TJAA Vol. **6**, *Special Issue*, *p*.149–158 (2025). DOI: 10.55064/tjaa.1589899 *Research Article*

UPK 45 ve UPK 185 Açık Yıldız Kümelerinin Fotometrik ve Tayfsal İncelenmesi

Rüya Demirci[1] ⋆, İnci Akkaya Oralhan[2], Cenk Kayhan[3]

[1] *Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, 38039, Melikgazi, Kayseri, Türkiye*
[2] *Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, Fen Fakültesi, Erciyes Üniversitesi, 38039, Melikgazi, Kayseri, Türkiye*
[3] *Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü Birimi, Kayseri Üniversitesi, 38280, Talas, Kayseri, Türkiye*

Accepted: March 17, 2025. Revised: March 17, 2025. Received: November 22, 2024.

Özet
Bu çalışmada Ulsan Pusan Korea (UPK) kataloğundan UPK 45 ve UPK 185 açık yıldız kümelerinin (AYK) fotometrik ve tayfsal üyelik analizleri yapılmıştır. Üyelikler ve kümelere ait yaş, uzaklık, kızarma belirlenirken Gaia DR3 astrometrik veriler kullanılmıştır. Large sky Area Multi-Object fiber Spectroscopic Telescope (LAMOST) DR9 tayfsal verileri kullanılarak UPK 45 ve UPK 185'in üye yıldızlarının etkin sıcaklık ($T_{\rm eff}$), yüzey çekim ivmesi ($\log g$), ortalama etal bolluğu ([Fe/H]) değerleri elde edilmiş ve Gaia sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Küme üyesi yıldızlar Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) verileri kullanılarak değişen yıldız analizi yapılmış ve bu yıldızlar değişen türlerine göre sınıflandırılmıştır.

Abstract
In this study, we conducted a photometric and spectral analysis of the membership of the open star clusters UPK 45 and UPK 185, as presented in the Ulsan Pusan Korea (UPK) catalog. The age, distance, and reddening of the memberships and clusters were determined using Gaia DR3 astrometric data. The effective temperature ($T_{\rm eff}$), surface gravitational acceleration ($\log g$), and average metal abundance ([Fe/H]) values of the member stars of UPK 45 and UPK 185 were obtained using the Large Sky Area Multi- Object Fiber Spectroscopic Telescope (LAMOST) DR9 spectral data and compared with the Gaia results. The cluster member stars were analyzed as variable stars using Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) data and classified according to their variable types.

Anahtar Kelimeler: (Galaxy:) open clusters and associations: general – techniques: spectroscopic – techniques: photometric

1 Giriş

Yıldız kümeleri, galaksilerin temel yapı taşlarıdır ve galaksilerin oluşumu ile evrimi hakkında önemli bilgiler sunmaktadır (Janes & Phelps 1994; Friel 1995; Krumholz, McKee, & Bland-Hawthorn 2019). Açık yıldız kümeleri (AYK), çok sayıda yıldızın aynı kütleçekim etkisi altında bir arada bulunduğu ve galaksi diskine yakın konumlanan yıldız gruplarıdır. Bu kümelerdeki yıldızlar, aynı moleküler buluttan oluşmuş olup kimyasal yapıları, yaşları ve uzaklıkları bakımından benzerlik gösterir. Galaktik düzleme yakın bir konumda bulunan AYK'lar, Galaktik diskin evrimini incelemek için bize önemli ipuçları sunmaktadır (Chen, Hou, & Wang 2003; Jacobson ve diğ. 2016).

Çalışmamızda, yeni bir katalog olan UPK kataloğundan seçilen UPK 45 ve UPK 185 açık kümeleri incelenmiştir. Buna göre, çeşitli araştırmacılar bu kümelerin yaş, uzaklık, metal bolluğu ve öz hareket bileşenleri gibi temel parametrelerini belirlemiştir. Cantat-Gaudin & Anders (2020), Gaia DR2 verilerini kullanarak UPK 45'in öz hareket bileşenlerini $\mu_\alpha \cos\delta$=-0.714 mas yıl^{-1} ve μ_δ=-2.092 mas yıl^{-1} olarak hesaplamışlardır. Aynı çalışmada, UPK 185'in öz hareket bileşenleri $\mu_\alpha \cos\delta$=-6.283 mas yıl^{-1} ve μ_δ=-9.281 mas yıl^{-1} olarak hesaplanmıştır. Dias ve diğ. (2021), Gaia DR2 verilerini kullanarak UPK 45 ve UPK 185 dahil toplamda 1743 açık yıldız kümesinin yaş, uzaklık ve kızarma parametrelerini elde etmişlerdir. Başka bir çalışmada ise Poggio ve diğ. (2021), Gaia EDR3 verileri ile UPK 45 ve UPK 185'i detaylı şekilde incelemiştir. Çalışmada, UPK 45'in yaşı $\log t$=8.02 yıl (104 Myıl), uzaklığı 897 pc, ve trigonomterik paralaksı 1.141 mas olarak tespit edilmiştir. UPK 185 için ise yaş 74 Myıl yıl, uzaklık 573 pc, uzaklık modülü 8.79 kadir ve trigonometrik paralaks 1.796 mas olarak hesaplanmıştır. Tarricq ve diğ. (2022), Gaia DR2 verileriyle gerçekleştirdiği analizde UPK 45'in yaşını 112 Myıl, uzaklığını 875 pc ve dikine hızını 26.60 km s^{-1} olarak tayin etmişlerdir. Aynı çalışmada UPK 185'in yaşını 74 Myıl, uzaklığını 565 pc ve dikine hızını -11.25 km s^{-1} olarak belirlemişlerdir.

LAMOST tayfsal verilerini kullanan Fu ve diğ. (2022), UPK 185'in demir bolluğu ve dikine hız gibi parametrelerini tespit etmiş, ayrıca UPK 45'in temel özelliklerini incelemiştir. Almeida, Monteiro, & Dias (2023) ise Gaia DR3 verileriyle UPK 45 ve UPK 185 dahil olmak üzere toplamda 773 AYK'nın yaş, uzaklık, metal bolluğu, sönükleşme ve başlangıç kütle fonksiyonu gibi parametrelerini ayrıntılı bir şekilde incelemişlerdir. Bu çalışmalar, UPK 45 ve UPK 185 kümelerinin yıldız özellikleri, yaş, uzaklık, metal bolluğu, dikine hız ve öz hareket gibi çeşitli parametrelerini ortaya koyarak, bu yıldız kümelerinin Galaktik yapı içindeki konumlarını ve evrimsel süreçlerini anlamada önemli katkılar sağlamıştır.

Bu çalışmada ise yukarıda literatür bilgisi verilen iki AYK için Gaia, LAMOST ve TESS verileri birarada kullanılmıştır.

⋆ 4011730069@erciyes.edu.tr

© 2025 Turkish Astronomical Society (TAD)

Çizelge 1. Çalışma kapsamında incelenen AYK'ların konumları (α, δ) ve özhareketleri (μ).

Küme	α (hh:mm:ss)	δ (hh:mm:ss)	$\mu_\alpha \cos\delta$ (mas yıl^{-1})	μ_δ (mas yıl^{-1})
UPK 45	19:26:47.90	+00:13:37.71	-0.714	-2.092
UPK 185	23:05:37.92	+49:22:03.03	2.641	-1.919

ESA'nın Gaia görevi (Cantat-Gaudin ve diğ. 2020; Gaia Collaboration ve diğ. 2021), Galaksimizin bileşimini ve evrimini incelemek, yıldızların hareket ve konum verileri ile üç boyutlu bir harita oluşturmak amacıyla tasarlanmış ve Dünya atmosferinin etkilerinden kaçınmak için uzaya fırlatılmıştır. Gaia'nın en güncel verisi olan GaiaDR3, 13 Haziran 2022 tarihinde yayımlanmış ve 1.8 milyardan fazla kaynağın koordinatları, öz hareket bileşenleri, trigonometrik paralaksları ve görünür parlaklık verilerini içermektedir (Tadross 2023). Ancak Gaia'nın gökyüzündeki G=19 kadirden sönük yıldızlar için sağladığı trigonometrik paralaks değerlerinin doğruluğunda sınırlamalar bulunmaktadır.

LAMOST veri tabanı, yıldızların fiziksel özelliklerinin anlaşılmasını sağlayacak tayfsal parametreler sunmaktadır (Chen ve diğ. 2021). LAMOST, geniş açıklık ve görüş alanı sayesinde tek bir pozda 3000'den fazla tayf kaydetme kapasitesine sahiptir ve düşük çözünürlüklü bir araştırma ile geniş bir dalgaboyu aralığını kapsamaktadır. Bu veriler, Gaia verileriyle birleştirildiğinde yıldızların üyelik analizini desteklemekte ve kümelerin daha derinlemesine incelenmesini sağlamaktadır.

NASA'nın 2018 yılında başlattığı TESS görevi de, her biri geniş görüş alanına sahip dört kamera ile donatılmış olup tüm gökyüzünde fotometrik bir araştırma yürütmektedir (Ricker ve diğ. 2014). Kırmızı dalgaboyu aralığına duyarlı kameraları ile parlak yıldızları gözlemleyen TESS, yıldız ışığındaki dönemsel değişimlerin izlenmesine olanak tanımaktadır.

Bu çalışmada, yukarıda detayları verilen Gaia, LAMOST ve TESS verilerini bir araya getirerek az çalışılmış UPK 45 ve UPK 185 kümeleri incelenmiş ve dolayısıyla Galaksimizdeki yıldız oluşumu ve evrimi üzerine yapılan çalışmalara katkı sağlanmıştır.

2 Yöntem ve Materyal

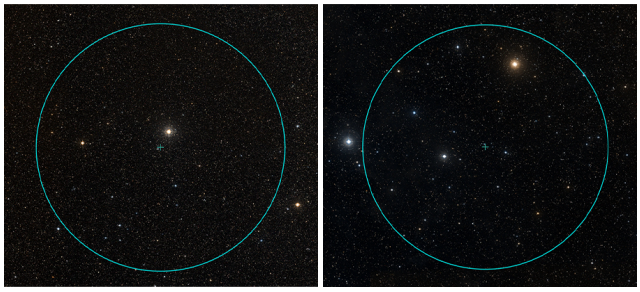
Bu çalışmada, Galaksimizde tespit edilen kümeler hakkında geniş bilgi sunan UPK küme kataloğu (Sim ve diğ. 2019), Gaia DR3 veritabanı ile bir arada kullanılmıştır. İncelenen UPK 45 ve UPK 185 kümelerine ait verilen ekvatoral koordinat ve öz hareket bileşenleri Çizelge 1'de verilmiştir. Bu tablodaki değerler Cantat-Gaudin & Anders (2020)'den alınmıştır.

Bu kaynaklar, incelenecek kümelerin seçiminde önemli bir bilgi sağlamaktadır. Çalışmada, literatürde nispeten az çalışılmış ve sınırlı bilgiye sahip kümeler özellikle tercih edilmiştir; bu nedenle, bu kümeler üzerinde yapılacak araştırmaların bilimsel literatüre anlamlı katkılar sunması beklenmektedir.

2.1 Fotometrik Analiz

2.1.1 Alan Taraması ve pyUPMASK Algoritmasının Kullanımı

Kümelerin sağ açıklık (RA) ve dik açıklık (DEC) verileri temel alınarak, 1° yarıçapında kapsamlı bir alan taraması gerçekleştirilmiştir. Kümelerin 1° lik alan görüntüsü Şekil 1'de sunulmuştur. Alan taramasının geniş tutulmasının amacı, potansiyel küme üyelerinin kayıp riskini en aza indirerek daha geniş bir örneklem elde etmektir. Böylece daha fazla veri toplanabilmekte ve analizlerde daha yüksek güvenilirlik sağlanmaktadır. Bu yaklaşım, seçilen kümelerin astrofiziksel özelliklerini daha ayrıntılı anlamaya olanak tanıyarak, onlar üzerinde kapsamlı çalışmalar yapılmasına olanak tanır. Yıldız kümelerinin gökyüzünde geniş bir alan kaplaması ve çok sayıda alan yıldızı barındırması nedeniyle, yıldızların kümeye ait olma olasılıklarını hesaplamak ve alan yıldızları ile küme üyelerini ayırmak için pyUPMASK algoritması tercih edilmiştir. PyUPMASK algoritması, UPMASK tabanlı bir yaklaşımdan türetilmiş olup, çalışma mekanizması UPMASK algoritmasıyla benzerlik göstermektedir. UPMASK algoritması, iç ve dış olmak üzere iki temel döngüden oluşmaktadır (Krone-Martins & Moitinho 2014). İç döngü (UPMASK çekirdeği), üç ana adımdan oluşan yinelemeli bir süreçle yıldızların konum uzayında kümelenme durumunu değerlendirir. Bu değerlendirmede, yoğunluk tahminleri kullanılarak, gerçek veriler ile rastgele oluşturulan alanlardaki yoğunluk parametreleri karşılaştırılmaktadır. Bu süreçte toplamda 2000 rastgele örnekleme yapılmaktadır (Krone-Martins & Moitinho 2014). Dış döngü ise yıldızların gözlemsel hatalarından yola çıkarak Gauss dağılımından elde edilen ortalama değerlerden, standart sapmaları hesaplamaktadır. Gauss dağılımına uymayan hata modelleri ise yönteme esnek bir şekilde entegre edilebilmektedir (Krone-Martins & Moitinho 2014). Bu iki adım, kullanıcı tarafından belirlenen maksimum yineleme sayısına ulaşana kadar tekrarlanır. Ardından, tüm yinelemelerin sonuçları analiz edilerek her bir yıldızın küme üyesi olma olasılıkları hesaplanır. Bu süreçte, Gaia verilerinde parlaklığı G>19 kadirden daha sönük yıldızlar analizlerden çıkarılmış, negatif trigonometrik paralaks verilerine sahip yıldızlar, ön temizleme sırasında silinmiştir. Ayrıca, UPK kataloğundaki uzaklık ve öz hareket ($\mu_\alpha \cos\delta$, μ_δ) değerlerine dayalı ek kısıtlamalar uygulanarak, yalnızca analize dahil edilecek yıldızlar belirlenmiştir.



Şekil 1. UPK 45 (sol) ve UPK 185 (sağ) AYK etrafındaki SIMBAD veritabanından elde edilen 1° alanları göstermektedir. Camgöbeği daireler her bir kümenin yaklaşık sınırlarını göstermektedir.

pyUPMASK algoritması ile uzaysal dağılım ve fotometrik veriler üzerinden Gaussian Mixture Model (GMM) yöntemi kullanılarak en uygun üyelik olasılık histogramı elde edilmiştir. Bu sayede, alan yıldızları ile küme üyeleri arasındaki ayrım en doğru şekilde yapılmış, üyelik olasılığı yüksek olan yıldızlar belirlenmiştir. Belirlenen bu üye yıldızlar için renk - parlaklık diyagramları (CMD) oluşturulmuş, bu diyagramlar üzerinden iki kümenin yaş, metal bolluğu ve diğer temel parametreleri belirlenmiştir.

2.1.2 Renk-Parlaklık Diyagramı ve MIST Eşyaş Çizgileri

UPK 45 ve UPK 185 kümelerinin yaş, metal bolluğu, kızarma miktarı ve uzaklık modülü gibi fiziksel parametrelerini belirlemek amacıyla oluşturulan CMD'lerine, MESA yıldız iç yapı ve evrim kodunun (Paxton ve diğ. 2011) kullanıldığı MIST eş-yaş eğrileri uygulanmıştır. Eş-yaş eğrileri seçilirken, literatürde yer alan tahmini yaş, metal bolluğu ve kızarma değerleri dikkate alınmıştır. Bu tahmini değerler doğrultusunda, CMD'ler üzerinde farklı eş-yaş eğrileri grafiksel olarak çizilmiştir. CMD'lerde en iyi uyumu sağlayan eş-yaş eğrileri, gözlemsel verilerle karşılaştırılarak seçilmiş ve elde edilen yaş, kızarma miktarı ile uzaklık modülü değerleri, literatürdeki diğer çalışmalarla uyumlu bir şekilde doğrulanmıştır. İlk aşamada, metal bolluğu Güneş bolluğu olarak kabul edilmiş ve analizler bu varsayıma göre gerçekleştirilmiştir.

2.2 LAMOST Tayfsal Verilerinin Kullanımı ve Analiz Süreci

Hem Gaia hem de LAMOST'ta ortak olarak tespit edilen UPK 45 ve UPK 185 kümelerine ait yıldızların özelliklerini ayrıntılı bir şekilde incelemek amacıyla, LAMOST DR9 verilerinden elde edilen yıldız tayfları üzerinden tayfsal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, kümelerin üye yıldızlarının etkin sıcaklık, metal bolluğu ve yüzey çekim ivmesi gibi temel tayfsal özelliklerini değerlendirmek açısından büyük önem taşımaktadır. Elde edilen tayfsal parametreler, CMD ve MIST eş-yaş eğrileri ile karşılaştırılarak, kümelerin üye yıldızlarının doğrulanmasını sağlamıştır. İlk aşamada yalnızca LAMOST tayflarından elde edilen değerler kullanılmış, ardından bu tayflar tek tek detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

Tayfsal analiz sürecinde, LAMOST'tan sağlanan düşük çözünürlüklü tayflar, iSpec yazılım paketi (Blanco-Cuaresma ve diğ. 2014) kullanılarak ayrıntılı bir şekilde işlenmiştir. Bu analiz, tayfların gürültüden arındırılması, kalibre edilmesi ve normalize edilmesi gibi adımları içermekte olup her bir yıldız için tahmin edilen parametrelere göre uygun bir atmosfer modeli uyarlanmıştır. Ardından, bu model üzerinden sentetik tayf üretilmiş ve gözlemlenen tayf ile karşılaştırılmıştır. Tayf çizgilerinin genişliği, derinliği ve konumu gibi özellikler analiz edilerek yıldızların etkin sıcaklık, yüzey çekim ivmesi ve metal bolluğu gibi temel atmosfer parametreleri hesaplanmıştır. Elde edilen bu tayfsal veriler, üye yıldızlar arasında karşılaştırılarak sonuçların doğruluğu ve güvenilirliği değerlendirilmiştir. Böylece kümelerin astrofiziksel özelliklerinin ayrıntılı bir analizi yapılmıştır.

2.3 Değişen Yıldız Analizi: TESS Verilerinin Kullanımı

Çalışmanın son aşamasında, UPK 45 ve UPK 185 kümelerindeki değişen yıldızların ayrıntılı analizi için TESS verileri (Ricker ve diğ. 2014) kullanılmıştır. İlk olarak, TESS verileri indirildikten sonra ışık eğrilerini etkileyebilecek tüm gürültülerden arındırılmıştır. Zamana bağlı parlaklık değişimlerini gösteren ışık eğrileri oluşturulmuş ve bu eğrilerdeki dönemsel değişimler analiz edilmiştir. Bu analizle, yıldızların parlaklıklarında gözlemlenen düzenli değişimler incelenerek hangi tür değişen yıldız oldukları belirlenmiştir. Işık eğrileri, bilinen değişen yıldız sınıfları ile karşılaştırılarak sınıflandırma yapılmış ve elde edilen değişim periyotları, yıldızların temel özelliklerine dair ipuçları sunmuştur.

Bu analiz sonucunda, UPK 45 ve UPK 185 kümelerinde bulunan değişen yıldızların, kümelerin yaş ve metal bolluğu gibi parametrelerle ilişkisi ortaya konulmuş ve küme üyelerinin evrimsel süreçleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Çizelge 2. MESA eş-yaş modeli kullanılarak UPK 45 ve 185 AYK üyesi değişen yıldızların temel özellikleri (kütle: $M/\mathrm{M}_\odot$, etkin sıcaklık: $\log(T_{\mathrm{eff}})$, yüzey yerçekimi ivmesi: $\log g$ ve ışıtma: $\log(L/\mathrm{L}_\odot)$.

AYK	ID	M ($\mathrm{M}_\odot$)	$\log T_{\mathrm{eff}}$ (K)	$\log g$ (cm s^{-2})	$\log L$ ($\mathrm{L}_\odot$)
UPK 45	2	2.94	4.09	4.15	2.06
	26	1.23	3.82	4.39	3.91
	46	9.90	3.77	4.53	-5.60
	40	9.13	3.75	4.58	-2.24
	47	9.24	3.75	4.57	-1.99
UPK 185	265	3.38	4.05	4.05	2.08
	214	1.20	3.76	4.44	7.99
	297	2.84	3.44	4.72	-2.10
	303	3.83	3.50	4.78	-1.82

3 Bulgular

3.1 Fotometrik Analiz

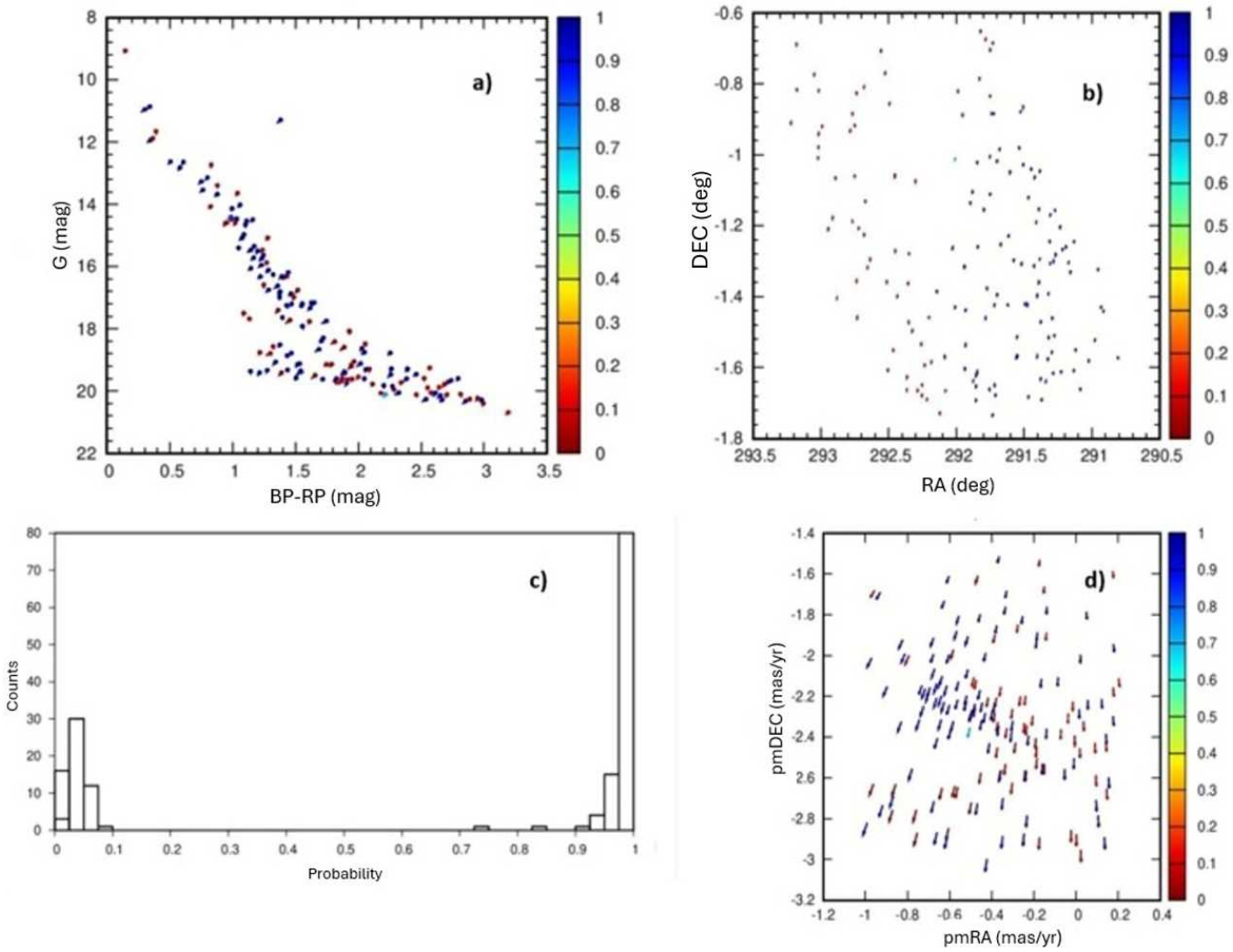
Bu çalışmada UPK 45 ve UPK 185 AYK üzerinde kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, UPK 45 ve UPK 185'in evrimsel süreçlerine dair mevcut bilgilere önemli katkılar sunmaktadır. Şekil 2 ve 3 her iki küme için GMM ile kümelerin üyelik hesaplamasından elde edilen grafikleri göstermektedir. Şekil 2'de, UPK 45 kümesi için olasılığı $P>0.90$ yıldızlar küme üyesi olarak seçilmiştir. Burada incelenen 164 yıldızdan 100'ü küme üyesi olarak tespit edilmiştir. Şekil 3 incelendiğinde ise UPK 185 kümesi için bu olasılık değeri $P>0.70$ ve üzeri yıldızlar için kabul edilmiştir. UPK 185 açık kümesinde incelenen 584 yıldızın 203'ü küme üyesi yıldızlar olarak kabul edilmiştir. Daha sonraki aşamada renk-parlaklık diyagramı çizdirilerek UPK 45 ve UPK 185 kümeleri için $E(B-V)$ kızarma değeri, DM (uzaklık modülü) ve kümelere ait yaş parametresi belirlenmiştir. Burada yaş belirleme, teorik eş-yaş eğrilerinin gözlemsel verilere uygun bir çakıştırması yapılarak kızarma çizgisi boyunca kaydırılmasından elde edilmiştir.

Teorik eş-yaş eğrileri için, güneş bolluğunda Z=0.015, MIST eşyaş çizgileri kullanılmıştır Şekil 4 ve 5'deki G-(G_{BP}-G_{RP}) CMD'de TESS analizleri sonucunda belirlenen değişen yıldızların bulunduğu bölgeler renkli noktalar ile işaretlenmiştir.Burada mavi noktalar dönen değişenleri (rotating variable star), yeşil noktalar zonklayan değişenleri ve mor noktalar ise çift yıldızları sembolize etmektedir.Kümelere ait kütle ($M/\mathrm{M}_\odot$), etkin sıcaklık (T_{eff}), yüzey çekim ivmesi ($\log g$) ve ışıtma ($\log(L/\mathrm{L}_\odot)$) parametrelerini elde etmek için hem güneş bolluğu hem de LAMOST verileri ile elde edilen metal bolluğu kullanılarak MIST eş-yaş eğrileri uygulanmıştır. Değişen yıldızların MIST eşyaş çizgisi ile belirlenen kütle, $\log T_{\mathrm{eff}}$, $\log g$ ve $\log(L/\mathrm{L}_\odot)$ değerleri her iki küme için de Çizelge 2'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

3.2 Tayfsal Analiz

UPK 45 ve UPK 185 AYK üyesi yıldızların incelenmesi sırasında Çizelge 3'de belirtilen alandaki yıldızların düşük çözünürlüklü LAMOST tayfları taranmıştır. İlk olarak, bu yıldızların tayfları Gaia tarafından elde edilen yıldızlarla eşleştirilmiştir. Bu yıldızların listesi Çizelge 5'de verilmiştir.

Şekil 6'da üst panelde her iki kümeye ait alan taraması



Şekil 2. UPK 45 kümesinin GMM uygulaması sonucu elde edilen grafikler. (Panel a) Kadir biriminde, G'ye karşın G_{BP}-G_{RP} (CMD). (Panel b) RA ve DEC. (Panel c) 164 örnek yıldıza ait GMM üyelik olasılıklarının histogramı. (Panel d) özhareket bileşenleri ($\mu_\alpha \cos\delta$ ve μ_δ).

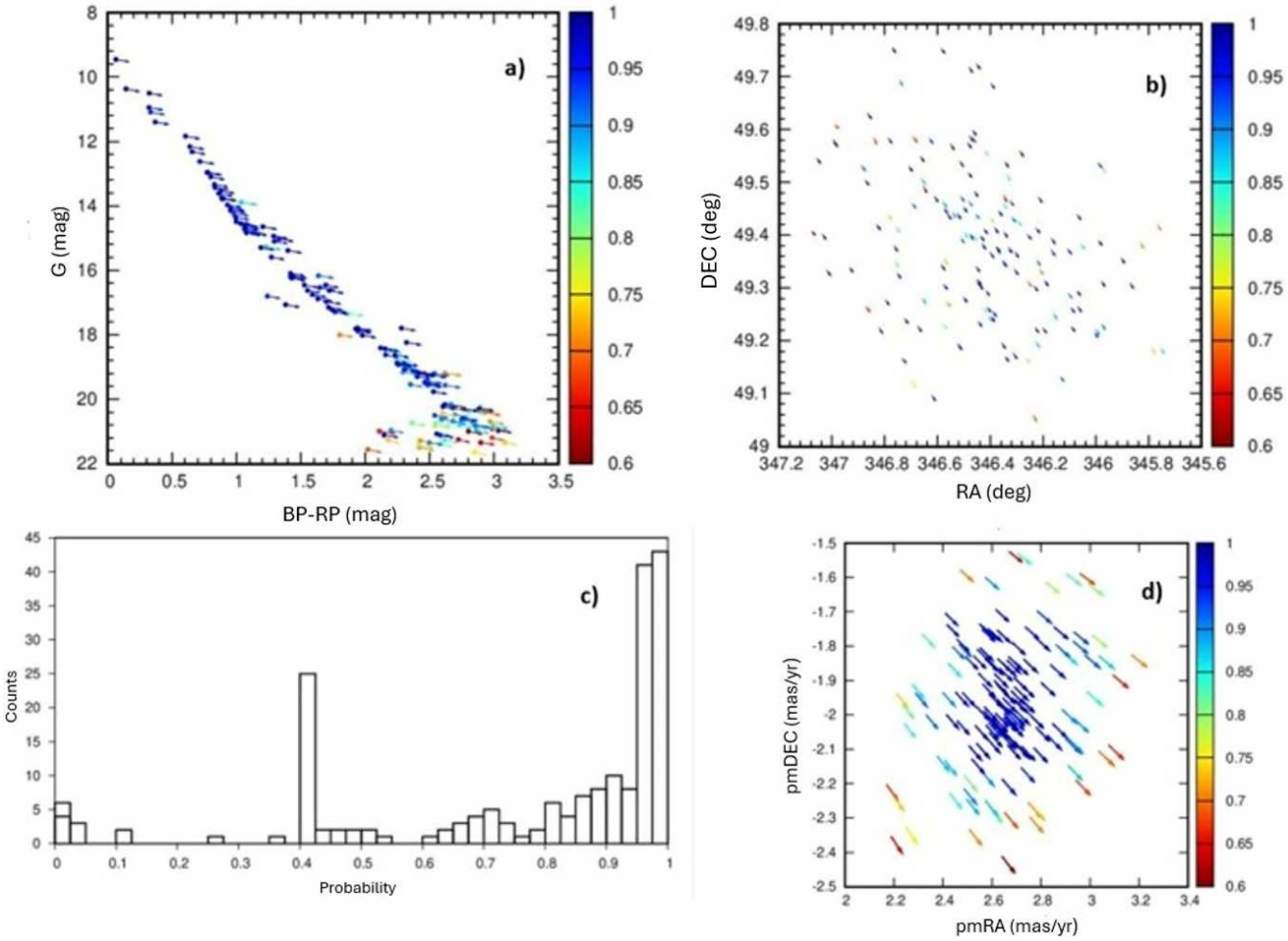
Çizelge 3. UPK 45 ve UPK 185 kümelerinin Lamost tayfsal veri tabanında taranan alanı.

Küme	α (°)	δ (°)
UPK 45	290.807 - 292.143	-1.728 - (-0.858)
UPK 185	345.638 - 347.384	48.960 - 49.828

Çizelge 4. UPK 45 ve UPK 185 AYK'larının Güneş metal bolluğunda ve bu çalışma sonucunda elde edilen metal bolluğu değerlerinde bulunan temel parametreleri. $E(G_{BP}$-$G_{RP})$ kızarmayı, t kümenin yaşını, DM ise uzaklık modülünü ifade etmektedir.

AYK	[Fe/H] (dex)	$E(G_{BP}$-$G_{RP})$ (kadir)	t (Myıl)	DM (kadir)
UPK 45	0.0±0.38	0.45±0.15	160±41	9.6±0.10
	-0.17±0.47	0.45±0.15	200±52	9.5±0.10
UPK 185	0.0±0.36	0.19±0.18	125±32	8.5±0.15
	0.05±0.30	0.19±0.18	178±74	8.7±0.15

görülmektedir. Orta panelde ise eşleşen yıldızlar işaretlenmiştir. Eşleştirilen yıldızların LAMOST tayfsal parametreleri, Gaia ile elde edilen parametreler ile karşılaştırılmıştır. Belirlenen bu üye yıldızlar üzerinden güvenilir metal bolluğu aralığı belirlenmiş ve bulunan ortalama metal bolluğu MIST eş-yaş eğrilerinde kullanılarak yaşlar bu metal bolluk değerine göre yeniden belirlenmiştir. Çizelge 4, UPK 45 ve UPK 185 için bulunan metal bolluğu değerinde kümeye ait parametrelerin değerlerini göstermektedir. Bir sonraki aşamada güvenirliği arttırmak amacıyla, UPK 45 ve UPK 185 kümelerindeki yıldızlara ait Gaia ve LAMOST tayfsal verileri iSpec kodu kullanılarak daha ayrıntılı incelenmiştir. Her iki veri kaynağından aynı yıldız için alınan tayflar kullanılarak, LAMOST tayflarında dalgaboyu düzeltmesi, Gaia tayflarında ise akı düzenlemesi yapılmış ve tayflar üst üste çizdirilmiştir. Şekil 7'de gösterilen üst üste bindirilmiş tayflar, dalgaboyu arttıkça akının nasıl değiştiğine dair bir karşılaştırma sunmaktadır. Bu grafikler, LAMOST ve Gaia verileri arasında dalgaboyu tayfının farklı aralıklarında gözlemlenen bazı uyumsuzlukları ve benzerlikleri ortaya koymaktadır. Örneğin, üst grafikte UPK 45 AYK'sındaki ID8 Gaia verilerinin akı değeri, LAMOST verilerinden belirgin



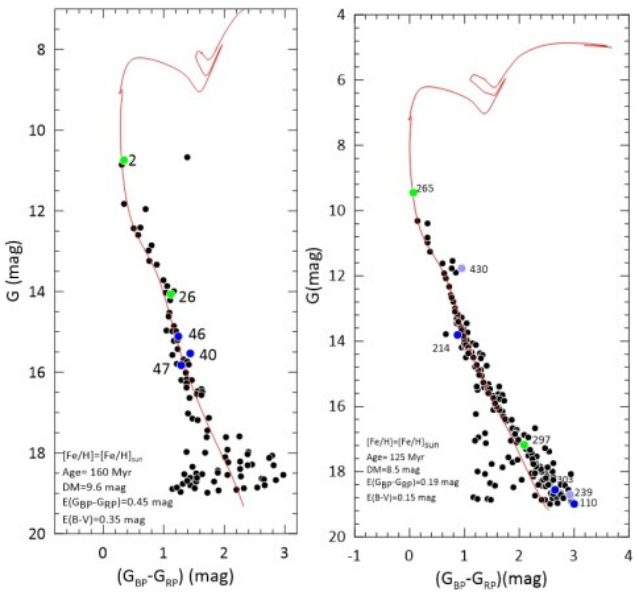
Şekil 3. UPK 185 kümesinin GMM uygulaması sonucu elde edilen grafikler. (Panel a) Kadir biriminde, G'ye karşın G_{BP}-G_{RP} (CMD). (Panel b) RA ve DEC. (Panel c) 584 örnek yıldıza ait GMM üyelik olasılıklarının histogramı. (Panel d) özhareket bileşenleri ($\mu_\alpha \cos\delta$ ve μ_δ).

Çizelge 5. UPK 45 ve UPK 185 AYK'ları için Gaia ve LAMOST'da eşleşen üye yıldızların tayfsal özellikleri. Burada, yıldızların kimlik numaraları (ID) ile birlikte, Gaia tarafından sağlanan metal bolluğu ($[Fe/H]_{Gaia}$), etkin sıcaklık ($T_{eff,Gaia}$) ve yüzey çekim ivmesi ($\log g_{Gaia}$) değerleri, hata paylarıyla birlikte verilmiştir. Benzer şekilde, LAMOST tarafından sağlanan metal bolluğu, etkin sıcaklık ve yüzey çekim ivmesi değerleri de hata paylarıyla sunulmaktadır. Son sütunda bulunan `probs_final` ise bu yıldızların üye olma olasılığını göstermektedir.

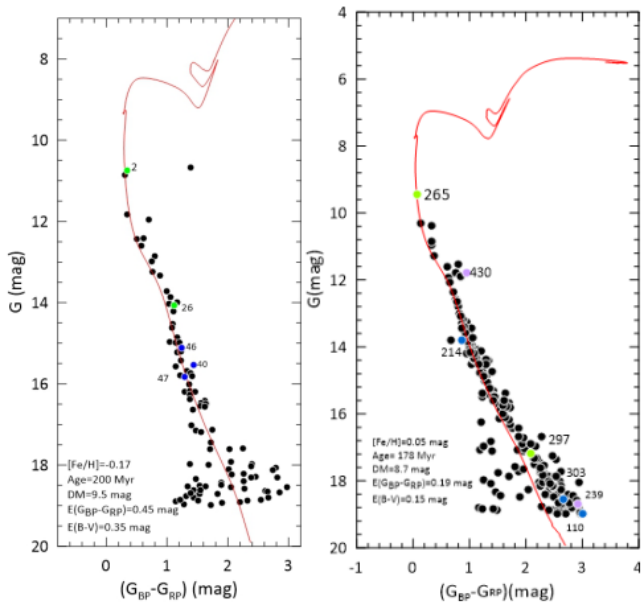
Küme Adı	ID	feh_gaia	logg_gaia	T_{eff}_gaia	feh_lam	logg_lam	T_{eff}_lam	probs_final
UPK 45	9	-	3.95±0.02	7433±16	-0.12±0.01	3.95±0.02	7433±16	1
	18	-0.29±0.08	4.11±0.05	6868±200	0.09±0.05	4.07±0.07	6798±47	0.9739
	26	-0.36±0.02	4.08±0.02	5809±100	0.11±0.06	4.10±0.09	6221±60	0.9998
UPK 185	241	-0.13±0.01	4.34±0.01	4840±100	-0.03±0.01	4.29±0.03	6009±20	0.9825
	289	-0.24±0.01	4.33±0.01	6230±500	-0.07±0.01	4.33±0.06	6249±19	0.9891
	376	-0.28±0.01	4.39±0.03	5765±500	0.01±0.02	4.39±0.04	5897±24	0.9935
	266	-0.29±0.01	4.38±0.01	5824±500	0.02±0.02	4.38±0.03	6030±25	0.9943
	250	-0.27±0.01	4.32±0.01	6255±500	0.01±0.02	4.32±0.02	5825±29	0.9921
	336	-0.34±0.02	4.35±0.02	5847±500	0.06±0.03	4.35±0.03	6023±24	0.9931
	267	-0.26±0.02	4.07±0.01	6171±500	-	-	-	0.9923
	432	-0.42±0.01	4.39±0.01	5963±500	0.06±0.04	4.39±0.04	6193±27	0.8301
	492	-0.42±0.01	4.01±0.01	6291±500	-0.18±0.02	4.33±0.04	6251±26	0.8305
	214	-0.52±0.03	4.06±0.03	5853±500	-0.06±0.06	4.31±0.10	6165±59	0.8791
	478	-0.51±0.01	4.01±0.01	5800±500	0.06±0.06	3.15±0.11	4865±59	0.8365

Çizelge 6. ID 8 ve ID 344 yıldızlarına ait Gaia, LAMOST ve bu çalışma (iSpec) sonuçlarının karşılaştırması.

		$T_{\rm eff}$ (K)			$\log g$ (cm s^{-2})			[Fe/H] (dex)		
Küme	ID	Gaia	iSpec	LAMOST	Gaia	iSpec	LAMOST	Gaia	iSpec	LAMOST
UPK 185	344	6060	6490	6255	4.32	4.54	4.37	-0.41	0.01	0.01
UPK 45	8	-	7712	7433	-	4.10	3.95	-	-0.06	-0.12



Şekil 4. UPK 45 (sol) ve UPK 185 (sağ) AYK'larına ait CMD gösterilmektedir. Diyagramlarda renklerle işaretlenmiş yıldızlar değişen yıldızları temsil etmektedir. Mavi noktalar dönen değişen yıldızları, yeşil noktalar zonklayan değişen yıldızları, mor noktalar ise çift yıldızları sembolize etmektedir. Şeklin sol alt panelinde ise eş yaş çizgileri kullanılarak elde edilen parametreler yer almaktadır.



Şekil 5. UPK 45 (sol) ve UPK 185 (sağ) AYK'larına ait LAMOST tayfları kullanılarak bu çalışmada elde edilen metal bolluğu değerinde oluşturulan CMD'ler.Diyagramlarda renklerle işaretlenmiş yıldızlar değişen yıldızları temsil etmektedir. Mavi noktalar dönen değişen yıldızları, yeşil noktalar zonklayan değişen yıldızları, mor noktalar ise çift yıldızları sembolize etmektedir. Şeklin sol alt panelinde ise eş yaş çizgileri kullanılarak elde edilen parametreler yer almaktadır.

şekilde daha yüksek iken, alt grafikte UPK 185 AYK'sındaki ID344 Gaia ve LAMOST verileri arasında uyum daha iyidir. Bu farklılıkların, her iki teleskobun duyarlılığı ve veri toplama yöntemleri gibi çeşitli etkenlerden kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

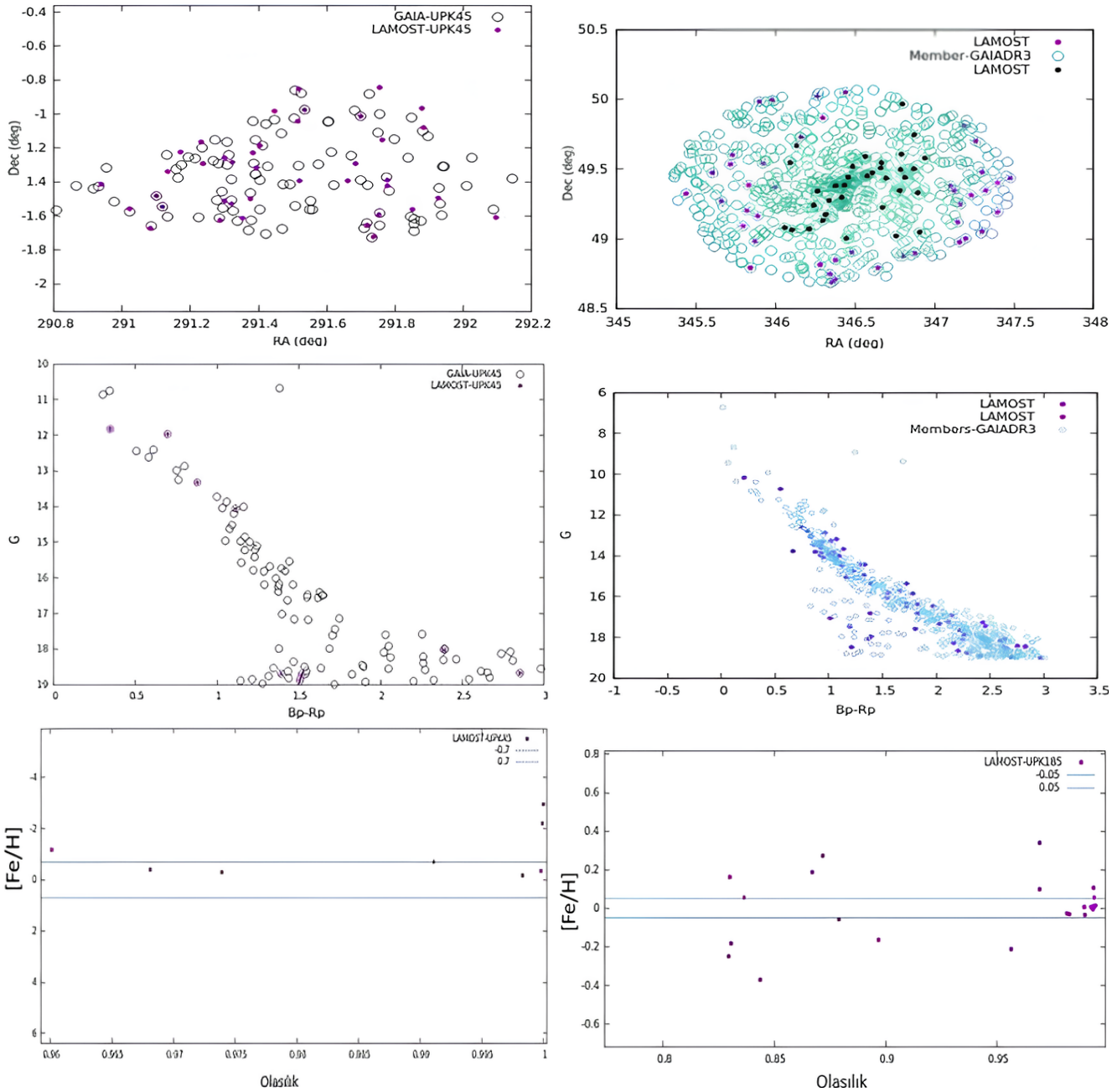
Bu farkın nedenlerini daha iyi anlamak amacıyla, çalışmamızda Gaia tayflarından belirlenen hidrojen çizgilerinin sınırları, LAMOST tayflarında da sınırlanarak karşılaştırmalı analiz yapılmıştır. Çizgilerin ayrıntılı analizi için, kendi yazdığımız kod yardımıyla iSpec yazılımı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerin sonucu, Şekil 8 ve 9'da gösterilmiştir. Burada UPK 45 kümesine ait ID8 yıldızının Gaia tayfında iki çizgi (H_δ ve H_γ) bulunması sebebiyle LAMOST tayfında da sadece bu çizgiler incelenmiştir.UPK 185 kümesi üyesi ID344'ün ise tüm çizgilerinin mevcut olması dolayısıyla dört hidrojen çizgisi (H_α, H_β, H_γ, H_δ) tamamı incelenebilmiştir. Böylece, gözlemlenen farklılıkların kaynaklarına dair daha kesin çıkarımlar yapılması amaçlanmıştır. Bu incelemeler sonucunda elde ettiğimiz ortalama sıcaklık, yüzey çekim ivmesi ve metal bolluğu değerlerinin sonuçları her bir veri seti için Çizelge 6'da verilmiştir.

4 Tartışma ve Sonuç

4.1 Tartışma

Bu çalışmada UPK 45 ve UPK 185 yıldız kümelerinin temel astrofiziksel parametreleri ve üyelik analizleri, literatürdeki çeşitli çalışmalarla kıyaslanarak Gaia DR3 (Gaia Collaboration et al. 2023) ve LAMOST DR9 (Cui et al. 2012) verileri yardımıyla kapsamlı şekilde incelenmiştir. Bu analizler, önceki çalışmalardaki verilerle uyumluluk ve farklılıkları ortaya koymuş, aynı zamanda daha güncel ve hassas sonuçlar elde edilmiştir.

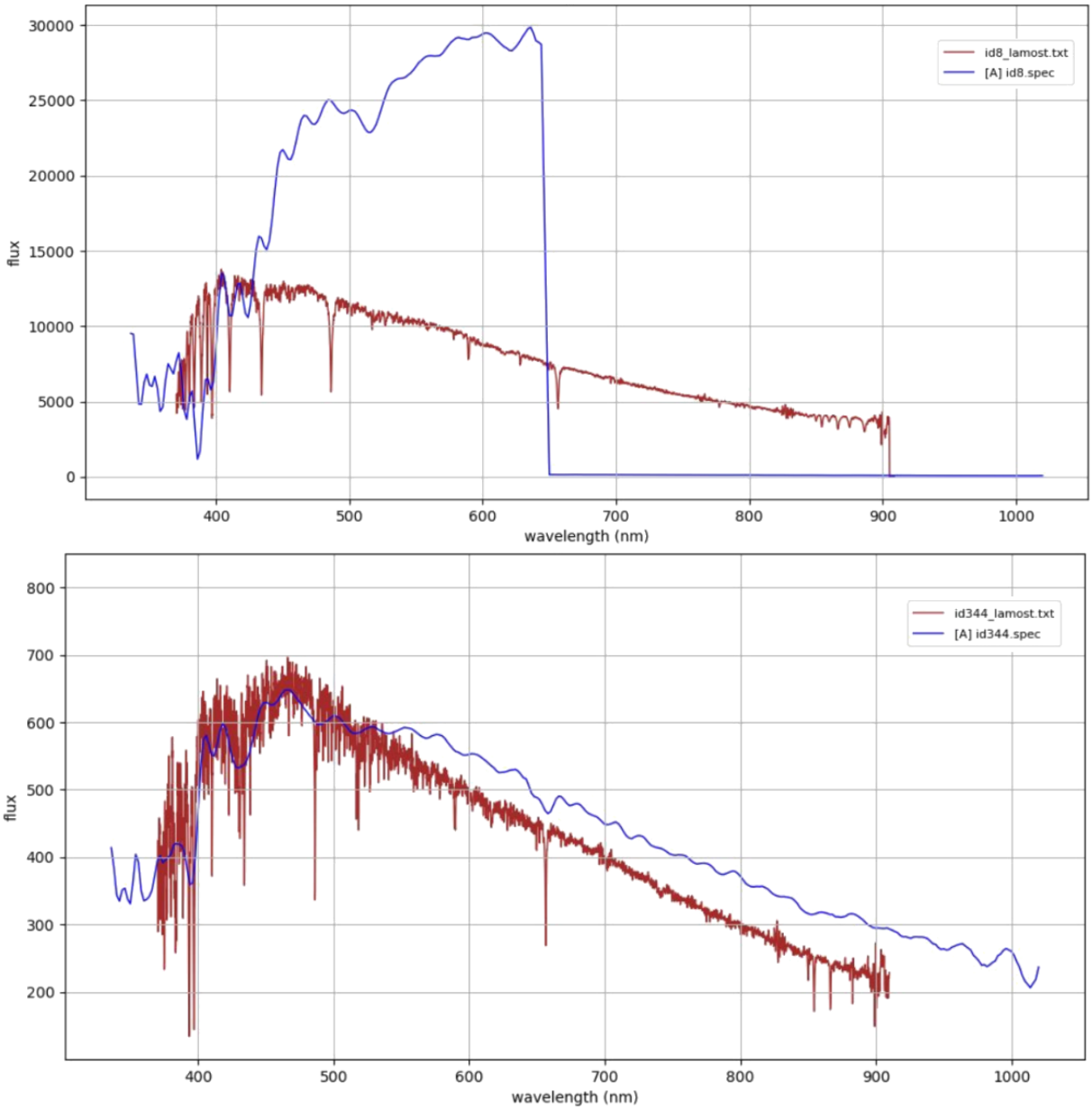
UPK 45 ve UPK 185 kümelerinin yaş, uzaklık ve metal bolluğu değerleri, literatürde sunulan sonuçlarla genel olarak tutarlılık göstermektedir. Örneğin, Tarricq ve diğ. (2022) tarafından UPK 45 için $\log(t)$=8.05 yıl ve d=875 pc uzaklık bildirilmiştir. Bu çalışmada ise yaş değeri benzer bir yaş aralığında ($\log(t)$=8.2 yıl) belirlenirken, uzaklık biraz daha az, yaklaşık 831 pc olarak tespit edilmiştir. Bu küçük fark, Gaia DR3 verilerinin önceki verilere kıyasla daha yüksek hassasiyetle ölçülmesi ve küme üyelik analizinde kullanılan yöntem farklılıkları gibi etkenlerden kaynaklanabilir. UPK 185 için Poggio ve diğ. (2021) tarafından verilen 573 pc uzaklık değeri ile bu çalışmada elde edilen değerler (501-550 pc) birbirine oldukça yakındır.



Şekil 6. UPK 45 (sol) ve UPK 185 (sağ) AYK'larına ilişkin analiz grafiklerini göstermektedir. (Üst Panel) Yıldızların uzaysal dağılımı (RA'ya karşı DEC); Gaia verilerinden elde edilen küme üyeleri ile LAMOST verileriyle örtüşen üyeler farklı renklerle gösterilmiştir. (Orta Panel) CMD: Gaia verilerinden elde edilen üyeler içi boş dairelerle, LAMOST verilerinden elde edilen üyeler ise mor dairelerle işaretlenmiştir. (Alt Panel) Metal bolluğu ([Fe/H]) değerleri ile olasılık dağılımı.

Çalışmamızda bulunan ortalama özhareket bileşenleri de literürle benzer sonuçlar vermiştir. Cantat-Gaudin & Anders (2020) çalışmasında UPK 45 için belirlenen $\mu_\alpha \cos\delta$=-0.714 mas yıl^{-1} ve μ_δ=-2.092 mas yıl^{-1} değerleriyle bu çalışmada ulaşılan sonuçlar arasında yalnızca küçük farklılıklar bulunmaktadır. Bu küçük farklılıklar, Gaia DR3 verilerinin daha yüksek duyarlılığı ve küme üyelik analizinde kullanılan farklı yöntemlerle açıklanabilir. Örneğin, bu çalışmada üyelik belirleme sürecinde `pyUPMASK` ve GMM yöntemleri kullanılarak daha hassas sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Özhareket değerlerinin kesinleşmesi, küme üyelerinin doğru tanımlanması için kritik önem taşır; bu çalışmanın katkılarından biri de Gaia DR3 verilerinin sunduğu hassasiyeti kullanarak UPK 45 ve UPK 185 kümeleri için üyelik analizini daha güvenilir hale getirmektir.

Tayfsal analizde ise, LAMOST ve Gaia verileri arasında farklılıklar gözlemlenmiştir. Örneğin, UPK 45 ve UPK 185 kümelerinin metal bollukları LAMOST ve Gaia verileri ile analiz edildiğinde, özellikle metal bolluk dağılımlarında ufak uyumsuzluklar dikkat çekmiştir. Bu uyumsuzluklar, her iki teleskobun tayfsal çözünürlüğü, veri toplama teknikleri ve duyarlılık farklılıklarından kaynaklanabilmektedir. Bu çalışmada

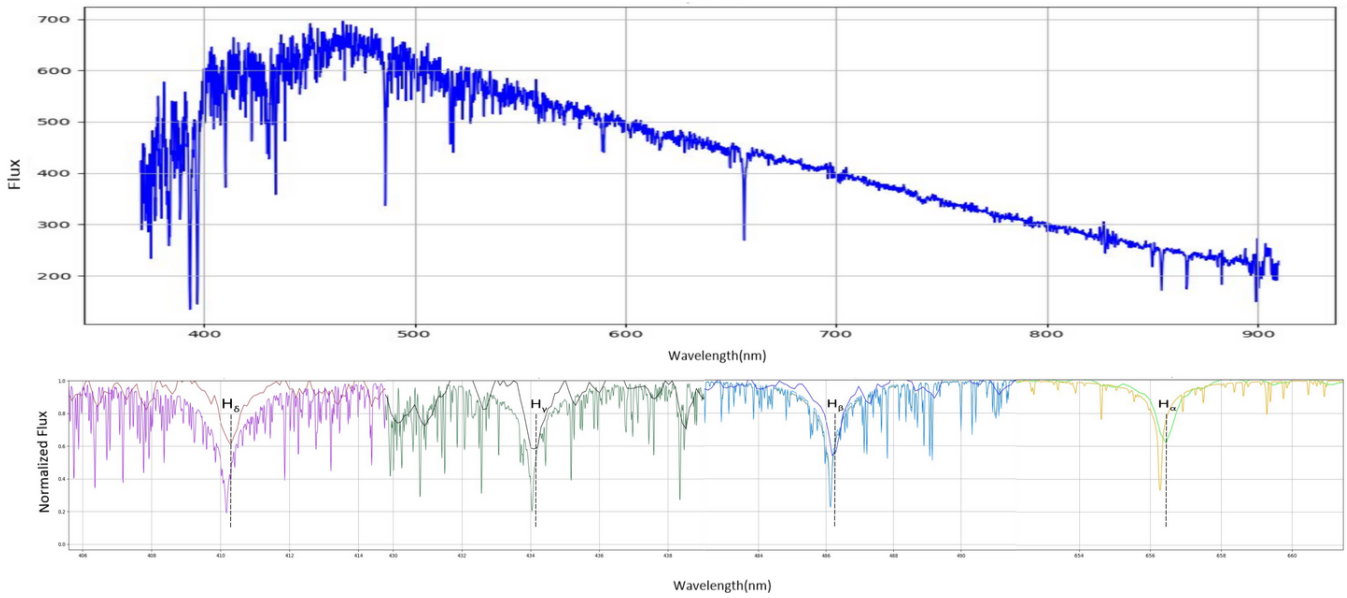


Şekil 7. (Üst panel) ID 8, UPK 45 ve (Alt Panel) ID 344, UPK 185 için Gaia (mavi) ve LAMOST (kırmızı) tayfları.

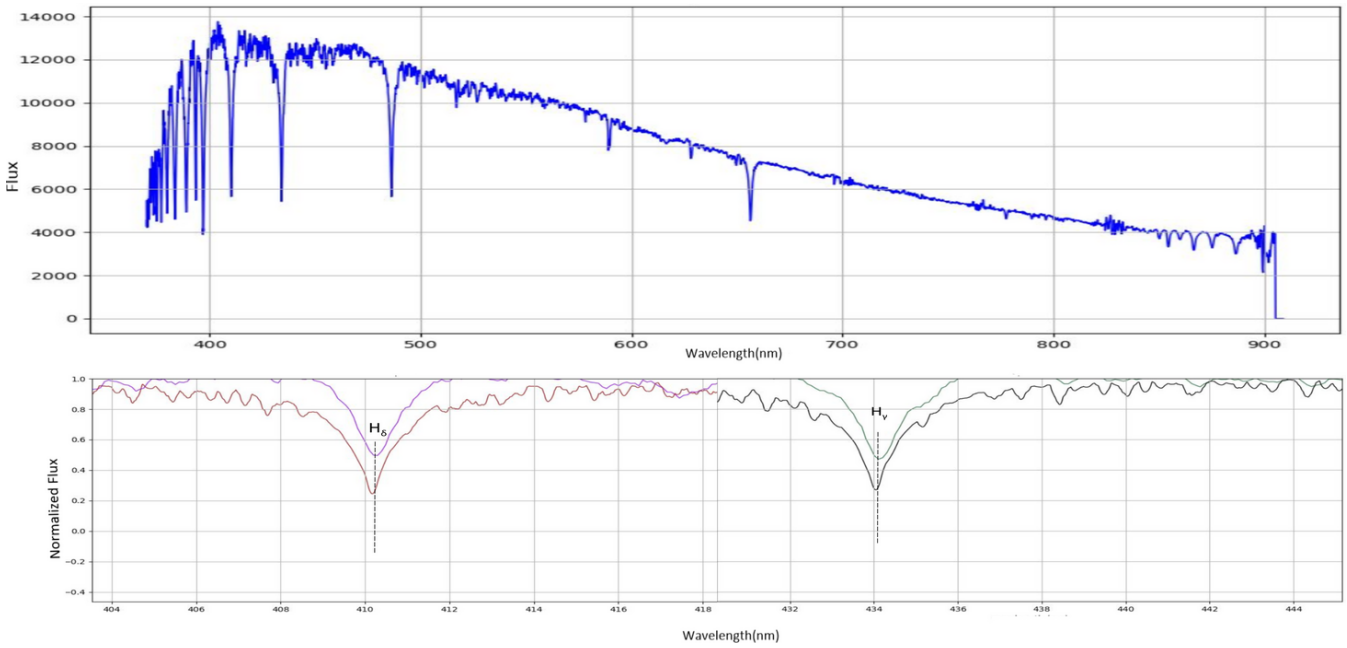
kullanılan MIST eş-yaş eğrileri göre güncellenmiş yaş ve uzaklık modülü değerleri, özellikle tayfsal metal bolluk değerleriyle uyumlu olacak şekilde yeniden hesaplanmıştır.

Renk-parlaklık diyagramı ve TESS verileri kullanılarak gerçekleştirilen değişen yıldız analizi, UPK 45 ve UPK 185 kümelerinde ilk kez değişen yıldızların ve çift yıldızların tespit edilmesine olanak tanımıştır. Gaia DR3 ve TESS verilerinin yüksek hassasiyeti sayesinde, bu çalışmada hem zonklama yapan hem de dönen değişen yıldızlar belirlenmiş, aynı zamanda çift yıldız sistemleri de detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Daha önce literatürde bu kümeler için rapor edilmemiş küçük ışık değişimleri ve çift yıldızlar bu çalışmada ilk kez tanımlanmış olup UPK 45 ve UPK 185 kümelerinin yıldız popülasyonu kapsamlı bir şekilde ortaya konulmuştur. CMD kullanılarak elde edilen değişen yıldız grupları MIST eşyaş çizgilerine göre sınıflandırılmış ve her iki küme için yıldızların kütle, etkin sıcaklık ($\log T_{\rm eff}$), yüzey çekim ivmesi ($\log g$) ve ışıtma $\log(L/\mathrm{M}_\odot)$ parametreleri belirlenmiştir. Elde edilen bu parametreler, değişen yıldızların kümeye olan katkısını anlamada önemli bilgiler sunmaktadır.

Çalışmanın bir diğer dikkat çekici bulgusu, bu çalışmada yapılan Gaia ve LAMOST verilerinin aynı yıldız için sağladığı tayfsal parametreler arasındaki farkların hidrojen çizgileri üzerinden yapılan ayrıntılı inceleme ile belirlenmiş olmasıdır. Gaia tayfında iki çizgi (H_δ ve H_γ) gözlemlenen bir yıldızda, LAMOST verilerinde de benzer çizgi yapıları gözlenmiş, ancak akı düzeylerinde belirgin farklılıklar bulunmuştur. Bu farklılıklar, Gaia verilerinin tayfsal çözünürlüğü sayesinde ayrıntılı analizlerin yapılmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca, Gaia ve LAMOST verilerinin tayfsal özelliklerinin örtüşmesi ve ayrıştığı noktaların belirlenmesi, iki veri seti arasındaki



Şekil 8. UPK 185 kümesinin ID344 numaralı yıldızına ait bu tayflarda, alt kısımda gösterilen tayflardan pembe, yeşil, sarı ve mavi renkli olanlar sentetik tayfları; açık yeşil (H_δ), mor (H_γ), siyah (H_β) ve kırmızı (H_α) renkli çizgiler ise orijinal tayfımızdaki hidrojen çizgilerini temsil etmektedir. Üst bölümde ise, bu yıldıza ait çizgilerin alındığı LAMOST tayfı bulunmaktadır. Fitlerin iyi görünmesi için ayrık biçimde gösterim yapılmıştır.



Şekil 9. UPK 45 kümesinin ID8 numaralı yıldızına ait bu tayflarda, alt kısımda gösterilen tayflardan kırmızı ve siyah renkli olanlar sentetik tayfları, pembe ($H\delta$) ve yeşil ($H\gamma$) renkli çizgiler ise orijinal tayfımızdaki hidrojen çizgilerini temsil etmektedir. Üst bölümde ise, bu yıldıza ait çizgilerin alındığı LAMOST tayfı bulunmaktadır. Fitlerin iyi görünmesi için ayrık biçimde gösterim yapılmıştır.

uyumluluğu değerlendirme açısından kıymetli bir sonuç sunmaktadır.

4.2 Sonuçlar

Bu çalışmada, UPK 45 ve UPK 185 AYK'larının astrofiziksel parametreleri Gaia DR3 ve LAMOST DR9 verileri kullanılarak kapsamlı şekilde analiz edilmiştir. Gaia ve LAMOST verilerinin birlikte kullanılması, yıldız kümelerinin üyelik analizi, yaş, uzaklık ve metal bolluğu gibi temel parametrelerin yüksek hassasiyetle belirlenmesini sağlamıştır. Çalışma kapsamında `pyUPMASK` ve GMM algoritmaları yardımıyla yapılan üyelik analizleri sonucunda, UPK 45 kümesinde 164 yıldız incelenmiş ve bunlardan 100'ü yüksek üyelik olasılığına sahip küme üyesi olarak tanımlanmıştır. UPK 185 kümesinde ise 584 yıldız analiz

edilmiş, bunlardan 203'ü küme üyesi olarak belirlenmiştir. Bu üyelik analizleri, UPK 45 ve UPK 185 kümelerine ait yıldızların güvenilir bir şekilde sınıflandırılmasına olanak tanımıştır.

Renk-parlaklık diyagramları oluşturulmuş ve MIST eş-yaş eğrileri kullanılarak yaş, uzaklık modülü ve metal bolluğu değerleri belirlenmiştir. LAMOST verilerinin tayfsal çözünürlüğü, yıldızların etkin sıcaklığı, metal bolluğu ve yüzey çekim ivmesi gibi parametrelerin daha güvenilir bir şekilde hesaplanmasını sağlarken, Gaia verileri astrometrik analizlerde önemli bir katkı sunmuştur. Ancak, Gaia tayfları LAMOST tayfları ile bu çalışmada iSpec kodu kullanılarak karşılaştırıldığında düşük çözünürlüklü tayflarda bazı uyumsuzluklar göstermesi, tayfsal analizlerde LAMOST'un daha uygun bir veri kaynağı olduğunu ortaya koymuştur. Gaia tayflarındaki çizgi çeşitliliği ne yazık ki LAMOST'a göre oldukça azdır. Bu nedenle Gaia tayfları ile daha fazla çizginin analizi ve buradan hareketle elde edilen tayfsal parametrelerin denetlenmesi mümkün değildir. Aynı zamanda LAMOST ile ortak çizgilerin belirlenmesi açısından da oldukça zayıf kalmaktadır. Bu nedenle, Gaia tayfları yalnızca H çizgilerinde kıyas olarak kullanılabilmekte ve LAMOST tayflarını denetlemeyi sağlamaktadır. Sonuç olarak, LAMOST tayflarının daha güvenilir olduğu görülmüştür.

TESS verilerinin kullanımı, incelenen kümelerdeki çok sayıda değişen yıldızın belirlenmesini sağlamıştır. Değişen yıldız analizi sonucunda, UPK 45 kümesinde beş, UPK 185 kümesinde ise yedi değişen yıldız tespit edilmiştir. Bu yıldızlar dönen değişen, zonklayan değişen ve çift yıldız olarak sınıflandırılmıştır. Bu değişenlerin keşfi sayesinde küme eş-yaş eğrisi üzerinde saçılan yıldızların grafik üzerindeki konumları daha anlaşılır hale gelmektedir. Değişen yıldızların parlaklık değişiminden dolayı anakoldan saçılmaları anlaşılmıştır. Ayrıca bir sonraki çalışmamızda değişen yıldız türlerinden elde edilecek yaş, metal bolluğu ve uzaklık parametreleri kullanılarak küme parametreleri denetlenebilecektir.

Bu çalışma sonucunda, UPK 45 ve UPK 185 kümelerinin yapısal özelliklerinin ayrıntılı incelenmesi sağlanmış ve bu iki AYK ile ilgili literatüre önemli katkılar sunulmuştur. Elde edilen bulgular, bu kümelerin evrimsel süreçlerine dair mevcut bilgilere katkı sunarak, galaksimizin AYK hakkındaki anlayışımızı derinleştirmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmada Fransa Strazburg'da yer alan ve CDS tarafından yürütülen SIMBAD veritabanı kullanıldı. Bu çalışma, 122F364 numaralı TÜBİTAK 1001 projesi ile desteklenmiştir. Yazarlar desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür etmektedir.

Kaynaklar

Almeida A., Monteiro H., Dias W. S., 2023, MNRAS, 525, 2315.

Blanco-Cuaresma S., Soubiran C., Heiter U., Jofré P., 2014, A&A, 569, A111. doi:10.1051/0004-6361/201423945

Cantat-Gaudin T., Anders F., 2020, A&A, 633, A99. doi:10.1051/0004-6361/201936691

Cantat-Gaudin T., Anders F., Castro-Ginard A., Jordi C., Romero-Gómez M., Soubiran C., Casamiquela L., ve diğ., 2020, A&A, 640, A1. doi:10.1051/0004-6361/202038192

Castro-Ginard A., Jordi C., Luri X., Álvarez Cid-Fuentes J., Casamiquela L., Anders F., Cantat-Gaudin T., ve diğ., 2020, A&A, 635, A45. doi:10.1051/0004-6361/201937386

Chen D.-C., Yang J.-Y., Xie J.-W., Zhou J.-L., Dong S., Zheng Z., Zhang J.-H., ve diğ., 2021, AJ, 162, 100. doi:10.3847/1538-3881/ac0f08

Chen L., Hou J. L., Wang J. J., 2003, AJ, 125, 1397. doi:10.1086/367911

Cui X.-Q., Zhao Y.-H., Chu Y.-Q., Li G.-P., Li Q., Zhang L.-P., Su H.-J., et al., 2012, RAA, 12, 1197. doi:10.1088/1674-4527/12/9/003

Dias W. S., Monteiro H., Moitinho A., Lépine J. R. D., Carraro G., Paunzen E., Alessi B., ve diğ., 2021, MNRAS, 504, 356. doi:10.1093/mnras/stab770

Friel E. D., 1995, ARA&A, 33, 381. doi:10.1146/annurev.aa.33.090195.002121

Fu X., Bragaglia A., Liu C., Zhang H., Xu Y., Wang K., Zhang Z.-Y., ve diğ., 2022, A&A, 668, A4. doi:10.1051/0004-6361/202243590

Gaia Collaboration, Brown A. G. A., Vallenari A., Prusti T., de Bruijne J. H. J., Babusiaux C., Biermann M., ve diğ., 2021, A&A, 649, A1. doi:10.1051/0004-6361/202039657

Gaia Collaboration, Vallenari A., Brown A. G. A., Prusti T., de Bruijne J. H. J., Arenou F., Babusiaux C., et al., 2023, A&A, 674, A1. doi:10.1051/0004-6361/202243940

Jacobson H. R., Friel E. D., Jílková L., Magrini L., Bragaglia A., Vallenari A., Tosi M., ve diğ., 2016, A&A, 591, A37. doi:10.1051/0004-6361/201527654

Janes K. A., Phelps R. L., 1994, AJ, 108, 1773. doi:10.1086/117192

Krone-Martins A., Moitinho A., 2014, A&A, 561, A57. doi:10.1051/0004-6361/201321143

Krumholz M. R., McKee C. F., Bland-Hawthorn J., 2019, ARA&A, 57, 227. doi:10.1146/annurev-astro-091918-104430

Liu, L., Pang, X. 2019. A Catalog of Newly Identified Star Clusters in Gaia DR2. The Astrophysical Journal Supplement Series 245. doi:10.3847/1538-4365/ab530a

Paxton B., Bildsten L., Dotter A., Herwig F., Lesaffre P., Timmes F., 2011, ApJS, 192, 3. doi:10.1088/0067-0049/192/1/3

Poggio E., Drimmel R., Cantat-Gaudin T., Ramos P., Ripepi V., Zari E., Andrae R., ve diğ., 2021, A&A, 651, A104. doi:10.1051/0004-6361/202140687

Ricker G. R., Winn J. N., Vanderspek R., Latham D. W., Bakos G. Á., Bean J. L., Berta-Thompson Z. K., ve diğ., 2014, SPIE, 9143, 914320. doi:10.1117/12.2063489

Riello M., De Angeli F., Evans D. W., Montegriffo P., Carrasco J. M., Busso G., Palaversa L., ve diğ., 2021, A&A, 649, A3. doi:10.1051/0004-6361/202039587

Sim G., Lee S. H., Ann H. B., Kim S., 2019, JKAS, 52, 145. doi:10.5303/JKAS.2019.52.5.145

Tadross A. L., 2023, AN, 344, e20230073. doi:10.1002/asna.20230073

Tarricq Y., Soubiran C., Casamiquela L., Castro-Ginard A., Olivares J., Miret-Roig N., Galli P. A. B., 2022, A&A, 659, A59. doi:10.1051/0004-6361/202142186

Access:
M25-0302: Turkish J.A&A — Vol.6, Issue 3.