

Galaksi Merkezine Zıt Doğrultuda Galaktik Model Parametreleri

Serap Ak, Selçuk Bilir, Salih Karaali, Yüksel Karataş

İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 34119, Üniversite-İstanbul
akserap-sbilir-karsa-karatas}@istanbul.edu.tr

Özet: Bu çalışmada, Galaktik koordinatları $l = 181.88^\circ$, $b = -45^\circ.19$ olan 8 derece karelik bir yıldız alanı, Sloan fotometrisi ile, $g'_o = 19.5$ limit kadire kadar incelenerek Galaksimize ait model parametreleri tayin edilmiştir. Çalışmanın en önemli özelliği, İ.Ü.F.F. Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü'nde Galaktik yapı üzerinde çalışan araştırmacılar tarafından geliştirilen ve literatüre kazandırılan yeni yöntemlerin kullanılmasıdır: a) Mutlak kadirler yıldızların metal bolluğunun bir fonksiyonu olarak elde edilmiştir (Karaali ve ark. 2004a), b) Metal bolluğu yeni bir formülle tayin edilmiştir (Karaali ve ark. 2003a, 2004a), c) Yıldızların popülasyon sınıflarına ayırımında Karaali'nin (1994) uzay dağılımları yönteminin iyileştirilmiş bir şekli kullanılmıştır (Karaali ve ark. 2004b) ve d) model parametresi tayininde teorik ve gözlemsel uzay yoğunlukları her popülasyon için ve belli bir popülasyonun her mutlak kadir aralığı için ayrı ayrı karşılaştırılmıştır (Karaali ve ark. 2003b, 2004b). Bu yeni uygulama, model parametrelerinin büyük bir doğrulukla tayinine olanak verdiği gibi bunların mutlak kadirin bir fonksiyonu olduğu görüşünü de desteklemektedir. Evrimleşmemiş G tayf türündeki yıldızlardan, Galaksi diski için $d[M/H]/dz = -0.28 \pm 0.02$ dex kpc^{-1} lik bir metal gradiyenti elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Galaksi: Yapı – Galaksi: Yıldız popülasyonları – Galaksi: Genel

Abstract: We estimated the Galactic model parameters by means of Sloan photometry for a given star field ($l = 181.88^\circ$, $b = -45^\circ.19$, 8 square-degree) down to limiting apparent magnitude $g'_o = 19.5$. We used several methods either new or developed ones by us in recent years: a) Absolute magnitudes were derived as a function of metallicity (Karaali et al. 2004a), b) Metallicities were determined by a new formula (Karaali et al. 2003a, 2004a), c) The separation of stars into different population types is carried out by their spatial distribution (Karaali et al. 2004b), a developed method of Karaali (1994), and d) The Galactic model parameters were estimated by comparison of the observed and theoretical space densities for each population and for each absolute magnitude interval of the corresponding population. This process allows accurate Galactic model parameters and confirm the argument that these parameters are absolute magnitude dependent. A metallicity gradient of $d[M/H]/dz = -0.28 \pm 0.02$ dex kpc^{-1} could be revealed for the unevolved G type stars.

Key words: Galaxy: Structure – Galaxy: Stellar Populations – Galaxy: General

1. Giriş

Galaksimizin yapısının öğrenilmesinde modellerin önemli bir yeri vardır. Disk ve halo bileşeninden ibaret Galaksimize ait ilk modeli Bahcall ve Soneira (1980) oluşturdu. Günümüzde, disk ve halo bileşenlerinden başka kalın disk adını verdikleri üçüncü bir bileşeni içeren Gilmore ve Wyse'in (1985) modeli kabul edilmektedir. Galaksi düzleminden dik doğrultuda veya Galaksi merkezinden yarıçap doğrultusunda uzaklaştıkça yıldız sayılarının veya uzay yoğunluklarının (birim hacimdeki yıldız sayısının) değişimi ile ilgili fizik kanunları bellidir. Yapılacak iş bu kanunlardaki parametrelerin tayinidir. Yaklaşık 20 yıldan beri Galaksimizin farklı doğrultularında CCD görünümüne tekniğinin de kullanıldığı çalışmalar

yapılmasına rağmen model parametrelerinin tayini ile ilgili işlemler henüz tamamlanamamıştır. Belli bir popülasyon için farklı araştırmacılar farklı değerler vermekte veya belli bir parametre için ya geniş bir değişim aralığı veya büyük bir hata vermektedirler. Bunun sebebi kullanılan yöntemlerden kaynaklanmaktadır. Örneğin, mutlak kadir tayininde bir popülasyon için, o popülasyonun temsil edildiği metal bolluğunda olan bir renk kadir diyagramı kullanılmakta ve o popülasyonda olan bütün yıldızların mutlak kadirleri bu diyagramdan tayin edilmektedir. Halbuki, Karaali ve ark. (2004a) mutlak kadirlerin bir yıldızın metal bolluğunun fonksiyonu olarak daha doğru bir şekilde hesaplanabileceğini göstermişlerdir. Çalışmamızda mutlak kadir tayini için bu yeni yöntemi kullandık. Metal bolluğu tayini için de yine Karaali ve ark.'nın (2004a) çalışmasındaki yöntem kullanıldı. Literatürde, popülasyon tiplerine ayırım belli bir renk indeksi için çizilen histograma göre

yapılmaktadır (Phleps ve ark. 2000, Chen ve ark. 2001). Oysa, yıldızların uzay dağılımları yöntemi (Karaali 1994) çok daha duyarlı ayırımı yapmaya uygundur. Ayrıca bugün, bu yöntem iyileştirilmiş olarak kullanılmaktadır (Karaali ve ark. 2004b). Çalışmamızda popülasyon ayırımı için bu yöntemi kullandık.

Literatürde, bütün popülasyonlara (ince disk, kalın disk ve halo) ait teorik ve gözlemsel veriler karşılaştırılarak her bir popülasyona ait model parametreleri eş zamanlı olarak elde edilmektedir. Halbuki, yıldızları popülasyon tiplerine büyük bir doğrulukla ayırabildiğimize göre, model parametreleri her bir popülasyon için ayrı ayrı tayin edilebilir, Karaali ve Bilir (2002) ve Bilir'in (2002) çalışmasında olduğu gibi. Bu konuya son bir örnek olarak, sadece her bir popülasyon için model parametresi tayini ile yetinilmeyip o popülasyona ait parametrelerin mutlak kadirin bir fonksiyonu olarak da tayin edildiği Karaali ve ark.'nın (2004b) çalışmasını verebiliriz. Ayrıca, bu yöntemin çalışmamızda da başarılı bir şekilde uygulandığını belirtelim.

2. Veri ve İndirgemeler

8 derece kare büyüklüğündeki yıldız alanının merkezi koordinatları $\alpha = 3^h 20^m 00^s$, $\delta = 00^\circ 00' 00''$; $l = 181^\circ.88$, $b = -45^\circ.19$ (epok 2000) dir. Bu alanda $g_0 = 26$ limit kadire kadar 64213 kaynak Sloan fotometrisinin beş bandında (u', g', r', i', z') gözlenmiştir. Veriler, Sloan Dijital Gökyüzü Taraması (SDSS) nın Birinci Veri Sunumunun (Data Release 1, DR1) WEB sitesinden²⁸ alınmıştır. Kaynaklar kızarmadan arındırılmıştır.

Yıldız alanındaki galaksi-dışı cisimlerin belirlenmesinde, Sloan bandlarında hesaplanan "yıldızlımsılık" indeksi ile Fan'a (1999) ait renk simülasyonları kullanılmıştır. Böylece, 64213 kaynağın 6230 tanesi "yıldız" olarak sınıflandırılmıştır. Yıldız örneğinin sönük uçtaki tamlık sınırı $g_0 = 19.5$ kadir olarak belirlenmiştir.

(14-19.5] görünen kadir aralığında (g'-r'), (r'-i'), (i'-z') renklerine ait hatalar ± 0.03 kadir iken (u'-g') rengine ait hatalar parlak görünen kadirler-den sönük görünen kadirlerle doğru (± 0.03) ten (± 0.13) değerine artmaktadır. Yıldızların mutlak kadir ve metal bolluğu tayini bu bildiri kitapçığının ilgili bölümünde Karaali ve ark. tarafından verilmiştir.

3. Galaktik Model Parametreleri

3.1. Farklı popülasyon ve mutlak kadirler için Galaktik model parametreleri

Yıldızların popülasyon ayırımı Karaali ve ark. (2004b) tarafından görünen ve mutlak kadirin bir

fonksiyonu olarak geliştirilmiş "uzay dağılımları" yöntemine göre yapılmıştır. Bu yöntem, yıldızların galaksi düzlemine olan dik uzaklık, $z = r \sin(b)$, ve frekans sayıları arasındaki ilişkidir yıldız popülasyonlarının ayırımına olanak sağlar (Karaali 1994).

Geliştirilmiş uzay dağılımı yöntemi, Sloan fotometrisine ilk defa bu çalışmada uygulanmıştır. Yıldızların, (14-19.5] görünen kadir aralığı için (4-5], (5-6], (6-7], (7-8] ardışık mutlak kadir aralıklarında uzay dağılımlarını gösteren (N-z) diyagramları oluşturulmuş ve popülasyon tiplerine ayırımı yapılarak gözlemsel yoğunluk fonksiyonları bulunmuştur. Popülasyonlara ait teorik yoğunluk kanunları literatürde verildiği gibi hesaplanmıştır.

Teorik ve gözlemsel uzay yoğunluklarının karşılaştırılmasında χ^2 istatistiği uygulanmıştır. Şekil 1 ve 2'de, bu karşılaştırmadan bulunan model parametreleri ise Tablo 1'de verilmiştir. Halo yıldızları istatistiksel olarak sadece (4-5] mutlak kadir aralığında etkin olduğundan, buna ait şekil verilmemiştir.

Mutlak kadirin fonksiyonu olarak hesaplanan parametreler için şunlar söylenebilir:

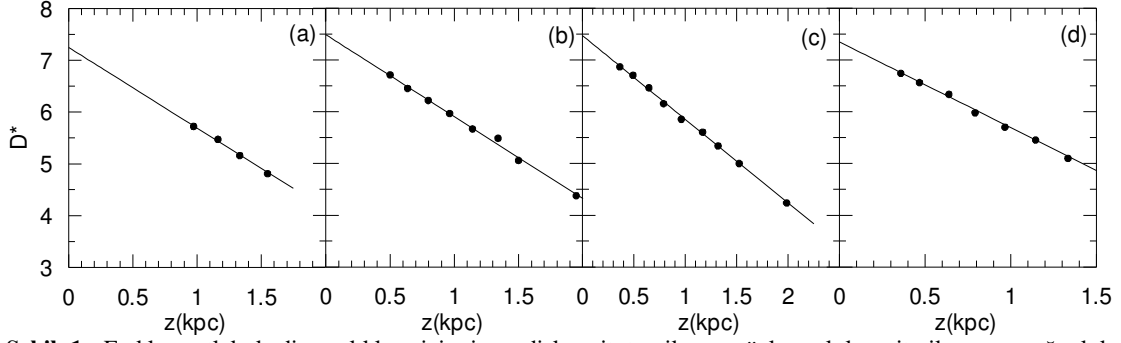
i) İnce disk yıldızlarının yükseklik ölçeği parlak mutlak kadirlerle doğru artmakta olup bu artış hata sınırları içinde kalmaktadır.

ii) Yeterli sayıda kalın disk yıldızı bulunmayan (7-8] mutlak kadir aralığı hariç, kalın disk yıldızlarının yükseklik ölçeği parlak mutlak kadirlerle doğru artmaktadır.

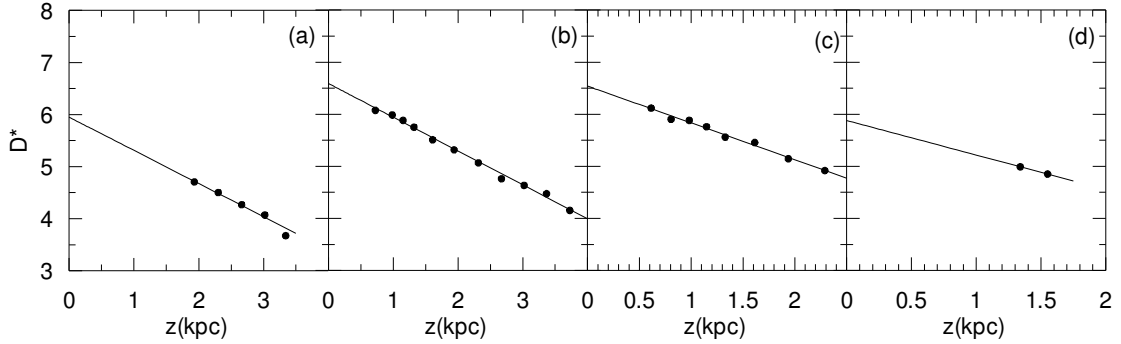
iii) Güneş civarındaki kalın disk yıldızlarının, göreceli uzay yoğunluğu (5-6] mutlak kadir aralığında %12.59 ile en büyük iken, (7-8] ve (4-5] mutlak kadir aralıklarında, sırası ile, %3.39 ve %5.01 dir. Bu bulgu popülasyonlara ait lokal uzay yoğunluklarının mutlak kadirin bir fonksiyonu olduğunu göstermektedir.

iv) (4-5] mutlak kadir aralığında halo yıldızlarının göreceli uzay yoğunluğu %0.17, literatürde verilen değerler ile uyum içerisindedir (Gilmore ve Reid 1983, Siegel ve ark. 2002). Bu çalışmada haloya ait basıklık $c/a = 0.37 \pm 0.03$ olup literatürde şimdiye kadar hesaplanan en küçük değerlerden biridir. Son zamanlarda, Lemon ve ark. (2004) tarafından Galaksinin halosu üzerine yapılan araştırmada basıklık $c/a = 0.45 \pm 0.1$ olarak verilmektedir. Görüldüğü gibi her iki çalışmaya ait değerler hata sınırları içinde yer almaktadır. Bununla birlikte bu değer görünen limit kadirin sönük olmamasından kaynaklanabilir.

²⁸<http://www.sdss.org/dr1/access/index.html>



Şekil 1. Farklı mutlak kadir aralıkları için ince diske ait teorik ve gözlemsel logaritmik uzay yoğunluk fonksiyonlarının karşılaştırılması (a) (4-5], (b) (5-6], (c) (6-7], (d) (7-8]. Katı çizgi model parametrelerinden bulunan teorik yoğunluk fonksiyonunu ve (•) gözlemsel uzay yoğunluk değerini göstermektedir.



Şekil 2. Farklı mutlak kadir aralıkları için kalın diske ait teorik ve gözlemsel logaritmik uzay yoğunluk fonksiyonlarının karşılaştırılması (a) (4-5], (b) (5-6], (c) (6-7], (d) (7-8]. Semboller Şekil 1'deki gibidir.

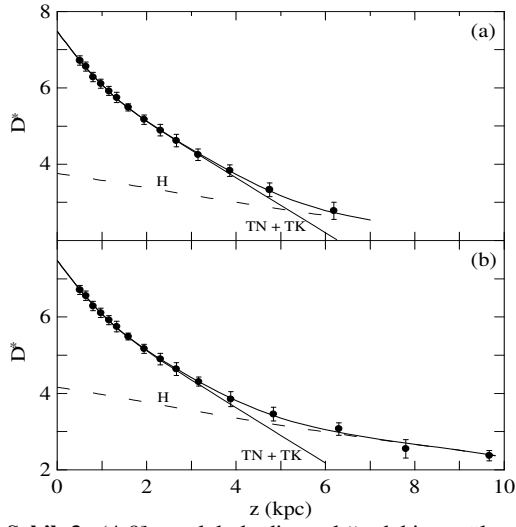
3.2. Birim mutlak kadire göre Galaktik model parametreleri

Literatürde Galaksi modellerine ait parametreler, yıldızlar popülasyon tiplerine ayrılmadan, birim mutlak kadir için hesaplanan logaritmik uzay yoğunlukları ile teorik yoğunlukların karşılaştırılmasından tayin edilir (Phleps ve ark. 2000, Siegel ve ark. 2002, Du ve ark. 2003). Ayrıca popülasyonlara ait model parametreleri eş zamanlı olarak hesaplanır. Bölüm (3.1)'de bulunan parametrelerle karşılaştırmak amacı ile çalışmamızda bu yöntemi de uyguladık. Uygulamada iki yol izlendi; birincide görünen limit kadir $g'_0 = 19.5$, ikincide ise $g'_0 = 21.0$ alındı. Yukarıda da belirtildiği gibi, sönük kadirler gidildikçe parlaklıklara ait hatalar artmaktadır, iki görünen limit kadir verilmesi bundan kaynaklanmaktadır. Chen ve ark.'na (2001) göre halo bileşni $g'_0 > 18.0$ kadir aralığı için etkin olduğundan, $g'_0 = 21.0$ limit kadiri için halo parametrelerinin farklı olması beklenir.

(4-8] mutlak kadir aralığı için teorik ve gözlemsel logaritmik uzay yoğunluklarının karşılaştırılması Şekil 3'te yapılmış ve elde edilen parametreler Tablo 2'de gösterilmiştir. Daha fazla bilgi Bölüm (5)'te verilmiştir.

Tablo 1. Mutlak kadirin bir fonksiyonu olarak hesaplanan galaktik model parametreleri: n Güneş civarında (lokal) logaritmik uzay yoğunluğu, H yükseklik ölçeği (pc), χ^2 istatistiği (10^{-10}), n_i / n_1 : popülasyonların yoğunluk oranları (%) olup (i=1, 2, 3), sırası ile, ince disk (TN), kalın disk (TK) ve halo (H) gösterir.

Pop	M(g')	n	H	χ^2	n_2/n_1
TN	(7-8]	$7.35^{+0.02}_{-0.04}$	262^{+06}_{-10}	57559	
TK	(7-8]	5.88	655	-	3.39
TN	(6-7]	$7.47^{+0.03}_{-0.03}$	269^{+08}_{-07}	77556	
TK	(6-7]	$6.54^{+0.04}_{-0.04}$	615^{+36}_{-29}	36624	11.75
TN	(5-6]	$7.49^{+0.03}_{-0.03}$	274^{+08}_{-06}	47851	
TK	(5-6]	$6.59^{+0.04}_{-0.04}$	670^{+32}_{-30}	33353	12.59
TN	(4-5]	$7.25^{+0.02}_{-0.02}$	279^{+04}_{-03}	2631	
TK	(4-5]	$5.95^{+0.04}_{-0.04}$	682^{+17}_{-16}	798	5.01
Pop	M(g')	n	e	χ^2	n_3/n_1
H	(4-5]	$4.48^{+0.06}_{-0.06}$	$0.37^{+0.04}_{-0.02}$	110	0.17



Şekil 3. (4-8] mutlak kadir aralığındaki popülasyonların birleştirilmiş gözlemsel uzay yoğunluk fonksiyonları ile teorik yoğunluk fonksiyonlarının karşılaştırılması. (a) $g'_0 = 19.5$ ve (b) $g'_0 = 21.0$ limit kadirine kadar.

Tablo 2. $g'_0 = 19.5$ ve $g'_0 = 21.0$ limit kadire kadar (4-8] mutlak kadir aralığındaki yıldızların birim mutlak kadire indirgenmiş sayılarından hesaplanan model parametreleri.

$g'_0 = 19.5$			
Parametre	İnce Disk	Kalın Disk	Halo
n	$7.42^{+0.03}_{-0.04}$	$6.52^{+0.05}_{-0.05}$	$3.80^{+0.98}_{-1.00}$
H (pc)	260^{+08}_{-08}	604^{+39}_{-35}	-
n_2/n_1 (%)	-	12.59	0.02
c/a	-	-	$0.65^{+0.35}_{-0.30}$
$g'_0 = 21.0$			
Parametre	İnce Disk	Kalın Disk	Halo
n	$7.42^{+0.03}_{-0.04}$	$6.52^{+0.05}_{-0.05}$	$4.20^{+0.68}_{-1.00}$
H (pc)	260^{+08}_{-08}	600^{+39}_{-37}	-
n_2/n_1 (%)	-	12.59	0.06
c/a	-	-	$0.57^{+0.35}_{-0.30}$

4. Metal Bolluğu Gradiyenti

Alan yıldızlarının metal bolluğu, Karaali ve ark.'nın (2004a) Sloan fotometrisi için vermiş olduğu bağıntıdan hesaplanmıştır.

Evrimselmemiş G tayf sınıfına denk gelen (5-6] mutlak kadir aralığındaki yıldızların metal bolluğu dağılımı ortalama z uzaklığının bir fonksiyonu olarak elde edilmiş ve $d[M/H]/dz = -0.28 \pm 0.02$

dex kpc^{-1} lik bir metal bolluğu gradiyenti bulunmuştur.

5. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, Galaktik koordinatları $l = 181.88^\circ$, $b = -45^\circ.19$ olan 8 derece karelik bir yıldız alanında, $g'_0 = 19.5$ limit kadire kadar Sloan fotometrisi yardımı ile Galaksimize ait yıldız popülasyonlarının model parametreleri belirlenmiştir. Alan yıldızlarının mutlak kadir ve metal bolluğu hesabı literatüre yeni kazandırılan yöntemler ile yapılmıştır (Karaali ve ark. 2004a). Galaktik model parametreleri, (4-8] mutlak kadir aralığındaki yıldızların uzay yoğunluk fonksiyonlarından itibaren farklı iki yöntem ile incelenmiştir: İlk yöntemde farklı popülasyonlar ve farklı mutlak kadir aralıkları, ikinci yöntemde ise literatürde yapıldığı gibi, birim mutlak kadir için hesaplanmıştır.

İlk yöntemde göre; disk yıldızlarının yükseklik ölçeği, parlak mutlak kadirlere doğru artmaktadır. İnce diskin yükseklik ölçeği (262-279) pc, kalın diskin yükseklik ölçeği ise (615-682) pc aralığında değişmektedir. Kalın disk yıldızlarının göreceli uzay yoğunluk oranı, mutlak kadirin bir fonksiyonu olarak % (3.39 – 12.59) arasında değişmektedir. Bu yöntemde, Galaksimizin halo bileşeni (4-5] mutlak kadir aralığında etkindir. Halonun güneş civarındaki göreceli uzay yoğunluğu son zamanlarda yapılan çalışmalar ile uyum içersindedir (Robin ve ark, 2000; Siegel ve ark. 2002). Haloya ait basınlık $c/a = 0.37 (\pm 0.04)$ şimdiye kadar hesaplanan en küçük değer olup, Lemon ve ark. (2004) nın Galaksimizin halosu için hesapladıkları $c/a = 0.45 (\pm 0.1)$ basınlık değeri ile hata sınırı içinde uyumludur. Halo için bulduğumuz $c/a = 0.37$ lik basınlık değeri limit kadiri $g'_0 = 19.5$ olarak almamızdan kaynaklanmaktadır.

İkinci yöntemde göre ince ve kalın diske ait yükseklik ölçekleri, sırası ile, $H = 260$ ve $H = 604$ pc ve haloya ait basınlık ise $c/a = 0.65$ olarak hesaplanmıştır. Kalın disk ve halo yıldızlarının göreceli uzay yoğunlukları, sırası ile, % 12.59 ve %0.02 dir. Bu yöntemle hesaplanan parametreler farklı mutlak kadir aralıkları için hesaplanan sonuçlar ile bire bir aynı değildir. $g'_0 = 19.5$ limit kadire kadar haloya ait göreceli uzay yoğunluk değeri %0.02 olup literatür ile pek uyumlu değildir. Ancak, bunu açıklamak mümkündür: Chen ve ark. (2001) nın gösterdikleri gibi halo yıldızları $g'_0 > 18$ kadirden sonra etkin olmaya başlar. Yıldızların renk hataları ve tamlık sınırı dikkate alınmaksızın, $g'_0 = 21$ limit kadirene kadar yapılan çalışmada haloya ait göreceli uzay yoğunluğu %0.06 ve basınlık $c/a=0.57$ bulunmuştur. Bu yoğunluk, Robin ve ark. (2003) nın $M(V) < 8$ mutlak kadir için verdikleri %0.06 değeri ile bire bir aynı, halonun basınlığı ise Chen ve ark. (2001) nın $c/a=0.55$ değerine yakındır.

Her iki yöntemden elde edilen ışımaya gücü fonksiyonu Hipparcos'dan bulunan güneş civarındaki logaritmik ışımaya gücü fonksiyonu ile uyum içerisindedir (Tablo 3). Ancak mutlak kadire bağlı yeni yöntemden bulunan ışımaya gücü fonksiyonu Hipparcos'a ait güneş civarındaki ışımaya gücü fonksiyonu ile daha uyumludur. Bu da, Galaksi model parametrelerinin mutlak kadirin bir fonksiyonu olduğunu göstermektedir.

$0.8 < z \leq 1.7$ kpc uzaklık aralığında verdiğimiz metal bolluğu gradyenti $d[M/H]/dz = -0.28 \pm 0.02$ dex kpc⁻¹ dir. Metal bolluğu gradyenti, ince disk ile kalın diskin geçiş bölgesinde ve kalın diskin etkin olduğu ortalama metal bolluğu değerinde bulunmaktadır. Örneğimize ait metal bolluğu gradyenti, Karaali ve ark.'nın (2003b) Galaksinin hemen hemen aynı z uzaklığı için verdikleri $d[M/H]/dz = -0.28 \pm 0.05$ dex kpc⁻¹ değeri ile uyumludur.

Tablo 3. Farklı iki yöntemle göre hesaplanan model parametrelerinden bulunan ışımaya gücü değerleri. $M(g')$ mutlak kadir aralığı, (\odot) Hipparcos'dan hesaplanan Güneş civarındaki ışımaya gücü, (φ^*) iki farklı yöntemden bulunan ışımaya gücü değerleri, (s) yöntemlere ait standart sapma.

$M(g')$	Hipparcos		Yeni yöntem		Literatürdeki yöntem	
	\odot	φ^*	s	φ^*	s	s
(4-5]	7.30	7.27	0.04	7.14	0.16	
(5-6]	7.47	7.54	0.03	7.65	0.05	
(6-7]	7.47	7.52	0.03	7.52	0.05	
(7-8]	7.47	7.36	0.03	7.17	0.12	

6. Kaynaklar

- Bahcall J.N., Soneira R.M., 1980, ApJS, 44, 73
 Bilir, S., 2002, Doktora Tezi, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü
 Chen B., Stoughton C., Smith J. A., Uomoto A., Pier J.R., Yanny B., ve SDSS Çalışanları, 2001, ApJ, 553, 184.
 Du C., Zhou X., Ma J., Bing-Chih Chen A., Yang Y., Li J., Wu H., Jiang Z., Chen J., 2003, A&A, 407, 541
 Fan X., 1999, AJ, 117, 2528
 Gilmore G., Reid N., 1983, MNRAS, 202, 1025
 Gilmore G., Wyse R.F.G., 1985, AJ, 90, 2015
 Karaali S., 1994, A&AS, 106, 107
 Karaali S., Bilir S., 2002, İ.Ü. Araştırma Fonu Projesi, No : 1417/05052000
 Karaali S., Bilir S., Karataş Y., Ak S.G., 2003a, PASA, 20, 165
 Karaali S., Ak S.G., Bilir S., Karataş Y., Gilmore G., 2003b, MNRAS, 343, 1013
 Karaali S., Bilir S., Tunçel S., 2004a, PASA, kabul edildi
 Karaali S., Bilir S., Hamzaoğlu E., 2004b, MNRAS, kabul edildi
 Lemon D.J., Wyse R. F.G., Liske J., Driver S.P. Phleps S., Meisenheimer K., Fuchs B., Wolf C., 2000, A&A, 356, 10
 Robin, A. C., Reylé, C., Crézé, M. 2000, A&A, 359, 103
 Robin, A. C., Reylé, C., Derrière, S., Picaud, S. 2003, A&A, 409, 523
 Siegel M.H., Majewski S.R., Reid I.N., Thompson I.B., 2002, ApJ, 578, 151