

Güneş Civarındaki Metalce Fakir Yıldızların SED Yöntemiyle Temel Astrofizik Parametrelerinin Tayini

Deniz Cennet Dursun¹  , Selçuk Bilir² , Timur Şahin³ , Talar Yontan² ,
Olçay Plevne² 

¹ İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Astronomi ve Uzay Bilimleri Programı, İstanbul 34116, Türkiye

² İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, İstanbul 34119, Türkiye

³ Akdeniz Üniversitesi, Fen Fakültesi, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Bölümü, Antalya 07058, Türkiye

Accepted: February 1, 2023. Revised: December 18, 2022. Received: November 14, 2022.

Özet

Bu çalışmada, Güneş civarından seçilmiş metalce fakir yıldızların tayfsal enerji dağılımları (SED) analiz edilmiş ve teorik olarak hesaplanan model atmosfer fitleriyle, yıldızların tayfsal analizlerinde kullanılabilecek öncül temel astrofizik parametreler tayin edilmiştir. Bu amaç doğrultusunda Polarbase veri tabanı ve ELODIE tayf kütüphanesinden metalce fakir 10 yıldız seçilmiş ve bu yıldızların mor-ötesinden orta kızılötesi bölgesine kadarki parlaklıkları yardımıyla SED'leri oluşturulmuştur. İncelenen yıldızların temel astrofizik parametrelerinin yanı sıra uzaklık ve sönmüşlük değerleri de tayin edilmiştir. Elde edilen bulgular, yüksek çözünürlüklü ve yüksek sinyal/gürültü değerli tayflardan hesaplanan model atmosfer parametreleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, [Vines ve Jenkins \(2022\)](#) tarafından sağlanan ve bu çalışma kapsamında uygulanan yöntem ile SED'lerden hesaplanan temel astrofizik parametreleri içerisindeki model atmosfer parametrelerinin yıldızlar için gerçekleştirilecek detaylı bolluk analiz çalışmalarında öncül girdi değerler olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Abstract

In this study, the spectral energy distributions (SED) of metal-poor stars selected from the Sun neighborhood were analyzed. Then, the basic astrophysical parameters that can be used in the spectral analyzes of the stars are determined by using the theoretically calculated model atmosphere fits. Therefore, 10 metal-poor stars were selected from the Polarbase database and the ELODIE spectral library, and their SEDs were generated using their luminosities from the ultraviolet to the mid-infrared region. In addition to the basic astrophysical parameters of the studied stars, their distance and extinction values were also determined. The obtained findings were compared with model atmosphere parameters calculated from high resolution and high signal/noise spectra. The results showed that model atmosphere parameters within the basic astrophysics parameters calculated from SEDs with the method provided by [Vines ve Jenkins \(2022\)](#) and applied in this study can be used as preliminary input values in detailed abundance analysis studies for stars.

Anahtar Kelimeler: Galaxy: solar neighbourhood, stars: metal-poor stars, SED

1 Giriş

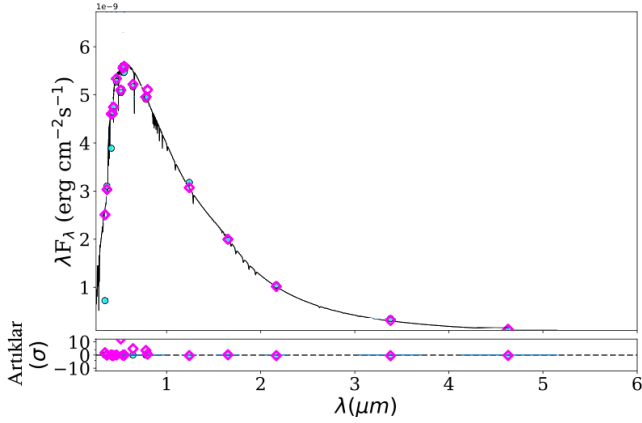
Samanyolunun kimyasal evriminin araştırılmasında F-G-K tayf türündeki metalce fakir yıldızların kullanılması, Galaktik yıldız popülasyonlarının oluşum senaryolarının sınanması ve yıldız evriminin erken döneminde gerçekleşen çekirdek tepkimelerinin modellenmesi aşamasında önemlidir. Galaksinin kimyasal olarak zenginleşmesine yönelik senaryoların anlaşılması ve/veya mevcut olanların sınanması, element bolluklarının farklı popülasyonlara göre dağılımlarının incelenmesiyle mümkündür. Galaksimizin halo alt bileşenlerinin (iç ve dış halo) keşfiyle başlayan serüven, söz konusu halo üyesi yıldızlar için güncel element bolluklarına olan gereksinimi açıkça vurgulamaktadır ([Grillmair 2006](#); [Belokurov ve diğ. 2007](#); [Kepley ve diğ. 2007](#); [Sesar ve diğ. 2007](#); [Klement 2010](#); [Helmi ve diğ. 2017](#); [Li ve diğ. 2019](#)).

Yer ve uzay tabanlı gözlemlerden elde edilen tayfsal, astrometrik ve fotometrik verilerin analizleriyle yıldızların temel astrofizik parametreleri belirlenmektedir. Geleneksel olarak

yıldızların duyarlı bir şekilde etkin sıcaklıkları, yüzey çekim ivmeleri, metal bollukları ve mikrotürbülans hızları gibi temel parametrelerinin elde edilmesinde yüksek çözünürlüklü ve yüksek sinyal/gürültü (S/N) değerli tayflar kullanılmaktadır. Fakat bu yöntem göreceli olarak parlak yıldızlar için duyarlı sonuçlar verirken sönmüş yıldızlarda ($V \geq 13$ kadir) duyarlılık azalmaktadır.

Günümüzde yıldızların astrofiziksel parametrelerini tayin etmek için farklı yöntemler ortaya konmuştur. Bu yöntemlerden en sık kullanılanlardan biri de, yıldızların farklı fotometrik veriler ile oluşturulan SED'lerin sentetik atmosfer modelleriyle sınanmasına dayanmaktadır. Bu yöntemde incelenen yıldızın parlaklıkları akı değerlerine dönüştürülerek tayfsal enerji dağılımları elde edilmektedir. Ardından, incelenen yıldız için oluşturulan SED farklı metal bollukları ve farklı yaşlar için üretilen sentetik atmosfer modeller ile karşılaştırılmaktadır. SED'i temsil eden en uyumlu atmosfer modelinin etkin sıcaklık, yüzey çekim ivmesi ve metal bolluğu değerleri yıldızın temel astrofizik parametre değerlerinin kabulüne dayanmaktadır ([Robitaille ve diğ. 2007](#); [Pecaut ve diğ. 2013](#); [Bayliss ve diğ. 2018](#); [Morrell ve Naylor 2019](#); [Martinez ve diğ. 2019](#)).

* denizcdursun@gmail.com



Şekil 1. HD 345957 yıldızı için Kurucz modeliyle eşleşen SED eğrisi (üst panel) ve model ile gözlemsel veriler arasındaki farklar (alt panel). Mavi daire sembolü gözlemsel parlaklıklardan hesaplanan akıları, pembe elmas sembolü ise sentetik verileri göstermektedir.

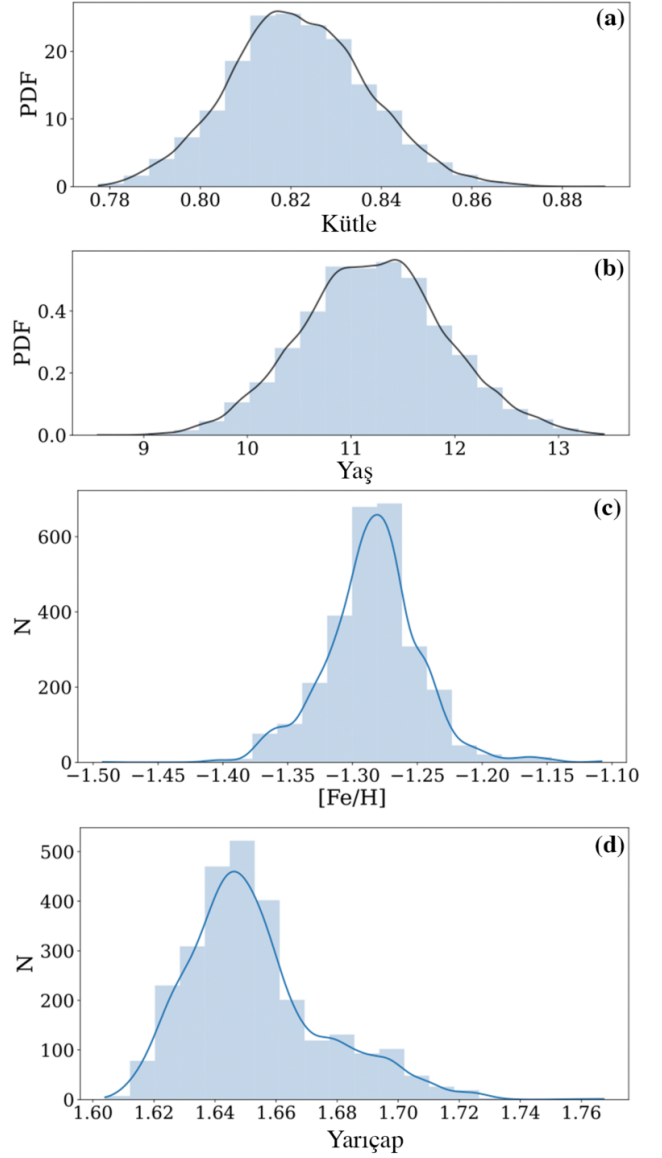
Bu çalışmada, Güneş civarında tayfsal yöntemler ile analiz edilen metalce fakir 10 yıldızın atmosfer model parametreleri güncel bir SED analiz koduyla yeniden incelenmiştir. Literatürden farklı olarak yıldızların atmosfer model parametreleri dışında uzaklıkları, sönükleşmeleri, kütle ve yarıçap parametreleri de belirlenmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde kullanılan yıldızların verileri, üçüncü bölümde analiz yöntemi ve elde edilen bulgular, son olarak dördüncü bölümde de ulaşılan sonuçlar literatürdekiler ile karşılaştırılarak bir tartışma yapılmıştır.

2 Veri

Çalışmada orta tayf türünde (F-G-K) yüksek çözünürlüklü ve yüksek S/N değerli tayfları bulunan üç yıldız **ELODIE** (Soubiran ve diğ. 2003) ve yedi yıldız **PolarBase** (Donati ve diğ. 1997; Petit ve diğ. 2014) tayf kütüphanelerinden olmak üzere toplam 10 yıldız dikkate alınmıştır. ELODIE ve PolarBase kütüphanelerindeki yıldız tayflarının çözünürlükleri ve S/N değerleri sırasıyla $R=42\ 000$ ile $40 \leq S/N \leq 140$ ve $R=76\ 000$ ile $200 \leq S/N \leq 400$ arasında değişmektedir. Her bir yıldızın 10 ile 110 arasında değişen sayıda tayfsal çalışması bulunduğu tespit edilmiştir. Tayf verileri kullanılarak literatüre kazandırılan çalışmalar dikkate alındığında belirlenen yıldızların etkin sıcaklıklarının $5000 \leq T_{\text{eff}} \leq 6200$ K, yüzey çekim ivmelerinin $4 \leq \log g \leq 4.8$ cm s^{-2} ve metal bolluklarının $-2 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -0.75$ dex aralığında değiştiği belirlenmiştir.

3 Analizler

Bu çalışmada, metalce fakir yıldızların SED analizlerini gerçekleştirmek üzere literatüre yeni kazandırılan spectrAl eneRgy dIstribution bAyesian moDeL averagiNg fittEr (ARIADNE) programı kullanılmıştır (Vines ve Jenkins 2022). ARIADNE yazılımıyla tek yıldızların, etkin sıcaklık (T_{eff}), yüzey çekim ivmesi ($\log g$), metal bolluğu $[\text{Fe}/\text{H}]$, sönükleşme (A_V), uzaklık (d), kütle (M), yarıçap (R) ve yaş (t) değerlerinin belirlenmesinde PHOENIX v2 (Husser ve diğ. 2013), BT-Sett1 (Allard ve diğ. 2012), BT-NextGen (Hauschildt ve diğ. 1999), BT-Cond (Allard ve diğ. 2012), (Castelli ve Kurucz 2003) ve KURUCZ (Kurucz 1993) gibi literatürde tayfsal analizlerde sıklıkla tercih edilen sentetik tayf kütüphaneleri kullanılmıştır.



Şekil 2. HD 345957 yıldızı için kütle (a), yaş (b), metal bolluğu (c) ve yarıçap (d) dağılımları. N model sayısını, PDF ise olasılık yoğunluk fonksiyonunu ifade etmektedir.

Ayrıca yıldızların kütleleri ve yaşlarının hesaplanmasında MIST evrim modelleri (Morton 2015; Dotter 2016) kullanılmaktadır. Program SED'leri oluştururken, öncelikle yıldızların güncel astrometrik ve fotometrik verilerini *Gaia* DR3 (Gaia işbirliği 2022) katalogundan seçmekte ve yıldızların koordinat verilerini dikkate alarak diğer gökyüzü tarama programlarındaki fotometrik verilere ulaşmaktadır. Genel olarak yıldızların SED'lerinin oluşturulmasında elektromanyetik tayfin $0.1 < \lambda < 5$ μm dalgaboyu aralığında 20'den fazla parlaklık verisi kullanılmaktadır. Programın çalıştırılması neticesinde her bir yıldız için en az 15 dakikalık bir süre içerisinde SED dağılımları oluşturulmakta ve seçilen altı sentetik tayf kütüphanesindeki model atmosferler ile karşılaştırılarak yıldız için en uygun olan temel astrometrik parametreleri belirlenmektedir.

Çalışmada incelenen yıldızların sayısı fazla olduğundan örnek teşkil etmesi için HD 345957 yıldızının ARIADNE

Çizelge 1. İncelenen 10 yıldızın ARIADNE programıyla tayin edilen temel parametreleri ve tayf türleri. Yıldızların T_{eff} etkin sıcaklığını, $\log g$ yüzey çekim ivmesini, $[\text{Fe}/\text{H}]$ metal bolluğunu, A_V sönmüşlüğü, d_{SED} SED analizleriyle hesaplanan uzaklığını, d_{∞} *Gaia* trigonometrik paralaks ölçümlerinden hesaplanan uzaklığını, M kütlesini, R yarıçapını ve t yaşını göstermektedir.

Sıra	Yıldız	Tayf Türü	T_{eff} (K)	$\log g$ (cgs)	$[\text{Fe}/\text{H}]$ (dex)	A_V (kadir)	d_{SED} (pc)	d_{∞} (pc)	M (M_{\odot})	R (R_{\odot})	t (Gyıl)
1	BD -01 306	G2V	5766±60	4.52±0.02	-0.99±0.02	0.031±0.020	62±0.2	61±0.4	0.741±0.027	0.895±0.016	13.10±1.72
2	BD +07 4841	F8V	6148±64	4.33±0.07	-1.40±0.03	0.143±0.055	157±1.7	157±0.9	0.764±0.016	1.235±0.039	13.28±1.00
3	BD +36 2165	F8V	6133±22	4.20±0.08	-1.52±0.02	0.014±0.018	140±4.6	137±0.9	0.771±0.009	1.332±0.048	13.40±0.33
4	BD +41 3931	G7V	5573±25	4.66±0.05	-1.76±0.02	0.126±0.067	72±0.2	72±0.3	0.701±0.026	0.663±0.007	12.77±3.78
5	HD 103095	K2V	5069±26	4.67±0.08	-1.21±0.07	0.019±0.013	99±0.1	100±0.4	0.613±0.021	0.624±0.036	11.87±5.66
6	HD 105757	G1V	5831±56	4.11±0.06	-0.78±0.02	0.024±0.017	184±0.2	191±7.1	0.902±0.049	1.465±0.035	11.00±3.06
7	HD 188510	G5V	5634±29	4.66±0.06	-1.60±0.06	0.087±0.078	38±0.1	38±0.2	0.776±0.024	0.679±0.012	13.07±1.14
8	HD 201891	G5V	5928±24	4.44±0.06	-1.09±0.06	0.263±0.089	34±0.1	33±0.2	0.781±0.015	1.006±0.019	13.34±0.98
9	HD 284248	F8V	6165±32	4.34±0.09	-1.61±0.07	0.079±0.039	90±1.3	88±0.5	0.756±0.011	1.099±0.022	13.17±0.31
10	HD 345957	G6V	5606±41	4.12±0.08	-1.28±0.01	0.237±0.044	110±0.1	110±0.5	0.817±0.024	1.647±0.033	11.43±1.11

ile belirlenmiş SED dağılımı ve bu dağılıma en uygun fit edilen Kurucz (1993) atmosfer model eğrisi Şekil 1'de, yıldızın kütle, yaş, metal bolluğu ve yarıçap değerlerine ait olasılık dağılım fonksiyonları da Şekil 2'de gösterilmiştir. Histogramlara uygulanan Bayes yaklaşımıyla yapılan fitlerin tepe noktaları yıldızın ilgili parametresinin en olası değerini ifade etmektedir. Çalışmada incelenen 10 yıldızın SED analiziyle tayin edilen temel astrofizik parametreleri Çizelge 1'de listelenmiştir. Analizler sonucunda yıldızların etkin sıcaklıklarının $5069 \leq T_{\text{eff}}(\text{K}) \leq 6165$, yüzey çekim ivmelerinin $4.11 \leq \log g(\text{cm s}^{-2}) \leq 4.67$ ve metal bolluklarının da $-1.76 \leq [\text{Fe}/\text{H}](\text{dex}) \leq -0.78$ aralığında bulunduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, yıldızların orta tayf türünde, anakol sınıfında ve metalce fakir olduğunu göstermektedir.

4 Tartışma ve Sonuçlar

Bu çalışmada, literatürde metalce fakir olarak sınıflanan 10 yıldızın fotometrik verileri farklı gökyüzü tarama programlarından derlenerek $0.1 < \lambda < 5 \mu\text{m}$ dalgaboyu aralığında SED'leri oluşturulmuştur. Yıldızlara ait SED'ler altı farklı sentetik atmosfer model kütüphanesiyle karşılaştırılarak yıldızların etkin sıcaklıkları, yüzey çekim ivmeleri, metal bollukları, V-bandı sönmüşlüğü, uzaklıkları, kütleleri, yarıçapları ve yaşları gibi temel astrofizik parametreleri elde edilmiştir.

Çalışmada SED analizleri yapılırken çok sayıda parametre eş zamanlı tayin edildiğinden, parametreler arasında bir dejenerasyonluğun bulunabileceğini söz konusudur. HD 345957 yıldızının ARIADNE ile hesaplanan parametreleri arasındaki dejenerasyonluğunu inceleyebilmek için her bir parametre kendi içinde analiz edilmiş ve köşegen histogramları oluşturulmuştur (Şekil 3). Parametreler ait histogramlar genellikle Gauss benzeri bir dağılım göstermektedir. Bu da ARIADNE ile hesaplanan değerlerin kendi aralarında parametre dejenerasyonluğuna uğramadığını gösteren önemli delillerden biridir. Parametre dejenerasyonluğunu ortadan kaldırmanın en iyi yöntemlerinden biri de parametrenin iki farklı yöntem ile bağımsız olarak test edilmesidir. Çizelge 1'de verilen parametreler arasında bağımsız yöntem ile tayin edilen en iyi parametre uzaklıktır. Program dahilinde incelenen yıldızlar, *Gaia* uydusu tarafından gözleendiği için trigonometrik paralaks verileri bulunmaktadır. Yıldızların trigonometrik paralaks verileri dikkate alınarak $d(\text{pc}) = 1000/\varpi$ (mas) bağıntısıyla uzaklıkları (d_{∞}) elde edilmiş ve Çizelge 1'de SED yöntemiyle belirlenen

uzaklıkları (d_{SED}) karşılaştırılmıştır. Yıldız uzaklıkları arasında sadece birkaç pc'lik farkların bulunduğu tespit edilmiştir. İki farklı yöntemden hesaplanan yıldız uzaklık farklarının ortalaması $\Delta d = 0.73$ pc ve standart sapması da $\sigma(\Delta d) = 0.88$ pc olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, SED analizleriyle hesaplanan uzaklıkların doğru ve duyarlı olduğunu belirtmekle birlikte, yıldız uzaklıklarının parametre dejenerasyonluğuna uğramadığı bağımsız bir yöntem ile sınanarak gösterilmiştir.

Çalışmada incelenen 10 yıldızın hesaplanan atmosfer model parametrelerinin doğruluğunu ve duyarlılığını daha iyi ortaya koyabilmek için literatürdeki diğer tayfsal çalışmalar dikkate alınmıştır. Yıldızların literatür taramaları yapıldığında 10 ile 110 arasında değişen sayıda tayfsal çalışması tespit edilmiş ve yıldızların etkin sıcaklık, yüzey çekim ivmesi ve metal bolluk değerleri dikkate alınarak bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4). Ayrıca aynı şekil üzerine, HD 345957 ve HD 188510 yıldızları dışında, sekiz yıldızın *Gaia* DR3'te (*Gaia* işbirliği 2022) verilen temel astrofizik değerleri de (kırmızı yıldız sembolleri) gösterilmiştir. Literatürdeki yıldızların atmosfer model parametreleri dikkate alındığında (yeşil noktalar), etkin sıcaklık, yüzey çekim ivmesi ve metal bolluk değerleri için en küçük ve en büyük değişim aralıklarının sırasıyla $350 \leq \Delta T_{\text{eff}}(\text{K}) \leq 700$, $0.45 \leq \Delta \log g(\text{cm s}^{-2}) \leq 1.40$, $0.25 \leq \Delta [\text{Fe}/\text{H}](\text{dex}) \leq 0.85$ arasında bulunduğu tespit edilmiştir. Çalışmada SED yöntemiyle hesaplanan etkin sıcaklık, yüzey çekim ivmesi ve metal bolluk değerleri literatürdeki aralık içerisinde yer alırken, *Gaia* DR3'te (*Gaia* işbirliği 2022) verilen parametrelerin genellikle literatürün sınır bölgelerinde toplandığı belirlenmiştir. Bu da *Gaia* verilerinin parametre dejenerasyonluğuna uğradığını göstermektedir.

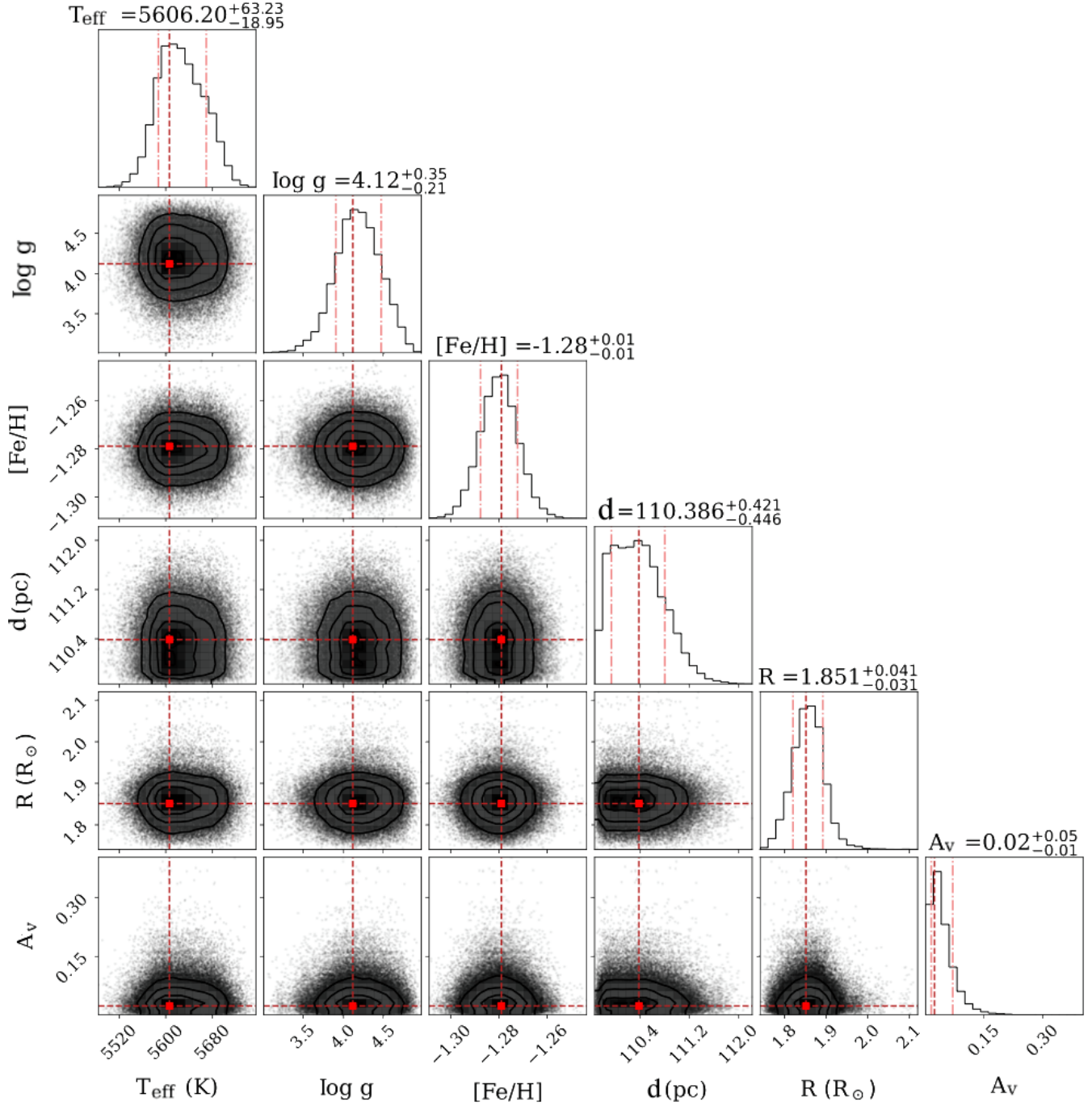
Sonuç olarak yüksek çözünürlüklü tayfları bulunmayan metalce fakir yıldızların ön analizlerinin SED analiz yöntemiyle yeterli doğruluk ve duyarlılık ile yapılabileceği bu çalışmayla ortaya konmuştur.

5 Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 121F265 numaralı projeye desteklenmiştir.

Kaynaklar

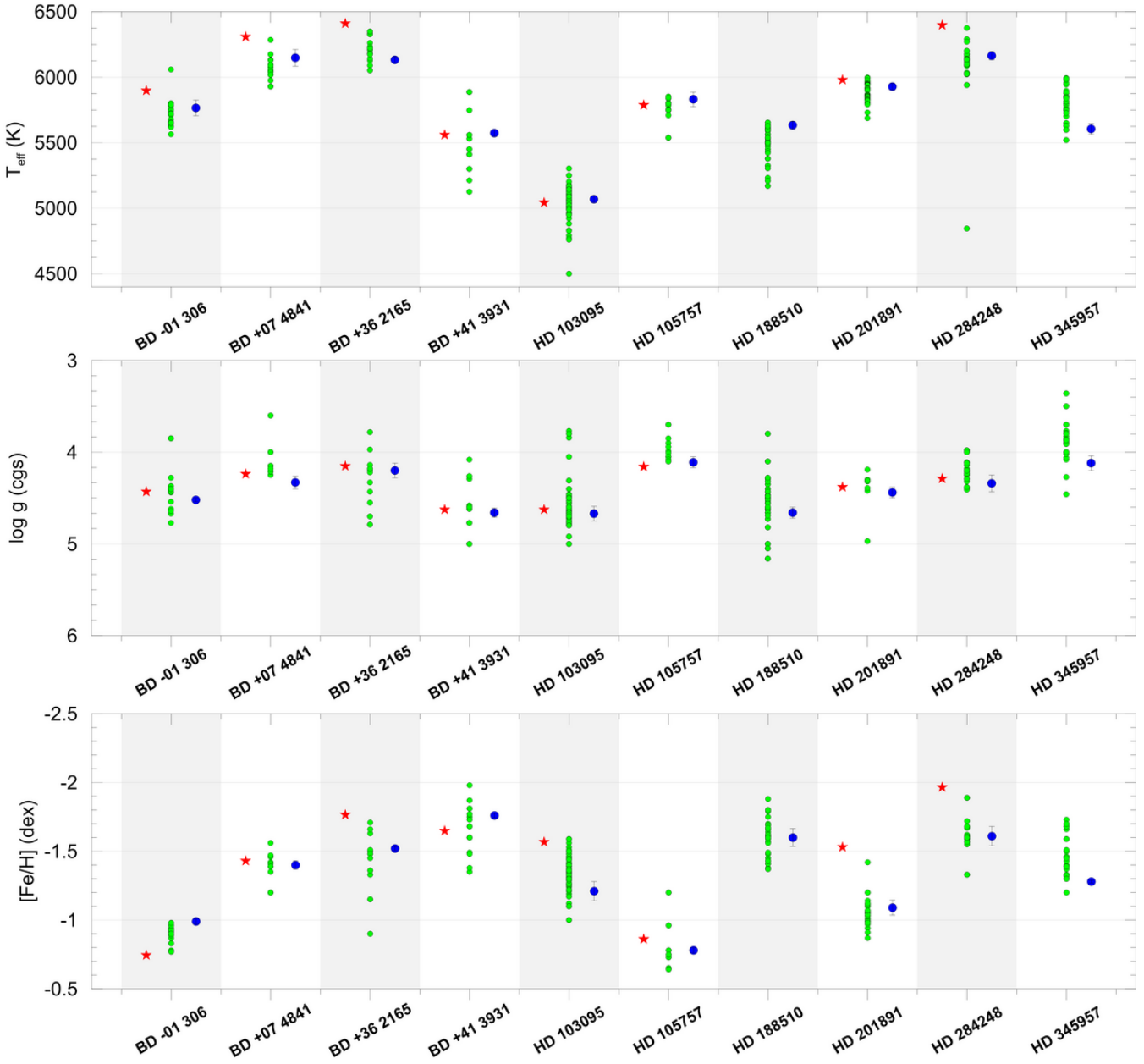
Allard, F., Homeier, D., Freytag, B., 2012, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 370, 2765



Şekil 3. HD 345957 yıldızının Kurucz (1993) modelinden hesaplanan T_{eff} , $\log g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$, d , R ve A_v parametreleri ve bu parametrelerin diğer parametreler ile olan ilişkisi. Analizler sonucunda belirlenen en uygun parametreler ve hataları her bir panelin üst kısmında gösterilmiştir.

Bayliss, D., Gillen, E., Eigmuller, P. ve diğ., 2018, MNRAS, 475, 4467
 Belokurov, V., Evans, N. W., Bell, E. F., ve diğ., 2007, ApJ, 657, 89
 Castelli, F., Kurucz, R. L., 2003, in Piskunov N., Weiss W. W., Gray D. F., Modelling of Stellar Atmospheres, 210, A20
 Donati, J.-F., Semel, M., Carter, B. D., Rees, D. E., Collier, C. A., 1997, MNRAS, 291, 658
 Dotter, A., 2016, ApJS, 222, 8
 Gaia işbirliği, Vallenari, A., Brown, A. G. A., Prustive, T., ve diğ., 2022, arXiv e-prints, arXiv:2208.00211

Grillmair, C. J., 2006, ApJ, 651, 29
 Hauschildt, P. H., Allard, F., Baron, E., 1999, ApJ, 629, 865
 Helmi, A., van Leeuwen, F., McMillan, P. J., ve diğ., 2017, A&A, 598, 58
 Husser, T. O., von Berg, S. W., Dreizler, S., Homeier, D., Reiners, A., Barman, T., Hauschildt, P. H., 2013, A&A, 553, A6
 Kepley, A. A., Morrison, H. L., Helmi, A., ve diğ., 2007, AJ, 134, 1579
 Kurucz, R., 1993, ATLAS9 Stellar Atmosphere Programs and 2 km/s grid. Kurucz CD-ROM No. 13. Cambridge, 13



Şekil 4. Seçilen 10 yıldızın SED analiz tekniğiyle elde edilen sıcaklık T_{eff} , yüzey çekim ivmesi $\log g$ ve metal bolluğu $[\text{Fe}/\text{H}]$ değerlerinin literatür değerleriyle ve *Gaia* DR3 (*Gaia* işbirliği 2022) verileriyle karşılaştırılması. Kırmızı yıldız sembolü *Gaia* DR3 verilerini, yeşil daire sembolü literatür değerlerini ve mavi daire sembolü de bu çalışmada SED ile tayin edilen değerleri göstermektedir.

Klement, R. J., 2010, *A&ARv*, 18, 567

Li, H., Du, C., Liu, S., Donlon, T., Newberg, H. J., 2019, *ApJ*, 874, 74

Martínez-Rodríguez, H., Caballero, J. A., Cifuentes, C., Piro, A. L., Barnes R., 2019, *ApJ*, 887, 261

Morrell, S., Naylor, T., 2019, *MNRAS*, 489, 2615

Morton, T. D., 2015, *isochrones: Stellar model grid package* (ascl:1503.010)

Pecaut, M. J., Mamajek, E. E., 2013, *Astrophysical Journal, Supplement Series*, 208

Petit, P., Louge, T., Théado, S., Paletou, F., Manset, N., Morin, J., Marsden, S. C., ve diğ., 2014, *PASP*, 126, 469.

Recio-Blanco, A., de Laverny, P., Palicio, P. A., ve diğ.2022, *arXiv e-prints*, arXiv:2206.05541

Robitaille, T. P., Whitney, B. A., Indebetouw, R., Wood, K., 2007, *ApJS*, 169, 328

Sesar, B., Ivezić, Z., Lupton, R. H., ve diğ., 2007, *AJ*, 134, 2236

Soubiran, C., Le Campion, J. F., Brouillet, N., Chemin, L., 2016, *A&A*, 591, 1

Vines, J. I., Jenkins, J. S., 2022, *MNRAS*, 513, 2719

Access:

M23-0307: [Turkish J.A&A — Vol.4, Issue 3.](#)