

O, B ve A yıldızlarında P-Cygni Profilleri ve Mutlak Parametreler

Çağlar Püsküllü^{1,2} ve Faruk Soyduğan¹

¹ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fizik Bölümü, Çanakkale

² Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı, Çanakkale

Özet Yüksek yüzey sıcaklıklarına sahip yıldızlar olarak tanımlanan O, B ve A tayf türü 209 adet yıldız, karakteristik biçimleriyle rüzgârın gözlemsel belirteci olarak görülen P-Cygni profillerinin özelliklerini incelemek amacıyla seçildi. Seçilmiş yıldızlar için mutlak parametreler (kütle, yarıçap, ışınım gücü, etkin sıcaklık ve yüzey çekim ivmesi) ile birlikte yıldızların dönme hızları literatürden toplanarak sınıflandırıldı. Moröte bölgede başta N V, C IV, Si IV çizgileri olmak üzere çeşitli çizgiler ve görsel bölgede H α (6562.8 Å) çizgisi incelendi. P-Cygni profillerinin biçimselliklerinin yıldızların mutlak parametreleriyle ve dönme hızlarıyla ilişkisi üzerinde duruldu. İncelenen yıldızlar içinde P Cygni profili gösterenlerin profil baskınlıkları ile mutlak parametreler ve dönme hızları arasındaki ilişkiler ayrı ayrı incelendi ve ortalama dağılımları elde edildi. P-Cygni profillerini de örnekleyen atmosfer modeli uygulaması WM-BASIC (Pauldrach ve ark. 1998) ile bazı yıldızlar için yapay tayflar üretilerek gözlemsel verilerle karşılaştırıldı ve yazılımın bu yıldızlar için hesapladığı rüzgârın kütle kaybı oranları ve terminal hızları sunuldu. $\dot{M} \propto L^{1.46}$ ilişkisi elde edildi.

1 Giriş

Sıcak yıldızlarda rüzgârlar, yıldız atmosferlerinde ışınım basıncının kütle çekim kuvvetine karşı gelebildiği bölgelerde görülür. Rüzgârı oluşturan madde parçacıkları, yıldız ışınımının yarattığı basıncın etkisiyle atmosferin alt katmanlarından üst katmanlarına sürülerek hızla dışarı atılır. Yıldızdan dışarı atılan madde, zamanla yıldızın etrafında kalın bir zarf oluşturur. Bu zarf, özellikle salma ve soğurma çizgilerinin ve/veya her ikisinin birleşimi olarak gördüğümüz P-Cygni profillerinin kaynağıdır. Moröte bölgede yer alan rezonans çizgilerinde görülen P-Cygni profilleri, rüzgâr varlığına kanıt olarak sunulur. Bu mekanizma, ışınımı yüksek, büyük kütleli yıldızlarda çalışmaktadır.

2 Veri listesi

Bu çalışmada 209 adet sıcak yıldız listelenmiştir. Bu liste oluşturulurken Snow ve ark. (1994)'nın çalışmasından yararlanılmıştır. Snow'un çalışmasına göre bu

yıldızlar, Uluslararası Morötesi Gözlemsel Uydusuyla (IUE) gözlenmiş sıcak yıldızlar içinde rüzgar etkinlikleri gösterebilecekleri düşünülerek belli ölçütlere göre süzülerek listelenen yıldızlardır. Mutlak parametrelerden birkaç yıldız haricinde kütle ve etkin sıcaklık, tüm yıldızlar için yarıçap, ışıma gücü ve yüzey çekim ivmesi, kalibrasyonlar kullanılarak bulundu. O tür yıldızların yarıçapı, ışıma gücü, etkin sıcaklığı ve yüzey çekim ivmesi, Martins ve ark. (2005) tarafından verilen bağıntılar kullanılarak hesaplandı. B ve A tür yıldızların kütle, yarıçap, etkin sıcaklık ve yüzey çekim ivmesi değerleri, Straizys ve Kuriliene (1981) tarafından verilen kalibrasyon çizelgelerinden alındı. Kalibrasyonlar dışında ulaşılan güncel mutlak parametrelere de yer verildi. Yıldızların dönme hızları da (*vsini*), son zamanlarda yayımlanan kaynaklardan alınarak verilmiştir. Dikine hız (V_R) düzeltilmesi için Snow ve ark. (1994) tarafından verilen değerler kullanılmıştır.

3 Tayf Çizgilerinin ve P-Cygni Profillerinin Sınıflandırılması ve İncelenmesi

Bu çalışmada kütle kaybının etkilerini görebildiğimiz çizgiler ve P-Cygni profilleri, gözle baskınlıklarına göre incelendi ve değerlendirildi. Değerlendirilen çizgiler, aşağıda listelenmiştir:

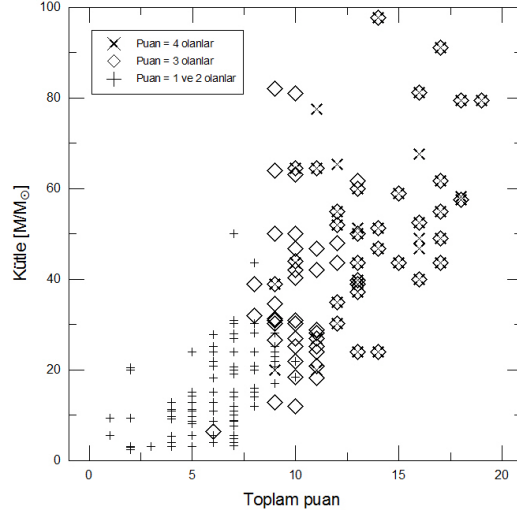
- O tür yıldızlar için N V, C IV, Si IV ikili çizgileri ve C III, N IV çizgileri
- B0-B2.5 arasındaki yıldızlarda N V, C IV, Si IV, Al III ikili çizgileri ve Si III çizgisi
- B2.5-B9.5 yıldızları için Si II, C IV, Si IV, Al III ikili çizgileri ve Si III çizgisi
- A tür yıldızlar içinse Al III, C II, Si II, Mg II ikili çizgileri ve Si III çizgisi

Değerlendirme, oluşturulan puan cetveli kullanılarak yapıldı. 1'den 4'e kadar değerlendirmeleri içeren cetvelde, 1 puan alan tayf çizgisi çizgi merkezine göre kaymamış soğurma çizgisine, 2 puan alan ise asimetric soğurma çizgisine – dolayısıyla olası bir hareketli zarf bölgesinde üretilmiş çizgiye – işaret eder. 3 ve 4 puanlar ise incelenen çizgide P-Cygni profilinin görüldüğü anlamına gelmektedir. 3 puan tayflarda doymamış P-Cygni profiline; 4 puan ise doymuş P-Cygni profiline rastlandığını gösterir. Gözle çizgi tanımının yapılamadığı ve geçerli çizgi için tayfın bulunmadığı durumlarda puan olarak 0 yazılmıştır.

Sonuç olarak seçilen beş çizgi üzerinden her bir yıldız için toplam puan hesaplanmış ve mutlak parametrelere ve dönme hızına göre grafiklere aktarılmıştır. Grafikler, yatay eksen, toplam puan; dikey eksen, mutlak parametre olmak üzere çizildi. Noktalamalar, üç farklı işaretçi ile yapıldı. 5 çizgiden en az biri 4 puanlı olduğunda \times simgesi, 3 puanlı olduğunda \diamond simgesi, 1 ve 2 puanlı olduğunda + simgesi kullanıldı. Örneğin, Şekil 1'e göre toplam puanı 15 olan $59 M_{\odot}$ kütleli bir yıldızın incelenen 5 çizgisinin en az biri 4 puan almış; bununla birlikte diğer çizgileri içinde de en az biri 3 puanlı olarak değerlendirilmiştir.

4 P-Cygni Profilleri ve Yıldızların Mutlak Parametreleri

Kütle – toplam puan grafiğinde çok büyük kütleli ($70 M_{\odot}$ 'den daha büyük) yıldız içinde birkaç örnek dışında 10 puan üstündeki çoğu yıldızın 20 ile $60 M_{\odot}$ aralığında dağıldığı görülüyor (bkz. Şekil 1).



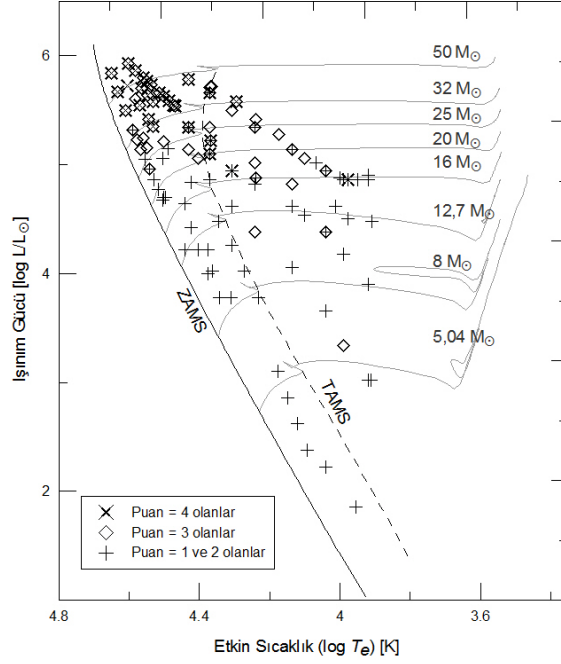
Şekil 1. Kütle–toplam puan grafiği

Yıldızların yarıçaplarına karşılık toplam puan dağılımında P-Cygni profili gösteren ve 13 puanın üstünde yer alan yıldızların hemen hemen hepsinin yarıçapları, $20 R_{\odot}$ 'den küçük değerlerde seyretmekte ve toplam puan değerleri arttıkça daha dar bir aralıkta toplanmaktadır. Yüksek puanlı yıldızlar, aynı zamanda çok yüksek ışımlı yıldızları oluşturuyor. Bu durum, ışımlı basıncıyla sürülen rüzgârlar kuramını gözlemsel olarak destekler niteliktedir. Birkaç yıldız dışında P-Cygni profili gösterdiği belirlenenler (4 ve 3 puanlı), $5 \lesssim \log L/L_{\odot} \lesssim 6$ aralığında dağılmıştır. Baskın profiller, $20000 K$ 'den daha yüksek etkin sıcaklığa sahip yıldızlarda gözlenmektedir. $\log g$ - toplam puan grafiğine göre 4 puanlı profillerle $\log g \gtrsim 2,5$ olduğu durumlarda karşılaşılmaktadır. Mutlak parametrelerin, puan (P) aralıklarına göre dağılımı Tablo 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Mutlak parametreler–Toplam puan dağılım çizelgesi

Aralık	N_M	$\langle \log M \rangle$	N_R	$\langle \log R \rangle$	N_L	$\langle \log L \rangle$	N_T	$\langle \log T \rangle$	$N_{\log g}$	$\langle \log g \rangle$
$P < 5$	54	$0,9 \pm 0,3$	51	$0,9 \pm 0,4$	51	$3,0 \pm 0,8$	54	$4,2 \pm 0,2$	49	$3,6 \pm 0,7$
$6 \leq P \leq 5$	102	$1,4 \pm 0,3$	102	$1,2 \pm 0,4$	102	$4,8 \pm 0,7$	102	$4,3 \pm 0,2$	102	$3,2 \pm 0,7$
$P > 10$	53	$1,6 \pm 0,2$	53	$1,4 \pm 0,2$	53	$5,5 \pm 0,3$	53	$4,5 \pm 0,1$	49	$3,2 \pm 0,4$

Ortalamalar; P-Cygni profilini görme ihtimalinin çok düşük olduğu $P < 5$ durumunu, ardından olası profil yapılarını içerebilecek $6 \leq P \leq 10$ aralığını ve en az bir çizgisinde P-Cygni profiliyle karşılaşılan $P > 10$ durumunu kapsar. 209 yıldızın 53'ünün en az bir tayf çizgisinde baskın P-Cygni profiliyle karşılaşılmıştır (bkz. Tablo 1).



Şekil 2. Yıldızların HR diyagramında dağılımları

Yıldızların HR diyagramında dağılımlarına bakıldığında (bkz. Şekil 2) doymuş P-Cygni profili gösteren dolayısıyla yoğun zarf yapılarına sahip yıldızların çoğunun ZAMS ile TAMS (Sınır yaş anakolu) arasında kaldıkları seçilebiliyor. HR diyagramı üzerinde baskınlıklara göre yapılacak bir değerlendirme, özellikle doymuş P-Cygni profili gösteren yıldızların diyagramın en sol üst köşesinde anakol ve süperdev yıldızların içiçe girdiği bölgede yoğunlaştığını ve bu ayrımın giderek azaldığını söylüyor. Yıldızların evrim yollarına, ZAMS'a ve yarıçaplara bakıldığında profilleri genç, ortalama $49 M_{\odot}$ kütlelerinde ve ortalama $25 R_{\odot}$ yarıçapını aşmayan büyüklükteki yıldızlarda görmekteyiz. Baskın P-Cygni profili gösteren yıldızlarda $H\alpha$ çizgilerinin yapıları, çoğunlukla salma, merkezi dalgaboyunda salma veya soğurma ve asimetrik soğurma olarak karşımıza çıkmaktadır. $H\alpha$ çizgisinde HD210839 (O6I(n)f) ve HD188209 (O9.5Iab) yıldızlarında P-Cygni profili, HD30614 (O9.5Ia) ve HD47240 (B1Ib) yıldızlarında P-Cygni benzeri yada iç soğurma görülen salma

yapıları dikkat çekmektedir. P Cygni profillerinin yıldızlarda tayf türü geriledikçe baskınlığını yitirdiğini söyleyebiliriz. Yıldızların toplam ışınım gücü arttıkça profiller, çok daha baskın olmaya başlıyor. Diğer bir ifadeyle yıldızların kütleleri, ışınım güçleri ve etkin sıcaklıkları azaldıkça rüzgâr belirteçleri de azalmaktadır. Buna bağlı olarak geç B tayf türü ve A tayf türü yıldızlarda rüzgârın kanıtlarını bulmak zorlaşmaktadır. Sonuç olarak yapılan inceleme, ışınım basıncının sürdüğü rüzgârlar kuramını istatistiksel olarak doğrulamaktadır.

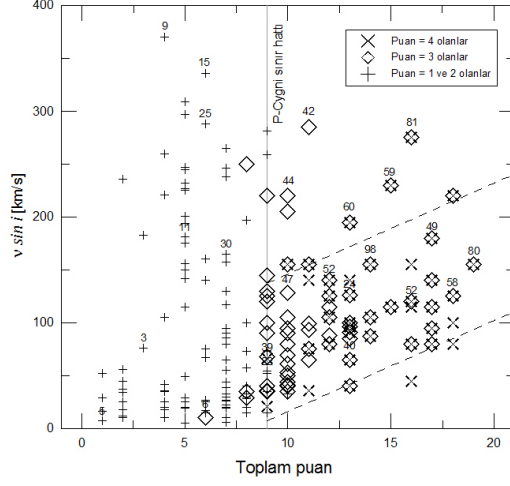
5 P-Cygni Profilleri ve Yıldızların Dönme Hızları

C IV çizgisine göre oluşturulan grafiklerde bu çizginin özellikle O-tür ve bazı erken B-tür yıldızlarda baskın bir çizgi olduğu; fakat tayf türü geriledikçe baskınlığının azaldığı söylenebilir. Aynı durum nispeten Si IV çizgisi için de geçerli denilebilir. O tür yıldızlarda Si IV çizgisi, C IV çizgisine kıyasla daha küçük puanlarda dağılım gösteriyor. Grafikler, P-Cygni profili gösteren yıldızların O-tür birkaç yıldız hariç yüksek hızlarla dönmediklerini, hızlarının yaklaşık 150 km/s'nin altında kaldığını söylüyor.

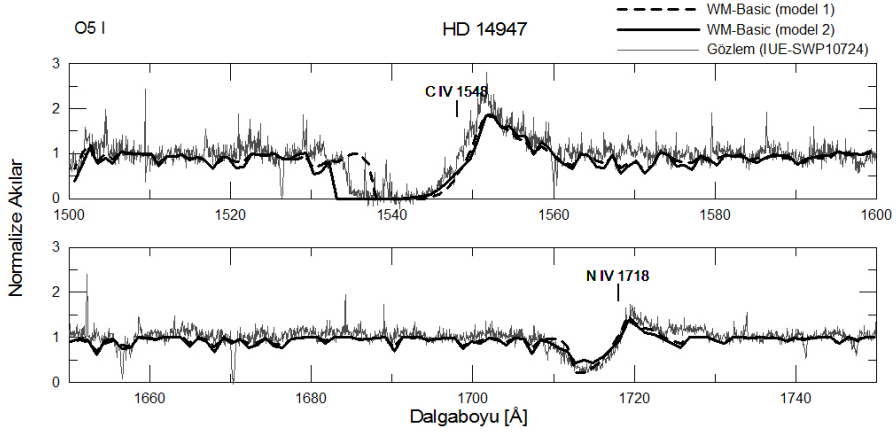
Çizelge 2. Dönme hızı–Toplam puan dağılım çizelgesi

Aralık	$N_{v \sin i}$	$\langle v \sin i \rangle$
$P < 5$	49	107
$6 \leq P \leq 5$	90	91
$P > 10$	46	98

Dönme hızının toplam puana göre dağılımını veren şekilde (bkz Şekil 3) yüksek puanlı yıldızların bir çoğunun dönme hızlarının 20 ile 150 km/s arasında dağıldığı dikkati çekiyor. Şekilde noktalı çizgilerle gösterilen doğrular, "P-Cygni sınır hattı"nın ötesine, özellikle 10 ve üstü puanlara gidildikçe hızlarının yaklaşık doğrusal bir eğimle arttığını gösteriyor. Puanı 10'dan büyük olan 51 yıldızın 5'i 150 ile 300 km/s arasında dönmektedirler. Hızlı dönen bu yıldızların – HD 303308 (O4V((f+)), HD 66811 veya bilinen ismiyle ζ Pup (O4I(n)f), HD210839 (O6I(n)f), HD101436 (O6.5V) ve HD175754 (O8II((f))) – ortak özellikleri salma gösteren yıldızlar olmasıdır ki bu yıldızların içinde sadece HD210839 yıldızının H α çizgi yapısına, ELODIE arşivinde (Moultaka ve ark. 2004) ulaşılabildiği için bakılabilmiş ve P-Cygni profili benzeri yapıyla karşılaşılmıştır. Grafikte her bir simgenin üzerine yıldızın kütlesi yazılmıştır. Bu grafikte yıldızların evrimsel durumlarının da dahil edildiği dönme hızı ve P-Cygni profil baskınlığı ilişkisi hakkında yorum yapmanın mümkün olmadığını görmekteyiz.



Şekil 3. Dönme hızı-puan dağılımı grafiği



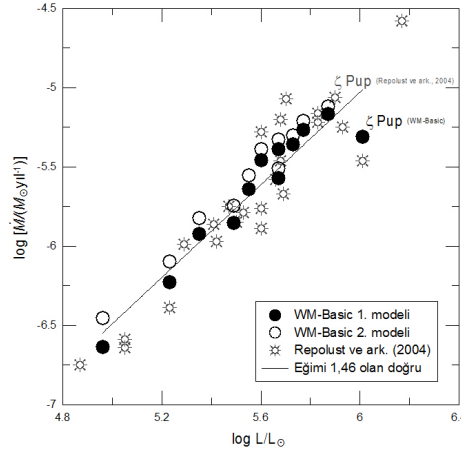
Şekil 4. HD 14947 yıldızı için yapılan WM-Basic çözümleri

6 P-Cygni Profilleri ve Atmosfer Model Uygulamaları

Atmosfer modeli uygulaması için Pauldrach ve ark. (1998) tarafından sıcak yıldızlarda genişleyen atmosferleri örneklemek amacıyla geliştirilen WM-BASIC yazılımı seçildi. Mutlak parametrelerin sabit tutularak çizgi şiddeti parametrelerinin değiştirildiği iki ayrı model için çözüm yapıldı. Çözümler için girdi olarak He sayısı oranı: $N(\text{He})/N(\text{H}) = 0,10$, ağır element bolluğu: $Z/Z_{\odot} = 1$, sıcaklık: $T_e = 36261 \text{ K}$, yüzey çekim ivmesi: $\log g = 3,56$, yarıçap: $R_* = 19,6 R_{\odot}$ ve çizgi şiddeti parametreleri 1. ve 2. model için sırasıyla $k_1 = 0,188$ ve $k_2 = 0,140$; $\alpha_1 = 0,599$ ve $\alpha_2 = 0,670$; $\delta_1 = 0,100$ ve $\delta_2 = 0,095$ alınmıştır. O5 I yıldızı HD 14947'e uygulanan her iki WM-BASIC çözümünün, gözlemi temsil ettiği görülmektedir (bkz. Şekil 4). Modeller arasındaki farklılıklar çizgi şiddeti parametrelerinden kaynaklanmaktadır. Modeller, farklı yıldızlara da uygulanmıştır. Uygulamaya alınan yıldızlarda WM-BASIC tarafından girdi parametrelerine göre hesaplanan kütle kaybı oranlarının 10^{-6} mertebesinde kaldığı görülmektedir. Sonuçlar karşılaştırıldığında 2. modelin belirlediği kütle kaybı oranları ve terminal hızlar, 1. modelin sonuçlarından daha büyüktür. Şekil 5'te kütle kaybı oranlarının ışınım gücüne bağlı değişimi yer almaktadır. Modeller için noktalardan geçen en iyi doğru oluşturulmuş ve aşağıdaki bağıntıya ulaşılmıştır:

$$\log \dot{M}/M = 1,46 \times \log L/L_{\odot} - 13,79$$

Sonucun rüzgâr momentum-ışınım bağıntısına uyduğu görülmüştür. Repolust ve ark. (2004)'ün çözümlerinin de benzer dağılıma sahip olduğunu görülebilmektedir (bkz. Şekil 5). Modeller arasında farklılıklar ve yetersizliklerin olduğu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 5. Rüzgâr momentum-ışınım Değişimi

Teşekkür. Bu çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi BAP birimi tarafından 2009/05 no'lu proje ile desteklenmiştir.

Kaynaklar

- Snow T. P., Lamers H. J., Lindholm D. M. ve Odell A. P.: An Atlas of Ultraviolet P Cygni Profiles. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, **95** (1994) 163-299.
- Pauldrach A. W. A., Lennon M., Hoffmann T. L., Sellmaier F., Kudritzki R.-P. ve Puls J.: Realistic Models for Expanding Atmospheres. *Boulder-Munich II: Properties of Hot, Luminous Stars*, ASP Conference Series, **131** (1998) 258.
- Martins F., Schaerer D. ve Hillier D. J.: A new calibration of stellar parameters of Galactic O stars. *Astronomy and Astrophysics*, **436(3)** (2005) 1049-1065.
- Straizys V. ve Kuriliene G.: Fundamental stellar parameters derived from the evolutionary tracks. *Astrophysics and Space Science*, **80** (1981) 353-368.
- Repolust T., Puls J., ve Herrero A.: Stellar and wind parameters of Galactic O-stars. The influence of line-blocking/blanketing. *Astronomy and Astrophysics*, **415** (2004): 349-376.
- Moultaka J., Ilovaisky S. A., Prugniel P., ve Soubiran C.: The ELODIE Archive. *The Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, **116(821)** (2004) 693-698.