ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

BLAZHKO ETKİSİ GÖSTEREN BAZI RR LYRAE TÜRÜ YILDIZLARIN FREKANS ANALİZİ

Lale ÇELİK ŞENAVCI

ASTRONOMİ VE UZAY BİLİMLERİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2016

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Lale ÇELİK ŞENAVCI tarafından hazırlanan **"Blazhko Etkisi Gösteren Bazı RR Lyrae Türü Yıldızların Frekans Analizi"** adlı tez çalışması 13/07/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı'da **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Fehmi EKMEKÇİ

Jüri Üyeleri :

Başkan : Prof. Dr. Halil KIRBIYIK
TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi

Üye : Prof. Dr. Fehmi EKMEKÇİ
Ankara Üniversitesi,
Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Selim O. SELAM
Ankara Üniversitesi,
Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı

Üye : Doç. Dr. Mehmet TANRIVER
Erciyes Üniversitesi,
Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı

Üye : Yrd. Doç. Dr. Özgür BAŞTÜRK
Ankara Üniversitesi,
Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. İbrahim DEMİR
Enstitü Müdürü

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

24.06.2016



Lale ÇELİK ŞENAVCI

ÖZET

Doktora Tezi

BLAZHKO ETKİSİ GÖSTEREN BAZI RR LYRAE TÜRÜ YILDIZLARIN FREKANS ANALİZİ

Lale Çelik Şenavcı

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı

Danışman:Prof. Dr. Fehmi EKMEKÇİ

Kepler teleskobu aslında ötegezegen araştırmaları için tasarlanmış olsa da bu görev aracılığıyla alınan veriler sayesinde yıldız astrofiziğine ilişkin yeni bulgular elde edilmektedir. Bu bağlamda, Kepler verileri kullanılarak yapılan çalışmalar Astrosismoloji araştırmalarına önemli bir katkı sağlamış, özellikle RR Lyrae türü bünyesel değişen yıldızlarda görülen Blazhko etkisinin detaylı incelenmesine olanak sağlamıştır. Bu tez çalışmasında, Kepler Teleskobu K1 görevi görüş alanında yer alan yaklaşık 40 adet RR Lyrae yıldızından biri olan V450 Lyr yıldızının Kepler verileri kullanılarak detaylı frekans analizi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında öncelikle, bazı aletsel etkiler nedeniyle meydana gelen sezonlar arası seviye farkları, C ve IDL programlama dilleri ile geliştirilen bir kod kullanılarak düzeltildi. Bu aşamadan sonra, toplamda 17 sezonluk ve yaklaşık olarak 4 yılı kapsayan kesintisiz veriler kullanılarak V450 Lyr yıldızına ilişkin Q1'den Q17'ye kadar uzun poz süreli (Long Cadence) toplu sezon ve ayrı ayrı sezonlar ile birlikte 7. sezonda elde edilen kısa poz süreli (Short Cadence) verilerin frekans analizleri gerçekleştirildi. Ek olarak mevcut verilerin maksimum zamanları belirlenerek yıldızın dönem (O-C) analizi de yapıldı. Uzun ve kısa poz süreli verilerden elde edilen f_0 frekansına karşılık dönem ~ 0.505 gün olup hem birbirleriyle hem de literatür ile uyum içerisindedir. Uzun ve kısa poz süreli verilere ek olarak O-C analizlerinden elde edilen f_B Blazhko dönemi ise ~ 125 gün olup yine literatür ile uyumludur. Yıldızın klasik olmayan bir RRd türü olduğunu gösteren f_2 ikinci üst tona (second overtone) karşılık dönem ~ 0.301 gün olup, O-C ve kısa poz süreli verilere uygulanan frekans analizlerinden elde edilmiştir. Ayrıca ikinci modülasyon göstergesi olan f_s (secondary modulation)'ye karşılık dönem ~ 80 gün olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak bu çalışma kapsamında edilen bulguların literatür bilgileri ile uyum içerisinde olduğu tespit edilmiş ve V450 Lyr yıldızının uzun dönemli bir Blazhko yıldızı olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, V450 Lyr yıldızının literatürdeki türünün (RRab) yapılan detaylı analizler sonucunda klasik olmayan bir RRd türü olarak değiştiği sonucuna ulaşılmıştır.

Temmuz 2016, 127 sayfa

Anahtar Kelimeler: RR Lyrae türü, Zonklama, Blazhko Etkisi, Frekans Analizi

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

THE FREQUENCY ANALYSIS OF SOME RR LYRAE TYPE STARS WITH BLAZHKO EFFECT

Lale Çelik Şenavcı

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Astronomy and Space Sciences

Supervisor: Prof. Dr. Fehmi EKMEKÇİ

Though the Kepler Telescope is designed for exoplanet research, the data received by this mission allows us to obtain new findings concerning stellar astrophysics. In this context, the studies based on the Kepler data provide significant amount of contribution to asteroseismology, especially on the investigation of the Blazhko Effect observed in RR Lyrae type stars. In this thesis study the frequency analysis of V450 Lyr, one of which the ~ 40 RR Lyrae stars in the Kepler Field of K1 mission, was performed using precise Kepler data. Within the context of this study, the level differences due to some instrumental effects are primarily corrected with the help of the codes written in C and IDL programming languages. After this stage, 17 quarters of long cadence data covering ~ 4 years are used individually and totally for the detailed frequency analysis together with the short cadence data obtained at the quarter 7. In addition, an O-C analysis of V450 Lyr was also performed using the maxima times determined from the current data. The fundamental mode f_0 obtained via both long and short cadences as ~ 0.505 d^{-1} is very well in accordance with each other as well as the related studies from the literature. The Blazhko period f_B determined from the O-C analysis as ~ 125 d^{-1} in addition to that is obtained by the frequency analysis of both long / short cadences is also in accordance with the literature. The second overtone f_2, which reveals V450 Lyr is a non-classical RRd type star, is obtained only from the O-C analysis and frequency analysis as ~ 0.301 d^{-1} in addition to the secondary modulation f_s as ~80 d^{-1}. In conclusion, the results obtained in this study show that V450 Lyr is a long – term Blazhko star that is also in agreement with the results from the literature. Besides, detailed analysis also yield strong evidences that V450 Lyr is a non-classical RRd type star unlike the identified type of the star as RRab, in the literature.

July 2016, 127 pages

Key Words: RR Lyrae type, Pulsation, Blazhko Effect, Frequency Analysis

TEŞEKKÜR

Bu çalışma boyunca bana zaman ayıran ve birçok konuda yardımcı olan sayın danışmanhocam Prof. Dr. Fehmi EKMEKÇİ'ye (Ankara Üniversitesi Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı) ilgi ve özverisinden dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca beni her zaman her konuda destekleyen anneme, babama ve ablama, bu tez çalısmam boyunca yoğun temposuna rağmen fedakarlıkta bulunup bana çok yardımcı olan sevgili eşim Doç. Dr. Hakan Volkan ŞENAVCI'ya (Ankara Üniversitesi Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı) ve canım oğlum Mete Efe ŞENAVCI'ya sonsuz tesekkür ederim.

Bu tez çalışmasında bilgi ve deneyimleriyle bana katkı sağlayan Ankara Üniversitesi Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim dalı öğretim üyelerinden Prof. Dr. Selim O. SELAM, Ankara Üniversitesi Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı)Yrd. Doç. Dr. Özgür BAŞTÜRK, TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi Müdürü Prof. Dr. HalilKIRBIYIK ve Erciyes Üniversitesi Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim dalı öğretim üyelerinden Doç. Dr. Mehmet TANRIVER hocalarıma teşekkür ederim.

Bu tez çalısmasının en önemli bölümünü bitirmemde, gözlemlerden analizlere kadar bana her asamada yardımcı olan, başta Kepler Uzay Teleskobu ekibinde yer almış herkese ve verilerin değerlendirilmesi konusunda *Kepler* Asteroseismic Science Consortium (KASC) grubu'na, Dr. Katrien KOLENBERG'e, Dr. Karen KINEMUCHI'ye, Konkoly Observatory-Hungarian Asteroseismology Group (Konkoly Gözlemevi-Macaristan Astrosismoloji Grubu) üyesi ve Eötvös Universitesi Dr. László Molnár'a, Dr. József Benkő'ya, Dr. James Nemec'e, teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince, özellikle verilerin kullanışlı hale getirilebilmesi için yazılan IDL ve C programlama dili ile ölçeklendirme kodunun oluşturulmasında ve kullanılmasında bana yardımcı olan Doç. Dr. Hakan Volkan ŞENAVCI'ya, M. Ertan TÖRÜN'e, İbrahim ÖZAVCI'ya, ve Engin BAHAR'a teşekkür ederim.

Bu süreçte araştırmalarım ve tezimin yazım aşamasında bana manevi desteklerini esirgemeyen Başkent Üniversitesi Devlet Konservatuvarı ve Siyaset Bilimi ve Uluslararası İlişkiler Bölümü'ndeki tüm hocalarıma ayrıca teşekkürlerimi sunuyorum.

Lale ÇELİK ŞENAVCI
Ankara, Temmuz 2016

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI
ETİK..... i
ÖZET..... ii
ABSTRACT..... iii
TEŞEKKÜR..... iv
SİMGELER DİZİNİ..... vi
SEKİLLER DİZİNİ..... ix
ÇİZELGELER DİZİNİ..... xiii
1. GİRİŞ..... 1
1.1 RR Lyrae Türü Yıldızların Genel Özellikleri ve Doğası..... 1
1.2 Fotometrik ve Tayfsal Özellikleri..... 8
1.3 RR Lyrae Yıldızlarının Evrim Özellikleri..... 16
1.4 Blazhko Etkisi..... 21
2. RR YILDIZLARININ ANALİZİ İÇİN VERİ ELDE EDİLMESİ..... 44
2.1 Kepler Uzay Teleskobu..... 44
3. V450 LYR (KIC7671081) YILDIZINA İLİŞKİN KAYNAK ÖZETLERİ..... 50
4. MATERYAL VE YÖNTEM..... 63
5. ARAŞTIRMA BULGULARI..... 79
5.1 Uzun Poz Süresi İle Elde Edilen Verilerin Frekans Analizi..... 79
5.2 Uzun Poz Süresi İle Elde Edilen Her Bir Sezon Verilerinin Frekans Analizi..... 85
5.3 Kısa Poz Süresi İle Elde Edilen Verilerin Frekans Analizi..... 104
6. V450 LYR YILDIZININ DÖNEM DEĞİŞİM KARAKTERİSTİĞİ (O-C ANALİZİ)..... 111
7. TARTIŞMA VE SONUÇ..... 114
KAYNAKLAR..... 119
ÖZGEÇMİŞ..... 125

SİMGELER DİZİNİ

ρ	Yoğunluk
κ	Donukluk
λ	Dalgaboyu
φ	Evre
[Fe/H]	Demir bolluğunun hidrojen bolluğuna oranı
Å	Angstrom
A_i	Genlik
b	Galaktik boylam
d	Gün
dk	Dakika
e^-	Elektron
g	Yüzey çekim ivmesi
H	Hidrojen
He	Helyum
K	Kelvin
kG	KiloGauss
km	Kilometre
l	Galaktik enlem
Log	Logaritma
$L_\odot$	Güneş'in toplam ışınım gücü, $3.86x10^{33}$ ergsn-1
m	Kadir; parlaklık birimi
M	Kütle
mag	Magnitude; parlaklık birimi
M_{bol}	Mutlak bolometrik paralaklık
mmag	milikadir
m_v	Görünen görsel parlaklık
M_v	Mutlak görsel parlaklık
$M_\odot$	Güneş'in kütlesi $1.99x10^{33}$ gr
nm	Nanometre
P	Dönem

pc	parsek
R	Yarıçap
R	Tayfsal Çözünürlük
$R_\odot$	Güneş'in yarıçapı, 6.96×10^5 km
sa	Saat
sn	Saniye
T_e	Etkin sıcaklık
T_{eff}	Etkin Sıcaklık
V_0	Dönme hızı
Z	Metal bollugu
τ_{KH}	Kelvin-Helmholtz zaman ölçeği
Φ_i	Period04 programında kullanılan evre
Ω_i	Period04 programında kullanılan frekans

Kısaltmalar

BD	Bonner Durchmusterung Kataloğu
CCD	Charge Coupled Device
f	Frekans
FM	Fundamental Mode (Temel zonklama modu)
FWHM	Yarı siddetteki tam genislik
GCVS	General Catalogue of Variable Stars
HD	Henry Draper Kataloğu
HIF	Half Integer Frequency (Yarım tamsayı frekanslar)
HIP	Hipparcos katalogu
HJD	Heliosentrik Jülyen Günü
HR diyagramı	Hertzsprung Russel diyagramı
KIC	Kepler Input Catalog
O1	Birinci üst ton
O2	İkinci üst ton
PD	Period Doubling
P-L	Dönem-Parlaklık bağıntısı

Pop I - II	Popülasyon I - Popülasyon II
Q	3 Aylık gözlem sezonu
S/N	Sinyalin gürültüye oranı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 κ Mekanizması aşamalarının sıralı gösterimi 3

Şekil 1.2 Kısmi İyonlaşma Bölgesinin sıcaklığı ile ilgili fiziksel şartlarda donukluğun kaynağına iyonlaşmanın katkısı 5

Şekil 1.3 Daha düşük sıcaklıkta Kısmi İyonlaşma bölgesindeki fiziksel şartlarda donukluk kaynağına iyonlaşmanın katkısı 5

Şekil 1.4 Sol sütun temel modda zonklama, ortadaki sütun birinci harmonik modda zonklama, en sağdaki sütunda sıcaklık yüksek, yoğunluk düşük ve zonklama yoktur 7

Şekil 1.5 İyonizasyon Bölgesinin derinliği ve kritik sıcaklık aralığı 8

Şekil 1.6 HR diyagramında yatay kol üzerindeki konumları 9

Şekil 1.7 Sefeid ve RR Lyrae değişenlerine ait Dönem-Parlaklık bağıntısı 9

Şekil 1.8 Sırasıyla a, b, c türüne ait yıldızların ışık eğrilerindeki maksimum ve minimumlar arasındaki ortalama farkı gösterimi 11

Şekil 1.9 RRd türünün diğer altsınıflarla kıyaslanmasına ait ışık eğrisi 11

Şekil 1.10 25/07/2012 tarihinde yıldız maksimum evresindeyken alınmış bir tayf 13

Şekil 1.11 Maksimum ışık yoğunluğu civarında RR Lyrae tayfının moröte kısmı 13

Şekil 1.12 Farklı RR Lyrae türü yıldızların tayflarının kesitlerinden örnekler 14

Şekil 1.13 Üst panelde ve alt panelde RR Lyrae yıldızının sırasıyla maksimum ve minimum evredeyken alınmış tayf görüntüsü 15

Şekil 1.14 4860 Å'de alınmış H_β soğurma çizgisi 15

Şekil 1.15 RR Lyrae değişen yıldızlarının HR diyagramındaki konumu 17

Şekil 1.16 1 $M_\odot$ kütleli yıldızın evrim durumunu gösteren diyagram 18

Şekil 1.17 Kütleleri 1, 2, 3 ,4, 7, 12 ve 20 $M_\odot$ kütleli değişen yıldızların HR diyagramındaki konumları ve evrim yollarının gösterimi 20

Şekil 1.18 RRab, RRc ve RRd türü yıldızların yarıçaplara bağlı olarak zonklama modları 22

Şekil 1.19 Temel ve birinci harmonik modlarının gösterim 22

Şekil 1.20 Blazhko etkisini açıklayan iki model 25

Şekil 1.21 1995-2006 Yılları arasında Blazhko Etkisini açıklayan Manyetik model ile rezonans modellerin şeması 25

Şekil 1.22 Tipik RR Lyrae değişen yıldızlarının ışık eğrisi 26

Şekil 1.23 Blazhko Etkisini açıklamak için öne sürülen modellerin kronolojik sıralaması 27

Şekil 1.24 Bir RR Lyrae yıldızındaki en dış katmanda şok dalgasının yayılması esnasında Hα çizgi profilinin evrimini gösteren kuramsal şema 29

Şekil 1.25 Prototip RR Lyrae Yıldızının evreden evreye göre H_α çizgi profilinin değişimi yani evrimi..... 31
Şekil 1.26 RR Lyrae Yıldızının He I λ5875.66 çizgi profilinin evrimi..... 31
Şekil 1.27 RR Lyrae Yıldızının He II λ4685.68 çizgi profilinin evrimi.....32
Şekil 1.28 RR Lyrae Yıldızının He I λ6678.16 çizgi profilinin evrimi..... 32
Şekil 1.29 Hα çizgisinde oluşan gözlenmiş üç salma bileşenin çizgi profili.....35
Şekil 1.30 Şok dalgalarının zonklama evresine karşılık yarıçap eğrisinde oluşum bölgelerini göstermektedir..... 38
Şekil 1.31 Bir zonklama çevrimi süresince görülen şok dalgaları.....39
Şekil 1.32 Işık eğrisinde minimumdan maksimuma geçiş süreci.....39
Şekil 1.33 Genliğe karşılık zonklama çevrim sayısını veren grafik..... 40
Şekil 1.34 Farklı türde zonklayan yıldızlarda atmosfer boyunca dağılan şok dalgalarının sebep olduğu salma çizgileri.....41
Şekil 1.35 RR Lyrae atmosferinin şematik hareketi.....42
Şekil 2.1 Kepler Uzay Teleskobu..... 45
Şekil 2.2 Kepler Teleskobunun tasarımı.....45
Şekil 2.3 Kepler Teleskobunun görüş alanı (FOV)..... 46
Şekil 2.4 Gökyüzündeki görüş alanı olarak galaksimizin Orion kolu boyunca uzanmış Cygnus ve Lyrae bölgeleri seçilmiştir.....47
Şekil 2.5 Kepler'in yörüngesi - Güneş panellerinin yörünge boyunca Güneş'e doğru ayarlanması.....48
Şekil 3.1 V450 Lyr yıldızının Q1-Q2 verileri birleştirilerek elde edilen ışık eğrisi sağ üstte görülmektedir.....51
Şekil 3.2 RRab, RRc ve RRd türü yıldızların yarıçaplara bağlı olarak zonklama modları, n merkez ve yüzey arası düğüm sayısı..... 52
Şekil 3.3 RR Lyrae Bailey alt sınıfları ve zonklama modları F: radyal temel mod; 1H: radyal birinci üst tonu simgelemektedir.....52
Şekil 3.4 RR Lyrae yıldızının kendisinin Q5 short-cadence verilerinin normalize edilmiş ışık eğrisi.....54
Şekil 3.5 PD dönüşümlü olarak yüksek ve düşük maksimum zamanı göstermektedir.....54
Şekil 3.6 Yarı tekrarlayan 3 zonklama çevrimi yapısının sonucu olarak 3:5 oranına yakın f_0/f_2 dönemi.....55
Şekil 3.7 Birinci üst ton ve temel modun birleşimi görülen klasik RRd türü örnek ışık eğrisi.....56
Şekil 3.8 Fourier spektrumunda temel moda (f_0) ek olarak sadece tek bir ek mod (f_2) görülmektedir.....56

Şekil 3.9 Dr. Molnár'ın doktora tezinde V450 Lyr yıldızında f_2 (c/d) değerini ikinci üst ton'a karşılık gelen f_2 (c/d) frekansı 56
Şekil 3.10 Çeşitli RR Lyrae türü yıldızların ek frekansların yapısı 57
Şekil 3.11 Bazı RR Lyrae yıldızların O-C Analiz diyagramları 58
Şekil 3.12 Genlik ve Frekans değişiminin özellikleri görülmektedir 59
Şekil 3.13 En üst panel V450 Lyr yıldızının O−C diyagramının Fourier tayfının yakınlaştırılmış hali 61
Şekil 4.1 Q1-Q7 sezon verileri kullanılarak yeniden ölçeklendirilmemiş birinci örnek yıldızın ışık eğrisi 64
Şekil 4.2 Q1-Q7 sezon verileri kullanılarak yeniden ölçeklendirilmemiş ikinci örnek yıldızın ışık eğrisi 65
Şekil 4.3 Q1-Q7 sezon verileri kullanılarak yeniden ölçeklendirilmemiş üçüncü örnek yıldızın ışık eğrisi 65
Şekil 4.4 Q1-Q7 sezon verileri kullanılarak yeniden ölçeklendirilmemiş dördüncü örnek yıldızın ışık eğrisi 66
Şekil 4.5 Q1-Q7 sezon verileri kullanılarak yeniden ölçeklendirilmemiş beşinci örnek yıldızın ışık eğrisi 66
Şekil 4.6 Beşinci örnek yıldız üzerinde Kepstitch ve Kepdetrend taskları uygulanarak yapılan düzeltme 67
Şekil 4.7 Beşinci örnek yıldız üzerinde uygulanan ilk düzeltme uygulaması 68
Şekil 4.8 Yeniden ölçeklendirmeyi gösteren akış şeması 70
Şekil 4.9 Q1-Q7 sezon verileri kullanılarak yeniden ölçeklendirilmiş birinci örnek yıldızın ışık eğrisi 71
Şekil 4.10 Q1-Q7 sezon verileri kullanılarak yeniden ölçeklendirilmiş ikinci örnek yıldızın ışık eğrisi 71
Şekil 4.11 Q0-Q7 verileri kullanılarak yeniden ölçeklendirilmiş üçüncü örnek yıldızın ışık eğrisi 72
Şekil 4.12 Q1-Q7 sezon verileri kullanılarak yeniden ölçeklendirilmiş dördüncü örnek yıldızın ışık eğrisi 72
Şekil 4.13 Q1-Q7 sezon verileri kullanılarak yeniden ölçeklendirilmiş beşinci örnek yıldızın ışık eğrisi 73
Şekil 4.14 Ölçeklendirme yapılmadan önce *Kepler*'den alınan verilerin karşılaştırılması 74
Şekil 4.15 Ölçeklendirme yapıldıktan sonra *Kepler*'den alınan verilerin karşılaştırılması 75
Şekil 4.16 Q1-Q11 sezon verileri ve Dr. József Benkő'nun geliştirdiği kod ile yeniden ölçeklendirilmiş V450 Lyr yıldızın ışık eğrisi 76
Şekil 4.17 Dr. József Benkő'nun geliştirdiği kod ile bu çalışma kapsamında yazılan kodların sonuçlarının karşılaştırılması 76

Şekil 4.18 Toplam 17 Sezonun birleştirilmiş ışık eğrisi.....77
Şekil 4.19 PERIOD04 programında 17 Sezonun birleştirilmiş ışık eğrisinden bir kesit..... 77
Şekil 4.20 Sezon 7'nin alt sezonları olan 7.1, 7.2 ve 7.3'ün birleştirilmiş ışık eğrisi.....78
Şekil 4.21 Sezon 7'nin alt sezonları olan 7.1, 7.2 ve 7.3'ün ışık eğrisinden bir kesit.... 78
Şekil 5.1 Prototip RR Lyrae yıldızının frekans analizinde görülen PD Etkisi.....81
Şekil 5.2 Frekans analizi sonucunda elde edilen tayfsal pencere..... 83
Şekil 5.3 Frekans analizi sonucunda elde edilen güç tayfı..... 84
Şekil 5.4 V450 Lyr yıldızının belirli bir aralıktaki gözlemsel ve kuramsal ışık eğrileri.....84
Şekil 5.5 Gözlemsel ve kuramsal ışık eğrilerinin daha detaylı incelenmesi.....85
Şekil 5.6 Gözlemsel ışık eğrilerinde görülen hump yapısının kuramsal eğriye fit edilmesi..... 85
Şekil 5.7 PERIOD04 programının matris hatası gösterilmektedir.....86
Şekil 5.8 Kısa poz süreli verilerin frekans analizi sonucunda elde edilen tayfsal pencere..... 105
Şekil 5.9 Kısa poz süreli verilerin frekans analizi sonucunda elde edilen güç tayfı.... 105
Şekil 5.10 V450 Lyr yıldızının belirli bir aralıktaki gözlemsel ve kuramsal ışık eğrileri..... 106
Şekil 5.11 Gözlemsel ve kuramsal ışık eğrilerinin daha detaylı incelenmesi..... 106
Şekil 5.12 Gözlemsel ışık eğrilerinde görülen hump yapısının kuramsal eğriye fit edilmesi..... 106
Şekil 5.13 Fourier spektrumunda temel moda (f_0) ek olarak sadece tek bir ek mod (f_2) görülmesi..... 109
Şekil 5.14 Dr. MOLNÁR'ın doktora tezinde V450 Lyr yıldızında ikinci üst tona karşılık gelen f_2 frekansı görüntüsü..... 110
Şekil 5.15 Bu çalışmadaki frekans analizi sonucunda elde edilen f_2 frekansı görüntüsü.....110
Şekil 6.1 V450 Lyr yıldızının Long - Cadence verileri kullanılarak elde edilen O - C eğrisi..... 111
Şekil 6.2 V450 Lyr yıldızının O – C eğrisine gerçekleştirilen frekans analizi sonucu elde edilen model.....112
Şekil 6.3 V450 Lyr yıldızının O-C diyagramının Fourier tayfının yakınlaştırılmış hali..... 113
Şekil 7.1 Radyal zonklama modlarının $Ak f_0 / A f_0$ harmonik bileşenlerinin genlik oranları, $Ak f_0 - f$ m /A $f_0 - f$ m, $Ak f_0 + f$m /A $f_0 + f$ m modülasyon bileşenlerinin genlik oranları ile karşılaştırılması..... 118

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 Farklı galaktik konumlardaki RR Lyrae'lerin [Fe/H] oranları..... 12
Çizelge 1.2 RR Lyrae yıldızlarının genel özellikleri..... 12
Çizelge 2.1 Sezonların Planlanmış Başlama Tarihleri.....48
Çizelge 2.2 KASC'nin arşiv listesinden seçilen yıldız isimleri 49
Çizelge 3.1 V450 Lyr yıldızına ait parametreler..... 50
Çizelge 3.2 V450 Lyr yıldızının frekans analizi sonucunda elde edilen parametreler... 50
Çizelge 3.3 V450 Lyr yıldızına ait parametreler..... 50
Çizelge 3.4 Kepler Blazhko Yıldızı V450 Lyr'ın Başlıca Özellikleri..... 60
Çizelge 4.1 Verileri Analize Hazırlarken Kullanılan Örnek Yıldızlar..... 63
Çizelge 4.2 Aynı evreler için elde edilen katsayılarının belirlenmesi ve evre eşleştirmesi..... 69
Çizelge 5.1 Frekans Analizi sonucunda elde edilen değerler (Q1-Q17)..... 82
Çizelge 5.2 Sadece Q1 için yapılan frekans analizi sonucunda elde edilen değerler..... 87
Çizelge 5.3 Sadece Q2 için yapılan frekans analizi sonucunda elde edilen değerler..... 88
Çizelge 5.4 Sadece Q3 için yapılan frekans analizi sonucunda elde edilen değerler..... 89
Çizelge 5.5 Sadece Q4 için yapılan frekans analizi sonucunda elde edilen değerler..... 90
Çizelge 5.6 Sadece Q5 için yapılan frekans analizi sonucunda elde edilen değerler..... 91
Çizelge 5.7 Sadece Q6 için yapılan frekans analizi sonucunda elde edilen değerler..... 92
Çizelge 5.8 Sadece Q7 için yapılan frekans analizi sonucunda elde edilen değerler..... 93
Çizelge 5.9 Sadece Q8 için yapılan frekans analizi sonucunda elde edilen değerler..... 94
Çizelge 5.10 Sadece Q9 için yapılan frekans analizi sonucunda elde edilen değerler... 95
Çizelge 5.11 Sadece Q10 için yapılan frekans analizi sonucunda elde edilen değerler. 96
Çizelge 5.12 Sadece Q11 için yapılan frekans analizi sonucunda elde edilen değerler. 97
Çizelge 5.13 Sadece Q12 için yapılan frekans analizi sonucunda elde edilen değerler..... 98
Çizelge 5.14 Sadece Q13 için yapılan frekans analizi sonucunda elde edilen değerler..... 99
Çizelge 5.15 Sadece Q14 için yapılan frekans analizi sonucunda elde edilen değerler.....100

Çizelge 5.16 Sadece Q15 için yapılan frekans analizi sonucunda elde edilen değerler.....101
Çizelge 5.17 Sadece Q16 için yapılan frekans analizi sonucunda elde edilen değerler.....102
Çizelge 5.18 Sadece Q17 için yapılan frekans analizi sonucunda elde edilen değerler.....103
Çizelge 5.19 f_0, f_B, f_2, ve f_s frekanslarının görüldüğü sezonlar ve değerleri..... 104
Çizelge 5.20 Frekans analizi sonucunda elde edilen bulgular.....108
Çizelge 6.1 V450 Lyr yıldızının O – C eğrisine gerçekleştirilen frekans analizi sonucu hataları ile birlikte elde edilen frekanslar, genlik ve evre.....112
Çizelge 7.1 Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm frekans değerleri..... 116
Çizelge 7.2 Q1-Q17 Sezonların analizi sonucunda elde edilen frekanslar.....117

1. GİRİŞ

1.1 RR Lyrae Türü Yıldızların Genel Özellikleri ve Doğası

İtalyan David Fabricius tarafından 13 Ağustos 1596 tarihinde ilk değişen yıldızın Cetus (Balina) Takımyıldızında keşfedilmesiyle birlikte, günümüze kadar birçok değişen yıldız türü keşfedilmiştir. Bu keşfedilen yıldız türlerinden bir tanesi de bünyesel değişen RR Lyrae türü değişen yıldızlardır. RR Lyrae değişen yıldızların keşfi küresel kümelerdeki bazı yıldızların değişen yıldızlar olduğunun fark edilmesi ile olmuştur. RR Lyrae değişen yıldızları küresel kümelerde çok rastlanılmasından dolayı 'küme değişenleri' olarak adlandırılmıştır. İlk RR Lyrae yıldızı ω Cen küresel kümesinde bulunmuştur. Artık prototip; aralarındaki en parlak olan ve 1899 yılında Mrs. Williamina Fleming tarafından keşfedilen RR Lyrae türü olarak anılmaya başlanmıştır (Guggenberger 2008).

Bu tür yıldızların diğer bünyesel değişen yıldızlardan ayrılmasının sebebi doğası gereği sahip olduğu zonklama mekanizması ve daha sonraki bölümlerde bahsedeceğimiz çoklu modülasyon etkileridir (Blazhko Etkisi, Period Doubling vb.).

Bir yıldızın birbirini takip eden evrim evreleri süresince, belirli zaman dilimlerinde ve değişim türüne bağlı olarak parlaklık ve renk değişimi gösterme olgusunun kaynağı yıldızın sahip olduğu zonklama mekanizmasıdır ki zonklama mekanizmasına göre, bir yıldızın dış kısımlarına uygulanan çekim kuvveti dengede olmadığı zaman, yıldız zonklama yapacaktır. Zonklama kaynağı He-II ve He-III kısmi iyonizasyon bölgeleri kaynaklı κ-mekanizmasıdır (Stellingwerf 1984). Zonklayan yıldızlar için en önemli belirteç He iyonizasyon bölgesinin derinliğidir ve bu bölgenin derinliği yıldızın evrim durumuyla ilişkilendirilmektedir. Eğer He katmanı çok derin olursa yıldız içerisindeki mekanizma zonklamayı sürdüremeyecektir. Yıldızın dış kısımlarına uygulanan çekim kuvveti ile iç basınç dengede olmazsa yıldızın gaz basıncı artar ve azalır. Gaz basıncının artması durumunda yıldızın yarıçapı artar ve yıldız genişleyecektir. Böylece yıldız maddesinin yoğunluğu tekrar hidrostatik dengeye ulaşıncaya kadar azalacaktır. Daha sonra çekim kuvveti tekrar baskın hale gelerek yıldız büzülmeye başlayacaktır. Basınç

tekrar artar ve bu artış basıncı belli bir değere yükseltince yeni bir genişleme çevrimi başlayacaktır. Bu olay bir çevrim şeklinde bir süreç olarak devam edecektir (Çelik 2008).

Temel zonklama denklemi,

$$P\sqrt{\rho} = \text{sabit} \tag{1.1}$$

İfadesiyle blirtilir. Yıldızların zonklamasını açıklayan çeşitli mekanizmalar bulunmaktadır:

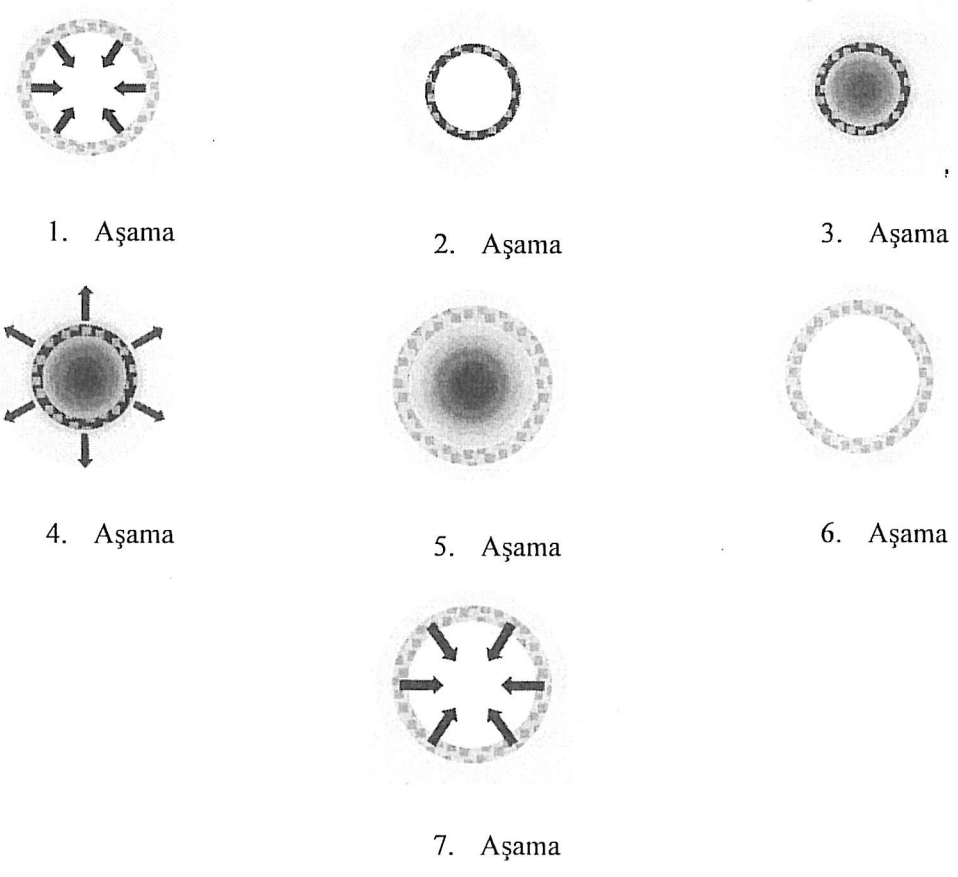
Eddington Yaklaşımı: Yıldız maddesinin, büzülme sonucu sıkışacağını ve böylece donukluğunun artacağını ileri süren zonklama mekanizmasına "κ Mekanizması" denir. Christy (1966) He^+ iyonizasyon katmanına sahip yıldızların, bu katmandaki ani donukluk değişimleriyle denge durumlarından saparak kararsız hale gelebileceklerini göstermiş ve zonklamaya ilişkin teorilerle bu mekanizmayı açıklamaya çalışmıştır. Bu mekanizma için öne sürülen aşamalar aşağıdaki gibidir:

1. Aşama: Güneş kütlesinden daha büyük kütleli yıldızlar anakol evrimleri sırasında, sonuna doğru ya da hemen sonrasında hidrostatik dengeden yerel ayrılmalar gösterirler. Bu aşamada yıldızın içinde bir katman hidrostatik dengeden ayrılıp içeri doğru çökmeye başlar.
2. Aşama: İçeri doğru olan bu hareket bu katmandaki gazın sıkışmasına, ısınmasına ve yoğunluğunun yükselmesine yol açar.
3. Aşama: Yoğunluğu ve sıcaklığı yükselen gaz, ışınıma donuk hale gelecek ve alttan gelen enerji bu katmandan geçmekte zorlanacaktır.
4. Aşama: Bu katmanın içinde sıcaklık giderek yükselir ve bu katmanı dışarı doğru itecek şekilde bir basınç oluşturur.
5. Aşama: Bu katman dışarı itildikçe soğur, basıncı, yoğunluğu ve sıcaklığı giderek düşer.

6. Aşama: Yoğunluğu ve sıcaklığı düşüp, genişleyen bu katman giderek ışınımı daha geçirgen bir hale gelir. Bu sırada katmanın iç tarafında kalan basınç ve sıcaklık da giderek düşer.

7. Aşama: Bu katmanın üstünde bulunan gaz tekrar baskı yapıp, katmanın içeri doğru ileri hareketini tekrar başlatır ve zonklama çevrimi tekrar başlar (http://ozgur.astrotux.org 2016).

Bu zonklama mekanizması buharla çalışan motorlara benzetilebilir ve Sir Arthur Eddington tarafından önerilmiştir. Şekil 1.1'de gösterildiği gibi sıkışan ve genişleyen katman piston, ışınım buhar, katmanın donukluğu ise sübap görevini görür (http://science.sbcc.edu 2016).



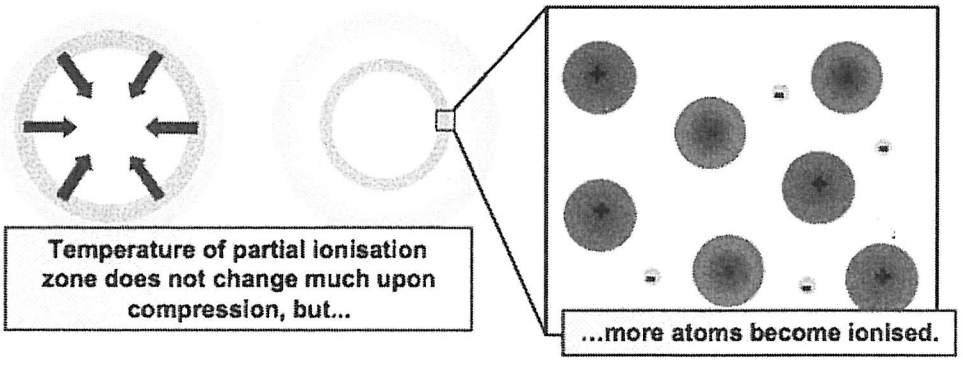
Şekil 1.1 κ Mekanizması aşamalarının sıralı gösterimi (http://ozgur.astrotux.org 2016)

Eddington yaklaşımı modelinde donukluğun sıcaklıkla artmasını bekleriz, fakat ileri sürülen bu görüşe ters bir görüş vardır ki bu da Kramer Kuralı'dır. Kural'a göre yıldız maddesinin sıkışmasıyla donukluk artmaz, aksine azalması gerekir. (Bono vd. 2000). Donukluk, sıcaklık ve yoğunluktan daha hassastır. Basıncın donukluğu azaltıcı bir etkisi vardır. Yoğunluk $T^{3.5}$'tan daha hızlı yükselir ve donukluk artar. Kramer Kuralına göre donukluğun (κ), yoğunluk (ρ) ve sıcaklıkla (T) ilgili olan bağıntı,

$$\kappa \propto \frac{\rho}{T^{3.5}} \tag{1.2}$$

denklemi ile verilmektedir. Bu bağıntıda donukluk sıcaklığın 3.5'uncu kuvveti ile ters orantılıdır. Gaz sıkıştıkça hem yoğunluk (ρ), hem de sıcaklık (T) artar ancak κ, sıcaklığa daha kuvvetle, ters orantılı olarak bağlı olduğu için gaz sıkışıp, sıcaklığı arttıkça donukluğun azalmasını beklememiz gerekir.

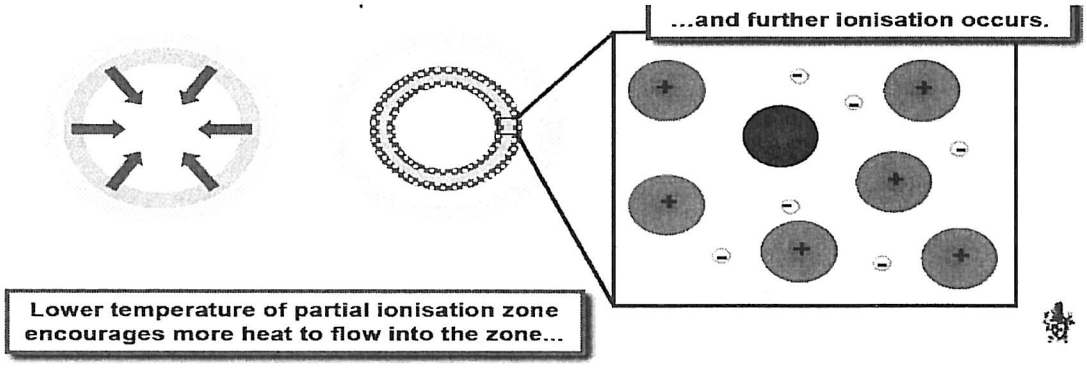
κ mekanizması: Farklı bir görüş savunan Zhevakhin (1953, 1959)'e göre, çökmekte olan katmanın enerjisinin bir kısmının gazın sıcaklığını arttırmak yerine hidrojen atomlarının iyonizasyonu için kullanılmaktadır. γ mekanizmasına göre bu durum, kısmi iyonizasyonun gerçekleştiği katman ile çevresi arasında bir sıcaklık farkına sebep olacaktır. Bu aradaki sıcaklık farkı, iletim yoluyla transfer olmaktadır. Kısmi iyonizasyon bölgesi incelendiğinde, merkezde He yanarken merkezden farklı bir yerde hidrojenin yanmaya devam ettiği durum ortaya çıkar. Hidrojen iyonizasyon bölgesinin karakteristik sıcaklığı 1.5×10^4 K ve Helyum iyonizasyon bölgesi de yıldızın daha derinlerindedir. Bu nedenle bu bölgenin Hidrojen iyonizasyon katmanından daha sıcak olması beklenir. Karakteristik sıcaklığı 4×10^4 K'dir (Çelik 2008). Bu basit modelimizde 2. ve 3. aşamalar yerine şekil 1.2'de gösterildiği gibi donukluk kaynağı doğru şekilde ifade edilmiş olur.



Şekil 1.2 Kısmi İyonlaşma Bölgesinin sıcaklığı ile ilgili fiziksel şartlarda donukluğun kaynağına iyonlaşmanın katkısı (http://astronomy.swin.edu.au 2016)

Yani gaz sıkışır ama sıcaklığı (T) artmaz, enerji iyonizasyon icin kullanılır. Dolayısı ile yoğunluk (ρ) artarken sıcaklık onu takip etmez ve donukluk (κ) artmış olur. İyonize olan elementler katman genişlerken de yeniden birleşmeyle eski hallerine dönerler ve bu da sıcaklığın dramatik bir şekilde azalmasını engeller. Böylece her iki durumda da Kramer Kuralı ihlal edilmemiş olur (http://ozgur.astrotux.org 2016).

Şekil 1.2 - 1.3'te κ mekanizması iyonizasyonun gercekleştiği katman ile ona komşu katmanlar arasındaki sıcaklık gradyenti nedeniyle iyonizasyon bölgesine daha çok ısının transfer olması neticesinde pekiştirilir ve daha fazla iyonizsyon gerçekleşir. κ mekanizmasını pekiştiren bu mekanizma γ mekanizması olarak adlandırılır.



Şekil 1.3 Daha düşük sıcaklıkta Kısmi İyonlaşma bölgesindeki fiziksel şartlarda donukluk kaynağına iyonlaşmnın katkısı (http://astronomy.swin.edu.au 2016)

Pek çok yıldızda iki iyonizasyon bölgesi bulunmaktadır:

1. Hidrojen Kısmi İyonizasyon Bölgesi: Oldukça geniş bölge olan nötr H ve birinci Helyum iyonizasyonudur. Sıcaklığın 1000-15000 K arasında değiştiği katmanlarda gerçekleşir.

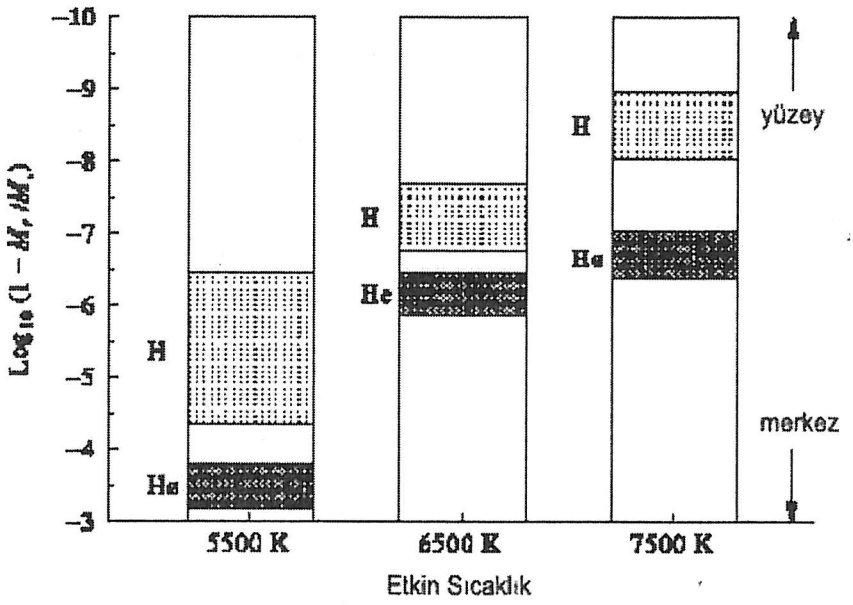
$H \rightarrow H^+ + e^-$

$He \rightarrow He^+ + e^-$ tepkimeleri gerçekleşir.

2. Helyum Kısmi İyonizasyon Bölgesi: Daha derin katmanlarda Helyumun ikinci iyonizasyonunu içerir. Bu da 4000 K sıcaklığında gerçekleşir ve He II Kısmi İyonizasyon Bölgesi denir. Bu iyonizasyon bölgelerinin yeri zonklama özelliğini belirler.

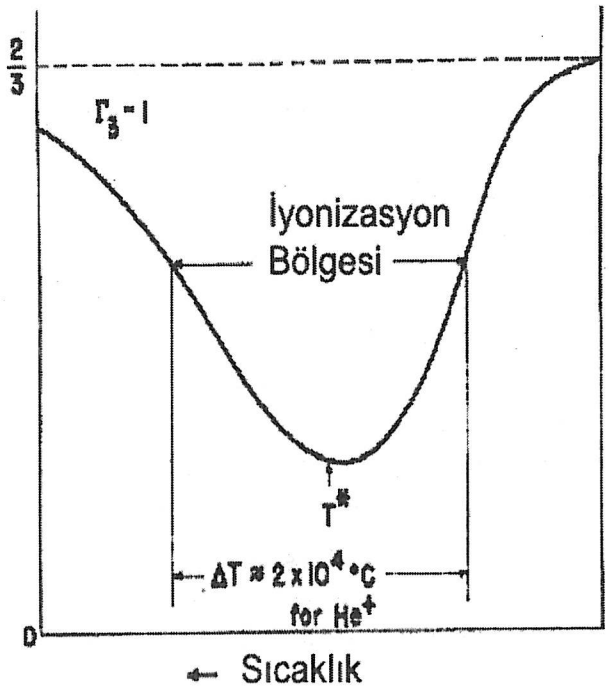
$He^+ \rightarrow He^{++} + e^-$ tepkimesi gerçekleşir.

Zonklamaların sebebini oluşturan kısmi iyonlaşma bölgelerinin, zonklamaların devamlı olabilmesi için, kritik bir derinlikte olması gerekir. Yıldızın zonklama özellikleri bu kısmi iyonizasyon bölgelerinin yıldızın neresinde (hangi derinliğinde) bulunduğuna göre belirlenir (mod düğümleri). Bunu belirleyen de yıldızın sıcaklığıdır. $T_{eff} > 8500$ K olan yıldızlar için kısmi iyonizasyon bölgeleri yüzeye çok yakındır. Bu nedenle zonklamaları başlatacak yani gazı sıkıştıracak kadar kütle bulunmaz. $T_{eff} < 5500$ K olan yıldızlar için ise kısmi iyonizasyon bölgeleri derindedir. Ancak düşük sıcaklıkta enerjiyi taşımada konveksiyon çok daha etkin bir mekanizma olduğu için zonklama yapan katmanın altında yeterli sıcaklık ve basınç oluşmaz. Bunlara ek olarak κ-mekanizmasının çalışabilmesi icin zonklama periyodunun ısısal zaman ölçeğinden (Kelvin- Helmholtz zaman ölçeği, τ_{KH}) kısa olması gerekir. Aksi takdirde iyonizasyon bölgesi etrafıyla termal dengede kalır ve ısı transferi gerçekleşmez. κ-mekanizmasının çalışabilmesi için diğer bir önemli koşul yıldız içinde basınç gradyentinin var olması, ancak iyonizasyon bölgesinde basınç değişiminin çok az olmasıdır (Balona ve Dziembowski 2011).



Şekil 1.4 Sol sütun temel modda zonklama, ortadaki sütun birinci harmonik modda zonklama, en sağdaki sütunda sıcaklık yüksek, yoğunluk düşük ve zonklama yoktur (1., 2., 3. ve 4. aşama) (http://www.faculty.virginia.edu 2016)

Zonklayan bir yıldız maksimum parlaklığına, hidrojen iyonizasyon bölgesi ile yıldız yüzeyi arasında minimum kütle varken ulaşır. İyonizasyon bölgesi ışınım basıncı en dışa kadar itildiğinde yani kısmi iyonizasyon bitip rekombinasyon başladığında her ne kadar yıldızın yarıçapı minimumdayken (sıkışma) H-iyonizasyon bölgesinin altındaki enerji maksimum olsa da bu enerji hidrojen iyonizasyon bölgesini dışarı sürmekte kullanılır. Dolayısı ile yıldız minimum yarıçapına sıkıştıktan bir süre sonra maksimum parlaklığına ulaşır. Yıldızın bulunduğu yer kararsızlık kuşağıdır. Eğer söz konusu iyonlaşma katmanı fazla derinde yer alıyorsa üzerindeki büyük kütleyi itemeyeceği için zonklamalar sönümlenecektir. Bu yüzden bu katmanın kritik sıcaklık ve konum olarak uygun bir derinlikte olması gerekmektedir.

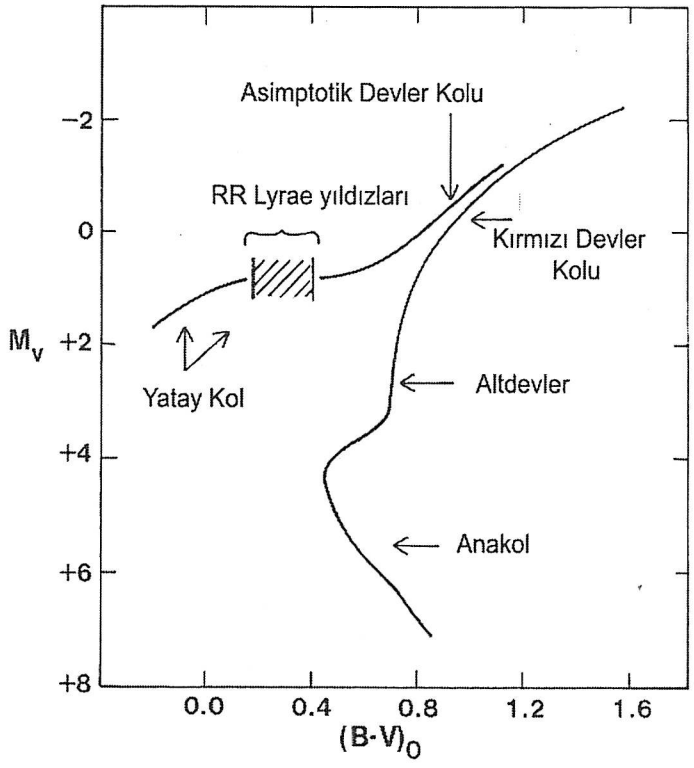


Şekil 1.5 İyonizasyon Bölgesinin derinliği ve kritik sıcaklık aralığı (http://home.strw.leidenuniv.nl 2016)

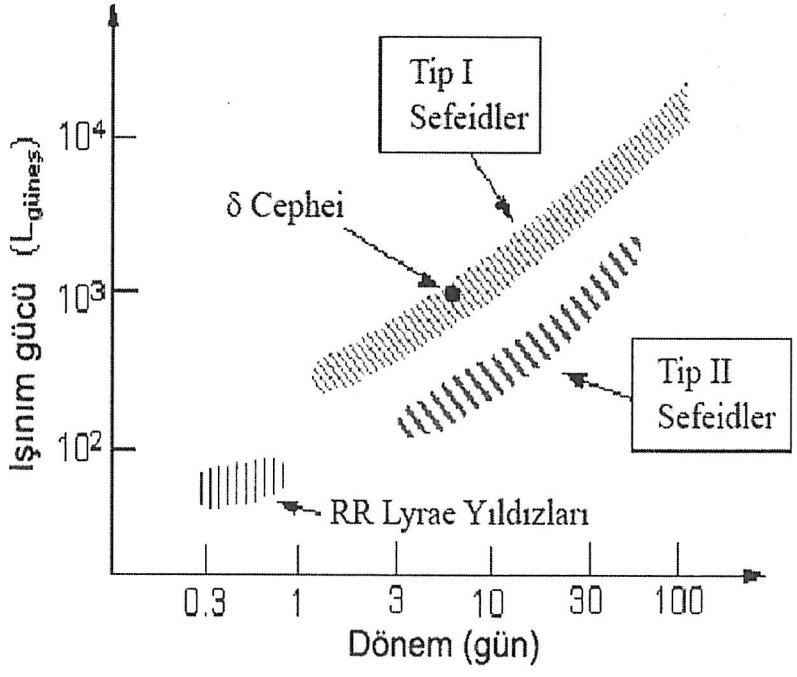
1.2 Fotometrik ve Tayfsal özellikleri

RR Lyrae yıldızları dönemleri ne olursa olsun, dönem-parlaklık (P-L) bağıntısında görsel mutlak parlaklıkları, HR diyagramında 0.5 kadire karşılık gelen yatay bir kol oluştururlar ki (Şekil 1.6-1.7) hemen hemen aynı ışınım gücüne sahip oldukları ve bu yüzden uzaklık belirteci olarak kullanıldıkları çok iyi bilinmektedir (www.astro.columbia.edu 2016).

Şekil 1.7'de görüldüğü gibi RR Lyrae yıldızları Cepheid'lere göre daha dar bir alana dağılım göstermektedir. Bu yüzden uzaklık belirteci olarak kullanılsalar dahi uzaklık belirlemede tercih edilen daha geniş dağılıma sahip olan Cepheidler olmaktadır (Çelik 2008).



Şekil 1.6 HR diyagramında RR Lyrae yıldızlarının yatay kol üzerindeki konumları (http://online.kitp.ucsb.edu 2016)



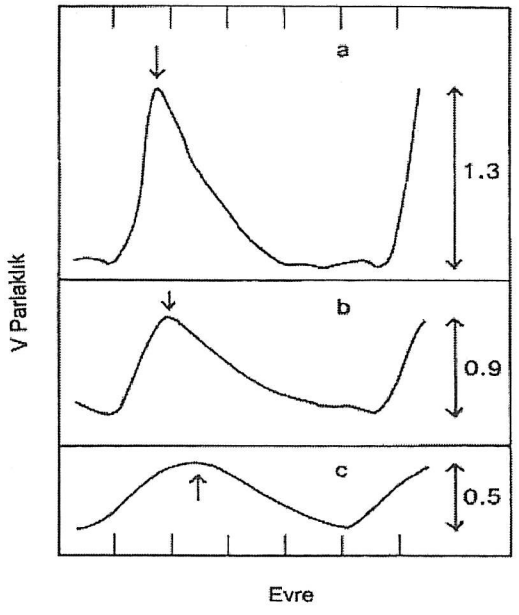
Şekil 1.7 Sefeid ve RR Lyrae değişenlerine ait Dönem - Parlaklık bağıntısı (http://ircamera.as.arizona.edu 2016).

Bailey ve Pickering (1902) Omega Centauri küresel kümesindeki RR Lyrae değişen yıldızları üzerine yaptıkları çalışmada 3 ayrı ışık eğrisi tipini yayınlamıştır. Bunlar zonklama özelliklerine bağlı olarak a, b, c, (d) olmak üzere alt sınıflara ayrılmıştır (Şekil 1.8-1.9).

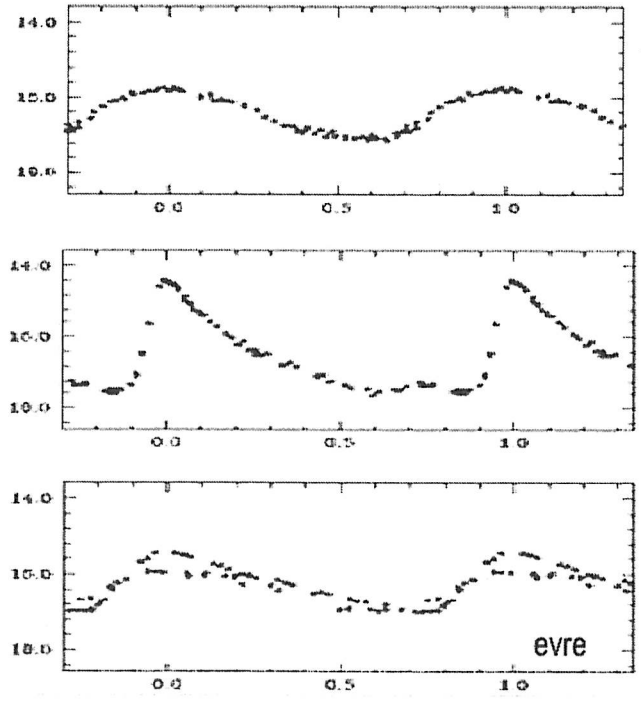
Alt sınıf a: Işık artışı hızlıdır. Artış hızı azalma hızından fazladır. Işık değişimi tüm dönemin yaklaşık bir yarısı için minimumda sabittir, fakat bu esnada ışık değişimi yavaştır. Bu oran genellikle 1^m'den daha fazla ve yıldızın dönemi 12-15 saattir.
Alt sınıf b: Işık artışı kısmen hızlıdır. Azalış yavaştır ve sakin evre haricinde bu azalma devam eder. Bu oran genellikle 1^m'den daha düşük ve yıldızın dönemi 15-20 saattir.
Alt sınıf c: Işık değişimi orta hızdadır. Işığın artış hızı azalış hızından fazladır. Fakat bir kaç durumda, eşit ya da daha az hızlı görülür. Değişim $0^m.5$ civarında ve yıldızın dönemi 8-10 saattir (Bailey ve Pickering (1902).

Bu sınıflar kısaca RRa, RRb, RRc (RRc veya RR1), RRd'dir (LaCluyze vd. 2002). Yalnız günümüzde a ve b bir grup gibidir ve RRab olarak adlandırılmaktadır. RRab yıldızları büyük genlikli ve sinüsel olmayan ışık eğrilerine sahiptir. RRab türünün ışık eğrisi RRc türününkine kıyasla oldukça asimetrik ve genliği ortalama olarak 1^m'den daha büyüktür. RRc yıldızları RRab yıldızlarına göre daha küçük genlikli ($<1^m$)'dir. Işık eğrilerinin genlikleri düşük olduğu için c türü değişenlerin çalışılması daha zordur. Bailey'e göre evrimin kimi aşamalarında bilinmeyen bir takım özelliklere sahip olarak bilinen diğer alt sınıf 'double-mode' yani çift modlu RR Lyrae RRd yıldızlarıdır (Çelik 2008). Bu tür RRd yıldızları klasik ve klasik olmayan RRd olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Klasik RRd yıldızları temel zonklama frekansına (FM-fundamental mode-) eşlik eden "O1" first overtone yani birinci üst ton, klasik olmayan RRd yıldızlarında ise temel zonklama frekansına eşlik eden "O2", second overtone yani ikinci üst tonda zonklama yaparlar. Bu ikinci grubun keşfinde daha sonra bahsedeceğimiz daha başarılı olan uzay gözlemlerine borçluyuz (Netzel vd. 2016) . Bu konudan daha sonraki bölümlerde bahsedilecektir.

Şekil 1.9'da en üstte RRc, ortada RRab ve altta RRd türü ışık eğrisi gösterilmektedir. RRd türünde dikkat çeken şey, farklı zamanlarda elde edilen iki ışık eğrisinin farklı olmasıdır.



Şekil 1.8 Sırasıyla a, b, c türüne ait yıldızların ışık eğrilerindeki maksimum ve minimumlar arasındaki ortalama farkı gösterimi (Davis 2002)



Şekil 1.9 RRd türünün diğer altsınıflarla kıyaslanmasına ait ışık eğrisi (Lub 1977)

Bütün RRab türü RR Lyrae değişen yıldızları minimumdayken (evre 0.5 ve 0.85) atmosferik sıcaklığı 6000K'dir. Işık eğrisinde maksimum'a karşılık gelen evredeyken sıcaklık kütlesine bağlı olarak 7000K'den 7800K'e kadar ulaşır (Çelik 2008). HR diyagramında RRab yıldızları, RRc yıldızlarına kıyasla daha soğuk tarafta bulunurlar. Bu yıldızlar A0-F0 tayf türündendir. RRab türü yıldızların birçoğunda, Hidrojen soğurma çizgilerinden elde edilen tayf türü maksimum parlaklıkta A7, minimum parlaklıkta F5 yöresindedir. Ortalama kütleleri $0.5M_{\odot}$ - $0.7M_{\odot}$ ve ortalama yarıçapları $4R_{\odot}$ - $6R_{\odot}$ aralığındadır. Dönemleri ortalama olarak 0.2-1.2 gündür. Işık eğrilerinin genliği $0^{m}.3$ - 2^{m} aralığındadır. Mutlak parlaklıkları $0^{m}.5$ civarındadır. Mutlak parlaklıkları metal bolluğuna bağlı olarak değişkenlik gösterir, metal bolluğunun artmasıyla parlaklık azalır. Galaksideki farklı konumlara göre RR Lyrae değişen yıldızların [Fe/H] oranı (Güneşe göre metal bolluğu) ve M_v değerleri çizelge 1.1'de verilmektedir. RR Lyrae değişen yıldızlarının genel özellikleri çizelge 1.2'de özetlenmektedir.

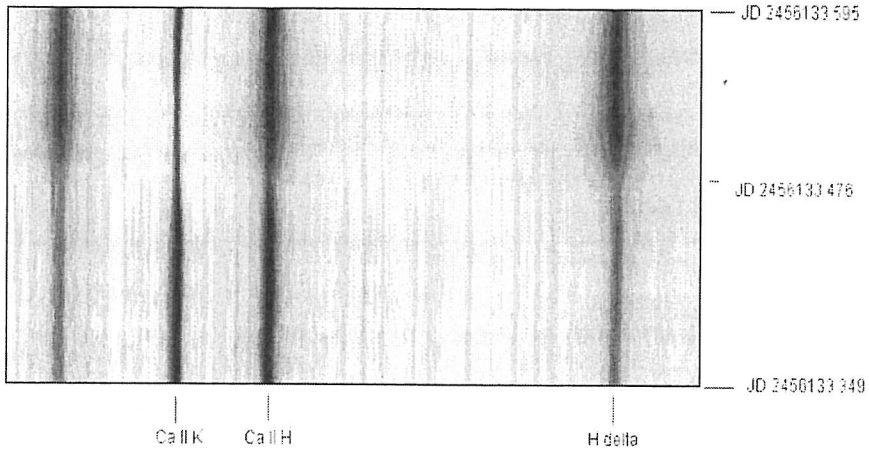
Çizelge 1.1 Farklı galaktik konumlardaki RR Lyrae'lerin [Fe/H] oranları

	[Fe/H]	Mv
Tüm RR Lyrae'lar	-1.32	0.76 ± 0.13
Halo RR Lyrae'lar	-1.66	0.77 ± 0.17
Metalce zengin RR Lyrae'lar	-0.85	0.60 ± 0.21

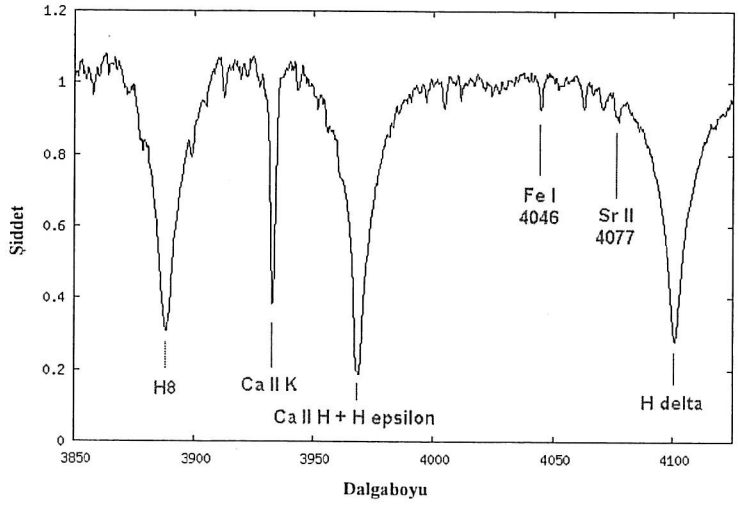
Çizelge 1.2 RR Lyrae yıldızlarının genel özellikleri (Smith 1995a)

Zonklama dönemi (gün)	0.2 - 0.85
<Mv>	0.6 ± 0.2
$<T_e>$ (K)	6000 – 7300
<log g>	2.5 - 3.0
[Fe/H]	~ 0.0... - 2.5
Kütle ($M_{\odot}$)	~ 0.6 - 0.8
Yarıçap ($R_{\odot}$)	~ 4 - 6
Parlaklık ($L_{\odot}$)	~ 40
Metal bolluğu (Z)	0.001 – 0.0001

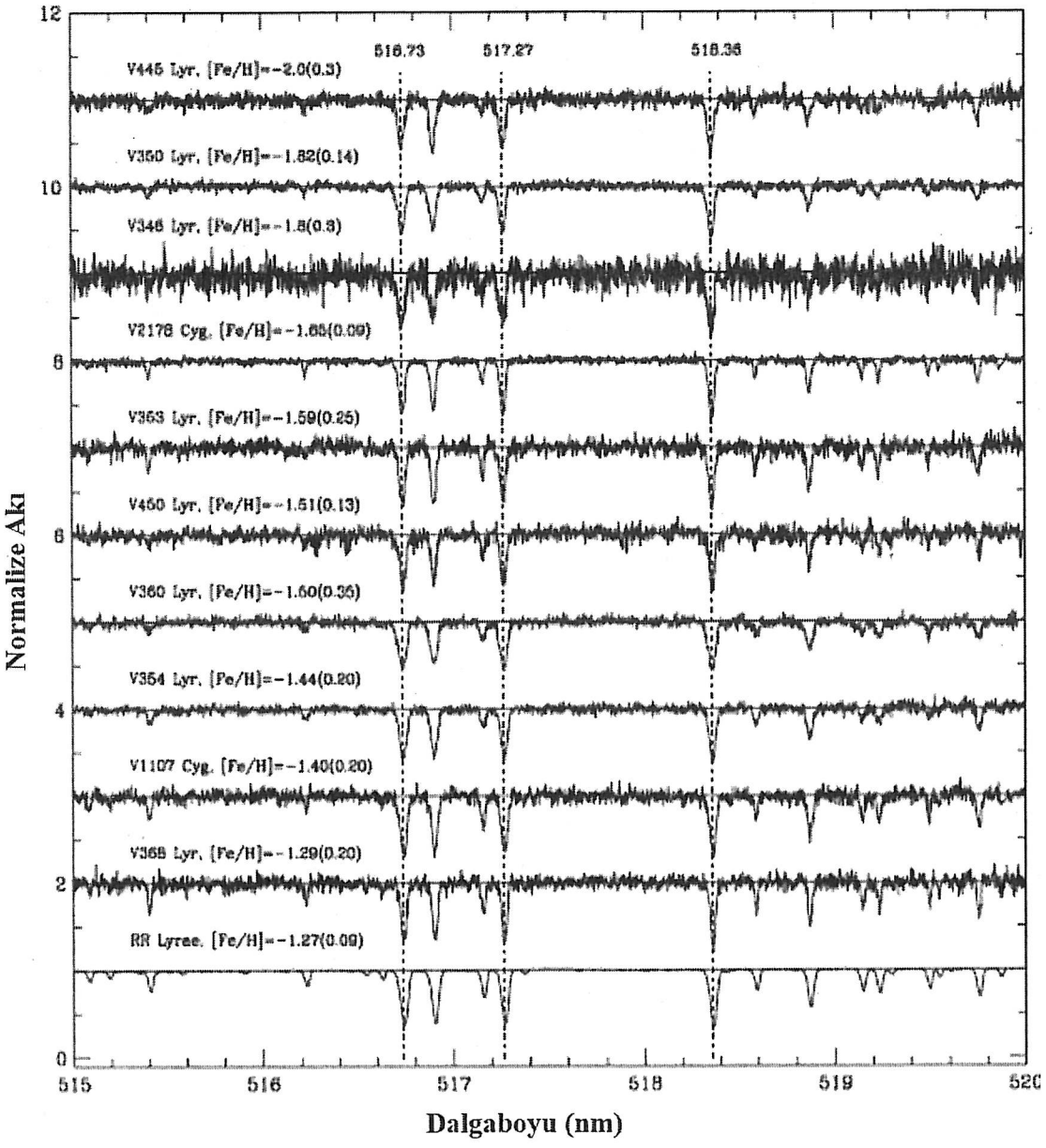
RR Lyrae yıldızlarının tayflarından temel karakteristik özelliklerini anlayabiliriz. Şekil 1.10'da çeşitli RR Lyrae türü yıldıza ilişkin tayf örnekleri karşılaştırılmaktadır. Balmer H ve K soğurma çizgileri artan parlaklık sırasında görülmektedir (Clementini vd. 1991). Şekil 1.10 - 1.11'de prototip RR Lyrae yıldızının kendisine ait 25/07/2012 tarihinde Fransa'da konuşlandırılmış Castanet Tolosan Gözlemevinden alınmış R=10000 orta çözünürlüklü échelle (eşel) tayfları gösterilmektedir. Şekil 1.10'da muhtemelen, yıldızın atmosferinde şok dalgası olayı sırasında, H_δ'nın yoğunluğunda hızlı ve çabuk bir azalma olması oldukça dikkat çekicidir.



Şekil 1.10 25/07/2012 tarihinde yıldız maksimum evresindeyken alınmış bir tayf (http://www.astrosurf.com 2016)

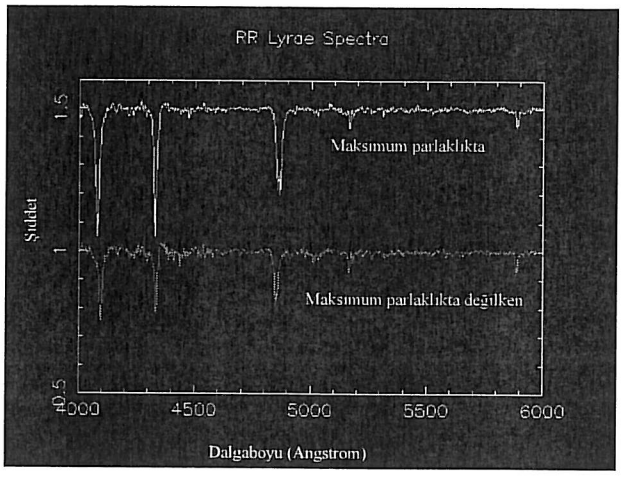


Şekil 1.11 Maksimum ışık yoğunluğu civarında RR Lyrae tayfının moröte kısmı görülmektedir (http://www.astrosurf.com 2016)

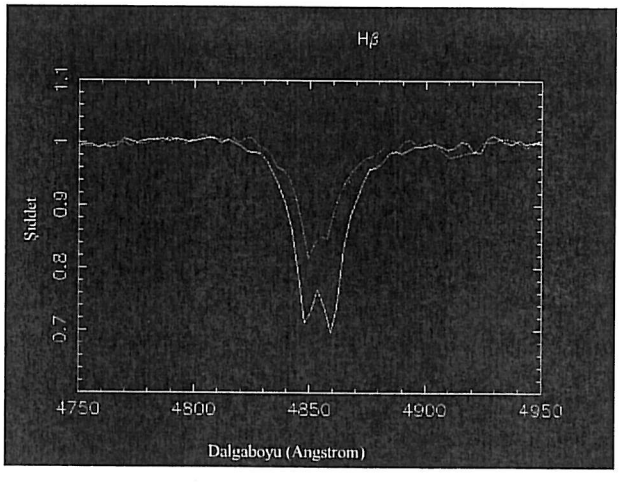


Şekil 1.12 Farklı RR Lyrae türü yıldızların tayflarının kesitlerinden örnekler (http://inspirehep.net 2016)

Şekil 1.12'de Keck teleskobu ile RR Lyrae yıldızının kendisini de kapsayacak şekilde metalce kendisinden daha fakir olan RRab türü yıldızlarını içeren tayflar verilmiştir. Bu bölge HIRES tayfının kadar küçük bir parçasıdır. Tayfların en üstünde üç adet MgI çizgileri verilmiştir. Bu mozaik şekil, artan metal bolluğuna göre düzenlenmiştir ve prototip RR Lyrae yıldızı (S/N~ 250) şeklin en alt kısmında verilmiştir (http://inspirehep.net 2016).



Şekil 1.13 Üst panelde ve alt panelde RR Lyrae yıldızının sırasıyla maksimum ve minimum evredeyken alınmış tayf görüntüsü (http://loke.as.arizona.edu 2016)



Şekil 1.14 4860 Å'de alınmış H_β soğurma çizgisi (http://loke.as.arizona.edu 2016)

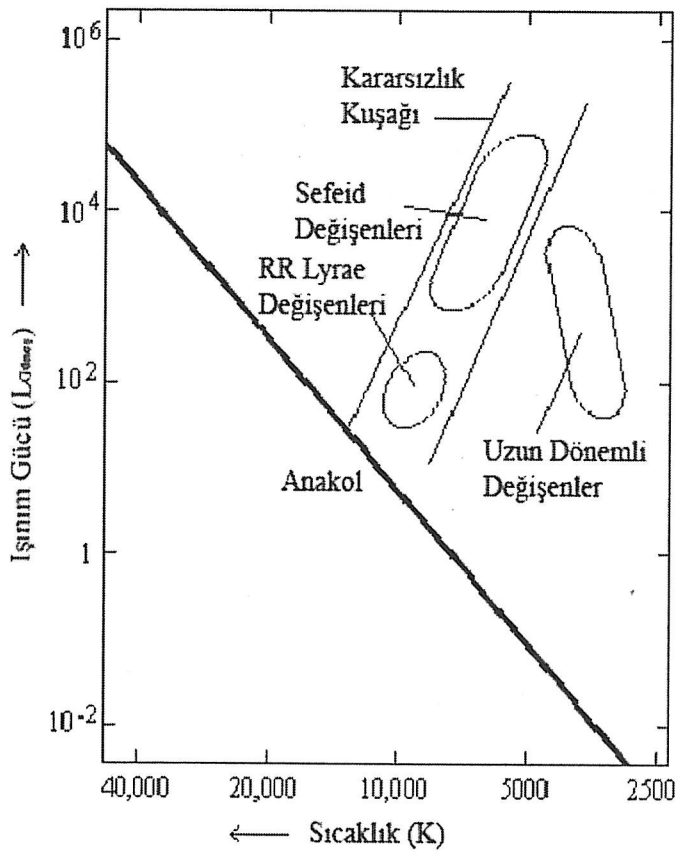
Şekil 1.13-1.14 Prototip RR Lyrae yıldızının aynı anda hem tayfsal hem de fotometrik gözlemlerini içeren kampanya projesine ait uzun saatler sonucunda alınmış maksimum ışıktaki iki adet tayfıdır. Farklı şiddetlerdeki hidrojen soğurma çizgileri (4860, 4340, 4100 Å) dikkat çekmektedir. Yıldız sıcaklığı arttıkça, şiddetli hidrojen çizgileri (10.000 K'e kadar, hidrojenin iyonizasyonun başlaması için yeterli sıcaklığın olduğu nokta) oluşur. 5890 Å'da zayıf Sodyum D doublet çizgisi vardır. Sıcaklık arttıkça, iyonizasyon tarafından yok edilmesi nedeniyle zayıflar. Bu nedenle RR Lyrae yıldızlarının sıcaklığı arttıkça parlaklığı artacaktır. Şekil 1.14'de 4861 Å (486.1nm) H_β çizgisine yakınlaştırılmış hali görülmektedir. Şeklin altında kalan sarı çizgi maksimum

evredeyken alınmış olup, çizgi sadece derin değil (yüksek sıcaklıktan dolayı), ayrıca daha geniştir (yıldız büzülmüş olmalı). Bu bize RR Lyrae yıldızları maksimum parlaklıkta daha sıcak olması ve daha yoğun (sıkışık) olması gerektiğini, minimumda ise daha soğuk ve büyük olması gerektiğini ifade eder (http://loke.as.arizona.edu 2016)

1.3 RR Lyrae Yıldızlarının Evrim Özellikleri

Kütlece düşük ($0.5M_{\odot}$ - $0.7M_{\odot}$) popülasyon II (POP II) yıldızları HR diyagramında "Kararsızlık Kuşağı"nda bulunurlar ve bu bölgeyi, çekirdekte helyum yanması sırasında geçerler. Bu sırada zonklama yaparlar ve kararsız olurlar. "Kararsızlık Kuşağı" zonklama mekanizmasının gerçekleşmesini sağlayan iyonizasyon bölgelerinin oluşması için yeterli sıcaklıkların meydana geldiği bölge şekil 1.15'de gösterilmektedir.

RR Lyrae alan yıldızları Hertzprung-Russel (HR) diyagramında, küresel küme diyagramının karakteristiği olan yatay kol üzerinde bulunurlar. Onların bu konumu, gelişimin çok ileri bir evresinde olduklarını göstermektedir. Çok az bir sayıda RR Lyrae yıldızı henüz sıfır yaş yatay kola ulaşamamıştır veya yatay kolda ömrünün sonuna doğru kısa yapısal karasızlıklara uğrayanların dönemlerinde büyük düşme özelliği göstermiş olmalıdır (Smith 2013).

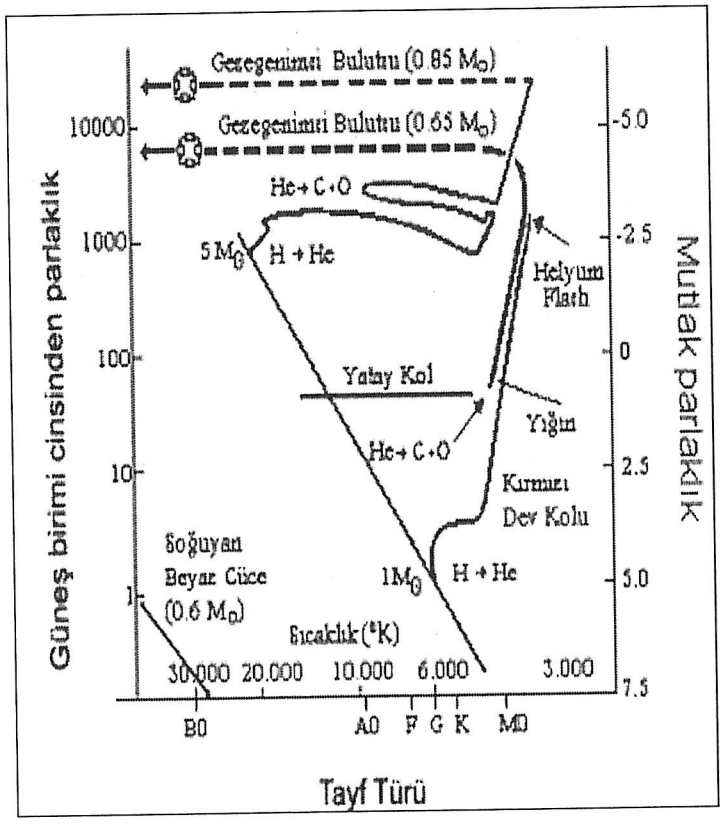


Şekil 1.15 RR Lyrae değişen yıldızlarının HR diyagramındaki konumu (www.astro.columbia.edu 2016)

Düşük kütleli (0.3 ile 0.5 $M_{\odot}$) RR Lyrae yıldızları, radyal zonklama yapan düşük kütleli yıldız evriminin çekirdekte helyum yakma aşamasındadır. Bu evrim aşamasına karşılık gelen yer, HR diyagramındaki yatay koldur fakat tüm yatay kol RR Lyrae yıldızları değildir. Evrimlerinin ilk aşamalarında merkezlerindeki hidrojeni helyuma çevirerek enerjilerini üreten yıldızlardır. Bu düşük kütleli RR Lyrae yıldızlarının atası olan yıldızlar, hidrojen yakma zamanının çoğunu anakolda harcar (Davis 2002).

Merkezinde hidrojenin yaklaşık %90'nını bitirdiği zaman anakoldan ayrılma zamanı gelir. Bundan sonra, kırmızı dev koluna yükselir, burada çekirdekteki hidrojen tamamı helyuma dönüşmüş olur. Oluşan helyum çekirdekte sıcaklık henüz helyum atomlarını daha ağır elementlere dönüştürmek için yeterli değildir ve çekirdek çöker ve elektron dejenere olmaya başlar. Kırmızı dev kolunun daha ilerdeki aşamalarında (Şekil 1.16)

çekirdek sıcaklığı helyumu tutuşturmak için yeterli sıcaklığa ulaşır ve "Helyum Flash" meydana gelir (Davis 2002).



Şekil 1.16 1 $M_\odot$ kütleli yıldızın evrim durumunu gösteren diyagram (http://nh7-gliyiz.tr.gg 2016)

Eğer yıldız HR diyagramında kararsızlık kuşağı sınırlarına düşerse RR Lyrae gibi zonklar. Merkezde çekirdeğin kütlesi 0.5 $M_\odot$'e ve etkin sıcaklığı 10^8K'e ulaştığı zaman RGB (kırmızı devler kolu) aşaması sonlanır (Dall'Ora vd. 2006).

RGB (kırmızı devler kolu) aşaması anakol aşamasından daha hızlı geçmektedir. Sonuç olarak, çekirdekteki helyum kaynağı tükenir ve yıldız yatay kolu terk eder (Şekil 1.16). Tekrar büyür ve soğur, asimptotik kırmızı dev koluna yükseldiği zaman hidrojen yakıtını tüketir ve çekirdek etrafındaki kabukta helyum yanar. Muhtemelen bu yükselişten sonra dış gazlar gezegenimsi nebula olarak çekirdeğin etrafında zarf oluşturur ve yıldız bir beyaz cüce olarak düşük oranda etrafına kendi ısı enerjisini yayar (Davis 2002).

RR Lyrae yıldızların çok yaşlı olduğu düşünülmektedir. Tahmini yaşı 10^9 yıldan daha yaşlıdır (Catelan 2006). Blazhko Etkisi gösteren yıldızlarda gözlenen dönem değişimi yıldızların evrim doğasına göre oldukça hızlıdır (Smith 1995b; LaCluyze vd. 2002).

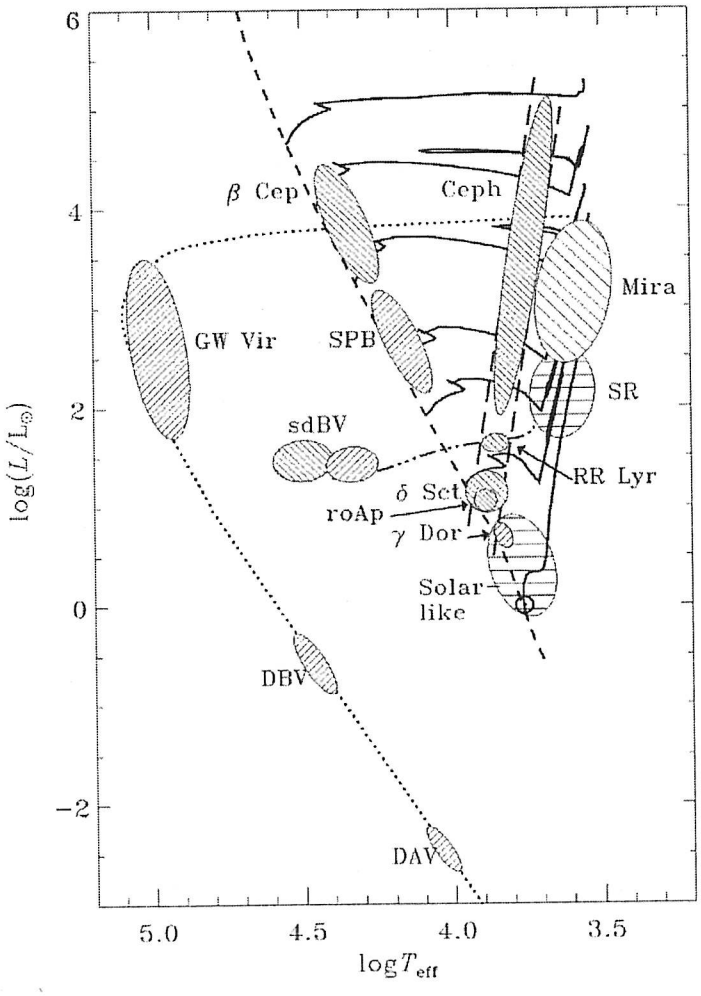
Anakolda, güneş kütleli yıldızın nükleer reaksiyonlar sonucu, bir kırmızı dev olduğu ve HR diyagramında sağa doğru hareket ederek $M_V = -3^m$'e kadar geldiği bilinmektedir. Bu noktada bulunan bir yıldızın çekirdeğinin sıcaklığı 100 milyon K'e yükselmiştir. Bu kadar büyük sıcaklıklarda karbon–karbon ve proton–proton çevriminin dışında daha başka nükleer olaylar olur ve helyumdan daha ağır elementler çekirdekte toplanır. Bu nükleer olaylar uzun sürmez. Çünkü çekirdeğin büzülmesi sonucu bu olaylar durur. Böylece kırmızı dev yıldızın gelişmesi de sona erer. Bundan sonra yüzey büzülebilir, yüzey sıcaklığı artar ve HR diyagramında bir aşağı doğru yönelir. Sonra sola doğru hareket ederek RR Lyrae bölgesine gelir (Şekil 1.16). Buradaki yıldızlar hareketli bir evrede bulunmaktadır. Yıldızın nükleer enerji kaynağı iyice tükenir. Bu durumda yıldız, yalnız büzülerek enerji üretir. Büzülme sonucu yoğunluk artar. M_V yaklaşık 11^m ve B – V yaklaşık $0^m.3$ ile $0^m.5$ aralığında beyaz cüce bölgesine gelir ve bu aşama hayatının son aşamasıdır (Çelik 2008).

RR Lyrae yıldızları ile Güneş'imizi karşılaştırırsak pek çok RR Lyrae yıldızı, muhtemelen Güneş'ten daha yaşlı ve Güneş'ten çok daha sıcaktır. Bu yıldızlar hayatlarının öyle bir aşamasındadırlar ki; hidrojen merkezden dışa doğru genişlemiş durumda ve merkezde helyum karbon'a dönüşecek şekilde, nükleer füzyon tepkimeleri olmaktadır. Yüksek metal bolluğuna sahip kümelerde, RR Lyrae türü değişen yıldızlar bulunmamaktadır (Çelik 2008).

Özetle 'tek' yıldız, evrimi boyunca birçok farklı değişim safhası gösterir. Örneğin $1M_\odot$ kütleli bir yıldız ana kola gelmeden önce T Tauri yıldızı olarak gözlenirken; kırmızı dev evresini geçtikten sonra yatay kol üzerinde bir RR Lyrae yıldızı olarak zonklama yapacaktır. Büyük kütleliler Cepheid değişenleri olarak gözlenirler. Bundan sonra da dev veya süperdev evresine geçerler. Orta kütleli bir yıldız, kırmızı dev, gezegenimsi

nebula veya süperdev evresindeyken, kütlesinin büyük bir kısmını kaybederek bir 'beyaz cüceye' dönüşür (Zeilik vd. 1992).

HR Diyagramı boyunca zonklayan yıldızlar şekil 1.17'de görülmektedir. Kesik çizgiler sıfır yaş anakolu, sürekli çizgiler seçilmiş evrim yollarını, üç nokta kesikli çizgi yatay kolu, noktalı çizgiler beyaz cüceye doğru soğuma eğrisidir. RR Lyare yıldızları yatay kolda kararsızlık kuşağında yer alır. Zonklayan yıldızların bölgesindeki tarama, modun türünü ve eksitasyon mekanizmasını göstermektedir Sol üst akustik modlara sebep olan donukluk için, sağ üst iç çekim modlarına sebep olan donukluk ve rastgele uyarılmış modlar için yatay kolu içermektedir.



Şekil 1.17 Kütleleri 1,2,3,4,7,12 ve 20 $M_{\odot}$ kütleli değişen yıldızların HR diyagramındaki konumları ve evrim yollarının gösterimi (Christensen-Dalsgaard vd. 2004)

1.4 Blazhko Etkisi

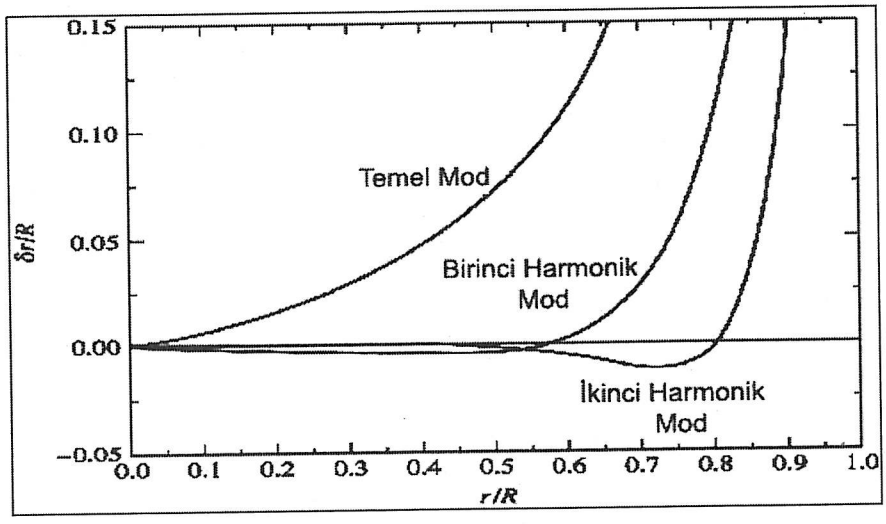
Farklı evrim durumlarına sahip birçok zonklayan yıldızın ışık eğrisindeki genlik ve evre değişimleri onların en belirgin özellikleridir. Bu değişimler, ışık eğrisinde maksimumun tepesindeki değişimler veya ışık eğrisinde görülen morfoloji farklılıklarıdır. Bu değişimlerin temelinde, bu türden bünyesel değişen yıldızlarda çoğul dönemli olaylar olarak bilinen Blazhko Etkisi bulunmaktadır. RRab türü RR Lyrae yıldızlarının eğrisi RRc türüne oranla daha geniş genlikli artışa sahiptir. Bu nedenle maksimumdaki genliğin değişmesi, genliği daha fazla olan RRab yıldızlarında daha belirgindir (Kolenberg 2004).

Bu olay RR Lyrae yıldızlarının önemli sınıfı astrofizik açısından ilk kez incelenmiş ve daha sonra Blazhko Etkisi olarak adlandırılmıştır. Sergei Nicolaevich Blazhko (1907) ilk olarak RW Dra yıldızının ışık eğrisinde maksimum parlaklık zamanlarında periyodik değişimleri gözlemlemiştir (http://www.aavso.org 2016). Benzer yıldızların haftalar, aylar sonra ışık eğrilerinin şekillerinde değişimler gösterdiği gözlenmiştir. 1916 yılında Harlow Shapley prototip RR Lyrae yıldızının kendisine ait ışık eğrisinde, tayfında ve döneminde değişimler bulmuştur (Shapley 1916).

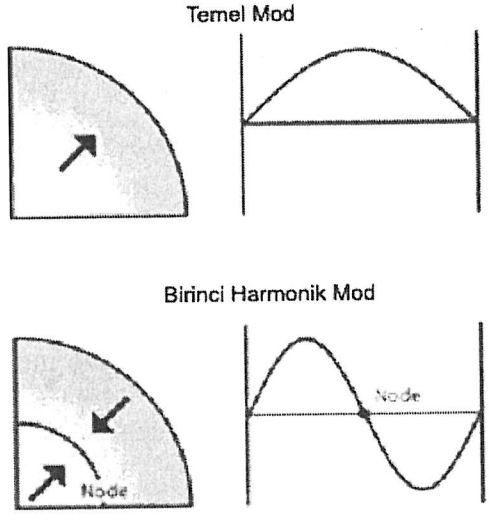
Bu zamana kadar Blazhko yıldızları üzerine adanmış çalışmalarda, bu tür yıldızlarda değişen Blazhko çevrimi, ek uzun çevrimler, çoklu modülasyon periyodları, frekans tayflarında karmaşık multiplet yapılar, büyük harmonik modlara karşılık gelen ek frekanslar gözlemlenmiştir (Kolenberg 2012).

Bu etki RR Lyrae yıldızlarında 2 farklı ışık eğrisine sahip yıldızların ışık eğrilerinde şekil 1.22'te açıkça görülmektedir. Temel modda (RRab) yani boşlukta bir dalganın hareketsiz olmasındaki düğümü, yıldız yüksek genliğe ve birinci üst ton moddakinden (RRc) daha uzun döneme sahiptir. Birinci üst ton mod tek modlu dalga gibidir. Temel mod zonklayıcıları RRab türü yıldızları olarak ve birinci üst ton (first harmonic) zonklayıcıları RRc türü RR Lyrae yıldızları olarak adlandırılır. Bir seferde her iki

modda zonklama yapan yıldızlar RRd veya "double-mod" RR Lyrae yıldızları olarak adlandırılmaktadır (Şekil 1.18 -1.19).



Şekil 1.18 RRab, RRc ve RRd türü yıldızların yarıçaplara bağlı olarak zonklama modları (http://crescent.astro.illinois.edu 2016)



Şekil 1.19 Temel ve birinci harmonik modlarının gösterimi (Çelik 2008)

Blazhko Etkisi RRab yıldızlarının %20-30'unda RRc yıldızlarının yaklaşık %5'inde görülür RRab yıldızlarındaki bu olayın sıklığı metal bolluğu etkisi ile ilişkilidir (Alcock vd. 1998).

RR Lyrae değişen yıldızlarındaki Blazhko Etkisi için yorum ve açıklamalar onun keşfinden yaklaşık bir yüzyıl sonra tartışılmaya başlanmış ama Blazhko Etkisinin fiziksel temeli tam olarak açıklığa kavuşamamıştır (Shibahashi 2000). Tek dönemli RR Lyrae yıldızlarının ışık ve hız eğrileri çevrimden çevrime dönemli değişim gösterir. Buna rağmen, gözlenmiş RR Lyrae yıldızlarının yaklaşık üçte biri onların zonklamasına ait uzun dönemli değişimler gösterir. Buna "Blazhko Etkisi" denir. Blazhko Etkisinin nedeni, tam olarak bilinmemekle birlikte 10'dan fazla varsayımlar üzerinde durulmaktadır: Ancak öne çıkan 6 model: Manyetik Etki, Dönme, Zonklama, Değişken Türbülans Konveksiyonu, Radyal Rezonans ve Güçlü Dipol Manyetik Alan ve Şok Modeldir. Fakat bunların hiç biri Blazhko Etkisini açıklamaya yeterli olmamıştır.

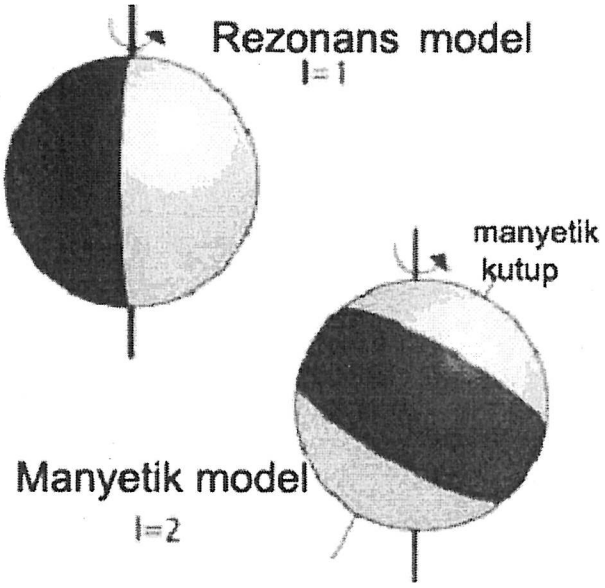
RR Lyrae yıldızında gözlenen manyetik alanın varlığı çok uzun zamandır bilinmemektedir. İlk olarak Babcock (1958) ve daha sonra Romanov vd. (1987) RR Lyrae'nin manyetik alana sahip olabileceğini öne sürmüşlerdir (Chadid vd. 2000). RR Lyrae manyetik alanın zonklama dönemine eşit bir dönemle ve ortalama manyetik alan kuvvetinin Blazhko Etkisinin dönemi ile periyodik olarak değişmesine sebep olan ortalama 1.5 kG'luk manyetik alan şiddeti göstermektedir. Bu sonuçlar ciddi olarak yıldızın manyetik aktivitesi ile Blazhko Etkisinin ilişkili olabileceğini göstermektedir (Chadid vd. 2000).

Blazhko Etkisi için yapılan bir diğer açıklama şöyledir; κ mekanizması'nın neden olduğu kendine özgü radyal zonklamadır. Ek olarak radyal olmayan zonklama bileşenlerinin manyetik eksenleri bakış doğrultusu ile uyuşmaktadır. Son olarak yıldızın dönme eksenine doğru yatırıldığı varsayılmaktadır. Yıldızın dönmesi gibi, radyal olmayan bileşenlerin konum açısı değişir ve sonra bu bileşenler, RR Lyrae yıldızlarının parlaklık değişimindeki uzun dönemli değişimler gibi kendilerini gösterirler. Bu modelde Blazhko genliği manyetik alan kuvvetine bağlı olmaktadır (Chadid vd. 2000).

Blazhko etkisi gözlenen yıldızlarda (RR Lyrae'nın kendisi de dahil) bu etkiye sebep olabilecek denli yüksek bir manyetik etkinliğin ve güçlü dipol manyetik alanın gözlenememiş olması da bu açıklamanın savunulmasını güçleştirmektedir (Chadid vd. 2004, Kolenberg ve Bagnulo 2009).

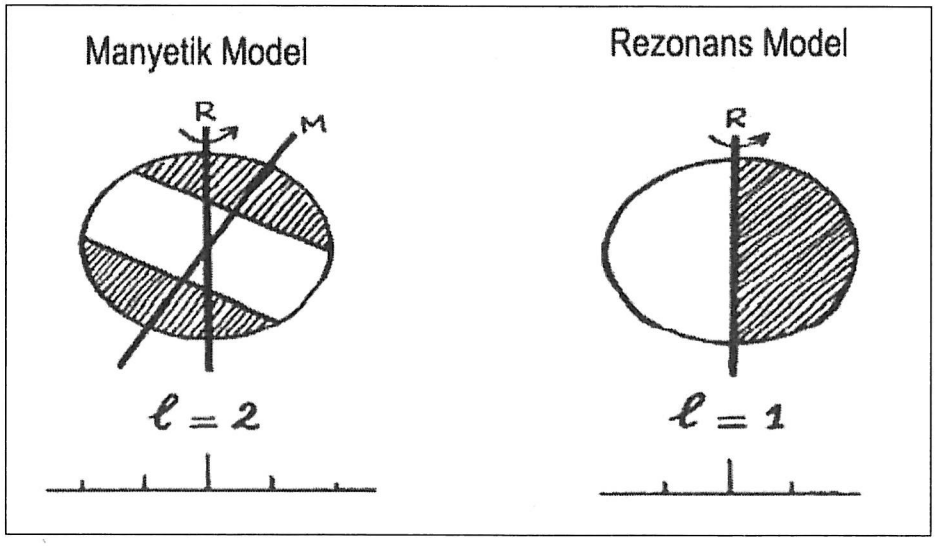
Yukarıda belirtildiği gibi Blazhko Etkisine neyin sebep olduğu tam olarak bilinmemekle birlikte bu etkiyi açıklamak üzere kronolojik açıdan ilk olarak öne sürülen iki teori (Şekil 1.20): Rezonans modeli ve manyetik alanları içeren teorilerdir. H.A. Kluvyer (1936) tarafından öne sürülen ilk teori Manyetik Model'dir. Kovacs (1995) tarafından tartışıldığı üzere, Blazhko Etkisini açıklamayı amaçlayan iki modelde radyal olmayan salınım modları çok önemli rol oynar. Bunlardan biri eğik zonklayıcı modelidir (Cousens 1983, Shibahashi and Takota 1995, Shibahashi 2000). RR Lyare yıldızlarının gerçek manyetik alana sahip olduğu varsayılarak manyetik eksen, dönme eksenine doğru yatırılmaktadır. Böylece Blazhko Etkisi için eğik zonklayıcı model önerilmektedir (Shibahashi ve Takota 1995).

Bu yıldızlarda simetri ekseni manyetik eksen ile çakışmaktadır (Şekil 1.20-1.21). Böylece manyetik eksenin dönme eksenine yatırıldığı varsayılmaktadır. Yıldızların dönmesiyle, radyal olmayan bileşenler de bakış açısına göre değişir ve sonra bu bileşenler, RR Lyrae yıldızlarının parlaklık değişiminin uzun-dönemli değişimi gibi kendilerini açıkça belli ederler. Bu model aslında Ap yıldızlarının hızlı salınımları için önerilen eğik zonklayıcı modelin aynısıdır (Kurtz, 1982); fakat Cousens (1983)'nin modelinden biraz farklılık gösterir (Shibahashi ve Takota 1995). Eğik zonklayıcı modele göre Blazhko dönemi, yıldızın zonklama döneminin 2 katına eşit olmalıdır. RR Lyrae yıldızlarının dönme dönemleri gözlemsel olarak elde edilememiş olmasına rağmen, onların Blazhko dönemlerinin gözlenen oranı ile uyumlu olduğu düşünülmektedir (Shibahashi and Takota, 1995). Moskalik ve Poretti (2003) OGLE gözlemlerinden yola çıkarak "eğik zonklayıcı" modelinin geçerli olamayacağını öne sürmüşlerdir. Le Borgne (2012) aynı zonklama dönemine sahip RRab yıldızlarının farklı Blazhko dönemlerine sahip olabildiği gibi aynı Blazhko dönemine fakat farklı zonklama dönemlerine sahip RR Lyrae yıldızları da olduğunu göstermişlerdir. "Eğik zonklayıcı" modelinin farklı bakış açılarında, farklı dönme hızları için gözlenen olguları açıklayabileceğini ancak gereken şiddette manyetik alanların gözlenememiş olmasının ve Blazhko Etkisinde çevrimden çevrime gerçekleşen değişimlerin açıklanamıyor oluşunun bu modelin geçerliliği önünde engel olarak durduğunu belirlemişlerdir.



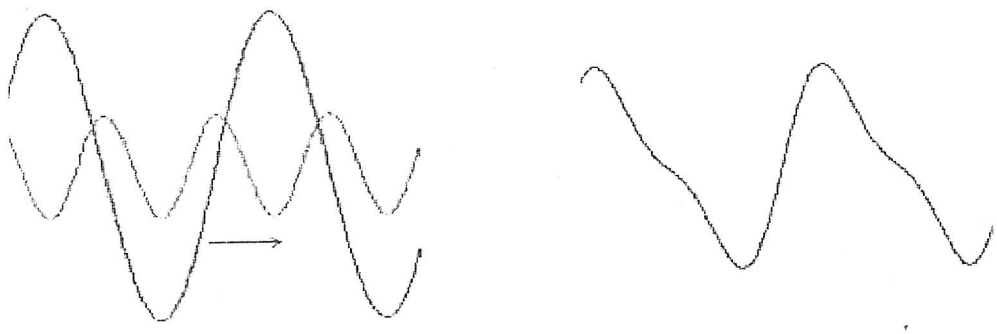
Şekil 1.20 Blazhko Etkisini açıklayan iki model (Kolenberg 2004)

Uzun zamandır kullanımda olan eğik zonklayıcı modelinin tüm çeşitleri zonklama dikkate alınarak geliştirilmiştir. Eğik manyetik zonklayıcı model ile Blazhko Etkisini açıklamak için RR Lyrae türü yıldızların, yapılacak daha duyarlı tayfsal gözlemler ile manyetik alanları ölçülmelidir. Diğer farklı iki modelin manyetik alan varlığına ihtiyacı yoktur.



Şekil 1.21 1995-2006 Yılları arasında Blazhko Etkisini açıklayan Manyetik model ile Rezonans modellerin şeması (Kolenberg 2011b)

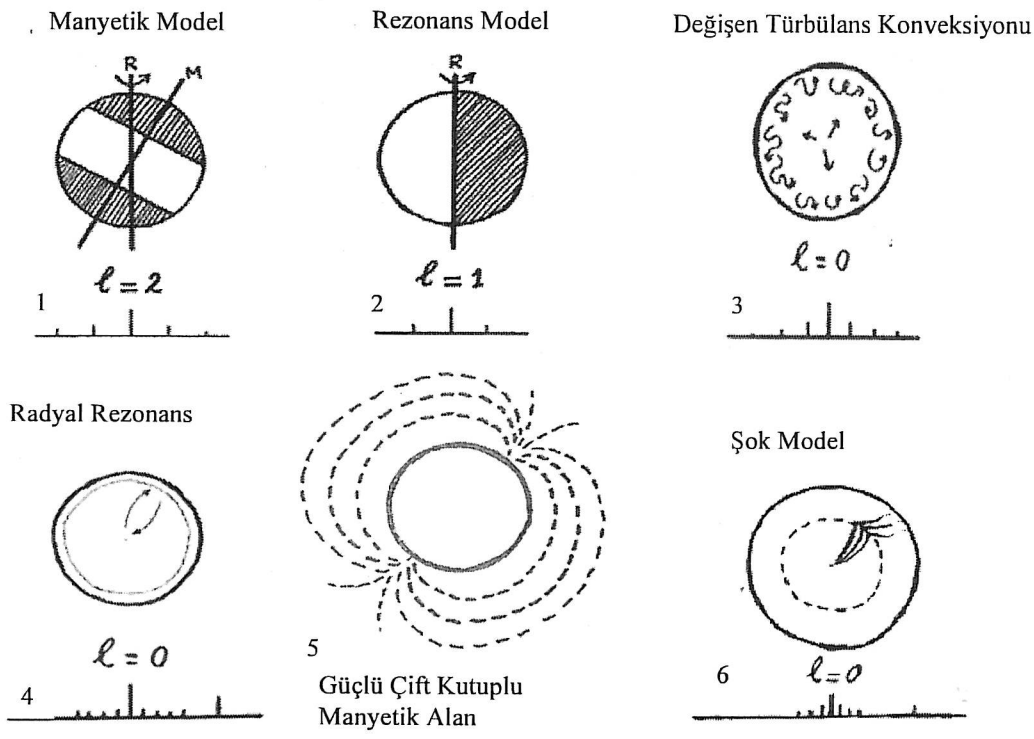
Blazhko Etkisi gösteren yıldızlara daha önce açıkladığımız durumlardan dolayı kısaca literatürde 'Blazhko yıldızları' da denmektedir. Blazhko yıldızlarında iki dönemin birleşik etkisi sonucunda ışık eğrisi bozulmaya uğrar. Bu durum Şekil 1.22'de açıklanmaktadır.



Şekil 1.22 Tipik RR Lyrae değişen yıldızlarının ışık eğrisi (Dall'Ora vd. 2006)

Şekil 1.22'de soldaki şekilde üst üste binmiş 2 ışık eğrisi görülmektedir. Burada iki dönemin birleşmesi sonucunda sağdaki değişime uğramış ışık eğrisi oluşmaktadır.

Daha önce de belirttiğimiz gibi Blazhko Etkisini açıklamaya çalışan 6 adet üzerinde çalışılmış model bulunmaktadır. Bunlar; Manyetik Model (Shibahashi, 2000), Rezonans Model (Van Hoolst et.al. 1998; Dziembowski ve Mizerski 2004), Değişen Türbülans Konveksiyonu (Stothers 2006), Radyal Rezonans, Güçlü Dipole Manyetik Alan ve Şok modeli (Gillet 2013) Şekil 1.23'de gösterilmektedir. Günümüzde Blazhko Etkisine Şok Dalgalarının sebep olduğu düşüncesi baskındır. Bu yeni açıklama Kararsızlık Kuşağında yer alan Blazhko yıldızlarında temel mod ve birinci üst ton'un aynı anda uyarılmasının gözlenmesine dayanmaktadır (Gillet 2013).



Şekil 1.23 Blazhko Etkisi açıklamak için öne sürülen modellerin kronolojik sıralaması (http://online.kitp.ucsb.edu 2016)

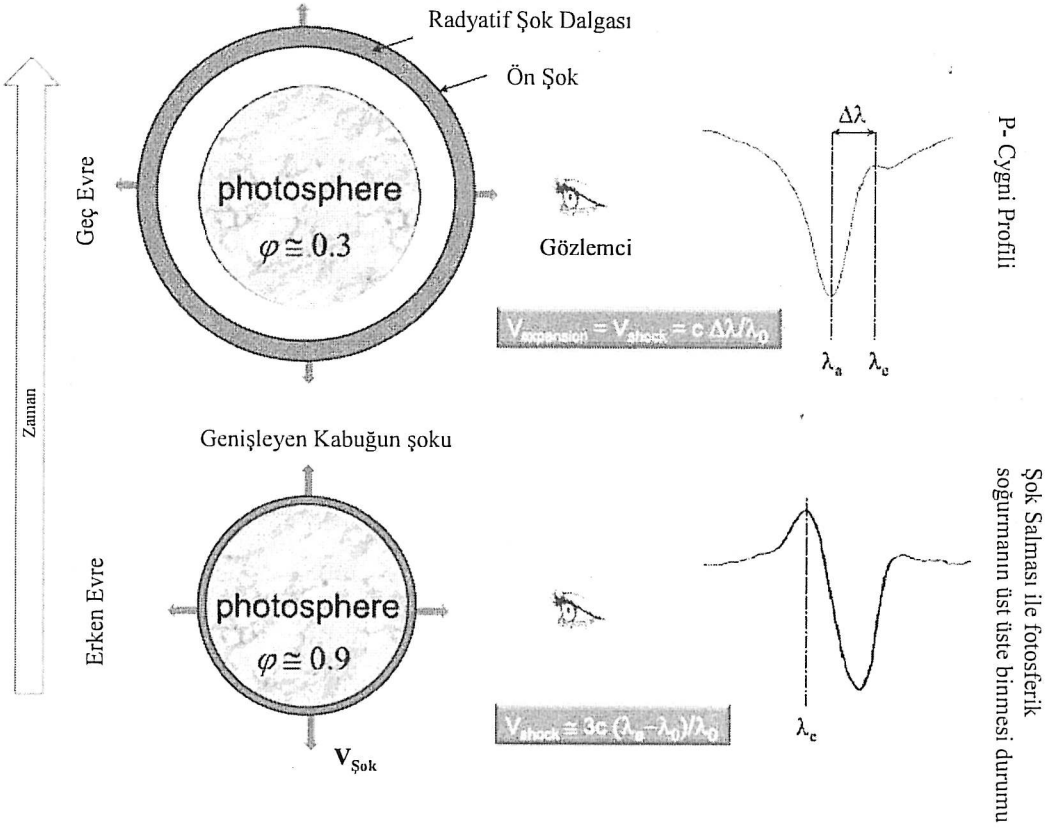
Atmosfer katmanlarının hareketinde, uzun dönemli bir değişiklik beklenebilir. Bu, RR Lyrae'in Blazhko dönemi boyunca Hidrojen salma çizgisinin şiddetinin değişimi ile uyuşmaktadır (Chadid ve Gillet 1997). Çünkü bu etki, doğrudan doğruya şok dalgalarının şiddetiyle ilgilidir. Hill (1972) ve Fokin (1992)'in çalışmalarından ikinci şok veya erken şok olarak bilinmektedir. Bu erken şok (secondary shock) olarak adlandırılır. Bu ikinci şok, serbest düşen bir dış atmosferik katman ile yukarı doğru hareket eden fotosfer katmanının çarpışmasına bağlıdır (balistik hareket). Bu şok, metalik çizgilerin yarı genişliklerinin (FWHM) artması ve zayıf Hidrojen salmasının varlığı ile saptanmıştır (Gillet ve Crowe 1989). Bu eğrilerde görülen birinci özellik, aynı şekilde davranarak (düşerek ve yükselerek), zonklama fazlarıyla beraber pik yapmalarıdır. İkinci özellik, dönme ve zonklama etkileri ile açıklanan, maksimum parlaklıktan *(evre=0.00)* hemen sonra gerçekleşmeleri ve sonuncusu ise, *(evre=0.70)* "early shock" yani ikinci şok diye adlandırılan, bir düşey şokun yayılması sebebiyle ikinci ivmelenme sırasında oluşur.

FWHM (bir tayfsal çizginin yarı yükseklikteki tam genişliği) temelde, fotosferde gerçekleşen türbülans, hız ve sıcaklık değişimine bağlıdır. Zonklama yapan yıldızlardaki hız alanı değişimi, öncelikle şok dalgalarının atmosferde yayılması sırasında FWHM'de de değişikliğe sebep olur (https://tr.wikipedia.org 2016).

Bu hızlı şok dalgaları Güneşte dikey ve yatay hızlarda önemli ölçüde zayıf bir şekilde oluşmaktadır. Zonklama yapmayan bu yıldızlarda akustik dalgalar konvektif hareketler sayesinde uyarılır, yukarı doğru yayılır, şok dalgasının içine doğru yükselir, dağılır ve yok olur, atmosferin üst katmanında mekanik enerji olarak kalır. Radyal zonklayan yıldızlarda dikey şoklar, onların yüksek hızlarından (hipersonik şoklar) dolayı üst atmosferin atmosferik dinamiğini kontrol altına alıp, onlara hakim olurlar. Ayrıca bu durumda, şoklar ve şokların çoğu enerjisi katmana yayılır. Bu tür yıldızlarda atmosferin fotosferik dinamiğinin sonucunda zonklama döneminin her birinde beş güçlü şok dalgası tarafından çok güçlü etkilenir (Gillet 2013). W Virginis türü zonklayan yıldızlar için ilk Şok Dalgaları modeli Whitney (1956) tarafından geliştirilmiştir Şok dalgalarından etkilenen çizgilerin profilleri Şekil 1.24'de gösterildiği gibi ters P-Cygni profilini andırmaktadır (Gillet 2013). Atmosferde meydana gelen her iki şok dalgası birleşerek Blazhko etkisine sebep olmaktadır. Bu etki sadece birinci üst tonun temel mod ile aynı anda uyarılması ile mevcut olur. İlgili fiziksel mekanizmalar aslında doğrusal değildir, yani lineer olmayan hareketlerdir (şok dalgaları, atmosferik dinamikler, ışıma kaybı, yarılma modları). Bu durum, Blazhko sürecinin sabit olmamasına ve düzensiz olmasına sebep olur (Gillet 2013). Şekil 1.34'de farklı türde zonklayan yıldızlara ilişkin ters P-Cygni Profillerini anımsatan tayf örnekleri verilmektedir.

Blazhko Etkisi RRc ve RRab değişenleri arasında yaygın bir etki olabilir fakat RRc ve RRab yıldızları için bu etkiye sebep tamamiyle aynı fiziksel mekanizma henüz tespit edilememiştir. Bu yüzden RRc yıldızları RRab yıldızları ile aynı Blazhko Etkisi göstermeyebilir. Ayrıca, eğer Blazhko etkisi güçlü şok dalgaları ile etkileşimli ise şokların yoğunluğu RRc yıldızlarında RRab yıldızlarına oranla daha düşüktür bu yüzden RRc yıldızlarında Hidrojen salma çizgileri gözlenmemektedir. Bu nedenle, bu önemli fark RRc yıldızlarındaki Blazhko Etkisi açıklamaya çalışırken hesaba

katılmalıdır. RRc ve RRd yıldızlarının ışık genliği birbirine yakındır ve RRab yıldızlarının maksimum genliğinden 2-3 kez daha düşük seviyededir (Gillet 2013).



Şekil 1.24. Bir RR Lyrae yıldızındaki en dış katmanda şok dalgasının yayılması esnasında Hα çizgi profilinin evrimini gösteren kuramsal şema (Gillet ve Fokin 2014)

Şekil 1.24'de görüldüğü üzere erken evre (alt panel) parlaklığın maksimuma ulaşmasından hemen önceki evre'de (zonklama evresi 0.9) yani "shock front" (haberci termalizasyon bölgesi) fotosfere yakın olduğu zaman meydana gelir. Geç evre ilk üst panel (zonklama evresi 0.3 civarında P-Cygni benzeri profil gözlemlenir. Bu da demek oluyor ki "shock front"(şok dalgası yüzü) fotosferden bağımsızdır. Genişleyen kabuk yani dış katman Hα salma çizgisi formundadır. λ_e , Hα salma çizgisinin maksimum yoğunluğunun dalgaboyudur, λ_a ise Hα soğurma çizgisinin ve λ_0 laboratuvar dalgaboyunun maksimum yoğunluğunun dalgaboyudur (Gillet ve Fokin 2014).

Bu zamana kadar RRd yıldızlarında Blazhko Etkisi görülmemiştir. Bunun sebebi çok az sayıda RRd yıldızının RRab ve RRc yıldızları ile karşılaştırılmasından kaynaklanan bir gözlemsel yanlılık olabilir. Aynı zonklama çevrimi esnasında birinci üst ton ve temel modda istikrarlı salınımların birarada olması şok dalgalarının genliğinin gelişimini düşürebilir. Bu yüzden, güçlü şok dalgalarının etkileşimine dayanan Blazhko Etkisi çift modlu (double-mode) RR Lyrae yıldızlarında olmayabilir. Bu fikir, güçlü şok dalgalarının belirteci olan hidrojen salma çizgilerinin RRd yıldızlarında görülmemesi ile uyumludur. Fakat RRc ve RRd yıldızları yaklaşık aynı genliğe sahiptir. Buna göre, olası RRd türü Blazhko yıldızları olabilir bu durum yadsınamaz ama gözlemlenen Blazhko etkisi gösteren RRc yıldızlarıdır (Gillet 2013).

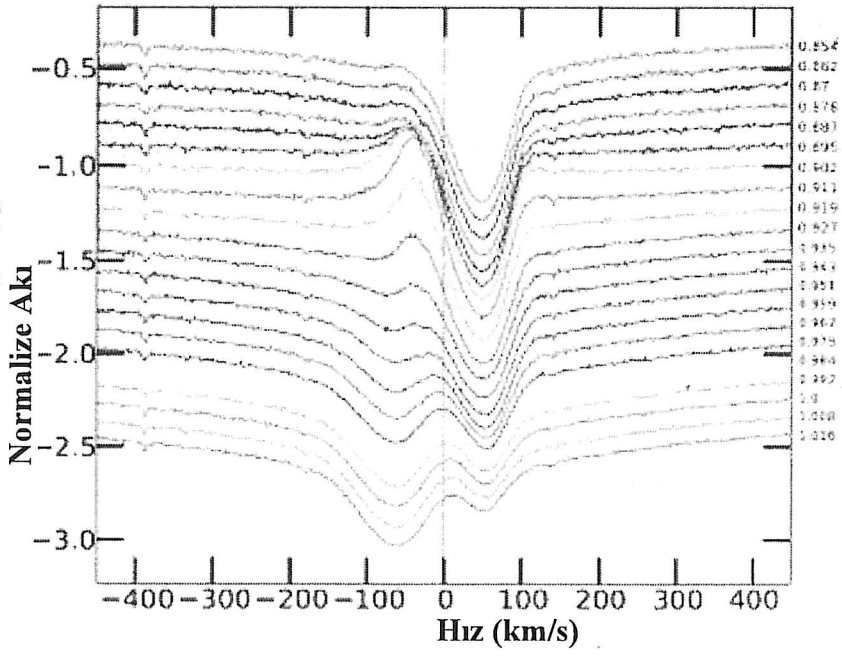
Neredeyse bütün RRab Blazhko yıldızları yüksek ışık değişim genliklerine ($0.7<\Delta V<1.6$) sahiptir. Bu; güçlü şok dalgaları genellikle onların atmosferlerinde meydana geldiğini göstermektedir. Blazhko Etkisi gösteren RRab yıldızları için şok dalgasını açıklayan dinamik modeller bulunurken RRc ve RRd yıldızları için atmosferik zonklama modelleri üzerinde bir çalışma bulunmamaktadır (Gillet 2013).

Son yüzyıl boyunca özellikle RRab türünde olanlarda helyum salma çizgileri RR Lyrae yıldızlarında gözlenmemiştir ama yine de atmosferlerinde şok dalgaları bulunduğu düşünülmektedir (Gillet vd. 2013). Sadece son zamanlarda 10 adet RRab yıldızında HeI çizgileri görülmüştür ve 3'ünde de çok çok zayıf HeII salma çizgisi tespit edilmiştir (Gillet vd. 2013). Blazhko Etkisi göstermeyen RR Lyrae yıldızları (Non-Blazhko yıldızları) helyum salma çizgisi göstermemektedir (Gillet vd. 2013). He I ve HeII salma çizgilerinin varlığı şok dalgalarının yoğunluğu ile doğrudan ilgilidir. Helyum salma çizgileri sadece Blazhko yıldızlarının en güçlü genlikli evresinde ortaya çıkar. Büyük Blazhko genliğinde yani şok dalgalarının yoğunluğunun artması ile helyum çizgilerinin salma şiddeti artacaktır (Gillet vd. 2013). Blazhko etkisi göstermeyen RR Lyrae yıldızlarının HeI (6678.16 Å) ve HeII (4685.68 Å) çizgileri göstermemesi bize bu yıldızlarda şok dalgalarının olmadığını işaret eder ki bu çok önemli bir göstergedir. Sonuç olarak 3 adet başlıca şok dalgası sistemi açıklanmaktadır:

a- Sadece H çizgilerinin görüldüğü süpersonik sistem

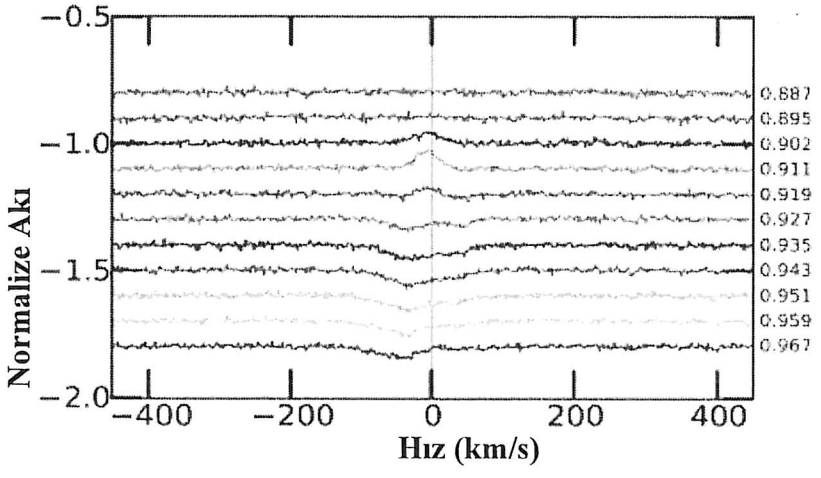
b- .HeI çizgilerinin üretildiği bölgedeki zayıf hipersonik sistem ve

c- HeII salma çizgilerinin ek gözlemi ile güçlü hipersonik sistem (Gillet vd. 2013)



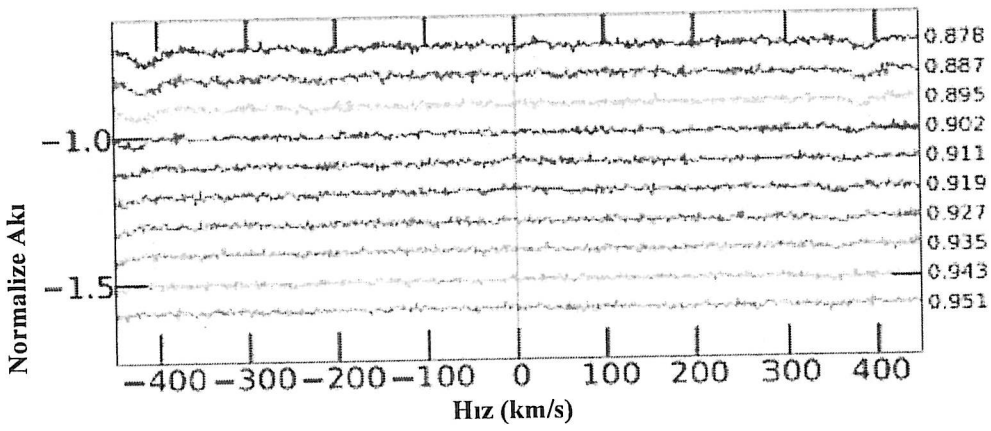
Şekil 1.25 Prototip RR Lyrae Yıldızının evreden evreye göre Hα çizgi profilinin değişimi (Gillet vd. 2013)

Sağ eksen zonklama evrelerini, dikey eksen yıldızın 0 (km/s) hızda sakin olduğu anı göstermektedir



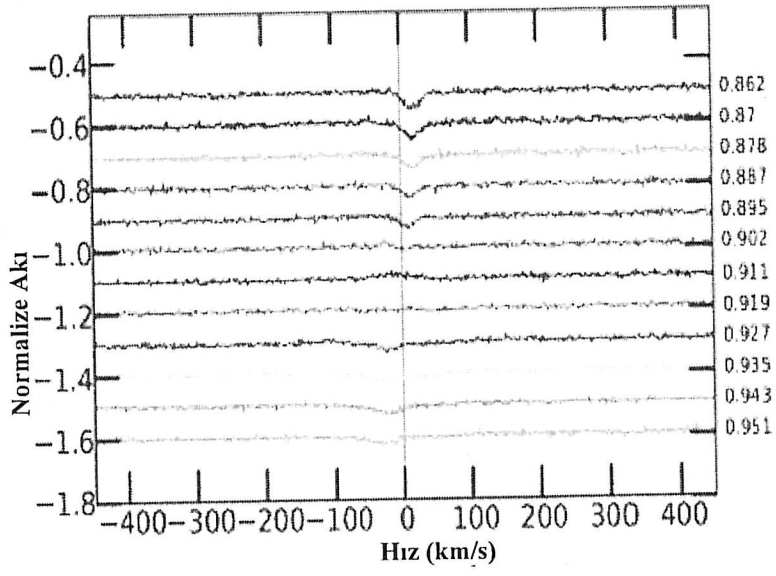
Şekil 1.26 RR Lyrae Yıldızının He I λ5875.66 çizgi profilinin evrimi (Gillet vd. 2013)

Salma Çizgileri ardışık üç tayfta (0.902, 0.911 ve 0.919) görülmektedir



Şekil 1.27 RR Lyrae Yıldızının He II λ4685.68 çizgi profilinin evrimi (Gillet vd. 2013)

0.911 ve 0.919 evresinde He II salmasının yoğunluğunu sürekliliğin yukarısında sırasıyla %0.4 ve %0.2 olarak beklenmektedir



Şekil 1.28 RR Lyrae Yıldızının He I λ6678.16 çizgi profilinin evrimi (Gillet vd. 2013)

0.911 evresinde zayıf salma çizgisi görülmektedir

0.3 zonklama evresi civarında ortaya çıkan kırmızıya kaymış Hα salma bileşeni, son zamanlarda geçerli bir açıklama olan "main shock" yani ana şok tarafından üretilir. Ana şok en güçlü olanıdır ve şekil 1.33'ten görüleceği üzere ışık eğrisinin genliği ana şok'un genliği ile bağlantılıdır. Ana şokun enerjisi metalik nötr elementlerini iyonize etmek için yeterlidir, fakat iyonize olmuş metalik çizgileri iyonize etmeye yetecek kadar büyük

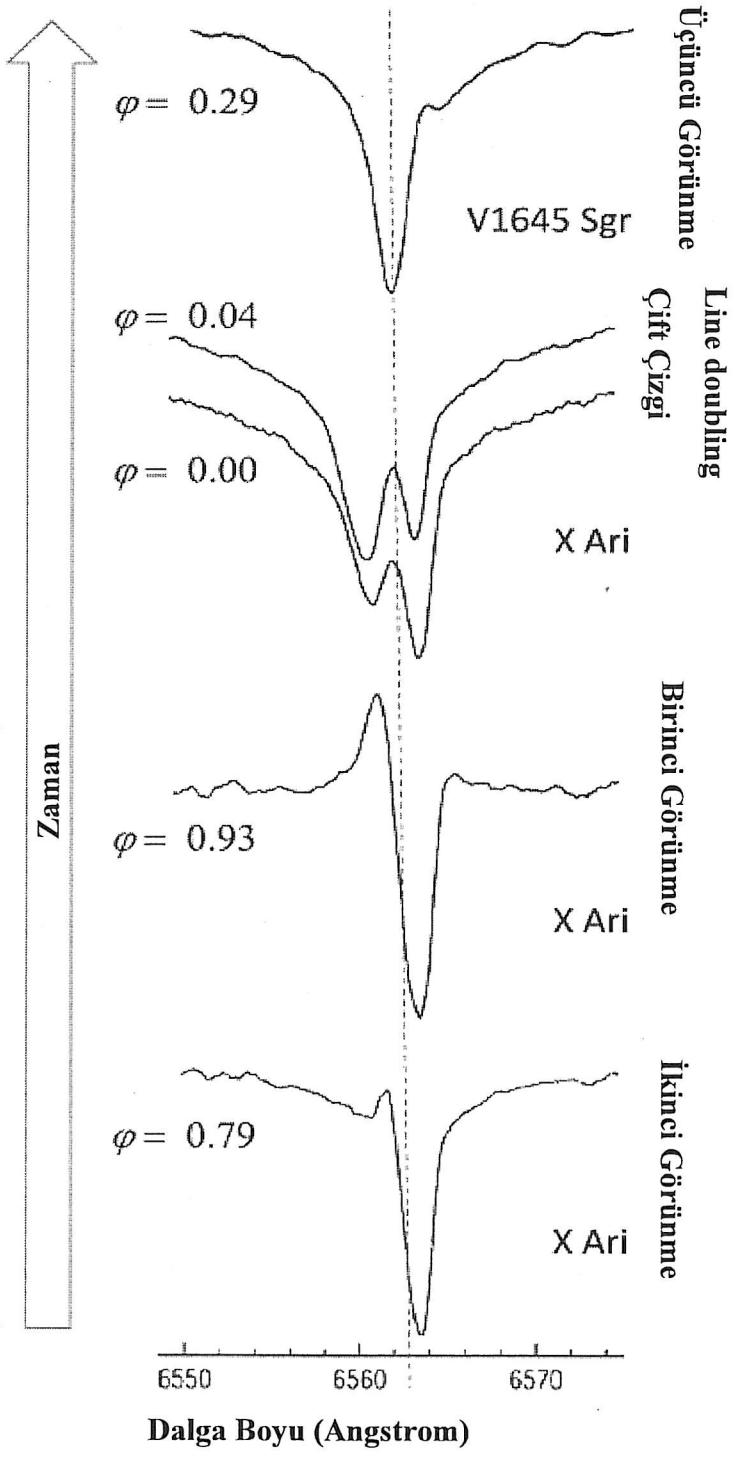
değildir. Hiçbir iyonlaşmamış çizginin yokoluş durumu gözlenmemektedir. Bu durumda, bu salmalar, genişleyen atmosferin doğal sonucudur. Bu yüzden RR Lyrae yıldızlarında gözlenen bu zayıf salmaya sebep olan ana şok fotosferden yeterince uzağa yayılır. Bu olay sonucu oluşan çizgilerin profilleri P-Cygni Profiline benzetilebilir. Hα P-Cygni profili uzun dönemli Cepheid yıldızlarında ana şok dalgası sebebiyle daha sık görülmektedir. Güncel olarak, He II sadece bazı Blazhko yıldızlarında tespit edilmiştir. RR Lyrae yıldızlarındaki bu durumu onaylamak için kapsamlı bir çalışma ve araştırma gerekmektedir. Bu yüzden diyebiliriz ki, He II çizgileri Blazhko etkisi göstermeyen yıldızlarda salma halinde görülmemektedir. Yani sadece RR Lyrae yıldızlarında Blazhko Etkisi gösteren ve radyal zonklama yapan türlerde görülmektedir (Gillet ve Fokin 2014). RR Lyrae yıldızlarının keşfi yüzyılı geçmiş olmasına rağmen helyum salma çizgileri ancak son zamanlarda keşfedilmiştir. Çok uzun zamandır yıldız maksimum parlaklığa erişmeden hemen önce hidrojen salma bileşenin oluştuğunu bilinmekteydi (Gillet ve Fokin, 2014). Tayfsal gözlemlerin kalitelerinin artması ile helyum salmaları yeni yeni keşfedilirken, hidrojen salma bileşenleri onlarca yıldır bilinmektedir. Hidrojen salmaları maksimum parlaklıktan hemen önce ortaya çıkmaktadır (Gillet ve Fokin 2014).

Şimdi gözlenen He II salma profilleri atmosferin ana hızlanma aşaması esnasında atmosfere doğru şok dalgasının radyatif uyarılması ile oluşur. Bu şok fotosferin altında minimum yarıçap civarı ve aniden hızlanan dış katman ile oluşur. Bu şok çok güçlüdür ve maddenin atmosferde yükselirken düşmesi ile durur. Zayıf hidrojen salması yüksek atmosfer katmanlarının daha derinlerdeki katmanlar ile düşerek çarpışması sonucu uyarılabilir. Böylece, şok/basınç dalgası ışık eğrisinde görülen bump yapısını oluşturur (Gillet ve Fokin 2014).

Preston (2011), zonklama çevrimi esnasında Hα profilinde üç adet orta ölçekte küçük salma bileşenlerini, çok net bir şekilde görmüştür. Yoğunluğun düşüş sırası ve keşfedilme zamanlarına göre "first apparition" birinci görünme (ana şok) diye isimlendirilen salma parlaklığın maksimuma ulaşmasından hemen önce meydana gelir. Bu salma ilk kez Sanford (1949) tarafından bulunmuştur. Bu olayın fiziksel kaynağı Schwarzschild (1952) "shock front" yapısının dışa hareketi arkasında salma katmanının

varlığına atıfta bulunur. Preston tarafından "second apparition" yani ikinci görünme diye isimlendirilen ikinci Hα salması Gillet ve Crowe (1989) tarafından minimumdan hemen önce parlaklıkta zonklama evresi 0.72 civarında keşfedilmiştir. 0.72 evresi ışık eğrisinde bump yapısına karşılık gelmektedir. Bu ikinci görünme yani erken şoktur. Kısaca ikinci şok, erken şok ve ikinci görünme aynıdır. Bu ikinci şok (bump) çizgi profillerinde tümsek yapısının oluşmasına sebeptir. Dış atmosferik katmanların balistik düşüşü ile daha içerdeki ve daha yavaş fotosferik katmanlar ile çarpışmasıyla bu salma çizgisi üretilir. İkinci salma (görünme) bileşeni kırmızıya kayar. Zayıf salma "third apparition" yani üçüncü görünme Hα profilinin kırmızı soğurma kanadında Preston (2011) tarafından gözlenmiştir. Fakat henüz bu olayın kaynağı tanımlanamamıştır. Bu şok zayıftır ve kırmızıya kaymış salma çizgisi zonklama evresi 0.30 civarında parlaklılığın azalmaya başladığı zaman görülmektedir. Bu şok hem Blazhko yıldızlarında hem de Blazhko Etkisi göstermeyen yıldızlarda vardır. Chadid ve Preston (2013) bu salma bileşenin zayıf süpersonik ve birbirini tetikleyen şok dalgalarından kaynaklandığını öne sürmüştür. Bu farazi şok "lump" ve karın görünümlü çıkıntı "bulge phenomenon" ile ilgili olduğu farzedilmiştir. Lump yapısının üçüncü salma ile ilgili olup olmadığı tam olarak kesin değildir. Bu yapıların özellikleri bugünlerde ışık eğrisinde ve radyal hız eğrilerinde öne çıkmaktadır. Bu yüzden bu şok atmosferik sıkışmanın başlangıcında örneğin atmosferin düşme hareketinin erken evrelerinde oluşmaktadır. Kısaca bir zonklama çevrimi esnasında Şekil 1.29'dan görüleceği üzere Hα profili için üç adet salma bölümü vardır (Gillet ve Fokin 2014). Birinci görünme, ikinci görünme, üçüncü görünme salma çizgilerinin bulunduğu tarihler baz alınarak isimlendirilmiştir (Gillet ve Fokin 2014).

Salmalar, zonklama çevrimi esnasında çok net olarak görülmektedir. En yoğun salma ilk kez zonklama evresi 0.93 civarında keşfedilmiştir. İkincisi ilk kez X Ari yıldızında Gillet ve Crowe (1989) tarafından evre aralığı 0.72-0.82'de gözlenmiştir. RV Oct, WY And ve V1645 Sgr'da gözlenen üçüncü şok 0.30 evresi civarında en güçlü salmayı verir (Preston 2011). X Ari yıldızının 0.30 evre civarında halen gözlemi bulunmamaktadır. İki adet birinci salma bileşenleri maviye kayarken, sonuncusu ve daha zayıf olan kırmızıya kayar. Bu salma çizgilerinin görünmeleri keşiflerinin tarihleri baz alınarak sıralanmıştır (Gillet ve Fokin 2014).



Şekil 1.29 Hα çizgisinde oluşan gözlenmiş üç salma bileşenin çizgi profili (Gillet ve Fokin 2014)

Hidrojen salma çizgileri değişik türlerdeki radyal zonklayan yıldızların karakteristik özelliklerini tespit etmek için önemlidir. Hidrojen salma yoğunluğunun, zonklamanın genliği ile korelasyonlu olduğu görülür (Gillet ve Fokin 2014). Gerçekten RR Lyrae

yıldızları sadece zayıf salma çizgileri göstermelerine rağmen klasik Cepheidlerde hidrojen salma çizgileri tespit edilmiş, ama Miralarda güçlü hidrojen salmaları gözlenmiştir. Şokun bıraktığı etkinin kanıtı olarak çift çizgi (line doubling) ve hidrojen çizgilerindeki salmalardır. Dahası RR Lyrae yıldızları için, gözlemler çok kısa bir süre boyunca, (yaklaşık olarak zonklama çevriminin %4'ü kadar) güçlü salmalar gösterir.

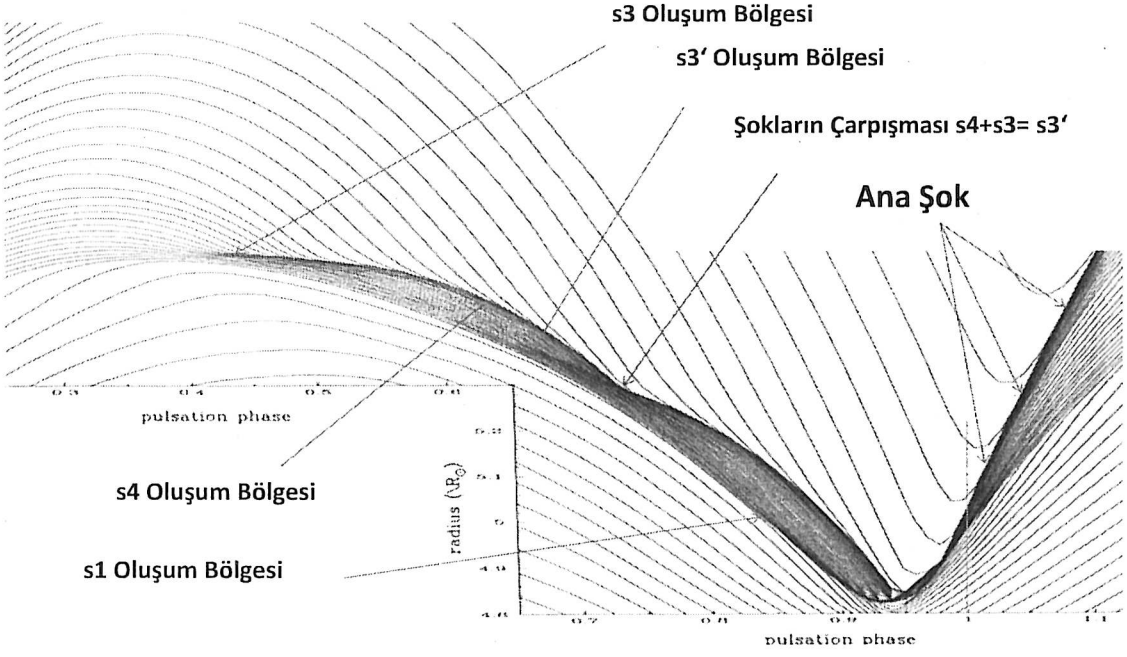
Gözlenen tüm salmaların fiziksel kaynağından anladığımız, şok dalgaları ve radyal zonklayan atmosferin doğrusal olmayan dinamik yapısı hakkında bize çok önemli bilgiler vermesidir. Gerçekten salma ve soğurma profilleri, atmosferik hız yapıları ve dışarı akan ve geri çöken maddelerin katmanlaşmasının nicel kavramlarının elde edebilebilmesi hakkında çok önemli bilgiler taşımaktadır. Radyatif uyarılmadaki salma çizgilerinin hesaplanması oldukça zor bir iştir. Bu nedenle bu konu hakkında ve bu konuyu çözmeye odaklı çok az araştırmacı vardır.

Bu şok dalgalarının fiziksel yapısını daha detaylı açıklamak istersek: Temel modda zonklama yapan bütün RRab zonklayanları ana şok diye adlandırılan şok dalgası üretir (Gillet vd. 2013). Zonklama çevriminde modellerce 5 adet şok dalgası bulunmaktadır. Şekil 1.31'de Atmosferin genişlemesinden minimum yarıçapa kadar s4 (buzz waves) yani birikmiş zayıf basınçlı dalgalar tarafından oluşan dalga görülür. Bunları şekil 1.30'da olduğu gibi s3, s3', s1, ve s2 takip eder. Sadece s1 ve s2 yarıçapta ve kütlede dışarı doğru hareket eder, bu arada yarıçap minimum olana kadar, s4, s3, s3' yıldızın merkezine doğru hareket eder fakat kütlede hareket dışarıya doğrudur. **κ mekanizması** tarafından üretilen zonklama modellerinde gözlenen iki güçlü şok dalgası s1 ve s2, hidrojen ve helyum alt fotosferik katmanların her ikisinde de oluşur (Gillet 2013). Böylelikle "Ana şok dalgası", Hidrojen ve Helyum alt fotosferik iyonizasyon katmanlarnda meydana gelen **κ mekanizmasın**dan kaynaklanan s1 ve s2 şoklarından oluşmaktadır. Fotosferin üzerinde s1, s2 ile bölgesi ile birleşir ve tek bir şok dalgası oluşturur (Gillet vd. 2013). s3 şok dalgasının başlangıcı, maksimum genişleme evresi civarında hidrojenin yeniden birleşmesinin durması ile ilgilidir (Gillet 2013). Gillet (2013) tarafından Blazhko Etkisini açıklayan öneride, Blazhko yıldızlarındaki zonklama modu geçici yani süreksiz olan birinci üst ton tarafından etkilenir. s3' şok dalgası

(s4+s3), birinci üst ton tarafından tedirgin edilen temel modun sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Orta şiddetteki bu şok en yüksek atmosfer katmanlarının serbest düşüş hareketinin başlangıcından sonraki yaklaşık 0.5-0.6 zonklama evresinde fotosferi geçer. s3' şok dalgasının rolü kademeli olarak atmosferde aşağı doğru yavaşça serbest düşüştür. Bu s3' şok dalgasının etkisi her zonklama çevrimindeki atmosferik basıncı düşürür (Gillet vd. 2013). s3' şok dalgasının sebebi çok net olmamakla birlikte şokun, süreksiz birinci üst ton tarafından temel modun tedirgin edilmesi ile oluşabilmektedir. Eğer s3' şok dalgası mevcut değilse basınç yerçekimi tarafından kontrol edilir (Gillet 2013). Ana şok dalgasının ışıma kaybı güçlenmeye başladığında, yıldızın ortalama etkin sıcaklığı artar ve yıldız HR Diyagramında kırmızı devler koluna doğru yolculuğu başlar.

Sonuç olarak temel modun üzerindeki birinci üst ton'un etkisi artacak, aynı s3' şok dalgasının yoğunluğu gibi, ve ana şok dalgasının yoğunluğu gittikçe azalır. Bu dinamik genişleme süreci fotosferik katmanların eş zamanlı hareketleri bozulana kadar devam eder. Şok ne kadar yoğun olursa He çizgisi o kadar uyarılır. Çünkü Blazhko olmayan yıldızların atmosferi birinci üst ton tarafından değişime uğratılmaz, genişleme süreci meydana gelmez, ve ana şokun yoğunluğu nispeten daha sakin ve durağan olur. Her durumda bu zamana kadar Blazhko olmayan yıldızlarda helyum salma çizgisi tespit edilmemiştir. Bu yıldızlarda şok dalgalarının yoğunluğunun genişleme süreci beklenemez. Sonuç olarak, helyum salmaları yoğunluğun yeterince yüksek olduğu ve ana şokun yeni oluştuğu zaman üretilir. Helyum salmalarının maksimum yoğunluğu hidrojen salma çizgileri ile aynı zonklama evrelerinde (0.911) ortaya çıkar. Bu durum beklenen şokun başlangıç noktası ile tutarlıdır. Helyum salmaları en şiddetli Blazhko yıldızlarında genliğin en yüksek olduğu zaman görülebilmektedir. Yalnız bu zaman kadar Blazhko olmayan yıldızlarda helyum salmaları görülmemiştir. Gillet (2013)'in Blazhko Etkisi için önermiş olduğu açıklamaya göre non- Blazhko yıldızlarındaki ana şokun yoğunluğu helyum salmalarını üretmek için yeterince güçlü değildir. Salmalardaki nötr helyumun (λ6678.16) varlığı ana şok dalgasının gücünü işaret eder. Şok dalga rejimlerinden b şıkkı zayıf hipersonik sistem (rejime) karşılık gelmektedir. Eğer iyonize helyum (λ4885.68) gözlenmiş ise bu demek oluyorki şokun yoğunluğu önemli bir ölçüdedir yani c şıkkı güçlü hipersonik sistem (rejim)dir (Gillet vd 2013).

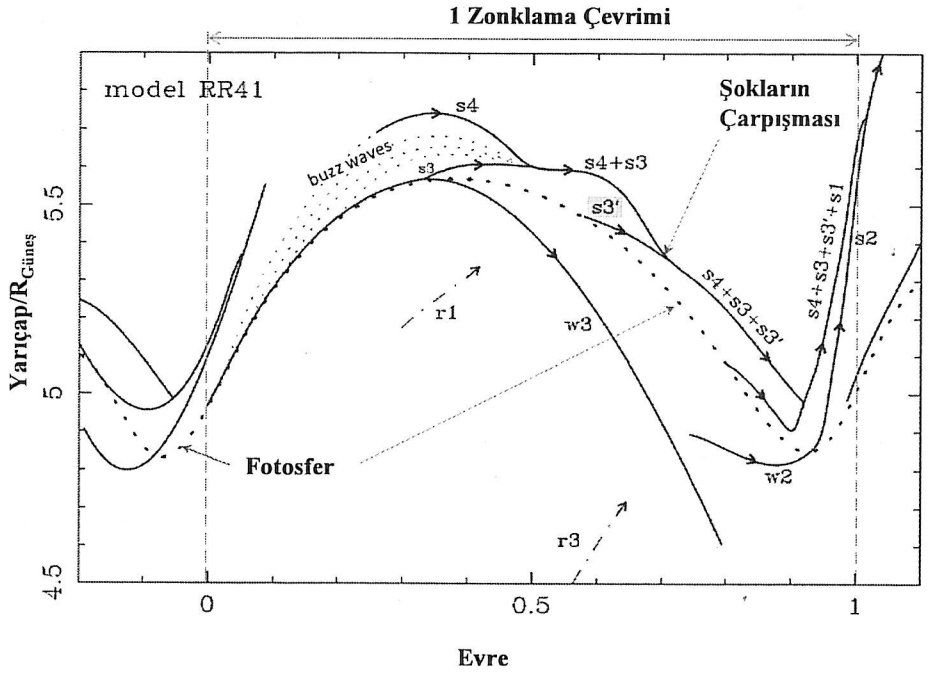
Şekil 1.30'da, zonklama evresi 0.90 civarında atmosferde meydana gelen bütün şok dalgaları, s4+s3+ s3'+s1+s2 'nin birleşmesi ve tek bir dalga gibi hareket etmesine ana şok dalgası (main shock) denmektedir (Gillet 2013). En güçlü salma, parlaklık artışının maksimuma erişmesinden hemen önceki evre olur ve ana şok dalgası ile ilişkilidir. İlk kez Struve and Blaauw (1948) tarafından keşfedilmiştir. İkinci Hα salmaları zonklama evresi 0.7 civarında pre-minimum parlaklığı esnasında oluşur. Bu ilk kez Gillet ve Crowe (1989) tarafından bulunmuştur ve bu salmalar dış atmosferik katmanların balistik çökmesi ve daha derindeki daha yavaş çöken katmanları yakalaması ile oluşur. Aslında, salma s3''den sonra görülür (s3'=s3+s4). Böylece, onların çöküşünden önce çöküş hızları çok çok zayıftır olduğundan dolayı) s3, s4, s3' emisyon salma çizgileri üretmez



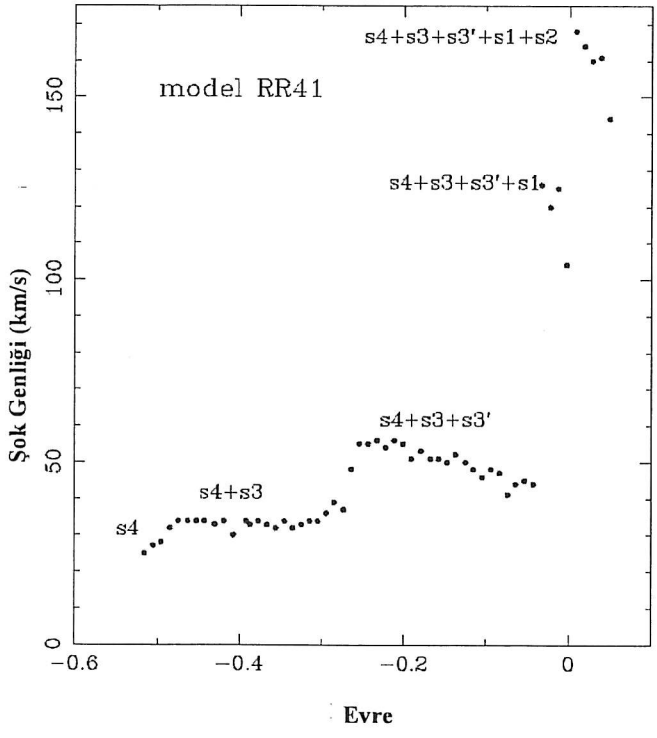
Şekil 1.30 Şok dalgalarının zonklama evresine karşılık yarıçap eğrisinde oluşum bölgelerini göstermektedir (Gillet 2013)

Buradaki teorik bir ışık eğrisi olup T_{eff}=7175 K, L=62 $L_\odot$ ve M=0.578 $M_\odot$ olarak alınmıştır

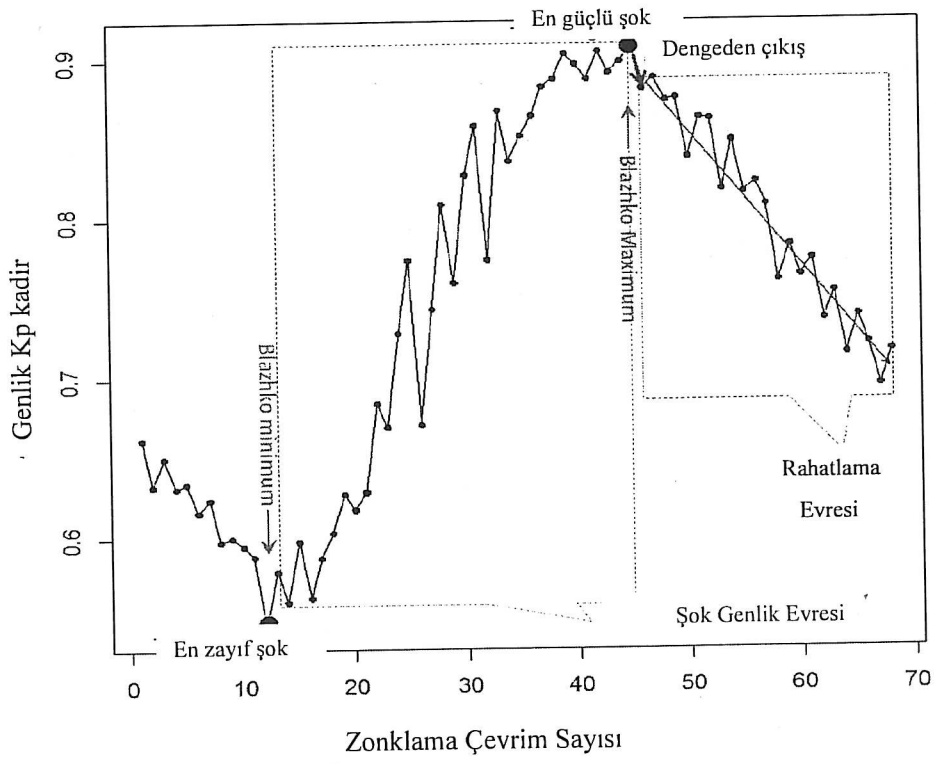
Şekil 1.31'de görüldüğü üzere bir zonklama çevrimi boyunca, şok dalgalarının ışık eğrisindeki yansıması görülmektedir. s3' ile s4+s3 dalgalarının çarpışması ile oluşan yeni bir dalga ve onu takip eden çarpışma sonucu dalgaların birbiri ile eklenerek farklı dalgalar oluşturması gözlenmiştir.



Şekil 1.31 Bir zonklama çevrimi süresince görülen şok dalgaları (Fokin ve Gillet 1997)

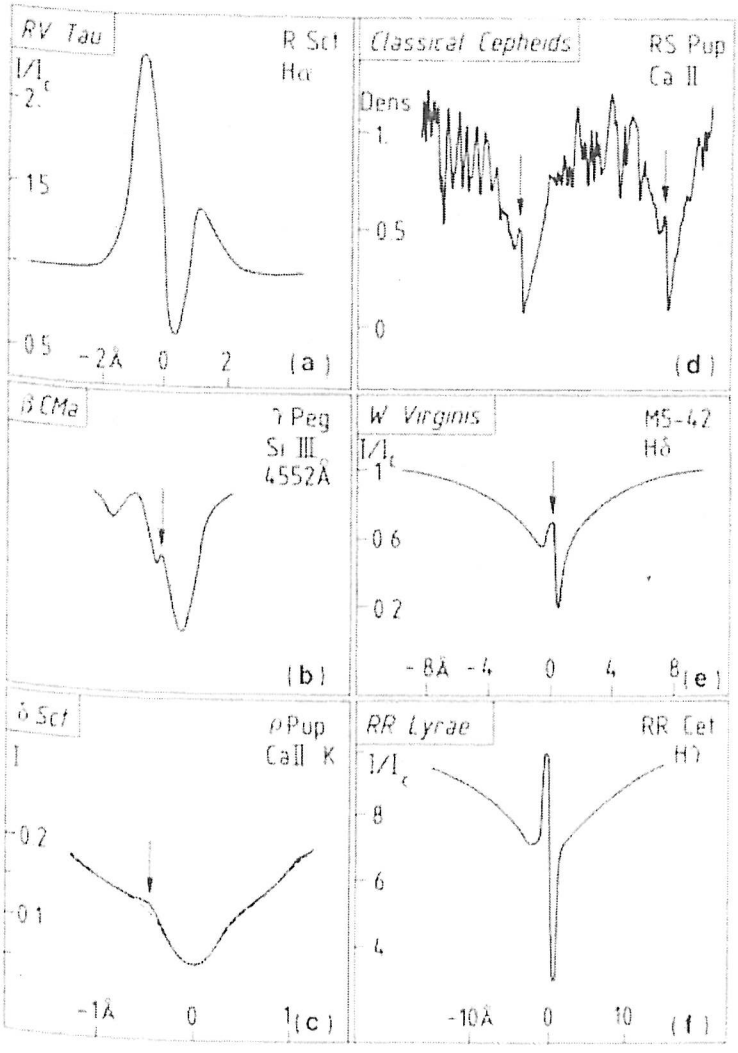


Şekil 1.32 Işık eğrisinde minimumdan maksimuma geçiş süreci (Fokin ve Gillet 1997)

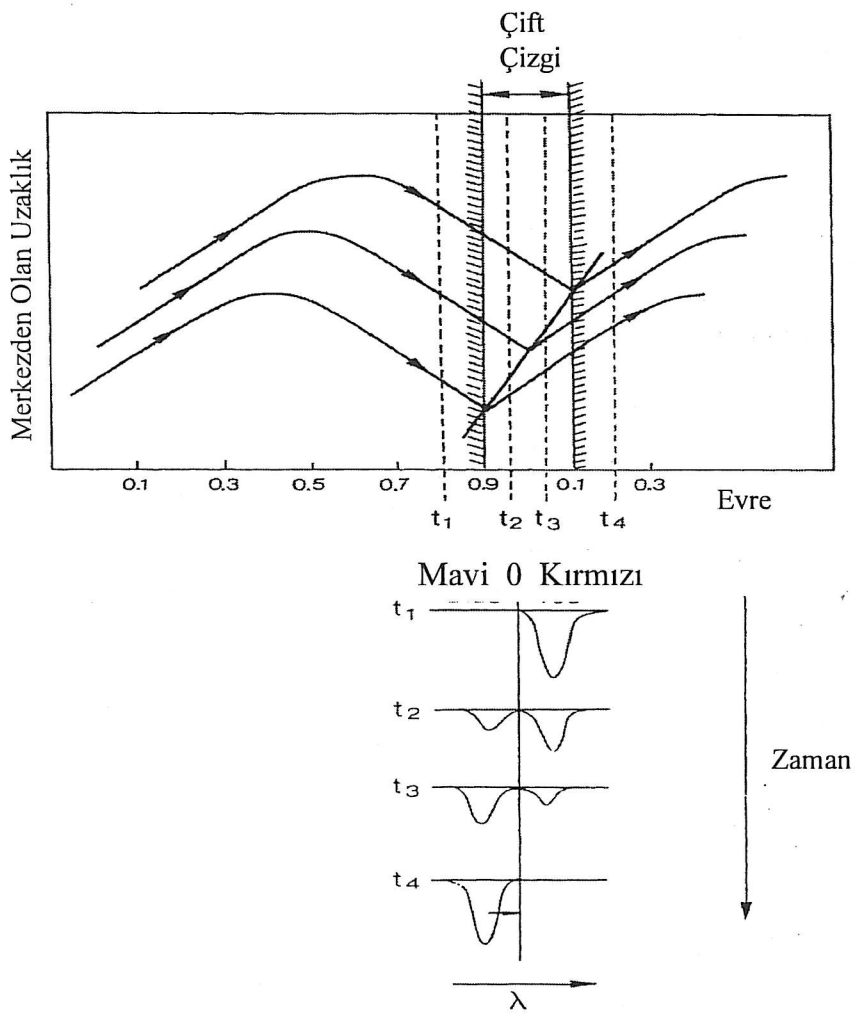


Şekil 1.33 Genliğe karşılık zonklama çevrim sayısını veren grafik. Işık eğrisinin genliği ile ilk şokun genliği arasında güçlü bir ilişki vardır (Gillet 2013)

Şekil 1.33'de 4 Temmuz-11 Ağustos 2009 tarihleri arasında alınmış olan (Q2'e karşılık gelen) prototip RR Lyrae yıldızının kendisine ait Kepler Uzay Teleskobundan alınmış zonklama çevrim sayısına karşılık genlik verilmektedir. Işık eğrisinde Blazhko Minimumu, Blazhko Maksimumu ve maksimuma karşılık şok dalgasının gücü ve rahatlama evresi açıkça görülmektedir.



Şekil 1.34 Farklı türde zonklayan yıldızlarda atmosfer boyunca dağılan şok dalgalarının sebep olduğu salma çizgileri (https://www.eso.org/ 2016)



Şekil 1.35 RR Lyrae yıldızına ait atmosferin şematik hareketi (Gillet vd. 1989)

Şekil 1.35'de üç ışık eğrisi alt, orta ve en üst atmosferik katmanların hareketini göstermektedir. Şok, kalın düz çizgi ile ifade edilmiş, zaman ve çift çizgi soğurmasının ilgili profili gösterilmektedir.Bu şema şok dalgalarının atmosfer içinde yayılmasını ve çift çizgili soğurma çizgisini gösteren Schwarzschild'ın mekanizmasıdır (Schwarzschild 1952).

Bu açıklamalar doğrultusunda manyetik alan kökenli olayların mekanizması dikkate alınarak RRab ve RRc türünden RR Lyrae yıldızlarının temel mod ve birinci üst ton radyal zonklayıcılar olduklarına ilişkin veriler doğrultusunda herhangi bir değişikliğe gerek olmadan ve aynı zamanda dönemli değişenlerin daha sıcak ve daha soğuk sınıflarının Blazhko Etkisi göstermediği görülmektedir. Temelde yıldız zarfındaki

türbülans şeklindeki dolaşım hareketinin yavaş yavaş şiddetlenmesi ve zayıflamasının nedeni Blazhko Etkisidir.

CoRoT (Poretti vd. 2010, Guggenberger vd. 2011) ve Kepler (Guggenberger vd. 2012) gözlemleri Blazhko mekanizmasının saat gibi çalışmasına dayanan her iki olası açıklamanın da eksik kaldığını zira RR Lyrae'nın kendisi dahil olmak üzere (Le Borgne vd. 2007) birçok Blazhko yıldızında Blazhko çevrimleri boyunca değişimlerin görüldüğünü ortaya koydu (Le Borgne 2014).

Uzun zamandır Blazhko dönemi (P_{mod}) ile zonklama dönemi (P_0) arasında bir ilişki bulunamamıştı. Son zamanlarda, Jurcsik vd. (2005), farklı sistemlerde (Küçük Macellan Bulutsusu, Galaktik Karın ve Sagittarius cüce galaksi) bulunan 894 yıldız verisini kullanarak P_0 ve modülasyon dönemi arasında bir olası bir oran olabileceğini bulmuştur (Guggenberger 2008). SS Cnc, RR Gem ve AH Cam yıldızlarının hepsinin $P_{zonklama}$ zamanları 0.4 günden daha kısadır ve bu oranı bulmak için kullanılacak formülde hesaba katılmıştır. $Max(f_{mod}) = 0.125\, f_0 - 0.142$ formülü ile frekans modülasyonunu ifade edersek, burada, f_{mod} and f_0 sırasıyla modülasyon dönemi ve temel (zonklama) dönemidir. (Guggenberger 2008). V450 Lyr Yıldızı için bu formülü uygularsak, $Max(f_{mod}) = 0.125 * 1{,}981688035 - 0.142 = 0{,}105711$ olarak bulunmaktadır.

Blazhko Çevrimini kısaca özetlersek: Genel olarak dönemi ortalama 30 ile 70 gün arasındadır, fakat 5 ve 500 arasında değişen çok nadir Blazhko yıldızları bulunmaktadır. RRc yıldızları temel modda zonklayan RR Lyrae türü yıldızlardan daha kısa modülasyon dönemine sahiptir. Zonklama dönemi ile Modülasyon (Blazhko) dönemi arasında olası bir ilişki bulunmaktadır.

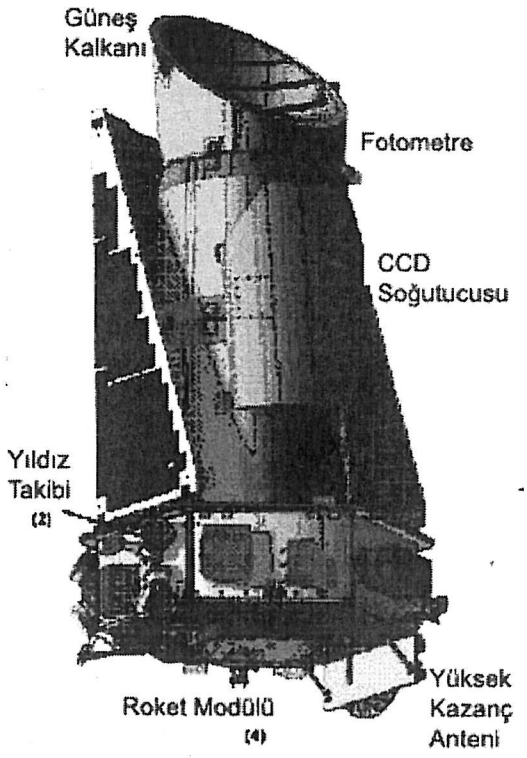
Blazhko Çevriminin uzunluğu mutlaka sabit değildir ve değişkenlik gösterebilir. Blazhko Etkisinin tam olarak nedeni bulunamamıştır ve henüz Blazhko etkisine bütünsel, etkinin gözlendiği tüm RR Lyrae yıldızları için (bu grup içerisinde çeşitlilik gösteren karakteristiklerde yıldızlar vardır) uygun şekilde çalışan ve geçerli bir açıklama üzerinde görüş birliğine varılamamıştır.

2. RR LYRAE YILDIZLARININ ANALİZİ İÇİN VERİ ELDE EDİLMESİ

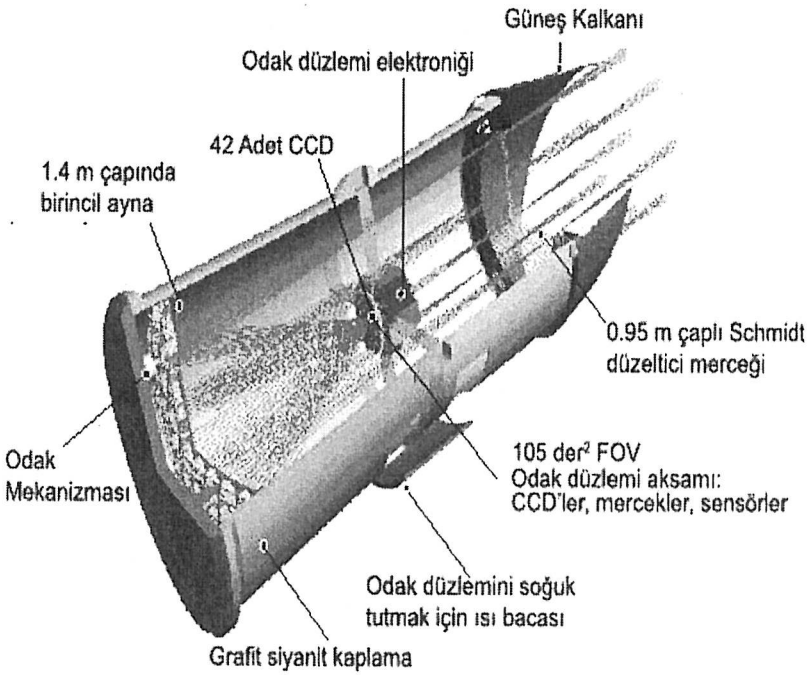
2.1 Kepler Uzay Teleskobu

RR Lyrae yıldızlarının doğasının anlaşılması astrofizik açısından oldukça önemlidir fakat bu yıldızların genelde düşük parlaklığa sahip olmasından dolayı gözlemleri oldukça zordur. Güvenilir verilerin elde edilmesi için büyük teleskoplara ya da uzay teleskoplarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yıldızların ışık değişimlerinin doğası gereği, fotometrik gözlemlerin kesintisiz olarak yapılması gerekmektedir. Bu koşul yer tabanlı gözlemler için kampanya gözlemleri ile sağlanmıştır. Ancak, son yıllarda çeşitli uzay teleskoplarının sağladığı olanaklar tercih edilir hale gelmiştir. Böylece farklı gözlemevlerinden farklı dedektörlerle elde edilen verilerin birleştirilmesinde yaşanan sorunlar (bazı yalancı etkiler) da aşılmış ve bu verilerle yapılan analiz sonuçlarının güvenilirlik düzeyi arttırılmış oldu. Bu yıldızların düşük parlaklıkta olması, gözlemlerin uydu teleskoplarla elde edilmesine yönelik ilgi arttırmıştır. Bu uydulardan bir tanesi de bu çalışmada verilerini kullandığımız ***Kepler* Uzay Teleskobudur** (Şekil 2.1).

***Kepler* Uzay Teleskobu** 6 Mart 2009 tarihinde fırlatılmış ve beklenen ömrü ortalama 3.5 yıl ile 6 yıldır. 0.95 metre açıklığa ve 105 derece^2 görüş alanına sahiptir. Dedektöründe 21 adet modül ve Şekil 2.2'den de görüldüğü üzere her modülde 2 adet CCD ile toplamda 42 adet CCD'si bulunmaktadır. Her bir CCD'nin boyutları 50x25 mm ve 2200x1024 pikseldir. Dedektörün yarı maksimumdaki bant geçirgenliği 435-845 nm'dir (http://archive.stsci.edu 2016).

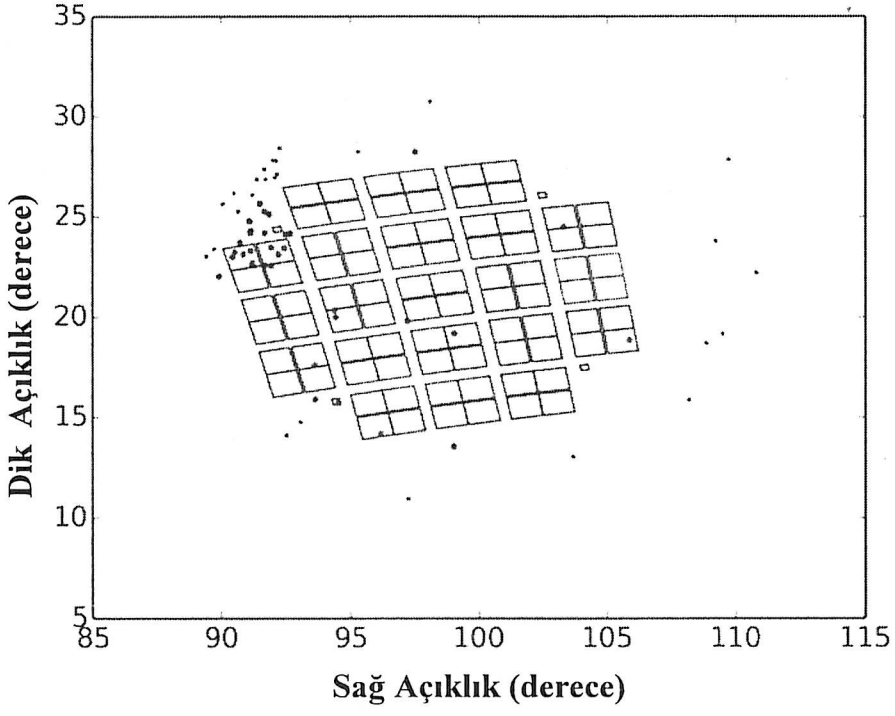


Şekil 2.1 *Kepler* Uzay Teleskobu

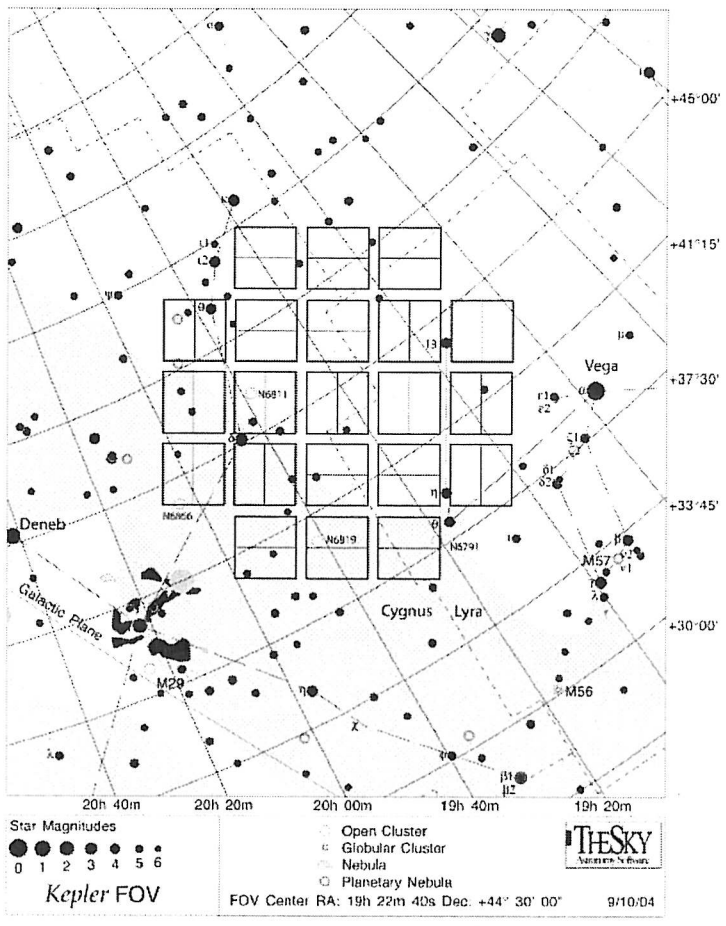


Şekil 2.2 *Kepler* Teleskobunun tasarımı (http://kepler.nasa.gov 2016)

Kepler parlaklığı (*Kp*) $7.9 \leq Kp \leq 17.4$'dir (Kolenberg vd. 2010). Şekil 2.4'te görüldüğü üzere gökyüzündeki görüş alanı olarak galaksimizin Orion kolu boyunca uzanmış Cygnus (Kuğu) ve Lyrae (Çalgı) bölgeleri seçilmiştir (Szabó vd. 2010). Kuğu ve Çalgı takım yıldızlarının olduğu bölge aralığının seçilmesinin sebebi gökyüzünde hem sayıca zengin hem de Güneşimizin Kepler uzay aracının yörüngesine doğruca giremeyeceği bir alan olmasıdır. Kuğu takım yıldızı Dünyanın yörüngesine yeterince uzak olduğu için ve Güneş Kepler'in bakış doğrultusuna giremeyince için seçilmiştir. Ayrıca bu alan Samanyolu Gökadasının yıldız bakımından en zengin bölgelerinden birisidir (http://kepler.nasa.gov/Mission/faq/). Bir Kepler Yılı P_K=372.5 gündür (Banyai vd. 2013).



Şekil 2.3 Kepler Uzay Teleskobunun görüş alanı (Field Of View - FOV) (http://keplerscience.arc.nasa.gov/ 2016)

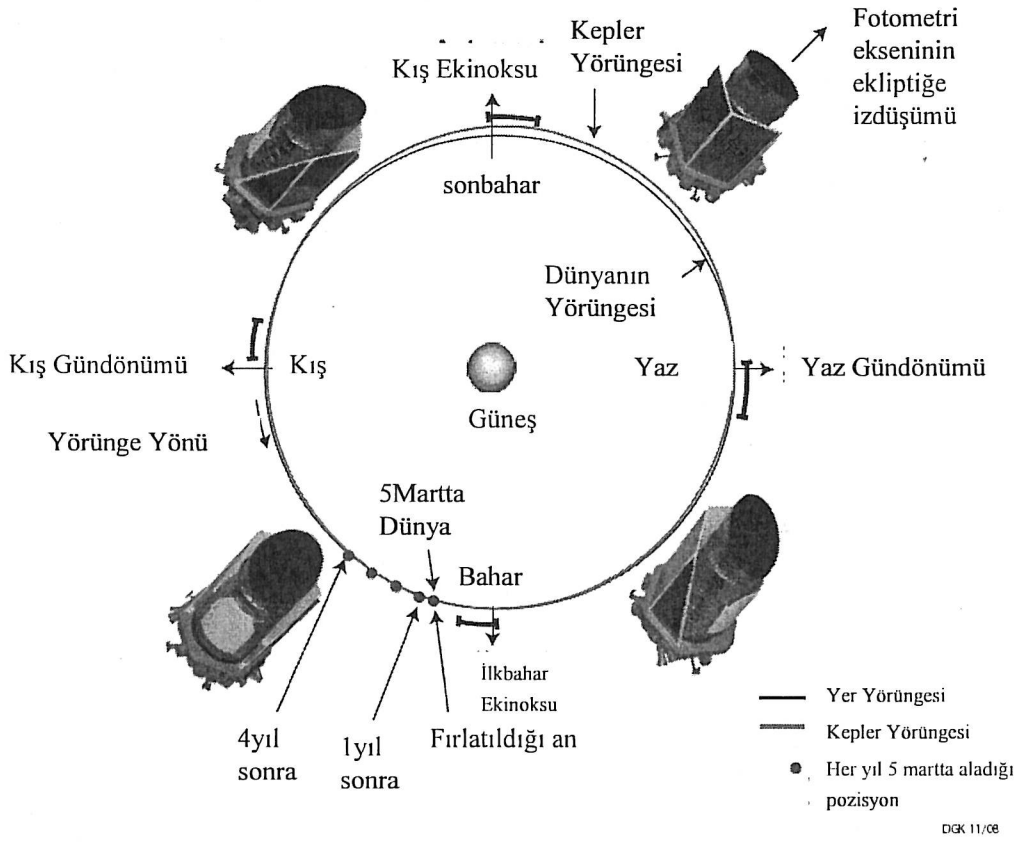


Şekil 2.4 Gökyüzündeki görüş alanı olarak galaksimizin Orion (Avcı) kolu boyunca uzanmış Cygnus (Kuğu) ve Lyrae (Çalgı) bölgeleri seçilmiştir (https://en.wikipedia.org 2016)

Kepler teleskobunun uzun poz süreli (29.4 dakika) ve kısa poz süreli (1 dakika) olmak üzere 2 adet gözlem seçeneği bulunmaktadır (Kolenberg vd. 2010). Teleskobun bir sezonu (Quarter) süresince fotometrik gözlemleri 3 ay devam etmekte ve daha sonra teleskop optik ekseni etrafında 90° döndürülmektedir. Böylece hem gözlemleri etkileyen Güneş ışığının teleskoba girmesi önlenmekte, hem de enerji sağlayan güneş panellerinin en üst düzeyde aydınlatılması sağlanmaktadır. Sonuç olarak, uydu gözleminin her yörünge döneminde 4 defa 90° döndürme işlemi yapılmaktadır (Benkő vd. 2010). Görev esnasında aynı grup yıldızlardan alınan veri kaydedilmekte ve işlenmektedir. Çizelge 2.1'de gözlem sezonlarına ilişkin bilgiler bulunmaktadır.

Çizelge 2.1 Sezonların Planlanmış Başlama Tarihleri (http://kepler.nasa.gov 2016)

Yıl	İlkbahar	Yaz	Kış	Sonbahar
2009	May 12	Haz 18	Eyl 17	Ara 17
2010	Mar 22	Haz 24	Eyl 23	Ara 22
2011	Mar 28	Haz 27	Eyl 29	Ara 29
2012	Nis 02	Haz 28		



Şekil 2.5 Kepler'in yörüngesi - Güneş panellerinin yörünge boyunca Güneş'e doğru ayarlanması (http://kepler.nasa.gov 2016)

Kepler teleskobu başlangıçta yaşanılabilir gezegen aramak için tasarlanmış olsa da sadece gezegen aramak amaçlı kullanılmamaktadır. Teleskoptan elde edilen veriler sayesinde yıldızlara ilişkin birçok ilginç olay, etki ve onların evrimleri hakkında bilgi elde edilmektedir. Kepler teleskobunun görüş alanında (FOV) (Şekil 2.3) yer alan yaklaşık 40 adet RR Lyrae yıldızının ve bu tür yıldızların göstermiş olduğu Blazhko Etkisi hakkında veri alınabilmektedir. Herkese açık olan Kepler verileri

http://archive.stsci.edu/kepler/ adresinden elde edilebilir. Kesintisiz gözlem verisine ihtiyaç duyulan RR Lyrae yıldızlarının zonklama doğalarının anlaşılması ve astrosismolojiye katkı sağlanması bağlamında *Kepler* teleskobu verisi çok değerlidir. Kepler teleskobunun görevleri arasında yer alan Asteroseismic Science Consortium (KASC) grubu altında 13 adet çalışma grubu yer almaktadır. Bu çalışma gruplarına tüm dünyadan katılmış yaklaşık olarak 350 kişiden fazla üyesi bulunmaktadır.

Kepler Asteroseismic Science Consortium (KASC)'un 13. Ayrı Çalışma Grubu olarak başlayan gruplar içinde birleşerek ile yollarına 7. Çalışma Grubu (KASC RR Lyrae-Cepheid WG) olarak devam etmişlerdir ve RR Lyrae yıldızları üzerinde çalışmaktadırlar. Danışman Hocam Prof. Dr. Fehmi EKMEKÇİ ile birlikte bu çalışma grubuna dahil olarak resmi üyelik talebimiz yapılmış ve olumlu karşılanmıştır ve 2010 yılından beri KASC üyesi olarak bu çalışmalara devam etmekteyiz. Bu çalışmada, analizi yapılması düşünülen yıldızlar KASC'nin yıldız arşiv listesinden seçildi (http://astro.phys.au.dk/KASC/). Listeden seçilen yıldızlar çizelge 2.2'de KIC (Kepler Input Catalog) ve ID numaraları ile birlikte verilmektedir.

Çizelge 2.2 KASC'nin arşiv listesinden seçilen yıldız isimleri (http://astro.phys.au.dk 2016)

Adet	KIC numaraları	ID numaraları	Not
1	3864443	V2178 Cyg	Çok uzun Blazhko dönemi
2	3733346	NR Lyr	Blazhko Etkisi yok
3	7671081	V450 Lyr	Çok uzun Blazhko dönemi
4	5559631	V783 Cyg	27.7-gün Blazhko Etkisi
5	9591503	V894 Cyg	Blazhko Etkisi yok
6	11125706	ROTSE1J1190058.78+4844441.5	Blazhko Etkisi yok

Grup içinde yapılan görüşmelerden sonra çizelge 2.2'deki yıldızların özellikleri hakkında elde edilen bilgiler doğrultusunda ve Blazhko Etkisi gösteren yıldızlar üzerinde çalıştığımız için çizelge 2.2'de 3.yıldız olan V450 Lyr (KIC7671081) yıldızı 13. grubun başkanı Dr. Katrien KOLENBERG tarafından ilk adımda analizi yapılması doğrultusunda önerilmesi ile bu yıldızın analizi üzerinde çalışılmaya başlandı.

3. V450 Lyr (KIC7671081) YILDIZINA İLİŞKİN KAYNAK ÖZETLERİ

V450 Lyr yıldızı tipik bir RRab türü yıldız olup sağaçıklığı 19^{sa} 09^{dk} $36^{sn}.63$ dikaçıklığı +43° 21' 49".97'dir ve B bandı parlaklığı 14.3 kadirdir.

V450 Lyr yıldızı ilk olarak Romano (1972) tarafından Asiago Astrofizik Gözlemevi'nde yeni keşfedilen 16 değişen yıldızdan biridir. RR Lyrae türü bir yıldız olarak sınıflandırılmıştır. Ayrıca bu yıldızın uzun dönemli bir değişim gösterdiği de belirtilmektedir (Romano 1972).

Kepler parlaklığı (*Kp*) 16.653 kadir olup temel zonklama dönemi (P_0) 0.50457 gündür. V450 Lyr yıldızının Q1 sezonu ve Q2 sezonuna ait verilere dayanarak gerçekleştirilen frekans analizinde PERIOD04 programı (Lenz ve Breger 2005) kullanılmış ve ulaşılan sonuçlar çizelge 3.1 ve 3.2'de verilmektedir (Benkő vd. 2010). Çizelge 3.3'te ise V450 Lyr yıldızına ilişkin Skarka (2012) tarafından elde edilne bazı parametreler verilmiştir. Şekil 3.1'de ise V450 Lyr yıldızının Q1 ve Q2 sezonlarının birleştirilmiş ışık eğrileri gösterilmiştir (Benkő vd. 2010).

Çizelge 3.1 V450 Lyr yıldızına ait parametreler (Benkő vd. 2010)

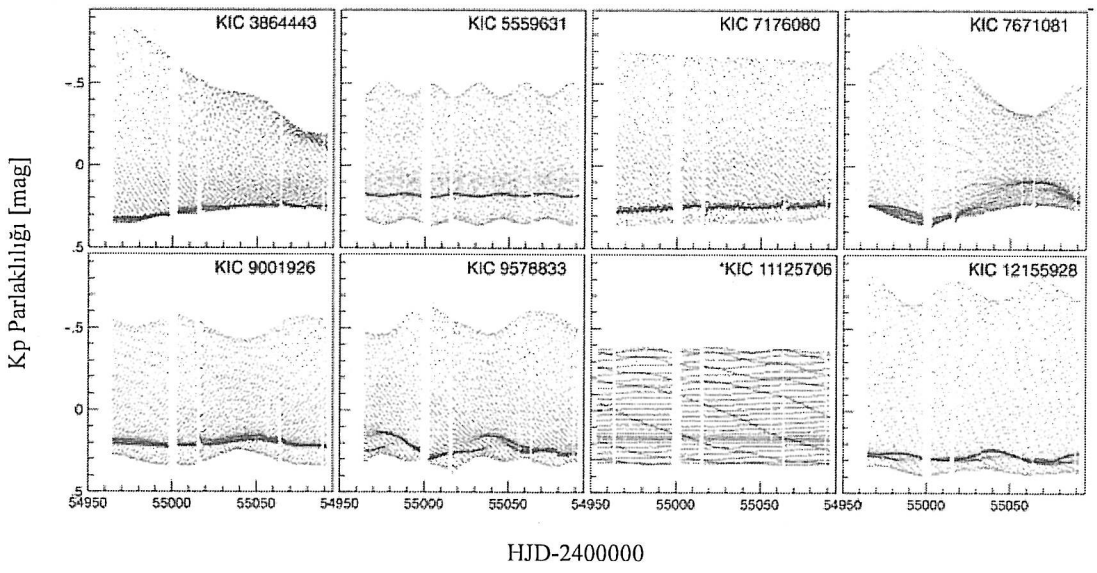
RA (J 2000)	Dec (J 2000)	*Kp* (mag)	P_0 (d)	$\sigma(P_0)$ (10^{-5} d)	A_1 (mag)	$\sigma(A_1)$ (10^{-3} mag)	Runs	Note
19 09 36.63	+43 21 49.97	16.653	0.50457	0.86	0.313	2.5	Q1, Q2	Bl

Çizelge 3.2 V450 Lyr yıldızının frekans analizi sonucunda elde edilen parametreler (Benkő vd. 2010)

KIC	GCVS	P_B (d)	σ (P_B) (d)	ΔA_1 (mag)	$\Delta\phi 1$	Q
7671081	V450 Lyr	≈125		0.391	0.004 882	0.235

Çizelge 3.3 V450 Lyr yıldızına ait parametreler (Skarka 2012)

RA (J2000)	Dec (J2000)	Type	Vmax [mag]	Vmin [min]	Ppuls [d]	PBl[d]
19 09 36.66	+43 21 50.0	RRab	14.3	16.7	0.50461	~125



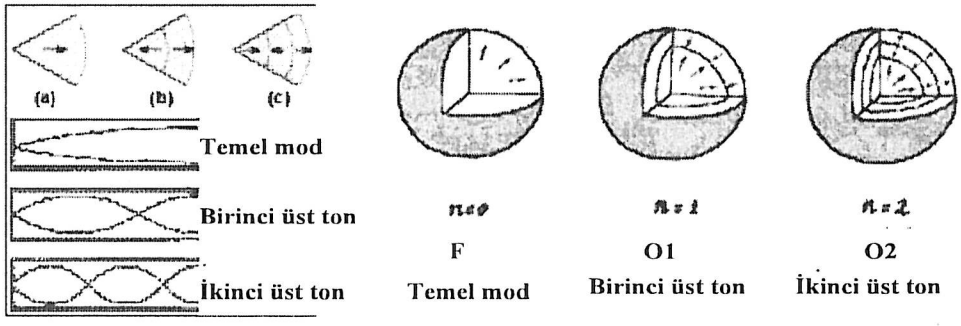
Şekil 3.1 V450 Lyr yıldızının Q1-Q2 verileri birleştirilerek elde edilen ışık eğrisi sağ üstte görülmektedir (Benkő vd. 2010)

Bir dakikalık poz süresi ile alınmış olan **kısa poz süreli (Short-Cadence, SC)** olan **7. sezondaki 7.1, 7.2** ve **7.3 olmak üzere 3 adet alt-sezonu** ve toplamda **127506** gözlem noktası bulunmaktadır. Uzun poz süresi ile alınmış olan (29.4 dakika) **Long-cadence (uzun poz süreli, LC) 17. sezonu** dahil olmak üzere toplam **64839** nokta bulunmaktadır.

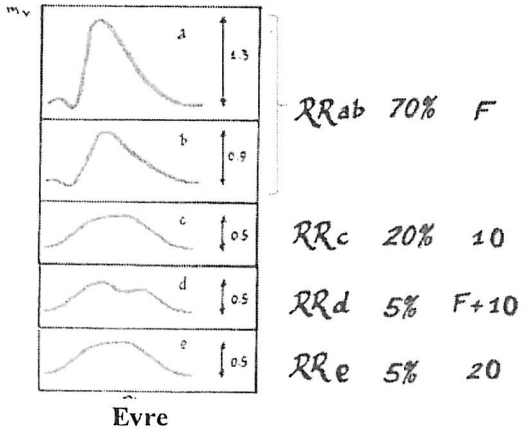
V450 Lyr yıldızı, genel olarak RRab türü olarak tanımlansa da yapılan analizler sonucunda, temel ve ikinci üst ton modda (klasik double mod:birinci üst ton modda – bkz Şekil3.3) zonklayan **klasik olmayan** çift modda **(RRd)** zonklayan bir yıldız olabilme ihtimali bulunmaktadır (Molnár 2014). Bu türlerde üç farklı modun etkileşimli olduğunu gözlemlemekteyiz bunlara mixed-mode "karışık mod" denmektedir. RRd türü yıldızlar çok nadir (%0.5 civarında) olarak görülmektedir (Soszynski vd. 2011). **Klasik olmayan** bu tür yıldızlar (KIC 7671081=V450 Lyr) çoklu mod -FM+O2- olarak adlandırılır (Molnár vd. 2014). İçerisinde V450 Lyr'ın da dahil olduğu klasik olmayan 3 RRd adayı Kepler'in gözlediği alanda yer almaktadır (Molnár vd. 2014).

Bir seferde radyal iki modda zonklama yapan yıldızlar **RRd** veya **çift mod** RR Lyrae yıldızları olarak adlandırılmaktadır. Klasik RRd'ler için bu iki mod temel mod ve

birinci üst ton'dur (bkz. Şekil 3.7). Birinci üst ton'nun (O1) genliği (temel) modun genliğinden daha büyüktür yani birinci üst ton daha baskındır (Şekil 3.2). Uzun dönemi 0.42-0.6 gün arasında değişirken, kısa dönemin uzun döneme oranı 0.74 ile 0.75 arasında değişmektedir (Soszynski vd. 2011). Bu tür klasik RRd yıldızlarında öncelikli olarak P_0 ve P_1 değeleri bulunmalıdır. **V450 Lyr** gibi **olası klasik olmayan RRd** yıldızlarında f_0 (main pulsation frequency/temel zonklama frekansı), f_2 (second radial overtone yani ikinci üst ton-harmonik) frekansları ve bunlara bağlı olarak P_0 ve P_2 (gün) dönemleri bulunmalıdır. RRd'lerin HR Diyagramında Karasızlık Kuşağının temel mavi kenarı ile birinci üst ton'un kırmızı kenarı arasındaki geçiş bölgesinde bulunduğu düşünülmektedir. RRd yıldızları yıldız parametrelerini belirlemede ve gözlenen dönemlerinden kütleleri hesap edilebildiği için evrim ve zonklama modellerini test etme bakımından önemli rol oynamaktadırlar.



Şekil 3.2 RRab, RRc ve RRd türü yıldızların yarıçaplara bağlı olarak zonklama modları, n merkez ve yüzey arası düğüm sayısı (Çelik 2008).

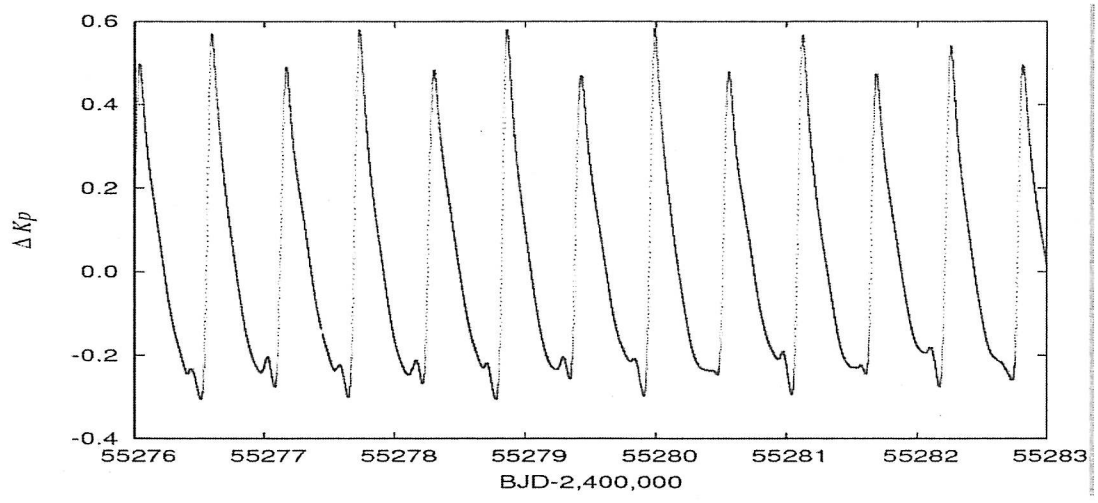


Şekil 3.3 RR Lyrae Bailey alt sınıfları ve zonklama modları F: radyal temel mod; 1H: radyal birinci üst tonu göstermektedir (Kolenberg 2012)

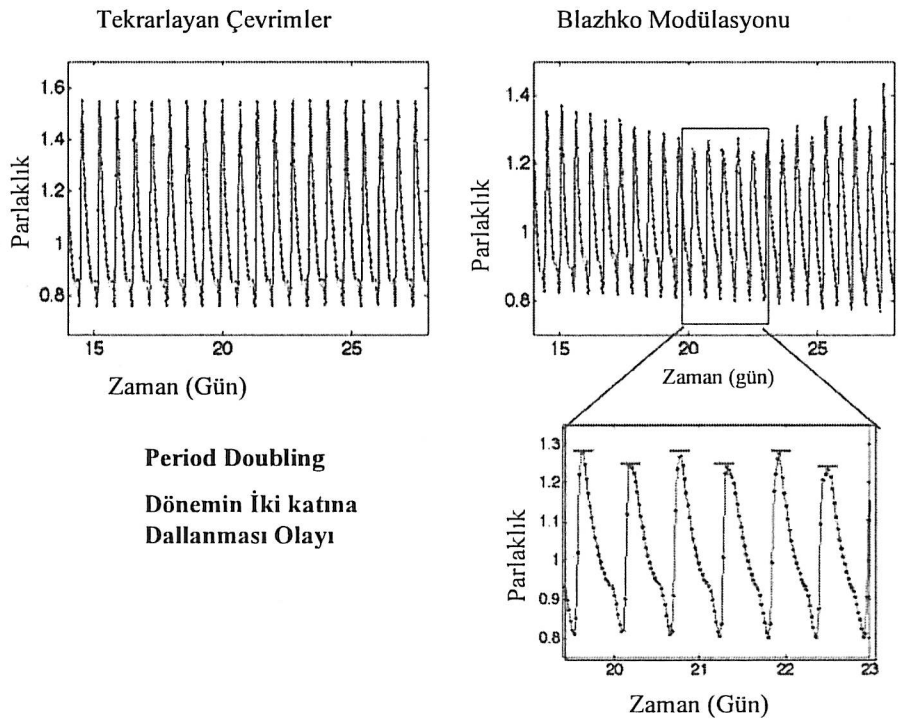
Farklı bir "double-mode" RRd türü adayı olan yıldızlarda ikinci üst ton'a eşlik eden Period-Doubling (PD) etkisi de görülebilir veya görülmeyebilir. Kepler gözlemleri, "dönemin iki katına dallanması" (ing. period doubling bifurcation) adı verilen olgunun RR Lyrae yıldızında gözlendiğini ilk kez ortaya koymuştur. Dönemin iki katına dallanması olgusu, dönemli bir değişimin yapısını ifade eden denklemlerdeki küçük bir değişimin sistemi orjinal dönemin iki katı dönemli yeni bir davranışa zorlaması sonucu gerçekleşir. Period-Doubling (PD) olayının en belirgin göstergesi (HIFs: $0.5f_0$, $1.5f_0$,...) vb. şeklinde frekanslar ve yardımcı ek çevrimlerdir. Period Doubling olayı Blazhko modülasyonu ile direk olarak ilişkilidir. Prototip RR Lyrae yıldızının PD etkisini gösterdiği şekil 3.4'de görülmektedir. Period-Doubling etkisi (PD) sadece Blazhko Yıldızlarında görülür ama Blazhko yıldızlarının hepsinde görülmez.

Period-Doubling (PD) aslında nedir ve kaos ile nasıl ilişkilidir? Çift Dönemli olmasından kaynaklı kaotik sistemde parametrelerin (kütle, sıcaklık, yarıçap veya metal bolluğu) değişimi olduğu Period Doubling etkisi görülmektedir. Eğer parametrelerdeki bu değişimler tekrar tekrar olursa, çevrim kaosa girer ve dönem "doubling" yani sürekli çift olma etkisi gösterir. Kısaca Period Doubling demek Blazhko Etkisinin kaotik olduğu anlamına gelir. Yeni gözlemsel bulgular bize yıldızda radyal titreşimlerin rezonanslarının kaotik kararsızlığa sebep olduğu görülen yıldızları işaret etmektedir. Blazhko Dönemi ile birlikte radyal titreşimler ve titreşimlerin genlikleri artış göstermektedir. Period doubling etkisi gösteren RR Lyrae yıldızlarına ek olarak, kaotik etki gösteren ve kaotik olma eğiliminde olan birçok RR Lyrae türü yıldız vardır. Tamamiyle ayrı bir çalışma konusu olan Hidrodinamik modeller bu olayı açıklamak ve anlamak için de kullanılmaktadır, fakat şimdi uzun zamandır gizemini koruyan bu olayın çözümüne çok yakınız. (http://astrobites.org/ 2016)

V450 Lyr yıldızında Period Doubling (PD) ve bunun belirteci olan HIF (Half Integer Frequency, $f/2$ alt harmonikleri ve onun tek sayılı multipletleri)'e ait herhangi bir işaret bulunmamıştır (Benkő vd. 2010).



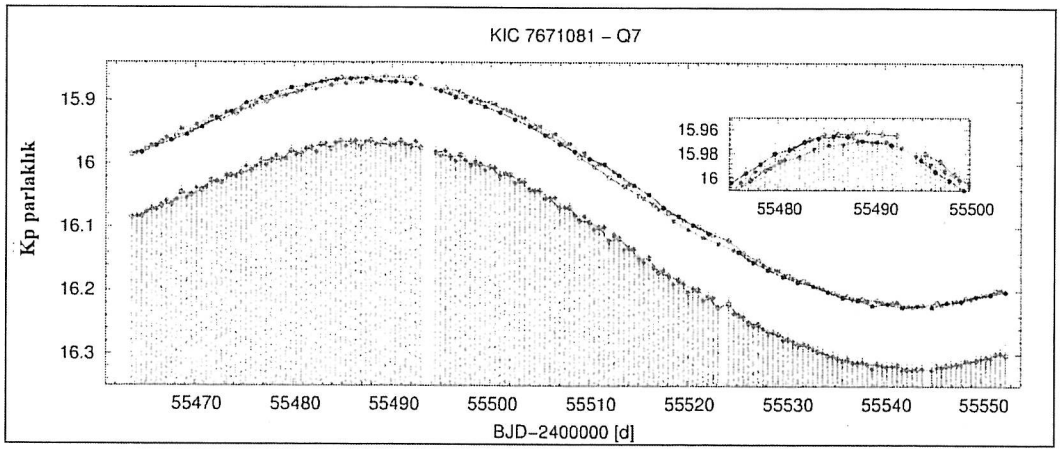
Şekil.3.4 RR Lyrae yıldızının kendisinin Q5 verileri ile çizilmiş ışık eğrisi. Bu iki aylık kısım boyunca PD sürekli görülmektedir. Başlangıçtaki ardarda olan maksimumların yükseklikleri arasında belirgin bir fark göze çarpmaktadır (Szabó vd. 2013)



Şekil 3.5 PD dönüşümlü olarak yüksek ve düşük maksimum zamanı göstermektedir. Tıpkı Blazhko mödülasyonu gösteren yıldızlarda olduğu gibi (Kolenberg, 2012)

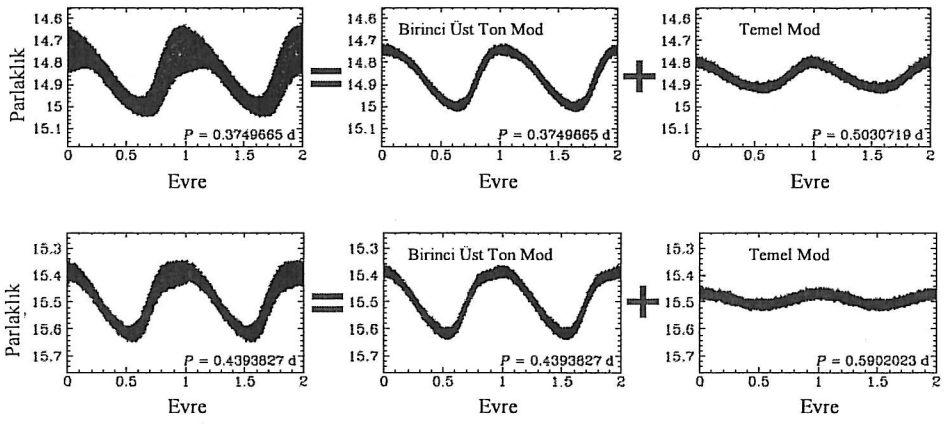
Şekil 3.5'te RR Lyr'ın kendisi üst sağ panelde görülmektedir. Sol üst panelde, period doubling modülasyonuna uğramayan yıldızlarda tekrarlayan çevrimler görülmektedir (Kolenberg 2012).

İki tane RR Lyrae yıldızına ilişkin Kepler ışık eğrisi (Parlaklığa karşılık zaman) Şekil 3.5'te verilmektedir. Birçok yıldız düzenli zonklarken, Örneğin şekil 3.5'te sol kısım, RR Lyrae yıldızlarının büyük bir kısmı ışık eğrisi şekillerinde 10-100gün arasında değişen uzun dönemli modülasyonlar göstermektedir. Kepler verisi ile bu prototip sınıfta yeni bir değişim türü bulunmuştur, bu değişime Period Doubling (PD) denilmektedir (www.faculty.virginia.edu 2016).

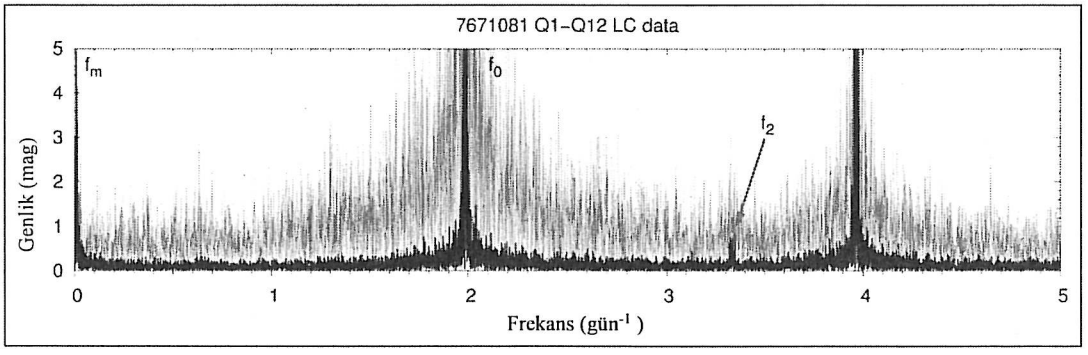


Şekil 3.6 Yarı tekrarlayan 3 zonklama çevrimi yapısının sonucu olarak 3:5 oranına yakın f_0/f_2 dönemi (http://www.konkoly.hu 2016)

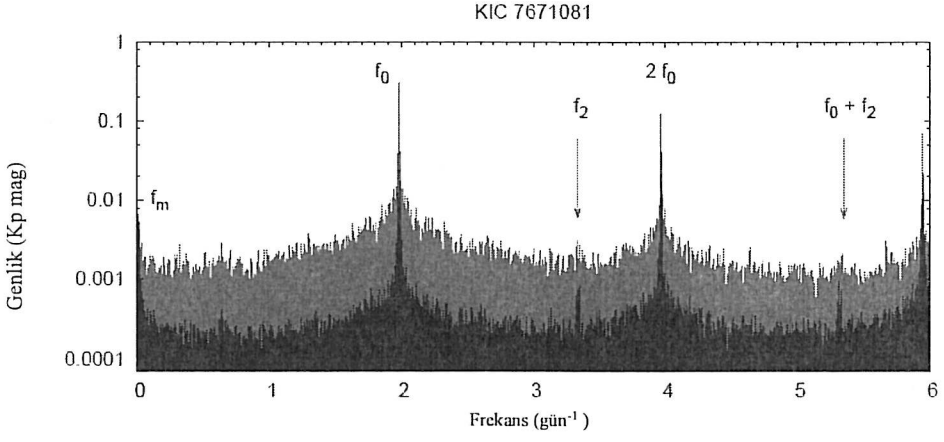
Şekil 3.6'da görüldüğü üzere, f_0/f_2 frekans oranının 3:5 olması bu modlar arasında vuru (beat phenomenon) olgusunun gerçekleştiği yerini desteklemektedir. Bu modu henüz inceleyecek bir hidrodinamik model bulunmamaktadır (Molnár vd. 2014). Bu üç dönemle ilgili bu çalışmada bulunan değerler analiz sonuçlarında tartışılmıştır. Bu etki 0.01 kadir veya daha düşük olan küçük bir etkidir. Ancak "short cadence" kısa poz süresi ile elde edilen verilerin analizinde kolaylıkla anlaşılabilmektedir (bkz. Şekil 3.8 ve Şekil 3.9). Bu etki, modülasyonun yüksek genlikli evresinde daha belirgin olarak göze çarpmaktadır (http://www.konkoly.hu 2016).



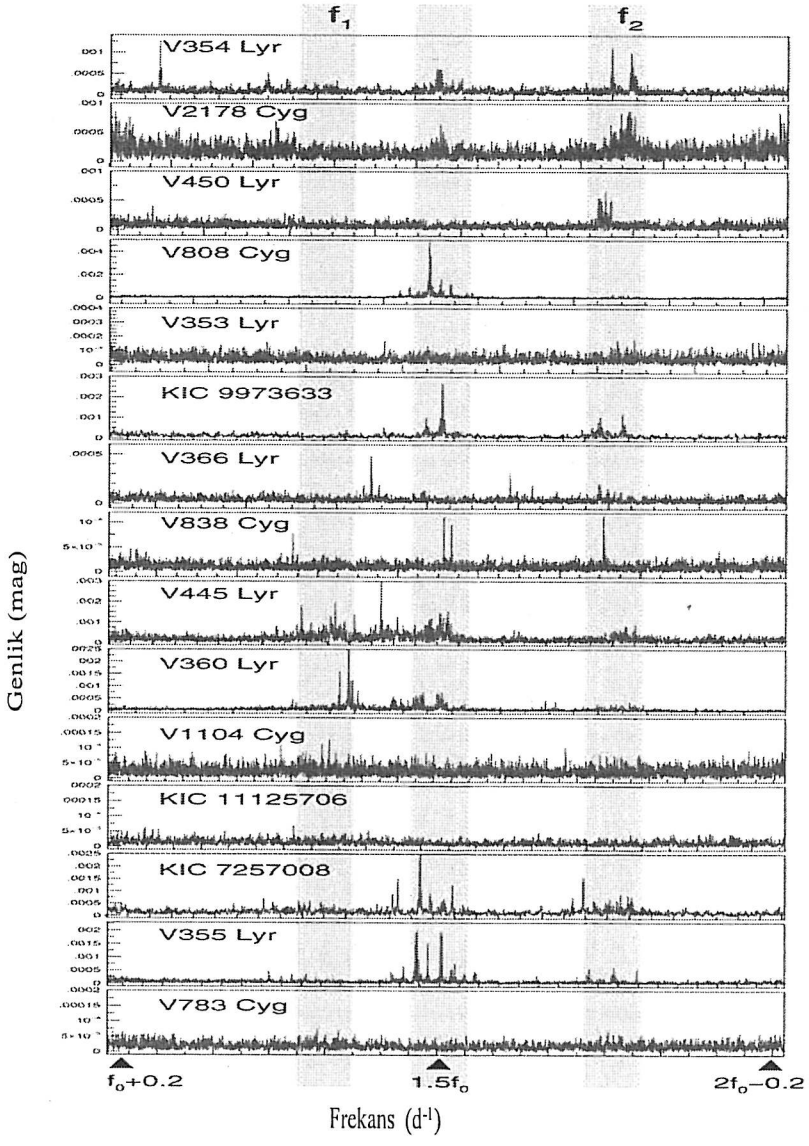
Şekil 3.7 Birinci üst ton ve temel modun birleşimi görülen klasik RRd türü örnek ışık eğrisi



Şekil 3.8 Fourier spektrumunda temel moda (f_0) ek olarak sadece tek bir ek mod (f_2) görülmektedir (http://www.konkoly.hu 2016)



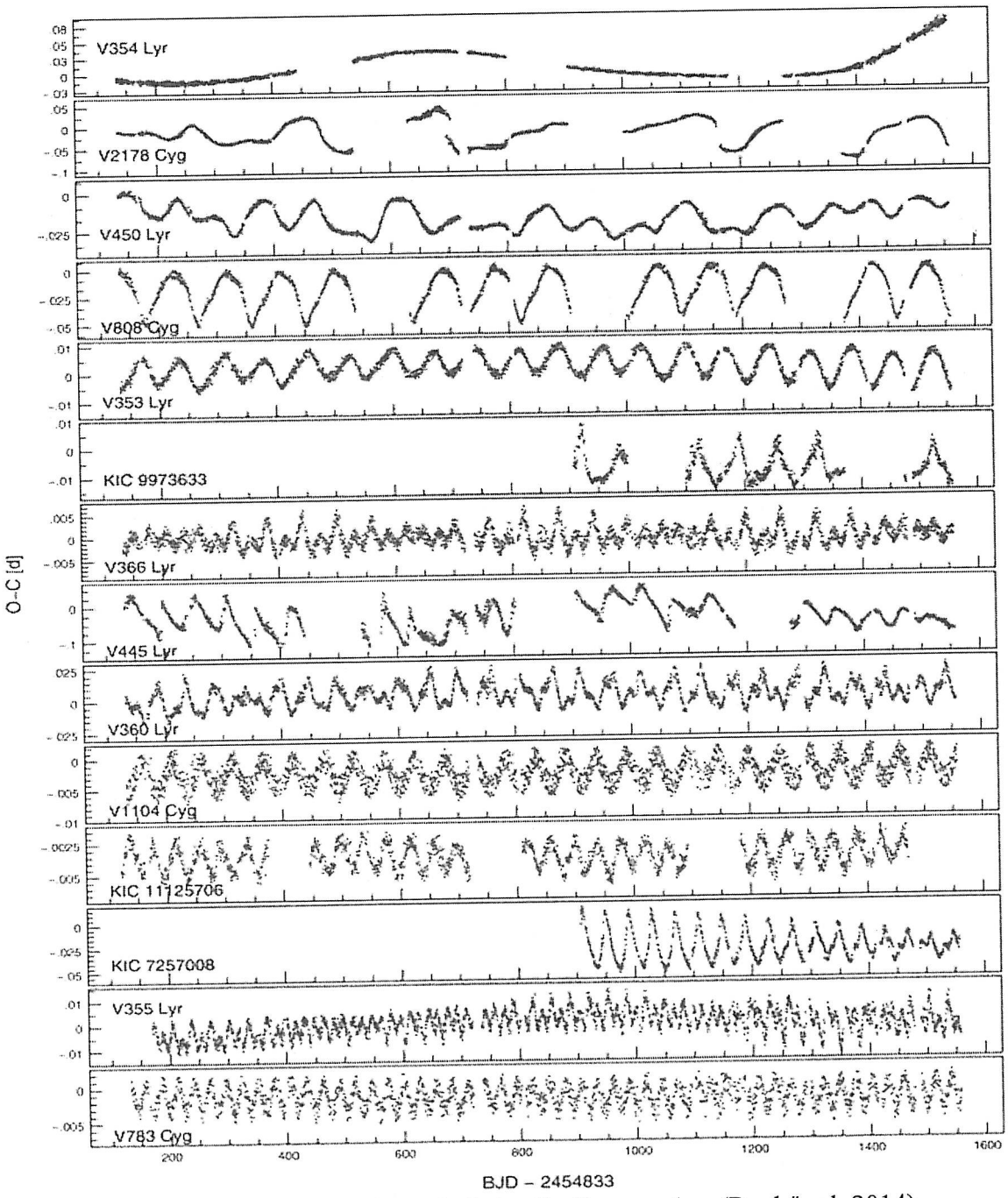
Şekil 3.9 V450 Lyr yıldızında f_2 (c/d) değerini ikinci üst tona karşılık gelen f_2 (c/d) frekansı (Molnar 2013)



Şekil 3.10 Çeşitli RR Lyrae türü yıldızların ek frekansların yapısı (Benkő vd. 2014)

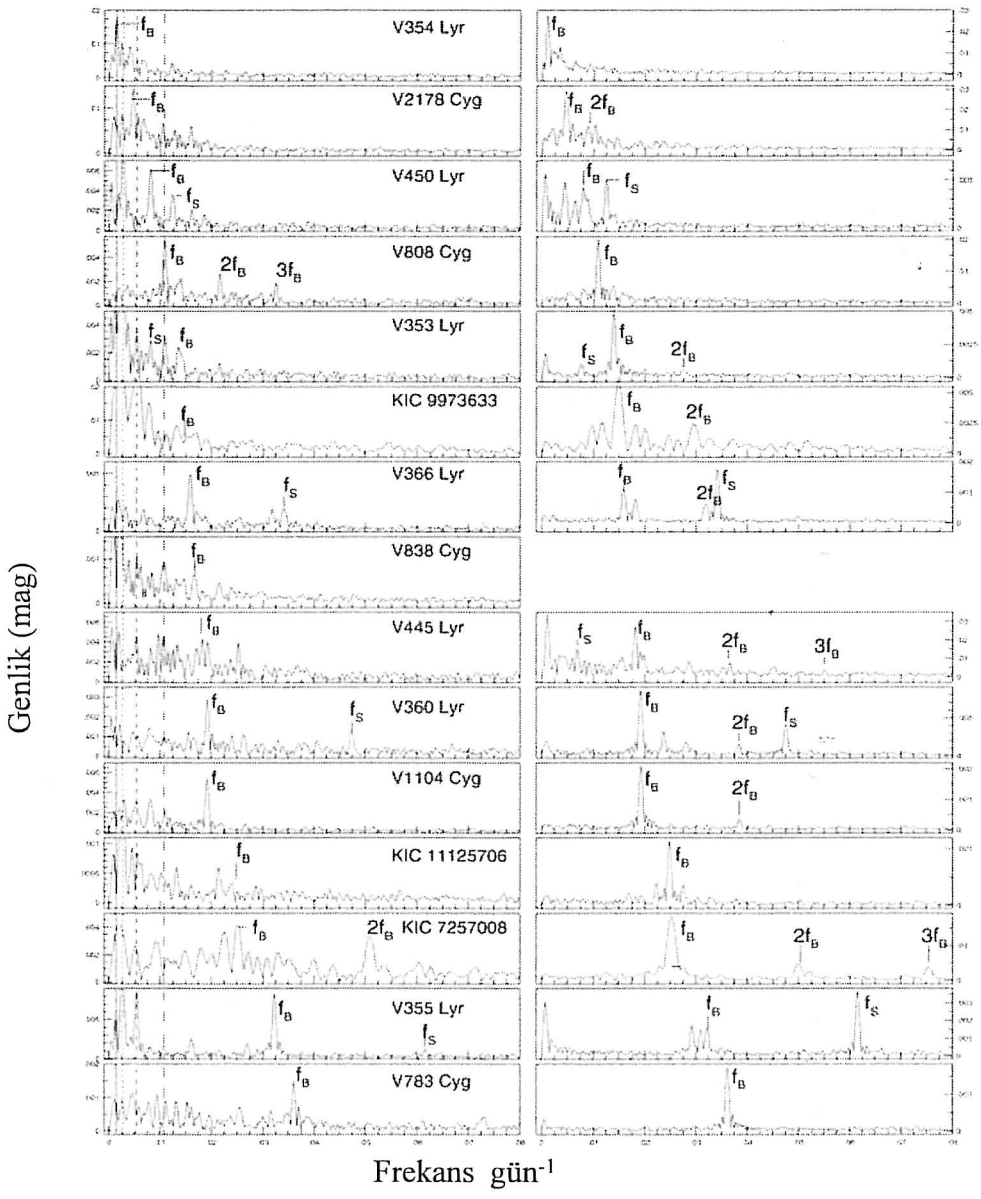
Zonklama frekansı ve onun ilk harmonikleri frekans tayfında işaretlenmiştir ($f_0 + 0.2 < f < 2f_0 - 0.2$). Sarı şeritler radyal birinci harmoniği (birinci üst ton f_1), Period doubling ($1.5f_0$), ve radyal ikinci harmonik yani ikinci üst tonu (f_2) ilgilendiren pozisyonları göstermektedir

V450 Lyr yıldızının ilk detaylı dönem değişimi analizi Benkő vd. (2014) tarafından incelenmiş ve ilgili O-C (Gözlenen-Hesaplanan) Diyagramı şekil 3.11'de diğer yıldızlarla birlikte verilmiştir.



Şekil 3.11 Bazı RR Lyrae yıldızların O-C Analiz diyagramları (Benkő vd. 2014)

Bu diyagramlar, zonklama maksimum zamanlarının interpolasyonundan hesaplanır. Basit çevrimler, bütün yıldızlar için ilk maksimum zaman değeri olarak alınır. Şekilde Blazhko dönemi aşağıdan yukarı doğru azalmaktadır



Şekil 3.12 Genlik ve Frekans değişiminin özellikleri görülmektedir (Benkő vd. 2014)

Şekil 3.12'de sol panel: Işık eğrisinin Fourier tayfının düşük frekans oranını temsil etmektedir. Mavi dikey çizgiler yaygın aletsel frekansların konumlarını göstermektedir: $f_K/2$ (sürekli çizgi), f_K (noktalı), $2f_K$ (kısa kesik çizgi), ve $4f_K = f_Q$ (uzun kesik çizgi)'dir. Sağ panel: *O−C* diyagramının fourier tayfı. (f_B) ve (f_S) sırasıyla birinci ve ikinci modülasyon frekansları ve onların harmonikleri işaretlenmiştir (Benkő vd. 2014).

O-C Diyagramlarının frekansları tekrar Fourier analizi ile bulunmuştur. İlgili sonuçlar Şekil 3.12'de birbirleri ile karşılaştırılarak verilmiştir. Genele göre her iki frekans

priyodogramların yapısı benzerdir fakat O-C diyagramı daha nettir. Burada aletsel pikler tespit edilmemiştir ve birden fazla modülasyona uğrayan yıldızlar oldukça çok sayıdadır ve çok önemlidir. Analizde zonklama frekansı f_0, Blazhko frekansı (f_B ve f_S), ve frekanslara ait ek radyal üst modlar (f_1, f_2, ve PD etkisine sebep olan ilginç mod f_9). Hatalar PERIOD04 programı Monte Carlo simülasyonu ile elde edilmiştir. Burada frekans modülasyonundan etkilenen genliklerin aksine, frekanslar modulasyonun yarattığı etkiye bağlı olarak asla değişim göstermemektedir. Sonuç olarak zonklama genliği için hata tahmini en düşük limitlerdedir.

Çizelge 3.4 *Kepler* Blazhko Yıldızı V450 Lyr'ın Başlıca Özellikleri

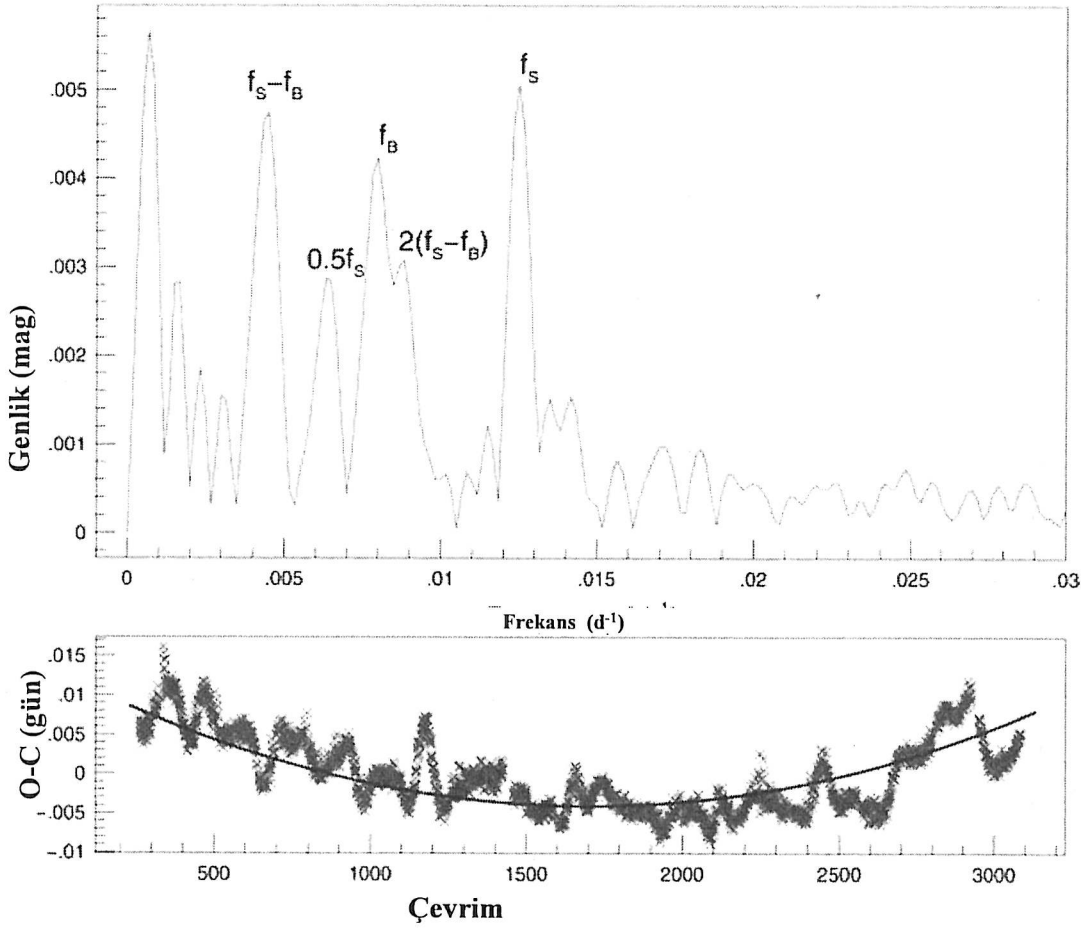
KIC	GCVS	P_0 (gün)	A f_0 (mag)	P_B (Gün)	P_s (Gün)	Ek Frekans
7671081	V450 Lyr	0.5046198	0.3110	123.8±0.9	80.5±0.5	F2

Çizelge 3.4'te P_0 zonklama dönemini, A f_0 zonklama döneminin genliğini, P_B Blazhko dönemi, P_s ikinci modülasyon dönemi, F_2 ikinci radyal üst tonu göstermektedir.

V450 Lyr yıldızının maksimum zamanlarını içeren ışık eğrisi, iki modülasyon dönemi arasında çok güçlü "beating" (vuruş) olayını göstermektedir; ve aynı özellikler başka yıldızlarda da görülmektedir. (örneğin V355 Lyr ve KIC 7257008), bu bize aletsel hatalardan kaynaklanabileceğini gösterir. Buna göre ışık eğrisinde ve O-C diyagramında frekansları karşılaştırıken çok dikatli olmalıyız. Işık eğrisinde en büyük düşük frekans Kepler yılı (f_K)'na aittir. Diğer modülasyon frekansı ise f_B = 0.00813 gün^{-1} ($A(f_B)$ = 6 mmag). Blazhko frekansının harmonikleri $2f_B$'da bulunabilmektedir. Frekanstaki üçüncü en büyük genlikli pik f_S = 0.01243 gün^{-1}'dür (Benkő vd. 2014).

O−C diyagramınında benzer bir analizin sonuçları iki bağımsız frekansı, f_B (Blazhko Frekansı), f_S (ikinci modülasyonun frekansı) ve onların çeşitli kombinasyonları ($f_S - f_B$, $f_S - 2f_B$, $f_S/2$). Şekil 3.13'de görülmektedir (Benkő vd. 2014). Böylece f_S (ikinci modülasyonun frekansı) veya onun kombinasyonu $f_S/2$ gerçek ikinci modülasyon frekansı olduğu kesinleşti. Eğer adı geçen bütün frekanslar ile bir fit ortaya çıkartırsak, O-C diyagramının artıkları, Şekil 3.12'de en alt panelde, geriye kalan yarı-periyodik

sinyal ve güçlü dönem değişimini belirten parabolik şekil birleşimini göstermektedir. İkinci dereceden fonksiyon fiti ile hızlı dönem artışını $dP_0/dt = 2.4 \times 10^{-8}$ ggün^{-1} olarak buluruz. Bu durum yıldız evrimi tarafından oluşamaz. Bu olay ancak üçüncü daha uzun dönem işareti ya da rastgele gelişen yarı-periyodik/kaotik modülasyon olarak açıklanabilir (Benkő vd. 2014).



Şekil. 3.13 Üst panel: V450 Lyr yıldızının Fourier tayfından bir kesit. Alt panel: O-C diyagramı

Şekil 3.13'ün alt panelinde yukarıda belirtilen beş frekans ile O−C diyagramının ilk beş frekanstan arındırıldıktan sonra (pre-whitened) yapıldıktan sonraki artıkları En iyi fit edilmiş parabol (sürekli çizgi) çok hızlı dönem artışını göstermektedir (Benkő vd. 2014).

Zonklama frekansı (f_0)'nın harmonikleri arasında Fourier Tayfının ince yapısının incelenmesi ile Molnár vd. (2014) V450 Lyr yıldızının ikinci üst tonda zonkladığını Şekil 3.10'da açıkça görülmektedir. Eğer bu bölgedeki en yüksek pikin frekansı 3.33670 gün^{-1} (f_2), dönem oranları $P_2/P_0 = 0.594$, kabul edilmiş standart ikinci üst ton dönem aralığına girmektedir.

Çoklu dönem modülasyonlarının karakterleri kısaca şu şekildedir: RZ Lyr hariç ikinci üst tonun genliği daha düşük ve birinciye oranla dönemi genellikle daha uzundur ve beş tane daha bu özelliği (daha kısa P_2 dönemli) taşıyan yıldızlar bulunmaktadır (V355 Lyr, V450 Lyr, V366 Lyr, V360 Lyr, ve KIC 9973633).

1. Birinci ve ikinci modülasyonun tanımlanmasının göreceli olduğu kanıtlandı. Üç durumda (V450 Lyr, V366 Lyr, ve V355 Lyr) genlik modülasyonundakine göre Frekans modülasyonundaki birinci modülasyonun göreli etkinliği daha zayıftır.
2. Modülasyon frekanslarının lineer kombinasyonları genellikle saptanabilir. Alt frekanslar örneğin ($f_B/2$ ve/veya $f_S/2$) sayısız durumlar için bulunabilir (KIC 7257008, V355 Lyr, V450 Lyr, and V360 Lyr). Durumların çoğunda, iki modülasyon dönemi küçük sayısal değerler oranı içinde olur: 1:2 için V353 Lyr; 2:1 için V366 Lyr ve V355 Lyr (3:2 için V2178 Cyg); 2:3 için KIC 11125706; ve 5:2 for KIC 9973633 ve V360 Lyr (Benkő vd. 2014).

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Kepler teleskobu ile gözlenmiş yaklaşık olarak 40 adet RR Lyrae yıldızı bulunmaktadır (Kolenberg ve KASC RR Lyrae Working Group 2011). Bu yıldızların zonklamalarına ilişkin ve Blazhko Etkisinden kaynaklanan Blazhko Dönemlerini bulmak için yapılacak olan frekans analizinde ışık eğrisi verilerinin mümkün olduğunca kesintisiz ve atlamasız olması gerekmektedir.

Bu zamana kadar *Kepler* teleskopu ile gözlenmiş RR Lyrae yıldızlarında (Blazhko ve Blazhko olmayan yıldızlarda) ardışık seyreden sezonlarda atlama görülmezken bazılarında ardışık sezonlarda bile ciddi sapmalar/boşluklar görülmektedir. Veri akışının durmasının çeşitli nedenleri bulunmaktadır: Güneş panellerinin doldurulması ve radyatörlerin soğutulması için 93 günde bir 90 derecelik dönüş, veri aktarımı için antenleri çevirmek üzere her ay olağan kesintiler, maksimum açısal hız ulaşan tekerleri "boşaltmak" için 3 günde bir kısa süreli kesintiler, tepki farkları (attitude tweaks), yönlendirme sorunları ve aşırı kozmik parçacığa maruz kalma gibi... Ayrıca bir tehlikenin varlığında sistemin "güvenli kip"'e (safe mode) alınmasından kaynaklı kesintiler de olmuştur (http://ozgur.astrotux.org 2016).

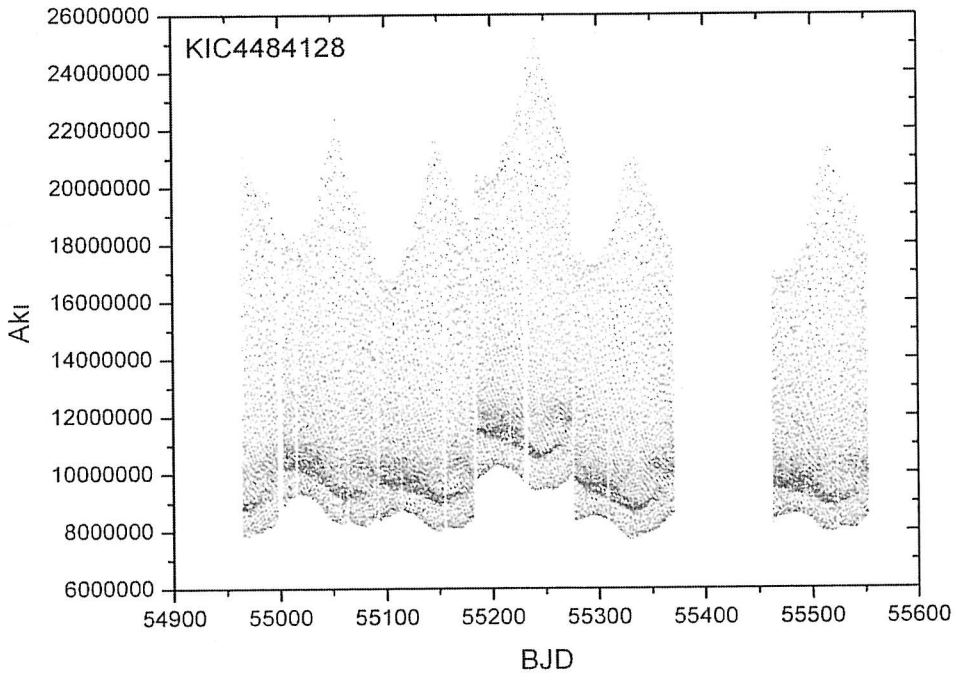
Analize geçmeden önce verilerin kullanılabilmesi için birtakım işlemlerden geçmesi gerekmektedir. Çizelge 4.1'de verilen 5 adet örnek yıldız üzerinde bu çalışmalar yapıldı. Sezon sayısı olarak birinci örnek yıldızda 6 sezon, ikinci örnek yıldızda 7 sezon, üçüncü örnek yıldızda 8 sezon, dördüncü örnek yıldızda 7 sezon, beşinci örnek yıldızda 7 sezonluk veri kullanıldı. Fakat birinci yıldızda Q6 verisi, veri arşivinde bulunmamaktadır.

Çizelge 4.1 Veriler analize hazırlarken kullanılan örnek yıldızlar

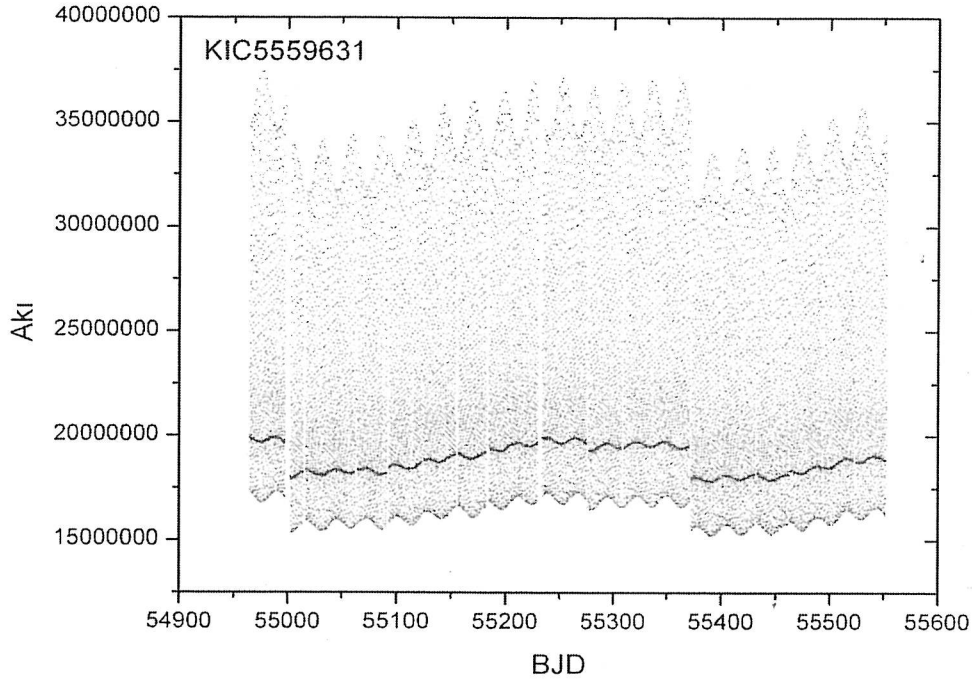
1.Örnek Yıldız	KIC4484128	6 Sezon veri
2.Örnek Yıldız	KIC5559631	7 Sezon veri
3.Örnek Yıldız	KIC11125706	8 Sezon veri
4.Örnek Yıldız	KIC12155928	7 Sezon veri
5.Örnek Yıldız	KIC7671081	7 Sezon veri

Kepler verileri 10 günlük bir başlangıç dönemi (Q0), 34 günlük Q1 ve 3 aylık sezonlar (Q2-Q17) olmak üzere dönemlere ayrılmıştır.

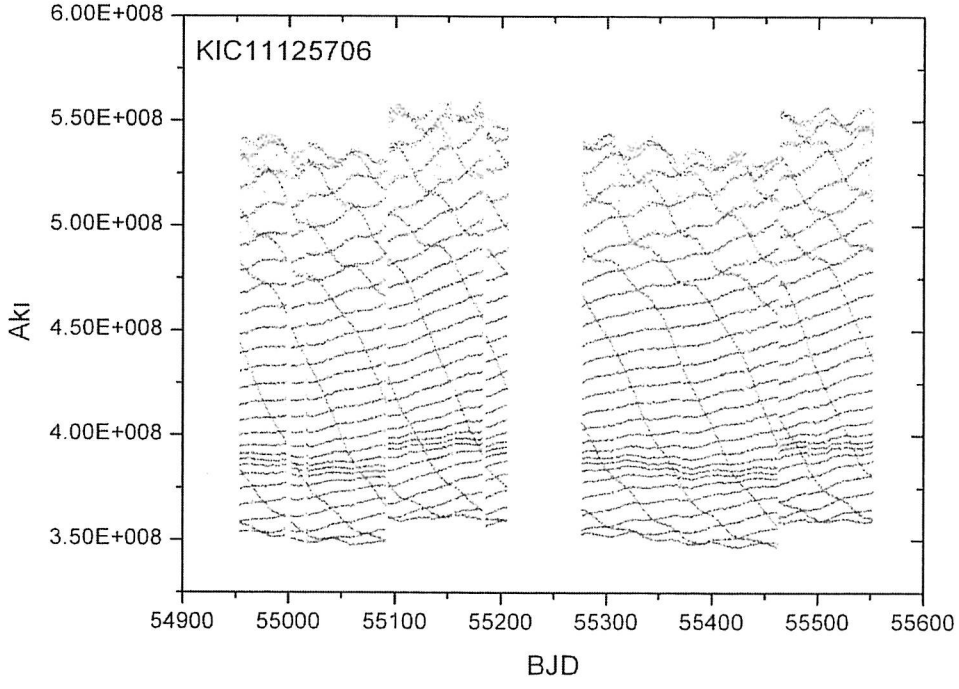
Analize başlarken teleskoptan aldığımız her bir sezona ait verileri, (Q0-Q7) birleştirdiğimizde, sezonlar arası bir uyumsuzluk dikkat çekmektedir. Sezonlar arasındaki belirgin atlamalardan kaynaklanan uyumsuzluklar Şekil 4.1-4.5'te gösterilmektedir. Sezonlar arasındaki atlamalar ve belli bir trendi takip etmemesinden dolayı sezonlardaki orijinal ışık eğrisi ölçeklendirilmesinde bazı düzeltmeler yapılması gerektiği görüldü. Yani her bir sezonu yeniden ölçeklendirmemiz gerekti. Ölçeklendirme yapmadan önce teleskoptan alınan verilerde hatalı olanların ayıklandı. Bu ayıklama işlemi için IDL'de bir kod yazıldı ve hatalı değerler temizlendi.



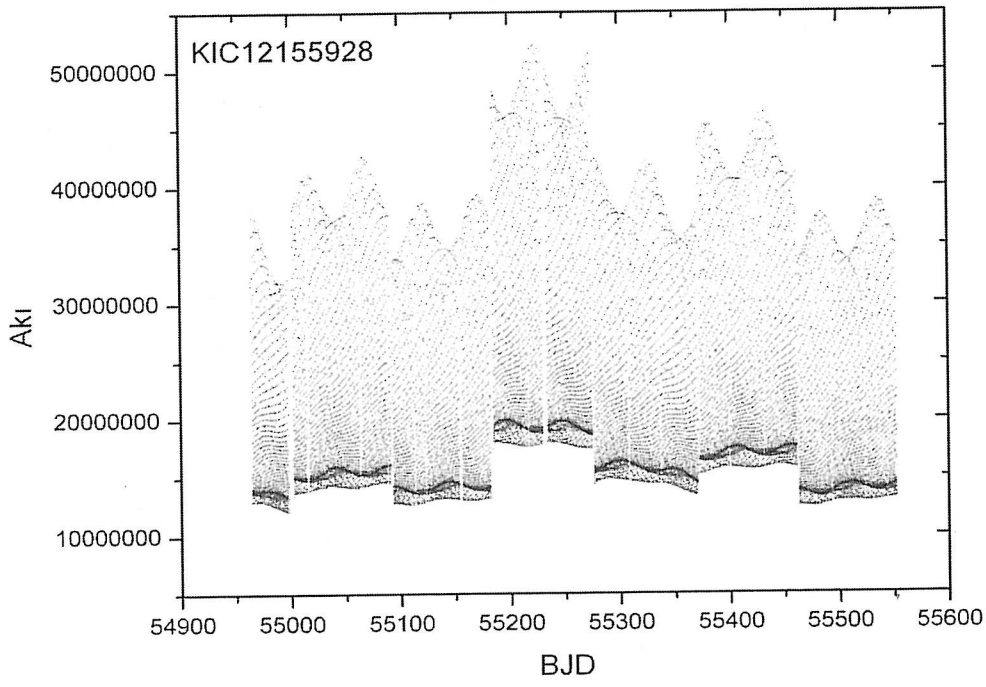
Şekil 4.1 Q1-Q7 sezon verileri kullanılarak yeniden ölçeklendirilmemiş birinci örnek yıldızın ışık eğrisi



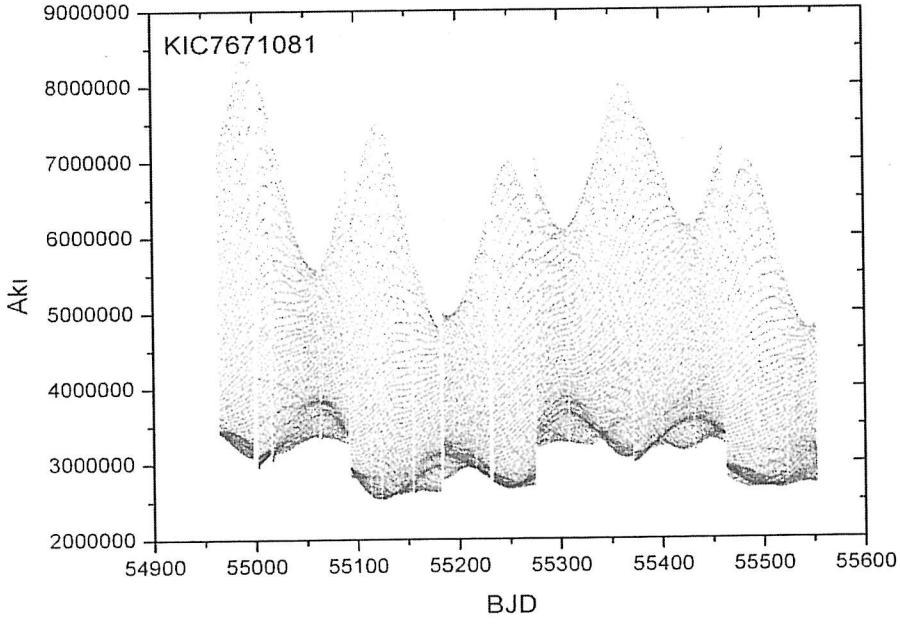
Şekil 4.2 Q1-Q7 sezon verileri kullanılarak yeniden ölçeklendirilmemiş ikinci örnek yıldızın ışık eğrisi



Şekil 4.3 Q0-Q7 sezon verileri kullanılarak yeniden ölçeklendirilmemiş üçüncü örnek yıldızın ışık eğrisi



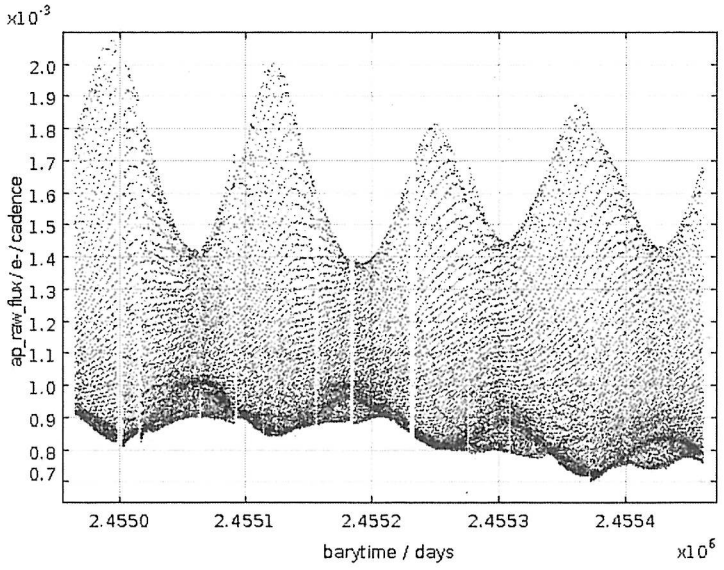
Şekil 4.4 Q1-Q7 sezon verileri kullanılarak yeniden ölçeklendirilmemiş dördüncü örnek yıldızın ışık eğrisi



Şekil 4.5 Q1-Q7 sezon verileri kullanılarak yeniden ölçeklendirilmemiş beşinci örnek yıldızın ışık eğrisi

Sezonlar arasındaki bu uyumsuzluğu gidermek için PyKep programı (http://keplergo.arc.nasa.gov 2016) altında çalışan Kepstitch ve Kepdetrend taskları

kullanıldı fakat bu uyumsuzluk tam olarak giderilemedi. Bu çalışmada analizi yapılan örnek beşinci yıldız V450 Lyr (KIC 7671081) üzerinde yapılan bu düzeltme şekil 4.6'da verilmektedir.

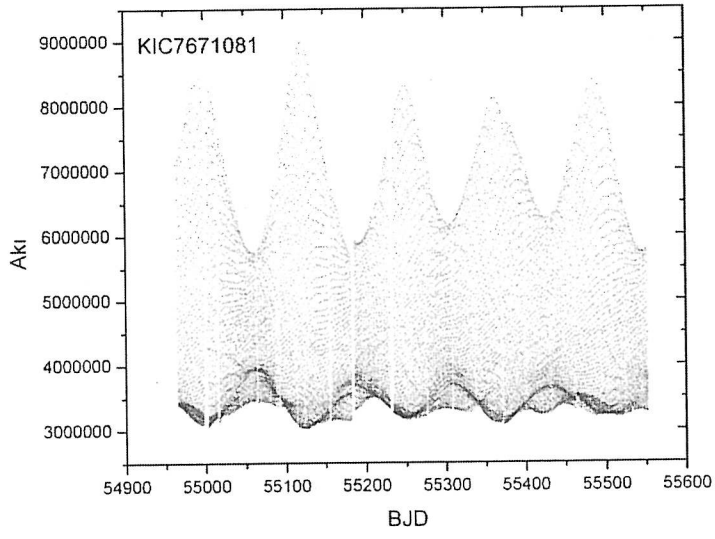


Şekil 4.6. Beşinci örnek yıldız üzerinde Kepstitch ve Kepdetrend taskları uygulanarak yapılan düzeltme

Kepstitch ve Kepdetrend taskları ile yapılan düzeltme istenilen düzeyde ışık eğrisindeki atlama ve sapmaları düzeltemediği ve yeniden ölçeklendirme konusunda yetersiz kaldığı için C programlama dilinde yeni bir kod yazıldı ve bu kod ile teleskoptan alınan verilerin hem hatalı noktaları ayıklandı, hem de yeniden ölçeklendirerek sezonlar arasındaki sapmalar düzeltildi. Yeni yazılan bu kodun, Blazhko Etkisi gösteren RR Lyrae yıldızlarının ışık eğrilerinin yanı sıra farklı türden değişen yıldızların ışık eğrilerine de uygulanmış ve olumlu sonuçlar alınmıştır.

Kepler teleskobu tarafından farklı sezonlarda elde edilen verilerin yeniden ölçeklendirilmesi için başlangıçta denenen yöntem, eşit seviyeye sahip iki veri setine ilişkin akıların da neredeyse eşit ortalama değerlere sahip olabileceği yaklaşımına dayanmaktadır. Bu bağlamda her bir sezona ilişkin verilerin aritmetik ortalaması alındı ve seçilen bir dönem referans alınarak bu referans dönem ile diğer dönemlerin ortalamaları oranlarından bazı ölçeklendirme katsayıları elde edildi. Daha sonra her bir

döneme ilişkin akıların referans döneme ilişkin akılara göre elde edilen katsayı ile çarpılmasıyla tüm dönemlerin ortalama akılarına eşit hale getirildi. Başlangıçta bu yaklaşım ciddi seviye farkları bakımından başarılı gibi görünse de, özellikle Blazhko Etkisi'nin belirgin olduğu ışık eğrilerinde beklenen ölçüde duyarlılık gösteremedi. Ancak ışık değişiminin düzenli olduğu veya hiç olmadığı sistemlerde bu yaklaşım kullanılabilir. Bu uygulamaya örnek olarak elde edilen bir sonuç şekil 4.7'de gösterilmektedir.



Şekil 4.7 Beşinci örnek yıldız üzerinde uygulanan ilk düzeltme uygulaması

Verilerin yeniden ölçeklendirilmesine ilişkin kullanılan yöntem ardışık iki sezondan ilkinin sondan birkaç ışık eğrisi ile diğerinin baştan birkaç ışık eğrisi verilerinin evrelendirilerek karşılaştırılmasına dayanmaktadır. Bu karşılaştırmanın temel dayanağı ise, ardışık iki sezon arasında birbirine en yakın birkaç ışık eğrisinin aynı evrelerine ilişkin seviyelerin eşit olması gerektiği prensibine dayanmaktadır. Evrelendirilerek karşılaştırılacak ışık eğrisi sayısının, Blazhko etkisi'ni de barındırmaması bakımından ve 5.3 gün ile en kısa Blazhko modulasyonu (Jurcsik vd. 2006) gösteren SS Cnc yıldızı referans olarak alınması uygun görüldü.

Tekniğin uygulanması oldukça basit işlemlere dayanmaktadır. İlk olarak bilinmesi gereken en önemli parametre yıldızın dönemidir (burada RR Lyr yıldızları için temel

modda zonklama dönemi) ve "keptrial taskı" ile bulunabilir. Yıldızın dönemi elde edildikten sonra örneğin birinci sezona ilişkin veri setinin son noktasından itibaren yıldızın döneminin 5 katı kadar öncesi alınır ki bu, birinci sezondaki ışık eğrilerinin son beş çevrimine karşılık gelmektedir. Benzer şekilde takip eden sezonun, veri setinin ilk noktasından başlamak üzere, yıldızın döneminin 5 katı kadar sonrası alınır. Bu da ikinci sezonun ilk beş çevrimine karşılık gelir. Bu aşamadan sonra alınan bu verilerin evrelendirilmesi işlemine geçilir. Bunun için yıldızın döneminin yanında bilinmesi gereken bir diğer önemli parametre referans alınabilecek bir zamandır. Bu, örneğin RR Lyr türü yıldızları için maksimum zamanı olabilir. Evrelendirme işlemi için aşağıda verilen denklem 4.1 veya "kepfold taskı" kullanılabilir.

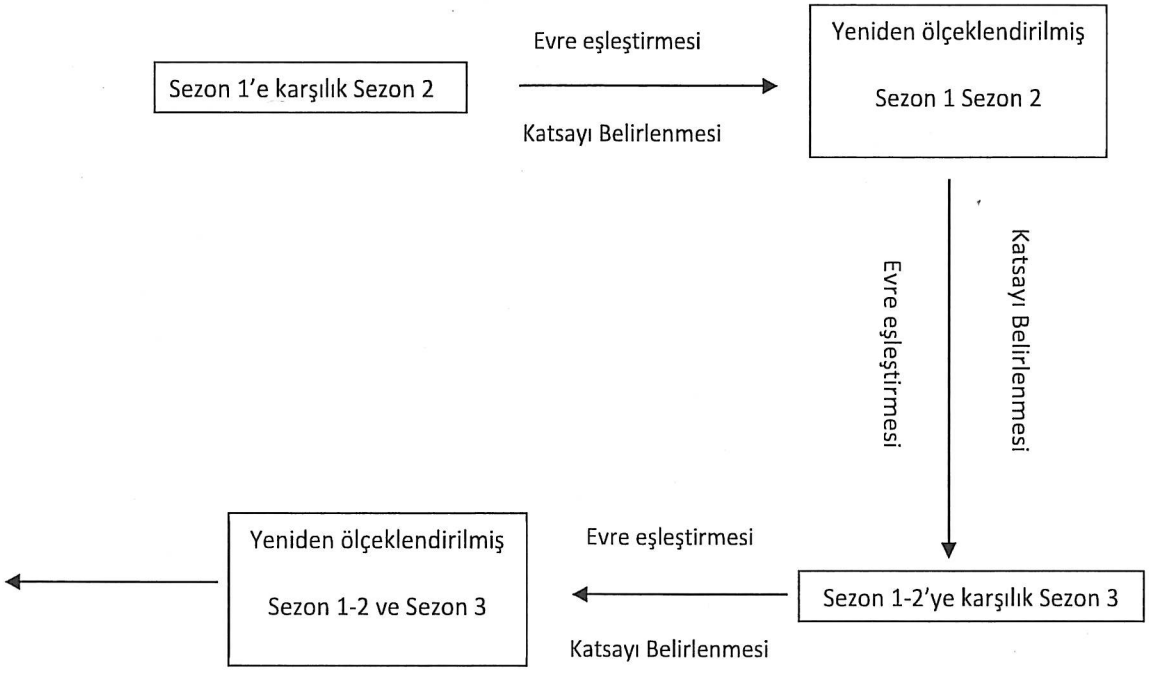
$$\text{Evre} = (T - T_0)/P_0 - \text{int}((T - T_0)/P_0) \tag{4.1}$$

Burada P_0 yıldızın dönemi, T_0 referans zamanı (maksimum veya minimum zamanı) ve T gözlemlerin zamanıdır. Birinci ve ikinci sezonlara ilişkin sırasıyla son beş ve ilk beş çevrimin evrelendirme işleminin ardından aynı evrelerin karşılaştırılması aşaması gerçekleştirilir. Bu aşamada evrenin hata değerine göre duyarlılık sınırı önem kazanır. Bu çalışma kapsamında evre duyarlılığı noktadan sonra iki hane olarak alınmıştır. Dolayısıyla mevcut evreler noktadan sonra iki haneye yuvarlanarak karşılaştırma işlemi gerçekleştirilerek düzeltilir. Karşılaştırma sonrasında her iki sezon için evrelendirilen ışık eğrilerinin aynı evrelerine karşılık gelen akı değerleri belirlenerek oranlanır (birinci sezona ilişkin akı değerleri ikinci sezona ilişkin akı değerlerine bölünür) ve herbir aynı evre için ölçeklendirme katsayıları elde edilmiş olur. Bir örnek vermek üzere gerçekleştirilen bu aşamanın bir kısmı çizelge 4.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.2 Aynı evreler için elde edilen katsayılarının belirlenmesi ve evre eşleştirmesi

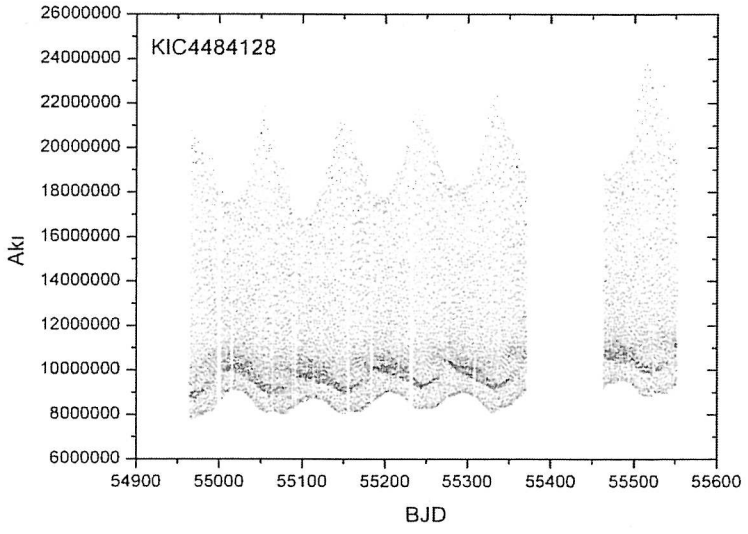
Evre	Akı 1	Akı 2	Katsayı
0.30	4173882.2	4227863.0	0.98723
0.45	3587012.0	3622098.2	0.99031
0.69	3390232.2	3422067.2	0.99069
0.90	3851316.8	4087150.8	0.94223

Bu aşamadan sonra elde edilen tüm katsayıların aritmetik ortalaması alınarak ikinci sezon için ortalama bir ölçeklendirme katsayısı elde edilmiş olur. İkinci sezona ilişkin tüm akı değerleri bu katsayı ile çarpılarak ilk iki sezon için ölçeklendirme tamamlanmış olur. Her ölçeklendirme işleminden sonra ölçeklendirmenin yapıldığı sezonlar tek bir sezon olarak kabul edilir ve bu işlem mevcut sezon sayısı kadar tekrarlanır. Ölçeklendirme işlemine ilişkin temel akış şeması şekil 4.8'de gösterildiği gibidir.

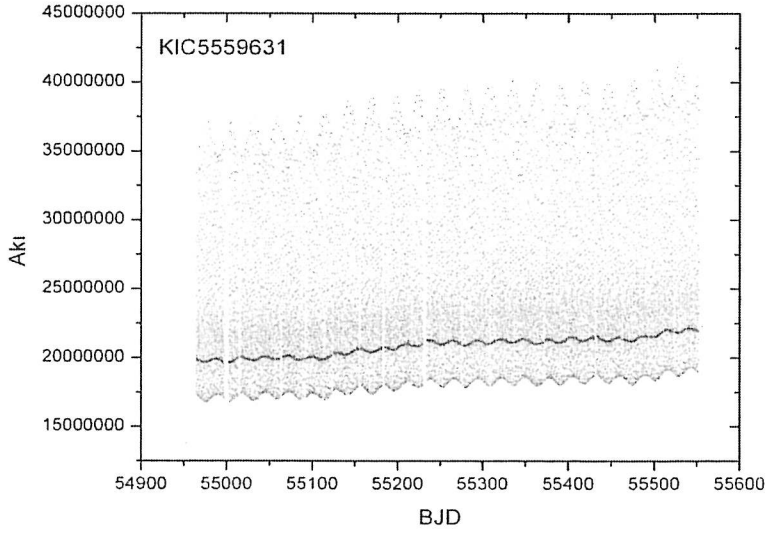


Şekil 4.8 Yeniden ölçeklendirmeyi gösteren akış şeması

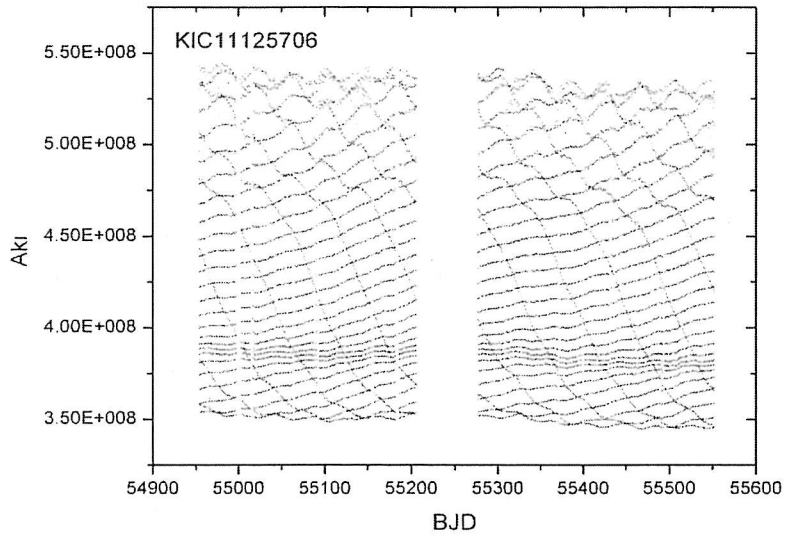
Blazhko Etkisi gösteren örnek beş yıldız için gözlem sezonları dikkate alınarak yazılan kod ile yeniden ölçeklendirilmenin yapıldığı ışık eğrilerin ilişkin örnekler şekil 4.9 - 4.13'de sırasıyla gösterilmektedir.



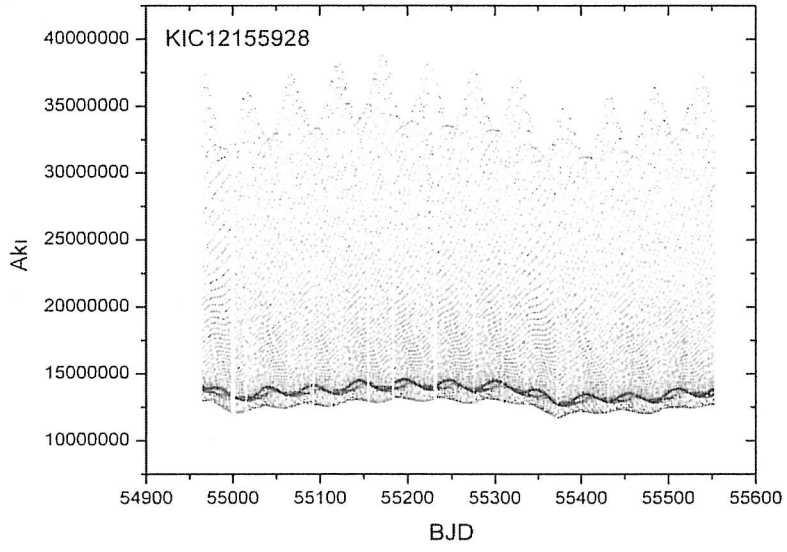
Şekil 4.9 Q1-Q7 sezon verileri kullanılarak yeniden ölçeklendirilmiş birinci örnek yıldızın ışık eğrisi



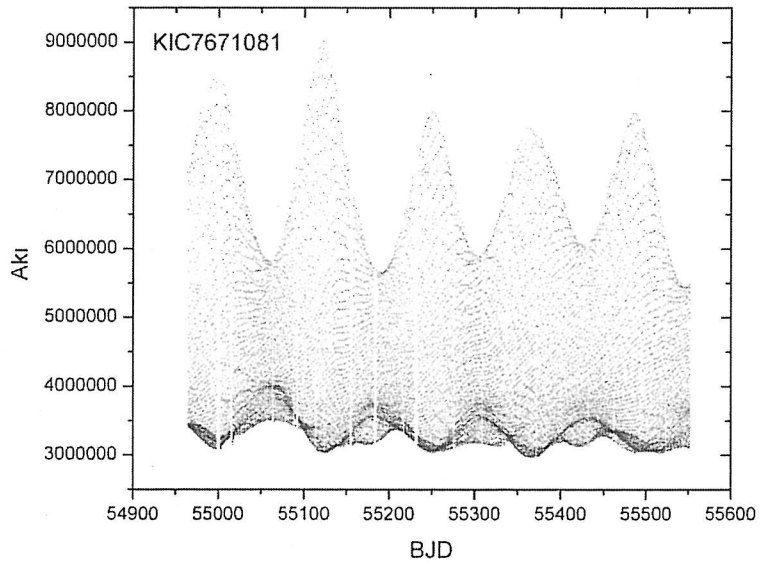
Şekil 4.10 Q1-Q7 sezon verileri kullanılarak yeniden ölçeklendirilmiş ikinci örnek yıldızın ışık eğrisi



Şekil 4.11 Q0-Q7 sezon verileri kullanılarak yeniden ölçeklendirilmiş üçüncü örnek yıldızın ışık eğrisi



Şekil 4.12 Q1-Q7 sezon verileri kullanılarak yeniden ölçeklendirilmiş dördüncü örnek yıldızın ışık eğrisi



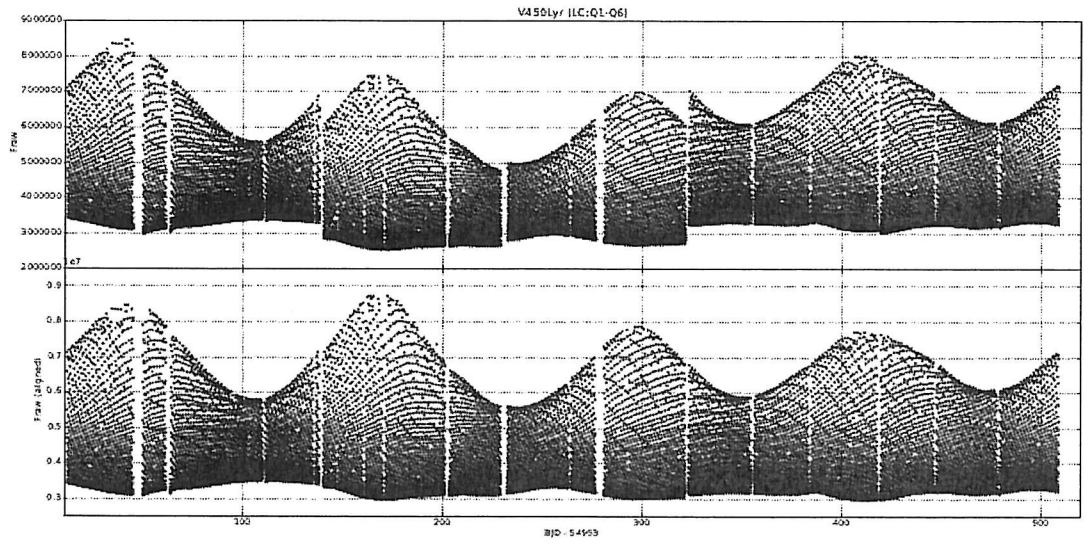
Şekil 4.13 Q1-Q7 sezon verileri kullanılarak yeniden ölçeklendirilmiş beşinci örnek yıldızın ışık eğrisi

Blazhko Etkisi gösteren yıldızların ardışık sezonlarının birleştirme işleminde görülen atlamalar ve verilerin olmasına rağmen görülen kesiklikler yazılan kod sayesinde giderilmiştir. Böylece yıldızların zonklamalarına ilişkin uygulanacak analizde verilerin daha güvenilir olmasını sağlamıştır.

Evre yuvarlamasını (hassasiyetini), bu çalışmada virgülden sonra iki hane olarak alındı. Yeniden ölçeklendirme işlemini daha hassas yapabilmek için evrenin hassasiyeti virgülden sonra üç veya dört hane alınabilir. Ancak bu duyarlılıkta evrelerin mevcut ışık eğrilerinde olmama ihtimali sebebiyle interpolasyon işlemi yapılabilir.

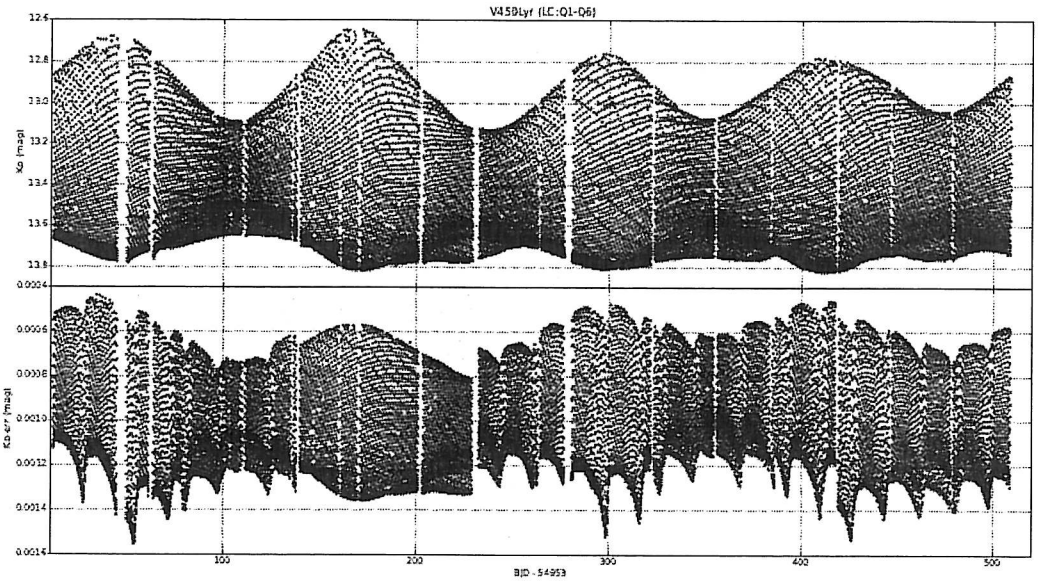
Evreler karşılaştırıldıktan sonra, karşılık gelen akı değerlerinin ortalaması yerine medyan değeri alınabilir. Bu, az da olsa saçılmış noktaların ortalamayı olumsuz yönde etkilemesini önleyebilir. Blazhko çevrimi bilinen yıldızlarda karşılaştırma esnasında alınan beş çevrim arttırılabilir veya azaltılabilir. Artırılması daha çok aynı evrenin olmasını ve dolayısıyla ölçeklendirme işleminin daha hassas yapılmasını sağlar. Çevrim sayısının azaltılması durumunda ise interpolasyon tekniğine ihtiyaç duyulabilir.

Dr. James Nemec ile yapılan özel görüşmeler sonucunda bize gönderdiği kendi programı ile yeniden ölçeklendirilen V450 Lyr yıldızına ilişkin elde edilen ölçeklendirme sonuçları (Q1-Q6) ile bu çalışmada yazılan IDL ve C kodu ile elde edilen ölçeklendirme sonuçları karşılaştırıldı. BJD'ye karşılık parlaklık değeri çizilerek her iki yönteme dayanarak elde edilen ışık eğrisi sırasıyla şekil 4.14 ve 4.15'de görülmektedir. Şekil 4.15'da Dr. James Nemec'in programı ile yeniden ölçeklendirme (Q1-Q6) ve Kp-err (hataları) görülmektedir. Her iki ışık eğrisinde aynı sezonu ışık eğrisi verilerindeki genlikler birbirinden farklıdır. Örneğin şekil 4.14'de görülen ikinci sezonu verileri ile şekil 4.15'de görülen ikinci sezonu (sezon) verilerinin genliği birbirinden farklı çıktığı hesaplanmıştır.



Şekil 4.14 Ölçeklendirme yapılmadan önce Kepler'den alınan verilerin karşılaştırılması

Şekil 4.14'de yukarı panel: Ölçeklendirme yapılmamış Kepler'den alınanan veriler (Q1-Q6), aşağı Panel: J. Nemec tarafından yeniden ölçeklendirilen V450 Lyr yıldızına ilişkin elde edilen ışık eğrisi gösterilmiştir.

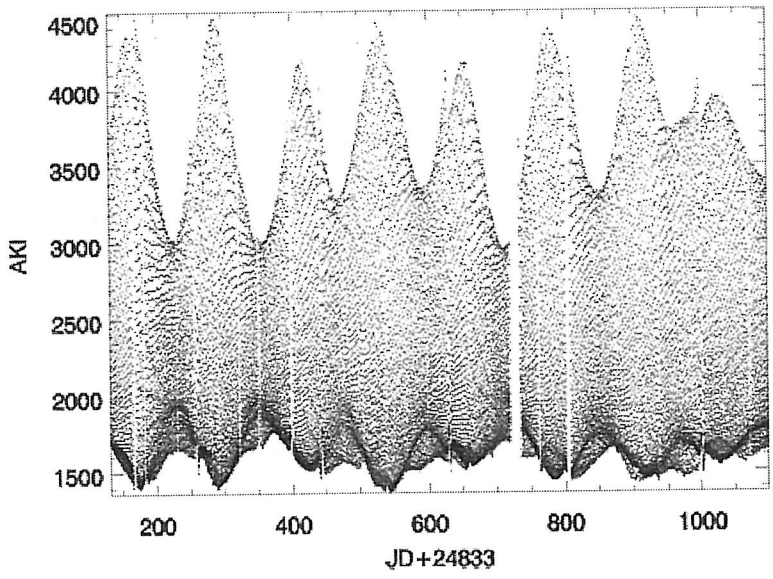


Şekil 4.15 Ölçeklendirme yapıldıktan sonra Kepler'den alınan verilerin karşılaştırılması

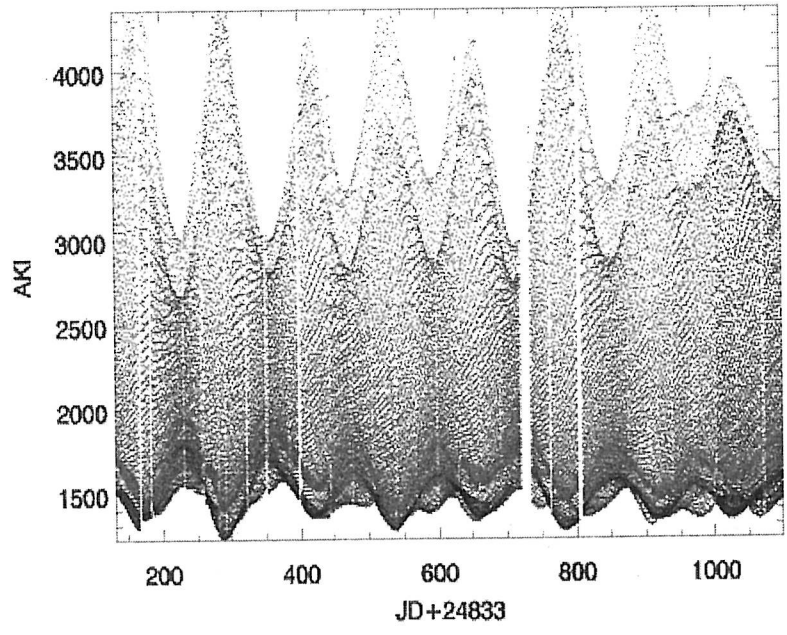
Şekil 4.15'de yukarı panel: Ölçeklendirme yapılmamış Kepler'den alınanan veriler (Q1-Q6), aşağı Panel: J.Nemec tarafından yeniden ölçeklendirilen V450 Lyr yıldızına ilişkin elde edilen ışık eğrisinin Kp-err hatası görülmektedir.

Ayrıca Kepler Asteroseismic Science Consortium (KASC) grubu ve Konkoly Observatory-Hungarian Asteroseismology Group (Konkoly Gözlemevi-Macaristan Astrosismoloji Grubu) üyesi ve Eötvös Universitesi Dr. László Molnár ile İspanya'da yapılan görüşmelerde, Dr. József Benkő tarafından Corot ve *Kepler* uydusu verilerinin birleştirilmesi amacıyla Fortran programlama dilinde geliştiren kodun bu çalışma kapsamında geliştirilen kod ile karşılaştırılması önerildi. Bu öneri doğrultusunda bu kod kullanılarak elde edilen sonuçlar (Şekil 4.16) ile bu çalışma kapsamında C programlama dilinde yazılan kod sonuçları karşılaştırıldı (http://konkoly.hu 2016).

Bu çalışma kapsamında yazılan ve geliştirilen kod ile Dr. Benkő'nun geliştirdiği kod sonuçları şekil 4.17'deki gibi karşılaştırıldığında her iki ışık eğrisi arasında genlik farkı görülmektedir. Bu genlik farkına sebep kodlarda kullanılan farklı çarpan katsayı değerleridir.



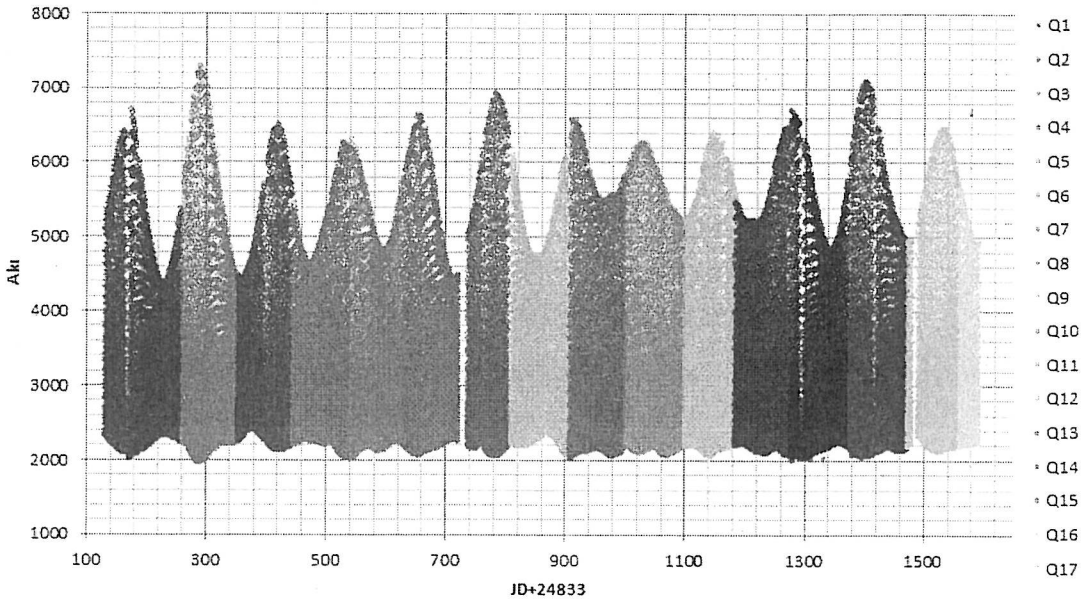
Şekil 4.16 Q1-Q11 sezon verileri ve Dr. József Benkő'nun geliştirdiği kod ile yeniden ölçeklendirilmiş V450 Lyr yıldızın ışık eğrisi



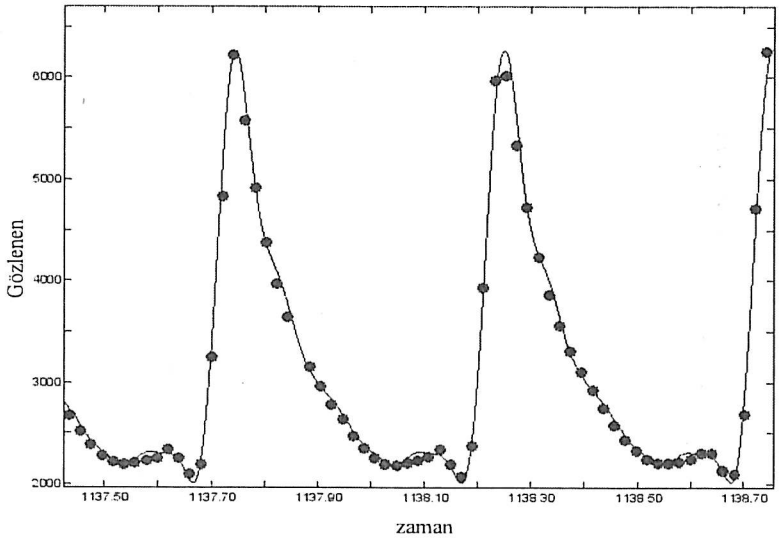
Şekil 4.17 Dr. József Benkő'nun geliştirdiği kod ile bu çalışma kapsamında yazılan kodların sonuçlarının karşılaştırılması

Bu çalışmada bahsedilen yöntemimiz yardımıyla, uzun poz süresi ile alınmış olan (29.4 dakika) **Long-cadence 17. sezon**da dahil edilerek birleştirildi (bkz Şekil 4.18). **Long-**

cadence (uzun poz süreli) 17. sezonda dahil olmak üzere toplam **64839** nokta içermektedir.



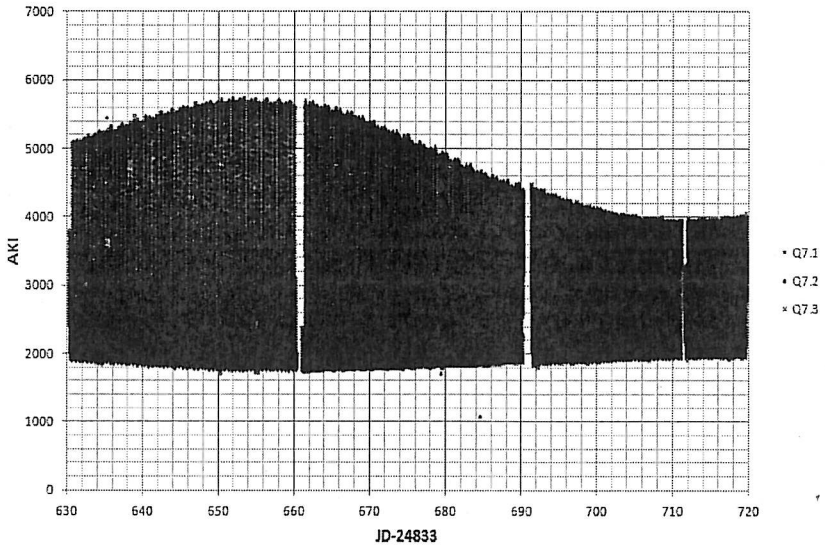
Şekil 4.18 Toplam 17 Sezon verisinin birleştirilmiş ışık eğrisi



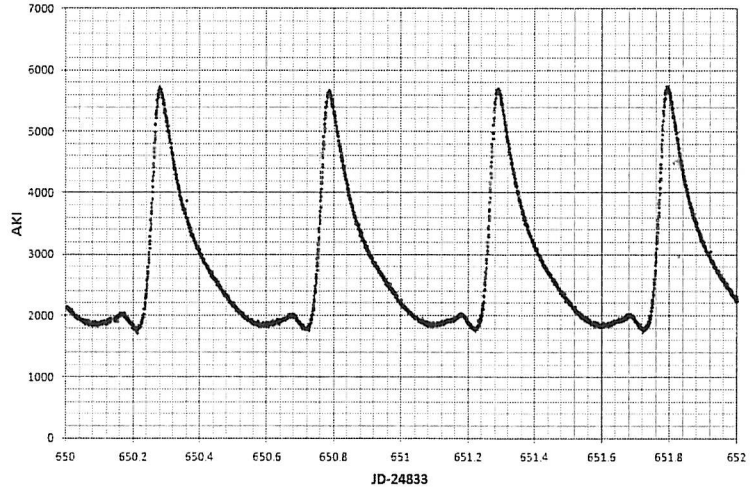
Şekil 4.19 PERIOD04 programında 17 Sezon verisinin birleştirilmiş ışık eğrisinden bir kesit

Bir dakikalık poz süresi ile alınmış olan **Short-cadence (kısa poz süreli)** olan **7. sezonda** bulunan **7.1, 7.2** ve **7.3 alt sezonlar** daha önce kullandığımız yöntem

yardımıyla birleştirildi (Şekil 4.20-4.21). **Short-cadence (kısa poz süreli) 7. sezonda** toplam **127506** nokta birleştirilmiştir.



Şekil 4.20 Q7'nin alt sezonları olan 7.1, 7.2 ve 7.3'ün birleştirilmiş ışık eğrisi



Şekil 4.21 Q7'nin alt sezonları olan 7.1, 7.2 ve 7.3'ün ışık eğrisinden bir kesit

Yeniden ölçeklendirme kodunu ve kullanımını içeren "How to correctly stitch together data of a Blazhko star" başlıklı bir poster sunumu ile 05-09/09/2011 tarihinde İspanya Granada şehrinde gerçekleştirilmiş olan Stellar Pulsation Conference Series dahilindeki "Impact of new instrumentation and new insights in stellar pulsations" adlı konferansa katılım gerçekleşti. Sunulan bu çalışma Astrophysics and Space Science Proceedings series (AP&SS)'de yayınlanmıştır (http://stellarpulsations.iaa.es 2016)

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

5.1 Uzun Poz Süresi İle Elde Edilen Verilerin Frekans Analizi

Yeniden ölçeklendirme yapılan ışık eğrisinden elde edilen veriler ile yapılan frekans analizinde PERIOD04 programı (Lenz ve Breger 2005) kullanıldı. Gözlemsel verilerin frekans analizi sonucu elde edilecek Blazhko değişimi için ışık elemanları aşağıda verilen denklem 5.1, 5.2 ve 5.3 ile hesaplandı.

$$Z+\Sigma A_i \sin(2\Pi(\Omega_i t + \Phi_i)) \quad (5.1)$$

şeklinde tanımlanan Fourier serisi uygulandı. Formülde kullanılan A_i parametresi genliği, Ω_i frekansı ve Φ_i evreyi temsil etmektedir. Gözlemsel verilerin frekans analizi sonucu elde edilecek Blazhko değişimi için ışık elemanları denklem (5.2) ve (5.3) kullanılarak hesaplandı.

$$HJD(T_{max}) = T_0 + P \times E_{puls} \quad (5.2)$$

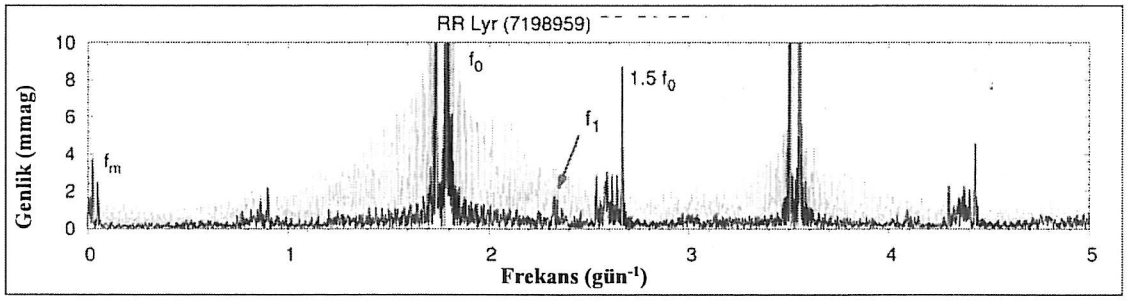
$$HJD(T_{Blmax}) = T_0 + \text{Blazhko dönemi} \times E_{Blazhko} \quad (5.3)$$

Analizlerde denetleme parametresi olarak sinyal/gürültü (S/N) değerleri dikkate alındı. S/N oranı 4'ün altında olan frekanslar dikkate alınmadı. Bu analiz sonucunda elde edilen frekanslar, tayfsal pencere, peryodogramlar kontrol edilerek teorik ışık eğrileri oluşturuldu. Yeniden ölçeklendirilmiş verilerin frekans analizinde Nyquist frekansını PERIOD04'ün önerdiği 24.5003 olarak alındı; analizler orijinal veriler ve orijinal verilerin artıkları üzerinden yapıldı. Frekans analizi sonucunda kullanılan tayfsal pencere şekil 5.2'de, şekil 5.3'de güç tayfı verilmektedir. Analiz sonucunda elde edilen gözlemsel ve kuramsal ışık eğrileri fiti şekil 5.4 ve 5.5'de görülmektedir. Şekil 5.6'da da gözlemsel ışık eğrilerinde görülen hump yapısının kuramsal ışık eğrisine fiti gösterilmektedir.

Nyquist frekansını kısaca özetlersek: Örnekleme frekansının yarısına denir. Bu frekansın üzerinde frekanslara sahip değişimler doğru bir şekilde algılanamaz. Dolayısı ile bir sinyali doğru algılamak için en az onun iki katında bir örneklemeye sahip olmanız gerekir. Örnek olarak filmlerdeki araba tekerleklerinin kamera tarafından kaydını verebiliriz. "Diyelim ki tekerimiz, jantların bölmelemesi yardımıyla 8 sezonu daireden oluşan bir yapıda olsun (birbirini 45° açıyla kesen 4 doğru). Bu teker saniyede 3 devirle dönüyor olsun. Tipik olarak videomuz da saniyede 24 resimden oluşarak kaydedilmiş olsun. Bu durumda ardışık 2 resim arasında değişen sezonu daire sayısını 3*8/24 sonucu 1 olarak buluruz. 8 sezonu dairede oluşan bir çemberde, 1 sezonu daire ilerleyince göreceğimiz resim de doğal olarak aynı resim olacaktır. Yani biz tekerleği duruyor olarak görürüz. Eğer görüntüyü saniyede 24 resim yerine 48 resim ile örnekliyor olsaydık, o vakit ardışık 2 resim arasında değişen sezonu daire sayısı 0.5 olur, biz de tekerleği dönüyor görürdük. Eğer Nyquist frekansının (bu örnekte 48) altında bir frekansla (örneğin 32 resim / saniye) görüntülüyor olsak (3*8 / 32 = 0.75) sezonu daireyi 0.75 tur ileri değil de 0.25 tur geri gider gibi görür ve gerçek değişimi yanlış yorumlarız (http://ozgur.astrotux.org 2016)

Toplam 17 sezonun frekans analizinde 50 frekansa kadar gidildi. Bu frekanslar arasından anlamlı olanlar frekans parametreleriyle çizelge 5.1'deki gibi eşleştirildi. Ayrıca frekans analizlerinde elde edilen f_K ~0.00268 (c/d) değerindeki frekans **Kepler Yılı**'na ait olup dönemi $\mathbf{P_K=372.5}$ **gündür** (Banyai vd. 2013) ve analizler esnasında dikkate alınmamıştır. Analiz sonucunda elde edilen bulgulara göre hem f_0 temel frekansı ve frekansların etrafında yer alan $\mathbf{k}f_0$ harmonikleri bulundu. Blazhko Frekansı f_B olup, Blazhko Dönemi $1/f_B$ 'dan 123.2505 gün olarak hesaplandı. Ancak bu uzun poz süreli verileri toplu olarak analiz edildiğinde second overtone (ikinci üst ton)'a karşılık gelen f_2 **(c/d)** değerini $\mathbf{P_2}$ **(gün)** ikinci üst ton'un dönemi bulunamamıştır. Klasik RRd yıldızlarında f_0 / f_1 oranı 0.74-0.75 arasında olması gerekmektedir (Soszynski vd. 2011). f_1 frekansı teorik olarak elde edilse de periyodogramlarda belirlenen aralıkta frekans saptanmamıştır. Fakat klasik olmayan RRd yıldızlarında bu oran takribi f_0 / f_2 = 0.597-0.592 arası değişmektedir. f_0 frekansına karşılık gelen değerimiz 1,981688035 olup $\mathbf{P_0=1/f_0}$**'dan** $\mathbf{P_0}$ **(gün)=0.50462'dur.** Bulunan sonuçlar Benkő vd. (2014)'ün elde ettiği değerler ile uyumlu olduğu görülmektedir. f_2 **(c/d)** değerini kısa poz süreli

verilerde modülasyonun yüksek genlikli evresinde daha belirgin olduğu için bu değeri bulabilmek için kısa poz süreli veriler analize tabi tutulmuştur.



Şekil 5.1 Prototip RR Lyrae yıldızının frekans analizinde görülen PD Etkisi (http://www.konkoly.hu 2016)

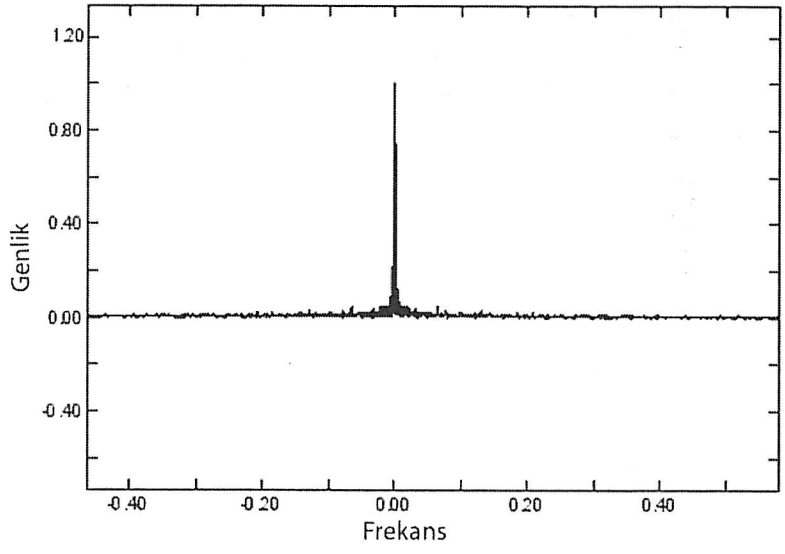
V450 Lyr yıldızında **Period Doubling (PD)** ve bunun belirteci olan **HIF (-Half Integer Frequency)** yani $f/2$ alt harmoniklerive onun tek sayılı multipletlerine ait herhangi bir işaret bulunmamıştır. Bu sonuç Benkő vd. (2010)'nun bulguları ile uyumludur. Prototip RR Lyrae yıldızının Period-Doubling (PD) etkisi belirgin olarak şekil 5.1'de görülmektedir.

Çizelge 5.1 Frekans Analizi sonucunda elde edilen değerler (Q1-Q17) (Zp = 2639.394)

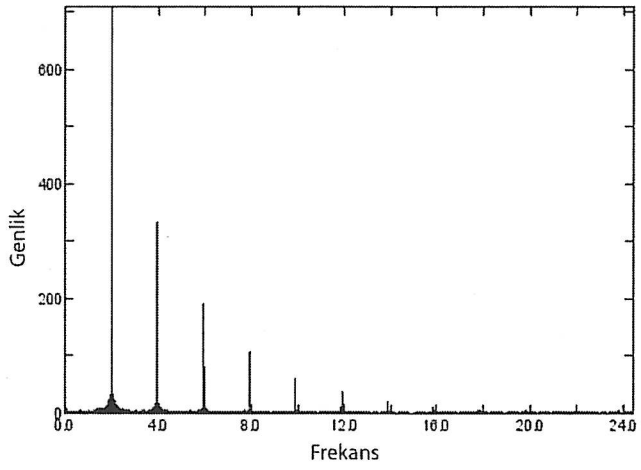
Fr	f[c/d]$^{-1}$	Frekans Değeri	S/N	Genlik	Evre	Gün	Frekans Hata	Genlik Hata	Evre Hata
F1	f_0	1.981688035	302.1576	1229.764757	0.495218266	0.504620295	0.000000369	0.859272816	0.000135577
F2	$2f_0$	3.963377494	1047.272	596.6524363	0.871155545	0.252310057	0.000000577	0.894686015	0.000264697
F3	-	5.944454867	78709.51	62.23406226	0.010629656	0.168224004	0.000006126	0.933318904	0.002354169
F4	$3f_0$	5.945073256	658.6416	360.1246747	0.251769456	0.168206506	0.000001079	0.833735144	0.000471523
F5	-	7.92840759	370.0674	19.47110292	0.121967279	0.126128732	0.000021467	0.862912764	0.006944257
F6	$4f_0$	7.92680386	281.6112	201.1921818	0.611464587	0.126154251	0.000001953	0.749335658	0.000628078
F7	f_0+f_B	1.989838363	221.1949	165.1901642	0.124079693	0.502553383	0.000004088	1.118181136	0.001420891
F8	f_0-f_B	1.973574904	206.2683	129.4528204	0.928785874	0.506694728	0.000002265	0.960724139	0.001064247
F9	$5f_0$	9.908465939	173.1615	115.0160711	0.006772445	0.100923796	0.000014752	0.745306617	0.004849100
F10	$3f_0+f_B$	5.953211311	170.6763	93.32807234	0.841708801	0.167976567	0.000000464	0.367347925	0.000292934
F11	$2f_0+f_B$	3.971547255	125.3729	98.590839	0.464701995	0.251791037	0.000000592	0.428288285	0.000292707
F12	$4f_0+f_B$	7.934832037	127.074	69.51615546	0.30217831	0.126026612	0.000005177	0.803065415	0.001581550
F13	-	1.981301062	108.3993	113.3392421	0.077739391	0.504718853	0.000013076	0.751154524	0.006067963
F14	$6f_0$	11.89013432	99.67205	67.7686237	0.407406728	0.084103339	0.000005969	0.752837617	0.002528110
F15	-	3.962719205	102.4727	58.38867139	0.671865936	0.252351971	0.000007424	0.867337830	0.003254841
F16	-	1.987898199	78780.14	57.78973394	0.536124615	0.503043869	0.000005216	0.725212356	0.002139001
F17	f_B	0.008113558	98.29886	59.20195683	0.803567437	123.2504964	0.000005019	0.833291655	0.001826680
F18	-	3.969621789	92.52253	52.71436984	0.847011442	0.251913168	0.000013470	0.975563677	0.005740606
F19	-	7.925833295	92.9266	59332.23743	0.099093961	0.126169699	0.000000004	0.440497855	0.000001586
F20	-	7.925833608	92.33868	59360.42291	0.598878174	0.126169694	0.000000004	0.440348107	0.000001259
F21	$5f_0+f_B$	9.916535897	84.86399	50.79184125	0.690224216	0.100841666	0.000006883	0.880359907	0.002437606
F22	-	5.951325192	88.76992	46.37921372	0.233638938	0.168029803	0.000006967	0.847906405	0.002856311
F23	$2f_0-f_B$	3.957111071	77.60953	49.30003908	0.587051294	0.252709611	0.000000840	0.390726994	0.000496936
F24	-	1.97542522	81.02784	44.08128782	0.253142194	0.506220124	0.000008433	0.737415982	0.002923352
F25	-	1.977237868	69.66459	38.8439384	0.042875405	0.505756043	0.000014315	1.110639130	0.004079006
F26	$3f_0-f_B$	5.938809	87.56563	44.19782342	0.964396766	0.16838393	0.000013056	0.928364225	0.005155933
F27	-	3.959018064	76.13884	42.14489151	0.355135461	0.252587885	0.000000860	0.392984741	0.000507897
F28	-	1.990442138	74.57003	50.62290153	0.975702042	0.502400939	0.000012724	1.132433816	0.003498716
F29	-	5.957533138	65.19437	40.03347829	0.07276713	0.16785471	0.000007719	0.820942586	0.003312477
F30	-	9.907841885	68.5545	38.02952054	0.79348007	0.100930153	0.000002583	0.710185467	0.001125092
F31	-	1.986127225	68.35855	36.27234583	0.341936173	0.503492419	0.000008360	0.838836727	0.003304931
F32	-	7.933067671	75.52351	37.04512914	0.592396915	0.126054641	0.000009352	1.004404811	0.003782864
F33	$7f_0$	13.87183439	62.29176	36.19726657	0.795761941	0.072088519	0.000045711	0.804071882	0.020815134
F34	-	3.975853719	64.06401	34.33834956	0.628660463	0.251518308	0.000009165	0.755411516	0.003709600
F35	-	5.936954644	62.94811	35.6981101	0.468297166	0.168436523	0.000041178	0.739215410	0.019974241
F36	-	3.967842559	63.51652	34.98971382	0.737958692	0.252026129	0.000008368	0.815477540	0.003237769
F37	$6f_0+f_B$	11.89823089	61.16748	34.15655833	0.070130636	0.084046108	0.000009664	0.775585794	0.004174603

Çizelge 5.1 Frekans Analizi sonucunda elde edilen değerler (Q1-Q17) (Zeropoint = 2639.394) (devam)

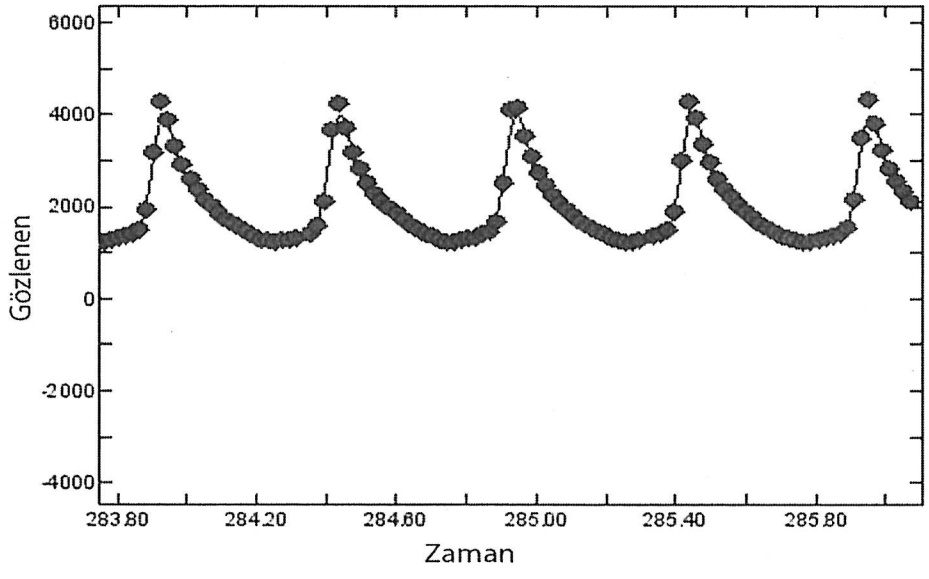
Fr	f[c/d]$^{-1}$	Frekans Değeri	S/N	Genlik	Evre	Gün	Frekans Hata	Genlik Hata	Evre Hata
F38	-	7.939266147	55.48437	33.39958889	0.453229613	0.125956226	0.000009545	0.882759681	0.004334935
F39	-	5.94951642	66.3657	32.97709587	0.157202181	0.168080887	0.000011718	0.740174486	0.003808958
F40	$4f_0$-f_B	7.920488267	57.40011	30.12615305	0.355187547	0.126254843	0.000010052	0.780463009	0.003750899
F41	-	3.97215756	56.9885	36.77749514	0.294754531	0.25175235	0.000000615	0.425660653	0.000298547
F42	$3f_0$-f_B	5.940725228	52.96147	31.64878036	0.720870132	0.168329617	0.000011645	0.691263828	0.003830016
F43	-	5.953845928	61.34235	34.0009807	0.655760274	0.167958663	0.000000489	0.364675756	0.000299869
F44	-	1.974326892	52.8342	30.80211045	0.576692568	0.506501737	0.000010957	0.839926024	0.002983671
F45	-	7.918626803	49.4393	28.59857843	0.886767074	0.126284522	0.000011471	0.810530129	0.004724031
F46	-	3.955209508	48.52228	27.39072101	0.382452721	0.252831107	0.000011634	0.860641179	0.004355106
F47	$6f_0$-f_B	11.88952334	48.99068	26.99087526	0.204868586	0.084107661	0.000016984	0.705829447	0.005535490
F48	-	9.914778837	49.56974	26.61684388	0.969634366	0.100859537	0.000012829	0.939218032	0.004555299
F49	-	9.920953944	46.72622	26.09320256	0.878134775	0.100796759	0.000053292	0.989060978	0.021842714
F50	-	1.982013861	1006.579	80.86547498	0.440510082	0.504537339	0.000006219	0.818246570	0.002944859



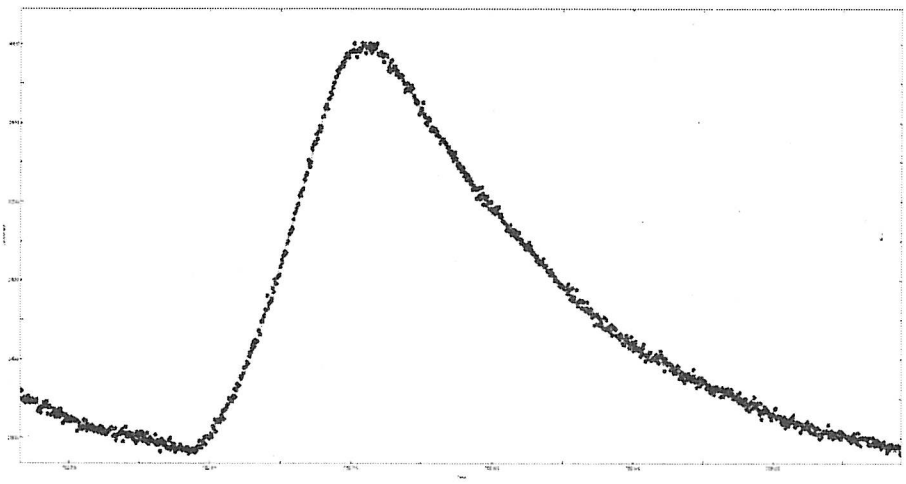
Şekil 5.2 Frekans analizi sonucunda kullanılan tayfsal pencere



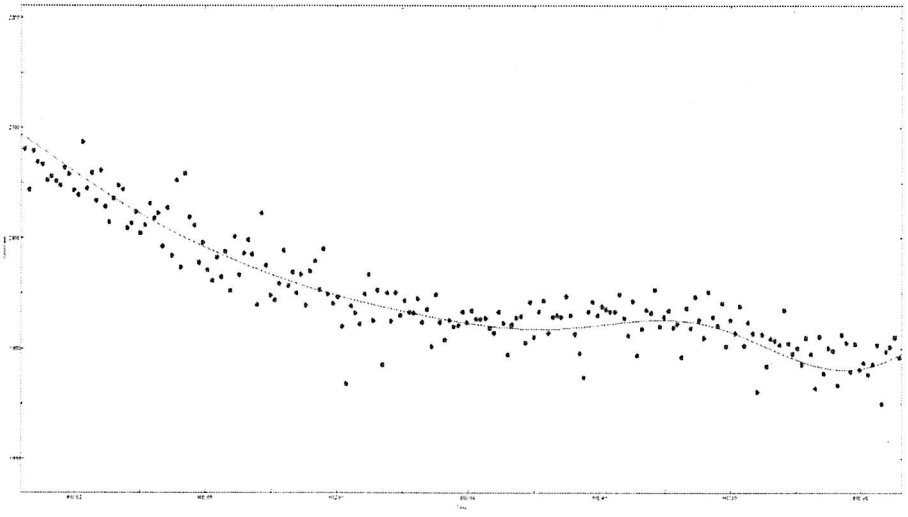
Şekil 5.3 Frekans analizi sonucunda elde edilen güç tayfı



Şekil 5.4 V450 Lyr yıldızının belirli bir aralıktaki gözlemsel ve kuramsal ışık eğrileri



Şekil 5.5 Gözlemsel ve kuramsal ışık eğrilerinin daha detaylı incelenmesi

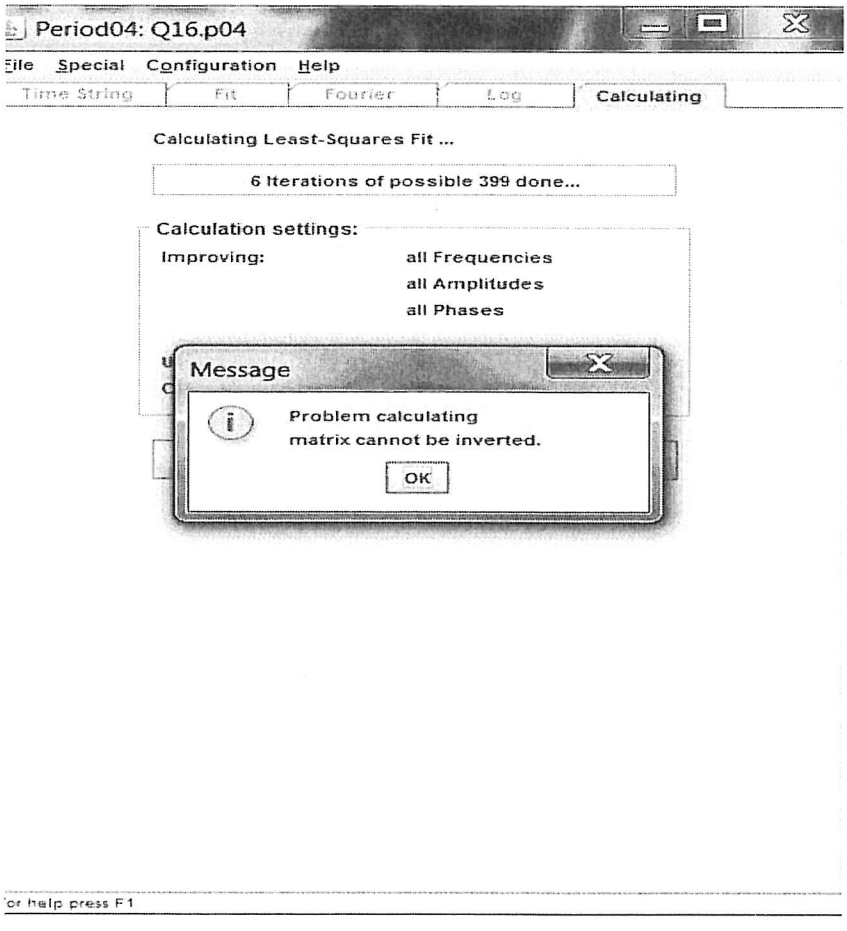


Şekil 5.6 Gözlemsel ışık eğrilerinde görülen hump yapısının kuramsal eğriye fit edilmesi

5.2 Uzun Poz Süresi ile Elde Edilen Her Bir Quarter Verilerin Frekans Analizi

Q1-Q17 arası tüm verilere ilişkin frekans analizi yapıldıktan sonra herbir çeyreği tek tek inceleyerek ve her bir çeyreği PERIOD04 programı ile ayrı ayrı analiz ederek 17 adet 30'ar frekanstan 17 tane frekans çizelgesi elde edildi. Frekanslar hesaplanırken sadece 30 frekans'a kadar analiz yapmamızın sebebi PERIODO4 programının matris hatası

vermesi ve bulguların bu hata sonucunda güvenilirliğini yitirmesidir. Hata ekranı Şekil 5.7'de gösterilmektedir. Analiz sonucunda bu frekanslar öncelikle kendi aralarında daha sonra Q1-Q17 verilerini kapsayacak şekilde frekans analizi sonucunda elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 5.2-5.18 arası sırasıyla Q1-Q17 sezonlarının frekans analiz sonuçlarını içermektedir. Çizelgede yer alan f_0, f_B, f_2, f_s sırasıyla zonklama frekansına, Blazhko frekansına, ikinci üst tona (ikinci modülasyon frekansına ve Blazhko dönemine eşlik eden ikinci bir modülasyona sebep olan İkinci bir Blazhko frekansına karşılık gelmektedir. f_1 frekansı teorik olarak elde edilse de şekil 5.13-5.15'te görülememiştir.



Şekil 5.7 PERIOD04 programının matris hatası gösterilmektedir

Çizelge 5.2 Sadece Q1 için yapılan Frekans Analizi sonucunda elde edilen değerler

Frekans	$f[c/d]^{-1}$	Frekans Değeri	Genlik	Evre
F1	f_0-f_B	1.975038176	264.998905	0.316951478
F2	$2f_0$	3.962976407	603.192525	0.986511449
F3	$3f_0$	5.951988083	5536.679686	0.846005078
F4	$4f_0$	7.934087135	3695.0624297	0.687415486
F5	$5f_0$+f_B	9.916194686	3529.5799513	0.082798759
F6	$6f_0$	11.89845572	1975.509001	0.011656169
F7	f_0	1.982837074	1131.073760	0.381508748
F8	$7f_0$	13.87185652	78.400990	0.027869206
F9	$2f_0$+f_B	3.972804597	133.457395	0.408991457
F10	f_B	0.008356013	83.0517487	0.634013096
F11	$3f_0$+f_B	5.952249026	5333.953592	0.005239799
F12	$8f_0$	15.85604037	51.081658	0.198715607
F13	$4f_0$+f_B	7.934426487	3536.164146	0.536215450
F14	$9f_0$-f_B	17.835463170	34.891616	0.220107166
F15	$5f_0$	9.9164534288	3426.407885	0.361901759
F16	$10f_0$	19.816998124	24.633831	0.094997009
F17	$6f_0$-f_B	11.898815918	1896.746508	0.712994739
F18	$11f_0$	21.799359980	17.0851899	0.483393017
F19	$7f_0$+f_B	13.888820296	22.019928	0.106213442
F20	$12f_0$	23.779859125	11.313202	0.311787334
F21	$8f_0$+f_B	15.873489363	12.938815	0.640915308
F22	$9f_0$+f_B	17.856279848	8.724899	0.473504617
F23	-	23.175867924	7.291394	0.562649656
F24	$10f_0$+f_B	19.836579485	6.377049	0.246669482
F25	-	1.9962188760	65.893443	0.401568165
F26	$3f_0$-f_B	5.9384135601	172.267403	0.062415004
F27	$5f_0$-f_B	9.8984996320	55.656943	0.828857133
F28	$4f_0$-f_B	7.9179501654	90.391960	0.797753062
F29	$6f_0$-f_B	11.876886903	30.078091	0.763784967
F30	-	21.195742779	4.033548	0.151670452

Çizelge 5.3 Sadece Q2 için yapılan Frekans Analizi sonucunda elde edilen değerler

Frekans	$f[c/d]^{-1}$	Frekans Değeri	Genlik	Evre
F1	$\boldsymbol{f_0}$	**1.982032**	**1056.664015**	**0.668584**
F2	$2f_0$	3.965039	547.773570	0.484692
F3	$3f_0$	5.942691	7044.497998	0.186909
F4	f_0+f_B	1.990242	241.296271	0.093598
F5	$2f_0+f_B$	3.971096	235.236605	0.471045
F6	$4f_0$	7.933681	329616.211006	0.569952
F7	$3f_0+f_B$	5.958781	18345.977972	0.743339
F8	-	7.933684	329593.378742	0.913708
F9	f_0-f_B	1.973423	147.563286	0.219371
F10	$5f_0+f_B$	9.918499	293089.883209	0.702449
F11	$\boldsymbol{f_B}$	**0.009348**	**55.185980**	**0.976990**
F12	$5f_0+2f_B$	9.918506	293843.126994	0.830770
F13	$6f_0$	11.899355	171192.876217	0.952424
F14	-	11.899359	171289.017320	0.236155
F15	-	5.942556	6862.936107	0.107997
F16	$7f_0$	13.878341	156069.540692	0.198917
F17	-	9.920732	765.230964	0.773009
F18	$4f_0+f_B$	7.946396	23.131636	0.533640
F19	-	13.878343	156068.518198	0.631939
F20	$6f_0+f_B$	11.904345	109.225427	0.266994
F21	-	3.950478	14.741805	0.388877
F22	-	5.958805	18257.511232	0.908772
F23	$7f_0+f_B$	13.893187	13.148957	0.894460
F24	-	15.871828	602.014173	0.170779
F25	$8f_0+f_B$	15.871647	602.060543	0.645928
F26	$8f_0$	15.857170	9.047686	0.065622
F27	-	1.966513	24.708243	0.018699
F28	$5f_0$	9.897203	7.467807	0.701727
F29	$9f_0$	17.823195	6.628860	0.145344
F30	$4f_0-f_B$	7.915282	6.930303	0.869345

Çizelge 5.4 Sadece Q3 için yapılan Frekans Analizi sonucunda elde edilen değerler

Frekans	$f[c/d]^{-1}$	Frekans Değeri	Genlik	Evre
F1	f_0	1.982086	1057.220868	0.644619
F2	$2f_0$	3.963099	523.447497	0.321352
F3	$3f_0+f_B$	5.949701	234.226357	0.917443
F4	$4f_0+f_B$	7.931531	169.101058	0.575367
F5	f_0+f_B	1.990473	176.488989	0.352003
F6	$5f_0+f_B$	9.913987	106.676216	0.724193
F7	$6f_0$	11.896041	70.194532	0.006162
F8	$3f_0$	5.942120	201.084567	0.824801
F9	$2f_0+f_B$	3.970994	129.099755	0.131584
F10	f_B	0.009263	84.274052	0.558670
F11	$4f_0$	7.922946	118.244829	0.834733
F12	$5f_0$	9.904336	83.037981	0.735051
F13	$7f_0$	13.878346	46.779040	0.493872
F14	f_0-f_B	1.973880	209.185313	0.027197
F15	$6f_0-f_B$	11.886161	56.301424	0.609997
F16	$7f_0-f_B$	13.867648	38.827324	0.181254
F17	$8f_0+f_B$	15.856654	33.616651	0.314068
F18	$4f_0-f_B$	7.913212	47.275117	0.183817
F19	$5f_0-f_B$	9.894703	40.159576	0.544088
F20	$3f_0-f_B$	5.933301	49.469440	0.774195
F21	-	3.950920	41.809499	0.711593
F22	$8f_0$	15.846650	25.462949	0.648506
F23	$9f_0+f_B$	17.837932	22.144824	0.351839
F24	$6f_0-2f_B$	11.876048	32.358610	0.969610
F25	$9f_0$	17.827598	19.676994	0.890235
F26	$10f_0$	19.819077	15.157468	0.752612
F27	$7f_0-2f_B$	13.857616	23.598599	0.087658
F28	f_0-2f_B	1.964196	27.891012	0.717731
F29	$11f_0$	21.795226	12.552219	0.490513
F30	$10f_0-f_B$	19.809109	14.909577	0.104939

Çizelge 5.5 Sadece Q4 için yapılan Frekans Analizi sonucunda elde edilen değerler

Frekans	$f[c/d]^{-1}$	Frekans Değeri	Genlik	Evre
F1	f_0-f_B	1.976061	197.421146	0.560640
F2	$2f_0$	3.963482	492.678970	0.156378
F3	$2f_0$+f_B	3.975110	107.580083	0.815088
F4	$3f_0$	5.943985	269.514653	0.149862
F5	f_0	1.981979	989.438947	0.536725
F6	$4f_0$	7.925634	151.664066	0.770930
F7	$3f_0$+f_B	5.952991	154.159078	0.591581
F8	$5f_0$	9.907242	85.111735	0.700213
F9	$4f_0$+f_B	7.935136	115.225311	0.833201
F10	f_B	0.007021	64.410126	0.234669
F11	$6f_0$-f_B	11.889867	57.379170	0.456623
F12	f_0+f_B	1.992881	127.948450	0.238685
F13	$5f_0$+f_B	9.916498	83.502730	0.320984
F14	$7f_0$	13.871918	33.175190	0.854894
F15	$6f_0$	11.899450	49.248522	0.006308
F16	-	3.959493	98.899917	0.791218
F17	$4f_0$+$2f_B$	7.947992	29.181220	0.604131
F18	$7f_0$+f_B	13.882314	29.754862	0.508682
F19	$3f_0$+$2f_B$	5.964570	31.865723	0.947428
F20	-	9.930129	27.936709	0.310663
F21	$8f_0$	15.854407	19.707563	0.043656
F22	$6f_0$+f_B	11.913174	21.468115	0.864320
F23	$8f_0$+f_B	15.866729	18.087335	0.373531
F24	$7f_0$+$2f_B$	13.895969	16.622920	0.203222
F25	$9f_0$	17.835359	13.577439	0.147856
F26	f_0+$2f_B$	2.001948	19.268777	0.193990
F27	$9f_0$+f_B	17.849226	11.306532	0.129058
F28	$2f_0$+$2f_B$	3.985827	14.629187	0.664519
F29	-	15.880058	10.983600	0.039147
F30	$10f_0$	19.817368	8.758519	0.962242

Çizelge 5.6 Sadece Q5 için yapılan Frekans Analizi sonucunda elde edilen değerler

Frekans	$f[c/d]^{-1}$	Frekans Değeri	Genlik	Evre
F1	f_0	1.982393	1087.149818	0.596622
F2	$2f_0$	3.961929	10574.932902	0.175100
F3	$3f_0$	5.945989	297.094565	0.450833
F4	f_0+f_B	1.988886	200.706113	0.097189
F5	$4f_0+f_B$	7.934560	52.173016	0.854930
F6	f_B	0.007629	117.069975	0.743035
F7	$5f_0$	9.909043	88.786927	0.196144
F8	$2f_0+f_B$	3.971504	95.892437	0.198801
F9	f_0-f_B	1.968491	2027.176751	0.177798
F10	$3f_0+f_B$	5.952838	76.315691	0.186190
F11	$6f_0$	11.889754	62.499831	0.697241
F12	$4f_0$	7.927537	160.585665	0.679103
F13	$5f_0-f_B$	9.898733	34.222932	0.947756
F14	$7f_0$	13.869895	17421.412631	0.701600
F15	$3f_0-f_B$	5.933499	40.205542	0.685408
F16	$6f_0-f_B$	11.882792	32.761556	0.255082
F17	$8f_0$	15.852518	6282.754272	0.416373
F18	$4f_0-f_B$	7.916083	37.891391	0.648206
F19	-	13.869885	17403.304353	0.737880
F20	$5f_0+f_B$	9.917422	28.359842	0.423479
F21	$9f_0+f_B$	17.835833	17.087536	0.972964
F22	-	3.941855	9.801420	0.674578
F23	$2f_0-f_B$	3.961815	10119.968085	0.944241
F24	-	15.852502	6271.348772	0.800201
F25	$10f_0$	19.819192	10.036920	0.020498
F26	$6f_0+f_B$	11.899692	15.402891	0.753409
F27	$9f_0$	17.829432	11.155190	0.506366
F28	$11f_0$	21.800585	7.720815	0.857009
F29	f_0-2f_B	1.968288	1912.045668	0.906888
F30	$7f_0+f_B$	13.885612	7.844976	0.061682

Çizelge 5.7 Sadece Q6 için yapılan Frekans Analizi sonucunda elde edilen değerler

Frekans	$f[c/d]^{-1}$	Frekans Değeri	Genlik	Evre
F1	f_0	1.981523	1155.267329	0.739096
F2	$2f_0$	3.962196	535.950647	0.474887
F3	$3f_0$	5.944576	342.645316	0.655434
F4	$4f_0$	7.924303	147.662192	0.833889
F5	f_0-f_B	1.972962	107.057557	0.915199
F6	$5f_0$	9.905626	78.844396	0.488542
F7	$3f_0$+f_B	5.952205	26499.742565	0.495720
F8	f_0+f_B	1.988639	199.056315	0.834245
F9	f_B	0.009122	54.823281	0.111447
F10	$4f_0$+f_B	7.936864	56.010273	0.047403
F11	$2f_0$+f_B	3.971172	75.597754	0.490677
F12	$6f_0$+f_B	11.892122	67.146578	0.539658
F13	$5f_0$+f_B	9.917939	42.257682	0.579876
F14	$6f_0$+$2f_B$	11.896738	64.549739	0.188307
F15	$7f_0$+f_B	13.875840	22600.665594	0.995588
F16	-	13.875832	22594.545698	0.947453
F17	$2f_0$-f_B	3.951290	25.975940	0.588751
F18	$8f_0$	15.857370	12624.626161	0.237577
F19	-	5.952218	26449.149450	0.267607
F20	$4f_0$-f_B	7.902888	11.261569	0.408430
F21	-	9.890938	6320.814394	0.278999
F22	$9f_0$+f_B	17.844516	8.833456	0.238883
F23	-	15.857362	12619.167541	0.191369
F24	$6f_0$	11.880937	21.343111	0.495288
F25	$2f_0$+$2f_B$	3.982606	11.140026	0.443635
F26	$7f_0$	13.860642	11.484585	0.914364
F27	$3f_0$-f_B	5.921959	7.839745	0.772817
F28	$8f_0$-f_B	15.839969	7.280843	0.286577
F29	$5f_0$-f_B	9.890949	6320.372425	0.142000
F30	-	13.893037	5.793650	0.151949

Çizelge 5.8 Sadece Q7 için yapılan Frekans Analizi sonucunda elde edilen değerler

Frekans	$f[c/d]^{-1}$	Frekans Değeri	Genlik	Evre
F1	f_0	1.982469	944.970105	0.246404
F2	$2f_0$	3.965357	401.017520	0.140230
F3	$3f_0$	5.947880	289.765928	0.349660
F4	f_0+f_B	1.990935	178.253412	0.504662
F5	$4f_0$	7.929488	176.507072	0.228141
F6	$2f_0+f_B$	3.974921	111.119785	0.458302
F7	$3f_0+f_B$	5.958234	95.425983	0.800900
F8	$5f_0-f_B$	9.901931	34.488381	0.703211
F9	$4f_0+f_B$	7.939278	90.827512	0.041327
F10	$5f_0$	9.912379	100.925206	0.963047
F11	$6f_0-f_B$	11.887455	39.188692	0.361621
F12	f_B	0.007555	59.753586	0.021972
F13	$6f_0$	11.897481	54.109758	0.037831
F14	$7f_0$	13.871153	25.881557	0.335463
F15	f_0-f_B	1.976010	190.182523	0.734840
F16	$7f_0+f_B$	13.881598	29.950493	0.743634
F17	$4f_0-f_B$	7.920993	46.187199	0.557149
F18	$3f_0-f_B$	5.941962	99.138259	0.598095
F19	$5f_0+f_B$	9.920972	70.619370	0.241594
F20	$8f_0-f_B$	15.854938	15.703673	0.392262
F21	$8f_0$	15.864442	18.033495	0.118150
F22	$6f_0+f_B$	11.907059	36.244504	0.645658
F23	$2f_0-f_B$	3.961320	135.147086	0.110275
F24	$9f_0$	17.844048	12241.466492	0.818115
F25	$7f_0+2f_B$	13.891422	21.408671	0.688074
F26	-	17.844055	12239.638418	0.949127
F27	$10f_0$	19.819644	9.058609	0.510664
F28	$4f_0+2f_B$	7.951814	12.433534	0.379884
F29	$5f_0+2f_B$	9.934192	14.193896	0.574347
F30	$8f_0+f_B$	15.874649	13.093459	0.798773

Çizelge 5.9 Sadece Q8 için yapılan Frekans Analizi sonucunda elde edilen değerler

Frekans	$f[c/d]^{-1}$	Frekans Değeri	Genlik	Evre
F1	f_0	1.981225	1031.808323	0.398772
F2	$2f_0$	3.969665	140.448896	0.358411
F3	$3f_0$	5.943982	301.214050	0.777017
F4	$4f_0$	7.926626	233.130548	0.091047
F5	$5f_0$	9.909612	183.403643	0.464634
F6	f_0-f_B	1.972638	138.573790	0.993027
F7	$6f_0$	11.891335	117.516723	0.991059
F8	f_B	0.008984	67.455292	0.506434
F9	$2f_0$-f_B	3.962377	506.368922	0.673255
F10	-	13.873870	74.787166	0.386582
F11	$3f_0$+f_B	5.949567	134.291005	0.065574
F12	$4f_0$+f_B	7.933336	59.132748	0.789541
F13	$8f_0$	15.851474	34.857387	0.963404
F14	$5f_0$+f_B	9.912942	88.833971	0.946997
F15	$6f_0$+f_B	11.896083	46.544702	0.649216
F16	$9f_0$	17.836827	19.901801	0.580992
F17	$10f_0$	19.814275	17.418114	0.868072
F18	$7f_0$+f_B	13.879368	28.762867	0.312383
F19	f_0+f_B	1.988297	233.343560	0.062712
F20	$11f_0$	21.795658	12.501237	0.304506
F21	-	3.951860	43.137404	0.673735
F22	$5f_0$-f_B	9.896738	38.325368	0.220980
F23	$4f_0$-f_B	7.915423	37.985187	0.004577
F24	$6f_0$-f_B	11.875992	23.415715	0.051168
F25	$12f_0$	23.777678	8.648891	0.341335
F26	$8f_0$+f_B	15.861396	12.440259	0.110705
F27	$3f_0$-f_B	5.936590	43.881713	0.720070
F28	$7f_0$	13.858256	16.653451	0.578725
F29	-	23.179451	4.861046	0.742479
F30	$9f_0$-f_B	17.825531	10.527492	0.735505

Çizelge 5.10 Sadece Q9 için yapılan Frekans Analizi sonucunda elde edilen değerler

Frekans	$f[c/d]^{-1}$	Frekans Değeri	Genlik	Evre
F1	f_0	1.983793	190334.408254	0.469386
F2	$2f_0$	3.963800	548.009353	0.475875
F3	$3f_0$	5.946466	398.256568	0.529381
F4	$4f_0$	7.930751	83582.376404	0.428367
F5	-	1.983813	188787.355170	0.859872
F6	$5f_0$	9.912842	86856.518128	0.471457
F7	-	5.951862	207.142212	0.524553
F8	-	3.971065	137.360115	0.392539
F9	-	7.930762	83504.055208	0.287228
F10	-	9.912849	86830.859251	0.579583
F11	-	11.894620	51642.985938	0.987668
F12	-	*0.000059*	572500.126218	0.473747
F13	-	11.894627	51633.541262	0.078796
F14	$7f_0$	13.876124	48649.456204	0.244094
F15	-	13.876120	48650.135154	0.989497
F16	-	1.981814	879.016522	0.230891
F17	-	15.857511	2011.888661	0.492136
F18	-	5.935770	17.432318	0.440203
F19	-	15.857452	2009.600526	0.280017
F20	$9f_0$	17.838768	1499.006133	0.020018
F21	-	1.972524	44.397985	0.393334
F22	-	13.893794	11.060161	0.754756
F23	$6f_0$	11.912515	11.040081	0.438242
F24	-	17.838712	1497.235395	0.643681
F25	-	1.999283	13.783122	0.098399
F26	-	9.931164	10.178842	0.133944
F27	-	3.957225	24.478184	0.198604
F28	$8f_0$	15.875112	8.789155	0.897653
F29	-	7.916610	7.885375	0.157864
F30	$10f_0$	19.825923	7.160281	0.065964

Çizelge 5.11 Sadece Q10 için yapılan Frekans Analizi sonucunda elde edilen değerler

Frekans	$f[c/d]^{-1}$	Frekans Değeri	Genlik	Evre
F1	f_0	1.981715	1152.154655	0.135543
F2	$2f_0$	3.962968	623.369150	0.883016
F3	$3f_0+f_B$	5.943252	140183.179349	0.755910
F4	$4f_0+f_B$	7.925120	2401.525854	0.180120
F5	f_0-f_B	1.972295	115.632579	0.318904
F6	$5f_0$	9.907169	210.526817	0.552933
F7	f_B	0.006205	111.214607	0.305347
F8	$6f_0$	11.887026	32169.159733	0.232468
F9	$2f_0-f_B$	3.958362	103.955987	0.422554
F10	$3f_0$	5.943245	139859.600445	0.606411
F11	$7f_0$	13.868636	282.328430	0.075860
F12	$4f_0$	7.924877	2214.813452	0.240174
F13	$5f_0-f_B$	9.903414	119.812669	0.580220
F14	f_0+f_B	1.991690	36517.508961	0.870471
F15	$6f_0-f_B$	11.887014	32120.101871	0.365617
F16	$8f_0$	15.852597	24.812839	0.733741
F17	-	3.980263	22.762280	0.630296
F18	-	7.944575	19.640673	0.501670
F19	-	5.963991	18.933713	0.444756
F20	-	9.926190	16.358100	0.166223
F21	-	13.867826	258.110271	0.754225
F22	$9f_0$	17.835795	13.207559	0.950796
F23	$6f_0+f_B$	11.906303	13.780300	0.572251
F24	-	1.991697	36477.650124	0.989512
F25	$8f_0-f_B$	15.845361	15.759622	0.912017
F26	$3f_0-f_B$	5.932969	22.538683	0.806378
F27	$7f_0+f_B$	13.887718	10.098976	0.325491
F28	$10f_0+f_B$	19.820026	9.060608	0.593651
F29	$4f_0-f_B$	7.915454	26.727462	0.827861
F30	$9f_0-f_B$	17.826170	9.382399	0.453244

Çizelge 5.12 Sadece Q11 için yapılan Frekans Analizi sonucunda elde edilen değerler

Frekans	$f[c/d]^{-1}$	Frekans Değeri	Genlik	Evre
F1	f_0	1.981872	1004.406131	0.337955
F2	$2f_0$	3.962922	501.641336	0.441558
F3	$3f_0$	5.944349	351.751995	0.519521
F4	$4f_0$	7.925419	177.007197	0.566284
F5	$5f_0$	9.906893	107.495667	0.034094
F6	f_B	0.007064	89.168681	0.701720
F7	f_0+f_B	1.989363	80.353764	0.015939
F8	$6f_0$	11.888572	70.871921	0.074861
F9	$2f_0+f_B$	3.969488	44.873107	0.780379
F10	$7f_0$	13.869886	38.057230	0.464795
F11	$4f_0+f_B$	7.930377	53.188774	0.633490
F12	-	5.948066	59.480242	0.083057
F13	$5f_0+f_B$	9.913385	34.950478	0.384003
F14	$6f_0+f_B$	11.899829	29.811891	0.095296
F15	$7f_0+f_B$	13.881319	22.227489	0.712977
F16	f_0-f_B	1.976062	176.019352	0.940283
F17	$8f_0$	15.851482	18.975709	0.080779
F18	$8f_0+f_B$	15.863329	13.779511	0.207481
F19	$5f_0-f_B$	9.891350	12.138327	0.966591
F20	$9f_0$	17.833715	11.594329	0.045001
F21	$4f_0-f_B$	7.908140	10.328832	0.511936
F22	$3f_0+f_B$	5.955270	32.380421	0.219112
F23	$6f_0-f_B$	11.871644	10.792474	0.361769
F24	$7f_0+2f_B$	7.940545	19.056610	0.345948
F25	$10f_0$	19.815297	8.572662	0.463690
F26	-	0.019978	9.620344	0.220226
F27	$9f_0+f_B$	17.845145	7.863189	0.584150
F28	$5f_0+2f_B$	9.923065	18.125969	0.371509
F29	f_0-2f_B	1.967991	18.366937	0.604115
F30	-	3.956912	48.328865	0.315815

Çizelge 5.13 Sadece Q12 için yapılan Frekans Analizi sonucunda elde edilen değerler

Frekans	$f[c/d]^{-1}$	Frekans Değeri	Genlik	Evre
F1	f_0	1.982013	1083.770524	0.444890
F2	$2f_0$	3.964041	541.858401	0.838117
F3	$3f_0$-f_B	5.945719	341.117680	0.938641
F4	$4f_0$	7.929565	214.523148	0.614098
F5	$5f_0$	9.911165	141.895425	0.035739
F6	$6f_0$	11.893204	86.925824	0.908262
F7	f_0-f_B	1.973215	72.674691	0.128383
F8	$3f_0$	5.955868	95.233388	0.833543
F9	$4f_0$+f_B	7.942369	46.166084	0.902665
F10	$2f_0$+f_B	3.974979	82.808034	0.597151
F11	$7f_0$	13.875508	48.956466	0.940529
F12	$5f_0$+f_B	9.924477	42.566469	0.936337
F13	f_B	0.009305	30.477412	0.182149
F14	$6f_0$+f_B	11.907072	32.390286	0.692131
F15	f_0+f_B	1.992185	102.291627	0.012295
F16	$8f_0$	15.856953	27.438704	0.007197
F17	$7f_0$+f_B	13.889746	23.681971	0.034741
F18	$2f_0$-f_B	3.954945	31.848226	0.396991
F19	$9f_0$	17.837381	18.033974	0.970978
F20	$8f_0$+f_B	15.870946	18.548055	0.869855
F21	$5f_0$-f_B	9.898133	21.323754	0.632493
F22	$6f_0$-f_B	11.878804	16.408937	0.101871
F23	$9f_0$+f_B	17.852553	13.800549	0.916214
F24	$10f_0$	19.818362	11.939046	0.049593
F25	$10f_0$+f_B	19.835410	9.504681	0.938871
F26	$7f_0$-f_B	13.860186	9.984889	0.744875
F27	$4f_0$-f_B	7.920863	39.249557	0.751165
F28	$11f_0$	21.801508	6.743260	0.931230
F29	$11f_0$+f_B	21.819175	6.319469	0.201783
F30	$3f_0$+f_B	5.969977	8.617882	0.144485

Çizelge 5.14 Sadece Q13 için yapılan Frekans Analizi sonucunda elde edilen değerler

Frekans	$f[c/d]^{-1}$	Frekans Değeri	Genlik	Evre
F1	f_0	1.981061	1180.452933	0.773589
F2	$2f_0$	3.962761	617.853483	0.572777
F3	$3f_0$	5.945506	401.721358	0.771578
F4	$4f_0$	7.927386	210.267357	0.486584
F5	$5f_0$	9.908668	118.224205	0.722400
F6	-	1.990854	100.023015	0.400086
F7	-	11.890656	71.688587	0.414458
F8	-	3.966109	121.936737	0.490068
F9	-	5.937817	105.328815	0.985115
F10	-	13.875612	1579.589728	0.684232
F11	-	7.920126	105.393783	0.667964
F12	-	9.901116	75.602642	0.279967
F13	-	15.856983	1467.681034	0.932997
F14	f_s	0.012467	26.415509	0.885654
F15	-	1.975193	140.252601	0.121248
F16	$6f_0$	11.882869	51.929785	0.167199
F17	-	5.950232	135.328495	0.348725
F18	-	7.932941	81.590495	0.598759
F19	-	17.830396	24.561726	0.251536
F20	-	9.915375	49.852281	0.245295
F21	$7f_0$	13.863644	33.587676	0.766864
F22	$10f_0$	19.810634	35.123620	0.028041
F23	$8f_0$	15.843634	22.188022	0.473082
F24	-	11.897140	35.229414	0.409302
F25	$9f_0$	17.825970	22.110934	0.759566
F26	-	19.808544	32.822738	0.613338
F27	-	13.875736	1562.340984	0.233476
F28	$11f_0$	21.794478	8.723896	0.760242
F29	-	15.857075	1457.276952	0.305274
F30	-	3.974803	24.664461	0.015815

Çizelge 5.15 Sadece Q14 için yapılan Frekans Analizi sonucunda elde edilen değerler

Frekans	$f[c/d]^{-1}$	Frekans Değeri	Genlik	Evre
F1	f_0	1.981648	1130.500320	0.831678
F2	$2f_0$	3.962670	775.588666	0.712513
F3	$3f_0$	5.945389	351.247849	0.310344
F4	$4f_0$	7.925066	5117.830487	0.742885
F5	-	1.990202	149.481537	0.840166
F6	-	5.954398	123.561306	0.702998
F7	-	3.972390	106.501366	0.168789
F8	$5f_0$	9.910796	132.536708	0.269651
F9	-	7.936086	102.315979	0.218007
F10	-	9.917455	100.874250	0.681163
F11	$6f_0$	11.892432	79.495865	0.667220
F12	-	11.899257	71.824560	0.795519
F13	-	0.010181	42.807365	0.813280
F14	-	1.974568	110.140174	0.089792
F15	-	13.882113	41.684178	0.700048
F16	$7f_0$	13.873256	38.715102	0.690467
F17	-	15.865621	26.617058	0.943723
F18	-	5.937277	40.448848	0.345180
F19	$8f_0$	15.854631	16.250256	0.791482
F20	-	17.852118	11252.822486	0.381243
F21	-	13.892051	15.800128	0.862496
F22	-	11.911783	13.824558	0.591501
F23	$9f_0$	17.852125	11249.319913	0.441260
F24	-	15.873242	16.449147	0.349679
F25	-	9.932566	11.853508	0.370644
F26	-	3.960575	258.298835	0.894066
F27	-	7.924956	4939.994792	0.422574
F28	-	7.947593	11.697847	0.265811
F29	$10f_0$	19.834537	5312.989442	0.794818
F30	-	19.834548	5312.554731	0.656971

Çizelge 5.16 Sadece Q15 için yapılan Frekans Analizi sonucunda elde edilen değerler

Frekans	$f[c/d]^{-1}$	Frekans Değeri	Genlik	Evre
F1	f_0+f_B	1.988084	175.791021	0.901554
F2	$2f_0+f_B$	3.967011	179.275781	0.630718
F3	$3f_0$	5.947446	272.174848	0.594092
F4	$4f_0+f_B$	7.929050	197.814766	0.807760
F5	f_0	1.981338	1065.930759	0.283539
F6	$5f_0+f_B$	9.910781	133.711414	0.867932
F7	$6f_0+f_B$	11.892495	85.380439	0.887281
F8	-	5.942640	176.454095	0.824168
F9	$4f_0$	7.923286	103.498488	0.888147
F10	$2f_0$	3.962340	455.094355	0.308240
F11	f_B	0.008231	70.424878	0.333916
F12	$5f_0$	9.903911	75.511008	0.143754
F13	$7f_0+f_B$	13.873994	55.273884	0.010234
F14	$6f_0$	11.885550	55.414885	0.374068
F15	f_0-f_B	1.971635	120.727259	0.941563
F16	$8f_0$	15.853911	37.242326	0.045044
F17	$7f_0$	13.866960	34.737417	0.454332
F18	-	3.949547	41.311439	0.782953
F19	$8f_0-f_B$	15.845821	23.929504	0.872468
F20	$9f_0$	17.834759	24.103491	0.740550
F21	$3f_0-f_B$	5.932288	47.233038	0.961963
F22	$4f_0-f_B$	7.913305	41.890461	0.167907
F23	$5f_0-f_B$	9.893989	30.503673	0.064355
F24	$9f_0-f_B$	17.826503	17.910110	0.900598
F25	$10f_0$	19.816338	17.052954	0.369174
F26	$6f_0-f_B$	11.875068	25.293699	0.815839
F27	$10f_0-f_B$	19.807431	14.062796	0.123199
F28	$11f_0+f_B$	21.798038	12.252700	0.156692
F29	$7f_0-f_B$	13.856405	18.597421	0.051451
F30	$11f_0$	21.788863	10.346781	0.004125

Çizelge 5.17 Sadece Q16 için yapılan Frekans Analizi sonucunda elde edilen değerler

Frekans	$f[c/d]^{-1}$	Frekans Değeri	Genlik	Evre
F1	f_0	1.981902	1070.383760	0.530536
F2	$2f_0$	3.963340	547.522552	0.093860
F3	$3f_0$	5.943932	337.299638	0.358122
F4	-	0.004301	511.708483	0.661189
F5	$4f_0$	7.925632	210.275878	0.147025
F6	$5f_0$	9.907331	128.069780	0.976848
F7	-	1.974708	204.204331	0.026038
F8	-	11.889102	80.325750	0.765916
F9	-	3.971526	89.468088	0.626226
F10	-	5.951596	122.264008	0.299246
F11	-	13.871417	52.198560	0.921486
F12	-	7.934777	84.502343	0.674102
F13	-	9.916732	66.932268	0.067229
F14	-	15.853743	30.877119	0.422118
F15	$6f_0$	11.898228	49.730046	0.401391
F16	-	1.989342	135.107732	0.170602
F17	-	3.954841	73.921180	0.155560
F18	$7f_0$	13.881348	31.630185	0.154756
F19	$9f_0$	17.836237	17.831745	0.483554
F20	$8f_0$	15.864817	18.928497	0.296316
F21	$10f_0$	19.816012	11.670922	0.693547
F22	-	7.945914	11.905216	0.877433
F23	-	9.929812	10.225415	0.841953
F24	-	5.961040	16.409422	0.934406
F25	$11f_0$	21.800662	8.961579	0.273721
F26	-	11.910462	10.187600	0.815407
F27	-	17.848783	11.203266	0.405914
F28	-	13.893252	8.047179	0.156975
F29	-	19.829776	8.765084	0.006381
F30	-	15.877213	6.354891	0.537586

Çizelge 5.18 Sadece Q17 için yapılan Frekans Analizi sonucunda elde edilen değerler

Frekans	$f[c/d]^{-1}$	Frekans Değeri	Genlik	Evre
F1	f_0	1.983724	285469.314310	0.563090
F2	$2f_0$	3.965416	97618.264040	0.922875
F3	$3f_0$	5.949178	49299.753544	0.424023
F4	$4f_0$	7.931685	26485.568447	0.654913
F5	$5f_0$	9.909857	30785.419885	0.434951
F6	-	1.983736	285305.764927	0.371950
F7	f_s	0.012709	56.505825	0.652556
F8	$6f_0$	11.877126	456.455372	0.381691
F9	-	3.965434	97179.077758	0.387925
F10	-	5.949208	49076.060595	0.216726
F11	-	7.931726	26379.873834	0.863648
F12	$7f_0$	13.866175	19.758741	0.593590
F13	-	9.909881	30731.022006	0.553587
F14	$8f_0$	15.849105	11.546219	0.951872
F15	-	1.987800	480.089086	0.471421
F16	$9f_0$	17.827814	6.291472	0.435866
F17	-	11.876534	423.557718	0.315205
F18	-	9.882875	9.338009	0.029984
F19	f_2	*3.358587*	5.351695	0.813487
F20	-	5.912506	5.433577	0.791342
F21	-	5.331172	4.722231	0.801418
F22	-	9.935890	8.588238	0.879787
F23	$11f_0$	21.786138	4.400682	0.154484
F24	$10f_0$	19.849096	4.416897	0.604865
F25	-	1.365174	4.335051	0.142312
F26	-	11.305201	18.414212	0.472737
F27	-	3.948843	14.015969	0.512688
F28	-	13.261492	4.193445	0.530887
F29	-	12.825794	4.109647	0.366775
F30	-	11.311276	18.297685	0.342379

İncelenen her sezonun verisi kendi içerisinde ve Q1-Q17 toplu frekans analizi ile genel olarak uyum göstermektedir. Her sezon verisinde tek tek f_B **(Blazhko frekansı),** f_2 **(second radial overtone yani ikinci üst ton),** f_s **(secondary modulation frequency yani ikinci modülasyon frekansı)** bulunamamıştır. Q1-Q17 toplu frekans analizinde f_s elde edilememiş; Q11, Q13, Q14 ve Q17'nin sonuçlarında görülmektedir. Çizelge 5.19'da f_0 (main pulsation frequency yani başlıca zonklama frekansı), f_B (Blazhko frekansı), f_2 (second radial overtone yani ikinci üst ton), f_s (secondary modulation frequency yani ikinci modülasyon frekansı) hangi sezon verilerinin analizinde bulunduğunu ve değerleri göstermektedir

Çizelge 5.19 f_0, f_B, f_2, ve f_s frekanslarının görüldüğü sezonlar ve değerleri

Quarter (Sezon Sayısı)	Quarter (Gün Sayısı)	f_0	f_B	f_2	f_s
Q1	33	1.9828371	0.008356	-	-
Q2	89	1.9820432	0.009348	-	-
Q3	89	1.982086	0.009263	-	-
Q4	90	1.981979	0.007021	-	-
Q5	95	1.982393	0.007629	-	-
Q6	90	1.981523	0.009122	-	-
Q7	72	1.982469	0.007555	-	-
Q8	54	1.981225	0.008984	-	-
Q9	97	1.983793	-	-	-
Q10	94	1.981715	0.006205	-	-
Q11	97	1.981872	0.007064	-	-
Q12	83	1.982013	0.009305	-	-
Q13	91	1.981061	-	-	0.012467
Q14	97	1.981648	-	-	-
Q15	98	1.981338	0.008231	-	-
Q16	85	1.981902	-	-	-
Q17	32	1.983724	-	3.358587	0.012709
Q1-Q17	*1386*	*1.981688*	*0.008114*	-	-

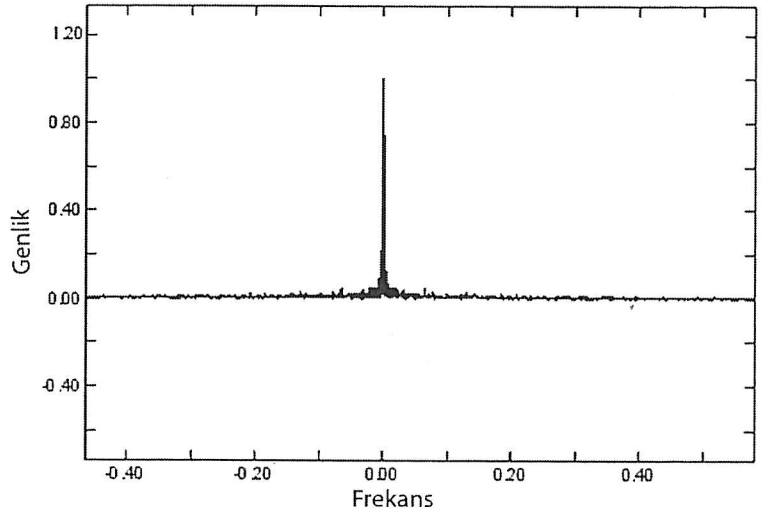
Bu çalışmada elde edilen f_0, f_B, f_2, ve f_s frekansları (1/gün) çizelge 3.4'te verilmiş olan (Benkő vd. 2014) **P_0 (gün), P_B (gün) ve P_s (gün)** ile uyumlu olduğu görülmektedir.

5.3 Kısa Poz Süresi İle Elde Edilen Verilerin Frekans Analizi

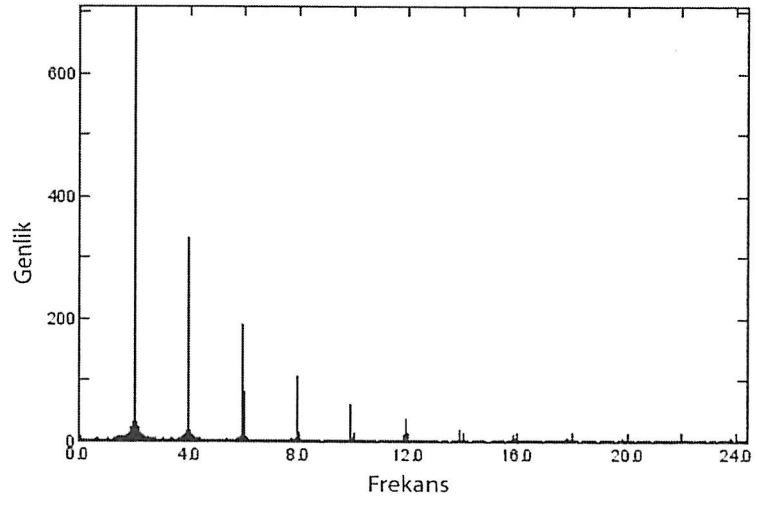
Ocak 2014-Temmuz 2014 Döneminde bir dakikalık poz süresi ile alınmış olan **Short-cadence (kısa poz süreli)** olan **7. sezon**da bulunan **7.1, 7.2** ve **7.3 alt sezonlar** daha önce kullandığımız yöntem yardımıyla birleştirildi (bkz Şekil 4.20 ve 4.21). **Short-cadence (kısa poz süreli) 7. sezonda** toplam **127506** nokta birleştirilmiştir.

Analizlerde denetleme parametresi olarak yine sinyal/gürültü (S/N) değerleri ~3.5'in altına düşen değerler dikkate alınmadı. Bu analiz sonucunda elde edilen frekanslar, tayfsal pencere, peryodogramlar kontrol edilerek teorik ışık eğrileri kısa poz süreli veriler için de oluşturuldu. Yeniden ölçeklendirilmiş verilerin frekans analizinde Nyquist Frekansını PERIOD04'ün önerdiği 680.397 olarak orijinal veriler ve orijinal verilerin artıkları üzerinden yapıldı. Frekans analizi sonucunda elde edilen tayfsal pencere şekil 5.8'de verilmektedir. Şekil 5.9'de güç tayfı gösterilmektedir. Analiz

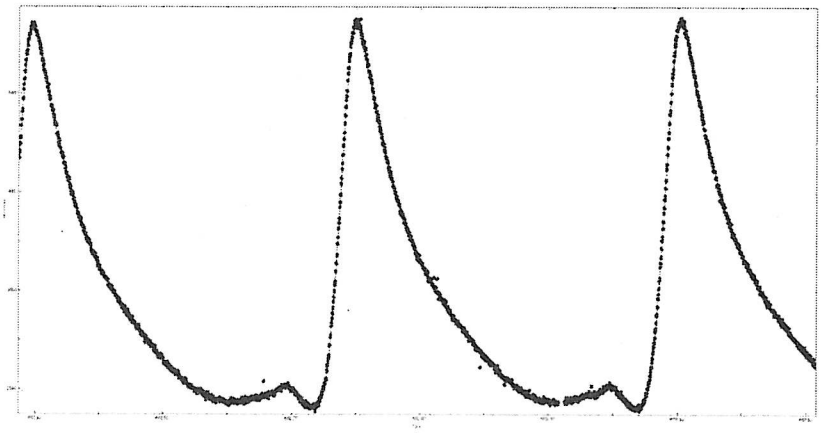
sonucunda elde edilen gözlemsel ve kuramsal ışık eğrileri fiti şekil 5.10'da görülmektedir. Şekil 5.11 ve 5.12'de Gözlemsel ışık eğrilerinde görülen hump yapısının kuramsal ışık eğrisine fiti gösterilmektedir. Elde edilen frekanslara ait priyodogramlar uzun poz süreli verilere yapılan analiz sonuçlarındaki periyodogramlarla uyumludur.



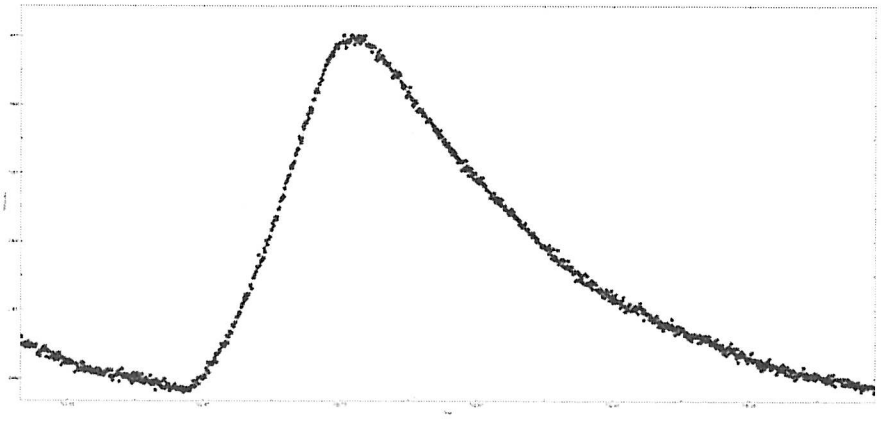
Şekil 5.8 Kısa poz süreli verilerin frekans analizi sonucunda elde edilen tayfsal pencere



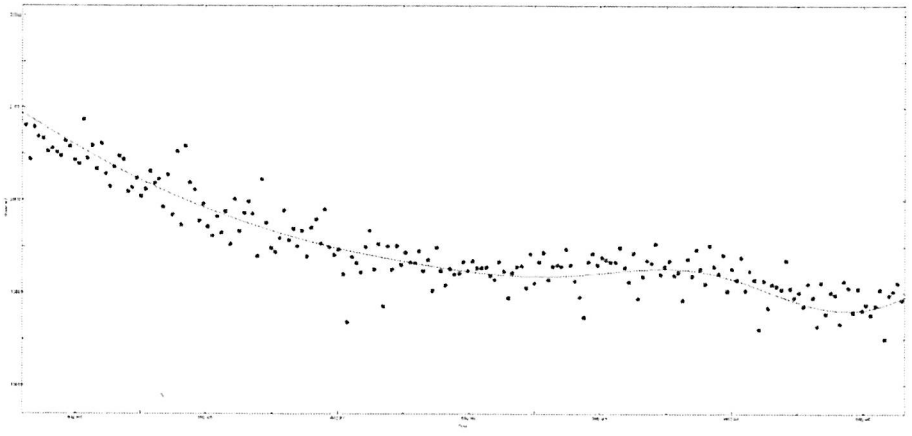
Şekil 5.9 Kısa poz süreli verilerin frekans analizi sonucunda elde edilen güç tayfı



Şekil 5.10 V450 Lyr yıldızının belirli bir aralıktaki gözlemsel ve kuramsal ışık eğrileri



Şekil 5.11 Gözlemsel ve kuramsal ışık eğrilerinin daha detaylı incelenmesi



Şekil 5.12 Gözlemsel ışık eğrilerinde görülen hump yapısının kuramsal eğriye fit edilmesi

7. sezonun frekans analizinde 100 frekansa kadar gidildi. Bu frekanslar arasından anlamlı olanlar (54 adet) frekans parametreleriyle çizelge 5.20'deki gibi eşleştirildi. Analiz sonucunda elde edilen bulgulara göre hem f_0 zonklama frekansı, Blazhko frekansı f_B bulunmuş, temel frekansın sağ ve sol pikleri hesap edilmiştir ve böylece temel frekans etrafında kf_0 harmonikleri bulunmuştur. Ayrıca Blazhko dönemine eşlik eden ikinci bir modülasyon frekansı da elde edilmiştir. Bu ikinci modülasyon frekansı fs elde edilmiştir. Şekil 5.15'ten görüleceği üzere f_2 **(c/d)= 3.325771** değeri P_2 **(gün)** ikinci üst ton'nun dönemine karşılık gelmektedir. Klasik RRd yıldızlarında daha önceki bölümde belirttiğimiz gibi frekanslar veya dönemler oranı (P_1/P_2), f_0/f_1 =0.74-0.75 arası olması gerekmektedir (Soszynski vd. 2011). Fakat klasik olmayan RRd yıldızlarında bu oran takribi f_0 / f_2 = 0.597-0.592 arası değişmektedir. Bir çok RRd yıldızında birinci üst ton mod zonklama genliği temel mod zonklama yani başlıca zonklama frekansın genliğinden daha büyüktür (Hurdis, 2009). Klasik olmayan Bir RRd yıldız adayı V450 Lyr yıldızı, bilinen klasik diğer RRd yıldızlarına nazaran temel zonklama frekans (f_0) genliği daha büyüktür. Kısa poz süreli alt sezon verilerinden elde edilen sonuçlardan bulduğumuz (V450 Lyr için) f_0 / f_2 oranı = 0.59587 çıkmaktadır. Bu değer beklenilen olası değerler aralığında olup Benko vd. 2014 sonuçları ile son derece uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Kısa poz süreli sezon verilerine yapılan analizde de V450 Lyr yıldızında **Period Doubling (PD)** ve bunun belirteci olan **HIF (Half Integer Frequency)**'e ait herhangi bir işaret bulunmamıştır. Kısa poz süreli verilere yapılan analizde zonklama frekansı f_0 değerimiz **1.982162** olup $P_0=1/f_0$**'dan** P_0**=0.504499'**dur. Uzun poz süreli (P_0**=0.5046)** ve kısa poz süreli (P_0**=0.5045)** verilerden elde edilen birincil zonklama dönemleri (P_0) 0.0001 kadar sapma göstermektedir.

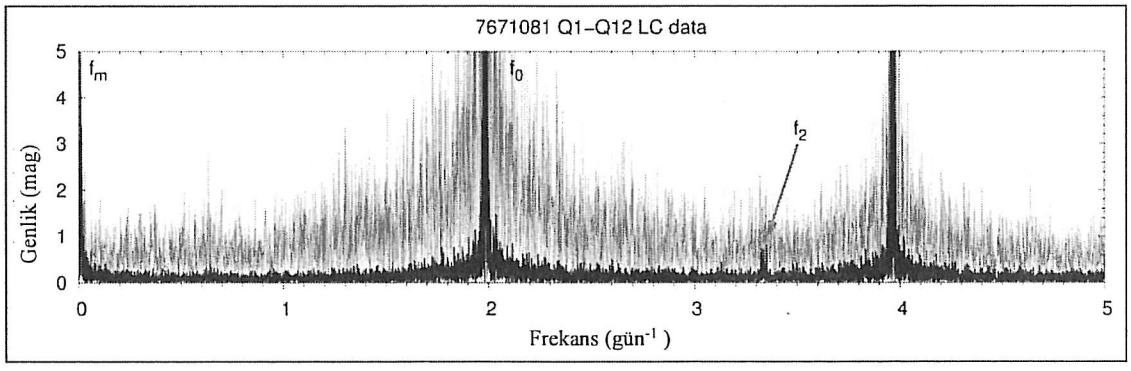
Şekil 5.13 - 5.14'de Dr. Molnár tarafından yapılan ön analiz sonuçları ile bu çalışmada yapılan frekans analizi sonucunda elde edilen şekil 5.15'deki f_2 frekansının karşılaştırılması gösterilmektedir. Görüntüler karşılaştırıldığında frekansların konumları birbirleriyle uyumlu olduğu açıkça görülmektedir.

Çizelge 5.20 Frekans Analizi sonucunda elde edilen bulgular (Zeropoint = 2639.394)

Frekans	f[c/d]$^{-1}$	Frekans	Genlik	Evre	Frekans Hata	Genlik Hata	Evre Hata
F1	f_0	1.982162	1011.316	0.19342	0.00000498	3.020249	0.000764
F2	$2f_0$	3.965797	339.5879	0.292569	0.00080036	8.970151	0.025568
F3	$3f_0$	5.947557	304.6762	0.628782	0.00022478	9.052309	0.007495
F4	$4f_0$	7.930228	185.2635	0.37438	0.00118015	5.052512	0.013225
F5	$5f_0$	9.905323	63.7757	0.062792	0.00086325	8.479445	0.02097
F6	$6f_0$	11.89768	61.02941	0.474695	0.00062954	1.432362	0.018499
F7	$7f_0$	13.87130	30.84744	0.157635	0.00246670	6.593845	0.186871
F8	$8f_0$	15.84244	2.988478	0.493108	0.00703906	1.06483	0.311657
F9	$9f_0$	17.84384	14254.13	0.660765	0.00000120	2.840623	0.000029
F10	$10f_0$	19.81880	12.69515	0.610652	0.01262000	5.100279	0.272762
F11	$11f_0$	21.80097	9.434233	0.709714	0.00380200	1.713171	0.043076
F12	$12f_0$	23.78491	5.935552	0.628299	0.01557200	2.319734	0.14063
F13	$13f_0$	25.77836	1.724482	0.319862	0.00598600	1.168453	0.206514
F14	$14f_0$	27.75168	2.682896	0.128284	0.00778800	1.782526	0.229576
F15	$15f_0$	29.72835	2.122717	0.821895	0.00391100	1.154288	0.181276
F16	$16f_0$	31.70837	1.559676	0.333798	0.00533600	1.111435	0.25343
F17	f_0-f_B	1.974843	137.2826	0.084387	0.00031101	3.535555	0.002803
F18	f_0+f_B	1.990657	189.7174	0.638263	0.00035903	8.700769	0.008324
F19	$2f_0$+f_B	3.975216	107.0636	0.107478	0.00062508	2.221315	0.02996
F20	$2f_0$-f_B	3.962241	213.7582	0.595999	0.00008683	6.624330	0.32786
F21	$3f_0$+f_B	5.957557	107.6195	0.071896	0.00036822	5.297588	0.004547
F22	$3f_0$-f_B	5.941121	81.09577	0.751547	0.00068343	10.84970	0.018692
F23	$4f_0$+f_B	7.940585	84.53086	0.593665	0.01233945	4.552051	0.285378
F24	$4f_0$-f_B	7.922469	64.65002	0.39627	0.00046167	3.444121	0.006463
F25	$5f_0$+f_B	9.914264	102.7233	0.224177	0.00066891	7.810047	0.009191
F26	$5f_0$- f_B	9.896211	3.219818	0.88137	0.02279309	5.499867	0.28194
F27	$6f_0$+f_B	11.90701	41.33855	0.431251	0.00331777	1.700618	0.394014
F28	$6f_0$-f_B	11.88758	45.70575	0.104552	0.00125534	2.274223	0.014174
F29	$7f_0$+f_B	13.88199	34.96165	0.150008	0.00551369	5.829739	0.133784
F30	$7f_0$-f_B	13.85458	4.220624	0.450613	0.00905807	5.132543	0.263281
F31	$8f_0$+f_B	15.85493	18.85222	0.211207	0.00433912	1.565811	0.045647
F32	$9f_0$+ f_B	17.86049	8.509985	0.068764	0.01227445	5.203130	0.265273
F33	$9f_0$-f_B	17.82694	6.954732	0.990365	0.00558632	2.233968	0.201374
F34	$10f_0$+f_B	19.83996	6.643832	0.938037	0.00416412	1.786086	0.124689
F35	$10f_0$-f_B	19.80585	4.614586	0.258602	0.00705187	3.101882	0.208272
F36	$11f_0$+ f_B	21.81048	4.816347	0.567219	0.00571198	3.926793	0.284464
F37	$11f_0$- f_B	21.78811	3.278479	0.329097	0.00622639	1.358537	0.24959
F38	$12f_0$+f_B	23.80617	1.789236	0.852659	0.02395122	6.228124	0.297751
F39	$12f_0$-f_B	23.77205	1.850814	0.273578	0.03419545	3.546795	0.257055
F40	$14f_0$+ f_B	27.76230	1.620992	0.178654	0.01221071	2.019874	0.338126

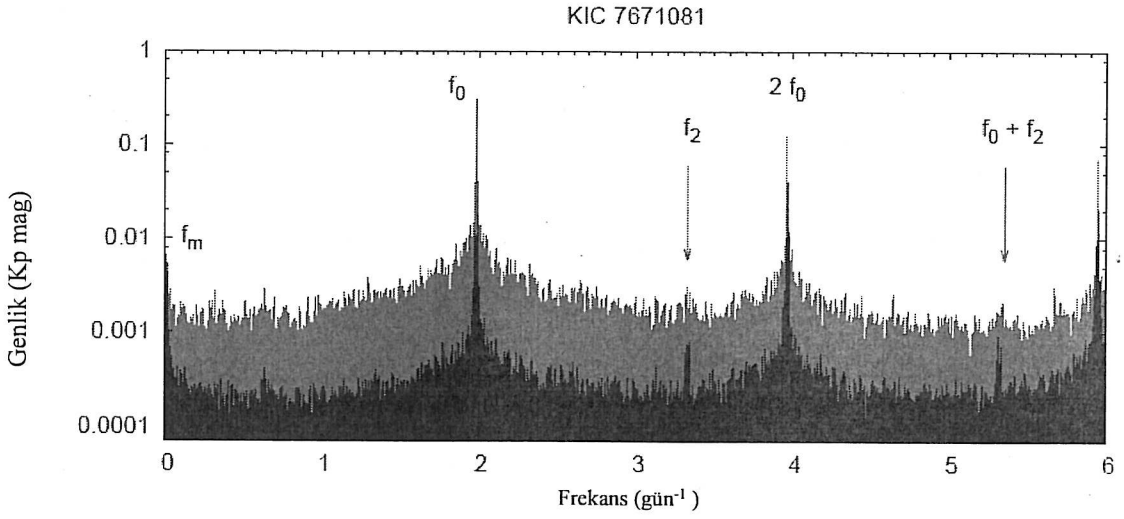
Çizelge 5.20 Frekans Analizi sonucunda elde edilen bulgular (Zeropoint = 2639.394) (devam)

Frekans	f[c/d]$^{-1}$	Frekans Değeri	Genlik	Evre	Frekans Değeri Hata	Genlik Değeri Hata	Evre Değeri Hata
F41	fB	0.007586	62.52508	0.227445	0.0003387	5.756836	0.391287
F42	f_2	3.325771	5.173862	0.262842	0.001691	1.044832	0.217425
F43	$2f_0$-$2f_B$	3.942152	8.419811	0.218212	0.005382	9.679174	0.300228
F44	$3f_0$+$2f_B$	5.972021	8.153708	0.493152	0.002825	1.604409	0.097693
F45	$3f_0$-$2f_B$	5.923296	6.573196	0.994157	0.002527	1.593658	0.039491
F46	$4f_0$+$2f_B$	7.954779	9.43935	0.218913	0.003117	1.468974	0.122147
F47	$4f_0$-$2f_B$	7.90388	6.042714	0.998548	0.008821	1.377385	0.174653
F48	$5f_0$+$2f_B$	9.924037	57.53776	0.857299	0.004132	8.107800	0.131056
F49	$7f_0$+$2f_B$	13.89151	25.55542	0.995472	0.00235	6.088882	0.068058
F50	$8f_0$+$2f_B$	15.87525	16.54061	0.046275	0.007706	0.914206	0.045558
F51	$9f_0$+ $2f_B$	17.86051	8.509985	0.068764	0.012285	5.203190	0.265282
F52	$10f_0$+ $2f_B$	19.85171	3.733972	0.262955	0.005773	1.603461	0.189725
F53	$11f_0$+$2f_B$	21.82279	3.65233	0.577039	0.011052	3.845494	0.290259
F54	$f2$+$2f_B$	3.347026	2.268653	0.580975	0.003739	0.981553	0.274948

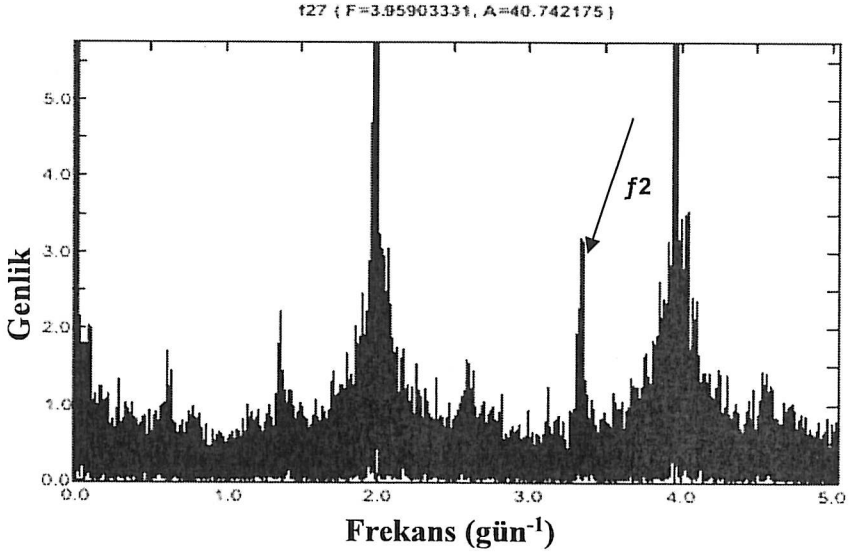


Şekil 5.13 Fourier spektrumunda temel moda (f_0) ek olarak sadece tek bir ek mod (f_2) görülmesi

1 ve 3 c/d deki frekanların buçuklu katları görülmemektedir. V450 Lyr temel modu ve ikinci üst ton'u gösteren, klasik olmayan bir "double-modlu" RR Lyr adayıdır. Bizim tarafımızdan yapılan analiz sonuçlarında elde edilen sonuçlar bu ihtimali daha da güçlendirmektedir.



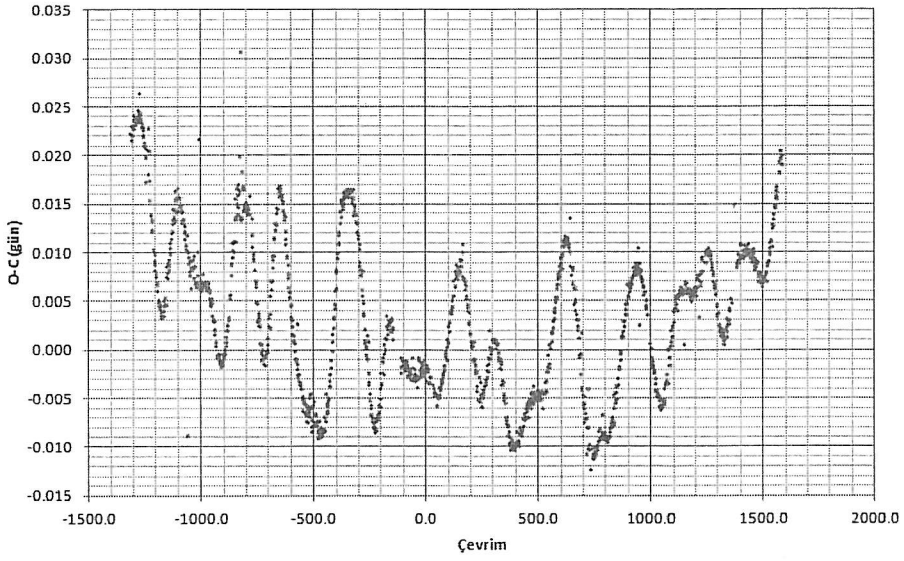
Şekil 5.14 Dr. Molnár'ın doktora tezinde V450 Lyr yıldızında ikinci üst tona karşılık gelen f_2 frekansı görüntüsü



Şekil 5.15 Bu çalışmadaki frekans analizi sonucunda elde edilen f_2 frekansı görüntüsü

6. V450 LYR YILDIZININ DÖNEM DEĞİŞİM KARAKTERİSTİĞİ (O-C ANALİZİ)

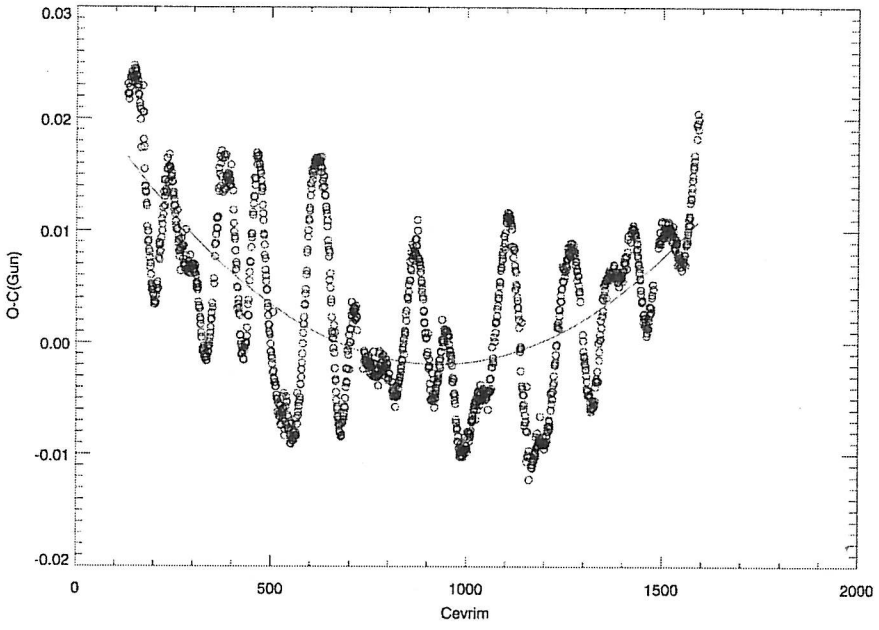
Bu çalışmada V450 Lyr yıldızının uzun poz süreli verileri kullanılarak maksimum zamanları hesaplandı ve yıldızın dönem değişimi grafiği elde edildi. İlgili grafik şekil 6.1'de verildi.



Şekil 6.1 V450 Lyr yıldızının Kepler Long – Cadence verileri kullanılarak elde edilen O – C eğrisi

Şekil 6.1'den de görüleceği gibi V450 Lyr yıldızının dönem değişim karakteristiği birbiri üzerine binmiş çevrimsel yapılara ek olarak parabolik bir dönem değişim karakteristiği içeriyor gibi görünmektedir. Ancak özelikle parabolik olarak görülen dönem değişiminin, üçüncü bir uzun dönemli başk çevrimsel yapı olup olmadığı, veya kaotik bir modülasyon olup olmadığı mevcut verilerin kapsadığı zaman aralığı bakımından belirsizdir.

Çalışma kapsamında, V450 Lyr yıldızının dönem değişimi karakteristiğini belirlemek için, Dr. Katrien Kolenberg'in de tavsiyesi üzerine (özel görüşme) O – C verilerine frekans analizi yapılmıştır. İlk aşamada gerçekleştirilen frekans analizi sonucu elde edilen frekanslar ve O – C modeli sırasıyla şekil 6.2 ve çizelge 6.1'de verilmektedir.

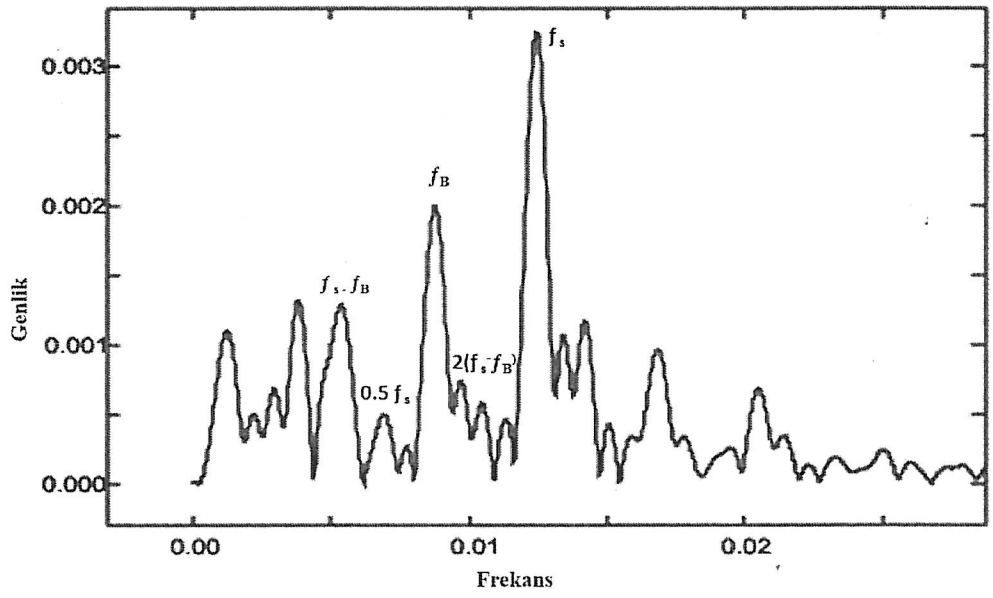


Şekil 6.2 V450 Lyr yıldızının O – C eğrisine gerçekleştirilen frekans analizi sonucu elde edilen model

Çizelge 6.1 V450 Lyr yıldızının O – C eğrisine gerçekleştirilen frekans analizi sonucu hataları ile birlikte elde edilen frekanslar, genlik ve evre

f[c/d]$^{-1}$	Frekans	Gün	Genlik	Evre	Frekans Hata	Genlik Hata	Evre Hata
f_B	0.00795	125.77920	0.00443	0.36075	0.000582951	0.297258480	0.101160094
f_S	0.01250	80.002370	0.00267	0.44411	0.022956832	0.084010657	0.440734489

0.01250 [c/d]$^{-1}$ ve 0.00795 [c/d]$^{-1}$ olarak elde edilen sırasıyla f_S ikinci modülasyon frekansı ve f_B Blazhko frekansı hem uzun hem de kısa poz süreli verilere yapılan frekans analizi sonucunda elde edilen değerler ile uyum içerisindedir.



Şekil 6.3 V450 Lyr yıldızının O-C diyagramının Fourier tayfının yakınlaştırılmış hali

Şekil 6.3 üzerinde yıldızın dönem değişimi için O-C diyagramında PERIOD04 analizi sonucunda elde edilen frekans priyodogramında sırasıyla f_s ikinci modülasyon frekansı ve f_B Blazhko frekansı ve multipletleri ve harmonikleri gösterilmektedir. Böylece f_s (ikinci modülasyonun frekansı) veya onun kombinasyonu olan $f_s/2$ gerçek ikinci modülasyon frekansı olduğu kesinleşmiştir.

7. TARTIŞMA ve SONUÇ

Kepler teleskobunun uzun poz süreli (29.4 dakika) ve kısa poz süreli (1 dakika) olmak üzere 2 tür gözlem verisi mevcuttur. Buna dayanarak gözlemlerdeki aletsel bir takım olaylardan meydana gelen verilerdeki uyumsuzluklar bu çalışmada yazılan kod sayesinde giderilmiş ve veriler üzerinde detaylı frekans analizi ve dönem analizi yapılmıştır.

uzun poz süreli (Long-cadence) 17. sezonu da dahil olmak üzere toplam **64839** nokta içermektedir. Bir dakikalık poz süresi ile alınmış olan **kısa poz süreli (Short-cadence, SC)** olan **7. sezon 7.1, 7.2** ve **7.3 olmak üzere 3 adet alt-sezon** ve toplamda **127506** nokta bulunmaktadır.

Toplam, Q1'den Q17'yi de dahil sezonları içeren frekans analizi sonucunda elde edilen bulgulara göre f_0 temel frekansı, kf_0 harmonikleri, Blazhko Frekansı f_B bulundu. Blazhko Dönemini $\mathbf{P_B}$ **(gün)** 123.2505 gün olarak hesaplandı ve bu değerin literatür ile uyumlu olduğu görüldü. Ancak bu uzun poz süreli veriler toplu olarak analiz edildiğinde 50 frekansa kadar gidildi fakat ikinci üst ton (second overtone)'a karşılık gelen f_2 **(c/d)** değerini ve bu bağlamda $\mathbf{P_2}$ **(gün)** ikinci üst ton'un dönemi bulunamadı. f_0 frekansına karşılık gelen değerimiz 1,981688035(c/d) olup $\mathbf{P_0=1/f_0}$**'dan** $\mathbf{P_0}$ **0.50462 gündür.** Bulunan sonuçların Benkő vd. (2014)'ün elde ettiği değerler ile uyumlu olduğu görüldü. f_2 **(c/d)** değerini kısa poz süreli verilerde modülasyonun yüksek genlikli evresinde daha belirgin olduğu için bu değeri bulabilmek üzere kısa poz süreli veriler üzerinden analiz yapılmasına karar verildi ve 7.1, 7.2 ve 7.3 alt sezonlarının frekans analizinde 100 frekansa kadar gidildi. Bu frekanslar arasından anlamlı olanlar (54 adet) frekans parametreleriyle eşleştirildi. Analiz sonucunda elde edilen bulgulara göre hem f_0 zonklama frekansı, hem de Blazhko frekansı f_B bulunmuş, temel frekansın sağ ve sol pikleri hesap edilmiştir ve böylece temel frekans etrafında kf_0 harmonikleri bulunmuştur. İkinci üst ton frekansı f_2 **(c/d)= 3.325771** değeri $\mathbf{P_2}$ **(gün)** ikinci üst ton'nun dönemine karşılık gelmektedir. Birçok RRd yıldızında birinci üst tondaki zonklama genliği, temel mod zonklama yani başlıca zonklama frekansındaki genlikten daha büyüktür (Hurdis 2009). Klasik olmayan bir RRd yıldız adayı olan V450 Lyr

yıldızı, bilinen klasik diğer RRd yıldızlarıyla karşılaştırıldığında temel zonklama frekansındaki (f_0) genliğinin daha büyük olduğu görülmüştür. Klasik RRd yıldızlarında f_0 / f_1 oranın 0.74-0.75 arasında olması beklenmektedir (Soszynski vd. 2011). Fakat klasik olmayan RRd yıldızlarında bu oran f_0 / f_2 = 0.597-0.592 arasında değişmektedir. Kısa poz süreli alt sezon verilerinden elde edilen sonuçlardan bulduğumuz (V450 Lyr için) f_0 / f_2 oranı = 0.59587 çıkmaktadır. Bu değer beklenilen olası değerler aralığında olup Benko vd. (2014) sonuçları ile son derece uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Kısa poz süreli verilere yapılan analizde zonklama frekansı (f_0) değerimiz **1.9821 (c/d)** olup **$P_0=1/f_0$'dan P_0=0.5045 gündür**. Uzun poz süreli (**P_0=0.5046 gün)** ve kısa poz süreli (**P_0=0.5045 gün)** verilerden elde edilen birincil zonklama dönemleri arasında (P_0) 0.0001gün kadar bir fark gözlenmiştir. Ayrıca kısa poz süreli verilere yapılan analiz sonucunda Blazhko frekansı (f_B) değeri **0.007586** olarak bulundu ve uzun poz süreli sezonlardan parametrenin değeri **0.008114(c/d)** olarak elde edildi. İki farklı poz süreli verilerden elde edilen Blazhko frekansları arasındaki fark 0.000528 (c/d)'dir.

Çizelge 7.1'de yer alan f_0, f_B, f_2, f_s sırasıyla zonklama frekansına, Blazhko frekansına, ikinci üst tona yani ikinci modülasyon frekansına ve Blazhko dönemine eşlik eden ikinci bir modülasyona sebep olan İkinci bir Blazhko frekansına karşılık gelmektedir. f_1 frekansı teorik olarak elde edilse de V450 Lyr yıldızında frekans analizi periyodogramlarında f_1 frekansı görülmemektedir. Bu da bizi V450 Lyr yıldızının klasik RRd türü olmadığı yolundaki öngörümüzü desteklemektedir. Dr. Molnár tarafından yapılan ön analiz sonuçları ile bu çalışmada yapılan frekans analizi sonucunda elde edilen f_2 frekansının karşılaştırılmış ve elde edilen frekanların örtüştüğü görülmüştür. Sonuçlara ilişkin bulgular karşılaştırıldığında frekansların konumlarının birbirleriyle uyumlu olduğu açıkça görülmektedir.

Kısa poz süreli sezon verilerine yapılan analizde de V450 Lyr yıldızında **Period Doubling (PD)** ve bunun belirteci olan **HIF (Half Integer Frequency)**'e ait herhangi bir işaret bulunmamıştır. V450 Lyr yıldızında **Period Doubling (PD)** ve bunun belirteci

olan **HIF** yani $f/2$ alt harmonikleri ve onun tek sayılı multipletlerine ait herhangi bir işaret bulunmamış olup, Benkő vd. (2010)'nun bulguları ile uyumludur.

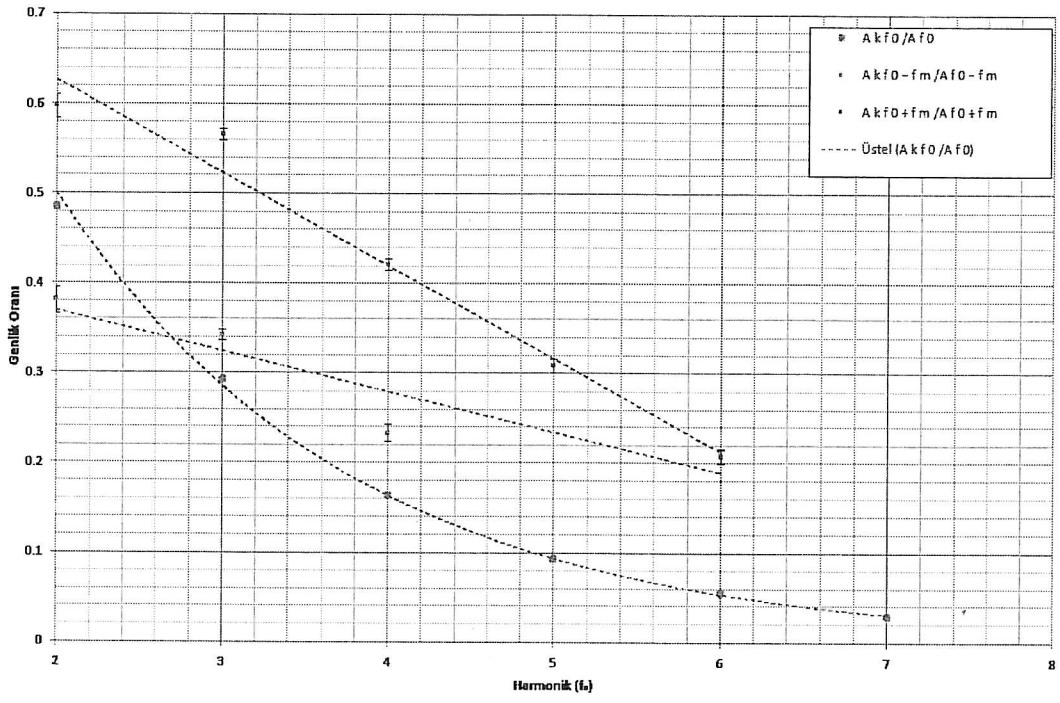
Çizelge 7.1 Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm frekans değerleri

Sezon Sayısı	Sezon (Gün)	f_0	f_B	f_2	f_s
Q1	33	1.9828371	0.008356	-	-
Q2	89	1.9820432	0.009348	-	-
Q3	89	1.982086	0.009263	-	-
Q4	90	1.981979	0.007021	-	-
Q5	95	1.982393	0.007629	-	-
Q6	90	1.981523	0.009122	-	-
Q7	72	1.982469	0.007555	-	-
Q8	54	1.981225	0.008984	-	-
Q9	97	1.983793	-	-	-
Q10	94	1.981715	0.006205	-	-
Q11	97	1.981872	0.007064	-	-
Q12	83	1.982013	0.009305	-	-
Q13	91	1.981061	-	-	0.012467
Q14	97	1.981648	-	-	-
Q15	98	1.981338	0.008231	-	-
Q16	85	1.981902	-	-	-
Q17	32	1.983724	-	3.358587	0.012709
Q1-Q17	Toplam	1.981688	0.008114	-	-
Q7.1+7.2+7.3	72	1.982162	0.007586	3.325771	-
O-C analizi	-	-	0.00795	-	0.01250

Çizelge 7.2'de verilmiş olan değerler uzun poz süreli verilere yapılmış olan analiz sonucunda elde edilen temel zonklama frekansı, harmonik frekansları, Blazhko frekansı ve bunların multiplerinin genlik oranlarına **Ak f_0 /A f_0, A k f_0− f_m /A f_0−f_m, A k f_0+ f_m /A f_0+ f_m** bakılırsa Şekil 7.1'deki grafik elde edilecektir. Burada A genliği, k harmonikleri (k=1, 2, 3 ...) ve f_m= f_B 'yi temsil etmektedir. Şekil 7.1'de Radyal zonklama modlarının **A k f_0 /A f_0** harmonik bileşenlerinin genlik oranları, **A k f_0− f m /A f_0− f m, A k f_0+ fm /A f_0+ f m** modülasyon bileşenlerinin genlik oranları ile karşılaştırılmıştır. Zonklama genliği katlanarak azalırken, modülasyonun genliği lineer azalmaktadır.

Çizelge 7.2 Q1-Q17 Sezonların analizi sonucunda elde edilen frekanslar

Fr	f[c/d]$^{-1}$	Frekans	Genlik	Genlik Hata
F17	f_B	0.008114	59.20196	0.83329166
F8	f_0-f_B	1.973575	129.4528	0.96072414
F1	f_0	1.981688	1229.765	0.85927282
F7	f_0+f_B	1.989838	165.1902	1.11818114
F23	$2f_0$-f_B	3.9571111	49.300039	0.390726994
F2	$2f_0$	3.9633775	596.65244	0.894686015
F11	$2f_0$+f_B	3.9715473	98.590839	0.428288285
F26	$3f_0$-f_B	5.938809	44.197823	0.928364225
F4	$3f_0$	5.9450733	360.12467	0.833735144
F10	$3f_0$+f_B	5.9532113	93.328072	0.367347925
F40	$4f_0$-f_B	7.9204883	30.126153	0.780463009
F6	$4f_0$	7.9268039	201.19218	0.749335658
F12	$4f_0$+f_B	7.934832	69.516155	0.803065415
F9	$5f_0$	9.9084659	115.01607	0.745306617
F21	$5f_0$+f_B	9.9165359	50.791841	0.880359907
F47	$6f_0$-f_B	11.889523	26.990875	0.705829447
F14	$6f_0$	11.890134	67.768624	0.752837617
F37	$6f_0$+f_B	11.898231	34.156558	0.775585794
F33	$7f_0$	13.871834	36.197267	0.804071882



Şekil 7.1 Radyal zonklama modlarının **A k f_0 /A f_0** harmonik bileşenlerinin genlik oranları, **Ak f_0− f m /A f_0− f m, A k f_0+ fm /A f_0+ f m** modülasyon bileşenlerinin genlik oranları ile karşılaştırılması

Literatür taramasına bakıldığında V450 Lyr yıldızına ilişkin uzun poz süreli Q1-Q17 toplu sezonları kapsayan, her bir sezonu kendi içinde ayrı ayrı analiz edip bunları hem birbirleriyle hem de tüm sezonlar için yapılan frekans analiziyle kıyaslayan ve kısa poz süreli verilere frekans analizi uygulayıp bunları uzun poz süreli verilerle karşılaştıran herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada yapılan detaylı frekans analizleri ve O-C analizi sonucunda V450 Lyr temel modu ve ikinci üst ton'u gösteren, klasik olmayan bir "çift-modlu" RR Lyrae yıldızı olduğu görüşü daha çok desteklenmektedir. Bu çalışmanın analiz sonuçlarından elde edilen sonuçlar bu ihtimali daha da güçlendirmiş ve V450 Lyr yıldızının türü ikinci üst tonda zonklayan bir RRd türü bir RR Lyrae yıldızı olduğu fikri güçlenmiştir.

KAYNAKLAR

Alcock, C., Alves, D., Becker, A. C., Bennet, D. P., Cook, K. H., Freeman, K. C., Griest, K., Kurtz, D. W., Lehner, M. J., Marshall, S. L., Minniti, D., Peterson, B. A., Prott, M. R., Quinn, P. J., Rodgers, A. W., Sutherland, W., Tomaney, A., Vandehei, T. and Welch, D.L. 1998. The Blazhko Effect in RR Lyrae Stars: Strong Observational Support for the Oblique Pulsator Model in Three Stars. Eprint arXiv:astro-ph/9808190.

Anonim. 2016. Web Sitesi: http://ozgur.astrotux.org/tr/teaching/ast526-astrosismoloji/, Erişim Tarihi: 07/02/2016. Anonymous. 2016. Web Sitesi: https://www.eso.org/sci/publications/messenger /archive/no.34-dec83/messenger-no34-38-41.pdf, Erişim Tarihi: 05/02/2016.

Anonim. 2016. Web Sitesi: https://tr.wikipedia.org/wiki/RR_Lyrae_de%C4%9Fi%C5%9Feni, Erişim Tarihi: 15/03/2016.

Anonymous. 2016. Web Sitesi: http://www.aavso.org/media/jaavso/2835.pdf, Erişim Tarihi: 05/02/2016.

Anonymous. 2016. Web Sitesi: http://science.sbcc.edu/~physics/flash/heatengines/Carnot%20cycle.html, Erişim Tarihi: 07/02/2016.

Anonymous. 2016. Web Sitesi: https://en.wikipedia.org/wiki/Kepler_(spacecraft), Erişim Tarihi: 15/03/2016.

Anonymous. 2016. Web Sitesi: http://www.faculty.virginia.edu/ASTR5610/lectures/stellar_evolution/pulsational.html, Erişim Tarihi: 09/05/2016.

Anonymous. 2016. Web Sitesi: http://inspirehep.net/record/1243842/plots, Erişim Tarihi: 12/05/2016.

Anonymous. 2016. Web Sitesi: http://ircamera.as.arizona.edu/astr_250/Lectures/Lec18_sml.htm, Erişim Tarihi: 15/05/2016.

Anonymous. 2016. Web Sitesi: http://keplerscience.arc.nasa.gov/K2/Tools K2FOV.shtml, Erişim Tarihi: 23/05/2016.

Anonymous. 2016. Web Sitesi: http://crescent.astro.illinois.edu/yhchu/astro404/Lectures_2013/404_lecture31.pdf, Erişim Tarihi: 23/05/2016.

Anonymous. 2016. Web Sitesi: http://astronomy.swin.edu.au/sao/downloads/HET611-M17A01.pdf, Erişim Tarihi: 23/05/2016.

Anonymous. 2016. Web Sitesi: http://home.strw.leidenuniv.nl/~nielsen/SSEs16/Lectures-2016/lecture-12-1-2016.pdf, Erişim Tarihi: 02/06/2016.

Anonymous. 2016. Web Sitesi: http://online.kitp.ucsb.edu/online/asteroseismo-c11/szabo/ oh/02.html, Erişim Tarihi: 02/06/2016.

Anonymous. 2016. Web Sitesi:http://archive.stsci.edu/kepler/manuals/K_archive_manual_v4_083009.html, Erişim Tarihi: 05/06/2016.

Anonymous. 2016. Web Sitesi: http://www.astrosurf.com/buil/rrlyr2/20120724_anim.htm, Erişim Tarihi: 05/06/2016.

Anonymous. 2016. Web Sitesi: http://loke.as.arizona.edu/~ckulesa/camp/1998/spectroscopy.html, Erişim Tarihi: 05/06/2016.

Anonymous. 2016. Web Sitesi: http://kepler.nasa.gov/Mission/QuickGuide/, Erişim Tarihi: 05/06/2016.

Anonymous. 2016. Web Sitesi: http://kepler.nasa.gov/Mission/faq, Erişim Tarihi: 09/06/2016.

Anonymous. 2016. Web Sitesi: http://astrobites.org/2014/12/02/making-order-out-of-chaos, Erişim Tarihi: 05/06/2016.

Anonymous. 2016. Web Sitesi: http://www.konkoly.hu/~lmolnar/docs/beyond pd_poster.pdf, Erişim Tarihi: 05/06/2016.

Anonymous. 2016. Web Sitesi: http://konkoly.hu/HAG/research.html, Erişim Tarihi: 05/06/2016.

Babcock, H.W. 1958. A Catalog of Magnetic Stars. ApJS, 3, 141.

Bailey, S.I. and Pickering, E.C. 1902. A Discussion of Variable Stars in the Cluster[omega] Centauri. Annals of the Astronomical Observatory of Harvard College, 38, 252.

Balona, L.A. and Dziembowski, W.A. 2011. Kepler Observations of δ Sct Stars. MNRAS, 417, 591.

Bányai, E., Kiss, L.L., Bedding, T.R., Bellamy, B., Benkő, J.M., Bódi, A., Callingham, J.R., Compton, D., Csányi, I., Derekas, A., Dorval, J., Huber, D., Shrier, O., Simon, A. E., Stello, D., Szabó, Gy. M., Szabó, R. and Szatmáry, K. 2013. Variability of M giant stars based on Kepler photometry: general characteristics. MNRAS, 436, 1576.

Benkő, J. M., Kolenberg, K., Szabó, R. and Kurtz, D.W. 2010. Flavours of variability: 29 RR Lyrae stars observed with *Kepler*. MNRAS, 409(4), 1585-1593.

Benkő, J. M., Szabó, R., and Paparó, M. 2011, MNRAS, **417**, 974.

Benkő, J.M., Plachy, E., Szabo, R., Molnár, L., and Kollath, Z. 2014. Long-Tımescale Behavıor Of The Blazhko Effect From Rectıfied *Kepler* Data. The Astrophysical Journal Supplement Series, 213,31.

Blazhko, S. 1907. Mitteilung über veränderliche Sterne. Astron., Nachr., 175, 325.

Bono, G., Castellani, V. and Marconi, M. 2000. The RR Lyrae Star U Comae as a Test for Nonlinear Pulsation Models. ApJL, 532, L129.

Catelan, M. 2006. Near-Field Cosmology with Horizontal Branch and RR Lyrae Stars. 2006 RevMexAA, 26, 93.

Chadid, M., Gillet, D., Kolenberg, A. and Aerts, C. 2000. Blazhko Effect and Magnetic Field in RR Lyrae. ASPC, 203, 318-319.

Chadid, M., Gade, G., A., Shorlin, S. L. S. and Landstreet, J. D. 2004. No evidence of a strong magnetic field in the Blazhko star RR Lyrae. Astronomy and Astrophysics. 413,1087-1093.

Chadid, M. and Gillet, D. 1997. The Blazhko effect on line profiles in the variable star RR Lyrae. Astronomy and Astrophysics, 319, 154-160.

Chadid, M., and Preston, G. W. 2013. Atmospheric dynamics in RR Lyrae stars: a high-resolution spectroscopic survey. MNRAS, 434, 552.

Christensen-Dalsgaard, J. Corbard, T., Dikpati, M., Gilman, P. A., and Thompson, M. J. 2004. Detection of Jets and Associated Toroidal Fields in the Solar Tachocline. ESA SP, 559,376.

Christy, R. F. 1966. Pulsation Theory. Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics, 4,353-392.

Clementini, G., Merighi, R. and Tosive, M. 1991. CaII K Line: New metallicity indicator for RR Lyrae stars. The Astronomical Journal, 101, 6.

Cousens, A. 1983. A possible explanation of the Blazhko effect in RR Lyrae. MNRAS, 203, 1171.

Çelik, L. 2008. RR Lyrae Türü Degisen Yıldızlar T Sex, RR Leo ve ST Boo'nun Fotometrik Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Dall'Ora, M., Bono, G., Storm, J., Caputo, F., Andreuzzi, G. and Marconi, G. 2006. The RR Lyrae distance scale from Near-Infrared photometry. Memorie della Società Astronomica Italiana , 77, 214.

Davis, K. 2002. The Impulsive XZ Cygni. The American Association of Variable Star Observers, Variable Star of the Month, Web Sitesi: https://www.aavso.org/vsots_xzcyg, Erişim Tarihi:22.03.2016.

Dziembowski, W. A. and Mizerski, T. 2004. Nonradial Mode Excitation as the Cause of the Blazhko Effect in RR Lyrae Stars. Acta Astron.,54, 363.

Fokin, A.B. 1992. Shock waves and H-alpha profiles in the hydrodynamical model for RR Lyrae. MNRAS, 256, 26.

Fokin, A. B. and Gillet, D. 1997, Theoretical interpretation of the metallic line doubling phenonenon in the variable star RRLyrae. A&A, 325, 1013.

Gillet, D.; Burki, G. and Crowe, R.A. 1989. Shock waves of large amplitude in the atmospheres of RR Lyrae stars?. A&A, 225, 445.

Gillet, D. and Crowe, R.A. 1988. Bump, hump and shock waves in the RR Lyrae stars - X Ari and RR LYR. A&A, 199, 242.

Gillet, D. 2013. Atmospheric dynamics in RR Lyrae stars The Blazhko effect. A&A, 554, A46.

Gillet, D., Fabas, N.and Lèbre, A. 2013. First detection of helium emissions in RR Lyrae. A&A, 553, A59.

Gillet, D. and Fokin, A. B. 2014. Emission lines and shock waves in RR Lyrae stars. A&A, 565, A73.

Guggenberger, E. 2008. Stellar Cycles: Photometric observations of the Blazhko Effect in RR Lyrae stars. Doktora Tezi.

Guggenberger E., Kolenberg K., Chapellier, E., Poretti, E., Szabó, R.,Benkő, J. M. and Paparo, M. 2011. The *CoRoT* star 105288363: strong cycle-to-cycle changes of the Blazhko modulation. MNRAS, 415, 1577–1589.

Guggenberger, E., Kolenberg, K., Nemec, J. M., Smolec, R., Benkő, J. M., Ngeow, C.-C., Cohen, J. G., Sesar, B., R. Szabó, Catelan, M., Moskalik, P., Kinemuchi, K., Seader,, S. E., Smith, J. C., P. Tenenbaum and Kjeldsen, H. 2012. The complex case of V445 Lyr observed with *Kepler*: two Blazhko modulations, a non-radial mode, possible triple mode RR Lyrae pulsation, and more. MNRAS, 424, 649–665.

Hill, S.J. 1972. Hydrodynamic and Radiative-Transfer Effects on an RR Lyrae Atmosphere. Astrophysical Journal, 178, 793.

Hurdis, D. A. 2009. Two-Color Photometry of the Double-Mode RR Lyrae Star NSVS 5222076. JAVSO, 37, 28.

Jurcsik, J., Szeidl, B., Nagy, A. and Sodor, A. 2005. On the Distribution of the Modulation Frequencies of RR Lyrae Stars. Acta Astronomica, 55, 303.

Jurcsik, J., Szeidl, B., Sódor, Á., Dékány, I., Hurta, Zs., Posztobányi, K., Vida, K., Váradi, M., Szing, A. 2006. The Shortest Modulation Period Blazhko RR Lyrae Star: SS Cancri. AJ, 132, 61-70.

Kluvyer, H.A. 1936. On the extension of the theory of adiabatic Cepheid Pulsation. Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands, 7, 265-270.

Kolenberg, K. 2004. New Approaches to Solve the Old Blazhko Puzzle in RR Lyrae Stars. IAUS, 224, 367.

Kolenberg, K. and Bagnulo, S. 2009. Observational constraints on the magnetic field of RR Lyrae stars. A&A, 498, 543-550.

Kolenberg, K., Szabó, R., Kurtz, D. W., Gilliland, R. L., Christensen-Dalsgaard, J., Kjeldsen, H., Brown, T. M., Benkő, J. M., Chadid, M., Derekas, A., Di Criscienzo, M., Guggenberger, E., Kinemuchi, K., Kunder, A., Kolláth, Z., Kopacki, G., Moskalik, P., Nemec, J. M., Nuspl, J., Silvotti, R., Suran, M. D., Borucki, W. J., Koch, D. and Jenkins, J. M. 2010. First Kepler Results on RR Lyrae Stars . Astrophysical Journal Letters, 713, 198–203.

Kolenberg, K., KASC RR Lyrae Working Group. 2011. RR Lyrae studies with Kepler. Bulletin of the American Astronomical Society, Vol. 43

Kolenberg, K. 2011b. Peculiarities of Blazhko Stars: New Insights. Carnegie Observatories Astrophysics Series,5,100.

Kolenberg, K. 2012. RR Lyrae Stars: Cosmic Lighthouses With a Twist. JAAVSO, 40 481-491.

Kovacs, G. 1995. Studies on amplitude-modulated RR Lyrae stars I. RV Ursa Majoris. A&A, 295, 693.

Kurtz, D. W. 1982. Rapidly oscillating AP stars. MNRAS, 200,807.

LaCluyze, A., Smith, H.A., Gill, E.-M., Hedde A. N., Kinemuchi, K., Rosas, A. M., Pritzl ,B.J., Sharpee, B., Wilkinson, C. S., Robinson K. W., Baldwin M. E. and Samolyk, G. 2002. The Changing Blazhko Effect of XZ Cygni. Radial and Nonradial Pulsations as Probes of Stellar Physics, ASP Conference Series, 259, 416-417.

Le Borgne, J. F., Paschke, A., Vandenbroere, J., Poretti, E., Klotz, A., Boër, M., Damerdji, Y., Martignoni, M. and Acerbi, F. 2007. Stellar evolution through the ages: period variations in galactic RRab stars as derived from the GEOS database and TAROT telescopes. A&A, 476, 307.

Le Borgne, J.F. 2012. The All-Sky GEOS RR Lyrae Survey With the TAROT Telescopes: Analysis of the Blazhko Effect. AJ, 144, 39.

Le Borgne, J.F. 2014. Historical vanishing of the Blazhko effect of RR Lyr from the GEOS and Kepler surveyst. MNRAS, 144, 39.

Lenz, P. and Breger, M. 2005. Period04 User Guide. Comm. in Asteroseismology, 146, 53.

Lub, J. 1977. An Atlas of Light and Colour Curves of Field RR Lyrae Stars. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 29, 345-378.

Molnár, L., Benkő, J. M., Szabó, R. and Kolláth, Z. 2014. Kepler RR Lyrae stars: beyond period doubling. IAUS, 301, 459.

Molnár L. 2013. Dinamikai jelenségek RRLyrae csillagokban. Doktora tezi.

Moskalik, P. and Poretti, E. 2003. Fourier decomposition and frequency analysis of the pulsating stars with P < 1 d in the OGLE database. II. Multiperiodic RR Lyrae variables in the Galactic Bulge. A&A, 398, 213-222.

Netzel, H., Smolec, R., and Moskalik P. 2016. Nonradial modes in RR Lyrae stars from the OGLE Collection of Variable Stars. CoKon, 105, 31.

Poretti, E., Paparo, M., Deleuil, M., Chadid, M., Kolenberg, K., Szabó, R., Benkő, Chapellier, J.M., Guggenberger, E., Le Borgne, J.F., Rostagni, F., Trinquet, H., Auvergne, M., Baglin, A., Sarro, L.M. and Weiss, W.W. 2010. CoRoT light curves of RR Lyrae stars CoRoT 101128793: long–term changes in the Blazhko effect and excitation of additional modes. A&A, 520, A108.

Preston, G. W. 2011. RR Lyrae Atmospherics: Wrinkles Old and New. A Preview. AJ, 141, 6.

Romano, G. 1972. New Variable Stars in Lyra. IBVS, Number 645.

Romanov, Yu.S., Udovichenko, S.N., and Frolov, M.S. 1987. The Magnetic Variability of Rr-Lyrae. Sov. Astr. Lett., 13, 29.

Sanford, R. 1949. Radial Velocities of RR Lyrae from COUDÉ Spectrograms. ApJ, 109, 208.

Schwarzschild, M. 1952. Transaction of the IAU VIII, ed. P. Th. Oosterhoff (Cambridge University Press), 811.

Shapley, H. 1916. On the changes in the spectrum, period, and lightcurve of the Cepheid variable RR Lyrae. ApJ, 43, 21.

Shibahashi, H. and Takota, M. 1995. Oblique Pulsator Model for the Blazhko Effect of RR Lyrae Stars. ASPC, 83, 42-43.

Shibahashi, H. 2000. The Oblique Pulsator Model for the Blazhko Effect in RR Lyrae Stars. Theory of Amplitude Modulation I. ASPC, 203, 299-306.

Skarka, M. 2013. Known Galactic field Blazhko stars. A&A, 549, 101.

Smith, H. A. 1995. RR Lyrae Stars. Cambridge Astrophysics Series Vol. 27.

Smith, H. A. 2013. Period Changes Of Mira Variables, RR Lyrae Stars, And Type II Cepheids. arXiv:1310.0149.

Soszyński, I., Dziembowski, W. A., Udalski, A., Poleski, R., Szymański, M. K., Kubiak, M., Pietrzyński, G., Wyrzykowski, Ł., Ulaczyk, K., Kozłowski, S. and Pietrukowicz, P. 2011. The Optical Gravitational Lensing Experiment. The OGLE-III Catalog of Variable Stars. XI. RR Lyrae Stars in the Galactic Bulge AcA., 61, 1.

Stellingwerf, R.F. 1984. Convection in pulsating stars. V - Limit cycle characteristics. ApJ, 284,712.

Stothers, R.B. 2006. A new explanation of the Blazhko Effect in RR Lyrae Stars. ApJ, 652, 643-649.

Struve, O., and Blaauw, A. 1948. The Radial Velocity of RR Lyrae. ApJ, 108, 60.

Szabó, R., Kolláth, Z., Molnár, L., Kolenberg, K., Kurtz, D. W., Bryson, S. T., Benkő, J. M., Christensen-Dalsgaard, J., Kjeldsen, H., Borucki, W. J., Koch, D., Twicken, J. D., Chadid, M., di Criscienzo, M., Jeon, Y.-B., Moskalik, P., Nemec, J. M. and Nuspl, J. 2010. Does Kepler unveil the mystery of the Blazhko effect? First detection of period doubling in Kepler Blazhko RR Lyrae stars. MNRAS, 409, 3, 1244-1252.

Szabó, R., Kolláth, Z., Molnár, L., Kolenberg, K. and Kurtz, D. W. 2013. Period Doubling in Kepler RR Lyrae Stars. Stellar Pulsations, Astrophysics and Space Science Proceedings, Volume 31. ISBN 978-3-642-29629-1. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, p. 81.

Whitney, C. 1956. Stellar pulsation II A kinematic model for the atmosphere of W Virginis. AnAp, 19, 142.

Van Hoolst, T., Dziembowski, W. A., and Kawaler, S.D. 1998. Unstable non-radial modes in radial pulsators: theory and an example. MNRAS, 297, 536.

Zhevakin, S. A. 1953. К Теории Цефеид. I", Астрономический журнал. Russ. Astron. J., 30, 161

Zhevakin, S. A. 1959. The Pulsational Theory of Stellar Variability. V. (Multilayer Spherical Discrete Model). SvA, 3, 389.

Zeilik, M., Gregory, S. A., Smith and Elske, V. P. 1992. Introductory Astronomy and Astrophysics. Third Edition, Sounders College Pub. Fort Wort Philadelphia San Diego New York.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Lale ÇELİK ŞENAVCI
Doğum Yeri : Antalya
Doğum Tarihi : 1981
Medeni Hali : Evli
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu:

Lise :Yüce Fen Lisesi (1996-1999)
Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü (2005)
Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı (2008)
Doktora : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı (Eylül 2008 – Temmuz 2016)

Çalıstıgı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Başkent Üniversitesi İdari Personel 2012 -

SCI YAYINLAR

1. Pribulla, T., Vaňko, M., Ammler- von Eiff, M., Andreev, M.; Aslantürk, A., Awadalla, N., Baluďanský, D., Bonanno, A., Božić, H., Catanzaro, G., **Çelik, L.**, Christopoulou, P. E., Covino, E., Cusano, F.; Dimitrov, D., Dubovský, P., Esmer, E. M., Frasca, A., Hambálek, Ľ., Hanna, M., Hanslmeier, A., Kalomeni, B., Kjurkchieva, D. P., Krushevska, V., Kudzej, I., Kundra, E., Kuznyetsova, Yu., Lee, J. W., Leitzinger, M., Maciejewski, G.; Moldovan, D.; Morais, M. H. M., Mugrauer, M., Neuhäuser, R., Niedzielski, A., Odert, P., Ohlert, J., Özavcı, İ., Papageorgiou, A., Parimucha, Š., Poddaný, S., Pop, A., Raetz, M.; Raetz, S., Romanyuk, Ya., Ruždjak, D., Schulz, J., Şenavcı, H. V., Szalai, T., Székely, P.,

Sudar, D., Tezcan, C. T., Törün, M. E., Turcu, V., Vince, O., Zejda, M. 2012. The DWARF project: Eclipsing binaries-precise clocks to discover exoplanets Astron. Nachrichten, 333, 754

HAKEMLİ DERGİLER

1. M. Yılmaz, Ö. Baştürk, N. Alan, H.V. Şenavcı, T. Tanrıverdi, T. Kılıçoğlu, Ş. Çalışkan, **L. Çelik**, G. Aydın, D. Çakan, D. Bilgiç, N.D. Uluş, A. Elmaslı, S.O. Selam, B. Albayrak, F. Ekmekçi. 2009. New Times of Minima of Some Eclipsing Binary Stars and Maxima of Pulsating Stars. IAU-IBVS, no:5887

2. T. Kılıçoğlu, Ö. Baştürk, H.V. Şenavcı, M. Yılmaz, T. Tanrıverdi, N. Alan, S. Sipahioğlu, G. Aydın, **L. Çelik,** Ş. Çalışkan, A. Elmaslı, G. Gökay, D. Çakan, Y. Demircan, F. Ekmekçi, S.O. Selam, K.Yüce, B. Albayrak. 2007. Photoelectric Minima of Some Eclipsing Binary Stars. IAU-IBVS, no:5801

ULUSLARARASI TOPLANTILARDA SUNULAN POSTER VE BİLDİRİLER

1. How to correctly stitch together data of a Blazhko star. Astrophysics and Space Science Proceedings series AP&SS 2011 2012arXiv1202.3607C (Poster)

2. RR Lyrae stars, ST Boo and RR Leo: 2007 observations and the preliminary results of the frequency analysis. Astrophysics and Space Science Proceedings series AP&SS 2011 2012arXiv1202.3606E (Poster)

ULUSAL BİLİMSEL TOPLANTILARDA SUNULAN VE BİLDİRİ KİTABINDA BASILAN BİLİDİRİLER ve POSTERLER

1. Çelik, L., Ekmekçi, F., Şenavcı, H. V., 2012, "KIC 7671081 Yıldızının Frekans Analizleri", XVIII. Ulusal Astronomi Kongresi Tebliğleri (Poster).

2. Çelik, L., Ekmekçi, F., Şenavcı, H. V., 2008, "ST Boo ve RR Leo'nun Frekans Analizlerinin Ön Sonuçları", XVI. Ulusal Astronomi Kongresi Tebliğleri, Bildiri s. 1170.

BİLİMSEL KURULUŞ/ORGANİZASYONLARA ÜYELİK

ASART - Astronomi Araştırma Topluluğu

NASA Kepler Mission-Kepler Asteroseismic Science Consortium (KASC)

TAMAMLANMIŞ PROJELER

15 Eylül 2007-15 Eylül 2008 Ankara Üniversitesi Rasathanesi Popüler ve Eğitsel Astronomi Etkinlikleri, TÜBİTAK Bilim ve Toplum Projesi (Proje No: 107B074), Bursiyer

7'den 77'ye Turunç Gökbilim ve Fizik Şenlikleri, TÜBİTAK Bilim ve Toplum Projesi (Proje No: 111B124), Eğitmen