TÜBİTAK

Örten Çiftlerden Örten Ötegezegenlere

Program Kodu: 1001

Proje No: 113F353

Proje Yürütücüsü:
Prof. Dr. Ahmet ERDEM

Araştırmacılar:
Prof. Dr. Edwin BUDDING
Prof. Dr. Faruk SOYDUGAN
Prof. Dr. Esin SOYDUGAN
Yrd. Doç. Dr. Mehmet TÜYSÜZ

Danışman:
Prof. Dr. Osman DEMİRCAN

Bursiyerler:
Araş. Gör. Dr. Çağlar PÜSKÜLLÜ
Tunç ŞENYÜZ
M. Faruk YILDIRIM
Hülya ÇUHA
Ünal AKTOKA
Aysel KAHRAMAN
Emrullah SEVEN
Gökçe Z. ÖZALP

NİSAN 2017
ÇANAKKALE

Önsöz

Ötegezegenler, özellikle gözlemsel astrofiziğin son 20 yılında üzerinde en çok çalışmanın yapıldığı hedef nesnelerden biri haline gelmiştir. Ötegezegenlerin fotometrik olarak gözlenmesi ve gözlemlerin analizi, ötegezegen keşfinde ve gezegen parametrelerinin bulunmasında büyük rol oynamaktadır. Şimdiye kadar keşfedilen ötegezegenlerin büyük çoğunluğu geçiş ışık eğrileri gözlenerek saptanmıştır. Dolayısıyla, yıldız-gezegen sistemlerinin gözlemsel ışık eğrilerinin çözüm yöntemleri ve sisteme ilişkin parametrelerin duyarlıkla bulunması, ötegezegen araştırmalarında büyük bir öneme sahip olmaktadır.

Proje çalışmasında, yıldız-gezegen sistemlerinin gözlemsel ışık eğrilerinin çözüm yöntemlerinden biri olan WinFitter yazılımı, özellikle sistemin bileşenlerinin yakınlık etkilerini (bileşenlerin biçimsel basıklık ve yansıma etkileri) ve Doppler far etkisini (Doppler beaming effect) modelleyecek şekilde geliştirildi ve projenin önemli çıktıları olan, Budding vd. (2016a, 2016b)'nin makalelerinde ayrıntılı bir şekilde literatüre sunuldu. Bu iki makalede, Kepler NEA veri tabanından, Kepler-91 yıldız-gezegen sistemi için alınan 17 tam ışık eğrisi ve Kepler-1 yıldız-gezegen sistemi için alınan 14 tam ışık eğrisi, WinFitter yazılımının yeni versiyonu kullanılarak, çözüldü. Özellikle, Budding vd. (2016b)'nin makalesinde, WinFitter yazılımında kullanılan matematiksel ve fiziksel denklem ve yaklaşımlar ayrıntılı bir şekilde tartışıldı.

Proje çerçevesinde gözlem kriterlerine bağlı olarak seçilen ötegezegenlerin yer-tabanlı fotometrik gözlemleri, ÇOMÜG'deki 122 cm (T122), 30 cm (T30) ve İstanbul Üniversitesi ortaklığı ile kurulan 60 cm (T60) ayna çaplı teleskoplar ile TUG'daki 100 cm (TUG100) ayna çaplı teleskop kullanılarak yapıldı. Yer-tabanlı proje gözlemlerinde, seçilen yıldız-gezegen sistemlerinin ışık eğrilerinde gezegen örtüldüğünde gezegenden yansıyan ışığın örtülmesini temsil eden ikinci minimum evrelerinde ikinci minimum derinliklerinin tespit edilemeyecek denli sığ olmasından dolayı, yalnızca ötegezenlerin geçiş ışık eğrileri elde edildi. Böylece, proje gözlemlerinden yeterince duyarlıkta ve sayıda geçiş ışık eğrisine sahip olan ötegezegenlerin (TrES-3b, Qatar-1b ve WASP-52b) fotometrik analizleri, WinFitter yazılımı kullanılarak yapıldı. TrES-3b için 12 geçiş ışık eğrisi, Qatar-1b için 12 geçiş ışık eğrisi ve HAT-P-52b için 8 geçiş ışık eğrisi çözüme alındı. TrES-3b ve Qatar-1b için elde edilen WinFitter modeli sonuçlar, Püsküllü vd. (2017)'nin makalesinde yayınlandı.

Bu çalışma, **Türkiye Bilimsel ve Teknoloji Kurumu (TÜBİTAK)** tarafından 113F353 nolu proje altında desteklenmiştir.

İçindekiler

	sayfa
Özet	i
Abstract	ii
1. Giriş	1
2. Literatür Özeti	5
3. Gereç ve Yöntem	10
3.1 Gözlemler	10
3.1.1 Yer-tabanlı Gözlemler (ÇOMÜG ve TUG Gözlemleri)	10
3.1.2 Kepler Uydusu Gözlemleri	15
3.2 WinFitter (Işık Eğrisi Analizi Yazılımı)	17
3.3 Geçiş Zamanı Değişimlerinin (TTV) Analizi	39
4. Bulgular	42
4.1 Seçilen Ötegezegenlerin Yer Tabanlı Geçiş Işık Eğrilerinin ve Geçiş Zamanlarının Analizleri	42
4.1.1 TrES-3b	42
4.1.2 Qatar-1b	49
4.1.3 WASP-52b	55
4.2 Seçilen Ötegezegenlerin Kepler Geçiş Işık Eğrilerinin ve Geçiş Zamanlarının Analizleri	62
4.2.1 Kepler-91b	62
4.2.2 Kepler-1b	69
5. Sonuç ve Tartışma	76
Kaynaklar	
Ek 1. Seçilen Ötegezegenlerin Yer-tabanlı Gözlemleri (110 sayfa)	

Çizelge Listesi

Sayfa

Çizelge 3.1 TUG ötegezegen fotometrik gözlemleri. 13

Çizelge 3.2 ÇOMÜG ötegezegen fotometrik gözlemleri. 14

Çizelge 3.3 Proje çalışmasında kullanılan *Kepler* ötegezegen gözlemleri. 17

Çizelge 4.1 TrES-3 yıldız-gezegen sisteminin temel parametreleri. 43

Çizelge 4.2 TrES-3b'nin ÇOMÜG ve TUG gözlemleri özet bilgisi. 43

Çizelge 4.3 TrES-3b'nin WinFitter çözüm sonuçları ve literatür değerleriyle karşılaştırılması. 44

Çizelge 4.4 TrES-3 yıldız-gezegen sistemi için çözümde literatürden alınan ve sabit tutulan parametreler ile her 12 adet gözlemsel ışık eğrisinin ayrı çözümlerinden elde edilen parametrelerin ağırlıklı ortalamaları. 46

Çizelge 4.5 TrES-3b'nin proje çalışmasından okunan gözlemsel geçiş zamanları. 48

Çizelge 4.6 Qatar-1 yıldız-gezegen sisteminin temel parametreleri. 49

Çizelge 4.7 Qatar-1b'nin proje gözlemleri 50

Çizelge 4.8 Qatar-1b'nin WinFitter çözüm sonuçları ve literatür değerleriyle karşılaştırılması. 50

Çizelge 4.9 Qatar-1 yıldız-gezegen sistemi için çözümde literatürden alınan ve sabit tutulan parametreler ile her 11 adet gözlemsel ışık eğrisinin ayrı WinFitter çözümlerinden elde edilen parametrelerin ağırlıklı ortalamaları. 52

Çizelge 4.10 Qatar-1b'nin proje gözlemlerinden elde edilen geçiş zamanları. 54

Çizelge 4.11 WASP-52 yıldız-gezegen sisteminin temel parametreleri. 56

Çizelge 4.12 WASP-52b'nin proje gözlemleri. 56

Çizelge 4.13 WASP-52b'nin WinFitter çözüm sonuçları ve literatür değerleriyle karşılaştırılması. 57

Çizelge 4.14 WASP-52 yıldız-gezegen sistemi için çözümde Hébrard vd. (2013)'den alınan ve sabit tutulan parametreler ile her 8 adet gözlemsel ışık eğrisinin ayrı WinFitter çözümlerinden elde edilen parametrelerin ağırlıklı ortalamaları. 59

Çizelge 4.15 WASP-52b'nin proje gözlemlerinden elde edilen geçiş zamanları. 60

Çizelge 4.16 Kepler-91 yıldız-gezegen sisteminin temel parametreleri. 62

Çizelge 4.17 Kepler-91'in NEA'dan alınan 17 ışık eğrisi için WinFitter sonuçları. 63

Çizelge 4.18 Kepler-91 sistemi için WinFitter çözüm sonuçları ile literatürdeki değerlerin karşılaştırılması. 67

Çizelge 4.19 Kepler-1 sisteminin temel parametreleri (NEA'dan alınan ortalama değerler) 70

Çizelge 4.20 Kepler-1b'nin NEA'dan alınan 14 geçiş ışık eğrisi için WinFitter sonuçları. 71

Çizelge 4.21 Kepler-1 sistemi için tüm evre aralığında yaklaşık 4000 noktaya toplanan (binning) temsili gözlemsel ışık eğrisinin WinFitter çözüm sonuçları. 73

Çizelge 4.22 Kepler-1 sistemi için hesaplanan temel parametreler ve literatür ile karşılaştırılması. 75

Çizelge 5.1 Projede örnek olarak çalışılan 5 dev gezegene ilişkin temel parametreler. 79

Şekil Listesi

Sayfa

Şekil 2.1 Üç farklı TLC'de leke etkisi (Sanchis-Ojeda vd., 2012) 7

Şekil 2.2 TrES-2 yıldız-gezegen sisteminde, yakınlık etkilerinin (basıklık ve yansıma) ve Doppler far etkisinin neden olduğu ışık değişimleri ve onlara uygulanan kuramsal model (Barclay vd., 2012). 8

Şekil 3.1 TUG T100 teleskobuyla 12.11.2013 gözlem gecesinde hedef kaynak WASP-10'nun elde edilen odak-dışı üç boyutlu profil görüntüsü. 11

Şekil 3.2 ρ yoğunluklu, *P* basıncına sahip, kararlı/denge durumundaki r' yarıçaplı küresel akışkan bir katman (Kopal, 1959). 18

Şekil 3.3 Basit yaklaşımda bir çift sistem (yıldız + gezegeni vb.) ve ışık eğrisi (Budding ve Demircan, 2007). 23

Şekil 3.4 HAT-P-36b ötegezegenin ÇOMÜG'de 17.03.2012'de *R* filtresinde elde edilen geçiş ışık eğrisi. Lineer kenar-kararma katsayısı için kullanılan 0.0, 0.60 ve 1.0 kuramsal değerleriyle yapılan üç farklı fit (Erdem vd., 2015) 30

Şekil 3.5 Rhodes & Budding (2014)'ün çalışmasında ele alınan 16 Kepler ötegezegenin geçiş ışık eğrilerinde kenar-kararma katsayıları için kullanılan kuramsal değerler ile gözlemsel değerlerin karşılaştırılması. 31

Şekil 3.6 Kepler-2b'nin geçiş ışık eğrisi ve WinFitter modeli (üstte). Kuramsal model ile gözlemlerin farkı (altta). Burada, -5 ile 0 derece evre aralığında leke etkisi açıkça görülmektedir (bkz. Rhodes & Budding, 2014). 33

Şekil 3.7 Kepler-3b'nin geçiş ışık eğrisi ve WinFitter modeli (üstte). Kuramsal model ile gözlemlerin farkı (altta). Burada, 0° evrenin hemen altında leke etkisi açıkça görülmektedir (bkz. Rhodes & Budding, 2014). 34

Şekil 3.8 Kepler-410b'nin geçiş ışık eğrisi ve WinFitter modeli (üstte). Kuramsal model ile gözlemlerin farkı (altta). Burada, tutulma evrelerinin tamamında leke etkisi açıkça kendini göstermektedir (bkz. Rhodes & Budding, 2014). 35

Şekil 3.9 Kepler-13 (KOI-13) yıldız-gezegen sisteminde ölçülen ışık akısının modellenmesi (Shporer vd., 2011). Akı değişiminde, Doppler far etkisi, kırmızı kesikli çizgi (B), yansıma etkisi, yeşil kesikli çizgi (R) ve yakınlık ve dönmeden dolayı elipsoidal biçim bozunması etkisi, mavi kesikli çizgi (E) ile gösterilmiştir. KOI-13 sisteminden gelen toplam ışık akısı değişimi, siyah düz çizgi ile temsil edilmiştir. 36

Şekil 3.10 KOI-13'ün Kepler verisine uygulanan WinFitter modeli.
Maksimum ışık düzeyleri arasındaki asimetriye dikkat ediniz. 37

Şekil 3.11 KOI-13.01 gezegenin geçiş ışık eğrisindeki asimetri, yıldızın dönme hareketinden kaynaklanan Doppler etkisini (yani, fotometrik Rossiter etkisini) göstermektedir. WinFitter programı uygulanarak yapılan fitte, yıldızın ekvatoryal dönme hızı, ~65 km/s olarak hesaplanmıştır (Erdem vd., 2015). 38

Şekil 3.12 KOI-1'in Kepler verisine uygulanan WinFitter modeli.
Maksimum ışık düzeyleri arasındaki asimetriye dikkat ediniz (Budding vd., 2016b). 38

Şekil 4.1 TrES-3b'nin gözlemsel ve kuramsal geçiş ışık eğrileri
ve gözlemlerin kuramsal modelden artıkları. 45

Şekil 4.2 TrES-3b ötegezegenin yıldız diskinden geçiş geometrisi (üstte). Gözlenen tüm geçiş ışık verisinin 70 noktaya toplanmasıyla (binning) oluşturulan geçiş ışık eğrisi ile WinFitter kuramsal ışık eğrisinin karşılaştırılması. 47

Şekil 4.3 TrES-3b'nin geçiş ortası zamanı değişimi. 48

Şekil 4.4 TrES-3 b'nin *O-C* verisi için Lomb-Scargle periyodiyagramı. Düz çizgi, tüm verilerin ve aralıklı çizgi, zaman hatası $\sigma_{BJD} \leq 0.0005$ olanların frekans dağılımını göstermektedir. 48

Şekil 4.5 Qatar-1b'nin gözlemsel ve kuramsal geçiş ışık eğrileri ve gözlemlerin
kuramsal modelden artıkları. 51

Şekil 4.6 Qatar-1b ötegezegenin yıldız diskinden geçiş geometrisi (üstte). Gözlenen tüm geçiş ışık verisinin 70 noktaya toplanmasıyla (binning) oluşturulan geçiş ışık eğrisi ile WinFitter kuramsal ışık eğrisinin karşılaştırılması. 53

Şekil 4.7 Qatar-1b'nin *O-C* verisi için Lomb-Scargle frekans eğrisi.
Kesikli çizgi %5 FAP seviyesini göstermektedir. 54

Şekil 4.8 Qatar-1b'nin geçiş ortası zamanı değişimi ve fit edilen çevrimsel eğri. 55

Şekil 4.9 WASP-52b'nin gözlemsel ve kuramsal geçiş ışık eğrileri
ve gözlemlerin kuramsal modelden artıkları. 58

Şekil 4.10 WASP-52b'nin *O-C* verisi için Lomb-Scargle frekans eğrisi.
Kesikli çizgi %50 FAP seviyesini göstermektedir. 60

Şekil 4.11 WASP-52b'nin geçiş ortası zamanı değişimi.
Kesikli çizgiler arasında *O-C* değerlerinin kümelendiği görülmektedir. 61

Şekil 4.12 Kepler-91b için geçiş evrelerini kapsayan gözlem noktalarının
97 noktaya indirgenmiş geçiş ışık eğrisi ve WinFitter modeli kuramsal eğri. 64

Şekil 4.13 Kepler-91 için 65000 LC gözlem noktasının 360 noktaya toplanmasıyla oluşturulan temsili gözlem noktalarıyla WinFitter modeli arasındaki artıklar için Lomb-Scargle yöntemiyle elde edilen güç tayfı. 65

Şekil 4.14 Gözlem-model artıklarına Lomb-Scargle yöntemiyle uygulanan frekans analizinin sonucu. Yaklaşık 0.5 ve 0.17 evrelerde meydana gelen ışık azalmaları, sistemde olası Trojan ve/veya Hilda türü asteroidlerin sistemin ışığını engellemesinden kaynaklanmış olabilir. 66

Şekil 4.15 Kepler-91 sisteminin arındırılmış temsili ışık eğrisi. Yakınlık etkileri ve ikinci minimum, ışık eğrisinde belirgin şekilde gözükmektedir. Gözlem noktalarının WinFitter programı ile yapılan son fitten farkları, diyagramın altında gösterilmektedir. 68

Şekil 4.16 Kepler-91 sisteminin gözlenen ve hesaplanan birinci minimum zamanları (Kepler-91b'nin geçiş zamanları) arasındaki farklar, kolları aşağıya bakan bir parabolik değişimi göstermektedir. 69

Şekil 4.17 Kepler-1b için geçiş evrelerini kapsayan gözlem noktalarının 200 noktaya indirgenmiş geçiş ışık eğrisi ve WinFitter modeli kuramsal eğri. Gözlem noktalarının WinFitter programı ile yapılan fitten farkları, diyagramın altında gösterilmektedir. 72

Şekil 4.18 Kepler-1 sisteminin yaklaşık 4000 noktadan oluşan temsili gözlemsel ışık eğrisi ve WinFitter modeli kuramsal eğri. Maksimum ışık düzeyleri arasındaki düşük düzeyli asimetri için yakınlık etkileri (elipsoidal biçim bozulması/basıklık etkisi ve yansıma etkisi) ile Doppler far etkisi birlikte ele alınmıştır. Işık eğrisinde ikinci minimumda görülen küçük ışık azalmasında gezegenden yansıyan ışığın tutulması modellenmiştir. WinFitter programı ile yapılan son fitin gözlem noktalarından farkı, diyagramın altında gösterilmektedir. 73

Şekil 4.19 Kepler-1b'nin geçiş ışık eğrileri çözümlerinden elde edilen $\Delta\phi_0$ evre kaymalarının zaman bazında sıralı çeyreklere göre değişimi. Küçük eğimli, siyah renkli, doğrusal fit, çözümlerde kullanılan, gezegenin yörünge döneminin değişmediğini gösteren kırmızı renkli doğrusal fitten kayda değer derecede fark göstermemektedir. 74

Şekil 5.1 Seçilen 737 yıldız-gezegen sisteminin gezegen kütlesine göre istatistiksel dağılımı. Koyu mavi olanlar, fotometrik ve tayfsal yolla keşfedilen ötegezegenleri; mavi olanlar, yalnızca fotometrik yolla keşfedilen ötegezegenleri ve açık mavi olanlar, yalnızca tayfsal yolla keşfedilen ötegezegenleri göstermektedir. 82

Şekil 5.2 Seçilen 737 yıldız-gezegen sisteminin gezegenin yörünge dönemine göre istatistiksel dağılımı. Koyu mavi olanlar, fotometrik ve tayfsal yolla keşfedilen ötegezegenleri; mavi olanlar, yalnızca fotometrik yolla keşfedilen ötegezegenleri ve açık mavi olanlar, yalnızca tayfsal yolla keşfedilen ötegezegenleri göstermektedir. 83

Şekil 5.3 Seçilen 737 yıldız-gezegen sistemi için ötegezegen sayısının yıldızın dikine hız genliğine göre istatistiksel dağılımı. Koyu mavi olanlar, fotometrik ve tayfsal yolla keşfedilen ötegezegenleri; mavi olanlar, yalnızca fotometrik yolla keşfedilen ötegezegenleri ve açık mavi olanlar, yalnızca tayfsal yolla keşfedilen ötegezegenleri göstermektedir. 84

Şekil 5.4 Seçilen 737 yıldız-gezegen sistemi için gezegen bileşen sayısının yıldız bileşeni kütlesine göre istatistiksel dağılımı. Koyu mavi olanlar, fotometrik ve tayfsal yolla keşfedilen ötegezegenleri; mavi olanlar, yalnızca fotometrik yolla keşfedilen ötegezegenleri ve açık mavi olanlar, yalnızca tayfsal yolla keşfedilen ötegezegenleri göstermektedir. 85

Şekil 5.5 Seçilen 737 yıldız-gezegen sistemi için ötegezegen sayısının yörünge basıklığına göre istatistiksel dağılımı. Koyu mavi olanlar, fotometrik ve tayfsal yolla keşfedilen ötegezegenleri; mavi olanlar, yalnızca fotometrik yolla keşfedilen ötegezegenleri ve açık mavi olanlar, yalnızca tayfsal yolla keşfedilen ötegezegenleri göstermektedir. 86

Şekil 5.6 Seçilen 737 yıldız-gezegen sistemi için dikine hız genliğinin denklem (5.2)'de verilen parametrelere göre değişimi. Düz çizgi, gözlemsel verilere ağırlıklı en küçük kareler yöntemiyle elde edilen doğrusal fiti temsil etmektedir. 87

ÖZET

Yıldız-gezegen sistemlerinin uydu-tabanlı ışık eğrilerinin ve yer-tabanlı geçiş ışık eğrilerinin çözümleri için, WinFitter yazılımının geliştirilmesi ve uygulamaları üzerine yapılan proje çalışmasının sonuç raporu sunulmaktadır (bkz. Erdem vd., 2015; Budding vd., 2016a,b; Püsküllü vd., 2017). WinFitter, modifiye edilmiş Marquardt-Levenberg yöntemini kullanarak, gözlemsel ışık eğrisine teorik bir fonksiyonun fit edilmesini sağlar. Kullanılan fit fonksiyonu, görelice yakın ve çekimsel olarak birbirine bağlı iki cismin gel-git ve dönme tedirginlikleri altında bozulmuş biçim (elipsoit biçim) ve yansıma etkilerini gözönüne alan ve Kopal (1059) tarafından geliştirilen Radau modeline dayanır. Proje çalışmasında, seçilen bir yıldız-gezegen sisteminin ışık eğrisini çözmek için küresel model ışık eğrisine bozucu etkiler olarak, bileşenlerin elipsoit biçim ve yansıma etkileri ile birlikte Doppler far etkisi, WinFitter yazılımının son versiyonunda dikkate alındı. Kepler-1 ve Kepler-91 yıldız-gezegen sistemlerinin NEA'dan alınan, sırasıyla 14 ve 17 ışık eğrisi, WinFitter yazılımı kullanılarak çözüldü. Kepler-1b ve Kepler-91b ötegezegenleri için fotometrik yolla hesaplanan kütle ve yarıçap değerleri (sırasıyla, 1.18(±0.05) M_{jup}, 1.21(±0.05) R_{jup} ve 0.60(±0.08) M_{jup}, 1.37(±0.05) R_{jup}), literatürde duyarlı tayfsal yolla hesaplanan değerlere çok yakın çıkmıştır. Geçiş zamanı değişimi (TTV) analizinden; Kepler-1b için önemli bir yörünge dönemi değişimine rastlanılmamış, ancak Kepler-91b için gezegenin yörünge döneminin olası bir lineer değişimi tartışılmıştır. Öte yandan projenin yer-tabanlı gözlemlerinden TrES-3b için 12 geçiş ışık eğrisi, Qatar-1b için 12 geçiş ışık eğrisi ve HAT-P-52b için 8 geçiş ışık eğrisi, WinFitter yazılımı kullanılarak çözülmüştür. TrES-3b, Qatar-1b ve HAT-P-52b için, çözümlerden hesaplanan ötegezegen yarıçap değerleri (sırasıyla 1.39(±0.04), 1.14(±0.03) ve 1.28(±0.03) R_{jup}), literatürde verilen değerlerle uyuşmaktadır. Bu üç ötegezegen için, gözlenen ışık eğrilerinden gezegen geçiş zamanları ve hataları elde edilmiş ve yeni/düzeltilmiş lineer ışık ögeleri hesaplanmıştır. Geçiş zamanı değişimi (TTV) analizinden; TrES-3b ve HAT-P-52b için çevrimsel bir değişime rastlanılmamışken, Qatar-1b için olası bir çevrimsel değişim gösteren, ancak duyarlı yeni geçiş zamanlarıyla doğrulanabilecek, zayıf bir sinyal yakalanmıştır. Ayrıca, proje çalışmasında, The Exoplanet Data Explorer (exoplanets.org) veri tabanından, duyarlı fotometrik ve tayfsal gözlemlerin birlikte analiz edildiği 737 yıldız-gezegen sisteminin temel parametre değerleri kullanılarak, ele alınan sistemlerin gezegen kütlelerinin, yörünge dönemlerinin, dikine hız genliklerinin, yıldız kütlelerinin ve yörünge basıklıklarının istatistiksel dağılımları incelendi.

Anahtar kelimeler: Yıldız-gezegen sistemleri, ötegezegenler, ışık eğrisi analizi.

ABSTRACT

We report on continued applications and development of the light curve analysis package WinFitter, especially for light curves of star-exoplanet systems taken from the NASA Exoplanet Archive (NEA) and also exoplanet transit light curves obtained from Earth-based observations (cf. also Erdem et al., 2015; Budding et al., 2016a,b; Püsküllü et al., 2017). WinFitter performs optimization by a modified Marquardt-Levenberg application of a fitting function to a photometric data set (light curve). The fitting function is based on the Radau model developed from Kopal's (1959) approach to the tidal and rotational distortions (ellipticity), together with the radiative interactions (reflection), of massive and relatively close gravitating bodies. In order to solve observational light curve of a star-planet system, the full perturbation of the light from the idealized spherical model could be regarded as made up of the combined effects of ellipticity, reflection and Doppler beaming in the latest version of WinFitter. Then, we have applied the last version of WinFitter to intensive studies of Kepler-1 and Kepler-91 using all the available photometry from NEA. Our photometrically derived values for the masses and radii of Kepler-1b and Kepler-91b (which are 1.18(±0.05) M_{jup}, 1.21(±0.05) R_{jup} and 0.60(±0.08) M_{jup}, 1.37(±0.05) R_{jup}, respectively) are closer to the published spectroscopic values. From the transit timing variation (TTV) analysis, we could not find evidence of any time of transit variation for Kepler-1b, however we discussed suggestions of a possible secular period variation for Kepler-91b. The 12 transit light curves of TrES-3b, 12 transit light curves of Qatar-1b and 8 transit light curves of HAT-P-52b obtained from our Earth-based observations were solved using the WinFitter code. Our photometrically derived values for the radii of TrES-3b, Qatar-1b and HAT-P-52b (which are 1.39(±0.04), 1.14(±0.03) and 1.28(±0.03) R_{jup}, respectively) are closer to the published literature values. New transit times and their uncertainties of these three exoplanets were determined, and new linear ephemerides were computed for all three systems. Analysis of transit times showed that a significant signal could not be determined for TrES-3b and HAT-P-52b, while weak evidence was found for Qatar-1b, which should be tested using more precise future transit times. Statistical distributions of the fundamental parameters (orbital period and mass of the planet, radial velocity semi-amplitude and mass of the host star, and orbital eccentricity) of 737 star-planet systems were examined using the sensitive solutions of their photometric and spectroscopic data, given in The Exoplanet Data Explorer (exoplanets.org).

Keywords: Star-planet systems, transiting exoplanets, light curve analysis.

1. GİRİŞ

Bilim insanlarını, sürekli meşgul eden soruların başında “biz (dünyalılar) evrende yalnız mıyız?” ya da “evrende dünyalılardan başka canlılar var mı? İnsanlardan başka akıllı yaratıklar bulunuyor mu?” soruları gelir. Yer/dünya dışında yaşam arayışlarının en önemli adımlarından biri, yaşamın meydana gelebileceği güneş sistemi içerisinde ve/veya dışında gezegen araştırmasıdır. Son birkaç on yılda bu amaç doğrultusunda yapılan çalışmalar hızla artmış ve güneş sistemi dışında keşfedilen gezegenlere “güneş sistemi ötesi gezegen (extrasolar planet)” ya da kısaca “ötegezegen (exoplanet)” adı verilmiştir.

İlk kabul gören ötegezegen keşfi, 1992 yılında gerçekleşmiştir. Keşfedilen ötegezegen, ölü bir yıldız olan pulsar PSR B1257+12'nin etrafında bulundu (Wolszczan ve Frail, 1992). Bir anakol yıldızı etrafında dolanan ilk ötegezegenin keşfi, 1995'te yapıldı (Mayor ve Queloz, 1995). Özellikle 1995'ten sonra hızla artan çalışmalarla çok sayıda ötegezegen keşfi gerçekleşmektedir. Nisan-2017 itibariyle keşfedilen ötegezegen sayısı, 4000'e yakındır. Aşağıda ötegezegenlerin keşif ve araştırma yöntemleri ile keşfedilenlerin sayıları verilmektedir
(http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts_detail.html):

- Konum-ölçümü (astrometry): 1 gezegen,
- Doğrudan görüntüleme (imaging): 44 gezegen,
- Dikine hız ölçümü: 631 gezegen,
- **Işıkölçümü (geçiş/transit yöntemi): 2719 gezegen,**
- Geçiş zamanı değişimleri (transit timing variations): 15 gezegen,
- Tutulma zamanı değişimleri (eclipse timing variations): 8 gezegen,
- Mikro-merceklenme (microlensing): 44 gezegen,
- Atarca zamanı değişimleri (pulsar timing variations): 5 gezegen,
- Pulsasyon zamanı değişimleri (pulsation timing variatios): 2 gezegen ve
- Yörüngesel parlaklık modülasyonları (orbital brightness modulations): 6 gezegen.

Sayılardan görüleceği üzere; ötegezegenlerin neredeyse %99'u dikine hız ve ışıkölçümü yöntemleriyle keşfedilmiştir. Günümüzde hızla gelişen teknoloji, yıldızların dikine hızlarında, yıldıza bağlı gezegenin neden olduğu 10-100 m/s genlikli değişimlerin ve ışıkölçümde ışık eğrilerinde mmag mertebeden duyarlı değişimlerin belirlenebilmesine olanak tanımaktadır.

Yukarıda değinildiği üzere; ötegezegen keşfetmenin ve ötegezegenlerin üzerine araştırma yapmanın bir yolu/yöntemi, ışıkölçümüdür. Bu yöntemde tek ya da çift (çoklu) yıldızların ışık eğrileri gözlenir. Ötegezegen, bağlı olduğu yıldızın önünden geçerken yıldızı örter ve ışık eğrisinde yıldızın ve gezegenin geometrik, fiziksel ve yörünge özelliklerine bağlı bir azalma meydana gelir. Bu yöntemle keşfedilen gezegenlere "örten ötegezegen (transit exoplanet)" adı verilir. Aslında yıldız-gezegen bir çift sistemdir ve yıldız-gezegen tutulma olayı, örten çift yıldız sistemlerinkine çok benzerdir. Bu yüzden ötegezegenlerin ışık eğrileri analizinde çift yıldızların ışık eğrileri analiz yöntemleri kullanılabilmektedir. Çift yıldızların ışık eğrilerinde yakınlık etkileri baskınken; ötegezegenlerin ışık eğrilerinde yıldız diskinin kenar kararması, yıldız leke etkisi, basıklık etkisi, yansıma etkisi ve Doppler far etkisi (Doppler beaming effect) ön plana çıkar.

Bu proje çalışmasında çift yıldız ışıkölçümü üzerine kazanılan deneyim ve bilgi, yıldız-ötegezegen ışıkölçümü konusuna aktarılmaya çalışılmıştır. Yıldız-ötegezegen ışıkölçümü, yeni, geniş ve çok hassas bir konudur, ancak; çift yıldızların ışık eğrileri ile yıldız-ötegezegen sistemlerinin ışık eğrileri, analitik prensipler çerçevesinde birbirine çok benzeyen problemleri içermektedir. Bu amaçla, çift yıldızların ışık eğrisi analizinde kullanılan ILOT programı (Budding ve Zeilik, 1987), yıldız-ötegezegen ışık eğrisi analizinde kullanılmak üzere, **WinFitter** adı altında, GUI tabanlı bir programa dönüştürülmüştür. WinFitter, ötegezegen veri arşivlerinden (özellikle NASA Exoplanet Archive, NEA) seçilen yüksek duyarlı/çok hassas ışık eğrilerine ve gözlem kriterlerine göre seçilen ötegezegenlerin TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi (TUG) ile Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Gözlemevi (ÇOMÜG)'de elde edilen geçiş ışık eğrilerine uygulandı.

Kepler, diğer yıldızların çevresinde dolanan yer-benzeri gezegenlerin keşfedilmesi amacıyla, 2006'da fırlatılan uydu gözlemevi olup, ışık eğrilerinde gezegen geçişi gösteren yıldızları belirlemek amacıyla seçilen gökyüzü bölgelerini sürekli taramaktadır. Bu uydu gözlemevinden elde edilen ışık eğrileri, çok sayıda araştırmacı tarafından yoğun bir şekilde incelenmektedir. Seçilen Kepler ötegezegen geçiş ışık eğrilerinin WinFitter çözümünden elde edilen parametreler, literatürde verilen parametrelerle karşılaştırıldı ve çözüm modelleri arasındaki farkların nedenleri tartışıldı (bkz. örneğin, Budding vd., 2016a, 2016b). Farklı analitik yaklaşımların kullanılması, ötegezegen probleminde, ayrıntıların birleştirilmesinde yapıcı bir rol oynayabilir. Proje çalışmasında, WinFitter yazılımı ile, özellikle, kenar-kararması ve yakınlık etkileri (küresel biçimden sapma/basıklık ve yansıma etkileri) üzerinde duruldu. Örneğin NExSCI (NASAS Exoplanet Science Institute) çözümlerinde kullanılan kenar-kararma katsayıları, güneş kimyasal kompozisyonu varsayılarak hesaplanmıştır. Bu

yaklaşımın farklı kimyasal kompozisyon olasılıklarına göre test edilmesi/denetlenmesi gerekmektedir. Öte yandan kullanılan çekim-kararması modeli de birçok belirsizlik içermektedir. Bu etkiyi gösteren özel örnekler, birçok yazar tarafından (örneğin Barnes, 2011) tartışılmış ancak bu model-bağımlı etkiyi denetleyen çalışmalar ortaya konmamıştır. Ayrıca, WinFitter programı ile, ancak çok duyarlı ışık eğrileri ile test edilebilen Doppler far etkisi ele alındı (örneğin KOI-13 sistemi, bkz. Mazeh vd., 2012). KOI-13 sisteminin ışık eğrisinde görülen asimetrik ikinci minimum, çözüm bekleyen başka bir problem için iyi bir örnektir.

Proje çalışmasının sonuç raporunda; 1. Bölüm (Giriş)'ten sonra, 2. Bölüm'de örten ötegezegen çalışmalarına ilişkin literatür bilgisi özetlenmekte, 3. Bölüm'de, proje çalışmasında kullanılan gözlemsel veriye (uydu ve yer-tabanlı gözlemlere) değinilmekte ve ötegezegen geçiş ışık eğrilerinin çözümleri için kullanılan WinFitter yazılımı ile geçiş zamanı değişimlerinin analizlerinde kullanılan yöntemler anlatılmakta, 4. Bölüm'de proje çalışmasından elde edinilen bulgular sunulmakta ve 5. Bölüm'de sonuç ve tartışma verilmektedir.

Proje çalışmasında başarıyla kabul edilen bir doktora tez çalışması yer almaktadır:

1) Çağlar PÜSKÜLLÜ (Danışman: Prof.Dr. Faruk SOYDUGAN), "Ötegezegenlerin Geçiş Gözlemlerinin Fotometrik Analizleri", Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, doktora tezi, 2016.

Proje çalışmasında devam eden üç lisansüstü tez çalışması yer almaktadır:

1) Oğuz ÖZTÜRK (Danışman: Prof.Dr. Ahmet ERDEM), "Yıldız-Gezegen Sistemleri: Model ve Analiz", Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, doktora tezi, devam ediyor.

2) Hülya ÇUHA (Danışman: Prof.Dr. Ahmet ERDEM), "Ötegezegenlerin Geçiş Işık Eğrilerinde Yıldız Kenar Kararmasının Etkisi", Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, yüksek lisans tezi, devam ediyor.

3) Ünal AKTOKA (Danışman: Prof.Dr. Ahmet ERDEM), "Örten Gezegen-Yıldız Sistemlerinde Işık-Zaman Etkisi", Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, yüksek lisans tezi, devam ediyor.

Proje sonuçlarından aşağıdaki yayınlar çıkarılmıştır:

1) Püsküllü, Ç.; Soydugan, F.; Erdem, A.; Budding, E.; “Photometric investigation of hot exoplanets: TrES-3b and Qatar-1b”, New Astronomy, 55, 39-47 (2017)

2) Öztürk, O.; Erdem, A.; “Effect of planetary mass on the orbit of star-planet systems”, AIP Conference Proceedings, Volume 1815, Issue 1, id.080018 (2017)

3) Budding, E.; Rhodes, M. D.; Püsküllü, Ç.; Ji, Y.; Erdem, A.; Banks, T.; “Photometric analysis of the system Kepler-1”, Astrophysics and Space Science, 361, 346 (2016)

4) Budding, E.; Püsküllü, Ç.; Rhodes, M. D.; Demircan, O.; Erdem, A.; “Analysis of the exoplanet containing system Kepler-91”, Astrophysics and Space Science, 361, 17 (2016)

5) Erdem, A.; Budding, E.; Rhodes, M. D.; Püsküllü, Ç.; Soydugan, F.; Soydugan, E.; Tüysüz, M.; Demircan, O.; “Analysis of Exoplanet Light Curves”, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 496, p. 365 (2015)

6) Püsküllü, Ç.; Soydugan, F.; Erdem, A.; Budding, E.; Soydugan, E.; Tüysüz, M.; Rhodes, M.; Demircan, O.; “Photometric Study of Hot Jupiters: WASP-10 b and HAT-P-36 b”, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 496, p. 356 (2015)

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Ötegezegenler konusu, son birkaç on yılda astronomide araştırmacıların en çok yöneldiği konulardan biri haline gelmiştir. Ötegezegen araştırmak için uydular fırlatılmakta; yerdeki önemli gözlemevleri teleskoplarını bu alana yöneltmektedirler. Örneğin CoRoT (**Co**nvection **Ro**tation and planetary **T**ransits) uydusu, Avrupa Uzay Ajansı (ESA) ve Brezilya işbirliğinde Fransa Uzay Ajansı (CNES) tarafından 2006'da ötegezegen ve astrosismoloji konusunda gözlem yapmak amacıyla fırlatıldı (http://sci.esa.int/corot/). CoRoT, örten gezegen keşfetmek amacıyla fırlatılan ilk uydu olup ilk keşfini (CoRoT-1b) 2007'de yapmıştır. CoRoT, 27 cm'lik küçük teleskobuyla, dört CCD kamerasıyla, güneş ışınlarından kaçınmak için, yazın galaksi merkezi doğrultusunda, kışın galaksi merkezine zıt doğrultuda, 2.7x3.05 derece^2'lik bir alanı sürekli taramaktadır. CoRoT, onbinlerce yıldızı gözlemekte; 600'e yakın ötegezegen adayı keşfinde bulunmuştur. Diğer bir uydu, Kepler Mission, diğer yıldızların etrafında dolanan yer-benzeri gezegenleri keşfetmek amacıyla 2009'da NASA tarafından fırlatıldı (Borucki vd., 2009). Kepler uydusu, ışıkölçümde gezegen örtmesi gösteren özellikle anakol yıldızlarını belirlemek için galaktik alanın Cygnus-Lyra bölgesinde 10x10 derece^2'lik bir alanı sürekli olarak taramaktadır. Kepler uydusunun hedef listesinde yaklaşık 150 bin yıldız bulunmaktadır. Kepler uydusunun ilk sonuçları, kısa dönemli ötegezegen keşifleriyle 2010'da duyuruldu. Günümüze kadar 2000'den fazla gezegen geçişi gözlendi ve analiz edildi. Ancak gezegen adaylarının yaklaşık %10'unun yer-benzeri boyutlarda olduğu tahmin edilmektedir. NASA'ya göre; keşfedilen ötegezegenlerin yalnızca %5'i bağlı bulunduğu yıldızın "yaşam kuşağındadır". Öte yandan, WASP (**W**ide **A**ngle **S**earch for **P**lanets) ve KELT (**K**ilodegree **E**xtremely **L**ittle **T**elescope), yalnızca ötegezegen araştırmalarına ayrılmış yer tabanlı gözlemevlerine örnek olarak verilebilir.

Özellikle son yıllarda ötegezegen çalışmalarına bakıldığında, devam eden uydu ve yer-tabanlı gözlemlerin/keşiflerin yanı sıra, aşağıdaki ana başlıklar verilebilir: (i) yıldız-ötegezegen ışık eğrisi (TLC) analizi, (ii) dikine hız eğrisi (RVC) analizi, (iii) yörünge çözümleri, (iv) ötegezegen geçiş ışık eğrilerinde tutulma zamanlarının (TTV) analizi, (v) gözlem verisi analizleriyle elde edilen ötegezegenlerin fiziksel ve geometrik ögelerinin istatistik sorgulanması, (vi) ötegezegenlerin sınıflandırılması, (vii) yer-benzeri gezegen araştırmaları, (viii) kütle-yarıçap ilişkileri, (ix) ötegezegen atmosferlerinin özelliklerinin incelenmesi vb. Bir ötegezegenin yalnızca dikine hız eğrisi analizinden, yörünge dönemi, yörünge basıklığı ve yörünge eğim açısının fonksiyonu olarak kütlesi ve yörüngenin yarı-büyük eksen uzunluğu hesaplanabilir (bkz. örneğin, Jiang vd., 2013). Yalnızca ışık eğrisi analizinden, yörünge eğikliği ve gezegen ile yıldızın kesirsel yarıçapları bulunabilir (örneğin

Hoyer vd., 2013). Işık ve dikine hız eğrilerinin birlikte analiziyle, gezegenlerin kütle, yarıçap, yoğunluk ve yüzey çekim ivmeleri vb temel parametrelerine ulaşılabilir (örneğin Winn vd., 2005; Southworth vd., 2007; Southworth, 2008; Almenera vd., 2013).

İlk ötegezegen geçişi, HD 209458 yıldızı etrafında dolanan bir gezegenin neden olduğu ışık değişimi ile belirlendi (Charbonneau vd., 2000; Henry vd., 2000). O günden bu yana uydu ve yer tabanlı taramalar ile gözlenen ötegezegen geçişlerinin sayısı oldukça artmış olup, Nisan-2017 itibarıyla, bu yöntemle keşfedilen gezegen sayısı 2000'nin üzerine çıkmıştır (http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/).

Öte yandan, 1900'lü yılların başlarında başlayan (örneğin, Russell, 1912) örten çift yıldızların ışık eğrisi analizleri ve fiziksel parametrelerinin belirlenmesi çalışmaları, gelişen teleskop ve alıcı (dedektör) teknolojilerinin yanında, gelişmiş bilgisayarlar ve oluşturulan yazılımlar yardımıyla önemli ilerlemeler göstermiştir. Örten çift yıldızların ışık eğrileri analizlerinde son yıllarda en çok kullanılan yazılımlara örnek olarak, ILOT (Budding ve Zeilik, 1987), Wilson-Devinney (Wilson ve Devinney, 1971), WINK (Wood, 1973), EBOP (Etzel, 1975), PHOEBE (Prsa ve Zwitter, 2005) ve JKTEBOP (EBOP yazılımının farklı bir versiyonu; Southworth vd., 2004a,b) verilebilir.

Örten çift yıldız sistemleri ile yıldız-ötegezegen sistemlerinde temelde problemlerin çok benzer olması, örten çift yıldızların ışık eğrileri analizlerinde kullanılan yazılımların, yıldız-ötegezegenlerin ışık eğrilerinin analizleri için de uyarlanabileceğini ortaya koymaktadır (örneğin JKTEBOP ve WinFitter yazılımları). JKTEBOP, EBOP yazılımından türetilmiş bir yazılım olup hem örten çiftlerin ışık eğrilerine hem de yıldız-ötegezegen sistemlerinin ışık eğrilerine uygulanabilmektedir (bkz. Southworth vd., 2004a,b; Wilson vd., 2006; Gimenez, 2006; Southworth vd., 2007; Southworth, 2008).

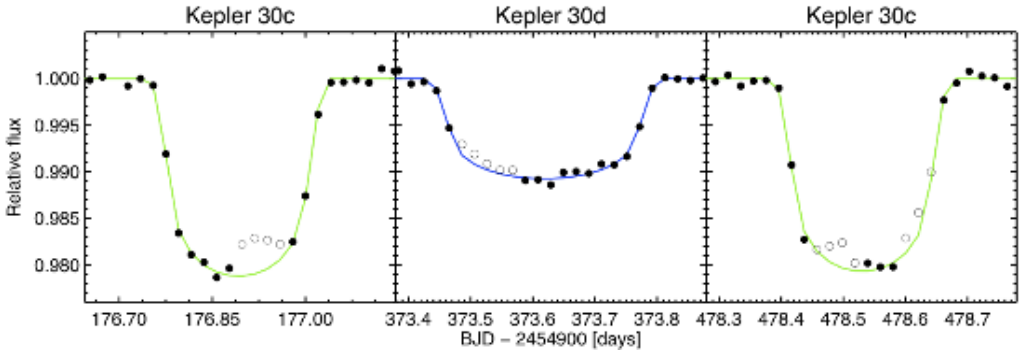
Proje çalışmasında geliştirilen WinFitter yazılımı, ILOT (ya da diğer adıyla CURVEFIT) yazılımından türetilmiş bir programdır. **ILOT** (**I**nformation **L**imit **O**ptimization **T**echnique), özellikle RS CVn türü çift yıldızlarda oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (bkz. Budding ve Zeilik, 1987). Aslında, ILOT, iki işleve sahiptir: (i) Ele alınan örten çift yıldızın ışık eğrisini çözmek ve (ii) Yıldız lekelerini modellemek. ILOT, ki-kare çözüm uzayında vektör analizi ve parabolik interpolasyonu kullanarak istatistik yöntemlerle en iyi fiti bulmayı amaçlar (bkz. Budding, 1977). Ayrıca, ki-kare çözüm uzayında optimal sonuç için Hessian yöntemiyle hata matrislerini hesaplar (Banks ve Budding, 1990a). ILOT'un ışıkölçümü konusunda uygulamaları çok geniştir; örneğin, Pluto'da gözlenen ışık değişimleri

için iki karanlık leke ILOT ile modellenmiştir (Banks ve Budding, 1990b). ILOT, çift yıldızların ışık eğrilerini modellerken yaklaşık 16 parametreye bağlı bir fit fonksiyonunu kullanır. Fit fonksiyonu, başlıca çift yıldızın yörüngesini (eğikliği, dışmerkezliği, ortalama ayrıklığı), sistemin bileşenlerinin ışıtmalarını, yarıçaplarını, sıcaklıklarını, kütle oranını, yakınlık etkilerini, kenar-kararma, çekim-kararması ve yansıma etkilerini, (eğer varsa) yıldız leke etkilerini ele alarak ışık eğrisini modeller.

Proje çalışması öncesinde ILOT programı, ötegezegenlerin geçiş (transit) ışık eğrilerini analiz etmek amacıyla **WinKepler** adı altında bir fit programına dönüştürülmüştür. WinKepler, 16 tane Kepler ötegezegen adayının geçiş ışık eğrilerine uygulanmıştır; sonuçlar, Rhodes & Budding (2014) tarafından yayına dönüştürülmüştür.

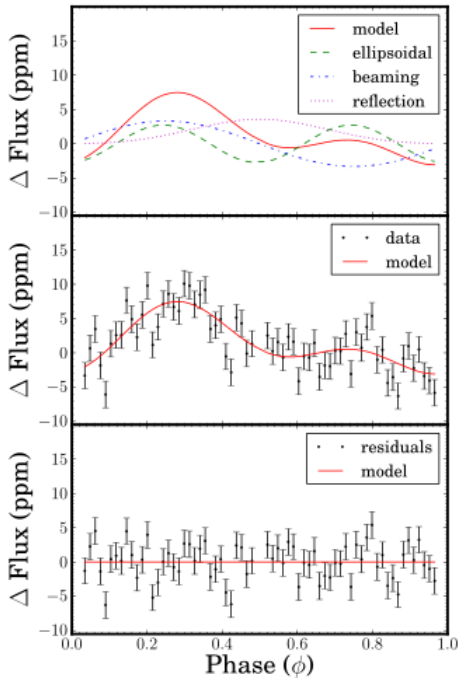
Öte yandan, Southworth (2008, 2009, 2010, 2011, 2012) tarafından yapılan bir seri çalışmada, 82 TLC analiz edilmiş, bulunan fotometrik çözümler ile literatürde yayınlanmış tayfsal yörünge çözümleri birleştirilerek, gezegenlerin geometrik ve fiziksel parametreleri elde edilmiştir. Analizlerde, JKTEBOP yazılımı kullanılırken, özellikle kenar-kararma yasası için farklı yaklaşımlarda (örneğin; lineer, ikinci dereceli, kareköklü, üçüncü dereceli vb kenar-kararma yasaları) çözümler denenmiştir. Başka yazarlar da kenar-kararma için farklı yaklaşımlar ele almışlar (örneğin, Mancini vd., 2013) ve kenar-kararma katsayıları için genellikle Claret (2004) ve Claret ve Bloemen (2011) tarafından verilen değerleri kullanmışlardır. CoRoT verilerinden, farklı dalgaboyları için değişken kenar-kararma katsayılarını dikkate alan ve bu parametreleri serbest bırakarak belirleyen bir çalışma da Borsa ve Poretti (2012) tarafından yapılmış ve yanlış kenar-kararma katsayılarının yanlış çözümler vereceğini belirmişlerdir. Yukarıda özetlenen çalışmalar, kenar-kararma etkisinin TLC analizlerindeki önemini ortaya çıkarmaktadır.

Ötegezegenlerin bağlı oldukları yıldızların %90'undan fazlası 6500 K'den daha soğuk yıldızlardır. Bu durumda, gezegenli ve konvektif zarflı olan bu yıldızlarda, manyetik etkinlik sonucunda ortaya çıkan soğuk leke etkilerini görmek mümkündür. Özellikle CoRoT ve Kepler ışık eğrilerinde yüksek duyarlık nedeniyle bu etkiler çalışılmaya başlanmıştır. Bu tür etkiler kısa dönemli ve küçük leke kaynaklı ise, tek bir geçiş gözleminde bile ortaya çıkarılabilmektedir. Ayrıca, TLC'nin içindeki leke değişiminin izlenmesi ve analizi ile gezegen eğim açısına ilişkin öngörüler de yapılabilmektedir (Sanchis-Ojeda & Winn, 2011; Sanchis-Ojeda vd., 2012). Şekil 2.1'de üç farklı geçiş ışık eğrisinde leke etkisi gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Üç farklı TLC'de leke etkisi (Sanchis-Ojeda vd., 2012).

Doppler far etkisi (Doppler beaming effect), yıldız-gezegen sisteminde, yıldızın yörünge hareketinde, yıldızın gözlemciye yaklaşması ve uzaklaşması ile ortaya çıkan parlaklık değişimi olarak özetlenebilir. Yıldızın yaklaşması sırasında parlaklığının artması, uzaklaştığında ise parlaklığının azalması beklenir. Doppler far etkisinin oluşturduğu parlaklık değişiminin genliği, sadece yıldızın dikine hız değişiminin genliğine değil aynı zamanda, gözlem yapılan dalgaboyu aralığına ve yıldızın tayf türüne de bağlıdır (bkz. Barclay vd., 2012). Bu etkinin somut olarak belirlendiği ve modellendiği ilk sistem, TrES-2 yıldız-gezegen sistemidir. Şekil 2.2'de, TrES-2 için, Doppler far etkisi ile birlikte, basıklık ve yansımanın neden olduğu ışık değişimleri gösterilmektedir. Doppler far etkisinin modellenmesi, gezegenin kütlesinin tahmin edilebileceği bağımsız bir yol olup, diğer yöntemlerle bulunan değerlerle karşılaştırma olanağını sağlar (örneğin Loeb ve Gaudi, 2003; Zucker vd., 2007; Barclay vd., 2012).



Şekil 2.2 TrES-2 yıldız-gezegen sisteminde, yakınlık etkilerinin (basıklık ve yansıma) ve Doppler far etkisinin neden olduğu ışık değişimleri ve onlara uygulanan kuramsal model (Barclay vd., 2012).

Güneş sisteminde gezegenlerin hemen hemen çember yörüngelerde yaklaşık aynı yörünge düzleminde aynı doğrultuda dolanmakta olduğu iyi bilinir. Bununla birlikte, gezegenler, güneş sisteminin ortak kütle merkezi etrafında tamamen bağımsız yörüngeler çizemezler, mutlaka birbirlerini çekimsel olarak etkilerler. Bu iyi bilinen olay, ötegezegen sistemlerinde de gözlenmelidir. Örneğin, Kepler uydusu tarafından, birden fazla örten gezegen adayı içeren 170 sistem keşfedilmiştir (Borucki vd., 2011). Bunun yanında, Kepler uydusu verileri ile önerilen 2300 gezegen adayından, 880'den fazlasının çoklu gezegen içerebileceği öngörülmektedir (Fabrycky vd., 2012). Birden fazla gezegen içeren sistemlerde gezegenlerin birbirlerini çekimsel olarak tedirgin etmesi, yörüngelerini dolayısıyla gezegen geçiş zamanlarını etkiler. Örten çift yıldızlardaki gözlenen minimum zamanları ile hesaplanan minimum zamanları arasındaki çevrimsel *O-C* farklarından, çoğu zaman, ışık-zaman etkisi ile bir üçüncü cismin çift yıldızı çekimsel olarak etkilediğinin belirlenişine benzer olarak; yıldız-ötegezegen sistemlerinde gözlenen geçiş zamanları ile hesaplanan geçiş zamanları farklarının analizi (TTV analizi), aynı yıldızın etrafında dolanan çoklu gezegenlere ilişkin bilgi verecektir. Bu yöntem, ötegezegen çalışmalarında, daha duyarlı analizler ile uygulanmaya başlanmış ve çoklu gezegen sistemlerinin araştırılmasında kullanılan, yaygın bir yöntem haline gelmiştir. *O-C* analizi ya da başka bir deyişle geçiş zamanı değişimlerinin analizi, ötegezegenlerde çoklu ötegezegen sistemlerinin varlığını ortaya koyar ve bulunan diğer cisimlerin kütlelerinin tahmin edilmesine imkan sağlar (örneğin Holman vd., 2005; Fabrycky vd., 2012). Şu ana kadar keşfedilen gezegenlerin büyük bölümü büyük kütleli gaz gezegenlerdir. Şu anda, daha çok, asıl amaçlardan olan, Güneş-benzeri yıldızlar etrafında yer-benzeri kayaç gezegenlerin keşifleri üzerine çalışmalar artmaya başlamıştır. Bu tür gezegenlerin neden olabileceği dikine hız değişimlerinin genliği birkaç 10 cm/s değerini geçemeyeceği için ve geçiş sırasındaki parlaklık değişimleri de bugünkü limitlerin altında kalacağından, bugünlerde çok kullanılan dikine hız yöntemi ve geçiş gözlemleri ile bu tür gezegenleri belirlemek pek kolay gözükmemektedir. Bu nedenle, yerin kütle ve yarıçapına yakın kayaç gezegenlerin belirlenmesinde başka yöntemler araştırılmaktadır. Bunlardan biri, TTV verisi üzerine yapılan zaman analizi yöntemidir. Bu yöntemi kullanarak, özellikle Kepler adayları ile ilgili uygulamalarda, bazı çoklu gezegenlerin varlığı TTV analizleri ile doğrulandı (örneğin, Lissauer vd., 2011). Yer tabanlı gözlemler kullanılarak da belirlenen geçiş zamanları ile daha önceki verilerin birleştirilmesi sonucu, TTV analizleri ile bazı çoklu gezegen sistemlerin varlığı da önerilmektedir (örneğin, WASP-10b için Maciejewski vd., 2011; WASP-5b için Fukui vd., 2011). Bu durumda, Kepler, CoRoT vb uydu verilerinin takibi ve aynı zamanda duyarlı yer tabanlı geçiş gözlemlerinden elde edilecek geçiş zamanlarının duyarlı analizleri, verilerin birikimiyle, daha önemli ve somut sonuçlar doğuracaktır.

3. GEREÇ ve YÖNTEM

3.1 Gözlemler

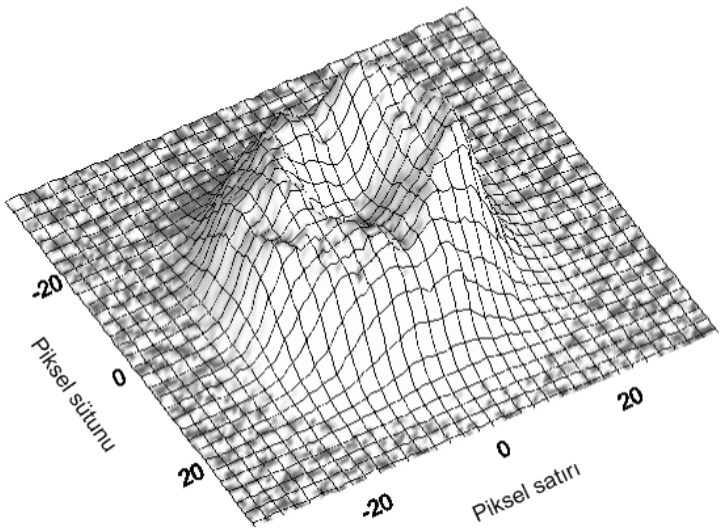
3.1.1 Yer-tabanlı Gözlemler (ÇOMÜG ve TUG Gözlemleri)

Proje çalışmaları çerçevesinde gözlem kriterlerine bağlı olarak seçilen ötegezegenlerin yer-tabanlı geçiş gözlemleri, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Gözlemevi (ÇOMÜG)'nde yer alan 122 cm (T122), 30 cm (T30) ve İstanbul Üniversitesi ortaklığı ile kurulan 60 cm (T60) ayna çaplı teleskoplar ile TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi (TUG)'ndeki 100 cm (TUG100) ayna çaplı teleskop kullanılarak yapılmıştır.

2012 yılı Mart ayında (proje öncesi çalışmalarla) başlayan ÇOMÜG ötegezegen gözlemlerinde; T122, T60 ve T30 teleskopları ile bu teleskoplara bağlı SBIG STL-1001E, Apogee Alta U42 CCD (AP42) ve Apogee Alta U47 CCD (AP47) alıcıları kullanılmıştır. SBIG STL-1001E CCD kamerasında, alıcı yongası, her biri 24×24 μm boyutlu toplamda 1024×1024 pikselden oluşmakta ve yonga boyutu, 24.6×24.6 mm'dir. STL-1001E, odak uzaklığı 12200 mm olan T122 teleskobu için çözünürlüğü piksel başına 0.41″ olan 6.9′×6.9′ görüntü alanı (field of view) ve odak uzunluğu 4800 mm olan T60 teleskobu için çözünürlüğü piksel başına 1.03″ olan 17.5′×17.5′ görüntü alanı vermektedir. Apogee Alta U42 CCD kamerasında (AP42), alıcı yongası, her biri 13.5×13.5 μm boyutlu 2048×2048 pikselden oluşmakta olup, yonganın boyutu, 27.6×27.6 mm (764 mm^2)'dir. AP42, odak uzaklığı 12200 mm olan T122 teleskobu için çözünürlüğü 0.23″/piksel olan 7.8′×7.8′ görüntü alanı ve odak uzunluğu 4800 mm olan T60 teleskobu için çözünürlüğü 0.58″/piksel olan 19.8′×19.8′ görüntü alanı vermektedir. Yalnızca T30 teleskobunda kullanılan Apogee Alta U47 CCD kamerasında (AP47) ise; alıcı yongası, her biri 13×13 μm boyutlu 1024×1024 pikselden oluşmakta ve yonganın boyutu, 13.3×13.3 mm (177 mm^2) görüş alanına sahiptir. AP47, odak uzunluğu 3048 mm olan T30 teleskobu için çözünürlüğü piksel başına 0.88″ olan 15.0′×15.0′ görüntü alanı vermektedir.

TUG teleskobu T100'de, Spectral Instruments SI 1100 "Cryo-cooler" soğutmalı (-100 °C) CCD alıcı kuruludur. Alıcı yongası, her biri 15×15 μm boyutlu 4096×4037 pikselden oluşmaktadır. SI1100 CCD kamera, T100 için çözünürlüğü piksel başına 0.31″ olan 21.1′×20.8′ görüş alanı sunmaktadır.

Gözlemler, genelde, duyarlılıktan kaybetmemek amacıyla 1×1 binning, okuma süresinin uzaması durumunda ise 2×2 binning ile gerçekleştirilmiştir. Binning, bilindiği üzere, bitişik/komşu piksellere gelen yüklerin birleşmesine yol açarak, daha yüksek okuma hızına imkan tanır. Öte yandan, bir çok gözlem (kaynak hedefin akı sayımlarının 10000 ADU üzerinden alınabildiği durumlarda), "odak bozma tekniği" kullanılarak yapılmıştır. Southworth vd. (2009)'a göre odak-dışı görüntülerde rastlantısal hataları ve düz-alan düzeltmesinden gelen hataları azaltmak mümkündür. Odak bozma yöntemiyle; optik sistemin odağı, nokta kaynaktan halka kaynağa yaklaştırılarak bozulur (bkz. Şekil 3.1).



Şekil 3.1 TUG T100 teleskobuyla 12.11.2013 gözlem gecesinde hedef kaynak WASP-10'nun elde edilen odak-dışı üç boyutlu profil görüntüsü.

CCD görüntülerinin işlenmesinde, indirgenmesinde, gözlemlerde güneş sistemi merkezli zaman (BJD) düzeltmesinin yapılmasında ve fark fotometrisinin gerçekleştirilmesinde, AstroImageJ yazılımı kullanıldı. AstroImageJ, ve dahili programları, Collins ve Kielkopf (2013) tarafından çeşitli ImageJ algoritmalarının geliştirilmesiyle oluşturulan ve ImageJ üzerinde çalışan ek programlardan oluşmaktadır. Yazılım çalıştırıldıktan sonra, alınan çıktıda, gözleme ilişkin BJD zamanına karşılık akı veya parlaklık değişimi elde edilmektedir.

Görüntülerin arındırılması işleminde, alışılagelen sıfır-seviye akım (bias), kara-akımı (dark) ve düz-alan (flat) düzeltmeleri yapılmış, ancak düz-alan düzeltmesi, saçılmayı artırdığı durumlarda, boşlanmıştır. Özellikle takibin duyarlı olmadığı teleskoplarda düz-alan düzeltmesinin çoğunlukla saçılmayı arttırdığı görülmüştür. Southworth vd. (2015)'e göre hedef nesnenin komşu pikseller üzerinde küçük miktarlardaki hareketi, düz-alan düzeltmesini gerektirmemektedir. Büyük miktarlardaki yer değiştirme durumunda ise, alıcıdaki değişken aydınlanmanın etkisini giderebilmek için düzeltmeye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durumda T122 ve T60 teleskoplarında düzeltme yapılması önemliyken; oto-takibin bulunmadığı bu teleskoplarda, eğer homojen dağılımlı düz alan görüntüsü almak mümkün olamıyorsa, düz-alan düzeltmesi iyileştirme yerine görüntüyü bozmaktır. Sonuç olarak piksel duyarlılık farklılıklarının getireceği saçılma, düzeltmenin getireceği olası saçılmaya tercih edilmiştir.

Gözlemlerin indirgemesi, fark fotometrisiyle yapıldı. Mukayese olarak çoğunlukla görüntü çerçevesindeki hedeften daha parlak kaynak(lar) seçildi. Işıkölçümünde, hedef nesnelerin en büyük genişlikteki yarı yükseklik (FWHM) değerleri okunarak "çok mukayeseli değişen açıklık fotometrisi" uygulanmıştır. Işık eğrisinde saçılma olarak ortaya çıkan CCD alıcı gürültüsüne, "beyaz gürültü" denir. Öte yandan, hedef nesnelerin değişkenlikleri, atmosferik etkiler ve aletsel etkiler kaynaklı (sistematik) gürültülere, "kırmızı gürültü" denir. Özellikle sistematik gürültüleri meydana getiren aletsel etkilerin başında teleskobun hedef nesneleri iyi takip etmeyişi gelmektedir. Optik düzenekteki kusurlar, hedefin CCD çerçevesinde hareket etmesi, atmosferik sönümleme, saydamlık ve/veya hedef yıldız ile mukayese yıldız arasındaki renk farklılıkları nedeniyle; ışık eğrilerinde seviye değişimi ve/veya atlamalar ortaya çıkabilmektedir. Bu doğal olmayan değişim, gezegen geçişi dışında kalan noktalardan geçen bir doğru fiti kullanılarak düzeltilmiştir. Gözlemsel duyarlılık için; ışık eğrisinde gezegen geçişi dışında kalan gözlem verisi kullanılarak, standart sapma ($\sigma_{gözlem}$) hesaplanmıştır.

Proje çalışması boyunca TUG ve ÇOMÜG'de yapılan ötegezegen gözlemlerine ilişkin özet bilgi, Çizelge 3.1 ve 3.2'de verilmekte; ayrıca gözlemlerden elde edilen geçiş ışık eğrileri, Ek-1'de gösterilmektedir. TUG'da gözlem koşullarına bağlı olarak seçilen 22 ötegezegen, 42 gece gözlenmiş ve geçiş ışık eğrilerinin elde edilmesine çalışılmıştır (bkz. Çizelge 3.1 ve Ek-1). Öte yandan, ÇOMÜG'de 27 ötegezegen, 68 gece gözlenmiş ve geçiş ışık eğrilerinin elde edilmesine çalışılmıştır (bkz. Çizelge 3.2 ve Ek-1). Bu çizelgelerde, gözlenen ötegezegen sayısı, ötegezegenin adı, gözlem gecesi, gözlem başlangıç ve bitiş UT zamanı, kullanılan teleskop ve filtre bilgisi verilmektedir (TUG'da yalnızca T100 teleskobu kullanıldığından dolayı Çizelge 3.1'de teleskobun tekrar yazılmasına gerek duyulmamıştır). Ek-1'de ise gözlem ve fotometrik bilgilere ek olarak gözlem yöntemi (odak dışı olup olmadığı), toplama (binning) sayısı, poz süresi, başlangıç ve bitişteki hava kütlesi, nokta

sayısı, kullanılan mukayeseler, gözlem verisinin geçiş dışı standart sapması ve BJD biriminde geçiş ortası hesaplanan zaman ve hatası verilmektedir.

Çizelge 3.1 TUG ötegezegen fotometrik gözlemleri.

Sayısı	Adı	Tarih	Başlangıç - Bitiş (UT)	Filtre
1	CoRoT-2 b	06.08.2014	20:00 - 00:46	R Bessel
	CoRoT-2 b	21.08.2015	19:51 - 23:50	R Bessel
2	HAT-P-1 b	13.07.2016	20:15 - 00:59	R Bessel
3	HAT-P-3 b	23.02.2014	19:14 - 03:10	R Bessel
	HAT-P-3 b	25.04.2014	19:02 - 02:47	R Bessel
4	HAT-P-9 b	19.01.2015	16:40 - 21:30	R Bessel
5	HAT-P-10 b	23.11.2015	21:45 - 23:39	R Bessel
	HAT-P-10 b	07.11.2016	20:32 - 23:10	R Bessel
6	HAT-P-19 b	18.09.2015	19:42 - 22:29	R Bessel
	HAT-P-19 b	01.11.2015	17:57 - 23:03	R Bessel
7	HAT-P-28 b	04.10.2014	18:35 - 02:35	R Bessel
8	HAT-P-32 b	02.11.2015	18:18 - 03:08	VR Bessel
9	HAT-P-36 b	19.01.2015	21:45 - 03:30	R Bessel
	HAT-P-36 b	16.05.2015	18:30 - 01:10	R Bessel
10	HAT-P-37 b	22.09.2014	19:12 - 23:48	R Bessel
	HAT-P-37 b	17.04.2015	20:22 - 23:52	R Bessel
11	Qatar 1 b	14.06.2014	19:40 - 00:36	R Bessel
	Qatar 1 b	20.09.2014	20:08 - 01:52	R Bessel
	Qatar-1 b	15.05.2015	02:25 - 04:25	R Bessel
12	TrES-2 b	21.09.2014	17:44 - 23:23	R Bessel
	TrES-2 b	21.04.2016	22:03 - 01:49	R Bessel
13	TrES-3 b	15.06.2014	19:14 - 23:00	VR Bessel
	TrES-3 b	14.05.2015	21:18 - 01:32	R Bessel
	TrES-3 b	08.07.2015	18:56 - 20:37	R Bessel
	TrES-3 b	07.08.2015	18:40 - 00:00	R Bessel
	TrES-3 b	19.04.2016	20:20 - 02:00	R Bessel
14	TrES-5 b	09.07.2014	19:10 - 03:00	R Bessel
	TrES-5 b	28.07.2016	19:35 - 01:18	R Bessel
15	WASP-10 b	12.11.2013	00:12 - 03:00	R Bessel
	WASP-10 b	08.08.2015	18:30 - 01:20	VR Bessel
	WASP-10 b	15.11.2015	16:10 - 22:23	R Bessel
16	WASP-12 b	21.01.2015	17:50 - 02:00	R Bessel
17	WASP-3 b	10.07.2014	19:00 - 01:18	BVRI Bessel
18	WASP-33 b	04.11.2014	16:50 - 03:00	V Bessel
	WASP-33 b	25.08.2015	20:34 - 00:16	R Bessel
	WASP-33 b	05.09.2015	20:52 - 02:03	V Bessel
	WASP-33 b	16.09.2015	20:56 - 01:57	V Bessel
19	WASP-36 b	23.02.2016	17:36 - 23:20	R Bessel
20	WASP-50 b	13.11.2013	18:47 - 00:58	R Bessel
21	WASP-52 b	18.09.2015	22:50 - 01:18	R Bessel
22	WASP-103 b	15.05.2015	18:47 - 23:13	R Bessel
	WASP-103 b	27.05.2015	22:42 - 00:55	R Bessel

Çizelge 3.2 ÇOMÜG ötegezegen fotometrik gözlemleri.

Sayısı	Adı	Tarih	Başlangıç - Bitiş (UT)	Teleskop + CCD	Filtre
1	CoRoT-1 b	22.12.2014	21:53 - 01:11	T122+STL1001E	R Bessel
2	CoRoT-2 b	14.06.2015	20:24 – 00:34	T122+STL1001E	R Bessel
3	HAT-P-5 b	03.05.2012	21:35 - 02:08	T60+AP42	R Bessel
4	HAT-P-12 b	05.04.2016	20:07 - 23:34	T60+AP42	R Bessel
5	HAT-P-18 b	30.03.2014	20:54 - 01:51	T60+AP42	R Bessel
6	HAT-P-36 b	22.04.2012	23:21 - 02:30	T60+AP42	VR Bessel
	HAT-P-36 b	18.04.2015	20:30 - 02:05	T122+STL1001E	R Bessel
	HAT-P-36 b	23.01.2016	22:40 – 02:42	T60+AP42	R Bessel
	HAT-P-36 b	08.02.2016	21:13 – 01:16	T60+AP42	R Bessel
	HAT-P-36 b	28.03.2016	22:39 – 02:44	T60+AP42	R Bessel
	HAT-P-36 b	03.05.2016	20:10 – 00:13	T60+AP42	R Bessel
	HAT-P-36 b	07.05.2016	19:54 – 01:23	T60+AP42	R Bessel
	HAT-P-36 b	15.05.2016	18:58 – 00:45	T60+AP42	R Bessel
7	HAT-P-37 b	21.03.2012	00:08 - 03:33	T60+AP42	VR Bessel
	HAT-P-37 b	05.05.2012	18:41 - 22:08	T60+AP42	R Bessel
	HAT-P-37 b	04.06.2016	19:34 - 00:01	T60+AP42	R Bessel
8	HD 189733 b	07.08.2012	21:30 - 01:20	T60+AP42	BV Bessel
	HD 189733 b	28.06.2014	20:20 - 00:50	T122+AP42	R Bessel
	HD 189733 b	18.07.2014	19:29 - 23:55	T60+AP42	R Bessel
9	Kepler-17 b	16.06.2013	20:12 - 00:32	T122+AP42	V Bessel
10	Qatar 1 b	07.08.2012	20:40 - 01:27	T60+AP42	VR Bessel
	Qatar 1 b	01.07.2014	20:06 - 00:50	T122+AP42	R Bessel
	Qatar 1 b	28.07.2014	23:34 - 00:55	T122+AP42	R Bessel
	Qatar 1 b	30.09.2014	17:56 - 23:05	T60+STL1001E	R Bessel
	Qatar-1 b	04.08.2015	20:38 - 00:42	T122+STL1001E	R Bessel
	Qatar-1 b	03.11.2015	17:23 - 23:43	T60+AP42	R Bessel
	Qatar-1 b	13.11.2015	16:21 - 21:15	T60+AP42	R Bessel
	Qatar-1 b	20.11.2015	17:35 - 00:05	T60+AP42	R Bessel
	Qatar-1 b	27.04.2016	21:30 – 00:22	T60+AP42	R Bessel
	Qatar-1 b	03.08.2016	19:21 - 00:05	T60+AP42	R Bessel
11	Qatar-2 b	11.04.2013	20:45 - 01:00	T122+AP42	R Bessel
12	TrES-2 b	08.06.2012	18:53 - 20:52	T122+AP42	R Bessel
	TrES-2 b	10.07.2012	19:50 - 00:40	T60+AP42	VR Bessel
	TrES-2 b	13.05.2014	20:10 - 00:00	T30+AP47	R Bessel
	TrES-2 b	24.06.2014	20:25 - 00:40	T60+AP42	R Bessel
	TrES-2 b	18.08.2015	23:58 – 03:39	T60+AP42	R Bessel
13	TrES-3 b	03.06.2012	21:42 - 01:32	T122+AP42	VR Bessel
	TrES-3 b	03.06.2012	21:43 - 01:51	T60+AP42	R Bessel
	TrES-3 b	07.06.2012	20:51 - 23:44	T122+AP42	VR Bessel
	TrES-3 b	23.04.2013	20:49 – 23:42	T122+AP42	R Bessel
	TrES-3 b	27.05.2013	20:14 - 23:24	T122+AP42	R Bessel
	TrES-3 b	13.07.2013	19:50 - 01:12	T122+AP42	VR Bessel
	TrES-3 b	02.07.2014	19:40 - 23:15	T122+AP42	R Bessel
	TrES-3 b	18.08.2014	19:16 – 23:08	T30+AP47	R Bessel
	TrES-3 b	30.06.2015	22:33 - 01:00	T122+STL1001E	R Bessel
	TrES-3 b	14.05.2015	21:15 - 01:27	T122+STL1001E	R Bessel
	TrES-3 b	24.08.2015	18:30 - 22:50	T60+AP42	R Bessel
	TrES-3 b	29.03.2016	21:27 - 03:02	T60+AP42	R Bessel

Çizelge 3.2 ÇOMÜG ötegezegen fotometrik gözlemleri (devam)

Sayısı	Adı	Tarih	Başlangıç - Bitiş (UT)	Teleskop + CCD	Filtre
14	TrES-5 b	29.06.2013	20:29 - 23:30	T122+AP42	R Bessel
	TrES-5 b	27.05.2014	21:25 - 01:20	T60+AP42	R Bessel
15	WASP-1 b	05.12.2015	17:05 - 23:26	T60+AP42	R Bessel
16	WASP-2 b	18.07.2013	19:45 - 01:00	T60+AP42	VR Bessel
	WASP-2 b	15.08.2013	19:10 - 00:26	T30+AP47	VR Bessel
	WASP-2 b	23.06.2014	20:20 - 00:37	T60+AP42	R Bessel
17	WASP-3 b	11.06.2012	20:16 - 00:00	T122+AP42	VR Bessel
	WASP-3 b	24.08.2015	23:02 - 01:03	T60+AP42	R Bessel
18	WASP-10 b	12.11.2013	18:53 – 22:17	T30+AP47	R Bessel
	WASP-10 b	13.12.2012	18:32 - 22:24	T60+STL1001E	R Bessel
19	WASP-12 b	14.01.2016	17:00 - 00:00	T60+AP42	R Bessel
20	WASP-33 b	28.10.2013	17:44 - 01:28	T60+AP42	RI Bessel
21	WASP-43 b	03.05.2013	19:00 - 22:32	T122+AP42	R Bessel
22	WASP-52 b	06.12.2015	17:57 - 22:40	T60+AP42	R Bessel
23	WASP-77 b	23.09.2014	21:00 - 02:16	T60+STL1001E	R Bessel
24	WASP-103 b	15.06.2016	20:27 - 00:58	T60+AP42	R Bessel
25	WASP-104 b	01.04.2016	19:13 - 20:47	T60+AP42	R Bessel
26	XO-1 b	30.03.2016	19:51 - 23:50	T60+AP42	R Bessel
27	XO-5 b	14.01.2013	17:21 - 22:25	T60+STL1001E	VR Bessel, Filtresiz
	XO-5 b	01.03.2013	17:51 - 23:55	T60+STL1001E	VR Bessel

3.1.2 Kepler Uydusu Gözlemleri

Kepler Uzay Teleskobu'nun ana hedefi, fotometrik yöntemle ötegezegen keşfi yapmaktır (Borucki vd., 1997). Ancak, *Kepler* teleskobunun Aralık 2009'da başlayan gözlemleri, Ağustos 2013'te teknik nedenlerle durdurulmak zorunda kalınmıştır. *Kepler* teleskobu, ilk görevi sonlanana kadar Kuğu, Çalgı, Ejderha takımyıldızları arasında 10°.2×10°.2'lik sabit bir bölgeyi izlemekteydi. *Kepler* teleskobuyla Kasım 2013 tarihi itibariyle *K2* adını verdikleri, uydunun kalan teknik imkanlarını kullanarak 3 ayda bir, farklı bir gözlemsel alana yöneleceği yeni bir gözlem sürecine başlanmıştır.

Kepler teleskobu ile alınan veriler, değerlendirilerek, gözlediği ışık eğrileri içinden gezegen geçişi göstermeye aday olanlar, *Kepler Object of Interest* (KOI) olarak sınıflandırılmaktadır. KOI listesi (http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/cgi-bin/TblView/nph-tblView?app=ExoTbls&config=cumulative), *Kepler* ile gözlenen ~150.000 yıldızın kataloğundan (Kepler Input Catalog: KIC) seçilmektedir. Seçim, Transiting Planet

Search (TPS) geçiş bulma modülü ile yapılmaktadır. Bu modülün Threshold Crossing Event (TCE) algoritması, işleme aldığı herhangi bir gözlemsel ışık eğrisinin tamamını, 7.1σ düzeyinin üzerinde bir yapı aramak üzere taramakta; sonrasında belirlenen dönemlere göre evrelendirip, bir veya birden fazla geçiş benzeri değişimi tanımlamaktadır (Batalha vd., 2010; Jenkins vd., 2010).

KOI listesine eklenen tüm hedefler doğrulama süreçleri tamamlanana kadar NOT DISPOSITIONED etiketiyle listede tutulmaktadır. Bu süreçte, eğer ışık eğrisinin tüm fotometrik öğeleri bir geçiş eğrisi değişimiyle uyumluysa CONFIRMED etiketiyle onaylanana kadar CANDIDATE etiketini alır; eğer geçiş benzeri değişim gösteren bir adayın gezegen olduğu doğrulanmazsa, aday KOI listesinde FALSE POSITIVE etiketiyle yer almaktadır. FALSE POSITIVE etiketli verilerin çoğunlukla ayrıklıkları çok fazla olan örten çift yıldızlardan geldiği düşünülmektedir.

Kepler teleskobu ile şimdiye kadar 575'i çoklu sistem olmak üzere, 3400'ün üzerinde doğrulanmış ötegezegen ve 4500'ün üzerinde doğrulanmayı bekleyen gezegenli sistem keşfedilmiştir. Teleskobun fotometrik duyarlılığı, V = 12 kadir bir yıldız için 6.5 saatlik bir sürede milyonda 20'den daha az olarak verilmiştir (Batalha, 2014). *K2* için bu duyarlılık, aynı koşullar altında ~ milyonda 300'e düşmüştür (Howell vd., 2014). *K2*'de gözlenebilen cisim sayısı ~10.000'dir.

Kepler uydu verilerine Nasa Exoplanet Archive (NEA)'dan doğrudan zaman serisi haliyle ulaşılabilmektedir. Öncelikle 54.2 saniyelik poz süreleriyle alınan kısa aralıklı (Short Cadence – SC) gözlem verileri tercih edilmiştir. Uzun aralıklı gözlem (Long Cadence – LC) verilerinde süre aralığı ise 1626 saniye ya da ~30 dakika'dır. *Kepler* veri tabanında ayrıca geçiş parametrelerinin TCE (Threshold Crossing Events) algoritmasıyla hesaplanmış değerleri de yer almaktadır (Twicken vd., 2016). Proje çalışmasında, NEA veritabanı kullanılarak ışık eğrileri alınan ve çözümleri yapılan *Kepler* gezegenleri listesi, Çizelge 3.3'te verilmektedir.

Çizelge 3.3 Proje çalışmasında kullanılan *Kepler* ötegezegen gözlemleri.

Ötegezegen Adı	Gözlem Çeyreği ve Veri Türü	Başlangıç - Bitiş (BJD – 2454833+)
Kepler-1b	0 – 2, 4 – 7, 9 – 11, 13 – 15, 17 SC	121 – 258, 352 – 720, 809 – 1098, 1183 – 1471, 1559 – 1591
Kepler-91b	1 – 17 LC	148 – 1575

3.2 WinFitter (Işık Eğrisi Analizi Yazılımı)

WinFitter yazılımı, önceden sözü edildiği üzere, ki-kare (χ^2) algortimasını (Budding ve Najim, 1980; Budding ve Zeilik, 1987) içerir. Algoritmada en iyi fit edilen model, en küçük ki-kare değerine karşılık gelen model olarak alınır. Burada, ki-kare (χ^2),

$$\chi^2 = \sum \frac{(l_{o,i} - l_{c,i})^2}{\Delta l_i{}^2} \qquad (3.1)$$

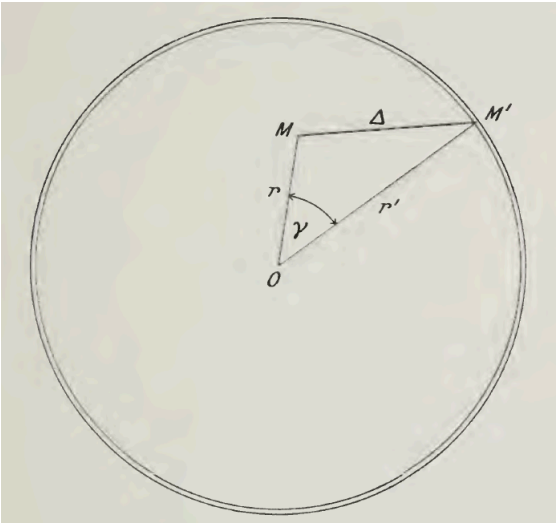
olarak tanımlanır (Bevington, 1969). Burada, $l_{o,i}$ ve $l_{c,i}$, herhangi bir evrede gözlenen ve hesaplanan ışık akı değerleridir; Δl_i gözlemsel $l_{o,i}$'nin hata değeridir. WinFitter yazılımında, en küçük ki-kare değerini bulmak için yapılan iterasyonlarda, serbest bırakılan parametrelerde eşzamanlı iyileştirmeyi bulmak için Marquardt-Levenberg yöntemi kullanıldı. Bu yöntemle ki-kare çözüm uzayında optimal sonuç için Hessian hata matrisleri hesaplanır. En iyi çözüm için χ^2/ν değeri kullanılır ve 1'e yakın olması beklenir (ki burada ν, iterasyonda serbest bırakılan parametre sayısıdır).

WinFitter, Kopal (1959)'un klasik yaklaşımını takip ederek, çekimsel olarak birbirine bağlı iki nesnenin (bir çift yıldız sistemi ya da bir yıldız-gezegen sistemi) ışık eğrisini modeller. İlk adımda, eşpotansiyel yüzey tanımları kullanılarak, dönme (rotation) ve gel-git (tidal) tedirginlikleri altında bozunmuş cismin biçimi ele alınır. Eşpotansiyel yüzeyleri tanımlamak için küresel harmonik seriler kullanılır. Küresel harmonik serilerde terimlerin katsayılarını hesaplamak için Clairaut teoremi (bkz. Pressley, 2001) izlenir. Öte yandan dönme ve gel-git altında bozunmuş biçim hesabında Kopal (1959) tarafından Radau denklemi adı verilen 1. mertebeden diferansiyel denklemin nümerik açılımı kullanılır.

Bir çift sistemin bileşenlerin birinde, Şekil 3.2'de verildiği biçimde, M' küresel katmanın içerisinde herhangi bir *M* noktasında bulunan birim kütle için toplam potansiyel enerji fonksiyonu aşağıdaki biçimde yazılabilir (Kopal, 1959):

$$\Psi = U + V + V' \qquad \text{... (3.2)}$$

Burada, *U*, gözönüne alınan birim kütleye etkiyen iç kuvvetlerin oluşturduğu iç potansiyel enerji fonksiyonunu, *V*, dış kuvvetlerin oluşturduğu dış potansiyel enerji fonksiyonunu ve V', tedirgin edici iç/dış kuvvetlerin potansiyel enerji fonksiyonunu göstermektedir.



Şekil 3.2 ρ yoğunluklu, *P* basıncına sahip, kararlı/denge durumundaki r' yarıçaplı küresel akışkan bir katman (Kopal, 1959).

Şekil 3.2'de verildiği biçimde, M' küresel katmanın içerisinde herhangi bir *M* noktasında bulunan birim kütle için iç potansiyel enerji fonksiyonu,

$$U = G \int \frac{dm'}{R} \qquad \text{... (3.3)}$$

ile verilir; ki burada *G*, evrensel çekim sabitidir. dm' kütle elemanı (ya da test kütlesi) için, ρ yoğunluk olmak üzere, küresel koordinatlarda

$$dm' = \iiint \rho r'^2 dr' \sin\theta' \, d\theta' d\phi' \quad \text{... (3.4)}$$

ifadesi yazılabilir. *M* ve M' arasındaki *R* uzaklığı,

$$R^2 = r^2 + r'^2 - 2rr' \cos\gamma \quad \text{... (3.5)}$$

biçiminde verilirken; γ açısı için

$$\cos\gamma = \cos\theta \cos\theta' + \sin\theta \sin\theta' \cos(\phi - \phi') \quad \text{... (3.6)}$$

ifadesi yazılır. Burada, r' terimine göre integral alınırken, gözönüne alınan herhangi bir M noktası için θ' ve ϕ' terimleri sabit kalacağından dolayı, r' teriminin türevi, yalnızca herhangi bir a uzaklığına bağlı olur:

$$dr' = \frac{\partial r'}{\partial a} da \quad \text{... (3.7)}$$

Öte yandan, M' küresel katmanı, bir eşpotansiyel yüzey olarak düşünülürse; bu eşpotansiyel yüzeyin yarıçapı,

$$r' = a\left\{1 + \sum_{j=2}^{\infty} Y_j^i(a, \theta', \phi')\right\} \quad \text{... (3.8)}$$

olarak verilebilir (Kopal, 1959). Burada, a, ele alınan eşpotansiyel yüzeyin ortalama yarıçapı; Y_j^i, katmanın ideal küresel biçimden sapma miktarını temsil eden izometrik (tesseral) harmoniklerdir. Buna göre, denklem (3.3)'te verilen iç enerji fonksiyonu için, $P_n(\cos\gamma)$ Legendre polinomları ve üstteki tanımlamalar ve gerekli düzenlemeler yapılırsa, aşağıdaki denklem elde edilir (Kopal, 1959):

$$U = U_0 + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{4\pi G r^j}{2j+1} \int_{a_0}^{a_1} \rho \frac{\partial}{\partial a}\left(a^{2-j} Y_j^i\right) da \quad \text{... (3.9)}$$

Burada, U_0,

$$U_0 = 4\pi G \int_{a_0}^{a_1} \rho a da \quad \text{... (3.10)}$$

formuna sahiptir.

Gözönüne alınan $M(a,\theta,\phi)$ noktasındaki V dış potansiyelin yazılışı, U'nun bulunuşuna çok benzer ve *a*'nın bir fonksiyonu olarak aşağıdaki biçimde yazılabilir (Kopal, 1959):

$$V = G\frac{m_0}{r} + \sum_{j=2}^{\infty} \frac{4\pi G}{(2j+1)r^{j+1}} \int_0^{a_0} \rho \frac{\partial}{\partial a}\left(a^{j+3} Y_j^i\right) da \qquad \text{... (3.11)}$$

Denklemde verilen m_0 kütlesi,

$$m_0 = 4\pi \int_0^{a_0} \rho a^2 da \qquad \text{... (3.12)}$$

ifadesine sahiptir.

Şimdi, gözönüne alınan $M(a,\theta,\phi)$ noktasındaki için, tedirgin edici V' potansiyeli, $P_i^j(\theta,\phi)$ yüzey harmonikleri cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir (Kopal, 1959):

$$V' = \sum_{i,j} c_{i,j} r^j P_j^i(\theta,\phi) \qquad \text{... (3.13)}$$

Burada, $c_{i,j}$, tedirginliğin nedenlerine bağlı olan katsayılardır/sabitlerdir.

Sonuç olarak, herhangi bir $M(a,\theta,\phi)$ noktasına etkiyen tüm kuvvetlerin Ψ toplam potansiyel enerji fonksiyonu, $\Psi = \mathrm{U} + \mathrm{V} + \mathrm{V}'$ tanımında, denklem (3.9), (3.11) ve (3.13) kullanılarak, aşağıdaki biçimde elde edilir (Kopal, 1959):

$$\Psi = U_0 + \frac{V_0}{r} + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{4\pi G r^j}{2j+1} \int_0^{a_1} \rho \frac{\partial}{\partial a}\left(a^{2-j} Y_j^i\right) da + \sum_{j=2}^{\infty} \frac{4\pi G}{(2j+1)r^{j+1}} \int_0^{a} \rho \frac{\partial}{\partial a}\left(a^{j+3} Y_j^i\right) da + \sum_{i,j} c_{i,j} r^j P_j^i(\theta,\phi) \qquad \text{... (3.14)}$$

Burada, $r = a\{1 + \sum Y_j^i\}$ uzaklıkları boyunca eşit basınçlı veya eşit yoğunluklu yüzeyler üzerinde Ψ toplam potansiyelinin sabit kalabilmesi için (yani, eşpotansiyel yüzeylerin hesaplanabilmesi için), Ψ denklemindeki tüm j terimini içeren katsayıların sıfıra eşit olması gerekir. Denklem (3.14)'teki tüm j terimini içeren katsayıların sıfıra eşit olması ancak ve ancak aşağıda verilen denklem sağlanırsa gerçekleşebilir (Kopal, 1959):

$$Y_j^i \int_0^a \rho a^2 da - \frac{1}{(2j+1)a^j} \int_0^a \rho \frac{\partial}{\partial a}\left(a^{j+3} Y_j^i\right) da - \frac{a^{j+1}}{2j+1} \int_0^{a_1} \rho \frac{\partial}{\partial a}\left(a^{2-j} Y_j^i\right) da = \frac{c_{i,j}}{4\pi G} a^{j+1} P_j^i(\theta, \phi)$$

... (3.15)

Aslında, denklem (3.15), literatürde **Clairaut denklemi** olarak bilinir. Clairaut denklemi, tedirgin edilen/bozunan bir cismin eşpotansiyel yüzeylerinin "izometrik (tesseral) Y_j^i harmoniklerinin" kullanılarak hesaplanabileceğini göstermektedir.

Şimdi, denklem (3.15)'in her iki tarafını öncelikle a^j ile çarpalım sonra a ya göre diferansiyelini alalım ve sonra da a^{2j}'ye bölelim. Bu durumda aşağıdaki denklem elde edilmiş olacaktır:

$$\left\{ j \frac{Y_j^i}{a^{j+1}} + \frac{1}{a^j} \frac{\partial Y_j^i}{\partial a} \right\} \int_0^a \rho a^2 da - \int_a^{a_1} \rho \frac{\partial}{\partial a}\left(\frac{Y_j^i}{a^{j-2}}\right) da = \frac{c_{i,j}}{4\pi G} (2j+1) P_j^i(\theta, \phi)$$

... (3.16)

Yukarıdaki denkleme dikkat edilirse; eşitliğin sol tarafındaki ikinci integral, sınır durumunda, (yani $a = a_1$ için) sıfıra eşit olur. Eşitliğin sol tarafındaki ilk integral ise, yine sınır durumunda, bozunan cismin yüzeyini verir (Kopal, 1959):

$$\int_0^{a_1} \rho a^2 da = \frac{m_1}{4\pi} \quad \text{... (3.17)}$$

Bu denklem, bozunan cismin biçiminin, gerçekte, $0 \le a \le a_1$ aralığında, $\rho(a)$ yoğunluk dağılımına, dolayısıyla cismin iç yapısına kuvvetle bağlı olduğunu göstermektedir.

Denklem (3.16)'yı $a = a_1$ için ele alır ve gerekli düzenlemeler yapılırsa;

$$Y_j^i(a_1) = c_{i,j}\, \Delta_j \frac{a_1^{j+1}}{G m_1} P_j^i(\theta, \phi) \quad \text{... (3.18)}$$

elde edilir ki denklemdeki Δ_j katsayıları

$$\Delta_j = \frac{2j+1}{j + \eta_j(a_1)} \quad \text{... (3.19)}$$

ifadesine eşittir. Buradaki $\eta_j(a_1)$ türev fonksiyonu ise

$$\eta_j(a) = \frac{a}{Y_j^i} \frac{\partial Y_j^i}{\partial a} = a \frac{\partial \ln Y_j^i}{\partial a} \quad \text{... (3.20)}$$

olarak tanımlanır.

Öte yandan, iç yapının etkilerini net görmek için, denklem (3.15)'in a'ya göre türevi alınır ve gerekli düzenlemeler yapılırsa;

$$a^2 \frac{\partial^2 Y_j}{\partial a^2} + 6\frac{\rho}{\bar{\rho}}\left(a\frac{\partial Y_j}{\partial a} + Y_j\right) = j(j+1)Y_j \quad \text{... (3.21)}$$

olur ki burada,

$$\bar{\rho} = \frac{3}{a^3}\int_0^a \rho a^2 da \quad \text{... (3.22)}$$

denklemi, ortalama yoğunluğun a'ya bağlı olduğunu ifade eder.

Bozunmuş cismin biçiminin "*Y* harmoniklerinin logaritmik türevi" ile "iç yapısına (yani, $\frac{\rho}{\bar{\rho}}$ oranına)" bağlı olduğunu göstermek için; denklem (3.20)'de tanımlanan $\eta_j(a)$ türev fonksiyonu, denklem (3.21)'de kullanılırsa;

$$a\frac{d\eta_j}{da} + 6\frac{\rho}{\bar{\rho}}\left(\eta_j + 1\right) + \eta_j\left(\eta_j - 1\right) = j(j+1) \quad \text{... (3.23)}$$

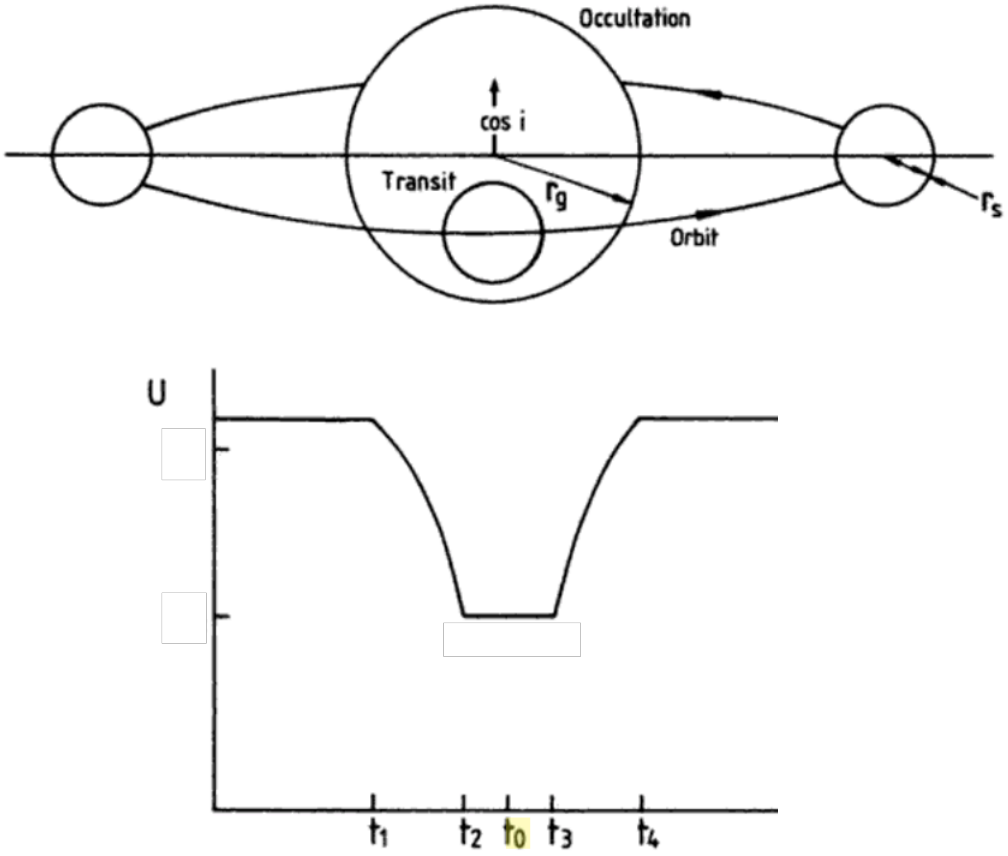
Kopal (1959)'un **Radau denklemi** adını verdiği ifade elde edilir. Radau denklemindeki bağımlı değişken, η_j, cismin (yıldız ya da Jüpiter benzeri gezegenin) iç yoğunluk dağılımını temsil etmektedir. Clairaut denkleminde ya da Radau denkleminde tanımlanan Δ_j katsayıları (ya da literatürde sık kullanılan anlamda k_j katsayıları), yıldız iç yapı parametreleri olarak bilinir ve $\Delta_j = 1$ eşitliği, bizi, Roche modeline götürür (Kopal, 1959). Δ_j katsayılarının sayısal değerleri, İnlek ve Budding (2012) tarafından, modern yıldız modelleri kullanılarak hesaplanmış ve tartışılmıştır.

WinFitter yazılımında, gözlemsel ışık eğrisi fit edilirken, alınan temel yaklaşım, aşağıda verilmiştir:

Gözlemsel ışık eğrisi ≡ "küresel model ışık eğrisi" + "bozucu etkiler".

... (3.24)

Konuya basit yaklaşımla girmek için; oluşturdukları ortak kütle merkezi etrafında dairesel yörüngelerde hareket eden küresel yapıda iki cisim (örneğin yıldız + gezegeni) ele alalım. Sistemin basit geometrisi, Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Burada; *U*, ışık eğrisinin tutulmalar dışındaki ışık düzeyinin ortalama değeri; *L*, bir bileşenin ışıtması; *r*, bir bileşenin (bileşenlerin merkezleri arası uzaklık cinsinden) kesirsel yarıçapı; *i*, yörünge eğikliği; θ, yörünge evre açısı ve Λ, belli bir evre aralığında sabit kalan ışık düzeyi olarak tanımlanır.



Şekil 3.3 Basit yaklaşımda bir çift sistem (yıldız + gezegeni vb.) ve ışık eğrisi (Budding ve Demircan, 2007).

Gezegen geçişinin sağ-el dik koordinat sisteminin (x, y, z) başlangıcında olduğunu ve z eksenin bakış doğrultusunda olduğunu kabul edelim. Böylece, gezegenin koordinatları için;

$$x = \sin\theta$$

$$y = -\cos\theta\cos i$$

yazılır. Buradan, iki cismin merkezleri arasındaki uzaklığın gökyüzü küresi üzerindeki izdüşümü,

$$\delta^2 = \sin^2\theta\sin^2 i + \cos^2 i \qquad \text{... (3.25)}$$

olarak bulunur. Yörünge evre açısı, basitçe, gezegenin yörünge dolanma dönemi *P*, geçiş orta zamanı t_0 ve herhangi bir zaman *t* olmak üzere, $\theta = 2\pi(t - t_0)/P$ formülü kullanılarak hesaplanabilir.

Öte yandan, gezegen geçişinin ortasında, yıldız ve gezegenin merkezleri arasındaki izdüşüm uzaklığa "geçiş (veya etki) parametresi" denir ve basık ve çember yörüngeler için

$$b = \frac{a}{R_*}\cos i\,\frac{1-e^2}{(1+e\sin\omega)} \qquad \text{... (3.26)}$$

ifadesiyle bulunur. Geçiş derinliği için, basitçe,

$$\Lambda_{tr} = \frac{L_{geçiş\ dışı} - L_{geçiş\ ortası}}{L_{geçiş\ dışı}} = \frac{R_g^2}{R_*^2} \qquad \text{... (3.27)}$$

yazılır; burada, *k* yarıçaplar oranı,

$$k = \frac{R_g}{R_*} = \frac{r_g}{r_*} = \sqrt{\Lambda_{tr}} \qquad \text{... (3.28)}$$

olarak tanımlanır.

Eğer bileşenler arası ayrıklık, *d*, (örtülen) yıldızın kesirsel yarıçapı cinsinden $d = \delta/r_1$ olarak tanımlanırsa; gezegenin geçişi sırasında yıldızın kesirsel ışık kaybı, α = α (*u*, *k*, *d*) olacaktır. Böylece, **küresel modelde ışık eğrisinin temel denklemi** için

$$l(\phi) = U - L_*\alpha\big(u, k, d(\phi)\big) \qquad \text{... (3.29)}$$

ifadesi yazılabilir (Budding ve Demircan, 2007). Bileşenler arası uzaklık *d*'nin yörünge evresi ϕ'ye bağlılığı, δ'dan ve denklem (3.25)'ten kaynaklanmaktadır. Denklem (3.29)'daki α fonksiyonu için, Kopal (1959) tarafından tanımlanan, α-integralleri kullanılır.

WinFitter yazılımında, denklem (3.24) ile verilen temel yaklaşımda, gözlemsel ışık eğrisini fit etme fonksiyonunda, bozucu etkileri tanımlarken; tutulma (eclipse) dışı evrelerde, yakınlık etkileri, küresel yapıdan sapmalar ("**basıklık etkisi**") ve ışınımsal etkileşmeler ("**yansıma etkisi**") olmak üzere iki kısımda ele alınır:

Basıklık etkisinde; çift sistemin bileşenlerinin "gel-git (tidal) + dönme (rotational)" kaynaklı küresel yapıdan sapmadan (elipsoit biçiminden) kaynaklanan ışık değişimleri, kenar kararmayı içermeyen $\Delta\mathcal{L}_0$ terimi ile kenar kararmayı içeren $\Delta\mathcal{L}_1$ teriminin lineer toplamı olarak kurgulanabilir (Budding vd., 2016b):

$$\Delta\mathcal{L}_0 = \left(2 + \frac{\Omega_{12}}{4}\right) P_2(\nu)v_2/3 - \left(2 + \frac{\Omega_{12}}{4}\right) P_2(\lambda)w_2 + \left(1 + \frac{\Omega_{14}}{24}\right) P_4(\lambda)w_4/8$$

ve

$$\Delta\mathcal{L}_1 = \left(8 + \frac{4\Omega_{22}}{5}\right) P_2(\nu)v_2/9 - \left(8 + \frac{4\Omega_{22}}{5}\right) P_2(\lambda)w_2/3 - \left(3 + \frac{\Omega_{23}}{6}\right) P_3(\lambda)w_3/2 \quad \text{... (3.30)}$$

Sonuçta, tutulma dışında, elipsoit biçimden kaynaklanan ışık değişimi için, denklem, lineer toplamda, *u* kenar-kararma katsayısı olmak üzere:

$$\Delta\mathcal{L}_E = 3[(1 - u)\Delta\mathcal{L}_0 + u\Delta\mathcal{L}_1]/(3 - u) \quad \text{... (3.31)}$$

ifadesi yazılır (Budding vd., 2016b). Burada Ω terimleri,

$$\Omega_{ij} = (1 + \eta_j)\tau_\lambda - j(i + 1) - 2 \quad \text{... (3.32)}$$

ifadesiyle tanımlanır ki τ_λ çekim-kararma katsayısı, *i* kenar-kararma indeksidir (kenar-kararma olmadığında *i*=0, doğrusal/kosinüslü yasa için *i*=1, ikinci dereceden kosinüslü yasa için *i*=2 vb.) ve j ilgili küresel harmoniğin mertebesini göstermektedir. Legendre polinomları, $P_j(\lambda)$ ve $P_j(\nu)$, gel-git etkisi için $\lambda = \cos\phi \sin i$ ve dönme için $\nu = \cos i$ olarak alınır. Burada, ϕ, sistemin ortak kütle merkezine göre bileşenin yörünge evresidir. Öte yandan Clairaut denkleminin çözümünden gel-git etkisi için

$$w_j = (2j+1)qr_1^{j+1}/(j+\eta_j) \quad \text{... (3.33)}$$

ve dönme etkisi için

$$v_j = (2j+1)(1+q)\omega^2 r_1^{j+1}/\left[(j+\eta_j)\omega_0^2\right] \quad \text{... (3.34)}$$

terimleri bulunur ki; burada *q* bileşenlerin kütle oranı, η_j logaritmik yoğunluk ve ω bileşenin açısal dönme hızıdır (Budding vd., 2016b).

Yansıma etkisini ifade eden denklemi bulmak için benzer bir yol izlenir. Sonuçta, Budding (1974) ve Kopal (1959)'dan yararlanılarak, tutulma dışında, ikinci bileşenin yüzeyinden, birinci bileşenin ışınımından dolayı, yansıyan $\Delta\mathcal{L}_{R2}$ ışık miktarı için

$$\Delta\mathcal{L}_{R2} = E_2(\lambda,T)L_1\left\{r_2^2\frac{2[(\pi-\theta)\cos\theta+\sin\theta]}{3\pi}+r_2^3\frac{[3\cos^2\theta+2\cos\theta-1]}{8}+\frac{r_2^4\cos^2\theta\sin\theta}{\pi}-\frac{r_1^2r_2^2\sin\theta}{\pi}\left(\pi-\frac{12[5+(\pi-5)u]}{5(3-u)}\right)\right\} \quad \text{... (3.35)}$$

ifadesi bulunur (Budding vd., 2016b). Burada $\theta = \cos^{-1}(\cos\phi\sin i)$ olarak tanımlanır ki; ϕ, bileşenin yörünge evresini ve *i*, yörünge eğikliğini göstermektedir. Denklem (3.35)'te verilen, *λ* dalgaboyuna ve *T* sıcaklığına bağlı olan, yansıtıcı yüzeyin ışınım katkısı, E_2'nin açılımı,

$$E_2 = \frac{J(\lambda,T_2)T_1^4}{J(\lambda,T_1)T_2^4}\left(\frac{x_2\psi}{4(1-e^{-x_2})}\right) \quad \text{... (3.36)}$$

olarak verilir (Budding vd., 2016b). Burada, $x_2 = hc/k\lambda T_2$ ile verilen Boltzmann-Planck terimini ve ψ, özellikle kenar-kararmasına bağlı bir fonksiyonu (yansıma/albedo katsayısı) göstermektedir. Görelice küçük ölçekli yansımalarda; $J(\lambda,T)$ akısı için, karacisim yaklaşımı altında, Planck fonksiyonu $B(\lambda,T)$ kullanılabilir.

Öte yandan, geometrik yansıma katsayısı (albedo), Barclay vd. (2012) tarafından aşağıdaki biçimde tanımlanmıştır:

$$A_g = r_2^2 A_r. \quad \text{... (3.37)}$$

Burada, denklem (3.35) kullanılarak, $A_r = \pi \Delta L_{R2}/\phi_1$ şeklinde açılırsa, geometrik yansıma

$$A_g = \frac{2}{3} E_2 (1 + \phi_n/\phi_1) \quad \text{... (3.38)}$$

halini alır ki; ϕ_1, denklem (3.35)'in sağ tarafındaki ilk köşeli parantezin içindeki terimleri; ϕ_n, denklem (3.35)'te gerekirse ihmal edilebilen diğer terimlerin etkisini göstermektedir. Öte yandan, A_r tanımında paydasındaki ifadeyi, denklem (3.35)'in sağ tarafındaki parantezin içerisindeki tüm ifadeye eşitlemek uygun olmaz. Aksi takdirde, $A_g \sim E_2$ olur ki; bu durum, yansıyan ışığın ısısal ışınım gibi davrandığını gösterir. Aslında, bir gezegenin atmosferinde bulutlar ve benzeri ışık yansıtan faktörler gözönüne alındığında; geometrik yansımanın büyük olması beklenir.

WinFitter yazılımı, yeterince duyarlı veri için, **Doppler far (beaming) etkisini** de gözönüne alır. WinFitter, yıldızın kesirsel ışıtması L_1'de, yıldızın yörünge hareketinden dolayı meydana gelen değişim için (yani, Doppler far etkisi için) L_{D1}'i

$$L_{D1} = L_1 \left(1 + \frac{B_1 \upsilon_{z1}}{c}\right) \quad \text{... (3.39)}$$

olarak tanımlar ki; burada υ_{z1}, yıldızın yörünge hızının bakış doğrultusundaki bileşeni (dikine hız bileşeni) ve c, ışık hızıdır. Akı-dalgaboyu dönüşüm faktörü B_1 için

$$B_1 = 1.4388 \left(\frac{\kappa}{\lambda T_1}\right) \left\{\frac{1}{1 - e^{-\frac{1.4388}{\lambda T_1}}}\right\} \quad \text{... (3.40)}$$

ifadesi yazılır (Budding vd., 2016b). Burada κ yıldızın akı dağılımı vb etkilere bağlı bir çarpan, λ gözlemin yapıldığı etkin dalgaboyu, T_1 yıldızın etkin sıcaklığıdır. Örneğin tüm ışınım (bolometric radiation) için κ = 4 olur ki; bu değerin küçük ölçekli Doppler far etkisi için kullanılması geçerli bir yaklaşımdır (Shporer vd., 2012). Yıldızın yörünge hızının bakış doğrultusundaki bileşeni (dikine hız bileşeni), υ_{z1},

$$\upsilon_{z1} = \frac{q \upsilon_0 (\sin \phi \sin i)}{(1+q)} \quad \text{... (3.41)}$$

ifadesine eşit olur (Budding vd., 2016b) ki burada çift sistemin Kepler yörünge hızı, $\upsilon_0 = 2\pi a/P$; ve dairesel yörüngenin yarıçapı, $a = (GM/P^2)^{\frac{1}{3}}$ ile verilir. Prensip olarak, Doppler far

etkisini gezegenin ışınım katkısı için de yazmak mümkündür; ancak değişimin katkısı ihmal edilecek denli çok küçük olduğu için burada gezegen için Doppler far etkisi gözönüne alınmamıştır.

Sonuç olarak, WinFitter yazılımında, gözlemsel ışık eğrisini fit ederken, denklem (3.24) ile tanımlanan fit fonksiyonunda, sözü edilen tüm bozucu etkileri içeren düzeltme terimi, *C*, birinci bileşen (yıldız) için aşağıdaki biçimde yazılabilir:

$$C_1 = (E - \Delta E)L_{D1} + (R - \Delta R)L_{D2}B_2' \quad \text{... (3.42)}$$

Burada, E, denklem (3.31) ile verilen basıklık etkisini ve R, denklem (3.35) ile verilen yansıma etkisini göstermektedir. B_2', denklem (3.40)'a benzeyen ancak birinci ve ikinci bileşenin sıcaklıklarına bağlı olan, akı-dalgaboyu dönüşüm çarpanıdır. Öte yandan ikinci bileşenin ışınım katkısı için de C_2 yazılabilir. ΔE ve ΔR terimleri, tutulma (eclipse) evreleri süresindeki basıklık ve yansıma etkilerini göstermektedir. ΔE ve ΔR terimlerini hesaplamak için, Kopal (1959) tarafından verilen, α-integralleri kullanılır.

WinFitter'in uygulamasında, gezegen geçiş ışık eğrisi modellenirken 14 bağımsız parametre kullanılır:

(i) $\boldsymbol{U}$, 1'e normalize edilmiş ışık eğrisinin tutulmalar dışındaki akı düzeyinin ortalama değeri,

(ii) $\boldsymbol{L_s}$, yıldızın kesirsel ışıtması (L_s'in genelde *U*'ya yakın olması beklenir),

(iii) $\boldsymbol{k} = \frac{\boldsymbol{R_p}}{\boldsymbol{R_s}}$, gezegen yarıçapının yıldız yarıçapına oranı,

(iv) $\boldsymbol{u_s}$, yıldız için kenar-kararma katsayısı,

(v) $\boldsymbol{\Delta\phi_0}$, evre kayması,

(vi) $\boldsymbol{r_s}$, yıldızın kesirsel yarıçapı,

(vii) $\boldsymbol{i}$, yıldız-gezegen sisteminin yörünge eğikliği,

(viii) $\boldsymbol{e}$, yıldız-gezegen sisteminin yörünge dışmerkezliği,

(ix) $\boldsymbol{M_0}$, sıfır evredeki ortama ayrıklık açısı,

(x) $\boldsymbol{q} = \frac{\boldsymbol{m_p}}{\boldsymbol{m_s}}$, gezegenin kütlesinin yıldızın kütlesine oranı,

(xi) $\boldsymbol{T_s}$, yıldızın etkin sıcaklığı,

(xii) $\boldsymbol{T_p}$, gezegenin yüzey sıcaklığı,

(xiii) $\boldsymbol{\lambda_{eff}}$, gözlemin yapıldığı filtrenin etkin dalgaboyu ve

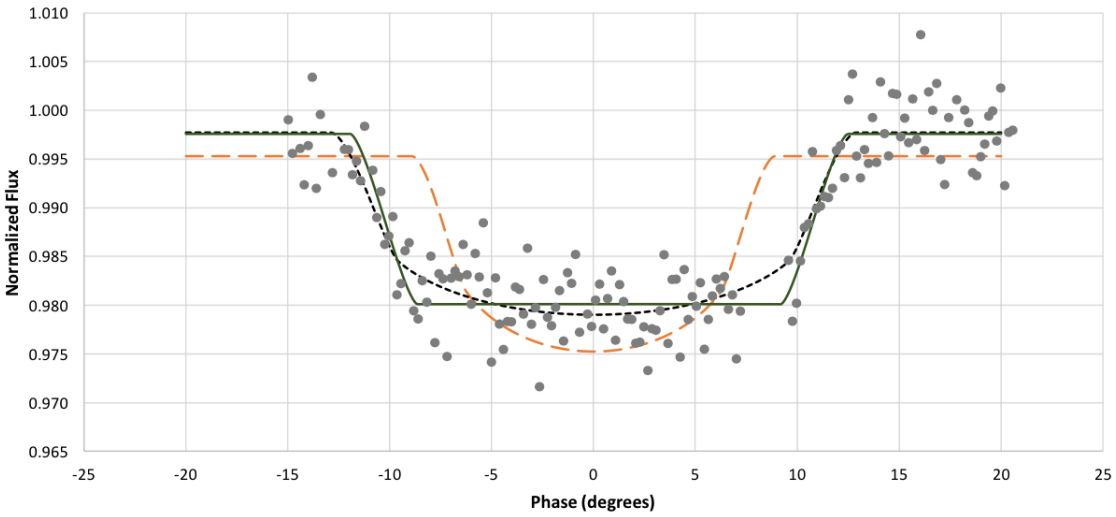
(xiv) $\boldsymbol{E_p}$, gezegen için ışınım yansıma (albedo) katsayısı.

WinFitter programı çalıştırılırken iterasyonlarda genelde 6 parametre ($\Delta\phi_0$, U, r_s, k, i ve u) serbest bırakılır. Yukarıdaki parametrelerden 11. ve 12. parametreler aslında karacisim yaklaşımı altında cisimlerin çekim-kararma katsayılarını hesaplamak için kullanılır.

(i) Yıldız Diskinin Kenar-Kararma Katsayısı

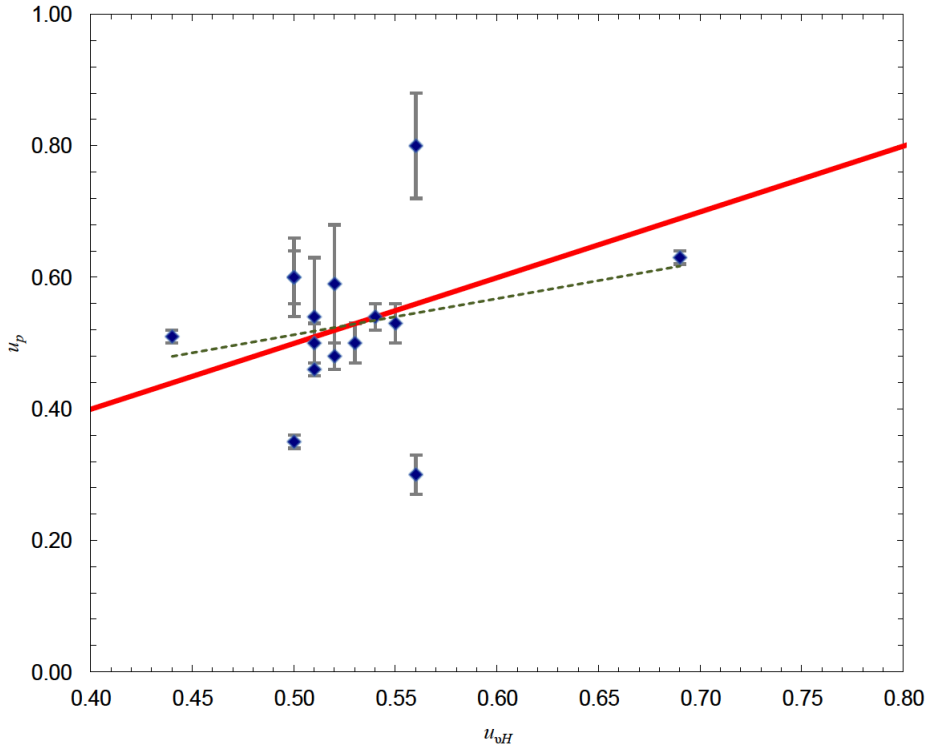
WinFitter programı çalıştırılırken; yıldız diski için kenar-kararma katsayısının hesaplanmasında Van Hamme (1993)'ün tablolarını kullanabilme olanağı vardır. Dar bant (narrow band) ve geniş bant (wide band) fotometri için filtre, yıldızın metal bolluğu, etkin sıcaklığı ve yüzey çekim ivmesinin logaritmik değeri girilerek seçilen kenar-kararma yasası için programda kullanılacak katsayılar hesaplanır.

Ötegezegenlerin geçiş ışık eğrilerinde yıldız diskinde kenar-kararma olayının etkisini tartışırken ilk aşamada yerden yapılan gözlemlerde bu etkiyi tartışmanın zor olduğu görüldü. Bir örnek olarak HAT-P-36b ötegezegeninin Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Gözlemevi'nde *R* filtresinde yapılan gözlemleri ele alındı. Lineer kenar-kararma katsayıları 0, 0.6 ve 1.0 için gözlemlere yapılan fitler, Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



Şekil 3.4 HAT-P-36b ötegezegenin ÇOMÜG'de 17.03.2012'de *R* filtresinde elde edilen geçiş ışık eğrisi. Lineer kenar-kararma katsayısı için kullanılan 0.0, 0.60 ve 1.0 kuramsal değerleriyle yapılan üç farklı fit (Erdem vd., 2015).

Geçiş ışık eğrilerinde kenar-kararma etkisini tartışmak için en uygun gözlemler, yüksek duyarlıklı uydu gözlemleridir. Bunun için Rhodes & Budding (2014)'in çalışmasında kullanılan 16 Kepler ötegezegenin geçiş ışık eğrileri ele alındı. Yapılan fitlerde kuramsal değerleri gözlemlerden elde edilen değerlerle karşılaştırabilmek için iterasyonlarda kenar-kararma katsayıları da serbest bırakılmıştır. Böylece lineer kenar-kararma katsayıları için; Şekil 3.5'te Van Hamme (1993)'ün tablolarından hesaplanan kuramsal değerler ile geçiş ışık eğrilerinin fitlerinden çıkarılan gözlemsel değerlerin karşılaştırması verilmektedir. Çoğu ötegezegenin geçiş ışık eğrileri için gözlemsel kenar-kararma katsayı değerleri, kuramsal değerlere yakın çıkmıştır.



Şekil 3.5 Rhodes & Budding (2014)'ün çalışmasında ele alınan 16 Kepler ötegezegenin geçiş ışık eğrilerinde kenar-kararma katsayıları için kullanılan kuramsal değerler ile gözlemsel değerlerin karşılaştırılması.

Öte yandan Kepler-1b (KOI-1.01) ötegezegenin geçiş ışık eğrisi için yıldızın kenar-kararma katsayısının kuramsal değeri 0.56 iken gözlemsel değeri 0.80±0.08 olarak bulunmuştur. Kepler-1 sistemi, gezegenin etrafında dolandığı bir G0 yıldızından ve K4.5-K6 kırmızı cücesinden oluşmaktadır (Daemgen vd., 2009). Kuramsal ve gözlemsel kenar-kararma katsayıları arasında çıkan anormal yüksek fark, muhtemelen, gezegenin etrafında dolaştığı yıldızın 5800 K'den çok daha soğuk bir yıldız olabileceğini göstermektedir. Belki de bu farka yıldızlararası soğurma yol açmış olabilir.

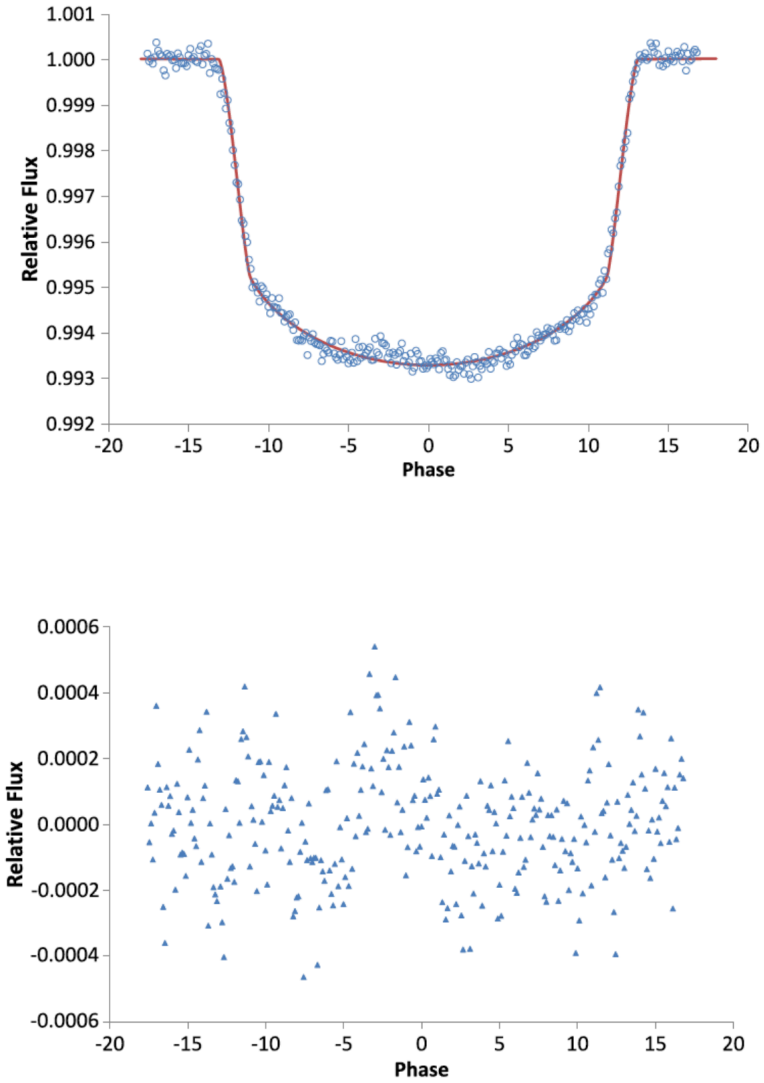
Kepler-448b (KOI 12.01)'in geçiş ışık eğrisinde ise Van Hamme (1993)'ün tablolarından hesaplanan kuramsal kenar-kararma katsayısı 0.50 sabit alınarak yapılan fitte kuramsal ışık eğrisi ile gözlemsel ışık eğrisi arasındaki farklar sistemik bir eğilim göstermiştir. İterasyonlarda kenar-kararma katsayısı da serbest bırakıldığında kenar-kararma katsayısı için bulunan gözlemsel değer 0.35(±0.01)'te çözümde en iyi fit olmuş ve farklardaki eğilim

ortadan kalkmıştır. Dolayısıyla, KOI-12'nin kuramsal kenar-kararma katsayısı hesaplanırken kullanılan NASA ötegezegen veri arşivinde bu ötegezegenin bağlı olduğu yıldızın etkin sıcaklığının muhtemelen yanlış tayin edildiği söylenebilir. Ya da, teorik ve gözlemsel kenar-kararma katsayıları arasında çıkan bu farka, Bourrier vd. (2015)' in senaryolarına göre, KOI-12 ve KOI-12.01'nin bir yıldız+gezegen sistemi yerine aslında bir çift yıldız sistemi olmaları ya da KOI-12'den gelen ışığa, başka bir çift yıldızın ışığının karışması ya da KOI-12 ve KOI-12.01 bir çift yıldızdır ve gelen ışığına bir üçüncü yıldızın ışığının karışması neden olabilir.

(ii) Yıldız Leke Etkisi

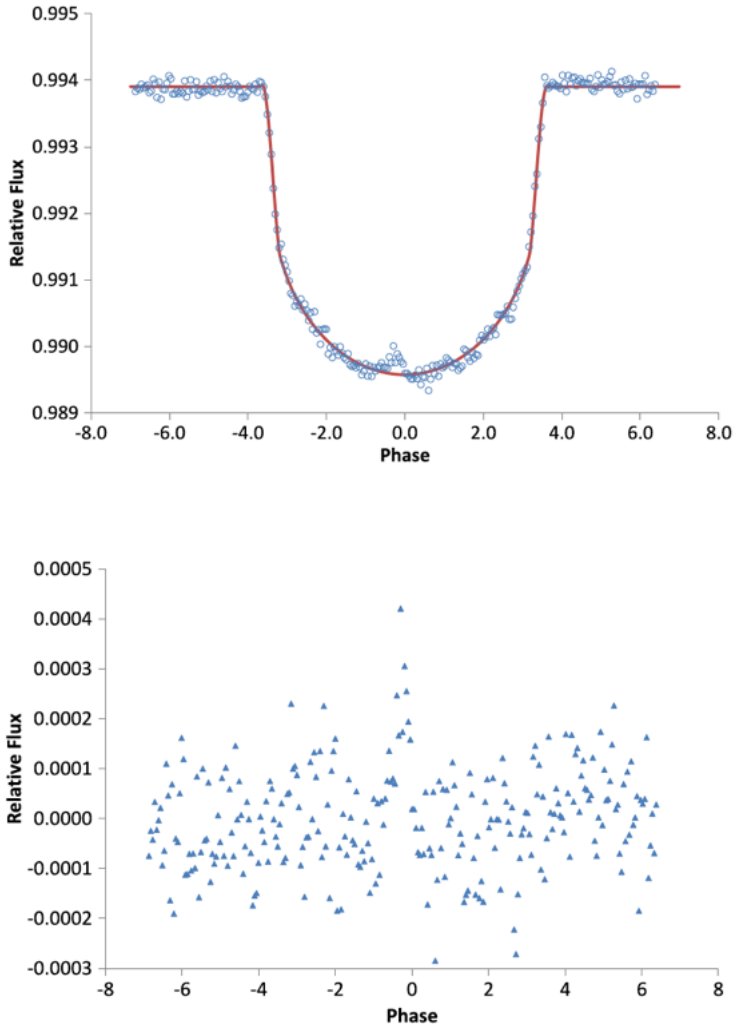
Ötegezegenlerin bağlı oldukları yıldızların %90'undan fazlası 6500 K'den daha soğuk yıldızlardır. Bu durumda, gezegenli ve konvektif zarflı olan bu yıldızlarda, manyetik etkinlik sonucunda ortaya çıkan soğuk leke etkilerini görmek mümkündür. Özellikle CoRoT ve Kepler ışık eğrilerinde yüksek duyarlık nedeniyle bu etkiler çalışılmaya başlanmıştır. Güneşe bakıldığında büyük güneş lekelerinin ~4° boyutlara kadar ulaştığı görülmektedir. Böyle bir leke Δm ~ 0.005 mag düzeyinde bir fotometrik değişim gösterir ki bu fotometrik düzey çoğu yer-tabanlı gözlemlerde kendini gösterebilecek sınıra çok yakındır. Kepler verisinde duyarlık sınırı ise Δm ~ 0.0001 mag olup bu değer ~1° boyutta bir lekeye karşılık gelir ki bu boyut aslında yerin güneşe göre boyutuyla hemen hemen aynıdır.

Örneğin Şekil 3.6'da Kepler-2b (KOI 2.01)'in ışık eğrisinin geçiş minimumunda bir lekenin gezegen tarafından örtüldüğü açıkça görülmektedir (Rhodes & Budding, 2014). Lekenin tutulması, yaklaşık 8 derecelik bir evre aralığına denk gelmektedir ki bu da bize lekenin ~4.5 R_j yarıçapına sahip gezegenden çok daha büyük bir boyuta sahip olduğunu gösterir. Bu gözlem de bu yıldızdaki lekenin güneş lekelerinden çok daha büyük boyutlara sahip olduğunu kanıtlamaktadır.



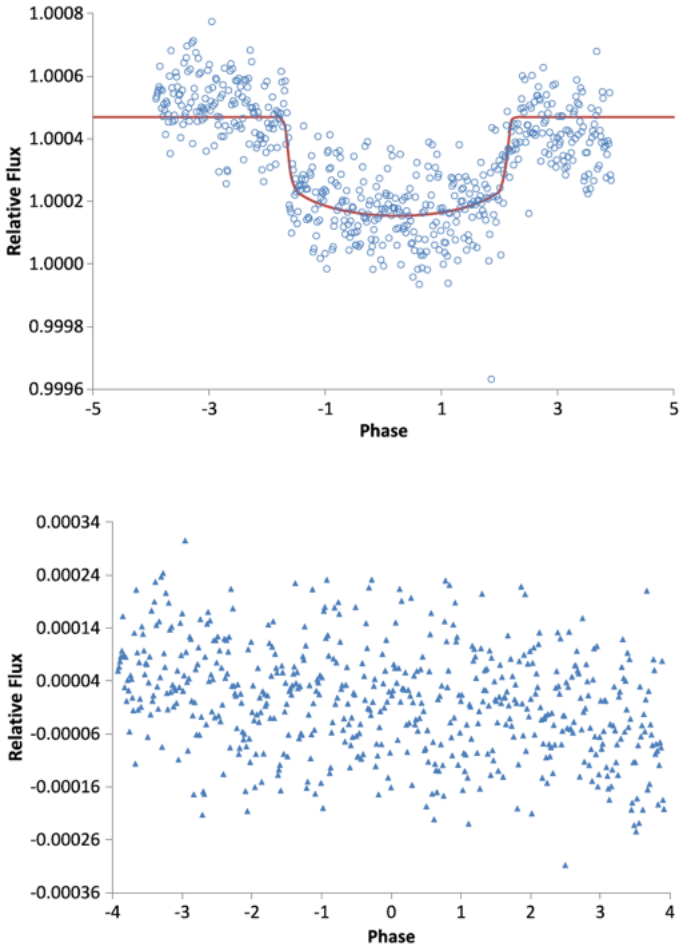
Şekil 3.6 Kepler-2b'nin geçiş ışık eğrisi ve WinFitter modeli (üstte). Kuramsal model ile gözlemlerin farkı (altta). Burada, -5 ile 0 derece evre aralığında leke etkisi açıkça görülmektedir (bkz. Rhodes & Budding, 2014).

Yıldız lekesine ilişkin başka bir örnek Şekil 3.7'de verilmektedir. Burada Kepler-3 (KOI-3) sisteminde gezegen geçiş minimumunda bir soğuk yıldız lekesinin varlığı, özellikle fark eğrisinde 0° evrenin hemen altında kendini göstermiştir (Rhodes & Budding, 2014).



Şekil 3.7 Kepler-3b'nin geçiş ışık eğrisi ve WinFitter modeli (üstte). Kuramsal model ile gözlemlerin farkı (altta). Burada, 0° evrenin hemen altında leke etkisi açıkça görülmektedir (bkz. Rhodes & Budding, 2014).

Öte yandan, Kepler-410b (KOI-42.01) ötegezegenin geçiş ışık eğrisinde; yıldız leke etkisinin büyüklüğünün neredeyse tutulmanın büyüklüğü kadar olduğu gözükmektedir (bkz. Şekil 3.8). Bu tür geçiş ışık eğrilerinde; yıldız leke modeli yerine daha basit olarak küçük eğimli doğrusal denklem gözlemlere fit edilir ve gözlemlerden fark alınarak (detrending) geçiş modeli parametre arayışına geçilir.



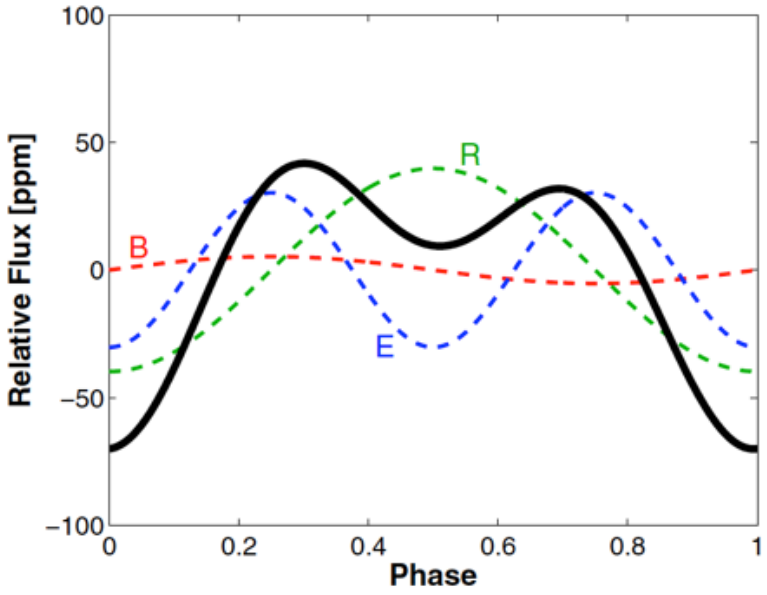
Şekil 3.8 Kepler-410b'nin geçiş ışık eğrisi ve WinFitter modeli (üstte). Kuramsal model ile gözlemlerin farkı (altta). Burada, tutulma evrelerinin tamamında leke etkisi açıkça kendini göstermektedir (bkz. Rhodes & Budding, 2014).

(iii) Doppler Far Etkisi (Doppler Beaming Effect)

Bir yıldız-gezegen sisteminde, örneğin yörünge hareketinden kaynaklanan Doppler etkisi yüzünden; yıldızın ölçülen akısının 0.25 yörünge evresinde (yani yıldız bize yaklaşırken, ışığı maviye kayarken) en büyük değerde olması, 0.75 evresinde (yani yıldız bizden uzaklaşırken, ışığı kırmızıya kayarken) en küçük değerde olması beklenir.

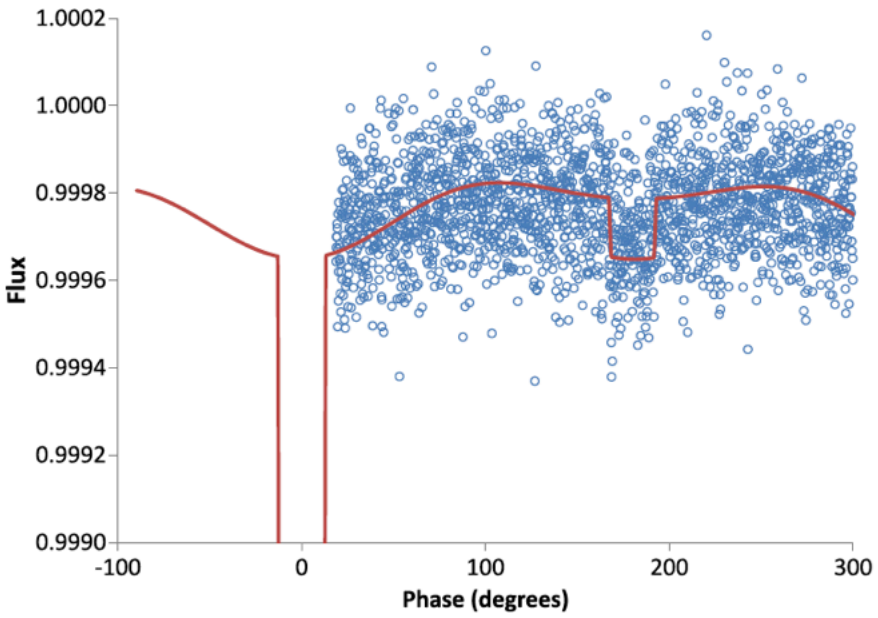
Doppler etkisi, yıldızın kendi ekseni etrafında dönme hareketinde de kendisini gösterir: yıldızın gözlemciye yaklaşan yüzeyi, uzaklaşan yüzeyinden daha parlak gözükür. Buna **fotometrik Rossiter etkisi** denir.

Sonuçta; evreye bağlı çizilen bir ışık eğrisinde, yalnızca Doppler far etkisinin sinüzoidal bir değişimle kendisini belli etmesi beklenir. Bu durum Şekil 3.9'da KOI-13 yıldız-gezegen sistemi için modellenmiştir (bkz. Shporer vd., 2011).



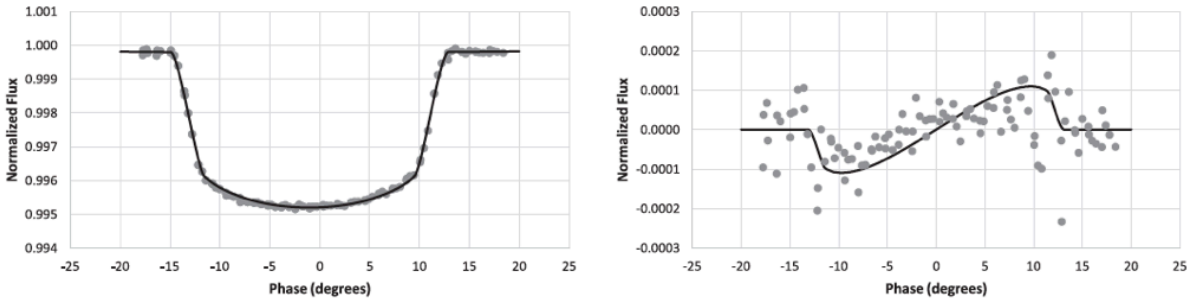
Şekil 3.9 Kepler-13 (KOI-13) yıldız-gezegen sisteminde ölçülen ışık akısının modellenmesi (Shporer vd., 2011). Akı değişiminde, Doppler far etkisi, kırmızı kesikli çizgi (B), yansıma etkisi, yeşil kesikli çizgi (R) ve yakınlık ve dönmeden dolayı elipsoidal biçim bozunması etkisi, mavi kesikli çizgi (E) ile gösterilmiştir. KOI-13 sisteminden gelen toplam ışık akısı değişimi, siyah düz çizgi ile temsil edilmiştir.

KOI-13, parlak bir A türü yıldızdan ve yaklaşık 9.2 M_J kütleli bir gezegenden oluşan ilginç bir yıldız-gezegen sistemidir (Rowe vd., 2011). Gezegenin yıldız etrafında dolanma dönemi 1.76 gün'dür. KOI-13 sisteminin ışık eğrisinde üç etki açıkça kendini göstermektedir: Doppler far etkisi, yansıma etkisi ve yakınlık ve dönmeden dolayı elipsoidal biçim bozunması etkisi. KOI-13'ün Kepler ışık eğrisine üç etkinin de gözönüne alınarak yapılan WinFitter uygulaması Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



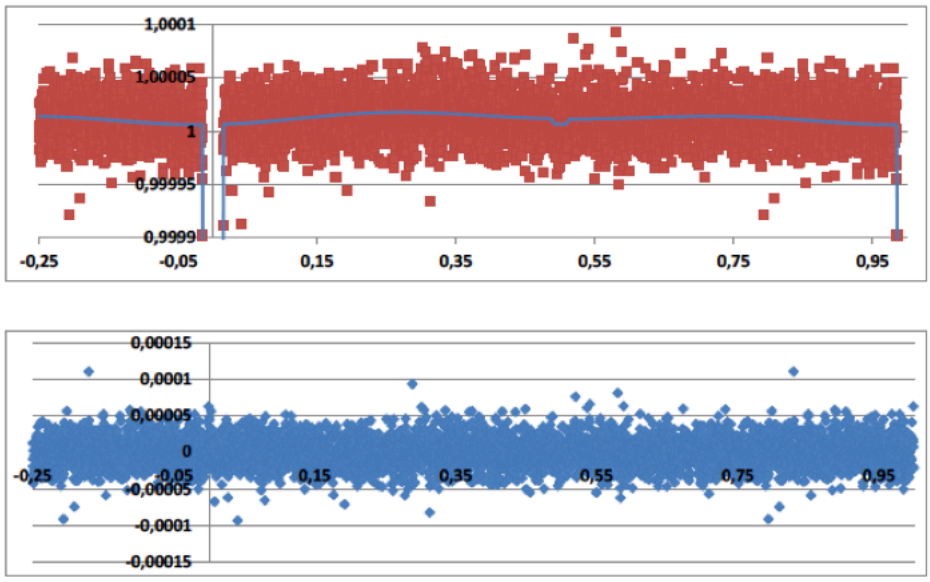
Şekil 3.10 KOI-13'ün Kepler verisine uygulanan WinFitter modeli. Maksimum ışık düzeyleri arasındaki asimetriye dikkat ediniz.

Öte yandan, Fotometrik Rossiter etkisinin hem dönme ekseninin eğim açısına bağlı olmasından dolayı hem de tutulmalar dışında yakınlık ve yansıma etkilerinin baskın olmasından dolayı, çoğunlukla kendisini geçiş ışık eğrilerinde göstermesi beklenir (bkz. Şekil 3.11).



Şekil 3.11 KOI-13.01 gezegenin geçiş ışık eğrisindeki asimetri, yıldızın dönme hareketinden kaynaklanan Doppler etkisini (yani, fotometrik Rossiter etkisini) göstermektedir. WinFitter programı uygulanarak yapılan fitte, yıldızın ekvatoryal dönme hızı, ~65 km/s olarak hesaplanmıştır (Erdem vd., 2015).

Kepler-1 (KOI-1) sistemi, gezegenin etrafında dolandığı bir G0 yıldızından ve K4.5-K6 kırmızı cücesinden oluşmaktadır (Daemgen et al., 2009). Şekil 3.12'de KOI-1'in Kepler verisine uygulanan WinFitter modeli gösterilmektedir. Maksimum ışık düzeyleri arasındaki asimetri için Doppler far etkisi ile elipsoidal biçim bozunması etkisi birlikte ele alınmıştır. Işık eğrisinde ikinci minimumda görülen küçük ışık azalmasında gezegenden yansıyan ışığın tutulması da modellenmiştir.



Şekil 3.12 KOI-1'in Kepler verisine uygulanan WinFitter modeli. Maksimum ışık düzeyleri arasındaki asimetriye dikkat ediniz (Budding vd., 2016b).

3.3 Geçiş Zamanı Değişimlerinin (TTV) Analizi

Bir ötegezegenin geçiş ışık eğrisinde, geçiş zamanı ya da geçiş ortası zamanı, gezegenin etrafında dolandığı yıldızın önünden geçiş süresinin tam ortasındaki andır. Geçiş zamanı, örten çift yıldızlar için yaygın kullanılan ifadeyle, "birinci minimum/baş minimum zamanı" olarak ta bilinir. Bir ötegezegenin geçiş zamanları, gözlemlerde, genellikle (yer merkezine göre) Jülyen günü olarak okunur ve yer merkezli Jülyen günü, güneş sistemi kütle merkezine göre Jülyen gününe düzeltilir. Bu nedenle, bu çalışmada elde edilen ışık ve geçiş eğrilerinin zamanları, gözlemlerde okunan yer merkezli Jülyen günü (JD)'den güneş sistemi kütle merkezine göre Jülyen günü (Barycentric Julian Date, BJD)'ne, Eastman vd. (2010) tarafından verilen yöntem kullanılarak, çevrilmiştir.

Bir ötegezegenin gözlenen geçiş ışık eğrilerinden ölçülen geçiş zamanları, gözlenen (observed) değerler olarak ele alınır. İlk geçiş zamanı ya da başlangıç geçiş zamanı T_0, gezegenin yörünge dönemi P ve geçiş çevrimi sayısı E olmak üzere $C = T_0 + E \times P$ denklemi kullanarak hesaplanan değerlerden; aynı çevrimlere karşılık gelen gözlenen geçiş zamanları ile hesaplanan geçiş zamanları arasındaki farklara, kısaca, "geçiş zamanı değişimleri (transit timing variation, TTV)" denir.

Bu proje çalışmasında, seçilen ötegezegenlerin gözlenen geçiş ışık eğrilerinden geçiş zamanları, WinFitter kullanılarak, elde edilmiştir. WinFitter yazılımındaki $\Delta\phi_0$ parametresi, gezegen geçişinin ortasındaki evre kaymasını derece cinsinden vermektedir. Örneğin, WinFitter ile modellenen bir geçiş ışık eğrisinde, $\Delta\phi_0$ evre kayması parametresi kullanılarak, geçiş zamanındaki kayma miktarı ΔT_0'a geçilmek istenirse,

$$\Delta T_0 = \left(\frac{1}{360}\Delta\phi_0\right) P \qquad \text{... (3.43)}$$

yazılır ve düzeltilmiş geçiş zamanı,

$$T_0{}' = T_0 + \Delta T_0 \qquad \text{... (3.44)}$$

olarak elde edilir. Ele alınan gezegen geçişinin çevrim sayısı, $E = (T - T_0)/P$ kullanılarak bulunur. Böylece, ele alınan gezegen geçişin düzeltilmiş gözlenen geçiş zamanı,

$$T = E \times P + T_0{}' \qquad \text{... (3.45)}$$

denklemi kullanılarak hesaplanır.

Bu proje çalışmasında, ele alınan ötegezegenler için, geçiş zamanı değişimleri analizinde, ilk adım olarak, ağırlıklı en küçük kareler yöntemiyle, lineer geçiş zamanı ışık elemanları yeniden hesaplanmıştır. İkinci adımda, yeni lineer geçiş zamanı ışık elemanları, gözlenen geçiş zamanlarına uygulanarak, ele alınan ötegezegenler için geçiş zamanlarının *O-C* dağılımları oluşturulmuştur. Üçüncü adımda, oluşturulan *O-C* dağılımlarına, Lomb-Scargle yöntemi (Lomb, 1976; Scargle, 1982) uygulanarak frekans arayışına gidilmiştir. Eğer baskın frekans(lar) bulunmuşsa; baskın frekans(lar)a göre elde edilen sinüslü değişim, ağırlıklı en küçük kareler yöntemiyle çözülmüş ve sinüslü değişimin genliği (A_{TTV}) ve fazı (E_{TTV}) hesaplanmıştır. Eğer durum böyleyse; geçiş zamanı hesaplama denklemi,

$$T = T_0{}' + EP + A_{TTV} \sin 2\pi \frac{E - E_{TTV}}{P_{TTV}} \quad \text{... (3.46)}$$

halini alır.

Frekans analizinden bulunan genlik (A_{TTV}), yıldız+gezegen sisteminde tedirginlik meydana getiren bir üçüncü cismin kütlesi ve dışmerkezliğiyle ilişkilidir (bkz. Lithwick vd., 2012). Bulunan genlik değeri yardımıyla; üçüncü cismin kütlesi ve yörüngesinin basıklığı hesaplanabilmektedir.

Lomb-Scargle Frekans Analizi

Gözlemsel astronomide, hedef cismin farklı zamanlarda alınmış bir dizi verisinde, dönemli değişimleri bulmak amacıyla yapılan analize, "zaman serisi çözümü" ya da "frekans/dönem analizi" denir. Frekans/dönem analizlerinde istatistik yöntemler kullanılabileceği gibi seri analizi yöntemleri de kullanılabilir. En yaygın kullanılan seri analizi yöntemi, bir dizi trigonometrik fonksiyonları (değişken dönem, genlik ve evrelerle uygulanan sinüs ve kosinüs) kullanarak çözüme gitmeyi hedefleyen Fourier analizleridir. Lomb-Scargle analizi, bu analizlerden biridir (Lomb, 1976; Scargle, 1982). Ötegezegenler için, gözlenen geçiş zamanları kullanılarak elde edilen geçiş zamanı değişimleri, Lomb-Scargle frekans analizine alınır (örneğin, bkz. Mazeh vd., 2013).

Lomb-Scargle analizinde, farklı zaman aralıklarında kaydedilmiş gözlemsel veri için sinüs ve kosinüs dalgaları araştırılarak şiddetin derecesine göre hesaplanan frekans, güç tayfında gösterilir. Burada, açısal frekans ω olmak üzere, frekansın gücü,

$$P_x(\omega) = \frac{1}{2}\left(\frac{\left[\sum_j X_j \cos\omega(t_j-\tau)\right]^2}{\sum_j \cos^2\omega(t_j-\tau)} + \frac{\left[\sum_j X_j \sin\omega(t_j-\tau)\right]^2}{\sum_j \sin^2\omega(t_j-\tau)}\right) \quad \text{... (3.47)}$$

ile verilir. Denklemdeki zaman gecikmesi, τ,

$$\tan 2\omega\tau = \frac{\sum_j \sin 2\omega t_j}{\sum_j \cos 2\omega t_j} \quad \text{... (3.48)}$$

ifadesi kullanılarak hesaplanır. Böylece her *ω* frekansı için salınım bağıntısı

$$\phi(t) = A\sin\omega t + B\cos\omega t \quad \text{... (3.49)}$$

olarak yazılır.

Lomb-Scargle yönteminde frekans penceresi, ν ortalama zaman farkı olmak üzere $f_{Nyquist} = {}^1\!/_2\,\nu$ ile tanımlanan Nyquist frekansına kadar açılmıştır. Frekans analizinde baskın frekansın belirlemesi, "yanlış uyarı olasılığına" (*false alarm probablity – FAP*) göre yapılmıştır (Horne ve Baliunas, 1986).

4. BULGULAR

Bu bölümde TUG ve ÇOMÜG gözlemlerinden elde edilen ötegezegen geçiş ışık eğrilerinin ve NASA Ötegezegen Veri-Arşivi (NASA Exoplanet Archive, NEA)'dan alınan yıldız-ötegezegen ışık eğrilerinin, WinFitter yazılımı kullanılarak, yapılan analizleri ve sonuçları verilmiştir.

4.1 Seçilen Ötegezegenlerin Yer Tabanlı Geçiş Işık Eğrilerinin ve Geçiş Zamanlarının Analizleri

4.1.1 TrES-3b

TrES-3 (GSC 03089-00929), 0.9 $M_{\odot}$ kütlesinde neredeyse metal fakiri ([Fe/H] = -0.2) olan G tayf türü bir yıldızdır. Yıldıza ilişkin temel parametre değerleri, Torres vd. (2008)'den alınmıştır (bkz. Çizelge 4.1). Gezegenin varlığı, O'Donovan vd. (2007) tarafından keşfedilmiştir. O'Donovan vd. (2007), sistemin ışıkölçüm ve tayfsal veri analizi sonuçlarından, TrES-3b'nin 1.3 gün yörünge dönemine sahip 1.92 M_J kütlesinde bir gezegen olduğunu hesaplamışlar, ayrıca, gezegenin yarıçapını ve geçiş parametresini, sırasıyla, R_g = 1.295 R_J ve b = 0.827 olarak vermişlerdir. TrES-3 sistemini, Winn vd. (2008), Gibson vd. (2009) ve Vavnko vd. (2013) fotometrik olarak çalışmışlardır. Sozzetti vd. (2009) ise fotometrik ve tayfsal bir çalışma sonucunda, bileşenler arası ayrıklık ($a/R_{\star}$)'ın sıcaklık ve metal bolluğu değerleriyle ilişkisini kullanarak yıldız parametrelerini tahmin ettiler ve yıldızın kütlesini $M_{\star}$ = 1.404 $M_{\odot}$ ve yarıçapını $R_{\star}$ = 1.846 $R_{\odot}$ olarak verdiler.

Knutson vd (2008), de Mooij ve Snellen (2009), Fressin vd. (2009) ve Croll vd. (2010), TrES-3b gezegeninin örtülme ışık eğrilerini elde etti. Fressin vd. (2009), gezegenin yörüngesinin dairesel olduğunu önermiştir. Öneri, Croll vd. (2010) tarafından desteklenmiştir. Ancak, yakın kızılötede yapılan gözlemlerde örtülme ışık eğrisi girişinde kendini gösteren sistematik saçılmanın, gezegen yörüngesinin basık olmasından kaynaklanmış olabileceği tartışılmıştır (bkz. de Mooij ve Snellen, 2009). Bir çok yazar, gezegen geçiş zamanı değişimlerini (TTV) araştırmıştır (örneğin Sozzetti vd, 2009; Christiansen vd., 2011; Kundurthy vd., 2013; Vavnko vd., 2013). Bu yazarlardan yalnızca Kundurthy vd. (2013), geçiş ortası zamanı değişimine ilişkin kanıt bulamadıklarını açıkladılar.

Çizelge 4.1 TrES-3 yıldız-gezegen sisteminin temel parametreleri.

Parametre	Değer
Kütle, $M_\star$ ($M_\odot$)	$0.928^{+0.028}_{-0.048}$
Yarıçap, $R_\star$ ($R_\odot$)	$0.829^{+0.015}_{-0.022}$
Yoğunluk, $\rho_\star$ (cgs)	2.304 ± 0.066
Yüzey çekim ivmesi, $\log g_\star$ (cgs)	4.4 ± 0.1
Etkin sıcaklık, T_e (K)	5650 ± 75
[Fe/H]	-0.19 ± 0.08
Yaş (Gyıl)	$0.9^{+2.8}_{-0.8}$
Geçiş ortası zamanı, T_0 (BJD)	2454185.9109932 ± 0.0000502 [a]
Yörünge dönemi, P (gün)	1.306186483 ± 0.000000070 [a]
Normalize ayrıklık, $a/R_\star$	5.94 ± 0.21
Doğrusal kenar kararma katsayısı, u	(R) 0.567 [b]

[a] Kundurthy vd. (2013)'dan alınmıştır. Diğer tüm değerler Sozetti vd. (2009)'dan alınmıştır.

[b] Claret ve Bloemen (2011)'in çizelgelerinden hesaplamıştır.

TrES-3b'nin proje gözlemleri, Çizelge 4.2'de sunulmuştur. Gözlemler, proje ön çalışmasında 2012'de başlamış ve 2015'te son bulmuştur. TrES-3b'nin ÇOMÜG ve TUG'ta yapılan gözlemlerinden 12 adet geçiş ışık eğrisi elde edilmiştir (bkz. Şekil 4.1).

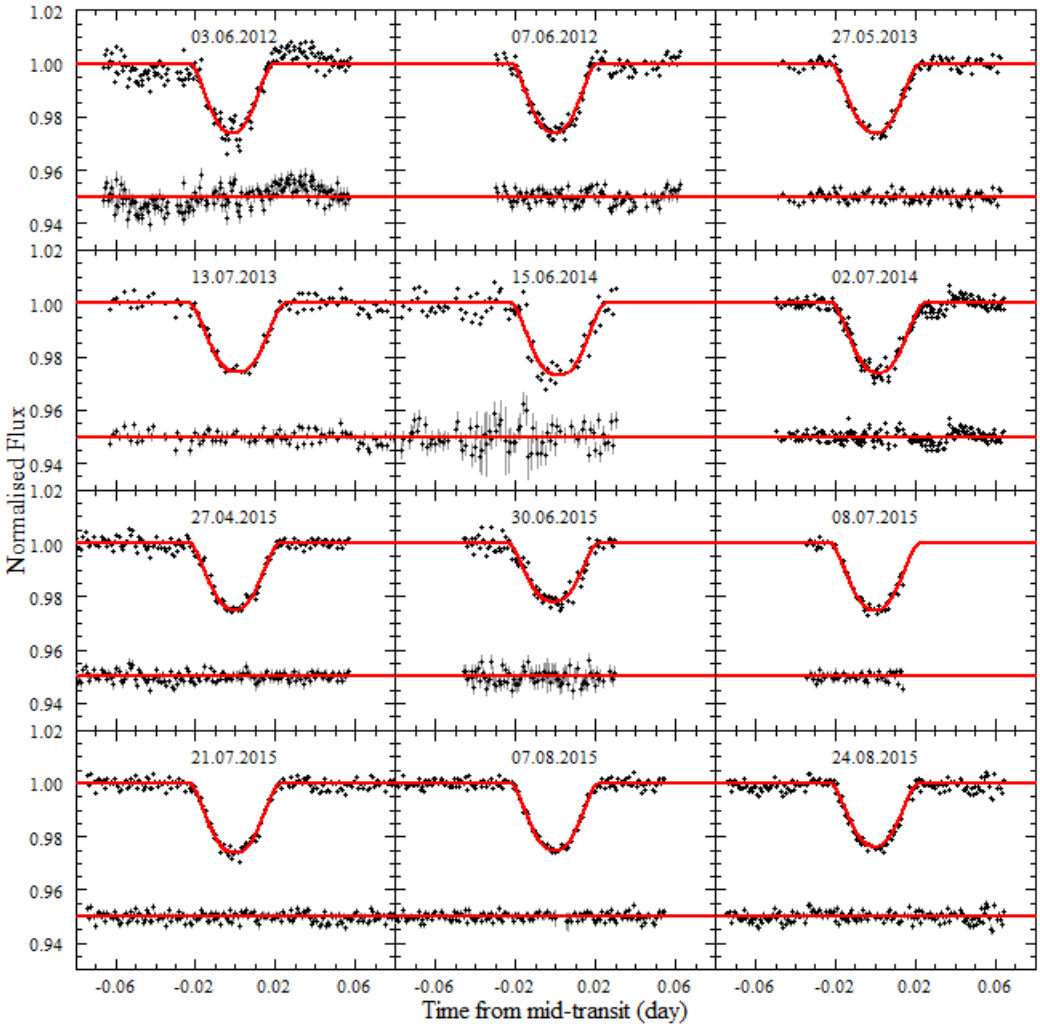
Çizelge 4.2 TrES-3b'nin ÇOMÜG ve TUG gözlemleri özet bilgisi.

Tarih	Teleskop+CCD	Nokta sayısı	Bin.	Poz süresi (s)	Hava kütlesi	$\sigma_{gözlem}$ (mkadir)	σ_s (mkadir)
03.06.2012	T122+AP42	178	1	20	1.02 – 1.34	4.7	15.2
07.06.2012	T122+AP42	109	1	20	1.02 – 1.09	2.8	2.8
27.05.2013	T122+AP42	110	1	100	1.44 – 1.01	2.3	2.3
13.07.2013	T122+AP42	123	1	60	1.02 – 2.55	2.6	2.6
15.06.2014	TUG100+SI1100	64	2	40	1.22 – 1.00	3.4	3.4
02.07.2014	T122+AP42	216	2	45	1.00 – 1.08	2.3	4.9
27.04.2015	TUG100+SI1100	196	2	80	1.98 – 1.00	2.4	2.6
30.06.2015	T122+STL1001E	97	1	80	1.02 – 1.32	3.3	3.3
08.07.2015	TUG100+SI1100	58	2	20	1.06 – 1.00	2.5	2.5
21.07.2015	TUG100+SI1100	211	2	80	1.01 – 1.92	1.9	2.8
07.08.2015	TUG100+SI1100	154	2	80	1.00 – 1.43	1.6	1.6
24.08.2015	T60+AP42	153	1	80	1.00 – 1.60	2.0	3.0

TrES-3b ötegezegenin proje gözlemlerinden elde edilen 12 adet geçiş ışık eğrisi, Bölüm 3.2'de anlatıldığı biçimde WinFitter ile ayrı ayrı çözüldü. Ayrı çözümlerden elde edilen parametrelerin ağırlıklı ortalamaları alındı ve hatalarıyla birlikte Çizelge 4.3'te sunuldu (03/Haziran/2012 ve 02/Temmuz/2014 tarihli gözlem verilerinde, sırasıyla standart sapmaların yüksek olması nedeniyle bu iki geçiş model parametreleri, ağırlıklı ortalama hesabına dahil edilmemiştir.) Aynı çizelgede WinFitter sonuçlarının literatür değerleriyle karşılaştırması da yer almaktadır. TrES-3b'nin gözlemsel geçiş ışık eğrileri ile WinFitter modeli kuramsal ışık eğrilerinin karşılaştırılması, Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 TrES-3b'nin WinFitter çözüm sonuçları ve literatür değerleriyle karşılaştırılması.

Çalışmalar	r_s	$k=(r_p/r_s)$	i (°)	$T_4 - t_1$ *(dk)*
O'Donovan vd. (2007)	0.165 ± 0.0027	0.1660 ± 0.0024	82.15 ± 0.21	—
Sozzetti vd. (2009)	0.1687 ± 0.0140	0.1655 ± 0.0020	81.85 ± 0.16	—
Gibson vd. (2009)	—	0.1664 ± 0.0011	81.73 ± 0.13	79.92 ± 1.44
Col vd. (2010)	—	0.1662 ± 0.0046	—	83.77 ± 1.15
Southworth (2010)	0.1666 ± 0.0017	0.1639 ± 0.0037	82.07 ± 0.17	—
Lee vd. (2011)	0.1674 ± 0.0023	0.1603 ± 0.0042	81.77 ± 0.14	—
Christiansen vd. (2011)	0.1664 ± 0.0204	0.1661 ± 0.0343	81.99 ± 0.3	81.9 ± 1.1
Southworth (2011)	0.1682 ± 0.0014	0.1635 ± 0.0025	81.93 ± 0.13	—
Kundurthy vd. (2013)	0.1675 ± 0.0008	0.1652 ± 0.0009	81.95 ± 0.06	—
	0.1698 ± 0.0014	0.1649 ± 0.0015	81.51 ± 0.14	—
Turner vd. (2013)	0.1721 ± 0.0056	0.1693 ± 0.0087	81.35 ± 0.63	81.30 ± 0.23
Vavnko vd. (2013)	0.1682 ± 0.0032	0.1644 ± 0.0047	81.86 ± 0.28	79.20 ± 1.38
	0.1696 ± 0.0024	0.1669 ± 0.0027	81.76 ± 0.14	79.08 ± 0.72
Bu çalışma	0.1674 ± 0.0021	0.1659 ± 0.0022	81.94 ± 0.17	82.89 ± 0.25



Şekil 4.1 TrES-3b'nin gözlemsel ve kuramsal geçiş ışık eğrileri ve gözlemlerin kuramsal modelden artıkları.

TrES-3b'nin 12 adet gözlemsel ışık eğrilerinin WinFitter programı ile çözümünde; literatürden seçilen ve programın iterasyonlarında sabit tutulan parametreler ve çözüm sonucunda elde edilen tüm parametrelerin ağırlıklı ortalamaları, Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Gezegenin denge sıcaklığı (T'_{eq}), aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır (bkz. Hansen & Barman, 2007):

$$T'_{eq} = T_e \sqrt{\frac{R_\star}{2a}} \qquad \ldots (4.1)$$

Kütle-çekim odaklama parametresi olarak tanımlanan Safronov sayısı (Θ), aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır (bkz. Safronov, 1972):

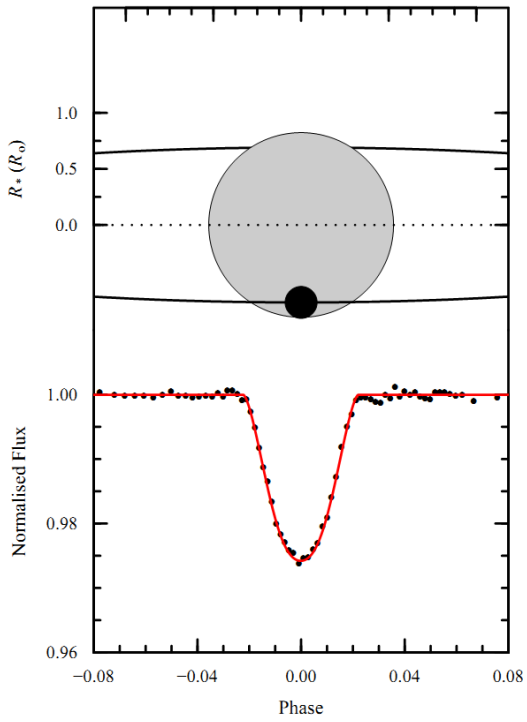
$$\Theta = \frac{1}{2}\left(\frac{\upsilon_{\text{kaçış}}}{\upsilon_{\text{yörünge}}}\right)^2 = \frac{\mathrm{a}}{R_g}\frac{M_g}{M_\star} \qquad \text{... (4.2)}$$

Safronov sayısı, bir gezegenin diğer cisimler üzerindeki tedirginliğinin bir ölçüsüdür. TrES-3b için, Safronov sayısı, Θ = 0.068 ± 0.003 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, TrES-3b'nin II. Sınıf gezegenler grubunda yer aldığını göstermektedir (bkz. Hansen & Barman, 2007).

Tüm geçiş ışık eğrilerinin birleştirilerek 70 noktaya toplanmasıyla (binning) elde edilen gözlemsel noktaları ile Çizelge 4.4'te verilen parametrelere göre hesaplanan kuramsal ışık eğrilerinin karşılaştırılması, Şekil 4.2'de verilmiş; ayrıca, gezegenin geçiş geometrisi de tasvir edilmiştir. WinFitter sonuçlarına göre; gezegen, yıldız diskinin alt kenarına yakın seyretmektedir. Bu durum, geçiş parametresi, *b* = 0.840 ± 0.025 olarak hesaplanan sistemde; gezegenin geçiş ışık eğrisinin neden v biçimli olduğunu açıklamaktadır.

Çizelge 4.4 TrES-3 yıldız-gezegen sistemi için çözümde literatürden alınan ve sabit tutulan parametreler ile her 12 adet gözlemsel ışık eğrisinin ayrı çözümlerinden elde edilen parametrelerin ağırlıklı ortalamaları.

Literatürden alınan ve sabit tutulan parametreler	
$M_\star$ ($M_\odot$)	0.915 ± 0.031
M_p (M_J)	1.910 ± 0.064
T_e (K)	5650 ± 75
Çözümden elde edilen parametreler	
$a/R_\star$	5.93 ± 0.09
$R_\star$ ($R_\odot$)	0.824 ± 0.013
$\rho_\star$ ($\rho_\odot$)	1.619 ± 0.077
$\log g_\star$ (cgs)	4.57 ± 0.01
R_p (R_J)	1.388 ± 0.035
ρ_p (ρ_J)	0.660 ± 0.051
$\log g_p$ (cgs)	3.39 ± 0.02
T'_{eq} (K)	1641 ± 25
Safronov sayısı (Θ)	0.068 ± 0.003
Akı <*F*> (10^9 erg s^{-1} cm^{-2})	1.642 ± 0.082



Şekil 4.2 TrES-3b ötegezegenin yıldız diskinden geçiş geometrisi (üstte). Gözlenen tüm geçiş ışık verisinin 70 noktaya toplanmasıyla (binning) oluşturulan geçiş ışık eğrisi ile WinFitter kuramsal ışık eğrisinin karşılaştırılması.

Geçiş Ortası Zamanları ve Analizi

TrES-3b için gözlemlerden elde edilen geçiş zamanları ile hataları ve *O-C* değerleri Çizelge 4.5'te listelenmiştir. Çizelgedeki geçiş zamanları, literatürden alınan zamanlarla birleştirilerek yeni ışık elemanları, ağırlıklı en küçük kareler yöntemiyle,

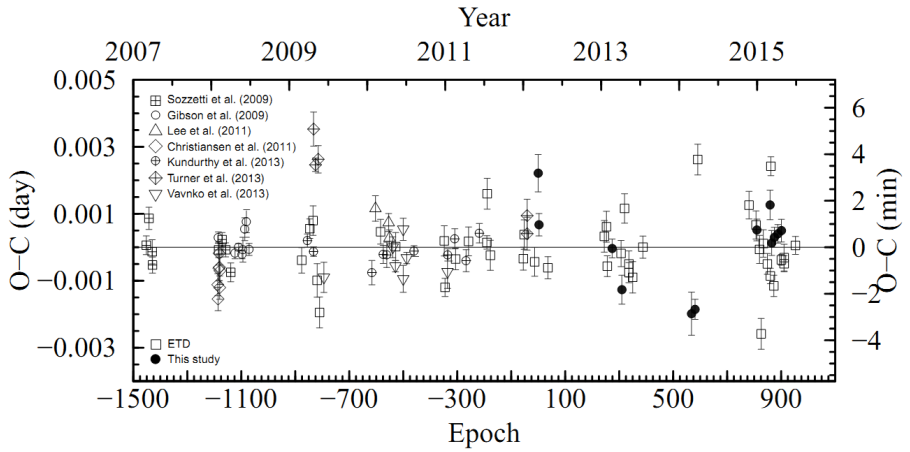
$$T_c = 2456082.49390148\ (3212) + 1.30618652\ (4) \times E \qquad \ldots (4.3)$$

olarak hesaplanmıştır (bkz. Şekil 4.3).

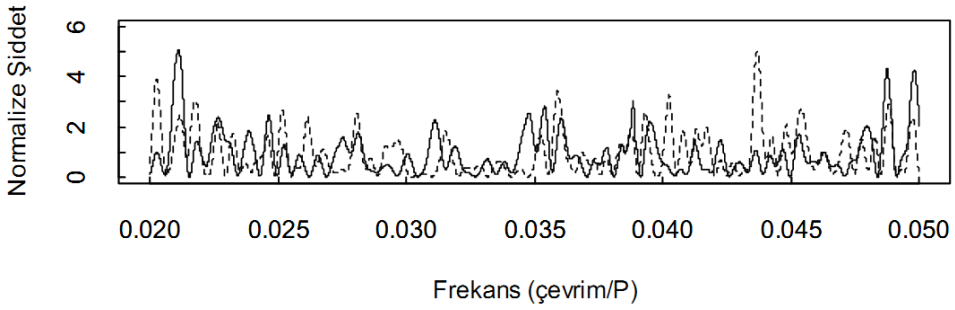
TrES-3b'nin Şekil 4.3'te verilen ve yeni ışık elemanlarına göre hesaplanan *O-C* verileri, geçiş zamanı değişimlerini (TTV) bulmak için Lomb-Scargle frekans analizine alınmıştır. TrES-3b ötegezegenin yaklaşık 8 yıllık gözlemsel verisi olmasına rağmen, %5 FAP değerini aşan baskın frekans veya frekanslar gözlenmemiştir (bkz. Şekil 4.4). Üç yıllık bir zaman dilimine yayılan proje çalışmasının verileri, Şekil 4.3'te siyah noktalarla gösterilmiştir.

Çizelge 4.5 TrES-3b'nin proje çalışmasından okunan gözlemsel geçiş zamanları.

Tarih	Filtre	Çevrim	T_0 (BJD_{TDB} – 2450000+)	*O-C* (gün)
03.06.2012	$R_{Bessell}$	0	6082.49611 ± 0.00056	0.00221
07.06.2012	$R_{Bessell}$	3	6086.41313 ± 0.00034	0.00067
27.05.2013	$R_{Bessell}$	274	6440.38897 ± 0.00028	-0.00004
13.07.2013	$R_{Bessell}$	310	6487.41046 ± 0.00043	-0.00127
15.06.2014	$R_{Bessell}$	568	6824.40586 ± 0.00064	-0.00198
02.07.2014	$R_{Bessell}$	581	6841.38641 ± 0.00030	-0.00185
27.04.2015	$R_{Bessell}$	810	7140.50550 ± 0.00033	0.00052
30.06.2015	$R_{Cousins}$	859	7204.50938 ± 0.00044	0.00126
08.07.2015	$R_{Bessell}$	865	7212.34536 ± 0.00037	0.00013
21.07.2015	$R_{Bessell}$	875	7225.40740 ± 0.00030	0.00030
07.08.2015	$R_{Bessell}$	888	7242.38793 ± 0.00028	0.00040
24.08.2015	$R_{Bessell}$	901	7259.36845 ± 0.00034	0.00050



Şekil 4.3 TrES-3b'nin geçiş ortası zamanı değişimi.



Şekil 4.4 TrES-3 b'nin *O-C* verisi için Lomb-Scargle periyodiyagramı. Düz çizgi, tüm verilerin ve aralıklı çizgi, zaman hatası $\sigma_{BJD} \leq 0.0005$ olanların frekans dağılımını göstermektedir.

4.1.2 Qatar-1b

Qatar-1b, Alsubai vd. (2011) tarafından, yıldızından a = 0.023 AB uzaklığındaki yörüngesini 1.4 gün'de dolanan ve 1.09 M_J kütlesine sahip bir gezegen olarak duyuruldu. Qatar-1, metal zengini ([Fe/H] = 0.2) ve K tayf türünden bir yıldızdır. Alsubai vd. (2011)'den alınan Qatar-1'e ilişkin temel parametre değerleri, Çizelge 4.6'da gösterilmiştir.

Qatar-1b'nin geçiş zamanı değişimi, von Essen vd. (2013) tarafından, 190 gün olarak verilmiştir. Covino vd. (2013), gezegenin yörünge parametrelerini geliştirdiler ve izdüşümü dönme-dolanma eğikliğini λ = 8.4° ± 7.1° derece olarak buldular ve yıldızın aktif olduğunu beyan ettiler. Mislis vd. (2015), Qatar-1b'nin 12 adet geçiş ışık eğrisini yayınladılar; ancak, Qatar-1 yıldızının aktif olmasından dolayı beklenen leke etkisine ilişkin olarak, gezegen geçişi sırasında leke örtülmesine ilişkin bir bulguya rastlamadılar ve bunu gezegenin düşük yoğunluklu bir leke bölgesine düşen enlem üzerinde geçiş gösterdiği olarak yorumladılar.

Çizelge 4.6 Qatar-1 yıldız-gezegen sisteminin temel parametreleri.

Parametre	Değer
Kütle, $M_\star$ ($M_\odot$)	0.850 ± 0.030
Yarıçap, $R_\star$ ($R_\odot$)	0.823 ± 0.025
Yoğunluk, $\rho_\star$ (cgs)	1.52 ± 0.12
Yüzey çekim ivmesi, $\log g_\star$ (cgs)	4.536 ± 0.024
Etkin sıcaklık, T_e (K)	4861 ± 125
[Fe/H]	0.20 ± 0.10
Yaş (Gyıl)	> 6
Geçiş ortası zamanı, T_0 (BJD)	2455799.57954 ± 0.00004 [a]
Yörünge dönemi, P (gün)	1.42002586 ± 0.00000275 [a]
Normalize ayrıklık, $a/R_\star$	6.12 ± 0.06
Doğrusal kenar kararma katsayısı, u	(R) 0.668 [b]
Safronov sayısı (Θ)	0.0629 ± 0.0019

[a] Mislis vd. (2015), diğer tüm değerler, Alsubai vd. (2011)'dan alınmıştır.

[b] Claret ve Blomen (2011) çizelgelerinden hesaplamıştır.

Qatar-1b, proje çalışması boyunca, 2014 – 2015 yılları arasında, 12 gece fotometrik olarak gözlenmiştir; gözlemlere ilişkin özet bilgi, Çizelge 4.7'de sunulmakta ve gözlemlerden elde edilen geçiş ışık eğrileri, Şekil 4.5'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.7 Qatar-1b'nin proje gözlemleri

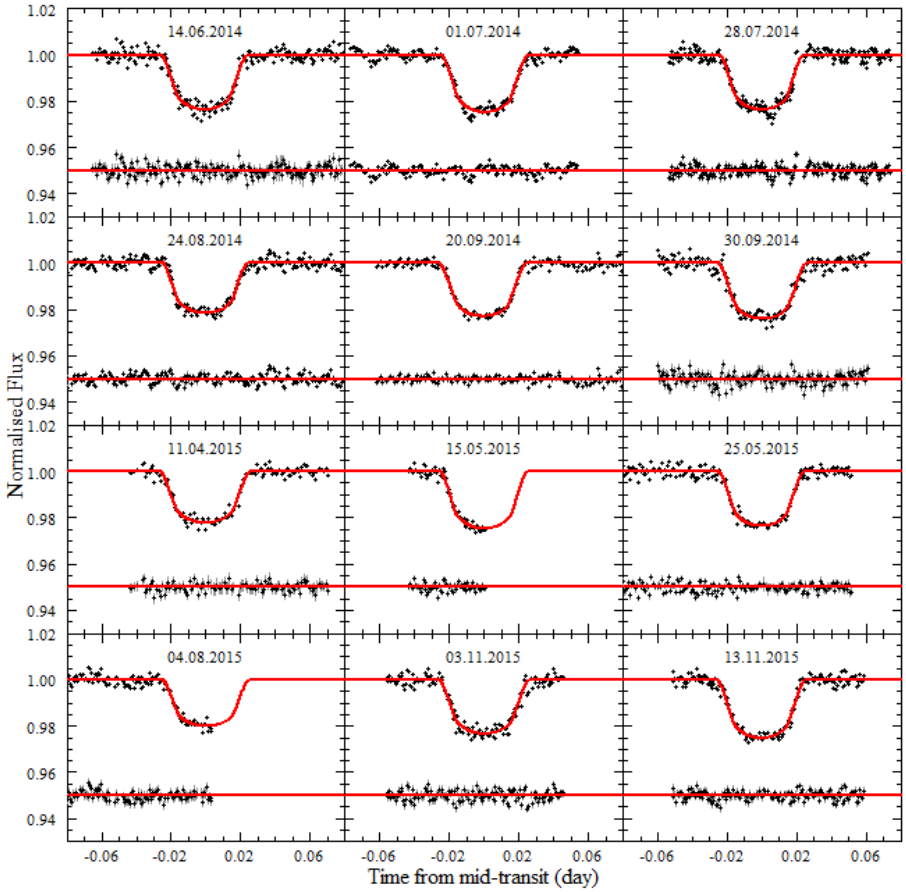
Tarih	Teleskop+CCD	Nokta sayısı	Bin.	Poz süresi (s)	Hava kütlesi	$\sigma_{gözlem}$ (mkadir)	σ_s (mkadir)
14.06.2014	TUG100+SI1100	217	2	60	1.57 – 1.14	2.5	2.5
01.07.2014	T122+AP42	195	1	80	1.40 – 1.20	2.1	2.1
28.07.2014	T122+AP42	261	1	52	1.13 – 1.10 – 1.21	2.2	2.2
24.08.2014	T122+AP42	269	1	100	1.12 – 1.10 – 1.64	2.5	2.5
20.09.2014	TUG100+SI1100	245	2	90	1.14 – 1.14 – 2.37	2.2	2.7
30.09.2014	T60+STL1001E	198	1	90	1.11 – 1.36	2.6	2.6
11.04.2015	T122+STL1001E	120	1	120	2.19 – 1.25	2.2	2.2
15.05.2015	TUG100+SI1100	75	2	80	2.13 – 1.15	3.4	3.4
25.05.2015	TUG100+SI1100	226	2	80	1.30 – 1.16	2.3	2.6
03.11.2015	T60+AP42	140	1	80	1.25 – 1.88	2.5	2.5
13.11.2015	T60+AP42	153	1	80	1.19 – 1.78	2.1	2.1
20.11.2015	T60+AP42	212	1	80	1.34 – 3.00	4.7	4.7

Geçiş Işık Eğrileri Çözümü

Qatar-1b'nin proje çalışmasından elde edilen geçiş ışık eğrileri, WinFitter ile çözüldü. Çözüm sonucu elde edilen parametrelerin ağırlıklı ortalamaları ve hataları ile literatürdeki değerleriyle karşılaştırılması, Çizelge 4.8'de verilmiştir. Gezegenin gözlemsel geçiş ışık eğrileri ile WinFitter modeli kuramsal ışık eğrilerinin karşılaştırılması ise Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.8 Qatar-1b'nin WinFitter çözüm sonuçları ve literatür değerleriyle karşılaştırılması.

Çalışmalar	r_1	k (r_2/r_1)	i (°)	$t_4 - t_1$ (dk)
Alsubai vd. (2011)	0.1633 ± 0.0053	0.1454 ± 0.0015	83.47 ± 0.40	96.71 ± 1.11
von Essen vd. (2013)	0.1558 ± 0.0024	0.1435 ± 0.0008	84.52 ± 0.24	—
Covino vd. (2013)	0.1601 ± 0.0025	0.1513 ± 0.0008	83.82 ± 0.25	97.63 ± 1.44
Mislis vd. (2015)	0.1640 ± 0.0030	0.1475 ± 0.0009	84.03 ± 0.16	—
Maciejewski vd. (2015)	0.1582 ± 0.0017	0.14591 ± 0.0008	84.26 ± 0.17	98.50 ± 1.70
Collins vd. (2015)	0.1600 ± 0.0018	0.1463 ± 0.0006	84.08 ± 0.16	99.66 ± 0.47
Bu çalışma	0.1641 ± 0.0028	0.1476 ± 0.0011	83.95 ± 0.26	102.62 ± 0.78



Şekil 4.5 Qatar-1b'nin gözlemsel ve kuramsal geçiş ışık eğrileri ve gözlemlerin kuramsal modelden artıkları.

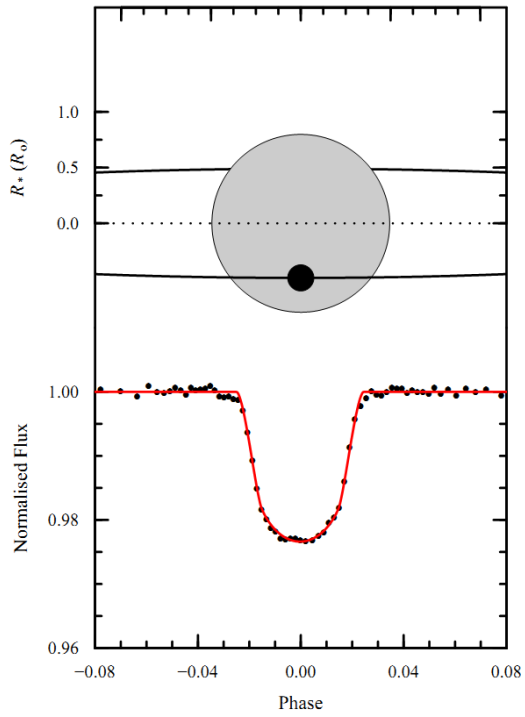
Bu çalışmada elde edilen ve Çizelge 4.8'de verilen WinFitter modeli parametreleri, Mislis vd. (2015)'nin model parametreleriyle daha iyi uyum göstermektedir. Bu çalışmada, her nasılsa, literatürden epey farklı olarak geçiş süresi, $t_4 - t_1$ = 102.62 ± 0.78 dakika hesaplanmıştır.

Qatar-1b'nin 12 adet geçiş ışık eğrisinin WinFitter programı ile çözümünde; literatürden seçilen ve programın iterasyonlarında sabit tutulan parametreler ve çözüm sonucunda elde edilen tüm parametrelerin ağırlıklı ortalamaları, Çizelge 4.9'de verilmiştir. Bu parametreler yardımıyla Qatar-1 b'nin, Safronov sayısı, $\Theta_{\text{Qatar-1 b}}$ = 0.053 ± 0.002 olarak hesaplanmıştır. Bu değerle gezegenin I. ve II. sınıf arasına düştüğü görülmektedir Safronov, 1972. Tüm geçiş ışık eğrilerinin birleştirilerek 70 noktaya toplanmasıyla (binning) elde edilen gözlemsel noktaları ile Çizelge 4.9'da verilen parametrelere göre hesaplanan kuramsal ışık eğrilerinin

karşılaştırılması, Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Şekil 4.6'da, ayrıca, gezegenin geçiş geometrisi de tasvir edilmiştir. WinFitter sonuçlarına göre; gezegen, TrES-3b gibi, yıldız diskinin alt kenarına yakın seyretmektedir. Parametrelerin ağırlıklı ortalamaları hesaplanırken, 4 Ağustos 2015 tarihli geçiş eğrisinin WinFitter model parametreleri, gözlemsel veride eksik noktalardan kaynaklanan yarıçapta görülen farklılık nedeniyle dışarıda bırakılmıştır.

Çizelge 4.9 Qatar-1 yıldız-gezegen sistemi için çözümde literatürden alınan ve sabit tutulan parametreler ile her 11 adet gözlemsel ışık eğrisinin ayrı WinFitter çözümlerinden elde edilen parametrelerin ağırlıklı ortalamaları.

Literatürden alınan ve sabit tutulan parametreler	
$M_\star$ ($M_\odot$)	0.850 ± 0.030
M_g (M_J)	1.090 ± 0.011
T_e (K)	4861 ± 125
Çözümlerden elde edilen parametreler	
$a/R_\star$	6.31 ± 0.11
$R_\star$ ($R_\odot$)	0.798 ± 0.016
$\rho_\star$ ($\rho_\odot$)	1.665 ± 0.103
$\log g_\star$ (cgs)	4.56 ± 0.02
R_p (R_J)	1.142 ± 0.025
ρ_p (ρ_J)	0.680 ± 0.045
$\log g_p$ (cgs)	3.32 ± 0.02
T'_{eq} (K)	1368 ± 29
Safronov sayısı (Θ)	0.053 ± 0.002
Akı $<F>$ (10^9 erg s^{-1} cm^{-2})	0.798 ± 0.060



Şekil 4.6 Qatar-1b ötegezegenin yıldız diskinden geçiş geometrisi (üstte). Gözlenen tüm geçiş ışık verisinin 70 noktaya toplanmasıyla (binning) oluşturulan geçiş ışık eğrisi ile WinFitter kuramsal ışık eğrisinin karşılaştırılması.

Geçiş Ortası Zamanları ve Analizi

Qatar-1b için proje gözlemlerinden elde edilen geçiş zamanları, hataları ve *O-C* değerleri, Çizelge 4.10'da listelenmiştir. Literatürden alınan geçiş zamanları ve bu çalışmada elde edilen geçiş zamanları kullanılarak oluşturulan *O-C* değişimine ağırlıklı en küçük kareler yöntemiyle doğru fit edilmiş ve yeni ışık elemanları,

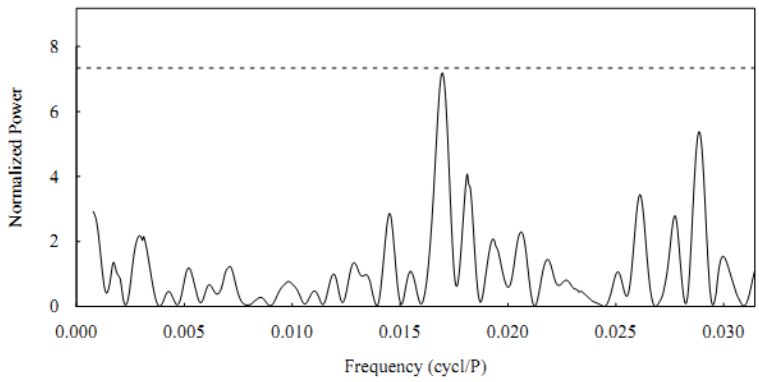
$$T_c = 2456823.4136628(432) + 1.4200248(1) \times E \qquad \ldots (4.4)$$

olarak hesaplanmıştır. İkinci adım olarak, Qatar-1b'nin yeni ışık elemanlarına göre hesaplanan *O-C* verileri, geçiş zamanı değişiminin (TTV) periyodikliğini bulmak için Lomb-Scargle frekans analizine alınmıştır. Frekans analizinde %5 FAP seviyesine çok yakın ν_1 = 0.0169 çevrim P^{-1} (yani, P ~84 gün) değerinde baskın bir frekans görülmüştür (bkz. Şekil 4.7). Şekil 4.7'nin frekans ekseni, Nyquist frekansı ile sınırlandırılmış, dikey ekseni ise normalize güç olarak verilmiştir. Bu baskın frekans kullanılarak, *O-C* değişimine en küçük kareler yöntemiyle sinüs eğrisi fit edilmiş ve A_{ttv} = 0.00053 gün (= 45.8 s) genliği

hesaplanmıştır (bkz. Şekil 4.8). Bu değerin von Essen vd. (2013) tarafından verilen değerle benzer olduğu görülürken, yazar tarafından verilen frekansın (ν_1 = 0.00769 çevrim P^{-1} ya da 180 gün) bu çalışmada %95 olasılığında yanlış uyarı olduğu bulunmuştur.

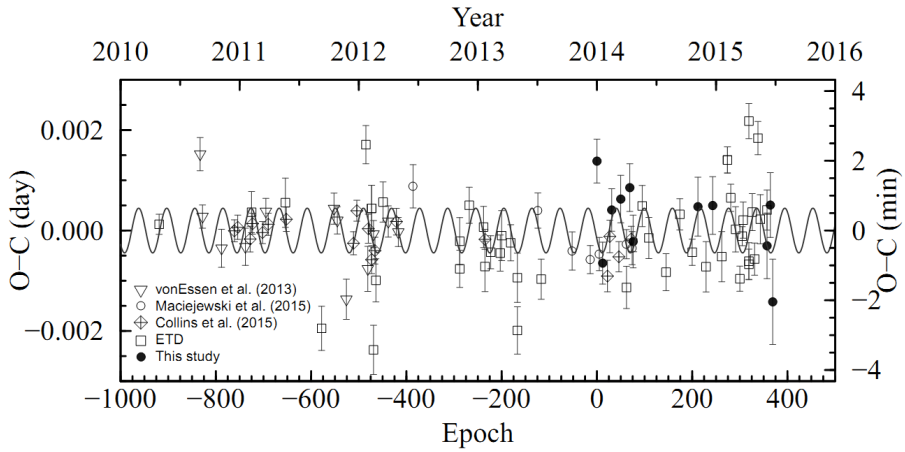
Çizelge 4.10 Qatar-1b'nin proje gözlemlerinden elde edilen geçiş zamanları.

Tarih	Filtre	Çevrim	T_0 (BJD_{TDB} – 2450000+)	O-C (gün)
14.06.2014	$R_{Bessell}$	0	6823.41503 ± 0.00049	0.00141
01.07.2014	$R_{Bessell}$	12	6840.45333 ± 0.00042	-0.00059
28.07.2014	$R_{Bessell}$	31	6867.43474 ± 0.00042	0.00035
24.08.2014	$R_{Bessell}$	50	6894.41544 ± 0.00048	0.00058
20.09.2014	$R_{Bessell}$	69	6921.39598 ± 0.00050	0.00065
30.09.2014	$R_{Cousins}$	76	6931.33525 ± 0.00053	-0.00025
11.04.2015	$R_{Cousins}$	212	7124.45974 ± 0.00063	0.00086
25.05.2015	$R_{Bessell}$	243	7168.48089 ± 0.00059	0.00124
03.11.2015	$R_{Bessell}$	357	7330.36243 ± 0.00073	-0.00004
13.11.2015	$R_{Bessell}$	364	7340.30326 ± 0.00064	0.00062
20.11.2015	$R_{Bessell}$	369	7347.40129 ± 0.00081	-0.00148



Şekil 4.7 Qatar-1b'nin *O-C* verisi için Lomb-Scargle frekans eğrisi. Kesikli çizgi %5 FAP seviyesini göstermektedir.

Şekil 4.8'de, Çizelge 4.10'da verilen ve bu çalışmada elde edilen geçiş zamanları, noktalarla; 2010 yılından başlayan literatür verileri ise çeşitli simgelerle gösterilmiştir. Diyagramda, yıl ve çevrim yatay eksenlerde, *O-C* değişimi ise gün ve dakika birimleriyle gösterilen iki ayrı dikey eksenle verilmiştir. Yaklaşık üçer aylık boşluklar barındıran Şekil 4.8'deki *O-C* değişiminde, ayrıca, Lomb-Scargle frekans analizinden elde edilen baskın frekans (ν), genlik (A_{ttv}) ve faz miktarı (E_{ttv}) kullanılarak çizilen çevrimsel eğri gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Qatar-1b'nin geçiş ortası zamanı değişimi ve fit edilen çevrimsel eğri.

4.1.3 WASP-52b

WASP-52b, Hébrard vd. (2013) tarafından, yıldızından *a* = 0.027 AB uzaklığındaki yörüngesini 1.8 gün'de dolanan ve 0.46 M_J kütlesine sahip bir gezegen olarak duyuruldu. WASP-52, metal bolluğu ve tayf türü, sırasıyla, [Fe/H] = 0.03 ve K2V olan bir yıldızdır. Hébrard vd. (2013)'den WASP-52'ye ilişkin temel parametre değerleri, Çizelge 4.11'de gösterilmiştir.

Swift vd. (2015), WASP-52b'nin kendi fotometrik geçiş gözlemlerini analiz ederek, Hébrard vd. (2013)'ün çalışmaları ile uyum gösteren sonuçlar elde ettiler. Baluev vd. (2015), gezegen geçiş zamanı değişimini incelediler; ancak, sistemde olası üçüncü bir cisim ile ilgili herhangi bir kanıt bulamadılar. Kirk vd. (2016), elde etmiş oldukları yer tabanlı hassas geçiş gözlemleri analizlerinden, WASP-52 yıldızının fotosferinde parlak bir leke olabileceğini öne sürdüler. Mancini vd. (2017) de WASP-52'nin yer-tabanlı fotometrik geçiş gözlemlerini yapmışlar ve gezegen geçişi esnasında gözüken ilave akı değişimlerini soğuk leke varsayımı

altında modellemişler ve izdüşümü dönme-dolanma eğikliğini λ = 3.8° ± 8.4° derece bulmuşlardır.

Çizelge 4.11 WASP-52 yıldız-gezegen sisteminin temel parametreleri.

Parametre	Değer
Kütle, $M_\star$ ($M_\odot$)	0.870 ± 0.030
Yarıçap, $R_\star$ ($R_\odot$)	0.790 ± 0.020
Yoğunluk, $\rho_\star$ (cgs)	1.76 ± 0.08
Yüzey çekim ivmesi, $\log g_\star$ (cgs)	4.582 ± 0.014
Etkin sıcaklık, T_e (K)	5000 ± 100
[Fe/H]	0.03 ± 0.12
Yaş-Gyrochron (Gyıl)	$> 0.4^{+0.3}_{-0.2}$
Geçiş ortası zamanı, T_0 (BJD)	2455793.68143 ± 0.00009
Yörünge dönemi, P (gün)	1. 7497798 ± 0. 0000012
Normalize ayrıklık, $a/R_\star$	7.38 ± 0.11
Doğrusal kenar kararma katsayısı, u	(R) 0.57 [a]
Safronov sayısı (Θ)	0.023 ± 0.001

[a] Claret ve Blomen (2011) çizelgelerinden hesaplamıştır.

WASP-52b, proje çalışması boyunca, 2016 yılı içerisinde, 8 gece fotometrik olarak gözlenmiştir; gözlemlere ilişkin özet bilgi, Çizelge 4.12'de sunulmakta ve gözlemlerden elde edilen geçiş ışık eğrileri, Şekil 4.9'da gösterilmektedir.

Çizelge 4.12 WASP-52b'nin proje gözlemleri.

Tarih	Teleskop+CCD	Nokta sayısı	Bin.	Poz süresi (s)	Hava kütlesi	$\sigma_{gözlem}$ (mkadir)	σ_s (mkadir)
01.07.2016	TUG100+SI1100	108	2	80	2.76 – 1.20	2.3	2.3
08.07.2016	TUG100+SI1100	76	2	80	1.72 – 1.14	2.6	2.6
15.07.2016	TUG100+SI1100	71	2	80	1.82 – 1.16	2.1	2.1
29.07.2016	T60+STL1001E	78	1	100	2.00 – 1.13	3.3	3.3
26.08.2016	T60+STL1001E	184	1	70	2.15 – 1.13 – 1.17	2.5	2.5
02.09.2016	T60+STL1001E	89	1	70	1.17 – 1.13 – 1.35	3.2	3.2
02.09.2016	TUG100+SI1100	140	2	80	1.17 – 1.13 – 1.58	3.3	3.3
21.10.2015	TUG100+SI1100	211	2	60 & 80	1.40 – 1.13 – 2.80	2.4	2.4

Geçiş Işık Eğrileri Çözümü

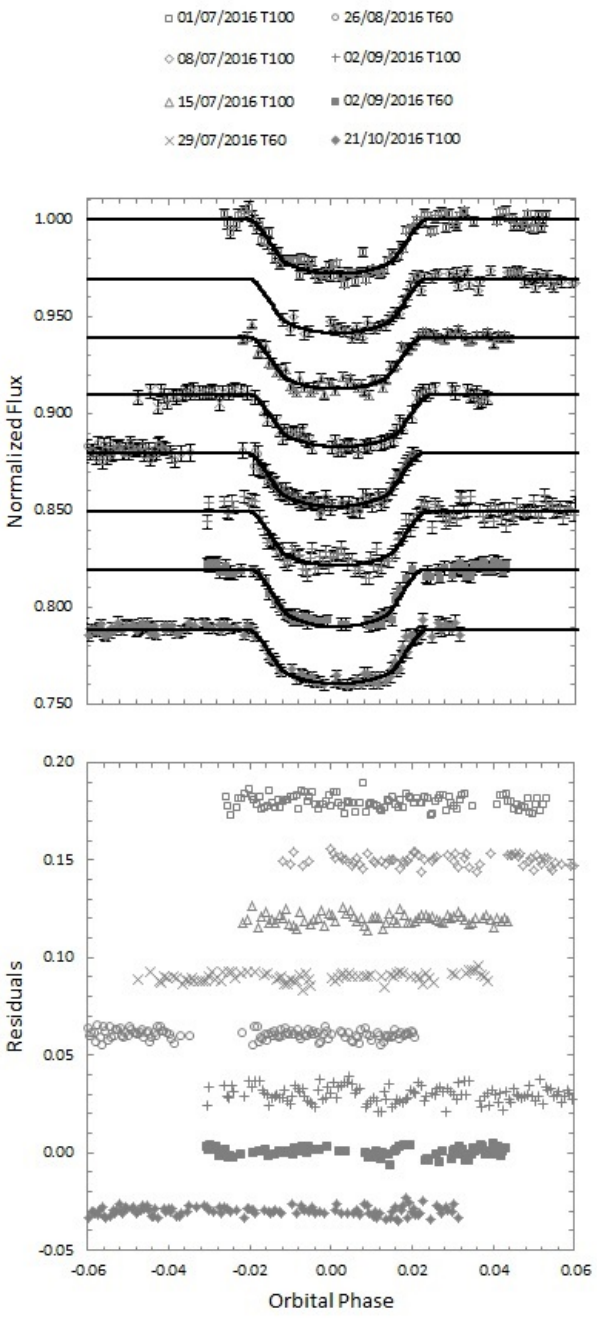
WASP-52b'nin proje çalışmasından elde edilen geçiş ışık eğrileri, WinFitter ile çözüldü. Çözüm sonucu elde edilen parametrelerin ağırlıklı ortalamaları ve hataları ile literatürdeki değerleriyle karşılaştırılması, Çizelge 4.13'te verilmiştir. Gezegenin gözlemsel geçiş ışık eğrileri ile WinFitter modeli kuramsal ışık eğrilerinin karşılaştırılması ise Şekil 4.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.13 WASP-52b'nin WinFitter çözüm sonuçları ve literatür değerleriyle karşılaştırılması.

Çalışmalar	r_1	k (r_2/r_1)	i (°)	$t_4 - t_1$ *(dk)*
Hébrard vd. (2013)	0.1355 ± 0.0020	0.165 ± 0.001	85.35 ± 0.20	—
Swift vd. (2015)	0.1269 ± 0.0125	0.164 ± 0.004	86.52 ± 0.72	108.576 ± 1.872
Kirk vd. (2016)	0.1383 ± 0.0008	0.164 ± 0.002	85.30 ± 0.08	—
Mancini vd. (2017)	0.1384 ± 0.0005	0.1601 ± 0.0002	85.15 ± 0.06	—
Bu çalışma	0.1355 ± 0.0018	0.161 ± 0.005	85.36 ± 0.74	108.350 ± 0.880

Bu çalışmada elde edilen ve Çizelge 4.13'te verilen WinFitter modeli parametreleri, literatür parametreleriyle, özellikle Hébrard vd. (2013)'ün sonuçlarıyla, uyumlu görünmektedir. Bu çalışmada, gezegen geçiş süresi, Swift vd. (2015)'in buldukları değere çok benzer olarak, $t_4 - t_1$ = 108.35 ± 0.88 dakika hesaplanmıştır.

WASP-52b'nin 8 adet geçiş ışık eğrisinin WinFitter programı ile çözümünde; literatürden seçilen ve programın iterasyonlarında sabit tutulan parametreler ve çözüm sonucunda elde edilen tüm parametrelerin ağırlıklı ortalamaları, Çizelge 4.14'te verilmiştir. Bu parametreler yardımıyla, WASP-52b için Safronov sayısı, $\Theta_{\text{WASP-52 b}}$ = 0.023 ± 0.001 olarak hesaplanmıştır. Bu değerle gezegenin II. Safronov sınıfı (Hansen & Barman, 2007) içine düştüğü görülmektedir.



Şekil 4.9 WASP-52b'nin gözlemsel ve kuramsal geçiş ışık eğrileri ve gözlemlerin kuramsal modelden artıkları.

Çizelge 4.14 WASP-52 yıldız-gezegen sistemi için çözümde Hébrard vd. (2013)'den alınan ve sabit tutulan parametreler ile her 8 adet gözlemsel ışık eğrisinin ayrı WinFitter çözümlerinden elde edilen parametrelerin ağırlıklı ortalamaları.

Literatürden alınan ve sabit tutulan parametreler	
$M_\star$ ($M_\odot$)	0.870 ± 0.030
M_g (M_J)	0.460 ± 0.020
$T_{\star,e}$ (K)	5000 ± 100
$T_{g,eq}$ (K)	1315 ± 35
Çözümlerden elde edilen parametreler	
$a/R_\star$	7.43 ± 0.37
$R_\star$ ($R_\odot$)	0.790 ± 0.020
$\rho_\star$ ($\rho_\odot$)	1.765 ± 0.070
$\log g_\star$ (cgs)	4.582 ± 0.045
R_p (R_J)	1.280 ± 0.030
ρ_p (ρ_J)	0.219 ± 0.020
$\log g_p$ (cgs)	2.85 ± 0.03
Safronov sayısı (Θ)	0.023 ± 0.001

Geçiş Ortası Zamanları ve Analizi

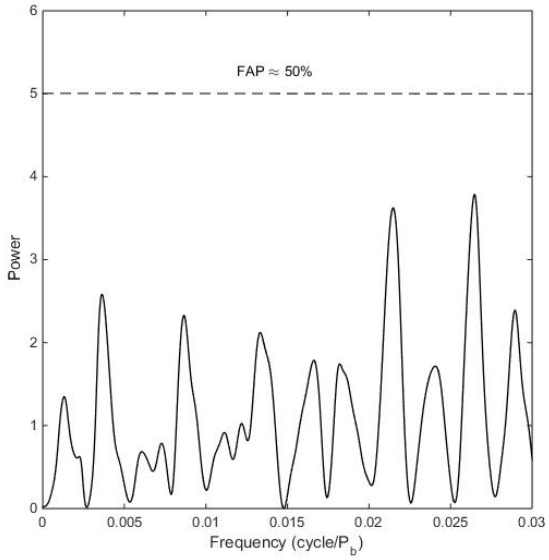
WASP-52b için proje gözlemlerinden elde edilen geçiş zamanları, hataları ve *O-C* değerleri, Çizelge 4.15'te listelenmiştir. Literatürden alınan geçiş zamanları ve bu çalışmada elde edilen geçiş zamanları kullanılarak oluşturulan *O-C* değişimine ağırlıklı en küçük kareler yöntemiyle doğru fit edilmiş ve yeni ışık elemanları,

$$T_c = 2455793.679610(4) + 1.749783710(2) \times E \quad \ldots (4.5)$$

olarak hesaplanmıştır. İkinci adım olarak, WASP-52b'nin yeni ışık elemanlarına göre hesaplanan *O-C* verileri, geçiş zamanı değişiminin (TTV) periyodikliğini bulmak için Lomb-Scargle frekans analizine alınmıştır. Ancak, frekans analizinde baskın bir frekans görülememiştir (bkz. Şekil 4.10).

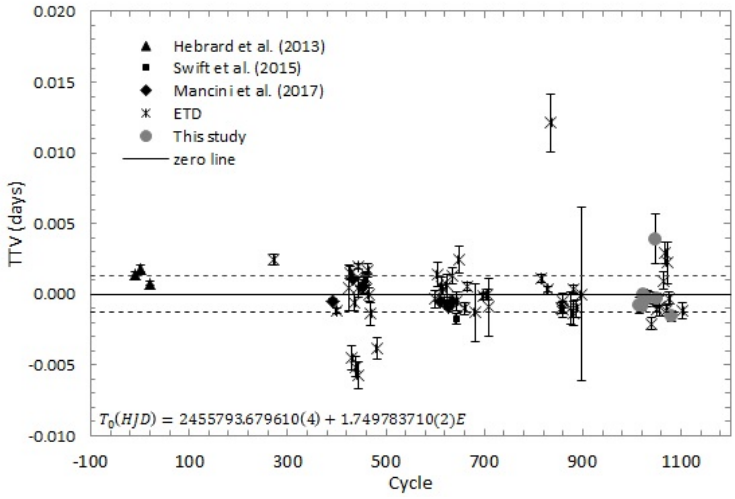
Çizelge 4.15 WASP-52b'nin proje gözlemlerinden elde edilen geçiş zamanları.

Tarih	Filtre	Çevrim	T_0 (BJD_{TDB} – 2450000+)	*O-C* (gün)
01.07.2016	$R_{Bessell}$	1016	7571.4599 ± 0.0006	-0.00076
08.07.2016	$R_{Bessell}$	1020	7578.4589 ± 0.0003	-0.00090
15.07.2016	$R_{Bessell}$	1024	7585.4589 ± 0.0004	-0.00003
29.07.2016	$R_{Bessell}$	1032	7599.4569 ± 0.0006	-0.00030
26.08.2016	$R_{Bessell}$	1048	7627.4608 ± 0.0018	0.00715
02.09.2016	$R_{Cousins}$	1052	7634.4533 ± 0.0004	0.00042
21.10.2015	$R_{Bessell}$	1080	7683.4453 ± 0.0004	-0.00152



Şekil 4.10 WASP-52b'nin *O-C* verisi için Lomb-Scargle frekans eğrisi. Kesikli çizgi %50 FAP seviyesini göstermektedir.

Şekil 4.11'de, Çizelge 4.15'te verilen ve bu çalışmada elde edilen geçiş zamanları, noktalarla; 2010 yılından başlayan literatür verileri ise çeşitli simgelerle gösterilmiştir. Diyagramda, çevrim yatay eksende, *O-C* (TTV) değişimi ise gün birimiyle gösterilmiştir.



Şekil 4.11 WASP-52b'nin geçiş ortası zamanı değişimi. Kesikli çizgiler arasında *O-C* değerlerinin kümelendiği görülmektedir.

Şekil 4.11'den görüleceği üzere, *O-C* noktalarının çoğu (~90% kadarı), genliği ~115 s olan ve kesikli çizgilerle gösterilen bölge içerisine yoğunlaşmıştır. Çevrimsel bir değişime işaret eden baskın bir frekans tespit edilmemiş olmasına rağmen, WASP-52b'nin yörünge döneminin sabit olmadığı söylenebilir. Kirk vd. (2016)'nın ve Mancini vd. (2017)'nin WASP-52b'nin fotometrik gözlemlerinde gezegen geçişi evrelerinde ilave ışık değişimlerinin görülmesi ve leke etkisine bağlanması, dolayısıyla ilave ışık değişimleri (ya da yıldız leke etkisi) nedeniyle geçiş ortası zamanlarının duyarlı bir biçimde okunamayacağı ihtimalini doğurmaktadır. Öte yandan, Mancini vd. (2017) ve Baluev vd. (2015), WASP-52b'nin geçiş zamanı değişimini incelediler; ancak, sistemde olası üçüncü bir cisim ile ilgili herhangi bir kanıt bulamadılar.

4.2 Seçilen Ötegezegenlerin Kepler Geçiş Işık Eğrilerinin ve Geçiş Zamanlarının Analizleri

4.2.1 Kepler-91b

Kepler-91 (KOI-2133.01 = KIC 8219268), 1.3 $M_{\odot}$ kütleli ve 6.3 $R_{\odot}$ yarıçaplı bir kırmızı dev yıldızdır (Lillo-Box vd., 2014a, 2014b). Kepler-91'in etrafında yaklaşık 6.25 gün dönemli, 0.88 M_j kütleli ve 1.38 R_j yarıçaplı, oldukça sıcak (yaklaşık 2000 K) bir ötegezegen dolanmaktadır (Lillo-Box vd., 2014a, 2014b; Barclay vd., 2015). Kepler-91 yıldız-gezegen sistemine ilişkin literatürden toplanan özet bilgi, Çizelge 4.16'da verilmiştir.

Çizelge 4.16 Kepler-91 yıldız-gezegen sisteminin temel parametreleri.

Parametre	Değeri [a]
Kütle, $M_\star$ ($M_\odot$)	1.31 ± 0.10
Yarıçap, $R_\star$ ($R_\odot$)	6.30 ± 0.16
Yüzey çekim ivmesi, $\log g_\star$ (cgs)	2.953 ± 0.007
Etkin sıcaklık, T_e (K)	4550 ± 75
Doğrusal kenar kararma katsayısı, *u*	(*Kp*) 0.549
[Fe/H]	+0.11 ± 0.07
Yaş (Gyıl)	4.86 ± 2.13
Kütle, M_p (M_j)	$0.88^{+0.17}_{-0.33}$
Yarıçap, R_p (R_j)	$1.384^{+0.011}_{-0.054}$
Yoğunluk, ρ_p (ρ_j)	$0.44^{+0.13}_{-0.07}$
Yörünge dönemi, *P* (gün)	6.24650 ± 0.000082
Yörünge eğikliği, i_p (°)	$68.5^{+1.0}_{-1.6}$
Yörünge basıklığı, e_p	$0.066^{+0.013}_{-0.017}$
Normalize ayrıklık, $a/R_\star$	$2.45^{+0.15}_{-0.33}$

[a] Parametrelerin değerleri ve hataları, Lillo-Box vd. (2014a, 2014b)'den alınmıştır.

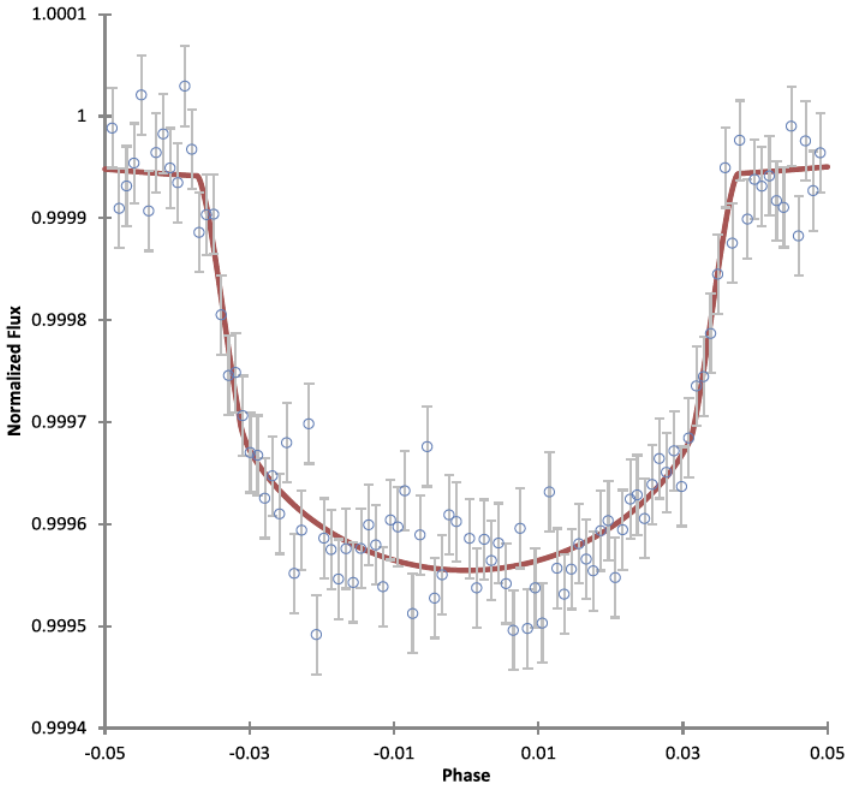
Geçiş Işık Eğrileri Çözümü

Kepler-91 (dev yıldız + dev gezegen) sisteminin WinFitter programı ile analizinde ilk adımda Kepler veri tabanından (NEA) alınan 0 – 17 çeyrekleri arasındaki LC verileri kullanıldı. Her bir veri seti, 0.0 ile 1.0 evre aralığında, yaklaşık 4000'er noktaya indirgendi. Proje çalışmasında, yer-tabanlı fotometrik geçiş gözlemlerinin analizi yapılan TrES-3b, Qatar-1b ve WASP-52b ötegezegenlerinde olduğu biçimde yalnızca geçiş ışık eğrileri değil, Kepler uydusu gözlemlerinin analizinde 0.0 ile 1.0 evre aralığında tüm yörünge evrelerini kapsayacak şekilde ışık eğrilerinin çözümleri yapıldı. WinFitter iterasyonlarında, programa parametre girişi için önceki çalışmalarda bulunan değerler girildi ve $\boldsymbol{U}$ (1'e normalize edilmiş ışık eğrisinin tutulmalar dışındaki akı düzeyinin ortalama değeri), $\boldsymbol{\Delta\phi_0}$ (evre kayması), $\boldsymbol{r_1}$ (yıldızın kesirsel yarıçapı), $\boldsymbol{k}$ (gezegenin yarıçapının yıldızın yarıçapına oranı), $\boldsymbol{r_2}$ (gezegenin kesirsel yarıçapı), $\boldsymbol{i}$ (yıldız-gezegen sisteminin yörünge eğikliği) ve $\boldsymbol{q}$ (gezegenin kütlesinin yıldızın kütlesine oranı) parametreleri serbest bırakıldı. Bulunan sonuçlar, Çizelge 4.17'de verilmektedir.

Çizelge 4.17 Kepler-91'in NEA'dan alınan 17 ışık eğrisi için WinFitter sonuçları.

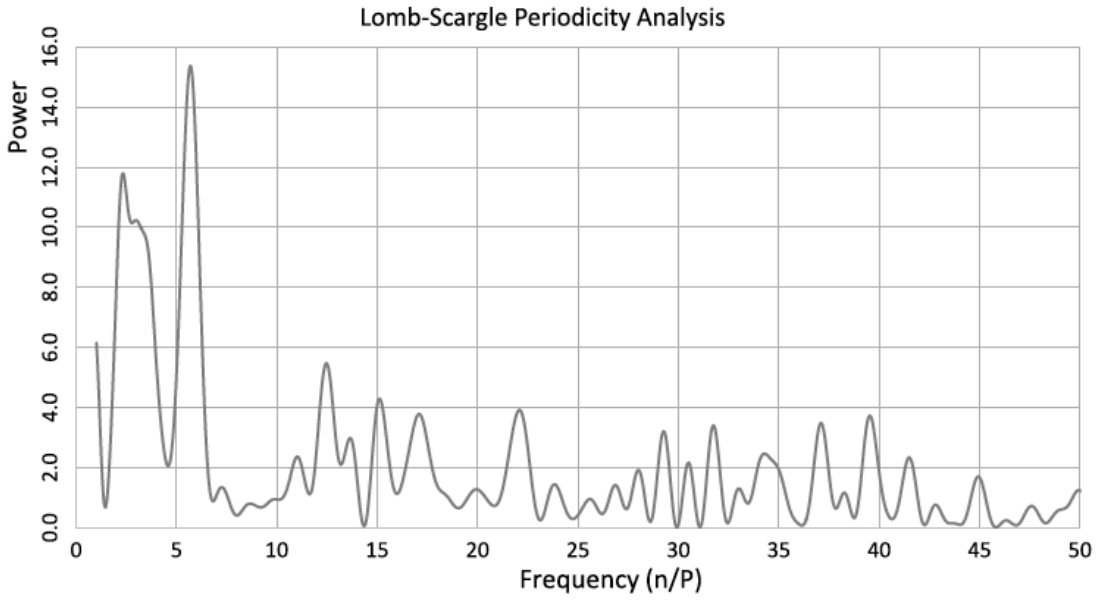
Çeyrek	U	$\Delta\phi_0$	r_1	k	r_2	i (°)	q
1	1.00079	−1.5	0.404	0.0261	0.0105	68.2	0.00039
2	1.00084	−0.5	0.406	0.0247	0.0100	68.5	0.00040
3	0.99972	0.2	0.403	0.0209	0.0084	69.1	0.00037
4	0.99987	0.3	0.403	0.0206	0.0083	70.0	0.00021
5	0.99985	−0.6	0.403	0.0229	0.0092	70.1	0.00039
6	0.99991	2.0	0.407	0.0228	0.0092	68.6	0.00065
7	0.99980	0.6	0.403	0.0183	0.0074	69.8	0.00048
8	0.99981	0.6	0.400	0.0224	0.0089	70.4	0.00046
9	0.99984	−0.4	0.393	0.0215	0.0084	70.3	0.00027
10	0.99984	0.7	0.406	0.0229	0.0093	69.1	0.00051
11	0.99988	−2.1	0.405	0.0237	0.0096	68.9	0.00054
12	0.99984	0.5	0.396	0.0220	0.0087	69.5	0.00042
13	1.00000	−0.6	0.395	0.0220	0.0087	70.1	0.00012
14	1.00002	−0.9	0.403	0.0221	0.0089	69.6	0.00036
15	0.99994	0.6	0.405	0.0206	0.0084	68.8	0.00056
16	0.99967	−1.7	0.407	0.0213	0.0086	69.9	0.00048
17	0.99948	−0.5	0.409	0.0196	0.0080	69.2	0.00055
Ortalama	0.99999(34)	−0.2(1.0)	0.4026(43)	0.0220(18)	0.0089(7)	69.4(7)	0.00045(6)

Analizin ikinci adımında; NEA'dan alınan LC gözlem noktalarından 17 adet ışık eğrilerinin –0.05 ile 0.05 evre aralığına düşen (gezegen geçişini gösteren) veri seçildi ve gerekli evre düzeltmesi yapılarak 97 temsili gözlem noktasına birleştirildi. Kepler-91'in 17 ışık eğrisinin yalnızca geçiş evrelerindeki noktalarının 97 temsili noktasına birleştirilerek oluşturulan gezegen geçiş ışık eğrisi ve Çizelge 4.17'deki WinFitter ağırlıklı ortalama değerlerinden çizdirilen kuramsal eğri, Şekil 4.12'de gösterilmektedir.

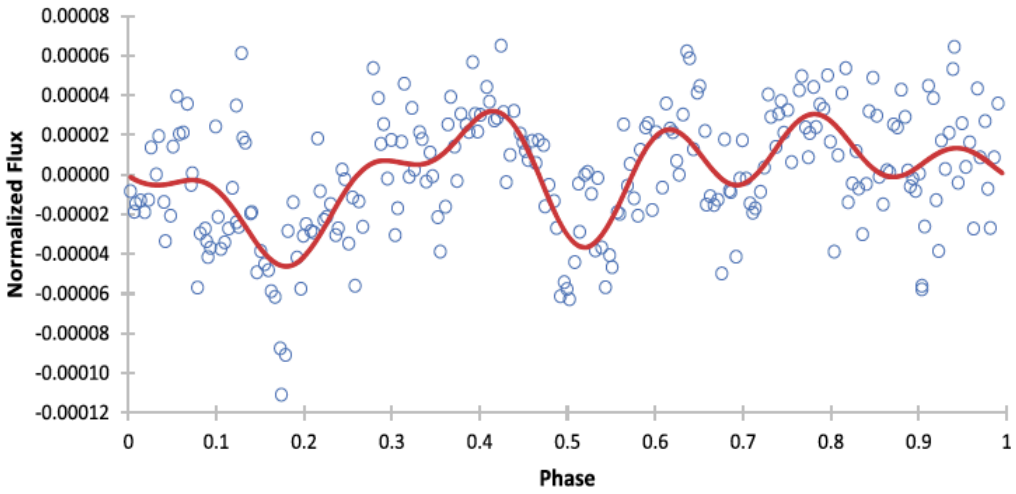


Şekil 4.12 Kepler-91b için geçiş evrelerini kapsayan gözlem noktalarının 97 noktaya indirgenmiş geçiş ışık eğrisi ve WinFitter modeli kuramsal eğri.

Analizin üçüncü adımında; NEA'dan alınan ve her bir veri seti 4000'er noktaya toplama (binning) yöntemiyle indirgenen 17 adet ışık eğrisinin yaklaşık 65000 gözlem noktasına gerekli evre kayması düzeltmeleri yapılarak, ikinci bir toplama (binning) yöntemiyle 360 noktadan oluşan tek bir temsili gözlemsel ışık eğrisi elde edildi. Bu temsili ışık eğrisinin WinFitter ile çözümünde, iterasyonlarda, parametrelerin başlangıç değerleri için, 17 ayrı ışık eğrisinin çözümünden elde edilen değerlerin ortalama değerleri girildi. İterasyon sonucu elde edilen en iyi teorik fit ile gözlem noktaların arasındaki farklara (artıklara) bakıldı. Artık noktalar, bir salınım gösterdiğinden dolayı, bu artık noktalara Lomb-Scargle frekans analizi uygulandı. Sonuçlar, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te gösterilmektedir. Şekil 4.13'te ~6/P frekansında önemli bir pik ve ~3/P frekansında düşük ama geniş bir pik görülmektedir. Kepler-91b gezegeninin ~240 yörünge dolanımını içeren gözlemsel veri setine fit edilen frekans analizi, aslında bir "yörünge-salınım rezonansına" işaret etmektedir. Bu yüzden, bu ilave fotometrik etki, Kepler-91 soğuk kırmızı dev yıldızın yüzeyinde oluşabilen soğuk lekelerden daha çok, Placek vd. (2015) tarafından değinildiği biçimde, Trojan ya da Hilda benzeri sistemde var olabilecek bir asteroid yoğunlaşmasının sistemden gelen ışığı yörünge evresine bağlı biçimde engellemesi olarak açıklanabilir.



Şekil 4.13 Kepler-91 için 65000 LC gözlem noktasının 360 noktaya toplanmasıyla oluşturulan temsili gözlem noktalarıyla WinFitter modeli arasındaki artıklar için Lomb-Scargle yöntemiyle elde edilen güç tayfı.



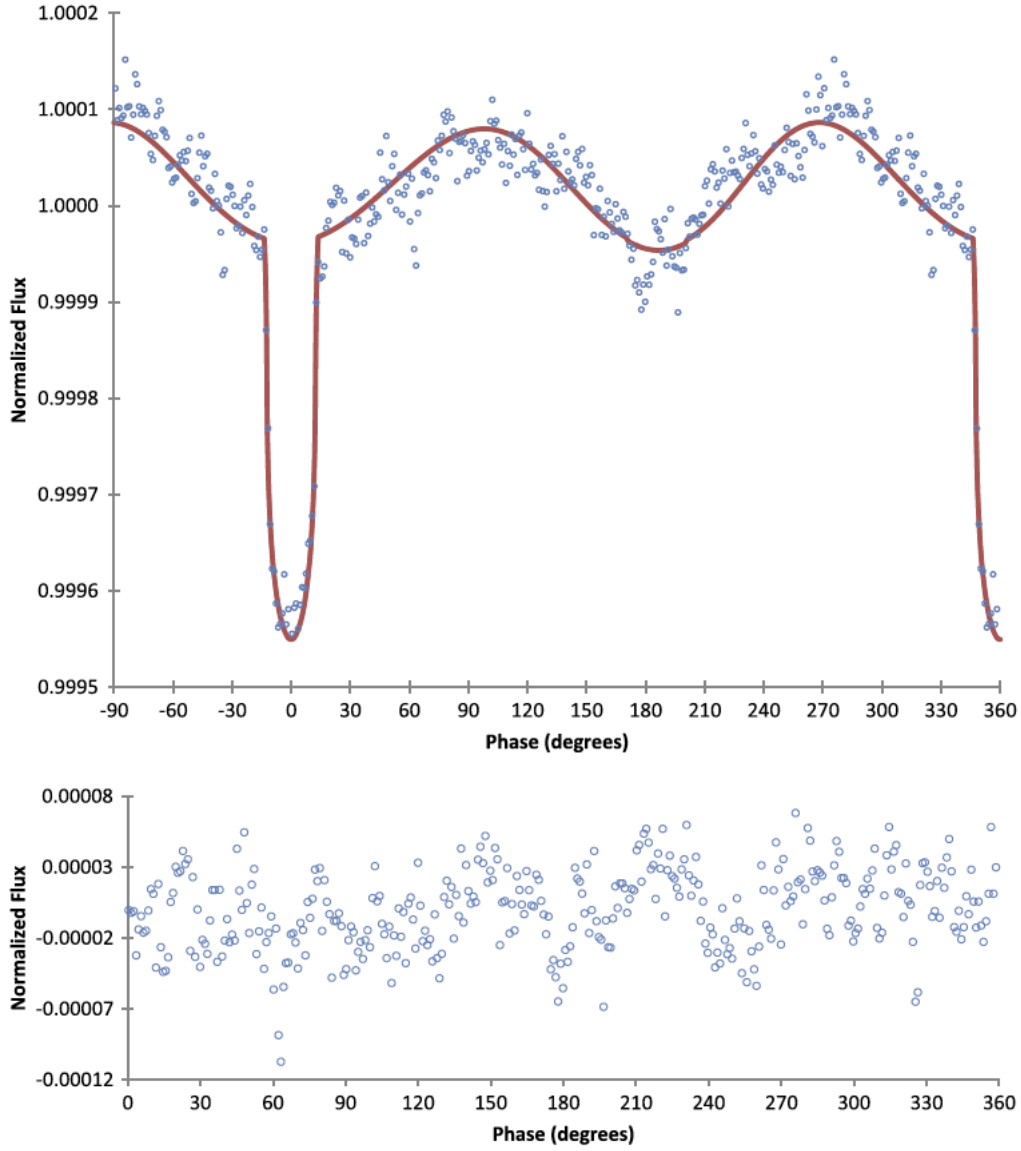
Şekil 4.14 Gözlem-model artıklarına Lomb-Scargle yöntemiyle uygulanan frekans analizinin sonucu. Yaklaşık 0.5 ve 0.17 evrelerde meydana gelen ışık azalmaları, sistemde olası Trojan ve/veya Hilda türü asteroidlerin sistemin ışığını engellemesinden kaynaklanmış olabilir.

Analizin son adımında; artık noktalardan elde edilen en iyi teorik (Fourier frekans) fit kullanılarak, temsili gözlemsel ışık eğrisi arındırıldı/temizlendi. Bu ilave fotometrik etkilerden ayıklanmış/arındırılmış/temizlenmiş temsili ışık eğrisine WinFitter programıyla son/final çözüm uygulandı. Elde edilen parametreler ve literatürdekilerle karşılaştırılması, Çizelge 4.18'de verilmekte; WinFitter modeli ile gözlemlerin karşılaştırılması, Şekil 4.15'te gösterilmektedir.

Sonuç olarak, WinFitter programı, Kepler-91b için "dış merkezli/ basık yörüngeli bir model" vermektedir. Analiz sonucu bulduğumuz fotometrik kütle oranı q=0.00045±0.00006 değeri, Sato vd. (2015)'in yüksek duyarlı dikine hız verisinden elde ettikleri tayfsal kütle oranı değerine çok yakın çıkmıştır (bkz. Çizelge 4.18).

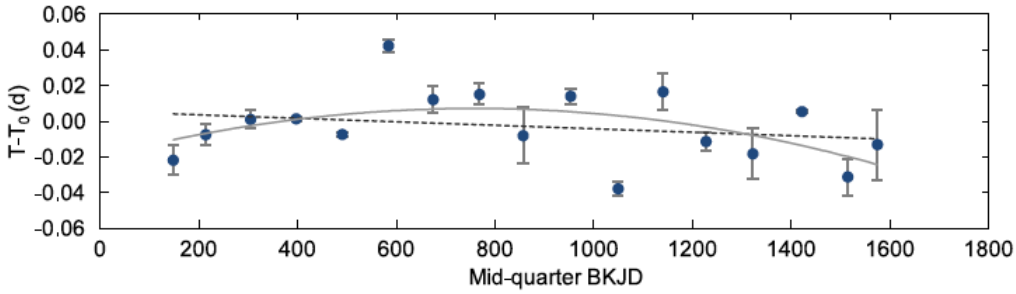
Çizelge 4.18 Kepler-91 sistemi için WinFitter çözüm sonuçları ile literatürdeki değerlerin karşılaştırılması.

Parametre	Lillo-Box vd. (2014a)	Barclay vd. (2015)	Sato vd. (2015)	Esteves vd. (2015)	Bu çalışma	Hata
$M_\star$ ($M_\odot$)	1.31	1.31	1.31	1.31	1.3	
T_p (K)	2000		1920–2460	2040–3000	2000	
a ($R_\odot$)	15.62	15.53	15.93	15.71	15.57	
$\log g_s$ (cgs)	2.95			2.953	2.96	
M_p/M_s	0.00061	0.00053	0.00048	0.00059	0.00044	0.00006
r_s	0.403	0.406	0.406	0.401	0.409	0.004
r_p	0.0091	0.0088	0.0090	0.0087	0.0090	0.0002
i (°)	67–78	69.17	67.37	69.7	69.8	0.5
e	0.07	0.02	0.04	0.0	0.05	0.02
ω (°)	320.0	41.9	302.8		300	20
b	0.88	0.87	0.90	0.87	0.85	0.03



Şekil 4.15 Kepler-91 sisteminin arındırılmış temsili ışık eğrisi. Yakınlık etkileri ve ikinci minimum, ışık eğrisinde belirgin şekilde gözükmektedir. Gözlem noktalarının WinFitter programı ile yapılan son fitten farkları, diyagramın altında gösterilmektedir.

Öte yandan, Kepler-91b'nin geçiş zamanı değişimi (TTV) analizi için ilk adımda sistemin 17 ayrı ışık eğrisi çözümlerinden elde edilen $\Delta\phi_0$ evre kayması değerleri ele alındı ve zamana karşı çizdirildiğinde parabolik bir değişim görüldü (bkz. Şekil 4.16). Çift yıldızlardan iyi bilindiği üzere, kolları aşağıya bakan parabolik *O-C* değişimi, bileşenin yörünge döneminin azaldığını gösterir. Ancak, Sato vd. (2015)'nin Kepler-91b'nin yörünge döneminin artmakta olduğunu önermesi, Kepler-91b'nin yörünge döneminde bir azalma olduğuna işaret eden bu parabolik fitin duyarlığını azaltmaktadır. Bu yüzden Kepler-91b'nin yörünge dönemindeki değişimin hangi yönlü olduğunun belli olabilmesi için duyarlı ve daha çok veriye ihtiyaç vardır.



Şekil 4.16 Kepler-91 sisteminin gözlenen ve hesaplanan birinci minimum zamanları (Kepler-91b'nin geçiş zamanları) arasındaki farklar, kolları aşağıya bakan bir parabolik değişimi göstermektedir.

4.2.2 Kepler-1b

Kepler-1b (ya da KOI-1.01, TrES-2b), O'Donovan vd. (2006) tarafından, Trans-Atlantic Exoplanet Survey (TrES) gözlemlerinde, GSC 03549-02811 yıldızının ışık eğrisinde gezegen geçişi göstermesiyle keşfedildi. O'Donovan vd. (2006), gezegenin kütlesini, 1.17 M_j, yarıçapını 1.16 R_j ve yörüngesini 2.47 gün olarak buldular. Kepler-1b, aynı zamanda, adından/kodundan anlaşılacağı üzere, Kepler uydusunun gözlediği alanda ilk keşfedilen gezegendir. Daha sonraları, Daemgen vd. (2009) tarafından, Kepler-1 sisteminin, gezegenin etrafında 2.47 gün dönemle dolandığı bir G0 yıldızından ve K4.5-K6 kırmızı cücesinden oluştuğu ortaya kondu. Kepler-1 yıldız-gezegen sistemine ilişkin NEA'dan alınan ve WinFitter iterasyonları için kullanılan parametre giriş değerleri, Çizelge 4.19'da verilmiştir.

Çizelge 4.19 Kepler-1 sisteminin temel parametreleri (NEA'dan alınan ortalama değerler)

Parametre	Değer
Kesirsel ışıtma, $L_\star$	0.9683
Kütle, $M_\star$ ($M_\odot$)	0.960
Yarıçap, $R_\star$ ($R_\odot$)	0.980
Yüzey çekim ivmesi, $\log g_\star$ (cgs)	4.440
Yıldızın metal bolluğu, [Fe/H]	- 0.15
Yıldızın etkin sıcaklığı, $T_\star$ (K)	5850
Gezegenin denge sıcaklığı, $T_{p,eq}$ (K)	1470
Gözlemin (*Kp*) etkin dalgaboyu (Å)	7190
Doğrusal kenar kararma katsayısı, *u*	(*Kp*) 0.640
Başlangıç geçiş zamanı (BJD)	2454849.52664
Gezegenin yörünge dönemi (gün)	2.47061892
Gezegenin yörünge ayrıklığı (AB)	0.0353
$M_p/M_\star$	0.0013

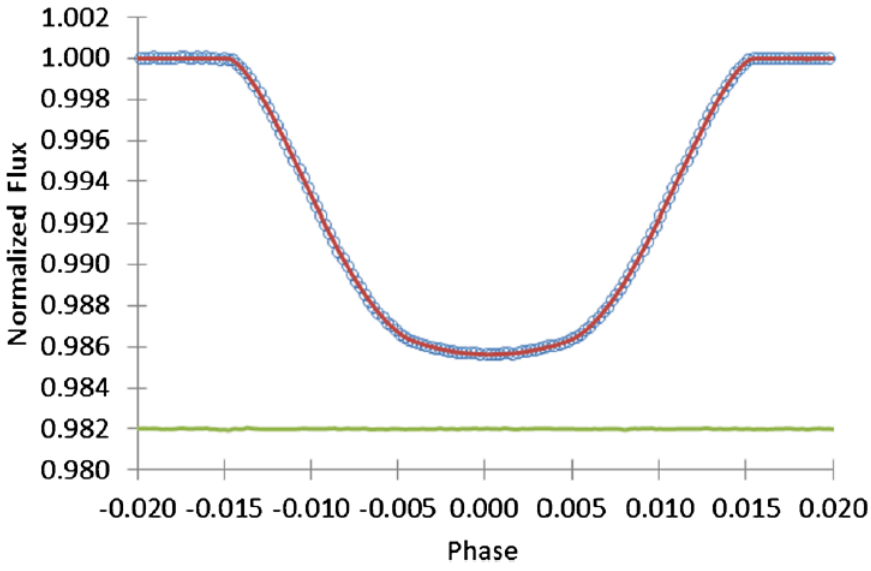
Geçiş Işık Eğrileri Çözümü

Kepler-1 sisteminin WinFitter programı ile analizinde ilk adımda Kepler veri tabanından (NEA) alınan 0 – 17 çeyrekleri arasındaki 14 çeyrek için SC verilerinin tamamı kullanıldı. Toplam 1,570,640 gözlem noktası, 0.0 ile 1.0 evre aralığında, yaklaşık 4000 noktaya indirgendi. Evre aralığı –0.025 ile 0.025 seçilerek yaklaşık 200'er noktadan oluşacak şekilde 14 geçiş ışık eğrisi, WinFitter programına alındı. İterasyonlarda, programa parametre girişi için önceki çalışmalarda bulunan değerler girildi ve $\boldsymbol{U}$ (1'e normalize edilmiş ışık eğrisinin tutulmalar dışındaki akı düzeyinin ortalama değeri), $\boldsymbol{\Delta\phi_0}$ (evre kayması), $\boldsymbol{r_1}$ (yıldızın kesirsel yarıçapı), $\boldsymbol{k}$ (gezegenin yarıçapının yıldızın yarıçapına oranı), $\boldsymbol{r_2}$ (gezegenin kesirsel yarıçapı) ve $\boldsymbol{i}$ (yıldız-gezegen sisteminin yörünge eğikliği) serbest bırakıldı. Bulunan sonuçlar, Çizelge 4.37'de verilmektedir.

Çizelge 4.20 Kepler-1b'nin NEA'dan alınan 14 geçiş ışık eğrisi için WinFitter sonuçları.

Çeyrek	U	$\Delta\phi_0$	r_1	k	r_2	i (°)
0	1.000024	−0.000	0.12583	0.12757	0.01605	83.912
1	0.999993	−0.002	0.12471	0.12743	0.01589	84.003
2	1.000004	−0.002	0.12541	0.12768	0.01601	83.937
4	1.000002	−0.004	0.12485	0.12730	0.01589	83.995
5	1.000029	−0.001	0.12514	0.12774	0.01598	83.973
6	1.000017	0.003	0.12522	0.12775	0.01600	83.997
7	1.000002	0.002	0.12563	0.12783	0.01606	83.946
9	1.000017	−0.003	0.12549	0.12769	0.01602	83.926
10	1.000013	−0.003	0.12548	0.12763	0.01601	83.930
11	1.000023	0.003	0.12539	0.12766	0.01601	83.955
13	1.000031	0.002	0.12542	0.12758	0.01600	83.943
14	1.000022	−0.001	0.12513	0.12763	0.01597	83.960
15	1.000020	0.003	0.12529	0.12770	0.01600	83.961
17	1.000006	0.000	0.12571	0.12771	0.01605	83.925
Ortalama	1.000014(1)	0.000(2)	0.1253(3)	0.1276(1)	0.01600(6)	83.95(3)

Analizin ikinci adımında; Kepler-1 için NEA'dan alınan tüm SC gözlem noktalarından ışık eğrilerinin -0.025 ile 0.025 evre aralığına düşen (gezegen geçişini gösteren) veri seçildi ve gerekli evre kayması düzeltmeleri yapılarak, toplama (binning) yöntemiyle, 200 temsili gözlem noktasına birleştirildi. Böylece, Kepler-1'in 14 ışık eğrisinin yalnızca geçiş evrelerindeki noktalarının 200 temsili gözlem noktasına birleştirilerek oluşturulan gezegen geçiş ışık eğrisi ve Çizelge 4.20'deki WinFitter ağırlıklı ortalama değerlerinden çizdirilen kuramsal eğri, Şekil 4.17'de gösterilmektedir.

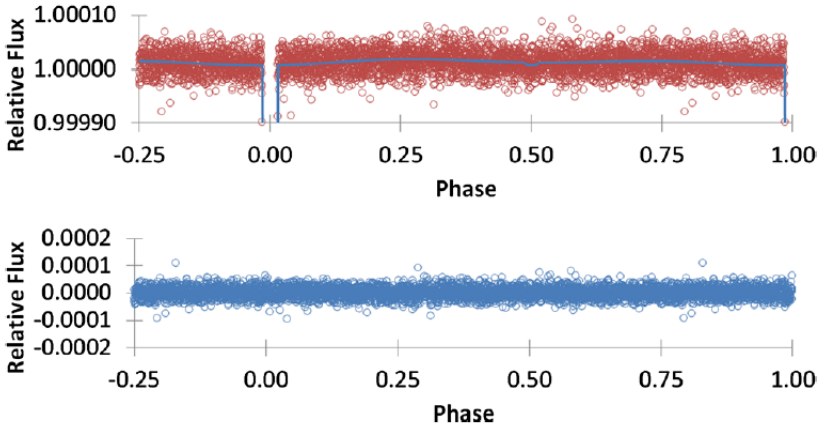


Şekil 4.17 Kepler-1b için geçiş evrelerini kapsayan gözlem noktalarının 200 noktaya indirgenmiş geçiş ışık eğrisi ve WinFitter modeli kuramsal eğri. Gözlem noktalarının WinFitter programı ile yapılan fitten farkları, diyagramın altında gösterilmektedir.

Analizin üçüncü adımında; Kepler-1b için NEA'dan alınan gözlem noktalarına gerekli evre kayması düzeltmeleri yapılarak, yaklaşık 4000 noktadan oluşan tek bir temsili gözlemsel ışık eğrisi kullanıldı. Bu temsili ışık eğrisinin 0.0 ile 1.0 evre aralığındaki çözümünde, iterasyonlarda, parametrelerin başlangıç değerleri için, 14 ayrı ışık eğrisinin çözümünden elde edilen değerlerin ortalama değerleri girildi. İterasyonlarda yalnızca U, q ve geometrik albedo A_g parametreleri serbest bırakılmıştır. Temsili ışık eğrisinde maksimum düzeylerde görülen düşük düzeyli asimetriden yıldız bileşenin ışığında Doppler olayının sorumlu olduğu düşünüldü. Böylece, tüm evrelerde temsili ışık eğrisi, bileşenlerin yakınlık (basıklık ve yansıma) etkileri ve Doppler far etkisi gözönüne alınarak çözüldü. Çözüm sonucu elde edilen parametreler, Çizelge 4.21'de verilmekte ve WinFitter modeli ile gözlemlerin karşılaştırılması, Şekil 4.18'de gösterilmektedir.

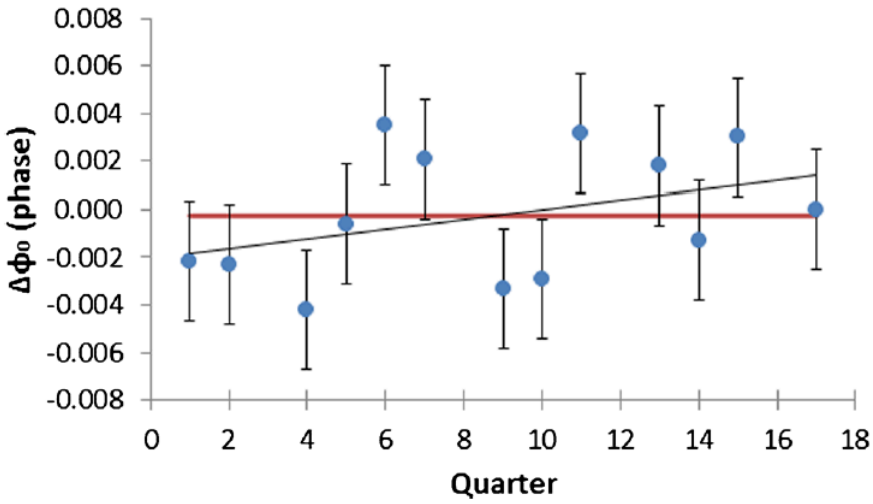
Çizelge 4.21 Kepler-1 sistemi için tüm evre aralığında yaklaşık 4000 noktaya toplanan (binning) temsili gözlemsel ışık eğrisinin WinFitter çözüm sonuçları.

Parametre	Değeri	Hatası
U	1.0000194	5×10^{-7}
L_1	0.9963	
r_1	0.1255	
k	0.1277	
i (°)	83.94	
u_1	0.620	
q	0.00117	0.00004
A_g	0.030	0.003
$\Delta\phi_0$ (°)	0.0	



Şekil 4.18 Kepler-1 sisteminin yaklaşık 4000 noktadan oluşan temsili gözlemsel ışık eğrisi ve WinFitter modeli kuramsal eğri. Maksimum ışık düzeyleri arasındaki düşük düzeyli asimetri için yakınlık etkileri (elipsoidal biçim bozulması/basıklık etkisi ve yansıma etkisi) ile Doppler far etkisi birlikte ele alınmıştır. Işık eğrisinde ikinci minimumda görülen küçük ışık azalmasında gezegenden yansıyan ışığın tutulması modellenmiştir. WinFitter programı ile yapılan son fitin gözlem noktalarından farkı, diyagramın altında gösterilmektedir.

Kepler-1b'nin geçiş zamanı değişimi (TTV) analizi için, Kepler-91b için yapılana benzer biçimde, Kepler-1b'nin 14 ayrı geçiş ışık eğrisi çözümlerinden elde edilen ve Çizelge 4.20'de verilen $\Delta\phi_0$ evre kayması değerleri ele alındı ve zaman anlamında sıralı çeyreklere karşı çizdirildi (bkz. Şekil 4.19). Sonuç olarak, Kepler-1b'nin Şekil 4.19'daki TTV diyagramından gezegenin geçiş zamanı değişimi gösterdiğine ilişkin açık bir kanıta rastlanılmadı.



Şekil 4.19 Kepler-1b'nin geçiş ışık eğrileri çözümlerinden elde edilen $\Delta\phi_0$ evre kaymalarının zaman bazında sıralı çeyreklere göre değişimi. Küçük eğimli, siyah renkli, doğrusal fit, çözümlerde kullanılan, gezegenin yörünge döneminin değişmediğini gösteren kırmızı renkli doğrusal fitten kayda değer derecede fark göstermemektedir.

Kepler-1 yıldız-gezegen sistemi için WinFitter çözümleri kullanılarak hesaplanan mutlak parametre değerleri, hataları ve literatürdeki değerler ile karşılaştırılması, Çizelge 4.22'de gösterilmiştir. Çizelgede önemli farkların, kenar-kararma katsayıları ve geometrik yansıma (albedo) katsayılarında olduğu hemen görülebilir. Kenar-kararma katsayılarındaki fark, aslında, kenar-kararma yasası için, proje çalışmasında lineer formülün kullanılmasından, Barclay vd. (2012)'nin dördüncü dereceden formülü ve Raetz vd. (2014)'nin ikinci dereceden formülü kullanmalarından kaynaklanmaktadır; bu yüzden, kenar-kararma katsayıları için, Çizelge 4.22'de doğrudan bir karşılaştırma verilememiştir. Geometrik yansıma katsayısındaki fark, proje çalışmasında kullanılan ve çekimsel (gel-git=tidal) etki terimini içeren formüllerin (bkz. Bölüm 3.2), Barclay vd. (2012)'nin makalelerindeki denklem (11)'den daha büyük bir etki üretmesinden kaynaklanmaktadır.

Çizelge 4.22 Kepler-1 sistemi için hesaplanan temel parametreler ve literatür ile karşılaştırılması.

Parametre	Bu çalışma	Barclay vd. (2012)	Raetz vd. (2014)
M_p (M_j)	1.18(15)	1.44(21)	1.18(09)
R_s (km x 10^5)	6.62(14)	6.62(14)	6.67(13)
R_p (km x 10^4)	8.46(17)	8.30(16)	8.31(15)
kenar-kararma yasası	doğrusal formül	dördüncü dereceden formül	ikinci dereceden formül
A_g	0.03(02)	0.014(003)	–

5. SONUÇ ve TARTIŞMA

Ötegezegen araştırmalarında en yaygın kullanılan yöntemlerinden biri, ötegezegenlerin fotometrik olarak incelenmesidir. Bu nedenle, ötegezegenlerin fotometrik olarak gözlenmesi ve gözlemlerin analizi, ötegezegen keşfinde ve gezegen parametrelerinin bulunmasında büyük rol oynamaktadır. Şimdiye kadar keşfedilen ötegezegenlerin büyük çoğunluğu fotometrik olarak geçiş gözlemleriyle saptanmıştır. Dolayısıyla, yıldız-gezegen sistemlerinin gözlemsel ışık eğrilerinin çözüm yöntemleri ve sisteme ilişkin parametrelerin duyarlıkla bulunması, ötegezegen araştırmalarında büyük bir öneme sahip olmaktadır.

Literatürde ötegezegenlerin geçiş ışık eğrilerini analiz etmek için en yaygın kullanılan programlara, örnek olarak, JKTEBOP kodu (Southworth vd., 2004a,b), EXOFAST kodu (Eastman vd., 2013) ve WinFitter yazılımı verilebilir. JKTEBOP, EBOP yazılımından (Popper ve Etzel, 1981) türetilmiş bir program olup, hem örten çift yıldızların ışık eğrilerine hem de yıldız-gezegen sistemlerinin ışık eğrilerine uygulanabilmektedir. JKTEBOP kodunda, bileşen cisimler, üç eksenli elipsoitler olarak gözönüne alınırlar. EXOFAST kodu ise ötegezegenlerin yalnızca geçiş ışık eğrileri için Mandel ve Agol (2002) modelini kullanır ve gezegen geçişi dışındaki evreler için ışık eğrisi fitini vermez.

Proje çalışmasının ana konusu, WinFitter yazılımını geliştirmek ve seçilen yıldız-gezegen sistemlerinin gözlemsel fotometrik ışık eğrilerini WinFitter yazılımı ile çözmek ve sonuçları tartışmaktır. WinFitter yazılımında kullanılan matematiksel ve fiziksel yöntemler, Bölüm 3.2'de ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. WinFitter yazılımı, ki-kare algoritmasını içerir; algoritmada en iyi fit edilen model, en küçük ki-kare değerine karşılık gelen model olarak kabul edilir. En küçük ki-kare değerini bulmak için yapılan iterasyonlarda, serbest bırakılan parametrelerde eşzamanlı iyileştirmeyi bulmak için Marquardt-Levenberg yöntemi kullanılır. Bu yöntemle ki-kare çözüm uzayında optimal sonuç için Hessian hata matrisleri hesaplanır. En iyi çözüm için χ^2/ν değeri kullanılır ve 1'e yakın olması beklenir (ki burada ν, iterasyonda serbest bırakılan parametre sayısıdır). Öte yandan, WinFitter yazılımında, eşpotansiyel yüzey tanımları kullanılarak; dönme (rotation) ve gel-git (tidal) tedirginlikleri altında bozunmuş cismin biçimini bulmak için Kopal (1959)'un klasik yaklaşımı ele alındı. Eşpotansiyel yüzeyleri tanımlamak için küresel harmonik seriler kullanıldı. Küresel harmonik serilerde terimlerin katsayılarını hesaplamak için Clairaut teoremi takip edildi. Dönme ve gel-git altında bozunmuş biçim hesabında Kopal (1959) tarafından Radau denklemi adı verilen 1. mertebeden diferansiyel denklemin nümerik açılımı kullanıldı. WinFitter yazılımında, gözlemsel ışık eğrisini fit etme fonksiyonunda, bozucu etkiler için, yakınlık etkileri olarak

küresel yapıdan sapmalar (“basıklık etkisi”) ve ışınımsal etkileşmeler (“yansıma etkisi”) üzerinde duruldu. WinFitter yazılımında, yeterince duyarlı veri için, “Doppler far (beaming) etkisi” de gözönüne alındı.

Yıldız diskinin kenar-kararma etkisini tartışmak için, Rhodes ve Budding (2014)’in çalışmasında kullanılan 16 Kepler ötegezegenin geçiş ışık eğrileri ele alındı. Lineer kenar-kararma katsayısının Van Hamme (1993)’ün çalışmasından hesaplanan kuramsal değerleri ile geçiş ışık eğrilerinin fitlerinden elde edilen gözlemsel değerlerinin karşılaştırması yapıldı. Sonuç olarak, çoğu ötegezegenin geçiş ışık eğrileri için lineer kenar-kararma katsayısının gözlemsel değerlerinin, kuramsal değerlerine yakın çıktığı gözlendi.

Öte yandan, yıldız lekelerinin ötegezegen geçiş ışık eğrilerindeki etkileri üzerinde duruldu. Yıldız leke etkisinin ötegezegen geçiş ışık eğrilerinde gözlenebilmesinin ancak yüksek duyarlığa sahip fotometrik gözlemlerle mümkün olduğu vurgulandı. Örneğin Kepler-2b’nin geçiş ışık eğrisinde görülen yıldız lekesi, güneş lekelerinden çok daha büyük boyutlara ulaşabilmektedir. Bazı durumlarda ise, örneğin Kepler-410b’nin geçiş ışık eğrisinde, yıldız leke etkisinin büyüklüğü neredeyse tutulmanın büyüklüğü kadar çıkabilmektedir.

WinFitter yazılımı, proje çalışmasında, çoğunlukla, Doppler far etkisini modellemek için geliştirildi. Model için kullanılan matematiksel denklemler ve fiziksel yaklaşım, Bölüm 3.2’de verilmiştir. Ele alınan bir yıldız-gezegen sisteminin gözlemsel fotometrik ışık eğrisinde, Doppler far etkisini modelleyebilmek için, önceden söz edildiği biçimde, yeterince yüksek duyarlı veri gerekmektedir. Yazılan model, örnek olarak, Kepler-1 ve Kepler-13 yıldız-gezegen sistemlerinin ışık eğrilerine uygulandı (bkz. Bölüm 3.2).

WinFitter yazılımı, geliştirilen kısımlar, kullanılan denklemler ve fiziksel yaklaşımlar, Kepler-1 yıldız-gezegen sisteminin Kepler uydusundan alınan fotometrik verisinin analizinin verildiği ve bulguların tartışıldığı, aynı zamanda projenin önemli bir çıktısı olan, Budding vd. (2016b)’nin makalesinde ayrıntılı bir şekilde literatüre sunulmuştur. Bu çalışmada, kabul edilen ideal küresel modelden ΔL ışık değişimi, Barclay vd. (2012)’nin çalışmasında yapıldığına benzer biçimde, üç terimin katkısı olarak gözönüne alındı:

$$\Delta L = \Delta L_{E1} + \Delta L_{R2} + \Delta L_{D1} \quad \text{... (5.1)}$$

Burada, ΔL_{E1}, birinci bileşenin (yıldızın) dönmesinden ve çekimsel etkiden dolayı küresel biçiminin bozulmasından oluşan ışık değişimini; ΔL_{R2}, ikinci bileşenin (gezegenin)

yüzeyinden, birinci bileşenin ışığından dolayı, yansıyan ışık miktarını ve ΔL_{D1}, birinci bileşene (yıldıza) ilişkin Doppler far etkisini göstermektedir. ΔL_{E1}, ΔL_{R2} ve ΔL_{D1} ışık değişimlerinin nasıl hesaplanabileceğine ilişkin denklemler, sırasıyla denklem (3.31), denklem (3.35) ve denklem (3.39)'da verilmiştir. Denklem (5.1)'deki ΔL terimleri, tutulma dışı evreler için geçerlidir; tutulma evrelerinde ΔL terimleri yerine $(\Delta - \delta)L$ terimleri yazılır ki burada δ, Δ ışık değişimlerinin tutulma olduğunda örtülen kısımlarını göstermektedir. Aslında, uygulamada, ΔL_{E1} ve ΔL_{R2} ışık değişimleri, gezegen geçiş evrelerinde, gözönüne alınamayacak denli çok küçüktür; ancak, ΔL_{R2}'nin, gezegenin yüzeyinden yansıyan ışık değişimi olduğu için, özellikle gezegenin örtüldüğü evrelerde dikkate alınması gerekmektedir, dolayısıyla ΔL_{R2}, yıldız-gezegen sisteminin ışık eğrisinin ikinci minimum derinliğiyle doğru orantılıdır. Öte yandan, bu üç ışık değişimi, aynı zamanda, birbirinden bağımsız değildir. Örneğin, denklem (3.39)'a göre, $\Delta L_{D1} = L_{D1} - L_1$ olmak üzere, Doppler etkisinin, denklem (3.41)'den görüleceği üzere, yörünge eğikliği dışında, yalnızca *q* kütle oranına bağlı olduğu görülebilir. Öte yandan, yapısal sabitler yüzünden biçim basıklığı (bileşenlerin elipsoit biçimleri), *q* kütle oranını etkiler (bkz. denklem (3.33) ve denklem (3.34)) ve böylesi parametreler arasındaki ilişki, ΔL terimlerinin birbirine bağımlı olmasını gerekli kılar. Literatürden, örneğin, Faigler ve Mazeh (2011) ve Barclay vd. (2012), ΔL_{E1} ile ΔL_{D1}'in gerçekte birbirinden bağımsız terimler olamayacağına dikkat çekmişlerdir.

Proje çerçevesinde gözlem kriterlerine bağlı olarak seçilen ötegezegenlerin yer-tabanlı fotometrik geçiş gözlemleri, ÇOMÜG'deki 122 cm (T122), 30 cm (T30) ve İstanbul Üniversitesi ortaklığı ile kurulan 60 cm (T60) ayna çaplı teleskoplar ile TUG'daki 100 cm (TUG100) ayna çaplı teleskop kullanılarak yapılmıştır. Yer-tabanlı proje gözlemlerinde, seçilen yıldız-gezegen sistemlerinin ışık eğrilerinde gezegen örtüldüğünde gezegenden yansıyan ışığın örtülmesini temsil eden ikinci minimum evrelerinde ikinci minimum derinliklerinin tespit edilemeyecek denli sığ olmasından dolayı, yalnızca ötegezenlerin geçiş ışık eğrileri elde edilmiştir. Böylece, proje gözlemlerinden yeterince duyarlıkta ve sayıda geçiş ışık eğrisine sahip olan ötegezegenlerin (TrES-3b, Qatar-1b ve WASP-52b) fotometrik analizleri, WinFitter yazılımı kullanılarak yapılmıştır. TrES-3b için 12 geçiş ışık eğrisi, Qatar-1b için 12 geçiş ışık eğrisi ve HAT-P-52b için 8 geçiş ışık eğrisi çözüme alınmıştır.

Kepler uydusu gözlemlerindeki yüksek duyarlık, bazı durumlarda, gözlenen yıldız-gezegen sistemlerinin ışık eğrilerinde derinlikleri çok sığ olan ikinci minimumların belirgin olmasını sağlar. Bu nedenle, proje çalışmasında, Kepler-91 ve Kepler-1 yıldız-gezegen sistemlerinin, hem gezegenin yıldızın önünden geçişini kapsayan birinci minimum evrelerini hem de gezegenin yıldız tarafından örtülmesini kapsayan ikinci minimum evrelerini, doğru bir

deyişle sistemin 0.0 ile 1.0 evre aralığında tüm yörünge evrelerini kapsayacak şekilde ışık eğrileri, WinFitter yazılımı kullanılarak, çözülmüştür. Kepler NEA veri tabanından, Kepler-91 için 17 ışık eğrisi ve Kepler-1 için 14 ışık eğrisi analize alınmıştır.

Sonuç olarak, proje çalışmasında fotometrik geçiş ışık eğrileri çözümleri yapılan 3 ötegezegene ve tam ışık eğrileri çözülen 2 ötegezegene ilişkin hesaplanan temel fiziksel parametreler, Çizelge 5.1'de özetlenmektedir.

Çizelge 5.1 Projede örnek olarak çalışılan 5 dev gezegene ilişkin temel parametreler.

Gezegen	M_p (M_J)	R_p (R_J)	ρ_p (g cm^{-3})	log g_p (cgs)	Θ	T'_{eq} (K)
TrES-3b	[1]1.910 ± 0.064	1.388 ± 0.035	0.886 ± 0.066	3.39 ± 0.02	0.068 ± 0.003	1641 ± 25
Qatar-1b	[2]1.090 ± 0.011	1.142 ± 0.025	0.901 ± 0.06	3.32 ± 0.02	0.053 ± 0.002	1368 ± 29
WASP-52b	[3]0.46 ± 0.02	1.28 ± 0.03	0.27 ± 0.02	2.85 ± 0.03	0.023 ± 0.001	1297 ±30
Kepler-91b	0.60 ± 0.08	1.37 ± 0.05	0.39 ± 0.05	2.898 ± 0.065	0.048 ± 0.011	[4]2040
Kepler-1b	1.18 ± 0.05	1.21 ± 0.05	0.88 ± 0.12	3.350 ± 0.032	0.073 ± 0.005	1350 ± 18

[1] Sozzetti vd. (2009), [2] Alsubai vd. (2011), [3] Hebrard vd. (2013) ve [4] Lillo-Box vd. (2014).

Önceden sözü edildiği üzere; yer-tabanlı gözlemlerden TrES-3, Qatar-1 ve WASP-52 yıldız-gezegen sistemlerinin ışık eğrilerinde yalnızca gezegen geçişlerinin (yani, birinci minimumların) elde edilebilmesi, dolayısıyla yalnızca gezegen geçiş ışık eğrilerinin çözülmesi, ışık eğrisi analizinde, bu sistemlerin kütle oranlarının literatürden alındığı biçimde sabit tutulmasını (serbest bırakılamamasını) gerek kılmaktadır. Bu nedenle, Çizelge 5.1'de, projede örnek olarak çalışılan ve yer-tabanlı gezegen geçiş ışık eğrilerinin çözümleri yapılan TrES-3b, Qatar-1b ve WASP-52b gezegenlerinin temel parametreleri hesaplanırken gezegenlerin kütleleri için literatürden alınan değerler kullanılmıştır. Ancak geçiş ışık eğrilerinin çözümü, bileşenlerin *k* yarıçaplar oranının duyarlı biçimde hesaplanabilmesine olanak sağlar. Böylece, bu çalışmada, bu üç ötegezegenin yarıçapları ve buna bağlı olarak ortalama yoğunlukları, yüzey çekim ivmeleri, Safronov sayıları ve denge sıcaklıkları hesaplanmıştır.

Kepler-91 yıldız-gezegen sisteminin fotometrik analizinde, Kepler NEA'dan alınan LC gözlem noktalarının 360 noktaya toplanmasıyla (binning yöntemiyle) oluşturulan ve 0.0 ile 1.0 arasındaki tüm yörünge evrelerini kapsayan temsili gözlemsel ışık eğrisinin çözümünde, iki önemli sonuç göze çarpmaktadır. WinFitter iterasyonları sonucu elde edilen en iyi teorik fit ile gözlem noktaların arasındaki farklara uygulanan Lomb-Scargle frekans analizinin sonuçları (bkz. Şekil 4.13), bir yörünge-salınım rezonansı olarak yorumlanmış ve Kepler-91 yıldız-gezegen sisteminin ışık eğrisinde görülen ilave ışık değişimlerinin (bkz. Şekil 4.14), soğuk kırmızı dev yıldızın yüzeyinde oluşabilen soğuk lekelerden daha çok, Placek vd. (2015) tarafından değinildiği biçimde, güneş sistemindeki Trojan ya da Hilda benzeri sistemde var olabilecek bir asteroid yoğunlaşmasının sistemden gelen ışığı yörünge evresine bağlı biçimde engellemesi olarak açıklanmıştır. Öte yandan Kepler-91'in ışık eğrisinin (bkz. Şekil 4.15), yalnız gezegen geçiş evresinde değil, tüm evrelerde WinFitter ile çözümü (özellikle gezegenin örtüldüğü ikinci minimum derinliği belirgin olan ışık eğrisinin çözümü), sistemin kütle oranının da serbest parametre olarak duyarlıkla belirlenmesine imkan sağlamıştır. Böylece, bu çalışmada, Kepler-91 için, WinFitter yazılımı ile fotometrik yoldan bulunan kütle oranı değeri (q_{photo}= 0.00044 ± 0.00006), Barclay vd. (2015)'in yüksek duyarlıklı dikine hız verisinden buldukları tayfsal kütle oranı değerine (q_{spec}= 0.00053) çok yakın çıkmıştır.

Kepler-1 yıldız-gezegen sisteminin fotometrik analizinde, Kepler NEA'dan alınan 1,570,640 gözlem noktasının 4000 noktaya toplanmasıyla (binning yöntemiyle) oluşturulan ve 0.0 ile 1.0 arasında tüm yörünge evrelerini kapsayan temsili gözlemsel ışık eğrisinin çözümünde önemli sonuçlar elde edilmiştir. Kepler-91'in ışık eğrisi çözümünde olduğu gibi, Kepler-1'in ışık eğrisinde ikinci minimumun gözönüne alınması, WinFitter iterasyonlarında sistemin kütle oranı q'nun ve geometrik albedo A_g'nin serbest bırakılmasına, dolayısıyla duyarlıkla belirlenmesine imkan sağlamıştır. Böylece, bu çalışmada, WinFitter ile yüksek duyarlıkla bulunan sistemin kütle oranından hesaplanan Kepler-1b gezegenin kütle değeri (M_p = 1.18 ± 0.15 M_J), O'Donovan vd. (2006)'nın ve Sozzetti vd. (2007)'nin tayfsal yolla buldukları kütle değerlerine (sırasıyla, M_p = 1.28 +0.09 /- 0.04 M_J ve M_p = 1.20 ± 0.05 M_J) çok yakın çıkmıştır. Öte yandan Kepler-1'in tüm evrelerde ışık eğrisinin WinFitter çözümünde, maksimum ışık düzeylerinde görülen düşük düzeyli asimetri, Doppler far etkisi ile yıldızın biçimsel basıklığı (elipsoit biçim) etkisinin birlikte modellenmesine imkan sağlamıştır (bkz. Şekil 4.18). Aynı zamanda, Kepler-1 sisteminin ışık eğrisinde ikinci minimumda görülen küçük ışık azalmasında gezegenden yansıyan ışığın tutulması modellenmiştir. Ancak, bu çalışmada bulunan geometrik albedo ile Barclay vd. (2012) tarafından bulunan geometrik albedonun oldukça farklı çıkması, hem Kepler-1'in gözlemsel ışık eğrisinde ikinci minimum

derinliğinin kesin olarak ölçülememesinden hem de proje çalışmasında kullanılan ve çekimsel (gel-git=tidal) etki terimini içeren formüllerin (bkz. Bölüm 3.2), Barclay vd. (2012)'nin makalelerindeki denklem (11)'den daha büyük bir etki üretmesinden kaynaklanmaktadır.

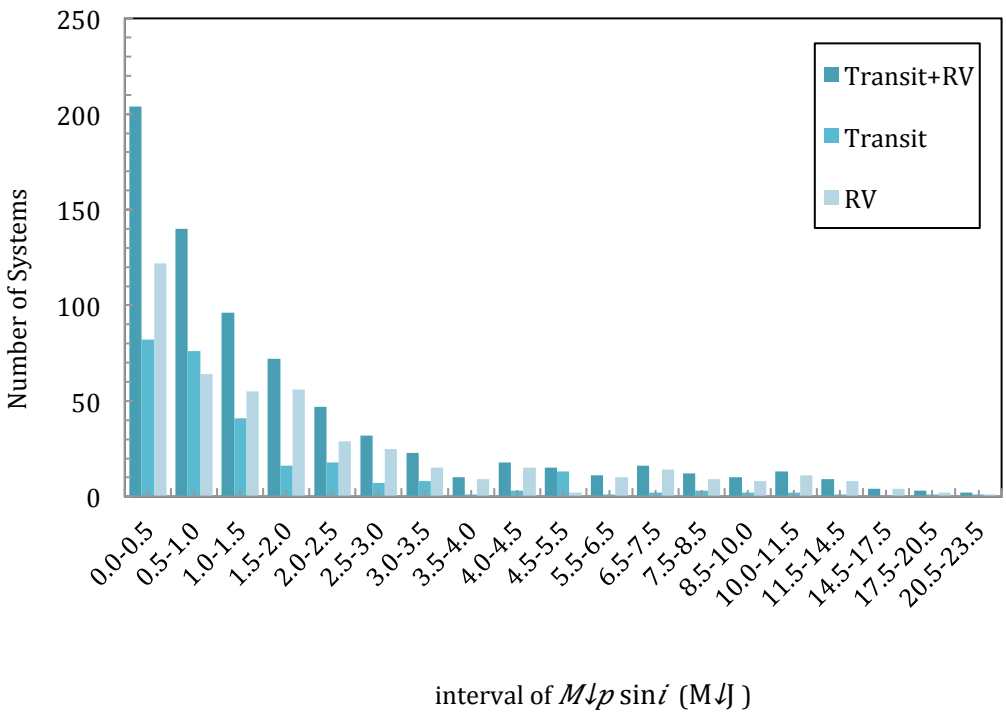
Safronov sayısı, bir gezegenin diğer cisimler üzerindeki çekimsel tedirginliğinin bir ölçüsüdür. Hansen ve Barman (2007) tarafından önerilen sınıflamaya göre; gezegenlerin denge sıcaklıkları ile Safronov sayıları arasında iki sınıf oluşturan bir dağılım vardır. Buna göre, Safronov sayısı $\Theta \sim 0.07 \pm 0.01$ aralığında dağılan gezegenler, I. Sınıf ve $\Theta \sim 0.04 \pm 0.01$ aralığında olanlar ise II. Sınıf olmaktadır. Sınıflar arasındaki temel fark, kütlede görülmektedir: I. sınıf gezegenler, benzer T'_{eq} değerindeki II. sınıf gezegenlere göre, çekimsel olarak bağlı bulundukları yıldızlar daha küçük kütleli iken gezegenlerin kendileri daha büyük kütlelidirler. Ayrıca, I. sınıf gezegenler, benzer T'_{eq} değerindeki II. Sınıf gezegenlere göre, daha soğuk yıldızların çevrelerinde ancak daha yakın uzaklıklarda dolanmaktadırlar (Hansen ve Barman, 2007). Proje çalışmasında ele alınan dev gezegenlerden, TrES-3b ve Kepler-1b, I. Sınıf; WASP-52b ve Kepler-91b ise II. Sınıf gezegen olmakta; Qatar-1b ise $\Theta_{Qatar\text{-}1b} = 0.053 \pm 0.002$ değeriyle I. Sınıf ve II. Sınıf arasına düşmektedir. Öte yandan, Hansen ve Barman'ın 2007'de yaptıkları bu sınıflama/ayırım, 2007'den bu yana neredeyse üstel olarak artan veri karşısında belirsizliğe düşmektedir (örneğin bkz. Southworth, 2010).

Proje çalışmasında yer tabanlı gözlenen gezegenler içinde sadece Qatar-1b için %6.5 FAP değerinde baskın sayılabilecek bir frekans yakalanmıştır. Bu frekans için tek cismin tedirginliğine dayalı sinüs modeli anlamlı olarak yorumlanabilir (bkz. Şekil 4.8). Kepler-91b'nin TTV analizinde, parabolik bir değişimden söz edilmiş (bkz. Şekil 4.16), dolayısıyla gezegenin yörünge döneminde bir azalış olabileceği olasılığı üzerinde durulmuş, ancak, gezegenin yörünge dönemindeki değişimin kesin bir şekilde belirlenebilmesi için duyarlı ve daha çok veriye ihtiyaç olduğu belirtilmiştir.

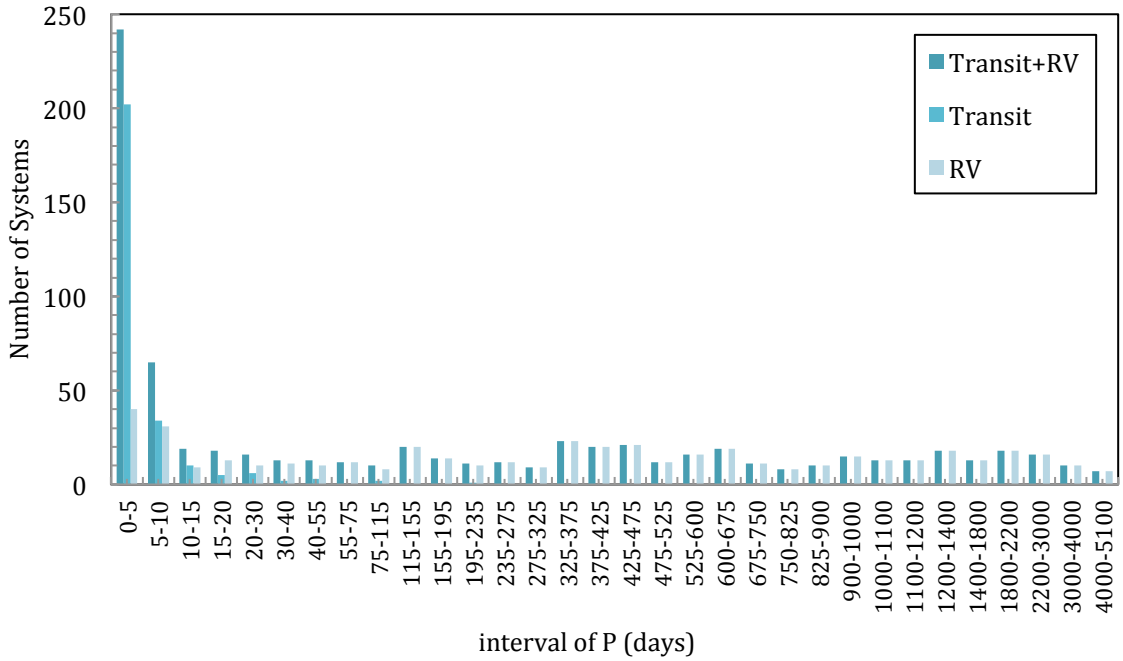
Proje çalışmasının nihai hedeflerinden biri, iyi çalışılmış yıldız-gezegen sistemlerinde parametre dağılımlarını incelemektir. Bunun için, şimdiye kadar izlenilen yöntem yerine farklı bir yöntem izlenildi: Yalnızca fotometrik gözlemler ve bulgulardan faydalanmak yerine duyarlı tayfsal gözlemlerin ve duyarlı fotometrik gözlemlerin birlikte analizinden elde edilen parametrelerin dağılımları üzerinde durmak. Bu istatistiksel amaçta parametre değerlerini almak için "The Exoplanet Data Explorer (exoplanets.org)" veri tabanı seçildi ve duyarlı fotometrik ve tayfsal gözlemlerin birlikte analiz edildiği 737 yıldız-gezegen sisteminin temel parametre değerleri kullanıldı. Böylece, ele alınan sistemlerin gezegen kütle değeri, yörünge

dönemi değeri, dikine hız genliği değeri, yıldız kütle değeri ve yörünge basıklığı değeri istatistiksel dağılımları incelendi.

Şekil 5.1'de yıldız-gezegen sistemi sayılarının gezegen kütle değerlerine göre dağılımı verilmiştir. Buna göre, seçilen 737 örnek yıldız-gezegen sisteminde 23.5 M_j'den büyük kütleli gezegen gözlenmemiştir. Keşfedilen ötegezegenlerin yaklaşık %60'ı $0 < M_p \sin i < 1.5\ M_J$ kütle değer aralığına düşmektedir. Öte yandan, yıldız evrimi kuramsal çalışmalarda deteryum yanması (yani yıldız oluşumu) için varsayılan minimum gaz/plazma kütlesi 13 M_j olarak verilmektedir (örneğin Desidera vd., 2012; Boss vd., 2012). Belki çok büyük kütleli gezegenler keşfedildikçe yıldız evrimi kuramsal çalışmalarının tekrar gözden geçirilmesi gerekecektir.

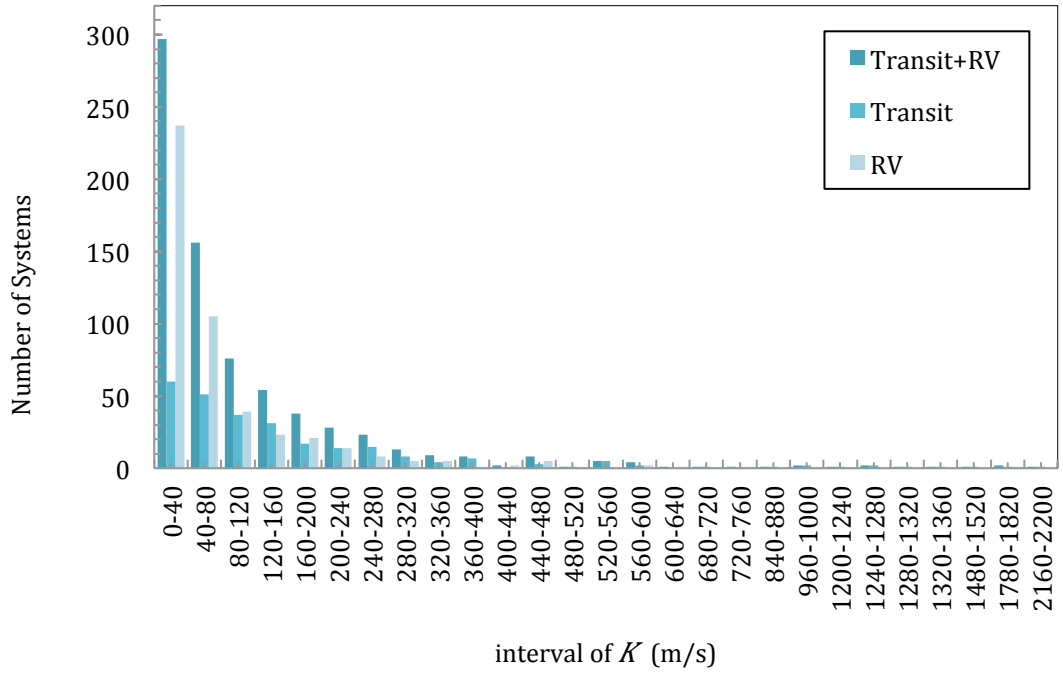


Şekil 5.1 Seçilen 737 yıldız-gezegen sisteminin gezegen kütlesine göre istatistiksel dağılımı. Koyu mavi olanlar, fotometrik ve tayfsal yolla keşfedilen ötegezegenleri; mavi olanlar, yalnızca fotometrik yolla keşfedilen ötegezegenleri ve açık mavi olanlar, yalnızca tayfsal yolla keşfedilen ötegezegenleri göstermektedir.



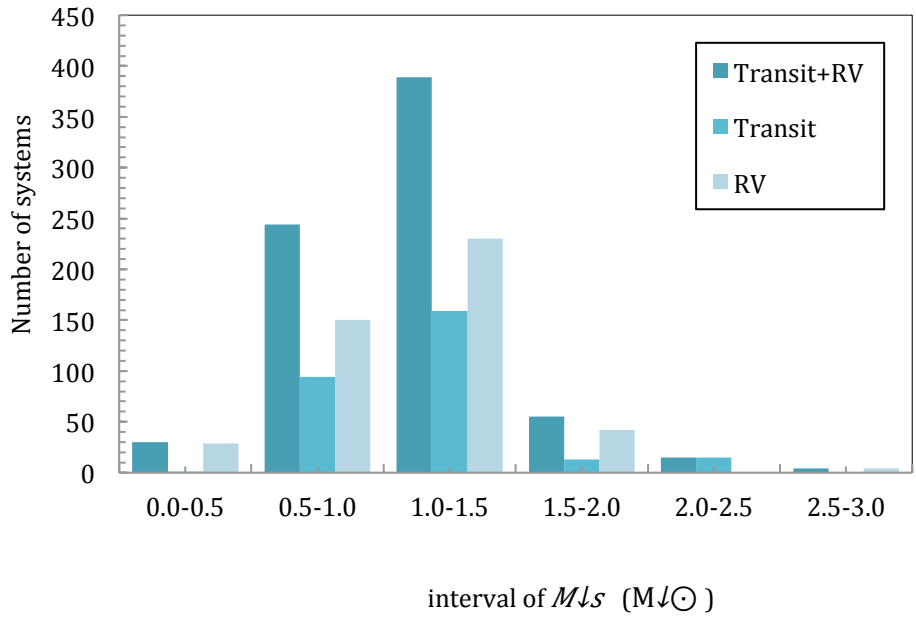
Şekil 5.2 Seçilen 737 yıldız-gezegen sisteminin gezegenin yörünge dönemine göre istatistiksel dağılımı. Koyu mavi olanlar, fotometrik ve tayfsal yolla keşfedilen ötegezegenleri; mavi olanlar, yalnızca fotometrik yolla keşfedilen ötegezegenleri ve açık mavi olanlar, yalnızca tayfsal yolla keşfedilen ötegezegenleri göstermektedir.

Şekil 5.2'de yıldız-gezegen sistemi sayılarının gezegenin yörünge dönemine göre dağılımı verilmiştir. Keşfedilen ötegezegenlerin büyük çoğunluğunun yörünge dönemi, neredeyse 5 günden daha küçüktür. Öte yandan yalnızca geçiş yöntemiyle keşfedilen 235 günden daha büyük dönemli ötegezegen yoktur. Nitekim, literatürde, N_t gezegen geçişi sırasında elde edilen nokta sayısı ile P yörünge dönemi arasındaki ilişki için $N_t \propto P^{-1}$ ve sigma fotometrik gözlemin duyarlığı olmak üzere, sinyal/gürültü oranı için $S/N \approx \sqrt{N_t}\ \left(R_p\ /\ R_s\right)^2\ \sigma^{-1}$şeklinde çıkarılan bağıntılardan keşfedilen ötegezegen sayısının yörünge dönemine $\propto P^{-5/3}$ biçiminde bağlı olduğu bildirilmiştir (örneğin, bkz. Gaudi, 2005; Seager, 2010).



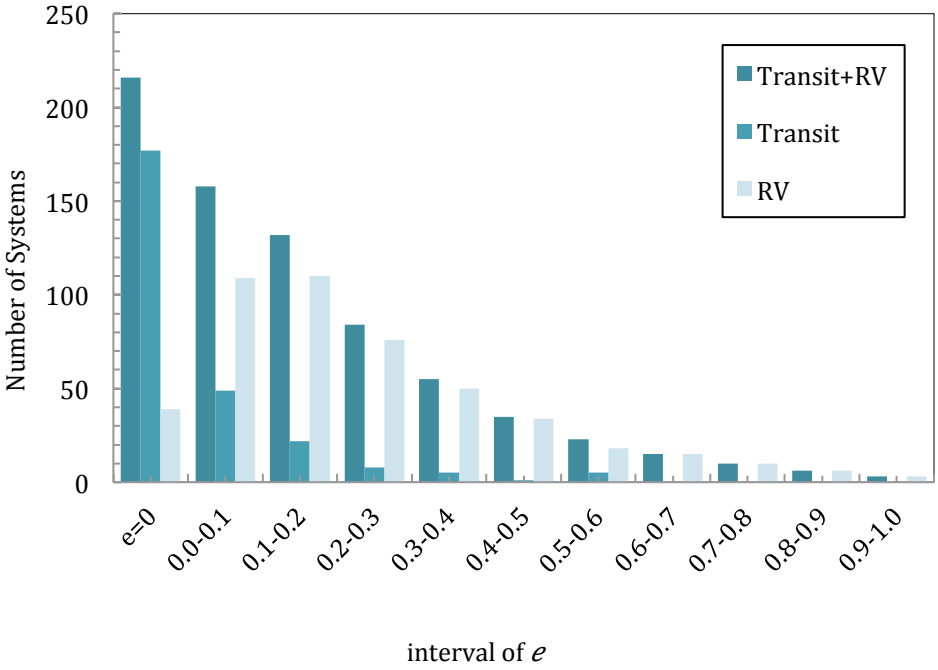
Şekil 5.3 Seçilen 737 yıldız-gezegen sistemi için ötegezegen sayısının yıldızın dikine hız genliğine göre istatistiksel dağılımı. Koyu mavi olanlar, fotometrik ve tayfsal yolla keşfedilen ötegezegenleri; mavi olanlar, yalnızca fotometrik yolla keşfedilen ötegezegenleri ve açık mavi olanlar, yalnızca tayfsal yolla keşfedilen ötegezegenleri göstermektedir.

Şekil 5.3'te seçilen 737 yıldız-gezegen sistemi için ötegezegen sayısının yıldızın dikine hız genliğine göre istatistiksel dağılımı verilmiştir. Keşfedilen ötegezegen sayısı, dikine hız genliği değerlerine karşı üstel olarak azalmaktadır. 737 yıldız-gezegen sisteminin yaklaşık %90'ının dikine hız genlikleri 0 m/s<K<280 m/s aralığına düşmektedir. Bir yıldız-gezegen sisteminde gezegen bileşenin kütlesinin yıldız bileşeninden çok küçük olması, yıldız bileşenin yörünge hareketini küçük ölçekte etkileyeceği için bu sonuçların çıkması doğaldır.



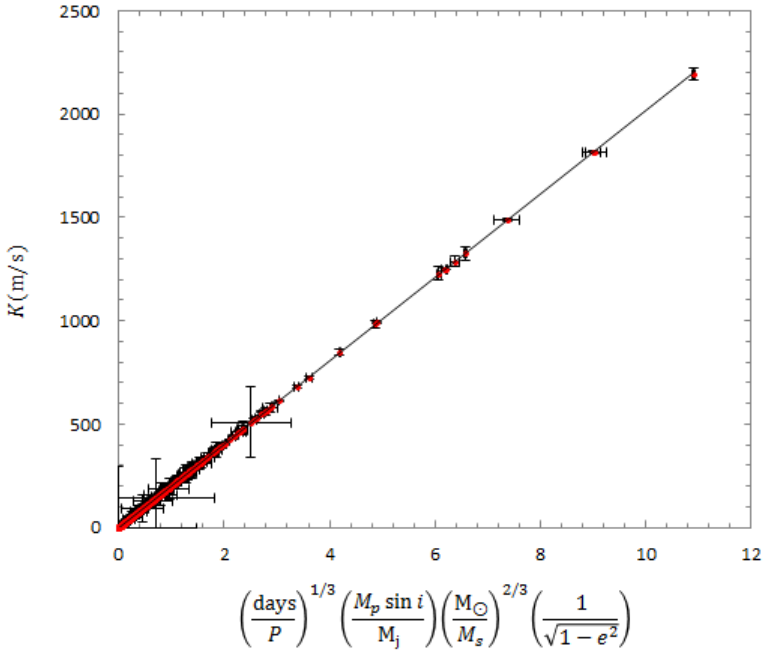
Şekil 5.4 Seçilen 737 yıldız-gezegen sistemi için gezegen bileşen sayısının yıldız bileşeni kütlesine göre istatistiksel dağılımı. Koyu mavi olanlar, fotometrik ve tayfsal yolla keşfedilen ötegezegenleri; mavi olanlar, yalnızca fotometrik yolla keşfedilen ötegezegenleri ve açık mavi olanlar, yalnızca tayfsal yolla keşfedilen ötegezegenleri göstermektedir.

Şekil 5.4'te seçilen 737 yıldız-gezegen sistemi için gezegen bileşen sayısının yıldız bileşeni kütlesine göre istatistiksel dağılımı verilmiştir. Oldukça geniş bir kütle aralığı için, yani $\sim 0.2\,M_\odot$ (beyaz cücelerden) $\sim 3M_\odot$ kütleli evrimleşmiş belki anakol yıldızlarına, keşfedilen ötegezegenlerin yaklaşık %90'ı $0.5 \leq M_s \leq 1.5\,M_\odot$ yıldız bileşeni kütle aralığına düşmektedir. Bu sonucun bir nedeni, fotometrik olarak gözlenen yıldız-gezegen sistemlerinin yıldız bileşenlerinin çoğunun güneş benzeri yıldızlar olması, yani seçim etkisi olabilir. Başka bir neden, dikine hız ölçümleri için, büyük kütleli yıldızlara gidildikçe ölçümü yapılabilen tayf çizgisi sayısının azalması ve artan dönmeden dolayı tayf çizgilerinin genişlemesi, dolayısıyla dikine hız okumalarında duyarlığın azalması ve bu nedenle tayfsal gözlemler için güneş benzeri yıldızların tercih edilmesidir (örneğin, bkz. Seager, 2010).



Şekil 5.5 Seçilen 737 yıldız-gezegen sistemi için ötegezegen sayısının yörünge basıklığına göre istatistiksel dağılımı. Koyu mavi olanlar, fotometrik ve tayfsal yolla keşfedilen ötegezegenleri; mavi olanlar, yalnızca fotometrik yolla keşfedilen ötegezegenleri ve açık mavi olanlar, yalnızca tayfsal yolla keşfedilen ötegezegenleri göstermektedir.

Şekil 5.5'te seçilen 737 yıldız-gezegen sistemi için ötegezegen sayısının ötegezegenin yörünge basıklığına göre istatistiksel dağılımı verilmiştir. Keşfedilen ötegezegen sayısı, yörünge dış-merkezliğine karşı neredeyse üstel olarak azalmaktadır. Öte yandan, gezegen kütlesi ve yörünge dönemi de dikkate alındığında; gezegen kütlesi arttıkça yörünge basıklığının ve döneminin de arttığı sonucu bulunmuştur. Bu sonucun nedeni, belki de, küçük yörünge dönemli yıldız-gezegen sistemlerinde, bileşenlerin birbirlerine yakınlığı, gel-git (tidal) çekimsel kuvvetini artırarak, gezegenin çember ya da küçük dış-merkezli yörüngelerde dolanmasına zorlaması olabilir.



Şekil 5.6 Seçilen 737 yıldız-gezegen sistemi için dikine hız genliğinin denklem (5.2)'de verilen parametrelere göre değişimi. Düz çizgi, gözlemsel verilere ağırlıklı en küçük kareler yöntemiyle elde edilen doğrusal fiti temsil etmektedir (Öztürk ve Erdem, 2017).

Bir yıldız-gezegen sisteminde yıldız bileşenin dikine hız değişiminin yarı-genliği aşağıdaki denklemle verilir:

$$K = 203.255\ (\text{gün} / P)^{1/3} \times (M_p \sin i / M_J) \times (M_\odot / M_\star)^{2/3}\ (1 - e^2)^{-1/2}. \qquad \ldots (5.2)$$

Burada K dikine hız yarı-genliği, P yörünge dönemi, M_p gezegen bileşenin kütlesi, $M_\star$ yıldız bileşenin kütlesi, i yörünge eğikliği ve e yörünge dış-merkezliğidir. Dikine hız yarı-genliği, denklemden de görüleceği biçimde, başta yörünge dönemi ve gezegenin kütlesi olmak üzere, yıldızın kütlesine ve yörünge dış-merkezliğine de bağlıdır.

Seçilen 737 yıldız-gezegen sistemi için fotometrik ve tayfsal gözlemlerden elde edilen P yörünge dönemine, M_p gezegen bileşenin kütlesine, $M_\star$ yıldız bileşenin kütlesine e yörünge dış-merkezliğine karşı dikine hız yarı-genliği değerlerine en küçük kareler yöntemiyle elde edilen doğrusal fit, aşağıdaki sonucu vermiştir (bkz. Şekil 5.7):

$$K\ (\text{m/s}) = (\ 202.1 \pm 2.4)\ \ (\text{gün} / P)^{1/3} \times (M_p \sin i / M_J) \times (M_\odot / M_\star)^{2/3}\ (1 - e^2)^{-1/2} \qquad \ldots (5.3)$$

Bu fit, aslında, duyarlı fotometrik ve tayfsal gözlemlerden hesaplanan temel parametreler ile Kepler denklemlerinden elde edilen denklem (5.2)'nin test edilmesi anlamındadır. Sonuçta; denklem (5.2) ile gözlemsel fit sonucu elde edilen denklem (5.3), hata sınırları içerisinde birebir uyum göstermiştir.

KAYNAKLAR

Almenara, J. M., Bouchy, F., Gaulme, P., ve 47 ortak yazar. 2013. "Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XXIV. CoRoT-25b and CoRoT-26b: two low-density giant planets", Astronomy & Astrophysics, 555, 118-129.

Alsubai, K. A., Parley, N. R., Bramich, D. M., ve 17 ortak yazar. 2011. "Qatar-1b: a hot Jupiter orbiting a metal-rich K dwarf star", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 417, 709-716.

Baluev, R. V., Sokov, E. N., Shaidulin, V. Sh., ve 13 ortak yazar. 2015. "Benchmarking the power of amateur observatories for TTV exoplanets detection", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 450, 3101-3113.

Banks, T., Budding, E. 1990a. "Information limit optimization techniques applied to AB Doradus", Astrophysics and Space Science, 167, 221-234.

Banks, T., Budding, E. 1990b. "Information limit optimisation techniques applied to recent photometry of Pluto", Earth, Moon, and Planets, 49, 15-23.

Barclay, T., Huber, D., Rowe, J. F., ve 16 ortak yazar. 2012. "Photometrically Derived Masses and Radii of the Planet and Star in the TrES-2 System", Astrophysical Journal, 761, 53-63.

Barclay, T., Endl, M., Huber, D., Foreman-Mackey, D., Cochran, W. D., MacQueen, P. J., Rowe, J. F., Quintana, E. V. 2015. "Radial Velocity Observations and Light Curve Noise Modeling Confirm that Kepler-91b is a Giant Planet Orbiting a Giant Star", The Astrophysical Journal, 800, article id. 46, 9 pp.

Barnes, J. W. 2011. "Measurement of the Spin-Orbit Misalignment of Planet Candidate KOI-13.01 from Gravity Darkening", American Astronomical Society, ESS meeting #2, #24.02.

Batalha, N. M. ve 12 ortak yazar. 2010. "Selection, prioritization, and characteristics of Kepler target stars", The Astrophysical Journal Letters, 713, L109-L114.

Batalha N. M. 2014. “Exploring exoplanet populations with NASA's Kepler Mission”, Proceedings of the National Academy of Science, 111, 12647-12654.

Bevington, Philip R. 1969. “Data reduction and error analysis for the physical sciences”, New York: McGraw-Hill.

Borsa, F., Poretti, E. 2012. “The importance of asteroseismology in exoplanetary science”, Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplement, 20, p.25.

Borucki W. J., Koch, D. G., Dunham, E. W., Jenkins, J. M. 1997. “The Kepler Mission: A Mission To Detennine The Frequency Of Inner Planets Near The Habitable Zone For A Wide Range Of Stars”, in Planets Beyond the Solar System and the Next Generation of Space Missions, Proceedings of a workshop held at Space Telescope Science Institute, Baltimore, MD, October 16-18, 1996, ASP Conference Series, Vol. 119, p.153.

Borucki, W., ve 69 ortak yazar. 2011. “Characteristics of Planetary Candidates Observed by Kepler. II. Analysis of the First Four Months of Data”, Astrophysical Journal, 736, 19-22.

Boss, A., Lecavelier des Etangs, A., Mayor, M., Bodenheimer, P., Collier-Cameron, A., Kokubo, E., Mardling, R., Minniti, D., Queloz, D. 2012. “Commission 53: Extrasolar Planets”, Transactions IAU, 7, 138-140.

Bourrier, V., ve 13 ortak yazar. 2015. “SOPHIE velocimetry of Kepler transit candidates. XVI. Tomographic measurement of the low obliquity of KOI-12b, a warm Jupiter transiting a fast rotator”, Astronomy & Astrophysics, 579, id.A55, 16 pp.

Budding, E. 1974. “Calculations of Proximity Effects in Close Binary Systems”, Astrophysics and Space Science, 29, 17-39.

Budding, E. 1977. “Analysis of the light curves of SZ Cam using automatized Fourier techniques”, Astrophysics and Space Science, 46, 407-428.

Budding, E., Najim, N. N. 1980. “The system VV ORI and the consistency of photometric analysis of eclipsing binary light curves”, Astrophysics and Space Science, 72, 369-396.

Budding, E., Zeilik, M. 1987. “An analysis of the light curves of short-period RS Canum Venaticorum stars - Starspots and fundamental properties”, Astrophysical Journal, 319, 827-835.

Budding, E., Demircan, O., 2007. “Introduction to Astronomical Photometry”, Cambridge University Press, Cambridge observing handbooks for research astronomers, vol. 6., ISBN 0521847117.

Budding, E., Püsküllü, Ç., Rhodes, M. D., Demircan, O., Erdem, A. 2016a. “Analysis of the exoplanet containing system Kepler-91”, Astrophysics and Space Science, 361, p. 17.

Budding, E., Rhodes, M. D., Püsküllü, Ç., Ji, Y., Erdem, A., Banks, T. 2016b. “Photometric analysis of the system Kepler-1”, Astrophysics and Space Science, 361, p. 346.

Charbonneau, D., Brown, T. M., Latham, D. W., Mayor, M. 2000. “Detection of Planetary Transits Across a Sun-like Star”, Astrophysical Journal, 529, L45-L48.

Christiansen J. L., Ballard, S., Charbonneau, D., Deming, D., Holman, M. J., Madhusudhan, N., Seager, S., Wellnitz, D. D., Barry, R. K., Livengood, T. A., Hewagama, T., Hampton, D. L., Lisse, C. M., A'Hearn, M. F. 2011. “System Parameters, Transit Times, and Secondary Eclipse Constraints of the Exoplanet Systems HAT-P-4, TrES-2, TrES-3, and WASP-3 from the NASA EPOXI Mission of Opportunity”, The Astrophysical Journal, 726, p. 94.

Claret, A. 2004. “A new non-linear limb-darkening law for LTE stellar atmosphere models III. Sloan filters: Calculations for -5.0 ≤ log [M/H] ≤ +1, 2000 K ≤ Teff ≤ 50 000 K at several surface gravities”, Astronomy & Astrophysics, 428, 1001-1005.

Claret A., Bloemen, S. 2011. “Gravity and limb-darkening coefficients for the Kepler, CoRoT, Spitzer, uvby, UBVRIJHK, and Sloan photometric systems”, Astronomy and Astrophysics. 529, p. 75.

Collins, K., Kielkopf, J. 2013. “AstroImageJ: ImageJ for Astronomy”, Astrophysics Source Code Library, record ascl:1309.001.

Covino E., Esposito, M., Barbieri, M., ve 66 ortak yazar. 2013. “The GAPS programme with HARPS-N at TNG. I. Observations of the Rossiter-McLaughlin effect and characterisation of the transiting system Qatar-1”, Astronomy and Astrophysics, 554, A28.

Croll B., Jayawardhana, R., Fortney, J. J., Lafreni, D., Albert, L. 2010. “Near-infrared Thermal Emission from TrES-3b: A Ks-band Detection and an H-band Upper Limit on the Depth of the Secondary Eclipse”, The Astrophysical Journal, 718, 920-927.

Daemgen, S., Hormuth, F., Brandner, W., Bergfors, C., Janson, M., Hippler, S., Henning, T.. 2009. “Binarity of transit host stars. Implications for planetary parameters”, Astronomy and Astrophysics, 498, 567-574.

de Mooij, E. J. W., Snellen, I. A. G. 2009. “Ground-based K-band detection of thermal emission from the exoplanet TrES-3b”, Astronomy and Astrophysics, 493, L35-L38.

Desidera, S., Gratton, R., Carolo, E., Martinez Fiorenzano, A. F., Endl, M., Mesa, D., Cecconi, M., Claudi, R., Cosentino, R., Scuderi, S., Sozzetti, A., Zurlo, A. 2012. “A long-period massive planet around HD 106515A”, Astronomy & Astrophysics, 546, id.A108, 8 pp.

Eastman, J., Siverd, R., Gaudi, B. S. 2010. “Achieving Better Than 1 Minute Accuracy in the Heliocentric and Barycentric Julian Dates”, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 122, 935-946.

Eastman, J., Gaudi, B. S., Agol, E. 2013. “EXOFAST: A Fast Exoplanetary Fitting Suite in IDL”, Publications of the Astronomical Society of Pacific, 125, pp. 83.

Erdem, A., Budding, E., Rhodes, M. D., Püsküllü, Ç., Soydugan, F., Soydugan, E., Tüysüz, M., Demircan, O. 2015. “Analysis of Exoplanet Light Curves”, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 496, p. 365.

Esteves, L. J., De Mooij, E. J. W., Jayawardhana, R. 2015. “Changing Phases of Alien Worlds: Probing Atmospheres of Kepler Planets with High-precision Photometry”, The Astrophysical Journal, 804, article id. 150, 28 pp.

Etzel, P.B. 1975. Masters Thesis, San Diego State University.

Fabrycky, D.C., Ford, E.B., Steffen, J.H. 2012. “Transit Timing Observations from Kepler. IV. Confirmation of Four Multiple-planet Systems by Simple Physical Models”, Astrophysical Journal, 750, 114.

Faigler, S., Mazeh, T. 2011. “Photometric detection of non-transiting short-period low-mass companions through the beaming, ellipsoidal and reflection effects in Kepler and CoRoT light curves”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 415, 3921-3928.

Fressin F., Guillot, T., Nesta, L. 2009. “Interpreting the yield of transit surveys: are there groups in the known transiting planets population?”, Astronomy and Astrophysics, 504, 605-615.

Fukui, A., Narita, N., Tristram, P.J. 2011. “Measurements of Transit Timing Variations for WASP-5b”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 63, 287-300.

Gaudi, B. S. 2005, “On the Size Distribution of Close-in Extrasolar Giant Planets”, The Astrophysical Journal, 628, L73-L76.

Gibson N. P., Pollacco, D., Simpson, E. K., Barros, S., Joshi, Y. C., Todd, I., Keenan, F. P., Skillen, I., Benn, C., Christian, D., Hrudkov, M., Steele, I. A. 2009. “A Transit Timing Analysis of Nine Rise Light Curves of the Exoplanet System TrES-3”, The Astrophysical Journal, 700, 1078-1085.

Gimenez, A. 2006. “Equations for the analysis of the light curves of extra-solar planetary transits”, Astronomy & Astrophysics, 450, 1231-1237.

Hansen B. M. S., Barman, T. 2007. “Two Classes of Hot Jupiters”, The Astrophysical Journal, 671, 861-871.

Hebrard, G., Collier Cameron, A., Brown, D. J. A., ve 30 ortak yazar. 2013. “WASP-52b, WASP-58b, WASP-59b, and WASP-60b: Four new transiting close-in giant planets”, Astronomy & Astrophysics, Volume 549, id.A134, 11 pp.

Henry, G.W., Marcy, G.W., Butler, R. P., Vogt, S. S. 2000. “A Transiting 51 Peg-like Planet”, Astrophysical Journal, 529, L41-L44.

Holman, M. J., Murray, N. W. 2005. “The Use of Transit Timing to Detect Terrestrial-Mass Extrasolar Planets”, Science, 307, 1288-1291.

Horne J. H., Baliunas, S. L. 1986. “A prescription for period analysis of unevenly sampled time series”, The Astrophysical Journal, 302, 757-763.

Howell S. B., ve 18 ortak yazar. 2014. “The K2 Mission: Characterization and Early Results”, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 126, 398-408.

Hoyer, S., López-Morales, M., Rojo, P., Nascimbeni, V., Hidalgo, S., Astudillo-Defru, N., Concha, F., Contreras, Y., Servajean, E., Hinse, T. C. 2013. “TraMoS project - III. Improved physical parameters, timing analysis and starspot modelling of the WASP-4b exoplanet system from 38 transit observations”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 434, 46-58.

İnlek, G., Budding, E. 2012. “Structure coefficients for use in stellar analysis”, Astrophysics and Space Science, 342, 365-370.

Jenkins, J. M., ve 54 ortak yazar, 2010. “Discovery and Rossiter-McLaughlin effect of exoplanet Kepler-8b”, The Astrophysical Journal, 724, 1108-1119.

Jiang, P., ve 52 ortak yazar. 2013. “Very Low Mass Stellar and Substellar Companions to Solar-like Stars from MARVELS. IV. A Candidate Brown Dwarf or Low-mass Stellar Companion to HIP 67526”, Astronomical Journal, 146, 65-76.

Kirk, J., Wheatley, P. J., Louden, T., Littlefair, S. P., Copperwheat, C. M., Armstrong, D. J., Marsh, T. R., Dhillon, V. S. 2016. “Transmission spectroscopy of the inflated exoplanet WASP-52b, and evidence for a bright region on the stellar surface”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 463, 2922-2931.

Knutson, H. A., Charbonneau, D., Allen, L. E., Burrows, A., Megeath, S. T. 2008. “The 3.6-8.0 μm Broadband Emission Spectrum of HD 209458b: Evidence for an Atmospheric Temperature Inversion”, The Astrophysical Journal, 673, 526-531.

Kopal, Z. 1959. “Close Binary Systems”, Chapman & Hall, London.

Kundurthy P., Becker, A. C., Agol, E., Barnes, R., Williams, B. 2013. “APOSTLE: 11 Transit Observations of TrES-3b” The Astrophysical Journal, 764, article id. 8, 11 pp.

Lillo-Box, J., Barrado, D., Moya, A., Montesinos, B., Montalbán, J., Bayo, A., Barbieri, M., Régulo, C., Mancini, L., Bouy, H., Henning, T. 2014a. “Kepler-91b: a planet at the end of its life. Planet and giant host star properties via light-curve variations”, Astronomy and Astrophysics, 562, id.A109, 19 pp.

Lillo-Box, J., Barrado, D., Henning, Th., Mancini, L., Ciceri, S., Figueira, P., Santos, N. C., Aceituno, J., Sánchez, S. F. 2014b. “Radial velocity confirmation of Kepler-91 b. Additional evidence of its planetary nature using the Calar Alto/CAFE instrument”, Astronomy and Astrophysics, 568, id.L1, 4 pp.

Lissauer, J.J., Fabrycky, D.C., Ford, E.B. 2011. “A closely packed system of low-mass, low-density planets transiting Kepler-11”, Nature, 470, p. 53.

Lithwick, Y., Xie, J., Wu, Y. 2012. “Extracting Planet Mass and Eccentricity from TTV Data”, The Astrophysical Journal, 761, 122.

Loeb, A., Gaudi, B. S. 2003. “Periodic Flux Variability of Stars due to the Reflex Doppler Effect Induced by Planetary Companions”, Astrophysical Journal, 588, L117-L120.

Lomb, N. R. 1976. “Least-squares frequency analysis of unequally spaced data”, Astrophysics and Space Science, 39, 447-462.

Maciejewski, G., Dimitrov, D., Neuhäuser, R. ve 13 ortak yazar. 2011. “Transit timing variation and activity in the WASP-10 planetary system”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 411, 1204-1212.

Mancini, L., Nikolov, N., Southworth, J., Chen, G., Fortney, J. J., Tregloan-Reed, J., Ciceri, S., van Boekel, R., Henning, Th. 2013. “Physical properties of the WASP-44 planetary system from simultaneous multi-colour photometry”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 430, 2932-2942.

Mancini, L., Southworth, J., Raia, G., ve 27 ortak yazar. 2017. “Orbital alignment and star-spot properties in the WASP-52 planetary system”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 465, 843-857.

Mandel, K., Agol, E. 2002. “Analytic Light Curves for Planetary Transit Searches”, The Astrophysical Journal, 580, L171-L175.

Mayor, M., Queloz, D. 1995. “A Jupiter-mass companion to a solar-type star”, Nature, 378, 355-359.

Mazeh, T., Nachmani, G., Sokol, G., Faigler, S., Zucker, S. 2012. “Kepler KOI-13.01 - Detection of beaming and ellipsoidal modulations pointing to a massive hot Jupiter”, Astronomy & Astrophysics, 541, 56-65.

Mazeh, T., Nachmani, G., Holczer, T., ve 13 ortak yazar. 2013. “Transit Timing Observations from Kepler. VIII. Catalog of Transit Timing Measurements of the First Twelve Quarters”, The Astrophysical Journal Supplement, 208, article id. 16, 21 pp.

Mislis, D., Mancini, L., Tregloan-Reed, J., ve 12 ortak yazar. 2015. “High-precision multiband time series photometry of exoplanets Qatar-1b and TrES-5b”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 448, 2617-2623.

O'Donovan, F. T., Charbonneau, D., Mandushev, G., ve 17 ortak yazar. 2006. “TrES-2: The First Transiting Planet in the Kepler Field”, The Astrophysical Journal, 651, L61-L64.

O'Donovan, F. T., Charbonneau, D., Mandushev, G., ve 15 ortak yazar. “2007. TrES-3: A Nearby, Massive, Transiting Hot Jupiter in a 31 Hour Orbit”, The Astrophysical Journal, 663, L37-L40.

Placek, B., Knuth, K. H., Angerhausen, D., Jenkins, J. M. 2015. “Characterization of Kepler-91b and the Investigation of a Potential Trojan Companion Using EXONEST”, The Astrophysical Journal, 814, article id. 147, 14 pp.

Popper, D. M., Etzel, P. B. 1981. “Photometric orbits of seven detached eclipsing binaries”, Astronomical Journal, 86, 102-120.

Pressley, A. 2001. “Elementary Differential Geometry”, Springer, Berlin.

Prsa, A., Zwitter, T. 2005. “A Computational Guide to Physics of Eclipsing Binaries. I. Demonstrations and Perspectives”, Astrophysical Journal, 628, 426-438.

Püsküllü, Ç., Soydugan, F., Erdem, A., Budding, E. 2017. “Photometric investigation of hot exoplanets: TrES-3b and Qatar-1b”, New Astronomy, 55, 39-47.

Raetz, St., Maciejewski, G., Ginski, Ch., ve 21 ortak yazar. 2014. “Transit timing of TrES-2: a combined analysis of ground- and space-based photometry”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 444, 1351-1368.

Rhodes, M. D., Budding, E. 2014. “Analysis of selected Kepler Mission planetary light curves”, Astrophysics and Space Science, 351, 451-471.

Rowe, J., Borucki, W. J., Howell, S. B., Gilliland, R. L., Buchhave, L. A., Batalha, N. M., Latham, D. W., Kepler Science Team. 2011. “Kepler Discovery Of An A-star With A Hot-planetary Companion”, American Astronomical Society, AAS Meeting #217, id.103.04; Bulletin of the American Astronomical Society, 43.

Russell, H.N. 1912. “On the Determination of the Orbital Elements of Eclipsing Variable Stars. I”, Astrophysical Journal, 35, p.315.

Safronov, V. S. 1972. “Evolution of the protoplanetary cloud and formation of the earth and planets”, Translated from Russian, Jerusalem (Israel): Israel Program for Scientific Translations, Keter Publishing House, 212 p.

Sanchis-Ojeda, R., Winn, J.N. 2011. “Starspots, Spin-Orbit Misalignment, and Active Latitudes in the HAT-P-11 Exoplanetary System”, Astrophysical Journal, 743, p. 61.

Sanchis-Ojeda, R., Fabrycky, D.C., Winn, J. N. 2012. “Alignment of the stellar spin with the orbits of a three-planet system” Nature, 487, 449-453.

Sato, B., Hirano, T., Omiya, M., Harakawa, H., Kobayashi, A., Hasegawa, R., Takarada, T., Kawauchi, K., Masuda, K. 2015. “Precise Radial Velocity Measurements for Kepler Giants Hosting Planetary Candidates: Kepler-91 and KOI-1894”, The Astrophysical Journal, 802, article id. 57, 9 pp.

Scargle, J. D. 1982. “Studies in astronomical time series analysis. II - Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data”, The Astrophysical Journal, 263, 835-853.

Seager, S. 2010. “*Exoplanets”*, Tucson, AZ: University of Arizona Press, 526 pp. ISBN 978-0-8165-2945-2.

Shporer, A., Brown, T., Mazeh, T., Zucker, S. 2012. “On using the beaming effect to measure spin-orbit alignment in stellar binaries with Sun-like components”, New Astronomy, 17, 309-315.

Southworth, J., Maxted, P. F. L., Smalley, B. 2004a. “Eclipsing binaries in open clusters - I. V615 Per and V618 Per in h Persei”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 349, 547-559.

Southworth, J., Maxted, P. F. L., Smalley, B. 2004b. “Eclipsing binaries in open clusters - II. V453 Cyg in NGC 6871”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 351, 1277-1289.

Southworth, J., Wheatley, P. J., Sams, G. 2007. “A method for the direct determination of the surface gravities of transiting extrasolar planets”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 379, p.11.

Southworth, J. 2008. “Homogeneous studies of transiting extrasolar planets - I. Light-curve analyses“, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 386, 1644-1666.

Southworth, J. 2009. “Homogeneous studies of transiting extrasolar planets - II. Physical properties”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 394, 272-294.

Southworth, J., ve 23 ortak yazar. 2009. “High-precision photometry by telescope defocusing - I. The transiting planetary system WASP-5”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 396, 1023-1031.

Southworth, J. 2010. “Homogeneous studies of transiting extrasolar planets - III. Additional planets and stellar models”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 408, 1689-1713.

Southworth, J. 2011. “Homogeneous studies of transiting extrasolar planets - IV. Thirty systems with space-based light curves”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 417, 2166-2196.

Southworth, J. 2012. “Homogeneous studies of transiting extrasolar planets - V. New results for 38 planets”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 426, 1291-1323.

Southworth, J., Mancini, L., Ciceri, S., ve 24 ortak yazar. 2015. “High-precision photometry by telescope defocusing - VII. The ultrashort period planet WASP-103”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 447, 711-721.

Sozzetti, A., Torres, G., Charbonneau, D., Latham, D. W., Holman, M. J., Winn, J. N., Laird, J. B., O'Donovan, F. T. 2007. “Improving Stellar and Planetary Parameters of Transiting Planet Systems: The Case of TrES-2”, The Astrophysical Journal, 664, 1190-1198.

Sozzetti, A., Torres, G., Charbonneau, D., ve 17 ortak yazar. 2009. “A New Spectroscopic and Photometric Analysis of the Transiting Planet Systems TrES-3 and TrES-4”, The Astrophysical Journal, 691, 1145-1158.

Swift, J. J., Bottom, M., Johnson, J. A., ve 26 ortak yazar. 2015. “Miniature Exoplanet Radial Velocity Array (MINERVA) I. Design, Commissioning, and First Science Results”, Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 1, id. 027002.

Torres, G., Winn, J. N., Holman, M. J. 2008. “Improved Parameters for Extrasolar Transiting Planets”, The Astrophysical Journal, 677, 1324-1342.

Twicken, J. D., Jenkins, J. M., Seader, S. E., ve 25 ortak yazar. 2016. “Detection of Potential Transit Signals in 17 Quarters of Kepler Data: Results of the Final Kepler Mission Transiting Planet Search (DR25)”, The Astronomical Journal, 152, article id. 158, 25 pp.

Van Hamme, W. 1993. “New limb-darkening coefficients for modeling binary star light curves”, Astronomical Journal, 106, 2096-2117.

Vavnko, M., Maciejewski, G., Jakub, M., Krej, T., Budaj, J., Pribulla, T., Ohlert, J., Raetz, S., Bukowiecki, L. 2013. “Photometric follow-up of the transiting planetary system TrES-3: transit timing variation and long-term stability of the system”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 432, 944-953.

von Essen, C., Schröter, S., Agol, E., Schmitt, J. H. M. M. 2013. “Qatar-1: indications for possible transit timing variations”, Astronomy and Astrophysics, 555, id.A92, 12 pp.

Wilson, R. E., Devinney, E. J. 1971. “Realization of Accurate Close-Binary Light Curves: Application to MR Cygni”, Astrophysical Journal, 166, p. 605.

Wilson, D. M., Enoch, B., Christian, D. J., ve 18 ortak yazar. 2006. “SuperWASP Observations of the Transiting Extrasolar Planet XO-1b”, The Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 118, 1245-1251.

Winn, J. N., ve 12 ortak yazar. 2005. “Measurement of Spin-Orbit Alignment in an Extrasolar Planetary System”, Astrophysical Journal, 631, 1215-1226.

Winn, J. N., Holman, M. J., Shporer, A., Fern, J., Mazeh, T., Latham, D. W., Charbonneau, D., Everett, M. E. 2008. “The Transit Light Curve Project. VIII. Six Occultations of the Exoplanet TrES-3”, The Astronomical Journal, 136, 267-271.

Wolszczan, A., Frail, D. A. 1992. "A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257+12", Nature, 355, 145-147.

Wood, D.B. 1973. “A Computer Program for Modeling Nonspherical Eclipsing Binary Star Systems”, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 85, p. 253.

Zucker, S., Mazeh, T., Alexander, T. 2007. “Beaming Binaries: A New Observational Category of Photometric Binary Stars”, Astrophysical Journal, 670, 1326-1330.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. AHMET ERDEM
Proje No:	113F353
Proje Başlığı:	Örten Çiftlerden Örten Ötegezegenlere
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	36
Araştırmacılar:	ESİN SOYDUGAN, MEHMET TÜYSÜZ, FARUK SOYDUGAN
Danışmanlar:	OSMAN DEMİRCAN
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ÇANAKKALE ONSEKİZ MART Ü. FEN EDEBİYAT F. FİZİK B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/03/2014 - 01/03/2017
Onaylanan Bütçe:	289990.0
Harcanan Bütçe:	226387.94
Öz:	Yıldız-gezegen sistemlerinin uydu-tabanlı ışık eğrilerinin ve yer-tabanlı geçiş ışık eğrilerinin çözümleri için, WinFitter yazılımının geliştirilmesi ve uygulamaları üzerine yapılan proje çalışmasının sonuç raporu sunulmaktadır (bkz. Erdem vd., 2015; Budding vd., 2016a,b; Püsküllü vd., 2017). WinFitter, modifiye edilmiş Marquardt-Levenberg yöntemini kullanarak, gözlemsel ışık eğrisine teorik bir fonksiyonun fit edilmesini sağlar. Kullanılan fit fonksiyonu, görelice yakın ve çekimsel olarak birbirine bağlı iki cismin gel-git ve dönme tedirginlikleri altında bozulmuş biçim (elipsoit biçim) ve yansıma etkilerini gözönüne alan ve Kopal (1059) tarafından geliştirilen Radau modeline dayanır. Proje çalışmasında, seçilen bir yıldız-gezegen sisteminin ışık eğrisini çözmek için küresel model ışık eğrisine bozucu etkiler olarak, bileşenlerin elipsoit biçim ve yansıma etkileri ile birlikte Doppler far etkisi, WinFitter yazılımının son versiyonunda dikkate alındı. Kepler-1 ve Kepler-91 yıldız-gezegen sistemlerinin NEA?dan alınan, sırasıyla 14 ve 17 ışık eğrisi, WinFitter yazılımı kullanılarak çözüldü. Kepler-1b ve Kepler-91b ötegezegenleri için fotometrik yolla hesaplanan kütle ve yarıçap değerleri (sırasıyla, 1.18(±0.05) Mjup, 1.21(±0.05) Rjup ve 0.60(±0.08) Mjup, 1.37(±0.05) Rjup), literatürde duyarlı tayfsal yolla hesaplanan değerlere çok yakın çıkmıştır. Geçiş zamanı değişimi (TTV) analizinden; Kepler-1b için önemli bir yörünge dönemi değişimine rastlanılmamış, ancak Kepler-91b için gezegenin yörünge döneminin olası bir lineer değişimi tartışılmıştır. Öte yandan projenin yer-tabanlı gözlemlerinden TrES-3b için 12 geçiş ışık eğrisi, Qatar-1b için 12 geçiş ışık eğrisi ve HAT-P-52b için 8 geçiş ışık eğrisi, WinFitter yazılımı kullanılarak çözülmüştür. TrES-3b, Qatar-1b ve HAT-P-52b için, çözümlerden hesaplanan ötegezegen yarıçap değerleri (sırasıyla 1.39(±0.04), 1.14(±0.03) ve 1.28(±0.03) Rjup), literatürde verilen değerlerle uyuşmaktadır. Bu üç ötegezegen için, gözlenen ışık eğrilerinden gezegen geçiş zamanları ve hataları elde edilmiş ve yeni/düzeltilmiş lineer ışık ögeleri hesaplanmıştır. Geçiş zamanı değişimi (TTV) analizinden; TrES-3b ve HAT-P-52b için çevrimsel bir değişime rastlanılmamışken, Qatar-1b için olası bir çevrimsel değişim gösteren, ancak duyarlı yeni geçiş zamanlarıyla doğrulanabilecek, zayıf bir sinyal yakalanmıştır. Ayrıca, proje çalışmasında, The Exoplanet Data Explorer (exoplanets.org) veri tabanından, duyarlı fotometrik ve tayfsal gözlemlerin birlikte analiz edildiği 737 yıldız-gezegen sisteminin temel parametre değerleri kullanılarak, ele alınan sistemlerin gezegen kütlelerinin, yörünge dönemlerinin, dikine hız genliklerinin, yıldız kütlelerinin ve yörünge basıklıklarının istatistiksel dağılımları incelendi.
Anahtar Kelimeler:	Yıldız-gezegen sistemleri, ötegezegenler, ışık eğrisi analizi
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

TÜBİTAK

Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Analysis of the exoplanet containing system Kepler-91 (Makale - Diğer Hakemli Makale), 2- Photometric Study of Hot Jupiters: WASP-10 b and HAT-P-36 b (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum), 3- Photometric Study of Hot Jupiters: WASP-10 b and HAT-P-36 b (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum), 4- Analysis of Exoplanet Light Curves (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 5- Analysis of Exoplanet Light Curves (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 6- Photometric analysis of the system Kepler-1 (Makale - İndeskli Makale),

TÜBİTAK