

# TESS (TASC) hedef listesinden seçilen yıldızların asterosismik incelenmesi

Sibel Örtel<sup>1\*</sup>, Mutlu Yıldız<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, İzmir

## Özet

Yıldızların titreşimleri, özellikle güneş benzeri titreşimler, yıldızların iç yapı ve evrimini anlamamız adına önemli bir çığır açmıştır. Araştırmada NASA TESS projesi kapsamında belirlenen hedef yıldız listesi içerisinde güneş benzeri titreşim göstermesi beklenen 10 yıldız incelenmiştir. Literatürdeki fotometrik ve tayf verilerinden elde edilen parametreler ( $[Fe/H]$ ,  $\log g$ ,  $d$ ,  $T_{\text{eff}}$  vb.) kullanılarak  $M$ ,  $R$  gibi salt parametreler hesaplanmış ve bu parametreler kullanılarak yıldız iç yapı modelleri MESA evrim kodu kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen modellerin frekansları ADIPLS paketi kullanılarak hesaplanmıştır. Her bir yıldız için frekanslar arasındaki büyük ayrılma ve maksimum genlik frekansı hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** asteroseismology, Yıldızlar, Ötegezegenler

## 1 Giriş

Yıldızların iç yapısı ve evrimini daha iyi anlayabilmemiz yıldız fiziği hakkındaki bilgimizin artışının yanı sıra daha büyük ölçekli yapıların (gökada gibi) anlaşılmasında da önemli role sahiptir. Asterosismoloji, özellikle güneş benzeri titreşim bilimi, yıldızların evrim ve iç yapısını anlayabilmemizi sağlayan muazzam bir yöntemdir. Bu alanda Kepler (Borucki ve ark. 2010) ve CoRoT (Baglin ve ark. 2006) ile yapılan gözlemler güneş benzeri titreşim yapan yıldızlarda çığır açmıştır. 2018 yılında fırlatılan TESS (Sullivan ve ark. 2015) uydusu ile bu alan gelişmeye devam etmektedir. Uydular sayesinde elde edilen frekans verilerinden yıldızların büyük ayrılma ( $\Delta\nu$ ), küçük ayrılma ( $\delta\nu$ ) ve minimum frekanslar ( $\nu_{\text{min}}$ ) (Yıldız ve ark. 2014) gibi asterosismik parametreleri elde edilmektedir. Bu asterosismik parametreler kullanılarak yıldızların  $M$ ,  $R$ ,  $T_{\text{eff}}$  ve yaş gibi temel parametreleri hesaplanır.

Yaptığımız araştırmada TESS Asterosismik Konsorsiyumu (TASC) tarafından belirlenen listeden seçilen yıldızlara ait  $V$ ,  $B$  ve  $K$  parlaklıkları,  $[Fe/H]$ ,  $T_{\text{eff}}$  ve  $\log g$  değerleri SIMBAD veri tabanından alındı. Uzaklık değeri ( $d$ ) ise *Gaia* (DR2:Gaia Collaboration (2018)) ve *Hipparcos* (van Leeuwen 2007) veri tabanından alındı. Bu gözlem verileri kullanılarak yıldızlara ait temel parametreler hesaplandı. Hesaplanan değerler ile MESA kodu (Paxton 2011) kullanılarak yıldızların iç yapı modelleri yapıldı. Elde edilen modellerin frekansları ADIPLS paketi (Christensen-Dalsgaard 2008b) kullanılarak hesaplandı. Yapılan bu modeller sayesinde asterosismik veriler elde edilmeden önce yıldızların asterosismik parametrelerinin tahmini değerleri hesaplanmıştır.

## 2 Yıldız İç Yapı Modelinin Yapılması

Yıldızların modellenmesi lineer olmayan dört iç yapı denkleminin (kütlenin sürekliliği, hidrostatik denge, sıcaklık gradyanı ve ısı denge) sonlu farklar yöntemi ile çözümüne dayanmaktadır. Yıldızların iç yapısına ilişkin başlıca bilgi kaynağımız bu modellerdir. Biz seçilen yıldızların modelini yaparken MESA evrim kodunu difüzyon ve dönme olmadan çalıştırdık. İç yapı modeli için bu koda kullandığımız girdi parametreleri:  $M$ ,  $Z$ ,  $Y$

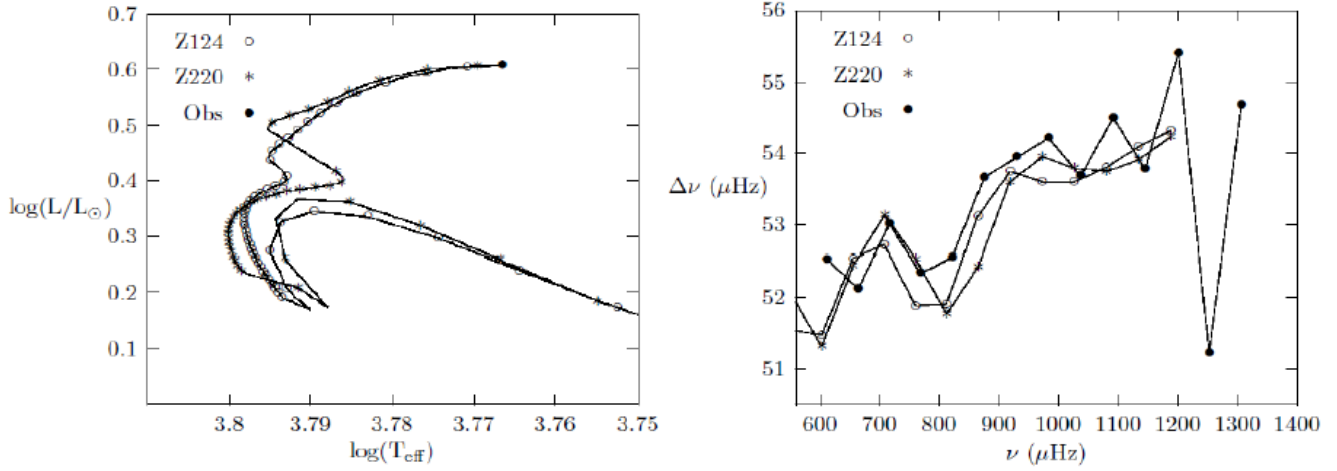
ve  $\alpha'$ 'dir (konvektif parametre). Yaptığımız bütün modellerde  $\alpha$  parametresini güneş değeri  $\alpha_{\odot} = 2.16$  olarak aldık.

Girdi parametreleri olan  $M$  ve  $Z$  değerlerini gözlemsel fotometrik ve tayf verilerinden hesaplayabiliriz.  $M$  hesabını yaparken izlediğimiz yol şöyledir;  $V$  parlaklığı ve  $d$  kullanılarak  $M_V$  bulunur. Daha sonrasında bolometrik düzeltme tablosu kullanılarak  $M_V$  parlaklığından  $M_{\text{bol}}$  elde edilir. Tablodan elde edilen  $M_{\text{bol}}$  parlaklığından da yıldızın  $L$  değeri hesaplanır. Hesapladığımız  $L$  ile tayftan elde edilen  $T_{\text{eff}}$  kullanılarak ışıma gücü bağıntısından yıldızın  $R$  değeri hesaplanır. Son olarak, tayftan elde edilen  $\log g$  değeri ile hesaplanan  $R$  kullanılarak  $M$  değerini elde ediyoruz. Hesaplanan kütle  $M_{FT\pi}$  şeklinde gösterilmektedir. Burada alt indis olarak gösterilen  $FT\pi$ ; Fotometri, Tayf ve paralaksı ifade etmektedir. Yukarıda bahsedilen yöntemle hesaplanan kütle üzerinde bir çok parametrenin etkisi olacaktır. Bu parametreler ne kadar hassas belirlenirse hesaplanan kütlenin duyarlılığı da o kadar artar ve iyi bir kütle tahmini yapılmış olur. Bir diğer girdi parametresi olan  $Z$ 'yi hesaplamak için şöyle bir yol izledik; tayftan elde edilen  $[Fe/H]$  değerini tüm ağır elementler için geçerli olduğunu varsaydık:  $Z = 10^{[Fe/H]} Z_{\odot}$ .

## 3 HRD'da Yaşanan Biriciklik ve Yaş Sorunu

Yıldız anakol ömrüne başladığında  $\delta\nu$  değeri  $\sim 15 \mu\text{Hz}$ , anakoldan ayrılırken ise bu değer  $\sim 5 \mu\text{Hz}$ 'e kadar düşmektedir. Bu asterosismik parametre ile anakol yıldızlarının yaşı çok duyarlı bir şekilde belirlenebilir. Örnek olarak, Güneş'in  $\delta\nu$  değeri  $9.8 \mu\text{Hz}$ 'dir (Chaplin ve ark. 1999). Bu değerden anlaşıldığı gibi, Güneş ömrünü yarılamıştır. Ancak anakoldan ayrılan yıldızlarda  $\delta\nu$  iyi bir yaş belirteci değildir. Modelden yaş belirleme yolunu seçtiğimiz zaman işimiz zorlaşmaktadır, çünkü HR diyagramında tek bir nokta için farklı kompozisyonlarda birçok iç yapı modellerinin olması söz konusudur. Yani anakol sonrası yıldızlar için yaşı belirlenmesi büyük bir sorundur. Bu soruna çözüm bulabilmek için KIC 7747078 yıldızı ile bir uygulama yaptık. Şekil.1'de yapılan modellerin iki tanesi ile  $T_{\text{eff}}-L$  (a) ve  $\nu-\Delta\nu$  (b) grafikleri çizilmiştir. Sol taraftaki grafikte farklı kompozisyona ve evrim yoluna sahip olmalarına rağmen iki modelde HR diyagramında gözlem noktasında çakışmaktadır. Sağ taraftaki  $\nu-\Delta\nu$  grafiğine baktığımızda ise iki modelin frekanslarının ayırt edilmediği görülüyor. İlk bakışta bu durum mo-

\* frogsybl@gmail.com

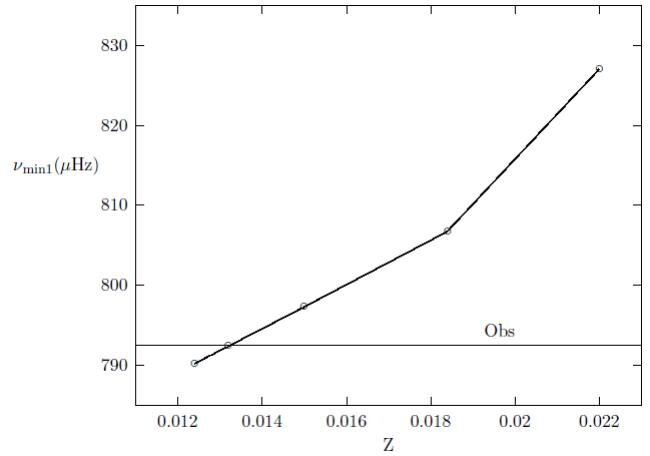


**Şekil 1.** Sol tarafta (a) tek bir nokta için farklı kompozisyona sahip iki modelin  $T_{\text{eff}}-L$  grafiği görülmektedir. İçi boş daire ile gösterilen modelin  $Z$  değeri 0.0124, asteriks ile gösterilen modelin  $Z$  değeri ise 0.0220'dir. İçi dolu nokta ise gözlem verisini temsil etmektedir. Sağ tarafta (b) ise bu modellere ait  $\nu-\Delta\nu$  grafiği görülmektedir.

**Çizelge 1.** KIC 7747078 yıldızına ait fit modellerinin  $Z$ ,  $Y$ ,  $t$ ,  $\nu_{\text{min}0}$  ve  $\nu_{\text{min}1}$  değerleri verilmiştir. Son satırda yıldızın gözlem frekansından elde edilen minimum frekansları yer almaktadır.

$Z$	$Y$	$t(10^9)$	$\nu_{\text{min}0}(\mu\text{Hz})$	$\nu_{\text{min}1}(\mu\text{Hz})$
0.0124	0.2670	6.03	1003.23	790.21
0.0132	0.2749	5.89	1010.40	792.37
0.0150	0.2903	5.64	1044.38	797.27
0.0184	0.3140	5.30	1052.78	806.72
0.0220	0.3357	5.00	1061.68	827.04
—	—	—	1039.3	792.5

delleri frekanslardan ayırt etmemizi engeller niteliktedir. Daha dikkatli bakıldığında, 800  $\mu\text{Hz}$  civarında gözlemin yanı sıra her iki modelin  $\Delta\nu$ 'sü de yerel minimuma ( $\nu_{\text{min}1}$ ) sahiptir. Çizelge 1 de KIC7747078 yıldızına ait farklı kompozisyondaki modellerin  $Z$ ,  $Y$ ,  $t$ ,  $\nu_{\text{min}0}$  ve  $\nu_{\text{min}1}$  değerleri verilmiştir. En alt satırda ise yıldızın gözlem verilerinden belirlenen  $\nu_{\text{min}0}$  ve  $\nu_{\text{min}1}$  değerleri yer almaktadır. 3. sütunda modellerin yaşları verilmiştir. HR diyagramında aynı noktada bulunmalarına rağmen farklı yaşlara sahip olduğunu görüyoruz.  $\nu_{\text{min}}$ 'in modelleri ayırt edici özelliğinin olup olmadığını inceledik. Şekil 2'de  $Z$  ve  $\nu_{\text{min}1}$  grafiği yer almaktadır. Bu grafiğe baktığımız zaman  $\nu_{\text{min}1}$  ile modelleri birbirinden ayırt edebildiğimizi görüyoruz. Düz çizgi ile gösterilen frekans değeri gözlem verisine aittir. Bu değer kestirdiği noktadaki  $Z$ 'ye baktığımız zaman  $\sim 0.0133$  değerini vermektedir. Çizelge.1'de gözleme ait  $\nu_{\text{min}1}$ 'in  $Z$ 'si 0.0132 ve 0.0150 olan modellerin  $\nu_{\text{min}1}$ 'i arasında yer almaktadır. Aynı durum  $\nu_{\text{min}0}$  için de geçerlidir.  $\nu_{\text{min}1}$ 'in bize gösterdiği  $Z$  ile model yaptığımız zaman elde ettiğimiz  $\nu_{\text{min}0}$  ve  $\nu_{\text{min}1}$  değerleri 1041.55 ve 792.47  $\mu\text{Hz}$ 'dir. Modelin yaşı ise 5.88 milyar yıldır. Bu sonuçtan da anlaşılacağı gibi anakol sonrası yıldızlarda  $\nu_{\text{min}}$  değerlerini kullanarak modelleri birbirinden ayırt edebiliyoruz.



**Şekil 2.** Grafikte  $Z$ 'ye karşı farklı modellerin  $\nu_{\text{min}1}$  değerleri çizdirilmiştir. Düz çizgi  $\nu_{\text{min}1}$ 'in gözlemsel değerine aittir(792.5  $\mu\text{Hz}$ ).

#### 4 Seçilmiş TESS Yıldızlarının Modelleri

Araştırmada yıldızlar TASC'ın V6 listesindeki ilk 50 yıldız içerisinde belirlenmiştir. Bu 50 yıldız içerisinde literatürde  $V$  parlaklığı,  $[Fe/H]$ ,  $T_{\text{eff}}$ ,  $\log g$  ve  $d$  verileri tam olan ve 1-1.5 $M_{\odot}$  kütle aralığında yer alan 10 yıldız üzerinde inceleme yapılmıştır. Bu yıldızların uzaklık aralığı 9-80 pc'tir. Yıldızların  $\log g$  değerine baktığımız zaman anakoldan ayrılmış olduklarını söyleyebiliriz. Bölüm 2'de  $M_{FT\pi}$ 'nin duyarlı bir şekilde belirlenmesinde bir çok parametrenin etkili olduğunu söylemiştik. İncelediğimiz TESS yıldızlarını düşünecek olursak bize yakın oldukları için  $M$  üzerinde esas olarak  $\log g$  ve  $T_{\text{eff}}$  etkilidir diyebiliriz.

TESS tarafından bu yıldızların gözlem frekansları daha elde edilmediği için iç yapı modeli yaparken iki farklı yol izledik. Birinci yol bölüm 2'de bahsettiğimiz yoldan hesapladığımız kütle olan  $M_{FT\pi}$ 'yi kullanarak hesaplanan  $L$  değerini veren

$Y$ 'yi bulmaya dayanmaktadır. İkinci yol ise  $Y$  değerini güneş değeri olan  $Y_{\odot} = 0.2794$  alıp aynı  $L$  değerini veren  $M$ 'yi bulmaya dayanmaktadır. Böylece, daha gözlem verileri elde edilmeden yıldızların sismik parametrelerini önceden hesapladık. Yıldızlara ait model ve bazı gözlem verileri Çizelge 2'de yer almaktadır. Üstteki tabloda  $Y$ 'nin değişken olduğu model verileri, alttaki tabloda ise  $M$ 'nin değişken alındığı model verileri yer almaktadır.  $M_{FT\pi}$  ile yapılan modellerde helyum bolluğu çok düşük ve yüksek olan değerler vardır (Çizelge 2'de üst tablo). Bu durum  $\log g$  veya  $T_{\text{eff}}$  değerlerinin tayfsal yoldan iyi bir şekilde belirlenememesinden kaynaklanıyor olabilir. İkinci yol ile yapılan yani  $Y = Y_{\odot}$  alınarak yapılan modellerde alternatif  $\log g$  değerleri elde edilmiştir.

Genel olarak bakıldığında  $Y_{\odot}$  kullanılarak yapılan modellerde yaş daha fazla çıkmaktadır. Özellikle iki tabloda da altı çizili olan TIC 287096308 yıldızının yaşı dikkat çekmektedir. Bu yıldız kırmızı dev kolunu (RGB) tırmanan bir yıldızdır. Her iki yoldan yapılan modelde de yıldızın yaşı öngörülen gökada yaşından daha fazla çıktı. Bu problemi çözebilmek için  $T_{\text{eff}}$  yerine yıldızın ( $B - V$ ) renginden elde edilen  $T_{B-V} = 4916$  K sıcaklığı kullanılarak hesaplamalar tekrardan yapılmıştır. Hesaplanan yeni parametreler ile model yapıldığı zaman elde edilen yaşları şöyledir;  $Y$ 'si değişen alınarak yapılan modelde 13.1 ve  $M$ 'si değişen alınarak yapılan modelde ise 12.3 milyar yıl. Görüldüğü üzere hata payı içerisinde yer alabilen 130 K'lık bir fark ile yıldızın yaşı makul değere çekilmiştir. RGB kolunu tırmanan bir yıldız için sıcaklıktaki değişimin kütle ve yaş üzerindeki etkisinin ne kadar kuvvetli olduğunu TIC 287096308 yıldız üzerinde yapılan incelemede görülmektedir. Bu yıldızla ait yeni model verileri Çizelge 3'tedir. Yeni yapılan modelde  $M$ 'nin yanı sıra  $Y$  değeri de daha makul bir değere sahip olmaktadır.

## 5 Sonuçlar

TASC tarafından belirlenen hedef listesindeki ilk 50 yıldız içerisinde gözlem verileri tam ve kütlesi  $1-1.5M_{\odot}$  arasında olan 10 yıldız incelendi. Asterosismik parametreler kullanılarak yıldızların  $M$ ,  $R$  ve  $t$  gibi temel parametrelerini hassas bir şekilde belirleyebiliyoruz. TESS tarafından henüz bu yıldızların frekansları elde edilmediği için fotometrik ve tayf verileri kullanılarak yıldızların temel parametreleri hesaplanmıştır. Hesaplanan parametreler ile MESA evrim kodunda yıldızların iç yapı modelleri yapılmıştır. Yapılan bu iç yapı modellerinin frekanslarında ADIPLS paketi kullanılarak hesaplanmıştır. Gözlem verilerinden elde edilecek olan  $\Delta\nu$  ve  $\nu_{\text{max}}$  değerlerinin iç yapı modellerinden elde edilen aralıkta çıkması beklenmektedir.

İkinci yol ile yapılan modellerde yani  $Y = Y_{\odot}$  alındığı zaman yaşta genel olarak bir artış görülmektedir. Özellikle TIC 287096308 yıldızının her iki yoldan yapılan modelde öngörülen yaş gökada yaşından çok daha fazla çıkmaktadır. Bu sorunu  $T_{\text{eff}}$ 'i tayf sıcaklığı almak yerine ( $B - V$ ) renk sıcaklığı alarak çözüme kavuşturduk. Bu örnek sayesinde RGB'yi tırmanan yıldızlarda sıcaklığın kütle ve yaş gibi parametreler üzerindeki ne kadar etkili olduğu net bir şekilde görülmektedir.

Anakol yıldızlarında yaş  $\delta\nu$  ile duyarlı bir şekilde belirleyebiliyoruz. Ancak anakol sonrası yıldızlarda  $\delta\nu$  iyi bir yaş belirteci değildir. Bu yıldızlarda  $\delta\nu$  yerine yaş tahmini yapabilmek için  $\nu_{\text{min}0}$ ,  $\nu_{\text{min}1}$  ve  $\nu_{\text{min}2}$  gibi minimum frekanslar kullanılabilir.

## Kaynaklar

Baglin A., Michel E., Auvergne M., COROT Team, Scientific Objectives for a Minisat: CoRoT, 2006, ESA Special Publication, 1306, 33

- Borucki W. J., Koch D., Basri G., ve ark., Kepler Planet-Detection Mission: Introduction and First Results, 2010, Science, 327, 977
- Brown T. M., Gilliland R. L., Noyes R. W., Ramsey L. W., Detection of possible p-mode oscillations on Procyon, 1991, ApJ, 368, 599
- Chaplin, W.J., Elsworth, Y., Isaak, G.R., Miller, B.A., New, R., Skew-symmetric solar P modes in low-l BiSON data, 1999, MNRAS, 308, 424
- Christensen-Dalsgaard J., ADIPLS-the Aarhus adiabatic oscillation package, 2008b, Ap&SS, 316, 13
- Gaia Collaboration, Brown A. G. A., ve ark., Gaia Data Release 2, Summary of the contents and survey properties, 2018, A&A, 616, A1
- Kjeldsen, H., Bedding, T. R., Amplitudes of stellar oscillations: the implications for asteroseismology, 1995, A&A, 293, 87
- van Leeuwen, F., Validation of the new Hipparcos reduction, 2007, 474, 653
- Paxton B., Bildstein L., Dotter A., ve ark., Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA), 2011, ApJS, 192, 3
- Sullivan P. W. ve ark., The Transiting Exoplanet Survey Satellite: Simulations of Planet Detections and Astrophysical False Positives, 2015, ApJ, 809, 77
- Tassoul, M., Asymptotic approximations for stellar nonradial pulsations, 1980, ApJS, 43, 469
- Ulrich R.K., Determination of stellar ages from asteroseismology, 1986, ApJ, 306, L37
- Yıldız M., Çelik Orhan Z., Aksoy Ç., Ok S., Fundamental properties of solar-like oscillating stars from frequencies of minimum  $\Delta\nu$  - I. Model computations for solar composition, 2014, MNRAS, 441, 2148

## Erişim:

022-1150: UAK-2018 Program — UAK Bildiri — Turkish J.A&A.

**Çizelge 2.** TESS yıldızlarının hem gözlemden hem de modellerden elde edilen verileri aşağıdaki tablolarda yer almaktadır. Üstteki tabloda  $Y$  değişken, alttaki tabloda ise  $M$  değişken alınmıştır.

$TIC$	$d(pc)$	$\log g$	$T_{Tayf}(K)$	$M(M_{\odot})$	$Y$	$Z$	$t(10^9)$	$\delta\nu(\mu Hz)$	$\nu_{max}(\mu Hz)$
38511251	9.1	3.74	5012	1.13	0.2176	0.0128	9.7	41.07	656.5
43255143	10.7	3.71	5766	1.44	0.2505	0.0118	2.9	36.42	572.4
96290130	60.8	3.43	5059	1.27	0.2087	0.0085	5.5	23.19	320.0
123699670	22.5	3.70	5365	1.13	0.3185	0.0108	4.4	38.21	577.5
189839944	75.8	3.45	5060	1.14	0.2955	0.0135	5.8	24.62	335.0
275371234	40.9	3.60	4979	1.08	0.2750	0.0169	9.2	32.52	478.6
277548101	29.7	3.62	4937	1.10	0.2402	0.0154	10.3	33.45	501.8
287096308	65.9	3.30	4786	1.10	0.1780	0.0143	15.1	19.11	243.9
375621179	13.4	3.54	5062	1.26	0.2068	0.0092	5.9	28.22	413.0
413853880	71.5	3.39	4962	1.51	0.1620	0.0120	4.5	20.34	295.3

$TIC$	$d(pc)$	$\log g$	$T_{Tayf}(K)$	$M(M_{\odot})$	$Y$	$Z$	$t(10^9)$	$\delta\nu(\mu Hz)$	$\nu_{max}(\mu Hz)$
38511251	9.1	3.66	5012	0.95	0.2794	0.0128	12.4	37.43	549.8
43255143	10.7	3.70	5766	1.39	0.2794	0.0118	2.8	35.77	551.7
96290130	60.8	3.33	5059	1.00	0.2794	0.0085	8.5	20.48	252.4
123699670	22.5	3.73	5365	1.21	0.2794	0.0108	4.4	39.73	621.4
189839944	75.8	3.48	5060	1.21	0.2794	0.0135	5.2	25.39	355.7
275371234	40.9	3.59	4969	1.06	0.2794	0.0169	9.5	32.19	469.9
277548101	29.7	3.56	4937	0.96	0.2794	0.0154	13.0	31.29	440.0
287096308	65.9	3.15	4786	0.78	0.2794	0.0143	27.8	15.95	172.6
375621179	13.4	3.44	5062	0.99	0.2794	0.0092	9.2	24.81	323.6
413853880	71.5	3.23	4962	1.03	0.2794	0.0120	8.9	16.98	201.5

**Çizelge 3.** TIC 287096308 yıldızı için ( $B - V$ ) sıcaklığı ile tayf sıcaklığı kullanılarak yapılan modellerin temel özellikleri.

	Değişken	$\log g$	$T_{eff}(K)$	$M(M_{\odot})$	$Y$	$Z$	$t(10^9)$
$T_{eff} = T_{B-V}$	Y	3.30	4916	0.93	0.2901	0.0143	13.1
	M	3.32	4916	0.97	0.2794	0.0143	12.3
$T_{eff} = T_{B-V}$	Y	3.30	4786	1.10	0.1780	0.0143	15.1
	M	3.15	4786	0.78	0.2794	0.0143	27.8