

AKÜ FEMÜBİD 21 (2021) 041101 (776-782)

AKU J. Sci. Eng. 21 (2021) 041101 (776-782)

DOI: 10.35414/akufemubid.891941

Araştırma Makalesi / Research Article

Güneş Benzeri Titreşim Yapan Evrimleşmiş Yıldızlar için Δv - ρ İlişkisi

Zeynep ÇELİK ORHAN¹¹ Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, İzmir.Sorumlu yazar e-posta: zeynep.celik@ege.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9424-2339>

Geliş Tarihi: 05.03.2021

Kabul Tarihi: 14.08.2021

Öz

CoRoT (2006), Kepler (2009) ve TESS (2017) uzay teleskopları sayesinde çok sayıda güneş benzeri titreşim yapan anakol ve evrimleşmiş yıldız gözlenmiştir. Bu tür titreşimler gösteren anakol yıldızlarının gözlenen titreşim frekansları kullanılarak yıldızlara ait temel parametreler oldukça hassas bir şekilde belirlenmektedir. Güneş benzeri titreşim yapan anakol yıldızlarının kütle ve yarıçapını belirlemek için geliştirilen yöntemlere ölçeklendirme ilişkisi denmektedir. Güneş benzeri titreşim yapan yıldızlar için türetilen bu ilişkilerde doğrudan gözlem frekanslarından oldukça duyarlı bir şekilde belirlenen büyük ayrılma (Δv) ve maksimum genlikteki titreşim frekansıyla (v_{max}) birlikte tayftan belirlenen T_{eff} kullanılmaktadır. Bu çalışmada anakol yıldızları için geliştirilen ölçeklendirme ilişkisinde yer alan Δv ile yıldız ortalama yoğunluğu (ρ) arasındaki ilişkinin evrimleşmiş yıldızlardaki değişimi modeller yardımıyla araştırıldı. Bunun için MESA evrim koduyla 1.00-1.60 M_{\odot} kütle aralığında güneş kompozisyonuna sahip evrimleşmiş yıldız iç yapı modelleri yapıldı. Yapılan bu modeller detaylı olarak incelendi. Sonuç olarak, evrimleşmiş yıldızlardaki Δv - ρ ilişkisi anakol yıldızlarına göre farklılaşmaktadır. Bu durumda hem bu ilişkinin hem de ölçeklendirme ilişkilerinin güncellenmesi gerekmektedir.

Anahtar kelimeler

Asteroseismoloji; Yıldız iç yapı ve evrimi; Güneş benzeri titreşimler; İç yapı modelleri; Evrimleşmiş yıldızlar.

Abstract

Thanks to CoRoT, (2006), Kepler (2009) and TESS (2017) a large number of solar-like oscillating main sequence and evolved stars have been observed. By using the observed solar-like oscillation frequencies of main sequence stars, the fundamental parameters are determined very precisely. The methods developed to determine the mass and radius of main sequence stars are called scaling relationship. In these relations of solar-like oscillating stars, the large separation (Δv) determined very sensitively from the direct observation frequencies and the oscillation frequency at the maximum amplitude (v_{max}) and T_{eff} obtained from the spectrum are used. In this study, the scaling relation between the average density (ρ) and Δv of main sequence stars was investigated for evolved stars. For this purpose, stellar internal structure models for evolved stars with solar composition were made using the MESA evolution code for in the mass range of 1.00-1.60 M_{\odot} . These models were examined in detail. As a result, it was revealed that the relationship between Δv and ρ for evolved stars differs compared to main sequence stars. In this case, both this relation and scaling relations need to be updated.

Keywords

Asteroseismology; Structure and evolution of stars; Solar-like oscillations; Interior models; Evolved stars.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi.

1. Giriş

Astrofiziğin temel amaçlarından biri yıldızların iç yapı ve evrimini anlamaktır. Yıldızlardan gerek tayfölçer gerekse ışıkölçer yardımıyla alınan yegane bilgi kaynağı olan foton, doğrudan yıldızın yüzey katmanlarıyla ilgili bilgi taşımaktadır. Bu gözlem yöntemleriyle yıldızların tayf türü, sıcaklığı, rengi ve

yüzey çekim ivmesi ($\log g$) duyarlı bir şekilde belirlenebilir. Ancak yıldızların iç yapılarına dair doğrudan bilgi edinilemez. Ayrıca bu gözlem verilerinden tek yıldızların temel parametreleri olan kütle ve yarıçap verilerinin elde edilmesi oldukça zordur. Öte yandan, örten çift yıldız sistemlerine ait ışık ve dikine hız eğrilerindeki değişimlerden faydalanarak, kütle (M) ve yarıçap (R) oldukça

duyarlı bir şekilde elde edilebilir. Özellikle tutulma gösteren çift çizgili örten yıldız sistemlerinde belirlenen kütle ve yarıçaptaki belirsizlik yaklaşık olarak sırasıyla %1 ve %0.5 civarındadır (Southworth 2012, Huber 2015, Gaulme ve diğ. 2016). Anakol yıldızlarının kütlesi ise kütle-ısıtma (M-L) bağıntısından dolayı olarak belirlenebilmektedir. Kütle ve yarıçap belirlemede kullanılan bir diğer yöntem de astrofizikçiler tarafından yapılan yıldız iç yapı modelleridir. Bu modeller yapılırken yıldızın gözlemsel olarak belirlenen ısıtma (L), etkin sıcaklık (T_{eff}), $\log g$ ve renk indeksi (B-V) vb. parametreleri girdi olarak alınır. Böylece bu gözlem parametreleri ile uyumlu modeller yapılır. Bu kuramsal modellerden yıldızların kütle ve yarıçapı hatta yıldızlar için belirlenmesi zor olan yaş, tayin edilebilir. Ancak yıldızların iç kısımlarını gözleyemediğimiz için, modellerin ne kadar gerçekçi olduğuna dair kesin bir bilgi yıldızlar üzerine sismoloji çalışmaları başlayana kadar bilinmiyordu. Bu konuda astrofizikçilere ışık tutan yeni gözlemsel alanlar; Güneş sismolojisi (helyosismoloji) ve yıldız sismolojisi (asterosismoloji)'dir. Bu sayede Güneş ve yıldızlardaki titreşimlerden faydalanarak başta özek olmak üzere iç katmanlar hakkında detaylı olarak bilgi sahibi olunur. Örneğin bu yöntemle Güneş'in özekten yüzeye kadar dönme profili çıkartılıp diferansiyel dönmenin varlığı ve difüzyonun Güneş kütleli yıldızlarda oldukça önemli olduğu bulunmuştur. Bunlara ek olarak Güneş'in helyum bolluğu ve konvektif katman kalınlığı daha duyarlı bir şekilde belirlenmiştir (Basu & Antia 2004).

Ayrıca bu çalışmada detaylı olarak incelenen güneş benzeri titreşim yapan yıldızların gözlenen frekanslardan belirlenen büyük ayrılma (Δv), aynı azimutal mod (l) değerine sahip olan ardışık radyal modlardaki (n) frekanslar arasındaki farktır. Asterosismik yöntemlerle belirlenen bu büyük ayrılma aynı zamanda yıldızın ortalama yoğunluğun (ρ) karekökü ile orantılıdır (Bakınız Denklem 3). Bu çalışmada, güneş benzeri titreşim yapan anakol ve evrimleşmiş yıldızların kütle ve yarıçapını belirlemede literatürde yaygın olarak kullanılan ölçeklendirme ilişkilerinde (scaling relations) yer alan Δv frekansı ile ortalama yoğunluk (ρ) arasındaki ilişki, evrimleşmiş yıldızlar için yapılan iç yapı

modelleriyle incelendi. Buradan da güneş benzeri titreşim yapan evrimleşmiş yıldızlar için Δv - ρ ilişkisinin değiştiği tespit edildi. Bu sayede genel olarak güneş benzeri titreşim yapan yıldızlarda geçerli olan ölçeklendirme ilişkilerinin evrimleşmiş yıldızlar için güncellenmesi gerektiği ortaya çıktı.

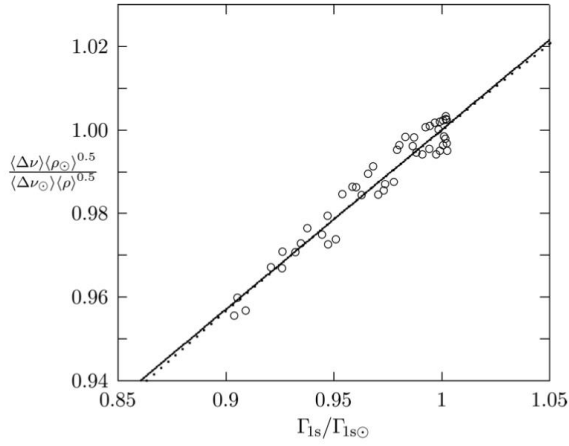
1.1 Güneş Benzeri Titreşim Yapan Yıldızlar için Δv - ρ İlişkisi

Güneş bize oldukça yakın olduğu için beş dakika gibi kısa bir gözlem süresinde binlerce farklı modda titreşim alınmaktadır. Bu sayede Güneş'in yüzeyinin yanı sıra merkezi de ayrıntılı olarak incelenebilmektedir. Fakat diğer yıldızlar düşünüldüğünde yeryüzünden yapılan gözlemlerle bu hassasiyette verilerin alınması pek mümkün olmamaktadır. Bu nedenle uzaydan yapılan gözlemlere ihtiyaç duyularak CoRoT (Convection, Rotation and planetary Transits), Kepler ve TESS (The Transiting Exoplanet Survey Satellite) uzay araçları gönderilmiştir. Bu uzay araçlarından elde edilen gözlem verileriyle astrofizikçiler için aydınlık bir çağ başlamıştır. Bu verilerin ışığında gelişen yıldız sismolojisinin en büyük başarısı güneş benzeri titreşim gösteren tek yıldızların frekanslarından faydalanarak yıldızın ait temel parametrelerin (M, R, L vb.) oldukça duyarlı bir şekilde belirlenmesidir. Bu duyarlılık kütle ve yarıçap için sırasıyla %5-6 ve %2-3 olarak verilebilir (Metcalf ve diğ. 2014, Mathur ve diğ. 2012). Bu yüzden kütle ve yarıçapın hesaplanmasında ölçeklendirme ilişkisi kullanılmaktadır (Denklem (1) ve (2), Kjeldsen and Bedding, 1995).

$$\left(\frac{M}{M_{\odot}}\right) = \left(\frac{v_{max}}{v_{max,\odot}}\right)^3 \left(\frac{\Delta v}{\Delta v_{\odot}}\right)^{-4} \left(\frac{T_{eff}}{T_{eff,\odot}}\right)^{1.5} \quad (1)$$

$$\left(\frac{R}{R_{\odot}}\right) = \left(\frac{v_{max}}{v_{max,\odot}}\right) \left(\frac{\Delta v}{\Delta v_{\odot}}\right)^{-2} \left(\frac{T_{eff}}{T_{eff,\odot}}\right)^{0.5} \quad (2)$$

Denklem (1) ve (2)'deki v_{max} ve Δv değerleri, yıldızların ışık eğrilerinin analiziyle elde edilen frekanslar yardımıyla saptanmaktadır. Tayfsal gözlemlerle de yıldızların etkin sıcaklıkları elde edilmektedir.



Şekil 1. Anakol modelleri için Yıldız ve diğ. (2016) tarafından elde edilen $\left(\frac{\Delta v}{\Delta v_{\odot}}\right) / \left(\frac{\rho}{\rho_{\odot}}\right)^{0.5} - \Gamma_{1s} / \Gamma_{1s\odot}$ ilişkisi.

Ölçeklendirme ilişkisi ile sadece gözlem verileri kullanılarak tek yıldızların kütle ve yarıçapı hassas bir şekilde belirlenebilir. Peki kütle ve yarıçap verilerini bulmak için kullanılan bu ölçeklendirme ilişkisi ne kadar hassa sonuçlar veriyor? Denklem (1) ve (2)'de görüldüğü gibi kütle ve yarıçapın tayinindeki belirsizlik v_{\max} ve Δv parametrelerinin elde edilmesindeki belirsizliğe çok fazla bağlıdır. Günümüzde bu ölçeklendirme ilişkisinin doğruluğunun test edilmesi ve daha da iyileştirilmesi için çok sayıda çalışma yapılmaktadır. v_{\max} 'ın hesaplanan ve gözlenen değerlerine bakıldığında da özellikle büyük değerlerinde farklılaşma görülmüştür. Ayrıca Procyon gibi bazı F-tipi yıldızlarda v_{\max} 'ın tayftan ve ışık eğrisinden elde edilen değerleri arasında oldukça büyük farklılıklar gözlenmiştir (Brown ve diğ. 1991). Bu da v_{\max} 'ın ölçeklendirme ilişkisindeki belirsizlikte etkili role sahip olduğunu göstermektedir. Bu konuda literatürde çok sayıda tartışma vardır (Chaplin & Miglio 2012, Mazumdar 2014 vb). Bu çalışmada ölçeklenme ilişkilerinde sadece Δv kaynaklı olarak evrimleşmiş yıldızlarda görülen etkilere bakılmıştır.

1.2 Anakol Yıldızları için Δv - ρ İlişkisi

Güneş benzeri titreşim yapan yıldızlarda doğrudan gözlem parametreleri kullanılarak kütle ve yarıçapın belirlenmesi çok değerlidir. Denklem (1) ve (2)'de yer alan Δv değeri, gözlemlerle oldukça duyarlı olarak belirlenmektedir. Gözlenen adyabatik

titreşim frekanslarından belirlenen Δv ile ρ arasındaki ilişki:

$$\left(\frac{\Delta v}{\Delta v_{\odot}}\right) = \left(\frac{\rho}{\rho_{\odot}}\right)^{0.5} \quad (3)$$

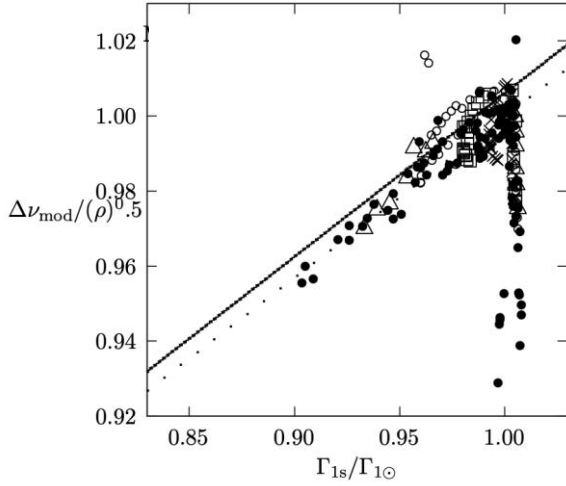
şekindedir. Bu ilişkinin ne kadar doğru olduğuna dair literatürde çok sayıda test yapılmıştır. Bu konuda yapılan örnek bir çalışma da White ve diğ. (2011) aittir. Bu çalışmada büyük ayrılmanın sadece yoğunluğun karekökü ile orantılı olmadığı ayrıca sıcaklığın da bir fonksiyonu olduğu yaptıkları iç yapı modelleriyle ortaya çıkmıştır. Böylece (1) ve (2) numaralı denklemlere sıcaklığa bağlı tanımlanan yeni bir fonksiyon eklenmiştir. Bir diğer çalışma ise Yıldız ve diğ. (2016) tarafından yapılmıştır. Yıldız ve diğ. (2016) çalışmalarında MESA evrim koduyla (Paxton ve diğ. 2013) 1.00-1.60 M_{\odot} kütle aralığı için anakola ait iç yapı modelleri yapmışlardır. Onların yaptıkları çalışmada da $\left(\frac{\Delta v}{\Delta v_{\odot}}\right) / \left(\frac{\rho}{\rho_{\odot}}\right)^{0.5}$ oranı olması gereken bir değerinden saptığı görülmüştür. Şekil 1' de, $\left(\frac{\Delta v}{\Delta v_{\odot}}\right) / \left(\frac{\rho}{\rho_{\odot}}\right)^{0.5}$ ile yüzey birinci adyabatik indeks (Γ_{1s}) arasında doğrusal bir ilişki tespit edilmiştir. Şekil 1' den elde edilen denklem aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\left(\frac{\Delta v}{\Delta v_{\odot}}\right)}{\left(\frac{\rho}{\rho_{\odot}}\right)^{0.5}} = f_{\Delta v} = 0.430 \frac{\Gamma_{1s}}{\Gamma_{1s\odot}} + 0.570 \quad (4)$$

Yıldız ve diğ. (2016) çalışmalarında Denklem (4)'ü kullanarak anakol yıldızları için ölçeklendirme ilişkisini güncellemişlerdir. Böylece Denklem (1) ve (2)'ye Γ_{1s} 'i dahil edilmiştir.

1.3 Evrimleşmiş Yıldızları için Δv - ρ İlişkisi

Literatürde Denklem (1) ve (2) de verilen ilişkiler anakol yıldızları için türetilmiştir. Ancak bu ilişkiler evrimleşmiş yıldızların kütle ve yarıçaplarını hesaplamada da kullanılmaktadır (Metcalf ve diğ. 2014, Mathur ve diğ. 2012). Bu tamamen doğru bir yaklaşım değildir. Yıldızlar anakol evresinde merkezinde hidrojeni helyuma yakarak nükleer tepkimelerine devam etmektedir.



Şekil 2: Anakol (içi boş daireler) ve evrimleşmiş yıldızları (içi dolu daireler, üçgenler ve kareler) için $\left(\frac{\Delta v}{\Delta v_{\odot}}\right) / \left(\frac{\rho}{\rho_{\odot}}\right)^{0.5}$ ile $\Gamma_{1s} / \Gamma_{1s\odot}$ ilişkisi. Bu grafikte yer alan düz ve noktali fit çizgileri sırasıyla Denklem 4’de yer alan ve evrimleşmiş yıldızlar için geçerli olan (Denklem 5) doğrusal ilişkiyi temsil etmektedir.

Dolayısıyla anakoldan ayrılan bir yıldızın merkezi koşulları başta olmak üzere bir çok özelliği değişmiştir. Bu yüzden anakol yıldızlarına için geçerli olan bu yöntemleri evrimleşmiş yıldızlarda kullanmak hesaplanan M ve R değerlerinde sistematik hatalara neden olmaktadır. Bu sistematik hataları gidermek için literatürde çok sayıda çalışma yer almaktadır (Sharma ve diğ. 2016, Yıldız ve diğ. 2014, 2015, 2016, Kayhan ve diğ. 2019 vb.).

Bu çalışmada ise anakol yıldızlarında olduğu gibi ilk olarak ölçeklendirme ilişkilerinde oldukça hassas olarak belirlenen Δv ve Denklem (3)’te verilen Δv - ρ ilişkisi incelendi. Bunun için, 1.00-1.60 M_{\odot} kütle aralığında güneş kompozisyonunda evrimleşmiş yıldız iç yapı modelleri MESA evrim koduyla yapıldı.

2. MESA Modellerinin Özellikleri

Evrilmiş yıldızlarda Denklem (3)’te verilen Δv ile ρ arasındaki geçerli olan ilişkiyi test etmek için 1.00-1.60 M_{\odot} kütle aralığında MESA (versiyon 10000) evrim koduyla 0.05 M_{\odot} adımlarla iç yapı modelleri yapıldı. Yapılan bu modellerde Güneş’in asterosismik olan ve asterosismik olmayan gözlem verilerini en iyi temsil eden (özellikle M, L, R ve T_{eff} ve gözlenen frekansları) MESA modelinden güneş

kompozisyonu olarak helyum bolluğu (Y) 0.2744, ağır element bolluğu (Z) 0.0172 (Asplund ve diğ. 2009) ve konvektif karışım uzunluğu parametresi (mixing length) (α) 2.175 olarak belirlendi. Ayrıca bu iç yapı modelleri konvektif sınıraşımı (overshooting) difüzyon içermemektedir. Saydamsızlık (opasite) tabloları olarak yüksek sıcaklık için Iglesias Rogers (1993, 1996) ve düşük sıcaklıklar içinse Ferguson ve diğ. (2005) OPAL kullanılmıştır.

Metal bolluğu yıldızın yapı ve evrimi belirlemede etkili olduğu gibi yıldızların oluşumu aşaması olan anakol öncesini de belirlemede etkilidir. Dolayısıyla yapılan tüm modellere anakol öncesi de dahil edilmiştir. Ayrıca titreşim frekansı hesaplamaları için yapılan iç yapı modellerine ince de olsa bir atmosferin dahil edilmesi gerekir. Bu yüzden yapılan modellerde *simple_photosphere* seçeneği tercih edilmiştir. İç yapı modellerinden elde edilen fgong dosyalarından ADIPLS (Christensen Dalsgaard 2008) paketiyle modellerin adyabatik titreşim frekansları elde edilmiştir.

3. Bulgular

Bu çalışmada, MESA evrim koduyla elde edilen evrimleşmiş modellerde ilk olarak Δv ile ρ arasındaki ilişkiye bakıldı. Bu ilişkinin Yıldız ve diğ. (2016) çalışmasındaki gibi model Γ_{1s} ile olan ilişki incelendi. Şekil 2’de içi boş daireler Yıldız ve diğ. (2016) çalışmasına ait anakol modellerini, bu çalışmada yapılan modellere ait farklı kütledeki evrimleşmiş yıldızlar içi dolu daireler, üçgen ve karelerle temsil etmektedir. Şekil 2’de belli bir yaşa ya da evrime kadar, anakol ve evrimleşmiş modeller için $\left(\frac{\Delta v}{\Delta v_{\odot}}\right) / \left(\frac{\rho}{\rho_{\odot}}\right)^{0.5}$ ile Γ_{1s} arasındaki doğrusal ilişki geçerlidir. Ancak belli bir $\Gamma_{1s} / \Gamma_{1s\odot}$ aralığından sonra bu ilişkinin doğrusal olmadığı açıktır. Ayrıca Şekil 2’de düz çizgiyle temsil edilen anakol modelleri için geçerli olan Denklem 4’teki doğrusal ilişkide bozulmaktadır. Bunun yerine evrimleşmiş modellerde Şekil 2’de noktalarla temsil edilen

$$\left(\frac{\Delta v}{\Delta v_{\odot}}\right) / \left(\frac{\rho}{\rho_{\odot}}\right)^{0.5} = f_{\Delta v} = 0.380 \frac{\Gamma_{1s}}{\Gamma_{1s\odot}} + 0.520 \quad (5)$$

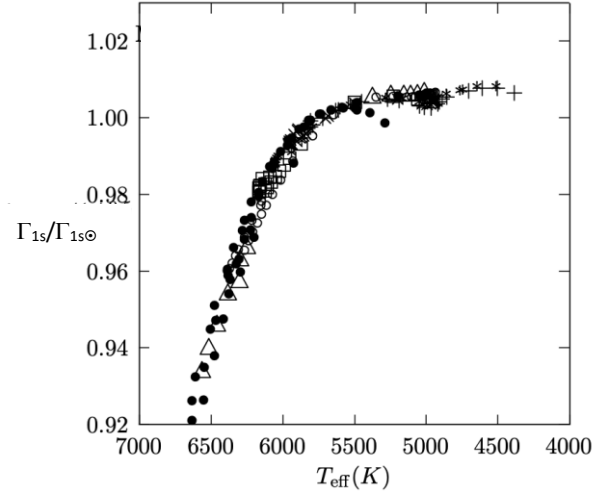
doğrusal ilişki geçerlidir. Bunların yanı sıra Şekil 2’de özellikle $\Gamma_{1s}/\Gamma_{1s\odot} = 1$ civarında bir kırılmanın olduğu açıktır. Bu kırılma, ilgili bölgede fiziksel bir sürecin ya da yapının değiştiğini gösterir.

Şekil 3’te bu kırılmanın sebebini araştırmak için model etkin sıcaklıkları ile $\Gamma_{1s}/\Gamma_{1s\odot}$ arasındaki ilişkiye bakıldı. Burada da Şekil 2’ye benzer bir durum geçerlidir. $T_{\text{eff}} < 5000$ °K de evrimleşmiş yıldız modellerinde $\Gamma_{1s}/\Gamma_{1s\odot} = 1$ civarında anakol modellerinden keskin bir kırılma vardır. Ayrıca $4000 < T_{\text{eff}} < 5000$ °K dar sıcaklık aralığında hafif bombeli bir yapı dikkat çekmektedir.

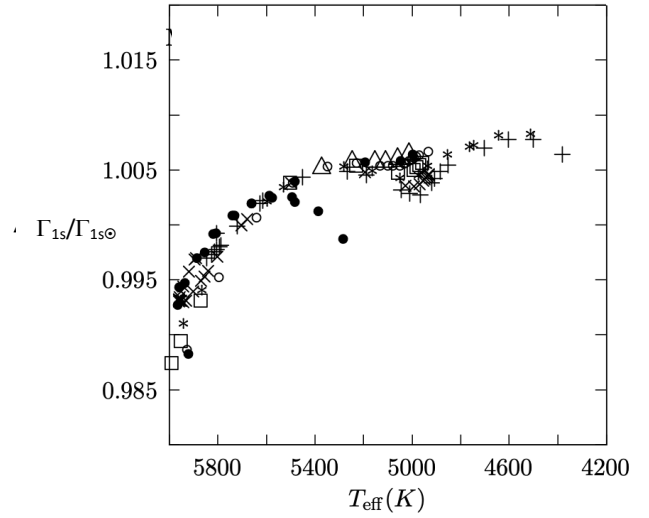
Şekil 4, $4200 < T_{\text{eff}} < 6000$ °K aralığını daha ayrıntılı incelemek için verilmiştir. Özellikle küçük kütleli yıldız modellerinde $4800 < T_{\text{eff}} < 5200$ °K sıcaklık aralığında belirgin bir düşme dikkat çekicidir (Şekil 4). Bu da, ortamın adyabatik durumdan uzaklaştığına işarettir. Bu bölgede iyonlaşma ya da uyarılma etkileri hakimdir. Böyle dar bir düşük sıcaklık aralığında özellikle küçük kütleli yıldızlarda gözlenen bu etki H^- iyonlarından kaynaklıdır.

4. Tartışma ve Sonuç

Gözlemsel verilerden elde edilen kütle ve yarıçap tayininde ölçeklendirme ilişkisinin kullanımı, güneş benzeri titreşim yapan yıldızlar için önemli bir keşiftir. Ancak yıldız iç yapı ve evrimi çalışan astrofizikçiler için bu yöntemlerle belirlenen kütle ve yarıçapın oldukça duyarlı olması önemlidir. Özellikle yıldız evriminde başat role sahip olan kütleli hassas olarak belirlenmesi gerekir. Bu nedenle literatürde anakol yıldızlarına yönelik bu ölçeklendirme ilişkilerini test etme ve geliştirme üzerine çalışmalar özellikle gözlemlerle oldukça hassas belirlenen Δv frekansının ρ ile arasındaki



Şekil 3: $\Gamma_{1s}/\Gamma_{1s\odot} - T_{\text{eff}}(K)$ ilişkisi. İçi boş daireler Yıldız ve diğ. (2016)'e ait anakol modelleri, içi dolu daireler, üçgen ve kareler ise evrimleşmiş yıldızlar için bu çalışmadaki yapılan modelleri temsil etmektedir.



Şekil 4: $4200 < T_{\text{eff}} < 6000$ °K aralığında $\Gamma_{1s}/\Gamma_{1s\odot} - T_{\text{eff}}(K)$ ilişkisi.

ilişkinin incelenmesi üzerinedir (White ve diğ. 2012, Yıldız ve diğ. 2016). Bu ilişkiler güneş benzeri titreşim yapan evrimleşmiş yıldızlar için de aynen kullanılmaktadır. Halbuki yapısal ve evrimsel olarak farklı olan evrimleşmiş yıldızlar için bu ilişkilerin anakol yıldızlarındaki gibi geçerli olacağını kabul etmek sistematik hataları beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla evrimleşmiş yıldızlar için de, gerekli test ve güncellemelerin yapılmasına ihtiyaç vardır.

Bu çalışmada MESA evrim koduyla yapılan evrimleşmiş ve anakol iç yapı modellerinin $\Delta v-\rho$ arasındaki ilişkileri kıyaslanmaktadır. Evrimle birlikte

doğrusal olan $\left(\frac{\Delta v}{\Delta v_{\odot}}\right) / \left(\frac{\rho}{\rho_{\odot}}\right)^{0.5}$ ile $\Gamma_{1s}/\Gamma_{1s\odot}$ ilişkisi değişmektedir. Dolayısıyla evrimleşmiş yıldızlar için bu ölçeklendirme ilişkilerinin güncellenmesi gerekmektedir. Ayrıca bu ilişki $\Gamma_{1s}/\Gamma_{1s\odot} = 1$ durumunda keskin bir kırılma göstermektedir. Bunun sebebi ise o bölge için adyabatik koşulların geçerli olmamasıdır. Özellikle $4800 < T_{\text{eff}} < 5200$ °K aralığında H⁻'nin iyonlaşmasından kaynaklı olarak $\left(\frac{\Delta v}{\Delta v_{\odot}}\right) / \left(\frac{\rho}{\rho_{\odot}}\right)^{0.5}$ ile $\Gamma_{1s}/\Gamma_{1s\odot}$ arasındaki var olan ilişki değişmektedir. Dolayısıyla H⁻'nin iyonlaşma muntikasında yer alan evrimleşmiş yıldızlar için de farklı ölçeklendirme ilişkilerine ihtiyaç vardır.

Teşekkür

Bu çalışma 118F352 nolu TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmektedir. Beni her konuda destekleyen Prof. Dr. Mutlu YILDIZ'a ve her zaman yanımda olan oğlum Emirhan Sami ve eşim Mustafa ORHAN'a çok teşekkür ederim. Ayrıca makaleme katkılarından dolayı Sibel Örtel'e de teşekkür ederim.

5. Kaynaklar

Asplund, M., Grevesse, N., Sauval, A. J., Scott, P., 2009. The Chemical Composition of the Sun. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, **47**, 481–522.

Basu S., Antia H. M., 2004. Constraining Solar Abundance Using Helioseismology. *Astrophysical Journal*, **606**, L85-L93.

Brown T.M., Gilliland R. L., Noyes R. W., Ramsey L. W., 1991. Detection of possible p-mode oscillations on Procyon. *Astrophysical Journal*, **368**, 599-609.

Chaplin W. J. and Miglio A., 2013. Asteroseismology of Solar-Type and Red-Giant Stars. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, **51**, 353-392.

Christensen-Dalsgaard J., 2008. Lecture Notes on Stellar Oscillations. *Institut for Fysik og Astronomi Aarhus Universitet, and Teoretisk Astrofysik Center*, **345**, 215-355.

Gaulme, P. et al., 2016. Testing the Asteroseismic Scaling Relations for Red Giants with Eclipsing Binaries Observed by Kepler. *The Astrophysical Journal*, **832**, 233-243.

Huber, D., 2015. Asteroseismology of Eclipsing Binary Stars. *Giants of Eclipse: The ζ Aurigae Stars and Other Binary Systems*, **169**, 23-32.

Iglesias C. A., Rogers F. J., 1993. Radiative opacities for carbon- and oxygen-rich mixtures. *Astrophysical Journal*, **412**, 752-762.

Iglesias C. A., Rogers F. J., 1996. Updated Opal Tables. *Astrophysical Journal*, **464**, 943-956.

Kayhan C., Yıldız M. Çelik Orhan, Z., 2019. Asteroseismic investigation of 20 planet and planet candidate host stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **490**, 1509-1516.

Kjeldsen, H., Bedding, T. R., 1995. Amplitudes of stellar oscillations: the implications for asteroseismology. *Astronomy and Astrophysics*, **293**, 87-106.

Mathur S., Hekker S., Trampedach R., Ballot J., Kallinger T. et al., 2012. A Uniform Asteroseismic Analysis of 22 Solar-type Stars Observed by Kepler. *The Astrophysical Journal*, **749**, 14-28.

Mazumdar A., Monteiro M. J. P. F. G., Ballot J., Antia H. M., Basu, S. et al., 2014. Measurement of Acoustic Glitches in Solar-type Stars from Oscillation Frequencies Observed by Kepler. *The Astrophysical Journal*, **782**, 18-27.

Metcalf T. S., Creevey O. L., Doğan G., Mathur S., Xu, H. et al., 2014. Properties of 42 Solar-type Kepler Targets from the Asteroseismic Modeling Portal. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, **214**, 27-33.

Paxton B., Cantiello M., Arras P., Bildsten L., Brown E.F. et al., 2013. Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA): Planets, Oscillations, Rotation, and Massive Stars. *The Astrophysical Journal Supplement*, **208**, 4-42.

Sharma S., Stello D., Bland-Hawthorn J., Huber D., Bedding T. R., 2016. Stellar population synthesis based modelling of the milky way using asteroseismology of 13000 Kepler red giants. *The Astrophysical Journal*, **822**, 15-25.

Southworth, J., 2012. Eclipsing Binary Stars: the Royal Road to Stellar Astrophysics. *Orbital Couples: Pas de*

Deuxin the Solar System and the Milky Way, **234**, 51–58.

White T. R., Bedding T. R., Stello D., Christensen-Dalsgaard J., Huber D., Kjeldsen H., 2011. Calculating Asteroseismic Diagrams for Solar-like Oscillations. *The Astrophysical Journal*, **743**, 13-21.

Yıldız M., Çelik Orhan Z., Aksoy Ç., Ok S., 2014. Fundamental properties of solar-like oscillating stars from frequencies of minimum $\Delta\nu$ - I. Model computations for solar composition. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **441**, 2148-2158.

Yıldız M., Çelik Orhan Z., Kayhan C., 2015. Fundamental properties of solar-like oscillating stars from frequencies of minimum $\Delta\nu$ - II. Model computations for different chemical compositions and mass. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **448**, 3689-3696.

Yıldız M., Çelik Orhan Z., Kayhan C., 2016. Fundamental properties of Kepler and CoRoT targets - III. Tuning scaling relations using the first adiabatic exponent. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **462**, 1577-1590.