



## Ötegezegenler ve Geçiş Işık Ölçümü

Özgür Baştürk<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, Ankara, Türkiye.

**Özet:** Ötegezegen keşifleri gözlemsel astronominin en büyük başarılarından biridir. Bugüne kadar dikine hız, geçiş, doğrudan görüntüleme, mikromercek ve zamanlama yöntemleriyle toplamda sayıları 3000'ü aşan ötegezegen keşfedilmiştir. Bu keşiflerin büyük çoğunluğu (~%76), geçiş yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Yerden (HAT-P: Bakos vd. 2004, WASP: Pollaco vd. 2006, KELT: Pepper vd. 2004, XO: McCollough vd. 2004, TrES: Alonso vd. 2004, Qatar: Alsubai vd. 2013) ve uzaydan (CoRoT: Barge vd. 2007, Kepler: Borucki vd. 2010) yapılan tarama gözlemleriyle keşfedilen bu gezegenlerin büyük çoğunluğu kısa yörünge dönemli, sıcak, dev gaz gezegenler (sıcak-Jüpiterler) olsa da tarama gözlemleri ile giderek daha uzun yörünge dönemli ve daha küçük gezegenler de keşfedilmektedir. Bu çalışmada geçiş yöntemi irdelenecek, geçiş ışık ölçümü sonucu elde edilebilen parametreler ve bugüne kadarki geçiş gözlemleriyle ulaşılan sonuçlar değerlendirilecektir.

**Anahtar Kelimeler:** ötegezegenler, geçiş yöntemi, odak dışı ışık ölçüm

**Abstract:** The discovery of exoplanets has been one of the outstanding achievements of observational astronomy. Until today, over 3000 exoplanets have been discovered in total with radial velocity, transit, direct imaging, gravitational lensing, and timing techniques. Majority of these discoveries (~76%) has been accomplished thanks to the transit method. Although a good fraction of the transiting planets discovered so far from the ground (HAT-P: Bakos et al. 2004, WASP: Pollaco et al. 2006, KELT: Pepper et al. 2004, XO: McCollough vd. 2004, TrES: Alonso et al. 2004, Qatar: Alsubai et al. 2013) and space-based surveys (CoRoT: Barge et al. 2007, Kepler: Borucki et al. 2010) has been the short orbital-period, giant planets that lead to flux drops up to 5% when they pass between the observer and their host stars, smaller planets on relatively larger orbits are also being discovered with the improvements in the photometry as well as the extension of the baseline of observations with time. In this study, the basic principles of the transit technique will be reviewed, the physical parameters that can be derived from transit photometry will be discussed, and the results from the study of a population of transiting planets will be briefly mentioned.

**Key Words:** exoplanets, transit technique, defocus photometry

### 1. Giriş

Ötegezegen geçişi, gözlemci ile minimum kütlesi gezegen kütle limitleri dahilinde bir cismin, kütle çekimle bağlı bulunduğu yıldızın (barınak yıldızı) arasından geçmesi sonucu gerçekleşir. Her ne kadar ilk ötegezegen geçişi 1990'ların sonunda gözlenmiş olsa da (Charbonneau vd. 2000), Güneş Sistemi cisimlerinin geçiş gözlemleriyle gökbilim için temel bilgi kabul edilebilecek pek çok bilgiye ulaşılmıştır. Danimarkalı gökbilimci Romer'in Jüpiter uydularının geçiş ve örtme gözlemlerinden elde ettiği, dönemi için ışık hızının en hassas değerinden, Venüs geçişi gözlemleriyle elde edilen Astronomi Birimi'nin en hassas değerine, Güneş tutulması gözlemleriyle Helyum'un keşfinden, Dünya'nın dönüş hızındaki yavaşlamanın farkedilmesine, Einstein'ın genel görelilik kuramının ilk gözlemsel kanıtlarından, çift yıldızların geçiş / örtme gözlemleriyle temel yıldız parametrelerinin belirlenmesine varana değin, yıldız yapısı ve evrimine değin pek çok önemli bilgiye geçiş gözlemleriyle ulaşmak mümkün olmuştur.

### 2. Geçiş Gözlemleriyle Elde Edilebilecek Parametreler

#### 2.1 Geçiş Geometrisi ve Geçiş Işık Eğrisi

Bir ötegezegen geçişi sırasında gözlenen yıldızdan alınan toplam akı, yıldız ile gezegenin görelî büyüklükleri nispetinde azalır. Yerden yapılan bir geçiş gözleminde elde edilebilecek bir ışık eğrisi ve bu eğriye ilişkin temel parametreler Şekil 1'de verilmiştir. Bu parametrelerden etki parametresi (b) ve gezegenle yıldızın yarıçapları oranı ( $k = R_g / R_*$ ) bir gezegenin geçiş ışık eğrisinden elde edilebilecek en kritik parametrelerdir. Bir gezegenin odaklarından birinde barınak yıldızın bulunduğu görelî yörüngesi Şekil 2'de verilmiştir. İki cisim probleminde hareketle gezegene ilişkin hareket denklemi (1) ile verilebilir.

$$\ddot{\mathbf{r}} + G(m_1 + m_2) \frac{\mathbf{r}}{r^3} = 0 \quad (1)$$

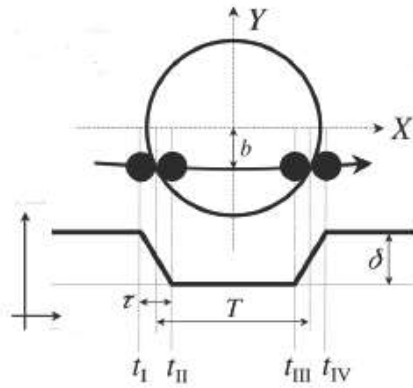
Kepler'in 1. yasası gereği elips üzerinde gerçekleşecek bu hareket denkleminin çözümü (Murray ve Correia 2010) yıldız ile gezegen arasındaki uzaklığı verir.

$$\mathbf{r} = \frac{a(1-e^2)}{1+e \cos f} \quad (2)$$

(2) numaralı diferansiyel denklemin çözümünden gelen katsayıların geometrik karşılıkları a: Dışmerkezli (eliptik) yörüngenin yarı-büyük eksen uzunluğu, e: Elipsin dış merkezliliği ve f: Gezegenin her hangi bir anda yörüngesinin enberi noktasından açışal

\*Sorumlu Yazar E-Posta: obasturk@ankara.edu.tr

uzaklığıdır (gerçel anomalî).



$b$  : etki parametresi

$\delta$ : Geçiş ışık eğrisi derinliği ya da contrast (yüzde cinsinden)

$t_I, t_{II}, t_{III}, t_{IV}$ : Geçiş zamanları

$\tau_{giriş} = t_{II} - t_I$ : Geçiş başlangıcı zaman ölçeği

$\tau_{çıkış} = t_{IV} - t_{III}$ : Geçiş sonu zaman ölçeği

$\tau = 0.5 (\tau_{giriş} + \tau_{çıkış})$ : Geçiş giriş / çıkış zaman ölçeği

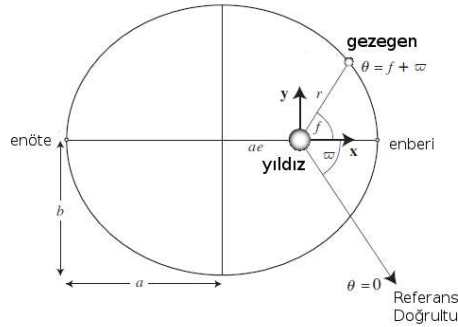
$T_{toplaml}$ : Toplam geçiş zaman ölçeği

$T$ : Geçiş süresi,  $T = T_{toplaml} - \tau$

$R_g, M_g, R_*, M_*$ : Gezegen (g) ve yıldızın (\*) yarıçap ve kütleleri

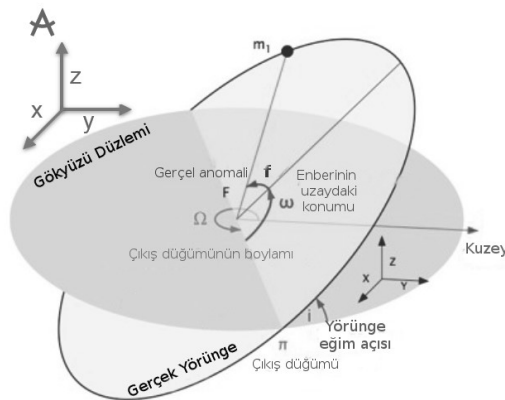
$k = R_g / R_*$

**Şekil 1:** Ötegezegen geçiş geometrisi ve geçiş ışık eğrisi parametreleri (Winn 2010).



**Şekil 2:** Gezegenin odaklarından birinde barınak yıldızın bulunduğu göreceli yörüngesi.  $\theta = 0$  keyfi seçilmiş bir referans doğrultusunu göstermektedir.

Yörünge, düğümler doğrultusunun +X eksenine ile çakışık olduğu varsayımıyla ( $\Omega = 180^\circ$ ) üç boyutlu kartezyen koordinat sistemine taşınacak olursa (Şekil 3), gezegenin bu yeni koordinat sistemindeki konumu (3), (4) ve (5) ile verilir.



**Şekil 3:** Göreceli yörüngenin gökyüzü düzlemi üzerine izdüşümü.

$$X = r(\cos \Omega \cos(\omega + f) - \sin \Omega \sin(\omega + f) \cos i) \rightarrow \Omega = \pi \rightarrow X = -r \cos(\omega + f) \quad (3)$$

$$Y = r(\sin \Omega \cos(\omega + f) + \cos \Omega \sin(\omega + f) \cos i) \rightarrow \Omega = \pi \rightarrow Y = -r \sin(\omega + f) \cos i \quad (4)$$

$$Z = r \sin(\omega + f) \sin i \quad (5)$$

Gezegen geçişi gökyüzü düzleminde (X-Y) gerçekleştiği için (Z = 0), cisimler arası görünen uzaklık ( $r_{gök}$ ) (6) ile verilir.

$$r_{gök} = \sqrt{X^2 + Y^2} \rightarrow r_{gök} = \frac{a(1-e^2)}{1+e \cos f} \sqrt{1 - \sin^2(\omega + f) \sin^2 i} \quad (6)$$

Gezegen geçişi  $r_{gök}$  için minimum değerde gerçekleşir. Dolayısı ile bu ifadeyi minimize etmeye ihtiyaç vardır. Ancak bu çözümü oldukça uzun bir lineer cebir problemidir. Problem Kipping (2008) tarafından ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bu problemin çözümü için iyi bir yaklaşım geçişin (gezegen barınak yıldızın önünde) ve örtmenin (gezegen barınak yıldızın arkasında) düğüm noktalarında gerçekleştiğini varsaymaktır (X = 0). Bu durumda geçiş ve örtme sırasında gerçel anomali (7) ve (8) denlemleri ile verilebilir.

$$f_{geçiş} = +\frac{\pi}{2} - \omega \quad (7), \quad f_{örtme} = -\frac{\pi}{2} - \omega \quad (8)$$

Etki parametresinin (b) her iki durum (geçiş ve örtme) için değeri (9 ve 10),  $b = r_{gök} / R_*$  ifadesi ile bulunur. Bu noktada  $r_{gök}$  parametresinin hesabı için gerçel anomali geçiş (7) ve örtme (8) anındaki değerleri ile yerine konulmalıdır.

$$b_{geçiş} = \frac{r_{gök}}{R_*} = \frac{a \cos i}{R_*} \left( \frac{1-e^2}{1+e \sin \omega} \right) \quad (9)$$

$$b_{örtme} = \frac{r_{gök}}{R_*} = \frac{a \cos i}{R_*} \left( \frac{1-e^2}{1-e \sin \omega} \right) \quad (10)$$

$R_* \ll a$  genel varsayım altında, gezegenin yıldızın önünden (ya da arkasından) geçerken izlediği yol (11) ve (12) 'de verildiği şekilde elde edilmiştir.

$$X = \pm R_* \sqrt{1 - b^2} \quad (11), \quad Y = b R_* \quad (12)$$

## 2.2 Geçiş Süreleri

İki cisim probleminde hareket denklemini çözerek gökyüzü düzlemi üzerinde yıldız ve gezegen diskleri arasındaki uzaklığı ( $r_{gök}$ ) gerçel anomalinin bir fonksiyonu olarak türettikten sonra diskler arası uzaklığı bu kez zamanın bir fonksiyonu olarak ifade edebilmek üzere (6) denklemini gezegen ve yıldızın görünen disklerinin içten ve dıştan kontakt (temas) noktaları olan II ve III noktaları için ( $r = R_* - R_g$ ) düzenleyerek bu noktalarındaki gerçel anomali değeri hesaplanabilir. Gerçel anomali değerinin II ve III kontakt noktaları arasında integer edilmesiyle ise, geçiş ışık eğrisinde geçiş başlangıcının (ing. ingress) tamamlanmasından geçiş sonunun (ing. egress) başlangıcına kadarki görece düz olan bölümünün süresi hesaplanır (13).

$$T_{düzlük} = t_{III} - t_{II} = \frac{P}{2\pi\sqrt{1-e^2}} \int_{f_{II}}^{f_{III}} \left[ \frac{r(f)}{a} \right]^2 df \quad (13)$$

$r(f)$  (13) denkleminde yerine konularak yapılacak integrasyon sonucunda (14) denklemi elde edilir.

$$T_{düzlük} = t_{III} - t_{II} = \frac{P}{\pi} \sin^{-1} \left( \frac{R_*}{a} \frac{\sqrt{(1-k)^2 - b^2}}{\sin i} \right) \quad (14)$$

Aynı prosedür dıştan kontakt noktaları olan I ve IV için de (bu kez  $r = R_* + R_g$ ) takip edilirse de toplam geçiş süresi ( $T_{toplam}$ ) elde edilmiş olur (15).

$$T_{toplam} = t_{IV} - t_I = \frac{P}{\pi} \sin^{-1} \left( \frac{R_*}{a} \frac{\sqrt{(1+k)^2 - b^2}}{\sin i} \right) \quad (14)$$

Dış merkezliliği yüksek bir yörünge için geçiş başlangıcında ( $\tau_i = t_{II} - t_I$ ) ve geçiş sonunda ( $\tau_e = t_{IV} - t_{III}$ ) içten ve dıştan kontaktlar arasındaki süre, Kepleryan yörünge üzerinde hızın sabit olmaması nedeniyle eşit olmaz (15).

$$\frac{\tau_e - \tau_i}{\tau_e + \tau_i} \sim e \cos \omega \left( \frac{R_*}{a} \right)^3 (1 - b^2)^{3/2} \quad (15)$$

Yörünge büyüklüğüne ölçekli barınak yıldızı yarıçapı  $R_* / a = 0.2$  olan bir sıcak-Jüpiter için bu oran dış merkezliliğin %1'inden (0.01 e) daha küçüktür. Yörüngesi daha büyük, barınak yıldızına uzak dolanan bir gezegen için bu oranın daha da küçük olacağı açıktır. Özellikle yerden yapılan geçiş gözlemlerindeki fotometrik duyarlılık ve zaman çözünürlüğü genellikle bu düzeyde bir farkı belirlemek için yeterli olmaz.

Sonuç olarak, genel durum için yörünge çembere yakın ( $e \rightarrow 0$ ); gezegenin yarıçapı, barınak yıldızın yarıçapından ve her ikisi de yörünge yarı-büyük eksen uzunluğundan çok küçük ( $R_g \ll R_* \ll a$ ) varsayılır ve barınak yıldız diskini sıyrarak geçen (ing. grazing) geçişler ( $b \ll 1 - k$ ) hariç tutulursa  $T_0$  karakteristik zaman ölçeğini göstermek üzere bir geçiş için Şekil 1'de gösterilen kritik süreler (16) ve (17) ile verilir.

$$T \approx T_0 \sqrt{1 - b^2} \quad (16), \quad \tau \approx \frac{T_0 k}{\sqrt{1 - b^2}} \quad (17)$$

Kepler'in 3. yasası kullanılarak ifade yeniden düzenlenir ve tüm nicelikler Güneş birimlerinde ifade edilirse karakteristik zaman ölçeği için (18) numaralı denklem elde edilir.

$$T_0 \equiv \frac{R_* P}{\pi a} \approx \left(\frac{P}{1 \text{ yıl}}\right)^{1/3} \left(\frac{R_*}{\rho_{\text{güneş}}}\right)^{-1/3} \quad (18)$$

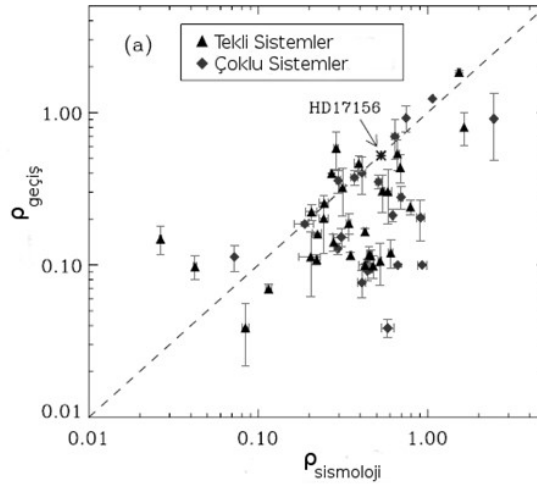
Seager ve Mallen-Ornelas (2003)'ta verildiği şekliyle bu ifade (19) denklemiyle de ifade edilebilir.

$$\bar{\rho}_* \approx \frac{3\pi}{G P^2} \left(\frac{a}{R_*}\right)^3 \quad (19)$$

Bu denklem, sadece geçiş ışık eğrisi gözlemiyle, barınak yıldız için ortalama bir yoğunluk verilebildiğini göstermesi açısından önemlidir. Zira yıldız yarıçapının gezegenin yarı-büyük eksenine ölçekli büyüklüğünün tersi olan  $a / R_*$ , etki parametresinden türetilebilir. P ise gezegenin gözlenen geçişleri arasındaki süreden elde edilebilir. Dışmerkezliliği sıfırdan farklı (eliptik) bir yörünge için bu ifade (20) ifadesi ile çarpmalıdır.

$$\frac{\sqrt{1 - e^2}}{1 - Fe \sin \omega} \quad (20)$$

Bu ifadenin parametreleri olan dış merkezlilik (e) ve enberinin boylamı ( $\omega$ ), geçiş başlangıç ( $\tau_i$ ) ve geçiş sonu ( $\tau_e$ ) zaman ölçekleri kullanılarak (15) denklemi ve dikine hız gözlemleri sonucu elde edilebilir. Tekli ve çoklu sistemler için sadece geçiş gözlemleri kullanılarak elde edilen barınak yıldız yoğunlukları ile yıldızın iç katmanlarının çalışılmasına olanak sağlayan asterosismoloji yöntemiyle elde edilen barınak yıldız yoğunlukları arasındaki ilişki Huber vd. (2013) tarafından verilmiştir ve sadece ışık ölçüm gözlemlerine dayanan geçiş yönteminin barınak yıldızının yoğunluğu için iyi bir kestirimde bulunabileceğini göstermektedir (Şekil 4).



**Şekil 4:** Geçiş ışık ölçümü ile elde edilen barınak yıldız yoğunlukları ( $\rho_{\text{gecis}}$ ) ile aynı sistemler için asterosismoloji ( $\rho_{\text{sismoloji}}$ ) yöntemiyle elde edilen barınak yıldız yoğunlukları (Huber vd. 2013).

### 3. Geçiş Gözlemlerinden Gezegen Parametrelerine

#### 3.1 Geçiş Sırasındaki Işık Kaybı

Ötegezegen barındıran bir sistemin ışık ölçümünden alınan akının geçiş sırasında zaman göre değişimi (21) ifadesi ile verilebilir.

$$F(t) = F_*(t) + F_g(t) - k^2 \alpha_{\text{gecis}}(t) F_*(t) \quad (21)$$

$I_g$  ve  $I_*$  sırasıyla gezegen ve yıldız disklerinin tümü üzerinden entegre akıları,  $F_g / F_* = k^2 I_g / I_*$  olmak üzere, normalize ışık eğrisinde geçiş sırasında gözlenen zaman bağlı normalize ışık değişimi,  $f(t) = F(t) / F_*$  (22) ifadesiyle verilir.

$$f(t) = 1 + k^2 \frac{I_g(t)}{I_*(t)} - k^2 \alpha_{\text{gecis}}(t) \quad (22)$$

Gezegen diskinin entegre akısının ( $I_g$ ) zamanla değişmesinin nedeni gezegen diskinin Dünya'daki gözlemciye ışık yansıtan yüzeyinin yörünge boyunca evreyle değişimi ve gezegen atmosferindeki değişimlerdir. Bir geçiş süresi boyunca  $I_g$ 'nin değişmediği (ya da değişiminin gözlenemeyeceği) varsayıldığında, ki yerden optik bölgede yapılan ışık ölçüm gözlemlerinde çoğunlukla durum budur, ışık kaybı tamamen  $\alpha$  fonksiyonuna bağlı hale gelir.  $\alpha_{geçiş}$  bir yamuk fonksiyonu (trapezoid) olarak kabul edilir, normalize akı değişimi ( $f(t)$ ) ise  $\delta$  (derinlik ya da kontrast) parametresi ile ifade edilecek olursa (23) ifadesi elde edilmiş olur.

$$\delta_{geçiş} \approx k^2 \left[ 1 - \frac{I_g(t_{geçiş})}{I_*} \right] \text{ ve } \frac{I_g(t_{geçiş})}{I_*} \approx 0 \text{ olduğundan } \delta_{geçiş} \approx k^2 \quad (23)$$

### 3.2 Barınak Yıldızın Kenar Kararması

Kenar kararması geçiş derinliğinin yıldız diskinin merkez doğrultusunda  $k^2$  'den büyük, diskin kenarında ise  $k^2$  'den küçük olarak gözlenmesine neden olur. Dalgaboyu bağımlılığı da bulunan kenar kararması kaynaklı yeğlilik profili lineer (Russell vd. 1912), kuadratik (Kopal 1950), kübik (van't Veer 1960), karekök (Diaz-Cordoves ve Gimenez 1992), logaritmik (Klinglesmith, Sobieski 1970) ve dört sabitli (Claret 2000) kenar kararma yasalarına bağlı olarak verilmekte, ışık eğrilerinden bu yasalar çerçevesinde ayıklandıktan sonra parametre hesabına geçilmektedir. Southworth vd. (2009) özellikle yerden, gezegen barındıran yıldızların soğuk yıldızlar olmaları nedeniyle parlak oldukları uzun dalgaboyunda geçiren filtreler ( $R, I, R_c, I_c, r', i', z'$ ) kullanılarak yapılan gözlemlerinde, kuadratik yasayla dört sabitli yasa arasında anlamlı bir fark bulamamışlardır. Geçiş ışık eğrilerinin modellenmesinde kullanılan pek çok yazılım paketinde bu yasaların tümü entegre edilmiş durumdadır.

### 3.3 Geçiş Gözlemleri ile Elde Edilebilen Parametreler

*i. Etki Parametresi (b):* Gezegen yarıçapı yıldız yarıçapına göre çok küçük kabul edilerek ( $R_g \ll R_*$ ) sadece gözlenebilir nicelikler cinsinden ifadesi kullanılarak hesap edilebilir (24).

$$b^2 = \frac{(1-\sqrt{\delta})^2 - \left(\frac{T_{düzlek}}{T_{toplam}}\right)^2 (1+\sqrt{\delta})^2}{1 - \left(\frac{T_{düzlek}}{T_{toplam}}\right)^2} \quad (24)$$

*ii. Yarıçap:* Geçiş ışık eğrisinin derinliğinden (kontrast) görelisi ( $k = \sqrt{\delta} = R_g / R_*$ ) büyüklüğe geçilir. Eğer cisim çok sönük değilse dikine hız gözlemleri için elde edilen tayflarından, aksi takdirde çok bant ışık ölçümleri ve kalibrasyonlardan hareketle belirlenen sıcaklık, ışınım gücü ve varsa yaş bilgisi de kullanılarak yıldız atmosferi modellerinden barınak yıldız yarıçapı ( $R_*$ ) alınır ve gezegen yarıçapı ( $R_g$ ), model bağımlı olmakla birlikte, elde edilmiş olur.

*iii. Kütle:* Gezegen kütlelerini mutlak olarak elde edebilmek için barınak yıldızın dikine hız değişiminin yarı-genliğine ( $K_*$ ) ihtiyaç duyulur. Kepler'in 3. yasasından hareketle gezegen kütlesi ( $M_g$ ) ile barınak yıldızın kütlesi ( $M_*$ ) arasındaki ilişki (25) ifadesi ile verilir.

$$\frac{M_g}{(M_g + M_*)^{2/3}} = \frac{K_* \sqrt{1-e^2}}{\sin i} \left(\frac{P}{2\pi}\right)^{1/3} \quad (25)$$

Bir geçiş için  $\sin i \sim 1$  olduğundan dikine hızdaki yörünge eğim açısı ( $i$ ) kaynaklı dejenerasyon ortadan kalkar. Ancak gezegen kütlesi yıldız kütlesine göre çok küçük ( $M_g \ll M_*$ ) kabul edilse dahi (25) denkleminde sonuçta elde edilen ( $M_g / M_*$ )<sup>2/3</sup> olacağı için yıldızın kütlesini belirlemeden gezegenin kütlesini belirlemek mümkün olmaz Barınak yıldız kütlesi ( $M_*$ ), ve yarıçapı ( $R_*$ ) için interferometrik gözlemler (Baines vd. 2009), asterosismoloji (Stello vd. 2009) ve çift yıldız sistemlerine dayanılarak oluşturulan kalibrasyonlar kullanılabilir.

*iv. Yörünge Büyüklüğüne Ölçeklendirilmiş Yıldız Yarıçapı ( $R_*/a$ ):* Bu önemli parametre; ışık eğrisi parametreleri, zaman ölçekleri ve dikine hız eğrisinden elde edilen dışmerkezlilik ( $e$ ) ile yörünge enberi noktasının boylamı ( $\omega$ ) kullanılarak modellenen bağımsız, sadece gözlemsel niceliklerden hareketle elde edilebilir (26).

$$\frac{R_*}{a} = \frac{\pi}{2\delta^{1/4}} \frac{\sqrt{T_{düzlek}^3 - T_{toplam}^3}}{P} \frac{1+e \sin \omega}{\sqrt{1-e^2}} \quad (26)$$

$R_*/a$  (ve  $R_g/a$ ) oranları yıldızla gezegen arasındaki tedirginlik kuvvetlerinin ne derece etkili olabileceğini gösterir.  $R_*/a$  oranı ayrıca yıldızın ışığının hangi oranda gezegenin yüzeyine ulaştığını (ing. irradiation) da belirler.

*v. Barınak Yıldızının Ortalama Yoğunluğu ( $\rho_*$ ):* Yörünge Büyüklüğüne Ölçeklendirilmiş Yıldız Yarıçapı ( $R_*/a$  oranı), ortalama yıldız yoğunluğu ile gezegen yoğunluğu arasındaki ilişki üzerinden yıldızın ortalama yoğunluğunun elde edilmesini de sağlar (Denklem 19).

*vi. Yörünge Eğim Açısı (i):* Etki parametresi ışık eğrisi üzerinden gözlemsel parametrelerle elde edildikten sonra (27) ifadesi ile yörünge eğim açısına geçmek mümkündür.

$$b_{geçiş} = \frac{a \cos i}{R_*} \left( \frac{1-e^2}{1+e \sin \omega} \right) \quad (27)$$

**vii. Gezegenin Yüzey Çekim İvmesi ( $g_g$ ):** Ayrıca yine Kepler'in 3. yasası ve yıldızın dikine hız yarı genliği ( $K_*$ ) ifadesi (28) kullanılarak elde edilen (29) ifadesiyle yıldızın parametrelerinden bağımsız olarak gezegenin yüzey çekim ivmesine ilişkin bilgi sahibi olmak da mümkündür.

$$K_* = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \left( \frac{n a \sin i}{\sqrt{1-e^2}} \right) \quad (28) \quad g_g = \frac{2\pi}{P} \frac{\sqrt{1-e^2} K_*}{\left( \frac{R_g}{a} \right)^2 \sin i} \quad (29)$$

**viii. Gezegenin Denge Sıcaklığı ( $T_{denge}$ ):** Bir gezegenin denge sıcaklığı, gezegen yüzeyinin eşsıcaklıklı (izotropik) olduğu varsayılarak belirlenen yüzey sıcaklığıdır ( $T_{denge}$ ) ve  $A_B$ : Bond albedosu,  $f$ : Isı dağılım parametresi (Sheets ve Deming 2014),  $T_{etkin}$ : Yıldızın etkin sıcaklığı olmak üzere (30) ifadesiyle verilir. Pratik bir yaklaşım bu ifadede  $f(1 - A_B) = 1$  varsaymaktır.

$$T_{denge} = T_{etkin} \left( \frac{R_g}{a} \right)^{1/2} (f(1 - A_B))^{1/4} \quad (30)$$

**ix. Geçiş Zamanları ( $t_c$ ):** Geçiş dönemi ( $P$ ), genellikle geçiş yöntemiyle gezegen “avlayan” araştırmalar tarafından 3 geçiş sounda duyarlı olarak belirlenir. Duyarlılık her bir geçiş (ya da örtme) gözlemi sonrası daha da artar. Zira bu zamanlar  $n$ , gözlem sayısını,  $t_c[0]$  herhangi bir referans geçiş ortası zamanını göstermek üzere lineer olarak artar (31).

$$t_c[n] = t_c[0] + nP \quad (31)$$

Bu ilişki sonucu hesaplanan geçiş zamanları Güneş Sistemi'nin kütle merkezine indirgenerek Dünya'nın hareketinden, dinamik zaman kullanılarak ışık-zaman etkilerinden arındırılmalıdır (BJD-TDB). Yörünge başka etkiler (ek cisimlerin varlığı, dönme ya da tedirginlik etkileri kaynaklı küresel simetriden uzaklaşmalar, genel görelilik etkileri gibi) nedeniyle aynı elipsi sürekli olarak izlemediği takdirde geçiş ve örtme zamanlarında, bu zamanların arasında ve geçiş ışık eğrisinin şeklinde değişimler gözlenir. Bu değişimler presesyon durumunda parametrelerin yavaş bir şekilde değişimi (Miralda-Escude 2002), ek cisimlerin varlığında kısa dönemli değişimler (Holman & Murray 2005, Agol vd. 2005) olarak gözlenir. İkinci türden etkiler özellikle geçişi gözlenen gezegenin yörüngesiyle rezonans durumunda bir yörüngeye sahip ek bir bileşen için büyük olabilmektedir.

**x. Gezegen Geçişleri ve Yörünge Eğimleri:** Geçiş yöntemiyle keşfedilen gezegenlerin keşif kolaylığı nedeniyle, önemli bir kesri sıcak-Jüpiterlerdir ( $M_g > 0.3 M_{Jüp}$ ,  $P_{yör} < 10^{gün}$ ). Mevcut gezegen oluşum senaryoları bu gezegenlerin bu çizgisinin ötesinde oluşması gerektiğini öngörmektedir. Bu durumda bu gezegenlerin gözlemlenmeleri yere nasıl geldikleri önemli bir sorudur. Bu gezegenlerin oluştuğu sırada öngezegen diskleri içinde içe doğru düzenli göç (Goldreich ve Tremaine 1980), sistemdeki diğer gezegenlerle etkileşimleri (Fabricky ve Tremaine 2007, Dawson ve Murray-Clay 2013), gezegen-yıldız ve gezegen-gezegen arası tedirginlik kuvvetleri (Albrecht vd. 2012) gibi mekanizmalarla buldukları yere geldikleri düşünülmektedir. Mevcut oluşum senaryoları sonuçta oluşan gezegen popülasyon karakteristikleri üzerine farklı öngörülere sahiptirler. Gezegenin yörüngesi ile yıldızın dönme eksenini arasındaki açı ( $\Psi$ ), oluşum senaryolarının üzerinde kestirimde bulunduğu parametrelerden en önemlisidir. Dolayısı ile bu açıyı (ya da gökyüzündeki izdüşümünü,  $\lambda$ ) belirlemek, gezegen oluşum senaryolarının testi açısından önem taşır (Mancini ve Southworth 2016). Bu açıyı gezegen geçişleri sırasında dikine hızda Rossiter-McLaughlin etkisi gözlemleri (Hirano vd. 2011), tayfsal çizgilerin asimetrisi üzerinden yapılan Doppler tomografi ( $\Psi$ ) çalışmaları (Collier-Cameron vd. 2010, Zhou vd. 2016) ve yüzey parlaklık dağılımı düzensizliklerinin gözlemleri (Sanchis Ojeda ve Winn 2011, Nutzman vd. 2011) ile belirlemek mümkündür. Gezegenin yıldızının önünden geçtiği yol (11) ve (12) numaralı denklemlerden belirlenebilirken, yıldızın dönme eksenini de üzerindeki bir parlaklık dağılımı düzensizliğinin (yıldız lekeleri) hareketinden belirlenebilir. Bu şekilde hizalanmış yörüngelere sahip gezegenler (HD 189733b: Winn vd. 2006) gözlenmiş olduğu gibi yıldızın dönme eksenine eğik (XO-3b: Hirano vd. 2011), dik (Albrecht vd. 2011), hatta retrograd yörüngelerde dolanan gezegenlere (Winn vd. 2009) rastlanmıştır. Bu çeşitliliği açıklamak mevcut gezegen oluşum ve yörünge evrimi senaryolarının önünde duran önemli bir problemdir.

**xi. Gezegen Atmosferlerinin Yapısı:** Geçiş ışık eğrilerinin modellenmesinde genellikle gezegen diskinin kenarı düzgün bir yay olarak ele alınır. Ancak gaz gezegenlerin bir yüzeyi bulunmadığı gibi, karasal gezegenlerin de kalın atmosferleri olabilir.  $R_g$  gezegenin tüm dalgaboylarında opak olan yarıçapını tanımlamak üzere, gezegenin optik ince atmosferi kaynaklı ekstra donukluk yarıçapı kaynaklı geçiş derinliği farkı ( $\Delta\delta$ ) (32) ile verilir.

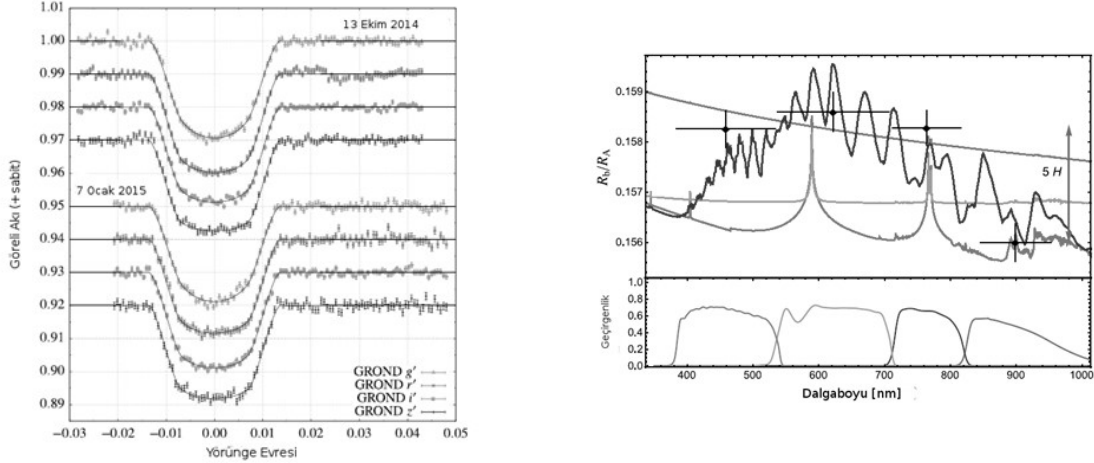
$$\Delta\delta = \frac{\pi(R_g + N_H H)^2}{\pi R_*^2} - \frac{\pi R_g^2}{\pi R_*^2} \approx 2N_H \delta \left( \frac{H}{R_g} \right) \quad (32)$$

Burada  $H$ , gezegen atmosferindeki ölçek yüksekliği (ing. scale height);  $N_H$ , yıldız ışığının içinden geçtiği ölçek yüksekliği sayısıdır. Ölçek yüksekliği gezegenin yüzey sıcaklığı ( $T_g$ ), atmosferindeki parçacıkların ortalama molekül ağırlığı ( $\mu_m$ ) ve yüzey çekim ivmesi ( $g_g$ ) ile ilişkilidir (33).



$$H = \frac{k_B T_g}{\mu_m g_g} \quad (33)$$

Çok bantlı ışık gözlemlerinden elde edilen geçiş derinliklerinin ( $\delta_\lambda$ ) dalgaboyu bağımlılığının teorik modellerle öngörülenlerle karşılaştırılması sonucu gezegenin atmosferi yapısı üzerinde kestirimde bulunulabilmesi mümkündür (Şekil 5).

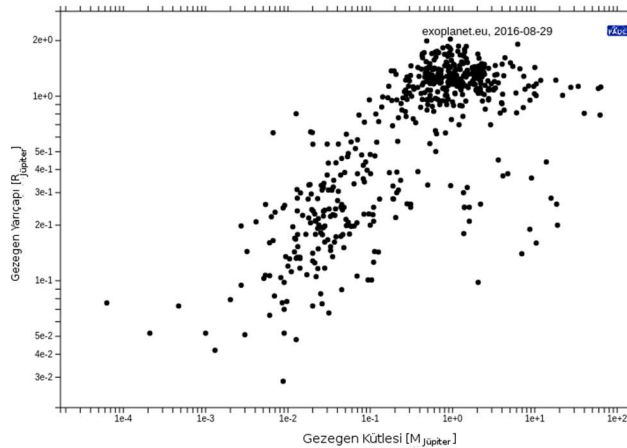


**Şekil 5:** (solda) WASP-98b'nin İki farklı tarihte yapılmış çok bant GROND gözlemleri, (sağda) ışık eğrisi derinliğinden ( $\delta$ ) elde edilen  $k = (R_g / R_*)$  değerlerinin dalgaboyu ile değişimi. Farklı bantlardaki ışık eğrilerinde elde edilen noktalar üzerindeki hata değerleri gözlemsel hatalardan türetilirken dalgaboyundaki hata kullanılan fotometrik bandın FWHM'sini göstermektedir.

Kesiksiz eğriler “temiz bir atmosfer”, aynı atmosferin puslu bir versiyonu için Rayleigh saçılması 1000 kat artırılmış hali, bulutlu bir atmosfer ve TiO ile VO molekülleri baskın atmosferi göstermektedir (Mancini ve Southworth 2016).

#### 4. Geçiş Gözlemleriyle Ulaşılan Sonuçlar

Bugüne kadar (30 Ağustos 2016) keşfedilen toplam 3518 ötegezegenin 2678'i (%76) geçiş yöntemiyle keşfedilmiştir. Bunların 2290'ı (%86) Kepler Uzay Teleskobu ile keşfedilmiş gezegenlerdir (<http://exoplanet.eu>). Bu sayıların tamamı dikine hız gözlemleriyle kütleleri ve gezegen doğaları kesinleştirilmiş ötegezegenlere ilişkindir. Geçiş gözlemleriyle ulaşılan en çarpıcı sonuç gezegenler için kütle yarıçap ilişkisidir. Geçiş yöntemiyle keşfedilen büyük çoğunluğu sıcak-Jüpiter türündeki ötegezegenler için bir kütle yarıçap ilişkisi bugüne kadar keşfedilmiş örnekler üzerinden Şekil 6'da verilmiştir.



**Şekil 6:** Geçiş yöntemiyle keşfedilen ötegezegenlerin kütlelerine karşılık yarıçapları. Veri <http://exoplanet.eu> 'dan alınmıştır.

#### 5. Kaynaklar

- Agol, E., vd. 2005, MNRAS, 359, 567
- Albrecht, S., vd. 2111, ApJ, 738, 52
- Albrecht, S. vd. 2012, ApJ, 744, 189
- Alonso, R., vd. 2004, ApJ, 613, L153
- Alsubai, K. A., vd. 2013, AcA, 63, 465



- Baines, E. K. 2009, ApJ, 701, 514  
Bakos, G., vd. 2004, PASP, 116, 266  
Borucki, W. J., vd. 2010, Science, 327, 977  
Barge, P., vd. 2007, Proceedings of The European Planetary Science Congress <http://meetings.copernicus.org/epsc2007>, p.562  
Claret, A. 2000, A&A, 363, 1081  
Charbonneau, D., vd., 2000, ApJ, 529, 45  
Collier Cameron, A., vd., 2010, MNRAS, 403, 151  
Dawson, R. ve Murray-Clay, R., 2013, Protostar & Planets IV, Heidelberg, Poster #2B075  
Diaz-Cordoves, J. ve Gimenez, A. 1992, A&A, 259, 227  
Fabricky, T. ve Tremaine, S. 2007, ApJ, 669, 1298  
Goldreich, P. ve Tremaine, S. 1980, ApJ, 241, 425  
Hartman, J. D., vd. 2015, AJ, 150, 197  
Hirano, T., vd. 2011, PASJ, 63, 57  
Holman, M. J. ve Murray, N. W., Science, 307, 1288  
Huber, D., vd. 2013, ApJ, 767, 127  
Kipping, D. M. 2008, MNRAS, 389, 1383  
Klinglesmith, D. A. ve Sobieski, S. 1970, AJ, 75, 175  
Kopal, Z. 1950, HarCi, 454, 1  
Mancini, L. ve Southworth, J. 2016, astro.ph 1605.05576  
McCullough, P. R., vd. 2004, Bulletin of the American Astronomical Society, 36, 1566  
Miralda-Escudé, J. 2002, ApJ, 564, 1019  
Murray, C. D. ve Correia, A. C. M. 2010, Exoplanets, ed. Sarah Seager, University of Arizona Press, p. 15-23  
Nutzman, P.A., vd. 2011, ApJ, 740, 10  
Pepper, J., vd. 2004, AIPC, 713, 185  
Pollacco, D., vd. 2006, Ap&SS, 304, 253  
Russell, I. vd. 1912, ApJ, 36, 239  
Sanchis-Ojeda, R. ve Winn, J. N. 2011, ApJ, 743, 61  
Seager, S. ve Mallen-Ornelas, G. 2003, ApJ, 585, 1038  
Sheets, H. A. ve Deming, D. 2014, ApJ, 794, 133  
Southworth, J., vd., 2009, MNRAS, 396, 1023  
Stello, D., vd., 2009, ApJ, 700.1589  
van't Veer, F. 1960, L'assombrissement centre-bord des etoiles, Utrecht, Drukkerij Schotanus & Jens  
Winn, J. N., vd. 2006, ApJ, 653, 69  
Winn, J. N., vd. 2009, ApJ, 703, 99  
Winn, J. N. 2010, Exoplanets, ed. Sarah Seager, University of Arizona Press, p. 55-77  
Zhou, G., vd. 2016, AJ, 152, 136