



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



**KIRMIZI SÜPERDEV YILDIZ BETELGEUSE
ETRAFINDAKİ TOZ OLUŞUMUNA YÖNELİK BİR
ARAŞTIRMA**

Yüksek Lisans Tezi

Murat ESENDEMİR

Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı

İzmir
2023

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**KIRMIZI SÜPERDEV YILDIZ BETELGEUSE
ETRAFINDAKİ TOZ OLUŞUMUNA YÖNELİK BİR
ARAŞTIRMA**

Murat ESENDEMİR

Tez Danışmanı: Prof. Dr. M. Serdar EVREN

Tez Eş Danışmanı: Dr. Gillian Pearce

Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı
Genel Astronomi Yüksek Lisans Programı

İzmir
2023

ÖZET

KIRMIZI SÜPERDEV YILDIZ BETELGEUSE ETRAFINDAKİ TOZ
OLUŞUMUNA YÖNELİK BİR ARAŞTIRMA

ESENDEMİR, Murat

Yüksek Lisans Tezi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. M. Serdar EVREN

Tez Eş Danışmanı: Dr. Gillian Pearce

01/09/2023, 69 sayfa

Kırmızı süperdev yıldızlar, büyük kütleli ($8 M_{\odot} - 40 M_{\odot}$), geniş yarıçapa sahip evrimleşmiş yıldızlardır. Bu tür yıldızlar, yıldız evrimi açısından önem taşımaktadırlar. Bir kırmızı süperdev olan Betelgeuse, Yer'e yakın konumu (~ 197 pc) ve geniş yarıçapı ($R_{\star} = 887 R_{\odot} \pm 203$) sayesinde uzun yıllardır gözlenebilmiştir. Dolayısıyla kırmızı süperdevler hakkındaki bilgilerimize geniş katkılar sağlamıştır. Betelgeuse'da zonklama, aktivite ve kütle kaybı mekanizmaları sonucunda ışık değişimleri yaşanmaktadır. Aralık 2019 tarihinde parlaklığında düşüş başlamış, Şubat 2020 itibariyle tarihindeki en düşük değere ulaşmıştır. Bu olağanüstü sönükleşmeye “*Büyük Sönme*” adı verilmiştir.

Tez kapsamında kırmızı süperdev yıldızlar hakkında genel bilgiler verilmiş olup asıl odak Betelgeuse üzerinde toplanmıştır. AAVSO veri tabanı sayesinde gözlem verilerine ulaştığımız Betelgeuse'un ışık değişimini analiz ettik. Ayrıca literatürde daha önce yapılmadığını tespit ettiğimiz renk ölçeği analizini gerçekleştirdik. Bu sayede yıldızda meydana gelen bozulmaların temelinde yatan mekanizmaları daha iyi açıklamayı amaçladık. Çalışma kapsamında amacımıza uygun banttaki en güvenilir verileri sağlayan AAVSO gözlemcileri ve tarihleri bir araya getirdik. 2018-2023 yılları arasını 5 gözlem sezonuna ayırdık. Analizlerimizi bu tarihler arasında yoğunlaştırdık. Bu çalışma ile Betelgeuse yıldızı kapsamında, renk ölçeği konusuna değinerek kırmızı süperdevlerin literatürüne katkı sağlamayı amaçladık.

Anahtar sözcükler: Betelgeuse, kırmızı süperdev, renk ölçeği, (B-V), süpernova, zonklama.



ABSTRACT**AN INVESTIGATION INTO CIRCUMSTELLAR DUST
FORMATION AROUND THE RED SUPERGIANT STAR
BETELGEUSE**

ESENDEMİR, Murat

MSc in Astronomy and Space Sciences

Thesis Advisor: Prof. Dr. M. Serdar EVREN

Thesis Co-Advisor: Dr. Gillian Pearce

September 1, 2023, 69 pages

Red supergiant stars are massive ($8 M_{\odot} - 40 M_{\odot}$), large-radius evolved stars. Such stars are important for stellar evolution. Betelgeuse, a red supergiant, has been observable for many years thanks to its near-Earth position (~ 197 pc) and large radius ($R_{\star} = 887 R_{\odot} \pm 203$). Therefore, it has made extensive contributions to our knowledge of red supergiants. Light changes occur in Betelgeuse as a result of pulsating, activity and mass loss mechanisms. Its brightness started to decrease in December 2019, and as of February 2020, it reached the lowest value in its history. This extraordinary dimming has been called the “*Great Dimming*”.

Within the scope of the thesis, general information about red supergiant stars is given and the main focus is on Betelgeuse. Thanks to the AAVSO database, we performed the light change analysis of Betelgeuse, which we accessed the observation data. In addition, we carried out the color index analysis, which we found that has not been done before in the literature. In this way, we aimed to better explain the mechanisms underlying the deterioration of the star. Within the scope of the study, we brought together the AAVSO observers and dates that provided the most reliable data in the band suitable for our purpose. We divided the years 2018-2023 into 5 observation seasons. We concentrated our analyzes between these dates. With this study, we aimed to contribute to the literature of red supergiants by addressing the color scale issue within the scope of Betelgeuse star.

Key words: Betelgeuse, red supergiant, color index, (B-V), supernova, pulsation.



TEŞEKKÜR

Astronomi hayatımın, akademik yolda da devam etmesine olanak sağlayan, bir danışmandan öte yol gösterici olan, bilgisini ve tecrübesini hiç esirgemedi gece gündüz benimle paylaşan değerli hocam Prof. Dr. M. Serdar Evren'e saygı ve sevgi ile teşekkürlerimi bir borç bilirim. Eğitimimi tamamlarken geçtiğim tüm yollarda bana destek olan, lisans hayatımın değerli Ankara Üniversitesi Astronomi ve Uzay Bilimleri hocalarına, tüm dünyanın içinde bulunduğu zorlu koşullara rağmen eğitimlerini büyük bir özveri ile tamamlayan yüksek lisans hayatımın değerli Ege Üniversitesi Astronomi ve Uzay Bilimleri hocalarına çok teşekkür ederim. Ayrıca danışmanım olmayı kabul eden ve her zaman desteğini sürdüren İngiltere/Aston Üniversitesi'nden Dr. Gillian Pearce'a çok teşekkür ederim.

Tüm bu süreçlerde yaşadığım her türlü zorluğu ve engeli benim için ortadan kaldıran, bir an olsun desteğini esirgemeyen, her yorulduğumda bana güç veren, meslektaşım, eşim, yol arkadaşım sevgili Duygu Gürbüzoglu Esendemir'e hep yanımda olduğu için sonsuz teşekkür ederim.

Bilginin elde edilmesi sürecinde yaşanan tüm sıkıntıları aşmama yardımcı olan, bu yolda emin adımlarla ilerlememi sağlayan, en yakınımıdaki tüm aile bireylerime, arkadaşlarıma, dostlarıma çok ama çok teşekkür ederim.

Yıldızların ışığıyla parlayan evrenin içinde, bilgi dağarcığıma katkı sağlayan her ışık hüzmesine içten teşekkürlerimle.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxi
1. GİRİŞ	1
2. YEREL GRUP GÖKADALARINDAKİ BÜYÜK KÜTLELİ YILDIZLAR.....	2
2.1 Anakol Yıldızları	2
2.2 Parlak Mavi Değişenler.....	4
2.3 Sarı Süperdevler	5
2.4 Kırmızı Süperdevler	6
2.5 Wolf-Rayet Yıldızları.....	7
2.6 Süpernovalar	7

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3. KIRMIZI SÜPERDEVLERİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ	9
3.1 Kırmızı Süperdevlerin Belirlenmesinin Metal Bolluğuna Bağlılığı	9
3.2 Etkin Sıcaklık (T_e) ve Metal Bolluğu	10
3.3 Maksimum Işınım Gücü (L_{max}) ve Metal Bolluğu.....	12
4. KIRMIZI SÜPERDEVLERİN EVRİMİ	14
4.1 Kırmızı Süperdev Yıldızlarda Metal Bolluğu ve Kütle Kaybı	17
4.2 Kırmızı Süperdev Yıldızlarda Yakın Çevre ve Toz Oluşumu	19
5. KIRMIZI SÜPERDEV BETELGEUSE.....	21
5.1 Betelgeuse'un Tarihçesi.....	21
5.2 Betelgeuse'un Tayfsal ve Fotometrik Değişkenlikleri	23
5.3 Betelgeuse'un Çevresindeki Toz Ortam ve Atmosferik Özellikleri	25
5.4 Betelgeuse'da Zonklama	29
5.5 Betelgeuse'da Aktivite.....	31
5.6 Günişığında Işıölçüm	33
5.7 Betelgeuse'un Işığında "Büyük Sönme"	35

İÇİNDEKİLER (devam)Sayfa

6. BETELGEUSE’UN IŞIKÖLÇÜM VERİ ANALİZİ ve BULGULAR	39
6.1 Görsel ve V Bant Işık Değişimleri.....	39
6.2 B-V Renk Ölçeği.....	43
7. SONUÇ ve TARTIŞMA.....	51
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ.....	69



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Büyük lütleli yıldızların anakol sonrası evrim yolları. Yeşil renk $120 M_{\odot}$, kırmızı $40 M_{\odot}$, mor $25 M_{\odot}$, mavi $20 M_{\odot}$, turkuaz $15 M_{\odot}$, açık yeşil $12 M_{\odot}$ kütleyle sahip yıldızları temsil etmektedir (Massey, 2013).	3
2.2. P Cyg yıldızının şematik ışık değişim grafiği (Groot, 1988).	4
3.1. Evrim yolları üzerinde işaretlenen RSG yıldızları. Solda Humphreys (1978)'den alınan degerler, sağda Levesque et al. (2005)'den alınan ve düzeltilmiş, yeni değerler ile işaretlenen RSG yıldızları görülmektedir (Levesque, 2010). Evrim yolları Meynet and Maeder (2003)'den alınmıştır.	11
3.2. Samanyolu, LMC ve SMC'deki RSG'lerin tayf türü ve T_e ilişkisi (Levesque, 2010).	12
4.1. Hidrojen yakan yıldız çekirdeği ile helyum yakan çekirdeğin karşılaştırması.	14
4.2. Farklı kütlelerdeki yıldızların evrim yolları. Siyah çizgi $12 M_{\odot}$, lacivert çizgi $15 M_{\odot}$, açık mavi çizgi $18 M_{\odot}$, yeşil çizgi $21 M_{\odot}$, sarı çizgi $24 M_{\odot}$, kırmızı çizgi $27 M_{\odot}$ başlangıç kütlelerine sahip yıldızları temsil etmekte (Beasor, 2021).	15
4.3. Büyük kütleli yıldızların evrim yolu modeli. Sürekli çizgiler dönme etkisi altında, kesikli çizgiler dönme etkisi olmadan gerçekleşen evrim yolunu ifade etmektedir (Hirschi, 2010).	18

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.1. Betelgeuse'a ait 1928 - 2020 yıllarını kapsayan ışık değişimi. Güncel verileri içeren ışık değişim grafiği Bölüm 6'da sunulmaktadır. Mavi noktalar AAVSO'dan alınan V band ışıkölçüm verilerini, gri noktalar görsel tahminleri, kırmızı noktalar SMEI (Solar Magnetic Ejection Imager) verilerini temsil etmektedir (Joyce et al., 2020).	24
5.2. Betelgeuse'un ışık değişimi (üst panel) ve tayf gözlemlerinden elde edilen dikine hız eğrisi (alt panel) (Jadlovsky, 2023). Dikine hız eğrisindeki kesikli çizgi, Betelgeuse'un sakin dönemdeki 21.9 km s^{-1} değerini temsil etmektedir.	25
5.3. Güneş dışında yüzeyi görüntülenen ilk yıldız Betelgeuse'un gözlemleri. Orijinal veri A panelinde görülmekte. Görüntü iyileştirmeleri uygulanarak elde edilen görüntüler harflerle belirtilmiştir. F panelinde kenar kararma etkisi eklenerek oluşturulmuş görüntü yer almaktadır. Ayrıca bu görüntüde 55 mas olarak ölçülen fotosferik çap siyah çember ile belirtilmiştir (Gilliland and Dupree, 1996).	26
5.4. Betelgeuse (sağ) ve mukayese yıldızı Aldebaran'ın (sol) etrafındaki toz oluşumu. VLT (Very Large Telescope) üzerinde bulunan VISIR aletiyle elde edilen görüntüler. 7.76 ile 19.50 m aralığında 8 dar bant filtre kullanılmıştır (Kervella, 2011).	27
5.5. Betelgeuse'a ait tayf profili (Kervella, 2009).	28
5.6. Belirtilen kütle değerlerinin evrim izleri için adyabatik temel mod zonklama dönemleri (Joyce et. al., 2020).	30

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.7. Betelgeuse'un Period04 programı ile tespit edilen zonklama dönemleri (Joyce et al., 2020).	31
5.8. Betelgeuse'a ait gece (mavi) ve gündüz (kırmızı) gözlemleri. Hata barlarıyla birlikte, gece gözlemleri PEP (Photoelektrik Photometry-Fotoelektrik Fotometri) verileri, gündüz gözlemleri CCD verilerini yansıtmaktadır.	33
5.9. Tek kare ve yığın görüntü yöntemi ile elde edilen veriler. Sol panel tek bir görüntü verisini, sağ panel 100 görüntüden oluşan yığının verilerini ifade etmektedir.	34
5.10. Güneş ışığında elde edilen parlaklıklar ile gece gözleminden elde edilen parlaklıkların karşılaştırması.	35
5.11. Güneş ışığı ışıkölçümü ve AAVSO verileri ile oluşturulan ışık değişimi. Mavi daireler AAVSO gözlemcisi Tom Calderwood'un (CTOA) verilerini, yeşil daireler ise AAVSO gözlemcisi Otmar Nickel'in (NOT) elde ettiği güneş ışığı ışık ölçüm verilerini temsil etmektedir.	35
5.12. Betelgeuse tayf profili (Dupree et al., 2020).	36
5.13. Betelgeuse'un 2004 ve 2020 yılına ait tayf profili (Levesque, 2020).	37
5.14. Betelgeuse'a ait V bant ışık değişimi (üst) ve dikine hız değişimi (alt) (Dupree et al., 2020).	37

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.15 Harper et al. (2020) çalışmasında elde edilen ışıkölçüm verileri. Sarı daireler ve hata çubukları Wasatonic Gözlemevi'nde TiO soğurma bantlarından hesaplanan etkin sıcaklık değerlerini, yeşil daireler V bant fotometri verilerini, mavi daireler C bant (merkezi dalgaboyu:10240 Å, bant genişliği: 445 Å) ışık ölçüm verilerini temsil eder.	38
6.1 1964 - 2023 yılları arası Betelgeuse'a ait V parlaklık değişimi.	40
6.2 1987 - 2004 yılları arası Betelgeuse'a ait V parlaklık değişimi.	41
6.3 2011 – 2018 yılları arası Betelgeuse'a ait V parlaklık değişimi.	41
6.4 2018 - 2023 yılları arası Betelgeuse ışık değişimi. Büyük Sönme olayının yaşandığı Aralık 2019 - Mart 2020 tarihleri arası gerçekleşen sönme olayı çarpıcı biçimde dikkat çekmekte.	42
6.5 1. Sezon zamana karşılık V ve (B-V) grafiği.	44
6.6 1. Sezon (B-V) - V grafiği.	44
6.7 2. Sezon zamana karşılık V ve (B-V) grafiği.	45
6.8 2. Sezon (B-V) - V grafiği.	45
6.9 3. Sezon zamana karşılık V ve (B-V) grafiği.	46
6.10 3. Sezon (B-V) - V grafiği.	47
6.11 4. Sezon zamana karşılık V ve (B-V) grafiği.	47
6.12 4. Sezon (B-V) - V grafiği.	48

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.13 5. Sezon zamana karşılık V ve (B-V) grafiği.	48
6.14 5. Sezon (B-V) - V grafiği.	49
6.15 Tüm B ve V verileriyle oluşturulan grafik. Turuncu noktalar B-V parlaklık değerlerini, mavi noktalar V parlaklık değerlerini göstermekte.	49
6.16 AAVSO gözlemcisi CTOA verileriyle oluşturulan (B-V) - V grafiği.	50



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.1 Kütle aralıklarına göre yıldızların evrim aşamaları (Hirschi, 2010).....	16
4.2 Anakol yıldızlarının yaşam süreleri	16
4.3 α Ori, VY CMa ve NML Cyg yıldızlarında gözlenen moleküller (Ziurys et al., 2007; Tenenbaum & Ziurys, 2009; Teyssier et al., 2012; Kaminski et al., 2013).	20
5.1 Betelgeuse'un fiziksel parametreleri.	22



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
P	Dönem
$M_{\odot}$	Güneş'in kütlesi (1.99×10^{33} g)
$R_{\odot}$	Güneş'in yarıçapı (6.96×10^5 km)
K	Kelvin
L	Işınım gücü
$L_{\odot}$	Güneş'in ışınım gücü (3.85×10^{33} ergs ⁻¹)
$\text{\AA}$	Ångstrom
T_e	Etkin sıcaklık
m_V	Görünür parlaklık
M_V	Salt parlaklık
Z	Metal bolluğu
$L_{\max}$	Maksimum ışınım gücü
$R_{\star}$	Yıldız yarıçapı
ΔV	Işık değişimi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
SRc	Semi Regular
LSP	Long Secondary Period
LBV	Luminous Blue Variable
YSG	Yellow Supergiants
RSG	Red Super Giant
CNO	Karbon-Azot-Oksijen
AGB	Asymptotic Giant Branch
AAVSO	American Association of Variable Star Observers
H-R	Hertzsprung – Russell
WR	Wolf – Rayet
BSG	Blue Super Giants
LMC	Large Magellanic Cloud
SMC	Small Magellanic Cloud
ZAMS	Zero Age Main Sequence
SMEI	Solar Magnetic Ejection Imager

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
HST	Hubble Space Telescope
FOC	Faint Object Camera
VLT	Very Large Telescope
MESA	Modules for Experiments in Stellar Astrophysics
UV	Ultraviole
PEP	Photoelektrik Photometry
JD	Julian Date



1. GİRİŞ

Betelgeuse, Yer'e en yakın kırmızı süperdev yıldızlardan bir tanesidir. Bu özelliği ve dev yarıçapı sayesinde gökyüzündeki en parlak yıldızlardandır. Tarih boyunca gözlemlerine rastlanmaktadır. Betelgeuse, yarı düzenli değişen yıldız (SRc – Semi Regular) olarak kabul edilmektedir (Kiss et al., 2006). Bir değişen yıldız olarak ışık değişimi göstermektedir. M2 Iab tayf türünde zonklayan bir yıldızdır. Birincil zonklama dönemi $P=416 \pm 24$ gün, uzun ikincil dönemi (Long Secondary Period – LSP) $P_{LSP}=2050 \pm 460$ gündür. Güncel çalışmalar ile $P=185 \pm 13,5$ günlük yeni zonklama dönemi tespit edilmiştir (Joyce et al., 2020). Betelgeuse'un parlaklığı Aralık 2019 itibariyle düşmeye başlamış ve Şubat 2020 tarihinde o zamana kadar görülen en düşük parlaklık seviyesine ulaşmıştır. Bu olaya Büyük Sönme adı verilmektedir ve neden olduğuna ilişkin çalışmalar devam etmektedir.

Kırmızı süperdevler, evrimlerinin son aşamasında olan, olağanüstü büyük yarıçapa ulaşabilen, büyük kütleli ($8 M_{\odot} - 40 M_{\odot}$) yıldızlardır (Britavskiy et al., 2019). Yıldız astrofiziği açısından çok önemli bir yere sahiptirler. Çünkü yaşamlarının son evresinde olan bu yıldızlar, evrenin kimyasal yapısına ve çeşitliliğine önemli katkılar sağlamaktadırlar. Bu katkıyı, yaşamlarını sona erdiren süpernova patlaması ile gerçekleştirirler. Ayrıca yıldız evrimi açısından da kırmızı süperdevlerin geçirdiği aşamalar oldukça değerlidir.

Bu tez çalışmasında, Betelgeuse'un ışıkölçüm verileri kullanılarak elde edilen grafikler ile ışık değişimi, renk değişimi, dönem analizi ve Büyük Sönme olayı ele alınmaktadır. Bir kırmızı süperdev olduğu için Bölüm 2'de Yerel Grup Gökadalarındaki Büyük Kütleli Yıldızlar ele alınmıştır. Bölüm 3'te Kırmızı Süperdevlerin Fiziksel Özellikleri yer almaktadır. Bölüm 4'te Kırmızı Süperdevlerin Evrimi açıklanmaktadır. Betelgeuse'un tarihçesine, değişkenliklerine, toz ortam ve atmosferik özelliklerine, zonklama, aktivite ve Büyük Sönme olayına Bölüm 5'te değinilmiştir. Tez kapsamında yapılan çalışmalar Bölüm 6'da sunulmaktadır. Bu analizlere ait sonuçlar ve tartışmalar Bölüm 7'de yer almaktadır.

2. YEREL GRUP GÖKADALARINDAKİ BÜYÜK KÜTLELİ YILDIZLAR

Yıldızlar, merkezlerinde meydana gelen termonükleer tepkimeler sonucunda enerji üretirler. Ortaya çıkan enerji, dışa doğru ışıyım basıncı oluşturur ve bu kuvvet, içe doğru kütleçekim kuvveti ile dengelenir. Yıldızın sahip olduğu bu denge durumuna hidrostatik denge adı verilir (Iben, 1967). Hidrostatik denge, yıldızın oluşumunu ve iç dinamiğini açıklayan önemli bir kavramdır. Bu dengenin sağlanmasıyla yıldız, anakoldaki evrim sürecine başlamış olur. Bir yıldızın başlangıç kütlesi, yaşam süresini ve evrimini belirleyen temel parametredir. Kütle ise yıldızı oluşturan elementlerin bolluğuyla belirlenmektedir.

Sahip oldukları olağanüstü değerlerle astrofiziğin en uç noktalarında yer alan dev yıldızların yüksek kütleleri, Güneş'in bir milyon katı enerji çıkışıyla birlikte bu yıldızlara çok yüksek parlaklık sağlar. Parlak Mavi Değişenler (Luminous Blue Variable – LBV) ileri evrim aşamasındaki dev yıldızlardır. Sarı Süperdevler (Yellow Supergiants – YSG) bir gökada içindeki en parlak yıldızlar arasındadır fakat yıldızlararası ortamın etkisi nedeniyle tanımlanmaları zor olmaktadır. Kırmızı Süperdevler (Red Supergiants – RSG) bir yıldızın ulaşabileceği en büyük yarıçap değerine sahip olan yıldızlardır. Hidrostatik dengenin bozulmaya başladığı sınırdaki varlığını sürdürürler. Dev yıldızlar astrofiziksel açıdan oldukça önemli bir konumda yer alır. Bu dev yıldızların yaşamları, evrenin en görkemli olaylarından biri olan süpernova patlaması şeklinde sona erer (Massey, 2013).

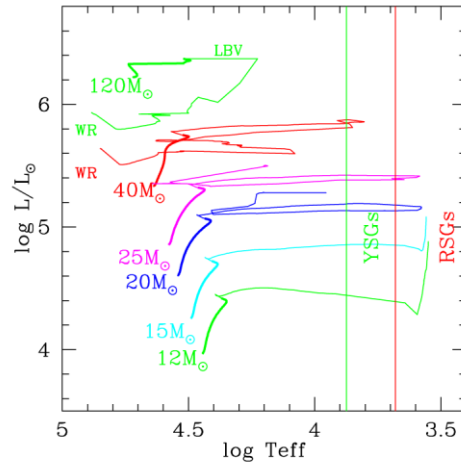
2.1 Anakol Yıldızları

Yıldızlar, gaz ve toz bulutlarının içe doğru çökmesiyle oluşurlar. Bu çökme sonucunda çekirdeklerinde gerçekleşen sıkışma, sıcaklığı artırır ve nükleer füzyon tepkimelerini başlatır. Yıldızlar hidrojeni helyuma çevirmeye başladıklarında ve hidrostatik dengeyi sağladıklarında, anakol evrimi de başlamış olur. Bu evrim basamağı yıldızların kararlı yapılarının korunduğu ve çekirdek tepkimelerinin devam ettiği evredir. Bununla birlikte bir yıldızın tüm yaşam süresinin en uzun kısmı bu evrede gerçekleşir.

Büyük kütleli yıldızların ($>8 M_{\odot}$) evrimi ilerledikçe, CNO çevrimi sayesinde çekirdeklerinde hidrojen yakarlar. Güneş'in metal bolluğundaki Geneva evrim

modellerine göre bu yıldızların anakol süresi 3×10^6 yıl ($120 M_{\odot}$) ile 30×10^6 yıl ($9 M_{\odot}$) aralığında değişmektedir (Ekström et al., 2012). Anakol süresince bu yıldızların parlaklıklarında önemli değişimler gerçekleşmez. Yüksek kütleli yıldızlarda, düşük kütlelilerin aksine, tayf türü belirli bir kütleyi işaret etmez. Tayf türü, farklı kütle değerlerine sahip yıldızların anakol evrimleri boyunca geçebilecekleri bir evrimi temsil eder. Örneğin O4 V tayf sınıfına ait bir yıldız $35 M_{\odot}$ ile $85 M_{\odot}$ aralığındaki herhangi bir değere sahip olabilir. Bir diğer önemli nokta ise bu tür yıldızların sahip olacakları ışıınım sınıfının, yüzey çekim ivmesinden ziyade yıldız rüzgârlarına bağlı olduğudur. Belirli bir metal bolluğunda parlaklık ne derece yüksek olursa yıldız rüzgârları o kadar güçlü olacaktır (Massey, 2013).

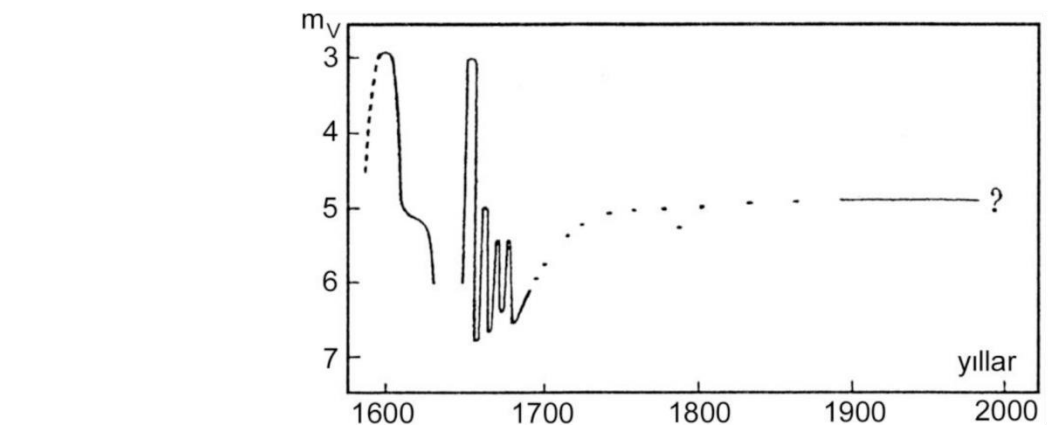
Bir yıldızın anakoldaki yaşam süresi, çekirdeğinde sahip olduğu hidrojen miktarına ve bu hidrojenin tükenme hızına yani parlaklığına bağlı olmaktadır. Çekirdekteki hidrojenin neredeyse tamamı helyuma dönüştüğünde anakol evrimi tamamlanmış olur. Çekirdeğindeki hidrojen miktarı, sahip olduğu toplam kütle ile doğrudan ilişkili olduğundan yıldızın anakolda geçireceği süreyi temel olarak kütlesi belirler. Bu ilişki anakol sonrası evrim için de geçerli olmaktadır. Anakol evrimini tamamlayan yıldızlar Şekil 2.1'deki gibi H-R diyagramında neredeyse yatay bir kolu takip eder (Ekström et al., 2012).



Şekil 2.1: Büyük kütleli yıldızların anakol sonrası evrim yolları. Yeşil renk $120 M_{\odot}$, kırmızı $40 M_{\odot}$, mor $25 M_{\odot}$, mavi $20 M_{\odot}$, turkuaz $15 M_{\odot}$, açık yeşil $12 M_{\odot}$ kütleyle sahip yıldızları temsil etmektedir (Massey, 2013).

2.2 Parlak Mavi Değişenler

H-R diyagramında parlaklık değerinin üst limiti bulunmaktadır. Bu sınırın çevresi, bilinen en büyük kütleli ve en yüksek ışıyım gücüne sahip yıldızlardan oluşmaktadır. Hiperdevler olarak adlandırılan bu bölgedeki yıldızlarda ani püskürmeler (kütle atımları) meydana gelir ve bu püskürmeler sonrasında sakin bir evre geçirirler. Bu değişenler, Parlak Mavi Değişenler (LBV) olarak adlandırılan evrimleşmiş dev yıldızlardır. S Dor Değişenleri veya Hubble – Sandage Değişenleri olarak da adlandırılırlar. Samanyolu Gökadası veya yakın komşuluğundaki gökadalarda yapılan incelemeler sonucunda sayılarının oldukça az olduğu anlaşılmıştır. Bu nedenle dev yıldızlar hakkında hali hazırda sınırlı olan bilgi, Parlak Mavi Değişenler söz konusu olduğunda çok daha azalmaktadır. Evrende az olmalarına bir açıklama olarak, yüksek kütleli yıldızların evrim süreçlerindeki bu aşamanın çok hızlı geçilmesi gösterilebilir. Yıldızlar kabaca 25000 yıl gibi kısa bir sürede LBV evresini geçmektedirler. Bu durum onların gözlenebilir olma olasılığını düşürmektedir. Eta Carina, P Cyg, S Dor, AG Car yıldızları en çok bilinen LBV yıldızlarıdır. P Cygni, uzun yıllar boyunca gözlenebilen bir örnektir. İlk kez 1600 yılında parlaklığındaki ani artış ile görülebileceği bir parlaklığa erişmiş ve gözlenebilmiştir (Weis and Bomans, 2020). Şekil 2.2’de bu yıldızla ilişkin şematik ışık değişimi gösterilmektedir.



Şekil 2.2: P Cyg yıldızının şematik ışık değişim grafiği (de Groot, 1988)

M31 ve M33 gökadalardaki parlak yıldızları inceleyen Hubble ve Sandage tarafından, 1953 yılında yeni bir yıldız sınıfını tanımlayan düzensiz değişen yıldızlar keşfedilmiştir (Hubble and Sandage, 1953). Bu yıldızlar üç ortak özellik göstermektedir; yüksek parlaklık, mavi renk, F tayf türü. Bu özelliklerine rağmen

bir LBV yıldızını tayfına veya rengine göre tanımlamak doğru olmamaktadır. LBV'leri diğer yıldızlardan ayıran en önemli özellik, parlaklıklarında gösterdikleri belirgin değişkenlik veya dönemsel patlamalarıdır. Patlama ya da püskürme şeklinde gerçekleşen değişimlerinin dönemleri düzensizdir. Böyle bir olay birkaç yıl ile on yıllarca süren zaman aralıklarında gerçekleşebilmektedir. Düzensizliğin nedeni tam olarak anlaşılamamıştır. Değişim, yalnızca parlaklıklarında olmayıp aynı zamanda etkin sıcaklıklarında yani tayf sınıflarında da olmaktadır. Bir S Dor değişeni, değişim dönemi içinde önemli ölçüde parlaklık değişimi gösterirken aynı zamanda renginde de (ön ve geri tayf türü arasında) değişim göstermektedir (Van Genderen et al., 1997).

LBV'lerin püskürme anlarında sahip oldukları parlaklık değeri onları, süpernovalardan sonra en parlak gökcisimleri olarak işaret eder. Bu özellikleri sayesinde gökada dışı uzaklık göstergesi olarak kullanılmaktadırlar. Karakteristik olarak kısa yaşam sürelerine sahiptirler. Bir değişen yıldız türü olarak LBV'ler $10^6 L_{\odot}$ 'in üzerinde ışıyım gücü ve 15000 – 30000 K aralığında yüksek etkin sıcaklık (T_e) değerine sahiptirler. B, Of veya geri WN tayf türüne sahip olabilirler. Bu özellikleri onları H-R diyagramının en sol üst köşesine yerleştirmektedir. Püskürmeler sonucunda çevrelerinde biriken maddenin kimyasal yapısı onların anakol sonrası evrimleşmiş yıldızlar olduğunu ortaya koymaktadır.

2.3 Sarı Süperdevler

Sarı süperdevler genellikle F veya G tayf türünden, parlak süperdev ışıyım sınıfına dahil yıldızlardır (Drout et al., 2012). Sarı süperdevlerin anakol üzerinde kalma süreleri yaklaşık olarak birkaç milyon yıldır. H-R diyagramı üzerinde “kararsızlık kuşağı” adı verilen, bir tür değişen yıldız grubunun içinde yer alırlar. Anakoldan çıkarak evrimleşir, genişler ve parlaklıklarını artırırlar. Büyük kütleli bir yıldız, kırmızı süperdev evresine doğru geçerken sarı süperdev olur. Bu evrenin uzunluğu birkaç bin yıl olarak ölçülmektedir (Chiosi and Maeder, 1986). Bu süre, yıldızın toplam yaşam süresinin yaklaşık olarak %0.1'ine karşılık gelmektedir. Kısa zaman ölçeğinde kat edilen bu evre, yıldızların evrimleri açısından oldukça önemlidir (Massey, 2013).

Sarı süperdevler, kırmızı süperdev yıldızlardan daha küçük yarıçap değerine sahiptirler. Karakteristik sarı renkleri, ışıyım akı dağılımlarının zirvesinin görünür

dalgaboyunda olmasından ileri gelmektedir. Canopus ve Polaris, çıplak gözle görülebilen örnekleridir. Çoğunlukla δ Cepheid gibi zonklayan değişen yıldızlardır. Etkin sıcaklık değerleri 4000 K ile 7000 K aralığında değişir (Stothers and Chin, 2001). Işınım güçleri ise $10^3 L_{\odot}$ ile başlar ve en parlak olanları $10^5 L_{\odot}$ değerini aşabilir.

Yapılan gözlemsel çalışmalarda, sarı süperdevlerin sayı yoğunluğunun, Samanyolu Gökadası ve yakın gökadalarda oldukça az olduğu ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte sarı süperdevler nadir ama önemli bir alt sınıf olmaktadır. Sarı süperdev yıldızların iki kriteri karşılaması beklenir: F veya G tayf sınıfından olmaları ve -5 ile -8 aralığında bir salt parlaklık (M_V) değerine sahip olmaları. Bu iki kriteri karşılayabilen yıldız sayısı oldukça az olmaktadır. Bunun yanı sıra aynı parlaklık ve renk değerlerine sahip cüce yıldızların bolluğu, sarı süperdevlerin tespitini zorlaştırmaktadır.

2.4 Kırmızı Süperdevler

Büyük kütleli yıldızların çoğunluğu, evrimlerinde helyum yanan sürecin büyük kısmını kırmızı süperdev olarak geçirir. Kırmızı süperdevler (Red Supergiant, RSG), yüksek kütleli ($10-25 M_{\odot}$) sayılabilecek yıldızların, yaşamlarında evrimleşmiş ileri bir helyum yanma evresidir (Levesque, 2010). Bu yıldızların fiziksel özellikleri, onları büyük kütleli yıldız evriminin önemli ve uç bir aşaması olarak anılmasını sağlar, ancak bu özelliklerin belirlenmesi uzun yıllardır sürmektedir. RSG'lerin soğuk genişlemiş atmosferleri, onları Hertzsprung-Russell diyagramında uç bir konuma yerleştirir ve geleneksel yıldız atmosfer modelleri varsayımlarında önemli tartışmaları da beraberinde getirir (Massey, 2013). Bu yıldızları çevreleyen tozlu ortamlar, yıldızların fiziksel özelliklerinin belirlenmesini zorlaştırır. Samanyolu ile komşu gökadalardaki olağandışı RSG'ler, yıldız evrim kuramı tahminlerini zorlayan ve hatta bazen meydan okuyan bir dizi esrarengiz özellik ve davranış da sunar. Bununla birlikte, son yıllarda, bu yıldızların gözlemlerine ve yorumlarına uygulanan modeller ve yöntemler de RSG'ler hakkındaki anlayışımızı değiştirmiş ve geliştirmiştir (Levesque, 2010).

Bu tez kapsamında incelenecek olan Betelgeuse (α Orionis), M2 Iab tayf türünden bir kırmızı süperdevdir (Dolan et al., 2016). Sahip olduğu büyük yarıçap değeri sayesinde ilk kez doğrudan görüntülenebilmiştir (Gilliland & Dupree, 1996).

Büyüklüğü ve aynı zamanda yakın olması dolayısıyla parlak bir yıldızdır. Avcı (Orion) Takımyıldızı'nın en parlak yıldızı olarak işaretlenmiştir ve eski tarihlerden beri gözlem kayıtlarına rastlanabilir. Betelgeuse, SRc alt sınıfına ait değişen yıldız olarak kabul edilmektedir. Fotometrik değişiminin zonklama (Kiss et al., 2006), toz oluşumu (Kervella, 2009) ve yıldız aktivitesinden (Alexeeva et al., 2021) kaynaklandığı düşünülmektedir. Zonklama dönemleri; birincil dönem 388 ± 30 gün, uzun ikincil dönem (Long Secondary Period - LSP) 2050 ± 460 gündür (Kiss et al., 2006). Betelgeuse hakkında daha detaylı çalışmalara Bölüm 6'da değinilecektir.

2.5 Wolf – Rayet Yıldızları

Wolf – Rayet (WR) yıldızları, bir tayf sınıfını ifade etmektedir (Shenar, 2022). Tipik helyum (He) zengini olanlar için WR biçiminde ifade edilmelerinin yanı sıra azot (N) bakımından zengin olan yıldızlar için WN, karbon (C) ve oksijen (O) bakımından zengin olanları için sırasıyla WC ve WO ifadeleri kullanılmaktadır (Smith, 1968). Tayfları alındığında, tanımlandığı elementlere ait geniş ve güçlü salma çizgileri sergilerler. Evrimleşmiş ve olağanüstü büyüklükte kütleyle sahip yıldızlardır (Conti, 2000). Bu tür yıldızlar 2000 km s^{-1} değerine ulaşan hızdaki yıldız rüzgârları ile kütle kaybederler. Sahip oldukları bu sıcak ve güçlü yıldız rüzgârları, onları işaret eden karakteristik özellikleridir. Yıldız rüzgârları, Eddington sınırına yakın olmalarından kaynaklanmaktadır. Eddington sınırı bir yıldızın sahip olabileceği en yüksek ışıyım gücü olarak tanımlanabilir. Hidrostatik dengede olan bir yıldız kütesine bağlı olarak belirli bir ışıyım gücüne sahip olacaktır. Kütle – ışıyım gücü bağıntısı kullanılarak bir yıldızın olası en yüksek kütesi tahmin edilebilmektedir. Samanyolu Gökadası'nda belirlenmiş 667 WR yıldızı bulunmaktadır (Shenar, 2022). Yerel gökada grubunun yakın gökadalarda WR'lere yönelik ilk tespit çalışmaları Massey and Conti (1983) tarafından özetlenmektedir.

2.6 Süpernovalar

Büyük kütleli yıldızların yaşamı, yıldızlararası maddeyi çeşitlendirerek büyük miktarlarda enerji sağlamalarının ardından süpernova olarak sona erer. SN 1987A, yerel grupta bilinen bir yıldızın patlamasına ilişkin örnek olarak verilebilir. SN 1987A, B tayf türünden yaklaşık $20M_{\odot}$ kütleyle sahip mavi süperdev (Blue

Super Giants – BSG) bir yıldızdır. Süpernovalar hidrojen zengin Tür II ya da hidrojen ve helyum açısından fakir Tür Ib ve Ic olabilir. Tür II sınıflandırılması, ışık eğrisi veya tayf özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Ib ve Ic türlerinin tayflarında hidrojen özelliklerini barındırmaması, öncüllerinin dış hidrojen zarfının soyulduğunu göstermektedir. Bu soyulmanın nasıl gerçekleştiğine ilişkin iki kuram ortaya çıkmakta; ilk olarak sahip oldukları güçlü yıldız rüzgârları, ikinci olarak da ikili etkileşim yoluyla gerçekleşen kütle kaybı. İlk senaryo, yıldızları Wolf-Rayet yıldızları ile ilişkilendirmiş olsa da bunu kanıtlayacak ata yıldızla ait gözlemsel bir kanıt elde edilememiştir. Bu durum Wolf-Rayet yıldızlarının tanımlanmasının önemini bir kez daha vurgulamaktadır (Massey, 2013).



3. KIRMIZI SÜPERDEVLERİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

Kırmızı süperdevler, bir yıldızın sahip olabileceği en büyük yarıçapa erişebilen, büyük kütleli ve evrimleşmiş yıldızlardır. Başlangıç kütlesi $8 M_{\odot}$ - $40 M_{\odot}$ aralığındaki tüm yıldızların, çekirdekte helyum yakma aşması olan kırmızı süperdev evresinden geçtiği kabul edilmektedir. Kırmızı süperdev aşaması, 35 milyon yıldan kısa sürmektedir ve yıldızın tüm yaşam süresinin oldukça kısa bir dilimini kapsamaktadır (Britavskiy et al., 2019). Kırmızı süperdevler, anakoldan ayrılmalarının ardından Hertzsprung-Russell (H-R) diyagramı üzerinde neredeyse yatay bir yolu takip ederler. Başlangıç kütlelerine ve kütle kayıp oranlarına bağlı olarak geçirdiği evreler farklılık göstermektedir. Hidrojen yakan öncüllerinden evrilen dev yıldızlar kısa ömürlü üst dev aşaması sonrasında “sarı boşluk – (yellow void)” aralığını geçerler. Bazı kırmızı süperdev yıldızlar için bu aşama, süpernova patlamasından önce geçirdiği son aşamadır. Daha büyük kütleli olan yıldızlar için kırmızı süperdev aşaması tekrarlanır. Ardından başlangıç kütlelerine bağlı olarak Wolf-Rayet yıldızı veya mavi süperdev olarak patlar ve yaşamları sona erer (Levesque et al., 2010).

Dev yıldızların yüzey çekim ivmeleri, dış atmosferlerinde düşük bir değere ulaşmaktadır. Dış katmanlarındaki yıldız maddesi, düşük yüzey çekimiyle orantılı olarak yıldıza daha zayıf biçimde bağlıdır. Bu durum, genişlemiş bir atmosferden kaybedilen madde miktarının artmasıyla sonuçlanır.

3.1. Kırmızı Süperdevlerin Belirlenmesinin Metal Bolluğuna Bağlılığı

H-R diyagramı üzerinde kırmızı süperdevler ve kırmızı süperdevlerden daha düşük başlangıç kütlesine ($0.5 M_{\odot}$ – $8 M_{\odot}$) sahip bir yıldız grubunu ifade eden Asimptotik Dev Kolu (Asymptotic Giant Branch – AGB) arasında net bir ayrım yapılamamaktadır. AGB yıldızları, düşük ve orta kütleli yıldızların evrimlerinin geç dönem aşamasıdır. Kütle üst sınır değeri, yıldızların konveksiyon hareketlerine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Bu yıldızların çekirdeklerinde nükleer tepkimeler sona ermiştir. Karbon ve oksijence zengin çekirdeklerini, hidrojen ve helyumun yanmasıyla enerji açığa çıkartan ince kabuk yapı sarmaktadır. Yıldızın yaşamı sona ermeden geçirdiği son evrim aşamasıdır. Evrenin yaşı göz önüne

alındığında $0.8 M_{\odot}$ 'ten daha küçük bir yıldızın gözlemi yapılamamıştır çünkü bu kütleye sahip bir yıldız, evrim sürecinde henüz bu evreye ulaşamamıştır (Höfner and Olofsson, 2018).

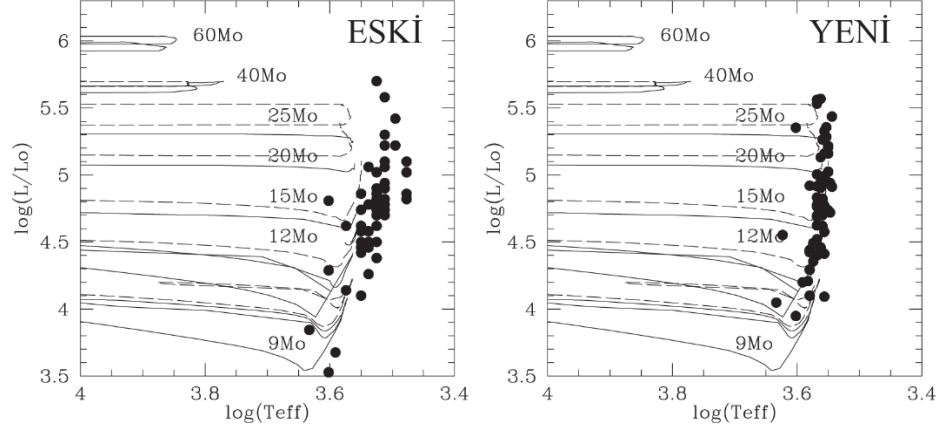
RSG yıldızlarının $\geq 10 M_{\odot}$ ile AGB yıldızlarının $\leq 10 M_{\odot}$ üyeleri arasında evrimsel olarak açık biçimde bir farklılık görülüyor olsa da H-R diyagramı üzerinde bu ayrım net yapılamamaktadır. Düşük parlaklık değerine sahip RSG'ler ile AGB yıldızları birbirine yakın bölgeler üzerinde işaretlenmektedir (Brunish et al., 1986). Süper-AGB olarak ifade edilen çok parlak üyeler tipik RSG yıldızları ile aynı bölgede yer almaktadır.

Bunun yanı sıra gökada dışı kırmızı süperdevlerin belirlenmesinde de birtakım zorluklar yaşanabilmektedir. Humphreys and Sandage (1980), M33 üzerinde parlak yıldızları belirlemeye yönelik yaptıkları çalışmada bu zorluğu ifade etmişlerdir. Yaşanan bu karmaşa Massey (1998) tarafından çözüme kavuşmuş ve karışıklığa neden olan yıldızların %50'sinin ön planda yer alan kırmızı cüceler olduğu anlaşılmıştır. Massey bu çalışmasında arka planda yer alan düşük yüzey çekimine sahip dev yıldızlar ile ön plandaki yüksek yüzey çekimine sahip cüceler arasında net bir ayrım yapmaya imkân veren bir araç geliştirmiştir. Yıldızların (B-V)'ye karşılık (V-R) renklerini, renk-renk diyagramında yerleştirerek, (B-V) renklerinde açıkça bir ayrım olduğunu ortaya çıkartmıştır.

3.2. Etkin Sıcaklık (T_e) ve Metal Bolluğu

Bir kırmızı süperdev yıldızın H-R diyagramındaki konumu etkin sıcaklığı (T_e) ile belirlenmektedir. Soğuk yıldızlar olmalarından kaynaklı, önemli bolometrik düzeltmelere ihtiyaç duymaktadırlar. Etkin sıcaklıklarındaki küçük hata payları, bolometrik düzeltme söz konusu olduğunda dikkate değer hata paylarına ulaşmaktadır. Bu nedenle etkin sıcaklık değerlerinin daha kesin sonuçlarla belirlenmeleri gerekmektedir. Levesque et al. (2005) MARCS yıldız atmosfer modellerini kullanarak yeni bir T_e belirleme ölçeği geliştirmişlerdir. Josselin et al. (2000) bolometrik parlaklık (M_V) belirlemek için K bandının oldukça kullanışlı olduğunu göstermektedir. K bandı ile elde edilen parlaklık değerlerinin, kızıllaşma etkilerine karşı daha az etkilendiklerini ve ayrıca K bandındaki bolometrik düzeltmenin T_e ve yüzey çekim ivmesine göre daha sabit kaldığını ifade etmektedirler. Sonuç olarak moleküler bant ve $(V-K)_0$ rengi ile belirlenen

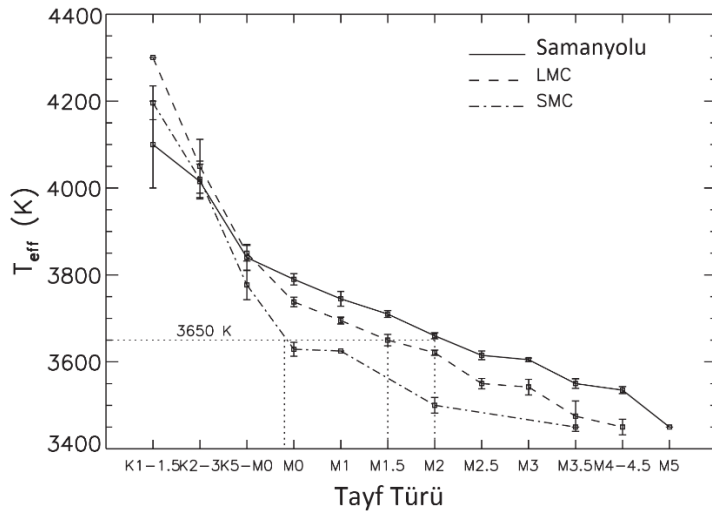
T_e değerleri, 100 K değerinden fazla olmayan hata payı ile temsil edilmektedir. Şekil 3.1’de, literatürden alınan RSG verileri ile Levesque et al. (2005)’ten alınan uyarlanmış RSG değerleri gösterilmiştir. Gelişmiş yöntemler kullanılarak belirlenen etkin sıcaklık değerlerinin, önceki tahminlere kıyasla daha yüksek değerlerde olduğu göze çarpmaktadır.



Şekil 3.1: Evrim yolları üzerinde işaretlenen RSG yıldızları. Solda Humphreys (1978)'den alınan değerler, sağda Levesque et al. (2005)'den alınan ve düzeltilmiş yeni değerler ile işaretlenen RSG yıldızları görülmektedir. Evrim yolları Meynet and Maeder (2003)'den alınmıştır (Levesque, 2010).

Büyük Macellan Bulutu (Large Magellanic Cloud – LMC) ve Küçük Macellan Bulutu (Small Magellanic Cloud – SMC)’nda gözlenen RSG’ler üzerine yapılan çalışmalar, yıldızların metal bolluğu (Z) ile T_e değerleri arasında bir ilişki olduğunu göstermektedir. SMC’de gözlenen RSG’lerin T_e değerleri, LMC ve Samanyolu Gökadası örneklerine kıyasla daha yüksek değerde çıkmaktadır. Bu durum, düşük metal bolluğuna sahip yıldızlarda, dönme-karıştırma etkilerinin artmasıyla açıklanmaktadır (Maeder and Meynet, 2001). Bunun yanı sıra Elias et al. (1985) Samanyolu Gökadası ve Macellan Bulutları’nda bulunan RSG’ler üzerine yapmış olduğu çalışmalarda, tayf sınıflarına ilişkin farklılıklar gözlemlemiştir. Düşük metal bolluğuna sahip yıldızların tayf sınıfları, ortalama bir RSG tayf sınıfına göre daha ön tayf türünü işaret etmektedir. Örneğin SMC’de bulunan ortalama yaştaki bir RSG’nin metal bolluğu $Z=0,2 Z_{\odot}$ iken tayf sınıfı K5-K7 olarak belirlenmekte. LMC’de M1 I tayf türünde $Z=0.5 Z_{\odot}$, Samanyolu Gökadası’nda $Z=Z_{\odot}$ iken tayf sınıfı M2 I olarak belirlenmekte.

Metal bolluğundan ileri gelen, tayf sınıfı ve T_e farklılıkları iki farklı senaryo ile açıklanmaktadır. İlk olarak tayf sınıfı belirlemede kullanılan temel parametre TiO bantları, sıcaklığa bağlı olmakla birlikte metal bolluğuna da duyarlılık göstermektedir. Düşük metal bolluğunda daha zayıf bir etki görülmektedir. Örneğin $T_e=3650$ K olan bir kırmızı süperdev Samanyolu Gökadası'nda M2 I, LMC'de M1.5 I, SMC'de K5-M0 I olarak belirlenebilmektedir. İkinci açıklama Hayashi sınırını içermektedir. Burada vurgulanan nokta, bir yıldız hidrostatik dengede iken ne kadar soğuk, dolayısıyla ne kadar geri tayf türü olabileceğinin Hayashi sınırı tarafından kısıtlanmasıdır. Düşük metal bolluğu yıldızı daha yüksek sıcaklıklara yani ön tayf türüne doğru taşır. LMC'de bulunan 15 – 25 $M_\odot$ aralığındaki bir RSG, evriminin en soğuk aşamalarında Samanyolu Gökadası'na göre 100 – 150 K, SMC'de bulunan bir yıldız ise yaklaşık 500 K daha sıcak olmaktadır. Samanyolu, LMC ve SMC'deki RSG'lerin tayf türü ve T_e ilişkisi Şekil 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.2: Samanyolu, LMC ve SMC'deki RSG'lerin tayf türü ve T_e ilişkisi (Levesque, 2010).

3.3. Maksimum Işınım Gücü (L_{max}) ve Metal Bolluğu

Van den Bergh (1968, 1973) çalışmalarında, yakın gökadalardaki mavi süperdevlerin ve RSG'lerin sayılarının, gökadalardan salt parlaklıklarıyla ilişkili olduğunu gösterir. Bu çalışmaya göre gökadalardan salt parlaklıklarındaki azalma, göreceli RSG sayılarında da azalmaya işaret etmektedir. Gökadalardaki parlaklık ve metal bolluğu arasındaki ilişki, kimyasal bolluk ile açıklanır. Humphreys and Davidson (1979) bu durumun evrimsel sürecin bir parçası olabileceğini ifade

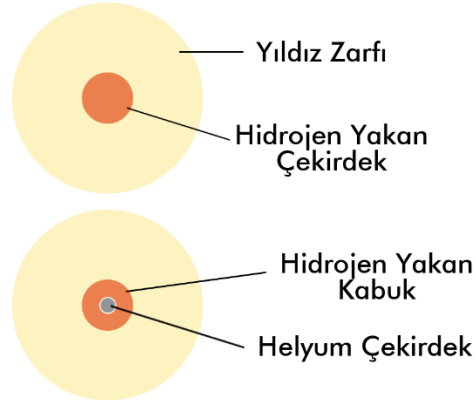
etmesinin ardından Maeder et al. (1980) kütle kaybı oranlarının RSG ve WR yıldızlarının ömürlerine etki edebileceğini önermektedir. Ayrıca RSG/WR oranının azalmasının, metal bolluğunun artması ile mümkün olabileceğini ifade etmektedir.

RSG'lerin metal bolluğu ile en yüksek ışıyım güçleri ($L_{\max}$) arasında bir ilişki bulunmaktadır (Massey, 1998). Düşük metal bolluğuna sahip kırmızı süperdevlerin daha yüksek parlaklıklara erişebildiği belirtilmektedir. Bu durum kütle kaybıyla ilişkilendirilir. Yüksek metal bolluğuna sahip belirli kütledeki yıldızlar, yüksek kütle kayıp oranının bir sonucu olarak anakoldan ayrılmalarının hemen ardından dış hidrojen ve helyum katmanlarını kaybederek hızla Wolf-Rayet yıldızına dönüşmesi beklenir. Düşük metal bolluğunda fakat aynı kütledeki bir başka yıldız, dış katmanlarını daha yavaş ilerleyen bir süreçte kaybedeceğinden, kırmızı süperdev evresine evrimleşebilir. Bununla birlikte kırmızı süperdevlere ilişkin en yüksek parlaklık değerleri belirlenirken, düşük metal bolluğuna sahip geri tayf türündeki sarı süperdevlerin de yıldız örneklerine dahil edilmesi önemlidir. Ancak sarı süperdevlerin çok kısa ömürleri ve yakın gökadarlar için ön planda bulunan diğer yıldızlarla karışıklık yaratma durumları göz önüne alındığında bu durum zorlayıcı olmaktadır (Massey et al., 2009).

Son olarak RSG evrimlerinin son aşamasında yaşanan bir sorun göze çarpmaktadır. $L_{\max}$ değeriyle belirlenen araştırmalar göstermektedir ki RSG'lerin en yüksek kütle değerleri 25-30 $M_{\odot}$ aralığına denk gelmektedir. Fakat yapılan gözlemlerde, Tür II-P süpernova patlamasıyla yaşamları son bulan kırmızı süperdevlerin kütleleri 17 $M_{\odot}$ değerinin üzerine çıkmamaktadır. Yani 17 $M_{\odot}$ değeri ile 25-30 $M_{\odot}$ kütle aralığında süpernova patlamasının gerçekleşmediği dikkat çekmektedir. Bu, literatürde "kırmızı süperdev sorunu" olarak yer alır (Smartt, 2009). Bu çıkarım yapılırken RSG'lerin kütle değerlerinin yalnızca $L_{\max}$ değerleriyle bağlantılı olarak elde edilmesinin çok kesin sonuçlar çıkarmayacağı ifade edilmektedir. H-R diyagramındaki Hayashi sınırında yıldızların evrim yolları neredeyse dik bir yol izler. Bu bölgede yer alan farklı kütlelerdeki yıldızların parlaklıkları iç içe geçmeye başlar. Bu nedenle Hayashi sınırında, parlaklık değerlerinden yola çıkılarak kütle analizi yapmak anlamsız olmaktadır.

4. KIRMIZI SÜPERDEVLERİN EVRİMİ

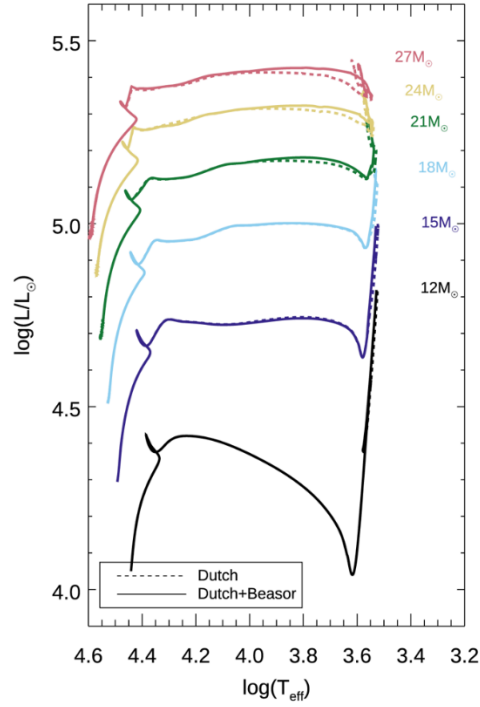
Yıldızlar, çekirdeklerinde hidrojen füzyonu gerçekleşmeye başladığında anakola yerleşmiş ve ZAMS (Zero Age Main Sequence – Sıfır Yaş Anakol) adı verilen noktaya ulaşmış olurlar. Bu aşamada yıldızın içe doğru çökmesi durur, çekirdeğinde hidrojen yanmaya başlar, hidrostatik denge sağlanmış olur. Hidrojen, yıldızlarda en bol bulunan element olduğu için nükleer tepkimeler uzun süre ve dengeli biçimde devam edebilir. Anakol evresi, yıldız yaşamının büyük bir bölümünü kapsar. Füzyon tepkimeleri sonucunda hidrojen kütlelerinin yalnızca %0.7'si enerjiye dönüşür. Bu, anakol evrimi boyunca yıldızın toplam kütlelerinde kayda değer bir değişim yaratmaz. Anakol evresinin sona ermesi, füzyon tepkimeleri sonucunda hidrojenin tükenmesiyle gerçekleşir. Eğer yıldızın iç ısı, helyumu tutuşturacak sıcaklığa ulaşabilirse, helyum yanma süreci başlar. Yıldızın çekirdeğinde helyumu yakabilecek sıcaklığa ulaşması, kütleçekim kuvvetinin galip gelerek hidrostatik dengeyi bozması ve büzülen çekirdeğin sıcaklığını arttırmasıyla mümkün olur. Helyum yakan çekirdeğin üst katmanında hidrojen yakan kabuk meydana gelir (Şekil 4.1). Helyum sentezi gerçekleşirken yıldızın sıcaklığı, parlaklığı ve yarıçapı değişime uğrar. Bu noktada yıldız anakolu terk eder ve anakol sonrası evrimi başlamış olur. Anakol evriminin bitişi, hidrostatik dengenin bozulmasıyla ifade edilen bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 4.1: Hidrojen yakan yıldız çekirdeği ile helyum yakan çekirdeğin karşılaştırması.

Başlangıç kütlesi $8 M_{\odot}$ 'in altında olan yıldızlar, yaşamlarının sonunda beyaz cüce olurlar. Büyük kütleli yıldızlar ($M > 8 M_{\odot}$) anakol yaşamlarına O veya B tayf türü olarak başlar. İlerleyen süreçte çekirdeklerinde CNO çevrimi ile hidrojen

yakarlar (Massey, 2013). Dev yıldızlar, genel kabul görmüş evrim modeline göre, anakoldan ayrılımlarının ardından mavi süperdev (BSG), kırmızı süperdev (RSG) ve ardından nihai kaderleri olan süpernova (SN) patlamasına kadar ilerleyen aşamaları hızla takip ederler (Gordon and Humphreys, 2019). Şekil 4.2’de $12 - 27 M_{\odot}$ kütle aralığındaki dev yıldızların evrim modelleri görülmektedir.



Şekil 4.2: Farklı kütlelerdeki yıldızların evrim yolları. Siyah çizgi $12 M_{\odot}$, lacivert çizgi $15 M_{\odot}$, açık mavi çizgi $18 M_{\odot}$, yeşil çizgi $21 M_{\odot}$, sarı çizgi $24 M_{\odot}$, kırmızı çizgi $27 M_{\odot}$ başlangıç kütlelerine sahip yıldızları temsil etmekte (Beasor, 2021).

Yıldızlar çok yüksek sıcaklıkları ve bunu destekleyen diğer fiziksel koşulları sayesinde füzyon tepkimelerini gerçekleştirirler. Hidrojen elementinin helyuma dönüşmesiyle başlayan füzyon tepkimeleri, gerekli olan sıcaklık sağlandığı sürece daha büyük atomlara sahip elementlere doğru devam eder. Silikon elementi üretilene kadar nükleer faaliyetler devam eder. Bu aşamadan sonra çekirdek çökmesi meydana gelir ve süpernova patlaması gerçekleşir. Bu tür yıldızlar büyük kütleli olarak kabul edilir (Hirschi et al., 2010). Belirli kütle aralıklarında farklı evrim süreçleri ve dolayısıyla farklı süpernova türleri meydana gelmektedir. (Çizelge 4.1). Diğer ağır elementlerin üretim süreçleri bu süpernova patlamaları sırasında gerçekleşmektedir.

Çizelge 4.1: Kütle aralıklarına göre yıldızların evrim aşamaları (Hirschi et al., 2010).

Kütle aralığı	Gerçekleşen durum
$8 M_{\odot} - 13 M_{\odot}$	Anakol evriminden sonra RSG olur. Bu sırada mavi döngüden (Blue Loop) geçer.
$13 M_{\odot} - 25 M_{\odot}$	Anakolun ardından H-R diyagramı üzerinde RSG bölgesine doru ilerler. Son aşamalarında Tür II süpernova olarak patlar.
$25 M_{\odot} - 40 M_{\odot}$	RSG olur ve kütle kaybı sonucunda hidrojen zengin zarfını kaybeder. Son evrede Ib SNe olarak yaşamı sonlanan bir Wolf-Rayet yıldızı olur.
$> 40 M_{\odot}$	Çok yüksek kütle kayıp oranı nedeniyle RSG evresine ulaşmadan hidrojen zengini zarfını kaybeder. Bununla birlikte H-R diyagramının en soğuk bölgesine ulaşamaz. Kütlelerine bağlı olarak mavi süperdev (BSG) ve parlak mavi değişenler (LBV) aşamalarından geçer. Genellikle Ib/c SNe olarak yaşamı sona erer. Fakat son yapılan çalışmalarda LBV yıldızlarının Tür II SNe öncüleri olduğu tespit edilmiştir.

Yıldız oluşurken merkezinde biriken hidrojenin kütlesi arttıkça, sıcaklık ve yoğunluk da buna bağlı olarak artmaktadır. Artan sıcaklık protonlara daha fazla kinetik enerji kazandırır ve diğer protonlar ile etkileşime girme olasılığını artırır. Füzyon tepkimelerinde, diğer elementlerle birlikte en çok hidrojen kütlesi baskın rol oynar. Tepkime hızının artmasıyla birim zamanda daha fazla hidrojen helyuma dönüşür. Üretilen enerji ve buna bağlı olarak yıldızın parlaklığı da artar¹. Büyük kütleli yıldızların yaşam sürelerinin, küçük kütleli olanlara kıyasla daha kısa olmasının nedeni bu şekilde açıklanmaktadır (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2: Anakol yıldızlarının yaşam süreleri.

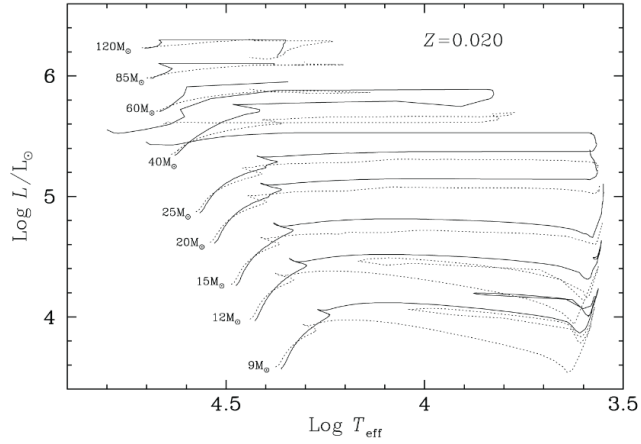
Tayf Türü	Yüzey Sıcaklığı (K)	Kütle ($M_{\odot}$)	Anakol Yaşam Süresi (yıl)
O5	54000	40	1 milyon
B0	29200	16	10 milyon
A0	9600	3.3	500 milyon
F0	7350	1.7	2,7 milyar
G0	6050	1.1	9 milyar
K0	5240	0.8	14 milyar
M0	3750	0.4	200 milyar

¹ <https://pressbooks.online.ucf.edu/astronomybc/chapter/22-1-evolution-from-the-main-sequence-to-red-giants/>

4.1. Kırmızı Süperdev Yıldızlarda Metal Bolluğu ve Kütle Kaybı

Büyük kütleli yıldızlar kütlelerinin belirli bir kısmını kırmızı süperdev aşamasında kaybeder. RSG aşamasındaki bir yıldızın yarıçapı $500 - 1500 R_{\odot}$ aralığında olabilir. Buna bağlı olarak bir RSG'nin yüzey çekim ivmesi oldukça azdır. Düşük kütleçekimi, yıldızın madde kaybını kolaylaştıran bir faktör olarak karşımıza çıkar. Birçok RSG'nin kütle kayıp oranı $10^{-6} - 10^{-4} M_{\odot} \text{yıl}^{-1}$ aralığındadır (Mauron and Josselin, 2011). Samanyolu Gökadası'nda bulunan O tayf türü yıldızların kütle kayıp oranlarının $0.5 - 20 \times 10^{-6} M_{\odot} \text{yıl}^{-1}$ olduğu bilinmektedir (Puls et al., 1996). Çok büyük kütleli yıldızlar ($100 M_{\odot}$) evrimleri boyunca kütlelerinin %50'sini kaybedebilir (de Loore, De Greve, & Lamers, 1977). Kütle kaybının varlığı, evrimleşmiş büyük kütleli yıldızlarda gözlenen mavi döngünün ortaya çıkmasında önemli bir rol üstlenmektedir (Chiosi and Maeder, 1986).

Crowther et al. (2002) tarafından, demir atomunun W-R yıldız rüzgarlarını yönlendirmede etkili olduğu ve buna bağlı olarak kütle kaybının metal bolluğuna bağlı olabileceği tartışılmıştır. Yıldızların evrim yollarının konveksiyon ve karışım mekanizmalarına karşı hassas olduğu bilinmektedir (Maeder and Meynet 1987). Yıldız evrim modellerine bu süreçlerin nasıl uygulanacağı konusunda bazı belirsizlikler bulunmaktadır. Buna bağlı olarak yıldızların dönme hareketlerinin evrim üzerindeki önemli etkisi son yıllarda etkin biçimde tartışılmaktadır (Maeder and Meynet, 2000) (Şekil 4.3). Manyetik alanlar, Kappa mekanizması, akustik dalgalar ve yıldızların dönme hareketlerinin kütle kaybında etkili olup olmadığı incelenmektedir.



Şekil 4.3: Büyük kütleli yıldızların evrim yolu modeli. Sürekli çizgiler dönme etkisi altında, kesikli çizgiler dönme etkisi olmadan gerçekleşen evrim yolunu ifade etmektedir (Maeder and Meynet, 2000).

Bir yıldızın ileri evrim aşamalarını belirleyen temel değer kütle olmakla birlikte, metal bolluğu da önemli derecede etkili olmaktadır. Metal bolluğunun etkisi, ışıınım basıncıyla harekete geçen yıldız rüzgârları ve onun da yol açtığı kütle kaybı ile ortaya çıkmaktadır (Massey, 2003). Metal bolluğu yıldızın opaklığını doğrudan etkilemektedir. Düşük metal bolluğu, düşük opaklık anlamına gelir. Bu nedenle daha düşük metal bolluğuna sahip anakol yıldızları daha sıkışık yapıdadır ve daha sıcak (mavi) yüzeye sahiptirler. Metal bolluğunun düşük olması, kırmızı süperdev evresine geçişi zorlaştırmaktadır. Ayrıca bir yıldızın düşük metal bolluğu, daha düşük kütle kayıp oranına işaret etmektedir (Hirschi et al., 2010).

Yıldızların kütle kayıp oranları, yıldız yüzeyinin metal bolluğu analiziyle belirlenmektedir. Fakat konveksiyon ve dönme hareketleri, yıldızların anakoldan sonraki kimyasal bolluğunu farklılaştırmaktadır. Bu nedenle atom türlerinin kütle kaybı ve opaklığa katkısının belirlenmesi önemli olmaktadır. Örneğin O tayf türü yıldızlarda ve W-R yıldızlarında demir atomunun, ışıınıma dayalı kütle kaybında baskın atom olduğu tespit edilmiştir (Vink and de Koter, 2005). Diğer yandan geri tayf türü K – M yıldızlarının tayf sınıfları, büyük ölçüde sıcaklığa karşı hassas olan TiO bant çizgilerinin kuvvetine bağlı olarak belirlenir. Sonuç olarak bu tür yıldızların tayfsal sınıflandırmalarında da metal bolluğu önem kazanmaktadır (Levesque, 2006).

4.2. Kırmızı Süperdev Yıldızlarda Yakın Çevre ve Toz Oluşumu

Soğuk kırmızı süperdev yıldızlar, gökadalara kimyasal kompozisyonunu oluşturan önemli yapıtaşları olarak kabul edilmektedir. RSG'ler arasında oldukça yaygın bir durum olan çevresel toz ortam, kütle kaybının bir kanıtı olarak sunulmaktadır. Oldukça geniş atmosferleri, yıldızın içinde meydana gelen konveksiyon, zonklama, kütle kaybı gibi süreçler ile birleşerek toz oluşumunu destekler. Bunların yanı sıra süpernova patlamaları da yıldızlararası ortamın kimyasını belirlemektedir. Nihai evrimlerinin sonucu süpernova olan ve evrim süreçlerinde kütle kaybeden, dolayısıyla çevresel ortama madde kazandıran RSG'lerin araştırılması bu bağlamda çok önemlidir. Hem yıldızlararası ortamın kimyasal zenginlik kazanmasında hem de moleküler bulutların süpernova patlamasıyla tedirgin edilerek yeni yıldızların doğmasında RSG'lerin payı oldukça büyüktür.

Yıldızlararası ortama fırlatılan maddenin, toz yapıyı oluşturması için silikat türleri (oksijen zengin) (Verhoelst et al. 2009) ve karbon (C) bazlı bazı moleküller olması gerektiği bilinmektedir. (Sylvester et al. 1994). Soğuk yıldız çevresinde oluşan toz yapının genel karakteristik özelliklerine göre $C/O < 1$ bolluğuna sahip ortamlar için oksijen zengin taneciklerin, $C/O > 1$ bolluğuna sahip ortamlarda ise karbon zengini taneciklerin oluşması beklenir. Sylvester'ın et al. (1994) çalışmasında bu beklentiye karşılayan veriler elde edilmiş olmasıyla birlikte bazı istisnai yıldızların varlığı da belirtilmektedir.

RSG'lerde kütle kaybı ve bunun sonucunda meydana gelen toz oluşumu biliniyor olsa da süreç tüm ayrıntılarıyla açıklanamamaktadır. Kütle kaybeden dev yıldızlarda olduğu gibi zonklama, konveksiyon ve şokların meydana gelmesi atmosferik hareketlilik yaratır (Kiss et al., 2006). Ortaya çıkan bu hareketlilik tozun oluşması için yeterince soğuktur. Son olarak dışarı doğru akışı sağlayacak ışıyım basıncı ile süreç tamamlanır. Tüm bu bilinenlere rağmen tüm işleyiş içerisinde önemli boşluklar doldurulamamıştır. Örneğin; demirce zengin silikat taneciklerinin oluşması yeterince iyi anlaşılamamıştır. Yeterli toz oluşmadığında kütle kaybı mekanizmalarının tamamen anlaşılması gerekir (Mauron and Josselin, 2011). Ayrıca yıldız çevresindeki tozun varlığı, fiziksel değerlerin belirlenmesi konusunda zorluklar yaratmaktadır. Bu zorlukların üstesinden gelebilmek ve yıldızlar

hakkında daha doğru astrofiziksel parametreleri ortaya koymak adına toz yapıların incelenmesi önemlidir.

Literatürde, RSG yıldız rüzgârlarıyla ilişkili çok sayıda kızlötesi gözlem yer almaktadır. VY CMa, μ Cep ve α Ori (Betelgeuse) ile çeşitli yıldızları içeren gözlemlerde moleküller tespit edilmiştir. Danielson et al. (1965) tarafından μ Cep ve α Ori'yi kapsayan çalışmada, ilk kez su molekülüne (H_2O) rastlanmıştır. Tsuji (2000; 2006) elde ettiği yıldız tayflarında su buharı soğurma bantları tespit etmiş ve Mira değişenleri olan R Leo ve o Cet yıldızlarında olağanüstü güçlü bantlara rastlamıştır. Soğurma bantları, MOLsphere adı verilen moleküler katmandan ileri gelmektedir. Bu katman yıldız fotosferine yakın, $\sim 2 R_\star$ mesafede yer alır. Özel bir durum olarak SiO, H_2O , Al_2O_3 parçacıkları içeren ince bir MOLsphere katmanı, Betelgeuse'a $1.3 R_\star$ mesafede bulunmaktadır. RSG rüzgârlarının daha iyi anlaşılmasına ilişkin çalışmalar, Royer et al. (2010) tarafından VY CMa yıldızında gerçekleştirilmiştir. Burada, H_2O tarafından baskın ortamda oksijence zengin kimyasal bollukla birlikte HCN ve CS gibi karbon taşıyan moleküllerin yer aldığı tespit edilmiştir. Çizelge 4.3'te bazı yıldızların atmosferlerinde tespit edilen molekül türleri listelenmiştir.

Çizelge 4.3: α Ori, VY CMa ve NML Cyg yıldızlarında gözlenen moleküller (Ziurys et al., 2007; Tenenbaum & Ziurys, 2009; Teyssier et al., 2012; Kaminski et al., 2013).

Tür	α Ori	NML Cyg	VY CMa
CO	X	X	X
H_2O	X	X	X
OH	X	X	X
SiO		X	X
HCN		X	X
H_2S		X	X
CS			X
SiS			X
CN			X
PN			X
AlO			X
TiO			X
TiO_2			X
NaCl			X
HCO^+			X

5. KIRMIZI SÜPERDEV BETELGEUSE

5.1 Betelgeuse'un Tarihçesi

Yer'e en yakın kırmızı süperdev yıldızlardan biri olan Betelgeuse; yıldız evrimi, kırmızı süperdev, değişen yıldızlar gibi alanlara ilişkin çok değerli olanaklar sunmaktadır. Büyük yarıçapı, yüksek ışıyım gücü, zonklamaya bağlı parlaklık değişimi vb. özellikleri astronomlar için oldukça uygun gözlem koşulları sağlamaktadır. Betelgeuse, Güneş dışında gökyüzünde görülebilecek en büyük açısız çapa sahip yıldızdır. Bu da onu yüz yılı aşkın süredir, düzenli olarak gözlemi yapılan bir yıldız yapar. Bununla birlikte Betelgeuse'un ilk gözlemleri ve sahip olduğu ün modern çağın öncesine dayanır. Tarih öncesi dönemlerden bu yana Avcı (Orion) Takımyıldızı'nın omzunda parlayan Betelgeuse, insanları etkilemiştir.

Betelgeuse adına ilişkin çeşitli varsayımlar bulunmaktadır. Tarih boyunca aktarılan ve çevrilen kelimeler dolayısıyla yanlış yorumlanmış olabileceğine dair yorumlar yapılmaktadır. İlk olarak Arap bilim insanları tarafından "devin omzu" anlamındaki bat al-jawza olarak adlandırılan yıldızın son hecesinin al-Jawza'dan gelmiş olabileceği genel kabul görmektedir¹. Türkçe'de Betelgöz olarak kullanılabilmektedir. Avcı (Orion) Takımyıldızı'nın bir üyesi olduğundan sıklıkla karşımıza α Ori olarak çıkmaktadır.

İnsan yaşamına kıyasla çok daha uzun süredir gözlemlerinin yapıyor olması, Betelgeuse hakkında daha detaylı bilgiler edinmemizi sağlamaktadır. Örneğin Betelgeuse'un günümüzde olduğu kadar "kırmızı" olmadığı, yazılı tarihsel kayıtların araştırılmasıyla ortaya çıkartılmış bir durumdur. Antik Roma ve Çin uygarlıklarının kayıtları incelendiğinde, bugünkünden önemli düzeyde farklı, Satürn'e benzetilerek sarı renkte olduğu rapor edilmektedir (Neuhauser et al., 2022). Bir-iki bin yıllık zaman aralığında Betelgeuse'un değişen rengi, evrimiyle ilişkili önemli soruları yanıtlayabilir. Özellikle geçtiğimiz yıllarda meydana gelen, tarihinin en büyük sönme olayında Betelgeuse'un parlaklığı yaklaşık $m_v=1^m.1$ düşmüştür (Guinan et al., 2019a). "Büyük Sönme" adı verilen bu olay Bölüm 5.7'de ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Betelgeuse'un ilk bilimsel tabanlı gözlemleri Sir John Herschel tarafından gerçekleştirilmiştir. 1836 ve 1840 yılları arasında parlaklığının düştüğünü

kaydetmiş ve 1839 yılında Betelgeuse'un değişen yıldız olduğunu ifade etmiştir. Ardından 1849 yılında 'Outlines of Astronomy' kitabında bu gözlemleri yayımlanmıştır. Zaman içinde $m_v=1^m.2$ değerine kadar düşen parlaklığının yanı sıra aynı takımyıldızın içinde bulunduğu Rigel ile kıyaslanabilecek kadar yüksek bir parlaklığa $m_v=0^m.4$ ulaştığı gözlenmiştir². Albert A. Michelson tarafından 1920 yılında ilk kez bir yıldızın açısal çap ölçümü Betelgeuse üzerinde yapılmıştır.

1985 yılında Roddier (1985) tarafından Betelgeuse çevresinde bulunan toz yapıya ilişkin kanıtlar tespit edilmiştir. Güneş dışındaki bir yıldızla ait ilk doğrudan görüntü 1996 yılında Gilliland and Dupree (1996) tarafından elde edilmiştir. Betelgeuse'a ait fiziksel özellikler Çizelge 5.1'de sunulmaktadır.

Çizelge 5.1: Betelgeuse'un fiziksel parametreleri.

Parlaklık (mag)	:	0.51	(Dolan et al., 2016)
Tayf Türü	:	M2 Iab	(Stothers, 1971)
T_e (K)	:	3650 ± 25	(Levesque et al., 2020)
Işınım Gücü $\log(L/L_\odot)$	:	5.10 ± 0.22	(Dolan et al., 2016)
Açısal Çap (mas)	:	41.9 ± 0.06	(Dolan et al., 2016)
Uzaklık (pc)	:	197 ± 45	(Dolan et al., 2016)
Değişim Dönemi (gün)	:	$416 \pm 24 - 2365 \pm 10$	(Joyce et al., 2020)
Yarıçap ($R_\odot$)	:	887 ± 203	(Dolan et al., 2016)
Kütle ($M_\odot$)	:	19.4	(Dolan et al., 2016)
Kütle Kaybı ($M_\odot \text{yr}^{-1}$)	:	$2 \times 10^{-6} \pm 1 \times 10^{-6}$	(Dolan et al., 2016)

² https://www.aavso.org/vsots_alphaori

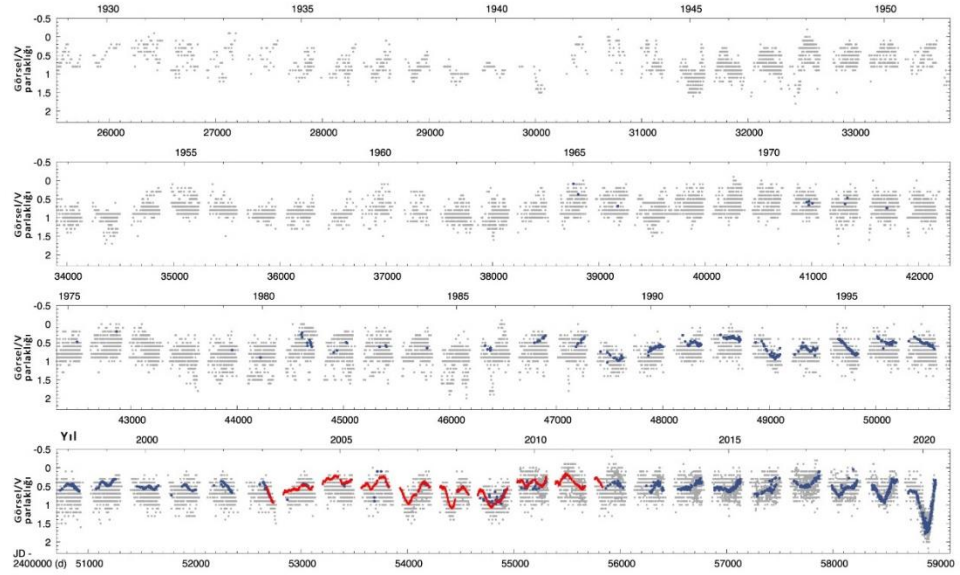
5.2 Betelgeuse'un Tayfsal ve Fotometrik Değişkenlikleri

Betelgeuse, yarı düzenli değişen bir yıldızdır. Değişen yıldız sınıflandırmasında; SRc, yarı-düzenli değişen olarak kabul edilir. SRc türü değişen yıldızlar yarı düzenli dönemlere ve değişken genliklere sahip çok parlak M türü süper devlerdir. Bu tür değişen yıldızların değişim genliği yaklaşık 1 kadir mertebesindedir. Değişim dönemleri 30 günden birkaç bin güne kadar olabilir (Kiss, 2006). Bu bölümde Betelgeuse'a ait fotometrik değişimler ve buna neden olan durumlar ele alınacaktır. İlk değişiminin, 1839 yılında Sir John Herschel tarafından tespit edilmesinden bu yana gözlemlerine devam edilmektedir.

Gökyüzündeki en parlak yıldızlardan ($m_v=0^m.51$) (Dolan et al., 2016) biri olması nedeniyle kolaylıkla gözlemleri yapılabilmektedir. Ayrıca en yakın RSG'lerden (Red Super Giants – Kırmızı Süperdev) bir tanesi olması (197 ± 45 pc) (Harper et al., 2008) ve geniş yarıçapı ($887 \pm 203 R_\odot$) (Dolan, 2016) gökyüzünde belirgin bir açısal çapa (~ 44 mas) (Perrin et al., 2004) sahip olmasını sağlamaktadır. Bu özellikleri sayesinde Betelgeuse, amatör astronomların katkılarıyla uzun yıllardır devam eden fotometrik gözlemlere sahiptir. Şekil 5.1'de 1930 yıllarında görsel parlaklık verileriyle başlayan ve ilerleyen yıllarda fotometrik gözlemlerin eklendiği ışık değişimi görülmektedir. 2020 yılında daha önce hiç gözlenmemiş biçimde ışık kaybı yaşandığı göze çarpmaktadır. "Büyük Sönme" (Great Dimming) (Harper, 2020) olarak adlandırılan bu olay Bölüm 5.7'de ayrıntılarıyla ele alınmıştır. Güncel verilerle birlikte son yıllardaki ışık değişimi Bölüm 6'da ele alınmıştır.

Amerikan Değişen Yıldız Gözlemcileri Derneği (The American Association of Variable Star Observers – AAVSO) yaklaşık yüz yıldır gözlem verisi elde eden astronomlar ile oldukça geniş veri tabanına sahiptir. Bu çalışma kapsamında yapılan ışık değişimi analizlerine ait gözlem verileri AAVSO veri tabanından alınmıştır³.

³ <https://www.aavso.org/data-download>

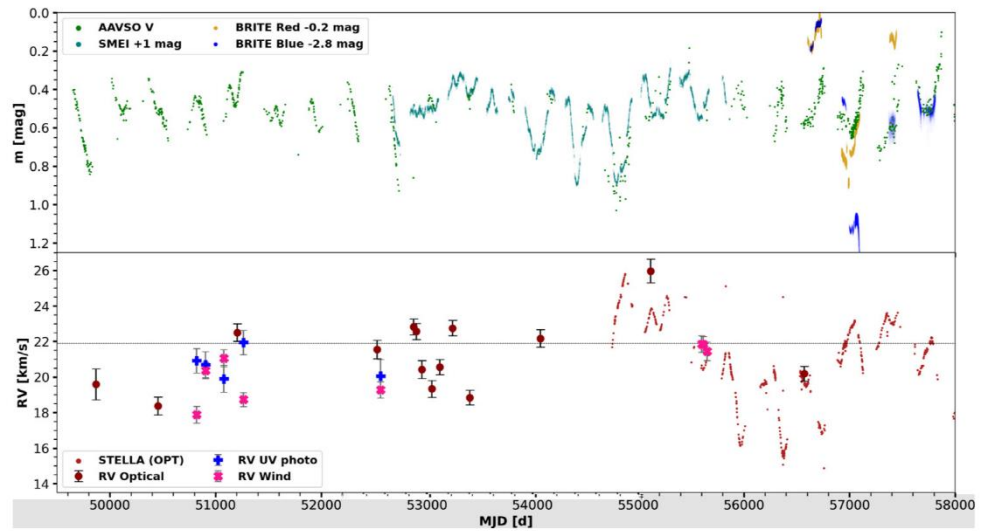


Şekil 5.1: Betelgeuse'a ait 1928 – 2020 yıllarını kapsayan ışık değişimi. Güncel verileri içeren ışık değişim grafiği Bölüm 6'da sunulmaktadır. Mavi noktalar AAVSO'dan alınan V band ışıkölçüm verilerini, gri noktalar görsel tahminleri, kırmızı noktalar SMEI (Solar Magnetic Ejection Imager) verilerini temsil etmektedir (Joyce et al., 2020).

Astronomlar tarafından geçmiş dönemlerde yapılan gözlemlerde belirgin biçimde iki farklı değişim dönemi göze çarpmaktadır. Bunlardan birincisi 416 ± 24 günlük birincil dönem, ikincisi 2050 ± 460 günlük uzun ikincil dönem (Long Secondary Period – LSP). Kaynak taraması sırasında farklı çalışmalarda farklı değerlerin elde edildiği görülmüştür. Bu durum RSG'lerin fiziksel özelliklerini belirlemedeki zorluğu bir kez daha hatırlatmaktadır. Betelgeuse için fotometrik değişimin nedeni tam olarak belirlenememiş olmakla birlikte birincil kısa dönem ile ilgili genel düşünce, zonklamadan kaynaklandığı yönündedir (Joyce et al., 2020). RSG'lerdeki fotometrik değişim sıklıkla çapsal zonklamaya atfedilmektedir (Stothers 1969; Guo and Li 2002). Uzun ikincil dönem için dev konveksiyon hücreleri, manyetik aktivite, dönme hareketi, toz oluşumu gibi mekanizmalar önerilmektedir (Wood, 2000; Wood et. al., 2004). Bunlardan hangisinin değişime neden olduğu halâ tartışma konusudur.

Betelgeuse gözlemlerinden elde edilen dikine hız ve parlaklık arasındaki ilişki, Sefeid türü değişen yıldızların karakteristik özelliklerine benzemektedir. Örneğin ayrıntılı çalışmaları olan δ Cep yıldızının en düşük parlaklığı, yıldızın en yüksek büzülme dikine hızından $0.085 P$ önce gerçekleştiği bilinmektedir (Engle et al., 2017). Sefeid yıldızlarında karşımıza çıkan bu durum Betelgeuse'da da

gözlenmektedir. Jadlovský'nin (2023) çalışmasında belirtildiği üzere optik dikine hızın maksimuma ulaştığı tarih, minimum parlaklık değerinin yaşandığı tarihe kıyasla kabaca 30 günlük bir gecikmeye uğramaktadır. Bu davranışlar Betelgeuse'un birincil zonklama döneminde gözlenen V parlaklığı, T_e ve dikine hız değişimlerinin çapsal zonklamadan kaynaklanabileceğini göstermektedir (Harper, 2020). Şekil 5.2'de tayf gözlemlerinden elde edilen dikine hız grafiği ile fotometrik ışık değişimi birlikte sunulmaktadır.



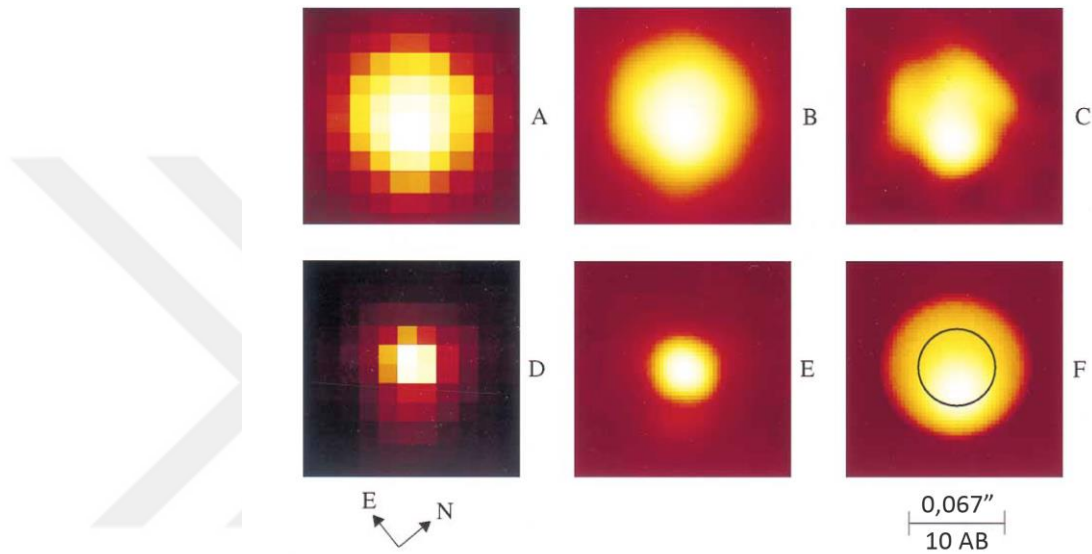
Şekil 5.2: Betelgeuse'un ışık değişimi (üst panel) ve tayf gözlemlerinden elde edilen dikine hız eğrisi (alt panel) (Jadlovsky, 2023). Dikine hız eğrisindeki kesikli çizgi, Betelgeuse'un sakin dönemdeki 21.9 km s^{-1} değerini temsil etmektedir.

Betelgeuse'un birden çok döneme ve yarı düzenli ışık değişimlerine sahip olmasından dolayı değişimin doğası hakkında kesin bir sonuca varılamamaktadır. Yapılan çalışmalarda dikine hız ile parlaklığın zıt korelasyon gösterdiği görülür. Bu durum, yıldızlararası ortama atılan maddenin zamanla toz oluşturduğunu ve opaklık yarattığını gösterir (Goldberg, 1984). Bu çalışma kapsamında ele alınan Betelgeuse etrafındaki toz oluşumu Bölüm 5.3'te incelenmiştir.

5.3 Betelgeuse'un Çevresindeki Toz Ortam ve Atmosferik Özellikleri

Betelgeuse (K bant) $\sim 44 \text{ mas}$ açısal çapı ile gökyüzünde görülebilen en büyük yıldızlardan birisidir. Bu özelliği onu diğer yıldızlardan daha ayrıntılı incelenebilmesi için uygun bir aday konumuna getirir. Öyle ki tarihte ilk kez yüzeyi

görüntülenebilen yıldız, Betelgeuse olmuştur (Şekil 5.3) (Gilliland and Dupree, 1996). Hubble Uzay Teleskobu (Hubble Space Telescope – HST) üzerinde yer alan Sönük Cisim Kamerası (Faint Object Camera – FOC) kullanılarak yapılan morötesi gözlemlerde, optik açısal çapın yaklaşık 2.2 katı büyüklükte açısal çap belirlenmiştir. Morötesi dalgaboyunda yapılan gözlem, büyük ölçüde genişlemiş bir kromosferi işaret etmektedir. Şekil 5.3, kızılötesi kamera kullanılarak elde edilen görüntüde belirgin biçimde ortaya çıkan toz yapıyı sunmaktadır.

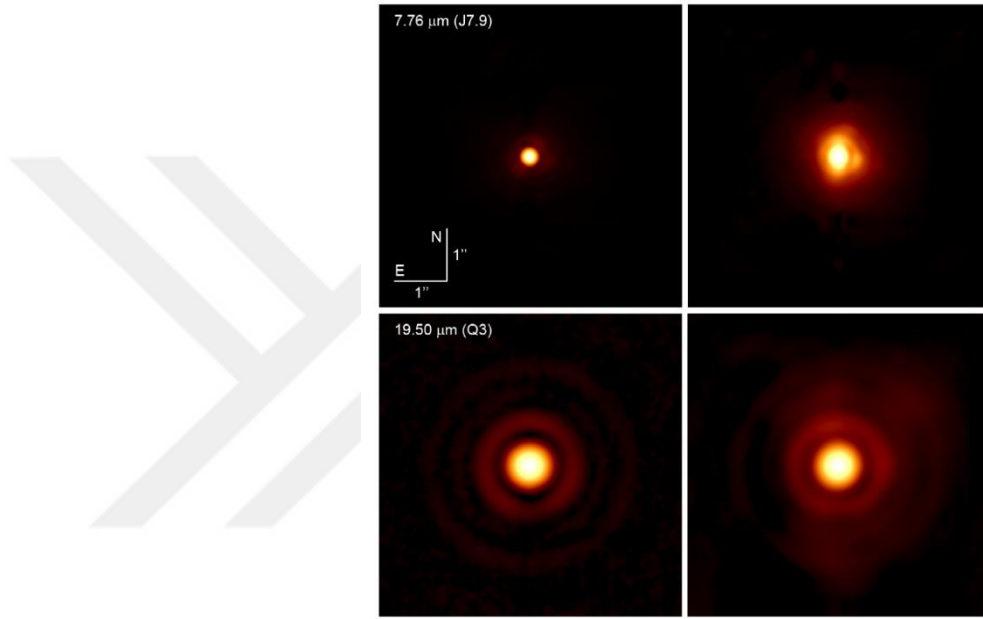


Şekil 5.3: Güneş dışında yüzeyi görüntülenen ilk yıldız Betelgeuse'un gözlemleri. Orijinal veri A panelinde görülmekte. Görüntü iyileştirmeleri uygulanarak elde edilen görüntüler harflerle belirtilmiştir. F panelinde kenar kararma etkisi eklenerek oluşturulmuş görüntü yer almaktadır. Ayrıca bu görüntüde 55 mas olarak ölçülen fotosferik çap siyah çember ile belirtilmiştir (Gilliland and Dupree, 1996).

Asimptotik Dev Kolu (Asymptotic Giant Branch – AGB) yıldızlarında görülen kütle kaybı, zonklama ve yıldız rüzgârları ile açıklanabilmektedir. Fakat aynı açıklama düşük genlikli zonklamalar gösteren, atmosfer yoğunluğu az olan RSG yıldızlarında tatmin edici olmamaktadır. Betelgeuse'un kütle kaybı oranı $\sim(1-3) \times 10^{-6} M_{\odot} \text{ y}^{-1}$ aralığındadır (Humphreys, 2022). Betelgeuse'da Mira yıldızlarına benzer, kızılötesi gözlemlerden yıldız çevresi tozun varlığına dair kanıt tespit edilmiştir. Benzerlik olmasına karşın, Betelgeuse'un zonklama genliği, yıldız maddesini atmosferin yeterince üst katmanlarına taşımasına izin vermemektedir. Dolayısıyla tozu, ışıyım basıncı etkisiyle yıldız çevresine püskürtememektedir. Bu durum Mira yıldızları ile kayda değer bir fark oluşturmaktadır (Kervella, 2009).

Atmosferin genişleme mekanizması halâ gizemini korumaktadır. Sıra dışı bu yıldız için fotosfer katmanından itibaren tozun tespit edildiği en uzak mesafeye kadar ayrıntılı inceleme gerekmektedir.

Betelgeuse ve mukayese yıldızı Aldebaran'ın etrafındaki toz oluşumu Şekil 5.4'te gösterilmektedir. Merkezi parlak bölgeler yıldızların fotosfer çaplarını ifade etmektedir. Görüntüde yıldız çevresinde geniş bir alana yayılmış olan toz yapı dikkat çekmektedir.

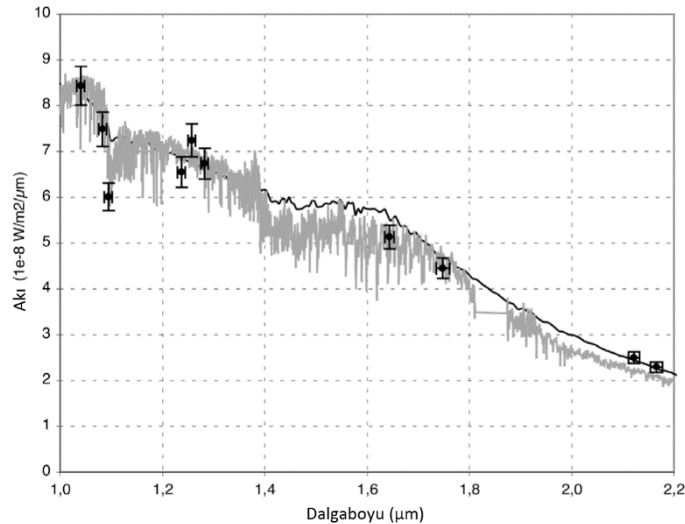


Şekil 5.4: Betelgeuse (sağ) ve mukayese yıldızı Aldebaran'ın (sol) etrafındaki toz oluşumu. VLT (Very Large Telescope) üzerinde bulunan VISIR aletiyle elde edilen görüntüler. 7.76 ile 19.50 μm aralığında 8 dar bant filtre kullanılmıştır (Kervella, 2011).

Betelgeuse çevresinde, tanecik boyutu 0.05 ile 0.5 μm olan silikon tozun varlığına ilişkin kızılötesi gözlemler bulunmaktadır. Kervella (2011) çalışmasında, oksijence zengin silikatlar ve alüminyum oksit gibi moleküllerden meydana gelen toz yapının varlığına ilişkin kanıtlar sunmaktadır. Toz yapı yıldızın çevresinde homojen ve eş yönlü dağılım göstermemektedir. 2.0 – 2.5 $R_{\star}$ yarıçapa kadar ulaşan asimetric ve eliptik bir yapıdadır (Mauron and Le Borgne 1986). Bu durum, $T_e=3600$ K değeri göz önünde bulundurularak, silikat taneciklerinin 1.8 $R_{\star}$ mesafesinde yoğunlaşmaya başlayacağını ifade eden Draine (1980) çalışması ile uyumlu olmaktadır.

Yıldız fotosferi üzerinde yer alan yapıda, görünür bölge ve yakın kızılötesi gözlemlerden MOLsphere katmanı tespit edilmiştir (Kervella, 2009). Bu kavram RSG'lerde görülen toz oluşumunu açıklamaya yönelik en iyi adaydır. Buna rağmen MOLsphere katmanının nasıl oluşup fotosferin üzerine yükseldiğine ilişkin kesin kanıtlar içermemektedir. Chiavassa et al. (2010) kuramına göre konveksiyon hücrelerinin hareketinin bir sonucu olarak yıldız yüzeyinden üst atmosfere madde yükselir. Yükselen madde MOLsphere katmanında ve ötesinde karşımıza toz olarak çıkar.

Haubois et al. (2019) çalışmasında kullandığı modeller sayesinde Betelgeuse'un çevresel toz yapısına ilişkin detaylı analizler ortaya koymaktadır. Fotosferin $0.5 R_{\star}$ kadar yukarısında bulunan toz yapı rapor edilmektedir. Bu çalışmada oksijence zengin evrimleşmiş yıldızlarda görülmesi beklenen alümina (Al_2O_3), forsterit (Mg_2SiO_4) ve enstatit ($MgSiO_3$) molekülleri ele alınmaktadır. Şekil 5.5'te Kervella'nın et al. (2009) çalışmasından alınan Betelgeuse tayf profili yer almaktadır. Siyah noktalar Kervella et al. (2009) çalışmasında kullanılan 10 dar bant filtreyi; siyah düz çizgi açılal çapı 43.7 mas, $T_e=3500$ K, kenar kararması normalize edilen bir süperdev yıldız modelini; gri çizgi Betelgeuse tayf profilini temsil etmektedir.



Şekil 5.5: Betelgeuse'a ait tayf profili (Kervella et al., 2009).

5.4 Betelgeuse'da Zonklama

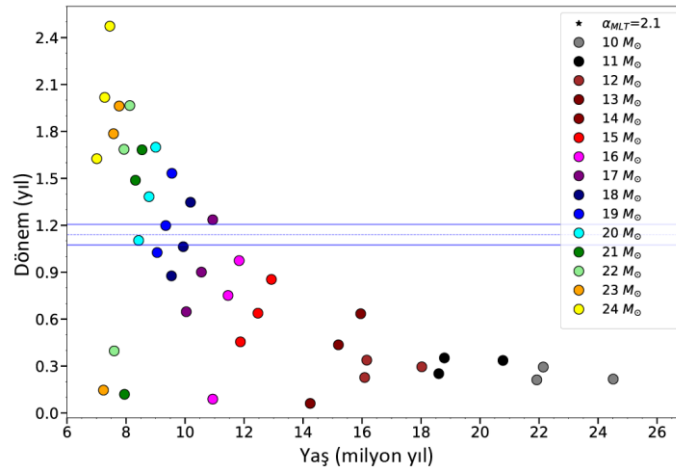
RSG yıldızlarının uzun zaman aralıklarıyla değişim gösterdiği bilinmektedir. Süperdevlerin bu değişimi genellikle zonklama kaynaklı olduğu düşünülse de teorik olarak büyük konveksiyon hücrelerinin neden olduğu da düşünülmektedir (Stothers, 1969; Schwarzschild, 1975). Zonklamalar, teorik modellerin gözlemler ile karşılaştırılmasıyla titreşim modlarının belirlenebilmesini sağlar. Astrosismoloji, yıldızların frekanslarını ölçerek iç yapıları hakkında bilgi edinmemize olanak tanır. Ancak değişim döneminin çok uzun zaman aralıklarında gerçekleştiği RSG yıldızları için bu durum kolay olmamaktadır. Zonklama modeli oluşturabilmek için, 150 ila 4000 gün aralığında değişen temel modlarla birlikte temel ve düşük genlikli üst ton modlarının kararsızlığa dahil edilmesi gerekir. Tüm bunlar onlarca yıllık gözlem verisi sonucunda ortaya koyulabilecek çalışmalardır.

Kırmızı süperdev yıldızlara ilişkin ilginin artması, dönem-parlaklık (P-L) ilişkisinin keşfi ile mümkün olmuştur. Her ne kadar Sefeid yıldızlarında karşımıza çıkan ilişki kadar güçlü olmasa da RSG'lerin de gökada dışı mesafelerin ölçümünde kullanılabileceğini gösteren çalışmalar yapılmıştır (Wood and Bessel 1985). Pierce, Jurcevic & Crabtree (2000) RSG'lerin P-L ilişkisini yeniden kalibre etmişlerdir.

Yakın geçmişe kadar evrimsel modeller ile RSG gözlemleri arasında bir tutarsızlık göze çarpmıştır. H-R diyagramında modellenen yıldızların yeri, gözlenen yıldızlara kıyasla daha sıcak bir noktada işaretlenmiştir. Gözlemler, modelleme çalışmalarıyla tahmin edilenden daha soğuk veya parlak yıldızların var olduğunu ortaya koymaktadır. Bu soruna bir çözüm olarak Levesque et al. (2005) yeni bir sıcaklık ölçeği geliştirerek uyuşmazlıkları büyük oranda gidermektedir.

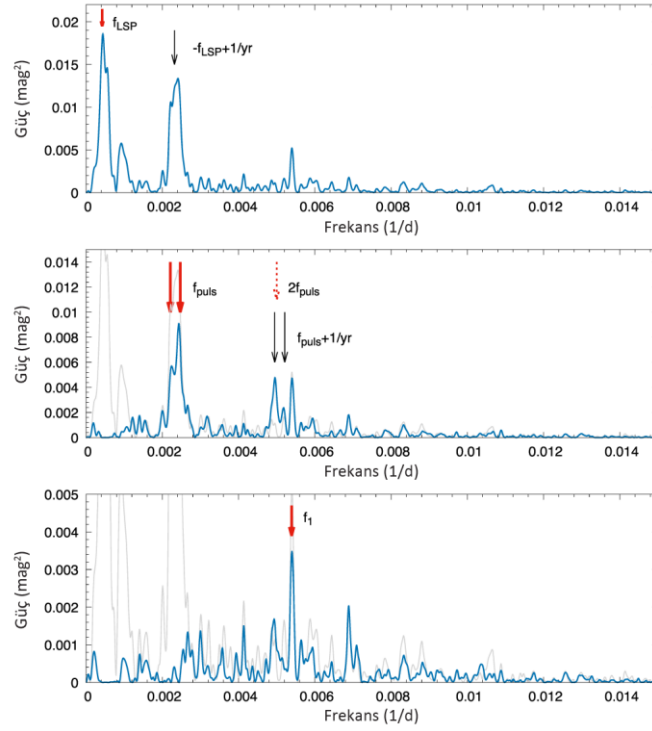
Betelgeuse'un fotometrik ışık değişim dönemi iki ana dönem ile karakterize edilmektedir. Birincil dönem ~400 günlük kısa dönem, uzun ikincil dönem (Long Secondary Period – LSP) ~2000 günlük uzun dönem. Kısa dönemli ışık değişimi için temel veya düşük mod zonklamalar ve konveksiyon hücrelerinin varlığı gibi mekanizmalar önerilmekte (Kiss et al. 2006; Joyce et al. 2020). Uzun ikincil dönem içinse bir yoldaş yıldızın var olabileceği, manyetik aktivite (Wood et al. 2004) veya dev konveksiyon hücrelerinin varlığı (Stothers 2010) önerilmektedir.

Joyce et al., (2020) çalışmasına göre MESA (Modules for Experiments in Stellar Astrophysics – Yıldız Astrofizikinde Deneyler İçin Modüller) modelleme kodunun GYRE eklentisi kullanılarak elde edilen verilerde büyük kütleli yıldızların kütlesi arttıkça zonklama dönemi buna bağlı olarak artmaktadır. Şekil 5.6’da başlangıç kütleleri 10 – 24 $M_{\odot}$ aralığındaki RSG’ler gösterilmiştir. Betelgeuse’un temel mod $P_0=416$ gün dönemi, mavi çizgi ile temsil edilmektedir. Şekilde karıştırma uzunluğu değeri $\alpha_{MLT}=2.1$ ve metal bolluğu $Z=0.02$ olarak kabul edilmiştir. Şekilde ifade edilen ilişkinin, yıldızların He yakan evrim süreçleri boyunca 0.5 – 1.0 milyon yıl gibi kısa bir zaman ölçeğinde gerçekleşeceği unutulmamalıdır.



Şekil 5.6: Belirtilen kütle değerlerinin evrim izleri için adyabatik temel mod zonklama dönemleri (Joyce et al., 2020),

Joyce et al. (2020), Betelgeuse’un önceden belirlenmiş olan zonklama dönemlerine ek olarak $P=185$ gün olan yeni bir dönem tespit etmişlerdir. Bu tespit Betelgeuse’u çift modda zonklama gösteren bir yıldız yapmaktadır. Aynı çalışmada Betelgeuse’un zonklama kaynaklı değişim dönemleri $P_0 = 416 \pm 24$ $P_1 = 185 \pm 13.5$, $P_{LSP} = 2365 \pm 10$ olarak açıklanmaktadır (Şekil 5.7).



Şekil 5.7: Betelgeuse'un Period04 programı ile tespit edilen zonklama dönemleri (Joyce et al., 2020).

Kırmızı süperdevler arasında birden fazla modda zonklama az rastlanan olay değildir. Kiss et al. (1999) çalışmasında iyi gözlenen 93 yıldızın %60'ında, birden fazla dönem tespit etmiştir. Ayrıca yıldızların %30 kadarının temel mod ve aynı anda üst mod zonklamaları tespit edilmiştir. Betelgeuse için de bu mümkün görünmektedir. Bununla birlikte bir başka modun harmoniği olma durumu ya da fotometrik verilerde ortaya çıkmayan bir zonklama olabileceği göz ardı edilmemektedir. Bu nedenle şüphelerin en aza indirilmesi adına daha uzun gözlem süreleri gerekmektedir. Astrosismolojinin öngördüğü şekilde farklı modların tespit edilmesi, fiziksel özelliklerin belirlenmesi yolunda bazı kısıtlamalar yapılmasını mümkün kılmaktadır.

5.5 Betelgeuse'da Aktivite

Soğuk yıldızlar, fotosfer altı maddenin yukarı yönlü hareketlerine yol açan güçlü çalkantılı bölgelere sahiptir. Yıldız lekelerine, kromosfer katmanına, yıldızdan madde çıkışlarına ve aktif bölgelere, yüzey manyetik alanları ve iyonize plazmanın etkileşimleri neden olduğu düşünülmektedir. Yıldız aktivitesinin ortaya

koyduğu tam olarak anlaşılamamış olmasına rağmen önemli astrofiziksel sonuçları da beraberinde getirir.

RSG'ler gibi düşük kütleçekimine sahip yıldızlarda meydana gelen konvektif hareketlerin daha iyi anlaşılması için Betelgeuse gibi yıldızların gözlemleri önem taşımaktadır. Konvektif hareketler, türbülans hareketlerini ortaya çıkartmakta ve bunlar da Betelgeuse'da gözlenene benzer manyetik alanlar yaratabilmektedir. Ayrıca fotosfer katmanında ortaya çıkan bu konvektif hareketler güçlü yıldız rüzgârları oluşturarak yıldızlararası ortamın zenginleşmesine katkı sağlayan kütle kaybına katkıda bulunmaktadır.

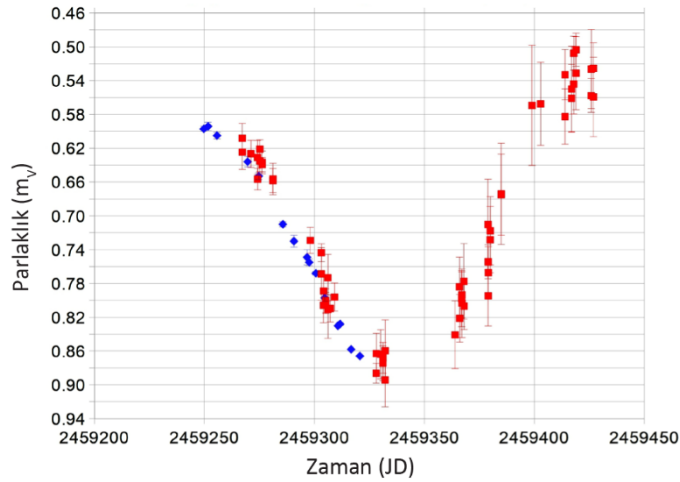
Gilliland and Dupree (1996) tarafından ilk kez doğrudan görüntülenen Betelgeuse üzerinde homojen olmayan parlak bir alan tespit edilmiştir. UV bölgedeki bu gözlemlerde daha önce görsel bölgede tespit edilen 55 mas açısal çaptan çok daha geniş, 125 mas çapında bölge belirtilmektedir. Bu geniş açısal çapın bir kısmından kenar kararması sorumludur. UV gözlemleri, optik interferometrik gözlemlerde olduğu gibi bazı yüzey özelliklerini ortaya koymaktadır. Birkaç sıcak bölgeden oluşan bu yüzey özelliği, toplam yüzey akısına $\sim 10\%$ 'luk bir katkı yapmakla birlikte haftalar veya aylar zaman ölçeğinde değişim göstermektedir (Wilson, Dhillon, & Haniff, 1997).

Gray (2008), çalışmasında Betelgeuse'un yüksek çözünürlüklü tayf gözlemlerini elde etmiştir. Bu gözlemlerin analizlerinde zamanla değişen Doppler kaymaları ve tayf çizgi güçleri belirlenmiştir. Değişime neden olan döngü, sıcaklık artışıyla maddenin yükselmesi, soğuması ve tekrar aşağı hareketiyle ifade edilmektedir. Dev konvektif hücreye neden olan bu hareket aynı zamanda 400 günlük değişim dönemini de açıklamaktadır. Ancak Kravchenko'ya et. al. (2019) göre bu döngü sıcaklık ve Doppler değişimlerini açıklamak için yeterli olmamaktadır. Ona göre bu döngüyü oluşturan, yıldızın iç bölgelerindeki konvektif hareketin akışındaki bir bozulmadır. Bozulmanın etkisi olarak üretilen akustik dalgaların yaydığı şok dalgalarıyla döngünün bağlantılı olduğunu göstermektedir.

5.6 Güneşinde Işıkolçüm

Betelgeuse gökyüzünde bulunduğu konum itibarıyla ancak belirli dönemlerde gece gözlemi yapılabilen bir yıldızdır. Kuzey yarımküre için genellikle eylül ayında başlayan gözlem dönemi, mayıs ayının ilk haftalarına kadar güvenilir fotometrik sonuçlar sağlayabilmektedir. Bu durum yıl içinde yaklaşık dört ay boyunca gözlem yapılamayacağı anlamına gelmektedir. Uzay tabanlı fotometri mümkün olsa da standart bir fotometri gerçekleştirilememektedir.

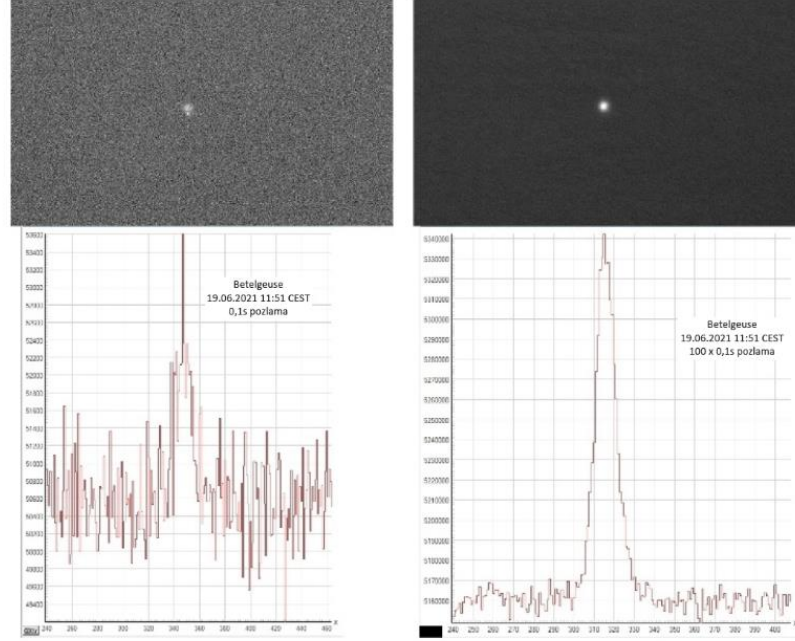
Betelgeuse gökyüzünün en parlak yıldızlarından birisidir. Parlaklığı sayesinde bazı teknikler kullanılarak güneşinde fotometri yapılması mümkün olmuştur. Burada yer alan gözlemler Nickel and Calderwood'a (2021) ait güneşinde fotometri çalışmasını kapsamaktadır. Çalışma sonucunda elde edilen ışık değişimi Şekil 5.8'de sunulmaktadır.



Şekil 5.8: Betelgeuse'a ait gece (mavi) ve gündüz (kırmızı) gözlemleri. Hata barlarıyla birlikte, gece gözlemleri PEP (Photoelectric Photometry – Fotoelektrik Fotometri) verileri, gündüz gözlemleri CCD verilerini yansıtmaktadır.

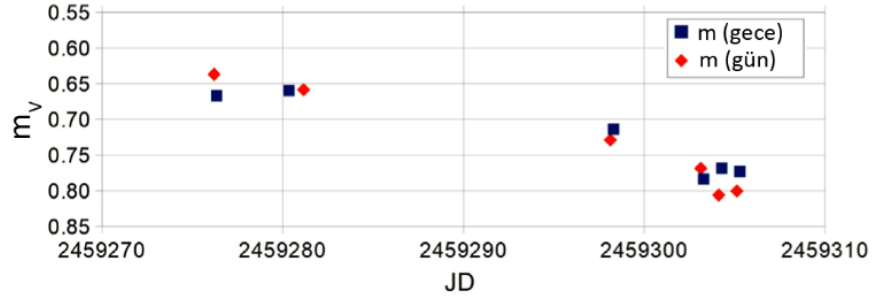
Gözlemler, 250 mm açıklığa ve 1250 mm odak uzunluğuna sahip Alman ekvatorial kurgulu Newtonian teleskop ile yapılmıştır. Fotometrik veriler 21 Şubat – 31 Temmuz 2021 tarihleri arasında elde edilmiştir. Gündüz gökyüzü parlaklığı dolayısıyla her bir kare için uzun pozlama alınması mümkün olmadığından, 0.1 saniyelik pozlamaların ardışık görüntüleri alınarak yığın yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem çok parlak yıldızların güneşinde gözlemlerine olanak tanımaktadır. Çok kısa pozlamalarla büyük fotometrik yığınları içermektedir.

10 saniyelik pozlamaya karşılık gelen 100 görüntü art arda alınarak bu yöntemle tabi tutulmuştur (Şekil 5.9). Görüntülerin işlenmesi Fitsmag yazılım paketi kullanılarak yapılmıştır (Nickel and Calderwood, 2021). Fotometrik dönüşüm işlemleri, gökyüzü arka planı ve sinyal gürültü oranı gibi teknik işlemlerin anlatımları, orijinal çalışma içinde yer almaktadır.

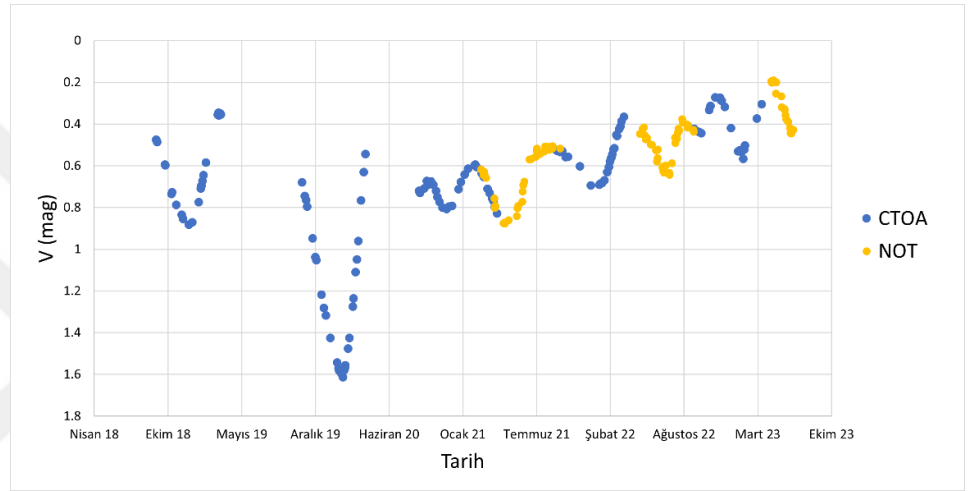


Şekil 5.9: Tek kare ve yığın görüntü yöntemi ile elde edilen veriler. Sol panel tek bir görüntü verisini, sağ panel 100 görüntüden oluşan yığının verilerini ifade etmektedir.

Gözlemler sonucunda CCD fotometrisinin $0^m.02 - 0^m.05$ aralığında kalan bir doğrulukla yapıldığı belirtilmiştir. Gündüz gözlemleri, 8 haftalık gece gözlem verisiyle karşılaştırılmış ve $0^m.02$ 'den az sistematik farklar belirlenmiştir. Şekil 5.10'da gece gözlemleri ile karşılaştırıldığında ortaya büyük farklar çıkmadığı açıkça ifade edilmektedir. Çalışma kapsamında elde edilen ve yayın haline getirilen veriler 21 Şubat – 31 Temmuz 2021 tarih aralığını kapsamaktadır. Bu tarihten sonraki yıllarda AAVSO gözlemcisi Otmar Nickel günışığı gözlemlerine devam etmektedir. AAVSO'da yayınlanan verilerle oluşturulan ışık değişimi Şekil 5.11'de gösterilmektedir. Günışığında yapılan ışıkölçümün geniş zaman ölçeğinde doldurduğu boşluk daha net anlaşılmaktadır.



Şekil 5.10: Günişığında elde edilen parlaklıklar ile gece gözleminden elde edilen parlaklıkların karşılaştırması.

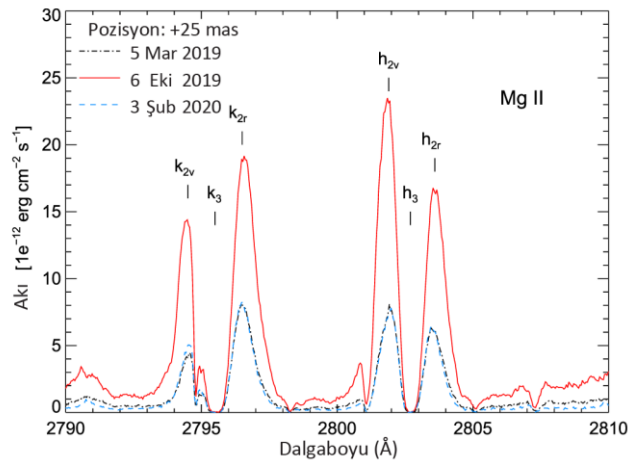


Şekil 5.11: Günişığı ışıkölçümü ve AAVSO verileri ile oluşturulan ışık değişimi. Mavi daireler AAVSO gözlemcisi Tom Calderwood'un (CTOA) verilerini, yeşil daireler ise AAVSO gözlemcisi Otmar Nickel'in (NOT) elde ettiği günişığı ışıkölçüm verilerini temsil etmektedir.

5.7 Betelgeuse'un Işığında “Büyük Sönme”

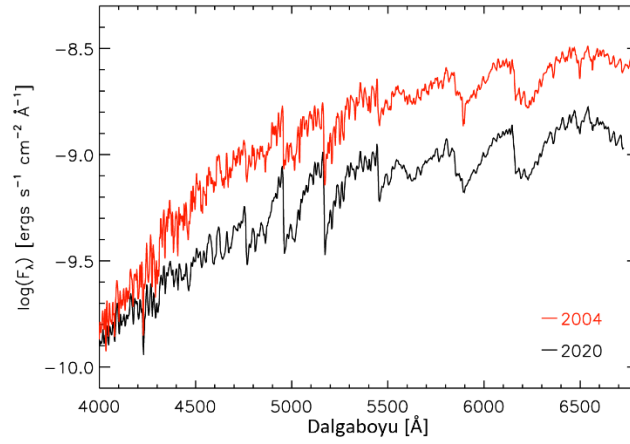
Betelgeuse, SRc türü bir değişen yıldızdır. Işık değişimi tipik olarak $\Delta V \approx 0^m.5$ mertebesinde olmaktadır. 2019 yılının Eylül ayından itibaren Betelgeuse'un parlaklığı dikkate değer biçimde azalmaya başlamıştır (Guinan, 2019a). 7 – 13 Şubat 2020'de bugüne kadarki en sönük haline ($1^m.61$) ulaşmış ve tepeden tepeye ışık değişimi $\Delta V \approx 1^m.1$ olmuştur (Harper et al., 2020). Bu ani ve büyük parlaklık değişimi yaklaşmakta olan bir süpernova patlamasını akıllara getirmiştir. Literatürde Büyük Sönme olarak adlandırılan bu olayın arkasında hangi fiziksel olayların gerçekleştiğini bulmaya yönelik araştırmalar sürdürülmektedir.

Dupree et al. (2020) çalışmasında sönme olayının yaşanmasından önce Eylül – Kasım 2019 tarihlerinde Betelgeuse’un fotosferinin genişlemekte olduğunu belirtmektedir. Bunun yanı sıra Hubble Uzay Teleskobu (Hubble Space Telescope – HST) kullanılarak elde edilen verilerden, yıldızın güney yarımküre kromosferinde morötesi tayf ve Mg II çizgisi salmalarında kayda değer bir artış olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5.12). Bu etkinlikler Büyük Sönme’den önce gerçekleşmiştir.



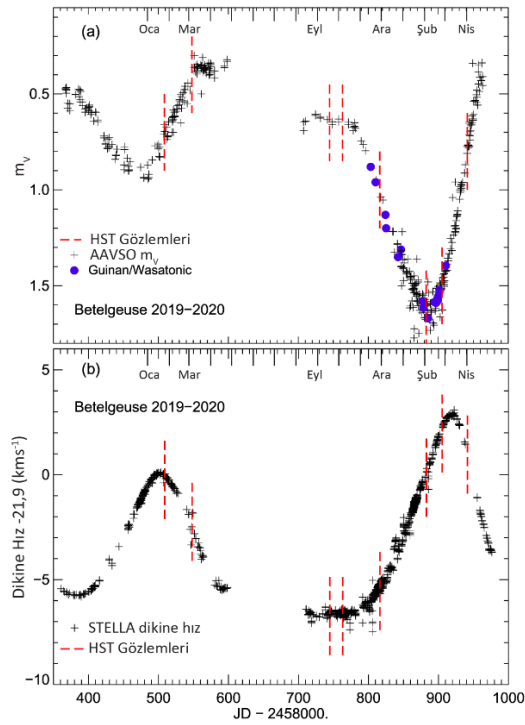
Şekil 5.12: Betelgeuse tayf profili (Dupree et al., 2020).

Levesque et al. (2020) çalışmasında, 7-8 Mart 2004 tarihine ait tayf profili ile 15 Şubat 2020 tarihinde elde edilen tayf profilini karşılaştırmakta. Şekil 5.13’te bu iki tarih aralığındaki akı düzeylerinin belirgin şekilde değiştiği ifade edilmektedir. Profil yapısı çok benzer olmasına karşın 2020 yılına ait akı önemli düzeyde daha düşüktür. Kısa dalgalarda artışı, 2020 yılı profilinde kendisini belli etmektedir.



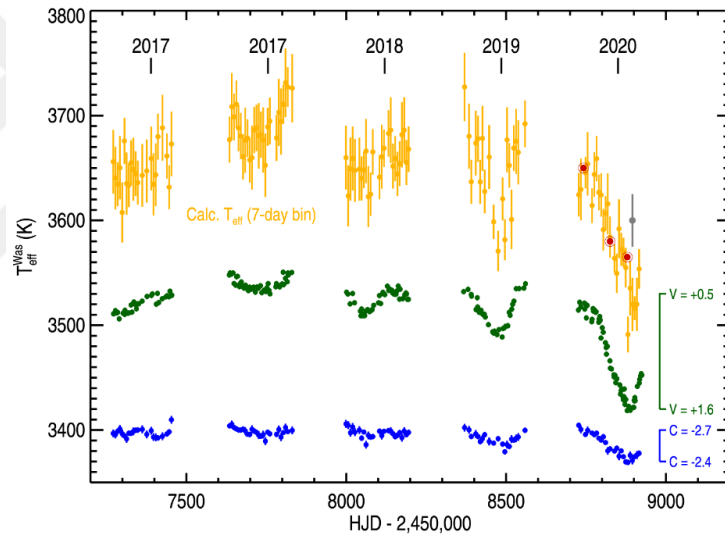
Şekil 5.13: Betelgeuse'un 2004 ve 2020 yılına ait tayf profili (Levesque et al., 2020).

2019 yılında Eylül ayından Kasım ayına kadar meydana gelen zonklama ve akustik dalgaların bir sonucu olarak yıldız maddesinin dışa doğru püskürdüğü ve 400 günlük zonklama döneminin bu püskürmeyi güçlendirdiği ifade edilmekte. Bu gözlemlere ait dikine hız verileri Şekil 5.14'te sunulmaktadır. Mg II k çizgisi profilindeki değişkenlikler bunu doğrular niteliktedir. Morötesi gözlemler, püskürme ile dev konvektif hücrelerin sönmeye neden olduğunu açıklamaya yönelik sonuçlar vermektedir.



Şekil 5.14: Betelgeuse'a ait V bant ışık değişimi (üst) ve dikine hız değişimi (alt) (Dupree et al., 2020).

Harper et al. (2020) çalışmasında iki farklı olayın sönmeye neden olmuş olabileceğini ifade etmektedir. Wasatonic Gözlemevi'nde alınan gözlemler V bandı, TiO ve yakın kızılötesi gözlemleri kapsamaktadır (Şekil 5.15). Bu gözlemlerin sonuçları, daha önce $T_e=3650$ (Levesque and Massey, 2020) değerinden daha soğuk fotosfer katmanını işaret etmektedir. Zonklama mekanizmalarının belirgin şekilde tanımlanmamasına rağmen kısa temel mod zonklama döneminin Kappa mekanizması tarafından yönlendirilen bir etki olduğu (Joyce et al., 2020) uzun ikincil dönemin ise dev konvektif hücrenin bir sonucu olduğuna dair güvenilir bulgular sunulmaktadır (Stothers, 2010). Betelgeuse için dikkate değer nokta ise bu iki zonklama döneminin Şubat 2020'de birbiriyle çakışıyor gibi görünmesidir (Guinan et al., 2019b). Yaklaşık $0^m.4$ daha sönük olmasına ek olarak bu çakışmanın minimumu etkilemiş olabileceği belirtilmektedir.



Şekil 5.15: Harper et al. (2020) çalışmasında elde edilen ışıkölçüm verileri. Sarı daireler ve hata çubukları Wasatonic Gözlemevi'nde TiO soğurma bantlarından hesaplanan etkin sıcaklık değerlerini, yeşil daireler V bant fotometri verilerini, mavi daireler C bant (merkezi dalgaboyu: 10240 Å, bant genişliği: 445 Å) ışıkölçüm verilerini temsil eder.

6. BETELGEUSE'UN IŞIKÖLÇÜM VERİ ANALİZİ VE BULGULAR

Bu bölümde Betelgeuse'a ilişkin çalışmalar ve elde edilen bulgular açıklamalarıyla birlikte sunulmaktadır. Betelgeuse'a ait fotometrik veriler AAVSO'dan (American Association of Variable Star Observers – Amerikan Değişen Yıldız Gözlemcileri Derneği) alınmıştır¹. Bu veriler kullanılarak tüm gözlem zamanlarına ait Tarih – Parlaklık (V) grafiği çizdirildi. AAVSO verilerinin görsel (herhangi bir fotometrik çalışma olmaksızın çıplak göz ile elde edilen değerler) ve V bant ışıkölçümüne ilişkin parlaklıkları ayrı ayrı grafiklenmiştir. Elde edilen grafikler Bölüm 6.1'de ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bunun dışında tez kapsamında AAVSO gözlem verileri içinde bulunan B bant fotometrik gözlem verilerini kullandık. B bant parlaklıklarına ait grafikler Bölüm 6.2'de açıklanmaktadır.

Bölüm 5.6'da ayrıntılı olarak incelenen, Betelgeuse'un gözlem sezonu dışındaki (yaz aylarını kapsayan) verileri için AAVSO veri tabanındaki gün ışığı gözlem verilerini kullandık. Ayrıntılı gün ışığı gözlem teknikleri Nickel and Calderwood (2021) çalışmasında yer almaktadır.

6.1 Görsel ve V Bant Işık Değişimleri

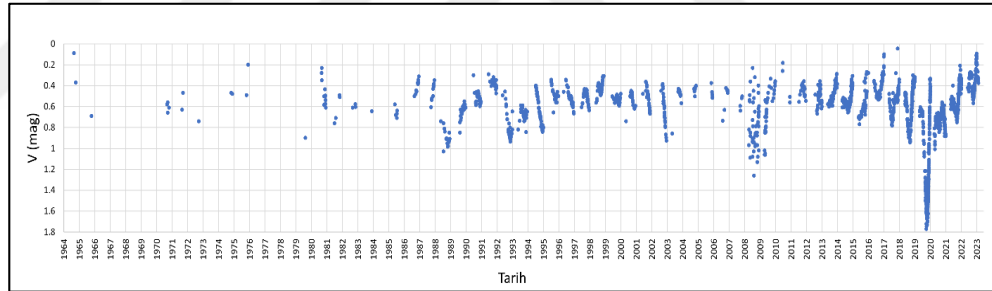
AAVSO gözlem verilerinde farklı filtrelerin parlaklık değerleri yer almaktadır. Bu bölümde, V bant ve görsel bölgede alınan Vis (Visual – Görsel Bölge) parlaklık değerlerinin analizleri sonucu elde edilen bulgular paylaşılacaktır.

Işık değişimi yıldız astrofiziği açısından önemli bir kavramdır. Bir yıldız, anakol evriminde kayda değer parlaklık değişimine uğramaz. Anakol evrimi sonrasında evriminin üst basamaklarına doğru ilerleyen yıldızlarda bazı fiziksel özelliklerin değiştiği gözlenmektedir. Parlaklık değişimi bu tür yıldızlar için en belirgin ve gözlenebilir parametredir. Bu nedenle V bant ışıkölçüm ile elde edilen parlaklık değerleri önem taşımaktadır.

1900'lü yıllarda başlayan görsel parlaklığa ilişkin gözlem verileri AAVSO'dan alınarak ışık değişim grafikleri elde edilmiştir. Görsel parlaklık ölçümlerinin hata payı, gözlem yönteminin doğası gereği yüksek değerde olabilmektedir. Bundan dolayı grafiklerde saçılma olmaktadır. Bu durumu

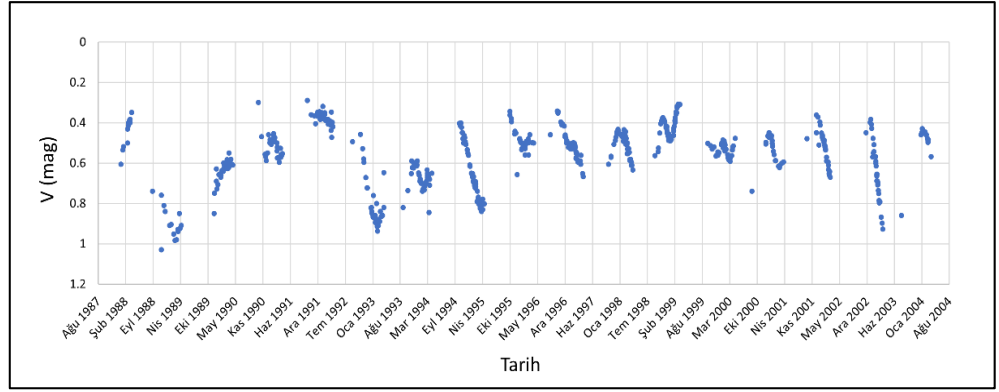
engellemek adına parlaklık değerlerinin 10 – 50 ve 100 günlük ortalaması alınarak ışık değişim grafikleri elde edilmiştir. 50 günlük ortalama ile elde edilen ışık değişim grafiği en anlamlı sonucu vermektedir. Görsel bölge verilerinin 1950 yıllarına kadar olan kısmından anlamlı bir sonuç elde edilememektedir.

Betelgeuse’a ait V bant parlaklıklarının 1964 – 2023 tarih aralığındaki ışık değişimi Şekil 6.1’de gösterilmektedir. Şekilde 1990’lı yıllara kadar elde edilen parlaklıkların düzensiz ve belirsiz olduğu göze çarpmaktadır. Işık değişim dönemlerinin daha anlaşılır olması adına veriler iki gruba ayrılmıştır. Şekil 6.2’de 1988 – 2004 yıllarını kapsayan ışık değişimi görülmektedir. 2004 ve 2011 yılları arasındaki veri eksikliğinden dolayı grafiğe aktarılmamıştır. Şekil 6.3’te 2011–2018 tarihleri arasındaki ışık değişimi görülmektedir. Bu şekillerde, Betelgeuse’un ~400 günlük ışık değişim döneminden söz edilmektedir (Joyce et al., 2020). Şekil 6.1’den de rahatlıkla görülebileceği gibi Betelgeuse’un V bant ışık değişimi Büyük Sönme’ye kadar genellikle 0.3-0.7 mag aralığında değişimler vererek ilerlemiştir.



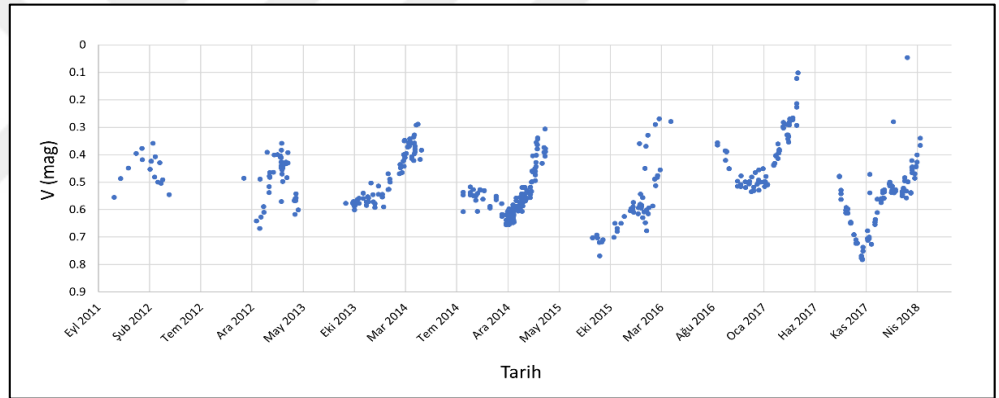
Şekil 6.1: 1964 – 2023 yılları arası Betelgeuse’a ait V parlaklık değişimi.

Ancak, yıl aralıkları ayrıntılı incelendiğinde Şekil 6.2’deki parlaklık değerleri 0.3 mag’lık maksimum parlaklıkları aşmasa da parlaklık değişiminin minimumlarında zaman zaman dikkat çekici sönmelere rastlanır. Örneğin, yaklaşık 1989, 1993-1995 yıl aralığı ve 2003 yıllarında minimum parlaklıklar ~0.7 kadirinden 0.2 mag daha da sönerek 0.9 kadir değerlerine kadar ulaşmıştır.



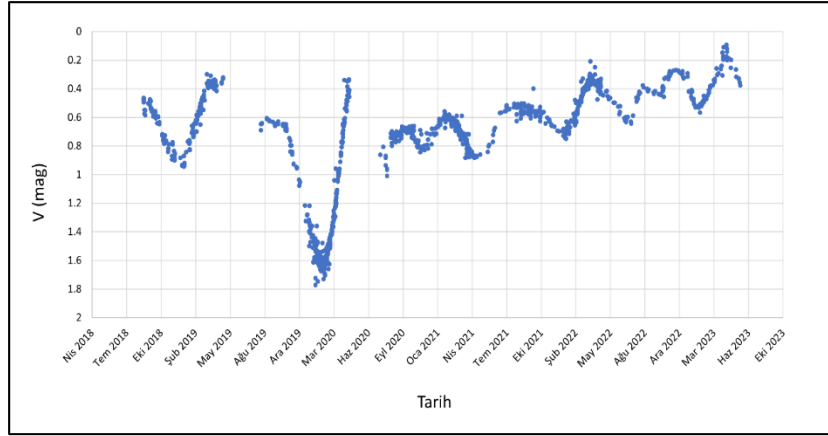
Şekil 6.2: 1987 – 2004 yılları arası Betelgeuse’a ait V parlaklık değişimi.

Benzer incelemeyi Şekil 6.3’te verilen yıl aralıkları için de inceleyecek olursak; maksimum parlaklık sınırının 2017 yılı başına kadar pek aşılmadığını, ancak sonrasında birkaç ay süreli gözlemlerde sınır değerin 0.2 mag daha üzerine çıkılarak 0.1 mag’a kadar ulaştığını görüyoruz.



Şekil 6.3: 2011 – 2018 yılları arası Betelgeuse’a ait V parlaklık değişimi.

2019 – 2020 gözlem sezonunda gerçekleşen Büyük Sönme olayından dolayı, 2018 – 2023 yılları arası gözlem verileri ayrıca grafiklendirilmiştir. Şekil 6.4’te Büyük Sönme görülmektedir. Bu olayın gerçekleşmeye başladığı tarih olan Aralık 2019’da yıldız parlaklığı ani ve hızlı şekilde düşüş göstermektedir. Bu grafikte turuncu daireler AAVSO gözlemcisi Nickel Otmar’ın gün ışığı V parlaklık verilerini, mavi daireler tüm AAVSO gözlemcilerinin verilerini temsil etmektedir. Büyük Sönme olayına ilişkin açıklamalar Bölüm 5.7’de yapılmış olup tartışmalar Bölüm 7’de ele alınmıştır.



Şekil 6.4: 2018 – 2023 yılları arası Betelgeuse ışık değişimi. Büyük Sönme olayının yaşandığı Aralık 2019 – Mart 2020 tarihleri arası gerçekleşen sönme olayı çarpıcı biçimde dikkat çekmekte.

Şekil 6.4'ten görülebildiği gibi yıldızın V bandı ortalama maksimum parlaklık değeri olan $0^m.3$ değeri 2023 yılı Mart ayı itibariyle yeniden aşılmaya başlamıştır. Tez çalışmasının devam ettiği süreçteki parlaklık değerleri ortalama maksimum değerinin $0^m.2$ üzerine çıkarak $0^m.1$ 'e ulaşmıştır. Benzer parlaklık değerlerine yaklaşık 2017 Nisan ayında da ulaşılmıştı. Bu şekilde Büyük Sönme dışında dikkat çeken parlaklık değişimine ait bir diğer özellik de maksimumlardan ziyade minimum parlaklık seviyelerine ilişkindir. 2019 yılı başındaki değişimin minimum parlaklık değeri 0.9 mag'a ulaşmıştır. Bu değer ortalamadan $0^m.2$ daha sönüktür. Aslında bu değerlerdeki seyir Büyük Sönme'den sonraki yıllarda da kısmen devam etmiştir. 2022 yılı başlarında ortalama minimum parlaklık değerine ($0^m.7$) tekrar geri dönmüş olmasına rağmen, bu sefer de yıldızın ışığındaki global parlamanın günümüze kadar devam etmesi dikkat çekicidir. Bir diğer nokta ise literatürde sıklıkla yer alan $P=400$ gün olan zonklama döneminin Büyük Sönme olayından itibaren değişiklik göstermesidir. Kırmızı Süperdevlerde görülen mod değişimi, Betelgeuse'da da ortaya çıkmaktadır. Joyce et al. (2020) çalışmasında bu zonklama dönemini $P=185 \pm 13.5$ gün olarak tespit etmişlerdir. Yapılan çalışmalardan ortaya çıkan sonuç, bu mod değişiminin önümüzdeki 5-10 yıl içinde kaybolarak eski 400 günlük temel moduna döneceği şeklindedir (MacLeod, 2023). Büyük Sönme sürecini takiben yıldızdaki düzenli parlamanın ve bunun yanı sıra yıldızın zaman zaman gösterdiği sönükleşmenin nedenlerine yardımcı olabilecek en önemli parametrelerden biri de Bölüm 6.2'de değineceğimiz B-V renk değişimlerini incelemek olacaktır.

6.2 B-V Renk Ölçeği

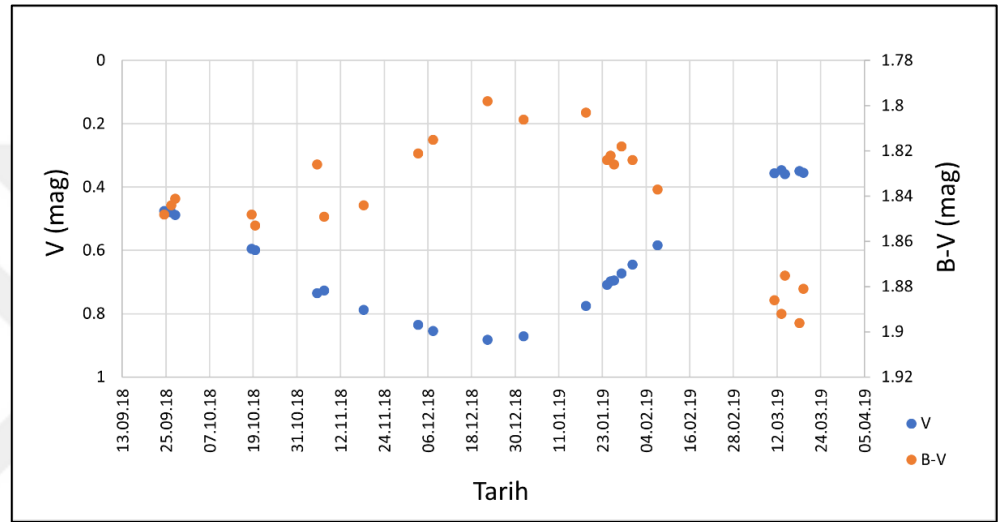
Yıldızlardan gelen ışık çeşitli filtrelerden geçirilerek farklı dalgaboylarındaki akıları ölçülebilmektedir. Buna astronomide çok renk ışıkölçüm adı verilmektedir. Bu filtreler ile elde edilen parlaklık değerlerinin farkları, renk ölçekleri oluşturulmasına olanak sağlar. Bunlardan birisi B-V renk ölçeğidir. Yıldızların renkleri, sıcaklıklarının birer fonksiyonudur. Renk ölçekleri yıldızların tayf türü, sıcaklığı, rengi gibi bazı özelliklerini belirleyebilmemizde yardımcı olmaktadır.

Bu tez çalışmasında Betelgeuse'a ait B-V renk ölçeği değişimini inceledik. Süperdev yıldızlar literatürden de görüldüğü gibi farklı astrofiziksel mekanizmalara dayanan parlaklık ve renk değişimleri gösterebilmektedir. Betelgeuse da Bölüm 5'te söz edilen farklı mekanizmalara ait üst üste binmiş dönemsel parlaklık değişimlerine sahiptir. Bunların B-V renk ölçeğine katkısının incelenmesi gerektiğine karar verdik. Ölçek verilerini oluştururken AAVSO gözlemcilerinin B bant gözlem verilerine başvurduk. B bant AAVSO gözlem verileri, 1990'lı yıllarda başlasa da eski tarihli verilerin eksikliği nedeniyle son yıllarda (2018-2023) alınan gözlemleri tercih ettik.

AAVSO verileri içinde yer alan tüm B bandı parlaklıklarını kullanarak analizler gerçekleştirdik. Bununla birlikte AAVSO gözlemcisi olan Tom Calderwood'un (AAVSO gözlemci kodu: CTOA) verilerinin B-V renk ölçeği oluşturulabilmesi için en iyi koşullarda olduğunu tespit ettik. Buradaki amaç aletsel parlaklıkların en doğru ve hassas şekilde standart dönüşümleri yapılarak kıyaslanabilir verileri ayırmaktır. Tek bir gözlemcinin verileri, farklı gözlem koşulları olasılığını eleyerek bilimsel açıdan daha güvenilir sonuçlar doğurmaktadır. Bunun yanı sıra verilerinden faydalandığımız gözlemcinin B ve V filtrelerinde yapmış olduğu gözlemler sistematik şekilde birbirini takip eden ve aynı gözlem dakikası içinde elde edilmiş verilerdir.

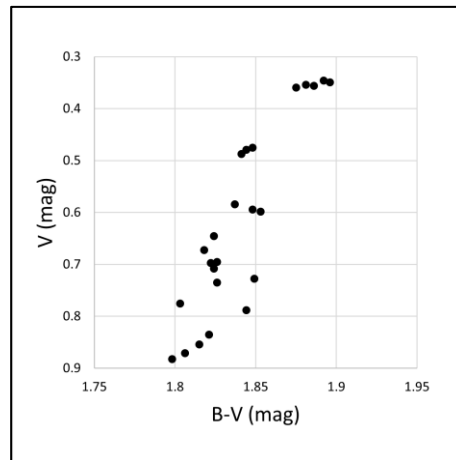
B-V renk ölçeği analizleri yaparken verileri gözlem sezonlarına ayırdık. Bunları 1'den 5'e kadar sezon numaraları ile belirttik. 1. Sezon, 23 Eylül 2018 – 18 Mart 2019 tarih aralığını, 2. Sezon, 24 Ekim 2019 – 26 Mart 2020, 3. Sezon, 6 Eylül 2020 – 7 Nisan 2021, 4. Sezon, 13 Eylül 2021 – 17 Mart 2022 ve 5. Sezon, 23 Eylül 2022 – 25 Mart 2023 tarih aralığını kapsamaktadır.

Şekil 6.5'te 1. Sezon'a ait zamana karşılık V ve B-V değerleri aynı grafik üzerinde verilmektedir. Bu grafikte mavi daireler V parlaklığını, turuncu daireler B-V değerlerini temsil etmektedir. Bu sezon içinde yapılan gözlemler Şekil 6.4'te mavi noktalarla temsil edilen ve içinde bir parlaklık düşmesinin de olduğu ilk grup gözlemlerdir. Gözlem aralığı Eylül 2018-Mart 2019 aralığını kapsar ve bu sürede parlaklıktaki yaklaşık 0.6 mag'lık sönmeye karşılık B-V renginde yaklaşık 0.1 mag'lık bir mavileşme görülmektedir. Gözlem sezonunun en sönük olduğu 2019 yılbaşında renk en mavi olmaktadır.



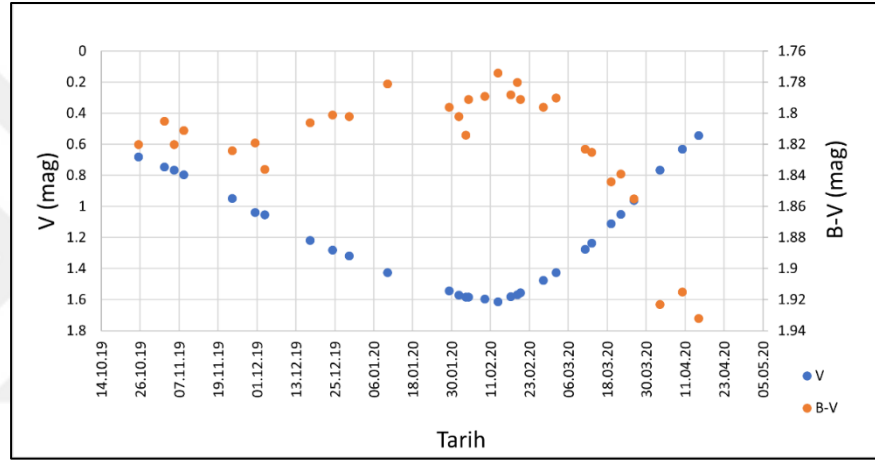
Şekil 6.5: 1. Sezon zamana karşılık V ve (B-V) grafiği.

Bu değişim, renk-parlaklık diyagramında yani Şekil 6.6'da 1. Sezon'a ait (B-V) – V grafiğinde gösterilmektedir. Şekilde V parlaklık ve B-V renk ölçeği arasındaki ilişki kendini çok net olarak belli etmektedir.



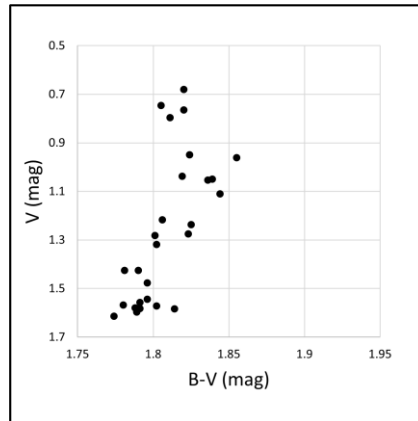
Şekil 6.6: 1. Sezon (B-V) – V grafiği.

Şekil 6.7'deki gözlem verileri Büyük Sönme olarak da adlandırılan 2. Sezon'a ait zamana karşılık V ve (B-V) değerleridir. Bu değerler aynı grafik üzerinde verilmektedir ve grafikteki mavi daireler V parlaklığını, turuncu daireler ise B-V değerlerini temsil etmektedir. Gözlem aralığı Ekim 2019-Nisan 2020 aralığını kapsar. Yıldız 2020 Şubat ayında 1.6 mag'lık bugüne kadarki en sönük değerine inerken aynı tarihte B-V renk değeri de 1^m.78'e ulaşarak bir önceki sezona göre daha da mavileşmiştir. 0^m.9 kadirlik sönmeye karşılık 0^m.08'lik renk mavileşmesiyle karşılaşılmaktadır. Bir önceki gözlem sezonuna göre Büyük Sönme sezonunda aslında hem parlaklık hem de renk ölçeği değerleri aynı yönlü olarak artışlar göstermiştir.



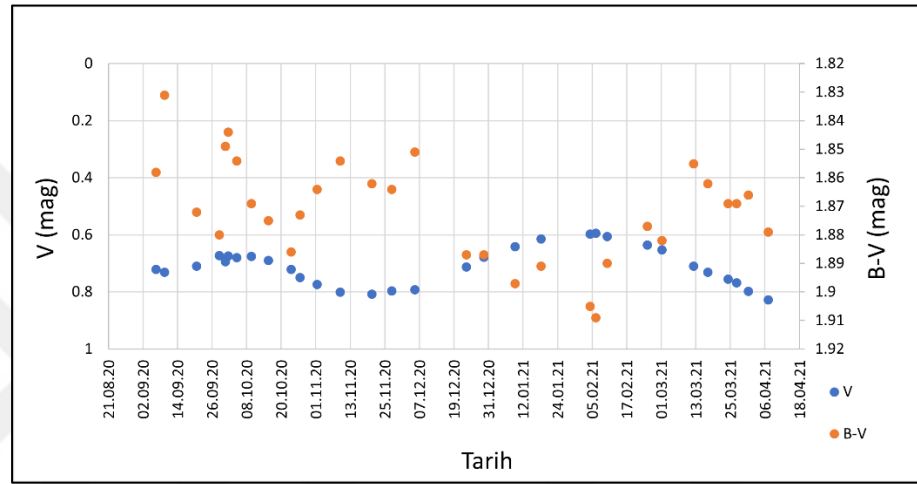
Şekil 6.7: 2. Sezon zamana karşılık V ve (B-V) grafiği.

Şekil 6.8'de 2. Sezon'a ait (B-V) – V grafiği gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi saçılmalı değerlere rağmen sönme sırasındaki renk mavileşmesi kendisini belli etmektedir.



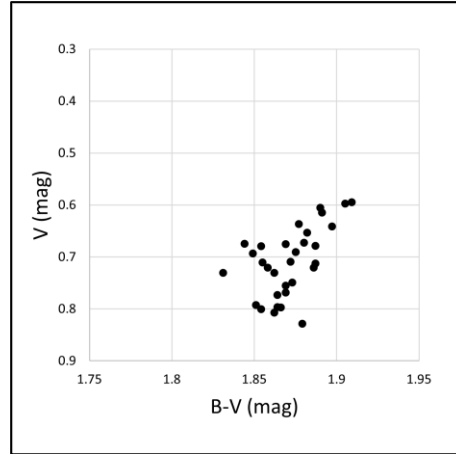
Şekil 6.8: 2. Sezon (B-V) – V grafiği.

Şekil 6.9’da 3. Sezon olan 2020 Eylül ile 2021 Nisan tarih aralığını kapsayan zamana ilişkin V ve (B-V) değerleri aynı grafik üzerinde verilmektedir. Bu grafikte diğerlerine benzer olarak mavi daireler V parlaklığını, turuncu daireler ise B-V değerlerini temsil etmektedir. Bu gözlem sezonundaki parlaklık değişim düzeyi genelde $0^m.6-0^m.8$ arasında nispeten daha düşük genlikli kalmakta ve buna karşılık renk değerleri de daha önceki gözlem sezonlarında karşımıza çıkan mavileşme düzeylerine erişemeyip, $1^m.83$ değerine kadar ulaşabilmektedir. Bu sezondaki renk değeri Büyük Sönme sezonundakine göre yaklaşık $0^m.05$ daha kırmızıdır.



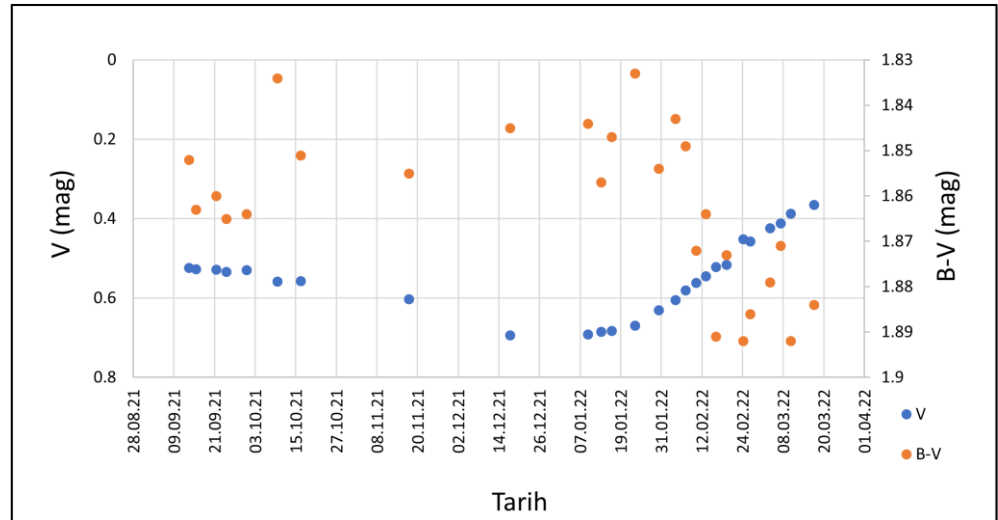
Şekil 6.9: 3. Sezon zamana karşılık V ve (B-V) grafiği.

Şekil 6.10’da 3. Sezon’a ait (B-V) – V grafiği gösterilmektedir. Bu şekilden de görüldüğü gibi parlaklık değişimlerinin genliği azaldıkça renk değişim genlikleri de azalmakta ve saçılmalar görülmektedir. Buna karşılık parlaklık azalmasına karşılık mavileşme kendini açıkça belli etmektedir. Bunun dışında Şekil 6.9’dan görüldüğü gibi yıldız, 2021 Şubat ayında parlaklık artışı gösterirken aynı tarihte renk değişimi ortalamaya göre $0^m.04$ kırmızılaşmaktadır.

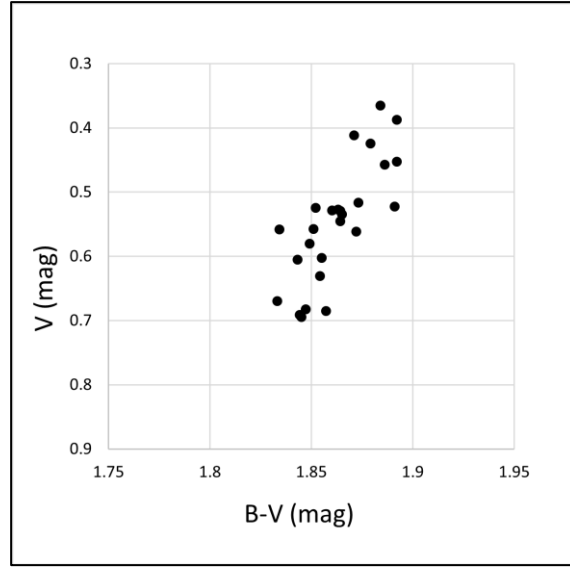


Şekil 6.10: 3. Sezon (B-V) - V grafiği.

Şekil 6.11’de ise 4’üncü gözlem sezonuna yönelik, zamana karşı V ve (B-V) değerleri verilmektedir. Bu grafikte yine mavi daireler V parlaklığını, turuncu daireler B-V değerlerini temsil etmektedir. Şekilden görüldüğü gibi parlaklık azalması $0^m.7$ ’i aşmazken buna karşılık, yıldızın renk ölçeğinde genel anlamda bir miktar kırmızılaşma mevcuttur. 2022 Ocak ayında sönme en fazlayken saçılmalı da olsa renk ölçeğindeki değerlerin mavileşme eğiliminde olduğu fark edilebilir. Burada bir diğer belirgin örnekleme de yıldızın ışığı parlamaya başladığında renk değerlerinin de yaklaşık 0.05 mag kırmızılaşmaya başlamasıdır. Yıldızın sezon içinde en sönük olduğu anda mavileşmesi Şekil 6.12’de verilen renk-parlaklık grafiğinde de kendini belli etmektedir.

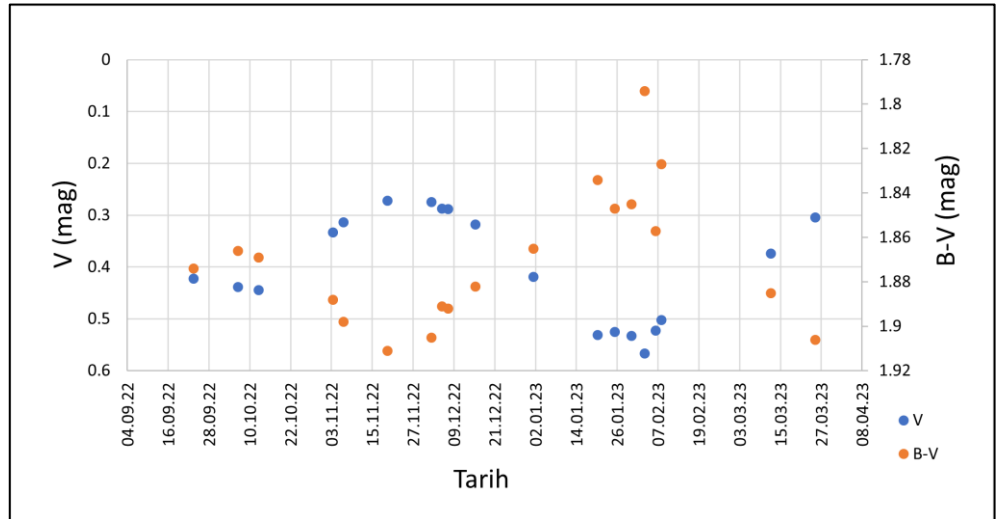


Şekil 6.11: 4. Sezon zamana karşılık V ve (B-V) grafiği.

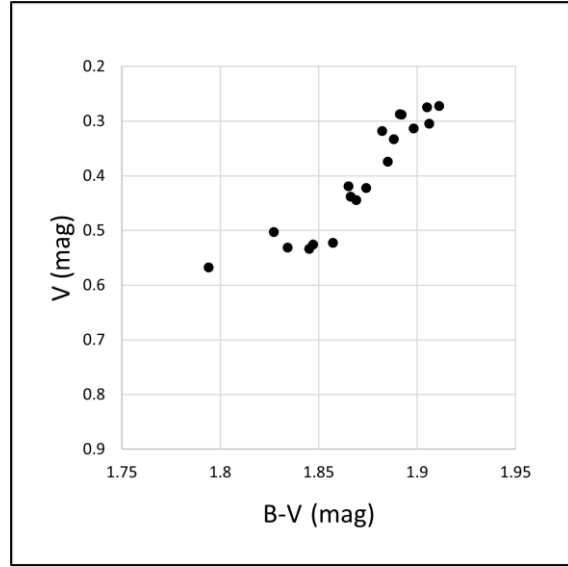


Şekil 6.12: 4. Sezon (B-V) - V grafiği.

Son gözlem sezonu olan 5'inci sezondaki değişimler, Şekil 6.13'te zamana karşılık V ve (B-V) değerleri üzerinden verilmektedir. Şekildeki renk dağılımları diğer sezon grafiklerindekiyle aynıdır. Bu sezondaki parlaklık ve renk değişimleri diğer sezonlara uyum sağlar ve yıldız söndükçe renk mavileşir buna karşılık parladıkça renk kırmızılaşmaktadır. Şekil 6.14'te 5. Sezon'a ait (B-V) – V grafiği gösterilmektedir. Daha önce de belirttiğimiz gibi son gözlem sezonunda yıldız global olarak parladığı halde renk değişimlerinin ortalama düzeyi aynı kalmaktadır. Ortalama düzey üzerinde mavileşen ve kırmızılaşan değerlere sahip olunmaktadır.

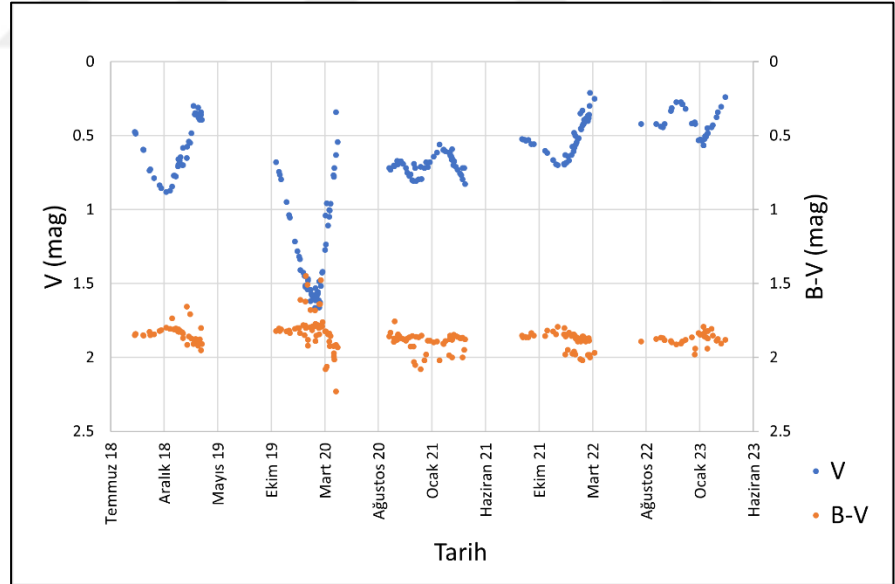


Şekil 6.13: 5. Sezon zamana karşılık V ve (B-V) grafiği.



Şekil 6.14: 5. Sezon (B-V) - V grafiği.

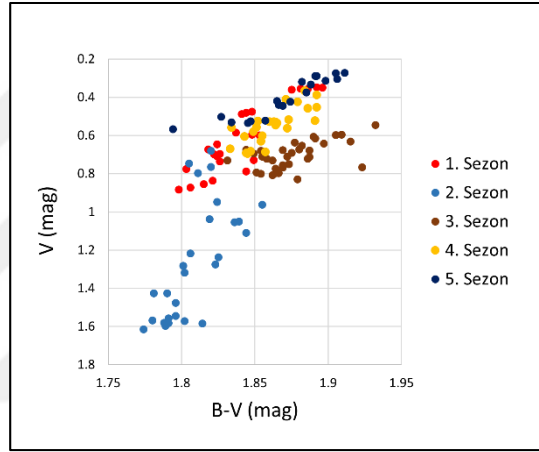
Şekil 6.15'te gözlem sezonlarına ayırdığımız tarih aralıklarına ait parlaklık ve renk ölçeği değişimleri aynı grafikte topluca gösterilmektedir. Bu grafikte zamana karşılık V parlaklığı ve B-V renk ölçeği değerleri yer almaktadır. Mavi daireler V parlaklığını, turuncu daireler B-V renk ölçeğini temsil etmektedir.



Şekil 6.15: Tüm B ve V verileriyle oluşturulan grafik. Turuncu noktalar B-V parlaklık değerlerini, mavi noktalar V parlaklık değerlerini göstermekte.

Şekil 6.16'da AAVSO gözlemcisi Tom Calderwood (CTOA) verilerinin tümü kullanılarak elde edilen (B-V) – V grafiği gösterilmektedir. Kırmızı daireler 1. Sezon, mavi daireler 2. Sezon, kahverengi daireler 3. Sezon, sarı daireler 4. Sezon

ve lacivert daireler 5. Sezon verilerini temsil etmektedir. Tüm verilerin dağılımına bakıldığında her bir gözlem sezonu grafiklerinde görülen genel görüntü karşımıza topluca çıkmakta ve yıldız söndükçe renginin mavileştiği açıkça görülmektedir. Burada ilginç olan Büyük Sönme öncesindeki 1'inci sezon ile en son sezon arasında geçen yaklaşık 5 yıl içinde yıldız yine benzer parlaklık ve renk değerlerine ulaşmış olmasıdır. Büyük Sönme'nin görüldüğü 2'nci sezon gözlem verileri şekilde bariz olarak farklılık göstermekte ve en büyük mavileşmeye sahip olunmaktadır. 3'üncü gözlem sezonunda yıldızın parlaklığı Büyük Sönme'deki kadar olmasa da yıldızın global parlaklığının altında kaldığı için renk değerleri de Büyük Sönme sezonu hariç, diğer hepsininkinden nispeten daha kırmızı kalmaktadır.



Şekil 6.16: AAVSO gözlemcisi CTOA verileriyle oluşturulan (B-V) – V grafiği.

7. SONUÇ VE TARTIŞMA

M2 Iab tayf türünden kırmızı süperdev olan Betelgeuse, AAVSO gözlemcileri tarafından uzun yıllardır yapılan V bant ışıkölçümü sayesinde elde edilen parlaklık değişimi yüzünden, yarı düzenli bir değişen yıldız olarak kabul edilmekte, uzun ve kısa dönemli fotometrik dönem değişimleri göstermektedir. Bu tez çalışması boyunca Betelgeuse'un evrimi yanı sıra, yapılan fotometrik ve tayfsal çalışmalardan söz edilmiş, geniş bant ışıkölçümü sayesinde parlaklık ve renk değişimleri arasındaki ilişki yakın planda incelenmiştir.

Tez amaçları içinde yer alan fotometrik ışık değişimlerinin araştırılabilmesi için AAVSO veri tabanında yer alan parlaklık değerleri kullanılmıştır. Yıldızın çok parlak olmasından dolayı yaklaşık yüz yıldır, gözlemcilerin büyük çoğunluğu, görsel parlaklıklar üzerinden verileri elde etmişlerdir ve günümüzde de hala gözlemler sürdürülmektedir. Ancak 1950'li yıllardan sonra Johnson geniş bant V ve 2018'den sonra da B bant gözlemleri yapılmaya başlanmıştır. Görsel gözlemlerdeki saçılmanın fazla olması küçük genlikli, yarı düzenli bir parlaklık değişimi gösteren yıldızdaki astrofiziksel bulguları ortaya koymakta yetersiz ve yüksek hatalı sonuçlar doğuracağından, son 40-50 yıldaki geniş bant gözlem verileri daha güvenilir kabul edilip kullanılmaya başlanmıştır. Tarafımızdan yapılan yıldızın parlaklık değişimlerinin analizi yanında B-V renk ölçeklerinin değişiminin de araştırılacak olmasından dolayı özellikle 2018 yılı sonrası B ve V bant gözlemleri tez çalışmamızda analiz edilmiştir.

Araştırmamızın sonuçları, literatüre kattığı yenilik açısından değerlendirildiğinde yapılan önceki araştırmaların hiçbirinde B-V renk ölçeği değişimine yer verilmediği görülmüş ve bu konu üzerine yoğunlaşmıştır. Bilindiği gibi renk değişimleri, değişen yıldızların parlaklık değişimleri yanı sıra astrofiziksel değişimleri ortaya koymada ve sonuçları desteklemede önemli parametre olarak kabul edilir. Yıldızın fotosferinde veya onu çevreleyen dış ortamlarla olan etkileşimlerinde ortaya çıkan parlaklık ve renk arasındaki yakın ilişki, bize bozucu yapılar veya ortamın fiziksel durumu üzerine karar vermemizi kolaylaştırır. Genelde yıldızın V bant parlaklığının azalması sonucunda, B-V renk değerlerinin de kırmızılaşması beklenir. Böylece bozucu etkinin daha soğuk bir yapı veya ortam

kaynaklı olduğu ortaya konmuş olur. Yıldızın fotosferindeki soğuk yıldız lekeleri gibi bozucu etkilerden dolayı veya yıldızı çevreleyen soğurucu toz ortamlardan kaynaklanan parlaklık azalması saptanıyorsa bu soğuk soğurucu ortamdan alınan renk değişimleri de gözlenen renkte bir kırmızılaşma doğurur. Buna karşılık, parlaklık azalırken, beklenenin tersine, renkte mavileşme görülüyorsa, fotosfer kaynaklı yüzey özelliklerinin veya nedeni ne olursa olsun onu çevreleyen toz ortam yapısının yeniden değerlendirilmesi gerekir. Tez çalışmamızdaki yıldız da işte tam bu gözlenen renkteki beklenin tersi durumu sergilemektedir.

Betelgeuse'un yarı düzenli parlaklık değişimleri için literatürde yer alan önerilerden özellikle üç tanesi ön plana çıkmaktadır. Bunlardan birincisi, yıldız kırmızı bir süperdev olduğundan büyük hızlarda soğuk yıldız rüzgarları üretir veya yüzey üzerinden olan püskürmeler/fıskırmalar çevrede bir toz ortam oluşturur (Roddiier, 1985); ikincisi, yıldız aktivitesine bağlı olarak fotosferde soğuk yıldız lekeleri ve dolayısıyla parlak faküller alanlar yer almaktadır (Kervella 2009; Montarges, 2016), ve üçüncüsü yıldızın parlaklık değişimi zonklama kaynaklıdır (Joyce et al., 2020). Bu üç öneriye konu olan fiziksel süreçler, yıldızın parlaklık değişimi üzerinde ayrı ayrı baskın olabildiği gibi bazen ikisi veya üçü aynı anda baskın olarak karşımıza çıkabilmektedir. Tez içeriğinde yer alan ve 2020 yılında gözleendiğinde “Büyük Sönme” olarak adlandırılan fotometrik değişkenlik için literatürde sunulan önerilerin ikisinin veya üçünün, eş zamanlı olarak denk gelmesinden kaynaklanmış olabileceğine yönelik çalışmalar önceki yıllarda yayımlanmıştır (Dupree et al., 2020).

Parlaklık ve renk ölçeği değerlerinin değişkenliği üzerine yaptığımız bu çalışmayla, literatürde yer almayan bazı sonuçlar elde ettik ve aşağıda ayrıntılı olarak yer verdik.

- ★ Yıldızın görsel parlaklık dışındaki V bant parlaklık değişimi Şekil 6.1, 6.2 ve 6.3'te gösterilmiş olup, veriler genelde ortalama olarak 0.3 mag'lık maksimum parlaklık değerlerini aşmasa da değişimin minimumlarında zaman zaman dikkat çekici sönmelere rastlanmıştır. Parlama değerleri özellikle 2017 ve 2023 yıllarında ortalamanın 0^m.1 kadar üzerine çıkmıştır. Buna karşılık parlaklık değişimlerinin minimum olduğu yıllarda, 1989, 1993-1995 yıl aralığı ve 2003 yıllarında minimum parlaklıklar 0^m.7'den 0^m.2 daha sönerek 0^m.9 değerlerine

kadar ulaşmıştır. İzleyen yıllarda, örneğin 2017-2022 yılları arasında yıldızın en sönük görüldüğü anlardaki parlaklık değeri $0^m.9$ olarak devam etmiş ve hatta 2020 yılında Büyük Sönme ile $1^m.6$ 'e ulaşmıştır. Betelgeuse'un ışık değişim genliği literatürde sıklıkla $0^m.5$ olarak yer almaktadır (MacLeod, 2023).

- ★ Parlaklık değişimleri yanı sıra B-V renk değişimlerini de değerlendirebilmek için 2018 yılı sonrasına yönelik B bant gözlemleri de incelemeye dahil edilmiştir. 2018-2023 yılı gözlem aralığı, yıldızın sonbahardan ilkbahara kadar olan aylarda gözlenebilmesinden dolayı gözlem verileri, 5 ayrı gözlem sezonuna ayrılarak incelenmiştir. 50 yıllık gözlem verilerine bakıldığında en ilginç değişimlerin var olduğu yıl aralığı da bu son 5 sezonluk dilime denk gelmektedir. Özellikle 2'nci sezonda Büyük Sönme yaşanmış ve 2022-2023 gözlem sezonunu kapsayan 5'inci sezonda da yıldız hiç olmadığı kadar parlak duruma ulaşmıştır. Bu kadar üst üste binmiş değişkenliklerin açıklanması beraberinde oldukça güvenilir dönem analizleri de gerektirmektedir ki tez içeriğinde bu tür bir çalışmaya yer verilmemiş, ama H-R diyagramında aynı bölgede yer alan diğer kırmızı süperdevlerin parlaklık ve renk değişimleriyle birlikte ayrı bir çalışmada topluca incelenecektir. Yıldızın dönemli veya çevrimsel parlaklık değişimleri için literatürde yer alan üç önerinin her birinin olası varlığı veya katkısını ortaya koyabilecek fotometrik dönem analizleri de yine yıldızın ortalama parlaklık ve sezonluk değişimlerine ışık tutacaktır.
- ★ Her bir gözlem sezonu içinde elde edilen gözlem verilerinden yola çıkarak çizdirilen B-V renk ölçeklerine karşılık V bant parlaklıklarından oluşan grafiklerde çarpıcı olarak şu sonuca ulaşılmıştır; yıldızın parlaklığı azaldıkça yani yıldız söndükçe, yıldızın rengi olduğundan daha mavi olarak elde edilmektedir. Elde ettiğimiz bu sonuç oldukça çarpıcıdır ve ilk defa bu kadar çok veri kullanılarak ortaya konmaktadır. Şekil 6.16'dan görülen değişimlere göre Büyük Sönme öncesindeki sezon ile en son sezon arasında kalan yaklaşık 5 yıllık zaman aralığında, yıldız benzer parlaklık ve renk değerlerine ulaşmıştır. Büyük Sönme'nin görüldüğü 2'nci sezon gözlem verileri, söz konusu şekilde bariz olarak farklılık göstermekte ve en büyük mavileşmeye sahip olmaktadır. 3'üncü gözlem sezonunda ise yıldızın parlaklığı Büyük Sönme'deki kadar olmasa da yıldızın global parlaklığının altında kaldığı için renk değerleri de

Büyük Sönme sezonu hariç, diğer hepsininkinden nispeten daha mavi kalmaktadır. Bu durum da aslında 2019 yılı sonlarından itibaren yıldızda görülen, Büyük Sönme olarak adlandırılan ve 2020 yılına kadar devam eden fiziksel süreçlerin, o yıllar için aslında henüz bitmediğini ve gelecek sezona aktarılmış biçimde devam ederek tamamlandığının habercisidir. Bu önerimiz aslında Şekil 6.16'da 2 ve 3'üncü sezon renk-parlaklık değişimlerinin birbirini takip eder şekilde görünmesiyle ortaya konabilir. Bu durum aslında bu kadar büyük bir fiziksel değişimin de bir yıldan daha uzun sürmesi gerektiğini ortaya koymakta; dolayısıyla, Büyük Sönme önerilerinden biri olabilecek geometrik bir tutulma olayının da dikkate alınması olasılığını ortadan kaldırmaktadır.

- ★ Şekil 6.4'te gösterilen 2018-2023 yılları arasında görülen parlaklık değişimlerinden çıkarabileceğimiz bir diğer sonuç da 2023 yılındaki parlaklık artışlarından gelmektedir. Bu durum, Büyük Sönme için literatürde özellikle önerilen yıldız saran toz ortamın zamanla dağıldığının habercisi de olabilir. Yıldızın son zamanlardaki global parlaklık artışı bunu öngörür. Önümüzdeki gözlem sezonları bu önerimizi destekleyecek yönde olabilir. Yıldız ortalama parlaklığını arttırırken parlaklık değişimlerinin yarı dönemli olarak devam etmesi üst üste binmiş fiziksel süreçleri de ortaya koymaktadır. Bu değişimler her ne kadar literatürde yıldızda var olan zonklamalar üzerine yapılandırılsa da farklı araştırmacılar tarafından yapılan fotometrik dönem analizleri maalesef farklı farklı sonuçlar vermektedir. Yıldızın yarı dönemli değişen yıldız olmasına neden olan varsayım belki de bu durumdan ortaya çıkmaktadır.
- ★ Literatürdeki son değişim önerilerden biri de yıldız fotosferinde görülen soğuk yıldız lekeleri ve parlak alanlardır. Biliyoruz ki soğuk yıldız lekeleri yıldızın dönmesiyle birlikte yüzey üzerinde hareket etmekte, zaman zaman bakış doğrultumuza geldiğinde parlaklıkta azalmaya neden olmaktadır. Yine yıldız aktivitesine yönelik çalışmalardan biliyoruz ki özellikle büyük alanlara sahip yıldız lekelerinin uzun yaşam süreli olması, uzun süreli parlaklık değişimleri görülmesine neden olabilmektedir. Bunun yanı sıra Güneş fotosferinde görüldüğü gibi, geri tür yıldızların yüzeylerinde soğuk/karanlık lekelerin etrafında sıcak/parlak faküller alanlar da mevcuttur. Bu tür parlak alanların soğuk lekeli alanlara göre daha baskın olması durumunda bazı aktif yıldızlarda

görüldüğü gibi parlaklık değişimleri yanı sıra renk ölçekleri üzerinde de mavileşmeye neden olmaktadır (Taş et al., 1999). Benzer yapıların Betelgeuse üzerinde de görülmesi doğaldır ancak bunu ortaya koymak için yıldızın belli bir proje kapsamında tüm geniş bant filtrelerini kapsayacak şekilde uzun süreli ışıkölçümünün yapılması gerekmektedir. Belki de Büyük Sönme'nin ortaya çıkması gelecek yıllarda yıldız üzerine yapılacak gözlemlerin farklı amaca yönelik projelerle yürütülmesini sağlamış olacaktır.

Parlaklık değişimlerine ve özellikle Büyük Sönme'ye yönelik literatürde en çok tartışılan model yıldızın fırlatmış olduğu madde dolayısıyla yıldızı çevreleyen bir toz ortamdır (Dupree et al., 2020;2022). Bu çevresel toz ortam, kütle kaybının bir kanıtı olarak ileri sürülmektedir. Oldukça geniş atmosferlerinin, yıldızın içinde meydana gelen konveksiyon, zonklama, kütle kaybı gibi süreçlerle birleşerek toz oluşumunu destekleyeceğinden söz edilmektedir. Yıldızlararası ortama fırlatılan maddenin, toz yapıyı oluşturmaları için silikat türleri ve karbon bazlı bazı moleküller olması gerektiği bilinmektedir. Ortam içindeki parçacıkların boyutları, ortamın saçarak saldırdığı ışığın rengini mavileştirebildiği ve buna benzer yıldızların olduğu bilinmektedir.

Sonuç olarak, eğer yıldızı çevreleyen ve herhangi bir nedenle oluşan toz ortam bakış doğrultumuz üzerinde yoğunlaşmış ve zamanla dağılmaktaysa; bu toz ortamın parçacık boyutlarından kaynaklı bir mavi ışık saçılması yaratıyorsa renk üzerindeki mavileşmelerin görülmesi doğaldır. Ancak bunun sezonlar boyunca her sönmede görünmesi olayın fiziksel sürecinde yıldız aktivitesine bağlı faküler yapıların da baskın mavileşen renk değişikliğine neden olabileceğini akla getirmektedir.

Yapılacak ayrıntılı geniş bant ışıkölçüm ve fotometrik dönem analizleri hem Betelgeuse hem de benzer yapıları kırmızı süperdevlerdeki parlaklık-renk ilişkisi üzerinde önemle durulmasını göstermektedir.



KAYNAKLAR

- Alexeeva, S., Zhao, G., Gao, D.Y., Du, J., Li, A., Li, K., and Hu, S., 2021,** Spectroscopic evidence for a large spot on the dimming Betelgeuse, *Nature communications*, 12(1), 4719.
- Benvenuto, O.G. and Althaus, L.G.,** 1998, Evolution of helium white dwarfs with hydrogen envelopes, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 293, 177-188pp
- Beasor, E. R., Davies, B., & Smith, N.,** 2021, The impact of realistic red supergiant mass loss on stellar evolution. *The Astrophysical Journal*, 922(1), 55.
- Britavskiy, N., Bonanos, A., Herrero, A., Cervin˜o, M., Garcia-Alvarez, D., Boyer, M., Masseron, T., Mehner, A., and McQuinn, K.,** 2019, Physical parameters of red supergiants in dwarf irregular galaxies in the Local Group, *Astronomy & Astrophysics*, 631, A95.
- Brunish, W., Gallagher, J., and Truran, J.,** 1986, Blue-to-red ratios as tests for theoretical models of massive stars, *The Astronomical Journal*, 91, 598–601.
- Chiavassa, A., Haubois, X., Young, J., Plez, B., Josselin, E., Perrin, G., and Freytag, B.,** 2010, Radiative hydrodynamics simulations of red supergiant stars- II. Simulations of convection on Betelgeuse match interferometric observations, *Astronomy & Astrophysics*, 515, A12.
- Chiosi, C. and Maeder, A.,** 1986, The evolution of massive stars with mass loss, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 24(1), 329–375.
- Conti, P.S.,** 2000, Wolf-Rayet Stars and Galaxies¹, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 112(777), 1413.
- Crowther, P.A., Dessart, L., Hillier, D.J., Abbott, J.B., and Fullerton, A.W.,** 2002, Stellar and wind properties of LMC WC4 stars-A metallicity dependence for Wolf-Rayet mass-loss rates, *Astronomy & Astrophysics*, 392(2), 653–669.

KAYNAKLAR (devam)

- Danielson, R., Woolf, N., and Gaustad, J.**, 1965, A Search for Interstellar Ice Absorption in the Infrared Spectrum of MU Cephei., *The Astrophysical Journal*, 141, 116.
- de Groot, M.**, 1988, The most luminous stars in the universe, *Irish Astronomical Journal*, 18, 163–170.
- De Loore, C., De Greve, J., and Lamers, H.**, 1977, Evolution of massive stars with mass loss by stellar wind, *Astronomy and Astrophysics*, 61, 251–259.
- Dolan, M.M., Mathews, G.J., Lam, D.D., Lan, N.Q., Herczeg, G.J., and Dearborn, D.S.**, 2016, Evolutionary tracks for Betelgeuse, *The Astrophysical Journal*, 819(1), 7.
- Draine, B.**, 1980, Physical Processes in Red Giants: Proceedings of the Second Workshop, *Erice, Italy, September*, pages 3–13.
- Drout, M.R., Massey, P., and Meynet, G.**, 2012, The yellow and red supergiants of M33, *The Astrophysical Journal*, 750(2), 97.
- Dupree, A. K., Strassmeier, K. G., Matthews, L. D., Uitenbroek, H., Calderwood, T., Granzer, T., ... & Weber, M.**, 2020, Spatially resolved ultraviolet spectroscopy of the great dimming of Betelgeuse. *The Astrophysical Journal*, 899(1), 68.
- Dupree, A. K., Calderwood, T. J., Carona, D., Granzer, T., Strassmeier, K., & Weber, M.**, 2022, December, A Surface Mass Ejection (SME) from Betelgeuse. In *Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun* (p. 217).
- Ekström, S., Georgy, C., Eggenberger, P., Meynet, G., Mowlavi, N., Wyttenbach, A., Granada, A., Decressin, T., Hirschi, R., Frischknecht, U., et al.**, 2012, Grids of stellar models with rotation-I. Models from 0.8 to 120 M at solarmetallicity ($Z = 0.014$), *Astronomy & Astrophysics*, 537, A146.

KAYNAKLAR (devam)

- Elias, J. H., Frogel, J. A., and Humphreys, R. M.**, 1985, M supergiants in the Milky Way and the Magellanic Clouds Colors, spectral types, and luminosities. *Astrophysical Journal Supplement Series (ISSN 0067-0049)*, vol. 57, Jan. 1985, p. 91-131., 57, 91-131.
- Engle, S.G., Guinan, E.F., Harper, G.M., Cuntz, M., Evans, N.R., Neilson, H.R., and Fawzy, D.E.**, 2017, The Secret Lives of Cepheids: δ Cep—The Prototype of a New Class of Pulsating X-Ray Variable Stars, *The Astrophysical Journal*, 838(1), 67.
- Gilliland, R.L. and Dupree, A.**, 1996, First image of the surface of a star with the Hubble Space Telescope, *The Astrophysical Journal*, 463(1), L29.
- Goldberg, L.**, 1984, The variability of alpha Orionis., *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 96(579), 366.
- Gordon, M.S. and Humphreys, R.M.**, 2019, Red Supergiants, Yellow Hypergiants, and Post-RSG Evolution, *Galaxies*, 7(4), 92.
- Gray, D. F.**, 2008, Mass motions in the photosphere of Betelgeuse, *The Astronomical Journal*, 135(4), 1450.
- Guinan, E.F. and Wasatonic, R.J.**, 2020, Betelgeuse updates, *The Astronomer's Telegram*, 13439, 1.
- Guinan, E.F., Wasatonic, R.J., and Calderwood, T.J.**, 2019a, The fainting of the nearby red supergiant Betelgeuse, *The Astronomer's Telegram*, 13341, 1.
- Guinan, E. F., Wasatonic, R. J., & Calderwood, T. J.**, 2019b, Updates on the "Fainting" of Betelgeuse. *The Astronomer's Telegram*, 13365, 1.
- Guo, J. and Li, Y.**, 2002, Evolution and Pulsation of Red Supergiants at Different Metallicities, *The Astrophysical Journal*, 565(1), 559.
- Harper, G.M., Guinan, E.F., Wasatonic, R., and Ryde, N.**, 2020, The photospheric temperatures of Betelgeuse during the great dimming of 2019/2020: no new dust required, *The Astrophysical Journal*, 905(1), 34.

KAYNAKLAR (devam)

- Harper, G. M., Brown, A., & Guinan, E. F.**, 2008, A New VLA–Hipparcos Distance to Betelgeuse and its Implications. *The Astronomical Journal*, 135(4), 1430.
- Haubois, X., Norris, B., Tuthill, P., Pinte, C., Kervella, P., Girard, J., Kostogryz, N., Berdyugina, S., Perrin, G., Lacour, S., et al.**, 2019, The inner dust shell of Betelgeuse detected by polarimetric aperture-masking interferometry, *Astronomy & Astrophysics*, 628, A101.
- Hirschi, R., Meynet, G., Maeder, A., Ekström, S., and Georgy, C.**, 2010, Stellar evolution in the upper HR diagram, in *Hot and Cool: Bridging Gaps in Massive Star Evolution*, volume 425, page 13.
- Höfner, S. and Olofsson, H.**, 2018, Mass loss of stars on the asymptotic giant branch: Mechanisms, models and measurements, *The Astronomy and Astrophysics Review*, 26, 1–92.
- Hubble, E. and Sandage, A.**, 1953, The Brightest Variable Stars in Extragalactic Nebulae. I. M31 and M33., *The Astrophysical Journal*, 118, 353.
- Humphreys, R. M.**, 1978, Studies of luminous stars in nearby galaxies. I. Supergiants and O stars in the Milky Way. *Astrophysical Journal*, Suppl. Ser., Vol. 38, p. 309-350, 38, 309-350.
- Humphreys, R.M. and Davidson, K.**, 1979, Studies of luminous stars in nearby galaxies. III-Comments on the evolution of the most massive stars in the Milky Way and the Large Magellanic Cloud, *Astrophysical Journal, Part 1*, vol. 232, Sept. 1, 1979, p. 409-420., 232, 409–420.
- Humphreys, R.M. and Jones, T.J.**, 2022, Episodic Gaseous Outflows and Mass Loss from Red Supergiants, *The Astronomical Journal*, 163(3), 103.
- Humphreys, R. M., and Sandage, A.**, 1980, On the stellar content and structure of the spiral Galaxy M33. *Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 44, Nov. 1980, p. 319-381., 44, 319-381.

KAYNAKLAR (devam)

- Iben Jr, I.**, 1967, Stellar evolution within and off the main sequence, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 5(1), 571–626.
- Jadlovsky, D., Krticka, J., Paunzen, E., and Stefl, V.**, 2023, Analysis of photometric and spectroscopic variability of red supergiant Betelgeuse, *New Astronomy*, 99, 101962.
- Josselin, E., Blommaert, J., Groenewegen, M., Omont, A., and Li, F.**, 2000, Observational investigation of mass loss of M supergiants, *Astronomy and Astrophysics*, 357, 225–232.
- Joyce, M., Leung, S. C., Molnár, L., Ireland, M., Kobayashi, C., and Nomoto, K. I.**, 2020, Standing on the shoulders of giants: New mass and distance estimates for betelgeuse through combined evolutionary, asteroseismic, and hydrodynamic simulations with MESA. *The Astrophysical Journal*, 902(1), 63.
- Kaminski, T., Gottlieb, C., Menten, K., Patel, N., Young, K., Brünken, S., Müller, H., McCarthy, M., Winters, J., and Decin, L.**, 2013, Pure rotational spectra of TiO and TiO₂ in VY Canis Majoris, *Astronomy & Astrophysics*, 551, A113.
- Kervella, P., Verhoelst, T., Ridgway, S. T., Perrin, G., Lacour, S., Cami, J., and Haubois, X.**, 2009, The close circumstellar environment of Betelgeuse- Adaptive optics spectro-imaging in the near-IR with VLT/NACO. *Astronomy & Astrophysics*, 504(1), 115-125.
- Kervella, P., Perrin, G., Chiavassa, A., Ridgway, S. T., Cami, J., Haubois, X., & Verhoelst, T.**, 2011, The close circumstellar environment of Betelgeuse- II. Diffraction-limited spectro-imaging from 7.76 to 19.50 μm with VLT/VISIR. *Astronomy & Astrophysics*, 531, A117.
- Kiss, L., Szabo, G.M., and Bedding, T.**, 2006, Variability in red supergiant stars: pulsations, long secondary periods and convection noise, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 372(4), 1721–1734.

KAYNAKLAR (devam)

- Kravchenko, K., Chiavassa, A., Van Eck, S., Jorissen, A., Merle, T., Freytag, B., & Plez, B.**, 2019, Tomography of cool giant and supergiant star atmospheres-II. Signature of convection in the atmosphere of the red supergiant star μ Cep. *Astronomy & Astrophysics*, 632, A28.
- Levesque, E.M.**, 2010, The physical properties of red supergiants, *New Astronomy Reviews*, 54(1-2), 1–12.
- Levesque, E.M. and Massey, P.**, 2020, Betelgeuse just is not that cool: effective temperature alone cannot explain the recent dimming of Betelgeuse, *The Astrophysical Journal Letters*, 891(2), L37.
- Levesque, E.M., Massey, P., Olsen, K., and Plez, B.**, 2007, Late-type red supergiants: Too cool for the magellanic clouds?, *The Astrophysical Journal*, 667(1), 202.
- Levesque, E.M., Massey, P., Olsen, K., Plez, B., Josselin, E., Maeder, A., and Meynet, G.**, 2005, The effective temperature scale of galactic red supergiants: cool, but not as cool as we thought, *The Astrophysical Journal*, 628(2), 973.
- Levesque, E. M., Massey, P., Olsen, K. A. G., Plez, B., Meynet, G., and Maeder, A.**, 2006, The effective temperatures and physical properties of Magellanic Cloud red supergiants: the effects of metallicity. *The Astrophysical Journal*, 645(2), 1102.
- MacLeod, M., Antoni, A., Huang, C. D., Dupree, A., & Loeb, A.**, 2023, Left Ringing: Betelgeuse Illuminates the Connection Between Convective outbursts, Mode switching, and Mass Ejection in Red Supergiants. *arXiv preprint arXiv:2305.09732*.
- Maeder, A. and Meynet, G.**, 2001, Stellar evolution with rotation. VII.-Low metallicity models and the blue to red supergiant ratio in the SMC, *Astronomy & Astrophysics*, 373(2), 555–571.

KAYNAKLAR (devam)

- Maeder, A. and Meynet, G.,** 1987, Grids of evolutionary models of massive stars with mass loss and overshooting-Properties of Wolf-Rayet stars sensitive to overshooting, *Astronomy and Astrophysics*, 182, 243–263.
- Maeder, A. and Meynet, G.,** 2000, The evolution of rotating stars, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 38(1), 143–190.
- Maeder, A., Lequeux, J., and Azzopardi, M.,** 1980, The numbers of red supergiants and WR stars in galaxies-an extremely sensitive indicator of chemical composition. *Astronomy and Astrophysics*, vol. 90, no. 1-2, Oct. 1980, p. L17-L20., 90, L17-L20.
- Massey, P.,** 1998, Evolved Massive Stars in the Local Group. I. Identification of red supergiants in NGC 6822, M31, and M33, *The Astrophysical Journal*, 501(1), 153.
- Massey, P.,** 2013, Massive stars in the galaxies of the Local Group, *New Astronomy Reviews*, 57(1-2), 14–27.
- Massey, P., & Olsen, K. A. G.,** 2003, The evolution of massive stars. I. Red supergiants in the Magellanic Clouds. *The Astronomical Journal*, 126(6), 2867.
- Massey, P. and Conti, P.S.,** 1983, Wolf-Rayet stars in M33, *The Astrophysical Journal*, 273, 576–589.
- Massey, P., Levesque, E.M., Plez, B., and Olsen, K.A.,** 2007, The physical properties of red supergiants: Comparing theory and observations, *Proceedings of the International Astronomical Union*, 3(S250), 97–110.
- Massey, P., Silva, D. R., Levesque, E. M., Plez, B., Olsen, K. A., Clayton, G. C., ... and Maeder, A.,** 2009, Red supergiants in the Andromeda Galaxy (M31). *The Astrophysical Journal*, 703(1), 420.
- Mauron, N. and Josselin, E.,** 2011, The mass-loss rates of red supergiants and the de Jager prescription, *Astronomy & Astrophysics*, 526, A156.

KAYNAKLAR (devam)

- Mauron, N., & Le Borgne, J. F.**, 1986, The polarized dust shell around Alpha Orionis. II-The silicon fractional condensation, mass-loss rate and grain radius. *Astronomy and Astrophysics* (ISSN 0004-6361), vol. 168, no. 1-2, Nov. 1986, p. 217-224., 168, 217-224.
- Meynet, G., & Maeder, A.**, 2003, Stellar evolution with rotation-X. Wolf-Rayet star populations at solar metallicity. *Astronomy & Astrophysics*, 404(3), 975-990.
- Montargès, M., Kervella, P., Perrin, G., Chiavassa, A., Le Bouquin, J. B., Aurière, M., ... & Berger, J. P.**, 2016, The close circumstellar environment of Betelgeuse-IV. VLTI/PIONIER interferometric monitoring of the photosphere. *Astronomy & Astrophysics*, 588, A130.
- Neuhauser, R., Torres, G., Mugrauer, M., Neuhaeuser, D.L., Chapman, J., Luge, D., and Cosci, M.**, 2022, Colour evolution of Betelgeuse and Antares overtwo millennia, derived from historical records, as a new constraint on mass and age, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 516(1), 693–719.
- Nickel, O. and Calderwood, T.**, 2021, Daylight Photometry of Bright Stars—Observations of Betelgeuse at Solar Conjunction, *arXiv preprint arXiv:2112.12673*.
- Perrin, G., Ridgway, S. T., Mennesson, B., Traub, W. A., & Lacasse, M. G.**, 2004, Interferometric observations of the supergiant stars α Orionis and α Herculis with FLUOR at IOTA. *Astronomy & Astrophysics*, 418(2), 675-685.
- Pierce, M. J., Jurcevic, J. S., & Crabtree, D.**, 2000, Period-luminosity relations for red supergiant variables—I. The calibration. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 313(2), 271-280.

KAYNAKLAR (devam)

- Puls, J., Kudritzki, R.P., Herrero, A., Pauldrach, A., Haser, S., Lennon, D., Gabler, R., Voels, S., Vilchez, J., Wachter, S., et al.,** 1996, O-star mass-loss and wind momentum rates in the Galaxy and the Magellanic Clouds Observations and theoretical predictions., *Astronomy and Astrophysics*, 305, 171.
- Roddier, F. and Roddier, C.,** 1985, An image reconstruction of Alpha Orionis, *The Astrophysical Journal*, 295, L21–L23.
- Royer, P., Decin, L., Wesson, R., Barlow, M. J., Polehampton, E. T., Matsuura, M., ... & Yates, J. A.,** 2010, PACS and SPIRE spectroscopy of the red supergiant VY CMa. *Astronomy & Astrophysics*, 518, L145.
- Schwarzschild, M.,** 1975, On the scale of photospheric convection in red giants and supergiants. *Astrophysical Journal*, vol. 195, Jan. 1, 1975, pt. 1, p. 137-144., 195, 137-144.
- Shenar, T.,** 2022, Wolf-Rayet stars: recent advances and persisting problems, *arXiv preprint arXiv:2208.02614*.
- Smartt, S.J.,** 2009, Progenitors of core-collapse supernovae, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 47, 63–106.
- Smith, L.F.,** 1968, A revised spectral classification system and a new catalogue for galactic Wolf–Rayet stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 138(1), 109–121.
- Stothers, R.,** 1968, On the pulsation hypothesis for massive red supergiants, Technical report.
- Stothers, R.B.,** 2010, Giant convection cell turnover as an explanation of the long secondary periods in semiregular red variable stars, *The Astrophysical Journal*, 725(1), 1170.
- Stothers, R.B. and Chin, C.w.,** 2001, Yellow hypergiants as dynamically unstable post-red supergiant stars, *The Astrophysical Journal*, 560(2), 934.

KAYNAKLAR (devam)

- Sylvester, R., Barlow, M., and Skinner, C.,** 1994, UIR-band emission from M supergiants, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 266(3), 640–648.
- Tas, G., Evren, S., & Ibanoglu, C.,** 1999, The activity pattern on MM Herculis: spots and faculae. *Astronomy and Astrophysics*, v. 349, p. 546-552, 349, 546-552.
- Tenenbaum, E. and Ziurys, L.M.,** 2009, Millimeter detection of AlO ($X\ 2\Sigma^+$): metal oxide chemistry in the envelope of ν canis majoris, *The Astrophysical Journal*, 694(1), L59.
- Teyssier, D., Quintana-Lacaci, G., Marston, A., Bujarrabal, V., Alcolea, J., Cernicharo, J., Decin, L., Dominik, C., Justtanont, K., de Koter, A., et al.,** 2012, Herschel/HIFI observations of red supergiants and yellow hypergiants-I. Molecular inventory, *Astronomy & Astrophysics*, 545, A99.
- Tsuji, T.,** 2000, Water on the early M supergiant stars α Orionis and μ Cephei, *The Astrophysical Journal*, 538(2), 801.
- Tsuji, T.,** 2006, Infrared spectra and visibilities as probes of the outer atmospheres of red supergiant stars. *The Astrophysical Journal*, 645(2), 1448.
- van den Bergh, S.,** 1968, The galaxies of the local group (to be concluded), *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 62, 145.
- van den Bergh, S.,** 1973, The Brightest Red and Blue Stars in Galaxies, *The Astrophysical Journal*, 183, L123.
- Van Genderen, A., Sterken, C., and De Groot, M.,** 1997, New discoveries on the S DOR phenomenon based on an investigation of the photometric history of the variables AG Car, S Dor and eta Car., *Astronomy and Astrophysics*, v. 318, p. 81-98, 318, 81–98.

KAYNAKLAR (devam)

- Verhoelst, T., Van der Zypen, N., Hony, S., Decin, L., Cami, J., and Eriksson, K.,** 2009, The dust condensation sequence in red supergiant stars, *Astronomy & Astrophysics*, 498(1), 127–138.
- Vink, J. S., and de Koter, A.,** 2005, On the metallicity dependence of Wolf-Rayet winds. *Astronomy & Astrophysics*, 442(2), 587-596.
- Weis, K. and Bomans, D.J.,** 2020, Luminous blue variables, *Galaxies*, 8(1), 20.
- Wilson, R., Dhillon, V., and Haniff, C.,** 1997, The changing face of Betelgeuse, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 291(4), 819–826.
- Wood, P. R.,** 2000, Variable red giants in the LMC: Pulsating stars and binaries?. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 17(1), 18-21.
- Wood, P. R., Bessell, M. S., & Paltoglou, G.,** 1985, A sample of long-period variables in the bar of the Large Magellanic Cloud and evidence for a recent burst of star formation. *Astrophysical Journal*, Part 1 (ISSN 0004-637X), vol. 290, March 15, 1985, p. 477-486., 290, 477-486.
- Wood, P. R., Olivier, E. A., & Kawaler, S. D.,** 2004, Long secondary periods in pulsating asymptotic giant branch stars: An investigation of their origin. *The Astrophysical Journal*, 604(2), 800.
- Ziurys, L., Milam, S., Apponi, A., and Woolf, N.,** 2007, Chemical complexity in the winds of the oxygen-rich supergiant star VY Canis Majoris, *Nature*, 447(7148), 1094–1097

İNTERNET KAYNAKLARI

University of Central Florida, "Evolution from the Main Sequence to Red Giants"
<https://pressbooks.online.ucf.edu/astronomybc/chapter/22-1-evolution-from-the-main-sequence-to-red-giants/> (Eriřim tarihi: 28.04.2023)

AAVSO, "Betelgeuse", https://www.aavso.org/vsots_alphaori (Eriřim tarihi: 01.06.2023)

AAVSO, " Betelgeuse Fotometrik Verileri AAVSO ", <https://www.aavso.org/data-download> (Eriřim tarihi: 02.06.2023).

ÖZGEÇMİŞ

Murat ESENDEMİR, İlköğretim, ortaöğretim ve lise hayatını başarıyla tamamladıktan sonra 2008 yılında Ankara Üniversitesi Astronomi ve Uzay Bilimleri bölümünü kazandı. Çeşitli nedenlerden dolayı astronomi eğitimine ara verdi ve ailesiyle birlikte iş hayatına atıldı.

Yarıda bıraktığı bölümüne, büyük bir istekle 2015 yılında devam etti. 2019 yılında başarıyla mezun oldu ve astronomi alanında çeşitli işler yapmaya başladı. Bu sırada 2018 yılında evlendi ve İzmir'e yerleşti. 2020 yılında Ege Üniversitesi Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü'nde yüksek lisans hayatına başladı.

En büyük tutkusu olan astronomiyi insanlara aktarabilmek için hem akademik hayatına hem de çeşitli çalışmalarına devam etmektedir.