

# Simbiyotik Sistemlerde Jet ve Rüzgar Yapılarının Nümerik Çözümleri

Melis Yardımcı<sup>1</sup>  

<sup>1</sup> Ege Üniversitesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 35100, İzmir, Türkiye

Accepted: February 12, 2025. Revised: February 12, 2025. Received: November 30, 2024.

## Özet

Simbiyotik sistemler yıldız rüzgarları, jet ve jet benzeri yapılar, sistemi saran soğuk simbiyotik bulutsu gibi birçok karmaşık astrofiziksel bileşenlere sahip çift yıldız sistemleridir. Bu sistemlerin bazılarında jet benzeri yapılarının ya da geçici jet yapılarının görülmesi, jet çıkış süreçlerinin nasıl başladığını ve/veya sürekliliğinin nasıl sağlandığının araştırılması açısından önemli laboratuvarlardır. Ek olarak, sistemdeki astrofiziksel bileşenlerin birbiriyle etkileşimi ısısal süreçlerin anlaşılması açısından da önemlidir. Bu çalışmada, nümerik çözümler sayesinde simbiyotik yıldızlarda da görülen bükülmüş jet yapılarına ve jet-yıldız rüzgarı etkileşimleriyle ilgili çalışmalara dikkat çekilmesi amaçlanmıştır.

## Abstract

Symbiotic systems are binary star systems with many complex astrophysical components, such as stellar winds, jets and jet-like structures, and a cold symbiotic nebula surrounding the system. Observations of jet-like structures or transient jets in symbiotic stars make them important laboratories for investigating how jet ejection launches and/or how their existence is maintained. In addition, the interaction between the astrophysical components in the system is also important for understanding thermal processes. This study aims to highlight the studies of the curved jet structures, observed in various systems such as symbiotic stars, and the jet-stellar wind interactions through numerical simulations.

**Anahtar Kelimeler:** binaries: symbiotic – stars: winds, outflows, jets – methods: numerical

## 1 Giriş

Simbiyotik sistemler (SySt'ler) bileşenlerinden biri evrimleşmiş kırmızı dev yıldız ve diğeri sıkışık cisim olan büyük yörünge ayrıklıklarına sahip etkileşen çift yıldız sistemleridir. Sıkışık cisim genellikle bir beyaz cüce, nadiren ise bir nötron yıldızdır (Chakrabarty & Roche 1997; Masetti ve diğ. 2006). SySt'ler, birkaç yüz günden birkaç on yıla kadar geniş bir aralıkta uzun yörünge dönemlerine sahiptir (Belczyński ve diğ. 2000). Birçok açıdan benzerlik göstermesi nedeniyle bu sistemler, kataklizmik değişen yıldızların (CV'ler) büyük yörünge ayrıklığına sahip türevleri olarak bahsedilir (Sokoloski & Kenyon 2003). Simbiyotik sistemler; sistemi saran soğuk simbiyotik bulutsu, bileşenlerin yıldız rüzgarları, sıkışık cismin etrafındaki disk yapı, sıkışık cisimden yıldızlararası ortama yayılan bipolar madde atımları gibi karmaşık yapılar barındırabilir. Yörünge ayrıklığının büyük olması sayesinde bu sistemler, her bir yapının davranışının araştırılmasına uygun bir ortam sağlayabilir.

Bu sistemlerde sıkışık cisim etrafındaki diske madde transferi gerçekleşmektedir. Madde transferinin nasıl olacağı kırmızı dev bileşenin Roche lobunu doldurup doldurmamasına ve/veya rüzgara sahip olup olmamasına bağlıdır. Kırmızı dev bileşen Roche lobunu doldurduğu durumda baskın madde transferi, Lagrange 1 (L1) noktasından sıkışık cisme doğru gerçekleşir ve Roche lobu taşımasıyla gerçekleşen madde transferi olarak adlandırılır (RLOF: Roche lobe overflow, Paczyński 1971). SySt'lerde dev bileşen güçlü yıldız rüzgarına sahip olabilir; bu durumda, Roche lobunu dolduramayan kırmızı dev bileşen için baskın madde transferi güçlü yıldız rüzgarlarıyla

gerçekleşir ve bu süreç rüzgarlarla madde transferi olarak adlandırılır (Theuns & Jorissen 1993; Bondi & Hoyle 1944). Bu tür sistemler için önerilen bir diğer madde transfer mekanizması ise rüzgarla Roche lobu taşmasıdır (WRLOF: wind Roche lobe overflow, Mohamed & Podsiadlowski 2007). Bu mekanizmada kırmızı devin Roche lobunu dolduran madde, kırmızı dev yıldızın yoğun ve soğuk rüzgarıdır. Roche lobun yoğun rüzgarla dolması sonucu, L1 noktasından sıkışık cisim üzerine madde transferi gerçekleşir. Ancak bu mekanizma ekvator düzleminde bipolar madde çıkışı önerir ve sonuç olarak sistemin etrafında bipolar bulutsu yapısının oluşması gerçekleşebilir (Mohamed ve diğ. 2015).

Elektromanyetik tayfın neredeyse her bölgesinde çalışma fırsatı sunan SySt'ler, yumuşak X-ışın ( $kT \leq 2$  keV) kaynakları olarak da literatürde yer alır (Mürset ve diğ. 1997). Bununla birlikte, sert X-ışık bölgesinde ( $kT > 2$  keV) salma gösteren simbiyotik yıldızların keşif sayısı her geçen gün artmaktadır (Luna ve diğ. 2013).

Bu çalışmada, simbiyotik sistemlerde de görülen bükük jet yapıları simülasyon çalışmasından (Fendt & Yardımcı 2022) ve soğuk bileşen yıldız rüzgarlarıyla jet etkileşimi simülasyon çalışmasından bahsedilecektir (Yardımcı ve diğ. hazırlık aşm.). §2'de SySt'lerin bipolar madde çıkışları ve yıldız rüzgarları hakkında genel bilgi verilecektir. Nümerik simülasyon için kullanılan koddan ve temellerinden ise §3'te bahsedilecektir. Son olarak, §4'te elde edilen sonuçların tartışılması ve gelecek çalışmalar için öneriler sunulacaktır.

## 2 SySt'lerde Madde Çıkışları ve Yıldız Rüzgarları

Toplanmaya sahip sistemlerde (aktif gökada çekirdekleri, genç yıldızimsı cisimler, X-ışın çiftleri vb.) jet yapılarının

\* melisyardimci@gmail.com

**Çizelge 1.** Jet ve jet benzeri yapılar gösteren bazı SySt'lerin temel özellikleri. Kaynaklar: (1) Mikolajewska ve diğ. (1995); (2) Munari ve diğ. (2001); (3) Skopal (2005); (4) Skopal ve diğ. (2009); (5) Crocker ve diğ. (2002); (6) Crocker ve diğ. (2001); (7) Munari ve diğ. (2005); (8) Kafatos & Michalitsianos (1982); (9) Nichols ve diğ. (2007); (10) Melnikov ve diğ. (2018); (11) Rupen ve diğ. (2008); (12) Tomov ve diğ. (2000); (13) Schmid ve diğ. (2001); (14) Brocksopp ve diğ. (2004); (15) Drake ve diğ. (2009); (16) Smith ve diğ. (2001); (17) Skopal ve diğ. (2013).

| Sistem Adı       | $R_{dev}$<br>( $R_{\odot}$ ) | $a$<br>(AU) | $\dot{M}_{rüzgar}$<br>( $M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ) | $\dot{M}_{jet}$<br>( $M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ) | $l_{jet}$<br>(AU) | $V_{jet}$<br>( $\text{km s}^{-1}$ ) | $V_{rüzgar}$<br>( $\text{km s}^{-1}$ ) | Kaynak |
|------------------|------------------------------|-------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|--------|
| CH Cyg           | 370                          | 8.5         | $1.9 \times 10^{-6}$                                  | $\sim 10^{-8}$                                     | 1000              | 600-2500                            | 20-40                                  | 3,5,6  |
| AG Dra           | 33                           | 1.86        | $2 \times 10^{-7}$                                    | -                                                  | 6000              | 800                                 | $\sim 30$                              | 1,3    |
| Z And            | 106                          | $\sim 2$    | $7 \times 10^{-7}$                                    | $2 \times 10^{-6}$                                 | -                 | $\geq 1000$                         | $\geq 30$                              | 3,4    |
| R Aqr            | 250-300                      | $\geq 13$   | $2.7 \times 10^{-7}$                                  | $\sim 10^{-8}$                                     | 1400              | >300-600                            | 30                                     | 8,9,10 |
| RS Oph           | -                            | $\sim 1.5$  | $\sim 10^{-6}$                                        | -                                                  | -                 | 3800                                | 20                                     | 11,15  |
| V1329 Cyg        | $\sim 132$                   | 5.8         | -                                                     | -                                                  | -                 | 250                                 | -                                      | 3      |
| StH $\alpha$ 190 | -                            | -           | -                                                     | $5 \times 10^{-8}$                                 | -                 | $\geq 1000$                         | >40                                    | 2,16   |
| Hen 3-1341       | -                            | -           | -                                                     | -                                                  | -                 | 820                                 | -                                      | 12     |
| BF Cyg           | -                            | -           | -                                                     | -                                                  | -                 | $\geq 300$                          | -                                      | 17     |
| MWC 560          | 140 $\pm$ 40                 | 3-5.5       | -                                                     | $>7 \times 10^{-9}$                                | >10-100           | $\sim 600$ -2500                    | -                                      | 13     |
| HD 149427(?)     | -                            | -           | -                                                     | -                                                  | -                 | -                                   | -                                      | 14     |

görülmesi beklenirken, CV'ler ve SySt'ler bu duruma istisnalar göstermektedir. Jet ve jet benzeri yapılarının oluşması ve sürekliliğini sağlayan süreçler günümüzdeki açık problemlerdendir. Jet yapıların oluşumunda gerekli bazı mekanizmalar vardır (Fendt & Zinnecker 1998). Jetin oluşumundaki kilit noktalardan en önemlisi jet kaynağının manyetize diske sahip olmasıdır. Disk üzerinde madde toroidal alan boyunca toplanıp, poloidal alanları takip ederek disk yüzeyinden uzaklaşır. Bu durumda jetin hızı merkez kaynağın kaçma hızından büyük olmalıdır. Böylece toplanan maddenin jet tarafından atılma miktarı yaklaşık %10'dur (Price ve diğ. 2003). Jet kaynağının manyetik alanı ise jetin koşutlanma durumunu belirleyebilen bir olgudur (Livio 1999, 2001; Lynden-Bell 2003).

SySt'lerin yaklaşık %5 – 10'unda jet ve jet benzeri bipolar madde akışları belirlenmiştir. Gözlemsel olarak bipolar madde çıkışlarının olduğu belirlenen SySt'ler ve bazı temel özellikleri Çizelge 1'de verilmektedir. Jet gösterdiği bilenen SySt'lerden biri olan Z Andromedae (Z And) sisteminde olduğu gibi, bu sistemlerde geçici (transient) jetler de görülmektedir (Skopal ve diğ. 2009, 2018). Bu sistemlerdeki jet yapıları genel olarak büyük yapıdadır (Melnikov ve diğ. 2018; Crocker ve diğ. 2002). Büyük jet yapıları (C- ya da S-şekilli) birçok çift sistem ya da genç yıldızlı nesneler gözlenen yapılarıdır. Optik ve moröte gözlemler büyük jetlerin SySt'lerde de gözlemlendiğini ortaya koymuştur. R Aquarii (R Aqr) sistemi S-şeklindeki jet yapısıyla (Melnikov ve diğ. 2018) bu durum için bir prototip sistem olarak söylenebilir. Büyük jet yapıları yüksek presesyon gösteren mikroküasarlarda da görülmektedir. Aralarında yüksek kütle farkı olmasına karşın, bu iki astrofiziksel nesne tayfsal olarak da benzerlikler göstermektedir (Zamanov & Marziani 2002).

SySt'lerin soğuk dev bileşeni yoğun yıldız rüzgarlarına sahiptir. Kırmızı dev yıldızlar için rüzgar hızı  $< 100 \text{ km s}^{-1}$ 'dir (Espey & Crowley 2008). Çizelge 1'de jet gösteren SySt'lerin dev bileşenine ait belirlenebilen rüzgar hızı ve kayıp kütleleri verilmiştir. Yıldız rüzgarı, sistemi saran yoğun simbiyotik bulutsuya katkıda bulunur. Tayf gözlemlerinden elde edilen akı oranları sonucunda sıcak bileşenin de yıldız rüzgarlarına sahip olduğu önerilir (Wallerstein ve diğ. 1984; Nussbaumer & Vogel 1989; Nussbaumer ve diğ. 1995). Sistemlerin soğuk dev bileşeni Mira benzeri zonklamalar gösteren bir dev yıldız da olabilir

(Whitelock 1987). Bu tür yıldızlar genel olarak SySt'lerin büyük ayrıklığa sahip olanlarında yer alır ve yaklaşık 100 güne varan zonklama dönemleri gösterebilir. R Aqr sisteminin Mira türü dev bileşenin yıldız rüzgarının, uzak mesafelere uzanan geniş konili bipolar madde çıkışına katkı sağladığı öngörülmektedir (Melnikov ve diğ. 2018).

### 3 Nümerik Çözümler

Simülasyonlar, PLUTO (Mignone ve diğ. 2007, 2012) koduyla gerçekleştirilmiştir. Bu kod, akışkan dinamiğindeki kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünü gerçekleştiren açık kaynak kodudur. Akışkan hareketlerinin çözümü için Euler grid (ızgara) yöntemi kullanılır. Simülasyon çözünürlüğü ızgara sayısı ile doğru orantılıdır. Kod, astrofiziksel birimlerde çözüme izin verse de kodun yaratıcıları, simülasyonların kararlı çalışması için kod biriminde çalışılmasını tavsiye etmektedir. Burada bahsedilen çalışmaların sonuçları kod biriminde olup, farklı yörünge ve akışkan parametrelerin çalışmalarını içermektedir. Kod biriminde olan tüm parametrelerin astrofiziksel değerlere dönüşümü esastır. Bunun için normalizasyon işlemi uygulanmalıdır. Kod biriminde çalışmanın en büyük avantajı, simülasyon parametrelerinin farklı astrofiziksel kaynaklar için ölçeklendirilebilir olmasıdır.

Fendt & Yardımcı (2022) çalışmasında yörünge hareketi ve presesyon hareketi yapan sistemlerin jet davranışının kısa ve uzun zaman ölçeğindeki davranışları sunulmuştur. 2-boyutlu bir tasarım sonucunda gerçekleştirilen simülasyonlarda büyük yapıdaki jet akışları belirlenmiştir. Bir parametre çalışması olan bu simülasyonlar da farklı başlangıç parametreleri (yörünge dönemi, ayrıklık, presesyon açısı, ortam ve jet yoğunluğu, jet hızı ve manyetik alan şiddeti) seçilmiştir. Jet püskürme bölgesinin (nozzle) yörüngesel hareket yaptığı simülasyonlar jetin C-şekilli bir formda olmasını destekler. Uzun zaman adımlarında jete eğriliğini veren yanıl (lateral) kuvvetler azalmaya başlar ve bu jet konisinin genişlemesine sebep olur. R Aqr sisteminin 900 AB mesafelerine uzanan geniş konili bipolar madde çıkışı bu duruma gözlemsel bir örnektir (Melnikov ve diğ. 2018). Az uyarılmış gazla dolu bu koninin merkez kısmında ise, S-şekilli daha yoğun bir jet yapısı bulunmaktadır. Bu jetin geniş koniyi beslediği düşünülmektedir. Jet püskürme noktasının uzaysal hareketinin olmadığı ancak bu

noktanın presesyon hareketi yaptığı simülasyonlarda jet yapıları S-şekilli bir formda olmaya meğillidir. Presesyon açısı artıkça ( $>45^\circ$ ) jet akışı, merkez kaynaktan uzaklaşamaz hale gelir. Bu durum iyi bilinen bir simbiyotik sistem olan CH Cygni (CH Cyg) jet gözlemlerine benzerdir (Crocker ve diğ. 2002). Sonuç olarak, jetin morfolojisi üzerine baskın etkisi olan temel parametreler; yörünge ayıklığı, yörünge dönemi ve jet hızıdır. Ortam manyetik alanı ve jet manyetik alanının poloidal olması, hem presesyon hareketi hem de yörünge hareketi yapan jet kaynağı için manyetik kuvvetlere dengeleyici bir etki sağlamıştır. Hidrodinamik ve düşük manyetik alan değerlerinde ( $\beta=100$ ) büyük farklar görülmezken, yüksek manyetik alan değerlerinde ( $\beta=10$  ve 1) uzun zaman adımlarına gidildikçe jet tarafından tetiklenen yanıl genliğin sönümlenmesi sonucu jet daha uzak mesafelere yayılabilmektedir.

Bu sistemlerdeki soğuk bileşenin yoğun rüzgarlarının nasıl etkilendiğinin araştırılması için Fendt & Yardımcı (2022) çalışmasındaki tasarıma yıldız rüzgarı eklenmesi planlanmıştır (Yardımcı ve diğ. hazırlık aşm.). Geometrik tasarımın belirlenmesi için ön simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve sonuç olarak hesaplama alanı dışında bulunan bölgede küresel yıldız rüzgarı yayan bir kaynak tasarımı oluşturulmuştur. Kaynaktan çıkan rüzgar, hesaplama alanına girerek (yan rüzgar) ortam ve jet akışıyla karşılaşmaktadır. Simülasyon kurulumu bir önceki çalışmada olduğu gibi 2-boyutlu kartezyen koordinat sisteminde oluşturulmuştur. Bununla birlikte, simülasyonlara soğuma kaynak fonksiyonu eklenerek de jet ve rüzgar etkileşimlerini incelemek mümkündür. PLUTO kodu, soğuma fonksiyonu ( $\Lambda(T)$ ) için farklı seçenekler sunmaktadır (Teşileanu ve diğ. 2008). Bu çalışmada PLUTO'nun içinde bulunan 11 dereceden bir polinomla ifade edilen soğuma fonksiyonu kullanılmıştır. Yapılan ön simülasyon çalışmalarında şok üretimleri belirlenmiştir. Jet ve rüzgar etkileşimlerinin yanı sıra şok üretiminin gözlemlendiği durumlarda, bu fonksiyon aracılığıyla soğurma ve salma çizgilerinin davranışlarını anlamak için kullanılabilir. Yukarıda presesyona sahip ve yörünge hareketi yapan jet kaynakları için gerçekleştirilen simülasyonlara bahsedilen rüzgar etkilerinin eklenmesiyle jet morfolojisindeki değişimler ve kuvvet dengelerinin araştırılması sağlanmaktadır.

#### 4 Tartışma ve Sonuçlar

Nümerik simülasyonlar aracılığıyla sistemlerdeki süreçlerin oluşması ve zaman içindeki durumunu inceleme imkanı sunmaktadır. Bu çalışmada anlatılan simülasyon çalışmaları sadece SySt'ler için değil, bükük jet yapısı gösteren güçlü jet hızlarına sahip ve rüzgar-jet etkileşimi olan tüm sistemler içindir. Bu çalışmada simülasyon çalışmalarının SySt'lerle uyum gösteren bölümlerine ve sonuçlarına dikkat çekilmiştir. Amacımız her ne kadar belli bir sistem üzerinden gitmek değilse de, SySt'lerin yapısal özellikleri nedeniyle çalışmalarımıza örnek sistemlerdir ve çalışma sonuçlarıyla gözlemler uyum göstermektedir. Bu nedenle, hazırlık aşamasındaki ikinci çalışmamızın kurulumu daha çok simbiyotik yıldızlar gözönüne alınarak oluşturulmaya çalışılmıştır. Gözlemsel olgularla birebir örtüşen geometrik kurulumlar oluşturmak fiziksel süreçlerin yorumlanmasını zorlaştıracığından, jet yayılımının ve jet kaynağının doğasına odaklanmayı tercih ediyoruz.

SySt'ler gibi karmaşık astrofiziksel yapılara sahip sistemlerde, yapıların ayrı ayrı davranışlarını ya da etkileşimlerini incelemek ve fiziksel kökenlerini araştırmak için nümerik simülasyon çalışmaları verimli sonuçlar sunabilir. SySt'ler özelinde literatürde genel olarak hidrodinamik simülasyon

çalışmaları mevcuttur (Stute & Sahai 2007; de Val-Borro ve diğ. 2017). Sistemlerle ilgili manyetohidrodinamik çalışmaların az sayıda olması, literatürdeki bir boşluktur.

Simbiyotik sistemler farklı astrofiziksel bileşenleri bir arada barındırması hem gözlemsel hem de teorik açıdan çalışılması açısından zengin bir ortam sunar. Kaynakların her birinin kendine has davranışları olmasına rağmen geniş perspektifte uyumlu davranışlar göstermesi ayrıntılı mekanizmaları incelememizde bir avantaj sağlayabilir. Bu sistemlerin en güçlü çalışma motivasyonlarından biri temel problemlere ışık tutabilecek kaynaklar olmasıdır. Jet oluşum ve devamlılığının sağlanabilmesi bu açık problemlerden biridir. Sistemlerin bazılarında jet oluşumunun görülmesi ve bunların bir kısmının geçici jet yapıları olması gibi özellikler sayesinde bu temel soruya ışık tutulabilir. Ayrıca, SySt'lerin sıkışık bileşenlerinden yalnızca birkaçı yüksek manyetik alana sahiptir (Sokoloski & Bildsten 1999; Panferov & Mikolajewski 2000; Nichols ve diğ. 2007). Bu durum SySt'lerin X-ışın davranışını etkileyeceğinden, alanın çalışılması literatür açısından önemlidir.

#### Teşekkür

Nümerik hesaplamalar ve kodun öğrenimi the Max Planck Institute for Astronomy (MPIA)'de gerçekleşmiştir. MPIA ziyareti sırasında sundukları alt yapı ve diğer tüm imkanlarından dolayı MPIA'ya teşekkürlerimizi sunarız. Enstitüde bulunduğu sürece TÜBİTAK 2214 - Doktora Sırası Araştırma Bursu ile desteklenen M.Y. TÜBİTAK'a teşekkürlerini sunar. Ayrıca M.Y., tecrübelerini ve bilgilerini paylaştan Christian Fendt'e teşekkürlerini bir borç bilir.

#### Kaynaklar

- Belczyński K., Mikolajewska J., Munari U., Ivison R. J., Friedjung M., 2000, *A&AS*, 146, 407
- Bondi H., Hoyle F., 1944, *MNRAS*, 104, 273
- Brockopp C., Sokoloski J. L., Kaiser C., Richards A. M., Muxlow T. W. B., Seymour N., 2004, *MNRAS*, 347, 430
- Chakrabarty D., Roche P., 1997, *ApJ*, 489, 254
- Crocker M. M., Davis R. J., Eyres S. P. S., Bode M. F., Taylor A. R., Skopal A., Kenny H. T., 2001, *MNRAS*, 326, 781
- Crocker M. M., Davis R. J., Spencer R. E., Eyres S. P. S., Bode M. F., Skopal A., 2002, *MNRAS*, 335, 1100
- Drake J. J., ve diğ., 2009, *ApJ*, 691, 418
- Espey B. R., Crowley C., 2008, in Evans A., Bode M. F., O'Brien T. J., Darnley M. J., eds, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series Vol. 401*, RS Ophiuchi (2006) and the Recurrent Nova Phenomenon. p. 166 ([arXiv:0803.1170](https://arxiv.org/abs/0803.1170))
- Fendt C., Yardımcı M., 2022, *ApJ*, 933, 71
- Fendt C., Zinnecker H., 1998, *A&A*, 334, 750, *ADS*
- Kafatos M., Michalitsianos A. G., 1982, *Nature*, 298, 540
- Livio M., 1999, *Phys. Rep.*, 311, 225
- Livio M., 2001, in Peterson B. M., Pogge R. W., Polidan R. S., eds, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series Vol. 224*, Probing the Physics of Active Galactic Nuclei. p. 225
- Luna G. J. M., Sokoloski J. L., Mukai K., Nelson T., 2013, *A&A*, 559, A6
- Lynden-Bell D., 2003, *MNRAS*, 341, 1360
- Masetti N., Orlandini M., Palazzi E., Amati L., Frontera F., 2006, *A&A*, 453, 295
- Melnikov S., Stute M., Eislöffel J., 2018, *A&A*, 612, A77
- Mignone A., Bodo G., Massaglia S., Matsakos T., Tesileanu O., Zanni C., Ferrari A., 2007, *ApJS*, 170, 228
- Mignone A., Zanni C., Tzeferacos P., van Straalen B., Colella P., Bodo G., 2012, *ApJS*, 198, 7

#### 4 Yardımçı, M.

- Mikolajewska J., Kenyon S. J., Mikolajewski M., Garcia M. R., Polidan R. S., 1995, *AJ*, 109, 1289
- Mohamed S., Podsiadlowski P., 2007, in Napiwotzki R., Burleigh M. R., eds, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series* Vol. 372, 15th European Workshop on White Dwarfs. p. 397
- Mohamed S., Booth R., Podsiadlowski P., Ramstedt S., Vlemmings W., Maercker M., 2015, in *EAS Publications Series*. pp 81–86, [doi:10.1051/eas/1571015](https://doi.org/10.1051/eas/1571015)
- Munari U., ve diğ., 2001, *A&A*, 369, L1
- Munari U., Siviero A., Henden A., 2005, *MNRAS*, 360, 1257
- Mürset U., Wolff B., Jordan S., 1997, *A&A*, 319, 201, *ADS*
- Nichols J. S., DePasquale J., Kellogg E., Anderson C. S., Sokoloski J., Pedelty J., 2007, *ApJ*, 660, 651
- Nussbaumer H., Vogel M., 1989, *A&A*, 213, 137, *ADS*
- Nussbaumer H., Schmutz W., Vogel M., 1995, *A&A*, 293, L13, *ADS*
- Paczyński B., 1971, *ARA&A*, 9, 183
- Panferov A., Mikolajewski M., 2000, preprint, ([arXiv:astro-ph/0007009](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0007009)), *ADS*
- Price D. J., Pringle J. E., King A. R., 2003, *MNRAS*, 339, 1223
- Rupen M. P., Mioduszewski A. J., Sokoloski J. L., 2008, *ApJ*, 688, 559
- Schmid H. M., Kaufer A., Camenzind M., Rivinius T., Stahl O., Szeifert T., Tubbesing S., Wolf B., 2001, *A&A*, 377, 206
- Skopal A., 2005, *A&A*, 440, 995
- Skopal A., ve diğ., 2009, *ApJ*, 690, 1222
- Skopal A., Tomov N. A., Tomova M. T., 2013, *A&A*, 551, L10
- Skopal A., Tarasova T. N., Wolf M., Dubovský P. A., Kudzej I., 2018, *ApJ*, 858, 120
- Smith R. K., Brickhouse N. S., Liedahl D. A., Raymond J. C., 2001, *ApJ*, 556, L91
- Sokoloski J. L., Bildsten L., 1999, *ApJ*, 517, 919
- Sokoloski J. L., Kenyon S. J., 2003, *ApJ*, 584, 1021
- Stute M., Sahai R., 2007, *ApJ*, 665, 698
- Teşileanu O., Mignone A., Massaglia S., 2008, *A&A*, 488, 429
- Theuns T., Jorissen A., 1993, *MNRAS*, 265, 946
- Tomov T., Munari U., Marrese P. M., 2000, *A&A*, 354, L25
- Wallerstein G., Willson L. A., Salzer J., Brugel E., 1984, *A&A*, 133, 137, *ADS*
- Whitelock P. A., 1987, *PASP*, 99, 573
- Zamanov R., Marziani P., 2002, *ApJ*, 571, L77
- de Val-Borro M., Karovska M., Sasselov D. D., Stone J. M., 2017, *MNRAS*, 468, 3408

#### Access:

M25-0331: *Turkish J.A&A* — Vol.6, Issue 3.