

# Makine Öğrenmesi Yöntemiyle Tayfsal Yolculuk: Anakoldan Devlere Disk Yıldızlarının Metal Bolluğu

Merve Bozkurt<sup>1</sup>  

<sup>1</sup> İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzak Bilimleri Bölümü, 34119 İstanbul, Türkiye

Accepted: April 6, 2025. Revised: April 6, 2025. Received: November 27, 2024.

## Özet

Bir yüksek lisans tezinin bir kısmını oluşturan bu çalışma, APOGEE DR17 ve *Gaia* EDR3 gökyüzü tarama programlarından elde edilmiş duyarlılığı yüksek verilere sahip ince disk anakol yıldızlarının analizlerini içermektedir. Çeşitli sınırlama kriterleri getirilerek seçilen yıldızların astrometrik verileri kullanılarak metal bolluğu gradyentleri hesaplanmıştır. Galaktik yörünge parametrelerinden biri olan  $R_m$  uzaklığına göre hesaplanan ince disk anakol yıldızlarının metal bolluğu gradyenti  $Z_{\max} < 500$  kpc için metal bolluğu ( $d[\text{Fe}/\text{H}]/dR_m = -0.048 \pm 0.345$ ),  $0.5 < Z_{\max} \leq 1$  kpc için ise ( $d[\text{Fe}/\text{H}]/dR_m = -0.046 \pm 0.347$ ) olarak bulunmuştur. Sonuçların Samanyolu'nun içten dışa oluşum senaryoları ile uyumlu olduğu görülmektedir.

## Abstract

This study, which is part of a master's thesis, includes analyses of thin disc main sequence stars with high-sensitivity data obtained from the APOGEE DR17 and *Gaia* EDR3 sky survey programs. Metallicity gradients were calculated using the astrometric data of selected stars by applying various selection criteria. The metallicity gradient of thin disc main sequence stars was calculated according to the  $R_m$  distance one of the galactic orbit parameters, as ( $d[\text{Fe}/\text{H}]/dR_m = -0.048 \pm 0.345$ ) for  $Z_{\max} < 500$  kpc and ( $d[\text{Fe}/\text{H}]/dR_m = -0.046 \pm 0.347$ ) for  $0.5 < Z_{\max} \leq 1$  kpc. The results seem to be consistent with the inside-out formation scenarios of the MilkyWay.

**Anahtar Kelimeler:** galaxy – thin disc – abundance

## 1 Giriş

Samanyolu'nun yapısını anlamak için çalışmalar 19.yüzyıldan itibaren yapılmakta olup günümüze kadar gelmektedir. **Herschel (1847)** tarafından yapılan araştırmalar ile gökyüzü ilk kez haritalandırılmıştır. Yaptığı gözlemler sonucunda sönük olan yıldızların uzakta, parlak yıldızların ise yakında olduklarını ortaya koymuştur. **Shapley (1919)** küresel kümeleri kullanarak yıldızların astrometrik parametrelerini hesaplamış ve Samanyolu'nun çapını yaklaşık 300 000 ışık yılı ( $\sim 92$  kpc) olarak, Güneş'in Galaksi merkezinden uzaklığını ise yaklaşık 50 ,000 ışık yılı ( $\sim 15$  kpc) olarak hesaplamıştır. İlerleyen yıllarda **Trumpler (1930)** açık yıldız kümelerinin uzaklıklarını ve görünen açısız çaplarını hesaplamıştır. Elde ettiği sonuçlar fotometrik yöntemle hesaplananlardan farklı çıktığından, yıldızların ışığının bir ortamdan geçip azalarak Dünya'ya ulaştığı sonucunu çıkarmış ve yıldızlararası sönükleşmeyi keşfetmiştir. Teknolojinin ilerlemesi ile yıldızların fiziksel ve kimyasal yapılarıyla ilgili çalışmalar hız kazanmıştır. 1944 yılında **Baade (1944)**, popülasyon kavramını ortaya atarak Güneş civarındaki yıldızlar için Pop I, küresel kümeleri oluşturan yıldızlar için Pop II sınıflaması yapılmış ve metal bolluğu ile ilgili çalışmaların öncüsü olmuştur. Başka galaksiler üzerinde yapılan çalışmalarda yıldızlardaki farklılıkların keşfedilmesiyle, tayf gözlemleri ve yıldızların element bolluklarının tayin edilmesiyle beraber Samanyolu'nun oluşum ve kimyasal evrim süreci ile ilgili sorular artmıştır.

Bu sorulara ilk cevap **Eggen, Lynden-Bell, & Sandage**

(1962) tarafından gelmiştir. ELS senaryosu adı verilen modelde araştırmacılar yıldızların konumları ile demir bollukları ( $[\text{Fe}/\text{H}]$ ) arasında bir ilişki bulmuşlardır. Bu ilişkiye göre Galaktik düzlemden uzaklaşıp diskin sınırına doğru gidildikçe  $[\text{Fe}/\text{H}]$  değeri azalmaktadır. Samanyolu galaksisinin metal bakımından fakir ilkel galaktik bulutun çökmesiyle oluştuğunu ileri sürmüşlerdir. ELS modeli disk yıldızları için gözlem bulgularına tatmin edici açıklama getirmiş olsa da, halo yıldızlarının metal bolluğu değerleri ve yaş aralıklarının uyumsuzluğunu açıklamada yetersiz kalmıştır. **Searle & Zinn (1978)** tarafından önerilen ve SZ senaryosu olarak adlandırılan modelde Galaksi'nin tek ilkel bir bulut yerine birden çok küçük bulutun bir araya gelmesiyle oluştuğu ileri sürüldü. Bir araya gelen bu küçük bulutların şişkin bölge ve küresel kümeleri, kalan gazın ise diski oluşturduğunu önerdiler. Böylece, halen güncelliğini koruyan Samanyolu'nun oluşumu ve kimyasal evrim sürecini içeren "Galaktik Arkeoloji" çalışması ilk kez yapıldı. Gelişen teknolojiyle birlikte gözlem sayılarının artmasıyla Galaktik diskte bulunan yıldızların farklı özellikleri tespit edildi. Bu araştırmalar sonucunda Galaktik diskin tek tür yapıdan oluşmadığı iki alt bileşenden olduğu öne sürülmüş ve böylece kalın disk bileşeni literatüre kazandırılmıştır (**Gilmore & Reid 1983; Gilmore & Wyse 1985**). Kalın disk keşfinden sonra Galaktik diskin yapısını açıklamada ELS ve SZ modelleri yetersiz kalmıştır. Bunun üzerine (**Chiappini ve diğ. 1997**) ikili çökme adı verilen yeni bir modelle Galaktik diskin iki farklı zamanda çökerek oluştuğu ileri sürülmüştür. İkili çökme modeline göre Samanyolu, metalce fakir ilkel galaktik bulutun kısa zaman ölçeğinde ( $\sim 1$  Gyr) çökmesiyle oluşmuştur. Bu çökme ile Galaksinin şişkin bölge, halo ve kalın disk bileşenleri oluşmuştur. İkinci çökme ise daha uzun zaman ölçeğinde

\* merve.bozkurt@ogr.iu.edu.tr

(~8 Gyl) gerçekleşerek diskte bulunan gazın içten dışarıya doğru çökmesiyle ince disk ve kalın disk bileşenlerinin oluşturmuştur. Bu model ince disk ve kalın disk bileşenlerinin farklı zamanlarda oluştuğunu belirterek yıldızların yaş ve metal bolluğu farklılıklarının açıklanabileceğini ileri sürmektedir.

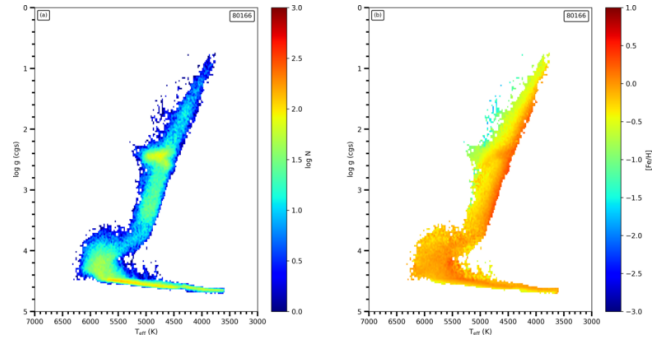
Gelişen CCD teknoloji sayesinde, Samanyolu ile ilgili artan keşif ve bilgiler yeni tarama programlarını zorunlu hale getirmiştir. Bu sayede farklı dalgaboylarında yapılan gökyüzü tarama (SDSS, WISE, 2MASS, CADIS, BATC, UKIDSS/VISTA) programları başlatılmıştır. Bu gökyüzü tarama programlarına ek olarak ESA tarafından gönderilen *Hipparcos* uydusu (Beekmans 1980) *V* bandında 8. kadirinden daha parlak yıldızların gözlemini yaparak 120 000 yıldızın trigonometrik paralaks ve öz hareket bileşenlerine ait verileri döneminin en duyarlı ölçümleriyle elde etmiştir. Uzay tabanlı çalışmalara ek olarak farklı dalgaboyunda tayfsal gökyüzü taramaları (RAVE, APOGEE, GALAH, LAMOST, GAIA-ESA) başlatılmıştır. Tayfsal veri analizleri yıldızların radyal hız, etkin sıcaklık, yüzey çekim ivmesi ve farklı elementlerin bolluk değerlerinin tayin edilmesini sağlamaktadır.

*Hipparcos* uydusunun beklenenden fazla başarı göstermesi yeni bir uydu projesinin hayata geçmesine zemin hazırlamış ve 2013 yılında ESA tarafından *Gaia* uydusu fırlatılmıştır. *Gaia* uydusu belirlenen her yıldız alanını en az 70 kez gözlemlemektedir. Bu gözlemleri *G* bandında yaklaşık 20 kadir parlaklık sınırına kadar yapmaktadır. Uydu, yıldızların konum, öz hareket bileşenleri ve trigonometrik paralaks verilerini ölçerek etkin sıcaklık, yüzey çekim ivmesi ve elementlerin bolluk analizlerini tayin etmeyi amaçlamaktadır. *Gaia* uydusunun verileri Samanyolu'nun oluşum ve evrim süreciyle ilgili bilgilerimizi güncelleyerek süreçleri daha iyi anlamamızı sağlayacaktır.

Galaksi diski ikili çökme modeline uygun olarak evrimleşmektedir. Bu evrimleşmenin temel göstergesi radyal metal bolluğu gradyentidir. Analizleri yapılan farklı gök cisimleri geniş bir gradyent aralığının varlığını ortaya çıkarmaktadır. Bu gradyent belirsizliği literatürde probleme yol açmaktadır. Bu çalışma, bu problemin çözümüne katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Çalışmada kullanılan tayfsal veriler APOGEE DR17'den (Abdurro'uf ve diğ. 2022), astrometrik veriler *Gaia* uydusundan alınmıştır. *Gaia* ve APOGEE DR17 kataloglarından belirlenen ince disk bileşenine ait anakol yıldızları kullanarak Galaksi'ye ait metal bolluğu gradyenti tayini yapılmıştır. Galaksi'nin çeşitli doğrultuları için metal bolluğu gradyentleri elde edilerek kemo-dinamik modele dair güncel sonuçlar elde edilerek literatürle karşılaştırılması yapılmıştır.

## 2 Veri Seçimi

Çalışma yüksek lisans tezinin bir kısmını içermekte olup yıldızlar SDSS-IV (Blanton ve diğ. 2017) gökyüzü tarama programının APOGEE DR17 (Abdurro'uf ve diğ. 2022) ve *Gaia* EDR3 kataloglarından alınmıştır. Oluşturulan bu kataloglarda 733 901 yıldızın tayfsal ve astrometrik parametreleri bulunmaktadır. APOGEE gökyüzü tarama programı ile 3.5 milyon gök cisminin (yıldız, galaksi ve kuazar) gözlemi yapılmıştır. Bu gök cisimlerinin tamamı Apache Point Gözlemevi bünyesinde bulunan 2.5 m'lik Sloan Foundation Teleskobu ile gözlenmiştir. Alınan veriler yüksek çözünürlüklü ( $R \sim 22\,500$ ) ve yüksek sinyal/gürültü ( $S/N \geq 100$ ) değerine sahiptir. Tarama programının fotometrik analizleri ise yakın kızılötesi bölgede ( $1.151 < \lambda < 1.70$  mikron) yapılmaktadır. Elde edilen tayfsal veriler ASPCAP (APOGEE Stellar Parameters and Chemical



Şekil 1. APOGEE DR17 katalogundan alınan yıldızların kiel diyagramları. (a) yıldız sayı yoğunluğuna göre, (b) metal bolluğuna göre renklendirilmiştir.

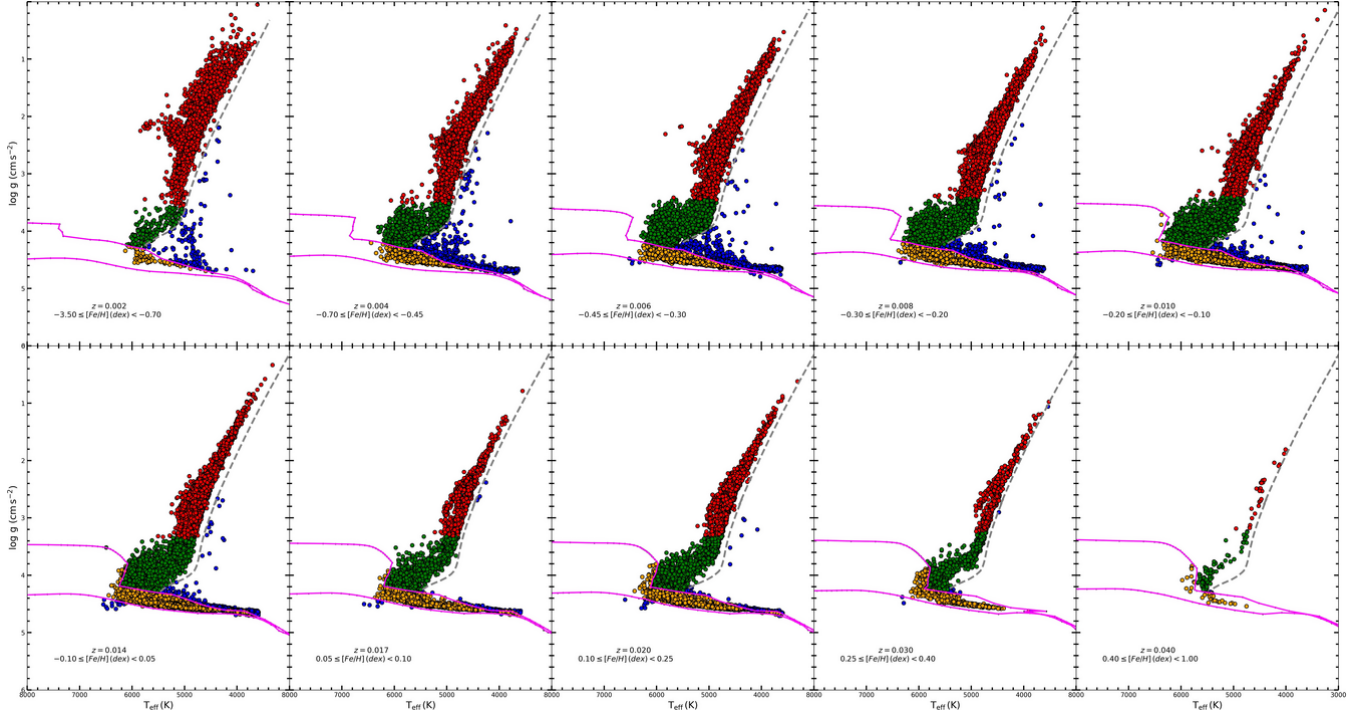
Abundances Pipeline) aracılığıyla alınmıştır. Buradan alınan gözlem verileri ile atmosfer model parametreleri elde edilerek 20 farklı elementin (C, Cl, N, O, Na, Mg, Al, Si, S, K, Ca, Ti, Ti II, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Ce) bolluk analizi yapılmıştır. Çalışmada kullanılan Data Reduction 17 (DR 17) veri seti en güncel APOGEE verisi olan APOGEE-2S ve APOGEE-2N'nin dahil edildiği APOGEE-2 verisinden elde edilmiştir. APOGEE DR17 veri seti en duyarlı verilerle bu isim altında toplanmıştır ve altı tane veri tipine sahiptir. Bunlar optik tayf (SDSS, SEGUE, BOSS, SEQUESS, eBOSS), kızılötesi tayf (APOGEE, APOGEE-2), IFU (Integral Field Unit) tayf (MaNGA), yıldız kütüphanesi tayfları (MaStar), parlaklık ve kırmızıya kayma verileri içeren katalogda derlenmiştir.

### 2.1 Veri Kalite Sınırlamaları

Çalışma için kullanılacak yıldızlar seçilirken gökyüzü tarama programlarının belirlediği kalite değeri göz önünde bulundurulmuştur. Konsorsiyum tarafından tayfsal verileri içeren APOGEE DR17'nin önerilen kalite değeri için sinyal/gürültü oranı,  $S/N \geq 100$  olarak belirlenmiştir. *Gaia* gökyüzü taraması için rölatif paralaks hatası ise  $0 < \sigma_\pi / \pi \leq 0.1$  olarak belirlenmiştir. Model atmosfer parametreleri ( $T_{\text{eff}}$ ,  $\log g$ ,  $[\text{Fe}/\text{H}]$ ,  $v_{\text{mic}}$ ) bilinen yıldızlar ve en kaliteli tayf verilerini elde etmek için demir bolluğu değerleriyle ilgili hiçbir uyarı içermeyen yıldızlar kullanılmıştır. Veri ile ilgili dosya bilgisayar ortamına indirilmiş ve başlangıçtaki yıldız sayısı 733 901 iken belirlenen kalite sınırlamalarıyla bu sayı 80 166 olmuştur. Bu veriye ait oluşturulmuş Kiel diyagramı Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde APOGEE verilerine ait anakol, dönüm noktası, kırmızı dev ve kırmızı yığın yıldızlarının bulunduğu geniş bir örnek görülmektedir.

### 2.2 Yıldızların Seçimi

Çalışmada APOGEE DR17'den ince disk bileşenine ait anakol yıldızları seçilmiştir. Anakol yıldızları seçilirken Bilir ve diğ. (2020) tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır. Farklı ısıma gücüne sahip yıldızları ayırmada PARSEC (Padova TRIeste Stellar Evolution Code) yıldız evrim yollarını (Bressan ve diğ. 2012) kullanılarak veriler 10 farklı metal bolluğu aralığına bölünmüştür. Belirlenen bu aralıklardaki metal bolluğu ve yaş değerine en uygun izokron elde edilmiştir. Belirlenen metal bolluğundaki yıldızlar etkin sıcaklık ve yüzey çekim ivmelerine göre  $\log g - T_{\text{eff}}$  diyagramına (Şekil 2) yerleştirilmiş ve PARSEC eş yaş eğrileri (Bressan ve diğ. 2012) kullanılarak



**Şekil 2.** Farklı metal bolluğu aralıklarına yerleştirilmiş yıldızları göstermektedir. Diyagram üzerindeki kırmızı, yeşil, turuncu ve mavi renkli noktalar sırasıyla dev, alt dev, anokol ve istatistik dışı yıldızları temsil etmektedir.

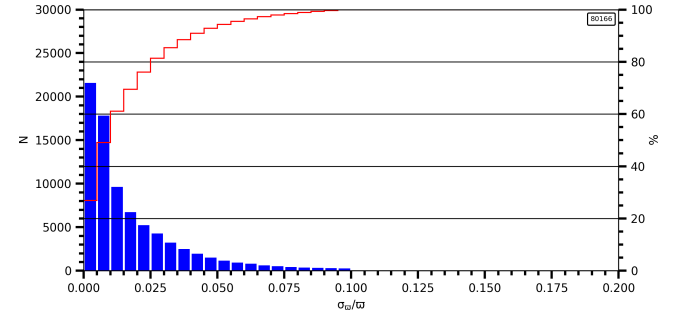
belirlenen ZAMS ve TAMS eğrileri de bu diyagramlar üzerinde gösterilmiştir. Bu diyagramlardan itibaren yıldızların ışıma gücü sınıfları belirlenmiştir.

Şekil 2’de gösterilen diyagramda izokronun sol tarafında kalan yıldızlar ince diske ait farklı ışıma gücü sınıfındaki yıldızları göstermektedir. ZAMS ve TAMS eğrileri belirlenmiş; arada kalan yıldızlar anokol yıldızları olarak sınıflandırılmıştır. TAMS ile  $\log g > 3.5$  arasında kalan yıldızlar alt dev,  $\log g < 3.5$  arasında kalan yıldızlar dev yıldızları olarak sınıflandırılmıştır. Analizler sonucunda 80 166 yıldız içinden 26 191 anokol, 16 929 alt dev, 31 868 dev ve 5 178 istatistik dışı yıldız belirlenmiştir.

### 2.3 Yıldızların Astrometrisi

Yıldızların uzaklık ölçümlerine dair hatalarını incelemek önemlidir. Rölatif paralaks hataları için sınır değeri belirlemek kinematik parametrelerin analizlerinin doğru yapılmasına dolayısıyla hassas olarak metal bolluğu gradyent hesaplamasına yardımcı olmaktadır. Bu hataları yıldız verilerinden çıkarmak için trigonometrik paralaks ve bunlara ait hata değerleri *Gaia* EDR3 (Gaia Collaboration ve diğ. 2021) veri sürümünden alınmıştır ve oluşturulan histogram Şekil 3’te verilmiştir. Belirlenen yıldızların Güneş’e uzaklıklarının hesaplanmasında  $d(\text{pc}) = 1000/\varpi(\text{mas})$  bağıntısı kullanılmıştır. Histogram incelendiğinde rölatif paralaks hatasının  $0 < \sigma_\varpi/\varpi \leq 0.20$  aralığında olduğu görülmektedir.

Seçilen yıldızların Güneş civarındaki ve Galaksi düzlemindeki sayı yoğunluklarını tespit edebilmek için uzaklık tayinleri yapılmıştır. Güneş merkezli kartezyen koordinat sistemine ( $X \times Y$ ,  $X \times Z$ ) yerleştirilmiş ve Galaksi merkezine uzaklık  $R_\odot = 8$  kpc olarak alınmıştır (Majewski 1993). Yıldızların çoğunun birinci, ikinci ve üçüncü çeyrekte toplandığı dördüncü çeyrekte seyrek olduğu tespit edilmiştir. APOGEE deneyi



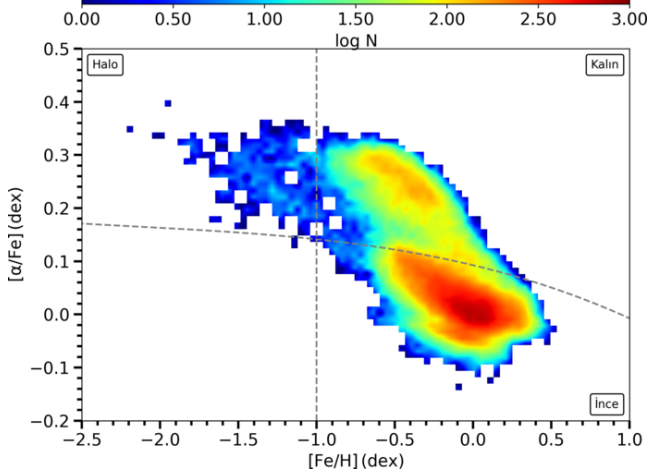
**Şekil 3.** Kırmızı çizgi APOGEE DR17’den veri sınırlaması ile seçilen yıldızların rölatif paralaks hatalarının birikimli toplamını göstermekte.

genellikle kuzey yarı küreden gözlem yaptığından dördüncü çeyrekteki veri azlığı beklentiye uymaktadır. APOGEE deneyinde gözlem konumundan dolayı yanlışlıklar mevcuttur. Yıldızların uzaklıklarının daha iyi açıklanması sebebiyle  $X$ ,  $Y$  ve  $Z$  uzaklıklarının medyan değerleri hesaplanarak sırasıyla -43.11 pc, 79.88 pc ve 251.31 pc olarak hesaplanmıştır. Çalışmada yıldızların öz hareket bileşenleri *Gaia* EDR3’ten alınmıştır (Gaia Collaboration ve diğ. 2021).

Öz hareket bileşenlerinin ( $\mu_\alpha \cos \delta$ ,  $\mu_\delta$ ) dağılımı hesaplanmıştır. Oluşturulan düzlemlerde yıldızların yıllık değişimlerinin -100 mas ile +60 mas aralığında, yıldızların radyal hız değerleri de  $-190 < \gamma < 140$  aralığında hesaplanmıştır. Yıldızların popülasyon ayrımının yapılması çalışmanın verimliliği açısından önemlidir. Bu amaçla kinematik parametreler kullanılarak yıldızların popülasyon ayrımında Toomre diyagramı kullanılmaktadır (Norris & Ryan 1989). Toomre diyagramı her bir yıldız için  $V_{\text{LSR}}$  ve  $\sqrt{U_{\text{LSR}}^2 + W_{\text{LSR}}^2}$  hızlarını kullanan

Çizelge 1. Kimyasal yöntemle sınıflaması yapılan yıldızların sayıları.

| İnce Disk | Kalın Disk | Halo  | Toplam |
|-----------|------------|-------|--------|
| 56 291    | 17 561     | 1 146 | 74 988 |

Şekil 4. APOGEE DR17 kataloğundan seçilen ve analizi yapılan 74 988 yıldızın kimyasal düzlemdeki konumları. Halo yıldızları  $[Fe/H] = -1$ 'den itibaren belirlenmiştir.

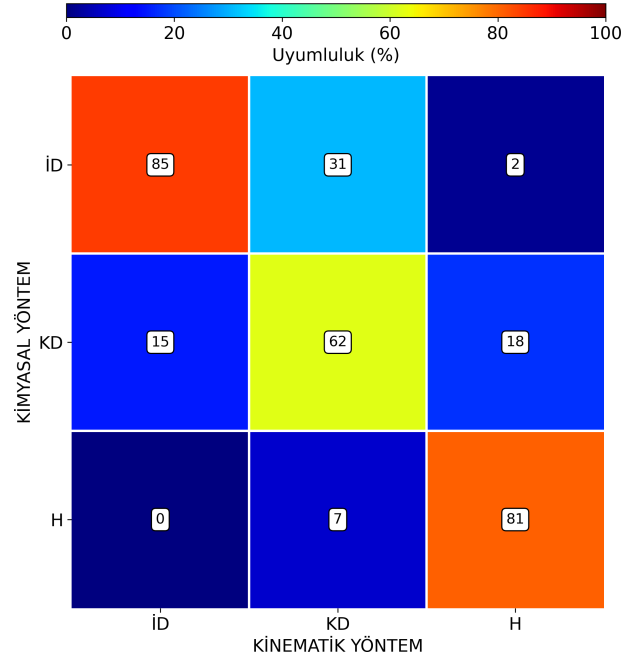
bir yıldızın hangi Galaktik bileşene ait olduğunu gösteren bir hız grafiğidir. Buna göre  $-60 \text{ km s}^{-1}$  ve  $40 \text{ km s}^{-1}$  dairelerinde metalce zengin yıldızların yoğunlaştığı, metalce fakir yıldızların haloya doğru uzanmakta olduğu,  $-40 \text{ km s}^{-1}$  ve  $50 \text{ km s}^{-1}$  dairelerinde alfa elementi bakımından zengin yıldızların yoğunlaştığı ve haloya doğru bu yıldızların arttığı tespit edilmiştir.

### 3 Gauss Karışım Modeliyle Popülasyon Sınıflaması

Galaktik disk için yapılan çalışmalar diskte iki farklı yıldız grubunun bulunabileceğini önermiş (Gilmore & Reid 1983; Gilmore & Wyse 1985) ve bu  $[\alpha/Fe]$ - $[Fe/H]$  kimyasal düzlemine yerleştirilerek disk bileşeninin iki popülasyona ayrıldığı gösterilmiştir. Çalışmada ince diske ait yıldızların metal bolluğu gradyanları araştırılmış, yıldızlar kinematik ve kimyasal yöntemler kullanılarak popülasyonlarına ayrılmıştır. Çalışma için seçilen yıldızların kinematik popülasyon analizleri için Bensby, Feltzing, & Lundström (2003) ve Bensby ve diğ. (2005), kimyasal düzlemde popülasyon ayrımı için Plevne ve diğ. (2020)'nin bağıntısı kullanılmıştır. Metal bolluğu gradyanı analizi iki farklı düzlemde yapılmış böylece çalışmanın devamlılığını sağlayacak olan yıldızların popülasyon sınıflaması oldukça hassas olarak seçilmiştir.

#### 3.1 Kimyasal Yöntemle Popülasyon Sınıflaması

APOGEE DR17 (Abdurro'uf ve diğ. 2022) kataloğundan seçilen 80 166 yıldızın kimyasal popülasyon sınıflaması için Plevne ve diğ. (2020)'nin kullandığı bağıntı tercih edilmiştir. Tercih edilen yöntemde Plevne ve diğ. (2020), kırmızı yığın yıldızları kullanmış ve yıldızları  $[\alpha/Fe]$ - $[Fe/H]$  düzlemine yerleştirerek GMM (Gauss Mixture Model) ile popülasyon ayrımı için gözlemsel olarak oluşturulan izokron kullanmıştır. Makine öğrenmesi yöntemiyle yapılan bu modelde eğimli kesikli çizgi

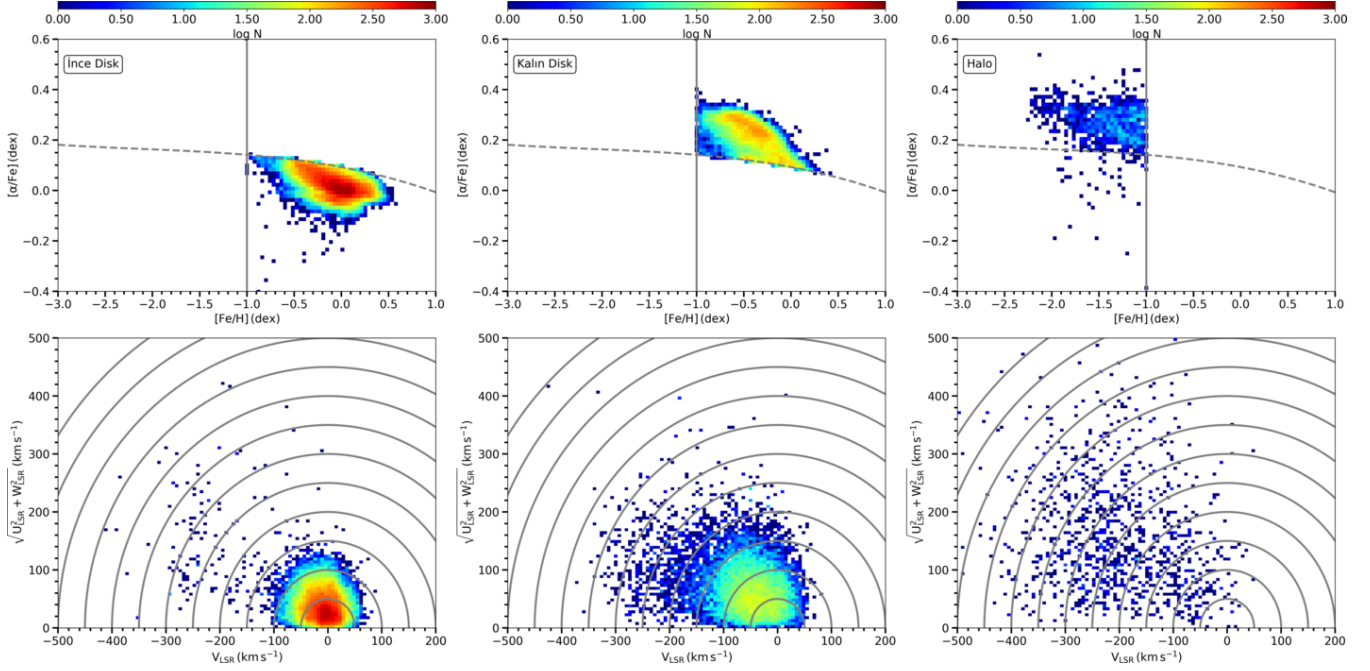


Şekil 5. Veri sınırlamasıyla seçilen yıldızların karmaşıklık matrisi.

karar sınır çizgisini ifade etmektedir. Bu karar sınır çizgisi Gauss dağılımındaki olasılığa göre belirlenmektedir. Olasılığın kullandığı iki parametre; popülasyon sayısını belirlemek ve Gauss yüzeylerinin matrisini oluşturmaktır. Python bilgisayar dilinde bu parametrelere gerekli ifadeler atandığında karar sınır değeri belirlenmektedir. Plevne ve diğ. (2020)'nin kullandığı yöntemle oluşturulan  $[\alpha/Fe]$ - $[Fe/H]$  düzleminde bileşenlerine ayrılan yıldızlar Şekil 4'te gösterilmiştir. Bu yöntemle popülasyon sınıfına ayrılan yıldızların sayısı Çizelge 1'de verilmiştir. Tez çalışması kapsamında araştırılan 80 166 yıldız içinden demir ve alfa bollukları hesaplanabilen yıldızların sayısı 74 988'dir.

Şekil incelendiğinde yıldızların  $-2.35 < [Fe/H] < 0.60$  dex,  $-0.20 < [\alpha/Fe] < 0.50$  dex, aralıklarında yoğunlaştığı görülmektedir. Örnekteki yıldızların büyük bölümünün  $[Fe/H]$  değerinin  $-1$  dex'ten daha büyük olduğu bölgelerde toplandığı görülmektedir. Aynı bölgede alfa elementlerinin bolluk analizlerinde Plevne ve diğ. (2020)'nin GMM ile ürettiği deneysel çizgi dikkate alındığında alfa elementleri bakımından fakir, demir elementi bakımından zengin olan yıldızların ince disk popülasyonuna üye oldukları tespit edilmiştir. Çalışmada ince disk yıldızlarını hassas şekilde seçmek amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda kinematik ve kimyasal kriterlerle seçilen yıldızların popülasyon sınıflaması için bir karmaşıklık matrisi oluşturulmuştur. Söz konusu matris, kinematik yöntemle seçilen yıldızlarla kimyasal yöntemle seçilen yıldızlar arasındaki uyumu göstermektedir. Şekil 5 incelendiğinde; matrisin x eksenini kinematik (Bensby, Feltzing, & Lundström 2003) ve (Bensby ve diğ. 2005) yöntemi, y eksenini kimyasal (Plevne ve diğ. 2020) yöntemi göstermektedir. Buna göre her iki yöntemle de seçilen yıldızlar %85 doğrulukla ince diske ait çıkmıştır. Böylece çalışmada araştırması yapılacak yeni yıldız sayısı 80 166 yıldız içinden 56 291 olmuştur.

Ş2.2'de anlatılan yöntemle ince disk yıldızlarının içinden anakol yıldızları seçilerek radyal metal bolluğu gradyanı araştırması yapılmıştır. PARSEC evrim yolları kullanılarak ince



**Şekil 6.** Kimyasal (üst grup) ve kinematik (alt grup) yöntemlerle popülasyon sınıflarına ayrılan yıldızların konumları. Kimyasal düzlemde ince disk yıldızları sol üstte, kalın disk yıldızları ortada ve halo yıldızları sağ üstte gösterilmiştir.

disk içinden anakol yıldızları seçilmiştir. Bu yöntemle çalışmada kullanılacak olan yeni yıldız sayısı 22 362 olmuştur.

### 3.2 Kinematik Yöntemle Popülasyon Sınıflaması

Tez çalışması için seçilen yıldızların kinematik analizleriyle her bir yıldızın farklı popülasyona üye olma olasılığı hesaplanmıştır. Yıldızların kinematik yöntemle sınıflandırılmasında [Bensby, Feltzing, & Lundström \(2003\)](#) ve [Bensby ve diğ. \(2005\)](#) tarafından belirlenen TD/D oranı dikkate alınmıştır. Bahsedilen oran ince diskte bulunan yıldızların disk yıldızlarına oranını temsil etmekte olup yıldız sayı yoğunluğuna göre hesaplanmaktadır. Buna göre  $TD/D \leq 1$  ince disk,  $1 < TD/D \leq 10$  kalın disk,  $TD/D > 10$  halo yıldızı olarak belirlenmiştir ve bu yöntemle seçilen yıldızlar Çizelge 2’de verilmiştir. Kinematik ve kimyasal yöntemle popülasyon sınıflaması yapılan yıldızlar kimyasal ve Toomre diyagramları üzerinde Şekil 6’te gösterilmiştir. Şekilde Toomre diyagramları alt grupta verilmiştir. Şekil incelendiğinde ince disk popülasyonuna üye olan yıldızların Güneş’e benzer şekilde Toomre diyagramında hareket ettikleri tespit edilmiştir. Aynı şekilde alfa elementleri bakımından zengin, demir elementi bakımından  $[Fe/H] = -1$  dex’ten büyük olan kalın disk popülasyonuna ait yıldızların Güneş’e göre yavaş hareket ettikleri tespit edilmiştir. Halo yıldızlarının ise oldukça düşük uzay hızlarında hareket ettikleri tespit edilmiştir.

### 4 Radyal Metal Bolluğu Gradyenti

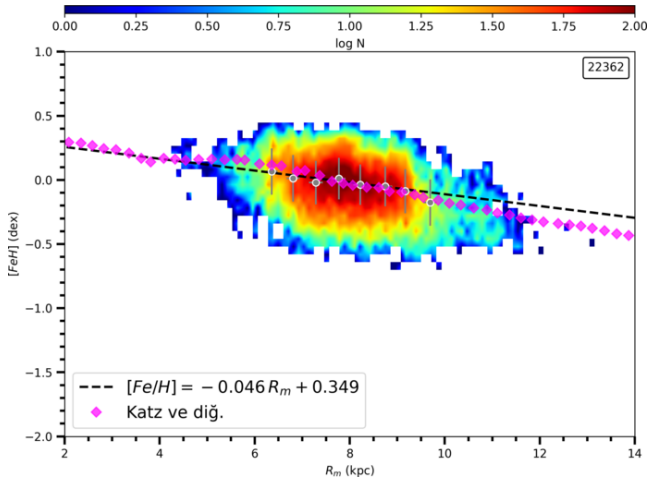
Çalışmada APOGEE DR17’den ([Abdurro’uf ve diğ. 2022](#)) alınan ve §2.2’de anlatılan yöntemle seçilen 56 291 ince disk yıldızları farklı ışıma gücü sınıflarına ayrılmış ve 18 904’ü anakol, 12 544’ü alt dev ve 24 843’nün dev olarak sınıflandığı tespit edilmiştir. Çalışmada radyal metal bolluğu gradyenti hesaplanması için yıldızların Galaktik yörünge parametreleri

**Çizelge 2.** Kinematik yöntemle sınıflaması yapılan yıldızların sayıları.

| Aralık             | Tür        | $N$    |
|--------------------|------------|--------|
| $TD/D \leq 1$      | İnce Disk  | 53 719 |
| $1 < TD/D \leq 10$ | Kalın Disk | 19 081 |
| $TD/D > 10$        | Halo       | 2 188  |
| Toplam             |            | 74 988 |

incelenmiştir. Literatürle karşılaştırmak amacıyla araştırılması yapılan Galaktik yörünge parametrelerinden  $R_m$  uzaklığı tercih edilerek metal bolluğu gradyenti tayin edilmiştir. Galaksi’nin ince disk popülasyonuna üye anakol yıldızı olarak belirlenen yıldızların  $R_m$  uzaklığına göre radyal doğrultudaki metal bolluğu değişimi Şekil 7’de gösterilmiştir. Bulunan radyal metal bolluğu gradyentinin literatürle uyumuna bakmak için [Katz ve diğ. \(2021\)](#)’nin dev yıldızlarını kullanarak tayin ettikleri radyal metal bolluğu gradyent değeri alınmış ve bulunan sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

Seçilen yıldızların radyal metal bolluğu gradyenti makine öğrenmesi aracılığıyla tayin edilmiştir. Tercih edilen yöntemde bazı olasılık fonksiyonları kullanılmıştır. Bu olasılık fonksiyonlarından biri  $\chi^2$ ’dir. Bu fonksiyon modelin gözlemle ne kadar iyi örtüştüğünün analizini yaparak hatayı belirler. Diğeri doğrusal model olan  $y = mx + b$  denklemi ile hesaplanan fonksiyondur. Bu denklemde  $m$  doğrunun eğimini,  $x$  bağımsız değişkeni ve  $b$  doğrunun  $y$  eksenini kestiği noktayı ifade eder. Bilgisayar ortamında  $[Fe/H]$ ,  $R_m$  ve bu parametrelerin hataları kullanılarak değişkenler atanmıştır. Radyal metal bolluğu gradyent tayininde Markov Chain Monte Carlo (MCMC) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem girdi parametrelerinin eğimi ve kesim noktasının olasılık dağılımını tahmin ederek metal bolluğu gradyentinin  $R_m$  uzaklığı ile değişimini modellemektedir. Galaktik yörünge parametresi

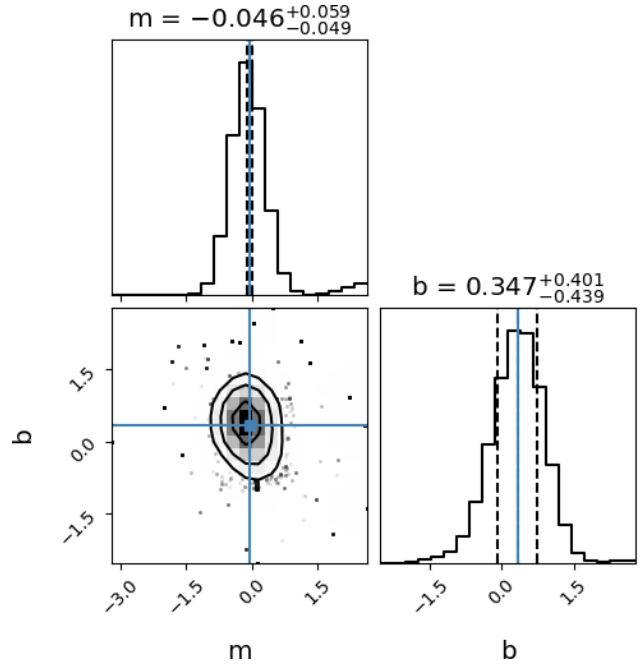


Şekil 7. Kesikli çizgi bu çalışmada kullanılan yıldızlardan elde edilen metal bolluğu gradyentine ait fiti, elmas sembolü **Katz ve diğ.** (2021)'nin kullandığı yıldızları temsil etmekte.

uzaklığı  $3.5 < R_m < 13.5$  (kpc) sınırlarında yoğunlaştığından gradyent tayini için seçilen uzaklık bu sınırlar içindedir. APOGEE DR17'den (**Abdurro'uf ve diğ.** 2022) seçilen ince diskteki anakol yıldızlarının ağırlık merkezleri hesaplanmış ve belirlenen bu noktalardan bir eğim geçirilerek metal bolluğu gradyenti  $[Fe/H] = -0.046 R_m + 0.349$  olarak tayin edilmiştir.

## 5 Sonuç

Galaktik popülasyon sınıflamasında kullanılan kinematik (**Bensby, Feltzing, & Lundström 2003**), (**Bensby ve diğ.** 2005) ve kimyasal (**Plevne ve diğ.** 2020) yöntemler sayesinde üç popülasyon sınıfına ayrılmış yıldızların uyumunu incelemek için oluşturulan karmaşıklık matrisi incelendiğinde popülasyon ayrımında ince disk, kalın disk ve halo yıldızlarının, sırasıyla, %85, %62 ve %80 başarı elde edilmiştir. Oluşturulan köşegen diyagramına göre  $m$  için hatanın tahmini değeri  $-0.046^{+0.059}_{-0.049}$ ,  $b$  için  $0.347^{+0.401}_{-0.439}$  olarak hesaplanmıştır. APOGEE DR17 (**Abdurro'uf ve diğ.** 2022) kataloğundan belirlenen ince disk popülasyonuna üye anakol yıldızları kullanılarak yapılan çalışmada radyal metal bolluğu gradyenti araştırılmış ve literatürle karşılaştırması yapılmıştır. Buna göre; **Önal Taş ve diğ.** (2016) tarafından kırmızı yığın yıldızları ve  $R_m$  uzaklığı kullanılarak yapılan çalışmada  $0 < Z_{\max} < 0.5$  (kpc) aralığında gradyent değeri  $d[Fe/H]/dR_m = -0.053 \pm 0.004$  olarak, **Plevne ve diğ.** (2015) tarafından F-G anakol yıldızları kullanılarak yapılan çalışmada  $0 < Z_{\max} < 0.5$  (kpc) aralığında  $d[Fe/H]/dR_m = -0.083 \pm 0.030$  olarak,  $0.5 < Z_{\max} < 0.8$  (kpc) aralığında  $d[Fe/H]/dR_m = -0.048 \pm 0.037$  olarak, **Bilir ve diğ.** (2020) tarafından kırmızı yığın yıldızları ve  $TD/D \leq 0.1$  aralığı kullanılarak gradyent değeri  $d[Fe/H]/dR_m = -0.041 \pm 0.003$  olarak hesaplanmıştır. Çalışmada, Galaktik yörünge parametreleri kullanılarak, ince disk anakol yıldızlarının metal bolluğu gradyenti  $Z_{\max} < 500$  (kpc) aralığında  $[Fe/H] = -0.048 R_m + 0.345$  ve  $0.5 < Z_{\max} < 1$  (kpc) aralığında  $[Fe/H] = -0.046 R_m + 0.347$  olarak tayin edilmiştir. Yapılan çalışmada hesaplanan radyal metal bolluğu gradyentinin literatürle uyumlu olduğu görülmektedir. Samanyolu Galaksisi'nin oluşumu ve evrimi için oluşturulan ikili çökme modeline uygun olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 8. MCMC yöntemiyle analizi yapılan yıldızların köşegen diyagramı.

## Kaynaklar

- Abdurro'uf, Accetta K., Aerts C., Silva Aguirre V., Ahumada R., Ajgaonkar N., Filiz Ak N., et al., 2022, ApJS, 259, 35.  
 Baade W., 1944, ApJ, 100, 137.  
 Beeckmans F., 1980, ESAJ, 4, 15.  
 Bensby T., Feltzing S., Lundström I., 2003, A&A, 410, 527.  
 Bensby T., Feltzing S., Lundström I., Ilyin I., 2005, A&A, 433, 185.  
 Blanton M. R., Bershadsky M. A., Abolfathi B., Albareti F. D., Allende Prieto C., Almeida A., Alonso-García J., et al., 2017, AJ, 154, 28.  
 Bressan A., Marigo P., Girardi L., Salasnich B., Dal Cero C., Rubele S., Nanni A., 2012, MNRAS, 427, 127.  
 Bilir S., Alan N., Güçtekin S. T., Çelebi M., Yontan T., Plevne O., Ak S., et al., 2020, PASA, 37.  
 Chiappini C., Matteucci F., Gratton R., 1997, ApJ, 477, 765.  
 Eggen O. J., Lynden-Bell D., Sandage A. R., 1962, ApJ, 136, 748.  
 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.  
 Gilmore G., Reid N., 1983, MNRAS, 202, 1025.  
 Gilmore G., Wyse R. F. G., 1985, AJ, 90, 2015.  
 Herschel J. F. W., 1847, raom.book.  
 Katz D., Gómez A., Haywood M., Snaith O., Di Matteo P., 2021, A&A, 655, A111.  
 Majewski S. R., 1993, ARA&A, 31, 575.  
 Norris J. E., Ryan S. G., 1989, ApJL, 336, L17.  
 Önal Taş Ö., Bilir S., Seabroke G. M., Karaali S., Ak S., Ak T., Bostancı Z. F., 2016, PASA, 33, e044.  
 Plevne, O., AK, T., Karaali, S., Bilir, S., Ak, S., Bostancı, Z. F. 2015.  
 Plevne O., Önal Taş Ö., Bilir S., Seabroke G. M., 2020, ApJ, 893, 108.  
 Searle L., Zinn R., 1978, ApJ, 225, 357.  
 Shapley H., 1919, ApJ, 49, 311.  
 Trumpler R. J., 1930, PASP, 42, 214.

## Access:

M25-0345: **Turkish J.A&A — Vol.6, Issue 3.**