Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367 **DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1800325**
CITE: Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering **26(3)** (2026) 571-582

Yaşın Galaktik Popülasyon Ayrımındaki Rolü: Gaia–Enceladus Üzerine Bir İnceleme

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 09.10.2025
Kabul/Accepted: 04.04.2026
Yayımlandı/Published: 03.06.2026

The Role of Age in Galactic Population Separation: An Analysis of Gaia–Enceladus

Olcay PLEVNE*

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

© 2026 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Bu çalışma, Gaia DR3 ve APOGEE DR17 verilerini birleştirerek oluşturulan yıldız örneklemi üzerinden Samanyolu'nun birleşme kalıntılarından biri olan Gaia–Enceladus/Sausage popülasyonunu kimyasal, kinematik ve yaş parametreleri bakımından incelemektedir. Yüksek doğruluklu kimyasal bolluklar (*Fe, Mg, Si, Ca, Ti, O, Al, Na, C, N, Mn, Ni*) ile Gaia'nın konum, öz hareket, trigonometrik paralaks ve radyal hız bilgileri birleştirilmiş; yıldızların uzay hızları ve yörünge parametreleri Galpy kütüphanesi kullanılarak McMillan potansiyeli altında hesaplanmıştır. Yıldız yaşları, Bayesçi ve MCMC temelli yaklaşımlar ile AstroNN sinir ağı tahminlerinden elde edilmiştir. Bu üç yöntemin bir arada kullanılması, yaş parametresinin galaktik popülasyon ayrımındaki belirleyiciliğini sınamak açısından özgün bir çerçeve sunmaktadır. Kimyasal uzay, Ana Bileşen Bolluk Analizi yöntemiyle indirgenmiş ve k-ortalama algoritmasıyla popülasyonlara ayrılmıştır. Bulgular, GES'in hem kimyasal hem dinamik olarak kararlı bir imzaya sahip olduğunu göstermektedir: [Fe/H] ≈ –1.3, [Mg/Fe] ≈ +0.24, [O/Fe] ≈ +0.34, R_{peri} ≈ 1.2 kpc, R_{apo} ≈ 10 kpc, Z_{max} ≈ 4.4 kpc. Yaş parametresi bu kimyasal–dinamik imzayı değiştirmemekte, ancak kalın disk ile halo arasındaki sınırda tamamlayıcı bir rol oynamaktadır. Bu yönüyle çalışma, yaş bilgisinin galaktik popülasyonların ayrımında doğrulayıcı bir değişken olarak nasıl işlev gördüğünü sistematik biçimde ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Gaia–Enceladus birleşmesi; yıldız yaşlar; kimyasal ve kinematik analiz; galaktik popülasyon ayrımı*

Abstract

This study investigates the Gaia–Enceladus/Sausage population, one of the major merger remnants of the Milky Way, by combining spectroscopic, kinematic, and age information from Gaia DR3 and APOGEE DR17. High-precision chemical abundances (*Fe, Mg, Si, Ca, Ti, O, Al, Na, C, N, Mn, Ni*) were cross-matched with Gaia astrometric data — positions, proper motions, trigonometric parallaxes, and radial velocities — to derive space velocities and orbital parameters under the McMillan Galactic potential using the Galpy package. Stellar ages were estimated through a Bayesian approach, an MCMC-based posterior sampling, and AstroNN neural network predictions. The combination of these three techniques provides an original framework to assess the discriminative power of stellar age in separating Galactic populations. The chemical abundance space was reduced using Principal Component Abundance Analysis, and clusters were identified through the k-means algorithm. The results show that the GES population maintains a chemically and dynamically stable signature, with median values of [Fe/H] ≈ –1.3, [Mg/Fe] ≈ +0.24, [O/Fe] ≈ +0.34, R_{peri} ≈ 1.2 kpc, R_{apo} ≈ 10 kpc, and Z_{max} ≈ 4.4 kpc. Including stellar age does not alter this chemo-dynamic signature, yet provides complementary separation along the thick disk–halo interface. Hence, this study demonstrates that while age is not a primary identifier of GES stars, it serves as a confirmatory and boundary-sensitive parameter in Galactic population classification.

Keywords: *Gaia–Enceladus merger, stellar ages, chemical and kinematic analysis, galactic population classification.*

1. Giriş

Galaksilerin oluşum ve evrim süreçleri, günümüzde galaktik arkeoloji olarak adlandırılan alanın temel araştırma konularından biridir. Büyük disk galaksilerinin bugünkü yapısının yalnızca içsel yıldız oluşum süreçlerinin bir sonucu olmadığı, önemli ölçüde geçmiş birleşme ve yutulma olayları tarafından şekillendirildiği uzun süredir bilinmektedir (Freeman ve Bland-Hawthorn, 2002). Bu birleşmeler, özellikle galaktik haloda kimyasal ve dinamik alt yapılar olarak korunur ve bu nedenle yıldız popülasyonlarının kökenini incelemek galaksinin oluşum tarihinin yeniden inşasında anahtar rol oynar.

Son on yılda büyük ölçekli gözlemsel taramalar bu alanda devrim yaratmıştır. Gaia görevi milyarlarca yıldızın konum, özdevinim ve paralaks ölçümlerini yüksek doğrulukla sağlayarak Samanyolu'nun faz uzayındaki yapısını ayrıntılı biçimde ortaya koymuştur (Gaia Collaboration vd., 2022). Bu astrometrik bilgiler APOGEE gibi yüksek çözünürlüklü spektroskopik taramalarla birleştirildiğinde yıldızların hem kinematik hem kimyasal özellikleri aynı anda incelenebilmektedir (Majewski vd., 2017). Böylece geçmiş birleşme olaylarına ait yıldız toplulukları yalnızca dinamik özellikleriyle değil, kimyasal

Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Olcay PLEVNE *e-posta/e-mail: olcayplevne@istanbul.edu.tr*

"etiketleme" yaklaşımıyla da doğrudan tanımlanabilir hâle gelmiştir.

Bu gelişmeler sonucunda Samanyolu'nun en belirgin birleşme kalıntılarından biri olan Gaia–Enceladus/Sausage (GES) yapısı keşfedilmiştir (Helmi vd., 2018; Belokurov vd., 2018). GES yıldızları düşük açısal momentumlu, yüksek **basıklıklı** yörüngeleri ve α-element zengin kimyasal imzaları ile karakterize edilir ve erken dönemde Samanyolu tarafından yutulmuş bir cüce galaksinin kalıntısı olarak yorumlanır (Mackereth vd., 2019; Horta vd., 2020; Hasselquist vd., 2021). Bu birleşmenin galaktik halonun önemli bir bölümünü oluşturduğu ve kalın diskin oluşumunda dahi rol oynamış olabileceği öne sürülmüştür. Bu nedenle GES yıldızlarının güvenilir biçimde ayrıştırılması, yalnızca tek bir alt yapının tanımlanmasından öte, Samanyolu'nun erken evrim senaryosunun sınanması açısından kritik öneme sahiptir.

Ancak galaktik popülasyonların ayrımında hangi parametrelerin gerçekten belirleyici olduğu konusu hâlen açık değildir. Birçok çalışma kimyasal bolluklar ve yörüngesel özelliklerin birlikte kullanımının GES'i tanımlamak için yeterli olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte özellikle kalın disk ve iç halo yıldızlarının kimyasal ve dinamik özelliklerinin kısmen örtüştüğü bölgelerde ayrımın zorlaştığı bilinmektedir. Bu durum, kronolojik bir değişken olan yıldız yaşının popülasyon sınıflandırmasına eklenmesinin gerekli olup olmadığı sorusunu ortaya çıkarmaktadır.

Yıldız yaşları galaktik evrim açısından en doğrudan fiziksel zaman ölçeğini temsil eder; ancak aynı zamanda astrofiziğin en belirsiz parametrelerinden biridir (Pont & Eyer, 2004). Eş-yaş eğrisi uyumlamaları, Bayesçi istatistiksel yaklaşımlar, Monte Carlo örnekleme yöntemleri ve makine öğrenmesi temelli kestirimler farklı sistematik hatalara sahiptir ve özellikle dev yıldızlarda yaş dağılımları geniş belirsizlikler içerebilir. Bu nedenle yaş parametresi bazı çalışmalarda güçlü bir ayrıştırıcı olarak kullanılırken, bazı çalışmalarda yalnızca yardımcı bir doğrulayıcı değişken olarak değerlendirilmektedir. Dolayısıyla yaşın galaktik popülasyon ayrımında bağımsız bir ayırt edici mi yoksa yalnızca tamamlayıcı bir parametre mi olduğu hâlen tartışmalıdır.

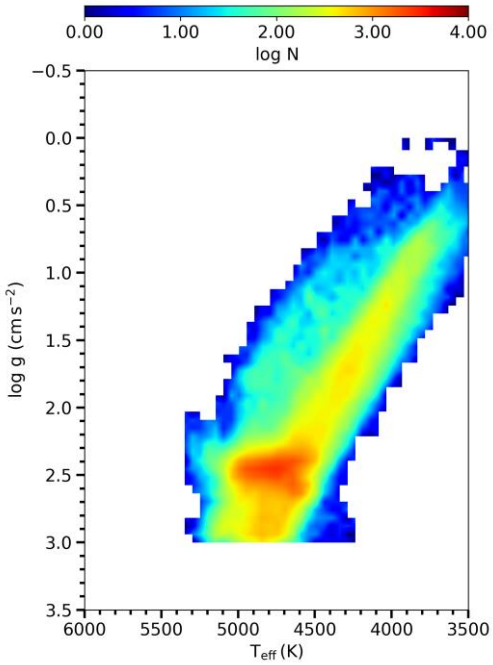
Bu çalışma, yıldız yaşının galaktik popülasyon sınıflandırmasındaki rolünü doğrudan sınamayı amaçlamaktadır. Gaia DR3 ve APOGEE DR17 verileri birleştirilmiş, çok elementli kimyasal uzayda gerçekleştirilen kümeleme analizleri üç farklı yaş belirleme yöntemi (Bayesçi yaklaşım, MCMC örneklemesi ve AstroNN sinir ağı tahminleri) kullanılarak karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Böylece yaş bilgisinin GES yıldızlarını tanımlayıcı bir parametre olup olmadığı ve hangi popülasyonlarda tamamlayıcı rol oynadığı sistematik biçimde değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, aynı örneklem üzerinde farklı yaş yöntemlerinin etkisini doğrudan test ederek galaktik arkeolojide yaş parametresinin işlevini nicel olarak ortaya koymayı hedeflemektedir.

2. Materyal ve Metot

2.1 Veri Seti

Bu çalışmada, APOGEE DR17 (Abdurro'uf vd., 2022) ve Gaia DR3 (Gaia Collaboration vd., 2022) veri setleri birlikte kullanılmıştır. APOGEE, yüksek çözünürlüklü yakın kızılötesi tayf gözlemleri sayesinde yıldızların kimyasal bolluklarını yüksek hassasiyetle sunmaktadır. Gaia ise yıldızların konum, özdevinim ve parlaklık bilgilerini sağlayarak, kimyasal ve kinematik analizler için kritik bir tamamlayıcı rol üstlenmektedir.

Veri seçimi aşamasında, APOGEE tarafından önerilen kalite kriterleri esas alınmıştır. Ölçümlerinde eksik parametre (T_{eff} , log g, [Fe/H] vb.) bulunan yıldızlar ile kimyasal bolluk verilerinde eksiklik olanlar dışlanmıştır. Ayrıca sinyal-gürültü oranı düşük gözlemlerin etkisini en aza indirmek için minimum sinyal-gürültü değeri konsorsiyumun önerisi olan 70 seçilmiş olup, astrometrik ölçüm kalitesini arttırmak adına trigonometrik paralaksın hatasına oranı olan rölatif paralaks hatası %20 ile üstten sınırlandırılmıştır. Bu kalite sınırlamalarından sonra dev yıldızları seçmek adına yıldızların etkin sıcaklıkları 3500 ile 5500 ve yüzey çekim ivmesi 3'ten küçük yıldızlar seçilmiştir. Bu kriterler sonrasında elde edilen dev yıldız örneklemine ait Kiel diyagramı **Şekil 1** ile gösterilmiştir.



Şekil 1: Seçilen dev yıldız örneklemine ait Kiel diyagramı.

APOGEE veri setinden elde edilen yıldız parametreleri, gözlemsel ve model bağımlı belirsizlikler içermektedir. Etkin sıcaklık ve yüzey çekim ivmesi değerleri, tayf uyumlama sürecine bağlı olarak tipik olarak sırasıyla yaklaşık 50–150 K ve yaklaşık 0.05–0.15 dex mertebesinde hatalara sahiptir (Abdurro'uf vd., 2022). Kimyasal bolluk oranları ([X/Fe]) elemente bağlı olarak değişmekle birlikte, çoğu element için tipik belirsizlikler 0.01–0.05 dex aralığındadır ve sinyal-gürültü oranı ile doğrudan ilişkilidir. Radyal hız ölçümleri ise yüksek çözünürlüklü yakın kızılötesi tayflar sayesinde oldukça hassas olup, tipik hata değerleri 0.1–0.5 km s^{-1} düzeyindedir. Bu gözlemsel belirsizlikler, türetilen fiziksel parametreler (örneğin yaş ve yörünge parametreleri) üzerinde doğrudan etkili olmakta ve özellikle yaş kestirimlerinde daha geniş hata aralıklarına yol açabilmektedir.

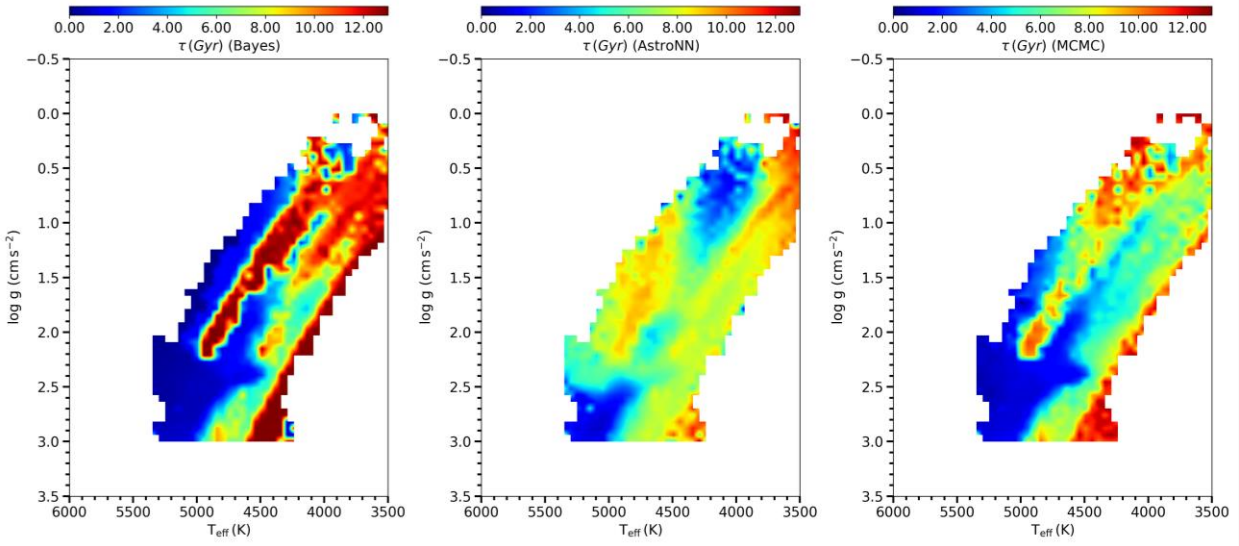
2.2 Kinematik ve Yörünge Hesaplamaları

Kimyasal özelliklerin yanı sıra, yıldızların kinematik parametreleri ve galaktik yörüngeleri de incelenmiştir. Bu amaçla Gaia DR3'ten elde edilen konum bilgileri (α, δ), öz hareket bileşenleri (μ_α, μ_δ), trigonometrik paralaks (ϖ) değerleri ve APOGEE tayfölçümlerinden sağlanan radyal hız ölçümleri birlikte kullanılmıştır. Bu parametreler öncelikle Galaktik Kartezyen koordinat sistemine dönüştürülmüş ve her bir yıldız için üç boyutlu uzay hızları hesaplanmıştır. Hız dönüşümlerinde Güneş'in yerel hareketi ve Galaktik merkezden uzaklığı için literatürde yaygın olarak kullanılan değerler esas alınmıştır (Reid vd., 2002; Schönrich ve Binney, 2009).

Elde edilen konum ve hız vektörleri, galpy kütüphanesi (Bovy, 2015) yardımıyla galaktik potansiyel altında yörünge entegrasyonuna tabi tutulmuştur. Potansiyel modeli olarak, disk, şişkinlik ve hâle bileşenlerini içeren ve Samanyolu'nun güncel kütle dağılımını gerçekçi biçimde temsil eden McMillan (2017) Milky Way potansiyeli kullanılmıştır.

Yörünge entegrasyonları sonucunda yıldızların dinamik özelliklerini tanımlayan temel parametreler elde edilmiştir. Bunlar arasında galaktik merkez etrafındaki en yakın ve en uzak konumları gösteren perigalaktik (R_{peri}) ve apogalaktik (R_{apo}) uzaklıklar, galaktik düzlemden dikey yönde ulaşılan maksimum uzaklık (Z_{max}), yörünge basıklığı (e) ve yıldızların yörüngesel açısal momentumu (L) yer almaktadır.

Gözlemsel belirsizliklerin türetilen kinematik ve yörünge parametreleri üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, Gaia astrometrik ölçümleri (paralaks ve öz hareketler) ile APOGEE radyal hızlarının hata aralıkları birlikte dikkate alınmıştır. Bu parametrelerdeki belirsizlikler, yıldızların üç boyutlu hız bileşenlerine ve buna bağlı olarak yörünge parametrelerine doğrudan yansımaktadır. Bu etkiyi nicel olarak incelemek için, her bir yıldızın gözlemsel parametreleri kendi hata dağılımlarına göre örneklenmiş ve 1000 denemeli bir Monte Carlo yaklaşımı uygulanmıştır. Her bir örneklem için hız bileşenleri hesaplanmış ve galaktik potansiyelde yörünge integrasyonu gerçekleştirilerek türetilen parametrelerin dağılımları elde edilmiştir. Gaia ve APOGEE veri setlerinin yüksek hassasiyeti sayesinde bu belirsizliklerin yörünge parametreleri üzerindeki etkisinin oldukça sınırlı olduğu görülmüştür; yörünge parametrelerindeki apogalaktik (R_{apo}) için yaklaşık 0.14 kpc, perigalaktik (R_{peri}) için yaklaşık 0.09 kpc, maksimum uzaklık (Z_{max}) için yaklaşık 0.11 kpc ve yörünge basıklığı (e) için yaklaşık 0.012 düzeyinde belirsizlik hesaplanmıştır. Ayrıca, bu çalışmada yörünge ve hız parametreleri kümeleme analizine doğrudan dahil edilmemiştir; dolayısıyla söz konusu belirsizlikler popülasyon ayrımını etkilememekte, yalnızca elde edilen kümelerin fiziksel olarak doğrulanması ve karşılaştırılması amacıyla kullanılmaktadır.



Şekil 2. Farklı yaş tayin yöntemlerinin sonuçlarının Kiel diyagramı üstünde gösterimi.

2.3 Yıldız Yaşı Belirleme

Bu çalışmada yıldız yaşları üç farklı yöntem kullanılarak belirlenmiştir: eş-yaş eğrisi (isochrone) tabanlı Bayesçi kestirim, Markov Zinciri Monte Carlo (MCMC) örneklemesi ve derin öğrenme tabanlı AstroNN katalog yaşları. Amaç yalnızca yaş tahmini üretmek değil, farklı yöntemlerin galaktik popülasyon sınıflandırmasına etkisini karşılaştırmaktır.

Tüm eş-yaş eğrisi tabanlı analizlerde kuramsal yıldız evrim modelleri olarak PARSEC (Bressan vd. 2008) eş-yaş eğrileri kullanılmıştır. Yaş tayini için kullanılan model ızgarası 0–13 Gyr yaş aralığında 0.10 Gyr adım genişliği ve $[\mathrm{Fe/H}] = -2.5$ ile $+0.5$ dex aralığında 0.01 dex çözünürlükle oluşturulmuştur. Hem Bayesçi hem MCMC çözümlemeleri aynı model uzayı üzerinde gerçekleştirilmiştir.

2.3.1 Bayesçi yaş kestirimi

Bayesçi yaş belirleme yöntemi, gözlemsel atmosfer parametrelerinin kuramsal eş-yaş eğrileri ile olasılıksal olarak karşılaştırılmasına dayanır. Gözlemsel parametreler olarak etkin sıcaklık (effective temperature, T_{eff}), yüzey çekimi (surface gravity, $\log g$) ve metal bolluğu (metallicity, $[\mathrm{Fe/H}]$) kullanılmıştır.

Yaş olasılık yoğunluk fonksiyonu Jørgensen ve Lindegren (2005) formülasyonu temel alınarak tanımlanmıştır. Buna göre model parametreleri yaş (τ), metal bolluğu (ζ) ve kütle (m) için başlangıç olasılık yoğunluğu

$$f_0(\tau, \zeta, m) = \psi(\tau)\, \phi(\zeta \mid \tau)\, \xi(m \mid \zeta, \tau)$$

şeklindedir. Burada sırasıyla yıldız oluşum hızı, metal bolluk dağılımı ve başlangıç kütle fonksiyonu yer almaktadır.

Kuramsal ve gözlemsel parametrelerin karşılaştırılmasıyla elde edilen olabilirlik fonksiyonu (likelihood)

$$\mathcal{L} \propto \exp\left(-\frac{1}{2}\sum_i \frac{(X_{i,\mathrm{obs}} - X_{i,\mathrm{model}})^2}{\sigma_i^2}\right)$$

olarak tanımlanmıştır. Öncül dağılımlar (prior) şu şekilde seçilmiştir:

- Başlangıç kütle fonksiyonu: Kroupa IMF
- Yıldız oluşum tarihi (SFH): düzgün dağılım
- Metal bolluk dağılımı (MDF): düzgün dağılım

Bu tanımlarla yaşın ardıl dağılımı (posterior)

$$G(\tau) \propto \int \mathcal{L}(\tau, \zeta, m)\, f_0(\tau, \zeta, m)\, d\zeta\, dm$$

şeklinde elde edilir ve en yüksek değeri veren yaş en olası yaş olarak alınır. Belirsizlikler %16–%84 güven aralığından hesaplanmıştır.

2.3.2 MCMC yaş kestirimi

Parametre uzayındaki çoklu çözüm olasılıklarını örneklemek amacıyla Markov Zinciri Monte Carlo (MCMC) yöntemi uygulanmıştır. Eş-yaş eğrisi ızgarası ayrık bir model uzayı oluşturduğundan, çözüm uzayında süreklilik sağlamak amacıyla üç boyutlu Delaunay interpolasyonu uygulanmıştır. Bu işlem model uzayını yarı-sürekli hale getirerek örnekleyicilerin kararlı biçimde yakınsamasını sağlar. Her örnekleme adımında model değerleri ile gözlemler arasındaki fark aşağıdaki maksimum olabilirlik fonksiyonu ile hesaplanmıştır:

$$\ln \mathcal{L} = -\frac{1}{2}\sum_i \frac{(X_{i,\mathrm{obs}} - X_{i,\mathrm{model}})^2}{\sigma_i^2}$$

Örnekleme işlemi emcee python (Foreman-Mackey vd., 2013) kütüphanesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her yıldız için 20 örnekleyici (walker) kullanılmış ve her biri 5000 adım boyunca ilerletilmiştir. İlk %20'lik bölüm yakma evresi (burn-in) olarak atılmıştır. Kalan örneklerden elde edilen ardıl dağılımın medyanı yaş değeri olarak alınmış, belirsizlikler %16–%84 güven aralığından hesaplanmıştır.

2.3.3 AstroNN katalog yaşları

Eş-yaş eğrisi tabanlı yöntemlere ek olarak derin öğrenme tabanlı AstroNN yaş tahminleri de kullanılmıştır. AstroNN yöntemi, APOGEE tayflarından yıldız parametrelerini yapay sinir ağları aracılığıyla tahmin eden veri-odaklı bir yaklaşıma dayanır.

Bu çalışmada AstroNN modeli yeniden eğitilmemiş veya yeniden çalıştırılmamıştır. Bunun yerine ilgili veri sürümü için yayımlanmış katalog (Leung ve Bovy, 2019) yaş değerleri doğrudan kullanılmıştır. Dolayısıyla AstroNN yaşları, eş-yaş eğrisi tabanlı Bayesçi ve MCMC yöntemlerinden bağımsız bir referans yaş göstergesi olarak değerlendirilmiştir.

Bu üç yöntemle elde edilen yaşların Kiel diyagramı üstündeki gösterimi **Şekil 2** ile verilmiştir. Bu şekilden görüleceği üzeri farklı yöntemler farklı yaş dağılımları göstermektedir. Bu farklılık çalışmanın ana sorusu olan yaşın bir parametre olarak kullanılabilirliği ve güvenilirliğinin sorgulanması gerektiğini ortaya koymaktadır.

2.4 Makine Öğrenmesi Yöntemleriyle Verinin Galaktik Popülasyonlara Ayrımı

Yıldızların kimyasal imzaları galaktik popülasyonların ayrıştırılmasında güçlü bir gösterge sunar. Ancak çok sayıda element bolluğunun birlikte değerlendirilmesi yüksek boyutluluk problemi nedeniyle doğrudan istatistiksel yorumlamayı zorlaştırır. Bu nedenle çalışmada

kimyasal bolluk uzayına Ana Bileşen Bolluk Analizi (Principal Component Abundance Analysis: PCAA (Andrews vd. 2012)) uygulanmıştır.

APOGEE tayflarından elde edilen 12 element bolluğu (Al, C, N, O, Na, Mg, Si, Ca, Ti, Mn, Fe, Ni), 12 boyutlu kimyasal uzayı tanımlamaktadır. PCAA yöntemi, bolluklar arasındaki doğrusal bağımlılıkları ortadan kaldırarak kimyasal evrim tarafından belirlenen ana varyasyon eksenlerini ortaya çıkarmayı amaçlar. Bu işlem klasik PCA'nın kimyasal bolluk uzayına uygulanmış özel bir formudur ve galaktik popülasyonların ayrıştırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Varyans analizi sonucunda toplam varyansın büyük bölümü korunacak şekilde kimyasal uzay dört ana bileşene indirgenmiştir. Böylece hem hesaplama maliyeti düşürülmüş hem de kümeleme algoritmasının kararlılığı artırılmıştır. Boyut indirgeme yapılmadan önce 12 boyutlu uzaya Standart Normal Dağılım düzeltmesi yapılmıştır ve bu analizlerin hepsi bir *Python* kütüphanesi olan *sklearn* (Pedregosa vd., 2011) kütüphanesinin 1.6.1 sürümü ile yapılmıştır.

2.4.1 Kimyasal kümelenme

Boyut indirgeme sonrasında yıldızların alt popülasyonlara ayrılmasında k-ortalama (k-means) kümeleme algoritması kullanılmıştır. k-means, veriyi öklidyen mesafeye dayalı benzerliklerine göre kümelere ayıran gözetimsiz bir öğrenme yöntemidir ve sürekli kimyasal bolluk dağılımlarında yorumlanabilir sonuçlar sunar.

Optimum küme sayısı Calinski–Harabasz indeksi ile belirlenmiş ve altı kümenin en uygun çözüm olduğu bulunmuştur. Bu küme sayısı literatürde bildirilen galaktik bileşenlerle uyumludur (Das vd., 2020; Horta vd., 2020, 2023; Mackereth vd., 2019). Elde edilen kümeler ince disk, kalın disk, halo, splash bileşeni ve Gaia–Enceladus/Sausage (GES) adaylarını temsil etmektedir.

Bu ilk aşamada yalnızca kimyasal bolluklara dayalı kümelenme gerçekleştirilmiştir. Analiz güçlü kimyasal imzaya sahip popülasyonları belirgin biçimde ayırırken, özellikle kalın disk–halo sınırında sınırlı ayrım gücü göstermiştir.

2.4.2 Yaş parametresinin popülasyon ayrımındaki rolünün sınanması

Bu çalışmanın temel amacı yıldız yaşının galaktik popülasyonların ayrıştırılmasında bağımsız bir ayırt edici parametre olup olmadığını doğrudan test etmektir. Bu nedenle analiz, kontrollü bir karşılaştırma yaklaşımıyla iki aşamada gerçekleştirilmiştir.

İlk aşamada yalnızca kimyasal bolluklardan elde edilen dört boyutlu PCAA uzayı kullanılarak kümelenme yapılmıştır. Bu adım, kimyasal imzaların tek başına hangi galaktik alt yapıları ayırt edebildiğini belirlemek için referans çözüm olarak kabul edilmiştir.

İkinci aşamada aynı veri setine yıldız yaşı eklenmiş ve analiz tekrarlanmıştır. Yaş bilgisi üç farklı yöntemden (Bayesçi eş-yaş eğrisi, MCMC eş-yaş eğrisi ve AstroNN katalog yaşları) elde edilmiştir. Her yaş yöntemi için analiz bağımsız olarak uygulanmış ve dört boyutlu kimyasal uzaya tek bir yaş parametresi eklenerek beş boyutlu veri uzayı oluşturulmuştur. Böylece yaşın etkisi diğer değişkenlerden ayrıştırılarak izole biçimde incelenmiştir.

Bu yaklaşım, yaş parametresinin yalnızca popülasyonları doğrulayan yardımcı bir değişken mi yoksa kimyasal uzayın sağlayamadığı ek ayırt edici bilgi mi taşıdığını nicel olarak belirlemeyi mümkün kılar. Özellikle kimyasal ve kinematik özellikleri örtüşen kalın disk ve iç halo yıldızlarının ayrımında yaşın katkısı karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Böylece GES'in belirlenmesinde yaşın zorunlu olup olmadığı doğrudan sınanmıştır.

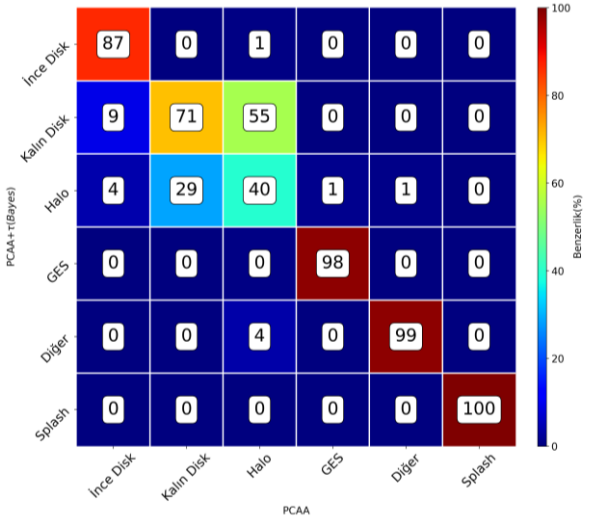
3. Bulgular

Bu çalışmada, yaş parametresi dahil edilmeden gerçekleştirilen PCAA+k-means kümeleme sonucu, örneklemde altı ana popülasyon tanımlanmıştır. Bu kümeler, kimyasal ve dinamik özelliklerine göre Galaktik bileşenlerle karşılaştırılmış; özellikle bir kümenin kimyasal ve yörünge parametrelerinin Gaia–Enceladus/Sausage (GES) özellikleriyle güçlü biçimde örtüştüğü belirlenmiştir.

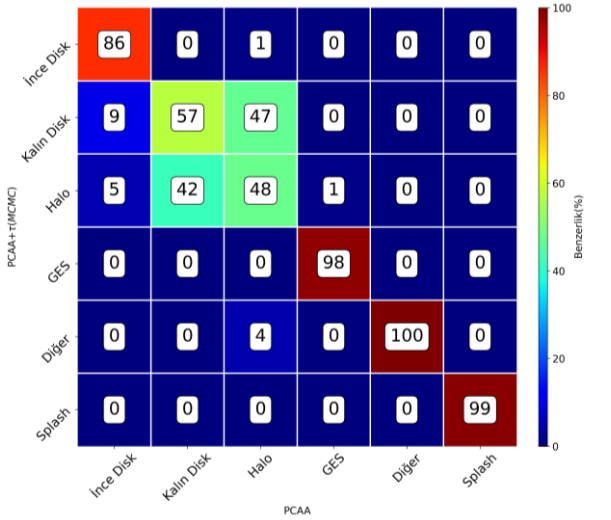
3.1. Farklı Yaş Uzaylarında Kümeleme Sonuçlarının Karşılaştırılması

Kimyasal uzayda elde edilen kümelerin yaş parametresine duyarlılığını incelemek amacıyla, yalnızca kimyasal bolluklara dayalı PCAA sınıflandırması ile üç farklı yaş yaklaşımının eklendiği çözümler karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, sınıflandırmanın popülasyon yapısını ne ölçüde değiştirdiğini nicel olarak değerlendirmek amacıyla benzerlik (karmaşıklık) matrisleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu matrislerde yatay eksen (X ekseni), yalnızca kimyasal bolluklara dayalı referans kümeleme sonuçlarını (PCAA) temsil ederken; dikey eksen (Y ekseni), kimyasal uzaya yaş parametresinin dahil edilmesiyle elde edilen yeni kümeleme sonuçlarını (PCAA +) ifade etmektedir. Matris içerisindeki yüzde (%) değerleri, referans modelde belirli bir popülasyona atanmış yıldızların, yaş parametresi eklendiğinde hangi oranda aynı kümede kaldığını (köşegen üzerindeki hücreler) veya farklı bir kümeye kaydığını (köşegen dışındaki hücreler) göstermektedir. Dolayısıyla köşegen üzerindeki yüksek değerler, ilgili popülasyonun yaş değişkeninden bağımsız olarak güçlü ve kararlı bir kimyasal imzaya sahip olduğunu kanıtlarken; köşegen dışındaki değerler (örneğin kalın disk

ile halo arasındaki geçişler), yaş bilgisinin sınır bölgelerindeki yıldızları nasıl yeniden sınıflandırdığını ortaya koymaktadır.



Şekil 3: Bayesçi yaş bilgisinin eklenmesiyle elde edilen kümelemenin kimyasal sınıflandırmayla karşılaştırmasını gösteren karmaşıklık matrisi.

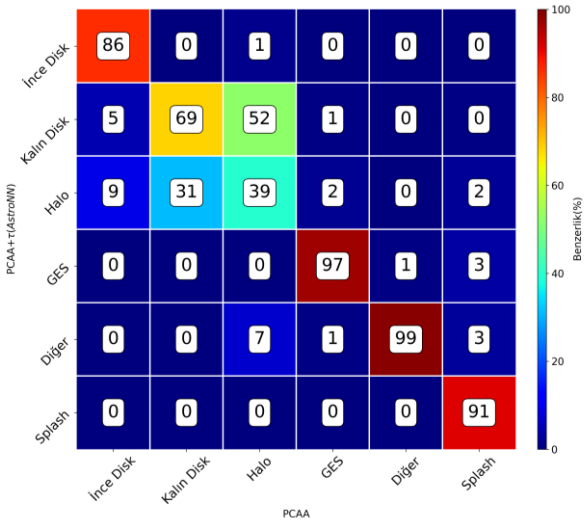


Şekil 4: MCMC yöntemi kaynaklı yaş bilgisinin eklenmesiyle elde edilen kümelemenin kimyasal sınıflandırmayla karşılaştırmasını gösteren karmaşıklık matrisi.

Şekil 3'te PCAA ile elde edilen sınıflandırma ile PCAA+τ(Bayes) çözümünün karşılaştırması verilmiştir. Bu yaklaşımda ince disk (%87) ve GES (%98) bileşenlerinin büyük ölçüde korunduğu görülmektedir. Buna karşılık kalın disk–halo ayrımının yeniden düzenlendiği dikkat çekmektedir. Özellikle halo yıldızlarının önemli bir kısmının kalın disk kümesine taşınması, kimyasal imzanın tek başına bu iki bileşeni tam olarak ayıramadığını, yaş bilgisinin ise sınır bölgede düzenleyici bir rol oynadığını göstermektedir.

Şekil 4'te PCAA ile PCAA+τ(MCMC) çözümü karşılaştırılmıştır. MCMC yaşlarının belirsizliklerinin daha geniş olması nedeniyle kalın disk ve halo arasında daha güçlü bir karışım gözlenmektedir. Bununla birlikte GES popülasyonu %98 oranında korunmuş, splash bileşeni ise %99 kararlılık göstermiştir. Bu durum, yaş belirsizliklerinin yüksek olduğu durumda bile belirgin kimyasal imzaya sahip popülasyonların değişmeden kaldığını ortaya koymaktadır.

Şekil 5'te PCAA ile PCAA+τ(AstroNN) çözümünün karşılaştırması verilmiştir. İnce disk ve GES bileşenlerinin yine büyük ölçüde korunduğu, ancak kalın disk ve halo yıldızları arasında yeniden dağılımın devam ettiği görülmektedir. Kimyasal olarak sınır bölgede bulunan yıldızların yaş parametresi eklendiğinde farklı popülasyonlara kayabildiği açıkça ortaya çıkmaktadır. Buna rağmen GES popülasyonu %97 oranında korunarak en kararlı bileşenlerden biri olmuştur.



Şekil 5: AstroNN yaş bilgisinin eklenmesiyle elde edilen kümelemenin kimyasal sınıflandırmayla karşılaştırmasını gösteren karmaşıklık matrisi.

Bu üç karşılaştırma birlikte değerlendirildiğinde, yaş parametresinin popülasyon sayısını veya ana yapılarını değiştirmediği, ancak kimyasal olarak örtüşen bileşenlerin sınırlarını yeniden düzenlediği görülmektedir. Başka bir deyişle yaş, yeni bir popülasyon tanımlamamakta; yalnızca mevcut kimyasal yapı içinde yıldızların üyelik olasılıklarını yeniden dağıtmaktadır.

Bu sonuç özellikle GES açısından dikkat çekicidir. Tüm yaş yaklaşımlarında GES'in yüksek benzerlik oranıyla korunması, bu yapının tanımının yaşa duyarlı olmadığını göstermektedir. Bu nedenle GES'in fiziksel özellikleri ayrıntılı olarak bir sonraki bölümde nicel parametreleri üzerinden incelenmiştir.

3.2. GES Popülasyonunun Parametrik Kararlılığı: Yaş Parametresinin Etkisinin Nicel Değerlendirilmesi

Çizelge 1'de verilen medyan ve standart sapma değerleri, GES popülasyonunun kimyasal ve dinamik özelliklerinin kullanılan yaş belirleme yönteminden büyük ölçüde bağımsız olduğunu göstermektedir. Tüm çözümler

arasında [Fe/H] medyan değeri yalnızca birkaç yüzde birlik değişim göstermekte ve yaklaşık –1.3 dex civarında sabit kalmaktadır. Benzer şekilde α-element bollukları da dar bir aralıkta korunmaktadır: [O/Fe], [Mg/Fe], [Si/Fe] ve [Ca/Fe] değerleri tüm yöntemlerde birbirleriyle örtüşen dağılımlar üretmektedir. Standart sapmaların da yöntemler arasında karşılaştırılabilir olması, yaş eklenmesinin kimyasal dağılım genişliğini değiştirmediğini ortaya koymaktadır.

Demir-üstü ve hafif element bollukları ([Al/Fe], [Mn/Fe], [Ni/Fe], [C/Fe], [N/Fe], [Na/Fe]) da benzer biçimde kararlıdır. Medyan değerlerde gözlenen küçük oynamalar standart sapma aralıklarının içinde kalmakta ve farklı yaş çözümlerinin yeni bir kimyasal popülasyon üretmediğini göstermektedir. Bu durum, GES'in kimyasal olarak tutarlı bir yıldız oluşum geçmişine sahip olduğunu doğrulamaktadır.

Yörüngesel parametreler de aynı davranışı sergilemektedir. Perigalaktik uzaklık, apogalaktik uzaklık ve maksimum dikey uzaklık tüm çözümlerde birbirine yakın medyan değerler üretmekte ve standart sapmalar önemli ölçüde değişmemektedir. Hız bileşenleri ve özellikle azimutal hızın negatif değerlerde kalması, GES yıldızlarının düşük açısal momentumlu ve retrograda yakın yörüngelerini koruduğunu göstermektedir. **GES** kümesinde gözlenen yüksek R_{apo} ve Z_{max} standart sapmaları (yaklaşık 80 ve 44 kpc), küme içinde yörünge entegrasyonu sırasında ıraksayan az sayıda aykırı yıldızın varlığından kaynaklanmaktadır. Bu yıldızlar galaktik potansiyeli aşan toplam enerjiye sahip olduğundan medyan değerleri etkilememekte; dolayısıyla GES'in ortalama dinamik profilini bozmamaktadır.

Çizelge 1'de verilen yörüngesel parametrelerin hiçbir kümeleme analizine girdi değişkeni olarak dahil edilmemiştir. Yalnızca kimyasal bolluklar ve ilgili durumda yaş kullanılmıştır. Dolayısıyla Çizelge 1'de verilen yörüngesel ve kinematik nicelikler sınıflandırmanın bağımsız bir doğrulaması niteliğindedir. Farklı yaş çözümlerinde aynı dinamik yapının elde edilmesi, GES'in veri güdümlü bir algoritma çıktısı değil fiziksel bir galaktik alt yapı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 1: Farklı yaş yaklaşımlarında GES popülasyonunun kimyasal, dinamik ve kinematik parametrelerinin medyan ve standart sapma değerlerini gösteren tablo.

Parametre	PCAA	PCAA + τ(Bayes)	PCAA + τ(MCMC)	PCAA + τ(AstroNN)
[Al/Fe] (dex)	-0.22 ± 0.13	-0.22 ± 0.13	-0.22 ± 0.13	-0.22 ± 0.13
[C/Fe] (dex)	-0.33 ± 0.23	-0.33 ± 0.24	-0.33 ± 0.24	-0.33 ± 0.24
[N/Fe] (dex)	0.15 ± 0.27	0.15 ± 0.27	0.15 ± 0.27	0.15 ± 0.28
[O/Fe] (dex)	0.32 ± 0.13	0.32 ± 0.13	0.32 ± 0.13	0.32 ± 0.13
[Na/Fe] (dex)	0.06 ± 0.38	0.06 ± 0.38	0.06 ± 0.38	0.07 ± 0.38
[Mg/Fe] (dex)	0.21 ± 0.10	0.21 ± 0.10	0.21 ± 0.10	0.21 ± 0.10
[Si/Fe] (dex)	0.21 ± 0.09	0.21 ± 0.09	0.21 ± 0.09	0.21 ± 0.09
[Ca/Fe] (dex)	0.20 ± 0.13	0.20 ± 0.13	0.20 ± 0.13	0.20 ± 0.13
[Ti/Fe] (dex)	-0.06 ± 0.15	-0.06 ± 0.15	-0.06 ± 0.15	-0.06 ± 0.15
[Mn/Fe] (dex)	-0.31 ± 0.16	-0.31 ± 0.16	-0.31 ± 0.16	-0.31 ± 0.16
[Fe/H] (dex)	-1.29 ± 0.30	-1.29 ± 0.29	-1.29 ± 0.29	-1.29 ± 0.30
[Ni/Fe] (dex)	-0.04 ± 0.08	-0.04 ± 0.08	-0.04 ± 0.08	-0.04 ± 0.09
R_{apo} (kpc)	12.59 ± 79.97	12.55 ± 79.77	12.55 ± 79.77	12.65 ± 79.99
R_{peri} (kpc)	1.41 ± 2.21	1.40 ± 2.21	1.41 ± 2.21	1.41 ± 2.22
Z_{max} (kpc)	6.13 ± 44.34	6.10 ± 44.23	6.10 ± 44.24	6.14 ± 44.36
e	0.81 ± 0.19	0.81 ± 0.19	0.81 ± 0.19	0.81 ± 0.19
$L_z(\mathrm{kpc\,km\,s^{-1}})$	-32.16 ± 853.68	-35.82 ± 853.35	-35.82 ± 853.06	-44.35 ± 855.55
U (km s^{-1})	27.65 ± 201.48	27.68 ± 200.97	27.63 ± 201.06	31.50 ± 202.49
V (km s^{-1})	-245.27 ± 114.08	-245.19 ± 114.16	-245.45 ± 113.91	-246.31 ± 113.57
W (km s^{-1})	-9.95 ± 110.62	-9.58 ± 110.53	-10.07 ± 110.63	-12.32 ± 110.82

4. Tartışma

4.1. Literatür ile Nicel Karşılaştırma: GES Parametrelerinin Konumlandırılması

Bu çalışmada elde edilen Gaia–Enceladus/Sausage (GES) popülasyonuna ait kimyasal ve dinamik parametreler, literatürdeki başlıca çalışmalarla nicel olarak karşılaştırılmıştır. Çizelge 1'de sunulan medyan ve standart sapma değerleri, GES'in literatürde tanımlanan kemodinamik özellikleriyle yüksek düzeyde uyumlu olduğunu göstermektedir.

Metal bolluğu açısından, bu çalışmada GES için elde edilen [Fe/H] = -1.29 ± 0.30 dex değeri, Helmi vd. (2018) tarafından rapor edilen -1.3 dex civarındaki dağılımla doğrudan örtüşmektedir. Benzer şekilde Belokurov vd. (2018) ve Feuillet vd. (2021) çalışmalarında GES yıldızlarının -1.2 ile -1.5 dex aralığında yoğunlaştığı

gösterilmiştir. Bu bağlamda elde edilen metal bolluğu dağılımı, GES'in düşük metal içerikli dışarıdan katılmış kökenini doğrulamaktadır.

Alfa-element bollukları bakımından, bu çalışmada elde edilen [Mg/Fe] = +0.21± 0.10 ve diğer α-elementlerdeki benzer zenginleşme değerleri, literatürde GES için rapor edilen düşük-orta α-zenginleşme rejimiyle uyumludur (Mackereth vd. 2019; Hasselquist vd. 2021). Bu değerler, kalın disk yıldızlarına kıyasla daha düşük, ancak ince diskten belirgin şekilde yüksek bir α-zenginleşme seviyesine işaret ederek GES'in kimyasal olarak ayrı bir evrimsel yol izlediğini göstermektedir. Dinamik parametreler açısından, bu çalışmada elde edilen **yüksek yörünge basıklığı** (e = 0.81± 0.19) ve düşük açısal momentum değerleri (L_z = -32 kpc km s^{-1}) literatürde GES için tanımlanan karakteristik özelliklerle doğrudan uyumludur (Belokurov vd. 2018). Özellikle azimutal hız bileşeni (V = -245± 114 km s^{-1}) civarında elde edilen değerler, GES yıldızlarının belirgin şekilde düşük momentumlu ve sıfıra yakın ya da hafif retrograd yörüngelerde bulunduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, GES'in radyal olarak uzamış ve **yüksek basıklıklı yörüngelerle** karakterize edilen bir birleşme kalıntısı olduğu yönündeki standart senaryoyu desteklemektedir.

Yörünge parametreleri açısından da benzer bir uyum söz konusudur. Bu çalışmada elde edilen R_{peri} = 1.41 ± 2.21kpc ve R_{apo} = 12.59 ± 79.97 kpc değerleri, literatürde GES için verilen geniş radyal dağılımla tutarlıdır (Helmi vd. 2018; Mackereth vd. 2019). Bu yapı, GES yıldızlarının galaktik merkeze yakın bölgelerden başlayarak dış halo bölgelerine kadar uzanan yüksek basıklıklı yörüngelere sahip olduğunu göstermektedir.

Bu karşılaştırmalar birlikte değerlendirildiğinde, bu çalışmada yalnızca kimyasal bolluklar ve yaş parametresi kullanılarak elde edilen GES seçiminin, literatürde hem kinematik hem de kimyasal olarak tanımlanmış GES popülasyonu ile nicel olarak tutarlı olduğu görülmektedir. Özellikle dikkat çekici olan nokta, bu uyumun yaş parametresinden bağımsız olarak elde edilmesidir.

Dolayısıyla bu çalışma, GES'in tanımlanmasında kimyasal ve dinamik parametrelerin birincil belirleyiciler olduğunu, yaş bilgisinin ise bu yapıyı yeniden üretmek için gerekli olmadığını literatürle doğrudan karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Bu sonuç, galaktik arkeolojide birleşme kalıntılarının belirlenmesinde kronolojik bilgiden ziyade kimyasal evrim izlerinin daha yüksek ayırt edici güce sahip olduğunu güçlü biçimde desteklemektedir.

4.2. Disk–Halo Ayrımı ve Yaşın Gerçek Rolü

Kümeleme sonuçlarının karşılaştırılması, yaş parametresinin GES gibi kimyasal olarak belirgin popülasyonların tanımını değiştirmediğini, ancak kimyasal olarak örtüşen bileşenlerin sınırlarını yeniden düzenlediğini göstermektedir. Özellikle kalın disk ve iç halo yıldızları arasında gözlenen yeniden atamalar, yaş bilgisinin bu bölgede düzenleyici bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Bu durum galaktik evrim senaryoları ile uyumludur. İnce disk, kalın disk ve iç halo bileşenleri tamamen ayrık kimyasal yollar izlemez; aksine kısmen örtüşen zenginleşme geçmişlerine sahiptir. Özellikle kalın disk ile iç halo yıldızları benzer metal bollukları ve α-element oranları gösterebilir. Bu nedenle yalnızca kimyasal bolluklara dayalı sınıflandırmalar, bu iki bileşen arasında doğal bir geçiş **bölgesi** üretir. Yaş parametresi bu bölgede yıldızların oluşum dönemlerini ayırt ederek üyelik olasılıklarını yeniden dağıtır.

Buna karşılık GES yıldızları tek ve hızlı bir yıldız oluşum geçmişine sahip, galaksi dışından katılmış bir sistemin ürünüdür. Bu nedenle disk bileşenleriyle örtüşen geniş bir kimyasal süreklilik oluşturmaz ve yaş parametresi eklendiğinde yeniden tanımlanmaya ihtiyaç duymaz. Başka bir deyişle, yaş bilgisi GES'i ortaya çıkarmak için değil, kimyasal olarak süreklilik gösteren yerinde oluşmuş (in-situ) popülasyonların ayrımını rafine etmek için işlevseldir.

Bu sonuç yaşın galaktik arkeolojideki rolünün bağlama bağlı olduğunu göstermektedir. Yaş, dışarıdan katılmış sistemleri keşfetmekten çok, sürekli yıldız oluşumuna sahip disk bileşenlerinin ayrıntılı ayrıştırılmasında daha etkili bir parametredir.

4.3. Yaş Belirsizlikleri ve Fiziksel Yapıların Dayanıklılığı

Çizelge 1'de görüldüğü üzere farklı yaş belirleme yöntemleri kullanıldığında GES popülasyonunun medyan kimyasal bollukları ve dinamik parametreleri birbirleriyle örtüşen dağılımlar üretmektedir. Yaş tahminlerinin farklı yöntemlere bağlı olarak değişmesine rağmen kimyasal ve yörüngesel özelliklerin korunması, yaş belirsizliklerinin galaktik alt yapıların fiziksel tanımını belirlemediğini göstermektedir.

Yıldız yaşları dolaylı olarak türetilen niceliklerdir ve yıldız evrim modellerinin ters çözümüne dayanır. Atmosfer parametrelerindeki küçük belirsizlikler geniş yaş aralıklarına karşılık gelebilir; bu nedenle farklı yöntemlerin farklı yaş dağılımları üretmesi beklenen bir durumdur. Buna karşın kimyasal bolluklar, yıldızın oluştuğu gazın bütünleşik zenginleşme geçmişini temsil eder ve model bağımlılığı daha düşüktür. Çizelge 1'de tüm yaş çözümleri için [α/Fe] oranlarının ve metal bolluğunun değişmemesi, kimyasal imzanın yaşa göre daha yüksek ayırt edici bilgi taşıdığını göstermektedir.

Dinamik parametrelerin de benzer biçimde korunması bu yorumu desteklemektedir. Perigalaktik ve apogalaktik uzaklıkların, hız bileşenlerinin ve açısal momentumların tüm çözümlerde örtüşmesi, elde edilen yapının belirli bir yaş modeli tarafından üretilmediğini ortaya koymaktadır. Başka bir deyişle yaş tahmini popülasyonun zamanını ölçerken, kimyasal ve dinamik özellikler kökenini belirlemektedir.

Dolayısıyla yaş ölçümlerindeki sistematik farklılıklar GES'in tanımını değiştirmemekte, yalnızca yorumunu zenginleştirmektedir. Bu sonuç, galaktik birleşme kalıntılarının belirlenmesinde kronolojik bilginin tamamlayıcı, ancak belirleyici olmayan bir rol oynadığını göstermektedir.

4.4 Galaktik Popülasyonların Karşılaştırmalı Özellikleri

Çizelge 2, boyut indirgeme ve makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak ayrıştırılan temel galaktik popülasyonların kimyasal bolluk, yörünge dinamiği ve yaş parametrelerine ait medyan değerlerini toplu olarak sunmaktadır. Bu tablo, Samanyolu'nun yerleşik (in-situ) bileşenlerinin kimyasal ve dinamik özellikler bakımından nasıl ayrıştığını nicel olarak ortaya koymaktadır.

İnce Disk popülasyonu, yüksek metal bolluğu ([Fe/H] = −0.05 dex) ve düşük α-element zenginleşmesi ([Mg/Fe] = +0.09 dex) ile geç dönem ve uzun zaman ölçekli yıldız oluşumunu işaret etmektedir. Düşük yörünge basıklığı (e = 0.30) ve galaktik düzleme yakınlık (Z_{max} = 0.88 kpc), bu popülasyonun dinamik olarak soğuk disk bileşenini temsil ettiğini göstermektedir. Bu özellikler literatürde tanımlanan ince disk parametre aralıklarıyla tutarlıdır (Schönrich ve Binney, 2009; Plevne vd. 2015; Akbaba vd. 2024).

Kalın Disk popülasyonu daha düşük metal bolluğu ([Fe/H] = −0.46 dex) ve belirgin α-zenginleşmesi ([Mg/Fe] = +0.31 dex) ile ince diskten ayrılmaktadır. Daha yüksek dikey genlik (Z_{max} = 1.95 kpc) ve daha düşük ortalama rotasyon hızı (V = −90 km s^{-1}), bu bileşenin erken dönemde ısınmış ve kimyasal olarak hızlı evrim geçirmiş bir disk yapısını temsil ettiğini göstermektedir (Schönrich ve Binney, 2009, Plevne vd. 2015; Mackereth vd., 2019; Yolalan vd., 2025).

Halo popülasyonu, kalın disk ile benzer α-zenginleşmesi ([Mg/Fe] = +0.32 dex) göstermesine rağmen daha düşük metal bolluğu ([Fe/H] = −0.58 dex) ve daha sıcak kinematik yapısıyla (Z_{max} = 2.14 kpc, e = 0.40) ondan ayrılmaktadır. Bu değerler, yerleşik iç halo yıldızlarının tipik özellikleriyle uyumludur (Helmi ve White, 1999; Helmi vd. 2018; Das vd., 2020).

Splash popülasyonu ise kimyasal olarak kalın diske yakın özellikler sergilemesine rağmen dinamik açıdan belirgin biçimde ayrışmaktadır. Metal bolluğu ve α-element oranları kalın diskle karşılaştırılabilir düzeydeyken, yüksek yörünge basıklığı (e =0.67), güçlü retrograd eğilim (V = −238 km s^{-1}) ve artmış dikey genlik (Z_{max} = 3.29 kpc) bu grubun GES birleşmesinin dinamik etkisiyle ısınmış bir in-situ disk bileşeni olduğunu düşündürmektedir. Bu yapı, literatürde "Splash" olarak tanımlanan ve dışsal birleşmenin yerleşik diski dinamik olarak yeniden yapılandırması sonucu ortaya çıkan yıldız grubuyla uyumludur (Belokurov vd., 2020; Di Matteo vd., 2019).

Diğer (Others) olarak sınıflandırılan küme ise kimyasal ve kinematik olarak ana popülasyonların sınır bölgelerinde yer alan, homojen olmayan bir yıldız grubunu temsil etmektedir. Bu kümenin tekil bir fiziksel yapıyı değil, geçiş özellikleri gösteren alt grupları içerdiği değerlendirilmektedir.

Genel olarak Çizelge 2'de sunulan medyan değerler, kimyasal uzaya dayalı makine öğrenmesi sınıflandırmasının Samanyolu'nun temel bileşenlerini hem kökensel hem de dinamik özellikler bakımından tutarlı biçimde ayırabildiğini göstermektedir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada Gaia DR3 ve APOGEE DR17 veri setleri birleştirilerek galaktik popülasyonların, özellikle Gaia–Enceladus/Sausage (GES) birleşme kalıntısının, kimyasal bolluklar ve yıldız yaşları kullanılarak ayrıştırılmasında yaş parametresinin rolü incelenmiştir. Kimyasal bollukların Principal Component Abundance Analysis (PCAA) ile indirgenmesi ve k-means kümelemesi sonucunda GES popülasyonu yaş parametresi kullanılmadan da açık biçimde tanımlanabilmiştir.

Bayesçi yaklaşım, MCMC analizi ve AstroNN katalog yaşları kimyasal uzaya ayrı ayrı eklenerek sınıflandırma tekrarlanmıştır. Tüm yöntemlerde elde edilen GES yıldızlarının kimyasal bollukları ve dinamik parametreleri Çizelge 1'de görüldüğü üzere birbirleriyle örtüşen dağılımlar üretmiştir. Metal bolluğu, element bolluğu oranları, hız bileşenleri ve açısal momentum dağılımlarının korunması, GES'in yaş yönteminden bağımsız kararlı bir kimyasal ve dinamik imzaya sahip olduğunu göstermektedir. Bu parametrelerin kümelemeye dahil edilmemiş olması, elde edilen yapının bağımsız bir doğrulaması niteliğindedir. Çizelge 2'de verilen bulgular, galaktik popülasyonların ayrıştırılmasında yıldız yaşının birincil belirleyici değil, ikincil bir doğrulayıcı değişken olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durumun fiziksel kökeni, kimyasal bollukların yıldız oluşum süreçlerinin zaman ölçeklerini doğrudan kodlamasında yatmaktadır.

Çizelge 2: Galaktik popülasyonlar için kimyasal bollukların, yörüngesel parametrelerin ve yaş medyan ve standart sapma değerleri.

Yaş	Popülasyon	[Fe/H]	[Mg/Fe]	Rperi	Rapo	Zmax	e	Lz	U	V	W	τ(Bayes)	τ(MCMC)	τ(AstroNN)
		dex	dex	kpc	kpc	kpc		kpc km s^{-1}	km s^{-1}	km s^{-1}	km s^{-1}	Gyr	Gyr	Gyr
Yaşsız	İnce Disk	-0.05±0.22	0.09±0.06	9.55±7.94	5.13±2.28	0.88±3.15	0.30±0.10	1543±702	-23±71	-58±57	-2±30	3.15±4.05	3.40±3.40	6.42±2.09
Yaşsız	Kalın Disk	-0.46±0.20	0.31±0.05	8.75±3.86	3.80±1.75	1.95±2.12	0.39±0.16	1150±574	-12±86	-90±75	-2±54	12.90±5.04	8.21±4.05	9.15±1.78
Yaşsız	Splash	-1.37±0.31	0.18±0.19	7.20±53.31	1.55±1.81	3.29±44.77	0.67±0.18	-21±774	157±161	-238±99	-65±90	3.00±5.18	6.44±3.81	4.97±2.65
Yaşsız	Halo	-0.58±0.21	0.32±0.06	8.89±3.33	3.68±1.87	2.14±2.16	0.40±0.18	1110±614	-12±88	-94±81	-0±56	12.35±5.41	7.08±4.25	8.34±1.75
Yaşsız	Diğer	-0.70±0.34	0.31±0.09	9.10±70.93	3.13±2.18	2.62±41.72	0.46±0.22	889±822	-10±115	-108±99	-4±70	12.80±5.55	8.11±4.40	8.11±2.02
τ(Bayes)	İnce Disk	-0.02±0.21	0.08±0.05	9.56±4.80	5.16±2.28	0.85±1.64	0.30±0.10	1550±701	-23±71	-57±57	-2±30	3.00±3.38	3.14±3.08	6.26±2.05
τ(Bayes)	Kalın Disk	-0.48±0.22	0.32±0.06	8.81±6.97	3.82±1.90	1.95±3.30	0.39±0.17	1151±615	-12±86	-90±79	-2±54	12.95±1.02	10.21±2.61	9.50±1.39
τ(Bayes)	Splash	-1.37±0.31	0.18±0.19	7.20±53.25	1.55±1.81	3.29±44.72	0.67±0.18	158±161	-238±99	-65±90	3.07±5.19	6.53±3.80	4.97±2.65	
τ(Bayes)	Halo	-0.48±0.21	0.30±0.06	8.87±3.24	3.93±1.82	1.95±1.85	0.38±0.16	1183±588	-13±85	-85±71	-1±52	1.40±1.27	1.69±1.48	6.94±1.47
τ(Bayes)	Diğer	-0.70±0.33	0.31±0.08	9.09±66.58	3.13±2.15	2.60±39.16	0.45±0.21	904±808	-13±114	-108±99	-3±69	12.85±5.38	8.45±4.29	8.32±2.01
τ(MCMC)	İnce Disk	-0.02±0.21	0.08±0.05	9.56±8.32	5.16±2.29	0.85±3.27	0.30±0.10	1548±706	-23±71	-57±58	-2±30	3.00±3.59	3.16±2.82	6.27±2.05
τ(MCMC)	Kalın Disk	-0.48±0.23	0.32±0.06	8.87±3.77	3.91±1.86	1.91±2.02	0.38±0.17	1182±601	-13±86	-88±76	-2±52	13.00±1.43	10.94±1.66	9.48±1.40
τ(MCMC)	Splash	-1.37±0.31	0.18±0.19	7.20±53.30	1.54±1.81	3.29±44.76	0.67±0.18	-18±774	157±161	-238±99	-65±90	3.05±5.18	6.59±3.81	4.96±2.65
τ(MCMC)	Halo	-0.49±0.21	0.30±0.06	8.78±3.82	3.80±1.89	1.99±2.31	0.38±0.17	1144±609	-12±85	-88±77	-2±54	1.70±4.85	2.04±1.80	7.34±1.82
τ(MCMC)	Diğer	-0.70±0.33	0.31±0.08	9.08±65.88	3.14±2.15	2.60±38.75	0.45±0.21	904±806	-12±114	-107±99	-3±69	12.80±5.44	8.14±4.27	8.25±2.01
τ(AstroNN)	İnce Disk	-0.02±0.21	0.08±0.05	9.45±8.32	5.07±2.23	0.86±3.35	0.30±0.10	1523±691	-22±71	-59±57	-2±30	3.25±3.89	3.51±3.32	6.55±1.90
τ(AstroNN)	Kalın Disk	-0.47±0.21	0.32±0.05	8.76±3.94	3.80±1.80	1.95±2.27	0.39±0.17	1146±586	-15±85	-90±76	-2±54	12.95±3.20	9.69±3.17	9.61±0.87
τ(AstroNN)	Splash	-1.37±0.30	0.16±0.19	7.20±55.40	1.56±1.79	3.33±46.55	0.67±0.18	-35±760	174±159	-242±98	-69±87	2.80±5.11	5.93±3.82	4.97±2.66
τ(AstroNN)	Halo	-0.49±0.22	0.30±0.08	9.07±3.53	4.02±2.13	1.94±1.76	0.37±0.17	1210±674	-9±86	-84±78	-1±52	1.45±4.77	1.82±3.69	6.51±1.65
τ(AstroNN)	Diğer	-0.69±0.33	0.31±0.08	9.00±62.95	3.16±2.11	2.55±37.05	0.45±0.21	913±795	-12±113	-105±97	-2±69	12.80±5.53	7.91±4.39	8.10±1.94

Özellikle α-element bollukları hızlı süpernova zenginleşmesini, demir-üstü elementler ise gecikmeli katkıları temsil ederek yıldızların oluştuğu ortamın evrimsel geçmişini yansıtmaktadır. Buna karşılık yaş tahminleri model bağımlı ve belirsizlikleri yüksek türetilmiş niceliklerdir. Bu nedenle farklı yaş yöntemleri farklı dağılımlar üretmesine rağmen, kimyasal imza korunmakta ve aynı popülasyonlar tanımlanabilmektedir.

Bu sonuçlar, GES'in tanımının yaş uzayında değil, kimyasal evrim uzayında yapıldığını göstermektedir. Yaş parametresi yalnızca sınır bölgelerdeki yıldızların üyelik olasılıklarını küçük ölçekte yeniden düzenlemekte, ancak popülasyonun ortalama özelliklerini değiştirmemektedir. Buna karşılık kalın disk–halo geçişinde ayrımın kısmen iyileştiği gözlenmiştir. Dolayısıyla yaş bilgisi yapıyı tanımlayan değil, yorumu destekleyen tamamlayıcı bir eksen olarak davranmaktadır.

Bu çalışma, aynı örneklem üzerinde üç farklı yaş yönteminin sistematik olarak karşılaştırıldığı nadir örneklerden biridir ve galaktik birleşme kalıntılarının belirlenmesinde kökensel bilginin kronolojik bilgiden daha ayırt edici olduğunu göstermektedir. GES için kimyasal bolluklar ve yörüngesel parametreler birincil tanımlayıcılar olurken, yaş parametresi tamamlayıcı bir değişken olarak kalmaktadır.

Sonuç olarak galaktik arkeolojide yaşın evrimsel zaman ölçeğini anlamada kritik olmasına rağmen popülasyon kimliğini belirlemede zorunlu olmadığı gösterilmiştir. Bu bulgu, büyük ölçekli tayfsal taramalarda alt yapıların hızlı biçimde tanımlanabilmesi için yüksek doğruluklu yaş ölçümlerine her durumda ihtiyaç olmadığını ortaya koymaktadır.

Gelecek çalışmalarda, bu çalışmada kimyasal ve dinamik olarak tanımlanan GES örnekleminin yıldız oluşum geçmişinin kimyasal evrim modelleriyle birlikte nicel olarak yeniden üretilmesi hedeflenmektedir. Özellikle yaş dağılımlarının doğrudan sınıflandırma değişkeni olarak kullanılmasından ziyade, birleşme zamanının ve gaz zenginleşme sürelerinin kısıtlanmasında kullanılması planlanmaktadır. Gaia DR4 ve SDSS-V MWM gibi daha geniş ve hassas veri setleriyle, yaş belirsizliklerinin azaltılması ve kimyasal–dinamik olarak tanımlanmış alt yapıların zaman ölçeklerinin bağımsız biçimde sınanması mümkün olacaktır. Bu yaklaşım, galaktik birleşmelerin yalnızca varlığını değil, evrimsel kronolojisini de güvenilir biçimde belirlemeye yönelik bir sonraki adımı oluşturacaktır.

Etik Standartlar Bildirgesi

Bu makale, Avrupa Astronomi Derneği Yıllık Toplantısı (EAS 2024, Padova/İtalya, 1–5 Temmuz 2024) kongresinde kısa sunum olarak sunulan ancak tam metni yayımlanmayan "Assessing Stellar Ages and Their Impact on Chemical Tagging Methods" adlı tebliğin içeriği, kongrede alınan eleştiri ve öneriler doğrultusunda yeni bir veri seti ve genişletilmiş bir kapsam çerçevesinde geliştirilerek ve kısmen değiştirilerek üretilmiş hâlidir.

Yazarlık Katkı Beyanı

Author Araştırma, Fikir Sahibi Kaynaklar, Yazma, Görselleştirme

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında analiz edilen tüm veriler, açık kaynaklı olup isteyen herkesin erişimine açıktır.

Teşekkür

Bu araştırma TÜBİTAK 3501 kapsamında MFAG-123F227 numaralı proje tarafından desteklenmiştir.

5. Kaynaklar

Abdurro'uf, Accetta, K., Aerts, C., Silva Aguirre, V., Ahumada, R., Ajgaonkar, N., … Zhu, K. 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), 35.

Akbaba, F., Ak, T., Bilir, S., Plevne, O., Önal Taş, Ö., Seabroke, G. M., 2024, "Radial Metallicity Gradients for the Chemically Selected Galactic Thin Disc Main-Sequence Stars", Astronomische Nachrichten, 345, e20240052. doi:10.1002/asna.20240052

Belokurov, V., Erkal, D., Evans, N. W., Koposov, S. E., Deason, A. J. 2018. "Co-formation of the Galactic disc and the stellar halo". MNRAS, *478*(1), 611-619.

Belokurov, Vasily, Kravtsov, A. 2024. "In-situ versus accreted Milky Way globular clusters: a new classification method and implications for cluster formation". Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, *528*(2), 3198-3216.

Belokurov, Vasily, Sanders, J. L., Fattahi, A., Smith, M. C., Deason, A. J., Evans, N. W., Grand, R. J. J. 2020. "The biggest splash". Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, *494*(3), 3880-3898.

Bovy, J. 2015. "galpy: A python Library for Galactic Dynamics", *216*(2), 29.

Çınar, D. C., Bilir, S., Şahin, T., Plevne, O., Çınar, D. C., Bilir, S., … Plevne, O. 2025. "Tracing the Galactic Origins of Selected Four G-type Stars in the Solar Neighborhood". AJ, *170*(1), 13.

Das, P., Hawkins, K., Jofré, P. 2020. "Ages and kinematics of chemically selected, accreted Milky Way halo stars". Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, *493*(4), 5195-5207.

Freeman, K., Bland-Hawthorn, J. 2002. "The New Galaxy: Signatures of Its Formation", *40*, 487-537.

Foreman-Mackey, D., Hogg, D. W., Lang, D., Goodman, J. 2013. "emcee: The MCMC Hammer". Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 125(925), 306–312. https://doi.org/10.1086/670067

Gaia Collaboration, Vallenari, A., Brown, A. G. A., Prusti, T., de Bruijne, J. H. J., Arenou, F., … Zwitter, T. 2022. "Gaia Data Release 3: Summary of the content and survey properties".

Hagen, J. H. ~J., Helmi, A. 2018. "The surface mass density in the solar neighbourhood using red clumps stars in TGASxRAVE". Içinde C. Chiappini, I. Minchev, E. Starkenburg, & M. Valentini (Ed.), *Rediscovering Our Galaxy* (C. 334, ss. 304-305).

Hasselquist, S., Hayes, C. R., Lian, J., Weinberg, D. H., Zasowski, G., Horta, D., … Vincenzo, F. 2021. "APOGEE Chemical Abundance Patterns of the Massive Milky Way Satellites". The Astrophysical Journal, *923*(2), 172.

Helmi, A., Babusiaux, C., Koppelman, H. H., Massari, D., Veljanoski, J., Brown, A. G. A. 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., White, S. D. M. 1999. "Building up the stellar halo of the Galaxy". Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, *307*(3), 495-517.

Horta, D., Schiavon, R. P., MacKereth, J. T., Beers, T. C., Fernández-Trincado, J. G., Frinchaboy, P. M., … Zasowski, G. 2020. "The chemical compositions of accreted and in situ galactic globular clusters according to SDSS/APOGEE". Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, *493*(3), 3363-3378.

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.

Jørgensen, B. ~R., Lindegren, L. 2005. "Determination of stellar ages from isochrones: Bayesian estimation versus isochrone fitting", *436*(1), 127-143.

Lancaster, L., Belokurov, V., Wyn Evans, N. 2019. "Quantifying the smoothness of the stellar halo: A link to accretion history". Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, *484*(2), 2556-2565.

Leung, H. W., Bovy, J. 2018. "Deep learning of multi-element abundances from high-resolution spectroscopic data". Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, *483*(3), 3255-3277.

Mackereth, J. T., Schiavon, R. P., Pfeffer, J., Hayes, C. R., Bovy, J., Anguiano, B., … Ferńandez-Trincado, J. G. 2019. "The origin of accreted stellar halo populations in the milky way using apogee, gaia, and the eagle simulations". Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, *482*(3), 3426-3442.

Majewski, S. R., Schiavon, R. P., Frinchaboy, P. M., Allende Prieto, C., Barkhouser, R., Bizyaev, D., … Zamora, O. 2017. "The Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment (APOGEE)", *154*(3), 94.

Marışmak, M., Şahin, T., 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.

McMillan, P. J. 2017. "The mass distribution and gravitational potential of the Milky Way". Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, *465*(1), 76-94.

Plevne, O., Akbaba, F. 2025. "Estimating Initial Mass of Gaia-Enceladus Dwarf Galaxy with Chemical Evolution Model". ApJ, *991*(2), 207.

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., … Duchesnay, É. 2011. "Scikit-learn: Machine Learning in Python". Journal of Machine Learning Research, 12, 2825–2830.

Pont, F., Eyer, L. 2004. "Isochrone ages for field dwarfs: method and application to the age-metallicity relation", *351*(2), 487-504.

Reid, I. N., Gizis, J. E., Hawley, S. L. 2002. "The Palomar/MSU Nearby Star Spectroscopic Survey. IV. The Luminosity Function in the Solar Neighborhood and M Dwarf Kinematics", *124*(5), 2721-2738.

Schönrich, R., Binney, J. 2009. "Chemical evolution with radial mixing", *396*(1), 203-222.

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, *170*(2), 119.