

# Örten Gezegenlerin Geçiş Işık Eğrileri Analizleri için Yeni bir Yazılım: WinFitter ve Uygulamaları

Çağlar Püsküllü<sup>1,2\*</sup>, Faruk Soyduğan<sup>1,2</sup>, Ahmet Erdem<sup>1,2</sup>, Edwin Budding<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fizik Bölümü, Çanakkale

<sup>2</sup>Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Astrofizik Araştırma Merkezi ve Ulupınar Gözlemevi, Çanakkale

<sup>3</sup>Carter Gözlemevi ve Victoria Üniversitesi, SCPS, Wellington ve Canterbury Üniversitesi, Fizik ve Astronomi Bölümü, Yeni Zelanda

## Özet

Kepler teleskobu ile gözlenen HAT-P-7 b (Kepler-2 b), Kepler-6 b ve Kepler-8 b gezegenleri geçiş ışık eğrilerinin çözümleri, yeni bir analiz yazılımı olan WINFITTER ile yapıldı ve ilgili sistemlerin yörünge elemanları ile yıldızların ve gezegenlerin fiziksel parametreleri belirlendi.

**Anahtar Kelimeler:** planets and satellites: fundamental parameters, Yıldızlar, Ötegezegenler

## 1 Giriş

Yörünge hareketi yapan örten gök cisimlerinde gözlemsel verinin analitik yöntemlerle modellenmesi sayesinde sadece ışık eğrilerinin analizinden birçok yörünge elemanı ile bileşenlerin birçok fiziksel parametresine ulaşılabilmektedir. Yer tabanlı gözlemlerin aksine, Kepler uzay teleskobuyla gözlenen Jüpiter boyutlarındaki gezegenlerin geçiş ışık eğrilerinin yüksek duyarlılık olması nedeniyle sözü edilen parametreler hassas olarak elde edilebilmektedir.

## 2 Seçilmiş Ötegezegenlerin Geçiş Işık Eğrilerinin Analizi

Yıldızına çok yakın dolanan HAT-P-7 b, Pál et al. (2008) tarafından HATNet teleskoplarıyla keşfedildiğinde; Kepler teleskobu henüz görevine başlamamıştı. HAT-P-7 b (Kepler-2 b)'nin ilk Kepler gözlemleri, Welsh et al. (2010) tarafından yayınlandı. Jüpiter boyutunda bir gezegen olan Kepler-6 b, Dunham et al. (2010) tarafından keşfedilmiştir. Gezegenin yarıçapı,  $R_g = 1,3 R_J$  ve yıldızına uzaklığı,  $0,045 AB$  olarak ölçülmüştür. Yıldız metal zenginidir. Keşfi, Jenkins et al. (2010) tarafından yapılan Kepler-8 b, düşük yoğunluklu gezegenlerden bir tanesidir.

Bu çalışmadaki fotometrik analizlerde kullanılan WINFITTER yazılımı, tutulma gösteren herhangi bir sistemin gözlemsel ışık eğrisini, sistemin geometrik ve fiziksel parametreleri yardımıyla modelleyebilmektedir (Rhodes & Budding 2014). Analiz algoritması olan FITTER kodu (Budding & Najim 1980; Budding & Zeilik 1987; Budding & Demircan 2007), yıldızın dönme ve gel-git tedirginlikleriyle oluşan biçim bozulmasını, çekim ve kenar kararma etkisini ve yansıma etkisini Radau denklemleriyle (Kopal 1959) hesaplayarak, fiziksel bir model üretebilmektedir. WINFITTER hata hesabında Hessian matrisi ve öz değer-öz vektör türevlerini kullanır.

Çalışmanın ilk adımında, WINFITTER programına giriş değerlerini bulmak için, Kepler'in geçiş tanımlamaya yönelik algoritmalarından biri olan Threshold Crossing Event (TCE) (Tenenbaum et al. 2014) kullanılarak, HAT-P-7 b (Kepler-2 b), Kepler-6 b ve Kepler-8 b'nin 01-16 çeyrekleri verisi çözüldü. TCE verisinin analizinde geometrik parametreler,  $k$ ,  $r_1$  ve  $i$ 'nin Rhodes & Budding (2014) tarafından verilen değerleriyle başlandı.

Temel fiziksel nicelikler, yıldızın kütlesi ( $M_*$ ), etkin sıcaklığı ( $T_e$ ); gezegenin kütlesi ( $M_g$ ), Çizelge 1'de verilen kaynaklardan alındı. Gezegenlerin denge sıcaklığı  $T_{eq}$ , Bond albedoları sıfır kabul edilerek hesaplandı (Rowe et al. 2008). İkinci adımda, TCE verisi çözümlerinden bulunan geometrik ve fiziksel parametreler, WINFITTER'a başlangıç/giriş değerleri olarak alındı ve nihai çözüme ulaşmak için ele alınan üç ötegezegenin Pre-search Data Conditioned (PDCSAP) verisi kullanıldı. TCE ve PDCSAP verilerinin çözümlerinde geçiş ortası başlangıç zamanı ( $T_0$ ) ve yörünge dönemi ( $P$ ), NASA Ötegezegen Kayıtlarından<sup>1</sup>; doğrusal kenar kararma katsayısı ( $u$ ), Claret & Bloemen (2011) çizelgeleri ATLAS modelinden alınmıştır. Yörüngeler dairesel kabul edilmiştir. Sonuçlar, Çizelge 1'de verilmekte; gözlemler ile modellerin karşılaştırılması, Şekil 2a, 2b ve 2c'de gösterilmektedir.

## 3 Sonuç ve Tartışma

Yıldızından 0,0377 AB uzaklıktaki HAT-P-7 b'nin sıcaklığı  $T'_{eq} = 2220 \pm 31 K$  ve ortalama yoğunluğu  $\rho = 0,65 \rho_J$  olarak elde edilmiştir. Pál et al. (2008)'nin tayfsal gözlemlerle destekledikleri çalışmalarında gezegenin kütlesini  $M_g = 1,78 M_J$  ve yarıçapını  $R_g = 1,36 R_J$  olarak buldular. Bu çalışmada ise 0. çeyrek veri setinden seçilen BJD 125 - 127 aralığındaki tek bir geçiş eğrisinin analiziyle gezegenin yarıçapı,  $R_g = 1,50 \pm 0,04 R_J$ , yörünge eğikliği,  $i = 82^\circ, 79 \pm 0,37$  olarak hesaplandı (bkz. Çizelge 1). Kepler-6 b'de ise gezegenin yarıçapı,  $R_g = 1,71 \pm 0,03 R_J$ , yörünge eğimi,  $i = 83^\circ, 25 \pm 0,11$  ve yıldızın yarıçapı,  $R_* = 1,73 \pm 0,02 R_\odot$  olarak hesaplanmıştır. Yarıçapı  $R_g = 1,64 \pm 0,08 R_J$  olarak hesaplanan dev gezegen Kepler-8 b'nin ortalama yoğunluğu ise  $\rho = 0,38 \pm 0,01 \rho_J$ 'dir.

## Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK-MFAG 113F353 no'lu proje ile desteklenmiştir. Bu çalışma, ayrıca Çağlar Püsküllü'nün doktora tezi çalışması kapsamındadır.

## Kaynaklar

Budding E., Demircan O., 2007, Introduction to Astronomical Photometry. Cambridge University Press, Cambridge

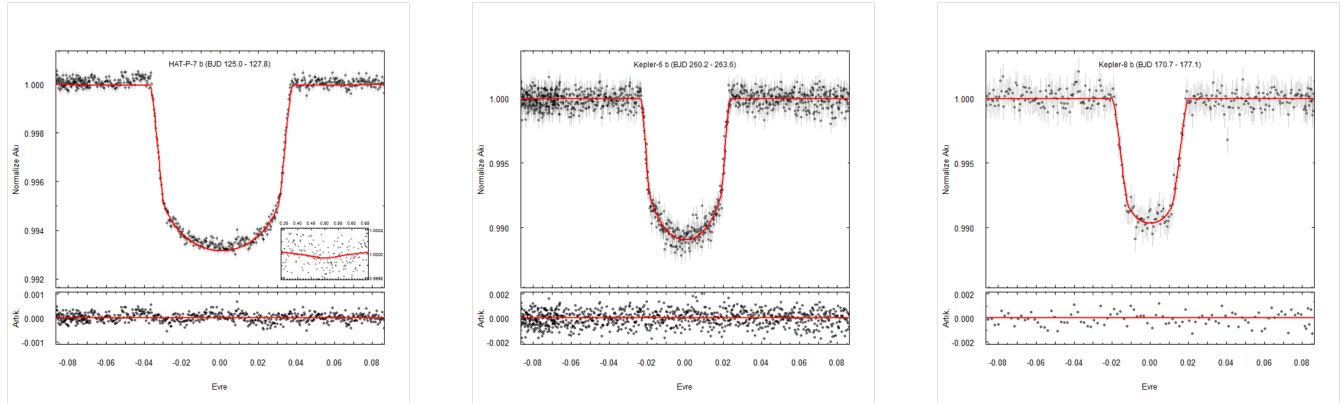
\* cpuskullu@comu.edu.tr

<sup>1</sup> <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>

**Çizelge 1.** HAT-P-7, Kepler-6 ve Kepler-8 yıldızları ve gezegenlerinin WinFitter çözüm parametreleri

Yıldız	HAT-P-7 (Kepler-2)	Kepler-6	Kepler-8
Kütle, $M_*$ ( $M_\odot$ )	$1,470 \pm 0,080^a$	$1,209 \pm 0,044^b$	$1,213 \pm 0,067^c$
Yarıçap, $R_*$ ( $R_\odot$ )	$1,98 \pm 0,04$	$1,39 \pm 0,03$	$1,68 \pm 0,06$
Yüzey Çekim İvmesi, $\log g_*(cgs)$	$4,01 \pm 0,03$	$4,23 \pm 0,03$	$4,07 \pm 0,04$
Etkin Sıcaklık, $T_e(K)$	$6350 \pm 80^a$	$5647 \pm 44^b$	$6213 \pm 150^c$
Gezegen	HAT-P-7 b (Kepler-2 b)	Kepler-6 b	Kepler-8 b
Kütle, $M_g$ ( $M_J$ )	$1,780 \pm 0,097^a$	$0,669 \pm 0,024^b$	$0,603 \pm 0,033^c$
Yarıçap, $R_g$ ( $R_J$ )	$1,5 \pm 0,04$	$1,3 \pm 0,04$	$1,64 \pm 0,08$
Yüzey Çekim İvmesi, $\log g_g(cgs)$	$3,29 \pm 0,03$	$2,99 \pm 0,03$	$2,74 \pm 0,05$
Ortalama yoğunluk, $\rho_g(cgs)$	$0,65 \pm 0,04$	$0,38 \pm 0,02$	$0,17 \pm 0,01$
Denge Sıcaklığı, $T_{eq}(K)$	$2220 \pm 22$	$1506 \pm 20$	$1766 \pm 51$
Işık Eğrisi	HAT-P-7 b (Kepler-2 b)	Kepler-6 b	Kepler-8 b
Yarıçaplar oranı, $k(r_2/r_1)$	$0,07807 \pm 0,00027$	$0,09562 \pm 0,00068$	$0,10064 \pm 0,00115$
Kesir. yarıçapları toplamı, $(r_1 + r_2)$	$0,26344 \pm 0,00335$	$0,15576 \pm 0,00337$	$0,17784 \pm 0,00571$
Yörünge eğimi, $i(^{\circ})$	$82,79 \pm 0,37$	$87,15 \pm 0,51$	$82,72 \pm 0,38$
Doğr. kenar kararım katsayısı, $u$	$0,536$	$0,613$	$0,548$
Kesir. yarı-büyük eksen uzunluğu, $a/R_*$	$4,09 \pm 0,12$	$7,03 \pm 0,19$	$6,19 \pm 0,25$
Geçiş parametresi, $b = a \cos i / R_*$	$0,514 \pm 0,024$	$0,349 \pm 0,016$	$0,784 \pm 0,048$
Geçiş süresi, $t_{14}$	$0,147 \pm 0,004$	$0,137 \pm 0,004$	$0,112 \pm 0,014$
Giriş-çıkış süresi, $t_{23}$	$0,015607 \pm 0,000003$	$0,014938 \pm 0,000326$	$0,029372 \pm 0,001292$
Geçiş ortası zamanı (BJD 2454000+)	$965,379692 \pm 0,000079$	$967,424721 \pm 0,000176$	$964,687029 \pm 0,00041$

<sup>a</sup> Pál et al. (2008), <sup>b</sup> Dunham et al. (2010), <sup>c</sup> Jenkins et al. (2010)



**Şekil 1.** Geçiş ışık eğrileri, WINFITTER modelleri ve artıkları (sol: HAT-P-7 b: Q00 BJD 125-127; orta: Kepler-6 b: Q03 BJD 260-263; sağ: Kepler-8 b: Q00 BJD 170-177).

- Budding E., Najim N. N., 1980, *ApSS*, 72, 369  
 Budding E., Zeilik M., 1987, *ApJ*, 319, 827  
 Claret A., Bloemen S., 2011, *A&A*, 529, A75  
 Dunham E. W., et al., 2010, *ApJL*, 713, L136  
 Jenkins J. M., et al., 2010, *ApJ*, 724, 1108  
 Kopal Z., 1959, Close binary systems. Chapman & Hall, London  
 Pál A., et al., 2008, *ApJ*, 680, 1450  
 Rhodes M. D., Budding E., 2014, *ApSS*, 351, 451  
 Rowe J. F., et al., 2008, *ApJ*, 689, 1345  
 Tenenbaum P., et al., 2014, *ApJS*, 211, 6  
 Welsh W. F., Orosz J. A., Seager S., Fortney J. J., Jenkins J., Rowe J. F., Koch D., Borucki W. J., 2010, *ApJL*, 713, L145

#### Erişim:

O24-1805: UAK-2015 Program --- UAK Bildiri --- Turkish J.A&A.