

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**GÜNEŞ KOMŞULUĞUNDA SEÇİLMİŞ G TAYF TÜRÜ YILDIZLARIN
YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ KIRMIZIÖTE SPEKTROSKOPİSİ**

Sena Aleyna ŞENTÜRK

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2025

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**GÜNEŞ KOMŞULUĞUNDA SEÇİLMİŞ G TAYF TÜRÜ YILDIZLARIN
YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ KIRMIZIÖTE SPEKTROSKOPİSİ**

Sena Aleyna ŞENTÜRK

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2025

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜNEŞ KOMŞULUĞUNDA SEÇİLMİŞ G TAYF TÜRÜ YILDIZLARIN
YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ KIRMIZIÖTE SPEKTROSKOPİSİ

Sena Aleyna ŞENTÜRK

UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez" Güneş Civarındaki Orta Tayf Türündeki Metalce Fakir Yıldızların
Kökeni" başlıklı 121F265 nolu TÜBİTAK 1001 Projesi tarafından desteklenmiştir.

HAZİRAN 2025

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜNEŞ KOMŞULUĞUNDA SEÇİLMİŞ G TAYF TÜRÜ YILDIZLARIN
YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ KIRMIZIÖTE SPEKTROSKOPİSİ

Sena Aleyna ŞENTÜRK

UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 16/07/2025 tarihinde jüri tarafından oy birliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Timur ŞAHİN (Danışman)

Prof. Dr. Selçuk BİLİR

Prof. Dr. Volkan BAKIŞ

ÖZET

GÜNEŞ KOMŞULUĞUNDA SEÇİLMİŞ G TAYF TÜRÜ YILDIZLARIN YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ KIRMIZIÖTE SPEKTROSKOPİSİ

Sena Aleyna ŞENTÜRK

Yüksek Lisans Tezi / Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Timur ŞAHİN

Haziran 2025; 184 sayfa

Bu tez, Güneş komşuluğunda bulunan iki G tayf türü yıldızın (HD 76151 ve HD 115617) kimyasal bileşimlerini ve evrimsel kökenlerini yüksek çözünürlüklü kırmızıöte spektroskopi ile araştırmaktadır. Optik (HARPS, ESPRESSO) ve yakın kırmızıöte (IGRINS) tayflarının analizinde, α -elementleri (O, Mg, Si, Ca, Ti), demir grubu (Fe, Ni, Cr) ve nötron yakalama elementlerinin (Y, Zr) detaylı bolluk dağılımları belirlenmiş ve Güneş ile kıyaslamalı $[X/Fe]$ oranları sunulmuştur. MCMC yöntemiyle gerçekleştirilen evrimsel analiz, HD 76151 için 4.2 ± 0.7 milyar yıl, HD 115617 için 8.1 ± 1.3 milyar yıl yaş tespiti sağlamıştır. Gaia verileriyle entegre edilen kinematik ve yörünge dinamik analizleri, her iki yıldızın Galaktik ince disk kökenli olduğunu ve doğum yarıçaplarının sırasıyla 6.1 ± 0.4 kpc ile 7.3 ± 0.5 kpc aralığında bulunduğunu ortaya koymuştur. Tez çalışmasında $1-2.5 \mu\text{m}$ dalga boyu aralığında geliştirilen yeni atomik çizgi listesi Doğu Anadolu Gözlemevi'nde (DAG) yürütülecek kırmızıöte tayfsal analizler için ulusal misyon kapsamında öncül bir veri kaynağı niteliği taşımaktadır. Ayrıca, kırmızıöte bölgede literatürde ilk kez sunulan detaylı kimyasal bolluk analizleriyle Güneş benzeri yıldızların radyal göç dinamiklerinin anlaşılması için bir reçete oluşturulmuştur.

ANAHTAR KELİMELEER: Gökada: Güneş Civarı, Yıldız: Element Bolluğu, Yıldız: Kinematik ve Dinamik.

JÜRİ:

Prof. Dr. Timur ŞAHİN

Prof. Dr. Selçuk BİLİR

Prof. Dr. Volkan BAKIŞ

ABSTRACT

HIGH RESOLUTION INFRA-RED SPECTROSCOPY OF SELECTED G STARS IN THE SOLAR NEIGHBORHOOD

Sena Aleyna ŞENTÜRK

MSc Thesis in SPACE SCIENCES and TECHNOLOGIES

Supervisor: Prof. Dr. Timur ŞAHİN

June 2025, 184 pages

This thesis investigates the chemical compositions and evolutionary origins of two G-type stars (HD 76151 and HD 115617) in the solar neighborhood using high-resolution infrared spectroscopy. Analysis of optical (HARPS, ESPRESSO) and near-infrared (IGRINS) spectra has determined detailed abundance distributions for α -elements (O, Mg, Si, Ca, Ti), iron-group elements (Fe, Ni, Cr), and neutron-capture elements (Y, Zr), while providing solar-comparative $[X/Fe]$ ratios. Evolutionary analysis via the MCMC method yields ages of 4.2 ± 0.7 billion years for HD 76151 and 8.1 ± 1.3 billion years for HD 115617. Kinematic and orbital dynamics analyses integrated with Gaia data confirm both stars originate from the Galactic thin disk, with birth radii of 6.1 ± 0.4 kpc and 7.3 ± 0.5 kpc, respectively. The novel atomic line list developed for the 1-2.5 μm wavelength range serves as a foundational data resource for infrared spectroscopic analyses at the Eastern Anatolia Observatory (DAG) under the national mission framework. Furthermore, the first detailed chemical abundance analyses in the infrared region presented in this study establish a methodological framework for understanding radial migration dynamics of solar-type stars.

KEYWORDS: Galaxy: Solar Neighbourhood, Star: Elemental Abundance, Star: Kinematics and Dynamics.

COMMITTEE:

Prof. Dr. Timur ŞAHİN

Prof. Dr. Selçuk BİLİR

Prof. Dr. Volkan BAKIŞ

ÖNSÖZ

Evreni anlamamızın temeli, madde ile ışık arasındaki kadim etkileşime dayanır. Gökyüzüne her baktığımızda yıldızların, gökadalara ve bulutsuların bizlere anlattığı hikâyeler, aslında fotonların maddeyle etkileşiminin birer yansımasıdır. Işık, yıldızların derinliklerinden doğarak evrenin derinliklerinde yol alır ve sonunda teleskoplarımıza kadar ulaşır. Ancak gördüğümüz yalnızca bir ışık hüzmesi değil, aynı zamanda doğanın en temel yasalarının işleyişidir. Kuantum düzeyinde bir atomun bir fotonu soğurması ya da salması; yıldızların kimyasal bileşimini, yaşını ve evrimini anlamamızı sağlayan anahtardır. Spektroskopinin gücü de işte burada devreye girer: yıldız atmosferlerindeki elementlerin imzasını okuyarak, onların doğduğu yıldız kümelerini hatta kökenlerini keşfetme şansı yaratır. Bu çalışma, Güneş benzeri HD 76151 ve HD 115617 yıldızlarını tam da bu perspektiften yararlanarak kimyasal bileşimlerini ve evrimsel kökenlerini yüksek çözünürlüklü kırmızıöte spektroskopisi aracılığıyla ortaya çıkarmayı amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda tez kapsamında oluşturulan ve test edilen atomik çizgi listesini kullanarak, literatürdeki açıklıkların kapatılması hedeflenmiştir. Tez yıldızları için literatürde ilk kez detaylı kırmızıöte bolluk analizleri bu tez kapsamında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca 1-2.5 mikron dalgaboyu aralığında oluşturulan çizgi listesi ulusal bir misyon anlayışı ile birlikte yakın zamanda ilk ışığını alması planlanan ve tez kapsamındaki dalgaboyu aralığında çalışacak olan Doğu Anadolu Gözlemevi (DAG) için de öncül bir çalışma niteliği taşımaktadır.

Akademik yolculuğum boyunca bilgiye olan merakımı derinleştiren, araştırma tutkumun şekillenmesinde önemli bir rol oynayan ve bilimsel düşünce yapımı geliştirmeme katkı sağlayan danışmanım Prof. Dr. Timur ŞAHİN'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Lisans eğitimimdeki bitirme ödevi sürecinden başlayarak lisansüstü eğitimimdeki tüm aşamalarda, yürüttüğümüz projeler, makalelerdeki iş birliğimiz ve bilimsel çerçevedeki tartışmalar sayesinde akademik karakterimin oluşum sürecinde bana çok değerli bir perspektif kazandırdı. Ayrıca yaratmış olduğu işbirlikçi çalışma ortamı, kendimi daha özgürce ifade edebildiğim ve farklı bakış açılarıyla gelişim gösterebildiğim bir ortamda çalışma imkânını da beraberinde getirdi. Bu vesileyle gerek aynı amaç doğrultusunda birlikte yol aldığımız çalışmalar gerekse göstermiş oldukları arkadaşlık ve her anlamdaki desteklerinden ötürü Akdeniz Üniversitesi Yüksek

Çözünürlüklü Yıldız Spektroskopisi Araştırma Grubu çatısı altında bulunan Gizay YOLALAN, Mahmut MARIŞMAK, Nur ÇINAR ve Ferhat GÜNEY’e teşekkür etmeyi de borç bilirim.

Disiplinlerarası çalışma kapsamında öncelikle benim de bursiyeri olduğum ve başarılı bir şekilde tamamlanan 121F265 numaralı TÜBİTAK-1001 projesi ile birlikte bir araya geldiğim ve daha sonrasında tez çalışmam çerçevesinde yaş, kinematik, yörünge ve köken analizleri hesaplamasında göstermiş olduğu destekten dolayı başta Prof. Dr. Selçuk BİLİR olmak üzere İstanbul Üniversitesi Galaktik Araştırma Grubu’na da en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bahsi geçen iki araştırma grubunun yürütücülüğünü üstlenen değerli hocalarımızın yanı sıra, yolun başında olmalarına rağmen ileride Türk Astronomisi’ne önemli katkılarda bulunacak araştırmacıların varlığı, akademik çalışmalarında bana sadece motivasyon kaynağı olmakla kalmıyor, aynı zamanda kendimi yalnız hissetmememi de sağlıyor. Çünkü, benimle birlikte temelden yetişen ve başarılı işler yapan araştırmacıların yetiştiğini görmek, bu sürecin bir parçası olmaktan daha da gurur duymamı sağlıyor.

Bu süreçte en büyük desteği veren ve her adımda yanımda olan aileme, özellikle kız kardeşim Esma Serra ŞENTÜRK ve annem Sunay ARSLAN’a teşekkürlerimi sunarım. Kız kardeşim, tayfsal çalışmalarımın başında Güneş Kataloğu yardımıyla ölçtüğüm çizgileri karşılaştırmamı dolayısıyla ölçümlerimi daha sağlıklı bir şekilde yapmamı sağladı. Bu süreci bir oyun haline getirerek benimle vaktini paylaştı. Bu desteği benim için çok kıymetli. Annem ise her zaman yanımda durarak hem duygusal açıdan hem de çalışma ortamımı iyileştirerek motive kalmamı sağladı. Onların bu özverili destekleri, bu akademik yolculuğun en değerli parçasıydı.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ	iii
AKADEMİK BEYAN	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Samanyolu Gökadası: Evrimi ve Bileşenleri	5
1.2. Güneş Komşuluğunda Kimyasal Çeşitlilik ve Yıldız Dağılımı	12
1.3. Güneş'in İzini Sürmek: Güneş ve Yansımaları	13
1.3.1. "Solar Twin", "Solar Analog" ve "Solar Like" sınıflandırmaları	14
1.4. Güneş ve Güneş Benzeri Anakol Yıldızlarının Evrimi	16
1.5. Yakın Kırmızıöte Penceresi: Kimyasal İzler ve Gözlemsel Avantajlar	19
1.5.1. Ulusal misyon ve Türkiye ulusal gözlemevleri vurgusu	20
2. TEZ KAPSAMINDA LİTERATÜR İNCELEMESİ	23
2.1. HD 76151	23
2.2. HD 115617	24
3. MATERYAL VE METOT	27
3.1. Echelle Tayfin Doğası	27
3.2. Kullanılan Tayf Verilerinin İncelenmesi	29
3.2.1. ESPRESSO	29
3.2.2. HARPS	31
3.2.3. IGRINS	34
3.3. Tayf Verisinin Ölçüme Hazırlanması	35
3.3.1. Süreklilik normalizasyonu	35
3.3.2. Radyal hız (RV) düzeltmesi	38
3.4. Kimyasal Bolluk Analizi	41
3.4.1. Çizgi ölçümü	41
3.4.2. Çizgi teşhisi	46
3.4.3. Multiplet analizi ve doğası üzerine bazı notlar	49
3.4.4. Atomik veri kütüphaneleri ve atomik verinin test edilmesi	50

3.4.5. Yıldız model atmosfer parametrelerinin tayini ve ilave yaklaşımlar	51
3.4.6. α -, demir grubu ve nötron yakalama elementlerinin doğası	57
3.4.7. Konveksiyon ve NLTE etkilerin bolluklar üzerindeki rolü	73
3.5. MCMC Yaş Analizleri	75
3.6. Kinematik ve Yörünge Dinamik Analizler	76
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	85
4.1. HD 76151 (HIP 43726)	85
4.1.1. Klasik tayfsal analiz sonuçları	85
4.1.2. Yaş analizi sonuçları	99
4.1.3. Kinematik ve yörünge dinamik analiz sonuçları	104
4.2. HD 115617 (HIP 64924)	110
4.2.1. Klasik tayfsal analiz sonuçları	111
4.2.2. Yaş analizi sonuçları	122
4.2.3. Kinematik ve yörünge dinamik analiz sonuçları	127
5. SONUÇLAR	135
6. KAYNAKLAR	137
7. EKLER	169
EK.1. Yeni Çizgi Listesinin Oluşturulması İçin Genişletilmiş Literatür İncelemesi	169
EK.1.1. J. Meléndez ve B. Barbuy (1999):	169
EK.1.2. J. M. Borrero ve diğerleri (2003):	170
EK.1.3. J. T. Rayner ve diğerleri (2009):	170
EK.1.4. N. Ryde ve diğerleri (2010):	170
EK.1.5. V. V. Smith ve ark. (2013):	170
EK.1.6. M. Afsar ve diğerleri (2016, 2018):	171
EK.1.7. S. Kondo ve diğerleri (2019):	172
EK.2. HD 76151 Yıldızı için Literatür Derlemesi	173
EK.3. HD 115617 Yıldızı için Literatür Derlemesi	175
EK.4. NIR Çizgi Listesi	177

ÖZGEÇMİŞ

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “GÜNEŞ KOMŞULUĞUNDA SEÇİLMİŞ G TAYF TÜRÜ YILDIZLARIN YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ KIRMIZIÖTE SPEKTROSKOPİSİ” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak bulunduğunu belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgi, veri ve fikirlerin kaynağını akademik etik kurallarına uygun şekilde gösterdiğimi beyan ederim.

16/06/2025

Sena Aleyna ŞENTÜRK

İmza



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler:

$\text{\AA}$	: Angstrom
c	: Işık hızı
$\odot$	: Güneş
$\log_e(X)$	: Logaritmik (mutlak) bolluk
λ	: Dalgaboyu
l	: Galaktik boylam
b	: Galaktik enlem
π	: Paralaks
ξ	: Mikrotürbülans hız değeri
L	: Işıtma
τ	: Yaş

Kısaltmalar:

1D	: Bir boyutlu
2D	: İki boyutlu
A_v	: Sönümlenme
APOGEE	: Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment
e	: Basıklık
Gaia	: Global Astrometric Interferometer for Astrophysics.
GALAH	: Galactic Archaeology with HERMES
L.E.P.	: Lower-level Excitation Potential
LIME	: Line Measurement for Echelle Spectra
LSR	: Yerel durağanlık noktası
R_a	: Gökada merkezine en uzak mesafe
R_p	: Gökada merkezine en yakın mesafe
R.W.	: Reduced Equivalent Width
Z_{max}	: Galaktik düzlemde olan yükseklik

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1	Samanyolu Gökadası'nın yapısal bileşenleri	3
Şekil 1.2	ELS modeli ile Samanyolu'nun oluşumu	5
Şekil 1.3	SZ modeli ile Samanyolu'nun oluşumu	6
Şekil 1.4	İkili çökme modeli ile Samanyolu'nun oluşumu	8
Şekil 1.5	Galaktik kimyasal evrimde [O/Fe	10
Şekil 1.6	Alfa element bolluklarındaki boşluk ve yıldız oluşum hızı	11
Şekil 1.7	Güneş komşuluğundaki yıldızların dağılımı.	12
Şekil 1.8	Güneş'in yaşam döngüsü	17
Şekil 1.9	Güneş yarıçapının zaman döngüsü boyunca geçireceği değişimin temsili görseli.	18
Şekil 3.1	Temsili echelle kırınım şebekesi	28
Şekil 3.2	Paranal Gözlemevi, ESPRESSO tayfçekeri ve HD 115617 ham tayfı	30
Şekil 3.3	La Silla Gözlemevi, HARPS tayfçekeri ve HD 76151 ham tayfı . .	33
Şekil 3.4	IGRINS tayf kütüphanesindeki yıldızların dağılımı	34
Şekil 3.5	HD 76151'nin ham ve normalize edilmiş HARPS tayfı	36
Şekil 3.6	HD 115617'nin ham ve normalize edilmiş ESPRESSO tayfı	37
Şekil 3.7	Dikine hız, teğetsel hız ve uzay hızını temsili gösterimi.	39
Şekil 3.8	HD 76151 ve HD 115617 için hesaplanan RV değerleri	40
Şekil 3.9	Büyüme eğrisi (curve of growth)	42
Şekil 3.10	Eşdeğer genişlik ifadesinin kavramsal gösterimi	42
Şekil 3.11	Çizgi profili ile büyüme eğrisinin ilişkisi	44
Şekil 3.12	Analiz edilen elementlerin periyodik tablodaki konumu	46
Şekil 3.13	1D düzlem-paralel atmosfer varsayımı	52
Şekil 3.14	ATLAS9 modelinde kullanılan parametreler	53
Şekil 3.15	HD 76151 ve HD 115617 için LTE vs. Non-LTE $H\alpha$ karşılaştırması	56
Şekil 3.16	p-p zinciri ve CNO çevrimi	58
Şekil 3.17	Farklı kütleyle sahip yıldızlarda enerji taşınım mekanizmaları . . .	73
Şekil 3.18	U, V, W hız bileşenleri ve toplam uzay hızı	77
Şekil 3.19	<i>MWPotential2014</i> altında galaktik dönme eğrisi	81
Şekil 4.1	Güneş ve HD 76151 için MOOG çıktısı	87
Şekil 4.2	HD 76151 için optik, NIR ve optik+NIR model parametreleri karşılaştırması	88

Şekil 4.3	HD 76151 için mikrotürbülans hata grafiği	91
Şekil 4.4	HD 76151 ve Güneş için NLTE düzeltmeler	93
Şekil 4.5	HD 76151 için [X/Fe	97
Şekil 4.6	HD 76151 için HARPS model setinden MCMC metoduyla türetilen yaş	101
Şekil 4.7	HD 76151 için IGRINS model setinden MCMC metoduyla türetilen yaş	102
Şekil 4.8	HD 76151 için HARPS+IGRINS model setinden MCMC metoduyla türetilen yaş	103
Şekil 4.9	HD 76151 için HARPS yaş tahmini dikkate alınarak hesaplanan doğum bölgesi tahmini	107
Şekil 4.10	HD 76151 için IGRINS yaş tahmini dikkate alınarak hesaplanan doğum bölgesi tahmini	108
Şekil 4.11	HD 76151 için HARPS+IGRINS yaş tahmini dikkate alınarak hesaplanan doğum bölgesi tahmini	109
Şekil 4.12	Güneş ve HD 115617 için MOOG çıktısı	112
Şekil 4.13	HD 115617 için optik, NIR ve optik+NIR model parametreleri karşılaştırması	114
Şekil 4.14	HD 115617 için mikrotürbülans hata grafiği	114
Şekil 4.15	HD 115617 ve Güneş için NLTE düzeltmeler	117
Şekil 4.16	HD 115617 için [X/Fe	121
Şekil 4.17	HD 115617 için ESPRESSO model setinden MCMC metoduyla türetilen yaş	124
Şekil 4.18	HD 115617 için IGRINS model setinden MCMC metoduyla türetilen yaş	125
Şekil 4.19	HD 115617 için ESPRESSO+IGRINS model setinden MCMC metoduyla türetilen yaş	126
Şekil 4.20	HD 115617 için ESPRESO yaş tahmini dikkate alınarak hesaplanan doğum bölgesi tahmini	130
Şekil 4.21	HD 115617 için IGRINS yaş tahmini dikkate alınarak hesaplanan doğum bölgesi tahmini	131
Şekil 4.22	HD 115617 için ESPRESO+IGRINS yaş tahmini dikkate alınarak hesaplanan doğum bölgesi tahmini	132

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1	HD 115617 Yıldızı için ESPRESSO gözlem bilgileri	31
Çizelge 3.2	HD 76151 Yıldızı için HARPS gözlem bilgileri	32
Çizelge 3.3	Literatürdeki NIR çizgi sayılarına ilişkin istatistiki özet	47
Çizelge 4.1	HD 76151 ve Güneş için model parametre karşılaştırması	86
Çizelge 4.2	Güneş ve HD 76151 için elde edilen bollukların karşılaştırması .	89
Çizelge 4.3	Güneş ve HD 76151 için optik bölgedeki bollukların duyarlılıkları	95
Çizelge 4.4	Güneş ve HD 76151 için NIR bölgedeki bollukların duyarlılıkları	96
Çizelge 4.5	Güneş ve HD 76151 için optik+NIR bölgeden elde edilen bollukların duyarlılıkları	96
Çizelge 4.6	HD 76151'in temel astrofiziksel ve yörünge parametreleri	105
Çizelge 4.7	HD 115617 ve Güneş için model parametre karşılaştırması . . .	111
Çizelge 4.8	Güneş ve HD 115617 için elde edilen bollukların karşılaştırması	115
Çizelge 4.9	Güneş ve HD 115617 için optik bölgedeki bollukların duyarlılıkları	119
Çizelge 4.10	Güneş ve HD 115617 için NIR bölgedeki bollukların duyarlılıkları	119
Çizelge 4.11	Güneş ve HD 115617 için optik+NIR bölgeden elde edilen bollukların duyarlılıkları	120
Çizelge 4.12	HD 115617'nin temel astrofiziksel ve yörünge parametreleri . .	128

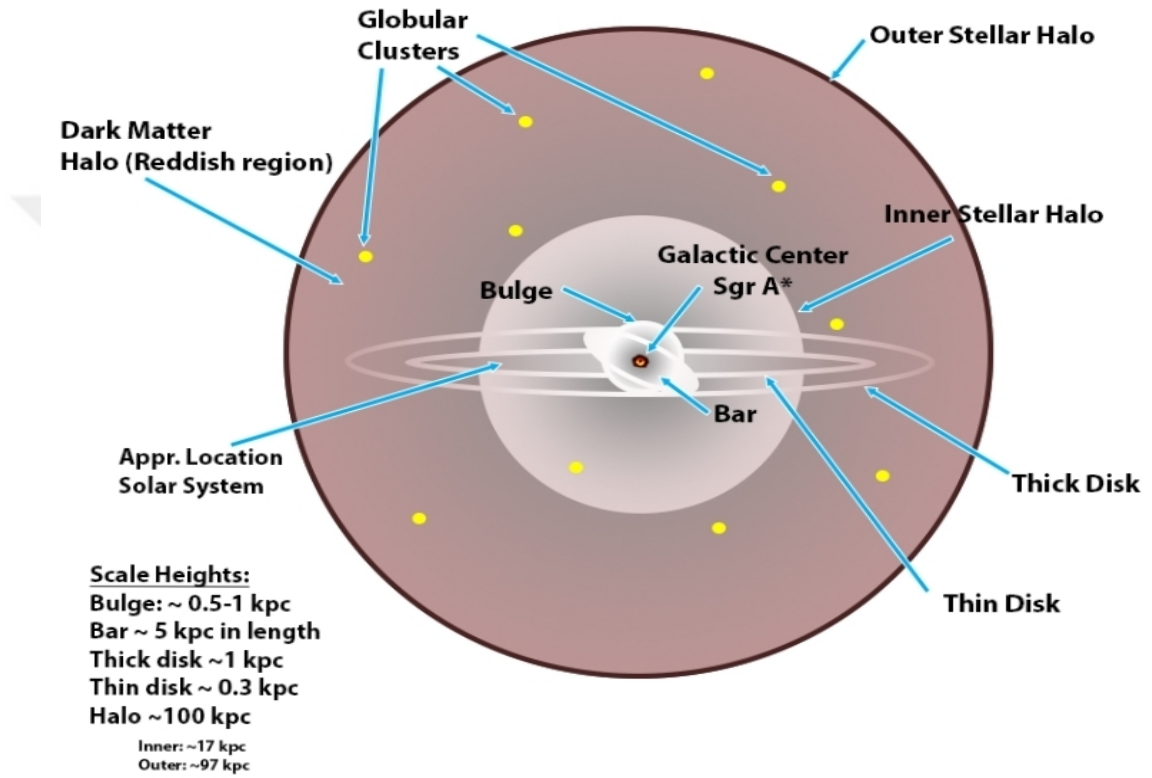
1. GİRİŞ

İnsanlık, gökyüzüne ilk kez baktığı andan itibaren evrende hangi noktada bulunduğunu, evrenin nasıl oluştuğunu ve yıldızların hangi maddelerden doğduğunu sorgulamıştır. Bu kadim sorular, zamanla bilimsel yöntemin doğuşuna öncülük etmiş ve özellikle astrofizik disiplini bu sorulara ışık ve madde arasındaki etkileşimi çözümleme perspektifi altında yanıtlar aramaya itmiştir. Foton, yalnızca bir enerji taşıyıcısı değil, aynı zamanda yıldızların iç yapısından kimyasal bileşimlerine, erken evrenin fiziksel koşullarından gökadalara evrimine kadar birçok bilgiye farklı ölçeklerde ulaşmamızı sağlayan bir ulak niteliği taşımaktadır. Dolayısıyla ışık ile madde arasındaki bu etkileşimin doğasını anlamak, evrenin geçmişine dair temel sorulara yanıt verebilmenin yegâne anahtarıdır. Bu etkileşimin en belirgin izleri yıldız tayflarında gözlenir. Tayf üzerinde yer alan ve yıldız atmosferinde bulunan elementlere dair bilgi sağlayan her bir tayf çizgisi, söz konusu bu elementlerin varlığı, bulunma miktarları (element bolluk değerleri) ve oluştuğu atmosfer katmanına dair fiziksel koşulların anlaşılmasını sağlar. Tayfta element bazında tespit edilen bu izlerin doğasına dair ayrıntılar, kullanılan tayçeker için bazı temel aletsel özellikleri (örn. tayfsal çözünürlük) de ön plana çıkarır. Dolayısıyla fotonun taşıdığı bilginin deşifre edilmesinde gözlemsel alet ve algaç kadar fotonik/astrofotonik teknolojiler de önemli bir rol üstlenir. Bu kapsamda değerlendirildiğinde, gözlemsel tayf verilerinin hassasiyetini ve doğruluğunu belirleyen teknolojik altyapının gelişmesi sayesinde tayfsal analizlerin başarılı bir şekilde uygulanması kritik bir öneme sahiptir. Özellikle son yıllarda önemi artan astrofotonik uygulamalar fotonun toplanması, yönlendirilmesi ve tayfsal olarak çözülmesi süreçlerinde kayıpları en aza indirerek bu etkileşimi daha verimli bir biçimde gözlemlemeyi mümkün kılmaktadır (Bland-Hawthorn ve Horton 2006; Jovanovic vd. 2016). Bu teknolojiler, özellikle yakın-kırmızıöte dalga boylarında gözlem yapan tayfsal sistemlerde sinyal-gürültü (S/N) oranını optimize ederek düşük parlaklıktaki yıldızlarda bile kimyasal bollukların daha hassas belirlenmesini mümkün kılmaktadır. Bu tez kapsamında da astrofotonik teknolojilerinin dolaylı etkisiyle şekillenen veri kalitesi, elde edilen tayfsal çizgi ölçümlerinin doğruluğu ve detaylı kimyasal analizler açısından belirleyici rol oynamaktadır.

Yüksek çözünürlüklü tayçekerler yardımı ile elde edilecek yüksek çözünürlüklü

tayflar kullanılarak gerçekleştirilecek analizler, yıldız atmosferleri kadar yıldızların iç yapıları hakkında da önemli bilgiler sağlar. Özellikle yaşam kaynağımız ve başlıca referans yıldızımız olan Güneş gibi orta kütleli anakol yıldızlarının evrimsel süreçlerinin anlaşılması, yıldız evriminin genel dinamiklerini çözümleyebilmek açısından büyük önem taşımaktadır. Güneş'in kökeni, yapısı ve galaktik çevreni ile olan ilişkisini çözümlemek hem yıldız oluşum süreçlerini hem de Samanyolu Gökadası'na yönelik oluşum senaryolarının daha iyi anlaşılmasına ışık tutar. Güneş, Galaktik merkezden yaklaşık 8 kpc uzaklıkta (Majewski 1993) yer almakta olup, Gökadası'nın ince disk bileşeninde konumlanmıştır (Reid 1993; Haywood vd. 2019). Ancak, bu konumda yer alan yıldızların ortalama metalisite dağılımı $[Fe/H] \approx -0.2 \pm 0.1$ dex düzeyinde zirve yaparken (Rocha-Pinto ve Maciel 1996), Güneş'in metal içeriği yaklaşık $[Fe/H] \approx 0.0$ dex olarak ölçülmektedir. Bu metalisite farkı, Güneş'in bugünkü konumunda değil daha iç galaktik yarıçaplarda ($R \approx 6-7$ kpc) oluşmuş olabileceği ve zamanla disk boyunca dışa doğru göç ettiği hipotezini gündeme getirmiştir (Wielen vd. 1996; Minchev vd. 2013; Fujimoto vd. 2023). Bu çerçevede değerlendirilen radyal göç (radial migration) mekanizması, yalnızca Güneş'in olası doğum yerinin belirlenmesinde değil, aynı zamanda ince disk yıldızlarının kimyasal çeşitliliğini, yaş-metal dağılımındaki yayılımını ve galaktik evrimdeki iç-dış disk bölgeleri arasındaki yapısal/kimyasal farklarını açıklamak açısından da temel bir süreç olarak kabul edilmektedir (Sellwood ve Binney 2002; Schönrich ve Binney 2009). Radyal göç, yıldızların doğdukları galaktik yarıçaptan zaman içinde kalıcı olarak sapmalar göstermeleri sürecidir. Radyal göç sırasında yörüngelerin eksantrikliği artmaz; yıldızlar, kinetik enerjilerinde büyük değişimler olmadan daha iç ya da dış bölgelere taşınırlar (Sellwood ve Binney 2002). Tüm bu çerçeve neticesinde, evrenin kimyasal ve yapısal evrimini anlamada yıldızlara ilişkin tayfsal çalışmaların rolü büyüktür. Tayfbilim, modern astrofiziğin sıklıkla başvurduğu en temel araştırma yöntemidir.

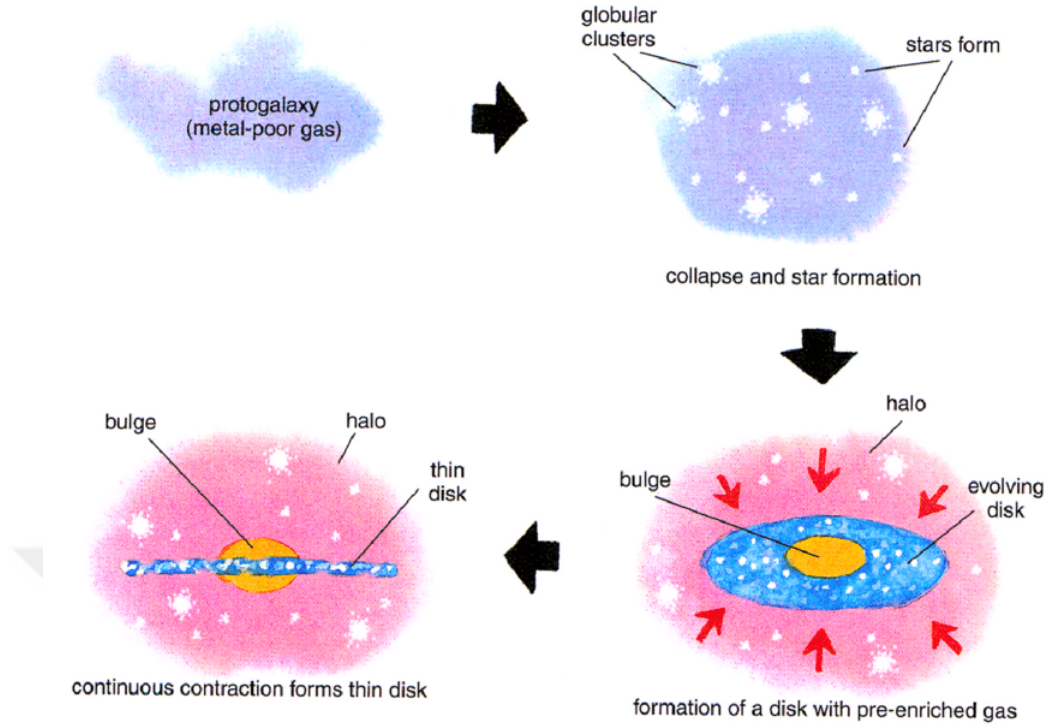
Bu duruma ek olarak, Galaktik yapı içerisinde Güneş benzeri yıldızların dağılımı, Güneş'in olası ikizlerinin tespiti ve izlenmesi açısından da önemli ipuçları sunmaktadır. Bilinen gökadalara kimyasal düzlemdeki evrimlerinin (Galactic Chemical Evolution, GCE) anlaşılması aşamasında astrometrik, kinematik ve yörünge dinamik analizi yöntemleri ile kıyaslandığında spektroskopi nispeten avantajlı bir konumdadır.



Şekil 1.1. Samanyolu Gökadası'nın yapısal bileşenlerinin şematik gösterimi. Galaktik merkezde yer alan çubuk (bar) yapısı ve şişkin (bulge) bölgesi, ince ve kalın disk yapılarının çevrelediği iç bileşenlerdir. Tüm bu bileşenlerin etrafını, Gökadanın toplam kütlelerinin önemli bir bölümünü oluşturan karanlık madde halosu çevrelemektedir (kırmızı gölgeli bölge). Güneş Sistemi'nin yaklaşık konumu diskin iç bölgelerinde yer alır. Sol alt köşede her bir yapısal bileşenin karakteristik ölçek uzunlukları verilmiştir.

Güneş benzeri yıldızların sınıflandırılması, modern yıldız astrofizikinde giderek artan bir öneme sahiptir. Literatürde bu yıldızlar genellikle üç kategoride tanımlanmaktadır: "Güneş benzeri" (solar-like), "Güneş analogları" (solar analogs) ve "Güneş ikizleri" (solar twins). Bu tanımlar, yıldızların temel fiziksel ve kimyasal özelliklerinin Güneş'e olan benzerlik düzeyine göre ayrıştırılmasını mümkün kılar (Datson vd. 2015; Meléndez vd. 2015). Güneş ikizleri, etkin sıcaklık, yüzey çekim ivmesi ($\log g$) ve metalisite ($[Fe/H]$) gibi parametrelerde Güneş ile neredeyse ayırt edilemeyecek düzeyde benzerlik gösteren (± 100 K, ± 0.20 cgs ve ± 0.1 dex) yıldızları tanımlarken; Güneş analogları bu parametrelerde küçük sapmalar (± 300 K, ± 0.30 cgs ve ± 0.3 dex) gösteren, ancak genel yapı itibarıyla Güneş'e yakın olan yıldızları içerir (Berke vd. 2023; Lehmann vd. 2023). Güneş benzeri yıldızlar ise daha geniş bir parametre aralığında, esas olarak anakol evresindeki FGK tipi yıldızları kapsar. Bu tanımsal ayrımın yapılması, hem galaktik kimyasal evrim hem de Güneş'in kökenine yönelik araştırmalarda benzer yıldızların sistematik olarak karşılaştırılabilmesini sağlar. Tez kapsamında bu ayrımın dikkate alınması, seçilen örnek yıldızların hangi kategoriye ait olduğunun belirlenmesine katkı sunmakla kalmayacak; aynı zamanda fiziksel karakterizasyonunun literatür ile kıyaslanabilir düzeyde yapılmasını da mümkün kılacaktır.

Spektroskopi, modern astrofizikte yıldızların fiziksel yapılarının anlaşılması için en temel gözlemsel tekniklerden biridir. Yüksek çözünürlüklü tayflar üzerinden gerçekleştirilen ayrıntılı çizgi analizleri, yıldız atmosferlerinin sıcaklık yapısı, metal içeriği ve element bolluk desenleri gibi kritik parametrelerin yüksek doğrulukla tayinine olanak sağlar (Gray 2005). Bu çalışmada uygulanan spektroskopik analiz teknikleri—optik ve yakın kızılöte (metnin devamında NIR olarak kullanılacaktır.) tayf bölgelerinin birlikte değerlendirilmesi, NLTE düzeltmeleri, iyonizasyon dengesinin kontrolü, eşdeğer genişlik ölçümleri ve LDR yöntemleri gibi çok yönlü yaklaşımlar—yalnızca örnek iki yıldız için değil, aynı zamanda bu türden birçok Güneş benzeri sistemlerin karakterizasyonunda kullanılabilecek bütüncül bir metodoloji sunmaktadır. Bu bağlamda, tezde uygulanan analiz prosedürleri, Güneş benzeri yıldızların fiziksel doğasını anlamada referans alınabilecek sistematik bir “analiz reçetesi” işlevi görmektedir; gelecekte benzer çalışmalara temel teşkil edecek bir çerçeve oluşturmaktadır. Böyle bir incelemenin temelini sağlam kurabilmek adına öncelikle yıldızların yer aldığı gökadanın



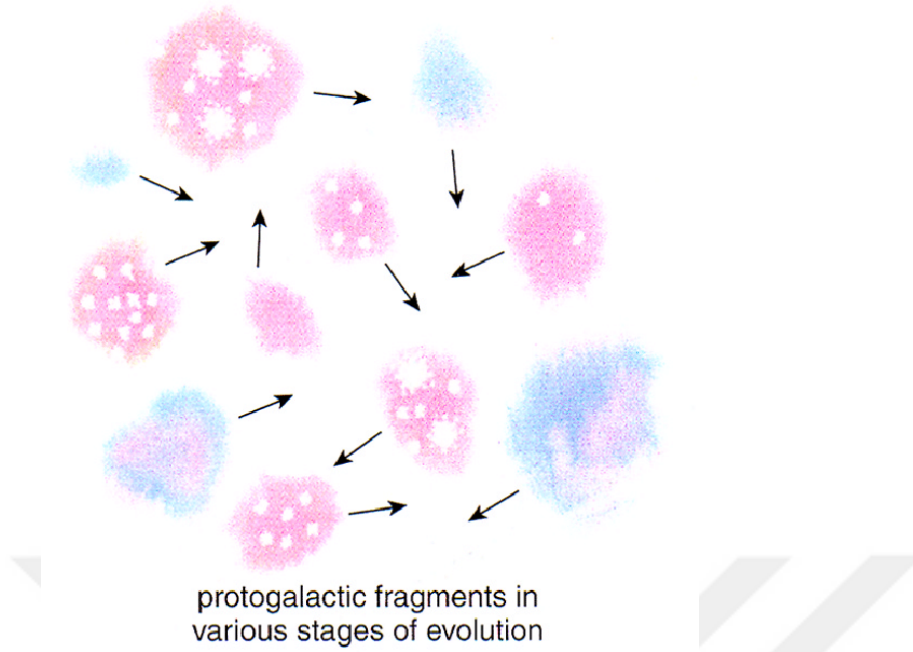
Şekil 1.2. ELS modeli, Samanyolu’nun tek bir gaz bulutunun hızlı çöküşüyle oluştuğunu öne sürer. Çöküşün erken evrelerinde oluşan yıldızlar, metal açısından fakir gazın dinamik özelliklerini korumuş ve halo içinde eliptik yörüngelerde hareket etmiştir. Bulut, tercihen kendi dönme eksenini boyunca (kırmızı oklarla gösterilmiştir) çökerken, ilk nesil halo yıldızlarının zenginleştirdiği bir disk yapısı oluşmuştur.

yani Samanyolu’nun genel yapısı ve dinamik evrimi ele alınmalıdır. Bu nedenle ilk bölüm, Samanyolu Gökadası’nın evrimi ve bileşenleri üzerine odaklanmaktadır.

Bu noktada, Gökada’nın yapısal bileşenlerine (bkz. Şekil 1.1) ve geçirdiği evrimsel süreçlere genel bir bakış sağlanmadan, yıldızların bireysel düzeyde sergiledikleri kimyasal farklılıkların doğasının değerlendirilmesi mümkün olmayacaktır.

1.1. Samanyolu Gökadası: Evrimi ve Bileşenleri

Samanyolu Gökadası’nın oluşumu ve evrimi, gözlemsel verilerle uyumlu olacak şekilde çeşitli kuramsal modeller aracılığıyla açıklanmaya çalışılmıştır. Literatürde öne çıkan başlıca senaryolar; monolitik çöküş modeli (ELS; Eggen, Lynden-Bell ve Sandage 1962), hiyerarşik birleşme modeli (SZ; Searle ve Zinn 1978) ve ikili çökme modeli (Chiappini, Matteucci ve Gratton 1997) olarak öne çıkmaktadır. Bu modeller, yıldız popülasyonlarının kimyasal, kinematik ve dinamik özelliklerini temel alarak,



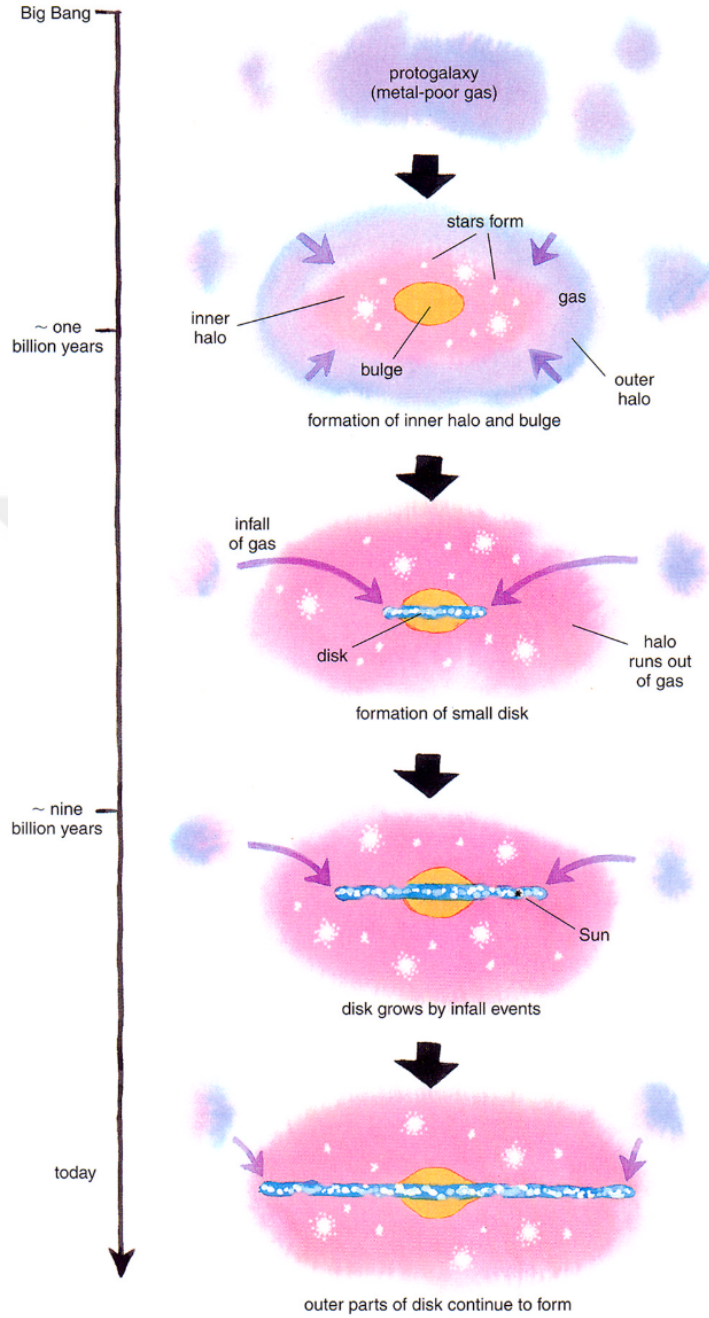
Şekil 1.3. SZ modeline göre, Samanyolu Gökadası, birkaç bağımsız gaz bulutunun zaman içinde birleşmesiyle oluşmuştur. Her bir gaz bulutunun kendine özgü bir kimyasal evrim geçirmişe sahip olduğu varsayılır; bu nedenle bazı bulutlar daha fazla yıldız oluşumu ve süpernova patlaması geçirerek daha yüksek metal içeriğine ulaşmış, bazıları ise daha ilkel yapısını korumuş olabilir. Sonuç olarak, bu model kapsamında farklı metalisite düzeylerine sahip yıldız kümeleri ve yıldızlar oluşmuş ve günümüzde gözlemlenebilir hale gelmiştir.

Gökadamızın farklı bileşenlerinin hangi süreçlerle meydana geldiğine dair açıklamalar sunmaktadır.

Galaktik disk ve yıldız halosunun oluşum tarihini gözlemlerle tutarlı biçimde açıklamaya yönelik ilk kuramsal çerçeve, Eggen, Lynden-Bell ve Sandage (1962) tarafından geliştirilmiş ve literatüre ELS modeli olarak geçmiştir. Bu model, gökadanın büyük ve tek bir gaz bulutunun hızlı ve düzenli bir şekilde çökmesiyle oluştuğunu ileri sürmektedir (Şekil 1.2). ELS modeli, Güneş çevresindeki anakol yıldızlarının yörünge dışmerkezlikleri (e), dikey hız bileşenleri (W) ve metalisiteleri ($[Fe/H]$) arasındaki sistematik ilişkileri ortaya koymuştur. Buna göre, düşük metalisiteye sahip yıldızlar yüksek hızlara ve yüksek dışmerkezli yörüngelere sahiptir; bu da onların Gökada'nın erken dönemlerinde oluştuğunu düşündürmektedir. Öte yandan, daha yüksek metal içeriğine sahip yıldızların daha düzenli ve dairesel yörüngelerde hareket ettikleri, dolayısıyla daha sonraki evrelerde oluştukları değerlendirilmiştir.

Bu çerçevede, yıldız kinematiki ile kimyasal bileşim (metal bolluğu) arasındaki ilişki üzerinden, halo ve disk popülasyonları arasındaki ayrım ilk kez sistematik biçimde ortaya konmuştur. ELS modeline göre, çökmenin etkisiyle halo yıldızlarının yörüngeleri oldukça dışmerkezli hale gelir ve bu durum, yıldızların gözlenen kemo-kinematik özelliklerini açıklamada kullanılabilir. Bununla birlikte, sonrasında yapılan çalışmalar (bkz. Norris, Bessell ve Pickles 1985; Beers ve Sommer-Larsen 1995; Carney vd. 1996; Chiba ve Yoshii 1998), dışmerkezlik ile metalisite arasında öne sürülen korelasyonun, Eggen ve arkadaşlarının kullandığı örnekleme etkileyen bir seçim yanlılığından kaynaklanabileceğini göstermiştir. Ayrıca, ELS modeli disk oluşumunu "halonun düzleşmesi" üzerinden açıklamaya çalışmakta ve bu süreçte galaktik dış birleşmelerin rolünü büyük ölçüde ihmal etmektedir. Günümüzdeki çok sayıda gözlemsel bulgu dikkate alındığında, ELS modelinin gökadamızın evrimsel geçmişini tam olarak temsil edemediği genel kabul görmektedir.

ELS modeline alternatif olarak geliştirilen Searle ve Zinn (1978) modeli, Gökada'nın özellikle halo yapısının, birçok küçük gökada benzeri yapıdan oluştuğunu ve bu yapıların zamanla birleşerek Samanyolu Halosu'nu meydana getirdiğini öne sürer (Şekil 1.3). Özellikle dış halo bölgelerinde yer alan küresel kümelerin metal bolluklarındaki gradyent ve bu kümeler arasındaki yaş farklarına dikkat çekmektedir. Eğer halo, ELS'nin öngördüğü gibi hızlı ve yekpare bir çökme ile oluşmuş olsaydı, küresel kümelerin metal bollukları arasında bu denli geniş bir dağılımın beklenmeyeceğini savunur. Bu gözlemsel veriler, halonun çok sayıda bağımsız parçanın birleşmesiyle oluştuğunu ve bu yapıların kendilerine özgü kimyasal evrim geçmişlerine sahip olduklarını düşündürmüştür (Searle ve Zinn, 1978). Nitekim günümüzde Gaia verileriyle keşfedilen Gaia-Enceladus, Sequoia ve Kraken gibi yapıların varlığı, SZ modeline güçlü gözlemsel destek sunmaktadır. Bu birleşme izleri, Samanyolu'nun halo ve kısmen kalın disk bileşeninin önemli bir kısmının gökada dışı kökenli olduğunu göstermektedir (Helmi vd. 2018). Ancak SZ modelinde Gökada'nın dış bileşenleri başarılı bir şekilde açıklanırken, disk yapısının oluşumu konusunda sınırlı bilgi sunmaktadır. Modelde disk, bulutların birleşmesinden sonra oluşan gazın dinlenerek çökmesiyle şekillenir. Ancak bu sürecin süresi, oluşum hızı ve içerdiği kimyasal evrim mekanizmaları net olarak belirtilmemiştir. Bu nedenle modern modellerde SZ yaklaşımı, halo oluşumunu açıklayan bir bileşen olarak ele alınmakta, disk içinse daha



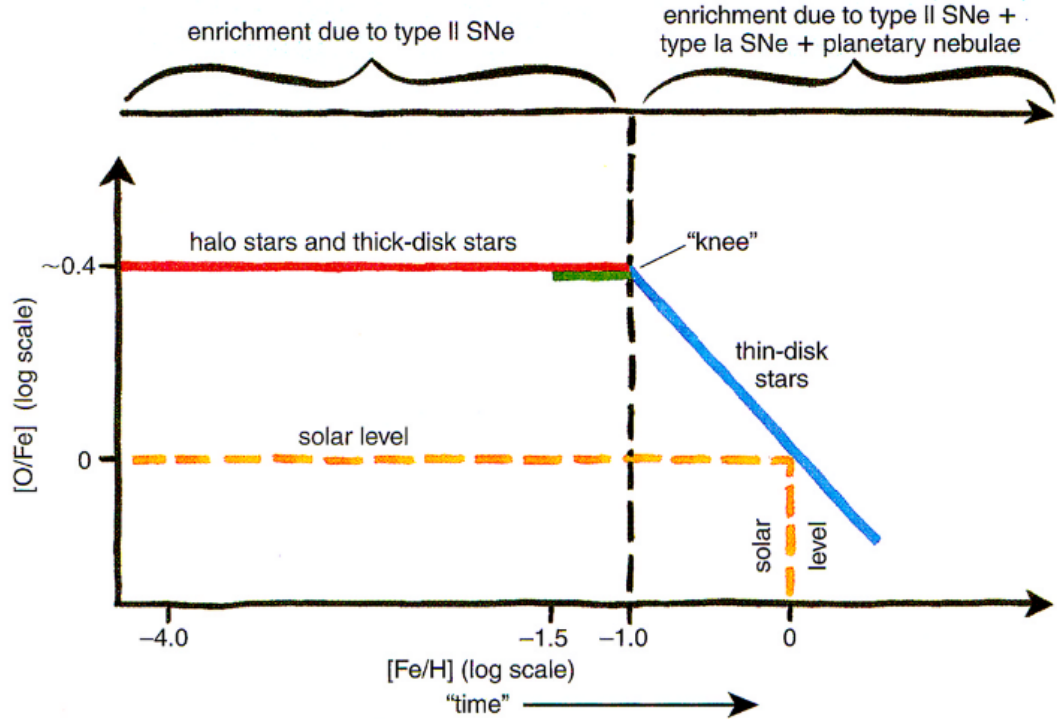
Şekil 1.4. “İkili çökme” modeli, Samanyolu’nun halo ve diskinin Gökada’nın evriminde farklı zamanlarda ayrı gaz kütlelerinden oluştuğunu öne sürer. Halo ve Galaktik bulge ilk olarak, ilk bir milyar yıl içinde düşük açısal momentuma sahip metal fakiri bir gaz bulutundan oluşurken disk ise yüksek açısal momentumlu gazın çökmesiyle oluşmuştur. Diskin aynı zamanda “içten dışa” doğru evriliyor olması öngörülmektedir ve en merkezi bölgeler daha önce oluşmuştur. Yaklaşık 10 milyar yıl önce başlayan güneş komşuluğunun oluşumu, disk yaklaşık yedi milyar yaşındayken tamamlanırken, diskin dış kısımları bugün bile ekstragalaktik gaz bulutlarının katkısıyla büyümeye devam etmektedir.

karmaşık süreçleri içeren çökme modelleri tercih edilmektedir.

Güncel galaktik kimyasal evrim modelleri, Samanyolu'nun oluşumunun zamansal ve yapısal olarak çok evreli olduğunu ortaya koymaktadır. Bu çerçevede en yaygın kabul gören yaklaşım, Chiappini, Matteucci ve Gratton (1997) tarafından geliştirilen ve ikili çökme modeli (two-infall model) olarak adlandırılan senaryodur. Bu modele göre Samanyolu, iki ana bulutun çöküşü sonucunda şekillenmiştir (Şekil 1.4). Birinci çökme, hızlı ve yoğun bir şekilde gerçekleşmiş olup halo, şişkin bölge ve kalın diskin büyük bölümünün oluşumuna yol açmıştır. Bu evredeki yıldız oluşum oranı oldukça yüksektir ve büyük kütleli yıldızların kısa yaşam süreleri sonunda gerçekleşen tip II süpernova patlamaları yardımıyla yıldızlararası ortamı α elementleri bakımından zenginleştirmiştir (Matteucci ve Greggio 1986). Bu süreçte oluşan yıldızlar düşük metal bolluklarına ($[\text{Fe}/\text{H}] \leq 1$) ve yüksek $[\alpha/\text{Fe}]$ oranlarına sahiptir. Gözlemler, bu özelliklere sahip yıldızların hâlen halo ve kalın disk bileşenlerinde yer aldığını göstermektedir (Gratton vd. 2000; Chiappini vd. 2001).

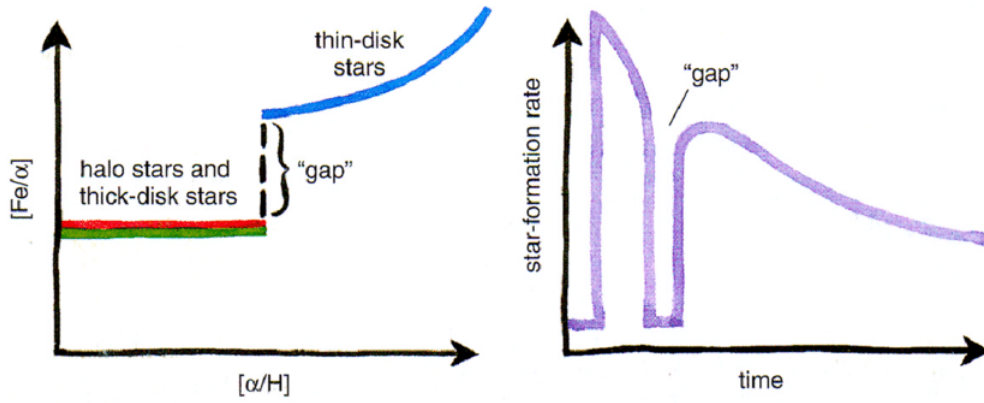
Yüksek yıldız oluşum verimliliği nedeni ile bu ilk evredeki gaz, hızla tüketilmiş, yoğunluk belirli bir eşik değerin altına düştüğünde ise yıldız oluşumu sonlanmıştır. Bu süreçte, halo bölgesinden taşınan gazın gökada merkezinde birikmesi ile şişkin bölge meydana gelmiştir. Kimyasal olarak bu erken evre, $[\text{O}/\text{Fe}]$ – $[\text{Fe}/\text{H}]$ düzleminde gözlenen yatay plato (Şekil 1.5) ile tanımlanır; çünkü tip Ia süpernovalar henüz demir üretimine katkı yapmaya başlamamıştır (Chiappini vd. 2001). İzleyen dönemde, Tip-Ia süpernovaların devreye girmesiyle demir oranı artmaya başlar ve böylece bu platonun sonlandığı "kırılma" noktası oluşur (Şekil 1.5). Bu kırılma, tipik olarak ≈ 1 Gyr zaman ölçeğini işaret etmektedir (Wyse ve Gilmore 1995).

İkinci çökme evresi, daha yüksek açısal momentuma sahip gazın gökada düzlemine doğru yavaş ve sürekli biçimde birikmesi ile gerçekleşmiştir. Bu süreç, daha uzun zaman dilimlerine yayılmış olup ince diskin oluşumuna karşılık gelmektedir. Yıldız oluşumu bu evrede daha düşük yoğunlukta ancak süreklilik arz eder şekilde devam etmiştir. Bu kademeli yıldız oluşumu, zamanla artan metal zenginleşmesini beraberinde getirmiştir. Gözlemler, ince disk yıldızlarının daha yüksek $[\text{Fe}/\text{H}]$ değerlerine ve düşük $[\alpha/\text{Fe}]$ oranlarına sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Chiappini vd. 1997; Haywood vd. 2013). Ayrıca bu evrenin, içten dışa doğru gelişen bir disk oluşumu senaryosu ile uyumlu



Şekil 1.5.

[Fe/H] ilişkisi] [Fe/H] değeri ile temsil edilen Gökada metalisitesi zamanla artar ve bu nedenle farklı zaman ölçeklerinde sentezlenen iki elementin (O ve Fe gibi) göreceli bolluklarını ([O/Fe]) karşılaştırmak için bir temel oluşturur. Grafik, Gökadadaki demirin göreceli oranı arttıkça bir “kırılma” noktasında metal fakiri yıldızların ([Fe/H] < -1) bir “platosunu” ortaya koymaktadır. Tip Ia süper novalar (SNe) birincil demir kaynağı olduğu için gökbilimciler “kırılmanın” Gökada oluşmaya başladıktan yaklaşık 1 Gyr sonra meydana geldiğini düşünmektedir. Halo yıldızları (kırmızı çizgi) ve bazı kalın disk yıldızları (yeşil çizgi) “plato” bölgesinde baskınken, ince disk yıldızları mavi renkli olarak ifade edilen plato üzerinde baskındır. Bu gözlemler, halonun ve kalın diskin bir kısmının Gökada’nın evriminin ilk milyar yılında oluştuğunu ve ince diskinin daha sonra oluştuğunu göstermektedir.

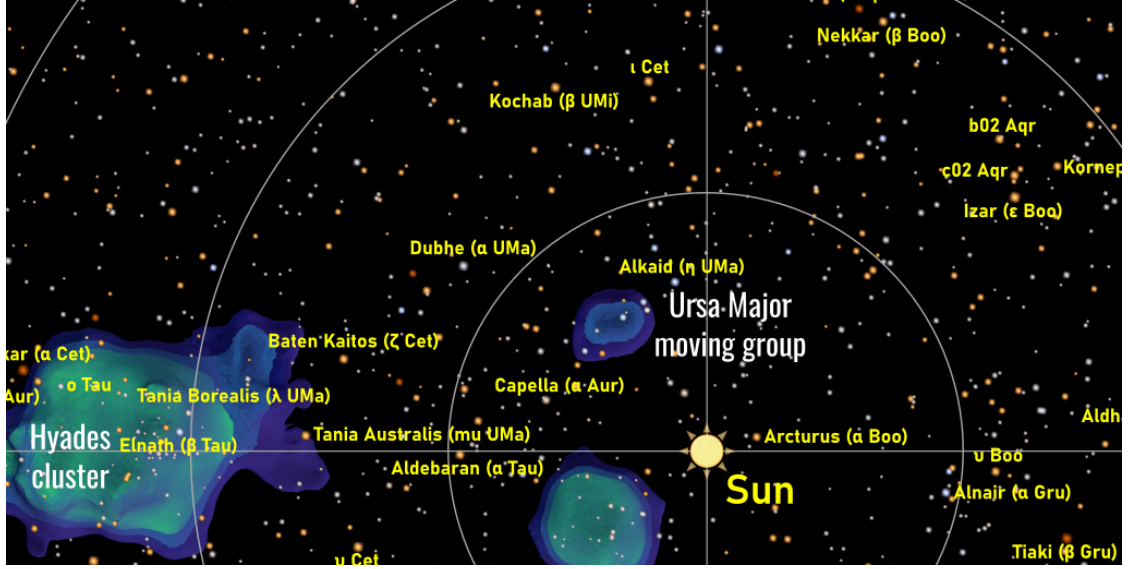


Şekil 1.6. Demir ve oksijen gibi α elementlerinin (solda) göreceli bolluklarındaki bir “boşluk (gap)”, Gökadadaki yıldız oluşum hızının azaldığı bir dönem olarak yorumlanır (sağda). Bunun nedeni, alfa elementlerinin yıldız oluşum hızının etkin bir göstergesi olan Tip-II süpernovalar tarafından üretilmesidir. Yıldız oluşumundaki boşluk evresi, halo ve kalın diskin tam anlamıyla “gazı bittikten” sonra ortaya çıkmış ve yeni biriken gazın ince diski oluşturmak üzere yerleşmesine kadar yıldız oluşumu tekrar artmamıştır (Chiappini vd. 2001).

olduğu, yani gökadanın merkez bölgelerinin daha erken, dış bölgelerinin ise daha geç evrilmiş olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum, yıldız popülasyonları arasında gözlenen yaş ve metalisite gradyentleriyle desteklenmektedir (Minchev vd. 2013).

Ayrıca Gratton ve arkadaşlarının (2000) çalışmaları, halo ve kalın diskin oluşumundan sonra yıldız oluşumunun kısa bir süre durduğunu, bu arada tip Ia süpernovaların devreye girerek $[\text{Fe}/\text{H}]$ oranını artırdığını göstermektedir (Şekil 1.6). Bu durum, $[\alpha/\text{Fe}]$ oranında ani bir düşüş olarak gözlenmekte ve halo–disk geçişinde evrimsel bir süreksizlik olduğunu ortaya koymaktadır. Dolayısıyla Samanyolu’nun kimyasal ve dinamik evrimi, yalnızca sürekli bir çöküş değil aynı zamanda farklı evrelerde yıldız oluşumunun artıp azaldığı, dışsal birleşmelerin katkı sağladığı, kimyasal ve kinematik ayrışımaların belirlediği bir süreç olarak değerlendirilmelidir.

Gökada temelli evrimsel süreçlerin yalnızca geniş ölçekli yapılar üzerinden değil, aynı zamanda Güneş çevresindeki yıldız popülasyonlarının detaylı incelenmesi ile de açığa çıkacağı düşünülmektedir. Bu bağlamda, Güneş komşuluğu, hem farklı gökada bileşenlerinin temsilcilerini içermesi hem de yüksek hassasiyetli gözlemlere erişim imkanı sunuyor olması nedeniyle gökada evrim çalışmalarında anahtar bir rol oynamaktadır.



Şekil 1.7. Güneş komşuluğundaki yıldızların dağılımı.

1.2. Güneş Komşuluğunda Kimyasal Çeşitlilik ve Yıldız Dağılımı

Güneş, Samanyolu'nun ince disk bileşeninde, Galaktik merkeze yaklaşık 8 kpc uzaklıkta (Majewski 1993; Griv vd. 2021) ve Galaktik düzleme oldukça yakın bir konumda yer almaktadır. Güneş çevresindeki 1–2 kpc'lik bölge (bkz. Şekil 1.7), hem dinamik hem de kimyasal açıdan görece iyi çalışılmış olsa da, son on yılda yer ve uzay tabanlı olarak gerçekleştirilen büyük gözlemsel taramalar (ör. APOGEE, GALAH, Gaia-ESO, RAVE) bu bölgedeki yıldız popülasyonlarının aslında karmaşık ve çok bileşenli bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymuştur (Minchev vd. 2013; Hayden vd. 2015; Anders vd. 2017). Güneş'in komşuluğu olarak adlandırılan bu bölge, yalnızca yıldız yoğunluğu bakımından değil, aynı zamanda farklı galaktik oluşum senaryolarını test etmek için gerekli olan yaş-metal bolluğu dağılımları açısından da benzersizdir. Zira bu bölge, Galaktik diskin iç ve dış bölgeleriyle etkileşim hâlinde olduğu düşünülen göç etmiş yıldızları, yerel olarak oluşmuş anakol yıldızlarını ve hatta bazı erken dönem kalın disk üyelerini içerecek biçimde heterojen bir yıldız topluluğu barındırmaktadır (Edvardsson vd. 1993; Bensby vd. 2014; Bergemann vd. 2014).

Bu komşuluk, aynı zamanda kimyasal çeşitlilik açısından da dikkat çekicidir. Yakın çevredeki yıldızlarda gözlemlenen geniş $[\alpha/\text{Fe}]$ dağılımları, Galaktik diskin iki bileşenli (ince ve kalın disk) yapısını destekleyen gözlemsel kanıtlardan biri olarak kabul edilmektedir (Fuhrmann 1998; Reddy vd. 2006; Adibekyan vd. 2012). Güneş ile

benzer metal içeriğine sahip yıldızların önemli bir bölümü, tipik olarak farklı α -zenginlik düzeyleri sergileyerek ortak bir kimyasal evrim geçmişinden sapmalar gösterebilmektedir. Bu durum, Güneş'in tipik (in-situ) bir yerel yıldız mı yoksa göç yolu ile şu anki mevcut konumuna ulaşmış ve kimyasal açıdan aykırı bir nesne mi olduğu sorusunu gündeme getirmiştir (Wylie-de Boer vd. 2010; Nissen 2015; Zwart 2009). Benzer biçimde, Güneş'in bulunduğu Galaktik yarıçap civarında gözlemlenen yaş-metal bolluğu dağılımının yüksek saçılım göstermesi (Casagrande vd. 2011; Anders vd. 2017), farklı galaktik bileşenler arasında gerçekleşmesi muhtemel dinamik etkileşmeler nedeni ile oluşabilecek yıldız göçü (Çınar vd. 2025), farklı doğum bölgeleri ve yerel yeniden karışımların etkilerini düşündürmektedir.

Güneş'in 1–2 kpc çevresi, dolayısıyla hem Güneş'in kökenine ışık tutmak hem de Galaktik kimyasal evrim modellerini test etmek için kritik öneme sahiptir. Bu kapsamda, Güneş'e benzer yıldızların detaylı kimyasal, kinematik ve yörünge dinamik analizleri, hem Güneş'in doğum ortamının izini sürmek hem de yerel yıldız popülasyonlarının galaktik evrimdeki rollerini anlamak açısından temel bir veri kaynağı oluşturmaktadır. Tez kapsamında HD 76151 ve HD 115617 yıldızları için gerçekleştirilen analizleri kapsayan bu tez çalışması, bu bağlamda Güneş ile karşılaştırmalı analiz için oldukça uygun aday yıldızlar üzerinden Güneş komşuluğundaki kimyasal çeşitliliğin çözümlenmesine ve anlaşılmasına yönelik olarak literatüre tayfsal, kinematik ve yörünge dinamik analizleri kapsayan bütünsel bir analiz metodolojisi (Şahin ve Bilir 2020; Marışmak vd. 2024; Şentürk vd. 2024; Çınar vd. 2025; Yolalan vd. 2025) ve reçete sunuyor olması nedeni ile özgündür ve literatüre önemli bir katkı sunacaktır.

1.3. Güneş'in İzini Sürmek: Güneş ve Yansımaları

Güneş'in doğum yeri, günümüz astrofiziksel sorunlardan biridir. Mevcut teorik ve gözlemsel bulgular, Güneş'in izole biçimde değil, aksine geniş bir yıldız doğumevinde –muhtemelen bir açık kümede– oluştuğunu ileri sürmektedir. Burbidge vd. (1957) ile Lada ve Lada (2003) gibi erken dönem çalışmalardan bu yana, yıldızların çoğunun kümeler dahilinde oluştukları ve bu kümelerin zamanla çözülerek üye yıldızların galaktik düzleme dağılmış olduğu fikri genel kabul görmüştür. Bu bağlamda, Güneş'in de benzer şekilde bir ata kümenin parçası olduğu ve bu kümenin zaman içinde dinamik

etkilerle çözülmüş olabileceği öngörülmektedir. Zwart (2009), bu hipotezi test etmek için N-body simülasyonları ve kimyasal dinamik modeller kullanarak, Güneş için bahsi geçen ata kümesinin yaklaşık 10^4 üyeye sahip, kütle bakımından zengin ve görece yoğun bir ortam olduğunu göstermiştir. Bu senaryoda, yıldızlar arası yakın karşılaşmalar ve Galaktik gelgit etkileri nedeniyle küme içindeki kümelenme zamanla çözülmüş ve üyeler farklı yörüngelere savrulmuştur. Zwart'a göre, Güneş'in kardeşleri bugün galaktik diskin çeşitli bölgelerine dağılmış durumdadır ve kimyasal etiketleme (chemical tagging) yöntemleriyle tanımlanabilir. Bu noktada, Güneş'e benzer fiziksel özellikler taşıyan yıldızların tanımlanması, bu kardeşleri tespit etmenin anahtarıdır. Literatürde Güneş'e benzer yıldızlar genel olarak üç kategoride sınıflandırılır: Güneş İkizi, Güneş Analogu, ve Güneş Benzeri. Bu ayrımlar, fiziksel parametrelerdeki (model parametreleri, kütle ve yarıçap) benzerlik derecesine göre belirlenir ve Güneş'in evrimsel konumunun ve kimyasal imzasının izini sürmek açısından önemlidir.

Bu ayrışım, yalnızca sınıflandırma amacı ile değil, aynı zamanda Güneş'in evrimsel durumunu değerlendirmek ve potansiyel kardeşlerini ayırt etmek için de kullanılabilir. Liu vd. (2014), Güneş ikizlerinin kimyasal izlerinin saptanmasının Güneş'in doğduğu bölgenin metalisite profili, yaş ve dinamik yapılarına dair önemli bilgiler sağlayabileceğini göstermiştir. Meléndez (2020), özellikle α -element bollukları ve s-proses elementlerindeki değişimlerin, yıldızların doğum ortamlarına dair güçlü kimyasal parmak izleri sunduğunu vurgulamıştır. İlgili ayrışımaya dair literatürdeki görüşler, bir sonraki alt başlık altında detaylandırılmıştır.

1.3.1. "Solar Twin", "Solar Analog" ve "Solar Like" sınıflandırmaları

Güneş benzeri yıldızların sınıflandırılması, hem galaktik kimyasal evrim çalışmalarında hem de Güneş'in doğum ortamını anlama çabalarında önemli bir rol oynar. Literatürde "Solar Twin", "Solar Analog" ve "Solar-like" olarak ayrıştırılan kategoriler, Güneş'e benzer yıldızların farklı düzeylerdeki benzerliklerini tanımlamak amacıyla geliştirilmiştir.

- **"Solar Twin"** kavramı, ilk olarak Meléndez vd. (2009) ve Ramírez vd. (2009) tarafından detaylı şekilde tanımlanmış ve Güneş'in etkin sıcaklığı ($T_{eff} \approx 5777$ K), yüzey yerçekimi ($\log g \approx 4.44$) ve metalisitesi ($[Fe/H] \approx 0.00$) ile neredeyse birebir eşleşen yıldızları kapsamıştır. Bu tanım, spektroskopik parametrelerde çok

dar tolerans aralıkları benimseyerek (örneğin $|T_{eff} - T_{\odot}| < 100$ K) yalnızca birkaç yıldızın bu kategoriye dahil edilebilmesine imkan tanır. Bu bağlamda, Güneş ikizleri kimyasal bolluk örüntüleri bakımından da Güneş ile son derece uyumludur ve bu yıldızlar, Güneş'in olduğu çevrenin astrofiziksel koşullarını anlamak adına eşsiz gözlemsel hedeflerdir (Liu vd. 2014; Ramírez vd. 2014).

- **"Solar Analog"** tanımı ise, Güneş'e yakın fakat birebir benzerlik göstermeyen yıldızları kapsar. Bu tanımda toleranslar daha geniştir, Datson vd. (2015) çalışmasına göre: 5600–5950 K arası sıcaklık, 4.2–4.6 cgs arası yüzey yerçekimi, ve $0.2 < [Fe/H] < +0.2$ dex aralığındaki parametrelerin bu kategoriye dahil edilen yıldızlar için uygundur. Güneş benzeri yıldızların çok sayıda olmasına rağmen, detaylı spektroskopik analizler sonucu ancak küçük bir kısmının gerçek anlamda solar analog olabileceği anlaşılmıştır.
- Daha geniş perspektiften bakıldığında, **"Solar-like"** yıldızlar daha da genel bir sınıflamayı temsil eder. Bu grup, 5000–6300 K sıcaklık aralığındaki F–G tipi yıldızları içerir ve genellikle galaktik ölçekli istatistiksel analizler, örneğin kimyasal bolluk dağılımları, yaş-metalisite ilişkileri gibi büyük örneklemelerle yapılan çalışmalarda tercih edilir (do Nascimento vd. 2014; Schirbel vd. 2015).

Bu sınıflandırmaların teorik ve gözlemsel açıdan önemi büyüktür. Özellikle kimyasal etiketleme (chemical tagging) yönteminde, Solar Twin'ler Güneş'in kardeşlerini bulmak için başlıca hedef kaynaklardır (Zwart 2009). Güneş'in muhtemelen açık bir yıldız kümesinde doğduğu ve zamanla bu kümenin çözülerek yıldızların Galaktik diske yayıldığı fikri (Zwart 2009) üzerine kurulu bu yaklaşım, yüksek çözünürlüklü spektroskopik verilere dayanacak tayfsal analizler ile desteklenebilir hale gelmiştir.

Bu tez kapsamında incelenen HD 76151 ve HD 115617 yıldızları, literatürde "Güneş Analogu" olarak tanımlanmış, Güneş'e yakın fiziksel özellikler taşıyan, yaşça benzer ve α -element desenleri bakımından karşılaştırmalı analiz yapılabilir yıldızlardır. Spektroskopik yöntemin sağladığı yüksek çözünürlük, bu tür tanımlamaları ve ayrımları hassas bolluk ölçümleri ile desteklemeyi mümkün kılmaktadır (Heiter vd. 2015; Jofré vd. 2015). Bu yıldızlar üzerinde yapılan detaylı tayfsal analizler, hem optik hem de NIR bölgede gerçekleştirilmiş ve çeşitli spektroskopik teknikler (EW ölçümleri,

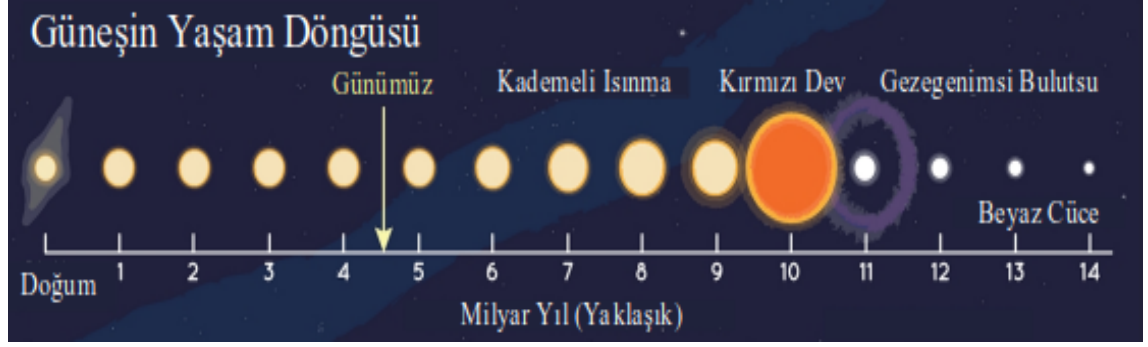
LDR yöntemi, NLTE düzeltmeleri) ile yıldızların fiziksel doğasına dair derinlemesine veriler elde edilmiştir. Bu veriler sayesinde, yakın bir zamanda çok sayıda Güneş benzeri yıldızın kimyasal ve kinematik yapısını çözümlemeye imkân verecek şekilde planlanan bir TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında literatüre kazandırılmak üzere genel bir metodolojinin de geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Sonuç olarak, bu sınıflandırmalar yalnızca semantik bir ayırım sunmamakta, aynı zamanda gözlemsel astrofizik ve galaktik kimya alanlarında kullanılacak farklı analitik yaklaşımların sınırlarını da çizmektedir. Bu tez çalışması, bu kavramlar çerçevesinde inşa edilmiş olması açısından literatürdeki bu ayrımların uygulamalı bir örneğini de sunmaktadır.

Bu çalışmada incelenen yıldızların Güneş'e olan benzerlikleri, yalnızca kimyasal bileşimleriyle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda evrimsel süreçler açısından da değerlendirilmiştir. Bu nedenle, Güneş'in evrimi ve onunla benzer özellikler taşıyan anakol yıldızların yapısal ve termonükleer gelişimi, çalışmanın ilerleyen analizlerine sağlam bir temel oluşturmak amacıyla detaylı olarak ele alınmıştır. Özellikle Güneş'in anakol evrimi hem kimyasal izlerin zaman içindeki dönüşümünü anlamak hem de galaktik yapı içerisinde izledikleri yolu yorumlamak açısından kritik öneme sahiptir. Devam eden bölümde, Güneş ve Güneş benzeri anakol yıldızların iç yapıları, enerji üretim mekanizmaları ve yaşam evreleri literatür desteğiyle kapsamlı bir şekilde tartışılarak, izleyen bölümlerdeki tayfsal analiz ve evrimsel bağlamdaki yorumlara kuramsal bir çerçeve sunması hedeflenmiştir.

1.4. Güneş ve Güneş Benzeri Anakol Yıldızlarının Evrimi

Güneş benzeri bir yıldızın evrimi, protogezegenimsi bir disk ortamında çekirdek çökmesi ile başlar ve beyaz cüce yıldız evresi ile sonlanır. Bu süreç boyunca yıldız, fiziksel ve iç yapı koşullarına göre farklı evrimsel yollar izler. Güneş kütleli yıldızların erken dönemde maruz kalmış oldukları evrimsel süreçler, Hayashi ve Henyey izleri olarak adlandırılan iki temel yol üzerinde tanımlanır (Hayashi 1961; Henyey vd. 1955). Güneş'in oluşumu, büyük ölçüde konvektif olan Hayashi izinde gerçekleşir. Burada yıldız, yaklaşık 10^6 yıl boyunca hızlı bir şekilde büzülürken yüzey sıcaklığı sabit kalır. Ardından, Henyey yolu boyunca yerçekimsel büzülmeye devam eden yıldız, enerji taşınımının büyük oranda



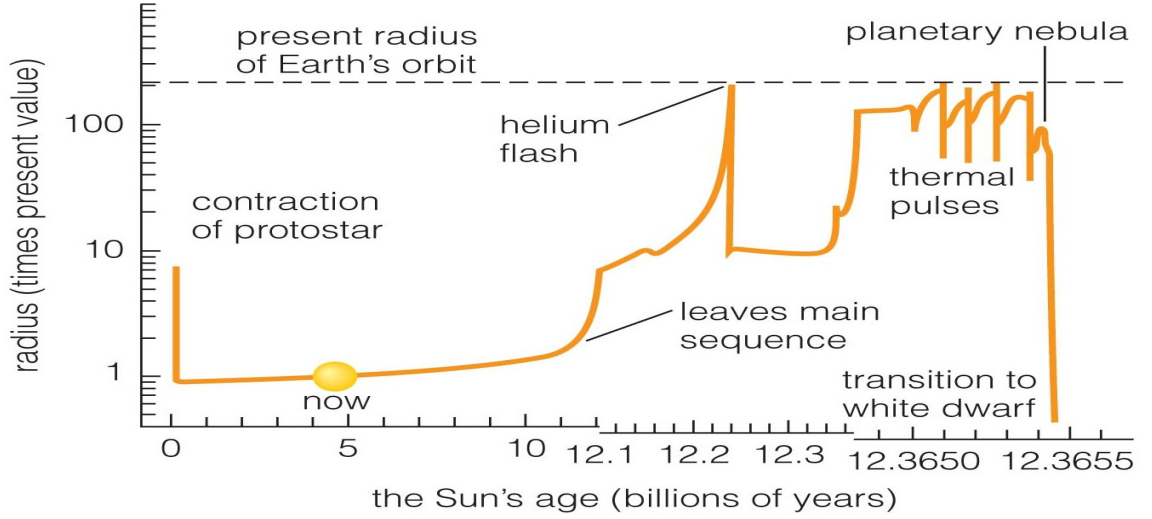
Şekil 1.8. Güneş'in protogezegensimsi bulutsudan beyaz cüceye uzanan temsili yaşam döngüsü.

ışınım ile gerçekleştiği bir yapıya evrilir.

Samanyolu'nun erken dönemlerinde oluşan veya günümüzde oluşumları devam eden, anakol yaşam süreleri göz önüne alındığında Gökada'nın yaşı ile kıyaslanabilecek kadar uzun ömürlü orta tayf türündeki (F–G tipi) yıldızlar, iç yapı bakımından geniş bir konvektif zarf tarafından çevrelenmiş radyatif çekirdeklere sahiptir ($5559K < T_{eff} < 7161K$; Eker vd. 2018). Bu yapısal özellik, çekirdekte sentezlenen ağır elementlerin dış atmosfer katmanlarına taşınmasını engeller. Dolayısıyla bu yıldızların atmosferlerinde gözlenen kimyasal bolluklar, büyük oranda oluşum ortamlarındaki kimyasal bileşimleri yansıtır. Bu nedenle F–G tipi anakol yıldızları, galaktik kimyasal evrimin izlenmesinde eşsiz zaman kapsülleri işlevi görür (Pagel ve Patchett 1975). Nitekim, bu çalışmada detaylı tayfsal analizleri gerçekleştirilen HD 76151 ve HD 115617 gibi Güneş benzeri yıldızlar da, Samanyolu'nun kimyasal geçmişine ışık tutan temsilciler olarak değerlendirilmiştir.

Bir yıldız için anakol evrim aşaması, yaklaşık 10 milyar yıllık bir zaman diliminde (Schaller vd. 1992; Bahcall ve Pinsonneault 1995), termonükleer reaksiyonlarla hidrojenin helyuma dönüştürüldüğü evrim aşaması olarak tanımlanır. Bu sürede yıldız, çekirdeğinde sürdürülebilir hidrostatik dengeyi sağlamak için proton-proton (pp) zinciriyle enerji üretimini devam ettirir. Bu aşamada, çekirdek ısıtım ile dış katmanlar ise konveksiyon ile enerji taşır (Christensen-Dalsgaard vd. 1996). Güneş için farklı enerji taşınım mekanizmaları yolu ile gerçekleşen bu bölgesel ayrışım, helioseismoloji yolu ile doğrulanmıştır (Basu ve Antia 2008).

Anakol evrimi sırasında, çekirdekte hidrojenin tükenmeye başlaması ile yıldızın



Şekil 1.9. Güneş yarıçapının zaman döngüsü boyunca geçireceği değişimin temsili görseli.

merkezi büzülürken, çekirdeğin çevresindeki hidrojen kabuk ısınır ve yanmaya başlar. Bu evrede yıldız, Hertzsprung-Russell (H-R) diyagramı üzerinde sabit etkin sıcaklığa karşılık artan ışıınım gücü ile altdev koluna (subgiant branch) doğru ilerler. Ardından, yıldız kabuğunu genişletip etkin sıcaklığını düşürerek kırmızı dev koluna (RGB) geçer (Hayden vd. 2015). Bu süreçte kabukta gerçekleşen hidrojen yanması, çekirdekte helyum birikimini artırır ve çekirdekteki helyum miktarı kritik düzeye ulaştığında üçlü α reaksiyonu ile helyum yanması başlar. Bu nükleer süreçler sonucunda karbon ve oksijen üretilir (Kippenhahn vd. 2012).

Düşük kütleli yıldızlarda ($0.5 - 3 M_{\odot}$), merkezdeki helyum yanması “helium flash¹” adı verilen ani bir süreçle başlar. Bu olayla birlikte çekirdek genişler, H-yanan katman zayıflar, yıldızın toplam ışıınım gücü düşer ve yıldız büzülmeye başlar (bkz. Şekil 1.9). Ancak $8 M_{\odot}$ üzerindeki yıldızlarda helyum yanması daha dengeli gerçekleşir ve çekirdek genişlemesi daha yavaş olur. Kırmızı dev kolunda bulunan G, K ve M tipi yıldızlar bu sürecin farklı evrelerini yansıtır.

Bu evrimsel tablo, yalnızca Güneş’in kaderini anlamak açısından değil, aynı zamanda Güneş benzeri yıldızların kimyasal içeriklerinin korunma biçimleri, çekirdekten yüzeye madde taşınımı mekanizmaları ve galaktik evrime katkı düzeylerinin modellenebilmesi bakımından temel bir referans sağlar. Ayrıca, bu süreçlerin detaylı tayfsal gözlemlerle

¹Helium, hızlı bir şekilde yanma özelliği gösterir bir yapıya sahiptir.

izlenebilmesi, spektroskopinin astrofizikteki kritik rolünü de gözler önüne serer.

Güneş ve benzeri anakol yıldızlarının içsel yapılarına ve evrimsel süreçlerine dair edinilen bilgiler, bu yıldızların dış atmosferlerinde gözlemlenen kimyasal izlerle doğrudan ilişkilidir. Özellikle, atmosfer bileşenlerinin tayfsal analiz yoluyla hassas bir şekilde belirlenmesi, yıldızların oluşum koşullarını, yaşlarını ve galaktik konumlarını anlamak adına kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, kullanılan dalga boyu aralığı, gözlemlenen elementlerin doğası ve tayfsal özellikleri üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Optik bölgede yapılan geleneksel analizlerin ötesine geçilerek, NIR dalga boyu penceresinin kullanılması, hem gözlemsel hem de kimyasal açıdan çeşitli avantajlar sunmaktadır. Bu nedenlerle, takip eden bölümde NIR penceresinin sunduğu gözlemsel ve kimyasal katkılar detaylı şekilde ele alınacaktır.

1.5. Yakın Kırmızıöte Penceresi: Kimyasal İzler ve Gözlemsel Avantajlar

NIR ($\approx 0.8 - 2.5 \mu\text{m}$) bölge, son yıllarda yıldız atmosferlerinin tayfsal analizinde giderek daha fazla tercih edilen bir gözlem penceresi haline gelmiştir. Bu bölgenin sunduğu başlıca avantajlardan biri, elektromanyetik tayfin optik bölgesine kıyasla yıldızlararası ortamdan daha az etkilenmesidir. Toz absorpsiyonu ve saçılma etkisi, özellikle kısa dalga boylarında baskın olduğundan, optik gözlemler yoğun toz içeren bölgelerde ciddi sınırlamalar ile karşı karşıya kalmaktadır (Draine 2003). Buna karşın, NIR dalga boyları yıldızlararası toz tarafından daha az saçıldığından, özellikle galaksi diskinin iç bölgeleri ya da galaktik merkez gibi yüksek derecede sönümleme etkisinin gözlemlendiği bölgelerinde daha derin ve güvenilir gözlemler yapılmasına olanak tanır (Indebetouw vd. 2005; Nishiyama vd. 2006).

NIR bölgenin bir diğer önemli avantajı, bazı ağır elementlerin (örneğin Al, Mn, K, Si gibi) ilgili bölgede gözlemlenebilen güçlü geçiş çizgilerine sahip olmasıdır (Smith vd. 2013; Souto vd. 2016). Bu geçişler, optik bölgede zayıf ya da tellürik etkiler ile örtüşen çizgiler yerine, daha izole ve analiz edilebilir biçimde tespit ve teşhis edilebildiklerinden kimyasal bolluk analizinde kritik bir rol oynarlar. Özellikle soğuk yıldız atmosferlerinde baskın moleküler katkılar (CO, OH, CN) da yine NIR bölgesinde oldukça belirgindir ve bu bölge yıldızların moleküler içeriklerinin tespiti açısından eşsiz bilgiler sunar (Ryde vd. 2010).

Bununla birlikte, NIR gözlemleri sağlamış olduğu avantajlar kadar bazı gözlemsel zorlukları da gündeme getirir. Dünya atmosferi, özellikle su buharı ve CO₂ gibi moleküller aracılığıyla NIR bölgesinde güçlü tellürik soğurma çizgileri oluşturur. Bu tellürik çizgilerin şiddeti, atmosferin anlık bileşimi, gözlem yapılan hava kütlesi (airmass) ve irtifa gibi değişkenlere duyarlıdır (Seifahrt vd. 2010). Bu durum, özellikle 1.4 μm ve 1.9 μm civarındaki tellürik bantlarda ciddi sinyal kayıplarına yol açabilir. Bu bağlamda, gözlemsel strateji ve tellürik düzeltme algoritmalarının dikkatle seçilmesi gerekir. Yüksek irtifalı, kuru iklimli gözlemevlerinde (örneğin McDonald, Mauna Kea, Paranal) yapılan NIR gözlemler, bu absorpsiyonlardan daha az etkilenecek daha yüksek sinyal/gürültü oranı sağlar.

Ayrıca, gece gökyüzünün kendi yaydığı kırmızıöte salım (gece arz ışıması) NIR bölgesinde artış gösterir. Bu doğal arka plan salımı, özellikle H ve K bantlarında gözlemler sırasında CCD cihazlarının doygunluğa ulaşmasına veya düşük kontrastlı tayf çizgilerin baskılanmasına neden olabilir (Maihara vd. 1993). Bu sebeple, NIR gözlemler genellikle yüksek çözünürlüklü, kısa poz süreli ve çoklu pozlamalarla gerçekleştirilir. Bu yöntemler, hem arka plan etkisini minimize eder hem de tellürik düzeltmelerde kullanılacak standart yıldızların uygun şekilde seçilmesini mümkün kılar.

Tüm bu nedenlerle, NIR bölgesi, hem galaksinin yüksek toz yoğunluklu bölgelerine ulaşmak hem de optik bölgenin sınırlarını aşan yeni kimyasal izler elde etmek açısından önemli bir gözlemsel pencere sunmaktadır. Bu tez kapsamında IGRINS spektrografi ile elde edilen NIR veriler, hem Güneş hem de Güneş benzeri yıldızlar için kırmızıöte bölgedeki çizgi davranışlarını sistematik olarak inceleme ve literatürdeki optik odaklı analizlerle karşılaştırma fırsatı sağlamaktadır. Bu karşılaştırmalar, özellikle çok bantlı (multi-wavelength) spektroskopik karakterizasyonun önemini vurgulamakta ve gelecekteki çok daha fazla sayıda yıldızı içerir örneklem analizleri için bir zemin hazırlamaktadır.

1.5.1. Ulusal misyon ve Türkiye ulusal gözlemevleri vurgusu

NIR bölgenin kimyasal izleri ortaya çıkarma konusundaki bu potansiyeli, son yıllarda yalnızca küresel ölçekte değil, ulusal düzeyde de dikkat çeken bir araştırma alanı haline gelmiştir. Özellikle Türkiye'nin elektromanyetik tayfin kırmızıöte bölgesindeki

bilimsel kapasitesini artırma vizyonu doğrultusunda inşa edilen ve Türkiye Ulusal Gözlemleri çatısı altında faaliyet gösteren Doğu Anadolu Gözlemevi (DAG), bu doğrultuda stratejik bir role sahiptir. Yüksek irtifası, kuru atmosferik koşulları ve gelişmiş adaptif optik sistemleri ile DAG, özellikle NIR dalga boylarında yüksek hassasiyetli gözlemler gerçekleştirmeye olanak tanıyacak bir potansiyele sahiptir. Bu kapsamda, bu tez çalışmasında kullanılan kırmızıöte referans çizgi listeleri ve analiz metodolojileri, yalnızca mevcut veri setlerinin değerlendirilmesini değil, aynı zamanda DAG teleskobunun yakın gelecekte sağlayacağı yüksek kaliteli tayfsal NIR verilerinin analizleri için de doğrudan bir kaynak niteliğindedir. Böylece bu tez, aynı zamanda ulusal bazda ülkemizin kırmızıöte tayfsal gözlem kapasitesinin gelişimine imkan verebilecek bir nitelikte misyonel bir katkı taşımaktadır.

Bu tez çalışması, Güneş benzeri yıldızların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin 121F165 No'lu TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında geliştirilen bütünleşik analiz metodolojisi kullanılarak incelenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Tez çalışması, 2025 Şubat ayında başarılı bir şekilde sonuçlandırılan bu proje kapsamında optik dalgaboyu aralığında gerçekleştirilen analizlerin yakın zamanda verilmesi hedeflenen yeni bir TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında daha fazla sayıda Güneş benzeri örneklem yıldızları içerecek şekilde kırmızıöte bölgede planlanan tayfsal analizler için de bir ön çalışma olma özelliğine sahiptir.

Takip eden bölümde, HD 76151 ve HD 115617 yıldızları özelinde gerçekleştirilen detaylı literatür taraması ile bu yıldızların önemi ve seçilme gerekçeleri sunulmuştur.



2. TEZ KAPSAMINDA LİTERATÜR İNCELEMESİ

2.1. HD 76151

HD 76151, Su Yılanı (Hyades) takım yıldızında, G2V tayf türüne (Keenan ve McNeil 1989; Gray vd. 2001; Sharma vd. 2020) sahip, yaklaşık 16.85 pc uzaklıkta (Gaia İşbirliği 2018, 2020) yer alan ve Güneş'e yakın fiziksel ve kimyasal parametreler sergileyen bir güneş analog (Datson vd. 2015; Martos vd. 2023; Şentürk vd. 2024) yıldızdır. Literatürde farklı çalışmalarda HD 76151'in dönme hızı ($v \sin i$), 1.06–1.2 km/s aralığında raporlanmıştır. Silva vd. (2020) çalışmasında bu değer 1.06 km/s, Soto ve Jenkins (2018) tarafından 1.16 km/s, Marsden vd. (2014) tarafından ise 1.2 km/s olarak verilmiştir. Bu düşük ($v \sin i$) değerleri, yıldızın tayfsal çizgilerinde minimum dönme genişlemesi göstermesine olanak tanımakta ve yüksek çözünürlüklü spektroskopik analizlerde çizgi ölçüm ve teşhis güvenilirliğini artırmaktadır. Ramírez vd. (2009), yıldızın hem [Fe/H] değeri hem de sıcaklık ve yüzey çekim ivmesi açısından Güneş'e oldukça yakın olduğunu belirtmiş; özellikle [X/Fe] oranlarının Güneş ile diferansiyel bolluk analizlerinde güvenilir sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Yıldız, hem optik hem de yakın-kırmızıöte dalga boylarında erişilebilir yüksek çözünürlüklü tayf verileri sayesinde çok rejimli karşılaştırmalı spektroskopi çalışmalara olanak tanımaktadır.

HD 76151'in galaktik yapısal bağlamı da literatürde iyi tanımlanmıştır. Bensby vd.(2014) çalışmasında, yıldızın kinematik verilerini ve kimyasal bolluk oranlarını kullanarak Galaktik İnce Disk bileşeni içerisinde konumlandığını belirtmiştir. Casagrande vd. (2011) ve Holmberg vd. (2009) çalışmalarında, yıldızın yaşını 3.4–5.0 Gyr aralığında rapor etmiştir. Yıldızın yaş dağılımı 0.3-5 Gyr aralığında bir değişim sergilemektedir (Bkz. EK Tablo EK.1). Kütle (M) ve yarıçap (R) gibi parametrelerinin literatürdeki dağılımı EK Tablo EK.1'da sunulmuş olup, tablodan da görülebileceği gibi Güneş ile yapısal açıdan hata payı içerisinde bire bir benzerlik gösterdiği görülmüştür. Bu yapısal ve kimyasal özellikleri sayesinde HD 76151, Güneş'in yakın evrimsel benzerlerini (güneş analoglarını) temsil etme açısından büyük bir öneme sahiptir.

Yıldız için farklı dalgaboyu bölgelerini içerir şekilde gözlemsel verilerin çeşitliliği, tayfsal analiz kapsamını belirgin bir şekilde güçlendirmiştir. ESO Science Portal üzerinde HD 76151'e ait toplam 114 farklı tayf verisi kayıtlıdır. Bu verilerin dağılımı

incelendiğinde; yaklaşık 4 tanesi 350 nm'nin altında kalan morötesi (UV) bölgede, 5 tanesi 1–5 μm aralığında yer alan NIR bölgede, geri kalan 105 tanesi ise optik bölgededir. Bu tayflar, çok sayıda yüksek çözünürlüklü tayfçekerle elde edilmiştir: 69'u HARPS, 17'si FEROS, 13'ü ESPRESSO, 11'i UVES, 3'ü XSHOOTER ve 1'i NIRPS verisidir. Bu çeşitlilik, yıldızın hem zamansal hem de dalga boyu kapsamı bakımından çok yönlü analizlere uygun bir hedef olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada, optik bölge tayf analizi yalnızca HARPS verisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunun başlıca nedeni, HD 76151 için alınmış ESPRESSO verilerinin çalışmanın yürütüldüğü dönemde genel erişime açık olmamasıdır. Geriye kalan veri setlerinin ise ya daha düşük tayfsal çözünürlüğe sahip (örneğin FEROS; $R \approx 48000$) olmaları ya da sınırlı dalga boyu kapsamı nedeniyle detaylı çizgi analizine imkan vermeyecekleri değerlendirilmiştir. Yıldızın HARPS tayflarının ise $R \approx 115000$ çözünürlüğü ve yüksek sinyal-gürültü oranları ile optik bölgede izole metal çizgileri için kaynaşık yapıda olanların tespitini mümkün kılacak şekilde hassas eşdeğer genişlik (EW) ölçümlerine imkan verecekleri değerlendirilmiştir. Bu yönüyle HD 76151, optik ve NIR bölgede çizgi-seçim güvenilirliği açısından en uygun hedeflerden biri olarak değerlendirilmiştir. Ek olarak, HD 76151, IGRINS Tayf Kütüphanesi (Park vd. 2018) içerisinde yer alan az sayıda Güneş benzeri yıldızdan biridir. Bu katalogta sunulan tellürik etkilerden arındırılmış kırmızıöte tayflar (H ve K bantları, $R \approx 45000$) sayesinde, yıldızın kırmızıöte çizgilerinin de yüksek çözünürlükte incelenebilmesi mümkün olmaktadır. IGRINS verilerinin varlığı, HD 76151 için hem optik hem de kırmızıöte bölgede gerçekleştirilecek tayfsal analiz sonuçlarının karşılaştırılmasına imkan tanımıştır.

2.2. HD 115617

HD 115617 (61 Vir), Başak Takımyıldızı'nda, G7V tayf türü (Gray vd. 2006; Park vd. 2018), yaklaşık 8.5 pc uzaklıkta (Gaia DR2, 2018; Gaia EDR3, 2020) yer alan, Güneş'e benzer fiziksel ve kimyasal özellikler gösteren bir ana kol yıldızdır. Ekvatora yakın göksel konumu ($RA \approx 13:18:24.31$, $Dec \approx -18:18:40.30$; Gaia İşbirliği 2020) sayesinde hem kuzey (Eggen 1955; Oja 1984, 1996; Luck ve Heiter 2005; Binks vd. 2015) hem de güney yarımküredeki (Soderblom vd. 1998 ; Santos vd. 2000; Jenkins vd. 2006; Murphy vd. 2015; Luck 2018; Wittenmyer vd. 2025) gözlemvlerinden gözlenebilir bir yıldızdır.

Nitekim HARPS, FEROS, KECK, HIRES, IGRINS ve ESPRESSO gibi farklı coğrafi konumlarda yer alan tayfçekerler tarafından gözlenmiş ve literatürde pek çok optik bölge temelli çalışmada yer almıştır.

HD 115617, özellikle gezegen barındıran Güneş benzeri yıldızlar arasında öncül bir konuma sahiptir. Vogt vd. (2010), bu yıldız etrafında üç adet (bir süper-Dünya ve iki Neptün tipi) gezegenin varlığını öne sürmüştür. Yıldızın bu çok gezegenli karakteri, yıldızın aynı zamanda gezegen oluşumu kuramları çerçevesinde değerlendirilmesine de imkan tanımıştır. Örneğin Delgado Mena vd. (2010) ve Adibekyan vd. (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda yıldızın kimyasal bileşimi ile gezegen oluşum eğilimleri arasındaki ilişkiyi araştırmak üzere çalışılan örneklem yıldız grupları içerisinde değerlendirilmiştir. Yıldız için $[Fe/H]$ değeri farklı çalışmalarda -0.12 ile 0.11 dex aralığında raporlanmış, $[\alpha/Fe]$ ise yaklaşık sıfır civarında bir değişim göstermiştir (bkz. EK Tablo EK.2). Neticede yıldız element bolluğu açısından Güneş'e yakın, ancak gezegen barındıran bir sistem olarak dikkat çekici farklılık sergilemektedir.

HD 115617, Güneş'e benzerliği nedeniyle "güneş analoğu" veya "güneş benzeri" yıldız olarak sınıflandırılmıştır. Ramírez vd. (2009) çalışmasında yıldızı, bir solar analog olarak tanımlarken, Datson vd. (2015), renk indeksleri, düşük bir kromosferik aktivite ve belirlenen atmosfer parametreleri temelinde "güneş benzeri" karakteristiği taşıdığını rapor etmiştir. Bu bağlamda yıldız, Güneş'in kimyasal ve yapısal evrimini modellemek için sıklıkla referans olarak tercih edilen yıldız grupları içerisinde listelenmiştir. Ek olarak, Ghezzi vd. (2010) ve Bensby vd. (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmalar, yıldızın yaşını 2–13.1 Gyr aralığında raporlayarak Güneş'ten daha yaşlı bir anakol yıldızı olduğunu belirtmişlerdir (bkz. EK Tablo EK.2). Bensby vd. (2014), yıldızın düşük dış merkezlikli yörüngesi ile ince disk bileşenine aidiyetini ortaya koymuştur.

Bu tezin temel hedeflerinden biri, Güneş benzeri yıldızların optik ve kırmızıöte bölgelerdeki tayfsal davranışlarını karşılaştırmalı olarak incelemektir. HD 115617'nin bu kapsamda tercih edilmesini sağlayan en özgün neden, sadece optik bölgede değil, aynı zamanda kırmızıöte bölgede de yüksek çözünürlüklü ve tellürik etkilerden arındırılmış tayflarının mevcut olmasıdır. Park vd. (2018) tarafından yayınlanan IGRINS Tayf Kütüphanesi, yıldızın H ve K bantlarında $R \approx 45.000$ çözünürlükte tayfları içermektedir. Bu veri seti, tellürik çizgilerden temizlenmiş oluşu sayesinde

özellikle kırmızıöte çizgi analizleri, multipler davranışları, NLTE etkileri ve atomik veri kalitesinin değerlendirilmesi için iyi koşullar sunmaktadır. İlave olarak çalışma kapsamında optik ve kırmızıöte tayfsal analizler yardımı ile incelenen kaynakların fiziki doğlarına yönelik varsa farklılıkların ortaya konması hedeflenmiştir. Nitekim, literatürde kırmızıöte bölgede detaylı tayfsal analiz sonuçlarının yer aldığı çalışmaların sayısı son derece azdır. Bu çalışmaların bir kısmında incelenen kaynaklara yönelik kırmızıöte bölgede gerçekleştirilen tayfsal analizler için optik bölge tayfsal analiz sonuçlarının (model atmosfer parametrelerinin) esas alındığı görülmektedir. Tez çalışmasının bu kapsamda değerlendirildiğinde, bu hususun değerlendirilmesi aşamasında orijinal sonuçlar sağlayacak olması bakımından özgün olduğu değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak HD 115617; geniş dalga boyu aralığını kapsayan tayfsal verilerinin varlığı ve erişilebilir olması, Güneş benzerliği, gezegen sistemine sahip olması, düşük aktivitesi ve literatürde iyi karakterize edilmiş yapısıyla, bu tez kapsamında hem optik hem kırmızıöte bölgede yapılacak bolluk analizleri için metodolojik bütünlük sağlayan ideal bir hedef olarak seçilmiştir.

Takip eden “Materyal ve Metot” bölümünde, gözlemsel verilerin kaynağı, tayfin ölçüme hazırlanması, çizgi ölçümleri, atomik veri kaynakları ve bolluk analiz yöntemleri sistematik ve detaylı bir biçimde ele alınmış; klasik spektroskopik analizler yanında, multipler ve NLTE düzeltmeleri, konveksiyonun etkileri ve LDR gibi yaklaşımlarla NIR bölgeye özgü analiz derinleştirilmiştir. İlave olarak, yıldızların yaşlarının MCMC (Markov Chain Monte Carlo) yöntemi ile belirlenmesine yönelik detaylar aktarılmış ve galaktik doğum bölgeleri ile yörünge parametrelerinin tayini için kullanılan kinematik ve yörünge dinamik analizlere ilişkin detaylar paylaşılmıştır. Bulgular ve Tartışma bölümünde, her bir yıldız için elde edilen tayfsal, yaş, kinematik ve yörünge dinamik sonuçlar bağımsız alt başlıklar halinde sunulmuş; sonuçlar incelenen yıldızlar için literatürde gerçekleştirilen çalışma sonuçları ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Ekler bölümünde ise, çizgi listelerinin oluşturulmasında başvuru kaynakçalara ve çizgilere dair istatistiki bilgiler ve nihai çizgi listesi (Tablo EK.4. – EK.9.) detaylı bir şekilde sunulmuştur.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Echelle Tayfin Doğası

Astrofiziksel nesnelerin fiziksel ve kimyasal yapılarını anlamada tayfsal gözlemler en önemli araçlardan biridir. Tayf, yıldızdan ya da herhangi bir astronomik cisimden gelen elektromanyetik ışınının dalga boylarına veya frekanslarına ayrılmış olduğu gözlemsel bir veri türüdür. İlgili tayfsal verilerin doğru bir şekilde analiz edilmesi sonucunda yıldızların etkin sıcaklığı, yüzey çekim ivmesi, metalisitesi ve mikrotürbülans gibi atmosfer parametreleri elde edilir. Özellikle yüksek çözünürlüklü tayfsal veriler, tayf çizgilerinin hassas bir şekilde analiz edilmesine imkan tanır ve bu durum atmosferik parametrelerin daha yüksek doğrulukla elde edilmesini sağlar.

Bu tez çalışması kapsamındaki yıldızlar için kullanılan tüm gözlemsel tayf verileri, Avrupa Güney Gözlemevi'ne (ESO) ait açık veri arşivinden (ESO Archive Science Portal) edinilmiştir. Hem optik hem de kırmızıöte (IR) spektral bölgelerde veri sağlayan üç farklı yüksek çözünürlüklü tayfçeker sistemi içerilmiştir: ESPRESSO, HARPS ve IGRINS.

Bu çalışmada kullanılan üç tayfçeker sisteminin tamamı yüksek çözünürlüklü echelle tayflar sağlamakta olup farklı optik mimariler ile optimize edilmiştir. Tayfsal gözlemlerde kullanılan echelle şebekeler, düşük çentik/çizgi yoğunluğuna (groove density) ve yüksek blaze açısına sahip kırınım şebekeleridir. Bu yapı, sistemin yüksek kırınım mertebelerinde çalışmasına olanak tanıyarak, geniş bir spektral aralıkta yüksek tayfsal çözünürlük elde edilmesini sağlar (Tull vd. 1995).

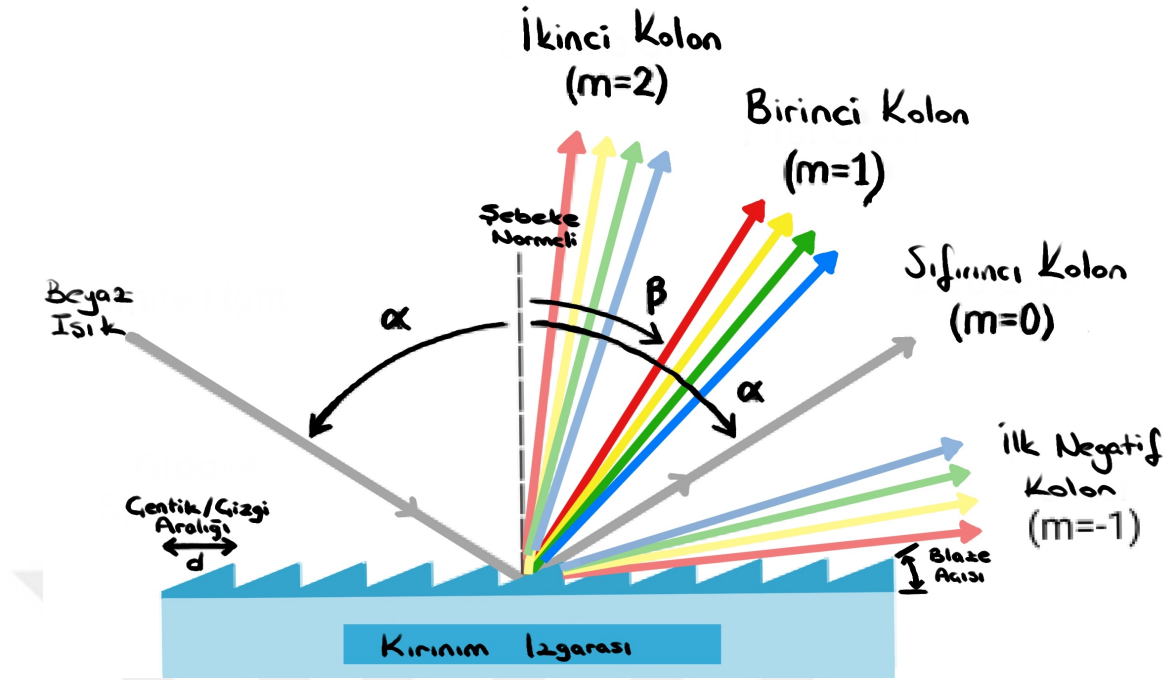
Bir echelle sisteminde tayfsal çözünürlük R , gözlenen dalga boyu (λ) ile ayırt edilebilen en küçük dalga boyu farkı ($\Delta\lambda$) arasındaki oranla tanımlanır:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{c}{V_R} \quad (3.1)$$

Echelle sistemler için çözünürlük, aynı zamanda sistemin çalıştığı kırınım mertebesi (m) ve aydınlatılan toplam çentik/çizgi sayısı (N) ile de doğrudan ilişkilidir:

$$R = mN \quad (3.2)$$

Bu ilişki, tayfçekerlerin çözünürlüğünü artırmak için yüksek kırınım mertebesi ve



Şekil 3.1. Echelle bir kırınım şebekesi için temsili gösterim. Şebeke normalini (yeşil kesikli çizgi) ile (blazed) yüzey normalini (facet normal) arasındaki ϕ blaze açısı da temsili olarak gösterilmiştir.

geniş ışık aydınlatmalı ızgara kullanımının önemini gösterir. Yüksek çözünürlüğün elde edilebilmesi için ızgaranın tasarımı özel bir blaze açısı (blaze angle; θ_B) ile optimize edilir. Blaze açısı, ızgara yüzeyindeki çentiklerin/çizgilerin eğim açısını belirleyerek ışığın belirli bir dalga boyunda maksimum verimle kırınımına uğramasını sağlar (Loewen ve Popov 1997).

Blaze açısına sahip sistemlerde özellikle Littrow konfigürasyonu olarak bilinen durumda, giriş ve çıkış ışını aynı yönde olduğunda maksimum enerji verimi elde edilir. Bu durumda grating denklemi şu şekilde yazılır:

$$m\lambda = 2d \sin \theta_B \quad (3.3)$$

Burada d , ızgara çentik/çizgi aralığını; λ , merkez dalga boyunu; θ_B , blaze açısını ve m , çalışılan kırınım mertebesini temsil etmektedir (Bkz. Şekil 3.1).

Denklem 3.3, blaze açısının yalnızca ışık verimliliğini değil aynı zamanda çözünürlük kapasitesini de doğrudan etkilediğini göstermektedir. Dolayısıyla, her yüksek çözünürlüklü tayfçeker sisteminde blaze açısı, optik tasarımın temel belirleyicisi olarak

kabul edilir.

Kullanılan tayfçeker sistemlerinden ESPRESSO ve HARPS, klasik echelle ızgaraları ve çapraz dağıtıcılar ile çalışan sabit ve yüksek kararlılığa sahip sistemlerdir. Blaze açıları sırasıyla $\approx 76^\circ$ ve $\approx 71.5^\circ$ olarak tasarlanmış ve optik bölgedeki soğurma çizgilerinin hassas ölçümünü sağlayacak şekilde optimize edilmiştir.

IGRINS ise immersiyon echelle teknolojisi kullanarak blaze etkisini daha kompakt bir geometri ile kırmızıöte bölgeye taşımaktadır. Silikon gibi yüksek kırılma indisli ortamlarda yer alan immersiyon ızgaraları, aynı blaze prensibiyle çalışmakta ancak dispersiyon yetisini daha küçük fiziksel boyutlarda sağlamaktadır (Yuk vd. 2010).

Bu sistemler aracılığıyla HD 76151 ve HD 115617 yıldızlarından elde edilen tayfsal veriler; çizgi ölçümleri, atmosfer parametrelerinin belirlenmesi ve bolluk analizleri için yüksek doğrulukta veri sağlamıştır. Blaze açısının doğru seçimi ve tayfsal çözünürlük ile olan ilişkisi, elde edilen tayfların kalitesini ve bu çalışmanın genel analiz güvenilirliğini doğrudan etkilemiştir.

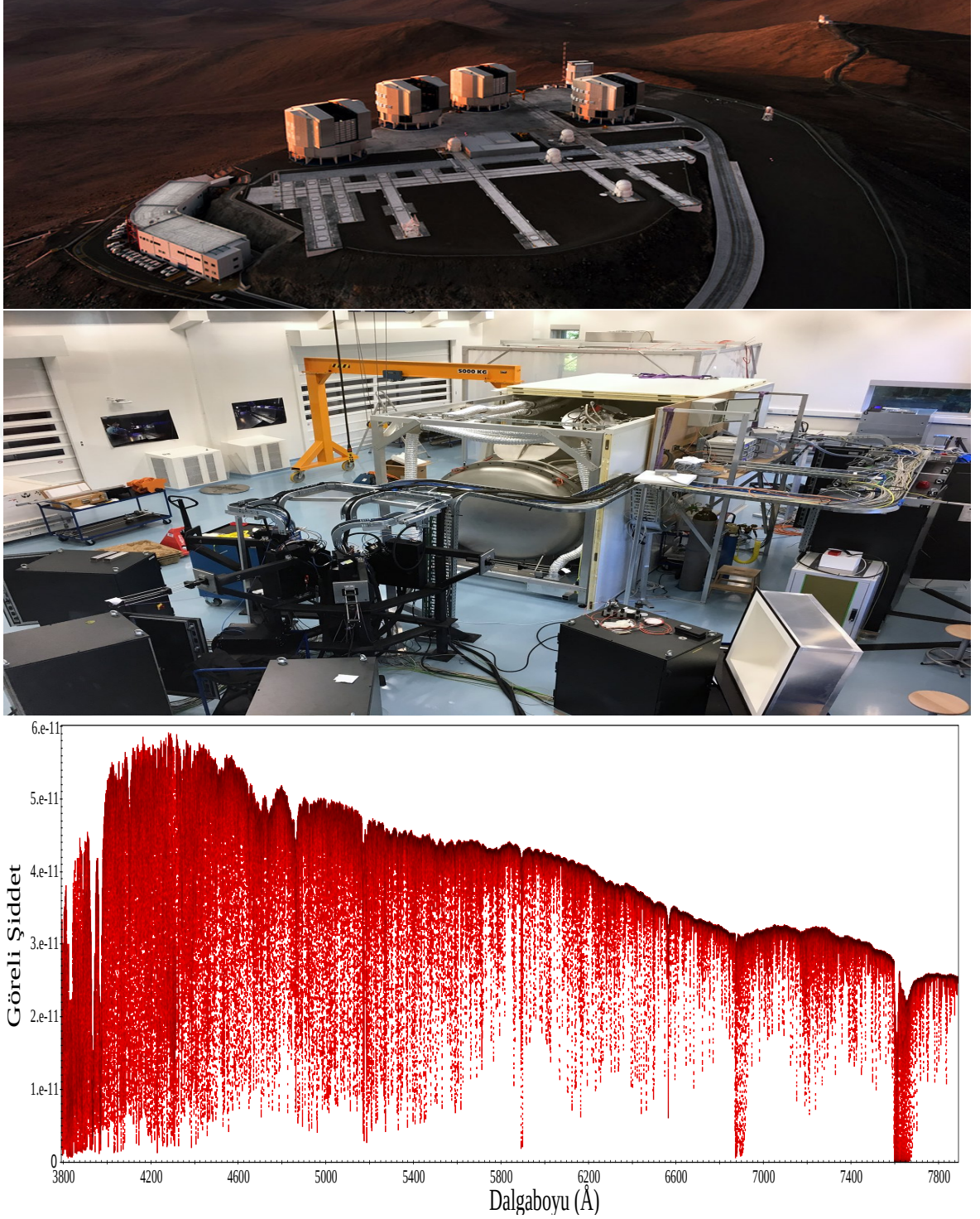
Tayfçeker sistemlerine ve her bir tayfın alındığı gözlem programının detaylarına takip eden ilgili alt başlıklarda yer verilmiştir.

3.2. Kullanılan Tayf Verilerinin İncelenmesi

3.2.1. ESPRESSO

ESPRESSO (Echelle SPectrograph for Rocky Exoplanets and Stable Spectroscopic Observations), Avrupa Güney Gözlemevi (ESO) tarafından hem Dünya benzeri ötegezegenlerin keşfi hem de yüksek hassasiyetli yıldız tayf analizleri için geliştirilen son nesil bir echelle tayfçeker sistemidir. İlk ışığını 27 Kasım 2017 tarihinde almış, bilimsel operasyonlara 2018 yılında başlamış ve ilk sonuçlarını ise 2021 yılında yayınlamıştır (Pepe vd. 2021). Şili'nin Atacama Çölü'nde 2635 metre yükseklikte bulunan Paranal Gözlemevi'nde yer alan Very Large Telescope (VLT) üzerine monte edilmiştir ve eş zamanlı olarak dört ana teleskop birimi (UT1–UT4) ile çalışabilme kapasitesine sahiptir (Figür 3.2). Bu yapı, gözlemsel esnekliği ve sinyal toplama verimini büyük ölçüde artırmaktadır.

ESPRESSO'nun bilimsel amacı, özellikle FGKM tayf türündeki yıldızlar üzerinden yüksek çözünürlükle hem düşük kütleli ötegezegenlerin dolaylı tespitini mümkün kılmak



Şekil 3.2. ESPRESSO tayfçekerine ait görsellerde üst panel: Paranal Gözlemevi'ni, orta panel: ESPRESSO coude tayfçekerinin görselini ve son panel: ESPRESSO tayfçekeriyile alınan HD 115617 yıldızın ham tayfını göstermektedir.

Tablo 3.1. HD 115617 yıldızı için ESO arşivi bilim portalı üzerinden temin edilen ESPRESSO tayfı başlık (header) bilgileri.

Gözlem Programının Adı:	Detection and Characterisation of Earth-Like Planets with ESPRESSO
Program ID:	1102.C-0744
PI:	Francesco Pepe
Gözlem Tarihi (GG/AA/YYYY - MJD):	08/03/2019 - 58550.32327
Poz Süresi:	700 s
Dalgaboyu Aralığı:	380 - 788 nm
Çözünürlük (R):	140 000
Sinyal/Gürültü Oranı (SNR):	1600.3
Verinin Yayınlanma Tarihi (GG/AA/YYYY):	29/04/2021

hem de kimyasal bolluklar üzerinden galaktik evrim çalışmalarına katkı sağlamaktır (Pepe vd. 2014). Sistemin optik stabilitesi, lazer frekans tırağı ve simültane referans ışığı desteği ile birlikte ≈ 10 cm/s düzeyinde dalga boyu kararlılığı sunarak yalnızca gezegen tespiti değil aynı zamanda yüksek doğruluklu bolluk analizleri için de eşsiz bir platform oluşturmaktadır.

Sistem, 380–788 nm aralığında çalışmakta olup gözlem moduna göre $R \approx 134\,000$ ile 190 000 arasında değişen tayfsal çözünürlük sunmaktadır. Echelle ızgarası yaklaşık 76° 'lik bir blaze açısıyla tasarlanmış böylece yüksek kırınım mertebelerinde geniş dalga boyu kapsama alanı ile yüksek verim elde edilmiştir. ESPRESSO'nun optik düzeneği, klasik echelle tayfçeker mimarisini modern fiber teknolojileri ile birleştirerek hem kararlılık hem de çözünürlük açısından günümüz spektroskopisinde referans sistemlerden biri haline gelmiştir.

Bu çalışmada ESPRESSO verileri, HD 115617 (61 Vir; G5V) yıldızına ait optik bölge analizinde kullanılmıştır. Söz konusu veri kümesine ait teknik bilgiler Tablo 3.1'de özetlenmiştir. Gözlem verileri, ESO Archive Science Portal üzerinden kamuya açık olarak temin edilmiştir. Temin edilen tayf için önce süreklilik düzeltmesi (continuum normalization) ardından radyal hız düzeltmesi yapılarak ilgili tayf verisi eşdeğer genişlik ölçümüne hazır hale getirilmiştir.

3.2.2. HARPS

HARPS (High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher), Avrupa Güney Gözlemevi (ESO) tarafından 2400 metre yükseklikteki La Silla Gözlemevi'nde bulunan 3.6 metrelik

Tablo 3.2. HD 76151 yıldızı için ESO Archieve Science Portal üzerinden temin edilen HARPS datasının teknik bilgileri.

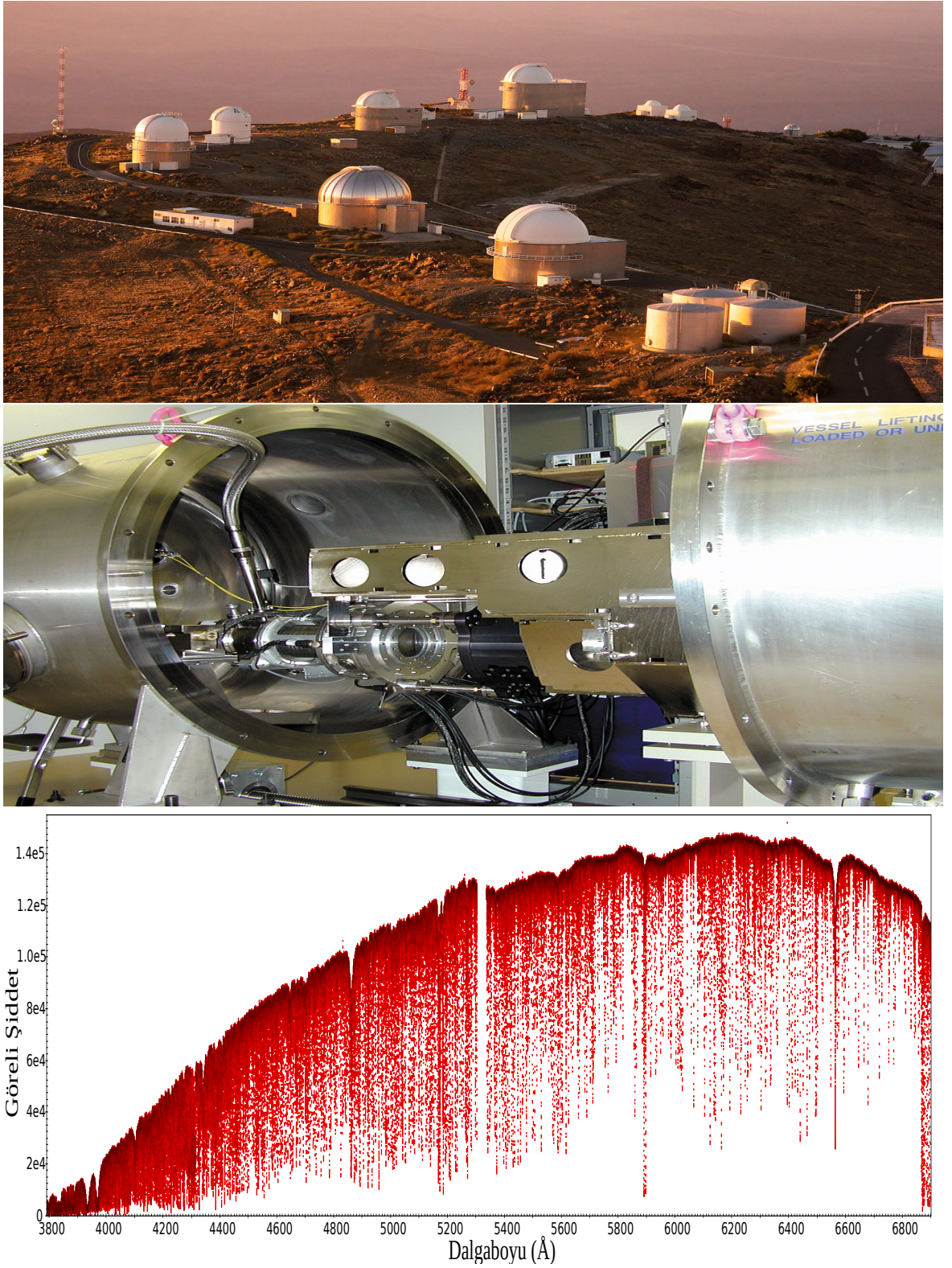
Gözlem Programının Adı:	A Census of the Super-Earth and Neptune-Mass Planet Population Around Solar-Type Stars
Program ID:	183.C-0972
PI:	UDRY, S.
Gözlem Tarihi (GG/AA/YYYY - MJD):	19/04/2010 - 55305.01205
Poz Süresi:	900 s
Dalgaboyu Aralığı:	378.1 - 691.2 nm
Çözünürlük (R):	115 000
Sinyal/Gürültü Oranı (SNR):	356.7
Verinin Yayınlanma Tarihi (GG/AA/YYYY):	24/09/2014

teleskoba entegre edilmiş ve yüksek tayfsal kararlılık hedefiyle tasarlanmış bir echelle tayfçeker sistemidir. Geliştirme süreci 2003 yılında tamamlanmış ve aynı yıl içerisinde bilimsel gözlemlere başlamıştır (Mayor vd. 2003). HARPS, özellikle düşük kütleli ötegezegenlerin yıldız etrafındaki dolaylı etkilerini tespit etmeyi amaçlayan uzun soluklu gözlem programları için geliştirilmiş ancak zaman içerisinde yüksek doğrulukta kimyasal bolluk analizleri için de yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır.

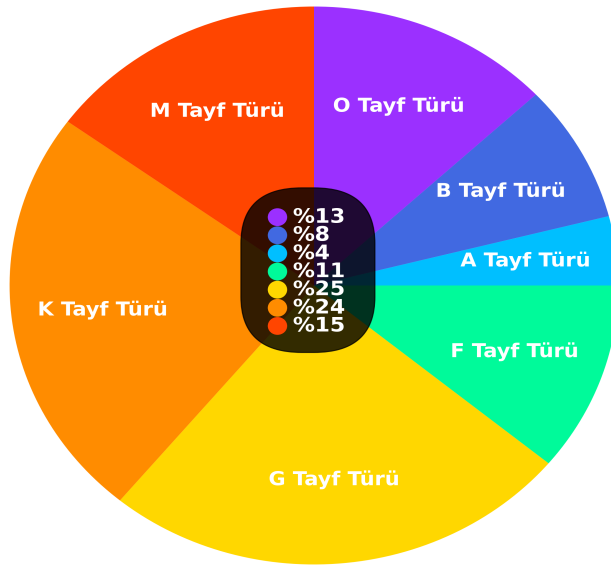
HARPS sisteminin başlıca teknik özelliği, sabit termal ve mekanik koşullar altında çalışacak şekilde tasarlanmış olmasıdır. Bu sayede, gözlemler arasında dalga boyu kayması minimum düzeyde tutulur ve sistemin dalga boyu kararlılığı ≈ 1 m/s seviyesine kadar düşürülebilir. Sistem, 380–690 nm aralığında gözlem yapabilir ve yaklaşık $R \approx 115\,000$ çözünürlüğe sahiptir. Klasik echelle ızgarası, yaklaşık 71.5° 'lik bir blaze açısı ile optimize edilmiş olup, optik bölgede bulunan metal çizgilerinin ayrıştırılmasında yüksek verim sunar. Tayfçeker, çapraz dağıtıcı sistem sayesinde geniş bir tayfı tek pozlamada analiz edilebilir hale getirir.

HARPS, özellikle G ve K tayf tipindeki yıldızların gözlemlenmesine odaklanmış olup pek çok galaktik kimya ve gezegen bolluk ilişkisi projesinin temel gözlemsel kaynağını oluşturmaktadır. Sistemin yaygın şekilde kullanıldığı programlar arasında, HARPS GTO (Guaranteed Time Observations) ve HARPS-FEROS uyumlu çoklu gözlem programları yer almaktadır.

Bu çalışmada HARPS, G5V tayf tipine yakın bir Güneş benzeri yıldız olan HD 76151'in optik bölgedeki tayfsal analizinde kullanılmıştır. Gözlemsel veriler, ESO Science Archive Portal üzerinden elde edilmiştir. Tablo 3.2'de ilgili veri setine ilişkin



Şekil 3.3. HARPS tayfçekerine ait görsellerde üst panel: HARPS tayfçekerinin konumlandırıldığı La Silla Gözlemevi'ni, orta panel: HARPS coude tayfçekerinin görselini ve alt panel: HD 76151 yıldızı için kullanılan HARPS tayfını göstermektedir.



Şekil 3.4. Park vd. (2018) çalışmasında içerilen yıldızların tayf türüne göre dağılımı. O Tayf türü: 11 yıldız, B Tayf türü: 7 yıldız, A Tayf türü: 3 yıldız, F Tayf türü: 9 yıldız, G Tayf türü: 21 yıldız, K Tayf türü: 20 yıldız ve M Tayf türü: 13 yıldızın H ve K bant tayfları tellürik çizgilerden arındırılmış olarak verilmektedir.

gözlem bilgileri özetlenmiştir.

3.2.3. IGRINS

IGRINS (Immersion GRating INfrared Spectrometer), kırmızıöte tayfsal gözlemler için özel olarak tasarlanmış ve kırmızıöte H ve K bölgesini yüksek çözünürlükle kapsayabilen çapraz dağıtılmış immersiyon echelle yapısında modern bir tayfçeker sistemidir. İlk olarak Teksas Üniversitesi Astronomi Bölümü tarafından geliştirilen bu sistem hem McDonald Gözlemevi'ndeki Harlan J. Smith teleskobuna hem de Gemini South teleskobuna entegre edilerek çok sayıda yüksek çözünürlüklü kırmızıöte gözlemde kullanılmıştır. IGRINS, 14500–25000 Å aralığındaki H ve K bantlarını tek pozlamada gözlemleyebilmektedir. Sistemin ortalama tayfsal çözünürlüğü $R \approx 45\,000$ olup iki adet $2k \times 2k$ HgCdTe IR dedektörle geniş bir dalga boyu kapsamı sunar (Yuk vd. 2010).

IGRINS'in optik ve mekanik tasarımına dair kapsamlı bilgiler Park vd. (2014) tarafından sunulmuştur. Cihazın kısa poz süreleriyle yüksek sinyal-gürültü oranı sağlayabilmesi ve düşük termal gürültü üretmesi IGRINS'i kırmızıöte gözlemler için oldukça uygun kılmıştır.

Kırmızıöte gözlemlerde karşılaşılan temel zorluklardan biri, Dünya atmosferine ait tellürik soğurma çizgileridir. Bu çizgiler özellikle H_2O ve CO_2 gibi moleküllerin etkisiyle yıldız tayfı üzerine eklendiğinden özellikle 6800 Å ötesindeki çizgilerin teşhisini zorlaştırmaktadır. Bu bağlamda Park vd. (2018) tarafından yayımlanan ilk tellürik düzeltmeli IGRINS tayf arşivi kırmızıöte tayf analizlerinin güvenilirliğini artıran önemli bir kaynak olmuştur. Bahsi geçen çalışmada McDonald Gözlemevi'nde 2.7 metre sınıfında Harlen J. Smith teleskobuna monte IGRINS tayfçeker yardımıyla 2014 - 2016 yılları arasında gözlemleri yapılan O tayf türünden M tayf türüne (bkz. Şekil 3.4) sahip toplamda 84 yıldız örnekleme sistematik olarak tellürik etkilerden arındırılmış, süreklilik normalizasyonu ve dikine hız düzeltmeleri yapılmış ve akının dalga sayısına (wave number) göre değişimi olacak şekilde kamuya açık olarak paylaşılmıştır. Bu düzeltmeler çizgi teşhisi ve eşdeğer genişlik ölçümlerinde daha güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

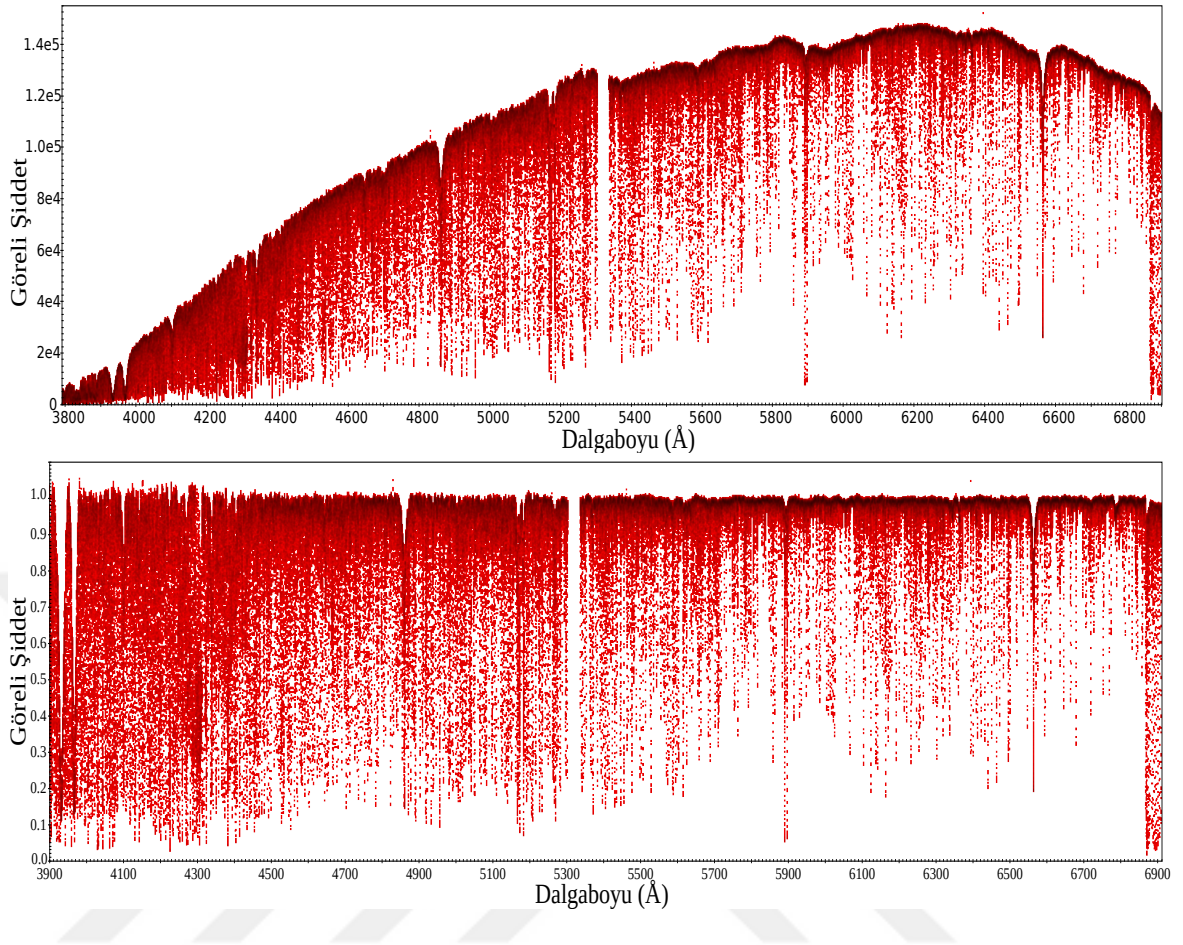
Bu tez kapsamında IGRINS verileri hem HD 76151 hem de HD 115617 yıldızlarının NIR (14500–25000 Å) bölgedeki tayfsal analizlerinde kullanılmıştır. Ancak çalışmadan elde edilen tayfsal veriler doğrudan eşdeğer genişlik analizlerini ölçmek için uygun değildir. Tayf verisi için dalga sayısından dalga boyuna dönüşüm işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sırasında VALD veri tabanında paylaşılan formülasyon kullanılmıştır.

Benzer şekilde HARPS ve ESPRESSO tayf verilerini de çizgi teşhisi ve ölçümüne hazır hale getirmek için öncelikli olarak süreklilik normalizasyonu ve radyal hız düzeltiminin yapılması gerekmektedir. Söz konusu işlemlerin metodolojik detayları bir sonraki alt başlık olan 3.3. Tayf Verisinin Ölçüme Hazırlanması kısmında detaylıca irdelenmiştir.

3.3. Tayf Verisinin Ölçüme Hazırlanması

3.3.1. Süreklilik normalizasyonu

Tayfsal analizde yıldızın fiziksel doğasına ilişkin parametrelerin hassas biçimde elde edilebilmesi için ham tayf verisinin analiz için uygun forma getirilmesi gerekmektedir. Bu hazırlık sürecinin en temel adımlarından biri çizgi ölçüm ve teşhis süreçlerini doğrudan etkileyen süreklilik (continuum) düzeltmesidir. Özellikle echelle tayfçeker sistemlerinden

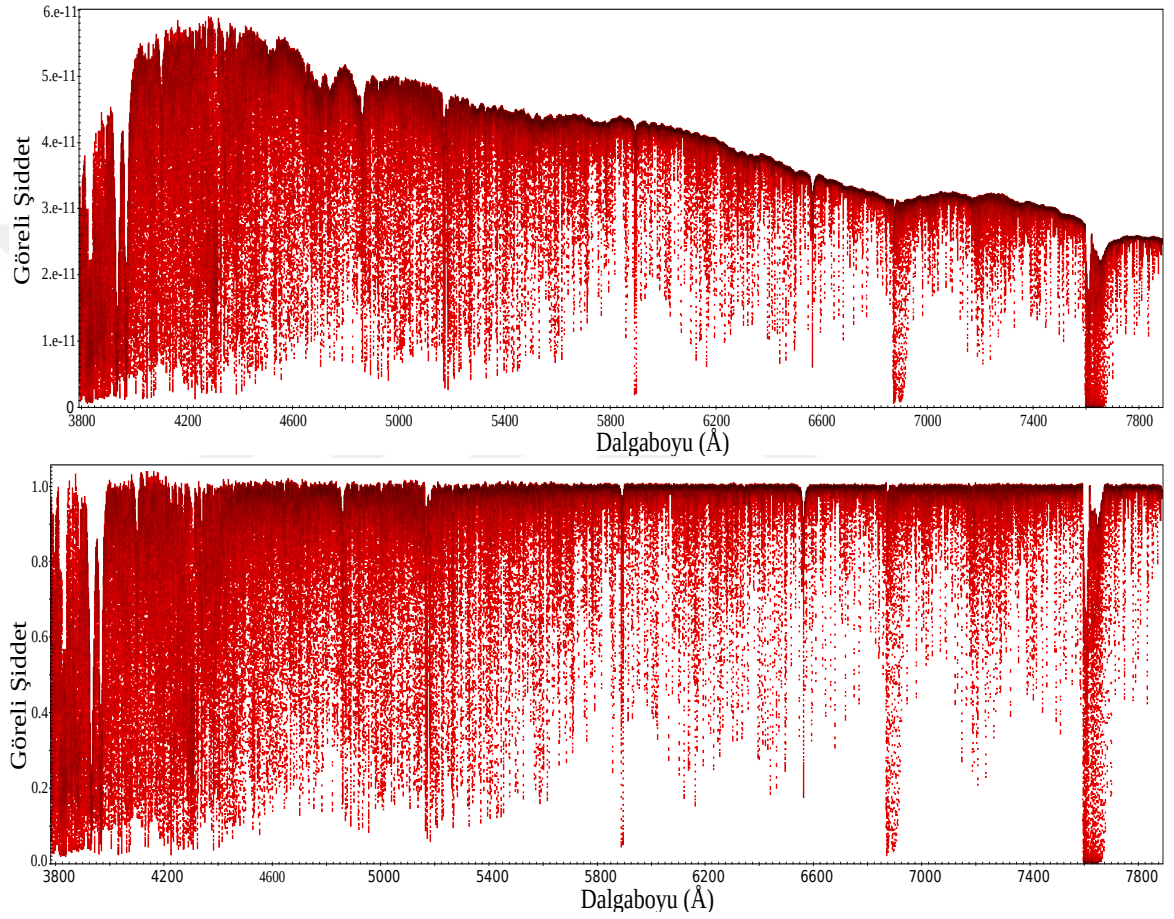


Şekil 3.5. Üst panel HD 76151 yıldızı için HARPS tayfının ESO Science Portal aracılığıyla elde edilen ham halini temsil ederken alt panel iSpec arayüzü ile süreklilik normalizasyonu yapılmış tayf verisini göstermektedir.

elde edilen tayflarda her sıranın (order) kendine özgü hassasiyet ve radyal hız dağılımına sahip olması nedeniyle süreklilik düzeltmesi dikkatli bir biçimde gerçekleştirilmelidir.

Süreklilik normalizasyonu işlemi, tayf üzerindeki soğurma çizgilerinin eşdeğer genişliklerinin (EW) doğru şekilde ölçülebilmesini mümkün kılarak kimyasal bolluk analizlerinin temelini oluşturur. Bu çalışmada kullanılan tayf verileri (HARPS ve ESPRESSO) iSpec yazılımı aracılığıyla normalize edilmiştir (Blanco-Cuaresma vd. 2014). Python tabanlı bu platform; süreklilik düzeltmesi, radyal hız tayini, model atmosfer parametrelerinin belirlenmesi (ızgara karşılaştırması ve EW yöntemiyle), sentetik tayf üretimi gibi işlevleri bütüncül biçimde sunmaktadır.

iSpec ortamında süreklilik düzeltmesi genellikle polinomal ya da spline tabanlı fit yöntemleriyle uygulanmaktadır. Bu bağlamda, tez kapsamında yapılan denemelerde en



Şekil 3.6. Üst panel HD 115617 yıldızı için ESPRESSO tayfının ESO Science Portal aracılığıyla elde edilen ham halini temsil ederken alt panel iSpec arayüzü ile süreklilik normalizasyonu yapılmış tayf verisini göstermektedir.

başarılı sonucu veren yöntem ikinci dereceden spline eğrisi ile süreklilik düzeltmesi olmuştur. iSpec ile yürütülen süreklilik düzeltme sürecine ait örnek bir uygulama Şekil 3.5 ve Şekil 3.6 sunulmuştur. Analiz kapsamında incelenen HD 76151 ve HD 115617 yıldızlarına elde edilen ham tayflar ve ilgili tayf verilerine ait normalize edilmiş tayflar yine 3.5 ve Şekil 3.6'de gösterilmiştir. Bu işlem sonrasında tayfin eşdeğer genişlik ölçümüne uygun hale gelmesi kısmen sağlanmış ve bir sonraki adım olan radyal hız düzeltmesine geçilmiştir.

3.3.2. Radyal hız (RV) düzeltmesi

Dikine hız (radyal hız, V_R) bir gökcisminin uzay hareketinin gözlem doğrultusundaki hız bileşenidir. Astronomide bu bileşen, yıldızın tayfında gözlenen maviye ya da kırmızıya kayma yoluyla da ifade edilir. $V_R < 0$ değeri gözlemciye yaklaşan, $V_R > 0$ değeri ise gözlemciden uzaklaşan cisimleri temsil eder. Bu parametre, yalnızca kinematik ve yörünge dinamik analizler kapsamında galaktik popülasyon sorgulamasına yardımcı olması açısından değil aynı zamanda tayfsal çizgilerin laboratuvar dalga boyuna ötelenerek hassas bir şekilde ölçülebilmesi ve yıldız kimyasal kompozisyonunun belirlenmesi için de kritik öneme sahiptir. Radyal hız bilgisi, teğetsel hız (V_T) ile birlikte yıldızın toplam uzay hızının belirlenmesini mümkün kılar (Bkz. Şekil 3.7).

Literatürde dikine hız düzeltimi için temelde üç farklı yaklaşım kullanılmaktadır. Bu yöntemler;

- Atomik Çizgi Maskesi (Atomic Line Mask): Bu yaklaşımda, gözlemlenen tayfsal çizgilerin merkez dalga boyları, laboratuvar dalga boyları ile karşılaştırılarak her bir çizgi için hız farkı hesaplanır. Ortalama dikine hız değeri şu eşitlikle tanımlanır:

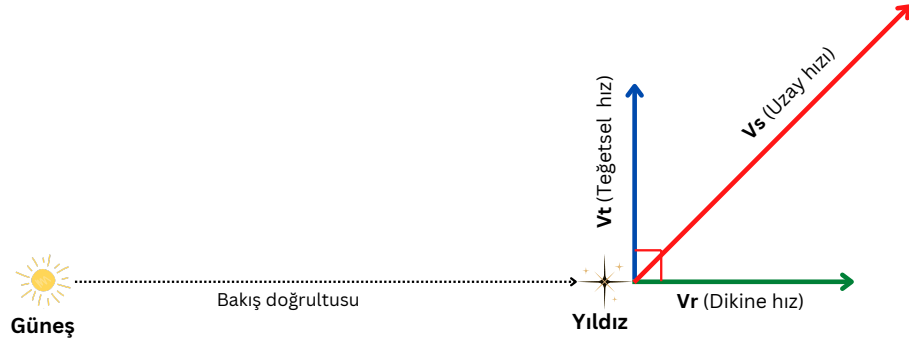
$$V_R = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \quad (3.4)$$

Burada c , ışık hızını; $\Delta\lambda$, gözlenen ve laboratuvar dalga boyları arasındaki farkı; λ ise çizginin referans (laboratuvar) dalga boyunu temsil eder.

- Referans Tayf ile Çapraz-Korelasyon (Cross-Correlation): Radyal hızı iyi bilinen bir referans tayf ile ölçümü yapılmak istenen hedef tayf karşılaştırılır. Her iki

tayfın birbirine göre maksimum benzerlik sağladığı kayma miktarı dikine hız olarak yorumlanır.

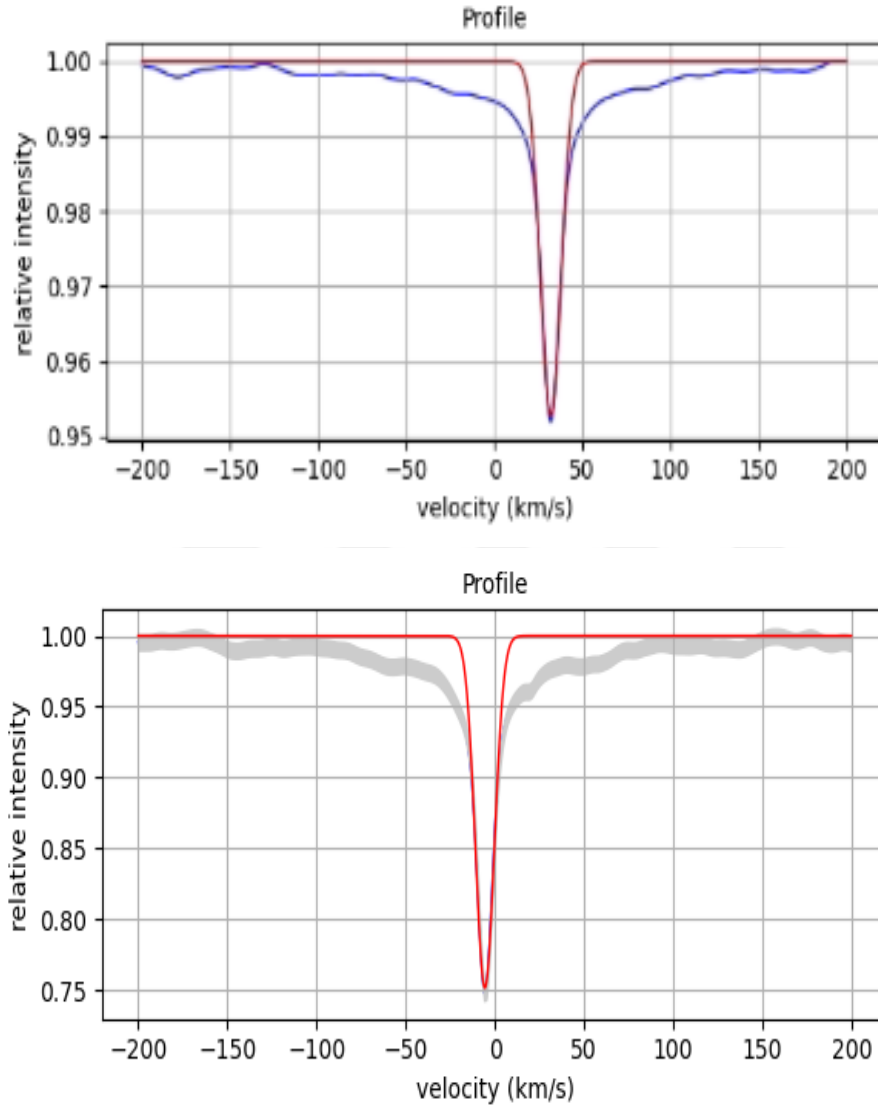
- Tellürik Çizgi Maskesi (Telluric Line Mask): Literatürde kullanılan diğer bir yöntem atmosferik (tellürik) çizgiler referans alınarak gerçekleştirilen dikine hız hesaplama yöntemidir. Özellikle kırmızıöte bölgeye gidildikçe, Dünya atmosferine ait tellürik çizgiler referans alınarak tayf üzerindeki yıldızsal kayma belirlenebilir. Bu yöntem, atomik maskeleme ile aynı prensibe dayanır.



Şekil 3.7. Dikine hız, teğetsel hız ve uzay hızını temsili gösterimi.

Bu tez kapsamında kullanılan tüm tayf verileri (HARPS, ESPRESSO ve IGRINS), kamuya açık arşivlerden (ESO Science Archive) elde edilmiştir. ESPRESSO ve HARPS tayfları yalnızca dalga boyu birleştirilmiş formda sunulduğundan analize hazırlık aşamasında hem süreklilik düzeltmesi hem de radyal hız düzeltmesi işlemleri çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Bu işlemler, iSpec (Blanco Cuaresma vd. 2014) yazılım ortamında gerçekleştirilmiştir. iSpec hem atomik çizgi maskesi temelli RV tayini hem çapraz-korelasyon tabanlı RV düzeltmesini hem de tellürik maskeleme yöntemini desteklemektedir. Tez kapsamında kullanılan yöntem, Güneş'in NARVAL tayfı üzerinden çapraz-korelasyon yöntemiyle V_R hesaplamasına dayanmaktadır. RV düzeltmesi tamamlandıktan sonra tayflar, spektral çizgilerin laboratuvar merkezlerine hizalanmış ve eşdeğer genişlik ölçümlerine hazır hale



Şekil 3.8. HD 76151 ve HD 115617 yıldızlarının iSpec arayüzü yardımıyla Güneş'in NARVAL tayfı referans alınarak cross-correlation metoduyla hesaplanan dikine hızları. Üst panel: HD 76151, $V_R = 32.05 \pm 0.05$ km/s; Alt panel: HD 115617 $V_R = -5.60 \pm 0.04$ km/s

getirilmiştir. HD 76151 ve HD 115617 yıldızları için elde edilen tayflara ait örnek RV düzeltme uygulamaları ve iSpec arayüzü ile belirlenen RV düzeltme değerleri Şekil 3.8’da gösterilmektedir.

Normalize edilmiş ve laboratuvar dalga boylarına ötelenmiş bu tayflar üzerinde artık soğurma çizgilerinin eşdeğer genişlik (EW) değerlerinin ölçülmesi ve teşhis edilmesi mümkün hale gelmiştir. Böylece, tayf üzerindeki elementel çizgiler kullanılarak yıldız atmosferlerinin kimyasal bileşiminin nicel olarak inceleneceği kimyasal bolluk analizine geçilmektedir. Bu analiz süreci ve kullanılan yöntemler bir sonraki ana başlık altında ayrıntılı şekilde sunulmaktadır.

3.4. Kimyasal Bolluk Analizi

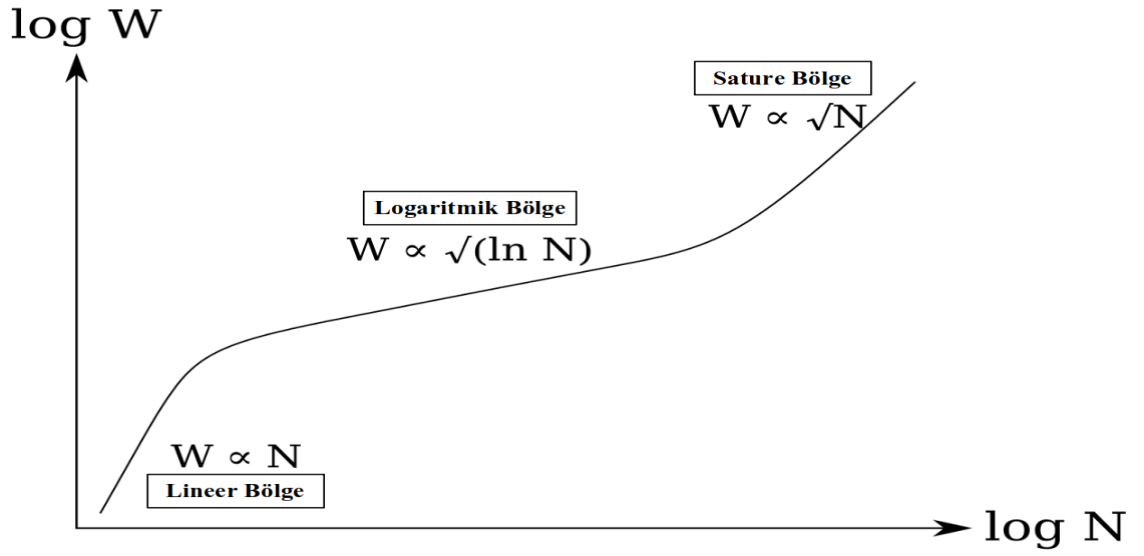
Bu tezde seçilip analiz edilen elementlerin kimyasal bolluk değerleri büyüme eğrisi prensibi altında elde edilmiştir. Büyüme eğrisi temelde, yıldız atmosferlerinde oluşan soğurma çizgilerinin eşdeğer genişliğinin (EW), ilgili atomik geçişi oluşturan soğurucu N_i atomlarının sütun yoğunluğuna göre fonksiyonu olacak şekilde ifade edilir. Sütun yoğunluğu, birim kesit yüzeyli silindir içerisindeki atomların miktarını ($N = \int_0^s n ds$) temsil eder. Bu ilişki; çizginin genişliği, çizginin olduğu atmosfer katmanının soğurma katsayısı, atomik parametreler, sıcaklık ve yüzey çekimi gibi niceliklere doğrudan bağlıdır. Temelde üç ana bölgeden oluşmaktadır (Bkz. Şekil 3.9).

Bölüm 3.4.1.’de verilen tanım ve formülasyonlar David F. Gray’in *‘The Observation and Analysis of the Stellar Photospheres’* (2005) isimli kitabından derlenmiştir.

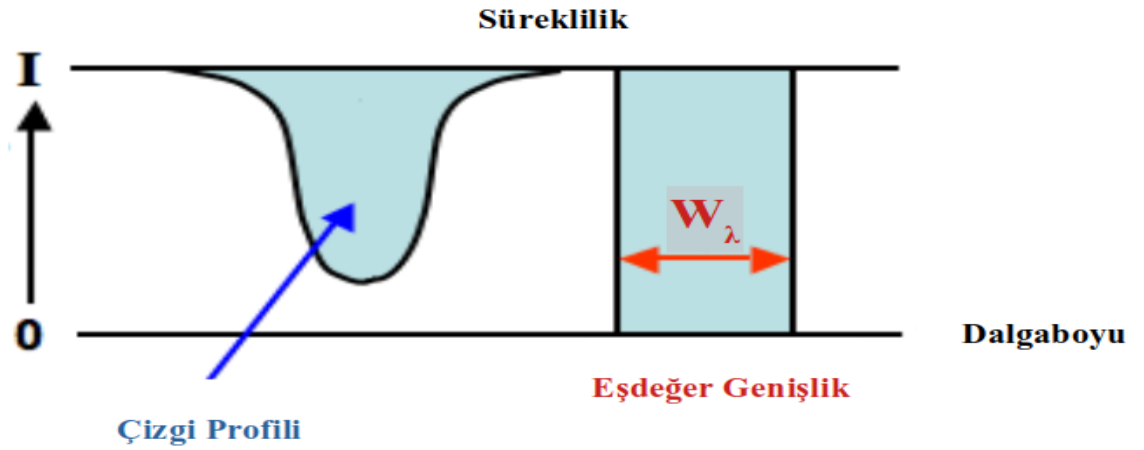
3.4.1. Çizgi ölçümü

Bir yıldız atmosferinin kimyasal bileşimini tayin etmenin temel yollarından biri, tayf üzerindeki soğurma çizgilerinin eşdeğer genişlik (Equivalent Width; EW) ölçümleridir. Ancak bu ölçüm yalnızca geometrik bir alan hesabı değil aynı zamanda ilgili geçişi veren çizginin yıldız atmosferi boyunca karşılaştığı atomik ve radyatif süreçlerin karmaşık etkileşimini temsil eden fiziksel bir parametredir.

Eşdeğer genişlik, spektral çizginin soğurduğu enerji miktarını temsil eder ve süreklilik seviyesinde aynı miktarda enerji içerecek dikdörtgenin alanı olarak tanımlanır (Şekil 3.10). EW matematiksel olarak, F_c süreklilik akısı ile F_ν çizgi akısındaki farkın süreklilik



Şekil 3.9. Büyüme eğrisi üç ana bölge ile ifade edilir: lineer (zayıf çizgiler), logaritmik (orta kuvvetli çizgiler ve saturasyon (güçlü çizgiler).



Şekil 3.10. Eşdeğer genişlik, süreklilik ile çizgi profili arasındaki alana eşdeğer bir dikdörtgen alanın ölçümüdür.

akısına oranından (bkz. Denklem 3.5) elde edilir:

$$W = \int \frac{(F_c - F_\nu)}{F_c} d\nu = \int \left(1 - \frac{F_\nu}{F_c}\right) d\nu \quad (3.5)$$

Ancak çizginin derinliği ve genişliği yalnızca bollukla değil, aynı zamanda ışığın atmosfer boyunca izlediği yol ($d\tau$), soğurma (κ_ν) ve saçılmaya (j_ν) uğrama biçimi ve çizginin sahip olduğu atomik özellikleri ile de doğrudan ilişkilidir. Bu süreç, ışıının transfer denklemi (Radiative Transfer Equation, RTE) ile tasvir edilir. Tez içerisinde de kullanıldığı versiyonuyla LTE koşulu altında ve düzlem-paralel bir atmosfer yaklaşımı

altında:

$$I_{\lambda}(\tau = 0) = \int_0^{\infty} S_{\lambda}(\tau_{\lambda}) e^{-\tau_{\lambda}} d\tau_{\lambda} \quad (3.6)$$

denklemini ile ifade edilir. Burada $I_{\lambda}(\tau = 0)$, yıldız yüzeyinden çıkan ışığı; S_{λ} , kaynak fonksiyonunu (j_{ν}/κ_{ν} , LTE koşullarda Planck fonksiyonu ile eşit) ve τ_{λ} çizginin optik derinliğini ifade eder.

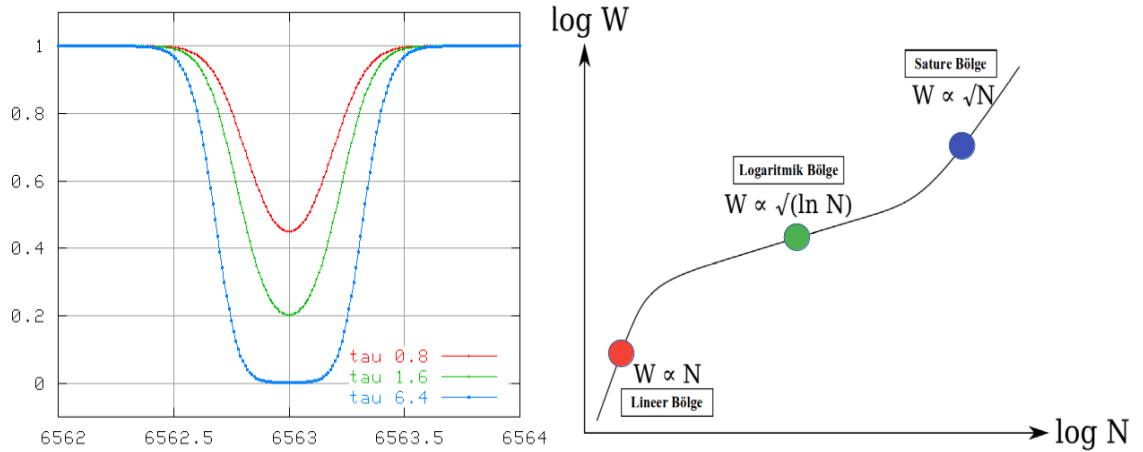
Optik derinlik, bir fotonun belirli bir atmosfer katmanından kaçma olasılığına karşılık gelir. Zayıf çizgilerde ($\tau \ll 1$) ışık nispeten serbestçe geçerken, güçlü çizgilerde ($\tau \gg 1$) çizgi merkezinde soğurma baskın hale gelir ve çizgi profili kanatlara doğru yayılmaya başlar (bkz. Şekil 3.11). Bu geçiş, büyüme eğrisinde rejim değişimlerine denk gelir (Rutten 2003; Gray 2005).

Atmosferin optik olarak ince ($\tau \ll 1$) ve sıcaklığın düşük olduğu üst katmanlarda (yani çizgi oluşumunun lineer rejiminde) aşağıdaki denklem kullanılır.

$$\frac{W_{\lambda}}{\lambda} = \frac{\pi e^2}{m_e c} \frac{\lambda}{c} N_i g f \quad (3.7)$$

Burada m_e , elektronun kütlesini; e , elektronun yükünü, c , ışık hızını; λ , dalgaboyunu ve gf osilatör şiddeti, alt enerji seviyesinin istatistiksel ağırlığı g ile çizginin geçiş olasılığı f parametrelerinin çarpımından oluşur. Osilatör şiddeti, bir atom ya da molekülün belirli iki enerji katmanı arasından bir fotonun soğurulma ya da salınımına uğrama olasılığını ifade eden boyutsuz bir niceliktir. Büyüme eğrisi denklemini (3.7) açıkça göstermektedir ki, eşdeğer genişlik W_{λ} ile N_i soğurucu atomları arasında doğrusal bir ilişki ($W \propto N_i$) bulunmaktadır. Bu durum Şekil 3.10'deki lineer bölgeye karşılık gelir. Oldukça yalın olan bu yaklaşım ne yazık ki atmosferin kalın katmanlarında ($\tau \gg 1$) geçerliliğini yitirir. Çünkü bu katmanlarda ışınının taşınımı daha karmaşık hesaplamalara ihtiyaç duyar. Isısal genişleme gibi Doppler kaynaklı etkilerinde giderilmesi için geleneksel olarak W_{λ} , dalgaboyuna (λ) bölünür ve $\frac{W_{\lambda}}{\lambda}$ gösterimiyle ifade edilir.

Birim yüzeyde bulunan soğurucu atomların sayısını tasvir eden sütun yoğunluğu, atomların salt bolluğunu betimler. Bolluklar Hidrojen (H) elementine göre ölçeklendirilir ve Hidrojenin tipik bolluğu $\log \epsilon(H) = 12$ dex olarak kabul edilir. Büyüme eğrisi ise temel olarak belirli bir tayf çizgisinin eşdeğer genişliği ile ilgili tayf çizgisini veren



Şekil 3.11. Belirli bir tayf çizgisinin farklı güçteki profilleri (sol panel) için kuramsal bir büyüme eğrisi grafiğinde (sağ panel) bulundukları rejim tasvir edilmiştir.

elementin sütun yoğunluğu yani bolluğu arasındaki ilişkiyi verir. Özetle ölçülen eşdeğer genişliğin element bolluğuna çevirir. Şekil 3.11 bolluğun (yani sütun yoğunluğunun) eşdeğer genişlik ile nasıl değiştiğini göstermektedir. Kırmızı çizgi büyüme eğrisinin lineer kısmına karşılık gelir dolayısıyla bu tip çizgilerde $W_\lambda \propto N_i$ 'dir. Çizginin derinliği arttıkça enerji daha fazla soğurulur. Belli bir noktaya ulaşıldığında bolluk eşdeğer genişlik ile değişmez. Bu tür çizgiler büyüme eğrisinin logaritmik kısmına düşer ve güvenilir bir bolluk göstergesi değildirler. Örnek olarak Şekil 3.11'deki yeşil nokta verilebilir. Çizgi profili çok güçlü ve derin çizgilerde çizgi merkezi tamamen doymuştur ve kanatlardan katkı alarak sature forma dönüşür. Böylesi çizgilerde bolluk $W_\lambda \propto \sqrt{N_i}$ ile ifade edilir ve Şekil 3.11'de mavi nokta ile betimlenmiştir. Büyüme eğrisi prensibi bize bolluk belirlemek için lineer bölgede kalan zayıf çizgilerin tercih edilmesinin daha doğru olacağını göstermektedir.

Şimdiye kadar sunulan büyüme eğrisi tanımı, klasik lineer ortam varsayımları altında verilmiştir. Ancak yıldız atmosferlerinde optikçe kalın rejimdeyken yani teorik büyüme eğrisinin doygunluk bölgesine ilerledikçe klasik büyüme eğrisi analizi yeterli olmayabilir. Bu durumda Milne–Eddington yaklaşımı, ışıınım transferinin daha gerçekçi bir biçimde çözümlenmesini mümkün kılar. Bu yaklaşım altında aşağıdaki varsayımlar kabul edilir:

- Kaynak fonksiyonu salmanın soğurmaya olan oranı optik derinlik ile doğrusal değişim gösterir.
- Opasite, optik derinlikle değişmez. Bu durumda atmosferin homojen olduğu

düşünülür.

- Çizgi ve süreklilik opasiteleri arasındaki oran atmosferin tüm katmanlarında sabit kabul edilir.
- Yerel ısısal denge durumu mevcuttur.
- LTE koşul geçerlidir.
- Düzlem-paralel atmosfer koşulu altında statik bir atmosfer kabul edilir.

Milne-Eddington varsayımları altında klasik büyüme eğrisi denklemi aşağıdaki formu alır:

$$\log \frac{W\lambda}{\lambda} = \log \left(\frac{\pi e^2}{m_e c^2} \frac{1}{U} \frac{N_{ion}}{N_{el}} N_H A_0 \right) + \log(gf\lambda) - \theta_X + \log(A_{el}) + \log(\alpha_\nu^c) \quad (3.8)$$

Denklemin sağ tarafındaki ilk parantez içerisinde $\frac{N_{ion}}{N_{el}}$ terimi, SAHA denklemini; N_H , hidrojen atomlarının sayısını; A_0 , çizgi ile süreklilik arasındaki akı zıtlığını tanımlayan sabiti ve U ise ilgili atom ya da iyonların aynı enerji düzeyindeki düzenleme yollarının ağırlıklı toplamıdır. Denklemin yine sağ tarafında gf , osilatör şiddetini; θ_X , alt uyarılma enerjisini; A_{el} , element bolluğunu ve son olarak $\log(\alpha_\nu^c)$ süreklilik saydamlığı parametresini temsil eder. Süreklilik saydamlığı parametresi, yıldız atmosferinde sürekli ışınımın opasitelerle ne ölçüde zayıflatıldığını ya da geçirildiğini ifade eden, dolaylı olarak çizgi formasyonunu etkileyen bir tanımdır. Analitik olarak opasite oranlarıyla, fiziksel olarak da fotonların kaçma derinliğiyle ilgilidir. Denklemlerde gözüken bir başka önemli nokta çizgiye ait atomik geçiş olasılığını ifade eden osilatör şiddetidir. $\log gf$ değerlerindeki küçük belirsizlikler bile elde edilen bolluklarda sistematik hatalara neden olabilir. Bu çalışmada kullanılan çizgi listeleri, güvenilirliği literatür ve laboratuvar verileriyle yüksek çözünürlüklü Güneş tayfi üzerinde kanıtlanmış $\log gf$ değerleri esas alınarak oluşturulmuştur.

Büyüme eğrisi ve ışınım transferi kuramı üzerine yapılan bu kuramsal açıklamaların ardından analizde kullanılan spektral çizgilerin nasıl seçildiği ve teşhis edildiği bir sonraki başlık altında sunulmaktadır.

The periodic table is color-coded by groups. Elements are grouped into categories like Alkali metals, Transition metals, Post-transition metals, Lanthanoids, Actinoids, Nonmetals, and Noble gases. Some elements are highlighted with black boxes and red dashed borders, indicating they are the focus of the study.

Şekil 3.12. Şekildeki periyodik tabloda elementler ait olduğu gruplara göre (alkali, metal, soygaz vb.) renklendirilmiştir. Tez kapsamında optik (Şahin vd. 2023, 2024) ve NIR (Şentürk vd. 2024) bölgede analiz edilen elementler siyah kutularla betimlenmiştir.

3.4.2. Çizgi teşhisi

Çizgi teşhisi, yıldız tayfından kimyasal bollukların elde edilmesi sürecinde kritik rol oynayan adımlardan biridir. Bu aşamayı dikine hız (radial velocity) düzeltmesi uygulanmış tayf üzerinden gerçekleştirmek ise son derece kritiktir. Güvenilir bir teşhis gerçekleştirebilmek için öncelikle tayfta gözlemlenen çizgilerin merkez dalga boylarının yüksek hassasiyetle tespit edilmesi gereklidir. Bu işlem aynı zamanda atomik parametrelerinde doğru şekilde kullanılabilmesi açısından temel bir ön koşuldur.

Tez kapsamında, optik bölgede gerçekleştirilen tayfsal analizlerde Akdeniz Üniversitesi Yüksek Çözünürlüklü Yıldız Spektroskopisi (HRSS) Bilimsel Araştırma Laboratuvarı araştırma grubu üyeleri tarafından yayımlanan Şahin vd. (2023) ve Şahin vd. (2024) çalışmalarında sunulan güncel çizgi listeleri kullanılmıştır (bkz. Şekil 3.12). Her iki çizgi listesi de G tayf türü yıldızların kimyasal bolluk analizlerinde kullanılmak üzere yüksek çözünürlüklü tayf verilerine dayalı olarak hazırlanmış ve hem Güneş hem de HD 218209 yıldızlarının tayfları üzerinden kalibre edilmiştir.

Söz konusu iki liste, geçtiğimiz yıl başarıyla tamamlanan 121F265 numaralı TÜBİTAK-1001 projesi kapsamında metale fakir G tayf türü yıldızların kimyasal bolluk

Tablo 3.3. Kırmızıöte bölgede incelenen çalışmalara ilişkin çizgi sayısı istatistikleri

Referans	Dalgaboyu (Å)	Toplam Çizgi	Fe I	Fe II	Mg I	Si I	Ca I	Ca II	Ti I	Ti II
Melendez ve Barbuy (1999)	10000-17980	2218	1163	13	79	181	52	7	82	1
Borrero vd. (2003)	9860-15650	83	42	–	–	17	4	–	6	–
Rayner vd. (2009)	8180-38658	608	299	–	48	114	19	10	16	–
Ryde vd. (2010)	15320-15700	104	63	–	–	19	–	–	7	–
Smith vd. (2013)	15159-16828	53	9	–	7	9	4	–	5	–
Afşar vd. (2016, 2018)	15020-23379	120	27	–	11	12	11	–	28	7
Andreasen vd. (2016)	10070-24648	330	317	13	–	–	–	–	–	–
Abdurro'uf vd. (2022)	15000-17000	51227	4740	2979	256	332	346	72	1899	181
Kondo vd. (2019)	9117-13291	171	171	–	–	–	–	–	–	–
Kurucz	9780-24999	72964	8295	2600	2118	1184	822	159	1480	160
İncelenmiş Çizgiler	8180-38658	127878	15126	5605	2519	1868	1258	248	3523	349
Bu çalışma	10003-23308	267	204	10	2	28	11	1	10	1

analizi için oluşturulmuş ve Marışmak vd. (2024), Çınar vd. (2025), Yolalan vd. (2025) çalışmalarında ise başarıyla uygulanmıştır. Benzer şekilde, Şentürk vd. (2024) tarafından The Astrophysical Journal dergisinde yayımlanan ve bu tezin ilk çıktısını oluşturan çalışmada Şahin vd. (2023) çizgi listesi, metalce zengin karakter sergileyen Güneş Analogu HD 76151 yıldızı için de optik bölge tayf analizinde başarıyla kullanılmıştır.

HD 115617 yıldızının optik bölgedeki tayfsal analizlerinde ise ESPRESSO tayfçekerinin sağladığı geniş dalga boyu aralığı göz önünde bulundurularak Şahin vd. (2023) çizgi listesinin güncellenmiş ve genişletilmiş hâli olan Şahin vd. (2024) çizgi listesi tercih edilmiştir. Bu seçim, geniş spektral kapsamanın sunduğu avantajları en iyi şekilde değerlendirmek ve NIR bölgeye doğru uzanan geçişlerin analizini mümkün kılmak amacıyla yapılmıştır. Ayrıca, Güneş analizi için her iki çizgi listesi de yıldızlara ait hassas diferansiyel bolluk tayini yapabilmek için kullanılmıştır.

Tezin nihai amaçlarından biri, Güneş ve iki Güneş benzeri yıldız olan HD 76151 ile HD 115617 yıldızlarına ait yüksek çözünürlüklü tayf verilerine dayanarak Fe ve α -elementler (Ca, Mg, Si, Ti) için kırmızıöte (IR) bölgede yeni ve güvenilir bir çizgi listesi oluşturmaktır. Başlangıç aşamasında APOGEE projesinin (Majewski vd. 2017) 1500.0–1700.7 nm aralığını kapsayan çizgi listesi, Y-J-H ve K bantlarını (1000-2500 nm) içerecek şekilde genişletilmiştir. Seçilen geçişlerin yüksek çözünürlüklü ($R \approx 700000$) KPNO Güneş tayfı üzerinde izole, nispeten simetrik ve ölçüme uygun olmasına özen gösterilmiş; özellikle eşdeğer genişlik (EW) yöntemiyle bolluk analizi yapılabilecek

uygun çizgilerin merkez dalga boyları belirlenmiştir. Bu çizgilerin, mevcut atomik çizgi kütüphanelerinde (örneğin NIST, Kurucz, VALD) karşılıklarının tespit edilmesi özellikle kırmızıöte bölgedeki tanımlama açısından kritik öneme sahiptir. Böylece ölçülen tayf çizgileri için olası element adayları belirlenmiş ve bu adayların geçerli olup olmadıkları detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sürecinde kullanılan başlıca yöntem, çizgilerin multiplet yapısının analiz edilmesine dayanan “multiplet analizi”dir.² Bu analizle, tayfta gözlenen bir geçişin ait olduğu multiplet içindeki diğer geçişlerin gözlemlenebilirliği kontrol edilmiş; gözlenmeyen veya karışmaya (blending) maruz kalan çizgiler liste dışı bırakılmıştır.

1999 yılından günümüze yayımlanan ve literatürde sıklıkla başvurulanan tüm çizgi listeleri, Güneş tayfı üzerinde sistematik olarak test edilmiştir. İncelenen çizgi listeleri ve çizgi sayısı istatistikleri Tablo 3.3’de verilmiştir. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, bu listelerde yer alan geçişlerin önemli bir kısmında merkez dalga boylarının ve $\log gf$ değerlerinin teorik hesaplamalara dayandığı tespit edilmiştir. Bu durum, model atmosfer parametreleri ve bolluk hesabı açısından da çeşitli belirsizlikler doğurmuştur. İlk yaklaşım olarak, Andreasen vd. (2016) tarafından sunulan çizgi listesini kullanarak benzer bir analiz gerçekleştirmek hedeflenmiş; ancak yapılan detaylı değerlendirme sonucunda söz konusu çizgi listesinin birçok geçişinde atmosferik (tellürik) çizgilerle kirlenme tespit edilmiş ve bu durumun EW ölçümlerine ciddi sistematik hatalar getirebileceği anlaşılmıştır. Bu nedenle, mevcut çizgi listesinin doğruluğu ve kullanılabilirliği açısından daha güvenilir, gözlemsel olarak test edilmiş ve tellürik etkilerden arındırılmış yeni bir çizgi listesinin oluşturulması kaçınılmaz hâle gelmiştir. Sonuç olarak oluşturulan çizgi listesi Şentürk vd. (2024) çalışmasında ve tezin ekler kısmında paylaşılmıştır.

Söz konusu bu çizgi listesi, Bulge küresel küme üyesi yıldızların olası doğasının incelenmesi üzerine yazılan TÜBİTAK-1001 projesinin (değerlendirme aşamasında) yanı sıra Güneş ikiz ve benzerleri için planlanan yeni TÜBİTAK-1001 projesinde kırmızıöte tayfsal analizleri aşamasında da kullanılacaktır. Akdeniz Üniversitesi HRSS temel bilim araştırma laboratuvarı grubunun çalışmasıyla oluşturulan atomik çizgi listesi için dalgaboyu limiti 2024 Aralık itibariyle 3800-25000 Å aralığını kapsayacak şekilde

²Multiplet: İki ana enerji düzeyin ince yapı bileşenleri arasındaki geçişlerden oluşan çizgiler grubudur. Bu çizgiler, uyarılma enerjileri birbirine yakın seviyelere sahip olduğundan benzer davranış gösterirler (Bkz. Böhm 1993).

ve literatürde paylaşılan tayfların büyük çoğunluğunun tayfsal analizlerini mümkün kılacak şekilde genişletilmiştir. Kırmızıöte bölge çizgi listesinde bulunan demir ve alfa elementlerinin de diğer elementleri (öncelikli olarak Al, Mn) içerecek şekilde genişletilmesi planlanmaktadır.

3.4.3. Multiplet analizi ve doğası üzerine bazı notlar

Çizgi teşhisinde yalnızca merkez dalga boyu uyumu değil, aynı zamanda bu çizgilerin ait olduğu enerji düzeyleri arasındaki yapısal geçişlerin de tutarlı olması büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, kırmızıöte bölge için oluşturulan çizgi listesinin güvenilirliğini artırmak amacıyla multiplet analizi yapılmıştır. Bu analizde, bir çizginin ait olduğu multiplet ailesi içerisinde teorik olarak bulunması gereken diğer çizgilerin tayf üzerinde gözlemlenebilirliği değerlendirilmiştir.

Multiplet yapılarının tanımlanmasında, Rowland Multiplet Number (RMT) sistemi esas alınmıştır. Bu bağlamda Nave vd. (1994) tarafından yayımlanan ve nötral demir (Fe I) geçişlerini içeren ayrıntılı atlas temel referans olarak kullanılmıştır. Söz konusu bu atlas, Fe I geçişlerine ilişkin enerji düzeyleri, RMT numaraları, dalga boyları ve osilatör şiddetleri gibi parametreleri içererek multiplet analizini sistematik bir şekilde gerçekleştirmeyi mümkün kılmıştır. Bu çalışmada, Andreasen vd. (2016) çalışmasından yapılan RMT temelli incelemeler sayesinde 39 yeni Fe I geçişi tespit edilmiş; bunlardan 18 tanesi Güneş bollukları ile uyumlu sonuç gösterdiğinden nihai çizgi listesine dahil edilmiştir.

Ancak mevcut durumda, kırmızıöte bölgeye yönelik sistematik bir RMT kataloğunun eksik olduğu dikkat çekicidir. Özellikle iyonize geçişler (Fe II) ve diğer elementler için RMT temelli referans veri bulunmamaktadır. Bu eksiklik, kırmızıöte tayfsal analizlerin gelişimiyle birlikte, geniş kapsamlı ve güncel RMT kataloglarına duyulan ihtiyacın giderek artacağını göstermektedir. Gelecekte yapılacak multiplet analizlerinin, yalnızca Fe I geçişleriyle sınırlı kalmaması ve kırmızıöte bölgede başta α -elementler olmak üzere daha fazla element için RMT temelli katalogların oluşturulması yönünde ilerlemesi beklenmektedir. Bu gelişmeler, özellikle yüksek çözünürlüklü IR spektroskopisinin yükselişiyle birlikte tayfsal çizgi teşhisinde yeni bir standardın oluşmasına katkı sağlayacaktır.

3.4.4. Atomik veri kütüphaneleri ve atomik verinin test edilmesi

Tayfsal analizlerin güvenilirliği ve doğruluğu büyük ölçüde kullanılan atomik verilere dayanmaktadır. Analizde kullanılan çizgilerin teşhisinde analiz edilen yıldızların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin doğru biçimde ortaya konabilmesi kritik öneme sahiptir. Bu süreçte kullanılan başlıca atomik parametreler, alt düzey uyarılma potansiyeli (Lower Excitation Potential, LEP) ve geçiş olasılıkları ($\log gf$) olarak sıralanabilir.

Geçiş olasılıkları, bir atomun belirli enerji seviyeleri arasında foton salınması ya da soğurulması ile gerçekleşen süreçlerin birimsiz niceliksel bir ifadesidir. Bu parametre, istatistiksel ağırlık (g) ve osilatör şiddeti (f) çarpımıyla tanımlanır ve geleneksel olarak logaritmik formu ($\log gf$) kullanılır. Osilatör şiddeti, elektronların bir enerji seviyesinden diğerine geçiş yaparken yayılan ışınımın şiddetini belirler.

Atomik osilatör şiddeti, aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$f = 1.499 * 10^{-16} \frac{g_i}{g_k} \lambda^2 A_{ik} \quad (3.9)$$

Denklem 3.9'da g_i ve g_k , alt ve üst seviyeler için istatistiksel ağırlığı; λ , iki atomik düzey arasındaki geçiş sonrasında yayınlanan çizginin dalgaboyunu ve A_{ik} ise sn^{-1} başına bir i - düzeyinden k - düzeyine tanımlanan geçişin olasılığını temsil eder. A_{ik} büyüklüğü, dallanma oranı (BF_{ik}) ve radyatif yaşam süresi (τ_i) kullanılarak Denklem 3.10'da verildiği gibi tanımlanır:

$$A_{ik} = \frac{(BF)_{ik}}{\tau_i} \quad (3.10)$$

Dallanma oranı, belirli bir enerji seviyesinden gerçekleşebilecek tüm geçişler arasında ilgili geçişin oranını ifade eder ve çizgi şiddetiyle doğrudan ilişkilidir. Geçiş olasılığındaki belirsizlik hem çizgi şiddeti ölçümlerine hem de yaşam süresi tayinindeki belirsizliklere bağlıdır. Bu bağlamda, yüksek doğrulukta tayfsal bolluk analizleri için atomik parametrelerin olabildiğince hassas bir şekilde ölçülmesi ve rapor edilmesi gerekir.

Özellikle NIR bölgede gerçekleştirilen analizlerde, geçiş olasılıklarındaki belirsizlikler, optik bölgeye kıyasla daha yüksektir.

Bunun temel nedenlerinden biri, IR bölgesine özgü laboratuvar verilerinin sınırlı olması ve geçişlerin çoğunun teorik hesaplamalara dayanmasıdır. Bu durum, çizgi şiddetlerinin tayini ve buna bağlı olarak element bolluklarının hesaplanmasında önemli belirsizlikler doğurabilir. Tezin sağladığı bir diğer önemli analiz ise teorik çizgilerin tayf analizlerinde uygulanabilirliğinin (eşdeğer genişlik ölçümüne uygun bir şekilde) değerlendirmesidir.

Literatürde aynı atomik geçiş için farklı kaynaklarda bildirilen $\log gf$ değerleri, kullanılan spektrum sentez veya eşdeğer genişlik analizlerinde belirgin bolluk sapmalarına yol açmaktadır. Bu durum özellikle NIR bölge gibi çoğunlukla teorik verilerin hakim olduğu tayf aralıklarında daha da belirgin hâle gelmektedir.

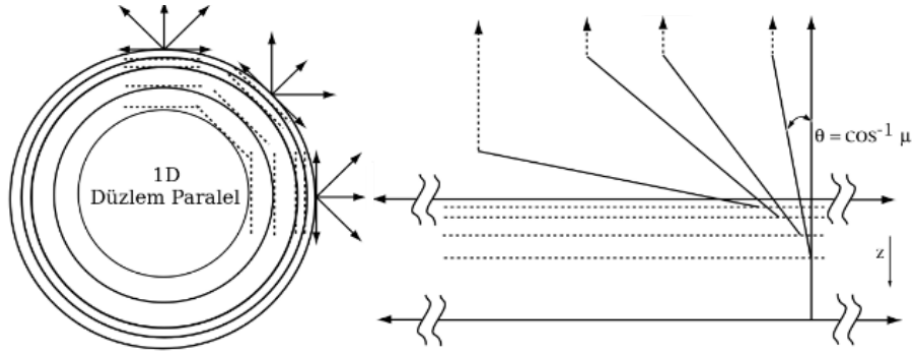
Bu çalışmada, analiz edilen her bir spektral çizgi için farklı atomik veri kataloglarında (Tablo 3.3'e ek olarak NIST ve VALD atomik veritabanları) yer alan $\log gf$ değerleri, yüksek çözünürlüklü Güneş tayfı üzerinde test edilmiştir. Güneş için referans alınan literatür bolluğuna (örneğin Fe için: $\log \epsilon(\text{Fe}) = 7.50$, Asplund vd. 2009) en yakın sonucu sağlayan $\log gf$ değeri, ilgili geçiş için en uygun değer olarak kabul edilmiştir. Böylece, her bir çizgi için farklı kaynaklardan elde edilen $\log gf$ değerlerinin bolluk hesaplamalarına etkisi karşılaştırmalı olarak analiz edilerek, en doğru ve tutarlı osilatör şiddeti seçimi gerçekleştirilmiştir.

Bu yaklaşım sayesinde, literatürde dağınık şekilde bulunan atomik geçiş verileri ilk kez sistematik biçimde bir araya getirilmiş ve kullanıcıların doğrudan kullanabileceği optimize edilmiş bir $\log gf$ veri seti oluşturulmuştur. Böylece, gelecekte benzer tayfsal analizler gerçekleştirecek araştırmacıların zaman ve emek kaybı önlenmiş, analizlerin güvenilirliği artırılmıştır. Tez kapsamında oluşturulan çizgi listesi ve incelenen çalışmalara dair istatistiki detaylar Ekler kısmında içerilmiştir.

Tayfsal çizgilerin titizlikle teşhis edilip osilatör şiddetleri optimize edildikten ve eşdeğer genişlik ölçümleri tamamlandıktan sonra yıldız atmosferlerinin temel fiziksel parametrelerinin türetilmesine yönelik aşamaya geçilmiştir.

3.4.5. Yıldız model atmosfer parametrelerinin tayini ve ilave yaklaşımlar

Yıldızların tayfsal analizlerinde kimyasal bollukların güvenilir biçimde hesaplanabilmesi için yıldız atmosferinin fiziksel koşullarını temsil eden doğru model atmosfer parametrelerinin (T_{eff} , $\log g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$, ξ) belirlenmesi büyük önem taşır (Gonzalez ve



Şekil 3.13. Küresel yüzeye sahip yıldızlarda varsayılan 1D düzlem-paralel atmosferin gösterimi.

Lambert 1996; Fuhrmann vd. 1997). Bu tez kapsamında hem optik hem de NIR dalga boyu bölgelerinde yapılan analizler için model atmosfer parametreleri klasik tayfsal yöntemler çerçevesinde elde edilmiştir. Model atmosferlerin hesaplanmasında *ATLAS9* (Castelli ve Kurucz 2003) kodu tercih edilmiş, bu kodun güncellenmiş opasite dağılım fonksiyonlarını içeren *ODFNEW* versiyonu kullanılmıştır. Bu kod çerçevesinde hesaplanan model atmosfer parametrelerinin hesabına dair yaklaşımlar aşağıda maddelenen şekilde kabul edilir:

- Yıldız atmosferi bir boyutlu ve düzlem paralel (1D and plane-parallel) olarak kabul edilir (Şekil 3.13).
- Yıldız atmosferi 72 katmandan oluşur ve her katmanda hidrostatik denge kurulmuştur. Enerji transferi ise ışıınım yoluyla gerçekleşir ve ışıının dağılımı Plankiendir.
- Yerel Termodinamik denge (Local Thermodynamic Equilibrium, LTE) koşulu bulunmaktadır.
- Yıldızın içerdiği sıcak yıldız maddesi ideal gaz yasasına uyan parçacıklardan oluşur ve hızları da Maxwell-Boltzmann hız dağılımına uyar.
- Yıldız yüzeyinde bulunabilecek leke ve granül yapılanmaları ile manyetik alan etkileri ihmal edilir.

ATLAS9 kodu, atmosferi 72 eşit optik derinlik katmanına ayırarak her bir katman için yıldıza ait sırasıyla *RHOX*, kütle fonksiyonu; *T*, sıcaklık; *P*, gaz

```

TEFF 5780. GRAVITY 4.35000 LTE
TITLE
OPACITY IFOP 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 0 0 0 0
CONVECTION ON 1.96 TURBULENCE OFF 0.00 0.00 0.00 0.00
ABUNDANCE SCALE 1.58489 ABUNDANCE CHANGE 1 0.92070 2 0.07836
ABUNDANCE CHANGE 3 -10.94 4 -10.64 5 -9.49 6 -3.52 7 -4.12 8 -3.21
ABUNDANCE CHANGE 9 -7.48 10 -3.96 11 -5.71 12 -4.46 13 -5.57 14 -4.49
ABUNDANCE CHANGE 15 -6.59 16 -4.71 17 -6.54 18 -5.64 19 -6.92 20 -5.68
ABUNDANCE CHANGE 21 -8.87 22 -7.02 23 -8.04 24 -6.37 25 -6.65 26 -4.54
ABUNDANCE CHANGE 27 -7.12 28 -5.79 29 -7.83 30 -7.44 31 -9.16 32 -8.63
ABUNDANCE CHANGE 33 -9.67 34 -8.63 35 -9.41 36 -8.73 37 -9.44 38 -9.07
ABUNDANCE CHANGE 39 -9.80 40 -9.44 41 -10.62 42 -10.12 43 -20.00 44 -10.20
ABUNDANCE CHANGE 45 -10.92 46 -10.35 47 -11.10 48 -10.27 49 -10.38 50 -10.04
ABUNDANCE CHANGE 51 -11.04 52 -9.80 53 -10.53 54 -9.87 55 -10.91 56 -9.91
ABUNDANCE CHANGE 57 -10.87 58 -10.46 59 -11.33 60 -10.54 61 -20.00 62 -11.03
ABUNDANCE CHANGE 63 -11.53 64 -10.92 65 -11.69 66 -10.90 67 -11.78 68 -11.11
ABUNDANCE CHANGE 69 -12.04 70 -10.96 71 -11.98 72 -11.16 73 -12.17 74 -10.93
ABUNDANCE CHANGE 75 -11.76 76 -10.59 77 -10.69 78 -10.24 79 -11.03 80 -10.91
ABUNDANCE CHANGE 81 -11.14 82 -10.09 83 -11.33 84 -20.00 85 -20.00 86 -20.00
ABUNDANCE CHANGE 87 -20.00 88 -20.00 89 -20.00 90 -11.95 91 -20.00 92 -12.54
ABUNDANCE CHANGE 93 -20.00 94 -20.00 95 -20.00 96 -20.00 97 -20.00 98 -20.00
ABUNDANCE CHANGE 99 -20.00
READ DECK6 72 RHOX,T,P,XNE,ABROSS,ACCRAD,VTURB, FLXCNV,VCONV,VELSND
3.84224279E-04 3660.9 8.602E+00 2.344E+09 3.471E-04 1.105E-01 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 6.976E+05
5.04203561E-04 3683.6 1.129E+01 3.021E+09 3.943E-04 1.151E-01 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 6.823E+05
6.45377118E-04 3706.6 1.445E+01 3.808E+09 4.459E-04 1.161E-01 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 6.720E+05
8.11696671E-04 3730.3 1.817E+01 4.728E+09 5.051E-04 1.162E-01 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 6.649E+05
1.00723360E-03 3754.2 2.255E+01 5.798E+09 5.734E-04 1.160E-01 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 6.599E+05
1.23668612E-03 3777.8 2.769E+01 7.043E+09 6.522E-04 1.161E-01 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 6.565E+05
1.50562345E-03 3801.1 3.371E+01 8.488E+09 7.417E-04 1.163E-01 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 6.541E+05
1.82301778E-03 3824.7 4.081E+01 1.018E+10 8.337E-04 1.143E-01 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 6.527E+05
2.19896633E-03 3847.7 4.923E+01 1.216E+10 9.402E-04 1.130E-01 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 6.518E+05
2.64273843E-03 3870.3 5.916E+01 1.448E+10 1.064E-03 1.127E-01 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 6.513E+05
...
...
...

```

Şekil 3.14. HD 76151 yıldızına ait ATLAS9 modelinde ilk 23 satır opasite kaynak anahtarını, model parametrelerini, 99 element için opasite hesabında referans olarak kullanılan Güneş için Hidrojen dahil edilmemiş bolluk değerlerini içerir. ATLAS9 için söz konusu bu Güneş bollukları Anders ve Gravesse (1989) çalışmasından alınmıştır.

basıncı; XNE , elektron sayı yoğunluğu; $ABROSS$, Rosseland opasitesi; $ACCRAD$, ışıyım soğrulmasından kaynaklanan ivme; $VTURB$, mikrotürbülans hızı; $FLXCNV$, konvektif olarak taşınan enerji akısı; $VCOMV$, konvektif taşınım hızı ve $VELSND$, ses hızı parametreleri iteratif olarak hesaplar (Şekil 3.14). LTE kabülü altında, her katman karacisim gibi davranır ve kaynak fonksiyonu Planck fonksiyonu ile ifade edilir:

$$B_v(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (3.11)$$

Kod aynı zamanda hidrostatik denge denklemini ($\frac{dP}{dr} = -g\rho$) ve radyatif denge koşulunu ($\frac{dF}{dr} = 0$) sağlar. Bu varsayımlar altında, tayf çizgilerinin doğrudan yorumlanabilir hale gelmesi için model atmosfer parametrelerinin hassas biçimde tayin edilmesi gereklidir.

Model atmosfer parametreleri olan etkin sıcaklık (T_{eff}), yüzey yerçekimi ($\log g$), metalisite ($[\text{Fe}/\text{H}]$) ve mikrotürbülans hızı (ξ) yukarıda özetlenen varsayımların bütüncül bir çözümü altında klasik tayfsal yöntem ile belirlenmiştir. Bu tez kapsamında her bir yıldız için eşdeğer genişlikleri ölçülen nötr/iyonize elementlerin büyüme eğrisi prensibi altında hesaplanan model parametreleri ve aynı model parametrelerinden türetilen logaritmik element bollukları elde edilmiştir. Optik bölgede model parametre tayin etmek için öncelikli olarak Fe I/II iyonizasyon dengesi kurulmuş, Ti I/II ve Cr I/II element türleri için de eşzamanlı olarak denge durumunda olması sağlanmıştır. Kırmızıöte bölge analizlerde ise model parametreleri kırmızıöteye özgü bağımsız ölçümlerden ve Fe I/II iyonizasyon denge koşulunun sağlanmasıyla elde edilmiştir.

Model atmosfer parametrelerinin hesaplanması için MOOG yazılımı ve 'abfind' sürücüsü kullanılmıştır. İlgili paketin çalışması için girdi parametresi olarak sırasıyla soğurma çizgilerinin merkez dalgaboyu, geçişi veren elementin bilgisi, alt uyarılma enerjisi, geçiş olasılığı ve EW ölçümlerinin bulunduğu bir liste gereklidir. *abfind* sürücüsü kullanılarak analiz süreci başlatılır ve her bir model parametre değeri için farklı kabüller göz önüne alınır:

- T_{eff} ; Nötral elementlere duyarlıdır. Nötral elementler için ölçülen bolluk değerlerinin düşük ya da yüksek alt uyarılma enerjisinden bağımsız olma koşulu aranır. Dolayısıyla ölçülen tüm çizgilerin eşdeğer genişlik analizinden elde edilen

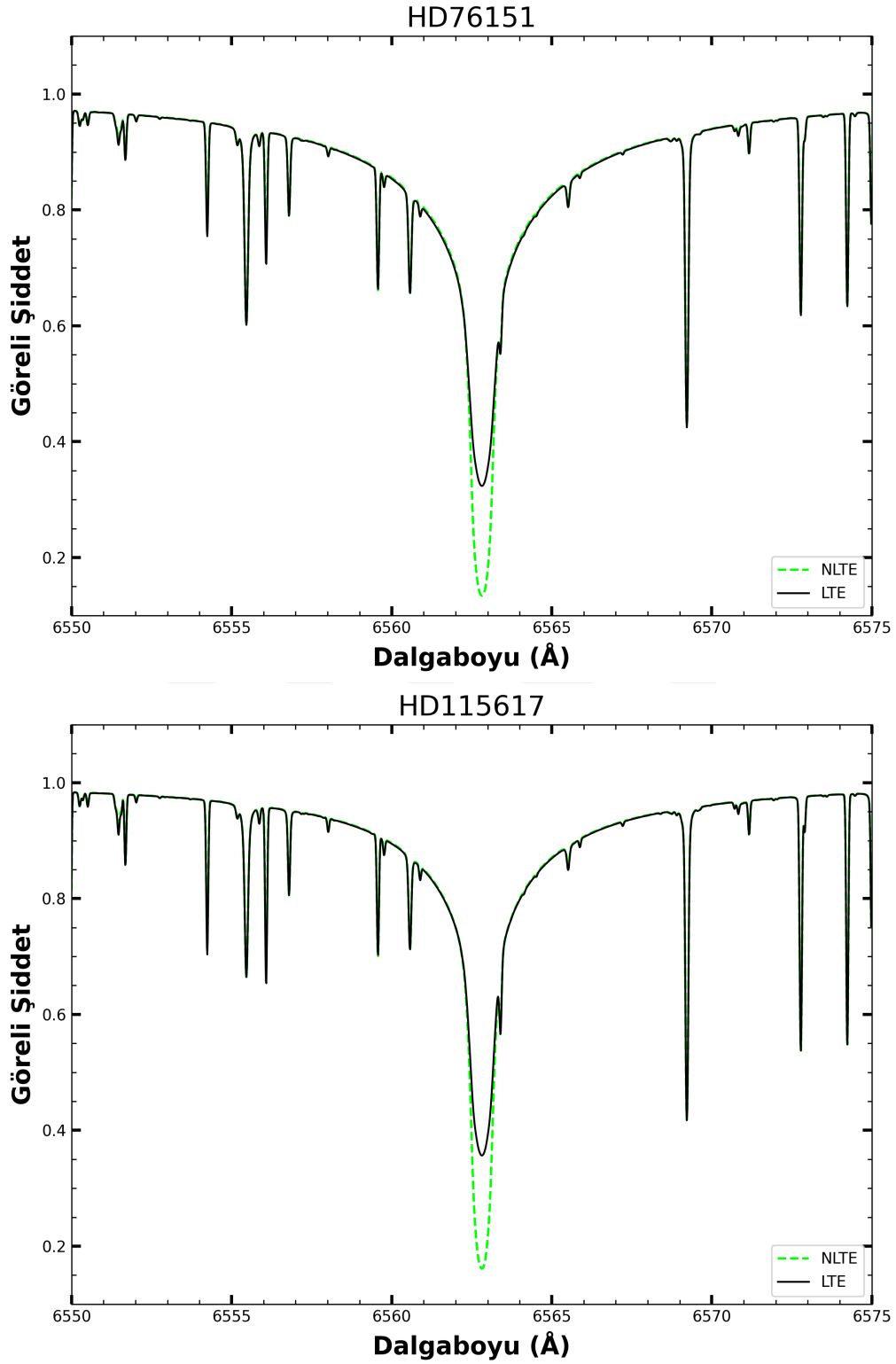
bollukların birbirine eşit (ya da belli bir σ değeri etrafında saçılım gösteren) olduğu sıcaklık, etkin sıcaklık olarak kabul edilir.

- $\log g$; İyonize elementlere duyarlıdır. Aynı elementin nötral ve iyonize durumları arasında denge koşulunun sağlandığı değerdir. Bu tez kapsamında optik bölge için Fe I/II, Ti I/II ve Cr I/II denge koşulları sağlanarak; kırmızıöte bölge için geçiş sayısının azalmasından dolayı Fe I/II dengesinden elde edilmiştir.
- $[Fe/H]$; Tez kapsamında elde edilen metalisite değeri optik ve kırmızıöte bölgelerde belirtilen elementler çerçevesinde nötral-iyonize denge koşulu sağlandıktan sonra Fe II logaritmik bolluğundan belirlenmiştir. İyonize demir değerlerinin Non-LTE etkilerden etkilenmediği ya da çok az etkilendiği tespit edildiği için böyle bir tercih yapılmıştır.
- ξ ; Nötral elementler (özellikle nötral Fe) için hesaplanan bolluk değerlerinin güçlü ve zayıf çizgiler için aynı olma koşulu aranır. Bolluk değeri indirgenmiş eşdeğer genişlik (W_λ/λ) ile değişmemelidir.

Yukarıda özetlenen tüm yaklaşımlar model parametresinin elde edilmesi sırasında eşzamanlı olarak sağlanmalıdır. Aksi bir durumda, yıldız atmosferinde LTE koşulu sağlanmış olarak kabul edilemez.

Nitekim yıldız fotosferinin üst katmanlarında kara cisim varsayımı geçerliliğini kaybeder (Gray, 2005). Bu nedenle yüksek katmanlarda LTE varsayımı yapılamaz. Kaynak fonksiyonunun Planck fonksiyonu ile açıklanamadığı bu duruma Non-LTE adı verilir. Yıldız atmosferinin derinlerinde oluşan çizgiler için bu varsayımdan sapma oldukça önemlidir. Bilindiği üzere çizginin kanatları derin katmanlarda (LTE) ve merkezi ise yüksek katmanlarda (Non-LTE) oluşur (Örnek olarak Şekil 3.15). Yıldızların model parametreleri ve elde edilen model parametrelerden türetilen logaritmik bolluklar LTE yaklaşımıyla hesaplanmıştır. Ancak Non-LTE etkiler de analize dahil edilmiş ve INSPECT aracılığıyla NLTE-LTE düzeltme parametreleri hesaplanmıştır.

Bununla birlikte, özellikle NIR (NIR) bölge tayf analizlerinde geçerli olan sınırlı çizgi sayısı, atomik verilerdeki belirsizlik ve yoğun tellürik etkiler gibi nedenlerle klasik tayfsal yöntemlerin bazı durumlarda yeterli duyarlılığı sağlayamaması düşünülebilir. Bu sebeple,



Şekil 3.15. HD 76151 (üst panel) ve HD 115617 (alt panel) yıldızları için H α bölgesinde hesaplanan Non-LTE etkilerin gösterimi. Non-LTE etkilerin çizgi merkezinde etkili olduğu gösterilmiştir. Non-LTE etkisi dikkate alınarak hesaplanan sentetik çizgi profilleri yeşil renkli olarak gösterilmiştir.

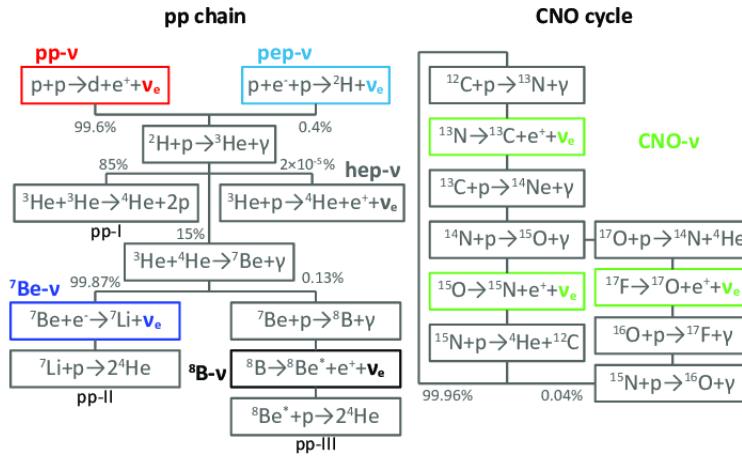
bu çalışmada NIR bölgeden elde edilen model atmosfer parametrelerinin güvenilirliğini değerlendirmek ve NIR analizine destekleyici bir perspektif kazandırmak amacıyla, etkin sıcaklık belirlemede bağımsız bir yöntem olan Çizgi Derinlik Oranı (Line Depth Ratio, LDR) yaklaşımı kullanılmıştır.

LDR yöntemi özellikle sıcaklık duyarlılığı yüksek çizgi çiftlerinin analizine dayanmaktadır. Bu çizgiler, tellürik kontaminasyondan arındırılmış ve merkez derinlik ölçümü yapılabilecek izolasyonda seçilmiştir. Analiz sonucunda, IR bölge için elde edilen etkin sıcaklıkların doğrulanmasını sağlamış ve model atmosferin tutarlılığı açısından önemli bir karşılaştırma aracı olmuştur. Bu tez çalışmasında LDR ilişkileri, Fukue vd. (2015) çalışmasında tanımlanan G ve K tayf türü yıldızlar üzerinden kalibrasyonlara dayanarak uygulanmış ve klasik yöntemlerle elde edilen sıcaklık değerleriyle karşılaştırılmıştır.

Buna ek olarak, mikrotürbülans hızının (ξ) doğruluğunu test etmek amacıyla, ilk olarak Şahin ve Lambert (2009) tarafından literatüre kazandırılmış bir metodoloji benimsenmiştir. Bu metodoloji çerçevesinde öncelikli olarak T_{eff} , $\log g$, Fe/H ve ξ için yukarıda maddelenen koşullar sağlanır. Ardından sadece ξ değeri belirli adımlarla değiştirilir ve model atmosferin elde edilmesini sağlayan nötr/ionize element çiftleri için elde edilen bollukların sapma değerleri hesaplanır. Bu işlem sonucunda tüm nötr/ionize element çiftleri için bir minimum noktası oluşur. Bu görselleştirme bize hem uygun ξ değerini hem de σ_{ξ} değerini verir. Böylece, model atmosfer parametrelerinin tayinindeki yaklaşımların birlikte kullanımı ile IR bölgedeki analizlerin tutarlılığı ve model parametrelerinin geçerliliği güçlendirilmiştir.

3.4.6. α -, demir grubu ve nötron yakalama elementlerinin doğası

Model atmosfer parametrelerinin güvenilir biçimde tayin edilmesinin ardından, yıldızların kimyasal kompozisyonlarının detaylı biçimde ortaya konması gerekmektedir. Tez kapsamında, özellikle Güneş ve Güneş benzeri yıldızların evrimsel geçmişlerinin ve galaktik kimyasal evrimin izlerinin sürülebilmesi adına belirli element grupları (alfa elementleri, demir grubu elementleri ve nötron yakalama süreciyle oluşan ağır elementler) ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Her bir element grubu, nükleosentez süreçleri ve galaktik evrimsel tarihçeleri bakımından farklı üretim mekanizmalarına sahip olduğundan, bu



Şekil 3.16. Proton-proton zinciri ve karbon-nitrojen-oksijen döngüsü ile hidrojen yakma sürecinin özeti.

elementlerin tayfsal olarak doğru biçimde teşhis edilmesi ve bolluklarının hesaplanması hem yıldız iç yapısına hem de ait oldukları galaktik bileşene dair önemli bilgiler sunar. Takip eden alt bölümlerde, bu çalışmada analiz edilen elementlerin kökenleri, oluşum süreçleri ve yıldız evriminin anlaşılmasındaki rolleri ayrıntılı biçimde sunulacaktır.

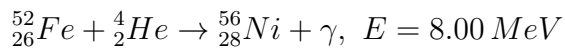
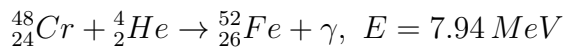
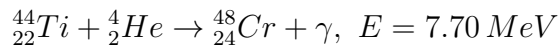
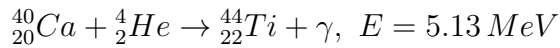
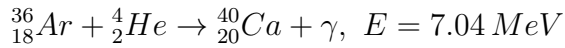
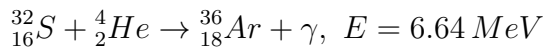
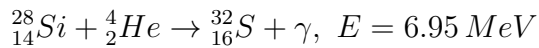
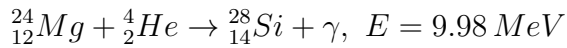
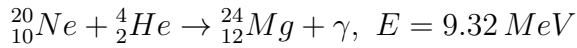
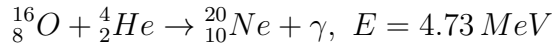
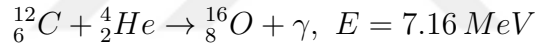
Günümüzdeki kimyasal elementlerin varlığı ve dağılımı, Büyük Patlama ile başlamış, daha sonrasında yıldızlarda ve yıldızlararası ortamda (ISM) bulunan nükleer süreçlerle oluşumuna devam etmiştir. Bu süreçler günümüzde bile hem teorik hem de deneysel olarak çalışılmaktadır.

Başlangıçta ilk birkaç dakika içerisinde $\approx 10^9$ Kelvin (K) basamağında bir sıcaklıkta kozmolojik nükleosentezin tüm ${}^1\text{H}$ (Hidrojen) ve D (Döteryum)'u, az miktarda ${}^3\text{He}$ (Helyum) ve ${}^4\text{He}$ 'un büyük bir kısmını biraz da ${}^7\text{Li}$ oluşturduğunu bilmekteyiz (Wagoner vd. 1967). Bir başka açıdan $X(\text{H}) \approx 0.755$, $Y(\text{He}) \approx 0.231$, $Z(>{}^4\text{He}) \approx 0.014$ ilkel kütle kesir fonksiyonlarına (primordial mass function) karşılık gelmektedir (Burbidge vd. 1957; B²FH).

BBN sırasında oluşan termodinamik koşullar, daha ağır elementlerin sentezine olanak tanımamıştır. Bu nedenle, periyodik tablonun geri kalanı evrenin daha sonraki dönemlerinde yıldızlar içerisinde ve bazı yüksek enerjili nükleer süreçler aracılığıyla üretilmiştir. Burbidge vd. (1957, B²FH) çalışmasında yıldız içerisindeki nükleosentez süreçleri tanımlanmış olup, yıldızların yaşam döngüsü boyunca üretebileceği elementler açıklığa kavuşturulmuştur.

Yıldızların çekirdeklerinde gerçekleşen hidrojen yakma süreçleri, enerji üretiminin temelini oluşturur. Düşük sıcaklıklarda etkin olan proton-proton zinciri (pp-chain) ve daha yüksek sıcaklıklarda baskın hale gelen karbon-nitrojen-oksijen döngüsü (CNO cycle) aracılığıyla hidrojen helyuma dönüştürülür (Clayton 1983; Rolfs ve Rodney 1988). Şekil 3.16 proton-proton zinciri ve karbon-nitrojen-oksijen döngüsünü göstermektedir. Bu reaksiyonlar yalnızca yıldızların enerji üretimini değil aynı zamanda daha ağır elementlerin oluşumuna giden yolu da başlatır.

α **elementleri** (Mg, Si, Ca, Ti vb.), atom çekirdeklerine ardışık şekilde ^4He (alfa parçacığı) eklenmesiyle oluşan elementlerdir. Bu elementler başlıca yıldız içi nükleosentez süreçlerinin ürünüdür ve özellikle kütleli yıldızların evrimlerinin ileri evrelerinde gerçekleşen α -yakalama reaksiyonları ile üretilirler. Örneğin, karbon (^{12}C) ve oksijen (^{16}O) gibi öncül çekirdeklerin ^4He ile çarpışmaları sonucunda magnezyum (^{24}Mg), silisyum (^{28}Si), kalsiyum (^{40}Ca) ve titanyum (^{48}Ti) gibi çekirdekler meydana gelir (Arnett 1996; Clayton 1983; bkz. Denklem 3.4.6.).



Bu süreçler yıldızların çekirdek çökmesiyle gerçekleşen Tip II süpernova patlamaları

sırasında dış katmanlara saçılır. Dolayısıyla alfa elementlerinin bolluğu, gökadalardaki yıldız oluşum hızı ve Tip II süpernova oranı ile doğrudan ilişkilidir. Özellikle demire göre alfa elementleri oranı ($[\alpha/\text{Fe}]$) yıldızların oluştuğu ortamın zenginleşme sürecine dair zaman ölçeklerini anlamada kritik bir gösterge sağlar (Tinsley 1979; McWilliam 1997; Matteucci 2003). $[\alpha/\text{Fe}]$ oranının yüksek olduğu yıldızlar, kısa ömürlü kütleli yıldızların hâkim olduğu erken dönem yıldız oluşum bölgelerinde doğmuştur.

Bu tez kapsamında analiz edilen yıldızlar — G tayf türü anakol yıldızları — α elementlerinin termal yapı üzerindeki etkilerini ve dolayısıyla opasiteyi değiştirebilecek nitelikteki rolleri nedeniyle, bu elementlerin doğru bolluklarının elde edilmesi model atmosfer çözümleri açısından da önem arz eder (Salaris ve Cassisi 2005).

Analiz edilen elementlerin hangi nükleosentez süreçleriyle oluştuğuna ve yıldız evrimindeki rollerine kısaca değinmek, bu tezdeki kimyasal bolluk sonuçlarının anlamlandırılması açısından yararlı olacaktır:

- **Magnezyum (Mg):** B2FH (1957) çalışmasında magnezyum, esas olarak karbon ve neon yakması süreciyle ilişkili bir α -yakalama ürünü olarak sınıflandırılmıştır. Özellikle ^{25}Mg ve ^{26}Mg izotopları, kararsız nükleonların ardışık α -yakalama reaksiyonları sonucunda nükleosentez yoluyla oluşur. Mg, kısa ömürlü ve yüksek kütleli yıldızların ($M > 8M_{\odot}$) geç evrim evrelerinde sentezlenir ve Tip II süpernova patlamaları sonucunda yıldızlararası ortama salınır (Woosley ve Weaver 1995; Kobayashi vd. 2006). Mg/H oranı, yıldızın köken aldığı galaktik bileşen (örneğin kalın disk) hakkında bilgi sağlayabilir (Fuhrmann 1998). Güneş-benzeri yıldızlarda gözlenen Mg bollukları, yıldızın doğduğu ortamın kimyasal zenginliği ve galaktik diskin evrimsel geçmişi hakkında bilgi sunar. FGK tayf türü anakol yıldızlarında Mg, özellikle metal fakir yıldızların α -zenginliğini anlamada önemli bir belirteçtir. Ayrıca yapılan birçok çalışmada (örneğin Feuillet vd. 2016; Silva Aguirre vd. 2018) $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ oranının, yıldız yaşı ile doğrudan korele olduğu gösterilmiştir. Özellikle APOGEE ve GALAH gibi büyük tayfsal tarama projelerinde $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ oranı yaş skalası olarak kullanılır.
- **Silisyum (Si):** Si, B2FH çalışmasında hem karbon hem de oksijen yakması süreçleriyle bağlantılı olarak α -element sınıfında tanımlanmıştır. $^{24}\text{Mg}(\alpha, \gamma)^{28}\text{Si}$

reaksiyonu temel sentez kanalını oluşturur (Arnett 1996). Özellikle ^{28}Si izotopu, oksijen yakması evresinde büyük miktarda üretilir ve yine Tip II süpernovalarla çevreye salınır. Silisyumun üretimi, metal açısından fakir yıldızların çekirdeklerinde başlar ve galaktik disk boyunca metal zenginliği arttıkça göreceli olarak azalır (Timmes vd. 1995). Bu durum, yıldız evrimi ve galaktik kimyasal evrimin zamanlamasının modellenmesinde kritik bir role sahiptir (McWilliam 1997; Kobayashi vd. 2006). Güneş ve benzeri yıldızlarda Si bollukları, galaktik kimyasal evrimin takibinde, yıldız popülasyonlarının ayrıştırılmasında kritik bir rol oynar.

- **Kalsiyum (Ca):** Ca, B2FH’de hem α -element hem de geç oksijen ve silikon yanma ürünlerinden biri olarak tanımlanmıştır. ^{40}Ca , en yaygın izotopudur. Tip II süpernovalar tarafından yayılan kalsiyum, özellikle metalce fakir yıldızlarda $[\text{Ca}/\text{Fe}]$ artışına neden olur (Matteucci ve Greggio 1986). FGK tayf türü anakol yıldızlarında Ca çizgileri hem nötral hem de iyonize hallerde gözlenebildiği için iyonizasyon denge testleri açısından da kullanışlıdır. Ca bollukları, α -element zenginliğinin takibi için güvenilir bir referans sağlar (McWilliam 1997; Venn vd. 2004).

Özellikle Ca II H (3968.47 Å) ve K (3933.66 Å) çizgileri, erken G ve F tayf türü yıldızlarda atmosferik yapıyı, kromosfer aktivitesini ve metal içeriğini değerlendirmek amacıyla kullanılan en güçlü soğurma çizgilerinden bazılarıdır. Bu çizgiler, düşük uyarılma potansiyeline sahip olmaları ve geniş kanat yapıları sayesinde hem düşük hem de yüksek çözünürlüklü tayflarda kolaylıkla gözlenebilir (Gray 2005). Bu çizgiler aynı zamanda yıldızların yaşını, yüzey aktivitesini ve kromosfer yapılarını araştırmakta da kullanılır (Linsky ve Avrett 1970; Baliunas vd. 1995). Özellikle S-index gibi kromosfer aktivite göstergeleri, Ca II H ve K çizgilerinden türetilmiştir ve Güneş benzeri yıldızların döngüsel aktivite varyasyonlarını incelemede kritik öneme sahiptir (Duncan vd. 1991). Ca H ve K çizgileri ayrıca yıldızların atmosferik parametreleriyle korele oldukları için metal bolluğu tayinlerinde de birincil göstergeler arasında yer alır. Ayrıca, bu çizgiler düşük metalisiteye sahip yıldızlarda dahi izlenebilir oldukları için metalce fakir

yıldızların tanımlanmasında da sıklıkla tercih edilir (Beers vd. 1990; Sneden vd. 2003).

- **Titanyum (Ti):** Titanyum, diğer α elementlerinden farklı olarak hem α -yakalama ürünlerinin birleşimi hem de çekirdek bozunmaları yoluyla sentezlenir (Woosley ve Weaver 1995). Nitekim titanyumun α -element olup olmadığı literatürde uzun süre tartışmalı olmuştur. B2FH (1957) çalışmasında Ti, Fe-peak elementleri ile α -elementler arasında konumlandırılmıştır. Ancak gözlemsel veriler, özellikle Ti II çizgileri üzerinden yapılan analizlerde, Ti'nin α -element benzeri davranış sergilediğini göstermektedir. Bu durum, Tip II süpernovalarda kısmen α -yakalama süreçleriyle sentezlenebileceğini düşündürmektedir (Kobayashi vd. 2020). Ti bolluğundaki varyasyonlar, farklı galaktik bileşenlerdeki (ör. kalın disk, ince disk, halo) kimyasal evrim süreçlerini ayırt etmekte önemlidir. Titanyum çizgileri, yüksek çözünürlüklü tayflarda güçlü ve izole geçişler sunması nedeniyle model atmosfer parametrelerinin güvenilir biçimde test edilmesine olanak sağlar (Sneden vd. 2016). Yüksek çözünürlüklü tayflarda Ti I ve Ti II geçişlerinin analiz edilmesi, iyonizasyon dengesi kıyaslamaları açısından da kıymetlidir.

α element bollukları, aynı zamanda büyük ölçekli spektroskopik taramalarda (örneğin GALAH, APOGEE, Gaia-ESO) kimyasal bolluk analizlerinin kalibrasyonu açısından da temel referanslar arasında yer alır (Jofré vd. 2015). Özellikle galaktik bulge bölgesinin oluşum zaman ölçeğini belirlemede $[\alpha/\text{Fe}]$ oranlarının belirleyici olduğu gösterilmiştir (Friaça ve Barbuy 2017). Ek olarak, dev gezegen barındıran yıldızların gezegen barındırmayanlara göre sistematik biçimde daha yüksek α element bolluğu gösterdiği de ortaya konmuştur (Adibekyan vd. 2012). Bu durum, gezegen oluşum süreçleri ile kimyasal zenginleşme arasındaki ilişkiyi anlamak açısından da α elementlerinin önemini vurgular. Bu nedenlerle α elementlerinin hassas bir şekilde tayin edilmesi yalnızca yıldızların evrimini anlamakla sınırlı kalmaz, aynı zamanda gökadalara oluşum süreçlerini, yıldız popülasyonlarının kimyasal yapılarını ve hatta gezegen sistemlerinin evrimini de anlamada çok kapsamlı bir rol üstlenir.

α elementlerinin incelenmesinin ardından, tayfsal analizlerde kritik rol oynayan ve yıldız evrim süreçlerinin izlenmesinde yaygın olarak başvurulmuş bir diğer önemli grup

olan demir grubu elementlerine geçilmiştir. Bu grup, başta Fe olmak üzere Cr, Co, Mn ve Ni gibi geçiş metallerini içerir ve Güneş tayfında en yoğun çizgi dağılımına sahip elementler olarak dikkat çeker. Bu elementler, yalnızca atmosfer parametrelerinin tayininde değil, aynı zamanda yıldızın kimyasal geçmişi, metal içeriği ve galaktik evrime katkısı açısından da temel belirteçler arasında yer alır.

Demir grubu elementleri, çekirdek kütle numarası $21 \leq Z \leq 30$ olan geçiş metalleri olarak tanımlanır ve astrofiziksel çalışmalarda özellikle demir (Fe), krom (Cr), nikel (Ni), kobalt (Co) ve mangan (Mn) gibi türleri içerir. Bu elementlerin nükleosentez kökeni ağırlıklı olarak Tip Ia ve Tip II süpernova patlamalarına dayanmaktadır (Woosley ve Weaver 1995; Nomoto vd. 2013). Özellikle demir, Tip Ia süpernovaların başlıca ürünü olarak kabul edilirken, Cr, Mn ve Co gibi elementlerin üretiminde süpernova ortamındaki nötron zenginliğinin ve patlama enerjisinin belirleyici olduğu belirtilmiştir (Seitenzahl vd. 2013).

Demir elementi, tayfsal analizlerde en sık kullanılan türlerden biridir ve yüzlerce güçlü ve zayıf çizgiye sahip olması nedeniyle hem optik hem de kırmızıöte bölgelerde model atmosfer parametrelerinin tayininde yaygın olarak kullanılır (Gray 2005). Nitekim etkin sıcaklık (T_{eff}) ve mikrotürbülans hızı (ξ) tayininde Fe I çizgileri; yüzey yerçekimi ($\log g$) tayininde ise Fe I ve Fe II iyonları arasındaki denge (ionization balance) temel alınır (Gonzalez ve Lambert 1996; Sneden 1973). Ayrıca Fe II çizgilerinin, Non-LTE etkilerden daha az etkilenmesi nedeniyle metal bolluğunun ($[\text{Fe}/\text{H}]$) tayininde tercih edilen tür olduğu literatürde yaygın biçimde belirtilmiştir (Mashonkina vd. 2011).

Demir grubunun yıldız evrimi açısından önemi, bu elementlerin yıldızların metal içeriğini belirlemedeki rolüyle ilişkilidir. Metal bolluğu, yıldızın oluştuğu ortamın kimyasal evrimine dair bilgi sunarken, aynı zamanda yıldızın yaş tayini, galaktik popülasyon sınıflandırması ve yıldızlararası ortamın zenginleşme süreçlerinin izlenmesinde de kullanılır (Venn vd. 2004; Kobayashi vd. 2006).

Demir grubu elementleri, genellikle α elementlerinden daha geç bir evrimsel dönemde, özellikle galaktik ince disk bileşeninin zenginleşme sürecinde artış göstermektedir. Bu özellikleri sayesinde $[\alpha/\text{Fe}]$ oranlarının galaktik kimyasal evrim modellerine entegre edilmesi, gökada oluşum senaryolarının test edilmesinde anahtar rol oynamaktadır (Tinsley 1979; Matteucci ve Brocato 1990).

Bu bölümde, söz konusu elementlerin kökenleri, üretim mekanizmaları ve yıldız evrimi bağlamındaki rolleri detaylandırılacaktır.

- **Skandinyum (Sc, Z=21):** Sc elementi, B²FH çalışmasında doğrudan detaylandırılmamış olsa da, çekirdek kütlesi açısından demir grubuna yakınlığı ve oluşum koşulları nedeniyle demir çekirdeği yakın çevresinde sentezlenen geçiş elementlerinden biri olarak ele alınabilir. Nükleosentez açısından bakıldığında Sc, büyük ölçüde nükleer parçalanma ürünlerinin ikincil reaksiyonları sonucunda, özellikle hidrostatik ve patlayıcı neon (Ne) ve oksijen (O) yanma evrelerinde üretildiği düşünülmektedir (Woosley ve Weaver 1995).
- **Vanadyum (V, Z=23):** V, B²FH tarafından tanımlanan nükleosentez şemalarında doğrudan detaylandırılmasa da, demir grubu elementleri arasında yer alır ve bu grup içinde çekirdek sentezi sürecine dahil olan geçiş metallerindendir. Özellikle hidrostatik ve patlayıcı neon (Ne) ve oksijen (O) yanması aşamalarında ortaya çıkan kısa ömürlü radyoaktif izotopların bozunmasıyla oluştuğu öne sürülmektedir (Woosley ve Weaver 1995; Kobayashi vd. 2006). Buna göre Vanadyum'un üretimi, özellikle Type II süpernova patlamalarında gerçekleşen patlayıcı nükleosentez ile ilişkilidir. Bazı çalışmalar, Vanadyum bolluklarının galaktik kimyasal evrim bağlamında demir ile birlikte arttığını ve [V/Fe] oranının disk yıldızları arasında karakteristik eğilimler gösterdiğini ortaya koymuştur (Battistini ve Bensby 2015).
- **Kromyum (Cr, Z=24):** Cr, demir grubunun önemli üyelerinden biridir ve çekirdek içi nükleosentez süreçleriyle, özellikle Type II süpernovalarda gerçekleşen patlayıcı silikon (Si) yanması sonucunda sentezlenir (B²FH; Woosley ve Weaver 1995; Nomoto vd. 2013). Bu süreçlerde ⁵²Fe gibi radyoaktif öncüllerin bozunması sonucunda ⁵²Cr gibi izotoplara ulaşılır. Krom, galaktik kimyasal evrim açısından da önemli bir elementtir çünkü [Cr/Fe] oranı çoğu zaman demirle birlikte benzer oranlarda artış gösterir, bu da ortak üretim mekanizmalarının varlığına işaret eder (Gratton ve Sneden 1991; Kobayashi vd. 2020). Ayrıca Cr bollukları, yıldız atmosfer parametrelerinin tayininde iyonizasyon dengesi kurulmasında tamamlayıcı bir rol oynamaktadır.

- **Mangan (Mn, Z=25):** Mn, demir grubu elementleri arasında yer almakla birlikte, galaktik kimyasal evrimde izlenen $[Mn/Fe]$ oranı açısından Fe'den farklı davranış gösteren nadir elementlerden biridir (McWilliam vd. 2003; Kobayashi vd. 2006). Mangan'ın üretimi büyük oranda Type Ia süpernova patlamalarında gerçekleşir ve bu yönüyle Type II süpernovalarda sentezlenen diğer demir grubu elementlerinden ayrılır. B²FH çalışmasında da belirtildiği üzere Mn gibi Z-tek elementlerin sentezinde nükleer süreçlerin detayları ve başlangıç koşulları kritik önemdedir.

Tayfsal analizlerde Mn çizgileri genellikle nötral formda (Mn I) gözlenir ve hiperince yapı (hyperfine splitting, HFS) etkileri (çekirdek spininin dahil edilmesi) nedeniyle bu çizgiler çoklu bileşenlere ayrılır. Bu durum, çizgi şekillerinin asimetrik ve geniş görünmesine yol açar. Bu nedenle Mn bolluk analizlerinde hiperince yapı düzeltmeleri mutlaka dikkate alınmalıdır (Prochaska ve McWilliam 2000).

Ayrıca Mn, galaktik kimyasal ayrımlar açısından da önemli bir role sahiptir. Son yıllarda yapılan çalışmalar (örn. Horta vd. 2021, 2023), $[Mn/Fe]$ oranının gökadada in-situ (Gökada içinde oluşmuş) ve ex-situ (birleşmeler yoluyla edinilmiş) yıldız popülasyonlarının ayrımında önemli bir izleyici olduğunu göstermektedir. Bu çalışmalarda, Mg, Al ve Fe ile birlikte Mn'ın izlediği bolluk trendlerinin yıldızların oluştuğu çevreyi ayırt etmede anahtar bir rol oynadığı vurgulanmaktadır.

- **Demir (Fe, Z=26):** Fe, yıldız evriminin ileri aşamalarında sentezlenen en kararlı çekirdek yapısına sahip elementlerden biridir ve hem nükleer astrofizik hem de galaktik kimyasal evrim bağlamında eşsiz bir rol oynar. B²FH tarafından temelleri atılan çekirdek sentez süreçlerinde, Fe başta olmak üzere demir grubu elementlerin çoğu çekirdek çökmesiyle sonlanan yüksek kütleli yıldızların süpernova patlamaları sırasında üretilir (Woosley ve Weaver 1995; Nomoto vd. 2013). Bu tür süreçler, nükleon başına bağlanma enerjisi en yüksek olan demir civarındaki elementlerin sentezinde kritik rol oynar. Dolayısıyla Fe, yıldız çekirdeğinde enerji üretilen füzyon zincirinin nihai sonudur.

Ancak demir yalnızca süpernova kalıntısı olarak galaktik ortama yayılmaz aynı zamanda galaktik kimyasal evrim sürecinin izlenmesinde temel bir metalisite

göstergesidir. Fe bolluğu, yıldızların doğdukları ortamlardaki zenginliği gösterdiği için galaktik disk, halo ve kalın disk gibi yapısal bileşenlerin ayrımında önemli bir belirteç olarak kullanılır (Nissen ve Schuster 2010; Haywood vd. 2013). Ayrıca Fe'nin α elementlere (Mg, Si, Ca, Ti) oranı, yıldızın olduğu ortamda hangi tip süpernovaların baskın olduğunu gösterir ve böylece yıldızın doğduğu galaktik bileşenin kimliği hakkında bilgi verir.

Bununla birlikte, demirden daha ağır elementlerin önemli bir kısmı süpernova gibi patlamaların yanı sıra yıldızların içinde, özellikle de AGB yıldızları veya nötron yıldızlarında gerçekleşen nötron yakalama süreçleri ile oluşur. Bu açıdan demir, yalnızca kimyasal son ürün değil, aynı zamanda n-yakalama süreçlerinin başlangıç çekirdeği olarak da özel bir konuma sahiptir. Demirin nötron zengin ortamlarda β -çözünmeleri ve nötron absorpsiyonları sonucu daha ağır n-capture elementlere dönüşebileceği r- ve s-süreci senaryoları, galaktik nükleosentez zincirinin önemli bir bileşenini oluşturur (Busso vd. 1999; Cowan ve Sneden 2006).

Yıldız iç astrofiziği açısından bakıldığında ise demir içeriği, yıldız atmosferindeki opaklık üzerinde belirleyici etkiye sahiptir. Yüksek Fe bolluğu, ışıının dış katmanlara taşınmasını zorlaştırarak konveksiyon bölgelerini derinleştirir, böylece yıldızın genel yapısını ve evrimsel yolunu etkiler (Christensen-Dalsgaard 2003). Aynı zamanda demir içeriği, yıldız salınımlarında etkin olan κ -mekanizmasının gücünü de belirler ve bu bağlamda asteroseismoloji çalışmaları için de önemlidir (Aerts vd. 2010).

Galaktik arkeoloji çerçevesinde, demirin bolluğu ve dağılımı; yıldızların yaşı, doğum yeri ve gökadamdaki göç senaryoları ile ilişkilendirilir. Özellikle in-situ ve ex-situ oluşum senaryoları açısından Fe, Mg, Al ve Mn gibi elementlerle birlikte ayırıştırıcı bir rol üstlenir (Horta vd. 2021, 2023).

Sonuç olarak Fe, hem yıldız iç yapısında hem de galaktik düzeyde sentez süreçlerinin izini taşıyan, evrimin çok yönlü izleyicilerinden biridir. Hem bir sonuç hem bir başlangıç noktası olması, onu astrofiziksel analizlerin vazgeçilmez elementi hâline getirir.

- **Kobalt (Co, Z=27):** Co, demir grubu elementleri içerisinde yer alan ve özellikle

süpernova patlamalarıyla galaktik ortama salınan geçiş metallere biridir. B²FH çalışmasında belirtildiği üzere, Fe'ye yakın kütle numarasına sahip Co, yüksek sıcaklık ve yoğunluk ortamlarında gerçekleşen nükleer tepkimeler sonucu sentezlenir. Özellikle Tip II süpernova patlamalarında gerçekleşen çekirdek çökmesi sürecinde, patlama şok dalgaları yoluyla serbest kalan nötronlar ile birlikte nükleer reaksiyon zincirleri tetiklenir ve bu sayede Co gibi geçiş metallere üretimi sağlanır (Woosley ve Weaver 1995; Nomoto vd. 2013). Sentez mekanizması bakımından Co, öncelikle nükleer eşdeğerlik noktasının hemen ötesinde oluşan protonca zengin bölgelerde üretilir. Bu üretim genellikle α -rich freeze-out olarak bilinen süreçte, termonükleer reaksiyonların kütle numarası 60 civarında yavaşlaması sonucu gerçekleşir. Co'nun bol miktarda üretimi, patlamanın dinamiğine ve çekirdekteki nötron/proton oranına son derece duyarlıdır (Tominaga vd. 2007).

Kimyasal evrim açısından bakıldığında, Co/Fe oranları galaktik yaşa bağlı olarak evrimsel bir eğilim sergiler. Metalce fakir yıldızlarda gözlenen yüksek [Co/Fe] oranları, erken galaktik evrede tip II süpernovaların baskın olduğunu göstermektedir (McWilliam 1997; Kobayashi vd. 2006). Buna karşılık, Tip Ia süpernovalar Co üretiminde daha düşük verimlilik sergilediğinden, artan metalisite ile birlikte [Co/Fe] oranı düşme eğilimi gösterir. Bu durum, Co'nun Tip II SN ürünlerine daha duyarlı bir element olduğunu ve bu nedenle galaktik kimyasal evrim modellerinde zamansal kalibrasyon için kullanılabileceğini göstermektedir.

- **Nikel (Ni, Z=28):** Ni, demir grubunun son üyesi olup Fe ile birlikte çekirdek çökmesi süpernovalarında yüksek verimle üretilen elementlerdendir. Özellikle ⁵⁶Ni izotopu, tip II süpernova patlamalarının ilk evresinde sentezlenir ve bozunarak ⁵⁶Co ve sonrasında ⁵⁶Fe izotopuna dönüşür. Bu bozunma zinciri, süpernova artalan ışınımının (light curve) enerji kaynağı olarak da kritik rol oynar (Woosley ve Weaver 1995; Arnett 1996).

B²FH çalışmasında belirtildiği gibi, Ni üretimi yüksek sıcaklıkta α -zinciri tepkimeleriyle bağlantılıdır. Tip II süpernovalarda Ni hem hidrostatik yanma süreçleri sırasında hem de patlama sırasında sentezlenir. Ancak metalce zengin

ortamlarda tip Ia süpernovaların da önemli bir Ni kaynağı haline geldiği bilinmektedir (Iwamoto vd. 1999; Seitenzahl vd. 2013). Bu durum, galaktik kimyasal evrim sürecinde $[Ni/Fe]$ oranının zamanla göreceli olarak sabit kalmasını açıklar. Detaylı spektroskopik analizlerde, $[Ni/Fe]$ oranındaki hafif oynamalar bile tip Ia ve tip II süpernovaların katkı oranlarını ortaya koymak açısından önemlidir (Kobayashi vd. 2006; Bensby vd. 2014).

Demir grubu elementler, özellikle Tip Ia ve Tip II süpernova patlamaları ile nükleosentez sahnesinde önemli roller üstlenmekte ve yıldız evrimi boyunca yıldızların iç yapılarında enerji üretimi ve yapısal dengede belirleyici olmaktadır. Bu grup, Galaktik kimyasal evrimin izlenmesinde sıklıkla referans alınan metal bolluk göstergeleriyle, gökadamızın disk, kalın disk ve halo bileşenlerinin kimyasal ayrımında kritik bir konumda yer almaktadır. Ancak, bu elementlerin ötesinde kalan, daha yüksek atom numaralı türlerin sentezi, nükleosentez mekanizmalarının çeşitliliğini gözler önüne serer.

Bu bağlamda, Fe ve benzeri çekirdeklerin ötesinde yer alan daha ağır elementlerin kökeni, doğrudan proton ya da α -yakalama süreçleriyle açıklanamaz. Bunun yerine, yıldız içi ortamlarda gerçekleşen nötron yakalama reaksiyonları ile izah edilmektedir. Aşağıda sunulacak olan bölümde, hem s- hem de r- süreciyle sentezlenen nötron yakalama elementlerinin üretim mekanizmaları ve Galaktik kimyasal evrim açısından taşıdıkları anlam detaylı biçimde ele alınacaktır.

Yıldız içi nükleosentez süreçleri, evrenin kimyasal çeşitliliğini açıklamak adına temel bir role sahiptir. Fe grubundan daha ağır olan elementlerin büyük çoğunluğu, proton veya α parçacığı yakalama reaksiyonları ile değil, nötron yakalama süreçleriyle (neutron-capture processes), nötron yakalama elementleri (neutron-capture-elements) sentezlenmektedir. Bu süreçler, özellikle yıldız evriminin ileri evrelerinde ve yüksek nötron akısının bulunduğu ortamlarda etkili olur. Nötron yakalama reaksiyonları başlıca iki temel mekanizma altında incelenir: yavaş nötron yakalama süreci (s-süreci) ve hızlı nötron yakalama süreci (r-süreci). Bu iki mekanizma, nükleer reaksiyon hızları ile radyoaktif bozunma zaman ölçeklerinin göreceli büyüklüğüne bağlı olarak birbirinden ayrılır (B²FH, Cameron 1957).

s-süreci, genellikle düşük kütleli yıldızların (özellikle asimptotik dev kol, AGB yıldızları) evrimsel aşamalarında, termal atımlar sırasında meydana gelirken (B²FH;

Busso, Gallino ve Wasserburg 1999); r-süreci ise nötron yoğunluğunun yüksek olduğu kısa süreli olaylar, örneğin nötron yıldızı birleşmeleri veya çekirdek çökmesi süpernovaları gibi patlayıcı ortamlarda gerçekleşir (Thielemann vd. 2017; Cowan vd. 2021). Nötron yakalama süreçleriyle üretilen Sr, Y, Ba, La, Ce, Nd, Sm gibi elementlerin yıldız tayflarında gözlenebilir geçişlerinin analiz edilmesi, yalnızca yıldızın kimyasal kompozisyonunu ortaya koymakla kalmaz; aynı zamanda Galaktik kimyasal evrimin zaman çizelgesi ve farklı yıldız popülasyonlarının oluşum süreçlerine dair önemli bilgiler sunar (Snedden, Cowan, ve Gallino 2008).

Bu bölümde, söz konusu nötron yakalama elementlerinin kökenlerine, tayfsal analizlerdeki önemlerine ve galaktik arkeolojideki kullanımlarına dair detaylı bir inceleme sunulacaktır.

- **Stronsiyum (Sr, Z=38):** Sr, başlıca yavaş nötron yakalama (s-process) süreciyle oluşan bir elementtir ve özellikle asimptotik dev kolu (AGB) yıldızlarının geç evrimsel evrelerinde meydana gelen “termal atım” (thermal pulse) olayları sırasında sentezlenir (Busso vd. 1999; Kappeler vd. 2011). Bu süreçlerde çekirdekteki helyum kabuğunda nötron kaynakları olarak genellikle $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ ve $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ reaksiyonları etkin olur. Sr, özellikle metalce fakir yıldızlardaki bollukları incelenerek galaktik kimyasal evrimin erken fazlarındaki s-süreci katkılarını anlamada anahtar rol oynar (Bisterzo vd. 2014).

Stronsiyum bolluğu, yıldızlarda hem s-süreci hem de hızlı nötron yakalama (r-process) katkısı gösterebildiği için galaktik kimyasal evrimdeki katkıların ayrıştırılmasında kritik bir test aracıdır (Arlandini vd. 1999; B²FH). B²FH çalışması, Sr gibi elementlerin özellikle s-sürecin ürünü olduğunu ortaya koyan öncü referanslardan biridir. Ayrıca Sr bolluklarının yıldızın yaşıyla olan ilişkisi sayesinde galaktik arkeolojide zaman izleyici olarak da kullanılabileceği önerilmektedir (Skuladottir vd. 2019).

- **İtriyum (Y, Z=39):** Y, galaktik kimyasal evrim sürecinde sürekli olarak yavaş nötron yakalama süreci (s-process) ile üretilen bir elementtir ve özellikle düşük-kütleli AGB yıldızlarının iç yapısındaki termal atım evrelerinde sentezlenir (Busso vd. 1999; Karakas ve Lattanzio 2014). ^{13}C ve ^{22}Ne kaynaklı nötron akışı,

Fe grubundaki atomların üzerine nötron yakalayarak Sr, Y ve Zr gibi hafif s-süreci elementlerinin oluşmasına neden olur.

İtriyum, Sr ve Zr ile birlikte hafif s-process (ls) elementi olarak sınıflandırılır ve bu üçlü arasındaki bolluk oranları s-sürecinin etkinliğine, nötron yoğunluğuna ve yıldızın metal içeriğine dair önemli bilgiler sunar (Cristallo vd. 2011). Bu bağlamda Y elementi hem kimyasal bolluk kalibrasyonları hem de nötron yakalama süreçlerinin zamanlaması için kritik bir role sahiptir. Günümüzde Y bollukları, gökadanın yaş tayini ve iç katmanlardaki element taşınım süreçlerinin test edilmesinde etkin biçimde kullanılmaktadır (Spina vd. 2016; Delgado Mena vd. 2017).

- **Zirkonyum (Zr, Z=40):** Zirkonyum, hafif s-süreci elementleri (light-s) arasında yer almakta olup Sr ve Y ile birlikte nötron yakalama süreçlerinin erken evrelerini temsil eder. Başlıca üretim mekanizması, düşük-kütleli AGB yıldızlarının termal atım evresinde gerçekleşen yavaş nötron yakalama (slow neutron capture, s-process) sürecidir.

Zirkonyum bolluğu, özellikle metalce fakir AGB yıldızlarında önemli bir gösterge olup s-süreci verimliliğini ve konvektif karışım süreçlerinin etkilerini izlemek için kullanılır. [Zr/Y] ve [Zr/Sr] oranları, nötron akışının ne derece ilerlediğini ve hangi çekirdeklerin tercihli olarak zenginleştiğini belirlemede kritik öneme sahiptir (Cristallo vd. 2015).

- **Baryum (Ba, Z=56):** Baryum elementi, ağır nötron yakalama elementleri arasında yer almakta olup s-sürecinin klasik bir ürünü olarak kabul edilir. Özellikle AGB (Asymptotic Giant Branch) evresindeki düşük ve orta kütleli yıldızlarda, termal atımlar (thermal pulses) sırasında açığa çıkan nötronlar aracılığıyla sentezlenir. Bu bağlamda başlıca nötron kaynakları, $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ ve $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ reaksiyonlarıdır (Gallino vd. 1998; Busso vd. 1999).

Ba bollukları, hem yıldız evriminde hem de Galaktik kimyasal evrim çalışmalarında kritik role sahiptir. Özellikle [Ba/Fe] ve [Ba/Eu] oranları, s- ve r-süreci katkılarını birbirinden ayırt etmek için sıklıkla kullanılır. Çünkü baryumun üretiminde s-süreci baskındır ancak metalce fakir yıldızlarda kısmi r-süreci katkıları da gözlenebilir

(Travaglio vd. 1999; Sneden vd. 2008). Bu oranların yaşa bağlı evrimi, gökadamızın disk yapılarındaki nüfusların kökeni hakkında bilgi sağlar (Delgado Mena vd. 2017).

Burbidge vd. (1957) tarafından ortaya konan klasik nükleosentez sınıflandırmasında baryum, ağır s-süreci elementi olarak tanımlanmış ve AGB yıldızlarındaki yavaş nötron akışları sonucunda demir çekirdeği üzerine nötron yakalanmasıyla üretildiği belirtilmiştir. Bu yaklaşım günümüzde halen geçerliliğini korumakta ve gelişmiş yıldız evrim modelleriyle detaylandırılmaktadır (Karakas ve Lattanzio 2014).

- **Lantan (La, Z=57):** Lantan elementi, s-proces (yavaş nötron yakalama) ile oluşan ağır nötron yakalama elementlerinden biridir ve özellikle düşük-orta kütleli yıldızların Asimptotik Dev Anakol (AGB) evresinde, termal atımlar sırasında sentezlenir (Busso vd. 1999; Bisterzo vd. 2014). Bu süreçte demir grubu çekirdekler üzerine nötronların yavaş yavaş yakalanmasıyla birlikte Lantan gibi ağır elementlerin üretimi gerçekleşir. Lantan, bu nedenle s-proces izleyicisi (s-process tracer) olarak kabul edilir.

La bolluğu, gökadanın farklı popülasyonlarında izlenerek s-process'in zaman içindeki katkısı değerlendirilebilir. Örneğin, genç yıldız popülasyonlarında La/Fe oranlarının artışı, AGB yıldızlarının evrimsel süreçler sonucunda ortama geri kazandırdığı materyalin kimyasal izlerini taşır (Battistini ve Bensby 2016).

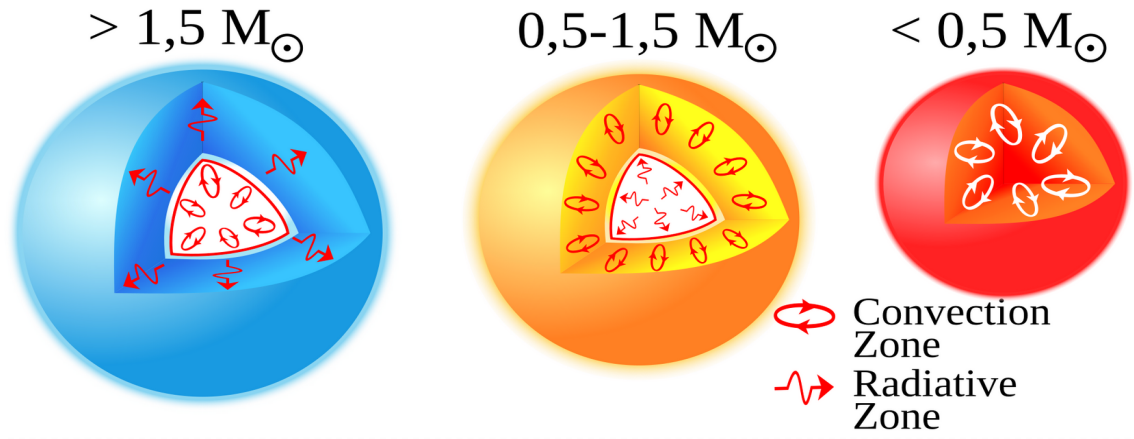
B²FH, Lantan gibi elementlerin n-capture süreçleriyle olan ilişkisini kuramsal temellere oturtmuş ve bu elementlerin yıldız içi evrimdeki üretim süreçlerini ilk kez bütüncül biçimde açıklamıştır. B²FH çalışmasında, La elementi açıkça s-process ürünleri arasında tanımlanır ve galaktik kimyasal evrimdeki rolü vurgulanır.

- **Seryum (Ce, Z=58):** B²FH çalışmasında Ce elementi, s-proces ürünlerinin tanımlandığı tablolar arasında yer almakta olup, yıldız içi nötron yakalama süreçlerinin evrimsel etkilerini anlamak açısından önemli bir örnektir. Ce'nin Güneş benzeri yıldızlardaki bolluk değerleri, AGB yıldızlarının geçmişteki katkısını izlemek için kullanılır (Sneden vd. 2008). Aynı zamanda Ce, özellikle disk ve halo yıldızları arasındaki kimyasal ayrımları değerlendirmek için de kullanılan bir izleyici elementtir (Battistini ve Bensby 2016).

Seryum elementi, tıpkı Lantan gibi ağırlıklı olarak s-proces ile sentezlenen bir ağır elementtir. Bu süreçte nötronların demir grubu çekirdekler üzerine yavaş yavaş yakalanmasıyla birlikte Ce gibi ağır çekirdekler oluşur. Seryum'un büyük kısmı, özellikle düşük–orta kütleli yıldızların AGB evresindeki termal atımlar sırasında üretilir ve yıldızdan dış ortama atılır (Busso vd. 1999; Bisterzo vd. 2014).

- **Neodimyum (Nd, Z=60):** Neodimyum, s-proces ile sentezlenen ağır elementlerin başlıcalarından biridir ve galaktik kimyasal evrim çalışmalarında sıkça başvurulmuş bir izleyici olarak ön plana çıkar. Nd'nin kökeni esas olarak düşük ve orta kütleli yıldızların AGB evresinde, termal atımlar sırasında gerçekleşen yavaş nötron yakalama süreçlerine (s-process) dayanmaktadır (Bisterzo vd. 2014). Ancak toplam bolluğunun yaklaşık % 40-45 kadarı r-process kaynaklıdır ki bu durum Nd elementini hem s- hem r-proces bileşenlerini temsil eden karma bir izleyici hâline getirir (Arlandini vd. 1999; Sneden vd. 2008). Ayrıca, galaktik bileşenlerin ayrımında (örneğin, disk-halo farklılıkları) da kullanılır (Battistini ve Bensby 2016; Delgado Mena vd. 2017).
- **Samaryum (Sm, Z=62):** Samaryum da Neodim gibi karma kökenli bir elementtir; toplam bolluğunun yaklaşık % 70'i r-process ve geri kalanı s-process kaynaklıdır (Simmerer vd. 2004). Bu nedenle, galaktik kimyasal evrimde hem hızlı nötron yakalama süreçlerinin izlenmesinde hem de AGB yıldızlarının katkılarının belirlenmesinde önemli bir role sahiptir. B²FH makalesinde Sm, r-process çekirdeklerinin klasik örneklerinden biri olarak değerlendirilmiş ve nötron yoğunluğuna bağlı olarak sentez yollarının değiştiği elemanlardan biri olarak tanımlanmıştır. Sm bollukları, özellikle metal fakir yıldızlar üzerindeki r-process katkısını incelemek amacıyla sıklıkla kullanılır (Sneden vd. 2008; Roederer vd. 2014). Ayrıca, Sm ve Eu gibi r-dominant elementlerin birbirlerine oranları, nötron akısının şiddeti ve sürekliliği hakkında bilgi verir (Bisterzo vd. 2011).

Farklı nükleosentez süreçlerinin bütüncül bir çerçevede değerlendirilmesi, galaktik kimyasal evrimin zaman içindeki izlerini sürmemizi ve yıldızların doğası ile oluşum koşulları hakkında derinlemesine bilgi elde etmemizi mümkün kılmaktadır. Ancak



Şekil 3.17. Farklı kütleye sahip yıldızlarda enerji taşıma mekanizmalarının temsili diyagramı. $M_{\odot} \leq 0.5$ kütleli yıldızlarda iç yapı tamamen konvektifken, Güneş kütleline ($1 \leq M_{\odot} \leq 1.5$) benzer yıldızlarda çekirdekte radyatif, dış atmosferde ise konvektif bölge yer almaktadır. Daha kütleli ($1.5 \leq M_{\odot}$) yıldızlarda ise çekirdek konvektif, dış katmanlar radyatif yapıdadır. Bu yapı farklılıkları, çizgi oluşum bölgelerinde konvektif karışımın rolünü belirlerken aynı zamanda NLTE etkilerin hangi katmanlarda baskın olduğunu da temsil eder.

tayfsal analizlerin güvenilirliği yalnızca çizgi seçimine değil aynı zamanda yıldız atmosferindeki fiziksel koşullara da bağlıdır. Bu bağlamda, konveksiyon hareketleri ve yerel termodinamik denge dışı (NLTE) etkiler, özellikle nötral türlerin bolluklarında sistematik sapmalara neden olabilmektedir. Bir sonraki bölümde bu etkilerin bolluk analizleri üzerindeki rolü ele alınmıştır.

3.4.7. Konveksiyon ve NLTE etkilerin bolluklar üzerindeki rolü

Yıldız atmosferlerinin katmanları arasında enerji taşınımı iki temel mekanizma ile gerçekleşir: ışıınım ve konveksiyon. Özellikle düşük ve orta kütleli yıldızlarda, dış atmosfer katmanlarında konvektif enerji taşınımı baskın hâle gelir. Bu durum, tayfsal çizgilerin şekli ve derinliği üzerinde önemli etkiler yaratır. Spektral analizlerde kullanılan model atmosferler, bu enerji taşınım mekanizmalarını tanımlamak amacıyla çeşitli fiziksel varsayımlara dayanır. Bu tez kapsamında model atmosferler, 1-boyutlu (1D), düzlem-paralel geometri varsayımı altında, yerel termodinamik denge (LTE) koşulları altında ATLAS9 kodu (Kurucz 1993; Castelli ve Kurucz 2003) ile üretilmiştir. Ancak LTE kabulleri, özellikle yıldız atmosferinin üst katmanlarında geçerliliğini kaybeder ve yerini Non-LTE (NLTE) etkilerin baskın olduğu bir rejime bırakır (Gray 2005).

Farklı tayf türlerine sahip yıldızlarda konvektif bölgelerin dağılımı değişiklik gösterir. Örneğin, düşük sıcaklıklı M tayf türü yıldızlar tamamen konvektif bir yapıya sahipken, G tayf türü (örneğin Güneş) yıldızlarda çekirdek radyatif ve dış katmanlar konvektiftir. Buna karşın O–B tayf türü sıcak yıldızlarda bu yapı tersine döner; çekirdek konvektif, dış katmanlar ise radyatif hâle gelir (bkz. Şekil 3.17). Bu fark, yıldız tayfında oluşan çizgilerin farklı atmosferik katmanlarda ortaya çıkmasına ve dolayısıyla konveksiyonun çizgi profillerine doğrudan etkilemesine neden olur.

ATLAS9 kodu, konvektif taşınımı hesaba katmak üzere karışım uzunluğu parametresini (mixing-length parameter, ML) kullanır. Bu çalışmada, ATLAS9'un 'CONVECTION ON/OFF' anahtarı kullanılarak hem konvektif taşınımın hesaba katıldığı hem de ihmal edildiği durumlar için iki farklı model atmosferler üretilmiş ve her iki durumda elde edilen kimyasal bolluklar karşılaştırılmıştır. Olası bir konveksiyon etkisini araştırmak için yapılan deneyde, Ludwig ve arkadaşları (1999) tarafından 2B hidrodinamik modele dayalı olarak bildirilen denklem ve Magic ve arkadaşları (2015) tarafından 3B hidrodinamik modele dayalı olarak bildirilen denklem kullanılarak iki farklı karıştırma uzunluğu parametresi hesaplanmıştır. Model parametreleri üzerinde daha güncel ve 3D hesaplamalara dayalı sonuçlar sunduğu için Magic vd. (2015) çalışması tercih edilmiştir.

Model atmosferin üst katmanlarında fotonların madde ile çarpışma olasılığı azaldıkça LTE koşulu bozulur. Bu durumda, kaynak fonksiyonu artık Planck fonksiyonu ile tanımlanamaz ve NLTE etkiler baskın hâle gelir. Literatürde pek çok çalışma, Non-LTE etkilerin özellikle nötral türlere ait tayf çizgilerinde daha belirgin olduğunu ortaya koymuştur (Asplund 2005; Bergemann ve Nordlander 2014; Amarsi vd. 2016; Şentürk vd. 2024). Bu tez çalışmasında, optik ve NIR bölgede tayfsal analizler yapılırken elde edilen bolluk değerlerine INSPECT³ ve MPIA⁴ veri tabanlarının sağladığı NLTE düzeltmeleri uygulanmıştır.

Elde edilen bollukların çizgi teşhis süreci, model atmosfer parametrelerinin tayini ve Non-LTE düzeltmeleri gibi kritik aşamalardan geçirilerek güvenilir biçimde hesaplanması, yıldızların kimyasal evrimini anlamamıza önemli katkılar sunmaktadır.

³<https://www.inspect-stars.com/>

⁴https://nlte.mpia.de/gui-siuAC_secE.php

Bu bağlamda, elde edilen bolluk bilgilerinden yararlanılarak yıldızların evrimsel durumlarının incelenmesi ve yaşlarının belirlenmesi amacıyla Bayesyen temelli yaş analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerin detayları takip eden bölümde sunulmaktadır.

3.5. MCMC Yaş Analizleri

Bu çalışmada analiz edilen yıldızların evrimlerini anlamak açısından yaşlarının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, yıldız yaşları, maksimum olabilirlik (maximum-likelihood) tahmini ve izokron ızgarası temelinde çalışan Markov Zinciri Monte Carlo (MCMC) yöntemi kullanılarak tahmin edilmiştir. Bu yöntemde kullanılan izokron ızgarası, PARSEC yıldız izokron kütüphanesinin CMD 3.89 sürümünden (Bressan vd. 2012) türetilmiştir. Elde edilen ızgaranın özellikleri şu şekildedir:

- Yaş uzayında $6 \leq \log \tau \leq 10.13$ aralığında 0.05 adımlarla örnekleme yapılır,
- metal bolluğu Z parametresi için ise $0 \leq Z \leq 0.03$ aralığında 0.0005 adımlarla izokron ızgarası oluşturulmuştur.

Her ne kadar bu yapı oldukça yüksek bir hassasiyet sağlasa da, sürekli bir parametre uzayını tam olarak temsil edememektedir. Bu durum, yaş tahminlerinde belirsizliklere neden olmakta ve MCMC yönteminde kullanılan “walker”ların hareketliliğini kısıtlamaktadır. Bu sınırlamaları azaltmak amacıyla, ızgara uzayında ara noktaların interpolasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, Python’un SciPy kütüphanesinde yer alan Delaunay interpolasyon fonksiyonu (Virtanen vd. 2020) kullanılmıştır. Bu fonksiyon, giriş parametreleri arasında üç boyutlu bir enterpolasyon yaparak sürekli bir uzay sağlar ve böylece ızgara adım boyutlarından kaynaklanan ayırık yapının oluşturabileceği belirsizlikleri ortadan kaldırır.

Süreçte, Delaunay fonksiyonu yardımıyla izokron ızgarasında istenilen gözlemsel parametreleri temsil eden bir fonksiyon ($I(Z, \tau, M) \rightarrow \theta$) elde edilmiştir. Bu fonksiyon aracılığıyla, iki farklı θ giriş parametre kümesi için MCMC yöntemi ve maksimum olabilirlik yaklaşımı ile yıldız yaşları tahmin edilmiştir. İlk parametre kümesi fotometrik verilere dayanmaktadır; burada Gaia fotometrisi ve tayfsal demir bolluğu kullanılmıştır. İkinci küme ise yıldız atmosfer model parametrelerini (T_{eff} , $\log g$ ve $[Fe/H]$) içermektedir.

MCMC işlemi sırasında kullanılan maksimum olabilirlik fonksiyonu aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$\log \psi = -\frac{1}{2} \sum \left(\frac{\theta_i^{\text{obs}} - \theta_i^{\text{model}}}{\sigma_i} \right)^2 \quad (3.12)$$

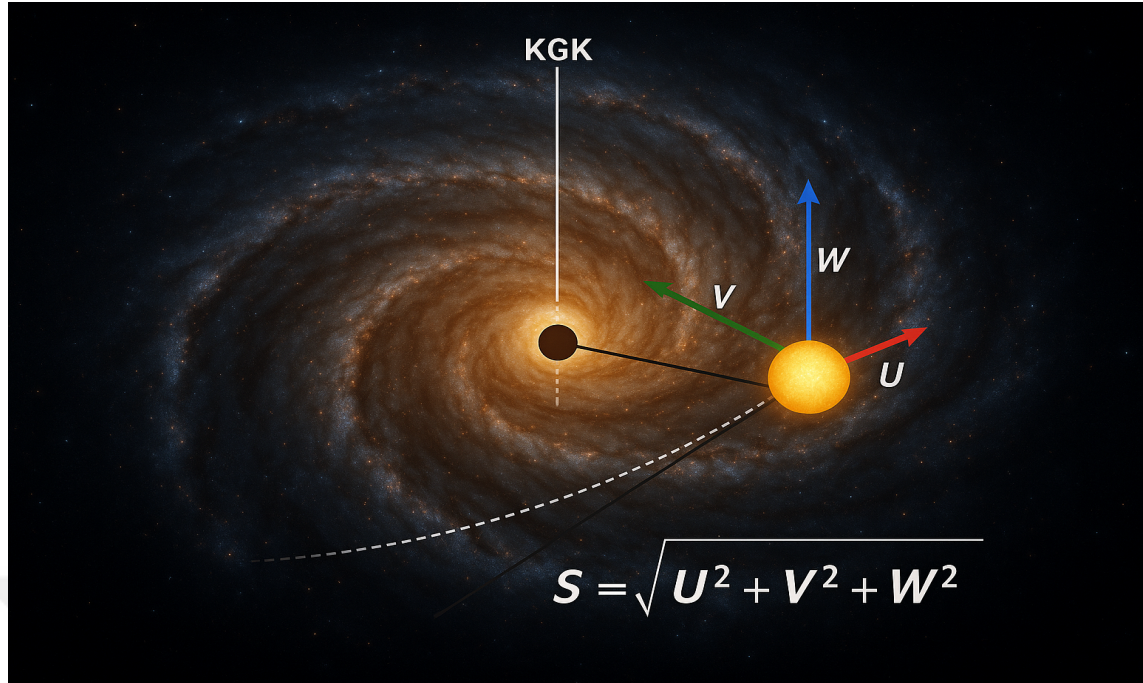
Burada ψ , maksimum olabilirlik fonksiyonunu, θ_i^{obs} gözlemsel parametreleri (örneğin MG ve $(G_{BP}G_{RP})_0$ renkleri ya da T_{eff} , $\log g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$) ve θ^{model} ise interpolasyon yoluyla izokronlardan elde edilen model parametrelerini ifade eder. σ_i ise her bir gözlemsel parametreye ait belirsizlikleri temsil etmektedir. Bu fonksiyon, gözlemsel ve model parametreleri arasındaki farkların karelerini, belirsizliklerine göre ağırlıklandırarak minimize eder ve böylece en olası yaş çözümünü belirler.

Yaş tahminlerinin nihai olarak elde edilebilmesi için, her bir yıldızın giriş parametreleri 22 ayrı walker ile 5000 iterasyon boyunca işlenmiştir. Elde edilen posterior dağılımlar kullanılarak medyan yaş değeri hesaplanmış ve belirsizlikler, bu medyan değer $\pm 1\sigma$ (standart sapma) aralığında tanımlanmıştır. Bu yaklaşım, gözlemsel parametrelerin içerdiği belirsizlikleri doğrudan hesaba katması sayesinde istatistiksel olarak sağlam bir yaş tahmini sunmaktadır.

Yaş analizleri, yıldızların evrimsel tarihlerini anlamak açısından temel bir rol oynasa da, galaktik evrim bağlamında bu bilgilerin daha bütüncül yorumlanabilmesi için yıldızların galaktik hareketleri ve yörüngesel özellikleriyle birlikte değerlendirilmesi gerekir. Bir yıldızın yaşının hesaplanmasına ilave olarak gökadamdaki hareket biçimi —yani nasıl bir yörüngeye sahip olduğu, galaktik düzlemden ne kadar uzaklaştığı ve ne tür bir galaktik potansiyel içinde hareket ettiği— onun doğum yeri, galaktik bileşen aidiyeti ve potansiyel göç geçmişi hakkında değerli bilgiler sunar. Dolayısıyla bu tez çalışması kapsamında incelenen yıldızların yaşlarına ek olarak, kinematik özellikleri ve yörüngesel dinamikleri de detaylı olarak analiz edilmiş ve takip eden alt başlıkta detaylandırılmıştır.

3.6. Kinematik ve Yörünge Dinamik Analizler

Yıldızların kimyasal bileşenleri ve yaşlarının belirlenmesi, yıldızların galaktik evrim içerisindeki rollerini anlamak açısından oldukça değerlidir. Ancak bu parametrelerin



Şekil 3.18. U , V ve W uzay hızı bileşenlerinin sağ el koordinant sistemi çerçevesinde tasviri. KGK: Kuzey Galaktik Kutbu ve S değeri ise U , V ve W uzay hızı bileşenlerinin karelerinin toplamının karekökünden toplam uzay hızını temsil etmektedir.

yörüngesel ve kinematik özellikler ile birlikte incelenmesi, yıldızların ait oldukları galaktik bileşenlerin (ince disk, kalın disk, halo) ayırt edilmesini ve gökadanın kimyasal evrim tarihçesinin daha iyi modellenmesini sağlar (Freeman ve Bland-Hawthorn 2002; Helmi 2020). Bu bağlamda, yaş tayinlerinin ardından her bir yıldız için detaylı kinematik ve yörünge analizleri gerçekleştirilmiştir.

Her bir yıldızın uzay hız bileşenleri (U , V , W) Johnson ve Soderblom (1987) tarafından tanımlanan yöntem ile hesaplanmıştır. Bu bileşenlerden U galaktik merkeze doğru hız bileşenini, V gökada merkezi etrafındaki yörüngeye teğet hız bileşenini ve W ise galaktik kuzey kutba doğru tanımlanan hız bileşenini ifade eder (bkz. Şekil 3.18). GAIA programının en güncel sürümü olan GAIA DR3 (Gaia İşbirliği, 2023) aracılığı ile yıldızların kinematik analizleri için ihtiyaç duyulan veriler (ekvatorial ve galaktik koordinatları, öz hareketleri, dikine hızları ve paralaks/uzaklık değerleri) temin edilmiştir. Bu hesaplamalar için altı gerekli astrometrik parametre bulunur: sağ açıklık (α), dik açıklık (δ), sağ açıklıktaki öz hareket (μ_α), dik açıklıktaki öz hareket (μ_δ), paralaks (π) (veya uzaklık, d) ve dikine hız (V_R) bileşenleridir.

Uzay hızlarının hesaplanması için Blaauw vd. (1960) tarafından tanımlanan

ve üç temel açı ile ifade edilen Galaktik koordinat sistemi kullanılmıştır. Bu koordinat sisteminde Kuzey Galaktik Kutup noktasının ekvatoriyel koordinatları ($\alpha_{KGG} = 192^\circ.85948$ ve $\delta_{KGG} = 27^\circ.12825$ (J2000)) bu açılardan ikisini temsil etmektedir. Bu değerler aşağıda verilen T matrisinin hesaplanması sırasında kullanılmıştır.

$$T = \begin{bmatrix} -0.0548755604 & -0.8734370902 & -0.483835015 \\ +0.4941094279 & -0.4448296300 & +0.7469822445 \\ -0.8676661490 & -0.1980763734 & +0.4559837762 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Aşağıda verilen denklemde T matrisi dönüşüm için kullanılmaktadır.

$$\begin{bmatrix} \cos b \cos l \\ \cos b \sin l \\ \sin b \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} \cos \delta \cos \alpha \\ \cos \delta \sin \alpha \\ \sin \delta \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Aşağıda verilen A matrisi yardımı ile uzay hız bileşenleri hesaplanır. Bu denklemde uzay hızı hesaplanacak olan cismin verileri kullanılır.

$$A = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \delta & -\sin \alpha & -\cos \alpha \cos \delta \\ \sin \alpha \cos \delta & \cos \alpha & -\sin \alpha \cos \delta \\ \sin \delta & 0 & \cos \delta \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

3.18, 3.19 ve 3.20 bağıntıları ile birlikte yıldızların uzay hızlarının hesaplanması için aşağıdaki denklemler kullanılır. T matrisi (Denklem 3.18) ile A matrisinin (Denklem 3.20) çarpımından B matrisi elde edilir. ($B = T \times A$). k eşitliğinde k parametresi sabittir ve $k = 4.74057$ değerine sahip olup öz hareketi, $km s^{-1}$ cinsine dönüştürmek için kullanılmıştır (Blaauw vd. 1960).

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} V_R \\ k\mu_\alpha/\pi \\ k\mu_\delta/\pi \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Uzay hızı hata hesabı için yıldızların α ve δ ekvatorial koordinatlarının hatasız olduğu varsayımı yapılır. Buna göre uzay hızındaki hatalar, öz hareketlere ($\mu_\alpha ve \mu_\delta$), paralaks (π) ve radyal hıza (V_R) bağlıdır. Uzay hızı hata hesabı için Denklem 3.22 kullanılmıştır. Bu denklem çerçevesinde B matrisinin her bir elemanının karesi alınarak C matrisi oluşturulmuştur:

$$\begin{bmatrix} \sigma_U^2 \\ \sigma_V^2 \\ \sigma_W^2 \end{bmatrix} C = \begin{bmatrix} \sigma_{V_R}^2 \\ (k/\pi)^2 [\sigma_{\mu_\alpha}^2 + (\mu_\alpha \sigma_\pi / \pi)^2] \\ (k/\pi)^2 [\sigma_{\mu_\delta}^2 + (\mu_\delta \sigma_\pi / \pi)^2] \end{bmatrix} + 2\mu_\alpha \mu_\delta k^2 \sigma_\pi^2 / \pi^4 \begin{bmatrix} b_{12}b_{13} \\ b_{22}b_{23} \\ b_{32}b_{33} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Yıldızlar, gökada merkezi etrafında belirli yörüngelerde hareket ederler. Dünya tabanlı (barisenterik) olarak gerçekleştirilen uzay hızı ölçümlerinin Güneş'in uzay hızı değerinden (heliosenterik) arındırılması gerekir. Bu düzeltme, LSR (Local Standard of Rest, Yerel Durağanlık Standardı) düzeltmesi olarak bilinir. LSR düzeltmeleri için Coşkunoğlu vd. (2011) tarafından önerilen Güneş uzay hızı bileşenleri kullanılmıştır: $U_\odot = 8.50 \pm 0.29$, $V_\odot = 13.38 \pm 0.43$, $W_\odot = 6.49 \pm 0.26 \text{ km s}^{-1}$.

Ancak yıldızların galaktik yörüngelerinde izlediği hareketler çoğu zaman sabit hızda değildir. Gözlemler, Galaktik merkeze yakın yıldızların dönüş hızlarının daha yüksek, dış bölgelere doğru olan yıldızların hızlarının ise daha düşük olduğunu ortaya koymaktadır. Bu etki, Galaktik diferansiyel dönme (differential rotation) olarak adlandırılır. Bu durumun fiziksel temeli, klasik Kepler yasaları ile açıklanabilir.

Kepler'in üçüncü yasasına göre, bir yörüngedeki bir cismin dönme periyodu T ile yarıçapı r arasında aşağıdaki ilişki bulunur:

$$T^2 \propto r^3 \rightarrow v = \sqrt{\frac{GM}{r}} \quad (3.18)$$

Denklem 3.18’de v : yörüngesel hızı; G : evrensel çekim sabitini; M : merkezdeki kütleyi ve r : dönme yarıçapını ifade eder. Bu denklem, merkeze daha yakın olan cisimlerin daha hızlı döneceğini öngörür. Kinematik analizlerde gözlemlenen bu farklılıkların giderilmesi için yıldızların uzay hız bileşenlerine diferansiyel dönme düzeltmesi uygulanır. Özellikle U ve V bileşenleri için yapılan bu düzeltme, Mihalas ve Binney (1981) tarafından önerilen aşağıdaki denklemlerle gerçekleştirilir:

$$dU = V_R \cos l - V_T \sin l \quad (3.19)$$

$$dV = V_R \sin l - V_T \cos l \quad (3.20)$$

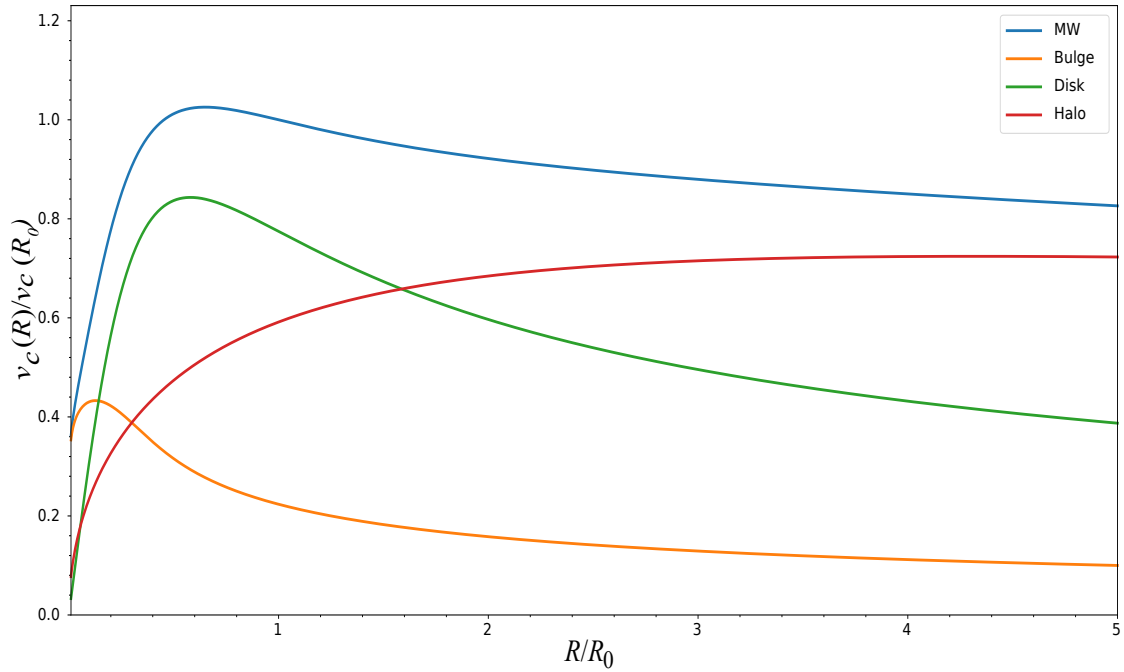
Denklem 3.19 ve Denklem 3.20’te l Galaktik boylamı, V_R yıldızın radyal hız bileşenini ve V_T ise yıldızın yörüngeye teğet olan hız bileşenini ifade eder. Bu bileşenler, 3.21 ve 3.22 numaralı denklemler aracılığı ile tanımlanır. Denklemlerdeki A ve B sabitleri Oort sabitleri ⁵ olarak bilinir ve değerleri Mihalas ve Binney (1981) çalışmasından alınmıştır.

$$V_R = Ad \sin 2l \quad (3.21)$$

$$V_T = d(A \cos 2l + B) \quad (3.22)$$

Bir yıldızın galaktik popülasyon üyeliğinin belirlenmesine yönelik olarak literatürde çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bensby vd. (2003), yıldızların uzay hız bileşenleri (U , V , W) ile galaktik popülasyonlar (ince disk, kalın disk ve halo) arasındaki ilişkileri tanımlayan ilk sistematik yaklaşımlardan birini ortaya koymuştur. Ancak yalnızca kinematik ölçütlere dayanan bu tür sınıflandırmalar, özellikle geçiş bölgelerindeki yıldızlar için yetersiz kalabilmektedir. Günümüzde, bir yıldızın popülasyon aidiyetinin güvenilir biçimde belirlenebilmesi için; metalisite, yaş, uzay hızları ve gökada merkezi etrafındaki yörünge karakteristikleri gibi çok boyutlu parametrelerin birlikte değerlendirilmesi gerektiği genel kabul görmektedir (Reddy vd. 2006; Adibekyan

⁵Gökadamızın dönüş özelliklerini temsil eden sabitlerdir:
 $A = 14.8 \text{ kms}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ ve $B = 12.4 \text{ kms}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$.



Şekil 3.19. *MWPotential2014* potansiyeli altında galaktik dönme eğrisi (32 pc'ye kadar). Galaktik bileşenlerin (şişkin bölge, turuncu; disk, yeşil; halo, kırmızı) Gökadamızın toplam potansiyeline (mavi, MW) olan katkısı görülmektedir (Bovy 2015). X eksenı Gökada merkezine göre Güneş'in indirgenmiş uzaklığını, Y eksenı ise Gökada merkezinden uzaklığına bağılı olarak Güneş'in dairesel hızını temsil etmektedir.

vd. 2012). Özellikle yörünge parametreleri, yıldızların galaktik merkez etrafındaki yörüngelerini karakterize etmesi bakımından önemli bir dinamik bilgi sunmaktadır. Bu sayede yıldızın gökadamızdaki konumuna, geçmişteki hareketine ve doğum bölgesine dair çıkarımlar yapılabilmektedir.

Tez kapsamında incelenen yıldızların yörünge parametreleri (Z_{max} , R_a , R_p , e_p), yıldızların konum (RA, Dec, parallax) ve hız bilgileri (radyal hız, öz hareket) kullanılarak *galpy* (Bovy 2015) Python kütüphanesi yardımıyla hesaplanmıştır. Yıldızların gökadamız içerisindeki potansiyel alan içerisinde nasıl hareket ettiklerini simüle etmek amacıyla *galpy* kütüphanesinin içerisinde bulunan *MWPotential2014* modeli tercih edilmiştir. Bu model, gökadamızın üç temel bileşenini (Disk, Bulge ve Halo) temsil eden bir potansiyel sistemidir (bkz. Şekil 3.19).

Bu potansiyel altında, yıldızların Gökada merkezi etrafındaki yörüngeleri 13 Gyr boyunca, 13000 zaman adımıyla ileriye ve geriye doğru entegre edilerek simüle edilmiştir. Böylece her yıldız için aşağıdaki temel yörünge parametreleri hesaplanmıştır:

- $Z_{\max}$: Yıldızın galaktik düzlemden en fazla ne kadar yükselebileceğini gösteren maksimum yükseklik değeri. Bu parametre, yıldızın galaktik kalınlık bileşenleri (ince disk, kalın disk, halo) arasındaki ayrımı için kritiktir (Schönrich ve Binney 2009).
- R_p ise Gökada merkezine olan en yakın uzaklığı temsil eder.
- R_a : Gökada merkezine en uzak olduğu apogalaktik uzaklık.
- R_m : Ortalama galaktik yarıçap. Aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$R_m = \frac{R_a + R_p}{2} \quad (3.23)$$

- e_p : Yıldızın yörüngesinin eliptikliği. Dairesel yörünge $e_p \approx 0$ iken daha eliptik yörüngelerde bu parametre 1'e yaklaşır. Eliptiklik, şu denklemle ifade edilir:

$$R_m = \frac{R_a - R_p}{R_a + R_p} \quad (3.24)$$

Bu tez kapsamında özetle, Güneş benzeri yıldızların fiziksel, kimyasal ve kinematik özellikleri yüksek çözünürlüklü tayfsal veriler ve yeni oluşturulan çizgi listesi ($\approx 3800\text{-}25000 \text{ \AA}$) aracılığıyla sistematik olarak incelenmiştir. Materyal ve Metot bölümünde detaylandırıldığı üzere, analiz süreci spektrumların (HARPS, ESPRESSO, IGRINS) gözlemsel veri tabanlarından (ESO Açık Arşivi; Park vd. 2018) temin edilmesiyle başlanmış, ardından *iSpec* (Blanco-Cuaresma vd. 2014) yazılımı aracılığı ile spektrum hazırlama süreçleri (radyal hız düzeltmesi, süreklilik düzeltmesi) gerçekleştirilmiş ve klasik tayfsal yöntemler çerçevesinde model atmosfer parametreleri (T_{eff} , $\log g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$, ξ) elde edilmiştir. *ATLAS9* (*ODFNEW*) (Kurucz 1993; Castelli ve Kurucz 2003) model atmosfer kodu yardımıyla oluşturulan yıldız atmosfer modelleri üzerinden *MOOG* (Snedden 1983) yazılımının *abfind* paketi ile element bollukları hesaplanmış, LTE kabulü altında elde edilen bolluklar için gerek duyulan NLTE düzeltmeleri ise *INSPECT* ve *MPIA* veri tabanları kullanılarak elde edilmiştir. Olası bir konveksiyon etkisinin bolluklar üzerindeki katkısını değerlendirmek için Magic vd. (2015) çalışmasında önerilen formülasyondan karışım uzunluğu parametresi (ML) hesaplanmış ve *ATLAS9*

kodunda bulunan CONVECTION ON/OFF anahtarında yerine konulmuştur. Böylece başlangıç parametrelerinden türetilen logaritmik bolluklar ile ML etkisi dahil edilerek türetilen modelden hesaplanan logaritmik bolluklar karşılaştırılmıştır. Ayrıca, NIR bölge için Line Depth Ratio (LDR) yöntemiyle yapılan etkin sıcaklık testleri, NIR bölgeden elde edilecek T_{eff} parametresi için ilave bir görüş sağlamıştır.

Analiz edilen elementler nükleosentez kökenlerine göre α -elementleri (Mg, Si, Ca, Ti), demir grup elementleri (Sc, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni) ve nötron yakalama elementleri (Cu, Zn, Sr, Y, Zr, Ba, La, Nd, Sm) olarak sınıflandırılmış ve her biri astrofiziksel bağlamda tartışılmıştır. Elde edilen atmosfer parametreleri temel alınarak, Bayezyen olasılık kuramına dayalı bir yöntemle yıldızların yaşları *PARSEC* (Bressan vd. 2012) izokronları üzerinden tahmin edilmiştir. Yaş analizlerini takiben, Gaia DR3 verileri kullanılarak Johnson ve Soderblom (1987) reçetesiyle uzay hız bileşenleri (U, V, W) hesaplanmış ve ardından *galpy* (Bovy 2015) yazılımı aracılığıyla yıldızların yörünge parametreleri belirlenmiştir. Diferansiyel dönme ve LSR düzeltmeleri de analize dâhil edilerek, yıldızların Gökada içi hareketleri ve yapısal bileşenlerle olan ilişkileri ortaya konmuştur.

Bu kapsamlı ve çoklu analiz sürecinden elde edilen sonuçlar, Bulgular ve Tartışma bölümünde her bir yıldız özelinde ayrı alt başlıklar altında (Klasik Tayfsal Analiz, Yaş Analizi, Kinematik ve Yörünge Dinamik Analiz) sunulmuş ve literatürdeki çalışmalarla birlikte değerlendirilmiştir.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. HD 76151 (HIP 43726)

4.1.1. Klasik tayfsal analiz sonuçları

HD 76151 yıldızının tayfsal analizinde optik bölge için HARPS ($R = 115\,000$; $S/N = 356.7$) ve NIR bölge için IGRINS tayfçekerlerinden elde edilen echelle spektrumlar kullanılmıştır. Tezin materyal-metot kısmında detaylıca irdelenen tayf verisinin ölçüme hazırlanması süreci içerisinde ilgili tayf verileri sürekliliğe normalize edilmiş ve dikine hız düzeltmeleri yapılmıştır. HD 76151 yıldızı için Güneş'in NARVAL spektrumu üzerinden çapraz korelasyon yöntemi kullanılarak elde edilen HARPS spektrumu için radyal hız $V_{rad} = 32.05 \pm 0.05 \text{ km s}^{-1}$ (bkz. Şekil 3.8, üst panel)'dir. IGRINS spektrumu için radyal hız düzeltimi Park vd. (2018) tarafından yapılmış ve $V_{rad} = 32.08 \text{ km s}^{-1}$ olarak rapor edilmiştir. Gaia DR3 (Gaia İşbirliği, 2023), yıldızın (Gaia DR3 5760701787150565888) radyal hızını $V_{rad} = 31.99 \pm 0.12 \text{ km s}^{-1}$ olarak rapor etmiş ve bu değer yıldızın HARPS ve IGRINS tayfindan elde edilen radyal hız değerleriyle hata payı içerisinde uyumludur.

Bu işlemlerin ardından ilk olarak, LIME kodu (Şahin 2017) aracılığıyla çizgilerin eşdeğer genişlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Eşdeğer genişlik ölçümlerinde yalnızca simetrik, izole ve kaynaşık yapıda olmayan ayrıca tellürik geçişlerden uzak seçilen çizgiler tercih edilmiştir. Ölçülen EW değerleri ve seçilen çizgilerin (Optik: Şahin vd. 2023; NIR: Şentürk vd. 2024) atomik parametreleri (dalga boyu, element türü, alt seviye enerjisi, $\log gf$) klasik tayfsal analizde kullanılan MOOG kodunun *abfind* modülüne girdi olarak sağlanmıştır.

Model atmosfer hesaplamaları için FORTRAN tabanlı, 1D düzlem-paralel ATLAS9 kodu (Castelli ve Kurucz, 2003) kullanılarak ve *ODFNEW* opasite versiyonu altında gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada başlangıç model parametreleri literatürdeki benzer G5V tipi yıldızlar göz önünde bulundurularak T_{eff} ve $\log g$ parametreleri için sırasıyla tahmini 6000 K, 5.0 cgs olarak girilmiş; parametre optimizasyonu ise klasik denge koşulları temelinde itere edilmiştir. Sırasıyla:

- Etkin sıcaklık (T_{eff}): Fe I çizgilerinden elde edilen bollukların alt uyarılma

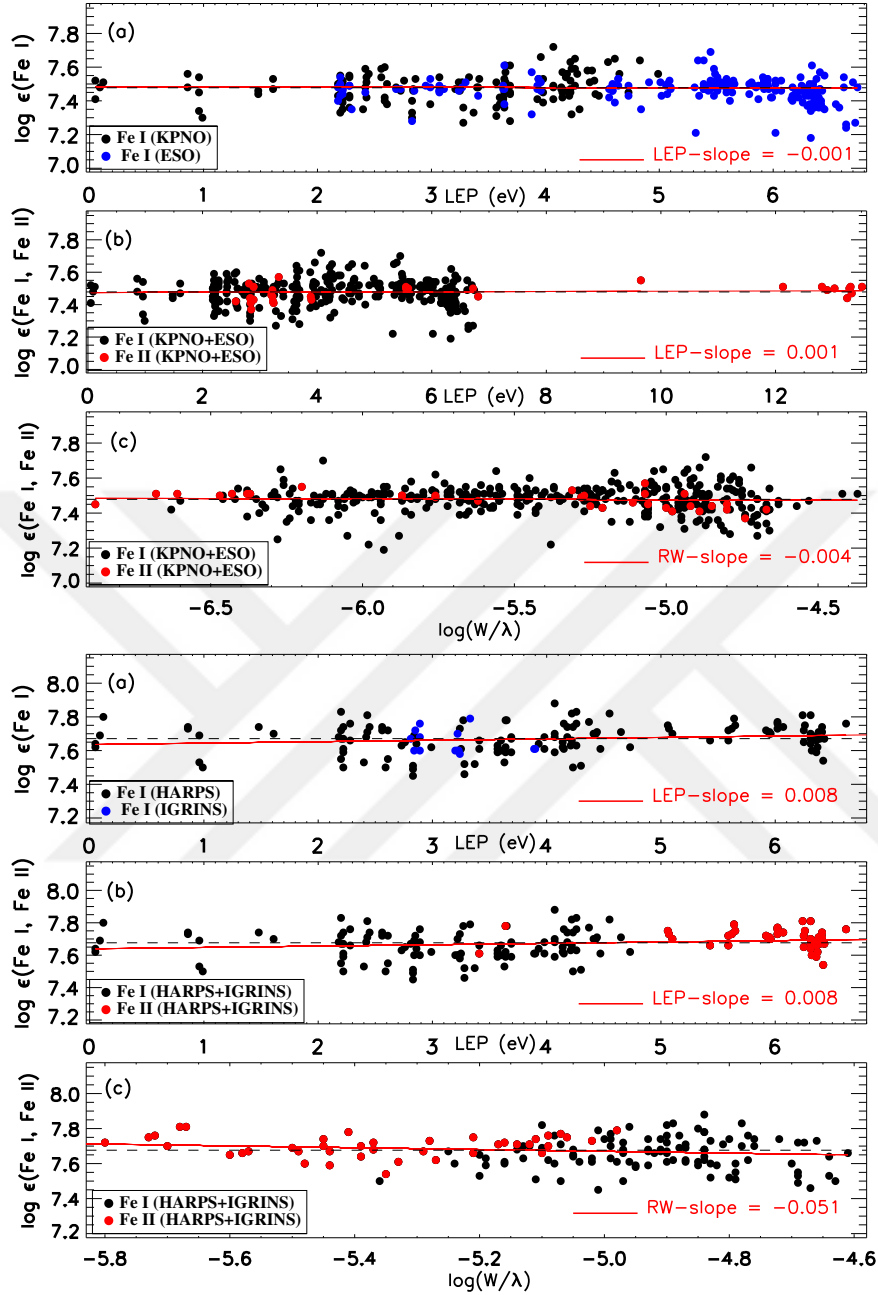
Tablo 4.1. HARPS ve IGRINS tayflarından elde edilen model atmosfer parametreleri. Ayrıca tabloda KPNO ve ESO Güneş tayflarından elde edilen model atmosfer parametreleri de sunulmuştur.

Yıldız	Tayfçeker	Dalga Boyu Aralığı (Å)	T_{eff} (K)	$\log g$ (cgs)	[Fe/H] (dex)	ξ (km s ⁻¹)
HD 76151	HARPS	3780-6910	5780±88	4.35±0.16	0.14±0.08	0.69±0.50
HD 76151	IGRINS	14500-24500	5780±178	4.31±0.25	0.21±0.13	2.10±0.50
HD 76151	HARPS+IGRINS	3780-24500	5790±170	4.35±0.18	0.24±0.09	0.30±0.50
Güneş	KPNO	4000-7000	5790±45	4.40±0.09	0.00±0.04	0.66±0.50
Güneş	ESO	9780-50050	5780±55	4.40±0.22	0.00±0.03	1.08±0.50
Güneş	KPNO+ESO	4000-50050	5790±78	4.44±0.14	0.00±0.05	0.90±0.50

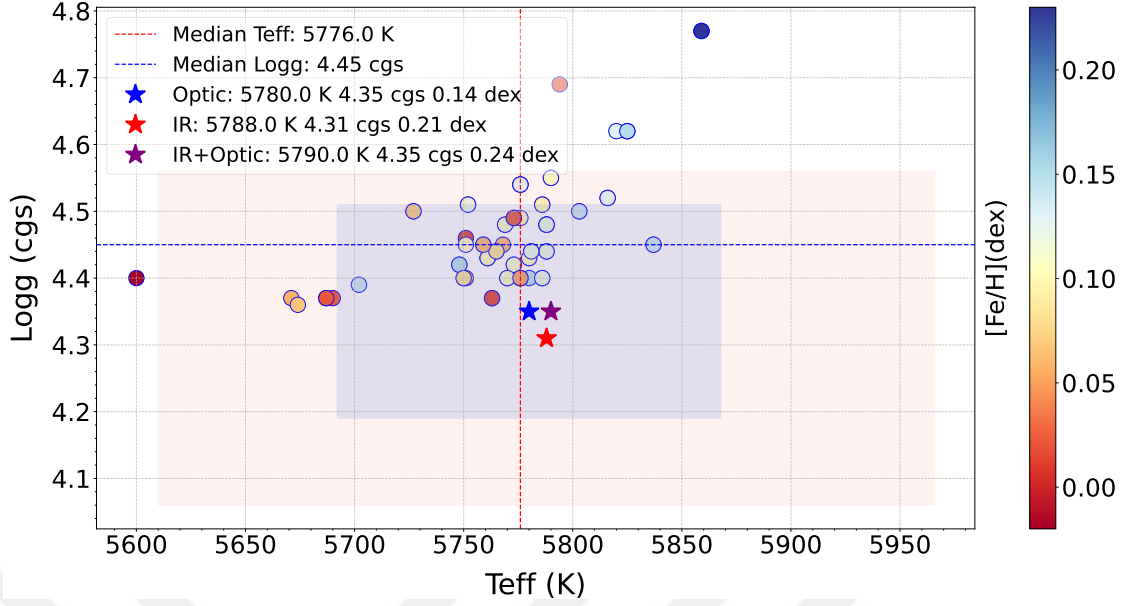
potansiyelinden (χ) bağımsız olması koşuluyla elde edilmiştir (bkz. 4.1 1. ve 4. panel.).

- Yüzey yerçekimi ($\log g$): Fe I ve Fe II çizgilerinden türetilen bollukların ortalaması arasındaki fark minimize edilerek iyonizasyon dengesi koşulu sağlanmıştır.
- Metal bolluğu ([Fe/H]): $\log g$ ve T_{eff} değerleri optimize edildikten sonra Fe II çizgilerinden elde edilen ortalama logaritmik bolluk değerinin ($\log \epsilon_{\text{Fe II}}$), Güneş analizinden elde edilen logaritmik iyonize demir bolluğundan farkı alınarak hesaplanmıştır.
- Mikrotürbülans hızı (ξ): Nötral Fe bolluğu ile indirgenmiş eşdeğer genişlik ($\log(EW/\lambda)$) arasındaki eğim sıfıra yakınlışana dek iteratif olarak ayarlanmıştır (bkz. 4.1 2. ve 5. panel.).

Bu iterasyonlar sonucunda elde edilen model atmosfer parametreleri hem optik hem NIR hem de optik+NIR bölgeden ayrı ayrı elde edilmiştir. Optik bölge için iyonizasyon koşulu nötral/iyonize Fe çiftinin yanı sıra, eşzamanlı olarak Ti ve Cr çifti için de sağlanmıştır. NIR tayf analizinde özellikle Fe I/Fe II dengesinin sağlandığı kırmızıöte geçişlerde bu sonuçlar desteklenmiştir. Güneş için yapılan kırmızıöte analizde ise ilave olarak Ca I/Ca II dengesi de sağlanmıştır. Bu tez çalışması kapsamında klasik tayfsal analiz yöntemi ile HD 76151 yıldızı ve Güneş için elde edilen model atmosfer parametreleri Tablo 4.1’de; optik (HARPS), NIR (IGRINS), optik+NIR (HARPS+IGRINS) olacak şekilde üç farklı ölçüm üzerinden rapor edilmiştir. HD 76151 yıldızı için IR bölgede model parametreleri ilk kez bu tez çalışmasının ön çıktısı



Şekil 4.1. MOOG LTE çizgi analiz koduyla Y-, J-, H- ve K- bantlarında gerçekleştirilen güneş tayf analizinin bir örneği gösterilmektedir. Üst panelde, sırasıyla üst ve orta paneller, Güneş için fotosferik model atmosfer parametrelerinin (KPNO+ESO) MOOG yıldız atmosfer kodu kullanılarak alt seviye uyarılma potansiyeli (L.E.P.) ve indirgenmiş eşdeğer genişliğin (R.W.) bir fonksiyonu olarak belirlenmesini göstermektedir. Alt panel HD 76151'in HARPS ve IGRINS spektrumları içindir. Tüm panellerdeki kesikli çizgiler verilere en küçük kareler uyumunu temsil eder. Alt paneller her iki paneldeki Fe çizgileri için hesaplanan bollukların dalga boyu dağılımını göstermektedir.



Şekil 4.2. Görüntüdeki soluk mavi alan, HD 76151’in HARPS spektrumundan optik bölgede (mavi yıldız sembolü) elde edilen model parametrelerindeki hataları ($\Delta T_{\text{eff}} = 88$ K, $\Delta \log g = 0.16$ cgs) temsil ederken, soluk kırmızı alan, kırmızıöte (kırmızı yıldız sembolü) IGRINS spektrumundan elde edilen model parametrelerindeki hataları ($\Delta T_{\text{eff}} = 178$ K, $\Delta \log g = 0.25$ cgs) temsil eder. Hem optik hem de kırmızıöte model parametreleri, mor renkli bir yıldız sembolü ile gösterilir.

olan Şentürk vd. (2024) çalışması kapsamında rapor edilmiştir. Yıldız için literatürde rapor edilen tüm atmosfer parametreleri optik bölgeden elde edilmiş olup, rapor edilen değerlerin tez kapsamında hesaplanan değerlerle uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Literatür verilerinin karşılaştırılması Şekil 4.2’de ve figürde kullanılan verilerin değerleri ve referansları ise EK-Tablo EK.1’de sunulmuştur. Logaritmik element bolluklarının elde edilmesi için yine LTE koşul altında çalışan MOOG (Snedden 1983) çizgi analiz kodunun *abfind* komutundan yararlanılmıştır.

Özellikle NIR bölgedeki atomik verilere ($\log gf$) ilişkin belirsizliklerin giderilmesi için Güneş tayfında teşhis edilen geçişler kullanılarak bolluk analizi gerçekleştirilmiş ve en az saçılma gösteren geçişler analiz için kabul edilmiştir (Şentürk vd. 2024). Güneş analizi için KPNO’daki FTS kullanılarak elde edilen yüksek çözünürlüklü ($R=700\,000$), tellürik çizgilerden arındırılmış ESO Güneş tayfı kullanılmıştır. Güneş’e ait model atmosfer parametreleri Tablo 4.1’de rapor edildiği şekilde $T_{\text{eff}} = 5780 \pm 55$ K, $\log g = 4.40 \pm 0.22$ cgs ve $\xi = 1.08$ km/s olarak belirlenmiştir. Optik bölge için Şahin vd. (2024) çerçevesinde elde edilen model parametreleri ise $T_{\text{eff}} = 5790 \pm 45$ K, $\log g = 4.40 \pm 0.09$

Tablo 4.2. Güneş ve HD 76151 için sırasıyla KPNO ve HARPS tayflarından elde edilen bolluklar verilmektedir. Ayrıca HD 76151 için IGRINS tayfindan elde edilen bolluklar bold olarak işaretlenmiştir. İlave olarak, Güneş için bu çalışmada hesaplanan logaritmik bolluklar (Şahin vd. 2024) ile literatürde sıklıklar referans olarak kullanılan Asplund vd. (2021) çalışmasının logaritmik bolluk değerleriyle karşılaştırması verilmiştir.

Atomik Türler	HD 76151			Güneş			
	[X/Fe] (dex)	σ	N	log $\epsilon(X)$ (dex)	N	ASP (dex)	$\Delta \log \epsilon_{\odot}(X)$
Na I	0.04	0.11	1	6.16 ± 0.07	2	6.24 ± 0.04	-0.08
Mg I	-0.15	0.11	1	7.60 ± 0.08	2	7.60 ± 0.04	0.00
Mg I	-	-	0	7.47 ± 0.02	2	7.60 ± 0.04	-0.13
Si I	0.03	0.13	10	7.50 ± 0.07	12	7.51 ± 0.03	-0.01
Si I	-0.04	0.17	1	7.50 ± 0.11	28	7.51 ± 0.03	-0.01
Ca I	0.00	0.14	16	6.34 ± 0.08	18	6.34 ± 0.04	0.00
Ca I	-	-	0	6.29 ± 0.11	11	6.34 ± 0.04	-0.05
Ca II	-0.07	0.13	1	6.22 ± 0.00	1	6.34 ± 0.04	-0.12
Sc I	0.03	0.17	3	3.23 ± 0.08	7	3.15 ± 0.04	0.08
Ti I	-0.04	0.16	36	4.96 ± 0.09	43	4.95 ± 0.05	0.01
Ti I	0.10	0.18	1	4.91 ± 0.12	10	4.95 ± 0.05	-0.04
Ti II	-0.02	0.14	9	4.99 ± 0.08	12	4.95 ± 0.05	0.04
Ti II	-	-	0	4.76 ± 0.00	1	4.95 ± 0.05	-0.19
V I*	0.06	0.11	4	3.90 ± 0.03	5	3.93 ± 0.08	0.03
Cr I	0.00	0.14	16	5.71 ± 0.07	19	5.64 ± 0.04	0.07
Cr II	0.03	0.17	2	5.64 ± 0.14	3	5.64 ± 0.04	0.00
Mn I	-0.01	0.20	9	5.62 ± 0.13	13	5.43 ± 0.05	0.19
Fe I	-0.02	0.15	90	7.54 ± 0.09	132	7.50 ± 0.04	0.04
Fe I	0.04	0.17	74	7.46 ± 0.07	204	7.50 ± 0.04	-0.04
Fe II	0.00	0.11	14	7.51 ± 0.04	17	7.50 ± 0.04	0.01
Fe II	0.00	0.19	6	7.50 ± 0.06	10	7.50 ± 0.04	0.00
Co I*	0.04	0.26	5	4.94 ± 0.14	6	4.99 ± 0.07	-0.05
Ni I	-0.01	0.15	45	6.28 ± 0.09	54	6.22 ± 0.04	0.06
Zn I*	0.14	0.08	1	4.60 ± 0.00	2	4.56 ± 0.05	0.04
Sr I*	0.07	0.08	1	2.86 ± 0.00	1	2.87 ± 0.07	-0.01
Y II*	0.06	0.15	2	2.20 ± 0.04	2	2.21 ± 0.05	-0.01
Zr II*	-0.10	0.08	1	2.70 ± 0.00	1	2.58 ± 0.04	0.12
Ba II	0.04	0.10	3	2.24 ± 0.06	4	2.18 ± 0.09	0.06
Ce II*	0.02	0.08	1	1.58 ± 0.02	2	1.58 ± 0.04	0.00
Nd II*	-0.12	0.12	1	1.33 ± 0.09	3	1.42 ± 0.04	-0.09

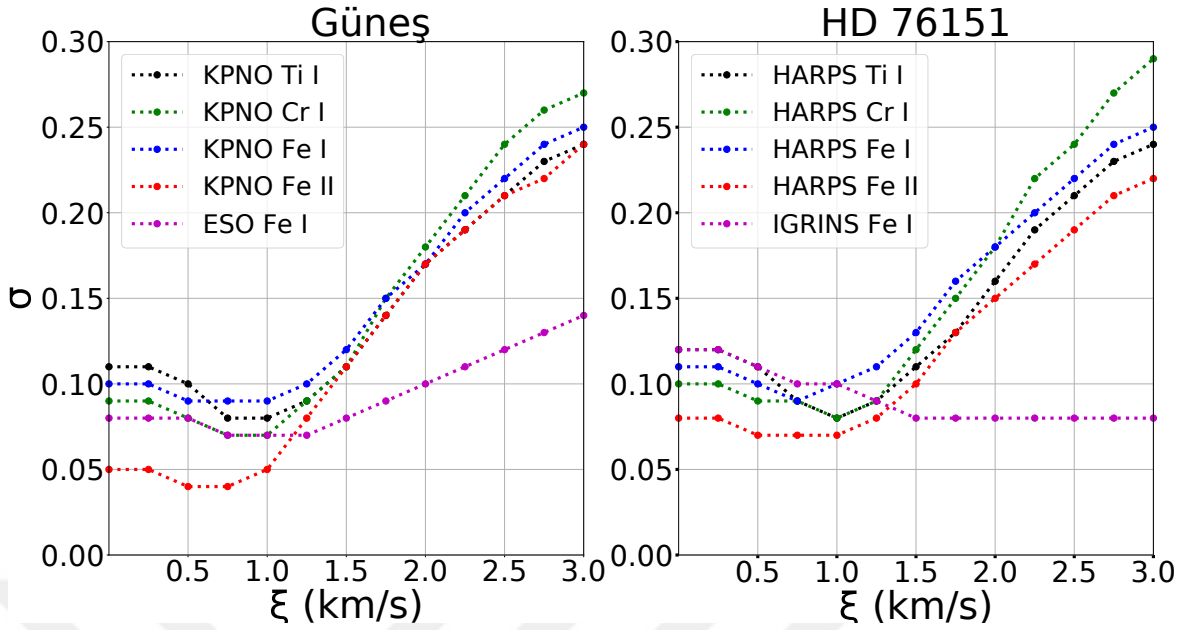
$$\Delta \log \epsilon_{\odot}(X) = \log \epsilon_{\odot}(X_{\text{TS}}) - \log \epsilon_{\odot}(X_{\text{ASP}})$$

(*) Bolluk hesaplamasında spektrum sentez tekniği kullanılmıştır.

Bold ve sarı olarak işaretlenen bolluklar IGRINS tayfindan elde edilen kırmızıöte bolluklarını ifade eder.

cgs ve $\xi = 0.66$ km/s olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu model atmosfer parametreleri, Güneş tayfı için element bolluklarının hesaplanması aşamasında kullanılmıştır. Logaritmik bollukların ($\log \epsilon X$), $[X/Fe]$ oranlarına dönüştürülmesi aşamasında dalgaboyu bölgesine bağlı olarak hesaplanan Güneş bolluk değerleri kullanılmıştır (differential abundance analysis). Diferansiyel bolluk analizinin temel prensibi, eşdeğer genişlik ve geçiş olasılıklarından kaynaklanan belirsizliklerin ortadan kaldırılması konusunda avantaj sağlamasıdır. Bu sayede elde edilen bolluk değerlerinde LTE yaklaşımından kaynaklı belirsizliklerin önüne geçilmesi hedeflenir. Güneş için hesaplanan element bollukları literatürde sıklıkla tercih edilen Asplund vd. (2009) çalışmasının güncel versiyonu olan Asplund vd. (2021) çalışmasında rapor edilen Güneş logaritmik element bolluk değerleri ile karşılaştırılmış ve sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmüştür (Tablo 4.2). Dikkat edilirse Asplund vd. (2021) tarafından rapor edilen güneş bolluk değerleri, tez çalışmasında analiz edilen tüm elementler için (NIR bölgedeki Ti I hariç.) hesaplanan güneş bolluk değerleri ile 0.1 dex içerisinde uyumludur. Bu sonuçlar doğrultusunda, Güneş tayfı üzerinde doğruluğu teyit edilen atomik verinin G tayf türü, Güneş benzeri yıldızlarda klasik tayfsal analizler için kullanılabileceği anlaşılmıştır.

Elde edilen model atmosfer parametrelerinin bağımsız olarak test edilmesi için NIR bölgede etkin sıcaklık (T_{eff}) tayininde çizgi derinlik oranı (Line Depth Ratio, LDR) yöntemi uygulanmıştır. Bu amaçla, Fukue vd. (2015) tarafından bildirilen H-bandındaki çizgi çiftleri kullanıldı. Mevcut çalışma, öncelikli olarak ESO Güneş tayfı üzerinde test edildi ve çalışmadaki 2, 3, 6 ve 9 numaralı çiftlerin Güneş verileriyle çok daha iyi uyum sağladığı tespit edildi. Bu çerçevede Güneş için etkin sıcaklık değeri 5685 ± 99 K olarak hesaplandı. Bu değer, bu çalışmada KPNO-NIR güneş spektrumu kullanılarak Güneş için elde edilen spektroskopik sıcaklıkla ($T_{\text{eff}} = 5780 \pm 55$ K) tutarlıdır. HD 76151'in IGRINS tayfindan aynı çizgi çiftlerinden yapılan ölçümler sonucunda $T_{\text{eff}} = 5690 \pm 38$ K olarak hesaplandı. Yıldızın IGRINS spektrumundan türetilen spektroskopik sıcaklık $T_{\text{eff}} = 5780 \pm 178$ K'dir. Çizgi oranları için kullanılan çizgiler arasında, yeni oluşturulan çizgi listesindeki 15194.50 Å ve 15207.54 Å'daki Fe I geçişleri de bulunmaktadır. Son geçiş, Andreasen vd. (2016) çalışmasındaki çizgi listesine uygulanan RMT analiziyle eklenmiştir (RMT analizinin ayrıntıları için Bölüm 3'e bakabilirsiniz.). Görülebileceği gibi, çizgi derinliği oranı yöntemiyle elde edilen etkin sıcaklık değerleri hem Güneş hem



Şekil 4.3. Ti, Cr ve Fe bolluklarının Ti I, Cr I, Fe I ve Fe II çizgilerinden ξ 'nin bir fonksiyonu olarak standart sapması.

de HD 76151 yıldızı için IR tayflardan elde edilen tayfsal sonuçlarla tutarlıdır.

Ek olarak, analiz sürecinde mikrotürbülans hızı (ξ) için bazı hata testleri uygulanmıştır. Mikrotürbülans hızı (ξ), yalnızca Fe I çizgileri üzerinden değil, aynı zamanda Ti I, Cr I ve Fe II çizgilerinden de ayrı ayrı belirlenebilmektedir. Bu bağlamda, HD 76151 ve Güneş için 0 ile 3.0 km/s aralığında 0.25 km/s değerindeki adımlarla farklı ξ değerleri denenmiş, her bir element grubu için hesaplanan bollukların saçılım değerleri (dispersiyon, σ) değerlendirilmiştir. Şekil 4.3, Ti I, Cr I, Fe I ve Fe II çizgilerinden elde edilen dispersiyonları göstermektedir.

HD 76151 için optik bölge Fe I çizgileri üzerinden gerçekleştirilen dispersiyon testi, minimum saçılım değerine karşılık gelen mikrotürbülans hızını yaklaşık $\xi = 0.8$ km/s olarak belirlemiştir. Aynı yöntemle Ti I ve Cr I çizgileri için hesaplanan ξ değeri 1.0 km/s bulunmuştur. Fe II çizgilerinden türetilen ξ değeri ise 0.5–1.0 km/s aralığında değişkenlik göstermiştir. Tüm bu analizler bir arada değerlendirildiğinde, HARPS tayfı üzerinden HD 76151 için mikrotürbülans hızının tahmini belirsizliği yaklaşık ± 0.5 km/s olarak hesaplanmıştır.

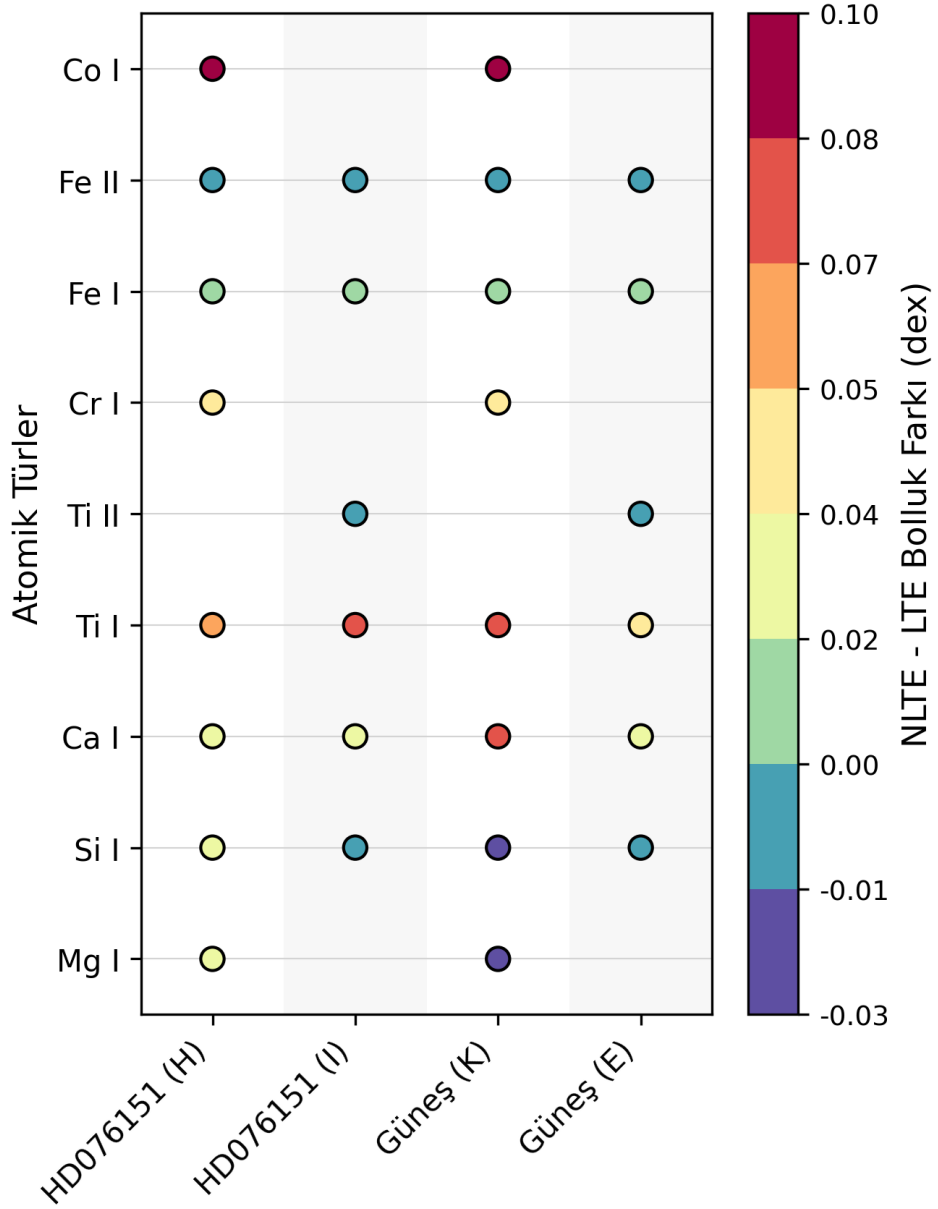
Özellikle IGRINS spektrumunda, nötral Fe çizgileri üzerinde ξ 'nin etkisi 1.0 km/s sonrasında zayıflamakta ve 1.5 km/s sonrasında sabitlenmektedir. IGRINS tayfında uygulanan eğim minimizasyon yöntemine göre, mikrotürbülans hızı $\xi = 2.1$ km/s olarak

bulunmuş ve bu değerin tahmini hata payı da ± 0.5 km/s olarak belirlenmiştir.

Optik ve NIR bölgedeki çizgi listelerinin birlikte kullanıldığı analizde, nötral Fe çizgilerinden türetilen ξ değeri 0.0–0.5 km/s aralığında, iyonize Fe çizgilerinden elde edilen değer ise 0.5–0.8 km/s aralığında yer almıştır (bkz. Şekil 4.3, sağ panel). Eğimi minimize eden mikrotürbülans değeri, tüm spektral bölgeyi kapsayan birleşik çizgi listesi için $\xi = 0.3$ km/s olarak saptanmış ve bu değerin belirsizliği de yine ± 0.5 km/s olarak değerlendirilmiştir.

Analiz sonucu elde edilen element bollukları üzerinde Non-LTE etkilerinin varlığı sorgulanmıştır. Non-LTE bollukların elde edilmesi aşamasında INSPECT (Lind vd. 2012) ve MPIA arayüzlerinden yararlanılmıştır. Fe II çizgilerinde NLTE etkilerin önemsiz olduğu literatürde çeşitli çalışmalarla gösterilmiştir (Bergemann vd. 2012a; Lind vd. 2012; Bensby vd. 2014). Özellikle Lind vd. (2012), uyarılma potansiyeli 8 eV'un altında olan Fe II çizgileri için $[\text{Fe}/\text{H}] \geq 3.0$ dex metalisite koşullarında LTE'den sapmaların ihmal edilebilir düzeyde olduğunu belirtmiştir. Bu bağlamda, çalışmamızda metalisite belirlemede Fe II çizgileri esas alınmıştır. Bu yaklaşım, özellikle atmosfer parametrelerinin doğruluğunu arttırmak ve model bağımlı sistematik hataları en aza indirmek açısından önemlidir. NLTE etkiler kırmızıöte bölgede IGRINS tayfı ve KPNO-NIR Güneş tayfı için ayrı ayrı incelendi. NIR bölgesinde, Güneş spektrumundaki dört nötral silikon çizgisi için hesaplanan NLTE düzeltmeler -0,003 dex (M. Bergemann ve ark. 2013) ve üç nötral titanyum çizgisi için NLTE düzeltmeler ise 0,047 dex (M. Bergemann ve ark. 2012) olarak hesaplandı. HD 76151'in IGRINS tayfında tespit edilen tek bir silikon çizgisi için düzeltme -0,001 dex iken, 15543.756 Å'daki nötral bir titanyum geçişi için düzeltme 0,08 dex olarak tespit edildi. IGRINS ve KPNO-NIR güneş spektrumları, 15873.88 Å'da yalnızca bir iyonize titanyum çizgisinden oluşuyordu. Bu çizgi için NLTE düzeltme her iki tayfta da -0,007 dex'tir. Son olarak, her iki spektrumdaki 44 nötral demir çizgisi için NLTE düzeltme 0,007 dex (M. Bergemann ve diğerleri, 2012) olarak hesaplanmıştır.

KPNO-OPTIK güneş tayfında ölçülen 66 nötral demir çizgisi için elde edilen NLTE düzeltme değeri 0.006 dex iken, HD 76151'in HARPS spektrumunda tespit edilen 46 nötral Fe çizgisi için bu değer 0.008 dex olarak hesaplandı (Bergemann vd. 2012a). HARPS tayfında tespit edilen Mg I (bir), Si I (yedi), Ca I (dokuz) ve Mn I (dokuz) için



Şekil 4.4. HD 76151 ve Güneş tayfı üzerinden hem optik hem de NIR bölgede gerçekleştirilen NLTE düzeltmeler.

NLTE düzeltme değerleri 0,03 dex'ten azdı (L. Mashonkina vd. 2007; M. Bergemann vd. 2013, 2017, 2019). En büyük fark titanyum için gözlemlendi. Buna göre, HARPS spektrumunda tespit edilen 36 nötral titanyum çizgisi için LTE dışı düzeltme 0,06 dex'tir (M. Bergemann 2011). KPNO güneş spektrumunda tespit edilen 43 Ti I çizgisi için ise bu değer 0,07 dex'tir. HARPS ve KPNO-OPTICAL güneş spektrumlarındaki 16 nötral krom çizgisi için NLTE düzeltmeler 0,05 dex (M. Bergemann ve G. Cescutti 2010) iken, aynı spektrumlardaki Co için NLTE düzeltme (M. Bergemann ve diğerleri 2010) yaklaşık 0.1 dex'tir. Görüleceği üzere, Güneş tayfı (optik ve NIR) ve HD 76151 (optik ve NIR) tayfında bildirilen element bollukları için ortalama NLTE düzeltmeler birbirleriyle tutarlıdır ve minimum düzeydedir. Şekil 4.4, yukarıda listelenen tüm elementler için NLTE düzeltmeler çerçevesinde özet bir görsel niteliği taşımaktadır.

HD 76151 yıldızı için hesaplanan nihai element bolluk değerleri, karşılaştırma amacıyla Güneş'in tayfindan elde edilen bolluklarla birlikte Tablo 4.2'te sunulmaktadır. Bu tabloda, analiz edilen her bir element için hesaplanan [Element/Fe] oranları (ikinci sütun) ve standart sapmaları (üçüncü kolon) ile birlikte yıldız tayfında ölçülebilen geçiş çizgilerinin sayısı (dördüncü sütun) rapor edilmiştir. Kırmızıöte bölgeden elde edilen bolluklar bold olarak içerilmiştir. Benzer şekilde, Güneş tayfında analiz edilen her bir element için hesaplanan [Element/H] oranları ve standart sapmaları (beşinci sütun) ile birlikte Güneş tayfında ölçülebilen geçiş çizgilerinin sayısı (altıncı sütun) rapor edilmiştir. Son olarak Asplund vd. (2021) çalışmasında rapor edilen logaritmik Güneş bollukları (yedinci sütun) ile Şahin vd. (2024) çalışmasında rapor edilen bolluklardan sapma (sekizinci sütun) miktarları içerilmiştir. Bu sayede hem yıldızın genel kimyasal bileşimi hem de Güneş ile karşılaştırmalı olarak element bolluklarındaki farklılıklar detaylı biçimde değerlendirilebilmiştir.

Model atmosfer parametrelerinin bolluk hesaplamalarına olan etkisini değerlendirmek amacıyla, yıldızın temel atmosfer parametreleri (T_{eff} , $\log g$, [Fe/H] ve ξ) bazında ayrı ayrı hata iletmelemleri uygulanmıştır. Bu süreçte, her bir parametreye ait Tablo 4.1'de rapor edilen hata payı kadar bir değişiklik yapılmıştır. Örneğin, HD 76151 için $T_{eff} = 5780 \pm 88$ K olduğundan, etkin sıcaklık 5868 K mertebesine yükseltilmiş ve diğer tüm parametreler sabit tutularak logaritmik bolluklar revize edilmiştir. Aynı yöntemle, $\log g$, [Fe/H] ve ξ için de bireysel varyasyonlar uygulanarak, her bir parametrenin kimyasal bolluklar üzerindeki

Tablo 4.3. Güneş'in optik bölge KPNO spektrumundan ve HD 76151'in HARPS spektrumundan elde edilen model atmosfer parametrelerindeki belirsizliklere karşı türetilen bollukların duyarlılığıdır.

$\Delta \log \epsilon$ (Optik)								
Güneş					HD 76151			
5790 4.40 0.00 0.66					5780 4.35 0.14 0.69			
Atomik	ΔT_{eff}	$\Delta \log g$	$\Delta [\text{Fe}/\text{H}]$	$\Delta \xi$	ΔT_{eff}	$\Delta \log g$	$\Delta [\text{Fe}/\text{H}]$	$\Delta \xi$
	(+45)	(+0.09)	(+0.04)	(+0.50)	(+88)	(+0.16)	(+0.08)	(+0.50)
Na I	+0.03	-0.02	+0.00	-0.06	+0.05	-0.06	+0.02	-0.04
Mg I	+0.04	-0.01	+0.00	-0.14	+0.11	+0.00	+0.00	-0.19
Si I	+0.01	+0.01	+0.01	-0.03	+0.02	+0.00	+0.01	-0.05
Ca I	+0.03	-0.02	+0.00	-0.11	+0.07	-0.03	+0.01	-0.10
Sc II	+0.01	+0.03	+0.02	-0.07	+0.00	+0.05	+0.03	-0.15
Ti I	+0.05	+0.00	+0.00	-0.12	+0.09	-0.01	+0.00	-0.14
Ti II	+0.01	+0.03	+0.02	-0.06	+0.01	+0.06	+0.03	-0.10
V I	+0.05	+0.01	+0.00	-0.04	+0.10	+0.01	+0.00	-0.06
Cr I	+0.04	-0.01	+0.00	-0.16	+0.07	-0.03	+0.00	-0.17
Cr II	-0.01	+0.02	+0.01	-0.10	-0.01	+0.04	+0.02	-0.17
Mn I	+0.04	-0.01	+0.01	-0.15	+0.08	-0.01	+0.01	-0.18
Fe I	+0.04	-0.01	+0.01	-0.14	+0.07	-0.02	+0.00	-0.16
Fe II	+0.00	+0.03	+0.02	-0.12	-0.02	+0.05	+0.03	-0.16
Co I	+0.03	+0.00	+0.00	-0.07	+0.07	+0.00	+0.01	-0.11
Ni I	+0.02	-0.01	+0.00	-0.09	+0.05	-0.01	+0.01	-0.11
Zn I	+0.01	+0.00	+0.01	-0.19	+0.02	+0.00	+0.03	-0.21
Sr I	+0.04	+0.00	-0.01	-0.24	+0.09	-0.01	+0.00	-0.25
Y II	+0.01	+0.03	+0.01	-0.21	+0.01	+0.05	+0.03	-0.26
Zr II	+0.01	+0.03	+0.01	-0.19	+0.02	+0.06	+0.03	-0.24
Ba II	+0.02	+0.01	+0.03	-0.16	+0.04	+0.02	+0.05	-0.21
Ce II	+0.01	+0.04	+0.01	-0.03	+0.02	+0.07	+0.03	-0.09
Nd II	+0.02	+0.04	+0.02	-0.02	+0.03	+0.08	+0.03	-0.03

etkisi ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Bu hata analizleri, hem yalnızca optik bölgeye dayalı bolluk hesaplamaları, hem yalnızca NIR bölgeye ait hesaplamalar, hem de optik ve NIR bölgelerinin birleşik olarak kullanıldığı analizler için tekrarlanmıştır. Elde edilen yeni logaritmik bolluk değerleri, Tablo 4.2'da sunulan başlangıç bolluk değerleri ile karşılaştırılmış ve model atmosfer parametrelerinin her biri için ayrı ayrı ne ölçüde sapma oluşturduğu Tablo 4.3 (optik), 4.4 (NIR) ve 4.5 (optik+NIR)'de sunulmuştur. Bu sayede, her bir geçişin ve gözlem bandının sistematik belirsizliklere duyarlılığı ayrıntılı şekilde incelenmiş ve toplam bolluk hatası hesabında bu etkiler dikkate alınmıştır.

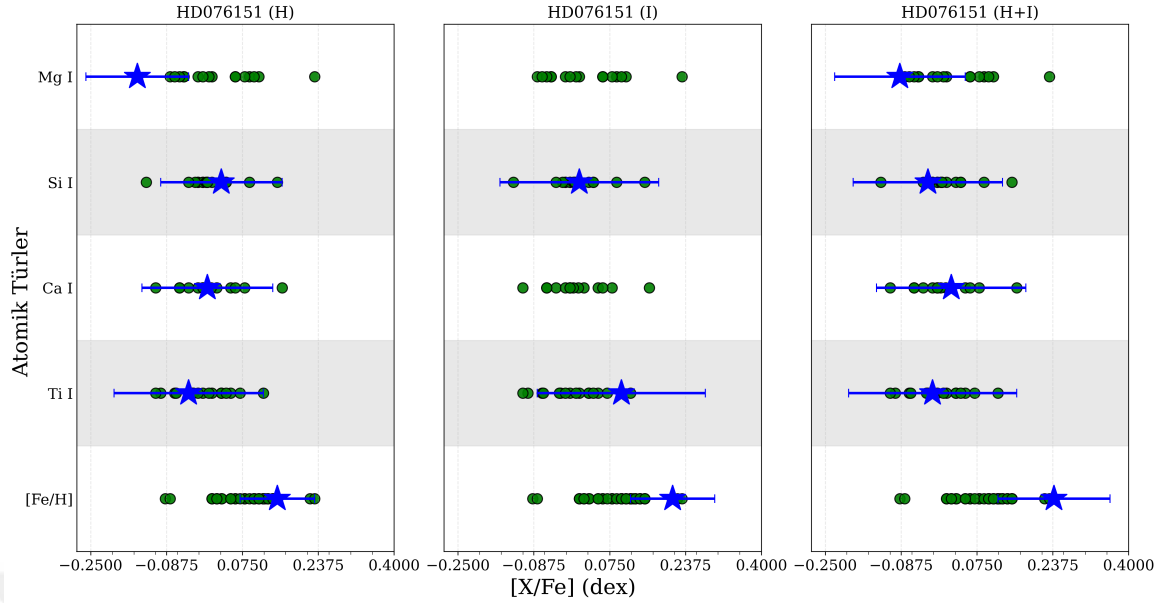
Olası bir konveksiyon etkisinin bolluklar üzerindeki rolünü araştırmak amacıyla, HD 76151 yıldızı için atmosfer yapısında kullanılan karışım uzunluğu parametresi (α)

Tablo 4.4. Güneş'in ESO Y, J, H ve K-bant spektrumlarından ve HD 76151'in IGRINS spektrumundan elde edilen model atmosferik parametrelerdeki belirsizliklere karşı türetilen bollukların duyarlılığıdır.

$\Delta \log \epsilon$ (NIR)								
Güneş					HD 76151			
5780 4.40 0.00 1.08					5780 4.31 0.21 2.10			
Atomik	ΔT_{eff}	$\Delta \log g$	$\Delta [\text{Fe}/\text{H}]$	$\Delta \xi$	ΔT_{eff}	$\Delta \log g$	$\Delta [\text{Fe}/\text{H}]$	$\Delta \xi$
	(+55)	(+0.22)	(+0.03)	(+0.50)	(+178)	(+0.25)	(+0.09)	(+0.50)
Si I	+0.01	+0.00	+0.01	-0.02	+0.05	+0.03	+0.01	+0.00
Ca I	+0.02	-0.01	+0.00	-0.03	..	..	..	..
Ti I	+0.05	+0.00	+0.00	-0.01	+0.16	+0.00	+0.00	+0.00
Ti II	+0.01	+0.10	+0.01	-0.01	..	..	..	..
Fe I	+0.03	+0.00	+0.00	-0.02	+0.08	+0.00	+0.01	+0.00
Fe II	-0.03	+0.07	+0.00	-0.01	-0.10	+0.05	-0.02	+0.00

Tablo 4.5. Güneş'in ve HD 76151'in hem optik hem de NIR dalga boyu bölgelerinden elde edilen model atmosferik parametrelerdeki belirsizliklere karşı türetilen bollukların duyarlılığıdır.

$\Delta \log \epsilon$ (Optik+NIR)								
Güneş					HD 76151			
5790 4.44 0.00 0.90					5790 4.35 0.24 0.30			
Atomik	ΔT_{eff}	$\Delta \log g$	$\Delta [\text{Fe}/\text{H}]$	$\Delta \xi$	ΔT_{eff}	$\Delta \log g$	$\Delta [\text{Fe}/\text{H}]$	$\Delta \xi$
	(+78)	(+0.14)	(+0.08)	(+0.50)	(+170)	(+0.18)	(+0.12)	(+0.50)
Na I	+0.05	-0.04	+0.01	-0.04	+0.09	-0.07	+0.03	-0.03
Mg I	+0.07	-0.03	-0.01	-0.15	+0.20	-0.02	+0.01	-0.13
Si I	+0.01	+0.00	+0.00	-0.03	+0.03	+0.00	+0.02	-0.03
Ca I	+0.05	-0.02	+0.00	-0.07	+0.11	-0.05	+0.01	-0.08
Sc II	+0.01	+0.05	+0.03	-0.10	-0.01	+0.05	+0.03	-0.12
Ti I	+0.07	-0.02	-0.01	-0.11	+0.16	-0.01	+0.01	-0.10
Ti II	+0.00	+0.05	+0.01	-0.10	-0.01	+0.06	+0.04	-0.09
V I	+0.08	-0.01	-0.01	-0.05	+0.17	+0.00	+0.00	-0.06
Cr I	+0.07	-0.02	+0.00	-0.17	+0.14	-0.04	+0.01	-0.13
Cr II	-0.01	+0.05	+0.02	-0.12	-0.05	+0.03	+0.02	-0.14
Mn I	+0.07	-0.03	+0.00	-0.17	+0.14	-0.03	+0.02	-0.14
Fe I	+0.05	-0.01	+0.00	-0.07	+0.12	-0.02	+0.02	-0.09
Fe II	-0.03	+0.05	+0.01	-0.09	-0.06	+0.04	+0.03	-0.12
Co I	+0.06	-0.01	+0.00	-0.08	+0.12	-0.01	+0.02	-0.09
Ni I	+0.05	+0.00	+0.01	-0.08	+0.09	-0.01	+0.03	-0.08
Zn I	+0.02	+0.01	+0.02	-0.20	+0.03	-0.02	+0.04	-0.15
Sr I	+0.07	+0.00	-0.01	-0.18	+0.16	-0.03	+0.01	-0.25
Y II	+0.01	+0.05	+0.03	-0.21	+0.01	+0.04	+0.04	-0.25
Zr II	+0.02	+0.06	+0.03	-0.17	+0.02	+0.06	+0.04	-0.25
Ba II	+0.03	+0.01	+0.04	-0.19	+0.04	+0.00	+0.06	-0.16
Ce II	+0.02	+0.07	+0.03	-0.05	+0.03	+0.08	+0.04	-0.12
Nd II	+0.02	+0.06	+0.02	-0.02	+0.04	+0.08	+0.04	-0.04



Şekil 4.5. b

olluk

karşılaştırması]HD 76151 yıldızı için HARPS(H), IGRINS(I) ve HARPS+IGRINS(H+I) analizlerinden türetilen logaritmik bollukların literatürdeki metaliyte ve α element bolluk değerleriyle karşılaştırılması.

farklı hidro-dinamik modellemelere dayanarak test edilmiştir. Bu kapsamda, Ludwig vd. (1999) tarafından 2 boyutlu hidrodinamik simülasyonlara dayanarak türetilen formül ile Magic vd. (2015) tarafından 3 boyutlu hidrodinamik modeller temelinde geliştirilen bağıntı kullanılmış ve her iki yaklaşım için farklı α değerleri elde edilmiştir. Ludwig vd. (1999) formülasyonu $\alpha=1.58$ verirken, Magic vd. (2015) çalışmasında bu değer $\alpha=1,96$ olarak hesaplanmıştır.

Her iki karışım uzunluğu değeri esas alınarak, Castelli ve Kurucz (2003) tarafından sunulan ATLAS9 model atmosfer kodu ile iki ayrı model oluşturulmuş ve bu modeller kullanılarak hesaplanan sentetik tayflar, HD 76151'in gözlenen HARPS tayfı ile karşılaştırılmıştır. Gözlemsel ve sentetik tayf karşılaştırmaları sonucunda, Magic vd. (2015) çalışmasına dayalı modelin gözlemle daha yüksek düzeyde uyum gösterdiği belirlenmiştir.

Konvektif yapının model parametreler üzerindeki etkisini daha gerçekçi yansıtmak amacıyla, bolluk analizlerinde kullanılan model atmosfer parametreleri yeniden optimize edilmiştir. Mikrotürbülans hızında +0.1 km/s, etkin sıcaklıkta +50 K ve yüzey yerçekimi ivmesinde +0.05 dex düzeyinde düzeltmeler uygulanarak uyarılma ve iyonizasyon

dengeci tekrardan sağlanmıştır. Bu iyileştirilmiş parametre setiyle elde edilen son model (5830 K, 4.40 cgs, 0.81 km/s) kullanılarak hesaplanan element bolluklarının ortalama değişimi, 22 element türü için 0.01 ± 0.03 dex olarak hesaplanmıştır.

Song vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada da vurgulandığı üzere, F-G-K tipi anakol yıldızları için karıştırma uzunluğu parametresindeki değişimlerin genel metal bolluk tahmini üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. İlgili çalışmada sekiz farklı küce yıldız için yapılan uygulamalarda bu etkinin <0.02 dex olduğu bildirilmiştir. HD 76151 için yapılan analizde, elementler arasında en belirgin fark ise Na I için gözlemlenmiş ve bu geçişte $+0.08$ dex'lik bir artış kaydedilmiştir.

Hd 76151 yıldızı için literatür karşılaştırması Tablo EK EK.1'te sunulduğu üzere 53 çalışma üzerinden gerçekleştirilmiştir (ayrıca bkz. Şekil 4.2). Bu çalışmada derlenen literatür değerlerine göre HD 76151 yıldızının etkin sıcaklıkları genellikle 5600–5850 K aralığında yoğunlaşmakta olup, $\log g$ değerleri 4.28–4.77 cgs arasında değişmektedir. Bu değerler, HD 76151'in bir G-tipi ana kol yıldızı olduğunu teyit etmektedir. Buna karşılık metalisite ($[Fe/H]$) değerleri -0.09 ile $+0.24$ dex arasında saçılmakta olup, yıldızın literatürde genel olarak Güneş'e benzer bir yapıda sınıflandırıldığını göstermektedir. Tabloda yer alan Mg, Si, Ca ve Ti gibi α elementlerin $[X/Fe]$ oranları incelendiğinde, bu değerlerin çoğunlukla -0.10 ile $+0.25$ dex arasında (bkz. Şekil 4.5) sınırlı bir dağılım gösterdiği görülmektedir. Bu durum, HD 76151'in α element zenginleşmesi açısından tipik bir disk yıldızı olduğunu ve büyük olasılıkla ince disk bileşenine ait olduğunu göstermektedir. Tabloda görülen değerler, HD 76151'in genel olarak Güneş'e benzer metal içerikli, ancak α elementleri açısından nötral veya çok hafif fakirlik gösteren bir yıldız olduğunu ortaya koymaktadır. Nitekim tez çalışması kapsamında üç farklı yoldan elde edilen bolluklar bu sonucu doğrular nitelikte olup, element bolluğu bazında Güneş ile benzer bir yıldız olduğunu teyit etmektedir.

Model atmosfer parametreleri çerçevesinde bir güneş ikizinin 5772 ± 100 K'lik etkin sıcaklığa, 4.44 ± 0.20 cgs'lik bir yüzey çekimine ve 0.0 ± 0.1 dex'lik bir metalisiteye (Lehmann vd. 2023); güneş analogu yıldızın ise 5772 ± 300 K'lik etkin sıcaklığa, 4.44 ± 0.30 cgs'lik bir yüzey çekimine ve 0.0 ± 0.3 dex'lik bir metalisiteye sahip olduğu tanımlanmıştır (Berke vd. 2023; Lehmann vd. 2023). Bu çalışmada, birleştirilmiş bir çizgi listesi (OPTİK + NIR) ile spektroskopik analizden elde edilen yıldız

parametrelerinin 5790 ± 170 K'lik etkin sıcaklık, 4.35 ± 0.18 cgs'lik bir yüzey çekimi ve 0.24 ± 0.09 dex'lik bir metalisite değeri sağlamıştır. Bu durumda literatürde verilen sınırlamalar doğrultusunda, HD 76151 yıldızının [Fe/H] hata sınırlarını aşması sebebiyle Güneş Analogu olarak sınıflandırılması uygun görülmüştür. Metalisite bakımından zengin karakterizasyonu yaş, kinematik ve yörünge dinamik analizleri doğrultusunda ilerleyen bölümlerde tekrar sorgulanacaktır.

4.1.2. Yaş analizi sonuçları

Evrimsel durumunu değerlendirmek amacıyla, bu çalışmada spektral analiz yoluyla elde edilen üç farklı model atmosfer parametresi seti dikkate alınmış ve her bir set için MCMC yaklaşımı altında PARSEC izokronları (Bressan vd. 2012) kullanılarak yıldızın yaşları (bkz. Figür 4.6, 4.7 ve 4.8) elde edilmiş ve evrimsel süreci hakkında çıkarımlarda bulunulmuştur.

Yıldızın [Fe/H] değeri, izokronlarla karşılaştırılabilir biçimde, kütle kesri Z 'ye dönüştürülerek kullanılabilir hale getirilmiştir. Bu dönüşüm, Bovy tarafından sağlanan ve PARSEC izokronlarıyla uyumlu olan denkleme dayanmaktadır. Dönüştürülen Z değeri, yıldızın izokron dizileri üzerindeki konumunu tanımlamada ve yaş tahmini gerçekleştirmede kritik rol oynamıştır.

$$Z = \frac{(Z_x - 0.2485 \times Z_x)}{(2.78 \times Z_x + 1)} \quad (4.25)$$

$$Z_x = 10^{\left[[\text{Fe}/\text{H}] + \log\left(\frac{Z_\odot}{1 - 0.2485 - 2.78 \times Z_\odot}\right) \right]} \quad (4.26)$$

Burada, Z ve Z_x sırasıyla helyumdan daha ağır elementleri ve ara operasyonel fonksiyonları ifade eder. $Z_\odot$, 0.0154 olarak kabul edilen güneş metal bolluğudur (Bressan vd. 2012). Yıldızın [Fe/H] metalisite oranları sırasıyla 0.14 (H), 0.21 (I), 0.24 (H+I) ve -0.05 (Gaia) dex olup, bu değerler Bovy (2015) tarafından verilen dönüşüm formülü kullanılarak Z metaliklik kütle kesrine çevrilmiştir. Buna göre sırasıyla 0.02054, 0.02382, 0.02536 ve 0.01363 değerleri elde edilmiştir.

MCMC metoduna göre tahmin edilen yaşlar ise HARPS için $6.7_{1.8}^{2.0}$ Gyr, IGRINS için $6.5_{1.5}^{1.5}$ Gyr, HARPS+IGRINS için $5.3_{1.6}^{1.8}$ Gyr, Gaia DR3 için ise 5.0 ± 1.0 Gyr

olarak bulunmuştur (bkz. Şekil Figür 4.6, 4.7 ve 4.8). Bu izokronlar, yıldızın Kiel diyagramındaki konumunu en iyi şekilde temsil eden modellerdir. Farklı spektroskopik parametre setleri kullanılarak hesaplanan yıldız yaşları belirsizlikler dahilinde birbirleriyle tutarlıdır. Literatürde yıldız için yaş dağılımı $0.3 \leq \tau \leq 5.0$ Gyr aralığındadır (bkz. EK Tablo EK.1) ve bu aralığa en yakın yaş değerini veren model parametre setinin HARPS+IGRINS olduğu görülmektedir.

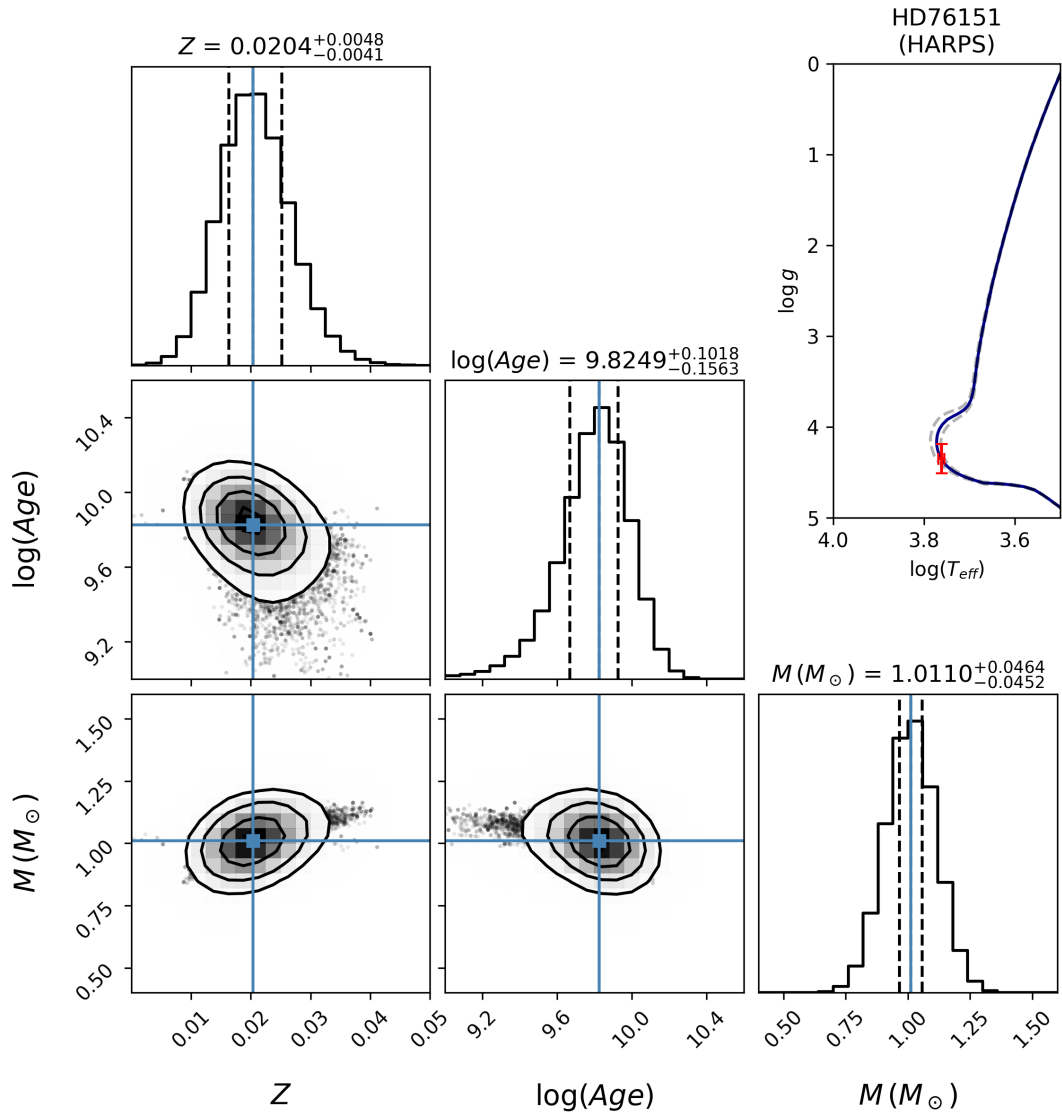
Gaia DR3'ten (Gaia İşbirliği, 2023) elde edilen veriler, -HD 76151 yıldızının fotometrik ve astrometrik verileri- yıldız evrimini incelemek için kullanıldı. İlk olarak uzaklık modülü, yıldızın G bandındaki mutlak parlaklığını (M_G) hesaplamak için kullanıldı. Yıldızın, yıldızlararası soğurma değerini belirlemek için Capitanio vd. (2017) tarafından geliştirilen çevrim içi *Stilism* aracı kullanılmış ve bu değer $E(BV)=0$ mag olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, yıldızın Güneş'e yakın olması nedeniyle mantıklı görünmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada G-bandı absorpsiyonu $A_G=0$ mag olarak kabul edilmiştir. Fotometrik ve astrometrik parametreler Tablo 4.6'te listelenmiştir. Bu verilere dayanarak yıldızın mutlak parlaklığı Denklem 4.27 aracılığıyla $M_G=4.714 \pm 0.003$ mag olarak hesaplanmıştır.

$$M_G = G - 5 \times \log(1000/\omega) + 5 - A_G \quad (4.27)$$

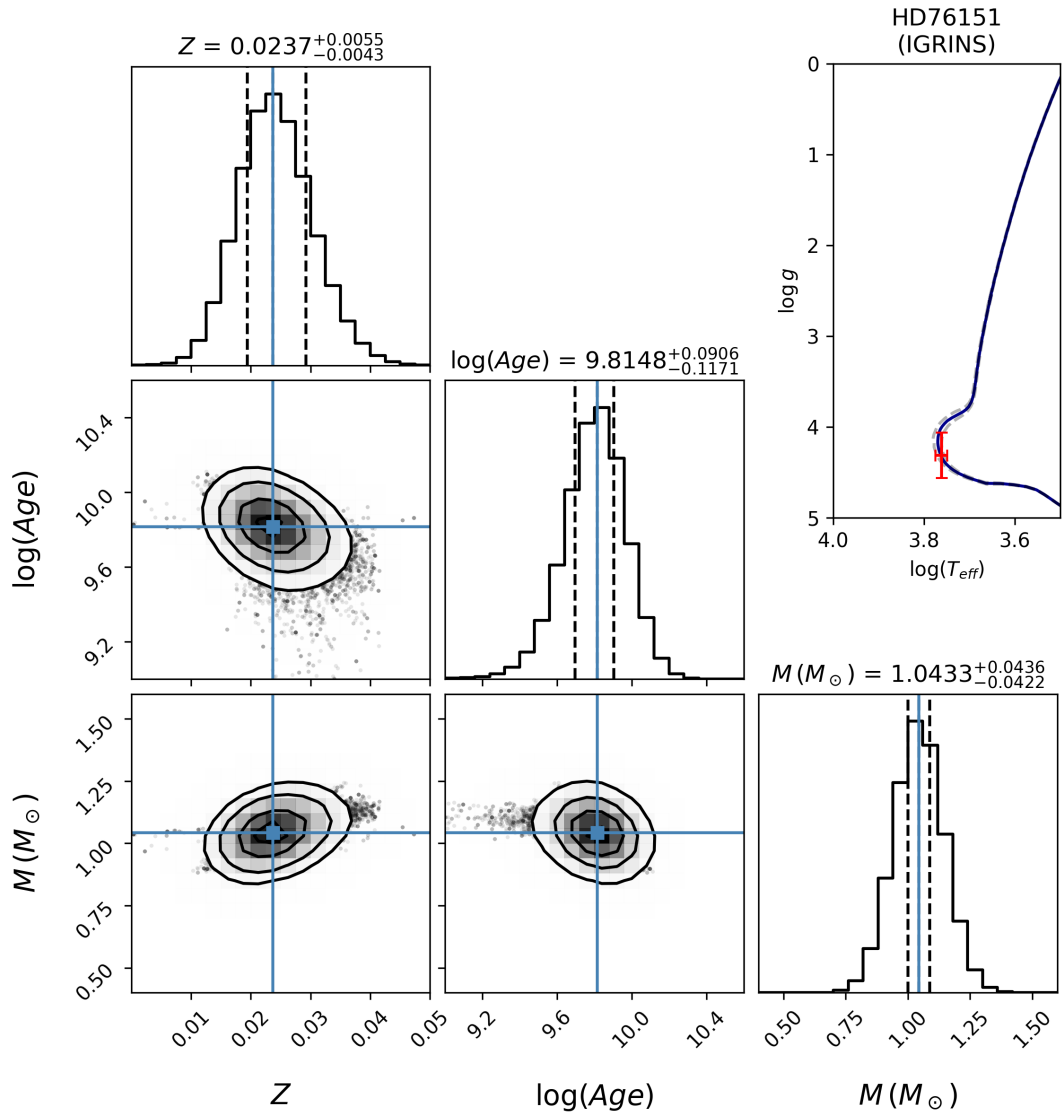
Burada G, yıldızın görünen parlaklığını; ω , mas cinsinden trigonometrik paralaksı ve A_G , G bandındaki yıldızlararası sönmüledir.

HD 76151'in izokronlar üzerindeki konumu, hem sıcaklık-yüzey yerçekimi dağılımı (Kiel diyagramı) hem de türetilen kütle ($M \approx 1.01-1.05 M_\odot$) ve yarıçap ($R \approx 1.12-1.19 R_\odot$) değerleri göz önüne alındığında, Güneş benzeri bir yıldızın orta yaşlı (yaklaşık 5–7 Gyr) evrim aşamasında bulunduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, HD 76151'in anakol üzerinde yer almakla birlikte, Güneş'ten nispeten daha metalce zengin ve nispeten daha büyük kütleli bir yıldız olduğunu ortaya koymaktadır.

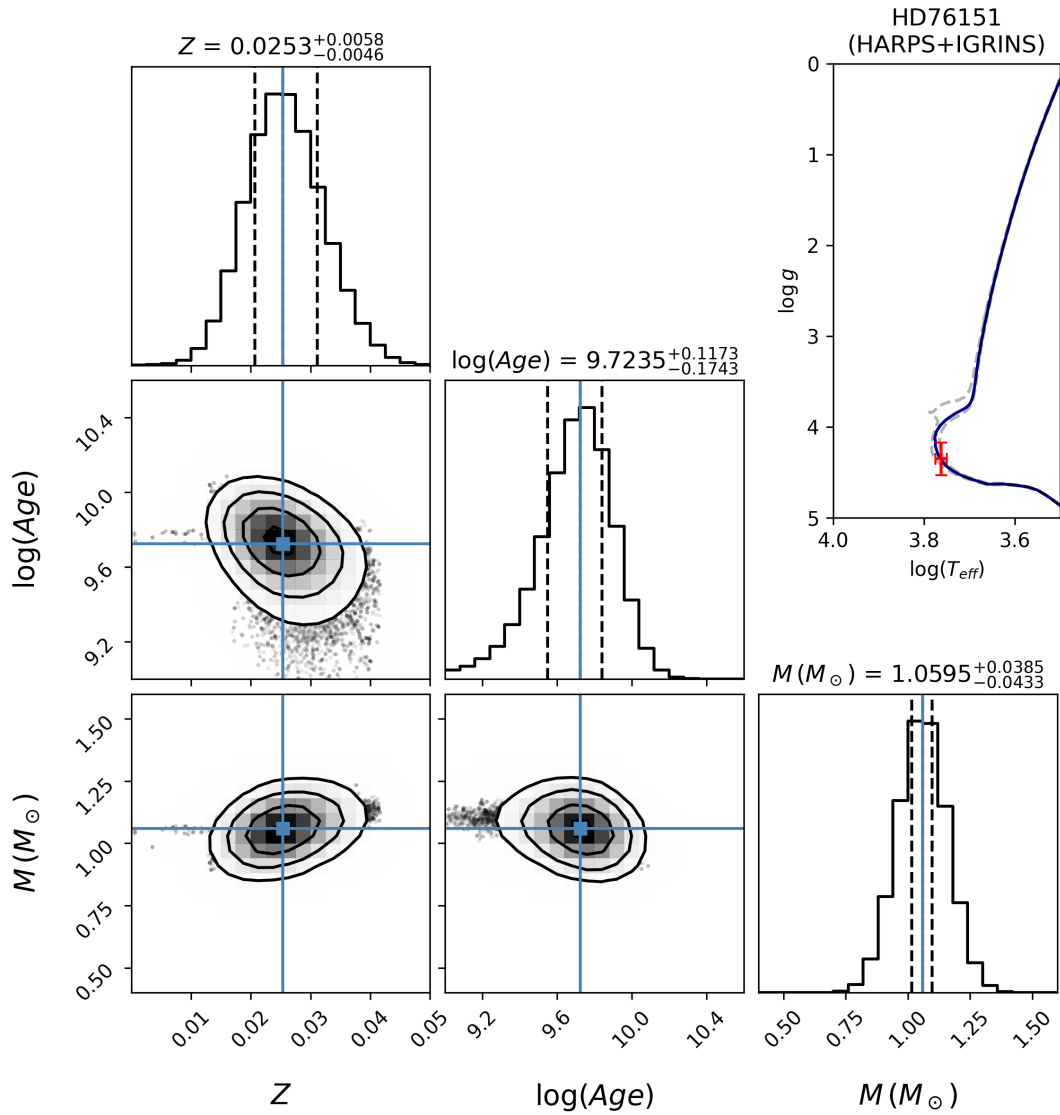
Tablo EK.1 incelendiğinde, son kırk yıla ait literatürde HD 76151 yıldızına ilişkin kütle, yarıçap ve yaş değerlerinin sırasıyla $0.88 \leq M/M_\odot \leq 1.24$, $0.97 \leq R/R_\odot \leq 1.12$ ve $0.3 \leq t(Gyr) \leq 6.8$ aralıklarında raporlandığı görülmektedir. Bu bağlamda, bu çalışmada elde edilen yaş değeri literatürde şimdiye dek bildirilmiş en yüksek yaş değeri olma özelliğini taşımaktadır. Ancak, yıldızın kütle ve parlaklık değerleri, literatürdeki



Şekil 4.6. HD 76151 yıldızının HARPS model setine ait iki boyutlu birleşik ve tek boyutlu kenar (marginal) posterior dağılımlarını gösteren köşe grafikleri. İki boyutlu birleşik posterior dağılımlarındaki konturlar sırasıyla %68, %90 ve %95 güven aralıklarını temsil etmektedir. Tek boyutlu dağılımlarda ise dikey kesikli çizgiler, ortanca (medyan) değeri ile 16. ve 84. yüzdelik dilimlere karşılık gelen belirsizlik aralıklarını göstermektedir. Grafiklerin sağ panelinde yıldızların Kiel diyagramları (kırmızı yıldız sembolleri) verilmiştir. Siyah çizgiler, posterior dağılımlarından elde edilen medyan değerlerle hesaplanan PARSEC izokronlarını temsil ederken, mavi kesikli çizgiler yıldızların yaş tahminlerine karşılık gelen belirsizlikleri göstermektedir.



Şekil 4.7. HD 76151 yıldızının IGRINS model setine ait iki boyutlu birleşik ve tek boyutlu kenar (marginal) posterior dağılımlarını gösteren köşe grafikleri. İki boyutlu birleşik posterior dağılımlarındaki konturlar sırasıyla %68, %90 ve %95 güven aralıklarını temsil etmektedir. Tek boyutlu dağılımlarda ise dikey kesikli çizgiler, ortanca (medyan) değeri ile 16. ve 84. yüzdelik dilimlere karşılık gelen belirsizlik aralıklarını göstermektedir. Grafiklerin sağ panelinde yıldızların Kiel diyagramları (kırmızı yıldız sembolleri) verilmiştir. Siyah çizgiler, posterior dağılımlarından elde edilen medyan değerlerle hesaplanan PARSEC izokronlarını temsil ederken, mavi kesikli çizgiler yıldızların yaş tahminlerine karşılık gelen belirsizlikleri göstermektedir.



Şekil 4.8. HD 76151 yıldızının HARPS+IGRINS model setine ait iki boyutlu birleşik ve tek boyutlu kenar (marginal) posterior dağılımlarını gösteren köşe grafikleri. İki boyutlu birleşik posterior dağılımlarındaki konturlar sırasıyla %68, %90 ve %95 güven aralıklarını temsil etmektedir. Tek boyutlu dağılımlarda ise dikey kesikli çizgiler, ortanca (medyan) değeri ile 16. ve 84. yüzdelik dilimlere karşılık gelen belirsizlik aralıklarını göstermektedir. Grafiklerin sağ panelinde yıldızların Kiel diyagramları (kırmızı yıldız sembolleri) verilmiştir. Siyah çizgiler, posterior dağılımlarından elde edilen medyan değerlerle hesaplanan PARSEC izokronlarını temsil ederken, mavi kesikli çizgiler yıldızların yaş tahminlerine karşılık gelen belirsizlikleri göstermektedir.

diğer çalışmalarla oldukça uyumludur. Kütle ve yarıçap bakımından sağlanan bu uyuma rağmen yaş değerinde görülen farkın, bu çalışmada kullanılan güncellenmiş izokron eğrilerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bu çalışmada kullanılan dört farklı model parametre setinin (HARPS, IGRINS, HARPS+IGRINS, GAIA) benzer yaş değerleri üretmiş olması, analizlerin doğruluğunu pekiştirmektedir. Literatürdeki tayfsal analiz çalışmaları dikkate alındığında, HD 76151 için özellikle α -elementler bazında bildirilen element bolluklarının Güneş'inkine oldukça yakın ya da hafif metal fakiri olduğu görülmektedir (bkz. Tablo EK.1). Bu sonuç, HD 76151'in α -element bileşimi açısından ince disk (thin disk) popülasyonuna ait olduğunu ortaya koymaktadır (Plevne vd. 2020).

Bununla birlikte, yıldızın ait olduğu galaktik bileşenin kesinleştirilebilmesi için yalnızca kimyasal göstergeler ya da yaş değerleri yeterli değildir. Yıldızın gökada içerisindeki uzay hareketleri, yörünge yapısı ve galaktik doğum yeri gibi kinematik ve yörünge dinamik özellikleri de ayrıca değerlendirilmelidir. Bu bağlamda, izleyen bölümde HD 76151'in kinematik analiz sonuçları, yörünge parametreleri ve doğum yeri tahmini detaylı biçimde tartışılacaktır.

4.1.3. Kinematik ve yörünge dinamik analiz sonuçları

Bu çalışmada, HD 76151 yıldızı için uzay hızı, Johnson ve Soderblom (1987) tarafından literatüre kazandırılmış yöntem kullanılarak hesaplandı. Yıldızın öz hareket bileşenleri, trigonometrik paralaksı ve radyal hızı Gaia DR3'ten (Gaia İşbirliği, 2023) elde edildi ve astrometrik ve spektroskopik veriler Tablo 4.6'de listelenmiştir. HD 76151 için uzay hızı bileşenleri, J. Bovy (2015) tarafından geliştirilen *galpy* kodu kullanılarak (U, V, W) = $-40.00 \pm 0.07, -20.01 \pm 0.09, -10.97 \pm 0.05$ km/s olarak hesaplandı. Uzay hızı bileşenleriyle ilişkili belirsizlikler yine Johnson ve Soderblom (1987) tarafından önerilen algoritma kullanılarak değerlendirildi. Yıldız Güneş'e çok yakın olduğundan, uzay hızı bileşenlerine diferansiyel dönüş düzeltmesi (Mihalas ve Binney, 1981) uygulanmamıştır. Ancak, uzay hızı bileşenleri, Coşkunoğlu vd. (2011) tarafından verilen (U, V, W) = $(8.83 \pm 0.24, 14.19 \pm 0.34, 6.57 \pm 0.21)$ km/s olan Güneş'in kendine özgü hızına göre düzeltilmiştir. Böylece, HD 76151'in (U, V, W)_{LSR} = $-30.84 \pm 0.25, -5.80 \pm 0.35$ ve -4.40 ± 0.22 km/s olarak hesaplanmıştır. HD 76151'in toplam uzay hızını hesaplamak için

Tablo 4.6. HD 76151'in fotometrik, astrometrik ve tayfsal verilerden hesaplanan temel astrofizik parametreleri ve kinematik / Yörünge dinamik parametreleri.

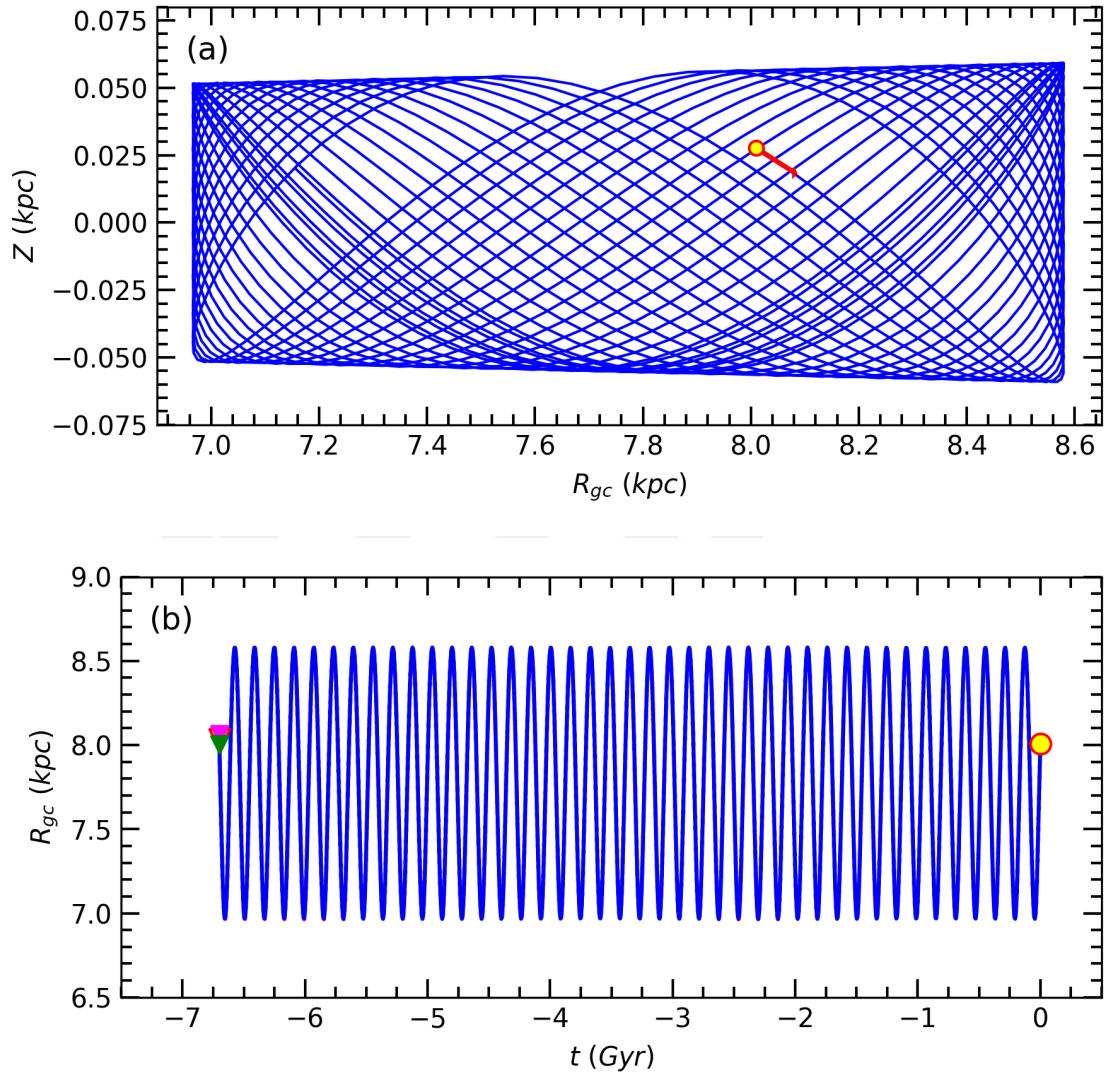
Parametreler	Değerler			
$(\alpha, \delta)_{J2000}$	08:54:17.95, -05:26:04.05			
$(l, b)_{J2000}$	233.205785, +24.164218			
$\mu_\alpha \cos \delta, \mu_\delta$ (mas yr ⁻¹)	$-413.648 \pm 0.036, 30.619 \pm 0.026$			
ω (mas)	59.3595 ± 0.0408			
d (pc)	16.85 ± 0.01			
Spektral Tipi	G2V			
V (mag)	6.00			
U-B (mag)	0.22			
B-V (mag)	0.67			
E(B-V) (mag)	0.00			
G (mag)	5.847 ± 0.003			
$G_{BP} - G_{RP}$ (mag)	0.825 ± 0.005			
M_G (mag)	4.714 ± 0.003			
	HARPS	IGRINS	HARPS+IGRINS	Gaia DR3
T_{eff} (K)	5780 ± 88	5780 ± 178	5790 ± 170	5825 ± 10
$\log g$ (cgs)	4.35 ± 0.16	4.31 ± 0.25	4.35 ± 0.18	4.44 ± 0.04
[Fe/H] (dex)	0.14 ± 0.08	0.21 ± 0.13	0.24 ± 0.09	-0.05 ± 0.05
Z	0.02039	0.02370	0.02533	0.01363
ξ (km s ⁻¹)	0.69 ± 0.50	2.10 ± 0.50	0.30 ± 0.50	...
V_R (km s ⁻¹)	32.05 ± 0.05	32.08	...	31.99 ± 0.12
$M(M_\odot)$	$1.011^{+0.046}_{-0.045}$	$1.043^{+0.044}_{-0.042}$	$1.059^{+0.038}_{-0.043}$	$0.968^{+0.002}_{-0.015}$
t (Gyr)	$6.7^{+1.8}_{-2.02}$	$6.5^{+1.5}_{-1.5}$	$5.3^{+1.6}_{-1.8}$	5.0 ± 1.0
R_{birth} (kpc)	8.03 ± 0.06	7.10 ± 0.05	8.43 ± 0.03	7.93 ± 0.13
$(U, V, W)_{\text{LSR}}$ (km s ⁻¹)	$-31.21 \pm 0.24, 14.19 \pm 0.34, 6.57 \pm 0.21$			
S_{LSR} (km s ⁻¹)	32.05 ± 0.47			
R_a, R_p (pc)	$8580 \pm 2, 6966 \pm 2$			
Z_{max} (pc)	59 ± 1			
e	0.104 ± 0.001			
P (Myr)	217 ± 1			

$S_{LSR} = \sqrt{U_{LSR}^2 + V_{LSR}^2 + W_{LSR}^2}$ ilişkisi kullanılmış ve $S_{LSR} = 31.39 \pm 0.49$ km/s olarak hesaplanmıştır. Yıldızın toplam uzay hızı, HD 76151'in genç, ince disk üyesi bir yıldız olduğunu göstermektedir (Leggett 1992). Kinematik sonuçlar Tablo 4.6'te listelenmiştir.

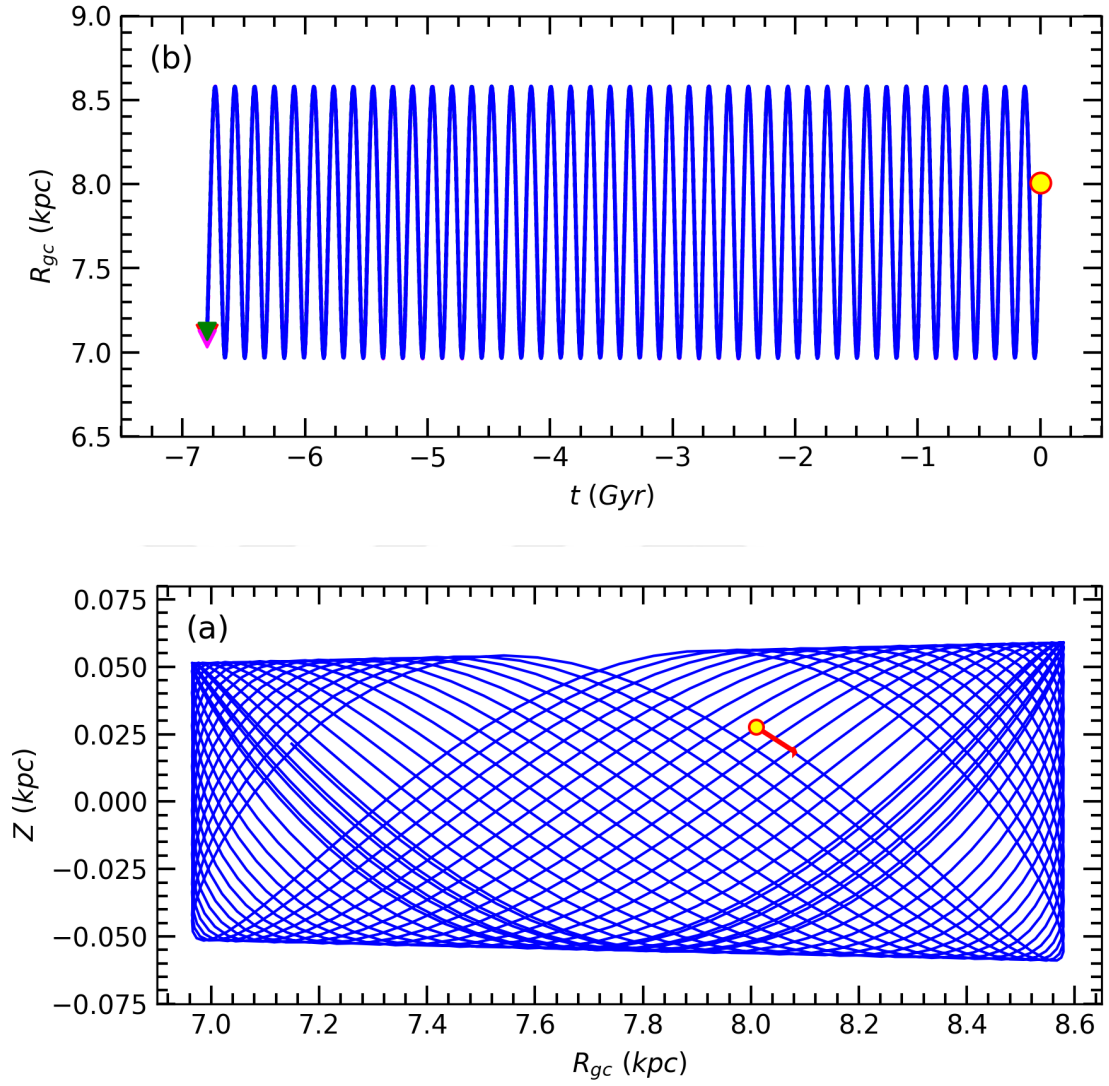
galpy kütüphanesindeki *MW Potential2014* potansiyeli, HD 76151'in Galaktik yörünge parametrelerini elde etmek için kullanıldı. *MW Potential2014* modeli, eksen simetrisi ve potansiyelin zamandan bağımsız olduğunu varsayarak Samanyolu'nun basitleştirilmiş bir gösterimidir. Küresel bir bulge, karanlık madde halosu ve Miyamoto-Nagai (Miyamoto ve Nagai, 1975) disk potansiyelinden oluşur. Küresel bulge, Samanyolu'nun kütle dağılımını temsil eder ve Bovy (2015) tarafından açıklanan küresel bir kuvvet yasası yoğunluk profili olarak tanımlanır. Bu analizde, Güneş için Galaktosentrik uzaklık ve yörünge hızı sırasıyla $R_{GC} = 8$ kpc ve $V_{rot} = 220$ km/s olarak varsayılmıştır (Majewski 1993). Ayrıca Güneş'in Galaktik düzleme olan uzaklığı Chen vd. (2000) tarafından sunulduğu gibi 27 ± 4 pc olarak kabul edilmiştir.

HD 76151'in Galaktik yörüngesi, yıldızın gökadamdaki mevcut konumlarından 7 Gyr yaşına kadar 5 Myr adımla geriye doğru entegre edildi. Yörünge analizlerinden tahmin edilen çıktı parametreleri Tablo 4.6'da listelenmiştir. Burada R_a ve R_p sırasıyla apogalaktik ve perigalaktik mesafelerdir, e eksantriklik, Z_{max} Galaktik düzlemden maksimum dikey mesafedir ve P yörünge periyodudur. Galaktik yörünge parametrelerindeki hatalar; HD 76151'in hareket bileşenlerindeki belirsizlikler, trigonometrik paralaks ve radyal hızı dikkate alınarak hesaplanır. Yıldızların farklı zamanlarda Galaktik merkezden uzaklıklarına (R_{GC}) ve Galaktik düzleme dik (z) konumları Şekil 4.9, 4.1.3., 4.11'de üst panelde gösterilmiştir. Sonuçlar, HD 76151'in hafifçe düzleştirilmiş bir Galaktik yörüngeye sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca yıldızın Galaktik düzlemden yaklaşık $z = 8$ pc uzaklıkta olması, yıldızın Gökada'nın ince disk popülasyonuna ait olduğunu göstermektedir (Güçtekin vd. 2019).

HD 76151'in farklı düzlemlerdeki yörüngesi, dinamik yörünge analizleri sonucunda Şekil 4.9, 4.1.3., 4.11'de gösterilmiştir. Bahsi geçen şekillerin üst panelinde, HD 76151'in hareketlerinin, Galaktik merkezden ve Galaktik düzlemden uzaklığa bağlı yan görünüşleri sunulmaktadır (örn. Yontan ve Canbay 2023), alt panelde ise yıldızın doğum anındaki ve girdi parametrelerine bağlı olarak bugünkü konumları sırasıyla sarı

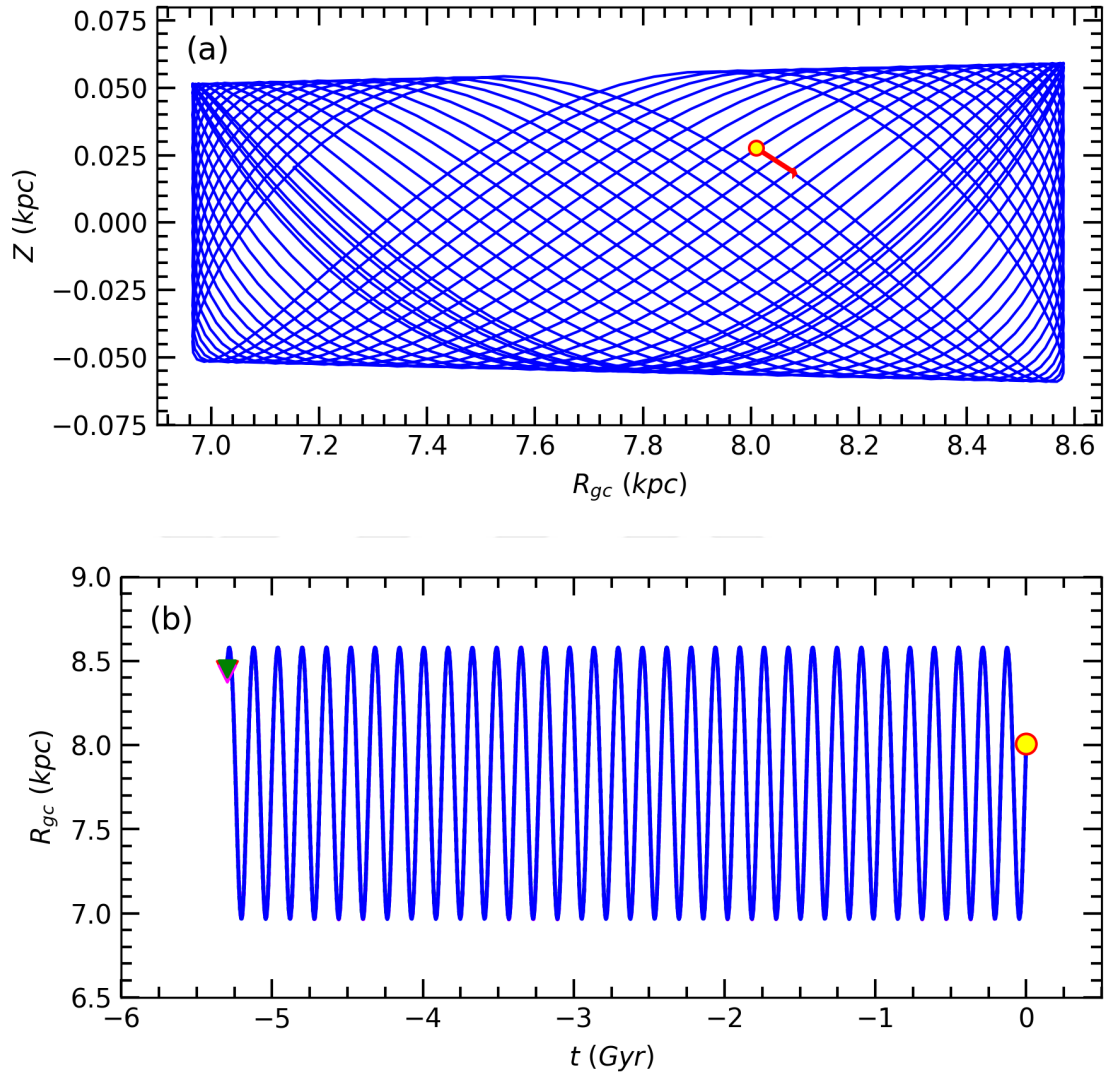


Şekil 4.9. $Z \times R_{gc}$ (a) ve $R_{gc} \times t$ (b) diyagramlarındaki HARPS yaş değeri için HD 76151'in Galaktik yörüngesi ve doğum yarıçapları. Sarı daireler ve üçgenler sırasıyla yıldızın bugünkü konumunu ve doğum pozisyonunu göstermektedir. Kırmızı ok, HD 76151'in sahip olduğu hareket vektörüdür. Yeşil ve pembe noktalı çizgiler, giriş değerlerinin parametre hataları dikkate alındığında yörüngeyi gösterirken, yeşil ve pembe dolu üçgenler, alt ve üst hata tahminlerine göre HD 76151'in doğum yerlerini temsil eder.



Şekil 4.10. Z

$\times R_{gc}$ (a) ve $R_{gc} \times t$ (b) diyagramlarındaki IGRINS yaş değeri için HD 76151'in Galaktik yörüngesi ve doğum yarıçapları. Sarı daireler ve üçgenler sırasıyla yıldızın bugünkü konumunu ve doğum pozisyonunu göstermektedir. Kırmızı ok, HD 76151'in sahip olduğu hareket vektörüdür. Yeşil ve pembe noktalı çizgiler, giriş değerlerinin parametre hataları dikkate alındığında yörüngeyi gösterirken, yeşil ve pembe dolu üçgenler, alt ve üst hata tahminlerine göre HD 76151'in doğum yerlerini temsil eder.



Şekil 4.11. $Z \times R_{gc}$ (a) ve $R_{gc} \times t$ (b) diyagramlarındaki HARPS+IGRINS yaş değeri için HD 76151'in Galaktik yörüngesi ve doğum yarıçapları. Sarı daireler ve üçgenler sırasıyla yıldızın bugünkü konumunu ve doğum pozisyonlarını göstermektedir. Kırmızı ok, HD 76151'in sahip olduğu hareket vektörüdür. Yeşil ve pembe noktalı çizgiler, giriş değerlerinin parametre hataları dikkate alındığında yörüngeyi gösterirken, yeşil ve pembe dolu üçgenler, alt ve üst hata tahminlerine göre HD 76151'in doğum yerlerini temsil eder.

dolu üçgenler ve dairelerle gösterilmiştir. HD 76151'in yörüngesinin eksantrikliği 0.11'i geçmemektedir. Galaktik düzlemden uzaklık, yıldız için $Z_{max} = 59 \pm 1$ pc noktasında maksimuma ulaşmaktadır. Ancak, bu çalışmada gerçekleştirilen spektral analizlerin de gösterdiği gibi, HD 76151'in α -element bolluğu bakımından zayıf olması, yıldızın kinematik ve dinamik yörünge analizlerinin sonuçlarını desteklemektedir. Bu sonuçlar, HD 76151'in Samanyolu'nun genç ince disk popülasyonuna ait olduğunu göstermektedir.

HD 76151'in Gökadadaki doğum yarıçapını elde etmek için, Galaktik merkez etrafındaki yörüngesi, PARSEC izokronları (Bressan vd. 2012) tarafından belirlenen yaşı dikkate alınarak zamanda geriye doğru sarıldı. Yıldızın 6.7, 6.5 ve 5.3 Gyr yaşlarına ait dinamik yörünge analizleri, yıldızın Galaktik merkezden sırasıyla 8.03 ± 0.06 , 7.10 ± 0.05 ve 8.43 ± 0.03 kpc uzaklıklarda doğduğunu göstermektedir (bkz. Şekil 4.9, 4.1.3. ve 4.11.). Bu sonuçlar, Galaktik diskin ikili çökme modelini (Chiappini vd. 1997) desteklemektedir ve HD 76151'in metal açısından zengin bir ortamda doğduğuna dair önemli bir kanıttır.

4.2. HD 115617 (HIP 64924)

HD 76151 yıldızına uygulanan ayrıntılı analiz prosedürlerinin aynısı, bu çalışmanın ikinci hedef yıldızı olan HD 115617 için de titizlikle uygulanmıştır. Yıldızın optik ve NIR bölgelerindeki tayfsal verileri kullanılarak model atmosfer parametreleri klasik tayfsal yöntemle belirlenmiş, mikrotürbülans belirsizlik testi gerçekleştirilmiş ve LDR yöntemiyle ek sıcaklık denetimi sağlanmıştır. Ayrıca, LTE ve NLTE etkileri ile olası konveksiyon etkisi göz önünde bulundurularak nihai bolluk değerleri elde edilmiştir. Bu parametreler ışığında yıldızın yaşı PARSEC izokronları aracılığıyla MCMC yaklaşımı altında hesaplanmış; akabinde uzay hız bileşenleri, galaktik yörünge parametreleri ve doğum bölgesi analizleri *galpy* kütüphanesi yardımıyla değerlendirilmiştir. Bu bölümde, HD 115617 için uygulanan analiz prosedürleri HD 76151'de detaylı biçimde sunulduğu için çok fazla tekrar edilmeden, yalnızca ilgili sonuçların bilimsel değerlendirmesine odaklanılacaktır.

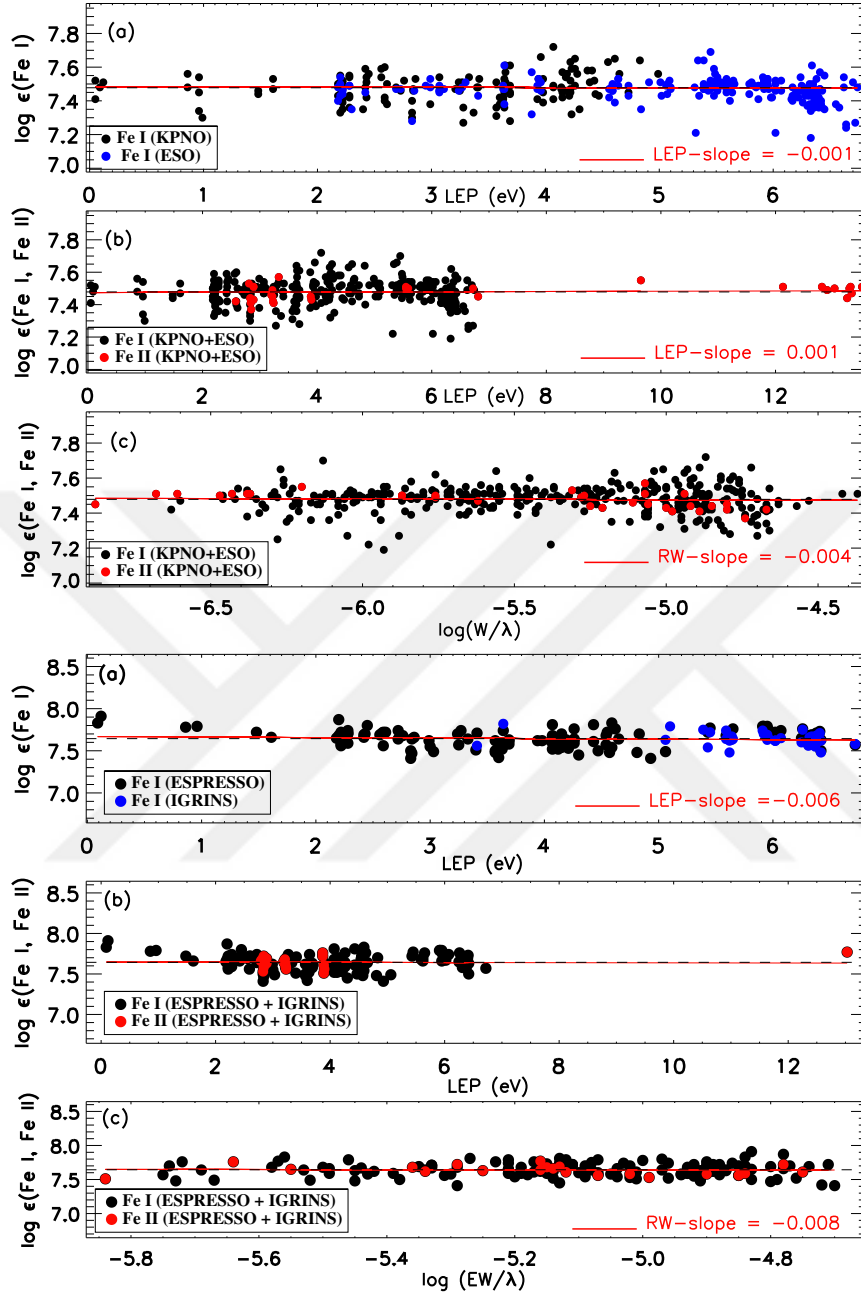
Tablo 4.7. ESPRESSO ve IGRINS tayflarından elde edilen model atmosfer parametreleri. Ayrıca tabloda KPNO ve ESO Güneş tayflarından elde edilen model atmosfer parametreleri de sunulmuştur.

Yıldız	Tayfçeker	Dalga Boyu Aralığı (Å)	T_{eff} (K)	$\log g$ (cgs)	[Fe/H] (dex)	ξ (km s ⁻¹)
HD 115617	ESPRESSO	3800-7880	5495±100	4.30±0.16	-0.04±0.16	0.57±0.50
HD 115617	IGRINS	14500-24500	5780±140	4.15±0.34	0.18±0.10	2.48±0.50
HD 115617	E+I	3800-24500	5710±132	4.70±0.16	0.15±0.12	0.33±0.50
Güneş	KPNO	4000-9000	5770±130	4.40±0.19	0.00±0.09	0.66±0.50
Güneş	ESO	9780-50050	5780±55	4.40±0.22	0.00±0.03	1.08±0.50
Güneş	KPNO+ESO	4000-50050	5790±118	4.44±0.20	0.00±0.08	0.90±0.50

4.2.1. Klasik tayfsal analiz sonuçları

HD 115617 yıldızının tayfsal analizinde optik bölge için ESPRESSO ($R = 140,000$; $S/N = 1600.3$), NIR bölge için ise IGRINS tayfçekerlerinden elde edilen yüksek çözünürlüklü echelle tayflar kullanılmıştır. Tezin materyal-metot kısmında detaylı olarak açıklanan süreç doğrultusunda, tayflar öncelikle sürekliliğe normalize edilmiş ve radyal hız düzeltmeleri uygulanmıştır. HD 115617 yıldızı için Güneş'in NARVAL spektrumu üzerinden çapraz korelasyon yöntemi kullanılarak elde edilen ESPRESSO spektrumu için radyal hız $V_{\text{rad}} = -5.60 \pm 0.04$ km/s (bkz. Şekil 3.8, alt panel) olarak hesaplanmıştır. IGRINS spektrumu için radyal hız düzeltimi Park vd. (2018) tarafından yapılmış ve $V_{\text{rad}} = -8.13$ km/s olarak rapor edilmiştir. Gaia DR3 (Gaia İşbirliği, 2023), yıldızın (Gaia DR3 5760701787150565888) radyal hızını $V_{\text{rad}} = -7.86 \pm 0.13$ km/s olarak rapor etmiş ve bu değer yıldızın IGRINS tayfından elde edilen radyal hız değerleriyle hata payı içerisinde uyumlu olduğu görülmüştür.

Ardından, LIME kodu (Şahin 2017) yardımıyla tayfta tanımlanan spektral çizgilerin eşdeğer genişlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. MOOG yazılımının *abfind* sürücüsü ve ATLAS9 (ODFNEW versiyonu) kullanılarak klasik tayfsal yöntemle model atmosfer parametreleri (T_{eff} , $\log g$, [Fe/H], ξ) hesaplanmıştır (bkz. Şekil 4.12). HD 115617 yıldızına ait tayfsal bolluk analizinde kullanılan atomik geçişler, gözlemlerde yararlanılan tayfın dalgaboyu aralığına göre dikkatle seçilmiştir. Optik bölgedeki analizlerde, ESPRESSO tayfının yüksek çözünürlüğü ve geniş spektral aralığı göz önünde bulundurularak, Şahin vd. (2024) tarafından güncellenen çizgi listesi tercih edilmiştir. Bu liste, özellikle modern laboratuvar verilerine dayalı olarak revize edilen $\log gf$ değerleri ve 6800-10000



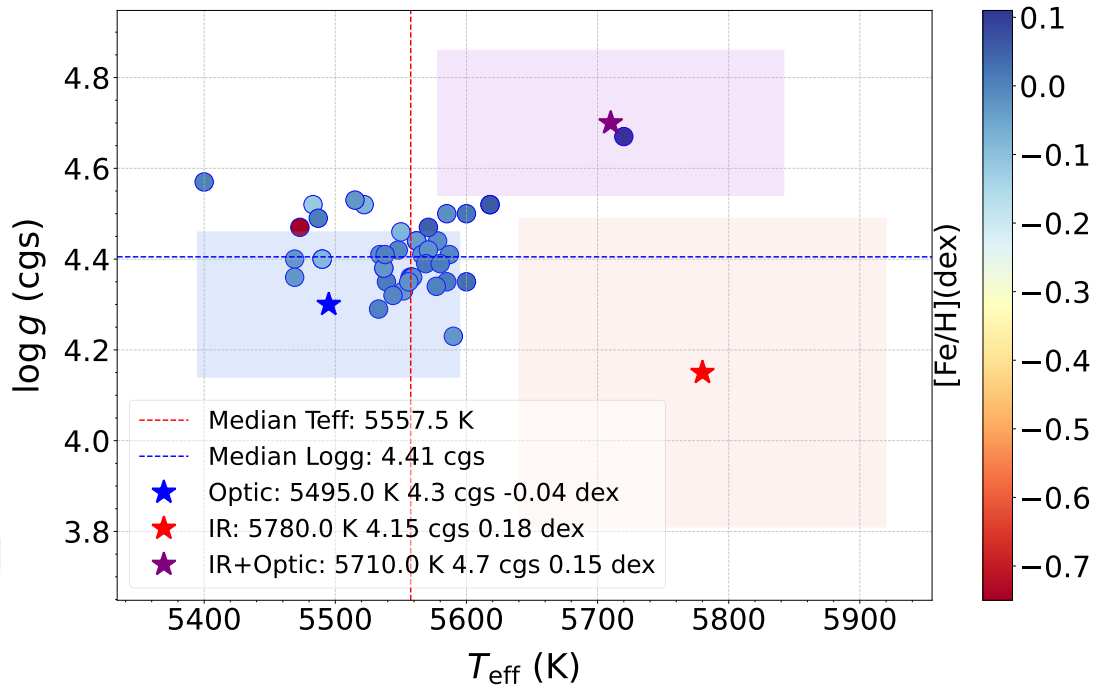
Şekil 4.12. MOOG LTE çizgi analiz koduyla Y-, J-, H- ve K- bantlarında gerçekleştirilen güneş analizinin bir örneği gösterilmektedir. Üst panelde, sırasıyla üst ve orta paneller, Güneş için fotosferik model atmosfer parametrelerinin (KPNO+ESO) MOOG yıldız atmosfer kodu kullanılarak alt seviye uyarılma potansiyeli (L.E.P.) ve indirgenmiş eşdeğer genişliğin (R.W.) bir fonksiyonu olarak belirlenmesini göstermektedir. Alt panel HD 115617'nin ESPRESSO ve IGRINS spektrumları içindir. Tüm panellerdeki kesikli çizgiler verilere en küçük kareler uyumunu temsil eder. Alt paneller her iki paneldeki Fe çizgileri için hesaplanan bollukların dalga boyu dağılımını göstermektedir.

Åaralığındaki ilave geçişleri sayesinde daha güvenilir bolluk hesaplamaları sunmaktadır. NIR bölge için ise, Şentürk vd. (2024) tarafından yüksek çözünürlüklü Güneş ve HD 76151 tayfları kullanılarak derlenen ve bu tez kapsamında genişletilen çizgi listesi kullanılmıştır. Tüm bu bilgiler ışığında diferansiyel bolluk hesabının yapılacağı göz önünde bulundurularak, Güneş için Şahin vd. (2024) çalışmasında rapor edilen model atmosfer parametreleri ve bu model atmosferlerden türetilen logaritmik bolluklar kullanılmıştır.

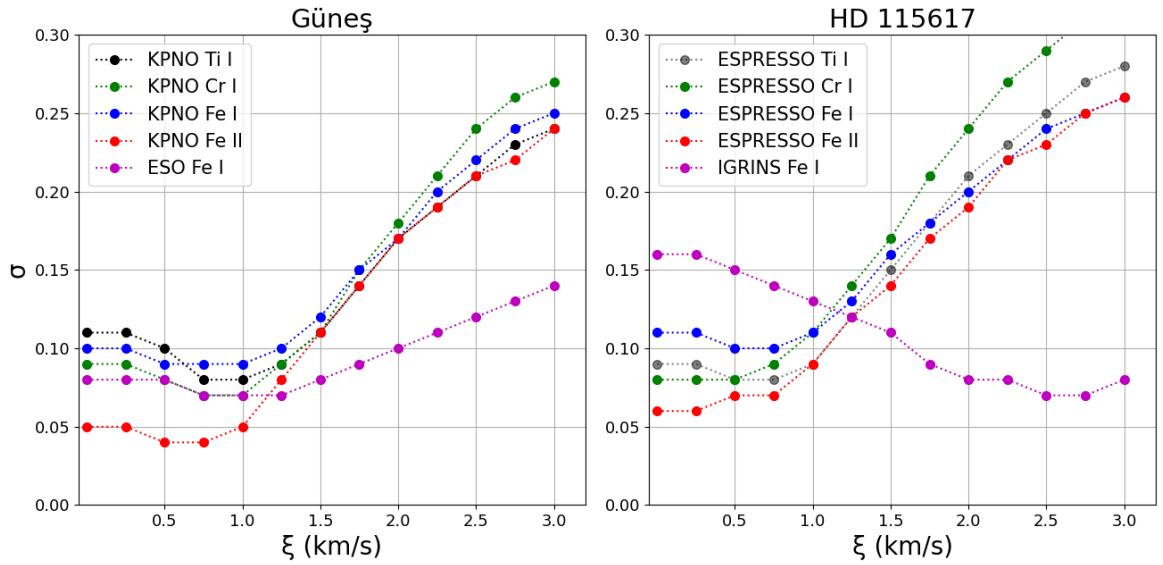
Bu tez çalışmasında HD 115617 yıldızının klasik tayfsal analizleri, hem optik hem NIR hem de bu iki bölgenin birleşiminden (bkz. Şekil 4.12) oluşan geniş spektral aralıkta ayrı ayrı gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Tablo 4.7’de sunulmuştur. Bu yıldız için NIR bölgeden elde edilen model parametreleri, tıpkı HD 76151 örneğinde olduğu gibi daha önce literatürde çalışılmamış ve bu tez kapsamında ilk kez rapor edilmiştir. HD 115617’e ait literatürde bulunan model atmosfer parametrelerinin ise yalnızca optik bölgeden türetildiği görülmüş; bu değerlerin büyük oranda tez kapsamında hesaplanan model parametrelerle tutarlı olduğu belirlenmiştir. Bu karşılaştırmalı değerlendirmenin görsel sunumu Şekil 4.13’de verilmiş, kaynak gösterimleri ve ilgili sayısal bilgiler ise Ek Tablo EK.2’de sunulmuştur.

Optik bölge analizlerinde nötral ve iyonize Fe çizgileri arasındaki iyonizasyon dengesi sağlanmış; aynı zamanda Ti I/II ve Cr I/II ve Zr I/II çiftleri için de eşzamanlı denge koşulları göz önünde bulundurulmuştur. NIR bölgedeki Fe I/II çizgileri, optik analizlerle etkin sıcaklık dışında tutarlı sonuçlar üretmiştir. Bu sonucu teyit etme amacı ile, LDR (Line Depth Ratio) yöntemi kullanılarak NIR bölgede sıcaklık tahmini yapılmış ve klasik tayfsal yöntemle elde edilen T_{eff} değeriyle karşılaştırılmıştır. Bunun için Fukue vd. (2015) tarafından bildirilen 2, 6 ve 9 numaralı çizgi çiftleri kullanılmıştır. Sonuç olarak NIR bölgede LDR yöntemi ile $T_{\text{eff}} = 5636 \pm 15$ olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç ilgili yıldızın kırmızıöte tayfında, optik bölgeye kıyasla daha yüksek etkin sıcaklık değeri gösterdiğini desteklemektedir.

HD 115617 yıldızı için ξ değerinin belirlenmesi amacıyla optik ve NIR tayflar üzerinde dispersiyon testi de uygulanmıştır. ESPRESSO tayfı kullanılarak Fe I çizgileri üzerinden gerçekleştirilen analizde, ξ değerine bağlı olarak bolluklarda oluşan saçılım incelenmiş ve eğim minimizasyonu yöntemine göre optimum mikrotürbülans hızı $\xi =$



Şekil 4.13. Görüntüdeki soluk mavi alan, HD 115617'nin ESPRESSO spektrumundan optik bölgede (mavi yıldız sembolü) elde edilen model parametrelerindeki hataları ($\Delta T_{\text{eff}} = 100$ K, $\Delta \log g = 0.16$ cgs) temsil ederken, soluk kırmızı alan, kırmızıöte (kırmızı yıldız sembolü) IGRINS spektrumundan elde edilen model parametrelerindeki hataları ($\Delta T_{\text{eff}} = 140$ K, $\Delta \log g = 0.34$ cgs) temsil eder. Hem optik hem de kırmızıöte model parametreleri, mor renkli bir yıldız sembolü ile gösterilir.



Şekil 4.14. Ti, Cr ve Fe bolluklarının Ti I, Cr I, Fe I ve Fe II çizgilerinden ξ 'nin bir fonksiyonu olarak standart sapması.

Tablo 4.8. HD 115617 yıldızı için hesaplanan element bollukları ($[X/H]$ ve $[X/Fe]$) ile analizde kullanılan çizgi sayıları gösterilmektedir. Aynı zamanda bu çalışmada elde edilmiş Güneş bollukları (Şahin vd. 2024) ve Asplund vd. (2021)'nin çalışmalarında elde ettikleri Güneş bollukları, karşılaştırma yapılabilmesi için verilmektedir.

Element	HD 115617			Şahin vd. 2024		Asplund vd. (2021)	$\Delta \log \epsilon_{\odot}(X)$ (dex)
	$[X/H]$	$[X/Fe]$	n	$\log \epsilon_{\odot}(X)$ (dex)	n	$\log \epsilon_{\odot}(X)$ (dex)	
O I*	8.80 ± 0.02	0.03 ± 0.10	3	8.81 ± 0.03	3	8.69 ± 0.04	0.12
Na I	6.19 ± 0.00	0.01 ± 0.15	1	6.22 ± 0.12	4	6.22 ± 0.00	0.00
Mg I*	7.70 ± 0.04	0.12 ± 0.10	2	7.62 ± 0.03	5	7.55 ± 0.03	0.07
Al I*	6.44 ± 0.01	0.05 ± 0.10	5	6.43 ± 0.03	8	6.43 ± 0.03	0.00
Si I	7.50 ± 0.04	0.04 ± 0.13	7	7.50 ± 0.09	21	7.51 ± 0.03	-0.01
Si I	7.65 ± 0.00	-0.03 ± 0.15	1	7.50 ± 0.11	28	7.51 ± 0.03	-0.01
Ca I	6.31 ± 0.07	0.06 ± 0.15	10	6.29 ± 0.09	21	6.30 ± 0.04	-0.01
Sc II	3.11 ± 0.20	0.01 ± 0.22	5	3.14 ± 0.02	12	3.14 ± 0.04	0.00
Ti I	4.89 ± 0.08	0.00 ± 0.15	39	4.93 ± 0.05	63	4.97 ± 0.05	-0.04
Ti I	5.12 ± 0.00	0.03 ± 0.16	1	4.91 ± 0.12	10	4.97 ± 0.05	-0.06
Ti II	4.95 ± 0.09	-0.02 ± 0.17	8	5.01 ± 0.05	11	4.97 ± 0.05	0.04
V I*	3.79 ± 0.02	-0.07 ± 0.10	5	3.90 ± 0.03	5	3.90 ± 0.08	0.00
Cr I	5.63 ± 0.08	-0.01 ± 0.15	17	5.68 ± 0.09	29	5.62 ± 0.04	0.06
Cr II	5.60 ± 0.11	0.00 ± 0.18	4	5.64 ± 0.11	4	5.62 ± 0.04	0.02
Mn I*	5.17 ± 0.07	-0.24 ± 0.14	6	5.45 ± 0.08	14	5.42 ± 0.06	0.03
Fe I	7.46 ± 0.10	0.00 ± 0.19	98	7.50 ± 0.11	252	7.46 ± 0.04	0.04
Fe I	7.64 ± 0.07	0.00 ± 0.14	40	7.46 ± 0.07	204	7.46 ± 0.04	0.00
Fe II	7.46 ± 0.07	0.00 ± 0.16	20	7.50 ± 0.09	32	7.46 ± 0.04	0.04
Fe II	7.65 ± 0.07	-0.03 ± 0.14	2	7.50 ± 0.06	10	7.46 ± 0.04	0.04
Co I*	4.77 ± 0.06	-0.14 ± 0.13	6	4.95 ± 0.06	8	4.94 ± 0.05	0.01
Ni I	6.21 ± 0.10	0.00 ± 0.17	48	6.25 ± 0.10	66	6.20 ± 0.04	0.05
Cu I*	3.84 ± 0.16	-0.32 ± 0.19	2	4.20 ± 0.06	4	4.18 ± 0.05	0.02
Zn I*	4.66 ± 0.02	0.07 ± 0.10	2	4.63 ± 0.02	2	4.56 ± 0.05	0.08
Sr II*	2.62 ± 0.00	-0.18 ± 0.09	1	2.84 ± 0.00	1	2.83 ± 0.06	0.01
Y II*	2.03 ± 0.11	-0.21 ± 0.14	2	2.28 ± 0.02	2	2.21 ± 0.05	0.07
Zr I*	2.41 ± 0.00	-0.08 ± 0.09	1	2.53 ± 0.00	1	2.59 ± 0.04	-0.06
Zr II*	2.41 ± 0.00	-0.16 ± 0.09	1	2.61 ± 0.02	2	2.59 ± 0.04	0.02
Ba II*	2.05 ± 0.05	-0.23 ± 0.13	2	2.32 ± 0.02	2	2.27 ± 0.05	0.05
La II*	0.99 ± 0.04	-0.11 ± 0.11	2	1.14 ± 0.05	3	1.11 ± 0.04	0.03
Ce II*	1.50 ± 0.04	-0.06 ± 0.11	2	1.60 ± 0.04	3	1.58 ± 0.04	0.02
Nd II*	0.37 ± 0.01	-0.95 ± 0.10	2	1.36 ± 0.03	3	1.42 ± 0.04	0.06
Sm II*	0.84 ± 0.00	-0.07 ± 0.09	1	0.95 ± 0.02	2	0.95 ± 0.04	0.00

$$\Delta \log \epsilon_{\odot}(X) = \log \epsilon_{\odot}(X)_{\text{Tez}} - \log \epsilon_{\odot}(X)_{\text{Asplund}}$$

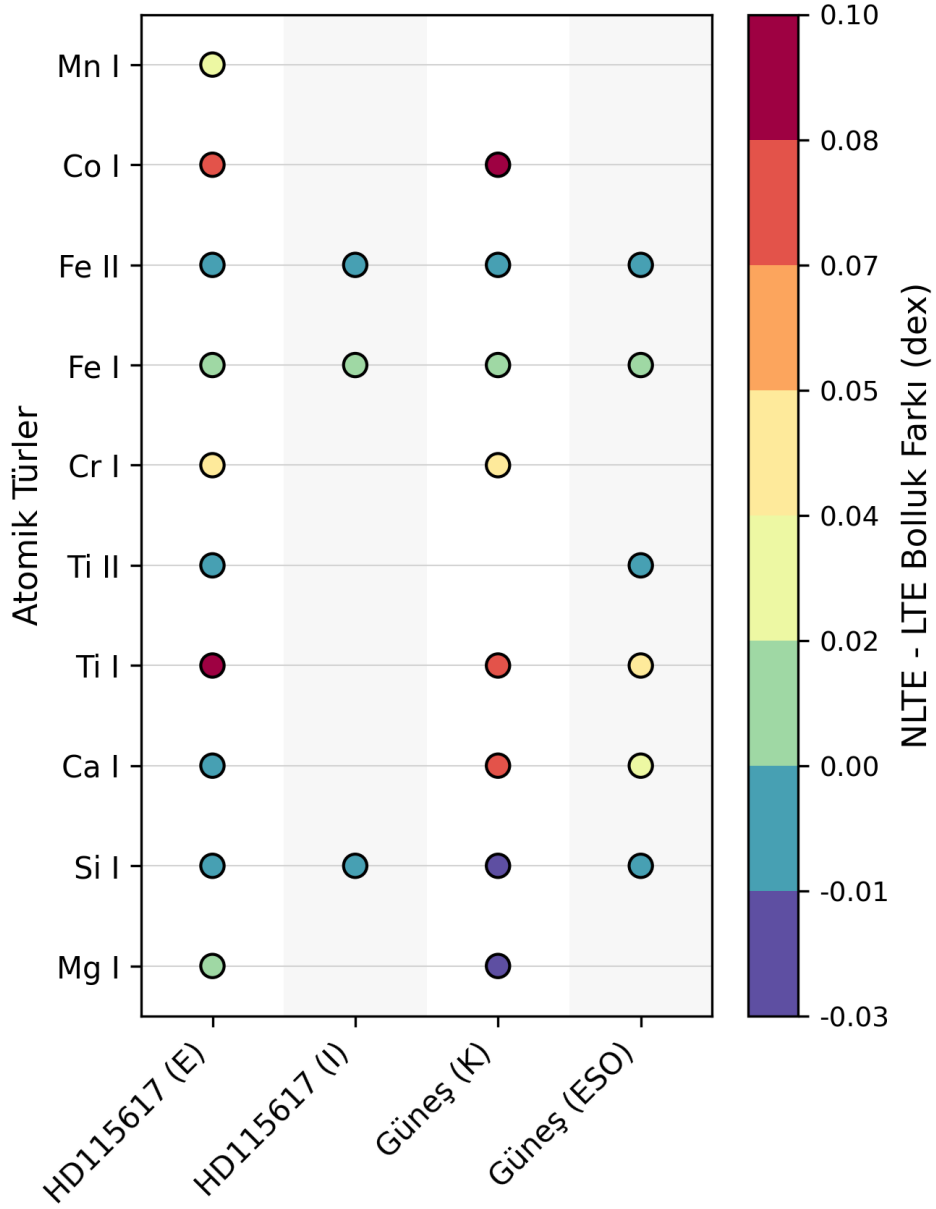
*: Sentezle bollukları elde edilen elementleri belirtir.

Bold ve sarı olarak içerilen bolluklar IGRINS tayfindan elde edilen kırmızıöte bolluklarını ifade eder.

0.6 km/s olarak saptanmıştır. Aynı yöntem Ti I ve Cr I çizgileri için de uygulanmış ve benzer şekilde 0.5–0.8 km/s aralığında değerler elde edilmiştir. Fe II çizgilerinden elde edilen mikrotürbülans hızı ise daha düşük olup 0.3–0.5 km/s aralığında bulunmuştur. Bu sonuçlara dayanarak, optik bölge için ξ parametresinin belirsizliği ± 0.5 km/s olarak değerlendirilmiştir. IGRINS tayfında yapılan analizlerde, Fe I çizgileri üzerinden hesaplanan bollukların ξ ile ilişkisi göz önünde bulundurulmuş ve 2.0 km/s sonrasında eğimin azalarak 2.5 km/s civarında sabitlendiği görülmüştür. Eğim minimizasyonu sonucu $\xi = 2.5$ km/s olarak belirlenmiş ve bu değer belirsizliği de ± 0.5 km/s olarak tahmin edilmiştir. Her iki tayf bölgesinden elde edilen çizgi listelerinin birlikte kullanıldığı birleşik analizde, Fe I çizgilerinden türetilen mikrotürbülans hızı 0.33 km/s olarak hesaplanmıştır. İyonize Fe çizgileri için ise bu değer 0.4–0.6 km/s aralığında değişmiştir. Böylece, birleşik spektral analizden elde edilen optimal mikrotürbülans hızı $\xi = 0.33 \pm 0.5$ km/s olarak kabul edilmiştir (bkz. Şekil 4.14).

Tayfsal bolluk hesaplamalarının ardından Non-LTE (NLTE) düzeltmelerinin etkisi değerlendirilmiştir. NLTE düzeltmeleri için INSPECT ve MPIA veritabanlarından yararlanılmıştır. Fe II çizgileri için yapılan çok sayıda çalışma, bu geçişlerin metalce zengin ortamlarda (özellikle $[\text{Fe}/\text{H}] > -3.0$) LTE koşullarına oldukça yakın sonuçlar verdiğini göstermektedir (Bergemann vd. 2012a; Lind vd. 2012; Bensby vd. 2014). Bu nedenle, HD 115617 yıldızının metalisite değeri $[\text{Fe}/\text{H}] \approx 0.00$ civarında olduğundan, bu çizgilerden elde edilen bollukların NLTE etkilerden önemli ölçüde etkilenmediği kabul edilmiştir. Bu çalışmada da metalisite belirlemede optik bölge için esas olarak Fe II çizgilerine başvurulmuştur.

NIR tayf bölgesinde NLTE düzeltmeleri Güneş ve HD 115617 spektrumları için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Güneş spektrumundaki dört Si I çizgisi için NLTE düzeltme -0.003 dex, üç Ti I çizgisi için ise 0.047 dex olarak belirlenmiştir (Bergemann vd. 2012b; 2013). HD 115617 için IGRINS tayfında tanımlanan 15361.16 Å'daki Si I çizgisi için NLTE düzeltmesi 0.001 dex, Co I için 0.08 dex ve Mn I için 0.02 dex bulunmuştur. Ayrıca, HD 115617 spektrumunda analiz edilen toplam 42 Fe I çizgisi için hesaplanan ortalama NLTE düzeltme değeri 0.01 dex olarak bulunmuştur (Bergemann vd. 2012b). Elde edilen bu sonuçlar (bkz. Şekil 4.15), klasik analizden türetilen bollukların güvenilirliğini artırmakta ve NLTE düzeltmelerin, analizde göz ardı edilemeyecek kadar önemli olmasa



Şekil 4.15. HD115617 ve Güneş tayfı üzerinden hem optik hem de NIR bölgede gerçekleştirilen NLTE düzeltmeler.

da, özellikle bazı çizgiler için dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

HD,115617 yıldızının logaritmik element bollukları, karşılaştırmalı bir değerlendirme yapabilmek amacıyla Güneş tayfindan hesaplanan bolluklarla birlikte Tablo 4.8'da sunulmuştur. Tabloda her bir element için HD 115617 tayfindan türetilen logaritmik element bollukları, [Element/Fe] oranları, bu oranlara ait standart sapmalar ve analizde kullanılan geçiş çizgilerinin sayısı sırasıyla ikinci, üçüncü ve dördüncü sütunlarda belirtilmiştir. Kırmızıöte tayf bölgesinden elde edilen bolluk verileri görsel olarak ayırt edilebilmesi adına koyu karakterle işaretlenmiştir. Tablo aynı zamanda Güneş tayfına dayalı [Element/H] değerlerini, bunlara ait hata paylarını ve çizgi sayısını da içermektedir (beşinci ve altıncı sütunlar). Yedinci sütunda Asplund vd. (2021) tarafından bildirilen referans Güneş bollukları, sekizinci sütunda ise Şahin vd. (2024) çizgi listesine dayalı olarak elde edilen bolluklardan hesaplanan farklar gösterilmiştir. Böylelikle, HD 115617 yıldızının kimyasal karakterizasyonu hem kendi içinde hem de Güneş ile kıyaslamalı biçimde kapsamlı bir biçimde ortaya konmuştur.

Bolluk hesaplarının model atmosfer parametrelerine duyarlılığını ortaya koymak amacıyla, her bir temel parametrenin (T_{eff} , $\log g$, ξ , [Fe/H]) nominal değerlerinden $\pm 1\sigma$ mertebesinde sapmalar uygulanmış ve bu varyasyonlara bağlı olarak hesaplanan yeni logaritmik bolluklar değerlendirilmiştir. Bu işlemde her bir parametre sırayla değiştirilmiş, diğer parametreler sabit tutulmuştur. Örneğin, $T_{\text{eff}} = 5495 \pm 100$ K olarak elde edildiğinden, sıcaklık değeri 5595 K'e çıkarılmış ve diğer parametreler sabit tutularak bolluklar yeniden hesaplanmıştır. Aynı prosedür $\log g$, ξ ve [Fe/H] için de tekrarlanmıştır.

Söz konusu hata propagasyonları, yalnızca optik tayfa dayalı analizler, yalnızca NIR bölgeye ait analizler ve bu iki bölgenin birlikte ele alındığı birleşik analizler için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Elde edilen logaritmik bolluk değerleri, Tablo 4.8'da sunulan nominal değerlerle kıyaslanmış ve sapmalar Tablo 4.9 (optik), Tablo 4.10 (NIR) ve Tablo 4.11 (optik+NIR) içinde ayrıntılı şekilde raporlanmıştır. Bu yaklaşım, her bir spektral çizginin ve analiz bölgesinin sistematik belirsizliklere karşı hassasiyetini değerlendirme imkânı sağlamış; toplam bolluk belirsizliği hesaplarında bu etkiler dikkatle göz önünde bulundurulmuştur.

Olası bir konveksiyon etkisinin bolluklar üzerindeki rolünü araştırmak amacıyla,

Tablo 4.9. Güneş'in optik KPNO spektrumundan ve HD 115617'nin ESPRESSO spektrumundan elde edilen model atmosferik parametrelerdeki belirsizliklere karşı türetilen bollukların duyarlılığıdır.

$\Delta \log \epsilon$ (Optik)								
Güneş					HD 115617			
5770 4.40 0.00 0.66					5495 4.30 -0.04 0.57			
Atomik	ΔT_{eff}	$\Delta \log g$	$\Delta [\text{Fe}/\text{H}]$	$\Delta \xi$	ΔT_{eff}	$\Delta \log g$	$\Delta [\text{Fe}/\text{H}]$	$\Delta \xi$
	(+130)	(+0.19)	(+0.09)	(+0.50)	(+100)	(+0.16)	(+0.11)	(+0.50)
O I	+0.04	-0.07	+0.02	-0.03	-0.07	-0.03	+0.01	-0.02
Na I	+0.07	-0.06	+0.00	-0.04	+0.05	-0.01	+0.00	-0.02
Mg I	+0.05	-0.05	+0.00	-0.06	+0.03	+0.00	+0.01	-0.04
Al I	+0.04	-0.02	+0.00	-0.02	+0.03	+0.01	+0.01	-0.03
Si I	+0.03	+0.01	+0.01	-0.03	+0.01	+0.01	+0.01	-0.03
Ca I	+0.09	-0.05	+0.01	-0.09	+0.08	-0.03	+0.01	-0.10
Sc II	+0.00	+0.07	+0.03	-0.08	+0.00	+0.06	+0.03	-0.06
Ti I	+0.13	-0.02	-0.01	-0.10	+0.11	-0.01	+0.01	-0.12
Ti II	+0.01	+0.06	+0.03	-0.10	+0.00	+0.05	+0.03	-0.10
V I	+0.14	+0.00	+0.00	-0.05	+0.08	+0.03	+0.02	-0.03
Cr I	+0.11	-0.03	+0.00	-0.12	+0.10	-0.03	+0.01	-0.15
Cr II	-0.03	+0.07	+0.03	-0.12	-0.03	+0.04	+0.02	-0.11
Mn I	+0.10	-0.05	+0.00	-0.15	+0.07	-0.02	+0.02	-0.10
Fe I	+0.09	-0.03	+0.00	-0.11	+0.07	-0.01	+0.01	-0.12
Fe II	-0.03	+0.07	+0.03	-0.11	-0.03	+0.05	+0.03	-0.11
Co I	+0.09	+0.00	+0.00	-0.07	+0.08	-0.03	+0.01	-0.09
Ni I	+0.08	-0.02	+0.01	-0.10	+0.05	-0.01	+0.02	-0.09
Cu I	+0.07	-0.03	+0.02	-0.13	+0.03	+0.01	+0.01	-0.06
Zn I	+0.08	-0.01	+0.01	-0.19	+0.02	+0.00	+0.03	-0.21
Sr I	+0.09	-0.02	+0.01	-0.23	+0.09	-0.01	+0.00	-0.25
Y II	+0.06	+0.04	+0.01	-0.20	+0.01	+0.05	+0.03	-0.26
Zr I	+0.07	-0.02	+0.02	-0.15	+0.02	+0.04	+0.03	-0.17
Zr II	+0.05	+0.03	+0.00	-0.17	+0.02	+0.06	+0.03	-0.24
Ba II	+0.10	+0.04	+0.03	-0.15	+0.04	+0.02	+0.05	-0.21
Ce II	+0.08	+0.03	+0.02	-0.09	+0.02	+0.07	+0.03	-0.09
Nd II	+0.11	+0.05	+0.03	-0.04	+0.03	+0.08	+0.03	-0.03

Tablo 4.10. Güneş'in ESO Y, J, H ve K-bant spektrumlarından ve HD 115617'nin IGRINS spektrumundan elde edilen model atmosferik parametrelerdeki belirsizliklere karşı türetilen bollukların duyarlılığıdır.

$\Delta \log \epsilon$ (NIR)								
Güneş					HD 115617			
5780 4.40 0.00 1.08					5780 4.15 0.18 2.48			
Atomik	ΔT_{eff}	$\Delta \log g$	$\Delta [\text{Fe}/\text{H}]$	$\Delta \xi$	ΔT_{eff}	$\Delta \log g$	$\Delta [\text{Fe}/\text{H}]$	$\Delta \xi$
	(+55)	(+0.22)	(+0.03)	(+0.50)	(+140)	(+0.34)	(+0.10)	(+0.50)
Si I	+0.01	+0.00	+0.01	-0.02	+0.04	+0.04	+0.01	-0.01
Ca I	+0.02	-0.01	+0.00	-0.03	..	..	..	..
Ti I	+0.05	+0.00	+0.00	-0.01	..	..	..	..
Ti II	+0.01	+0.10	+0.01	-0.01	+0.00	+0.14	+0.03	-0.01
Fe I	+0.03	+0.00	+0.00	-0.02	+0.07	+0.00	+0.01	-0.03
Fe II	-0.03	+0.07	+0.00	-0.01	-0.08	+0.04	-0.02	-0.02

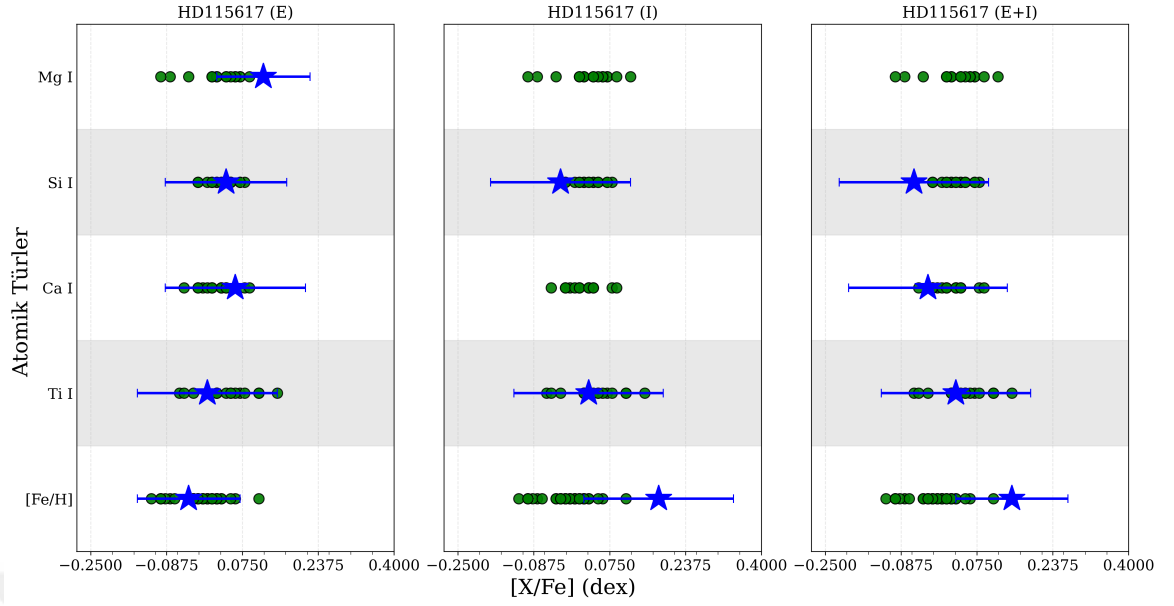
Tablo 4.11. Güneş'in ve HD 115617'nin hem optik hem de NIR dalga boyu bölgelerinden elde edilen model atmosferik parametrelerdeki belirsizliklere karşı türetilen bollukların duyarlılığıdır.

$\Delta \log \epsilon$ (Optik+NIR)								
Güneş					HD 115617			
5790 4.44 0.00 0.90					5710 4.70 0.15 0.33			
Atomik	ΔT_{eff}	$\Delta \log g$	$\Delta [\text{Fe}/\text{H}]$	$\Delta \xi$	ΔT_{eff}	$\Delta \log g$	$\Delta [\text{Fe}/\text{H}]$	$\Delta \xi$
	(+118)	(+0.20)	(+0.08)	(+0.50)	(+132)	(+0.16)	(+0.18)	(+0.50)
Na I	+0.05	-0.04	+0.01	-0.04	+0.07	-0.01	+0.01	-0.01
Si I	+0.01	+0.00	+0.00	-0.03	+0.01	+0.02	+0.02	-0.02
Ca I	+0.05	-0.02	+0.00	-0.07	+0.08	-0.07	+0.01	-0.07
Sc II	+0.01	+0.05	+0.03	-0.10	+0.00	+0.10	+0.03	-0.05
Ti I	+0.07	-0.02	-0.01	-0.11	+0.13	-0.03	+0.01	-0.09
Ti II	+0.00	+0.05	+0.01	-0.10	+0.00	+0.08	+0.03	-0.07
Cr I	+0.07	-0.02	+0.00	-0.17	+0.11	-0.06	+0.01	-0.11
Cr II	-0.01	+0.05	+0.02	-0.12	-0.04	+0.08	+0.03	-0.08
Fe I	+0.05	-0.01	+0.00	-0.07	+0.08	-0.02	+0.02	-0.07
Fe II	-0.03	+0.05	+0.01	-0.09	-0.05	+0.07	+0.03	-0.07
Ni I	+0.05	+0.00	+0.01	-0.08	+0.06	-0.02	+0.02	-0.07

HD 115617 yıldızı için atmosfer yapısında kullanılan karışım uzunluğu parametresi (α) farklı hidro-dinamik modellemelere dayanarak test edilmiştir. Bu kapsamda, Ludwig vd. (1999) tarafından 2 boyutlu hidrodinamik simülasyonlara dayanarak türetilen formül ile Magic vd. (2015) tarafından 3 boyutlu hidrodinamik modeller temelinde geliştirilen bağıntı kullanılmış ve her iki yaklaşım için farklı α değerleri elde edilmiştir. Ludwig vd. (1999) formülasyonu $\alpha=1.60$ verirken, Magic vd. (2015) çalışmasında bu değer $\alpha=1.99$ olarak hesaplanmıştır.

Her iki karışım uzunluğu değeri esas alınarak, Castelli ve Kurucz (2003) tarafından sunulan ATLAS9 model atmosfer kodu ile iki ayrı model oluşturulmuş ve bu modeller kullanılarak hesaplanan sentetik tayflar, HD 115617'nin gözlenen ESPRESSO tayfı ile karşılaştırılmıştır. Gözlemsel ve sentetik tayf karşılaştırmaları sonucunda, Magic vd. (2015) çalışmasına dayalı modelin gözlemle daha yüksek düzeyde uyum gösterdiği belirlenmiştir.

Konvektif yapının model parametreler üzerindeki etkisini daha gerçekçi yansıtmak amacıyla, bolluk analizlerinde kullanılan model atmosfer parametreleri yeniden optimize edilmiştir. Etkin sıcaklıkta +10 K ve yüzey yerçekimi ivmesinde +0.03 dex ve metalisite için -0.01 dex düzeyinde düzeltmeler uygulanarak uyarılma ve iyonizasyon dengesi tekrardan sağlanmıştır. Bu iyileştirilmiş parametre setiyle elde edilen son model (5505



Şekil 4.16. b

olluk karşılaştırması]HD 115617 yıldızı için ESPRESSO (E), IGRINS (I) ve ESPRESSO+IGRINS (E+I) analizlerinden türetilen logaritmik bollukların literatürdeki metalişite ve α element bolluk değerleriyle karşılaştırılması.

K, 4.33 cgs, -0.05 dex) kullanılarak hesaplanan element bolluklarının ortalama değişimi, 22 element türü için 0.01 ± 0.01 dex olarak hesaplanmıştır.

Song vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada da vurgulandığı üzere, F-G-K tipi anakol yıldızları için karıştırma uzunluğu parametresindeki değişimlerin genel metal bolluk tahmini üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. İlgili çalışmada sekiz farklı cüce yıldız için yapılan uygulamalarda bu etkinin <0.02 dex olduğu bildirilmiştir. HD 115617 için yapılan analizde, elementler arasında en belirgin fark ise Ti II ve Sc II için gözlemlenmiş ve bu geçişlerde $+0.02$ dex'lik bir artış kaydedilmiştir.

HD 115617 yıldızı için literatür karşılaştırması Tablo EK EK.2'te sunulduğu üzere 51 çalışma üzerinden gerçekleştirilmiştir (ayrıca bkz. Şekil 4.13). Bu çalışmada derlenen literatür değerlerine göre HD 115617 yıldızının etkin sıcaklıkları genellikle 5400–5720 K aralığında yoğunlaşmakta olup, $\log g$ değerleri 4.23–4.67 cgs arasında değişmektedir. Bu değerler, HD 115617'nin bir G-tipi ana kol yıldızı olduğunu teyit etmektedir. Buna karşılık metalişite ($[Fe/H]$) değerleri -0.75 ile +0.11 dex arasında saçılmakta olup, yıldızın literatürde genel olarak Güneş'e benzer bir yapıda sınıflandırıldığını göstermektedir. Tabloda yer alan Mg, Si, Ca ve Ti gibi α elementlerin $[X/Fe]$ oranları incelendiğinde,

bu değerlerin çoğunlukla -0.10 ile $+0.10$ dex arasında (bkz. Şekil 4.16) sınırlı bir dağılım gösterdiği görülmektedir. Bu durum, HD 115617'nin alfa element zenginleşmesi açısından tipik bir disk yıldızı olduğunu ve büyük olasılıkla ince disk bileşenine ait olduğunu göstermektedir. Tabloda görülen değerler, HD 115617'nin genel olarak Güneş'e benzer metal içerikli, ancak alfa elementleri açısından nötral veya ± 0.10 mertebesinde bolluk dağılımı gösteren bir yıldız olduğunu ortaya koymaktadır. Nitekim tez çalışması kapsamında üç farklı yoldan elde edilen bolluklar bu sonucu doğrular nitelikte olup, element bolluğu bazında Güneş ile benzer bir yıldız olduğunu teyit etmektedir.

Model atmosfer parametreleri çerçevesinde bir güneş ikizinin 5772 ± 100 K'lik etkin sıcaklığa, 4.44 ± 0.20 cgs'lik bir yüzey çekimine ve 0.0 ± 0.1 dex'lik bir metalisiteye (Lehmann vd. 2023); güneş analogu yıldızın ise 5772 ± 300 K'lik etkin sıcaklığa, 4.44 ± 0.30 cgs'lik bir yüzey çekimine ve 0.0 ± 0.3 dex'lik bir metalisiteye sahip olduğu tanımlanmıştır (Berke vd. 2023; Lehmann vd. 2023). Bu çalışmada, birleştirilmiş bir çizgi listesi (OPTİK + NIR) ile spektroskopik analizden elde edilen yıldız parametrelerinin 5710 ± 132 K'lik etkin sıcaklık, 4.70 ± 0.16 cgs'lik bir yüzey çekimi ve 0.15 ± 0.12 dex'lik bir metalisite değeri sağlamıştır. Bu durumda literatürde verilen sınırlamalar ve elde edilen üç parametre seti doğrultusunda; HD 115617 yıldızının optik bölgede etkin sıcaklık, NIR ve Optik+NIR bölgede $[\text{Fe}/\text{H}]$ ve $\log g$ hata sınırlarını aşması sebebiyle Güneş Benzeri olarak sınıflandırılması uygun görülmüştür. Metalisite bakımından zengin karakterizasyonu yaş, kinematik ve yörünge dinamik analizleri doğrultusunda ilerleyen bölümlerde tekrar sorgulanacaktır.

4.2.2. Yaş analizi sonuçları

Bu bölümde HD 115617 yıldızının evrimsel durumunu değerlendirmek amacıyla, tez kapsamında spektral analiz yoluyla elde edilen üç farklı model atmosfer parametre seti dikkate alınmış ve her bir set için MCMC yaklaşımı altında PARSEC izokronları (Bressan vd. 2012) kullanılarak yıldızın yaşları (bkz. Figür 4.17, 4.18 ve 4.19) elde edilmiş ve evrimsel süreci hakkında çıkarımlarda bulunulmuştur.

Yıldızın $[\text{Fe}/\text{H}]$ değeri, izokronlarla karşılaştırılabilir olarak kütle kesri Z 'ye dönüştürülerek kullanılabilir hale getirilmiştir. Bu dönüşüm, Bovy tarafından sağlanan ve PARSEC izokronlarıyla uyumlu olan denkleme dayanmaktadır. Dönüştürülen Z

değeri, yıldızın izokron dizileri üzerindeki konumunu tanımlamada ve yaş tahmini gerçekleştirmede kritik rol oynamıştır.

$$Z = \frac{(Z_x - 0.2485 \times Z_x)}{(2.78 \times Z_x + 1)} \quad (4.28)$$

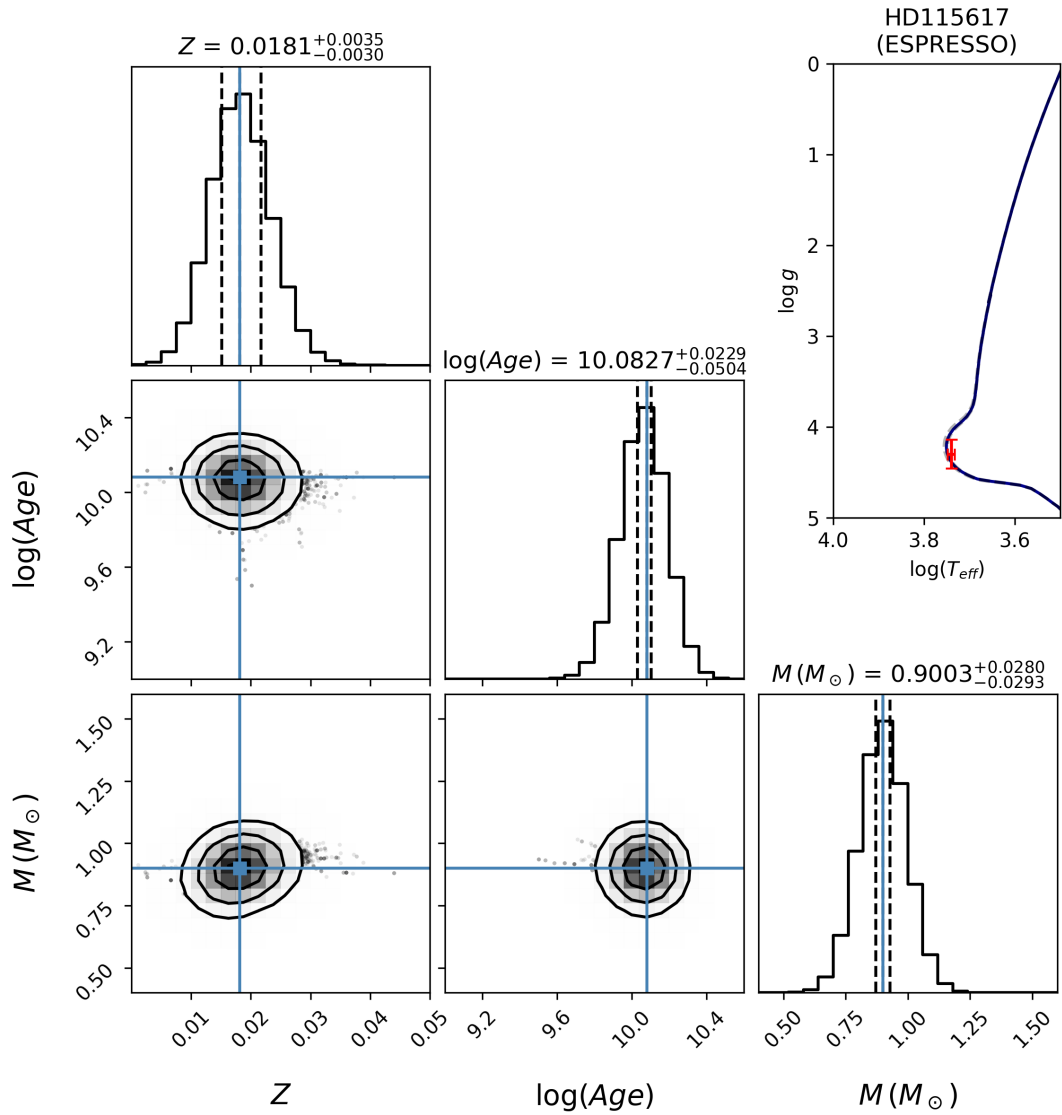
$$Z_x = 10^{\left[[\text{Fe}/\text{H}] + \log \left(\frac{Z_\odot}{1 - 0.2485 - 2.78 \times Z_\odot} \right) \right]} \quad (4.29)$$

Burada, Z ve Z_x sırasıyla helyumdan daha ağır elementleri ve ara operasyonel fonksiyonları ifade eder. $Z_\odot$, 0.0154 olarak kabul edilen güneş metal bolluğudur (Bressan vd. 2012). Yıldızın $[\text{Fe}/\text{H}]$ metalisite oranları sırasıyla -0.04 (E), 0.18 (I) ve 0.15 (E+I) dex olup, bu değerler Bovy (2015) tarafından verilen dönüşüm formülü kullanılarak Z metaliklik kütle kesirine çevrilmiştir. Buna göre sırasıyla 0.01814, 0.02259 ve 0.01827 değerleri elde edilmiştir.

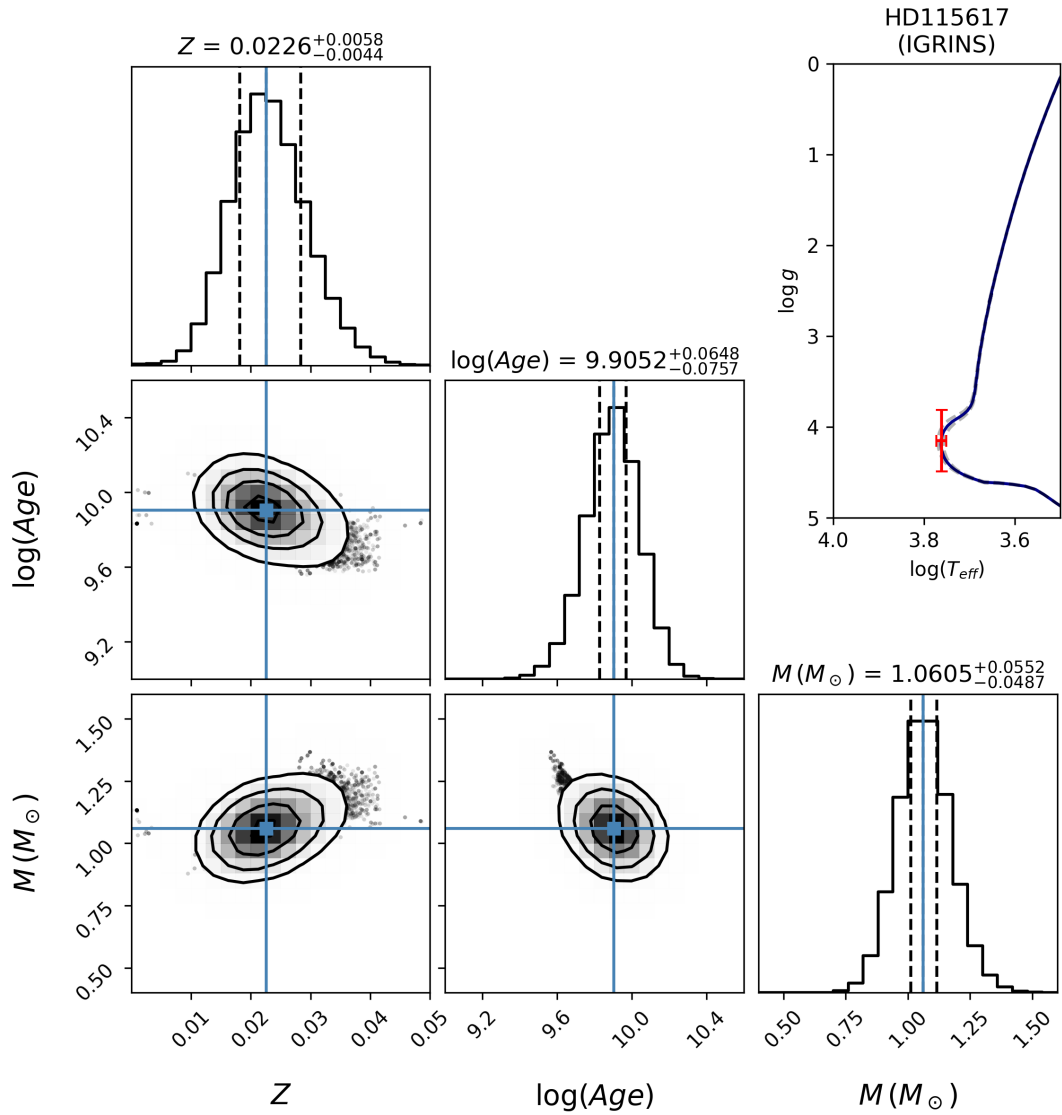
MCMC metoduna göre tahmin edilen yaşlar ise ESPRESSO için $12.1_{1.3}^{0.7}$ Gyr, IGRINS için $8.0_{1.3}^{1.3}$ Gyr, ESPRESSO+IGRINS için $0.7_{0.4}^{1.0}$ Gyr olarak bulunmuştur (bkz. Şekil Figür 4.17, 4.18 ve 4.19). Bu izokronlar, yıldızın Kiel diyagramındaki konumunu en iyi şekilde temsil eden modellerdir. Farklı spektroskopik parametre setleri kullanılarak hesaplanan yıldız yaşları birbirleriyle tutarsızdır. Bunun sebebi, ölçülen tayf bölgesine bağlı olarak yıldızın model parametrelerinde yaşadığı değişimdir. Literatürde yıldız için yaş dağılımı $2 \leq \tau \leq 13.1$ Gyr aralığındadır (bkz. EK Tablo EK.2) ve bu aralığa en yakın yaş değerini veren model parametre setlerinin ESPRESSO ve IGRINS olduğu görülmektedir.

HD 115617 yıldızının izokronlar üzerindeki konumu, hem sıcaklık-yüzey yerçekimi dağılımı (Kiel diyagramı) hem de türetilen kütle ($M \approx 0.90 - 1.07 M_\odot$) değeri göz önüne alındığında, Güneş benzeri bir yıldızın optik bölgeye göre yaşlı (12 Gyr), kırmızıöte bölgeye göre orta yaşlı (yaklaşık 5–7 Gyr) ve iki tayf bölgesinin kompozisyonuna göre ise genç (0.7 Gyr) evrim aşamasında bulunduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, HD 115617'nin anakol üzerinde yer almakla birlikte, Güneş'ten nispeten daha metalce zengin ve benzer büyüklükte kütleyle sahip bir yıldız olduğunu ortaya koymaktadır.

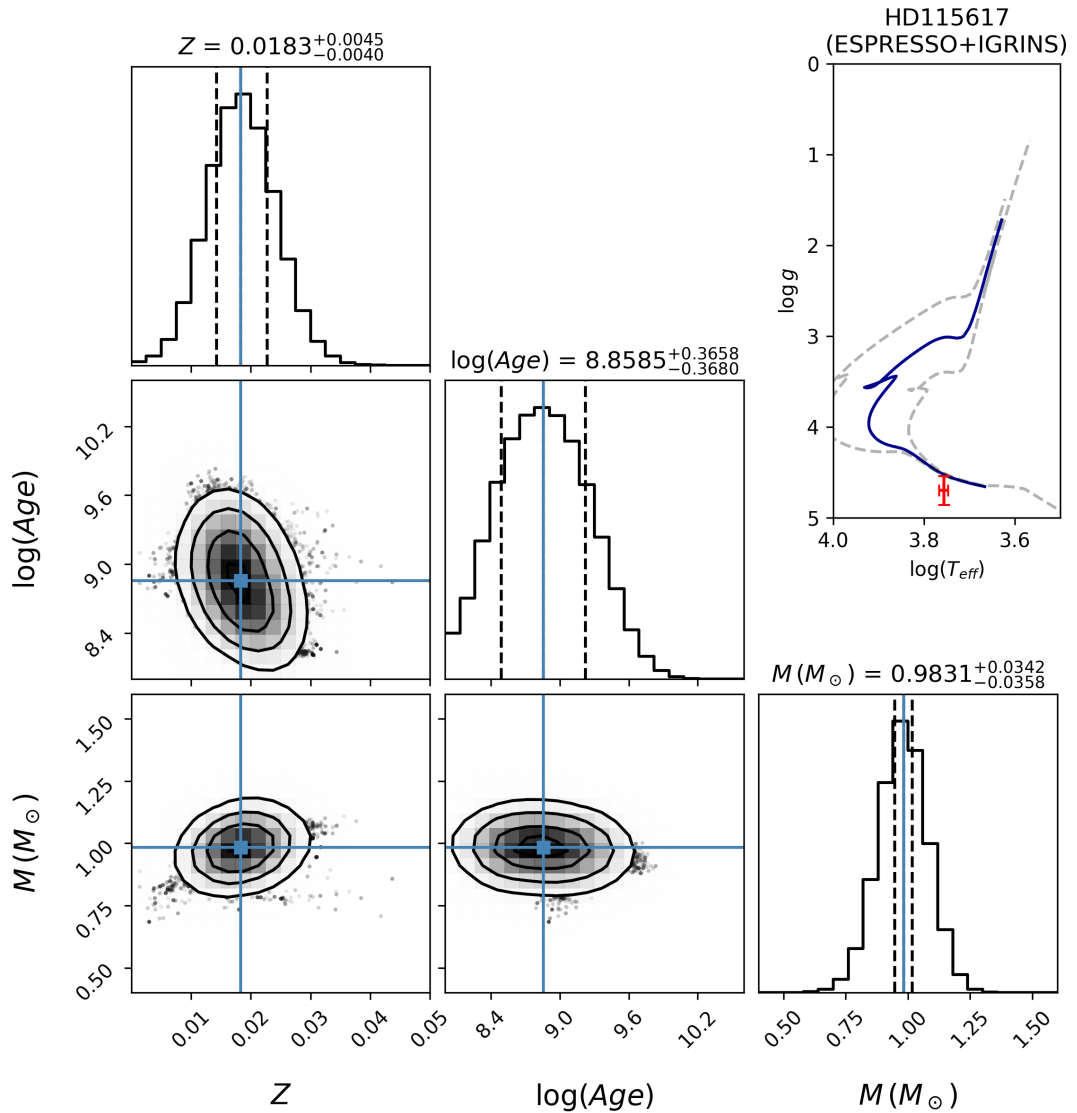
Tablo EK.2 incelendiğinde, son kırk yıla ait literatürde HD 115617 yıldızına ilişkin kütle, yarıçap ve yaş değerlerinin sırasıyla $0.88 \leq M/M_\odot \leq 1.06$, $0.91 \leq R/R_\odot \leq 1.04$ ve $2 \leq t(\text{Gyr}) \leq 13.1$ aralıklarında raporlandığı görülmektedir. Bu bağlamda, bu



Şekil 4.17. HD 115617 yıldızının ESPRESSO model setine ait iki boyutlu birleşik ve tek boyutlu kenar (marginal) posterior dağılımlarını gösteren köşe grafikleri. İki boyutlu birleşik posterior dağılımlarındaki konturlar sırasıyla %68, %90 ve %95 güven aralıklarını temsil etmektedir. Tek boyutlu dağılımlarda ise dikey kesikli çizgiler, ortanca (medyan) değeri ile 16. ve 84. yüzdelik dilimlere karşılık gelen belirsizlik aralıklarını göstermektedir. Grafiklerin sağ panelinde yıldızların Kiel diyagramları (kırmızı yıldız sembolleri) verilmiştir. Siyah çizgiler, posterior dağılımlarından elde edilen medyan değerlerle hesaplanan PARSEC izokronlarını temsil ederken, mavi kesikli çizgiler yıldızların yaş tahminlerine karşılık gelen belirsizlikleri göstermektedir.



Şekil 4.18. HD 115617 yıldızının IGRINS model setine ait iki boyutlu birleşik ve tek boyutlu kenar (marginal) posterior dağılımlarını gösteren köşe grafikleri. İki boyutlu birleşik posterior dağılımlarındaki konturlar sırasıyla %68, %90 ve %95 güven aralıklarını temsil etmektedir. Tek boyutlu dağılımlarda ise dikey kesikli çizgiler, ortanca (medyan) değeri ile 16. ve 84. yüzdelik dilimlere karşılık gelen belirsizlik aralıklarını göstermektedir. Grafiklerin sağ panelinde yıldızların Kiel diyagramları (kırmızı yıldız sembolleri) verilmiştir. Siyah çizgiler, posterior dağılımlarından elde edilen medyan değerlerle hesaplanan PARSEC izokronlarını temsil ederken, mavi kesikli çizgiler yıldızların yaş tahminlerine karşılık gelen belirsizlikleri göstermektedir.



Şekil 4.19. HD 115617 yıldızının ESPRESSO+IGRINS model setine ait iki boyutlu birleşik ve tek boyutlu kenar (marginal) posterior dağılımlarını gösteren köşe grafikleri. İki boyutlu birleşik posterior dağılımlarındaki konturlar sırasıyla %68, %90 ve %95 güven aralıklarını temsil etmektedir. Tek boyutlu dağılımlarda ise dikey kesikli çizgiler, ortanca (medyan) değeri ile 16. ve 84. yüzdelik dilimlere karşılık gelen belirsizlik aralıklarını göstermektedir. Grafiklerin sağ panelinde yıldızların Kiel diyagramları (kırmızı yıldız sembolleri) verilmiştir. Siyah çizgiler, posterior dağılımlarından elde edilen medyan değerlerle hesaplanan PARSEC izokronlarını temsil ederken, mavi kesikli çizgiler yıldızların yaş tahminlerine karşılık gelen belirsizlikleri göstermektedir.

çalışmanın optik+NIR parametre setinden elde edilen yaş değeri literatürde şimdiye dek bildirilmiş en düşük yaş değeri olma özelliğini taşımaktadır. Ancak, yıldızın kütle ve yarıçap değerleri, literatürdeki diğer çalışmalarla oldukça uyumludur. Kütle ve yarıçap bakımından sağlanan bu uyuma rağmen yaş değerinde görülen farkın, bu çalışmada kullanılan güncellenmiş izokron eğrilerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bu çalışmada kullanılan üç farklı model parametre setinin (ESPRESSO, IGRINS, ESPRESSO+IGRINS) benzer farklı yaş değerleri üretmiş olması, yıldızın analiz yapıldığı bölgeye göre tayfsal karakterinin değiştiğini göstermektedir. Literatürdeki tayfsal analiz çalışmaları dikkate alındığında, HD 115617 yıldızı için özellikle α -elementler bazında bildirilen element bolluklarının Güneş'inkine oldukça yakın ya da hafif metal zengini olduğu görülmektedir (bkz. Tablo EK.2). Bu sonuç, HD 115617'nin α -element bileşimi açısından ince disk (thin disk) popülasyonuna ait olduğunu ortaya koymaktadır (Plevne vd. 2020).

Bununla birlikte, yıldızın ait olduğu galaktik bileşenin kesinleştirilebilmesi için yalnızca kimyasal göstergeler ya da yaş değerleri yeterli değildir. Yıldızın gökada içerisindeki uzay hareketleri, yörünge yapısı ve galaktik doğum yeri gibi kinematik ve yörünge dinamik özellikleri de ayrıca değerlendirilmelidir. Bu bağlamda, izleyen bölümde HD 115617 yıldızının kinematik analiz sonuçları, yörünge parametreleri ve doğum yeri tahmini detaylı biçimde tartışılacaktır.

4.2.3. Kinematik ve yörünge dinamik analiz sonuçları

HD 115617 yıldızı için uzay hızı, Johnson ve Soderblom (1987) tarafından verilen yöntem doğrultusunda hesaplandı. Yıldızın öz hareket bileşenleri, trigonometrik paralaksı ve radyal hızı Gaia DR3'ten (Gaia İşbirliği, 2023) elde edildi ve hesaplanan astrometrik/spektroskopik veriler ile Tablo 4.12'te listelendi. HD 115617 için uzay hızı bileşenleri, J. Bovy (2015) tarafından geliştirilen *galpy* kodu kullanılarak (U, V, W) = $8.83 \pm 0.24, 14.19 \pm 0.34, 6.57 \pm 0.21$ km/s olarak hesaplandı. Uzay hızı bileşenleriyle ilişkili belirsizlikler yine Johnson ve Soderblom (1987) tarafından önerilen algoritma kullanılarak değerlendirildi. Yıldız Güneş'e çok yakın olduğundan, uzay hızı bileşenlerine diferansiyel dönüş düzeltilmesi (Mihalas ve Binney, 1981) uygulanmamıştır. Ancak, uzay hızı bileşenleri, Coşkunoğlu vd. (2011) tarafından verilen (U, V, W) = (8.83

Tablo 4.12. HD 115617'in fotometrik, astrometrik ve tayfsal verilerden hesaplanan temel astrofizik parametreleri ve kinematik / Yörünge dinamik parametreleri.

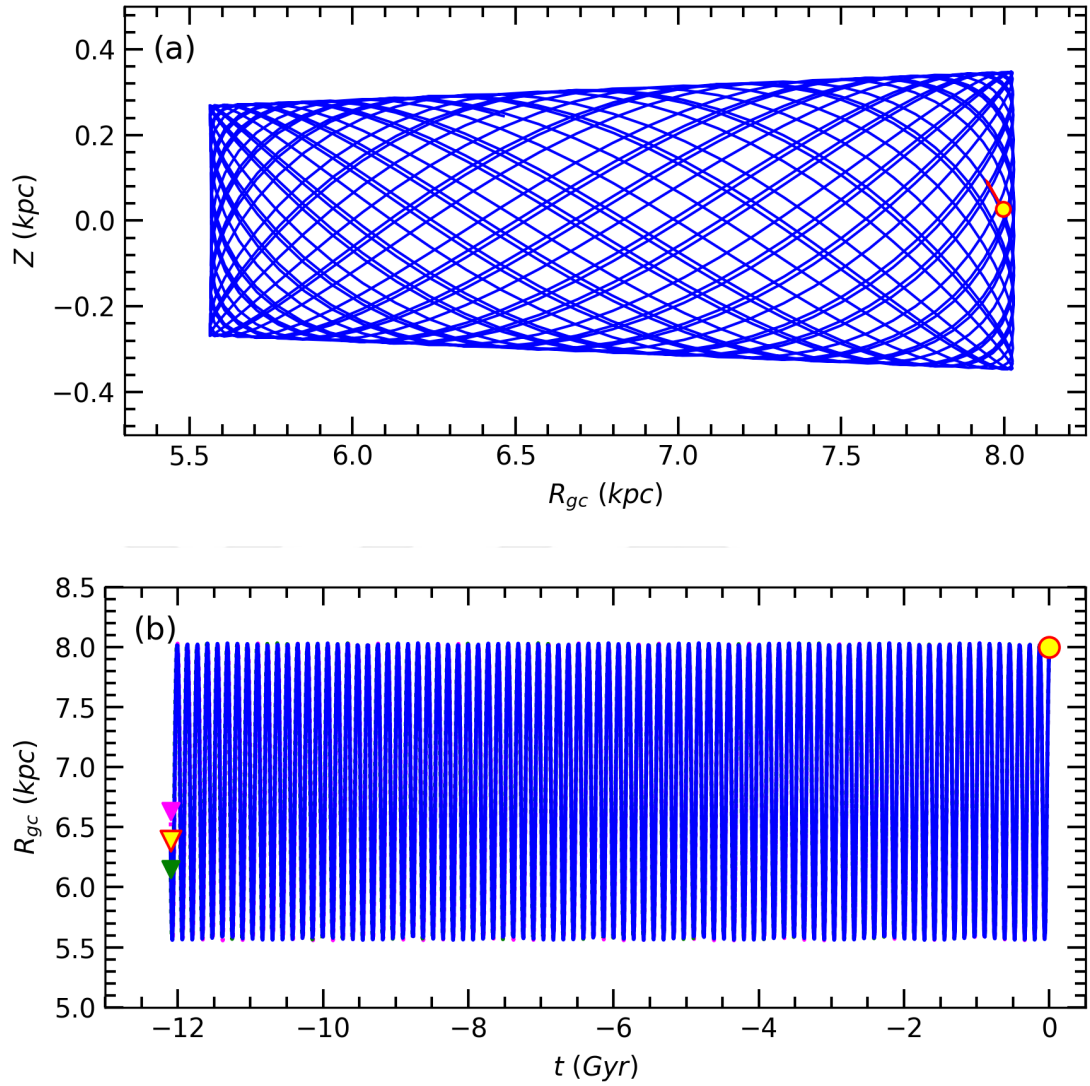
Parametreler	Değerler		
$(\alpha, \delta)_{J2000}$	13:18:24.31, -18:18:40.30		
$(l, b)_{J2000}$	311.851528, +44.088629		
$\mu_\alpha \cos \delta, \mu_\delta$ (mas yr ⁻¹)	$-1070.202 \pm 0.153, -1063.849 \pm 0.123$		
ω (mas)	117.1726 ± 0.1456		
d (pc)	8.53 ± 0.01		
Spektral Tipi	G7V		
V (mag)	4.74		
U-B (mag)	0.27		
B-V (mag)	0.70		
E(B-V) (mag)	0.00		
G (mag)	4.5325 ± 0.001		
$G_{BP} - G_{RP}$ (mag)	0.8984 ± 0.004		
M_G (mag)	4.877 ± 0.029		
	ESPRESSO	IGRINS	ESPRESSO+IGRINS
T_{eff} (K)	5495 ± 100	5780 ± 140	5710 ± 132
$\log g$ (cgs)	4.30 ± 0.16	4.15 ± 0.34	4.70 ± 0.16
[Fe/H] (dex)	-0.04 ± 0.11	0.18 ± 0.10	0.15 ± 0.09
Z	0.01814	0.02259	0.01827
ξ (km s ⁻¹)	0.57 ± 0.50	2.48 ± 0.50	0.33 ± 0.50
V_R (km s ⁻¹)	-5.60 ± 0.04	-8.13	...
$M(M_\odot)$	$0.900^{+0.028}_{-0.129}$	$1.061^{+0.055}_{-0.049}$	$0.983^{+0.034}_{-0.036}$
t (Gyr)	$12.1^{+0.7}_{-1.3}$	$8.0^{+1.3}_{-1.3}$	$0.7^{+1.0}_{-0.4}$
R_{birth} (kpc)	6.39 ± 0.48	5.66 ± 0.01	7.87 ± 0.07
$(U, V, W)_{\text{LSR}}$ (km s ⁻¹)	$-14.17 \pm 0.37, -33.68 \pm 0.52, -24.25 \pm 0.46$		
S_{LSR} (km s ⁻¹)	43.85 ± 0.79		
R_a, R_p (pc)	$8038 \pm 3, 5604 \pm 23$		
Z_{max} (pc)	364 ± 8		
e	0.178 ± 0.002		
P (Myr)	190 ± 1		

± 0.24 , 14.19 ± 0.34 , 6.57 ± 0.21) km/s olan Güneş'in kendine özgü hızına göre düzeltilmiştir. Böylece, HD 115617'nin (U, V, W)_{LSR} = -14.17 ± 0.37 , -33.68 ± 0.52 , -24.25 ± 0.46 km/s olarak hesaplanmıştır. HD 115617'nin toplam uzay hızını hesaplamak için $S_{LSR} = \sqrt{U_{LSR}^2 + V_{LSR}^2 + W_{LSR}^2}$ ilişkisi kullanılmış ve $S_{LSR} = 43.85 \pm 0.79$ km/s olarak hesaplanmıştır. Yıldızın toplam uzay hızı, HD 115617'nin genç, ince disk üyesi bir yıldız olduğunu göstermektedir (Leggett 1992). Kinematik sonuçlar Tablo 4.12'te listelenmiştir.

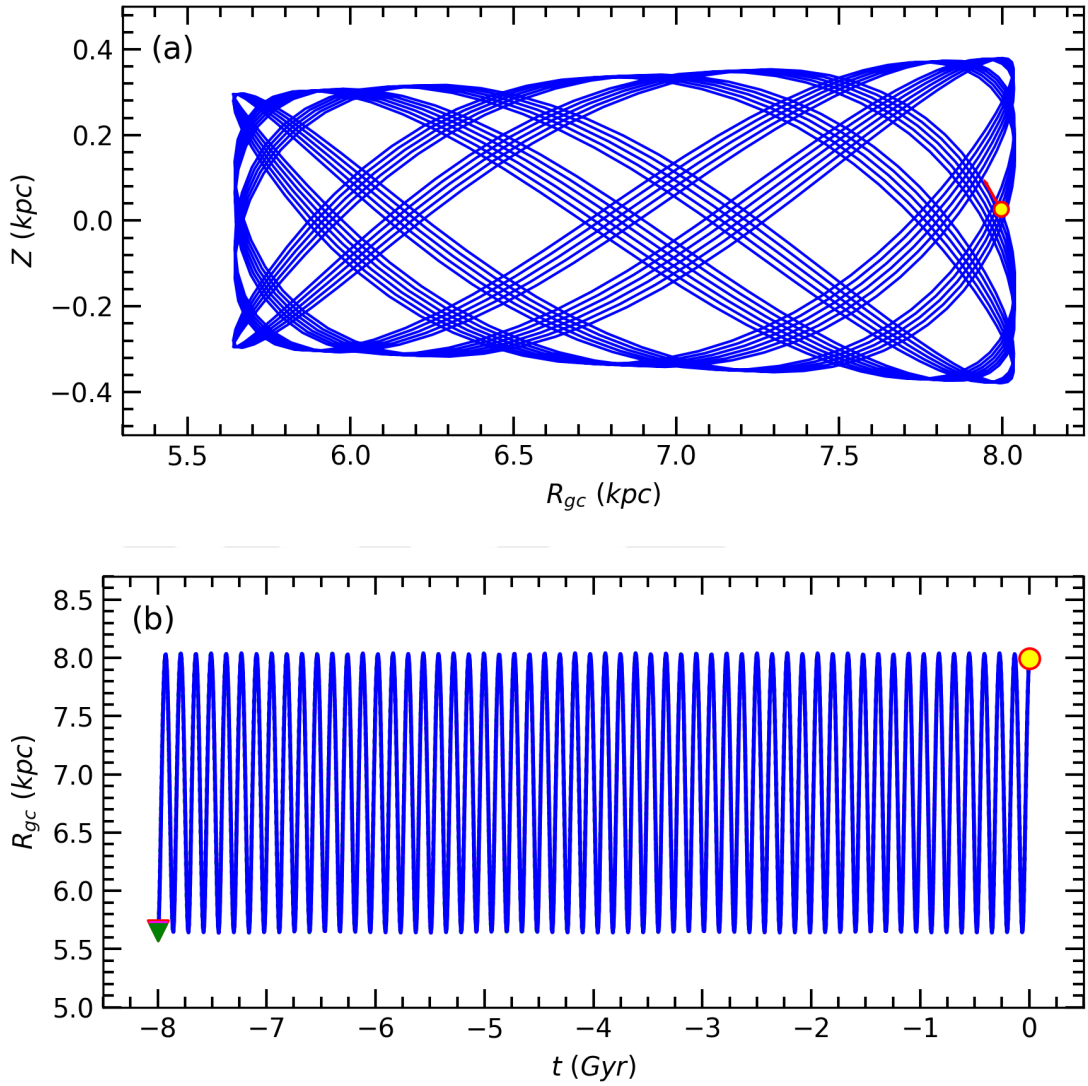
galpy kütüphanesindeki *MW Potential*2014 potansiyeli, HD 115617 yıldızı için Galaktik yörünge parametrelerini elde etmek için kullanıldı. Bu analizde, Güneş için Galaktosentrik uzaklık ve yörünge hızı sırasıyla $R_{GC} = 8$ kpc ve $V_{rot} = 220$ km/s olarak varsayılmıştır (Majewski 1993). Ayrıca Güneş'in Galaktik düzleme olan uzaklığı Chen vd. (2000) çalışmasında rapor edildiği gibi 27 ± 4 pc olarak kabul edilmiştir.

HD 115617'nin Galaktik yörüngesi, yıldızın gökadaki mevcut konumlarından 13 Gyr yaşına kadar 5 Myr adımla geriye doğru entegre edildi. Yörünge analizlerinden tahmin edilen çıktı parametreleri Tablo 4.12'te listelenmektedir. Burada R_a ve R_p sırasıyla apogalaktik ve perigalaktik mesafelerdir, e eksantriklik, Z_{max} Galaktik düzlemden maksimum dikey mesafedir ve P yörünge periyodudur. Galaktik yörünge parametrelerindeki hatalar; HD 115617 yıldızı için hesaplanan hareket bileşenlerindeki belirsizlikler, trigonometrik paralaks ve radyal hızı dikkate alınarak hesaplanır. Yıldızların farklı zamanlarda Galaktik merkezden uzaklıklarına (R_{GC}) ve Galaktik düzleme dik (z) konumları Şekil 4.20, 4.21, 4.22'da üst panelde gösterilmiştir. Sonuçlar, HD 115617'nin Galaktik düzlemden yaklaşık $z = 8$ pc uzaklıkta olduğunu ve yıldızın Gökada'nın ince disk popülasyonuna ait olduğunu göstermektedir (Güçtekin vd. 2019).

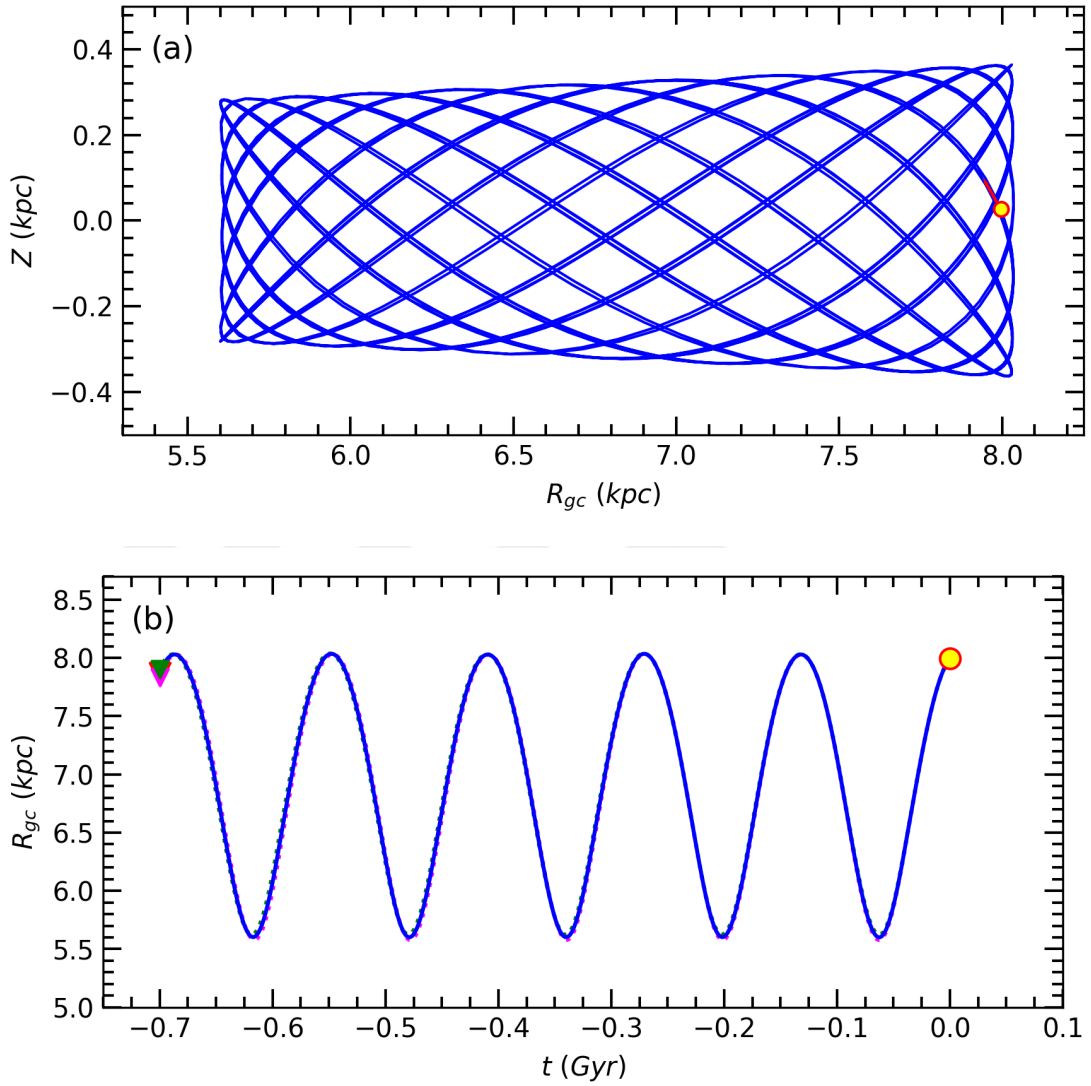
HD 115617 yıldızının farklı düzlemlerdeki yörüngesi, dinamik yörünge analizleri sonucunda Şekil 4.20, 4.21, 4.22'da gösterilmiştir. Bahsi geçen şekillerin üst panelinde, HD 115617'nin hareketlerinin, Galaktik merkezden ve Galaktik düzlemden uzaklığa bağlı yan görünüşleri sunulmaktadır (örn. Yontan ve Canbay 2023), alt panelde ise yıldızın doğum anındaki ve girdi parametrelerine bağlı olarak bugünkü konumları sırasıyla sarı dolu üçgenler ve dairelerle gösterilmiştir. HD 115617'nin yörüngesinin eksantrikliği 0.18'i geçmemektedir. Galaktik düzlemden uzaklık, yıldız için $Z_{max} = 190 \pm 1$ pc noktasında maksimuma ulaşmaktadır. Ancak, bu çalışmada gerçekleştirilen



Şekil 4.20. $Z \times R_{gc}$ (a) ve $R_{gc} \times t$ (b) diyagramlarındaki ESPRESSO yaş değeri için HD 115617'nin Galaktik yörüngesi ve doğum yarıçapları. Sarı daireler ve üçgenler sırasıyla yıldızın bugünkü konumunu ve doğum pozisyonunu göstermektedir. Kırmızı ok, HD 115617'nin sahip olduğu hareket vektörüdür. Yeşil ve pembe noktalı çizgiler, giriş değerlerinin parametre hataları dikkate alındığında yörüngeyi gösterirken, yeşil ve pembe dolu üçgenler, alt ve üst hata tahminlerine göre HD 115617'nin doğum yerlerini temsil eder.



Şekil 4.21. $Z \times R_{gc}$ (a) ve $R_{gc} \times t$ (b) diyagramlarındaki IGRINS yaş değeri için HD 115617'nin Galaktik yörüngesi ve doğum yarıçapları. Sarı daireler ve üçgenler sırasıyla yıldızın bugünkü konumunu ve doğum pozisyonunu göstermektedir. Kırmızı ok, HD 115617'nin sahip olduğu hareket vektörüdür. Yeşil ve pembe noktalı çizgiler, giriş değerlerinin parametre hataları dikkate alındığında yörüngeyi gösterirken, yeşil ve pembe dolu üçgenler, alt ve üst hata tahminlerine göre HD 115617'nin doğum yerlerini temsil eder.



Şekil 4.22. $Z \times R_{gc}$ (a) ve $R_{gc} \times t$ (b) diyagramlarındaki ESPRESSO+IGRINS yaş değeri için HD 115617'nin Galaktik yörüngesi ve doğum yarıçapları. Sarı daireler ve üçgenler sırasıyla yıldızın bugünkü konumunu ve doğum pozisyonlarını göstermektedir. Kırmızı ok, HD 115617'nin sahip olduğu hareket vektörüdür. Yeşil ve pembe noktalı çizgiler, giriş değerlerinin parametre hataları dikkate alındığında yörüngeyi gösterirken, yeşil ve pembe dolu üçgenler, alt ve üst hata tahminlerine göre HD 115617'nin doğum yerlerini temsil eder.

spektral analizlerin de gösterdiği gibi, HD 115617'nin α -element bolluğu bakımından Güneş benzeri olması, yıldızın kinematik ve dinamik yörünge analizlerinin sonuçlarını desteklemektedir. Bu sonuçlar, HD 115617'nin Samanyolu'nun ince disk popülasyonuna ait olduğunu göstermektedir.

HD 115617'nin Gökadadaki doğum yarıçapını elde etmek için, Galaktik merkez etrafındaki yörüngesi, PARSEC izokronları (Bressan vd. 2012) tarafından belirlenen yaşı dikkate alınarak zamanda geriye doğru sarıldı. Yıldızın 12.1, 8.0 ve 0.7 Gyr yaşlarına ait dinamik yörünge analizleri, yıldızın Galaktik merkezden sırasıyla 6.39 ± 0.48 , 5.66 ± 0.01 ve 7.87 ± 0.07 kpc uzaklıklarda doğduğunu göstermektedir (bkz. Şekil 4.20, 4.21, 4.22). Bu sonuçlar, Galaktik diskin ikili çökme modelini (Chiappini vd. 1997) desteklemektedir ve HD 115617'nin metal açısından zengin bir ortamda doğduğuna dair önemli bir kanıttır.



5. SONUÇLAR

Sonuç olarak bu tez çalışması kapsamında, Güneş benzeri iki yıldız olan HD 76151 ve HD 115617'nin optik ve NIR bölgelerinden elde edilen yüksek çözünürlüklü tayfları kullanılarak detaylı tayfsal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu işlem için $Y-$, $J-$, $H-$ ve $K-$ bandını içerir yeni bir çizgi listesi oluşturulmuş ve öncelikli olarak Güneş üzerinde ardından iki Güneş benzeri yıldız üzerinde test edilmiştir. Klasik tayfsal yöntemlerle türetilen model atmosfer parametreleri, hem optik hem de NIR veriler için ayrı ayrı ve birlikte değerlendirilmiş; çizgi listeleri, iyonizasyon dengeleri, konveksiyon etkisi ve NLTE düzeltmeleri doğrultusunda dikkatle seçilmiştir. Elde edilen parametreler ışığında, yıldızların logaritmik element bollukları hesaplanmış; bolluklar üzerinde sistematik hata analizleri uygulanarak güvenilirlikleri test edilmiştir. İzokron uyumlamaları ve modern MCMC yaklaşımlarıyla yaş tahminleri yapılmış, her iki yıldızın da hem klasik hem de istatistiksel yöntemlerle karakteristikleri ortaya konmuştur. Bulgular, literatürle karşılaştırmalı olarak tartışılmış; kinematik ve yörünge analizleri ile kimyasal bileşenlerin galaktik bağlamdaki yeri değerlendirilmiştir.

Bu tez kapsamında yürütülen analizler, gelecekte planlanan daha geniş ölçekli Güneş benzeri yıldız çalışmalarına da öncülük etme niteliği taşımaktadır. Özellikle burada incelenen sınırlı sayıdaki örneklemin, genişletilmiş örnekler üzerinde de benzer tayfsal karakteristikler gösterip göstermediği araştırılacaktır. Ayrıca, NIR bölgede Al ve Mn gibi geçişlerin varlığı detaylı olarak incelenecek; IGRINS tayf aralığı olan H ve K bantlarına ek olarak, özellikle Y ve J bantlarının da analize dahil edilmesi hedeflenecektir. Bu sayede hem tayfsal çizgi kapsamı genişletilecek hem de Güneş benzeri yıldızların kimyasal izlerinin daha derinlemesine anlaşılması mümkün olacaktır.



6. KAYNAKLAR

- Abdurro'uf, N., Accetta, K., Aerts, C., Silva Aguirre, V., Ahumada, R., Ajgaonkar, N., ... Kneib, J. P. (2022). The seventeenth data release of the Sloan Digital Sky Surveys: Complete release of MaNGA, MaStar, and APOGEE-2 data. *The Astrophysical Journal. Supplement Series*, 259(2).
- Adibekyan, V. Z., Sousa, S. G., Santos, N. C., Mena, E. D., Hernández, J. G., Israelian, G., ... Khachatryan, G. (2012). Chemical abundances of 1111 FGK stars from the HARPS GTO planet search program-Galactic stellar populations and planets. *Astronomy Astrophysics*, 545, A32.
- Aerts, C., Christensen-Dalsgaard, J., Kurtz, D. W. (2010). *Asteroseismology*. Springer Science Business Media.
- Afşar, M., Sneden, C., Frebel, A., Kim, H., Mace, G. N., Kaplan, K. F., ... Jaffe, D. T. (2016). The Chemical Compositions of Very Metal-poor Stars HD 122563 and HD 140283: A View from the Infrared. *The Astrophysical Journal*, 819(2), 103.
- Afşar, M., Sneden, C., Wood, M. P., Lawler, J. E., Bozkurt, Z., Topcu, G. B., ... Jaffe, D. T. (2018). Chemical Compositions of Evolved Stars from Near-infrared IGRINS High-resolution Spectra. I. Abundances in Three Red Horizontal Branch Stars. *The Astrophysical Journal*, 865(1), 44.
- Amarsi, A. M., Lind, K., Asplund, M., Barklem, P. S., Collet, R. (2016). Non-LTE line formation of Fe in late-type stars—III. 3D non-LTE analysis of metal-poor stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 463(2), 1518-1533.
- Anders, E., Grevesse, N. (1989). Abundances of the elements: Meteoritic and solar. *Geochimica et Cosmochimica acta*, 53(1), 197-214.
- Anders, F., Queiroz, A. B., Chiappini, C., Santiago, B. X., Fernández-Trincado, J. G., Meza, A., SDSS-IV/APOGEE Collaboration. (2017). The DR14 APOGEE-TGAS catalogue: Precise chemo-kinematics in the extended solar vicinity. *arXiv preprint arXiv:1708.09319*.

- Andreasen, D. T., Sousa, S. G., Mena, E. D., Santos, N. C., Tsantaki, M., Rojas-Ayala, B., Neves, V. (2016). Near-infrared spectroscopy of the Sun and HD 20010-Compiling a new line list in the near-infrared. *Astronomy Astrophysics*, 585, A143.
- Arlandini, C., Käppeler, F., Wisshak, K., Gallino, R., Lugaro, M., Busso, M., Straniero, O. (1999). Neutron capture in low-mass asymptotic giant branch stars: cross sections and abundance signatures. *The Astrophysical Journal*, 525(2), 886.
- Arnett, D. (1996). *Supernovae and nucleosynthesis: an investigation of the history of matter, from the big bang to the present (Vol. 7)*. Princeton University Press.
- Asplund, M. (2005). New light on stellar abundance analyses: departures from LTE and homogeneity. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 43(1), 481-530.
- Asplund, M., Grevesse, N., Sauval, A. J., Scott, P. (2009). The chemical composition of the Sun. *Annual review of astronomy and astrophysics*, 47(2009), 481-522.
- Asplund, M., Amarsi, A. M., Grevesse, N. (2021). The chemical make-up of the Sun: A 2020 vision. *Astronomy Astrophysics*, 653, A141.
- Bahcall, J. N., Pinsonneault, M. H., Wasserburg, G. J. (1995). Solar models with helium and heavy-element diffusion. *Reviews of Modern Physics*, 67(4), 781.
- Baliunas, S. L., Donahue, R. A., Soon, W. H., Horne, J. H., Frazer, J., Woodard-Eklund, L., ... Whitney, J. H. (1995). Chromospheric variations in main-sequence stars. *Astrophysical Journal*, Part 1 (ISSN 0004-637X), vol. 438, no. 1, p. 269-287, 438, 269-287.
- Basu, S., Antia, H. M. (2008). Helioseismology and solar abundances. *Physics Reports*, 457(5-6), 217-283.
- Battistini, C., Bensby, T. (2015). The origin and evolution of the odd-Z iron-peak elements Sc, V, Mn, and Co in the Milky Way stellar disk. *Astronomy*

- Astrophysics, 577, A9.
- Battistini, C., Bensby, T. (2016). The origin and evolution of r-and s-process elements in the Milky Way stellar disk. *Astronomy Astrophysics*, 586, A49.
- Baum, A. C., Wright, J. T., Luhn, J. K., Isaacson, H. (2022). Five decades of chromospheric activity in 59 Sun-like stars and new Maunder Minimum candidate HD 166620. *The Astronomical Journal*, 163(4), 183.
- Beers, T. C., Preston, G. W., Shectman, S. A., Kage, J. A. (1990). Estimation of stellar metal abundance. I-Calibration of the Ca II K index. *Astronomical Journal* (ISSN 0004-6256), vol. 100, Sept. 1990, p. 849-883. Research supported by Michigan State University and Alfred P. Sloan Foundation., 100, 849-883.
- Beers, T. C., Sommer-Larsen, J. (1995). Kinematics of metal-poor stars in the galaxy. *Astrophysical Journal Supplement Series* (ISSN 0067-0049), vol. 96, no. 1, p. 175-221, 96, 175-221.
- Beirao, P., Santos, N. C., Israelian, G., Mayor, M. (2005). Abundances of Na, Mg and Al in stars with giant planets. *Astronomy Astrophysics*, 438(1), 251-256.
- Bensby, T., Feltzing, S., Lundström, I. (2003). Elemental abundance trends in the Galactic thin and thick disks as traced by nearby F and G dwarf stars. *Astronomy Astrophysics*, 410(2), 527-551.
- 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 Astrophysics*, 562, A71.
- Bergemann, M., Cescutti, G. (2010). Chromium: NLTE abundances in metal-poor stars and nucleosynthesis in the Galaxy. *Astronomy Astrophysics*, 522, A9.
- Bergemann, M. (2011). Ionization balance of Ti in the photospheres of the Sun and four late-type stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 413(3), 2184-2198.

- Bergemann, M., Lind, K., Collet, R., Magic, Z., Asplund, M. (2012a). Non-LTE line formation of Fe in late-type stars—I. Standard stars with 1D and < 3D > model atmospheres. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 427(1), 27-49.
- Bergemann, M., Kudritzki, R. P., Plez, B., Davies, B., Lind, K., Gazak, Z. (2012b). Red Supergiant Stars as Cosmic Abundance Probes: NLTE Effects in J-band Iron and Titanium Lines. *The Astrophysical Journal*, 751(2), 156.
- Bergemann, M., Kudritzki, R. P., Würl, M., Plez, B., Davies, B., Gazak, Z. (2013). Red supergiant stars as cosmic abundance probes. ii. nlte effects in j-band silicon lines. *The Astrophysical Journal*, 764(2), 115.
- Bergemann, M., Nordlander, T. (2014). NLTE Radiative Transfer in Cool Stars: Theory and Applications to the Abundance Analysis for 24 Chemical Elements. Determination of Atmospheric Parameters of B-, A-, F- and G-Type Stars: Lectures from the School of Spectroscopic Data Analyses, 169-185.
- Bergemann, M. R. R. G., Ruchti, G. R., Serenelli, A., Feltzing, S., Alves-Brito, A., Asplund, M., ... Tautvaišienė, G. (2014). The Gaia-ESO Survey: radial metallicity gradients and age-metallicity relation of stars in the Milky Way disk. *Astronomy Astrophysics*, 565, A89.
- Bergemann, M., Collet, R., Amarsi, A. M., Kovalev, M., Ruchti, G., Magic, Z. (2017). Non-local Thermodynamic Equilibrium Stellar Spectroscopy with 1D and < 3D > Models. I. Methods and Application to Magnesium Abundances in Standard Stars. *The Astrophysical Journal*, 847(1), 15.
- Bergemann, M., Gallagher, A. J., Eitner, P., Bautista, M., Collet, R., Yakovleva, S. A., ... Hansen, C. (2019). Observational constraints on the origin of the elements-I. 3D NLTE formation of Mn lines in late-type stars. *Astronomy Astrophysics*, 631, A80.
- Berke, D. A., Murphy, M. T., Flynn, C., Liu, F. (2023). Probing Galactic variations in the fine-structure constant using solar twin stars: methodology and results. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 519(1), 1238-1252.

- Binks, A. S., Jeffries, R. D., Maxted, P. F. L. (2015). A kinematically unbiased search for nearby young stars in the Northern hemisphere selected using SuperWASP rotation periods. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 452(1), 173-192.
- Bisterzo, S., Gallino, R., Straniero, O., Cristallo, S., Käppeler, F. (2011). The s-process in low-metallicity stars–II. Interpretation of high-resolution spectroscopic observations with asymptotic giant branch models. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 418(1), 284-319.
- Bisterzo, S., Travaglio, C., Gallino, R., Wiescher, M., Käppeler, F. (2014). Galactic chemical evolution and solar s-process abundances: Dependence on the ^{13}C -pocket structure. *The Astrophysical Journal*, 787(1), 10.
- Blanco-Cuaresma, S., Soubiran, C., Heiter, U., Jofré, P. (2014). iSpec: Stellar atmospheric parameters and chemical abundances. *Astrophysics Source Code Library*, ascl-1409.
- Bland-Hawthorn, J., Horton, A. (2006, June). Instruments without optics: an integrated photonic spectrograph. In *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy* (Vol. 6269, pp. 224-237). SPIE.
- Blaauw, A., Gum, C. S., Pawsey, J. L., Westerhout, G. (1960). The new IAU system of galactic coordinates (1958 revision). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 121(2), 123-131.
- Bodaghee, A., Santos, N. C., Israelian, G., Mayor, M. (2003). Chemical abundances of planet-host stars-Results for alpha and Fe-group elements. *Astronomy Astrophysics*, 404(2), 715-727.
- Bonfanti, A., Ortolani, S., Nascimbeni, V. (2016). Age consistency between exoplanet hosts and field stars. *Astronomy Astrophysics*, 585, A5.
- Borrero, J. M., Rubio, L. B., Barklem, P. S. (2003). Accurate atomic parameters for near-infrared spectral lines. *Astronomy Astrophysics*, 404(2), 749-762.
- Bovy, J., Tremaine, S. (2012). On the local dark matter density. *The Astrophysical Journal*, 756(1), 89.

- Bovy, J. (2015). galpy: A python Library for Galactic Dynamics. The Astrophysical Journal Supplement Series, 216(2), 29.
- Böhm-Vitense, E. (1993). Introduction to Stellar Astrophysics: Volume 2, Stellar Atmospheres, Cambridge University Press.
- Bressan, A., Marigo, P., Girardi, L., Salasnich, B., Dal Cero, C., Rubele, S., Nanni, A. (2012). PARSEC: stellar tracks and isochrones with the PAdova and TRieste Stellar Evolution Code. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 427(1), 127-145.
- Brewer, J. M., Fischer, D. A. (2016). C/O and Mg/Si ratios of stars in the solar neighborhood. The Astrophysical Journal, 831(1), 20.
- Burbidge, E. M., Burbidge, G. R., Fowler, W. A., Hoyle, F. (1957). Synthesis of the elements in stars. Reviews of modern physics, 29(4), 547.
- Busso, M., Gallino, R., Wasserburg, G. J. (1999). Nucleosynthesis in asymptotic giant branch stars: Relevance for galactic enrichment and solar system formation. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 37(1), 239-309.
- Cameron, A. G. W. (1957). Nuclear reactions in stars and nucleogenesis. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 69(408), 201-222.
- 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 Astrophysics, 606, A65.
- Carretta, E. (2013). The fraction of first-and second-generation stars in globular clusters-I. The case of NGC 6752. Astronomy Astrophysics, 557, A128.
- Carney, B. W., Laird, J. B., Latham, D. W., Aguilar, L. A. (1996). A survey of proper motion stars. XIII. The Halo population. Astronomical Journal v. 112, p. 668, 112, 668.
- Casagrande, L., Schönrich, R., Asplund, M., Cassisi, S., Ramírez, I., Melendez, J., ... Feltzing, S. (2011). New constraints on the chemical evolution of the solar neighbourhood and Galactic disc (s)-Improved astrophysical parameters for the Geneva-Copenhagen Survey. Astronomy Astrophysics, 530, A138.

- Casali, G., Spina, L., Magrini, L., Karakas, A. I., Kobayashi, C., Casey, A. R., ... Zaggia, S. (2020). The Gaia-ESO survey: the non-universality of the age–chemical-clocks–metallicity relations in the Galactic disc. *Astronomy Astrophysics*, 639, A127.
- Castelli, F., Kurucz, R. L. (2004). New grids of ATLAS9 model atmospheres. arXiv preprint astro-ph/0405087.
- Cayrel de Strobel, G., Knowles, N., Hernandez, G., Bentolila, C. (1981). In search of real solar twins. *Astronomy and Astrophysics*, vol. 94, no. 1, Jan. 1981, p. 1-11., 94, 1-11.
- Cenarro, A. J., Peletier, R. F., Sánchez-Blázquez, P., Selam, S. O., Toloba, E., Cardiel, N., ... Vazdekis, A. (2007). Medium-resolution Isaac Newton Telescope library of empirical spectra–II. The stellar atmospheric parameters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 374(2), 664-690.
- Chavero, C., de la Reza, R., Ghezzi, L., Llorente de Andrés, F., Pereira, C. B., Giuppone, C., Pinzón, G. (2019). Emerging trends in metallicity and lithium properties of debris disc stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 487(3), 3162-3177.
- Chen, Y. Q., Nissen, P. E., Zhao, G., Zhang, H. W., Benoni, T. (2000). Chemical composition of 90 F and G disk dwarfs. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 141(3), 491-506.
- Chen, X., Ge, Z., Chen, Y., Bi, S., Yu, J., Li, T., ... Wu, Y. (2020). Ages of Dwarfs in the Solar Neighborhood: Considering C and O Enhancements. *The Astrophysical Journal*, 889(2), 157.
- Chiappini, C., Gratton, A. R. (1997). The chemical evolution of the galaxy: the two-infall model. *The Astrophysical Journal*, 477(2), 765.
- Chiappini, C., Matteucci, F., Romano, D. (2001). Abundance gradients and the formation of the Milky Way. *The Astrophysical Journal*, 554(2), 1044.

- Chiba, M., Yoshii, Y. (1998). Early Evolution of the Galactic Halo Revealed from Hipparcos Observations of Metal-poor Stars. *The Astronomical Journal*, 115(1), 168.
- Christensen-Dalsgaard, J., Däppen, W., Ajukov, S. V., Anderson, E. R., Antia, H. M., Basu, S., ... Ulrich, R. K. (1996). The current state of solar modeling. *Science*, 272(5266), 1286-1292.
- Christensen-Dalsgaard, J. (2003). Lecture notes on stellar oscillations.
- Clayton, D. D. (1983). Principles of stellar evolution and nucleosynthesis. University of Chicago press.
- Contursi, G., de Laverny, P., Recio-Blanco, A., Molero, M., Spitoni, E., Matteucci, F., Cristallo, S. (2024). The AMBRE Project: Lead abundance in Galactic stars. *Astronomy Astrophysics*, 690, A97.
- Coşkunoğlu, B., Ak, S., Bilir, S., Karaali, S., Yaz, E., Gilmore, G., ... Zwitter, T. (2011). Local stellar kinematics from RAVE data–I. Local standard of rest. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 412(2), 1237-1245.
- Cowan, J. J., Sneden, C. (2006). Heavy element synthesis in the oldest stars and the early Universe. *Nature*, 440(7088), 1151-1156.
- Cowan, J. J., Sneden, C., Lawler, J. E., Aprahamian, A., Wiescher, M., Langanke, K., ... Thielemann, F. K. (2021). Origin of the heaviest elements: The rapid neutron-capture process. *Reviews of Modern Physics*, 93(1), 015002.
- Cristallo, S., Piersanti, L., Straniero, O., Gallino, R., Domínguez, I., Abia, C., ... Bisterzo, S. (2011). Evolution, nucleosynthesis, and yields of low-mass asymptotic giant branch stars at different metallicities. II. The FRUITY database. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 197(2), 17.
- Çınar, D. C., Bilir, S., Şahin, T., Plevne, O. (2025). Tracing the Galactic Origins of Selected Four G-type Stars in the Solar Neighborhood. *The Astronomical Journal*, 170(1), 13.
- Da Silva, R., Milone, A. C., Reddy, B. E. (2011). Homogeneous photospheric parameters and C abundances in G and K nearby stars with and without

- planets. *Astronomy Astrophysics*, 526, A71.
- Da Silva, R., de Mello, G. P., Milone, A. C., da Silva, L., Ribeiro, L. S., Rocha-Pinto, H. J. (2012). Accurate and homogeneous abundance patterns in solar-type stars of the solar neighbourhood: a chemo-chronological analysis. *Astronomy Astrophysics*, 542, A84.
- Da Silva, R., Milone, A. D. C., Rocha-Pinto, H. J. (2015). Homogeneous abundance analysis of FGK dwarf, subgiant, and giant stars with and without giant planets. *Astronomy Astrophysics*, 580, A24.
- Datson, J., Flynn, C., Portinari, L. (2015). Spectroscopic study of solar twins and analogues. *Astronomy Astrophysics*, 574, A124.
- do Nascimento Jr, J. D., García, R. A., Mathur, S., Anthony, F., Barnes, S. A., Meibom, S., ... Ceillier, T. (2014). Rotation periods and ages of solar analogs and solar twins revealed by the Kepler mission. *The Astrophysical Journal Letters*, 790(2), L23.
- Draine, B. T. (2003). Interstellar dust grains. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 41(1), 241-289.
- Duncan, D. K., Vaughan, A. H., Wilson, O. C., Preston, G. W., Frazer, J., Lanning, H., ... Mihalas, D. (1991). CA II H and K measurements made at Mount Wilson Observatory, 1966-1983. *Astrophysical Journal Supplement Series* (ISSN 0067-0049), vol. 76, May 1991, p. 383-430. Research supported by Carnegie Institution of Washington, Smithsonian Institution, and National Geographic Society., 76, 383-430.
- Edvardsson, B., Andersen, J., Gustafsson, B., Lambert, D. L., Nissen, P. E., Tomkin, J. (1993). The chemical evolution of the galactic disk-part one-analysis and results. *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 275, NO. 1/AUG (I), P. 101, 1993, 275, 101.
- Eggen, O. J. (1955). Magnitudes and colors for 833 Northern and Southern stars. *Astronomical Journal*, Vol. 60, p. 65, 60, 65.

- Eggen, O. J., Lynden-Bell, D., Sandage, A. R. (1962). Evidence from the motions of old stars that the Galaxy collapsed. *Astrophysical Journal*, vol. 136, p. 748, 136, 748.
- Eker, Z., Bakış, V., Bilir, S., Soyduğan, F., Steer, I., Soyduğan, E., Eker, M. (2018). Main-sequence effective temperatures from a revised mass–luminosity relation based on accurate parameters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 479(4), 5491–5503.
- Feuillet, D. K., Bovy, J., Holtzman, J., Girardi, L., MacDonald, N., Majewski, S. R., Nidever, D. L. (2016). Determining ages of APOGEE giants with known distances. *The Astrophysical Journal*, 817(1), 40.
- Freeman, K., Bland-Hawthorn, J. (2002). The new galaxy: Signatures of its formation. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 40(1), 487-537.
- Friça, A. C. S., Barbuy, B. (2017). Tracing the evolution of the Galactic bulge with chemodynamical modelling of alpha-elements. *Astronomy Astrophysics*, 598, A121.
- Fuhrmann, K., Pfeiffer, M., Frank, C., Reetz, J., Gehren, T. (1997). The surface gravities of cool dwarf stars revisited. *Astronomy and Astrophysics*, v. 323, p. 909-922, 323, 909-922.
- Fuhrmann, K. (1998). Nearby stars of the Galactic disk and halo. *Astronomy and Astrophysics*, v. 338, p. 161-183 (1998), 338, 161-183.
- Fuhrmann, K. (2004). Nearby stars of the Galactic disk and halo. III. *Astronomische Nachrichten: Astronomical Notes*, 325(1), 3-80.
- Fujimoto, Y., Inutsuka, S. I., Baba, J. (2023). Efficient radial migration by giant molecular clouds in the first several hundred Myr after the stellar birth. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 523(2), 3049-3068.
- Fukue, K., Matsunaga, N., Yamamoto, R., Kondo, S., Kobayashi, N., Ikeda, Y., ... Inno, L. (2015). Line-depth ratios in H-band spectra to determine effective temperatures of G-and K-type giants and supergiants. *The Astrophysical Journal*, 812(1), 64.

- Gaia İşbirliği, Brown, A. G. A., Vallenari, A., Prusti, T., de Bruijne, J. H. J., Babusiaux, C., ... Bailer-Jones, C. A. L. (2018). Gaia Data Release 2: Summary of the contents and survey properties. *Astronomy Astrophysics*, 616, A1. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833051>
- Gaia İşbirliği, Brown, A. G. A., Vallenari, A., Prusti, T., de Bruijne, J. H. J., Babusiaux, C., ... Bailer-Jones, C. A. L. (2020). Gaia Early Data Release 3: Summary of the contents and survey properties. *Astronomy Astrophysics*, 649, A1. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039657>
- Gaia İşbirliği. (2023). Gaia Data Release 3: Summary of the content and survey properties. *Astronomy Astrophysics*, 674, A1.
- Gallino, R., Arlandini, C., Busso, M., Lugaro, M., Travaglio, C., Straniero, O., ... Limongi, M. (1998). Evolution and nucleosynthesis in low-mass asymptotic giant branch stars. II. Neutron capture and the s-process. *The astrophysical journal*, 497(1), 388.
- Ghezzi, L., Cunha, K., Smith, V. V., de La Reza, R. (2010). Lithium abundances in a sample of planet-hosting dwarfs. *The Astrophysical Journal*, 724(1), 154.
- Gonzalez, G., Lambert, D. L. (1996). A Fine Abundance Analysis of Four Stars in the gamma Per Cluster-a Cautionary Tale. *Astronomical Journal* v. 111, p. 424, 111, 424.
- Gonzalez, G., Carlson, M. K., Tobin, R. W. (2010). Parent stars of extrasolar planets–X. Lithium abundances and $v \sin i$ revisited. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 403(3), 1368-1380.
- Gratton, R. G., Sneden, C. (1991). Abundances of elements of the Fe-group in metal-poor stars. *Astronomy and Astrophysics* (ISSN 0004-6361), vol. 241, no. 2, Jan. 1991, p. 501-525., 241, 501-525.
- Gratton, R. G., Carretta, E., Castelli, F. (1996). Abundances of light elements in metal-poor stars. I. Atmospheric parameters and a new T_{eff} scale. *arXiv preprint astro-ph/9603011*.

- Gratton, R. G., Carretta, E., Matteucci, F., Sneden, C. (2000). Abundances Of Light Elements In Metal-Poor Stars IV. Fe/O And Fe/Mg Ratios And The History Of Star Formation In The Solar Neighborhood.
- 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(4), 2148.
- Gray, D. F. (2005). The observation and analysis of stellar photospheres. Cambridge university press.
- Gray, R. O., Corbally, C. J., Garrison, R. F., McFadden, M. T., Bubar, E. J., McGahee, C. E., ... Knox, E. R. (2006). Contributions to the nearby stars (NStars) project: spectroscopy of stars earlier than M0 within 40 pc—the southern sample. *The Astronomical Journal*, 132(1), 161.
- Griv, E., Gedalin, M., Pietrukowicz, P., Majaess, D., Jiang, I. G. (2021). The Sun's distance from the Galactic Centre and mid-plane, and the Galactic old bulge's morphology: 715 VVV Type II Cepheids. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 502(3), 4194-4198.
- Güçtekin, S. T., Bilir, S., Karaali, S., Plevne, O., Ak, S. (2019). Vertical and radial metallicity gradients in high latitude galactic fields with SDSS. *Advances in Space Research*, 63(3), 1360-1373.
- Hayashi, C. (1961). Stellar evolution in early phases of gravitational contraction. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol. 13, 450-452 (1961), 13.
- Hayden, M. R., Bovy, J., Holtzman, J. A., Nidever, D. L., Bird, J. C., Weinberg, D. H., ... Zasowski, G. (2015). Chemical cartography with APOGEE: metallicity distribution functions and the chemical structure of the Milky Way disk. *The Astrophysical Journal*, 808(2), 132.
- Haywood, M., Di Matteo, P., Lehnert, M. D., Katz, D., Gómez, A. (2013). The age structure of stellar populations in the solar vicinity—Clues of a two-phase formation history of the Milky Way disk. *Astronomy Astrophysics*, 560,

A109.

- Haywood, M., Snaith, O., Lehnert, M. D., Di Matteo, P., Khoperskov, S. (2019). Revisiting long-standing puzzles of the Milky Way: the Sun and its vicinity as typical outer disk chemical evolution. *Astronomy Astrophysics*, 625, A105.
- Heiter, U., Luck, R. E. (2003). Abundance Analysis of Planetary Host Stars. I. Differential Iron Abundances. *The Astronomical Journal*, 126(4), 2015.
- Heiter, U., Jofré, P., Gustafsson, B., Korn, A. J., Soubiran, C., Thévenin, F. (2015). Gaia FGK benchmark stars: Effective temperatures and surface gravities. *Astronomy Astrophysics*, 582, A49.
- Helmi, A., Babusiaux, C., Koppelman, H. H., Massari, D., Veljanoski, J., Brown, A. G. (2018). The merger that led to the formation of the Milky Way's inner stellar halo and thick disk. *Nature*, 563(7729), 85-88.
- Helmi, A. (2020). Streams, substructures, and the early history of the Milky Way. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 58(1), 205-256.
- Henry, L. G., Lelevier, R., Levee, R. D. (1955). The early phases of stellar evolution. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 67(396), 154-160.
- Hirsch, L. A., Rosenthal, L., Fulton, B. J., Howard, A. W., Ciardi, D. R., Marcy, G. W., ... Macintosh, B. (2021). Understanding the impacts of stellar companions on planet formation and evolution: a survey of stellar and planetary companions within 25 pc. *The Astronomical Journal*, 161(3), 134.
- Holmberg, J., Nordstrom, B., Andersen, J. (2009). VizieR Online Data Catalog: Geneva-Copenhagen Survey of Solar neighbourhood III (Holmberg+, 2009). *VizieR Online Data Catalog*, V-130.
- Horta, D., Schiavon, R. P., Mackereth, J. T., Pfeffer, J., Mason, A. C., Kisku, S., ... Smith, V. V. (2021). Evidence from APOGEE for the presence of a major building block of the halo buried in the inner Galaxy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 500(1), 1385-1403.

- Horta, D., Schiavon, R. P., Mackereth, J. T., Weinberg, D. H., Hasselquist, S., Feuillet, D., ... Zasowski, G. (2023). The chemical characterization of halo substructure in the Milky Way based on APOGEE. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 520(4), 5671-5711.
- Indebetouw, R., Mathis, J. S., Babler, B. L., Meade, M. R., Watson, C., Whitney, B. A., ... Churchwell, E. (2005). The wavelength dependence of interstellar extinction from 1.25 to 8.0 μ m using GLIMPSE data. *The Astrophysical Journal*, 619(2), 931.
- Iwamoto, K., Brachwitz, F., Nomoto, K. I., Kishimoto, N., Umeda, H., Hix, W. R., Thielemann, F. K. (1999). Nucleosynthesis in Chandrasekhar Mass Models for Type Ia Supernovae and Constraints on Progenitor Systems and Burning-Front Propagation. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 125(2), 439.
- Jenkins, J. S., Jones, H. R. A., Tinney, C. G., Butler, R. P., McCarthy, C., Marcy, G. W., ... Penny, A. J. (2006). An activity catalogue of southern stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 372(1), 163-173.
- Jofré, P., Heiter, U., Soubiran, C., Blanco-Cuaresma, S., Masseron, T., Nordlander, T., ... Vallenari, A. (2015). Gaia FGK benchmark stars: abundances of α and iron-peak elements. *Astronomy & Astrophysics*, 582, A81.
- Johnson, D. R., Soderblom, D. R. (1987). Calculating galactic space velocities and their uncertainties, with an application to the Ursa Major group. *Astronomical Journal* (ISSN 0004-6256), vol. 93, April 1987, p. 864-867., 93, 864-867.
- Jovanovic, N., Schwab, C., Cvetojevic, N., Guyon, O., Martinache, F. (2016). Enhancing stellar spectroscopy with extreme adaptive optics and photonics. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 128(970), 121001.
- Käppeler, F., Gallino, R., Bisterzo, S., Aoki, W. (2011). The s process: Nuclear physics, stellar models, and observations. *Reviews of Modern Physics*, 83(1), 157-193.

- Karakas, A. I., Lattanzio, J. C. (2014). The Dawes review 2: nucleosynthesis and stellar yields of low-and intermediate-mass single stars. Publications of the Astronomical Society of Australia, 31, e030.
- Katz, D., Soubiran, C., Cayrel, R., Barbuy, B., Friel, E., Bienaymé, O., Perrin, M. N. (2011). Probing the Galactic thick disc vertical properties and interfaces. *Astronomy Astrophysics*, 525, A90.
- Keenan, P. C., McNeil, R. C. (1989). The Perkins catalog of revised MK types for the cooler stars. *Astrophysical Journal Supplement Series* (ISSN 0067-0049), vol. 71, Oct. 1989, p. 245-266., 71, 245-266.
- Khalatyan, A., Anders, F., Chiappini, C., Queiroz, A. B. A., Nepal, S., Dal Ponte, M., ... Ardèvol, J. (2024). Transferring spectroscopic stellar labels to 217 million Gaia DR3 XP stars with SHBoost. *Astronomy Astrophysics*, 691, A98.
- Kippenhahn, R., Weigert, A., Weiss, A. (2012). *Stellar Structure and Evolution* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-30304-3>
- Kobayashi, C., Umeda, H., Nomoto, K. I., Tominaga, N., Ohkubo, T. (2006). Galactic chemical evolution: carbon through zinc. *The Astrophysical Journal*, 653(2), 1145.
- Kobayashi, C., Ishigaki, M. N., Tominaga, N., Nomoto, K. I. (2014). The origin of low [Fe] ratios in extremely metal-poor stars. *The Astrophysical Journal Letters*, 785(1), L5.
- Kobayashi, C., Karakas, A. I., Lugaro, M. (2020). The origin of elements from carbon to uranium. *The Astrophysical Journal*, 900(2), 179.
- Kondo, S., Fukue, K., Matsunaga, N., Ikeda, Y., Taniguchi, D., Kobayashi, N., ... Tsujimoto, T. (2019). Fe i Lines in 0.91–1.33 μ m Spectra of Red Giants for Measuring the Microturbulence and Metallicities. *The Astrophysical Journal*, 875(2), 129.
- KURUCZ, R. L. (1993). *ATLAS9 Stellar Atmosphere Programs and 2km/s grid*. Kurucz CD-Rom, 13.

- Lada, C. J., Lada, E. A. (2003). Embedded clusters in molecular clouds. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 41(1), 57-115.
- Leggett, S. K. (1992). Infrared colors of low-mass stars. *Astrophysical Journal Supplement Series* (ISSN 0067-0049), vol. 82, no. 1, Sept. 1992, p. 351-394., 82, 351-394.
- Lehmann, C., Murphy, M. T., Liu, F., Flynn, C., Smith, D., Berke, D. A. (2023). Survey for Distant Solar Twins (SDST)–III. Identification of new solar twin and solar analogue stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 521(1), 148-159.
- Lind, K., Bergemann, M., Asplund, M. (2012). Non-LTE line formation of Fe in late-type stars—II. 1D spectroscopic stellar parameters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 427(1), 50-60.
- Linsky, J. L., Avrett, E. H. (1970). The solar H and K lines. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 82(485), 169.
- Liu, F., Asplund, M., Ramírez, I., Yong, D., Melendez, J. (2014). A high-precision chemical abundance analysis of the HAT-P-1 stellar binary: constraints on planet formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 442(1), L51-L55.
- Luck, R. E., Heiter, U. (2005). Stars within 15 parsecs: abundances for a northern sample. *The Astronomical Journal*, 129(2), 1063.
- Luck, R. E., Heiter, U. (2006). Dwarfs in the local region. *The Astronomical Journal*, 131(6), 3069.
- Luck, R. E. (2017). ABUNDANCES IN THE LOCAL REGION. II. F, G, AND K DWARFS AND SUBGIANTS. *The Astronomical Journal*, 153(1), 21.
- Luck, R. E. (2018). Abundances in the local region. III. Southern F, G, and K dwarfs. *The Astronomical Journal*, 155(3), 111.
- Ludwig, H. G., Freytag, B., Steffen, M. (1998). A calibration of the mixing-length for solar-type stars based on hydrodynamical simulations-I. Methodical aspects and results for solar metallicity. *arXiv preprint astro-ph/9811179*.

- Loewen, E.G., Popov, E. (1997). Diffraction gratings and applications. New York : M. Dekker, c1997.
- Magic, Z., Weiss, A., Asplund, M. (2015). The Stagger-grid: A grid of 3D stellar atmosphere models-III. The relation to mixing length convection theory. *Astronomy Astrophysics*, 573, A89.
- Mahdi, D., Soubiran, C., Blanco-Cuaresma, S., Chemin, L. (2016). Solar twins in the ELODIE archive. *Astronomy Astrophysics*, 587, A131.
- Maihara, T., Iwamuro, F., Hall, D. N., Cowie, L. L., Tokunaga, A. T., Pickles, A. J. (1993, October). OH airglow suppressor spectrograph: design and prospects. In *Infrared Detectors and Instrumentation* (Vol. 1946, pp. 581-586). SPIE.
- Majewski, S. R. (1993). Galactic structure surveys and the evolution of the Milky Way. In: *Annual review of astronomy and astrophysics*. Vol. 31 (A94-12726 02-90), p. 575-638., 31, 575-638.
- Majewski, S. R., Schiavon, R. P., Frinchaboy, P. M., Prieto, C. A., Barkhouser, R., Bizyaev, D., ... Zamora, O. (2017). The apache point observatory galactic evolution experiment (APOGEE). *The Astronomical Journal*, 154(3), 94.
- Maldonado, J., Eiroa, C., Villaver, E., Montesinos, B., Mora, A. (2012). Metallicity of solar-type stars with debris discs and planets. *Astronomy Astrophysics*, 541, A40.
- Maldonado, J., Eiroa, C., Villaver, E., Montesinos, B., Mora, A. (2015). Searching for signatures of planet formation in stars with circumstellar debris discs. *Astronomy Astrophysics*, 579, A20.
- Marışmak, M., Şahin, T. İ. M. U. R., Güney, F., Plevne, O., Bilir, S. (2024). Spectroscopic and dynamic orbital analyses of metal-poor and high proper-motion stars: I. HD 8724 and HD 195633. *Astronomische Nachrichten*, 345(6-7), e20240047.
- Marsakov, V. A., Shevelev, Y. G. (1995). Catalogue of ages, metallicities, orbital elements and other parameters for nearby F stars. *Bulletin d'Information du Centre de Donnees Stellaires*, Vol. 47, p. 13, 47, 13.

- Marsden, S. C., Petit, P., Jeffers, S. V., Morin, J., Fares, R., Reiners, A., ... BCool Collaboration. (2014). A BCool magnetic snapshot survey of solar-type stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 444(4), 3517-3536.
- Martos, G., Meléndez, J., Rathsam, A., Carvalho Silva, G. (2023). Metallicity and age effects on lithium depletion in solar analogues. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 522(3), 3217-3226.
- Mashonkina, L., Korn, A. J., Przybilla, N. (2007). A non-LTE study of neutral and singly-ionized calcium in late-type stars. *Astronomy Astrophysics*, 461(1), 261-275.
- Mashonkina, L., Gehren, T., Shi, J. R., Korn, A. J., Grupp, F. (2011). A non-LTE study of neutral and singly-ionized iron line spectra in 1D models of the Sun and selected late-type stars. *Astronomy Astrophysics*, 528, A87.
- Matteucci, F., Greggio, L. (1986). Relative roles of type I and II supernovae in the chemical enrichment of the interstellar gas. *Astronomy and Astrophysics* (ISSN 0004-6361), vol. 154, no. 1-2, Jan. 1986, p. 279-287., 154, 279-287.
- Matteucci, F., Brocato, E. (1990). Metallicity distribution and abundance ratios in the stars of the Galactic bulge. *Astrophysical Journal, Part 1* (ISSN 0004-637X), vol. 365, Dec. 20, 1990, p. 539-543., 365, 539-543.
- Matteucci, F., Renda, A., Pipino, A., Della Valle, M. (2003). Modelling the nova rate in galaxies. *Astronomy Astrophysics*, 405(1), 23-30.
- Mayor, M., Pepe, F., Queloz, D., ... Weilenmann, U. (2003). Setting new standards with HARPS. *The Messenger*, 114, 20.
- McWilliam, A. (1997). Abundance ratios and galactic chemical evolution. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 35(1), 503-556.
- McWilliam, A., Rich, R. M., Smecker-Hane, T. A. (2003). Constraints on the origin of manganese from the composition of the Sagittarius dwarf spheroidal galaxy and the Galactic bulge. *The Astrophysical Journal*, 592(1), L21.

- Meléndez, J., Barbuy, B. (1999). Oscillator Strengths and Damping Constants for Atomic Lines in the J and H Bands. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 124(2), 527.
- Meléndez, J., Bergemann, M., Cohen, J. G., Endl, M., Karakas, A. I., Ramirez, I., ... Asplund, M. (2012). The remarkable solar twin HIP 56948: a prime target in the quest for other Earths. *Astronomy & Astrophysics*, 543, A29.
- Meléndez, J., Bean, J. L., Bedell, M., Ramirez, I., Asplund, M., Dreizler, S., ... Freitas, F. (2015). Using Solar Twins to Explore the Planet-Star Connection with Unparalleled Precision. *The Messenger*, 161, 28.
- Meléndez, J. (2020). Lithium and beryllium in solar twins. *Astronomische Nachrichten*, 341(5), 493-496.
- Mena, E. D., Israelian, G., Hernández, J. G., Bond, J. C., Santos, N. C., Udry, S., Mayor, M. (2010). Chemical clues on the formation of planetary systems: C/O versus Mg/Si for HARPS GTO sample. *The Astrophysical Journal*, 725(2), 2349.
- Mena, E. D., Tsantaki, M., Adibekyan, V. Z., Sousa, S. G., Santos, N. C., Hernández, J. G., Israelian, G. (2017). Chemical abundances of 1111 FGK stars from the HARPS GTO planet search program-II. Cu, Zn, Sr, Y, Zr, Ba, Ce, Nd, and Eu. *Astronomy & Astrophysics*, 606, A94.
- Mihalas, D., Binney, J. (1981). *Galactic astronomy. Structure and kinematics*. San Francisco: Freeman.
- Minchev, I., Chiappini, C., Martig, M. (2013). Chemodynamical evolution of the Milky Way disk-I. The solar vicinity. *Astronomy & Astrophysics*, 558, A9.
- Mishenina, T. V., Soubiran, C., Kovtyukh, V. V., Korotin, S. A. (2004). On the correlation of elemental abundances with kinematics among galactic disk stars. *Astronomy & Astrophysics*, 418(2), 551-562.
- Mishenina, T. V., Pignatari, M., Korotin, S. A., Soubiran, C., Charbonnel, C., Thielemann, F. K., ... Basak, N. Y. (2013). Abundances of

- neutron-capture elements in stars of the Galactic disk substructures. *Astronomy Astrophysics*, 552, A128.
- Miyamoto, M., Nagai, R. (1975). Three-dimensional models for the distribution of mass in galaxies. *Astronomical Society of Japan, Publications*, vol. 27, no. 4, 1975, p. 533-543., 27, 533-543.
- Murphy, T., Bell, M. E., Kaplan, D. L., Gaensler, B. M., Offringa, A. R., Lenc, E., ... Williams, C. L. (2015). Limits on low-frequency radio emission from southern exoplanets with the Murchison Widefield Array. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 446(3), 2560-2565.
- Nave, I. G., Johansson, S., Learner, R. C. M., Thorne, A. P., Brault, J. W. (1994). A new multiplet table for Fe. arXiv preprint astro-ph/9404049.
- Netopil, M. (2017). Metallicity calibrations for dwarf stars and giants in the Geneva photometric system. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 469(3), 3042-3055.
- Nishiyama, S., Nagata, T., Kusakabe, N., Matsunaga, N., Naoi, T., Kato, D., ... Sato, S. (2006). Interstellar extinction law in the J, H, and Ks bands toward the Galactic Center. *The Astrophysical Journal*, 638(2), 839.
- Nissen, P. E., Schuster, W. J. (2010). Two distinct halo populations in the solar neighborhood-Evidence from stellar abundance ratios and kinematics. *Astronomy Astrophysics*, 511, L10.
- Nissen, P. E., Chen, Y. Q., Carigi, L., Schuster, W. J., Zhao, G. (2014). Carbon and oxygen abundances in stellar populations. *Astronomy Astrophysics*, 568, A25.
- Nissen, P. E. (2015). High-precision abundances of elements in solar twin stars-Trends with stellar age and elemental condensation temperature. *Astronomy Astrophysics*, 579, A52.
- Nomoto, K. I., Kobayashi, C., Tominaga, N. (2013). Nucleosynthesis in stars and the chemical enrichment of galaxies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 51(1), 457-509.

- NORRIS, J., BESSELL, M., PICKLES, A. (1985). Subject headings: stars: abundances–stars: Population II–stars: stellar dynamics–stars: weak-line. THE ASTROPHYSICAL JOURNAL SUPPLEMENT SERIES, 58, 463-492.
- Oja, T. (1985). Photoelectric photometry of stars near the north Galactic pole. II. Astronomy and Astrophysics Supplement Series (ISSN 0365-0138), vol. 61, Aug. 1985, p. 331-339., 61, 331-339.
- Önehag, A., Gustafsson, B., Eriksson, K., Edvardsson, B. (2009). Calibration of Strömgren uvby-H photometry for late-type stars—a model atmosphere approach. Astronomy Astrophysics, 498(2), 527-542.
- Paegert, M., Stassun, K. G., Collins, K. A., Pepper, J., Torres, G., Jenkins, J., ... Latham, D. W. (2021). TESS input catalog versions 8.1 and 8.2: Phantoms in the 8.0 catalog and how to handle them. arXiv preprint arXiv:2108.04778.
- Pagel, B. E. J., Patchett, B. E. (1975). Metal abundances in nearby stars and the chemical history of the solar neighbourhood. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 172(1), 13-40.
- Paletou, F., Böhm, T., Watson, V., Trouilhet, J. F. (2015). Inversion of stellar fundamental parameters from ESPaDOnS and Narval high-resolution spectra. Astronomy Astrophysics, 573, A67.
- Park, S., Lee, J. E., Kang, W., Lee, S. G., Chun, M. Y., Kim, K. M., ... Jaffe, D. T. (2018). IGRINS Spectral Library. The Astrophysical Journal Supplement Series, 238(2), 29.
- Pepe, F., Molaro, P., Cristiani, S., Rebolo, R., Santos, N. C., Dekker, H., ... Zapatero Osorio, M. R. (2014). ESPRESSO: The next European exoplanet hunter. Astronomische Nachrichten, 335(1), 8-20.
- Pepe, F., Cristiani, S., Rebolo, R., Santos, N. C., Dekker, H., Cabral, A., ... Zanutta, A. (2021). ESPRESSO at VLT-On-sky performance and first results. Astronomy Astrophysics, 645, A96.

- Perrin, M. N., Cayrel de Strobel, G., Dennefeld, M. (1988). High S/N detailed spectral analysis of four G and K dwarfs within 10 PC of the sun. *Astronomy and Astrophysics* (ISSN 0004-6361), vol. 191, no. 2, Feb. 1988, p. 237-247., 191, 237-247.
- Plevne, O., Taş, Ö. Ö., Bilir, S., Seabroke, G. M. (2020). Multiwavelength Absolute Magnitudes and Colors of Red Clump Stars in the Gaia Era. *The Astrophysical Journal*, 893(2), 108.
- Prieto, C. A., Lambert, D. L. (1999). Fundamental parameters of nearby stars from the comparison with evolutionary calculations: masses, radii and effective temperatures. arXiv preprint astro-ph/9911002.
- Prieto, C. A., Barklem, P. S., Lambert, D. L., Cunha, K. (2004). SN: A spectroscopic survey of stars in the solar neighborhood-The Nearest 15 pc. *Astronomy Astrophysics*, 420(1), 183-205.
- Prochaska, J. X., McWilliam, A. (2000). On the Perils of Hyperfine Splitting: A Reanalysis of Mn and Sc Abundance Trends. *The Astrophysical Journal*, 537(1), L57.
- Prugniel, P., Vauglin, I., Koleva, M. (2011). The atmospheric parameters and spectral interpolator for the MILES stars. *Astronomy Astrophysics*, 531, A165.
- Ramírez, I., Prieto, C. A., Lambert, D. L. (2007). Oxygen abundances in nearby stars-Clues to the formation and evolution of the galactic disk. *Astronomy Astrophysics*, 465(1), 271-289.
- Ramírez, I., Melendez, J., Asplund, M. (2009). Accurate abundance patterns of solar twins and analogs-Does the anomalous solar chemical composition come from planet formation?. *Astronomy Astrophysics*, 508(1), L17-L20.
- Ramírez, I., Fish, J. R., Lambert, D. L., Prieto, C. A. (2012). Lithium abundances in nearby FGK dwarf and subgiant stars: internal destruction, galactic chemical evolution, and exoplanets. *The Astrophysical Journal*, 756(1), 46.

- Ramírez, I., Prieto, C. A., 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(1), 78.
- Ramírez, I., Bajkova, A. T., Bobylev, V. V., Roederer, I. U., Lambert, D. L., Endl, M., ... Wittenmyer, R. A. (2014). Elemental abundances of solar sibling candidates. *The Astrophysical Journal*, 787(2), 154.
- Rayner, J. T., Cushing, M. C., Vacca, W. D. (2009). The infrared telescope facility (IRTF) spectral library: cool stars. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 185(2), 289.
- Reddy, B. E., Lambert, D. L., Prieto, C. A. (2006). Elemental abundance survey of the Galactic thick disc. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 367(4), 1329-1366.
- Reddy, B. E., Lambert, D. L., Prieto, C. A. (2006). Elemental abundance survey of the Galactic thick disc. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 367(4), 1329-1366. ISO 690
- Reid, M. J. (1993). The distance to the center of the Galaxy. In: *Annual review of astronomy and astrophysics*. Vol. 31 (A94-12726 02-90), p. 345-372., 31, 345-372.
- Rich, E. A., Wisniewski, J. P., McElwain, M. W., Hashimoto, J., Kudo, T., Kusakabe, N., ... Tamura, M. (2017). The fundamental stellar parameters of FGK stars in the SEEDS survey Norman, OK 73071, USA. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 472(2), 1736-1752.
- Rocha-Pinto, H. J., Maciel, W. J. (1996). The metallicity distribution of G dwarfs in the solar neighbourhood. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 279(2), 447-458.
- Roederer, I. U., Preston, G. W., Thompson, I. B., Shectman, S. A., Sneden, C., Burley, G. S., Kelson, D. D. (2014). A search for stars of very low metal abundance. VI. Detailed abundances of 313 metal-poor stars. *The Astronomical Journal*, 147(6), 136.

- Rolfs, C. E., Rodney, W. S. (1988). *Cauldrons in the cosmos: Nuclear astrophysics*. University of Chicago press.
- Rutten, R. J. (1995). *Radiative transfer in stellar atmospheres* (pp. 053106-21). Utrecht: Sterrekundig Instituut Utrecht.
- Ryde, N., Gustafsson, B., Edvardsson, B., Melendez, J., Alves-Brito, A., Asplund, M., ... Zoccali, M. (2010). Chemical abundances of 11 bulge stars from high-resolution, near-IR spectra. *Astronomy Astrophysics*, 509, A20.
- Ryde, N., Gustafsson, B., Edvardsson, B., Melendez, J., Alves-Brito, A., Asplund, M., ... Zoccali, M. (2010). Chemical abundances of 11 bulge stars from high-resolution, near-IR spectra. *Astronomy Astrophysics*, 509, A20.
- Salaris, M., Cassisi, S. (2005). *Evolution of stars and stellar populations*. John Wiley Sons.
- Santos, N. C., Mayor, M., Naef, D., Pepe, F., Queloz, D., Udry, S., Blecha, A. (2000). The CORALIE survey for Southern extra-solar planets. IV. Intrinsic stellar limitations to planet searches with radial-velocity techniques. *Astronomy and Astrophysics*, v. 361, p. 265-272 (2000), 361, 265-272.
- Santos, N. C., Israelian, G., Mayor, M. (2001). The metal-rich nature of stars with planets. *Astronomy Astrophysics*, 373(3), 1019-1031.
- Santos, N. C., Israelian, G., Mayor, M. (2004). Spectroscopic [Fe/H] for 98 extra-solar planet-host stars-Exploring the probability of planet formation. *Astronomy Astrophysics*, 415(3), 1153-1166.
- Santos, N. C., Israelian, G., Mayor, M., Bento, J. P., Almeida, P. C., Sousa, S. G., Ecuivillon, A. (2005). Spectroscopic metallicities for planet-host stars: Extending the samples. *Astronomy Astrophysics*, 437(3), 1127-1133.
- Schaller, G., Schaerer, D., Meynet, G., Maeder, A. (1992). New grids of stellar models from 0.8 to 120 solar masses at $Z=0.020$ and $Z=0.001$. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series* (ISSN 0365-0138), vol. 96, no. 2, p. 269-331., 96, 269-331.

- Schirbel, L., Meléndez, J., Karakas, A. I., Ramírez, I., Castro, M., Faria, M. A., ... Do Nascimento, J. D. (2015). HIP 10725: The first solar twin/analogue field blue straggler. *Astronomy Astrophysics*, 584, A116.
- Schiavon, R. P. (2007). Population synthesis in the blue. IV. Accurate model predictions for lick indices and UBV colors in single stellar populations. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 171(1), 146.
- Schönrich, R., Binney, J. (2009). Chemical evolution with radial mixing. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 396(1), 203-222.
- Searle, L., Zinn, R. (1978). Compositions of halo clusters and the formation of the galactic halo. *The Astrophysical Journal*, 225, 357-379.
- Seifahrt, A., Käufel, H. U., Zängl, G., Bean, J. L., Richter, M. J., Siebenmorgen, R. (2010). Synthesising, using, and correcting for telluric features in high-resolution astronomical spectra-A near-infrared case study using CRIRES. *Astronomy Astrophysics*, 524, A11.
- Seitzzahl, I. R., Ciaraldi-Schoolmann, F., Röpke, F. K., Fink, M., Hillebrandt, W., Kromer, M., ... Taubenberger, S. (2013). Three-dimensional delayed-detonation models with nucleosynthesis for Type Ia supernovae. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 429(2), 1156-1172.
- Sellwood, J. A., Binney, J. J. (2002). Radial mixing in galactic discs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 336(3), 785-796.
- Sharma, K., Kembhavi, A., Kembhavi, A., Sivarani, T., Abraham, S., Vaghmare, K. (2020). Application of convolutional neural networks for stellar spectral classification. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 491(2), 2280-2300.
- Sharma, S., Hayden, M. R., Bland-Hawthorn, J., Zwitter, T., Freeman, K. C., Kos, J. (2020). The GALAH Survey: stellar parameters and chemical abundances from DR2. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 491(3), 4365-4400.

- Silva Aguirre, V., Bojsen-Hansen, M., Slumstrup, D., Casagrande, L., Kawata, D., Ciucă, I., ... Yu, J. (2018). Confirming chemical clocks: asteroseismic age dissection of the Milky Way disc (s). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 475(4), 5487-5500.
- Silva, A. C., Mena, E. D., Tsantaki, M. (2020). Chemical abundances of 1111 FGK stars from the HARPS-GTO planet search sample-III. Sulfur. *Astronomy Astrophysics*, 634, A136.
- Simmerer, J., Sneden, C., Cowan, J. J., Collier, J., Woolf, V. M., Lawler, J. E. (2004). The Rise of the s-Process in the Galaxy. *The Astrophysical Journal*, 617(2), 1091.
- Sitnova, T., Zhao, G., Mashonkina, L., Chen, Y., Liu, F., Pakhomov, Y., ... Zhang, H. W. (2015). Systematic non-LTE study of the 2.6[Fe/H] 0.2 F and G dwarfs in the solar neighborhood. I. Stellar atmosphere parameters. *The Astrophysical Journal*, 808(2), 148.
- Skúladóttir, Á., Hansen, C. J., Salvadori, S., Choplin, A. (2019). Neutron-capture elements in dwarf galaxies-I. Chemical clocks and the short timescale of the r-process. *Astronomy Astrophysics*, 631, A171.
- Smith, V. V., Cunha, K., Shetrone, M. D., Meszaros, S., Prieto, C. A., Bizyaev, D., ... Johnson, J. A. (2013). Chemical abundances in field red giants from high-resolution H-band spectra using the APOGEE spectral linelist. *The Astrophysical Journal*, 765(1), 16.
- Sneden, C. A. (1973). PhD thesis, Univ. Texas at Austin (Doctoral dissertation).
- Sneden, C., Cowan, J. J., Lawler, J. E., Ivans, I. I., Burles, S., Beers, T. C., ... Kratz, K. L. (2003). The extremely metal-poor, neutron capture-rich star CS 22892-052: a comprehensive abundance analysis. *The Astrophysical Journal*, 591(2), 936.
- Sneden, C., Cowan, J. J., Gallino, R. (2008). Neutron-capture elements in the early galaxy. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 46(1), 241-288.

- Snedden, C., Cowan, J. J., Kobayashi, C., Pignatari, M., Lawler, J. E., Den Hartog, E. A., Wood, M. P. (2016). Iron-group abundances in the metal-poor main-sequence turnoff star HD 84937. *The Astrophysical Journal*, 817(1), 53.
- Soderblom, D. R., King, J. R., Henry, T. J. (1998). High-Resolution Spectroscopy of Some Very Active Southern Stars. *The Astronomical Journal*, 116(1), 396.
- Song, N., Alexeeva, S., Sitnova, T., Wang, L., Grupp, F., Zhao, G. (2020). Impact of the convective mixing-length parameter on stellar metallicity. *Astronomy Astrophysics*, 635, A176.
- Soto, M. G., Jenkins, J. S. (2018). Spectroscopic Parameters and atmospheric Chemicals of Stars (SPECIES)-I. Code description and dwarf stars catalogue. *Astronomy Astrophysics*, 615, A76.
- Soubiran, C., Girard, P. (2005). Abundance trends in kinematical groups of the Milky Way's disk. *Astronomy Astrophysics*, 438(1), 139-151.
- Soubiran, C., Bienaymé, O., Mishenina, T. V., Kovtyukh, V. V. (2008). Vertical distribution of Galactic disk stars-IV. AMR and AVR from clump giants. *Astronomy Astrophysics*, 480(1), 91-101.
- Souto, D., Cunha, K., Smith, V., Prieto, C. A., Pinsonneault, M., Zamora, O., ... Geisler, D. (2016). Chemical abundances in a sample of red giants in the open cluster NGC 2420 from APOGEE. *The Astrophysical Journal*, 830(1), 35.
- Sousa, S. G., Santos, N. C., Mayor, M., Udry, S., Casagrande, L., Israelian, G., ... Monteiro, M. J. P. F. G. (2008). Spectroscopic parameters for 451 stars in the HARPS-GTO planet search program-stellar [Fe/H] and the frequency of exo-neptunes. *Astronomy Astrophysics*, 487(1), 373-381.
- Sousa, S. G., Adibekyan, V., Delgado-Mena, E., Santos, N. C., Andersen, D. T., Ferreira, A. C. S., ... Santerne, A. (2018). SWEET-Cat updated-New homogenous spectroscopic parameters. *Astronomy Astrophysics*, 620, A58.

- Spina, L., Meléndez, J., Karakas, A. I., Ramirez, I., Monroe, T. R., Asplund, M., Yong, D. (2016). Nucleosynthetic history of elements in the Galactic disk-[X/Fe]–age relations from high-precision spectroscopy. *Astronomy Astrophysics*, 593, A125.
- Stassun, K. G., Collins, K. A., Gaudi, B. S. (2017). Accurate empirical radii and masses of planets and their host stars with Gaia parallaxes. *The Astronomical Journal*, 153(3), 136.
- Suárez-Andrés, L., Israelian, G., Hernández, J. G., Adibekyan, V. Z., Mena, E. D., Santos, N. C., Sousa, S. G. (2017). CNO behaviour in planet-harboring stars-II. Carbon abundances in stars with and without planets using the CH band. *Astronomy Astrophysics*, 599, A96.
- Şahin, T., Lambert, D. L. (2009). High-resolution optical spectroscopy of a newly discovered post-AGB star with a surprising metallicity in the globular cluster M79. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 398(4), 1730-1741.
- Şahin, T. (2017). LIME: Semiautomated line measurement and identification from stellar spectra. *Turkish Journal of Physics*, 41(4), 367-376.
- Şahin, T., Bilir, S. (2020). On the Origin of Metal-poor Stars in the Solar Neighborhood. *The Astrophysical Journal*, 899(1), 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. *Physics and Astronomy Reports*, 1(2), 54-64.
- Şahin, T., Güney, F., Şentürk, S. A., Çınar, N., Marışmak, M. (2024). An Updated Line List for Spectroscopic Investigation of G Stars-II: Refined Solar Abundances via Extended Wavelength Coverage to 10,000 Å. *Physics and Astronomy Reports*, 2(2), 65-82.
- Şentürk, S. A., Şahin, T., Güney, F., Bilir, S., Marışmak, M. (2024). Near-infrared Spectroscopy of the Sun and Solar Analog Star HD 76151: Compiling an

- Extensive Line List in the Y, J, H, and K Bands. *The Astrophysical Journal*, 976(2), 175.
- Tabernero, H. M., Montes, D., Hernández, J. G. (2012). Chemically tagging the Hyades Supercluster-A homogeneous sample of F6-K4 kinematically selected northern stars. *Astronomy Astrophysics*, 547, A13.
- Takeda, Y., Ohkubo, M., Sato, B. E., Kambe, E., Sadakane, K. (2005). Spectroscopic Study on the Atmospheric Parameters of Nearby F–K Dwarfs and Subgiants. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 57(1), 27-43.
- Takeda, Y., Kawanomoto, S., Honda, S., Ando, H., Sakurai, T. (2007). Behavior of Li abundances in solar-analog stars-Evidence for line-width dependence. *Astronomy Astrophysics*, 468(2), 663-677.
- Thevenin, F. (1998). VizieR Online Data Catalog: Chemical Abundances in Late-Type Stars (Thevenin, 1998). *VizieR Online Data Catalog*, 3193, III-193.
- Thielemann, F. K., Eichler, M., Panov, I. V., Wehmeyer, B. (2017). Neutron star mergers and nucleosynthesis of heavy elements. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 67(1), 253-274.
- Timmes, F. X., Woosley, S. E., Weaver, T. A. (1995). Galactic chemical evolution: Hydrogen through zinc. *Astrophysical Journal Supplement Series* (ISSN 0067-0049), vol. 98, no. 2, p. 617-658, 98, 617-658.
- Tinsley, B. M. (1979). Stellar lifetimes and abundance ratios in chemical evolution. *Astrophysical Journal*, Part 1, vol. 229, May 1, 1979, p. 1046-1056. Research supported by the Alfred P. Sloan Foundation, 229, 1046-1056.
- Tominaga, N., Umeda, H., Nomoto, K. I. (2007). Supernova Nucleosynthesis in Population III 13-50 M Stars and Abundance Patterns of Extremely Metal-poor Stars. *The Astrophysical Journal*, 660(1), 516.
- Tomkin, J., Woolf, V. M., Lambert, D. L., Lemke, M. (1995). Carbon in Field F and G Disk Dwarfs. *Astronomical Journal* v. 109, p. 2204, 109, 2204.

- Travaglio, C., Galli, D., Gallino, R., Busso, M., Ferrini, F., Straniero, O. (1999). Galactic chemical evolution of heavy elements: from barium to europium. *The Astrophysical Journal*, 521(2), 691.
- Tsantaki, M., Sousa, S. G., Adibekyan, V. Z., Santos, N. C., Mortier, A., Israelian, G. (2013). Deriving precise parameters for cool solar-type stars-Optimizing the iron line list. *Astronomy Astrophysics*, 555, A150.
- Tull, R. G., MacQueen, P. J., Sneden, C., Lambert, D. L. (1995). The high-resolution cross-dispersed echelle white pupil spectrometer of the McDonald Observatory 2.7-m telescope. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 107(709), 251.
- Valenti, J. A., Fischer, D. A. (2005). Spectroscopic properties of cool stars (SPOCS). I. 1040 F, G, and K dwarfs from Keck, Lick, and AAT planet search programs. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 159(1), 141.
- Venn, K. A., Irwin, M., Shetrone, M. D., Tout, C. A., Hill, V., Tolstoy, E. (2004). Stellar chemical signatures and hierarchical galaxy formation. *The Astronomical Journal*, 128(3), 1177.
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., ... Van Mulbregt, P. (2020). SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature methods*, 17(3), 261-272.
- Vogt, S. S., Wittenmyer, R. A., Butler, R. P., O'Toole, S., Henry, G. W., Rivera, E. J., ... Batygin, K. (2009). A super-Earth and two Neptunes orbiting the nearby sun-like star 61 Virginis. *The Astrophysical Journal*, 708(2), 1366.
- Wielen, R., Fuchs, B., Dettbarn, C. (1996). On the birth-place of the Sun and the places of formation of other nearby stars. *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 314, p. 438, 314, 438.
- Wittenmyer, R. A., Errico, A., Holt, T. R., Horner, J., Harada, C. K., Kane, S. R., ... Fetherolf, T. (2025). Optimizing radial velocity detection limits for Southern Habitable Worlds Observatory targets. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 539(1), 457-462.

- Woosley, S. E., Weaver, T. A. (1995). The evolution and explosion of massive Stars II: Explosive hydrodynamics and nucleosynthesis (No. UCRL-ID-122106). Lawrence Livermore National Lab.(LLNL), Livermore, CA (United States).
- Wu, Y., Singh, H. P., Prugniel, P., Gupta, R., Koleva, M. (2011). Coudé-feed stellar spectral library–atmospheric parameters. *Astronomy Astrophysics*, 525, A71.
- Wylie-de Boer, E., Freeman, K., Williams, M. (2010). Evidence of tidal debris from Cen in the Kapteyn group. *The Astronomical Journal*, 139(2), 636.
- Wyse, R. F., Gilmore, G. (1995). Chemistry and kinematics in the solar neighborhood: Implications for stellar populations and for galaxy evolution. arXiv preprint astro-ph/9509007.
- Yee, S. W., Petigura, E. A., Von Braun, K. (2017). Precision stellar characterization of FGKM stars using an empirical spectral library. *The Astrophysical Journal*, 836(1), 77.
- Yolalan, G., Şahin, T., Bilir, S., Plevne, O. (2025). Stellar Ancestry Unlocked: Chemical and Orbital Clues Link Metal Poor Stars to Globular Clusters and the Galaxy's Thick Disk. *The Astronomical Journal*, arXiv preprint astro-ph/2506.10400.
- Yuk, I. S., Jaffe, D. T., Barnes, S., Chun, M. Y., Park, C., Lee, S., ... Gully-Santiago, M. (2010, July). Preliminary design of IGRINS (Immersion GRating INfrared Spectrograph). In *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III* (Vol. 7735, pp. 653-662). SPIE.
- Zakhozaj, V. A. (1979). Nearest stars. *Vestnik Khar'kovskogo Universiteta*, 190, 52-77
- Zhao, G., Mashonkina, L., Yan, H. L., Alexeeva, S., Kobayashi, C., Pakhomov, Y., ... Zhai, M. (2016). Systematic non-LTE study of the 2.6[Fe/H] 0.2 F and G dwarfs in the solar neighborhood. II. Abundance patterns from Li to Eu. *The Astrophysical Journal*, 833(2), 225.

Zwart, S. F. P. (2009). The lost siblings of the Sun. The Astrophysical Journal, 696(1), L13



7. EKLER

EK.1. Yeni Çizgi Listesinin Oluşturulması İçin Genişletilmiş Literatür İncelemesi

Bu bölümde, çeşitli yayınlardan ek atomik çizgileri belirleyip analize dahil edebilmek amacıyla kapsamlı bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. APOGEE DR17 (Abdurro'uf vd. 2022) çalışmasında tanımlanan, 15 000–17 007 Å dalga boyu aralığındaki ortak atomik geçişlerin bir alt kümesi, çizgi listemize dahil edilerek Tablo EK.3.'te sunulmuştur. α -elementlerinin bolluk analizinde, yine Tablo EK.3.'te ayrıntılı biçimde açıklandığı üzere *Y*-, *J*-, *H*- ve *K*-bantlarını kapsayan geniş kapsamlı bir çizgi listesi kullanılmıştır. Benzer şekilde, Tablo EK.3.–EK.9., *Y*- ile *K*-bantları boyunca demir çizgileri için ayrıntılı çizgi listelerini içermektedir. Literatürden derlenen model atmosfer parametreleri, α -element bollukları, HD 76151 yıldızına ait temel parametreler ise Tablo EK.1.'de ve HD 115617 yıldızına ait temel parametreler ise Tablo EK.2.'de özetlenmiştir.

EK.1.1. J. Meléndez ve B. Barbuy (1999):

J. Meléndez ve B. Barbuy (1999) tarafından 1.00–1.79 μm dalga boyu aralığında bildirilen 2218 tayf çizgisinin incelenmesi sonucunda, bu çalışmayla ortak olan toplam 185 Fe I ve 6 Fe II çizgisi tespit edilmiştir. Ortak Fe I çizgileri için osilatör şiddeti ($\log gf$) farkı ortalama olarak 0.016 ± 0.084 dex, Fe II çizgileri için ise 0.000 ± 0.074 dex olarak hesaplanmıştır.

İki çalışma arasında karşılaştırılan iki Mg I çizgisinin $\log gf$ değerlerinin birebir aynı olduğu bulunmuştur. Ayrıca, 25 Si I çizgisi için hesaplanan $\log gf$ farkı 0.041 ± 0.090 dex, 8 Ti I çizgisi için ise ortalama fark 0.066 ± 0.124 dex olarak belirlenmiştir.

Meléndez ve Barbuy (1999) çalışmasıyla karşılaştırıldığında, bu çalışmada aynı dalga boyu aralığında (1.00–1.79 μm) 15 ek geçiş (4 Fe I, 9 Fe II, 1 Ti II ve 1 Si I) rapor edilmiştir. Öte yandan, Meléndez ve Barbuy (1999) tarafından bildirilen ancak spektral olarak *kaynaşık* (blended) olduğu belirlenen bazı çizgiler, bu çalışmaya dahil edilmemiştir. Örneğin, 6.31 eV alt uyarılma potansiyeline sahip olan ve 15 246.49 Å dalga boyunda yer alan bir Fe I çizgisi, aynı dalga boyundaki (4.14 eV) başka bir Fe I çizgisiyle

örtüştüğünden analiz dışında bırakılmıştır.

EK.1.2. J. M. Borrero ve diğerleri (2003):

J. M. Borrero et al. (2003) tarafından yayımlanan çizgi listesi, 9 862 Å ile 15 563 Å dalga boyu aralığında toplam 83 tayf çizgisi içermektedir. Bu çalışma ile ortak olarak tespit edilen 27 Fe I çizgisi için hesaplanan ortalama osilatör şiddeti ($\log gf$) farkı -0.079 ± 0.060 dex olarak bulunmuştur.

Ayrıca, her iki çalışmada da ortak olan 5 Si I, 3 Ca I ve 4 Ti I çizgisi için hesaplanan ortalama $\log gf$ farklarının tümü 0.1 dex'in altında kalmaktadır.

EK.1.3. J. T. Rayner ve diğerleri (2009):

J. T. Rayner ve diğerleri (2009) ile karşılaştırıldığında, bu çalışmada 15 ortak çizgimiz vardır. Bu 15 çizgi, Güneş spektrumunda güçlü metal çizgileri olarak listelenmiştir. Atomik veri bildirmedi.

EK.1.4. N. Ryde ve diğerleri (2010):

N. Ryde et al. (2010), 15 324–15 699 Å dalga boyu aralığında 12 farklı element türüne ait toplam 104 tayf çizgisi rapor etmiştir. Bu çalışma ile ortak olan 11 Fe I çizgisi üzerinden hesaplanan ortalama osilatör şiddeti ($\log gf$) farkı -0.034 ± 0.062 dex olarak bulunmuştur. Ayrıca, ortak olarak belirlenen bir Si I ve iki Ti I çizgisi için $\log gf$ farkları sırası ile 0.040 dex ve -0.185 ± 0.145 dex olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışmada oluşturulan çizgi listesi kapsamında, Ryde et al. (2010) tarafından belirtilen dalga boyu sınırları içinde kalan 15,323.55–15,698.98 Å aralığında dört Fe I ve üç Fe II olmak üzere toplam yedi ek geçiş tanımlanmıştır.

EK.1.5. V. V. Smith ve ark. (2013):

Bu çalışma, V.V. Smith ve ark. (2013) tarafından yürütülen çalışma ile karşılaştırıldığında, 15159–16828 Å dalga boyu aralığında bir Si I, iki Ti I ve üç Fe I olmak üzere toplam altı ortak geçişi ortaya koymaktadır. İlgili çalışma, aynı dalga boyu aralığında 13 tür için 53 çizgi bildirmiştir. Üç ortak demir çizgisi için ortalama $\log gf$ farkı -0.063 ± 0.049 dex iken, ortak silikon ve titanyum çizgileri için ortalama $\log gf$ farkı sırasıyla -0.155 dex ve

-0.178 ± 0.181 dex'tir. Dahası, bu çalışma aynı dalga boyu aralığında ek 65 Fe I çizgisi ve yedi Fe II çizgisi bildirirken, V. V. Smith ve ark. (2013) iyonize demir, kalsiyum veya titanyum çizgileri bildirmedi.

EK.1.6. M. Afsar ve diğerleri (2016, 2018):

Bu çalışmada, H ve K bantlarındaki element bolluklarını belirlemek amacıyla, optik tayftan elde edilen model atmosfer parametreleri kullanılmıştır. IGRINS tayf aralığında Mg elementi için 22 808.03 Å, 17 108.63 Å, 15 765.84 Å, 15 748.99 Å, 15 740.71 Å ve 15 047.71 Å dalga boylarında toplam altı geçiş; Si elementi için ise 13 geçiş (21 354.26 Å ile 15 888.44 Å aralığında) listelenmiştir. Çizgi listemizin, M. Afşar et al. (2016) tarafından kullanılan geçişlerle karşılaştırılması sonucunda, bolluk analizinde iki çalışma arasında herhangi bir ortak geçiş bulunmamıştır.

Ancak, aynı spektral bölgede eşdeğer genişlik (*EW*) analizi için uygun olan 15 127.91 Å, 15 361.16 Å, 20 296.36 Å ve 20 343.84 Å dalga boylarında dört ek geçiş tespit edilmiştir. Bu geçişler, M. Afşar et al. (2016) tarafından Ti geçişi rapor edilmeyen H ve K bantlarını da kapsamaktadır. Aynı bant aralığında ek olarak 15 543.78 Å'da bir Ti I ve 15 873.84 Å'da bir Ti II çizgisi de listeye dahil edilmiştir. Öte yandan, M. Afşar et al. (2016) tarafından listelenen Fe geçişleri, tayfin optik bölgesinde konumlanmaktadır.

M. Afşar et al. (2016, 2018), H ve K bantlarındaki bolluk analizlerinde optik tayftan elde edilen model atmosfer parametrelerini kullanmış ve IGRINS tayf bölgesinde 27 Fe I geçişi rapor etmiştir. Bu çalışmada, bu çizgilerden 17 tanesiyle ortaklık saptanmıştır. Ortak Fe I çizgileri için hesaplanan ortalama $\log gf$ farkı -0.015 ± 0.074 dex'tir. Ayrıca, Fe bollukları spektrum sentezi yöntemiyle belirlenmiştir.

Bu çalışmada ayrıca dört ortak Ti geçişi (üç Ti I ve bir Ti II) analiz edilmiştir. Ortak Ti I çizgileri için ortalama $\log gf$ farkı -0.050 ± 0.104 dex, tek ortak Ti II çizgisi için ise fark -0.05 dex olarak bulunmuştur. Hazırlanan yeni çizgi listesi, ayrıca 15 118.20 Å dalga boyunda bir Ca I ve 16 649.88 Å dalga boyunda bir Ca II geçişi de içermektedir.

M. Afşar et al. (2018) tarafından gerçekleştirilen son çalışmada, 4 546–23 379 Å dalga boyu aralığında toplam 248 geçiş rapor edilmiştir. Bu tez çalışmasıyla karşılaştırıldığında, 1 Si I, 1 Ca I, 4 Ti I, 1 Ti II ve 17 Fe I çizgisinde ortaklık gözlenmiştir. Ortak Fe I çizgileri için $\log gf$ farkı yine -0.015 ± 0.074 dex olarak belirlenmiştir. Ayrıca, 20 343.84 Å'daki

Si I için fark -0.270 dex, Ti I çizgileri için ortalama fark -0.050 ± 0.104 dex, 19917.19 Å 'daki Ca I çizgisi için 0.160 dex ve 15873.84 Å 'daki Ti II çizgisi için -0.05 dex olarak bulunmuştur.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında $\sim 10\,000\text{--}23\,379 \text{ Å}$ dalga boyu aralığında 249 çizgi içeren yeni bir çizgi listesi sunulmakta olup; bu liste 188 Fe I, 15 Fe II, 2 Mg I, 27 Si I, 10 Ca I, 1 Ca II ve 6 Ti I çizgisini kapsamaktadır. Bu yönüyle, literatürde yer alan yakın kızılötesi çizgi listelerine önemli bir katkı sağlamaktadır.

EK.1.7. S. Kondo ve Ark. (2019) ile karşılaştırma

S. Kondo et al. (2019) tarafından yayımlanan çizgi listesi, $0.91\text{--}1.33 \mu\text{m}$ dalga boyu aralığını kapsamaktadır ve VALD ile J. Meléndez & B. Barbuy (1999) tarafından bildirilen listelerden seçilmiş çizgilerden oluşmaktadır. Bu liste, yalnızca Fe I çizgilerini içermekte olup, iki kırmızı dev yıldızın (Arcturus ve μ Leo) gözlemsel tayfları üzerinde test edilmiştir. Toplamda 171 Fe I çizgisi kullanılmış olup, bunların 97'si VALD'den, 75'i ise J. Meléndez & B. Barbuy (1999) çalışmasından alınmıştır. İyonize demir çizgileri ise bu çalışmada gözlemlenmemiştir.

Bu tez kapsamında oluşturulan çizgi listesi ile karşılaştırıldığında, iki çalışma arasında ortak olarak tanımlanan 56 Fe I çizgisi için $\log gf$ değerleri arasındaki ortalama fark -0.163 ± 0.211 dex olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, $0.91\text{--}1.33 \mu\text{m}$ aralığında bu çalışmada ilave olarak 76 geçiş (6 Ti I, 29 Fe I, 24 Si I, 9 Ca I, 2 Mg I ve 6 Fe II) tanımlanmıştır. Bununla birlikte, S. Kondo et al. (2019) tarafından dahil edilen üst sınır olan $1.33 \mu\text{m}$ 'in ötesinde, bu çalışmada 141 ek çizgi daha rapor edilmiştir.

EK.2. HD 76151 Yıldızı için Literatür Derlemesi**TABLO EK.1.** Literatürden HD 76151 için derlenen model parametreler, α/Fe bollukları ve temel parametreler. H (HARPS), I (IGRINS) ve H+I ise optik ve NIR bölge çizgi listeleri birleşiminden elde edilen bollukları temsil etmektedir.

T_{eff} (K)	$\log g$ (cgs)	[Fe/H] (dex)	[Mg/Fe] (dex)	[Si/Fe] (dex)	[Ca/Fe] (dex)	[Ti/Fe] (dex)	R ($R_{\odot}$)	M ($M_{\odot}$)	t (Gyr)	Referans
5780±88	4.35±0.16	0.14±0.08	-0.15±0.11	0.03±0.13	0.00±0.14	-0.04±0.16	1.125±0.008	1.015±0.037	6.8±1.6	TS(H)
5780±178	4.31±0.25	0.21±0.09	—	0.01±0.17	—	0.10±0.18	1.190±0.012	1.046±0.069	6.8±2.6	TS(I)
5790±170	4.35±0.18	0.24±0.12	-0.09±0.14	-0.03±0.16	0.02±0.16	-0.02±0.18	1.125±0.012	1.053±0.062	5.5±2.3	TS(H+I)
5600	4.44±0.20	-0.09±0.15	0.09	—	0.16	0.05	—	—	—	1
5763	4.37	0.01	0.11	-0.02	-0.06	0.03	—	—	—	2
5902	4.11	0.14	—	—	—	—	—	—	—	3
5763	4.37	0.01	—	—	—	—	—	—	—	4
5687	4.37	0.02	—	—	—	—	—	—	—	5
5727	4.50	0.10	0.10	0.02	0.02	-0.10	—	—	—	6
5825±50	4.62±0.15	0.15±0.06	—	—	—	—	—	1.07	—	7
5825	4.62	0.15	—	-0.01	-0.04	-0.01	—	—	—	8
5750±50	4.40±0.05	0.08±0.04	—	—	—	—	—	—	—	9
5759±70	4.45±0.10	0.06±0.07	—	—	—	—	1.02±0.04	1.05	—	10
5776±20	4.40±0.20	0.05±0.10	0.01	0.04	—	—	—	—	—	11
5803±29	4.50±0.08	0.14±0.04	—	—	—	—	—	1.07	—	12
5803±50	4.50±0.15	0.14±0.05	0.06±0.07	—	—	—	—	—	—	13
5770	4.39	0.03	0.08	0.03	-0.06	0.03	—	—	—	14
5773	4.49	0.02	—	—	—	—	—	1.02	—	15
5790±44	4.55±0.06	0.11±0.03	—	-0.01	—	—	0.979±0.017	1.24±0.12	3.60	16
5790±44	4.55±0.06	0.11±0.03	—	-0.01	—	—	0.979±0.017	1.05±1.03	3.60	16
5765±100	4.44±0.10	0.08±0.03	0.23	0.01	-0.01	0.01	—	—	—	17
5692	4.28	0.08	—	—	—	—	—	—	—	18
5678	4.49	0.22	—	—	—	—	—	—	—	19
5769	4.475	0.125	—	-0.026	—	-0.067	—	1.02	3.71±1.23	20
5768	4.45	0.06	—	—	—	—	—	—	—	21
5788±23	4.48±0.02	0.12±0.02	—	—	—	—	—	1.037	—	22
5760	4.40	0.01	—	—	—	—	—	—	—	23
5788	4.48	0.12	-0.02	-0.01	—	—	—	—	—	24
5770±25	4.40±0.07	0.11±0.02	—	—	—	—	0.98	0.88	2.00±2.50	25
5787±80	4.43	0.031	—	—	—	—	—	—	—	26
5787±80	4.43	0.031	—	—	—	—	—	—	—	26
5773±59	4.42±0.17	0.11±0.04	—	—	—	—	—	—	—	27
5758	4.42	0.07	—	—	—	—	—	—	—	28
5748±38	4.42±0.07	0.15±0.03	—	—	—	—	—	—	—	29
5793±26	4.47±0.05	0.13±0.04	—	—	—	—	—	—	—	30
5788	4.48	0.12	0.003	-0.003	0.008	0.003	—	—	—	31
5859±24	4.77±0.07	0.23±0.03	—	—	—	—	—	—	—	32
5756±50	4.42±0.03	0.09±0.04	—	—	—	—	—	1.02±0.03	1.40±0.30	33
5786±12	4.51±0.04	0.101±0.002	-0.051±0.010	-0.131±0.030	-0.111±0.010	-0.111±0.020	—	—	—	34
5687	4.37	-0.08	—	—	—	—	—	—	—	35
5776	4.40	0.05	0.06	0.09	-0.01	—	—	—	—	36
5781±17	4.44±0.05	0.12±0.01	—	—	—	—	—	1.054±0.010	0.295±0.211	37
5752	4.51	0.12	—	—	—	—	—	—	—	38
5786±34	4.40±0.14	0.12±0.04	-0.01±0.04	-0.04±0.04	-0.02±0.06	-0.03±0.05	—	1.05±0.03	2.50±1.40	39
5831	4.64	0.13	—	—	—	—	—	—	—	40
5702	4.39	0.14	—	—	—	—	—	—	—	41
5776±10	4.54±0.02	0.119±0.028	—	-0.001±0.037	-0.003±0.036	-0.033±0.049	—	—	—	42
5780	4.43	0.10±0.05	0.08±0.09	0.04±0.08	0.05±0.11	0.04±0.09	—	1.01±0.10	4.56	43
5787	4.43	0.10	—	—	—	—	—	—	—	44
5794±36	4.69±0.08	0.02±0.04	—	—	—	—	—	—	—	45
5781	4.44	0.12	—	—	—	—	—	—	—	46
5761	4.43	0.10±0.04	-0.05±0.16	0.00±0.05	-0.01±0.07	-0.02±0.07	—	—	—	47
5748±38	4.42±0.07	0.15±0.03	—	—	—	—	—	—	—	48
5816±30	4.51±0.25	0.13±0.06	-0.06±0.11	0.15±0.06	0.08±0.06	0.07±0.06	1.018±0.013	1.067±0.030	2.068±1.276	49
5776	4.49	0.10	—	—	—	—	—	—	—	50
5780	4.40	0.15	—	—	—	—	1.01±0.02	1.04±0.04	—	51
5777±139	4.47±0.08	0.10±0.01	—	—	—	—	0.984±0.053	1.04±0.13	—	52
5785±3	4.44±0.01	0.11±0.01	—	—	—	—	—	1.06±0.02	1.40±0.50	53

Referanslar:

[1] Cayrel de Strobel vd. (1981), [2] Edvardsson vd. (1993), [3] Marsakov ve Shevelev (1995), [4] Tomkin ve Lambert (1995), [5] Gratton vd. (1996), [6] Thevenin (1998), [7] Santos vd. (2001), [8] Bodaghee vd. (2003), [9] Heiter ve Luck (2003), [10] Fuhrmann (2004), [11] Mishenina vd. (2004), [12] Santos vd. (2004), [13] Beirão vd. (2005), [14] Soubiran ve Girard (2005), [15] Takeda vd. (2005), [16] Valenti ve Fischer (2005), [17] Luck ve Heiter (2006), [18] Cenarro vd. (2007), [19] Schiavon (2007), [20] Takeda (2007), [21] Soubiran vd. (2008), [22] Sousa vd. (2008), [23] Önehag vd. (2009), [24] Delgado Mena vd. (2010), [25] Ghezzi vd. (2010), [26] Casagrande vd. (2011), [27] da Silva vd. (2011), [28] Katz vd. (2011), [29] Prugniel vd. (2011), [30] Wu vd. (2011), [31] Adibekyan vd. (2012), [32] Maldonado vd. (2012), [33] Ramírez vd. (2012), [34] Tabernero vd. (2012), [35] Carretta vd. (2013), [36] Mishenina vd. (2013), [37] Tsantaki vd. (2013), [38] Datson vd. (2015), [39] da Silva vd. (2015), [40] Maldonado vd. (2015), [41] Paletou vd. (2015), [42] Mahdi vd. (2016), [43] Luck (2017), [44] Netopil vd. (2017), [45] Rich vd. (2017), [46] Suárez-Andrés vd. (2017), [47] Luck (2018), [48] Park vd. (2018), [49] Soto ve Jenkins (2018), [50] Casali vd. (2020), [51] Hirsch vd. (2021), [52] Paegert vd. (2021), [53] Martos vd. (2023), [TS] Bu Çalışma

EK.3. HD 115617 Yıldızı için Literatür Derlemesi**TABLO EK.2.** Literatürden HD 115617 için derlenen model parametreler, α/Fe bollukları ve temel parametreler. E (ESPRESSO), I (IGRINS) ve E+I ise optik ve NIR bölge çizgi listeleri birleşiminden elde edilen bollukları temsil etmektedir.

T_{eff} (K)	$\log g$ (cgs)	[Fe/H] (dex)	[Mg/Fe] (dex)	[Si/Fe] (dex)	[Ca/Fe] (dex)	[Ti/Fe] (dex)	R ($R_{\odot}$)	M ($M_{\odot}$)	t (Gyr)	Referans
5495±100	4.30±0.16	-0.04±0.16	0.12±0.10	0.04±0.13	0.06±0.15	0.00±0.15	1.125±0.008	1.015±0.037	6.8±1.6	TS(E)
5780±140	4.15±0.34	0.18±0.10	—	-0.03±0.15	—	0.03±0.16	1.190±0.012	1.046±0.069	6.8±2.6	TS(I)
5710±132	4.70±0.16	0.15±0.12	—	-0.06±0.16	-0.03±0.17	0.03±0.16	1.125±0.012	1.053±0.062	5.5±2.3	TS(E+I)
—	—	—	—	—	—	—	1.00	0.93	—	1
5585	4.50	-0.02	—	0.03	0.03	0.11	—	—	—	2
5590	4.23	-0.03	-0.06	-0.06	-0.06	-0.06	—	—	—	3
5552	4.33	-0.03	—	—	—	—	—	—	—	4
5600	4.50	0.02	0.07	0.04	—	0.05	—	—	—	5
5623	4.52	—	—	—	—	—	1.01	0.91	—	6
5600	4.35	0.03	—	—	—	—	—	—	—	7
5483	4.52	-0.12	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	—	—	—	8
5585	4.35	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	—	—	—	9
5577	4.34	0.01	—	—	—	—	0.90	—	—	10
5537	4.38	-0.07	0.04	0.07	0.04	0.15	—	—	—	11
5571	4.47	0.05	—	0.01	—	-0.06	1.00	0.96	6.3	12
5515	4.53	-0.03	0.02	0.05	-0.02	-0.06	—	—	—	13
5720	4.67	0.11	—	—	—	—	1.01	—	9.4	14
5487	4.49	0.01	—	—	—	—	—	—	—	15
5558	4.36	-0.02	—	—	—	—	0.88	—	—	16
5572	—	0.00	—	—	—	—	—	—	5.3	17
5558	4.36	-0.02	0.02	0.02	—	—	—	—	—	18
5618	4.52	0.06	—	—	—	—	1.06	0.94	2.0	19
5533	4.29	0.01	—	—	—	—	0.93	—	6.8	20
5539	4.35	0.02	—	—	—	—	—	—	—	21
5558	4.36	-0.02	0.07	0.03	0.08	0.07	—	—	—	22
5566	4.41	-0.01	—	—	—	—	0.92	—	4.2	23
5400	4.57	0.00	—	—	—	—	—	—	—	24
5587	4.41	0.00	0.06	0.00	0.00	0.02	0.94	—	6.8	25
5571	4.42	-0.02	—	—	—	—	0.92	—	9.2	26
5537	4.38	-0.03	—	—	—	—	0.89	—	9.0	27
5469	4.36	-0.03	0.06	0.07	-0.01	0.04	—	—	13.1	28
5534	4.41	-0.01	—	—	—	—	—	—	—	29
5469	4.40	-0.03	—	—	—	—	—	—	—	30
5544	4.32	0.00	0.05	0.05	0.01	0.02	0.92	—	9.1	31
5490	4.40	-0.10	0.10	—	—	—	0.93	—	—	32
5651	4.46	—	—	—	—	—	0.96	0.94	5.2	33
5490	4.40	-0.10	—	—	—	—	—	—	—	34
5562	4.44	-0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.93	0.97	7.1	35
5538	4.41	0.01	—	—	—	—	0.92	0.99	9.3	36
5578	4.44	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99	—	5.3	37
5550	4.46	-0.09	—	—	—	—	—	—	—	38
5548	4.42	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.96	—	7.6	39
5557	4.36	0.02	0.01	0.01	0.04	-0.05	0.91	1.04	10.6	40
5473	4.47	-0.75	-0.33	0.08	0.03	0.51	0.92	1.04	9.8	41
5569	4.39	0.03	—	—	—	—	0.93	—	—	42
5559	4.36	-0.01	—	—	—	—	0.93	—	—	43
5580	4.39	0.02	—	—	—	—	0.93	—	—	44
5556	4.35	-0.02	—	—	—	—	0.93	—	—	45
5562	4.44	-0.03	—	—	—	—	0.98	0.98	—	46
5618	4.52	0.02	—	—	—	—	0.97	—	3.5	47
5490	4.40	-0.10	—	—	—	—	0.88	—	11.1	48
5562	4.44	-0.04	—	—	—	—	—	—	7.1	49
5522	4.52	-0.08	—	—	—	—	—	—	—	50
5700	4.26	-0.01	—	—	—	—	1.04	—	—	51

Referanslar:

[1] Zakhosaj (1979, 1996), [2] Perrin vd. (1988), [3] Edvardsson vd. (1993), [4] Gratton vd. (1996), [5] Thevenin (1998), [6] Allende Prieto vd. (1999), [7] Heiter ve Luck (2003), [8] Allende Prieto vd. (2004), [9] Luck ve Heiter (2005), [10] Santos vd. (2005), [11] Soubiran vd. (2005), [12] Valenti ve Fischer (2005), [13] Reddy vd. (2006), [14] Takeda vd. (2007), [15] Ramirez vd. (2007), [16] Sousa vd. (2008), [17] Holmberg vd. (2009), [18] Delgado Mena vd. (2010), [19] Ghezzi vd. (2010), [20] Gonzalez vd. (2010), [21] Prugniel vd. (2011), [22] Adibekyan vd. (2012), [23] Ramirez vd. (2012), [24] Maldonado vd. (2012), [25] Da Silva vd. (2012), [26] Ramirez vd. (2013), [27] Tsantaki vd. (2013), [28] Bensby vd. (2014), [29] Nissen vd. (2014), [30] Battistini vd. (2015), [31] Da Silva vd. (2015), [32] Sitnova vd. (2015), [33] Bonfanti vd. (2016), [34] Zhao vd. (2016), [35] Brewer vd. (2016), [36] Yee vd. (2017), [37] Luck (2017), [38] Rich vd. (2017), [39] Luck (2018), [40] Soto ve Jenkins (2018, F), [41] Soto ve Jenkins (2018, H), [42] Sousa vd. (2018, F), [43] Sousa vd. (2018, H), [44] Sousa vd. (2018, N), [45] Sousa vd. (2018, U), [46] Stassun vd. (2019), [47] Chavero vd. (2019), [48] Chen vd. (2020), [49] Baum vd. (2022), [50] Contursi vd. (2024), [51] Khalatyan vd. (2024) [TS] Bu Çalışma

EK.4. NIR Çizgi Listesi

TABLO EK.3. Bu tez kapsamında oluşturulan çizgi listesi, 15 000-17 000 Å dalgaboyu aralığındaki APOGEE DR17 (Abdurro'uf vd. 2022) kütüphanesini de içermektedir. H-Band (15 000-17 000 Å) analizi için oluşturulan bu tabloda 17 000 Å ötesindeki geçişler yeni (new) olarak listelenmiştir. Kırmızı geçişler, EW ve spektrum sentez yöntemleriyle önemli ölçüde farklı bolluk değerleri üreten çizgilerdir bu sebeple analizden kaldırıldılar.

Atomik Tür	log gf (dex)			Species			log gf (dex)			Species			log gf (dex)			Species			
	λ (Å)	L.E.P (eV)	TS	DR17	Δ	Species	λ (Å)	L.E.P (eV)	TS	DR17	Δ	Species	λ (Å)	L.E.P (eV)	TS	DR17	Δ	Species	
FeII	15078.21	12.13	2.12	-4.68	6.80	FeI	15731.41	6.45	-0.66	-0.47	-0.19	FeI	16645.88	5.96	-0.27	-0.20	-0.07		
FeI	15080.25	6.26	-0.84	-0.61	-0.23	FeI	15733.51	6.25	-0.76	-0.56	-0.20	FeI	16648.24	6.55	-0.50	-0.28	-0.22		
CaI	15118.20	5.02	-0.65	-2.23	1.58	FeII	15792.03	12.81	2.22	-6.20	8.42	CaII	16649.88	9.24	0.57	0.57	0.00		
FeI	15120.50	5.45	-1.49	-1.02	-0.47	FeI	15829.29	6.30	-1.10	-0.83	-0.27	FeI	16665.49	6.02	-0.26	-0.26	0.00		
FeI	15122.38	5.62	-0.38	-0.38	0.00	FeI	15840.19	6.36	-0.40	-0.28	-0.12	FeI	16685.58	6.34	-0.36	-0.36	0.00		
SiI	15127.91	7.23	-1.90	-3.90	2.00	FeI	15858.66	5.59	-1.34	-1.22	-0.12	FeI	16693.11	6.42	-0.41	-0.26	-0.15		
FeI	15176.72	5.92	-0.95	-0.76	-0.19	FeI	15868.52	5.59	-0.17	-0.17	0.00	FeI	16898.90	6.31	-0.94	-0.78	-0.16		
FeI	15179.75	5.98	-1.24	-3.28	2.04	TiII	15873.88	3.12	-1.95	-1.95	0.00	FeI	16900.23	6.30	-1.27	-1.15	-0.12		
FeI	15182.92	6.33	-0.54	-0.54	0.00	FeI	15901.53	5.92	-0.60	-0.51	-0.09	FeI	16910.69	5.87	-1.96	-1.96	0.00		
FeI	15194.50	2.22	-4.85	-4.74	-0.11	FeI	15904.35	6.36	0.45	0.25	0.20	FeI	16969.91	5.95	-0.37	-0.25	-0.12		
FeI	15201.57	5.49	-1.45	yeni	yeni	FeI	15906.04	5.62	-0.20	-0.25	0.05	FeII	17000.92	13.03	4.25	-0.71	4.96		
FeI	15207.54	5.39	0.04	0.06	-0.02	FeI	15928.16	5.95	-0.88	-0.68	-0.20	FeI	17005.45	6.07	-0.25	-0.08	-0.17		
FeI	15213.02	6.31	-0.83	-0.63	-0.20	FeII	15928.14	13.33	3.83	-4.53	8.36	FeI	17009.02	6.62	-0.37	yeni	yeni		
FeI	15237.77	5.79	-1.60	-1.47	-0.13	FeI	15929.48	6.31	-0.59	-0.43	-0.16	FeI	17027.62	6.62	-0.67	yeni	yeni		
FeI	15239.74	6.42	-0.15	-0.05	-0.10	FeI	15934.02	6.31	-0.43	-0.21	-0.22	FeI	17037.79	6.39	-0.42	yeni	yeni		
FeI	15267.02	5.07	-2.49	-2.42	-0.07	FeI	15940.92	5.81	-1.42	-1.25	-0.17	FeI	17052.20	6.39	-0.60	yeni	yeni		
FeI	15301.56	5.92	-0.84	-0.65	-0.19	FeI	15941.85	6.31	-0.13	0.06	-0.19	FeI	17067.67	6.37	-0.17	yeni	yeni		
FeI	15315.66	6.28	-1.17	-2.86	1.69	FeI	15952.63	6.34	-0.81	-0.61	-0.20	FeI	17072.86	5.07	-2.41	yeni	yeni		
FeI	15343.81	5.65	-0.78	-0.63	-0.15	FeII	15952.70	12.90	3.36	-2.49	5.82	FeII	17161.12	6.02	-0.24	yeni	yeni		
SiI	15361.16	5.95	-2.08	-2.03	-0.05	FeI	15971.25	6.41	-0.41	-0.32	-0.09	FeII	17166.20	5.95	-0.79	yeni	yeni		
FeI	15381.98	3.64	-3.03	yeni	yeni	FeI	16019.79	6.35	-0.87	-0.59	-0.28	FeI	17200.34	6.36	-0.91	yeni	yeni		
FeI	15427.61	6.45	-1.18	-0.76	-0.42	FeI	16051.74	6.26	-1.01	-0.80	-0.21	FeI	17221.43	6.43	-0.85	yeni	yeni		
FeI	15522.64	6.32	-1.07	-0.92	-0.15	FeI	16171.93	6.38	-0.52	-0.43	-0.09	FeI	17257.59	6.32	-0.58	yeni	yeni		
FeI	15524.30	5.79	-1.51	-1.46	-0.05	FeI	16225.64	6.38	-0.03	0.11	-0.14	FeI	17278.72	6.72	-0.44	yeni	yeni		
FeI	15527.21	6.32	-1.11	-1.11	0.00	FeI	16228.67	6.38	-1.41	-1.13	-0.28	FeI	17282.32	6.43	-0.19	yeni	yeni		
FeI	15531.75	5.64	-0.57	-0.56	-0.01	FeI	16231.67	6.38	0.42	0.47	-0.05	FeI	17420.83	3.88	-3.62	yeni	yeni		
FeII	15531.74	13.25	4.42	-4.84	9.26	FeI	16235.98	5.92	-0.39	-0.30	-0.09	FeI	17433.67	6.41	-0.48	yeni	yeni		
FeI	15534.26	5.64	-0.34	-0.32	-0.02	FeI	16252.57	6.32	-0.54	-0.41	-0.13	FeII	17488.61	6.41	-0.78	yeni	yeni		
FeII	15536.68	13.51	2.99	-7.77	10.76	FeI	16258.93	6.24	-1.03	-0.78	-0.25	FeI	17500.01	5.96	-1.10	yeni	yeni		
TiI	15543.78	1.88	-1.48	-1.16	-0.32	FeI	16277.50	6.32	-0.51	-0.41	-0.10	FeI	17531.20	6.64	-0.71	yeni	yeni		
FeII	15563.40	13.31	2.90	-4.08	6.98	FeII	16468.51	13.29	3.46	-0.47	3.93	FeI	17534.80	6.64	-0.31	yeni	yeni		
FeI	15565.23	6.32	-0.96	-0.77	-0.19	FeI	16474.09	6.02	-0.60	-0.62	0.02	FeI	17536.93	5.91	-0.97	yeni	yeni		
FeI	15566.72	6.35	-0.54	-0.35	-0.19	FeI	16506.30	5.95	-0.56	-0.41	-0.15	FeI	17575.32	6.40	-1.01	yeni	yeni		
FeI	15579.08	6.32	-1.09	-1.15	0.06	FeI	16532.01	6.29	-0.19	-0.08	-0.11	FeI	17695.94	5.95	-0.65	yeni	yeni		
TiI	15602.84	2.27	-1.64	-1.63	-0.01	FeI	16544.70	6.34	-0.42	-0.25	-0.17	FeI	17714.37	6.58	-0.76	yeni	yeni		
FeI	15611.15	3.41	-2.98	-3.48	0.50	FeI	16552.02	6.41	-0.08	0.12	-0.20	FeI	17717.16	6.34	-0.75	yeni	yeni		
FeI	15648.52	5.43	-0.70	-0.65	-0.05	FeI	16559.71	6.40	-0.35	-0.20	-0.15	FeI	17747.37	5.92	-0.76	yeni	yeni		
FeI	15652.87	6.25	-0.19	-0.01	-0.18	FeI	16586.06	5.62	-1.53	-1.39	-0.14	FeI	17926.40	6.74	0.05	yeni	yeni		
FeI	15670.13	6.20	-1.07	-0.85	-0.22	FeI	16607.65	6.34	-0.59	-0.51	-0.08	-	-	-	-	-	-	-	
FeI	15700.08	6.33	-1.08	-0.98	-0.10	FeI	16619.73	5.59	-1.66	-1.47	-0.19	-	-	-	-	-	-	-	

$$\Delta \log(gf) = \log(gf)_{\text{TS}} - \log(gf)_{\text{DR17}}$$

TABLO EK.4. Tayfsal analizler için Y, J, H ve K bantlarındaki α -element çizgi listesi. Tek tek çizgiler için bolluklar KPNO-NIR spektrumu ve $T_{\text{eff}} = 5780$ K, $\log g = 4.40$ ve $\xi = 1.08 \text{ km s}^{-1}$ modeli için elde edilen değerlerdir.

Atomik Tür	λ (Å)	EW (mÅ)	$\log \epsilon(X)$ (dex)	LEP (eV)	$\log \Gamma$ ($\text{rad cm}^3 \text{s}^{-1}$)	$\log gf$				
						VALD	MB99	DR17	BO03	NIST
Ti I	10003.09	4.9	4.98	2.16	-7.83 ^K	-1.02	-1.32	-	-1.32	-1.32
Ti I	10011.74	4.6	4.80	2.15	-7.83 ^K	-1.18	-1.54	-	-	-
Si I	10013.86	7.3	7.49	6.40	-7.05 ^V	-2.32	-1.73	-	-	-
Ti I	10034.49	4.2	4.98	1.46	-7.83 ^K	-1.84	-2.09	-	-2.10	-1.77
Si I	10068.33	26.5	7.54	6.10	-7.23 ^V	-1.32	-1.40	-	-	-0.80
Si I	10098.55	7.1	7.50	6.40	-7.06 ^V	-1.83	-1.76	-	-	-
Ca I	10249.15	5.0	6.47	4.53	-7.02 ^K	-1.26	-0.96	-	-	-
Si I	10288.94	80.7	7.50	4.92	UNS	-1.51	-1.71	-	-	-1.48
Mg I	10299.24	7.3	7.46	6.12	UNS	-2.07	-2.06	-	-	-2.08
Si I	10301.41	11.6	7.52	6.10	-7.24 ^V	-2.17	-1.83	-	-	-
Mg I	10312.52	16.5	7.49	6.12	UNS	-1.52	-1.71	-	-	-1.73
Si I	10313.20	12.5	7.55	6.40	-7.08 ^V	-0.89	-1.56	-	-	-0.96
Ca I	10343.82	129.9	6.34	2.93	-7.57 ^K	-0.30	-0.40	-	-0.49	-
Si I	10371.27	164.3	7.45	4.93	UNS	-0.71	-0.80	-	-0.88	-0.71
Ti I	10396.81	28.5	5.00	0.85	-7.84 ^K	-1.54	-1.79	-	-1.83	-1.83
Ti I	10496.09	23.0	4.98	0.84	-7.84 ^K	-1.65	-1.91	-	-1.92	-1.92
Si I	10627.65	121.2	7.40	5.86	-7.39 ^V	-0.87	-0.50	-	-0.29	-
Ti I	10732.87	4.0	5.01	0.83	-7.84 ^K	-2.52	-2.82	-	-2.87	-2.87
Si I	10784.56	88.6	7.44	5.96	UNS	-0.84	-0.72	-	-0.59	-0.64
Si I	10796.11	20.7	7.50	6.18	-7.32 ^V	-1.27	-1.49	-	-	-
Ca I	10838.98	28.3	6.23	4.88	-7.63 ^K	0.24	0.03	-	-	0.29
Ca I	10861.59	9.0	6.31	4.88	-7.68 ^K	-0.34	-0.49	-	-0.57	-
Ca I	10879.88	8.9	6.33	4.88	-7.65 ^K	-0.36	-0.51	-	-0.59	-
Si I	10885.35	132.4	7.51	6.18	-7.33 ^V	0.22	-0.10	-	-	-
Si I	10893.68	8.2	7.48	6.19	-7.32 ^V	-1.66	-1.92	-	-	-
Si I	10894.80	14.1	7.50	6.19	-7.32 ^V	-1.47	-1.68	-	-	-
Si I	10984.55	88.4	7.36	6.19	-7.33 ^V	-0.37	-0.63	-	-	-
Si I	11627.56	19.1	7.52	5.96	-7.40 ^V	-1.93	-1.83	-	-	-
Si I	11640.96	95.5	7.47	6.27	-7.32 ^V	-0.43	-0.48	-	-	-0.49
Si I	11863.92	37.6	7.52	5.98	-7.39 ^V	-1.46	-1.50	-	-1.29	-
Si I	11900.03	20.5	7.49	5.96	-7.38 ^V	-1.86	-1.79	-	-	-
Ca I	11955.95	21.5	6.30	4.13	-7.36 ^K	-0.85	-0.91	-	-	-
Si I	12390.17	80.0	7.46	5.08	-7.52 ^V	-1.77	-1.93	-	-1.73	-1.97
Si I	12395.84	99.7	7.50	4.95	UNS	-1.64	-1.82	-	-1.76	-1.68
Si I	12583.95	64.7	7.48	6.62	-7.13 ^V	-0.46	-0.62	-	-	-
Ca I	12909.08	30.4	6.25	4.43	-7.79 ^K	-0.22	-0.50	-	-	-
Si I	13029.54	51.8	7.58	6.08	-7.40 ^V	-0.92	-1.37	-	-	-0.71
Si I	13030.97	91.2	7.35	6.08	-7.40 ^V	-0.67	-0.99	-	-	-0.71
Ca I	13033.56	47.7	6.31	4.44	-7.79 ^K	-0.06	-0.31	-	-	-
Ca I	13134.94	59.8	6.05	4.45	-7.79 ^K	0.09	0.14	-	-	-
Si I	13154.56	26.3	7.48	6.62	-7.10 ^V	-1.00	-1.20	-	-	-
Ca I	15118.20	18.7	6.40	5.02	-6.98 ^K	-2.22	-0.65	-2.23	-	-
Si I	15127.91	5.4	7.75	7.23	UNS	-1.90	-	-3.9	-	-
Si I	15361.16 ^S	25.9	7.49	5.95	UNS	-2.08	-2.08	-2.03	-	-1.71
Ti I	15543.78 ^S	18.8	5.01	1.88	-7.83 ^K	-1.13	-1.48	-1.16	-	-1.08
Ti I	15602.84 ^S	4.5	4.88	2.27	-7.83 ^K	-1.44	-1.81	-1.63	-	-
Ti II	15873.84	21.6	4.82	3.12	-7.86 ^K	-1.81	-	-1.95	-	-
Ca II	16649.88	32.0	6.22	9.24	-7.39 ^K	0.64	0.59	0.57	-	-

(^S) Smith vd. 2013 tarafından bildirilen $\log gf$ değerleri sırasıyla 15 361.16 Å için -1.93 dex, 15 543.78 Å için -1.12 dex ve 15 602.84 Å için **-1.64** dex'tir. (^K) Kurucz sönümlemesi, (^V) VALD3 sönümlemesi ve [UNS] Unsöld sönümlemesi.

TABLO EK.5. Tayfsal analizler için Y -, J -, H -, ve K -bantlarındaki demir ve α -element çizgi listesi. Mavi renkteki geçişler, Andreasen vd. 2016 tarafından bildirilen geçişlere uygulanan RMT analizi ile yeni çizgi listesine eklenen ek çizgileri; U/I: Nave 1994 tarafından tanımlanamayan çizgileri temsil eder.

Atomik Tür	λ	EW	$\log \epsilon(X)$	LEP	$\log \Gamma$	$\log gf$				RMT
	(Å)	(mÅ)	(dex)	(eV)	($\text{rad cm}^3\text{s}^{-1}$)	VALD	MB99	AN16	BO03	
Ca I	19917.19	108.3	6.18	1.90	-7.80^{K}	-2.32	-	-	-	-
Si I	20296.36	141.3	7.22	6.72	UNS	-0.16	-	-	-	-
Si I	20343.84	111.6	7.80	6.12	UNS	-1.40	-	-	-	-
Ti I	21782.94	34.9	4.75	1.75	-7.83^{K}	-1.11	-	-	-	-
Ti I	21897.38	18.4	4.71	1.74	-7.83^{K}	-1.40	-	-	-	-
Fe I	10006.86	2.5	7.46	5.51	-7.70^{K}	-1.77	-1.97	-	-	1998
Fe I	10019.79	9.4	7.51	5.48	-7.70^{K}	-1.46	-1.44	-	-	1996
Fe I	10065.05	87.8	7.36	4.84	-7.57^{K}	-0.29	-0.57	-	-	1781
Fe I	10070.52	7.0	7.50	5.51	-7.70^{K}	-1.93	-1.54	-1.53	-	1993
Fe I	10077.19	3.5	7.48	2.99	-7.82^{K}	-4.27	-4.28	-	-	833
Fe I	10081.39	6.2	7.45	2.42	-7.83^{K}	-4.54	-4.53	-4.55	-4.42	345
Fe I	10085.07	5.3	7.48	4.58	-7.76^{K}	-2.13	-2.54	-	-	1746
Fe I	10086.26	5.8	7.49	2.95	-7.82^{K}	-4.05	-4.10	-	-3.99	833
Fe I	10089.77	7.4	7.69	5.45	-7.70^{K}	-1.25	-1.77	-	-	1993
Fe I	10137.10	9.3	7.52	5.09	-7.71^{K}	-1.71	-1.83	-1.77	-	1861
Fe I	10149.08	3.5	7.47	5.10	-7.71^{K}	-2.12	-2.23	-	-	1861
Fe I	10155.16	16.0	7.48	2.18	-7.76^{K}	-4.23	-4.36	-4.34	-4.25	267
Fe I	10167.47	19.5	7.50	2.20	-7.77^{K}	-4.12	-4.26	-4.20	-4.13	267
Fe I	10195.11	22.2	7.47	2.73	-7.78^{K}	-3.58	-3.63	-3.63	-	620
Fe I	10216.32	120.8	7.43	4.73	-7.57^{K}	-0.06	-0.29	-	-0.18	1781
Fe I	10218.41	41.1	7.49	3.07	-7.78^{K}	-2.74	-2.93	-	-	905
Fe I	10230.78	19.7	7.49	5.87	-7.58^{K}	-3.32	-0.70	-0.41	-	2224
Fe I	10252.55	10.0	7.49	5.83	-7.58^{K}	-1.03	-1.08	-	-	2223
Fe I	10262.46	7.7	7.50	5.48	-7.70^{K}	-1.61	-1.54	-	-	1995
Fe I	10265.22	7.3	7.44	2.22	-7.76^{K}	-4.54	-4.67	-4.67	-4.55	267
Fe I	10283.77	6.1	7.54	5.51	-7.70^{K}	-1.66	-1.57	-	-	1994
Fe I	10307.45	6.2	7.46	4.59	-7.76^{K}	-2.07	-2.45	-	-2.39	1746
Fe I	10332.33	10.4	7.47	3.63	-7.75^{K}	-2.94	-3.15	-3.15	-3.05	1365
Fe I	10333.18	8.6	7.46	4.59	-7.76^{K}	-2.59	-2.30	-	-	1746
Fe I	10340.89	46.5	7.43	2.20	-7.77^{K}	-3.58	-3.65	-3.67	-3.59	267
Fe I	10345.20	6.4	7.41	6.16	-7.39^{K}	-4.44	-0.91	-	-	2365
Fe I	10347.96	36.6	7.47	5.39	-7.70^{K}	-0.55	-0.82	-0.75	-0.70	1995
Fe I	10353.81	23.4	7.48	5.39	-7.70^{K}	-0.82	-1.09	-1.04	-0.97	1994
Fe I	10362.70	12.1	7.51	5.48	-7.70^{K}	-1.34	-1.34	-	-	1993
Fe I	10364.06	17.4	7.52	5.45	-7.70^{K}	-0.96	-1.19	-1.13	-	1995
Fe I	10379.01	18.2	7.46	2.22	-7.76^{K}	-4.15	-4.25	-4.25	-	267
Fe I	10388.74	7.5	7.48	5.45	-7.70^{K}	-1.47	-1.57	-1.53	-	1994
Fe I	10395.80	61.2	7.40	2.18	-7.76^{K}	-3.39	-3.42	-	-3.40	267
Fe I	10423.03	22.3	7.47	2.69	-7.78^{K}	-3.62	-3.68	-	-3.58	620
Fe I	10423.75	29.2	7.45	3.07	-7.78^{K}	-2.92	-3.13	-3.12	-3.03	905
Fe I	10452.78	37.0	7.57	3.88	UNS	-	-2.30	-	-	U/I
Fe I	10469.66	88.9	7.32	3.88	-7.72^{K}	-1.18	-1.37	-	-	1461
Fe I	10532.24	63.7	7.47	3.93	-7.73^{K}	-1.48	-1.76	-1.70	-	1461
Fe I	10535.71	26.2	7.45	6.21	-7.33^{K}	-0.11	-	-0.22	-	none
Fe I	10555.65	11.8	7.50	5.45	-7.70^{K}	-1.11	-1.39	-1.35	-	1993
Fe I	10557.52	4.7	7.47	5.59	-7.57^{K}	-1.78	-1.66	-	-	2077
Fe I	10577.14	16.9	7.51	3.30	-7.77^{K}	-3.14	-3.28	-3.24	-3.16	1060

(^K) Kurucz sönümlemesi ve [UNS] Unsöld sönümlemesi.

TABLO EK.6. Tayfsal analizler için Y -, J -, H - ve K - bantlarındaki çizgi listesindeki demir geçişleri. Mavi renkteki geçişler, Andreasen vd. 2016 tarafından bildirilen geçişlere uygulanan RMT analizi ile yeni çizgi listesine eklenen ek çizgilerdir.

Atomik Tür	λ (Å)	EW (mÅ)	$\log \epsilon(X)$ (dex)	LEP (eV)	$\log \Gamma$ (rad cm ³ s ⁻¹)	$\log gf$					RMT
						VALD	MB99	AN16	BO03	NIST	
Fe I	10611.68	35.5	7.43	6.17	-7.33 ^K	0.02	0.09	-0.07	-	-	none
Fe I	10616.72	15.2	7.48	3.27	-7.77 ^K	-3.13	-3.34	-3.32	-3.22	-	1060
Fe I	10642.68	4.4	7.52	5.92	-7.58 ^K	-1.44	-1.37	-	-	-	2224
Fe I	10652.38	5.8	7.59	5.48	-7.70 ^K	-2.95	-1.79	-	-	-	none
Fe I	10674.07	15.3	7.48	6.17	-7.33 ^K	-0.47	-	-0.58	-	-	none
Fe I	10717.81	5.4	7.49	5.54	-7.53 ^K	-0.44	-1.68	-	-	-	2082
Fe I	10721.66	4.6	7.49	5.51	-7.70 ^K	-1.62	-1.78	-	-1.79	-	2035
Fe I	10725.21	16.2	7.47	3.64	-7.73 ^K	-2.76	-2.98	-2.95	-	-	1365
Fe I	10753.01	39.5	7.51	3.96	-7.73 ^K	-1.85	-2.14	-	-	-	1461
Fe I	10780.70	9.3	7.46	3.24	-7.77 ^K	-3.29	-3.59	-3.61	-3.48	-	1060
Fe I	10783.05	47.4	7.47	3.11	-7.78 ^K	-2.57	-2.80	-	-2.71	-	905
Fe I	10818.28	35.2	7.46	3.96	-7.73 ^K	-1.95	-2.23	-2.18	-	-	1461
Fe I	10849.46	35.2	7.51	5.54	-7.58 ^K	-1.44	-0.73	-	-	-	2080
Fe I	10863.52	59.3	7.49	4.73	-7.58 ^K	-0.90	-1.06	-	-	-	1780
Fe I	10881.76	24.7	7.46	2.85	-7.77 ^K	-3.60	-3.50	-	-	-	732
Fe I	10884.26	38.4	7.49	3.93	-7.72 ^K	-1.93	-2.18	-	-	-	1461
Fe I	10896.30	42.6	7.46	3.07	-7.78 ^K	-2.69	-2.93	-	-2.85	-	905
Fe I	10970.02	5.2	7.42	5.99	-7.55 ^K	-2.01	-1.23	-	-	-	2325
Fe I	11026.78	15.2	7.53	3.94	-7.72 ^K	-2.81	-2.77	-2.49	-	-	1438
Fe I	11045.60	21.7	7.53	5.59	-7.52 ^K	-0.62	-1.01	-	-	-	2082
Fe I	11071.71	12.8	7.46	3.07	-7.78 ^K	-4.28	-3.64	-	-	-	none
Fe I	11607.57	158.8	7.35	2.20	-7.77 ^K	-2.01	-2.46	-	-2.27	-2.01	266
Fe I	11783.26	149.0	7.28	2.83	-7.76 ^K	-1.57	-1.86	-	-	-1.57	733
Fe I	11882.86	193.3	7.54	2.20	-7.77 ^K	-1.70	-2.20	-	-2.03	-1.67	266
Fe I	12053.08	40.1	7.47	4.56	-7.58 ^K	-1.49	-1.75	-1.65	-1.56	-1.54	1712
Fe I	12119.50	28.2	7.50	4.59	-7.76 ^K	-1.64	-1.88	-1.81	-	-	1745
Fe I	12190.10	30.9	7.49	3.63	-7.77 ^K	-2.56	-2.75	-	-	-2.33	1364
Fe I	12213.34	17.6	7.49	4.64	-7.59 ^K	-1.85	-2.09	-2.02	-1.93	-	1712
Fe I	12227.12	45.9	7.39	4.61	-7.58 ^K	-1.37	-1.60	-	-1.45	-	1712
Fe I	12283.28	16.8	7.40	6.17	-7.32 ^K	-0.54	-0.61	-0.61	-	-	2385
Fe I	12342.92	39.1	7.53	4.64	-7.59 ^K	-1.46	-1.68	-1.57	-1.57	-	1712
Fe I	12557.01	33.1	7.49	2.28	-7.84 ^K	-3.63	-4.07	-4.02	-	-	343
Fe I	12615.93	35.9	7.53	4.64	-7.58 ^K	-1.52	-1.77	-1.82	-	-	1712
Fe I	12638.72	104.2	7.42	4.56	-7.58 ^K	-0.78	-1.00	-	-	-	1712
Fe I	12879.78	66.1	7.49	2.28	-7.84 ^K	-3.62	-3.61	-	-	-3.46	343
Fe I	12896.12	22.2	7.51	4.91	-7.58 ^K	-1.42	-1.80	-1.79	-	-	1801
Fe I	12934.67	25.3	7.50	5.39	-7.68 ^K	-0.95	-1.28	-1.14	-	-	1986
Fe I	13006.70	31.6	7.53	2.99	-7.84 ^K	-3.74	-3.49	-	-	-	832
Fe I	13014.85	10.3	7.50	5.45	-7.66 ^K	-1.69	-1.68	-1.59	-	-	1987
Fe I	13039.65	14.7	7.50	5.66	-7.70 ^K	-0.73	-1.32	-	-	-	2116
Fe I	13098.92	22.3	7.51	5.01	-7.58 ^K	-1.29	-1.73	-	-	-	1801
Fe I	13147.93	55.4	7.47	5.39	-7.68 ^K	-0.81	-0.93	-0.78	-	-	1987
Fe I	13291.78	11.1	7.43	5.48	-7.66 ^K	-1.90	-1.58	-	-	-	1987
Fe I	13352.18	89.0	7.48	5.31	-7.52 ^K	-0.52	-0.55	-0.48	-	-	1957
Fe I	13392.11	114.7	7.43	5.35	-7.51 ^K	-0.12	-0.25	-0.21	-	-	1958

(^K) Kurucz sönümlemesi

TABLO EK.7. Tayfsal analizler için Y -, J -, H - ve K - bantlarındaki çizgi listesindeki demir çizgileri. Mavi renkteki geçişler, Andreasen vd. 2016 tarafından bildirilen geçişlere uygulanan RMT analizi ile yeni çizgi listesine eklenen ek çizgilerdir; U/I: Nave 1994 tarafından tanımlanamayan çizgileri ifade eder.

Atomik Tür	λ (Å)	EW (mÅ)	$\log \epsilon(X)$ (dex)	LEP (eV)	$\log \Gamma$ (rad cm ³ s ⁻¹)	$\log gf$					RMT
						VALD	MB99	AN16	DR17	NIST	
Fe I	15080.25	16.7	7.39	6.26	-7.71 ^K	-0.84	-1.19	-	-0.61	-	2465
Fe I	15120.50	23.0	7.47	5.45	-7.71 ^K	-1.49	-1.58	-	-1.02	-0.80	1983
Fe I	15122.38	94.0	7.40	5.62	-7.55 ^K	-0.21	-0.61	-0.38	-0.38	-	2066
Fe I	15176.72	31.6	7.51	5.92	-7.58 ^K	-0.50	-0.95	-0.88	-0.76	-	2217
Fe I	15179.75	13.3	7.42	5.98	-7.58 ^K	-1.24	-1.75	-	-3.28	-	2217
Fe I	15182.92	18.0	7.18	6.33	-7.70 ^K	-0.53	-	-	-0.54	-	2426
Fe I	15194.50 ^S	13.2	7.47	2.22	-7.76 ^K	-4.82	-4.85	-4.80	-4.74	-	265
Fe I	15201.57	28.2	7.56	5.49	UNS	-0.16	-1.45	-1.34	-0.41	-	U/I
Fe I	15207.54 ^S	193.9	7.64	5.39	-7.52 ^K	0.32	-0.10	0.04	0.06	-	1956
Fe I	15213.02	17.6	7.44	6.31	-7.70 ^K	-0.47	-0.83	-0.94	-0.63	-	2453
Fe I	15237.77	9.3	7.44	5.79	-7.70 ^K	-1.91	-1.59	-1.60	-1.47	-	2167
Fe I	15239.74	49.5	7.38	6.42	-7.50 ^K	-0.03	-0.15	-0.03	-0.05	-	2591
Fe I	15267.02	6.5	7.50	5.07	-7.72 ^K	-2.16	-2.49	-	-2.42	-	1896
Fe I	15301.56	40.5	7.52	5.92	-7.58 ^K	-0.69	-0.84	-	-0.65	-	2212
Fe I	15315.66	9.0	7.43	6.28	-7.45 ^K	-3.40	-1.17	-	-2.86	-	2395
Fe I	15343.81	65.2	7.52	5.65	-7.56 ^K	-0.58	-0.78	-	-0.63	-	2066
Fe I	15381.98	42.2	7.61	3.64	UNS	-	-3.03	-	-	-	U/I
Fe I	15427.61	8.4	7.55	6.45	-7.42 ^K	-0.66	-0.98	-1.18	-0.76	-	2574
Fe I	15522.64	12.3	7.49	6.32	-7.71 ^K	-1.12	-1.07	-0.88	-0.92	-	2442
Fe I	15524.30	13.7	7.50	5.79	-7.70 ^K	-0.88	-1.51	-1.45	-1.46	-	2166
Fe I	15527.21	10.5	7.46	6.32	UNS	-1.81	-1.01	-0.98	-1.11	-	2422
Fe I	15534.26	108.0	7.45	5.64	-7.55 ^K	-0.38	-0.47	-0.34	-0.32	-	2066
Fe I	15565.23	14.8	7.46	6.32	-7.70 ^K	-0.56	-0.95	-0.96	-0.77	-	2424
Fe I	15566.72	33.9	7.48	6.35	-7.71 ^K	-0.68	-0.50	-0.54	-0.35	-	2469
Fe I	15579.08	11.5	7.47	6.32	UNS	-2.12	-0.99	-1.09	-1.15	-	2420
Fe I	15611.15	50.2	7.43	3.41	-7.78 ^K	-3.77	-3.20	-2.98	-3.48	-	1224
Fe I	15648.52 ^S	90.6	7.46	5.43	-7.52 ^K	-0.60	-0.80	-0.73	-0.65	-	1956
Fe I	15652.87	74.1	7.49	6.25	-7.70 ^K	-0.16	-0.19	-0.17	-0.01	-	2421
Fe I	15670.13	14.5	7.45	6.20	-7.43 ^K	-0.99	-1.04	-1.07	-0.85	-	2378
Fe I	15700.08	8.8	7.34	6.33	-7.30 ^K	-2.15	-1.08	-	-0.98	-	2420
Fe I	15731.41	17.9	7.35	6.45	-7.49 ^K	-0.34	-0.66	-0.87	-0.47	-	2578
Fe I	15733.51	26.1	7.46	6.25	-7.71 ^K	-0.98	-0.76	-0.90	-0.56	-	2439
Fe I	15829.29	11.4	7.44	6.30	-7.70 ^K	-1.20	-1.10	-	-0.83	-	2410
Fe I	15840.19	39.3	7.40	6.36	-7.70 ^K	-1.16	-0.40	-	-0.28	-	2412
Fe I	15858.66	26.5	7.45	5.59	-7.58 ^K	-0.49	-1.34	-1.08	-1.22	-	2064
Fe I	15868.52	147.4	7.51	5.59	-7.48 ^K	0.09	-0.26	-0.24	-0.17	-	2063
Fe I	15901.53	62.3	7.49	5.92	-7.58 ^K	-0.88	-0.60	-0.57	-0.51	-	2209
Fe I	15904.35	137.1	7.36	6.36	-7.69 ^K	0.45	0.25	-	0.25	-	2483
Fe I	15906.04	137.9	7.49	5.62	-7.48 ^K	-0.34	-0.34	-0.20	-0.25	-	2061
Fe I	15929.48	33.0	7.45	6.31	-7.71 ^K	-0.38	-0.59	-0.61	-0.43	-	2441
Fe I	15934.02	42.8	7.43	6.31	-7.71 ^K	-0.29	-0.43	-0.44	-0.21	-	2441
Fe I	15940.92	17.1	7.51	5.81	-7.70 ^K	-1.59	-1.42	-1.23	-1.25	-	2186
Fe I	15941.85	70.7	7.46	6.36	-7.53 ^K	0.27	-0.04	-0.13	0.06	-	none
Fe I	15971.25	35.0	7.38	6.41	-7.49 ^K	-0.14	-0.41	-	-0.32	-	2576
Fe I	16019.79	19.9	7.50	6.35	-7.70 ^K	-0.59	-0.81	-0.87	-0.59	-	2411
Fe I	16051.74	16.8	7.48	6.26	-7.71 ^K	-0.94	-0.95	-1.01	-0.80	-	2463
Fe I	16171.93	29.7	7.37	6.38	-7.70 ^K	-0.45	-0.52	-0.47	-0.43	-	2483

(^S) Smith vd. 2013 tarafından bildirilen $\log gf$ değerleridir. Sırasıyla 15 194.50 Å için -4.78 dex, 15 207.54 Å için 0.08 dex ve 15 648.52 Å için **-0.70** dex'tir. (^K) Kurucz sönümlemesi ve [UNS] Unsöld sönümlemesi.

TABLO EK.8. Tayfsal analizler için Y -, J -, H - ve K - bantlarındaki çizgi listesindeki demir çizgileri. Mavi renkteki geçişler, Andreassen vd. 2016 tarafından bildirilen geçişlere uygulanan RMT analizi ile yeni çizgi listesine eklenen ek çizgilerdir.

Atomik Tür	λ	EW	$\log \epsilon(X)$	LEP	$\log \Gamma$	$\log gf$					RMT
	(Å)	(mÅ)	(dex)	(eV)	($\text{rad cm}^3 \text{s}^{-1}$)	VALD	MB99	AN16	DR17	NIST	
Fe I	16225.64	80.6	7.44	6.38	-7.70^{K}	0.30	-0.03	-	0.11	-	2483
Fe I	16228.67	6.3	7.53	6.38	-7.67^{K}	-0.89	-1.18	-	-1.13	-1.41	none
Fe I	16231.67	142.2	7.41	6.38	-7.67^{K}	0.60	0.42	0.31	0.47	-	2551
Fe I	16235.98	86.0	7.48	5.92	-7.58^{K}	-0.02	-0.45	-0.39	-0.30	-	2218
Fe I	16252.57	38.0	7.46	6.32	-7.55^{K}	-0.31	-0.50	-0.54	-0.41	-	2423
Fe I	16258.93	19.2	7.54	6.24	-7.43^{K}	-1.03	-0.90	-	-0.78	-	2378
Fe I	16277.50	34.4	7.38	6.32	-7.43^{K}	-3.07	-0.51	-	-0.41	-	2417
Fe I	16474.09	58.0	7.50	6.02	-7.57^{K}	-0.50	-0.60	-0.57	-0.62	-0.96	2297
Fe I	16506.30	71.0	7.53	5.95	-7.57^{K}	-0.46	-0.56	-	-0.41	-	2284
Fe I	16532.01	74.7	7.47	6.29	-7.70^{K}	-0.82	-0.19	-0.19	-0.08	-	2463
Fe I	16544.70	46.4	7.46	6.34	UNS	-0.03	-0.42	-0.3	-0.25	-	2549
Fe I	16552.02	75.9	7.47	6.41	-7.66^{K}	0.34	-0.01	-0.08	0.12	-	2552
Fe I	16559.71	44.5	7.42	6.40	-7.66^{K}	0.21	-0.35	-0.31	-0.20	-	2551
Fe I	16586.06	19.7	7.49	5.62	-7.48^{K}	-0.75	-1.53	-1.52	-1.39	-	2063
Fe I	16607.65	31.9	7.43	6.34	-7.41^{K}	-1.60	-0.59	-0.57	-0.51	-	2407
Fe I	16619.73	15.5	7.48	5.59	-7.48^{K}	-0.86	-1.66	-	-1.47	-	2063
Fe I	16645.88	97.1	7.47	5.96	-7.58^{K}	-0.03	-0.34	-0.27	-0.20	-	2209
Fe I	16648.24	24.0	7.38	6.55	-7.49^{K}	-0.50	-0.45	-	-0.28	-	2644
Fe I	16665.49	97.8	7.52	6.02	-7.57^{K}	-0.04	-0.30	-0.26	-0.26	-	2291
Fe I	16685.58	54.2	7.49	6.34	-7.27^{K}	-2.95	-0.56	-	-0.36	-	2404
Fe I	16693.11	37.1	7.40	6.42	-7.66^{K}	-0.14	-0.41	-	-0.26	-	2552
Fe I	16898.90	18.1	7.48	6.31	-7.70^{K}	-0.91	-0.94	-	-0.78	-	2451
Fe I	16900.23	7.1	7.37	6.30	-7.70^{K}	-0.81	-1.27	-	-1.15	-	2408
Fe I	16910.69	4.0	7.41	5.87	-7.70^{K}	-1.61	-1.94	-	-1.96	-	2246
Fe I	16969.91	91.2	7.52	5.95	-7.57^{K}	-0.07	-0.37	-	-0.25	-	2287
Fe I	17005.45	94.2	7.52	6.07	-7.57^{K}	0.01	-0.25	-	-0.08	-	2295
Fe I	17009.02	33.4	7.48	6.62	-7.70^{K}	-0.30	-0.20	-0.37	-	-	2657
Fe I	17027.62	20.5	7.54	6.62	-7.70^{K}	-	-0.67	-	-	-	2657
Fe I	17037.79	41.6	7.45	6.39	-7.68^{K}	-0.85	-0.42	-0.52	-	-	2599
Fe I	17052.20	27.8	7.42	6.39	-7.68^{K}	-0.74	-0.60	-	-	-	2599
Fe I	17067.67	64.2	7.43	6.37	-7.46^{K}	-2.02	-0.17	-	-	-	none
Fe I	17072.86	8.0	7.44	5.07	-7.72^{K}	-1.91	-2.41	-	-	-	1893
Fe I	17161.12	92.2	7.46	6.02	-7.57^{K}	-0.07	-0.32	-0.24	-	-	2284
Fe I	17166.20	48.6	7.53	5.95	-7.57^{K}	-0.81	-0.79	-	-	-	2291
Fe I	17200.34	14.2	7.38	6.36	-7.69^{K}	-0.64	-0.91	-	-	-	2481
Fe I	17221.43	13.4	7.36	6.43	-7.64^{K}	-0.71	-0.85	-0.74	-	-	2629
Fe I	17257.59	38.0	7.50	6.32	-7.70^{K}	-0.38	-0.58	-	-	-	2421
Fe I	17278.72	15.4	7.27	6.72	-7.70^{K}	-0.44	-0.39	-	-	-	2702
Fe I	17282.32	60.0	7.46	6.43	-7.64^{K}	0.10	-0.16	-0.19	-	-	2629
Fe I	17420.83	6.3	7.42	3.88	-7.76^{K}	-2.88	-3.62	-	-	-	1437
Fe I	17433.67	37.0	7.47	6.41	-7.66^{K}	0.03	-0.43	-0.48	-	-	2550
Fe I	17488.61	25.1	7.57	6.41	-7.66^{K}	-0.13	-0.78	-	-	-	2550
Fe I	17500.01	24.7	7.48	5.96	-7.58^{K}	-0.76	-1.10	-1.28	-	-	2207
Fe I	17531.20	9.3	7.24	6.64	-7.70^{K}	-0.71	-0.68	-	-	-	2696
Fe I	17534.80	23.1	7.26	6.64	-7.70^{K}	-0.13	-0.31	-	-	-	2696
Fe I	17536.93	38.6	7.54	5.91	-7.70^{K}	-	-0.97	-	-	-	none

(^K) Kurucz sönümlemesi ve [UNS] Unsöld sönümleme.

TABLO EK.9. Tayfsal analizler için Y -, J -, H - ve K - bantlarındaki çizgi listesindeki demir çizgileri. APOGEE DR17’de hem Fe I hem de Fe II olarak listelenen demir geçişleri için dalga boyları bold olarak gösterilmiştir.

Atomik Tür	λ	EW	$\log \epsilon(X)$	LEP	$\log \Gamma$	$\log gf$					RMT
	(Å)	(mÅ)	(dex)	(eV)	($\text{rad cm}^3 \text{s}^{-1}$)	VALD	MB99	AN16	DR17	NIST	
Fe I	17575.32	10.1	7.36	6.40	-7.43^{K}	-0.82	-1.01	-	-	-	2501
Fe I	17695.94	60.9	7.52	5.95	-7.56^{K}	-0.52	-0.65	-	-	-	2291
Fe I	17714.37	12.1	7.36	6.58	-7.55^{K}	-0.76	-0.64	-0.40	-	-	2656
Fe I	17717.16	24.0	7.46	6.34	-7.70^{K}	-0.36	-0.75	-	-	-	2561
Fe I	17747.37	50.9	7.50	5.92	-7.58^{K}	-1.91	-0.76	-	-	-	2209
Fe I	17926.40	61.6	7.48	6.74	-7.70^{K}	0.05	0.27	-	-	-	2702
Fe I	19923.34	46.4	7.43	5.02	-7.59^{K}	-1.56	-	-1.55	-	-	1800
Fe I	20363.27	46.1	7.46	6.07	-7.57^{K}	-1.13	-	-0.63	-	-	2295
Fe I	20716.94	87.3	7.21	6.02	-7.57^{K}	-0.01	-	-	-	-	2286
Fe I	21178.16	8.5	7.33	3.02	-7.78^{K}	-4.01	-	-4.24	-	-	902
Fe I	21238.47	73.5	7.49	4.96	-7.58^{K}	-1.42	-	-1.37	-	-	1800
Fe I	21284.35	4.7	7.39	3.07	-7.71^{K}	-4.26	-	-4.51	-	-	902
Fe I	21515.15	11.6	7.64	5.34	-7.58^{K}	-2.17	-	-1.88	-	-	1971
Fe I	21553.30	11.1	7.51	6.70	-7.55^{K}	-0.50	-	-0.81	-	-	2735
Fe I	21735.46	27.3	7.45	6.17	-7.38^{K}	-0.72	-	-0.80	-	-	2344
Fe I	21813.98	8.2	7.48	5.85	-7.66^{K}	-1.39	-	-1.69	-	-	2162
Fe I	21851.38	10.0	7.38	3.64	-7.84^{K}	-3.61	-	-3.59	-	-	1362
Fe I	22257.11	138.6	7.49	5.06	-7.58^{K}	-0.71	-	-0.87	-	-	1856
Fe I	22385.10	23.3	7.21	5.32	-7.58^{K}	-1.36	-	-1.42	-	-	1941
Fe I	22392.88	61.9	7.48	5.10	-7.59^{K}	-1.25	-	-1.35	-	-	1856
Fe I	22419.98	58.3	7.42	6.22	-7.38^{K}	-0.16	-	-0.30	-	-	2344
Fe I	23308.48	27.7	7.35	4.08	-7.73^{K}	-2.31	-	-2.66	-	-	1484
Fe I	15531.75	87.1	7.49	5.64	-7.48^{K}	-0.24	-0.73	-0.57	-0.56	-	2061
Fe II	15531.74*	87.1	7.44	13.25	UNS	-3.27	-	-	-4.84	-	-
Fe I	15928.16	38.1	7.50	5.95	-7.57^{K}	-0.68	-0.88	-0.86	-0.68	-	2297
Fe II	15928.14*	38.1	7.47	13.33	UNS	-4.53	-	-	-4.53	-	-
Fe I	15952.63	27.9	7.61	6.34	-7.30^{K}	-3.25	-0.81	-	-0.61	-	2560
Fe II	15952.70*	27.9	7.49	12.9	UNS	-2.49	-	-	-2.49	-	-
Fe II	10366.17	3.5	7.50	6.72	-7.90^{K}	-1.82	-1.76	-	-	-1.83	-
Fe II	10490.90	2.6	7.51	5.55	-7.89^{K}	-2.91	-2.95	-	-	-3.00	-
Fe II	10501.50	18.1	7.50	5.55	-7.89^{K}	-2.01	-2.17	-1.93	-	-2.09	-
Fe II	10546.37	6.7	7.55	9.65	-7.69^{K}	-	0.91	-	-	-0.58	-
Fe II	10655.65	1.4	7.45	6.81	-7.90^{K}	-2.14	-2.12	-	-	-	-
Fe II	10862.64	14.5	7.50	5.59	-7.89^{K}	-2.14	-2.11	-2.04	-	-2.2	-
Fe II	15078.21*	6.4	7.51	12.13	UNS	-4.68	-	-	-4.68	-	-
Fe II	15536.68*	5.8	7.51	13.51	UNS	-7.77	-	-	-7.77	-	-
Fe II	15563.40*	6.5	7.51	13.31	UNS	-4.08	-	-	-4.08	-	-
Fe II	15792.03*	3.3	7.51	12.81	UNS	-6.20	-	-	-6.20	-	-
Fe II	16468.51*	22.1	7.50	13.29	-7.34^{K}	-0.47	-	-	-0.47	-	-
Fe II	17000.92*	92.2	7.50	13.03	-7.62^{K}	-0.69	-	-	-0.71	-	-

(*) $\log gf$ değerleri astrofizikselidir ve bu çalışma kapsamında hesaplanmıştır. (^K) Kurucz sönümlemesi ve [UNS] Unsöld sönümlemesi.

ÖZGEÇMİŞ

Sena Aleyna ŞENTÜRK

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2022-2025	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 2018-2022	Akdeniz Üniversitesi Fen Fakültesi, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Bölümü, Antalya

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler

1 – Şentürk, S. A., Şahin, T., Güney, F., Bilir, S. ve Marışmak, M. (Aralık, 2024), Near-Infrared Spectroscopy of the Sun and Solar Analog Star HD 76151: Compiling an Extensive Line List in Y-, J-, H-, and K-Bands, **The Astrophysical Journal**, 976(2), 175.

2 – Şahin, T., Güney, F., Şentürk, S. A., Çınar, N., Marışmak, M. (Aralık, 2024). An Updated Line List for Spectroscopic Investigation of G Stars-II: Refined Solar Abundances via Extended Wavelength Coverage to 10,000 Å. **Physics and Astronomy Reports**, 2(2), 65-82.

Ulusal ve Uluslararası Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitaplarında Basılan Bildiriler

1 – **Şentürk, S. A.**, Marışmak, M., ve Şahin, T. (Eylül, 2022), Kırmızıöte Bölgede FGK Türü Yıldızlar için Yeni bir Çizgi Listesi: HD 76151 Yıldızının H-Band Tayfsal Analizi, 22. Ulusal Astronomi Kongresi, **Kısa Bildiri**.

2 – **Şentürk, S. A.**, Şahin, T., Marışmak, M. ve Güney, F., (Haziran, 2024), Near-Infrared Spectroscopy of the Sun and Solar Analog Star HD 76151, Cambridge Workshops on Cool Stars, Stellar Systems and the Sun, **e-poster**.

3 – Çınar, N., Marışmak, M., **Şentürk, S. A.**, Güney, F., ve Şahin, T. (Eylül, 2024), FGK Tayf Türü Yıldızların Optik ve Kırmızıöte Bölge Tayfsal Analizleri için Kullanışlı bir Çizgi Listesi, 23. Ulusal Astronomi Kongresi, Poster.

4 – **Şentürk, S. A.**, Şahin, T., Marışmak, M., ve Güney, F. (Ekim, 2024), Understanding the Origin of Solar Analog Star HD76151 in the NIR Region, International School for Young Astronomers (ISYA), **Kısa Bildiri**.

5 – **Şentürk, S. A.** ve Şahin, T. (Mayıs, 2025). The First Infrared Portrait of A Solar-Like Star: Pioneering High-Resolution H- and K- Band Spectroscopy of HD 115617 with Comparative Optical Spectrum Analysis. **The Black Sea Journal of Engineering and Science**, (Yayın Aşamasında).

6 – **Şentürk, S. A.**, ve Şahin, T. (Haziran, 2025), Chemical Abundance Trends in Nearby and Distance Solar Twins, The European Astronomical Society Annual Meeting 2025, **e-poster**.

7 – **Şentürk, S. A.** ve Şahin, T. (Eylül, 2025), HD 115617 Yıldızının Çoklu Dalgaboyu Portresi: Güneş Benzeri mi? Güneş İkizi mi?, Türk Fizik Derneği 10. Fizik Öğrencileri Kongresi, **Kısa Bildiri**.