

KLASİK ALGOL TÜRÜ ÇİFT SİSTEM AT PEG: MUTLAK PARAMETRELER VE KÜTLE AKTARIMININ ARAŞTIRILMASI

Çağdaş KANVERMEZ^{1,2} ve Faruk SOYDUGAN^{2,3}

¹Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çanakkale (kanvermez.c@gmail.com)

²Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Astrofizik Araştırma Merkezi ve Ulupınar Gözlemevi, Çanakkale

³Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Çanakkale,
fsoydugan@comu.edu.tr

Özet: Bu çalışmada, klasik Algol türü çift sistem AT Peg'in tayfsal ve fotometrik verilerinin analiz sonuçları sunulmuştur. Sistemin Catania Astrofizik Gözlemevi'nde (İtalya) alınan orta çözünürlüklü tayf verilerinden öncelikle bileşenlerin dikine hızları belirlenerek sistemin yörünge çözümü yapılmıştır. Bunun yanında, AT Peg'in Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Gözlemevi'nde (ÇOMÜG) elde edilen çok renk ışık eğrileri çözülerek sistemin fotometrik parametreleri belirlenmiştir. Dikine ve ışık eğrisi analiz sonuçları birleştirilerek bileşenlerin mutlak parametreleri hesaplanmıştır. Buna göre AT Peg'in sıcak ve soğuk bileşeninin sırasıyla kütleleri, 2.43 ve 1.19 M_{\odot} , yarıçapları ise 1.85 ve 2.24 R_{\odot} olarak bulunmuştur. Sistemin O-C verisi analiz edilmiş ve soğuk bileşenin manyetik etkinliğinden kaynaklanan açısız momentum kaybının neden olabileceği dönem azalması ve olası üçüncü bir bileşenin oluşturduğu periyodik değişimler belirlenmiştir. Bunun yanında, görelilik olarak kısa dönemli yarı-ayrık sistem olan AT Peg'de olması beklenen kütle aktarımının etkisinin araştırılması için, kütle alan sıcak bileşenin dönme hızı ($v \sin i$) ölçülmüş ve ayrıca $H\alpha$ fark profili incelenmiştir.

1. Giriş

Klasik Algol türü örten çift sistem olan AT Peg (A4V+G, Maxted ve ark. 1994) görelilik olarak kısa dönemli bir sistemdir. Fotometrik çalışması ilk kez Cristaldi ve Walter (1963) tarafından yapılmıştır. Maxted ve ark. (1994) tarafından yapılan çalışmada bileşenlerin dikine hız eğrileri belirlenmiş ve Cristaldi ve Walter (1963) tarafından yayınlanan ışık eğrisi de kullanılarak, bileşenlerin mutlak parametreleri elde edilmiştir. Son çalışma ise, ışık eğrisi ve yörünge dönem analizini içermekte olup Liakos ve ark. (2012) tarafından yayınlanmıştır.

Bu çalışmada, AT Peg'in fotometrik ve tayfsal veri analizlerinden elde edilen sonuçlar tartışılacaktır. Öncelikle gözlem bilgisi verilip daha sonra ışık eğrisi çözümüne ilişkin sonuçlar tartışılacaktır. Dikine hız ölçümleri ve yörünge analizi verildikten sonra sıcak bileşenin dönme hızı ve $H\alpha$ profili incelenecektir. Yörünge dönem değişimi tartışıldıktan sonra, sistemin bileşenlerinin mutlak parametreleri verilecek ve sonuçlar değerlendirilecektir.

2. Gözlemler

AT Peg'in tayf gözlemleri İtalya'da bulunan Catania Astrofizik Gözlemevi'nde yapılmıştır. Gözlemlerde 91cm çaplı Cassegrain teleskobuna bağlı echelle tayfçeker (FRESCO) kullanılmıştır. Tayf serisi ortalama 21000 çözümüme gücünde, 4300-6650 Å aralığında 19 diziyeye yayılmış olarak alınmıştır. 1024x1024 piksel boyutlarında arkadan aydınlatmalı CCD kamera kullanılmıştır. 2003 ve 2004 yıllarında yapılan gözlemler sonucunda sisteme ilişkin toplam 20 tayf alınmıştır. Tayf verisinin indirgenmesinde IRAF yazılımının (iraf.noao.edu/) echelle paketi kullanılmıştır.

AT Peg'in fotometrik gözlemleri, Temmuz-Ağustos 2010 gözlem döneminde ÇOMÜG'de yapılmıştır. 30 cm'lik Schmidt-Cassegrain türü teleskop ve buna bağlı SBIG STL-1001E CCD kamerası kullanılmıştır. Işık eğrileri, Johnson BVR süzgeçlerinde yaklaşık 40 saatlik gözlem sonunda elde edilmiştir. Işık eğrisi oluşturulurken kullanılan yörünge evrelerini hesaplamak için aşağıdaki ışık elemanlarından yararlanılmıştır:

$$HJD(\text{Min I}) = 2455124.2709 + 1.146081x E \quad (1)$$

Buradaki minimum zamanı 2009 yılında ÇAAM'da elde edilmiş olup yörünge dönemi ise Kreiner (2004)'ten alınmıştır.

Çizelge 1. AT Peg ve gözlemlerde kullanılan mukayese ile denet yıldızlarının kimlik bilgileri (SIMBAD Veritanabı, <http://simbad.u-strasbg.fr>).

| Yıldız | GSC NO | V (mag) | B-V (mag) | α (2000) (saat dak. san.) | δ (2000) (deg dak. san.) | Tayf Türü |
|--------|------------|------------|--------------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------|
| AT Peg | 1137-185-1 | 9.02 | 0.195 | 22 13 23,5 | 08 25 30.7 | A0 |
| C1 | 1136-1084 | 8.37 | 0.551 | 22 12 13,4 | 08 27 38.0 | F8 |
| C2 | 1137-134 | 10.58 | 0.531 | 22 13 35,0 | 08 28 16.2 | - |

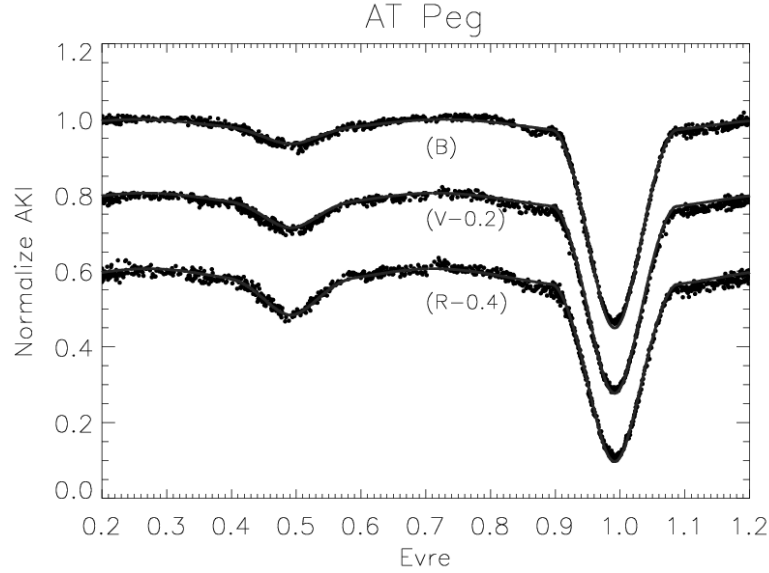
3. Işık Eğrisi Analizi

AT Peg'in ışık eğrisi çözümü için Wilson-Devinney (WD) programının 2005 sürümü kullanılmıştır (Wilson ve Devinney, 1971; van Hamme ve Wilson, 2003). Çözümde bazı parametreler serbest bazıları ise sabit parametreler olarak kabul edilmiştir. Serbest parametreler; evre kayması, yörünge eğikliği (i), yoldaş bileşenin yüzey sıcaklığı (T_2), baş bileşenin potansiyeli (Ω_1), kütle oranı (q), baş bileşenin ışıtmaya katkısı (L_1)'dir. Sabit parametreler ise baş bileşen sıcaklığı (T_1), lineer ve bolometrik kenar kararma katsayıları (van Hamme, 1993), bolometrik albedolar (A_1 ve A_2 , Rucinski 1969), çekim kararma katsayıları (g_1 ve g_2) sırasıyla radyatif atmosferli yıldızlar için (baş bileşen) von Zeipel (1924)'ten ve konvektif atmosferli yıldızlar için (yoldaş bileşen) Lucy (1967)'den alınmıştır. Bu yöntem ile ışık eğrisini çözmek için sistemin özelliğine ve literatür bilgisine göre parametre aralığı belirlenir ve WD yazılımı diferansiyel düzeltme yöntemi uygulayarak en olası çözüme ulaşılmaya çalışılır. İterasyonlar, olası hatalar düzeltmelerden büyük olana kadar yapılmıştır.

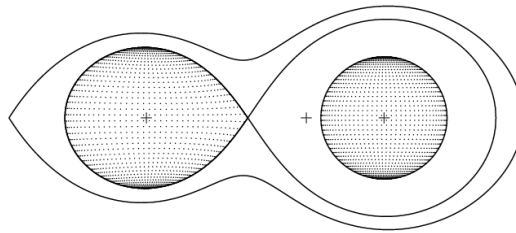
Işık eğrisi çözümü sırasında baş bileşen sıcaklığı 8400 K sabit olarak alınmıştır (Maxted ve ark. 1994). Kütle oranı (q) değeri ise 0.488 olarak (yörünge çözümünden bulunan değer) kullanılmıştır. Çözüm sırasında üçüncü cisim ışık katkısı serbest bırakılmış ve V bandında yaklaşık %25'lik üçüncü ışık katkısı belirlenmiştir. Çizelge 2'de çözüm sonunda bulunan parametreler, Şekil 1'de ise bu parametrelerle elde edilen kuramsal eğrilerin gözlemlerle uyumu gösterilmektedir. Şekil 2'de ise sistemin Roche geometrisi verilmiştir.

Çizelge 2 AT Peg'in BVR ışık eğrisi çözümünden elde edilen parametreleri.

| Parametre | AT Peg |
|---------------------------------|---|
| i (derece) | $81^{0.19} \pm 0.03$ |
| T_1 (K) | 8400 |
| T_2 (K) | 5011 ± 200 |
| Ω_1 | 4.342 ± 0.011 |
| Ω_2 | 2.851 |
| Evre Kayması | -0.0017 ± 0.0002 |
| q | 0.488 |
| l_3 (B, V, R) | $0.264 \pm 0.004, 0.257 \pm 0.003, 0.241 \pm 0.003$ |
| e | 0.0 |
| $A_1 - A_2$ | 1.0 - 0.5 |
| $g_1 - g_2$ | 1.00 - 0.32 |
| $L_1 / (L_1 + L_2)$ - (B, V, R) | $0.654 \pm 0.003, 0.627 \pm 0.002, 0.610 \pm 0.002$ |
| $L_2 / (L_1 + L_2)$ - (B, V, R) | 0.081, 0.116, 0.149 |
| r_{1_ort} | 0.262 ± 0.007 |
| r_{2_ort} | 0.317 |



Şekil 1. AT Peg'in BVR ışık eğrileri ve ışık eğrisi çözümünden elde edilmiş parametreleri ile hesaplanmış kuramsal eğriler.



Şekil 2. AT Peg'in 0.75 evrede Roche geometrisi..

4. Dikine Hız Ölçümü ve Yörünge Çözümü

AT Peg'in dikine hız değerlerinin ölçümü, çapraz korelasyon yöntemi ile IRAF içinde yer alan *fxcor* programı yardımıyla yapılmıştır. Yöntem, bileşenlerin yaptıkları yörünge hareketi nedeniyle tayf çizgilerinde ortaya çıkan Doppler kaymalarının hız karşılığını hesaplar. Ölçümlerde kullanılan standart yıldızlar Çizelge 3'te verilmektedir.

Çizelge 3. AT Peg'in dikine hız ölçümünde kullanılan standart yıldızlar (SIMBAD Veritabanı).

| Sistem | Sıcak bileşen dikine hız standardı | Soğuk bileşen dikine hız standardı |
|----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| AT Peg (A4 V + G) | Vega – 72 Oph (A0 V – A4 IV) | α Boo (K1.5 III) |

AT Peg kısa dönemli bir sistem olduğundan, bileşenlerin hızlı dönmesi beklenir bu da tayf çizgilerinin genişlemesi olarak karşımıza çıkar. Ölçülen dikine hız değerlerinin bazıları Çizelge 4'te verilmektedir. Şekil 3'te ise birinci bileşen ve ikinci bileşene ait dikine hız eğrileri gösterilmektedir. Yörünge çözümüne ilişkin sonuçlar Çizelge 5'te listelenmiştir. Maxted ve ark. (1994) tarafından elde edilen yörünge çözüm sonuçları ile karşılaştırıldığında uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

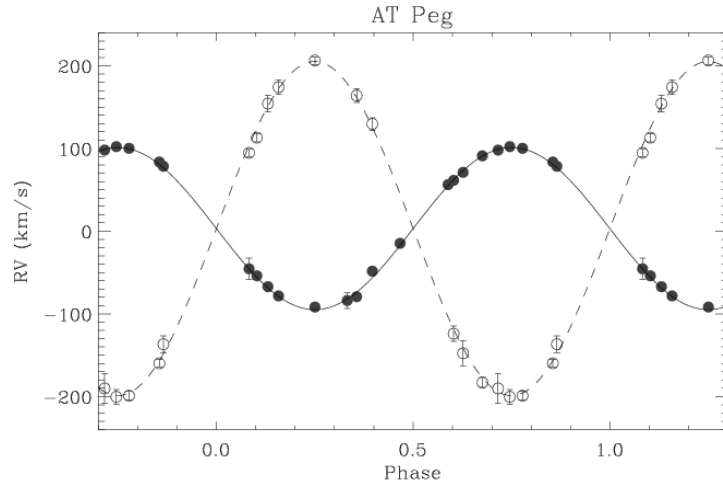
Çizelge 4. AT Peg'in iki bileşeninin ölçülen dikine hızları ve hataları için örnek veri.

| Zaman - HJD (+2400000) | Evre | V_{r1} (km/s) | Hata - V_{r1} (km/s) | V_{r2} (km/s) | Hata - V_{r2} (km/s) |
|---------------------------|--------|--------------------|---------------------------|--------------------|---------------------------|
| 53203.4892 | 0.0430 | -34.7 | 2.9 | 51.8 | 5.3 |
| 52896.3846 | 0.0828 | -45.5 | 12.9 | 94.7 | 4.3 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 53213.4995 | 0.7773 | 100.1 | 5.2 | -199.1 | 5.4 |
| 53213.5875 | 0.8544 | 83.6 | 4.1 | -159.8 | 4.7 |
| 52922.4949 | 0.8650 | 78.4 | 2.7 | -136.8 | 10 |

Çizelge 5. AT Peg'in ölçülen dikine hız değerlerinden elde edilen yörünge çözüm sonuçları.

| Parametre | Bu çalışma | Maxted ve ark. (1994) |
|------------------------------|--|--------------------------|
| T_0 (HJD+2400000) | 52500.8916 ^a | 42661.5281 |
| P (gün) | 1.146081 ^a | 1.146077 |
| V_0 (km/s) | 3.3 ± 0.7 | 4.1 ± 0.6 |
| K_1 (km/s) | 98.0 ± 1.0 | 94.1 ± 0.7 |
| K_2 (km/s) | 202.1 ± 2.1 | 199.0 ± 3.5 |
| $q = (M_2/M_1)$ | 0.488 ± 0.007 | 0.47 ± 0.02 |
| $M_1 \sin^3 i$ (M_\odot) | 2.13 ± 0.05 | 2.04 ± 0.06 |
| $M_2 \sin^3 i$ (M_\odot) | 1.04 ± 0.02 | 0.96 ± 0.03 |
| $a_1 \sin i$ (km) | $1.54 \times 10^6 \pm 1.5 \times 10^4$ | - |
| $a_2 \sin i$ (km) | $3.17 \times 10^6 \pm 3.4 \times 10^4$ | - |
| $a \sin i$ (km) | $4.71 \times 10^6 \pm 3.7 \times 10^4$ | 4.62×10^6 |

^a Kreiner (2004)'ten alınmıştır.

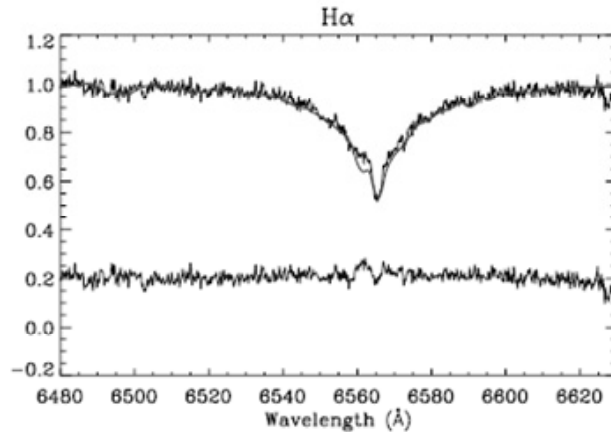


Şekil 3. AT Peg'in birinci (içi dolu daire) ve ikinci bileşen (içi boş daire) için ölçülen dikine hız değerleri ile bulunan yörünge çözümüne ilişkin kuramsal eğriler.

5. Sıcak Bileşenin Dönme Hızı ve H α Profili

Klasik Algollerdeki çalışmalar incelendiğinde, kütle alan bileşenlerin dönme hızlarının kütle aktarımı ve toplanmasına ilişkin kanıtlar sunabileceği görülmektedir. Bu tür sistemlerde, kütle alan bileşenin kütle aktarımının etkisi sonucunda eş-dönmeden daha hızlı dönmesi beklenebilir. Bu nedenle bu çalışmada, AT Peg'in sıcak bileşenin dönme hızı da ($v \sin i$) belirlenmiştir. Dönme hızı ölçümünde, $FWHM-v \sin i$ korelasyonu kullanılmıştır. Vega standart yıldızı için oluşturulan korelasyon, AT Peg için kullanılmış ve böylece sıcak bileşen için $v \sin i \approx 82 \pm 2$ km/s olarak belirlenmiş olup bu değer ilgili bileşenin eş-dönme hızına oldukça yakın çıkmıştır.

Kütle aktarımı ve özellikle toplanma yapılarının etkileri, H α profilleri incelenerek çalışılabilir. Bu nedenle, AT Peg'in bileşenlerinin elde edilen parametrelerine uygun olarak oluşturulan sentetik tayf ile gözlenen tayf karşılaştırılmış ve kütle aktarımına ilişkin açık bir kanıt bulunamamıştır (örnek çalışma için bakınız Soyduğan ve ark. 2007). İlgili tayflar ve sentetik ile gözlenen tayflar arasındaki farklardan oluşan fark profili Şekil 4'te verilmektedir.



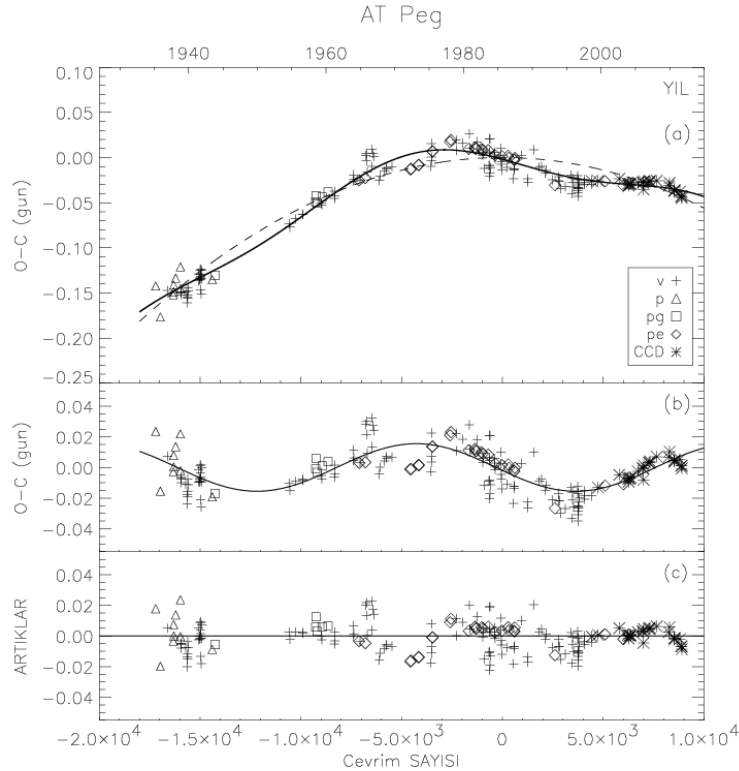
Şekil 4. AT Peg'in 0.71 evrede alınan H α profili ile oluşturulan sentetik tayfin uyumu ve fark profilinin görünümü.

6. Yörünge Dönem Analizi

AT Peg'in O-C grafiğinde, yörünge döneminin değiştiği açıkça görülmektedir (Kreiner ve ark. 2001). O-C verisinin dağılımı, parabolik bir değişim ile çevrimsel değişimi birlikte gösterdiğinden, yörünge dönem analizinde parabolik terim ve ışık-zaman etkisini içeren terim (LITE) birlikte kullanılmıştır (örneğin bakınız Soydugan ve ark. 2011). Dönem analizi sonucu bulunan parametreler Çizelge 6'da verilmektedir. O-C grafiği ile ona yapılan kuramsal temsiller ve farkların dağılımı Şekil 5'te görülebilir.

Çizelge 6. AT Peg'in yörünge dönemi analizi sonucu bulunan parametre değerleri ve hataları.

| Parametre | Değeri ve Hatası |
|---------------------------------------|---------------------------|
| T_0 (HJD) | 24 45640.4661 (48) |
| $P_{yör}$ (gün) | 1.1460830 (9) |
| Q (gün) | $-5.6(1) \times 10^{-10}$ |
| a_{12} sin <i>i</i> (AB) | 2.69 (23) |
| e | 0 |
| T (HJD) | 24 40742 (181) |
| P_{12} (yıl) | 49.6 (1.0) |
| $f(m_3)$ (M_{\odot}) | 0.0079 (20) |
| m_3 (M_{\odot}); $i=90^{\circ}$ | 0.5 |
| K_{12} ($km\ s^{-1}$) | 1.64 |



Şekil 5. a) AT Peg'in O-C değişimi ve analiz sonucunda bulunan parabolik ve LITE terimleriyle oluşturulmuş sürekli kuramsal eğriler. b) LITE etkisini temsil eden sürekli kuramsal eğri ile gözlem noktaları. c) Parabolik ve dönemli değişim temsilinden olan artıklar.

AT Peg'in O-C analizinden bulunan parabolik terimin (Q) katsayısından sistemin yörünge döneminin $-0,031$ s/yıl oranında azaldığını göstermektedir. O-C grafiğinde yer alan dönemli değişimine uygulanan LITE denklemi sonucunda, çiftin olası üçlü sistemin ortak kütle merkezi etrafında yaklaşık 50 yıllık bir dönemle dolandığı öngörülmüştür. Gelecek bölümde verilecek olan sistemin bileşenlerinin kütleleri ve üçüncü cisim çözümünden elde edilen kütle fonksiyonu kullanılarak, olası üçüncü cismin minimum kütlesi ise $M_3 \approx 0.5 M_{\odot}$ hesaplanmıştır. Işık eğrisi çözümünden de elde edilen üçüncü ışık katkısı bu sonucu desteklemektedir. Olası üçüncü bileşen nedeniyle, çift sistemin kütle merkezinin dikine hızının değişim genliği ise 1.6 km/s olarak bulunmuştur. Şekil 5'in en alt bölümünde parabolik ve LITE ile oluşturulmuş kuramsal eğri ile gözlem noktaları arasındaki artıklar görülmektedir. Bu artıkların da, özellikle son yıllardaki gözlem noktalarının daha duyarlı olduğu düşünülürse, çevrimsele benzer değişim gösterdiği söylenebilir. Üçüncü cisme göre daha kısa dönemli (20 yıldan küçük) ve çevrimsel olabilecek bu tür bir değişimin kaynağı AT Peg'in olası manyetik etkinlik gösterebilecek ikinci bileşeni olabilir. Ancak, bu değişiminin daha açık ortaya konması için daha fazla duyarlı gözleme ihtiyaç vardır.

7. Tartışma ve Sonuç

AT Peg'in tayfsal ve fotometrik verilerinin analizleri yapılarak sistemin ve bileşen yıldızların parametrelerine ulaşılmıştır. Yörünge ve ışık eğrisi çözümünden elde edilen parametreler birleştirilerek hesaplanan mutlak parametreler Çizelge 7'de verilmektedir. AT Peg'in bileşenlerinin HR diyagramındaki konumları incelendiğinde birinci bileşen ZAMS koluna yakın iken ikinci bileşen anakoldan ayrılmış görülmektedir. AT Peg'in kütle oranı (0.488), klasik Algoller'in ortalama kütle oranı değerinden (SD'lar için ortalama kütle oranı 0.27; İbanoğlu ve ark., 2006) oldukça büyük olup bu da sistemin evrim durumunda genel dağılıma göre farklılıklar olduğunu göstermektedir.

Çizelge 7. AT Peg'in bileşenlerinin mutlak parametreleri.

| Parametre | AT Peg | |
|--------------------------|-------------------|-----------|
| | Sıcak | Soğuk |
| M (M_{\odot}) | 2.21(7) | 1.08(5) |
| R (R_{\odot}) | 1.79(3) | 2.17(3) |
| T (K) | 8400 ^b | 5011(100) |
| Log L (L_{\odot}) | 1.16(4) | 0.43(5) |
| Log g | 4.28(4) | 3.80(3) |
| M _{bol} (kadir) | 1.86(9) | 3.69(12) |
| Uzaklık (pc) | 261 (14) | |

^aMarted ve ark. (1994)

Tayf analizi sonucunda, sıcak bileşen dönme hızı 82 ± 2 km/s olarak ölçülmüştür, yörünge dönemi 1.14608 gün ve birinci bileşen yarıçapı $1.79 R_{\odot}$ alınarak eş-dönme hızı hesaplandığında 79 km/s elde edilmiştir. Hatalar da dikkate alınır bu değer sıcak bileşenin hemen hemen eş-dönme hızında döndüğünü göstermektedir. Kütle aktarımına/toplanmasına ilişkin H α profillerinde açık bir etki görülmemiştir.

AT Peg'in yörünge dönem değişimi, dönem azalması ve çevrimsel değişimleri içermektedir. Bu değişimlerden, dönem azalmasının, özellikle soğuk (5011 K) ve alt-dev olan bileşenin olası manyetik etkinliğinin sonucu olarak oluşan açıl momentum kaybından kaynaklanabileceği önerilebilir. Manyetik etkinlik için, $H\alpha$ fark profillerinde, ikinci bileşen kaynaklı zayıf da olsa bir salma olması, dönem değişimdeki azalmayı desteklemektedir (bakınız Şekil 4). O-C dağılımındaki çevrimsel dağılım ise, sistemde olası bir üçüncü cisim ile açıklanmış ve ışık eğrisi çözümünde bulunan üçüncü ışık katkısı da bu olasılık için ikinci bir kanıt olmuştur.

Teşekkür. Bu çalışma 111T224 nolu TÜBİTAK projesi ve Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi BAP birimi tarafından 2011/014 nolu proje ile desteklenmiştir.

8. Kaynaklar

- Hill G., Barnes J.V., 1972, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. 84, 430.
- İbanoğlu C., Soyduğan F., Soyduğan E., Dervisoglu A., 2006, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 373, 435.
- Kreiner, J.M., Kim, C-H., Nha, II-S., 2001, Wydawnictwo Naukowe AP, Kraków, ul. Studencka 5, Poland.
- Kreiner J.M., 2004, *Acta Astronomica*. 54, 207.
- Liakos, A., Niarchos, P., Budding, E., 2012, *IAU Symposium*, Volume 282, p. 55.
- Lucy L.B., 1967, *Zeitschrift für Astrophysik*. 65, 89.
- Maxted P.F.L., Hill G., Hilditch R.W., 1994, *Astronomy and Astrophysics*. 285, 535.
- Rucinski S.M., 1969, *Acta Astronomica*. 19, 245.
- Soyduğan F. ve ark. 2011, *New Astronomy*, 16, 253.
- Soyduğan F. ve ark. 2007, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 379, 1653.
- SIMBAD Astronomical Database, <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>.
- Van Hamme W., ve Wilson R., 1990, *The Astronomical Journal*. 100, 1981.
- Van Hamme W., ve Wilson R., 1993, *The Astronomical Journal*. 106, 2096.
- Van Hamme W., ve Wilson R.E., 2003, *ASP Conference Series*. 298, 323.
- Wilson R.E. ve Devinney E.J., 1971, *The Astrophysical Journal*. 166, 605.