


Yeni Tanımlanmış Yüksek Çözünürlüklü Çizgi İndeksleri Kullanılarak Fornax Kümesindeki Cüce Eliptik Galaksilerin Element Bolluk Oranları

Şeyda Şen¹ *, Ersin Göğüş¹ 

¹ Sabancı Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İstanbul 34956, Türkiye

Accepted: December 21, 2022. Revised: December 14, 2022. Received: November 13, 2022.

Özet

Cüce Eliptik Galaksiler (dwarf elliptical galaxies, dEs), galaksi kümeleri içinde sayıca baskın tür olarak bulunurlar. Bu çalışmada çözülmemiş küçük yıldız sistemlerinin yıldız popülasyonu çalışmaları için kullanılacak yeni yüksek çözünürlüklü tayf indeksleri seti tanımlanıp, bunları kullanarak, Fornax galaksi kümesinde bulunan sekiz dEs yıldız popülasyonlarının ayrıntılı bir incelemesini sunulmuştur. Bu çalışmada 11 elemente ait 23 yeni çizgi indeksi tanımlanmıştır. Gözlem verileri Sidney-Avustralya Gözlemevinde bulunan 3.9m çapa sahip AAT'ye takılı olan Çoklu-Obje İntegral Alan Tayfmetresi (SAMI) ile elde edilmiştir. Sekiz dE'nin yeni yüksek çözünürlüklü indeks sistemimizde ölçülen çizgi kuvvetleri, yıldız popülasyon modelleri yardımıyla analiz edilmiştir. Bu kadar çok sayıda elemente ait bolluklar, Yerel Grup dışındaki cüce eliptik galaksiler için daha önce hiç çalışılmamıştır. Sonuçlar, Yerel Grup'taki çözülmemiş yıldızların bolluk oranları ve daha büyük erken tür galaksilerin integral ışığından alınan indekslerle karşılaştırılır. Tüm galaksilerimizin, Samanyolu diskiyle tutarlı bir bolluk oranı modeli gösterdiğini, yüksek kütleli emsallerine kıyasla yavaş oluşumun göstergesi olduğu bulunmuştur.

Abstract

We perform a detailed study of the stellar populations in a sample of massive Fornax dwarf galaxies using a set of newly defined line indices. Using data from the Integral field spectroscopic data, we study abundance ratios of eight dEs with stellar mass ranging from 10^8 to $10^{9.5} M_{\odot}$ in the Fornax cluster. We present the definitions of a new set of high-resolution Lick-style indices to be used for stellar population studies of unresolved small stellar systems. We identify 23 absorption features and continuum regions, mainly dominated by 11 elements in the wavelength range 4700 - 5400 Å and characterise them as a function of age, metallicity and alpha element abundance ratios. We analyse eight dEs and interpret the line strengths, measured in our new high resolution system of indices, with the aid of stellar population models with high enough spectral resolution. We obtain abundance ratio proxies for a number of elements that have never been studied before for dwarf ellipticals outside the Local Group. These proxies represent relative deviations from predicted index-strengths of base stellar population models built-up following the abundance pattern of The Galaxy. The abundance proxy trend results are compared to abundance ratios from resolved stars in the Local Group, and indices from integrated light of larger early-type galaxies. We find that all our dwarfs show a pattern of abundance ratios consistent with the disk of the Milky Way, indicative of slow formation in comparison to their high mass counterparts.

Anahtar Kelimeler: galaxies: dwarf elliptical – galaxies: evolution – galaxies: individual: Fornax - galaxies: abundances ratios – galaxies: stellar populations – techniques: spectroscopic

1 Giriş

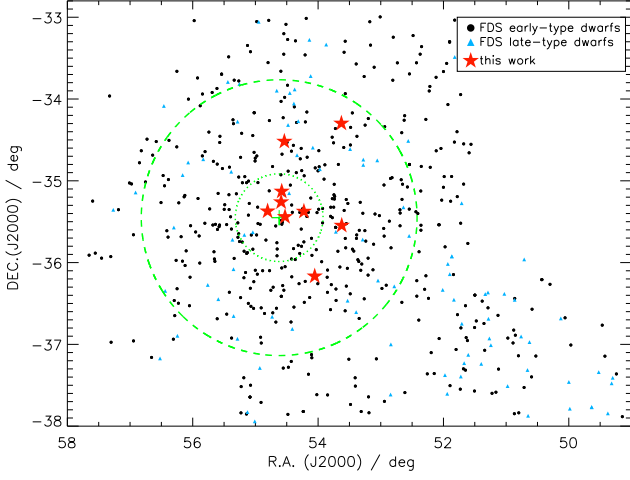
Galaksilerin yıldız popülasyonları, oluşumlarının ve evrimsel tarihlerinin fosil kaydını tutar. Yıldız popülasyon sentezi, galaksi evrimini incelemek için gerekli ve önemli bir araçtır. Galaksilerin çözülmemiş yıldız popülasyonlarının yıldız içeriği ve kimyasal bileşimi, tayflarındaki süreklilik ve soğurma çizgileri genişlikleri kullanılarak, onların integral tayflarında gözlemlenen soğurma özelliklerinin ayrıntılı olarak incelenmesiyle elde edilebilir.

Cüce eliptik galaksilerin (dEs), galaksi kümelerinde sayıca baskın tür oldukları bilinmektedir (Sandage & Binggeli 1984). Bu özellikleri sayesinde bize sadece kendi doğalarının değil aynı zamanda galaksi kümelerinin de yıldız oluşum tarihini

ve kimyasal evrimini inceleme fırsatı verirler. Öte yandan, bu galaksiler doğası gereği sönük oldukları ve metal bollukları genellikle fakir olduğu için onları tespit etmek ve soğurma çizgilerini ölçmek daha zordur.

Uzun yıllar boyunca çözülmemiş yıldız popülasyonu çalışmaları, gözlenen galaksi tayfları ile geniş metal bolluğu ve yaş aralığında ama sınırlı element bolluğu aralığında olan yıldız popülasyonu modellerinin karşılaştırılması ile yapılmıştır. Bu çalışmalar, yıldız oluşum tarihinin (SFH) örneğin yıldız yaşlarının, metal bolluklarının dağılımının ve belirli anahtar elementlerin bolluğunun elde edilmesini sağlar. Pratikte bu çalışma, tayfın tamamının modellere fit edilmesi veya çizgi indekslerinin ölçülmesi ve modellerde ölçülen değerler ile karşılaştırılmasıyla yapılabilir. Her iki yöntemin de kendine göre avantajları ve dezavantajları vardır. Çizgi indeksleri yöntemi, her bir element bolluğunun birkaç bağımsız ölçümden

* seyda.aydemir@sabanciuniv.edu



Şekil 1. Fornax kümesinin haritası. Siyah ve mavi semboller sırasıyla erken-tür ve geri-tür cüceleri temsil etmektedir. Kırmızı yıldızlar bu çalışmadaki örnekleri temsil etmektedir. Yeşil noktalı ve kesikli çemberler sırasıyla küme merkezini (Ferguson 1989) ve 2°2 (~0.7 Mpc, Drinkwater et al. 2001) virial yarıçapını temsil eder ve yeşil çarpı NGC 1399 merkez galaksinin yerini temsil eder.

elde edilebilmesi ve bu nedenle daha fazla kontrole sahip olunması avantajına sahiptir. Fakat her iki yöntem de genellikle düşük çözünürlüklü tayfsal indekslere uygulandığından sadece bazı güçlü soğurma çizgileri ve onlara ait elementlerin bollukları ölçülebilir ve bu nedenle aynı nitelikte çok sayıda bağımsız ölçüme sahip olma avantajını kaybeder. Bu çalışmada Şen ve diğ. (2022)'de tanımladığımız yüksek çözünürlüklü indekslerin avantajını kullanarak çok sayıda element bolluğuna ulaşmak amaçlanmıştır.

Galaksi tayflarını analiz etmek yaş-metal bolluğu dejenerasyonu nedeniyle düşünüldüğünden daha zordur. İndeks-İndeks diyagramı, yaşlı yıldız popülasyonlarında yaş-metal bolluğu dejenerasyonunu kırmak için kullanılabilir. Yaş ve metalliğe duyarlı indekslerin optimize edilmiş versiyonu Vazdekis (1999, 2001) de önerilmiştir. Bu indeksler yaş veya metal bolluğu belirteci olarak kullanılır. Araştırmacılar bu sistemi kullanmaya devam etmişlerdir çünkü kütleli galaksilerdeki hız genişlemesi o kadar büyüktür ki daha yüksek çözünürlüklü sistemler kullanmak önemli avantaj sağlamaz, küçük yıldız sistemlerinde ise verilerdeki Sinyal-Gürültü (S/G) oranı genellikle düşük olduğu için bu sistem tercih edilmiştir. Ancak küçük sistemler için verilerde ki S/G oranı arttıkça daha fazla bilgiye ulaşma ihtiyacı doğmuştur. Bu sistemlerde hız kaynaklı çizgi genişlemesi o kadar düşüktür ki, dev galaksilere kıyasla çok daha fazla çizgi ölçülebilir.

dE'lerin yıldız popülasyonları, metal bolluğu $[M/H] \sim 0.1 \text{ dex'ten } -1.5 \text{ dex'e}$ ve yaşları 1 ile 14 Gyl arasında değişen geniş bir metalce fakir metal bolluğu aralığını kapsar (Caldwell ve diğ. 2003; Michielsen ve diğ. 2008; Paudel ve diğ. 2010; Koleva ve diğ. 2011; Toloba ve diğ. 2014; Ryś ve diğ. 2015; Sybilska ve diğ. 2017, 2018; Şen ve diğ. 2018). Ayrıca bu sistemler basit, yaşlı ve metalce zengin yıldız popülasyonlarından oluşmazlar, yaş aralıkları geniş nispeten metalce fakir sistemlerdir (Michielsen ve diğ. 2008; Koleva ve diğ. 2009; Ryś ve diğ. 2015).

Yıldız popülasyon çalışmaları, metaliklik-parlaklık

ilişkisinden de beklendiği gibi, çözümlenemeyen dE'lerin dev eliptiklerden daha fakir bir metal içeriğine sahip olduğunu göstermiştir (Michielsen ve diğ. 2008; Skillman ve diğ. 1989; Sybilska ve diğ. 2017). Son çalışmalar, dE'lerin yıldız popülasyonlarının Yerel Grup'taki birkaç dEs ile uyumlu olarak hem genç hem de yaşlı popülasyon ve bu aralıkta değişim gösterdiklerini göstermiştir (örneğin Koleva ve diğ. 2009, 2011; den Brok ve diğ. 2011; Ryś ve diğ. 2015; Hamraz ve diğ. 2019). Ancak, dEs'in ayrıntılı bolluk oranları ile ilgili çalışmalar azdır. Gorgas ve diğ. (1997); Michielsen ve diğ. (2008); Sybilska ve diğ. (2017) ve Şen ve diğ. (2018) $[Mg/Fe]$ 'nin Güneş bolluğunda olduğunu ve bunun dev eliptiklerde tespit edilenden daha düşük olduğunu, dev eliptiklerde $[Mg/Fe]$ 'nin metalikliği azaltmak için muhtemelen yükseldiğini göstermişlerdir. Diğer elementler için bolluk oranları hakkında çok az şey bilinmektedir, bunun başlıca nedeni yüksek S/G tayflarının olmaması ve aynı zamanda bunları düzgün bir şekilde analiz edecek yöntem ve modellerin olmamasıdır. Şen ve diğ. (2018), Virgo kümesinde bulunan 39 cüce eliptik örneği için $[Ca/Fe]$ ve $[Na/Fe]$ bolluk oranları çalışılmış ve $[Ca/Fe]$ Güneş bolluğundan biraz daha büyükken, $[Na/Fe]$ Güneş bolluğundan oldukça fakir olduğu bulunmuştur. Bu, kütleli ETG'lerle keskin bir zıtlık içindedir (bknz, Ca için Vazdekis ve diğ. 1997 ve Na için La Barbera ve diğ. 2017).

2 Gözlemler ve Veri Analizi

Cüce eliptik galaksi verilerimiz FDS (Fornax Deep Survey) cüce galaksi örneklerinden (Venhola ve diğ. 2018) seçilmiştir. Bu çalışma için yüksek S/G oranına sahip, yıldız kütleleri $10^8 M_{\odot}$ ve $10^{9.2} M_{\odot}$ aralığında olan, integral hız dağılımları 10 ile 40 kms^{-1} arasında bulunan 8 cüce eliptik galaksi örneği seçilmiştir. Tüm örnekler Venhola ve diğ. (2018) tarafından dE olarak, bunlardan FCC135, FCC182 ve FCC203 diskli olarak sınıflandırılmıştır. Michea ve diğ. (2022) tarafından galaksilerin disk yapıları çubuklar, sarmal kollar, halkalar gösterdiği ve genellikle bu yapıların galaksilerle aynı renklere sahip oldukları, yığılma alt yapılarının ise yıldız oluşum bölgeleri, toz şeritleri ve merkez dışı çekirdekler gibi düzensiz parlaklık ve yoğunluk gösterdiği belirlenmiştir. Örneklerimizin hiçbiri yığılmış olarak sınıflandırılmamıştır. Şekil 1'de, Fornax kümesindeki galaksi örneklerinin konumlarını göstermiştir. Hepsisi kümenin merkezindeki Virial yarıçapı içinde yer alır.

Tüm gözlemsel veriler, Sidney-Avustralya Astronomi Gözlemevinde (AAO) bulunan 3.9 metrelik Anglo-Avustralya Teleskobu (AAT) nin ana odağına takılan Çok Nesneli İntegral-Alan (Multi-Object Integral-Field SAMI – Croom ve diğ. 2012) tayf çekeri ile elde edilmiştir.

SAMI, heksabundle (hexabundless – altılı-demet, Bland-Hawthorn ve diğ. 2011; Bryant ve diğ. 2011, 2014) adı verilen fiber demetlerine dayanır. SAMI, her biri gökyüzünde $15''$ çapa sahip 13 heksabundle'dan oluşur. Bunun yanı sıra, SAMI ayrıca gökyüzünü ayrı gözlemlemeye gerek kalmadan tüm IFU gözlemleri için gökyüzünü çıkarmamıza yarayan 26 ayrı gökyüzü fiberine sahiptir. SAMI, tek bir gözlemden 13 galaksiyi veya daha büyük olasılıkla 12 galaksiyi ve bir standart kalibrasyon yıldızını aynı anda gözlemleyebilir, bu da IFU verileriyle büyük bir galaksi örneği oluşturmak için gereken gözlem süresini önemli ölçüde azaltır. Bu standart yıldız, her bir gözlemin nokta yayılım fonksiyonunu ve iletimini anlamamıza izin vermesinin yanı sıra, veri indirgemedede (örneğin, tellürik düzeltme, mutlak akı kalibrasyonu) birkaç önemli adım için gereklidir.

AAOmega, mavi ve kırmızı optik tayfsal bölgeleri kapsayan

Çizelge 1. Bu çalışmada kullanılan Fornax kümesinde bulunan dE'lerin özellikleri. Sütun 1: galaksi ismi. Sütun 2: FSDC tarafından belirlenen FSDC isimleri (Venholo ve diğ. (2018)). Sütun 3 ve 4: sağ açıklık ve dik açıklık (J2000, derece). Sütun 5 ve 6: r -bandı and g -bandı parlaklıkları (kadir, AB sisteminde), Sütun 7: etkin yarıçap (yaysaniyesi, Venholo ve diğ. (2018)). Sütun 8: hız dağılımı (km s^{-1}). Sütun 9 ve 10: basıklık ve morfoloji sınıflandırması (Venholo ve diğ. (2018)), *; çekirdeği olan galaksileri temsil etmektedir. Sütun 11: kütleleri (M_{\odot}). Sütun 12: gözlem tarihi.

Galaksi	FDS	RA	DEC	M_r	M_g	R_e	σ_e	ϵ	Morfoloji Sınıfı	$\log(M^*)$	Gözlem tarihi
FCC135	F15D384	53.628	-34.297	-16.8	-16.2	14.7	21.2±2.8	0.53	e(s)	8.708±0.003	Ekim 2016
FCC136	F16D159	53.623	-35.546	-17.8	-17.0	17.5	30.9±1.6	0.13	e	9.082±0.003	Ekim 2016
FCC164	F12D367	54.054	-36.166	-16.0	-15.4	10.0	11.1±5.2	0.45	e(s)	8.335±0.003	Ekim 2016
FCC182	F11D279	54.226	-35.375	-17.9	-17.1	9.7	38.9±0.5	0.04	e(s)*	9.168±0.002	Ekim 2016
FCC202	F11D235	54.527	-35.440	-17.3	-16.6	13.3	31.5±1.0	0.41	e*	8.909±0.003	Kasım 2015
FCC203	F10D189	54.538	-34.519	-16.9	-16.3	16.0	31.4±2.3	0.45	e(s)	8.757±0.003	Ekim 2016
FCC211	F11D339	54.590	-35.260	-16.1	-15.5	6.6	20.1±5.7	0.25	e*	8.339±0.003	Kasım 2015
FCC222	F11D283	54.806	-35.371	-17.0	-16.3	16.1	18.6±3.8	0.11	e*	8.771±0.003	Kasım 2015

çift kollu bir tayfçektir. AAOmega, her kolda farklı dalgaboyu aralığına ve tayfsal çözünürlüğe sahiptir. Bu çalışmada, 4660–5430 Å dalgaboyu aralığında $R = \lambda/\Delta\lambda \simeq 5000$, mavi koldaki 1500V tayfçeker kullanılmıştır. Mavi kol, 20–40 km s^{-1} tipik hız dağılımına sahip cüce galaksileri çözmek için yeterli bir tayfsal çözünürlük sağlar. Ayrıca, yeni tanımlanmış yüksek çözünürlüklü çizgi indekslerini ve başlıca yıldız soğurma çizgilerinin (örneğin H_{β} , Fe5015, Mg) özelliklerini de kapsar.

SAMI verilerimiz *sami* Python paketi (Allen ve diğ. 2015) kullanılarak indirildi. SAMI veri indirilmesi iki ana adımda gerçekleştirildi; ilki, her bir fiberi için ham gözlemlenen verileri, tayfsal çıkarma, sapma çıkarmanın standart adımları, düz alan oluşturma, dalgaboyu kalibrasyonu, gökyüzü çıkarma dahil üzere veri indirme adımları indirme yazılım paketi (2dFDR) kullanılarak elde edilmiş Sıralı Yığılmış Spektrum (RSS) görüntülerini oluşturur. İkinci adım, *sami* paketinin bir parçası olan kullanacağımız amaca yönelik olarak spesifikleştirilmiş Python yazılımını kullanarak RSS görüntülerini akı kalibreli, üç boyutlu veri küplerine dönüştürülür. Tüm süreç *sami* Python *manager* tarafından denetlenir.

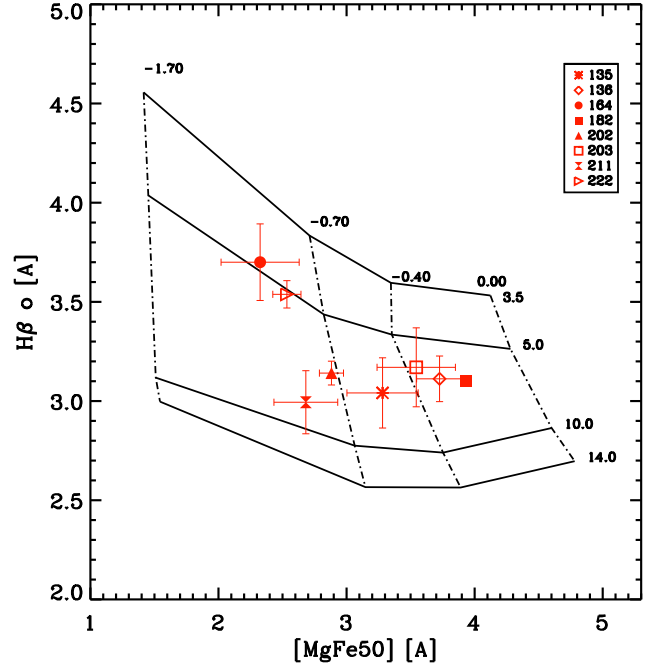
2.1 Yüksek Çözünürlüklü Çizgi İndeksi Kullanılarak Galaksilerin Ölçümleri

3 Sonuçlar

3.1 Yaş ve Metal Bolluğunun Belirlenmesi

Bu çalışmada ilk olarak yaşa ve metal bolluğuna hassas çizgiler (H_{β} ve $[\text{MgFe50}]$) kullanılarak galaksilerin yaş ve metal bollukları belirlenmiştir. Daha sonra galaksilerin yeni belirlenen yüksek çözünürlüklü çizgi indeks (bkz. Şen ve diğ. 2022) ölçümleri yapılmış ve galaksiler için bulunan yaş ve metalliğe uygun SSP modelleri kullanılarak yaklaşık bolluk oranları elde edilmiştir.

Galaksilere ait yaş ve metal bolluğu onların tek yaş ve tek metal bolluğu gösteren yıldız popülasyon modellerine (SSP) fit edilerek belirlenmiştir. Yıldız popülasyon modelleri ve verileri karşılaştırabilmek için PEGASE.HR (Le Borgne ve diğ. 2004) SSP modelleri (yaş 1 ile 14 Gyl, $[\text{Fe}/\text{H}]$ -1.7 ile 0.4 aralığında) kullanılmıştır. Tüm veriler ve modeller $\sigma=40 \text{ km s}^{-1}$ genişletilmiştir. Bu galaksilerdeki yaşları ve metal bollukları ($[\text{M}/\text{H}]$) RMODEL (Cardiel ve diğ. 2003) yazılımı kullanarak elde edilmiştir. Bu yazılım, bir indeks-indeks grafiğinin içindeki yaş ve metalliği interpolasyon



Şekil 2. H_{β} ya karşı $[\text{MgFe50}]$ çizgi indeksi, $\sigma = 40 \text{ km s}^{-1}$ için PEGASE.HR (Le Borgne ve diğ. 2004) SSP modelleri gösterilmiştir. Burada düz çizgiler sırasıyla 3.5, 5.0, 10.0 ve 14.0 Gyl yaşları, kesikli çizgiler sırasıyla $[\text{M}/\text{H}]$ -1.70, -0.70, -0.40 ve +0.00 e karşılık gelen metal bolluklarını göstermektedir.

yaparak, en yakın noktayı bulur. Yaş ve $[\text{M}/\text{H}]$ 'deki hatalar, genişliği belirsizliklerine eşit olan bir Gauss fonksiyonu içindeki tayfsal indekslerin değerlerini değiştirerek 1000 Monte Carlo simülasyonu çalıştırılarak hesaplanır.

Şekil 2'de, H_{β} - $[\text{MgFe50}]$ fonksiyonu olarak indeks diyagramı gösterilmiştir. Burada galaksilerin çözümünü kapsayan şekilde yaş 3.5 den 14.0 Gyl aralığında, metal bolluğu -1.7 dex'ten 0.0 aralığında verilmiştir. Çizgi indeks ölçümleri, yaş ve metal bolluğu sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir.

Yüksek çözünürlüklü tayflar, kütleli galaksilerden farklı olarak cüce galaksilerdeki birçok kimyasal element için çok sayıda soğurma çizgisinin doğru ölçümlerini sağlayarak onların bolluk modellerini türetmeyi kolaylaştırır. Çizgi indeksleri,

Çizelge 2. Fornax kümesindeki 8 dEs için yüksek çözünürlüklü tayf indeksleri (Şen ve diğ. 2022 tarafından tanımlanan) ölçümleri, yaş (Gyıl) ve metal bollukları.

	FCC135	FCC136	FCC164	FCC182	FCC202	FCC203	FCC211	FCC222
log(yaş)	0.84±0.03	0.79±0.03	0.67±0.04	0.79±0.02	0.95±0.07	0.76±0.03	0.90±0.05	0.70±0.06
[Fe/H]	-0.49±0.06	-0.33±0.04	-0.89±0.09	-0.27±0.04	-0.75±0.08	-0.38±0.09	-0.82±0.13	-0.81±0.12
İndeksler								
Ba2	0.361±0.056	0.409±0.036	0.333±0.060	0.401±0.016	0.274±0.019	0.219±0.066	0.320±0.051	0.355±0.022
Ca5041	0.991±0.074	1.454±0.045	0.786±0.083	0.944±0.021	0.945±0.025	1.108±0.081	0.742±0.065	1.015±0.028
Ca5261	0.275±0.042	0.387±0.026	0.368±0.043	0.359±0.011	0.314±0.013	0.327±0.043	0.253±0.035	0.215±0.015
Cr4789	0.229±0.049	0.353±0.030	...	0.378±0.014	0.261±0.016	0.338±0.050	0.245±0.043	0.314±0.018
Cr5072	0.134±0.030	0.159±0.019	0.115±0.032	0.191±0.008	0.158±0.010	0.177±0.033	0.130±0.027	0.180±0.012
Cr5247	0.231±0.041	0.245±0.027	0.175±0.044	0.262±0.011	0.214±0.013	0.125±0.044	0.194±0.035	0.194±0.015
Cr5265	0.605±0.048	1.001±0.028	0.692±0.050	1.035±0.012	0.813±0.014	0.800±0.047	0.620±0.040	0.677±0.017
Cr5275	0.268±0.048	0.406±0.030	0.246±0.051	0.404±0.013	0.342±0.015	0.331±0.049	0.258±0.041	0.292±0.017
Fe4891	0.504±0.047	0.612±0.030	0.472±0.049	0.708±0.013	0.617±0.016	0.393±0.056	0.330±0.045	0.515±0.019
Fe4920	0.944±0.083	1.257±0.052	1.116±0.086	1.389±0.022	0.968±0.028	0.778±0.097	0.711±0.077	0.928±0.032
Fe5226	0.812±0.093	0.898±0.059	0.767±0.100	0.931±0.025	0.771±0.029	0.865±0.099	0.520±0.081	0.831±0.033
Mg b	2.288±0.272	2.822±0.173	2.213±0.294	3.367±0.037	2.495±0.087	2.097±0.297	1.984±0.228	1.858±0.102
Mn4783	0.152±0.049	0.324±0.030	...	0.269±0.014	0.173±0.017	0.221±0.051	0.233±0.042	0.140±0.019
Mn4823	0.183±0.039	0.196±0.025	0.004±0.044	0.237±0.011	0.183±0.013	0.239±0.042	0.146±0.035	0.104±0.015
Mn5255	0.214±0.047	0.309±0.029	0.266±0.048	0.292±0.012	0.260±0.015	0.288±0.048	0.153±0.039	0.300±0.017
Na4978	0.102±0.043	0.120±0.028	-0.002±0.048	0.132±0.012	0.013±0.015	0.071±0.050	0.075±0.038	-0.058±0.018
Nd5192	0.273±0.031	0.297±0.020	0.340±0.034	0.351±0.008	0.300±0.010	0.180±0.034	0.229±0.027	0.279±0.012
Ni5036	0.350±0.048	0.429±0.030	0.261±0.054	0.456±0.014	0.279±0.017	0.400±0.053	0.301±0.042	0.265±0.019
Sc5083	0.184±0.041	0.350±0.025	0.177±0.043	0.403±0.011	0.328±0.013	0.235±0.044	0.259±0.035	0.223±0.016
Ti5014	0.379±0.043	0.460±0.027	0.270±0.044	0.441±0.012	0.374±0.014	0.388±0.047	0.331±0.041	0.318±0.017
Ti5064	0.264±0.044	0.375±0.027	0.090±0.049	0.312±0.012	0.250±0.015	0.331±0.048	0.229±0.039	0.295±0.017
Ti5129	0.124±0.036	0.181±0.023	0.112±0.038	0.203±0.010	0.210±0.012	0.128±0.039	0.110±0.030	0.169±0.013
V4924	0.481±0.054	0.526±0.034	0.421±0.058	0.605±0.015	0.384±0.019	0.333±0.063	0.306±0.049	0.469±0.021
Y4854	0.128±0.041	0.076±0.027	0.127±0.045	0.143±0.012	0.101±0.014	0.196±0.045	0.137±0.037	0.109±0.016
Hβ _o	3.041±0.177	.112±0.115	3.700±0.193	3.101±0.026	3.141±0.060	3.170±0.199	2.994±0.159	3.538±0.069
Fe5015	4.983±0.524	.505±0.337	3.123±0.575	5.545±0.074	4.042±0.178	5.641±0.577	3.996±0.472	3.785±0.208

tayfsal verileri sadece tek bir sayıya ve onun hatasına indirgeyebildiğinden, sonuçları analiz etmenin oldukça etkili bir yoludur. Bu çalışmada, Lick sistemine benzer, yüksek çözünürlüklü yeni bir dizi tayf indeksleri (bkz. Şen ve diğ. 2022) üzerinde çalışıyoruz; bu indeksler, soğurma bant aralıklarının her iki tarafında bir mavi ve bir kırmızı soğurma bant geçişleri ile tanımlanır. Burada yüksek çözünürlüklü indekslerin yorumlanması ve bolluk ölçümlerini incelemek için kütle ile iyi korelasyon gösteren 23 indekse odaklanıyoruz.

Evrimsel sentez koduyla hesaplanan tek yaş ve metaliklik (SSP) yıldız popülasyon modeli olan PEGASE.HR (Le Borgne ve diğ. 2004) kullanıyoruz. Bu modeller, metaliklikte [Fe/H] - 1.7 ile 0.4 aralığında, yaşta 1 Myıl ile 20 Gyr aralığında olan ELODIE.3 (Prugniel & Soubiran 2001, 2004) deneysel yıldız kitaplığına dayanmaktadır.

Tüm galaksileri ve tüm modelleri aynı çözünürlüğe getirdik. PEGASE.HR modelleri $\sigma=25 \text{ km s}^{-1}$ 'dir (R=5000'e karşılık gelir ve SAMI-çözünürlüğü ile aynıdır). Ardından tüm modeller ve tüm galaksiler $\sigma=40 \text{ kms}^{-1}$ enstrümantal hız dağılımına genişletildi. Bu şekilde tüm galaksiler ve modeller birbirleriyle karşılaştırılabilirler.

4 Tartışma

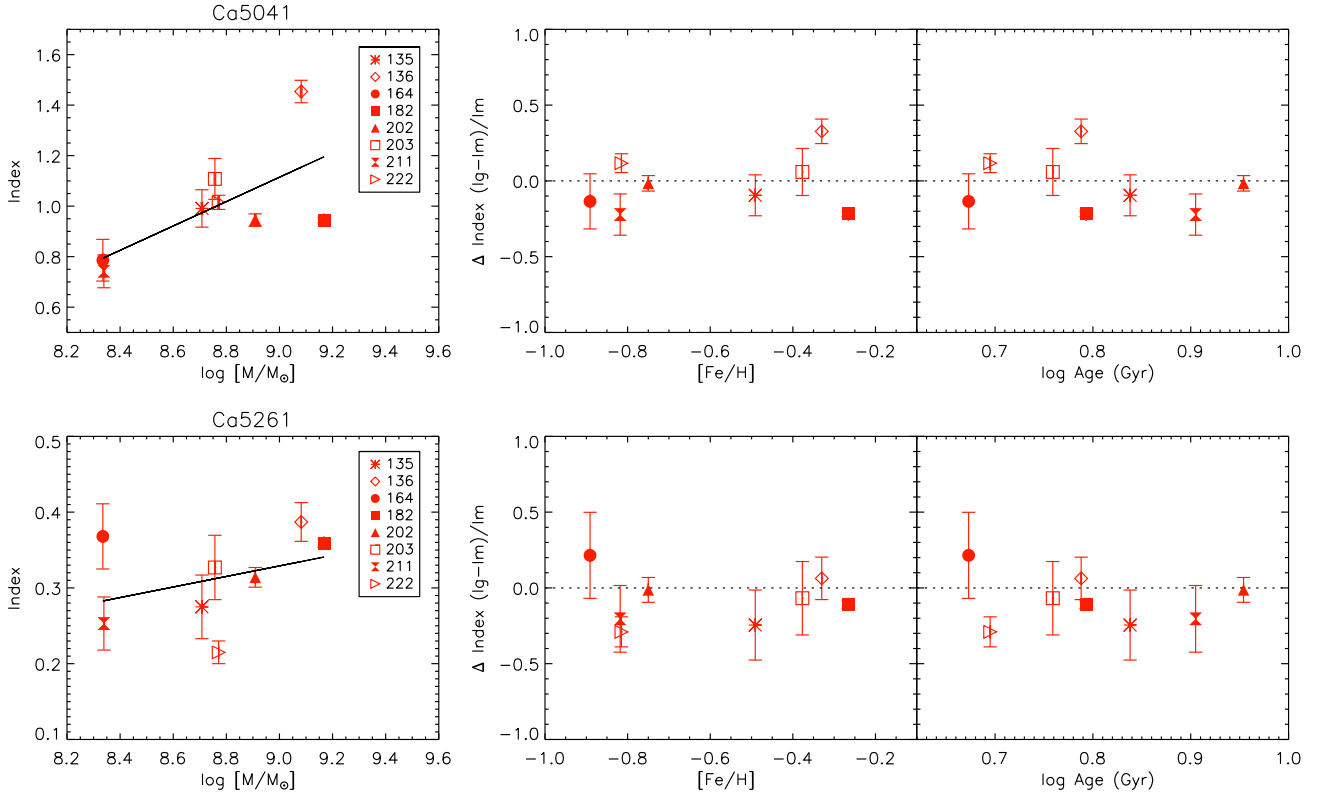
Bu çalışmada, yeni 23 yüksek çözünürlüklü tayfsal indeks seti kullanarak 8 cüce eliptik galaksi örneğinin bolluk oranlarını inceliyoruz. Niteliksel bir bakış açısıyla, daha büyük galaksi benzerlerine göre bolluk oranlarındaki farklılıkları

karşılatırlacaktır. Ancak, sonuçlarımızın güvenilirliğini arttırmak ve bağımsız ölçümlere sahip olabilmemiz için çizgi indekslerimiz kütleli fonksiyonu olarak değişenlerden seçilmiştir.

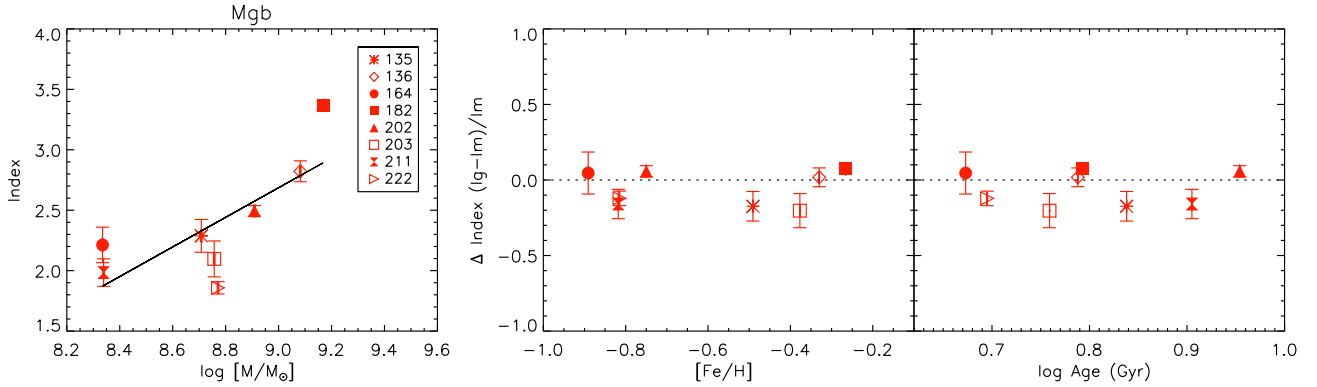
Alfa elementleri, örneğin O, Mg, Ca, Si ve Ti, ağırlıklı olarak büyük kütleli yıldızlarda çeşitli yanma evreleri sırasında alfa yakalama ile sentezlenir ve SN II patlamaları ile yıldızlararası ortama atılırlar. α -elementlerinin bolluğu, büyük kütleli yıldızların nispeten kısa ömürleri nedeniyle zamanla çok hızlı bir şekilde artar. Bu çalışmada elde edilen alfa element indeks sonuçları Şekil 3, 4 ve 5'te gösterilmiştir. Na alfa elementi olarak değil, hafif tek-Z elementi olarak tanımlanır. Na elementine ait çizgi indeksi Şekil 6 da verilmiştir. Diğer bir element grubu, atalarının ömürleri çok daha uzun olan SN Ia tarafından üretilen Fe-pik elementleridir (Ni, Co, Fe, Mn, vb.). Bu element grubuna ait çizgi indeksi ölçümleri Şekil 11, 7, 8, 9 ve 10 de gösterilmiştir. Belirli bir sistemdeki kimyasal bollukların evrimi, yıldız oluşum tarihi ile yakından ilişkili olduğundan, $[\alpha/\text{Fe}]$ gibi bolluk oranları galaksiler için SFH'yi keşfetmek için kullanılabilir.

Y, Ba ve Nd gibi demir pik noktasının ötesindeki daha ağır elementler, iki önemli sürecin (s- ve r- süreçleri) meydana geldiği nötron yakalaması ile sentezlenir ve ardından β bozunur. Bu iki süreç, iki karakteristik bolluk modeline yol açar.

Bu çalışmanın ana sonuçları, burada türetilen 11 element için bolluk oranlarının temsili gösterdiğimiz Şekil 13'da özetlenmiştir. Karşılaştırma için çok farklı hız dağılım



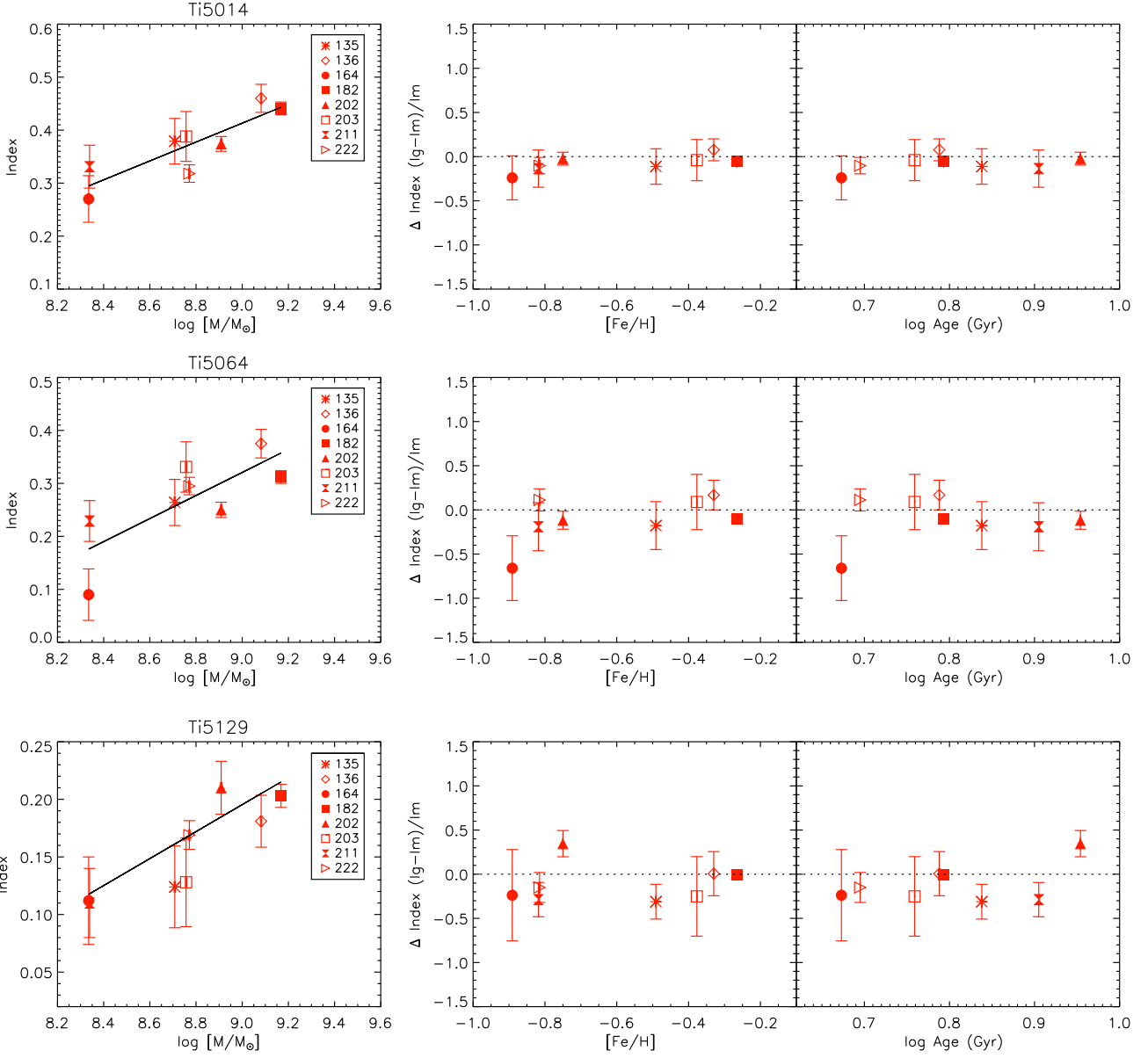
Şekil 3. Yeni tanımlanmış Ca çizgilerinin kütleli fonksiyonu olarak değişimi ve PEGASE.HR modelleri ile karşılaştırılması.



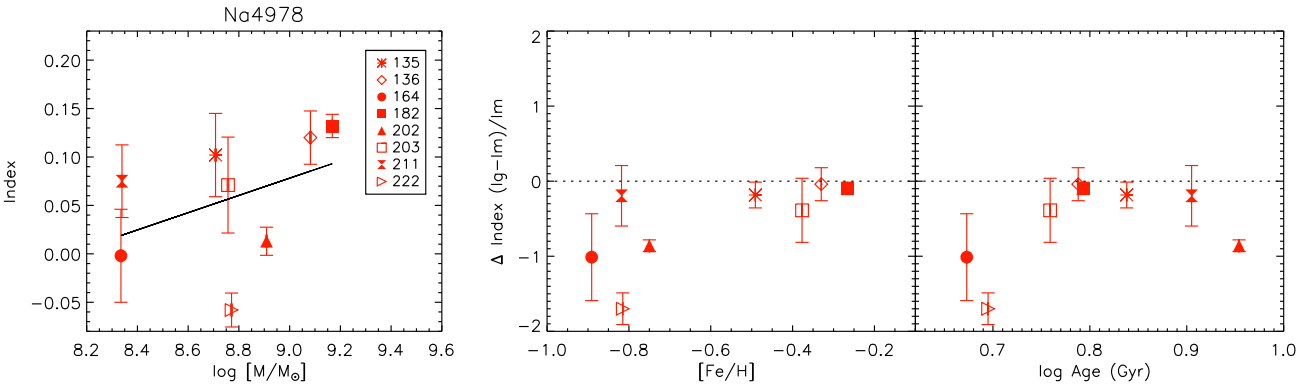
Şekil 4. Mgb çizgisinin kütleli fonksiyonu olarak değişimi ve PEGASE.HR modelleri ile karşılaştırılması.

değerlerine sahip daha kütleli eliptikler için Conroy ve diğ. (2014) tarafından "gerçek" bolluk oranı sonuçlarını sunuyoruz. Galaksilerimiz için türetilmiş bolluk oranı, referans temelli SSP modellerine göre göreceli indeks sapmalarına dayanır. Bu modeller ampirik yıldızlarla beslenir ve bu nedenle Şekil 13'da sol dikey ekseninde "0.0" değeriyle temsil edilen Samanyolu bolluk modelini takip eder. Bu referans değerinin Güneş ölçeğinde bolluk anlamına gelmediğini hatırlamakta fayda var (ki bu sadece Güneş metalikliği için geçerlidir). Sağ dikey eksen, bu şekilde gösterilen gE'ler için bolluk oranı değerlerini gösterir. Ancak bu iki tahminin aynı grafikte olması, bu galaksilerin eğilimlerinin görsel olarak karşılaştırmamızı sağlar. Bu sayede bu üç galaksi ailesi arasındaki türetilmiş bolluk eğilimlerindeki farkı değerlendirebiliriz.

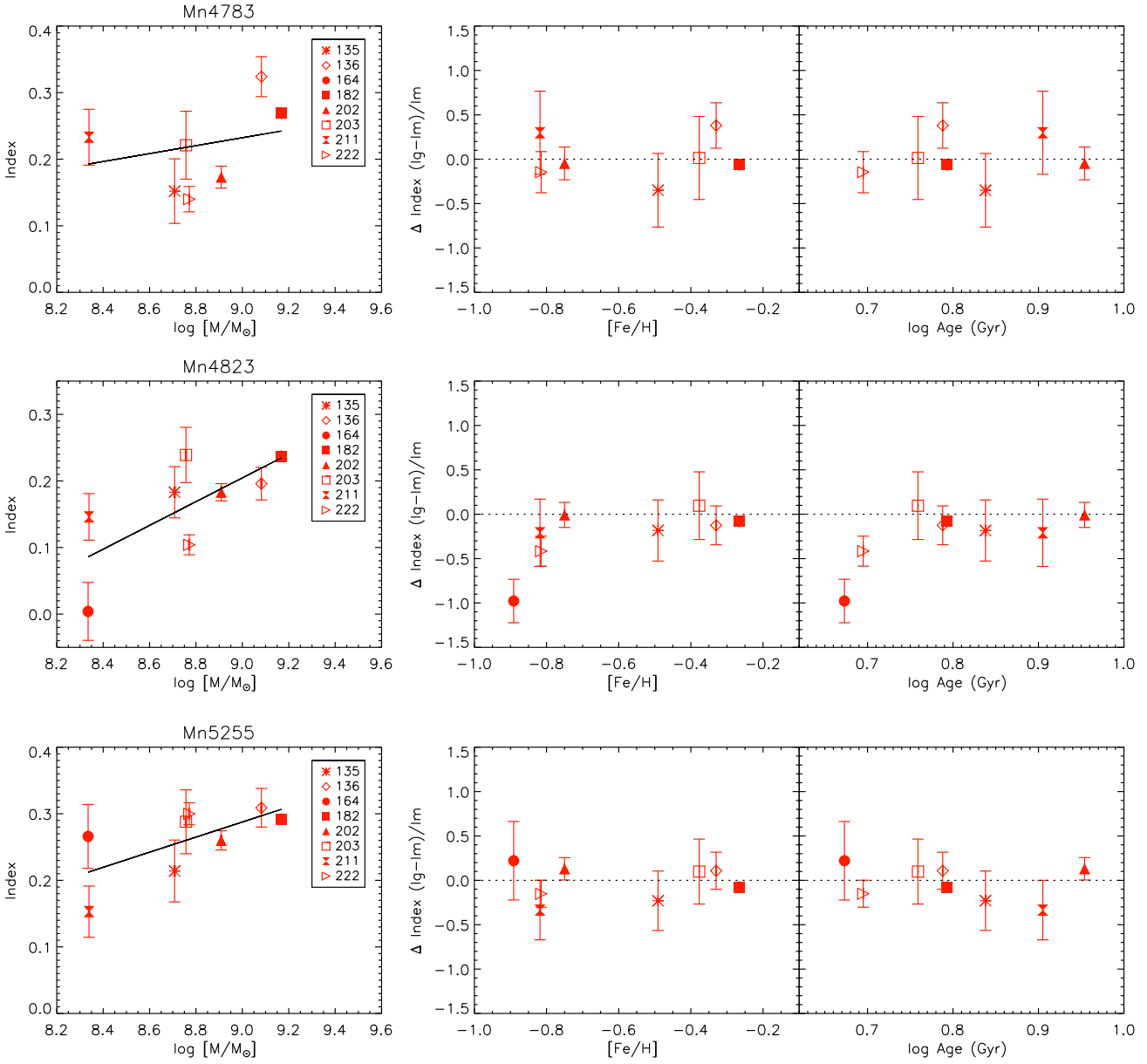
Galaksilerimiz için, tüm elementlerin bolluk oranı Güneş ölçeği değerinin altında veya ona yakın olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu sonuç, bu çalışmadaki cüce galaksilerin Samanyolu diskinde olduğu gibi yıldızlarını yavaş oluşturdukları anlamına gelir. Burada Mg ve Ca için elde edilen sonuçlar Şen ve diğ. (2018)'de yayınlananlarla oldukça iyi bir uyum içerisindedir. Bu davranış, Conroy ve diğ. (2014) tarafından analiz edildiği gibi, cücelerden Samanyolu tipi galaksilere ve en büyük dev galaksilere kadar artan kütleli bir eğilime iyi uyum sağlamaktadır. $\sigma \simeq 100 \text{ km s}^{-1}$ içeren galaksiler Güneş'e yakın bolluk oranlarına sahipken, büyük galaksiler α elementlerinin birkaç diğer unsurla birlikte geliştirilir (bkz. Conroy ve diğ. 2014). Özellikle Na, Güneş ölçeği değerine kıyasla cüceler için Güneş'ten önemli ölçüde daha fakir ve dev



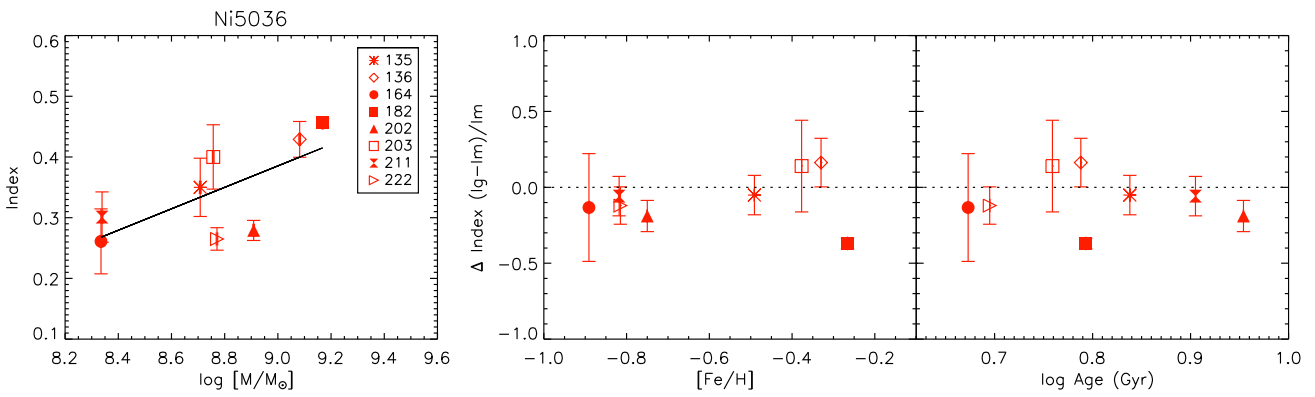
Şekil 5. Yeni tanımlanmış Ti çizgilerinin kütle fonksiyonu olarak değişimi ve PEGASE.HR modelleri ile karşılaştırılması.



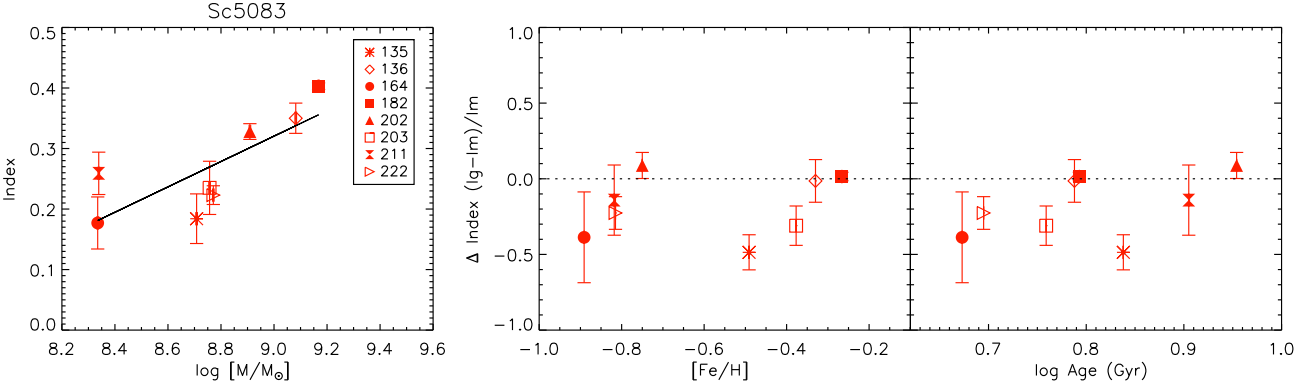
Şekil 6. Yeni tanımlanmış Na çizgisinin kütle fonksiyonu olarak değişimi ve PEGASE.HR modelleri ile karşılaştırılması.



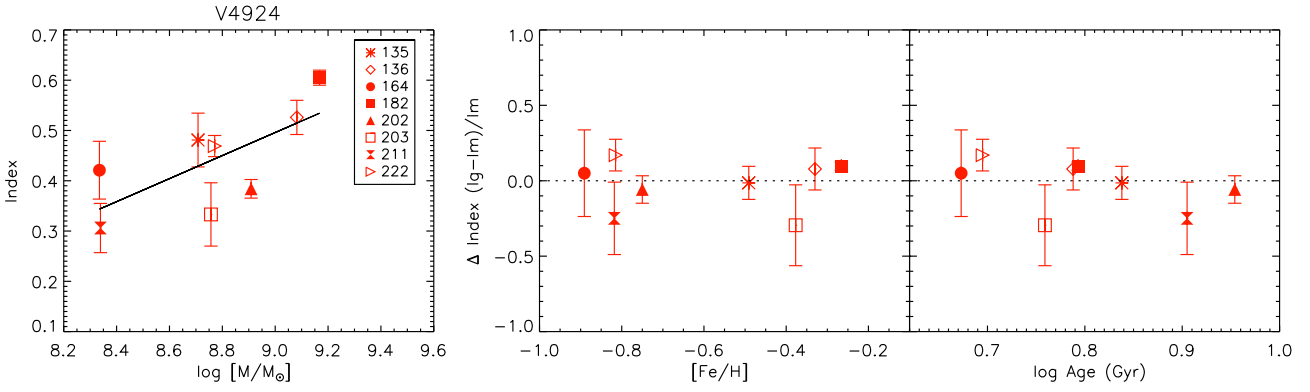
Şekil 7. Yeni tanımlanmış Mn çizgilerinin kütleli fonksiyonu olarak değışimi ve PEGASE.HR modelleri ile karşılatırılması.



Şekil 8. Yeni tanımlanmış Ni çizgisinin kütleli fonksiyonu olarak değışimi ve PEGASE.HR modelleri ile karşılatırılması.



Şekil 9. Yeni tanımlanmış Sc çizgisinin kütlelin fonksiyonu olarak değişimi ve PEGASE.HR modelleri ile karşılaştırılması.



Şekil 10. Yeni tanımlanmış V çizgisinin kütlelin fonksiyonu olarak değişimi ve PEGASE.HR modelleri ile karşılaştırılması.

eliptikler için çok daha yüksek olarak farklı bir ilişki gösterir (ör. Smith ve diğ. 2015; La Barbera ve diğ. 2017).

Bazı önemli unsurları belirtmemiz gerekir. $[\text{Mn}/\text{Fe}]$ 'nin diğer Fe-pik elementlerin bolluk oranlarından biraz daha fakir olduğunu görüyoruz. Bu sonuç muhtemelen dE'lerimizin metalce fakir rejimindeki Galaktik yıldızlar için türetilen $[\text{Mn}/\text{Fe}]$ oranlarıyla tutarlıdır, örneğin $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -0.5$ dex civarında $[\text{Mn}/\text{Fe}] \sim -0.2$ dex'tir. (Gratton 1989; McWilliam ve diğ. 2003). İkinci referans ayrıca Galaktik şişkin bölge ve Sagittarius cücelerindeki $[\text{Mn}/\text{Fe}]$ bolluğunun Güneş metal bolluğundan yaklaşık 0.2 daha düşük olduğunu gösterir. V'nin bolluğu henüz tam olarak belirlenmemiş olsa da, $[\text{V}/\text{Fe}]$ 'nin tüm meatl bolluklarında (Gratton & Sneden 1991) ~ 0.0 dex civarında olduğu düşünülmektedir. Mn eksiklikleri bir nötron aşırı bağımlılığından kaynaklanıyorsa, bu çalışmada yalnızca tek bir çizgi indeksine dayanmamıza rağmen, mevcut dEs örneği için çıkarsandığı gibi V ve Sc'nin de aynı eğilimi izlemesi beklenir.

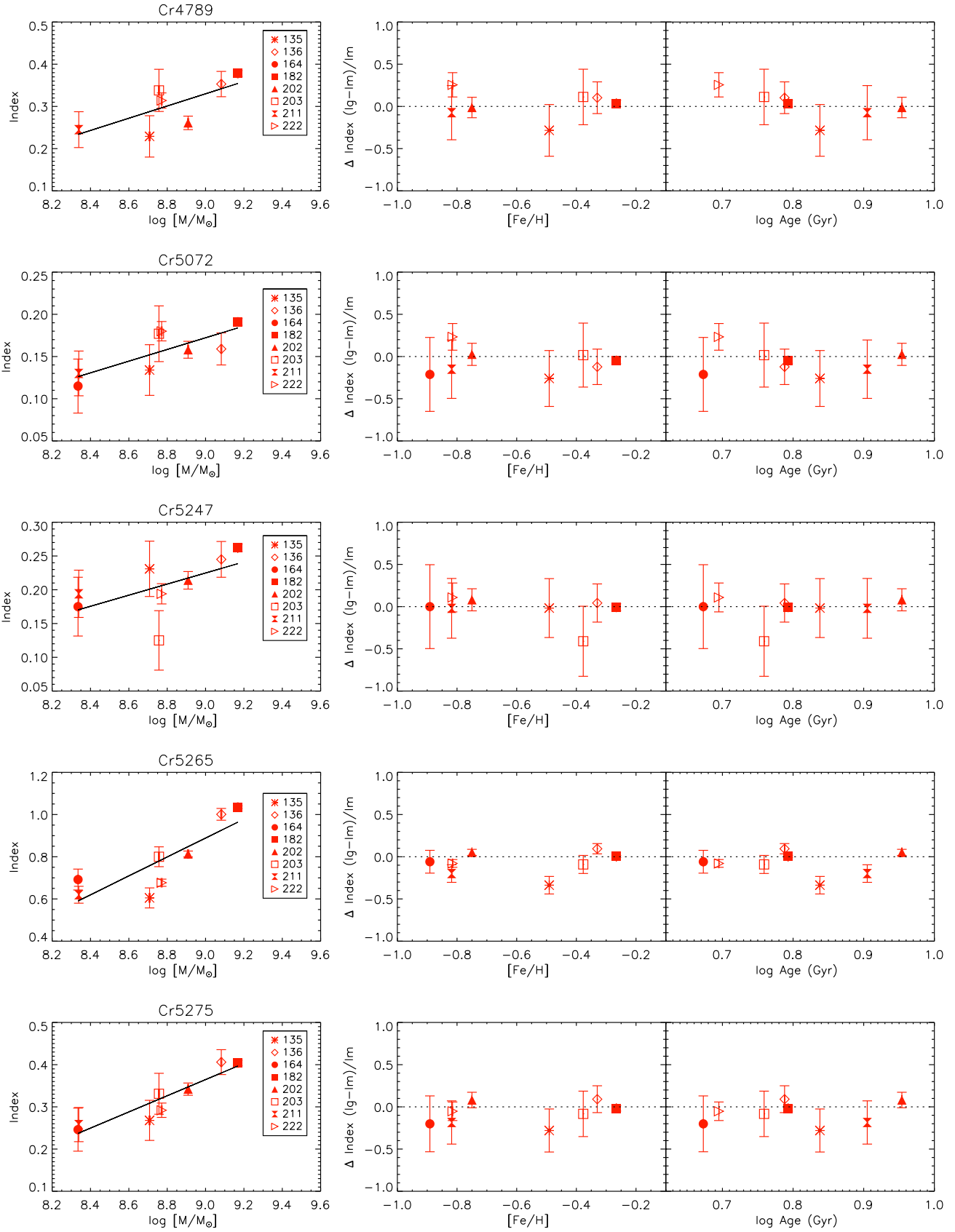
Na, nötron fazlalığına bağlı olarak büyük kütleli yıldızların içlerinde üretilen çok ilginç bir elementtir. Bu da yıldızdaki başlangıç ağır element bolluğuna bağlı olduğu anlamına gelir. dEs'deki modellere kıyasla Na değerlerinin düşük değerler gösterdiğini bulduk. Bu sonuçlar, Virgo dE'leri için $[\text{Na}/\text{Fe}]$ 'nin Güneş metal bolluğuna göre fakir olduğunu gösteren Şen ve diğ. (2018) sonuçlarıyla iyi bir uyum içindedir. Bunun, aşırı miktarda $[\text{Na}/\text{Fe}]$ bolluk oranları gösteren dev eliptikler için bulunan bolluk ile güçlü bir karşıtlık içindedir (örn. Conroy ve diğ. 2014;

La Barbera ve diğ. 2017). Bu bolluk oranı, galaksi kütleliyle de güçlü bir korelasyon gösterir.

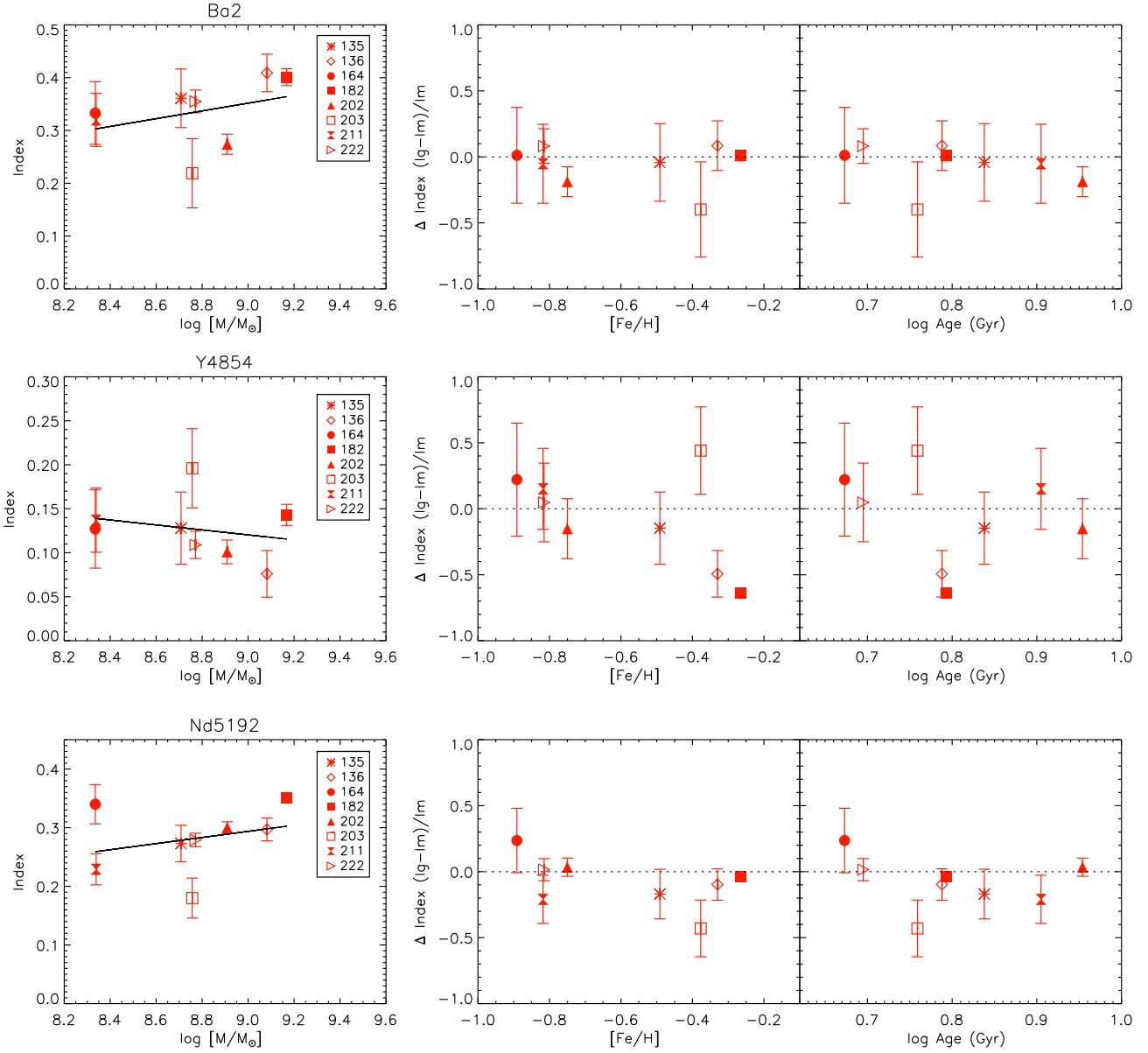
Disk benzeri bolluk oranları ile benzerlikler, dE'lerin oldukça yavaş oluşumlu yıldız oluşturan galaksilerden kaynaklandığını düşündürebilir. dE'lerin çoğunlukla yıldız oluşturan galaksilerin az olduğu yoğun ortamlarda bulunduğu göz önüne alındığında, kümeye ram basıncı sıyırma (örn. Binggeli ve diğ. 1988) yoluyla girerken yıldızlararası ortamlarını yitiren geç türdeki sarmallara veya yıldız oluşturan cücelere (örneğin düzensiz cüceler) işaret eder. Prensipinde galaksi etkileşimlerinin (Moore ve diğ. 1996) bu dönüşüme neden olması da mümkündür, ancak böyle bir durumda kümedeki konumun bir fonksiyonu olarak dE'lerin özelliklerinde şimdiye kadar görülmemeyen önemli değişikliklerin olması beklenir. Yıldız oluşturan cücelerin hareketsiz dE'lere dönüşmesi senaryosu, Scott ve diğ. (2020)'nin son kinematik sonuçlarıyla uyumludur. Bu yazarlar, dEs'deki dönme desteğinin, yıldız oluşturan cücelere benzer veya biraz daha düşük olduğunu göstermektedir. Dönme desteği ile küme merkezli mesafe arasında güçlü bir ilişki bulunamadı. dE'ler, Sd veya Sm galaksileri gibi geç tipteki sarmallardan oluşuyorsa, önemli miktarda açısal momentumun kaybolması gerekir; bu da dönüşümden sorumlu süreç olarak galaksi etkileşimlerini işaret eder.

5 Bulgular

- Bu çalışmada Yerel Grup dışındaki çözülmemiş cüce galaksilerdeki birçok elementin bolluk oranı ilk kez



Şekil 11. Yeni tanımlanmış Cr çizgilerinin kütle fonksiyonu olarak değişimi ve PEGASE.HR modelleri ile karşılaştırılması.



Şekil 12. Yeni tanımlanmış ağır element çizgilerinin (Ba, Y ve Nd) kütlelerin fonksiyonu olarak değişimi ve PEGASE.HR modelleri ile karşılaştırılması.

çalışılmıştır. Bu, dE galaksilerinin sekiz örneği analiz edilerek yapıldı. SAMI kullanılarak $R \approx 5000$ çözünürlükte AAT'de gözlemlendi. Bu bolluk vekilleri, Samanyolu bolluk modelini izleyen model tahminlerine göre göreceli indeks sapmaları olarak elde edilmiştir.

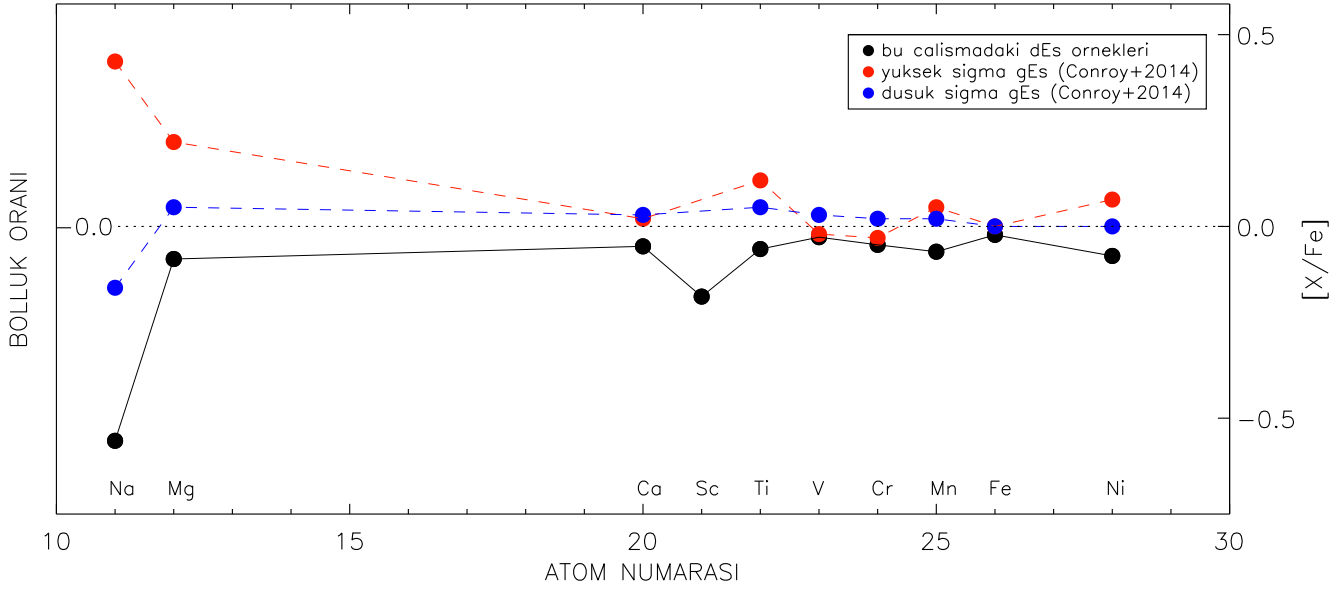
- Venhola ve diğ. (2019) tarafından küme üyeleri olarak sınıflandırılmış sekiz Fornax cüce galaksilerinden oluşan örnekler için yeni yüksek çözünürlüklü indeks sistemimizin soğurma çizgileri analiz edilmiştir.
- Yüksek çözünürlüklü tayf verilerimiz ve düşük hız dağılımı gösteren cüce örneklerimiz sayesinde yeni belirlenen indeks ölçümlerini yapılabilmiş ve bunlar PEGASE.HR modelleriyle karşılaştırarak 11 elemente ait bolluk oranı elde edilmiştir. Örneğimizdeki cüce galaksilerin Güneş metal bolluğuna yakın veya bu değer biraz altında bolluk oranlarına sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu model, büyük kütleli galaksilerin

(Conroy ve diğ. 2014) bolluğunun daha küçük kütlelere çıkarılmasıyla tutarlıdır.

- Bu cüce galaksilerin, Güneş metal bolluğuna göre oldukça fakir [Na/Fe] bolluk oranlarına sahip olduğu bulunmuştur. Bu sonuç, Şen ve diğ. (2018) tarafından yapılan Virgo kümesindeki dE'ler için bulunan [Na/Fe]'nin Güneş bolluğuna göre fakir olduğu sonucu ile uyumludur.
- Bu çalışma, VLT üzerindeki X-Shooter gibi güçlü araçlarla elde edilecek veriler ile küçük kütleli yıldız sistemlerine ilişkin gelecekteki çalışmalar için büyük potansiyele işaret etmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma 118C553 numaralı proje kodu ile Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir.



Şekil 13. Bu çalışmadan elde edilen cüce eliptiklerin element bolluğu ile düşük ve yüksek hız dağılımlı gEs'lerin element bolluk özetleri (Conroy et al. 2014) verilmiştir. Burada belirtilen iki gEs örneğine uygulanan sağ dikey eksende bolluk oranı değerleri gösterilmiştir. Cüce gökadalarmız için bolluk oranı sol dikey eksende gösterilmiştir.

Kaynaklar

- Allen J. T., ve diğ., 2015, *MNRAS*, 451, 2780
 Binggeli B., Sandage A., Tammann G. A., 1988, *ARA&A*, 26, 509
 Bland-Hawthorn J., ve diğ., 2011, *Optics Express*, 19, 2649
 Bryant J. J., O'Byrne J. W., Bland-Hawthorn J., Leon-Saval S. G., 2011, *MNRAS*, 415, 2173
 Bryant J. J., Bland-Hawthorn J., Fogarty L. M. R., Lawrence J. S., Croom S. M., 2014, *MNRAS*, 438, 869
 Caldwell N., Rose J. A., Concannon K. D., 2003, *AJ*, 125, 2891
 Cardiel N., Gorgas J., Sánchez-Blázquez P., Cenarro A. J., Pedraz S., Bruzual G., Klement J., 2003, *A&A*, 409, 511
 Conroy C., Graves G. J., van Dokkum P. G., 2014, *ApJ*, 780, 33
 Croom S. M., ve diğ., 2012, *MNRAS*, 421, 872
 Gorgas J., Pedraz S., Guzmán R., Cardiel N., González J. J., 1997, *ApJ*, 481, L19
 Gratton R. G., 1989, *A&A*, 208, 171, *ADS*
 Gratton R. G., Sneden C., 1991, *A&A*, 241, 501, *ADS*
 Hamraz E., Peletier R. F., Khosroshahi H. G., Valentijn E. A., den Brok M., Venhola A., 2019, *A&A*, 625, A94
 Koleva M., de Rijcke S., Prugniel P., Zeilinger W. W., Michielsen D., 2009, *MNRAS*, 396, 2133
 Koleva M., Prugniel P., de Rijcke S., Zeilinger W. W., 2011, *MNRAS*, 417, 1643
 La Barbera F., Vazdekis A., Ferreras I., Pasquali A., Allende Prieto C., Röck B., Aguado D. S., Peletier R. F., 2017, *MNRAS*, 464, 3597
 Le Borgne D., Rocca-Volmerange B., Prugniel P., Lançon A., Fioc M., Soubiran C., 2004, *A&A*, 425, 881
 McWilliam A., Rich R. M., Smecker-Hane T. A., 2003, *ApJ*, 592, L21
 Michea J., Pasquali A., Smith R., Calderón-Castillo P., Grebel E. K., Peletier R. F., 2022, preprint, ([arXiv:2205.06281](https://arxiv.org/abs/2205.06281)), *ADS*
 Michielsen D., ve diğ., 2008, *MNRAS*, 385, 1374
 Moore B., Katz N., Lake G., Dressler A., Oemler A., 1996, *Nature*, 379, 613
 Paudel S., Lisker T., Kuntschner H., Grebel E. K., Glatt K., 2010, *MNRAS*, 405, 800
 Prugniel P., Soubiran C., 2001, *A&A*, 369, 1048
 Prugniel P., Soubiran C., 2004, *ArXiv Astrophysics e-prints*, , *ADS*
 Ryś A., Koleva M., Falcón-Barroso J., Vazdekis A., Lisker T., Peletier R., van de Ven G., 2015, *MNRAS*, 452, 1888
 Sandage A., Binggeli B., 1984, *AJ*, 89, 919
 Scott N., ve diğ., 2020, *MNRAS*, 497, 1571
 Skillman E. D., Kennicutt R. C., Hodge P. W., 1989, *ApJ*, 347, 875
 Smith R., ve diğ., 2015, *MNRAS*, 454, 2502
 Sybilka A., ve diğ., 2017, *MNRAS*, 470, 815
 Sybilka A., Kuntschner H., van de Ven G., Vazdekis A., Falcón-Barroso J., Peletier R. F., Lisker T., 2018, *MNRAS*, 476, 4501
 Toloba E., ve diğ., 2014, *ApJS*, 215, 17
 Vazdekis A., 1999, *ApJ*, 513, 224
 Vazdekis A., 2001, *Ap&SS*, 276, 839
 Vazdekis A., Peletier R. F., Beckman J. E., Casuso E., 1997, *ApJS*, 111, 203
 Venhola A., ve diğ., 2018, *A&A*, 620, A165
 Venhola A., ve diğ., 2019, *A&A*, 625, A143
 Şen Ş., ve diğ., 2018, *MNRAS*, 475, 3453
 Şen Ş., Peletier R. F., Vazdekis A., 2022, *MNRAS*, 515, 3472
 den Brok M., ve diğ., 2011, *MNRAS*, 414, 3052

Access:

M23-0377: *Turkish J.A&A* — Vol.4, Issue 3.