkeologların geçmiş yaşam biçimleri ve kültürleri incelemek için kullandıkları tarihi eserler ve kalıntılar gibi, gökbilimciler de Samanyolu'nu detaylıca incelemek için yaşlı yıldızları kullanmaktadır.

Evrenin oluşumundan sorumlu Büyük Patlamadan hemen sonra, evren henüz büyük bir hacme genişlemeden hemen öncesi, etrafta yalnızca basit tek protonlu hidrojen, ona göre daha karmaşık bir element olan helyum ve eser miktarda lityum vardı. Ortamın sıcaklığı ve yoğunluğu, lityumdan daha ağır elementleri oluşturmak için yeterli değildi. İlerleyen süreçte, ilk yıldızlar oluşup ışıklarını yayana kadar ortalama birkaç yüz milyon yıl boyunca evrende hidrojen ve helyum elementleri başroldeydi. Atom çekirdeklerinin kaynaşmasıyla birlikte, yıldızların merkezi bölgelerinde daha ağır elementler üretilmeye başlamıştır. Bu yıldızların ömrü bir süpernova patlamasıyla sonlanarak yıldız çekirdeğinde üretilen ağır elementler yıldızlararası ortama dağılmıştır. Daha sonra, dağılan ağır elementleri çevreleyen bu yıldızlararası ortam, ilk yıldızlara nispeten zenginleşen ikinci kuşak yıldızların oluşmasını

sağlamıştır. Bu süreç, günümüze kadar kendini tekrarlayarak bugünkü halini almıştır (Şekil 1.1). Örneğin yaklaşık 4.6 Gyıl önce doğan Güneş, ilk yıldızlara göre zengin olan üçüncü nesil yıldız grubuna dahildir.

Günümüzde halen metalce fakir yıldızlar gözlenebilmektedir. İkinci nesil bu yıldızlar halen doğdukları yıldızlararası ortamın imzasını taşırlar. Bu metalce fakir küçük kütleli yıldızların günümüzdeki varoluşları, zenginleşme sürecinin ilk aşamalarında doğmuş ve hala varlıklarını sürdürmeleriyle veya elementlerin karışmasını önleyen izole ortamlarda doğmuş olmalarıyla açıklanmaktadır.

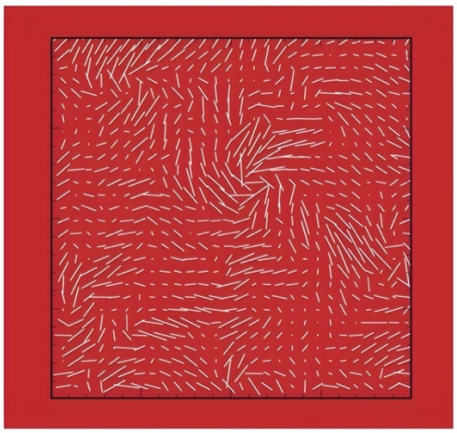


Şekil 1.1: Evrenin, Büyük Patlamadan sonra geçirdiği evrim aşamaları.

Kozmik enflasyon ve nötrinoların serbestleşmesi, erken evrende meydana gelen iki önemli olaydır. Kozmik enflasyon, Büyük Patlamadan saniyenin sadece bir kısmı sonrasında meydana gelen evrenin ani hızlanmasını ifade etmektedir. Bu hızlı genişlemeyle, günümüzde gözlemlenen evrenin homojen ve izotropik yapısı oluşmuştur (Guth, 1981). Bu sırada evren

aşırı derecede sıcak ve yoğundu. Nötrinolar yüksek enerjileri nedeniyle serbestçe hareket edemiyorlardı. Bununla birlikte, evren soğudukça, nötrinolar enerji kaybederek daha az enerjik hale gelmiştir. Bu da nötrinoların özgürce hareket etmesini sağlamıştır. Nötrinoların serbest kalması, evrendeki maddenin dağılımının şekillenmesinde önemli bir rol oynamıştır (Guth, 1981; Linde, 1982; Dolgov, 2002). O dönemde evren inanılmaz derecede sıcak ve yoğun olduğu için elektronlar ve protonlar nötr atomları oluşturmak için birleşmesi olanaksızdı. Evren, ışığa karşı geçirgensizdi ve fotonlar sürekli olarak serbest elektronlar tarafından saçılmaktaydı. Bununla birlikte, evren genişledikçe ve soğudukça, elektron ve protonların birleşmesiyle bir başka adıyla tekrar birleşmesiyle (rekombinasyon) nötr atomlar ortaya çıkmıştır. Bu olay, serbest elektronlar tarafından dağılmadan uzayda seyahat edebilen fotonların salınmasına yol açmıştır (Silk, 1977; Zel'dovich ve Sunyaev, 1969). Işık ve maddenin ayrılması, araştırmacılara erken evreni ve özelliklerini incelemek için önemli bir araç sağlamıştır. Evrende gözlemlenen en eski ışık, kozmik mikrodalga zemin radyasyonu olarak da bilinmektedir (Smooth, 1992).

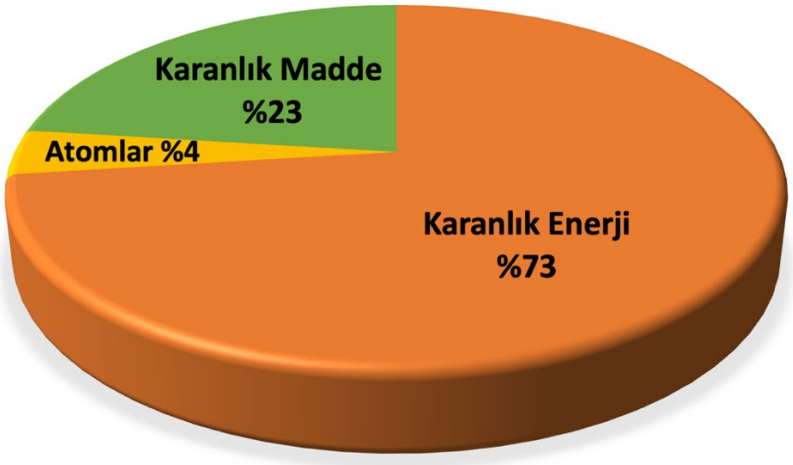
Kozmik enflasyon sırasında oluşan kütleçekim dalgaları, kozmik mikrodalga zemin radyasyonunda hala görülebilen özel bir desen olan B-modlarını oluşturmaktadır (Şekil 1.2). Kütleçekim dalgaları, bu dönemde ışığın polarizasyonunu etkiler ve böylece polarizasyon desenlerini oluşturur. Bu desenler, kozmik enflasyonun varlığını gösteren açık bir kanıt sağlar, çünkü kozmik mikrodalga zemin ışınımında oluşan bu tür desenler sadece kozmolojik kütleçekim dalgaları tarafından üretilmektedir.



Şekil 1.2: Kozmik enflasyon sırasında oluşan kütleçekimi dalgalarının oluşturduğu B-modlarının görüntüsü (Astronomy: Roen Kelly, after Wayne Hu).

Galaksi oluşumu, astrofizikteki en temel süreci temsil etmektedir. Mevcut anlayışa göre ilk galaksiler, madde yoğunluğundaki küçük dalgalanmalar ile oluşmuştur. Küçük yoğunluk bozulmaları, kütleçekim etkisiyle büyüyerek önce madde yığınlarını ve sonra galaksiler gibi daha büyük yapıları meydana getirmiştir. Evrendeki maddenin yaklaşık %20-25'ini içeren

karanlık madde, galaksilerin oluşumundaki en önemli faktörlerden biridir (Frieman, Turner ve Huterer, 2008). Karanlık madde, ışığı yaymayan, soğurmayan veya yansıtmayan kuramsal bir madde şeklidir. Karanlık maddenin dağılımı, kütleçekim yoluyla evrendeki yapının büyümesini de etkilemektedir. Galaksi oluşumunu etkileyen bir diğer önemli faktör ise erken evrendeki gazdır. Evren genişledikçe ve soğudukça, gaz kümeler halinde yoğunlaşmıştır. Yoğunlaşan gaz kümeleri de kendi kütleçekimi altında çökerek galaksileri oluşturmuştur (Ricotti, Gnedin ve Shull, 2002; Yoshida, Bromm ve Hernquist, 2004). Günümüzde Samanyolu'ndaki yıldızların hareketlerinin ve dağılımlarının incelenmesi, karanlık maddenin varlığına ve doğasına ilişkin kuramların sınanması için kullanılmaktadır (Şekil 1.3). Son yıllarda, yıldızların konumları, hızları ve kimyasal bileşimleri hakkında benzeri görülmemiş miktarda veri sağlayan Sloan Sayısal Gökyüzü Araştırması (SDSS; Sloan Digital Sky Survey) ve *Gaia* (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics) görevi gibi büyük gözlemsel araştırmaların başlaması sayesinde Galaktik arkeoloji alanında önemli gelişmeler yaşanmaya devam etmektedir (York ve diğ., 2000; Prusti ve diğ., 2016).



Şekil 1.3: Evrendeki madde ve enerjinin dağılımı.

20. yüzyılın başlarında, evrenin Samanyolu'na benzer milyarlarca galaksiye sahip olduğu fikri kabul görmemekteydi. İsimlerini tarihe yazdıracaklarından haberleri olmayan Shapley ve Curtis, ilk kez evrende milyarlarca galaksinin olduğu fikrini savunmuşlardır. Shapley, günümüzde sarmal galaksi olduğu bilinen gök cisimlerini, Samanyolu'na ait yıldız kümeleri olduğunu yanlış bir şekilde öne sürse bile gözlemlenen küresel kümelerin dağılımını

inceleyerek Güneş'in Samanyolu'nun merkezinde bulunmadığı çıkarımını doğru bir şekilde yapmıştır (Shapley, 1918). Buna karşılık, Curtis, Güneş'in Samanyolu'nun merkezinde olduğunu yanlış bir şekilde hesaplamasına rağmen, gözlemlenen bu bulutsuların her birinin aslında Samanyolu gibi birer galaksi olduğunu savunmuştur (Curtis, 1917). Samanyolu galaksisi, gözlemlenebilir evrendeki milyarlarca galaksiden sadece biridir. Hassas gözlemler yapabilen gelişmiş teleskoplar ve yöntemler ile bunları yorumlamak için karmaşık teorilerin sağlam bir temeli olmadan, Samanyolu galaksisinin nerede olduğu bilmek bile zordur. Durum böyle iken, bir galaksinin oluşumu ve evrimi gibi tüm karmaşık süreçleri kolaylıkla anlamayı beklemek güçtür. Araştırmalarda kullanılan ana tekniklerden biri, kökenlerini ve evrimsel tarihlerini izlemek için yıldızların kimyasal bolluklarını kullanmayı içermektedir. Araştırmacılar, Samanyolu'nun farklı bölgelerindeki yıldızların kimyasal bileşimini analiz ederek, ortak bir kökene sahip olan ve aynı moleküler bulutundan oluşmuş olabilecek yıldız gruplarını belirlemektedir. Bu yöntem, galaksinin farklı bölgelerinde yıldız oluşumunun ve kimyasal zenginleşmenin geçmişi hakkındaki izleri ortaya çıkarmaktadır. Bu veriler, galaksilerin yapısını ve özelliklerini benzeri görülmemiş ayrıntılarla haritalandırmasını ve galaksilerin evriminin incelenmesine yeni bir ışık tutmasını sağlamıştır.

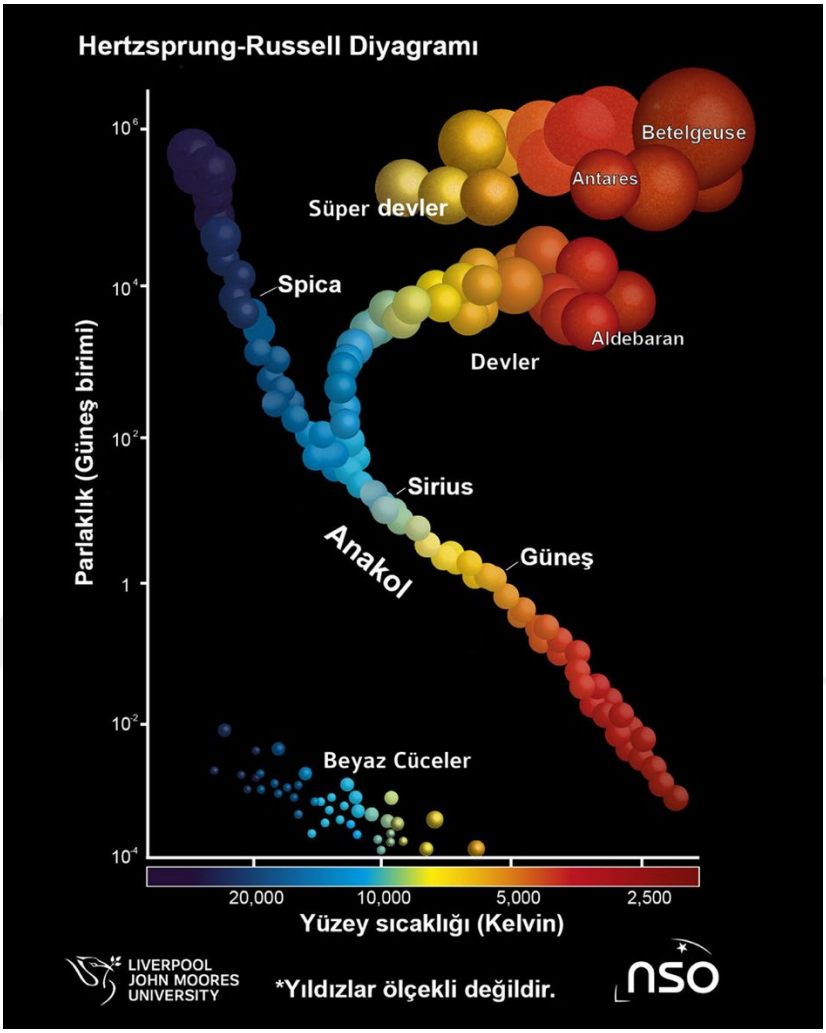
Yıldızların gece gökyüzünde ışıldayan çekiciliği yüzyıllardır insanoğlunu büyülemiştir. Ancak yıldızlar, estetik çekiciliklerinin ötesinde, evreni anlamamız için de göz ardı edilemeyecek derecede önemlidir. Yıldızlar, yaşam için gerekli ağır elementleri üreten fabrikalar ve kozmosun dinamiklerini çalıştıran temel yapı taşlarıdır. Araştırmacılar, yıldızların yapısını, özelliklerini ve evrimini inceleyerek evrenin gizemlerini ortaya çıkarmaktadır. Bu araştırmalar yıldızların geçmişi, bugünü ve geleceği hakkında fikir vermektedir. Yıldızlar, kütleleri, yarıçapları, parlaklıkları, sıcaklıkları ve kimyasal bileşimleri gibi yapısal özelliklerine göre sınıflanmaktadır. Bu özellikler birbirine bağlıdır ve farklı yıldız türleri arasında ayrım yapmak için kullanılmaktadır. Bir yıldızın kütlesi, sıcaklığını ve ışıma gücünü belirlemektedir. Bu da doğrudan yıldızın rengini ve parlaklığını etkilemektedir. Kütlesi büyük yıldızlar sıcak ve ışıma gücü büyükken, küçük kütleli olanlar daha soğuk ve daha düşük ışıma gücüne sahiptir. Bir yıldızın yarıçapı, kütlesi ve parlaklığı birbiriyle ilişkilidir ve yıldızları evrimleşmiş veya cüce olarak sınıflandırmak için kullanılmaktadır. Yıldızlar kütlelerine göre sınıflandırılırken Güneş'in kütlesi referans alınmaktadır. Kütlesi, 0.5 $M_{\odot}$ ve daha küçük yıldızlar kırmızı cüce

olarak bilinmektedir ve yaşam süreleri evrenin şimdiki yaşından daha fazla olabilir. Kütleleri 0.5 $<M/M_{\odot}<$ 8 aralığındaki orta kütleli yıldızlar, sayı bakımından kırmızı cücelerden daha azdır; ancak yine de yıldızların önemli bir bölümünü temsil etmektedir. Ömürleri kırmızı cücelerden daha kısadır ve yaşamlarını beyaz cüce olarak tamamlarlar. Kütlesi 8 $M_{\odot}$'ten daha büyük yıldızlar nadir bulunmakla birlikte Galaktik düzlemde yer alırlar. Ömürleri kısa olup ve süpernova patlamalarıyla nötron veya kara delik olarak yaşamlarını sonlandırırlar.

Yıldızları sınıflandırmanın bir başka yolu da sıcaklıklarına ve renklerine göredir. Bir yıldızın atmosfer sıcaklığı rengiyle ilişkilidir. Daha sıcak yıldızlar mavi görünürken, daha soğuk yıldızlar ise kırmızı renktedir. 20. yüzyılın başlarında Annie Jump Cannon ve Harvard College Gözlemevi'ndeki diğer astronomlar tarafından geliştirilen Harvard tayfsal sınıflandırma yöntemi, yıldızları tayflarına göre gruplandırmaktadır (Cannon, 1912). En sıcak ve en mavi yıldızlardan (O) en soğuk ve en kırmızı yıldızlara (M) kadar farklı tayfsal türleri belirtmek için O, B, A, F, G, K veya M harfleri kullanılmaktadır. Örneğin Güneş, sarı bir cüce olan G tipi bir yıldızdır. Aynı tayfsal türdeki yıldızlar ise sıcaklıklarına göre sınıflanmaktadır: grubun en sıcak üyesi 0, en soğuğu ise 9 ile gösterilmektedir. 20. yy. başında Ejnar Hertzsprung ve Henry Norris Russell tarafından bağımsız olarak geliştirilen Hertzsprung-Russell (HR) diyagramı ise, yıldızlar için parlaklığa karşı sıcaklığın gösterildiği bir dağılımdır (Hertzsprung, 1911; Russell 1913). Diyagram, çoğu yıldızın, çekirdeklerinde hidrojen yakan yıldızları temsil eden anakol adı verilen çapraz bir bant boyunca dağıldığını göstermektedir (Şekil 1.4). Diyagramın diğer bölgeleri, devler, süper devler ve beyaz cüceler gibi farklı evrim aşamalarındaki yıldız topluluklarından oluşmaktadır.

Yıldızlar, fiziksel özelliklerinin yanı sıra, kimyasal kompozisyonlarına göre de sınıflanmaktadır. Bir yıldızın tayfında hidrojen ve helyum dışındaki elementlerin varlığı ve bolluğu, yıldızın yaşı, oluşum tarihi ve çevresi hakkında bilgi vermektedir. Bir yıldızın kimyasal bileşimi, oluştuğu gaz bulutundaki elementleri temsil etmekte olup yıldız evrimini doğrudan etkilenmektedir. Hidrojen ve helyum dışındaki ağır elementler yıldızların metalleri olarak bilinmektedir. Güneş'in sahip olduğu ağır element miktarına göre kıyaslanması yıldızların metalce fakir veya zengin olduğunu göstermektedir. Metalce fakir yıldızlar, Büyük

Patlamadan geride kalan ilkel gazdan oluştukları için, bir nevi evrenin fosil kalıntıları olarak değerlendirilmekte ve Galaktik arkeoloji araştırılmalarında kullanılmaktadır.



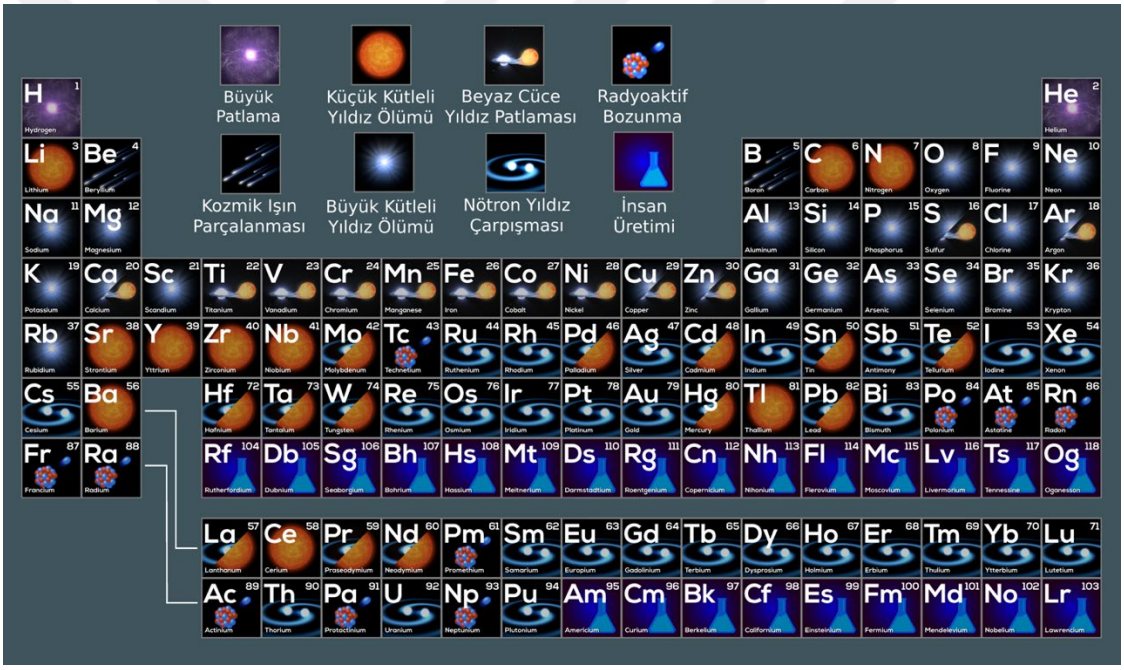
Şekil 1.4: Farklı sıcaklık ve ışıma gücü sınıfındaki yıldızların HR diyagramı.

Etimolojik olarak metal sözcüğü, Fransızca maden anlamına gelen kelimeden türemiştir. Astronomide ise metal sözcüğü, günlük anlamda veya bir kimya ders kitabındaki tanımının aksine hidrojen veya helyumdan daha ağır olan herhangi bir elementi ifade etmektedir. Yıldız kimyasal bileşimi genellikle X, Y ve Z parametreleriyle tanımlanmaktadır. Burada hidrojen X, helyum Y ve diğer tüm ağır elementler de Z ile gösterilmektedir. Buna göre, yıldızdaki toplam element bolluğu $X+Y+Z=1$ bağıntısıyla ifade edilmektedir. Metal bolluğu tanımlanırken, hassas ölçümü yapılabilen Güneş'e ait bolluk değerleri referans olarak kabul edilmektedir. Bir yıldızın

metal bolluğunun ölçülmesi ve pratikte bir tayftaki tüm elementlerin bolluklarını ölçmek epey zordur. Demir (Fe) elementi, tayf üzerinde farklı dalgaboylarında birden fazla soğurma çizgisi barındırması nedeniyle bolluk analizi yapılabilen en kolay elementtir. Bu sebeple, bir yıldızın olası metal bolluğu değeri genellikle demir bolluğu dikkate alınarak tayin edilmektedir. Metal bollukları Güneş'e göre logaritmik olarak ifade edilmektedir. Örneğin, metal bolluğu [Fe/H] = -1 dex olan bir yıldızın, Güneş'te bulunan demirin 10'da 1'i kadar demire sahip olduğu anlamına gelmektedir. Metal bolluğu tayfsal ve fotometrik yöntemler ile belirlenebilir. Literatürde genellikle tayfsal ve fotometrik yöntem ile hesaplanan metal bollukları, sırasıyla, [Fe/H] ve [M/H] olarak ifade edilmektedir. Demir bolluğunun yıldıza ait metal bolluğunu ifade eden pratik yaklaşım, tüm yıldız popülasyonları için geçerli değildir. Bir yıldızın toplam metal bolluğu belirlenirken demir elementinin ne ölçüde kullanılabileceği, bolluk modelinin Güneş'inkine ne kadar benzer olduğuyla doğrudan ilişkilidir. Samanyolu'nun farklı oluşum zaman ölçekleriyle meydana gelen Galaktik bileşenlerdeki (ince disk, kalın disk ve halo) nesnelerin ayrımında demir ve alfa element bollukları eş zamanlı olarak kullanılmaktadır. Bahsi geçen alfa elementi, yıldızlarda helyum yanmasıyla oluşan ağır elementleri ifade etmektedir. Alfa element bolluğu oranı [α/Fe], yıldızdaki alfa parçacıkları sayısının ağır element oranının logaritması olarak ifade edilmektedir. Bu oran, bir yıldızın nükleosentez geçmişinin önemli bir göstergesidir. Araştırmacılar, yıldızların kimyasal bolluklarını inceleyerek evrendeki elementlerin dağılımının tarihini izlemektedir.

Yıldızlar, kütlelerine bağlı olarak çekirdeklerinde meydana gelen farklı nükleer füzyon süreçleriyle daha ağır elementler oluşturmak için atomlarının kaynaşmasıyla enerji üretmektedir. Bir yıldızın çekirdeğindeki sıcaklık ve basınç yeterince yüksek olduğunda nükleer füzyon reaksiyonu başlamaktadır. Bu durum, kütleçekimin içe doğru olan kuvvetiyle ısıl basıncın dışa doğru olan kuvveti arasındaki hassas dengeyle oluşmaktadır. Güneş gibi orta ve daha küçük kütleli anakol yıldızları, proton-proton (pp) reaksiyonlarıyla hidrojen elementini helyum elementine çevirirken, büyük kütleli yıldızlar, karbon-azot-oksijen (CNO) reaksiyonuyla helyum üretmektedir. Bir yıldız anakol evrimi boyunca hidrojenini helyuma çevirdikten sonra ileri evrim aşamalarında atık olarak üretilen helyum elementini yakarak karbon, azot ve oksijen gibi daha ağır elementlere dönüştürmektedir. Bu süreç, yıldız çekirdeğinde demir elementini üretene kadar devam edecektir. Fakat yıldız çekirdekleri demir

elementini yakabilecek kütle ve sıcaklığa sahip olmadığından yıldız çekirdeği kararsız bir hale gelerek süpernova gibi yıkıcı bir olaya maruz kalır. Bu süreçte yıldız çekirdeğinde üretilen ağır elementler, süpernova patlaması neticesinde r (rapid) ve s (slow) gibi nötron yakalama işlevleri sayesinde demirden daha ağır elementler üretilmektedir. S işlevi sırasında, bir çekirdek nötron yakalamak suretiyle, kararsız hale gelmektedir. Daha sonra, bu elementler daha yüksek atom numarasına sahip kararlı bir atom haline dönüşmektedir. R işlevi ise, süpernova patlamaları gibi yüksek nötron akışları olan ortamlarda meydana gelmektedir. Bu süreç ile atom sayıları 56'nın üzerinde olan ağır elementler üretilmektedir (Şekil 1.5).



Şekil 1.5: Elementleri oluşum kaynaklarına göre düzenlenmiş periyodik cetvel (NASA/AASNova).

Genel olarak, yıldızların yapısı ve özelliklerinin incelenmesi, evren anlayışı için geniş kapsamlı çıkarımları olan kritik bir araştırma konusudur. Yıldızların yüksek çözünürlüklü ve yüksek sinyal/gürültü (*S*/*N*) oranlı tayflarının elde edilmesiyle ve güncel analiz yöntemleriyle tayfların incelenmesi yıldızların kimyasal kompozisyonlarının araştırmasında kritik bir rol oynamaktadır. Bu teknikler, araştırmacıların yıldızlardaki element bolluğunu benzeri görülmemiş bir doğrulukla ölçmelerine izin vererek, bu elementleri üreten nükleosentez süreçlerine ilişkin bilgiye ulaşılmasını sağlamaktadır. Yıldızlar, Samanyolu ve bir bütün olarak evren hakkındaki araştırmaların olduğu Galaktik arkeoloji, daha derin bir anlayış sağlamayı

vaat eden, heyecan verici ve hızla gelişen bir alandır. Bu alandaki araştırmalar, gözlemler, teorik modeller ve sofistike istatistiksel teknikler birleşerek Galaksi'nin karmaşık tarihini çözmekte ve galaksilerin evrimini yöneten temel süreçlere yeni bir bakış açısı kazandırmaktadır. Evrenin hikâyesi, tek bir kişi tarafından tek bir tezde kaleme alınamayacak kadar karmaşıktır. Günümüzde bu karmaşıklık ve arayış her zamankinden daha da iyi anlaşılmaktadır. Samanyolu ve onun zengin tarihini anlamaya yönelik kolektif arayışta, her yeni iç görü, her yeni keşif ve her araştırma, bu yönde atılmış etkili bir adımdır.

2. GENEL KISIMLAR

Astrofizik, evren ile ilgili temel soruları keşfetmek için fizik, astronomi ve matematik ilkelerini birleştiren çok disiplinli bir alandır. Astrofiziğin birincil hedeflerinden biri, evrenin genel yapısını, yıldızların oluşumunu ve evrimini ve evrendeki elementlerin kökenini ve dağılımını anlamaktır. Astrofizikteki en temel sorulardan biri evrenin doğası ve yapısıdır. Araştırmacılar, 20. yy başlarından beri evrenin kökenini ve evrimini anlamak için çalışmalar yürütmektedir. Mevcut anlayış, evrenin yaklaşık 13.8 Gyıl önce büyük patlamayla başladığı yönündedir (Planck işbirliği, 2018). Hidrojen ve helyum gibi evrende üretilen ilk elementlerin oluşumu ve evrenin erken tarihine dair kanıt sağlayan kozmik mikrodalga zemin radyasyonu Büyük Patlamayı destekleyen deliller sunmaktadır. Yıldızlar, galaksi içindeki gaz ve tozun yoğunlaştığı bölgelerde doğar ve oluşumları bir dizi fiziksel süreçten etkilenir. Yıldızların kütle ve kimyasal bolluk gibi temel astrofizik özellikleri, oluşumları sırasında evrendeki koşullar hakkında önemli ipuçları sağlamaktadır. Bununla birlikte, evrendeki elementlerin kökeni ve dağılımının incelenmesi de önem arz etmektedir. Karbon, oksijen ve demir gibi helyumdan daha ağır elementler, yıldızlarda bir dizi işlem ile oluşmaktadır. Bu elementlerin oluşumunun, bolluğunun ve dağılımının incelenmesi galaksilerin, bir bütün olarak evrenin, oluşumunu ve evrimini anlamak için çok önemlidir.

Bu karmaşık konuları daha iyi araştırmak için astrofizikçiler teleskoplar, detektörler, uydular, bilgisayar simülasyonları dahil olmak üzere bir dizi araç ve teknik kullanmaktadır. Teleskoplar, farklı dalgaboylarında gök cisimlerini gözlemlemek için kullanılırken, *Gaia* görevi gibi uydular yıldızların konumlarını ve hareketlerini doğru ve duyarlı ölçümlerini gerçekleştirmektedir. Sonuç olarak astrofizik, yıldızların oluşumu, evrimi ve evrendeki elementlerin kökeniyle dağılımını anlamaya çalışan büyüleyici bir çalışma alanıdır. Araştırmacılar, bir dizi gözlemsel ve hesaplamalı araç kullanarak önemli keşifler yapmaya ve evren anlayışımızın sınırlarını zorlamaya devam etmektedir.

2.1 ERKEN EVRENDE İLK YILDIZLAR

Yıldızların kökenlerini ve özelliklerini anlamak, erken evreni anlamak için önemlidir. Kütleleri 0.8 $M_{\odot}$ veya daha küçük kütleli yıldızlar doğdukları yer ve zamanda neredeyse saf olan

yıldızlararası maddenin fosil kayıtlarını içerirler. Bu küçük kütleli yıldızların kimyasal bileşimleri ve özellikleri, evrenin erken zamanları hakkında fikir vermektedir. Yıldızların kimyasal bileşimleri hakkında yapılan detaylı araştırmalar, küçük kütleli yıldız oluşumuna neden olan ve eski zamanlarda gerçekleşen nükleosentez için sınırların belirlenmesine olanak tanımaktadır. Karbon ve lityum elementleri, erken yıldız oluşumunda önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, demirden daha ağır elementlerin ilk üretim yerleri, halen cevapsız kalan önemli bir sorudur. Bu sorunun cevabı, ilk oluşan yıldızların atmosferlerinde bulunan elementlerin analiziyle elde edilebilir ve astrofizikte bu sorulara yanıtlar bulunabilir.

Evrenin oluşumu, büyük patlama ile başlamaktadır. Bu olay, yaklaşık 13.8 Gyıl önce gerçekleşmiştir. Evren, soğuk karanlık madde hiyerarşik küme paradigmasıyla evrimleştiği kabul edilmektedir (White ve Rees, 1978). Bu kurama göre, küçük karanlık madde haloları birleşerek ilk yıldızların ve galaksilerin oluşması için gaz ve tozu içeren büyük halolara dönüşmektedir. Büyük patlamadan yaklaşık 100-200 Myıl sonra yani kırmızıya kaymanın (z) 20-30 değerindeyken ilk yıldızların oluştuğu düşünülmektedir. Galaksilerin evrimi, merkezi haloda bir galaksinin oluşumundan, cüce galaksileri içeren daha küçük haloların birikmesine kadar yaygın bir süreçtir. Evrim sürecinin sonunda, oluşan galaksiler büyüyerek ve birleşerek, günümüzde görülen büyük galaksileri oluşturmuştur. Bu evrim süreci, hala devam etmektedir.

İlk yıldızların küçük karanlık madde halolarında oluştuğu düşünülmektedir. Bu haloların kütleleri yaklaşık $10^6\,M_\odot$ olduğu tahmin edilmektedir (Couchman ve Rees, 1986). Bu süreçte evrende ağır elementlerin yeterli olmamasından dolayı, soğuma sadece atomik veya moleküler hidrojen aracılığıyla gerçekleşmekteydi. Bu tür soğurma ve ortamda sadece hafif elementlerin varlığından dolayı evrende oluşan ilk yıldızların büyük kütleli (400 $M_\odot$) olduğu düşünülmektedir (Aguado ve diğ., 2016). Büyük kütleli yıldızlar hızlı bir şekilde evrimleşerek süpernova patlamalarıyla ömürlerini tamamlamaktadır. Günümüzde gama ışın patlamalarının incelenmesi, büyük kütleli yıldızların varlığına ait kanıtlar sunmaktadır. Örneğin kırmızıya kayma değerinin tayfsal olarak ölçüldüğü GRB 090423 gama ışın patlaması şimdiye kadar tespit edilen en eski nesnelerden biridir (Şekil 2.1). Kaynağı GRB 090423 olan ilk ışık yayıldığı anda evren 630 milyon yıl yaşındaydı. Bu gama ışın patlamasının tespiti, büyük kütleli yıldızların erken evren dönemlerinde bile oluşup süpernova patlamalarıyla yok olduklarını doğrulamaktadır (Olivares ve diğ., 2009). Süpernova patlamaları yıldızlararası ortamı metal

içeriği bakımından elementlerce zenginleştirir ve ortam şartları yeni bir yıldızı oluşturacak şekilde biçimlendiğinde de farklı kuşak yıldızlar oluşur. Bu süreç yıldızlar ile galaksilerin oluşumunda ve evriminde önemli bir rol oynamaktadır.



Şekil 2.1: Evrende şimdiye kadar keşfedilen en uzak nesne GRB 090423'ün temsili görüntüsü (ESO/Roquette, A)[1].

23 Nisan 2009 tarihinde Swift Gamma-Ray Burst görevi tarafından gama ışını patlaması olan GRB 090423'ün kırmızıya kayma değeri z = 8.2 olarak belirlenmiştir. Bugüne kadar tayfsal kırmızıya kaymayla tespit edilen en uzak nesneler arasında bulunmaktadır.

Yıldızlararası ortamda metalce zengin maddenin oluşmasıyla birlikte ilk küçük kütleli yıldızların doğduğu düşünülmektedir. Bu oluşum, gaz ve toz bulutlarının soğumasını sağlamıştır (Klessen, Glover ve Clark, 2012). Ancak büyük ve küçük kütleli yıldızların oluşumu arasındaki geçiş hala tam olarak anlaşılamamış ve bu nedenle daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu soruyu ele almanın bir başka yolu, farklı koşullar altında küçük kütleli yıldızların oluşumunu modelleyen simülasyonların yapılmasıdır. Bu simülasyonların oluşturulması ve küçük kütleli yıldızların oluşumuna katkıda bulunan astrofiziksel parametrelerinin belirlenmesiyle birlikte büyük kütleli yıldızlardan küçük kütleli yıldız

[1] https://www.eso.org/public/news/eso0917

oluşumuna geçiş hakkında da fikir sahibi olunabilir. Nihayetinde, bu süreçlerin ortaya konması evrenin evrimini daha iyi anlaşılmasına fırsat vermektedir.

Metalce fakir yıldızlar, benzersiz kimyasal bileşimleri nedeniyle erken evren araştırmalarında büyük önem taşımaktadır. Bu yıldızlar tipik olarak küçük kütleli ve uzun ömürlüdür ve karbon, oksijen ve demir gibi ağır elementlerden yoksun gaz bulutlarından oluştuğu düşünülmektedir. Kozmik tarihin erken dönemlerinde bu elementler az miktarda bulunmaktaydı. Elementlerin metalce fakir yıldızların atmosferlerindeki element bolluk modelleri, erken evrende aktif olan nükleosentez süreçleri hakkında bilgi sağlamaktadır. Astrofizikçiler bu modelleri analiz ederek, evrendeki ilk yıldızların oluşumu sırasında hüküm süren koşulların yanı sıra elementlerin kozmik zaman içindeki evrimi hakkında da bilgi edinmektedir. Ayrıca bu yıldızlar, erken kozmik tarihi anlamanın yanı sıra, Samanyolu galaksisinin özelliklerini incelemek için de yararlıdır. Bu yıldızlar tipik olarak galaksinin halosunda ve dış bölgelerinde bulunmaktadır. Yıldız kinematikleri ve uzay dağılımları galaksinin dinamikleri ve oluşum tarihi hakkında bilgi vermektedir. Sonuç olarak, metalce fakir yıldızlar, Samanyolu galaksisinin ve diğer sistemlerin özelliklerinin yanı sıra, erken evrenin kimyasal bileşimi ve evrimini incelemek için araştırmacılara benzersiz bir ortam sağlamaktadır.

2.2. GALAKTİK YILDIZ POPÜLASYONLARI

Galaksi, kütle çekimiyle birbirlerine bağlı olan milyarlarca yıldız, yıldızlararası gaz ve toz, yıldız kalıntılarıyla karanlık maddeden oluşan bir sistemdir. Galaksiler, küçük düzensiz sistemlerden büyük, karmaşık spirallere veya eliptiklere kadar çok çeşitli şekillerde ve boyutlarda bulunmaktadır. Güneş sistemi, Laniakea süper galaksisinin bir parçası olan Virgo galaksi kümesinde bulunan Yerel Galaksi Grubu'nun bir parçası olan Samanyolu galaksisinde yer almaktadır. Güneş sisteminin içinde bulunduğu Samanyolu galaksisi, tahminen 400 milyar yıldıza sahip bir çubuklu sarmal galaksidir. Samanyolu galaksisini incelemek için kullanılan yöntemler arasında astrometri (konumlar, öz hareketler ve trigonometrik paralakslar), fotometri (yıldız sınıflandırması ve uzaklıklar) ve tayfsal (radyal hız, model atmosfer parametreleri ve kimyasal bolluklar) yöntemler bulunmaktadır.

Yıldızların kimyasal bileşimleri ve hareketleri gibi özelliklerini incelemek, kökenleri ve evrimleri hakkında değerli bilgiler sağlamaktadır. Yüksek ve düşük hızlı yıldızların tayfsal

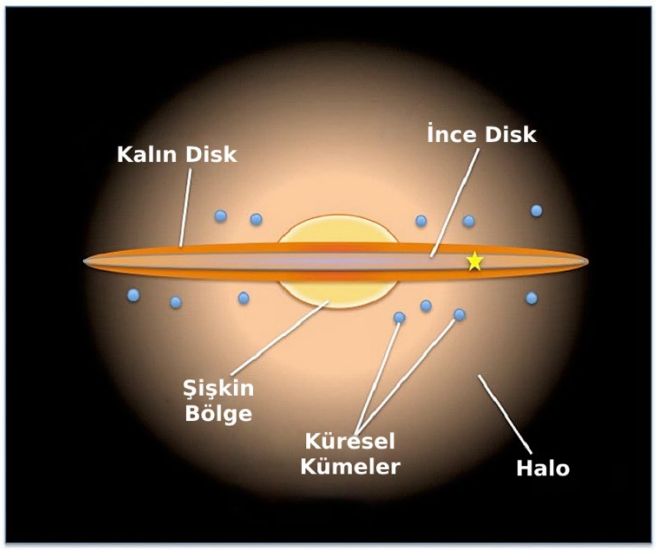
analizleri sonucunda hız-metal bolluğu arasında bir ilişki olduğu görülmüştür (Roman, 1956). Metalce fakir yıldızlar yüksek uzay hızları sergilerken, metalce zengin yıldızlar düşük uzay hızlarına sahiptir. Bu uzay hızlarındaki fark, bazı oluşum mekanizmalarıyla açıklanmaktadır. Metalce fakir yıldızların, kütleçekim etkileşimleri nedeniyle onlara yüksek hızlar kazandırmış olabilecek daha küçük sistemlerin birleşmesinden oluştuğu düşünülmektedir (Bland-Hawthorn ve Gerhard, 2016). Öte yandan, metalce zengin yıldızların ise kendilerine yüksek uzay hızları sağlayamayacak ağır elementlerle zenginleştirilmiş gazdan oluştuğu düşünülmektedir (Haywood, 2008).

Galaktik yıldız popülasyonları, Samanyolu galaksisinde var olan farklı yıldız gruplarını ifade etmektedir. Bu popülasyonlar, yaş, metal bolluğu, uzay dağılımları ve kinematik özellikleri bakımından çeşitli fiziksel ve kimyasal özelliklere göre ayırt edilmektedir (Tablo 2.1). Bu popülasyonların özelliklerini ve dağılımlarını incelemek, Samanyolu'nun oluşumu ve evriminin yanı sıra daha geniş Galaktik astronomi alanı hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Samanyolu'nda genellikle şişkin bölge, disk ve halo popülasyonları olmak üzere üç ana yıldız popülasyonu olduğu bilinmektedir (Şekil 2.2). Bu popülasyonların her birinin kendine özgü özellikleri ve kökenleri vardır ve bunları anlamak, Samanyolu'nun ve evrendeki yerinin kapsamlı bir resmini geliştirmek için çok önemlidir.

Tablo 2.1: Samanyolu'ndaki yıldız popülasyonları ve temel özellikleri.

Popülasyon Türü	**Galaktik Bileşen**	**Nesne Tipleri**	V_{rot} **(km/sn)**	$\sigma_U, \sigma_V, \sigma_W$ **(km/sn)**	**Yaş (Gyıl)**	**[Fe/H] (dex)**	**Yörünge Biçimi**
Pop II	Halo	Alt Devler, Küresel Kümeler, BHB Yıldızları	30	130:100:85	13.5 – 13.8	[-2.5, -1.5]	Basık
Ara Pop II	Kalın Disk	Küresel Kümeler, RR Lyrae ve RHB Yıldızları	170	60:45:40	10 – 12	[-0.6, -0.1]	Basık
Pop II	Şişkin Bölge	Gezegenimsi Bulutlar, RR Lyrae Yıldızları	60	120:120:120	10 – 13	[-1.0, -0.5]	Orta Basık
Pop I	Yaşlı İnce Disk	Yıldızlar	200	38:25:20	1 – 3	[-0.1, +0.2]	Hafif Basık
Pop I	Genç İnce Disk	Genç Yıldızlar, Spiral Yapı, Sefeid Yıldızları	220	20:10:08	8 – 10	[-0.1, +0.2]	Çember

Not: BHB yıldızı: Mavi Yatay kol yıldızı, RHB: Kırmızı yatay kol yıldızı.



Şekil 2.2: Samanyolu'nun şişkin bölge, disk ve halo bileşenleri (NASA / JPL Caltech / R.Hurt).[2]

İnce disk popülasyonu Galaksi merkezine göre çember yörüngede hareket eden genç ve metalce zengin yıldızlardan oluşmaktadır. Bu gruptaki yıldızlar Popülasyon I (Pop I) olarak adlandırılmaktadır. Halo popülasyonundaki nesneler ise Galaksi merkezi etrafında basık yörüngelerde hareket eden yaşlı ve metalce fakir yıldızlar ile temsil edilmektedir. Bu yıldızlara da Popülasyon II (Pop II) adı verilmektedir. Samanyolu'nun şişkin bölgesindeki yıldızların oluşumları ve evrimleri dikkate alındığında metalce fakir ve zengin, yaş bakımından yaşlı ve genç ve yörünge bakımından da çember ve basık biçimlerine sahip olduğu bilinmektedir (Ragaini ve diğ., 2007). Bu nedenle galaksinin şişkin bölgesi Pop I ve Pop II yıldızlarından oluşmaktadır. Ara Pop II ile ifade edilen kalın disk popülasyonundaki nesneler ise Galaksi merkezi etrafında hafif basık yörüngelerde hareket eden, ince disk ve halo yıldızlarının yaş ve metal bolluğu bakımından ara değerlerinde yer alan yıldızlardan meydana gelmektedir. Halo yıldızlarının atmosferlerinde az miktarda ağır element içeriğine sahip olmaları, 2000'li yılların başında bu yıldızların daha farklı bir yıldız popülasyonu tarafından oluşabileceği düşüncesi gündeme gelmiştir (Bromm ve Larson, 2004). Hemen hemen hidrojen ile helyumdan oluşan ve yaklaşık 400 $M_{\odot}$ kütleli yıldızların var olabileceğini öneren kuramlar, bugün halo yıldızlarında görülen ağır element bolluğunu açıklayabilecek durumdadır (Aguado ve diğ., 2016). Bu

[2] https://www.sci.news/astronomy/milky-ways-thick-disk-07881.html

kuramsal yıldızlar Popülasyon III (Pop III) olarak bilinmekte olup ancak evrenin sınırlarında bulunan gama ışın patlamaları neticesinde gözlenebilmektedir. Günümüzde Pop III yıldızlarının varlığı halen astrofizikte aktif bir araştırma konusu olmaya devam etmektedir (Salvadori, Schneider ve Ferrara, 2007; Frebel, 2010; Tumlinson, 2010).

Şişkin bölge popülasyonu, Samanyolu galaksisinin en yoğun merkezi bölgesini temsil etmektedir. Galaktik merkezden dışarı doğru uzanan ve yüksek yoğunluklu yıldızlarla karakterize edilen bir yapıdır. Samanyolu tarihinin erken dönemlerinde meydana gelen hızlı bir yıldız oluşum sürecinde oluştuğu düşünülmektedir. Şişkin bölge popülasyonu, kinematik özellikleri ve kimyasal bileşimi ile disk ve halo popülasyonları gibi diğer Galaktik yıldız popülasyonlarından farklılaşmaktadır. Şişkin bölge popülasyonuna ait yıldızlar, disk yıldızlarından farklı ve halo yıldızlarınınkine daha çok benzeyen bir yörünge hız dağılımı sergilemektedir (Matsunaga ve diğ., 2018). Bu bölge, daha küçük galaksilerin Samanyolu'yla birleşmesi ve şişkin bölgedeki gazın hızlı bir şekilde çökmesi sonucunda oluşmuştur (Bland-Hawthorn ve Gerhard, 2016). Samanyolu galaksisinin önemli bir bileşenini oluşturan şişkin bölge, Galaksi'nin karmaşık yapısının incelenmesine önemli bir katkı vermektedir (Freeman ve Bland-Hawthorn, 2002; Zoccali ve diğ., 2008; Shen, 2010).

Disk popülasyonu, Galaksi merkezi etrafında bir yörüngede dönen nispeten genç yıldızlardan oluşmaktadır. Bu yıldızlar tipik olarak Galaktik düzleme daha yakın bulunmaktadır. Disk popülasyonundaki yıldızlar haloda bulunan yıldızlara göre metalce daha zengindir. Disk popülasyonu ince disk ve kalın disk olmak üzere iki ana bileşene ayrılmaktadır. İnce disk, kalın diske göre daha belirgindir ve disk popülasyonları arasında Güneş'inde bulunduğu yıldızların çoğunu içermektedir. Yaşları veya metal bollukları çok az değişiklik gösteren, nispeten tek tip bir yıldız dağılımıyla karakterize edilmektedir. Kalın disk ise daha az yoğun ve daha dağınık bir popülasyondur. Kalın diskteki yıldızlar daha yaşlı olma eğilimindedir ve ince disktekilere göre metalce daha fakirdir. Ayrıca kalın disk yıldızların uzay hızları, ince diskteki yıldızların uzay hızlarına göre farklılık göstermektedir. Galaktik düzlem doğrultusunda ölçülen hız bileşenleri ince disk yıldızlarına göre büyüktür ve bu nedenle Galaksi diskini daha kalın göstermektedir (bkz. Tablo 2.1). Samanyolu'ndaki gazın ve tozun yoğun bir şekilde bulunduğu ve kütleçekim etkileşmelerin en fazla görüldüğü Galaktik düzlem civarında hala yeni yıldız oluşumları sürmektedir. Bu süreç milyarlarca yıldır devam etmekte olup, günümüzde görülen

çeşitli yaş ve metal bolluklarıyla kendini göstermektedir. Disk popülasyonu ayrıca açık yıldız kümeleri, yıldız oluşum bölgeleri ve çeşitli değişen ve çift yıldız türleri dahil olmak üzere ilgi çekici nesneleri içermektedir. Genel olarak, disk popülasyonu Samanyolu galaksisinin önemli bir bileşenidir ve Galaksi'nin yapısını ve evrimini şekillendirmede önemli bir rol oynamaktadır.

İnce disk, yaşlarına göre iki ana bileşene ayrılmaktadır. Genç ince disk popülasyonu, genellikle birkaç milyar yaşından küçük ve Güneş bolluğuna göre metalce zengin yıldızlardan oluşmaktadır. Bu yıldızlar tipik olarak Galaksi diskinin spiral kollarında bulunur ve diskteki oluşumlarıyla uyumlu yüksek uzay hızlarına sahiptir. Bu popülasyondaki yıldızlar A ve F tayf türündeki yıldızları, AFG ve K devlerini, GKM anakol yıldızlarını ve beyaz cüceleri içermektedir. Yaşlı ince disk yıldızları Güneş, çoğu G, bir kısmı K ve M tayf türündeki cüceler, alt devler, kırmızı devler ve gezegenimsi bulutsulardan oluşmaktadır. Ortalama metal bollukları Güneş'e yakın veya daha düşüktür. Buna karşılık, yaşlı ince disk popülasyonu, tipik olarak sekiz milyar yıldan daha yaşlı ve daha fakir bir metal bolluğuna sahip olan yıldızlardan oluşmaktadır. Bu yıldızlar, halo veya kalın diskteki oluşumlarıyla tutarlı uzay hızlarına sahiptir. Galaksi diskindeki bu iki yıldız popülasyonunun varlığı, Samanyolu'nun yıldız oluşum sürecinin bir sonucu olduğu düşünülmektedir. Genç ince disk popülasyonu, diskte aktif olarak oluşan mevcut yıldız neslini, yaşlı ince disk popülasyonu ise daha önceki yıldız oluşum bölümlerinin kalıntılarını temsil etmektedir. Bu iki popülasyonun incelenmesi, Galaksi diskinin kimyasal evrimi ve dinamiklerini anlamak için önemlidir (Bovy ve diğ., 2018; Bland-Hawthorn, Joss ve Ortwin-Gerhard, 2016).

Halo popülasyonu, Galaksinin şişkin bölgesini ve diskini çevreleyen küresel bir dağılımda bulunan yaşlı ve metalce fakir yıldızlardan oluşmaktadır. Halodaki yıldızların Galaksi tarihinin erken dönemlerinde, muhtemelen büyük patlamadaki ilkel gazdan ve daha küçük uydu galaksiler ile birleşme yoluyla oluştuğu düşünülmektedir. Halo popülasyonu ayrıca Samanyolu tarihinin erken dönemlerinde, disk ve şişkin bölge popülasyonları var olmadan önce, oluştuğu düşünülen küresel kümeleri de içermektedir. Halo popülasyonu, Samanyolu galaksisinin erken tarihini ve oluşumunu anlamak için önemlidir. Samanyolu galaksisinin halo popülasyonu "karanlık halo" ve "yıldız halosu" olmak üzere iki bileşene ayrılmaktadır. Karanlık halo, görünür madde üzerindeki kütleçekim etkisinden çıkarılan görünmez bir yapıdır. Işık ve diğer elektromanyetik radyasyon biçimleriyle çok zayıf etkileşime giren bir madde türü olan karanlık

maddeden oluştuğu düşünülmektedir. Yıldız halosu ise uydu galaksilerden veya parçalanmış yıldız kümelerinden ayrılmış yıldızlardan oluşan görünür bir yapıdır. Yüksek uzay hızlarına sahip metalce fakir yıldızlarından oluşan yıldız halosunun, Samanyolu tarihinin erken dönemlerinde meydana geldiği düşünülmektedir. Fakat yıldızlarının Galaksi merkezi etrafındaki yörüngeleri, Samanyolu'nun diğer galaksiler ile olan kütleçekim etkileşimleri veya gelgit kuvvetleri tarafından bozulmuştur. Karanlık halo, karanlık maddenin dağılımı ve özellikleri hakkında ipucu verirken, yıldız halosu ise Galaksi'nin yıldız oluşum tarihine ışık tutmaktadır.

İç yıldız halosu ve dış yıldız halosu, Galaktik yıldız halosunun iki farklı bileşenidir. İç yıldız halosu, Galaksi merkezinden yaklaşık 20 kpc'lik yarıçapa kadar uzanmaktadır. Daha küçük uydu galaksilerin Samanyolu'yla birleşmesi ve yıldız kümelerinin bozulmasından oluştuğu düşünülmektedir. İç yıldız halosundaki yıldızlar genellikle daha yaşlı, disktekilerden metalce daha fakir ve rastgele eş yönlü hız dağılımlarına sahiptir. Öte yandan dış yıldız halosu, Galaksi merkezinden 100 kpc'lik mesafelere uzanan yıldızların daha küresel bir dağılımıdır. Cüce galaksilerin Samanyolu'yla birleşmesi ve bozulmasının yanı sıra yıldızların kütleçekim etkileşimleri sonucundan diskten fırlatılmasıyla oluşmaktadır. Dış yıldız halosundaki yıldızlar genellikle daha yaşlıdır ve iç halodaki yıldızlardan metalce daha fakirdir. Hem iç hem de dış yıldız haloları, galaksi oluşumu ve karanlık madde kuramlarının sınanmasında önemli roller oynamaktadır (Carollo ve diğ., 2007; Helmi, 2008).

Güneş komşuluğundaki metalce fakir yıldızlar, Samanyolu tarihinin ilk aşamalarında oluştuğuna inanılan halo popülasyonunu temsil etmektedir. Bu yıldızlar, erken evrende oluşan gaz ve tozun kalıntıları oldukları için bir bütün olarak Güneş sisteminin oluşumuna yol açan süreçlerin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olmaktadır (Beers ve Christlieb, 2005). Bu yıldızların yörüngelerinin incelenmesi, Samanyolu'nun erken dönem dinamiklerinin yanı sıra Güneş ve gezegenleri oluştuğunda var olan koşullar hakkında fikir vermektedir. Araştırmacılar, metalce fakir yıldızların kimyasal bileşimlerini analiz ederek, erken evrende var olan koşullar ile Samanyolu ve diğer galaksilerin oluşumuna yol açan süreçler hakkında fikir edinebilirler. Örneğin, bu yıldızlardaki farklı elementlerin göreceli bollukları, yıldızlarda ve süpernovalarda daha ağır elementlerin oluştuğu süreç olan nükleosentez tarihini ortaya çıkarmaya yardımcı olmaktadır. Böylece, yıldız popülasyonlarının gözlemlenen kinematik ve dinamik özellikleriyle

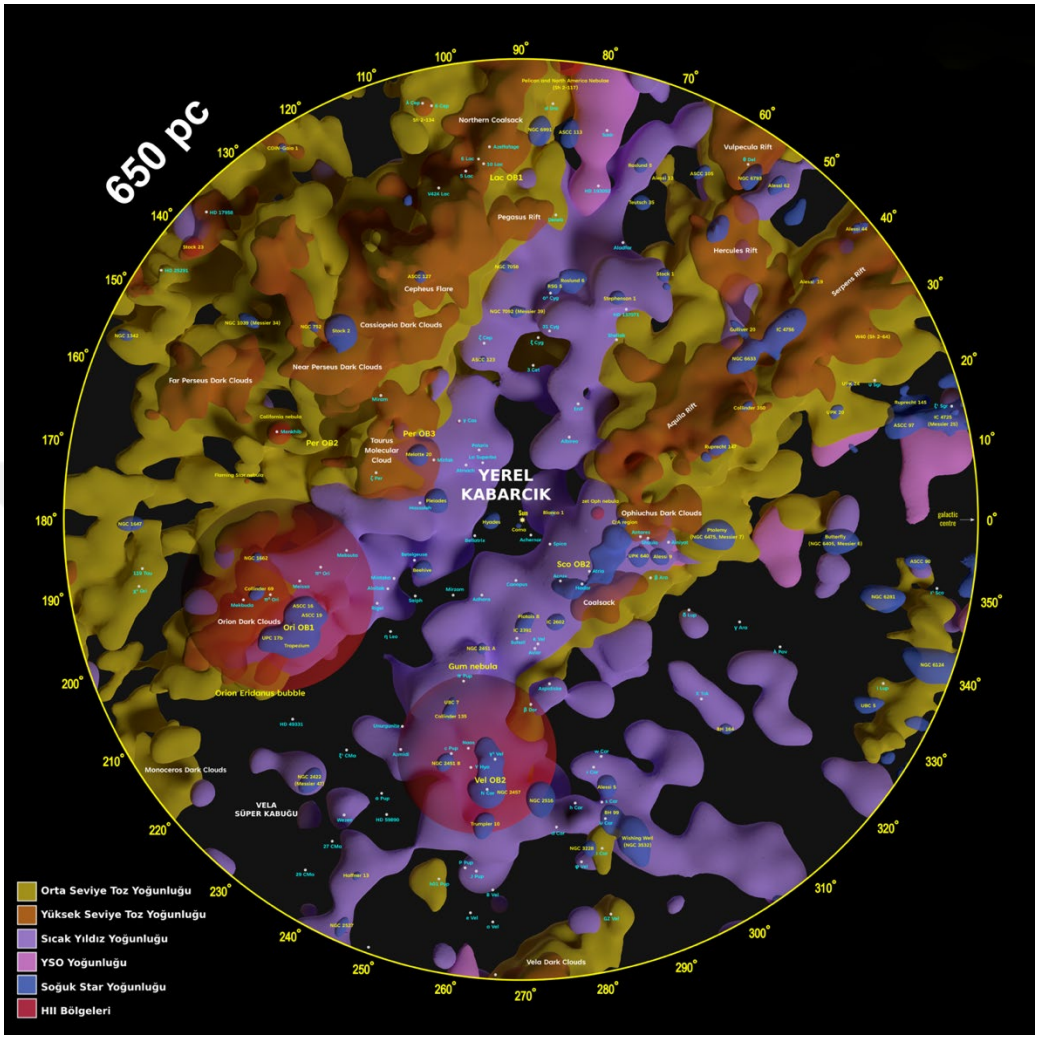
uzay dağılımlarının da birlikte analiz edilmesi, Galaksi'nin evrimleşmesine dair delillerin ortaya çıkartılmasında belirleyici bir faktördür.

2.3. GÜNEŞ CİVARININ KİMYASAL EVRİMİ

Güneş civarının kimyasal evriminin araştırılması, Galaksinin oluşumu ve evrimi hakkında değerli bilgiler sağlamaktadır. Güneş civarı, Güneş'ten birkaç yüz parsek mesafeye uzanan bir uzay bölgesi olarak tanımlanmaktadır. Binlerce yıldızın yanı sıra yıldızlar arasındaki boşluğu dolduran yıldızlararası gaz ve toza ev sahipliği yapar. Bu ortam, yıldızların doğduğu ve aynı zamanda geliştikleri ve sonunda öldükleri yerdir. Yıldızlararası ortamın kimyasal evrimi, yıldız oluşumu, süpernova patlamaları ve Galaksi'deki gaz karışımı da dahil olmak üzere bir dizi süreç ile meydana gelmektedir. Bu süreçler, Galaksi boyunca çeşitli yollarla dağılmış zengin bir kimyasal element çeşitliliğine yol açmaktadır.

Kimyasal evrim, bir sistemin zaman içinde kimyasal bileşiminde meydana gelen değişikliği ifade eder. Evrende kimyasal evrim, kozmik zaman boyunca yıldızların, galaksilerin ve yıldızlararası ortamın kimyasal yapısındaki değişiklikleri ifade etmektedir. Yıldızların kimyasal bileşimlerini ve yıldızlararası ortamdaki metal bolluğunu incelenmesiyle, yıldızlarda meydana gelen nükleer süreçler, süpernovalar ile yıldızlararası ortama dağılan ağır madde dağılımı analiz edilmektedir (Tinsley, 1980; Chiappini, Matteucci ve Romano, 2001; Nomoto, 2017). Güneş civarındaki yıldızlar, atmosferlerinde helyumdan daha ağır element bolluklarına göre sınıflanmaktadır. Metal bolluğu, yıldızlararası ortamın zaman içindeki kimyasal zenginleşmesini yansıttığı için bir yıldızın yaşının önemli bir göstergesidir. Pop II yıldızlarının, yaşlı ve metalce fakir olduğu bilinmektedir. Bu metalce fakir ve yaşlı yıldızların Galaksi'nin evriminin ilk aşamalarında oluştukları düşünülmektedir. Bu yıldızlar tipik olarak Galaktik halo ve küresel kümelerde bulunmaktadır. Buna karşılık, Güneş civarındaki, Pop I yıldızları olarak bilinen daha genç yıldızlar metalce daha zengindir ve önceki nesil yıldızlar tarafından zenginleştirilmiş gazdan oluşmuştur. Bu yıldızlar tipik olarak Galaksi diskinde ve açık kümelerde bulunmaktadır.

Güneş komşuluğundaki yıldızlar (Şekil 2.3), çeşitli tayf türlerinde bulunmaktadır. Bu tayfsal türler, 20. yüzyılın ortalarında geliştirilen ve günümüzde hala yaygın olarak kullanılan Morgan-Keenan (MK) sistemine göre sınıflandırılmaktadır (Morgan ve Keenan, 1943).



Şekil 2.3: Güneş merkezli 650 parsek yarıçap mesafedeki Güneş civarı (Galaxy Map)[3].

MK sınıflandırma sistemi, yıldızları azalan sıcaklık sırasına göre O, B, A, F, G, K ve M harfleriyle ifade edilen yedi tayf türünden oluşmaktadır. O tipi yıldızlar en sıcak ve büyük kütleliyken, M tipi yıldızlar en soğuk ve en küçük kütleli olanlardır. Her bir tayf türündeki yıldızlar, büyüklüklerini ve evrim aşamalarını yansıtan parlaklıklarına göre alt sınıflara ayrılmaktadır. O ve B yıldızları Güneş çevresinde nispeten nadirdir ve tayflarında güçlü hidrojen Balmer soğurma çizgileri ve iyonize helyum çizgileriyle sınıflanmaktadır. Sirius ve Vega gibi A tipi yıldızlar, güçlü hidrojen ve zayıf iyonize helyum çizgilerine sahiptir. Procyon ve Alpha Centauri A gibi F tipi yıldızların tayflarında, daha zayıf hidrojen çizgileriyle iyonize kalsiyum ve demir gibi belirgin metal çizgileri bulunmaktadır. Güneş gibi G tayf türündeki

[3] http://gruze.org/galaxymap/quartet/wallpapers/wallpaper_0650pc.png

yıldızların tayflarında, Güneş çevresinde en yaygın olanlardır, nispeten zayıf bir hidrojen çizgisiyle nötr ve iyonize kalsiyum ile demir de dahil olmak üzere belirgin çizgiler görülmektedir.

Alpha Centauri B gibi K tayf türündeki yıldızlar, titanyum oksit gibi molekül çizgileri de dahil olmak üzere daha da zayıf hidrojen çizgilerine ve diğer güçlü moleküler bantlara sahiptir (Gray ve Corbally, 2009).

Yıldızlararası ortam, Güneş civarındaki bölgenin kimyasal evriminde kilit bir rol oynamaktadır. Bu ortam, birbirleriyle ve yıldızlardan gelen radyasyon ile etkileşerek çeşitli kimyasal elementler oluşturan gaz ve toz taneciklerinden oluşmaktadır. Yıldızlararası ortam, evrimleşmiş yıldızların rüzgarları ve süpernova patlamaları da dahil olmak üzere, yıldız evriminin ürünleriyle sürekli olarak zenginleşmektedir (Jenkins, 2009; van Dishoeck ve Black, 1988). Bu olaylar, yıldızlararası ortamdaki gazı sıkıştırıp ısıtarak yeni moleküllerin ve elementlerin oluşumuna yol açan kimyasal reaksiyonları tetikler ve yıldızlararası ortamı süpüren şok dalgaları yaratır (Ciolek ve Mouschovias, 1995; Gusdorf ve diğ., 2019). Gaz ve toz bulutları kendi kütleçekimleri altında çökerek yeni yıldızlar oluştururken, moleküler bulutların ve öncül yıldız disklerin oluşumuna yol açan bir dizi karmaşık kimyasal reaksiyona girmektedir. Bu diskler, Güneş sistemi gibi gezegenli yıldız sistemlerinin doğum yerleridir ve su, organik moleküller ve mineraller de dahil olmak üzere yaşamın yapı taşlarını içermektedir (Ehrenfreund ve Charnley, 2000).

Yıldızlararası ortamın kimyasal bileşimi, kimyasal reaksiyonlar için katalizör görevi gören ve molekülleri radyasyon ile yok edilmekten koruyabilen toz taneciklerinin varlığından da etkilenir. Toz taneleri, yaşamın öncülleri olduğu düşünülen karmaşık organik moleküllerin oluşumunda da rol oynamaktadır. Ayrıca toz tanecikleri, yıldızların elektromanyetik tayfın morötesi ve optik gözlemlerini de zorlaştırmaktadır. Yıldızlararası ortamın Güneş çevresindeki gözlemleri, bölgeyi milyarlarca yıldır şekillendiren fiziksel ve kimyasal süreçlerin karmaşık etkileşimini yansıtan çok çeşitli kimyasal bollukları ve izotop oranları ortaya çıkarmıştır (Savage, 2019; Frisch, 2011). Bu gözlemler, yıldızların ve gezegenlerin oluşumu ve evrimiyle evrendeki yaşamın kökenleri hakkında önemli bilgiler sağlamıştır. Güneş civarının kimyasal evrimi, çeşitli fiziksel ve kimyasal süreçler ile şekillenen karmaşık yapıdır. Bu evrim sürecinin

ortaya konması, yıldızların ve galaksilerin oluşumuyla evrimini anlamanın yanı sıra evrendeki yaşamın kökenlerine dair fikir edinmek için önemlidir.

2.4. METALCE FAKİR YILDIZLAR VE KÖKENLERİ

Bir yıldızın metal bolluğundan bahsedilirken "fakir" veya "zengin" terimleri kullanılmaktadır. Yıldızın fakirliği veya zenginliği Güneş'e göre karşılaştırılma yapılarak belirlenmektedir. Bir elementin diğer elemente göre bolluğu verilirken genellikle $[A/B] \equiv \log_{10}(N_A/N_B)_* - \log_{10}(N_A/N_B)_\odot$ bağıntısı kullanılmaktadır. Burada N_A ve N_B, sırasıyla A ve B elementlerinin atomlarının sayısını ifade etmektedir. Galaksilerin ve yıldızların metal bolluğu genellikle demir elementiyle analiz edilir. Güneş'teki demir (Fe) atomlarının geçişlerinden kaynaklanan soğurma çizgilerinin sayısı nedeniyle, demir elementi geleneksel olarak bir yıldızın diğer bir yıldıza göre metal bolluğu karşılaştırması için kullanılan referans element olarak belirlenmiştir.

Element bolluğu, A'nın herhangi bir elementi temsil ettiği varsayımı altında, $\log \varepsilon(A) \equiv \log_{10}(N_A/N_H) + 12.0$ ile tanımlanan bağıntıda hidrojen atomlarının sayısına göre mutlak ölçek ile adlandırılabilir. Bir elementin logaritmik oranı, Güneş'teki oranına kıyasla negatif veya pozitif olduğunda, sırasıyla, bu element "fakir" veya "zengin" olarak adlandırılır. Yıldızlarda gözlemlenen element bolluğu, yıldızın iç yapısıyla doğrudan ilgili değildir. Yani, tayfta incelenen soğurma çizgileri oluştuğu yıldız atmosferinin bolluğunu yansıtmaktadır.

Yıldızlarda görülen hidrojen atomunun Balmer çizgilerinin yanı sıra özellikle demir elementine ait çizgilerin incelendiği çalışmaların artmasıyla birlikte metalce fakir yıldızlar tayf analizcilerinin ilgisini çekmiştir. Bu çalışmalardan önce, tüm yıldızların Güneş'in metal bolluğuna yakın veya benzer olduğu varsayılmaktaydı. Bu varsayım, Chamberlain ve Aller'in (1951) HD 19445 ve HD 140283 yıldızlarının ilk ayrıntılı tayfsal analizlerini sunduğu çalışmasını yayınlamasıyla son buldu. HD 19445 ve HD 140283 alt dev yıldızlarının metal bollukları, sırasıyla, -0.8 ve -1 dex olduğu keşfedildi. Güneş'in metal bolluğuyla karşılaştırıldığında, metal bolluğu tayin edilen HD 19445 ve HD 140283 yıldızlarının daha fakir olduğu ortaya çıkmıştır. Günümüzde, SMSS 0313-6708 yıldızının metal bolluğunun -7.3 dex olduğu ve Güneş'ten 20 milyon kat daha fakir olduğu ortaya çıkmıştır (Keller ve diğ., 2014; Nordlander ve diğ., 2017). Literatürde metal bolluğu tespit edilmiş metalce fakir yıldızların sayısı oldukça azdır. Metalce fakir yıldızların fakirleşme seviyesi arttıkça tespit edilen yıldız

sayısının da azaldığı görülmektedir. Metal bolluğu belirlenen yıldızlar arasında metal bolluğu -3.5 dex'ten daha fakirlerin sayısı yaklaşık 100 iken -4.5 dex'ten daha fakir olan yıldızların sayısı ise 14'tür (Frebel ve Norris, 2015). Ayrıca, zayıf çizgili yıldızlar ile yüksek uzay hızları arasındaki ilişkisi üzerine yayınlanan eski çalışmalarda da metalce fakir yıldızların varlığını ön plana çıkmıştır (Schwarzschild ve Schwarzschild, 1950; Roman, 1950).

Özellikle Roman'ın bu yönde yaptığı çalışmalara, Eggen, Lynden-Bell ve Sandage'in (ELS; 1962) Samanyolu'nun oluşumu ve evrimiyle ilgili çalışmalarına büyük ölçüde öncülük etmiştir. Yıldızların metal bolluğuyla Galaksi'deki yörüngelerinin dış merkezlikleri arasında güçlü bir ilişkinin olduğunu gösteren ELS senaryosu, uzun yıllar sürecek araştırmalara ilham kaynağı olmuştur. Disk benzeri yani küçük dış merkezli (e) yörüngelere sahip yıldızlar ile halo benzeri büyük dış merkezli ($e > 0.5$) yörüngeli yıldızlar arasında metal bolluğu açısından açık bir ayrım görülmesine rağmen, bu ilişki kinematik olarak tarafsız bir şekilde seçilen metalce fakir yıldızlar arasında büyük ölçüde sağlanamamaktadır (Yoshii ve Saio, 1979; Beers ve diğ., 2000; Chiba ve Beers, 2000).

1950'li yılların başında metalce fakir yıldızların keşfedilmesinden sonra, bu tür yıldızları aramak için birçok araştırma başlatılmıştır (Beers ve diğ., 1985; Beers ve Christlieb, 2005; Christlieb ve diğ., 2008). Yapılan araştırmalarda 20,271 metalce fakir yıldız adayı bulunmuştur. Sloan Dijital Gökyüzünü Tarama Programının (SDSS) bir alt çalışma alanı olan SEGUE 1 ve SEGUE 2 (Hogg, Blanton ve Eisenstein, 2008), kuzey yarımkürede fotometrik ve tayfsal araştırmalar yapmaktadır. Radyal Hız Deneyi (RAVE) gökyüzü taraması (Steinmetz ve diğ., 2006), milyonlarca yıldız için radyal hızları ve model yıldız atmosfer parametrelerini ölçmeyi amaçlamıştır. Bu araştırmanın temelinde metalce fakir yıldızları bulmaya odaklı olmamasına rağmen birkaç aday bulunmuştur. Ayrıca güney yarımkürede yapılan Skymapper araştırması ve Büyük Gökyüzü Alanı Çok Nesneli Fiber Tayfsal Teleskobu (LAMOST; The Large Sky Area Multi-Object Fibre Spectroscopic Telescope) sayısız metalce fakir yıldız adayı keşfetmiştir (Jacobson ve diğ., 2015; Li ve diğ., 2015).

Samanyolu'nda farklı metal bolluklarına sahip yıldızların olduğu tespit edildiğinde, fakir yıldızların metal bolluğu azlığını tanımlamak için kullanılan terminolojiyi detaylandırma ihtiyacı doğmuştur. Metalce fakir yıldızların metal bolluğunun, Tablo 2.2'de listelendiği gibi, -

$5.4 \leq [Fe/H] \leq +0.5$ dex aralığının değiştiği bilinmektedir (François ve diğ., 2007). Metalce mega fakir (MMP) kategorisine giren çok fazla yıldız bilinmemektedir fakat literatürde bir yıldızın [Fe/H] = -5.4 dex olduğu tespit edilmiştir (Frebel ve diğ., 2005). Tablo 2.2'de verilen ölçeğin üst satırında yani metal bolluğu 0.5 dex'ten büyük olan yıldızlar, metalce zengin yıldızlar olarak adlandırılmaktadır. Ölçeğin alt satırında bulunan -5 dex'ten daha fakir yıldızlar için literatürde genellikle farklı araştırmacılar tarafından tutarsız bir isimlendirilme ve sınır değerler kullanılmaktadır.

Tablo 2.2: Yıldız türlerine göre metal bolluğu değerleri (Beers ve Christlieb, 2005).

Yıldız Türü	Kısaltma	[Fe/H] (dex)
Metalce süper zengin (Super metal-rich)	SMR	> 0.5
Güneş bolluğu (Solar)	---	~ 0
Metalce fakir (Metal-poor)	MP	< -1
Metalce çok fakir (Very metal-poor)	VMP	< -2
Metalce aşırı fakir (Extremely metal-poor)	EMP	< -3
Metalce ultra fakir (Ultra metal-poor)	UMP	< -4
Metalce hiper fakir (Hyper metal-poor)	HMP	< -5
Metalce mega fakir (Mega metal-poor)	MMP	< -6

Metalce fakir yıldızların çoğunluğu Samanyolu'nun iç ve dış halo bölgelerinde bulunur. İç halo bölgesindeki yıldızların metal bolluğu ortalama [Fe/H] = -1.6 dex olarak belirlenmiştir. Bu bölgede yıldızlar Galaksi'yle birlikte oluştuğu için, Galaksi merkezinden uzaklaşmamıştır. Dış halo bölgesi ise $R_{gc} \sim 15$ kpc'de yer alır ve ortalama metal bolluğu [Fe/H] = -2.2 dex olarak belirlenmiştir. Bu bölgede yıldızlar Galaksi merkezi etrafında dönen daha küçük yıldız sistemleri tarafından oluşmuşlardır (Carollo ve diğ., 2012).

Metalce fakir yıldızların kökenleri, ilk yıldızlardan günümüzde çift yıldızların kendi arasındaki etkileşimleriyle oluşan yıldızlara kadar çeşitlilik göstermektedir. Metalce fakir yıldızların, Güneş civarında bulunma olasılığı düşüktür çünkü bu bölge yıldızlararası ortamı ağır elementlerle zenginleştiren birkaç nesil yıldızın evriminin etkisi altında kalmıştır. Bu bölgede oluşan yeni nesil yıldızlar, beklendiği gibi metalce daha zengindir. Bununla birlikte, metalce fakir yıldızlar, Güneş civarında, özellikle halo ve ayrıca önemli metal zenginleşmesi yaşamamış

bazı küresel kümelerde ve cüce galaksilerde bulunabilmektedir. Bu yıldızlardan bazıları, evrenin ilk zamanlarında, yani büyük patlamadan sonraki ilk birkaç yüz milyon yıl boyunca, evrenin hala çoğunlukla hidrojen ve helyumdan oluştuğu bir zamanda oluşmuştur. Ağır elementler henüz ilk yıldızlarda nükleer füzyon yoluyla üretilmediğinden dolayı bu yıldızlar metalce fakirdir.

Metalce fakir yıldızların oluşumuna yönelik alternatif bir senaryo da çift yıldızlar arasındaki etkileşimlerdir. Bazı durumlarda, baş yıldız, yoldaş yıldızının dış katmanlarını soyup geride helyum açısından zengin, metal açısından fakir bir çekirdek bırakabilmektedir. Bu çekirdek daha sonra metalce fakir içerikli yeni bir yıldız oluşturmaya devam etmektedir. Genel olarak, metal bolluğu açısından fakir yıldızların kökenlerini ve özelliklerini incelemek erken evrenin evrimi, galaksilerin oluşumu ve ağır elementler üreten nükleosentez süreçler hakkında önemli bilgiler sunmaktadır.

Metal bolluğu, yıldızların özelliklerini ve evrimini incelerken kritik bir parametredir. Bir yıldızın atmosferindeki helyumdan daha ağır elementlerin bolluğunu ifade etmektedir. Metalce fakir yıldızlar, evrendeki en eski yıldızlar oldukları düşünüldüğünden ve kozmik evrimin ilk aşamalarına dair değerli bilgiler sağlayabildiklerinden araştırmacılar için özellikle ilgi çekicidir.

Yıldızlarda metal bolluğunun belirlenmesi, tayflarının dikkatli bir şekilde analiz edilmesini gerektiren karmaşık bir süreçtir. En sık kullanılan yöntem, metal bolluğuna duyarlı belirli tayfsal çizgilerin gücünün ölçülmesini içeren eşdeğer genişlik yöntemidir. Diğer bir yöntem, bir yıldızın gözlenen tayfının, metal bolluğu bilinen bir model tayfıyla karşılaştırılmasını içeren tayfsal sentez tekniğidir. Bununla birlikte, özellikle metalce fakir yıldızlar söz konusu olduğunda, bu yöntemlerin her ikisinin de sınırlamaları ve belirsizlikleri vardır. Örneğin eşdeğer genişlik yöntemi, sıcaklık, yüzey çekim ivmesi ve mikrotürbülans hızı gibi bir dizi faktörden etkilenebilen zayıf çizgilerin doğru ve hassas ölçümüne dayanmaktadır. Öte yandan tayfsal analiz tekniği, yıldız parametrelerinin seçimi ve atomik verilerin işlenmesi gibi bir dizi belirsizlikten etkilenebilen model tayflarının doğruluğuna dayanmaktadır. Bu sınırlamaların üstesinden gelmek için gökbilimciler sürekli olarak yeni teknikler geliştirmekte ve mevcut olanları iyileştirmektedir. Örneğin, son araştırmalarda, metal bolluğu ölçümlerinin kesinliğini

artırmak için yüksek çözünürlüklü tayfsal analizler yapılmaktadır. Diğer çalışmalar, daha doğru yıldız atmosfer modelleri geliştirmeye ve model tayflarında atomik verilerin işlenmesini iyileştirmeye odaklanmıştır. Bu gözlemsel ve teorik zorluklara ek olarak, metal bolluğu verilerinin yorumlanmasında da zorluklar vardır. Örneğin bolluklar, yıldızlardaki kimyasal karışım, kütle kaybı ve nükleosentez süreçleri gibi bir dizi faktörden etkilenebilmektedir. Bu nedenle, yıldızların özelliklerinin ve evriminin daha eksiksiz bir resmini elde etmek için bolluk verilerini yaş, kütle ve kinematik gibi diğer gözlemsel ve teorik verilerle birleştirmek önemlidir.

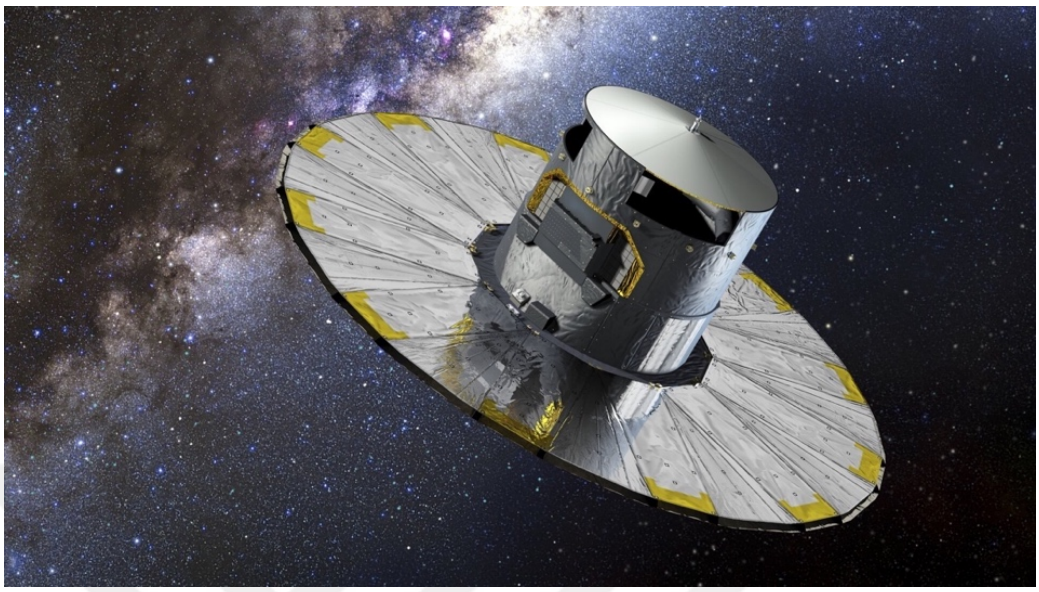
Element bolluğunun belirlenmesini gerçekleştirmek için ilgili yıldızın yüksek çözünürlüklü tayf gözlemleri gerekmektedir. Kaydedilen ham tayflara bir dizi veri azaltma ve analiz adımları uygulanmaktadır. Bu adımlar arasında, sıfır (bias) ve düz (flat) alan düzeltmelerinin yanı sıra dalgaboyu kalibrasyonunun gerçekleştirilmesi yer almaktadır. Yıldız tayfındaki soğurma çizgilerine dayalı olarak çeşitli elementlerin göreceli miktarlarını belirlemek için yıldız atmosfer modeli ve çizgi kataloğu gerekmektedir. Ayrıntılı yıldız model atmosferi, etkin sıcaklığı ($T_{\rm eff}$), yüzey çekim ivmesi ($\log g$), metal bolluğu ([Fe/H]) ve mikrotürbülans hızı (ξ) dahil olmak üzere yıldızın fiziksel özelliklerine ilişkin bilgiler içermektedir. Bolluk analizini gerçekleştirmek için yıldız model atmosferinin yanı sıra, tayfsal çizgilerin bulunduğu bir kataloğa ihtiyaç vardır. Bu katalogun tayfta gözlemlenen soğurma çizgilerine yol açan atomik ve moleküler geçişler hakkında ayrıntılı bilgi içermesi gerekmektedir. Bolluk tespitleriyle ilgili belirsizliklerin değerlendirilmesi de önemlidir. Sinyal/gürültü (S/N) oranı, tayfsal çözünürlük ve yıldız modeli parametrelerindeki hatalar gibi faktörlerin tümü, türetilen bolluklardaki genel belirsizliğe sebep olmaktadır.

Özetle, bir yıldız tayfındaki soğurma çizgilerinden element bolluğunu belirleme süreci, hassas veri analizi tekniklerinin derinlemesine anlaşılmasını gerektiren çok yönlü ve karmaşık bir çabadır. Yıldızların ve onların evreni şekillendirmedeki rollerinin incelenmesinde temel bir araçtır. Yıldızlarda bollukların belirlenmesi astronomide kritik ve devam eden bir araştırma alanıdır. İlgili zorluklara ve belirsizliklere rağmen, gözlem teknikleri ve teorik modellemedeki ilerlemeler, gökbilimcilerin, kozmik evrimin ilk aşamalarına dair değerli bilgiler sağlayabilen, metalce fakir yıldızlar da dahil olmak üzere, bir dizi yıldızda giderek daha kesin bolluk ölçümleri yapmalarına olanak sağlamaktadır.

2.5. *GAIA* UYDUSUNUN GÖREVİ

Gaia uydusu, Samanyolu galaksisinin üç boyutlu haritasını oluşturmak amacıyla Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından 2013 yılında başlatılan bir gözlem programıdır ve Şekil 2.4'te temsilen bir görüntüsü verilmiştir. (Perryman, Brown ve van Leeuwen, 2012). İkinci Lagrangian noktasında konumlanan *Gaia* uydusu, görünür parlaklıkları 3 ile 21 kadir arasında değişen galaksi ve galaksi dışı kaynakların fotometrik, astrometrik ve tayfsal gözlemlerini gerçekleştirmektedir. Galaksideki bir milyardan fazla yıldızın yanı sıra diğer gök cisimlerinin konumlarını, uzaklıklarını ve hareketlerini ölçmeyi hedeflemiştir. *Gaia* tarafından toplanan fotometrik veriler, Samanyolu galaksisinin yapısını, bileşimini ve evrimini anlamak için önemlidir. Fotometrik sistemler, yıldızlar, galaksiler ve kuazarlar dahil olmak üzere gök cisimlerinin parlaklığını ölçmeye, ışık tayflarını incelemeye ve fiziksel özelliklerini tahmin etmeye olanak tanımaktadır. *Gaia* uydusu, Samanyolu galaksisindeki 1.8 milyardan fazla yıldız için doğru ve hassas çok bantlı fotometri verisi sağlayarak fotometrik ölçümlerde devrim yaratmıştır (Gaia işbirliği, 2023). *Gaia* uydusunun fotometrik verileri, mavi, yeşil ve kırmızı olmak üzere üç dalgaboyu aralığında ölçüm gerçekleştirmektedir. Bu ölçümler yıldızların sıcaklıklarını, parlaklıklarını ve renklerini belirlemek için kullanılmaktadır.

Gaia uydusunun sağladığı fotometrik verilerin etkin bir şekilde kullanılması için fotometrik sistemler arasında dönüşümlerin yapılması gerekmektedir. Farklı fotometrik sistemler arasındaki ilişkilerin anlaşılması ve verileri bir sistemden diğerine doğru bir şekilde dönüştürebilen kalibrasyon tekniklerinin geliştirilmesi de önemlidir (Bilir ve diğ., 2008; 2011; 2012, Yaz ve diğ., 2010, Ak ve diğ., 2014). Günümüzde *Gaia* uydu fotometrisini Johnson-Cousins ve Sloan Dijital Gökyüzü Tarama (SDSS; Sloan Digital Sky Survey**;** York ve diğ., 2000) sistemleri gibi diğer fotometrik sistemlere kalibre etmek için literatürde çeşitli çalışmalar yer almaktadır (Jordi, Grebel ve Ammon., 2006; Ritter ve Huang, 2020; Carrasco ve diğ., 2023). Bu çalışmalar, *Gaia*'nın fotometrik ölçümlerini yer tabanlı teleskoplardan elde edilenler ile karşılaştırmayı ve verileri doğru bir şekilde dönüştürebilen matematiksel modeller geliştirmeyi içermektedir.

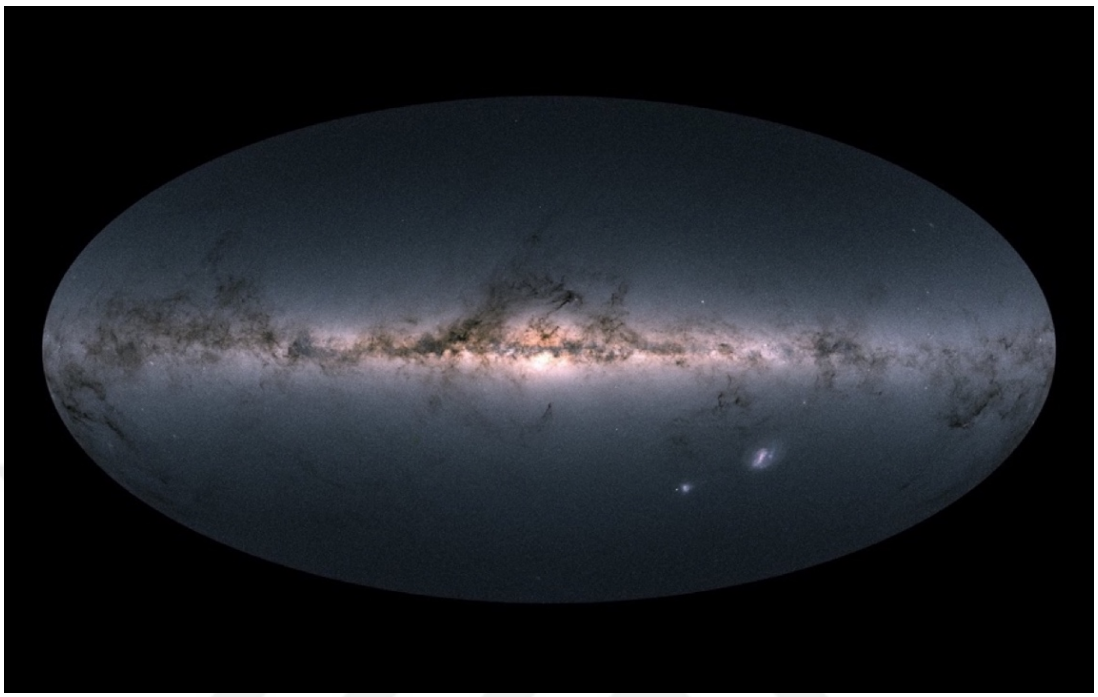


Şekil 2.4: *Gaia* Uzay Teleskobu temsili görüntüsü (ESA, 2019)[4].

Gaia uydusunun ilk veri sürümü (Gaia DR 1, Gaia işbirliği, 2016), araştırmacılara Samanyolu galaksisindeki bir milyardan fazla yıldızın konumları, renkleri ve hareketleri hakkında zengin bilgiler sağlayan çok önemli veri setlerinden biridir. ESA'nın bilim ekibindeki araştırmacılar, *Gaia* uydusunun göreve başladığından bu yana toplanan veriler bilim camiasına periyodik olarak farklı veri sürümleri olarak yayımlamaktadır. Bugüne kadar, biri erken sürüm olmak üzere (Gaia EDR3; Gaia işbirliği, 2021) dört farklı zamanda birden fazla veri tabanı literatüre kazandırılmıştır (Gaia DR1, DR2, DR3; Gaia işbirliği, 2016, 2018, 2023).

Gaia veri sürümleri, astronomların yıldızların ve diğer gök cisimlerinin özelliklerini ve evrimini benzeri görülmemiş ayrıntılar ile incelemelerine olanak tanımaktadır. Veri tabanları, Samanyolu'nun üç boyutlu haritalarını oluşturmak, yapısını ve dinamiklerini incelemek, yıldızların konumlarının ve hareketlerinin hassas ölçümlerini sağlamaktadır (Şekil 2.5). Ayrıca *Gaia* veri sürümleri, yıldız astrofiziği, Galaktik astronomi ve kozmoloji dahil olmak üzere astronominin birçok alanında çığır açan araştırmalara olanak sağlamıştır.

[4] https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2019/10/Gaia_astronomical_revolution



Şekil 2.5: *Gaia* uydusunun gözünden Samanyolu (ESA/Gaia/DPAC, CC BY-SA 3.0 IGO)[5].

Gaia uydusunun son veri sürümü olan DR3'ün yayınlanması (Gaia işbirliği, 2023), astronomide büyük verileri işlemek ve analiz etmek için yeni tekniklerin ve araçların geliştirilmesini sağlamıştır. Araştırmacılar, bu verilerden en iyi şekilde yararlanmak için gelişmiş veri analizi teknikleri ve makine öğrenimi algoritmaları oluşturmuştur (Şekil 2.6).

Ducourant ve diğ. (2023) *Gaia* DR3 verilerini kullanarak galaksilerin yüzey parlaklık profillerini incelemiştir. Ayrıca Tanga ve diğ. (2023) yakın kozmik çevre hakkında, Güneş sistemi, astrofiziksel olayların daha geniş bağlamını dikkate alarak değerli bilgiler sunmuştur. Katz ve diğ. (2023) ve Fremat ve diğ. (2023) radyal hız ölçümleri ve çizgi genişleme parametreleri hakkında literatüre katkıda bulunmuştur. Eyer ve diğ. (2023) çalışmasında değişen yıldızların sınıflandırılması ve analizine bir genel bakış sunarak, yıldızların sergilediği çeşitli davranışlara dair değerli bilgiler ortaya çıkarmıştır. Gomel ve diğ. (2023) çalışmasında kara delikler veya nötron yıldızlarıyla ilişkili elipsoidal değişkenlerin ilgi çekici sonuçlarını sunmuştur.

[5]https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/12/The_colour_of_the_sky_from_Gaia_s_Early_Data_Release_3



Şekil 2.6: Sayılar ile Gaia veri sürümü 3 (ESA/Gaia/DPAC)[6].

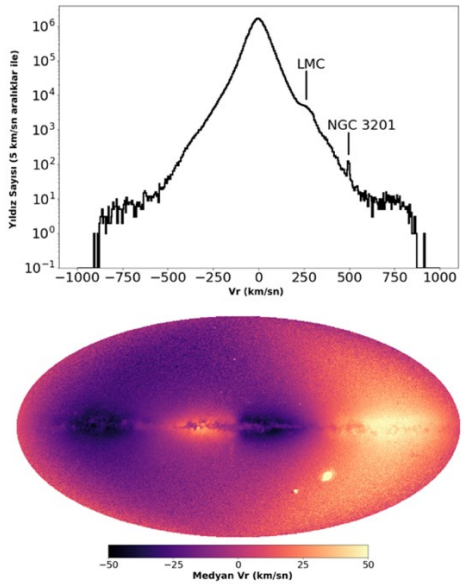
Ek olarak, Distefano ve diğ. (2023) çalışmalarında Güneş benzeri yıldızların üzerine analizler gerçekleştirmiştir. Marton ve diğ. (2023) genç yıldız adaylarına yönelik sınıflandırmaların doğrulanmasına katkıda bulunmuştur. Clementini ve diğ. (2023) RR Lyrae ve sefeid yıldızlarının özelliklerine ilişkin detaylı analizler gerçekleştirmiştir. Ayrıca Carnerero ve diğ. (2023) ile Fouesneau ve diğ. (2023) sadece değişen yıldızları değil aynı zamanda değişken aktif galaksi çekirdekleri ve yıldız parametrelerini de inceleyerek *Gaia* DR3 veri sürümünden elde edilen sonuçları çeşitlendirmiştir.

Ayrıca *Gaia* uydusu verileriyle Samanyolu galaksisinin farklı bölgelerindeki yıldızların özelliklerini inceleyerek, örneğin metalce fakir yıldızların konumlarının, uzaklıklarının ve hareketlerinin hassas ölçümleri sağlanarak kimyasal bileşimleri ve yaşları da dahil olmak üzere benzeri görülmemiş ayrıntılar ile özellikleri araştırılmaktadır. Metalce fakir yıldızlar Samanyolu ve diğer galaksilerin yapıları arasındaki ilişkileri araştırmak için de kullanılabilir (Pereira, Drake ve Roig, 2019; Şahin ve Bilir, 2020).

Gaia DR3, üç geniş banttan elde edilen fotometrik verileri sunar: G (3,300-10,500 Å; yeşil), G_{BP} (3,300-6,800 Å; mavi) ve G_{RP} (6,300-10,500 Å; kırmızı). Bu veri sürümünde aynı zamanda yaklaşık 1.8 milyar kaynak için astrometrik ve fotometrik ölçümlere ait belirsizlikler G görünen parlaklığının bir fonksiyonu olarak Tablo 2.3'te verilmiştir. *Gaia* DR3 veri tabanında

[6] https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Gaia/Gaia_data_release_3_media_kit

33,812,183 yıldızın ortalama radyal hız verileriyle etkin sıcaklığı 3,100 ila 14,500 K aralığında olan yaklaşık 32 milyon yıldızın da ortalama radyal hız verileri yer almaktadır. *Gaia* DR3 veri tabanında incelenen yaklaşık 33 milyon yıldızın radyal hız histogramı ve Galaksideki konumları Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Bu veri tabanında G = 12 kadirden daha parlak olan yıldızların radyal hız hataları 1.3 km/sn iken, G = 14 kadirde belirsizlikler 6.4 km/sn kadar artmaktadır (Katz ve diğ., 2023).



Şekil 2.7: *Gaia* DR3 kataloğunda radyal hız ölçümü yapılan 33,812,183 yıldızın radyal hız histogramı (üst panel) ve bu nesnelerin Galaktik koordinat sistemi üzerindeki konumları (alt panel). Şeklin orta alt kısmında parlak sarı renk ile görülen bölgeler LMC ve SMC galaksilerine aittir. Galaksi merkezi doğrultusunda sönük dik yönde görülen yapı Sagittarius cüce galaksisine aittir (Katz ve diğ., 2023).

Tablo 2.3: *Gaia* DR3 veri tabanındaki nesnelerin astrometrik ve fotometrik ölçülmelerine ait belirsizliklerini G görünen parlaklığına göre değişimi.

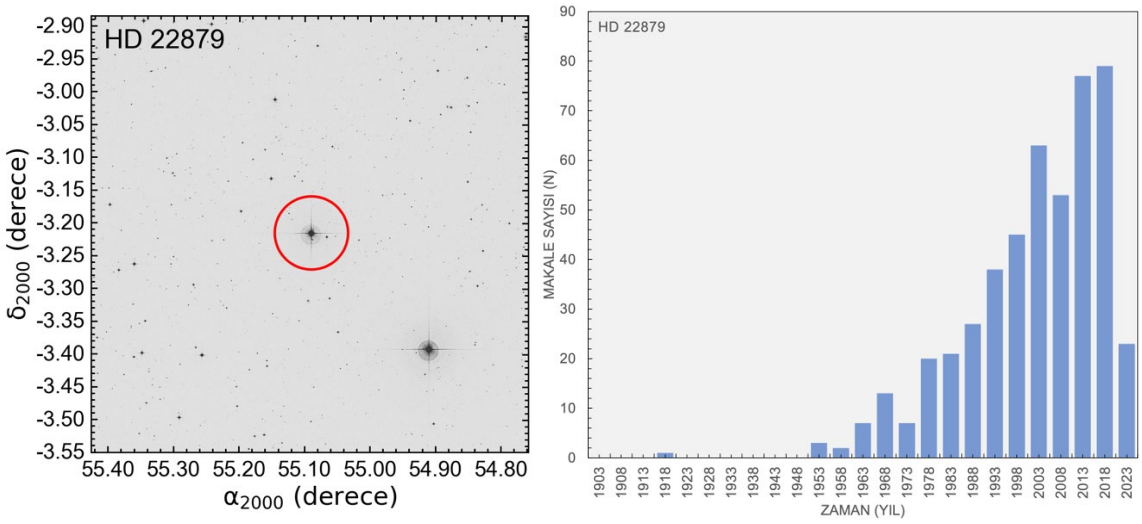
Veri	***G* < 15 (kadir)**	***G* = 17 (kadir)**	***G* = 20 (kadir)**	***G* = 21 (kadir)**
Konum (mas)	0.01 – 0.02	0.05	0.40	1.00
Trigonometrik paralaks (mas)	0.02 – 0.03	0.07	0.50	1.30
Öz hareket (mas/yıl)	0.02 – 0.03	0.07	0.50	1.40
	$G < 13$	$G = 17$	$G = 20$	
G (mili kadir)	0.3	1	6	
G_{BP} (mili kadir)	0.9	12	108	
G_{RP} (mili kadir)	0.6	6	52	

2.6. TEZ ÇALIŞMASINDAKİ YILDIZLARIN LİTERATÜR ÖZETİ

Tayf analizi, yıldızların özelliklerini, bileşimlerini ve evrimsel süreçlerini ortaya çıkarmak için temel bir araç olarak hizmet etmektedir. Bulguların karmaşık ayrıntılarına girmeden önce kapsamlı literatür araştırmaları yoluyla elde edilen verilerin incelenmesi önemlidir. Bu veriler araştırmanın temelini oluşturmaktadır. Bu tez çalışmasında incelenen dört yıldızın HD 22879, HD 144589, HD 188510 ve HD 201891'in, çalışmaları literatürde taranmıştır. Bu yıldızların fiziksel ve kimyasal özelliklerine dair bilgiler sağlayan önceki araştırmalardan elde edilen veriler ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

2.6.1 HD 22879

Kimyasal özel bir yıldız olarak bilinen HD 22879'un (V = $6^{m}.66$, B-V = $0^{m}.55$) tayf türü G0VmF2 olarak verilmektedir (Gray, Napier ve Winkler, 2001). Ekvatoral koordinatlarıyla (α, δ) = (03^{h} 40^{m} $22^{s}.07$, -03° 13′ 01″.13), Galaktik koordinatları (l, b) = 189°.7666, -43°.1192) olan HD 22879 yıldızı Samanyolu'nun III. çeyreğinde, Galaksi merkezinin zıt doğrultusunda ve orta güney Galaktik gökyüzü bölgesinde bulunmaktadır (Şekil 2.8, sol panel).

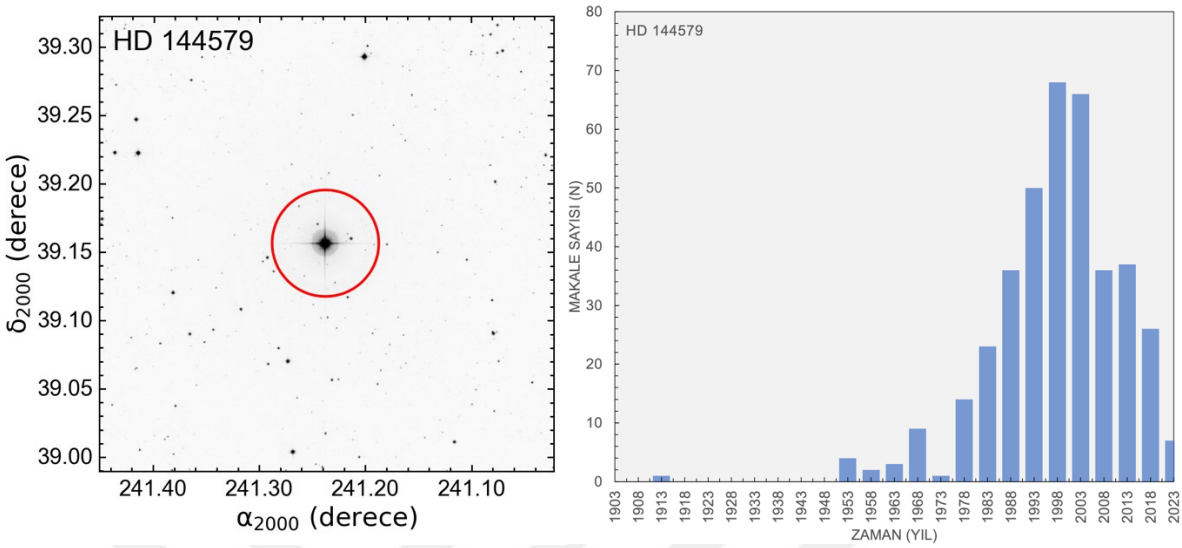


Şekil 2.8: Kırmızı daireyle işaretlenen HD 22879'un ekvatoral koordinat sistemindeki konumu (sol panel) ve HD 22879'un literatüre kazandırılan makalelerin sayı histogramı (sağ panel).

Literatürde Ekim 2023 tarihine kadar HD 22879 yıldızı için yapılan çalışmalardan 109'u tayfsaldır (Şekil 2.8, sağ panel). Bu çalışmalardan elde edilen model atmosfer parametreleri olan $T_{\rm eff}$, log g ve [Fe/H] değerlerinin bulunduğu çalışma sayısı, sırasıyla, 106, 96 ve 109'dur. Ayrıca bu parametreler $5485 < T_{\rm eff}$ (K) < 6053, $3.31 <$ log g (cm/sn^2) < 4.68 ve $-1.03 <$ [Fe/H] (dex) < -0.5 aralığında yer almaktadır. Yüksek radyal hızlı yıldızları araştıran Adams ve Joy'un (1919**)** çalışmasında HD 22879'un radyal hız ölçümü ilk kez gerçekleştirilmiştir. Eggen'in (1956) yaptığı hassas gözlemler sonucunda HD 22879'un fotometrik verileri elde edilmiştir. Jofre ve diğ. (2017) altı farklı yöntem kullanarak HD 22879 yıldızının tayfında görülen çeşitli elementlerin bolluklarını belirleyerek tayfsal analizdeki belirsizlikleri araştırmıştır. Chen ve diğ. (2020) HD 22879'un yaşı ve uzay hız bileşenlerini, sırasıyla, t = 12.9±0.65 Gyıl, U = -111.77 km/sn, V = -91.05 km/sn ve W = -42.22 km/sn olarak hesaplamıştır. Ayrıca bu çalışmada yıldızın sıcaklığı, yüzey çekim ivmesi ve metal bolluğu, sırasıyla, $T_{\rm eff}$ = 5800±90 K, log g = 4.29±0.07 cm/sn^2 ve [Fe/H] = -0.84±0.07 dex olarak verilmiştir. HD 22879 yıldızının literatürdeki en güncel çalışması Giribaldi ve Smiljanic'e (2023) ait olup Güneş civarındaki yıldızları analiz ederek, özellikle küçük uydu galaksiler ile birleşmeler sırasında Samanyolu'nun kimyasal evrimiyle ilgili olayları incelemişlerdir.

2.6.2 HD 144579

Literatürde HD 144579'un ($V = 6^{\rm m}.67$, B-$V = 0^{\rm m}.73$) tayf türü G8V olarak verilmektedir (Van Belle ve Von Braun, 2009). Ekvatoral koordinatlarıyla (α, δ) = ($16^{\rm h}$ $04^{\rm m}$ $56^{\rm s}.79$, +39° 09′ 23″.44), Galaktik koordinatları (l, b) = 62°.3693, +48°.2726) olan HD 144579 yıldızı Samanyolu'nun I. çeyreğindedir (Şekil 2.9, sol panel).



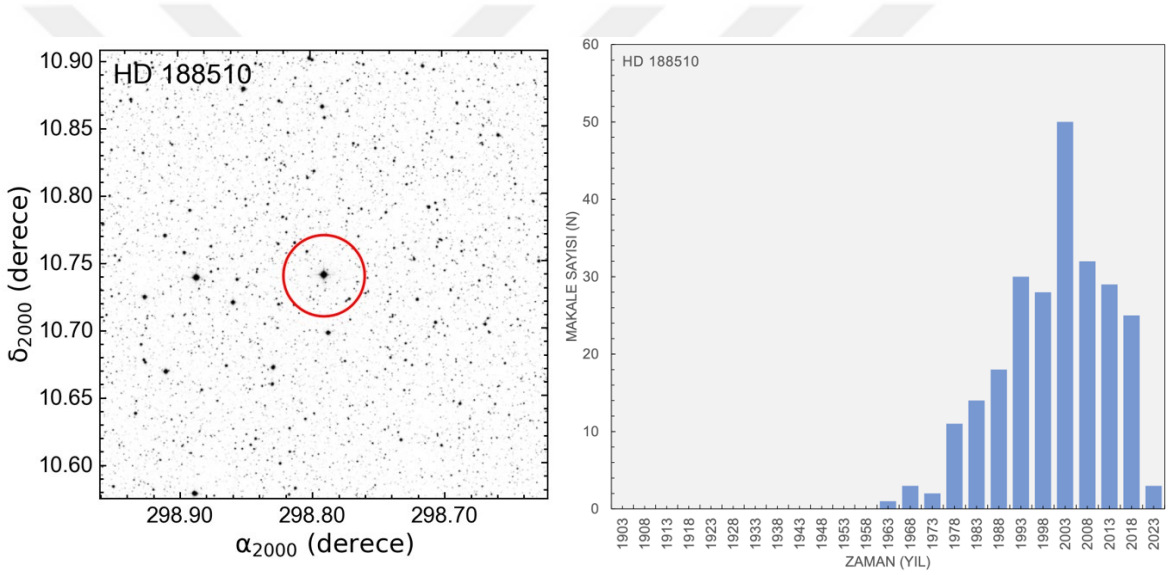
Şekil 2.9: Kırmızı daireyle işaretlenen HD 144579'un ekvatoral koordinat sistemindeki konumu (sol panel) ve yıldızın literatüre kazandırılan makalelerin sayı histogramı (sağ panel).

Günümüzde literatürde Ekim 2023 tarihine kadar HD 144579 yıldızının 45 tayfsal çalışması bulunmaktadır. Bu çalışmalar arasında 45 makalede yıldızın sıcaklığı, 37 makalede yüzey çekim ivmesi ve 35 makalede de metal bolluğu değeri verilmiştir. Bu parametreler $5139 < T_{\rm eff}$ (K) < 5427 K, $3.87 <$ log g (cm/sn^2) < 4.75 ve $-0.76 <$ [Fe/H] (dex) < -0.55 aralığında değişmektedir. Adams ve Kohlschutter (1914) HD 144579 yıldızının radyal hızını ilk kez ölçmüştür. Borkova ve Marsakov (2004) HD 144579 dahil olmak üzere Güneş civarındaki 77 metalce fakir yıldızı incelemiştir. Çalışmalarında yıldızın metal bolluğunu [Fe/H] = -0.69 dex, alfa element bolluğunu [Mg/Fe] = 0.38 dex, uzay hız bileşenlerini (U, V, W) = (35.5, -58.2, -18) km/sn ve Galaktik yörünge parametreleri olan $Z_{\rm max}$ ve yörünge basıklığını, sırasıyla, 0.1 kpc ve 0.23 olarak rapor etmişlerdir. Analizleri sonucunda yıldızın Samanyolu'nun kalın disk popülasyonuna ait olduğunu ortaya koymuştur. Mishenina ve diğ. (2015) Galaksi disk yıldızlarının bolluklarını analiz etmiş ve HD 144579 model atmosfer parametrelerini $T_{\rm eff} = 5294$ K, log $g = 4.10$ cm/sn^2, [Fe/H] = -0.70 dex ve $\xi_t = 1.30$ km/sn olduğunu ifade etmiştir. Tautvaisiene ve diğ. (2021) HD 144579 model atmosfer parametrelerini $T_{\rm eff} = 5296$ K, log $g = 4.59$ cm/sn^2 ile [Fe/H] = -0.65 dex ve yaşını 6.23 Gyıl olarak literatüre kazandırmıştır. Ayrıca yıldızın Galaktik yörünge parametrelerini hesaplayan araştırmacılar, Galaksi merkezine

olan uzaklığı 6.34 kpc ve Galaktik düzlemden ayrılabileceği maksimum uzaklığı ise 170 pc olarak vermiştir. Bu analizler sonucunda yıldızın kalın diske ait olabileceği iddia edilmiştir.

2.6.3 HD 188510

Literatürde HD 188510'un ($V = 8^m.82$, $B\text{-}V = 0^m.61$) tayf türü G5V olarak verilmektedir (Bond, 1970). Ekvatoral koordinatlarıyla (α, δ) = ($19^h55^m09^s.68$, $+10°44'27''.39$), Galaktik koordinatları (l, b) = 49°.9315, -08°.9179) olan HD 188510 yıldızı Samanyolu'nun I. çeyreğindedir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10: Kırmızı daireyle işaretlenen HD 188510'un ekvatoral koordinat sistemindeki konumu (sol panel) ve yıldızın literatüre kazandırılan makalelerin sayı histogramı (sağ panel).

Yıldıza ait Ekim 2023 tarihine kadar T_{eff}, log g ve [Fe/H] değerlerinin verildiği makale sayısı, sırasıyla, 52, 45 ve 43 olmak üzere toplam tayfsal çalışma sayısı 53'tür. Bu parametreler $5170 < T_{eff}$ (K) < 5926, $3.80 <$ log g (cm/sn^2) < 5.16 ve $-1.88 <$ [Fe/H] (dex) < -0.77 aralığında değişmektedir. Literatürün erken zamanlarında HD 188510 yıldızı alt cüceler üzerine yapılan tayf çalışmaları arasında incelenmiştir (Sandage ve Smith, 1963; Johnson ve Mitchell, 1968). Bond (1970) HD 188510 yıldızını tayfsal olarak analiz ederek metalce fakir yıldız olarak tanımlamıştır.

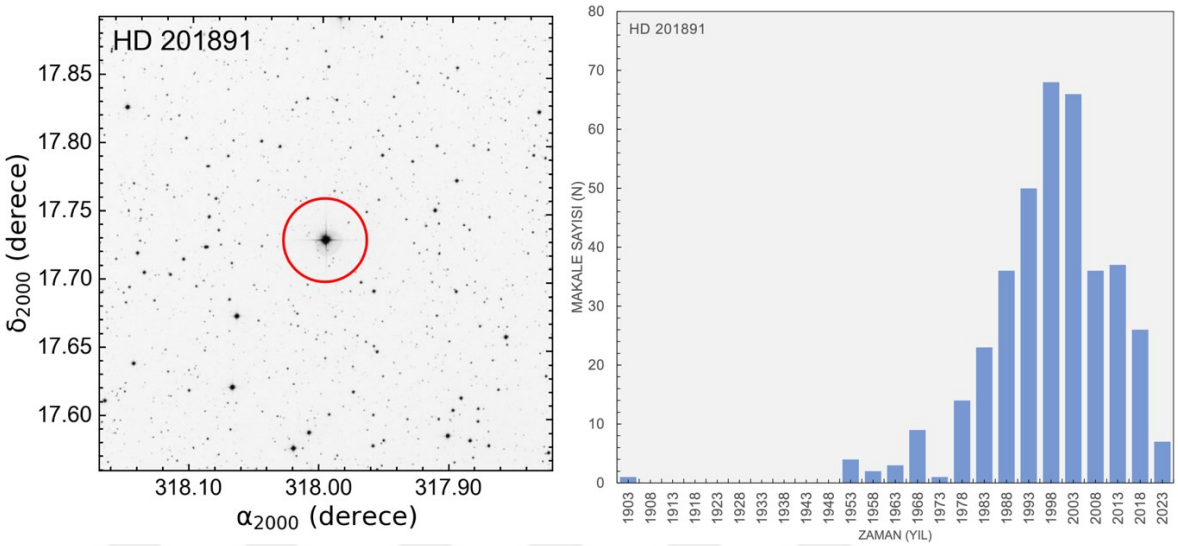
Ramirez ve diğ.'nin (2012) incelediği yıldızlara ait katalogda HD 188510'un model atmosfer parametrelerini T_{eff}, log g, [Fe/H] ve ξ_t hatalarıyla birlikte, sırasıyla, 5608±50 K, 4.63±0.03 cm/sn^2, -1.41±0.05 dex ve 0.8 km/sn vermiştir. Ayrıca yıldızın yaşı için

t = 13.14±7.32 Gyıl olarak rapor etmiştir. Bensby, Feltzing ve Oey'in (2014) Güneş civarındaki 714 F ve G cüce yıldızının ayrıntılı element bolluk analizini gerçekleştirmiştir. Bu analizler sonucunda yıldızın demir bolluğunu [Fe/H] = -1.69 dex, alfa bolluğunu [Mg/Fe] = 0.37 dex, yıldızın yaşını 14.6 Gyıl, uzay hız bileşenlerini $(U, V, W)_{LSR}$ = (-140, -103, 68) km/sn ve Galaktik yörünge parametreleri olan Z_{max} ve yörünge basıklığını, sırasıyla, 1.70 kpc ve 0.60 olarak rapor etmişlerdir. Bu sonuçlar dahilinde yıldızın bir halo popülasyonuna üye olduğu iddia edilmiştir. Pal ve diğ. (2023**)** Hubble Uzay Teleskobu'ndan (HST) alınan verileri derleyerek HD 188510 da dahil olmak üzere yıldızların düşük çözünürlüklü tayflarını incelemiştir. Ayrıca, Lucertini ve diğ. (2022) hem Galaktik şişkin bölge hem de disk içerisindeki kükürt bolluklarını araştırmıştır. Bu makalelerdeki araştırma bulguları toplu olarak, HD 188510'un benzersiz özelliklerine ve onun daha geniş bağlamdaki yerine ilişkin değerli bilgiler sağlamaktadır.

2.6.4 HD 201891

Literatürde HD 201891 ($V = 7^m.37$, $B\text{-}V = 0^m.51$) kimyasal olarak özel yıldız ve tayf türü G5V olarak bilinmektedir (Gray ve diğ., 2003). Samanyolu'nun I. çeyreğinde bulunan HD 201891 yıldızın ekvatoral koordinatları (α, δ) = ($21^h\ 11^m\ 59^s.03$, +17° 43′ 39″.89) ve Galaktik koordinatları (l, b) = 66°.7067 -20°.4288) olarak verilmektedir (Şekil 2.11).

Literatürde HD 201891'in Ekim 2023 tarihine kadar 77 tayfsal çalışması bulunmaktadır. Bu çalışmalar arasından 77'sinde yıldızın sıcaklığı, 70'inde yüzey çekim ivmesi ve 66'sında da metal bolluğu değeri verilmiştir. Bu parametreler $5688 < T_{eff}$ (K) < 6235, $4.00 <$ log g (cm/sn^2) < 4.97 ve $-1.42 <$ [Fe/H] (dex) < -0.49 aralığında değişmektedir. Adams ve Kohlschutter (1914) HD 201891'in radyal hızını ilk kez hesaplamıştır. Roman (1955) yüksek uzay hızlı yıldız kataloğunda HD 201891'e yer vermiştir. Cowley, Hiltner ve Witt (1967) HD 201891 yıldızını yüksek öz hareketli yıldızlar arasında fotometrik olarak incelemiş ve tayfsal olarak sınıflandırmıştır. Casagrande ve diğ. (2010) tayfsal analizler sonucunda HD 201891 için model atmosfer parametrelerini T_{eff} = 5947 K, log g = 4.31 cm/sn^{2}ve [Fe/H] = -1.05 dex olarak vermiştir. Ramirez, Allende Prieto ve Lambert (2013) tayfsal çalışmasında HD 201891'in model atmosfer parametrelerini (T_{eff}, log g, [Fe/H] ve ξ_t) ve yaşı (t), sırasıyla, 5985 K, 4.32 cm/sn^2, -1.03 dex, 1.47 km/sn ve 12.69 Gyıl vermiştir.



Şekil 2.11: Kırmızı daireyle işaretlenen HD 201891'in ekvatoral koordinat sistemindeki konumu (sol panel) ve yıldızın literatüre kazandırılan makalelerin sayı histogramı (sağ panel).

Bu analizler sonucunda yıldızın uzay hız bileşenlerini (U, V, W) = (91.8, -115.4, -58.5) km/sn olarak rapor etmişler ve analizler dahilinde yıldızın kalın disk ve halo popülasyonuna üye olma olasılıklarını %78 ve %22 olarak vermiştir. Ayrıca, çalışmaları sayesinde Güneş civarındaki FGK yıldızlarının oksijen bolluklarını analiz ederek literatüre Galaktik kimyasal evrimi araştırmalarında katkıda bulunmuştur. Maas ve diğ. (2022) 163 halo yıldızında demir ve fosfor bolluğunu ölçerek yıldızların model atmosfer parametreleriyle birlikte kinematik parametrelerini de hesaplamışlardır. Araştırmacılar HD 201891 için model atmosfer parametreleri ve element bollukları için $T_{\rm eff}$ = 6022 K, log g = 4.34 cm/sn^2, [Fe/H] = -0.96 dex ve [P/Fe] = 0.38 dex olarak vermiştir. Kinematik analizlerde HD 201891 yıldızının uzay hız bileşenlerini (U, V, W) = (99.3, -103.2, -47.3) km/sn hesaplamışlar ve kalın disk ile halo popülasyon üyelik olasılığını, sırasıyla, 0.88 ve 0.12 olarak vermişlerdir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Geçmişten günümüze kadar, bilimsel araştırmalarda kullanılan malzeme ve yöntemler, teknolojiyle birlikte evrimleşerek gelişmiştir. Astronomik çalışmalarda kullanılan malzemeler, teleskoplar ve dedektörlerden, özel yazılım programlarına kadar değişkenlik göstermektedir. Bu materyallerin her biri, toplanan verilerin doğruluğu ve hassasiyetiyle yapılan analizin kapsamında ve derinliğinde kritik bir rol oynamaktadır. Ayrıca, astronomik araştırmalarda kullanılan yöntemler, verilerin doğru ve hassas elde edilmesini sağlamak için dikkatli bir şekilde seçilmelidir. Örneğin, gözlem tekniğinin seçimi, elde edilen verilerin türünü ve kalitesini etkilemekte ve bu da sonuçların yorumlanmasını doğrudan etkilemektedir.

Bu nedenle, yapılan araştırmalarda kullanılan malzeme ve yöntemlerin dikkatli bir şekilde seçilmesi önemlidir. Bu, hangisinin en doğru ve güvenilir sonuçları sağlayacağını belirlemek için farklı malzeme ve yöntemlerin kapsamlı bir şekilde araştırılmasını ve sınanmasını içermektedir. Ek olarak, kullanılan materyallerin ve yöntemlerin uygun şekilde kayıt altına alınması, sonuçların tekrarlanabilirliğini sağlamak ve araştırmacılar arasında işbirliği ve iletişimi kolaylaştırmaktadır. Bu tercihler, doğru ve güvenilir verilerin toplandığı, analiz edildiği ve yorumlandığı bir temeli oluşturmaktadır.

Tez çalışmasında kullanılmak üzere yüksek çözünürlüklü ve yüksek sinyal/gürültü oranına sahip tayf verisi bulunan metalce fakir dört yıldız seçilmiştir. Her şeyden önce, kapsamlı astrofizik analizlerin yürütülmesi için *Gaia* DR3 verileri arasında yıldızların astrometrik verilerinin de bulunmasına dikkat edilmiştir. Yıldızların metalce fakir olması, yıldız popülasyonlarının kimyasal evrimine dair kapsamlı araştırma yapılmasına olanak tanımaktadır. Dengeli ve temsili bir örnek elde etmek için yıldızlar, TÜBİTAK 121F265 projesindeki yüksek öz harekete sahip metalce fakir 90 yıldız, $-2 < [Fe/H]\ (dex) < 0$ aralığında sınırlandırılmıştır. Dört farklı metal bolluğu bölgesini ([0, -0.5], [-0.5, -1.0], [-1.0, -1.5] ve [-1.5, -2.0]) temsil edecek birer yıldız seçilmiştir. Bu bölgeler içinde seçim yapılırken, her aday yıldıza ilişkin literatürde mevcut araştırmaların sayısı da göz önünde bulundurulmuştur. Tez çalışmasında nispeten literatüre sınırlı araştırma katkısı bulunan yıldızlar tercih edilmiştir. Bu bağlamda, metalce fakir ve yüksek öz hareketli HD 22879, HD 144579, HD 188510 ve HD 201891 yıldızları tez çalışmasında kullanılmak üzere seçilmiştir.

3.1. VERİ

3.1.1. Tayfsal Veri

İnsanların parmak izlerinin benzersiz olması gibi, her yıldızın tayfı da kendine özeldir. Yıldızların tayfları kendi evrim öykülerini yansıtmaktadır. Araştırmacılar, yıldızların atmosferindeki farklı elementler tarafından üretilen tayfsal çizgileri inceleyerek, nesnenin bileşimini belirleyebilir, sıcaklık ve yoğunluk gibi diğer temel özelliklerini tayin edebilir.

Tayfsal kütüphaneler, yıldızlardan galaksilere kadar çeşitli astronomik kaynaklardan yayılan veya emilen ışığı dalgaboyunun bir fonksiyonu olarak kaydeden tayfçekerler ile gözlenmesiyle oluşturulmaktadır. Tayfsal kütüphaneler, yeni gözlemlenen diğer astronomik nesnelerin tayflarıyla karşılaştırma yapmak ve referans olarak kullanılmak üzere astronomlara hizmet etmektedir. Bu kütüphaneler, yıldız popülasyonları, galaksiler ve yıldızlararası ortamın incelenmesi dahil olmak üzere astrofiziğin birçok alanında temel araç olarak kullanılmaktadır. Herkese açık bu tayf kütüphaneleri, yeni gözlemler yapıldıkça ve analiz teknikleri geliştikçe sürekli olarak güncellenmekte ve genişletilmektedir. Her tayf kütüphanesinin dalgaboyu aralığı, tayfsal çözünürlük ve sinyal/gürültü oranı (S/N) gibi kendine özgü özellikleri içermektedir.

Tayfsal kütüphanelerin çeşitliliği, araştırmacıların ilgili gök cisimlerinin doğru ve hassas ölçümlerini yapmasını sağlamaktadır. Bu tayfsal kütüphanelere bir örnek olan PolarBase[7] tayf kütüphanesi, Samanyolu'ndaki yakın yıldızlardan elde edilen yüksek çözünürlüklü optik tayfların bir koleksiyonunu sunmaktadır (Donati ve diğ., 1997; Petit ve diğ., 2014).

Kütüphanedeki yıldızların tayfları, farklı gözlemevlerinde bulunan iki farklı yüksek çözünürlüklü tayfçeker ile elde edilmiştir. Bunlar, Hawaii'deki Kanada-Fransa-Hawaii Teleskobu'nda (CFHT) bulunan Eşel SpektroPolarimetrik Tayfçekeri (ESPaDOnS; Donati ve diğ., 2006) ve Fransa'daki Pic du Midi Gözlemevi'ndeki Bernard Lyot Teleskopu'nda (TBL) bulunan NARVAL (Aurière, 2003**)** tayfçekeridir (Şekil 3.1). ESPaDOnS ve NARVAL, tüm optik ve yakın kızılötesi bölgede birkaç nanometrelik dalgaboyları aralıklarıyla tayfları kaydetmektedir. Bu tayfçekerler polarimetrik modda $R \approx 65{,}000$ tayfsal çözünürlüğe sahiptir,

[7] http://polarbase.irap.omp.eu

bu da yıldıza ait zayıf tayfsal çizgilerin tespit edilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, klasik tayf analizlerinde yaklaşık 76,000 çözünürlüğünde tayfsal veri alınabilmektedir (Silvester ve diğ., 2012). PolarBase kütüphanesine Sanal Gözlemevi (VO) veya PolarBase web sitesi aracılığıyla erişilmektedir. Ayrıca yeni tayflar ve geliştirilmiş kalibrasyon teknikleri ile düzenli olarak güncellenmektedir.

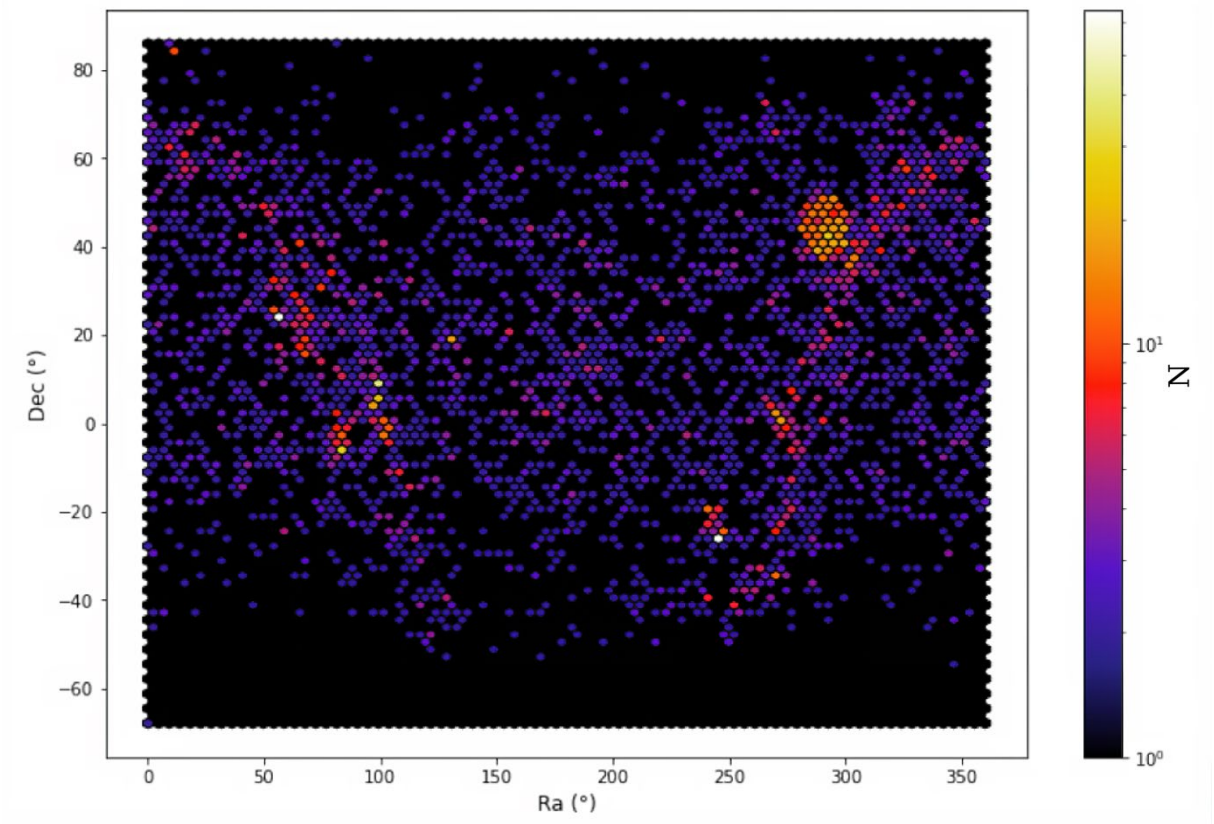


Şekil 3.1: Kanada-Fransa-Hawaii Teleskobu (CFHT; sol) ve Pic du Midi Gözlemevi (sağ).

PolarBase kütüphanesi, tayf türü O4 ile M8 arasında, farklı ışıma gücü sınıfında bulunan yaklaşık 4,700 yıldız tayfını içermektedir. Yıldız tayfları elektromanyetik tayfın 3,700 Å ile 10,000 Å aralığındaki bölgesinden alınmaktadır. Bu kütüphane, ayrıca erken evreni ve Samanyolu'nun oluşumunu araştırmak için çok sayıda metalce fakir yıldızın tayfını içermektedir. PolarBase kütüphanesinde yıldız tayfı alınan nesnelerin ekvatoral koordinat sistemindeki dağılımları Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Şekildeki noktalar yıldız sayı yoğunluğuna göre oluşturulmuştur ve u şeklindeki yapı Samanyolu'nun disk düzlemine yakın kısmını ifade etmektedir. Ayrıca sağ üst köşede görülen yoğun bölge Kepler yıldız alanındaki tayfı alınan yıldızları temsil etmektedir.

Tez kapsamında incelenen HD 22879, HD 144579, HD 188510 ve HD 201891 yıldızlarının tayfları PolarBase kütüphanesinden indirilmiştir. Bu dört yıldızın yüksek çözünürlüklü ve

yüksek (*S/N*) değerli tayfları ESPaDOnS ve Narval yüksek çözünürlüklü tayfçekeriyle elde edilmiş olup temel verileri Tablo 3.1'de listelenmiştir.



Şekil 3.2: PolarBase yıldızlarının ekvatoral koordinat sistemindeki konumları. Renkler yıldız sayı yoğunluğuna göre oluşturulmuştur.

Tablo 3.1: Tez kapsamında incelenen dört yıldızın Polarbase kütüphanesinden alınmış tayf verileri.

Yıldız	**Tayfçeker**	***S/N***	**V_t (km/sn)**	**T (gg/aa/yyyy)**
HD 22879	Narval	226.96	120.18	12.11.2010
HD 144579	ESPaDOnS	149.52	-59.61	12.03.2017
HD 188510	Narval	105.67	-192.72	11.08.2010
HD 201891	Narval	143.99	-44.69	16.08.2010

3.1.2. Fotometrik ve Astrometrik Veriler

Yıldızların özelliklerinin ve kökenlerinin incelenmesi astrofiziğin temel bir ihtiyacıdır ve çeşitli gözlem tekniklerinin kullanılmasını gerektirmektedir. En önemli tekniklerden biri, bir yıldızın kimyasal bileşimini, sıcaklığını, yüzey çekim ivmesini ve radyal hızını belirlemek için tayfsal verilerin elde edilmesini içeren tayfsal analizdir. Öte yandan fotometri, fiziksel özelliklerini tayin etmek için bir yıldızın parlaklığının farklı dalgaboylarında ölçülmesini sağlamaktadır. Bu tekniklerin her ikisi de yıldızların özelliklerini ve evrimini araştırmak için kullanılmaktadır. Geleneksel tayfsal analiz ve fotometriye ek olarak, astrometrik yöntemlerdeki son gelişmeler de evren anlayışımızı ilerletmede etkili olmuştur.

Kısa bir süre önce yayımlanan *Gaia* üçüncü veri sürümü (DR3; Gaia işbirliği, 2023), Güneş civarındaki tüm yıldızlar da dahil olmak üzere, Samanyolu'ndaki 1.8 milyardan fazla nesne için astrometrik ve fotometrik veriler sağlamaktadır. Bu veri seti, Samanyolu'nun yapısı, dinamikleri ve evrimi hakkında devrim yaratma potansiyeline sahiptir. *Gaia* DR3 verilerinin mevcudiyeti, bu tür çalışmalar için verilerin kalitesini ve miktarını daha da arttırmıştır. *Gaia* DR3 veri tabanı, kullanım kolaylığı açısından alt kategorilere ayrılmıştır; en kapsamlı katalog *gaiadr3.main_source* olarak bilinir ve 1,811,709,771 veri içerir. Bu veri seti, fotometrik ve astrometrik ölçümleri, ölçüm hatalarını ve temel ölçümlerden elde edilen astrofiziksel parametreleri kapsar. Bu tez çalışmasında, özellikle Güneş civarındaki metalce fakir yıldızların seçiminde *Gaia* DR3 veri tabanından parametrelere erişilirken *gaiadr3.main_source* kataloğundan yararlanılmıştır (Gaia işbirliği, 2023). Veri tabanının sorgulanması sonucunda tez kapsamında incelenen dört yıldızın astrometrik ve tayfsal verileri Tablo 3.1'de listelenmiştir.

Tablo 3.2: Tez kapsamında dört yıldızın *Gaia* DR3 veri tabanındaki astrometrik ve tayfsal verileri.

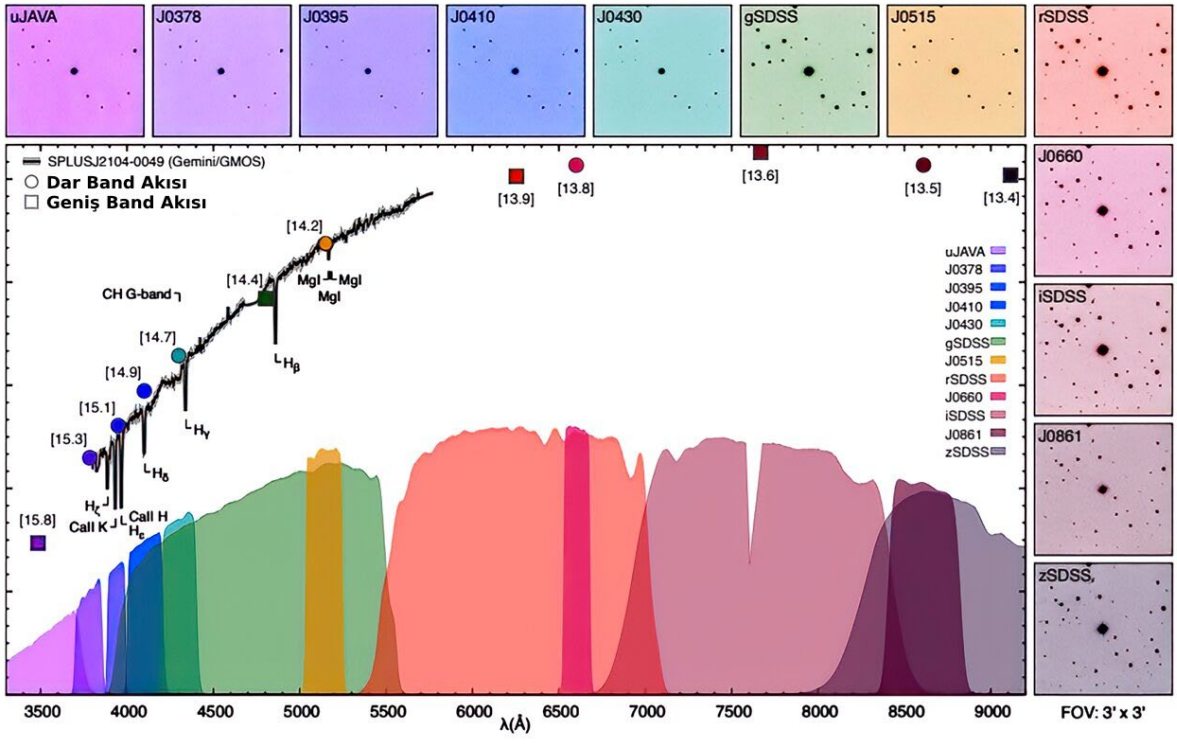
Yıldız	α (hh:mm:ss)	δ (dd:mm:ss)	l (°)	b (°)	V_r (km/sn)	$\mu_\alpha \cos\delta$ (mas/yıl)	μ_δ (mas/yıl)	ϖ (mas)	d (pc)
HD 22879	03:40:22.07	-03:13:01.13	189.77	-43.11	120.54	690.79	-213.44	38.32	26.09
HD 144579	16:04:56.79	+39:09:23.44	62.36	+48.27	-59.22	-570.87	52.63	69.64	14.35
HD 188510	19:55:09.68	+10:44:27.39	49.93	-08.92	-192.23	-38.39	290.61	26.27	38.05
HD 201891	21:11:59.03	+17:43.39.89	66.70	-20.43	-44.15	-122.13	-899.40	29.87	33.47

3.2. YILDIZLARIN TAYFSAL ENERJİ DAĞILIMI (SED)

Yıldızları doğru bir şekilde karakterize etmek, astronomi alanında uzun süredir devam eden zorlu bir uğraş olmuştur. Tayfsal analiz yöntemiyle yıldızların parametrelerini belirlemesi için yüksek *S*/*N* değerine sahip tayflara ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla birlikte, bu yaklaşım nispeten parlak yıldızlar için güvenilir sonuçlar verirken, sönük yıldızlar için ($V \geq 13$ kadir) doğruluğu azalmaktadır. Yüksek *S*/*N* değerli yıldız tayfların elde edilmesi için uzun gözlem süreleri gerekmektedir. Fakat tüm yıldızlar için yüksek *S*/*N* değerine sahip yıldız tayfları bulunmamaktadır. Yüksek *S*/*N* değerine sahip olmayan yıldızlara ait astrofiziksel parametrelerin hassas olarak belirlenme ihtiyacı, farklı yöntemlerin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bu girişimler, trigonometrik paralaks hesabıyla yıldız uzaklıklarını ölçmeyi amaçlayan uzay tabanlı gözlemler (Perryman ve diğ., 1997; van Leeuwen ve Fantino, 2005; Gaia işbirliği, 2016; 2018; 2021; 2023), yıldızların etkin sıcaklık ve yarıçap parametreleri için kesin değerler veren açısal çapları doğrudan gözlenmesi için interferometri içeren yöntemleri kapsamaktadır (Lane ve diğ., 2001; Berger ve diğ., 2006; Boyajian ve diğ., 2012a,b, 2013, 2015; Tanner ve diğ., 2015; Bonnefoy ve diğ., 2018). Ayrıca, eşdeğer genişlik hesaplamaları, tayfsal analiz ve benzer yaklaşımları içeren teknikler yıldızların metal bolluğu ve diğer kimyasal özelliklerini ortaya çıkartılmasında kullanılmıştır (Gray 1992; Edvardsson ve diğ., 1993; Valenti ve Piskunov 1996; Fischer ve Valenti 2005; Jenkins ve diğ., 2008; Pavlenko ve diğ., 2012; Yee, Petigura ve von Braun, 2017; Gill, Maxted ve Smalley, 2018; Tabernero ve diğ., 2019). Temel yıldız parametrelerini tayin edilmesinde kullanılan bir başka yaklaşım, çeşitli fotometrik gözlemlerden elde edilen tayfsal enerji dağılımının (Spectral Energy Distribution; SED), sentetik yıldız model atmosferleriyle karşılaştırılmasına dayanmaktadır (Robitaille diğ., 2007; Pecaut ve Mamajek 2013; Bayliss ve diğ., 2018; Martínez-Rodriguez ve diğ., 2019; Vines ve Jenkins, 2022). Tayfsal enerji dağılımı, astrofizikte gök cisimlerinin özelliklerinin anlaşılmasında önemli bir rol oynayan temel bir kavramdır. Tayfsal enerji dağılımı bir gök cismi tarafından yayılan enerjinin dalgaboyu veya frekansın bir fonksiyonu olarak dağılımını ifade etmektedir (Şekil 3.3).

Astrofizikçiler, tayfsal enerji dağılımını analiz ederek astronomik kaynaklarda meydana gelen fiziksel süreçler hakkında değerli bilgileri ortaya çıkarmaktadır. SED yöntemi ötegezegenler, yıldızlar, galaksiler ve kuazarlar gibi astronomik nesnelerin temel astrofiziksel parametrelerini

tayin etmek için sıklıkla kullanılmaktadır. Başka bir deyişle, bir astronomik nesne tarafından çevreye yayılan enerjinin elektromanyetik tayf boyunca dağılımının ölçülmesi olarak tanımlanır. Yıldızın parlaklığı kütle, sıcaklık ve yaş gibi diğer parametrelerle doğrudan ilişkili olduğu gibi evrimsel durumunun incelenmesi için önemli bir belirteçtir. Ayrıca, Güneş civarında bulunan G tayf türündeki metalce fakir yıldızların da bu yöntem ile incelenmesi, Samanyolu'ndaki kimyasal evriminin anlaşılmasında büyük önem taşımaktadır. Bu tür yıldızlar, farklı Galaktik yıldız popülasyonlarının oluşum senaryolarını incelemek ve yıldız evriminin ilk aşamalarında meydana gelen nükleer reaksiyon modellerini geliştirmek için değerli bir araç olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.3: Metalce ultra fakir SPLUS J2104−0049'un NOIRLab'ında 12 farklı filtre ile alınan görüntüleri. Grafikte renkler her filtreden görülen salma dalgaboyunu temsil etmektedir. Yıldızın tayfı Gemini Çok Nesneli Tayfçeker (GMOS) ile alınmıştır. Daire sembolü dar band ve kare sembolü geniş band filtreler ile yapılan ölçümlerdir (Placco/NOIRLab/NSF/AURA).

Farklı yıldız popülasyonları arasındaki element bolluğunun dağılımının incelenmesi, Samanyolu'nun kimyasal zenginleşmesine katkıda bulunan çeşitli senaryoların incelenmesine de olanak tanımaktadır (Grillmair, 2006; Belokurov ve diğ., 2007; Kepley ve diğ., 2007; Sesar ve diğ., 2007; Klement, 2010; Helmi ve diğ., 2017).

SED yöntemini yıldızlara uygulamak için çeşitli metodolojiler ortaya konmuştur. Bunlar arasında çoğunlukla kullanılan bir yöntem de sentetik modeller ile karşılaştırmak üzere çeşitli fotometrik veriler kullanılarak SED'lerinin oluşturulmasına dayanmaktadır. Tayfsal Enerji Dağılım Eşleştirme (Spectral Energy Distribution Matching, SEDF; Masana, Jordi ve Ribas, 2006) tekniği, belirli bir χ^2 işlevini en aza indirerek elde edilen *VJHK* fotometrik verileri aracılığıyla yıldız SED'lerinin oluşturulmasını içermektedir. χ^2 indirgemesini içeren başka bir yaklaşım, Bayo ve diğ. (2008) tarafından tanıtılan İspanyol Sanal Gözlemevi'nin bir parçası Sanal Gözlemevi SED Analizörüdür (Virtual Observatory SED Analyzer; VOSA). Bu araç, kullanıcılara çeşitli sentetik modelleri sunarak çevrimiçi SED oluşturmasına olanak tanımaktadır. Literatürde önerilen alternatif bir χ2 tabanlı yaklaşım, belirli sabit parametrelere ($T_{\rm eff}$, log g ve [Fe/H]) odaklanmaktadır (Stevens, Stassun ve Gaudi, 2017; Stassun ve Torres 2016, 2018). SED oluşturmak için bir Markov Zinciri Monte Carlo (MCMC) stratejisi kullanan Gillen ve diğ. (2017), geniş bant fotometrik verilerini PHOENIX v2 (Husser ve diğ., 2013) ve BT-Settl (Allard, Homeier ve Freytag, 2012) modellerine uyarlayarak analiz için ek bir yol sunmuştur.

Bu tez kapsamında incelenen Güneş civarında bulunan G tayf türündeki metalce fakir dört yıldızın SED profili ARIADNE programı kullanılarak oluşturulmuştur (Vines ve Jenkins, 2022). ARIADNE, yıldızların etkin sıcaklık, yüzey çekim ivmesi, metal bolluğu, uzaklık, yarıçap ve *V*-bandı sönükleşme değerini elde etmek için geniş bant fotometrik verilerine sahip altı farklı atmosferik model kütüphanesi kullanmaktadır: PHOENIX v2 (Husser ve diğ., 2013), BT-Settl (Allard ve diğ., 2012), BT-NextGen (Hauschildt ve diğ., 1999; Allard ve diğ., 2012), BT-Cond (Allard ve diğ., 2012), Castelli ve Kurucz (Castelli ve Kurucz, 2003) ve Kurucz (Kurucz, 1993). ARIADNE programında kullanılan sentetik modellerine ait parametre aralıkları Tablo 3.3'te listelenmiştir. Kurucz (1993) ile Castelli ve Kurucz'un (2003) modellerinin düşük sıcaklıklı yıldızlar konusunda güvenilir olmadığı bilindiğinden, sıcaklığı 4,000 K'den soğuk olan yıldızlar için model olarak tercih edilmemektedir. ARIADNE için gereken tek girdi, nesnenin koordinatları veya *Gaia* DR3 numarasıdır. ARIADNE algoritması birkaç temel adımı kapsamaktadır. Başlangıçta, ARIADNE tayfsal enerji dağılımlarını oluştururken, yıldızların astrometrik ve fotometrik verilerini güncel olarak *Gaia* DR3 (Gaia işbirliği, 2023) kataloğundan seçer. Program, yıldızların koordinat verilerini kullanarak diğer

gökyüzü tarama programlarındaki fotometrik verilerine de ulaşır. Elektromanyetik tayfın $0.1 < \lambda\ (\mu m) < 5$ dalgaboyu aralığında 20'den fazla fotometrik parlaklık verisi kullanılarak program SED'leri oluşturur. *Gaia* DR3 verileri kullanılarak, uygulama için modelleri belirlemek üzere kataloglar arasında çapraz eşleştirme sorgusu oluşturmaktadır. Ayrıca bu veri, daha sonra her kataloğu fotometrik veriler ve belirsizlikler açısından sorgulamak için de kullanılmaktadır. İsteğe bağlı olarak, MIST (MESA Isochrones and Stelllar Tracks, Morton, 2015; Dotter, 2016) eş-yaş eğrileri kullanılarak bir yüzey çekim ivmesi (log *g*) tahmini de hesaplanmaktadır. Seçilen her model atmosfer kütüphanesiyle bağımsız eğriler oluşturmaktadır. Son olarak, en uyumlu eğriyle elde edilen en uygun parametreler tayin edilmektedir. Ayrıca program MIST evrim modellerini kullanarak yıldızların kütlelerini ve yaşlarını hesaplar. Özetle bu yöntem, SED'i elde etmek için yıldızın farklı filtrelerden alınmış parlaklıklarını akı değerlerine dönüştürmektedir. Daha sonra incelenen yıldızın SED'i, farklı astrofiziksel parametreler için atmosfer model kütüphanelerindeki tayflar ile karşılaştırır. SED'i temsil eden en uyumlu atmosfer modelinin etkin sıcaklık, yüzey çekim ivmesi ve metal bolluğu değerleri yıldızın temel astrofizik parametre değerleri olarak kabul edilmektedir.

Tablo 3.3: ARIADNE programında kullanılan atmosfer modelleri ve parametre aralıkları (Vines ve Jenkins, 2022).

Model	T_{eff} (K)	log *g* (cm/sn^2)	[Fe/H] (dex)	Kaynak
Phoenix v2	[2300, 12000]	[0, 6]	[-2, 1]	1
BT-Settl	[2300, 12000]	[-0.5, 6]	[-1, 0.5]	2
BT-NextGen	[2300, 12000]	[-0.5, 6]	[-1, 0.5]	2, 3
BT-Cond	[2300, 12000]	[-0.5, 6]	[-2.5, 0.5]	2
Castelli ve Kurucz	[3500, 12000]	[0, 5]	[-2.5, 0.5]	4
Kurucz	[3500, 12000]	[0, 5]	[-1, 1]	5

(1) Husser ve diğ. (2013), (2) Allard ve diğ. (2012), (3) Hauschildt ve diğ. (1999), (4) Castelli ve Kurucz (2003), (5) Kurucz (1993)

3.3 TAYFSAL ANALİZ

3.3.1. Yıldız Tayfı ve Süreklilik

Yıldız atmosferlerinin karmaşıklığıyla yıldız tayflarında kodlanmış zengin bilgiler arasında derin bir ilişki vardır. Farklı katmanlar ile karakterize edilen yıldızların atmosferleri, tayfta gözlenen özelliklerin şekillenmesinde rol oynamaktadır. Bir yıldızın tayfı boyunca görülen

soğurma ve salma çizgileri, yıldızın atmosferik özelliklerini ortaya çıkarmaktadır. Yıldız atmosferlerinin tanımlanması ve yıldız tayflarının yorumlanması arasındaki bu bağlantı, astrofiziksel araştırmaların temel taşı olarak kabul edilmektedir. Yıldız atmosferleri, toplam bileşiminin yaklaşık %74'ü (X = %74) esas olarak hidrojen (H) ve yaklaşık %24'ü (Y = %24) helyumdan (He) oluşan bir bileşimden oluşmaktadır. Bu durumun aksine daha ağır elementler (Z), özellikle Güneş benzeri yıldızlar söz konusu olduğunda, birim hacim başına toplam kütlenin yaklaşık %2'sine karşılık gelmektedir. Bu bileşim, yıldızlararası ortamlardaki gazların davranışını yöneten fiziksel süreçlerin karmaşık etkileşimine neden olmaktadır. Yıldızlardaki atomların veya moleküllerin enerji seviyelerindeki değişiklikler, termodinamikte sıklıkla kullanılan Boltzmann ve Saha denklemleriyle ifade edilmektedir. Yıldızdaki atom veya moleküldeki elektronun iyonlaşması durumunda Saha denklemi, elektronun uyarılarak yörüngeler arasındaki hareketi söz konusuysa Boltzmann denklemi kullanılmaktadır. Bir ortamdaki tüm atomlar eş zamanlı uyarılma ve iyonize durumunda bulunamadıklarından Yerel Termodinamik Denge (Local Thermodynamic Equilibrium; LTE) varsayımı altında incelenmektedir. Fakat yıldızlar gerçekte LTE halinde değildir. Ancak yıldızın atmosferi ince tabakalar olarak ele alındığında termodinamik dengenin sağlandığı varsayılmaktadır. Bu da yıldızdaki gaz parçacıklarının belli bir sıcaklıkta aynı hızda hareket ettiği kabulünü gerektirir. Gaz parçacıklarının yıldız atmosferlerindeki bu davranışı, istatistiksel mekanikte önemli bir kavram olan Maxwell-Boltzmann dağılımıyla ifade edilmekte olup aşağıdaki gibi gösterilmektedir:

$$f(v) = 4\pi \times \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} \times v^2 \times \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) \tag{3.1}$$

Burada, gaz parçacıklarının kütlesi (m), Boltzmann sabiti (k) ve gazın sıcaklığı (T) hesaba katılmaktadır. Bu parametreler, parçacık hızlarının dağılımını ve gazın kinetik özelliklerini karakterize etmektedir. Yıldız atmosferlerindeki basınç, gaz parçacıklarının çarpışmasından kaynaklanan parçacık basıncı ve fotonların etkisinden radyasyon basıncı da dahil olmak üzere birçok faktörün birleşiminden oluşmaktadır. Bu birleşim, yıldız atmosferindeki dinamik ortamı şekillendirerek enerji aktarımında önemli bir rol oynamaktadır. Yıldızın merkezinden yayılan fotonlar, yıldız atmosferleri boyunca yıldızlararası ortama taşınmaktadır. Işık, yıldızın bileşimi ve yoğunluğu hakkında bilgiler barındırır. Fotonlar, yıldız atmosferini geçerken saçılma,

soğurma ve salma dahil bir dizi etkileşime girmektedir. Bu etkileşimler absorbsiyon katsayısı (κ) ve salma katsayısıyla (*j*) ifade edilmektedir. Bu katsayıların belirli bir dalgaboyu veya frekanstaki oranı, kaynak fonksiyonu olarak bilinir ve $S_\lambda = j_\lambda/\kappa_\lambda$ olarak tanımlanır. Kaynak fonksiyonu, soğurma ve salma süreçleri arasındaki dengeyi ve yıldız atmosferinde enerji değişimi göstermektedir.

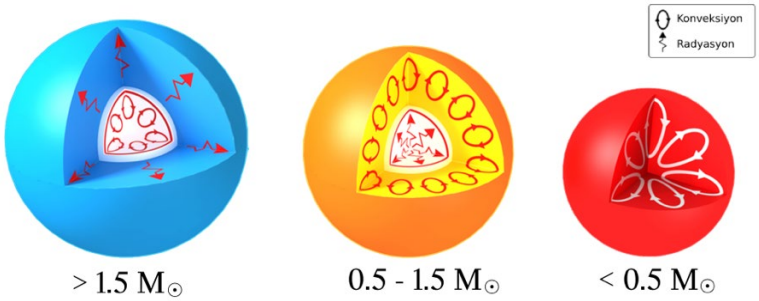
Işığın yıldız atmosferi içindeki davranışını karakterize etmek için fotonların ortalama serbest yolu dikkate alınır. Bir fotonun etkileşime girmeden önce kat edebileceği ortalama uzaklık olarak tanımlanan optik derinlik $\tau = \int \kappa \rho ds$ bağıntısıyla gösterilmektedir. Optik derinlik sönümleme katsayısına ve gaz yoğunluğuna (ρ) bağlıdır. Fonksiyondaki *S* parametresi fotonun kat ettiği mesafeyi temsil etmektedir. Yüksek optik derinlik ($\tau >> 1$), fotonların sıklıkla saçıldığı ve emildiği, optik olarak kalın bir gazı ifade etmektedir. Aksine düşük optik derinlik ($\tau << 1$), fotonların nispeten engellenmeden hareket ettiği optik olarak ince bir gaz olduğunu ifade eder. Bir yıldız belirli bir dalgaboyunda gözlemlenirken esas olarak yüzey katmanlarına $\tau_\lambda \sim 1$ noktasına kadar nüfuz edebilmektedir. Burası yıldız atmosferi ve onun bileşimi hakkındaki bilgilerin çoğunun elde edildiği bölgedir. Atmosferin üst kısmında ($\tau_\lambda \sim 0$) fotonlar engellenmeden yol aldığı için yıldızın özellikleri hakkında bilgiler taşımaktadır. Özetle, optik derinliği 1'den büyük olduğu durum yıldızın iç kısmını, optik derinliğin 0'a eşit olduğu durumda ise yıldızın yüzeyini, optik derinliğin 0 ile 1 aralığında olması durumunda ise yıldız atmosferini temsil etmektedir. Farklı dalgaboylarında gözlenen aynı optik derinlik, farklı geometrik derinliğe karşılık gelebilmektedir. Geometrik derinlik, yıldız atmosferinin kalınlığı olarak ifade edilmektedir ve yıldızın sıcaklığı arttıkça geometrik derinlik de artmaktadır. Yıldız atmosferinin kalınlığı tayf türüne ve evrim aşamasına göre farklılık göstermektedir.

Yıldızın farklı katmanlarında sıcaklık, basınç ve kimyasal bileşim gibi faktörlere bağlı olarak enerji iletim mekanizmaları farklılık göstermektedir. Radyatif aktarım, yıldızların dış katmanlarında, özellikle de fotosferinde baskın olan bir enerji iletim mekanizmasıdır. Sıcaklığın son derece yüksek olduğu bir yıldızın çekirdeğinde nükleer füzyon ile yüksek enerjili foton üretilmektedir. Bu fotonlar daha sonra yıldızın atmosfer katmanları boyunca dışarı doğru hareket etmektedir. Bu hareket, yıldız plazmasındaki atomlar ve iyonlar tarafından tekrar tekrar emilip yeniden yayılmasıyla oluşmaktadır. Foton ve madde arasındaki etkileşim, enerjinin nasıl yayıldığını ve sonunda yıldızın yüzeyinden nasıl açığa çıktığını belirlemektedir. Bir diğer enerji

iletim mekanizması olan konvektif aktarım, sıcaklık değişimlerinin gaz hareketini sağlayacak kadar yüksek olduğu bölgelerde meydana gelmektedir. Bir gaz bölgesi, çevresine göre daha sıcak ve daha az yoğun hale geldiğinde üst katmanlara yükselir. Bu sırada gaz kütlesi genişler ve adyabatik soğuma başlar. Çevresine göre daha soğuk ve yoğun olduğunda alt katmanlara çöker. Böylece Schwarzschild kriterine göre, konveksiyonun oluşabilmesi için adyabatik sıcaklık gradyentinin enerjinin transfer sonrası oluşan sıcaklığından daha az olması gerekmektedir. Bu konvektif hareket, ısıyı daha derin katmanlardan yüzeye taşıyarak enerji için bir taşıma bandı görevi görmektedir. Kırmızı devler gibi bazı yıldızlarda konveksiyon çekirdekten yüzeye kadar uzandığı tahmin edilmektedir. Konveksiyon, bir yıldızın içindeki elementlerin karıştırılmasında ve yeniden dağıtılmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Yıldızların iç katmanlarındaki enerji aktarımı kütlelerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Küçük kütleli yıldızlarda çekirdekte radyatif iletim ve zarfında konveksiyon yoluyla enerji iletimi gerçekleşirken, Güneş gibi orta kütleli yıldızlarda çekirdekte radyatif iletim ve zarfında büyük oranda radyasyon ve yıldız yüzeyinin altında ise konvektif akımlar ile enerji iletimi sağlanmaktadır. Büyük kütleli yıldızlar ise çekirdekte konveksiyon iletim söz konusuyken yıldız zarfında radyatif enerji taşınımı gerçekleşmektedir (Şekil 3.4). Enerji taşıma mekanizmalarındaki bu farklılıkların, çeşitli kütlelerdeki yıldızların evrimi, davranışı ve gözlemlenebilir özellikleri üzerinde derin etkileri vardır. Bu süreçlerin nasıl çalıştığını anlamak, yıldızların davranışlarını ve tayflarını modellemek ve yorumlamak, yıldız özelliklerine ve evrimine dair değerli bilgileri açığa çıkartmak çok önemlidir. Böylece, yıldız atmosferlerinin incelenmesi, bunların bileşiminin, gaz parçacıklarının davranışının, radyasyon ile madde etkileşiminin ve enerji taşınımını yöneten karmaşık süreçlerin ayrıntılı bir şekilde anlaşılmasını içermektedir.

Yıldızlara ait astrofiziksel parametrelerini doğru bir şekilde tespit etme amacıyla çizgi analizi gerçekleştirilmeden önce incelenecek yıldıza ait tayfa düzenlemeler yapılması gerekmektedir. PolarBase kütüphanesinden tez yıldızlarının yüksek çözünürlüklü tayfları indirildikten sonra, doğru ölçümler sağlamak için radyal hız kontrolünün yapılması gerekmektedir. *iSpec*, bu amaç için yaygın olan ve *Python* dilini kullanan bir programdır (Blanco-Cuearesma ve diğ., 2014). Yıldızın model atmosfer parametrelerini ve hassas radyal hız ölçümlerini belirlemek için kullanıcı dostu bir ara yüz sağlamaktadır.

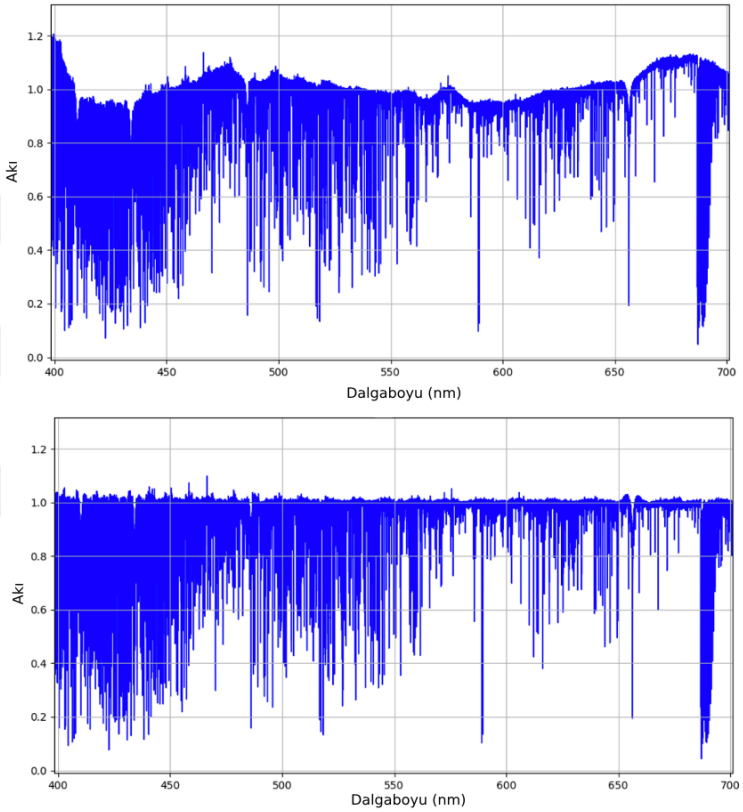


Şekil 3.4: Farklı kütlelerdeki yıldızların iç yapılarındaki enerji taşıma yöntemleri.

Güneş'e ait örnek bir tayf kullanılarak, yıldızın tayfına ait radyal hız düzeltmesinin doğru olup olmadığı kontrol edilmektedir. *iSpec*, bir referans tayf ile karşılaştırarak gözlenen tayfa ait çizgilerin Doppler kaymasını düzeltmek için çapraz korelasyon tekniğini kullanmaktadır. Bu düzeltme, yıldızın radyal hızı**,** $\Delta\lambda/\lambda_{ref} = v/c$ formülüyle yapılmaktadır. Burada $\Delta\lambda$, referans ile gözlenen tayfa ait çizgilerin farkını ifade etmektedir. Yıldızın tayf çizgileri, elde edilen radyal hız kadar kaydırılarak bu düzeltme uygulanmaktadır. Tez çalışması kapsamında HD 22879, HD 144579, HD 188510 ve HD 201891 yıldızlarının *iSpec* programı aracılığıyla radyal hızları, sırasıyla, 120.18 km/sn, -59.61 km/sn, -192.72 km/sn ve -44.69 km/sn olarak tayin edilmiştir.

Tayfı iyileştirmek için yapılan düzenlemeler arasında kullanılan bir başka yöntem de süreklilik düzeltmesidir. Süreklilik, bir yıldızın yaydığı ışık sayesinde oluşan tayfta görülen çizgilerin düzgün ve kesintisiz bir yapısını ifade etmektedir. Tayfın sürekliliği olarak bilinen bu kısmı, Planck'ın kara cisim ışınımı kanununa uygun olarak, yıldızın yüzeyinden yayılan termal ışınımdan kaynaklanmaktadır. Bu termal ışınım, sönümleme veya salma çizgileri gibi ayrı tayf özelliklerin belirginleştiği pürüzsüz ve kesintisiz bir arka plan oluşturmaktadır. Süreklilik kavramı tayf analizinin vazgeçilmezdir ve bir yıldız atmosferini karakterize etmek için kritik bir referans görevi görmektedir. Süreklilik düzeltmesinin titizlik ile uygulanmasının getirdiği temel avantajlardan biri, tayftaki çizgilerin genişliklerini ölçerken elde edilen hassasiyettir. Bu çizgilerin genişlikleri, yıldız atmosferinin sıcaklığına, kimyasal özelliklerine ve hatta hareketine dair bilgiler sunmaktadır. Bununla birlikte, *iSpec* kodunun tayfsal analizde güçlü bir araç olmasına rağmen, özellikle süreklilik normalizasyonu söz konusu olduğunda spline ve polinom uydurmalarında belirli kısıtlamalar ile karşı karşıyadır. Ancak bu zorluklar kodun genel faydasını azaltmamakta, daha ziyade incelikli bir yaklaşıma olan ihtiyacı vurgulamaktadır. Tez yıldızlarına süreklilik normalizasyonu uygularken ikinci dereceden geçirilen bir spline çizgisi

yeterli olmuştur. Şekil 3.5'te örnek olarak HD 201891 yıldızına uygulanan süreklilik düzeltmesi gösterilmiştir. Tez çalışması kapsamında titizlikle incelenen yıldızların temel astrofizik parametrelerini belirleme amacıyla çizgi teşhisi aşamasına geçmeden önce, tez yıldızlarının tayflarına süreklilik normalizasyonu uygulanmıştır.



Şekil 3.5: HD 201891 yıldızının süreklilik düzeltilmesi yapılmamış (üst panel) ve süreklilik düzeltmesi yapılmış tayfı (alt panel).

3.3.2. Çizgi Teşhisi ve Eşdeğer Genişlik Ölçümü

Titizlikle gözlemlenen ve hazırlanan tayflardan element bolluğu elde etme arayışı ve tayfsal çizgilerin karmaşıklığını çözmek, yıldızların kimyasal kökenlerini dikkat çekici bir şekilde aydınlatmak için önemlidir. Çizgi teşhisi, bir yıldızın tayfında gözlemlenen belirli tayfsal çizgileri veya bu çizgilerin özelliklerini kataloglama sürecini ifade etmektedir. Bu süreç, bir yıldız, bir bulutsu veya uzak bir galaksi olsun, nesnenin karmaşık tayfında ortaya çıkan farklı tayf çizgilerinin sistematik olarak tanımlanmasını ve kataloglamasını sağlamaktadır.

Çizgi teşhisi, birden fazla temel nedenden dolayı tayfsal analizde büyük öneme sahiptir. Farklı elementler, belirli dalgaboylarında ışığı soğurarak ve yayarak karakteristik tayfsal çizgiler üretmektedir. Çizgi teşhisi, temel astrofizik parametrelerinden biri olan yıldız sıcaklığının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Uzak galaksilerin ve diğer gök cisimlerinin kırmızıya kaymasını ölçmek için çizgi teşhisi çok önemlidir. Tayfsal çizgilerin kırmızıya kayması, evrenin genişlemesi nedeniyle nesnenin gözlemciden uzaklaşma hareketi hakkında bilgi verir. Bunun yanı sıra tayfsal çizgiler, yıldızların yoğunluğu ve manyetik alanları gibi fiziksel özelliklerine de ilişkin bilgiler sunmaktadır. Çizgilerin analiz edilmesi yıldızlarda, yıldızlararası veya galaksiler arası bölgelerde geçerli olan koşulların anlaşılmasını sağlamaktadır. Metalce fakir yıldızların kimyasal evriminin incelenmesi, kozmik zaman ölçeklerinde element bolluğundaki değişikliklerinin anlaşılmasına olanak tanımaktadır. Tayfsal analizde çizgi teşhisi, yıldızların bileşimini, özelliklerini ve evrimini ortaya çıkarmak için kritik bir araç olarak hizmet etmektedir ve araştırmaların önemli bir bileşeni haline getirmektedir.

Tez yıldızlarını incelerken tayf çizgilerin merkezi dalgaboylarını ölçmek için astronomik veri analizi alanında benimsenen *IRAF* (Görüntü Azaltma ve Analiz Tesisi) ve LIME (Şahin, 2017) yazılım paketleri kullanılmıştır. Kullanıcıya yalnızca bir ara yüz değil, aynı zamanda kendi programlama diliyle donatılmış çok yönlü bir platform sunarken, gökbilimcilerin interaktif olarak etkileşime geçmesine de olanak tanımaktadır. Bir yıldızın tayfındaki çizgileri teşhis etmek için öncelikle atomik ve moleküler geçişlere ilişkin verileri içeren bir çizgi listesine ihtiyaç vardır. Bu, belirli tayfsal çizgilerin görüldüğü dalgaboylarının belirlenmesini ve bunların belirli atomik veya moleküler geçişler ile ilişkilendirilmesini içermektedir. Çizgi listesi, belirli bir atomik geçiş için dalgaboyunu, uyarılma enerjisini, daha düşük seviyeli eksitasyon potansiyellerini (Low Excitation Potential; L.E.P.) ve atomik geçiş olasılıklarını (log gf) içermektedir. Çizgi listesinin oluşturulması gözlenen tayf çizgileri hızlı bir şekilde tanımlamasına, analiz edilmesine ve doğru veri yorumlamasına olanak tanımaktadır. Tayfsal analizin klasik ve zaman ile sınanmış tekniklerinden yararlanan metodoloji, bir dalganın merkezi dalgaboylarının kesin bir şekilde tanımlanması üzerine kurulmuştur. Bir çizgi listesi genellikle verileri laboratuvar ölçümlerinden, teorik modellerden veya mevcut veri tabanlarından derlenerek oluşturulmaktadır. Bu veriler daha sonra tayfsal analiz sırasında

referans olarak kullanılmak üzere yapılandırılmış bir katalog halinde düzenlenmektedir. Tez yıldızlarının çizgi teşhisini yaparken TÜBİTAK 122F265 numaralı projede Güneş civarındaki G tayf türünden metalce fakir 90 yıldızın tayfsal analizlerini gerçekleştirmek üzere hazırlanan çizgi listesi kullanılmıştır (Şahin ve diğ., 2023). Yıldızlara ait tayfta gözlenen ve incelemeye değer çizgiler, çizgi listesinde eşleştiği elementlere özgü geçişleri gerçek anlamda temsil edip etmediği kontrol edilmelidir. Yaygın olarak 'multiplet analiz tekniği' olarak bilinen bu son ve kritik aşama, dikkatli bir değerlendirme gerektirmektedir. Bu dikkat gerektiren aşama sıklıkla, ek atomik geçişlerin ortaya çıkarılmasını sağlayarak çizgi listesini geliştirmektedir. Çizgi listesinde bulunan ancak gözlemlenen yıldız tayfında bariz bir şekilde bulunmayan çizgiler dikkate alınmamaktadır. Bu titiz çaba, incelenen yıldıza ait kesin bir çizgi listesinin oluşturulmasıyla sonuçlanmaktadır (Tablo 3.4).

Genellikle EW olarak kısaltılan eşdeğer genişlik, astrofizikte bir elementin herhangi iki seviye arasında geçiş yaparak oluşturduğu tayfsal çizginin şiddetini veya derinliğini ölçmek için kullanılmaktadır. Belirli elementler ile ilişkili spesifik tayf çizgilerinin eşdeğer genişliğinin ölçülmesi, yıldızın kimyasal bileşimi hakkında çıkarım yapılmasını sağlamaktadır. Yıldızın tayf çizgilerinin eşdeğer genişlik ölçümü yapılırken, zayıf çizgiler için bir Gauss profilinin, güçlü çizgiler için bir Lorentz profilinin veya bunların bir kombinasyonu olan Voigt profilinin incelenen çizgilere uydurulmasını gerektirmektedir. Gözlenen akı dalgaboyuna karşı çizildiğinde çizginin soğurma veya salma özelliğiyle aynı alana sahip bir dikdörtgenin genişliğini temsil etmektedir:

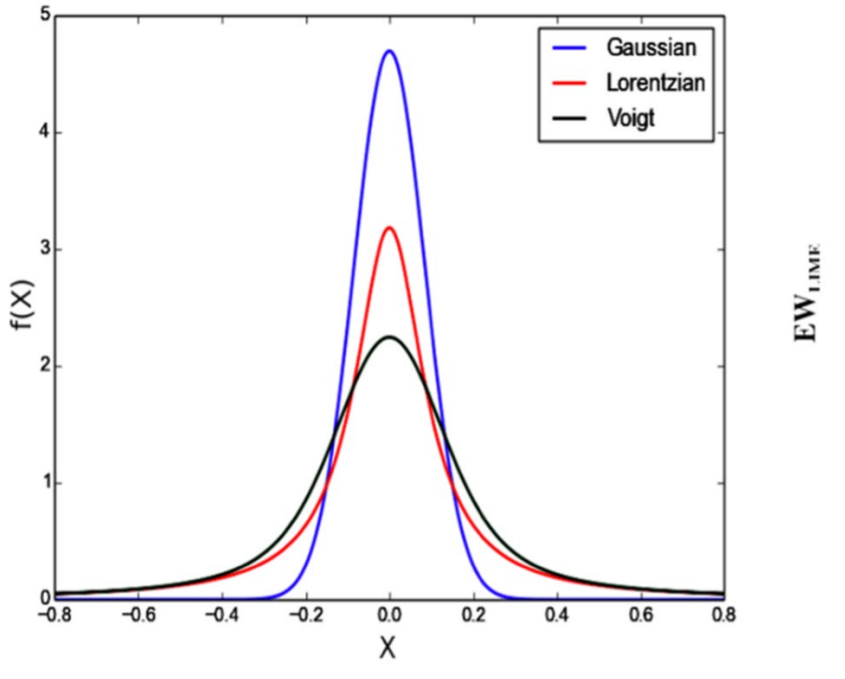
$$\mathrm{EW} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{F_{\text{süreklilik}} - F_{\lambda}}{F_{\text{süreklilik}}} d\lambda \tag{3.2}$$

Burada $F_{\text{süreklilik}}$ ve F_{λ}, sırasıyla, sürekliliğe ve çizgiye ait akı değeridir. Eşdeğer genişlik ile bir elemente ait bolluk analizi arasındaki ilişki aşağıda verilmiştir:

$$\log(EW) = \log C + \log(N_A) + \log(gf_{\lambda}) - \theta_x \chi - \log(\kappa_{\nu}) \tag{3.3}$$

Burada C, yıldıza ve belirli kuantum geçişine özgü bir sabittir, N_A, hesaplanmak istenen A elementinin hidrojen atomlarının sayısına göre atom sayısıdır, g, geçişin istatistiksel olasılığıdır, f, osilatör şiddeti, $\theta_x = 5040/T$, χ uyarılma potansiyelidir ve κ_{ν} ise soğurma katsayısıdır.

Tez kapsamında incelenen dört yıldızın eşdeğer genişlik ölçümlerinde *LIME* (Şahin, 2017) yazılım paketi kullanılmıştır. Söz konusu yazılım paketi, *IDL* ortamında, çizgi teşhisi ve eş değer genişlikleri ölçme amacına yönelik olarak oluşturulmuştur. İşlevselliği hem elle hem de otomatikleştirilmiş modları sunmaya kadar uzanmaktadır. Bu onu çok yönlü ve tayfsal analizin incelikli ihtiyaçlarına uyarlanabilir hale getirmektedir. Açık kaynak ilkelerinin bir örneği olan bu kodun dikkate değer özelliklerden biri, analiz sırasında tespit edilen çizgilerin karakterizasyonu için değerli bir girdi olan çizgi listesinin isteğe bağlı olarak dahil edilmesidir. Öne çıkan özelliklerden biri, kodun tespit edilen çizgileri, ilgili dalgaboylarına göre düzenlenmiş, yapılandırılmış ve düzenli bir şekilde sunma yeteneğidir. Kodun bu yeteneği, araştırmacılara analiz sırasında kapsamlı ve sistematik bir genel bakışa olanak tanımaktadır. *LIME* kodu, tayfsal çizgilerin tanımlanma sırasında uygun uydurma fonksiyonlarının seçilmesine de olanak sağlamaktadır. Varsayılan olarak, kullanılan birincil profil Voigt profilidir; ancak kullanıcılar özel analiz gereksinimlerine göre Lorentz veya Gaussian profili tercih etme esnekliğine de sahiptir (Şekil 3.6). Kodun işlevsellik ve yeteneklerinin kapsamlı bir şekilde anlaşılması için Şahin'in (2017) çalışmasında ayrıntılı bir açıklama bulunmaktadır.



Şekil 3.6: Bir tayfsal çizgiye uygulanan Gauss, Lorentz ve Voigt profillerine örnekler.

Tablo 3.4: Tez yıldızlarının çizgi teşhisinde kullanılan Fe I ve Fe II çizgileri.

Element	λ (Å)	LEP (eV)	log(gf) (dex)	Element	λ (Å)	LEP (eV)	log(gf) (dex)	Element	λ (Å)	LEP (eV)	log(gf) (dex)
Fe I	4080.22	3.28	-1.23	Fe I	5217.40	3.21	-1.16	Fe I	6137.70	2.59	-1.40
Fe I	4082.11	3.42	-1.51	Fe I	5228.38	4.22	-1.26	Fe I	6157.73	4.07	-1.22
Fe I	4088.56	3.64	-1.50	Fe I	5242.50	3.63	-0.97	Fe I	6165.36	4.14	-1.47
Fe I	4090.96	3.37	-1.73	Fe I	5243.78	4.26	-1.12	Fe I	6173.34	2.22	-2.88
Fe I	4204.00	2.84	-1.01	Fe I	5247.06	0.09	-4.95	Fe I	6180.21	2.73	-2.65
Fe I	4207.13	2.83	-1.41	Fe I	5250.22	0.12	-4.94	Fe I	6200.32	2.61	-2.44
Fe I	4220.35	3.07	-1.31	Fe I	5250.65	2.20	-2.18	Fe I	6213.44	2.22	-2.48
Fe I	4291.47	0.05	-4.08	Fe I	5253.47	3.28	-1.57	Fe I	6219.29	2.20	-2.43
Fe I	4365.90	2.99	-2.25	Fe I	5288.53	3.69	-1.51	Fe I	6232.65	3.65	-1.22
Fe I	4389.25	0.05	-4.58	Fe I	5298.78	3.64	-2.02	Fe I	6240.65	2.22	-3.17
Fe I	4432.58	3.57	-1.56	Fe I	5307.37	1.61	-2.99	Fe I	6252.56	2.40	-1.69
Fe I	4439.89	2.28	-3.00	Fe I	5322.05	2.28	-2.80	Fe I	6265.14	2.18	-2.55
Fe I	4442.35	2.20	-1.25	Fe I	5365.41	3.57	-1.22	Fe I	6270.23	2.86	-2.61
Fe I	4447.14	2.20	-2.73	Fe I	5373.71	4.47	-0.84	Fe I	6297.80	2.22	-2.74
Fe I	4447.73	2.22	-1.34	Fe I	5379.58	3.69	-1.51	Fe I	6301.51	3.65	-0.72
Fe I	4502.60	3.57	-2.31	Fe I	5398.29	4.44	-0.71	Fe I	6315.81	4.07	-1.66
Fe I	4556.93	3.25	-2.66	Fe I	5473.91	4.15	-0.79	Fe I	6322.69	2.59	-2.43
Fe I	4593.53	3.94	-2.03	Fe I	5483.11	4.15	-1.41	Fe I	6335.34	2.20	-2.18
Fe I	4602.01	1.61	-3.15	Fe I	5487.15	4.41	-1.51	Fe I	6336.83	3.69	-0.86
Fe I	4602.95	1.48	-2.22	Fe I	5501.48	0.96	-3.05	Fe I	6344.15	2.43	-2.92
Fe I	4619.30	3.60	-1.08	Fe I	5506.79	0.99	-2.80	Fe I	6393.61	2.43	-1.58
Fe I	4630.13	2.28	-2.59	Fe I	5525.55	4.23	-1.08	Fe I	6408.03	3.69	-1.02
Fe I	4635.85	2.84	-2.36	Fe I	5543.94	4.22	-1.11	Fe I	6419.96	4.73	-0.27
Fe I	4678.85	3.60	-0.83	Fe I	5546.51	4.37	-1.28	Fe I	6430.86	2.18	-2.01
Fe I	4704.95	3.69	-1.53	Fe I	5560.22	4.43	-1.16	Fe I	6469.19	4.83	-0.81
Fe I	4728.55	3.65	-1.17	Fe I	5618.64	4.21	-1.28	Fe I	6481.88	2.28	-2.98
Fe I	4733.60	1.48	-2.99	Fe I	5624.03	4.39	-1.20	Fe I	6498.94	0.96	-4.69
Fe I	4735.85	4.07	-1.32	Fe I	5633.95	4.99	-0.32	Fe I	6518.37	2.83	-2.46
Fe I	4741.53	2.83	-1.76	Fe I	5636.71	3.64	-2.56	Fe I	6593.88	2.43	-2.42
Fe I	4745.81	3.65	-1.27	Fe I	5638.27	4.22	-0.84	Fe I	6609.12	2.56	-2.69
Fe I	4788.77	3.24	-1.76	Fe I	5641.45	4.26	-1.15	Fe I	6678.00	2.69	-1.42
Fe I	4802.89	3.64	-1.51	Fe I	5662.52	4.18	-0.57	Fe I	6703.58	2.76	-3.06
Fe I	4839.55	3.27	-1.82	Fe I	5701.56	2.56	-2.22	Fe I	6750.16	2.42	-2.62
Fe I	4875.88	3.33	-1.97	Fe I	5705.47	4.30	-1.36				
Fe I	4917.23	4.19	-1.16	Fe I	5717.84	4.28	-1.10	Fe II	4178.86	2.58	-2.51
Fe I	4918.02	4.23	-1.34	Fe I	5741.86	4.26	-1.67	Fe II	4508.29	2.85	-2.44
Fe I	4924.78	2.28	-2.11	Fe I	5778.46	2.59	-3.43	Fe II	4576.34	2.84	-2.92
Fe I	4939.69	0.86	-3.34	Fe I	5806.73	4.61	-1.03	Fe II	4582.83	2.84	-3.06
Fe I	4961.92	3.63	-2.25	Fe I	5916.26	2.45	-2.99	Fe II	4620.52	2.83	-3.19
Fe I	4962.58	4.18	-1.18	Fe I	5929.68	4.55	-1.38	Fe II	5132.67	2.81	-4.09
Fe I	4973.10	3.96	-0.92	Fe I	5934.67	3.93	-1.12	Fe II	5197.58	3.23	-2.22
Fe I	5002.80	3.40	-1.53	Fe I	5952.73	3.98	-1.39	Fe II	5234.63	3.22	-2.21
Fe I	5022.24	3.98	-0.56	Fe I	5956.71	0.86	-4.61	Fe II	5264.81	3.33	-3.13
Fe I	5029.62	3.41	-2.00	Fe I	6027.06	4.07	-1.09	Fe II	5284.11	2.89	-3.11
Fe I	5074.75	4.22	-0.23	Fe I	6065.49	2.61	-1.53	Fe II	5414.07	3.22	-3.58
Fe I	5083.35	0.96	-2.96	Fe I	6079.02	4.65	-1.10	Fe II	5425.26	3.20	-3.22
Fe I	5088.16	4.15	-1.75	Fe I	6082.72	2.22	-3.57	Fe II	5534.85	3.24	-2.75
Fe I	5141.75	2.42	-2.24	Fe I	6096.67	3.98	-1.88	Fe II	6247.56	3.89	-2.30
Fe I	5145.10	2.20	-3.08	Fe I	6127.91	4.14	-1.40	Fe II	6432.68	2.89	-3.57
Fe I	5198.72	2.22	-2.13	Fe I	6137.70	2.59	-1.40	Fe II	6456.39	3.90	-2.05

3.3.3. Model Atmosfer Parametre ve Element Bolluklarının Tayini

Tayfsal analizde temel hedeflerinden biri, yıldızların karmaşık kimyasal özelliklerini ortaya çıkarmaktır. Bunun en önemli yönlerinden biri, yıldızlara ait temel astrofiziksel parametrelerinin kesin olarak belirlenmesidir. Yıldızlara ait temel astrofiziksel parametreler arasında etkin sıcaklık ($T_{\rm eff}$), yüzey çekim ivmesi (log g), metal bolluğu ([Fe/H]) ve mikrotürbülans hızı (ξ) gibi parametrelerin ölçülmesi yıldızların doğasının anlaşılmasında kritik önem taşımaktadır. Model atmosfer parametrelerinin tayini için çok yönlü ve literatürde *MOOG* (Sneden, 1973) olarak bilinen Python tabanlı yazılım programı kullanılmaktadır. *MOOG*, spesifik olarak çizgilerin eşdeğer genişliklerini dikkate alarak Yerel Termodinamik Denge (LTE) koşulları altında ATLAS9 (Castelli ve Kurucz, 2003) modellerini kullanarak yıldızların model atmosfer parametrelerinin türetilmesinde etkilidir. Programa verilen çizgi listesi, her yıldız için dalgaboyunu (Å), elementin atom numarasını, düşük uyarılma seviyesini (eV), osilatör şiddetini ve eş değer genişliğini (mÅ) içeren bir veri kümesini içermektedir. *MOOG*, model atmosfer parametrelerini yinelemeli olarak ayarlayarak sentetik ve gözlemlenen tayflar arasındaki farkı en aza indirmeyi ve sonuçta $T_{\rm eff}$, log g, [Fe/H] ve ξ için en doğru değerleri elde etmeyi amaçlamaktadır. Tez kapsamında incelenen dört yıldızın model atmosfer parametrelerinin tayini için *MOOG* yazılımının *abfind* paketi kullanılmıştır.

Model atmosfer parametreleri arasından yüzey çekimi ivmesinin tayini sırasında nötral demir çizgi bolluklarının düşük uyarma potansiyellerinden bağımsız olması, uyarılma ve iyonlaşma dengesini koruyan uygun bir yıldız modeline ulaşmak için kritik bir önem taşımaktadır. Bu koşul, model içinde uyarılma dengesini kurmak için çok önemlidir. Ayrıca iyonlaşma dengesinin sağlanmasında, analizde yer alan nötr ve iyonize elementlerin bolluğunun benzer olması gerekmektedir. Model atmosfer parametrelerinin belirlenmesinde geçişlerin yaygınlığı göz önüne alındığında, stratejik olarak demir anahtar bir elementtir. Bu bollukların hemen hemen aynı olmasını sağlamak modelin başarısı açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle nötral ve iyonize demir bolluklarının benzerliği, diğer elementler ile karşılaştırıldığında demire ait tayf üzerinde daha fazla tayfsal çizginin tespit edilmesinden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak nötral ve iyonize demir bolluklarının dengesi, nihai modelin doğrulanması için sağlam bir kriter olarak kabul edilmektedir. Bu titiz yaklaşım, modelin yalnızca gözlemlenen verileri doğru bir şekilde temsil etmesini sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda yıldızın özelliklerine

ilişkin kapsamlı bir anlayış sunarak yıldızın bileşimi ve evrimsel aşaması hakkında daha derin iç görülerin önünü açmaktadır. Etkin sıcaklığın, yüzey çekim ivmesinin ve mikrotürbülansın oluşturduğu dengenin ayrılmaz bir parçası olan demir bolluğu ([Fe/H]), metal bolluğunun belirlenmesinde etkili olmuştur. Burada kullanılan diferansiyel analiz yönteminde yıldızın metal bolluğu, bu tez kapsamında Güneş için hesaplanan demir bolluğuyla mutlak demir bolluğu arasındaki fark olarak hesaplanmıştır. Element bolluğu genellikle Güneş bolluğuna göre logaritmik bir ölçekte verilmektedir (tanım başına log ε(H) = 12):

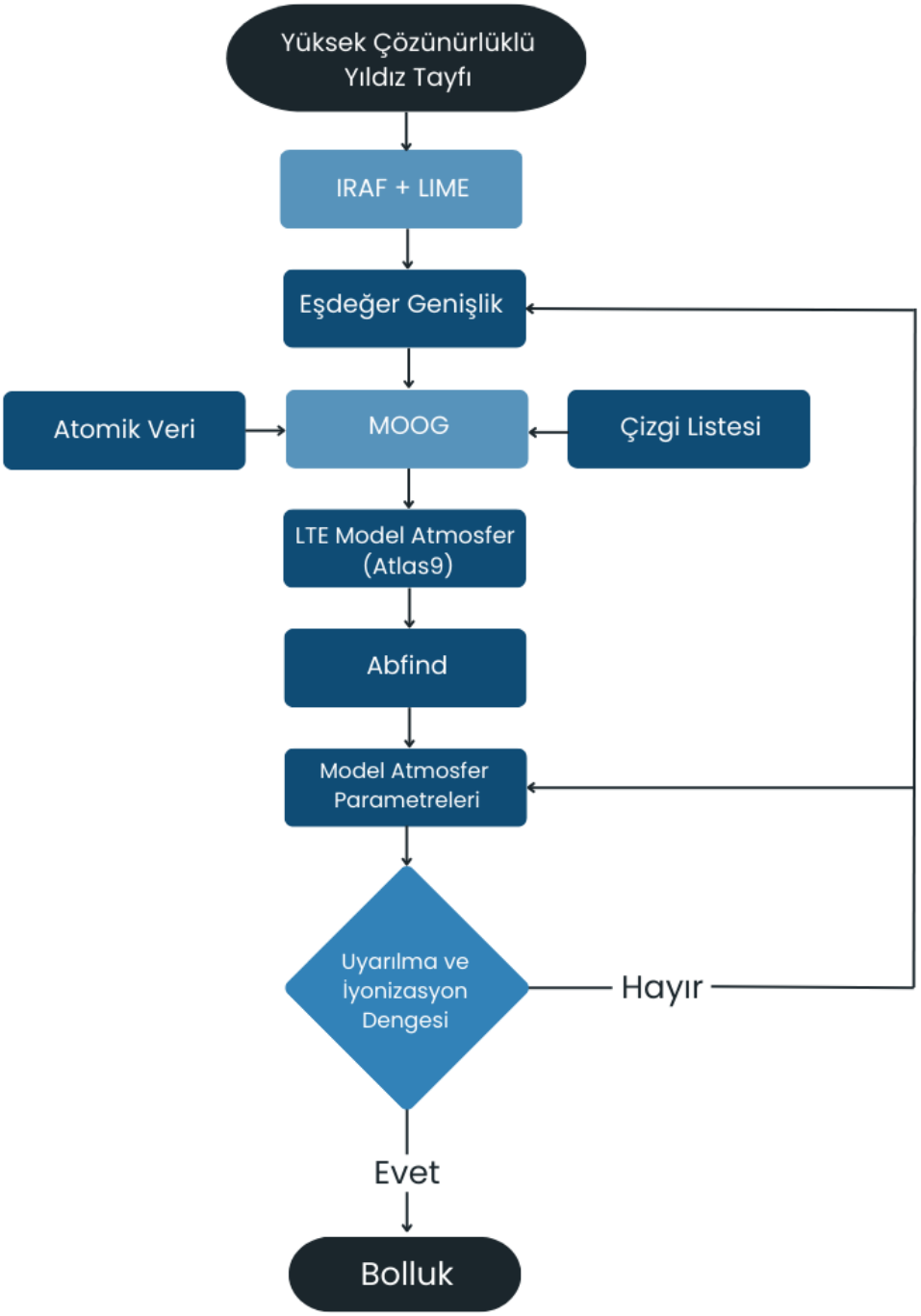
$$[A/B] = \log\left(\frac{N(A)}{N(B)}\right)_* - \log\left(\frac{N(A)}{N(B)}\right)_\odot \tag{3.4}$$

Burada N(A) ve N(B), sırasıyla yıldızdaki ($*$) ve Güneş'teki ($\odot$) A ve B elementlerinin kolon yoğunluğudur (kolon yoğunluğu 10^{12} hidrojen atomu başına verilmiştir). Bolluk mutlak bir ölçekte de verilebilir:

$$\log \in (A) = \log\left(\frac{N(A)}{N(H)}\right) - 12 \tag{3.5}$$

Bir yıldızın demir bolluğunu belirledikten sonra, genel olarak 7.5 dex olarak kabul edilen Güneş demir bolluğunu yıldızın demir bolluğundan çıkararak genel metal bolluğunu hesaplamak yaygın bir uygulamadır. Bu yaklaşım, göreceli demir bolluğunu tahmin etmek için bir referans noktası görevi görmektedir. Bu tez kapsamında, incelenen dört yıldız için model atmosfer parametreleri dahilinde etkin sıcaklık, yüzey çekim ivmesi ve mikrotürbülans değerlerini tespit etmek amacıyla nötral ve iyonize demir için mutlak bolluğu ±1σ aralığında bir hata analizi yapılmıştır. Bu karmaşık süreçlerin kapsamlı bir algoritması Şekil 3.7'de gösterilmiştir.

Özet olarak, bir dizi gelişmiş teknik ve metodolojiyi kullanan bu kapsamlı tayfsal analiz, yıldız atmosferlerinin ve bunların temel bileşimlerinin karmaşık ayrıntılarını detaylıca incelenmesini sağlamıştır.



Şekil 3.7: Tez yıldızlarının tayfsal analiz sürecini gösteren akış diyagramı.

3.4. YAŞ TAYİNİ

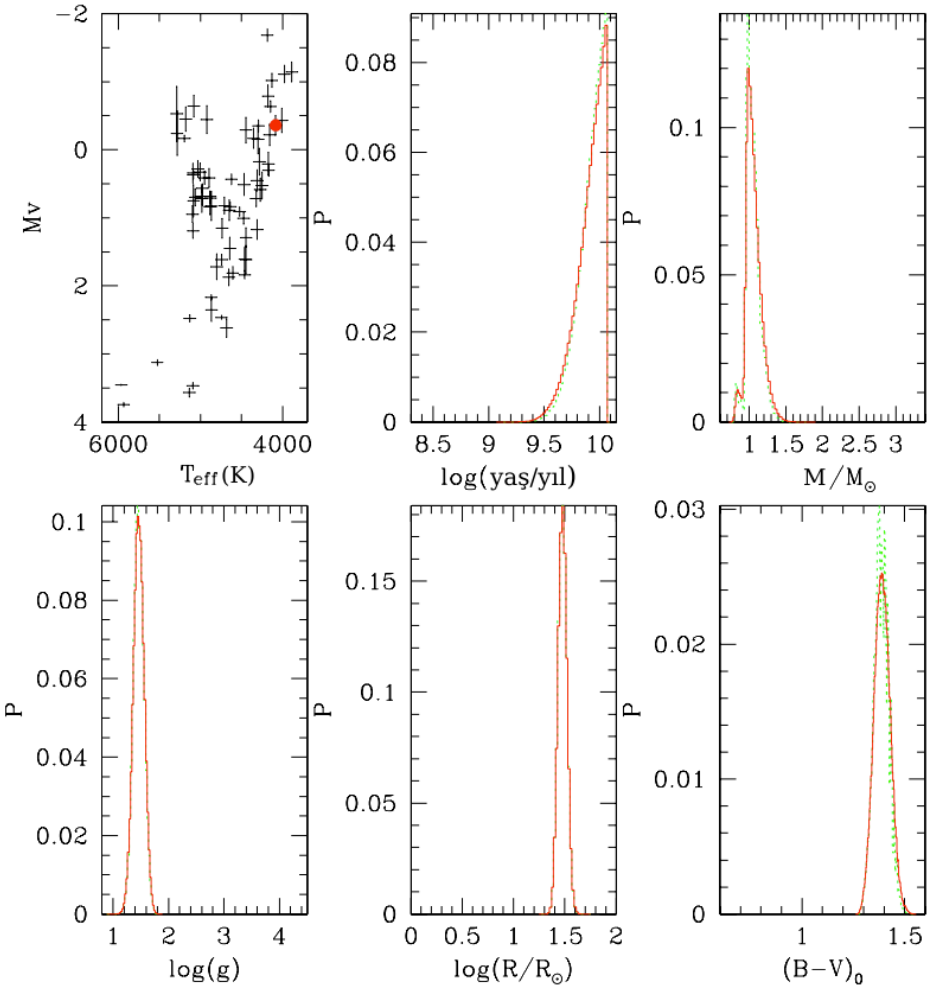
Bir yıldızın yaşının tayin edilmesi, yaşam döngüsünün bir bütün olarak incelenmesi açısından önemlidir. Süpernova patlamaları veya beyaz cüceye dönüşümü gibi önemli süreçleri geçirme olasılığı da dahil olmak üzere bir yıldızın yaşının belirlenmesi, onun geçmiş ve gelecekteki davranışlarını iyi anlaşılmasını sağlamaktadır. Dahası, yıldız oluşumu ve evrim modellerini kıyaslamaya yardımcı olarak yıldız doğumuna yol açan süreçler ve yaşamlarını etkileyen faktörler hakkındaki anlayışın gelişmesinin anlaşılmasına da olanak tanımaktadır. Doğru yaş ölçümleri aynı zamanda yıldız oluşum bölgelerindeki genç yıldızlar veya küresel kümelerdeki yaşlı yıldızlar gibi çeşitli yıldız popülasyonları içindeki yıldızların sınıflandırılmasına da yardımcı olmaktadır. Ayrıca yıldız yaşlarını belirlemek, evrenin yaşı da dahil olmak üzere kozmik evrimin daha geniş bağlamını çözmek için önemlidir. Yıldızlar kozmik saat görevi görür ve yaşları, kozmik olayların zaman çizelgesini oluşturmak için gerekli veri noktalarına katkıda bulunmaktadır. Metalce fakir yıldızların yaşlarının belirlenmesi, erken evrene dair sunduğu benzersiz bilgilerden dolayı özel bir öneme sahiptir. Çoğunlukla Popülasyon II yıldızları olarak anılan metalce fakir yıldızlar, evrenin ilk çağlarından kalma kalıntılardır. Metalce fakir yıldızların yaşlarını doğru ve duyarlı olarak tayin edilmesi, evrenin metalce zenginleştiği zaman çizelgesini ortaya çıkarmaktadır. Bu yıldızlar, ilk nesil yıldızlara ve onların nükleosentez süreçlerine dair ipuçları taşımaktadır. Ayrıca metalce fakir yıldızlar, gezegenlerin ve yaşamın oluşumu için hayati önem taşıyan ağır elementlerin sentezlenme sürecinin anlaşılmasında kilit rol oynar.

Literatürde yıldız popülasyonuna ve mevcut verilere bağlı olarak yıldızların yaşlarını belirlemek için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Örneğin, açık yıldız kümeleri kullanılarak yıldızların yaşları tespit edilmektedir. Açık yıldız kümeleri, benzer yaş ve bileşime sahip yıldızlar içermektedir. Küme üyesi yıldızların özellikleri analiz edilerek kümenin yaşı tespit edilmektedir. Tespit edilen bu yaş, üye yıldızların yaşlarını temsil etmektedir. Bir başka yöntem ise manyetik aktiviteyle ilgidir. Bazı yıldızlar, yaşlandıkça zamanla değişen karakteristik manyetik aktivite modeli sergilemektedir. Güneş lekeleri gibi aktivite göstergeleri izlenerek bir yıldızın yaşı tahmin edilmektedir. Bu yöntemlerin her biri çeşitli evrim aşamaları boyunca yıldız yaşlarını anlaşılmasına katkı vermektedir.

Bunların arasında öne çıkan bir diğer teknik ise HR diyagramı üzerinde aynı fiziksel özelliklere sahip fakat farklı kütlelerde bulunan yıldızları temsil eden eş-yaş eğrileriyle uyumu sonucunda belirlenen yaş tayinidir. Bu yöntem bir yıldıza ait parlaklık, sıcaklık ve metal bolluğu gibi temel parametrelerinin bilinen teorik modeller ile karşılaştırılmasına dayanmaktadır. Eş-yaş eğrileri, farklı yaşlara ve başlangıç koşullarına sahip yıldızların evrimini temsil etmektedir. Yıldızın özellikleriyle en uyumlu eş-yaş eğrisi, yıldızın yaşını ifade etmektedir. Hassas yaş tespiti için kullanılan bu yöntem, Pont ve Eyer'in (2004) öncülüğünü yaptığı bir çerçeve olan Bayes istatistiğine dayanmaktadır. Bu yaklaşım, eş-yaş eğrilerinin yıldız model atmosfer parametreleriyle karşılaştırılmasını, bununla ilgili belirsizliklerin dikkate alınmasını içermektedir. Yaş belirleme sürecinde teorik eş-yaş eğrilerinden elde edilen yaş, metal bolluğu ve kütle parametreleri, etkin sıcaklık ve yüzey çekim ivmesi gibi gözlemsel parametreler ile karşılaştırılmaktadır.

Tez kapsamındaki dört yıldızın yaşını belirlemek için da Silva ve diğ.'nin (2006) PARAM 1.7 ara yüzü kullanarak, güncel bir yıldız evrim modeli olan PARSEC (Bressan ve diğ., 2012) eş-yaş eğrileri kullanılmıştır. Tez yıldızlarının nihai yaşları, yıldızların model atmosfer parametrelerinin Bayes istatistiği kullanılarak PARSEC eş-yaş eğrileriyle karşılaştırarak elde edilmiştir. da Silva ve diğ. (2006) PARAM web sitesindeki algoritmayı kullanarak Güneş civarından seçilen 72 evrimleşmiş yıldızın tayfsal ve *Hipparcos* trigonometrik verilerini (ESA, 1997) kullanarak yıldızların yaşlarını tayin etmiştir. Tez çalışmasında örnek olması açısından HD 50778 yıldızının yaş tayini için yapılan adımlardan bahsedilmiştir. HD 50778 yıldızının M_V mutlak parlaklığı -0.36±0.15 kadir, T_{eff} etkin sıcaklığı 4084±70 K ve [Fe/H] metal bolluğu 0.29±0.05 dex olarak alındığında Bayes yöntemi kullanılarak yıldızın yaşıyla (t) birlikte kütlesi (M), yüzey çekim ivmesi (log g), yarıçapı (R) ve renk artığı $E(B\text{-}V)$ hesaplanmıştır. Bu yöntem ile yıldızın temel girdileri olan mutlak parlaklık, etkin sıcaklık ve metal bolluğu parametreleri PARSEC eş-yaş eğrileriyle karşılaştırılarak yıldızın temel parametreleri için en olası değerler elde edilmiştir. Çalışmalarında örnek olarak verilen HD 50778 yıldızının olasılık dağılımları Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Bu yöntem ile HD 50778 yıldızının yaşı t = 8.11±2.37 Gyıl, kütlesi M = 1.03±0.1 $M_{\odot}$, yüzey çekim ivmesi log g =1.46±0.10 cm/sn^2, yarıçapı R = 30.10±2.90 $R_{\odot}$ ve renk artığı $E(B\text{-}V)$ = 0.03±0.05 kadir olarak tayin edilmiştir. Tez çalışması kapsamında

incelenen dört yıldızın model atmosfer parametreleri elde edildikten sonra yaşı ve diğer temel astrofizik parametreleri PARAM ara yüzüyle hesaplanacaktır.

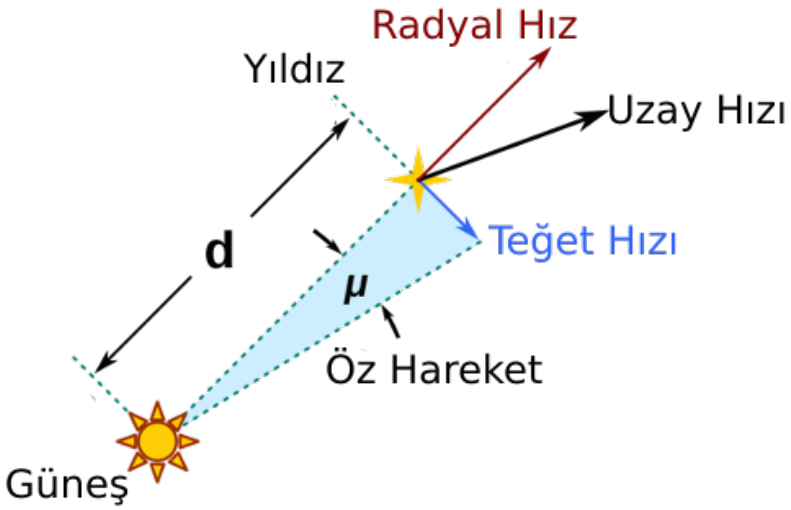


Şekil 3.8: da Silva ve diğ.'nin (2006) PARAM ara yüzüyle HD 50778 yıldızı için hesapladığı temel parametreler ve olasılık dağılımları.

3.5. KİNEMATİK ANALİZ

Bir yıldızın kinematik özellikleri onun uzaydaki hareketini ifade eder ve yıldızların Galaksi içindeki etkileşiminin anlaşılmasında, nihai kaderi de dahil olmak üzere evrim süreçleri hakkında bilgiler sağlamaktadır. Bu özellikler arasında öz hareket, radyal hız, teğet hız, uzay hızı ve yörünge parametreleri gibi birden fazla bileşen bulunmaktadır. Öz hareket, bir yıldızın gök küresindeki konumunun zaman içinde meydana gelen açısal değişimi olarak tanımlanmaktadır ve genellikle yıl başına yay saniyesi (yay saniyesi/yıl) cinsinden ifade

edilmektedir. Bu parametre, bir yıldızın zemindeki yıldızlara göre gökyüzünde hareketini göstermektedir. Radyal hız, bir yıldızın görüş hattı boyunca bir gözlemciye doğru veya gözlemciden uzaklaşma hızı olarak bilinmektedir. Genellikle saniyede kilometre (km/sn) cinsinden ölçülmektedir. Radyal hız (V_r) genellikle bir yıldızın tayfsal çizgilerinin Doppler kayması yoluyla belirlenmektedir. Teğet hız (V_T), bir yıldızın görüş hattına dik olan hızıdır (Şekil 3.9). Yıldızın öz hareketinden ve Dünya'ya olan uzaklığından (d) hesaplanmaktadır ($V_T = \mu \times d$). Uzay hızı, bir yıldızın üç boyutlu uzaydaki toplam hızı olarak ifade edilmekte olup radyal hız ile teğet hızın bileşiminden oluşmaktadır ($V = (V_r^2 + V_t^2)^{1/2}$, bkz Şekil 3.9). Çoklu yıldız sistemlerinde yörünge dönemi (P), yarı ana eksen (a) ve dış merkezlik (e) gibi yörünge parametreleri, yıldızların sistem içindeki hareketini tanımlamaktadır. Bahsi geçen bu kinematik özelliklerin hesaplanması astrofizikte önemli bir role sahiptir. Kinematik veriler, Samanyolu dahil galaksilerin yapısını ve dinamiklerin anlaşılmasına yardımcı olmaktadır. Özellikle yıldız kümelerindeki yıldızların yaşlarını belirlemek kullanılabilir. Benzer kinematik özelliklere sahip yıldızlar, aynı yıldız kümesine veya hareketli gruba ait olabilir, bu da ortak bir kökene işaret etmektedir. Büyük olasılıkla bu yıldızlar birlikte oluşmuştur ve benzer yaşlara sahiptir. Bu sayede yıldızların yaşlarını tahmin etmek için de kullanılmaktadır.



Şekil 3.9: Bir yıldızın teğet hızı, radyal hızı ve uzay hızını gösteren temsili şekil.

Bu tez çalışmasında Bovy'nin (2015) güçlü bir Python kütüphanesi olan *galpy* paketi kullanılarak dört yıldızın kinematik analizi gerçekleştirilmiştir. Samanyolu'nun yapısı ile dinamiklerini incelemek ve yıldızların davranışlarını benzetimi için literatürde sıklıkla *galpy* kullanılmaktadır. *Galpy*, Samanyolu'nda herhangi bir gök cisminin hareketi ve dinamikleriyle ilgili çeşitli hesaplamalar yapılmasına olanak tanıyan bir dizi araç ve işlev sunmaktadır. Paket, Galaksi'deki kütleçekim etkilerini analiz etmek için kullanılabilecek modeller sağlamaktadır. Ayrıca, kullanıcıların yıldızların yörünge davranışını anlaması için çeşitli dinamik özelliklerin de hesaplanmasına olanak tanımaktadır. Bunun yanı sıra, yıldızlara ait yörüngelerin ve diğer Galaktik özelliklerin görselleştirme araçları da bulunmaktadır. Analizin bu kısmında veri hazırlama, potansiyel modelleme, yörünge entegrasyonu ve sonuçların yorumlanması dahil olmak üzere birkaç önemli aşama bulunmaktadır. İlk adım, dört hedef yıldız için konumları, uzaklıkları, radyal hızları ve öz hareket bileşenleri de dahil olmak üzere gözlemsel verilerin toplanmasını içermektedir. Toplanan veriler *galpy* ile uyumluluğun sağlanması için dikkatle seçilmiş ve düzenlenmiştir. Analizin en önemli kısmı, yıldız yörüngelerinin hesaplanmasıdır. Burada *galpy*, seçilen potansiyel modeli kullanarak yörünge entegrasyonunu gerçekleştirerek bunu kolaylaştırır. Her yıldız için konum ve yaş gibi başlangıç koşulları belirtilmiştir. Yıldızların geçmiş ve gelecek yörüngelerinin izini sürmek için ileri ve geri entegrasyon yöntemleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, Samanyolu'ndaki yıldızların davranışlarına ilişkin bilgi vermektedir.

Galpy, Galaktik dinamiklerde kinematik analiz için güçlü bir araç olarak hizmet ederken, hassas astrofizik araştırmaların önemli bir yönü olan hata analizi için yerleşik işlevlerden yoksundur. Bu sınırlamanın farkında olarak, seçilen dört yıldızın kinematik parametreleri için hassas hata analizi gerçekleştirmek amacıyla alternatif bir yaklaşım dikkate alınmıştır. Tez kapsamında kinematik analiz aşamasında Johnson ve Soderblom'un (1987) algoritması ve dönüşüm matrisleri de kullanılmıştır. Tez yıldızlarının karmaşık dinamiklerini çözmek için ekvatoral koordinat (α, δ), radyal hız (V_r), öz hareket bileşenleri ($\mu_\alpha \cos\delta$, μ_δ) ve trigonometrik paralaks (ϖ) verileri gerekmektedir. *Gaia* DR3 veri tabanından seçilen öz hareket bileşenleri ve trigonometrik paralaks verileriyle çapraz referans vererek bu ihtiyaç giderilmiştir. Böylece veri seti sorunsuz bir şekilde tamamlanarak, mevcut güncel ve hassas astrometrik verilere erişim sağlanmıştır. Uzay hızı bileşenlerinin belirlenmesi için sağ el kuralına göre tanımlanan bir

referans sistemi kullanılmıştır. Bu çerçevede *U* bileşeni (*l*=0°, *b*=0°) Samanyolu'nun merkezini, *V* bileşeni (*l*=90°, *b*=0°) Galaktik dönme doğrultusunu, *W* (*b*=90°) bileşeni kuzey Galaktik kutba doğru yönelen yönü temsil etmektedir (Şekil 3.10).

Yıldızların uzay hızı bileşenleri matris formunda aşağıda tanımlandığı gibi hesaplanmaktadır:

$$(U, V, W) = B \cdot \left(V_r, K\frac{\mu_\alpha}{\pi}, K\frac{\mu_\delta}{\pi}\right) \tag{3.6}$$

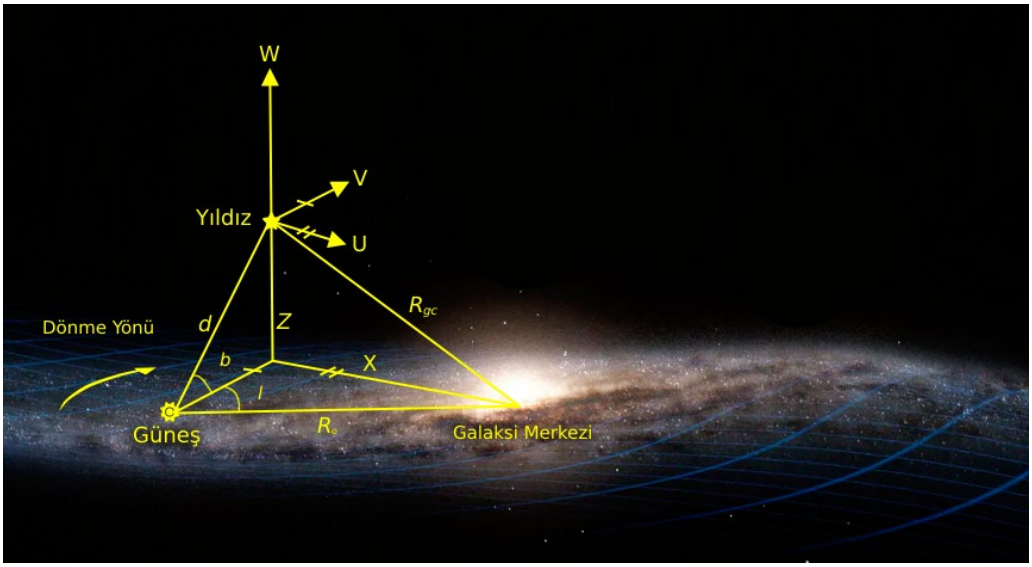
Burada *K*, değeri 4.74057 olan bir sabittir. *B* ise koordinatlara bağlı olarak tanımlanmış olup, *T* dönüşüm matrisi ve *A* koordinat matrislerinin skaler çarpımıyla hesaplanan başka bir matristir.

$$B = T \,.\, A \tag{3.7}$$

T ve *A* matrisleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$T = \begin{pmatrix} \cos\theta_o & \sin\theta_o & 0 \\ \sin\theta_o & -\cos\theta_o & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\sin\delta_{NGP} & 0 & \cos\delta_{NGP} \\ 0 & -1 & 0 \\ \cos\delta_{NGP} & 0 & \sin\delta_{NGP} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\delta_{NGP} & \sin\alpha_{NGP} & 0 \\ \sin\alpha_{NGP} & -\cos\delta_{NGP} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

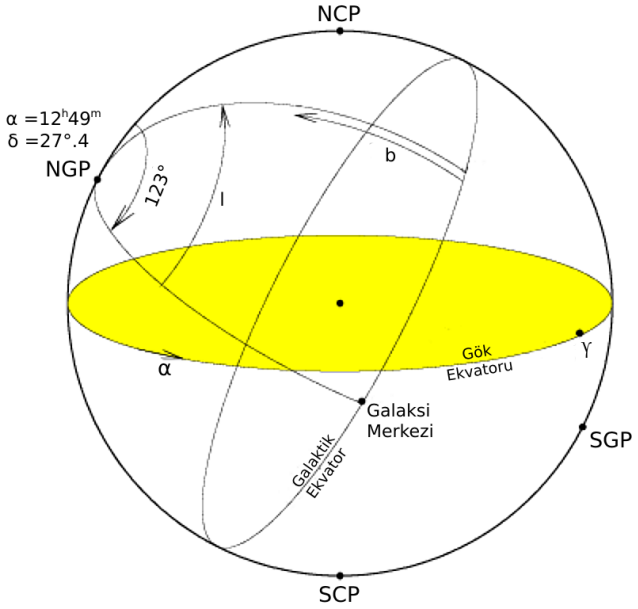
$$A = \begin{pmatrix} \cos\alpha\cos\delta & -\sin\alpha & -\cos\alpha\sin\delta \\ \sin\alpha\cos\delta & \cos\alpha & -\sin\alpha\sin\delta \\ \sin\delta & 0 & \cos\delta \end{pmatrix} \tag{3.8}$$



Şekil 3.10: Galaksi merkezi etrafında bir yörüngede hareket eden yıldızın *U*, *V*, *W* uzay hızı bileşenlerinin gösterimi.

Bağıntı (3.8)'de verilen T matrisinde Hipparcos'un verileriyle yeniden hesaplanmış güncel değerler olan ICRS koordinatları kullanılacaktır. Şekil 3.11'deki α_{NGP} ve δ_{NGP} Kuzey Galaktik Kutbu'nun (NGP) ekvatoral koordinatları, θ_0 =123° ise, Kuzey Gök Kutbu'nun (NCP) Galaktik boylamıdır. Bu değerler, Johnson ve Soderblom'un (1987) çalışmasındaki değerler olup *Hipparcos* çalışmalarında verilen (ESA, 1997) hassas astrometrik ölçümlerden hesaplanan daha güncel α_{NGP} ve δ_{NGP} değerleri T matrisine uyarlanmıştır. Bu yüksek lisans tez çalışmasında kuzey Galaktik kutbun ekvatoral koordinat sistemindeki değerleri α_{NGP} = 192°.85948 ve δ_{NGP} = 27°.12825 olarak alınmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda elde edilen T matrisi aşağıda ifade edilmiştir:

$$T = \begin{bmatrix} -0.0548755604 & -0.8734370902 & -0.4838350155 \\ +0.4941094279 & -0.4448296300 & +0.7469822445 \\ -0.8676661490 & -0.1980763734 & +0.4559837762 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$



Şekil 3.11: Galaktik koordinat sisteminin gök küresindeki gösterimi.

Galaktik düzlem boyunca içten dışa doğru yıldız yörüngelerindeki açısal dönme hızları yavaşlama eğilimindedir ve bu durum diferansiyel dönme olarak bilinmektedir. Tez kapsamında uzay hızı bileşenlerinde görülen bu etkinin kaldırılması için Mihalas ve Binney'in (1981) diferansiyel dönme bağıntıları kullanılmıştır. Diferansiyel dönme düzeltmesi özellikle Galaktik düzleme yakın hız bileşenlerini etkilediği için, bu düzeltmeler U ve V uzay hızı bileşenleri için elde edilmiştir:

$$dU = V_R \times \cos\ l - V_\mathrm{T} \times \sin\ l$$
$$dV = V_R \times \sin\ l + V_\mathrm{T} \times \cos\ l \quad (3.10)$$

Burada dU ve dV, sırasıyla, U ve V uzay hızlarına uygulanan diferansiyel dönme düzeltmeleri, V_r ve V_T de, sırasıyla, Galaktik diferansiyel dönmeden kaynaklanan radyal hız ve teğet hızdır. Yıldızların Güneş'e olan uzaklığına ve Galaktik boylamlarına göre radyal ve teğet hızları aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$V_R = A \times d \times \cos\ b \times \sin\ 2l$$
$$V_T = d \times \cos\ b \times (A \times \cos\ 2l + B) \quad (3.11)$$

Bağıntı (3.10) ve (3.11)'da verilen l ve b değerleri, sırasıyla, Galaktik boylam ve enlemdir. Oort sabitleri Mihalas ve Binney'den (1981) A = 14.8 km/sn/kpc ve B = -12.4 km/sn/kpc olarak alınmıştır.

Samanyolu'nun denge durumunu koruduğu, simetrik bir yapısal düzen sergilediği ve kütleçekimsel bozulmaların olmadığı bir ortamda belirli varsayımlar altında özel referans çerçevesinde Yerel Durağanlık Standardı (LSR) olarak bilinmektedir. Bu özel referans çerçevesi, dairesel bir yörünge boyunca elde edilen ortalama hızı yansıtan, hareket halindeki bir sistem ile karakterize edilmektedir. Bu varsayılan ortam, Galaksi merkezinden Güneş'in, genellikle R_0 = 8 kpc olarak tanımlanan konumuna kadar uzanmaktadır (Majewski, 1993). LSR düzeltmesinin etkili bir şekilde uygulanması, özellikle Güneş'in uzay hızı bileşenlerinin hesaplanmasını gerektirmektedir. Bu bileşenler esasen, Galaktik merkezden Güneş'in bulunduğu yere kadar olan uzaklık içinde sınırlı, hayali bir yörüngede gözlenen ortalama hareketi hesaplanmaktadır. Daha sonra, gözlenen tüm yıldızın uzay hızı bileşenleri bu LSR referans çerçevesine göre iyileştirilir. Tez kapsamında Coşkunoğlu ve diğ.'nin (2011) RAVE (The Radial Velocity Experiment, Radyal Hız Deneyi, Steinmetz ve diğ., 2006) gökyüzü tarama programından seçilen anakol yıldızlarından itibaren hesapladığı LSR değerleri kullanılmıştır. Güneş için değerler şu şekildedir: $(U_\odot, V_\odot, W_\odot)_\mathrm{LSR}$ = (8.83±0.24, 14.19±0.34, 6.57±0.24) km/sn.

Yıldızların uzay hızı bileşenlerinin hesaplanması sürecinde önemli bir varsayım yapılmaktadır. Olası hatalar öncelikle radyal hız (V_r), öz hareket bileşenleri ($\mu_\alpha \cos\delta$, μ_δ) ve uzaklık (d) parametrelerinden kaynaklanır. Koordinatlar, bu hesaplamalar için kullanılan T ve A matrislerindeki hassasiyetlerinin düşük olması nedeniyle hesaplamaya daha az etkide

bulundukları dikkate alınarak hatasız olarak kabul edilir. Bu yaklaşım, spesifik parametreler ile ilişkili rastgele ve bağımsız hataların ele alınmasını gerektirmektedir. Uzay hızlarıyla ilgili belirsizliklerin hesaplanmasında Johnson ve Soderblom'ın (1987) algoritması kullanılmıştır. Bu yöntem, her parametreye ilişkin hata büyüklüğünü tam olarak belirlenmesine olanak tanımaktadır. Bunun için her bir parametreden gelen belirsizlikler Bağıntı (3.12)'te verilen fonksiyon ile hesaplanmış ve Bağıntı (3.13) ile gösterilen eşitliğe yerleştirilmiştir:

$$\sigma^2_{F(x,y,z)} = \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 \tag{3.12}$$

$$\begin{bmatrix} \sigma^2_{\mathrm{U}} \\ \sigma^2_{\mathrm{V}} \\ \sigma^2_{\mathrm{W}} \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} \sigma_\gamma^2 \\ (k/\pi)^2\left[\sigma^2_{\mu_\alpha} + (\mu_\alpha \sigma_\pi/\pi)^2\right] \\ (k/\pi)^2\left[\sigma^2_{\mu_\delta} + (\mu_\delta \sigma_\pi/\pi)^2\right] \end{bmatrix} + 2\mu_\alpha \mu_\delta k^2 \sigma_\pi^2/\pi^4 \begin{bmatrix} b_{12}b_{13} \\ b_{22}b_{23} \\ b_{32}b_{33} \end{bmatrix} \tag{3.13}$$

Burada σ sembolü, üç farklı uzay hız bileşenindeki dispersiyonları ifade etmektedir. Bağıntıya çarpan olarak gelen C de Bağıntı (3.14)'te tanımlanan B matrisinin karesi alınarak elde edilmiştir:

$$C_{ij} = B_{ij}^2 \tag{3.14}$$

Yıldızların toplam uzay hızı (S) ve toplam uzay hızlarındaki belirsizlik (S_{hata}), sırasıyla, uzay hızı bileşenleri ve her bir uzay hızı bileşeninin hataları (U_{hata}, V_{hata}, W_{hata}), hataların yayılma prensibine göre, Bağıntı (3.15)'te verilen eşitlikler ile hesaplanmıştır:

$$\begin{aligned} S &= (U^2 + V^2 + W^2)^{\frac{1}{2}} \\ S_{\mathrm{hata}} &= (U^2_{\mathrm{hata}} + V^2_{\mathrm{hata}} + W^2_{\mathrm{hata}})^{1/2} \end{aligned} \tag{3.15}$$

3.6. Galaktik Yörünge Parametre Hesabı

Yıldızların Samanyolu'ndaki hareketi, oluşum, evrim ve etkileşimleri de dahil olmak üzere çeşitli astrofiziksel olaylar hakkında bilgiler verir. Bir yıldızın Galaktik yörünge parametrelerinin belirlenmesi, Samanyolu'ndaki hareketinin anlaşılmasını kolaylaştırır. Bu parametreler yıldızın yörüngesi, hızı ve Galaksi içindeki konumu hakkında önemli bilgileri kapsamaktadır. Bir yıldızın Galaksi içindeki yolculuğunun kesin olarak anlaşılması ve yıldız

dinamiklerinin ortaya çıkarılması için temel yörünge parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Galaktik yörünge parametresi hesaplamalarının sonuçları, yıldızın zaman içindeki yolculuğunun ayrıntılı bir portresini sunarak Galaksi'deki geçmiş ve gelecekteki konumlarını göstermektedir. Ayrıca bu sonuçlar yıldızın hız bileşenlerini, yörünge basıklığı ve özelliklerini ayırt etmek için önemli bulgular sağlamaktadır. Bu parametrelerin yorumlanması bir yıldızın kökenine, yaşına ve diğer gök cisimleriyle olan potansiyel etkileşimlerinin anlaşılmasını sağlar.

Galaktik yörünge parametrelerini doğru bir şekilde elde etmek için çok sayıda teknik ve hesaplama aracı kullanılmaktadır. Bu yöntemler konum, uzaklık, öz hareket bileşenleri ve radyal hız ölçümleri de dahil olmak üzere astrometrik ve tayfsal verilerin analizini kapsamaktadır. Ayrıca, literatürdeki bazı yazılım paketleri, sayısal benzetimleri oluşturmak, dinamik Galaktik ortamdaki yıldız yörüngelerini modellemek için kullanılmaktadır. Bu yüksek lisans tez kapsamında, yıldızların yörünge parametre hesapları, Bovy'nin (2015) *galpy* olarak bilinen Galaktik dinamik kütüphanesinde tanımlanmış potansiyel fonksiyonlarından yararlanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu analitik çalışma, her biri Galaktik evrenin farklı yönlerine ışık tutan iki ayrı senaryoyu kapsamaktadır. İlk senaryoda, Galaksi diski için eksenel simetri varsayımı yapılmıştır. Bu varsayım, yörünge dinamiği parametrelerinin hesaplanmasına temel oluşturmaktadır ve analizin önemli bir bileşeni olan MW modelinin oluşturulmasıyla sonuçlanmıştır. İkinci senaryoda model, Galaksi diskinde bulunan büyük ölçekli kütleçekimsel pertürbasyon kaynağı olan sarmal kolların ve çubuk yapısının etkisini kapsayan pertürbasyon fonksiyonlarının dahil edilmesiyle zenginleştirilmiştir. Bu güncelleme, başlangıçtaki eksenel simetrik MW modelini, MWBS potansiyel modeli olarak adlandırılan daha incelikli, eksenel simetrik olmayan bir modele dönüştürmüştür. Bu hesaplamalar, Güneş civarına ilişkin iki temel varsayıma dayanmaktadır: Galaktik dönme hızı ve Güneş'in Galaksi merkezine olan uzaklığı, sırasıyla, 220 km/sn ve 8 kpc (Majewski, 1993) olarak kabul edilmiştir. Literatüde *MWPotential2014* olarak bilinen MW potansiyel modeli, *galpy.potential* kütüphanesinde önceden tanımlanmış bir potansiyel fonksiyonudur. Tez çalışmasında *MWPotential2014* modeli kullanılacaktır (Tablo 3.5). Bu model, Samanyolu'nun parametrelerine ilişkin en güncel veriler ile uyum sağlayacak şekilde hazırlanmıştır.

Tablo 3.5: *MWPotential2014* modelinde kullanılan Samanyolu galaksisine ait parametreler.

Parametre	**Değer**	**Aralık**
R_0 (kpc)	8	
v_c (R_0) (km/sn)	220	
f_b	0.05	
f_d	0.60	
f_h	0.35	
Şişkin bölge için güç kanunu katsayısı	-1.8	
Şişkin bölge için kesilme yarıçapı (kpc)	1.9	
a (kpc)	3.0	
b (pc)	280	
Halo için r_s (kpc)	16	
σ_b (km/sn)	109	117±15
$F_Z(R_0,1.1\text{kpc})(2\pi GM_\odot/\text{pc}^2)$	72	67±6
$\Sigma_{vis}(R_0)$ $(M_\odot\ \text{pc}^{-3})$	53	55±5
F_Z uzunluk ölçeği (kpc)	3.2	2.7±0.1
$\rho(R_0,z=0)$ $(M_\odot/\text{pc}^3)$	0.10	0.10±0.01
$(\ln v_c / \ln R)\|_{Ro}$	-0.10	-0.2 – 0
$M(r<60$ kpc) $(10^{11}\ M_\odot)$	4.1	4.0±0.7
M_b $(10^{10}\ M_\odot)$	0.5	
M_d $(10^{10}\ M_\odot)$	6.8	
R_d (kpc)	2.6	
ρ_{DM} (R_o) $(M_\odot/\text{pc}^3)$	0.008	
M_{vir} $(10^{12}\ M_\odot)$	0.8	
r_{vir} (kpc)	245	
Yoğunlaşma	15.3	
v_{esc} (R_0) (km/sn)	513	

Bu, Galaktik ana bileşenlerin (şişkin bölge, disk ve halo) kütleçekimsel katkılarını açıklayan çok yönlü bir modeldir. Spesifik olarak, şişkin bölge, aşağıdaki matematiksel ifadeyle temsil edildiği gibi, 1.9 kpc'lik ayrı bir kesme noktasının ve -1.8'lik bir katsayının yapısını tanımladığı bir güç yasası yoğunluk profili ile de karakterize edilir.

$$\Phi_{\text{şişkin bölge}}(r) = A\left(\frac{r_1}{r}\right)^{\alpha} \exp\left[-\left(\frac{r}{r_c}\right)^2\right] \tag{3.16}$$

Burada A, kütle yoğunluğu biriminde potansiyel uygulanan genlik; α, iç kuvvet; r_c ve r_1 de, sırasıyla, kesim noktasının yarıçapı ve referans yarıçapın genliğidir.

Tez çalışmasında Galaksi diski Miyamoto ve Nagai'nın (1975) potansiyel bağıntısı kullanılmıştır:

$$\Phi_{\mathrm{disk}}(R_{\mathrm{gc}}, z) = -\frac{GM_{\mathrm{d}}}{\sqrt{R_{\mathrm{gc}}^2+\left(a_d+\sqrt{z^2+b_{\mathrm{d}}^2}\right)^2}} \tag{3.17}$$

Burada, R_{gc} yıldızın Galaksi merkezinden uzaklığı; z, yıldızın Galaktik düzleme dik doğrultudaki uzaklığı; G, evrensel çekim sabiti; M_{d}, disk kütlesi; a_{d} ve b_{d}, sırasıyla, Galaktik diskin uzunluk ve yükseklik ölçeği olarak tanımlanmıştır.

Galaksimizin halosu için Navarro, Frenk ve White'ın (1996) potansiyel bağıntısı kullanılmıştır:

$$\Phi_{\mathrm{halo}}(r) = -\frac{GM_{\mathrm{s}}}{R_{\mathrm{gc}}} \ln\left(1+\frac{R_{\mathrm{gc}}}{r_{\mathrm{s}}}\right) \tag{3.18}$$

Burada, M_{s} ve r_{s}, sırasıyla Samanyolu'nun karanlık madde halosunun kütlesini ve yarıçapını ifade etmektedir.

Şu ana kadar özetlenen bu ifadeler, eksenel simetrik MW potansiyel modeli içindeki Galaktik bileşenleri tanımlamaktadır.

Modelde Galaksi merkezi etrafında dönen her yıldızın yörünge özellikleri, 500 Myıl aralıklar ile toplam 10 Gyıl boyunca takip edilen yörüngelerinden elde edilmiştir. Yıldızlar, yörünge parametrelerinin kapalı bir yörünge oluşturması için 10 Gyıl gibi uzun bir dönem üzerinden analiz yapılmıştır. Bu hesaplamanın ardından, bir yıldızın Galaktik yörüngesine ilişkin yörünge parametreleri, peri-galaktik ve apo-galaktik mesafeleri (R_{p} ve R_{a}), yatay yörünge basıklığını (e_{p}) ve Galaktik düzleme dik ulaşılan maksimum uzaklığı (Z_{max}) kapsar. Yıldız yörüngelerinin ortalama Galaktosentrik mesafeleri, peri-galaktik ve apo-galaktik mesafelerin aritmetik ortalaması olarak hesaplanmıştır.

Sonuç olarak, yıldızların Galaktik yörünge parametrelerinin belirlenmesi, Samanyolu'nun dinamik ve evrimsel tarihine ışık tutmaktadır. *Galpy* paketi gibi araçların uygulanması ve çeşitli potansiyel modellerin dikkate alınması yoluyla, yıldızların yörüngelerini şekillendiren merkezi çubuk ve sarmal kollar gibi Galaktik bileşenlerin karmaşık etkileşimi hakkında bilgiler elde edilmektedir. Peri-galaktik ve apo-galaktik mesafeler, yörünge basıklığı ve Galaktik düzlemden maksimum sapmayı içeren bu türetilmiş yörünge özellikleri, Samanyolu'ndaki tek yıldızların

hareketleri ve geçmişleri hakkında daha derin bir anlayış sağlamaktadır. Hesaplama tekniklerindeki daha fazla iyileştirme ve gözlemsel verilerdeki artan hassasiyet, şüphesiz yıldız yörüngelerinin gizemlerini çözme yeteneğini artıracaktır.

3.7. Yıldızların Popülasyon Türlerinin Belirlenmesi

Astrofizik alanındaki dikkat çeken zorluklardan biri Samanyolu'ndaki yıldızlar arasındaki farklı popülasyon türlerinin tanımlanmasını içermektedir. Bu çaba, çeşitli nedenlerden dolayı büyük önem taşımaktadır. Samanyolu'nun oluşumu ve evrimi hakkındaki anlayışa katkıda bulunur. Farklı yıldız popülasyonları arasında ayrım yapmak, Samanyolu'nun tarihi boyunca meydana gelen yıldız oluşumunun, kimyasal olarak zenginleşmesinin ve dinamik süreçlerin tarihine dair önemli bilgiler sağlamaktadır (Matteucci, 2017). Yıldız popülasyon türlerini belirleme süreci çeşitli teknik ve metodolojileri içermektedir. Literatürde bulunan yaklaşımlardan biri, bir makine öğrenme algoritması olan Gauss Karışım Modelinin (GMM) kullanılmasıdır. GMM, verilere çoklu Gauss dağılımları uydurarak yıldız örneklerinin farklı popülasyonlar halinde sınıflandırılmasına olanak tanımaktadır (Pedregosa ve diğ., 2011). Her Gauss dağılımı belirli bir popülasyon türüne karşılık gelir ve bu yöntem, her popülasyona ait tek yıldızların olasılığını hesaplar. Ayrıca, mevcut kimyasal bolluk verileri ve yıldız örnekleriyle uğraşırken bu yöntem, [α/Fe] ve [Fe/H] bollukları yardımıyla popülasyon ayırmaya izin vermektedir. Yıldız popülasyonunun belirlenmesi, Galaktik evrimi daha geniş bir şekilde anlaşılmasına katkıda bulunarak, Samanyolu ve evrendeki diğer galaksiler hakkında daha kapsamlı çalışmaların yapılmasına olanak tanımaktadır.

Güneş civarındaki farklı popülasyonları ayırmada kullanılan bir başka yöntem ise yıldızların kinematik verilerine dayanmaktadır. Kinematik yaklaşım yöntemi, Güneş civarında bulunan yıldızların Galaktik popülasyon türlerini ayırt etmek için bir yaklaşım sunmaktadır. Bensby ve diğ. (2003) esas olarak Güneş'in yakınındaki ince disk yıldızlarından oluşan yıldız örnekleri içindeki kalın disk ve halo yıldızlarını tanımlanması için tasarlanmış bir teknik geliştirmiştir. Bu yöntem, ince disk, kalın disk ve halo popülasyonları için $(U, V, W)_{\mathrm{LSR}}$ olarak gösterilen uzay hızı bileşenlerinin Gauss dağılımları sergilediği varsayımına dayanır:

$$f_i(U,V,W) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}\times\sigma_{i,U}\times\sigma_{i,V}\times\sigma_{i,W}} \times \exp\left(-\frac{U_{LSR}^2}{2\sigma_{i,U}^2} - \frac{(V_{LSR}-v_{i,a})^2}{2\sigma_{i,V}^2} - \frac{W_{LSR}^2}{2\sigma_{i,W}^2}\right) \qquad (3.19)$$

Bağıntı (3.19)'da verilen $f(U,V,W)$ bir yıldızın ince disk, kalın disk ve halo popülasyonlarının uzay hızı bileşenleri için olasılık yoğunluk fonksiyonlarını temsil etmektedir. Bağıntıdaki U_{LSR}, V_{LSR} ve W_{LSR} yıldızların uzay hız bileşenlerini, σ_U, σ_V ve σ_W, her popülasyon için ilgili hız dağılımlarının dispersiyonlarını ve v_i ise her bir popülasyonun asimetrik sürüklenmeyi temsil etmektedir. Bu yöntem, Samanyolu yakınındaki yıldızların kendi popülasyon türlerine göre tanımlanmasına ve sınıflandırılmasına olanak tanıyarak Samanyolu'nun çeşitli yıldızlarına ilişkin anlayışı geliştirir. Bağıntı (3.19)'da verilen parametreler ilgili Galaktik popülasyonlar için yazıldığında bağıntı (3.20) elde edilir.

$$
\begin{aligned}
f(U,V,W)_{\text{ince}} &= \frac{1}{(2\pi)^{3/2}\times 35\times 20\times 16}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(U-35)^2}{35^2}+\frac{(V-20)^2}{20^2}+\frac{(W-16)^2}{16^2}\right]\right\}\\
f(U,V,W)_{\text{kalın}} &= \frac{1}{(2\pi)^{3/2}\times 67\times 38\times 35}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(U-67)^2}{67^2}+\frac{(V-38)^2}{38^2}+\frac{(W-35)^2}{35^2}\right]\right\}\\
f(U,V,W)_{\text{halo}} &= \frac{1}{(2\pi)^{3/2}\times 160\times 90\times 90}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(U-160)^2}{160^2}+\frac{(V-90)^2}{90^2}+\frac{(W-90)^2}{90^2}\right]\right\}.
\end{aligned}
\tag{3.20}
$$

Yıldızın Samanyolu'ndaki popülasyon türünü belirlemek için (3.21)'de elde edilen olasılık değerleri her bir popülasyonun Güneş civarındaki görülme olasılıkları (X) ile çarpılır. Burada X, Güneş komşuluğundaki yıldızların popülasyon oranlarını gösteren bir katsayıdır. Bunlar ince disk, kalın disk ve halo için, sırasıyla, X_{D}(ince) = 0.9385, X_{TD}(kalın) = 0.06 ve X_{H}(halo) = 0.0015'tir (Robin ve diğ., 1996; Buser ve diğ., 1999). Kalın diskin, ince disk ve haloya göre göreli olasılıkları aşağıdaki bağıntılar ile hesaplanır:

$$
\frac{TD}{D}=\frac{X_{TD}}{X_D}\times\frac{P_{TD}}{P_D}, \qquad \frac{TD}{H}=\frac{X_{TD}}{X_H}\times\frac{P_{TD}}{P_H}. \tag{3.21}
$$

Bensby ve diğ. (2005) $TD/D \leq 0.1$ olan yıldızları yüksek olasılıklı ince disk yıldızları olarak kabul etmiştir. Buna göre, seçilen yıldızların ince diske üye olma olasılığı kalın diske üye olma olasılığının on katıdır. Benzer şekilde $TD/D > 10$ olan yıldızları da yüksek olasılıklı kalın disk ve halo yıldızı olarak varsaymışlardır. Arada kalan $0.1 < TD/D \leq 1$ ve $1 < TD/D \leq 10$ gruplarını da, sırasıyla, düşük olasılıklı ince disk ve düşük olasılıklı kalın disk yıldızları olarak kabul etmişlerdir. Bensby ve diğ. (2005) ince ve kalın disk yıldızları için $TD/D > 1$'i gerekli bir koşul olarak kabul etmişlerdir.

Sonuç olarak, Samanyolu'ndaki yıldızların popülasyon türlerini belirlemek için farklı yaklaşımları bir arada içeren hibrit yöntemlerin kullanılması, yıldızları daha yüksek derecede hassasiyet ile ince disk, kalın disk ve halo popülasyonları olarak sınıflandırmasına olanak sağlamaktadır. Her popülasyon ile ilişkili farklı kinematik işaretleri ayırt ederek yalnızca Samanyolu'nun anlaşılması açısından değil, aynı zamanda galaksi oluşumu ve evriminin daha geniş bağlamına katkıda bulunmaktadır.

3.8. YILDIZLARIN KÖKENLERİNİN BELİRLENMESİ

Yüksek lisans tezin bu bölümünde, seçilen yıldızların Galaktik kökenlerinin, küresel kümeler ile ilişkisi araştırılarak küresel kümelerden ayrılma olasılıklarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Çalışmada incelenen yıldızların literatürde metal bolluklarının fakir olarak raporlanması ve bu yıldızların da Güneş civarında yer alması Samanyolu'nun ince disk popülasyonuna uyumluluğunu azaltmaktadır. Yıldızların metal bollukları dikkate alındığında bu yıldızların küresel kümelerden ayrılarak zaman içerisinde basık Galaktik yörüngelerinden dolayı Güneş civarından geçme ihtimali bulunmaktadır (Şahin ve Bilir, 2020). İncelenen yıldızlarının kökenlerinin belirlenmesinde model atmosfer parametreleri dışında kinematik, dinamik Galaktik yörünge parametrelerinin de eş zamanlı olarak incelenmesini büyük önemi vardır. Çalışmanın bu aşamasında tez kapsamında incelenen dört yıldızın kinematik ve dinamik Galaktik yörünge parametrelerinin dışında Samanyolu'nda yer alan küresel kümelerin bugünkü astrometrik ve tayfsal parametreleri dikkate alınarak Galaktik yörüngeleri oluşturulacaktır. Ardından yıldızların çalışmada tayin edilen yaşları da dikkate alınarak yörüngeleri boyunca günümüzden geriye doğru hareket ettirilir. Benzer durum tüm küresel kümeler için de gerçekleştirilerek kümelerin beş gel-git yarıçap mesafeleri içerisindeki karşılaştırmalar incelenir. Bunun ile birlikte analizlerde yıldız ile küresel kümelerin uzay hızlarının da birbirilerine yakın olması göz önünde tutulur. Son olarak, aday küresel kümelerin metal bolluklarıyla yıldızların metal bolluklarının yakın olmasına bakılarak küresel kümelerden ayrılma durumları göz önünde bulundurulur. Çalışmanın bu aşamasında incelenecek adımlar aşağıda detaylıca açıklanmıştır.

Yüksek lisans tezinin bu kısmında HD 22879, HD 144579, HD 188510 ve HD 201891 için yörüngeleri Vasiliev ve Baumgardt'ın (2021) Samanyolu'nda incelediği 170 küresel kümenin

merkezlerinden beş gel-git yarıçapı uzaklıkta eş zamanlı olarak bulunma olasılıkları incelenir. Buna göre, yıldızların elde edilen yörünge konumları arasındaki uzaklık her bir zaman dilimi için hesaplanır. Elde edilen sonuçların beş gel-git yarıçapından küçük olduğu durumlara karşılık gelen zaman dilimi için bir karşılaşma durumunun olduğu varsayılır. Her bir küresel küme ve yıldız karşılaşmasının aşağıda verilen bağıntılar ile konum ve hız bakımından ortak bir kökene sahip olma durum olasılığı hesaplanır:

$$\Delta d = \sqrt{(X_i - X_{\mathrm{KK}})^2 + (Y_i - Y_{\mathrm{KK}})^2 + (Z_i - Z_{\mathrm{KK}})^2}, \tag{3.22}$$

$$\Delta S = \sqrt{(U_i - U_{\mathrm{KK}})^2 + (V_i - V_{\mathrm{KK}})^2 + (W_i - W_{\mathrm{KK}})^2}, \tag{3.23}$$

$$P_{\mathrm{uzaysal}}\,(\theta \mid \Delta d, \Delta S, \sigma_{\Delta d}, \sigma_{\Delta S}) = \frac{1}{2\pi\sqrt{\sigma_{\Delta d}\sigma_{\Delta S}}} \times \exp\left(\left(\frac{\Delta d}{\sigma_{\Delta d}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{\sigma_{\Delta S}}\right)^2\right). \tag{3.24}$$

Burada Δd belli bir t zamanında yıldızın konumuyla küresel kümenin yörüngesi üzerindeki mesafeyi, $X_{\mathrm{i}}Y_{\mathrm{i}}Z_{\mathrm{i}}$ ve $X_{\mathrm{kk}}Y_{\mathrm{kk}}Z_{\mathrm{kk}}$ parametreleri de t zamanındaki, sırasıyla, yıldızın ve küresel kümenin kartezyen sistemdeki konumlarını göstermektedir. Benzer olarak ΔS belli bir t zamanında yıldızın uzay hızıyla küresel kümenin yörüngesi üzerindeki toplam uzay hız farklarını göstermektedir. $U_{\mathrm{i}}V_{\mathrm{i}}W_{\mathrm{i}}$ ve $U_{\mathrm{kk}}V_{\mathrm{kk}}W_{\mathrm{kk}}$ parametreleri de t zamanındaki, sırasıyla, yıldızın ve küresel kümenin uzay hızlarını ifade etmektedir. Son olarak, P_{uzaysal} parametresi normal dağılım varsayımı altındaki yıldızın konum ve hız bakımından incelenen küresel kümeye bağlı olma olasılığını gösterir. Bağıntı (3.22) için beş gel-git yarıçapı, Bağıntı (3.23) için de küresel kümelere ait merkezi kaçış hız değerleri dikkate alınmıştır.

Tez çalışmasında Samanyolu'na ait küresel kümelerinin astrometrik (α, δ, $\mu_\alpha\cos\delta$, μ_δ, ϖ) ve tayfsal parametresi (V_{t}) Vasiliev ve Baumgardt'ın (2021) *Gaia* EDR3 (Gaia işbirliği, 2021) verilerine dayalı çalışmasından alınmıştır. Küresel küme ve yıldız karşılaşmasının birden fazla zaman diliminde meydana geldiği durumda aralıksız kesişme olasılıklarının toplamından ilgili zaman dilimi için bir olasılık değeri hesaplanmıştır. Ayrıca, birden fazla zaman diliminde karşılaşma meydana gelmesi durumunda zaman kesişme kesitinin en yüksek olasılıklı değeri ilgili küresel küme için seçilerek diğer küresel kümeler ile karşılaştırılmasında kullanılmıştır. Bu olasılıklara bakılarak, yıldızların metal bollukları ve aday küresel kümelerin metal bolluklarıyla karşılaştırılarak kümeden ayrılma olasılıkları iyileştirilecektir.

4. BULGULAR

Yüksek lisans tez kapsamında Güneş civarındaki yüksek öz hareketli dört metalce fakir yıldızın (HD 22879, HD 144579, HD 188510 ve HD 201891) tayfsal enerji dağılımları (SED), klasik tayfsal analizleri, yaşları, kinematik ve dinamik yörünge parametreleri tayin edilmiştir. Elde edilen bulgulardan dört yıldızın yıldızların popülasyon türleri ve yıldızların kökenlerine yönelik araştırmalar gerçekleştirilmiştir Tez yıldızlarına ait çıktılar ilgili analizin alt başlığında sunulmuştur.

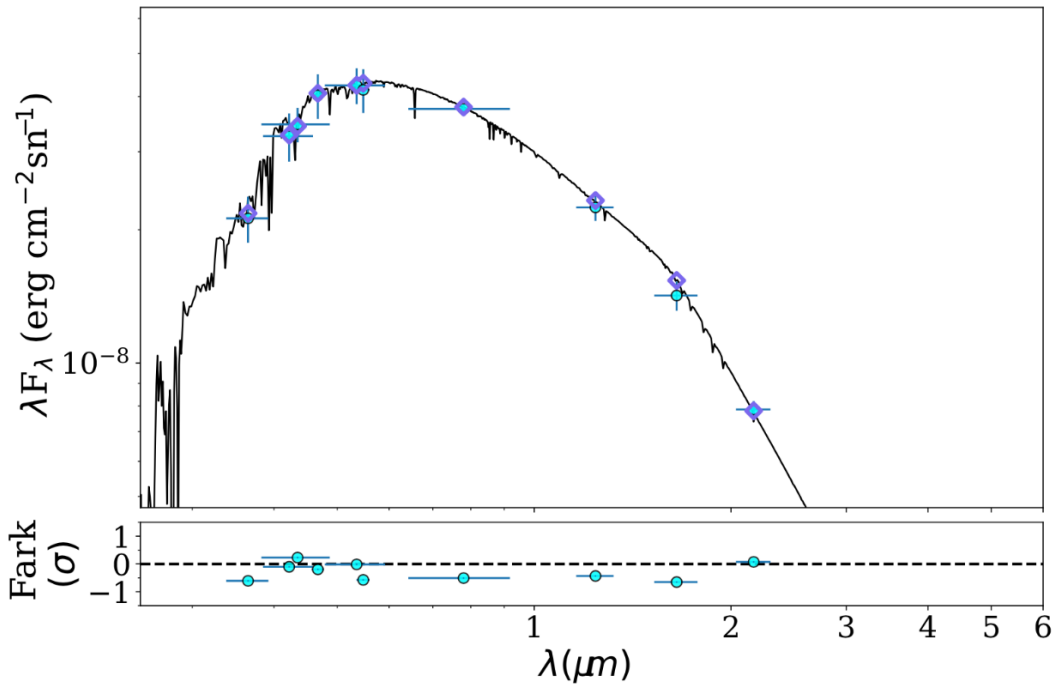
4.1. TAYFSAL ENERJİ DAĞILIMI (SED)

Sürekli gelişen astrofizik alanında, gök cisimlerini, özellikle de yıldızları incelemek için kesin ve yenilikçi yöntemlere duyulan ihtiyaç, yeni tekniklerin geliştirilmesine yol açmıştır. Bunların arasında Tayfsal Enerji Dağılımı (SED) yöntemi, yıldızların yaydığı elektromanyetik ışınımının analiz edilmesine olanak tanıyan güçlü bir araç olarak ortaya çıkmıştır. SED analiz süreci, gözlemlenen nesnenin akı dağılımının model atmosferler ile karşılaştırılmasını içermektedir. Yüksek lisans tez kapsamında, yıldızların tayfsal analizi yapılmadan önce girdi parametrelerini belirlemek ve tayfsal analiz ile hesaplanan model atmosfer parametreleri arasından etkin sıcaklık, yüzey çekim ivmesi ve metal bolluğunu sınamak için tez yıldızlarına SED yöntemi uygulanmıştır. Ayrıca bu yöntem her bir yıldız için yıldızlararası sönükleşme değerinin, uzaklığının, kütlesinin, yarıçapının ve yaşının hesaplanmasına fırsat tanır. Elektromanyetik tayfın farklı bölgelerinde gözlemleri yapılan yıldızların fotometrik ölçümleri birleştirilerek, tez yıldızları için çok dalgaboylu veriler elde edilmiştir. HD 22879, HD 144579, HD 188510 ve HD 201891 olmak üzere dört farklı yıldız için temel astrofizik parametreleri elde edilmiştir (Tablo 4.1).

SED yönteminin uygulanmasında Vines ve Jenkins'in (2022) Bölüm 3.2'de verilen ARIADNE kodu kullanılmıştır. Bu süreçte sentetik tayflar için mikrotürbülans değeri sabit olduğu varsayılmıştır. Tez yıldızlarının metal bollukları literatürde incelendiğinde metalce fakir olduğu tespit edilmiştir. ARIADNE kodunun efektif bir şekilde çalışabilmesi için metal bolluğu aralığı ve sıcaklığı geniş aralığa sahip Castelli ve Kurucz'un (2003) ve Husser ve diğ.'nin (2013) PHOENIX v2 modelleri kullanılmıştır (bkz. Tablo 3.3).

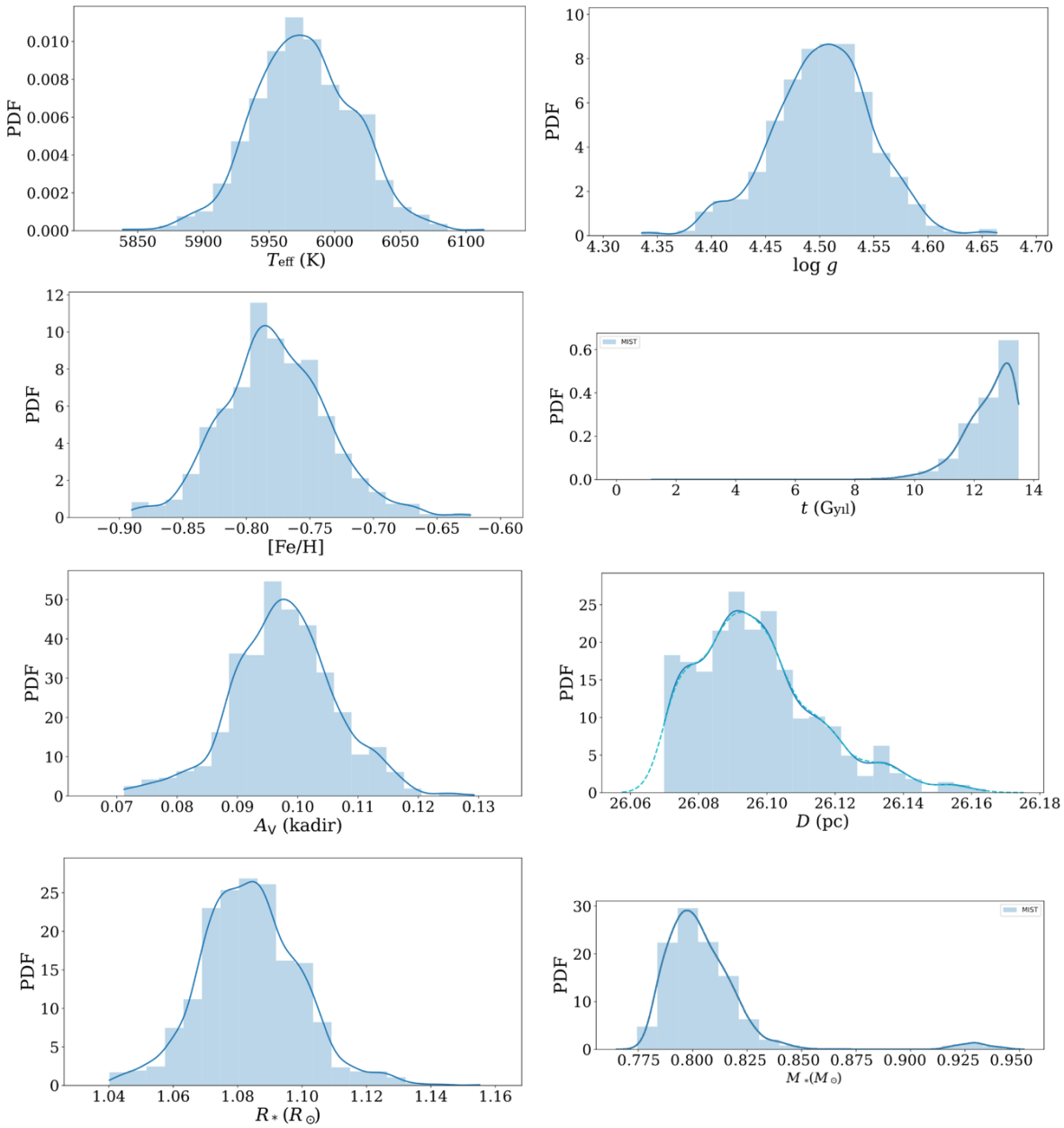
Her yıldızın SED analizinin gerçekleştirilirken koda yıldızın ekvatoral koordinatları girilmiş ve program aktif hale getirilmiştir. Bu aşamadan sonra *astroquery* modülü kullanılarak yıldızların geniş bir elektromanyetik bölgedeki fotometrik verileri çeşitli kataloglarda taranarak görünen parlaklıklar toplanmaktadır. Ardından belirlenen parlaklıklar akıya çevrilerek listelenmektedir. Daha sonra, yıldız için akı diyagramı oluşturularak Castelli ve Kurucz (2003) ile Husser ve diğ.'nin (2013) PHOENIX v2 model atmosferleriyle karşılaştırılmaktadır. En uyumlu model yıldızın temel astrofizik parametreleri olarak elde edilmektedir. Analizler sonucunda yıldızların model atmosfer parametreleri ($T_{\rm eff}$, log g ve [Fe/H]), V bandındaki sönükleşme değeri ve uzaklık ($A_{\rm V}$, d), yaş (t) ve temel astrofizik parametreleri (M, R ve L) belirlenen parametreler hatalarıyla birlikte bir dosyaya yazdırılmaktadır.

HD 22879: Literatürde yüksek öz hareketli bir yıldız olarak bilinen HD 22879 yıldızının SED analizlerini gerçekleştirebilmek için ARIADNE kodu kullanıldığında 10 fotometrik veriye ulaşılmıştır. Elde edilen görünen parlaklıklar akıya çevrilerek SED profili oluşturulmuştur (Şekil 4.1).



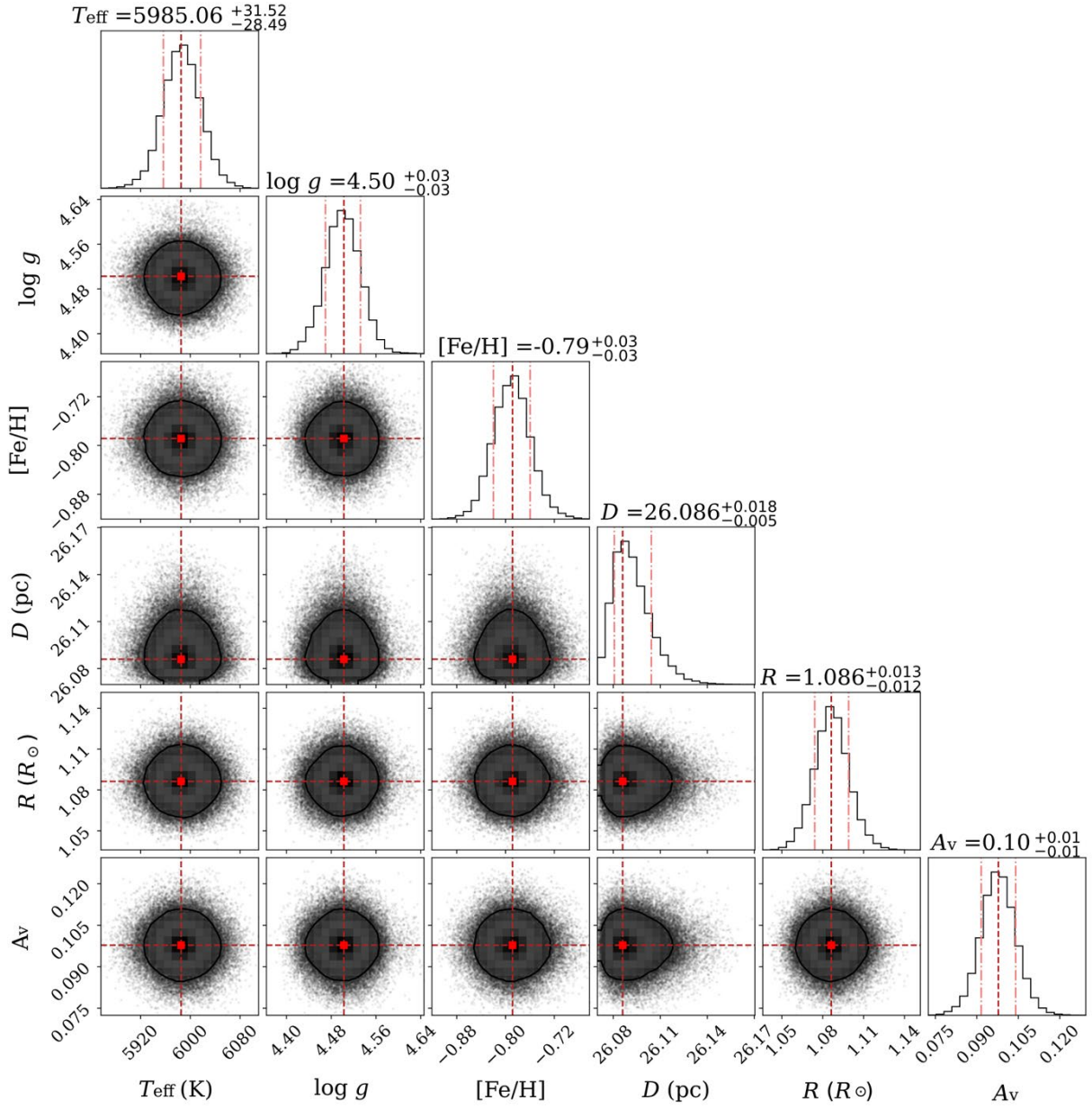
Şekil 4.1: HD 22879 yıldızının SED dağılımı ve bu dağılıma en iyi uyum gösteren Castelli ve Kurucz'un (2003) model atmosferi.

Ardından Castelli ve Kurucz'un (2003) model atmosferleriyle SED profilleri karşılaştırılarak *lte.5985.4.50.-0.79.fits* model atmosferin SED profilini en iyi uyum sağladığı tespit edilmiştir (Şekil 4.2 ve Şekil 4.3).



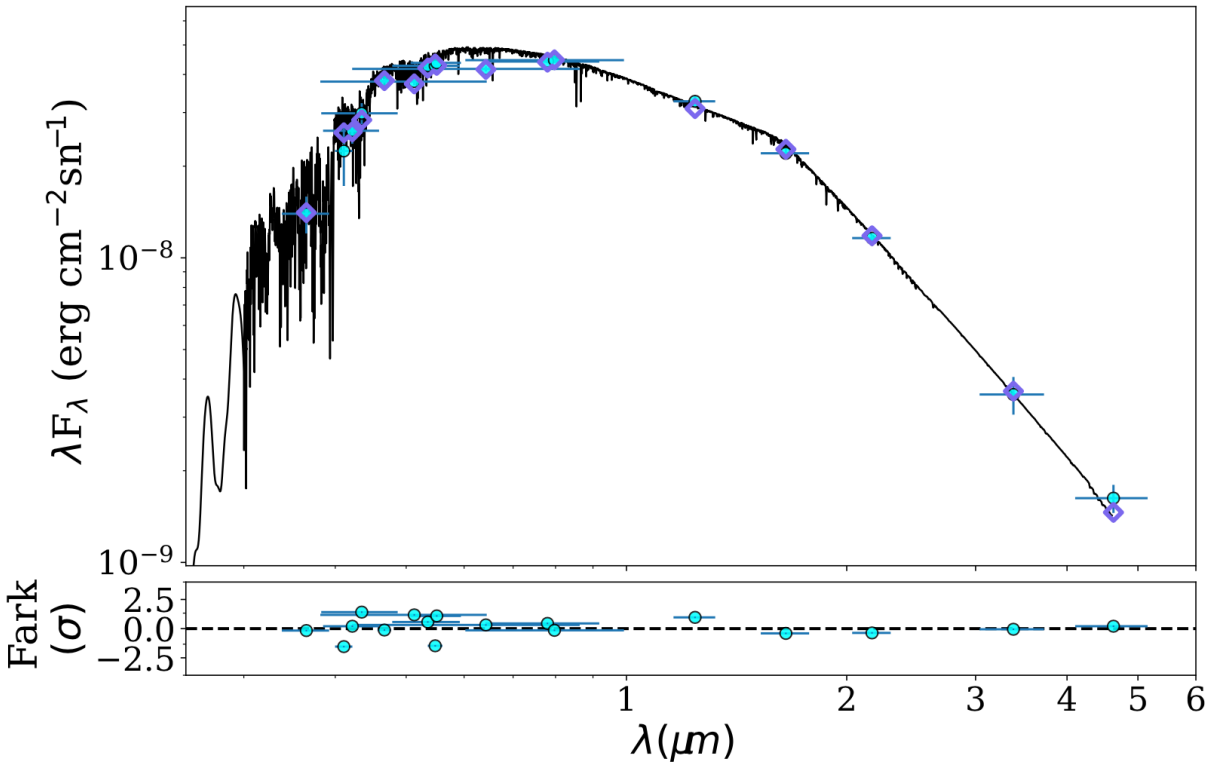
Şekil 4.2: HD 22879 yıldızının SED profiliyle en iyi uyum gösteren Castelli ve Kurucz'un (2003) model atmosferleri ve diğer temel astrofizik parametreler. Dağılımlara fit edilen en olası değerler yıldızın temel parametreleri olarak kabul edilmiştir.

Model atmosfer fitiyle gözlemler arasındaki farklar SED panelinin altında gösterilmiştir. Farkların yaklaşık ±1σ (standart sapma) içinde yer aldığı tespit edilmiştir. Bu da uyumun oldukça iyi olduğu anlamına gelmektedir.

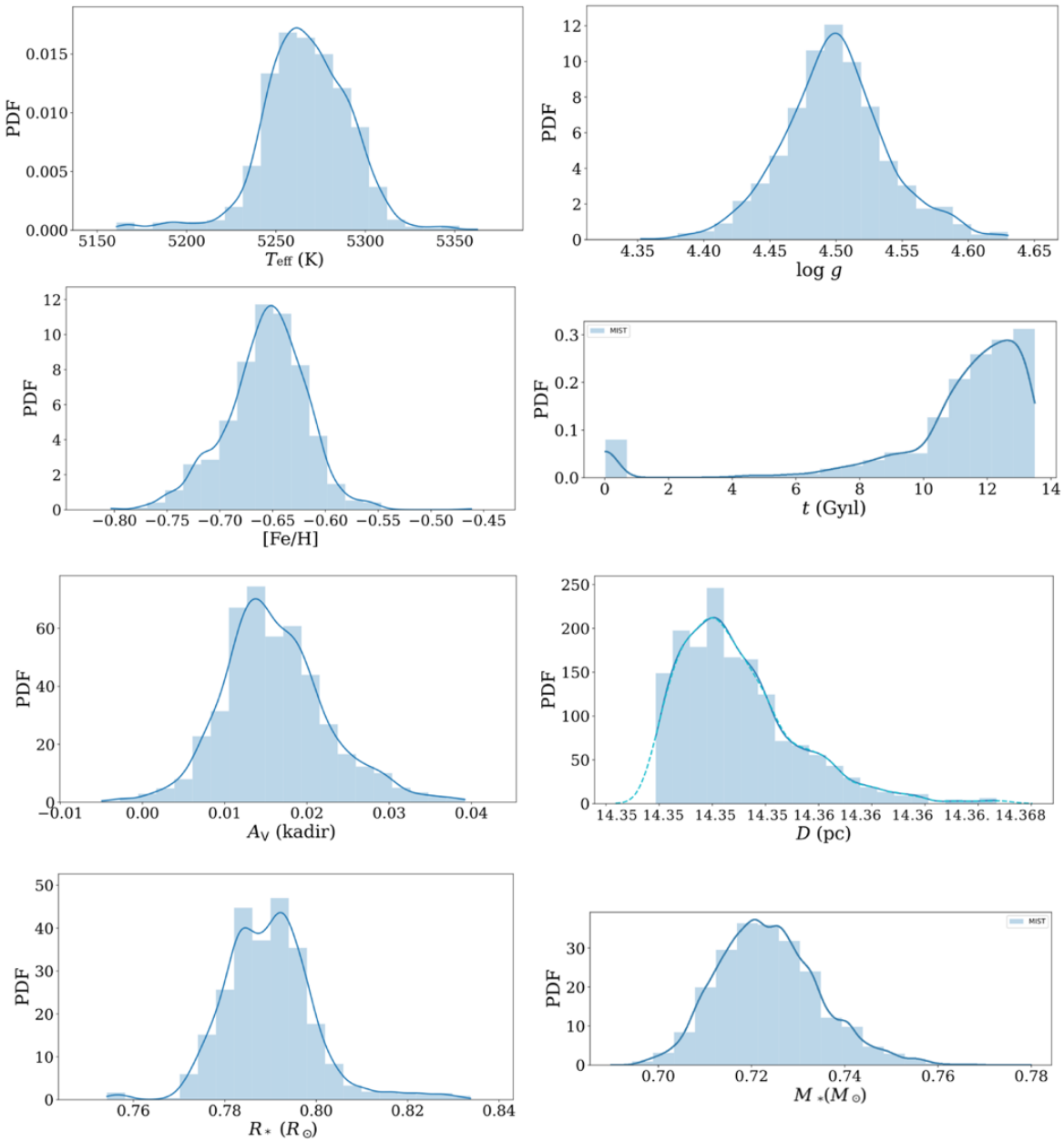


Şekil 4.3: Markov Zinciri Monte Carlo (MZMC) yöntemiyle HD 22879 yıldızının model atmosfer ve temel astrofizik parametrelerindeki hatalarının belirlenmesinde kullanılan olasılık dağılımları. Kesikli çizgiler ve merkezlerinde yer alan kırmızı kare sembolü parametrelerin en olası değerlerini ifade etmektedir.

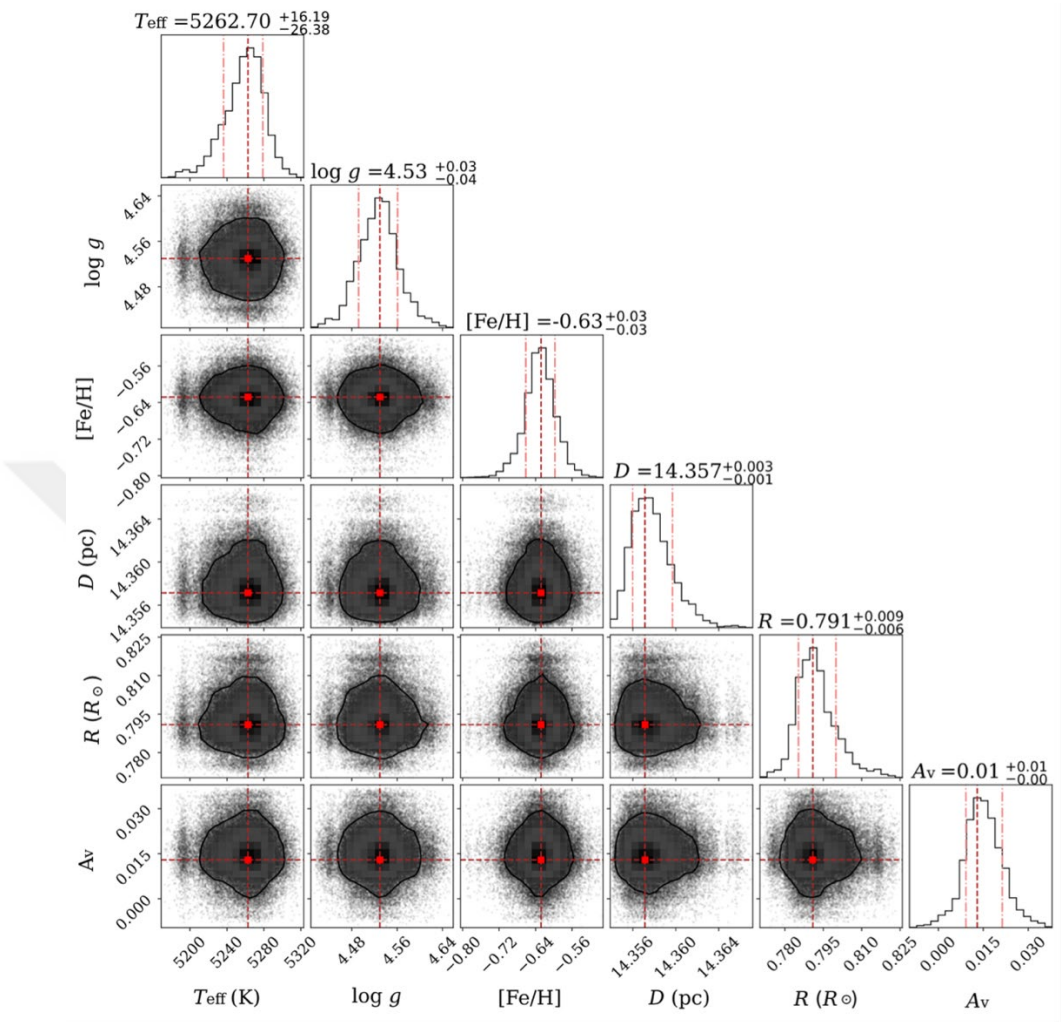
HD 144579: Literatürde yüksek öz hareketli bir yıldız olarak bilinen HD 144579 yıldızının SED analizi için ARIADNE kodu çalıştırıldığında 17 fotometrik parlaklık elde edilmiştir. Ulaşılan görünen parlaklıklar akıya çevrilerek SED profili oluşturulmuştur (Şekil 4.4). Daha sonra Husser ve diğ.'nin (2013) PHOENIX v2 model atmosferleriyle SED profilleri karşılaştırılarak *lte.5265.4.53.-0.63.fits* model atmosferin SED profilini en iyi temsil ettiği görülmüştür (Şekil 4.5 ve Şekil 4.6). Model atmosfer fitiyle gözlemler arasındaki farklar SED panelinin altında gösterilmiştir.



Şekil 4.4: HD 144579 yıldızının SED dağılımı ve bu dağılıma en iyi uyum gösteren PHOENIX v2 model atmosferi.

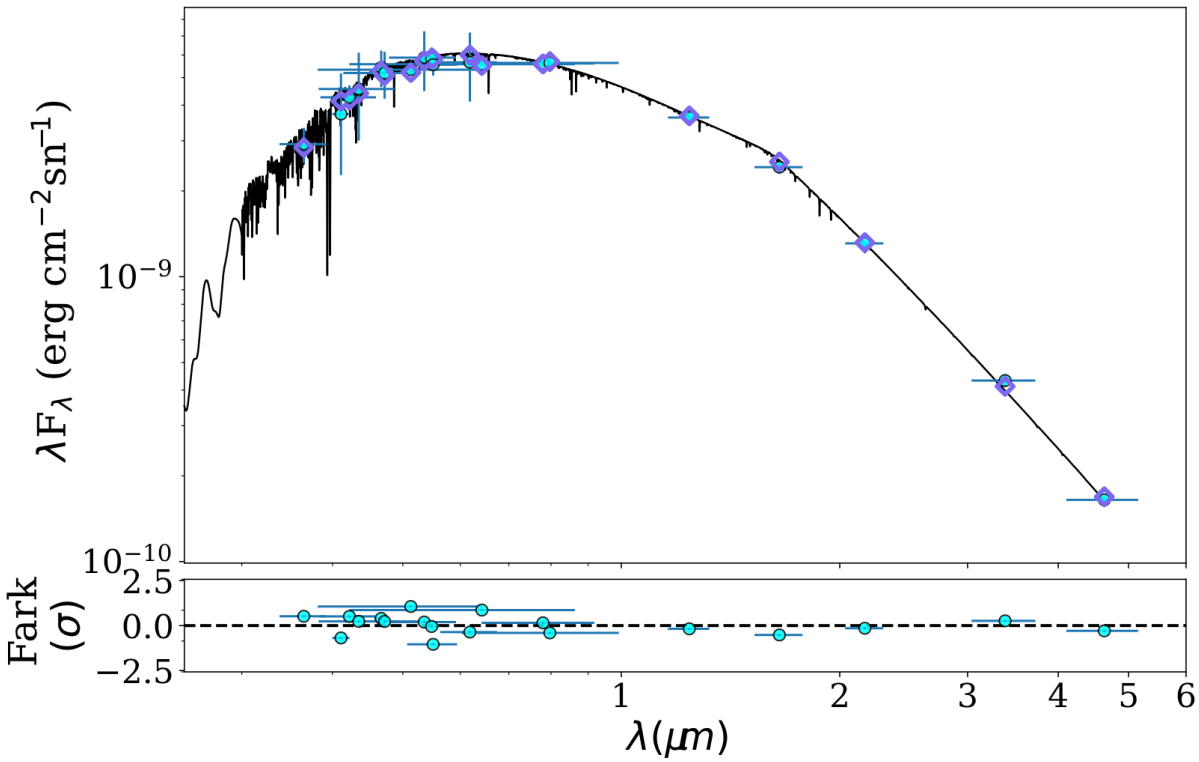


Şekil 4.5: HD 144579 yıldızının SED profiliyle en iyi uyum gösteren PHONENIX v2 model atmosfer parametreleri ve diğer temel astrofizik parametreler. Dağılımlara fit edilen en olası değerler yıldızın temel parametreleri olarak kabul edilmiştir.

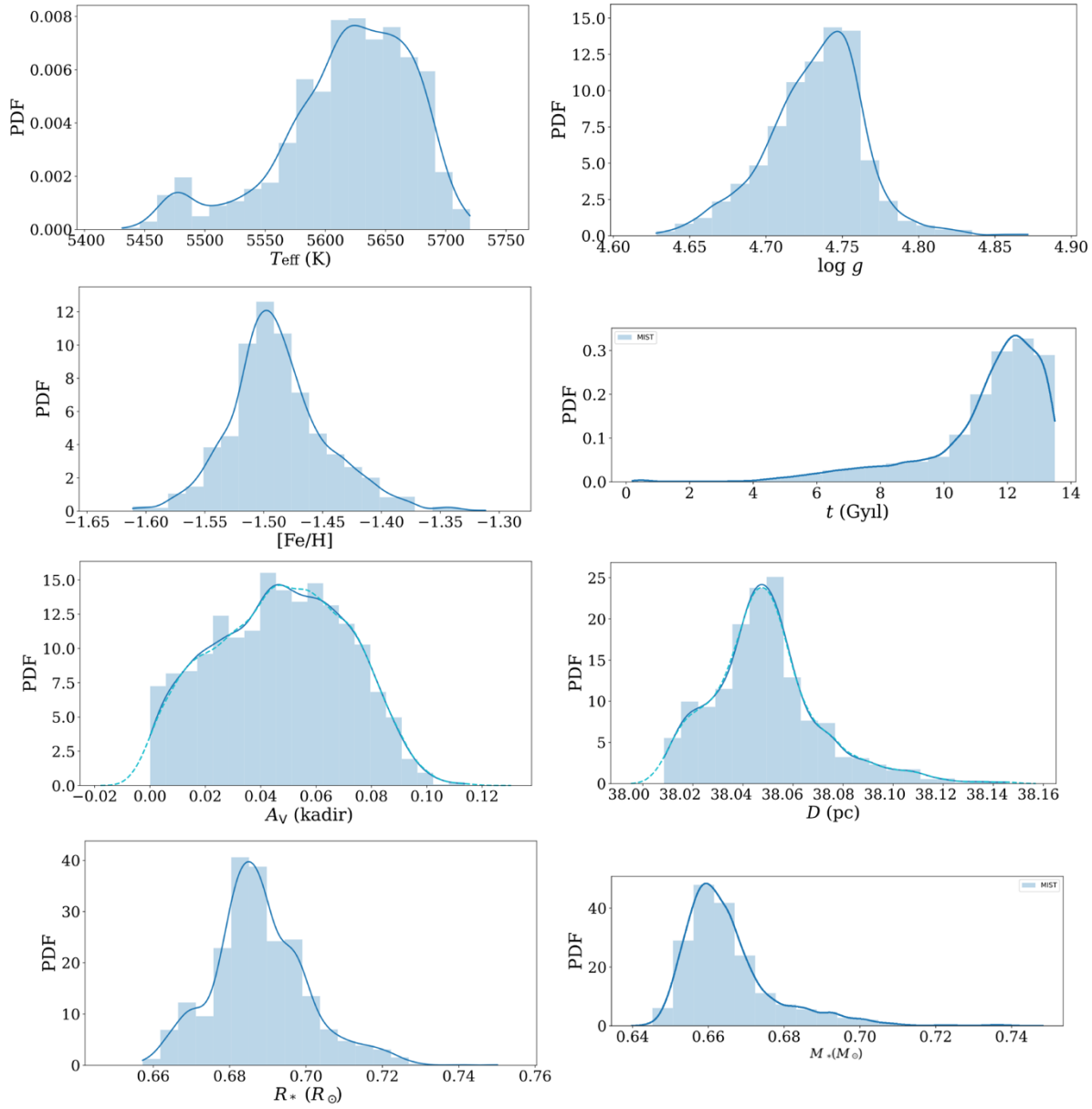


Şekil 4.6: Markov Zinciri Monte Carlo (MZMC) yöntemiyle HD 144579 yıldızının model atmosfer ve temel astrofizik parametrelerindeki hatalarının belirlenmesinde kullanılan olasılık dağılımları. Kesikli çizgiler ve merkezlerinde yer alan kırmızı kare sembolü parametrelerin en olası değerlerini ifade etmektedir.

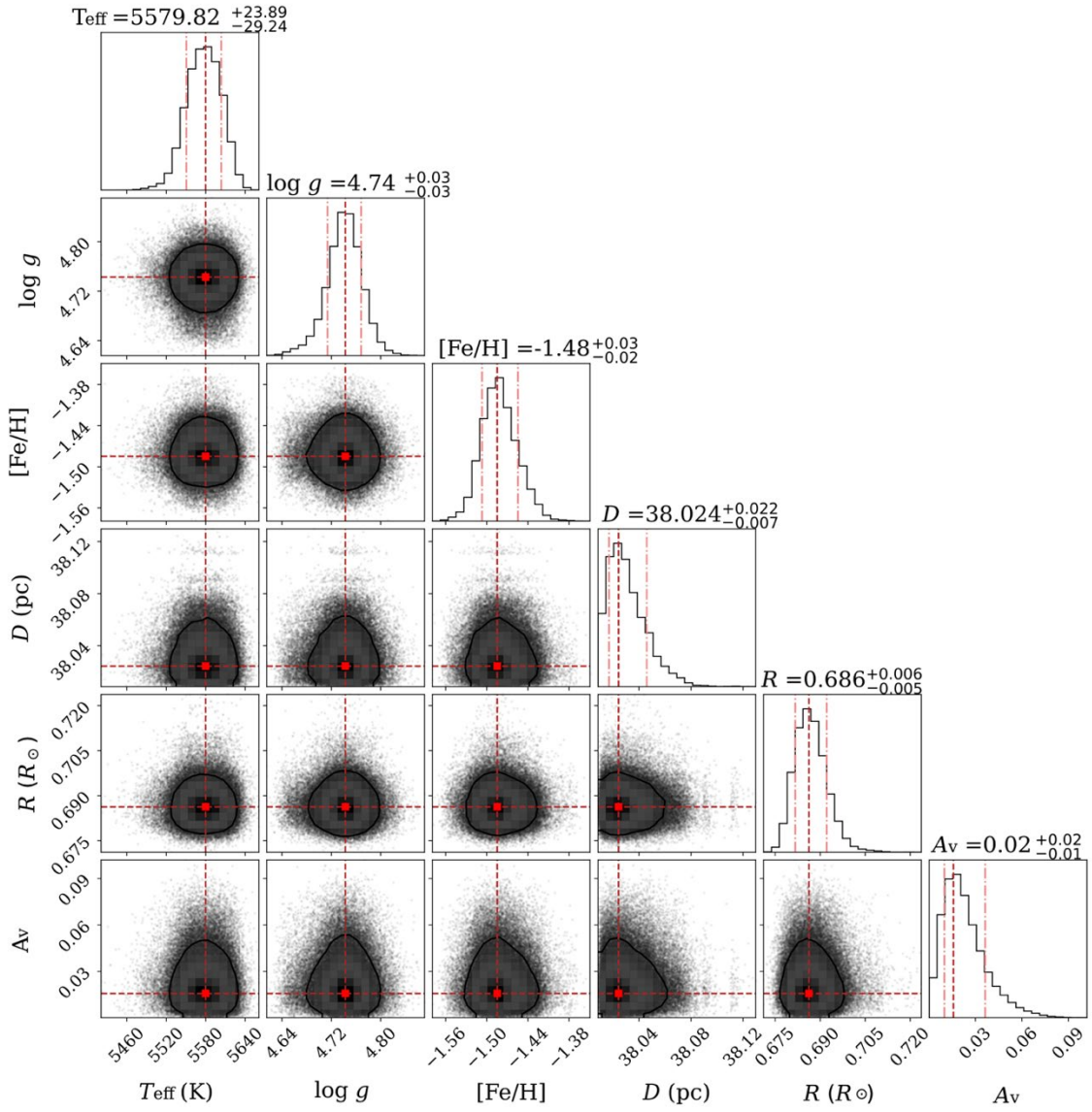
HD 188510: Literatürde yüksek öz hareketli bir yıldız olarak bilinen HD 188510 yıldızının SED analizinde ARIADNE kodu kullanılarak gerçekleştirilmiş 19 fotometrik parlaklığa ulaşılmıştır. Elde edilen görünen parlaklıklar akıya çevrilerek SED profili oluşturulmuştur (Şekil 4.7). Ardından Castelli ve Kurucz'un (2003) model atmosferleriyle yıldızın elde edilen SED profili karşılaştırılarak *lte.5520.4.60.-1.43.fits* model atmosferin SED profilini en iyi uyum sağladığı tespit edilmiştir (Şekil 4.8 ve Şekil 4.9). Model atmosfer fitiyle gözlemler arasındaki farklar SED panelinin altında gösterilmiştir. Farkların yaklaşık ±1σ (standart sapma) içinde yer aldığı tespit edilmiştir. Bu da uyumun oldukça iyi olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 4.7: HD 188510 yıldızının SED dağılımı ve bu dağılımı en iyi uyum gösteren Castelli ve Kurucz'un model atmosferi.



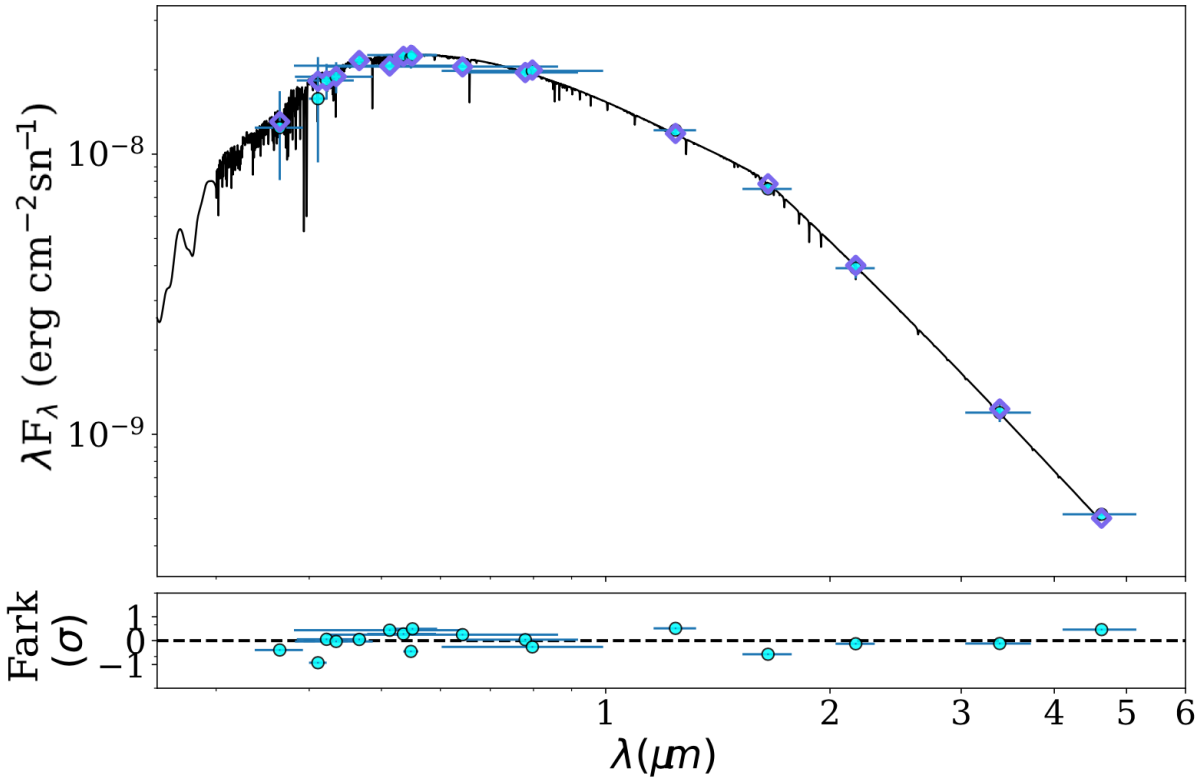
Şekil 4.8: HD 188510 yıldızının SED profiliyle en iyi uyum gösteren Castelli ve Kurucz'un (2003) model atmosferleri ve diğer temel astrofizik parametreler. Dağılımlara fit edilen en olası değerler yıldızın temel parametreleri olarak kabul edilmiştir.



Şekil 4.9: Markov Zinciri Monte Carlo (MZMC) yöntemiyle HD 188510 yıldızının model atmosfer ve temel astrofizik parametrelerindeki hatalarının belirlenmesinde kullanılan olasılık dağılımları. Kesikli çizgiler ve merkezlerinde yer alan kırmızı kare sembolü parametrelerin en olası değerlerini ifade etmektedir.

HD 201891: Literatürde yüksek öz hareketli bir yıldız olarak bilinen HD 201891 yıldızının SED analizleri gerçekleştirebilmek için ARIADNE kodu kullanıldığında 17 fotometrik veriye ulaşılmıştır. Elde edilen görünen parlaklıklar akıya çevrilerek SED profilleri oluşturulmuştur (Şekil 4.10). Daha sonra Husser ve diğ.'nin (2013) PHOENIX v2 model atmosferleriyle SED profilleri karşılaştırılarak *lte.5890.4.51.-1.02.fits* model atmosferin yıldızın SED profiliyle en

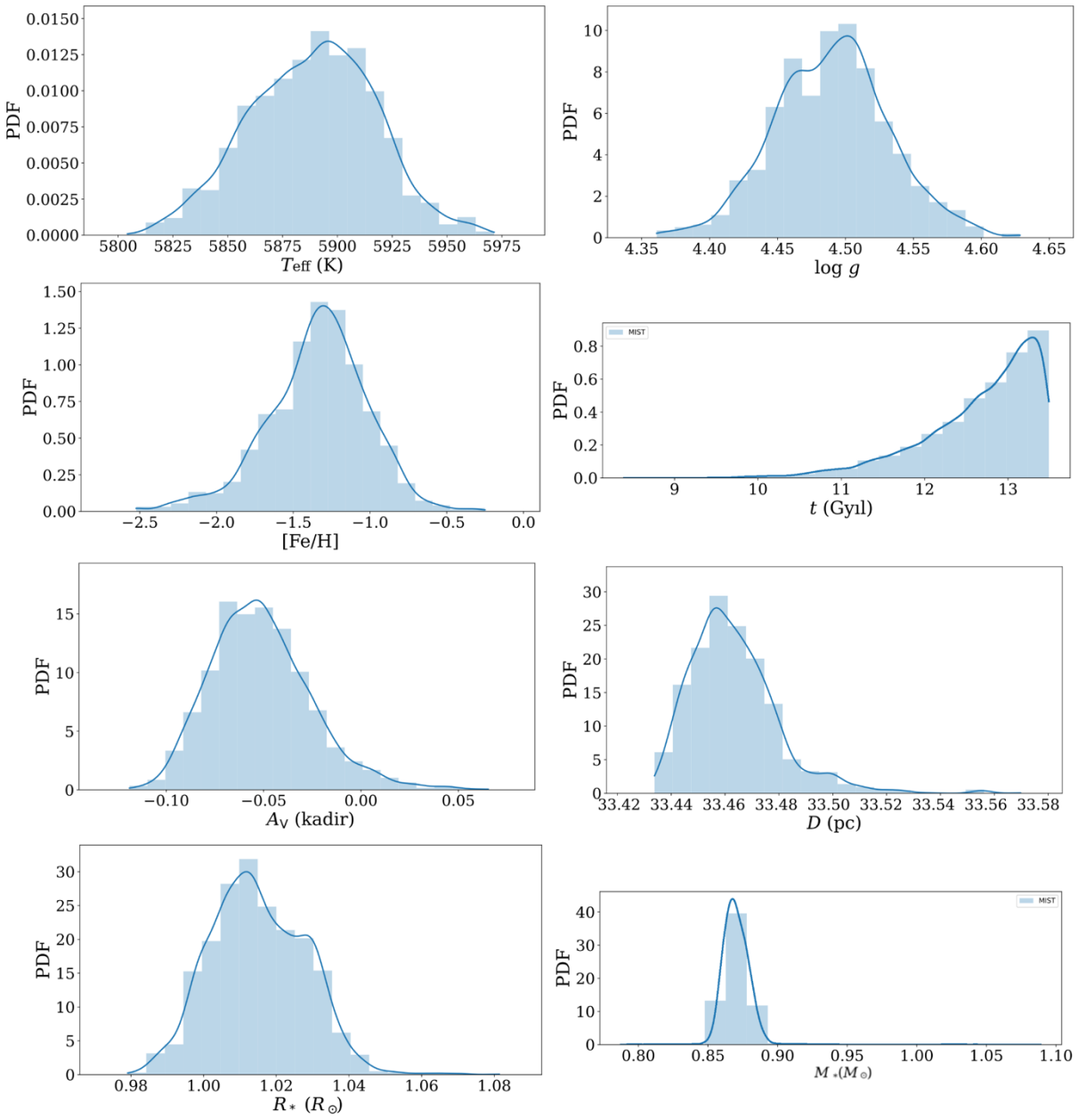
iyi uyum sağladığı görülmüştür (Şekil 4.11 ve Şekil 4.12). Model atmosfer eğrisiyle gözlemler arasındaki farklar SED panelinin altında gösterilmiştir. Farkların yaklaşık ±1σ (standart sapma) içinde yer aldığı tespit edilmiştir. Bu da uyumun oldukça iyi olduğu anlamına gelmektedir.



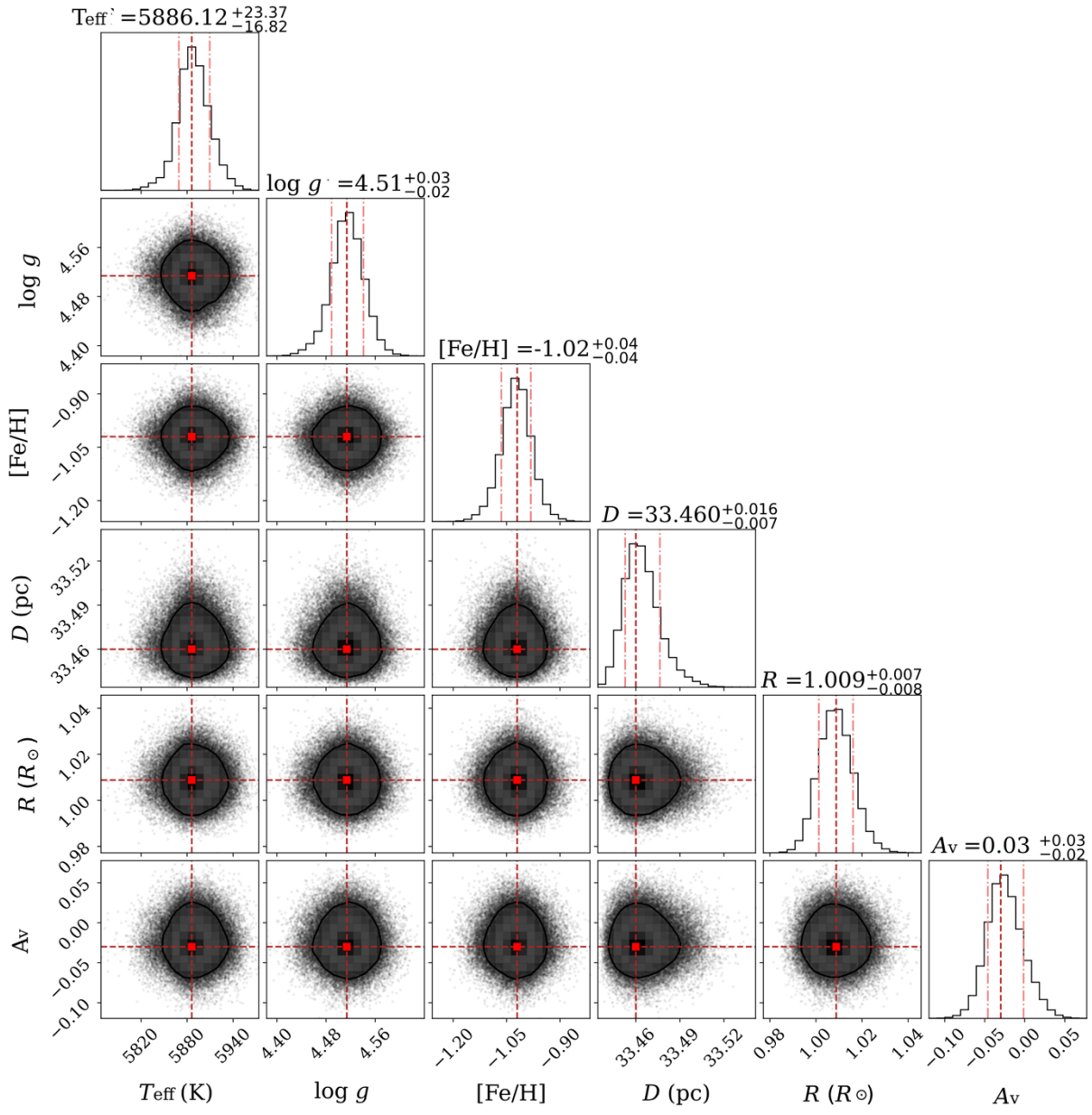
Şekil 4.10: HD 201891 yıldızının SED dağılımı ve bu dağılımı en iyi uyum gösteren PHONENIX v2 model atmosferi.

Tablo 4.1: Tez yıldızlarının SED yöntemiyle elde edilen astrofizik parametreleri.

Yıldız	T_{eff} **(K)**	**log** g **(cm/sn^2)**	**[Fe/H] (dex)**	A_V **(kadir)**	d **(pc)**	M **($M_\odot$)**	R **($R_\odot$)**	L **($L_\odot$)**	t **(Gyıl)**
HD 22879	5985	4.50	-0.78	0.10	26.08	0.79	1.08	1.34	13.08
	(30)	(0.03)	(0.03)	(0.01)	(0.01)	(0.02)	(0.01)	(0.09)	(1.95)
HD 144579	5263	4.53	-0.63	0.01	14.35	0.72	0.79	0.43	12.63
	(21)	(0.04)	(0.03)	(0.01)	(0.01)	(0.02)	(0.01)	(0.02)	(2.79)
HD 188510	5580	4.74	-1.48	0.02	38.04	0.66	0.69	0.40	12.54
	(26)	(0.03)	(0.03)	(0.02)	(0.02)	(0.02)	(0.01)	(0.03)	(3.57)
HD 201891	5886	4.51	-1.02	0.03	33.46	0.87	1.01	1.10	13.15
	(20)	(0.03)	(0.04)	(0.03)	(0.01)	(0.01)	(0.01)	(0.06)	(2.13)



Şekil 4.11: HD 201891 yıldızının SED profiliyle en iyi uyum gösteren Castelli ve Kurucz'un (2003) model atmosferleri ve diğer temel astrofizik parametreler. Dağılımlara fit edilen en olası değerler yıldızın temel parametreleri olarak kabul edilmiştir.



Şekil 4.12: Markov Zinciri Monte Carlo (MZMC) yöntemiyle HD 201891 yıldızının model atmosfer ve temel astrofizik parametrelerindeki hatalarının belirlenmesinde kullanılan olasılık dağılımları. Kesikli çizgiler ve merkezlerinde yer alan kırmızı kare sembolü parametrelerin en olası değerlerini ifade etmektedir.

4.2. ASTROMETRİK VE FOTOMETRİK ANALİZLER

Yıldız yaşlarının araştırıldığı bir başka düzlemde renk-parlaklık diyagramları üzerinden gerçekleştirilir. İncelenen yıldızların hassas astrometrik verilerinin bulunması özellikle yıldızların mutlak parlaklıklarının tayin edilmesinde önemlidir. *Gaia* çağının başlamasıyla birlikte Güneş civarındaki yıldızların öz hareket ve trigonometrik paralaksları mili yay saniyesi (mas) ve *Gaia* fotometrik verileri de mili kadir hassasiyetinde ölçülebilir hale gelmiştir. Bu hassasiyetlerin sağlanıyor olması tez çalışmasında incelenen dört yıldızın $M_G \times (G_{BP}\text{-}G_{RP})_0$ düzleminde gösterimine olanak tanımıştır. Ayrıca bu yıldızların fotometrik metal bollukları hesaplanarak yıldızların yaşlarının tayini mümkün hale gelebilir.

Tez çalışmasında bu yöntem ile yaş tayinin yapılabilmesi için öncelikle dört yıldızın metal bolluklarının tayin edilmesi gerekmektedir. Bunun için Çelebi ve diğ.'nin (2019) orta tayf türündeki anakol yıldızlarının *UBV* fotometrik verilerinden hesapladıkları fotometrik metal bolluğu bağıntısı kullanılmıştır:

$$[\mathrm{Fe/H}] = -4.7503(U-B)_0^2 - 8.395(B-V)_0^2 + 2.141(U-B)_0(B-V)_0 + 5.236(U-B)_0 + 3.775(B-V)_0 + 0.1597 \quad (4.1)$$

Dört yıldızın *UBV* fotometrik verileri Mermilliod'un (1987) *UBV* fotoelektrik fotometrik kataloğundan alınmış ve bu veriler Tablo 4.2'de listelenmiştir. Fotometrik metal bolluğu bağıntısının kullanılması için fotometrik verilerin yıldızlararası ortamın etkisinden arındırılması gerekmektedir. Yıldızların *V* bandındaki sönükleşme değerlerinin (A_V) belirlenmesinde Capitanio ve diğ.'nin (2017) yakın yıldızlar için (~1 kpc) gerçekleştirmiş olduğu üç boyutlu sönükleşme haritası kullanılmıştır. Bunun için yıldızların Galaktik koordinatları ve Güneş'ten olan uzaklıklarının bilinmesi gerekmektedir. Bu veriler Tablo 3.2'de verilmiştir. *Stilism* web sayfası[8] yıldızların Galaktik koordinatlarının girilmesi durumunda, Güneş'ten 1 kpc uzaklığa kadar A_V değerinin uzaklık ile değişimini vermektedir. Tez çalışmasında yıldızların uzaklıkları da *Gaia* DR3 kataloğundan (Gaia işbirliği, 2023) alınan trigonometrik paralakslarda $d(\mathrm{pc}) = 1000/\varpi$ (mas) bağıntısıyla tayin edilmiştir. Tablo 3.2'de verilen her bir yıldızın Galaktik koordinatları *Stilism* web sayfasına yazılarak sönükleşme

[8] https://stilism.obspm.fr

profilleri elde edilmiş ve yıldızların uzaklıkları dikkate alınarak A_V değerleri elde edilmiş ve Tablo 4.2'de listelenmiştir. Ardından yıldızların *UBV* parlaklık ve renkleri aşağıda verilen bağıntılar ile yıldızlararası ortamın sönükleşmesi ve kızarmasından arındırılmıştır.

$$V_0 = V - A_V \tag{4.2}$$

$$(B-V)_0 = (B-V) - E(B-V) \tag{4.3}$$

$$(U-B)_0 = (U-B) - E(U-B) \tag{4.4}$$

$$E(U-B)_0 = 0.72 \times (U-B) + 0.05 \times E(U-B)^2 \tag{4.5}$$

Fotometrik bantlara ait sönükleşme katsayıları Cartelli ve diğ.'den (1994) alınmıştır.

Yıldızların *UBV* parlaklık ve renk indeksleri yıldızlararası ortamın etkilerinden arındırıldıktan sonra Çelebi ve diğ.'nin (2019) fotometrik metal bolluğu bağıntısı kullanılarak fotometrik metal bollukları hesaplanmış ve Tablo 4.2'de listelenmiştir.

Tablo 4.2: Tez kapsamında incelenen dört yıldızın UBV fotometrik verileri, *V* bandındaki sönükleşme değerleri (A_V) ve Çelebi ve diğ.'nin (2019) fotometrik metal bolluğu bağıntısıyla hesaplanmış fotometrik metal bollukları ([Fe/H]).

Yıldız	***V*** **(kadir)**	***B-V*** **(kadir)**	***U-B*** **(kadir)**	A_V **(kadir)**	**[Fe/H] (dex)**
HD 22879	6.695	0.540	-0.080	0.095	-0.79
HD 144579	6.660	0.730	0.210	0.002	-0.34
HD 188510	8.820	0.590	-0.122	0.001	-1.40
HD 201891	7.380	0.510	-0.090	0.001	-0.71

Bu aşamadan sonra tez kapsamında incelenen dört yıldızın renk parlaklık diyagramı üzerinde işaretlenmesi ve metal bolluklarına bağlı olarak eş-yaş eğrileriyle yaşlarının tayin edilmesi gerekmektedir. Bunun için *Gaia* uydu verilerinden sağlanan fotometrik (G, G_{BP} ve G_{RP}) ve astrometrik (ϖ) verilere başvurulmuştur. Yıldızların bu verileri *Gaia* DR3 kataloğundan (Gaia işbirliği, 2023) alınmış ve Tablo 4.3'te listelenmiştir. *Gaia* fotometrik sisteminden tanımlanan G, G_{BP} ve G_{RP} bandları için sönükleşme katsayıları (A_λ/A_V), sırasıyla, 0.83627, 1.08337 ve 0.63439 olarak Cardelli ve diğ.'den (1994) alınmıştır. Ardından her bir filtre yıldızlararası sönükleşmeden arındırılmasında aşağıda verilen bağıntılar kullanılmıştır.

Tablo 4.3: Tez kapsamında incelenen dört yıldızın *Gaia* DR3 fotometrik (G, G_{BP} ve G_{RP}) ve astrometrik verileri (ϖ), G bandındaki sönükleşme değerleri (A_G) ve hesaplanmış G bandı mutlak parlaklıkları (M_G) ve kızarmadan arındırılmış renkleri ($(G_{BP}\text{-}G_{RP})_0$).

Yıldız	G	G_{BP}	G_{RP}	$(G_{BP}\text{-}G_{RP})$	ϖ	A_G	M_G	$(G_{BP}\text{-}G_{RP})_0$
	(kadir)				(mas)	(kadir)		
HD 22879	6.536 (0.003)	6.822 (0.003)	6.075 (0.004)	0.747 (0.005)	38.325 (0.031)	0.079 (0.005)	4.374 (0.002)	0.704 (0.005)
HD 144579	6.461 (0.003)	6.843 (0.003)	5.898 (0.004)	0.945 (0.005)	69.640 (0.014)	0.012 (0.001)	5.675 (0.001)	0.944 (0.005)
HD 188510	8.647 (0.003)	8.973 (0.003)	8.138 (0.004)	0.835 (0.005)	26.278 (0.020)	0.017 (0.002)	5.744 (0.002)	0.834 (0.005)
HD 201891	7.231 (0.003)	7.501 (0.003)	6.781 (0.004)	0.720 (0.005)	29.877 (0.021)	0.017 (0.001)	4.607 (0.001)	0.719 (0.005)

$$G_0 = G - A_G = G - 0.83627 \times A_V \tag{4.6}$$

$$(G_{BP})_0 = G_{BP} - A_{GBP} = G_{BP} - 1.08337 \times A_V \tag{4.7}$$

$$(G_{RP})_0 = G_{RP} - A_{GRP} = G_{RP} - 0.63439 \times A_V \tag{4.8}$$

Böylece, yıldızların *Gaia* DR3 (Gaia işbirliği, 2023) fotometrik verileri yıldızlararası sönükleşmenin etkilerinden arındırılmış ve hatalarıyla birlikte Tablo 4.3'te verilmiştir. Ardından yıldızların G bandındaki mutlak parlaklıkları aşağıdaki uzaklık bağıntısı yardımıyla hesaplanmıştır.

$$M_G = G - 5 \times \log\left(\frac{1000}{\varpi\ (\text{mas})}\right) + 5 - A_G \tag{4.9}$$

Burada M_G yıldızın mutlak parlaklığı, G görünen parlaklığı, A_G, G bandındaki sönükleşme değeri ve ϖ yıldızın trigonometrik paralaksını ifade etmektedir. Yıldızın uzaklığı d=1000/ϖ(mas) bağıntısıyla verildiğinde aşağıdaki bağıntı elde edilir:

$$M_G = G - 5 \times \log d + 5 - A_G \tag{4.10}$$

Burada her iki tarafın türevi alındığında G bandındaki mutlak parlaklık hatası (ΔM_G) aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$\Delta M_G = \frac{5}{d \times \ln 10} \times \Delta d + \Delta A_G \tag{4.11}$$

Burada ΔA_G, G bandındaki sönükleşme hatası, Δd trigonometrik paralaks ölçümlerinden kaynaklanan uzaklık hatasıdır ve uzaklıktaki hata aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$\Delta d = \frac{1000}{\varpi^2} \times \Delta\varpi \tag{4.12}$$

Sonuç olarak, elde edilen G bandı mutlak parlaklıkları hatalarıyla birlikte Tablo 4.3'te listelenmiştir.

Yıldızların astrometrik ve fotometrik verilerinden itibaren yaşların tayin edilebilmesi için Tablo 4.2'de hesaplanan metal bolluğu değerleri, Tablo 4.3'te verilen M_G mutlak parlaklıkları ve kızarmadan arındırılmış renkleri ($(G_{BP}\text{-}G_{RP})_0$) dikkate alınmış ve her bir yıldız için renk-parlaklık diyagramları oluşturulmuştur.

Yıldızların yaş tayininde kullanılan eş-yaş eğrileri ağır element bolluğuna (Z) duyarlı olduğundan, tez çalışmasında Çelebi ve diğ.'nin (2019) fotometrik metal bolluğu bağıntısıyla hesaplanan metal bollukları [Fe/H] PARSEC[9] eş-yaş eğrilerini (Bressan ve diğ., 2012) için elde edilen aşağıdaki bağıntılar tayin edilmiştir.

$$Z_X = 10^{\left[[\mathrm{Fe/H}]+\log\left(\frac{Z_\odot}{1-0.2485-2.78\times Z_\odot}\right)\right]} \tag{4.13}$$

$$Z = \frac{(Z_X - 0.2485 \times Z_X)}{(2.78 \times Z_X + 1)} \tag{4.14}$$

Güneş'in ağır element bolluğu $Z_\odot = 0.0152$ olarak alınmıştır (Bressan ve diğ., 2012). Burada Z_X bir ara işlem fonksiyonu olup, ayrıca Z parametresinin hesabında metal bolluğunun bir fonksiyonu olarak da kullanılmaktadır. Tez çalışmasında incelenen HD 22879, HD 144579, HD 188510 ve HD 201891 için fotometrik metal bollukları, sırasıyla, -0.79, -0.34, -1.40 ve -0.71 dex olarak hesaplanmış olup bu değerlerin Bağıntı (4.13) ve Bağıntı (4.14) kullanılarak elde edilen ağır element bollukları (Z), sırasıyla, 0.002587, 0.007166, 0.000640 ve 0.003104'tür.

Tez kapsamında incelenen dört yıldız $M_G \times (G_{BP}\text{-}G_{RP})_0$ düzlemleri üzerine işaretlenmiş ve ağır element bolluklarına uygun PARSEC (Bressan ve diğ., 2012) eş-yaş eğrileri de Padova

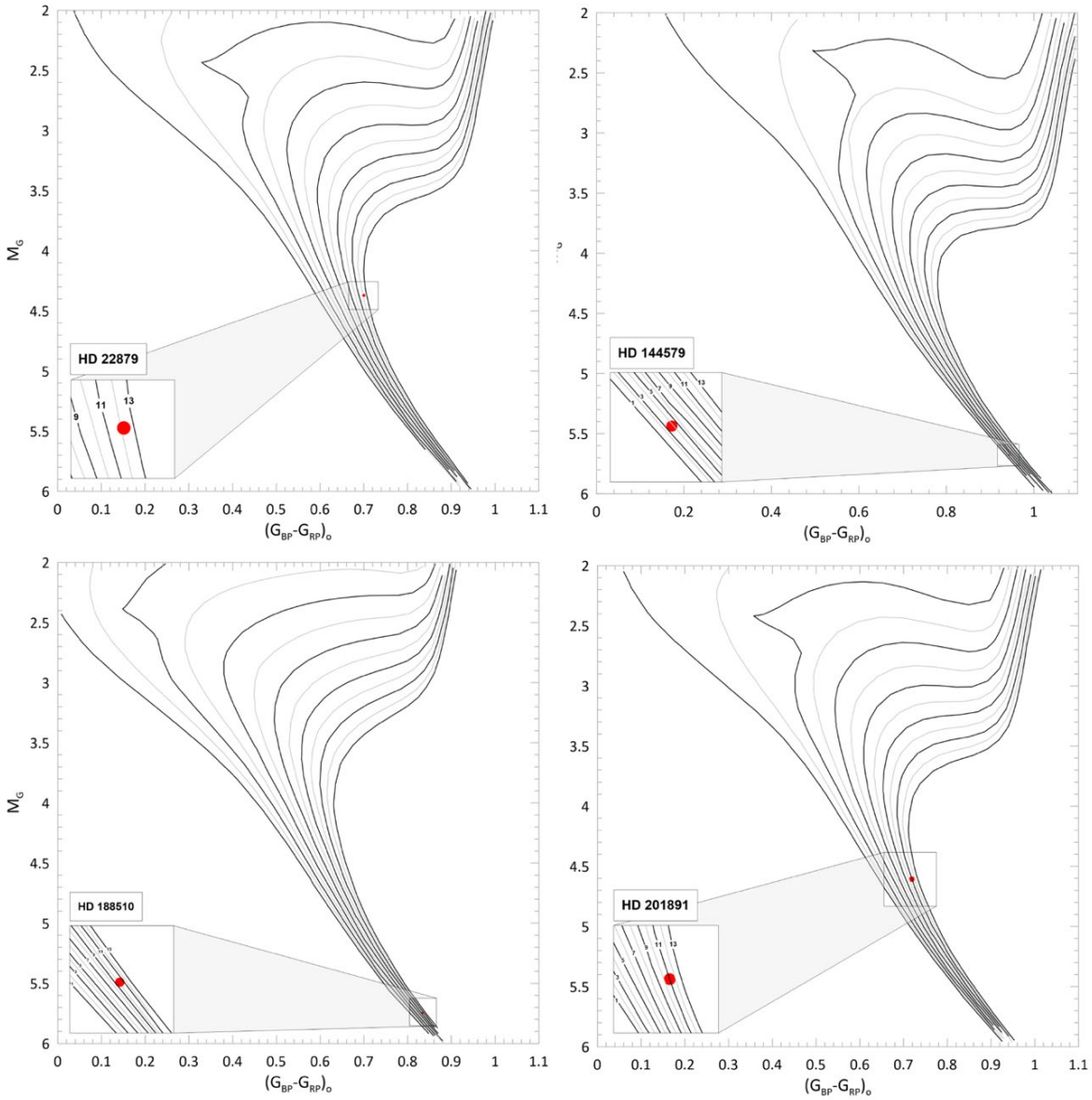
[9] https://github.com/jobovy/isodist/blob/master/isodist/Isochrone.py

grubunun CMD 3.7 web sitesinden[9] 1 ile 13 Gyıllık aralığı için 1 Gyıllık adımlar ile renk-parlaklık düzlemleri üzerine çizilmiştir (Şekil 4.13). Tez kapsamında incelenen yıldızların anakol bandı içerisinde yer aldığı tespit edilmiştir. PARSEC eş-yaş eğrilerinden itibaren duyarlı yaş tayini yapabilmek için yıldızların bulunduğu konum büyütülerek her bir panelin sol alt köşesine eklenmiştir. Büyütülmüş kutularda yıldızların konumlarıyla kesiştiği eş-yaş eğrileri dikkate alınarak yıldızların yaşları tayin edilmiştir. Bu yönteme göre HD 22879 yaşı 12.25±1 Gyıl, HD 144579'un yaşı 4.25±1 Gyıl, HD 188510'un yaşı 10.50±1 Gyıl ve HD 201891'in yaşı 11.00±1 Gyıl olarak tayin edilmiştir.

Yıldızların renk-parlaklık diyagramındaki konumlarına en yakın eş-yaş eğrisinden yaş ile birlikte incelenen yıldızın temel astrofizik parametreleri de belirlenebilir. Tez kapsamında incelenen dört yıldızın $M_G \times (G_{BP}\text{-}G_{RP})_0$ düzlemleri üzerindeki konumlarına en yakın eş-yaş eğrilerine ait parametre okumaları gerçekleştirilerek, yıldızların PARSEC eş-yaş eğrilerinden T_{eff}, log g, M, R ve L değerleri de elde edilmiş ve Tablo 4.4'te listelenmiştir.

Tablo 4.4: Tez kapsamında incelenen yıldızların $M_G \times (G_{BP}\text{-}G_{RP})_0$ verileriyle PARSEC eş-yaş eğrilerinin karşılaştırılmasından hesaplanan model atmosfer (T_{eff}, log g) ve temel astrofizik parametreleri (M, R ve L).

Yıldız	T_{eff} **(K)**	**log** g **(cm/sn²)**	**[Fe/H] (dex)**	Z	M $(M_\odot)$	R $(R_\odot)$	L $(L_\odot)$	t **(Gyıl)**
HD 22879	6111	4.30	-0.79	0.002587	0.80	1.04	1.35	12.25
HD 144579	5341	4.62	-0.34	0.007166	0.78	0.72	0.38	4.25
HD 188510	5677	4.63	-1.40	0.000640	0.67	0.65	0.40	10.50
HD 201891	6026	4.40	-0.71	0.003104	0.80	0.93	1.02	11.00



Şekil 4.13: Tez kapsamında incelenen dört yıldızın $M_G \times (G_{BP}\text{-}G_{RP})_0$ düzlemi üzerindeki konumları (kırmızı nokta) ve yıldızların metal bolluklarına göre oluşturulmuş 1 – 13 Gyıl aralığındaki PARSEC eş-yaş eğrileri. Yıldızların detaylandırılmış konumları panellerin sol alt köşelerinde yer almaktadır.

4.3. TAYFSAL ANALİZ

Klasik tayfsal analizin temeli, yıldızların yaydığı elektromanyetik radyasyonun kendi içinde zengin bir bilgi taşıdığı fikrine dayanır. Gelişmiş teleskoplar ve aletler aracılığıyla toplanan bu radyasyon, çok sayıda çizgi içeren tayflara ayrıştırılabilir. Bu analizin birincil odak noktası, diğerlerinin yanı sıra etkili sıcaklık ($T_{\rm eff}$), yüzey çekim ivmesi (log g), metal bolluğu ([Fe/H]) ve mikrotürbülans (ξ) gibi temel model atmosfer parametrelerini hesaplamaktır. Bu parametrelerin her biri, yıldızın temel özelliklerini karakterize etmede rol oynar. Gözlemlenen yıldız tayfı, bilgisayar modelleri tarafından oluşturulan sentetik tayflar ile karşılaştırılır. Modeller yıldız atmosferlerinin fiziğini, iyonlaşma dengesini ve ışınım aktarımını dikkate alır. Tekrarlanan süreçler ve optimizasyonlar aracılığıyla, istenen model atmosfer parametrelerini sağlayan en uygun çözüme ulaşılır. Yüksek lisans tezi kapsamında incelenen yüksek öz hareketli metalce fakir dört yıldızın PolarBase kütüphanesinden elde edilen tayflarına süreklilik ve radyal hız düzeltmeleri yapılmıştır (bkz. 3.3.1 Yıldız Tayfı ve Süreklilik). LIME koduyla tez yıldızlarının tayf çizgileri teşhis edilerek, eş değer genişlikleri ölçülmüştür (bkz. 3.3.2. Çizgi Teşhisi ve Eşdeğer Genişlik Ölçümü). Model parametreleri belirlenirken başlangıç parametreleri olarak tayfsal enerji dağılımından (SED) elde edilen değerler kullanılmıştır (Tablo 4.1). LTE koşulları altında MOOG ara yüzü kullanılarak tez yıldızlarının uyarılma ve iyonizasyon dengesini sağlayan parametreler Tablo 4.6'da sunulmuş, literatür değerleriyle ise Şekil 4.14'te gösterilmiştir.

Tez kapsamında incelenen HD 22879, HD 144579, HD 188510 ve HD 201891 yıldızlarının tayflarında teşhis edilen çizgilerin (Na I, Mg I, Si I, Ca I, Sc I, Sc II, Ti I, Ti II, V I, Cr I, Cr II, Mn I, Fe I, Fe II, Co I, Ni I, Zn I, Y I, Zr II ve Ba II) eşdeğer genişlikleri ölçülerek bolluk analizlerine hazır hale getirilmiştir. Bu çizgiler PyKMod ve MOOG ara yüzü kullanılarak element bolluk analizi gerçekleştirilmiş ve ölçülen çizgi sayılarıyla birlikte hesaplanan element bollukları ve hataları Tablo 4.5 ve Tablo 4.6'da listelenmiştir. Bu tablolarda verilen element bolluk değerleri demir [X/Fe] ve hidrojen [X/H] atomuna oranlanarak verilmiştir.

Yıldız tayfları üzerinde görülen Fe I ve Fe II, sırasıyla, nötr ve iyonize demir çizgileri yıldızın model atmosfer parametrelerin belirlenmesinde önemli role sahiptir. Özellikle yıldızların yüzey çekim ivmesinin (log g) duyarlı belirlenebilmesi için dört yıldızın tayfında teşhis edilen demir

çizgileri dikkate alınmıştır. Analizlerde HD 22879, HD 144579, HD 188510 ve HD 201891 yıldızları için, sırasıyla, 94, 103, 29 ve 79 Fe I çizgileriyle 13, 11, 1 ve 12 Fe II çizgileri teşhis edilmiştir (bkz. Tablo 4.5 ve Tablo 4.6).

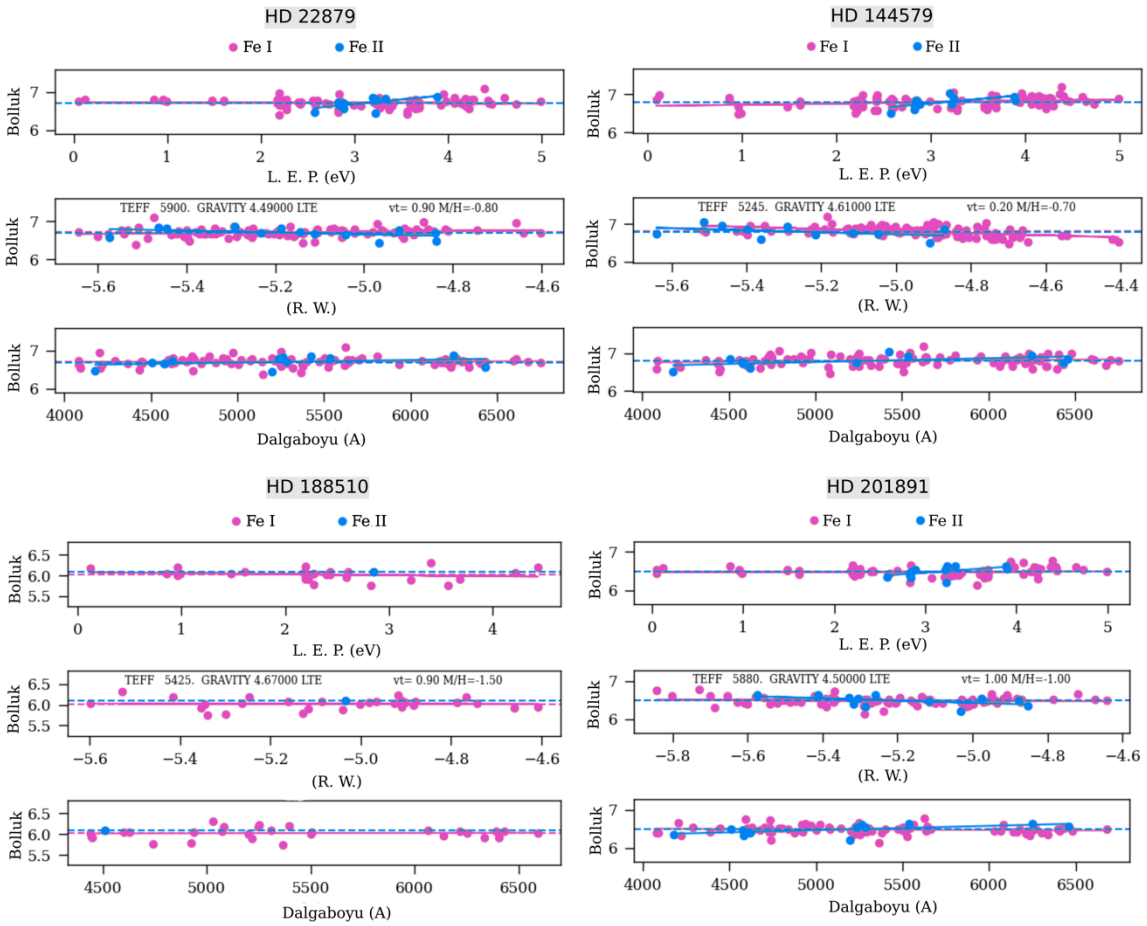
Yıldızların etkin sıcaklık ve mikrotürbülans hızlarının tayininde nötr çizgilere duyarlı uyarılma denge yöntemi kullanılmıştır. Klasik tayfsal analiz Fe I çizgilerinin bolluğuyla indirgenmiş eşdeğer genişliğin (R.W.) arasında oluşturulan doğrusal fitin eğimi, yıldızın mikrotürbülans hız değerinin belirlenmesi aşamasında kullanılmıştır. Yıldızların model atmosfer parametrelerinin belirlenmesi aşamasında, PyKMod programı kullanılarak öncül değerler ile sentetik modeller oluşturulmuş daha sonra MOOG ara yüzüyle her bir yıldız için Fe I ve Fe II çizgileri bolluk değerlerine karşı düşük seviyeli uyarılma potansiyelleri (L.E.P.; üst panel), indirgenmiş eşdeğer genişlik (R.W.; orta panel) ve dalgaboyuna (alt panel) karşılık gelen veriler aynı düzlem üzerinde farklı panellerde Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Düzlem üzerinde Fe I ve Fe II verilerine doğrusal bir fit geçirilerek etkin sıcaklık ve mikrotürbülans hız değerlerinin hesaplanması için çizdirilen doğruların korelasyon katsayıları (L.E.P. ve R.W.) hesaplanmıştır. Doğruların korelasyon katsayılarının $R^2 = 0$'a yakın olması durumunda, PyKMod programıyla oluşturulan sentetik modelin etkin sıcaklık ve mikrotürbülans değerleri yıldızın model atmosfer parametre değerleri olarak kabul edilmiş ve bu veriler Tablo 4.7'de hatalarıyla birlikte listelenmiştir. Burada mikrotürbülans hızının hesaplanmasındaki hassasiyet 0.5 km/sn'dir. Yüzey çekim ivmesinin (log g) hesaplanması aşamasında Fe I ile Fe II çizgilerinin bolluklarının mutlak farkı mümkün olduğu kadar küçük olması göz önünde bulundurulmuştur. Yıldızların Fe I ve Fe II çizgilerinin iyonizasyon dengesini oluşturduğu log g değeri yıldızların yüzey çekim ivme değerleri olarak kabul edilmiş ve hatalarıyla birlikte Tablo 4.7'de verilmiştir. Ayrıca tez kapsamında incelenen tez yıldızlarının çizgi teşhisi yapılmış elementlerin bollukları Asplund ve diğ.'nin (2009) Güneş için verdikleri element bolluklarıyla karşılaştırılmaları Tablo 4.8 ve Tablo 4.9'da listelenmiştir.

Tablo 4.5: Tez kapsamında HD 22879 ve HD 144579 yıldızları için hesaplanan bolluk oranları ve çizgi sayıları.

	HD 22879				HD 144579			
Element	**[X/Fe]**	**[X/H]**	**σ**	***N***	**[X/Fe]**	**[X/H]**	**σ**	***N***
	(dex)				**(dex)**			
Na I	-1.25	-2.03	0.06	2	-1.17	-1.88	0.00	1
Mg I	0.42	-0.36	0.07	2	0.40	-0.30	0.11	2
Si I	0.25	-0.53	0.05	3	0.23	-0.48	0.07	5
Ca I	-0.95	-1.73	0.05	13	-0.95	-1.65	0.07	15
Sc I	-4.41	-5.18	0.00	1	-4.47	-5.17	0.00	1
Sc II	-4.11	-4.88	0.04	6	-3.99	-4.70	0.07	6
Ti I	-2.28	-3.05	0.08	32	-2.24	-2.94	0.14	31
Ti II	-2.22	-3.00	0.08	12	-2.25	-2.95	0.09	9
V I	---	---	---	---	-3.14	-3.84	0.06	3
Cr I	-1.88	-2.65	0.08	17	-1.82	-2.52	0.10	17
Cr II	-1.86	-2.63	0.08	3	-1.75	-2.45	0.00	1
Mn I	-2.28	-3.06	0.16	8	-2.08	-2.78	0.14	11
Fe I	0.00	-0.78	0.09	94	0.00	-0.70	0.13	103
Fe II	0.00	-0.77	0.12	13	-0.01	-0.71	0.16	11
Co I	-2.34	-3.11	0.42	4	-2.46	-3.16	0.13	5
Ni I	-1.28	-2.05	0.09	31	-1.20	-1.90	0.14	38
Zn I	-2.78	-3.56	0.09	2	-2.58	-3.28	0.09	2
Y I	-5.15	-5.93	0.19	2	-5.34	-6.05	0.00	1
Zr II	-4.60	-5.37	0.00	1	-5.37	-6.07	0.08	3
Ba II	-5.16	-5.94	0.08	4	-1.17	-1.88	0.00	1

Tablo 4.6: Tez kapsamında HD 188510 ve HD 201891 yıldızları için hesaplanan bolluk oranları ve çizgi sayıları.

	HD 188510				HD 201891			
Element	**[X/Fe]**	**[X/H]**	**σ**	**N**	**[X/Fe]**	**[X/H]**	**σ**	**N**
	(dex)				**(dex)**			
Mg I	0.36	-1.11	0.04	2	---	---	---	---
Ca I	-0.97	-2.44	0.09	10	-1.00	-2.01	0.05	13
Sc II	-4.33	-5.81	0.00	1	-4.08	-5.10	0.05	5
Ti I	-2.34	-3.82	0.14	7	-2.41	-3.43	0.08	17
Ti II	-2.24	-3.72	0.11	3	-2.21	-3.22	0.06	9
Cr I	-1.90	-3.38	0.08	7	-1.94	-2.95	0.09	12
Cr II	---	---	---	---	-1.78	-2.79	0.01	2
Mn I	---	---	---	---	-2.31	-3.32	0.12	7
Fe I	0.00	-1.48	0.13	29	0.00	-1.02	0.11	79
Fe II	0.07	-1.40	0.00	1	0.00	-1.02	0.14	12
Ni I	-1.44	-2.91	0.09	3	-1.27	-2.28	0.12	18
Zn I	---	---	---	---	-2.77	-3.79	0.00	1
Y II	---	---	---	---	-5.39	-6.41	0.06	2
Zr II	---	---	---	---	-4.77	-5.79	0.00	1
Ba II	-5.32	-6.79	0.02	3	-5.29	-6.31	0.14	4



Şekil 4.14: Tez yıldızlarının MOOG yardımıyla model atmosfer parametrelerinin tayininde kullanılan alt seviye uyartılma potansiyeli, indirgenmiş eşdeğer genişlik fonksiyonu ve çizgilerin dalgaboyları. En küçük kareler yöntemi kullanılarak yapılan uydurmaları mavi kesikli çizgi, nötral demir çizgilerini pembe noktalar ve iyonize demir çizgilerini ise mavi noktalar temsil etmektedir.

Tablo 4.7: Tez yıldızlarının hesaplanmış model atmosfer ve temel astrofizik parametreleri.

Yıldız	$T_{\rm eff}$ (K)	log g (cgs)	ξ (km/sn)	[Fe/H] (dex)	Z	M ($M_\odot$)	R ($R_\odot$)	L ($L_\odot$)	t Gyıl
HD 22879	5900	4.49	0.9	-0.78	0.002646	0.75	1.16	1.44	10.90
	(120)	(0.17)	(0.5)	(0.09)					(1.20)
HD 144579	5245	4.61	0.2	-0.65	0.003558	0.67	0.67	0.30	12.00
	(130)	(0.16)	(0.5)	(0.10)					(1.00)
HD 188510	5425	4.67	0.9	-1.47	0.000520	0.62	0.60	0.29	12.00
	(130)	(0.17)	(0.5)	(0.13)					(1.00)
HD 201891	5880	4.50	1.0	-1.02	0.001529	0.71	0.78	0.65	13.00
	(140)	(0.19)	(0.5)	(0.11)					(0.70)

Tablo 4.8: Tez çalışması kapsamında HD 22879 ve HD 144579'un PolarBase tayflarından hesaplan çizgi sayılarıyla birlikte element bollukları ve Asplund ve diğ.'nin (2019) Güneş için hesapladıkları element bollukları.

Element	Güneş		HD 22879				HD 144579			
	$\log\epsilon_{\odot}(X)$	σ	*N*	$\log\epsilon_{\odot}(X)$	σ	$\Delta\log\epsilon_{\odot}(X)$	*N*	$\log\epsilon_{\odot}(X)$	σ	$\Delta\log\epsilon_{\odot}(X)$
	(dex)			(dex)				(dex)		
Na I	6.24	0.04	2	5.47	0.06	0.77	1	5.62	0.00	0.62
Mg I	7.60	0.04	2	7.14	0.07	0.46	2	7.20	0.11	0.40
Si I	7.51	0.03	3	6.97	0.05	0.54	5	7.02	0.07	0.49
Ca I	6.34	0.04	13	5.77	0.05	0.57	15	5.85	0.07	0.49
Sc I	3.15	0.04	1	2.32	0.00	0.83	1	2.33	0.00	0.82
Sc II	3.15	0.04	6	2.62	0.04	0.53	6	2.81	0.07	0.35
Ti I	4.95	0.05	32	4.45	0.08	0.50	31	4.56	0.14	0.39
Ti II	4.95	0.05	12	4.50	0.08	0.45	9	4.55	0.09	0.40
V I	3.93	0.08	0	---	---	---	3	3.66	0.06	0.27
Cr I	5.64	0.04	17	4.85	0.08	0.79	17	4.98	0.10	0.66
Cr II	5.64	0.04	3	4.87	0.08	0.77	1	5.05	0.00	0.59
Mn I	5.43	0.05	8	4.44	0.16	0.99	11	4.72	0.14	0.71
Fe I	7.50	0.04	94	6.73	0.09	0.78	103	6.80	0.13	0.70
Fe II	7.50	0.04	13	6.73	0.12	0.77	11	6.79	0.16	0.71
Co I	4.99	0.07	4	4.39	0.42	0.60	5	4.34	0.13	0.65
Ni I	6.22	0.04	31	5.45	0.09	0.77	38	5.60	0.14	0.62
Zn I	4.56	0.05	2	3.94	0.09	0.62	2	4.22	0.09	0.34
Sr I	2.87	0.07	0	---	---	---	0	---	---	---
Yn I	2.21	0.05	2	1.57	0.19	0.64	0	---	---	---
Y II	2.21	0.05	0	---	---	---	1	1.46	0.00	0.76
Zr II	2.58	0.04	1	2.13	0.00	0.45	0	---	---	---
Ba II	2.18	0.09	4	1.56	0.08	0.62	3	1.43	0.08	0.75

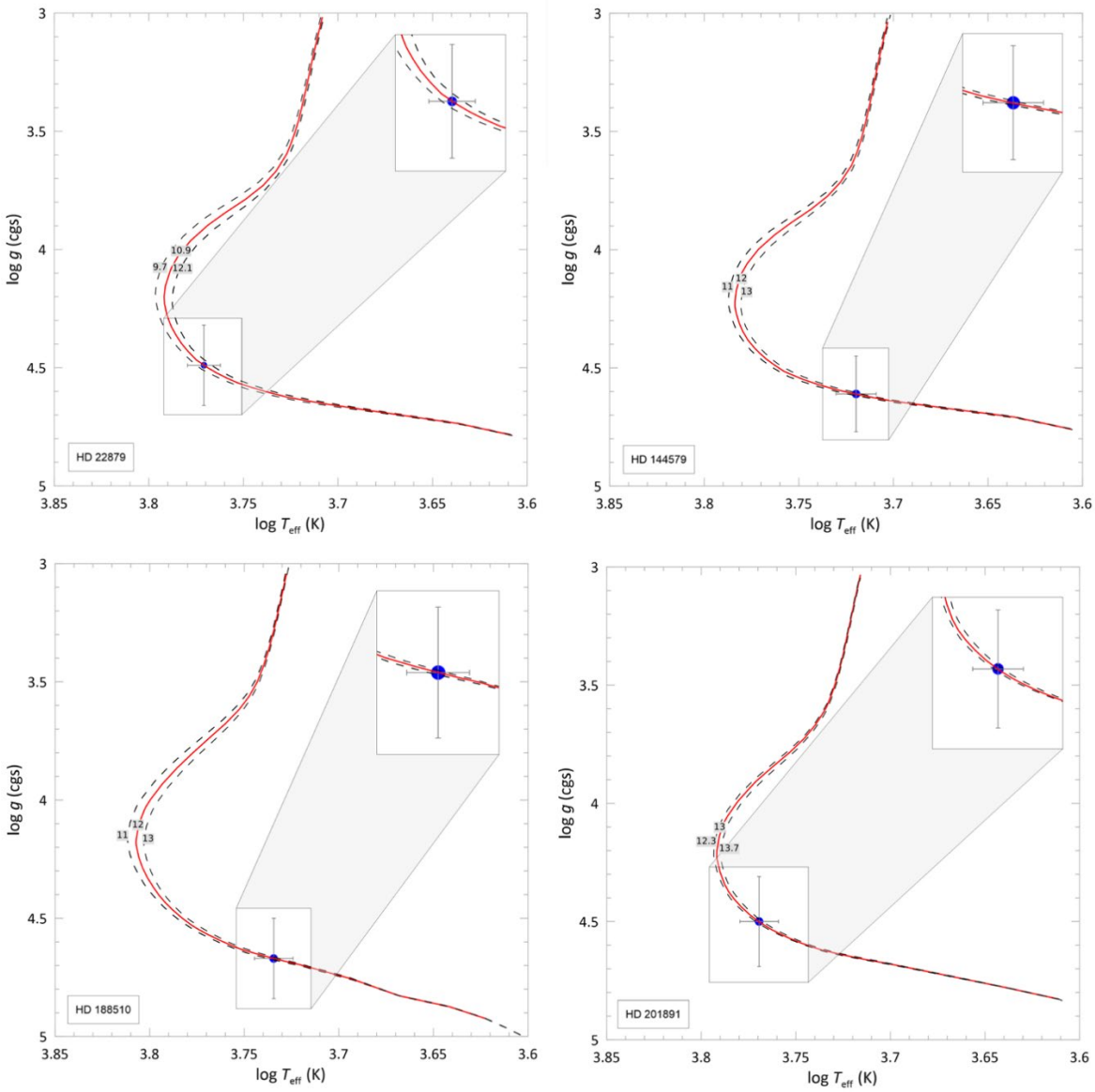
Bir yıldızın yaşı, onun evrimi, özellikleri ve evrendeki yeri hakkında önemli bilgiler sağlayan temel bir parametredir. Yıldız yaşlarının belirlenmesi, teorik modellerin ve gözlemsel verilerin karmaşık bir etkileşimini gerektirdiğinden zorlu bir süreçtir. Bu bölümde kullanılan yöntem, bir yıldızın model atmosfer parametrelerinden yaşı hesaplamak için Bayes istatistiğine dayalıdır. Bayes yaklaşımı, yıldız evrimini fiziksel süreçlere ilişkin ön bilgileri, sentetik tayfların ve gözlemlenen verilerin karşılaştırılmasından elde edilen olasılık fonksiyonuyla

birleştirir. Gelişmiş hesaplama teknikleri sayesinde tez çalışmasında kullanılan Bayes istatistiğiyle belirlenen yaşlar, olasılık dağılımlarını türeten geniş bir parametre uzayı oluşturur.

Tablo 4.9: Tez çalışması kapsamında HD 22879 ve HD 144579'un PolarBase tayflarından hesaplan çizgi sayılarıyla birlikte element bollukları ve Aspulund ve diğ.'nin (2019) Güneş için hesapladıkları element bollukları.

Element	Güneş		HD 188579				HD 201891			
	$\log\epsilon_\odot(X)$ (dex)	σ	*N*	$\log\epsilon_\odot(X)$	σ (dex)	$\Delta\log\epsilon_\odot(X)$	*N*	$\log\epsilon_\odot(X)$	σ (dex)	$\Delta\log\epsilon_\odot(X)$
Mg I	7.60	0.04	2	6.39	0.04	1.21	0	---	---	---
Ca I	6.34	0.04	10	5.06	0.09	1.28	13	5.49	0.05	0.85
Sc II	3.15	0.04	1	1.79	0.00	1.46	5	2.40	0.05	0.75
Ti I	4.95	0.05	7	3.68	0.14	1.27	17	4.07	0.08	0.88
Ti II	4.95	0.05	3	3.78	0.11	1.17	9	4.28	0.06	0.67
Cr I	5.64	0.04	7	4.12	0.08	1.52	12	4.55	0.09	1.09
Cr II	5.64	0.04	0	---	---	---	2	4.71	0.01	0.93
Mn I	5.43	0.05	0	---	---	---	7	4.18	0.12	1.25
Fe I	7.50	0.04	29	6.03	0.13	1.48	79	6.48	0.11	1.02
Fe II	7.50	0.04	1	6.10	0.00	1.40	12	6.48	0.14	1.02
Ni I	6.22	0.04	3	4.59	0.09	1.63	18	5.22	0.12	1.00
Zn I	4.56	0.05	0	---	---	---	1	3.72	0.00	0.85
Y II	2.21	0.05	0	---	---	---	2	1.09	0.06	1.12
Zr II	2.58	0.04	0	---	---	---	1	1.71	0.00	0.87
Ba II	2.18	0.09	3	0.71	0.02	1.47	4	1.19	0.14	0.99

Tayfsal analizler sonucunda hesaplanan model atmosfer parametrelerinin yıldız yaşlarının tayininde önemli bir yeri vardır. Yıldızlara ilişkin model atmosfer parametreleri ($T_{\rm eff}$, log *g*, [Fe/H], ξ) yüksek çözünürlüklü tayflardan sağlanmalıdır. Dört yıldız için elde edilen model atmosfer parametreleri da Silva ve diğ.'nin (2006) Bayes istatistiğine dayalı yönteme uygulanarak her bir yıldızın yaşı hatalarıyla birlikte hesaplanmıştır. Bu hesaplamaların gerçekleştirilmesinde PARAM 1.3 ara yüzü kullanılmıştır. Gözlemsel verilerin teorik eş-eğrileriyle karşılaştırma aşamasında Padova grubunun PARSEC eş-yaş eğrileri (Bressan ve diğ., 2012) dikkate alınmıştır. Tez kapsamında incelenen dört yıldızın model atmosfer parametreleri Tablo 4.4'te listelenmiştir. Şekil 4.15'te model atmosfer parametreleri kullanılarak tayin edilen dört yıldızın yaşı kiel diyagramlarıyla birlikte verilmiştir.



Şekil 4.15: Tez kapsamında incelenen dört yıldızın kiel diyagramları. PARAM arayüzü ile hesaplanan olası yaşlar kırmızı çizgiyle, yaş hataları kesikli gri çizgiler ve gri kutular ise eş-yaş eğrilerinin yaşlarını göstermektedir.

Bayes istatistiği sonucunda yaş analizlerine göre HD 22879'un yaşı 10.9±1.2 Gyıl, HD 1445879'un yaşı 12.0±1.0 Gyıl, HD 188510'un yaşı 12.0±1.0 Gyıl ve HD 201891'in yaşı 13.0±0.70 Gyıl olarak tayin edilmiştir. Tez kapsamında incelenen yıldızların $10.9 < t$ (Gyıl) $\leq$ 13 yaş aralığında bulunduğu tespit edilmiştir. Özellikle kiel diyagramında anakol bandının TAMS bölgesine yakın ve alt dev bölgesinde bulunan yıldızların yaşlarının daha hassas tayin edildiği görülmektedir (Lebreton ve Montalban, 2008). Tez kapsamında incelenen yıldızların

da söz konusu bu bölgelerde yer alması yıldızlar için önemli bir parametre olan yaşın doğru ve hassas tayin edildiğini gösteren önemli bir delildir.

4.4. KİNEMATİK ANALİZ

Kinematik analizler yıldızların geçmişini, bugünü ve gelecekteki etkileşimlerinin anlaşılmasını sağlar. Samanyolu durağan değildir; yıldızların sürekli hareket ettiği bir alandır. Bu yıldızların dinamik etkileşimini anlamak için gelişmiş hesaplama tekniklerinden ve gözlemsel verilerden yararlanılır. Bir yıldızın gök küresi boyunca görünen açısal hareketi olan öz hareketi, zaman içindeki hareketinin anlaşılmasını sağlar. Ayrıca kinematik parametreler, yıldızların Samanyolu içindeki yörüngelerinin belirlenmesini de sağlar.

Yüksek lisans tezi kapsamında G tayf türünde dört farklı metal bolluğundaki yıldızın kinematik analizleri Johnson ve Soderblom'un (1987) algoritması ve dönüşüm matrisleri kullanılarak hesaplanmıştır (bkz. Bölüm 3.5). Tez yıldızlarının uzay hız bileşenlerinin hesaplanmasında *Gaia* DR3 (Gaia işbirliği, 2023) veri tabanındaki astrometrik ve tayfsal verilerinden faydalanılmıştır. Tez yıldızlarının ekvatoral koordinatları (α, δ), öz hareket bileşenleri ($\mu_\alpha \cos\delta$, μ_δ), trigonometrik paralaks (ϖ) ve radyal hız (γ) verileri *Gaia* DR3'ten alınmıştır (bkz. Tablo 3.2).

Uzay hızı hesaplamaları Bovy'nin (2015) literatüre kazandırdığı *galpy* programı yardımıyla tayin edilmiştir. Bu yazılım Johnson ve Soderblom'un (1987) algoritmasını dikkate alarak yıldızların uzay hız bileşenlerini (U, V ve W) hesaplamaktadır. Dört tez yıldızı için *Gaia* DR3 veri tabanından alınan astrometrik ve tayfsal parametreler dikkate alınarak uzay hız bileşenleri *galpy* programı yardımıyla hesaplanmış ve elde edilen uzay hız bileşenleri Tablo 4.10'da listelenmiştir.

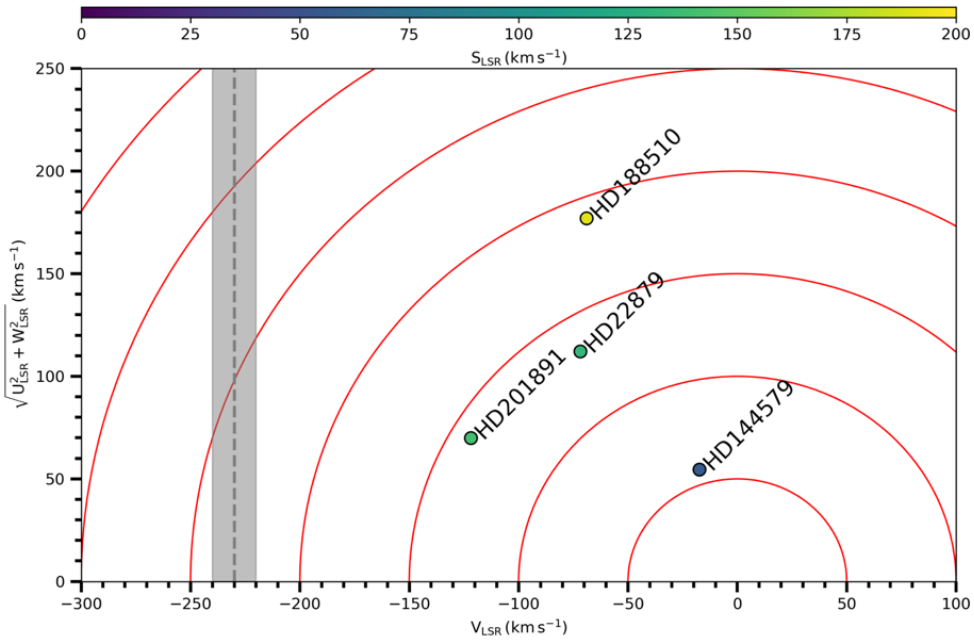
Yıldızların uzay hız bileşenleri Bölüm 3.5'te bahsedilen diferansiyel dönme ve yerel durağanlık standart düzeltmesi gibi iki yanlılıktan etkilenmektedir. Bu yanlılıkların ortadan kaldırılması için öncelikle Mihalas ve Binney'in (1981) diferansiyel dönme bağıntıları kullanılarak U ve V hızlarına ait düzeltmeler gerçekleştirilmiştir. Yapılan kinematik analizlerde HD 22879, HD 144579, HD 188510 ve HD 201891 yıldızlar için hesaplanan diferansiyel dönme düzeltmeleri (d_U, d_V), sırasıyla, $(-0.09, -0.04)_{\text{HD 22879}}$, $(0.23, 0.01)_{\text{HD 144579}}$, $(0.78, 0.06)_{\text{HD 188510}}$

ve $(0.78, 0.03)_{HD\ 201891}$ km/sn'dir. Hesaplanan bu düzeltme değerleri yıldızların uzay hız bileşen değerleriyle toplanmıştır. Ardından Coşkunoğlu ve diğ.'nin (2011) LSR için hesapladığı $(U_\odot, V_\odot, W_\odot)_{LSR} = (8.83\pm0.24, 14.19\pm0.34, 6.57\pm0.24)$ km/sn'lik değerler dikkate alınarak uzay hızlarındaki ikinci yanlılık düzeltmesi yapılmıştır. Bunun için tez kapsamında incelenen dört yıldızının diferansiyel rotasyon düzeltmesi yapılmış uzay hız bileşenlerinden Coşkunoğlu ve diğ.'nin (2011) hız değerleri çıkartılmıştır. Kinematik hızları etkileyen yanlılıkların ortadan kaldırılmasıyla dört yıldız için hesaplanan uzay hız bileşenleri ve toplam uzay hızları hatalarıyla birlikte Tablo 4.10'da verilmiştir.

Tablo 4.10: Tez kapsamında incelenen dört yıldızın uzay hız bileşenleri ve hataları.

Yıldız	U (km/sn)	V (km/sn)	W (km/sn)	U_{LSR} (km/sn)	V_{LSR} (km/sn)	W_{LSR} (km/sn)	S_{LSR} (km/sn)
HD 22879	-115.54 (0.16)	-85.99 (0.09)	-41.13 (0.15)	-106.62 (0.29)	-71.76 (0.35)	-34.56 (0.28)	133.09 (0.54)
HD 144579	-63.10 (0.11)	-31.49 (0.12)	-7.52 (0.08)	-54.50 (0.26)	-17.31 (0.34)	-0.95 (0.25)	57.19 (0.50)
HD 188510	-164.18 (0.33)	-83.04 (0.28)	76.79 (0.11)	-156.13 (0.41)	-68.91 (0.44)	83.36 (0.26)	189.93 (0.66)
HD 201891	58.33 (0.12)	-135.95 (0.15)	-28.35 (0.10)	66.38 (0.27)	-121.79 (0.37)	-21.78 (0.26)	140.40 (0.53)

Yıldızların Galaktik popülasyon ayrımlarında enerji diyagramı olarak da bilinen Toomre diyagramı kullanılmaktadır. Tez yıldızlarının hesaplanmış uzay hız bileşenlerinin Toomre diyagramındaki konumları Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Şekil üzerinde eş-hız eğrileri 50 km/sn'lik adımlar ile gösterilmiştir. Diyagramdaki $V_{LSR} = 0$ hız değeri Güneş civarındaki rölatif hızı ifade etmektedir. Düşük hızlara doğru gidildikçe Samanyolu'nda farklı popülasyonlara ait yıldızlar görülmektedir. Şekil 4.16'da kesikli çizgiyle gösterilen ve gri bölgeyle taralı band Samanyolu'ndaki en düşük hız değerini göstermektedir. Güneş'in Galaksi merkezi etrafındaki dolanma hızı 230±10 km/sn olup bu değer yıldızların V_{LSR} hızından çıkartıldığında Galaksideki durağan yıldızlara ulaşılmaktadır (Lina ve Tongyan, 2022). Bu değerin ötesindeki hızlarda bulunan yıldızlar ise Samanyolu'na katılan ve Samanyolu'na göre ters yönde hareket edenleri göstermektedir. Şekil 4.16'da görüleceği gibi dört yıldızın taralı bölgenin içerisinde kaldığı ve bu yıldızların Samanyolu'nun yıldızları olduğu görülmüştür.



Şekil 4.16: Tez yıldızlarının Toomre diyagramı üzerindeki konumları. Yıldızlar uzay hızı hatalarına göre renklendirilmiştir. Üst panelde bulunan renk ölçeği toplam uzay hızındaki hataları göstermektedir. Şekildeki kırmızı eğriler 50 km/sn'lik hız değerlerini, gri bölge içindeki kesikli çizgi S_{LSR}= -230 km/sn'lik hızı ifade etmektedir (Lina ve Tongyan, 2022).

4.5. GALAKTİK YÖRÜNGE PARAMETRELERİ

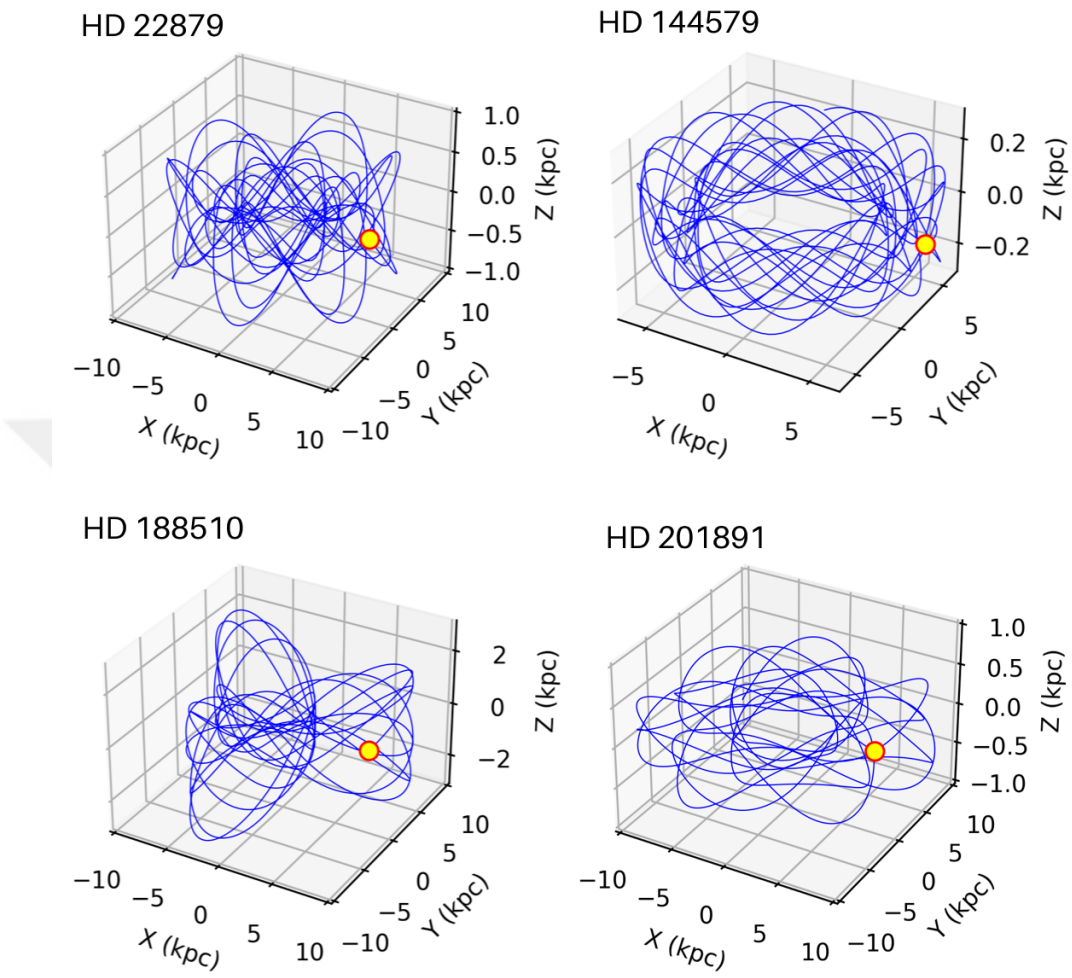
Galaksi içindeki gök cisimleri, Galaktik ortamın çekim kuvvetlerinden etkilenir ve Samanyolu boyunca karmaşık yollar kat ederler. Yıldızların uzay hızlarından hesaplanan Galaktik yörüngelerini incelemek, yörünge üzerindeki geçmiş ve gelecek hareketlerini tahmin etmek açısından önemlidir. Tez kapsamında incelenen dört yıldızın dinamik yörünge analizleri yapılmış ve analizin bu aşamasında yörünge basıklığı ve açısal momentum dahil ancak bunlar ile sınırlı olmamak üzere temel parametreleri elde edilmiştir. Bu parametreler, yıldızların Samanyolu boyunca yaptığı karmaşık hareketi özetlemekte ve dinamik geçmişlerini ortaya çıkarmaktadır. Analizin temeli, dört yıldızın astrometrik ve tayfsal gözlem verilerine dayanmaktadır. Konumları, hızları ve diğer kinematik özellikleri kapsayan bu veriler, yıldızların Galaksi merkez etrafındaki yörüngelerinin incelenmesine olanak tanır.

Bovy'nin (2015) Galaktik dinamik kütüphanesi olarak bilinen *galpy* programı içinde çok sayıda tanımlanmış potansiyel fonksiyonları bulunmaktadır. Program Samanyolu'nun çekim potansiyelinin modellerini oluşturarak ve bu modelleri yıldızların yörüngelerini zaman içinde yaymak için kullanır. Bu modeller şişkin bölge, disk ve karanlık madde halosu gibi çeşitli Galaktik bileşenlerin katkılarını hesaba katmaktadır. Bunlar içinde en önemlisi Galaksi diskinin eksenel simetrisi dikkate alınarak hazırlanan *MWPotential2014* olup tez çalışması kapsamında bu potansiyel takım tercih edilmiştir (bkz. Bölüm 3.6). Tez yıldızlarının Galaksi merkezi etrafında kapalı yörüngelerinin oluşturulabilmesi için hesaplamalarda 5,000 yıllık adımlar ile 13 Gyıllık bir integrasyon zamanı dikkate alınmıştır. Bu aşamadan sonra bir yıldızın Galaktik yörüngesine dair elde edilen parametreler, peri-galaktik ve apo-galaktik uzaklıklar (R_p ve R_a), basıklık (e), Galaktik düzleme dik doğrultuda erişilen en büyük uzaklık (Z_{max}) ve yıldızın Galaksi merkezi etrafındaki periyodudur (T_p). Yıldız yörüngelerinin ortalama Galaktosentrik uzaklıkları peri-galaktik ve apo-galaktik uzaklıklarının aritmetik ortalamasıyla hesaplanmıştır. Metalce fakir dört tez yıldızının Galaktik yörünge parametreleri *MWPotential2014* potansiyelleri altında tayin edilmiştir. Bu yıldızların Galaktik model parametreleri Tablo 4.11'de listelenmiş ve kartezyen Galaktik koordinat sistemindeki yörüngeleri Şekil 4.17'de gösterilmiştir.

Yapılan dinamik yörünge analizleri sonucunda incelenen dört yıldızın Galaksi merkezi etrafında kapalı bir yörünge oluşturduğu Şekil 4.17'de görülmektedir. Yörünge şekilleri yıldızların popülasyon ayrımlarında kullanılan bir araçtır. HD 144579 ve HD 201891 yıldızlarının Galaktik yörüngeleri incelendiğinde Galaksi merkezi etrafında simetrik hareket gerçekleştirdiği ve Galaktik düzlemden fazla ayrılmadığı ($Z < 250$ pc), buna karşın HD 22879 ve HD 188510 yıldızları ise karmaşık bir harekete sahip olduğu ve Galaktik düzlemden çok daha uzaklara eriştiği ($Z > 850$ pc) tespit edilmiştir.

Tablo 4.11: Dört yıldızın MWPotential2014 potansiyelleri altında hesaplanmış Galaktik yörünge parametreleri.

Yıldız	Z_{max}	R_a	R_p	R_m	e	T_p
	(pc)					(Myıl)
HD 22879	712	9514	3349	6431	0.48	189
HD 144579	161	8132	4958	6545	0.24	182
HD 188510	2289	10745	2637	6691	0.61	207
HD 201891	258	12427	4022	8225	0.51	245



Şekil 4.17: Tez yıldızlarının Galaksi merkezi etrafındaki yörüngeleri. Sol paneller *Y-X* düzlemindeki sağ paneller *Z-X* düzlemindeki hareketleri göstermektedir. Panellerdeki kırmızı yıldız sembolleri yıldızların bugünkü konumunu göstermektedir.

4.6. YILDIZLARIN POPÜLASYON TÜRLERİ

Samanyolu'nda bulunan yıldızların popülasyon türlerinin sınıflamasında farklı yöntemler kullanılmaktadır. İstatistiksel açıdan bir yıldızın bir Galaktik popülasyona üye olması için incelenen yıldızın Galaksi içindeki konumu, uzay hız bileşenleri, Galaksi merkezi etrafında çizdiğin yörüngenin biçimi, yaşı ve kimyasal kompozisyonu dikkate alınır. Yüksek lisans tezi kapsamında metalce fakir dört yıldız Güneş komşuluğunda bulunduğundan konumsal olarak tam doğru bir sonuç vermemektedir. Bu farklılığı ortaya koyabilmek için yıldızların kinematik,

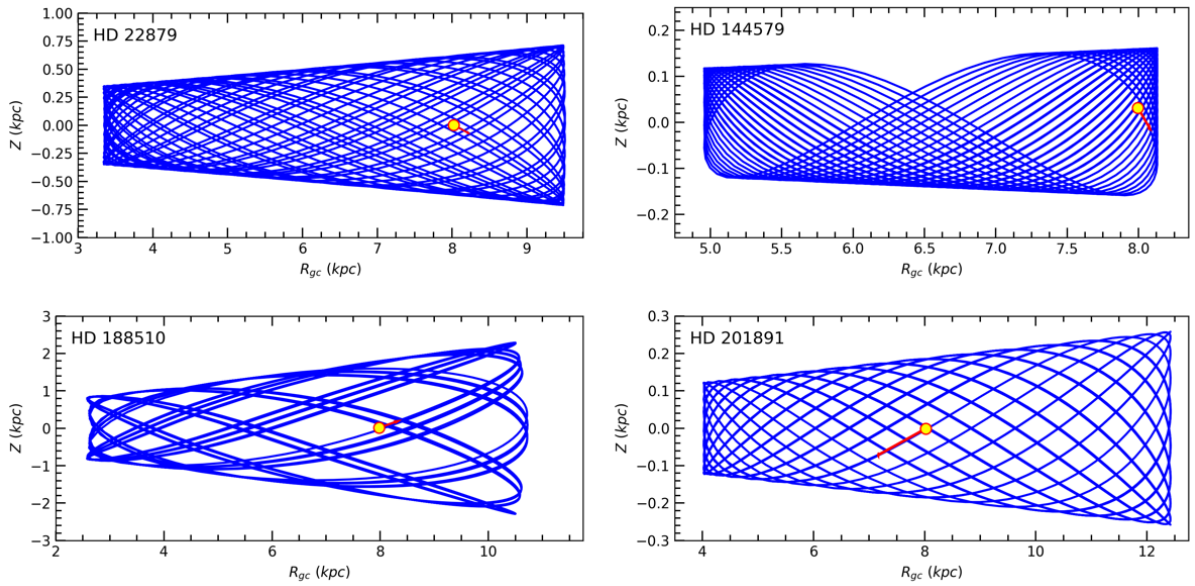
dinamik yörünge analizi, yaş ve tayfsal analizlerinden elde edilen bulgulara göre bir Galaktik popülasyon analizi gerçekleştirilmiştir.

Güneş civarındaki alan yıldızlarının Galaktik popülasyon türlerinin (ince disk, kalın disk ve halo) tayin edilmesinde kullanılan bir başka yöntem de kinematik analizlere dayanmaktadır. Bensby ve diğ. (2003) Güneş civarındaki ince disk yıldız örneklerindeki kalın disk ve halo yıldızlarını tespit etmek için popülasyonların tipik kinematik özelliklerini olasılık dağılımı içinde incelemiştir. Bu yöntemde ince disk, kalın disk ve halo popülasyonları için uzay hız bileşenlerinin, $(U, V, W)_{\mathrm{LSR}}$, Gauss benzeri dağılımlar gösterdiği varsayılmaktadır (bkz. Bölüm 3.7).

Yüksek öz hareketli metalce fakir dört tez yıldızının uzay hız bileşenleri Bensby ve diğ'nin (2003) kinematik kriterlerine göre analiz edilmiş ve popülasyon türlerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Bölüm 3'te verilen Bağıntı (3.20) ve Bağıntı (3.21) yardımıyla yıldızların TD/D oranları hesaplanmış ve Galaktik popülasyon türleri belirlenmiştir. Bu analizlere göre HD 22879, HD 144579, HD 188510 ve HD 201891 yıldızlarının TD/D oranları, sırasıyla, 66, 0.015, 1.62×10^5 ve 13111 olarak hesaplanmıştır. Bu bulgulara göre incelenen dört yıldızın biri ince diske ($TD/D<1$), üçü de halo popülasyonuna ($TD/D>10$) ait olduğu tespit edilmiştir.

Tez kapsamında dört yıldızın yörüngelerini daha iyi analiz edebilmek için yıldızların yörünge verileri $Z \times R_{\mathrm{gc}}$ düzleminde çizilmiştir ve Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Yıldız yörüngelerinin kenardan bir görünüşünü ifade eden $Z \times R_{\mathrm{gc}}$ düzlemi, yıldızların Galaksi merkezine en yakın ve en uzak olduğu konumlar ile Galaktik düzlemden ayrılabildikleri en büyük uzaklığı gösterdiği için iyi bir Galaktik popülasyon aracı olarak kullanılmaktadır. Şekil 4.18 üzerinde dört yıldızın konumları incelendiğinde Galaktik düzleme yakın oldukları görülmektedir. Bu yıldızların Güneş civarından seçilmiş olmaları sebebiyle Galaktik düzleme yakın olmaları beklenmektedir. 13 Gyıllık bir integrasyon zamanı içinde yıldızların yörüngeleri incelendiğinde HD 144579 yıldızı Galaksi merkezine 5 kpc yaklaşırken, diğer üç yıldızın Galaksi merkezine 3 kpc mesafeye kadar ulaşabildikleri görülmektedir. Benzer olarak, HD 144579 yıldızı Galaksi merkezi etrafındaki yörüngesi esnasında yaklaşık 8 kpc'lik en büyük uzaklığa ulaşırken, diğer üç yıldız bu mesafenin çok ötesine ulaşabilmektedir. Bu da HD 144579 yıldızının diğer üç yıldıza göre daha çembersel yörüngede hareket ettiğini gösteren önemli bir delildir. HD 144579

ile HD 201891 yıldızlarının Galaktik düzleme dik doğrultudaki uzaklıkları dikkate alındığında 500 pc'i geçmedikleri, buna karşın HD 22879 ve HD 188510 yıldızlarının 750 pc'ten daha büyük uzaklıklara ulaştığı Şekil 4.18'den görülmektedir. Bu bulgudan, HD 144579 ve HD 201891'in genç ince diske, HD 22879'un yaşlı ince diske ve HD 188510'un kalın disk popülasyonuna üye olduğu anlaşılmıştır (Tuncel-Güçtekin ve diğ., 2019).



Şekil 4.18: Tez yıldızlarının Galaksi merkezi etrafındaki yörüngeleri. Panellerdeki kırmızı yıldız sembolleri yıldızların bugünkü konumunu göstermektedir.

4.7. YILDIZLARIN KÖKENLERİ

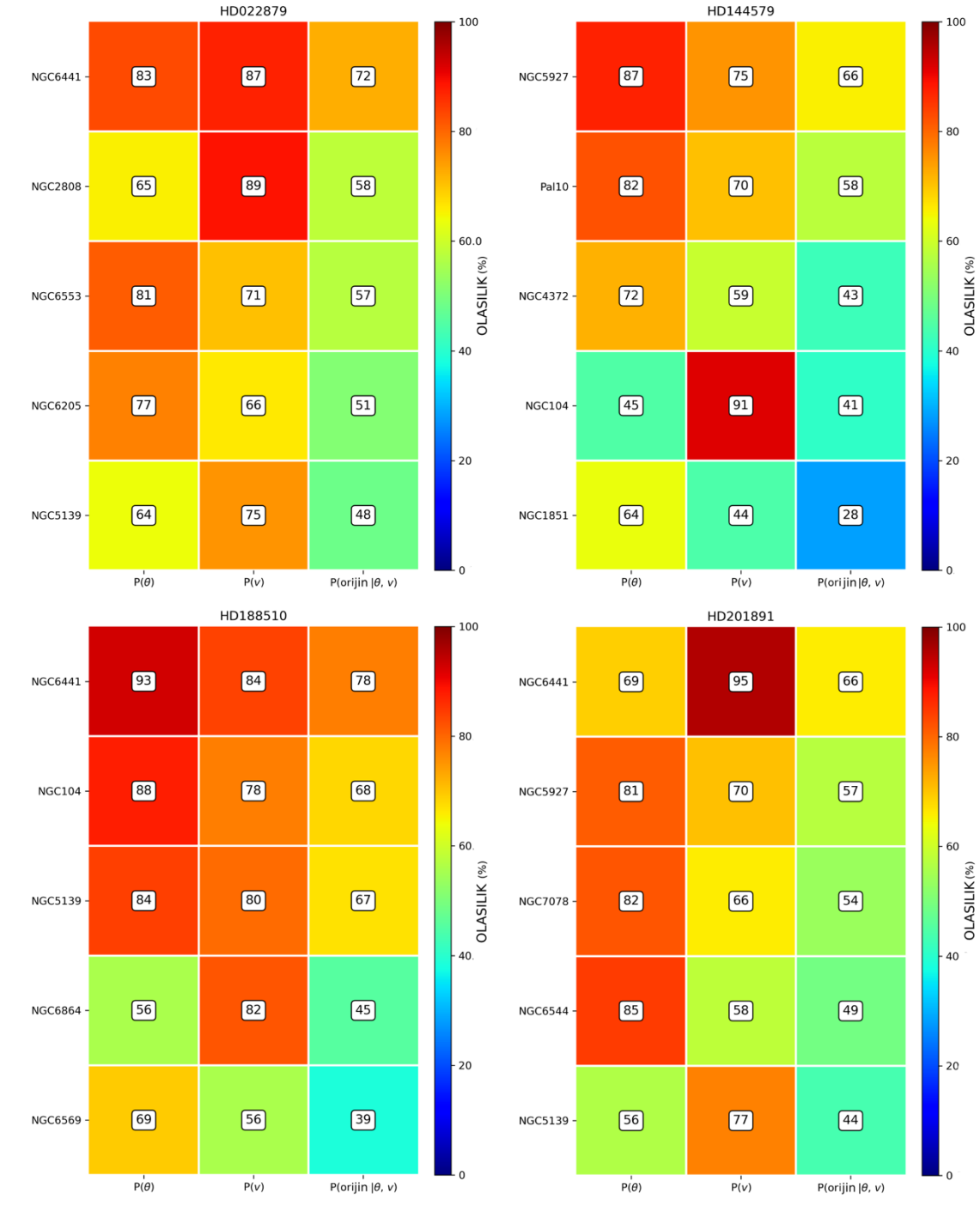
Yüksek lisans tez kapsamında incelenen metalce fakir dört yıldızın Galaktik kökenlerinin araştırmasında, Vasiliev ve Baumgardt'ın (2021) *Gaia* EDR3 verileriyle Samanyolu'nda incelediği 170 küresel kümenin astrometrik ve tayfsal verileri kullanılmıştır. Bu amaç doğrultusunda tez çalışmasında incelenen dört yıldızın Galaksi merkezi etrafındaki yörüngeleri yaşları dikkate alınarak, günümüzden yıldızın sıfır yaşına doğru, yüksek çözünürlüklü adımlar ile oluşturulmuştur. Benzer işlem Vasiliev ve Baumgardt'dan (2021) alınan 170 küresel küme için de gerçekleştirilmiştir. Analizlerde tez kapsamında incelenen yıldızların köken araştırmasında Bölüm 3.8'de verilen karşılaşma olasılıkları dikkate alınmıştır. Her bir integrasyon zamanında küresel kümeler için verilen gel-git yarıçaplarının beş katı bir mesafe

içerisinde, küresel küme ile yıldız arasındaki konum ve hıza bağlı karşılaşma olasılıkları Bağıntı (3.22) ile hesaplanmıştır.

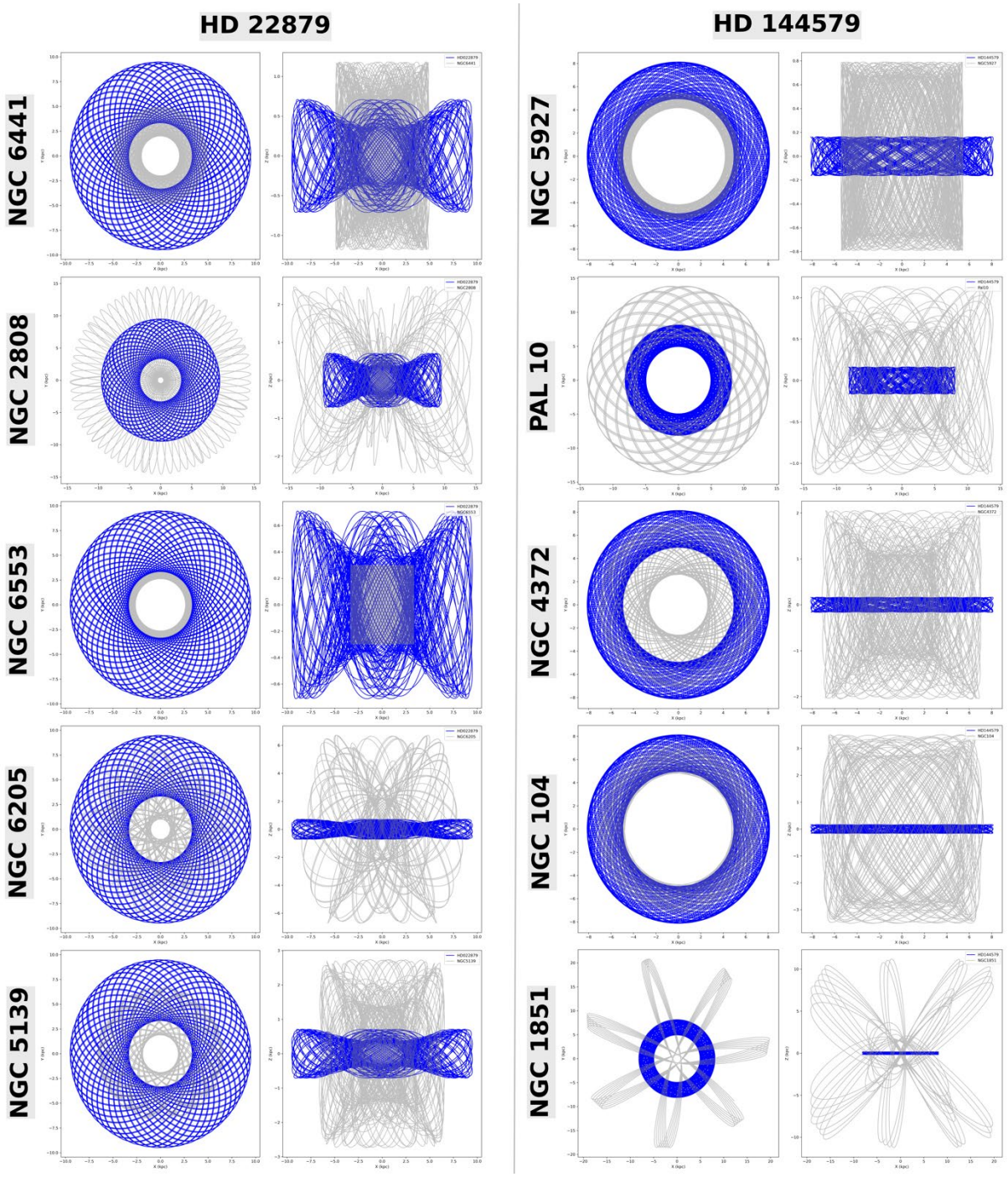
Elde edilen bulguların anlamlı bir şekilde literatüre kazandırılması için incelenen yıldızın en yüksek olasılıklı üye olduğu beş kümeyle karşılaştırılması matris yöntemiyle Şekil 4.19'da ve yörüngelerinin karşılaştırılmaları da Şekiller 4.20 ve 4.21'de gösterilmiştir. Oluşturulan matrislerin dikey ekseninde üyelik olasılığı olan küresel kümeler, yatay ekseninde ise, sırasıyla, konum ($P(\theta)$), hız ($P(v)$) ve bunların birleşiminden hesaplanan olasılık değeri ($P(\text{orijin}|\theta,v)$) yer almaktadır. Her bir duruma ait olasılık değerleri kutuların merkezlerinde verilmiştir ve bu değerler verilen küresel kümelerin üyelik olasılık değerlerine göre renklendirilmiştir.

HD 22879 yıldızının yörünge analizleri sonucunda küresel kümeler ile olan ilişkisine ait sonuçlar Şekil 4.19'un sol üst panelinde gösterilmiştir. Yıldız için gerçekleştirilen kinematik analizlerinde konum ve hız değerleri bakımından en olası beş küresel kümenin NGC 6441, NGC 2808, NGC 6553, NGC 6205 ve NGC 5139 olduğu tespit edilmiştir. Kinematik incelemeler sonucunda yıldızın beş küresel kümeye üye olma olasılığı, sırasıyla, %72, %58, %57, %51 ve %48 olduğu tespit edilmiştir. Bu analizler yıldızın en olası etkileşiminin NGC 6441 kümesi olduğunu göstermiştir. Buna göre HD 22879'un NGC 6441 küresel kümesiyle konuma %83 ve hıza %87 olasılıkla ilişkili olduğu görülmüştür. Bu iki verinin bir arada değerlendirilmesi sonucunda yıldızın küresel kümeye üyelik olasılığı %72 olarak belirlenmiştir.

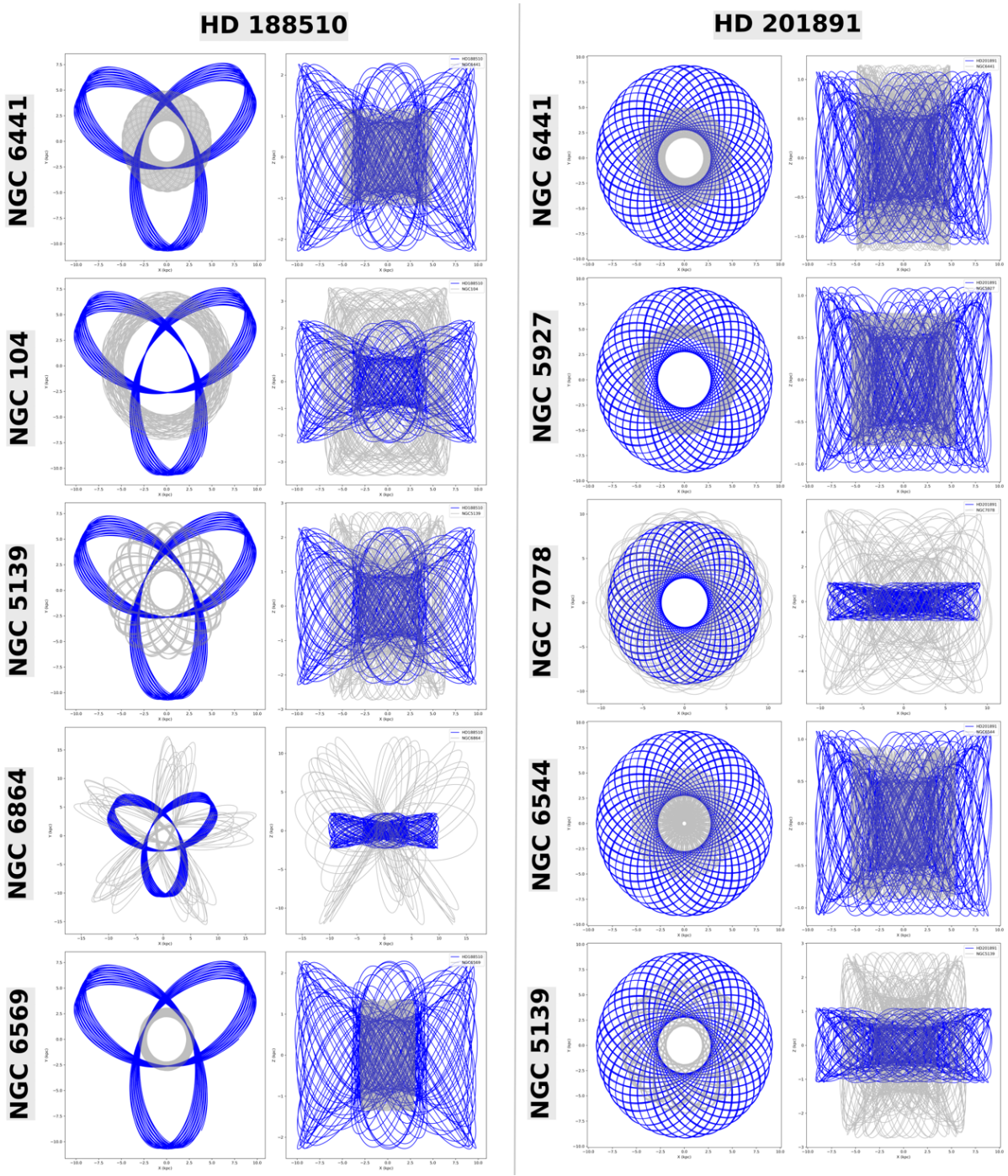
HD 144579'un yörünge analizleri sonucunda küresel kümeler ile olan ilişkisine ait sonuçlar Şekil 4.19'un sağ üst panelinde gösterilmiştir. Yıldız için gerçekleştirilen kinematik analizlerinde konum ve hız değerleri bakımından en olası beş küresel kümenin NGC 5927, Pal 10, NGC 4372, NGC 104 ve NGC 1851 olduğu tespit edilmiştir. Kinematik incelemeler sonucunda yıldızın beş küresel kümeye üye olma olasılığı, sırasıyla, %66, %58, %43, %41 ve %28 olduğu tespit edilmiştir. Bu analizler yıldızın en olası etkileşiminin NGC 5927 kümesi olduğunu göstermiştir. Buna göre HD 144579'un NGC 5927 küresel kümesiyle konuma %87 ve hıza %75 olasılıkla ilişkili olduğu görülmüştür. Bu iki verinin bir arada değerlendirilmesi sonucunda yıldızın küresel kümeye üyelik olasılığı %66 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.19: Tez kapsamında incelenen dört yıldızın, Samanyolu'ndaki küresel kümeler ile konum ve hız bakımından karşılaşma olasılık değerleri. Maviden kırmızıya doğru olan renk paleti olasılıkların yüzdesini ifade etmektedir.



Şekil 4.20: HD 22879 ve HD 144579'un en yüksek olasılıklı üye olduğu beş küresel küme için hesaplanan Galaktik *X-Y* ve *X-Z* düzlemleri üzerindeki Galaktik yörüngeleri. Mavi çizgi yıldızların, gri çizgiler küresel kümelerin yörüngelerini göstermektedir.



Şekil 4.21: HD 188510 ve HD 201891'in en yüksek olasılıklı üye olduğu beş küresel küme için hesaplanan Galaktik *X-Y* ve *X-Z* düzlemleri üzerindeki Galaktik yörüngeleri. Mavi çizgi yıldızların, gri çizgiler küresel kümelerin yörüngelerini göstermektedir.

HD 188510'un yörünge analizleri sonucunda küresel kümeler ile olan ilişkisine ait sonuçlar Şekil 4.19'un sol alt panelinde gösterilmiştir. Yıldız için gerçekleştirilen kinematik analizlerinde konum ve hız değerleri bakımından en olası beş küresel kümenin NGC 6441, NGC 104, NGC 5139, NGC 6864 ve NGC 6569 olduğu tespit edilmiştir. Kinematik incelemeler sonucunda yıldızın beş küresel kümeye üye olma olasılığı, sırasıyla, %78, %68, %67, %45 ve %39 olduğu tespit edilmiştir.

Bu analizler yıldızın en olası etkileşiminin NGC 6441 kümesi olduğunu göstermiştir. Buna göre HD 188510'un NGC 6441 küresel kümesiyle konuma %93 ve hıza %84 olasılıkla ilişkili olduğu görülmüştür. Bu iki verinin bir arada değerlendirilmesi sonucunda yıldızın küresel kümeye üyelik olasılığı %78 olarak belirlenmiştir.

Son olarak, HD 201891'in yörünge analizleri sonucunda küresel kümeler ile olan ilişkisine ait sonuçlar Şekil 4.19'un sağ alt panelinde gösterilmiştir. Yıldız için gerçekleştirilen kinematik analizlerinde konum ve hız değerleri bakımından en olası beş küresel kümenin NGC 6441, NGC 5927, NGC 7078, NGC 6544 ve NGC 5139 olduğu tespit edilmiştir. Kinematik incelemeler sonucunda yıldızın beş küresel kümeye üye olma olasılığı, sırasıyla, %66, %57, %54, %49 ve %44 olduğu tespit edilmiştir. Bu analizler yıldızın en olası etkileşiminin NGC 6441 kümesi olduğunu göstermiştir.

Buna göre HD 201891'in NGC 6441 küresel kümesiyle konuma %69 ve hıza %95 olasılıkla ilişkili olduğu görülmüştür. Bu iki verinin bir arada değerlendirilmesi sonucunda yıldızın küresel kümeye üyelik olasılığı %66 olarak belirlenmiştir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Tez çalışması kapsamında Güneş civarından seçilen metalce fakir dört anakol yıldızının fiziksel ve kimyasal özelliklerinin üç farklı yöntem ile tayin edilmesi ve elde edilen parametreler doğrultusunda Galaktik kökenlerinin araştırılması hedeflenmiştir. Ayrıca kullanılan üç farklı yöntemin tutarlılığı ve hassasiyeti birbirlerine kıyaslanarak sınanması amaçlanmıştır. G tayf türünden dört yüksek öz hareketli (HPM) yıldızın tayfsal enerji dağılımı (SED), fotometrik ve astrometrik analiz ile tayfsal analiz olmak üzere üç farklı yöntem kullanılarak model atmosfer parametreleri ($T_{\rm eff}$, log g ve [Fe/H]), temel astrofizik parametreleri (M, R, L ve t), kinematik ve Galaktik yörünge parametreleri elde edilmiştir. Tez yıldızlarının SED ve kinematik analizlerinde *Gaia* DR3'ten alınan fotometrik, astrometrik ve tayfsal veriler kullanılmıştır. Ek olarak, dört anakol yıldızının yüksek çözünürlüklü PolarBase tayfları analiz edilerek çizgileri teşhis edilen bazı elementlerin bollukları elde edilmiştir. Tez çalışmasında tayfsal analiz yöntemiyle model atmosfer parametreleri tayin edilen yıldızların yaşları Bayes istatistiği kullanılarak hesaplanmıştır. Analizler sonucunda metalce fakir dört anakol yıldızının yaşı 10.9 ile 13 Gyr aralığında olduğu tespit edilmiştir.

Tez yıldızlarının popülasyon türleri literatürde kabul gören üç farklı analiz yöntemiyle tayin edilmiştir. Tayfsal analizler sonucunda metal bolluğu ve yaşları tayin edilen HD 22879, HD 144579 ve HD 188510 yıldızlarının halo popülasyonuna, HD 201891 yıldızının ise kalın disk popülasyonuna üye olduğu tespit edilmiştir. Ancak Galaktik yörünge parametreleri dikkate alındığında HD 144579 ve HD 201891'in genç ince diske, HD 22879'un yaşlı ince diske ve HD 188510'un kalın disk popülasyonuna üye olduğu belirlenmiştir (Tunçel-Güçtekin ve diğ., 2019). Öte yandan, gerçekleştirilen kinematik analizlerin sonuçlarıyla Bensby ve diğ.'nin (2003) TD/D değerleri dikkate alındığında ise HD 144579'ın ince disk ve HD 22879, HD 188510 ve HD 201891'in halo popülasyonlarına ait olduğu görülmüştür.

Yıldızların Galaktik kökenlerini araştırmak için, aday küresel kümelerden bir kaçış senaryosu göz önünde bulundurulmuştur. Tez kapsamında incelenen dört yıldızın küresel kümelerden kaçış senaryosuna ait olasılıkları ve en yüksek beş kümeye ait üyelikleri tespit edilmiştir. Kinematik analizlere göre incelen üç yıldızın (HD 22879, HD 188510 ve HD 22879) NGC 6441

küresel kümesinden, HD 144579 yıldızının ise NGC 5927 küresel kümesinden ayrılma ihtimalinin yüksek olduğu hesaplanmıştır.

5.1. FARKLI YÖNTEMLERDEN ELDE EDİLEN VERİLERİN İRDELENMESİ

Bu tez çalışmasında yıldızların fiziksel ve kimyasal özelliklerini incelemek için kullanılan tayfsal enerji dağılımı (SED), fotometrik ve astrometrik yöntem ile tayfsal analiz tekniklerinden elde edilen parametrelerin hatalar mertebelerinde birbirleriyle uyumlu olduğu gösterilmiştir. Elektromanyetik tayf boyunca enerji dağılımına odaklanan SED yöntemi, yıldızların model atmosfer parametrelerin ($T_{\rm eff}$, log g ve [Fe/H]), V bandındaki sönükleşme değeri ve uzaklık ($A_{\rm V}$, d), yaş (t) ile temel astrofizik parametrelerini (M, R ve L) tayin edilmesini sağlamıştır. Yıldızlara uygulanan fotometrik ve astrometrik yaklaşım, yıldızın HR diyagramı üzerinde doğru ve duyarlı konumunun elde edilmesine fırsat verir. Bu da, teorik eş-yaş eğrilerini kullanarak yıldızların başta yaş olmak üzere diğer temel astrofizik parametrelerinin değerlerine model tabanlı ulaşılmasına olanak tanır. Tayfsal analiz yöntemi dikkate alındığında ise başta yıldızın etkin sıcaklığı olmak üzere, yüzey çekim ivmesi, mikrotürbülans hızı ve kimyasal bileşimi hakkında bilgilere ulaşılır.

Tez çalışmasında yıldızların temel astrofizik parametrelerinin tayin edilmesine dayanan üç yöntemin ayrıntıları incelenerek, yöntemlerin güçlü ve zayıf yönleriyle sınırlamaları araştırılmıştır. Böylelikle farklı yöntemler ile elde edilen sonuçlar incelenerek yıldızların fiziksel ve kimyasal parametrelerini belirlemenin çok yönlü doğası incelenmiştir. Tez kapsamında incelenen dört yıldızın üç yöntem ile incelenmesi, birbiriyle ilişkili farklı sonuçları ortaya çıkarmıştır. Bu sonuçlar, yıldızların fiziksel özelliklerinin kesin olarak belirlenmesindeki zorlukları ön plana çıkarmak ile birlikte, Galaktik popülasyon türlerinin tayin edilmesindeki karmaşıklıkları ortaya koymuştur.

Günümüzde gözlem tekniklerinin gelişmesi ve ölçüm araçlarındaki duyarlılığın artmasına karşın, yıldızların fiziksel, kimyasal, kinematik ve dinamik yörünge özellikleri bakımından kesin olarak belirlenmesindeki zorlukların devam ettiği görülmüştür. Tez çalışması kapsamında yürütülen bu araştırma, yıldızların sınıflanmasındaki karmaşıklığı göz önüne sermektedir. Büyük teleskopların gözlemler ile sağladığı zengin veri setlerinden, güvenilir astrofiziksel

bilgilerin elde edilmesi için kullanılan yöntemlerin geliştirilmesi ve bunların fizik yasalarına daha uygun bir şekilde kullanılması gerekliliği vurgulanmıştır.

5.1.1 Yıldızların Temel Astrofizik ve Model Atmosfer Parametreleri

Tez kapsamında incelenen yıldızların temel astrofizik parametrelerinin SED yöntemi kullanılarak elde edilmesinde Vines ve Jenkins'in (2022) Bölüm 3.2'de verilen ARIADNE kodu kullanılmıştır. Metalce fakir dört yıldızın analizinde ARIADNE kodunun doğru ve duyarlı bir şekilde çalışabilmesi için metal bolluğu ve sıcaklık aralığı geniş olan modeller tercih edilmiştir. HD 22879 ile HD 188510 için Castelli ve Kurucz'un (2003) modelleri ve HD 144579 ile HD 201891 için Husser ve diğ.'nin (2013) PHOENIX v2 modelleri kullanılmıştır (bkz. Tablo 3.3). Yıldızların SED'leriyle uyum gösteren modeller sonucunda tez yıldızlarının temel astrofizik parametreleri belirlenmiştir. Böylece incelenen yıldızların etkin sıcaklıkları $5250 < T_{\rm eff}$ (K) < 6000, yüzey çekim ivmeleri $4.50 < \log g$ (cm/sn^2) < 4.75, metal bollukları $-1.50 <$ [Fe/H] (dex) < -0.60, V bandındaki sönükleşme değerleri $0.01 < A_{\rm V}$ (kadir) < 0.1 kadir, kütleleri $0.65 < M$ ($M_{\odot}$) < 0.90, yarıçapları $0.65 < R$ ($R_{\odot}$) < 1.10, ışıma gücü değerleri $0.40 < L$ ($L_{\odot}$) < 1.34 ve yaşları $12.50 < t$ (Gyıl) < 13.15 Gyıl aralığında olduğu tespit edilmiştir (Bkz. Tablo 4.1).

Yıldızların SED profilleri incelendiğinde HD 22879 ve HD 201891 yıldızlarının gözlemsel akılarıyla model akıları arasındaki farkın $\pm 1\sigma$ aralığında değiştiği görülmektedir. Bu bulgu, HD 22879 ve HD 201891'in tez yıldızları arasında SED'lerinin sentetik model ile en iyi eşleştiği iki yıldız olduğunu göstermektedir. Markov Zinciri Monte Carlo (MZMC) yöntemiyle temel astrofizik parametrelerindeki hataları tespit edilen tez yıldızlarının her bir parametre için 600 binden fazla olasılık noktasının iki parametrenin yoğunlaştığı bir noktanın çevresinde dağılmaktadır. Parametre histogramları genellikle Gauss benzeri bir dağılım göstermektedir. Bu dağılımın standart sapması parametrelerdeki hataların ölçümünde kullanılmaktadır. Tez kapsamında dört yıldız için oluşturulan köşegen diyagramlar incelendiğinde parametrelerdeki değişimlerin hemen hemen simetrik bir dağılım göstermesi parametreler arasındaki dejenerasyonluğun düşük bir seviyede bulunduğunu göstermektedir. Bu da hesaplanan parametrelerin doğru ve duyarlı olduğu anlamına gelmektedir.

Parametre dejenarasyonluğunun kırılmasına yönelik yöntemlerinden biri de seçilen parametrenin birden farklı yöntem ile bağımsız olarak yeniden hesaplanmasıdır. Bu yöntemlerden biri de yıldız parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan fotometrik ve astrometrik verilere dayalıdır. Yıldızların uzaklıkları için *Gaia* DR3 kataloğunda verilen trigonometrik paralaks (ϖ) verileri, yıldızların metal bolluklarının ölçümünde ise *UBV* fotometrik bantlarına duyarlı bir metal bolluğu ([Fe/H]) kalibrasyonu kullanılmıştır.

Yıldızların fotometrik metal bolluğunu belirlemek için Mermilliod'un (1987) *UBV* parlaklık verileriyle Çelebi ve diğ.'nin (2019) fotometrik metal bolluğu bağıntısı kullanılmıştır (Bkz. Bölüm 4; Bağıntı 4.1). Yıldızlar için fotometrik metal bolluğu kalibrasyonundan hesaplanan metal bollukları -1.40 < [Fe/H] (dex) < -0.30 aralığında bulunmaktadır. Analizlerin sonucunda HD 144579 haricinde tüm yıldızların SED analiziyle hesaplanan metal bolluklarının uyumlu olduğu görülmüştür. Güneş benzeri bir yıldız olan HD 144579'un literatürdeki çalışmaları incelendiğinde kromosferik aktif bir yıldız olmadığı (Rocha-Pinto ve Maciel, 1998) raporlanmıştır. Yıldız için Çelebi ve diğ.'nin (2019) bağıntısından hesaplanan metal bolluğunun tez çalışmasındaki SED ve tayfsal analiz sonuçlarıyla literatürdeki veriler dikkate alındığında yaklaşık olarak 0.30 dex daha fakir olmalıdır. Bu durumda yıldızın gözlemsel *U-B* renk indeksinin 0.05 kadir daha parlak olması gerekmektedir ki bu durum yıldız yüzeyindeki büyük lekelerden kaynaklanıyor olabilir. Bunun için yıldızın farklı zamanlarda *UBV* sisteminde mutlak fotometrisinin tekrarlanması ve bu durumun yeniden tartışılması gerekmektedir.

Dört yıldızın G, G_{BP}, G_{RP} ve ϖ değerleri *Gaia* DR3 kataloğundan alınmış ve Bağıntı (4.6, 4.7 ve 4.8) kullanılarak her bir parlaklık sönükleşmeden arındırılmıştır. Daha sonra, Bağıntı (4.9) ile her bir yıldızın M_G mutlak parlaklığı hesaplanmıştır. Elde edilen fotometrik metal bolluklarının Bağıntı (4.13 ve 4.14) kullanılarak ağır element bolluğu dönüşümü yapılmıştır. Ağır element bolluklarına göre tez yıldızlarının PARSEC eş-yaş eğrileri $M_G \times (G_{BP}\text{-}G_{RP})_0$ renk-parlaklık diyagramı üzerinde işaretlenerek yaşları tayin edilmiş ve bu yaşlara ait eş-yaş eğri dosyaları göz önünde bulundurularak temel astrofizik parametreleri (M, R ve L) belirlenmiştir (Tablo 4.4). Tayin edilen bu değerler $5340 < T_{eff}$ (K) < 6150, $4.3 < \log g$ (cm/sn^2) < 4.65, $-1.40 <$ [Fe/H] (dex) < -0.30, $0.66 < M$ ($M_\odot$) < 0.8, $0.65 < R$ ($R_\odot$) < 1.05, $0.37 < L$ ($L_\odot$) < 1.36 ve $4.25 < t$ (Gyıl) < 12.25 aralığında bulunmuştur. HD 144579 daha önce de bahsi geçen yıldız için olası leke aktivitesinin bulunmasından dolayı temel astrofizik parametreleri de SED

analizlerinin verdiği sonuçlardan farklı bulunmuştur. Tez kapsamında incelenen diğer üç yıldız için (HD 22879, HD 188510 ve HD 201891) elde edilen parametreler ise SED yöntemiyle hesaplananlar ile uyumludur (Bkz. Tablo 4.4).

Tez kapsamında dikkate alınan son yöntem ise klasik tayfsal analiz ile ilgili olup dört yıldızın fiziksel ve kimyasal parametrelerinin tayininde kullanılmıştır. Tez yıldızlarının yüksek çözünürlüklü PolarBase tayfları Şahin'in (2017) LIME kodu ve Şahin ve diğ.'nin (2023) çizgi listesi kullanılarak eşdeğer genişlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Farklı elementler çizgileri için elde edilen eşdeğer genişlikler, LTE koşulları altında PyKMod koduyla oluşturulan sentetik tayflar ve Sneden'in (1973) Python diline dönüştürülmüş MOOG arayüzü kullanılarak dört yıldızın model atmosfer parametreleri hesaplanmıştır. Elde edilen bu parametreler arasında etkin sıcaklık $5245 < T_{\rm eff}$ (K) < 5900, yüzey çekim ivmesi $4.45 < \log g$ (cm/sn^2) < 4.70, metal bolluğu $-1.50 <$ [Fe/H] (dex) < -0.65 ve mikrotürbülans hızı $0.2 < \xi$ (km/sn) < 1 arasında bulunmaktadır. da Silva ve diğ.'nin (2006) Bayes istatistiğine dayalı PARAM 1.3 web sitesi kullanılarak dört yıldızın yaşları hesaplanmış ve Padova grubunun PARSEC eş-yaş eğri dosyaları dikkate alınarak temel astrofizik parametreleri (M, R ve L) belirlenmiştir. Yıldızların yaşları $10.9 < t$ (Gyıl) ≤ 13, kütleleri $0.62 < M$ ($M_{\odot}$) < 0.75, yarıçapları $0.6 < R$ ($R_{\odot}$) < 1.2 ve ışıma gücü değerleri $0.28 < L$ ($L_{\odot}$) < 1.45 aralığında tayin edilmiştir.

Dört yıldızın tayfsal analizleri sonucunda elde edilen fiziksel ve kimyasal parametre değerlerinin, SED ile fotometrik ve astrometrik yöntem kullanılarak elde edilen parametreler ile uyumlu olduğu görülmüştür.

5.2 LİTERATÜR KARŞILAŞTIRMASI

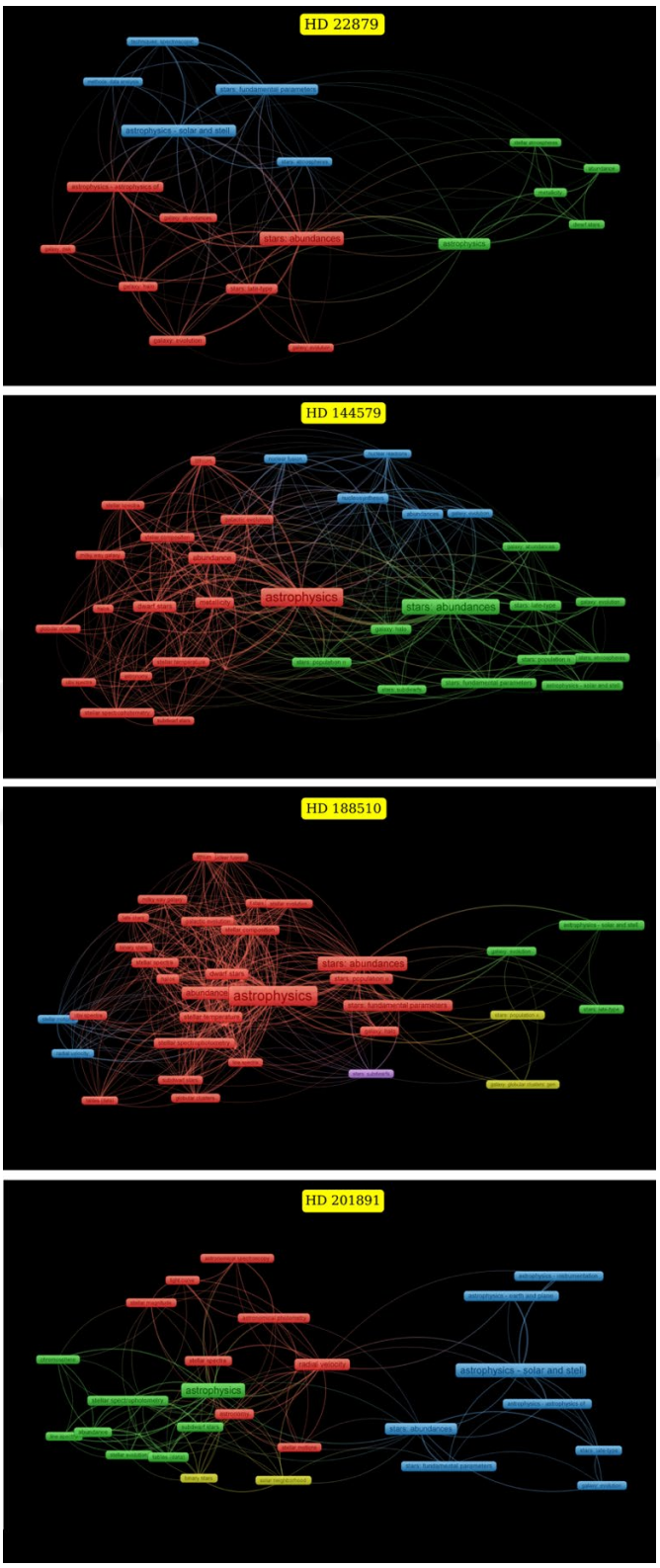
Tez kapsamında incelenen dört yıldızın üç farklı yöntem ile hesaplanan model atmosfer parametrelerinin doğruluğunu ve hassasiyetini daha iyi ortaya koyabilmek için literatürdeki diğer tayfsal çalışmalar dikkate alınmıştır. Bunun için öncelikle tez yıldızlarının Simbad veri tabanında bulunan çalışmalarda verilen anahtar kelimeleri Vosviewer[10] programı aracılığıyla toplanmış ve her bir yıldız için çalışma ağları görselleştirilmiştir (Şekil 5.1).

[10] https://www.vosviewer.com

Bu ağların uçlarındaki her bir anahtar kelime, ilgili yıldızın en az bu anahtar kelimeyi içeren 10 çalışması bulunduğunu, renkler makalelerin kendi içindeki gruplaşmasını ve renklerin arasındaki ağlar ise ortak çalışmaları ifade etmektedir. Şekil 5.1'den görüleceği gibi tez çalışması kapsamında incelenen yıldızların literatürdeki çalışmaları çoğunlukla yıldız bollukları, Galaksi ve yıldız evrimiyle yıldız popülasyonları üzerindir. Literatürde bu yıldızların temel astrofizik parametrelerinin tayini için farklı tekniklerin bir arada kullanıldığı bir çalışma henüz bulunmamaktadır. Bu da yüksek lisans tezinin özgünlüğüne bir kanıt niteliğindedir.

Tez kapsamında incelenen HD 22879, HD 144579, HD 188510 ve HD 201891 yıldızlarının literatür taramaları yapıldığında model atmosfer parametrelerine dayalı tayfsal çalışmaların sayısı, sırasıyla, 109, 45, 53 ve 77'dir. Bu çalışmalarda literatüre kazandırılan parametrelerin değişim aralıklarını inceleyebilmek için Şekil 5.2'de verilen dağılım kullanılmıştır. Literatürdeki tayfsal çalışmalarda verilen model atmosfer parametreleri (yeşil noktalar), etkin sıcaklık, yüzey çekim ivmesi ve metal bolluk değerleri için, sırasıyla, en küçük ve en büyük değişim aralıklarının $5100 < T_{\rm eff}$ (K) < 6350, $3.2 <$ log g (cm/sn^2) < 5.2, $-0.3 <$ [Fe/H] (dex) < -2 arasında bulunduğu Şekil 5.2'de görülmektedir. Ayrıca tez kapsamında incelenen dört yıldızın üç farklı yöntem kullanılarak hesaplanan model atmosfer ve temel astrofizik (M, R ve t) parametreleriyle literatürden derlenen medyan değerleri ve standart sapmaları Tablo 5.1'de listelenmiştir.

Ayrıca Şekil 5.2'deki panellerde tez çalışmasındaki yıldızlar için üç farklı yöntem ile tayin edilen etkin sıcaklık, yüzey çekim ivmesi ve metal bolluğu değerleri işaretlenmiştir. Genel olarak tez çalışmasında üç farklı yöntem ile hesaplanan model atmosfer parametreleri literatürde verilenler ile uyumludur. Fakat fotometrik ve astrometrik yöntem ile hesaplanan HD 22879'un etkin sıcaklığı ve HD 144579'un metal bolluğu değerleri dikkate alındığında ise literatür verilerinin dışında kaldığı görülmektedir.

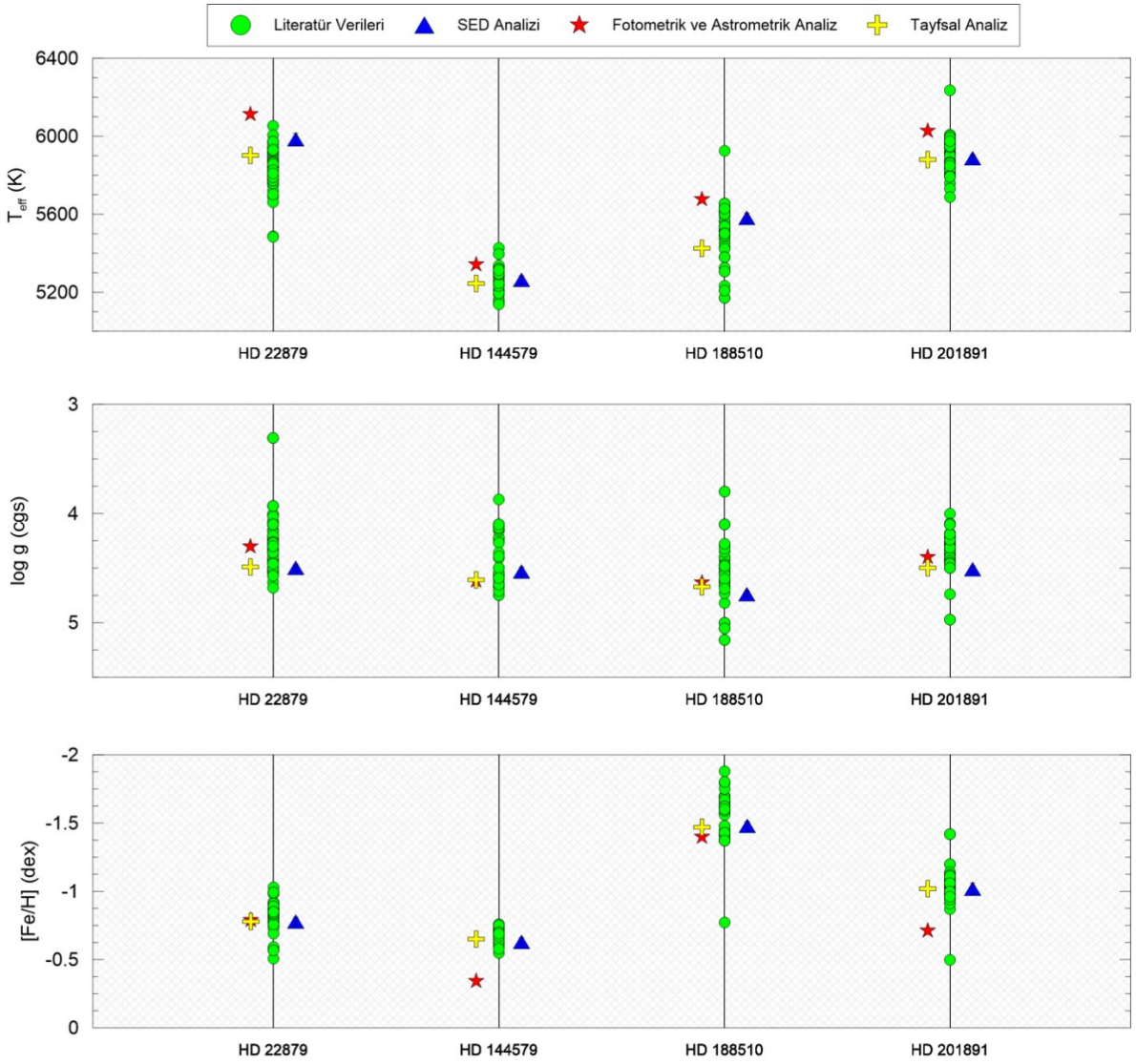


Şekil 5.1: Tez kapsamında incelenen yıldızların Vosviewer programı kullanılarak görselleştirilmiş literatürdeki anahtar kelime ağı.

Tablo 5.1: Tez kapsamında incelenen dört yıldızın üç farklı yöntem ile elde edilen model atmosfer parametreleri, kütle, yarıçap ve yaş değerleri. SED: Tayfsal enerji dağılımı, FA: Fotometrik ve astrometrik analiz, T: Tayfsal analiz ve Lit: Literatür verileri.

Parametre	Yöntem	HD 22879	HD 144579	HD 188510	HD 201891
$T_{\rm eff}$ (K)	SED	5985 (30)	5263 (21)	5580 (26)	5886 (20)
	FA	6111	5341	5677	6026
	T	5900 (120)	5245 (130)	5425 (130)	5880 (140)
	Lit	5857 (90)	5293 (64)	5500 (143)	5900 (80)
log g (cm/sn^2)	SED	4.50 (0.03)	4.53 (0.04)	4.74 (0.03)	4.51 (0.03)
	FA	4.30	4.62	4.63	4.40
	T	4.49 (0.17)	4.61 (0.16)	4.67 (0.17)	4.50 (0.19)
	Lit	4.29 (0.22)	4.50 (0.24)	4.52 (0.32)	4.32 (0.17)
[Fe/H] (dex)	SED	-0.78 (0.03)	-0.63 (0.03)	-1.48 (0.03)	-1.02 (0.04)
	FA	-0.79	-0.34	-1.40	-0.71
	T	-0.78 (0.09)	-0.65 (0.10)	-1.47 (0.13)	-1.02 (0.11)
	Lit	-0.84 (0.08)	-0.69 (0.05)	-1.60 (0.19)	-1.05 (0.12)
M ($M_\odot$)	SED	0.79 (0.02)	0.72 (0.02)	0.66 (0.02)	0.87 (0.01)
	FA	0.80	0.78	0.67	0.80
	T	0.75	0.67	0.62	0.71
R ($R_\odot$)	SED	1.08 (0.01)	0.79 (0.01)	0.69 (0.01)	1.01 (0.01)
	FA	0.67	0.72	0.65	0.93
	T	1.16	0.67	0.60	0.78
t (Gyıl)	SED	13.08 (1.95)	12.63 (2.79)	12.54 (3.57)	13.15 (2.13)
	FA	12.25	4.25	10.50	11.00
	T	10.90 (1.20)	12.00 (1.00)	12.00 (1.00)	13.00 (0.70)

Yıldızların üç farklı yöntem ile elde edilen temel astrofizik (M, R ve t) parametreleri birbirleriyle karşılaştırıldığında (bkz. Tablo 5.1) kütle değerlerindeki farklılık yaklaşık 0.15 $M_\odot$, yarıçaptaki değişim 0.4 $R_\odot$ ve yaştaki fark ise, HD 144579 dışında, 2 Gyıl mertebesindedir. Sonuç olarak, Tablo 5.1'de listelenen parametre sonuçları dikkate alındığında, üç farklı yöntem ile hesaplanan sonuçlar ve literatür değerleri karşılaştırıldığında parametrelerin birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 5.2: Tez kapsamında incelenen yıldızların üç farklı yöntem ile elde edilen model atmosfer değerlerinin literatür değerleriyle karşılaştırılması. Kırmızı yıldız sembolü fotometrik ve astrometrik analiz, yeşil daire sembolü literatür değerlerini, mavi üçgen sembolü SED analiz sonuçlarını, sarı artı değerleri tayfsal analiz ile tayin edilen değerleri göstermektedir.

5.3 YILDIZLARIN POPÜLASYON TÜRLERİ

Tez çalışmasında incelenen yıldızların popülasyon türleri konumsal, kinematik, dinamik yörünge parametreleri ve kimyasal açıdan dört farklı yöntem ile eş zamanlı olarak incelenmiştir. Yıldızları konumsal olarak incelemek için dört yıldızın *Gaia* DR3 kataloğundan alınan trigonometrik paralaks verileri d(pc) = 1000/ϖ(mas) bağıntısı kullanılarak Güneş'ten olan

uzaklıkları hesaplanmış ve yıldızların 14 ile 38 pc uzaklıkta yer aldığı tespit edilmiştir (Bkz. Tablo 5.2). Bu bulgu yıldızların Güneş civarında bulunduğunu ve çoğunlukla ince disk popülasyonundan oluştuğunu gösteren bir kanıttır. İncelenen yıldızların popülasyon türlerini daha iyi belirlemek için metal bolluklarının da bir arada değerlendirilmesi gerekmektedir.

Tez kapsamında incelenen dört yıldızın kinematik (U, V, W) ve dinamik yörünge parametreleri (R_a, R_p, R_m, Z_{max}, e, T_p) Bovy'nin (2015) geliştirmiş olduğu *galpy* kodu ve *MWPotential2014* potansiyelleri kullanılarak hesaplanmıştır. Yıldızlar için hesaplanan uzay hız bileşenlerine diferansiyel dönme ve LSR düzeltmeleri yapılarak uzay hızları bilinen yanlılıklardan arındırılmıştır. Kinematik hesaplamalardan yararlanılarak yıldızların popülasyon türlerinin tayininde Bensby ve diğ.'nin (2003) kinematik kriterleri dikkate alınmıştır. Tez çalışmasının Bölüm 3'te verilen Bağıntı (3.21) yardımıyla yıldızların popülasyonlara bağlı bulunma olasılıklarını ifade eden TD/D değerleri Tablo 5.2'de verildiği gibi hesaplanmıştır. Bensby ve diğ.'nin (2003) popülasyon kriterlerine göre HD 144579 ince diske ($TD/D<1$), HD 22879, HD 188510 ve HD 201891 halo popülasyonuna ($TD/D>10$) üye olduğu tespit edilmiştir.

Tez kapsamında incelenen dört yıldızın dinamik yörünge parametreleri *galpy* koduyla hesaplanarak Tablo 5.2'de listelenmiştir. Dinamik yörünge parametreleri dikkate alınarak yapılan popülasyon sınıflamasında yıldızların $Z \times R_{gc}$ düzlemindeki (Bkz. Şekil 4.18) yörüngeleri kullanılmıştır. Yıldızların yörünge hesaplamaları 13 Gyıllık bir integrasyon zamanı içinde çalıştırıldığında, HD 144579 yıldızı Galaksi merkezine 5 kpc yaklaşıp, 8 kpc'lik en büyük uzaklığa ulaşmaktadır. HD 144579 haricinde diğer üç yıldız Galaksi merkezine 3 kpc yaklaşıp, bu merkezden en uzak mesafe olarak 8 kpc'e erişmektedir. Bu da HD 144579 yıldızının diğer üç yıldıza göre daha çembersel yörüngede hareket ettiğini gösteren önemli bir delildir (Bkz. Tablo 5.2). Z_{max} parametresi yıldızların Galaktik düzlemden ayrılabildikleri en büyük uzaklığı gösterdiği için iyi bir Galaktik popülasyon sınıflama göstergesidir. HD 144579 ve HD 201891 yıldızlarının Galaktik düzleme dik doğrultudaki uzaklığı 500 pc'i aşmazken HD 22879 ve HD 188510 yıldızlarının 750 pc'ten daha büyük uzaklıklara ulaşabildiği görülmüştür (bkz. Şekil 4.18). Bu analizlerin sonucunda, HD 144579 ve HD 201891'in genç ince diske, HD 22879'un yaşlı ince diske ve HD 188510'un kalın disk popülasyonuna üye olduğu tespit edilmiştir (Tunçel-Güçtekin ve diğ., 2019).

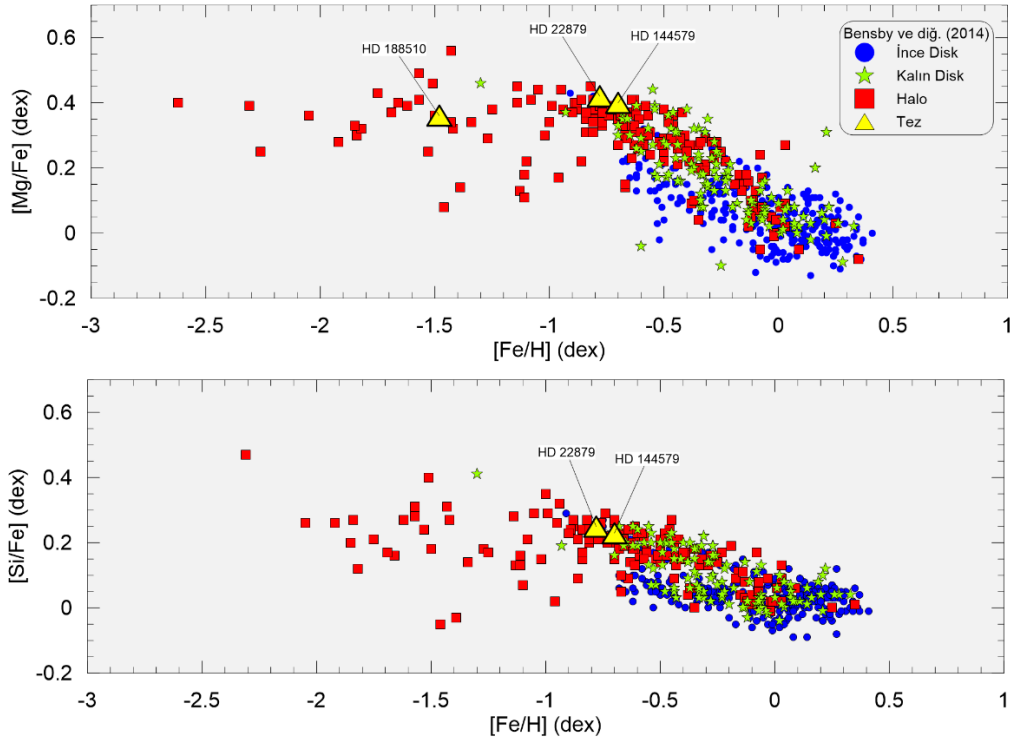
Tablo 5.2: Tez kapsamında incelenen yıldızların konumsal, kinematik, dinamik yörünge ve kimyasal özelliklerini içeren parametreler ve popülasyon türleri.

Yöntem	**Konumsal**			
Parametre	**HD 22879**	**HD 144579**	**HD 188510**	**HD 201891**
***d* (pc)**	26.09	14.35	38.05	33.47
Popülasyon Türü	İnce disk	İnce disk	İnce disk	İnce disk
	Kinematik			
U_{LSR} **(km/sn)**	-106.62	-54.50	-156.13	66.38
V_{LSR} **(km/sn)**	-71.76	-17.31	-68.91	-121.79
W_{LSR} **(km/sn)**	-34.56	-0.95	83.36	-21.78
S_{LSR} **(km/sn)**	133.09	57.19	189.93	140.40
TD*/*D	66	0.01	1.62×10^5	13111
Popülasyon Türü	İnce disk	Halo	Halo	Halo
	Dinamik Yörünge Parametreleri			
R_a **(pc)**	9514	8132	10745	12427
R_p **(pc)**	3349	4958	2637	4022
R_m **(pc)**	6431	6545	6691	8225
Z_{max} **(pc)**	712	161	2289	258
e	0.48	0.24	0.61	0.51
Popülasyon Türü	Yaşlı ince disk	Genç ince disk	Kalın disk	Genç ince disk
	Kimyasal			
[Fe/H] (dex)	-0.78 (0.09)	-0.65 (0.10)	-1.47 (0.13)	-1.02 (0.14)
[Mg/Fe] (dex)	0.42 (0.07)	0.40 (0.11)	0.36 (0.04)	---
[Si/Fe] (dex)	0.25 (0.05)	0.23 (0.07)	---	---
Popülasyon Türü	Kalın disk / Halo	Kalın disk / Halo	Halo	Halo

Tez kapsamında incelenen dört yıldızın yüksek çözünürlüklü ve yüksek *S*/*N* değerli PolarBase tayflarının analizi sonucunda çizgi teşhisi yapılan elementlerin (Na I, Mg I, Si I, Ca I, Sc I, Sc II, Ti I, Ti II, V I, Cr I, Cr II, Mn I, Fe I, Fe II, Co I, Ni I, Zn I, Y I, Zr II ve Ba II) bollukları elde edilmiştir (Bkz. Tablo 4.8). Tayf analizlerinde bollukları belirlenen silisyum ve magnezyum kimyasal olarak yıldızların Galaktik popülasyon ayrımında kullanılan elementlerdir. Tez çalışmasında magnezyum bolluğu ölçülebilen üç yıldız (HD 22579, HD 144579, HD 188510) bulunurken, silisyum ancak iki yıldızda (HD 22879, HD 144579) hesaplanabilmiştir. Tez çalışmasında popülasyon ayrımını yapmak için yeterli sayıda yıldız bulunmadığından orta tayf türünde anakol yıldızlarını homojen bir yöntem ile analiz eden Bensby, Feltzing ve Oey'in (2014) oluşturduğu örnek dikkate alınmıştır. Bensby, Feltzing ve Oey (2014) ESO'nun 1.5m 2.2m ve 3.6 m'lik teleskoplarına bağlı tayfçekerler ile (SOFIN, FIES, UVES ve HARPS) alınan Güneş civarından seçmiş olduğu 714 F ve G cüce yıldızın tayf

analizlerini gerçekleştirmiştir. Bu analizler sonucunda yıldız tayflarında bazı elementlerin detaylı element bolluklarını (O, Na, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Cr, Fe, Ni, Zn, Y ve Ba) hesaplamak ile birlikte yıldızların yaşlarını, kinematik ve yörünge parametrelerini de tayin etmiştir. Yapılan analizlerde tez çalışmasındaki üç yıldızın (HD 22579, HD 188510, HD 201891) Bensby, Feltzing ve Oey'in (2014) kataloğunda yer aldığı tespit edilmiştir.

Tez çalışması kapsamında yıldızların popülasyon türlerini belirlemek için Bensby, Feltzing ve Oey'in (2014) 714 cüce yıldız için hesapladığı [Mg/Fe], [Si/Fe], [Fe/H] bolluklarıyla kinematik kriterleri kullanılmış ve bu yıldızlar [X/Fe] × [Fe/H] düzleminde işaretlenmiştir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3: Tez kapsamında incelenen yıldızların (sarı üçgen sembolü) kimyasal popülasyon ayrımı. Üst panel [Mg/Fe] bolluğu ve alt panel [Si/Fe] bolluğunu göstermektedir. Bensby ve diğ.'nin (2014) ince disk yıldızlarını mavi daire sembolü, kalın disk yıldızlarını yeşil yıldız sembolü ve halo yıldızlarını ise kırmızı kare sembolü göstermektedir.

Şekil 5.3'ün üst panelinde [Mg/Fe] alt panelinde ise [Si/Fe] bollukları verilmiştir. Bensby, Feltzing ve Oey'in (2014) örneğinde $TD/D \leq 1$ olanlar ince disk, $1 < TD/D \leq 10$ aralığı kalın disk, $TD/D > 10$ olanlar ise halo yıldızı olarak kabul edilmiştir. Ardından bu kriterleri sağlayan

ve [Mg/Fe] ile [Si/Fe] bolluğu belirlenmiş Bensby, Feltzing ve Oey'in (2014) yıldızları farklı sembol ve farklı renkler kullanarak kimyasal düzlemlere işaretlenmiştir. Genel olarak metalce fakir yıldızların [Mg/Fe] ile [Si/Fe] oranları yüksek iken, metalce zengin olanların ise bu bollukları düşük olduğu görülmüştür (Şekil 5.3). Ayrıca bu düzlemlere tez çalışması kapsamında incelenen yıldızlar için hesaplanan bolluklar da işaretlenerek yıldızların kimyasal olarak popülasyon türü ayrımına gidilmiştir. Bu yönteme göre [X/Fe] × [Fe/H] düzlemleri dikkate alındığında, HD 201891 hariç, HD 188510'un halo yıldız popülasyonuna üye olduğu, HD 22579 ile HD 144579 ise kalın disk ile halo arasında geçiş bölgesinde yer aldığı belirlenmiştir.

5.4 YILDIZLARIN GALAKTİK KÖKENLERİ

Tez kapsamında incelenen dört yıldızın Galaktik kökenlerini incelemek için Vasiliev ve Baumgardt'ın (2021) Samanyolu'ndaki 170 küresel küme için listelediği *Gaia* EDR3 astrometrik ve tayfsal verileri kullanılmıştır. Yıldızların Galaktik köken araştırmasında incelenen dört yıldızın Galaksi merkezi çevresindeki yörüngeleriyle yaşları dikkate alınmış ve günümüzden yıldızın sıfır yaşına doğru zamanda geriye götürülmüştür. Tez kapsamında yıldızların köken araştırmasında Bölüm 3.8'de verilen karşılaşma olasılıkları dikkate alınarak her bir integrasyon zamanında her bir küresel kümeyle yıldız arasındaki konum ve hıza bağlı karşılaşma olasılıkları hesaplanmıştır.

Kinematik analizler sonucunda dört yıldızın küresel kümeler ile olan ilişkileri belirlenmiştir. Dört yıldızın küresel kümelerden ayrılma senaryosunu destekleyebilmek için konum ve hız verileri dışında element bollukları ve kümelerin yaşlarının da dikkate alınması gerekmektedir. Bunun için Bölüm 4.7'de belirlenen küresel kümelerin yeniden bir literatür taraması yapılarak Galaktik koordinatları (l, b), Galaktik düzlemden ayrılabilecekleri en büyük uzaklık (Z_{max}), demir bolluğu ([Fe/H]), yaş (t) ve magnezyum bolluğu ([Mg/Fe]) verileri derlenmiştir.

Aday küresel kümelerin Galaktik popülasyon sınıflamasında Lucey ve diğ.'nin (2022) kriterleri dikkate alınmıştır. Lucey ve diğ.'nin (2022) metalce fakir 319 yıldızın VLT/GIRAFFE tayflarını analiz ederek 13 elementin (C, Na, Mg, Al, Si, Ca, Sc, Ti, Cr, Mn, Zn, Ba ve Ce) bollukları belirlenmiş ve yıldızların kinematik ile dinamik yörünge analizlerini

gerçekleştirmiştir. Analizler sonucunda 319 metalce fakir yıldızı şişkin bölge (ŞB), halo (H) ve disk (D) olmak üzere üç ayrı Galaktik popülasyon sınıfına ayrılmıştır (Tablo 5.3). Tez çalışmasında Lucey ve diğ.'nin (2022) popülasyon sınıflama kriterleri dikkate alınarak aday küresel kümelerin popülasyon sınıfları belirlenmiş ve Tablo 5.4'te aday küresel kümelerin Galaktik koordinatları, hesaplanan konum, hız ve bu iki parametrenin olasılık değerleri, demir ile magnezyum bollukları yaşıyla birlikte listelenmiştir.

Tablo 5.3: Lucey ve diğ.'nin (2022) Galaktik popülasyon türlerinin belirlenmesinde kullandığı kriterler ve parametre aralıkları.

Popülasyon sınıfı	R_a **(kpc)**	Z_{max} **(kpc)**	**[Fe/H] (dex)**	**⟨[Fe/H]⟩**
Şişkin bölge	≤ 5	≤ 2.5	$-2.55 \leq [Fe/H] \leq 0.37$	-0.90
Halo	---	> 2.5	$-1.97 \leq [Fe/H] \leq 0.01$	-1.09
Disk	> 5	≤ 2.5	$-2.11 \leq [Fe/H] \leq 0.83$	-0.50

İncelenen yıldızların kümelerden kaçış senaryoları için oluşturulan aday kümelerin sınanması için Tablo 5.4'te verilen küme yaşı (t), demir ([Fe/H]) ve magnezyum ([Mg/Fe]) bollukları dikkate alınmıştır:

HD 22879 yıldızı ele alındığında, NGC 6441 küresel kümesinin metal bolluğu ve yaş açısından yıldız için elde edilen parametreler ile oldukça uyumlu olduğu sadece [Mg/Fe] bolluğunun tez çalışmasında elde edilen değerine göre dörtte bir değerinde olduğu tespit edilmiştir. Bu karşılaştırma, HD 22879'un bir şişkin bölge küresel kümesi ($Z_{max} \cong 1.10$ kpc) olan NGC 6441'den ayrılabileceğini gösteren önemli bir kanıttır.

HD 144579 yıldızı dikkate alındığında, konum ve hız bakımından NGC 5927 küresel kümesinden kaçma senaryosuna uygun bir kinematik davranış sergilediği görülmüştür. Literatür taramalarında NGC 5927 küresel kümesi için elde edilen yaş (t), demir ([Fe/H]) ve magnezyum ([Mg/Fe]) bollukları dikkate alındığında HD 144579 için tez kapsamında hesaplanan [Fe/H] bolluğu ve yaş parametresiyle oldukça uyumlu olduğu sadece [Mg/Fe] bolluğunun yıldız için elde edilen değerden dörtte bir oranında az olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgular HD 144579'un bir şişkin bölge küresel kümesi ($Z_{max} \cong 0.80$ kpc) olan NGC 5927'den kaçmış olabileceğini gösteren iyi bir kanıt sunmaktadır.

Tablo 5.4: Tez kapsamında incelenen dört yıldızın küresel kümelerden ayrılma senaryosuyla en olası beş kümenin Galaktik koordinatları (l, b), konum ($P(\theta)$), hız ($P(v)$) ile ve bunların birleşiminden ($P(\text{orijin}|\theta,v)$) hesaplanan olasılık değerleri, Galaktik düzlemden ayrılabilecekleri en büyük uzaklık (Z_{max}), demir ([Fe/H]) ile magnezyum ([Mg/Fe]) bollukları ve yaşları (t) ve popülasyon türleri (ŞB: Şişkin bölge, H: Halo, D: Disk). Tablonun son sütunun verilen kaynaklar iki referans olarak gösterilmiştir. [Fe/H] bolluğu ve yaşı içerirken, ikinci referans [Mg/Fe] bolluğunu ifade eder.

Küme	l	b	$P(\theta)$	$P(v)$	$P(\text{orijin}\|\theta,v)$	Z_{max}	**[Fe/H]**	t	**[Mg/Fe]**	**Tür**	**Ref**
	(°)	(°)	(%)	(%)	(%)	(kpc)	(dex)	(Gyıl)	(dex)		
NGC 6441	**353.532**	**-05.005**	**83**	**87**	**72**	**1.10**	**-0.65**	**10.44**	**0.11**	**ŞB**	**1,9**
NGC 2808	282.193	-11.253	65	89	58	2.20	-1.32	10.93	-0.06	D	1,1
NGC 6553	005.250	-03.023	81	71	57	0.70	-0.10	13.00	0.19	ŞB	2,2
NGC 6205	059.009	+40.912	77	66	51	6.25	-1.48	13.49	0.08	H	1,1
NGC 5139	309.102	+14.968	64	75	48	2.80	-1.53	12.75	0.00	H	3,1
HD 22879	---	---	---	---	---	---	-0.78	10.90	0.42		---
NGC 5927	**326.604**	**+04.860**	**87**	**75**	**66**	**0.80**	**-0.49**	**12.25**	**0.16**	**ŞB**	**4,1**
PAL 10	052.436	+02.725	82	70	58	1.10	-0.35	---	0.12	D	5
NGC 4372	300.993	-09.884	72	59	43	2.00	-2.34	12.50	0.31	ŞB	6,6
NGC 104	305.895	-44.889	45	91	41	3.20	-0.81	13.54	0.20	H	1,1
NGC 1851	244.513	-35.036	64	44	28	11.50	-1.14	12.27	0.05	H	1,1
HD 144579	---	---	---	---	---	---	-0.65	12.00	0.40		---
NGC 6441	353.532	-05.006	93	84	78	1.10	-0.65	10.44	0.11	ŞB	1,9
NGC 104	305.895	-44.889	88	78	68	3.20	-0.81	13.54	0.20	H	1,1
NGC 5139	**309.102**	**+14.968**	**84**	**80**	**67**	**2.80**	**-1.53**	**12.75**	**0.00**	**H**	**4,1**
NGC 6864	020.303	-25.748	56	82	45	12.00	-1.16	9.98	---	H	7
NGC 6569	000.481	-06.681	69	56	39	2.20	-0.79	10.90	0.50	ŞB	8
HD 188510	---	---	---	---	---	---	-1.60	12.00	0.36		---
NGC 6441	353.532	-05.006	69	95	66	1.10	-0.65	10.44	0.11	ŞB	1,9
NGC 5927	326.604	+04.860	81	70	57	0.80	-0.49	12.25	0.16	ŞB	4,1
NGC 7078	065.012	-27.312	82	66	54	4.50	-2.36	13.28	0.18	H	1,1
NGC 6544	**005.838**	**-02.204**	**85**	**58**	**49**	**1.10**	**-1.40**	**12.75**	**---**	**ŞB**	**4**
NGC 5139	309.102	+14.968	56	77	44	2.80	-1.53	12.75	0.00	H	4,1
HD 201891	---	---	---	---	---	---	-1.01	13.00	---		---

Ref: (1) Valcin ve diğ. (2020), (2) Montecinos ve diğ. (2021), (3) Baldwin ve diğ. (2016), (4) Usher ve diğ. (2019) (5) Harris (1996), (6) Kovalev ve diğ. (2019), (7) Kirby ve diğ. (2016), (8) Marsakov ve diğ. (2019), (9) Dias ve diğ. (2016).

HD 188510 yıldızı ele alındığında konum ve hız bakımından NGC 6441 küresel kümesiyle uyum gösterdiği (P(orijin|θ,v) = %78) ortaya konmasına karşın, kümenin literatür taraması sonucunda elde edilen [Fe/H], yaş ve [Mg/Fe] bolluğu açısından oldukça farklı olduğu tespit edilmiştir. Bu durum HD 188510'un NGC 6441 küresel kümesinden kaçış senaryosunu sınırlamaktadır. HD 188510 için yapılan incelemelerde diğer dört kümenin literatür taramaları dikkate alınmış ve kinematik bakımdan kaçış olasılığı P(orijin|θ,v) = %67 olan NGC 5189'un [Fe/H] bolluğu ve yaş değerleri açısından oldukça uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Sadece küresel kümenin [Mg/Fe] bolluğunun 0 dex olarak raporlanmış olması yıldızın bolluğuyla 0.5 dex'lik fark oluşturmaktadır. Bu bulgular HD 188510'un bir halo üyesi olan ($Z_{max} \cong$ 2.8 kpc) ve metal bolluğu [Fe/H] = -1.53 dex olan NGC 5189 küresel kümesinden kaçış senaryosunu desteklemektedir.

Tez kapsamında incelenen son yıldız HD 201891'in konum ve hız bakımından bir şişkin bölge küresel kümesi olan NGC 6441'den kaçma senaryosuna uyum gösterdiği (P(orijin|θ,v) = %66) sonucu elde edilmiştir. Öte yandan incelenen beş aday küresel küme içinde kinematik bakımdan kaçma olasılığı P(orijin|θ,v) = %49 olarak hesaplanan şişkin bölge küresel kümesi ($Z_{max} \cong$ 1.10 kpc) olan NGC 6544'ün [Fe/H] bolluğu ve yaş parametresinin HD 201891 için hesaplanan değerleriyle daha uyumlu olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, tez kapsamında incelenen dört yıldızın konum, hız, demir ile magnezyum bollukları ve yaşları dikkate alındığında HD 22980'un NGC 6441, HD 144579'un NGC 5927, HD 188510'un NGC 5139 ve HD 201891'in NGC 6544 küresel kümelerinden kaçmış olabileceği sonuçlarına ulaşılmıştır. Bu bulgular, HD 188510 yıldızı hariç olmak üzere diğer üç yıldızın küresel kümelerden kaçış senaryolarının şişkin bölge küresel kümelerinden kaynaklandığını göstermiştir. Şişkin bölge küresel kümeleri genel olarak $R_a \leq$ 5 kpc ve $Z_{max} \leq$ 2.5 şartlarının gerçekleştiği nesnelerden oluşmaktadır (Lucey ve diğ., 2022). Bu da şişkin bölge küresel kümelerinin Galaktik yörüngeleri açısından Güneş civarına ulaşamayacaklarını göstermektedir. Fakat tez kapsamında incelenen dört metalce fakir yıldızın bu bölgeden göç ederek Güneş civarına ulaşabilmeleri gizemini halen korumaktadır.

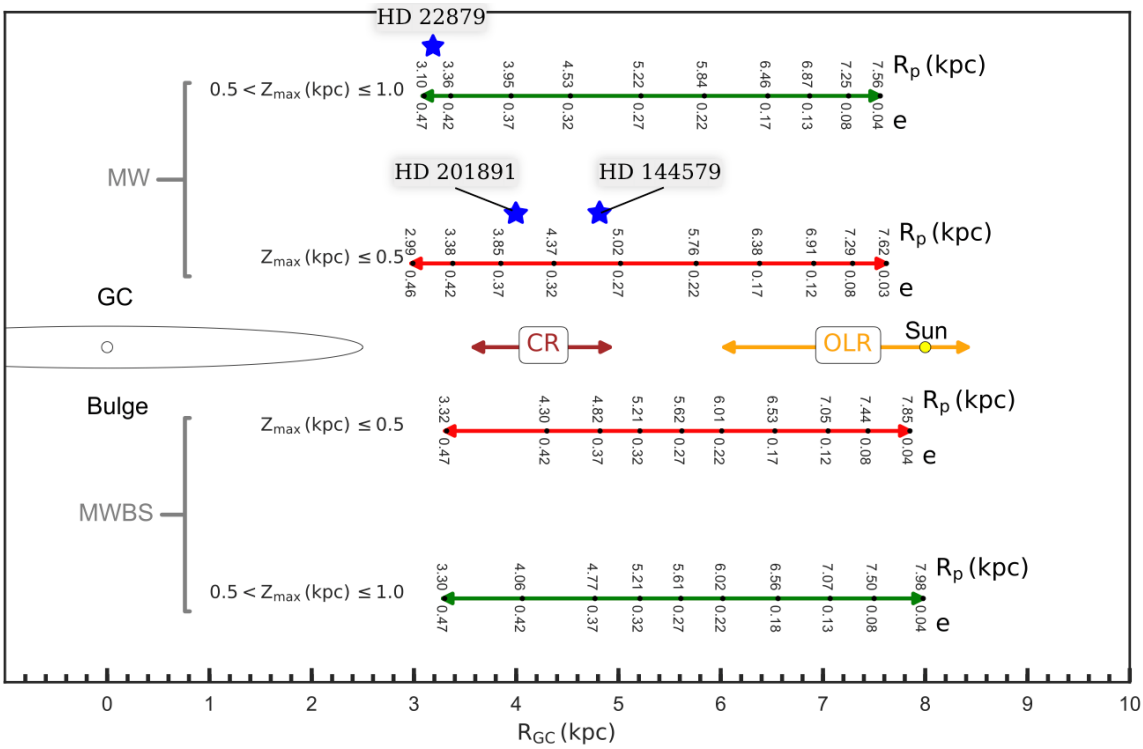
Önal-Taş ve diğ. (2018) Radyal Hız Deneyi'nin dördüncü veri sürümünden (RAVE DR4) seçilen kırmızı yığın yıldızlarının simetrik ve asimetrik potansiyel modellerinden elde edilen

yörünge parametreleri kullanılarak hesaplanan radyal metal bolluğu gradyentleri ve Güneş civarının dinamik yapısını araştırmışlardır. Araştırmacılar, radyal metal bolluğu gradyentlerini her iki potansiyel modeli için kırmızı yığın yıldızlarının Galaktik düzlemden ulaşabilecekleri en büyük dik uzaklık (Z_{max}) ve basıklık (e) parametrelerini kullanarak tayin etmişlerdir. En büyük radyal metal bolluğu gradyenti $0 < Z_{max} \leq 0.5$ kpc uzaklık aralığında $e \leq 0.1$ için -0.065±0.005 dex/kpc iken, en küçük değer aynı aralıkta $e \leq 0.5$ için -0.014±0.006 dex/kpc bulunmuştur. $Z_{max} > 1$ kpc'te radyal metal bolluğu gradyentleri sıfır ya da pozitif değer almış ve metal bolluğu gradyentinin yıldızların yörünge basıklıklarıyla ilişkili olmadığı gösterilmiştir. Araştırmacılar Galaktik düzlemden $Z_{max} = 1$ kpc uzaklık içinde hesapladıkları radyal metal bolluğu gradyentinin farklılığını yıldızların Galaksi çubuğunun neden olduğu rezonans noktalarıyla etkileşmesi sonucunda bulundukları bölgelerden göç etmeleri olduğunu önermişlerdir. Bu bulgularını kırmızı yığın yıldızların yörünge parametreleriyle Galaksi'nin rezonans noktalarını bir araya getirerek bir şematik şekil ile göstermişlerdir (Şekil 5.4).

Tez kapsamında incelenen dört yıldızdan biri haricinde, HD 188510'un $Z_{max} = 2.29$ kpc, diğer üç yıldız (HD 22879, HD 144579, HD 201891) Önal-Taş ve diğ.'nin (2018) oluşturduğu Şekil 5.4 üzerine yerleştirilmiştir. Bu üç yıldızın *MWPotential2014* potansiyelleri kullanılarak hesaplanan Galaktik yörünge parametreleri Önal-Taş ve diğ.'nin (2018) oluşturduğu ölçek içine yerleştirilmesiyle üç yıldızın Galaksi çubuğunun eş dönme rezonansın etkin olduğu bölge içine nüfus ettiği görülmektedir. Ayrıca kırmızı yığın yıldızları kullanılarak hazırlanan ölçek için verilen R_p ve e değerlerinin tez çalışmasında incelenen yıldızlarla da hemen hemen aynı olması dikkate değerdir (Bkz. Tablo 5.2). Bu da üç yıldızın $R_{gc} < 5$ kpc içerisinde bağlı bulundukları küresel kümelerden ayrıldıklarına işaret etmektedir.

Tez çalışmasında gerçekleştirilen ileri analizler ile Güneş civarından seçilen orta tayf türündeki metalce fakir dört yıldızın Galaktik kökeni farklı yöntemler altında incelenmiştir. HD 22879, HD 144579 ve HD 201891'in Samanyolu'nun şişkin bölge küresel kümelerinden buharlaşarak Galaktik çubuğun neden olduğu rezonanslar yoluyla Güneş civarına ulaştığı, HD 188510'un ise bir halo küresel kümesinden (NGC 5139) ayrılma ihtimalinin yüksek olduğu bulunmuştur. Tez çalışmasında, yüksek çözünürlüklü tayfsal veriler ile uzay tabanlı hassas fotometrik ve astrometrik verilerin kullanılmasına rağmen yıldızların popülasyon sınıflamasının halen kesin olarak belirlenmesinin zor olduğu gösterilmiştir. Güneş civarındaki metalce fakir yıldızların

Galaktik kökenin araştırması için yıldızların bağlı bulundukları küresel kümelerin yüksek çözünürlüklü tayflarıyla ve uzay tabanlı gözlemlerine ihtiyaç olduğu görülmüştür.



Şekil 5.4: Önal-Taş ve diğ.'nin (2018) Galaktik merkez, şişkin bölge, eş dönme rezonansı (CR), dış Lindblad yarıçapı (OLR) (Dehnen, 2000) ve Güneş'in konumunu (R_0 = 8 kpc) gösteren bir Galaktik şema. Ayrıca, MW ve MWBS potansiyel modellerine bağlı kalarak, farklı renkler ile temsil edilen iki Z_{max} aralığı ($0 < Z_{max} \leq 0.5$ ve $0.5 < Z_{max} \leq 1$ kpc) içindeki belirli metal bolluğu değişimini göstermektedir. Mavi yıldız sembolü tez kapsamında incelenen üç yıldızı temsil etmektedir.

KAYNAKLAR

Adams, W. S., Kohlschutter, A., 2014, The Radial Velocities of One Hundred Stars with Measured Parallaxes, *Astrophysical Journal*, 39, 341.

Adams, W. S., Joy, A. H., 1919, The Motions in Space of Some Stars of High Radial, Velocity, *Astrophysical Journal*, 49, 179.

Aguado, D. S., ve diğ., 2016, Follow-up Observations of Extremely Metal-Poor Stars Identified from SDSS, *Astronomy and Astrophysics*, 593, 13.

Ak, S., ve diğ., 2014, Colour Transformations between BVRc and g'r'i' Photometric Systems for Giant Stars, *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 31, 12.

Allard, F., Homeier, D., Freytag, B., 2012, Models of,ry-low-mass Stars, Brown Dwarfs and Exoplanets, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370, 2765.

Arnaud, J., Meunier, N., Auriere, M., 2003, Stellar Polarimetry with Narval, *European Astronomical Society*, 9, 105.

Asplund, M., Amarsi, A. M., Grevesse, N., 2021, The Chemical Make-up of the Sun: A 2020 Vision, *Astronomy and Astrophysics*, 653, A141, 30.

Auriere, M., 2003, Stellar Polarimetry with NARVAL, *EAS Publications Series*, 9, 105.

Baldwin, A.T., ve diğ., 2016, Hubble Space Telescope Proper Motion (HSTPROMO) Catalogs of Galactic Globular Clusters. IV. Kinematic Profiles and Average Masses of Blue Straggler Stars, *The Astrophysical Journal*, 827, 12.

Bayliss, D., ve diğ., 2018, NGTS-1b: a Hot Jupiter Transiting an M-dwarf, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,* 475, 4467.

Beers, T. C., Christlieb, N., 2005, The Discovery and Nature of the Metal-Poor Stars in the Galactic Halo, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 43, 531.

Belokurov, V., ve diğ., 2007, Cats and Dogs, Hair and a Hero: A Quintet of New Milky Way Companions, *The Astrophysical Journal,* 654, 897.

Bensby, T., ve diğ., 2003, Signatures of SN Ia in the Galactic Thick Disk. Observational Evidence From Alpha -Elements in 67 Dwarf Stars in the Solar Neighbourhood, *Astronomy and Astrophysics*, 397, 1.

Bensby, T., ve diğ., 2005, α-, r-, and s-process Element Trends in the Galactic Thin and Thick Disks, *Astronomy and Astrophysics*, 433, 185.

Bensby, T., Feltzing, S., 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, 28.

Berger, D. H., ve diğ., 2006, First Results from the CHARA Array. IV. The Interferometric Radii of Low-Mass Stars, *The Astrophysical Journal,* 644, 475.

Bilir, S., ve diğ., 2008, Transformations between 2MASS, SDSS and BVRI Photometric Systems: Bridging the Near-Infrared and Optical, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 384, 1178.

Blanco-Cuaresma, S., ve diğ., 2014, Determining Stellar Atmospheric Parameters and Chemical Abundances of FGK Stars with iSpec, *Astronomy and Astrophysics*, 569, 14.

Bland-Hawthorn, J., Gerhard, O., 2016, The Galaxy in Context: Structural, Kinematic, and Integrated Properties, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 54, 529.

Bond, H. E., 1970, A Search for Metal-Deficient Stars, *Astrophysical Journal Supplement*, 22, 117.

Bonnefoy, M., ve diğ., 2018, The GJ 504 System Revisited. Combining Interferometric, Radial, Velocity, and High Contrast Imaging Data, *Astronomy and Astrophysics*, 618, 32.

Bovy, J., ve diğ., 2018, The Milky Way's Thin and Thick Disk: Characterization and Understanding, *The Astronomy and Astrophysics Review*, 26, 1.

Bovy, J., 2015, Galpy: A python Library for Galactic Dynamics, *The Astrophysical Journal Suppement*, 216, 29.

Boya, A., ve diğ., 2008, VOSA: Virtual Observatory SED Analyzer. An Application to the Collinder 69 Open Cluster, *Astronomy and Astrophysics*, 492, 277.

Boyajian, T. S., ve diğ., 2012, Stellar Diameters and Temperatures. I. Main-sequence A, F, and G Stars, *The Astrophysical Journal,* 756, 101.

Boyajian, T. S., ve diğ., 2012, Stellar Diameters and Temperatures. II. Main-sequence K- and M-stars, *The Astrophysical Journal,* 757, 112.

Boyajian, T. S., ve diğ., 2013, Stellar Diameters and Temperatures. III. Main-sequence A, F, G, and K Stars: Additional High-precision Measurements and Empirical Relations, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,* 447, 846.

Boyajian, T. S., ve diğ., 2013, Stellar Diameters and Temperatures. VI. High Angular Resolution Measurements of the Transiting Exoplanet Host Stars HD 189733 and HD 209458 and Implications for Models of Cool Dwarfs, *The Astrophysical Journal,* 771, 40.

Bressan, A., ve diğ., 2012, PARSEC: Stellar Tracks and Isochrones wih the PAdova and TRieste Stellar Evolution Code, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 427, 127.

Bromm, V., Larson, R. B., 2004, The First Stars, *Annual Review of Astronomy andAstrophysics*, 42, 79.

Cannon, A. J., 1912, A Classification of 33,000 Stellar Spectra, *Harvard College Observatory Bulletin*, 76, 1.

Capitanio, L., Lallement, R., Vergely, J. L., Elyajouri, M., Monreal-Ibero, A., 2017, Three-Dimensional Mapping of the Local Interstellar Medium with Composite Data, *Astronomy and Astrophysics*, 606, id.A65, 17.

Carnerero, M. I., ve diğ., 2023, Gaia Data Release 3. The First Gaia Catalogue of Variable AGN, *Astronomy and Astrophysics*, 674, 19.

Carollo, D., ve diğ., 2007, The Outer Halo of the Milky Way as Probed by RR Lyr Variables from the Sloan Digital Sky Survey, *Nature*, 450, 1020.

Carollo, D., ve diğ., 2012, Carbon-enhanced Metal-poor Stars in the Inner and Outer Halo Components of the Milky Way, *The Astrophysical Journal,* 744, 22.

Carrasco, J. M., ve diğ., 2023, Photometric Catalogue for Space and Ground Night-Time Remote-Sensing Calibration: RGB Synthetic Photometry from Gaia DR3 Spectrophotometry, *Remote Sensing*, 15, 1767.

Casagrande, L., ve diğ., 2010, An Absolutely Calibrated T Scale from the Infrared Flux Method. Dwarfs and Subgiants, *Astronomy and Astrophysics*, 512, 22.

Castelli, F., Kurucz, R. L., 2003, New Grids of ATLAS9 Model Atmospheres, *Modelling of Stellar Atmospheres, Poster Contributions. Proceedings of the 210th Symposium of the International Astronomical Union held at Uppsala University, Uppsala, Sweden, 17-21 June, 2002*, 20.

Chen, X., ve diğ., 2020, Ages of Dwarfs in the Solar Neighborhood: Considering C and O Enhancements, *The Astrophysical Journal*, 889, 14.

Chiappini, C., Matteucci, F., Romano, D., 2001, The Chemical Evolution of the Milky Way: The Importance of Radial Mixing, *The Astrophysical Journal*, 554, 1044.

Ciolek, G. E., Mouschovias, T. C., 1995, The Chemical Consequences of Interstellar Shock Waves: I. Atomic Gas, *The Astrophysical Journal*, 454, 194.

Clementini, G., ve diğ., 2023, Gaia Data Release 3. Specific Processing and Validation of All-Sky RR Lyrae and Cepheid Stars: The RR Lyrae Sample, *Astronomy and Astrophysics*, 674, 42.

Coşkunoğlu, B., ve diğ., 2011, Local Stellar Kinematics from RAVE Data – I. Local Standard of Rest, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 412, 1237.

Couchman, H. M. P., Rees, M. J., 1986, Pregalactic Evolution in Cosmologies with Cold Dark Matter, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 221, 53.

Cowley, A. P., Hiltner, W. A., Witt, A. N., 1967, Spectral Classification and Photometry of High Proper Motion Stars, *Astronomical Journal*, 72, 1334.

Curtis, H., 1917, Novae in the Spiral Nebulae and the Island Universe Theory, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 29, 206.

Çelebi, M., Bilir, S., Ak, S., Ak, T., Bostancı, Z. F., Yontan, T., 2019, Metallicity and Absolute Magnitude Calibrations for FG Type Main-Sequence Stars in the Gaia Era, *Astrophysics and Space Science*, 364, 172.

da Silva, L., ve diğ., 2006, Basic Physical Parameters of a Selected Sample of Evolved Stars, *Astronomy and Astrophysics*, 458, 609.

Decressin, T., Meynet, G., Charbonnel, C., Prantzos, N., Ekström, S, 2006, Fast Rotating Massive Stars and the Origin of the Abundance Patterns in Galactic Globular Clusters, *Astronomy and Astrophysics*, 464, 3.

Distefano, E., ve diğ., 2023, Gaia Data Release 3. Rotational Modulation and Patterns of Colour Variation in Solar-Like Variables, *Astronomy and Astrophysics*, 674, 29.

Dias, B., ve diğ., 2016, FORS2/VLT Survey of Milky Way Globular Clusters. II. Fe and Mg Abundances of 51 Milky Way Globular Clusters on a Homogeneous Scale, *Astronomy and Astrophysics*, 590, 9.

Dolgov, A. D., 2002, Neutrinos in Cosmology, *Physics Reports*, 370, 333.

Donati, J. F., ve diğ., 1997, Spectropolarimetric Observations of Active Stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 291, 658.

Donati, J. F., ve diğ., 2006, ESPaDOnS: The New Generation Stellar Spectro-Polarimeter. Performances and First Results, *Solar Polarization 4 ASP Conference Series*, 358, 362.

Dotter, A., 2016, MESA Isochrones and Stellar Tracks (MIST) 0: Methods for the Construction of Stellar Isochrones, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 222, 11.

Ducourant, C., ve diğ., 2023, Gaia Data Release 3. Surface Brightness Profiles of Galaxies and Host Galaxies of Quasars, *Astronomy and Astrophysics*, 674, 22.

Edvardsson, B. ve diğ., 1993, The Chemical Evolution of the Galactic Disk - Part One - Analysis and Results, *Astronomy and Astrophysics*, 275, 101.

Eggen, O. J., 1956, Magnitudes, Colors and Photometric Parallaxes of Proper Motion Stars, *Astronomical Journal*, 61, 462.

Ehrenfreund, P., Charnley, S. B., 2000, Organic Molecules in the Interstellar Medium, Comets, and Meteorites: A Voyage From Dark Clouds to the Early Earth, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 38, 427.

Eyer, L., ve diğ., 2023, Gaia Data Release 3. Summary of the Variability Processing and Analysis, *Astronomy and Astrophysics*, 674, 19.

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

Fouesneau, M., ve diğ., 2023, Gaia Data Release 3. Apsis. II. Stellar Parameters, *Astronomy and Astrophysics*, 674, 36.

François, P., ve diğ., 2007, First stars. VIII. Enrichment of the Neutron-Capture Elements in the Early Galaxy, *Astronomy and Astrophysics*, 476, 935.

Frebel, A., Norris, J. E., 2015, Near-Field Cosmology with Extremely Metal-Poor Stars, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 53, 631.

Frebel, A. ve diğ., 2005, The New Record Holder for the Most Iron-Poor Star: HE 1327 2326, a Dwarf or Subgiant with [Fe/H]= -5.4, From Lithium to Uranium: Elemental Tracers of Early Cosmic Evolution, *IAU Symposium Proceedings of the international Astronomical Union 228, Cambridge University Press*, 7, 212.

Frebel, A., 2010, Pop III Stars and Their Chemical Signatures, *Reviews of Modern Physics*, 82, 1.

Freeman, K. C., Bland-Hawthorn, J., 2002, The New Galaxy: Signatures of its Formation, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 40, 487.

Frémat, Y., ve diğ., 2023, Gaia Data Release 3. Properties of the Line-Broadening Parameter Derived with the Radial, Velocity Spectrometer (RVS), *Astronomy and Astrophysics*, 674, 19.

Frieman, J. A., Turner, M.S., Huterer, D., 2008, Dark Energy and the Accelerating Universe, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 46, 432.

Frisch, P. C., 2011, The Interstellar Medium Surrounding the Sun, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 49, 237.

Gaia işbirliği ve diğ., 2016, Gaia Data Release 1: Summary of the Astrometric, Photometric, and Survey Properties, *Astronomy and Astrophysics*, 595, 1.

Gaia işbirliği ve diğ., 2018, Gaia Data Release 2. Summary of the Contents and Survey Properties, *Astronomy and Astrophysics,* 616, 22.

Gaia işbirliği ve diğ., 2021, Gaia Early Data Release 3. Summary of the Contents and Survey Properties, *Astronomy and Astrophysics*, 649, 20.

Gaia işbirliği ve diğ., 2023, Gaia Data Release 3: Summary of the Astrometric, Photometric, and Survey Properties, *Astronomy and Astrophysics*, 660, 1.

Gill, S., Maxted, P. F. L., Smalley, B., 2018, The Atmospheric Parameters of FGK Stars Using Wavelet Analysis of CORALIE Spectra, *Astronomy and Astrophysics*, 612, 14.

Gillen, E., ve diğ., 2017, New Low-mass Eclipsing Binary Systems in Praesepe Discovered by K2, *The Astrophysical Journal*, 849, 25.

Giribaldi, R. E., Smiljanic, R., 2023, Chronology of the Chemical Enrichment of the Old Galactic Stellar Populations, *Astronomy and Astrophysics*, 673, 18.

Gomel, R., ve diğ., 2023, Gaia Data Release 3. Ellipsoidal Variables with Possible Black Hole or Neutron Star Secondaries, *Astronomy and Astrophysics*, 674, 12.

Gray, D. F., 1992, The Observation and Analysis of Stellar Photospheres, *Camb. Astrophys. Ser.*, 20, 1.

Gray, R. O., Corbally, C. J., 2009, Stellar Spectral Classification, *Princeton University Press*, 11, 4.

Gray, R. O., ve diğ., 2003, Contributions to the Nearby Stars (NStars) Project: Spectroscopy of Stars Earlier than M0 within 40 Parsecs: The Northern Sample. I, *The Astronomical Journal*, 126, 2048.

Gray, R. O., Napier, M. G., Winkler, L. I., 2001, The Physical Basis of Luminosity Classification in the Late A-, F-, and Early G-Type Stars. I. Precise Spectral Types for 372 Stars, *The Astronomical Journal*, 121, 2148.

Grillmair, J. C., 2006, Substructure in Tidal Streams: Tributaries in the Anticenter Stream, *The Astrophysical Journal,* 651, 29.

Gusdorf, A., Anderl, S., Guedel, M., Hartogh, P., 2019, Shocks in the Interstellar Medium, *Astronomy and Astrophysics Review*, 27, 4.

Guth, A. H., 1981, Inflationary Universe: A Possible Solution to the Norizon and Flatness Problems, *Physical Review D*, 23, 347.

Harris, W. E., 1996, A Catalog of Parameters for Globular Clusters in the Milky Way, *The Astronomical Journal*, 112, 1487.

Hauschildt, P. H., ve diğ., 1999, The NEXTGEN Model Atmosphere Grid. II. Spherically Symmetric Model Atmospheres for Giant Stars with Effective Temperatures between 3000 and 6800 K, *The Astrophysical Journal*, 525, 871.

Haywood, M., 2008, Radial Mixing and the Transition between the Thick and Thin Galactic Discs, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 388, 1175.

Helmi, A., 2008, The Dynamics of the Galactic Halo, *The Astronomy and Astrophysics Review*, 15, 145.

Helmi, A., 2017, A Box Full of Chocolates: The Rich Structure of the Nearby Stellar Halo Revealed by Gaia and RAVE, *Astronomy and Astrophysics,* 598, 18.

Hernquist, L., 1990. An Analytical Model for Spherical Galaxies and Bulges, *The Astrophysical Journal,* 356, 359.

Hertzsprung, E., 1911, Über die räumliche,rteilung der,ränderlichen vom δ Cephei-Typus, *Astronomische Nachrichten*, 190, 121.

Hogg, D. W., Blanton, M. R., Eisenstein, D. J., 2008, The SEGUE Stellar Parameter Pipeline, *Astrophysical Journal Supplement Series*, 178, 288.

Husser, T. O., ve diğ., 2013, A New Extensive Library of PHOENIX Stellar Atmospheres and Synthetic Spectra, *Astronomy and Astrophysics*, 553, 9.

Jacobson, H. R., ve diğ., 2015, High-Resolution Spectroscopic Study of Extremely Metal-Poor Star Candidates from the SkyMapper Survey*, The Astrophysical Journal*, 807, 20.

Jahnson, H. L., Mitchell, R. I., 1968, The Spectral-Energy Curves of Subdwarfs. II, *Astrophysical Journal*, 153, 213.

Jenkins, E. B., 2009, The Interstellar Chemistry of Dust, Gas, and Grains, *Chemical Reviews*, 110, 1.

Jenkins, J. S., ve diğ., 2008, Metallicities and Activities of Southern Stars, *Astronomy and Astrophysics*, 485, 571.

Jofre, P., ve diğ., 2014, Gaia FGK Benchmark Stars: Metallicity, *Astronomy and Astrophysics,* 564, 27.

Jofre, P., ve diğ., 2017, Gaia FGK Benchmark Stars: Opening the Black Box of Stellar Element Abundance Determination*, Astronomy and Astrophysics*, 601, 38.

Johnson, D. R. H., Soderblom, D. R., 1987. Calculating Galactic Space, Velocities and Their Uncertainties with an Application to the Ursa Major Group, *Astrophysical Journal,* 93, 864.

Johnston, K. V., Spergel, D. N., Hernquist, L., 1995. The Disruption of the Sagittarius Dwarf Galaxy, *The Astrophysical Journal*, 451, 598.

Jordi, K. Grebel, E. K., Ammon, K., 2006, Empirical Color Transformations between SDSS Photometry and Other Photometric Systems, *Astronomy and Astrophysics*, 460, 339.

Katz, D., ve diğ., 2023, Gaia Data Release 3. Properties and Validation of the Radial, Velocities, *Astronomy and Astrophysics*, 674, 31.

Kepley, A. A., ve diğ., 2007, Halo Star Streams in the Solar Neighborhood, *The Astronomical Journal*, 134, 1579.

Kirby, E. N., ve diğ., 2016, Lithium-Rich Giants in Globular Clusters, *The Astrophysical Journal*, 819, 2.

Klement, R. J., 2010, Halo Streams in the Solar Neighborhood, *The Astronomy and Astrophysics Review,* 18, 567.

Klessen, R. S., Glover, S. C. O., Clark, P. C., 2012, On the Formation of, Very Metal Poor Stars: The Case of SDSS J1029151+172927, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 421, 3217.

Kovalev, M., ve diğ., 2019, Non-LTE Chemical Abundances in Galactic Open and Globular Clusters, *Astronomy and Astrophysics*, 628, 22.

Kurucz, R. L., 1993, SYNTHE Spectrum Synthesis Programs and Line Data, *Kurucz CD-ROM, Cambridge, MA:Smithsonian Astrophysical Observatory,* 1, 1.

Lane, B. F., ve diğ., 2001, Interferometric Measurement of the Angular Sizes of Dwarf Stars in the Spectral Range K3-M4, *The Astrophysical Journal,* 551, 81.

Lebreton, Y., Montalbán, J., 2008, Stellar Ages from Asteroseismology, *Proceedings of the International Astronomical Union*, 258, 419.

Li A. L.ve diğ., 2015, The First Data Release (DR1) of the LAMOST Regular Survey, *Research in Astronomy and Astrophysics*, 15, 1095.

Linde, A. D., 1982, A New Inflationary Universe Scenario: A Possible Solution of the Horizon, Flatness, Homogeneity, Isotropy and Primordial Monopole Problems. *Physics Letters B*, 108, 389.

Lucertini, F., ve diğ., 2022, Sulfur Abundances in the Galactic Bulge and Disk, *Astronomy and Astrophysics*, 657, 13.

Majewski, S. R., 1993, Galactic Structure Surveys and the Evolution of the Milky Way, *Annual Rev. Astronomy and Astrophysics*, 31, 575.

Marsakov, V. A., Koval, V. V., Gozha, M. L., 2019, Globular Clusters of the Galaxy: Chemical Composition vs Kinematics, *Astrophysical Bulletin*, 74, 403.

Martinez-Rodrigues, H., ve diğ., 2019, Exomoons in the Habitable Zones of M Dwarfs, *The Astrophysical Journal,* 887, 261.

Marton, G., ve diğ., 2023, Gaia Data Release 3. Validating the Classification of Variable Young Stellar Object Candidates, *Astronomy and Astrophysics*, 674, 21.

Masana, E., Jordi, C., Ribas, I., 2006, Effective Temperature Scale and Bolometric Corrections from 2MASS Photometry, *Astronomy and Astrophysics*, 450, 735.

Matsunaga, N., ve diğ., 2018, Exploring the Galactic Bulge with OGLE-IV Variable Stars. VI. The Spatio-Kinematical Structure of the Old Bulge from the OGLE-IV Classical Cepheids, *Astrophysical Journal*, 854, 44.

Matteucci, F., 2017, The Chemical Evolution of the Milky Way, *The Astronomy and Astrophysics Review*, 29, 5. Mermilliod, J. C.,1987, UBV Photoelectric Photometry Catalogue (1986): I-The Original Data, *Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 71, 3, 413-420.*

Mihalas, D., Binney, J., 1981, Galactic Astronomy Structure and Kinematics, *Science*, 214, 829.

Mishenina T., ve diğ., 2015, Mn Abundances in the Stars of the Galactic Disc with Metallicities -1.0 < [Fe/H] < 0.3, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 454, 1585.

Miyamoto, M., Nagai, R., 1975, Three-dimensional Models for the Distribution of Mass in Galaxies, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 27, 533.

Montecinos, C., ve diğ., 2021, Chemical Analysis of the Bulge Globular Cluster NGC 6553, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 503, 4336.

Morgan, W. W., Keenan, P. C., 1943, Spectral Classification, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 1, 29.

Morton, T. D., 2015, Isochrones: Stellar Model Grid Package, *Astrophysics Source Code Library*, 1503, 10.

Navarro, J. F., Frenk, C. S., White S. D. M., 1996, The Structure of Cold Dark Matter Halos, *Astrophysical Journal*, 462, 563.

Nomoto, K., 2017, Chemical Evolution of Galaxies: the Milky Way Perspective, *Proceedings of the International Astronomical Union*, 12, 1.

Olivares, F., ve diğ., 2009, GRB 090423: GROND Detection and Preliminary Photo-z, *GRB Coordinates Network Circular Service*, 9215, 1.

Önal-Taş, Ö., Bilir, S. ve Plevne, O., 2018, Local Stellar Kinematics From RAVE Data-VIII. Effects of the Galactic Disc Perturbations on Stellar Orbits of Red Clump Stars, *Astrophysics ands Space Science*, 363, 35.

Pal, T., ve diğ., 2023, HST Low-Resolution Stellar Library, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 266, 14.

Pavlenko, Y. V., ve diğ., 2012, Effective Temperatures, Rotational, Velocities, Microturbulent, Velocities and Abundances in the Atmospheres of the Sun, HD 1835 and HD 10700, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,* 422, 542.

Pecaut, M. J., Mamajek, E. E., 2013, Intrinsic Colors, Temperatures, and Bolometric Corrections of Pre-mainsequence Stars, *The Astrophysical Journal Supplement*, 208, 22.

Pedregosa, F., ve diğ., 2011, Scikit-learn: Machine Learning in Python, *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825.

Pereira, C. B., ve diğ., 2017, Chemical Abundances and Kinematics of TYC 5619-109-1, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 469, 774.

Pereira, C. B., Drake, N. A., Roig, F., 2019, The s-Process Enriched Star HD 55496: Origin from a Globular Cluster or from the Tidal Disruption of a Dwarf Galaxy, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 488, 482.

Perryman M. A. C., ve diğ., 1997, The HIPPARCOS Catalogue, *Astronomy and Astrophysics,* 500, 501.

Perryman, M. A. C., Brown, A. G. A., van Leeuwen, F., 2012, Gaia: The European Space Agency's Mission to Map the Milky Way, *Astronomy and Astrophysics*, 539, 1.

Petit, P., ve diğ., 2014, PolarBase: A Database of High-Resolution Spectropolarimetric Stellar Observations, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 126, 469.

Planck işbirliği, diğ., 2018, Planck 2018 Results. VI. Cosmological Parameters, *Astronomy and Astrophysics*, 641, 6.

Plotnikova, A., Carraro, G., Villanova, S., Ortolani, S., 2023, Very Metal-Poor Stars in the Solar Vicinity: Kinematics and Abundance Analysis, *The Astrophysical Journal*, 949, 31.

Pont, F., Eyer, L., 2004, Isochrone Ages for Field Dwarfs: Method and Application to the Age-Metallicity Relation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 351, 487.

Prusti, T., ve diğ., 2016, The Gaia Mission, *Astronomy and Astrophysics*, 595, 1.

Ragaini, S., Vallenari, A., Chiosi, C., Bertelli, G., Schmidtobreick, L., 2007, The Structure of the Galactic Bulge, *From Stars to Galaxies: Building the Pieces to Build Up the Universe. ASP Conference Series*, 374, 197.

Ramirez, I., ve diğ., 2012, Lithium Abundances in Nearby FGK Dwarf and Subgiant Stars: Internal Destruction, Galactic Chemical Evolution, and Exoplanets, *The Astrophysical Journal*, 756, 14.

Ramirez, I., Allende Prieto, C., Lambert, D. L., 2013, Oxygen Abundances in Nearby FGK Stars and the Galactic Chemical Evolution of the Local Disk and Halo, *The Astrophysical Journal*, 764, 23.

Ricotti, M., Gnedin, N. Y., Shull, J. M., 2002, The Reionization of the Universe by the First Stars and Quasars, *The Astrophysical Journal*, 575, 49.

Ritter, A., Huang, C., 2020, Transformations from Standard Photometric Systems to the Gaia Passbands, *Journal of Physics: Conference Series*, 1593, 1.

Robitaille, T. P., ve diğ., 2007, Interpreting Spectral Energy Distributions from Young Stellar Objects. II. Fitting Observed SEDs Using a Large Grid of Precomputed Models, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 169, 328.

Rocha-Pinto, H. J., Maciel, W. J., 1998, Metallicity Effects on the Chromospheric Activity-Age Relation for Late-Type Dwarfs, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 298, 332.

Roman, N. G., 1955, A Catalogue of High-Velocity Stars, *Astrophysical Journal Supplement*, 2, 195.

Roman, N. G., 1956, Spectral Types of Some Eclipsing Binaries, *Astrophysical Journal*, 123, 246.

Russell, H. N., 1913, Relations Between the Spectra and Other Characteristics of the Stars, *Popular Astronomy*, 21, 275.

Sahlholdt, C. L., ve diğ., 2019, Benchmark Ages for the Gaia Benchmark Stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 482, 895.

Salvadori, S., Schneider, R., Ferrara, A., 2007, The First Cosmic Structures and Their Effects, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 381, 647.

Sandage, A., Smith, L. L., 1968, A Four-Color Photometric System Applied to Line Blanketing of Subdwarfs, *Astrophysical Journal*, 13, 1057.

Savage, B. D., 2019, The Composition of the Interstellar Medium, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 57, 77.

Sbordone, L., 2005, Kurucz's Codes Under Gnu-linux, *Memorie della Società Astronomica Italiana Supplement*, 8, 61.

Sbordone, L., Bonifacio, P., Castelli, F., Kurucz, R., 2004, Atlas and Synthe Under Linux, *Memorie della Società Astronomica Italiana Supplement*, 5, 93.

Sesar, B., ve diğ., 2007, Exploring the Variable Sky with the Sloan Digital Sky Survey, *The Astronomical Journal,* 134, 2236.

Shapley, H., 1918, Studies Based on the Colors and Magnitudes in Stellar Clusters. VII. The Distances, Distribution in Space, and Dimensions of 69 Globular Clusters, *Astrophysical Journal*, 48, 154.

Silk, J., 1977, Cosmic Black-Body Radiation and Galaxy Formation. *The Astrophysical Journal*, 211, 638.

Silvester, J., ve diğ., 2012, Stokes IQUV Magnetic Doppler Imaging of Ap Stars - I. ESPaDOnS and NARVAL Observations, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 426, 1003.

Smoot, G. F., ve diğ., 1992, Structure in the COBE Differential Microwave Radiometer First-Year Maps, *The Astrophysical Journal*, 396, 1.

Sneden, C., 1973, Carbon and Nitrogen Abundances in Metal-Poor Stars, *Dissertation Abstracts International*, 35, 28.

Soubiran, C., Bienayme, O., Siebert, A., 2003, Vertical Distribution of Galactic Disk Stars. I. Kinematics and Metallicity, *Astronomy and Astrophysics*, 398, 141.

Stassun, K. G., Torres, G., 2016, Eclipsing Binaries as Benchmarks for Trigonometric Parallaxes in the Gaia Era, *The Astrophysical Journal*, 152, 13.

Stassun, K. G., Torres, G., 2018, Evidence for a Systematic Offset of -80 μas in the Gaia DR2 Parallaxes, *The Astrophysical Journal*, 862, 4.

Steinmetz, M., ve diğ., 2006, The Radial, Velocity Experiment (RAVE): First Data Release, *The Astronomical Journal*, 132, 1645.

Stevens, D. J., Stassun, K. G., Gaudi, B. S., 2017, Empirical Bolometric Fluxes and Angular Diameters of 1.6 Million Tycho-2 Stars and Radii of 350,000 Stars with Gaia DR1 Parallaxes, *The Astronomical Journal*, 154, 259.

Şahin, T., Bilir, S., 2020, On the Origin of Metal-poor Stars in the Solar Neighborhood, *The Astrophysical Journal*, 899,41.

Şahin, T., Marışmak, M., Çınar, N., Bilir, S., 2023, An Updated Line List for Spectroscopic Investigation of G Stars- I: Redetermination of the Abundances in the Solar Photosphere, eprint arXiv:2310.04129.

Şahin, T., 2017, LIME: Semiautomated Line Measurement and Identification From Stellar Spectra, *Turkish Journal of Physics*, 41, 367.

Tabernero, H. M., ve diğ., 2019, STEPAR: an Automatic Code to Infer Stellar Atmospheric Parameters, *Astronomy and Astrophysics*, 628, 131.

Tanga, P., ve diğ., 2023, Gaia Data Release 3. The Solar System Survey, *Astronomy and Astrophysics*, 674, 32.

Tanner, A., ve diğ., 2015, Stellar Parameters for HD 69830, a Nearby Star with Three Neptune Mass Planets and an Asteroid Belt, *The Astrophysical Journal*, 800, 5.

Tautvaisiene, G., ve diğ., 2021, Abundances of Neutron-Capture Elements in Thin- and Thick-Disc Stars in the Solar Neighbourhood, *Astronomy and Astrophysics*, 649, 20.

Tinsley, B. M., 1980, The Chemical Evolution of the Galaxy, *Fundamentals of Cosmic Physics*, 5, 287.

Tumlinson, J., 2010, The Chemical Evolution of the First Galaxies: There is No Such Thing as a Population III Star, *The Astrophysical Journal Letters*, 708, 139.

Tuncel-Güçtekin, S., ve diğ., 2019,rtical and Radial Metallicity Gradients in High Latitude Galactic Fields with SDSS, *Advances in Space Research*, 63, 1360.

Usher, C., ve diğ., 2019, The SLUGGS Survey: Measuring Globular Cluster Ages Using Both Photometry and Spectroscopy, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 490, 491.

Valcin, D., ve diğ., 2020, Inferring the Age of the Universe with Globular Clusters, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 12, 2.

Valenti, J. A., Piskunov, N., 1996, Spectroscopy Made Easy: A New Tool for Fitting Observations with Synthetic Spectra, *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 118, 595.

Van Belle, G. T., von Braun, K., 2009, Directly Determined Linear Radii and Effective Temperatures of Exoplanet Host Stars, *The Astrophysical Journal*, 694, 1085.

Van Dishoeck, E. F., Black, J. H., 1988, The Chemical Evolution of the Interstellar Medium, *The Astrophysical Journal*, 334, 771.

Van Leeuwen, F., Fantino, E., 2005, A New Reduction of the Raw Hipparcos Data, *Astronomy and Astrophysics,* 439, 791.

Vasiliev, E., Baumgardt, H., 2021, Gaia EDR3 View on Galactic Globular Clusters, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 505, 5978.

Ventura, diğ., 2001, Predictions for Self-Pollution in Globular Cluster Stars, *The Astrophysical Journal*, 550, 65.

Vines, J. I., Jenkins, J. S., 2022, ARIADNE: Measuring Accurate and Precise Stellar Parameters Through SED Fitting, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 513, 2719.

White, S. D. M., Rees, M. J., 1978, Core Condensation in Heavy Halos: a Two-Stage Theory for Galaxy Formation and Clustering, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 183, 341.

Yaz, E., ve diğ., 2010, Transformations between the 2MASS, SDSS, and BVI Photometric Systems for Late-Type Giants, *Astronomische Nachrichten*, 331, 807.

Yee, S. W., Petigura, E. A., van Braun, K., 2017, Precision Stellar Characterization of FGKM Stars Using an Empirical Spectral Library, *The Astrophysical Journal*, 836, 77.

York, D. G., ve diğ., 2000, The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary, *The Astronomical Journal*, 120, 1579.

Yoshida, N., Bromm, V., Hernquist, L., 2004, The First Galaxies: Formation and Early Evolution, *The Astrophysical Journal*, 605, 579.

Zel'dovich, Y. B., Sunyaev, R. A., 1969, The Interaction of Matter and Radiation in a Hot-Model Universe, *The Astrophysical Journal*, 4, 301.

Zoccali, M., ve diğ., 2008, The Metallicity Distribution of Bulge Clump Giants in Baade's Window, *Astronomy and Astrophysics*, 486, 177.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Deniz Cennet Dursun
Doğum Yeri	
Doğum Tarihi	
Uyruğu	☑ T.C. ❒ Diğer:
E-Posta Adresi	
Web Adresi	

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Fen Fakültesi
Bölümü	Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü
Mezuniyet Yılı	2020

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Astronomi ve Uzay Bilimleri
Programı	Astronomi ve Uzay Bilimleri

Makale ve Bildiriler

Dursun, D. C., Bilir, S., Şahin, T., Yontan, T., Plevne, O., 2022, Güneş Civarındaki Metalce Fakir Yıldızların SED Yöntemiyle Temel Astrofizik Parametrelerinin Tayini, *Turkish Journal of Astronomy and Astrophysics*, 4, 97.

Yontan, T., Göğüş, E., Bilir, S., **Dursun, D. C.**, Tanık-Öztürk, B., Canbay, R., Özel, C., 2022, Türkiye'de 1980-2020 Yılları Arası Yapılan Astronomi ve Astrofizik Araştırmalarının Uluslararası Çıktıları, *Turkish Journal of Astronomy and Astrophysics,* 4.

Yontan, T., Çakmak, H., Bilir, S., Banks, T., Raúl, M., Canbay, R., Koç, S., Taşdemir, S., Erçay, H., Tanık-Öztürk, B., **Dursun, D. C.**, 2022, A Study of the NGC 1193 and NGC 1798 Open Clusters Using CCD UBV Photometric and Gaia EDR3 Data, *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, 58, 333.

Bilir, S., Göğüş, E., Soydugan, F., **Dursun, D. C.**, Tanık-Öztürk, B., Özel, C., 2022, Türkiye'de Astronomi ve Astrofizik Araştırmalarının Çıktıları ve Etkileri - I: 2020 Yayınları, *Turkish Journal of Astronomy and Astrophysics,* 3, 1.