



Ötegezegenli Sistemlerin Açılal Momentum Dağılımlarının İncelenmesi

Gamze Bendeş^{1,2} *, Faruk Soyduğan^{2,3} 

¹ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 17100, Çanakkale

² Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Astrofizik Araştırma Merkezi ve Ulupınar Gözlemevi, Ulupınar, 17100, Çanakkale

³ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 17100, Çanakkale

Accepted: November 14, 2022. Revised: November 14, 2022. Received: November 4, 2022.

Özet

Bu çalışmada NASA'nın ötegezegen arşivinden derlenen 256 adet ötegezegen-barınak yıldız sisteminin (tek yıldızlı ve tek gezegenli sistemler) açılal momentum dağılımları incelendi ve açılal momentumun yıldızın kütlesi, dönme hızı ve gezegenin kütlesiyle ilişkisi araştırılarak belirlendi. Bunun yanında yıldızın yaşı ile yıldızın dönme hızı arasındaki ilişki incelenerek bunun yıldızın dönme açılal momentumuna ve sistemin toplam açılal momentumuna yansımaları ortaya konmaya çalışıldı. Örnek grubunun genişletilerek ve çeşitlendirilerek açılal momentum dağılımlarının incelenmesinin, bu sistemlerin ve onların oluşum ve evrimlerinin tartışılabilmesi açısından önemli olacağı ve ileriki dönemde araştırılabileceği belirtildi.

Abstract

In this study, angular momentum distributions of 256 planet-host stars systems (planetary systems with single star and single planet) that collected from NASA Exoplanet Archive were examined and relation of angular momentum with planet mass, host-star mass and rotational velocity of host-star by investigated was determine. Furthermore relation between stellar age and rotation velocity of star by examine, reflection to spin angular momentum of star and to orbital angular momentum of planet was aimed to exhibit. It was stated that examining the angular momentum distributions by expanding and diversifying the sample group will be important in terms of discussing these systems and their formation and evolution, and can be investigated in the future.

Anahtar Kelimeler: planet-star interactions, stars:fundamental parameters, stars: kinematics and dynamics, planetary systems

1 Giriş

Yaklaşık son 30 yılda keşfedilen ötegezegen sistemlerinin sürekli artması ve bu sistemlerdeki gezegenlerin çeşitliliğinin oldukça farklı hale gelmesiyle birlikte ötegezegenlerin oluşum ve evrim süreçlerinin araştırılması önemli hale gelmiştir. Bu süreçlerin anlaşılabilmesi için açılal momentum dağılımlarının incelenmesi anahtar denilebilecek başlıklardan biri olarak kabul edilebilir. Son yıllarda artan ötegezegen sayılarıyla birlikte sistemlerin istatistiksel olarak çalışılması da olanaklı hale gelmiş ve bu tür sistemlerin açılal momentumlarını yıldız ve gezegen parametreleriyle değerlendiren çalışmalar yapılmaya başlanmıştır.

İncelenen bir ötegezegen sisteminde, yıldız ve gezegen(ler) birbirinden bağımsız olarak düşünülemez. Gezegenli ve gezegensiz benzer yıldızlar üzerine yapılan karşılaştırmalar bunu açıkça göstermektedir. Örneğin Scholz (2013), merkezi yıldız ile ön-gezegen diski arasındaki dinamik etkileşimlerin, ilk birkaç mil-yon yıl süresince, merkezi yıldızın dönme hızını etkilediğini ifade eder. Sibony ve diğ. (2022) yaptıkları çalışmada gezegenli yıl-dızların gezegensiz olanlara göre daha yavaş döndükleri sonucuna ulaşmışlardır. Aynı zamanda sistemdeki açılal momentum ve kütlelerin farklı şekillerde dağılıyor olmasının genellikle ön-gezegen diski aşamasında gerçekleşen açılal momentum aktarım süreçlerinden kaynaklandığı ifade

edilmiştir (Williams & Cieza 2011). Gurumath ve diğ. (2019), ötegezegenler ve barınak yıldızlar arasındaki açılal momentum dağılımını anlamak için yaptıkları çalışmada, gezegen yörünge açılal momentumunun gezegen kütlesine bağımlılığını bildirmişler ve bu bağımlılığın ise tekli ve çoklu gezegen sistemlerinde birbirinden farklı olduğunu bulmuşlardır. Ötegezegenli sistemlerde özgül açılal momentum dağılımlarının ele alındığı çalışmalar da bulunmaktadır (Berget & Durrance 2010; Armstrong ve diğ. 2007). Bunların dışında yıldız-gezegen sistemlerinde toplam açılal momentumun barınak yıldızın yaşı arttıkça azaldığını rapor eden araştırmalar yayınlanmıştır (örn. Jiang ve diğ. (2022)).

Güneş Sistemine bakıldığında Güneş, sistemin toplam kütlelerinin çok büyük bölümünü (%99'u aşan) içerirken toplam açılal momentumun çok küçük bir kısmını (%1'den az) oluşturur (Ray 2012). Sistemin toplam açılal momentumunun önemli bölümünü Jüpiter ve Satürn gibi hem büyük kütleli hem de büyük yörüngeye sahip gezegenler oluşturur. Günümüzde keşfedilen ötegezegen sistemlerinin çoğu Güneş sistemine benzemezler. Bu durum da ötegezegen sistemlerinin oluşum ve evrim açısından birbirlerinden çok farklı mekanizmalara ve/veya farklı evrim durumlarına sahip olma ihtimalini düşündürmektedir. Bu çalışmada, yıldız-gezegen sistemlerindeki açılal momentum dağılımları, tek yıldız ve tek gezegenli sistemler için, incelenerek sistemlerdeki oluşum ve evrim senaryolarının anlaşılmasına katkı sağlanması hedeflenmiştir. Bu amaçla en tutarlı barınak yıldız ve

* gamzebnds@gmail.com

gezegen parametreleri kullanılarak açışal momentum değeri hesaplanmış ve farklı parametreler üzerinden açışal momentum dağılımları ve değışimleri incelenmiştir.

2 Veri Bilgisi

2.1 Kullanılan Veri Grubunun Elde Edilmesi

Bu araştırmada kullanılan veriler "NASA Exoplanet Archive" veri tabanındaki **Gezegen Sistemleri** (Planetary Systems) bölümünden derlendi. Hedef veri grubu elde edilirken öncelikli amaç hem açışal momentum hesaplamalarının yapılabilmesi için gerekli olan eksiksiz parametre setini (yıldız kütlesi, yıldız yarıçapı, yıldızın dönme hızı, gezegen kütlesi, gezegen yörünge basıklığı ve gezegen yörüngesinin yarı-büyük eksen uzunluğu) oluşturmak hem de dağılımları oluştururken anlamlı sonuçlar elde edebilecek kadar yeterli sayıda gezegen sistemine ulaşmaktı. Derlenen tüm veriler literatürdeki çalışmaların sonuçlarından elde edilmiş parametreleri içermektedir.

Kullanılan veri tabanındaki "Gezegen Sistemleri" tablosunda her bir gezegen için varsayılan parametre seti seçildiğinde hesaplamalar için gerekli olan parametrelerde eksik verilerin olduğu görülmektedir. 18 Temmuz 2022 tarihinde elde edilen tabloda 3789 gezegen sistemi ve 5063 gezegen bulunmaktadır. Tek gezegeni ve tek yıldız bulunan sistem sayısı 2683 olarak görülmektedir. Çoklu yıldız/gezegen sistemlerine gittikçe elde edilen sistem sayısı oldukça azalmaktadır. Bunun yanında, her gezegen satırındaki veri setlerinin parametrelerinin eksiksiz olmadığı düşünülüğünde veri sayıları oldukça düşmektedir. Bu nedenle bu çalışmada tek gezegeni ve tek yıldız olan gezegen sistemlerinin incelenmesi uygun bulundu. 2683 adet olan tek gezegeni ve tek yıldız olan veri grubuna, yıldız kütlesi (M_*), yıldız yarıçapı (R_*), yıldızın dönme hızı ($v \sin i$), gezegen kütlesi (M_p), gezegenin yörünge basıklığı (e) ve gezegenin yarı-büyük eksen uzunluğu (a) parametreleri eksiksiz olacak şekilde bir filt-releme işlemi uygulandığında elde edilen veri sayısı 256 olmaktadır.

2.2 Barınak Yıldız ve Ötegezegen Parametre Dağılımları

Barınak yıldızlarının kütle ve yarıçap dağılımına bakıldığında her iki parametrenin dağılım yoğunluğunun da Güneş'in yarıçap ve kütlesine yakın bir aralıkta olduğu görülür. Bu durum aslında bir yönden gözlem yanlılığını bize gösterir çünkü ötegezegen keşfetmek için yapılan görevlerin çoğu Güneş benzeri yıldızlar etrafında gezegen bulmaya odaklanmış durumdadır. Barınak yıldızların dönme hızının dağılımına bakıldığında 0-25 km/s aralığında (yaklaşık %95) bir dağılım gösterdiği bunun dışında 30-140 km/s aralığında az sayıda da olsa barınak yıldız bulunduğu söylenebilir. Çok yüksek hızlarda bulunan az sayıdaki barınak yıldızlarına daha detaylı bakıldığında beklendiği üzere daha genç yıldızlar olduğu görülür.

Gezegen kütle dağılımına bakıldığında yaklaşık 25 M_j kütlesine sahip gezegenlere kadar bir dağılım görülmektedir. Veri grubunun büyük çoğunluğu (yaklaşık %75) 0-2 M_j kütle aralığında bulunmaktadır. Veri grubundaki gezegenlerin yörüngelerinin basıklık değeri ise büyük çoğunlukla (yaklaşık %80 oranında) 0-0.2 değeri arasında yer almaktadır. Yörünge yarı-büyük eksen değerine bakıldığında bazı uç değerlere sahip gezegenler (2.03 AB, 0.85 AB, 0.83 AB vs.) olduğu ancak çoğu gezegenin (yaklaşık %95) 0.15 AB'den daha küçük a değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Yıldızlarına yakın ötegezegenleri keşfetmenin daha kolay olacağı dikkate alındığında bu dağılımlar için de gözlem

yanlılığından bahsedilebilir. Bu çalışmada kullanılacak veri dağılımlarından, hedef sistemlerdeki gezegenlerin çok büyük bölümünün yıldızlarına yakın gezegenler olduğu açıktır. Başka bir deyişle, bu araştırmadaki veri, tek barınak yıldız olan ve çoğunlukla yıldızına yakın tek ötegezegenli sistemlere aittir.

3 Yöntem

Bir yıldız-gezegen sisteminin açışal momentumu, içerisinde gezegenin yörünge açışal momentumunu ve barınak yıldızın dönme açışal momentumunu barındırır. Sistemin sahip olduğu gezegenin dönme açışal momentumu ise genellikle ihmal edilir (Jiang ve diğ. 2022). Gezegenin yörünge açışal momentumu aşağıdaki gibi hesaplanır (Berget & Durrance 2010):

$$L_p = M_p \sqrt{GM_* a (1 - e^2)} \quad (1)$$

Burada L_p , gezegenin yörünge açışal momentumunu ifade eder. M_p gezegenin kütlesi; G evrensel çekim sabiti; M_* yıldızın kütlesi; a yarı büyük eksen uzunluğu ve e yörünge basıklığıdır. Yıldızın dönme açışal momentumu ise aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$J_* = \left(\frac{v \sin(i)}{R_*} \right) I_* \quad (2)$$

Buradaki J_* yıldızın dönme açışal momentumunu ifade eder. $v \sin(i)$, yıldızın dönme eksen eğikliğine (i) bağlı dönme hızı; R_* yıldızın yarıçapı ve I_* eylemsizlik momentidir. Eylemsizlik momenti aşağıdaki denklemde olduğu gibi ifade edilir:

$$I_* = \frac{2}{5} M_* R_*^2 \quad (3)$$

Sistemin toplam açışal momentumu ise gezegenin yörünge açışal momentumu ve yıldızın dönme açışal momentumunun toplanmasıyla ($L_{\text{tot}} = L_p + J_*$) elde edilir (Gurumath ve diğ. 2019). Kütle başına açışal momentumu ifade eden özgül açışal momentum hesaplamaları (Berget & Durrance 2010) ise aşağıda verildiği gibi açışal momentumların kütleyle bölünmesiyle elde edilir;

$$l_p = \frac{L_p}{M_p} \quad (4)$$

$$l_* = \frac{J_*}{M_*} \quad (5)$$

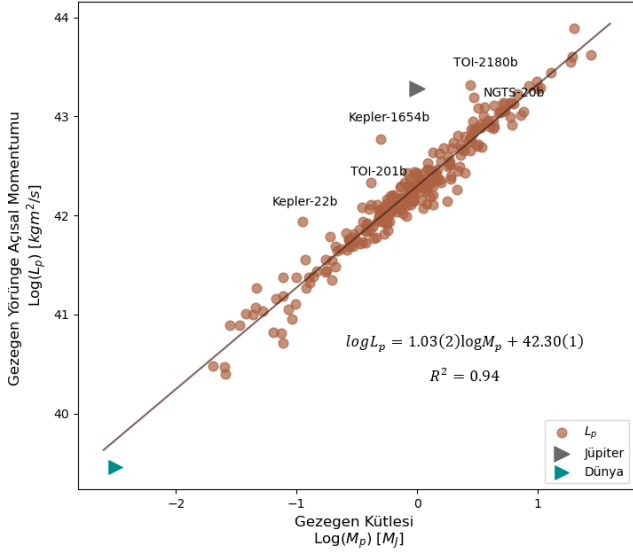
$$l_{\text{sistem}} = \frac{L_{\text{tot}}}{M_p + M_*} \quad (6)$$

Yukarıda da görülebileceği gibi özgül açışal momentum gezegen ve yıldız için ayrı ayrı hesaplanabilir veya sistemin toplam açışal momentumunun sistemdeki toplam kütleyle bölünmesiyle sistemin özgül açışal momentumu elde edilebilir.

4 Açışal Momentum Dağılımları ve Bulgular

4.1 Gezegenin Yörünge Açışal Momentumu ve Yıldızın Dönme Açışal Momentumu

Dağılımları oluştururken öncelikli olarak gezegen ve yıldızın fiziksel parametrelerine karşılık barınak yıldızın dönme açışal momentumu ve gezegenin yörünge açışal momentumu dikkate alındı. Şekil 1'deki grafikte gezegen kütlesine karşılık gezegenin yörünge açışal momentum dağılımı ve bu dağılıma ilişkin olarak oluşturulmuş doğrusal (eksenler logaritmik ölçekte olmak üzere) temsil görülmektedir. Aslında bu dağılımın beklenen bir ilişkiyi ortaya koyduğu söylenebilir. Gurumath ve diğ. (2019), yaptıkları çalışmada burada elde ettiğimize benzer bir



Şekil 1. Gezegenin kütlesine karşılık gezegenin yörünge açıl momentumunu ifade eden grafik ve bu dağılıma ilişkin elde edilen doğrusal temsil. Buradaki gri renkli üçgen Jüpiter'i, mavi renkli üçgen Dünya'yı göstermektedir. Grafikte genel dağılımın üzerinde yer alan bazı ötegezegenler de (Kepler-22b, TOI-201b, Kepler-1654b, TOI-2180b ve NGTS-20b) gösterilmiştir.

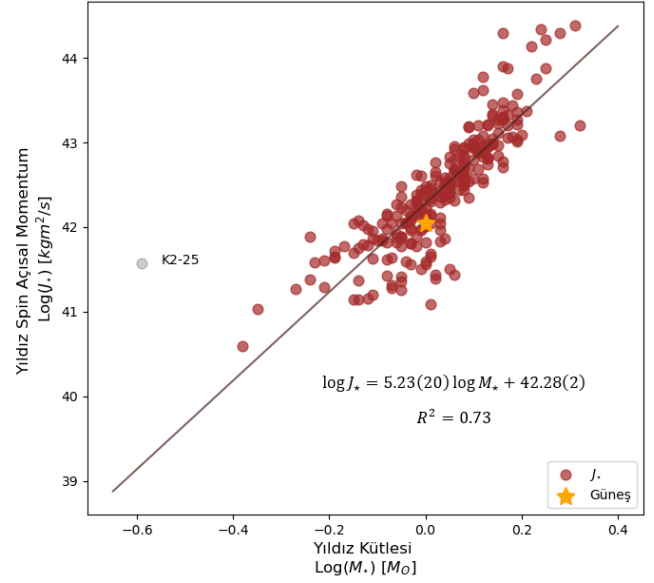
dağılım elde etmiş ve buna ilişkin bir güç yasası bulmuşlardır. Burada elde edilen güç yasası **Gurumath ve diğ. (2019)**'un çalışmasındaki dağılımı destekler nitelikte ama ondan biraz daha farklı olarak aşağıdaki gibi elde edilmiştir;

$$\log L_p = 1.03(2) \log M_p + 42.30(1) \quad (7)$$

Burada M_p , Jüpiter kütlesi biriminde gezegen kütlesi olarak kullanılmaktadır. Elde edilen denkleme göre $L_p \simeq M_p^{1.03(2)}$ olduğu görülmektedir.

Gezegen kütlesiyle açıl momentumu arasında bir ilişki olduğu açıkça görülmektedir ancak Şekil 1'den görülebileceği gibi bu doğrusal dağılımın dışında görünen birkaç sistem bulunmaktadır. Bu sistemlerin neden ayrık konumlandığı incelendiğinde bu farkın kaynağının önemli ölçüde yarı-büyük eksen uzunluğu olduğu görülmektedir. Başka bir ifadeyle, Kepler-22b, TOI-201b, Kepler-1654b, TOI-2180b ve NGTS-20b gezegenleri, genel dağılıma göre, barınak yıldızlarından daha uzak olan yörüngelerde dolanmaktadırlar.

Bu aykırı görünen gezegenlerin ne kadar farklı olduğu belirlenmek istenirse dağılım içerisindeki benzer kütleyle sahip gezegenlerle kıyaslaması yapılabilir. Örneğin Kepler-22b (0.11 M_j) gezegeninin kütlesine yakın bir grup gezegen (0.1–0.2 M_j aralığında 11 gezegen) seçilip bunların ortalama (medyan olarak) yarı-büyük eksen değerine bakıldığında 0.05 AB olduğu görülmektedir. Bunun yanında Kepler-22b gezegeninin yarı-büyük eksen değeri 0.85 AB'dir. Kepler-1654b (0.5 M_j) ve TOI-201b (0.42 M_j) gezegenlerinin kütlesine yakın aralıkta bir örnek (0.4–0.6 M_j aralığında 30 gezegen) seçildiğinde bu grubun ortalama (medyan olarak) yarı-büyük eksen değerinin 0.05 AB olduğu görülmektedir. Buna kıyasla Kepler-1654b'nin yarı büyük eksen değeri 2.03 AB ve TOI-201b'nin ise 0.3 AB'dir. Bu sonuçlara bakıldığında aykırı olarak dağılmış olan gezegenlerin yarı-büyük eksen uzunluklarının benzer kütle



Şekil 2. Yıldızın kütlesine karşılık dönme açıl momentumunun değişimi ve uygulanan doğrusal temsil (K2-25 yıldızı kullanılmamıştır). Sarı renkli yıldız Güneş'in diyagramdaki konumunu göstermektedir.

aralığındakilere göre ne kadar büyük oldukları daha açık bir şekilde görülmektedir.

Şekil 2'deki grafikte barınak yıldız kütlesine karşılık yıldızın dönme açıl momentumu dağılımı ve dağılıma ilişkin oluşturulmuş doğrusal temsil görülmektedir. Bu doğrusal ilişkinin denk-lemi aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\log J_* = 5.23(20) \log M_* + 42.28(2) \quad (8)$$

Elde edilen denkleme göre $J_* \simeq M_*^{5.23(20)}$ olduğu görülmektedir.

Yıldız kütlesiyle yıldızın dönme açıl momentumu arasındaki dağılımına bakıldığında (Şekil 3) genel eğilimin dışında bir yıldız bulunmaktadır. Bu yıldızın (K2-25) kütlesine bakıldığında (0.26 M_\odot) genel dağılım içerisinde dönme açıl momentumunun oldukça yüksek olduğu görülmektedir. K2-25 yıldızı ile aynı açıl momentuma sahip yıldızların oluşturduğu bir grup yıldızın ortalama (medyan olarak) dönme hızı değeri 0.8 km/s civarındadır. Buna kıyasla K2-25 yıldızının dönme hızı değeri 8.8 km/s civarındadır ve yüksek açıl momentum değerini oluşturan da bu yüksek dönme hızıdır. K2-25 yıldızına detaylı olarak bakıldığında ise oldukça genç (0.73 Gyr yaşında) ve M4.5V tayf türünde bir yıldız olduğu rapor edilmiştir (Stefansson ve diğ. 2020).

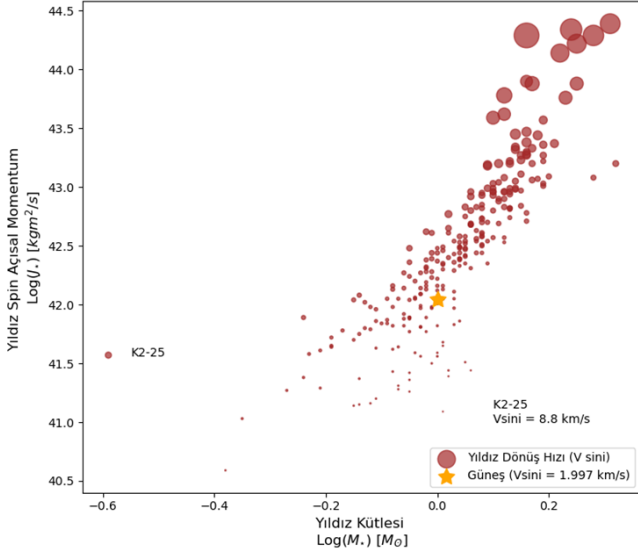
Yıldızın dönme hızına karşılık yıldızın açıl momentumu arasında bir dağılım oluşturulduğunda ise parametreler arasında daha iyi bir ilişki kurulduğu Şekil 4'te verilen grafikte görülmektedir. Bu dağılıma ilişkin elde edilen denklem ise aşağıda ve-rildiği gibi elde edilmiştir;

$$\log J_* = 1.35(20) \log(v \sin i) + 41.65(2) \quad (9)$$

Elde edilen denkleme göre $J_* \simeq v \sin(i)^{1.35(20)}$ olduğu görülmektedir.

4.2 Toplam Açıl Momentum

Gezegenin kütlesine karşılık toplam açıl momentum dağılımı Şekil 5a'da ve yıldızın kütlesine karşılık toplam açıl



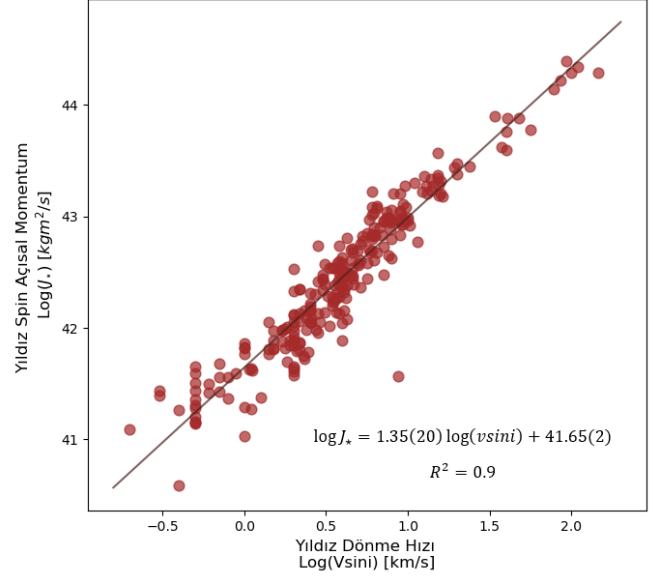
Şekil 3. Barınak yıldızların kütlelerine karşılık dönme açılal momentumunun değışimi. Semboller, yıldızın dönme hızına göre boyutlandırılmıştır.

momentum dağılımı da Şekil 5b'deki gibi elde edilmiştir. Toplam açılal momentum, yöntem ve hesaplama kısmında da bahsedildiği gibi gezegenin yörünge açılal momentumu ile yıldızın dönme açılal momentumunun toplamıyla elde edilir. Şekil 5a grafiğine bakıldığında dağılımın geniş bir bant şeklinde doğrusal bir ilişkiyi gösterdiği ifade edilebilir. Dağılımdaki saçılmayı veya bant yapısını detaylı araştırmak için farklı parametre aralıklarında daha fazla veriye ihtiyaç vardır. Ayrıca bu grafikte Güneş'in etrafında sadece Jüpiter'in olduğu varsayımıyla (bu varsayım fiziksel olarak mümkün değildir ancak Jüpiter'in kütlesi sistemdeki diğer tüm gezegenleri kütlelerinden iki katın üstünde daha büyük olduğundan sadece sembolik bir yaklaşım ve karşılaştırma için hesaplanmıştır) hesaplanan toplam açılal momentumun dağılım içerisindeki yeri dikkat çekmektedir. Jüpiter tek başına sistemin (Güneş Sistemi'nin) toplam açılal momentumunda oldukça önemli bir paya sahiptir.

Barınak yıldızın kütlelerine karşılık elde edilen açılal momentum dağılımı grafiğinde (Şekil 5b) genel eğilimin dışında kalan iki tane sistem bulunmaktadır. Şekil 6a'ya bakıldığında bu aykırı sistemler daha açık olarak görülebilir. K2-25 ve TOI-1278 sistemlerinin toplam açılal momentumları genel dağılıma göre daha yüksek bir değer almış olarak görünmektedir. Bunlardan K2-25 yıldızının dönme hızının kendi kütle değeri civarında kütleyle sahip bir grup yıldızla göre daha fazla olduğundan önceki bölümde bahsedilmiştir. Bu grafikte de bunun toplam açılal momentuma yansıyan hali görülmektedir. Diğer bir sistem olan TOI-1278'e bakıldığında yıldızın kütlelerinin görece küçük (0.54 M_{\odot}) olmasına rağmen gezegenin kütlelerinin oldukça büyük (18.5 M_J) olduğu görülmektedir. Gezegenin kütlesi büyük olduğu için yörünge açılal momentumu da büyüktür ve bu da toplam açılal momentuma yansımıştır.

Şekil 5b'de yıldız kütleleri ve toplam açılal momentum arasında olduğu görünen doğrusal ilişki, Şekil 6b'de K2-25 ve TOI-1278 sistemleri çıkartılarak elde edildi. Bu dağılıma ilişkin denklem;

$$\log L_{\text{tot}} = 4.37(20) \log M_* + 42.59(2) \quad (10)$$



Şekil 4. Yıldızın dönme hızına karşılık yıldızın dönme açılal momentumunu ifade eden grafik ve bu dağılıma uygulanan doğrusal temsil.

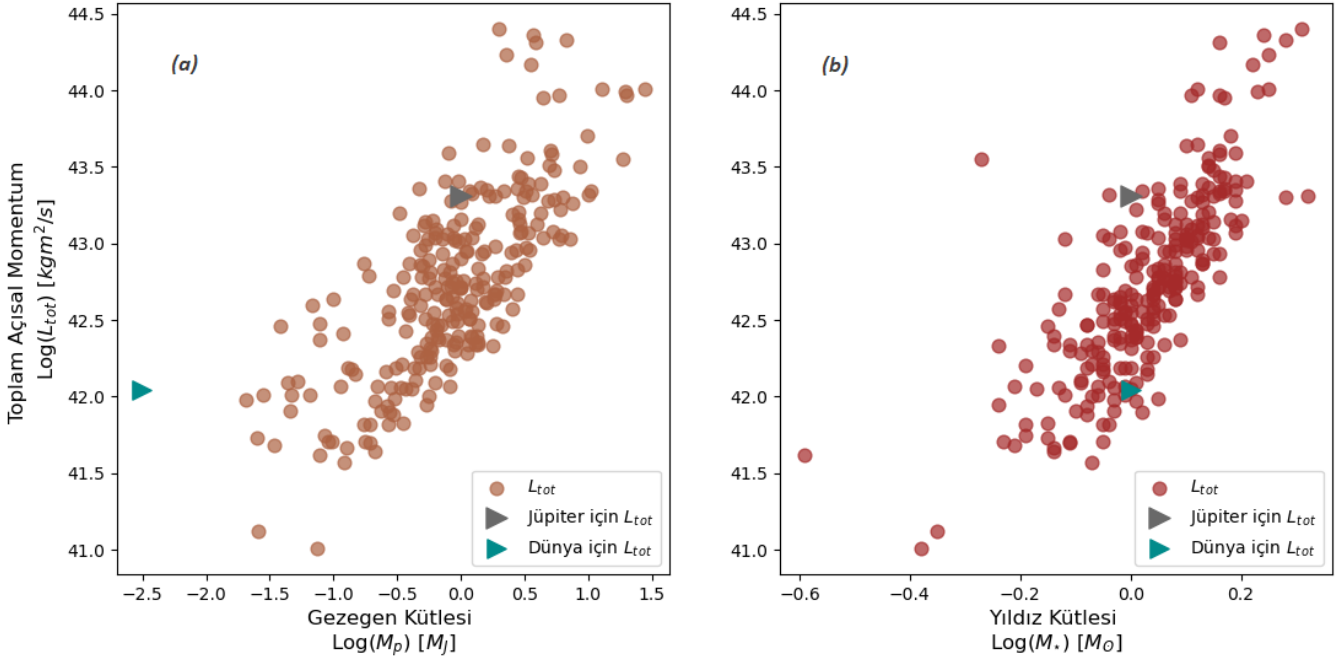
şeklinde elde edilmiştir ve buna göre $L_{\text{tot}} \simeq M_*^{4.37(20)}$ olduğu görülmektedir.

4.3 Özgül Açılal Momentümler

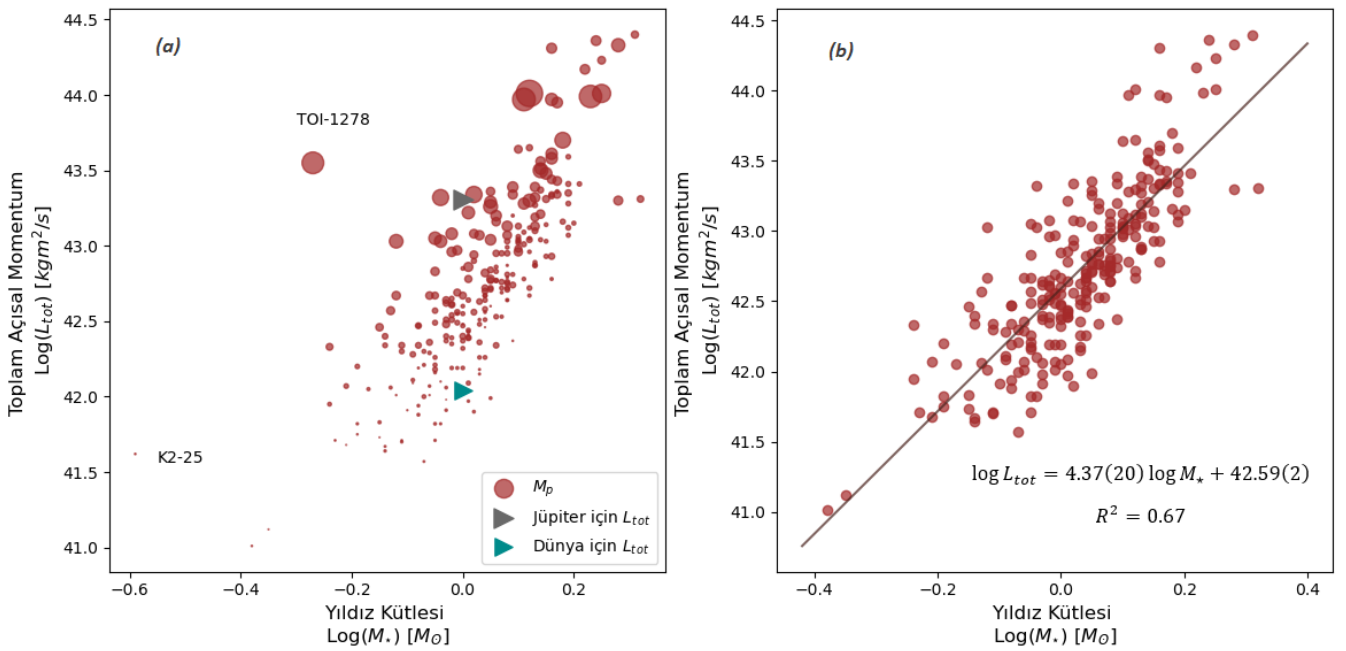
Açılal momentumun yıldız ve/veya gezegen kütlelerine bölünmesiyle elde edilen özgül açılal momentümlerin dağılımları da bu çalışmada incelenmiştir. Özgül açılal momentümlerin nasıl hesaplanacağına ilişkin bilgiler ve denklemler yöntem bölümünde verilmiştir. Yıldız kütlelerine karşılık sistemin özgül açılal momentum dağılımı Şekil 7'de verilmiştir. Şekle göre, Güneş Sistemi'nin özgül açılal momentumunun üzerine çıkan sistemler olduğu açıkça görülmektedir. Burada, tek ötegezegenli ve çoğunlukla barınak yıldızına yakın (seçim etkisi) sistemlerin incelendiği durum dikkate alınmalıdır. Şekil 7'de aynı zamanda barınak yıldızlar için yapılmış olan dev ve anakol ayrımı görülmektedir. Dağılıma bakıldığında aynı kütle değerlerinde dev barınak yıldızlar içeren sistemlerin anakol yıldızlarından daha düşük özgül açılal momentum değerlerine sahip oldukları söylenebilir ancak bu farkı detaylandırmak ve tartışmak için daha fazla dev barınaklı yıldız içeren sistem verisine ihtiyaç olduğu söylenebilir.

4.4 Barınak Yıldız Yaşı ve Açılal Momentum

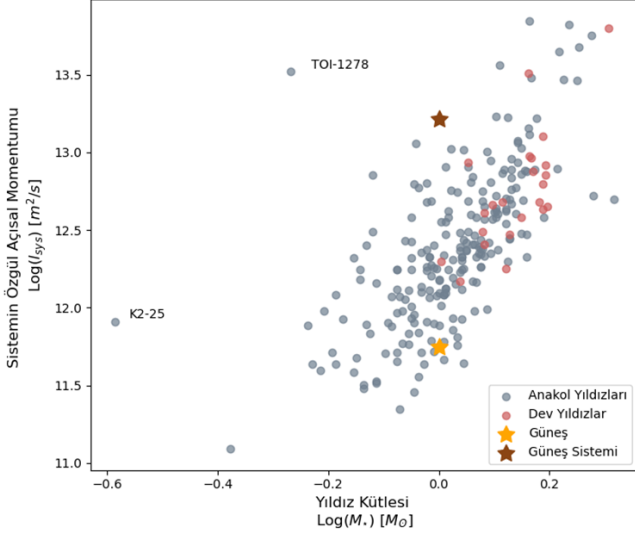
Bu çalışmada, tek gezegenli yıldız-gezegen sistemlerinin güncel verileri kullanılarak, öncelikli olarak gezegenin yörünge açılal momentumu ile kütleleri arasında ve yıldızın dönme açılal momentumu ile kütleleri arasında ilişkiler elde edildi. Ayrıca sistemin toplam açılal momentumu ile yıldızın kütleleri arasında bir bağıntı bulunmaya çalışıldı. Buna göre, gözlemsel veri analizlerinden elde edilen ve hesaplanan parametre dağılımları kullanılarak, gezegenin açılal momentumunun kütleleriyle $L_p \simeq M_p^{1.03(2)}$, yıldızın açılal momentumunun kütleleriyle $J_* \simeq M_*^{5.23(20)}$ ve sistemin açılal momentumunun yıldızın kütleleriyle $L_{\text{tot}} \simeq M_*^{4.37(20)}$ şeklinde bağıntı belirlendi. Bu bağıntılara benzer bağıntıları Gurumath ve diğ.



Şekil 5. (a) Gezegenlerin kütesine karşılık toplam açısal momentumlarının değişimi. Gri renkli üçgen Güneş'in etrafında sadece Jüpiter'in olduğu kabul edilerek hesaplanmış toplam açısal momentumu göstermektedir. Mavi renkli üçgen ise Güneş'in etrafında sadece Dünya'nın olduğu kabulüyle hesaplanmış toplam açısal momentuma karşılık gelmektedir. (b) Barınak yıldızların kütesine karşılık toplam açısal momentum değerlerinin değişimi.



Şekil 6. (a) Barınak yıldızların kütesine karşılık toplam açısal momentumlarının değişimi. Burada her yıldız kütesi için elde edilen toplam açısal momentumun grafik üzerinde işaretlenen sembolü, gezegenin kütesine göre boyutlandırılmıştır. Burada Jüpiter ve Dünya için yapılan hesaplamalar Şekil 5'te verildiği gibidir. (b) Yıldızın kütesine karşılık toplam açısal momentumunun değişimi ve bu değişime (K2-25 ve TOI-1278 sistemlerinin çıkarılmasıyla) uygulanan doğrusal temsil.



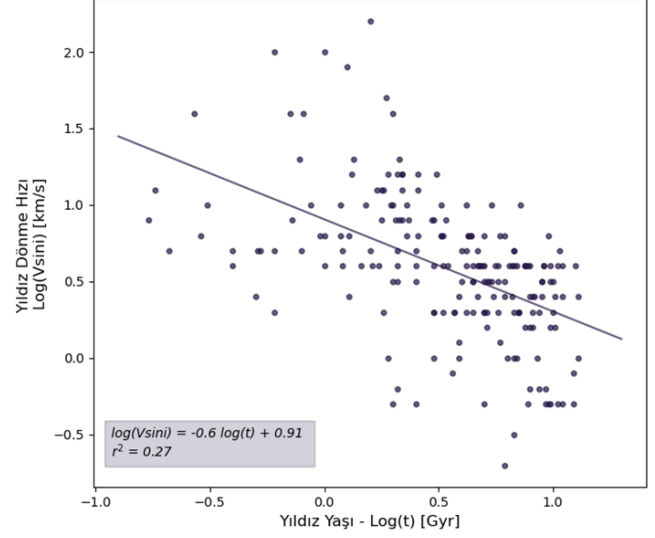
Şekil 7. Barınak yıldızların kütlesine karşılık sistemin özgül açılal momentumunun değişimi. Sarı renkli yıldız Güneş'in tek başına (gezegenleri olmadan) olduğu durumda sahip olduğu özgül açılal momentumunu temsil eder. Kahverengi yıldız ise Güneş Sistemi'nin toplam özgül açılal momentumuna karşılık gelmektedir.

(2019) yaptıkları çalışmada belirlemişler ve gezegenin açılal momentumunun kütlesi ile değişimini $L_p \simeq M_p^{1.26(5)}$ olarak elde etmişlerdir. Onların bulunduğu bağıntı ile bu çalışmada elde edilen bağıntının birbirine oldukça benzer olduğu görülmektedir. Bunun yanında Gurumath ve diğ. (2019), yıldızın açılal momentumunun kütlesi ile değişimini $J_* \simeq M_*^{4.18(53)}$ olarak ve toplam açılal momentumun yıldızın kütlesi ile değişimini $L_{tot} \simeq M_*^{3.97(31)}$ olarak elde etmişlerdir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlarla Gurumath ve diğ. (2019)'daki sonuçlar kıyaslandığındaysa birbirlerinden farklı sonuçlar elde edildiği (yıldızın kütlesinin kuvvetinin aldığı değere bakıldığında) görülebilir. Bu çalışmada aynı zamanda farklı olarak, yıldızın dönme açılal momentumunun dönme hızıyla olan değişimine bakıldı ve $J_* \simeq v \sin(i)^{1.35(20)}$ olarak elde edildi.

Bu çalışmada yer alan veri setinde barınak yıldızların yaşları üzerine değerlendirme yapılmak istendiğinde, bu yıldızların tümü için yaş bilgisi olmadığından, sadece yaşı bilinen anakol barınak yıldızları dikkate alındı. Bu durumda, bu verilere sahip 200 sistem için dağılımlar incelendi.

Bu zamana kadar yapılan çalışmalara bakıldığında, özellikle geri tayf türündeki yıldızlarda, yıldızın yaşı arttıkça dönme hızının azaldığı tespit edilmiştir (Skumanich 1972; Soderblom 1983). Bu azalma, Skumanich yasası olarak adlandırılan ve Skumanich (1972) tarafından $v \sin(i) \simeq t^{-0.5}$ olarak ifade edilen bir ilişki olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada da (Şekil 8'de görülebileceği gibi) barınak yıldızların yaşı ile dönme hızı arasında bir dağılım elde edilerek barınak yıldızların yaşı azaldıkça dönme hızının azaldığı bir kez daha görülmüş oldu. Buna göre dönme hızındaki azalma; $v \sin(i) \simeq t^{-0.6}$ olarak elde edilmiştir.

Yıldızın dönme hızının zamanla azalıyor oluşu Denklem 2'den de görülebileceği gibi yıldızın dönme açılal momentumuna da yansır. Jiang ve diğ. (2022) yaptıkları çalışmada yıldızın yaşı ve açılal momentumlar arasında ilişkiler elde etmişler ve zamanla hem gezegenin yörünge açılal



Şekil 8. Yıldızın yaşına karşılık dönme hızının değişimi ve bu dağılıma uygulanan doğrusal temsil.

momentumunun hem de yıldızın dönme açılal momentumunun azaldığını tespit etmişlerdir. Dolayısıyla zamanla sistemin toplam açılal momentumunun da azaldığını belirlemişlerdir. Bu çalışmada da barınak yıldız yaşı arttıkça açılal momentumların azaldığı belirlendi ancak Jiang ve diğ. (2022) çalışmasından farklı sonuçlar elde edildi. Zamanla yıldızın açılal momentum değişimi Şekil 9'a da olduğu gibi $J_* \simeq 10^{-0.1t}$ olarak elde edildi. Zamanla sistemin toplam açılal değişimi ise Şekil 9'b'de verildiği gibi $L_{tot} \simeq 10^{-0.08t}$ olarak bulundu.

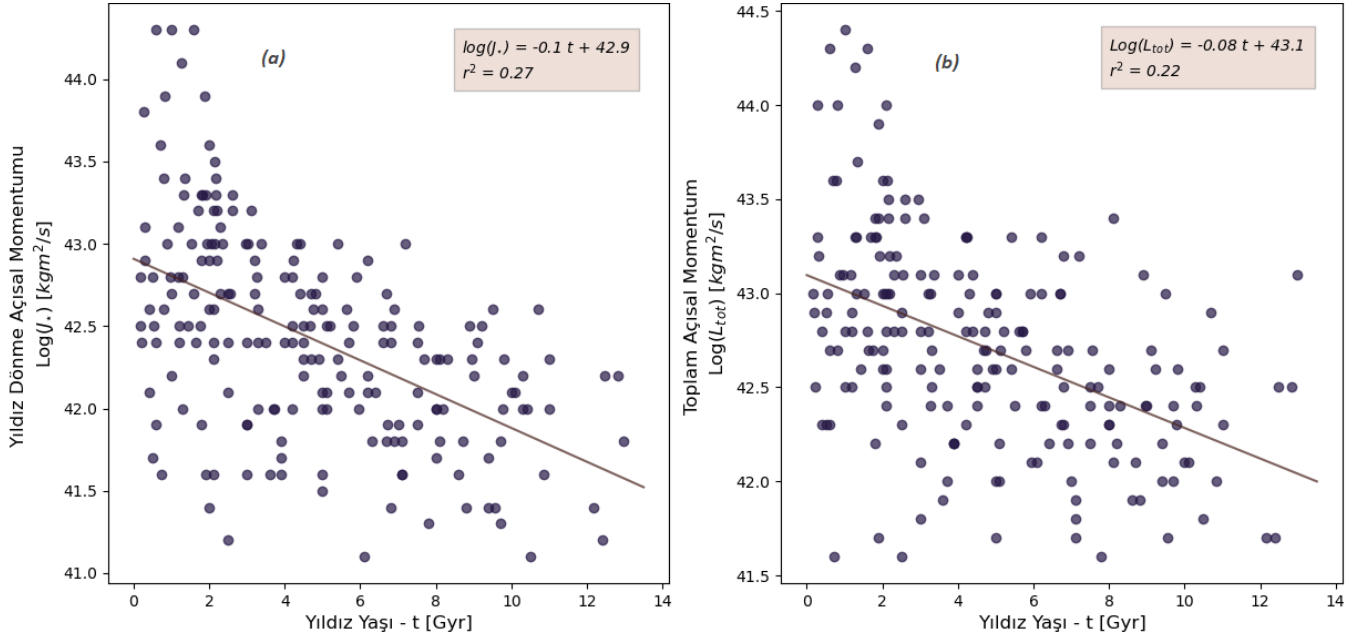
5 Tartışma ve Sonuçlar

Yıldızın dönme hızının yıldız yaşı ile değişimi için $v \sin(i) \simeq t^{-0.6}$ bağıntısı elde edildi ve ayrıca literatürde geri tayf türündeki yıldızların zaman geçtikçe dönme hızında azalma meydana gelmesi, bu çalışmadaki barınak yıldızlarıyla da gösterilmiş oldu. Bunun yanında, yıldızın dönme hızındaki azalmanın yıldızın açılal momentumundaki azalmaya da yansıtıldığını gösteren $J_* \simeq 10^{-0.1t}$ bağıntısı bulundu. Benzer şekilde zaman geçtikçe yıldızın toplam açılal momentumunun azaldığı $L_{tot} \simeq 10^{-0.08t}$ bağıntısı ile gösterildi. Jiang ve diğ. (2022) da yaptıkları çalışmada yıldız yaşıyla açılal momentum değişimini incelemişler ve $J_* \simeq 10^{-0.04t}$ ve $L_{tot} \simeq 10^{-0.02t}$ bağıntılarını elde etmişlerdir.

Bu çalışmada, yıldız-gezegen sistemlerinin dinamik evrimi açısından önemli parametrelerden olan açılal momentumun özellikle kütle ve zamana göre değişimleri incelenmiştir. Veri grubunda tek gezegenli sistemler incelenmiş olup gezegenlerin büyük kısmının yıldızına yakın sıcak ötegezegenler olduğunu hatırlatılmalıdır. Bu nedenle, keşiflerin artmasıyla bu seçim etkisi kısmen ortadan kalkacak olup bu tür bağıntıların farklı parametreler üzerinden çok daha fazla ve duyarlı veriyle tekrar analiz edilmesi ve tartışılması ihtiyacı duyulacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı yüksek lisans öğrencisi Gamze Bendeş'in tez araştırmalarının bir bölümünü



Şekil 9. (a) Barınak yıldızın yaşına karşılık yıldızın dönme açısal momentumunun değişimi ve dağılıma uygulanan doğrusal temsil. (b) Yıldız yaşına karşılık sistemin toplam açısal momentumunun değişimi ve dağılıma uygulanan doğrusal temsil.

kapsamaktadır. Bu araştırmada, "NASA Exoplanet Archive" verileri kullanılmıştır.

Kaynaklar

- Armstrong J. C., Larson S. L., Zollinger R. R., 2007, arXiv, arXiv:0708.1771
 Berget D. J., Durrance S. T., 2010, JSARA, 3, 32
 Gurumath S. R., Hiremath K. M., Ramasubramanian V., 2019, PASP, 131, 014401
 Jiang J. H., Burn R., Ji X., Fahy K. A., Eggenberger P., 2022, ApJ, 924, 118
 Ray T., 2012, A&G, 53, 5.19
 Scholz A., 2013, MmSAI, 84, 890
 Sibony Y., Helled R., Feldmann R., 2022, MNRAS, 513, 2057
 Skumanich A., 1972, ApJ, 171, 565
 Soderblom D. R., 1983, ApJS, 53, 1
 Stefansson G., Mahadevan S., Maney M., Ninan J. P., Robertson P., Rajagopal J., Haase F., et al., 2020, AJ, 160, 192
 Williams J. P., Cieza L. A., 2011, ARA&A, 49, 67

Access:

M23-0320: [Turkish J.A&A](#) — Vol.4, Issue 3.