T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

$H < 18^m$ OLAN YER'E YAKIN ASTEROİTLERİN FİZİKSEL VE DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI VE (2059) BABOQUIVARI ASTEROİDİNİN ANALİZİ

Orhan ERECE

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ARALIK 2023

ANTALYA

T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



H $< 18^m$ OLAN YER'E YAKIN ASTEROİTLERİN FİZİKSEL VE DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI VE (2059) BABOQUIVARI ASTEROİDİNİN ANALİZİ

Orhan ERECE

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ARALIK 2023

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

$H < 18^m$ OLAN YER'E YAKIN ASTEROİTLERİN FİZİKSEL VE DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI VE (2059) BABOQUIVARI ASTEROİDİNİN ANALİZİ

Orhan ERECE

UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

Bu tez 27/12/2023 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Murat KAPLAN (Danışman)

Prof. Dr. Zeki EKER

Prof. Dr. Birol GÜROL

Prof. Dr. Hicran BAKIŞ

Doç. Dr. Mehmet YEŞİLTAŞ

ÖZET

H $< 18^m$ OLAN YER'E YAKIN ASTEROİTLERİN FİZİKSEL VE DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI VE (2059) BABOQUIVARI ASTEROİDİNİN ANALİZİ

Orhan ERECE

Doktora Tezi, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Murat KAPLAN

Aralık 2023; 158 sayfa

Bu tez çalışmasında, Yer'e Yakın Asteroitler (YYA'lar) içerisinden mutlak parlaklığı $H < 18^m$ olanların fiziksel ve dinamik özellikleri araştırılmıştır. Güneş sistemi içerisindeki dinamik yollar ortaya çıkarılmaya çalışılmış, tayf türlerine göre gruplar incelenmiş ve ortak bir kökene sahip olabilecek YYA ikilileri ortaya çıkarılarak detaylı olarak paylaşılmıştır. Ayrıca, fotometrik, tayfsal ve polarimetrik gözlem teknikleriyle elde edilen veriler kullanılarak $H < 18^m$ bir YYA olan (2059) Baboquivari asteroidinin ilk kez fiziksel özellikleri ortaya çıkarılmıştır. Uzun dönme periyoduna sahip olan Baboquivari'nin fotometrik verilerindeki tuhaflıkların yanı sıra, elde edilen farklı fiziksel yaklaşımların da katkısıyla ana eksen etrafında dönmeyen diğer bir deyişle yalpalayan bir asteroit olabileceği ortaya koyulmuştur. Yan ürün olarak, asteroit fotometrisi için geliştirilen algoritmanın ve bu algoritmanın uygulanabilmesi için geliştirilen *PhoPS* yazılımının tüm detayları tez içerisinde paylaşılmıştır. Aynı zamanda, geliştirilen bu algoritma sonucunda ortaya çıkarılan, T100 teleskobunda elde edilen görüntülerde, sıfır-nokta parlaklığının görüntü merkezine olan uzaklığa bağlı doğrusal değişimi tüm detaylarıyla gösterilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: küçük gezegenler, Yer'e yakın asteroitler, gözlem teknikleri, fotometri, polarimetri, spektroskopi, yörünge analizi, yörünge mekaniği, sayısal integrasyon

JÜRİ: Doç. Dr. Murat KAPLAN

Prof. Dr. Zeki EKER

Prof. Dr. Birol GÜROL

Prof. Dr. Hicran BAKIŞ

Doç. Dr. Mehmet YEŞİLTAŞ

ABSTRACT

RESEARCH OF PHYSICAL AND DYNAMICAL PROPERTIES OF H $< 18^m$ NEAR-EARTH ASTEROIDS AND ANALYSIS OF (2059) BABOQUIVARI

Orhan ERECE

PhD Thesis in Space Sciences and Technologies

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Murat KAPLAN

December 2023; 158 pages 158

In this thesis, the physical and dynamical properties of Near-Earth Asteroids (NEAs) with an absolute magnitude $H < 18^m$ have been investigated. Efforts have been made to unveil the dynamic paths within the solar system, examine groups based on spectral types, and detail NEA pairs that may share a common origin. Additionally, using photometric, spectroscopic, and polarimetric observation techniques, the physical properties of the $H < 18^m$ NEA (2059) Baboquivari, have been revealed for the first time. Apart from the peculiarities in the photometric data of Baboquivari with a long rotation period, the contribution of various physical approaches suggests that it could be a non-principal-axis rotator, that is a tumbler, an asteroid exhibiting a tumbling motion. As a byproduct, the details of the algorithm developed for asteroid photometry and the *PhoPS* software developed for its application are shared within the thesis. Simultaneously, the linear variation in the distance from the image center to the zero-point brightness in the images obtained with the T100 telescope, resulting from the application of this algorithm, is presented in full detail.

KEYWORDS: minor planets, near-Earth asteroids, observational techniques, photometry, polarimetry, spectroscopy, orbit analysis, orbital mechanics, numerical integration

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Murat KAPLAN

Prof. Dr. Zeki EKER

Prof. Dr. Birol GÜROL

Prof. Dr. Hicran BAKIŞ

Assoc. Prof. Dr. Mehmet YEŞİLTAŞ

ÖN SÖZ

Yazıya başlamadan önce nereden başlamam gerektiği üzerine gerçekten çok düşündüm ancak bir türlü bulamadım. Bahsetmem gereken birçok konu var gibi hissediyorum ve düşündükçe herbiri yüzümde bir gülümsemeye sebep oluyor. Sanıyorum bu yazıyı yazabiliyor olmanın verdiği heyecanın da bunda etkisi büyük.

2012 yılında Bölüm'e ilk kez geldiğimde yıldız astrofiziği dışında bir alanda çalışmak istediğimi belirtmem sonrasında Prof. Dr. Zeki Eker'in beni yönlendirmesi ve Doç. Dr. Murat Kaplan ile tanıştırması ile akademik yolum belirlenmiş oldu. 10 yılı aşkın sürede Güneş sistemi alanında çok önemli işler başardığımızı düşündüğüm, öğrendiklerimin sadece bilimsel sınırlarda kalmadığı, her anlamda benim için çok değerli olan danışman hocam Doç. Dr. Murat Kaplan'a çok teşekkür ederim. Güneş sistemi alanının ülkemiz için önemini her daim vurgulayan ve bu alandaki çalışmalarımıza koşulsuz destek veren Prof. Dr. Zeki Eker'e de teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tezin gerçekleşmesi için çok önemli dokunuşları olan Prof. Dr. Birol Gürol'a ve katkıları için değerleri jüri üyeleri Prof. Dr. Hicran Bakış'a ve Doç. Dr. Mehmet Yeşiltaş'a çok teşekkür ederim.

Beni, yürüttüğü proje sebebiyle (2059) Baboquivari ile tanıştıran, sayesinde ülkemizdeki tek bir asteroidin fiziksel özelliklerini ortaya koyabildiğimiz, günümüze kadar yayımlanmış ilk kapsamlı yayını yaptığımız Dr. Irek Khamitov, bana kazandırdıklarınız için size ne kadar teşekkür etsem azdır.

Sevgili dostum Dr. Yücel Kılıç, eğer hakkında her detaya değinecek olursam yeni bir tez yazmam gerekebilir. O yüzden tek diyebileceğim, iyi ki varsın!

İyi bir bilim insanı nasıl olunması gerektiğinin yanı sıra hayata bakışıyla da bana rol model olan beraber çalıştığım için çok şanslı hissettiğim Dr. Murat Koçak'a çok teşekkür ederim. Aynı zamanda birlikte çalıştığım Sıla Eryılmaz Kılıç'a ve Doğan Tekay Köseoğlu'na da teşekkürü bir borç bilirim. Birlikte çalıştığımız zamanların önemini ve kıymetini her geçen gün daha iyi anladığımı vurgulamak isterim. TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'nde (TUG) birlikte çalıştığım çok değerli astronomlara ve tüm çalışma arkadaşlarıma da teşekkürü bir borç bilirim. Aynı zamanda, kıymetli Müdürümüz Prof. Dr. Halil Kırbıyık'a, 2013 yılında ilk kez çalışmaya başladığım TUG'daki heyecanımı gördüğü, herkes gibi benim de önümü açtığı ve bana güvendiği için sonsuz teşekkür ederim.

Eğitim hayatıma dönüp baktığımda astronomluğu bir meslek olarak yapabilme düşüncesinin ilk kez oluştuğu an dün gibi aklımdadır. O an yanımda olan ve bana bu mesleği aşılayan, başarabileceğime inanan, bu alana yönlendiren çok değerli fizik öğretmenim Aslı Gülsüm Erdoğan Döyen, çok açıktır ki siz olmasaydınız ben bugün bir astronom olmayacaktım. Size ne kadar teşekkür etsem azdır.

Uzakları yakın eden sevgili Zahide Terzioğlu'na, lisans öğrenimi süresince bir arada olduğumuzda tüm problemleri çözdüğümüz, bugün her ne kadar bu mesleği yapmasalar da gerçek astronomlar Muzaffer Güngör, Yasin Perçin ve Burak Büyükok'a, motivasyonumu her daim yüksek tutan sevgili dostlarım H. Aziz Kayıhan'a, Dr. Gökhan Yücel'e ve Johanna Deleu'ya teşekkür ederim.

Asteroitlerin fotometrik çalışmaları ile ilgili bizlere çok önemli katkıları olan Kore Astronomi ve Uzay Bilimleri Enstitüsü'nden (KASI) Dr. Myung-Jin Kim'e ve (2059) Baboquivari'nin fotometrik çalışmasında çevrim içi yaptığımız sohbetlerle önemli sonuçlar elde ettiğimiz Dr. Hee-Jae Lee'ye çok teşekkür ederim: Gomapseumnida! Yine aynı çalışma içerisinde önemli katkılar sağlayan Rus Bilimler Akademisi Uzay Araştırmaları Enstitüsü (IKI) ve Kazan Federal Üniversitesi'ndeki (KFU) meslektaşlarıma da çok teşekkür ederim: Spasibo!

Sevgili eşim Bilge, desteğin, inancın ve sabrın sayesinde bu tezi tamamlayabildim. Hayatıma dokunduğun ve her şeyi güzelleştirdiğin için çok teşekkür ederim. Canım oğlum Ekin, seninle oynayamadığım zamanlar için lütfen bana kızma. İleride bu çalışmayı okuduğunda bana hak vereceğine inancım tam. Ve tabii ki canım annem, bana her zaman inandığın ve güvendiğin için çok teşekkür ederim. Yüreğin ferah olsun, sonunda tezimi başarıyla bitirdim.

(2059) Baboquivari, seni unuttum sanma sakın. Papago yerlilerinin yanı sıra bendeki yerin de artık çok farklı. Doğru zamanda, gökyüzünde doğru yerde olduğun için sana da çok teşekkür ediyorum. Ülkemizde, farklı teleskoplar ve odak düzlemi aletleri kullanılarak fiziksel özellikleri ortaya çıkarılan ilk asteroit sensin. Seni tanımak çok güzel...

Bu tez LaTeX ile yazılmıştır.

İÇİNDEKİLER

ÖZET i
ABSTRACT iii
ÖN SÖZ v
AKADEMİK BEYAN ix
SİMGELER VE KISALTMALAR x
ŞEKİLLER DİZİNİ xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ xxi
1. GİRİŞ 1
2. KAYNAK TARAMASI 8
2.1. Güneş Sistemi Dinamiği 8
2.1.1. Rezonans Bölgeleri 8
2.1.2. Asteroit aileleri 10
2.1.3. Kaotiklik Belirteçleri 14
2.1.4. YYA Ailelerinin Araştırılması 17
2.1.5. YYA'ların Kaynak Bölgeleri 19
2.1.6. YYA'ların Yörünge Özellikleri Üzerindeki Yarkovsky Etkisi 26
2.2. YYA'ların Fiziksel Özellikleri 27
2.2.1. YYA'ların Fotometrik Özellikleri 28
2.2.2. Fotometrik Faz Eğrisi, Faz Fonksiyonu ve Faz İntegrali 31
2.2.3. Mutlak Parlaklık, Albedo ve Çap İlişkisi 38
2.2.4. Işık Eğrisi, Dönme Periyodu ve Şekil Analizleri 39
2.2.5. YYA'ların Dönme Özellikleri Üzerindeki YORP Etkisi 49
2.2.6. YYA'ların Tayfsal Özellikleri 51
2.2.7. YYA'ların Polarimetrik Özellikleri 56
2.3. $H < 18^m$ Olan YYA'ların Dağılımı 60
2.4. (2059) Baboquivari Asteroidinin Önceki Çalışmaları 63
3. MATERYAL VE METOT 66
3.1. Gözlem Verilerinin Elde Edilmesi 66
3.1.1. $H < 18^m$ Olan YYA'ların Gözlemsel Arşiv Verileri 71
3.2. Fotometrik Analiz Rutini ve *PhoPS* Yazılımı 72
3.2.1. Görüntü İçerisindeki Kaynakların Elde Edilmesi 74
3.2.2. *Gaia DR3* Yıldızlarının Farklı Parlaklık Sistemlerine Dönüşümleri . . . 76

3.2.3. Aletsel Parlaklıkların ve Sıfır-Nokta Parlaklığının Elde Edilmesi 77
3.2.4. Diğer Çıktıların Elde Edilmesi 82
3.3. Asteroitlerin Fotometrik Analizleri ve Baboquivari'nin Elde Edilen Fotometrik Özellikleri 83
3.4. Asteroitlerin Tayfsal Gözlem Verilerinin Tayf Türü ile Eşleştirilmesi ve Baboquivari'nin Tayfsal Analizi 90
3.5. Tek Nokta Polarimetrik Gözlem Verisi ile Albedo Hesabı ve Baboquivari'nin Polarimetrik Sonuçları 91
3.6. $H < 18^m$ Olan YYA'ların Yörünge İntegrasyonu 96
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 99
4.1. Gözlem Verilerinin Analizi 99
4.2. $H < 18^m$ Olan YYA'ların Dinamik Analizi 100
4.3. $H < 18^m$ Olan Baboquivari Benzeri *Sq* Tayf Türü YYA'ların Dinamik Analizi 104
4.4. $H < 18^m$ Olan YYA'ların Yörünge Benzerlik Analizleri 109
4.5. Baboquivari 110
4.5.1. Baboquivari'nin Fiziksel Özellikleri 110
4.5.2. Baboquivari'nin Dinamik Özellikleri 114
5. SONUÇLAR 116
6. KAYNAKLAR 119
7. EKLER 146
ÖZ GEÇMİŞ

AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum *"$H < 18^m$ Olan Yer'e Yakın Asteroitlerin Fiziksel ve Dinamik Özelliklerinin Araştırılması ve (2059) Baboquivari Asteroidinin Analizi"* adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

27 Aralık 2023

Orhan ERECE

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

”	: Yay saniyesi
′	: Yay dakikası
°	: Derece
a	: Yarı-büyük eksen uzunluğu
D	: Çap
D_{SH}	: D-kriteri (Southworth-Hawkins)
e	: Yörünge dış merkezliği
f_y	: Verimlilik parametresi
h	: Polarimetrik eğim
H	: Mutlak parlaklık
i	: Yörünge eğikliği
kyıl	: kiloyıl
kg	: kilogram
km	: kilometre
m	: metre
mm	: milimetre
mas	: miliyaysaniyesi
^{m}	: Kadir
Myıl	: milyon yıl
n	: Ortalama hareket (°/gün)
p	: Periyot
P_r	: Polarizasyon derecesi
p_v	: Geometrik albedo
Q	: Enöte uzaklığı
q	: Enberi uzaklığı
q	: Faz integrali
s	: Saniye
T_j	: Jüpiter ile ilişkili Tisserand parametresi
α	: Yörünge faz açısı
β	: Tutulum düzlemine göre enlem
ϵ	: Dönme ekseni eğikliği
λ	: Tutulum düzlemine göre boylam
μ	: Mikron
ρ	: Yoğunluk
σ	: Standart sapma

χ^2	: Ki kare
Ψ	: $P_r(30°)$ - $P_r(10°)$
$\overline{\omega}$	: Enberi noktasının boylamı
ω	: Enberi noktasının argümanı
Ω	: Çıkış düğümünün boylamı

Kısaltmalar

AB	: Astronomi Birimi
DART	: Double Asteroid Redirection Test
DR3	: Data Release 3
DR1	: Data Release 1
ESA	: Avrupa Uzay Ajansı
Fe	: Demir
FeO	: Demir oksit
Fe^0	: Metalik demir
FWHM	: Full Width at Half Maximum
Gaia	: Global Astrometric Interferometer for Astrophysics
HCM	: Hierarchical Clustering Method
HTC	: Halley Type Comet
IAS15	: Integrator with Adaptive Step-size control, 15th order
IAU	: Uluslararası Astronomi Birliği
IR	: Infra-Red
IRTF	: Infrared Telescope Facility
JD	: Jülyen zamanı (Julian Date)
JFC	: Jupiter Family Comet
JPL	: Jet Propulsion Laboratory
KPNO	: Kitt Peak National Observatory
L1	: 1. Lagrange noktası
L2	: 2. Lagrange noktası
LINEAR	: Lincoln Near-Earth Asteroid Research
MITHNEOS	: MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey
MOID	: Minimum Orbit Intersection Distance
NASA	: Amerikan Havacılık ve Uzay Dairesi
NEA	: Near-Earth Asteroid
NEO	: Near-Earth Object
NEOWISE	: Near-Earth Object Wide-field Infrared Survey Explorer
NPA	: Non-Principal Axis
OB	: Outer Belt
PA	: Principal Axis
PhoPS	: Photometry of Point Sources
PTA	: Potansiyel Tehlikeli Asteroitler
PHA	: Potentially Hazardous Asteroids

RMVS3	: Regularized Mixed Variable Symplectic 3
SMASS	: Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey
SNR	: Sinyal/Gürültü oranı (Signal to Noise Ratio)
TUG	: TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi
VIS	: Visible (Optik)
YORP	: Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack
WISE	: Wide-field Infrared Survey Explorer
YYA	: Yer'e Yakın Asteroit
YYC	: Yer'e Yakın Cisimler
ZTF	: Zwicky Transient Facility

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. 22 Kasım 2023 tarihi itibarıyla YYA sayıları (Chamberlin 2023) 2

Şekil 1.2. https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html [son erişim tarihi: 25.11.2023] adresindeki görselin yeniden düzenlenmesiyle oluşturulan yörünge şekillerine göre YYA grupları 4

Şekil 1.3. YYA gruplarının Güneş sistemi içerisindeki dağılımını gösteren yörünge yarı-büyük eksen uzunluğuna karşılık yörünge basıklık değeri grafiği. Grupları sınırlandıran bölgeler ayrıca gösterilmiştir (siyah eğriler). Veriler https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_query.html'den alınmıştır 4

Şekil 2.1. Ana kuşak bölgesindeki asteroit dağılımı ve Kirkwood boşlukları. Chamberlain (2007) tarafından 156929 asteroit kullanılarak elde edilen histogram grafiği güncellenmiş ve 1259129 asteroit kullanılarak bu tez çalışması için yeniden elde edilmiştir 9

Şekil 2.2. Ana kuşak asteroitlerinin öz yörünge elemanları e'ye (yatay eksen) karşılık $\sin i$ (düşey eksen) dağılımı. Sol panelde tüm nesneler görülürken, sağ panelde arka plandaki nesneler kullanılmadan yörünge uzayında gruplaşmış olarak 37 farklı asteroit ailesi görülmektedir (Parker vd. 2008) 11

Şekil 2.3. Ana kuşak asteroitlerinin sol panelde öz yörünge elemanları a (yatay eksen) ve $\sin i$'ye (düşey eksen) göre, sağ panelde ise a (yatay eksen) ve e'ye (düşey eksen) göre dağılımı. En üstte tüm nesneler, ortada yalnızca aileler, en altta ise yalnızca arka plandaki nesneler yer almaktadır. Aynı zamanda Kirkwood boşlukları da açıkça görülmektedir (Parker vd. 2008) 12

Şekil 2.4. Karin asteroit ailesi üyelerinin zamanda 10 milyon yıl geriye yapılan yörünge integrasyonu (Nesvorný vd. 2002). Yatay eksen zamanı gösterirken (sağdan sola doğru geriye giden zaman) dikey eksen **a** grafiğinde çıkış düğümü boylamının (Ω) **b** grafiğinde ise enberi noktasının argümanının (ω) değişimini göstermektedir. Kesikli çizgi ise yatay eksende 5.8 milyon yıla karşılık gelmektedir 13

Şekil 2.5. Başlangıçta birbirine çok yakın iki yörüngenin t anında uzaklaşması ve Lyapunov üsteli (λ) 15

Şekil 2.6. *Spacewatch* tarafından keşfedilen $H < 22^m$ olan 138 YYA'nın *a, e* dağılımı (Bottke vd. 2002). Amor (yıldız), Apollo (yuvarlak) ve Aten (üçgen) YYA grupları sınırlarıyla (Q = 0.983 AB, a = 1 AB, q = 1.017 AB, q = 1.3 AB eğrileri) gösterilmiştir. Günümüzde (163693) Atira asteroidinin 2003 yılında keşfedilmesiyle Atira olarak tanımlanan ancak yayının yapıldığı tarihte henüz keşfedilmemiş olan YYA sınıfı, IEO (Inner Earth Orbit) bölgesi olarak belirtilmiştir. JFC bölgesi $i = 0°$ için $T_j = 2$ ve $T_j = 3$ eğrileri aralığında tanımlanmıştır. NIC bölgesi de $T_j < 2$ olan kısımda gösterilmiştir. Bazı ortalama hareket rezonans bölgeleri ve $i = 0°$ için ν_6 seküler rezonans bölgesi de x-eksenine dik kesikli çizgiler ile gösterilmiştir. İç IMC (Intermediate Mars-Crossers) ve dış IMC bölgeleri ve OB1-OB5 (Outer Belt) dış ana kuşak bölgeleri de sınırlarıyla birlikte görülmektedir 22

Şekil 2.7. İleri yönlü integrasyon için kullanılan altı farklı gruba ait girdi asteroitleri (Kaplan vd. 2016) 24

Şekil 2.8. Geri yönlü integrasyon için kullanılan Apollo ve Amor grubuna ait girdi asteroitleri (Kaplan vd. 2016) 25

Şekil 2.9. LCDB veri tabanından elde edilen U > 2 olan 1827 YYA'nın çapına karşılık dönme frekanslarının grafiği. Mavi kesik çizgi D = 300 metre çapa karşılık gelirken kırmızı kesikli çizgi (spin barrier) 2 saatlik dönme periyoduna karşılık gelmektedir. Burada sınırlanan bölgedeki cisimlerin dönme hızlarının sınırlandırıldığını, belirli hızın üzerinde ise parçalanacaklarını öngörmektedir . . . 30

Şekil 2.10. Geometrik albedo p_v = 0.2 kabulüyle (aynı zamanda sabit H), G'nin fonksiyonu olarak elde edilmiş fotometrik verilere karşılık faz açısı (Verbiscer ve Veverka 1995). G değeri düşük değerlerde iken faz eğrisinin eğimli, yüksek değerlerdeyken eğimsiz olduğu açıkça görülmektedir. Farklı geometrik albedo değerleri (aynı zamanda farklı H değerleri) faz eğrisini y-ekseninde hareket ettirecek ve şeklini değiştirmeyecektir 33

Şekil 2.11. Örnek iki farklı asteroit için H,G ve H,G_1,G_2 faz fonksiyonları ile elde edilen faz eğrilerinin karşılaştırılması (Muinonen vd. 2010) 36

Şekil 2.12. Muinonen vd. (2010) tarafından gerçek cisimlerden elde edilen G_1 ve G_2 parametrelerinin ilişkisi 37

Şekil 2.13. Dönen elipsoit bir cismin farklı bakış açılarına göre ışık eğrisi. Üstteki şekil ekvatoral görünüşe göre ışık değişimini gösterirken, alttaki şekil kutup civarından görünüşüne göre ışık değişimini göstermektedir (Shepard 2017) 39

Şekil 2.14. (6478) Gault asteroidinin dönme periyodu için iki farklı yöntem ile elde edilen en iyi fit çözümleri (Devogèle vd. 2021). Üst panel 4. dereceden Fourier fiti ile elde edilen en iyi χ^2 çözümünü (2.4929 saat) gösterirken alt panel Lomb-Scargle analizi ile elde edilen en güçlü frekansı (1.2465 saat) göstermektedir 41

Şekil 2.15. 2021 DW1 asteroidinin bazı ışık eğrileri (Kwiatkowski vd. 2021). LC01 Lowell Gözlemevi (G.), LC02 Deokheong Optical Astronomy G., LC03 Schiaparelli G., LC05 Lowell G., LC06 Winer G., LC07 Odessa-Mayaki G., LC08 McDonald G., C005 Planatus G., Ampl ışık eğrisinin genliği (amplitude) 42

Şekil 2.16. Farklı yüzey oranlarına sahip C türü asteroitlerin faz açısına bağlı ışık eğrisi genliklerinin değişimi (Lu ve Jewitt 2019). Farklı renklerdeki eğriler farklı yüzey oranlarına (a/b = a:b = 2:1 gibi) karşılık gelmektedir. Faz açısı arttıkça ışık eğrisi genliğinin arttığı açıkça görülmektedir 44

Şekil 2.17. Şekil 2.16'dakine benzer, farklı yüzey oranlarına sahip S-türü asteroitlerin faz açısına bağlı ışık eğrisi genliklerinin değişimi (Lu ve Jewitt 2019) . 45

Şekil 2.18. Çok hızlı dönen bir YYA olan 2021 DW1'in tersine ışık eğrisi yöntemi ile elde edilmiş iki farklı şekil ve kutup yönelimi çözümü (Kwiatkowski vd. 2021) . 48

Şekil 2.19. a) (433) Eros asteroidinin NASA'nın NEAR uzay aracı ile elde edilmiş gerçek görüntüsü. b) Aynı asteroidin tersine ışık eğrisi yöntemiyle elde edilmiş ve gerçek görüntü ile aynı bakış yönünden görülen dışbükey (convex) modeli (Torppa 2007; Kabaş 2010) 48

Şekil 2.20. Tersine ışık eğrisi yöntemi kullanılarak ortaya çıkarılan, YORP etkisi sebebiyle Koronis ailesi asteroitlerin dönme ekseni eğikliklerinin hizalanması (Slivan vd. 2003) 50

Şekil 2.21. Şekilde 25 farklı tayf türünün dalga boyunun bir fonksiyonu olarak yansıtma (reflectance) grafikleri görülmektedir. http://smass.mit.edu/_documents/TaxoCardFigures/Taxonomy_English.pdf [son erişim tarihi: 25.11.2023] 52

Şekil 2.22. 2021 DW1 asteroidinin en muhtemel tayf türleri için dalga boyuna karşılık yansıtıcılık değerleri. Kırmızı noktalar elde edilen yansıtıcılık değerleri iken siyah noktalar DeMeo vd. (2009) tarafından verilen değerlerdir. Gri bant ise tayf türünün saçılma aralığını göstermektedir 55

Şekil 2.23. European Asteroid Research Node (EARN) verileri kullanılarak, YYA'ların çapları da dikkate alınarak elde edilen tayf türü dağılımı (Perna vd. 2018). Sol grafikte y-ekseni cisim sayısı iken sağ grafikte yüzdelik sayılar cinsinden verilmiştir 56

Şekil 2.24. İki farklı tayf türünden asteroit için polarimetrik faz eğrisi illüstrasyonu (Masiero vd. 2012). Kırmızı eğri tipik *S* türü bir asteroit için faz eğrisi iken kesikli mavi eğri ise tipik bir *C* türü asteroidin faz eğrisini ifade etmektedir. Görselde ayrıca her iki tür için P_{min} ve α_{inv} açısının yanı sıra *S* türü için *h* polarimetrik eğim (eğrinin α_{inv} noktasından geçen teğet) gösterilmiştir 58

Şekil 2.25. Nesvorný vd. (2023) tarafından yayımlanan YYA'ların yansız mutlak parlaklık dağılımı. Siyah çizgi medyan değerine karşılık gelirken mavi çizgi en iyi fit doğrusunu belirtmektedir. Kırmızı çizgi ise karşılaştırma amaçlı Harris ve Chodas (2021) tarafından hesaplanan mutlak parlaklık dağılımını göstermektedir. Gri bant ise MultiNest algoritmasından elde edilen 3-σ hata aralığını belirtmektedir. Bu aralık tanım gereği model çıktılarının %99.7'sine karşılık gelmektedir 62

Şekil 3.1. AAC yazılımının kullanımı 67

Şekil 3.2. 19AT100-1482 numaralı projeye tahsis edilen geceler (31 gece) ve gecelik gözlem yapılan saatler. Yatay eksende tarihe karşılık dikey eksende gözlem yapılan saatler görülmektedir. Bazı detaylar şekil içerisinde görülmektedir . 68

Şekil 3.3. Şekil 3.2 ile aynı özelliklere sahip olan 21AT100-1783 numaralı projeye tahsis edilen geceler (11 gece) ve gecelik gözlem yapılan saatler 68

Şekil 3.4. LCDB'de yer alan tüm YYA'ların (gri) ve $H < 18^m$ olan YYA'ların (mor) 0.5 *H* aralığı için *H* ve toplam sayı grafiği 71

Şekil 3.5. *PhoPS* yazılımında uygulanan temel adımlar. Çıktılar ilgilenilen tek bir asteroit için elde edilmektedir. **JD**: Jülyen zamanı, $\mathbf{mag}_{inst}$: aletsel parlaklık, $\mathbf{mag}_{std}$: standart görünür parlaklık, $\mathbf{mag}_{red}$: indirgenmiş parlaklık, **H**: mutlak parlaklık, **SNR**: Sinyal/Gürültü oranı, $\mathbf{mag}_{err}$: parlaklık hatası, σ: parlaklık dönüşümündeki standart sapma, α: faz açısı, **Arka plan ışık şiddeti**: tüm alanın arka plan ışık şiddetinin medyanı, $\mathbf{x}_{merkez}$ ve $\mathbf{y}_{merkez}$: ilgili asteroidin görüntü içerisindeki fiziksel koordinatları, $\boldsymbol{r}$: ilgili asteroidin Güneş'e olan anlık uzaklığı, Δ: ilgili asteroidin Yer'e olan anlık uzaklığı, $\mathbf{Yer}_{xyz}$ ve $\mathbf{Güneş}_{xyz}$: ilgili asteroidin sırasıyla Yer'e ve Güneş'e olan anlık kartezyen koordinatları, $\mathbf{FWHM}_{med}$: alandaki tüm kaynakların medyan FWHM değeri, **En yakın kaynak**: ilgili asteroidin en yakınındaki kaynağa olan uzaklığı (piksel) 73

Şekil 3.6. T100 teleskobunda, SI 1100 CCD kamera ile *V* bandında 22 Eylül 2019 tarihinde alınmış $21' \times 21''$'lık gökyüzü görüntüsü içerisinde yer alan *Gaia DR3* yıldızlarının *PhoPS* yazılımı kullanılarak eşleştirilmesi. Kırmızı yuvarlaklar içerisinde eşleştirilen 97 tane *Gaia DR3* yıldızı görülürken, mavi yuvarlak içerisinde o an gözlemi yapılan asteroit olan (2059) Baboquivari görülmektedir . . 75

Şekil 3.7. Açıklık, iç halka ve dış halka. Mavi noktanın olmadığı iç halka bölgesinde sayımlara bakılmazken, mavi noktalı bölgelerde sayımlara bakılmaktadır 77

Şekil 3.8. Şekil 3.6'da görülen *Gaia DR3* yıldızlarının hesaplanan V-bandı parlaklık değerleri ile aletsel parlaklıklarının farkı. y-ekseni fark değerlerini gösterirken, x-ekseni nesne sayısını göstermektedir. Parlaklık hataları, dağılımın görselini farklılaştırmaması adına bu aşamada gösterilmemiştir (bkz. Şekil 3.11) . . 78

Şekil 3.9. Şekil 3.6'da görülen *Gaia DR3* yıldızlarının hesaplanan V-bandı parlaklık değerleri ile aletsel parlaklıklarının farkına karşılık her bir noktanın CCD merkezine uzaklığı. y-ekseni fark değerlerini gösterirken, x-ekseni görüntü merkezine uzaklığı göstermektedir. Parlaklık hataları, dağılımın görselini farklılaştırmaması adına bu aşamada gösterilmemiştir (bkz. Şekil 3.11) 79

Şekil 3.10. Şekil 3.9'daki ile aynı grafiğin RANSAC algoritması sonucunda elde edilen artık verilerin turuncu ile gösterilmesi 80

Şekil 3.11. Elde edilen ilgili veri seti sonucunda koyu mavi ile gösterilen, hataları ile birlikte parlaklık farklarına karşılık her bir noktanın CCD merkezine uzaklığı. Veri setine uygulanan doğrusal fit kesikli turuncu doğru ile gösterilmiş, sıfır-nokta parlaklığının hesaplanabildiği doğru fonksiyonu ise görüntü içerisinde yer gösterilmiştir 81

Şekil 3.12. *PhoPS* yazılımı kullanılarak Baboquivari'nin elde edilen standart görünür parlaklık, indirgenmiş parlaklık ve mutlak parlaklıklarının ALCDEF veri tabanında yer alan veriler ile birleştirilmesi ile elde edilmiş yörünge faz açısına karşılık grafiği. Grafik, hem bu parlaklıkların birbirleri ile farklılıklarının anlaşılabilmesi hem de periyot analizi için kullanılan verilerin ($15° - 20°$ faz açısı aralığı) gösterilmesi için oluşturulmuştur 85

Şekil 3.13. Baboquivari'nin *Gatspy* yazılımı kullanılarak *Lomb-Scargle* yöntemi ile elde edilen frekans analizi sonucu (Erece vd. 2023) 86

Şekil 3.14. Baboquivari'nin evrelendirilmiş ışık eğrisi. (a) grafiği tüm verilerin kullanılmasıyla oluşturulmuşken (b) grafiği yalnızca periyodun elde edildiği veriler kullanılarak oluşturulmuştur (Erece vd. 2023) 87

Şekil 3.15. Baboquivari'nin fotometrik faz eğrisi. Dönme sebebiyle ortaya çıkan parlaklık farklarından dolayı (ışık eğrisi) oluşan saçılmış verilerden elde edilen *H* ve *G* değerleri grafik içerisinde görülmekedir 88

Şekil 3.16. Baboquivari'nin yapılan iterasyon sonrasında elde edilen *H*, *G* değerleri ile fotometrik faz eğrisi. (a) ve (b) grafiklerinde her bir renk farklı başlangıç durumlarını göstermektedir. Her bir durum için *H* ve *G*'nin aynı değerlere yakınsadığı açıkça görülmektedir. (c) grafiği ise iterasyon sonucunda elde edilen *H* ve *G* değerleri kullanılarak üretilen fotometrik faz eğrisidir (Erece vd. 2023) 89

Şekil 3.17. Baboquivari asteroidinin RTT150 ve MITHNEOS verilerinin birleştirilmesiyle oluşturulmuş tayfı. MITHNEOS verileri RTT150 verileriyle üst üste geldiği 7000 Å dalga boyuna normalize edilmiştir. Akı normalizasyonu ise 7000 Å dalga boyu için yapılmıştır. Medyan değerler kırmızı kare olarak görülen merkez değerlerin ± 250 Å etrafındaki değerlerden elde edilmiştir. Kırmızı doğru ise medyan değerler kullanılarak elden edilmiş fiti göstermektedir (Erece vd. 2023) 91

Şekil 3.18. Baboquivari'nin RTT150 teleskobunda yer alan TFOSC-WP polarimetresi ile 4 farklı kanalda ($90°$, $0°$, $45°$, $135°$) alınmış polarimetrik görüntüsü. Her bir kanalda Baboquivari siyah daire içerisinde görülmektedir (Erece vd. 2023) 93

Şekil 3.19. Lupishko (2022) tarafından APD veri tabanında yayımlanan tüm S-sınıfı asteroitlerin V-bandındaki polarizasyon dereceleri kullanılarak elde edilen polarimetrik faz eğrisi (Erece vd. 2023). Gri noktalar veri tabanındaki asteroitler iken kırmızı ile gösterilen Baboquivari'nin RTT150 ile elde edilen verisidir. Düz çizgi, Denklem 2.32 ile elde edilen en iyi fit, yeşil çizgi ise eğrinin α_{inv} açısındaki eğimidir (*h*) 94

Şekil 3.20. Baboquivari asteroidinin tek nokta polaritmetrik gözlem verisi ile elde edilen albedo değeri. Kırmızı nokta $43.6°$ faz açısında hesaplanan $3.6\% \pm 0.5\%$ polarizasyon derecesini göstermektedir. Siyah nokta ise dönüş açısının geçtiği varsayılan $\alpha_{inv} = 20°$ ve 0% polarizasyon derecesinin olduğu noktayı işaret etmektedir 95

Şekil 4.1. (1620) Geographos asteroidinin T100 teleskobu ile V-bandında elde edilmiş ışık eğrisi 99

Şekil 4.2. 25 Şubat 2023 tarihinde, JPL/Horizons veri tabanında yer alan ve *H* < 18^m olan tüm YYA'lar (1056 adet) için *a-e* grafiği. Farklı renkler farklı tayf türlerine karşılık gelmektedir. Gri renk ise tayf türü bilinmeyen (.na) YYA'lardır. Grafiğin yanında yer alan renk açıklamasında, renklere karşılık tayf türü ile birlikte her sınıfın toplam sayısı da görülmektedir 100

Şekil 4.3. Zamanda ileri yönlü yalnızca kütle çekim etkisi altında integrasyonu yapılan tüm $H < 18^m$ olan YYA'ların 100000 yıl sonunda elde edilen *a-e* grafiği. Çeşitli eğriler Güneş sistemi içerisindeki özel bölgelere karşılık gelmektedir. q_J Jüpiter'in enberi uzaklığını, $Q_{J.kesen}$ Jüpiter yörüngesini kesen cisimlerin enöte uzaklığını, $q_{M.kesen}$ Mars yörüngesini kesen cisimlerin enberi uzaklığını, Q_V ise Venüs'ün enöte uzaklığını belirtmektedir 101

Şekil 4.4. Şekil 4.3 ile aynı özelliklere sahip olan ancak zamanda geri yönlü elde edilen *a-e* grafiği 102

Şekil 4.5. Zamanda ileri ve geri yönlü yapılan integrasyonlar sonucunda ulaşılan yörünge a değerlerinin farkları (δa). Pozitif δa değeri cismin Güneş sisteminin dışına doğru taşındığını belirtirken negatif δa değeri ise cismin iç Güneş sistemine doğru taşındığını belirtmektedir 104

Şekil 4.6. *Sq* tayf türünden 36 YYA'nın Yarkovsky etkisi altında zamanda ileri ve geri yönlü integrasyonları sonucunda yörünge a değerlerinin değişimi. Kesikli dikey çizgi integrasyonun başlangıç anını (25 Şubat 2023) belirtmektedir 105

Şekil 4.7. İntegrasyonu yapılan (162011) Konnohmaru dışındaki 35 YYA'nın zamanda ileri ve geri yönde ulaştıkları yörünge a değerlerinin farkları. (162011) Konnohmaru asteroidi için bu fark zamanda ileri yönde Güneş sisteminin dışına çıktığı için sonsuz olmaktadır. Turuncu noktalar $H < 18^m$ olan asteroitleri gösterirken kırmızı noktalar ise $H < 18^m$ olan YYA'lardır. Nokta büyüklükleri YYA'ların çapları ile ölçekli olarak çizdirilmiştir. Kesikli çizgi ise değişimin olmadığı yeri işaret etmektedir 106

Şekil 4.8. (162011) Konnohmaru asteroidinin yörünge a değerinin Yarkovsky etkisi altında zaman içerisindeki değişimi. Şekil içerisinde yer alan diğer şekil asteroidin 5:2 rezonans bölgesindeki hareketini göstermektedir. X-ekseninin zamanda ileri yönde 100 binyıl görünmemesinin sebebi, 23431 yıl sonra asteroidin Güneş sisteminin dışına çıkması sonucu integrasyonun sonlanmasından dolayıdır . 107

Şekil 4.9. (162011) Konnohmaru asteroidinin yörünge a değerinin hem Yarkovsky etkisi (+Y) hem de yalnızca kütle çekimsel etki altındaki (-Y) değişimi . 108

Şekil 4.10. (162011) Konnohmaru asteroidinin beş farklı yörünge elemanının Yarkovsky etkisi altındaki zamanda ileri ve geri yönlü 100000 yıllık değişimi. X-ekseninin zamanda ileri yönde 100 binyıl görünmemesinin sebebi Şekil 4.8'deki ile aynıdır. Kesikli çizgi, integrasyonun başlangıç anını (25 Şubat 2023) göstermektedir 108

Şekil 4.11. Stephen M. Slivan tarafından geliştirilen ve http://smass.mit.edu/cgi-bin/busdemeoclass-cgi [son erişim tarihi: 25.11.2023] adresinden erişilebilen tayf sınıflaması uygulaması kullanılarak Baboquivari için MITHNEOS verileriyle elde edilen sonuç sayfası. Uygulamaya göre Baboquivari'nin *S, Sq, Q, L* ya da *K* tayf türünden bir asteroit olduğu görülmektedir 111

Şekil 4.12. ALCDEF (Warner vd. 2009) veri tabanında yer alan YYA'ların çaplarına karşılık dönme hızları (Erece vd. 2023). Siyah noktalar veri tabanında yer alan tüm YYA'ları (U > 2) gösterirken, kahverengi noktalar tüm bilinen ya da muhtemel NPA durumundaki YYA'ları (T or T+) göstermektedir. Kırmızı nokta ise Baboquivari'yi belirtmektedir 113

Şekil 4.13. Baboquivari'nin beş farklı yörünge parametresinin 100000 yıllık zamanda ileri ve geri yönlü yörünge integrasyonu. Kütle çekimsel etkilere ek olarak Yarkovsky etkisinin dahil edildiği integrasyonlar açık renk ile (+Y) yalnızca kütle çekimsel etkilerin kullanıldığı integrasyonlar ise koyu renk ile (-Y) çizdirilmiştir 115

Şekil 7.1. Baboquivari asteroidinin T100 teleskobu ile 5 farklı gecede alınmış fotometrik verileri 146

Şekil 7.2. Baboquivari asteroidinin RTT150 teleskobu ile 2 farklı gecede alınmış fotometrik verileri 147

Şekil 7.3. Baboquivari asteroidinin RTT150 teleskobu ile ardışık olarak alınmış tayfları. Asterodin tayfsal analizi bu üç tayfın medyanı alınarak gerçekleştirilmiştir (Erece et al. 2023) 148

Şekil 7.4. (1627) Ivar asteroidinin T100 teleskobu ile V-bandında elde edilmiş ışık eğrisi 149

Şekil 7.5. 137170 asteroidinin T100 teleskobu ile V-bandında elde edilmiş ışık eğrisi 149

Şekil 7.6. 152931 asteroidinin T100 teleskobu ile V-bandında elde edilmiş ışık eğrisi 150

Şekil 7.7. 19764 asteroidinin T100 teleskobu ile V-bandında elde edilmiş ışık eğrisi 150

Şekil 7.8. 6178 asteroidinin T100 teleskobu ile V-bandında elde edilmiş ışık eğrisi 151

Şekil 7.9. (3200) Phaethon asteroidinin T100 teleskobu ile V-bandında elde edilmiş ışık eğrisi 151

Şekil 7.10. 12538 asteroidinin T100 teleskobu ile V-bandında elde edilmiş ışık eğrisi 152

Şekil 7.11. 52768 asteroidinin T100 teleskobu ile R-bandında elde edilmiş ışık eğrisi 152

Şekil 7.12. 112221 asteroidinin T100 teleskobu ile V-bandında elde edilmiş ışık eğrisi 153

Şekil 7.13. 137199 asteroidinin T100 teleskobu ile R-bandında elde edilmiş ışık eğrisi 153

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Şekil 2.9'da aykırı görünen cisimlerin LCDB'den elde edilen bazı fiziksel parametreleri 30

Çizelge 2.2. (Dandy vd. 2003) tarafından 53 YYA kullanılarak KPNO *B* filtresi (4400 Å), Harris *V, R, I* (5500 Å, 6400 Å, 8100 Å) ve rGO *Z* (reduced Graphene-Oxide *Z* filter; 9100 Å) filtreleri ile elde edilen fotometrik renk parlaklıkları 53

Çizelge 2.3. Cellino vd. (2015a) tarafından elde edilen katsayılar ve nominal belirsizlik değerleri 59

Çizelge 2.4. (2059) Baboquivari'nin temel yörünge parametreleri 63

Çizelge 2.5. (2059) Baboquivari'nin geçmişte/gelecekte gerçekleşen/gerçekleşecek Yer ile olan yakın geçişleri 63

Çizelge 3.1. T100 teleskobu ile alınan fotometrik gözlem verilerinin detayları. Çizelgede görülen veriler, gecelik ortalama değerlerin göz önüne alınmasıyla elde edilmiştir 69

Çizelge 3.2. RTT150 teleskobu ile alınan Baboquivari gözlem verilerinin detayları. Çizelgede görülen veriler, gecelik ortalama değerlerin göz önüne alınmasıyla elde edilmiştir 70

Çizelge 3.3. *Gaia DR3*'te yer alan G parlaklıkları ve $G_{BP} - G_{RP}$ rengi ile Johnson-Cousins filtreleri arasındaki ilişki 76

Çizelge 4.1. Yörünge benzerlik parametreleri hesaplanan 144 YYA ikilisinin tayf türlerine göre dağılımı. Toplam sayı, 144 farklı ikilinin tayf türüne göre sayılarını verirken, ort. ve med. D-kriterleri, her bir ikili için elde edilen D-kriteri değerlerinin ilgili tayf türü için ortalama ve medyan değerleridir. Benzer şekilde C_i değerleri her bir YYA için hesaplanmış ve ikililer için farkları (δC_i) elde edilerek ilgili tayf türleri için ortalama ve medyan değerleri hesaplanmıştır 109

1. GİRİŞ

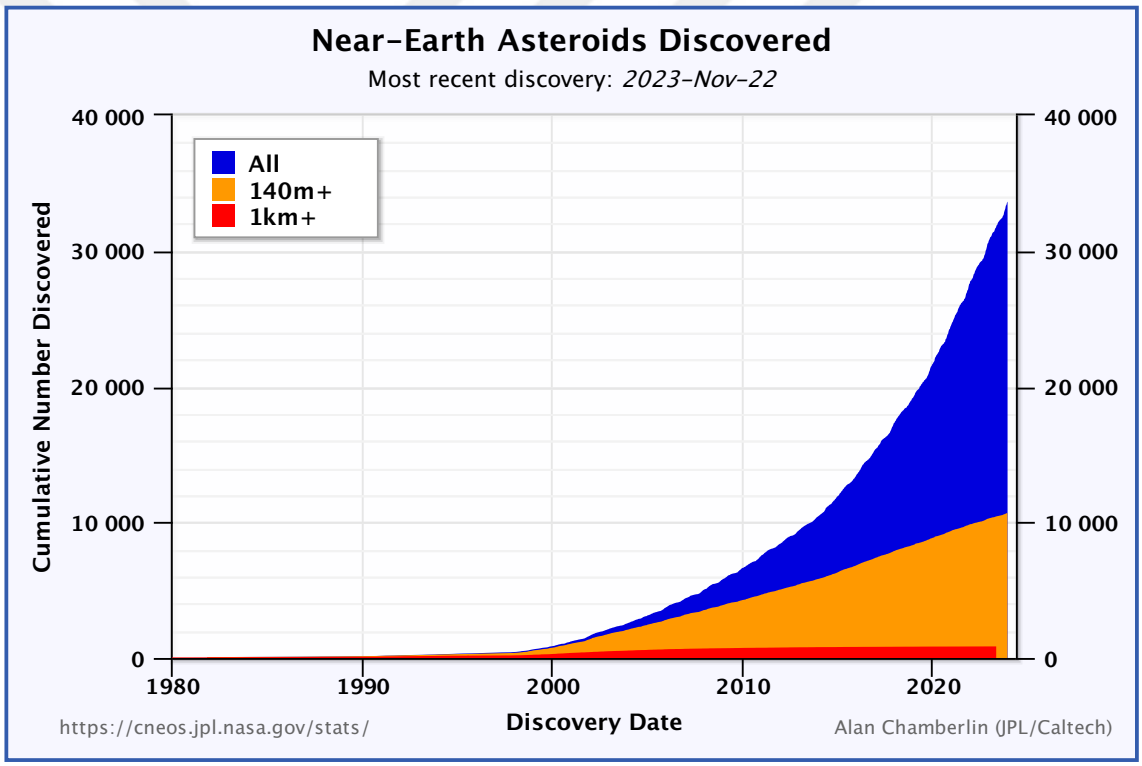
Işık kirliliğinin olmadığı yerlerde gece gökyüzüne baktığımızda yıldızların ihtişamı başımızı döndürebilir. Eğer şanslıysak bu yıldızların arasında gökyüzünde Ay'dan sonra en parlak olan ve kusursuz parlayan bazı gök cisimlerini de görebiliriz. Bu gök cisimleri yıldızlardan farklı olarak Güneş sistemimizin içerisinde yer alan ve Güneş'ten aldıkları ışığı yansıtan Merkür, Venüs, Mars, Jüpiter ya da Satürn olabilirler. Bu cisimler görece sönük olan Uranüs, Neptün ve tabii ki Yer ile birlikte *büyük gezegenler (major planets)* ya da yalnızca *gezegenler* denilen sınıfı oluştururlar. 18 Şubat 1930 yılında Clyde W. Tombaugh tarafından Lowell gözlemevinde keşfedilen Plüton da 2006 yılına kadar gezegen olarak sınıflandırılıyordu. Ancak Uluslararası Astronomi Birliği'nin (IAU) 26 Ağustos 2006 yılında gerçekleştirilen toplantısında alınan kararlar[1] sonrasında gezegen tanımı yeniden yapılmış ve yeni bir sınıf olarak *cüce gezegenler (dwarf planets)* tanımlanmıştır. Böylece Plüton, bu yeni tanım ile birlikte Neptün-ötesi cüce gezegen sınıfından bir nesne olarak kabul edilmiştir. Yine aynı toplantıda Plüton ile birlikte, 1 Ocak 1801 yılında ilk keşfedilen asteroit olan (1) Ceres ve Neptün-ötesi bir nesne olan (136199) Eris, cüce gezegen sınıfına dahil edilmiştir. Uydular dışında kalan ve Güneş etrafında dolanan diğer tüm nesneler için ise *küçük Güneş sistemi nesneleri* olarak adlandırılmıştır. Küçük Güneş sistemi nesneleri içerisinde asteroitler, aktif kuyruklu yıldızlar, sönmüş kuyruklu yıldızlar ve meteoroitler yer almaktadır. Aynı zamanda bu cisimlere *küçük gezegenler (minor planets)* de denilmektedir ve Güneş sistemi içerisine farklı şekillerde dağılmışlardır. Örneğin, asteroitlerin çok büyük çoğunluğu Jüpiter ve Mars arasında kalan *ana kuşak (main belt)* ya da *asteroit kuşağı (asteroid belt)* adı verilen bölgede yer almaktadır. Kuyruklu yıldızlar genellikle büyük yörüngelere sahiptirler ve yörünge enöte uzaklıkları (Q) Güneş sisteminin dış kısımlarına kadar uzanmaktadır. Ancak, tüm bu cisimler, büyük gezegenlerin ve özellikle Jüpiter'in kütle çekimsel etkileri ya da kütle çekimsel olmayan etkiler sonucunda yörüngeleri üzerinde tedirginlikler yaşamaktadırlar. Bu etkiler, zaman zaman bu cisimlerin bulundukları yerlerden başka yerlere sürüklenmelerine, Güneş sisteminin dışına atılmalarına ya da Güneş üzerine düşmelerine sebep olabilir. Aynı şekilde çarpışmalar sonucunda da bu nesnelerin Güneş sistemi içerisindeki konumları değişebilir. Dinamik olarak Güneş sistemi içerisindeki konumlarına göre bu nesneler farklı gruplarda incelenmektedir. Bu gruplar içerisinde Güneş etrafındaki dolanma hareketleri sırasında Yer'e yakın geçiş yapan asteroitlere *Yer'e Yakın Asteroitler (YYA'lar) (NEAs: Near-Earth Asteroids)* ya da daha genel adıyla *Yer'e Yakın Cisimler (YYC'ler) (NEOs: Near-Earth Objects)* denilmektir.

Wilhelms (1993) tarafından da belirtildiği üzere Ay ve Yer benzeri gezegenlerin yüzeyindeki kraterlerin kaynağı volkanik olaylardan çok yüzeye çarpan gök cisimleridir.

[1] https://www.iau.org/static/archives/releases/pdf/iau0603.pdf [son erişim tarihi: 25.11.2023]

Buna bağlı olarak da Yer ve Ay ikilisi, Güneş sistemi tarihi süresince sürekli olarak küçük gezegenler ya da artık yörünge özelliklerine göre sınıflandırılmış olan YYA'lar tarafından bombalanmıştır. Tanım olarak YYA'lar yörünge enberi uzaklıkları $q < 1.3$ AB (Astronomi Birimi) olan nesnelerdir (Rabinowitz 1994).

(1) Ceres asteroidinin 1 Ocak 1801 tarihinde İtalyan astronom Giuseppe Piazzi tarafından Palermo Gözlemevi'nde keşfedilmesinden neredeyse 100 yıl sonra 1898 yılında Berlin'deki Urania Gözlemevi'nde Carl Gustav Witt ve Felix Linke ile birlikte eş zamanlı olarak Nice Gözlemevi'nde Auguste Charlois tarafından ilk YYA olan (433) Eros keşfedilmiştir. Gelişen gözlem teknikleri sayesinde son yıllarda YYA keşiflerinin sayısı hızla artmıştır (bkz. Şekil 1.1) ve 25 Kasım 2023 tarihi itibarıyla bilinen YYA'ların sayısı 33876'dır[2]. Günümüzde YYA'ların bilinen tüm küçük gezegenler içerisindeki oranı ise %2.53'tür.



Şekil 1.1. 22 Kasım 2023 tarihi itibarıyla YYA sayıları (Chamberlin 2023)

YYA'lar yörünge özelliklerine göre dört farklı alt gruba ayrılmışlardır. Bu gruplar Apollo, Amor, Aten ve Atira gruplarıdır. Apollo ve Aten grubu Yer yörüngesini keserken, Amor ve Atira grubu Yer yörüngesini kesmezler (bkz. Şekil 1.2). Apollo grubunun yörünge yarı-büyük eksen uzunluğu $a \geq 1$ AB ve $q > 1.017$ AB, Aten grubunun $a < 1$ AB ve $Q > 0.983$ AB, Amor grubunun $1.017 \text{ AB} < q < 1.3$ AB ve Atira

[2] https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_query.html [son erişim tarihi: 25.11.2023]

grubunun ise $Q \leq 0.983$ AB'dir. Bu dört grubun yanı sıra Atira grubunun kapsadığı ve tamamen Venüs yörüngesi içerisinde ($0.307 > Q > 0.718$) kalan Vatira grubu (günümüzde Atiralar'ın alt grubu olarak düşünülebilir) ilk kez Greenstreet vd. (2012) tarafından tanımlanmıştır. İlk Vatira asteroidi 2020 AV_2 ya da diğer adıyla (594913) 'Ayló'chaxnim 4 Ocak 2020 tarihinde Palomar Gözlemevi'nde (gözlemevi kodu:141) bulunan ZTF (Zwicky Transient Facility) (Bellm vd. 2019) teleskobu kullanılarak keşfedilmiştir (Bolin vd. 2020). Hemen ardından yapılan çalışmalar ile de yörünge özellikleri ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır (örn. Greenstreet 2020; de la Fuente Marcos ve de la Fuente Marcos 2020). Benzer şekilde yörüngesi tamamen Merkür yörüngesi içerisinde kalan asteroitler ise Vulkanoitler'dir[3]. Henüz keşfedilen bir Vulkanoit bulunmamaktadır. Bilinen YYA'lar içerisinde en büyük çoğunluğu Apollo grubu oluşturmaktadır ve bu sayı 25 Kasım 2023 itibarıyla 18935'tir. Popülasyon sayısına göre daha sonra Amor, Aten ve Atira grupları gelmektedir ve günümüzde sayıları sırasıyla 12054, 2652 ve 32'dir. YYA'ların yarı-büyük eksen uzunluğuna karşılık yörünge basıklık değerine göre dağılımları Şekil 1.3'te verilmiştir. Bu asteroitler içerisinde Yer için tehdit oluşturan ve Yer'e çarpma tehlikesi bulunanlara *Potansiyel Tehlikeli Asteroitler*[4] *(PTA'lar)* denilmektedir ve günümüzde sayıları 2389'dur. PTA'lar da YYA'ların dinamik ve fiziksel özelliklerine bağlı olarak iki şart altında oluşturulmuş bir alt sınıftır. Bir YYA'nın PTA olabilmesi için Yer ile minimum yörünge kesişim uzaklığı'nın (MOID)[5] 0.05 AB'den daha küçük ve mutlak parlaklığı'nın (H[6]) 22^m'den daha parlak olması gerekmektedir. PTA'ların sürekli takip edilmesi ve yörüngelerinin güncel gözlem verileri ile yeniden hesaplanması Yer ile oluşabilecek çarpışma riskinin öngörülebimesi için hayati önem taşımaktadır. Günümüzdeki en popüler PTA'lardan biri 2004 yılında keşfedilen (99942) Apophis'tir. Mutlak parlaklığı 19.09^m olan ve $\sim$340 m çapa sahip Apophis'in Yer ile arasındaki MOID değeri yalnızca 0.000256684 AB'dir[7]. Dünyadaki birçok gözlemevi ve gözlemci tarafından uzun yıllar boyunca astrometrik (konum) gözlemleri yapılarak çarpma ihtimali araştırılan ve Aten grubu bir YYA olan Apophis, Yer ile en yakın geçişini 13 Nisan 2029 tarihinde Yer yüzeyinden yalnızca $\sim$32000 km uzaklıktan gerçekleştirecektir. Yapılan hesaplamalara göre ise önümüzdeki $\sim$100 yıl içerisinde Apophis'in Yer ile çarpışma ihtimali bulunmamaktadır (örn. Gleason vd. 2004; Farnocchia vd. 2013).

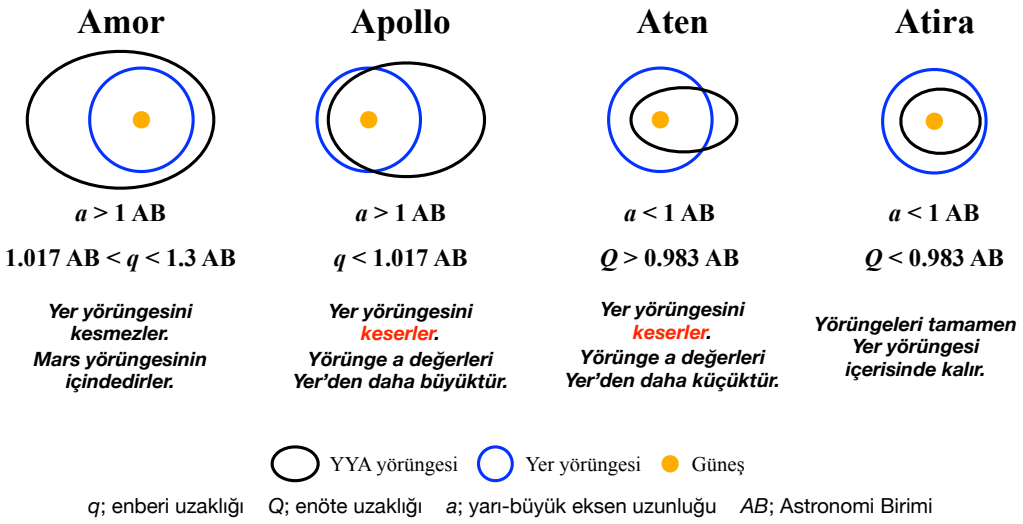
[3]Vulkanoitler (Vulcanoids), Le Verrier (1859) tarafından Merkür'ün tuhaf yörünge hareketlerini anlamlandırabilmek için Merkür ve Güneş arasında olabileceğini öngördüğü Vulkan (Vulcan) gezegeni sebebiyle adlandırılmıştır. Merkür'ün hareketinin sebebi ise daha sonra Einstein (1915) tarafından açıklanmıştır.

[4]Potansiyel Tehlikeli Asteroitler literatürde Potentially Hazardous Asteroids (PHAs) olarak geçmektedir.

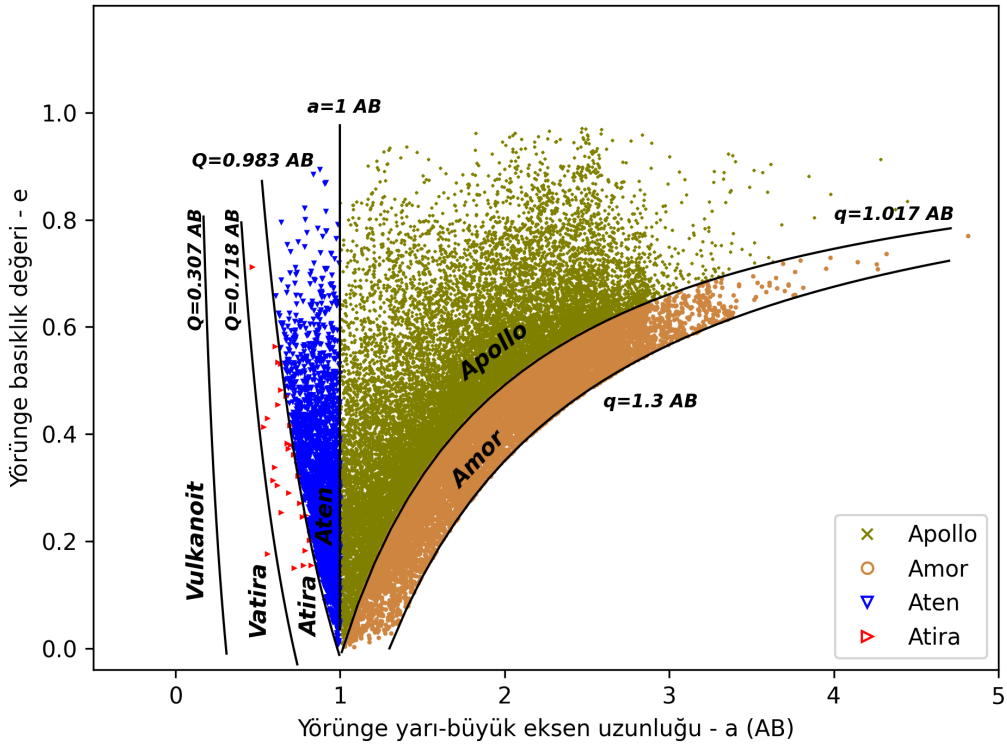
[5]MOID ya da açık haliyle Minimum Orbit Intersection Distance, iki cismin yörüngeleri üzerindeki hareketleri sırasında aralarında oluşabilecek herhangi bir zamandaki en yakın uzaklığı belirten değerdir.

[6]Mutlak parlaklık, bir asteroidin 0° yörünge faz açısında (Yer-asteroit-Güneş açısı) ve Güneş'ten ve Yer'den 1 AB uzaklıkta olduğu varsayılan konumdaki görünür parlaklığıdır.

[7]https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=apophis [son erişim tarihi: 25.11.2023]



Şekil 1.2. https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html [son erişim tarihi: 25.11.2023] adresindeki görselin yeniden düzenlenmesiyle oluşturulan yörünge şekillerine göre YYA grupları



Şekil 1.3. YYA gruplarının Güneş sistemi içerisindeki dağılımını gösteren yörünge yarı-büyük eksen uzunluğuna karşılık yörünge basıklık değeri grafiği. Grupları sınırlandıran bölgeler ayrıca gösterilmiştir (siyah eğriler). Veriler https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_query.html'den alınmıştır

Apophis ve benzeri, Yer'e çarpma tehlikesi olan PTA'lar üzerine yapılmış en güncel çalışmalardan bir tanesi *DART*[8] (Double Asteroid Redirection Test) isimli uzay görevidir. Bir gezegen savunma görevi olan *DART*, 26 Eylül 2022 tarihinde Apollo sınıfı bir YYA olan (65803) Didymos asteroidinin uydusu Dimorphos ile kinetik çarpışma gerçekleştirmiş ve Yer tabanlı gözlemler sonrasında yapılan ilk hesaplamalara göre Dimorphos'u Didymos etrafındaki yörüngesinden yüksek oranda saptırmıştır (Cheng vd. 2023). Didymos asteroidinin yörüngesindeki sapmayı uzun vadede hassas bir şekilde ölçebilmek için ise *Hera*[9] uzay aracının Ekim 2024 tarihinde ikili sisteme doğru yola çıkması beklenmektedir. *DART* ve *Hera* dışında Güneş sistemi içerisindeki asteroitleri ziyaret eden, örnek getirme görevi gerçekleştiren (sample-return mission)[10] ya da yakın geçiş yapan (flyby mission) başka birçok görev geçmişte gerçekleşmiş ya da gelecek için planlanmaktadır. Bu görevlerin hedeflerindeki küçük Güneş sistemi nesneleri elbette ki amaca göre önceden belirlenmiş olmalıdır. Bu belirleme süreci nesnelerin hem dinamik hem de fiziksel özelliklerinin detaylı olarak incelenmesi sonrasında sonuçlanmaktadır. Bu inceleme de tabii ki özellikle Yer tabanlı ve gelişen teknolojiyle birlikte uzay tabanlı teleskoplardan elde edilen gözlemsel verilerin analiz edilmesi sonucunda yapılmaktadır.

Asteroitler boyut olarak küçük olmaları ve Güneş'ten aldıkları ışığı yansıtmaları nedeniyle gökyüzünde görece sönük nesnelerdir. Bu sebeple fiziksel özelliklerinin belirlenebilmesi için Yer tabanlı gözlemlerden elde edilen veriler oldukça sınırlı kalmaktadır (Michel 2014). Örneğin fotometrik gözlemler ile asteroidin görünür parlaklıkları elde edilebilmektedir. Elde edilen bu parlaklık asteroidin gökyüzündeki konumuna göre yapılan bir düzeltme sonrasında mutlak parlaklığa dönüştürülmektedir (bkz. Bölüm 3.2.3). Mutlak parlaklığı bilinen bir asteroidin ise kabaca büyüklüğü yani çapı (D) tahmin edilebilir. Ancak daha hassas bir büyüklük hesabı için hem daha hassas elde edilmiş fotometrik verilere yani daha büyük teleskoplara hem de farklı gözlem tekniklerine (örn. spektroskopik, polarimetrik) ihtiyaç duyulmaktadır. Polarimetrik ya da radyometrik gözlemler (radar gözlemleri) ile albedo elde edilebilirse asteroidin büyüklüğü çok daha hassas hesaplanabilir. Ancak Yer tabanlı gözlemlerde büyüklük ve şekil belirleyebilmek için radyometrik gözlemler ya da çok-kirişli yıldız örtülme (multi-chord stellar occultation) gözlemleri yapılması gerekmektedir (Ortiz vd. 2020).

Dinamik açıdan bakıldığında ise yalnızca astrometri (konum belirleme) amaçlı gözlem verisi elde edilmek istenirse fotometrik gözlem kabiliyeti olan herhangi bir teleskop kullanılabilir. Kısaca özetlemek gerekirse, bir asteroidin ya da herhangi bir nesnenin gökyüzündeki konumu belirlenirken etrafındaki bilinen nesnelerin konumları

[8] https://dart.jhuapl.edu [son erişim tarihi: 25.11.2023]

[9] https://www.esa.int/Space_Safety/Hera [son erişim tarihi: 25.11.2023]

[10] Örnek getirme görevi, uzayda yer alan Yer dışındaki bir hedefin yüzeyine gönderilen robotik bir uzay aracının hedefin yüzeyine inmesi ve yüzeyden alınan örneğin araç tarafından Yer'e tekrar getirilmesi görevidir.

referans alınır. Bu durumda hassas bir konum hesabı için hem hedef nesneden yeterince ışık toplanması gerekmekte hem de etrafındaki bilinen nesnelerin (bu durumda tabii ki nokta kaynak olarak yıldızlar kullanılmalıdır) konumlarının hassas bir şekilde biliniyor olması gerekmektedir. Yeterince büyük bir teleskobumuz var ise, hedef nesneden yeterli ışığı toplayabilir ve ışık merkezini elde edebiliriz. Ancak referans olarak kullanılacak yıldızların konumları veri tabanlarından elde edilmelidir. Astrometrik veri tabanlarının (kataloglarının) oluşturulabilmesi yani gökyüzünün haritalanması ile ilgili geçmişten günümüze birçok gökyüzü tarama çalışması yapılmıştır. Gelişen teknoloji ile birlikte günümüzde gökyüzündeki nesnelerin konumlarını en hassas şekilde bize *Gaia*[11] *(Global Astrometric Interferometer for Astrophysics)* uzay teleskobu (ya da uydusu) sağlamaktadır. 2013 yılında Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından uzaya fırlatılan ve L2 noktasına yerleştirilen *Gaia* uzay teleskobu tarafından elde edilen verilerin 3. sürümü olan *Gaia DR3 (Data Release3)*[12] 13 Haziran 2022 tarihinde yayımlanmıştır. Bu çalışmada elde edilen gözlem verilerinin astrometrik çözümleri için de Kilic vd. (2018) tarafından üretilen *Gaia DR1 (Data Release1)* kataloğu kullanılmıştır. Tekrar vurgulamak gerekirse astrometrik çözümlerde referans yıldızlarının konum bilgilerinin hassasiyeti astrometrik çözümün hassasiyeti için son derece önemlidir. *Gaia DR3* kataloğunda neredeyse 2 milyar kaynağın astrometrik ve fotometrik verileri ile birlikte 158152 küçük Güneş sistemi nesnesinin verileri yer almaktadır ve astrometrik hassasiyet de kaynağın parlaklığına bağlı olarak 0.01 *mas* ile 1 *mas* aralığındadır (Gaia Collaboration vd. 2022; Gaia Collaboration vd. 2021; Lindegren vd. 2021). Yine bu çalışmada elde edilen gözlem verilerinin astrometrik çözümlerinin yanı sıra fotometrik indirgenmesi ve standart parlaklığa dönüşüm için gerekli aletsel sıfır-nokta parlaklığının[13] elde edilmesi için de *Gaia DR3* kataloğu kullanılmıştır (bkz. Bölüm 3.2).

Asteroitlerin fiziksel ve dinamik özelliklerinin araştırılması, Güneş sistemindeki astrofiziksel süreçlerin anlaşılabilmesi, Yer üzerindeki yaşamın kaynağının anlaşılabilmesi, Yer'e çarpma tehlikesi bulunan asteroitlerin tespiti ve savunma sistemi geliştirilebilmesinin yanı sıra günümüzde Güneş sistemi nesneleri için planlanan uzay görevlerinin artması ve uzay madenciliği açısından önemi katlanarak artan bir çalışma alanıdır. Bu tez çalışmasının da ana konusu olan asteroitlerin fiziksel ve dinamik özellikleri, daha dar bir kapsamda özelleştirilerek YYA'lar içerisinde $H < 18^m$ olan YYA'lar ve farklı gözlem teknikleriyle verileri elde edilmiş Amor grubu bir YYA olan (2059) Baboquivari asteroidi özelinde araştırılmıştır.

[11] https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Gaia [son erişim tarihi: 25.11.2023]

[12] https://gea.esac.esa.int/archive/ [son erişim tarihi: 25.11.2023]

[13] Sıfır-nokta parlaklığı, aletsel parlaklığın standart fotometrik sistemlerdeki parlaklığa dönüştürülebilmesi için her bir teleskop görüntüsü özelinde elde edilmesi gereken parlaklıktır.

Mutlak parlaklığın $H = 18^m$ ve geometrik albedonun[14] $p_v = 0.112$ olduğu durumda çap tam olarak $D = 1$ km'ye karşılık gelmektedir. $H < 18^m$ ise belirtilen albedo değerine göre $D > 1$ km olan cisimleri belirtmektedir. Bu albedo değeri çoğu asteroit için ortalama kabul edilebilecek bir değer olduğundan, mutlak parlaklık sınırlaması burada hem asteroitlerin çoğu için makul bir değer olarak değerlendirilmiş (Tedesco vd. 1992) hem de gözlemsel çalışmaların gerçekleştirilebilmesi açısından seçilmiştir. Bottke vd. (2002) tarafından da vurgulandığı üzere $H < 18^m$ olan YYA'lar, YYA popülasyonu araştırmaları için sıklıkla kullanılan bir kriterdir. Ancak bu çalışma içerisinde yapılan tüm gözlemler, analizler ve geliştirilen araçlar tüm küçük gezegenler için uygulanabilirdir.

Bu tez çalışmasında esas amaç, hedef olarak belirlenen YYA'ların fiziksel ve dinamik özelliklerinin astrofiziksel perspektifte incelenmesidir. Uzay görevlerinin öneminin vurgulanması ise bu tez ve benzeri çalışmalardan elde edilecek sonuçlar doğrultusunda bu görevlerin başarıyla gerçekleştirilebilecek olmasından dolayıdır. Fiziksel özellikleri iyi bilinen bir asteroidin uzun zaman aralığındaki yörünge integrasyonu (ya da yörünge simülasyonu) en doğru sonucu elde edebilmek için hayati önem taşımaktadır. Bu kapsamda tezin 1. bölümünde asteroitlerin fiziksel ve dinamik özelliklerinin belirlenmesinin önemi vurgulanmaya çalışılmıştır. 2. bölümde bu alanda yapılan önceki çalışmaların detaylarına yer verilmiştir. 3. bölümde bu tez kapsamında yapılan gözlemler, veri indirgeme yöntemleri, yörünge integrasyon araçları, kullanılan nümerik integrasyon şeması ve integrasyon için başlangıç koşulları anlatılmıştır. 4. bölümde elde edilen sonuçların astrofiziksel anlamları tartışılmıştır. 5. bölümde ise elde edilen sonuçlar ile ilgili genel bir değerlendirme yapılmış ve bu alanda yapılacak gelecek çalışmalar ile ilgili yorumlara yer verilmiştir.

[14]Güneş sistemi içerisindeki cisimler için geometrik albedo, cismin 0° faz açısında gözlenen parlaklığının cisim ile aynı büyüklükte ideal bir yansıtıcı yüzeyin (Lambert yüzeyi) varsayılan parlaklığına oranıdır. Gezegen biliminde, geometrik albedo, çoğunlukla standart Johnson-V bandında (yaklaşık $0.55\ \mu m$) ölçülür ve p_v sembolü ile gösterilir (Cellino vd. 2015a).

2. KAYNAK TARAMASI

Gezegenler, gezegenimsilerin çarpışmaları sonucunda önyıldızların etrafında yer alan öngezegen disklerinde oluşurlar[15] (Safronov 1972; Hayashi vd. 1985). Mars ve Jüpiter arasında yer alan ana kuşak asteroitlerinin ve tabii YYA'ların ve diğer küçük gezegenlerin de kaynağının bu gezegenimsilerin kalıntıları olduğu düşünülmektedir (Petit vd. 2001; Bottke vd. 2005). Özellikle, Yer tabanlı gözlemleri kolaylıkla yapılabilen görece büyük asteroitler ki 25 Kasım 2023 itibarıyla $D > 1$ km olan asteroitlerin sayısı 138803'tür, Güneş sisteminin evrimsel geçmişinin ortaya çıkarılması ve süregelen yapısının anlaşılabilmesi için en önemli kaynaklardır (Michel 2014). Bu kaynakların gözlemleri ile birlikte Bölüm 1'de de bahsedildiği üzere hem fiziksel özelliklerinin ortaya çıkarılması hem de dinamik açıdan Güneş sistemi içerisindeki yörüngelerinin araştırılması ile ilgili birçok farklı çalışma mevcuttur. Asteroitlerin fiziksel ve dinamik özellikleri ne kadar birbirleri ile ilişkili olsa da tamamen farklı çalışma alanları olarak da değerlendirilebilir. Bu sebeple bu iki konuda yapılan çalışmalar farklı başlıklar ve alt başlıklar altında incelenecektir.

2.1. Güneş Sistemi Dinamiği

2.1.1. Rezonans Bölgeleri

Literatürde 25 Kasım 2023 itibarıyla sayıları 1185080[16] olan ana kuşak asteroitleri (2 AB $< a <$ 3.2 AB; $q >$ 1.666 AB) Mars ve Jüpiter arasında düzensiz (non-uniform) bir dağılım göstermektedirler. Ana kuşaktaki asteroitlerin dağılımına bakıldığında bazı bölgelerde neredeyse hiç asteroit olmadığı görülmektedir. İlk olarak 1866 yılında Daniel Kirkwood tarafından farkedilen bu bölgelere Kirkwood boşlukları denilmektedir (Kirkwood 1867). Şekil 2.1'de boşluklar açıkça görülmektedir ve yatay eksen yörünge yarı-büyük eksen uzunluğu iken düşey eksen asteroit sayısını göstermektedir. Bu boş bölgeler rezonans bölgelerine karşılık gelmektedir. Özellikle, Jüpiter'in yörünge periyodu ile küçük tam sayılar oranında periyoda sahip yörüngelere karşılık gelen bölgeler en baskın boşlukları oluşturmaktadır. Örneğin Şekil 2.1'de 3:1 bölgesine karşılık gelen ve $\sim$2.5 AB'de yer alan bölgedeki bir nesne Kepler'in 3. yasasına[17] göre $\sim$4 yılda Güneş etrafında dolanmaktadır. Jüpiter'in periyodunun $\sim$12 yıl olduğu düşünüldüğünde ise dolanma periyotları arasında tam sayılı bir oran oluşmaktadır. Bu durumda bu bölgedeki ve diğer küçük tam sayı oranlı bölgelerdeki asteroitler Jüpiter ile periyodik olarak karşılaşmaktadır ve böylece yörünge rezonansı

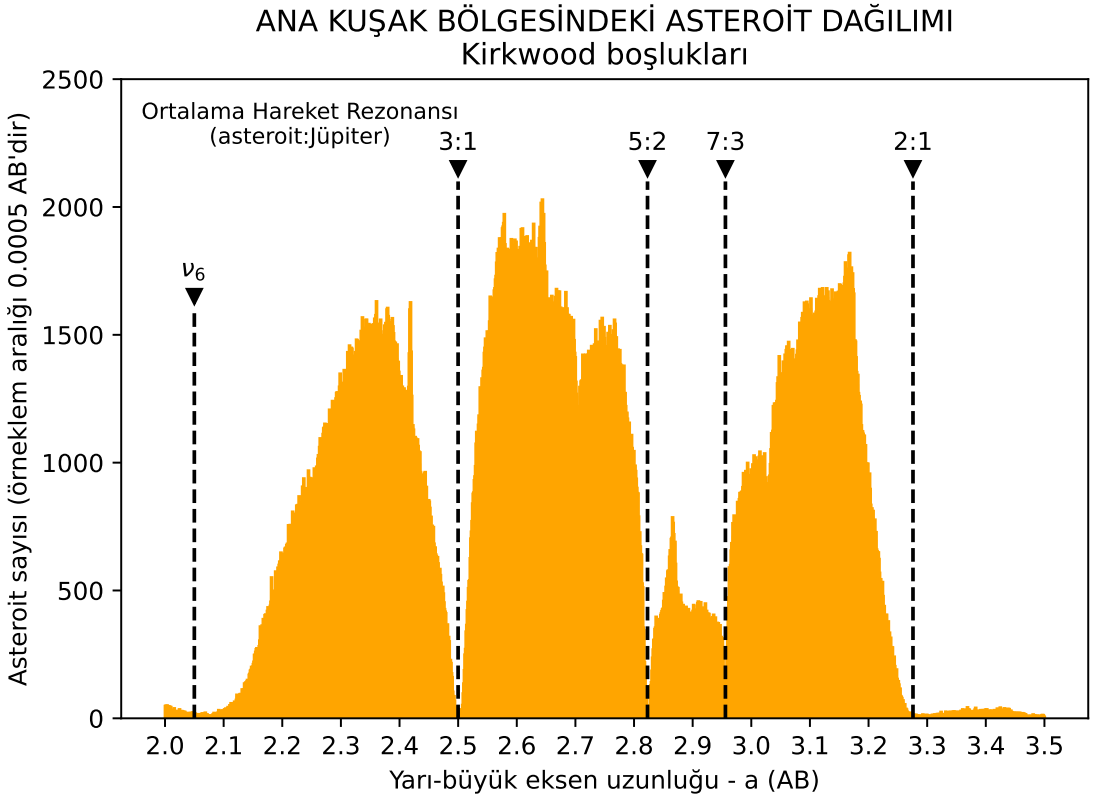
[15] Cümle içerisinde yer alan "gezegenimsiler", "önyıldızlar" ve "öngezegen diskleri" kavramları, ingilizce literatürde sırasıyla "planetesimals", "protostars" ve "protoplanetary disks" olarak geçmektedir.

[16] https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_query.html [son erişim tarihi: 25.11.2023]

[17] Kepler'in 3. yasası, Güneş sistemi içerisindeki cisimler için $a^3/p^2 = 1$ denklemidir. Burada a AB biriminde yörünge yarı-büyük eksen uzunluğu, p ise yıl biriminde dolanma periyodudur.

oluşmaktadır. Oluşan bu rezonansa *ortalama hareket rezonansı (mean motion resonance)* denilmektedir. Ortalama hareket rezonansına giren asteroitler kararsız yörüngelere sahiptirler (bazı istisnai durumlar dışında) ve periyodik kütle çekim etkilerine maruz kalmalarından dolayı bu bölgelerden uzaklaştırılacaklardır (Wisdom 1987).

Bir diğer önemli rezonans ise *seküler rezonanstır (secular resonance)*. Ortalama hareket rezonansından farklı olarak seküler rezonans iki farklı nesnenin e, $\overline{\omega}$ $(\omega + \Omega)$, i ve Ω (sırasıyla yörünge dış merkezliği, enberi noktasının boylamı, yörünge eğikliği ve çıkış düğümünün boylamı) yörünge elemanlarının presesyon frekansının birbirine eşit ya da kıyaslanabilir olduğu değerlerde gerçekleşir (Morbidelli ve Henrard 1991). En baskın seküler rezonans bölgesi $\sim$2 AB civarında bulunan (bkz. Şekil 2.1) ve Satürn'ün enberi noktasının boylamının salınım frekansı ile ilişkili olan ν_6 bölgesidir. Bu bölgedeki asteroitler yörünge dış merkezliklerinin zamanla artmasıyla (daha eliptik yörünge) iç yörüngelere taşınır, YYA olur ve Yer'e çarpma ihtimalleri büyük ölçüde artar (Ito ve Malhotra 2006; Haghighipour ve Winter 2016). Eğer Güneş sistemi içerisinde ν_6 rezonansı olmasaydı Yer ile çarpışan asteroit sayısı büyük oranda azalacaktı (Morbidelli vd. 1994; Bottke vd. 2000; Smallwood vd. 2018).

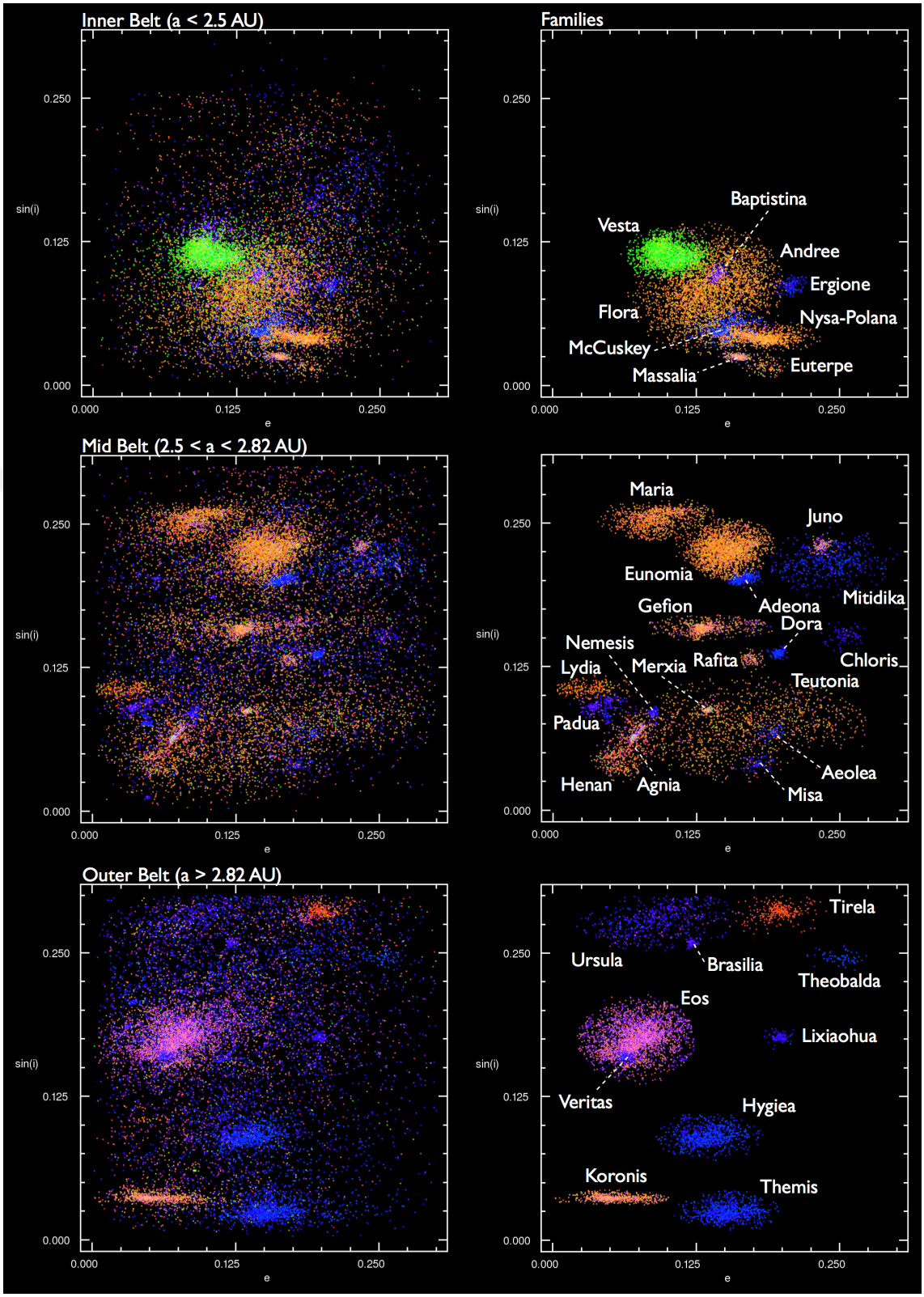


Şekil 2.1. Ana kuşak bölgesindeki asteroit dağılımı ve Kirkwood boşlukları. Chamberlain (2007) tarafından 156929 asteroit kullanılarak elde edilen histogram grafiği güncellenmiş ve 1259129 asteroit kullanılarak bu tez çalışması için yeniden elde edilmiştir

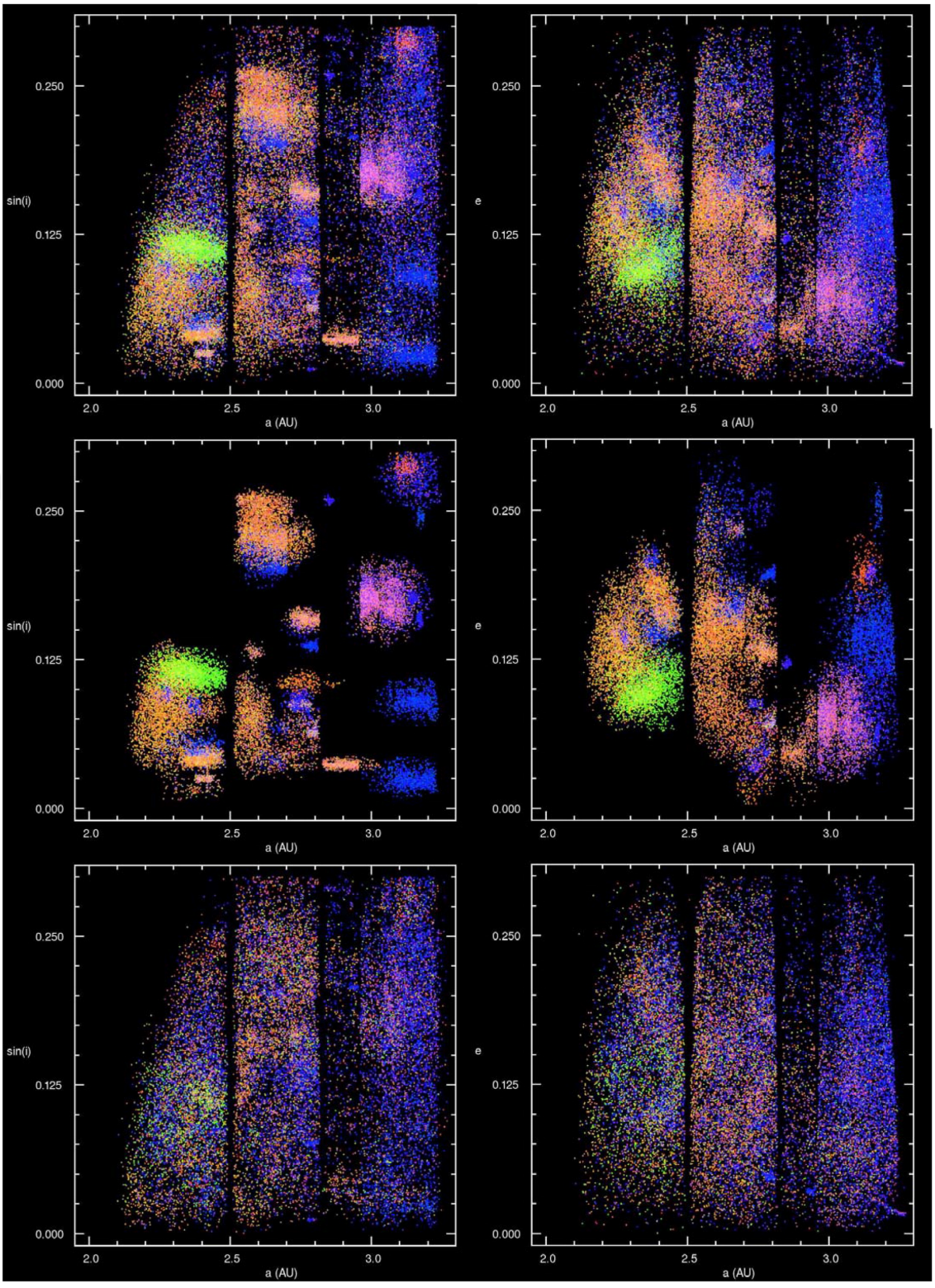
Güneş sistemi dinamiğinin uzun dönemli incelenebilmesi ise yörünge rezonanslarının çok iyi anlaşılmasını gerektirmektedir ve bu rezonanslar, Güneş sistemi içerisinde hem kararsızlık hem de bazı istisnai durumlar için uzun dönemli kararlılığın sebebi olabilirler (Malhotra 1998). Örneğin, Roig vd. (2002) tarafından günümüzde Jüpiter ile 2:1 rezonans bölgesindeki asteroitler için yapılan çalışmaya göre üç farklı grup tespit edilmiştir. Bunlardan Zhongguolar (en düşük numaraya sahip (3789) Zhongguo asteroidi sonrasında isimlendirilmiştir) kararlı yörüngeye sahiptirler ve Güneş sistemi tarihi süresince bu bölgede yer almaktadırlar. Griqualar (en düşük numaraya sahip (1362) Griqua asteroidi sonrasında isimlendirilmiştir) 2:1 rezonans bölgesi için tipik örnek grubunu oluştururlar ve birkaç 100 milyon yıl içerisinde rezonans bölgesinden taşınacaklardır. Bir diğer grup ise çok kararsız gruptur ve yalnızca birkaç 10 milyon yıl içerisinde farklı bölgelere taşınacaklardır. Aynı zamanda Roig vd. (2002)'ye göre Griqualar rezonans bölgesi içerisindeki büyük bir asteroidin parçalanması sonucu Zhongguolar ile birlikte de oluşmuş olabilirler. Bu durumda (1362) Griqua asteroidi ana asteroit olabilir. Rezonans bölgelerindeki işte bu belirsizlikler Güneş sistemi içerisindeki kaotik yapının en önemli göstergelerindendirler.

2.1.2. Asteroit aileleri

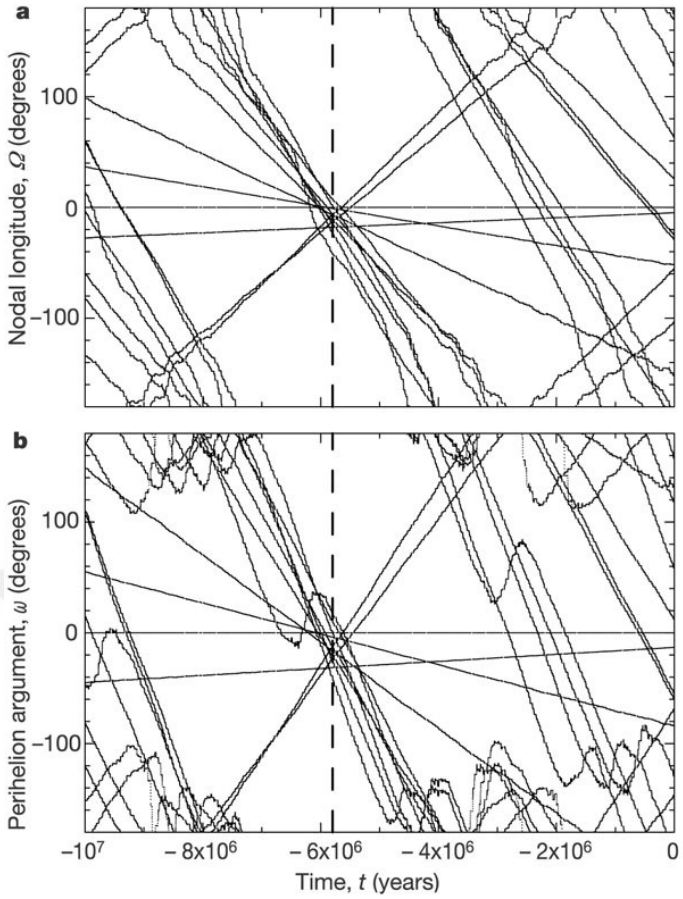
Bölüm 2.1.1'de bahsedilen rezonans bölgeleri YYA'ların en önemli kaynak bölgeleri sayılabilir. Aynı zamanda ana kuşak içerisindeki yıkıcı çarpışmalar sonucu dağılan parçalar da Yer'e yaklaşabilir ve YYA olabilir. Dağılan bu parçalar aynı zamanda daha büyük bir kütlenin uydusu olabilir, kütle çekim sonucunda tekrar ana kütlenin üzerine düşebilir ki bu durumda asteroide *moloz yığını (rubble pile)* denilmektedir, ana kuşaktan ayrılarak Güneş sistemi içerisinde farklı yollar izleyebilir ya da ana kuşak içerisinde kalmaya devam edebilir. Aynı ana asteroitten dağılan bu parçalara ise asteroit aileleri denilmektedir (Hirayama 1918; Zappalà vd. 1995). Tahmin edileceği üzere bu asteroitlerin kimyasal içerikleri (Cellino vd. 2002), renk parlaklıkları ve geometrik albedoları (Masiero vd. 2011) aynı olmalıdır. Bunun yanı sıra benzer dinamik özelliklere de sahip olmalıdırlar. Bu durum karşımıza öz yörünge elemanlarının (anlık yörünge elemanlarının aksine, değişmediği varsayılan ve yörüngenin karakteristiğini belirleyen yörünge elemanları) faz uzayı içerisinde gruplaşması ile çıkar (bkz. Şekil 2.2 ve 2.3). Nesvorný vd. (2002), *Nature* dergisinde yayımlanan çalışmasında ana kuşak içerisinde yer alan Karin asteroit ailesinin yalnızca 5.8 ± 0.2 milyon yıl önce gerçekleşen bir çarpışma sonucu oluşan genç bir aile olduğunu doğrudan sayısal yöntemler kullanarak keşfetmiştir. Şekil 2.4'te Karin ailesinin zamanda geriye doğru 10 milyon yıl için yapılan yörünge integrasyonu sonucunda yörünge elemanlarının (Ω ve ω) 5.8 milyon yıl önce aynı değerlerde kesiştiği açıkça görülmektedir. Günümüzde Nesvorný vd. (2015) tarafından Hiyerarşik Gruplama Yöntemi (HCM: Hierarchical Clustering Method) kullanılarak ortaya çıkarılan 122 aile bulunmaktadır.



Şekil 2.2. Ana kuşak asteroitlerinin öz yörünge elemanları e'ye (yatay eksen) karşılık $\sin i$ (düşey eksen) dağılımı. Sol panelde tüm nesneler görülürken, sağ panelde arka plandaki nesneler kullanılmadan yörünge uzayında gruplaşmış olarak 37 farklı asteroit ailesi görülmektedir (Parker vd. 2008)



Şekil 2.3. Ana kuşak asteroitlerinin sol panelde öz yörünge elemanları a (yatay eksen) ve $\sin i$'ye (düşey eksen) göre, sağ panelde ise a (yatay eksen) ve e'ye (düşey eksen) göre dağılımı. En üstte tüm nesneler, ortada yalnızca aileler, en altta ise yalnızca arka plandaki nesneler yer almaktadır. Aynı zamanda Kirkwood boşlukları da açıkça görülmektedir (Parker vd. 2008)



Şekil 2.4. Karin asteroit ailesi üyelerinin zamanda 10 milyon yıl geriye yapılan yörünge integrasyonu (Nesvorný vd. 2002). Yatay eksen zamanı gösterirken (sağdan sola doğru geriye giden zaman) dikey eksen **a** grafiğinde çıkış düğümü boylamının (Ω) **b** grafiğinde ise enberi noktasının argümanının (ω) değişimini göstermektedir. Kesikli çizgi ise yatay eksende 5.8 milyon yıla karşılık gelmektedir

Dinamik özelliklerden farklı olarak Reddy vd. (2014) yaptıkları çalışmada 15 Şubat 2013 tarihinde Rusya'nın Chelyabinsk şehrine düşen meteoridin Flora ailesinin en büyük üyesi olan (8) Flora asteroidi ile aynı kimyasal özelliklerde ve LL türü (düşük Fe ve düşük Fe^0/FeO içeren) sıradan kondirit (ordinary chondrite) olduğunu ve böylece meteoridin Flora ailesinin muhtemel bir üyesi olabileceğini belirtmişlerdir. Benzer şekilde Dunn vd. (2013), Flora ailesi asteroitlerinin ν_6 rezonans bölgesine oldukça yakın olması sebebiyle LL kondrit türündeki YYA'ların çoğunluğunun kaynağı olabileceğini belirtmişlerdir.

2.1.3. Kaotiklik Belirteçleri

Bölüm 2.1.2'de belirtilen fiziksel özelliklerine göre aile üyesi tahmini yapılabilen YYA'lar için henüz dinamik olarak Karin ailesinin keşfine benzer bir YYA ailesi keşfi gerçekleştirilememiştir. Bunun en önemli sebebi YYA yörüngelerinin çok güçlü kaotik bir dinamik yapıya sahip olmasıdır (Farinella vd. 1994). Karin ailesinin keşfinde olduğu gibi, YYA'lar için uzun süreli, zamanda geriye yapılacak yörünge integrasyonları YYA yörüngelerinin kaotik doğası sebebiyle deterministik sonuçlar vermeyecektir. Ancak yörüngenin evrimi ve özelliği ile alakalı niteliksel/istatistiksel bilgiler sağlayacaktır. Bu gibi kaotik sistemlerin iki temel özelliği vardır; rastgele dağılım gösterirler ve başlangıç koşullarına çok hassas bağlılıkları vardır (Malhotra vd. 2001). YYA'lar özelinde bir örnek vermek gerekirse; bir asteroit ve ona çok yakın konumdaki başka bir asteroidin yörünge integrasyonlarını yaptığımızı varsayalım. Böyle bir durumda kaotik yapı sebebiyle kısa bir süre sonra iki cisim birbirinden uzaklaşacak ve farklı yörüngeler izleyecektir. Böyle sistemlerin ne kadar kaotik yapıda olduğunu gösteren birçok farklı matematiksel yöntem geliştirilmiştir. Başlangıç koşullarına bağlılığı temel alan ve en sık kullanılan kaotiklik belirteçlerinden birisi *Lyapunov karakteristik üsteli (Lyapunov characteristic exponent)* ya da kısaca Lyapunov üstelidir (Cincotta vd. 2003; Rein ve Tamayo 2016).

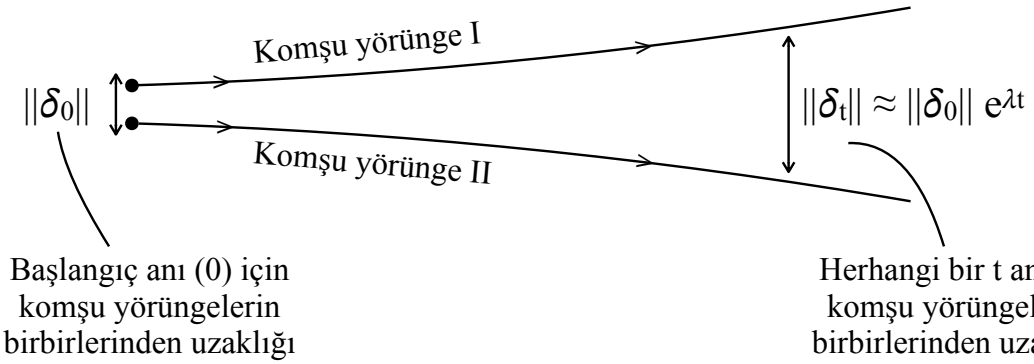
$$\lambda = \lim_{t\to\infty} \frac{1}{t} \ln \frac{\|\boldsymbol{\delta}(t)\|}{\|\boldsymbol{\delta}(0)\|} \tag{2.1}$$

Denklem 2.1'de $\|\boldsymbol{\delta}(t)\|$ başlangıçtaki küçük pertürbasyonun t anındaki boyutunu karakterize eden sapma vektörünün normudur. Eğer bir sistem kaotik ise Lyapunov üsteli $\lambda > 1$'dir. Böyle bir durumda pertürbasyon üstel olarak büyür ve yakın yörüngeler birbirinden üstel olarak ayrılırlar. $\lambda = 1$ durumu ise düzenli (regular) durumdur ve yakın yörüngeler birbirinden doğrusal (lineer) olarak ayrılırlar. Elde edilen Lyapunov üsteli (λ) kullanılarak Lyapunov zamanı (Lyapunov time) kolayca hesaplanabilir (Gajdoš ve Vaňko 2023).

$$t_L = \frac{1}{\lambda} \tag{2.2}$$

Burada Lyapunov zamanı, başlangıç koşulları birbirine oldukça yakın iki yörüngenin ne kadar süre sonra birbirinden uzaklaştığını söylemektedir yani deterministik sonuçların elde edilebileceği azami zamanı göstermektedir. Bir yörüngenin Lyapunov zamanı ne kadar büyükse kaotiklik derecesi (degree of chaos) o kadar az anlamına gelmektedir. Güneş sistemi genelinde Lyapunov zamanı 5-10 milyon yıldır (Laskar 1989; Laskar 1996; Sussman ve Wisdom 1992; Malhotra vd. 2001). YYA'lar

için ise Lyapunov zamanı yalnızca 50-100 yıldır (Tancredi 1998).



Şekil 2.5. Başlangıçta birbirine çok yakın iki yörüngenin t anında uzaklaşması ve Lyapunov üsteli (λ)

Kaotiklik belirteci olarak kullanılan bir diğer yöntem ise *Yakın Yörüngelerin Ortalama Üstel Büyüme Faktörü'dür (MEGNO: Mean Exponential Growth factor of Nearby Orbits)* (Cincotta ve Simó 2000; Goździewski vd. 2001; Cincotta vd. 2003)). MEGNO da kararlı ve kararsız yörüngeleri Lyapunov üsteli benzeri ancak daha hızlı bir şekilde birbirinden ayırt etmeye yarar (Cincotta ve Simó 2000; Gajdoš ve Vaňko 2023). Varsayılan bir $\varphi(t)$ yörüngesi için MEGNO hesabı;

$$Y(\varphi(t)) = \frac{2}{t}\int_0^t \frac{\dot{\delta}(\varphi(s))}{\delta(\varphi(s))}\, s\, ds \tag{2.3}$$

Burada $\delta(\varphi(t)) = \|\varphi'(t) - \varphi(t)\|$ ifadesi başlangıçta birbirine yakın olan iki yörüngenin t anında birbirine olan uzaklığını ifade eder. Ayrıca, zamana göre Y'nin ortalamasının asimptotik olarak davranışı aşağıdaki gibidir:

$$\left\langle Y(\varphi(t))\right\rangle \approx at + b \tag{2.4}$$

Denklem 2.4 ifadesinde $a = \chi_1/2$ ve $b \approx 0$ kaotik yörüngeyi (χ_1 Lyapunov üstelidir), $a = 0$ ve b ≈ 2 kararlı yarı-periyodik yörüngeyi belirtmektedir. $b < 2$ olduğu durumlar ise kararlı periyodik yörüngelere işaret edebilir (Maffione vd. 2013).

Hem Güneş sistemi içerisindeki hem de diğer gezegenli sistemlerdeki kararlılık durumlarının anlaşılabilmesi için geliştirilmiş farklı matematiksel yöntemler de vardır.

Örneğin, *Reversibility Error Method* (*REM*; Panichi vd. 2016; Panichi vd. 2017), *Angular Momentum Deficit* (*AMD*; Laskar ve Petit 2017; Petit vd. 2017; He vd. 2020), *Method of Maximum Eccentricity* (*MME*; Dvorak vd. 2003; Érdi vd. 2004; Vaňko vd. 2013) veya bir makine öğrenmesi algoritması olan *Stability of Planetary Orbital Configuration Klassifier* (*SPOCK*; Tamayo vd. 2020b) en sık kullanılan kaos belirteçleridir[18].

Güçlü kaotik yapıda olan YYA bölgelerinde yörünge simülasyonları ile uzun zaman sürecinde deterministik sonuçlar elde edilemediği açıktır. Bu durumda dinamik YYA ailelerinin tespiti için yörünge benzerlik fonksiyonları kullanılmaktadır. Bu fonksiyonlar Kepler uzayında tanımlanmış ve meteor akışlarının (meteor stream) kaynağını belirlemek için ya da iki veya, daha fazla asteroidin ortak kökeninin arayışında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu anlamda geliştirilen ilk fonksiyon Southworth ve Hawkins (1963) tarafından ortaya koyulan *D-kriteri'dir (D-criteria)*. Meteor akışlarının kaynağının belirlenmesi için geliştirilen kriter daha sonra dinamik asteroit ailerinin tespit edilebilmesi için de kullanılmaya başlanmıştır (Lindblad 1992). Benzer kriterler Drummond (1981) ve Jopek (1993) tarafından da ortaya koyulmuştur.

İlk olarak Southworth ve Hawkins (1963) tarafından geliştirilen ve iki farklı Kepler yörüngesinin benzerliğini ortaya koyabilmek için tanımlanan *D-kriteri* (D_{SH}) Jopek (1993)'in çalışmasında aşağıdaki biçimde tanımlanmıştır. Buna göre; *q,e,*Ω, ω,*i* yörünge elemanları olarak, O_A ve O_B ise Kepler uzayında tanımlanmış iki farklı yörünge olarak kabul edilirse;

$$O_k = \left\{q, e, \Omega, \omega, i\right\}_k, \qquad k = A, B$$

$$[D_{SH}]^2 = [e_B - e_A]^2 + [q_B - q_A]^2 + \left[2\sin\frac{I_{BA}}{2}\right]^2 + \left[\frac{e_B - e_A}{2}\right]^2 \left[2\sin\frac{\pi_{BA}}{2}\right]^2 \quad (2.5)$$

Buradaki I_{BA} ifadesi yörünge düzlemleri arasındaki açıdır ve aşağıdaki şekilde tanımlanır;

$$\left[2\sin\frac{I_{BA}}{2}\right]^2 = \left[2\sin\frac{i_B - i_A}{2}\right]^2 + \sin i_A \sin i_B \left[2\sin\frac{\Omega_B - \Omega_A}{2}\right]^2 \quad (2.6)$$

π_{BA} ifadesi ise yörüngelerin kesiştiği noktadan ölçülen enberi noktası boylamlarının farkıdır ve aşağıdaki şekilde tanımlanır;

[18] Yöntem isimleri Türkçe'ye çevirilmeden orjinal yazımları ile kullanılmıştır.

$$\pi_{BA} = \omega_B - \omega_A \pm 2 \arcsin \left[\cos \frac{i_B - i_A}{2} . \sin \frac{\Omega_B - \Omega_A}{2} . \sec \frac{I_{BA}}{2} \right] \tag{2.7}$$

$|\Omega_B - \Omega_A| > 180^\circ$ olması durumunda arcsin ifadesi negatif olacaktır.

Diğer bir yörünge benzerlik kriteri olarak ise aşağıda verilen hareket denklemleri kullanılmaktadır (Kozai 1962; Lidov 1962);

$$\begin{aligned} C_0 &= \frac{1}{a} \equiv sabit \\ C_1 &= (1 - e^2) \cos^2 i \equiv sabit \\ C_2 &= e^2 (0.4 - \sin^2 i \sin^2 \omega) \equiv sabit \end{aligned} \tag{2.8}$$

Her bir asteroit için C_0, C_1, C_2 parametreleri, Tisserand parametresi ile benzer şekilde uzun zaman sürecinde korunan ve sabit kabul edilen parametrelerdir. Böylece bu parametreler YYA ikililerini tespit edebilmek için kullanılabilirler (Beniyama vd. 2023; Ohtsuka vd. 2006; Ohtsuka vd. 2007).

2.1.4. YYA Ailelerinin Araştırılması

YYA ailelerinin tespit edilmesine yönelik *D-kriteri* kullanılarak yapılan ilk çalışmalar Drummond (1991) ve Drummond (2000) tarafından yapılmıştır. 708 YYA ile yapılan çalışmada 155 asteroit (%22) arasında dinamik bir ilişki tespit edilmiştir. İlgili tarihte bu asteroitlerin 56 tanesinin (%36) taksonomik türleri biliniyordu ancak farklı taksonomik türlere ait asteroitlerin aynı ilişkili gruplarda yer aldığı görülüyordu. Ana kuşak asteroit aile üyelerinin renkleri ve taksonomik türleri arasında çok yüksek oranda bir korelasyon bulunduğu bilinmektedir (Nesvorný vd. 2005; Cellino vd. 2002). Bu yüzden Drummond'ın çalışmasında tespit edilen ilişkili YYA gruplarının ortak bir kütleden geldiği yani genetik ilişkili bir aile oldukları tartışmalıdır. Diğer bir taraftan dinamik olarak ilişkisi tespit edilen bu asteroitlerin homojen olmayan ortak bir kütleden koptuğu düşünülebilir. Ancak, YYA'ların ana kuşak içerisindeki çarpışmalar sonucunda oluştuğu düşünüldüğünde ikinci önerinin doğru olamayacağı açıktır. Bu durumda elde edilen dinamik ilişki rastlantısaldır (Fu vd. 2005). Fu vd. (2005)'e göre YYA ailelerinin oluşması aşağıdaki durumlara bağlıdır;

- Kendiliğinden parçalanma (YORP etkisi sonucunda dönme hızı artışı, iç termal stres vb.)

- Büyük gezegenler ile yakın geçiş sırasında oluşacak kuvvetli gel-git etkileri (tidal disruption) sonucunda parçalanma
- Bir YYA ile ana kuşak asteroidinin çarpışması
- YYA bölgesindeki çarpışmalar
- Rezonans bölgesi civarında oluşmuş ana kuşak ailerinin dinamik yollarla YYA bölgesine taşınması

Schunová vd. (2012)'nin çalışmasında Fu vd. (2005) tarafından yukarıda belirtilen YYA aileleri oluşum mekanizmaları arasında bir olasılık atamasının yani en muhtemel mekanizmayı belirlemenin neredeyse mümkün olmadığını belirtilmiştir. İlk mekanizmayı ele alırsak, iç Güneş sistemi içerisine giren kuyruklu yıldızların %11'i Güneş'e yaklaşmaları (1.0 AB $< q \leq$ 1,5 AB) sonrasında termal stresin artması ile birlikte kendiliğinden parçalanma etkisine girerler (Masi ve Foglia 2009). Ancak YYA'lar uzun yıllar iç Güneş sistemi içerisinde yer alırlar ve birçok kez yörüngelerini tamamlarlar. Bu sebeple, bu mekanizma sonucunda YYA'ların kuyruklu yıldız benzeri parçalanması ve aile oluşabilmesi muhtemel değildir. Diğer taraftan, termal *YORP* (Yarkovsky–O'Keefe–Radzievskii–Paddack) etkisi asteroidin dönme hızını artırabilir ve üzerindeki maddenin ana kütleden kaçma hızından daha yüksek hızlara ulaşmasına ve asteroidin dağılmasına sebep olabilir (Walsh ve Richardson 2006; Pravec vd. 2010; Jacobson ve Scheeres 2011). Bu mekanizma sonucunda oluşacak olan YYA ailesi üyelerinin dönme hızları, kütle oranları ve kutup yönelimleri benzer olacağından ayırt edici fiziksel özelliklere sahip olurlar. Kuvvetli gel-git etkisi (tidal disruption) ise tıpkı Shomaker-Levy 9 kuyruklu yıldızı ile ilişkili asteroit ailesinin oluşumunda olduğu üzere (Sekanina vd. 1994), YYA'ların gezegenlere yakın geçişi sonrasında gerçekleşir (Richardson vd. 1998; Walsh ve Richardson 2006; Walsh ve Richardson 2008). Ancak bu tip bir aile oluşumunun gerçekte ne kadar çok olabileceği ile ilişkili bir tahmin bulunmamaktadır. YYA bölgesindeki çarpışmalar sonucu oluşabilecek aileler ise nispeten düşük ihtimal olarak öngörülebilir. Bunun en önemli sebebi ise YYA bölgesindeki asteroit yoğunluğunun ana kuşak içerisindeki asteroit yoğunluğuna kıyasla çok düşük olmasıdır (Bottke vd. 1996). En muhtemel YYA ailesi oluşum mekanizması ise YYA ile daha küçük bir ana kuşak asteroidinin çarpışmasıdır (Bottke vd. 1996). Birçok YYA'nın yörünge hareketleri sırasındaki enöte uzaklıkları ana kuşak içerisinde ya da ötesindedir. Bu bölgelerdeki ana kuşak asteroitlerinin hızı YYA'lara göre daha hızlı olacağından, aynı bölgedeki iki ana kuşak asteroidinin çarpışmasına göre daha yüksek hızda çarpışmaya maruz kalacaktır. Bunun sonucunda YYA yıkıcı bir etkiyle daha küçük parçalara ayrılarak aile oluşturabilir (Schunová vd. 2012). Sonuç olarak, YYA ailelerinin araştırılması ana kuşak asteroitlerinden farklı olarak asteroit dağılma/parçalanma mekanizmalarının fiziksel süreçleri hakkında önemli bilgiler sunmaktadır.

2.1.5. YYA'ların Kaynak Bölgeleri

YYA'lara kaynaklık eden bölgeler uzun yıllar tartışma konusu olmuştur. Güneş sistemi içerisindeki taşınma (migration) mekanizmasının tam olarak bilinmemesi nedeniyle 70'li yıllarda ilk yapılan çalışmalar sonucunda YYA'ların sönmüş kuyruklu yıldız kalıntıları oldukları öngörülmüştür (Wetherill 1976). Rezonans bölgelerinin ana kuşak asteroitlerinin yörüngelerini etkilemeleri sonucunda gezegen yörüngelerine yaklaşacağı fikri ise ilk olarak J.G. Williams tarafından ortaya atılmıştır (Wetherill 1979; Wisdom 1983). Ancak YYA'ların kaynak bölgeleri ile ilgili yapılan bu ilk çalışmalar rezonans bölgelerinin tam olarak anlaşılamaması ve sınırlı bilgisayar hesaplama gücü nedeniyle oldukça yetersiz kalmıştır. Sınırlı bilgisayar hesaplama gücü, asteroitlerin doğrudan yörünge integrasyonlarına olanak verememiş ve YYA'ların evrimsel yollarını belirlemek için kullanılamamıştır. Bu sebeple daha sonra araştırmacılar, YYA'ların yalnızca ana kuşak bölgesindeki çarpışmalar sonucu oluştuğunu öngörmüşlerdir (Michel vd. 2005). 90'lı yıllara gelindiğinde ise hızlı hesaplama araçlarının geliştirilmesi milyonlarca yıllık, uzun süreli, doğrudan yörünge simülasyonlarının yapılmasına olanak sağlamıştır. Bulirsch-Stoer sayısal integrasyon şemasını[19] kullanarak ilk çığır açıcı sonuca imza atan Farinella vd. (1994), yörünge yarı-büyük eksen uzunluğu $a < 2.5$ AB olan YYA'ların birkaç milyon yıl içerisinde Güneş'e kolayca düşebileceğini keşfetmiştir. Böylece, $a < 2.5$ AB'de yer alan YYA'ların tipik dinamik ömürlerini (typical dynamical lifetime) yani belirtilen bölgedeki ortalama kalış sürelerini de hesaplamışlardır.

Donanımsal gelişmelerin yanı sıra yazılımsal gelişmelerde de önemli adımlar atılmıştır. Yörünge simülasyonlarının yüksek doğrulukla yapılmasına olanak sağlayan ve Wisdom ve Holman (1991) tarafından geliştirilen nümerik simplektik algoritma[20] (numerical symplectic algorithm) daha sonra Levison ve Duncan (1994) tarafından daha da genişletilmiş ve çok daha fazla sayıda nesnenin aynı anda integrasyonunun yapılmasının ve bu sayede YYA yörünge dinamiklerinin istatistiksel olarak araştırılmasının önü açılmıştır. Daha sonraki çalışmalar, YYA'ların kökeni, dinamik evrimi ve yörünge dağılımları hakkındaki mevcut anlayışımızı oluşturmaya büyük katkıda bulunmuştur.

Hem teorik hem de nümerik yapılan birçok araştırma sonucuna göre rezonans bölgelerinden etkilenen asteroitlerin yörünge basıklık değerleri artar ve Mars yörüngesini kesen cisimler (Mars-crossers) hatta Yer yörüngesini kesen cisimler (Earth-crossers) ya da genel olarak söylemek gerekirse gezegenlerin yörüngelerini kesen

[19] Bulirsch-Stoer integraston şeması özellikle yakın geçişler sırasında hassas sonuç üreten yüksek dereceli bir nümerik integrasyon şemasıdır.

[20] Simplektik algoritma, sistemin toplam enerjisini doğru bir şekilde korumaya çalışır ve aynı zamanda yörüngenin uzun süreli kararlılığını korumasını diğer bir anlamda ise kesme/yuvarlama ve nümerik sebepli hatalardan kaynaklanan kararsızlıktan korumasını sağlar.

cisimler (planet crossers) olurlar (örn. Bottke vd. 2002; Michel vd. 2005). Migliorini vd. (1997) ise YYA bölgesinde yer almayan Mars yörüngesini kesen cisimlerin ν_6 ve 3:1 bölgelerinden buraya taşınma ihtimalinin bu cisimlerin sayısı ve yörünge dağılımı göz önüne alındığında tutarsız olacağını vurgulamıştır. Morbidelli ve Nesvorný (1999) çalışmalarında Mars yörüngesini kesen cisimlerin kaynağının Jüpiter veya Mars ile zayıf ortalama hareket rezonansında olan asteroitler ya da Jüpiter ve Satürn ile 3-cisim ortalama hareket rezonansında bulunan asteroitler olabileceğini yani bu rezonans bölgelerinin de asteroitlerin yörünge basıklıklarını yavaşça artırarak Mars yörüngesini kesmelerine sebep olabileceğini vurgulamıştır. Migliorini vd. (1998) ve Michel vd. (2000) çalışmalarında ise yalnızca Mars yörüngesini kesen cisimlerin birkaç on milyon yıl içerisinde YYA olabileceğini vurgulamışlardır. Böylece Mars yörüngesini kesen cisimlerin bulunduğu bölge (YYA bölgesi ile ana kuşak arasında kalan bölge olarak düşünülebilir) ν_6 ve ortalama hareket rezonans bölgelerinden (özellikle 3:1 rezonans bölgesinden) sonra en önemli kaynak bölgelerinden biri olarak düşünülebilir (Bottke vd. 2002).

YYA popülasyonu içerisindeki kuyruklu yıldız kökenli cisimler ise çoğunlukla Neptün civarı ve ötesindeki birkaç bölgeden beslenmektedir. Bunlar; Kuiper kuşağı (Kuiper belt) (örn. Levison ve Duncan 1994), Kuiper kuşağı ile ilişkili saçılmış kuyruklu yıldız diski (scattered comet disc associated with Kuiper Belt) (Duncan ve Levison 1997) ve Oort bulutudur (Weissman 1996). Kuiper kuşağı ile ilgili belirtilen ilk iki bölgedeki cisimler çoğunlukla beraber anılır ve bu bölgedeki cisimlere Neptün-ötesi cisimler (trans-Neptunian objects) denilmektedir. Bu bölgelerin yanı sıra bazı kuyruklu yıldız özelliği gösteren cisimlerin ise Truvalı[21] (ya da Trojan) popülasyonundan geldiği düşünülmektedir (Levison vd. 1997).

Farklı kuyruklu yıldız popülasyonlarını sınıflandırabilmek için kullanılan önemli bir dinamik parametre ise Tisserand parametresidir (örn. Carusi vd. 1987). Tisserand parametresi, korunumlu 3-cisim (restricted 3-body) hareketi özelinde düşünüldüğünde Güneş etrafında dolanan bir asteroidin büyük bir gezegen ile yakın geçişi sırasında Jacobi integralinin korunması sonucunda (toplam mekanik enerjinin korunumu) kısmi enerji (pseudo-energy) olarak korunan bir parametredir. Jüpiter ile ilişkili Tisserand parametresi aşağıdaki şekilde tanımlanır (Kresak 1979);

[21]Truvalılar, ana kuşak asteroitlerinden farklı olarak büyük bir gök cismine bağımlı hareket eden cisimlerdir. Her büyük cismin (gezegen, uydular vb.) Truvalıları olabilir ancak Güneş sistemi içerisinde en büyük Truvalı popülasyonu Jüpiter'e bağımlı hareket eden cisimlerdir ve bu sebeple Truvalı adı genel olarak Jüpiter Truvalılarını tanımlamaktadır. Bu cisimler L4 ve L5 Lagrange noktalarında, Jüpiter'in 60° arkasında (L4) ve önünde (L5) 1:1 ortalama hareket rezonansında bulunurlar. Gözlenebilirlikleri oldukça zor olduğundan, günümüzde, L4 noktasında bulunan yalnızca iki tane Yer Truvalısı keşfedilmiştir ($2010TK_7$ ve $2020XL_5$).

$$T_j = \frac{a_j}{a} + 2\left[(1-e^2)\frac{a}{a_j}\right]^{1/2} cos(i) \tag{2.9}$$

Burada a_j Jüpiter'in yarı-büyük eksen uzunluğu, a, e ve i ise asteroidin yörünge elemanlarıdır. Tisserand parametresi, asteroitler için $T_j > 3$, kuyruklu yıldızlar için $T_j < 3$ ve Jüpiter yörüngesini kesen kuyruklu yıldızlar için ise $2 < T_j < 3$ olarak kabul edilir. Jüpiter yörüngesini kesen cisimlere aynı zamanda Jüpiter ailesi kuyruklu yıldızları[22] denilmektedir. Daha özel bir sınıflandırma ise Bottke vd. (2002) tarafından yapılmıştır. Buna göre, yörünge eğiklikleri düşük ve $T_j > 2$ olan cisimler için ekliptik kuyruklu yıldızlar (ecliptic comets), yörünge eğiklikleri yüksek olan ve $T_j < 2$ olan cisimler için ise neredeyse izotropik kuyruklu yıldızlar[23] demişlerdir. Ancak bu dinamik tanımlara istisna bazı durumlar elbette vardır. Örneğin, Yer'e yakın 2P/Encke aktif kuyruklu yıldızının T_j = 3.025 (Levison ve Duncan 1994) yine Apollo türü Yer'e yakın aktif bir asteroit olan (3200) Phaethon'un ise T_j = 4.510'dur (Gustafson 1989). Aktif tüm kuyruklu yıldızlar neredeyse bu dinamik tanıma uyar ancak uymayan bu cisimler neredeyse sönmüş kuyruklu yıldızlar, aktif asteoritler ya da her iki durumun da görülebildiği cisimler olabilir. Aynı şekilde Jüpiter ile rezonans bölgelerinde bulunan bir asteroidin yörünge basıklık değeri ve yörünge eğikliği $T_j < 3$ hatta $T_j < 2$ değerlerine ulaşacak şekilde artabilir (Farinella vd. 1994; Gladman vd. 1997). Bu durumda $T_j < 3$ yörüngelerde dinamik olarak kuyruklu yıldız kökenli olabilecek bir cisim gerçekte asteroit olacaktır. Yine de Tisserand parametresi günümüzde dinamik olarak küçük gezegenleri sınıflayabildiğimiz (asteroit ya da kuyruklu yıldız olarak) oldukça önemli bir parametredir.

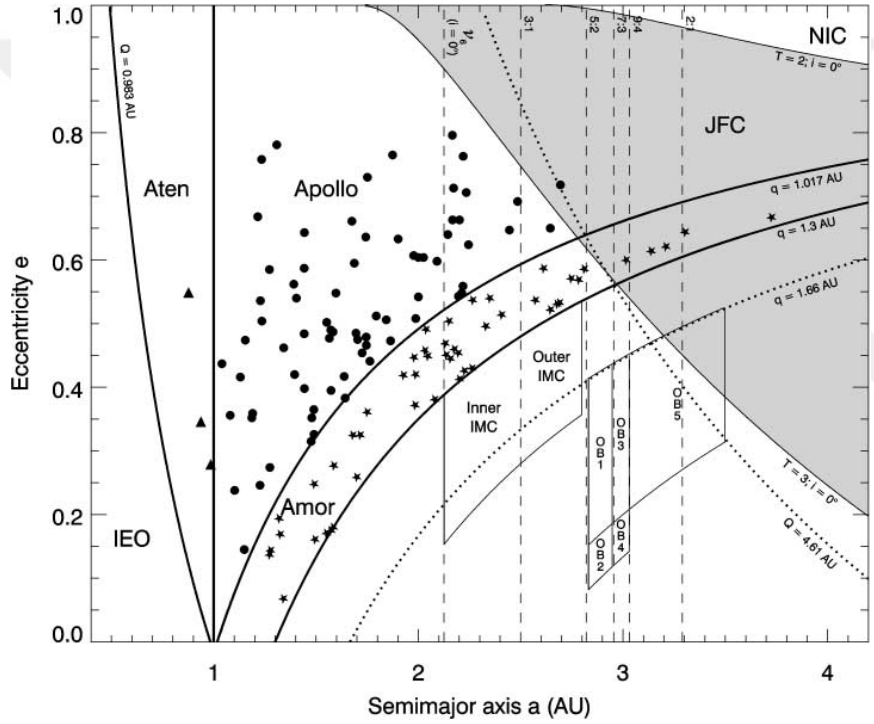
Bottke vd. (2002) yaptıkları kapsamlı çalışmada YYA'ların kaynak bölgelerini tespit edebilmek için Güneş sistemi içerisinde belirlenen birçok bölgeye (bkz. Şekil 2.6) test cisimleri yerleştirmiş (gerçekte var olmayan ama o bölgede olsaydı diye düşünülen) ve bu test cisimlerinin uzun zaman aralığında ileri yönlü yörünge integrasyonlarını yapmıştır. Belirlenen genel YYA kaynak bölgeleri ana kuşak bölgesi, Hungaria asteroitleri[24], Truvalılar, Neptün-ötesi cisimler ve Oort bulutudur. Daha önce bahsedildiği üzere en önemli pertürbasyon etkileri gezegenlerle yakın geçişler sırasında ve rezonans bölgelerinde görülmektedir. Bu durum göz önüne alındığında belirlenen genel kaynak bölgeleri içerisinde pertürbasyon etkilerinin etkin gözlendiği özelleşmiş bölgeler de ayrıca belirlenmiştir. Bu bölgeler, 3:1 ortalama hareket rezonans bölgesi, ν_6 seküler rezonans bölgesi, Mars yörüngesini kesen cisimlerin bulunduğu bölge, dış ana

[22] Jupiter Family Comets (JFCs)

[23] Nearly Isotropic Comets (NICs)

[24] Hungaria asteroitleri, Mars ve ana kuşak arasında yer alan (1.78 AB - 2.06 AB), görece yüksek yörünge eğikliğine (16°-30°) ve düşük yörünge basıklığına sahip ($e < 0.18$) kararlı denilebilecek yörüngelerde bulunan dinamik bir gruptur.

kuşak bölgesi ($a \geq 2.8$ AB), ekliptik kuyruklu yıldız bölgesi ve neredeyse izotropik kuyruklu yıldızların bulunduğu bölgedir. N-cisim integrasyonu için SWIFT kodunu (Levison ve Duncan 1994), şema olarak da RMVS3 (Regularized Mixed Variable Symplectic 3) (Wisdom ve Holman 1991) simplektik integrasyon şemasını kullanmışlardır. İleri yönlü integrasyon, asteroit bölgeleri için en az 100 milyon yıllık yapılmıştır. Sonlanma şartı olarak ise test cisminin Güneş'e düşmesi, Güneş'ten 10 AB uzaklaşması (genellikle Jüpiter ile yakın geçişlerin sonucunda) ve bir gezegen ile çarpışması durumlarında sonlandırılmıştır. Kuyruklu yıldız bölgeleri için ise integrasyon 4 milyar yıllık yapılmıştır ve asteroitler için benzer sonlanma şartlarının yanı sıra Güneş'ten uzaklaşma sınırı ise 1000 AB olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.6. *Spacewatch* tarafından keşfedilen $H < 22^m$ olan 138 YYA'nın *a, e* dağılımı (Bottke vd. 2002). Amor (yıldız), Apollo (yuvarlak) ve Aten (üçgen) YYA grupları sınırlarıyla (Q = 0.983 AB, a = 1 AB, q = 1.017 AB, q = 1.3 AB eğrileri) gösterilmiştir. Günümüzde (163693) Atira asteroidinin 2003 yılında keşfedilmesiyle Atira olarak tanımlanan ancak yayının yapıldığı tarihte henüz keşfedilmemiş olan YYA sınıfı, IEO (Inner Earth Orbit) bölgesi olarak belirtilmiştir. JFC bölgesi $i = 0°$ için T_j = 2 ve T_j = 3 eğrileri aralığında tanımlanmıştır. NIC bölgesi de $T_j < 2$ olan kısımda gösterilmiştir. Bazı ortalama hareket rezonans bölgeleri ve $i = 0°$ için ν_6 seküler rezonans bölgesi de x-eksenine dik kesikli çizgiler ile gösterilmiştir. İç IMC (Intermediate Mars-Crossers) ve dış IMC bölgeleri ve OB1-OB5 (Outer Belt) dış ana kuşak bölgeleri de sınırlarıyla birlikte görülmektedir

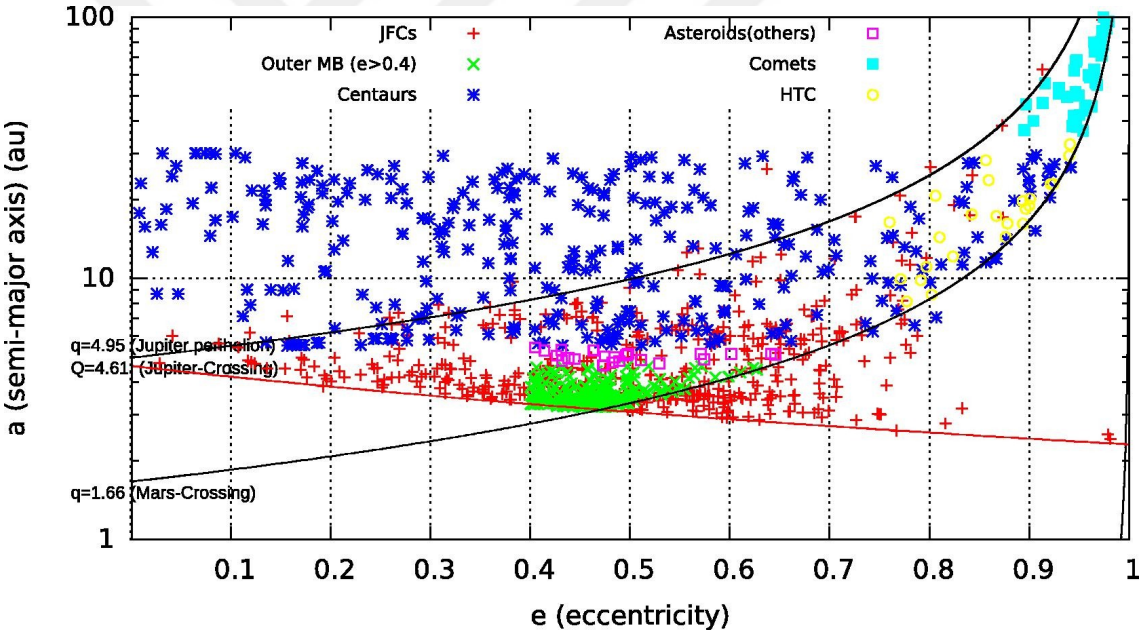
Bottke vd. (2002) tarafından yapılan integrasyonlar sonucunda, 3:1 rezonans bölgesinin, asteroitlerin yörünge basıklık değerlerini artırarak 1 Myıl'dan kısa bir sürede Mars ve hatta Yer yörüngesini kesebilecek değerlere ulaştırdığını göstermiştir. ν_6 seküler rezonans bölgesindeki asteroitlerin ise $\sim$1 Myıl'da YYA bölgesine taşındığı ve aynı zamanda bu bölgenin 3:1 bölgesine (%38) oranla YYA bölgesine yaklaşık iki kat daha fazla (%70) oranda katkıda bulunduğunu belirtmişlerdir. Mars yörüngesini kesen asteroit bölgesi ve dış ana kuşak bölgesi için 100 Myıl yapılan integrasyonlar sonucunda sırasıyla asteroitlerin %49'u ve %18'i YYA bölgesine taşınmıştır. Ekliptik kuyruklu yıldız bölgesi için 4 Milyar yıl yapılan integrasyonlar sonucunda %30'unun $q < 2.5$ AB değerlerine ulaştığı görülmüştür.

Bottke vd. (2002) tarafından gerçekleştirilen çalışmanın sonucu olarak Yer'e Yakın Asteroitler'in yaklaşık %61'i ana kuşak bölgesinin iç kısmından ($a < 2.5$ AB), %24'ü ana kuşağın orta bölgesinden ($2.5 < a < 2.8$ AB), %8'i ana kuşağın dış kısmından ($a > 2.8$ AB) ve %6'lık kısmı ise Jüpiter ailesi kuyruklu yıldızları bölgesinden gelmektedir.

Diğer bir çalışma ise Kaplan vd. (2016) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bottke vd. (2002)'nin çalışmasından farklı olarak Kaplan vd. (2016), NASA JPL/Horizons efemeris servisini kullanarak çalışmanın yapıldığı tarihteki gerçek cisimleri girdi olarak kullanmıştır. T_j değeri 2 ile 3 aralığında olan asteroitlerin kullanıldığı çalışmada Centaur[25] ve JFC bölgesinin YYA bölgesine olan katkısı incelenmiştir. $Q > 4.61$ AB, $4.95 \text{ AB} > q > 1.3$ AB ve $a < 100$ AB olarak belirlenen bölge içerisindeki tüm asteroitler ile birlikte bu bölge dışında kalan tüm Centaurlar ve JFC'ler ileri yönlü integrasyon için kullanılmıştır. Aynı zamanda kıyaslama adına yine ilgili tarihteki YYA bölgesinde bulunan T_j değeri 2 ile 3 aralığındaki tüm YYA'lar geri yönlü integrasyon için kullanılmıştır ve belirlenen bölgelere ulaşma durumları incelenmiştir. İleri yönlü integrasyon için 486 JFC, 38 ekliptik kuyruklu yıldız, 24 Halley-türü kuyruklu yıldız (HTC, Halley-type comet), 25 asteroit (dinamik olarak sınıflandırılamamış ancak o bölgede yer alan), 212 dış ana kuşak bölgesi asteroidi ($Q > 4.61$ AB, $4.95 \text{ AB} > q > 1.3$ AB ve $a < 100$ AB) ve 323 Centaur kullanılmıştır (bkz. Şekil 2.7). Toplam 1108 nesnenin 867'si belirlenen bölge içerisinde yer alırken, dışında kalan 185 Centaur ve 56 JFC de tüm Centaur ve JFC'ler ile çalışma yapılabilmesi adına eklenmiştir. Geri yönlü integrasyon için ise çalışmanın yapıldığı tarihe göre (1 Haziran 2014 - 00:00:00 UT) YYA bölgesinde bulunan ve T_j değeri 2 ile 3 aralığında bulunan 385 Apollo ve 280 Amor asteroidi kullanılmıştır (bkz. Şekil 2.8). İstatistiği güçlendirmek adına her bir YYA için kartezyen konumlarına yarı-büyük eksen uzunluklarının 1-σ belirsizlik değerinin yarısının eklenmesi/çıkarılması ile altı klon yörünge elde edilmiştir. Böylece

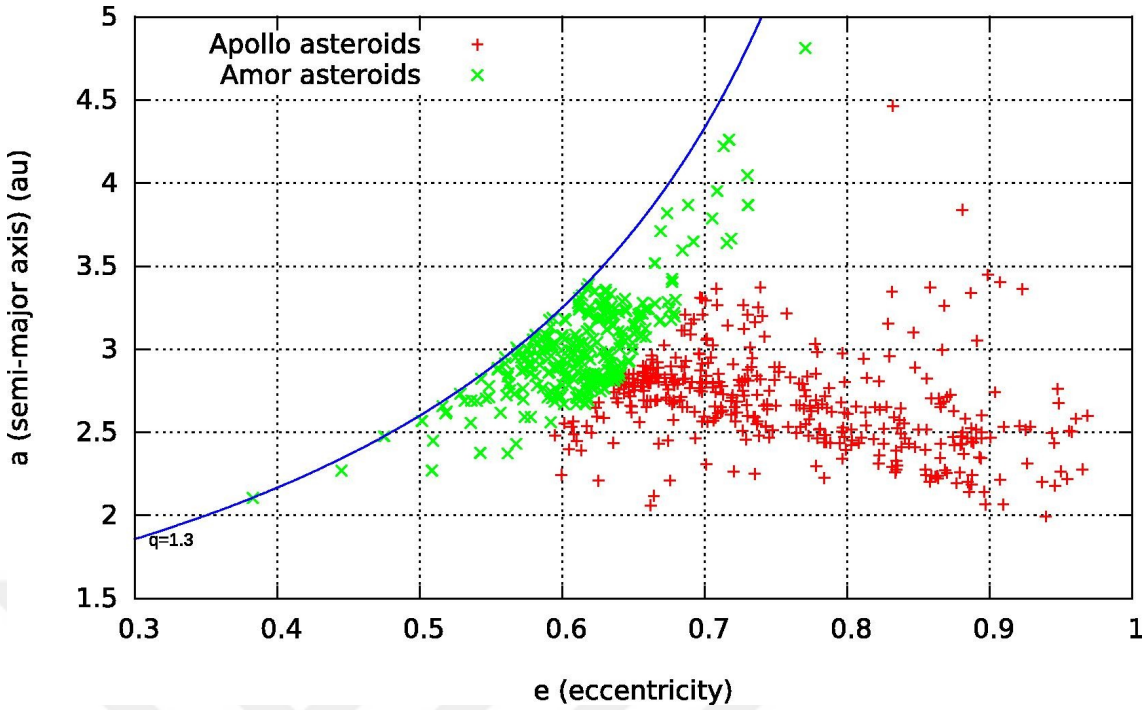
[25]Centaurlar: Jüpiter ve Neptün yörüngeleri arasında bulunan, hem asteroit hem de kuyrukluyıldız özellikleri gösteren Güneş sistemi nesneleridir.

geri yönlü integrasyonu yapılan nesnelerin toplam sayısı da 4655 olmuştur. Hem ileri hem de geri yönlü integrasyonlar için dört sonlanma şartı belirlenmiştir: (*i*) Asteroidin Güneş ya da bir gezegen ile çarpışması, (*ii*) asteroidin yarı-büyük eksen uzunluğunun 100 AB'nin dışına çıkması, (*iii*) asteroidin yörüngesinin hiperbolik olması ($e > 1$), (*iv*) asteroidin Güneş'e çok yaklaşması ($q < 0{,}008$ AB). Ayrıca, ileri yönlü integrasyonlarda asteroit Apollo türü olduğunda ($q < 1.017$ AB) integrasyon sonlandırılmıştır. Geri yönlü integrasyonlarda asteroidin Güneş ya da gezegenler ile çarpışması bölgenin kaotikliğinden ve uzun süreli yörünge integrasyonunda hata birikmelerinden dolayı (ne kadar gerçekçi olmasa da) karşılaşılabilir doğal bir sonuçtur. Böyle bir durumda o veri göz ardı edilerek istatistik dışında tutulmuştur. İntegrasyon sırasında çıktı olarak ise her bir asteroidin yörünge elemanları her 10 yıl için kaydedilmiştir. Asteroitlerin gezegenler ile yakın geçiş durumları da ayrıca incelenmiştir. Yakın geçiş kriteri olarak her bir gezegenin Hill küresi[26] hesaplanmış ve 3 Hill küresi uzaklıktan daha yakın geçişler kayıt altına alınmıştır. Böylece yörüngede ani bir değişiklik yaşanmış ise bu yakın geçişin ne denli etkili olduğunun analizi yapılabilmiştir.



Şekil 2.7. İleri yönlü integrasyon için kullanılan altı farklı gruba ait girdi asteroitleri (Kaplan vd. 2016)

[26]İlk olarak John W. Hill (1812–1879) tarafından hesaplanan Hill küresi, bir cismin daha büyük bir cismin çekim etkisi altındayken kendi çekim etkisinin daha baskın olduğu bölgedir. Kısaca, Hill küresi iki cisim probleminde tanımlanan L1 ve L2 Lagrange bölgeleri arasında kalan alan olarak tanımlanır.



Şekil 2.8. Geri yönlü integrasyon için kullanılan Apollo ve Amor grubuna ait girdi asteroitleri (Kaplan vd. 2016)

Kaplan vd. (2016) yaptıkları çalışma sonucunda tutarlı sonuçlar elde etmişlerdir. İleri yönlü integrasyon sonucunda, belirlenen bölgedeki T_j değeri 2 ile 3 aralığında bulunan tüm cisimlerin %31.9'u, JFC bölgesindeki tüm cisimlerin ise %35.1'i YYA olmuştur. Tüm Centaruların ise %22'si YYA olmuştur. Diğer taraftan geri yönlü integrasyon sonucunda ise YYA'ların %66.7'si JFC bölgesine ulaşmıştır. Sayısal olarak bakıldığında ise ileri yönlü integrasyon sonucunda 304 JFC sınıfındaki cisim YYA bölgesine ulaşırken, geri yönlü integrasyon sonucunda ise 254 YYA, JFC bölgesine gelmiştir. JFC bölgesine ve YYA bölgesine gelişler için ortalama süreler ise ileri yönlü integrasyon için 0.55 milyon yıl, geri yönlü integrasyon için ise 0.8 milyon yıldır. Ayrıca, tüm JFC bölgesindeki cisimlerin %88'i 1 milyon yıldan az bir sürede YYA bölgesine ulaşmıştır. Centaurlar için yapılan integrasyonlarda ise Jüpiter etkisi açıkça görülmüştür. Bu sebeple Centaurlar iki farklı gruba ayrılmışlardır: Centaur-I ($q < 4.61$ AB) ve Centaur-II ($q > 4.61$ AB). İleri yönlü integrasyon sonrasında Centaur-I grubu cisimlerin %38'i YYA bölgesine ulaşırken, Centaur-II grubu cisimlerin yalnızca %10'u YYA bölgesine ulaşabilmiştir. Ulaşma zamanları da birbirinden oldukça farklıdır. Centaur-I grubu yalnızca 0.4296 milyon yıl içerisinde YYA olurken, Centaur-II grubu 4.0227 milyon yıl sonra YYA bölgesine taşınmıştır.

Kendi yüksek lisans çalışmam olan Erece (2016) tez çalışmasında ise tüm Apollo asteroitlerinin kaynak bölgeleri araştırılmıştır. Kaplan vd. (2016) tarafından kullanılan

integrasyon metodu ve kriterler kullanılarak zamanda geriye doğru 10 milyon yıllık integrasyon yapılmıştır. Klon yörüngelerle birlikte toplam 38175 yörünge simüle edilmiştir. Jüpiter ile ilişkili Tisserand parametresine göre inceleyebilmek için tüm cisimler 0.1 aralıklarla gruplandırılmıştır. İntegrasyon sonucunda cisimlerin %63.69'unun integrasyon süresinin üst limiti olan 10 milyon yılı tamamladığı, %18.44'ünün yarı-büyük eksen değeri 50 AB limitinin dışına çıktığı için durdurulduğu, %12.27'sinin ise hiperbolik yörüngelere dönüştüğü için durdurulduğu görülmüştür. İntegrasyon süresini tamamlayan Apollo grubu asteroitlerin ise %79'u YYA olarak kalmaya devam etmiştir. Başlangıçta Apollo asteroit grubunda olan bu asteroitlerin integrasyon sonucunda %60.17'si Apollo, %11.52'si Amor, %11.09'u Aten ve %17.85'i ise Atira grubu asteroit yörüngelerine evrilmiştir. Ortaya çıkan bu sonuca göre YYA'ların kendi aralarında da geçiş yaptığı açıkça görülmüştür.

T_j'ye göre oluşturulan YYA grupları ise bu parametrenin dinamik özelliklerini ortaya koymuştur. Zamanda geriye doğru gidildiğinde ortalama T_j büyük çoğunlukla T_j < 3 değerlerine inmiştir. Bu durum, Erece (2016)'ya göre T_j > 3 olan Apollo grubu asteroitlerin geçmişte Jüpiter ile daha büyük etkileşime girdiklerini ve bu sayede iç bölgelere doğru hareket ettiklerini düşündürmektedir. Başlangıçta T_j < 3.3 olanlar için ise, parametre geçmişe götürüldüğünde nispeten çok daha kısa sürede 3'ün üstüne çıkmıştır.

2.1.6. YYA'ların Yörünge Özellikleri Üzerindeki Yarkovsky Etkisi

İlk kez Ivan Osipovich Yarkovsky tarafından 1901 yılında ortaya koyulan (Yarkovsky 1901) ve Öpik (1951) tarafından tekrar vurgulanarak önemli bir çalışma konusu haline gelen Yarkovsky etkisi asteroitlerin uzun zaman aralığı içerisinde yörünge yarı büyük eksen uzunluklarını etkileyen ve sürüklenmeye (da/dt) neden olan kütle çekimsel olmayan bir etkidir. Bu etki, asteroit yüzeyine gelen Güneş ışınlarının yüzeyi ısıtması sonrasında ısınan yüzeyin eşyönsüz (anizotropik) tekrar ışıma yapması (termal IR foton emisyonu) sonucunda oluşmaktadır. Yarkovsky etkisinin büyüklüğü, asterodin Güneş'e olan uzaklığına ve fiziksel özelliklerine (albedo, büyüklük, yüzey yoğunluğu, şekil vb.) bağlıdır (örn. Mouret ve Mignard 2011; Dziadura vd. 2022).

Yarkovsky etkisinin Güneş sisteminin dinamiksel evriminin anlaşılabilmesi için dikkate alınması gereken kütle çekimsel olmayan önemli bir etki olduğu birçok çalışmada vurgulanmıştır. Yarkovsky etkisi, Yer'e ulaşan meteoroitlerin dinamik özelliklerinin (Bottke vd. 2006), YYA'ların taşınım mekanizmalarının (Vokrouhlický vd. 2000), asteroitlerin aileleri içerisindeki dağılımlarının (Nesvorný ve Bottke 2004) açıklanmasında oldukça önemli bir rol oynamaktadır. Aynı zamanda PTA'ların çarpışma ihtimallerinin belirlenmesinde de kritik bir rol oynamaktadır (Farnocchia vd. 2015).

Örneğin, (99942) Apophis asteoridinin Aralık 2020 tarihinden itibaren elde edilen gözlemleri sonrasında Yarkovsky ivmelenmesi (*A2*) ve yarı büyük eksen uzunluğu değişimi (da/dt) sırasıyla *A2* = -2.899 $\pm$ 0.025 10^{-14} AB/gün^2 ve $da/dt = -199.0 \pm 1.5$ metre/yıl olarak belirlenmiştir (Pérez-Hernández ve Benet 2022). Elde edilen sonuçların ardından yapılan integrasyon çalışmaları sonrasında istatistiksel olarak (99942) Apophis'in çarpma ihtimalinin ortadan kalkması sebebiyle artık izlenmesine gerek kalmamış ve izlenmesi gereken asteroitlerin yer aldığı *NASA Sentry: Earth Impact Monitoring*[27] listesinden çıkarılmıştır.

Yarkovsky etkisi sonucunda oluşan yarı büyük eksen uzunluğundaki değişim (sürüklenme) Denklem (2.10) ile hesaplanabilir (Nugent vd. 2012);

$$\frac{da}{dt} = \left(\frac{1.457}{\sqrt{1-e^2}}\right)\left(\frac{f_y}{10^{-5}}\right)\left(\frac{1\ km}{D}\right)\left(\frac{1000\ kg\ m^{-3}}{\rho}\right) 10^{-3}\ AB\ Myıl^{-1} \tag{2.10}$$

Burada ρ yoğunluk, f_y ise verimlilik parametresidir ve $f_y = 1$ durumunda Güneş'ten gelen ışınımın tamamı yörüngedeki enerjide değişime neden olacaktır. Nugent vd. (2012)'ye göre km boyutlarındaki asteroitler için verimlilik parametresi $f_y \sim 10^{-5}$'tir ve tipik Yarkovsky sürüklenmesi (da/dt) = 10^{-3} *AB Myıl*$^{-1}$'dır.

2.2. YYA'ların Fiziksel Özellikleri

Güneş sistemi içindeki diğer tüm gök cisimleri gibi, asteroitlerden de Yer'e, Güneş'ten yansıttıkları ışık, yüzey sıcaklıkları nedeniyle yaydıkları termal emisyon veya yaydıkları diğer elektromanyetik bölgelerdeki emisyonları ulaşmaktadır. Teleskoplar ve kullanılan farklı odak düzlemi aletleriyle gelen bu ışıkların yüksek zaman-çözünürlüklü (high time-resolution) gecelik, uzun zaman-çözünürlüklü seyrek (sparse data) veya anlık olarak kaydedilmesi sonrasında analizlerinin yapılmasıyla asteroitlere ilişkin farklı fiziksel özellikler ortaya çıkarılabilmektedir. YYA'lar özelinde ise bazı gözlemsel zorluklar bulunmaktadır. Bunlar, YYA'ların görece küçük olmalarından dolayı daha sönük olmaları, görece öz hareketlerinin (proper motion) yüksek olması nedeniyle takip edilmelerindeki zorluk, Güneş'e yakın olmaları dolayısıyla gecelik gözlenebilirliğinin az olması ya da gözlenebilme zaman aralıklarının oldukça uzun olmasıdır (Hanus vd. 2021).

YYA'ların fiziksel özelliklerinin anlaşılabilmesi, bu cisimlerin ve tabii Güneş sisteminin geçmişi, kuyruklu yıldızlar ve meteorlarla olan ilişkisi, Yer'e çarpma ihtimalleri dolayısıyla yeni çalışma alanlarının oluşturulabilmesi ve yakın uzayda

[27] https://cneos.jpl.nasa.gov/sentry/

bulunmaları sebebiyle Dünyamız'da kullanılabilecek yeni maden kaynakları yaratılabilmesi (uzay madenciliği) açısından oldukça önemlidir (Michel 2014).

YYA'ların fiziksel özelliklerini genel olarak sıralayacak olursak; dönme periyodu (örn. Yer için ∼24 saat), kutup yönelimi (örn. Yer için ∼23.5°), şekli, çapı, yoğunluğu, mutlak parlaklığı, fotometrik eğimi (G), kimyasal (taksonomik) türü, albedosu (yansıtıcılığı), gözenekliliği (porositesi) vb. olarak sıralanabilir. Tüm bu farklı fiziksel özellikler farklı gözlem teknikleriyle elde edilen veriler ve bu verilerin birleştirilmesiyle ortaya çıkarılabilen parametrelerdir. Bu veriler, Yer'den gerçekleştirebildiğimiz optik bölgedeki fotometrik gözlemler, spektroskopik (tayfsal) gözlemler, polarimetrik gözlemler, termal gözlemler, radyo gözlemleri ve yıldız örtülme gözlemleridir.

2.2.1. YYA'ların Fotometrik Özellikleri

İnsan gözünün de bir çift teleskop olduğu düşünüldüğünde astronomideki en eski gözlem tekniği ve aynı zamanda en çok kullanılan gözlem tekniği fotometridir. Aynı zamanda asteroitlerin fiziksel özelliklerinin ortaya koyulması için en yaygın veri türünün bulunduğu gözlemsel çalışma alanıdır (Muinonen vd. 2020). Bir asteroidin tek bir fotometrik görüntüsüyle o asteroidin görüntünün alındığı andaki parlaklığı elde edilebilir. Zamana bağlı sürekli fotometrik görüntü alındığında ise asteroidin şekline ve dönme özelliklerine bağlı olarak ışık eğrisi elde edilebilir. Elde edilen ışık eğrisinin izin verdiği ölçüde (veri sayısı, veri kalitesi, içerdiği periyot sayısı vb. durumlara göre) dönme ve şekil özellikleri ortaya çıkarılabilmektedir (Muinonen vd. 2020).

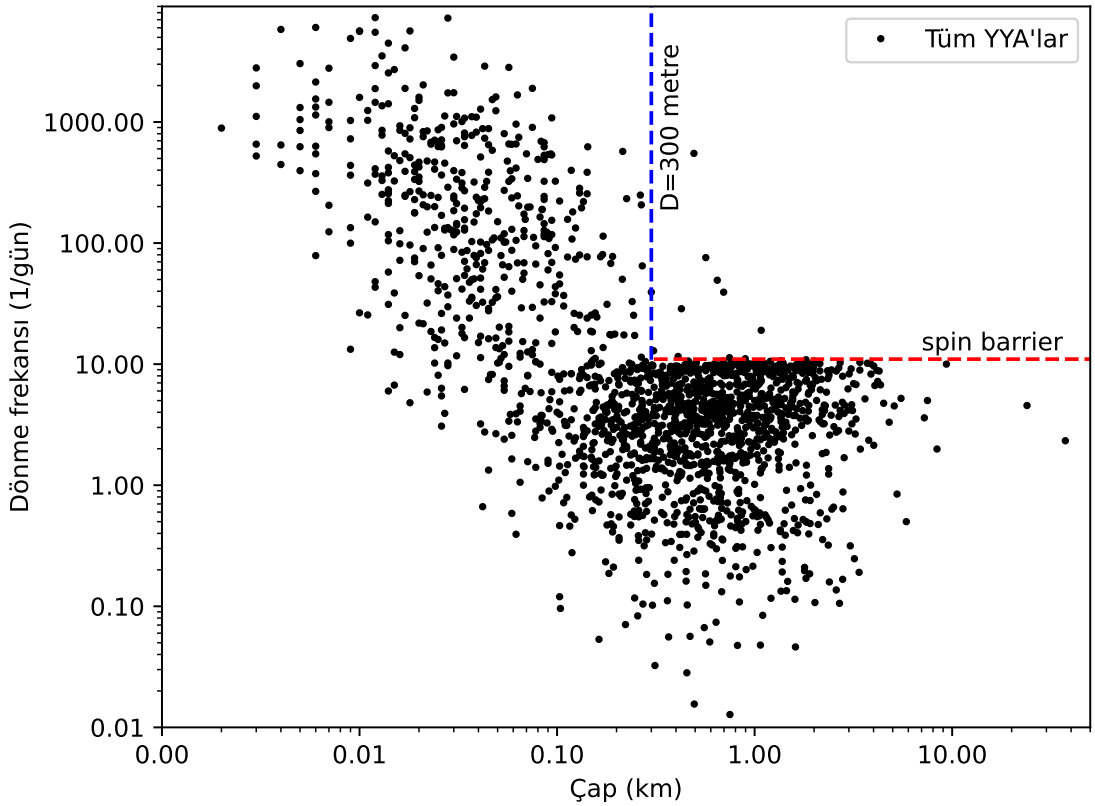
Asteroitlerin dönme periyotları birkaç günden, bazı küçük asteroitler için birkaç saniyeye kadar çok geniş bir aralığa sahiptir (örn. Pravec ve Harris 2000). Asteroitlerin dönme hızlarının yüzey çekim özelliklerine bağlı olması oldukça muhtemeldir. Dönme hızının çok yüksek olması asteroidin dağılmasına sebep olabilir. $D < 10$ km olan ve hızlı dönen cisimlerin yüzey çekimlerinin ya da oluştuğu maddenin birbirine bağlanma kuvvetinin (cohesion) küçük olması dahi, hızlı dönmeleri sonucunda dağılmalarını önlemek için yeterlidir. Bu tür cisimlere *hızlı dönenler (fast rotators)* denilmektedir (Holsapple 2007). Küçük çekim ve maddenin birbirine bağlanma kuvveti, hızlı dönen bu cisimlerin kararlı olmalarını sağlamaya yeter ve dağılmalarını önleyebilir. Analitik hesaplamalara göre bu durum bu tür cisimlerin tamamen yekpare olmalarını gerektirmez. Diğer taraftan yüzeyindeki maddenin bağlanma kuvvetinin olmadığı (cohesionless) saf bir moloz yığını (pure rubble pile) da olamazlar (Holsapple 2007). $D > 300$ m olan tüm cisimlerin dönme periyotları ise 2 saatten daha küçük olamaz (Pravec vd. 2002). İlk kez Harris (1996) tarafından 688 asteroidin dönme periyotlarının incelenmesiyle fark edilen bu durum, düşük yüzey gerilim kuvvetine (tensile strength) ve 2 saatten küçük dönme periyoduna sahip asteroitlerin merkezkaç kuvvetine karşı koyamayacağını ve

dağılacağını öngörmüştür. Daha sonra çok daha fazla örnek asteroit kullanılarak yapılan birçok çalışmada da (örn. Pravec ve Harris 2000; Warner vd. 2009; Waszczak vd. 2015) benzer durumun varlığı gösterilmiştir.

Warner vd. (2009) tarafından geliştirilen, IAU'nun www.minorplanetcenter.net web sitesi içerisinden de ışık eğrisi veri tabanı başlığı altından yönlendirilen ve asteroitlerin fiziksel özelliklerinin (periyot, çap, mutlak parlaklık, eğim parametresi, albedo gibi) tek bir platformda toplanmasını sağlayan LCDB (Asteroid Lightcurve Database) veri tabanında 25 Kasım 2023 itibarıyla 341131[28] Güneş sistemi nesnesinin verisi bulunmaktadır. İlgili tarihte YYA'lar için veri sayısı ise 4349'dur. Şekil 2.9'da LCDB veri tabanından alınmış hem periyodu hem de çapı bilinen ve U belirsizlik faktörü[29] $>$ 2 olan 1837 YYA'nın çap-dönme frekansı grafiği verilmiştir. Yukarıda bahsedilen çalışmalarda da vurgulandığı üzere 2 saate karşılık gelen periyot çizgisi spin barrier olarak kırmızı kesik çizgiyle gösterilmiştir. Şekil 2.9'da da açıkça bu sınırın geçilemediği (bazı istisnalar hariç) görülmektedir. Yine yukarıda bahsedilen ve Pravec vd. (2002) tarafından vurgulanan $D > 300$ m olan nesneleri gösteren sınır da mavi kesik çizgiyle gösterilmiştir. Şekil 2.9'da yasaklı olarak düşünülebilecek bölgede 6 cisim bulunmaktadır. Bu cisimlerin bazı fiziksel özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

[28] https://www.minorplanet.info/php/lcdb.php [son erişim tarihi: 25.11.2023]

[29] U belirsizlik faktörü Warner vd. (2009) tarafından tanımlanan 0-3 arasında birimsiz bir değerdir. $U = 3$ güvenilir veri olduğunu belirtirken $U = 0$ ise sonuçların yüksek oranda hatalı olabileceğini belirtmektedir.



Şekil 2.9. LCDB veri tabanından elde edilen U > 2 olan 1827 YYA'nın çapına karşılık dönme frekanslarının grafiği. Mavi kesik çizgi D = 300 metre çapa karşılık gelirken kırmızı kesikli çizgi (spin barrier) 2 saatlik dönme periyoduna karşılık gelmektedir. Burada sınırlanan bölgedeki cisimlerin dönme hızlarının sınırlandırıldığını, belirli hızın üzerinde ise parçalanacaklarını öngörmektedir

Çizelge 2.1. Şekil 2.9'da aykırı görünen cisimlerin LCDB'den elde edilen bazı fiziksel parametreleri

Numara	Geçici isim	Çap (km)	Periyot (saat)	H	G	Albedo
620070	2011 UA	0.566	0.3163	18.6	0.24	0.2
-	2019 HC	1.08	1.2612	17.2	0.24	0.2
-	2019 MA2	0.493	0.0436	18.9	0.24	0.2
-	2003 QN47	0.697	0.6108	18.95	0.24	0.2
455213	2001 OE84	0.647	0.4865	18.31	0.24	0.2
479325	2013 TV5	0.426	0.8367	19.22	0.24	0.2

2.2.2. Fotometrik Faz Eğrisi, Faz Fonksiyonu ve Faz İntegrali

Çizelge 2.1'de yer alan cisimler tuhaf (unusual) olarak tanımlanmıştır. Ayrıca çizelgede *G* ve albedo değerlerinin her cisim için aynı olduğu görülmektedir. Bu durum aslında yeterli verisi bulunmayan tüm asteroitler için geçerlidir. Parlaklığı bilinen ancak yeterli verisi bulunmayan ve *G* değeri bilinmeyen asteroitlerin mutlak parlaklığı çoğunlukla *G* değerinin 0.15, 0.2 ya da 0.24 olarak kabul edilmesiyle hesaplanır. Mutlak parlaklığı elde edebilmek için öncelikle görünür parlaklık değerini elde etmemiz gerekmektedir. Görünür parlaklığın elde edilmesinin ardından bu parlaklığı Güneş'ten ve Yer'den 1 AB uzaklığa taşımamız gerekmektedir. Elde edilen bu parlaklığa *indirgenmiş parlaklık (reduced magnitude)* denilmektedir.

$$H(\alpha) = V - 5\log(r\Delta) \tag{2.11}$$

Denklem 2.11'de $H(\alpha)$ indirgenmiş parlaklık, V görünür parlaklık, r görünür parlaklığın elde edildiği andaki AB biriminde Güneş'e olan uzaklık, Δ görünür parlaklığın elde edildiği andaki AB biriminde Yer'e olan uzaklık, α ise faz açısıdır (Yer-asteroit-Güneş açısı). Daha önce belirtildiği üzere mutlak parlaklık faz açısının 0° olduğu yani $\alpha = 0^\circ$ durumundaki indirgenmiş parlaklıktır (*H = H(0)*). Farklı faz açılarında elde edilmiş indirgenmiş parlaklıkların faz açılarına karşılık dağılımına *fotometrik faz eğrisi (photometric phase curve)* denilmektedir. Faz eğrisi ise faz fonksiyonu (phase function) ile tanımlanır ki bu fonksiyon elde edilen verilerin ekstrapolasyonu ile mutlak parlaklığı elde etmemizi sağlar.

İlk olarak 1985 yılında IAU 20. Komisyonu tarafından standart olarak kabul edilen, Lumme ve Bowell (1981) tarafından ortaya koyulan fotometrik model kullanılarak faz eğrisinin elde edilebildiği, iki parametreli *H,G* parlaklık sistemi (the two-parameter *H,G* magnitude system) Bowell vd. (1989) tarafından Denklem 2.12'de belirtilen şekilde verilmiştir.

$$H = H(\alpha) + 2.5\log[(1-G)\Phi_1(\alpha) + G\Phi_2(\alpha)] \tag{2.12}$$

H mutlak parlaklık (diğer bir deyişle *H(0)* yani $\alpha = 0^\circ$ faz açısındaki indirgenmiş parlaklık), $H(\alpha)$ indirgenmiş parlaklık, *G* eğim parametresi, Φ_1 ve Φ_2 ise temel fonksiyonlardır (basis functions). Denklem 2.12 aşağıdaki şekilde tekrar yazılabilir,

$$10^{-0.4H(\alpha)} = 10^{-0.4H}[(1-G)\Phi_1(\alpha) + G\Phi_2(\alpha)] \tag{2.13}$$

Denklem 2.13 daha sade hale getirilirse Denklem 2.14 elde edilecektir.

$$10^{-0.4H(\alpha)} = a_1\Phi_1(\alpha) + a_2\Phi_2(\alpha) \tag{2.14}$$

Denklem 2.14 kullanılarak *H* ve *G* aşağıdaki şekilde ifade edilebilir,

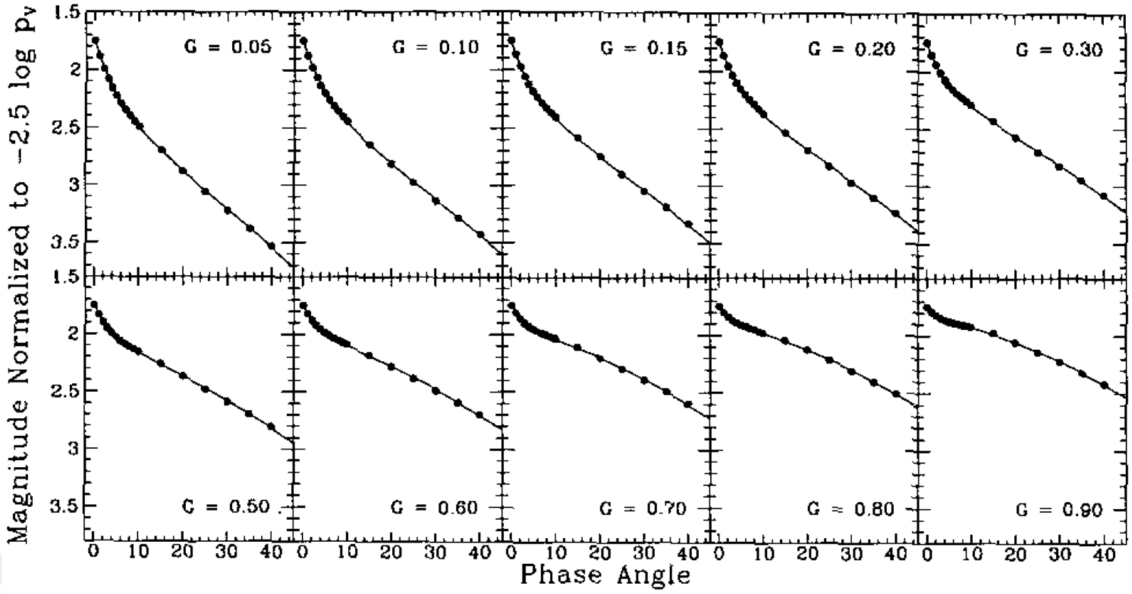
$$H = -2.5\log(a_1 + a_2), \qquad G = \frac{a_2}{a_1 + a_2} \tag{2.15}$$

Denklem 2.15'teki a_1 ve a_2 katsayıları elde edilen gözlemsel veriler kullanılarak lineer en küçük kareler yöntemiyle kolayca hesaplanabilir ve böylece *H* ve *G* parametreleri elde edilmiş olur (Muinonen vd. 2010).

Temel fonksiyonlar $\phi_1(\alpha)$ ve $\phi_2(\alpha)$ ise aşağıdaki şekilde verilmiştir (Muinonen vd. 2010),

$$\begin{aligned}\Phi_1(\alpha) &= \exp\{-3.33\tan^{0.63}(\frac{1}{2}\alpha)\}\\ \Phi_2(\alpha) &= \exp\{-1.87\tan^{1.22}(\frac{1}{2}\alpha)\}\end{aligned} \tag{2.16}$$

G eğim parametresi faz eğrisinin duruşunu ya da ne denli eğimli olduğunu belirtir. *G*, ne kadar küçükse faz eğrisinin eğimi o kadar yüksek, ne kadar büyükse eğimi o kadar düşük olacaktır. Verbiscer ve Veverka (1995) yaptıkları çalışmada sabit *H* ve p_v değeri için farklı *G* değerlerinde faz eğrisinin nasıl değiştiğini göstermiştir (bkz. Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Geometrik albedo p_v = 0.2 kabulüyle (aynı zamanda sabit H), G'nin fonksiyonu olarak elde edilmiş fotometrik verilere karşılık faz açısı (Verbiscer ve Veverka 1995). G değeri düşük değerlerde iken faz eğrisinin eğimli, yüksek değerlerdeyken eğimsiz olduğu açıkça görülmektedir. Farklı geometrik albedo değerleri (aynı zamanda farklı H değerleri) faz eğrisini y-ekseninde hareket ettirecek ve şeklini değiştirmeyecektir

İlk kez Russell (1916) tarafından faz eğrisinin altında kalan alanı tanımlayan ve gezegenimsi cisimler için yansıyan yüzeyin fiziksel özelliğini belirleyen temel parametrelerden biri olan *faz integrali*[30] (q) aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır,

$$q = 2 \int_0^{\pi} f(\alpha) \sin \alpha d\alpha \tag{2.17}$$

Denklem 2.17'de $f(\alpha)$ faz fonksiyonu, α ise faz açısıdır. Daha sonra Bowell vd. (1989) tarafından q, G'nin lineer bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır.

$$q = 0.290 + 0.684G \tag{2.18}$$

Faz integrali, geometrik albedo ile *Bond albedo*[31](A) ilişkisini tanımlayabilmesi

[30] *Faz integrali* (q), indirgenmiş parlaklığın 0° - 180° faz açısı aralığındaki integrali. Diğer bir deyişle 0° - 180° aralığındaki yörünge faz açısına karşılık elde edilen indirgenmiş parlaklık eğrisinin altında kalan alan.

[31] *Bond albedo* (A), geometrik albedodan farklı olarak bir cisimden tüm yönlerde ve tüm dalgaboylarında yansıyan ışığın gelen ışığa oranıdır.

açısından oldukça önemlidir ve bu basit ilişki Denklem 2.19'da verilmiştir (Morrison ve Lebofsky 1979).

$$A = p_v q \tag{2.19}$$

Bond albedo, asteroitlerin termal özelliklerini modellemek için termal denge denkleminde kullanılır. Yani *Bond albedo*, Güneş'ten gelen akının ne kadarlık bir kısmının yüzey tarafından absorbe edildiğini (emildiğini ya da soğurulduğunu) anlayabilmeyi ve böylece cismin enerji dengesine katkıda bulunan sıcaklığını belirleyebilmeyi sağlar (örn. Morrison 1977; Tedesco vd. 2002; Delbó vd. 2003; Masiero vd. 2011; Usui vd. 2011) ve termal kızılöte (Infra-Red (IR)) çalışmaları için oldukça önemlidir (Cellino vd. 2015a).

2012 yılı Ağustos ayına gelindiğinde ise Pekin'de düzenlenen IAU genel kurul toplantısında alınan karar doğrultusunda yeni bir standart olarak Muinonen vd. (2010) tarafından geliştirilen *üç parametreli* H,G_1,G_2 faz fonksiyonu (ya da parlaklık sistemi denilebilir) standart olarak kabul edilmiştir. Muinonen vd. (2010), H,G faz fonksiyonunun geliştirilmesi ve neden optimize edilmesi gerektiği ile ilgili bazı gerekçeler öne sürmüştür. H,G faz fonksiyonunun özellikle $\sim 10^\circ$ ile $\sim 60^\circ$ aralığında birçok asteroit için yeterli sonuçlar verdiğini ancak karşı konum etkisinin[32] (opposition effect) görüldüğü faz açılarında yeterli olmadığı görüşünü belirtmiştir.

Buna göre Muinonen vd. (2010) tarafından geliştirilen ve iki parametreli H,G faz fonksiyonun optimizasyonu sonucunda elde ettikleri üç parametreli H,G_1,G_2 faz fonksiyonunu aşağıdaki şekilde ifade etmiştir,

$$H = H(\alpha) + 2.5 \log[G_1 \Phi_1(\alpha) + G_2 \Phi_2(\alpha) + (1 - G_1 - G_2)\Phi_3(\alpha)] \tag{2.20}$$

Denklem 2.20 ifadesi aşağıdaki şekilde tekrar yazılabilir,

$$10^{-0.4H(\alpha)} = 10^{-0.4H}[G_1 \Phi_1(\alpha) + G_2 \Phi_2(\alpha) + (1 - G_1 - G_2)\Phi_3(\alpha)] \tag{2.21}$$

[32]Faz açısına bağlı olarak parlaklığın değişimi geniş bir aralıkta lineerdir (bkz. Şekil 2.10). Ancak küçük faz açılarına gidildikçe (kabaca $< 7^\circ$) parlaklıkta lineer olmayan bir değişim görülmektedir. Bu etkiye *karşı konum etkisi (opposition effect)* denilmektedir. Bu etkinin sebebi henüz tam olarak ortaya koyulamamakla birlikte gölgeleme (shadowing) ve tutarlı geri saçılma (coherent-back scattering) olabileceği düşünülmektedir (Muinonen vd. 2002b).

Denklem 2.21 daha sade hale getirilirse,

$$10^{-0.4H(\alpha)} = a_1\Phi_1(\alpha) + a_2\Phi_2(\alpha) + a_3\Phi_3(\alpha) \tag{2.22}$$

Denklem 2.22 kullanılarak *H,* G_1 ve G_2 aşağıdaki şekilde ifade edilebilir,

$$\begin{aligned} H &= -2.5\log(a_1 + a_2 + a_3) \\ G_1 &= \frac{a_1}{a_1 + a_2 + a3} \\ G_2 &= \frac{a_2}{a_1 + a_2 + a_3} \end{aligned} \tag{2.23}$$

Denklem 2.23'deki a_1, a_2 ve a_3 katsayıları elde edilen gözlemsel veriler kullanılarak lineer en küçük kareler yöntemiyle kolayca hesaplanabilir ve böylece*H,* G_1 *ve* G_2 parametreleri elde edilmiş olur. Muinonen vd. (2010) tarafından (24) Themis ve (44) Nysa asteroitleri için *H,G* ve *H,*G_1,G_2 faz fonksiyonlarının karşılaştırılması Şekil 2.11'de görülmektedir.

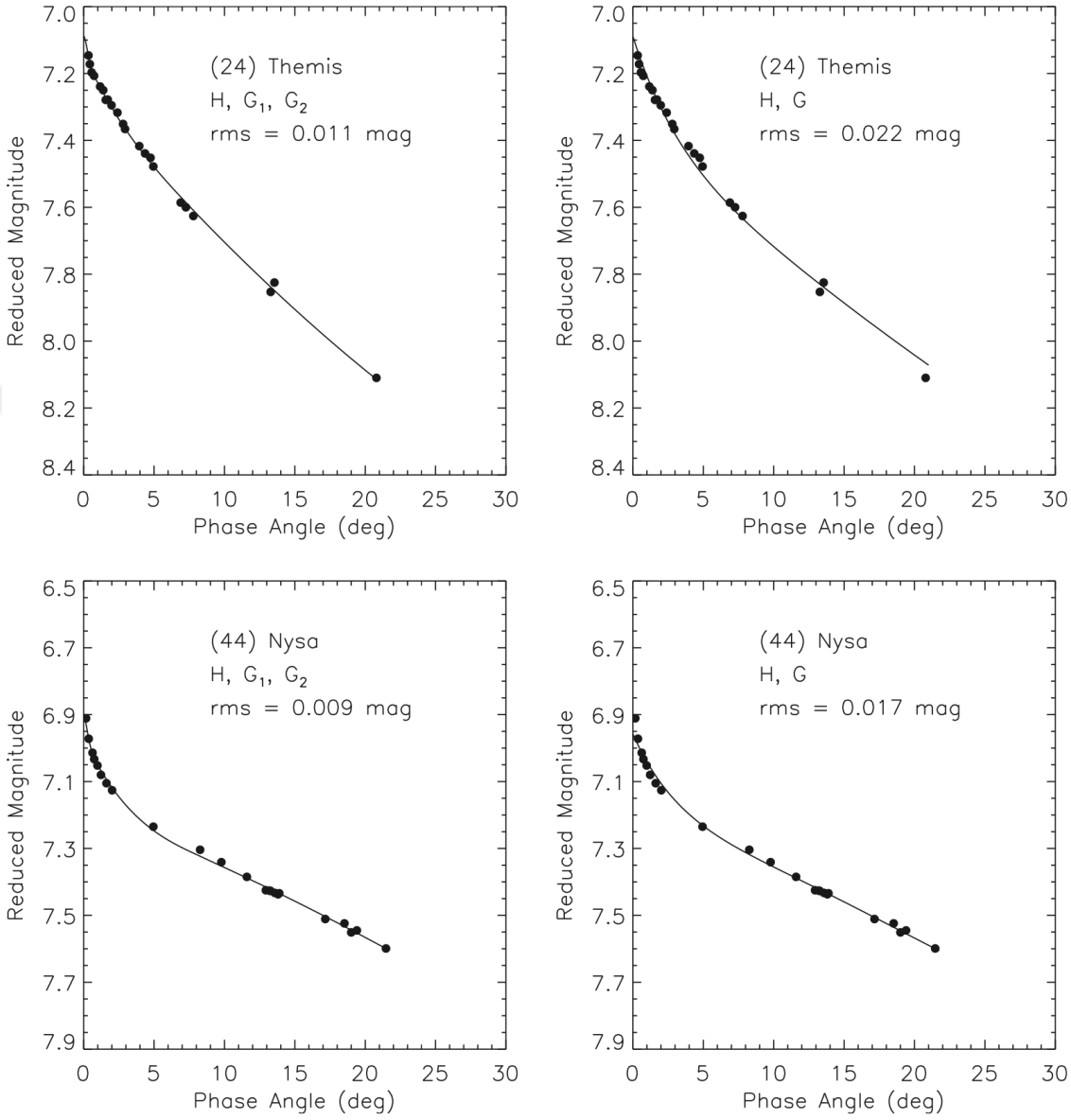
$\Phi_1(\alpha)$, $\Phi_2(\alpha)$ ve $\Phi_3(\alpha)$ temel fonksiyonları ise stokastik optimizasyon yöntemi (stochastic optimization method) kullanılarak farklı faz açılarını tanımlayabilecek şekilde elde edilmiştir. Bu yöntem ile farklı aralıklarla ayrık faz açıları belirlenerek kübik spline interpolasyonu ile en doğru temel fonksiyonlar belirlenmeye çalışılmıştır. $\Phi_1(\alpha)$ ve $\Phi_2(\alpha)$ faz eğrisinin lineer kısımlarını ifade ederken $\Phi_3(\alpha)$ temel fonksiyonu ise lineer olmayan yani karşı konum etkisinin görüldüğü daha küçük açılara karşılık gelen kısmı ifade etmektedir. Bu üç temel fonksiyon aşağıdaki şekilde verilmiştir,

$$\begin{aligned} \Phi_1(\alpha) &= 1 - \frac{6\alpha}{\pi} \\ \Phi_2(\alpha) &= 1 - \frac{9\alpha}{5\pi} \\ \Phi_2(\alpha) &= \exp(-4\pi\tan^{\frac{2}{3}}(\frac{1}{2}\alpha)) \end{aligned} \tag{2.24}$$

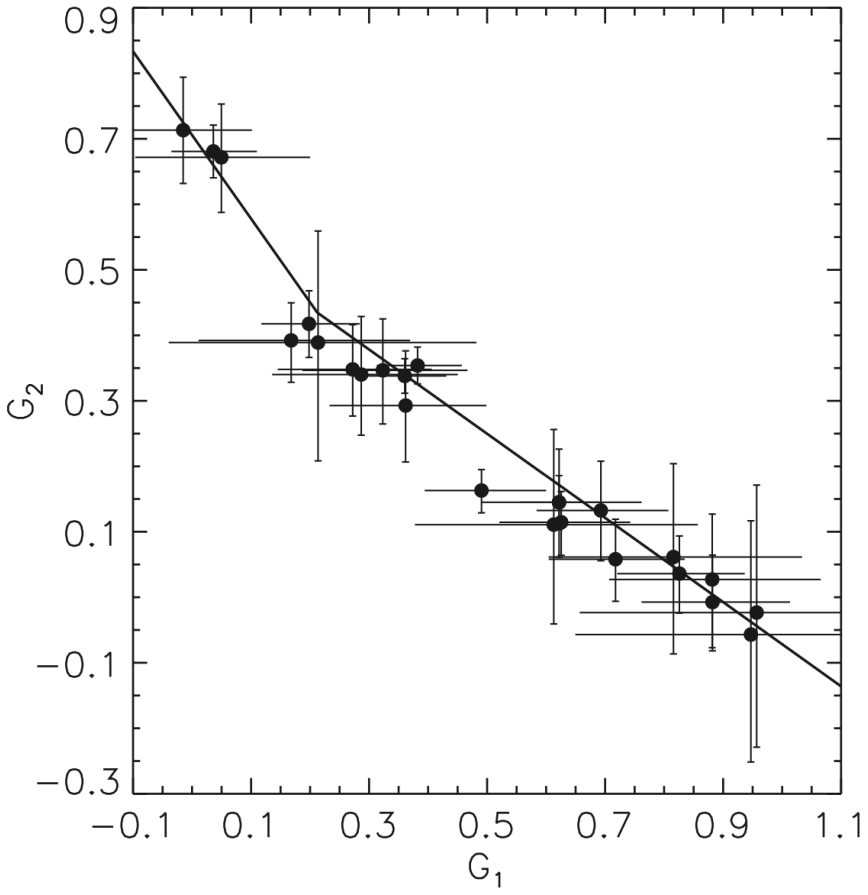
Üç parametreli faz fonksiyonundan elde edilen G_1 ve G_2 parametreleri kullanılarak faz integrali ise aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$q = 0.009082 + 0.4061G_1 + 0.8092G_2 \tag{2.25}$$

Elde edilen q değeri daha önce H,G faz fonksiyonunda da benzer şekilde uygulandığı üzere Denklem 2.19'da kullanılarak asteroidin *Bond albedo* değeri elde edilir.



Şekil 2.11. Örnek iki farklı asteroit için H,G ve H,G_1,G_2 faz fonksiyonları ile elde edilen faz eğrilerinin karşılaştırılması (Muinonen vd. 2010)



Şekil 2.12. Muinonen vd. (2010) tarafından gerçek cisimlerden elde edilen G_1 ve G_2 parametrelerinin ilişkisi

Şekil 2.12'de G_1 ve G_2 arasındaki ilişki açıkça görülmektedir. Buradaki ilişki lineer parçalı fonksiyonlar yardımı ile tanımlanabilir (bkz. Denklem 2.26) ve G_1 ve G_2 parametrelerinden G_{12} parametresi elde edilebilir. Böylece yeni bir yaklaşım ile iki parametreli H,G_{12} faz fonksiyonu da tanımlanmış olur (Muinonen vd. 2010).

$$G_1 = \begin{cases} 0.7527G_{12} + 0.06164, & G_{12} < 0.2, \\ 0.9529G_{12} + 0.02162, & G_{12} \geq 0.2, \end{cases}$$
$$G_2 = \begin{cases} -0.961212 + 0.6270, & G_{12} < 0.2, \\ -0.6125G_{12} + 0.5572, & G_{12} \geq 0.2, \end{cases} \tag{2.26}$$

2.2.3. Mutlak Parlaklık, Albedo ve Çap İlişkisi

Asteroitler için en yaygın kullanılan ve en bilindik ilişkilerden bir diğeri ise mutlak parlaklık, geometrik albedo ve çap ilişkisidir ve aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır (Fowler ve Chillemi 1992),

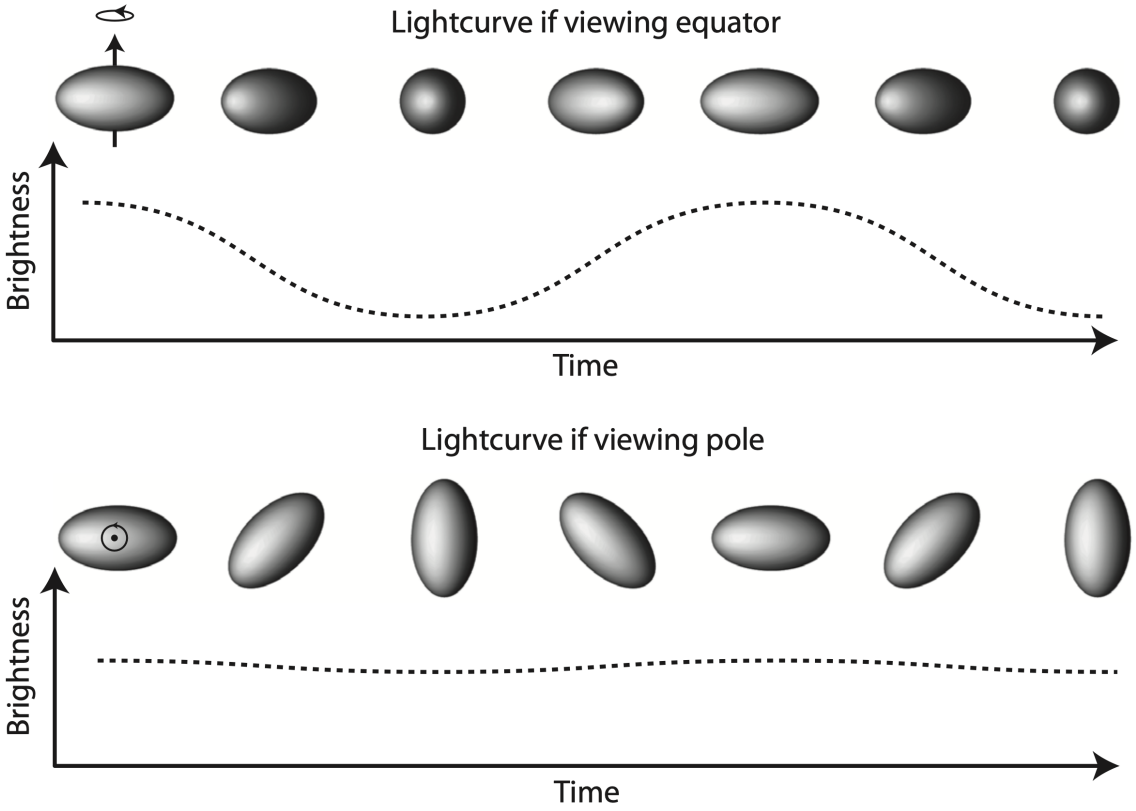
$$\log(D) = 3.1236 - 0.2H - 0.5\log(p_v), \tag{2.27}$$

Denklem 2.27'de yer alan D km cinsinden küresel olduğu varsayılan asteroidin çapıdır. Aynı zamanda bu çapa etkin çap (effective diameter) da denilmektedir. Bu ilişkinin birçok kullanım alanı bulunmaktadır ve buradaki üç farklı parametre farklı gözlemsel teknikler ile hassas bir şekilde hesaplanabilir. Örneğin, fotometrik yöntemlerle mutlak parlaklık hesabı yapıldıktan sonra yıldız örtülme (occultation) gözlemleri ya da termal radyometrik ya da radar gözlemlerle hassas bir şekilde çapı hesaplanan asteroidin geometrik albedosu hesaplanabilir. Ya da mutlak parlaklık ve albedo biliniyorsa çap hesaplanabilir (Muinonen vd. 2010). Ancak günümüzde asteroitlerin çok büyük çoğunluğu için yeterli gözlem verisi olmaması nedeniyle bu parametreler ile ilgili yaklaşımlar yapılmaktadır. Öte yandan, hassas albedo ve çap değerlerinin bilinmesi, dinamik asteroit ailelerinin albedo dağılımı ve asteoritlerin büyüklük dağılımı gibi temel çalışma alanları açısından kritik öneme sahiptir. (Cellino vd. 2009). Bununla birlikte, vurgulandığı üzere kaliteli gözlemsel veri eksikliğinden dolayı bu denklem ile elde ettiğimiz birçok asteroidin verisi tahmin edileceği üzere kaba değerlerdir ve belirli oranda hatalar içermektedir (Cellino vd. 2015a). NASA JPL/Horizons veri tabanında 25 Kasım itibarıyla bilinen tüm asteroitlerin %10.4'ünün ve tüm YYA'ların %3.6'sının albedosu, tüm asteroitlerin %10.4'ünün ve tüm YYA'ların %3.7'sinin çapı ile birlikte tüm asteroitlerin %99.7'sinin ve tüm YYA'ların %99.3'ünün mutlak parlaklığı tanımlanmıştır. Neredeyse tüm asteroitlerin mutlak parlaklığının biliniyor olmasının nedeni ise yukarıda da bahsedildiği üzere az gözlem verisi ile dahi yapılabilecek yaklaşımla mutlak parlaklığın hesaplanabiliyor olmasından dolayıdır. Aynı zamanda bu mutlak parlaklık değeri herhangi bir andaki asteroidin görünür parlaklığının hesaplanabilmesini de sağlamaktadır. Bu yüzdendir ki efemeris üreteçleri neredeyse her asteroidin istenilen andaki görünür parlaklığını verebilmektedir. Bu hesap G değerinin sabit (çoğunlukla 0.15) kabul edilmesi ile H,G faz fonksiyonu (bkz. Denklem 2.12) kullanılarak yapılmaktadır. H,G faz fonksiyonundan elde edilen indirgenmiş parlaklık değeri ise efemeris anındaki asteroidin Yer'e ve Güneş'e olan uzaklığına göre görünür parlaklığa dönüştürülür. Benzer şekilde yapılan bir kabul ile mutlak parlaklığı bilinen bir cismin çapı, albedonun çoğunlukla 0.2 olarak kabul edilmesiyle, Denklem 2.27 kullanılarak elde edilir ve böylece neredeyse tüm asteroitler için yaklaşık çap elde edilebilir.

2.2.4. Işık Eğrisi, Dönme Periyodu ve Şekil Analizleri

Bazı asteroitlerin uzay araçları ile ziyaret edilerek yerinde incelenmesinin dışında asteroitlerin fiziksel özellikleri ile ilgili bilgilerimiz Yer-tabanlı gözlemler ile elde edilmiştir. Bildiğimiz tüm asteroitlerden ışık yansıdığını düşündüğümüzde, farklı gözlem teknikleri içerisinde açık ara en önemli bilgi kaynağımızın zaman-çözünürlüklü fotometrik gözlemler olduğunu rahatlıkla söyleyebiliriz (Durech vd. 2010).

Güneş sistemi içerisindeki tüm nesnelerin dönme sonucunda, dönme zamanına bağlı olarak parlaklıklarında değişim meydana gelir ve sonucunda ışık eğrisi oluşur. Parlaklık değişimindeki farklılıkların ise çeşitli sebepleri olabilir. Örneğin düzensiz şekilleri ya da yüzeylerindeki albedo dağılımının homojen olmaması olabilir. Kuyruklu yıldızlar ya da aktif asteroitler[33] için ise belirtilen durumların yanı sıra yüzeylerindeki uçucu maddeye ve Güneş'e uzaklıklarına bağlı değişim gözlenir (Shepard 2017).



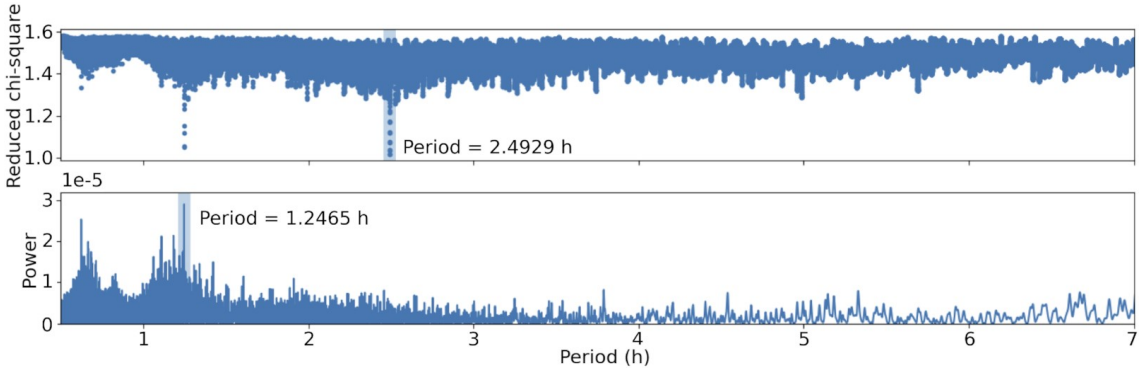
Şekil 2.13. Dönen elipsoit bir cismin farklı bakış açılarına göre ışık eğrisi. Üstteki şekil ekvatoral görünüşe göre ışık değişimini gösterirken, alttaki şekil kutup civarından görünüşüne göre ışık değişimini göstermektedir (Shepard 2017)

[33]Aktif asterotiler, kuyruklu yıldız benzeri koma ve kuyruk yapısı oluşturan, asteroit benzeri yörüngelerde dolanan cisimlerdir. Fiziksel özelliklerinin yanı sıra aktif asteroitler, Tisserand parametresine göre dinamik olarak da diğer cisimlerden ayrışırlar. Aktif asteroitler için $T_j < 3$'tür.

NASA JPL/Horizons[34] veri tabanında 2136 YYA'nın dönme periyodu bilgisi, LCDB[35] veri tabanında ise 2162 YYA'nın dönme periyodu bilgisi bulunmaktadır. Bu da bilinen toplam YYA sayısının $\sim$%6.6'sına karşılık gelmektedir. Tüm bilinen asteroitlere bakıldığında ise NASA JPL/Horizons veri tabanında 34127 asteroidin dönme periyodu bilgisi, LCDB veri tabanında ise 34691 asteroidin dönme periyodu bilgisi bulunmaktadır. Bu da bilinen toplam asteroit sayısının yalnızca $\sim$%2.6'sına karşılık gelmektedir. Görece olarak bakıldığında periyodunu bildiğimiz asteroit sayısının bu denli az olması, bu alandaki bilgimizin oldukça sınırlı olduğunun ve Güneş sistemi alanındaki gözlemsel çalışmaların da oldukça yeni olduğunun bir göstergesidir.

Gecelik yoğun zaman-çözünürlüklü parlaklığı elde edilen bir asteroidin (örn. bkz. Şekil 2.13) dönme periyodunu elde etmek için en sık kullanılan matematiksel yöntemler *Fourier* analizi ve *Lomb-Scargle* (Lomb 1976; Scargle 1982) periodogram analizidir. Fourier analizinde en iyi fit çözümü χ^2 istatistiği ile belirlenir ve en düşük χ^2 değeri en iyi fit çözümünü vermektedir. Lomb-Scargle analizinde ise frekans analizi sonucunda en güçlü değer en iyi fit çözümünü vermektedir. Devogèle vd. (2021) aktif bir ana kuşak asteroidi olan (6478) Gault asteroidinin periyot analizi için her iki yöntemi de kullanmıştır. Şekil 2.14'te (6478) Gault için her iki yöntem ile elde edilen en iyi sonuçlar görülmektedir. Üst panelde Fourier analizi ile 2.4929 $\pm$ 0.0003 saat (P_1) olarak elde edilen en iyi periyot sonucu, alt panelde Lomb-Scargle yöntemiyle 1.2465 $\pm$ 0.0003 saat (P_2) olarak elde edilmiştir. (6478) Gault için farklı yöntemlerle elde edilen sonuçlara dikkat edildiğinde P_1'in P_2'nin tam iki katı olduğu görülmektedir. Bu durum asteroitlerin dönme periyotlarının araştırılmasında sıklıkla karşılaşılan bir durumdur. Her iki sonuç da doğru olabilir ancak P_2 tek tepeli (mono-modal) bir ışık eğrisi çözümü iken P_1 çift tepeli (bi-modal) bir ışık eğrisi çözümüdür. Asteroitlerin fiziksel özellikleri gereği şekillerinin en iyi üç-eksenli elips (triaxial ellipsoid) ile tanımlanabildiği göz önüne alınırsa ki bu durumda çift tepeli ışık eğrisi oluşacaktır, çift tepeli ışık eğrisi oluşturan çözüm değeri kullanılmalıdır (Erece vd. 2023). (6478) Gault için hem Devogèle vd. (2021) hem de literatürdeki diğer çalışmalar dönme periyodunu çift tepeli çözüm olan $\sim$2.49 saat olarak vermektedir. Bu türden tek bir direkt ışık eğrisi analizi ile elde edilen dönme periyodu, sinodik (synodic) dönme periyodudur. Yıldızıl (sidereal) dönme periyodunu elde edebilmek için farklı geometrilerde sinodik periyot verilerine ihtiyaç vardır.

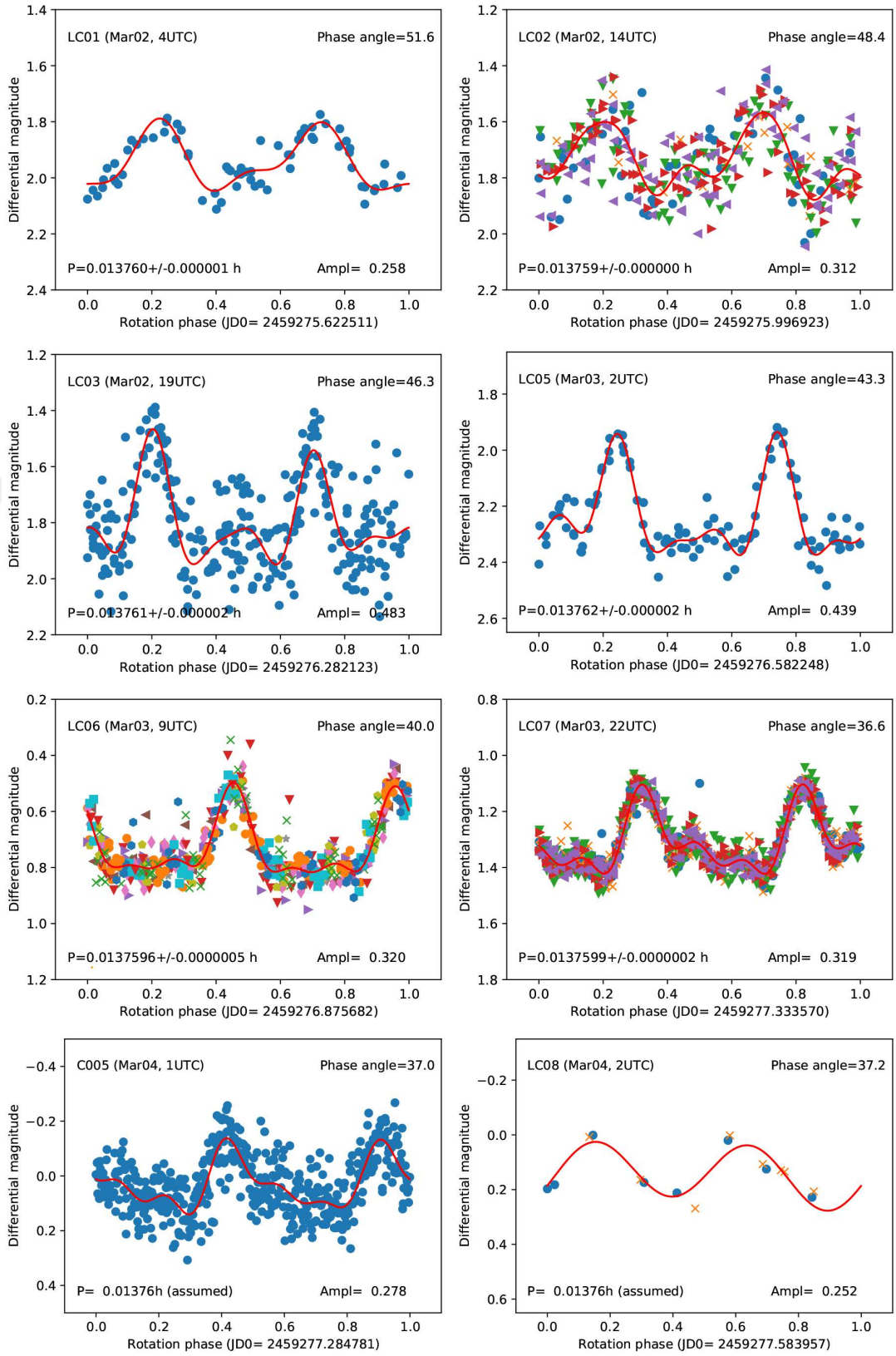
[34] https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_query.html [son erişim tarihi: 25.11.2023]
[35] https://www.minorplanet.info/php/lcdb.php [son erişim tarihi: 25.11.2023]



Şekil 2.14. (6478) Gault asteroidinin dönme periyodu için iki farklı yöntem ile elde edilen en iyi fit çözümleri (Devogèle vd. 2021). Üst panel 4. dereceden Fourier fiti ile elde edilen en iyi χ^2 çözümünü (2.4929 saat) gösterirken alt panel Lomb-Scargle analizi ile elde edilen en güçlü frekansı (1.2465 saat) göstermektedir

Asteroitlerin uzay hareketleri nedeniyle zamanla gökyüzündeki konumları değişmektedir. Bu değişim sonucunda Güneş'e ve Yer'e olan uzaklıkları ile faz açıları da değişir ve bu durum görünür parlaklıklarının değişmesine sebep olur. Benzer şekilde konumdaki değişiklik bakış açısının (aspect angle) da değişmesine sebep olur ki bu durumda parlaklığın yanı sıra ışık eğrisinin de şekli değişir. Bu sebeple asteroitlerin özellikle de YYA'ların uzun zaman aralıklarında alınan gözlem verilerini birleştirebilmek oldukça güçtür. Gecelik ya da birkaç gecelik yüksek zaman çözünürlüklü gözlem verileri asteoritlerin dönme periyotlarını elde edebilmek için en uygun yöntemdir. Ancak YYA'ların Yer'e ve Güneş'e yakın olmaları ve bu sebeple uzay hızlarının yüksek olması sebebiyle birkaç gecelik gözlem süresince dahi konumları hızlı değişeceğinden verilerin birleştirilmesi benzer şekilde güçleşmektedir. Kwiatkowski vd. (2021) yaptıkları çalışmalarında on farklı gözlemevinden ağ gözlemleri gerçekleştirmiş ve Apollo grubu bir YYA olan 2021 DW1 asteroidi için farklı zamanlarda fotometrik veriler elde etmişlerdir. Elde edilen verilere ışık zamanı düzeltmesi[36] (light-time correction) uygulandıktan sonra 4. ya da 6. dereceden Fourier serisi kullanılarak periyot elde edilmeye çalışılmış ve iki muhtemel periyot elde edilmiştir, $P_1 = 0.01376$ saat ve $P_2 = 0.00688$ saat. Daha önce de bahsedildiği üzere elde edilen değerler birbirinin iki katıdır ve bu durum tek tepeli ve çift tepeli çözümlere karşılık gelmektedir. Kwiatkowski vd. (2021) çift tepeli çözümü tercih etmiştir ve 2021 DW1 asteroidinin periyodunu $P_1 = 0.01376$ saat olarak vermiştir.

[36]Işık zamanı düzeltmesi, asteroidin ışığının uzaklığına bağlı olarak gözlemciye ulaşması için geçen süre içerisinde, cismin gerçek konumu ile görünür konumu arasında oluşan zaman farkının ortadan kaldırılmasıdır.



Şekil 2.15. 2021 DW1 asteroidinin bazı ışık eğrileri (Kwiatkowski vd. 2021). LC01 Lowell Gözlemevi (G.), LC02 Deokheong Optical Astronomy G., LC03 Schiaparelli G., LC05 Lowell G., LC06 Winer G., LC07 Odessa-Mayaki G., LC08 McDonald G., C005 Planatus G., Ampl ışık eğrisinin genliği (amplitude)

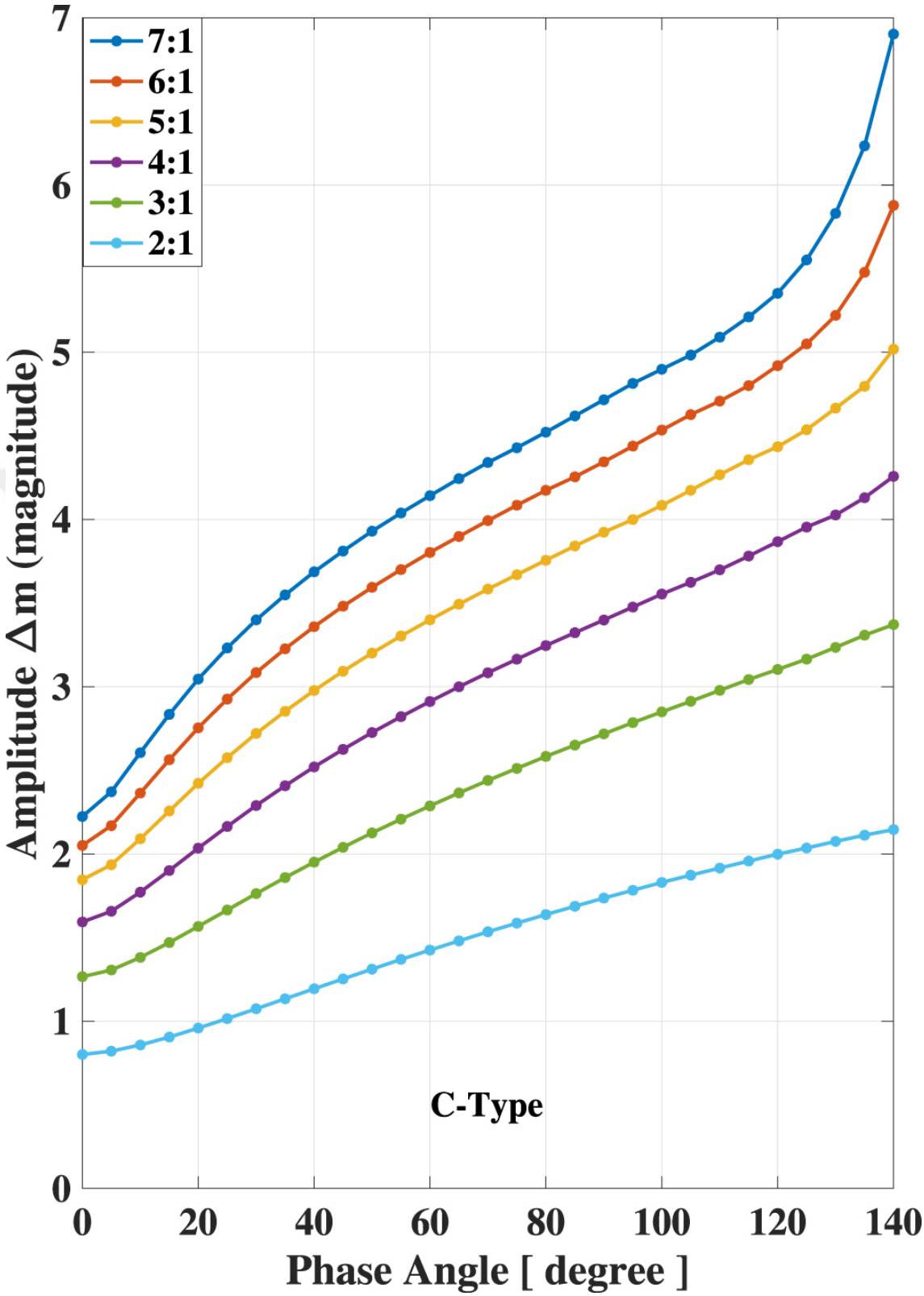
Şekil 2.15'te görülen altı ışık eğrisinin de evrelendirildiği (dönme evresi) görülmektedir. Zamana karşılık alınan her bir nokta için evrelendirme aşağıdaki ilişki kullanılarak yapılır.

$$Evre = \frac{T - T_0}{P} \mod 1 \tag{2.28}$$

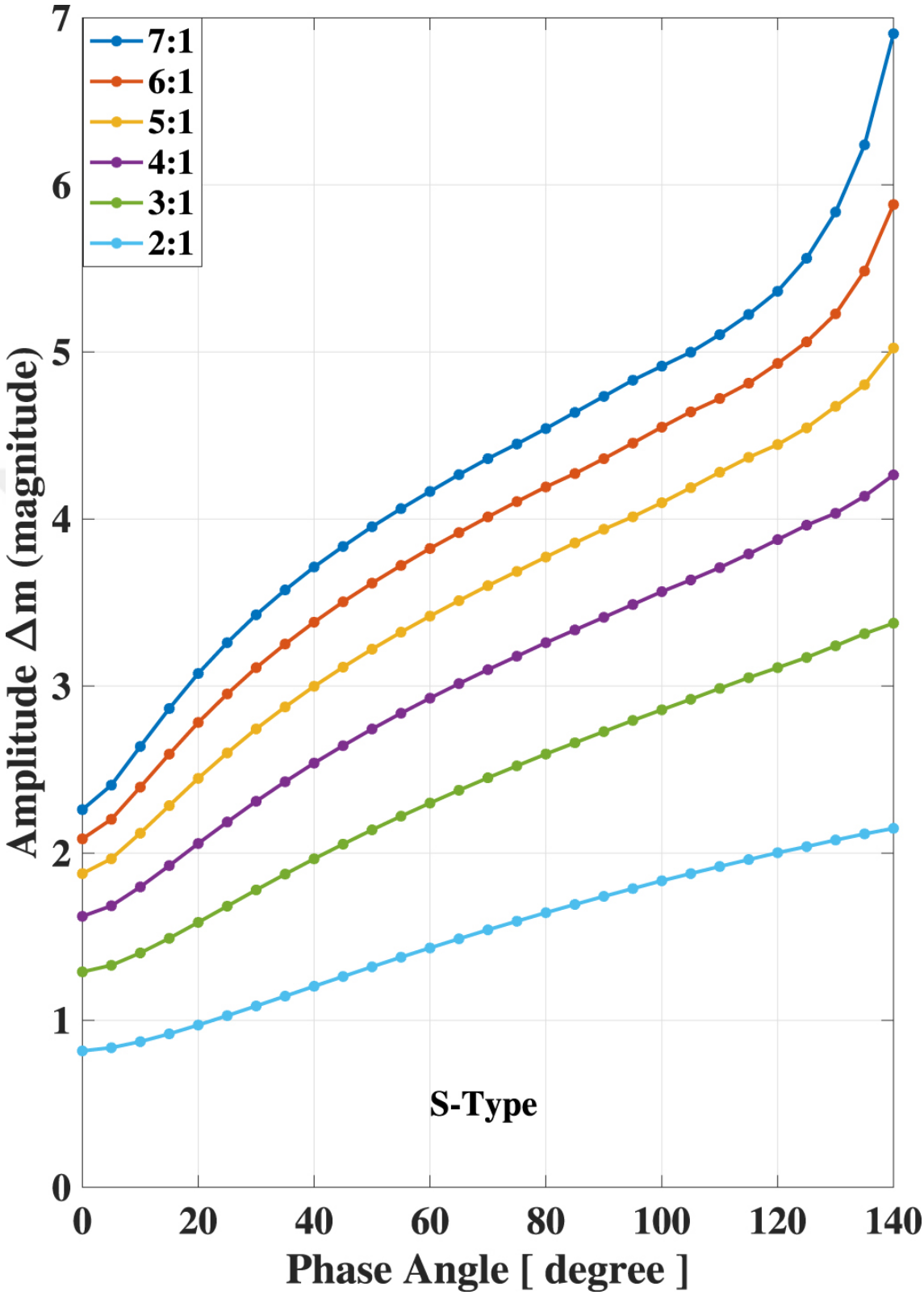
Denklem 2.28'de T gözlem anını, T_0 ise evrenin 0 anına karşılık gelen (ya da gelmesi istenen denilebilir) zamanı belirtmektedir. T_0 değeri istenirse 0 olarak da alınabilir. P değeri, yapılan analizler (Fourier, Lomb-Scargle vb.) sonrasında elde edilen periyot değeridir. Evre 0 ile 1 aralığında olacağından periyot ve zaman değerlerinden elde edilen oranın 1'e göre mod değeri alınmalıdır. Elde edilen her bir gözlem noktası için bu işlem uygulandıktan sonra ışık eğrisi evrenlendirilmiş olur. Şekil 2.15'te görülen 2021 DW1 asteroidinin evrelendirilmiş ışık eğrilerine bakıldığında birbirinden görece farklı oldukları aşikardır. Birbirine oldukça yakın ardışık üç gecede alınan görüntülerin bu denli farklı olmasının ana sebebi asteroidin faz açısının ve bakış açısının çok hızlı değişmesidir ki 2021 DW1 asteroidinin ışık eğrilerinin elde edildiği anlardaki uzay hızı 25"/dakika ile 112"/dakika aralığında değişmektedir (Kwiatkowski vd. 2021). Işık eğrilerinde dikkat çeken en önemli farklardan birisi de eğri genliklerinde görülmektedir. Işık eğrisinin genliği, iki eksenli elipsoit kabulü altında asteroitlerin eksen oranları, yani büyük ve küçük yüzeylerinin oranı (ya da ne kadar basık olabileceği (elongation)) hakkında fikir verdiğinden oldukça önemli bir parametredir. Işık eğrisinin genliği asteroidin yüzey oranlarının yanı sıra, tayf türü ve gözlendiği faz açısına bağlıdır (Lu ve Jewitt 2019). Işık eğrisi genliğinin faz açısı ve tayf türü ile ilişkisi ilk kez Zappala vd. (1990) tarafından ortaya koyulmaya çalışılmıştır ve aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

$$a/b = 10^{0.4A(\alpha)/(1-m\alpha)} \tag{2.29}$$

Denklem 2.29'da a ve b sırasıyla büyük ve küçük eksen uzunlukları, $A(\alpha)$ α faz açısındaki genlik, m ise birim faz açısına karşılık parlaklıktaki değişimdir. Zappala vd. (1990)'ne göre ışık eğrisinin genliği $\alpha < 50°$'ye kadar faz açısıyla lineer ilişki içerisindedir. Yani m değeri bu aralıkta sabittir. Lu ve Jewitt (2019) yaptıkları çalışmada bu durumu araştırmışlardır (bkz. Şekil 2.16 ve Şekil 2.17). S ve C türü asteroitlerin yanı sıra V türü asteroitler için de çok benzer değişimler gösterdiği ve ayrı grafik çizmeye gerek olmadığını belirtmişlerdir.



Şekil 2.16. Farklı yüzey oranlarına sahip *C* türü asteroitlerin faz açısına bağlı ışık eğrisi genliklerinin değişimi (Lu ve Jewitt 2019). Farklı renklerdeki eğriler farklı yüzey oranlarına (a/b = a:b = 2:1 gibi) karşılık gelmektedir. Faz açısı arttıkça ışık eğrisi genliğinin arttığı açıkça görülmektedir



Şekil 2.17. Şekil 2.16'dakine benzer, farklı yüzey oranlarına sahip S-türü asteroitlerin faz açısına bağlı ışık eğrisi genliklerinin değişimi (Lu ve Jewitt 2019)

Lu ve Jewitt (2019), ışık eğrisi genliği ve faz açısı ilişkisini $\alpha < 140^\circ$ değerlerine kadar hesaplamıştır. Bunun sebebinin daha büyük faz açılarında ışık eğrisinin asteroidin şekline ve ışık yansıtma özelliklerine hassas bağlı olmasından ve yine daha büyük bu faz açılarında gözlem yapılamamasından kaynaklı olduğunu belirtmişlerdir.

2021 DW1 örneğinde olduğu gibi farklı faz açılarında elde edilen ışık eğrileri fotometrik yöntemle asteroidin şeklinin ve dönme özelliklerinin ortaya çıkarılabilmesi için oldukça önemlidir. Kaasalainen ve Torppa (2001) ve Kaasalainen vd. (2001) tarafından geliştirilen *tersine ışık eğrisi yöntemi (lightcurve inversion method)*, bahsedilen birçok farklı faz açısında ve bakış açısında (farklı gözlem geometrilerinde) elde edilen ışık eğrilerini kullanarak asteroitlerin şekil ve kutup yönelimi (pole orientation) özelliklerinin ortaya çıkarılabilmesi için kullanılan çok güçlü bir yöntemdir (Durech vd. 2010). Tersine ışık eğrisi modelleri genellikle, asteroitlerin ışık-saçılma (light-scattering) özelliklerinin Lommel-Seeliger ve Lambert yüzey modellerinin bir kombinasyonu olarak tanımlanabileceği varsayımı altında elde edilir (Kaasalainen vd. 2002). Geniş faz açısı değerlerinde hassas fotometrik verilerin elde edilebildiği bazı durumlarda ise, Lommel-Seeliger + Lambert yüzey saçılma modelinin yerine Hapke yüzey saçılma modeli kullanılır (Hapke 1981; Hapke 1984; Hapke 1986).

Yer tabanlı gözlemlerle elde edilen asteroitlerin yoğun (dense) ışık eğrileri kullanılarak tersine ışık eğrisi yöntemi ile dışbükey şekil (eğer adaptif optik gibi sistemlerle alınmış çok yüksek çözünürlüklü veri yoksa) dönme ekseninin uzaysal konumu (kutup ya da dönme ekseni yönelimi) ile yıldızıl (sidereal) dönme periyodu elde edilebilmektedir. Aynı zamanda, Kaasalainen vd. (2004) ve Ďurech vd. (2005) çalışmaları ile gerçek veriler üzerinden tersine ışık eğrisi yöntemi kullanılan Durech vd. (2009)'nin çalışmasında vurgulandığı üzere yoğun ışık eğrilerinin yanı sıra tersine ışık eğrisi yöntemi ile yalnızca seyrek (sparse) fotometrik veriler kullanılarak da asteroitlerin fiziksel özelliklerinin ortaya çıkarılabileceği belirtilmiştir. Seyrek fotometrik veriler *Pan-STARRS* (Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System) ya da *LSST*[37] (Large Synoptic Survey Telescope) gibi Yer tabanlı gökyüzü tarama teleskoplarından ya da *Gaia* (Mignard vd. 2007) gibi uzay teleskoplarından elde edilen veriler olarak düşünülebilir. Durech vd. (2010) yaptıkları çalışmada bu verilerin kullanılmasıyla önümüzdeki yıllarda asteroit modellemelerinin çığ gibi büyüyeceğini vurgulamaktadır. Büyüyen/büyüyecek olan tersine ışık eğrisi yöntemi ile elde edilecek bu asteroit modellemelerine ve bu modellemelerin yer aldığı literatür bilgilerine araştırmacıların kolaylıkla ulaşabilmesi için Durech vd. (2010) tarafından *DAMIT*[38] (Database of Asteroid Models from Inversion Techniques) adında bir *MySQL* veri tabanı ve bu veri tabanının sorgulanabildiği ve güncel asteroitlerin güvenilir fiziksel verilerinin (şekil,

[37]LSST, daha sonra Vera C. Rubin Gözlemevi adını almıştır. Detaylar için: https://rubinobservatory.org adresini ziyaret ediniz. [son erişim tarihi: 25.11.2023]

[38]https://astro.troja.mff.cuni.cz/projects/damit/ [son erişim tarihi: 25.11.2023]

dönme periyodu, kutup yönelimi vb.) elde edilebildiği bir web arayüzü geliştirilmiştir. 25 Kasım 2023 tarihi itibarıyla DAMIT veri tabanında 10751 farklı asteroit için 16087 model yer almaktadır. Bu asteroitlerin 4 tanesi ise yalpalayan[39] asteroitlerdir. DAMIT, bir veri tabanı olmasının yanı sıra Durech vd. (2010) tarafından geliştirilen ve tersine ışık eğrisi yöntemini içeren GPL lisansı (General Public Licence) altında açık kaynak kodlu bir yazılım aracını geliştiriciler ve son kullanıcılar için yayımlamıştır[40]. Bu araç ile hem ışık eğrilerinden fiziksel modelleme yapılmakta hem de modellerden ışık eğrisi (sentetik ışık eğrisi) üretilebilmektedir.

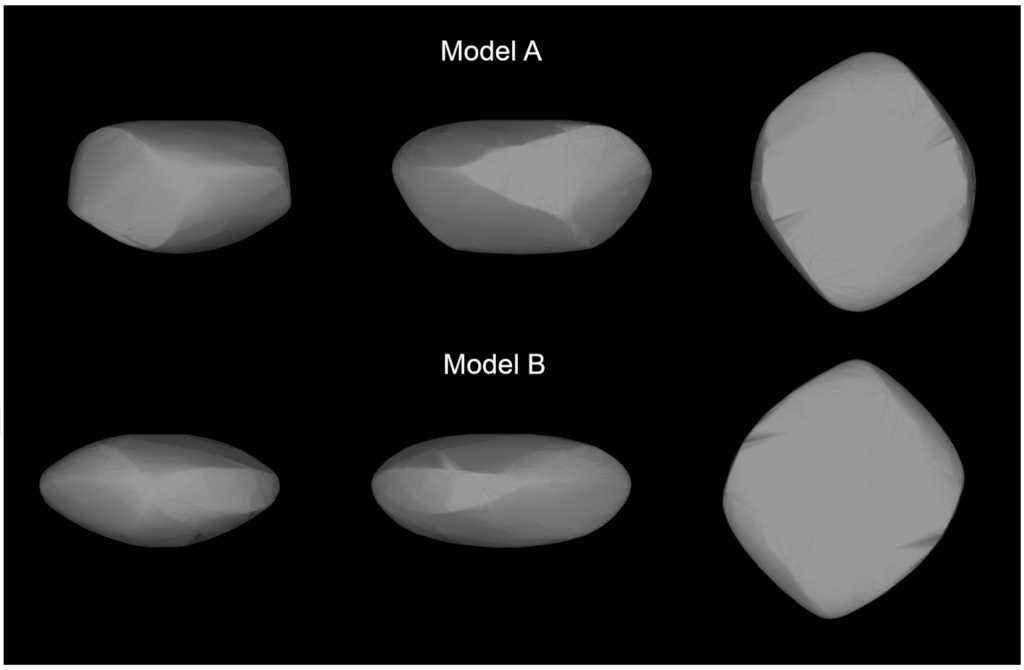
Tersine ışık eğrisi yöntemi ile elde edilen asteroit modelleri oldukça ilginç ve önemlidir ancak bu yöntem kullanılarak elde edilen çok daha önemli başka sonuçlar da vardır. Örneğin Koronis ailesi asteroitlerin YORP etkisi sebebiyle (bkz. Bölüm 2.2.5) dönme eksenlerinin tamamen aynı açılarda hizalanmış olduğu bu yöntemle ortaya çıkarılmıştır (Slivan vd. 2003). Benzer şekilde gözlemsel olarak YORP etkisi ilk kez bu yöntemle tespit edilebilmiştir (Kaasalainen vd. 2007). Asteroitlerin şekil ve dönme özelliklerinin ortaya çıkarılabilmesi için tersine ışık eğrisi yöntemi artık bir standart olarak düşünülebilir (Durech vd. 2010). Dahası bu yöntemin kullanılması için elde edilen fotometrik veriler başka verilerle birleştirilebilir ve çok daha hassas sonuçlar elde edilebilir (Kaasalainen ve Lamberg 2006). Örneğin, adaptif optik sistemi kullanılarak elde edilen çok yüksek çözünürlüklü veriler şeklin dışbükey olmayan (non-convex) yüzey özelliklerini de ortaya çıkarabilmektedir. Bunun yanı sıra termal IR gözlemlerden asteroidin gerçek büyüklüğü, termal eylemsizliği ve albedosu elde edilebilir (Delbo ve Tanga 2009). Tüm bu veriler birleştirildiğinde asteroidin yer tabanlı gözlemler ile fiziksel özellikleri ortaya çıkarılmış olur. Elde edilen asteroit modellerinin gerçek ile ne kadar uyumlu olduğu ise uzay araçları tarafından elde edilen görüntüler (Müller vd. 2005; Lamy vd. 2008) ve laboratuvar deneyleri (Kaasalainen vd. 2005) ile kanıtlanmıştır (bkz. Şekil 2.19).

Tersine ışık eğrisi yönteminin kullanıldığı güncel örneklerden bir tanesi yukarıda da bahsedilen 2021 DW1 asteroidi için Kwiatkowski vd. (2021) tarafından gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ışık eğrileri (bkz. Şekil 2.15) kullanılarak şekil ve kutup yönelimi çözümüne ilişkin iki farklı çözüm (Model A ve Model B) elde edilmiştir (bkz. Şekil 2.18). Kutup yönelimini tanımlayan dönme ekseninin tutulum koordinatları (λ: boylam, β: enlem) Model A için $\lambda_1 = 57^\circ \pm 10^\circ$, $\beta_1 = 29^\circ \pm 10^\circ$, Model B için ise $\lambda_2 = 67^\circ \pm 10^\circ$, $\beta_2 = 40^\circ \pm 10^\circ$ olarak bulunmuştur. Elde edilen bu koordinatlar kullanılarak dönme ekseninin eğikliği (ϵ) ise Model A için $\epsilon_1 = 54^\circ \pm 10^\circ$, Model B için ise $\epsilon_2 = 123^\circ \pm 10^\circ$ elde edilmiştir. Teoride (Čapek ve Vokrouhlický 2004; Golubov vd. 2021) YORP etkisi sebebiyle öngörülenin aksine elde edilen bu eğiklik değerleri 2021

[39] Yalpalayan ya da literatüre göre *non-principal axis (NPA) rotator* ya da *tumbler*, tek bir ana eksen etrafında dönmeyen asteroitlerdir.)

[40] https://astro.troja.mff.cuni.cz/projects/damit/pages/software_download [son erişim tarihi: 25.11.2023]

DW1 için asimptotik durumdan ($\epsilon = 0°, \epsilon = 180°$) oldukça uzaktır (bkz. Bölüm 2.2.5). 2021 DW1'in Denklem 2.27 kullanılarak elde edilen çapı ise $D = 30 \pm 10$ metredir ve bu tür asteroitlere *Çok Küçük Asteroitler (Very Small Asteroids, VAS)* denilmektedir.



Şekil 2.18. Çok hızlı dönen bir YYA olan 2021 DW1'in tersine ışık eğrisi yöntemi ile elde edilmiş iki farklı şekil ve kutup yönelimi çözümü (Kwiatkowski vd. 2021)



(a) **(b)**

Şekil 2.19. a) (433) Eros asteroidinin NASA'nın NEAR uzay aracı ile elde edilmiş gerçek görüntüsü. b) Aynı asteroidin tersine ışık eğrisi yöntemiyle elde edilmiş ve gerçek görüntü ile aynı bakış yönünden görülen dışbükey (convex) modeli (Torppa 2007; Kabaş 2010)

2.2.5. YYA'ların Dönme Özellikleri Üzerindeki YORP Etkisi

İlk kez Rubincam (2000) tarafından asteroitlerin dönme özelliklerini değiştirebileceği vurgulanan ve kendi önerisiyle YORP etkisi olarak adlandırılan kütle çekimsel olmayan bu etki, asteroitlerin gelen Güneş ışınlarını küresel olmayan yüzey özellikleri nedeniyle eşyönsüz (anizotropik) yayması, ısınan yüzeyin termal ışıma yapması ve böylece oluşan termal tork sonucunda ortaya çıkar. YORP, küçük çaplı asteroitler ($\leq$ 30 km) üzerinde uzun zaman aralığında etkilidir (Ďurech vd. 2018) ve iki farklı kuvvet bileşenine sahiptir; asteroitlerin dönme hızını (ω) artıran veya azaltan, aynı zamanda da sınırlayan ve düzgün (uniform) dağılmasını sağlayan (Pravec vd. 2008) T_z bileşeni, dönme ekseninin eğikliğinin (ϵ) değişmesine ve yine düzgün dağılmasına neden olan (Hanus vd. 2021) T_ϵ bileşenidir (Golubov vd. 2021). YORP etkisi ayrıca asteroitlerin yüksek hızlarda dönmelerine sebep olarak dağılmasına sebebiyet vermesi nedeniyle küçük ($D\leq$ 20 km) çift (binary) asteroitlerin ya da asteroit ikililerinin ya da üçlülerinin[41] oluşum mekanizmalarından biri olduğu düşünülmektedir (Pravec vd. 2010; Margot vd. 2015). Benzer şekilde YORP etkisi, asteroitlerin düşük hızlarda dönmelerine sebep olabilir ve dönme ile açısal momentum eksenlerinin farklı hizalanması sonucunda NPA (non-principal axis) dönen ya da diğer bir adıyla yalpalayan (tumbler) olmalarının en önemli sebeplerinden biridir.

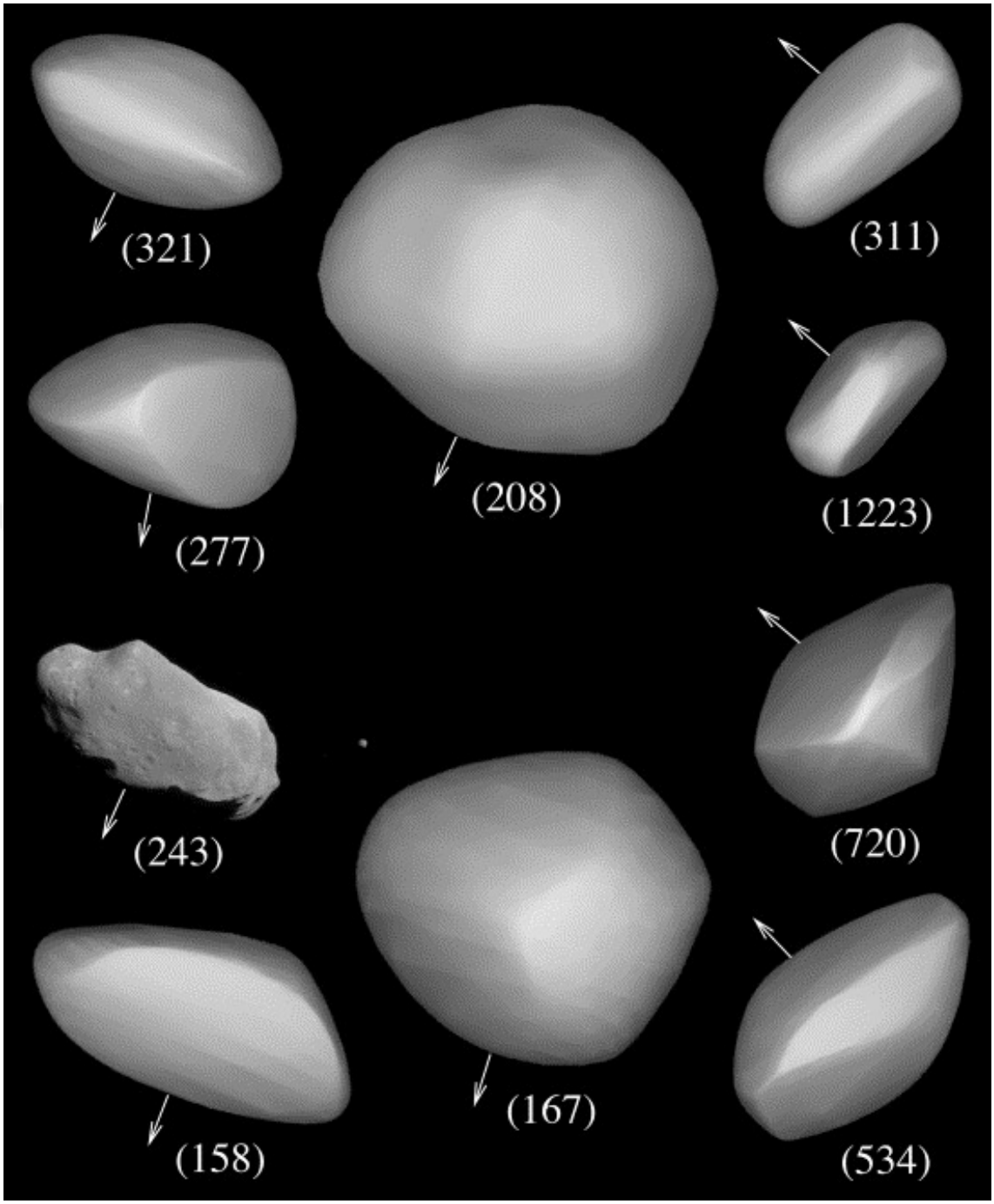
YORP etkisinin en önemli sonuçların bir tanesi ise Slivan vd. (2003) tarafından tersine ışık eğrisi yöntemi kullanılarak ortaya çıkarılan Koronis ailesi asteroitlerin dönme ekseni eğikliklerinin hizalanmış olduğudur (benzer eksen eğikliklerine sahip aile üyeleri, bkz. Şekil 2.20). Elde edilen sonuçlara göre 7.5-9.5 saat aralığında dönme periyoduna sahip prograt dönen[42] asteroitlerin dönme ekseni eğiklikleri $42^\circ - 50^\circ$ aralığında ve çok benzer tutulum boylamına sahipken, 5-13 saat aralığında dönme periyoduna sahip retrograt dönen[43] asteroitlerin ise dönme eğiklikleri $154^\circ - 169^\circ$ aralığındadır (bkz. Şekil 2.20). Aile oluşumu sürecinde gerçekleşen çarpışmalar sonucunda dönme durumlarının rastgele dağılım (random distribution) göstermesi beklenirken, Slivan vd. (2003) tarafından gözlemsel olarak elde edilen bu sonuç oldukça şaşırtıcıdır (Brož 2006). Buradan çıkan sonuca göre aynı fiziksel özelliklere ve uzaklıklara sahip aile üyelerine etkiyen YORP kuvveti aynı şiddette ve yöndedir.

Čapek ve Vokrouhlický (2004) tarafından yapılan simülasyonlar sonucunda ise YORP etkisi altındaki bir cismin dönme eğikliğinin son durumda 0° ya da 180° (her iki durumda da yörünge düzlemine dik) olması gerektiği belirtilmiştir.

[41] Asteroit ikilileri, aralarında kütle çekimsel bir ilişkinin olmadığı ancak aynı yörünge özelliklerini paylaşan genetik olarak ilişkili asteroitlerdir.

[42] Prograt dönme, yörünge hareket yönü ile aynı yönde dönme durumudur ($\epsilon < 90^\circ$)

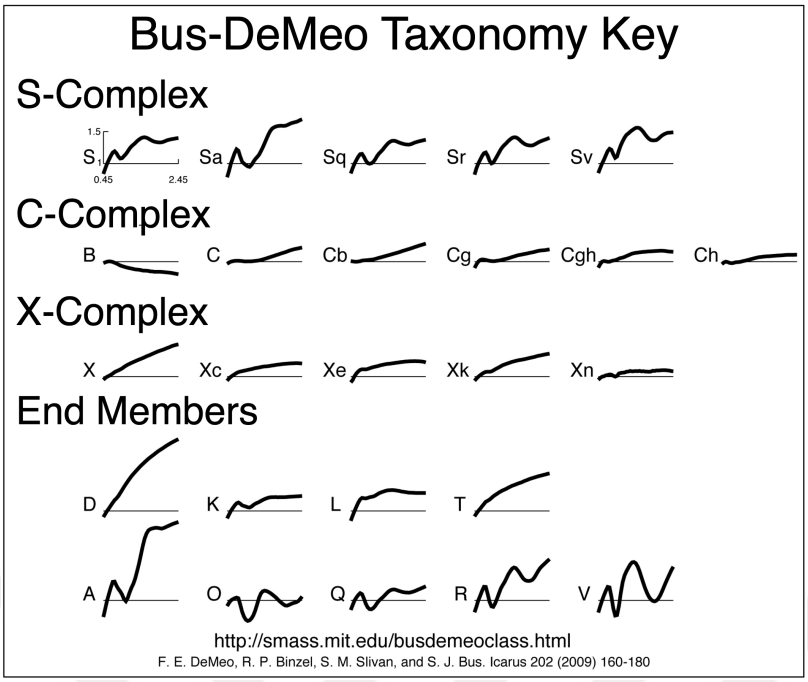
[43] Retrograt dönme, yörünge hareket yönünün tersi yönde dönme durumudur ($\epsilon > 90^\circ$)



Şekil 2.20. Tersine ışık eğrisi yöntemi kullanılarak ortaya çıkarılan, YORP etkisi sebebiyle Koronis ailesi asteroitlerin dönme ekseni eğikliklerinin hizalanması (Slivan vd. 2003)

2.2.6. YYA'ların Tayfsal Özellikleri

Asteroitler için ilk tayf türü araştırmaları Wood ve Kuiper (1963) ve Chapman vd. (1971) tarafından geniş bant filtre kullanılarak elde edilmiş, S ve C olarak iki farklı tayf türü olduğu belirtilmiştir. İlk çalışmaların ardından veri sayısındaki artış ve yüksek çözünürlüklü verilerin elde edilmeye başlamasıyla farklı tayf türleri ve isimlendirmeler de ortaya koyulmaya başlanmıştır. Farklı tayf türleri ile birlikte asteroitlerin kimyasal kompozisyonları, yaşları ve evrimsel süreçleri hakkında önemli bilgiler elde edilmeye başlanmıştır. Günümüzde de kullanılmaya devam eden oldukça kapsamlı tayfsal sınıflandırma David J. Tholen tarafından doktora tez çalışması olarak gerçekleştirilen (Tholen 1984) Tholen sınıflamasıdır. David J. Tholen yaptığı çalışmasında Eight-Color Asteroid Survey (ECAS; Zellner vd. 1985) verilerini kullanmış, fotometrik ve radyometrik verilerden 14 farklı tayf türü (*A, B, C, D, E, F, G, M, P, Q, R, S, T, V*) tanımlamıştır. Tayf gözlemleri ile birlikte asteroitlerin tayf sınıflaması daha da geliştirilmiştir. Schelte J. Bus yaptığı doktora tez çalışmasında ise (Bus 1999) Bus sınıflaması adı verilen yeni bir tayf sınıflaması oluşturmuştur. Daha sonra Bus ve Binzel (2002b) ve Bus ve Binzel (2002a) çalışmaları ile Second Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey (SMASS II) tayfsal verilerinin de kullanılmasıyla Bus sınıflaması daha da geliştirilmiştir. Bus sınıflamasında SMASS II içerisinde yer alan 1447 farklı asteroidin tayf verileri kullanılmış ve 26 farklı tayf türü tanımlanmıştır. DeMeo vd. (2009) yaptıkları çalışmalarında ise Bus sınıflamasında yer alan görünür bölgedeki verilere ek olarak farklı aygıtlarla elde edilen (örn. NASA Infrared Telescope Facility (IRTF) içerisinde yer alan SpeX aygıtı, Rayner vd. 2003) IR bölgesinde alınmış tayf verilerini de kullanmış ve 25 tayf sınıflamasının yer aldığı günümüzde en çok kullanılan tayf sınıflamalarından olan Bus-Demeo tayf sınıflamasını geliştirmiştir (bkz. Şekil 2.21).



Şekil 2.21. Şekilde 25 farklı tayf türünün dalga boyunun bir fonksiyonu olarak yansıtma (reflectance) grafikleri görülmektedir. http://smass.mit.edu/_documents/TaxoCardFigures/Taxonomy_English.pdf [son erişim tarihi: 25.11.2023]

Şekil 2.21'de görülen 25 farklı tayf türünün dalga boyuna (0.45 μm - 2.45 μm aralığında) karşılık yansıtıcılık eğrileri, her tayf türünün karakteristik bir sonucudur. Bir asteroidin en muhtemel tayf türü, elde edilen tayf verisi ile Şekil 2.21'de görülen dalga boyuna karşılık yansıtıcılık eğrileri ile benzerlik taraması yapılarak elde edilir. Şekil 2.21'de grafiklerin oluşturulduğu tüm veriler Microsoft Excel dosya formatında http://smass.mit.edu/_documents/busdemeomeanspectra.xlsx[44] adresinde paylaşılmıştır. Benzer şekilde Bus sınıflaması için dalga boyu ve yansıtıcılık değerleri Bus ve Binzel (2002a) tarafından yayımlanmıştır (Tablo I ve Tablo III).

MIT (Massachusetts Institute of Technology), Hawaii Üniversitesi ve NASA IRTF iş birliğiyle MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey (MITHNEOS) (Binzel vd. 2015; Binzel vd. 2019; Polishook vd. 2014) isimli, YYA'ların tayfsal gözlem kampanyası yürütülmektedir. Bu ortak kampanya kapsamında elde edilen YYA'ların tüm tayfsal gözlem verileri http://smass.mit.edu/minus.html[45] web adresi üzerinden neredeyse gerçek zamanlı olarak paylaşılmaktadır. 25 Kasım 2023 tarihi itibarıyla MITHNEOS kataloğunda 1020 YYA'nın tayf verileri bulunmaktadır. MITHNEOS verileri dışında küçük ana kuşak asteroitlerinin yer aldığı Small Main-Belt Asteroid

[44][son erişim tarihi: 25.11.2023]
[45][son erişim tarihi: 25.11.2023]

Spectroscopic Survey (SMASS) verileri de aynı internet sitesi üzerinden paylaşılmaktadır. 25 Kasım 2023 tarihi itibarıyla katalogda bulunan toplam asteroit tayfı sayısı 3077'dir.

Asteroitlerin tayf sınıflarının belirlenmesi tayf gözlemlerinin yanı sıra fotometrik renk gözlemleri ile de mümkündür. Dandy vd. (2003) tarafından 56 YYA kullanılarak Tholen sınıflamasındaki tayf türlerine göre renk parlakları elde edilmiştir. Kullanılan filtreler, KPNO *B*, Harris *V, R, I* (Johnson-Cousin *B, V, R, I* filtreleri ile neredeyse aynı aralıkta geçirgenliğe sahiptirler) ile birlikte *rGO Z* filtresidir (reduced Graphene-Oxide *Z* filter). *Z* filtresi *S* türü asterotilerde görülen piroksen/olivin soğurmasına karşılık geldiği için oldukça önemlidir ve Dandy vd. (2003)'nin çalışmasında özellikle kullanıldığı belirtilmiştir. Çizelge 2.2'de görülen tayf türlerine karşılık renk değerleri beklenen değerlerdir. Çizelgede yer alan filtreler kullanılarak elde edilen renk değerlerine göre bir asteroidin tayf türü tahmin edilebilir. Örneğin, Erece vd. (2023) tarafından yapılan çalışmada Amor türü bir YYA olan (2059) Baboquivari'nin *V-R* rengi 0.45 ± 0.02^m olarak elde edilmiş ve Çizelge 2.2'ye göre *S* sınıfı bir asteroit olabileceği belirtilmiştir. Yapılan tayf gözlemleri ile de bu sonuç doğrulanmıştır (bkz. Bölüm 4.5).

Çizelge 2.2. (Dandy vd. 2003) tarafından 53 YYA kullanılarak KPNO *B* filtresi (4400 Å), Harris *V, R, I* (5500 Å, 6400 Å, 8100 Å) ve rGO *Z* (reduced Graphene-Oxide *Z* filter; 9100 Å) filtreleri ile elde edilen fotometrik renk parlaklıkları

Tayf Türü	(B-V)	(V-R)	(V-I)	(V-Z)
A	1.018	0.560	0.978	1.001
B	0.666	0.361	0.695	0.761
C	0.698	0.376	0.744	0.836
D	0.734	0.464	0.960	1.113
F	0.633	0.366	0.712	0.783
G	0.739	0.370	0.728	0.820
Q	0.817	0.424	0.725	0.720
R	0.905	0.479	0.767	0.743
S	0.846	0.475	0.889	0.965
T	0.769	0.447	0.910	1.033
V	0.810	0.413	0.651	0.619
X	0.697	0.410	0.818	0.924

Günümüzde belirli bir amaç için adanmış teleskoplar ile tarama gözlemleri sonrasında veri sayısı çoğalmaya başlamıştır. Örneğin, Ivezić vd. (2001) ve Ivezic vd. (2002) tarafından The Sloan Digital Sky Survey (SDSS; York vd. 2000) verileri kullanılarak hazırlanmaya başlanan ve son olarak 4. versiyonu yayımlanan[46] Moving Object Catalog 4 (MOC4) kataloğunda 471569 küçük gezegenin astrometrik ve fotometrik verisi bulunmaktadır. Kızılöte (IR) bölgede gözlem yapan VISTA Hemisphere Survey (VHS; Sutherland vd. 2015) verileri kullanılarak Popescu vd. (2016) tarafından 50000'den fazla nesnenin bulunduğu MOVIS (Moving Objects from VISTA survey) kataloğu[47] hazırlanmıştır. MOVIS-C kataloğunda yer alan yakın IR dalgaboylarında (0.8μ - 2.5μ) asteroitlerin Bus-Demeo tayf sınıflamasına karşılık elde edilen renk değerleri Popescu vd. (2018) tarafından paylaşılmıştır (Appendix B). Benzer şekilde Mainzer vd. (2011) tarafından Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE) projesinin bir parçası olan NEOWISE projesi ile termal IR bölgede (3μ - 22μ) 150000'den fazla asteroidin renkleri[48] (WISE colors) elde edilmiş ve taksonomik ilişkileri araştırılmıştır.

Elde edilen fotometrik renk değerleri kullanılarak yansıtma (reflectance) değerleri de elde edilebilmektedir. DeMeo vd. (2009) tarafından SDSS filtreleri ile elde edilen görünür parlaklığın, Denklem (2.30) kullanılarak yansıtma değerlerine dönüştürülebileceği belirtilmiştir.

$$R_f = 10^{0.4}[(m_f - m_g) - (m_{f\odot} - m_{g\odot})] \tag{2.30}$$

Denklem 2.30'da R_f ilgili filtreye karşılık gelen yansıtma değerini, m_f asteroidin ilgili filtreye karşılık gelen görünür parlaklığını, m_g SDSS *g'* filtresindeki görünür parlaklığını, $m_{f\odot}$ ve $m_{g\odot}$ ise sırasıyla Güneş'in ilgili filtredeki ve SDSS *g'* filtresindeki parlaklıklarını belirtmektedir. Güneş'in SDSS filtrelerindeki renkleri Holmberg vd. (2006) tarafından $(u'-g')_\odot$ = 1.40 $\pm$ 0.08, $(g'-r')_\odot$ = 0.45 $\pm$ 0.02, $(r'-i')_\odot$ = 0.12 $\pm$ 0.01, $(i'-z')_\odot$ = 0.04 $\pm$ 0.02 olarak verilmiştir.

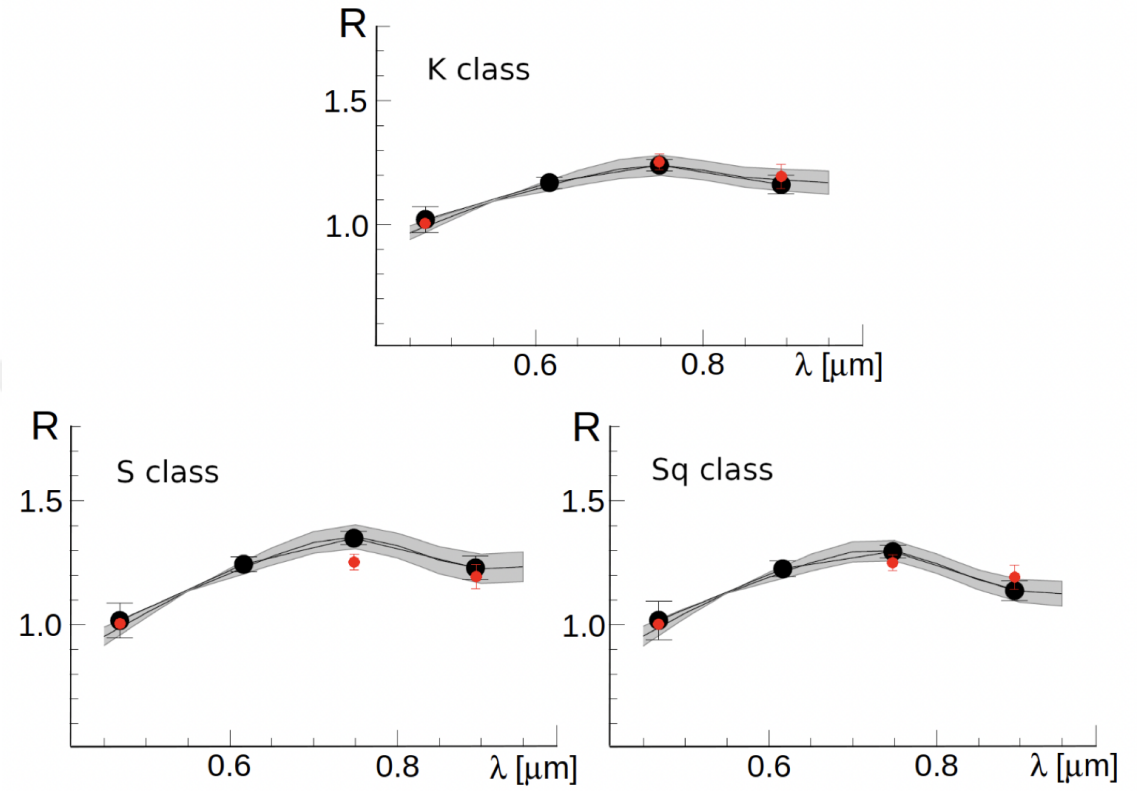
Kwiatkowski vd. (2021), 2021 DW1 için elde ettikleri *g'*, *r'* ve *z'* parlaklıkları ile Denklem 2.30 ve Güneş'in verilen renklerini kullanarak R_g, R_i ve R_z yansıtma değerlerini elde etmişlerdir. Şekil 2.22'de görülen üç farklı grafik 2021 DW1 için olası tayf türlerine karşılık gelen yansıtıcılık grafikleridir. Kırmızı noktalar Kwiatkowski vd.

[46] https://sbn.psi.edu/pds/resource/sdssmoc.html [son erişim tarihi: 25.11.2023]

[47] Genel adıyla MOVIS kataloğu kendi içerisinde üç farklı katalogdan oluşmaktadır. Bunlar asteroitlerin renk değerlerini içeren MOVIS-C kataloğu ile sırasıyla parlaklık ve tespit katalogları olan MOVIS-M ve MOVIS-D kataloglarıdır (Popescu vd. 2016).

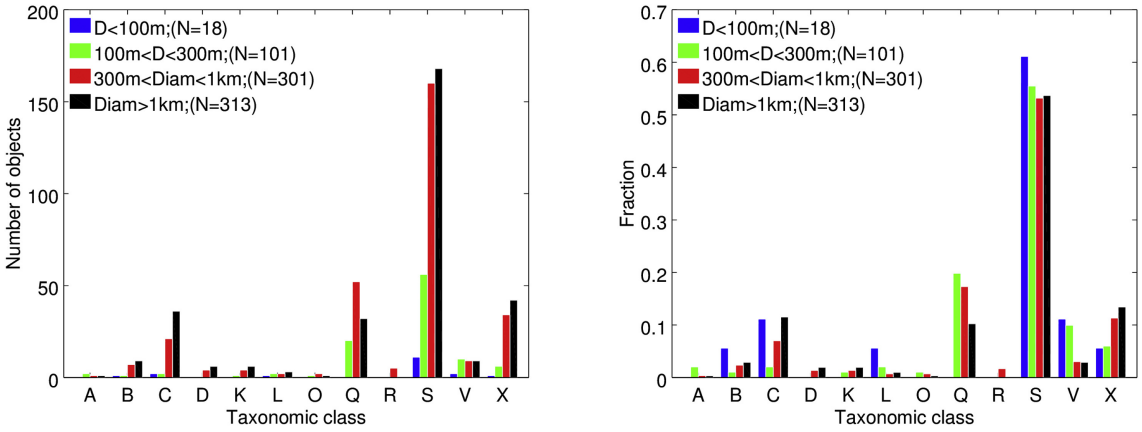
[48] WISE uzay teleskobu dört farklı IR dalga boyunda çalışmaktadır. Bunlar 3.4μ, 4.6μ, 12μ ve 22μ merkez dalgaboylarına karşılık gelen *W1, W2, W3 ve W4* filtreleridir. Detaylar için Mainzer vd. (2005) ve Liu vd. (2008) çalışmalarına bakınız.

(2021) tarafından renk parlaklıkları kullanılarak elde edilen yansıtıcılık değerleridir. Buna göre yalnızca SDSS renkleri kullanılarak, benzer tayf türleri içerisinden 2021 DW1 için en olası tayf türü *Sq* olarak belirtilmiştir.



Şekil 2.22. 2021 DW1 asteroidinin en muhtemel tayf türleri için dalga boyuna karşılık yansıtıcılık değerleri. Kırmızı noktalar elde edilen yansıtıcılık değerleri iken siyah noktalar DeMeo vd. (2009) tarafından verilen değerlerdir. Gri bant ise tayf türünün saçılma aralığını göstermektedir

Perna vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada ise YYA'ların tayf türlerine göre dağılımları incelenmiştir. Şekil 2.23'te açıkça görüldüğü üzere YYA'ların çoğunlukla *S* tayf türünden olduğu anlaşılmaktadır. Bu duruma gözlemsel belirsizliklerin (örn. albedo, faz açısı) etkisi elbette olabilir ancak dinamik taşınma mekanizmaları göz önüne alındığında, iç ana kuşak bölgesinde ($a < 2$ AB, $q > 1.666$ AB) de *S* türü asteroitlerin baskın olması bu durumun oluşmasının en açık sebeplerindendir (örn. Binzel vd. 2004).



Şekil 2.23. European Asteroid Research Node (EARN) verileri kullanılarak, YYA'ların çapları da dikkate alınarak elde edilen tayf türü dağılımı (Perna vd. 2018). Sol grafikte y-ekseni cisim sayısı iken sağ grafikte yüzdelik sayılar cinsinden verilmiştir

2.2.7. YYA'ların Polarimetrik Özellikleri

Güneş'ten çıkan ışık polarize değildir. Güneş ışığı asteroidin yüzeyinden yansırken polarize olur ve polarize olan ışığın polarizasyon derecesi asteroidin yörünge faz açısına (α) bağlıdır. Bu durum asteroidin yüzeyi ile alakalı benzersiz bilgiler içermektedir (örn. Muinonen vd. 2002b; Shkuratov vd. 2002). Temel yansıma modellerine göre yansıyan ışık, yansıma yüzeyine paralel ya da dik düzlemde polarize olur ve kabaca 90° faz açılarında maksimum polarizasyon gerçekleşir (Masiero vd. 2022). Asteroitlerde elde edilen faz açısına bağlı polarizasyon farklılıkları yüzey özelliklerine, yüzeyindeki parçacık büyüklüklerine, heterojenliğine, yansıtıcılık özelliklerine, yoğunluğuna ve yüzey pürüzlülüğüne (porosite) bağlıdır (Belskaya vd. 2009; Cellino vd. 2015b). Genellikle lineer polarizasyon özelliklerine göre çalışmalar yapılan asteroitlerin polarizasyon dereceleri (P_r) dik ($I_\perp$) ve paralel ($I_\parallel$) ışık şiddetlerine göre aşağıdaki denklem ile tanımlanır;

$$P_r = \frac{(I_\perp - I_\parallel)}{(I_\perp + I_\parallel)} \tag{2.31}$$

Denklem 2.31'e göre polarizasyon derecesi paralel ya da dik yöndeki akıların şiddetlerine bağlı olarak pozitif ya da negatif olabilir. P_r'nin minimum olduğu değerler genellikle -0.2% - 2% seviyelerindedir ve faz açıları 8°-10° aralığındadır (Belskaya vd. 2009). Minimum polarizasyon sonrasında faz açısı arttıkça P_r de artar ve genellikle 18° - 22° aralığında $P_r = 0\%$ olur (Mishchenko vd. 2010; Belskaya vd. 2009) ve bu açıya (polarizasyonun negatiften pozitife döndüğü açı) *dönüş açısı* (α_{inv} *ya da* α_0, *inversion angle)* denir. Belskaya vd. (2009)'a göre P_r'nin 0% olması $I_\perp$ ve $I_\parallel$ bileşenlerinin aynı

şiddette olması ya da lineer polarizasyon düzlemindeki yönelimden dolayı değil, gerçekten de lineer polarizasyondaki azalmadan kaynaklıdır. Dönüş açısından daha büyük açılarda ise P_r pozitif olur (örn. Dollfus ve Zellner 1979).

Ana kuşak asteroitlerinin gözlenebilir olduğu maksimum yörünge faz açıları yaklaşık $35°$'ye kadardır ve bu polarizasyon derecesinin ölçümünü sınırlar. YYA'lar ise çok daha büyük faz açılarında gözlenebilir durumdadır ve polarizyon derecelerinin maksimum değerlerine (P_{max}) ulaştığı faz açılarına ($\sim 80° - 100°$) kadar gözlenebilirler (Cellino vd. 2011). Farklı faz açılarında elde edilen polarizasyon dereceleri ile polarizasyon eğrisi ya da bir diğer adıyla polarimetrik faz eğrisi ($P_r(\alpha)$) elde edilir. Lineer polarizasyon derecesinin genel olarak ifade edildiği Denklem 2.31'in yanı sıra polarimetrik faz eğrisinin farklı empirik tanımları da yapılmıştır. Lumme ve Muinonen (1993) tarafından 4-parametreli trigonometrik fonksiyon ile aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir;

$$P(\alpha) = b\, sin^{c_1}(\alpha)\, cos^{c_2}(\alpha/2)\, sin(\alpha - \alpha_{inv}) \tag{2.32}$$

Denklem 2.32'de yer alan b, c_1, c_2 ve α_{inv} eğrinin şeklini belirleyen katsayılardır. Denklem $0°$ ve $180°$ faz aralığında kullanılabilir yani YYA'lar için uygun bir eğri tanımıdır (örn. Goidet-Devel vd. 1995; Penttilä vd. 2005; Erece vd. 2023).

Piironen vd. (2000) tarafından polarimetrik faz eğrisinin 3-parametreli matematiksel ifadesi aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır;

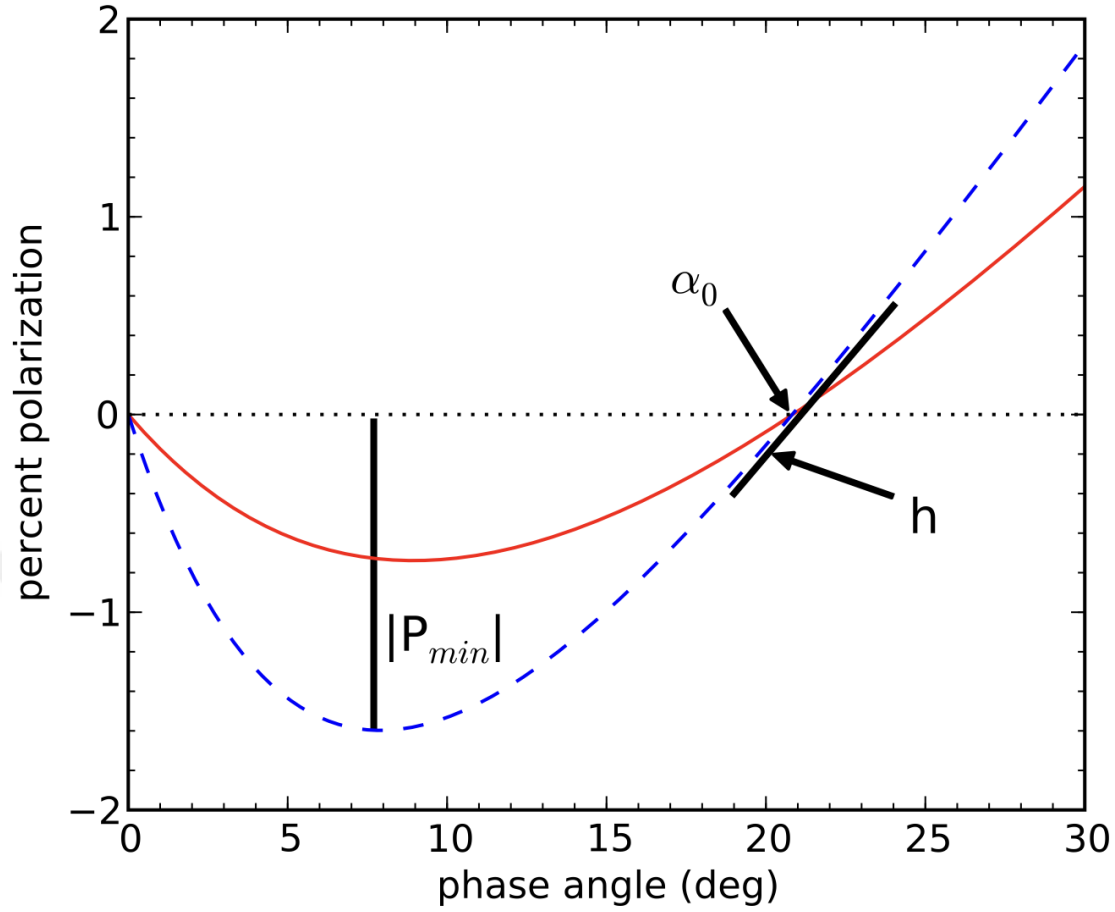
$$P(\alpha) = A_0(\exp^{(-\alpha/A_1)} - 1) + A_2\alpha \tag{2.33}$$

Denklem 2.33'te yer alan A_0, A_1 ve A_2 eğrinin şeklini belirleyen serbest katsayılardır. Bu denklem $0°$ ve $30°$ aralığında doğru sonuçlar vermektedir yani ana kuşak asteroitleri için kullanılabilir (örn. Cellino vd. 2010).

Muinonen vd. (2002a) ise polarimetrik faz eğrisinin bir başka 4-parametreli matematiksel ifadesini aşağıdaki şekilde tanımlamıştır;

$$P(\alpha) = a \exp^{(\alpha/d)} + b + k\alpha \tag{2.34}$$

Denklem 2.34'te yer alan a, b, d ve k eğrinin şeklini belirleyen serbest parametrelerdir. Bu denklem de $0°$ ve $30°$ aralığında kullanılır (örn. Kaasalainen vd. 2003; Muinonen vd. 2009)



Şekil 2.24. İki farklı tayf türünden asteroit için polarimetrik faz eğrisi illüstrasyonu (Masiero vd. 2012). Kırmızı eğri tipik *S* türü bir asteroit için faz eğrisi iken kesikli mavi eğri ise tipik bir *C* türü asteroidin faz eğrisini ifade etmektedir. Görselde ayrıca her iki tür için P_{min} ve α_{inv} açısının yanı sıra *S* türü için *h* polarimetrik eğim (eğrinin α_{inv} noktasından geçen teğet) gösterilmiştir

Polarimetrik faz eğrisinin ilişkili olduğu en önemli fiziksel parametrelerden biri geometrik albedodur (p_v). 70'li yıllarda adeta çığır açan bir gelişme olarak polarimetrik eğim parametresinin (h) albedo ile ilişkisi Denklem (2.35)'deki gibi tanımlanmıştır (Bowell ve Zellner 1974; Zellner vd. 1977; Lupishko ve Mohamed 1996; Cellino vd. 1999; Cellino vd. 2012; Cellino ve Bagnulo 2014; Masiero vd. 2012; Shestopalov ve Golubeva 2014).

$$\log(p_v) = C_1 \log(h) + C_2 \tag{2.35}$$

Polarimetrik eğim (h) yukarıda da bahsedildiği üzere faz açısına bağlı lineer polarizasyon eğrisinin α_{inv} açısındaki eğimidir (bkz. Şekil 2.24). C_1 ve C_2, literatürde

bilinen albedo ve polarimetrik eğim değerleri kullanılarak en küçük kareler yöntemiyle kolayca elde edilebilen katsayılardır. Denklem 2.35'e aynı zamanda polarimetrik eğim ve albedo yasası da denilmektedir (Cellino vd. 2015a). Veri sayısının artması ile birlikte polarimetrik eğim-albedo ilişkisinin katsayıları ve nominal hata değerleri farklı denklemler kullanılarak elde edilmiştir. Cellino vd. (2015a) yaptıkları çalışmalarında bu katsayıları hesaplamışlardır.

Çizelge 2.3. Cellino vd. (2015a) tarafından elde edilen katsayılar ve nominal belirsizlik değerleri

Denklem	**Katsayı 1**	**Katsayı 2**
$log(p_v) = C_1 \log(h) + C_2$	$C_1 = -1.111 \pm 0.031$	$C_2 = -1.781 \pm 0.025$
$log(p_v) = C_1 \log(h) + C_2 (p_v \geq 0.08)$	$C_1 = -0.800 \pm 0.041$	$C_2 = -1.467 \pm 0.037$
$log(p_v) = C_1 \log(h_{ABC}) + C_2$	$C_1 = -1.139 \pm 0.026$	$C_2 = -1.850 \pm 0.021$
$log(p_v) = C_1 \log(h_{ABC}) + C_2 (p_v \geq 0.08)$	$C_1 = -0.780 \pm 0.037$	$C_2 = -1.469 \pm 0.036$
$log(p_v) = C_3 \log(P_{min}) + C_4$	$C_3 = -1.419 \pm 0.034$	$C_4 = -0.918 \pm 0.006$
$log(p_v) = C_3 \log(P_{min}) + C_4 (p_v \geq 0.08)$	$C_3 = -0.869 \pm 0.042$	$C_4 = -0.789 \pm 0.008$
$log(p_v) = C_{\Psi 1} \log(\Psi) + C_{\Psi 2}$	$C_{\Psi 1} = -0.987 \pm 0.022$	$C_{\Psi 2} = -0.458 \pm 0.013$

Çizelge 2.3'te, h ifadesinin görüldüğü denklemlerde (1. ve 2. sıradaki denklemler) elde edilen katsayılar lineer fit kullanılarak, h_{ABC} ifadesinin görüldüğü denklemler (3. ve 4. sıradaki denklemler) ise eksponansiyel fit kullanılarak elde edilmiştir. $p_v \geq 0.08$ ifadesinin görüldüğü denklemler (2., 4. ve 6. sıradaki denklemler) ise albedo değeri 0.08'den büyük olan asteroitler için kullanılacağını belirtmektedir. P_{min} minimum polarizasyon derecesidir (5. ve 6. sıradaki denklemler). Ψ ise 30° ve 10° açılarındaki polarizasyon derecelerinin farkıdır ($P_r(30^\circ) - P_r(10^\circ)$) (7. sıradaki denklem). Özetlemek gerekirse, polarimetrik gözlemler sonucunda polarizasyon dereceleri, α_{inv}, h, P_{min} değerleri hesaplanan bir asteroidin albedo değeri Çizelge 2.3'teki katsayılar kullanılarak kolaylıkla hesaplanabilir. Ayrıca, Erece vd. (2023) tarafından (2059) Baboquivari asteroidi için elde edilen tek nokta polarizasyon derecesinden albedo değerinin elde edilmesi için 2. sıradaki denklem kullanılmış ve Bölüm 3.5'te detaylarıyla anlatılmıştır.

2.3. $H < 18^m$ Olan YYA'ların Dağılımı

YYA'ların kaynak bölgelerinin araştırılması ile birlikte yörünge (*a, e, i*), büyüklük (*D*), mutlak parlaklık (*H*) vb. dağılımlarının incelenmesi günümüzde çağdaş gezegen bilimi çalışmalarının oldukça önemli bir konusudur (Harris vd. 2015; Binzel vd. 2015; Granvik vd. 2018). Son 30 yıl içerisinde birçok yansız (debiased) yörünge dağılımı ve *H-frekans dağılımı (HFD)*[49] çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda kullanılan en temel denklem; *a, e, i* ve *H*'nin bir fonksiyonu olarak, *n* bilinen YYA popülasyonu, ϵ keşif yoğunluğu ve *N* gerçek YYA popülasyonu arasındaki ilişkiyi tanımlayan aşağıdaki denklemdir;

$$n(a, e, i) = \epsilon(a, e, i, H)N(a, e, i, H) \tag{2.36}$$

Yansız yörünge dağılımı ve *HFD* ile ilgili ilk çalışma Rabinowitz (1993) tarafından gerçekleştirilmiştir. *Spacewatch* projesi[50] kapsamında Eylül 1990 ve Aralık 1991 tarihleri arasında keşfedilen 23 asteroit kullanılarak yapılan çalışmada, $D{\sim}10$ *m* olan YYA'ların Yer'e çarpma ihtimallerini günümüzdeki hesaplamalara göre 100 kat daha fazla hesaplanmıştır (Brown vd. 2013). Rabinowitz vd. (2000) ise benzer yöntemi kullanarak yaptıkları çalışmada *JPL Near-Earth-Asteroid Tracking (NEAT)* programı kapsamında keşfedilen 46 YYA ile *HFD* hesaplamasını yapmış ve $H < 18^m$ olan YYA'ların sayısını 700 ± 230 olarak belirtmiştir.

Bottke vd. (2000) yaptıkları çalışmada YYA'ların en baskın kaynak bölgeleri olan ν_6 seküler rezonans bölgesini, Mars yörüngesini kesenlerin bulunduğu bölgeyi ve 3:1 ortalama hareket rezonans bölgesini göz önüne alarak HFD hesaplaması yapmış ve $H < 18^m$ olan YYA'ların sayısını 910^{+100}_{-120} olarak belirtmiştir. Daha sonra Bottke vd. (2002), JFC bölgesini de dikkate alarak yaptıkları genişletilmiş çalışmada ise $H < 18^m$ olan YYA'ların sayısını 960 ± 120 olarak tahmin etmiştir.

D'Abramo vd. (2001) yaptıkları çalışmada daha farklı bir yaklaşım geliştirmiş ve bilinen asteroitlerin yeniden keşfedilebilme olasılığını da göz önüne alarak HFD hesaplamasını yapmıştır. 1999-2000 yıları arasında Lincoln Near-Earth Asteroid Research (LINEAR) projesi kapsamında keşfedilen 784 YYA kullanarak $H < 18^m$ olan YYA'ların sayısını 855 ± 101 olarak hesaplamıştır. Harris ve D'Abramo (2015) tarafından aynı çalışmanın yeniden ve 11132 YYA ile daha geniş bir model kullanarak yapılması sonrasında ise $H < 18^m$ olan YYA'ların sayısının 1230 ± 27 olması gerektiğini belirtmiştir.

[49] H-frequency distribution
[50] https://spacewatch.lpl.arizona.edu/ [son erişim tarihi: 25.11.2023]

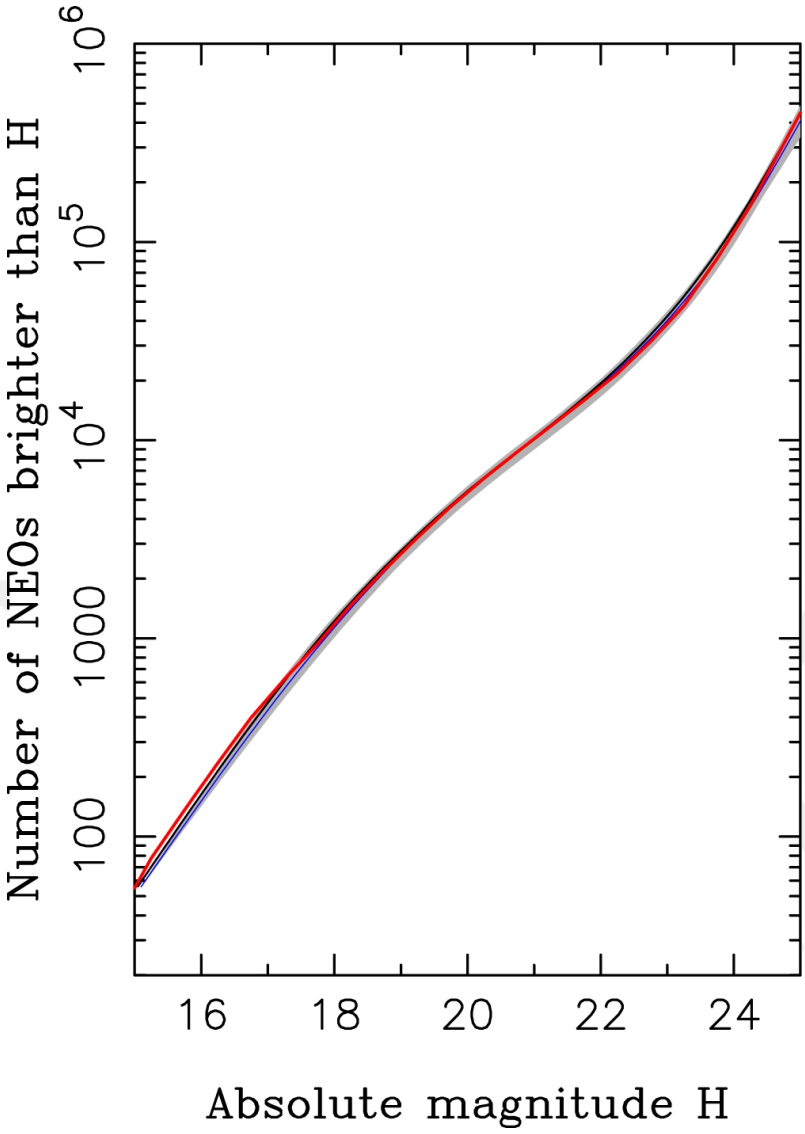
Stuart (2001) tarafından yapılan çalışmada LINEAR projesi kapsamında tespit edilen 1343 YYA'nın içerisindeki 606 farklı YYA kullanılmış ve $H < 18^m$ olan YYA'ların sayısının 1227^{+170}_{-90} olması gerektiği belirtilmiştir. Granvik vd. (2018) bu çalışmada elde edilen sayının Bottke vd. (2000)'de elde edilen sayıdan fazla olmasının sebebinin $i \geq 20°$ olan YYA'ları da içermesinden dolayı olduğunu vurgulamıştır. Stuart ve Binzel (2004) aynı çalışmayı genişleterek tayf türü ve albedo özelliklerini de göz önüne almıştır. Buna göre $D > 1$ km olan YYA'ların sayısının 1090 ± 180 olması gerektiğini ve tüm YYA'ların %62'sinin düşük yansıtıcılık özelliklerine sahip (dark asteroids) *C, D* ve *X* tayf türünden olması gerektiğini vurgulamıştır. Morbidelli vd. (2002)'ye göre ise bu oran %46'dır.

Mainzer vd. (2011) NEOWISE projesi kapsamında IR bölgede (3μ - 22μ) elde edilen gözlem verilerini kullanarak $D > 1$ km olan 981 ± 19 YYA olması gerektiğini hesaplamıştır. Ayrıca $p_v < 0.1$ olan yani düşük yansıtıcılık özelliklerine sahip YYA oranının ise %40 olması gerektiğini belirtmiştir. Mainzer vd. (2012) aynı çalışmayı genişletmiş ve $D > 100$ m olan PTA sayısının 4700 ± 1450 olması gerektiğini hesaplamış ve yine aynı çalışmasında Aten grubu YYA'ların Amor grubu YYA'lardan daha yüksek yansıtıcılığa sahip olduğunu vurgulamıştır.

Granvik vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen kapsamlı çalışmada ise ana kuşak içerisindeki yedi farklı YYA kaynak bölgesi (ν_6, 3:1, 5:2, 2:1, Hungaria asteroitleri ve Phocaea asteroitleri) göz önüne alınmış ve $H < 17.75^m$ ($D = 1$ km için $p_v = 0.14$'e karşılık gelen *H*) olan asteroitlerin sayısı 962^{+52}_{-56}, $H < 25^m$ olan asteroitlerin sayısı ise 802^{+48}_{-42} x 10^3 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca YYA bölgesindeki YYA gruplarının oranları da hesaplanmış ve %39.4 Amor asteroitleri, %54.4 Apollo asteroitleri, %3.5 Aten asteroitleri, %1.2 Atira asteroitleri ve %0.3 Vatira asteroitleri olması gerektiği belirtilmiştir.

Nesvorný vd. (2023) yaptıkları çalışmalarında Yarkovsky etkisini de göz önüne almışlardır. On iki farklı YYA kaynak bölgesi (ν_6, 3:1, 5:2, 7:3, 8:3, 9:4, 11:5, 2:1, JFC bölgesi, Hungaria asteroitleri, Phocaea asteroitleri ve iç ana kuşakta yer alan zayıf rezonans bölgesi) kullanılarak yapılan çalışmada Catalina Sky Survey (CSS) tarafından keşfedilen asteroitlere, *MultiNest* (Feroz ve Hobson 2008; Feroz vd. 2009) örneklem rutini ile oluşturulan test nesneleri model fiti oluşturmak için kullanılmıştır. *NEOMOD simülatörü*[51] adını verdikleri rutin kullanılarak $H < 17.75^m$ olan YYA'ların sayısının 931 ± 30 olması gerektiğini belirtmişler ve elde ettikleri sonucun Harris ve Chodas (2021) ile uyumlu olduğunu vurgulamışlardır (bkz. Şekil 2.25). Aynı zamanda Nesvorný vd. (2023), $H < 17.75^m$ olan YYA'ların Yer ile çarpışma sıklığını ise Harris ve D'Abramo (2015) ve Morbidelli vd. (2020) çalışmaları ile benzer şekilde $\simeq 630$ kyıl olarak hesaplamışlardır.

[51]Nesvorný vd. (2023) NEOMOD simülatör kodunu verilen bağlantı üzerinden paylaşmışlardır: https://www.boulder.swri.edu/đavidn/NEOMOD_Simulator [son erişim tarihi: 25.11.2023]



Şekil 2.25. Nesvorný vd. (2023) tarafından yayımlanan YYA'ların yansız mutlak parlaklık dağılımı. Siyah çizgi medyan değerine karşılık gelirken mavi çizgi en iyi fit doğrusunu belirtmektedir. Kırmızı çizgi ise karşılaştırma amaçlı Harris ve Chodas (2021) tarafından hesaplanan mutlak parlaklık dağılımını göstermektedir. Gri bant ise MultiNest algoritmasından elde edilen 3-σ hata aralığını belirtmektedir. Bu aralık tanım gereği model çıktılarının %99.7'sine karşılık gelmektedir

Son olarak bu tez çalışmasında kriter olarak kullanılan 18^m değerinin, YYA popülasyonunun belirlenebilmesi ile ilgili çalışmalarda da kriter olarak kullanıldığı, bazı çalışmalarda ise 17.75^m kriterinin kullanıldığı açıkça görülmektedir. Literatürde elde edilen sayılara karşılık NASA JPL/Horizons veri tabanındaki güncel sayılar ise 25 Kasım 2023 tarihi itibarıyla $H < 18^m$ için 1056, $H < 17.75^m$ için ise 845'tir. [52].

[52] https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_query.html [son erişim tarihi: 25.11.2023]

2.4. (2059) Baboquivari Asteroidinin Önceki Çalışmaları

Bu tez çalışmasında özel olarak üzerinde durulan (2059) Baboquivari (1963 UA) (bundan sonra Baboquivari olarak anılacak) asteroidi ilk kez 16 Ekim 1963 tarihinde İndiana Üniversitesi'ne bağlı, Goethe Link Gözlemevi'nde (gözlemevi kodu:760) keşfedilmiştir. Daha sonra gözlenemeyen ve kaybolduğu düşünülen Baboquivari, 5 Haziran 1976 tarihinde Kitt Peak Ulusal Gözlemevi'nde (KPNO)[53] bulunan ve Steward Gözlemevi'ne bağlı 2.3 metrelik Bok teleskobu[54] kullanılarak tekrar gözlenmiştir. Baboquivari adı ise KPNO yakınlarında yer alan ve Papago yerlileri için kutsal kabul edilen Babaquivari tepesinden dolayı yerlileri onurlandırmak adına Frank Kelley Edmondson tarafından önerilmiştir. Baboquivari, görece basık yörüngeye sahip Amor türü bir YYA'dır[55] (bkz. Çizelge 2.4).

Çizelge 2.4. (2059) Baboquivari'nin temel yörünge parametreleri

a (AB)	e	i (°)	q (AB)	Ω (°)	ω (°)	T_j	n (°/gün)	P (yıl)
2.6419	0.25052	11.0232	1.2367	200.6924	192.4591	3.154	0.2295	4.2942

n: Ortalama hareket, **P**: Periyot

Baboquivari asteroidinin yavaş dönen bir YYA olması, görece basık bir yörüngeye sahip olması ve uzun periyot aralıklarında görünür/gözlenebilir olması (bkz. Çizelge 2.5) bu asteroide olan ilgimizi artırmıştır.

Çizelge 2.5. (2059) Baboquivari'nin geçmişte/gelecekte gerçekleşen/gerçekleşecek Yer ile olan yakın geçişleri

Tarih	Uzaklık (AB)	Görünür Parlaklık (V)
1963-10-20	0.25052	13.9^m
1976-10-25	0.43060	16.3^m
2019-10-11	0.47426	16.5^m
2032-10-24	0.34652	15.6^m
2075-10-20	0.31429	15.3^m
2088-10-26	0.39975	16.1^m

Aynı zamanda literatürde Baboquivari'nin fiziksel parametrelerinin yalnızca bazı tarama verilerinden elde edilmiş olması da asteroidin önemini daha da artırmıştır. Daha

[53] Kitt Peak National Observatory (KPNO), gözlemevi kodu:695

[54] http://james.as.arizona.edu/ psmith/90inch/90inch.html [son erişim tarihi: 25.11.2023]

[55] https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=babouquivari [son erişim tarihi: 25.11.2023]

önce bahsedildiği üzere ve Çizelge 2.5'te de açıkça görüldüğü üzere Baboquivari ve benzeri diğer YYA'ların gözlenebilir aralıkları oldukça uzun olabilmektedir. Yer'e yakın geçiş yaptıkları yani gözlenebilir olduğu tarihler Yer tabanlı gözlemevleri için oldukça önemli fırsatlar oluşturmaktadır. Baboquivari'nin 2019 yılındaki yakın geçişi sırasında TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi (TUG) imkanları kullanılarak fotometrik, tayfsal ve ilk kez elde edilen polarimetrik gözlemleri bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilmiştir (bkz. Bölüm 4.5).

Baboquivari ile ilgili ilk çalışma Vereš vd. (2015) tarafından Pan-STARRS1[56] teleskobu tarama verileri kullanılarak yapılmıştır. Görece yüksek belirsizliğe sahip bu verilerden Baboquivari için *H,G* model (Bowell vd. 1989) parametreleri H = 16.45 $\pm$ 0.59^m, G = 0.8 $\pm$ 0.41 olarak elde edilirken, *H,G*$_{12}$ (Muinonen vd. 2010) model parametreleri H = 16.30 $\pm$ 0.32^m, G_{12} = -0.18 $\pm$ 0.23 olarak elde edilmiştir.

Warner ve Stephens (2020a) elde ettikleri gözlem verilerinden Baboquivari'nin dönme periyodunu 129.43 saat olarak bulmuşlardır. Uzun periyodu sebebiyle NPA dönen bir YYA adayı olabileceğini aynı zamanda da muhtemel çok uzak çift asteroit (very wide binary asteroid) olabileceğini raporlamışlardır. Aynı zamanda elde ettikleri verileri Asteroid Lightcurve Data Exchange Format (ALCDEF; Warner vd. 2011) adı verilen veri tabanında yayımlamışlardır. Baboquivari'nin ALCDEF veri tabanında 21 Temmuz 2019 tarihinden 23 Ağustos 2019 tarihine kadar farklı günlerde alınmış 827 gözlem verisi bulunmaktadır.

Gaia DR3 kataloğunda da Baboquivari'ye ait fotometrik veriler bulunmaktadır. 11 Eylül 2015 ile 25 Mart 2016 tarihleri arasında 134 gözlem verisi yayımlanmıştır. Literatürde Baboquivari için bu veriler kullanılarak yapılan bir çalışma henüz bulunmamaktadır. Muhtemel bakış açısı etkisi, bilinmeyen dönme ve fiziksel özellikleri ile asteroidin görüntü içerisinde gerçekte bulunması ancak parlaklığının çok düşük olması sebebiyle görünmemesi gibi etkiler yüzünden bu veriler bu çalışma kapsamında da kullanılmaya uygun görülmemiştir.

Masiero vd. (2021) NEOWISE verilerini kullanarak birkaç yüz YYA için albedo hesabı yapmıştır. Termal modelleme tekniğini (thermal modelling technique) kullanarak ve fotometrik eğim değeri için G = 0.15 kabulü yaparak Baboquivari için H = 15.90^m, D_{eff} = 1.84 $\pm$ 0.79 km ve p_v = $0.179^{+0.188}_{-0.092}$ değerlerini oldukça yüksek belirsizlikle hesaplamıştır.

Sonka vd. (2021) ise Baboquivari'yi farklı bir açıdan incelemiş ve uzay görevleri için uygunluğunu araştırmıştır. Asteroidin düşük Δv hızı (5.17 km/s) sebebiyle uzay görevleri için uygun olduğunu belirtmiştir. Bunun yanı sıra Sonka vd. (2021), farklı

[56] http://www2.ifa.hawaii.edu/research/Pan-STARRS.shtml [son erişim tarihi: 25.11.2023]

teleskoplar kullanarak Baboquivari için 0.48^m genliğe sahip ışık eğrisi ve 133.3222 ± 0.1 saatlik dönme periyodu ile 0.63^m genliğe sahip ışık eğrisi ve 152.1 ± 0.1 saatlik iki farklı dönme periyodu elde etmiştir.

Fotometrik verilerin yanı sıra Baboquivari'nin MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey (MITHNEOS) veri tabanında[57] (Binzel vd. 2019) yayımlanmamış tayf verileri bulunmaktadır. Baboquivari'nin MITHNEOS projesi kapsamında elde edilen verileri, Stephen M. Slivan tarafından geliştirilen web tabanlı bir uygulama[58] üzerinden muhtemel tayf türü tespit edilmeye çalışılmış ve sistem tarafından *S, Sq, Q, L* ya da *K* türünden olabileceği öngörülmüştür. TUG'da yapılan gözlemlerden elde edilen ve Erece vd. (2023) tarafından yayımlanan Baboquivari'nin fiziksel özelliklerine dair detaylı sonuçlar Bölüm 4.5'te anlatılacaktır.

[57] http://smass.mit.edu/minus.html [son erişim tarihi: 25.11.2023]
[58] http://smass.mit.edu/cgi-bin/busdemeoclass-cgi [son erişim tarihi: 25.11.2023]

3. MATERYAL VE METOT

Bu tez kapsamında $H < 18^m$ olan YYA'ların fiziksel özelliklerinin araştırılması için TUG T100 teleskobuna 19AT100-1482 ve 21AT100-1783 numaralı iki farklı proje verilmiştir ve projeler kapsamında sırasıyla 31 ve 11 gözlem gecesi alınmıştır. T100 teleskobu ile elde edilen fotometrik verilerin yanı sıra RTT150 teleskobundan (Aslan vd. 2001) yalnızca Baboquivari asteroidi için fotometrik, polarimetrik ve tayfsal gözlem verileri elde edilmiştir. $H < 18^m$ olan YYA'ların dinamik özelliklerinin araştırılması için ise JPL/Horizons veri tabanındaki tüm $H < 18^m$ olan YYA'ların güncel konum bilgileri elde edilmiş ve bu veriler üzerinden sayısal integrasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde öncelikle $H < 18^m$ olan gözlenebilir YYA'lar için gözlem verilerinin nasıl elde edildiği, elde edilen verilerin nasıl indirgendiği ve fiziksel özelliklerinin nasıl hesaplandığı üzerinde durulacak ardından ise tüm $H < 18^m$ olan YYA'ların sayısal integrasyonlar ile dinamik özelliklerinin nasıl elde edildiği detayları ile anlatılacaktır.

3.1. Gözlem Verilerinin Elde Edilmesi

TUG teleskoplarına verilen gözlem projeleri kapsamında elde edilen gecelerin verimli olarak kullanılabilmesi ve gözlenebilecek $H < 18^m$ olan YYA'ları anlık olarak belirleyebilmek için Asteroid-Altitude Calculation (AAC) adında bir yazılım[59] geliştirilmiştir. Yazılım, $H < 18^m$ olan YYA'ların gözlem gecesi anında ya da belirtilen herhangi bir anda TUG Bakırlıtepe Yerleşkesi'ne göre gözlenebilirlik durumlarının elde edilebilmesi için tasarlanmıştır. Ancak tek bir cisim ya da oluşturulacak herhangi bir nesne listesi için de sonuç üretmektedir. TUG'un yanı sıra yazılım içerisinde, ortak çalışma yürüttüğümüz Kore Cumhuriyeti'nde (Güney Kore'de) yer alan Sobaeksan Optical Astronomy Observatory (SOAO, gözlemevi kodu:345) için de gözlenebilirlik grafikleri oluşturulabilir (komut satırına *-o tug* yerine *-o soao* yazılmalıdır) ya da yeni gözlemevleri de eklenebilir (bkz. Şekil 3.1).

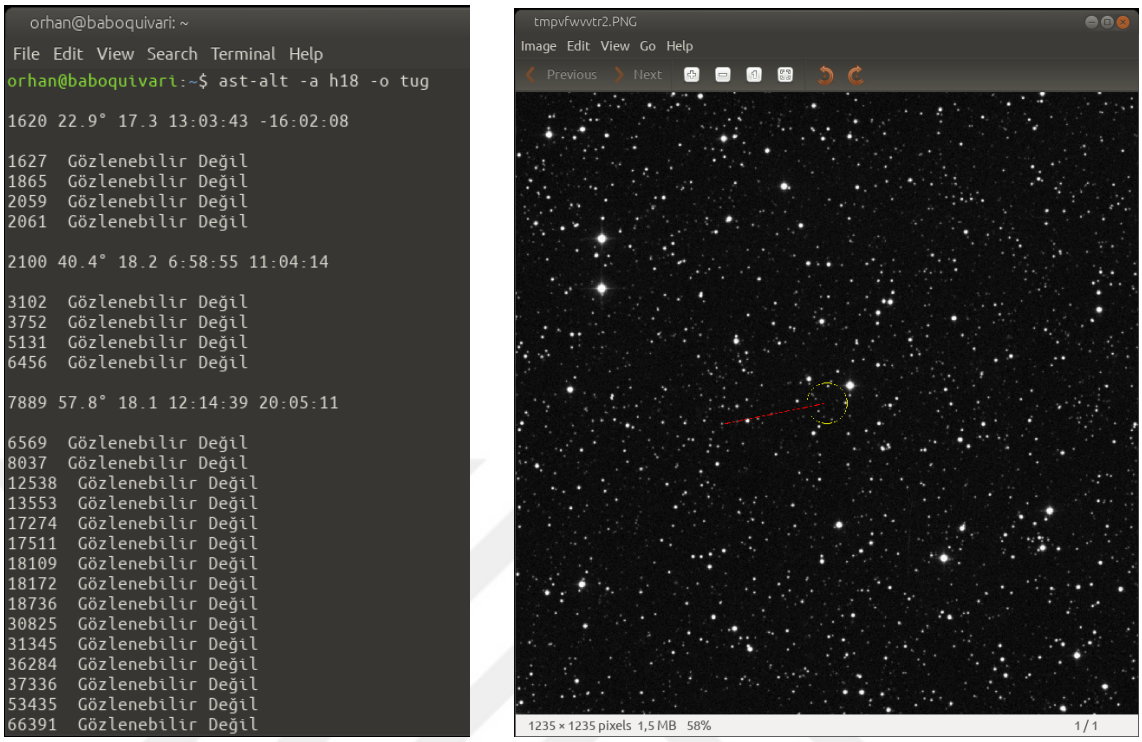
TUG'a önerilen 19AT100-1482 ve 21AT100-1783 numaralı T100 teleskobu gözlem projeleri sonucunda TUG tarafından tahsis edilen toplam 42 gecenin 22 gecesinde 3 saatten fazla gözlem yapılabilmiştir (bkz. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3[60]). Gözlem yapılamayan gecelerde teknik bir sorunla karşılaşılmamış ancak olumsuz hava şartları (bulutluluk, rüzgar, yüksek nem vb.) yaşanmıştır.

Gözlem yapılan gecelerde AAC yazılımı kullanılarak tüm $H < 18^m$ olan YYA'lar içerisinden gözlenebilir olanlar belirlenerek oluşturulan gözlem programı kullanılmıştır. Buna göre Amor (8), Apollo (4) ve Aten (2) grubundan toplam 14 farklı YYA için gözlem

[59] https://github.com/orhanerece/Asteroid-Altitude-Calculation

[60] http://t100web.tug.tubitak.gov.tr/t100projeistatistik/ [son erişim tarihi: 25.11.2023]. Bağlantıya yalnızca TUG ağı içerisinden erişilebilmektedir.

verisi elde edilmiştir. Gözlemler çoğunlukla Johnson-Bessel *V* ve *R* bantları kullanılarak elde edilmiş, bazı asteroitler için SDSS (*u', g', r', i', z'*) bantlarında da veri alınmıştır.



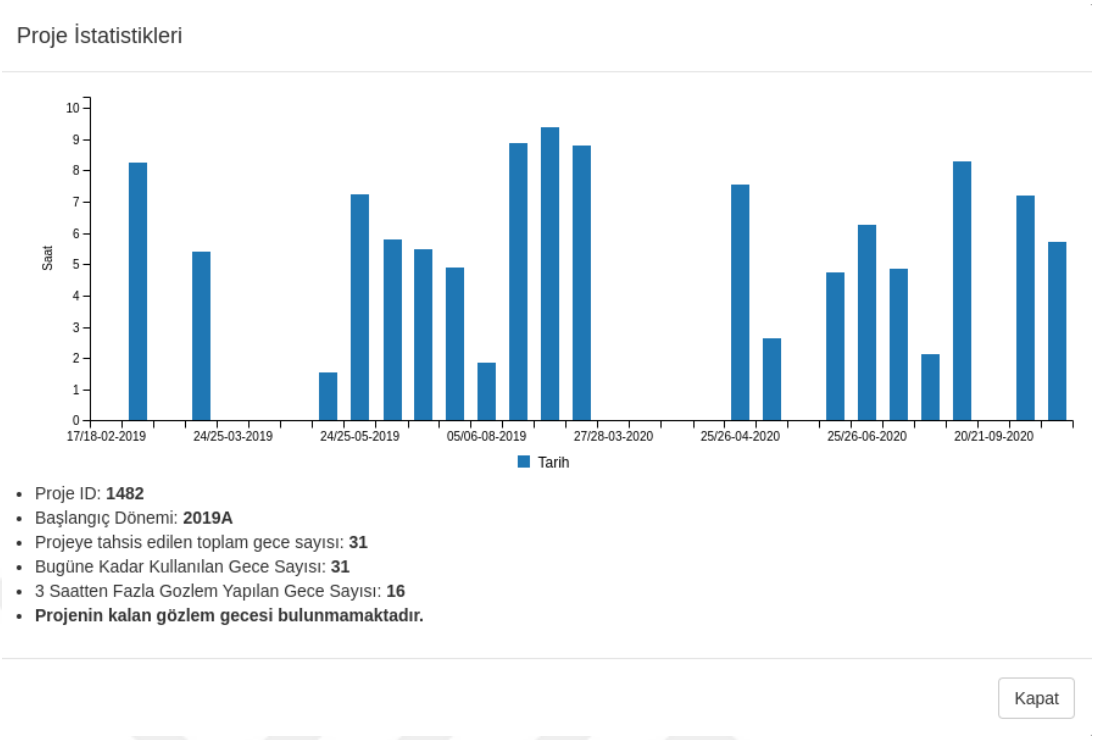
(a) Komut satırı (terminal) üzerinden çalıştırılan AAC yazılımının ilgili YYA'lar için çıktısı. Gözlenebilir olan YYA'ların sırasıyla numara, parlaklık, sağ açıklık ve dik açıklık bilgileri verilmektedir. Toplu çıktının yanı sıra *-c* argümanı ile tek cisim için de gözlenebilirlik elde edilmektedir

(b) Tüm nesnelerin yanı sıra tek bir cismin gözlenebilirlik durumu için AAC yazılımının bir diğer çıktısı. Merkezde yer alan sarı yuvarlak, cismin o anki konumunu gösterirken kırmızı çizgi ise uzay hızını (bir saat sonraki konumu) hareket yönünü göstermektedir. Gökyüzü görüntüsü, T100 ana kamera ile benzer şekilde $21' \times 21'$'lık alanı göstermektedir.

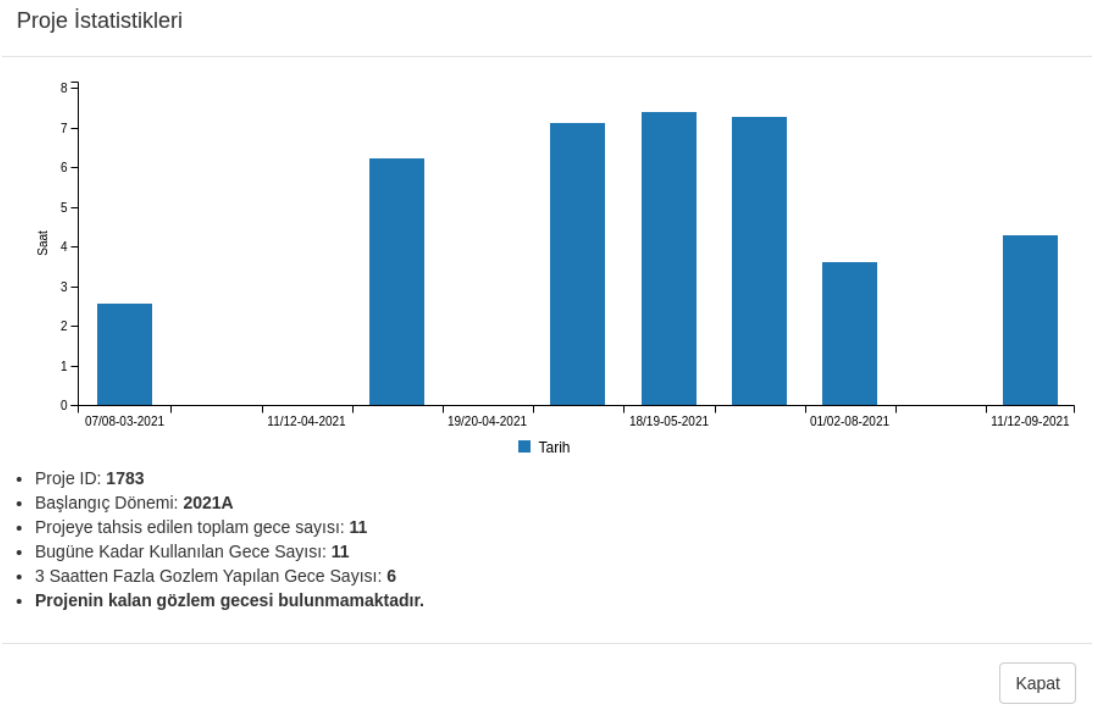
Şekil 3.1. AAC yazılımının kullanımı

YYA'lar, görece yüksek uzay hızlarına sahiptirler ve teleskop ile yıldızıl (sidereal) takip modunda, nokta kaynak yapısından uzaklaşabilir ve hareket yönlerinin doğrultusunda uzayabilirler. Bu uzamayı önlemek ve asteroidin nokta kaynak yapısını koruyabilmek için maksimum poz süresi belirlenmiştir. Bu poz süresini belirlerken asteroidin uzay hızı ve anlık gökyüzü görüş (seeing) değerleri göz önünde bulundurulmuştur. Görüş değeri asteroidin alabileceği maksimum yol olarak düşünülürse, maksimum poz süresi Denklem 3.1 kullanılarak her bir YYA için belirlenmiştir.

$$\textit{Maksimum poz süresi (saniye)} = \frac{\textit{Görüş (")}}{\textit{Uzay hızı ("/saniye)}} \tag{3.1}$$



Şekil 3.2. 19AT100-1482 numaralı projeye tahsis edilen geceler (31 gece) ve gecelik gözlem yapılan saatler. Yatay eksende tarihe karşılık dikey eksende gözlem yapılan saatler görülmektedir. Bazı detaylar şekil içerisinde görülmektedir



Şekil 3.3. Şekil 3.2 ile aynı özelliklere sahip olan 21AT100-1783 numaralı projeye tahsis edilen geceler (11 gece) ve gecelik gözlem yapılan saatler

T100 teleskobu kullanılarak fotometrik gözlemleri yapılan YYA'lar ile ilgili detaylı bilgi ise Çizelge 3.1'de verilmiştir. RTT150 teleskobu ile fotometrik veriler yalnızca Baboquivari için elde edilmiştir. Ayrıca, yine yalnızca Baboquivari için tayfsal ve polarimetrik veriler de RTT150 teleskobu kullanılarak elde edilmiştir. RTT150 teleskobu kullanılarak yapılan gözlemlerin detayları ise Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. T100 teleskobu ile alınan fotometrik gözlem verilerinin detayları. Çizelgede görülen veriler, gecelik ortalama değerlerin göz önüne alınmasıyla elde edilmiştir

Tarih (yıl-ay-gün)	Asteroit (IAU numarası)	V (kadir)	r (AB)	Δ (AB)	α ($^\circ$)	λ ($^\circ$)	β ($^\circ$)	N	Ay (aydınlanma)
2019-02-20	6178	17.17	1.47	0.67	34.12	95.85	8.57	65	%97
	152931	18.0	1.29	0.71	49.78	231.25	49.63	32	
2019-03-25	6178	17.35	1.28	0.68	50.25	103.21	8.17	3	%71
	152931	16.85	1.14	0.41	59.95	254.1	63.7	83	
2019-05-19	6178	17.38	1.19	0.67	58.14	146.22	4.98	6	%98
	137170	16.27	1.16	0.67	60.58	141.37	38.9	61	
2019-05-24	112221	16.88	1.33	0.62	46.74	269.87	71.24	135	%65
2019-07-05	12538	17.0	1.27	0.53	50.53	217.45	48.68	65	%12
2019-07-06	12538	17.04	1.28	0.54	50.18	218.41	48.54	9	%21
2019-08-29	Baboquivari	16.54	1.52	0.56	17.71	322.12	23.7	25	%0
2019-08-31	Baboquivari	16.52	1.51	0.55	18.53	321.62	23.44	129	%3
2019-09-18	Baboquivari	16.44	1.41	0.49	27.93	318.58	19.37	84	%80
2019-09-22	Baboquivari	16.44	1.39	0.49	30.18	318.4	18.09	64	%41
2019-09-28	Baboquivari	16.46	1.37	0.48	33.53	318.59	15.94	93	%0
	3200	16.69	1.64	0.92	33.37	63.22	34.41	90	
2020-04-25	137199	17.0	1.06	0.3	71.14	135.67	75.2	71	%8
	52768	11.65	1.03	0.05	63.3	151.32	-15.11	183	
2020-05-21	137199	16.52	1.14	0.28	56.56	200.62	62.8	40	%0
2020-06-25	19764	16.75	1.28	0.47	45.84	3.81	2.14	53	%0
2020-08-13	19764	16.5	1.36	0.46	33.47	9.49	3.19	131	%30
2022-11-13	1620	16.65	1.63	0.72	20.61	70.08	30.99	424	%72
2022-11-14	1620	16.65	1.63	0.72	20.41	69.76	31.06	221	%66
2022-12-04	1620	16.71	1.66	0.74	19.41	57.93	30.86	55	%90
2022-12-05	1620	16.72	1.66	0.75	19.59	57.57	30.77	390	%94
2022-12-09	1620	16.78	1.66	0.76	20.49	56.01	30.3	62	%99
2023-01-22	1627	16.2	2.12	1.63	26.59	197.01	6.64	190	%2
2023-01-23	1627	16.18	2.11	1.61	26.54	197.21	6.73	324	%7

V: Görünür parlaklık, ***r***: Asteroidin Güneş'e olan uzaklığı, Δ: Asteroidin Yer'e olan uzaklığı, α: Faz açısı, λ: Tutulum düzlemine göre boylam, β: Tutulum düzlemine göre enlem, **N**: Gecelik alınan veri sayısı, **Ay**: Ay'ın aydınlanma durumu

Çizelge 3.2. RTT150 teleskobu ile alınan Baboquivari gözlem verilerinin detayları. Çizelgede görülen veriler, gecelik ortalama değerlerin göz önüne alınmasıyla elde edilmiştir

Tarih (yıl-ay-gün)	Asteroit (IAU numarası)	V (kadir)	r (AB)	Δ (AB)	α (°)	λ (°)	β (°)	N	Ay (aydınlanma)
2019-09-27	Fot.	16.46	1.37	0.48	32.9	318.5	16.2	60	%1
2019-10-20	Fot. Pol.	16.6	1.27	0.48	43.6	324.31	6.75	6 5	%56
2019-09-23	Tayf	16.45	1.39	0.49	30.75	318.4	17.75	3	%30

Fot: Fotometri, **Pol**: Polarimetri

RTT150 teleskobu ile fotometrik gözlemler elde edilirken T100 teleskobu ile aynı gözlemsel yöntem kullanılmıştır. Ancak, polarimetrik ve tayfsal gözlemler için yıldızıl (sidereal) takip hızı yerine takip modu değiştirilmiş ve asteroidin, poz süresince, uzay hızında ve yönünde takip sağlanmıştır. Bu sayede hem daha uzun poz süresi verilebilmiş hem de asteroit nokta kaynak olarak kalmıştır.

T100 teleskobunda fotometrik gözlem verileri 4096×4096 piksele, $21' \times 21'$ görüş alanına[61], $0.31''$ piksel ölçeğine ve Fairchild 486 BI marka/model yongaya sahip SI 1100 CCD kamera[62] (-95°C) kullanılarak elde edilmiştir. Kameranın 0.0001 $e^-/pixel/s$ ve 0.57 e^-/ADU değerlerine sahip olması nedeniyle 5700 saniyeye kadar olan poz süreleri için dark (kara akım) görüntülerine ihtiyaç duyulmamaktadır.[63] Bu sebeple ön indirgeme adımlarında yalnızca bias (0 saniye görüntüsü) ve flat (düz alan görüntüsü) kullanılmıştır.

RTT150 teleskobunda Baboquivari için elde edilen tüm veriler ise Cassegrain odak düzleminde bulunan TFOSC[64] (TUG Faint Object Spectrograph and Camera) enstrümanı ve 2048×2048 piksele, $11.3' \times 11.3'$ görüş alanına, $0.33''$ piksel ölçeğine ve BEX2-DD-9ZQ model yongaya sahip Andor iKon-L 936 CCD kamera[65] (-80°C) kullanılarak elde edilmiştir. Polarimetrik veriler ise TFOSC sistemine sonradan entegre edilen Double-wedged Wollaston türü, TFOSC-WP[66] (Helhel vd. 2015) adı verilen alet kullanılarak elde edilmiştir.

[61] Field Of View (FOV)

[62] https://tug.tubitak.gov.tr/tr/teleskoplar/t100-odak-duzlemi-aletleri [son erişim tarihi: 25.11.2023] https://tug.tubitak.gov.tr/sites/images/tug/1100s_brochure_revb.pdf [son erişim tarihi: 25.11.2023]

[63] https://tug.tubitak.gov.tr/sites/images/tug/t100_ccd_report.pdf [son erişim tarihi: 25.11.2023]

[64] https://tug.tubitak.gov.tr/tr/icerik/tfosc-tug-faint-object-spectrograph-and-camera [son erişim tarihi: 25.11.2023]

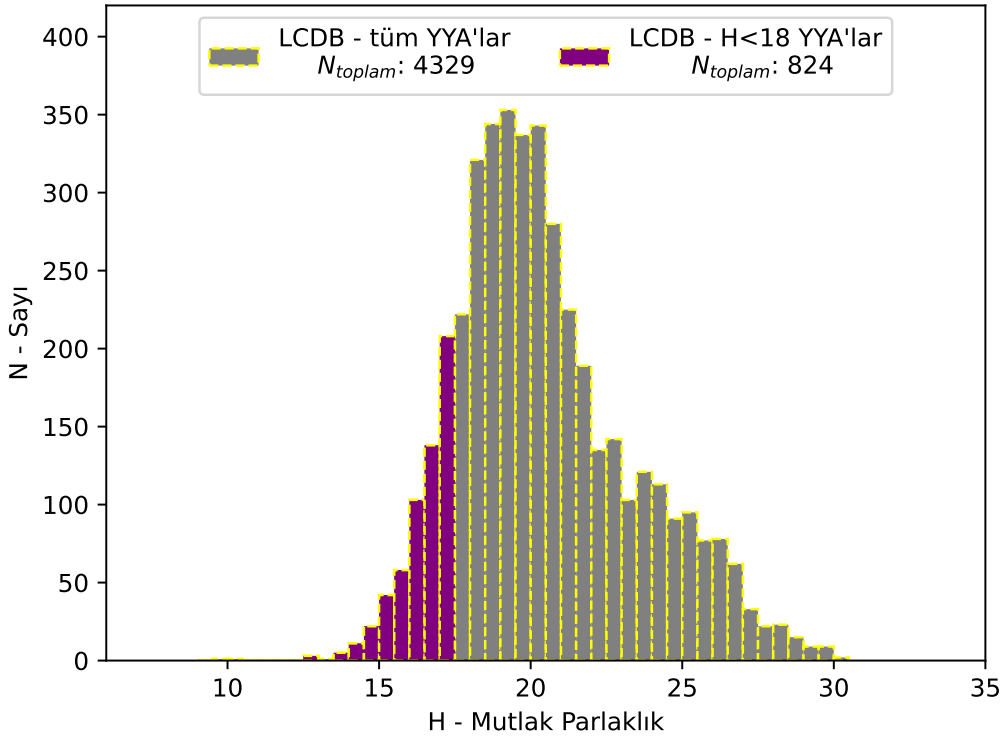
[65] https://andor.oxinst.com/products/ikon-xl-and-ikon-large-ccd-series/ikon-l-936 [son erişim tarihi: 25.11.2023]

[66] https://tug.tubitak.gov.tr/tr/icerik/tfosc-wollaston-prizmasi-polarimetre [son erişim tarihi: 25.11.2023]

3.1.1. $H < 18^m$ Olan YYA'ların Gözlemsel Arşiv Verileri

Günümüzde birçok alanda uzay tabanlı ya da yer tabanlı tarama (survey) teleskopları görev yapmaktadır. Küçük Güneş sistemi nesneleri genelinde de birçok adanmış (dedicated) teleskopla ya da tarama verilerinden yan ürün olarak küçük Güneş sistemi nesnelerine ait veriler elde edilmektedir. Diğer taraftan bu nesnelere ait farklı araçlar ile alınmış verilerin toplandığı web sunucuları da bulunmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında $H < 18^m$ olan YYA'ların arşiv verileri taranmış ve kullanılmıştır.

Warner vd. (2009) tarafından geliştirilen, asteroitlerin fotometrik verilerinin toplandığı Asteroit Işık Eğrisi Veri Tabanı'na (Asteroid Lightcurve Database (LCDB))[67] bakıldığında 824 farklı $H < 18^m$ YYA verisi bulunduğu görülmektedir (bkz. Şekil 3.4). Farklı günlerde farklı teleskoplardan alınan verilerin yüklenebildiği ve araştırmacılara açık bir platform olan Asteroid Lightcurve Data Exchange Format (ALCDEF; Warner vd. 2011) veri tabanından ise alınan her veriye ulaşılabilmekte ve veriler kullanılabilmektedir. Bu tez çalışmasında hem buradaki hem de aşağıda detaylandırılan diğer arşivlerdeki veriler taranmış ve uygun olanlar kullanılmaya çalışılmıştır.



Şekil 3.4. LCDB'de yer alan tüm YYA'ların (gri) ve $H < 18^m$ olan YYA'ların (mor) 0.5 H aralığı için H ve toplam sayı grafiği

[67] https://minplanobs.org/MPInfo/php/lcdbsummaryquery.php [son erişim tarihi: 25.11.2023]

13 Haziran 2022 tarihinde yayımlanan *Gaia DR3* kataloğu içerisinde ise elde edilen 158152 küçük Güneş sistemi nesnesinin fotometrik verileri mevcuttur (Gaia Collaboration vd. 2022). Bu asteroitler içerisinde 230 Apollo, 173 Amor, 43 Aten ve 1 Atira olmak üzere toplam 447 tane YYA bulunmaktadır (Tanga vd. 2023). Bu YYA'ların 363 tanesi (%81.2) ise $H < 18^m$'dir. Baboquivari'nin ise 134 tane fotometrik gözlem noktası *Gaia DR3* verileri içerisinde bulunmaktadır.

Küçük gezegenlerin en önemli tayf gözlemi taramalarından biri ise Bölüm 2.2.6'da da bahsedilen MIT (Massachusetts Institute of Technology), Hawaii Üniversitesi ve NASA IRTF iş birliğiyle MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey (MITHNEOS) projesidir (Binzel vd. 2015; Binzel vd. 2019; Polishook vd. 2014). Bu tarama kapsamında Mart 2022 tarihinde güncellenen son verilere göre 1708 tane YYA'nın tayfsal verisi elde edilmiştir. Bu verilerin 174 tanesi ise $H < 18^m$ olan YYA'lara aittir. Baboquivari'nin ise iki farklı tayf gözlemi gerçekleştirilmiş ve MITHNEOS veri tabanından paylaşılmıştır.

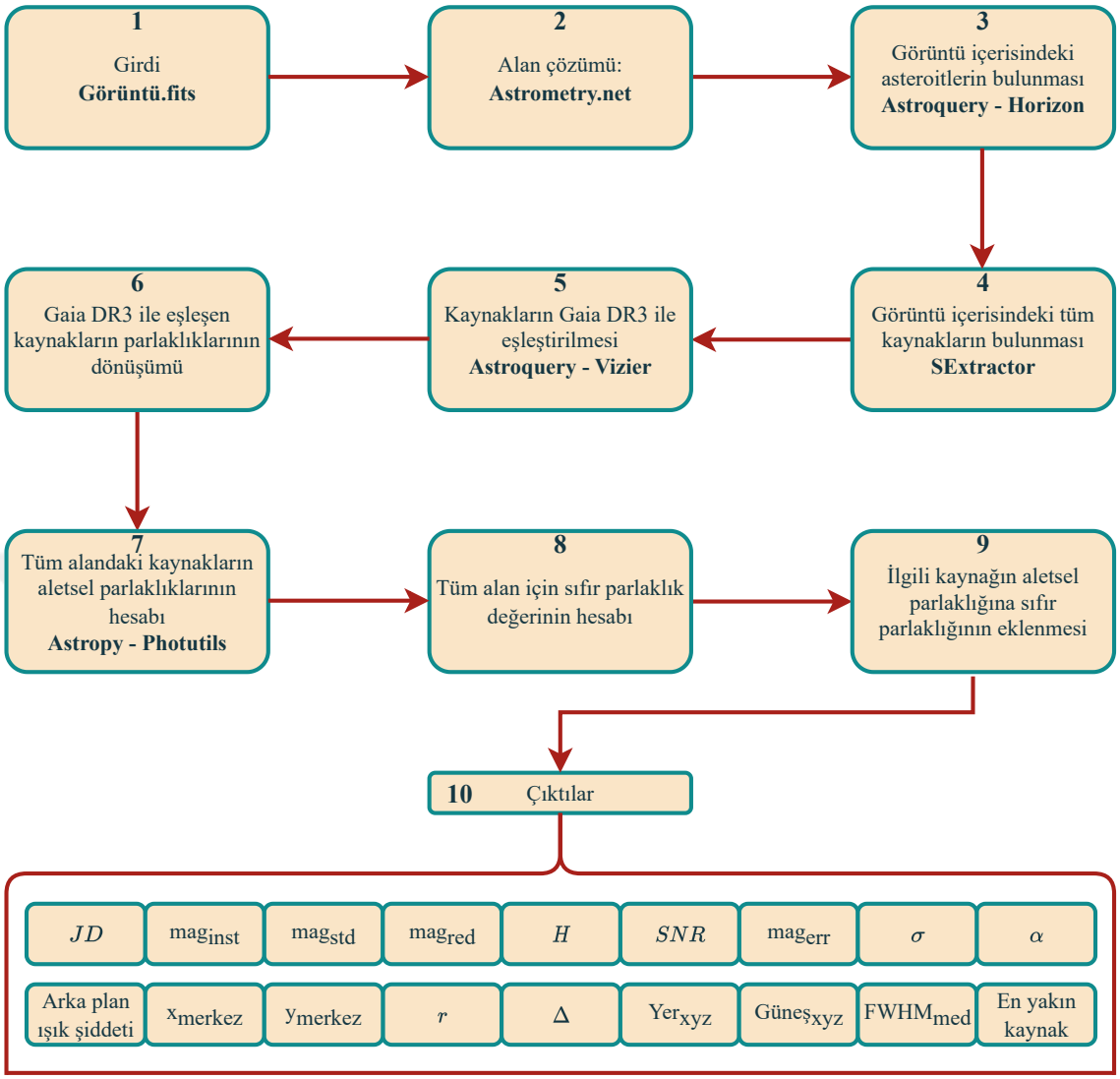
Farklı tarihlerde farklı gözlem araçları ile elde edilmiş asteroitlerin polarimetrik verileri ise Lupishko (2022) tarafından derlenmiş ve yayımlanmıştır[68]. Veri tabanı içerisinde yer alan toplam 518 farklı asteroidin 28 tanesi YYA ve 20 tanesi ise $H < 18^m$ olan YYA'lardır.

3.2. Fotometrik Analiz Rutini ve *PhoPS* Yazılımı

Fotometrik indirgeme için bu tez çalışması kapsamında geliştirilen indirgeme rutini ile birlikte bu rutinin kullanıldığı bir yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen ve *PhoPS* (PHotometry Of Point Sources) adı verilen fotometrik indirgeme rutini bu çalışmada hareketli cisimler için sonuç üretmektedir ancak yalnızca hareketli cisimler için değil tüm nokta kaynaklar için kullanılabilecek şekilde tasarlanmıştır. *PhoPS* yazılımı ile elde edilen sonuçlar, yaygın olarak kullanılan *IRAF* yazılımının açıklık fotometrisi için kullanılan *phot* aracının (Tody 1986; Stetson 1987) grafik arayüzü olarak Niaei vd. (2015) ve Kilic vd. (2016) tarafından geliştirilen *MYRaf* yazılımı kullanılarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmış ve neredeyse aynı sonuçların elde edildiği görülmüştür. Elde ettiğimiz sonuçlar neticesinde kendi geliştirdiğimiz fotometrik indirgeme rutininin kullanılmasına karar verilmiştir.

Şekil 3.5'te *PhoPS* yazılımının temel adımları görülmektedir. Adımlar içerisinde de görüldüğü üzere fotometri rutini içerisinde farklı yazılım teknolojilerinden yararlanılmıştır.

[68] https://sbn.psi.edu/pds/resource/apd.html [son erişim tarihi: 25.11.2023]



Şekil 3.5. *PhoPS* yazılımında uygulanan temel adımlar. Çıktılar ilgilenilen tek bir asteroit için elde edilmektedir. **JD**: Jülyen zamanı, **mag**$_{inst}$: aletsel parlaklık, **mag**$_{std}$: standart görünür parlaklık, **mag**$_{red}$: indirgenmiş parlaklık, **H**: mutlak parlaklık, **SNR**: Sinyal/Gürültü oranı, **mag**$_{err}$: parlaklık hatası, σ: parlaklık dönüşümündeki standart sapma, α: faz açısı, **Arka plan ışık şiddeti**: tüm alanın arka plan ışık şiddetinin medyanı, **x**$_{merkez}$ ve **y**$_{merkez}$: ilgili asteroidin görüntü içerisindeki fiziksel koordinatları, ***r***: ilgili asteroidin Güneş'e olan anlık uzaklığı, Δ: ilgili asteroidin Yer'e olan anlık uzaklığı, **Yer**$_{xyz}$ ve **Güneş**$_{xyz}$: ilgili asteroidin sırasıyla Yer'e ve Güneş'e olan anlık kartezyen koordinatları, **FWHM**$_{med}$: alandaki tüm kaynakların medyan FWHM değeri, **En yakın kaynak**: ilgili asteroidin en yakınındaki kaynağa olan uzaklığı (piksel)

İlk adımda girdi olarak kullanılan *.fits*[69] (ya da *.fit*) formatındaki görüntünün astrometrik alan çözümü *astrometry.net* (Lang vd. 2010) yazılımı kullanılarak yapılmaktadır. Görüntü içerisindeki asteroitlerin bulunması ve tüm kaynakların *Gaia DR3* ile eşleştirilmesi sırasıyla *Python* yazılım dili içerisinde yer alan *Astroquery* paketi (Ginsburg vd. 2019) içerisindeki sırasıyla *JPLHorizons* (kullandığı servis: JPL's HORIZONS system[70]) ve *Vizier* (kullandığı servis: CDS VizieR Astronomical Catalogues[71]) modülleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aletsel parlaklıkların elde edilmesinde ise *Astropy* (Astropy Collaboration vd. 2013; Astropy Collaboration vd. 2018; Astropy Collaboration vd. 2022) içerisinde yer alan *Photutils* paketi (Bradley vd. 2022) kullanılmıştır. Kullanılan yazılım paketlerinin yanı sıra elde edilen çıktıların tüm detaylarına da yine bu bölümde ve Bölüm 3.2.4'te değinilmiştir.

Şekil 3.5'te görülen çıktıların bazıları yerel sunucuda hesap yapılmadan elde edilmektedir. Bu çıktılardan, *JD*, *.fits* görüntü başlığından henüz ilk adımda elde edilirken, α, r, Δ, Yer$_{xyz}$, Güneş$_{xyz}$ çıktıları ilgili asteroit için yapılan servis sorguları (Astroquery-Horizon) sonucunda (uzak sunucularda yapılan hesaplar sonrasında) görüntü başlığından elde edilen *JD* kullanılarak elde edilmektedir.

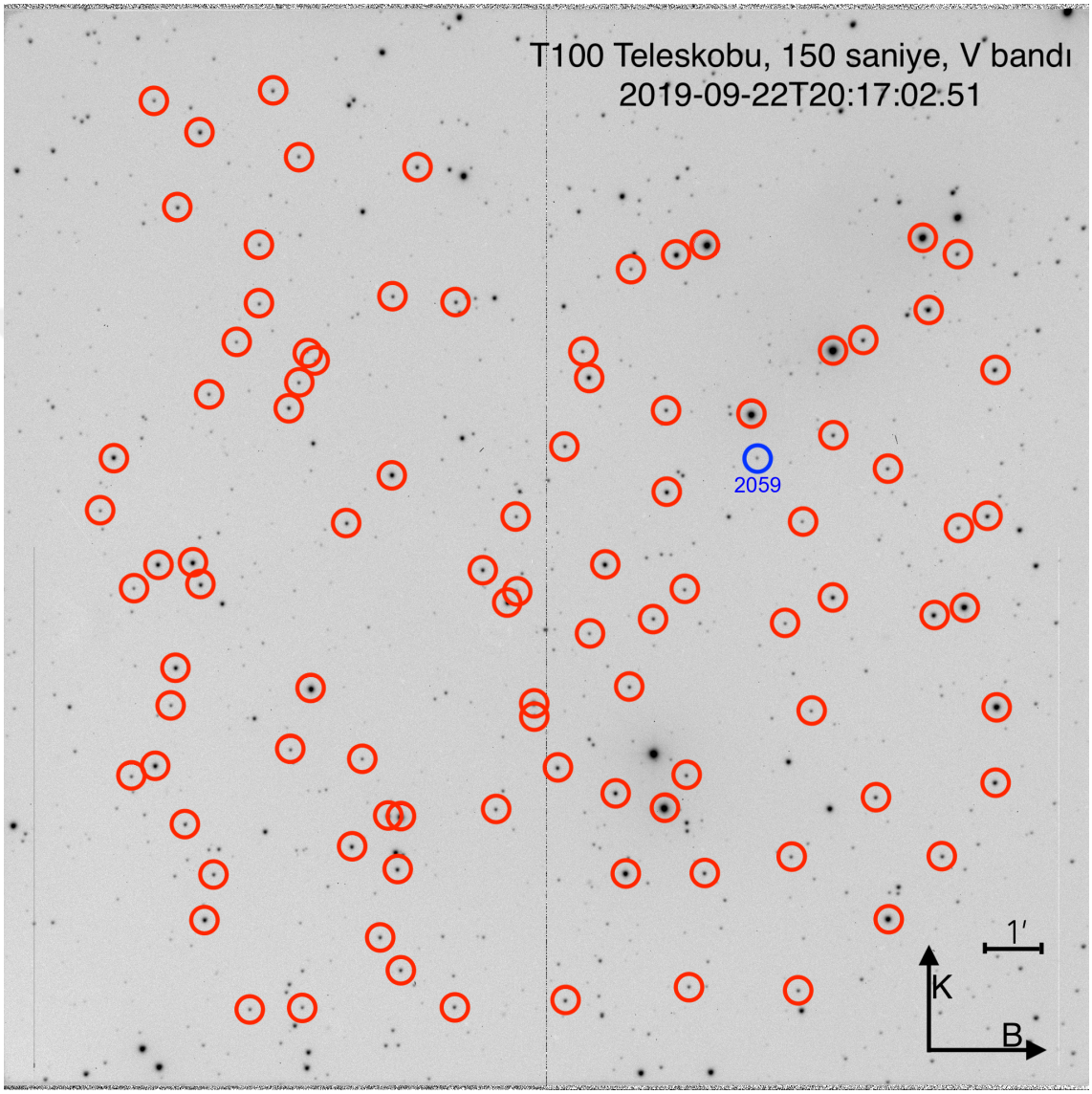
3.2.1. Görüntü İçerisindeki Kaynakların Elde Edilmesi

Fotometri adımına geçmeden önce alandaki kaynakların tespit edilmesi gerekmektedir. Bunun için öncelikle alanın astrometrik çözümü yapılır ve ardından görüntünün merkezinin ve görüntü içerisinde yer alan tüm kaynakların (daha genel bir söylem ile her bir fiziksel koordinatın) sağ açıklık (RA) ve dik açıklık (Dec) koordinatları elde edilir. Merkez koordinat ve *JD* bilgisi kullanılarak alanda o anda yer alan asteroitlerin internet üzerinden servis sorgusu (Astroquery.Imcce - Skybot) yapılır. Böylece varsa alanda yer alan diğer asteroitlerin bilgileri ile birlikte ilgilenilen asteroidin de görüntü içerisinde olup olmadığı kontrol edilir. Ardından, çok hızlı bir şekilde çalışan *SExtractor* yazılımı (Bertin ve Arnouts 1996) kullanılarak her bir kaynağın hem ekvatoral hem de fiziksel koordinat bilgileri üretilir. Servis sorguları sonrasında ilgilenilen asteroidin de RA ve Dec değerleri bilindiğinden görüntü içerisindeki yeri *Sextractor* çıktısı içerisinde taranır ve böylece fiziksel koordinatları (görüntü içerisindeki yeri) otomatik olarak tespit edilmiş olur.

Uyguladığımız fotometri rutininde standart parlaklığa dönüşüm için gerekli sıfır-nokta parlaklığının hesaplanmasında *Gaia DR3* yıldızları kullanılmıştır. Bunun için alan içerisinde yer alan *Gaia DR3* yıldızlarının tespit edilmesi gerekmektedir. Görüntü

[69] https://fits.gsfc.nasa.gov [son erişim tarihi: 25.11.2023]
[70] https://ssd-api.jpl.nasa.gov/obsolete/horizons_batch_cgi.html [son erişim tarihi: 25.11.2023]
[71] http://vizier.cds.unistra.fr [son erişim tarihi: 25.11.2023]

merkezinin ekvatoral koordinatlarının, görüntünün görüş alanı civarında[72] servis sorgusu yapılarak (Astroquery - VizieR) görüntü içerisinde olması gereken *Gaia DR3* yıldızları tespit edilir. *SExtractor* yazılımı ile elde ettiğimiz görüntü içerisindeki tüm kaynaklar ile yapılan sorgu sonrasında elde edilen kaynaklar eşleştirilir ve görüntü içerisinde yer alan *Gaia DR3* yıldızları tespit edilmiş olur.



Şekil 3.6. T100 teleskobunda, SI 1100 CCD kamera ile V bandında 22 Eylül 2019 tarihinde alınmış $21' \times 21'$'lık gökyüzü görüntüsü içerisinde yer alan *Gaia DR3* yıldızlarının *PhoPS* yazılımı kullanılarak eşleştirilmesi. Kırmızı yuvarlaklar içerisinde eşleştirilen 97 tane *Gaia DR3* yıldızı görülürken, mavi yuvarlak içerisinde o an gözlemi yapılan asteroit olan (2059) Baboquivari görülmektedir

[72]Örneğin, T100 teleskobu $21'$ x $21'$ görüş alanına sahip olduğundan dolayı merkez koordinatın $10'$ civarında bulunan *Gaia DR3* yıldızları sorgulanır.

Gaia DR3 ile birlikte *G* parlaklığı elde edilen yıldız sayısı 1806254432, G_{BP} ve G_{RP} parlaklıkları elde edilen yıldız sayısı ise sırasıyla 1542033472 ve 1554997939'dur[73]. Bu durumda bir buçuk milyardan fazla yıldızın hem *G* hem de renk parlaklığı ($G_{BP} - G_{RP}$) *Gaia* uydusu tarafından elde edilmiştir. T100 teleskobu gibi geniş görüş alanına sahip teleskoplar için bu durum oldukça önemlidir. Öyle ki, T100 teleskobu ile alınan görüntüler içerisinde birçok *Gaia* yıldızı bulunma olasılığı son derece yüksektir (bkz. Şekil 3.6).

3.2.2. *Gaia DR3* Yıldızlarının Farklı Parlaklık Sistemlerine Dönüşümleri

Gaia teleskobundan elde edilen fotometrik parlaklıklar *G* bandındadır[74]. Eşleşen kaynakların parlaklıklarını karşılaştırabilmek için *G* parlaklığını kullanılan filtreye dönüştürmek gerekmektedir. Carrasco ve Bellazzini (2022) tarafından yayımlanan çalışma sonrasında *Gaia DR3* fotometrik verilerinden elde edilen *G* parlaklığı ile diğer yaygın kullanılan fotometrik sistemlerin arasındaki ilişki ortaya koyulmuştur.

Çizelge 3.3. *Gaia DR3*'te yer alan *G* parlaklıkları ve $G_{BP} - G_{RP}$ rengi ile Johnson-Cousins filtreleri arasındaki ilişki

		$G_{BP} - G_{RP}$	$(G_{BP} - G_{RP})^2$	$(G_{BP} - G_{RP})^3$	$(G_{BP} - G_{RP})^4$	σ
$G - B$	0.01448	-0.6874	-0.3604	0.06718	-0.006061	0.0633
$G - R$	-0.02275	0.3961	-0.1243	-0.01396	0.003775	0.03167
$G - V$	-0.02704	0.01424	-0.2156	0.01426		0.03017
$G - I_c$	0.01753	0.76	-0.0991			0.03765

Çizelge 3.3'te yer alan katsayılar kullanılarak *G* parlaklığı, Johnson-Cousins parlaklıklarına dönüştürülebilmektedir. Yukarıdaki çizelgenin denklem olarak gösterimi ise Denklem 3.2 ile verilmiştir.

$$Filtre_{B,V,R,I_c} = G - a_i(G_{BP} - G_{RP})^i \tag{3.2}$$

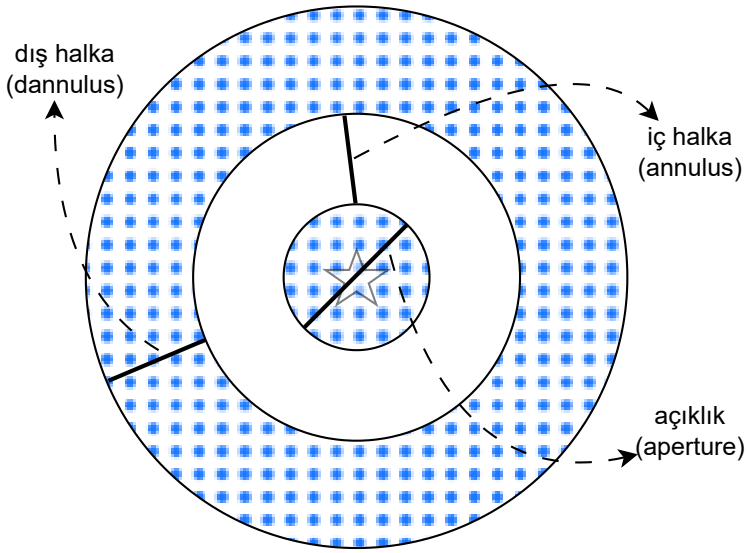
Bu aşamada görüntü içerisindeki Gaia yıldızlarının olması gereken parlaklık değerleri hesaplanmıştır. Örneğin, T100 teleskobu ile elde edilen görüntüler genellikle Johnson-Couisins *V* bandında elde edilmiştir. Bu durumda görüntü içerisindeki 75 farklı *Gaia DR3* yıldızının olması gereken *V* parlaklığı hesaplanmıştır. Artık, bu kaynakların aletsel parlaklığı hesaplanarak sıfır-nokta parlaklığı elde edilebilinir.

[73] https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dr3

[74] https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dr3-passbands [son erişim tarihi: 25.11.2023]

3.2.3. Aletsel Parlaklıkların ve Sıfır-Nokta Parlaklığının Elde Edilmesi

Aletsel parlaklıkların elde edilmesinde *Astropy* içerisinde yer alan *Photutils* paketinin kullanıldığı önceki bölümlerde belirtilmişti. Açıklık fotometresi uygulanarak elde edilen aletsel parlaklık için öncelikle açıklık (aperture), iç halka (annulus) ve dış halka (dannulus) büyüklükleri belirlenir (bkz. Şekil 3.7) ve alan içerisindeki sayımlar elde edilir.



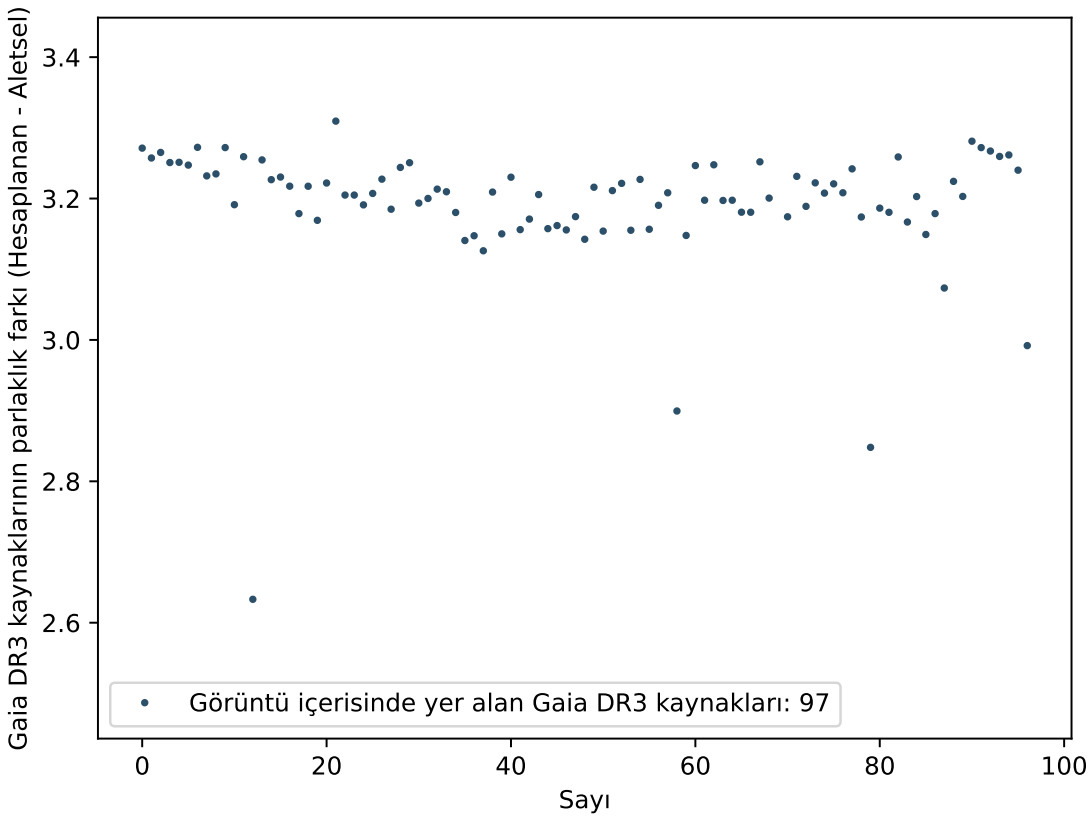
Şekil 3.7. Açıklık, iç halka ve dış halka. Mavi noktanın olmadığı iç halka bölgesinde sayımlara bakılmazken, mavi noktalı bölgelerde sayımlara bakılmaktadır

PhoPS yazılımında aletsel parlaklığın elde edilmesi aşamasında standart açıklık fotometrisi uygulanır. Yarı yükseklikteki tam genişlik (FWHM, Full Width at Half Maximum) değerine göre uygun açıklık, iç halka ve dış halka büyüklükleri belirlenir ve akı sayımları yapılır. Gökyüzü katkısının hesabı için dış halka içerisindeki piksellerdeki sayımların medyan değeri hesaplanır ve açıklığın alanı ile çarpılır. Böylece arka planın yani gökyüzünün kaynağa olan akı katkısı hesaplanmış olur. Ardından açıklık içerisindeki toplam akı hesaplanır ve bu değerden hesaplanan arka plan değeri çıkarılır. Elde edilen değer kaynağın akı değeridir ve bu değer kadir parlaklığına Denklem 3.3 kullanılarak dönüştürülür.

$$\textit{Aletsel Parlaklık} = 25 - 2.5\log(\textit{Akı}) \tag{3.3}$$

Denklem 3.3'te yer alan 25 değerinin fiziksel olarak bir önemi yoktur. Yalnızca elde edilecek aletsel parlaklığın anlamlı bir aralıkta olması için seçilmiştir.

Sıfır-nokta parlaklığının elde edilmesi için *Gaia DR3* kataloğu ile görüntü içerisinde eşleştirilen tüm *Gaia DR3* nesneleri için aletsel parlaklıklar belirtilen şekilde elde edilir. Ardından her bir nesnenin G parlaklığından hesaplanan (dönüştürülen) parlaklığı ile aletsel parlaklığının farkı alınır. Mükemmel bir durumda (yıldızların değişmediği, optik kusurların olmadığı vb.) her bir nesne için elde edilecek bu farkların aynı olması gerektiği düşünülebilir. Şekil 3.8'de T100 teleskobu ile alınan ve Şekil 3.6'da görülen kaynakların Denklem 3.2 kullanılarak V bandı için elde edilen parlaklıkları ile Denklem 3.3 kullanılarak elde edilen aletsel parlaklarının farkı görülmektedir.

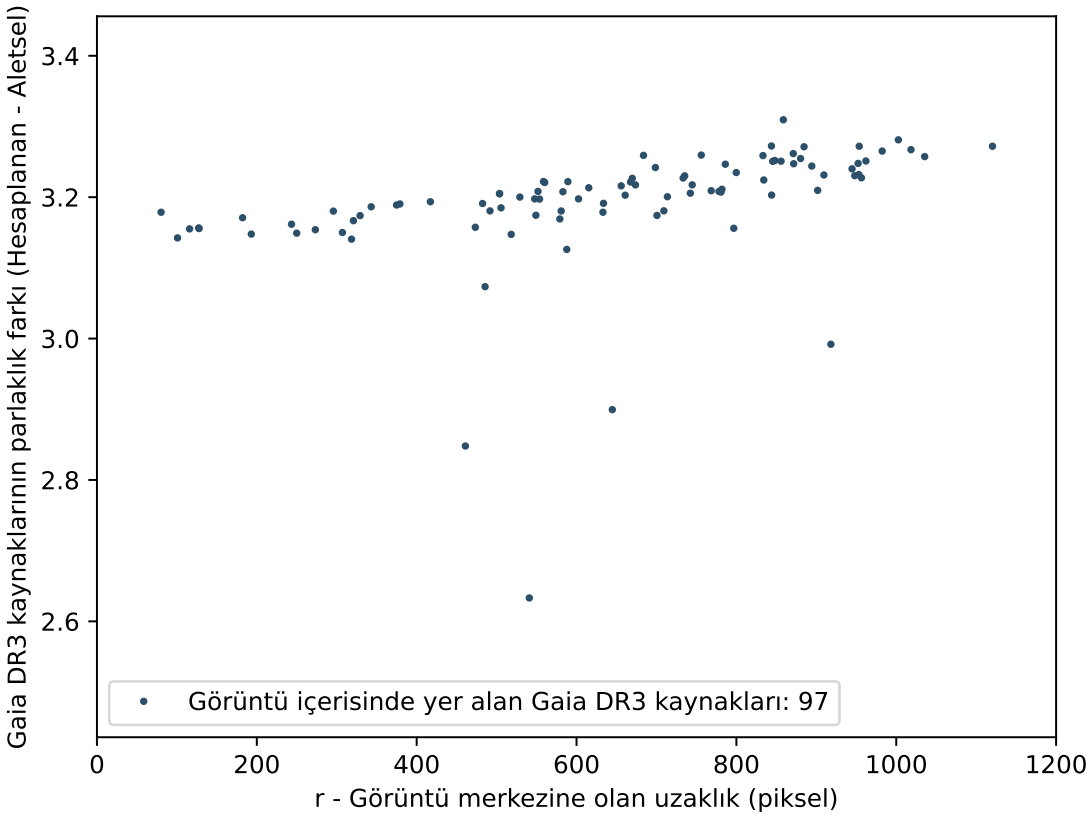


Şekil 3.8. Şekil 3.6'da görülen *Gaia DR3* yıldızlarının hesaplanan V-bandı parlaklık değerleri ile aletsel parlaklıklarının farkı. y-ekseni fark değerlerini gösterirken, x-ekseni nesne sayısını göstermektedir. Parlaklık hataları, dağılımın görselini farklılaştırmaması adına bu aşamada gösterilmemiştir (bkz. Şekil 3.11)

Şekil 3.8'de yatay eksene görece paralel bir dağılım görülmektedir. Bu dağılım kullanılarak sıfır-nokta parlaklığının elde edilmesi düşünülebilir. Bunun için, dağılımın 3-σ (ya da benzeri) aralığının dışında kalan noktalar çıkarıldıktan sonra yatay eksene paralel dağılmış bu noktaların ortalaması alınarak sıfır-nokta parlaklığı elde edilebilir. Diğer taraftan bu noktaların direkt medyan değeri alınarak da sıfır-nokta parlaklığı elde

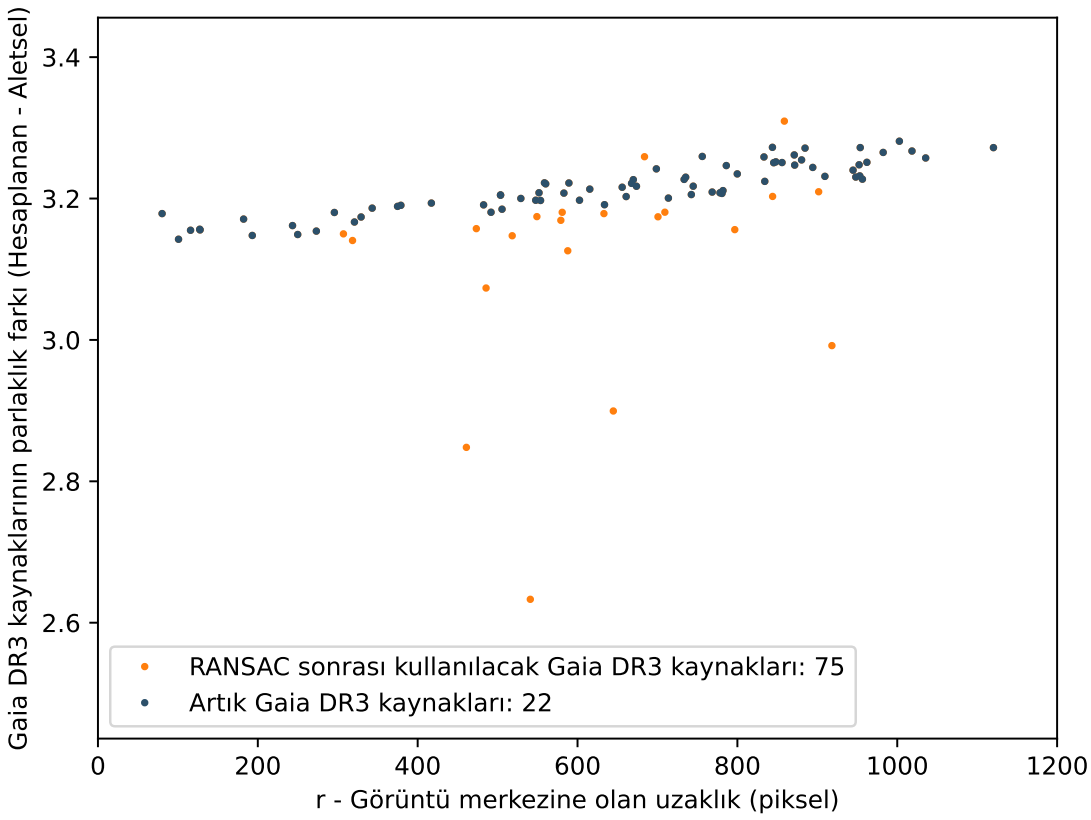
edilebilir. Battle vd. (2022) Apollo türü bir YYA olan (52768) 1998 OR2 için yaptıkları çalışmada SDSS DR12 (Alam vd. 2015) verilerini kullanarak sıfır-nokta parlaklığını elde etmeye çalışmışlardır. Öncelikle, SDSS filtrelerini kullanarak asteroit için aldıkları fotometrik görüntüler içerisindeki SDSS DR12 kaynaklarını eşleştirmiş, ardından katalog parlaklıkları (böyle bir durumda aynı filtre seti (SDSS) kullanılması sebebiyle filtre dönüşümüne ihtiyaç olmamıştır) ve aletsel parlaklıkları arasındaki farkları elde etmişler ve son olarak, tüm bu farkların medyan değerini alarak her bir görüntü için sıfır-nokta parlaklığına ulaşmışlardır.

Daha önce bahsedildiği üzere aynı teknik bu çalışma için de kullanılabilirdi. Ancak, çalışmamız sırasında, parlaklığa CCD kamera yüzeyinin olası etkilerini görebilmek amacıyla, her bir noktanın merkeze olan uzaklığına göre grafiği tekrar çizdirdiğimizde yine doğrusal bir değişim olduğu farkedilmiştir.



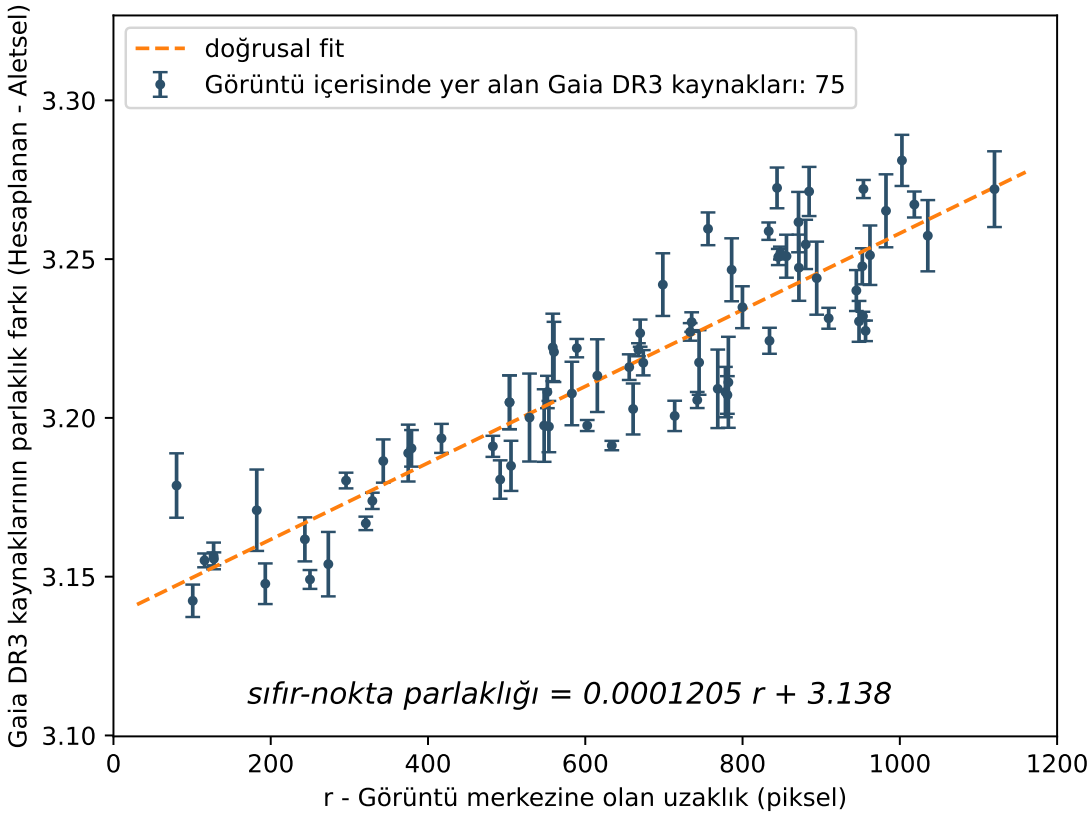
Şekil 3.9. Şekil 3.6'da görülen *Gaia DR3* yıldızlarının hesaplanan V-bandı parlaklık değerleri ile aletsel parlaklıklarının farkına karşılık her bir noktanın CCD merkezine uzaklığı. y-ekseni fark değerlerini gösterirken, x-ekseni görüntü merkezine uzaklığı göstermektedir. Parlaklık hataları, dağılımın görselini farklılaştırmaması adına bu aşamada gösterilmemiştir (bkz. Şekil 3.11)

Şekil 3.9'da görülen dağılıma görüntü merkezine olan uzaklık r'ye bağlı doğrusal bir fonksiyon tanımlamadan önce artık verilerin (outliers) belirlenmesi için standart sapma limiti yerine veri setimiz için daha etkili olduğunu düşündüğümüz Random Sample Consensus (RANSAC) algoritması (Fischler ve Bolles 1981) tercih edilmiştir. RANSAC algoritması, özetle bir veri seti içerisinde bulunan artık verilerin iteratif yöntemle belirlenebildiği ve en iyi fit için yalnızca ilgili verilerin (inliers) elde edilebildiği matematiksel bir filtreleme metodudur. Şekil 3.9'da görülen verilere RANSAC algoritması uygulandığında Şekil 3.10'da görülen 22 tane artık veri elde edilmiş ve veri setinden çıkarılmıştır.



Şekil 3.10. Şekil 3.9'daki ile aynı grafiğin RANSAC algoritması sonucunda elde edilen artık verilerin turuncu ile gösterilmesi

Başlangıçta 97 olan veri sayısı RANSAC algoritmasının uygulanmasının ardından 75 olmuştur. Elde edilen bu 75 veri üzerinden görüntü merkezine olan uzaklık r'ye bağlı doğrusal bir fonksiyon oluşturulabilir. Şekil 3.11'de RANSAC algoritmasının uygulanmasının ardından kalan ilgili veriler ve bu veriler kullanılarak elde edilen doğrusal fit fonksiyonu görülebilmektedir.



Şekil 3.11. Elde edilen ilgili veri seti sonucunda koyu mavi ile gösterilen, hataları ile birlikte parlaklık farklarına karşılık her bir noktanın CCD merkezine uzaklığı. Veri setine uygulanan doğrusal fit kesikli turuncu doğru ile gösterilmiş, sıfır-nokta parlaklığının hesaplanabildiği doğru fonksiyonu ise görüntü içerisinde yer gösterilmiştir

Elde edilen sıfır-nokta parlaklık fonksiyonu asteroidin ya da herhangi bir yıldızın (kısaca bir nokta kaynağın) görüntü içerisindeki konumuna bağlı olarak sıfır-nokta parlaklığının elde edilmesini sağlayacaktır. Konuma bağlı elde edilecek bu parlaklık değeri aletsel parlaklığa eklenerek standart parlaklığın elde edilmesini sağlayacaktır. Bu etkili fotometrik yöntem sonucunda gece boyunca değişen atmosferik etkilerin ortadan kaldırılması ve farklı gecelerde elde edilen parlaklıkların karşılaştırılabilmesi sağlanabilmektedir. Ayrıca, tüm ön indirgeme adımlarının uygulanmasının ardından elde edilen merkeze olan uzaklığa bağlı bu doğrusal değişim ise T100 teleskobu SI 1100 CCD kamerasının optik bir karakteristik özelliği olarak düşünülebilir. Baboquivari asteroidinin TUG teleskopları ile elde edilen fotometrik gözlem verilerinin analizinde kullanılan bu yöntem ve yan ürün olarak ortaya çıkan merkeze olan uzaklığa bağlı sıfır-parlaklığının doğrusal değişimi detaylı bir şekilde Erece vd. (2023)'nin çalışmasında da anlatılmıştır.

3.2.4. Diğer Çıktıların Elde Edilmesi

PhoPS yazılımı tarafından Şekil 3.5'te son adımda birçok farklı çıktının elde edildiği görülmektedir. En önemli çıktılardan birisi olan standart parlaklık (mag_{std}) *Gaia DR3* yıldızları kullanılarak görüntü içerisindeki konuma bağlı hesaplanan sıfır-parlaklığının, aletsel parlaklığa eklenmesi sonucunda ilgili filtre için elde edilmektedir. *PhoPS* yazılımı kullanılarak standart parlaklığın elde edilmesinin asteroitler özelinde olmadığı ve görüntü içerisindeki tüm nokta kaynaklara uygulanabileceği daha önce vurgulanmıştı. Ancak burada bir not düşmekte fayda vardır ki standart parlaklık kavramı asteroitler açısından düşünüldüğünde biraz hatalı görünebilmektedir. Standart parlaklık yerine standart görünür parlaklık demek daha doğru olacaktır. Çünkü asteroitlerin parlaklıkları konumlarına bağlı olarak sürekli değişmektedir. *PhoPS* yazılımının tüm nokta kaynaklara uygulanabilir olmasının yanı sıra asteroitler için özelleştirilmesi nedeniyle parlaklıklar üzerinde farklı hesaplar da yapılmaktadır. Asteroidin, Yer ve Güneş'e olan uzaklığının etkisinin ortadan kaldırılabilmesi için elde edilen standart görünür parlaklığının indirgenmiş parlaklığa (mag_{red}) dönüştürülmesi gerekir. Bunun için Denklem 2.11 kullanılır ve asteroidin indirgenmiş parlaklığı elde edilir. Uzaklık etkisinin yanı sıra faz açısı etkisinin de ortadan kaldırılması gerekmektedir ki buradan elde edilecek parlaklık asteroidin dönme periyodunun evresine bağlı mutlak parlaklığıdır (H) ve Denklem 2.20 yardımıyla elde edilir. Mutlak parlaklığın elde edilmesi için ise G değerine ihtiyaç vardır ve birçok asteroit için bu değer bilinmemektedir. Daha önce bahsedildiği üzere (bkz. Bölüm 2.2.3) eğer G değeri bilinmiyorsa bu değer 0.15 olarak kabul edilir ve dönme periyodunun evresine bağlı mutlak parlaklık değeri elde edilir.

Elde edilen görüntü içerisinde asteroidin Sinyal/Gürültü (SNR) değeri de Denklem 3.4'e göre hesaplanmaktadır.

$$SNR = \frac{F_{kaynak} \times K}{N_{toplam}}$$
$$N_{toplam} = \sqrt{F_{kaynak} \times K + F_{arkaplan} \times K + N_{okuma}^2 \times A} \tag{3.4}$$

Denklem 3.4'te F akı değeri, K CCD'nin kazanç (gain) değeri, N gürültü değeri, A ise kaynağın açıklığının (aperuture) alanıdır.

σ değeri Şekil 3.11'de görülen dağılımın standart sapmasıdır. Bu değer elde edilen sıfır-nokta parlaklık değerinin güvenilirliğini belirtmektedir. *Arka plan ışık şiddeti* dış halka içerisindeki piksellerdeki sayımların medyan değeri ile tüm alan içerisindeki

piksellerin medyan değerinin oranıdır. *Arka plan ışık şiddeti* değerinin 1'den yüksek oranda farklı olması da bu değerin hesabında bir sorun olabileceğini belirtmektedir. $FWHM_{med}$ değeri ise görüntü içerisindeki *Gaia DR3* kaynaklarının *SExtractor* kullanılarak elde edilen *FWHM* değeridir. Bu değerin belirli bir değerden büyük olması görüntünün alındığı anda hava kalitesinin kötü olabileceğini, odak sorunu olabileceğini ya da benzer farklı bir sorun olabileceğini kısaca görüntünün kalitesi hakkında fikir vermektedir.

Parlaklık hatası ise Denklem 3.5'e göre hesaplanmaktadır.

$$mag_{err} = 1.085736 \times \frac{E}{F_{kaynak}}$$
$$E = \sqrt{\frac{F_{kaynak}}{K} + \frac{F_{arkaplan}}{K}} \tag{3.5}$$

Denklem 3.5'te yer alan *F* akı değeri, *E* toplanan akıdaki hata değeri *K* ise kazanç değeridir.

Son olarak $\mathbf{x}_{merkez}$, $\mathbf{y}_{merkez}$ ve *En yakın kaynak* değerleri ise sırasıyla asteroidin görüntü içerisindeki fiziksel koordinatları ve asteroidin en yakında bulunan kaynağa olan uzaklığıdır (").

Elde edilen tüm diğer çıktılar elde edilen gökyüzü görüntüsünün ve yapılan fotometrinin kalitesi hakkında bilgiler içermektedir. *PhoPS* yazılımı, Baboquivari asteroidinin fotometrik verileri üzerinde de kullanılmış ve Erece vd. (2023)'nin çalışmasında da detaylıca anlatılmıştır.

3.3. Asteroitlerin Fotometrik Analizleri ve Baboquivari'nin Elde Edilen Fotometrik Özellikleri

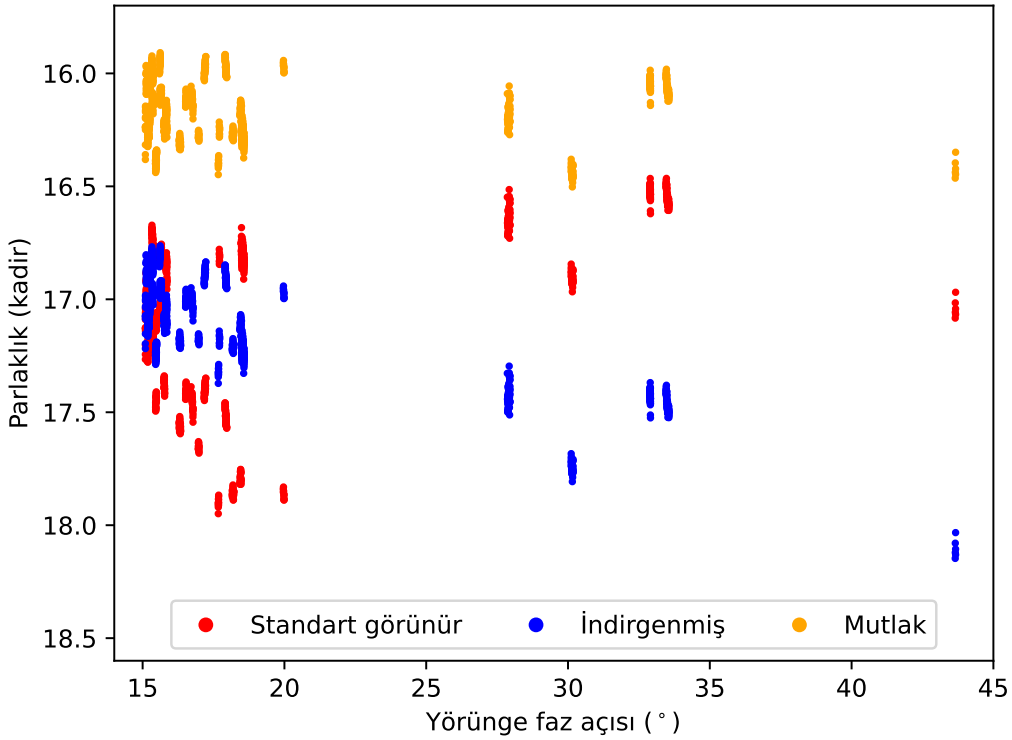
Asteroitlerin farklı gözlem zamanlarında elde edilen gözlem verilerini karşılaştırabilmek oldukça zordur. Kısaca özetlemek gerekirse, bir asteroidin elde edilen standart görünür parlaklığının öncelikle indirgenmiş parlaklığa dönüştürülmesi yani Yer'e ve Güneş'e olan uzaklığının görünür parlaklığa etkisinin ortadan kaldırılması gerekmektedir. Ardından, indirgenmiş parlaklığın mutlak parlaklığa dönüştürülmesi yani yörünge faz açısının etkisinin ortadan kaldırılması gerekmektedir ki bu dönüşüm için *G* parametresine ihtiyaç vardır. Bu etkilerin ortadan kaldırılması sonrasında asteroidin farklı zamanlarda ya da farklı konumlardan elde edilen parlaklıkları karşılaştırılabilir.

Ancak, burada görüş açısından kaynaklı, asteroidin farklı yüzlerinin görünmesinden dolayı yine sorunlar yaşanabilir. Asteroidin fotometrik gözlemler sonrasında elde edilebilecek fiziksel parametrelerinin hassas hesaplanabilmesi için tüm bu etkilerin göz önüne alınması gerekmektedir. Ancak bir asteroidin yörünge hızının yavaş olması, aynı gece için elde edilen gözlemlerinin yalnızca indirgenmiş parlaklığa göre yorumlanmasını sağlayabilir. Böyle bir durum, çok küçük olması sebebiyle faz açısı değişiminin göz ardı edilebileceği hızlar için geçerlidir. Bu hızlara sahip asteroitler çoğunlukla ana kuşak ve ötesinde yer alan asteroitlerdir.

Yukarıda bahsedilen zorluklar ve verinin farklılaşmasına sebep olan etkiler Baboquivari asteroidinin fotometrik çalışmasında açıkça görülmüştür. Gözlemler sırasında Yer'e ve aynı zamanda Güneş'e de yakın olması sebebiyle Baboquivari, gökyüzünde oldukça hızlı yer değiştirmiştir. Bu sebeple, Baboquivari'nin fotometrik özelliklerini elde edebilmek için farklı yöntemler uygulanmış böylece periyodu, mutlak parlaklığı (H) ve fotometrik eğim parametresi (G) elde edilebilmiştir. Baboquvari'nin periyodunun elde edilebilmesi için Çizelge 3.1'de ve Çizelge 3.2'de detayları verilen T100 ve RTT150 teleskopları ile elde edilmiş gözlem verilerinin yanı sıra Bölüm 2.4'te bahsedilen ALCDEF veri tabanında yer alan 1 Temmuz 2019 tarihinden 23 Ağustos 2019 tarihine kadar farklı günlerde alınmış 827 gözlem verisi kullanılmıştır.

Baboquivari'nin T100 ve RTT150 gözlem verileri *PhoPS* yazılımı kullanılarak indirgenmiş ve her bir görüntü içerisindeki standart görünür parlaklığı, indirgenmiş parlaklığı ve evreye bağlı mutlak parlaklığı elde edilmiştir. Elde edilen bu parlaklıklar ile ALCDEF veri tabanında yer alan Baboquivari'nin Johnson-V bandındanki parlaklıkları birleştirilmiş ve Şekil 3.12 oluşturulmuştur. ALCDEF veri tabanında standarda dönüştürülmüş görünür parlaklıklardan indirgenmiş parlaklık ve $G = 0.15$ kabulü ile evreye bağlı mutlak parlaklık dönüşümleri yapılmıştır. Şekil 3.12'de farklı renklerde veri tabanı ile birleştirilen Baboquivari'nin standart görünür parlaklıkları, indirgenmiş parlaklıkları ve mutlak parlaklıkları arasındaki farklar görülebilmektedir. Bu parlaklıkların birbirlerinden açıkça ayrı olmasının nedeni gözlemlerin farklı Yer ve Güneş uzaklıklarında ve farklı yörünge faz açılarında alınmış olmasından dolayıdır. Özellikle kırmızı ile gösterilen standart görünür parlaklıklar arasında bir uyum görülmemektedir. Bu durum normaldir çünkü asteroit Yer ve Güneş yakınından geçerken daha parlak görünecektir. İndirgenmiş parlaklık bu durumu ortadan kaldırmaktadır ki mavi ile gösterilen parlaklıklar arasında faz açısı arttıkça uyumlu bir azalma görülmektedir. 30° faz açısı civarında belirgin olan farklılık ise şekilden ya da farklı bir fiziksel özellikten (çift olma vb.) kaynaklıdır. Turuncu ile gösterilen mutlak parlaklık ise $G = 0.15$ yaklaşımı kullanılarak elde edilmiş faz açısı etkisinin de ortadan kaldırıldığı parlaklıktır. Bu parlaklıklara bakıldığında ise ne standart görünür parlaklığa benzer düzensiz bir dağılım ne de indirgenmiş parlaklığa benzer bir azalma görülmektedir. Beklendiği üzere mutlak parlaklıktaki değişimler belirli bir aralıkta ve

yalnızca asteroidin dönmesinden kaynaklı parlaklık değişimlerini içermektedir.



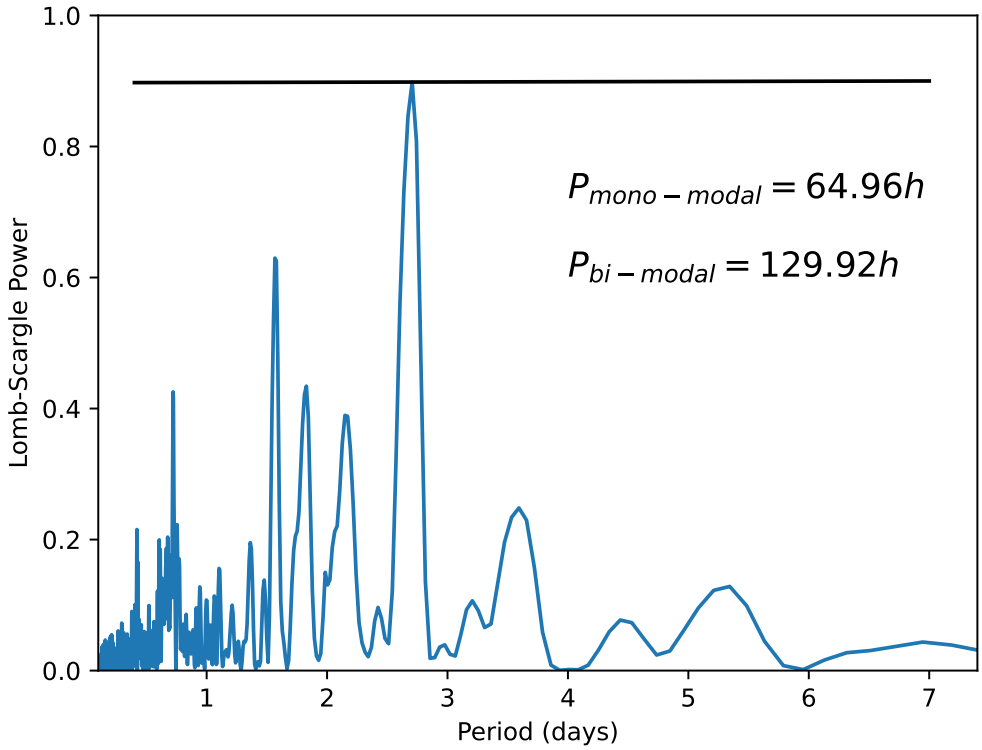
Şekil 3.12. *PhoPS* yazılımı kullanılarak Baboquivari'nin elde edilen standart görünür parlaklık, indirgenmiş parlaklık ve mutlak parlaklıklarının ALCDEF veri tabanında yer alan veriler ile birleştirilmesi ile elde edilmiş yörünge faz açısına karşılık grafiği. Grafik, hem bu parlaklıkların birbirleri ile farklılıklarının anlaşılabilmesi hem de periyot analizi için kullanılan verilerin ($15° - 20°$ faz açısı aralığı) gösterilmesi için oluşturulmuştur

Baboquivari'nin dönme periyodu hesabında Şekil 3.12'de görülen parlaklıklardan *mutlak parlaklık* kullanılmıştır. Ancak görülen tüm faz açılarında elde edilen parlaklıkların periyot hesabında kullanılması bu aşamada doğru sonucu vermeyecektir. Bunun sebebi farklı faz açılarında farklı bakış açıları sebebiyle asteroidin görünen yüzünün değişmiş olabileceğidir. Bu yüzden en yoğun verinin bulunduğu $15° - 20°$ faz açısı aralığındaki T100 ve ALCDEF verilerinden elde edilen evreye bağlı mutlak parlaklıklar kullanılarak periyot hesabı yapılmıştır.

Periyot hesabı, Vanderplas (2015) tarafından geliştirilen *Gatspy* yazılımı ile *Lomb-Scargle* (Lomb 1976; Scargle 1982) yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Erece vd. (2023) tarafından da yayımlanan Şekil 3.13'te görüldüğü üzere Baboquivari'nin en muhtemel dönme periyodu 64.96 saattir. Ancak, Bölüm 2.2.4'te bahsedildiği üzere

Lomb-Scargle yöntemi tek tepeli (mono-modal) bir ışık eğrisi çözümü üretmektedir. Bu yüzden Baboquivari'nin dönme periyodu, elde edilen bu değerin iki katı olan ve çift tepeli (bi-modal) çözüme karşılık gelen 129.93 saat olarak hesaplanmıştır.

Periyottaki hata hesabı ise Vanderplas (2018) tarafından açıklanan yönteme göre elde edilmiştir. Yönteme göre hata, en muhtemel periyot değerine karşılık gelen maksimum pikin yarı yüksekliğinin yarı genişlik değeridir (Half width at half maximum) yani FWHM değerinin yarısıdır. Sonuçta Baboquivari'nin periyodu 129.93 $\pm$ 2.31 saat olarak elde edilmiştir (Erece vd. 2023).

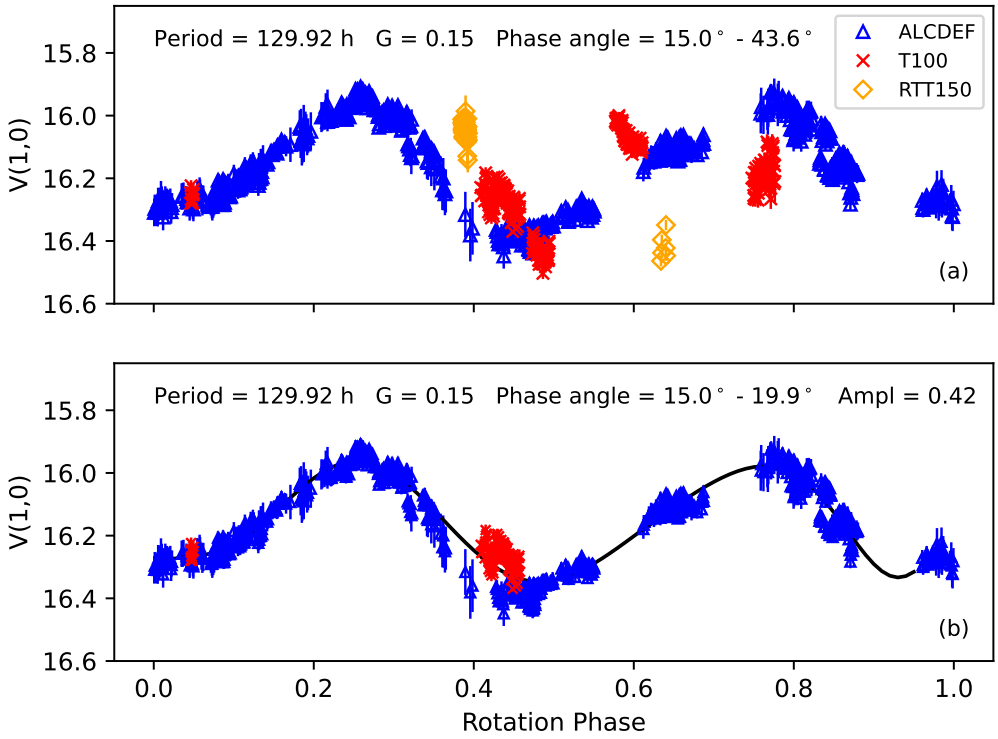


Şekil 3.13. Baboquivari'nin *Gatspy* yazılımı kullanılarak *Lomb-Scargle* yöntemi ile elde edilen frekans analizi sonucu (Erece vd. 2023)

Dönme periyodunun elde edilmesinin ardından artık ışık değişimi için evrelendirme yapılabilir. Bunun için her bir parlaklık değerinin elde edildiği zaman 0-1 aralığında yer alan evreye Denklem 2.28 yardımı ile dönüştürülmelidir. Evrelendirme sonrasında Baboquivari için elde edilen *parlaklık-evre* grafiği Şekil 3.14'te gösterilmiştir.

Şekil 3.14(a)'da görülen ışık eğrisinde Baboquivari'nin tüm parlaklık değerleri gösterilmiştir. Burada da açıkça görülen farklılıkların sebebi daha önce bahsedildiği üzere asteroidin gözlemler sırasında bakış açısındaki (aspect angle) değişimler, çift olması ya

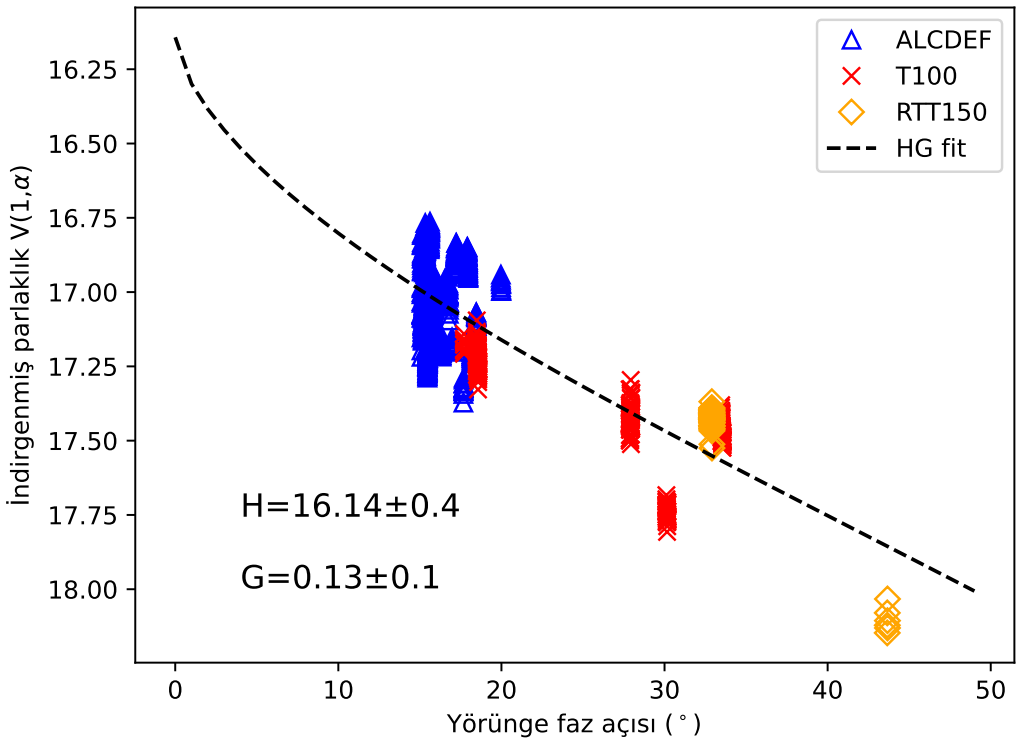
da yalpalaması (tumbling) gibi durumlardan dolayı olabilir. Bu sebeple periyot hesabı yalnızca Şekil 3.14(b)'de görülen benzer faz açılarındaki ($15° - 20°$) veriler kullanılarak elde edilmiştir. İki boyutlu eksen (yüzey) oranları ile ilgili bilgi veren ışık eğrisinin genliği ise 0.42'dir. Denklem 2.29 yardımıyla Baboquivari'nin olası minimum eksen oranı a/b = 1.44 olarak bulunmuştur (bkz. Bölüm 4.5).



Şekil 3.14. Baboquivari'nin evrelendirilmiş ışık eğrisi. (a) grafiği tüm verilerin kullanılmasıyla oluşturulmuşken (b) grafiği yalnızca periyodun elde edildiği veriler kullanılarak oluşturulmuştur (Erece vd. 2023)

Periyot hesabının ardından H ve G parametreleri ise farklı faz açılarındaki indirgenmiş parlaklıklar kullanılarak elde edilmiştir. Python yazılım dili içerisinde yer alan *Scipy* (Virtanen vd. 2020) paketi kullanılarak faz açısı ve indirgenmiş parlaklık verilerine Denklem 2.14 eğrisi fit (lineer olmayan en küçük kareler yöntemi) edilmiş ve sonucunda a_1 ve a_2 katsayıları elde edilerek, Denklem 2.15 yardımıyla H ve G elde edilmiştir. Şekil 3.16'te verilerin dağılımı ve elde edilen eğri fiti gösterilmiştir. Burada verilerin dönme evresine bağlı olarak saçıldıkları görülmektedir. Evreye bağlı saçılma sonucunda elde edilen parametreler beklendiği üzere yüksek oranda hatalıdır. Bu etkinin ortadan kaldırılması gerekmektedir. Bunun için her bir verinin aynı dönme evresine karşılık elde edilmesi ya da farklı evrelerdeki verilerin faz açısına göre parlaklığın

değişmediği evreye taşınması gerekmektedir. Shevchenko vd. (2002) tarafından asteroitlerin yörünge faz açısı değişiminden en az etkilenen evresinin maksimum olduğu belirtilmiştir. Buchheim (2010) da maksimum evresinin en az etkinlendiğini ancak maksimum evresinin belirlenemediği zorunlu durumlarda minimum evresinin ya da ortalama parlaklığın kullanılabileceğini belirtmiştir.

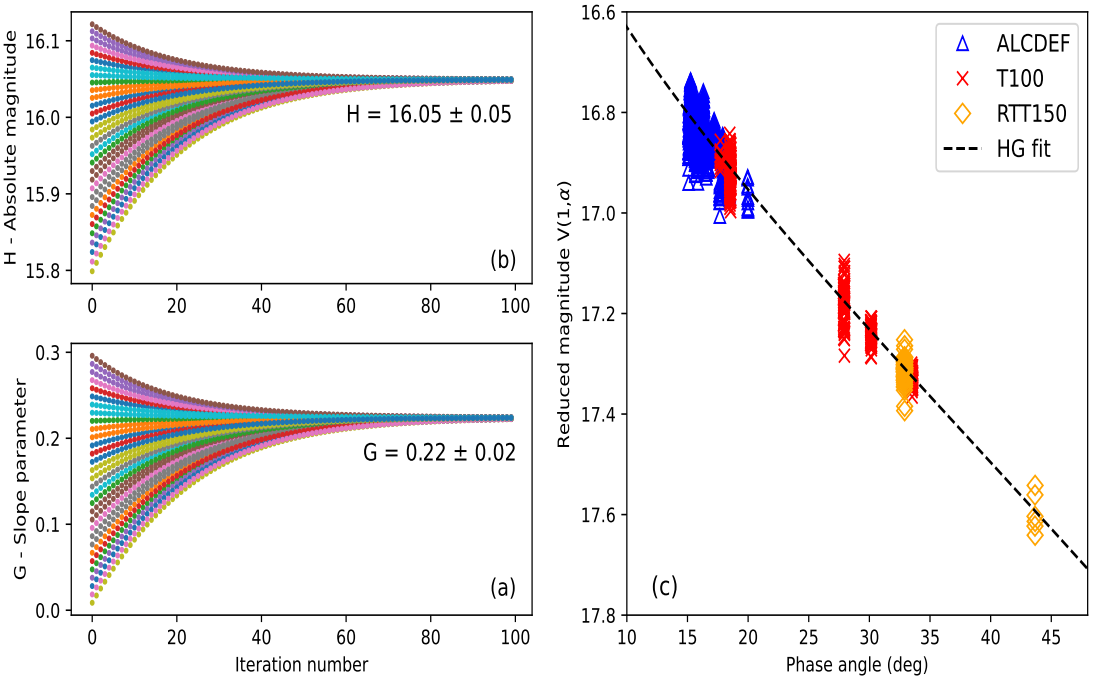


Şekil 3.15. Baboquivari'nin fotometrik faz eğrisi. Dönme sebebiyle ortaya çıkan parlaklık farklarından dolayı (ışık eğrisi) oluşan saçılmış verilerden elde edilen H ve G değerleri grafik içerisinde görülmekedir

Şekil 3.14'te görüldüğü üzere cisim maksimum parlaklığa $\sim$0.25 evresinde ulaşmaktadır. Buradaki maksimum parlaklık değeri kullanılarak dönmenin etkisi ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. Başlangıç için rastgele seçilen G parametresi kullanılarak yapılacak iterasyon sonrasında doğru değere yakınsaması beklenen H ve G değerleri için aşağıda belirtilen adımlar sırasıyla uygulanmıştır;

1. Başlangıç için rastgele bir G değeri belirle ve mutlak parlaklıkları hesapla
2. $\sim$0.25'teki maksimum mutlak parlaklığı bul
3. Her bir mutlak parlaklık değerini maksimum parlaklıktan çıkar

4. Elde edilen her bir parlaklık farkını indirgenmiş parlaklıklara ekle
5. İndirgenmiş parlaklıklardan yeni H ve G değerleri elde et
6. Elde edilen G değerinden mutlak parlaklık dönüşümü yap
7. Yeni mutlak parlaklıklardan yeni ışık eğrisini elde et
8. 1. adıma dön



Şekil 3.16. Baboquivari'nin yapılan iterasyon sonrasında elde edilen H, G değerleri ile fotometrik faz eğrisi. (a) ve (b) grafiklerinde her bir renk farklı başlangıç durumlarını göstermektedir. Her bir durum için H ve G'nin aynı değerlere yakınsadığı açıkça görülmektedir. (c) grafiği ise iterasyon sonucunda elde edilen H ve G değerleri kullanılarak üretilen fotometrik faz eğrisidir (Erece vd. 2023)

İterasyonun 1. adımında belirtilen başlangıç için rastgele seçilecek bir G değeri ile doğru sonuca ulaşılabilmektedir. Ancak, Şekil 3.16(a) ve 3.16(b) grafikleri seçilebilecek tüm farklı değerler için sonucun tek bir değere yakınsadığını açıkça göstermektedir. Bu aynı zamanda iterasyonun sonlanacağı adım sayısını da belirtmektedir. İterasyon sonucunda Baboquivari için elde edilen $H = 16.05 \pm 0.05$ ve $G = 0.22 \pm 0.02$ değerleri ile Şekil 3.16(c)'de görülen fotometrik faz eğrisi oluşturulmuştur. Grafikte açıkça farklı faz açılarındaki parlaklık farklarının ve saçılmaların ortadan kalktığı görülmektedir.

3.4. Asteroitlerin Tayfsal Gözlem Verilerinin Tayf Türü ile Eşleştirilmesi ve Baboquivari'nin Tayfsal Analizi

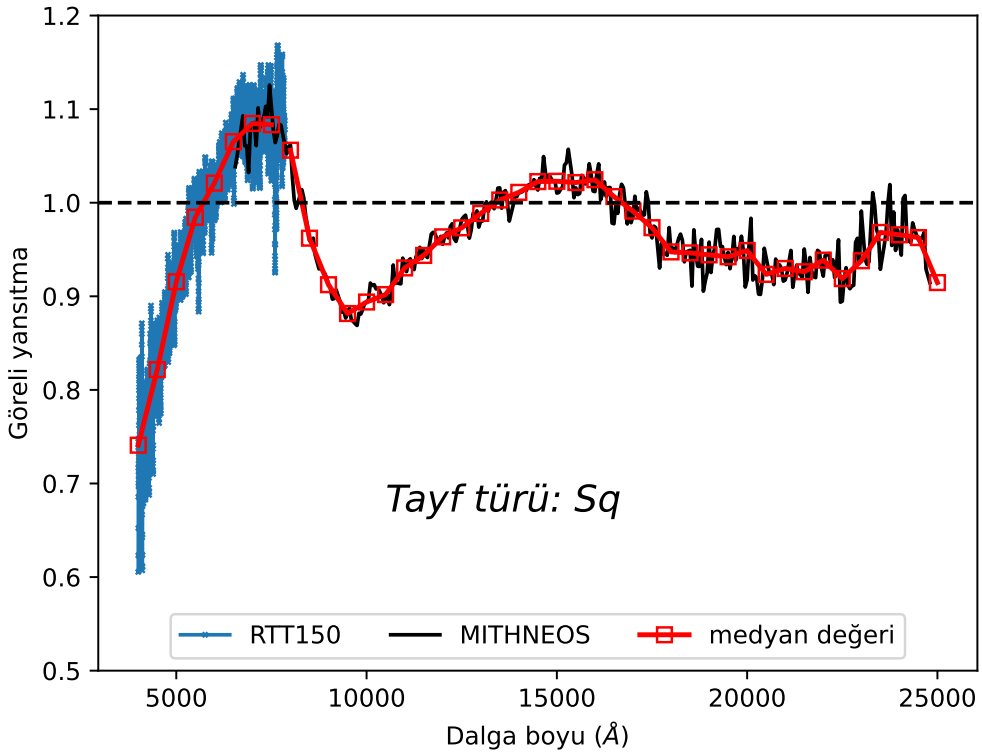
Günümüzde asteroitlerin tayf gözlemleri sonrasında elde edilen tayfın şekline göre 25 farklı tayf türünün (Bus-Demeo tayf sınıflaması) tanımlanması Bölüm 2.2.6'da detaylarıyla anlatılmıştı. Bu çalışmanın bir çıktısı olarak ilk kez tayin edilen Baboquivari'nin tayf türünün hangi türe karşılık geldiği ise RTT150 teleskobu ile 4000 Å ila 7800 Å dalga boyu aralığına karşılık gelen optik bölgede yapılan 25 Å çözünürlüklü tayf gözlemleri (bkz. Çizelge 3.2) kullanılarak elde edilmiştir.

RTT150 teleskobu ile Baboquivari'nin tayf gözlemleri grizm 15 optik ağı ve 0.2 mm (3.6 yaysaniyesi) genişlikli yarık (slit) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Poz süresi 600 saniye olarak belirlenmiş, asteroidin yarık içerisinde sürekli kalabilmesi için yıldızıl (sidereal) takip hızı yerine takip modu değiştirilmiş ve asteroidin, poz süresince, uzay hızında ve yönünde takip sağlanmıştır. Poz süresince asteroidin hareketi sebebiyle yarık içerisine girebilecek farklı kaynakların etkisini ortadan kaldırabilmek adına ise üç farklı poz alınmış, üç pozun medyanı alınarak temiz bir görüntü elde edilmiştir. Alınan her bir tayf Ek 7.3'de paylaşılmıştır. Aynı gece içerisinde güneş ikizi (solar twin) HIP 100963 (Takeda ve Tajitsu 2009) yıldızı da aynı dalga boyu ve tayfsal çözünürlük aralığında gözlenmiştir. Baboquivari'nin tayfı 5500 Å dalga boyunda akı normalizasyonu ile güneş ikizinin tayfına bölünerek elde edilmiştir. Ayrıca, asteroit ve Güneş ikizinin birbirine çok yakın olması ve hava kütlesinin 0.15'ten az olması nedeniyle atmosferik düzeltmeye ihtiyaç duyulmamıştır. Bunun bir diğer sebebi ise V-bandında gözlemevinin atmosferik sönümleme katsayısının $0.15^m/\textit{hava kütlesi}$[75] olması ve buradan gelecek hatanın %2'den küçük olacak olmasından dolayıdır.

Gözlemsel yöntemlerle elde edilen tayfın hangi tayf türüne karşılık geldiğini belirleyebilmek için matematiksel yöntemler kullanılmaktadır. Örneğin, RTT150 teleskobu ile elde edilen Baboquivari'nin VIS bölgesindeki tayfına uygulanacak en küçük kareler yöntemi ile en iyi fit elde edilmelidir. Ancak, yöntemin uygulanmasından önce veri 7 farklı dalga boyuna göre aralıklara bölünmüş (4400 Å , 5000 Å , 5500 Å , 6000 Å , 6500 Å , 7000 Å ve 7500 Å) her bir dalga boyunun ± 250 Å civarındaki değerlerin medyanı alınarak oluşturulan yeni değerlere en küçük kareler yöntemi uygulanarak en iyi fit elde edilmiştir. Elde edilen fit ile Bus ve Binzel (2002b) tarafından yayımlanan Çizelge III'teki 26 farklı tayf türü için verilen 4400 Å ve 9200 Å dalga boyu aralığındaki yansıtıcılık değerleri için oluşturulan en iyi fitlere Temel Bileşen Analizi'ne (Principal Component Analysis) dayalı örüntü tanıma yöntemi uygulanmış ve Baboquivari'nin *Sq* türü bir asteroit olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda MITHNEOS projesi kapsamında elde edilen VIS bölgenin yanı sıra IR bölgeyi de kapsayan Baboquivari'nin arşiv verileri RTT150 teleskobu ile elde edilen tayf verileriyle

[75] Dr. İrek Khamitov tarafından sözlü belirtilmiştir

birleştirilmiştir. MITHNEOS verileri RTT150 verileriyle çakıştığı 7000 Å dalga boyuna normalize edilmiştir. VIS bölgesi için uygulanan aynı yöntem birleştirilmiş tayf için de uygulanmış, 42 farklı aralık belirlenmiş ve en iyi fit elde edilmiştir. Bus-Demeo sınıflamasına göre paylaşılan 4500 Å ve 24500 Å aralığındaki 25 farklı tayf türü (bkz. Bölüm 2.2.6, 2.21) içerisinde benzerlik taraması yapılmış ve hem VIS hem de VIS+IR verileri Baboquivari'nin *Sq* tayf türünden bir asteroit olduğu sonucunu vermiştir (bkz. Şekil 3.17).



Şekil 3.17. Baboquivari asteroidinin RTT150 ve MITHNEOS verilerinin birleştirilmesiyle oluşturulmuş tayfı. MITHNEOS verileri RTT150 verileriyle üst üste geldiği 7000 Å dalga boyuna normalize edilmiştir. Akı normalizasyonu ise 7000 Å dalga boyu için yapılmıştır. Medyan değerler kırmızı kare olarak görülen merkez değerlerin ± 250 Å etrafındaki değerlerden elde edilmiştir. Kırmızı doğru ise medyan değerler kullanılarak elden edilmiş fiti göstermektedir (Erece vd. 2023)

3.5. Tek Nokta Polarimetrik Gözlem Verisi ile Albedo Hesabı ve Baboquivari'nin Polarimetrik Sonuçları

Bölüm 2.2.7'de YYA'ların polarimetrik özellikleri ve bu özelliklerin geometrik albedo ile ilişkisi detaylandırılmış, farklı faz açılarında elde edilen verilerin polarizasyon

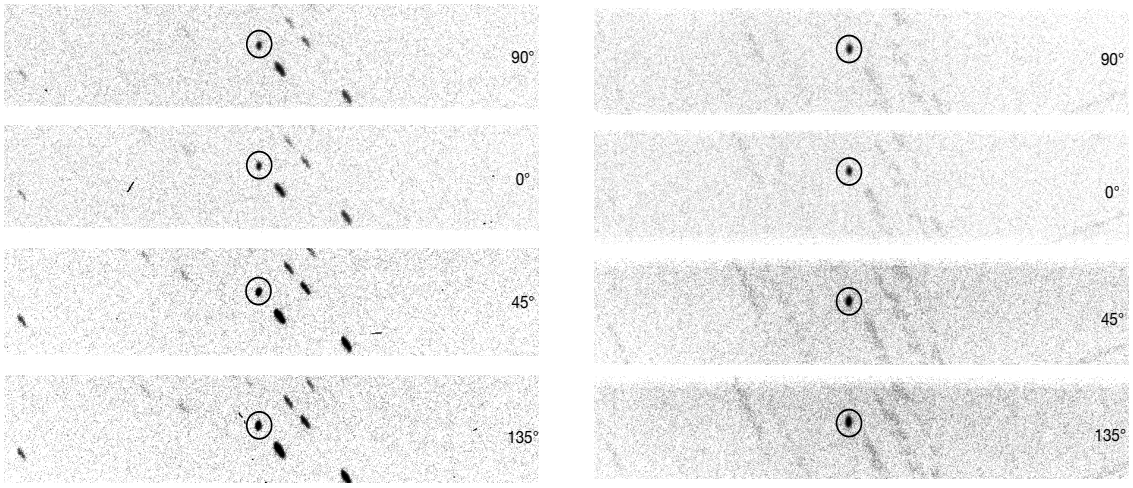
eğrisine dönüştürülebildiği denklemler ile Çizelge 2.3'te albedonun elde edilebildiği faz eğrisinin özelliklerine bağlı (h, P_{min}, Ψ) denklemler ve katsayılar verilmişti. Burayı kısaca özetlemek gerekirse, geometrik albedonun hesaplanabilmesi için farklı faz açılarında (yani farklı zamanlarda) polarizasyon dereceleri elde edilmeli, ardından uygun matematiksel ifade (örn. Denklem 2.32, 2.33 veya 2.34) kullanılarak polarimetrik eğri elde edilmeli ve Çizelge 2.3'teki denklemler yardımıyla albedo hesaplanmalıdır. Ancak asteroitler, gözlemsel zorluklar nedeniyle her zaman istenilen faz açısında gözlenemezler. Bu durum da polarizasyon eğrisinin elde edilmesini ve sonuçta da albedonun elde edilmesini güçleştirmektedir.

Baboquivari asteroidi için RTT150 teleskobu kullanılarak elde edilen polarimetrik görüntüler ise 20 Ekim 2019 tarihinde sistematik polarizasyon derecesi hatası 0.2% olan TFOSC-WP polarimetresi (Helhel vd. 2015) kullanılarak elde edilmiştir (bkz. Çizelge 3.2). TFOSC-WP polarimetresi ile aynı anda $0°, 45°, 90°$ ve $135°$ polarizasyon açılarında görüntü alınabilmektedir. Baboquivari'nin tek poz ile simultane elde edilen 4 farklı kanaldaki örnek görüntüsü Şekil 3.18a'da gösterilmiştir. Görüntü içerisine girebilecek diğer gök cisimlerini elimine edebilmek için ardışık 5 farklı poz alınarak medyan filtre uygulanmıştır (bkz. Şekil 3.18b). Asteroidin medyan görüntü içerisindeki farklı kanallardaki akı değerleri elde edilmiş, sırasıyla Denklem 3.6 ve 3.7 yardımıyla ilk üç Stokes parametresi $\vec{S}(I, Q, U)$ ve ardından bulunduğu yörünge faz açısı (43.6°) için lineer polarizasyon derecesi hesaplanmıştır.

$$\vec{S} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{0^\circ} + I_{90^\circ} \text{ veya } I_{45^\circ} + I_{135^\circ} \\ I_{0^\circ} - I_{90^\circ} \\ I_{45^\circ} - I_{135^\circ} \end{bmatrix} \tag{3.6}$$

$$P_L = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \tag{3.7}$$

Denklem 3.6'da görülen I_{i° ilgili kanal için asteroidin akısıdır. Medyan görüntü içerisindeki akı değerleri kullanılarak I, Q ve U parametreleri hesaplanmış ve Denklem 3.7 yardımıyla Baboquivari'nin lineer polarizasyon derecesi $3.6\% \pm 0.5\%$ olarak elde edilmiştir.

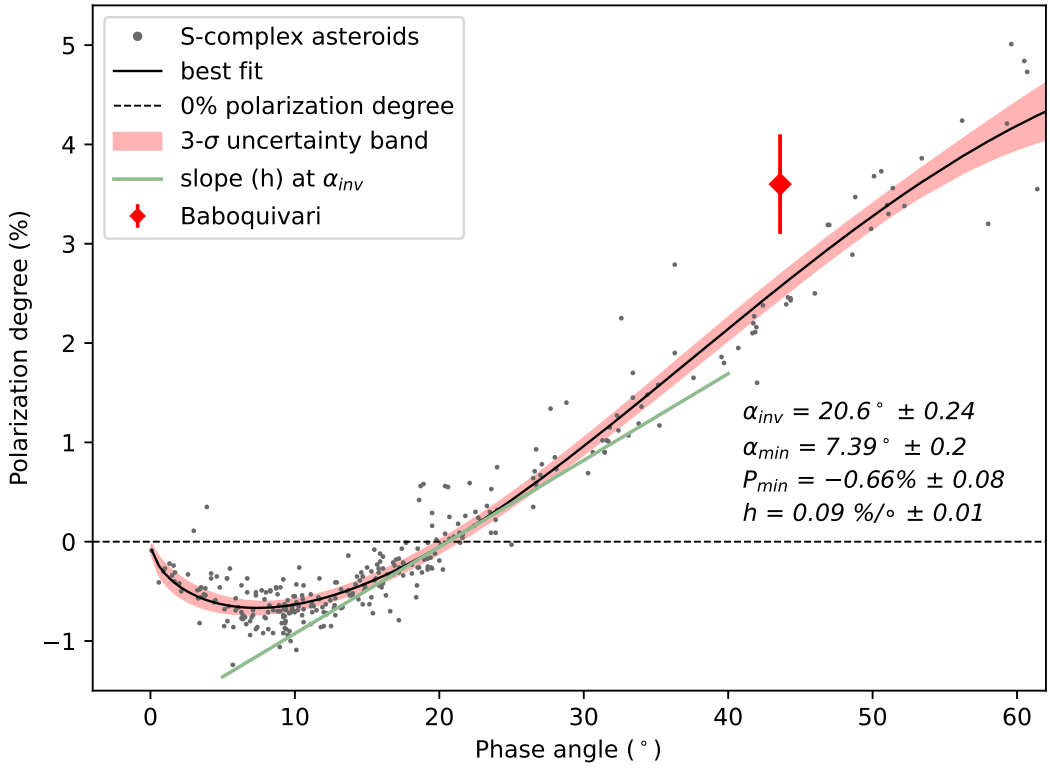


(a) V-bandında alınmış tek bir örnek görüntü **(b)** 5 farklı görüntüden oluşan medyan görüntü

Şekil 3.18. Baboquivari'nin RTT150 teleskobunda yer alan TFOSC-WP polarimetresi ile 4 farklı kanalda ($90°$, $0°$, $45°$, $135°$) alınmış polarimetrik görüntüsü. Her bir kanalda Baboquivari siyah daire içerisinde görülmektedir (Erece vd. 2023)

Günümüze kadar elde edilen polarimetrik veriler neticesinde önemli birkaç bulguya rastlanılmıştır. Bölüm 2.2.7'de bahsedildiği üzere bunlardan biri faz açısının ki bu açıya dönüş açısı denilmektedir, kabaca $18°$ - $22°$ olduğu aralıkta polarizasyon derecesinin $P_r = 0\%$ olduğudur (Mishchenko vd. 2010; Belskaya vd. 2009). Bir diğeri ise faz eğrisinin, dönüş açısından (α_{inv}) başlayarak $40° - 60°$ aralığına kadar doğrusal olduğudur (Lumme ve Muinonen 1993) (bkz. Şekil 2.24). Bu iki bulguyu kullanarak tek nokta polarimetrik gözlem verisi ile albedo hesaplanabilmektedir. Buradaki mantık, bahsedilen doğrusallık içerisinde olduğu düşünülen faz açısında ($\sim 60°$'ye kadar) alınan polarimetrik tek bir noktanın dönüş açısındaki ($20° \pm 2°$) nokta ile oluşturduğu doğru denkleminin elde edilmesidir. Elde edilen doğru denkleminin α_{inv} açısındaki değeri ki bu değer aynı zamanda polarimetrik eğrinin α_{inv} açısındaki teğetidir, Denklem 2.35 içerisinde kullanılır ve asteroidin albedosu böylece hesaplanabilir.

Baboquivari'nin hesaplanan polarizasyon derecesinin, polarizasyon derecesi bilinen diğer tüm *S* sınıfı (*S, Sa, Sq, Sr* ve *Sv*) asteroitler içerisindeki yerini görebilmek ve bazı parametreleri elde edebilmek için ise Şekil 3.19 oluşturulmuştur.

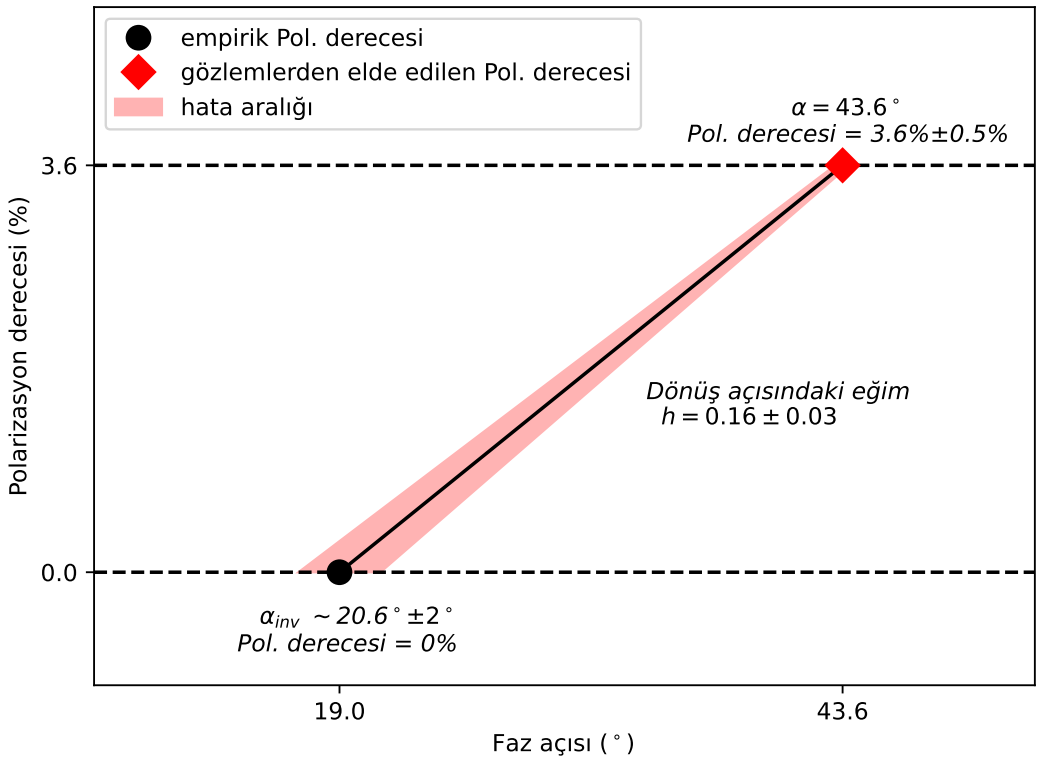


Şekil 3.19. Lupishko (2022) tarafından APD veri tabanında yayımlanan tüm S-sınıfı asteroitlerin V-bandındaki polarizasyon dereceleri kullanılarak elde edilen polarimetrik faz eğrisi (Erece vd. 2023). Gri noktalar veri tabanındaki asteroitler iken kırmızı ile gösterilen Baboquivari'nin RTT150 ile elde edilen verisidir. Düz çizgi, Denklem 2.32 ile elde edilen en iyi fit, yeşil çizgi ise eğrinin α_{inv} açısındaki eğimidir (h)

Şekil 3.19 Lupishko (2022) tarafından yayımlanmış V-bandındaki farklı tüm S-sınıfı asteroitlerin polarizasyon dereceleri ve elde edildikleri faz açılarından oluşturulmuştur. Tüm S-sınıfı asteroitlerin kullanılmasının sebebi APD veri tabanında yeterli sayıda *Sq* türü asteroide ait veri bulunmamasından dolayıdır. V-bandı verilerinin kullanılmasının sebebi ise Baboquivari verisinin V-bandında elde edilmiş olmasıdır. Grafiğin oluşturulmasındaki amaç hem Baboquivari'nin yerini görebilmek hem de α_{inv} açısını hesaplayabilmektir. En iyi fitin elde edilebilmesi için Denklem 2.32 kullanılmıştır. En iyi fitin elde edilmesinin ardından ilgili dağılım için α_{inv}, α_{min}, P_{min} ve h değerleri hesaplanmıştır. $20.6° \pm 0.24°$ olarak hesaplanan α_{inv} açısı Baboquivari'nin bilmediğimiz ancak olduğunu varsayacağımız dönüş açısı değeri olarak kullanılacaktır.

Baboquivari'nin albedo değerini hesaplayabilmek için daha önce bahsedilen polarizasyon eğrisinin $0°$ ile $\sim 60°$ faz açısı arasında doğrusal olduğu kabulü üzerine, polarizasyon derecesinin 0% olduğu α_{inv} açısı ile tek nokta polarimetrik gözlem verisi arasında oluşturulan doğrunun eğiminin elde edilmesi gerekmektedir. Şekil 3.20'te

Baboquivari için elde edilen tek nokta polarimetrik gözlem verisi (kırmızı nokta), elde edilen doğru ve dönüş açısındaki eğim (h) değeri görülebilmektedir.



Şekil 3.20. Baboquivari asteroidinin tek nokta polaritmetrik gözlem verisi ile elde edilen albedo değeri. Kırmızı nokta $43.6°$ faz açısında hesaplanan $3.6\% \pm 0.5\%$ polarizasyon derecesini göstermektedir. Siyah nokta ise dönüş açısının geçtiği varsayılan $\alpha_{inv} = 20°$ ve 0% polarizasyon derecesinin olduğu noktayı işaret etmektedir

Baboquivari'nin $h = 0.16 \pm 0.03$ olarak hesaplanan dönüş açısındaki eğimi, albedo hesabı için Denklem 2.35 içerisinde kullanılabilir. Denklem 2.35'te yer alan C_1 ve C_2 katsayıları Cellino vd. (2015a) tarafından albedosu $p_v > 0.08$ olan asteroitler için paylaşılmıştır. $h = 0.16 \pm 0.03$ ile birlikte $C_1 = -0.8 \pm 0.041$ ve $C_2 = -1.467 \pm 0.037$ değerleri Denklem 2.35'te kullanılmış ve Baboquivari için albedo değeri $p_v = 0.15 \pm 0.03$ olarak elde edilmiştir. Bu değer *Sq* türü ya da genel olarak S-sınıfı asteroitler için uygun bir değerdir.

3.6. $H < 18^m$ Olan YYA'ların Yörünge İntegrasyonu

$H < 18^m$ olan YYA'ların yörünge integrasyonları için yalnızca kütle çekimsel etkilerin kullanılabildiği *REBOUND*[76] (Rein ve Liu 2012) ve kütle çekimsel olmayan etkilerin (Yarkovsky vb.) de dahil edilebildiği *REBOUNDx*[77] (Tamayo vd. 2020a) integrasyon kodları kullanılmıştır. Kodlar içerisinde kullanılabilecek farklı birçok nümerik integrasyon şeması yer almaktadır. Nümerik şemalar, N-cisim integrasyonlarının temelini oluştururlar ve N-cisim içerisinde bir parçacığın belirlenen zaman adımında ileri ya da geri yönlü hareket ettirilmesini sağlarlar. Bunun için integrasyonu yapılacak her bir cismin başlangıç parametreleri olarak ilgili başlangıç zamanına karşılık gelen konum ve hız vektörlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

REBOUND ve *REBOUNDx* integrasyon kodları içerisinde yer alan nümerik şemalar aşağıda verilmiştir;

- IAS15 (Integrator with Adaptive Step-size control, 15th order) (Rein ve Spiegel 2015)
- WHFast (Wisdom-Holman Integrator) (Wisdom ve Holman 1991; Rein ve Tamayo 2015)
- Gragg-Bulirsch-Stoer (BS) (Hairer vd. 1993)
- Mercurius (Rein vd. 2019a; Chambers 1999)
- SABA (Blanes vd. 2012; Laskar ve Robutel 2001; Rein vd. 2019b)
- JANUS (Rein ve Tamayo 2018)
- EOS Method (Embedded Operator Splitting Method) (Rein 2020) (Rein ve Tremaine 2011)
- SEI (Symplectic Epicycle Integrator)
- Ayrıca geniş kullanım alanları olan Leapfrog, Euler, Runge-Kutta2 ve Runge-Kutta4 şemaları

Kod içerisinde yer alan nümerik şemaların yanı sıra literatürde yer alan daha birçok farklı nümerik şema kullanılmaktadır. Nümerik şemalar hareket denlemlerini içeren adi diferansiyel denklemler kümesinden oluşmaktadır. Bu diferansiyel denklemlerin kesin çözümleri genel olarak bilinmediğinden, her nümerik şema gerçek

[76] https://rebound.readthedocs.io [son erişim tarihi: 25.11.2023]
[77] https://reboundx.readthedocs.io [son erişim tarihi: 25.11.2023]

çözüme sayısal olarak yaklaşmaya çalışır. Farklı nümerik şemalar bunu farklı şekilde yapar ve her birinin bazı avantajları ve dezavantajları vardır. Örneğin, WHFast, SEI, Leapfrog, EOS simplektik şemalar iken IAS15 simplektik olmayan adaptif zaman adımlı bir şemadır. Cisimlerin yakın geçişleri sırasında IAS15 ve BS yüksek doğruluklu hesaplamalar yapabilmektedir. WHFast ise özellikle Güneş sistemi benzeri kütle merkezinin içerisinde bulunduğu ana bir kütleye sahip olan N-cisim problemleri için oldukça uygundur. Belirtildiği üzere N-cisim probleminin özel durumlarına (yakın geçişler vb.) karşılık her şemanın avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

Bu tez çalışması sırasında yapılan integrasyonlarda IAS15 nümerik integrasyon şeması kullanılmıştır. İntegrasyonu yapılan ilgili asteroit ve Güneş'in yanı sıra integrasyona dahil edilen diğer cisimler Merkür, Venüs, Yer, Ay, Mars, Jüpiter, Satürn, Uranüs ve Neptün ile birlikte toplam 11'dir. Başlangıç parametreleri (konum ve hız vektörleri) 25 Şubat 2023 tarihi için JPL/Horizons efemeris servisi kullanılarak elde edilmiştir. Yarkovsky etkisinin ihmal edildiği integrasyonlar, JPL/Horizons veri tabanında yer alan $H < 18^m$ olan tüm YYA'lar (1056 YYA) için hem zamanda ileri hem de zamanda geri yönlü olmak üzere 100000 yıl olarak gerçekleştirilmiştir.

Yarkovsky etkisinin dahil edildiği integrasyonlar yine JPL/Horizons veri tabanında yer alan, ancak dönme periyodu bilinen ve tayf türü *Sq* olan tüm YYA'lar için gerçekleştirilmiştir (bkz. Bölüm 4.3). İstatistiğin güvenilir olması için $H < 18^m$ sınırlaması getirilmemiştir. Buradaki amaç *Sq* tayf türü olduğu tespit edilen Baboquivari ile aynı tayf türünden olan YYA'ların dinamik özelliklerini karşılaştırmaktır. *REBOUNDx* kodu içerisinde Yarkovsky etkisinin hesaplanabilmesi için bilinmesi gereken fiziksel özellikler yoğunluk, albedo, dönme periyodu, yarıçap, emisyon gücü[78] ve dönme periyoduna bağlı olan k sabitine ihtiyaç duyulmaktadır.

Her asteroit özelinde bilinmesi gereken bu parametreler için bazı yaklaşımlar yapılmıştır. Örneğin, her bir YYA için yoğunluk parametresi olarak Carry (2012) tarafından *Sq* tayf türü asteroitler için ortalama değer olarak yayımlanan 3.43 g/cm^3 değeri kullanılmıştır. Albedo değeri, JPL/Horizons veri tabanından elde edilmiş ancak verisi olmayanlar için DeMeo ve Carry (2013) tarafından *S* sınıfı tayf türü asterotiler için ortalama değer olarak yayımlanan 0.23 değeri kullanılmıştır. Dönme periyodu, JPL/Horizons veri tabanından elde edilmiştir ve yukarıda belirtildiği üzere integrasyonda yalnızca dönme periyodu bilinen YYA'lar kullanılmıştır. Yarıçap ise yine JPL/Horizons veri tabanından elde edilmiş ancak verisi olmayanlar için JPL/Horizons veri tabanından elde edilen mutlak parlaklık (H) değeri (tüm cisimlerin mutlak parlaklık değeri bulunmaktadır) ve albedo değerleri kullanılarak Denklem 2.27 yardımıyla

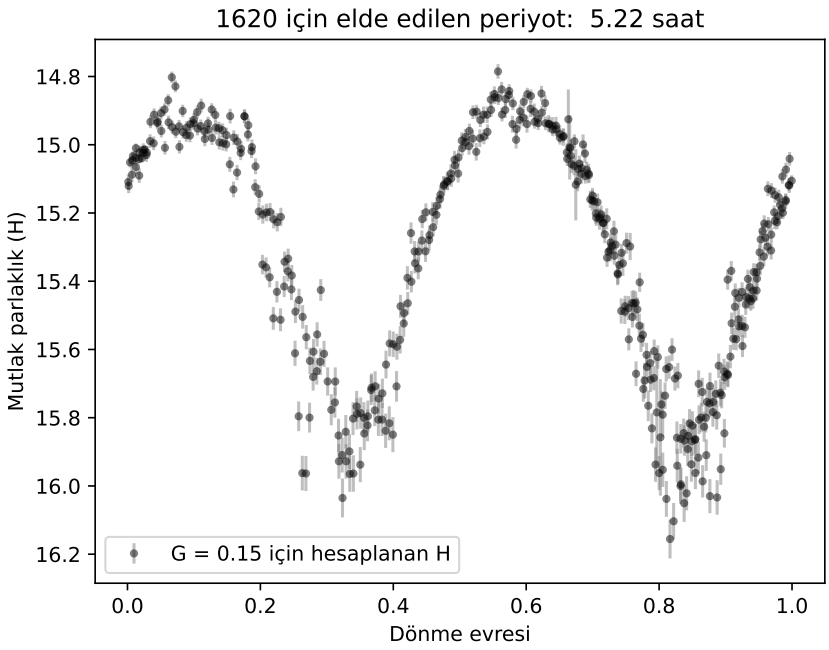
[78]Emisyon gücü (emissivity), bir cismin tüm dalgaboylarında yüzeyinden birim zamanda salınan enerjinin, aynı sıcaklıktaki ve aynı yüzeye sahip ideal bir karacisim tarafından birim zamanda salınacak olan enerjiye oranıdır.

hesaplanmıştır. Emisyon gücü için ise asteroitlerin termal modellemeleri için sıklıkla varsayılan değer olarak kullanılan 0.9 değeri kullanılmıştır (örn. Rozitis vd. 2018; Hamm vd. 2022; Maturilli vd. 2016). Dönme periyoduna bağlı olan k sabitinin ise Vereš vd. (2015) tarafından 0 ile 0.25 aralığında olması gerektiği belirtilmiş ve integrasyonda tüm cisimler için 0.25 kullanılmıştır. Yarkovsky etkisinin her cisim için belirtilen parametreler kullanılarak göz önüne alındığı integrasyonlar ise zamanda ileri yönlü 100000 yıl olarak gerçekleştirilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Gözlem Verilerinin Analizi

Daha önceki bölümlerde bahsedildiği üzere asteroitlerin fiziksel parametrelerinin fotometrik gözlemler ile belirlenebilmesi için farklı tarihlerde çok sayıda gözleme ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez kapsamında TUG'a önerilen 19AT100-1482 ve 21AT100-1783 numaralı T100 teleskobu gözlem projelerine tahsis edilen zamanlarda gözlemler yapılmış ve Baboquivari asteroidi için fotometrik veriler elde edilmiştir (bkz. Bölüm 4.5). Diğer YYA'lar için elde edilen gözlem verileri ise yalnızca belirli yörünge faz açılarında elde edilmiş ve ışık eğrilerinin elde edilebilmesi için alınmıştır. Bölüm 3.1'de yer alan ve Çizelge 3.1'de detayları verilen bazı $H < 18^m$ YYA'ların gözlem verilerinin analizi *PhoPS* yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Örnek olarak, Şekil 4.1'de Apollo türü bir YYA olan (1620) Geographos asteroidinin V-bandında T100 teleskobu ile alınmış gözlem verilerinin *PhoPS* yazılımı kullanılarak elde edilen evrelendirilmiş ışık eğrisi görülmektedir. Çizelge 3.1'de belirtilen her bir YYA'nın *PhoPS* yazılımı ile elde edilen ışık eğrileri EK-4'de verilmiştir.



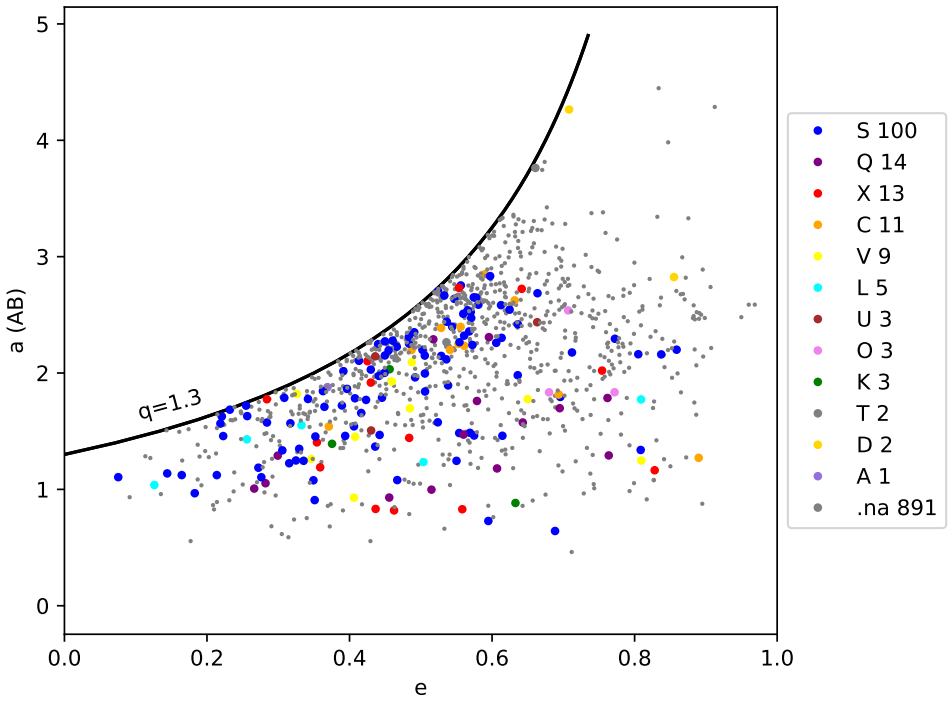
Şekil 4.1. (1620) Geographos asteroidinin T100 teleskobu ile V-bandında elde edilmiş ışık eğrisi

(1620) Geographos asteroidinin literatürde yer alan periyodu 5.22 saattir (örn. Ďurech vd. 2022; Warner ve Stephens 2020b). Bu tez kapsamında (1620) Geographos için elde edilen ışık eğrisi ve periyot, literatür ile tam uyumluluk göstermektedir. Bu ve

elde edilen diğer kaliteli fotometrik veriler genlik, eksen oranı vb. fiziksel özelliklerin dışında farklı teknikler ve geometrilerde elde edilen veriler ile birleştirilerek şekil, *YORP* ivmelenmesi, *Yarkovsky* ivmelenmesi gibi özelliklerin ortaya çıkarılması için daha sonraki çalışmalarda kullanılacaktır.

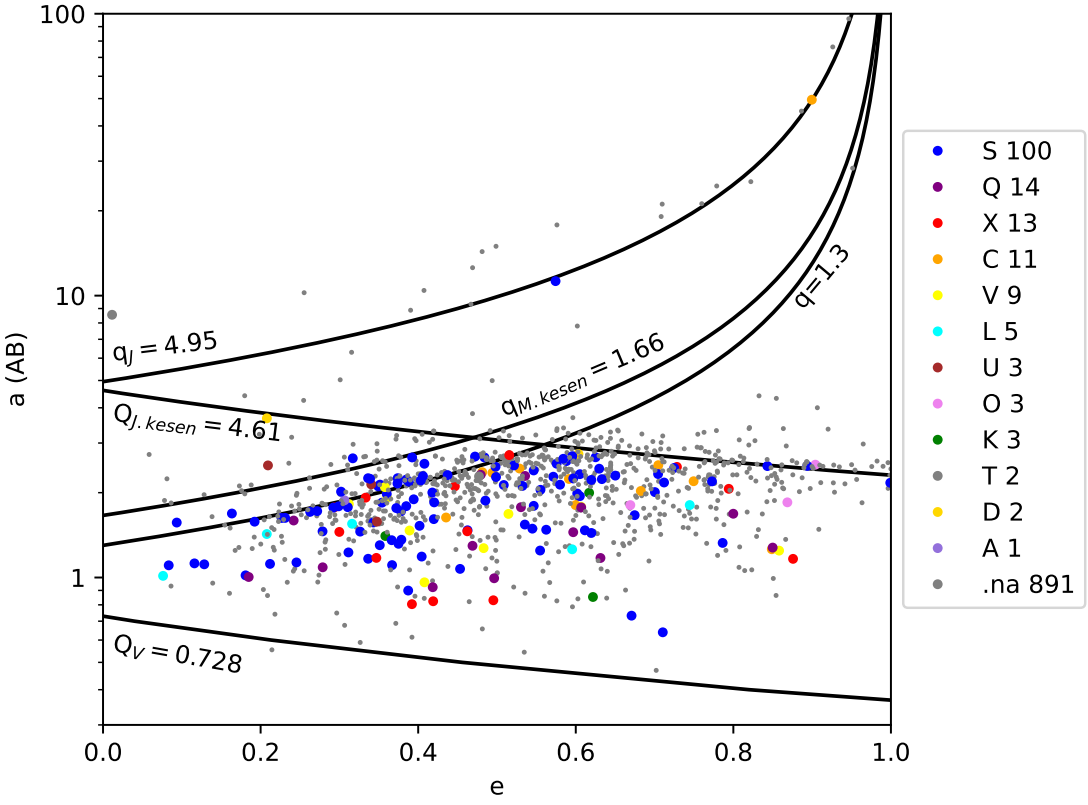
4.2. $H < 18^m$ Olan YYA'ların Dinamik Analizi

JPL/Horizons veri tabanında yer alan $H < 18^m$ olan tüm YYA'ların (1056 adet) *REBOUND* kodu ile yalnızca kütle çekimsel etkiler göz önüne alınarak zamanda ileri ve geri yönlü 100000 yıllık yörünge integrasyonları yapılmıştır. Yörünge integrasyonu yapılan YYA'ların başlangıç anındaki *a-e* grafiği Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Grafiğin yanında yer alan renklere karşılık tayf sınıfı gösterilmekte ve aynı zamanda toplam içerisindeki ilgili türün sayıları da yer almaktadır. Tayf sınıflarına göre toplam YYA sayısının %9.5'ini S sınıfı, %1.3'ünü Q sınıfı, %1.2'sini X sınıfı, %1'ini C sınıfı ve %1'in altını ise diğer sınıflar oluşturmaktadır. Tayf türü bilinmeyen YYA'lar (.na) ise toplam sayının %84'ünü oluşturmaktadır.

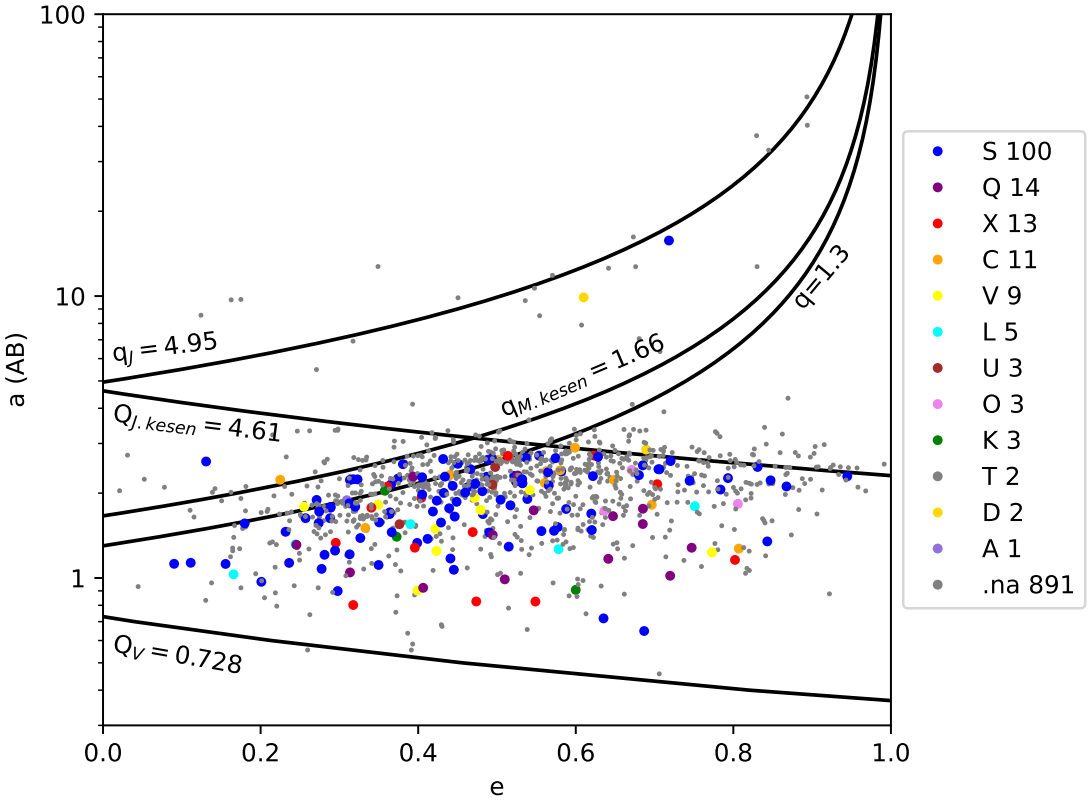


Şekil 4.2. 25 Şubat 2023 tarihinde, JPL/Horizons veri tabanında yer alan ve $H < 18^m$ olan tüm YYA'lar (1056 adet) için *a-e* grafiği. Farklı renkler farklı tayf türlerine karşılık gelmektedir. Gri renk ise tayf türü bilinmeyen (.na) YYA'lardır. Grafiğin yanında yer alan renk açıklamasında, renklere karşılık tayf türü ile birlikte her sınıfın toplam sayısı da görülmektedir

Zamanda ileri ve geri yönlü yapılan integrasyon sonuçları sırasıyla Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te verilmiştir. Her iki yöndeki integrasyonlarda da YYA'ların belirli sınırlara göre dağıldığı açıkça görülmektedir. Örneğin, Venüs'ün enöte uzaklığı olan Q_V = 0.728 AB eğrisi YYA'lar için bariz bir sınır oluşturmaktadır. Benzer şekilde Jüpiter yörüngesini kesen cisimler için enöte uzaklığı olan $Q_{J.kesen}$ = 4.61 AB eğrisi de benzer bir sınır oluşturmaktadır. Jüpiter'in enberi uzaklığına karşılık gelen q_J = 4.95 eğrisi ise Jüpiter'in kütle çekim etkisinin açıkça görüldüğü ve bu etki sebebiyle bazı cisimlerin bu eğri üzerinde ya da eğrinin yakınlarında yer aldığı görülebilmektedir. $q_{M.kesen}$ = 1.66 eğrisi Mars yörüngesini kesen cisimler için enberi uzaklığıdır. q = 1.3 eğrisi ise YYA sınırını göstermektektedir ve eğrinin altında kalan cisimler YYA'dır.



Şekil 4.3. Zamanda ileri yönlü yalnızca kütle çekim etkisi altında integrasyonu yapılan tüm $H < 18^m$ olan YYA'ların 100000 yıl sonunda elde edilen *a-e* grafiği. Çeşitli eğriler Güneş sistemi içerisindeki özel bölgelere karşılık gelmektedir. q_J Jüpiter'in enberi uzaklığını, $Q_{J.kesen}$ Jüpiter yörüngesini kesen cisimlerin enöte uzaklığını, $q_{M.kesen}$ Mars yörüngesini kesen cisimlerin enberi uzaklığını, Q_V ise Venüs'ün enöte uzaklığını belirtmektedir



Şekil 4.4. Şekil 4.3 ile aynı özelliklere sahip olan ancak zamanda geri yönlü elde edilen *a-e* grafiği

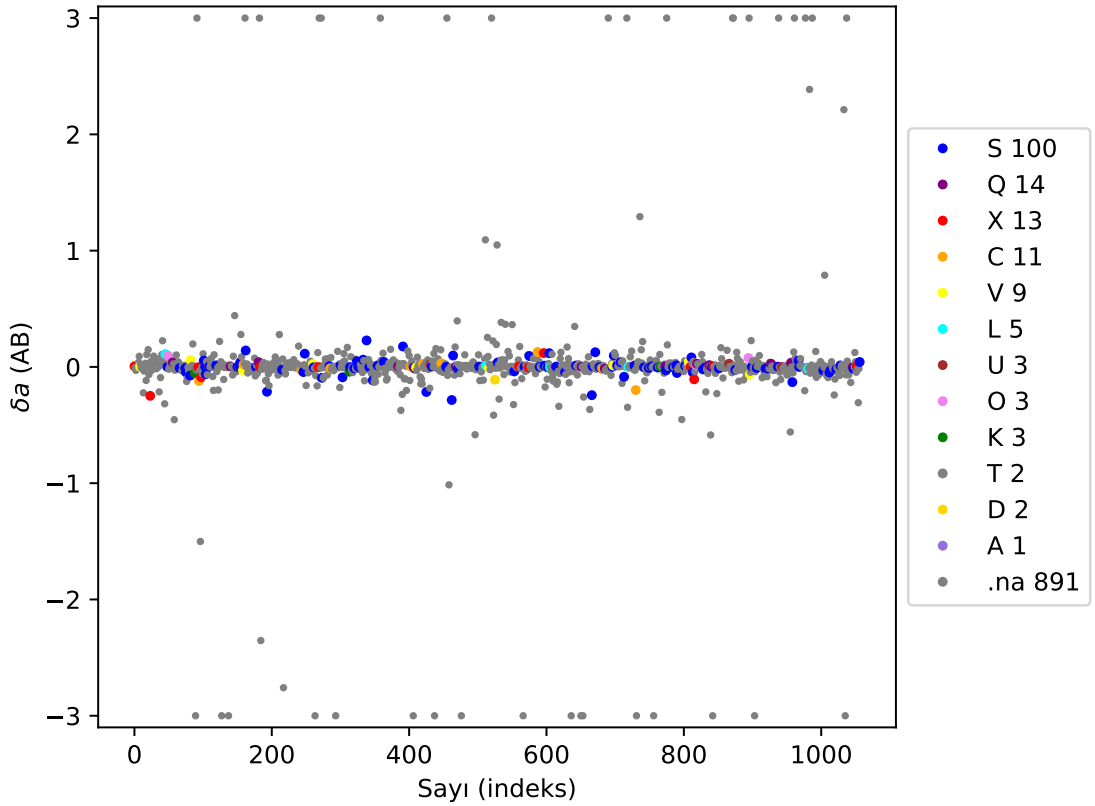
Zamanda ileri yönlü 100000 yapılan integrasyonlar sonucunda toplam YYA'ların %80.5'i (851 adet) halen YYA bölgesinde ($q < 1.3$ AB) bulunurken, %19.5'i (206 adet) YYA bölgesinin dışına ($q > 1.3$ AB) çıkmıştır. Tayf türüne göre bakıldığında ise *S* sınıfı YYA'ların %81'i (81) YYA bölgesinde bulunurken, YYA bölgesinin dışına çıkan *S* sınıfı YYA'ların sayısı ise %19'dur (19). *Q* sınıfı YYA'ların ise tamamı YYA bölgesinde kalmıştır. *X* sınıfı YYA'ların ise yalnızca 1 tanesi 100000 yılın sonunda YYA bölgesinin dışına çıkmıştır ki bulunduğu bölge YYA bölgesine oldukça yakındır ve $q = 1.31$ AB'dir. C sınıfı YYA'ların 10 tanesi YYA bölgesinde kalırken, yalnızca 1 tanesi YYA bölgesinin dışına çıkmıştır. Tayf sınıfı bilinmeyen YYA'lara bakıldığında ise %80 (712) YYA'nın YYA bölgesinde kaldığı %20 (179) YYA'nın ise YYA bölgesinin dışına çıktığı görülmektedir.

Zamanda geri yönlü 100000 yapılan integrasyon sonucunda ise toplam YYA sayısının %77.5'i (820) halen YYA bölgesinde bulunurken ($q < 1.3$ AB), %22.5'i (237) YYA bölgesinin dışına ($q > 1.3$ AB) çıkmış, yani son 100000 yıl içerisinde YYA olmuştur. Tayf türüne göre bakıldığında ise *S* sınıfı YYA'ların %86'sı (86) YYA bölgesinde bulunurken, YYA bölgesinin dışına çıkan *S* sınıfı YYA'ların sayısı ise

%14'tür (14). *Q* sınıfı YYA'ların ise yalnızca 1 tanesi son 100000 yıl içerisinde YYA bölgesine taşınmıştır. *X* sınıfı ve *C* sınıfı YYA'lar içerisinde ise 2'şer cisim son 100000 yıl içerisinde YYA olmuştur. C sınıfı YYA'ların 10 tanesi YYA bölgesinde kalırken, yalnızca 1 tanesi YYA bölgesinin dışına çıkmıştır. Tayf sınıfı bilinmeyen YYA'lara bakıldığında ise %80 (712) YYA'nın YYA bölgesinde kaldığı %20 (179) YYA'nın ise YYA bölgesinin dışına çıktığı görülmektedir.

Şekil 4.5'te tüm YYA'ların zamanda geri ve ileri yönlü integrasyonları sonucunda ulaştıkları yörünge *a* değerlerinin farkları δa gösterilmiştir. Şeklin detaylı görülebilmesi için y-ekseni ± 3 AB aralığında çizdirilmiştir. Sınırda görülen cisimler $|\delta a| > 3$ olan cisimlerdir ve şeklin ölçekli görülebilmesi için bu cisimler sınır değer olan $a = \pm 3$'te gösterilmiştir. Şekil 4.5'te elde edilen farklar ileri yönlü integrasyon sonucunda ulaşılan yörünge *a* değeri ile geri yönlü integrasyon sonucunda ulaşılan yörünge *a* değerinin farkıdır. Bu durumda pozitif değerler YYA'nın yörünge *a* değerinin zaman içerisinde arttığını yani Güneş sisteminin dışına doğru taşındığını, negatif değerler ise yörünge *a* değerinin azaldığını yani asteroidin daha iç Güneş sistemine doğru taşındığını belirtmektedir. Elde edilen sonuçlara göre tüm YYA'lar için $\delta a > 0$ olanların yani Güneş sisteminin dışına doğru taşınanların sayısı %48.7 (515), $\delta a > 0$ olanların yani iç Güneş sistemine doğru taşınanların sayısı ise %51.3'tür (542). Tayf sınıfına göre bakıldığında ise *S* sınıfı YYA'lar için $\delta a > 0$ olanların sayısı %44 (44), $\delta a < 0$ olanların sayısı ise %56'dır (56). *Q* sınıfı YYA'lar için $\delta a > 0$ olanların sayısı %79 (11), $\delta a < 0$ olanların sayısı ise %21'dir (3). *X* sınıfı YYA'lar için $\delta a > 0$ olanların sayısı %46 (6), $\delta a < 0$ olanların sayısı ise %54'tür (7). *C* sınıfı YYA'lar için $\delta a > 0$ olanların sayısı %55 (6), $\delta a < 0$ olanların sayısı ise %45'dir (5). Tayf sınıfı bilinmeyen YYA'lara bakıldığında ise $\delta a > 0$ olanların sayısının %49 (434), $\delta a < 0$ olanların sayısının ise %51 (457) olduğu görülmektedir.

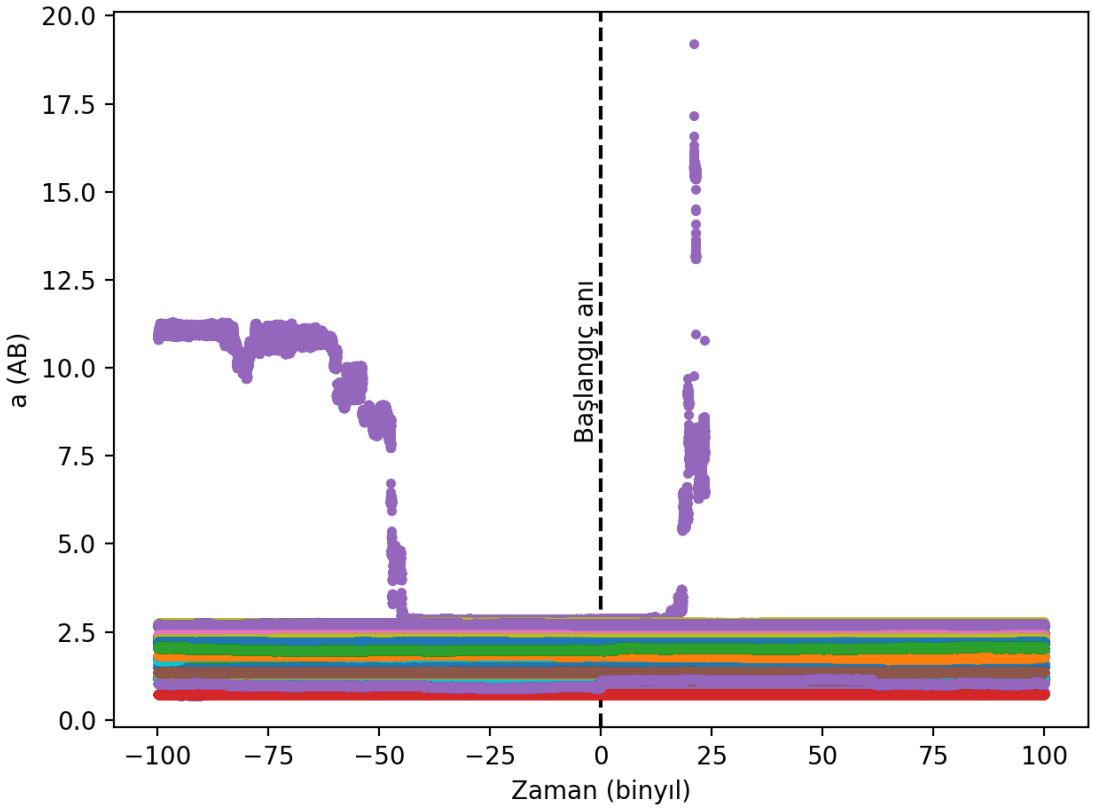
Tüm YYA tayf sınıflarına ve alt tayf türlerine göre integrasyon sonuçlarının detayları EK-5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Zamanda ileri ve geri yönlü yapılan integrasyonlar sonucunda ulaşılan yörünge a değerlerinin farkları (δa). Pozitif δa değeri cismin Güneş sisteminin dışına doğru taşındığını belirtirken negatif δa değeri ise cismin iç Güneş sistemine doğru taşındığını belirtmektedir

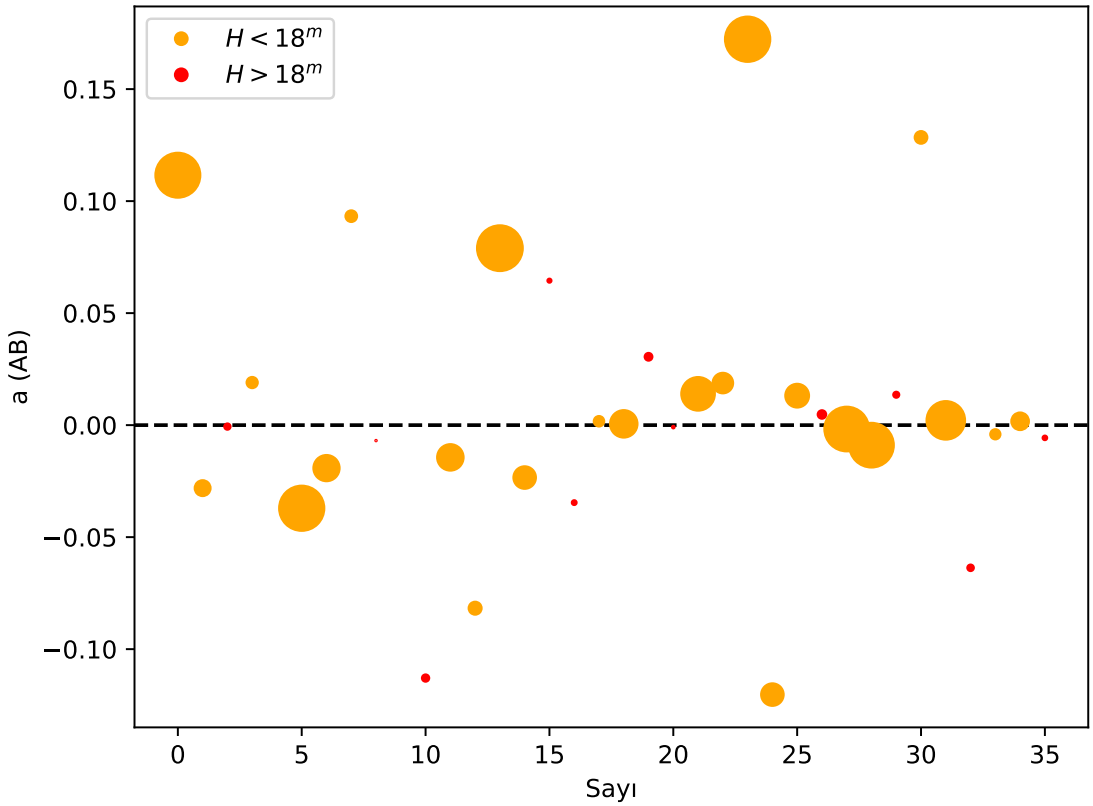
4.3. $H < 18^m$ Olan Baboquivari Benzeri *Sq* Tayf Türü YYA'ların Dinamik Analizi

Fiziksel özellikleri ortaya çıkarılan ve *Sq* tayf türü olduğu belirlenen Baboquivari asteroidi (bkz. 4.5.1) ile aynı tayf türüne ait, dönme periyodu bilinen tüm YYA'ların Yarkovsky etkisi altında yörünge integrasyonları gerçekleştirilmiştir. $H < 18^m$ kriteri uygulanmadan tüm YYA'lar içerisinden dönme periyotları bilinen, *Sq* tayf türünden Baboquivari ile birlikte 36 YYA belirlenmiştir. Zamanda ileri ve geri yönlü 100000 yıl gerçekleştirilen integrasyon sonuçlarına göre 36 YYA'nın yörünge a değerlerinin değişimi Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. *Sq* tayf türünden 36 YYA'nın Yarkovsky etkisi altında zamanda ileri ve geri yönlü integrasyonları sonucunda yörünge *a* değerlerinin değişimi. Kesikli dikey çizgi integrasyonun başlangıç anını (25 Şubat 2023) belirtmektedir

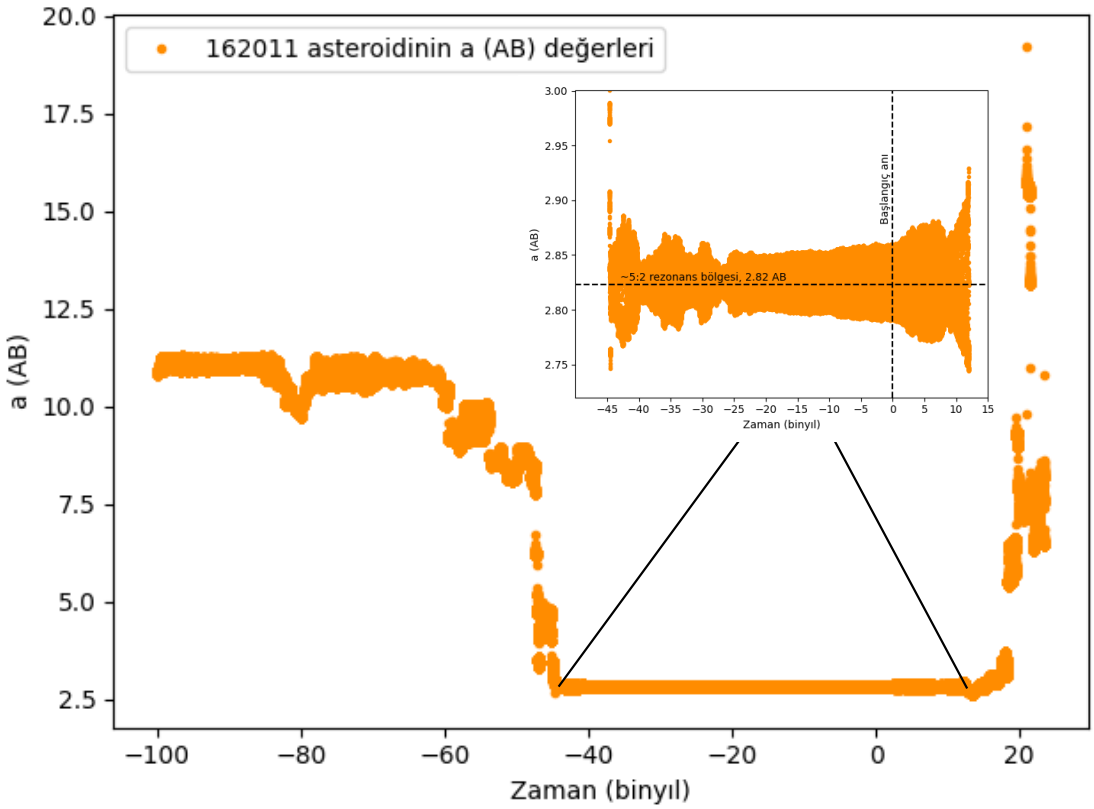
Şekil 4.6'da her bir YYA için *a* değerlerinin değişimi çizdirilmiştir. Yalnızca bir YYA'nın ((162011) Konnohmaru) yörüngesinin oldukça değişken olduğu ve hem zamanda geri yönlü hem de ileri yönlü oldukça farklı değerlere ulaştığı görülmektedir. Diğer YYA'lar ise 100000 yıllık sürelerde konumlarını kısmen korumuş ve çarpıcı değişimler göstermemişlerdir. Şekil 4.7 (162011) Konnohmaru haricindeki diğer 35 YYA'nın zamanda ileri ve yönlü integrasyonlar sonucunda ulaştıkları yörünge *a* değerlerinin farkı gösterilmektedir. Şekildeki nokta boyutları, değişimlerin büyüklük ile ilişkisini görebilmek için asteroitlerin çapları ile ölçekli olarak gösterilmiştir. Pozitif değerler YYA'nın yörünge *a* değerinin zaman içerisinde arttığını yani Güneş sisteminin dışına doğru taşındığını, negatif değerler ise yörünge *a* değerinin azaldığını yani asteroidin daha iç Güneş sistemine doğru taşındığını belirtmektedir. İntegrasyon sonucunda en büyük *a* farkı pozitif bölgede 0.17 AB, negatif bölgede ise -0.12 AB'dir. Şekil 4.7'te kesikli çizgi ile gösterilen değişimin olmadığı bölgeden 0.01 AB'den daha yakın olan asteroit sayısı ise %33 (12), 0.05 AB'den daha yakın olan asteroit sayısı ise %66'dır (24). Bu sonuca göre YYA bölgesinde yer alan *Sq* türü asteroitlerin 100000 yıllık süreler içerisinde görece kararlı yörüngelere sahip oldukları söylenebilir.



Şekil 4.7. İntegrasyonu yapılan (162011) Konnohmaru dışındaki 35 YYA'nın zamanda ileri ve geri yönde ulaştıkları yörünge a değerlerinin farkları. (162011) Konnohmaru asteroidi için bu fark zamanda ileri yönde Güneş sisteminin dışına çıktığı için sonsuz olmaktadır. Turuncu noktalar $H < 18^m$ olan asteroitleri gösterirken kırmızı noktalar ise $H < 18^m$ olan YYA'lardır. Nokta büyüklükleri YYA'ların çapları ile ölçekli olarak çizdirilmiştir. Kesikli çizgi ise değişimin olmadığı yeri işaret etmektedir

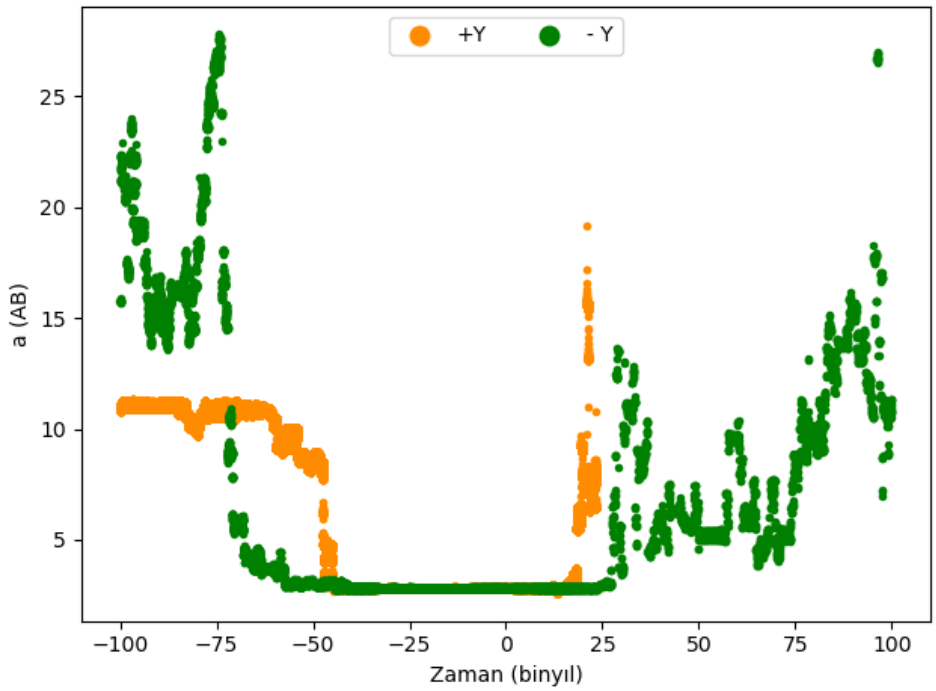
Yörüngesi oldukça değişken olan Amor türü (162011) Konnohmaru asteroidinin ($H = 16.60^m$) ise zamanda ileri yönlü integrasyonu Güneş sisteminin dışına çıkması sebebiyle kod tarafından 23431 yıl sonra sonlandırılmıştır. Bu sonuca göre (162011) Konnohmaru asteroidinin yalnızca ∼23 bin yıl sonra YYA bölgesinden uzaklaşması ve Güneş sisteminin dışına atılması beklenebilir. (162011) Konnohmaru asteroidinin a değerindeki değişim detaylı olarak Şekil 4.8'de verilmiştir. Asteroitteki bu denli hızlı değişimlerin bekleneceği üzere rezonans bölgeleri ile ilişkili olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuca göre asteroidin günümüzde Jüpiter ile ilişkili 5:2 ortalama rezonans bölgesinde bulunduğu (a = ∼2.82 AB) ve yalnızca ∼44 bin yıl önce iç Güneş sistemine doğru taşındığı açıkça görülmektedir. Yalnızca 5:2 rezonans bölgesi incelendiğinde, zamanda ileri ve geri yönlü sonuçlara göre (162011) Konnohmaru asteroidi toplamda ∼67 bin yıl bu bölgede kalmıştır. Şekil 4.9'de de Yarkovsky etkisi altındaki hareketinin yanı sıra yalnızca kütle çekimsel etkiler altındaki hareketi de görülmektedir. Her iki

durumda da 5:2 rezonansında kalma süresinin birbirine oldukça yakın olduğu Yarkovsky etkisi altında rezonans bölgesinde kalma süresinin daha kısa olduğu görülmektedir. Ancak, Güneş sistemi içerisinde bulunan kaos sebebiyle istatistiksel olarak güvenilirliğin artırılabilmesi için başlangıç koşulları civarında çok sayıda klon yörünge[79] kullanılması gerekmektedir.

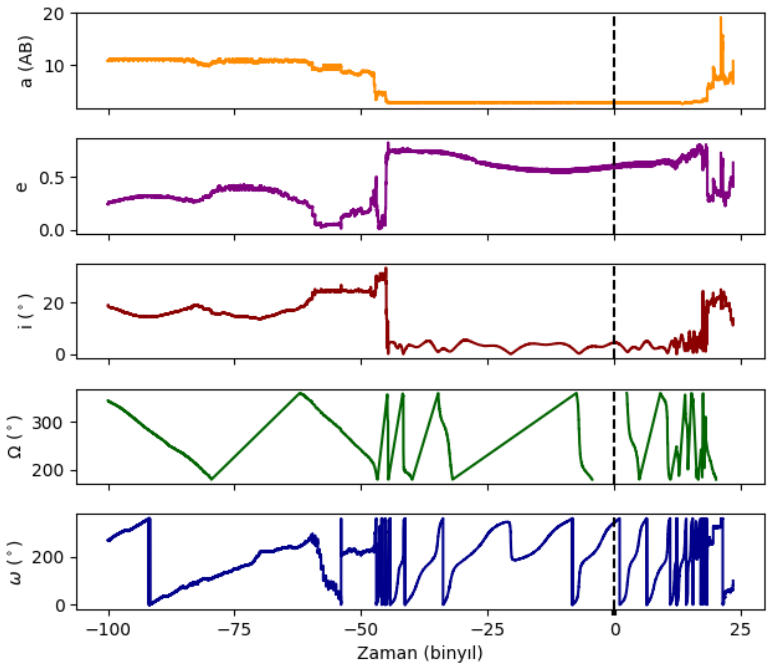


Şekil 4.8. (162011) Konnohmaru asteroidinin yörünge *a* değerinin Yarkovsky etkisi altında zaman içerisindeki değişimi. Şekil içerisinde yer alan diğer şekil asteroidin 5:2 rezonans bölgesindeki hareketini göstermektedir. X-ekseninin zamanda ileri yönde 100 binyıl görünmemesinin sebebi, 23431 yıl sonra asteroidin Güneş sisteminin dışına çıkması sonucu integrasyonun sonlanmasından dolayıdır

[79]Klon yörünge, yörünge integrasyonunda bir asteroidin konumundaki hata etrafında, istatistiğin güçlendirilmesi için oluşturulan ve integrasyonu yapılan yörüngeler.



Şekil 4.9. (162011) Konnohmaru asteroidinin yörünge *a* değerinin hem Yarkovsky etkisi (+Y) hem de yalnızca kütle çekimsel etki altındaki (-Y) değişimi



Şekil 4.10. (162011) Konnohmaru asteroidinin beş farklı yörünge elemanının Yarkovsky etkisi altındaki zamanda ileri ve geri yönlü 100000 yıllık değişimi. X-ekseninin zamanda ileri yönde 100 binyıl görünmemesinin sebebi Şekil 4.8'deki ile aynıdır. Kesikli çizgi, integrasyonun başlangıç anını (25 Şubat 2023) göstermektedir

4.4. $H < 18^m$ Olan YYA'ların Yörünge Benzerlik Analizleri

Bölüm 2.1.3'te detayları verilen yörünge benzerlik kriterlerinden *D-kriteri* ve C_0, C_1 ve C_2 parametreleri, JPL/Horizons veri tabanında yer alan 31813 YYA için uygulanmış ve oluşturulan her bir YYA ikilisi için *D-kriteri* ve yine her bir YYA ikilisi için C_0, C_1 ve C_2 parametrelerinin fark değerleri (δC_0, δC_1, δC_2) hesaplanmıştır. 31813 YYA'dan oluşturulan 506017578 ($\sim$506 milyon) adet ikiliden $\delta C_0 < 0.5, \delta C_1 < 0.01$ ve $\delta C_2 < 0.01$ kriterine uyan ikililer seçilmiştir. $H < 18^m$ olan tüm YYA'lar bu ikililer içerisinde sorgulanmış ve toplam 226768 farklı ikili (en az biri $H < 18^m$ olan) tespit edilmiştir. Aynı genetik kökene sahip asteroitlerin, dinamik benzerlik göstermelerinin yanı sıra kimyasal kompozisyonlarının da benzerlik göstermesi beklendiğinden tayf türleri için de analiz yapılmıştır. 226768 farklı ikili içerisinden tayf türleri bilinen ve Bus-Demeo sınıflamasına göre 9 farklı tayf türünden (*S, Sq, Sr, C, Cb, K, Q, V, X*) birbirinin aynısı olan 144 ikili tespit edilmiştir. Tespit edilen 144 YYA ikilisi için elde edilen detaylar Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Yörünge benzerlik parametreleri hesaplanan 144 YYA ikilisinin tayf türlerine göre dağılımı. Toplam sayı, 144 farklı ikilinin tayf türüne göre sayılarını verirken, ort. ve med. D-kriterleri, her bir ikili için elde edilen D-kriteri değerlerinin ilgili tayf türü için ortalama ve medyan değerleridir. Benzer şekilde C_i değerleri her bir YYA için hesaplanmış ve ikililer için farkları (δC_i) elde edilerek ilgili tayf türleri için ortalama ve medyan değerleri hesaplanmıştır

tayf türü / sonuçlar	**S**	**Sq**	**Sr**	**C**	**Cb**	**K**	**Q**	**V**	**X**
toplam sayı	63	32	2	11	1	1	24	2	8
ort. D-kriteri	0.69	0.65	0.69	0.87	1.14	0.92	0.69	0.95	0.76
med. D-kriteri	0.69	0.76	0.69	0.87	1.14	0.92	0.67	0.95	0.72
ortalama δC_0	0.10	0.08	0.15	0.06	0.08	0.04	0.10	0.20	0.09
medyan δC_0	0.07	0.07	0.15	0.07	0.08	0.04	0.06	0.20	0.07
ort. δC_1 (10^{-3})	5.1	4.9	3.5	6	3	2.2	4.9	9.4	4.2
med. δC_1 (10^{-3})	5.2	4.4	3.5	6.2	3	2.2	4.9	9.4	4.4
ort. δC_2 (10^{-3})	4.6	4.6	5.1	4.6	8.7	1.3	4.3	3.4	2.8
med. δC_2 (10^{-3})	4.3	4.3	5.1	4.3	8.7	1.3	4.7	3.4	1.5

Çizelge 4.1'de görülen 32 *Sq* türü ikili içerisinde 1 tane ikili, Baboquivari ve 399774 (2005 NB7) asteroididir. İkilinin benzerlik parametreleri, D-kriteri = 1.05435244, δC_0 = 0.110845, δC_1 = 0.00541538 ve δC_2 = 0.00590497 olarak hesaplanmıştır. Tespit edilen ikililerin detayları EK-6'te verilmiştir.

4.5. Baboquivari

4.5.1. Baboquivari'nin Fiziksel Özellikleri

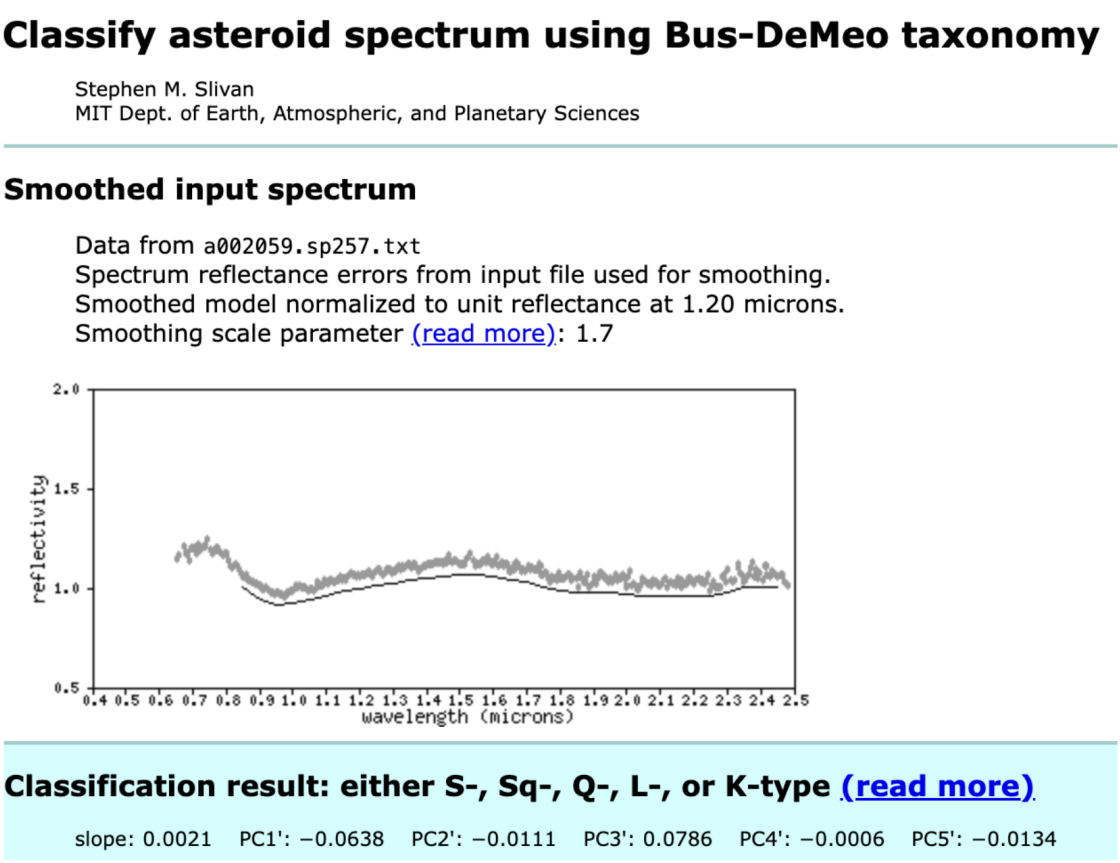
Baboquivari'nin T100 teleskobu ve ALCDEF verileri kullanılarak elde edilen periyodu (129.93 ± 2.31 saat) ve bu periyot kullanılarak oluşturulan ışık eğrisi (bkz. Şekil 3.14) tüm detaylarıyla Bölüm 3.3'te anlatılmıştı. Elde edilen periyot bilgisi Warner ve Stephens (2020a) tarafından yayımlanan periyot (129.43 ± 0.06 saat) ile neredeyse aynıdır ki zaten Baboquivari'nin periyot hesabı için yalnızca ALCDEF verilerini kullanmışlardır. Baboquivari'nin literatürde elde edilmiş diğer periyotlarına bakıldığında da çok büyük farklar görülmemektedir (bkz. Bölüm 2.4). Görülen küçük farkların sebebi kullanılan verinin kalitesi, hesaplama yöntemi ya da farklı faz açılarında elde edilen verilerin kullanılmasından kaynaklı olabilir. Sonuç olarak birbirine yakın elde edilmiş olan tüm periyot bilgileri, açıkça Baboquivari'nin yavaş dönen bir asteroit olduğunu göstermektedir. Bunun yanı sıra, iteratif yöntem kullanılarak mutlak parlaklığı H = 16.05 ± 0.05 ve fotometrik eğim parametresi G = 0.22 $\pm$ 0.02 olarak elde edilmiştir (bkz. Bölüm 3.3).

RTT150 teleskobu kullanılarak Baboquivari'nin ilk kez polarimetrik gözlemleri yapılmıştır. Elde edilen tek nokta polarimetrik gözlem sonucunda albedo değeri p_v = 0.15 $\pm$ 0.03 olarak hesaplanmıştır (bkz. Bölüm 3.5). Yüksek doğrulukla hesaplanan p_v ve H değerleri Baboquivari'nin çapının hesabı için kullanılmıştır. Literatürde sıklıkla kullanılan Denklem 2.27 yardımıyla Baboquivari'nin etkin çapı $D_{eff} = 2.12 \pm 0.21$ km olarak hesaplanmıştır. Bu değer Baboquivari'nin Yer'e yakın asteroitler arasında görece büyük bir asteroit olduğunu belirtmektedir (bkz. Şekil 4.12).

Şekil 3.14'ten elde edilen ışık eğrisinin genliği $A(\alpha) = 0.42^m$'dir ($\alpha \sim 17.5°$). Eğrinin genliği temel olarak asteroidin farklı yüzeylerinin büyüklük oranları ile ilişkilidir. Aynı zamanda ışık eğrisinin elde edildiği yörünge faz açısı ve asteroidin kimyasal kompozisyonu da genliği etkileyen faktörlerdendir. Bu ilişki Denklem 2.29'da verilmiştir (bkz. Bölüm 2.2.4). Zappala vd. (1990) tarafından verilen Denklem içerisinde A(α) faz açısına bağlı ışık eğrisinin genliğinin yanı sıra m değeri yer almaktadır. Bu değer yine Zappala vd. (1990) tarafından S-türü asteroitler için 0.03 olarak verilmiştir. Elde edilen bu değerler kullanılarak Baboquivari'nin iki boyutlu minimum eksen (yüzey) oranı 1.44 olarak hesaplanmıştır (Erece vd. 2023).

Baboquivari'nin literatürde yer alan tayfsal verileri ise Bölüm 2.4'te bahsedilen MITHNEOS projesi (Binzel vd. 2015; Binzel vd. 2019; Polishook vd. 2014) kapsamında elde edilmiştir. SpeX aygıtı (Rayner vd. 2003) kullanılarak elde edilen tayf gözlemleri hem VIS hem de IR bölgesini kapsamaktadır. Stephen M. Slivan tarafından geliştirilen

web tabanlı uygulama[80] üzerinden muhtemel tayf türü tespit edilmeye çalışılmış ve sistem tarafından *S, Sq, Q, L* ya da *K* tayf türünden olabileceği öngörülmüştür (bkz. Şekil 4.11).



Şekil 4.11. Stephen M. Slivan tarafından geliştirilen ve http://smass.mit.edu/cgi-bin/busdemeoclass-cgi [son erişim tarihi: 25.11.2023] adresinden erişilebilen tayf sınıflaması uygulaması kullanılarak Baboquivari için MITHNEOS verileriyle elde edilen sonuç sayfası. Uygulamaya göre Baboquivari'nin *S, Sq, Q, L* ya da *K* tayf türünden bir asteroit olduğu görülmektedir

Bölüm 3.4'te detaylarıyla anlatılan tayf birleştirme yöntemi ile RTT150 teleskobundan ve MITHNEOS projesinden elde edilen tayflar birleştirilmiş ve yine aynı bölümde detaylandırılan tayf eşleştirme yöntemi ile Baboquivari'nin *Sq* tayf türünden bir YYA olduğu ilk kez Erece vd. (2023) tarafından yayımlanmıştır. Tayf gözlemlerinin yanı sıra Baboquivari'nin T100 teleskobu ile *V-R* parlaklığı (rengi) 0.45 ± 0.02 olarak elde edilmiştir. Bu renk değeri, Baboquivari'nin Dandy vd. (2003) tarafından yayımlanan Çizelge 2.2'ye göre muhtemel S türü bir asteroit olabileceğini göstermektedir. Bu durum, fotometrik sonuçların da tayfsal sonuçları desteklediğini ve Baboquivari'nin *Sq* türü (ya da genel olarak S sınıfı) bir asteroit olduğunu açıkça göstermektedir.

[80] http://smass.mit.edu/cgi-bin/busdemeoclass-cgi [son erişim tarihi: 25.11.2023]

Baboquivari'nin tayfsal ve polarimetrik gözlemlerinde tuhaf özelliklere rastlanılmamış ancak fotometrik verilerde bariz asteroitten kaynaklı olduğu düşünülen saçılmalar görülmüştür. Bunun sebebi olarak Erece vd. (2023) tarafından iki durum öngörülmüştür; 1) yalpalayan (NPA dönen) asteroit olması, 2) aktif asteroit olması (kuyruklu yıldız aktivitesi göstermesi). Gözlemsel verilerin yetersizliği sebebiyle Baboquivari'nin dönme durumu ve şekil analizleri maalesef yapılamamış ve NPA dönüşe sahip olabilmesi ile ilgili kesin bir sonuç elde edilememiştir. Savın güçlenebilmesi açısından sönümlenme zaman ölçeği olan $\tau_{damping}$ göz önüne alınmıştır. $\tau_{damping}$ herhangi bir sebepten dolayı (örn. YORP, çarpışma) dönme durumu etkilenmiş (uyartılmış) olan bir asteroidin uyartılma durumunun sönümlenmesi için geçmesi gereken zamandır. Diğer bir deyişle, NPA dönüşe sahip bir asteroidin yani tek bir ana eksen etrafında dönmeyen bir asteroidin uyartılma enerjisini kaybetmesi ve PA (principal axis) dönüşe tekrar geçmesi için gereken zamandır. $\tau_{damping}$ aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$\tau_{damping} = \frac{P^3}{C^3 D^2} \tag{4.1}$$

Burada P saat biriminde periyot, D km biriminde çap ve C ise değeri 36 (bazı durumlar için 17) olan bir sabittir (Pravec vd. 2014). Denklem 4.1 kullanılarak Baboquivari için elde edilen sönümlenme zaman ölçeği ~ 8.5 Gyıl'dır ki bu değer Güneş sisteminin yaşının kabaca iki katına karşılık gelmektedir. Şekil 4.12'ye bakıldığında ise görece büyük asteroitlerin ($\geq$ 0.3 km) sönümlenme zaman ölçeklerinin 1 Gyıl'dan daha uzun süre olduğu görülebilmektedir. Daha önce belirtildiği üzere bu uyartılma durumu YORP etkisi sebebiyle olabilir ve bu durumda YORP etkisi sönümlenme zaman ölçeğini sürekli başa döndürüyor olabilir (Erece vd. 2023). Yani zaman içerisinde uyartılma durumundan çıkarken aynı zamanda YORP sebebiyle tekrar uyartılıyor olabilir. Bu durumu açıklayabilmek için YORP zaman ölçeğini (τ_{YORP}) hesaplamak gerekmektedir. Eğer YORP etkisi, sönümlenme zaman ölçeğinden daha uzun sürede asteroidin dönme durumunun uyartılmasına sebep oluyor ise asteroit PA dönüş durumuna geçebilir. Eğer YORP etkisi, sönümlenme zaman ölçeğinden daha kısa sürede dönme durumunu uyartıyor yani asteroidin yalpalamasına sebep oluyor ise asteroit sürekli NPA dönüş durumunda kalacaktır.

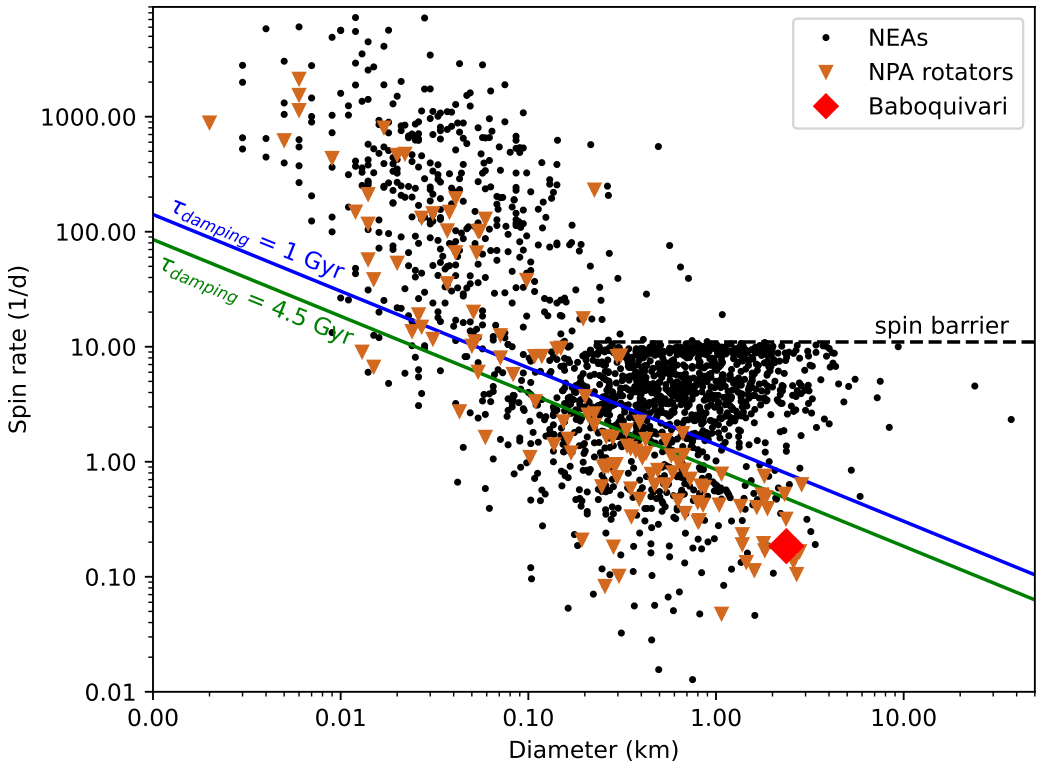
YORP zaman ölçeği aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır (Vokrouhlický vd. 2007):

$$\tau_{YORP} = \tau_0 \left(\frac{D}{D_0}\right)^2 \left(\frac{a}{a_0}\right)^2 \tag{4.2}$$

Vokrouhlický vd. 2007 tarafından örnek parametreler olan D_0 ve a_0 sırasıyla $= 50$

m ve $= 2$ AB olarak vermiş ve bu değerlere karşılık τ_0 değerini 5.3 kyıl olması gerektiğini ve ayrıca bu değerlerin referans başlangıç periyodu olarak $P_0 = 6$ saate karşılık geldiğini belirtmiştir. Eğer ilgili cismin periyodu 6 saatten daha büyük ise YORP zaman ölçeğinin daha kısa olması gerektiğini ayrıca vurgulamıştır. Buna göre Baboquivari için hesaplanan $\tau_{YORP} \sim 20$ Myıl'dır. Bu değer $\tau_{damping}$ ile karşılaştırıldığında Baboquivari'nin NPA durumunda kalması için oldukça yeterli bir süredir.

Baboquivari'nin aktif bir asteroit olması yani kuyruklu yıldız aktivitesi göstermesi ile ilgili bir bulguya rastlanılmadığı belirtilmişti. Bu durumun net olarak ortaya koyulabilmesi için farklı faz açılarında elde edilmiş daha fazla gözlemsel veriye ihtiyaç duyulmaktadır. Baboquivari, görece basık bir yörüngeye sahip olması sebebiyle (e = 0.53) Jüpiter ile ilişkili Tisserand parametresi hesaplanmıştır. Denklem 2.9 kullanılarak elde edilen Baboquivari'nin Jüpiter ile ilişkili Tisserand parametresi T_j = 3.154 olarak hesaplanmıştır. Jewitt (2012)'e göre aktif asteroitler için Tisserand parametresi $T_j > 3.08$'dir. Bu sonuca göre, Baboquivari'nin bu açıdan da incelenmesinin gelecek çalışmalar için oldukça önemli olduğu düşünülebilir.

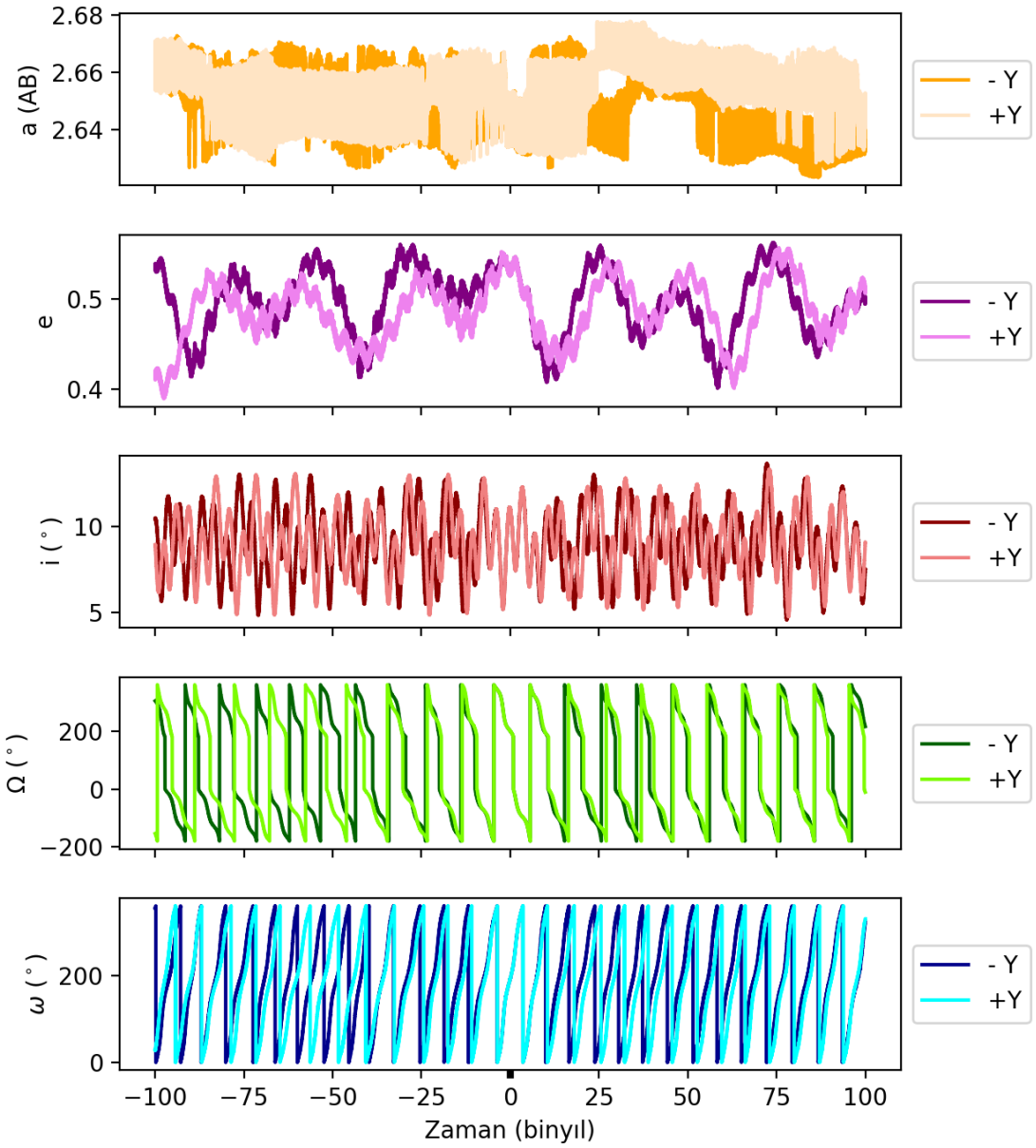


Şekil 4.12. ALCDEF (Warner vd. 2009) veri tabanında yer alan YYA'ların çaplarına karşılık dönme hızları (Erece vd. 2023). Siyah noktalar veri tabanında yer alan tüm YYA'ları (U > 2) gösterirken, kahverengi noktalar tüm bilinen ya da muhtemel NPA durumundaki YYA'ları (T or T+) göstermektedir. Kırmızı nokta ise Baboquivari'yi belirtmektedir

4.5.2. Baboquivari'nin Dinamik Özellikleri

Baboquivari'nin *REBOUND* ve *REBOUNDx* kodları kullanılarak IAS15 integrasyon şeması ile gerçekleştirilen yörünge integrasyonu Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Beş yörünge elemanının (*a, e, i*, Ω ve ω) zamanda ileri ve geri yönlü 100000 yıllık integrasyonu hem yalnızca kütle çekim etkisi altında hem de Yarkovsky etkisi göz önüne alınarak yapılmıştır. Bölüm 3.6'da anlatıldığı üzere Yarkovsky etkisinin hesabı için yoğunluk, emisyon gücü ve k değerleri sırasıyla 3.43 g/cm^3, 0.9 ve 0.25 olarak alınmış yarıçap, dönme periyodu ve albedo değerleri ise bu çalışma sırasında elde edildiği üzere sırasıyla 2.12 km, 129.93 saat ve 0.15 olarak alınmıştır. Şekil 4.13'te Baboquivari'nin zamanda geri yönlü yapılan integrasyonu ile ileri yönlü integrasyonu birleştirilmiştir. Yatay eksenin merkezi (0) integrasyonun başlangıç anını (25 Şubat 2023) gösterirken, pozitif yön zamanda ileriye, negatif yön ise zamanda geriye doğru olan hareketi göstermektedir. Koyu renk ile görülen hareket yalnızca kütle çekimsel etkiler altında elde edilmişken (-Y), açık renk ile görülen değişimler kütle çekimsel etkilere ek olarak Yarkovsky etkisi altında (+Y) gerçekleşen hareketi göstermektedir. Her iki durumda da 100000 yıl içerisinde çok büyük farklılıklar oluşmadığı ve başlangıç konumuna göre büyük değişiklikler olmadığı görülmektedir. Baboquivari'nin yörünge parametreleri beklendiği üzere zaman içerisinde salınımlar yapmaktadır ancak 100000 yılın sonunda yörüngesinin görece kararlı olduğu ve yörüngesinde büyük bir değişim olmadığı söylenebilir.

Yarkovsky etkisinin 100000 yıl içerisinde Baboquivari üzerinde çarpıcı bir fark ortaya koymamasının sebebinin hem daha uzun sürelerde dramatik etkisinin görülmesi hem de Baboquivari'nin görece büyük bir asteroit olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. İntegrasyon süresinin daha uzun zaman aralığında gerçekleşmesi durumunda farklılıklar oluşması beklenebilir ancak öyle bir durumda elde edilecek sonuçların deterministik olması beklenemez. İstatistiksel olarak güvenilirliğin artırılabilmesi için ise başlangıç koşulları civarında çok sayıda klon yörünge (162011) Konnohmura asteroidinde belirtildiği üzere Baboquivari için de kullanılması gerekmektedir. Yine de Baboquivari'nin kararlı bir yörüngeye sahip olması sebebiyle, yeterli sayıda klon yörüngeler için de istatistiksel olarak görece çok farklı bir sonuç çıkacağı düşünülmemektedir.



Şekil 4.13. Baboquivari'nin beş farklı yörünge parametresinin 100000 yıllık zamanda ileri ve geri yönlü yörünge integrasyonu. Kütle çekimsel etkilere ek olarak Yarkovsky etkisinin dahil edildiği integrasyonlar açık renk ile (+Y) yalnızca kütle çekimsel etkilerin kullanıldığı integrasyonlar ise koyu renk ile (-Y) çizdirilmiştir

5. SONUÇLAR

Bottke vd. (2002) tarafından vurgulandığı üzere $H < 18^m$ kriteri YYA çalışmaları kapsamında sıklıkla kullanılan bir kriterdir ve $H = 18^m$ değeri albedonun $p_v = 0.112$ olduğu durumda çapın tam olarak $D = 1$ km'ye karşılık geldiği değerdir. Bu kriter aynı zamanda görece parlak asteroitleri kapsadığından gözlemsel çalışmalar için de uygundur. Bu tez çalışması kapsamında da $H < 18^m$ kriteri uygulanmış ve bu kritere uyan, bilinen tüm YYA'ların fiziksel ve dinamik özelliklerine göre sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır.

25 Kasım 2023 tarihi itibarıyla JPL/Horizons veri tabanında yer alan tüm YYA'ların sayısı 33876'dır ve içerisinde tayf türü bilinenlerin sayısı yalnızca 313'tür ($\sim\%1$). Tayf türü bilinen YYA'lar içerisinde *S* sınıfı olanların oranı ise $\sim\%56$'dır. İlk bakışta, YYA bölgesi çoğunlukla S sınıfı asteroitlerden oluşmaktadır denilebilir. Ancak, bu durum henüz tam olarak açıklanamamakla birlikte gözlemsel kısıtlar ile ilgili olabilir. LCDB veri tabanında yer alan YYA'ların $\sim\%88$'inin $D < 1$ km olduğu (bkz. Şekil 3.4) göz önüne alındığında görece küçük çaplı bu asteroitlerin gözlenebilmesi için yüksek albedo değerlerine sahip olması beklenmelidir. Yalnızca bu duruma göre bakıldığında görece yüksek yansıtıcılığa sahip *S* sınıfı asteroitlerin (örn. Usui vd. 2013; Zellner 1979) bu bölgede yer almasın beklenen bir sonuçtur. Diğer taraftan, YYA'ların küçük çaplı olması da beklenebilir ki hem kütle çekimsel hem de kütle çekimsel olmayan etkilerin küçük çaplı asteroitler üzerinde oluşturacağı büyük yörünge kararsızlıkları nedeniyle YYA bölgesine kısa zamanda taşınabilsinler.

Bu tez çalışması kapsamında $H < 18^m$ olan tüm YYA'lar için zamanda ileri ve geri yönlü yörünge integrasyonu yapılmış, AAC yazılımı (bkz. Bölüm 3.1) ile belirlenen bazı YYA'lar içinse gözlemsel veriler elde edilmiştir. Gözlemsel çalışma kapsamında Çizelge 3.1 ve 3.2'de verilen YYA'ların fotometrik verileri elde edilmiştir. (2059) Baboquivari asteroidi için fotometrik verilerin yanı sıra Çizelge 3.2'de görüldüğü üzere spektroskopik ve polarimetrik veriler elde edilmiştir. Fotometrik gözlem verilerinden dönme periyodu ve faz açısına bağlı eksen oranının elde edilmesi dışında detaylı fiziksel parametrelerin elde edilebilmesi için diğer bölümlerde de bahsedildiği üzere farklı gözlem geometrilerinde verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez kapsamında elde edilen gözlem verileri Baboquivari asteroidi dışında yalnızca belirli faz açılarını kapsamaktadır. Bölüm 4.1 ve EK-4'de yapılan fotometrik gözlemlerden elde edilen ışık eğrileri ve *Lomb-Scargle* analizi ile elde edilebilenler için dönme periyotları paylaşılmıştır. Tez kapsamında fotometrik verilerin analizi için geliştirilen algoritma ve algoritmanın Güneş sistemi nesnelerinin fotometrik verilerinin analizi için uygulandığı *PhoPS* yazılımı ile ilgili tüm detaylar Bölüm 3.2'de anlatılmıştır. Python ile geliştirilen *PhoPS* yazılımı, kod standartlarına (PEP8) uygun ve kullanıcı dostu hale getirildikten sonra, Türkiye'deki ve dünyanın her yerindeki Güneş sistemi araştırmacılarına GNU Genel Kamu Lisansı v3 (GPLv3) ile paylaşılacaktır.

Tez kapsamında yapılan dinamik analizler hem yalnızca kütle çekim etkisi altında hem de kütle çekimsel olmayan Yarkovsky etkisi altında gerçekleştirilmiştir. JPL/Horizons veri tabanında yer alan ve $H < 18^m$ olan 1056 YYA için zamanda ileri ve geri yönlü 100000 yıllık yörünge integrasyonları *REBOUND* kodu kullanılarak gerçekleştirilmiş ve dinamik yollar belirlenmeye çalışılmıştır (bkz. Bölüm 4.2). İntegrasyonlar sonucunda tüm YYA'ların %19.5'inin 100000 yıl içerisinde YYA bölgesinden ayrılacağı tespit edilmiş, %22.5'inin ise geçtiğimiz 100000 yıl içerisinde YYA bölgesine geldiği görülmüştür. Bu sonuca göre, Güneş sisteminin yaşı göz önüne alındığında yalnızca 100000 yıl içerisinde dahi YYA'ların görece kararsız yörüngelere sahip olduğu söylenebilir. Diğer bir çarpıcı sonuç ise belirtilen zaman aralığı içerisinde YYA'ların %48.7'sinin iç Güneş sistemine doğru taşındığı, %51.3'ünün ise dış Güneş sistemine doğru taşındığıdır (bkz. Şekil 4.7). Bu durumun, YYA bölgesinin kaotik yapısının bir sonucu olarak içeri ya da dışarı taşınma mekanizmasının belirsiz olduğu anlamına geldiği düşünülmektedir. *REBOUNDX* kodu kullanılarak Yarkovsky etkilerinin de göz önüne alındığı dinamik analizler ise yalnızca *Sq* tayf türü YYA'lar için zamanda ileri ve geri yönde 100000 yıl gerçekleştirilmiştir (bkz. Bölüm 4.5.1). *Sq* tayf türü YYA'ların seçilmesinin sebebi, fiziksel özellikleri ortaya çıkarılan Baboquivari asteroidi için Yarkovsky etkisinin açıkça uygulanabilmesi ve benzer asteroitlere de bu etkinin benzer oranda uygulanabilecek olmasından dolayıdır. Yapılan integrasyon sonucunda çarpıcı bir benzerlik bulunamamış ancak (162011) Konnohmaru asteroidinin diğerlerinden farklı olarak çok kısa zaman içerisinde yörüngesinin değiştiği görülmüştür (bkz. Şekil 4.6). Bu farklılığın tespit edilmesi sonrasında (162011) Konnohmaru için detaylı analiz yapılmış ve yalnızca kütle çekim etkisi altındaki yörünge değişimi de ayrıca araştırılmıştır. Her iki durumda da benzer sonuçlar elde edilmiştir (bkz. Şekil 4.8, 4.9 ve 4.10). Yapılan analizler sonucunda, (162011) Konnohmaru asteroidinin 5:2 rezonans bölgesinde bulunduğu ve yalnızca $\sim$44 bin yıl önce iç Güneş sistemine taşındığı görülmüştür. Zamanda ileri yönlü yapılan integrasyonlara göre ise yalnızca $\sim$23 bin yıl sonra YYA bölgesinden ayrılacaktır. Elde edilen sonuçlar 5:2 rezonans bölgesinin (162011) Konnohmaru asteroidinin yörüngesi üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

Tez kapsamında elde edilen en önemli sonuçlardan olan yörünge benzerlik analizleri, Bölüm 2.1.3'te detayları verilen *D-kriteri* ve C_0, C_1, C_2 parametrelerine göre yapılmıştır (bkz. Bölüm 4.4). Tüm YYA'lar için $\delta C_0 < 0.5, \delta C_1 < 0.01$ ve $\delta C_2 < 0.01$ kriterine uyan ikililer elde edilmiş ve en az biri $H < 18^m$ olan 226768 ikili tespit edilmiştir. Bu ikililer içerisinde ise tayf türü bilinen ve aynı olanlar araştırılmış ve yörünge benzerliği bulunan 144 YYA ikilisinin aynı tayf türünden olduğu görülmüştür. Farklı bir çalışma konusu olarak, tespit edilen tüm ikililerin detaylı fiziksel özellikleri tespit edilmeli ve hem fiziksel yönden hem de dinamik yönden genetik ilişkileri ortaya koyulmalıdır.

Tez kapsamında elde edilen bir diğer önemli çıktı ise Amor türü bir YYA olan Baboquivari asteroidinin ilk kez ortaya koyulan detaylı fiziksel parametreleridir. Baboquivari'nin T100 teleskobu ile elde edilen fotometrik verilerinin yanı sıra RTT150 teleskobu ile hem tayfsal hem de polarimetrik verileri elde edilmiştir. Fotometrik sonuçlara göre 129.93 ± 2.31 saat olarak hesaplanan dönme periyodu, yavaş dönen bir asteroit olduğunu göstermiş ve fotometrik verilerindeki dağınık yapılar nedeniyle de yalpalayan (NPA dönen) bir asteroit olabileceği ortaya koyulmuştur. Bu durumun desteklenebilmesi için asteroidin sönümlenme zaman ölçeği ($\tau_{damping}$), YORP zaman ölçeği (τ_{YORP}) ve Jüpiter ile ilişkili Tisserand parametresi (T_j) hesaplanmıştır. Tüm durumlar Baboquivari'nin yalpalayan bir asteroit olabileceğini desteklemektedir. Baboquivari'nin bu çalışma kapsamında ilk kez hesaplanan albedosu ise tek nokta polarimetrik gözlem yöntemi kullanılarak elde edilmiştir (bkz. Bölüm 3.5). Kullanılan polarimetrik yöntem, asterotilerin uygun faz açı aralığında, tek noktadan elde edilen polarizasyon derecesi ile albedo hesabı yapılabileceğini ortaya koymuştur. Baboquivari asteroidinin fiziksel özelliklerinin ortaya çıkarılabilmesi için kullanılan yöntemler ve elde edilen sonuçlar Erece vd. (2023) tarafından yayımlanmıştır. Bu yayın, aynı zamanda TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'ndeki farklı teleskoplar ve odak düzlemi aletleri kullanılarak tek bir asteroidin fiziksel özelliklerinin ortaya koyulduğu günümüze kadar yayımlanmış ilk kapsamlı yayındır.

6. KAYNAKLAR

Alam, S. et al. 2015. The Eleventh and Twelfth Data Releases of the Sloan Digital Sky Survey: Final Data from SDSS-III. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 219.1, 12, p. 12.

Aslan, Z. et al. 2001. Preliminary Results of the Alignment and Hartmann Tests of the AZT-22 Telescope. *Astronomy Letters*, 27, pp. 398–403.

Astropy Collaboration et al. 2013. Astropy: A community Python package for astronomy. *Astronomy and Astrophysics*, 558, A33, A33.

Astropy Collaboration et al. 2018. The Astropy Project: Building an Open-science Project and Status of the v2.0 Core Package. *Astronomical Journal*, 156.3, 123, p. 123.

Astropy Collaboration et al. 2022. The Astropy Project: Sustaining and Growing a Community-oriented Open-source Project and the Latest Major Release (v5.0) of the Core Package. *The Astrophysical Journal*, 935.2, 167, p. 167.

Battle, A., Reddy, V., Sanchez, J. A., Sharkey, B., Pearson, N., and Bowen, B. 2022. Physical Characterization of Near-Earth Asteroid (52768) 1998 OR2: Evidence of Shock Darkening/Impact Melt. *The Planetary Science Journal*, 3.9, 226, p. 226.

Bellm, E. C. et al. 2019. The Zwicky Transient Facility: System Overview, Performance, and First Results. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 131.995, p. 018002.

Belskaya, I. N., Levasseur-Regourd, A.-C., Cellino, A., Efimov, Y. S., Shakhovskoy, N. M., Hadamcik, E., and Bendjoya, P. 2009. Polarimetry of main belt asteroids: Wavelength dependence. *Icarus*, 199.1, pp. 97–105.

Beniyama, J. et al. 2023. Photometry and Polarimetry of 2010 XC_{15}: Observational Confirmation of E-type Near-Earth Asteroid Pair. *The Astrophysical Journal*, 955.2, 143, p. 143.

Bertin, E. and Arnouts, S. 1996. SExtractor: Software for source extraction. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 117, pp. 393–404.

Binzel, R. P. et al. 2019. Compositional distributions and evolutionary processes for the near-Earth object population: Results from the MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey (MITHNEOS). *Icarus*, 324, pp. 41–76.

Binzel, R. P., Reddy, V., and Dunn, T. 2015. The near-Earth object population: Connections to comets, main-belt asteroids, and meteorites. *Asteroids IV*, 1, p. 243.

Binzel, R. P., Rivkin, A. S., Stuart, J. S., Harris, A. W., Bus, S. J., and Burbine, T. H. 2004. Observed spectral properties of near-Earth objects: results for population distribution, source regions, and space weathering processes. *Icarus*, 170.2, pp. 259–294.

Blanes, S., Casas, F., Farres, A., Laskar, J., Makazaga, J., and Murua, A. 2012. New families of symplectic splitting methods for numerical integration in dynamical astronomy. *arXiv e-prints*, arXiv:1208.0689, arXiv:1208.0689.

Bolin, B. T. et al. 2020. 2020 AV2. *Minor Planet Electronic Circulars*, 2020-A99.

Bottke William F., J., Nolan, M. C., Melosh, H. J., Vickery, A. M., and Greenberg, R. 1996. Origin of the Spacewatch Small Earth-Approaching Asteroids. *Icarus*, 122.2, pp. 406–427.

Bottke William F., J., Rubincam, D. P., and Burns, J. A. 2000. Dynamical Evolution of Main Belt Meteoroids: Numerical Simulations Incorporating Planetary Perturbations and Yarkovsky Thermal Forces. *Icarus*, 145.2, pp. 301–331.

Bottke William F., J., Vokrouhlický, D., Rubincam, D. P., and Nesvorný, D. 2006. The Yarkovsky and Yorp Effects: Implications for Asteroid Dynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34, pp. 157–191.

Bottke, W. F., Durda, D. D., Nesvorný, D., Jedicke, R., Morbidelli, A., Vokrouhlický, D., and Levison, H. 2005. The fossilized size distribution of the main asteroid belt. *Icarus*, 175.1, pp. 111–140.

Bottke, W. F., Morbidelli, A., Jedicke, R., Petit, J.-M., Levison, H. F., Michel, P., and Metcalfe, T. S. 2002. Debiased Orbital and Absolute Magnitude Distribution of the Near-Earth Objects. *Icarus*, 156.2, pp. 399–433.

Bowell, E., Hapke, B., Domingue, D., Lumme, K., Peltoniemi, J., and Harris, A. W. 1989. "Application of photometric models to asteroids." *Asteroids II*. Ed. by R. P. Binzel, T. Gehrels, and M. S. Matthews, pp. 524–556.

Bowell, E. and Zellner, B. 1974. "Polarizations of Asteroids and Satellites." *IAU Colloq. 23: Planets, Stars, and Nebulae: Studied with Photopolarimetry*. Ed. by T. Gehrels, p. 381.

Bradley, L. et al. 2022. *astropy/photutils:* Zenodo. Version 1.4.0.

Brown, P. G. et al. 2013. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. *Nature*, 503.7475, pp. 238–241.

Brož, M. 2006. "Yarkovsky Effect and the Dynamics of the Solar System." PhD thesis. Charles University, Prague, Czech Republic.

Buchheim, R. K. 2010. Methods and Lessons Learned Determining the H-G Parameters of Asteroid Phase Curves. *Society for Astronomical Sciences Annual Symposium*, 29, pp. 101–115.

Bus, S. J. and Binzel, R. P. 2002a. Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. A Feature-Based Taxonomy. *Icarus*, 158.1, pp. 146–177.

— 2002b. Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. The Observations. *Icarus*, 158.1, pp. 106–145.

Bus, S. J. 1999. "Compositional structure in the asteroid belt: Results of a spectroscopic survey." PhD thesis. Massachusetts Institute of Technology.

Čapek, D. and Vokrouhlický, D. 2004. The YORP effect with finite thermal conductivity. *Icarus*, 172.2, pp. 526–536.

Carrasco, J. M. and Bellazzini, M. 2022. *Relationships with other photometric systems*. https://gea.esac.esa.int/archive/documentation/GDR3/Data_processing/chap_cu5pho/cu5pho_sec_photSystem/cu5pho_ssec_photRelations.html#\protect\T1\textdollarCh5.T8e. [Online; accessed 29-January-2023].

Carry, B. 2012. Density of asteroids. *Planetary and Space Science*, 73.1, pp. 98–118.

Carusi, A., Kresak, L., Perozzi, E., and Valsecchi, G. B. 1987. High-Order Librations of Halley-Type Comets. *Astronomy and Astrophysics*, 187, p. 899.

Cellino, A. and Bagnulo, S. 2014. "Asteroid Polarimetry: recent advances." *European Planetary Science Congress*. Vol. 9, EPSC2014-171, EPSC2014–171.

Cellino, A., Bagnulo, S., Gil-Hutton, R., Tanga, P., Cañada-Assandri, M., and Tedesco, E. F. 2015a. On the calibration of the relation between geometric albedo and polarimetric properties for the asteroids. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 451.4, pp. 3473–3488.

Cellino, A., Belskaya, I. N., Delbo, M., Levasseur-Regourd, A., Muinonen, K., and Tedesco, E. F. 2011. "Asteroid Polarimetry: Current Activities and Recent Results." *Astronomical Polarimetry 2008: Science from Small to Large Telescopes*. Ed. by P. Bastien, N. Manset, D. P. Clemens, and N. St-Louis. Vol. 449. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, p. 358.

Cellino, A., Bus, S. J., Doressoundiram, A., and Lazzaro, D. 2002. "Spectroscopic Properties of Asteroid Families." *Asteroids III*, pp. 633–643.

Cellino, A., Delbò, M., Bendjoya, P., and Tedesco, E. F. 2010. Polarimetric evidence of close similarity between members of the Karin and Koronis dynamical families. *Icarus*, 209.2, pp. 556–563.

Cellino, A., Dell'Oro, A., and Tedesco, E. 2009. Asteroid families: Current situation. *Planetary and Space Science*, 57.2. Catastrophic Disruption in the Solar System, pp. 173–182.

Cellino, A., Gil-Hutton, R., and Belskaya, I. N. 2015b. "Asteroids." *Polarimetry of Stars and Planetary Systems*, pp. 360–378.

Cellino, A., Gil-Hutton, R., Dell'Oro, A., Bendjoya, P., Cañada-Assandri, M., and Di Martino, M. 2012. A new calibration of the albedo-polarization relation for the asteroids. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 113.18, pp. 2552–2560.

Cellino, A., Hutton, R. G., Tedesco, E. F., Di Martino, M., and Brunini, A. 1999. Polarimetric Observations of Small Asteroids: Preliminary Results. *Icarus*, 138.1, pp. 129–140.

Chamberlain, A. 2007. *Kirkwood gaps*. https://ssd.jpl.nasa.gov/diagrams/mb_hist.html. [Son erişim tarihi: 01.06.2023].

Chamberlin, A. 2023. *Near-Earth Asteroids (NEAs) versus time, Cumulative Totals*. https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html. [Son erişim tarihi: 03.01.2023].

Chambers, J. E. 1999. A hybrid symplectic integrator that permits close encounters between massive bodies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 304.4, pp. 793–799.

Chapman, C. R., Johnson, T. V., and McCord, T. B. 1971. "A Review of Spectrophotometric Studies of Asteroids." *NASA Special Publication*. Ed. by T. Gehrels. Vol. 267, p. 51.

Cheng, A. F. et al. 2023. Momentum Transfer from the DART Mission Kinetic Impact on Asteroid Dimorphos. *arXiv e-prints*, arXiv:2303.03464, arXiv:2303.03464.

Cincotta, P. M., Giordano, C. M., and Simó, C. 2003. Phase space structure of multi-dimensional systems by means of the mean exponential growth factor of nearby orbits. *Physica D Nonlinear Phenomena*, 182.3-4, pp. 151–178.

Cincotta, P. M. and Simó, C. 2000. Simple tools to study global dynamics in non-axisymmetric galactic potentials - I. *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 147, pp. 205–228.

D'Abramo, G., Harris, A. W., Boattini, A., Werner, S. C., Harris, A. W., and Valsecchi, G. B. 2001. NOTE: A Simple Probabilistic Model to Estimate the Population of near-Earth Asteroids. *Icarus*, 153.1, pp. 214–217.

Dandy, C. L., Fitzsimmons, A., and Collander-Brown, S. J. 2003. Optical colors of 56 near-Earth objects: trends with size and orbit. *Icarus*, 163.2, pp. 363–373.

de la Fuente Marcos, C. and de la Fuente Marcos, R. 2020. On the orbital evolution of 2020 AV_2, the first asteroid ever observed to go around the Sun inside the orbit of Venus. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 494.1, pp. L6–L10.

Delbo, M. and Tanga, P. 2009. Thermal inertia of main belt asteroids smaller than 100 km from IRAS data. *Planetary and Space Science*, 57.2, pp. 259–265.

Delbó, M., Harris, A. W., Binzel, R. P., Pravec, P., and Davies, J. K. 2003. Keck observations of near-Earth asteroids in the thermal infrared. *Icarus*, 166.1, pp. 116–130.

DeMeo, F. E. and Carry, B. 2013. The taxonomic distribution of asteroids from multi-filter all-sky photometric surveys. *Icarus*, 226.1, pp. 723–741.

DeMeo, F. E., Binzel, R. P., Slivan, S. M., and Bus, S. J. 2009. An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared. *Icarus*, 202.1, pp. 160–180.

Devogèle, M. et al. 2021. (6478) Gault: physical characterization of an active main-belt asteroid. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 505.1, pp. 245–258.

Dollfus, A. and Zellner, B. 1979. "Optical polarimetry of asteroids and laboratory samples." *Asteroids*. Ed. by T. Gehrels and M. S. Matthews, pp. 170–183.

Drummond, J. D. 1981. A test of comet and meteor shower associations. *Icarus*, 45.3, pp. 545–553.

Drummond, J. D. 1991. Earth-approaching asteroid streams. *Icarus*, 89.1, pp. 14–25.

— 2000. The D Discriminant and Near-Earth Asteroid Streams. *Icarus*, 146.2, pp. 453–475.

Duncan, M. J. and Levison, H. F. 1997. A scattered comet disk and the origin of Jupiter family comets. *Science*, 276, pp. 1670–1672.

Dunn, T. L., Burbine, T. H., Bottke, W. F., and Clark, J. P. 2013. Mineralogies and source regions of near-Earth asteroids. *Icarus*, 222.1, pp. 273–282.

Durech, J., Sidorin, V., and Kaasalainen, M. 2010. DAMIT: a database of asteroid models. *Astronomy and Astrophysics*, 513, A46, A46.

Durech, J. et al. 2009. Asteroid models from combined sparse and dense photometric data. *Astronomy and Astrophysics*, 493.1, pp. 291–297.

Ďurech, J. et al. 2018. YORP and Yarkovsky effects in asteroids (1685) Toro, (2100) Ra-Shalom, (3103) Eger, and (161989) Cacus. *Astronomy and Astrophysics*, 609, A86, A86.

Ďurech, J. et al. 2022. Rotation acceleration of asteroids (10115) 1992 SK, (1685) Toro, and (1620) Geographos due to the YORP effect. *Astronomy and Astrophysics*, 657, A5, A5.

Ďurech, J., Grav, T., Jedicke, R., Denneau, L., and Kaasalainen, M. 2005. Asteroid Models from the Pan-STARRS Photometry. *Earth Moon and Planets*, 97.3-4, pp. 179–187.

Dvorak, R., Pilat-Lohinger, E., Funk, B., and Freistetter, F. 2003. A study of the stable regions in the planetary system HD 74156 - Can it host earthlike planets in habitable zones? *Astronomy and Astrophysics*, 410, pp. L13–L16.

Dziadura, K., Oszkiewicz, D., and Bartczak, P. 2022. Investigating the most promising Yarkovsky candidates using Gaia DR2 astrometry. *Icarus*, 383, 115040, p. 115040.

Einstein, A. 1915. Erklarung der Perihelionbewegung der Merkur aus der allgemeinen Relativitatstheorie. *Sitzungsber. preuss.Akad. Wiss*, 47, pp. 831–839.

Érdi, B., Dvorak, R., Sándor, Z., Pilat-Lohinger, E., and Funk, B. 2004. The dynamical structure of the habitable zone in the HD 38529, HD 168443 and HD 169830 systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 351.3, pp. 1043–1048.

Erece, O. 2016. *Apollo asteroidlerine kaynaklık eden bölgelerin araştırılması*. Yüksek lisans tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye, 66 s.

Erece, O., Khamitov, I. M., Kaplan, M., Kilic, Y., Lee, H.-J., Kim, M.-J., Bikmaev, I. F., Gumerov, R. I., and Irtuganov, E. N. 2023. Physical properties of the slow-rotating near-Earth asteroid (2059) Baboquivari from one apparition. *Planetary and Space Science*, 232, 105698, p. 105698.

Farinella, P., Froeschlé, C., Froeschlé, C., Gonczi, R., Hahn, G., Morbidelli, A., and Valsecchi, G. B. 1994. Asteroids falling into the Sun. *Nature*, 371.6495, pp. 314–317.

Farnocchia, D., Chesley, S. R., Milani, A., Gronchi, G. F., and Chodas, P. W. 2015. "Orbits, Long-Term Predictions, Impact Monitoring." *Asteroids IV*, pp. 815–834.

Farnocchia, D., Chesley, S. R., Chodas, P. W., Micheli, M., Tholen, D., Milani, A., Elliott, G., and Bernardi, F. 2013. Yarkovsky-driven impact risk analysis for asteroid (99942) Apophis. *Icarus*, 224.1, pp. 192–200.

Feroz, F. and Hobson, M. P. 2008. Multimodal nested sampling: an efficient and robust alternative to Markov Chain Monte Carlo methods for astronomical data analyses. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 384.2, pp. 449–463.

Feroz, F., Hobson, M. P., and Bridges, M. 2009. MULTINEST: an efficient and robust Bayesian inference tool for cosmology and particle physics. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 398.4, pp. 1601–1614.

Fischler, M. A. and Bolles, R. C. 1981. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24.6, pp. 381–395.

Fowler, J. W. and Chillemi, J. R. 1992. "IRAS asteroid data processing." *The IRAS Minor Planet Survey*. Hanscom AF Base, MA: Phillips Laboratory. Chap. -, pp. 17–43.

Fu, H., Jedicke, R., Durda, D. D., Fevig, R., and Scotti, J. V. 2005. Identifying near-Earth object families. *Icarus*, 178.2, pp. 434–449.

Gaia Collaboration et al. 2021. Gaia Early Data Release 3. Summary of the contents and survey properties. *Astronomy and Astrophysics*, 649, A1, A1.

Gaia Collaboration et al. 2022. Gaia Data Release 3: Summary of the content and survey properties. *arXiv e-prints*, arXiv:2208.00211, arXiv:2208.00211.

Gajdoš, P. and Vaňko, M. 2023. Chaos in multiplanetary extrasolar systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 518.2, pp. 2068–2075.

Ginsburg, A. et al. 2019. astroquery: An Astronomical Web-querying Package in Python. *The Astronomical Journal*, 157.3, p. 98.

Gladman, B. J., Migliorini, F., Morbidelli, A., Zappala, V., Michel, P., Cellino, A., Froeschle, C., Levison, H. F., Bailey, M., and Duncan, M. 1997. Dynamical lifetimes of objects injected into asteroid belt resonances. *Science*, 277, pp. 197–201.

Gleason, A. E., Larsen, J. A., Descour, A. S., and Williams, G. V. 2004. 2004 MN4. *Minor Planet Electronic Circulars*, 2004-Y70.

Goidet-Devel, B., Renard, J. B., and Levasseur-Regourd, A. C. 1995. Polarization of asteroids. Synthetic curves and characteristic parameters. *Planetary and Space Science*, 43.6, pp. 779–786.

Golubov, O., Unukovych, V., and Scheeres, D. J. 2021. Limiting Behavior of Asteroid Obliquity and Spin Using a Semi-analytic Thermal Model of the YORP Effect. *The Astronomical Journal*, 162.1, 8, p. 8.

Goździewski, K., Bois, E., Maciejewski, A. J., and Kiseleva-Eggleton, L. 2001. Global dynamics of planetary systems with the MEGNO criterion. *Astronomy and Astrophysics*, 378, pp. 569–586.

Granvik, M., Morbidelli, A., Jedicke, R., Bolin, B., Bottke, W. F., Beshore, E., Vokrouhlický, D., Nesvorný, D., and Michel, P. 2018. Debiased orbit and absolute-magnitude distributions for near-Earth objects. *Icarus*, 312, pp. 181–207.

Greenstreet, S. 2020. Orbital Dynamics of 2020 AV_2: the First Vatira Asteroid. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 493.1, pp. L129–L131.

Greenstreet, S., Ngo, H., and Gladman, B. 2012. The orbital distribution of Near-Earth Objects inside Earth's orbit. *Icarus*, 217.1, pp. 355–366.

Gustafson, B. A. S. 1989. Geminid meteoroids traced to cometary activity on Phaethon. *Astronomy and Astrophysics*, 225.2, pp. 533–540.

Haghighipour, N. and Winter, O. C. 2016. Formation of terrestrial planets in disks with different surface density profiles. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 124, pp. 235–268.

Hairer, E., Wanner, G., and Norsett, S. P. 1993. *Solving ordinary differential equations I: nonstiff problems*.

Hamm, M. et al. 2022. Mid-infrared emissivity of partially dehydrated asteroid (162173) Ryugu shows strong signs of aqueous alteration. *Nature Communications*, 13, 364, p. 364.

Hanus, J., Durech, J., Marchis, F., Asencio, J., and Blaclard, G. 2021. "Physical Properties of Near-Earth Asteroids." *AGU Fall Meeting Abstracts*. Vol. 2021, P33A-02, P33A–02.

Hapke, B. 1981. Bidirectional reflectance spectroscopy. 1. Theory. *Journal of Geophysical Research*, 86, pp. 4571–4586.

Hapke, B. 1984. Bidirectional reflectance spectroscopy 3. Correction for macroscopic roughness. *Icarus*, 59.1, pp. 41–59.

— 1986. Bidirectional reflectance spectroscopy 4. The extinction coefficient and the opposition effect. *Icarus*, 67.2, pp. 264–280.

Harris, A. W. 1996. "The Rotation Rates of Very Small Asteroids: Evidence for 'Rubble Pile' Structure." *Lunar and Planetary Science Conference*. Vol. 27. Lunar and Planetary Science Conference, p. 493.

Harris, A. W., Boslough, M., Chapman, C. R., Drube, L., and Michel, P. 2015. Asteroid impacts and modern civilization: Can we prevent a catastrophe? *Asteroids IV*, pp. 835–854.

Harris, A. W. and Chodas, P. W. 2021. The population of near-earth asteroids revisited and updated. *Icarus*, 365, 114452, p. 114452.

Harris, A. W. and D'Abramo, G. 2015. The population of near-Earth asteroids. *Icarus*, 257, pp. 302–312.

Hayashi, C., Nakazawa, K., and Nakagawa, Y. 1985. "Formation of the solar system." *Protostars and Planets II*. Ed. by D. C. Black and M. S. Matthews, pp. 1100–1153.

He, M. Y., Ford, E. B., Ragozzine, D., and Carrera, D. 2020. Architectures of Exoplanetary Systems. III. Eccentricity and Mutual Inclination Distributions of AMD-stable Planetary Systems. *The Astronomical Journal*, 160.6, 276, p. 276.

Helhel, S., Khamitov, I., Kahya, G., Bayar, C., Kaynar, S., and Gumerov, R. 2015. Double-wedged Wollaston-type polarimeter design and integration to RTT150-TFOSC; initial tests, calibration, and characteristics. *Experimental Astronomy*, 39.3, pp. 595–604.

Hirayama, K. 1918. Groups of asteroids probably of common origin. *The Astronomical Journal*, 31, pp. 185–188.

Holmberg, J., Flynn, C., and Portinari, L. 2006. The colours of the Sun. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 367.2, pp. 449–453.

Holsapple, K. A. 2007. Spin limits of Solar System bodies: From the small fast-rotators to 2003 EL61. *Icarus*, 187.2, pp. 500–509.

Ito, T. and Malhotra, R. 2006. Dynamical transport of asteroid fragments from the ν_6 resonance. *Advances in Space Research*, 38.4, pp. 817–825.

Ivezic, Z., Juric, M., Lupton, R. H., Tabachnik, S., and Quinn, T. 2002. "Asteroids Observed by The Sloan Digital Sky Survey." *Survey and Other Telescope Technologies and Discoveries*. Ed. by J. A. Tyson and S. Wolff. Vol. 4836. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, pp. 98–103.

Ivezić, Ž. et al. 2001. Solar System Objects Observed in the Sloan Digital Sky Survey Commissioning Data. *The Astronomical Journal*, 122.5, pp. 2749–2784.

Jacobson, S. A. and Scheeres, D. J. 2011. Dynamics of rotationally fissioned asteroids: Source of observed small asteroid systems. *Icarus*, 214.1, pp. 161–178.

Jewitt, D. 2012. The Active Asteroids. *Astronomical Journal*, 143.3, 66, p. 66.

Jopek, T. J. 1993. Remarks on the Meteor Orbital Similarity D-Criterion. *Icarus*, 106.2, pp. 603–607.

Kaasalainen, M., Mottola, S., and Fulchignoni, M. 2002. "Asteroid Models from Disk-integrated Data." *Asteroids III*, pp. 139–150.

Kaasalainen, M. and Torppa, J. 2001. Optimization Methods for Asteroid Lightcurve Inversion. I. Shape Determination. *Icarus*, 153.1, pp. 24–36.

Kaasalainen, M., Torppa, J., and Muinonen, K. 2001. Optimization Methods for Asteroid Lightcurve Inversion. II. The Complete Inverse Problem. *Icarus*, 153.1, pp. 37–51.

Kaasalainen, M., Ďurech, J., Warner, B. D., Krugly, Y. N., and Gaftonyuk, N. M. 2007. Acceleration of the rotation of asteroid 1862 Apollo by radiation torques. *Nature*, 446.7134, pp. 420–422.

Kaasalainen, M. and Lamberg, L. 2006. Inverse problems of generalized projection operators. *Inverse Problems*, 22.3, pp. 749–769.

Kaasalainen, M. et al. 2004. Photometry and models of eight near-Earth asteroids. *Icarus*, 167.1, pp. 178–196.

Kaasalainen, S., Kaasalainen, M., and Piironen, J. 2005. Ground reference for space remote sensing. Laboratory photometry of an asteroid model. *Astronomy and Astrophysics*, 440.3, pp. 1177–1182.

Kaasalainen, S., Piironen, J., Kaasalainen, M., Harris, A. W., Muinonen, K., and Cellino, A. 2003. Asteroid photometric and polarimetric phase curves: empirical interpretation. *Icarus*, 161.1, pp. 34–46.

Kabaş, A. 2010. Asteroidlerin Fotometrik Gözlemlerinin Analizi. *Doktora Tezi*, pp. 1–79.

Kaplan, M., Erece, O., Aslan, G., and Eker, Z. 2016. Dynamical analyses on the transitivity from JFC and Centaur regions to NEAs with Tisserand parameters from 2 to 3. *Advances in Space Research*, 58.11, pp. 2407–2415.

Kilic, Y., Shameoni Niaei, M., Özeren, F. F., and Yesilyaprak, C. 2016. "MYRaf: A new Approach with IRAF for Astronomical Photometric Reduction." *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*. Vol. 48. Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series, pp. 38–39.

Kilic, Y., Erece, O., and Kaplan, M. 2018. "Astrometry with A-Track Using Gaia DR1 Catalogue." *Astrometry and Astrophysics in the Gaia Sky*. Ed. by A. Recio-Blanco, P. de Laverny, A. G. A. Brown, and T. Prusti. Vol. 330, pp. 94–95.

Kirkwood, D. 1867. *Meteoric astronomy: a treatise on shooting-stars, fireballs, and aerolites*. JB Lippincott & Company.

Kozai, Y. 1962. Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity. *Astronomical Journal*, 67, pp. 591–598.

Kresak, L. 1979. "Dynamical interrelations among comets and asteroids." *Asteroids*. Ed. by T. Gehrels and M. S. Matthews, pp. 289–309.

Kwiatkowski, T. et al. 2021. Photometry and model of near-Earth asteroid 2021 DW1 from one apparition. *Astronomy and Astrophysics*, 656, A126, A126.

Lamy, P. L. et al. 2008. Asteroid 2867 Steins. II. Multi-telescope visible observations, shape reconstruction, and rotational state. *Astronomy and Astrophysics*, 487.3, pp. 1179–1185.

Lang, D., Hogg, D. W., Mierle, K., Blanton, M., and Roweis, S. 2010. Astrometry.net Blind Astrometric Calibration of Arbitrary Astronomical Images. *The Astronomical Journal*, 139.5, pp. 1782–1800.

Laskar, J. and Petit, A. C. 2017. AMD-stability and the classification of planetary systems. *Astronomy and Astrophysics*, 605, A72, A72.

Laskar, J. 1989. A numerical experiment on the chaotic behaviour of the Solar System. *Nature*, 338.6212, pp. 237–238.

— 1996. Large Scale Chaos and Marginal Stability in the Solar System. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 64.1-2, pp. 115–162.

Laskar, J. and Robutel, P. 2001. High order symplectic integrators for perturbed Hamiltonian systems. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 80.1, pp. 39–62.

Le Verrier, U. J. 1859. Theorie du mouvement de Mercure. *Annales de l'Observatoire de Paris*, 5, p. 1.

Levison, H. F. and Duncan, M. J. 1994. The Long-Term Dynamical Behavior of Short-Period Comets. *Icarus*, 108.1, pp. 18–36.

Levison, H. F., Shoemaker, E. M., and Shoemaker, C. S. 1997. Dynamical evolution of Jupiter's Trojan asteroids. *Nature*, 385.6611, pp. 42–44.

Lidov, M. L. 1962. The evolution of orbits of artificial satellites of planets under the action of gravitational perturbations of external bodies. *Planetary and Space Science*, 9.10, pp. 719–759.

Lindblad, B. A. 1992. "A Computer Search for Asteroid Families." *Asteroids, Comets, Meteors 1991*. Ed. by A. W. Harris and E. Bowell, p. 363.

Lindegren, L. et al. 2021. Gaia Early Data Release 3. The astrometric solution. *Astronomy and Astrophysics*, 649, A2, A2.

Liu, F. et al. 2008. "Development of the Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE) mission." *Modeling, Systems Engineering, and Project Management for Astronomy III*. Ed. by G. Z. Angeli and M. J. Cullum. Vol. 7017. Society of

Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 70170M, p. 70170M.

Lomb, N. R. 1976. Least-Squares Frequency Analysis of Unequally Spaced Data. *Astrophysics and Space Science*, 39.2, pp. 447–462.

Lu, X.-P. and Jewitt, D. 2019. Dependence of Light Curves on Phase Angle and Asteroid Shape. *The Astronomical Journal*, 158.6, 220, p. 220.

Lumme, K. and Bowell, E. 1981. Radiative transfer in the surfaces of atmosphereless bodies. I. Theory. *The Astronomical Journal*, 86, pp. 1694–1721.

Lumme, K. and Muinonen, K. O. 1993. "A Two-Parameter System for Linear Polarization of Some Solar System Objects." *Asteroids, Comets, Meteors 1993*. Vol. 810. LPI Contributions, p. 194.

Lupishko, D. 2022. Asteroid Polametric Database (APD) Bundle V2.0. *NASA Planetary Data System*, p. 1.

Lupishko, D. F. and Mohamed, R. A. 1996. A New Calibration of the Polarimetric Albedo Scale of Asteroids. *Icarus*, 119.1, pp. 209–213.

Maffione, N. P., Darriba, L. A., Cincotta, P. M., and Giordano, C. M. 2013. Chaos detection tools: application to a self-consistent triaxial model. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 429.3, pp. 2700–2717.

Mainzer, A. et al. 2011. NEOWISE Observations of Near-Earth Objects: Preliminary Results. *The Astrophysical Journal*, 743.2, 156, p. 156.

Mainzer, A. et al. 2012. Characterizing Subpopulations within the near-Earth Objects with NEOWISE: Preliminary Results. *The Astrophysical Journal*, 752.2, 110, p. 110.

Mainzer, A. K., Eisenhardt, P., Wright, E. L., Liu, F.-C., Irace, W., Heinrichsen, I., Cutri, R., and Duval, V. 2005. "Preliminary design of the Wide-Field Infrared Survey Explorer (WISE)." *UV/Optical/IR Space Telescopes: Innovative Technologies and Concepts II*. Ed. by H. A. MacEwen. Vol. 5899. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, pp. 262–273.

Malhotra, R. 1998. "Orbital Resonances and Chaos in the Solar System." *Solar System Formation and Evolution*. Ed. by D. Lazzaro, R. Vieira Martins, S. Ferraz-Mello,

and J. Fernandez. Vol. 149. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, p. 37.

Malhotra, R., Holman, M., and Ito, T. 2001. Chaos and stability of the solar system. *Proceedings of the National Academy of Science*, 98.22, pp. 12342–12343.

Margot, J.-L., Pravec, P., Taylor, P., Carry, B., and Jacobson, S. 2015. "Asteroid Systems: Binaries, Triples, and Pairs." *Asteroids IV*, pp. 355–374.

Masi, G. and Foglia, S. 2009. Comet disruption: a statistical approach for the nearly isotropic comets. *Journal of the British Astronomical Association*, 119, pp. 203–204.

Masiero, J. R., Mainzer, A. K., Bauer, J. M., Cutri, R. M., Grav, T., Kramer, E., Pittichová, J., and Wright, E. L. 2021. Asteroid Diameters and Albedos from NEOWISE Reactivation Mission Years Six and Seven. *The Planetary Science Journal*, 2.4, 162, p. 162.

Masiero, J. R., Mainzer, A. K., Grav, T., Bauer, J. M., Wright, E. L., McMillan, R. S., Tholen, D. J., and Blain, A. W. 2012. A Revised Asteroid Polarization-Albedo Relationship Using WISE/NEOWISE Data. *The Astrophysical Journal*, 749.2, 104, p. 104.

Masiero, J. R., Tinyanont, S., and Millar-Blanchaer, M. A. 2022. Asteroid Polarimetric Phase Behavior in the Near-infrared: S- and C-complex Objects. *The Planetary Science Journal*, 3.4, 90, p. 90.

Masiero, J. R. et al. 2011. Main Belt Asteroids with WISE/NEOWISE. I. Preliminary Albedos and Diameters. *The Astrophysical Journal*, 741.2, 68, p. 68.

Maturilli, A., Helbert, J., Ferrari, S., Davidsson, B., and D'Amore, M. 2016. Characterization of asteroid analogues by means of emission and reflectance spectroscopy in the 1- to 100-μm spectral range. *Earth, Planets and Space*, 68.1, 113, p. 113.

Michel, P. 2014. Formation and Physical Properties of Asteroids. *Elements*, 10.1, pp. 19–24.

Michel, P., Migliorini, F., Morbidelli, A., and Zappalà, V. 2000. The Population of Mars-Crossers: Classification and Dynamical Evolution. *Icarus*, 145.2, pp. 332–347.

Michel, P., Morbidelli, A., and Bottke, W. F. 2005. Origin and dynamics of Near Earth Objects. *Comptes Rendus Physique*, 6.3, pp. 291–301.

Migliorini, F., Morbidelli, A., Zappala, V., Gladman, B. J., Bailey, M. E., and Cellino, A. 1997. Vesta fragments from v6 and 3:1 resonances: Implications for V-type NEAs and HED meteorites. *Meteoritics & Planetary Science*, 32.6, pp. 903–916.

Migliorini, F., Michel, P., Morbidelli, A., Nesvorny, D., and Zappala, V. 1998. Origin of Multikilometer Earth- and Mars-Crossing Asteroids: A Quantitative Simulation. *Science*, 281, p. 2022.

Mignard, F. et al. 2007. The Gaia Mission: Expected Applications to Asteroid Science. *Earth Moon and Planets*, 101.3-4, pp. 97–125.

Mishchenko, M. I., Rosenbush, V. K., Kiselev, N. N., Lupishko, D. F., Tishkovets, V. P., Kaydash, V. G., Belskaya, I. N., Efimov, Y. S., and Shakhovskoy, N. M. 2010. Polarimetric Remote Sensing of Solar System Objects. *arXiv e-prints*, arXiv:1010.1171, arXiv:1010.1171.

Morbidelli, A., Delbo, M., Granvik, M., Bottke, W. F., Jedicke, R., Bolin, B., Michel, P., and Vokrouhlicky, D. 2020. Debiased albedo distribution for Near Earth Objects. *Icarus*, 340, 113631, p. 113631.

Morbidelli, A., Gonczi, R., Froeschle, C., and Farinella, P. 1994. Delivery of meteorites through the nu_6 secular resonance. *Astronomy and Astrophysics*, 282.3, pp. 955–979.

Morbidelli, A. and Nesvorný, D. 1999. Numerous Weak Resonances Drive Asteroids toward Terrestrial Planets Orbits. *Icarus*, 139.2, pp. 295–308.

Morbidelli, A., Jedicke, R., Bottke, W., Michel, P., and Tedesco, E. 2002. From magnitudes to diameters: The albedo distribution of near Earth objects and the Earth collision hazard. *Icarus*, 158.2, pp. 329–342.

Morbidelli, A. and Henrard, J. 1991. Secular Resonances in the Asteroid Belt - Theoretical Perturbation Approach and the Problem of Their Location. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 51.2, pp. 131–167.

Morrison, D. 1977. Asteriod Sizes and Albedos. *Icarus*, 31.2, pp. 185–220.

Morrison, D. and Lebofsky, L. 1979. “Radiometry of asteroids.” *Asteroids*. Ed. by T. Gehrels and M. S. Matthews, pp. 184–205.

Mouret, S. and Mignard, F. 2011. Detecting the Yarkovsky effect with the Gaia mission: list of the most promising candidates. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 413.2, pp. 741–748.

Muinonen, K., Penttilä, A., Cellino, A., Belskaya, I. N., Delbò, M., Levasseur-Regourd, A. C., and Tedesco, E. F. 2009. Asteroid photometric and polarimetric phase curves: Joint linear-exponential modeling. *Meteoritics & Planetary Science*, 44.12, pp. 1937–1946.

Muinonen, K., Piironen, J., Kaasalainen, S., and Cellino, A. 2002a. Asteroid photometric and polarimetric phase curves: empirical modeling. *in Memorie della Società' Astronomica Italiana*, 73.3, p. 716.

Muinonen, K., Piironen, J., Shkuratov, Y. G., Ovcharenko, A., and Clark, B. E. 2002b. “Asteroid Photometric and Polarimetric Phase Effects.” *Asteroids III*, pp. 123–138.

Muinonen, K., Torppa, J., Wang, X. .-., Cellino, A., and Penttilä, A. 2020. Asteroid lightcurve inversion with Bayesian inference. *Astronomy and Astrophysics*, 642, A138, A138.

Muinonen, K., Belskaya, I. N., Cellino, A., Delbò, M., Levasseur-Regourd, A.-C., Penttilä, A., and Tedesco, E. F. 2010. A three-parameter magnitude phase function for asteroids. *Icarus*, 209.2, pp. 542–555.

Müller, T. G., Sekiguchi, T., Kaasalainen, M., Abe, M., and Hasegawa, S. 2005. Thermal infrared observations of the Hayabusa spacecraft target asteroid 25143 Itokawa. *Astronomy and Astrophysics*, 443.1, pp. 347–355.

Nesvorný, D., Brož, M., and Carruba, V. 2015. “Identification and Dynamical Properties of Asteroid Families.” *Asteroids IV*, pp. 297–321.

Nesvorný, D., Bottke William F., J., Dones, L., and Levison, H. F. 2002. The recent breakup of an asteroid in the main-belt region. *Nature*, 417.6890, pp. 720–771.

Nesvorný, D. and Bottke, W. F. 2004. Detection of the Yarkovsky effect for main-belt asteroids. *Icarus*, 170.2, pp. 324–342.

Nesvorný, D., Jedicke, R., Whiteley, R. J., and Ivezić, Ž. 2005. Evidence for asteroid space weathering from the Sloan Digital Sky Survey. *Icarus*, 173.1, pp. 132–152.

Nesvorný, D. et al. 2023. NEOMOD: A New Orbital Distribution Model for Near-Earth Objects. *The Astronomical Journal*, 166.2, 55, p. 55.

Niaei, M. S., Kilic, Y., and Özeren, F. F. 2015. "MYRaf: An Easy Aperture Photometry GUI for IRAF." *Living Together: Planets, Host Stars and Binaries*. Ed. by S. M. Rucinski, G. Torres, and M. Zejda. Vol. 496. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, p. 299.

Nugent, C. R., Margot, J. L., Chesley, S. R., and Vokrouhlický, D. 2012. Detection of Semimajor Axis Drifts in 54 Near-Earth Asteroids: New Measurements of the Yarkovsky Effect. *The Astronomical Journal*, 144.2, 60, p. 60.

Ohtsuka, K., Arakida, H., Ito, T., Kasuga, T., Watanabe, J., Kinoshita, D., Sekiguchi, T., Asher, D. J., and Nakano, S. 2007. Apollo Asteroids 1566 Icarus and 2007 MK_6: Icarus Family Members? *The Astrophysical Journal*, 668.1, pp. L71–L74.

Ohtsuka, K., Sekiguchi, T., Kinoshita, D., Watanabe, J. .-., Ito, T., Arakida, H., and Kasuga, T. 2006. Apollo asteroid 2005 UD: split nucleus of (3200) Phaethon? *Astronomy and Astrophysics*, 450.3, pp. L25–L28.

Öpik, E. J. 1951. "Collision probabilities with the planets and the distribution of interplanetary matter." *Proceedings of the Royal Irish Academy. Section A: Mathematical and Physical Sciences*. Vol. 54. JSTOR, pp. 165–199.

Ortiz, J. L., Sicardy, B., Camargo, J. I. B., Santos-Sanz, P., and Braga-Ribas, F. 2020. "Stellar occultation by TNOs: from predictions to observations." *The Trans-Neptunian Solar System*. Ed. by D. Prialnik, M. A. Barucci, and L. Young, pp. 413–437.

Panichi, F., Ciotti, L., and Turchetti, G. 2016. Fidelity and reversibility in the restricted three body problem. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 35, pp. 53–68.

Panichi, F., Goździewski, K., and Turchetti, G. 2017. The reversibility error method (REM): a new, dynamical fast indicator for planetary dynamics. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 468.1, pp. 469–491.

Parker, A., Ivezić, Ž., Jurić, M., Lupton, R., Sekora, M. D., and Kowalski, A. 2008. The size distributions of asteroid families in the SDSS Moving Object Catalog 4. *Icarus*, 198.1, pp. 138–155.

Penttilä, A., Lumme, K., Hadamcik, E., and Levasseur-Regourd, A. .-. 2005. Statistical analysis of asteroidal and cometary polarization phase curves. *Astronomy and Astrophysics*, 432.3, pp. 1081–1090.

Pérez-Hernández, J. A. and Benet, L. 2022. Non-zero Yarkovsky acceleration for near-Earth asteroid (99942) Apophis. *Communications Earth and Environment*, 3.1, 10, p. 10.

Perna, D., Barucci, M. A., Fulchignoni, M., Popescu, M., Belskaya, I., Fornasier, S., Doressoundiram, A., Lantz, C., and Merlin, F. 2018. A spectroscopic survey of the small near-Earth asteroid population: Peculiar taxonomic distribution and phase reddening. *Planetary and Space Science*, 157, pp. 82–95.

Petit, A. C., Laskar, J., and Boué, G. 2017. AMD-stability in the presence of first-order mean motion resonances. *Astronomy and Astrophysics*, 607, A35, A35.

Petit, J.-M., Morbidelli, A., and Chambers, J. 2001. The Primordial Excitation and Clearing of the Asteroid Belt. *Icarus*, 153.2, pp. 338–347.

Piironen, J., Muinonen, K., Keranen, S., Karttunen, H., and Peltoniemi, J. 2000. "Backscattering of Light by Snow." *Observing Land from Space: Science, Customers and Technology*. Ed. by M. M. Verstraete, M. Menenti, and J. Peltoniemi. Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 219–228.

Polishook, D., Moskovitz, N., Binzel, R. P., DeMeo, F. E., Vokrouhlický, D., Žižka, J., and Oszkiewicz, D. 2014. Observations of "fresh" and weathered surfaces on asteroid pairs and their implications on the rotational-fission mechanism. *Icarus*, 233, pp. 9–26.

Popescu, M., Licandro, J., Carvano, J. M., Stoicescu, R., de León, J., Morate, D., Boacă, I. L., and Cristescu, C. P. 2018. Taxonomic classification of asteroids based on MOVIS near-infrared colors. *Astronomy and Astrophysics*, 617, A12, A12.

Popescu, M., Licandro, J., Morate, D., de León, J., Nedelcu, D. A., Rebolo, R., McMahon, R. G., Gonzalez-Solares, E., and Irwin, M. 2016. Near-infrared colors

of minor planets recovered from VISTA-VHS survey (MOVIS). *Astronomy and Astrophysics*, 591, A115, A115.

Pravec, P., Harris, A. W., and Michalowski, T. 2002. "Asteroid Rotations." *Asteroids III*, pp. 113–122.

Pravec, P. et al. 2008. Spin rate distribution of small asteroids. *Icarus*, 197.2, pp. 497–504.

Pravec, P. et al. 2010. Formation of asteroid pairs by rotational fission. *Nature*, 466.7310, pp. 1085–1088.

Pravec, P. et al. 2014. The tumbling spin state of (99942) Apophis. *Icarus*, 233, pp. 48–60.

Pravec, P. and Harris, A. W. 2000. Fast and Slow Rotation of Asteroids. *Icarus*, 148.1, pp. 12–20.

Rabinowitz, D. L. 1993. The Size Distribution of the Earth-approaching Asteroids. *The Astrophysical Journal*, 407, p. 412.

Rabinowitz, D., Helin, E., Lawrence, K., and Pravdo, S. 2000. A reduced estimate of the number of kilometre-sized near-Earth asteroids. *Nature*, 403.6766, pp. 165–166.

Rabinowitz, D. L. 1994. The Size and Shape of the Near-Earth Asteroid Belt. *Icarus*, 111.2, pp. 364–377.

Rayner, J. T., Toomey, D. W., Onaka, P. M., Denault, A. J., Stahlberger, W. E., Vacca, W. D., Cushing, M. C., and Wang, S. 2003. SpeX: A Medium-Resolution 0.8-5.5 Micron Spectrograph and Imager for the NASA Infrared Telescope Facility. *The Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 115.805, pp. 362–382.

Reddy, V. et al. 2014. Chelyabinsk meteorite explains unusual spectral properties of Baptistina Asteroid Family. *Icarus*, 237, pp. 116–130.

Rein, H. and Liu, S. .-. 2012. REBOUND: an open-source multi-purpose N-body code for collisional dynamics. *Astronomy and Astrophysics*, 537, A128, A128.

Rein, H. 2020. Embedded operator splitting methods for perturbed systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 492.4, pp. 5413–5419.

Rein, H., Hernandez, D. M., Tamayo, D., Brown, G., Eckels, E., Holmes, E., Lau, M., Leblanc, R., and Silburt, A. 2019a. Hybrid symplectic integrators for planetary dynamics. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 485.4, pp. 5490–5497.

Rein, H. and Spiegel, D. S. 2015. IAS15: a fast, adaptive, high-order integrator for gravitational dynamics, accurate to machine precision over a billion orbits. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 446.2, pp. 1424–1437.

Rein, H. and Tamayo, D. 2015. WHFAST: a fast and unbiased implementation of a symplectic Wisdom-Holman integrator for long-term gravitational simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 452.1, pp. 376–388.

— 2016. Second-order variational equations for N-body simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 459.3, pp. 2275–2285.

— 2018. JANUS: a bit-wise reversible integrator for N-body dynamics. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 473.3, pp. 3351–3357.

Rein, H., Tamayo, D., and Brown, G. 2019b. High-order symplectic integrators for planetary dynamics and their implementation in REBOUND. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 489.4, pp. 4632–4640.

Rein, H. and Tremaine, S. 2011. Symplectic integrators in the shearing sheet. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 415.4, pp. 3168–3176.

Richardson, D. C., Bottke, W. F., and Love, S. G. 1998. Tidal Distortion and Disruption of Earth-Crossing Asteroids. *Icarus*, 134.1, pp. 47–76.

Roig, F., Nesvorný, D., and Ferraz-Mello, S. 2002. Asteroids in the 2 : 1 resonance with Jupiter: dynamics and size distribution. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 335.2, pp. 417–431.

Rozitis, B., Green, S. F., MacLennan, E., and Emery, J. P. 2018. Observing the variation of asteroid thermal inertia with heliocentric distance. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 477.2, pp. 1782–1802.

Rubincam, D. P. 2000. Radiative Spin-up and Spin-down of Small Asteroids. *Icarus*, 148.1, pp. 2–11.

Russell, H. N. 1916. On the Albedo of the Planets and Their Satellites. *The Astrophysical Journal*, 43, pp. 173–196.

Safronov, V. S. 1972. Evolution of the Protoplanetary Cloud and Formation of the Earth and the Planets.

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

Schunová, E., Granvik, M., Jedicke, R., Gronchi, G., Wainscoat, R., and Abe, S. 2012. Searching for the first near-Earth object family. *Icarus*, 220.2, pp. 1050–1063.

Sekanina, Z., Chodas, P. W., and Yeomans, D. K. 1994. Tidal disruption and the appearance of periodic comet Shoemaker-Levy 9. *Astronomy and Astrophysics*, 289, pp. 607–636.

Shepard, M. K. 2017. *Planetary Disk-Integrated Photometry*. Cambridge University Press.

Shestopalov, D. I. and Golubeva, L. F. 2014. "Polarized Light Scattered from Asteroid Surfaces. V. Can We Estimate Polarization Maximum for Main Belt Asteroids?" *45th Annual Lunar and Planetary Science Conference*. Lunar and Planetary Science Conference, p. 1062.

Shevchenko, V. G., Belskaya, I. N., Krugly, Y. N., Chiomy, V. G., and Gaftonyuk, N. M. 2002. Asteroid Observations at Low Phase Angles. II. 5 Astraea, 75 Eurydike, 77 Frigga, 105 Artemis, 119 Althaea, 124 Alkeste, and 201 Penelope. *Icarus*, 155.2, pp. 365–374.

Shkuratov, Y., Ovcharenko, A., Zubko, E., Miloslavskaya, O., Muinonen, K., Piironen, J., Nelson, R., Smythe, W., Rosenbush, V., and Helfenstein, P. 2002. The Opposition Effect and Negative Polarization of Structural Analogs for Planetary Regoliths. *Icarus*, 159.2, pp. 396–416.

Slivan, S. M., Binzel, R. P., Crespo da Silva, L. D., Kaasalainen, M., Lyndaker, M. M., and Krčo, M. 2003. Spin vectors in the Koronis family: comprehensive results from two independent analyses of 213 rotation lightcurves. *Icarus*, 162.2, pp. 285–307.

Smallwood, J. L., Martin, R. G., Lepp, S., and Livio, M. 2018. Asteroid impacts on terrestrial planets: the effects of super-Earths and the role of the ν_6 resonance. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 473.1, pp. 295–305.

Sonka, A., Birlan, M., Nedelcu, D. A., Badescu, O., and Henriksen, A. I. 2021. Photometric observations of Low Delta v asteroids. *Romanian Astronomical Journal*, 31.3, pp. 293–302.

Southworth, R. B. and Hawkins, G. S. 1963. Statistics of meteor streams. *Smithsonian Contributions to Astrophysics*, 7, pp. 261–285.

Stetson, P. B. 1987. DAOPHOT: A Computer Program for Crowded-Field Stellar Photometry. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 99, p. 191.

Stuart, J. S. 2001. A Near-Earth Asteroid Population Estimate from the LINEAR Survey. *Science*, 294.5547, pp. 1691–1693.

Stuart, J. S. and Binzel, R. P. 2004. Bias-corrected population, size distribution, and impact hazard for the near-Earth objects. *Icarus*, 170.2, pp. 295–311.

Sussman, G. J. and Wisdom, J. 1992. Chaotic Evolution of the Solar System. *Science*, 257.5066, pp. 56–62.

Sutherland, W. et al. 2015. The Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy (VISTA): Design, technical overview, and performance. *Astronomy and Astrophysics*, 575, A25, A25.

Takeda, Y. and Tajitsu, A. 2009. High-Dispersion Spectroscopic Study of Solar Twins: HIP 56948, HIP 79672, and HIP 100963. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 61, p. 471.

Tamayo, D., Rein, H., Shi, P., and Hernandez, D. M. 2020a. REBOUNDx: a library for adding conservative and dissipative forces to otherwise symplectic N-body integrations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 491.2, pp. 2885–2901.

Tamayo, D. et al. 2020b. Predicting the long-term stability of compact multiplanet systems. *Proceedings of the National Academy of Science*, 117.31, pp. 18194–18205.

Tancredi, G. 1998. Chaotic dynamics of planet-encountering bodies. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 70.3, pp. 181–200.

Tanga, P. et al. 2023. Gaia Data Release 3. The Solar System survey. *Astronomy and Astrophysics*, 674, A12, A12.

Tedesco, E. F., Veeder, G. J., Fowler, J. W., and Chillemi, J. R. 1992. *The IRAS Minor Planet Survey*. The IRAS Minor Planet Survey, Final Report by E.R. Tedesco, G.J. Veeder, J.W. Fowler, and J.R. Chillemi. Philliips Laboratory, Hanscom Air Force Base, MA, December 1992. PL-TR-92-2049.

Tedesco, E. F., Noah, P. V., Noah, M., and Price, S. D. 2002. The Supplemental IRAS Minor Planet Survey. *The Astronomical Journal*, 123.2, pp. 1056–1085.

Tholen, D. J. 1984. "Asteroid Taxonomy from Cluster Analysis of Photometry." PhD thesis. University of Arizona.

Tody, D. 1986. "The IRAF Data Reduction and Analysis System." *Instrumentation in astronomy VI*. Ed. by D. L. Crawford. Vol. 627. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, p. 733.

Torppa, J. 2007. Lightcurve Inversion for Asteroids Spins and Shapes. *Doktora Tezi*, pp. 1–36.

Usui, F., Kasuga, T., Hasegawa, S., Ishiguro, M., Kuroda, D., Müller, T. G., Ootsubo, T., and Matsuhara, H. 2013. Albedo Properties of Main Belt Asteroids Based on the All-Sky Survey of the Infrared Astronomical Satellite AKARI. *The Astrophysical Journal*, 762.1, 56, p. 56.

Usui, F. et al. 2011. Asteroid Catalog Using Akari: AKARI/IRC Mid-Infrared Asteroid Survey. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 63, pp. 1117–1138.

Vanderplas, J. T. 2018. Understanding the Lomb-Scargle Periodogram. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 236.1, 16, p. 16.

Vanderplas, J. 2015. *gatspy: General tools for Astronomical Time Seriesin Python*. Version v0.1.1.

Vaňko, M., Maciejewski, G., Jakubik, M., Krejčová, T., Budaj, J., Pribulla, T., Ohlert, J., Raetz, S., Parimucha, Š., and 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*, 432.2, pp. 944–953.

Verbiscer, A. J. and Veverka, J. 1995. Interpretation of the IAU two-parameter magnitude system for asteroids in terms of Hapke photometric theory. *Icarus*, 115.2, pp. 369–373.

Vereš, P. et al. 2015. Absolute magnitudes and slope parameters for 250,000 asteroids observed by Pan-STARRS PS1 - Preliminary results. *Icarus*, 261, pp. 34–47.

Virtanen, P. et al. 2020. SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*, 17, pp. 261–272.

Vokrouhlický, D., Breiter, S., Nesvorný, D., and Bottke, W. F. 2007. Generalized YORP evolution: Onset of tumbling and new asymptotic states. *Icarus*, 191.2, pp. 636–650.

Vokrouhlický, D., Milani, A., and Chesley, S. R. 2000. Yarkovsky Effect on Small Near-Earth Asteroids: Mathematical Formulation and Examples. *Icarus*, 148.1, pp. 118–138.

Walsh, K. J. and Richardson, D. C. 2006. Binary near-Earth asteroid formation: Rubble pile model of tidal disruptions. *Icarus*, 180.1, pp. 201–216.

— 2008. A steady-state model of NEA binaries formed by tidal disruption of gravitational aggregates. *Icarus*, 193.2, pp. 553–566.

Warner, B. D., Harris, A. W., and Pravec, P. 2009. The asteroid lightcurve database. *Icarus*, 202.1, pp. 134–146.

Warner, B. D. and Stephens, R. D. 2020a. Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at the Center for Solar System Studies: 2019 July-September. *Minor Planet Bulletin*, 47.1, pp. 23–34.

— 2020b. Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at the Center for Solar System Studies: 2019 September - 2020 January. *Minor Planet Bulletin*, 47.2, pp. 105–120.

Warner, B. D., Stephens, R. D., and Harris, A. W. 2011. Save the Lightcurves. *Minor Planet Bulletin*, 38.3, pp. 172–174.

Waszczak, A. et al. 2015. Asteroid Light Curves from the Palomar Transient Factory Survey: Rotation Periods and Phase Functions from Sparse Photometry. *The Astronomical Journal*, 150.3, 75, p. 75.

Weissman, P. R. 1996. "The Oort Cloud." *Completing the Inventory of the Solar System*. Ed. by T. Rettig and J. M. Hahn. Vol. 107. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, pp. 265–288.

Wetherill, G. W. 1976. Where do the meteorites come from? A re-evaluation of the earth-crossing apollo objects as sources of chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40.11, pp. 1297–1317.

— 1979. Steady state populations of Apollo-Amor objects. *Icarus*, 37.1, pp. 96–112.

Wilhelms, D. E. 1993. To a rocky moon: a geologist's history of lunar exploration. *Tucson: University of Arizona Press*,

Wisdom, J. 1983. Chaotic behavior and the origin of the 3/1 Kirkwood gap. *Icarus*, 56.1, pp. 51–74.

— 1987. Chaotic behaviour in the solar system. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, 413.1844, pp. 109–129.

Wisdom, J. and Holman, M. 1991. Symplectic maps for the N-body problem. *The Astronomical Journal*, 102, pp. 1528–1538.

Wood, X. H. J. and Kuiper, G. P. 1963. Photometric Studies of Asteroids. *The Astrophysical Journal*, 137, p. 1279.

Yarkovsky, I. 1901. The density of luminiferous ether and the resistance it offers to motion. *Bryansk, published privately by the author*,

York, D. G. et al. 2000. The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary. *The Astronomical Journal*, 120.3, pp. 1579–1587.

Zappala, V., Cellino, A., Barucci, A. M., Fulchignoni, M., and Lupishko, D. F. 1990. An analysis of the amplitude-phase relationship among asteroids. *Astronomy and Astrophysics*, 231.2, pp. 548–560.

Zappalà, V., Bendjoya, P., Cellino, A., Farinella, P., and Froeschlé, C. 1995. Asteroid families: Search of a 12,487-asteroid sample using two different clustering techniques. *Icarus*, 116.2, pp. 291–314.

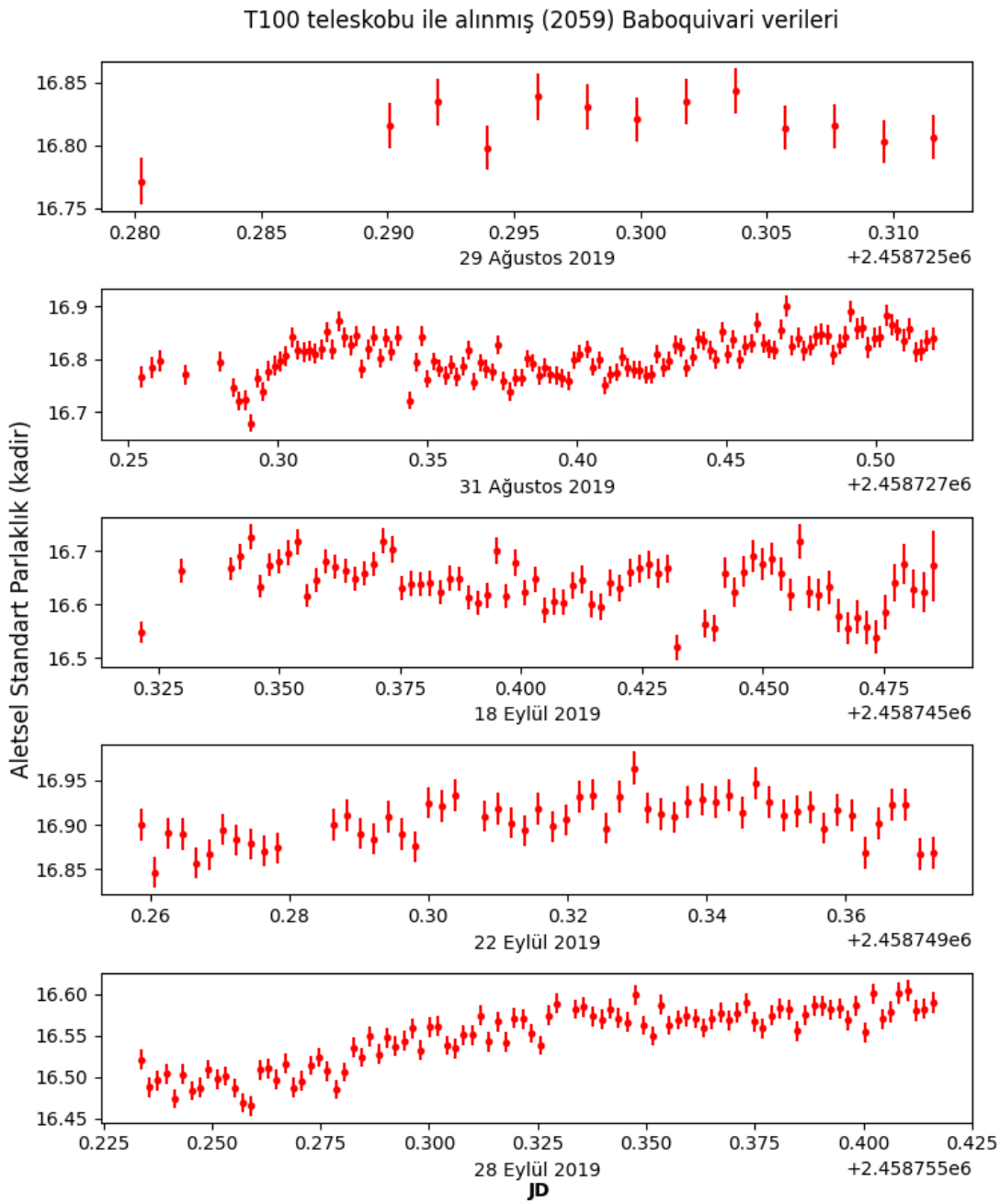
Zellner, B. 1979. "Asteroid taxonomy and the distribution of the compositional types." *Asteroids*. Ed. by T. Gehrels and M. S. Matthews, pp. 783–806.

Zellner, B., Leake, M., Lebertre, T., and Dollfus, A. 1977. "Polarimetry of Meteorites and the Asteroid Albedo Scale." *Lunar and Planetary Science Conference*. Vol. 8. Lunar and Planetary Science Conference, p. 1041.

Zellner, B., Tholen, D. J., and Tedesco, E. F. 1985. The eight-color asteroid survey: Results for 589 minor planets. *Icarus*, 61.3, pp. 355–416.

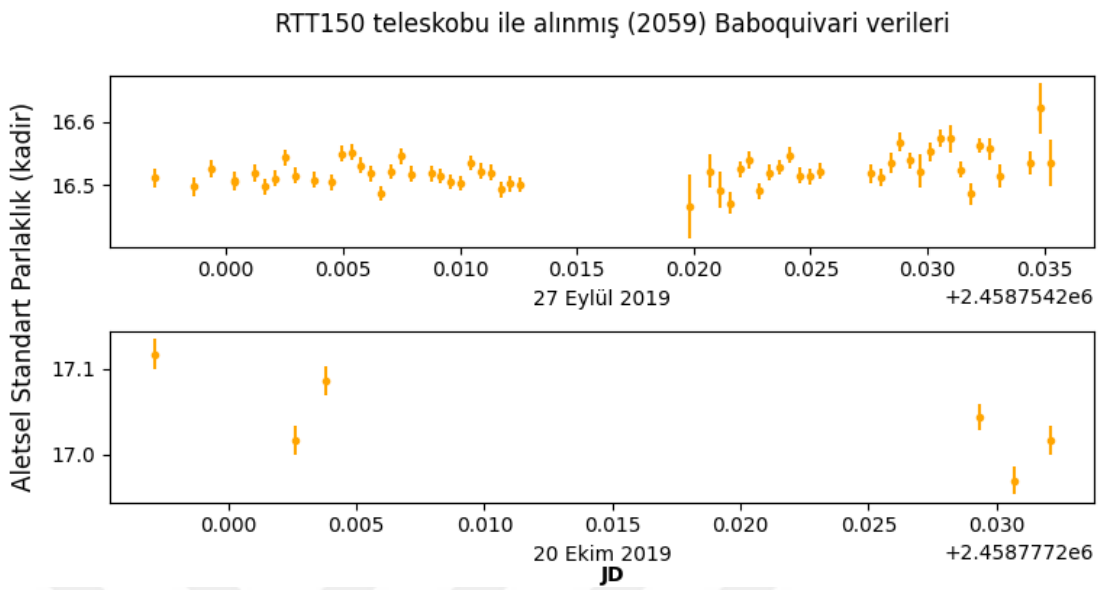
7. EKLER

EK-1. Baboquivari'nin T100 Teleskobu ile Alınan Fotometrik Verileri



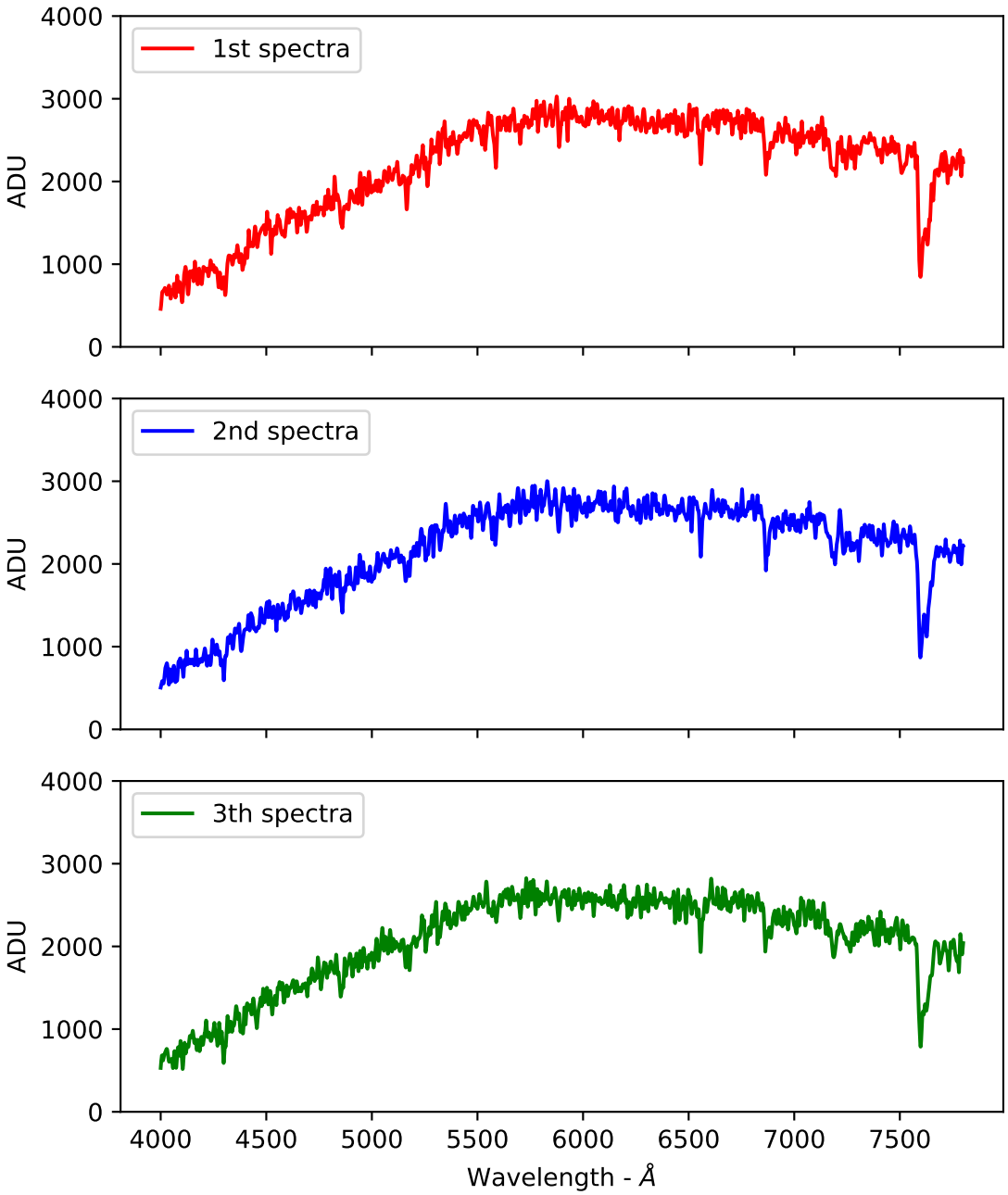
Şekil 7.1. Baboquivari asteroidinin T100 teleskobu ile 5 farklı gecede alınmış fotometrik verileri

EK-2. Baboquivari'nin RTT150 Teleskobu ile Alınan Fotometrik Verileri



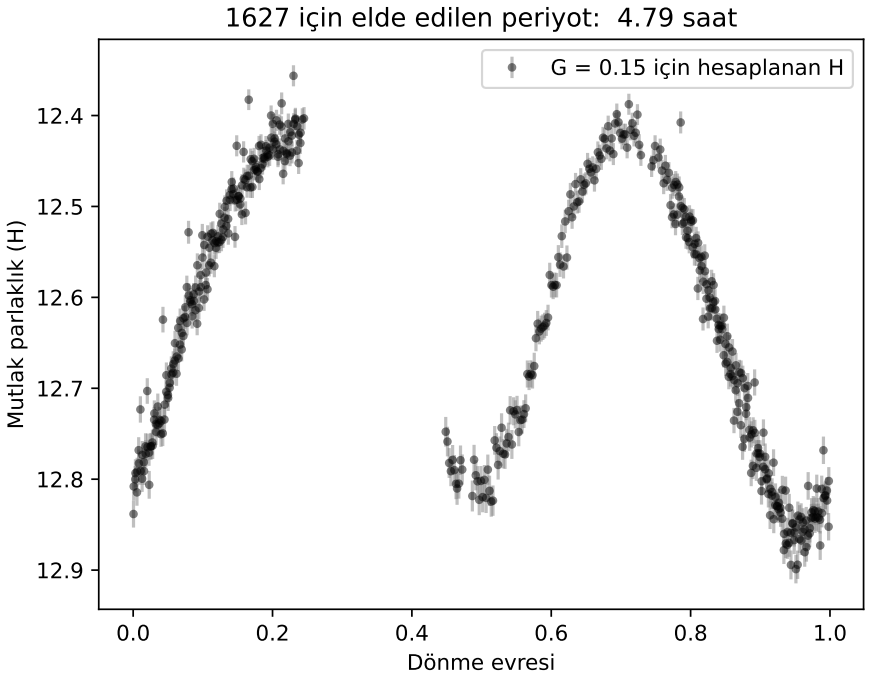
Şekil 7.2. Baboquivari asteroidinin RTT150 teleskobu ile 2 farklı gecede alınmış fotometrik verileri

EK-3. Baboquivari'nin RTT150 Teleskobu ile Alınan Tayfları



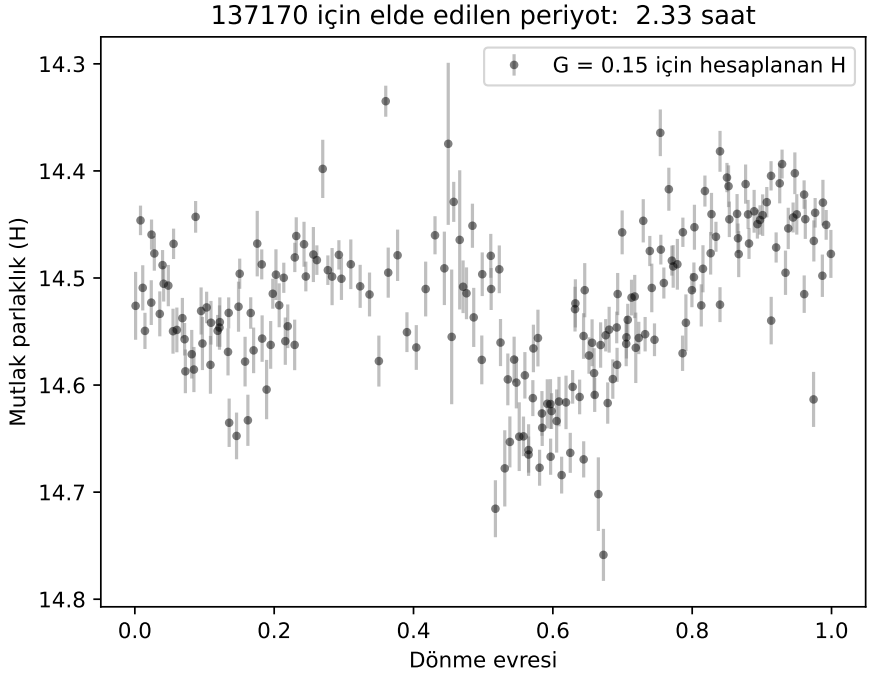
Şekil 7.3. Baboquivari asteroidinin RTT150 teleskobu ile ardışık olarak alınmış tayfları. Asterodin tayfsal analizi bu üç tayfın medyanı alınarak gerçekleştirilmiştir (Erece et al. 2023)

EK-4. T100 Teleskobu ile Elde Edilen ve *PhoPS* Yazılımı Kullanılarak Oluşturulan YYA'ların Işık Eğrileri

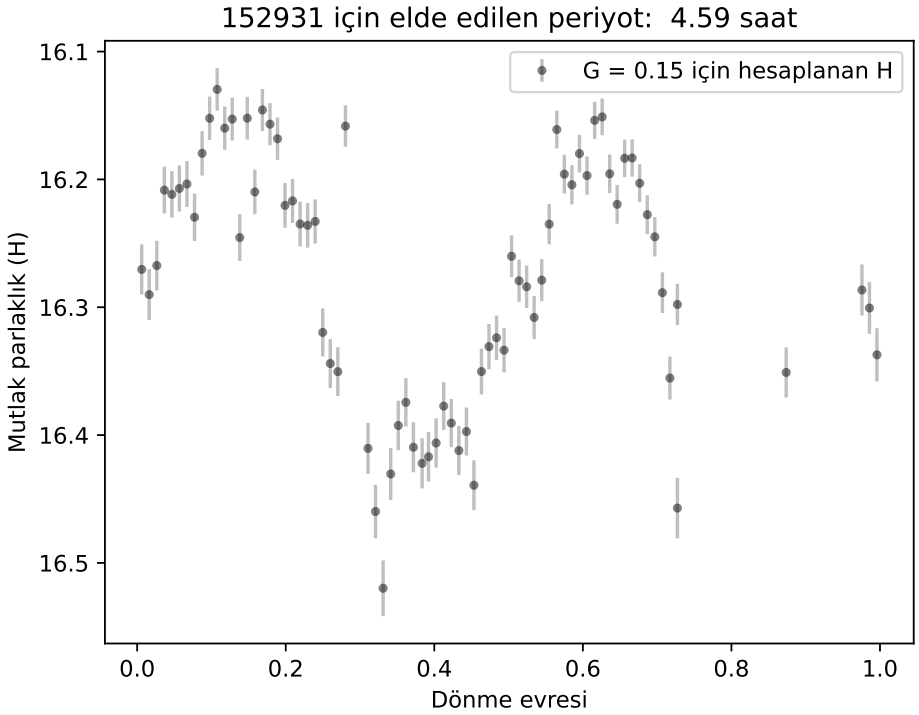


w

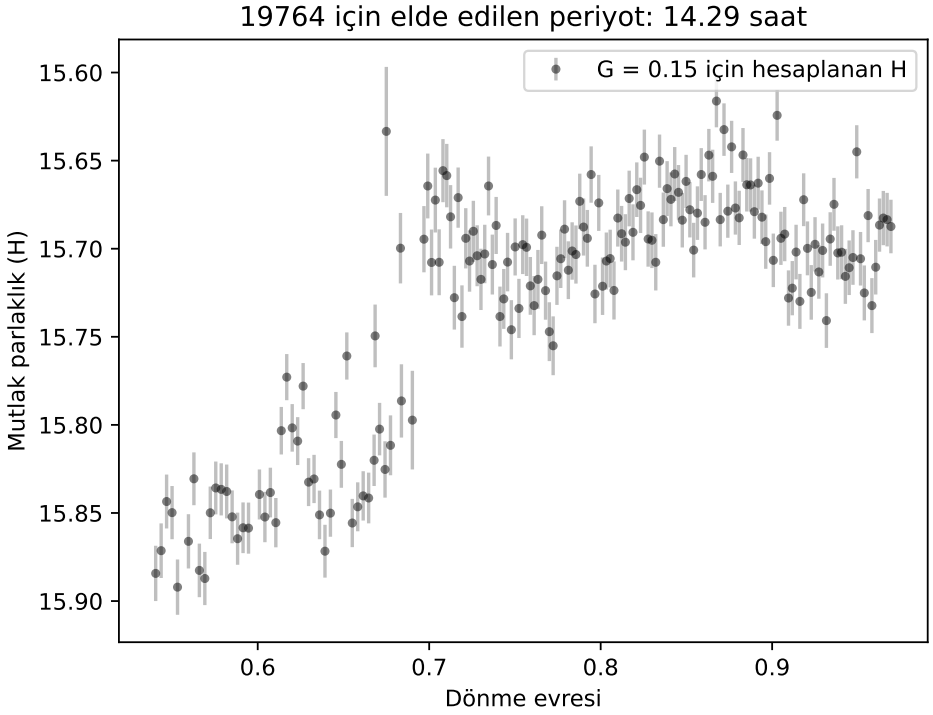
Şekil 7.4. (1627) Ivar asteroidinin T100 teleskobu ile V-bandında elde edilmiş ışık eğrisi



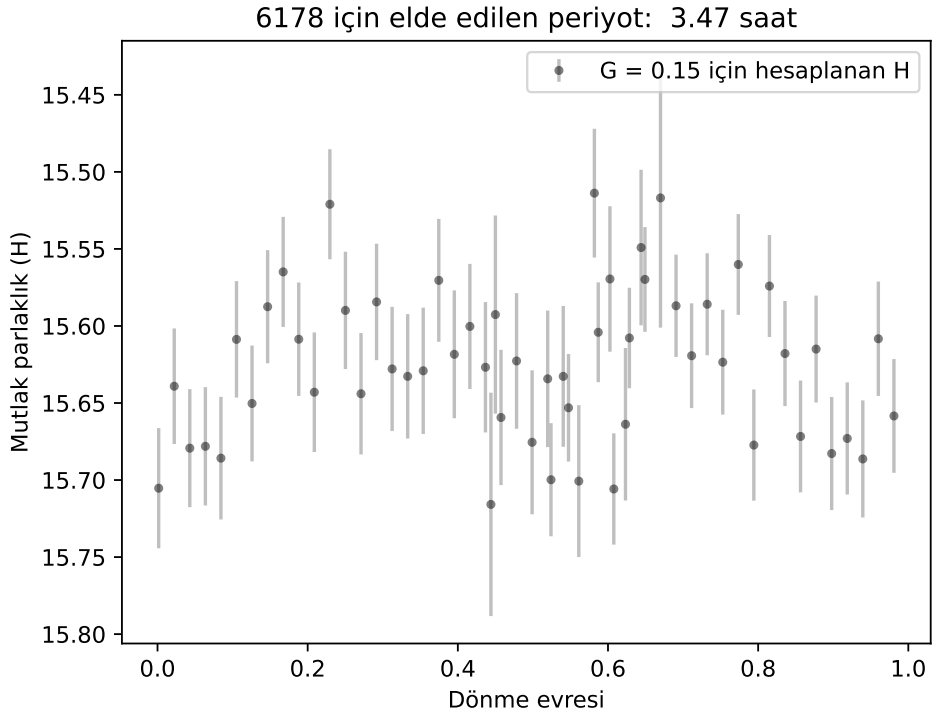
Şekil 7.5. 137170 asteroidinin T100 teleskobu ile V-bandında elde edilmiş ışık eğrisi



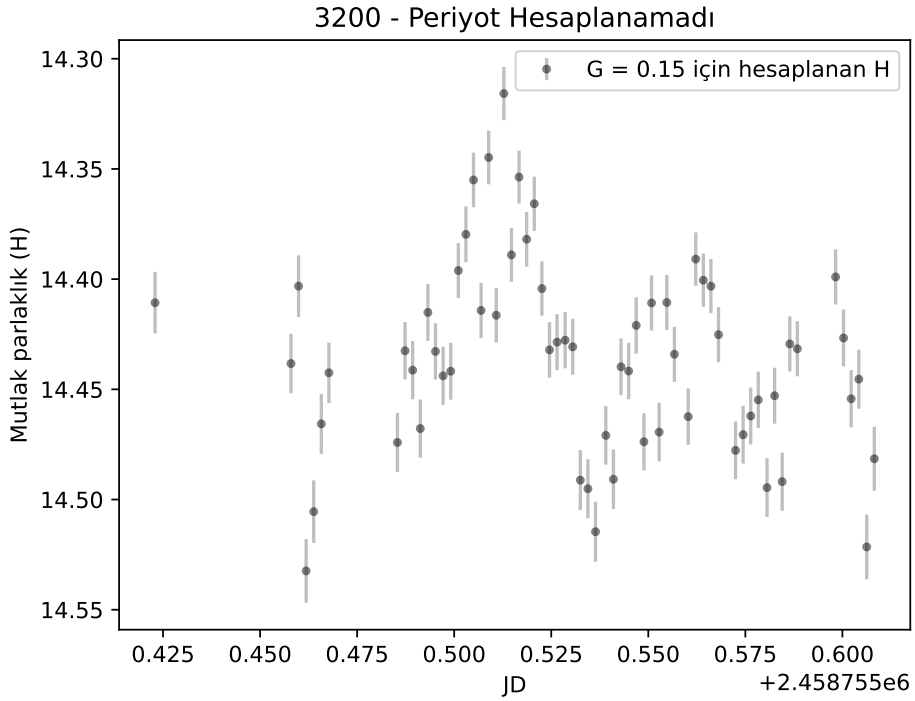
Şekil 7.6. 152931 asteroidinin T100 teleskobu ile V-bandında elde edilmiş ışık eğrisi



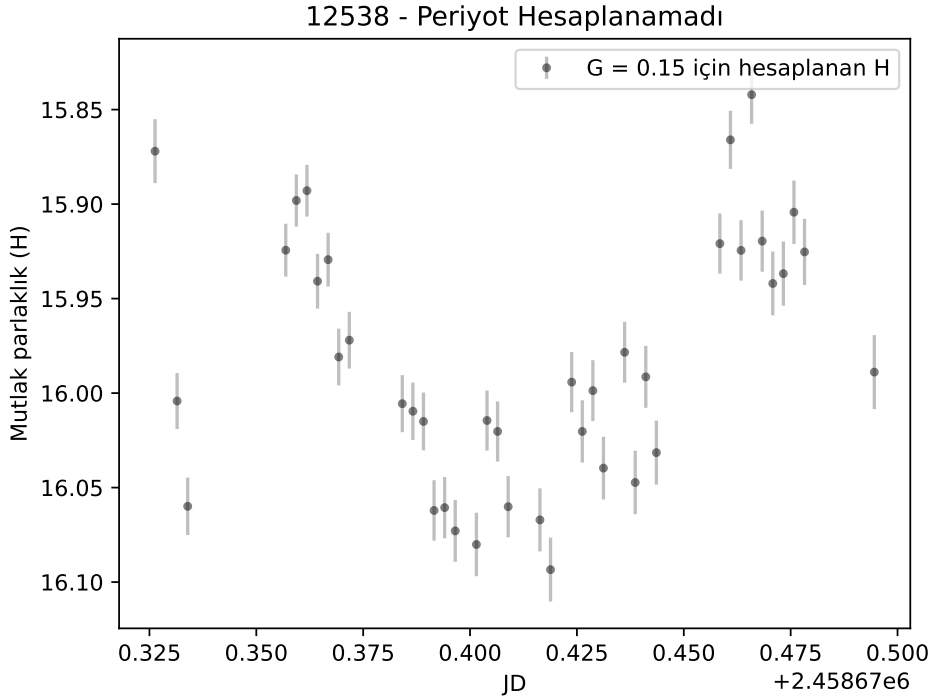
Şekil 7.7. 19764 asteroidinin T100 teleskobu ile V-bandında elde edilmiş ışık eğrisi



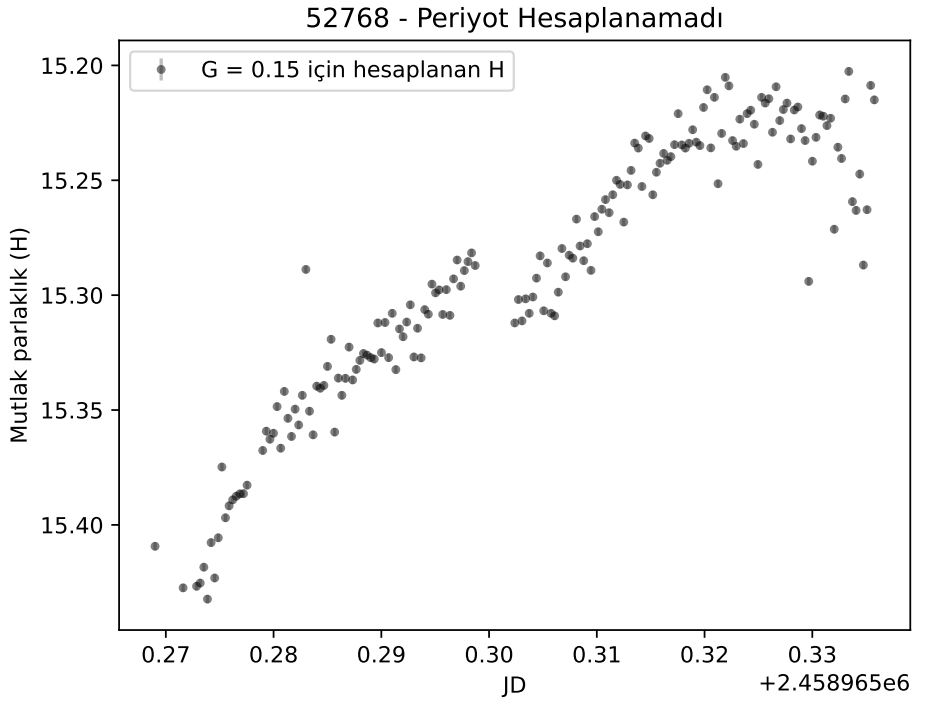
Şekil 7.8. 6178 asteroidinin T100 teleskobu ile V-bandında elde edilmiş ışık eğrisi



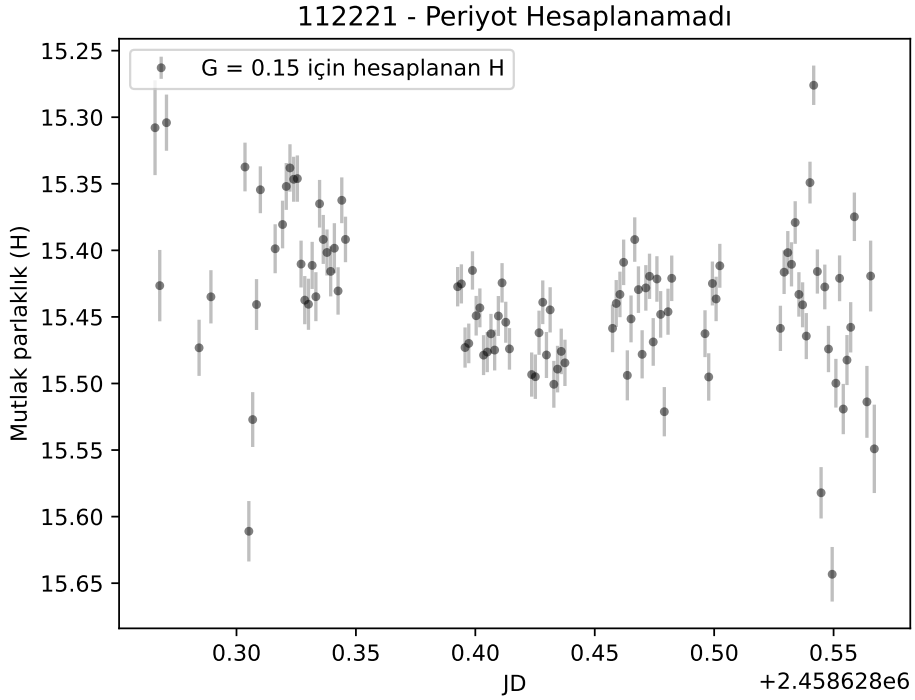
Şekil 7.9. (3200) Phaethon asteroidinin T100 teleskobu ile V-bandında elde edilmiş ışık eğrisi



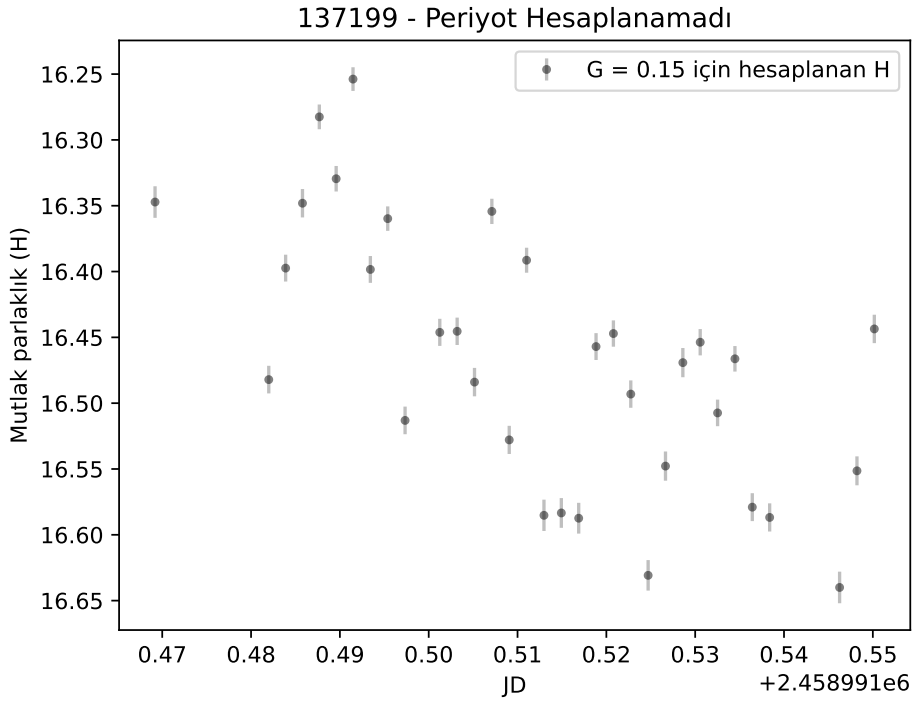
Şekil 7.10. 12538 asteroidinin T100 teleskobu ile V-bandında elde edilmiş ışık eğrisi



Şekil 7.11. 52768 asteroidinin T100 teleskobu ile R-bandında elde edilmiş ışık eğrisi



Şekil 7.12. 112221 asteroidinin T100 teleskobu ile V-bandında elde edilmiş ışık eğrisi



Şekil 7.13. 137199 asteroidinin T100 teleskobu ile R-bandında elde edilmiş ışık eğrisi

EK-5. Dinamik Analiz Sonrasında Tayf Türlerine ve Sonlanma Durumlarına Göre Elde Edilen Asteroit Sayıları

		Tayf Sınıfları ve Alt Türleri																				
		S						Q	X	C			V	L		U	O	K	T	D	A	.na
		S	Sq	Sr	Sk	Sl	Sa			C	Cb	B		L	Ld							
	Toplam sayı	52	28	9	5	4	2	14	13	7	2	2	9	3	2	3	3	3	2	2	1	891
İleri yönlü	YYA olarak sonlanan	41	22	8	4	4	2	14	12	6	2	2	8	3	2	1	3	3	1	1	0	712
	YYA bölgesinden ayrılan	11	6	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	2	0	0	1	1	1	179
Geri yönlü	YYA olarak sonlanan	43	24	8	5	4	2	13	11	5	2	2	8	3	2	3	3	2	1	1	0	820
	YYA bölgesinden ayrılan	9	4	1	0	0	0	1	2	2	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	237
	$\delta a > 0$ AB	27	10	3	2	1	1	11	6	4	1	1	5	2	0	2	3	1	1	0	0	434
	$\delta a < 0$ AB	25	18	6	3	3	1	3	7	3	1	1	4	1	2	1	0	2	1	2	1	457
	$\delta a > 1$ AB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24
	$\delta a < -1$ AB	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	21
	$\delta a > 3$ AB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19
	$\delta a < -3$ AB	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	17

EK-6. Yörünge Benzerliği Elde Edilen YYA İkilileri. (*) ile belirtilen cisimler $H > 18^m$ olan cisimlerdir

Tayf türü	Cisim1	Cisim2	D-kriteri	δC_0	δC_1	δC_2
S	152964	189040*	0.62036789	0.012585	0.00885438	0.00773449
S	10115	13651	0.46261127	0.0521811	0.00518869	0.00432825
S	10115	171839*	0.62043032	0.116474	0.00658168	0.00193904
S	12923	136795*	0.86907524	0.0627726	0.00864758	0.00695464
S	12923	236716	0.34669665	0.049976	0.00239674	0.00682083
S	12923	455213*	0.69606255	0.0707329	0.00388254	0.00657217
S	12538	100926	0.82572556	0.0878809	0.00229942	0.00081931
S	12538	303174	0.78727258	0.205422	0.00340769	0.00189961
S	18106	87311	1.11098574	0.219618	0.00927448	0.000587522
S	18106	143381	0.55845668	0.0237776	0.00181918	0.00139607
S	18106	244670*	1.05554597	0.162568	0.00202188	0.0097177
S	4487	10115	0.86875485	0.223056	0.00721594	0.00231683
S	4487	162038	0.59259785	0.0523512	0.0031691	0.00464362
S	719	20790	1.0474503	0.0159422	0.00393454	0.00568308
S	719	35432*	1.04976092	0.0205182	0.00616747	0.00117059
S	719	100756	1.07673892	0.0622945	0.00778489	0.00161293
S	100926	303174	0.52614724	0.117541	0.00110827	0.0010803
S	6047	85709	0.99865426	0.0798709	0.00754577	0.00966291
S	162781	206378*	0.84676643	0.110157	0.00244719	0.00367808
S	162781	2000 KL33*	0.89344387	0.0243132	0.00947302	0.00153858
S	3102	5626	0.57544932	0.00933063	0.00892949	0.00209614
S	3102	2002 BA1*	0.88729053	0.0202816	0.00808111	0.00343295
S	19356	20790	0.50731151	0.0348271	0.00960301	0.00122133
S	19356	200840	0.23916947	0.0326461	0.00142235	0.00082614
S	19356	330825	1.10874108	0.0148785	0.000942654	0.00592817
S	18882	357022*	0.44827832	0.185022	0.00135556	0.00628083
S	7822	54686	0.31630145	0.327837	0.000291239	0.00968652
S	89355	152978*	0.65850252	0.300785	0.0047724	0.00926956
S	13651	171839*	0.58965866	0.064293	0.00139299	0.00238921
S	13651	343098*	0.61360919	0.129558	0.00990055	0.00350072
S	13651	612199*	0.50085413	0.0503764	0.00555881	0.00535179
S	5626	162781	0.67631903	0.00653272	0.00405937	0.00997889
S	5626	206378*	0.42455077	0.103624	0.00650655	0.00630081
S	5626	2002 BA1*	0.83948967	0.0296122	0.000848381	0.00133681
S	3122	2014 YM9*	1.11464246	0.0397115	0.00129421	0.00912743
S	143381	244670*	0.96857024	0.186345	0.000202707	0.00832163
S	6063	293054*	0.70411732	0.0551114	0.0096809	0.00290087
S	68216	343098*	0.59315278	0.138462	0.00889564	0.00732714

S	1685	3102	0.7157753	0.266268	0.00764545	0.00719894
S	1685	5626	0.46646448	0.275598	0.00128403	0.00929508
S	1685	162781	0.82397472	0.282131	0.0053434	0.000683803
S	1685	206378*	0.39804559	0.171974	0.00779059	0.00299427
S	20790	200840	0.69085134	0.0674732	0.00818067	0.00204747
S	20790	330825	0.92036881	0.0199487	0.00866036	0.00470684
S	1620	4487	0.82598719	0.22488	0.000948611	0.0040181
S	1620	10115	0.15786228	0.00182412	0.00816455	0.00170128
S	1620	11500*	0.59698735	0.123318	0.00520665	0.00791167
S	1620	162038	0.43304565	0.172529	0.00222049	0.00866173
S	53435	99248	0.69084067	0.102946	0.00457456	0.00298572
S	7480	11284*	0.55155843	0.0630857	0.00986462	0.00789905
S	7480	39565*	0.33954441	0.0288408	0.00674493	0.00686062
S	7480	162911*	0.66124544	0.192671	0.00723768	0.00800102
S	200840	330825	1.12704032	0.0475246	0.000479691	0.00675431
S	236716	455213*	0.81382235	0.0207569	0.0014858	0.000248664
S	1627	163692*	0.23406926	0.118666	0.00620319	0.00468065
S	1627	333578*	0.45666387	0.0989569	0.00166674	0.00647028
S	96590	333578*	0.71140372	0.465844	0.00525082	0.00794853
S	87311	99248	1.05186285	0.0930604	0.0072868	0.00823154
S	87311	143381	1.06222129	0.243395	0.0074553	0.00198359
S	8013	162781	0.78031405	0.00529653	0.00620147	0.00126472
S	8013	206378*	0.78860922	0.10486	0.00375428	0.00241336
S	8013	391033*	0.23464825	0.0180568	0.00862119	0.00100362
S	8013	2000 KL33*	0.31915294	0.0190167	0.00327155	0.000273863
Sq	31669	136849	0.86890477	0.202672	0.00472277	0.00185961
Sq	39796	85938*	0.89918981	0.0953893	0.00385521	0.0060574
Sq	163014	413021*	0.5247894	0.123828	0.000784712	0.00542905
Sq	163014	1996 FQ3*	0.88770077	0.068135	0.00189943	0.00987998
Sq	31345	1999 FN19*	0.79630447	0.110742	0.00947042	0.00026745
Sq	31346	1997 TT25*	0.74965844	0.0217496	0.00418469	0.00419128
Sq	31346	2001 JV1*	0.28924821	0.0937329	0.0068122	0.00166326
Sq	7358	20255*	0.99479485	0.0101026	0.00790412	0.00292928
Sq	7358	85938*	0.96133585	0.0849073	0.0031398	0.00589649
Sq	162011	1998 BT13*	0.68175352	0.0548854	0.00158376	0.00102006
Sq	162011	2000 WJ63*	0.22273354	0.000120417	0.00857954	0.0026333
Sq	7341	7358	0.84962259	0.0883807	0.00558289	0.00319675
Sq	7341	20255*	0.7682764	0.0782781	0.00232124	0.00612603
Sq	7341	85938*	0.82723436	0.00347343	0.00872269	0.00909324
Sq	5620	19764	0.17213398	0.0155246	0.00215273	0.0075047
Sq	5620	31346	0.26250794	0.0294504	0.000611596	0.00300114
Sq	5620	1997 TT25*	0.77821787	0.00770083	0.00479629	0.00119014
Sq	5620	2001 JV1*	0.30651844	0.123183	0.0062006	0.0046644

Sq	4503	86819	1.085486	0.131164	0.00214677	0.00908572
Sq	194386	1999 DB2*	0.64072696	0.103987	0.00988417	0.00810535
Sq	141354	163014	0.84784961	0.0570348	0.0090753	0.00299274
Sq	141354	413021*	0.91310329	0.0667933	0.00829059	0.0024363
Sq	19764	31346	0.12123044	0.044975	0.00276433	0.00450356
Sq	19764	1997 TT25*	0.74888291	0.0232254	0.00694903	0.00869484
Sq	19764	2001 JV1*	0.31485955	0.138708	0.00404787	0.0028403
Sq	8567	163014	0.71554484	0.070595	0.00301421	0.00271346
Sq	8567	413021*	0.38754596	0.0532332	0.00379892	0.00271559
Sq	8567	1996 FQ3*	0.8295661	0.00245991	0.00111477	0.00716653
Sq	8567	1998 SG2*	0.20094734	0.0439927	0.00751175	0.00312951
Sq	2063	425450*	0.87050585	0.387236	0.00785909	0.00619201
Sq	2063	523585*	0.17274537	0.0496727	0.00359558	0.00571622
Sq	2059	399774*	1.05435244	0.110845	0.00541538	0.00590497
Sr	12711	162510	0.60595882	0.11632	0.00534491	0.00254245
Sr	137062	162015*	0.77751622	0.190311	0.00181426	0.00773916
C	285263	2001 SJ262*	1.11040082	0.0738051	0.0072423	0.0012501
C	6178	16064	0.97636022	0.00431832	0.00621467	0.00152278
C	6178	234061	0.87562598	0.068225	0.00415525	0.00733497
C	6178	2001 SJ262*	1.18931446	0.0161027	0.00868025	0.00402096
C	24761	249886	0.80144016	0.0748765	0.000944377	0.0043205
C	106589	355256	1.11799153	0.167093	0.005725	0.00417924
C	16064	285263	1.16779585	0.0620207	0.00970788	0.00679383
C	16064	2001 SJ262*	0.67369283	0.0117844	0.00246558	0.00554373
C	26760	65706	0.66573884	0.066577	0.00754784	0.00110256
C	26760	234061	0.35783128	0.0729413	0.00531941	0.00581977
C	276786	2012 ER14*	0.68232918	0.0292592	0.00777827	0.00914792
Cb	3671	413123*	1.14373912	0.0801652	0.00306707	0.00870002
K	3288	283460*	0.92294166	0.0443795	0.00225055	0.00129249
Q	168378	381677*	0.66729768	0.0726993	0.00317618	0.00313336
Q	168378	410195*	0.90755902	0.0312014	0.00924991	0.00953126
Q	168378	468738*	0.29223917	0.00657156	0.00894977	0.00109312
Q	86039	2007 ED125*	0.36647399	0.0477182	0.000902311	0.0051015
Q	363790	503861*	1.02189056	0.0630384	0.0055034	0.00639009
Q	4450	86039	1.17154701	0.125181	0.00510469	0.00478116
Q	4450	2007 ED125*	1.12877009	0.172899	0.006007	0.00032034
Q	6456	380981*	0.43309018	0.123022	0.00438912	0.00447327
Q	6456	2006 JX25*	0.17779643	0.00872486	0.00525535	0.00761934
Q	276397	337866*	0.85827389	0.061679	0.00199334	0.000910867
Q	276397	2005 QX151*	0.2680485	0.0060208	0.00307606	0.00319759
Q	1862	20236	0.93927712	0.188259	0.00142974	0.000176881
Q	1862	22753	0.50197673	0.140518	0.00498142	0.00771735
Q	1862	363790	0.44333768	0.15455	0.00250497	0.00505277

Q	1862	503861*	1.14740754	0.217588	0.00800838	0.00133732
Q	20236	22753	0.6709027	0.328777	0.00355168	0.00754047
Q	20236	363790	1.06163919	0.033709	0.00393471	0.00522965
Q	20236	503861*	0.83307868	0.0293294	0.00943811	0.00116044
Q	68063	168378	0.56151391	0.0392345	0.00491211	0.00488326
Q	68063	381677*	0.95669282	0.111934	0.00173593	0.0017499
Q	68063	410195*	0.64729772	0.00803314	0.0043378	0.004648
Q	136618	152560*	0.11962392	0.0569995	0.00498881	0.000519686
Q	141484	230111*	0.31016159	0.0494065	0.00744162	0.00779958
Q	22753	504025*	1.19896867	0.421622	0.00808707	0.00871162
V	52750	348400	1.04890307	0.25147	0.00947773	0.00456437
V	7889	163696	0.85215746	0.156114	0.00940854	0.00240454
X	326732	2001 HK31*	0.84944451	0.0421068	0.00702493	0.000645632
X	53319	413192	1.30905892	0.0591218	5.16998e-05	0.00203565
X	7350	411280*	0.370891	0.238676	0.00736073	0.0073257
X	5751	2001 WH2*	0.39469992	0.0137406	0.00778322	0.00151702
X	5731	53319	1.35673972	0.0740449	0.00150109	0.000425789
X	5731	413192	0.37068358	0.133167	0.00144939	0.00160987
X	48603	194006*	0.81019077	0.168823	0.00659618	0.00150566
X	48603	2002 CS11*	0.63937567	0.0258284	0.00230556	0.00730809

ÖZ GEÇMİŞ

ORHAN ERECE

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora 2015 - 2023	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Uzay Bilimleri ve Teknolojileri ABD, Antalya
Yüksek Lisans 2013 - 2015	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Uzay Bilimleri ve Teknolojileri ABD, Antalya
Lisans 2007 - 2012	Ege Üniversitesi Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, İzmir

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Kıdemli Uzman 2013 - Devam Ediyor	TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi Antalya

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

1- Rommel, F. L. vd. 2023. A large topographic feature on the surface of the trans-Neptunian object (307261) 2002 MS_4 measured from stellar occultations. *Astronomy and Astrophysics*, 678, A167, A167.

2- Erece, O., Khamitov, I. M., Kaplan, M., Kilic, Y., Lee, H.-J., Kim, M.-J., Bikmaev, I. F., Gumerov, R. I. ve Irtuganov, E. N. 2023. Physical properties of the slow-rotating near-Earth asteroid (2059) Baboquivari from one apparition. *Planetary and Space Science*, 232, 105698, p. 105698.

3- Ortiz, J. L. vd. 2023. Changing material around (2060) Chiron revealed by an occultation on December 15, 2022. *Astronomy and Astrophysics*, 676, L12, p. L12.

4- Lee, Y. J. vd. 2022. Reflectivity of Venus's Dayside Disk During the 2020 Observation Campaign: Outcomes and Future Perspectives. *The Planetary Science Journal*, 3.9, p. 209.

5- Kilic, Y. vd. 2022. Occultation portal: A web-based platform for data collection and analysis of stellar occultations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 515.1, pp. 1346–1357.

6- Santos-Sanz, P. vd. 2022. Physical properties of the trans-Neptunian object (38628) Huya from a multi-chord stellar occultation. *Astronomy and Astrophysics*, 664, A130, A130.

7- Lee, H.-J. vd. 2022. Refinement of the convex shape model and tumbling spin state of (99942) Apophis using the 2020-2021 apparition data. *Astronomy and Astrophysics*, 661, L3, p. L3.

8- Reddy, V. vd. 2022. Apophis Planetary Defense Campaign. *The Planetary Science Journal*, 3.5, 123, p. 123.

9- Lee, H.-J. vd. 2020. Shape model and spin state of non-principal axis rotator (5247) Krylov. *Astronomy and Astrophysics*, 635, A137, A137.

10- Wyrzykowski, Ł. vd. 2020. Full orbital solution for the binary system in the northern Galactic disc microlensing event Gaia16aye. *Astronomy and Astrophysics*, 633, A98, A98.

11- Devogèle, M. vd. 2017. Shape and spin determination of Barbarian asteroids. *Astronomy and Astrophysics*, 607, A119, A119.

12- Ortiz, J. L. vd. 2017. The size, shape, density and ring of the dwarf planet Haumea from a stellar occultation. *Nature*, 550.7675, pp. 219–223.

13- Kaplan, M., Erece, O., Aslan, G. ve Eker, Z. 2016. Dynamical analyses on the transitivity from JFC and Centaur regions to NEAs with Tisserand parameters from 2 to 3. *Advances in Space Research*, 58.11, pp. 2407–2415.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

1- Ortiz, J. L. vd. 2023. "Chiron Nos Sorprende Una Vez MÁS. Resultados de Una OCULTACIÓN ESTELAR EL 15 DE Diciembre de 2022." *Seventh edition of the Spanish Meeting of Planetary Sciences and Exploration of the Solar System (7th CPESS*, 80549, p. 80549.

2- Lee, Y. J. vd. 2023. "Reflectivity of Venus's Dayside Disk During the 2020 Observation Campaign: Outcomes and Future Perspectives". *LPI Contributions*. Vol. 2807. LPI Contributions, 8026, p. 8026.

3- Lee, H.-J. vd. 2022. "Observation Campaign of (99942) Apophis in the 2021 Apparition". *Apophis T-7 Years: Knowledge Opportunities for the Science of Planetary Defense*. Vol. 2681. LPI Contributions, 2015, p. 2015.

4- Lee, H.-J. vd. 2019. "The Non-Principal Axis rotation of (5247) Krylov". *EPSC-DPS Joint Meeting 2019*. Vol. 2019, EPSC-DPS2019-1294, EPSC-DPS2019–1294.

5- Lee, H.-J. vd. 2018. "Spin State of (5247) Krylov". *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #50*. Vol. 50. AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts, 414.10, p. 414.10.

6- Kılıç, Y., Erece, O. ve Kaplan, M. 2018. "Astrometry with A-Track Using Gaia DR1 Catalogue". *Astrometry and Astrophysics in the Gaia Sky*. Ed. by A. Recio-Blanco, P. de Laverny, A. G. A. Brown ve T. Prusti. Vol. 330, pp. 94–95.

7- Eker, Z., Birlan, M., Kaplan, M., Erece, O., Aslan, G., Popescu, M. ve Nedelcu, A. 2014. "Astrometry and Photometry of Karin Asteroid Family Members". *Gaia-FUN-SSO-3*, p. 81.

8- Erece, O., Eker, Z., Kaplan, M., Aslan, G. ve Birlan, M. 2014. "Turkish Facilities to meet Gaia Solar System TOO Observations". *Gaia-FUN-SSO-3*, p. 85.

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

1- Erece, O., Koçak, M., Eryılmaz Kılıç, S., Esenoğlu, H. ve Kırbıyık, H. 2020. TUG T100 Teleskobu ile GAIA Gözlemleri. *Turkish Journal of Astronomy and Astrophysics*, 1.1, pp. 107–108.

2- Esenoğlu, H. H. vd. 2020. TUG Teleskopları Gözlem Performansı. *Turkish Journal of Astronomy and Astrophysics*, 1.1, pp. 109–111.

3- Özkan, M. T. vd. 2020. TUG Teleskoplarının ve Gözlem Projelerinin Etkinliklerine İlişkin Değerlendirmeler. *Turkish Journal of Astronomy and Astrophysics*, 1.2, pp. 761–763.

Diğer Uluslararası Yayınlar

1- Guver, T., Erece, O., Kalemci, E., Eksi, E. G. K. Y. ve Kirbiyik, H. 2014. Optical observations of J1023+0038. *The Astronomer's Telegram*, 6162, p. 1.

2- Sonbas, E., Avdan, H., Dolek, F., Guver, T., Gogus, E., Erece, O. ve Kirbiyik, H. 2014. GRB 140713A: T100 observations. *GRB Coordinates Network*, 16583, p. 1.

3- Sonbas, E., Basturk, O., Guver, T., Gogus, E., Eryilmaz, S., Erece, O. ve Kirbiyik, H. 2015. GRB 150910A: T100 observations. *GRB Coordinates Network*, 18314, p. 1.

4- Sonbas, E., Dolek, F., Guver, T., Gogus, E., Erece, O., Camurdan, M., Camurdan, D. Z. ve Kirbiyik, H. 2014. GRB 140629A: T100 observations. *GRB Coordinates Network*, 16486, p. 1.

5- Sonbas, E., Guver, T., de Pasquale, M., Gogus, E., Erece, O., Kocak, M., Kirbiyik, H. ve Esenoglu, H. 2017. GRB 170202A: T100 observations. *GRB Coordinates Network*, 20591, p. 1.

6- Sonbas, E., Guver, T., Gogus, E., Erece, O., Kocak, M., Eryilmaz, S. ve Kirbiyik, H. 2015. GRB 151027A: T100 observations. *GRB Coordinates Network*, 18518, p. 1.

7- Sonbas, E., Guver, T., Gogus, E., Erece, O., Kocak, M. ve Kaplan, M. 2013. GRB 131128A: T100 observations. *GRB Coordinates Network*, 15540, p. 1.

8- Sonbas, E., Guver, T., Temiz, U., Dolek, F., Gogus, E., Erece, O. ve Basturk, O. 2014. GRB 140518A: T100 observations. *GRB Coordinates Network*, 16309, p. 1.

9- Sonbas, E., Guver, T., Temiz, U., Gogus, E., Kocak, M., Erece, O. ve Eker, Z. 2014. GRB 140206A: T100 observations. *GRB Coordinates Network*, 15797, p. 1.