



Örten Çift Yıldızların Dönem Analizi Programı: ANGORA

Cihan Tuğrul Tezcan^{1*}, Hakan Volkan Şenavcı¹

¹Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, Ankara, Türkiye.

Özet: Örten çift yıldız sistemleri ülkemiz astronomları tarafından en çok incelenen ve üzerinde çalışılmış, astronomi biliminin temel konularından biridir. Örten çift yıldızların fiziksel farklılıkları ile gözlemcinin bakış doğrultusuna göre örtme-örtülme olayları bu sistemlerin parlaklık gözlemlerinin bir çok temel bilgiyi gözlemciye aktarmasını sağlamaktadır. Parlaklıkta meydana gelen değişimin zamana göre incelenmesi ile ise sistem bileşenlerinin etkileşimleri analiz edilebilmektedir. Bu çalışmada parlaklık değişimlerinin periyodunda meydana gelen varyasyonların sebepleri incelenmiş ve bu sebeplerin veri üzerinde analizini yapabilen bir program geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: örten çift yıldızlar, çift yıldızlar, O-C Analizi, dönem değişim analizi

Abstract: Eclipsing binary stars are most popular and basic subject of astronomy discipline for research and study by Turkish astronomers. Astronomers obtain many basic information from eclipsing binary stars due to difference of physical quantities and situations of eclipse-occultation - photometric observations. Variation of magnitude by time allows us to study interactions between system components. In this study, we studied the reasons of changing magnitudes period variations and developed an application for analysis.

Key Words: eclipsing binary stars, binary stars, O-C Analysis, period variation analysis

1. Giriş

Örten çift yıldızların zamana göre parlaklık değişimini gösteren diyagrama ışık eğrisi denir. Işık eğrileri, sistemdeki bileşenlerin fiziksel yapılarına göre farklılıklar göstermektedirler. Örten çift yıldız sistemlerinde gözlemcinin bakış doğrultusuna göre soğuk yıldızın sıcak yıldız önünden geçmesiyle derin olan birinci minimum, sıcak yıldızın soğuk yıldızın önünden geçmesiyle ise daha sığ olan ikinci minimum gözlenmektedir. Bileşenleri küresel, sıcaklıkları, çapları ve kütlelerini eşit, yörüngelerini dairesel kabul edersek ışık değişiminin her zaman aynı olacağı öngörülmektedir. Dolayısıyla gözlenen ışık eğrisinin hesaplanan ışık eğrisine göre farklı olmasıyla fiziksel parametrelerin ışık eğrisine etkileri tartışılabilir. Işık eğrisinin başlangıç zamanı olarak referans alınan herhangi bir evresinden tekrar aynı evreye gelmesi için geçen süre o sistemin dönemi olarak tanımlanır. Çift yıldızlar için herhangi bir birinci minimum zamanı, T_0 zamanı olarak seçilirse, sistemin ışık eğrisinin tekrar birinci minimuma ulaştığı an T_1 olur ve bu süre periyodik olarak tekrarlanır. Sistemde dönem değişimi olmadığı sürece her bir T 'nin arasındaki zaman aynı kalacaktır.

Bir çift sistemin farklı tarihlerde gözlenmiş ışık eğrilerinden minimum zamanları belirlenebilir (O – observed). Ek olarak daha önce gözlenmiş ve referans olarak seçilen herhangi bir T_0 zamanından itibaren, ilgili T_0 zamanına dönem değeri eklenerek tahmini T değerleri oluşturulabilir ve bunlara hesaplanan (C – calculated) minimum zamanları denir. Hesaplanan minimum zamanlarını oluşturmak için T_0 zamanına eklenen her bir döneme ise çevrim (E- epoch) denir. Çevrim başına O-C farkının değişim göstermesi ise dönemin değiştiğini göstermektedir. Bu değişim, O-C değerlerine karşılık çevrim değerlerinin çizilmesi ile görülebilmektedir. Bu diyagrama ise “O-C Diyagramı” denir.

O-C diyagramında görülen değişimler örten çift yıldızlardaki 4 fiziksel süreç ile açıklanabilmektedir. Bunlar;

- Sistem bileşenleri arasında kütle aktarımı veya kütle kaybı
- Bileşenlerin manyetik aktiviteleri
- İlave cisim kaynaklı Işık-Zaman Etkisi
- Eksen dönmesi

Dönem değişiminin sebepleri, sistemlerin fiziksel parametrelerine bağlı olarak matematiksel modellerle açıklanabilmektedir. Değişimlerin sebebi ilk bakışta O-C diyagramından görülebilmektedir. Basit olarak, O-C diyagramının parabolik olması, bileşenler arası kütle aktarımını veya sistemden kütle kaybını, büyük genlikli sinüzoidal bir değişim, üçüncü cisim varlığını, düşük genlikli sinüzoidal değişim, manyetik etkinliği ve birinci ve ikinci minimumların zıt fazlarda sinüzoidal değişimleri ise eksen dönmesini göstermektedir. İlgili fiziksel süreçlerin açıklanabildiği matematiksel fonksiyonlar kullanılarak O-C diyagramına yapılan bir eğri oturtma (fit) işlemi ile O-C eğrisi modellenir ve elde edilen parametreler yardımıyla fiziksel süreçlere ilişkin bulgulara ulaşılabilir.

Eğri oturtma işlemini gerçekleştiren bir çok algoritma vardır. Günümüzde en çok kabul görenleri, En Küçük Kareler Yöntemi (EKKY) ile Monte-Carlo (MC) simülasyonudur. EKKY, iki ya da daha çok değişken arasındaki ilişkiyi ölçmek için kullanılan regresyon analizinin standart yaklaşımını oluşturmaktadır. En yaygın kullanıldığı alan eğri oturtma olup, oluşturulan

*Sorumlu Yazar E-Posta: c.tugrultezean@gmail.com



sentetik eğrinin verilerden farklarının karelerinin toplamını ($\Sigma(O-C)^2$) minimum yapmaya çalışır. Levenberg-Marquardt Algoritması (LMA) lineer olmayan denklem sistemlerinin çözümü için kullanılan en yaygın en küçük kareler yöntemidir. MC yöntemi, muhtemel veya rastlantısal (stokastik) bir istatistik yöntem olan ve rastgele sayıları kullanarak tahmini sistemleri modelleyen bir algoritmadır. En çok bilgisayar bilimlerinde kullanım alanı olan MC, alt yöntemleri ile fen bilimlerinde de oldukça yoğun olarak kullanılmaktadır. MC'nin en yaygın yöntemi olan Markov Chain Monte Carlo (MCMC) yöntemi ise basit olarak, bir parametrenin olasılık dağılımını örneklem uzayında markov zinciri yöntemiyle hesaplar. Örneklem uzayı içerisindeki her noktaya belirlenen adımlar yardımıyla yeni sonucun bir önce bulunmuş sonucun devamı olabilme olasılığını hesaplar. Böylelikle bir zincir oluşturur. Sonuç olarak hesaplanmak istenen parametrenin örneklem uzayında olabileceği en iyi yeri bir gauss dağılımı ile verir. MCMC'nin uygulanması, tanımlanan bütün uzayın incelenmesi nedeniyle oldukça zaman alıcıdır ve iyi bir bilgisayar donanımı gerektirmektedir. Bu nedenle parametrelerin olabileceği aralıklar önceden de verilebilir.

Gerçek eğri yapısının gösterdiği matematiksel yapı ile birlikte bağımlı/bağımsız parametrelerin durumuna göre bir çok alt algoritması mevcuttur. ANGORA'da lineer olmayan en küçük kareler yöntemi olan Levenberg-Marquardt algoritması kullanılmıştır. ANGORA, Python dili kullanılarak yazılmıştır.

Python, ileri seviyeli, okunabilirliği yüksek, basit yazım şekli amaçlanarak C++ veya Java gibi dillerden daha az satırla aynı işleri yapma özelliğine sahip en yaygın kullanılan programlama dillerinden birisidir. Nesne yönelimli, fonksiyonel ve prosedüral gibi farklı programlama stillerini uygulayabilme olanağı sunar ve hafıza yönetim sistemleriyle kodların hızlı çalışmasını sağlar. Python Guido van Rossum (van Rossum, 2009) tarafından 1980'lerin sonlarında geliştirilmeye başlanmış ve 2000 yılında Python 2.0'ı çıkarmıştır. Günümüzde 2.7 ve 3.0 versiyonları yaygın şekilde stabil versiyonlar olarak kullanılmaktadır. En güncel versiyonu olan 3.7 ile günümüzdeki bütün programlar bu versiyona yükseltilmeye başlamıştır. ANGORA'da 3.7 ile güncellenecektir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Materyal

ANGORA, programının çalışabilmesi için ihtiyaç duyduğu veri literatürde bir çok kaynaktan elde edilebilir. Bunlardan bazıları, AAVSO, BBSAG, VSNET, VSOLJ, AcA, BRNO, BAV, IBVS, NASA ADS Query gibi veri tabanlarıdır. İlgilenilen sistemler için literatürde mümkün olan bütün kaynaklar taranmalı ve hatta gözlemler yapılmalıdır. Ne kadar çok veri olursa O-C eğrisi o kadar verimli temsil edilir. Veriler alınırken minimum zamanları, minimum türleri (birinci minimum veya ikinci minimum) ve gözlem yöntemi (fotometrik, ccd vb.) şeklinde 3 kolon olacak şekilde alınır ve metin dosyası formatında (.txt) düzenlenir.

ANGORA, Python programlama dili kullanılarak ve Nesne Yönelimli Programlama metodu (Object Oriented Programming) gözetilerek geliştirilmiştir. Python, bilim ve mühendislik alanlarında en yaygın kullanılan, ücretsiz ve pratik bir programlama dilidir. C dili tabanlı yapısı sayesinde stabil ve hızlı çalışmaktadır. Gerekli kütüphaneler kurulduğu takdirde işletim sistemi platform bağımsız çalışmaktadır. ANGORA, Windows, MacOS, Linux işletim sistemlerinde aynı şekilde çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır. ANGORA kullanıcı ara yüzüne (GUI) sahip bir analiz programıdır. Ara yüz tasarımında sadelik ve kullanılabilirlik gözetilmiştir, tasarım PyQt kütüphanesi kullanılarak yapılmıştır.

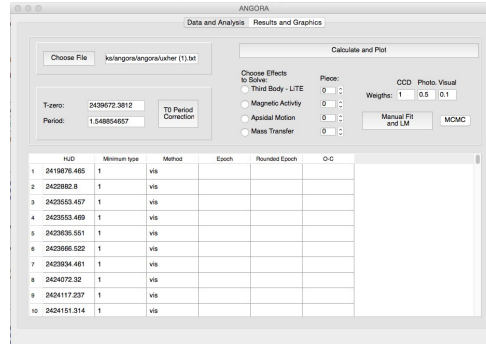
Python, dünyanın dört bir yanında geliştiricilere sahip binlerce kütüphaneye sahiptir. Bunların bir çoğu kendini sayısız yayın ile kanıtlamıştır. ANGORA'nın içeriğinde kullanılan paketler SciPy (Jones, E. Vd., 2001), NumPy (Stefan van der Walt, S. vd. 2011), LMFIT, emcee (Foreman-Mackey, D. 2013) ve matplotlib (John D. Hunter 2007) şeklinde özetlenebilir.

2.2 ANGORA'nın İşleyişi ve Kullanımı

ANGORA tasarlanırken kullanıcının işlemleri adım adım yapabilmesi ve her aşamada grafik çizdirilerek görsel olarak verimli olması gözetilmiştir. Pratik olarak anında parametreleri ve sonuçları gösterebilme, kaydetme özelliklerine sahiptir. O-C analizinin her aşaması opsiyonel olarak sunulduğundan istenilen süreç arzu edilen anda tatbik edilebilir.

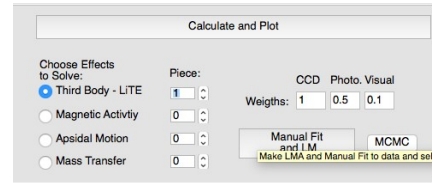
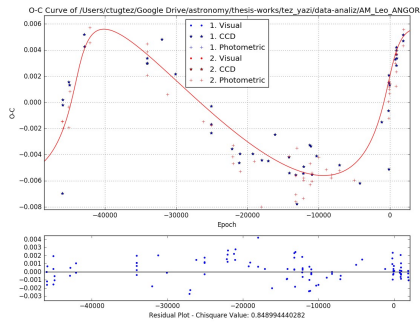
İlk aşamada kullanıcının gözlemler sonucunda elde ettiği ve/veya literatürden toplanan verileri üç kolon olacak şekilde sırasıyla, minimum zamanları, minimum türü (birinci veya ikinci minimum), gözlem yöntemi (fotometrik, ccd vb.) formatında .txt uzantılı bir metin belgesine kaydetmesi

ANGORA kurulumundan sonra oluşan kısa yolu aracılığıyla çalıştırılır. İlk olarak veriyi okutma işlemi gerçekleştirilecektir. Şekil 1'den görülebileceği gibi "Choose File" butonu tıklanarak gelen dosya seçme diyalog penceresinden önceden hazırlanan ".txt" uzantılı dosya seçilir. Program otomatik olarak dosyayı okuyarak kendi bünyesinde bulunan tablo sisteminden içeriğini gösterecektir. Hesaplama aşamasına geçilmeden önce "T-zero" ve "Period" metin kutucuklarına literatürden bulunan ve referans olarak seçilen T0 ve P değerlerinin girilmesi gerekmektedir. Literatürden bulunamamışsa veya hatalı olduğu düşünülüyorsa "T0-P Calculation" butonu tıklanarak T0-P düzeltilmesi işlemi yapılır.



Şekil 1: ANGORA programının ana pencere görünümü.

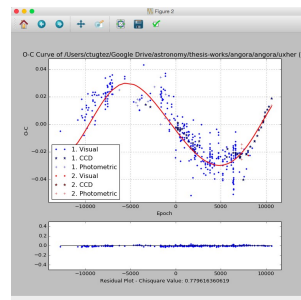
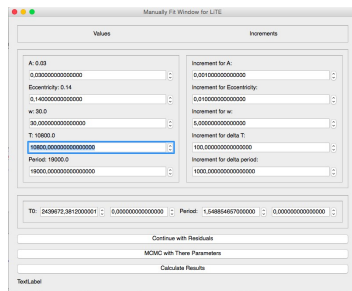
Her şeyin hazır olduğu düşünüldüğünde “Calculate and Plot” butonuna tıklanarak Epoch, Rounded Epoch ve O-C değerleri hesaplanır ve alınan verilerin oluşturduğu O-C eğrisi çizilmiş olur (bkz. Şekil 2).



ŞEKİL 2: Grafik penceresi ve fit örneği (solda). ANGORA ana pencerede çözüm seçeneklerinin listlendiği kısım (sağda).

Yıldızın gösterdiği dönem değişim karakteristiğine bağlı olarak, birden fazla dönem değişim karakteristiği olması durumunda, ilk çözülmek istenen etki seçilir. Şekil 2’te ki gibi etki seçimi aktif haldeyken çözüm yöntemleri olan “Manual Fit and LM” veya “MCMC” seçilerek uygulanması istenen algoritma tercihi yapılır. MCMC metodunun düzgün çalışabilmesi için başlangıç değerlerinin olabilecek en uygun şekilde belirlenmiş olması avantaj sağlayacaktır. Bu nedenle önce Manual Fit and LM tercih edilebilir.

ANGORA’nın yapacağı ilk çözüm esnasında LM algoritması uygulanır ve ulaşılan sonuçlar interaktif grafik yardımcı penceresine yazdırılır (bkz. Şekil 3). Bu aşamada kullanıcı sentetik eğriyi farklı parametre değerleri kullanarak istediği gibi değiştirebilir. Bu şekilde mutlak parametreler elde edilebileceği gibi MCMC metodu için en uygun başlangıç parametreleri de belirlenmiş olur. Bu pencerede T0-P düzeltmesi de hassas olarak güncellenebilir.

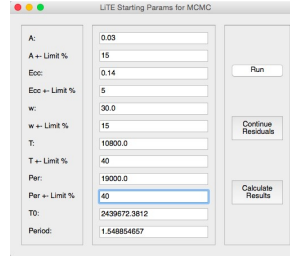


Şekil 3: Solda, EKKY ile gelen ilk fit sonuçlarının el ile manipüle edilerek daha iyi fit yapılmasını sağlayan pencere. Sağda, anlık olarak yapılan fit veya T0-P düzeltmesinin görülebileceği grafik penceresi.

Oluşturulan modelin O-C eğrisinden farkı olan artıklar grafik penceresinde görülebilir. Yapılan fitin eğriyi ne kadar iyi temsil ettiğinin bir göstergesi olan Chi2 değerleri de en altta gözükmektedir. Artık grafiği ve Chi² değerleri interaktif olarak yapılan değişikliklerle güncellenmektedir.

En iyi eğri modelinin yapıldığına karar verilip, artık noktalarının y=0 civarında yayıldığı gözlemlendiğinde artıklar ile diğer etkilerin çözümüne devam edilebilir. Bütün Manual Fit işlemleri esnasında bulunan parametre değerleri MCMC’de

kullanılmak üzere hafızaya alınabilir. Aynı oturum esnasında MCMC ile çözüm yapılmak istenirse bu değerler otomatik olarak MCMC kontrol penceresine yüklenecektir.

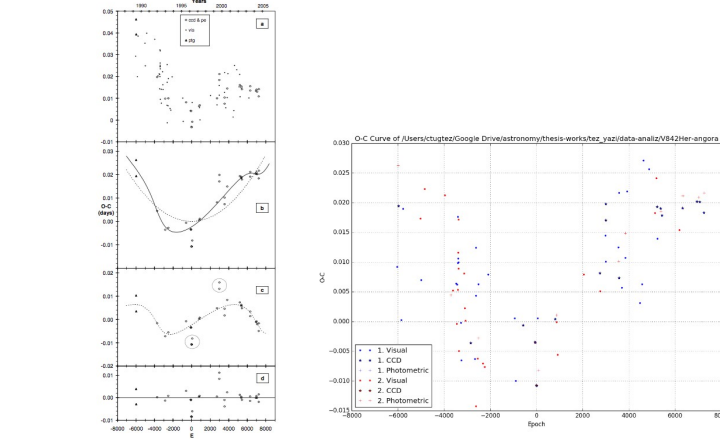


Şekil 4: LMA'dan MCMC'ye devam etme aşamasında LMA'da karar verilen parametrelere yüzde ile aralık verilerek +/- içerisinde MCMC analizine parametrelerin hazırlanması penceresi.

Manual Fit and LM kontrol penceresinin son aşaması parametrelere göre çözülen etkinin sonuçlarıdır. "Calculate Results" butonu tıklanarak arka planda hesaplar yapılır ve hafızaya atılır. ANGORA'nın ana penceresinde bulunan "Results and Graphics" sekmesinde bu sonuçlar listelenecek ve kullanıcının isteğine göre grafikler oluşturulacaktır. Kullanıcı bu sonuçları istediği formatta kaydedebilecektir.

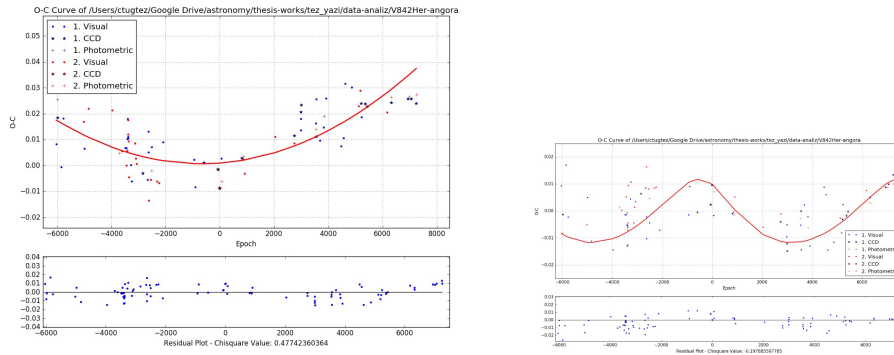
2.3 V842 Her ANGORA Analizi

Programın kıyaslama açısından bir örneği V842 Her cismi verileri analiziyle literatürdeki bir çalışma ile kıyaslaması verilmiştir. Sistemindeki değişim Geyer vd. (1955) tarafından keşfedilmiştir. Sonuç kıyaslaması için Selam vd. (2005) yayını kullanılmış, çalışmalarındaki O-C diyagramı ve yapılan fit Şekil 5'de verilmiştir.



ŞEKİL 5: Selam vd. (2005) tarafından yapılan O-C analizi diyagramı. Parabol ve LiTE çözümleri yapılmıştır (solda). ANGORA ile oluşturulmuş V842 Her O-C eğrisi (sağda).

O-C eğrisinde, Şekil 6'dan da görüleceği üzere ilk olarak parabolik bir yapı göze çarpmaktadır. Bu nedenle kütle aktarımı çözümü ile başlamak ve sonrasında artıklara göre analizi devam ettirmek gerekmektedir.

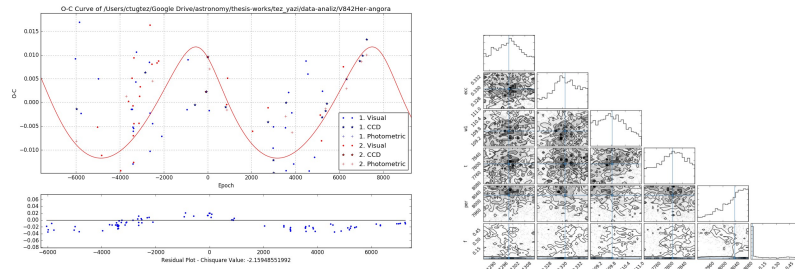


ŞEKİL 6: ANGORA LM ile V842 Her O-C diyagramına yapılan parabol modeli (solda). En küçük kareler yöntemi ile

parametrelerin el ile değiştirilerek yapılan model görülmektedir. Bu modelden bulunan değerlere +- aralık verilerek MCMC metodu için uzay belirlenir. (sağda)

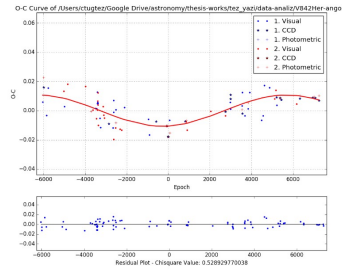
Şekil 6'de yapılan parabol modelini O-C üzerinde göstermektedir. Parabolden olan artıkların çevrimsel bir yapı göstermesi nedeniyle yapılan parabol fiti sonucu Chi2 değeri oldukça yüksek çıkmaktadır. Böyle durumlarda yapılan parabol fitinden olan artıkların O-C=0 etrafında, bu örnek için, çevrimsel yapı gösterdiğine dikkat edilmelidir. Gerektiğinde el ile müdahale edilebilir. Kütle aktarımı çözümünü V482 Her sistemine uyguladığımızda artıklar Şekil 9'da (altta) sinüzoidal bir dağılım şeklinde görülmektedir.

ANGORA ile EKKY ile yapılan fit Şekil 6'da (sağda) görüldüğü gibidir. MCMC ile yapılan fit Şekil 7'de görülmektedir. İki diyagram karşılaştırıldığında MCMC'nin artıklarının daha iyi olduğu görülmektedir.



ŞEKİL 7: MCMC metodu ile yapılan fit görülmektedir. Dağınık veri üzerinde görsel olarak anlam ifade etmeyen bir model olsa da artıklara ve sonuçlara bakarak MCMC yönteminin ANGORA'da kullanımı çalıştığını göstermektedir (solda). MCMC Metodunun çıktısı corner diyagramı. Histogramların altında bulunan Gauss dağılımlarının kutunun tamamına yayılması seçilen uzayın küçük olduğunu göstermektedir (sağda).

Şekil 7'de ki köşe diyagramında net bir Gauss dağılımının görülmemesinin sebebi MCMC için verilen parametre aralıklarının oldukça küçük olmasıdır. Histogramlara bakılırsa dağılım tepe noktasında olduğu görülmektedir.



ŞEKİL 8: LMA ile artıklara yapılan manyetik etkinlik fiti ile sinüsün genliği ve periyodu bulunmuştur.

ÇİZELGE 1: Kütle, yörünge eğim açısı ile T0-P değerleri Selam vd. (2005)

M1:	0.378
M2:	1.455
i:	77.74
T0:	50177.48750
P:	0.419034924

ÇİZELGE 2: Selam vd. (2005)'nin yaptığı çalışma ile ANGORA'nın V842 Her için kıyaslamasını göstermektedir. Bu sonuçlar ANGORA analizinde hiç beri atılmadan yapılmıştır.

	Selam, Albayrak, Şenavcı ve Aksu (2005)		ANGORA	
A (gün)	0.064	0.0002	0.012	0.0000757
PO-C (yıl)	12.35	0.08	8.37	0.041
e	0.48	0.039	0.33	0.0018
w (o)	196	2.1	109	1.6



a12sini (AB)	1.275	0.075	2.249	0.013
F(M3)	0.01267	0.00218	0.132	0.016
M3	0.41	0.03	1.059	0.005
M/yıl	3.15x10 ⁻⁷	-	3.34x10 ⁻⁷	7.78x10 ⁻⁸
B (kG)	12.6		8.4	

3. Sonuç

Bu çalışmada örten çift yıldızların dönem değişim karakteristiğini literatürdeki bilinen fiziksel mekanizmalarla inceleyen ve bu kapsamda Python programlama dili kullanılarak geliştirilen ANGORA programının içeriği detaylı olarak anlatılmıştır. Yakın gelecekte ANGORA, platform bağımsız olarak bilim dünyasına sunulacaktır. Bu tez içeriği çalışmanın ilk sonuçlarını içermekte olup farklı analiz ve farklı istatistik yöntemlerin programa zaman içerisinde eklenerek yeni versiyonlarının da oluşturulması hedeflenmiştir. Mevcut durumunda, ANGORA programı kullanılarak, dört temel O-C mekanizması olan, Kütle Aktarımı, Işık-Zaman Etkisi, Manyetik Etkinlik ve Eksen Dönmesi analizleri pratik bir biçimde yapılabilmektedir. Bu çözümleri yaparken interaktif olarak en küçük kareler yöntemi ile Markov Chain Monte Carlo (MCMC) istatistik yöntemleri uygulanmaktadır. O-C eğrisi oluşturma ve grafik olarak gösterebilme, interaktif olarak model üreterek katsayıları hesaplayabilme ve sonuçları listeleyebilme özellikleri ANGORA programında mevcuttur. Veri ve grafik manipülasyonu basit anlamda mevcutken ilerleyen versiyonlarda daha ayrıntılı olanaklar sunulacaktır.

Çalışma ve programın deneme aşamaları içerisinde AM Leo, V842 Her ve AR CMA sistemleri üzerinden, Kütle Aktarımı, Işık-Zaman Etkisi ve Eksen Dönmesi incelenmiştir. Sonuçların daha önce yayınlanmış sonuçlar ile kıyaslaması verilmiş ve ANGORA'nın performansı gösterilmiştir. Kullanıcı analiz süresince istatistik yöntemlerin sonuçlarını yorumlayabilmeli ve gerekirse müdahale edebilmelidir. ANGORA müdahaleye olanak vermekte ve sonuçların hassas bir şekilde hesaplanmasına olanak tanımaktadır.

Sonuçların verilmesinde en önemli unsurlardan biri olan hata payları MCMC metodu ile yapılan analizlerde otomatik olarak hesaplanmaktadır. Bazı parametrelerde özellikle en küçük kareler yöntemi kullanılmışsa hata payları hesaplanamamaktadır. Gelecek versiyonlarda bu konu üzerinde ayrıca durulacaktır.

4. Kaynaklar

- van Rossum, Guido, 2009, A Brief timeline of Python, The History of Python
- Jones, E, Oliphant. 2001, SciPy: Open Source Scientific Tools For Python, <http://www.scipy.com>, online, Erişim Tarihi: 25.11.2016
- Stefan van der Walt, S. Chris Colbert and Gael Varoquaux, 2011, The NumPy Array: A Structure for Efficient Numerical Computation, Computing in Science & Engineering, 13, 9-12
- Foreman-Mackey, D., Hogg, W. D., Lang, D., Goodman, J., 2013, emcee: The MCMC Hammer. arXiv:1202.3665v4
- John D. Hunter. 2007, Matplotlib: A 2D Graphics Environment, Computing in Science & Engineering, 9, 90-95
- Selam, S. O., Albayrak, B., Şenavcı H.V., Aksu, O., 2005, Light curve solution and orbital period analysis of the contact binary V842 Herculis