


GALAH ve Gaia Verileriyle Samanyolu'nda Metal Bolluğu Gradyent Araştırması

Furkan Akbaba,¹★  Tansel Ak,² Olcay Plevne^{1,2}

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

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

Accepted: February 8, 2022. Revised: January 12, 2022. Received: December 22, 2021.

Özet

Bu çalışmada GALAH DR3 ve *Gaia* EDR3 gökyüzü tarama programlarından duyarlılığı yüksek veriler arasından seçilen 66,220 anakol yıldızının metal bollukları, Galaktik yörünge parametreleri ve uzay hızları kullanılarak Samanyolu'nun ince disk popülasyonu için metal bolluğu gradyentleri araştırılmıştır. İnce disk yıldızlarının demir bolluklarına göre R_{GC} , R_{Rehber} , Z_{max} düzlemlerinde hesaplanan metal bolluğu gradyentleri $d[Fe/H]/dR_{GC} = -0.068 \pm 0.014$, $d[Fe/H]/dR_{Rehber} = -0.074 \pm 0.005$ ve $d[Fe/H]/dZ_{max} = -0.160 \pm 0.008$ dex/kpc'dir, alfa element bolluk gradyentleri de $d[\alpha/Fe]/dR_{GC} = +0.001 \pm 0.003$, $d[\alpha/Fe]/dR_{Rehber} = -0.005 \pm 0.001$ dex/kpc ve $d[\alpha/Fe]/dZ_{max} = 0.034 \pm 0.002$ dex/kpc'dir. Bulunan sonuçlar Samanyolu'nun içten dışa çökme senaryoları ile uyum içerisindedir.

Abstract

In this study, metallicity abundance gradients for the thin disk population of the Milky Way were investigated using the metal abundances, Galactic orbital parameters and space velocities of 66,220 main sequence stars selected from the high-sensitivity data from the GALAH DR3 and *Gaia* EDR3 sky survey programs. The metallicity abundance gradients calculated in the R_{GC} , R_{Rehber} , Z_{max} planes according to the iron abundances of thin disk stars are $d[Fe/H]/dR_{GC} = -0.068 \pm 0.014$, $d[Fe/H]/dR_{Rehber} = -0.074 \pm 0.005$ ve $d[Fe/H]/dZ_{max} = -0.160 \pm 0.008$ dex/kpc. Alpha element abundance gradients in the same planes were calculated as $d[\alpha/Fe]/dR_{GC} = +0.001 \pm 0.003$, $d[\alpha/Fe]/dR_{Rehber} = -0.005 \pm 0.001$ dex/kpc ve $d[\alpha/Fe]/dZ_{max} = 0.034 \pm 0.002$ dex/kpc. As a result, the findings obtained in the study support the two-infall model.

Anahtar Kelimeler: Galaxy: abundances – Galaxy: disc – solar neighbourhood

1 Giriş

Samanyolu'nun modern teleskoplarla araştırılmaya başlandığı 20. yüzyılın başlarında [Shapley \(1917\)](#), küresel kümelerin astrometrik parametrelerini hesaplayarak Samanyolu'nun yaklaşık 100 kpc çapında olduğunu ve Güneş'in Galaksi merkezine uzaklığının da 5 kpc olduğunu belirledi. Daha sonraki yıllarda [Trumpler \(1930\)](#), açık kümelerin uzaklıklarını, onların görünen açısız çaplarından hesapladı, sonuçların fotometrik yöntemle hesaplanan uzaklıklardan daha küçük olduğunu tespit etti ve yıldızlardan gelen ışığın soğurucu bir ortamdan geçerek Dünya'ya ulaştığını keşfetti.

Yıldızların yapısal farklılıklarını inceleyen [Baade \(1944\)](#) Güneş civarında bulunan yıldızlar için Pop I, küresel kümelere bulunan yıldızlar için Pop II isimlendirmelerini kullandı. Böylece yıldız popülasyonlarının araştırılmasının önünü açmış oldu.

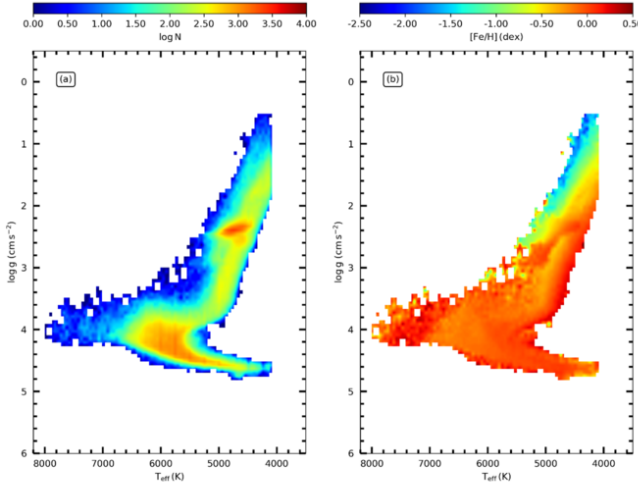
Ardından başka galaksilerin gözlemlerini yapan birçok araştırmacı yıldızların farklı yapılarında olduğunu tespit ederek bu özelliğin sadece Galaksi'mize özgü bir özellik olmadığını keşfetti. Literatüre kazandırılan popülasyon kavramıyla birlikte, Samanyolu'nun yapısı, oluşumu ve evrimine yönelik araştırmaların da başlatılması söz konusu olmuştur. Bu amaçlardan birine yönelik olarak 20. yüzyılın sonlarına doğru Güneş civarındaki yıldızların hassas fotometrik ve astrometrik gözlemlerinin yapılabilmesi için ESA tarafından Hipparcos uydusu tasarlanmıştır ([Beeckmans 1980](#)). Hipparcos uydusu

görev süresi boyunca görünen parlaklığı $V > 8$ kadir olan 120,000 yıldızın fotometrik ve astrometrik verilerinin alınmasını sağlamıştır, bu sayede Güneş civarındaki yıldızların uzaysal sayı yoğunluklarıyla birlikte kinematik özellikleri analiz edilmiştir. Hipparcos uydusundan sağlanan bilgilerin beklenenin üstünde olması ikinci kuşak bir astrometrik uydunun tasarlanmasına yol açmış ve bu yeni uydu *Gaia* ismiyle tanımlanmıştır.

21. yüzyılın başlarında tasarlanmış, farklı dalgaboylarında fotometrik gökyüzü tarama programlarının (WISE, SDSS, CADIS, 2MASS, UKIDSS/VISTA, BATC) kullanılmasıyla birlikte, daha sönük nesnelerin gözlemleri yapılmış ve Samanyolu'nun üç boyutlu haritasının ortaya çıkartılması gündeme alınmıştır. Fotometrik gözlemlerin ardından RAVE, APOGEE, GALAH, LAMOST gibi tayfsal gökyüzü tarama programları oluşturulmuş ve incelenen nesnelerin model atmosfer parametreleri, element bollukları ve radyal hızları tayin edilmiştir. Bu verilerin literatüre kazandırılmasıyla birlikte, yıldızların kinematik ve kimyasal özelliklerinin bir arada analizlerinin yapılabilmesi fırsatı doğmuş, bu sayede Samanyolu'nun oluşumu ve evrimine yönelik daha detaylı çalışmaların sayısı artmıştır.

Çalışmamızda kullanılan GALAH DR3 ([Buder et al. 2021](#)) tayfsal gökyüzü verilerinin *Gaia* uydusunun hassas astrometrik verileriyle birleştirilmesi sonucu elde edilen katalog Galaksi'mizin zamana bağlı kimyasal evrim sürecinin anlaşılmasına katkı verecek bilgileri içermektedir. Bu amaç doğrultusunda çalışmamızda *Gaia* ve GALAH kataloglarından elde edilen verilerden duyarlılığı yüksek olarak seçilen anakol

★ furkan.akbaba@ogr.iu.edu.tr



Şekil 1. GALAH DR3 kataloğundaki 281,143 yıldızın Kiel diyagramları: (a) yıldız sayı yoğunluğuna göre ve (b) demir bolluklarına göre renklendirilmiştir.

yıldızları kullanılarak Galaksi'mizdeki metal bolluğu gradyentleri araştırılmıştır. Galaksi'mizin farklı doğrultuları için metal bolluğu gradyentleri elde edilerek güncel bir kemo-dinamik modele ait sonuçlar çalışmadan elde edilen gözlemsel sonuçlar ile karşılaştırılmış ve Samanyolu'nun evrimine ait ip uçları elde edilmiştir.

2 Veri Seçimi

Bu çalışmada kullanılan GALAH DR3 tayfsal gökyüzü tarama programı kataloğu GALAH konsorsiyumunun Gaia EDR3 verileriyle gözledikleri yıldızların verilerini eşleştirmeleri sonucu tek bir katalogta toplanmıştır. Bu sayede tek bir katalogta yıldızların hem tayfsal hem de astrometrik verileri ve bu verilere ait hatalar kullanıma hazır hale getirilmiştir. Elde edilen verilerin element bollukları, uzay hızları ve Galaktik yörünge parametreleri tayin edilmiştir.

GALAH DR3 tayfsal gözlemleri Kasım 2013 ile Şubat 2019 tarihleri arasında Anglo-Avustralya Teleskobu'na bağlı HERMES tayfçeki gözlenmiş 588,571 yıldıza ait 678,423 tayfsal veriyi kapsamaktadır. HERMES tayfçeki; dört farklı optik dalgaboylarında (mavi: 4715–4900 Å, yeşil: 5649–5873 Å, kırmızı: 6478–6737 Å ve kızılötesi 7585–7887 Å) eş zamanlı, yüksek çözünürlüklü ($R = 28,000$) tayflar elde etmiştir ayrıca yaklaşık 30 farklı elementin (Li, C, O, Na, Al, K, Mg, Si, Ca, Ti, TiII, Sc, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Y, Ba, La, Rb, Mo, Ru, Nd, Sm, Eu) bolluk değerlerini ölçmüştür. Alınan tayflardan yıldızların radyal hızları da tayin edilmiştir. Bununla birlikte GALAH DR3 veri sürümünde element bolluklarına, radyal hız verilerine ait hatalar da bulunmaktadır (Buder et al. 2021). Yıldızların yaş hesapları ise Sharma et al. (2017) tarafından BSTEP adı verilen bir kod yardımıyla yapılmıştır.

GALAH DR3 kataloğunun içinde bulunan Gaia EDR3 (Gaia Collaboration 2020) verileri de yıldızların trigonometrik paralaksları, koordinatları, öz hareket bileşenleri ve bunlara ait hataları içermektedir.

2.1 Kalite Sınırlamaları

GALAH konsorsiyumu ölçüm yapmadığı parametrelere e20 değerlerini atanmıştır, Gaia EDR3 verileri de paralaks değeri negatif atanmış veriler bulunmaktadır bu yüzden toplam veriye i) Model atmosfer parametreleri (T_{eff} , $\log g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$, v_{mic}) ve yaşları bilinen, ii) Trigonometrik paralaksı $\sigma_{\pi} > 0$ olan, iii) GALAH konsorsiyumu tarafından en kaliteli tayf verilerini elde etmek için önerilen bazı flag değerleri; $\text{flag_sp} = 0$, $\text{flag_alpha_fe} = 0$, $\text{flag_fe_h} = 0$ iv) Demir bolluğundaki hata oranı $\sigma[\text{Fe}/\text{H}] < 0.10$ kalite sınırlamaları getirilmiştir. Bununla birlikte HERMES tayfçekerinin dört optik dalgaboyunda aldığı gözlemlerden elde edilen S/N oranlarının aritmetik ortalaması alınarak, her bir gözlem için ortalama S/N oranı belirlenmiş ve bu ortalama S/N değerinde medyan değeri olan 35 değerinden büyük seçilerek veri seçim tamamlanmıştır. Bu kalite kriterleri veriye uygulandıktan sonra yıldız sayısı 281,143 olmuştur. Bu veriye ait Kiel diyagramları Şekil 1'de gösterilmiştir.

2.2 Anakol Yıldızlarının Seçimi

Çalışmada anakol yıldızlarının seçimi için Bilir et al. (2020) tarafından önerilen yöntem tercih edilmiştir. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada farklı ışınma gücüne sahip yıldızları kategorize edebilmek için PARSEC (Padova TRIeste Stellar Evolution Code) yıldız evrim yollarını (Bressan et al. 2012) kullanmıştır. 10 farklı metal bolluğu gruplarına ayırdıkları farklı kütlelerdeki yıldızları $\log g \times T_{\text{eff}}$ diyagramları üzerinde göstermişlerdir.

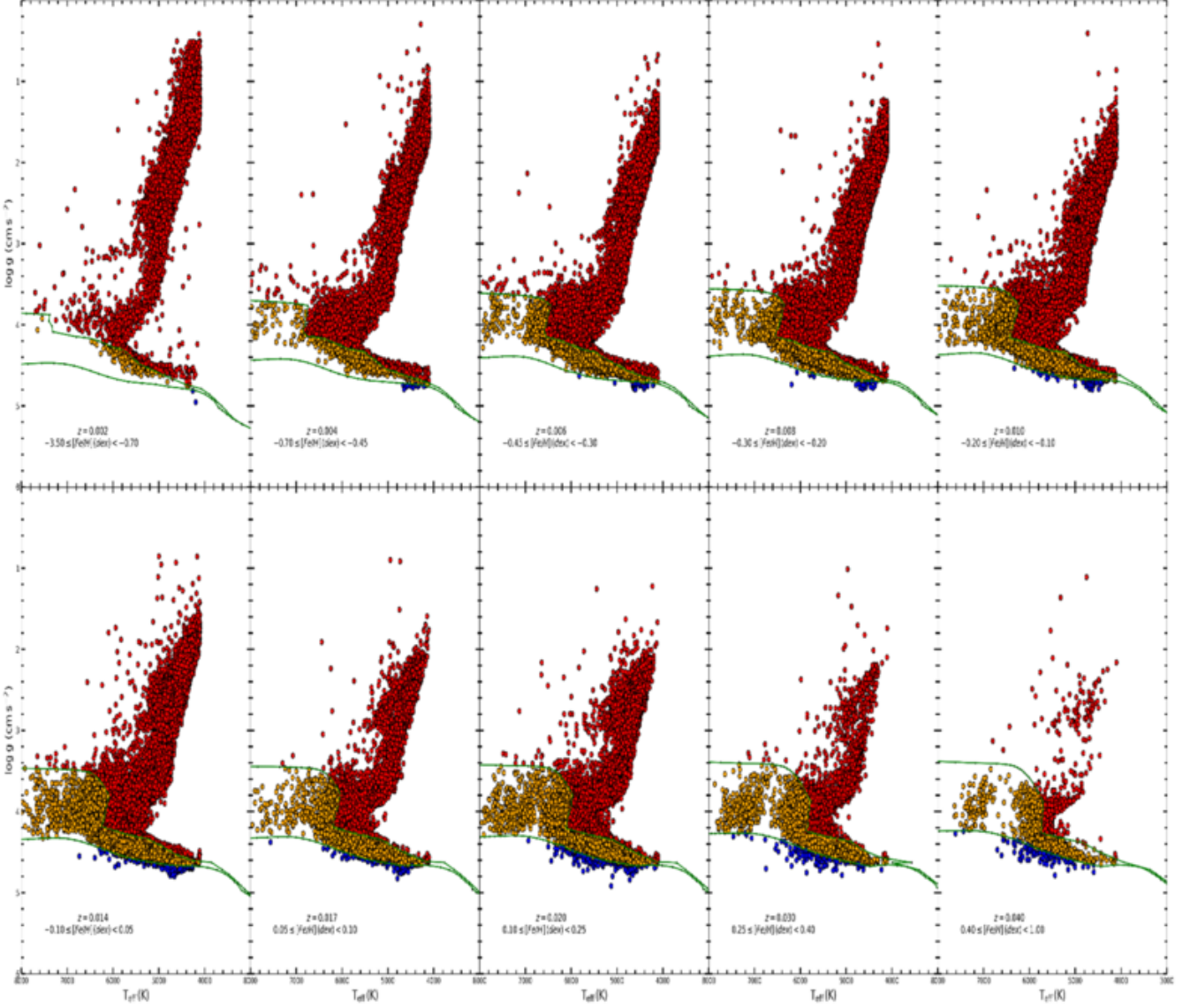
Farklı ışınma güçlerindeki 235,202 yıldız için PARSEC yıldız evrim yollarından hesaplanan ZAMS ve TAMS eğrileri $\log g \times T_{\text{eff}}$ diyagramında gösterilmiştir (Şekil 2). ZAMS ve TAMS eğrileri arasında kalan turuncu renkteki veriler anakol yıldızlarını, kırmızı renkteki veriler evrimleşmiş yıldızları ve mavi renkteki veriler istatistik dışı kalan yıldızları göstermektedir. Sonuç olarak 235,202 yıldızın 68,651'i anakol yıldızı, 165,817'si evrimleşmiş yıldız ve 734'ü ışınma gücü sınıfı belirlenememiş yıldız olarak gruplandırılmıştır. Bu işlem sonucunda çalışmada kullanılacak anakol yıldızları belirlenmiş olup, anakol örneğinde ki yıldızların sayısı 68,651'dir.

2.3 Yıldızların Uzaklıkları ve Düzlemsel Dağılımları

Örnekteki yıldızların uzaklık ölçüm hatalarını incelemek ve bu hatalardan arındırmak için trigonometrik paralaks değerleri ve bunlara ait hata değerleri Gaia EDR3 (Gaia Collaboration 2020) veri sürümünden alınmıştır. Yıldızların uzaklıklarına ait hata değerleri histogramı Şekil 3'te verilmiştir. Rölatif paralaks hatalarının sınırlandırılması yıldızların kinematik parametrelerinin doğru elde edilmesi dolayısıyla metal bolluğu gradyent hesaplarının doğru yapılabilmesi adına önemlidir. Bu sayede incelenen rölatif paralaks histogramından sonuçla rölatif paralaks hata sınırı $\sigma_{\pi}/\pi \leq 0.2$ alınmıştır. Böylece anakol yıldızlarının %96.5'i seçilerek uzaklıkları ve kinematik özellikleri daha hassas olan yıldız sayısı 66,220 olmuştur.

Anakol yıldızlarının Güneş civarındaki ve Galaksi çeyreklerindeki sayı yoğunluklarını inceleyebilmek için uzaklık hesapları yapılmış ve Güneş merkezli $X \times Y$, $X \times Z$ (Şekil 4) düzlemlerindeki dağılımları incelenmiştir. Çalışmada Güneş'in Galaksi merkezine uzaklığı $R_{\odot} = 8$ kpc olarak alınmıştır (Majewski 1993).

Yıldızların $X \times Y$ düzlemindeki dağılımları incelendiğinde daha çok Galaksi'nin üçüncü ve dördüncü çeyreklerinde sayıca yoğun oldukları, Güneş'e olan uzaklıklarının 1 kpc'e ulaşabildiği,

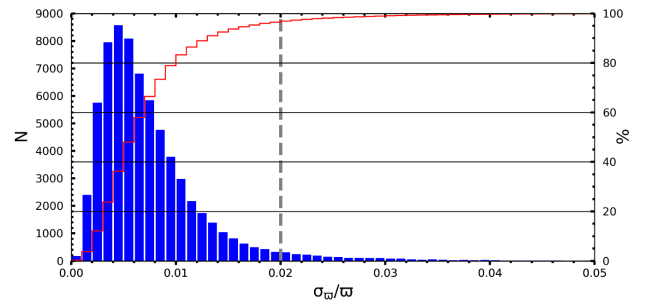


Şekil 2. PARSEC evrim yolları kullanılarak sınıflandırılan yıldızların Kiel diyagramları. Kırmızı noktalar evrimleşmiş yıldızları, turuncu noktalar anakol yıldızlarını ve mavi noktalar ışınma gücü belirlenemeyen yıldızları temsil etmektedir. Şekildeki eğriler ZAMS ve TAMS sınırlarını göstermektedir.

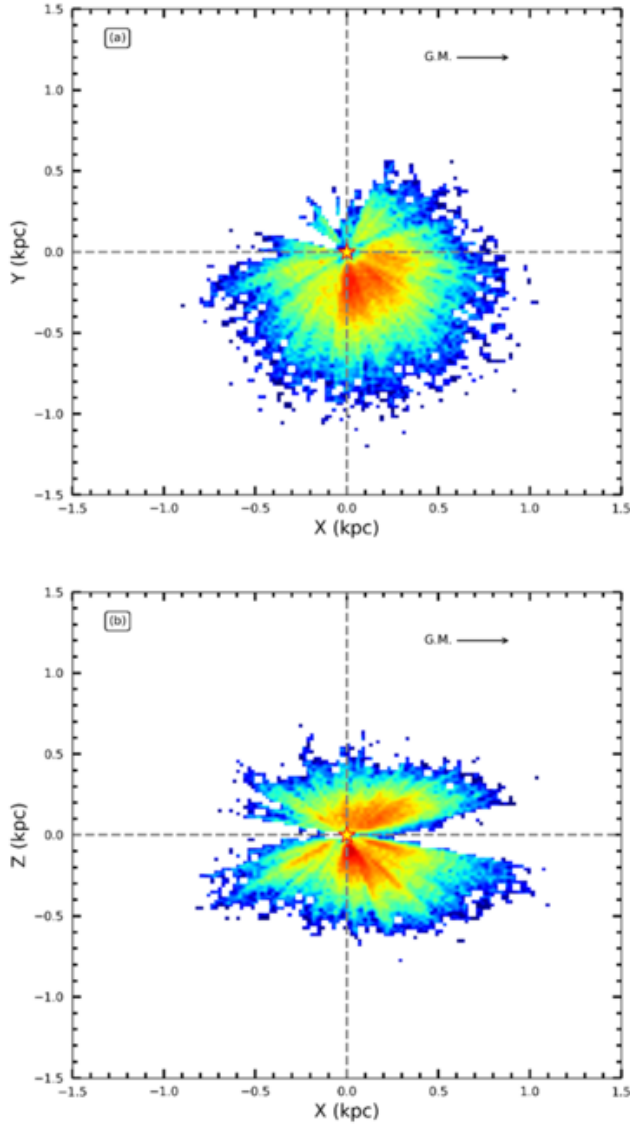
Galaktik düzlemde dik doğrultudaki uzaklıklarının ise 0.5 kpc'e ulaşabildiği anlaşılmıştır. GALAH gökyüzü tarama programı Güney yarıküreden yapılan gözlemleri içerdiği için yıldızların düzlemler üzerindeki dağılımlarının asimetrik olması beklenen bir sonuçtur.

2.4 Yörünge Parametrelerinin Hesaplanması

Ş2.3'de belirtildiği üzere örneğimizdeki yıldızların radyal doğrultuda ve Galaktik düzlemde dik doğrultuda uzaklıkları sınırlıdır. Çalışmamızdaki temel amaç radyal ve dik doğrultularda metal bolluğu gradyent araştırması yapmak olduğu için yörünge parametrelerinin belirlenmesi önemlidir. Yıldızların Galaktik düzlemde maksimum uzaklıklarının, doğum yarıçaplarının, yörünge basınlıklarının bilinmesi ve bu bilgiler dahilinde gradyent değerleri araştırılması Galaksi'nin oluşumu, evrimi konularında ip uçlarının bulunmasını sağlar.



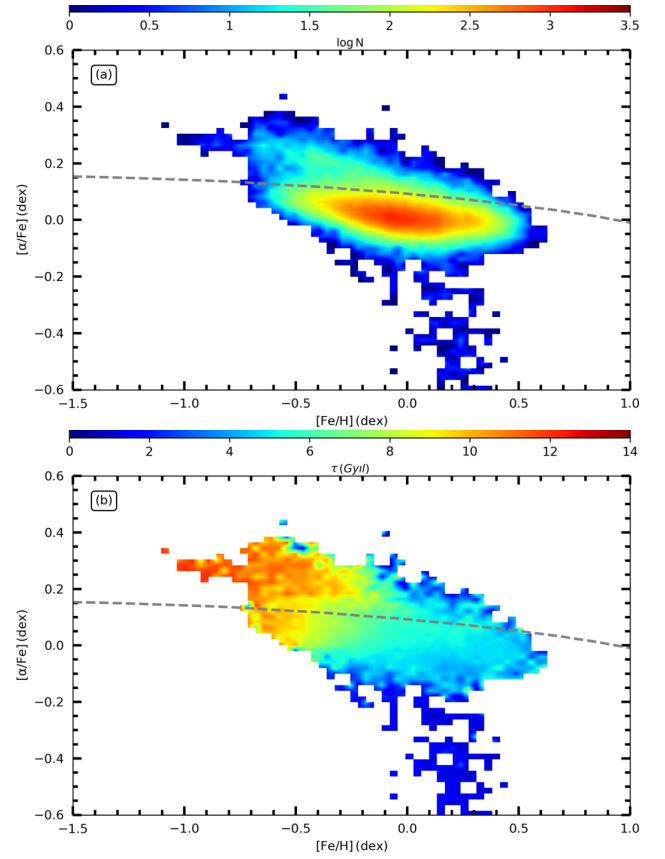
Şekil 3. Anakol yıldızlarının rölative parallax hataları histogramı. Kırmızı çizgi yıldızların birikimli toplamını, gri kesikli çizgi rölative parallax hatalarına getirilen sınır değerini göstermektedir.



Şekil 4. Anadol yıldızlarının (a) X-Y ve (b) X-Z düzlemlerindeki dağılımları. Merkezdeki yıldız simgesi Güneş'i temsil etmektedir. G.M. Galaksi merkezinin yönünü belirtmektedir. Renklendirme sayı yoğunluğuna göre yapılmıştır

Bununla beraber Samanyolu'nun oluşumu ve evrimi konusunda önerilmiş modellerin de gözlemsel verilerle sınanmasına öncülük eder.

Çalışmada Galaktik yörünge parametreleri hesaplanırken galpy (Bovy 2015) kütüphanesi kullanılmıştır. Bu kütüphanede bulunan MWPotential2014 kodu kullanılarak yıldızların Galaksi merkezi etrafındaki yörüngelerinin kapalı bir yörüngeye ulaşması sağlanmıştır, bunun için yıldızlar 5 Gyl'lık bir sürede 0.5 Myıl'lık adımlar kullanılarak yörüngeleri boyunca hareket ettirilmiştir. MWPotential koduna girdi parametreleri olarak anakol yıldızlarının ekvatorial koordinatları, radyal hızları, uzaklıkları ve öz hareket bileşenleri değerleri verilmiştir. Çıktı parametreleri de yıldızların rehber yarıçapı, Galaktik düzlemden ayrılabilirlikleri en büyük dik uzaklıkları, Galaksi merkezine en uzak ve en yakın mesafeleridir. Yıldızların Galaktik yörünge basıklıklarının hesaplanması için $e_p = R_a - R_p / R_a + R_p$



Şekil 5. Anadol yıldızlarının $[\alpha/Fe] \times [Fe/H]$ düzleminde sayı yoğunluklarına göre renklendirilmiş (a), yaşa göre renklendirilmiş (b) popülasyon ayrımı çizgisine göre (kesikli çizgi) ayrımı.

bağıntısı kullanılmıştır. Yıldızların Galaksi merkezine ortalama uzaklıklarının hesaplanması için $R_M = R_a + R_p / 2$ bağıntısı kullanılmıştır. R_p , R_a , R_M , R_{Rehber} , Z_{max} ve e_p yörünge parametrelerinin medyan değerleri, sırasıyla, 7.05 kpc, 8.69 kpc, 7.88 kpc, 7.76 kpc, 0.29 kpc ve 0.13'tür.

3 Yıldızların Galaktik Popülasyonları

Anadol yıldızlarının Galaktik popülasyon sınıfları belirlenirken Plevne et al. (2020) yapmış oldukları çalışmada önerilen Gauss Karışım Modeli kullanılmıştır. Araştırmacılar farklı gökyüzü tarama programlarından elde ettikleri verileri Gauss Karışım Modelini kullanarak makine öğrenmesi yardımıyla $[\alpha/Fe] \times [Fe/H]$ düzleminde Galaktik popülasyon ayırma çizgisi tayin etmişlerdir. Bu çalışmada anakol yıldızlarının popülasyon ayırımı yapmak için Plevne et al. (2020) tarafından önerilen ayırma çizgisi kullanılmıştır.

GALAH DR3'ten elde edilen anakol yıldızları $[\alpha/Fe] \times [Fe/H]$ düzleminde sayı yoğunluklarına (Şekil 5a) ve yaşlarına göre (Şekil 5b) renklendirilerek incelenmiştir. 66,220 anakol yıldızının sayı yoğunluğuna göre oluşturulan diyagramında yıldızların büyük bir kısmının alfa-elementleri bolluğu açısından fakir, demir bolluğu açısından zengin yıldızlardan oluştuğu anlaşılmıştır. Popülasyon ayırma çizgisi (gri kesikli çizgi) dikkate alındığında, çizginin altında kalan yıldızlar ince disk ve çizginin üstünde kalan yıldızlar kalın disk popülasyonu olarak tanımlanmış olup bu popülasyonlara ait yıldız sayısı sırasıyla,

60,461 ve 5,759'dur. Bu bulgu GALAH DR3 veri sürümünden seçilen anakol yıldızların %91.3'in ince disk, %8.7'in de kalın disk/halo popülasyonuna üye olduğunu göstermektedir. İnce disk yıldızlarının kalın disk/halo yıldızlarına göre sayıca daha yoğun bulunmalarının sebebi §2.3'te gösterildiği gibi gözlenen yıldızlarının büyük bir bölümünün Güneş civarı yıldızlar olmasından kaynaklanmaktadır ve bu beklenen bir durumdur. $[\alpha/Fe] \times [Fe/H]$ düzlemindeki ince disk yıldızlarının yaşları incelendiğinde (Şekil 5b) $2 < \tau < 10$ Gyl aralığında yaşlara sahip oldukları görülmektedir. Yaşları $2 < \tau < 6$ değer aralığında bulunan ince disk anakol yıldızlarının demir bolluğu açısından zengin, alfa bolluğu açısından fakir, $\tau > 6$ Gyl olan ince disk anakol yıldızlarının ise demir bolluğu açısından fakir, alfa element bollukları açısından zengin olduğu görülmektedir. Bu bulgu, ince disk popülasyonunu tanımlayan yaş değerleriyle uyumludur (Cox 2000). Galaktik popülasyon ayırımı sınırı civarında bulunan metalce zengin olan 1,231 kalın disk/halo yıldızı tespit edilmiştir. Bu yıldızların geçiş yıldızları oldukları düşünülmektedir. Bensby & Feltzing (2010) ve Nissen (2004) yapmış oldukları çalışmalarda ince disk ile kalın disk popülasyonları arasındaki geçiş yapan yıldızların toplam uzay hızlarını $50 < S_{LSR} < 70$ km/sn aralığında vermektedir. 1,231 yıldızın toplam uzay hız değerleri incelendiğinde %33'ünün bu değer aralığında kaldığı tespit edilmiştir. Geriye kalan %63'lük yıldız grubunun yaşlı ince disk yıldızları oldukları düşünülmektedir. Kalın disk/halo yıldızlarının metalce fakir olanları, alfa element bolluğu açısından zengin olmakla beraber $9 < \tau < 12$ Gyl aralığında yaşlara sahip oldukları tespit edilmiştir.

4 Bolluk Gradyentleri

Anakol yıldızlarının Galaktik düzlemden itibaren radyal ve Galaktik düzlemden dik metal bolluğu gradyentleri hesaplanmıştır. Metal bolluğu gradyent değerleri §2.4'te bahsedilen Galaktik yörünge parametrelerinden yıldızların doğum yarıçaplarına en yakın yarıçap olan rehber yarıçapları (R_{Rehber}) ve Galaktik düzlemden ulaşabilecekleri maksimum yükseklik olan (Z_{max}) kullanılarak tayin edilmiştir.

4.1 Demir Bolluğu Gradyentleri

60,461 ince disk anakol yıldızının $[Fe/H] \times R_{Rehber}$ düzleminde metal bolluğu değişimleri sayı yoğunluklarına ve yaşlarına bağlı olarak sırasıyla Şekil 6a,b'de gösterilmiştir. 60,461 ince disk anakol yıldızının Galaksi merkezine göre uzaklıkları $4.4 < R_{Rehber} < 10.6$ kpc ve demir bollukları $-0.75 < [Fe/H] < 0.60$ dex aralığındadır. $[Fe/H] \times R_{Rehber}$ düzlemi üzerindeki yıldızların duyarlı radyal metal bolluğu gradyent değerini elde edebilmek için yıldızlar 23 uzaklık adımına ayrılmış, yıldızların medyan uzaklık (R_{Rehber}) değerleri ve medyan demir bollukları $[Fe/H]$ hesaplanmış, son olarak hesaplanan değerler Şekil 6'da beyaz daire sembollerine gösterilmiştir. Ağırlıklandırılmış bu 23 noktadan doğrusal bir fit geçirilerek ince disk yıldızları için $d[Fe/H]/dR_{Rehber} = -0.074 \pm 0.005$ dex/kpc'lik bir radyal metal bolluğu gradyenti hesaplanmıştır. Bu yıldızların $[Fe/H] \times R_{Rehber}$ düzlemi üzerinde yaşa bağlı değişimleri de Şekil 6 (b)'de gösterilmiştir. $[Fe/H] \times R_{Rehber}$ düzlemi üzerinde ince disk yıldızlarından metalce zengin olanların yaş aralığı $2 < \tau < 6$ Gyl aralığında değişirken, metalce fakir yıldızların ise yaş değerlerinin $\tau > 6$ Gyl olduğu görülmüştür. Yaş değerlerindeki gözlenen değişim aralıkları literatürde ince disk popülasyonu ifade eden değerler ile oldukça uyumludur (Marsakov et al.

2011). Elde edilmiş bu sonuçlar Galaksi diskinde güçlü bir radyal metal bolluğu gradyentinin bulunduğunu göstermiştir.

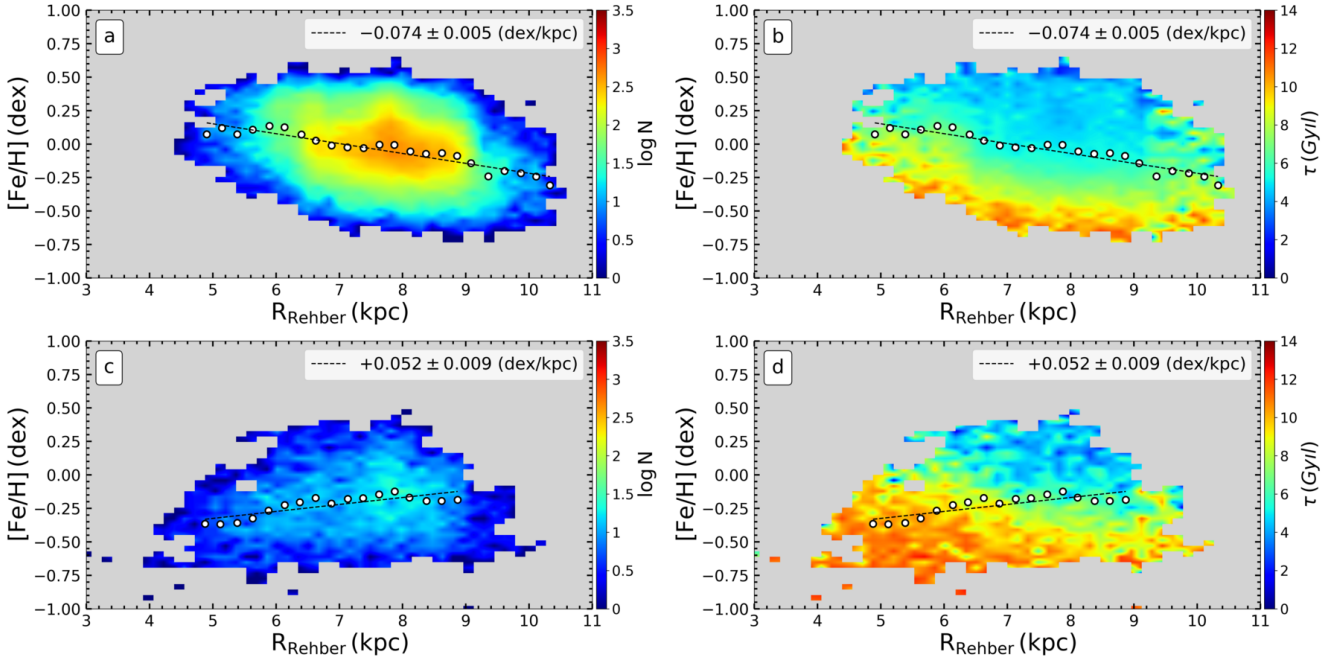
Kalın disk/halo anakol yıldızlarının Rehber yarıçap (R_{Rehber}) uzaklıkları $3 < R_{Rehber} < 10.3$ kpc aralığında değişirken, demir bollukları $-1 < [Fe/H] < 0.5$ dex aralığında değişmektedir (Şekil 6c). Bu yıldızların yaş değerleri de $4 < \tau < 12$ Gyl (Şekil 6d) aralığında değişmektedir. Kalın disk/halo yıldızlarının $[Fe/H] \times R_{Rehber}$ düzleminde 250 pc'lik uzaklık adımları dikkate alınarak medyan uzaklıkları ve demir bollukları hesaplanmıştır. Ağırlıklandırılmış 17 noktadan doğrusal bir fit geçirilerek $d[Fe/H]/dR_{Rehber} = +0.052 \pm 0.009$ dex/kpc'lik bir radyal metal bolluğu gradyent değeri hesaplanmıştır. Aynı düzlemde kalın disk/halo yıldızlarının yaşlarına bağlı değişimleri incelendiğinde (Şekil 6d), demirce zengin yıldızların göreceli olarak genç yaşlarda oldukları ($\tau < 6$ Gyl), demirce fakir yıldızların ise göreceli olarak yaşlı ($\tau > 6$ Gyl) oldukları görülmektedir. Ayrıca metalce fakir kalın disk yıldızların Galaksi merkezine yakın ($R_{Rehber} < 7$ kpc), metalce zengin olanlarının ise Güneş civarında ve Güneş çemberinin dışında yer aldıkları tespit edilmiştir.

İnce disk anakol yıldızlarının Galaktik düzlemden dik doğrultudaki maksimum uzaklıklarıyla (Z_{max}) demir bollukları $[Fe/H]$ arasındaki değişim yıldız sayı yoğunluğuna ve yıldız yaşına bağlı olarak Şekil 7a,b'de gösterilmiştir. İnce disk yıldızlarının Galaktik düzlemden maksimum dik uzaklıkları $0 < (Z_{max}) < 1.75$ kpc ve demir bollukları $-0.75 < [Fe/H] < 0.60$ dex aralığında bulunmaktadır. $[Fe/H] \times Z_{max}$ düzlemindeki ince disk yıldızlarından Galaktik düzleme dik doğrultuda bir metal bolluğu gradyenti elde edebilmek için örnekteki yıldızlar yedi uzaklık aralığına ayrılarak her bir aralıkta yıldızlarının medyan Z_{max} ve medyan $[Fe/H]$ 'leri hesaplanmış ve bu veriler Şekil 7a,b'de beyaz daire sembolüyle gösterilmiştir. Ağırlıklandırılmış bu noktalardan doğrusal bir fit geçirilerek hesaplanan demir bolluğu gradyenti $d[Fe/H]/dZ_{max} = -0.160 \pm 0.008$ dex/kpc'dir. Diyagramda demirce zengin yıldızların $2 < \tau < 6$ Gyl yaş aralığında olduğu, metalce fakir yıldızların ise 6 Gyl'dan daha yaşlı olduğu görülmüştür.

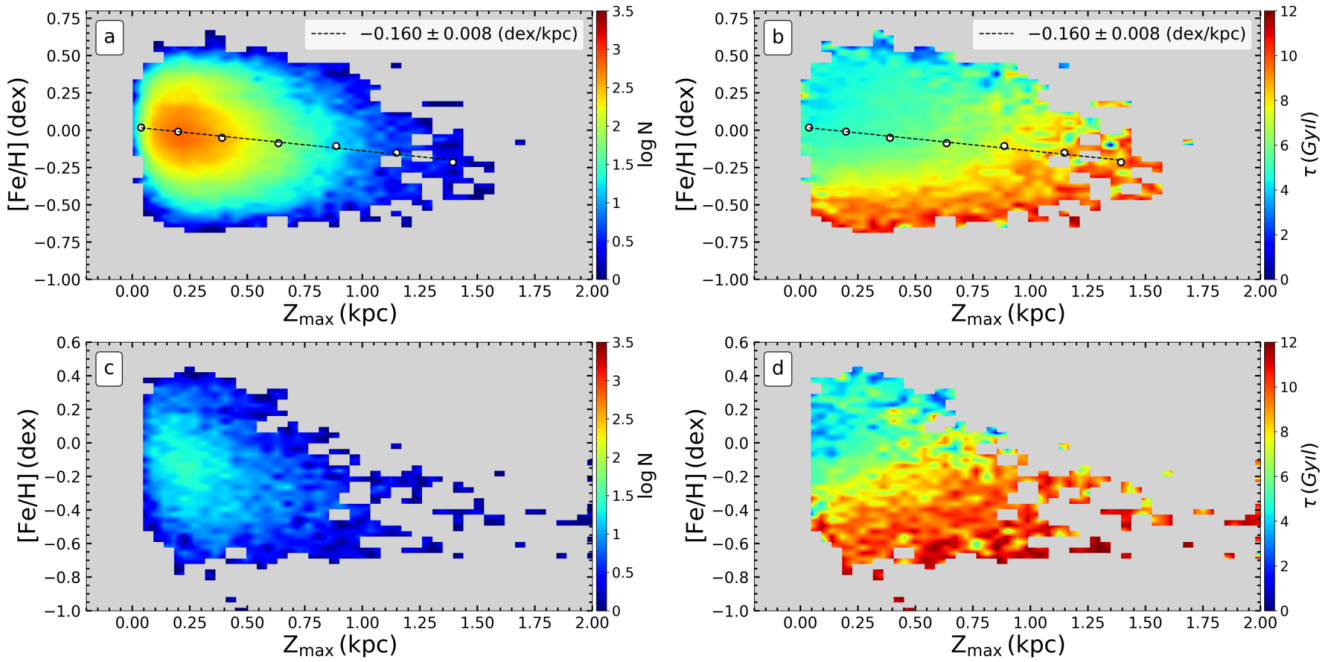
Kalın disk/halo yıldızlarının Galaktik düzlemden dik doğrultudaki maksimum uzaklıkları $0 < Z_{max} < 2$ kpc aralığında değişirken, demir bollukları $-1 < [Fe/H] < 0.5$ dex (Şekil 7a) aralığında ve yaşları da $5 < \tau < 12$ Gyl aralığında (Şekil 7b) bulunduğu tespit edilmiştir. Kalın disk/halo yıldızlarının $[Fe/H] \times Z_{max}$ düzlemindeki yıldız sayı yoğunlukları incelendiğinde, yıldız sayılarının Galaktik düzlemden dik doğrultuda bir demir bolluğu gradyentini hesaplanmasına yetecek miktarda yıldız barındırmadığı görülmüştür.

4.2 α -element Bolluğu Gradyentleri

60,461 ince disk anakol yıldızının Rehber yarıçap (R_{Rehber}) uzaklıklarıyla alfa element bollukları ($[\alpha/Fe]$) arasındaki değişim yıldız sayı yoğunluklarına ve yaşlarına bağlı olarak Şekil 8a,b'de gösterilmiştir. İnce disk anakol yıldızlarının Galaksi merkezine göre uzaklıkları $4.4 < R_{Rehber} < 10.6$ kpc, alfa element bollukları $-0.65 < [\alpha/Fe] < 0.15$ dex aralığında bulunmaktadır. $[\alpha/Fe] \times R_{Rehber}$ düzlemi üzerindeki yıldızlardan hassas radyal metal bolluğu gradyentini elde edebilmek için yıldızlar 23 uzaklık aralığına ayrılarak yıldızların medyan R_{Rehber} ve medyan $[\alpha/Fe]$ değerleri hesaplanmış ve bu veriler Şekil 8a,b'de beyaz daire sembolüyle gösterilmiştir. Ağırlıklandırılmış bu noktalardan doğrusal bir fit geçirilerek $d[\alpha/Fe]/dR_{Rehber} = -0.005 \pm 0.001$ dex/kpc'lik yazıf bir radyal alfa element bolluğu gradyenti hesaplanmıştır. İnce disk



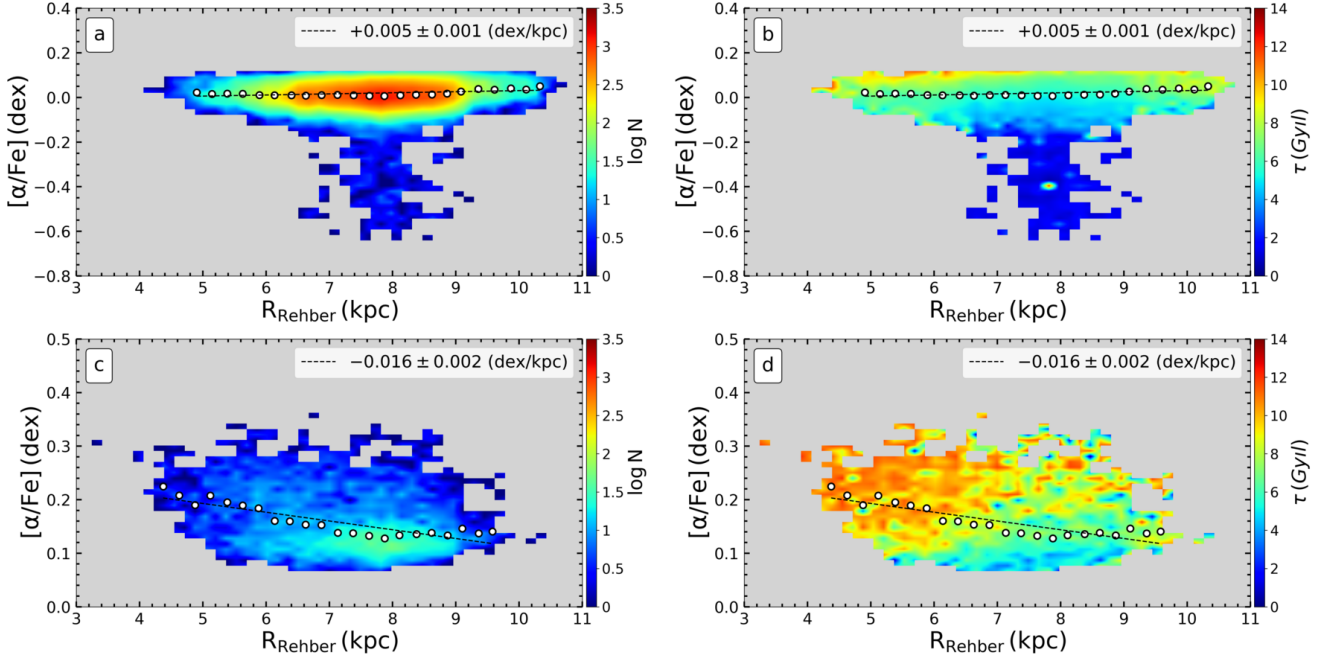
Şekil 6. İnce disk anakol yıldızlarının $[Fe/H] \times R_{\text{Rehber}}$ düzleminde sayı yoğunluklarına ve yaşlarına göre demir bolluğu gradyentleri. Panel a-b: ince disk, Panel c-d: kalın disk/halo yıldızlarını temsil etmektedir.



Şekil 7. Anakol yıldızlarının $[Fe/H] \times Z_{\text{max}}$ düzleminde sayı yoğunluklarına ve yaşlarına göre demir bolluğu gradyentleri. Panel a-b: ince disk, Panel c-d: kalın disk/halo yıldızlarını temsil etmektedir.

anakol yıldızlarının $[\alpha/Fe] \times R_{\text{Rehber}}$ düzlemi üzerinde yaşa bağlı değişimi de Şekil 8b'de gösterilmiştir. Diyagramda alfa elementleri bakımından zengin yıldızların $6 < \tau < 10$ Gyl yaş aralığında olduğu, alfa elementleri bakımından fakir yıldızların ise 6 Gyl'dan daha genç olduğu görülmüştür.

Kalın disk/halo anakol yıldızlarının Rehber yarıçap uzaklıkları $3 < R_{\text{Rehber}} < 10.6$ kpc aralığında, alfa element bollukları $0.08 < [\alpha/Fe] < 0.35$ dex (Şekil 8c) aralığında ve yaşları da $5 < \tau < 12$ Gyl (Şekil 8d) aralığında bulunduğu tespit edilmiştir. Alfa elementleri bakımından zengin yıldızların



Şekil 8. Anakol yıldızlarının $[\alpha/Fe] \times R_{\text{Rehber}}$ düzleminde sayı yoğunluklarına ve yaşlarına göre demir bolluğu gradyentleri. Panel a-b: ince disk, Panel c-d: kalın disk/halo yıldızlarını temsil etmektedir.

$[\alpha/Fe] \times R_{\text{Rehber}}$ düzlemi üzerindeki sayı yoğunlukları incelendiğinde alfa bolluğu gradyent hesaplaması yapılabilecek sayıda oldukları belirlenmiş ve yıldızlar bu düzlem üzerinde 250 pc'lik uzaklık adımları içinde medyan uzaklık ve alfa element bollukları hesaplanmıştır. Ağırlıklandırılmış noktalar üzerinden doğrusal fit geçirilerek $d[\alpha/Fe]/dR_{\text{Rehber}} = -0.016 \pm 0.002$ dex/kpc'lik bir radyal metal bolluğu gradyenti hesaplanmıştır (Şekil 8c,d). $[\alpha/Fe] \times R_{\text{Rehber}}$ düzlemi üzerinde kalın disk/halo yıldızlarının yaşa bağlı değişimleri incelendiğinde (Şekil 8d), zengin alfa element bolluklarında bulunan anakol yıldızlarının göreceli olarak yaşlı ($\tau > 6$ Gyl), alfa elementleri bakımından fakir olanların ise göreceli olarak genç ($\tau < 6$ Gyl) oldukları görülmektedir.

60,461 ince disk anakol yıldızlarının Galaktik düzlemden dik doğrultudaki maksimum uzaklıklarıyla (Z_{max}) alfa element bollukları ($[\alpha/Fe]$) arasındaki değişim yıldız sayı yoğunluklarına ve yaşlarına bağlı olarak Şekil 9a,b'de gösterilmiştir. İnce disk yıldızlarının Galaktik düzlemden dik uzaklıkları $0 < Z_{\text{max}} < 1.75$ kpc, alfa element bollukları $-0.65 < [\alpha/Fe] < 0.15$ dex aralığında bulunmaktadır. $[\alpha/Fe] \times Z_{\text{max}}$ düzlemi üzerindeki ince disk yıldızlarından Galaktik düzleme dik doğrultuda bir metal bolluğu gradyenti elde edebilmek için yıldızlar sekiz uzaklık aralığına ayrılarak her bir aralıkta yıldızlarının medyan Z_{max} ve medyan $[\alpha/Fe]$ 'leri hesaplanmış ve bu veriler Şekil 9a,b'de beyaz daire sembolüyle gösterilmiştir. Ağırlıklandırılmış bu noktalardan doğrusal bir fit geçirilerek $d[\alpha/Fe]/dZ_{\text{max}} = 0.034 \pm 0.002$ dex/kpc'lik bir metal bolluğu gradyenti hesaplanmıştır. Diyagramda alfa elementleri bakımından zengin yıldızların $5 < \tau < 12$ Gyl yaş aralığında olduğu, alfa elementleri bakımından fakir yıldızların ise 5 Gyl'dan daha yaşlı olduğu görülmüştür.

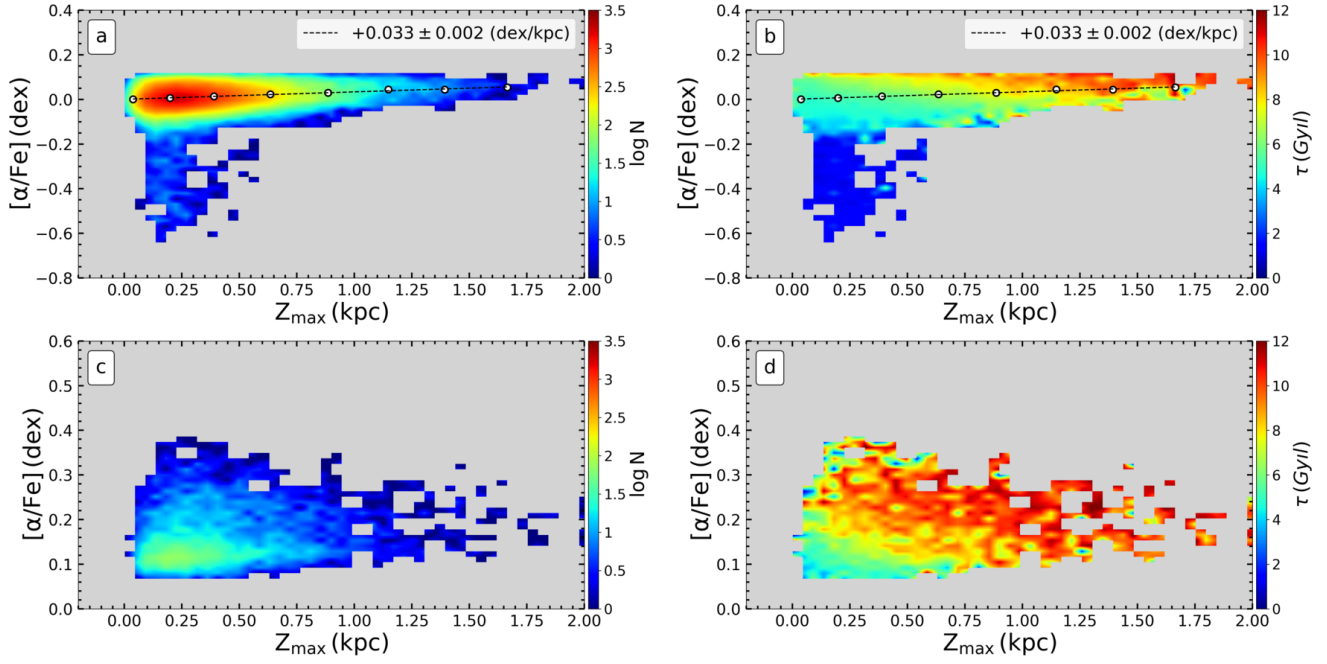
Kalın disk/halo yıldızlarının Galaktik düzlemden dik doğrultudaki uzaklıkları $0 < Z_{\text{max}} < 2$ kpc aralığında değişirken,

alfa element bollukları $0.08 < [\alpha/Fe] < 0.38$ dex (Şekil 9c) aralığında ve yaşları da $5 < \tau < 12$ Gyl (Şekil 9d) aralığında bulunduğu tespit edilmiştir. Kalın disk/halo yıldızlarının $[\alpha/Fe] \times Z_{\text{max}}$ düzlemindeki yıldız sayı yoğunlukları incelendiğinde, yıldız sayılarının Galaktik düzlemden dik doğrultuda bir metal bolluğu gradyentinin hesaplanmasına yetecek miktarda yıldız barındırmadığı görülmüştür. Bu nedenle Galaktik düzleme dik doğrultuda kalın disk/halo yıldızları için bir metal bolluğu gradyent hesaplaması yapılmamıştır.

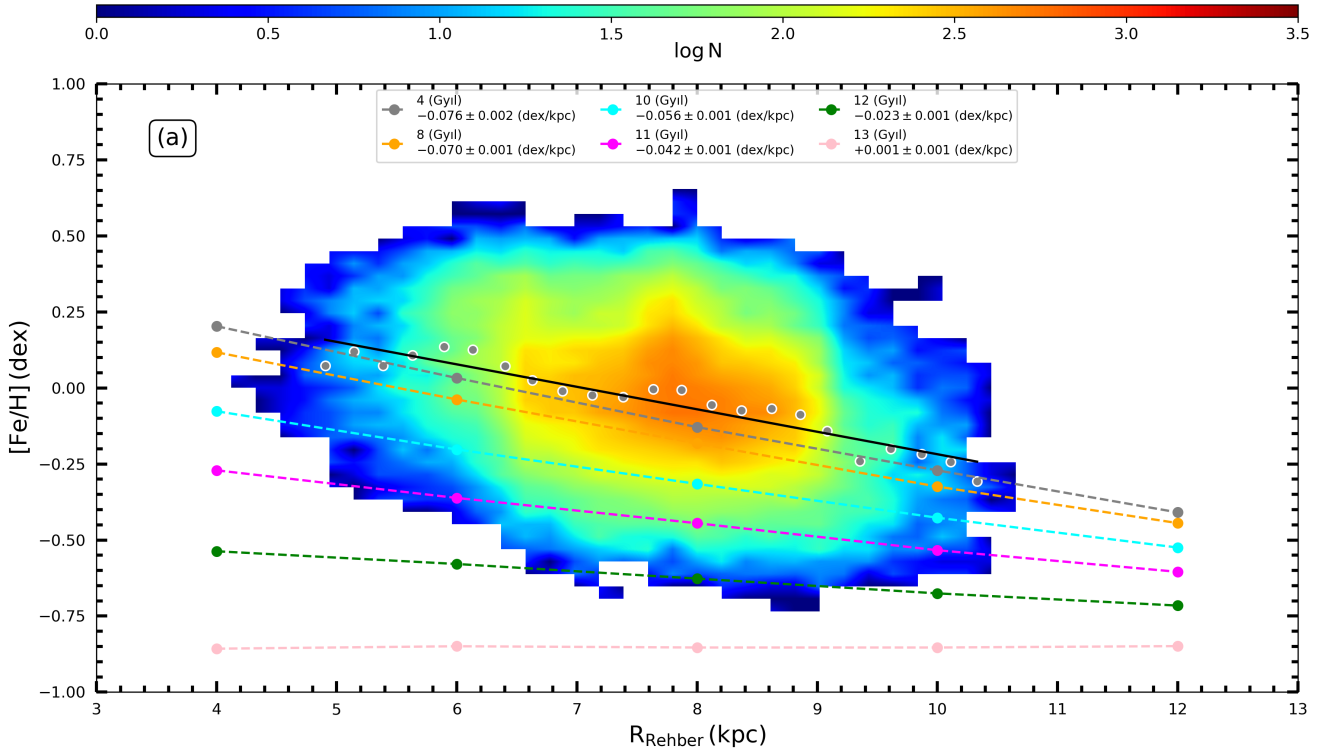
5 Tartışma ve Sonuç

Çalışmada elde edilen radyal metal bolluğu gradyentleri, Sharma et al. (2021)'nin Samanyolu Galaksi'si için üretmiş oldukları kemo-dinamik modellerden ulaşılan metal bolluğu gradyentleriyle karşılaştırılmıştır. Sharma et al. (2021) oluşturdukları kemo-dinamik modele Galaksi merkezinden ve Galaktik düzlemden farklı uzaklıklar için $[\alpha/Fe] \times [Fe/H]$ düzleminde yıldız yaşlarıyla metal bolluğu gradyentlerinin değişimlerini incelemiştir.

Çalışmada Sharma et al. (2021) kemo-dinamik modelinden Güneş çemberini kapsayan ($7 < R < 9$ kpc ve $0 < |Z| < 0.50$ kpc) uzaklık aralığında 4, 8, 10, 11, 12 ve 13 Gyl'a karşılık gelen demir bollukları ve Galaksi merkezine uzaklıklar derlenmiş ve bu veriler $[\alpha/Fe] \times [Fe/H]$ düzlemine yıldız yaşlarının bir fonksiyonu olarak çizilmiştir (Şekil 10). Ayrıca $[Fe/H] \times R_{\text{Rehber}}$ düzlemi üzerinde ince disk anakol yıldızlarının ağırlıklandırılmış verileriyle birlikte, yıldız sayı yoğunluklarına (Şekil 10) göre renklendirilmiş verileri gösterilmiştir. Ağırlıklandırılmış veriler üzerinden doğrusal bir fit geçirilerek ince disk anakol yıldızları için bolluk gradyent, $d[Fe/H]/dR_{\text{Rehber}} = -0.074 \pm 0.005$ dex/kpc olarak hesaplanmıştır. Yıldızların sayı yoğunluğu ve yaşları dikkate alındığında, Sharma et al. (2021) kemo-dinamik modelinden



Şekil 9. Anadol yıldızlarının $[\alpha/Fe] \times Z_{\max}$ düzleminde sayı yoğunluklarına ve yaşlarına göre demir bolluğu gradyentleri. Panel a-b: ince disk, Panel c-d: kalın disk/halo yıldızlarını temsil etmektedir.



Şekil 10. İnce disk anadol yıldızlarından hesaplanan radyal metal bolluğu gradyenti (Sharma et al. 2021)'nin Güneş civarı için yıldız yaşlarının fonksiyonu olarak üretilen kemo-dinamik model sonuçlarına ait gradyent değerleri. Panellerde daire sembolü ağırlıklandırılmış verileri, siyah çizgi tez çalışmasında hesaplanan doğrusal fiti, kesikli çizgiler de farklı yaşlardaki model fitlerini göstermektedir. Renklendirme GALAH DR3'ten seçilen anadol yıldızlarının sayı yoğunluklarına göre yapılmıştır.

$t = 4$ Gyıl için hesaplanan radyal metal bolluğu gradyent değerinin (-0.076 ± 0.002 dex/kpc) bu tez kapsamında hesaplanan değer ile oldukça iyi bir uyum sağladığı görölmüştür.

Sonuç olarak, Güneş civarındaki anakol yıldızlarının güncel ve duyarlı verilerden hesaplanan metal bolluğu gradyentlerinin kuramsal modellerden üretilenler ile uyumlu olduğu bu çalışmada gösterilmiştir. Bu çalışma farklı ışıma gücündeki diğer yıldız gruplarına uygulanarak Güneş civarının ötesindeki bölgeler için üretilen kemo-dinamik modellerin sınanması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Kaynaklar

- Baade W., 1944, *ApJ*, 100, 137
 Beeckmans F., 1980, *ESA Journal*, 4, 15, [ADS](#)
 Bensby T., Feltzing S., 2010, in Cunha K., Spite M., Barbuy B., eds, Vol. 265, *Chemical Abundances in the Universe: Connecting First Stars to Planets*. pp 300–303 ([arXiv:0908.3807](#)), [doi:10.1017/S1743921310000773](#)
 Bilir S., et al., 2020, *Publ. Astron. Soc. Australia*, 37, e022
 Bovy J., 2015, *ApJS*, 216, 29
 Bressan A., Marigo P., Girardi L., Salasnich B., Dal Cero C., Rubele S., Nanni A., 2012, *MNRAS*, 427, 127
 Buder S., et al., 2021, *MNRAS*, 506, 150
 Cox A. N., Pilachowski C. A., 2000, *Physics Today*, 53, 77
 Gaia Collaboration 2020, *VizieR Online Data Catalog*, p. I/350, [ADS](#)
 Majewski S. R., 1993, *ARA&A*, 31, 575
 Marsakov V. A., Koval' V. V., Borkova T. V., Shapovalov M. V., 2011, *Astronomy Reports*, 55, 667
 Nissen P. E., 2004, in McWilliam A., Rauch M., eds, *Origin and Evolution of the Elements*. p. 154 ([arXiv:astro-ph/0310326](#))
 Plevne O., Önal Tař Ö., Bilir S., Seabroke G. M., 2020, *ApJ*, 893, 108
 Shapley H., 1917, *PASP*, 29, 245
 Sharma S., et al., 2017, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 473, 2004
 Sharma S., Hayden M. R., Bland-Hawthorn J., 2021, *MNRAS*, 507, 5882
 Trumpler R. J., 1930, *PASP*, 42, 214

Access:

M22-0312: *Turkish J.A&A* — Vol.3, Issue 3.