

Güneş Civarındaki Anakol Yıldızlarının Işıma Gücü Fonksiyonunun Gaia Verileriyle Belirlenmesi

Doğru Deniz Bulut,[★] S. Tunçel Güçtekin

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

Accepted: January 26, 2022. Revised: January 19, 2022. Received: December 20, 2021.

Özet

Bu çalışmada, *Gaia* uydusunun erken üçüncü veri sürümü *Gaia* EDR3 kataloğundan seçilen yaklaşık 39 milyon anakol yıldızından Güneş civarını temsil eden ışımaya gücü fonksiyonları elde edilmiştir. Geniş bir mutlak parlaklık aralığında tanımlı ışımaya gücü fonksiyonlarının elde edilmesinde farklı uzaklıklarda ve üç farklı göreceli paralaks hatasına sahip yıldızlar kullanılmıştır. Bu çalışmadaki bulgular literatürde uzaklığı 100 pc için verilen ışımaya gücü fonksiyonunun, göreceli paralaks hataları $\sigma_{\varpi}/\varpi \leq 0.10$, mutlak parlaklıkları $2 < M_G \leq 13$ kadir aralığında ve 175 pc'lik uzaklık içindeki anakol yıldızlarından elde edilen ışımaya gücü fonksiyonuyla uyumlu olduğunu göstermiştir.

Abstract

In this study, we obtained luminosity function (LF) of 39 million main sequence (MS) stars in the Solar Neighborhood selected from *Gaia* Early Data Release 3 (*Gaia* EDR3). The LFs are revealed from the stars having different distances and three different relative parallax errors, and are analysed in a broad absolute magnitude range. The findings of our study for the stars located at a 175 pc distance, having relative parallax error of $\sigma_{\varpi}/\varpi \leq 0.10$, and absolute magnitude $2 < M_G \leq 13$ are compatible with the study in literature which was done with the stars in Solar Neighborhood of 100 pc.

Anahtar Kelimeler: Stars: luminosity function – Hertzsprung-Russell and Color-brightness diagram – Sun neighborhood

1 Giriş

Güneş civarındaki yıldızların uzay dağılımlarına yönelik incelemeler gökbilimcilerin yıldız paralakslarını duyarlı olarak ölçmeye başladığı 20. yüzyılın başından beri önemli ölçüde artmıştır. [Gliese \(1957\)](#)'in 20 pc içinde 915 yıldızın trigonometrik paralaks verilerini literatüre kazandırmasıyla birlikte yıldızların Güneş civarındaki dağılımlarına yönelik ilk çalışma başlatılmıştır. Zaman içerisinde yakın yıldızlar kataloğu, [Gliese & Jahreiß \(1991\)](#) tarafından 25 pc uzaklığa genişletilmiş ve yıldız sayısı 3,803'e çıkartılarak derlenmiştir. 1989 yılında *Hipparcos* uydusunun uzaya atılmasıyla birlikte yakın yıldızların fotometrik ve astrometrik gözlemleri uzaydan yapılabilir hale gelmiştir. Uydunun görevi tamamlaması, verilerin *Hipparcos* konsorsiyumu tarafından analiz edilmesi ve literatüre kazandırılması sonucu 25 pc'lik uzay hacmi içinde yakın yıldızların sayısı 5,835'e ulaşmıştır ([ESA 1997](#)). Yakın yıldızlar kataloğu kullanılarak yapılan çalışmalar farklı mutlak parlaklıkta bulunan yıldızların tamlıkları ve hassas trigonometrik paralaks verileriyle sınırlı kalmıştır. *Gaia* uydusunun 19 Aralık 2013 tarihinde uzaya gönderilmesiyle Güneş civarındaki yıldızların $G = 20.7$ limit parlaklığına kadar duyarlı astrometrik gözlemlerinin yapılabilmesi söz konusu olmuştur. *Gaia* uydusu verilerinin erken üçüncü veri sürümünün ([Gaia Collaboration et al. 2021a](#)) literatüre kazandırılmasıyla mevcut yıldız kataloğu, *Gaia* yakın yıldızlar kataloğu (GYK) ismini almıştır ([Gaia Collaboration et al. 2021b](#)). *Gaia* konsorsiyumundaki araştırmacıların oluşturduğu GYK, 100 pc içinde M8 tayf türüne kadar tüm yıldızları içerecek şekilde derlenmiştir.

Oluşturulan bu güncel katalogta farklı ışımaya gücü sınıfından 331,312 yıldız yer almaktadır.

2 Malzeme ve Yöntem

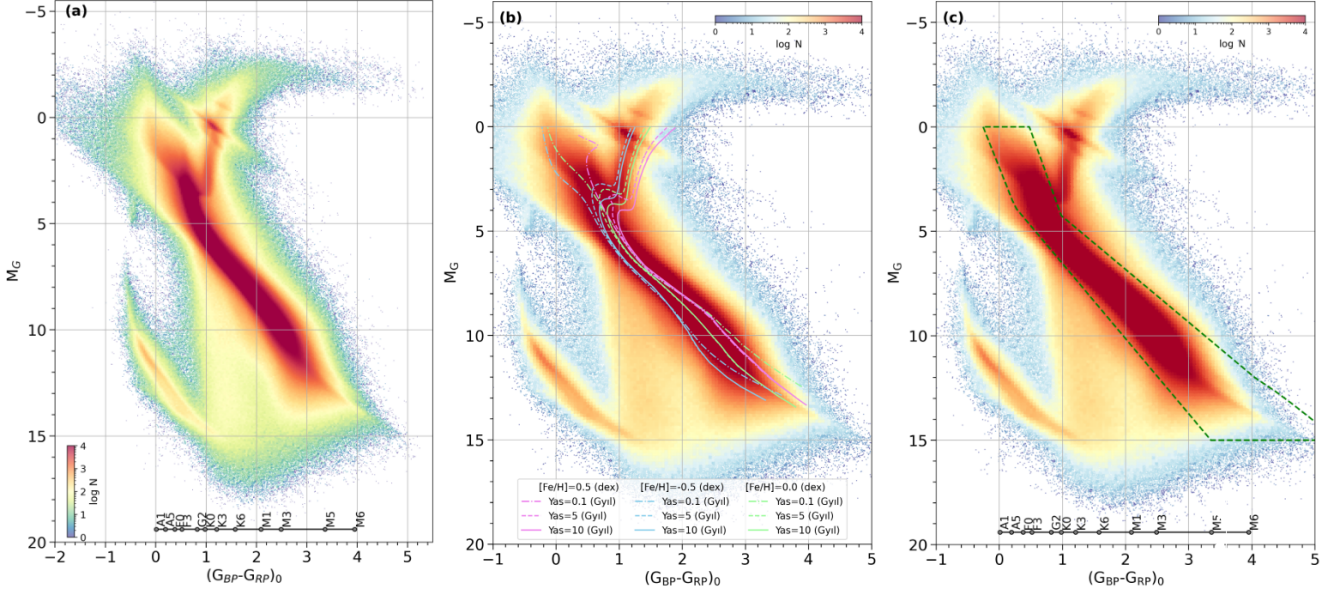
2.1 Gaia EDR3 Veri Seçimi

Gaia EDR3 verileri ([Gaia Collaboration et al. 2021a](#)) 3 Aralık 2020 tarihinde araştırmacıların kullanımına sunulmuştur. Bu çalışmadaki veriler *Gaia* veri merkezindeki web ara yüzüne tarafımızdan hazırlanan bir sql koduyla alınmıştır. Sorgu sonucunda *Gaia* EDR3 `gaiadr3.gaia_source` tablosu içerisinde Güneş merkezli 1 kpc'lik uzay hacmi içinde göreceli paralaks hatası $\sigma_{\varpi}/\varpi \leq 0.10$ şartına uyan 41,848,305 yıldız ulaşılmıştır.

2.2 Yıldızların Renk Artık Tayini

Yıldızların Güneş'ten uzaklıkları arttıkça fotometrik verileri yıldızlararası ortamın neden olduğu sönmüşleme etkisine maruz kalır. Güneş civarındaki yakın yıldızlar ($d < 100$ pc) yerel kabarcık içinde bulunduğu fotometrik verileri yıldızlararası ortamdan fazla etkilenmez iken, Güneş merkezli $r = 1$ kpc uzaklık içindeki 41,848,305 yıldızın inceleneceği bu çalışmada *Gaia* EDR3 veri tabanındaki G , G_{BP} ve G_{RP} parlaklıkları, yıldızlararası sönmüşlemeye maruz kalır. Yıldızların *Gaia* parlaklıklarına ait sönmüşmelerinin hesaplanmasında literatürde sıklıkla kullanılan [Schlegel et al. \(1998\)](#)'nin toz haritasından faydalanılmıştır. [Schlegel et al. \(1998\)](#)'nin çalışmasında zaman içerisinde ortaya çıkan hatalardan dolayı, toz haritası [Schlafly & Finkbeiner \(2011\)](#) tarafından güncellenmiş olup, bu çalışmada tercih edilmiştir. Yıldızlar doğrultusunda Galaksi sınırına kadar geçerli olan V bandındaki sönmüşleme $A_{\infty}(V)$ değerleri Bovy tarafından hazırlanan

★ dogudeniz.bulut@gmail.com



Şekil 1. Çalışmadaki 41,848,305 yıldızın renk-mutlak parlaklık diyagramı (a), farklı demir bolluklarında ve yaşlardaki PARSEC eş-yaş eğrilerini içeren renk-mutlak parlaklık diyagramı (b) ve çift yıldız etkisini içerecek şekilde seçilen anakol yıldız örneği (c). Yeşil kesikli çizgi bu çalışmada seçilen anakol yıldızlarını göstermektedir. Yıldızlar logaritmik sayı yoğunluklarına göre renklendirilmiştir.

`mw dust.py` isimli Python kodu yardımıyla belirlenmiştir. Çalışmadaki yıldızlar Galaksi sınırında bulunmadığı için toz haritalarından elde edilen sönmüşleme değerinin Güneş ile yıldız arasındaki mesafe için hesaplanması gerekmektedir. Güneş ile yıldızlar arasındaki indirgenmiş sönmüşlemelerin belirlenebilmesi için Bahcall & Soneira (1980)'nin bağıntısı kullanılmıştır.

$$A_d(b) = A_\infty(b) \left[1 - \exp\left(-\frac{|d \sin(b)|}{H}\right) \right] \quad (1)$$

Burada b yıldızın Galaktik enlemi, d yıldızın Güneş'e uzaklığı, H tozun yükseklik ölçeği ($H = 125$ pc; Marshall et al. 2006), $A_\infty(b)$ yıldız doğrultusunda Galaksi sınırına kadar ölçülen sönmüşleme değeri (Schlafly & Finkbeiner 2011) ve $A_d(b)$ de Güneş ile yıldız arasındaki uzaklık için hesaplanmış V bandındaki sönmüşlemeyi göstermektedir. Yıldızların indirgenmiş sönmüşleme değerlerinin, indirgenmiş renk artığına çevrilmesinde aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır:

$$E_d(B - V) = \frac{A_d(b)}{3.1} \quad (2)$$

Bu çalışmada *Gaia* EDR3 veri tabanındaki fotometrik veriler kullanıldığından, indirgenmiş $E_d(B - V)$ renk artığı değerini dikkate alarak G , G_{BP} ve G_{RP} bandlarına ait sönmüşleme değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. *Gaia* fotometrik verilerinin sönmüşlemeden arındırılmasında Weiler (2018)'in *Gaia* fotometrik bandları ve renk indeksi için belirlediği bağıntı ve bağıntılarda kullandığı katsayılar aşağıda verilmiştir:

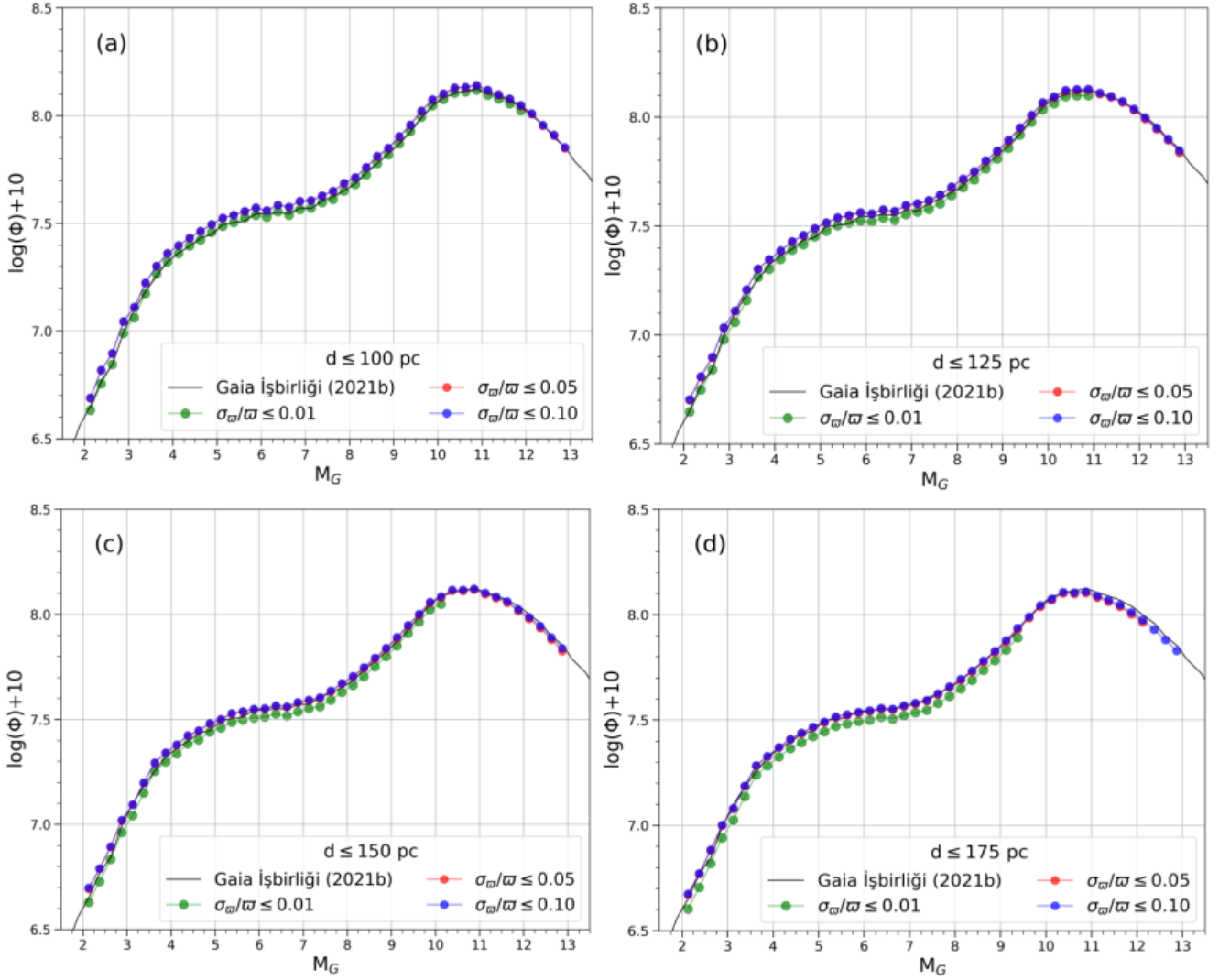
$$G_0 = G - 0.85926 \times E_d(B - V) \quad (3)$$

$$(G_{BP} - G_{RP})_0 = (G_{BP} - G_{RP}) - 0.41595 \times E_d(B - V) \quad (4)$$

Yıldızların M_G mutlak parlaklıklarının hesaplanmasında literatürde iyi bilinen uzaklık bağıntısı kullanılmıştır:

$$M_G = G_0 - 5 \log(1000/\varpi) + 5 \quad (5)$$

Burada ϖ yıldızın *Gaia* EDR3 kataloğundan alınan miliyar saniyesindeki (mas) trigonometrik paralaks değerini göstermektedir. Bağıntı 5 ile hesaplanan mutlak parlaklık ve renk dağılımı Şekil 1a'da gösterilmiştir. *Gaia* uydusundan sağlanan verilerin büyük kısmı ince disk yıldızlarından oluştuğundan renk-parlaklık diyagramı üzerinde ince disk popülasyonunu temsil eden PARSEC yıldız evrim model (Bressan et al. 2012) verilerinden faydalanılmıştır. Bunun için ince disk popülasyonunu ifade eden demir bolluğu $-0.5 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.5$ dex ve yaşı $0 < t \leq 10$ Gyl (Cox 2000) aralığındaki limit eş-yaş eğrileri renk-parlaklık diyagramına (Şekil 1b) eklenerek anakol yıldızlarının diyagram üzerindeki konumları belirlenmiştir. Şekil 1b'de anakol bandındaki yıldız sayı yoğunluğu ile eş-yaş eğrilerinin uyumu incelendiğinde, genel olarak model eğrilerinin gözlemsel verileri desteklediği fakat anakol yıldız bandının teorik sınırlardan daha geniş olduğu görülmektedir. Bunun nedeni çalışmada çift yıldız etkisinin dikkate alınmamış olmasıdır. Bilindiği gibi, çift yıldız etkisi bir yıldızın parlaklığında en fazla 0.75 kadirlik bir artışa sebep olur. Diyagram üzerinde yaş ve metal bolluğu etkisi dışında teorik eş-yaş eğrilerine 0.75 kadirlik fark ilave edilerek anakol bandı çift yıldız etkisini içerecek şekilde oluşturulmuş ve yeşil kesikli çizgiler ile Şekil 1c'de gösterilmiştir. Anakol bandı içindeki yıldızların tayf türü A1 ile M6 ve mutlak parlaklıkları $0 < M_G < 15$ kadir aralığında olup yıldız sayısı 39,131,320'dir.



Şekil 2. Mutlak parlaklıkları $2 < M_G \leq 13$ kadar aralığında, dört farklı uzaklık ($d \leq 100$ pc (a), $d \leq 125$ pc (b), $d \leq 150$ pc (c), $d \leq 175$ pc (d)) ve üç farklı göreceli paralaks hatasına ($\sigma_\pi/\varpi \leq 0.01$, $\sigma_\pi/\varpi \leq 0.05$, $\sigma_\pi/\varpi \leq 0.10$) sahip anadol yıldızlarından oluşturulan Güneş civarındaki ışınma gücü fonksiyonları.

2.3 Yıldızların Tamlık Sınırlarının Belirlenmesi ve Uzak Yoğunluğunun Hesaplanması

Bir popülasyona ait tipik parametrelerin ortaya konmasında kullanılan veri setindeki nesnelerin sayıları önemlidir. Astronomik gözlemlerde nesne sayıları çoğunlukla görünen parlaklığının bir fonksiyonu olarak değerlendirilir. Gözlenen nesnelerin tamlığı söz konusu olduğunda görünen parlaklığa göre oluşturulan histogramda yıldız sayılarının parlak kadirlerden sönük kadirler doğru artması beklenir. Sönük parlaklıklarda nesne sayısının sabit veya azalmaya başlaması sönük limit parlaklığın belirlenmesine olanak sağlar. Yıldız alanlarındaki nesnelerin uzaklık tamlıkları söz konusu olduğunda da yıldızların mutlak parlaklıkları önem kazanır. Araştırmacılar öncelikle yıldız alanındaki görünen parlak ve sönük limit kadirleri belirledikten sonra örnekteki yıldızları ardışık birim mutlak parlaklık aralıklarına ayırırlar. *Gaia* fotometrisinde bir yıldız alanında görünen parlak ve sönük limit parlaklıklar, sırasıyla, G_1 ve G_2 ile, bir ardışık M_{G_1} ve M_{G_2} mutlak

parlaklık aralığındaki yakın ve uzak tamlık sınırları da aşağıdaki bağıntılar ile hesaplanır:

$$d_{\text{yakın}} = 10^{[(G_1 - M_{G_1} + 5 - A_G)/5]} \quad (6)$$

$$d_{\text{uzak}} = 10^{[(G_2 - M_{G_2} + 5 - A_G)/5]} \quad (7)$$

Burada $d_{\text{yakın}}$ ile d_{uzak} , sırasıyla, seçilen mutlak parlaklık aralığındaki yakın ve uzak tamlık sınırlarını, A_G de *Gaia* fotometrisindeki G bandı için sönükleşme değerini göstermektedir. Çalışmada geniş bir tayf türü aralığındaki anadol yıldızları kullanılmıştır. Analizlerde trigonometrik paralaks verilerinden uzaklıklar tayin edildiğinden, yıldızların mutlak parlaklıkları duyarlı bir şekilde belirlenmiştir. Oluşturulan yakın yıldızlar kataloğunda her bir yıldızın trigonometrik paralaks verisi ve buna ait belirsizlikler bilindiğinden, tamlık sınırlarının hesaplanmasında

$$\sigma_\pi/\varpi \leq 0.01, \quad \sigma_\pi/\varpi \leq 0.05 \quad \text{ve} \quad \sigma_\pi/\varpi \leq 0.10$$

aralıklarındaki görelî paralaks hataları dikkate alınmıştır. Bu çalışmada ardışık mutlak parlaklık aralıklarındaki yıldızların uzay yoğunlukları farklı uzaklık aralıklarına göre hesaplanmıştır. Yıldızlar Güneş'ten uzaklaştıkça oluşturdukları küresel hacim büyümektedir. Ardışık uzaklık aralıkları için uzay hacmi ve uzay yoğunluk hesaplamaları, sırasıyla, Bağıntı 8 ve 9'da verilmiştir:

$$\Delta V_{1,2} = \frac{4}{3}\pi(d_2^3 - d_1^3) \quad (8)$$

$$\Phi = N/\Delta V \quad (9)$$

Burada, d_1 ve d_2 ardışık iki uzaklığı, $\Delta V_{1,2}$ bu uzaklık aralıklarına karşılık gelen küresel uzay hacmini, N söz konusu uzay hacminde bulunan yıldız sayısını ve Φ de uzay yoğunluğunu ifade etmektedir. Hesaplanan uzay yoğunlukları çok küçük değerlerde bulunduğundan literatürde ışım gücü değerlerinin gösteriminde $\Phi^* = \log(\Phi) + 10$ bağıntısı kullanılmaktadır (Fenkart & Karaali 1990).

2.4 Işım Gücü Fonksiyonlarının Elde Edilmesi

Çalışmada geniş bir tayf türü aralığındaki anakol yıldızlarının ışım gücü fonksiyonu yukarıda belirtilen yöntem ile hesaplanmıştır. Literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak, bu çalışmada anakol yıldızları kullanılarak ışım gücü fonksiyonları dört farklı uzaklık ($d \leq 100$, $d \leq 125$, $d \leq 150$ ve $d \leq 175$ pc) ve üç farklı görelî paralaks hata aralığında ($\sigma_{\varpi}/\varpi \leq 0.01$, $\sigma_{\varpi}/\varpi \leq 0.05$ ve $\sigma_{\varpi}/\varpi \leq 0.10$) oluşturulmuştur (Şekil 2). Farklı uzaklık aralıkları için oluşturulan ışım gücü fonksiyonları incelendiğinde, genel olarak tüm panellerdeki ışım gücü fonksiyonunun [Gaia Collaboration et al. \(2021b\)](#) tarafından 100 pc için verilen ışım gücü fonksiyonuyla uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 2a). Bu çalışmada uzaklığı 175 pc'e kadar olan anakol yıldızlarından oluşturulan ışım gücü fonksiyonu incelendiğinde uzaklıkları duyarlı hesaplanmış örnek için ($\sigma_{\varpi}/\varpi \leq 0.01$) belirlenen ışım gücü fonksiyonunun 100 pc için verilen daha küçük değerlerde olduğu görülmüştür (Şekil 2b). Benzer durum, daha uzakta seçilen anakol yıldızları için de geçerlidir. Özellikle görelî paralaks hataları büyük olan yıldız gruplarından oluşturulan ışım gücü fonksiyonları [Gaia](#) konsorsiyumunun ([Gaia Collaboration et al. 2021b](#)) 100 pc için verdiği ışım gücü fonksiyonundan küçük farklılıklar göstermektedir (Şekil 2c ve 2d). Çalışmada görelî paralaks hatası $\sigma_{\varpi}/\varpi \leq 0.10$ ve mutlak parlaklık aralığı $2 < M_G \leq 13$ kadar olan örnekten oluşturulan ışım gücü fonksiyonunun 100 pc için verilen ışım gücü fonksiyonuyla uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 2d). Bu durum, ışım gücü fonksiyonunun görelî paralaks hataları dikkate alınarak incelenmesi gerekliliğinin önemini göstermektedir.

3 Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, [Gaia](#) EDR3'ten ([Gaia Collaboration et al. 2021a](#)) alınan fotometrik ve astrometrik verilerden itibaren farklı uzaklık aralıklarında ve görelî paralaks hatalarındaki anakol yıldızlarının ışım gücü fonksiyonları elde edilmiştir. Analizlerde, Güneş merkezli 1 kpc uzaklığa varan [Gaia](#) yıldızlarının fotometrik verileri toz haritaları yardımıyla yıldızlararası ortamın neden olduğu sönükleşme etkilerinden arındırılmıştır. Oluşturulan renk-parlaklık diyagramı üzerine, seçilen yıldızlar ile birlikte ince disk popülasyonunu temsil eden PARSEC eş-yaş eğrileri çizilmiş ([Bressan et al. 2012](#)) ve çift yıldız etkisini içerecek şekilde anakol bandı belirlenmiştir. Bu yöntem

ile yaklaşık 39 milyon anakol yıldız çalışmada kullanılmıştır. Yıldızlar birim mutlak parlaklık aralıklarına ve bu aralıkları temsil eden tamlık uzaklık sınırlarına uygun bir şekilde ayrılarak sınıflandırılmıştır. Bu aşamadan sonra yıldızlar dört farklı uzaklık aralıklarına ve üç farklı görelî paralaks hata değerlerine göre yeniden gruplandırılarak her bir mutlak parlaklık aralığı için uzay yıldız yoğunlukları hesaplanmış, böylece ışım gücü fonksiyonları belirlenmiştir. Örnekteki en yakın yıldızlar için oluşturulan ışım gücü fonksiyonunun literatüre yeni kazandırılan ışım gücü fonksiyonuyla iyi bir şekilde uyum gösterdiği, görelî paralaks hataları küçük ve uzak olan örneklerden oluşturulan ışım gücü fonksiyonlarının sistematik olarak 100 pc için oluşturulan ışım gücü fonksiyonuna göre küçük değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Örnek içindeki en büyük görelî paralaks hatalarına ($\sigma_{\varpi}/\varpi \leq 0.10$) sahip ve 175 pc uzaklığa kadar olan anakol yıldızlarının [Gaia](#) konsorsiyumu ([Gaia Collaboration et al. 2021b](#)) tarafından belirlenen ışım gücü fonksiyonunu temsil ettiği gösterilmiştir. Sonuç olarak bu çalışma sayesinde Güneş'e uzaklığı 175 pc'yi geçmeyen ve görelî paralaks hataları en fazla % 10 olan örneğin literatürde verilen ışım gücü fonksiyonuyla uyumlu olduğu gösterilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası 37153.

Kaynaklar

- Bahcall J. N., Soneira R. M., 1980, [ApJS](#), 44, 73
 Bressan A., Marigo P., Girardi L., Salasnich B., Dal Cero C., Rubele S., Nanni A., 2012, [MNRAS](#), 427, 127
 Cox A. N., 2000, *Allen's astrophysical quantities*. AIP Press
 ESA ., 1997, *VizieR Online Data Catalog*, p. I/239, [ADS](#)
 Fenkart R., Karaali S., 1990, [A&AS](#), 83, 481, [ADS](#)
 Gaia Collaboration et al., 2021a, [A&A](#), 649, A1
 Gaia Collaboration et al., 2021b, [A&A](#), 649, A6
 Gliese W., 1957, *Astronomisches Rechen-Institut Heidelberg Mitteilungen Serie A*, 8, 1, [ADS](#)
 Gliese W., Jahreiß H., 1991, *Preliminary Version of the Third Catalogue of Nearby Stars, On: The Astronomical Data Center CD-ROM: Selected Astronomical Catalogs*
 Marshall D. J., Robin A. C., Reylé C., Schultheis M., Picaud S., 2006, [A&A](#), 453, 635
 Schlafly E. F., Finkbeiner D. P., 2011, [ApJ](#), 737, 103
 Schlegel D. J., Finkbeiner D. P., Davis M., 1998, [ApJ](#), 500, 525
 Weiler M., 2018, [A&A](#), 617, A138

Access:

M22-0310: [Turkish J.A&A](#) — Vol.3, Issue 3.