

Güneş-Benzeri Titreşim Yapan Evrimleşmiş Yıldızların Temel Özelliklerinin Titreşim Frekanslarından Bulunması

Zeynep Çelik Orhan¹, Mutlu Yıldız¹

¹Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri, İzmir, Türkiye.

Özet: Bu çalışmada CoRoT ve Kepler uzay araçları ile gözlenen düşük genliğe sahip olan Güneş benzeri titreşim yapan evrimleşmiş yıldızlar incelenmiştir. Bu yıldızların atmosfer dışı yöntemlerle gözlenen frekansları kullanılarak yıldızların temel parametreleri arasında ilişkiler elde edilmiştir. Bu çalışmada ise büyük ayrılmadaki minimumların frekanslarının tanımsal gücü ve literatürdeki yeni ölçeklendirme ilişkisi kullanılmıştır. Böylece farklı yöntemlerle elde edilen kütle, yarıçap, ısıtma ve yaş gibi yıldızların temel parametreleri saptanmıştır. Bu elde edilen parametreler birbiriyle kıyaslanmıştır. Ayrıca literatürdeki ölçeklendirme ilişkisi birinci adyabatik üs kullanılarak güncellenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Güneş benzeri titreşimler, evrimleşmiş yıldızlar, asteroseismoloji, yıldız iç yapısı ve evrimi.

Abstract: In this study solar-like oscillation evolved stars, which observed CoRoT and Kepler, were investigated. Relations between the fundamental properties of the stars have been obtained by using the observed frequencies for these stars. In this study, the diagnostic power of the frequencies of the large separation minima and the new scaling relations in the literature were used. Thus, the fundamental parameters of stars such as mass, radius, luminosity and age obtained by different methods have been determined. These obtained parameters are compared with each other. Moreover, the scaling relation in the literature has been modified using the first adiabatic exponent.

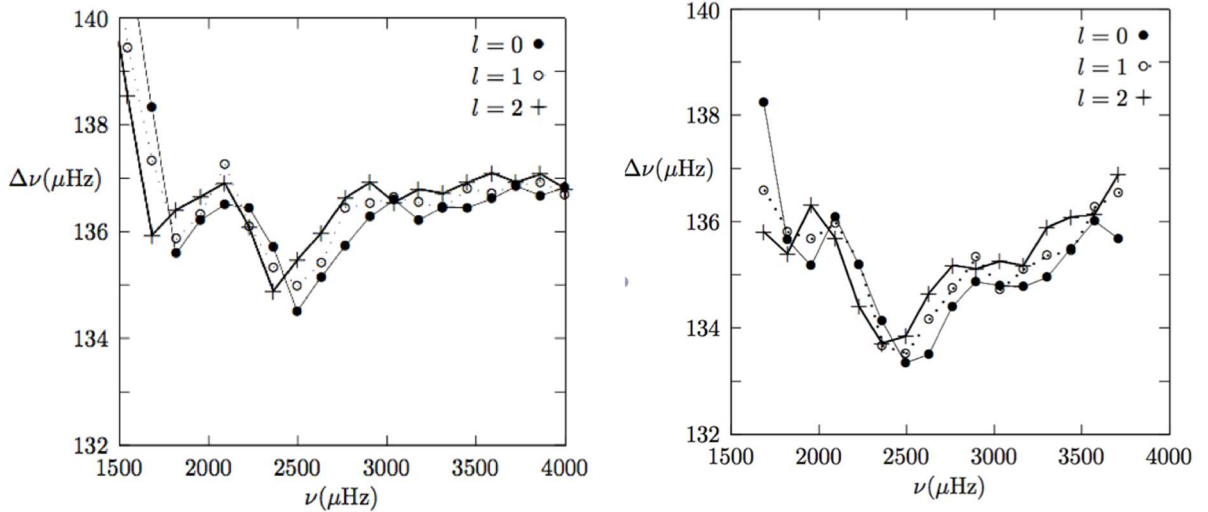
Key Words: solar-like oscillations, evolved stars, asteroseismology, structure and evolution of star.

1. Giriş

Astrofiziğin temel amaçlarından biri yıldızların iç yapısını ve evrimini anlamaktır. Ancak bunun için gerekli olan yıldızların iç katmanlarına ait bilgiler doğrudan gözlemler ile elde edilemez. Yıldızlardan gerek tayfçekker gerekse ışıkölçer yardımıyla alınan yegane bilgi kaynağı olan foton, yıldızların yüzey katmanlarıyla ilgili bilgi taşımaktadır. Bu gözlem yöntemleriyle yıldızların tayf türü, sıcaklığı, rengi ve çekim kuvveti (log g) duyarlı bir şekilde belirlenebilir. Bu gözlem verilerinin yanı sıra temel parametreler olarak bilinen; kütle, yarıçapın, metal bolluğunun, ısıtmanın ve yaşında duyarlı bir şekilde belirlenmesi yıldızları yapı ve evrimini anlayabilmek için gereklidir.

Yıldızların yapı ve evriminde başrol oynayan iki parameter: kütle ve kimyasal kompozisyonudur. Bu parametrelerin duyarlı bir şekilde belirlenmesi oldukça önemlidir. Örneğin, değişen yıldızların (parlaklığı zamanla değişim gösteren yıldızlar) özel bir sınıfı olan örten çift yıldızların ışık ve dikine hız eğrilerindeki dönemsel ve/veya dönemsel olmayan değişimlerden faydalanarak kütle ve yarıçap belirli bir duyarlılıkla doğrudan elde edilmektedir. Anakol yıldızları için kütle, kütle-ısıtma bağıntısından dolayı olarak belirlenebilir. Yine de gözlem verilerinden faydalanarak özellikle tek yıldızlar için kütle ve yarıçap verilerinin elde edilmesi oldukça zordur. Bu yüzden yıldızların kütle tespiti için kullanılan bir başka yöntem ise astrofizikçiler tarafından yapılan yıldız iç yapı modelleridir. Bu modeller yapılırken yıldızın gözlemler ile belirlenen ısıtma, sıcaklık, log g ve renk ölçeği (B-V) vb. parametreleri girdi olarak alınır. Böylece bu gözlem parametreleri ile uyumlu çok sayıda model elde edilir. Elde edilen bu kuramsal modellerin çıktı dosyasından, kütle ve yarıçap hatta yıldızlar için belirlenmesi zor olan yaş belirlenebilir. Ancak yıldızların iç kısımlarını gözleyemediğimiz için yapılan bu modellerin ne kadar gerçekçi olduğuna dair kesin bir bilgi yıldızlar üzerine sismolojik çalışmalar yapıldıkça kadar yoktu. Bu nedenle yapılan modellerle, yıldızların gözlenebilen katmanları çok iyi açıklansa da veri alamadığımız özek için belirsizlik taşımaktaydı. Bu konuda astrofizikçilere ışık tutan yeni gözlemsel çalışma alanları; Güneş sismolojisi (helyosismoloji) ve yıldız sismolojisi (asterosismoloji)'dir. Bu gözlemler ile elde edilen titreşimlerden faydalanarak başta özek olmak üzere diğer iç katmanlar hakkında detaylı bilgi sahibi olunabilir. Sismoloji sayesinde elde edilen duyarlı gözlem verileri ile yıldızların merkezinden yüzeyine kadar olan katmanların "sesi" görülebilir. Örneğin bu sayede, Güneş ve güneş benzeri yıldızlar için yapılan modellerde difüzyonun etkisinin göz ardı edilemeyeceği ortaya çıkmıştır.

Atmosfer dışı gözlem araçlarıyla yıldız sismolojisinde gözlemsel olarak ivmeli bir dönem başlasa da bu alanda kuramsal çalışmalar 1900'lü yıllara dayanmaktadır. Bu dönemde yakın olduğu için beş dakika gibi kısa bir sürede Güneş'in yüzeyinde milyonlarca titreşim alınmıştır. Bu titreşimler Grec ve ark. (1980), Varonsov & Marchenkov (1983) ve birçok isim tarafından detaylı olarak incelenmiştir. Heliosismoloji sayesinde Güneş'in konvektif katmanının tabanı ve He bolluğu oldukça duyarlı şekilde elde edilmiştir. Daha sonra Brown ve ark. (1991), Kjeldsen & Bedding (1995) ve Belkacem ve ak. (2011) Güneş'in iki referans frekansı ($\Delta\nu_{\odot}$ ve $\nu_{\max,\odot}$) ile yıldızların referans frekanslarını ($\Delta\nu$ ve $\nu_{\max}$) oranlayarak ölçeklendirme ilişkisini geliştirmiştir. Bu şekilde tek yıldızların sadece gözlemsel verileri kullanılarak yıldız iç yapı modelleri çalışan astrofizikçiler için önemli olan kütle ve yarıçapı belli duyarlılıkta hesaplanmıştır. Bu ölçeklendirme ilişkisinden elde edilen kütle ve yarıçapı Metcalfe ve ark. (2014) ve Mathur ve ark. (2013) tarafından AMP evrim kodu ile test edilmiştir. Frekans verileri kullanılarak kütle ve yarıçap sırasıyla %8-10 ve %2-3 duyarlılık ile belirlenmektedir. Günümüzde de bu yöntemin ne kadar geçerli olduğu ve duyarlılığını arttırmak amacıyla çok sayıda çalışma ve test yapılmaktadır. (White ve ark. 2011, Stello ve ark. 2011, Hubber ve ark. 2011, Mosser ve ark. 2012 vb.). Bu çalışma kapsamında, model ve modellerden elde edilen frekanslar analiz edildi. Bu kapsamda iki yeni referans frekansı saptandı. Modellerde gözlenen bu minimum frekanslara başta Güneş olmak üzere CoRoT ve Kepler tarafından gözlenen güneş benzeri titreşim yıldızlarında da (Şekil 1) rastlanıldı. Şekil 1'de ANKİ evrim kodu ile elde edilen difüzyonlu Güneş modelinin ile BiSON gözlem verilerinden elde edilen frekansların büyük ayrılmaya karşın frekans grafiği görülmektedir. Bu iki grafikte de büyük ayrılmada minimumlar görülmektedir. Modellerde gözlenen bu düşmelerin duyarlı gözlem frekanslarında da gözlenmesi bu alandaki çalışmalarımızda oldukça bizi motive etti.



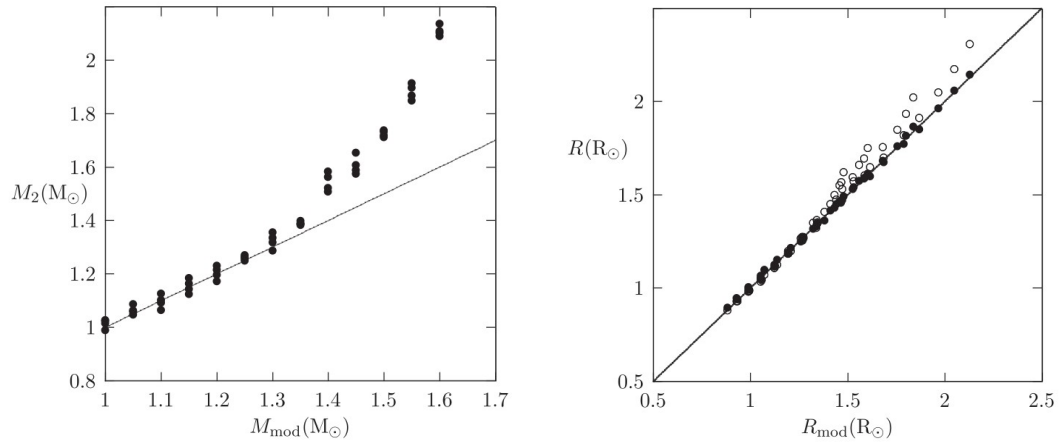
Şekil 1: Sağ taraftaki grafikte ANKİ evrim kodu ile elde edilen Güneş modelinde gözlenen $l=0, 1, 2$ ve 3 frekanslarındaki düşmeler. Sol taraftaki ise Güneş'in BiSON (Chaplin ve ark. 1999) gözlem verilerinden elde edilen $l=0, 1, 2$ ve 3 frekansları için büyük ayrılmaya karşın frekans grafiği.

Bu çalışmada ANKİ evrim kodu (Ankara-İzmir, Bilgi Tanrısı, Ezer & Cameron 1965) kullanıldı. Modellerin ADIPLS kodu (Christensen-Dalsgaard, 2008) ile adyabatik titreşim frekansları hesaplandı. Elde edilen çok sayıda titreşim frekansları incelenerek iki yeni referans frekans tanımlandı. Bu yeni frekanslar, $\nu_{\max}$ ve $\Delta\nu$ verileri kullanılarak temel parametreler elde edildi. Bu çalışma MNRAS 'ta yayınlandı (Yıldız ve ark. 2014, Makale 1). ANKİ evrim kodu kullanılarak $0.8 - 1.3 M_{\odot}$ kütle aralığı için $0.05 M_{\odot}$ aralıklar ile iç yapı modelleri yapıldı. Bu kod için Güneş kimyasal kompozisyonu hidrojen bolluğu (X) 0.7024 ve ağır element bolluğu (Z) 0.0172 olarak alındı. Güneşin konvektif parametre (α) değeri 1.98 alındı. Modellerden elde edilen merkez hidrojen bolluğu (X_c) 0.70, 0.53, 0.35 ve 0.17 değerleri için ADIPLS titreşim paketi (Christensen-Dalsgaard, 2008) ile adyabatik titreşim frekansları hesaplandı. Bu sayede farklı kütledeki aynı göreceli yaştaki modeller birbiri ile kıyaslanabildi. Göreceli yaş ($t_{\text{gör}}$), modellerden elde edilen anakol yaşının (t_{anakol}) farklı X_c 'deki yaşa (t) olan oranıdır ($t_{\text{gör}} = t / t_{\text{anakol}}$). Anakola oturduğu ilk an olan sıfır anakol yaşına (ZAMS) modelin $t_{\text{gör}}$ değeri oldukça küçüktür ($X_c=0.7$). $t_{\text{gör}}=1$ olduğu durumda ise yıldız anakolu terk etmek üzeredir (TAMS). Diğer X_c değerleri için (0.53, 0.35 ve 0.17) sırasıyla $t_{\text{gör}}$ değerleri yaklaşık olarak 0.30, 0.50 ve 0.75'tir.

Daha sonra bu ANKİ evrim kodu ile yapılan modeller daha geniş kütle ($0.75-1.60 M_{\odot}$), metal bolluğu ($Z=0.0172, 0.222$,

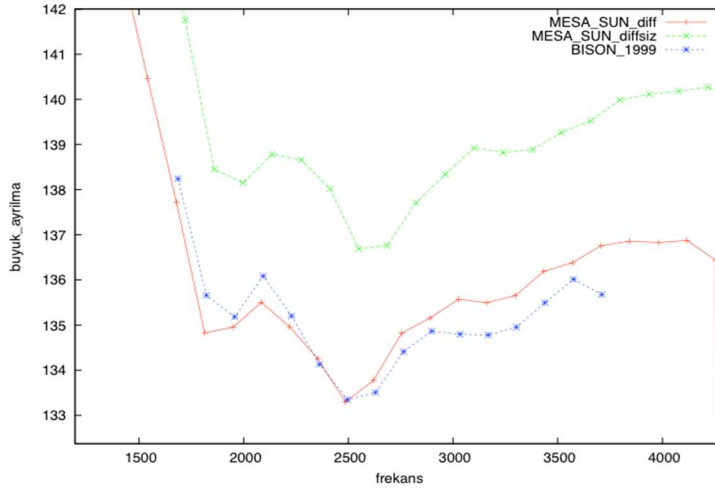
0.0272,0.322) ve helyum bolluğa ($Y = 0.2804, 0.3004, 0.3204$) göre yeniden elde edildi. Böylece değişen metal ve helyum bolluğuna göre minimumların ve elde edilen ölçeklendirme ilişkisinin nasıl değiştiğine bakıldı. Bu çalışma sonucunda özellikle ölçeklendirme ilişkisinde kütle belirlenmesinde helyum ve metal bolluğunun oldukça etkili olduğu sonucuna varıldı. Ayrıca artan kütle ile Makale 1’de elde edilen ilişkilerin değiştiği gözlemlendi. Şekil 2’de model kütle ve yarıçap

ilişkileri hesaplanan kütle ve yarıçap ile birlikte verilmiştir. Şekil 2’de görüldüğü gibi özellikle kütle grafiğinde $M > 1.40 M_{\odot}$ ’ten sonra keskin bir farklılaşma görülmektedir. Yarıçapların kıyaslanmasında daha az bir ayrılma görülmektedir. Bu çalışma ile elde edilen sonuçlar MNRAS’ta yayınlandı (Yıldız ve ark. 2015).



Şekil 2: Güneş kompozisyonundaki ANKİ evrim kodu ile genişletilmiş kütle aralığından elde edilen sonuçlar.

Ayrıca, elimizde Güneş ve Procyon olmak üzere 90 tane güneş benzeri titreşim yıldızlarının gözlem verisi literatürden elde edildi. Bu gözlem verilerini kullanarak Makale 1 ve 2’deki ilişkinin testleri yapıldı. Bu konuda yeni ve eski ölçeklendirme ilişkisi de test edildi. Ayrıca minimumlar kullanılarak Makale 2’den elde edilen sıcaklık formülü ile fotometrik olarak elde edilen sıcaklıklar tayf sıcaklıkları ile kıyaslandı. Bu çalışma da ayrıca MESA evrim kodu ile Güneş modelleri yaparak bu minimumların ve ilişkilerin modele bağımlı olarak nasıl bir değişim gösterdiği incelenmiştir (Şekil 3). Son olarak yapılan incelemeler sonucunda gözlenen frekanslarda minimum 1 ve 2’nin dışında yeni bir minimum gözlemlendi. Bu da yıldız evrimleştikçe daha derinleşen $\text{min}0$ olarak $\text{min}1$ ’den daha yüksek frekansta olan bir frekanstır. Bu gözlem verilerinin kıyaslandığı ve birbiriyle oldukça duyarlı olarak hesaplanan kütle, yarıçap ve sıcaklık verileri farklı yöntemler ile elde edildi. Burada en önemli sonuçlardan biri olarak Kjeldsen ve Bedding (1995) yılında türetilen ölçeklendirme ilişkisinin yıldızın Γ_1 parametresinin de katkısının ortaya çıkarılmasıdır. Bu da v_{max} ’ın hesaplanırken yüzey gammabir parametresinin sabit alınmasından kaynaklanmaktadır. Γ_1 sabit alınmadığında elde edilen ölçeklendirme ilişkisi daha duyarlı bir kütle ve yarıçap değeri vermektedir. Bu durum Güneş ve Procyon için açıkça görülmektedir. Ayrıca yıldızın frekansını en iyi şekilde temsil edildiğinde aslında yoğunluğu duyarlı bir şekilde belirlenmektedir (Yıldız ve ark. 2016). Bu durumda çok farklı kütle ve yarıçaptaki sonuçların yoğunlukları aynı olabilir.



Şekil 3: Güneş'te gözlenen minimumlar. Mavi asterisk ile Güneş'in BiSON'dan alınan (Chaplin ve ark. 1999) gözlem verilerini temsil etmektedir. Kırmızı artı difüzyonlu ve yeşil çarpı difüzyonsuz MESA güneş modellerini temsil etmektedir.

Ayrıca bu kapsamında, Güneş benzeri titreşim yapan evrimleşmiş olan 15 yıldız seçildi. Bu yıldızlardan 14 tanesi Kepler yıldızı iken bir tanesi HARPS (HD 2151) tayfçekeri yardımıyla yer tabanlı gözlenmiştir. Ayrıca 13 tanesi alt dev grubu iken 2 tanesi kırmızı dev evresindedir. Bu çalışmada da evrimleşmiş yıldızların gözlenen frekanslarından minimumlar elde edilmiştir. Bu saptanan minimumlar ve diğer referans frekansları kullanılarak yıldızların ölçeklendirme ilişkisi ile temel parametreleri elde edilmiştir. Bu yıldızlar tek tek MESA evrim kodu ile modellenmiştir. Yapılan bu modellerin tayftan elde edilen etkin sıcaklığı, büyük ayrılmaya karşın frekans grafiğinin uyumlu olmasına ve buradaki minimum düşmelerinin yakalanmasına dikkat edildi. Bu durumların sağlandığı en iyi modeller belirlendi. Modellere girdi parametresi olarak kütle, yaş, metal bolluğu, helyum bolluğu ve alfa parametresi alındı. Burada yıldızın kütlesi literatürde verilmiş ise ilk değer olarak o, verilmemiş ise ölçeklendirme ilişkisinden elde edilen değer alındı. Metal bolluğu ise taytan elde edilen $[Fe/H]$ bolluğunun Yıldız ve ark. (2014) gezegenler ile ilgili çalışmasında yer alan metal bolluğu hesabından alındı. Helyum bolluğu ve alfa parametresi Güneş kompozisyonu alındı. Yapılan çok sayıda model ile en iyi temsil eden modeller elde edildi. Ayrıca $l=1$ frekanslarında görülen karma modlar ADIPLS evrim kodu ile elde edilip incelenmeye başlandı. Bu konu da yapılan yayına dönüştürme çalışmaları sürüyor (Çelik Orhan ve ark. 2018, hazırlanıyor).

2. Sonuçlar

-Bu çalışmada duyarlı gözlem verilerinin elde edildiği CoRoT ve Kepler tarafından gözlenmiş Güneş benzeri titreşim yapan evrimleşmiş yıldızlara yer verildi. Bu uzay teleskopları sayesinde Güneş benzeri titreşimler gözlenen yıldızların kütle, yarıçap ve yaş gibi temel parametreleri oldukça duyarlı bir şekilde elde edilmektedir. Bunun için ölçeklendirme ilişkisi geliştirilmiştir. Literatürde bu ilişki daha çok anakol yıldızları için test edilmiştir. Bu çalışmada ise gözlem parametreleri en iyi bilinen 15 evrimleşmiş yıldız seçildi. Seçilen yıldızların MESA evrim kodu ile modelleri yapıldı. Bu yıldızların ölçeklendirme ilişkileri ile elde edilen kütle ve yarıçapları kıyaslandı. Ek olarak Güneş benzeri titreşim yapan yıldızların frekansları bilindiği takdirde yıldızların az bilinen yaşları hakkında belli bir hata (yaklaşık %7) aralığında saptandı. Ayrıca MESA evrim koduyla geniş kütle aralığı için modeller yapıldı. Bu modellerin frekansları hesaplandı. Bunun sonucunda literatürde yer alan ölçeklendirme ilişkisi güncellendi. Yeni elde edilen ölçeklendirme ilişkisine Γ_1 de dahil edildi. Bu iki ölçeklendirme ilişkisi CoRoT ve Kepler'in hedef yıldızı olan 90 yıldız için kıyaslandı. Yeni geliştirilen ölçeklendirme ilişkisi literatürdeki ölçeklendirme ilişkisine göre çoğu yıldız için oldukça iyi sonuçlar vermiştir. Özellikle Procyon A yıldızı için yeni ölçeklendirme ilişkisi ile elde edilen kütle ve yarıçap gözlemlerle oldukça duyarlı belirlenen bu değerler ile çok uyumludur.



3. Kaynaklar

- Chaplin W.J., Christensen-Dalsgaard J., Elsworth Y., Howe R., Isaak G.R., Larsen R.M., New R., Schou J., Thompson M.J., Tomczyk S., 1999, MNRAS, 308, 405-414
- Christensen-Dalsgaard J., 2008, Astrophysics and Space Science, 316, 13-24
- Belkacem, K., Goupil, M. J., Dupret, M. A., Samadi, R., Baudin, F., Noels, A., Mosser, B., 2012, A&A, 530, 8p
- Brown T.M., Gilliland R.L., Noyes R.W., Ramsey L.W., 1991, ApJ, 368, 599-609.
- Ezer D., Cameron A. G. W., 1965, ApJ, 70, 139
- Grec, G., Fossat, E., Pomerantz, M., 1980, Nature, 288, 541-544
- Huber D., Bedding T. R., Stello D., Hekker S., Mathur S. et al., 2011, ApJ, 743, 143, 10
- Kjeldsen, H., Bedding, T. R., 1995, A&A, 293, 87-106
- Mathur S., Hekker S., Trampedach R., Ballot J., Kallinger T. et al., 2012, ApJ, 749, 14
- Metcalf T. S., Creevey O. L., Doğan G., Mathur S., Xu, H. et al., 2014, ApJS, 214, 27, 13
- Mosser B., Goupil M. J., Belkacem K., Marques J. P., Beck P. G. et al., 2012, A&A, 537, 15
- Stello D., Meibom S., Gilliland R. L., Grundahl F. et al., 2011, ApJL, 737, 6
- Vorontsov, S. V., Marchenkov, K. I., 1983, Solar Physics, 82, 215-222
- White T. R., Bedding T. R., Stello D., Christensen-Dalsgaard J., Huber D., Kjeldsen H., 2011, ApJ, 743, 13p
- Yıldız M., Çelik Orhan Z., Aksoy Ç., Ok S., 2014, MNRAS, 441, 2148-2158
- Yıldız M., Çelik Orhan Z., Kayhan C., 2015, MNRAS, 448, 3689-3696
- Yıldız M., Çelik Orhan Z., Kayhan C., 2016, MNRAS, 462, 1577-1590
- Çelik Orhan Z., Yıldız M., Kayhan C., hazırlanıyor.