

T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**YER İLE EŞ-YÖRÜNGELERE SAHİP CİSİMLERİN YÖRÜNGE  
DİNAMİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Sergen CENGİZ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ  
ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**EKİM 2019**

**ANTALYA**

T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**YER İLE EŞ-YÖRÜNGELERE SAHİP CİSİMLERİN YÖRÜNGE  
DİNAMİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Sergen CENGİZ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ  
ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**EKİM 2019**

**ANTALYA**

**T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YER İLE EŞ-YÖRÜNGELERE SAHİP CİSİMLERİN YÖRÜNGE  
DİNAMİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Sergen CENGİZ**

**UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ**

**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Bu tez TÜBİTAK tarafından 118F025 nolu proje ile desteklenmiştir.**

**EKİM 2019**

T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YER İLE EŞ-YÖRÜNGELERE SAHİP CİSİMLERİN YÖRÜNGE  
DİNAMİKLERİNİN İNCELENMESİ

Sergen CENGİZ  
UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ  
ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 25.10./2019... tarihinde jüri tarafından ~~Oybirliği~~ Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Murat KAPLAN (Danışman)  
Prof. Dr. Zeki EKER  
Doç. Dr. Hasan Hüseyin ESENOĞLU

## ÖZET

### YER İLE EŞ-YÖRÜNGELERE SAHİP CİSİMLERİN YÖRÜNGE DİNAMİKLERİNİN İNCELENMESİ

Sergen CENGİZ

Yüksek Lisans, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Murat KAPLAN

Ekim 2019; 63 sayfa

Yer yakını bölgelerde bulunan yörüngeler arasında son yıllarda en çok dikkat çeken konulardan biri eş yörüngelerdir (co-orbital).Günümüzde teknolojik gelişmeler sayesinde bu yörüngelerdeki cisimleri gözlemleyebiliyoruz. Bunun yanı sıra geleceğe veya geçmişe dair simülasyonlar yapabiliyoruz.

Eş yörüngelerin kapsadığı birkaç farklı özel yörünge bulunmaktadır. Bunlar At nalı (Horseshoe), İribaş (Tadpole), Yarı-uydu (Quasi-stellite) ve Truva (Trojan) yörüngelerdir. Bu yörüngeleri birbirinden ayırt edebileceğimiz iki temel faktör vardır; yarı büyük eksen ve ortalama boylam değerleri. Tez kapsamında bu faktörleri zamanda ileriye doğru hesaplayıp grafik olarak elde ettik.Bu faktörlere, rölatif konum ve üretilen klon yörüngeler de eklendi. Ayrıca eş yörüngelerin kararlılıkları son yıllarda oldukça önem kazanmıştır ve eş yörünge kararlılıkları hakkındaki çalışmalar uzun zamandan beri sürdürülmektedir.

Bu tez çalışmasında, öncelikli olarak Yer ile eş yörünge hareketi yapan cisimleri tespit ettik.Seçilen cisimlerin yörünge elemanları için aralıkları belirledik.Eş yörüngelerde dolanan cisimlerin yörünge elemanlarını yakın zaman aralıkları için analiz ettik. Bu cisimler için kapsamlı kararlılık haritaları elde ettik ve bu haritaları analiz ettik.

**ANAHTAR KELİMELER:** Asteroid, Eş yörüngeler, Yörünge dinamiği, Yörünge kararlılığı, Yer Yakını Yörüngeler

**JÜRİ:** Dr. Öğr. Üyesi Murat KAPLAN

Prof. Dr. Zeki EKER

Doç. Dr. Hasan Hüseyin ESENOĞLU

**ABSTRACT**  
**INVESTIGATION OF ORBITAL DYNAMICS OF THE EARTH CO-ORBITAL**  
**OBJECTS**

**Sergen CENGİZ**

**MSc Thesis in SPACE SCIENCE AND TECHNOLOGIES**

**Supervisor: Asst.Prof.Dr. Murat KAPLAN**

**October 2019; 63 pages**

Co-orbitals are one of the most interesting subjects in the recent years among the orbits located near the Earth. Today, thanks to technological developments, we can observe the objects in these orbits. We can also simulate the future or the past.

There are several special orbits covered by co-orbitals. These are the Horseshoe, Tadpole, Quasi-satellite and Trojan orbits. There are two main factors that we can discriminate between these trajectories; semi-major axis and average longitude values. Within the scope of the thesis, we calculated these factors forward in time and obtained them graphically. To these factors, relative position and generated clone trajectories were also added. In addition, the stability of the co-orbits has gained considerable importance in recent years and studies on the co-orbital stability have been ongoing for a long time.

In this thesis, we have determined the objects that make the same orbital motion with the Earth. We have determined the intervals for the orbital elements of the selected objects. We have analyzed the orbital elements of bodies orbiting co-orbits for near time intervals. We obtained comprehensive stability maps for these objects and analyzed them.

**KEYWORDS:** Asteroid, Co-orbits, Near Earth orbits, Orbital dynamics, Stability of orbits,

**COMMITTEE:** Asst. Prof. Dr. Murat KAPLAN

Prof. Dr. Zeki EKER

Assoc. Prof. Dr. Hasan Hüseyin ESENOĞLU

## ÖNSÖZ

Bu tez kapsamındaki konuyu seçmemde bana yol gösteren ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Murat KAPLAN'a teşekkür ederim. Lisans ve yüksek lisans öğrenimim boyunca gerek manevi gerek bilgi destekleri ile yanımda olan dostlarıma çok teşekkür ederim.

Benden maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, her daim cesaretimi ve aklımı toplamamda yardımcı ve yanımda olan sevgili ablam Neslihan CENGİZ'e çok teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemi sağlayan, her türlü desteği veren anne ve babama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
AKADEMİK BEYAN.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
1.GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK TARAMASI .....	4
2.1. İki Cisim Problemi.....	4
2.2. Kepler Yasaları ve Yörünge Elemanları.....	4
2.2.1. Kepler yasaları.....	4
2.2.2. Kepler yörünge elemanları.....	5
2.3. Üç Cisim Problemi.....	6
2.3.1. Sınırlı üç cisim problemi.....	6
2.3.2. Hill Küresi.....	7
2.4. N-Cisim Problemi.....	7
2.5. Yörünge rezonansları.....	8
2.5.1. Dönme-dolanma rezonansı.....	8
2.5.2. Seküler rezonans.....	8
2.5.3. Ortalama hareket rezonansı.....	8
2.6. Kütle Çekimsel Olmayan Etkiler .....	9
2.6.1. Yarkovsky ve YORP etkileri.....	9
2.7. Kaotik Yörüngeler.....	10
2.8. Yer Yakını Eş Yörüngeler.....	11
2.8.1. Truva yörüngesi.....	13



2.8.2. Yarı-uydu yörüngesi.....	14
2.8.3. At nalı yörüngesi.....	15
3. MATERYAL VE METOT .....	17
3.1. MEGNO Kaos Ayıracı.....	19
3.2. Girdi Parametrelerinin Hazırlanması.....	20
3.3. İntegrasyon İçin Gerekli Kriterler .....	22
3.4. Yöntem .....	23
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	24
4.1. Mevcut Eş Yörünge Cisimlerinin Testleri.....	24
4.2. Yer İle Eş Yörüngede Olduğu Düşünülen Cisimler İçin Yapılan Testler.....	44
4.3. Kararlılık Analizleri Testleri.....	53
6. SONUÇLAR .....	58
7. KAYNAKLAR .....	60
ÖZGEÇMİŞ	

## AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Yer ile eş-yörüngelere sahip cisimlerin yörünge dinamiklerinin incelenmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

25/10/2019

Sergen CENGİZ



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

a	: Yarı büyük eksen
AB	: Astronomik birim
e	: Yörünge basıklığı
$F_{ij}$	: Kuvvet
G	: Evrensel çekim sabiti
H	: Mutlak parlaklık
i	: Yörünge eğimi
MA	: Ortalama anomali
M	: Güneş'in kütlesi
m	: Yer'in kütlesi
L	: Lagrange noktası
Q	: Enöte mesafesi
q	: Enberi mesafesi
$R_{Hill}$	: Hill yarıçapı
TA	: Gerçek anomali
t	: Zaman
T	: Periyod
$\omega$	: Enberi noktasının argümanı
$\Omega$	: Çıkış düğümünün boylamı
Y(t)	: MEGNO faktörü
$\langle Y \rangle$	: Ortalama MEGNO
$\gamma$	: Lyapunov göstergesi
$\frac{\delta'(s)}{\delta(s)}$	: Ayırma vektörü oranı
$\lambda$	: Ortalama boylam

$\lambda_r, l_r$  : Rölatif ortalama boylam

### **Kısaltmalar**

FLE	: Fast Lyapunov Exponent – Hızlı Lyapunov Göstergesi
FMI	: Frequency Map Index – Frekans Haritası Dizini
IAS15	: 15th Degree Integrator – 15. Dereceden İntegratör
IEOs	: Inner Earth Objects - İç Yer Nesneleri
JPL	: Jet Propulsion Laboratory
MEGNO	: Mean Exponential Growth Factor of Nearby Orbits – Yakın Yörüngelerin Ortalama Üssel Büyüme Faktörü
MOID	: Minimum Orbit Intersection Distance - Minimum Yörünge Kesişme Uzaklığı
NASA	: National Aeronautics and Space Administration - Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
NEA	: Near Earth Asteroid - Yer Yakını Asteroidler
NEOs	: Near Earth Objects - Yer Yakını Cisimler
NEO	: Near Earth Orbit - Yer Yakını Yörünge
PHO	: Potential Hazardous Object - Potansiyel Tehlikeli Cisim
PHA	: Potential Hazardous Asteroid - Potansiyel Tehlikeli Asteroid
RAI	: Realized Alignment Index – Gerçekleştirilmiş Hizalama Dizini
RLE	: Relative Lyapunov Exponent – Göreli Liyapunov Göstergesi
SALI	: The Smaller Alignment Index – Küçük Hizalama Dizini
TEOs	: Transient Earth Objects - Geçici Yer Yakını Cisimler
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Yer yakını asteroidler. Sırası ile soldan sağa doğru Apollo, Aten, Amor ve Atiras gruplarını göstermektedir .....	2
Şekil 2.1. Kepler yasalarının görselleştirilmiş hali .....	4
Şekil 2.2. Yörünge elemanları .....	6
Şekil 2.3. Yarkovsky ve YORP etkisinin birlikte gösterimi .....	10
Şekil 2.4. At nalı (HS), İribaş (TP) ve yarı-uydu (QS) eş yörüngelerinin dönen referans çerçevesinde temsili gösterimi .....	12
Şekil 2.5. 2002 AA29 için zaman-yarı büyük eksen grafiği.....	13
Şekil 2.6. Truva Yörüngesi .....	14
Şekil 2.7. Yarı-uydu yörüngesi .....	15
Şekil 2.8. At nalı yörüngesi .....	16
Şekil 4.1. 2010 TK7 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği.....	24
Şekil 4.2. 2010 TK7 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği.....	25
Şekil 4.3. 2004 GU9 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği.....	25
Şekil 4.4. 2004 GU9 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği.....	26
Şekil 4.5. 2006 FV35 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği.....	26
Şekil 4.6. 2006 FV35 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği.....	27
Şekil 4.7. 2013 LX28 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği.....	28
Şekil 4.8. 2013 LX28 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği.....	28
Şekil 4.9. 2014 OL339 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği.....	29
Şekil 4.10. 2014 OL339 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği.....	29
Şekil 4.11. 2015 YA asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği.....	30
Şekil 4.12. 2015 YA asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği.....	31
Şekil 4.13. 2016HO3 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği.....	31
Şekil 4.14. 2016HO3 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği.....	32
Şekil 4.15. 1986 TO asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği.....	33

Şekil 4.16. 1986 TO asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği.....	33
Şekil 4.17. 2000 PH5 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği.....	34
Şekil 4.18. 2000 PH5 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği.....	34
Şekil 4.19. 2001 GO2 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği.....	35
Şekil 4.20. 2001 GO2 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği.....	35
Şekil 4.21. 2002 AA29 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği.....	36
Şekil 4.22. 2002 AA29 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği.....	37
Şekil 4.23. 2003 YN107 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği.....	37
Şekil 4.24. 2003 YN107 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği.....	38
Şekil 4.25. 2010 SO16 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği.....	38
Şekil 4.26. 2010 SO16 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği.....	39
Şekil 4.27. 2013 BS45 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği.....	39
Şekil 4.28. 2013 BS45 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği.....	40
Şekil 4.29. 2015 SO2 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği.....	41
Şekil 4.30. 2015 SO2 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği.....	41
Şekil 4.31. 2015 XX169 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği.....	42
Şekil 4.32. 2015 XX169 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği.....	42
Şekil 4.33. 2015 YQ1 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği.....	43
Şekil 4.34. 2015 YQ1 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği.....	43
Şekil 4.35. 2005 UH6 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği.....	44
Şekil 4.36. 2005 UH6 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği.....	45
Şekil 4.37. 2016 CO246 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği.....	45
Şekil 4.38. 2016 CO246 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği.....	46
Şekil 4.39. 2017 SL16 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği.....	46
Şekil 4.40. 2017 SL16 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği.....	47
Şekil 4.41. 2017XQ60 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği.....	47

<b>Şekil 4.42.</b> 2017XQ60 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği.....	48
<b>Şekil 4.43.</b> 2018 AN2 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği.....	48
<b>Şekil 4.44.</b> 2018 AN2 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği.....	49
<b>Şekil 4.45.</b> 2018 PN22 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği.....	49
<b>Şekil 4.46.</b> 2018 PN22 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği.....	50
<b>Şekil 4.47.</b> 2018 XW2 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği.....	51
<b>Şekil 4.48.</b> 2018 XW2 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği.....	51
<b>Şekil 4.49.</b> 2019 AE3 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği.....	52
<b>Şekil 4.50.</b> 2019 AE3 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği.....	52
<b>Şekil 4.51.</b> Neredeyse-simetrik At nalı yörüngesine ait MEGNO haritası (e,i). $\omega_0=90^\circ$ , $\Omega_0=90^\circ$ , $a=0.9925$ AU, $TA=99.13^\circ$ (buradaki a ve TA değerleri 2002 AA29 asteroidine aittir).....	53
<b>Şekil 4.52.</b> Asimetrik At nalı yörüngesine ait MEGNO haritası (e,i). $\omega_0=90^\circ$ , $\Omega_0=90^\circ$ , $a=1.0022$ AU, $TA=109.19^\circ$ (buradaki a ve TA değerleri 2015 XX169 asteroidine aittir) .....	54
<b>Şekil 4.53.</b> Olağandışı At nalı yörüngesine ait MEGNO haritası (e,i). $\omega_0=90^\circ$ , $\Omega_0=90^\circ$ , $a=1.0035$ AU, $TA=133.37^\circ$ (buradaki a ve TA değerleri 2015 YQ1 asteroidine aittir).....	55
<b>Şekil 4.54.</b> Yarı-uydu yörüngesine ait ait MEGNO haritası(e,i). $\omega_0=90^\circ$ , $\Omega_0=90^\circ$ , $a=1.0014$ AU, $TA=275.65^\circ$ (buradaki a ve TA değerleri 2004 GU9 asteroidine aittir).....	56
<b>Şekil 4.55.</b> Truva yörüngesine ait ait MEGNO haritası(e,i). $\omega_0=90^\circ$ , $\Omega_0=90^\circ$ , $a=0.999$ AU, $TA=145.97^\circ$ (buradaki a ve TA değerleri 2010 TK7 asteroidine aittir) .....	57

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge.3.1.</b> Yer ile eş yörüngeye sahip asteroidlere ait yörünge elemanlarının aralıkları .....	18
<b>Çizelge.3.2.</b> Yer ile eş yörüngeye sahip asteroidlere ait $a$ , $e$ , $i$ , $\omega$ ve $\Omega$ değerleri. ( $a$ : yarı büyük eksen, $e$ : basıklık, $i$ : eğim, $\Omega$ : çıkış düğümünün boylamı, $\omega$ : enberi noktasının düğümler çizgisinden açısız uzaklığı) .....	20

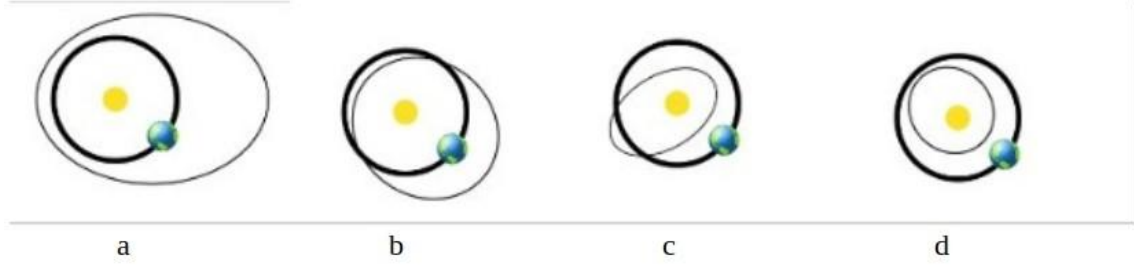


## 1. GİRİŞ

Uzay çalışmalarındaki teknolojik olanaklar geliştikçe, insanlık uzayda kendine yeni kaynaklar ve yaşanabilir alanlar aramaya başlamıştır. Bunun için maliyeti az olan ve Yer'e yakın bölgeler öncelikli tercih olarak göz önüne alınmıştır. Yer'e yakın bölgelerde bulunan, Yer yakını yörüngeler (NEO), adından da anlaşılacağı gibi gezegenimize yakın olduklarından uydu yerleştirme görevleri veya insanlı uzay uçuşlarına elverişli yörüngelerdir (de la Fuente Marcos ve de la Fuente Marcos 2013). Yer'e yakın bölgelerde bulunan gök cisimleri (asteroidler, meteorlar gibi.) ise bu tür çalışmalar için eşsiz bir öneme sahiptir. Bu cisimler uzun yıllardır uzay alanında popüler düşüncelerden biri olan insanlı uzay uçuşları veya görevleri için konak cisim adayları olarak incelenmektedir.

Güneş'e uzaklığı 1.3 AU'den küçük olan cisimler Yer Yakını Cisimler (NEOs) olarak adlandırılırlar. NEOs'ların büyük çoğunluğu Yer yakını asteroidlerden (NEA) oluşmaktadır. NEA'lar yörüngelerinin en beri ( $q$ ), en öte ( $Q$ ) ve yarı büyük eksen ( $a$ ) uzunlukları açısından alt gruplara ayrılırlar (Anonim 1). Ayrıca NEOs'lar içerisinde PHA (Potentially Hazardous Asteroid, Potansiyel Tehlikeli Asteroid) olarak adlandırılan bir asteroid grubu vardır. PHA olarak isimlendirilen bu cisimler, 0.05 AB veya daha az bir Dünya ile Minimum Kesişim Mesafesine (MOID) sahip ve mutlak parlaklıkları ( $H$ ) 22.0'dan daha az olan cisimlerdir. PHA'lar, Yer'e yakın geçişler yapabilirle ayrıca bu geçişler sırasında Yer'e çarpma riskleri de vardır. Ocak 2018 itibarıyla 157'si çapının bir kilometreden büyük olduğu tahmin edilen toplamda 1885 tane bilinen PHA cismi vardır.

Bu gruplar Apollo, Aten, Amor ve Atiras olarak adlandırılır (Şekil 1.1). Apollo grubu ismini 1930'lu yıllarda Alman gökbilimci Karl Reinmuth tarafından keşfedilen 1862 Apollo asteroidinden almıştır. Apollo asteroidlerinin yarı büyük eksen uzunluğu  $a > 1$  AB ve en beri uzunluğu  $q < 1.01$  AB'dir. Aten grubu ismi Amerikalı astronom Eleanor Helin tarafından keşfedilen 2062 Aten asteroidinden alınmıştır. Aten asteroidlerinin yarı büyük eksen uzunlukları  $a < 1$  AB ve en öte uzunluğu  $Q > 0.98$  AB'dir. Amor grubu ismini 1221 Amor asteroidinden almıştır. Amor asteroidlerinin yarı büyük eksen uzunlukları  $a > 1$  AB ve en beri uzunlukları  $q > 1.01$  AB'dir. Atiras grubu, iç Yer nesnelere (IEOs) olarak bilinir ve bu asteroidlerin yörüngeleri tamamen Yer'in yörüngesi ile sınırlıdır. Diğer gruplara kıyasla NEA'ların en küçük grubudur. Atira asteroidlerinin yarı büyük eksen uzunlukları  $a < 1$  AB ve en öte uzunlukları  $Q < 0.98$  AB'dir.



**Şekil 1.1.** Yer yakını asteroidler. Sırası ile soldan sağa doğru Amor (a), Apollo (b), Aten (c) ve Atira (d) gruplarını göstermektedir

6 Ocak 2019 tarihi itibari ile NEA'ların sayısı 19.363'tür (Anonim 2). Bilinen NEA'lar arasında büyük çoğunluğu Apollo grubu oluşturmaktadır. Aralık 2018'den itibaren bilinen Apollo asteroidlerinin sayısı 10485'tir ve bunlardan 1409 tanesi numaralandırılmıştır. Apollo asteroidlerini popülasyon sayısına göre, sırası ile Amor, Aten ve Atira grupları takip etmektedir. 2019 itibari ile 7427 Amor asteroidi keşfedilmiştir. Bunlardan 1153 tanesi numaralandırılmış ve 75 tanesi isimlendirilmiştir. 2019 itibari ile 300 Aten asteroidi keşfedilmiştir. Aten asteroidlerinin mesafeleri dolayısı ile PHA olma özellikleri oldukça yüksektir. Yine 2019 itibari ile 19 Atira asteroidi keşfedilmiştir. Bunlardan 6 tanesi numaralandırılmak için yeterli hassasiyette gözleme sahiptir. Bu tez çalışması çerçevesinde ele alınan asteroidler Apollo ve Aten gruplarına aittirler.

NEOs'lerin yeni keşfedilen cisimler ile birlikte toplam sayısı zamanla değişim göstermektedir. Güneş sistemi içerisinde hem kütle çekimsel hem de kütle çekimsel olmayan etkiler sebebi ile NEOs bölgesine yeni cisimler taşınmaktadır. Ayrıca bu bölgelerde bulunan bazı cisimler yörüngelerinde bir müddet kaldıktan sonra, buldukları yörüngeleri terk edebilirler. Bu tür cisimlere geçici Yer yakını cisimler (TEOs) denir.

Güneş sistemimizde bulunan küçük cisimler üzerinde tedirginlik yaratan en önemli cisim Jüpiter'dir. Jüpiter ve diğer büyük kütleli gezegenler sayesinde asteroidler vb. cisimler Güneş sistemi içerisinde gezegenlerin etrafındaki yörüngelere girebilirler. Güneş sistemi içerisinde yer alan asteroidler Güneş sistemi dışına atılabilirler. Kütle çekimine bağlı olmayan etkiler ise, en az kütle çekimsel etkiler kadar önemlidir ve gök cisimlerinin uzun süreli yörünge evrimlerinin anlaşılmasında etkin rol oynarlar. Bu etkiler; Yarkovsky ve YORP etkileri olarak literatürde yer almaktadır (Rubincam 2000; Bottke vd. 2006). Ancak kütle çekimsel olmayan etkiler kendilerini uzun sürede gösterdikleri için kısa dönemli çalışmalarda göz ardı edilebilirler. Bu tez kapsamında yapılan çalışmada kütle çekimsel olmayan etkiler ihmal edilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında Yer yakını yörüngeler içerisinde bir alt başlık olan eş yörüngeler ve bu yörüngelerin kararlılıkları incelenecektir. Eş yörüngeler etrafında dolandıkları gezegenler ile 1:1 ortalama hareket rezonansına sahip yörüngelerdir. Böyle bir durumda gezegen ve asteroid Güneş etrafında yaklaşık aynı periyotlarda yörüngelerini tamamlarlar. Yörünge şekilleri itibari ile eş yörüngeler üç alt sınıfta

incelenirler. Bunlar at nalı, truva ve yarı-uydu yörüngeleridir. Buna ek olarak at nalı yörüngesi kendi içerisinde üç sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar neredeyse-simetrik at nalı, asimetrik at nalı ve olağandışı at nalı yörüngeleridir.

Eş yörüngeler Güneş sisteminin dinamiklerini anlama açısından önemli yörüngelerdir ve bu yörüngeler uzun sürelerden beri araştırılmaktadır (Christou 2000; Brassier vd 2004; Connors vd 2005; Domingos ve Winter 2005; Puspitarini ve Dermawan 2010). Eş yörüngeler gelecekte planlanmakta olan insanlı uzay uçuşlarında, uzay madenciliği alanında göz önünde bulundurulacak yörüngelerdendir. Buna benzer görevler için cisimlerin yörünge kararlılıkları önemli konulardan biridir. Eş yörüngelerde bulunan cisimler, yörünge kararlılıkları ele alındığında belirtilen planlar veya görevler için oldukça elverişli birer hedef haline gelmektedirler. Örneğin, bu tür yörüngeler için son yıllarda yapılan önemli çalışmalardan biri Yer ve 2013 BS45 asteroidinin yörüngelerinin benzerliği hakkında olup, bu asteroidin Yer'e yakın geçişlerinde insanlı uzay uçuşları yapılabilir sonucuna varılmıştır. (Barbee vd 2013). Literatürde buna benzer birçok örnek yer almaktadır (de la Fuente Marcos ve de la Fuente Marcos 2014,2017; Kortenkamp 2005;).

Bir asteroidin eş yörüngeden hangisine ait olduğunu belirlemek için asteroidin ortalama boylamı ile Yer'in ortalama boylamı arasındaki farka bakılır.

$$\lambda_r = \lambda_{Yer} - \lambda_{Asteroid} \quad (1.1)$$

Formül (1.1)'de  $\lambda_r$  : rölatif ortalama boylam,  $\lambda_{Earth}$  : Yer'in ortalama boylamı,  $\lambda_{Asteroid}$  : asteroidin ortalama boylamı. Yer'in ve asteroidin ortalama boylamları için gerekli formül de aşağıda yer almaktadır.

$$\lambda = \omega + \Omega + M \quad (1.2)$$

Formül (1.2)'de  $\lambda$  : ortalama boylam,  $\omega$  : enberinin argümanı,  $\Omega$  : çıkış düğümünün boylamı,  $M$  : ortalama anomalidir.

Eğer  $\lambda_r \pm 60^\circ$  civarında salınıyorsa asteroid Truva,  $\pm 180^\circ$  civarında salınıyorsa at nalı ve  $\pm 0^\circ$  civarında salınıyorsa Yarı-uydu tipi yörüngededir. Eş yörüngelerin grupları ve alt sınıfları Bölüm 2.8'de detaylandırılmıştır.

Bu tez çalışması genel anlamda, Yer ile eş yörüngede bulunan cisimlerin tespiti, bu cisimlere ait yörünge parametrelerinin elde edilmesi ve elde edilen parametreler doğrultusunda cisimlerin yörünge kararlılıklarının incelenmesinden oluşmaktadır. İlk olarak literatürde Yer ile eş yörüngelerde bulunan cisimler belirlenmiştir. Ardından bu cisimlerin yörünge elemanları kontrol edilip yazmış olduğumuz kodlar kullanılarak yörünge integrasyonları yapılmıştır. Elde ettiğimiz sonuçlar doğrultusunda yörünge elemanlarının bazıları için (a, e ve i) aralıklar belirlenmiş ve bu aralıkları için kararlılık haritaları oluşturulmuştur.

## 2. KAYNAK TARAMASI

### 2.1. İki Cisim Problemi

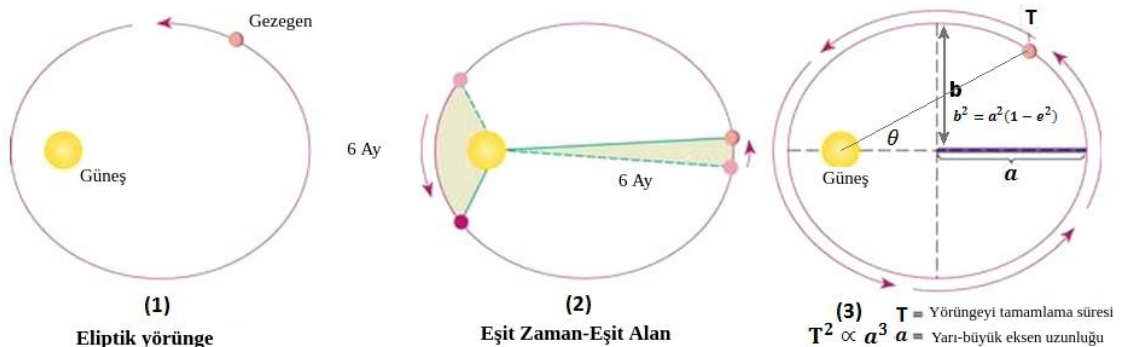
Klasik mekanikte iki cisim problemi; sadece birbirleri ile etkileşime giren iki cismin hareketini tanımlar. İki cisim problemi için, bir yıldızın ve etrafında dolanan gezegen, bir gezegen ve yörüngesinde bulunan uydu, ayrıca birbirleri etrafında dolanan iki yıldız en yaygın örnekler olarak gösterilebilir. Gök mekaniğinde iki cisim problemi genelde Güneş-Yer bazında incelenir. İki cisim probleminin özel bir hali olan Kepler Yasaları, gök cisimlerinin yörüngeleri hakkında bizlere bilgi vermektedir (Bölüm 2.2).

### 2.2. Kepler Yasaları ve Yörünge Elemanları

#### 2.2.1. Kepler yasaları

Kepler yasaları Güneş sisteminde bulunan gezegenlerin hareketini açıklamada kullanılmaktadır (Murray ve Dermott 1999). Alman astronom Johannes Kepler tarafından geliştirilen yasalar, Danimarkalı gök bilimci Tycho Brahe'nin gözlemlerine ve analizlerine dayanmaktadır. J. Kepler'in yaptığı çalışmaların sonucunda, gezegenlerin hareketleri ile ilgili ulaştığı sonuçlar aşağıda açıklamaları ile birlikte görsel olarak Şekil 2.1'de belirtilmiştir.

- 1) Tüm gezegenler odaklarından birinde Güneş bulunan eliptik bir yörüngede hareket ederler.
- 2) Herhangi bir gezegenden Güneş'e doğru çizilen bir yarıçap vektörü eşit zamanda eşit alanlar tarar.
- 3) Gezegenlerin periyotlarının kareleri, Güneş'e olan uzaklıklarının küpleri ile doğru orantılıdır.



Şekil 2.1. Kepler yasalarının örneklendirilmiş/görselleştirilmiş hali

Kepler yasaları, Sir Isaac Newton'un evrensel çekim yasası ile tanımlandığında, evrenin herhangi bir yerindeki tüm iki cisimler için geçerli olmaktadır (Murray ve Dermott 1999). Ayrıca, Newton çekim kuvveti altındaki cisimlerin yörüngelerinin, her zaman elips olması gerekmediğini, ancak konik eğriler tarafından tanımlanan

yörüngelerinde olabileceğini göstermiştir. Cisimin yörüngedeki toplam enerjisine bağlı olarak dairesel, eliptik, parabolik veya hiperbolik yörüngelerde bulunabilir. Böylece cismin enerjisi yeterli ise Güneş veya gezegen etrafında herhangi bir yörüngeye girebilir ya da yörüngeden ayrılabilir.

Kepler yasaları, doğal veya yapay uyduların, gök cisimlerinin vb. yörüngedeki hareketlerini ve davranışlarını anlamada oldukça önemli bir yere sahiptir. Bu yasalar, gök cisimleri için yörüngedeki durumlarını ifade etmekte oldukça kullanışlıdır.

Ancak Kepler yasalarını içeren hesaplamalarda gezegenlerin birbirleri üzerindeki kütle çekimsel etkileşimleri dikkate alınmaz. Bu durum hesapların kolaylaştırılması açısından önemlidir. Genel bir problem olan iki cisim probleminde cismin hareketini karşılıklı çekim kuvvetleri altında doğru bir şekilde hesaplayabilmekteyiz.

### 2.2.2. Kepler yörünge elemanları

Yörünge elemanları belirli bir yörüngeyi tanımlamak için kullanılır. Gök mekaniğinde bir yörüngeyi tanımlamada yaygın olarak altı parametre kullanılır. Bu parametreler detaylı olarak Şekil 2.2'de yer almaktadır. Gerçekte yörünge ve yörünge parametreleri kütle çekimsel etkiler ile zaman içerisinde değişmektedir.

Bir yörünge boyutunu ve şeklini tanımlamak için iki yörünge elemanı bulunmaktadır;

- 1) Basıklık ( $e$ ); elips yörünge için de denebilir. Bir elipsin daireye kıyasla ne kadar basık olduğunu belirtir.
- 2) Yarı-büyük eksen ( $a$ ); elips yörüngeler için büyük eksen uzunluğunun yarısına eşit olan değerdir.

Yörünge yönünü tanımlamak için üç yörünge elemanı bulunmaktadır;

- 1) Eğim ( $i$ ); yörünge düzlemi ile referans düzlemi arasındaki açıdır.
- 2) Çıkış düğümünün boylamı ( $\Omega$ ); referans düzlemi üzerinde, saat yönünde referans doğrultusu ile çıkış düğümü arasındaki açıdır.
- 3) Enberinin argümanı ( $\omega$ ); çıkış düğümü ile enberi noktasına arasındaki açıdır.

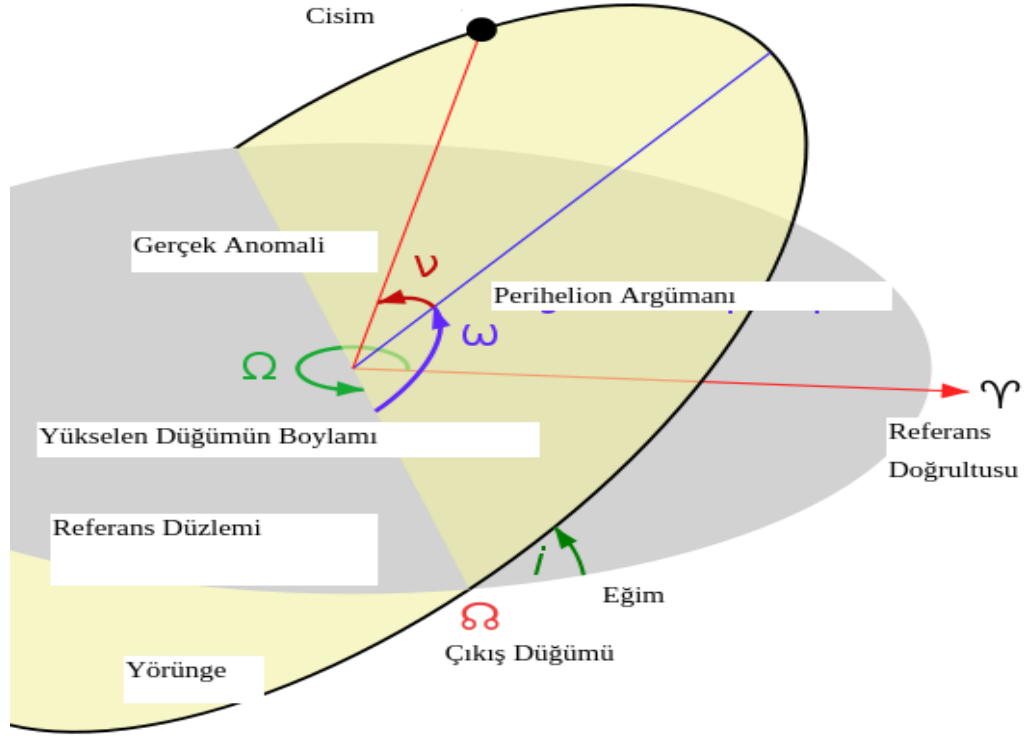
Geriyen kalan yörünge elemanı aşağıdaki gibidir;

- 2) Gerçek/Gerçek anomali ( $TA$ ); bir Kepler yörüngesi boyunca, hareket eden bir cismin konumunu tanımlayan açısal bir parametredir.

Eğim açısı olan  $i$  ile  $\omega$  ve  $\Omega$  referans koordinat sistemine göre yörünge yönünü tanımlayan Euler açıları olarak da bilinir (Curtis 2013).

Buraya kadar sözü edilen yörünge elemanlarına ek olarak, ortalama anomaliyi de verebiliriz. Ortalama anomali ( $M$ ); zamanla doğrusal olarak değişen, ancak gerçek bir

geometrik açıya karşılık gelmeyen yörünge elemanıdır. Ortalama açısal hız ile birlikte tanımlanır ve cismin yörüngesinde birim zamanda enberi noktasından ortalama açısal uzaklığını verir.



Şekil 2.2. Yörünge elemanları

### 2.3. Üç Cisim Problemi

Bir önceki bölümde bahsedildiği gibi, gök mekaniğinde iki cisim problemi en genel hali ile Güneş-Yer bazında incelenir. Bu ikili sisteme Ay'ı da dahil edersek basit bir şekilde üç cisim problemi tanımlamış oluruz. İki cisim probleminde olduğu gibi analitik bir çözümü olmasa da nümerik olarak çözülebilir. Ayrıca üç cisim problemi n-cisim probleminin özel bir halidir.

#### 2.3.1. Sınırlı üç cisim problemi

Sınırlı üç cisim probleminde iki büyük kütleli cisim etrafında bulunan kütleli cisim ihmal edilebilir üçüncü bir cismin hareketi incelenir. Üçüncü cismin kütlesi ihmal edildiğinden diğer iki büyük kütleli cisme herhangi bir kuvvet uygulamaz. Problemin çözümünde kütleli cisimler ortak kütle merkezi etrafında dairesel bir yörüngede hareket ederken, üçüncü cisim diğer iki kütleli cisim etrafında hareket eder. Sınırlı üç cisim problemi ile açıklanan konulardan biriside gezegenlerin eş yörüngeleridir. Bu konu bölüm 2.8'de detaylandırılmıştır.

### 2.3.2. Hill Küresi

J. W. Hill tarafından 1878 yılında hesaplanan ve ilk defa tanımlanan Hill küresi, astronomik bir cismin kütle çekimsel olarak baskın olduğu bölgeye verilen isimdir. Örnek olarak, Ay Yer'in Hill küresi içerisinde olduğundan Yer'in etrafında dolanır. Güneş sisteminde bir gezegenin Hill küresi içerisinde yer alan bir cisim, bulunduğu yörüngeden çıkarsa Güneş'in çekim etkisi altına girer. Böylesine bir cismin Hill küresi sınırları, kendi kütesine, ana cismin kütesine ve ana cisme olan uzaklığına bağlıdır. Güneş sistemindeki gezegenler için Hill küresi L1 ve L2 noktaları ile sınırlıdır. Bir gök cismine ait Hill küresi yarıçapı için aşağıdaki formülasyon kullanılır.

$$R_{hill} \approx a \sqrt[3]{\frac{m}{3M}} \quad (2.1)$$

Formülde yer alan  $a$ ; yarı-büyük eksen,  $M$ ; Güneş kütesi,  $m$ ; Yer'in kütesini belirtmektedir. Yer için hesaplanan Hill küresi mesafesi  $\sim 1.5$  milyon (0.01 AB) kilometredir.

Hill küresi sadece bir yaklaşımdır. Diğer kuvvetler (radyasyon basıncı veya Yarkovsky etkisi gibi) küre içerisinde bulunan cismin zaman içerisinde küre dışına çıkmasına sebep olabilirler.

### 2.4. N-Cisim Problemi

Gök mekaniğinde n-cisim problemi, kütle çekimsel olarak birbirleri ile etkileşime giren n tane gök cisminin bireysel hareketlerini öngörme problemidir. Bu probleme göre n tane cismin başlangıç koşulları, yani cismin başlangıç konumu, başlangıç hızı ve başlangıç zamanı vektörleri ( $x_0$ ,  $v_0$  ve  $t_0$ ) biliniyorsa belirli bir zaman sonraki konum ve hız vektörleri hesaplanabilir. N-cisim problemi Newton'un evrensel çekim yasası ile tanımlanabilir. Ancak bazı özel durumlar dışında üç cisim ve daha fazla cismin bulunduğu sistemlerin analitik çözümleri olmadığı için sayısal integrasyonlar kullanılmaktadır (Murray ve Dermott 1999).

N-cisim problemi üç boyutlu bir uzayda, cisimlerin karşılıklı çekim kuvvetleri etkisi altında ortak referans etrafında tanımlanır. Ortak referans etrafındaki cisimlerin kütlelerini  $m_i = 1, 2, 3, \dots, n$  şeklinde tanımyalım. Her  $m_i$  kütesi için konum vektörü  $q_i$  olsun. Newton'un ikinci yasasından,  $\frac{d^2(q_i)}{dt^2}$  ifadesi kütleler üzerindeki toplam kuvvete eşittir. Newton'un kütleçekimsel kanunu inceleyelim;

$$F_{ij} = G \frac{(m_i \cdot m_j)(q_j - q_i)}{|q_j - q_i|^3} \quad (2.2)$$

Formül (2.2)'de  $G$ ; evrensel çekim sabiti,  $m_i$  ve  $m_j$ ; birincil ve ikincil kütleler,  $|q_j - q_i|^3$ ;  $q_i$  ve  $q_j$  arasındaki mesafenin büyüklüğüdür.

Buradan yola çıkarak, toplam kütle ile birlikte n-cisim probleminin formülünü elde ederiz.

$$m_i \left( \frac{d^2 q_i}{dt^2} \right) = \sum \frac{G(m_i m_j)(q_j - q_i)}{(q_j - q_i)^3} \quad (2.3)$$

Formül (2.3) bize n-cisim probleminin Newton'un evrensel çekim kanunu ile elde edilen halini vermektedir.

## 2.5. Yörünge Rezonansları

Büyük kütleli bir cisim ve bu cisim etrafında dolanan küçük kütleli bir cisim düşünelim. Bu iki cisim birbirlerini kütle çekimsel olarak etkilerler. Bu şekilde etkileşimde bulunan cisimlerin yörünge periyotları küçük tam sayı oranları ile ilişkili olur. Buna yörünge rezonansı ismi verilir. Yörünge rezonansı, cisimlerin karşılıklı olarak birbirlerine uyguladıkları çekim kuvvetinden dolayı, yörünge tedirgin olarak bozulmasına neden olur. Yörünge rezonansları kendi içerisinde üç başlıkla incelenebilir.

### 2.5.1. Dönme-dolanma rezonansı

Bir cismin dönme periyodu ile dolanma periyodu arasında anlamlı bir oran varsa bu cisim için dönme-dolanma rezonansı vardır denir. Bu duruma örnek olarak Yer'in uydusu olan Ay verilebilir. Ay'ın Yer etrafındaki dönme-dolanma periyodu 1:1 oranına sahiptir. Bundan dolayı Ay'ın her zaman aynı yüzünü görmekteyiz.

### 2.5.2. Seküler rezonans

Seküler bir rezonans, senkronize bir şekilde iki cisme ait yörünge rezonansıdır. Seküler rezonanslar genel olarak asteroid kuşağı içerisindeki asteroidlerin ve asteroid ailelerinin bu kuşak içerisindeki uzun yörüngesel evrimlerini incelemek için kullanılır. Örnek olarak, eş yörüngelerin birinde bulunan bir asteroid, gezegen ile birlikte Güneş etrafında senkron bir şekilde dolandır.

### 2.5.3. Ortalama hareket rezonansı

Güneş sisteminde bulunan büyük gezegenlerden kaynaklı kütle çekimsel etkiler sebebi ile daha küçük cisimlerin yörüngeleri üzerinde tedirginlikler oluşmaktadır. Oluşan bu etkiler rastgele değil de periyodik olarak gerçekleşirse bu cisimler arasında ortalama hareket rezonansı vardır denir. Örnek olarak; bir asteroid bu periyodik etkilere maruz kalırsa asteroide ait yörünge elemanları da periyodik olarak değişecektir. Belirli bir zaman sonra asteroid gezegen tarafından ya iç yörüngeye çekilecek ya da yörünge dışına atılacaktır. Ortalama hareket rezonansına sahip gezegen ve asteroidin Güneş etrafında dolanma periyotları arasında tam sayılı bir oran oluşmaktadır.

Güneş sisteminde en büyük kütleyle sahip gezegen Jüpiter olduğu için sistemdeki baskın ortalama hareket rezonans bölgeleri Jüpiter'in etki alanında bulunmaktadır. Bu bölgelerde bulunan cisimler, Jüpiter'in Güneş etrafındaki dolanma periyodunun (~12 yıl) tam sayılı oranı ile hareket ederler. Bu durumda dolanma periyodu 4 yıl olan bir asteroid Jüpiter ile 3:1 ortalama hareket rezonansına sahip olur.



Önceden belirtildiği üzere, bir gezegen ile ortalama hareket rezonansına sahip asteroidler gezegene ait belirli alanlarda bulunan yörüngelerde dolanabilir ya da bu yörüngelerden ayrılabilirler. Yörünge rezonansları başlığı altında verilen Jüpiter örneğinde belirtildiği gibi NEA'lar farklı gezegenler de farklı ortalama hareket rezonanslarına girebilirler.

Yer'in NEA'ları için iki farklı ortalama hareket rezonansı bölgesi bulunur. Bunlardan birincisi, güçlü bölgeler olarak adlandırılır ve bu bölgelerde bulunan rezonans türleri; 1:1, 4:1, 3:1, 5:2, 7:3 ve 2:1 olarak verilir. İkincisi zayıf bölgeler olarak adlandırılır ve bu bölgelerde bulunan rezonans türleri; 9:2, 7:2, 7:4, 10:3, 8:3, 8:5, 9:4, 11:5, 11:6 ve 5:3 olarak verilir. Kütle çekimsel tedirginlikler asteroidlerin yörünge parametrelerindeki değişim hızını etkilemektedir. Değişim hızına bağlı olarak bu bölgeler güçlü ve zayıf rezonanslı bölgeler olarak adlandırılırlar.

Yer için önemli bir araştırma konusu olan ve bu tez kapsamında özellikle ele alınan 1:1 ortalama hareket rezonansı ve bu rezonansa sahip cisimlerin yörünge kararlılıkları son yıllarda oldukça önem kazanmıştır.

## 2.6. Kütle Çekimsel Olmayan Etkiler

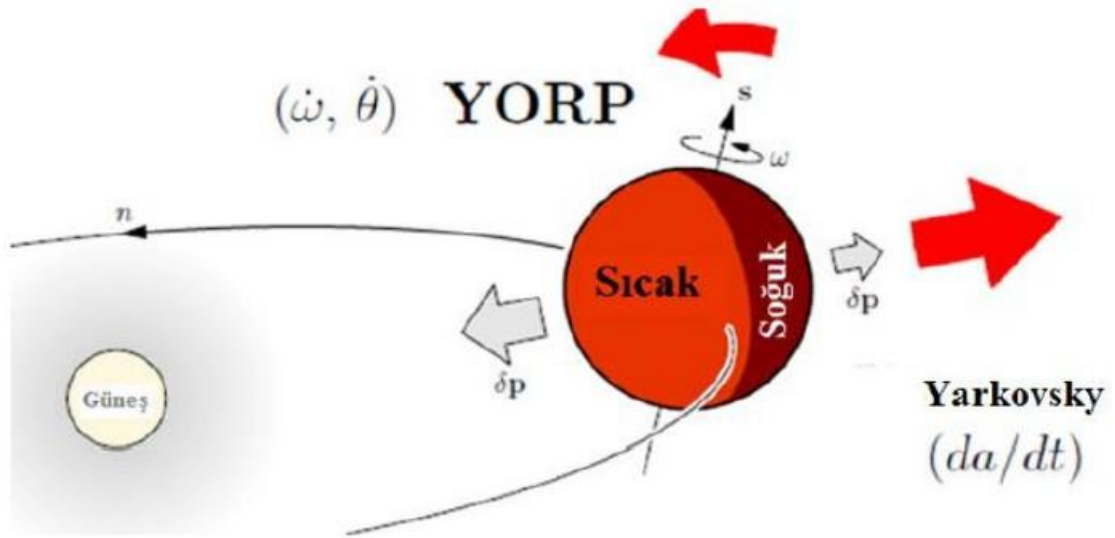
### 2.6.1. Yarkovsky ve YORP etkileri

Güneş sistemi içerisinde herhangi bir yörüngede dolanan küçük çaptaki cisimlerin üzerinde belirli bir zaman aralığında termal farklar oluşur ve yine belirli zaman aralıklarında bu farklardan kaynaklı olarak cisim dışarıya radyasyon yayar. Cismin yaydığı bu radyasyon aynı zamanda cisme momentum kazandırmaktadır (Şekil 2.3). Yarkovsky etkisi, cisim üzerinde oluşan termal farklardan dolayı cismin yörüngesinin yarı-büyük ekseninin zamanla değişmesi olayına verilen isimdir (Öpik 1951). İlk olarak Ivan Osipovich Yarkovsky (1844-1902) tarafından önerilmiştir. En genel halde etki cismin büyüklüğüne bağlıdır. Büyük cisimler neredeyse etkilenmezken, çapı 40 km'den küçük cisimler (asteroidler gibi) etkilenirler. Yarkovsky etkisi ilk olarak, 1991 yılında Eleanor F. Helin tarafından keşfedilen 6489 Golevka asteroidi için hesaplanmıştır. Hesaplamalarda asteroidin 12 yıl içerisinde yörüngesinden 15 km kadar uzaklaştığı tespit edilmiştir (Chesley vd. 2003).

Yarkovsky-O'keefe-Radzievskii-Paddack etkisi veya YORP etkisi, yörüngede bulunan küçük çaplı cisimlerin dönme hızlarını ve eksenlerini değiştiren etkidir. 19. yüzyılda Ivan Yarkovsky, Güneş tarafından ısınan bir cisimden çıkan termal radyasyonun hem ısı hem de momentum taşıdığını tespit etmiştir. Ardından Vladimir Radzievskii cismin albedosundaki değişimlerin cismin rotasyonunda değişim meydana getirdiğini tespit etmiştir. Stephen Paddack cismin şeklinin cismin dönüş hızının değişiminde önemli rol oynadığını tespit etmiştir (Paddack 1974). Stephen Paddack ve John O'Keefe, YORP etkisinin rotasyon sapmalarından kaynaklı patlamalara neden olduğunu ve bu işlemin tekrar tekrar gerçekleştiğinde, cismin sonsuz toz taneciklerine indirgiğini belirtmişlerdir (O'keefe 1976). YOPR kısaltması ilk olarak 2000 yılında

Rubincam (2000) tarafından bu çalışmaya katkıda bulunan bilim insanlarını onurlandırmak adına türetilmiştir.

2007 yılında YORP etkisini araştırmak amaçlı asteroid incelemeleri yapılmıştır. İncelemelerde ele alınan cisim 54509 YORP daha sonraki adlandırılması ile 2000 PH5 asteroididir. Yapılan hesaplamalar ile 2000 PH5 asteroidinin dolanma hızı 600 bin yılda iki katına çıkmıştır ve aynı süre içerisinde cismin eksen ve eğimi de değişmiştir (Taylor vd. 2007).



Şekil 2.3. Yarkovsky ve YORP etkisinin birlikte gösterimi

## 2.7. Kaotik Yörüngeler

Fransız gökbilimci Michel Heron ve Amerikan gökbilimci Carl Heiles, sarkaç gibi periyodik hareket sergileyen bir sistemin, periyodik olan harici bir kuvvet tarafından tedirgin edildiğini keşfetmişlerdir. Buradaki tahmin edilmez davranışa kaotik hareket adını vermişlerdir (Chauan 2018). Bu durumu sistemin başlangıç koşulları ile ilişkilendirmişlerdir. Güneş sistemi içerisindeki kaotik bölgeler ilk olarak asteroid kuşağında tespit edilmiştir (Chauan 2018).

Tipik bir asteroid yörüngesi için tedirginliği veren fonksiyonun genişlemesinde periyodik bir terim olan frekans küçükse, büyük cismin (gezegen vb.) asteroidin hareketini etkilediği gözlemlenir. Örneğin Jüpiter ile ortalama hareket rezonansında dönen bir asteroid için, genellikle tedirginlik fonksiyonunda frekans terimi oldukça küçüktür. Bundan dolayı asteroidin hareketinde bozulmalar meydana gelir. Buradan hareketle frekanslardan biri ortadan kalkarsa, periyodik terim neredeyse sabit veya seküler hale gelir. Bu durumda asteroid belirli bir ortalama hareket rezonansına sabitlenir. Böylesine sabit bir rezonansa giren asteroidin yörüngesi kararlı bir yörünge olarak adlandırılır. Bu duruma örnek olarak Yer'in L4 (Lagrange-4) noktası

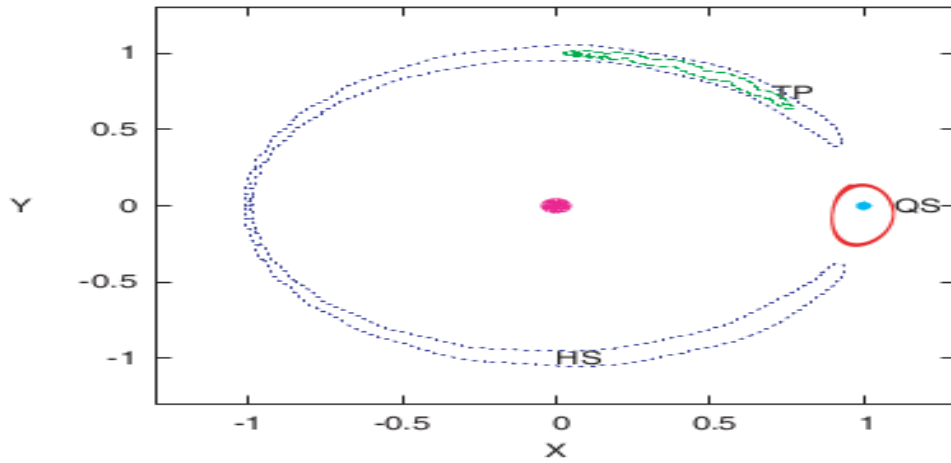
civarındayer alan 2010 TK7 Truva asteroidi verilebilir (Zhou vd. 2019).

## 2.8. Yer Yakını Eş Yörüngeler

Eş yörüngeler Yer yakını yörüngeler içerisinde erişim kolaylığı açısından önemli ve dinamik açıdan ilginç yörüngelerdir. Tanım itibarıyla, bir gezegen ile birlikte eş yörüngede dolanan ve gezegen ile 1:1 ortalama hareket rezonansı etkileşiminde bulunan cisimler eş yörüngesel cisimler olarak adlandırılırlar. Eş yörüngesel cisimlerin Güneş etrafında dolanma periyotları, etrafında dolandıkları gezegenin Güneş etrafındaki dolanma periyoduna çok yakındır. Eş yörüngesel cisimlerin gezegen uydularından farklı olarak, gezegenin Hill küresi dışında olduklarından bu cisimlerin yörüngeleri gezegenin değil Güneş'in etrafında dolanacak şekildedir. Buldukları bölgelere ve yaptıkları ortalama boylam salınımlarına göre birkaç eş yörünge sınıfı vardır (Morais ve Namouni 2013).

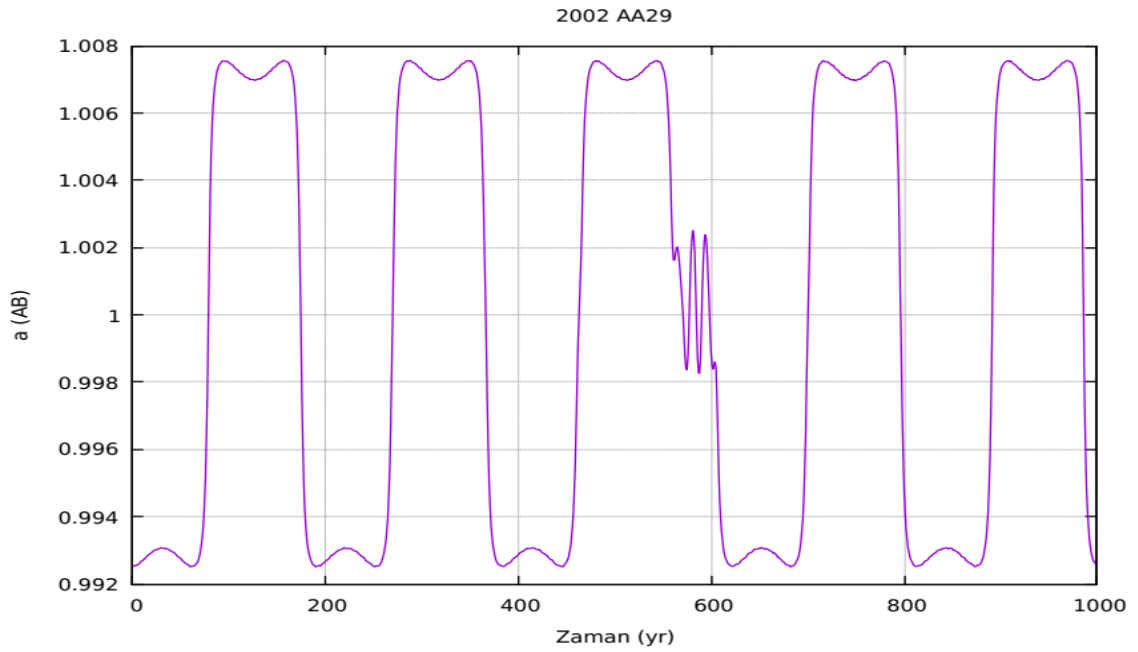
1. Güneş sisteminde en yaygın ve en bilinen sınıf, lagrange noktalarında (L4, L5) bulunabilen ve Yer'e göre  $60^\circ$  civarında salınan Truva ve İribaş yörüngeleridir (Şekil 2.4).
2. Bir diğeri ise Yer'e göre  $0^\circ$  civarında birsalınıma sahip olan Yarı-uydu yörüngeleridir (Şekil 2.4).
3. Son olarak Yer'e göre  $180^\circ$  'den büyük bir salınıma sahip olan at nalı yörüngeleridir. At nalı yörüngesinde bulunan cisimlerin diğeri iki yörüngede bulunan cisimlere göre yörüngelerinde taradıkları alan biraz daha geniştir (Giuppone vd. 2010) (Şekil 2.4).

Eş yörünge hareketinin tespiti doğrudan yörünge elemanları ile elde edilemez. Bazı yörünge parametrelerinin evrimi zaman içerisinde ileri veya geri integrasyonlar ile takip edilir. Özellikle  $a$  ve  $\lambda_r$  'nin (Yer'e göre ortalama boylam) zamana göre değişimi yörüngeciğin eş yörünge olup olmadığı hakkında bilgi sağlar.



**Şekil 2.4.**At nalı (HS), İribaş (TP) ve yarı-uydu (QS) eş yörüngelerinin dönen referans çerçevesinde temsili gösterimi (Mikkola vd. 2006)

Birbirleri ile periyodik hareket yapan iki cisim, birbirlerini kütle çekimsel olarak etkilediklerinde, yarı-büyük eksen ve yörünge basıklığı değerleri değişir ve cisimler başka tip bir yörüngeye geçiş yapabilir. Örnek olarak; 2002 AA29 asteroidi Yer'in at nalı yörüngesinde bulunan bir asteroiddir. Bir süre sonra bu asteroid yörüngesini değiştirecek ve Yarı-uydu olacaktır ve sonrasında tekrar at nalı yörüngesine dönecektir. Wajer (2010) tarafından, 2002 AA29 asteroidinin ileriki yıllar için yörüngedeki davranışı incelenmiştir. Bahsi geçen cismin 12 bin yıllık simülasyonu yapılmıştır ve şu anda at nalı yörüngesinde bulunan cismin  $\sim 6$  bin yıl sonra Yarı-uydu yörüngesine geçeceği tespit edilmiştir. Bu duruma ek olarak bu tez kapsamında yapılan testler sırasında aynı cismin yörüngesinin evrimini inceledik. Yaptığımız testlerin sonucunda 2002 AA29 asteroidi  $\sim 580$  yıl sonra Yarı-uydu yörüngesine geçiş yapıp kısa bir süre bu yörüngede kaldıktan sonra tekrar at nalı yörüngesine geçiş yapacağını tespit ettik (Şekil 2.5).



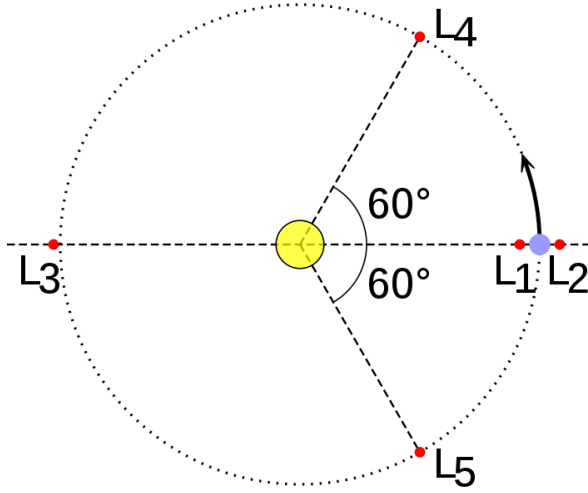
**Şekil 2.5.** 2002 AA29 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği

Yer'in eş yörüngelerinde dolanan cisimlerin birincil kaynakları, NEA'larda olduğu gibi asteroid kuşağının çeşitli bölgeleri olduğu düşünülmektedir (Morais ve Morbidelli 2002). Bununla birlikte yakın zamanda Nesvorný vd (2011) tarafından sayısal simülasyonlar kullanılarak, ilkel Venüs eş yörüngelerinin var olabileceği gösterilmiştir. Benzer şekilde ilkel bir eş yörünge popülasyonu Yer için mümkün olabilir. Yer'in eş yörüngelerinde olası ilkel cisimler varsa günümüzde at nalı tipi yörüngelerde olma olasılıkları oldukça yüksektir. Bu olasılık Yer'e ait at nalı eş yörüngelerinin çekiciliğini arttırmaktadır. Son üç yılda yörünge periyotları Yer'e çok yakın olan yaklaşık 25 yeni asteroid bulunmuştur ( $0.99 \text{ AB} < a < 1.01 \text{ AB}$  aralığında yer alan). Son 35 yılda bu sayı 100'e ulaşmıştır. NASA tarafından bazı cisimler henüz adlandırılmamış veya kabul edilmemiş olmasına rağmen yaklaşık 19 asteroid Yer ile eş yörünge cisimleri olarak kabul görmektedir (de la Fuente Marcos ve de la Fuente Marcos 2013).

### 2.8.1. Truva yörüngesi

Truva yörüngeleri, bir gezegen etrafında 1:1 ortalama hareket rezonansına sahiptir. Bu yörüngedeki cisimler gezegenin L4 veya L5 noktalarında gezegene göre  $60^\circ$  'lik bir alan etrafında salınım yaparlar (Şekil 2.6). Bu bölgelerde bulunan cisimler gezegen ile birlikte ortak kütle merkezi etrafında dönerler. Güneş sisteminde bilinen en çok Truva asteroidi Jüpiter'in Lagrange noktalarında bulunur. Günümüze kadar Jüpiter etrafında var olan Truva cisimlerinin sayısı bir milyondan fazla olduğu düşünülmektedir (Christou vd. 2017). Bunlardan 7.000 tanesi tespit edilmiştir. Bu cisimler arasında numaralandırılmış veya numaralandırılmamış cisimler de mevcuttur. Diğer gezegenlerde ise; Mars'a ait 9, Neptün'e ait 22, Uranüs'e ait 2 ve Yer'e ait bir Truva cismi bulunmuştur. Bazen Truva yörüngesinde bulunan cisimler gibi gezegenin doğal bir uydusu gibi davranabilmektedir. Güneş sisteminde bu duruma uyan Satürn'ün

uyduları olan Telesto ve Calypso, Tethys, Helene ve Ploydeuces'in Truva cisimleridirler. Truva yörüngelerinin kararlılıkları at nalı ve Yarı-uydu yörüngelerine kıyasla daha uzun dönemlidir (Christou vd. 2017). Ancak Güneş sisteminde olduğu gibi, Jüpiter büyüklüğündeki bir gezegen kendine yeteri kadar yakın başka bir gezegenin Truva yörüngesinde bulunan cisim veya cisimlerinin yörüngesinde tedirginlik yaratıp bozabilir. Bu durum at nalı ve Yarı-uydu yörüngeleri için de geçerlidir.

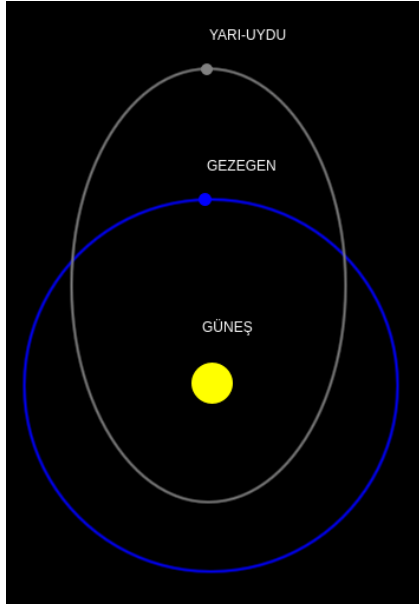


**Şekil 2.6.** Truva Yörüngesi

Truva yörüngelerinin yanı sıra gezegenin L4 ve L5 noktaları etrafında salınım yapan bir başka yörünge türü daha vardır. Bu yörüngenin ismi İribaş (Tadpole) olarak adlandırılmıştır. Bu isim yörüngede bulunan cisimlerin L4 ve L5 noktalarında iribaş (kurbağa yavrusu) şeklinde hareket etmelerinden dolayı verilmiştir. İribaş ve Truva yörüngeleri birbirlerine benzerdirler. Aralarındaki en büyük fark; bu bölgelerde bulunan cisimler, Truva yörüngesinde bulunan cisimler L4 veya L5 noktaları civarında küçük alanlar tararken, İribaş yörüngesinde bulunan cisimler Truva cisimlerine göre daha büyük alanlar tararlar. Bu güne kadar Yer'e ait bir tane Truva cismi literatürde yer almaktadır (2010 TK7). Dvorak vd. (2012), 2010 TK7 asteroidinin Yer'e ait ilk Truva asteroidi olduğunu belirtmişlerdir. Bunun yanında çalışmanın sonuçlarından biri de 2010 Tk7 asteroidinin, Truva bölgesinde yer aldığını öne sürmüşlerdir (Dvorak vd 2012).

### 2.8.2. Yarı-uydu yörüngesi

Yarı-uydu yörüngeleri etrafında dolandığı gezegen ile 1:1 ortalama hareket rezonansında olan yörünge türlerinden biridir. Yarı-uydu yörüngesinde bulunan cisimler, yörüngedeki hareketi boyunca birçok kez etrafında bulunduğu gezegen ile birbirlerine yakınlaşıp uzaklaşırlar (Şekil 2.7). Bu tür yörüngelerde bulunan cisimlerin dış merkezlikleri gezegene göre biraz daha farklıdır.



**Şekil 2.7.** Yarı-uydu yörüngesi

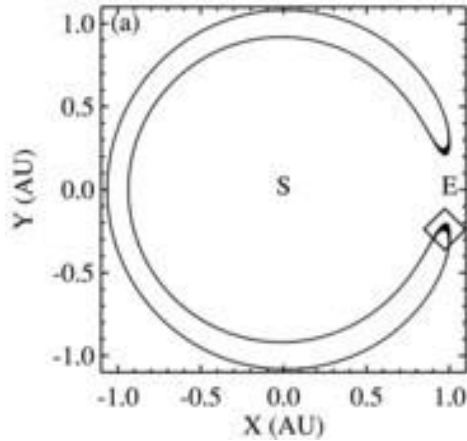
Gerçek uyduların aksine Yarı-uydular gezegenin Hill küresi dışında kalırlar ve yörünge kararlılık süreleri gerçek uydulara göre daha kısadır. Ayrıca Yarı-uydu yörüngelerinde bulunan cisimler farklı yörüngelere geçip tekrardan eski yörüngelerine dönebilirler.

Gezegen uyduları için kullanılan jeosenkron terimi bazen Yarı-uydu cisimleri için de kullanılır. Çünkü bu tür yörüngede bulunan cisimlerin Güneş etrafındaki hareketleri genellikle gezegen ile senkronizedir. Güneş sisteminde bulunan gezegenlere ait Yarı-uydu yörüngeleri; Venüs'ün bir tane (2002 VE68) (Mikkola vd 2004), Yer'in altı tane (2004 GU9, 2006 FV35, 2013 LX28, 2014 OL339, 105 YA, 2016 HO3) (Wajer 2010; de la Fuente Marcos ve de la Fuente Marcos 2014, 2016a), Neptün'ün bir tane (2007 RW10) Yarı-uydu yörüngelerine ait asteroidi bulunmaktadır. Uzun süreli hesaplamalar sonucunda Yarı-uydu cisimleri bir süreliğine at nalı yörüngesine geçiş yaptıktan sonra tekrar Yarı-uydu yörüngesine döndükleri görülmüştür (Brasser vd. 2004). Ayrıca Yer için yapılan çalışmalara göre 2002 AA29, 2003 YN107 ve 2015 SO2 cisimleri at nalı yörüngesinde bulunmalarına rağmen zamanla Yarı-uydu yörüngesine geçiş yapıp tekrar at nalı yörüngesine dönmektedirler (de la Fuente Marcos ve de la Fuente Marcos 2016a).

### 2.8.3. At nalı yörüngesi

At nalı yörüngesinde bulunan bir cisim, büyük cisim referansından bakıldığında at nalına benzer bir şekil çizer (Şekil 2.8). At nalı yörüngesi tam olarak kapalı bir yörüngeye sahip değildir. Bu yörüngede bulunan cisimler gezegenin L4 bölgesinden L5 bölgesine Güneş etrafından dolanacak şekilde hareket ederler ve bu hareketi periyodik olarak sürdürürler. Yani cisim gezegene her iki Lagrange noktasından yaklaşıp uzaklaşmaktadır. Yer için at nalı yörüngesinde günümüz itibari ile keşfedilen 18 cisim (3753 Cruithne, 2000 PH5, 2001 GO2, 2002 AA29, 2003 YN107, 2005 UH6, 2010

SO16, 2013 BS45, 2015 SO2, 2015 YQ1, 2015 XX169) bulunmaktadır.



**Şekil 2.8.** At nalı yörüngesi (Christou ve Asher 2011)

Yer'in at nalı eş yörüngelerinde bulunan asteroidler, üye oldukları alt NEO'lerde Apollo ve Aten gruplarına aittirler. Günümüz itibari ile at nalı yörüngelerinde bulunan cisimler arasında 6 Apollo alt grubuna ait asteroid vardır ve geri kalan asteroidler Aten grubuna aittir. Günümüzde Yer'e ait en çok cisme sahip eş yörünge grubu at nalıdır. At nalı yörüngeleri üç alt sınıfta incelenebilir.

- 1) Olağandışı at nalı yörüngesi (Unusual horseshoe)
- 2) Neredeyse-Simetrik at nalı yörüngesi (Near-Symmetric horseshoe)
- 3) Asimetrik at nalı yörüngesi (Asymmetric horseshoe)

Yukarıda sıralanan sınıflara ait cisimler; olağandışı at nalı için : (3753) Cruithne (1986 TO), YORP (2000 PH5), 2005 UH6 2015 YQ1, neredeyse-simetrik at nalı için : 2002 AA29, 2003 YN107, 2010 SO16, 2013 BS45, 2015 SO2, asimetrik at nalı yörüngeler için : 2001 GO2, 2015 XX169'dur.



### 3. MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışmasında amaç, Yer ile eş yörüngelerdeki asteroidlerin yörünge dinamiklerinin incelenmesidir. Eş yörüngelerin dinamiklerinin incelenmesi için gerekli kodlar REBOUND paketi kullanılarak C dilinde oluşturulmuştur. REBOUND açık kaynak kodlu çok amaçlı bir çok-cisim integrasyon paketidir. Oldukça modülerdir ve çeşitli problemler üzerinde çalışmak için özelleştirilebilir. REBOUND içerisinde birçok integrasyon şeması mevcuttur: Leap-Frog, Symplectic Epicycle Integrator (SEI) ve Wisdom-Holman Haritası (WHM), 15. dereceden yüksek doğruluklu simplektik olmayan zaman ayarlamalı integratör (IAS15) (Rein ve Liu 2012).

Tez kapsamında iki farklı kod yazılmıştır. Birinci kodda, Yer ile eş yörüngede bulunan cisimleri belirli bir zamanda ileriye doğru simüle edip, yörünge elemanlarının değişimlerini inceledik ve bazı yörünge elemanları (a, e ve i) için aralıklar belirledik. İkinci kodda, incelediğimiz yörünge elemanları için belirlediğimiz aralıkları kararlılık haritalarının sınırları olarak kullandık. Kodların ikisinde Güneş sistemindeki gezegenler ve Yer'in uydusu Ay dahil edilmiştir (Plüto ve diğer cüce gezegenler Ceres, Pallas vb. hariç). Birinci kod ile zamanda ileri doğru 10 bin yıllık simülasyonlar yapılmıştır. Bunun sebebi, eş yörüngelerdeki zamanla yörüngelerini terk edip etmediklerini görmektir. Ayrıca uzun vadede kodun verdiği sonuçların güvenilirliğini test etmektir. Testler literatürde bulunan çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Son olarak tez kapsamındaki grafikler 1000 yıllık bir süre için çizdirilmiştir. Bunun sebebi ise cisimlerin günümüzdeki hareketlerini daha kolay ayırt edebilmektir.

Öncelikle, literatürde yer alan ve yeni keşfedilen eş yörünge cisimleri test edilmiştir. Sonrasında ilk yazılan kod yardımı ile zamanda ileriye doğru simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyonlar sonucu elde etmiş olduğumuz yörünge elemanları değerlerini literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırdık. Kodun doğruluğundan emin olduktan sonra yeni bulunan birkaç cisim için yörünge testleri yaptık. Ayrıca yeni cisimler için yapılan yörünge testlerine Bulgular kısmında yer verilmiştir. Ardından tez çalışmasının ikinci aşaması olan kararlılık haritalarının belirlenmesi için kullanılacak aralıkları belirledik. Bu aralıkları ilk aşamada elde ettiğimiz grafiklerin genliklerine bakarak elde ettik (Çizelge 3.1). Örnek olarak, Şekil 2.5'te 2002 AA29 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği yer almaktadır. Grafikte neredeyse-simetrik at nalı yörüngesi için a aralığı [0.992-1.008] şeklinde ele alınmıştır. Bu durum neredeyse-simetrik at nalı yörüngesine giren tüm cisimler için tekrarlanmış olup, kararlılık haritalarının sınırları için ele alınan cisimlerin ortalama değerleri göz önünde bulundurulmuştur.

**Çizelge.3.1.** Yer ile eş yörüngeye sahip asteroidlere ait yörünge elemanlarının aralıkları

	Neredeyse-simetrik At nalı Yörüngesi	Asimetrik At nalı Yörüngesi	Olağandışı At nalı Yörüngesi	Truva Yörüngesi	Yarı-uydu Yörüngesi
a	0.989–1.013	0.994-1.006	0.992-1.006	0.997-1.002	0.995-1.005
e	0.002-0.120	0.184-0.210	0.229-0.517	0.189-0.190	0.134-0.463
i	0.586-14.519	5.455-7.612	1.040-19.807	20.857-20.921	1.168-13.661
$\omega$	1.073-338.336	281.558-296.632	43.836-354.220	45.943-52.606	83.438-306.739
$\Omega$	0.223-358.348	235.794-256.538	73.370-278.269	92.844-96.478	24.257-255.199
M	0.167-359.988	0.854-358.596	0.071-359.868	0.032-358.766	0.143-359.994
$\lambda$	0.167-359.836	0.196-357.073	0.568-359.991	125.980-260.794	0.450-359.883

İlk kod ile elde edilen yörünge elemanlarının salınım aralıkları ikinci kodda kararlılık haritalarının sınırlarını belirlemede kullanılmıştır. İkinci kod kapsamında kararlılık haritaları için zamanda ileri doğru 100 bin yıllık simülasyonlar yapılmıştır. Yapılan simülasyonlarda değişken parametreler e ve i'dir. Kod için  $\omega$  ve  $\Omega$  değerleri  $90^\circ$  olarak alınmıştır. Diğer değerler (a ve M) ele alınan yörünge türünde ortalama değere sahip cisimlerin değerleri olarak belirlenmiştir. Örnek olarak neredeyse-simetrik at nalı yörüngesinin kararlılık haritası için e ve i değerleri Çizelge 3.1'deki aralıktadır. a, M ve  $\lambda$  değerleri ise 2002 AA29 asteroidine aittir. Bu şekilde elde ettiğimiz sonuçlar Bölüm 4'te ayrıntılı bir şekilde yer almaktadır. İkinci kod kapsamında MEGNO kaos ayırıcı kullanılmıştır. MEGNO yardımı ile önceden belirlenen sınırlar içerisine giren cisimlerin yörüngelerinin kararlı olup olmadıkları hakkında bilgi elde edilmiştir. Kullandığımız kod içerisinde maksimum MEGNO değerini 20 olarak belirledik. Bu da aslında geniş bir alana karşılık gelmektedir. Bu sayede eş yörünge bölgelerindeki kararsızlıkları daha ayrıntılı bir şekilde görebilmekteyiz.

### 3.1. MEGNO Kaos Ayıracı

MEGNO (yakın yörüngelerin ortalama üssel büyüme faktörü) faktörü ilk olarak Cincotta ve Simo (2000) tarafından gezegenlere yakın yörüngelerin kararlılıklarını incelemek için ortaya atılmıştır. MEGNO faktörü, kaotik veya yarı-periyodik başlangıç koşulları ile karakterize edilen faz uzay bölgesini tespit etmek için kullanılan sayısal bir yöntemdir (Hinse vd. 2010). Ayrıca MEGNO faktörü kullanılarak, parametre uzayına bakıldığında, parçacığın yörüngesinin rezonansa girmek için alabileceği olası dinamik noktaları da tanımlamak mümkündür. MEGNO yöntemi sayesinde intgrasyon süresini kısa (Rein ve Tamayo 2016) tutabilmektedir.

MEGNO yöntemi, Galaksi dinamiklerinden, öte-gezegen sistemlerinin kararlılık analizine ve Güneş sistemindeki küçük cisimlerin dinamiklerine kadar uygulama alanı geniş bir yöntemdir (Goździewski vd. 2001; Goździewski, Bois ve Maciejewski 2002; Goździewski 2002; Bois vd. 2003; Cincotta, Giordano ve Simo 2003; Cincotta ve Giordano 2003; Goździewski ve Konocki 2004; Breiter vd 2005; Gayon ve Bois 2008).

MEGNO faktörü aşağıdaki gibi formülize edilir. Formülde,  $Y(t)$  ifadesi zamana bağlıdır ve MEGNO'yu ifade eder.  $t$  ve  $t_0$  sırası ile başlangıç ve bitiş zamanlarını belirtir.  $\delta$ 'lar ise yörüngeler arası mesafeleri belirtir.

$$Y(t) = \frac{2}{t} \int_{t_0}^t \frac{\delta'(s)}{\delta(s)} s ds \quad (2.4)$$

MEGNO, belirli bir sayısal integrasyondaki kısa süreli zaman aralıklarına dayandırılarak hesaplanır. Böylece integrasyon süresi kısalmır. Bu durum MEGNO'yu literatürde Hızlı Lyapunov Göstergesi (FLE), Küçük Hizalama Dizini (SALI), Görelî Lyapunov Göstergesi (RLE), Gerçekleştirilmiş Hizalama Dizini (RAI) ve Frekans Haritası Dizini (FMI) olarak bilinen diğer kaos göstergelerinden farklı kılar (Laskar 1990; Froeschle, Lega ve Gonczi 1997; Skokos vd. 2003; Sandor vd. 2004; Skokos, Bountis ve Antonopoulos 2007). Sıralanan bu yöntemlerin çoğu ele alınan sistemin değişken vektörünün mevcut durumuna bağlı olarak kaotik ve yarı-periyodik tespit teknikleri arasında yer alır.

MEGNO faktörü kullanılarak yapılan simülasyonlar sonucundaki değerler yardımı ile kararlılık haritaları adı verilen grafikler elde edilir. Bunlara MEGNO haritası adı da verilebilir. Literatürde MEGNO haritalarında kararlılığı belirlemede genel olarak 0-8 aralığında alınmıştır (Hinse vd. 2010; Morais ve Namouni 2016). Bu tez kapsamında MEGNO değerini 20 olarak belirledik. Kararlılık haritalarında MEGNO değeri 2 ve 2'nin altında olan bölgeler kararlı bölgeler olarak isimlendirilir. Eğer MEGNO değeri 2'nin üzerinde bir değerse kararsız bölgeler olarak isimlendirilir. Bu çalışmada MEGNO'nun maksimum değerinin 20 olmasının sebebi, kararlı ve kararsız olan bölgeleri daha anlaşılır bir şekilde görebilmektir.

MEGNO yöntemi sayesinde Lyapunov üsteline geçmek ve oradan da Lyapunov zamanını hesaplamak da mümkündür. Kaotik bir yörünge durumunda tanımlanan  $Y(t)$  (MEGNO) ve  $\langle Y \rangle$  (ortalama MEGNO) ifadeleri zamana göre lineer olarak artış

göstermektedir.  $Y$  ve  $\langle Y \rangle$  için değişim oranları sırası ile  $\gamma$  (Lyapunov) ve  $\gamma/2$ 'dir. Lineer artış durumunda  $\langle Y \rangle$  için  $\langle Y \rangle(t) = \alpha t + \beta$  gibi bir doğru denklemi tanımlanabilir. Bu denklem yardımı ile lineer artışa karşılık gelen sonuç bir doğru denklemi ile ifade edilmiş olur. Kaotik durumda doğrunun eğimi bize Lyapunov karakteristik sayısını verir. Yani bu durumda MEGNO ifadesinden Lyapunov ifadesi türetilmiş olur.

### 3.2. Girdi Parametrelerinin Hazırlanması

İntegrasyon hesaplamalarına dahil edilecek cisimler, literatüre ve JPL/Horizons'ın kataloğuna bakılarak tespit edilmiştir. Girdi parametreleri için 1 Haziran 2018 tarihi simülasyonun başlangıç tarihi olarak ele alınmıştır ve parametreler JPL/Horizons kataloğundan alınmıştır.

Asteroidlerin temel yörünge elemanlarından ( $a$ ,  $e$  ve  $i$ ) yola çıkılarak (Çizelge 3.2), her bir parametre için bir aralık belirlenmiştir ( $a$  : 0.989-1.017AB,  $e$  : 0.01-0.83,  $i$  : 0.77-49.97 derece). Bu parametre aralıklarına giren eş yörünge cisimleri tespit edilmiştir. Ardından kararlılık analizleri için yörünge parametrelerinin değişimlerine bakılmıştır. Simülasyon süreleri 100 bin yıldır.

**Çizelge.3.2.** Yer ile eş yörüngeye sahip asteroidlere ait  $a$ ,  $e$ ,  $i$ ,  $\omega$  ve  $\Omega$  değerleri. ( $a$  : yarı büyük eksen,  $e$  : basıklık,  $i$  : eğim,  $\Omega$  : çıkış düğümünün boylamı,  $\omega$  : enberi noktasının düğümler çizgisinden açılma uzaklığı). (Anonymous 1 – verilerin alındığı tarih : 01.06.2018)

	$a$	$e$	$i$	$\omega$	$\Omega$	Yörünge Türü	Condi-tion Kod
Cruithne (3753)	0.997	0.514	19.809	43.739	126.299	Olağandışı At nalı	0
2000 PH5	1.006	0.230	1.599	278.857	278.285	Olağandışı At nalı	0
2001 GO2	1.006	0.168	4.625	265.467	193.543	Asimetrik At nalı	7
2002 AA29	0.992	0.013	10.747	101.767	106.375	Neredeyse-simetrik At nalı	0
2003 YN107	0.988	0.013	4.320	87.530	264.414	Neredeyse-simetrik At nalı	1

Çizelge.3.2'nin devamı

2004 GU9	1.001	0.136	13.649	280.201	38.616	Yarı-uydu	0
2005 UH6	1.001	0.632	2.639	200.212	19.315	Olağandışı At nalı	1
2006 FV35	1.001	0.377	7.104	170.852	179.508	Yarı-uydu	1
2010 TK7	0.999	0.190	20.891	45.939	96.488	Truva	0
2010 SO16	1.002	0.075	14.520	108.879	40.407	Neredeyse-simetrik At nalı	0
2013 BS45	0.992	0.083	0.772	150.484	83.369	Neredeyse-simetrik At nalı	0
2013 LX28	1.001	0.452	49.975	345.771	76.677	Yarı-uydu	1
2014 OL339	0.999	0.460	10.186	289.682	252.182	Yarı-uydu	1
2015 SO2	0.997	0.108	9.166	290.765	182.864	Neredeyse-simetrik At nalı	1
2015 YA	0.995	0.279	1.619	83.626	255.011	Yarı-uydu	6
2015 XX169	1.003	0.184	7.601	282.890	256.475	Asimetrik At nalı	0
2015 YQ1	1.003	0.403	2.483	111.871	88.860	Olağandışı At nalı	6
2016 HO3	1.001	0.014	13.104	343.956	322.118	Yarı-uydu	0
2016 CO246	1.000	0.124	6.396	118.627	137.049	Asimetrik At nalı	0
2017 SL16	1.000	0.153	8.683	70.422	182.580	Asimetrik At nalı	1

Çizelge.3.2'nin devamı

2017 XQ60	1.001	0.213	27.184	283.258	269.218	Asimetrik At nalı	8
2018 AN2	1.001	0.154	22.077	284.779	290.126	Asimetrik At nalı	7
2018 PN22	0.997	0.039	4.384	219.173	317.077	Neredeyse-simetirk At nalı	3
2018 XW2	0.998	0.301	19.729	250.021	78.177	Asimetrik At nalı	7
2019 AE3	0.998	0.100	14.807	271.751	101.938	Neredeyse-simetirk At nalı	6

### 3.3. İntegrasyon İçin Gerekli Kriterler

Simülasyonlar sırasında sistemin toplam enerji korunumu kontrol edilmiştir ve uygun mertebelerde doğruluk sağlanmıştır. Literatürdeki yayınlar düşünüldüğünde toplam enerjideki bağıl hatanın  $10^{-12}$  mertebesinde büyük olmaması gerektiği görülmüştür. Bu çalışma sırasında enerji korunumunda bağıl hata  $10^{-14}$  mertebesinde kalacak şekilde hesaplamalar yapılmıştır. Yüksek enerji korunumu için 15. dereceden Gauß–Radau quadratur yönteminin son yıllarda geliştirilmiş bir versiyonu olan IAS-15 (Rein ve Spiegel 2014) integrasyon şeması kullanılmıştır.

Bütün sayısal integrasyonlarda kod içerisinde başlangıç zaman adımları 1 gün olarak alınmıştır. Sisteme test cisimi olarak eklenen asteroidlerin kütleleri ihmal edilmiştir. İlk kod için herhangi bir sonlandırma koşulu yer almamaktadır, ancak kararlılık haritaları için yazılan kodun sonlandırılmasında kullanılan iki koşul vardır;

- i) MEGNO değeri 20'den büyük olmayacak,
- ii) toplam enerji üzerindeki bağıl hata  $10^{-14}$  mertebesinde küçük olacak.

İntegrasyon için kullanılan kodlarda, Güneş ve Güneş sistemi gezegenleri yer almaktadır. Sisteme Plüto, Ceres gibi cüce gezegen sınıfına giren cisimler dahil edilmemiştir. Bu cisimlerin kısa süreli integrasyonlarda eş yörüngeler üzerine ciddi bir etkisi olmadığı ön çalışmalarda görüldüğü için sisteme dahil edilmemişlerdir.

Program çıktıları, yörünge elemanlarına ek olarak MEGNO ve Lyapunov değerlerini de üretecek şekilde hazırlanmıştır. Bu değerler yıllık olarak kaydedilmiştir.

Konum ve hız vektörleri, rölatif konum ve hız vektörleri ve enerji değişimi de yıllık olarak kaydedilmiştir.

### 3.4. Yöntem

İntegrasyonlar için IAS-15 integrasyon şeması kullanılmıştır. IAS-15 integratörü, 15. dereceden Gauß–Radau quadratur yöntemine dayanması sebebi ile tez kapsamında ele alınan konu için uygun bir şemadır. Kararlılık haritalarının oluşturulması esnasında yapılan hesaplamalar yoğun işlemler gerektirdiğinden, kullanılacak yöntemler uygun çalışma sürelerinde, uygun hassasiyet aralığında ve uygun programlama dilinde çalışacak şekilde seçilmiştir. Bu da yapılan integrasyonların hassasiyetini arttırmaktadır.

Literatürde karşılaştırmalı olarak, yörünge kararlılıkları için iki yaklaşım kullanılmıştır. Bunlardan biri Lyapunov üsteli diğeri ise MEGNO kaos ayırıcısıdır. Bu tez kapsamında ise sadece MEGNO kaos ayırıcısı kullanılmıştır.

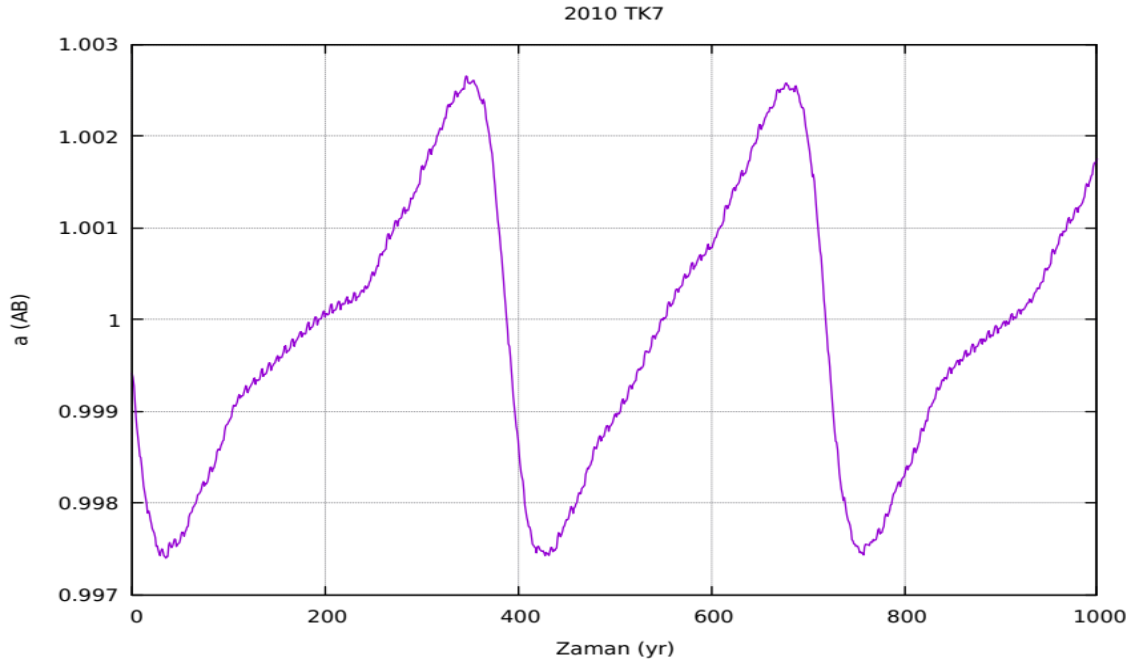
#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez kapsamında yarı-büyük eksen değeri  $0.983 < a < 1.017$  AU aralığına giren NEA'lar incelenmiştir (Bölüm 3). Bu aralığa giren cisimlerin nominal yörünge elemanları için eş yörünge sınıfları belirlenmiştir (at nalı, yarı-uydu ve truva). Bu cisimlerin yörüngelerini belirlemek için yapılan simülasyonlarda cisimlerin zaman-yarı büyük eksen, zaman-rölatif ortalama boylam ve rölatif konumlarındaki değişimlerine bakılmıştır.

##### 4.1. Mevcut Eş Yörünge Cisimlerinin Testleri

Benzer çalışmalarda olduğu gibi (Connors vd. 2005; de la Fuente Marcos ve de la Fuente Marcos 2016a,2016b), kütle çekimsel olmayan etkiler ve sistemdeki diğer küçük kütleli cisimler, eş yörüngeleri belirlemede önemli bir etkiye sahip değildir. Bundan dolayı tez kapsamında bu tür etkiler ihmal edilmiştir. Ancak uzun süreli ve hassas ölçümler yapılmak istendiğinde bu etkiler dikkate alınmalıdır.

Literatürde yer alan ve bu süreç içerisinde belirlenmiş yörünge parametreleri aralığına giren yeni keşfedilmiş cisimler ile birlikte toplamda 25 cisim analiz edilmiştir. Aşağıda bu analizler sonucunda elde edilen zamana karşı yarı-büyük eksen ve zamana karşı rölatif ortalama boylam grafikleri yer almaktadır. Grafiklerde, cisimlerin günümüzde nasıl bir hareket sergilediğini görebilmek için zaman aralığını 0-1000 yıl olarak seçtik.

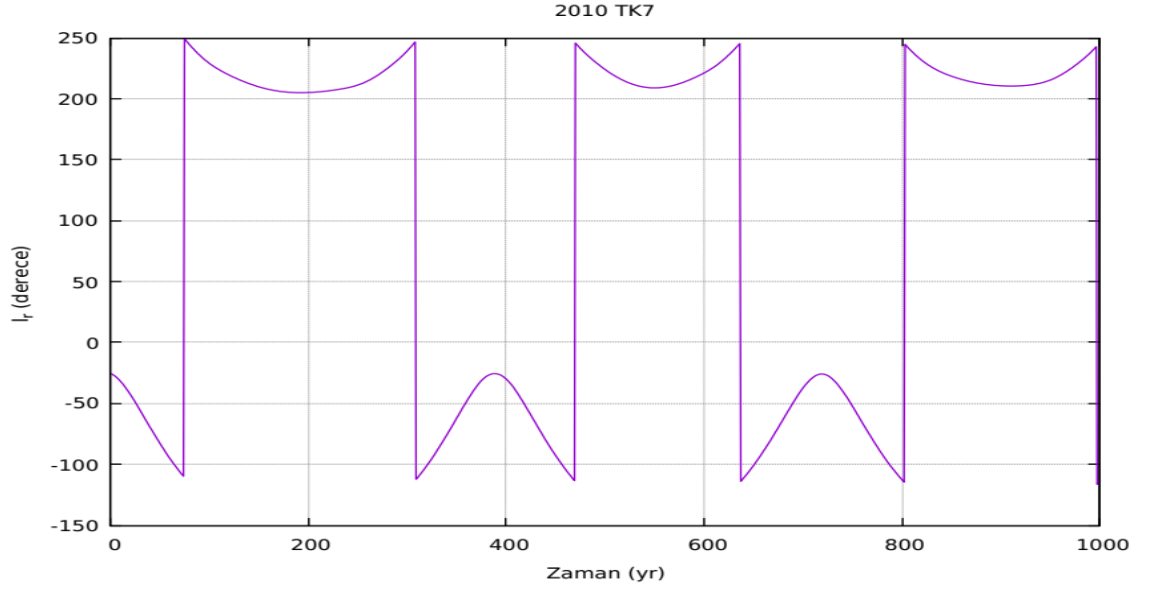


**Şekil 4.1.** 2010 TK7 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği

Şekil 4.1'de Yer'in tek truva asteroidi 2010 TK7'nin zamana karşı yarı-büyük eksen grafiği yer almaktadır. Tez kapsamında elde edilen grafik literatürdeki benzer çalışmalar ile aynıdır. Bu durumu Çizelge 3.1'deki truva yörüngelerinin yarı büyük eksen aralığı ile ilişkilendirebiliriz ( $0.997 < a < 1.002$ ). 2010 TK7 cismi Şekil

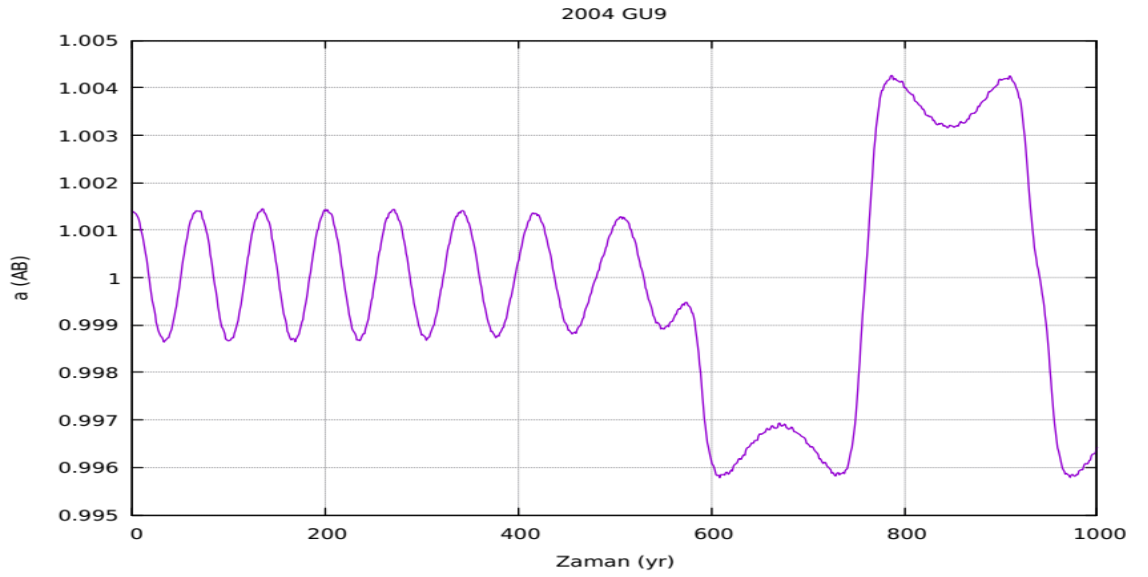


4.1'deki gibi benzer salınımlar göstererek hareketine 1000 yıl daha devam edebileceği yorumunu yapabiliriz.



**Şekil 4.2.** 2010 TK7 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği

Şekil 4.2'de Yer'in truva asteroidi olan 2010 TK7 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği yer almaktadır. Grafikten görüldüğü üzere cisim ~200 yılda bir

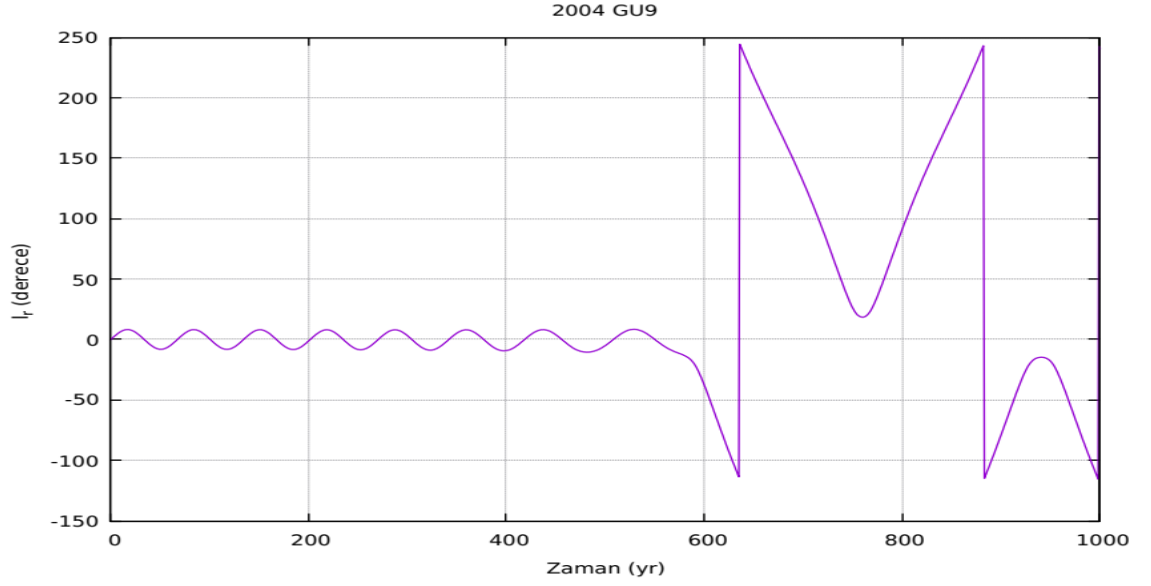


salınıma başladığı konuma geliyor.

**Şekil 4.3.** 2004 GU9 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği

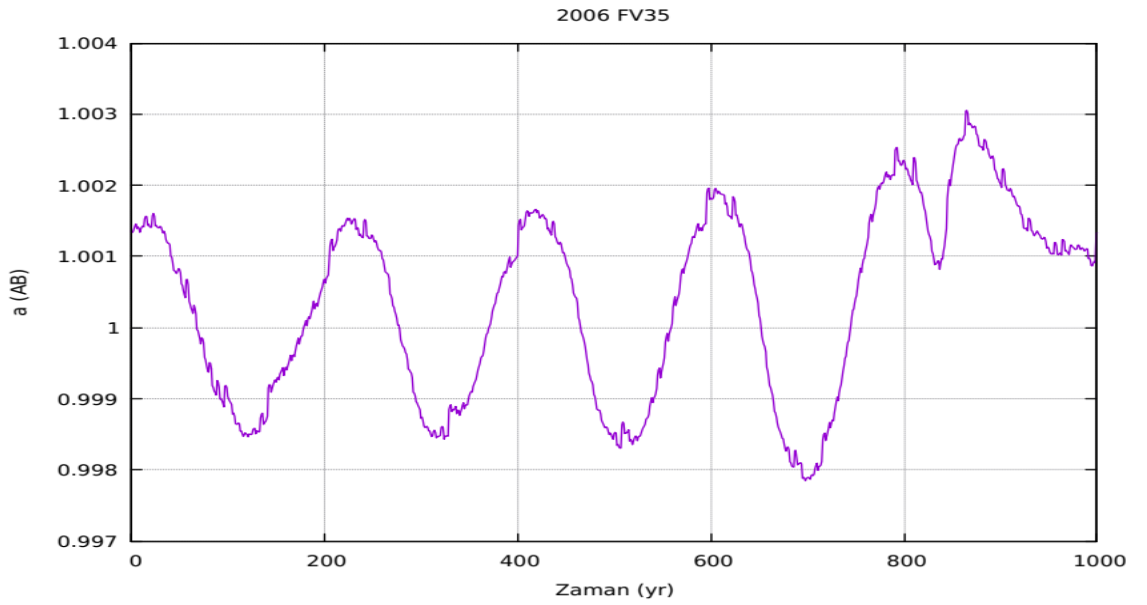
Şekil 4.3'de yarı-uydu yörüngesinde bulunan asteroidlerden 2004 GU9 asteroidi yer almaktadır. Grafikten görüldüğü üzere, cisim günümüz itibari ile ~600 yıl boyunca

yarı-uydu yörüngesinde kalacaktır ve 600 ile 1000 yılları arasında at nalı yörüngesine geçiş yapacaktır.



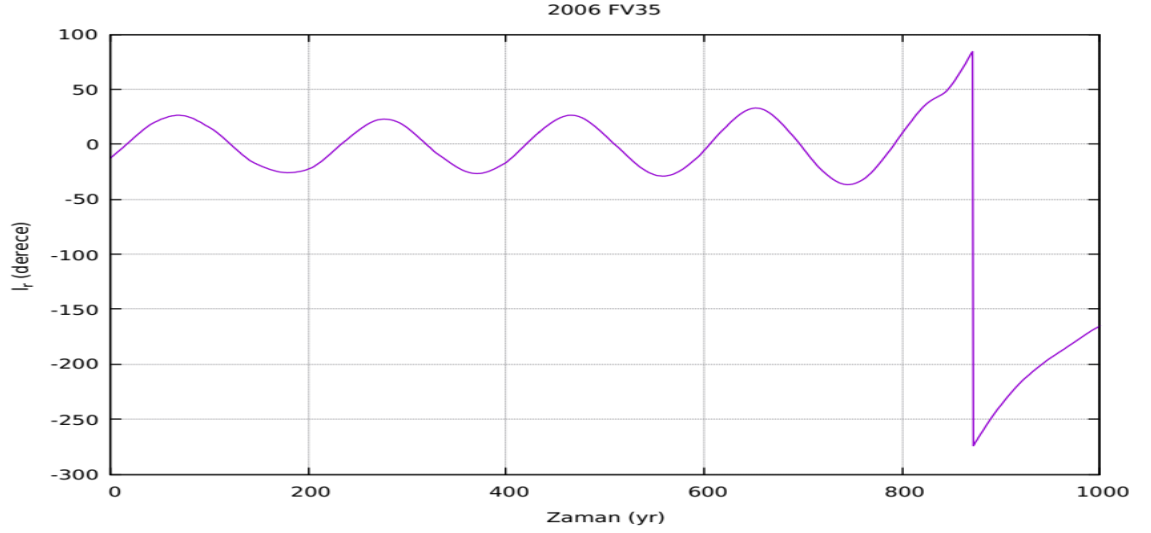
**Şekil 4.4.** 2004 GU9 asteroidine ait zaman-zaman-rölatif ortalama boylam grafiği

Şekil 4.4'de yarı-uydu yörüngesinde bulunan 2004 GU9 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği yer almaktadır. Yarı-uydu tanımında olduğu gibi, bu tür yörüngelerde bulunan cisimler rölatif ortama boylam değerleri yaklaşık  $0^\circ$  civarında salınım yaparlar. 2004 GU9 asteroidi Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de görüldüğü üzere ~600 yıl sonra yarı-uydu yörüngesinden at nalı yörüngesine geçiş yapacaktır ve bir süre bu yörüngede hareketine devam edecektir.



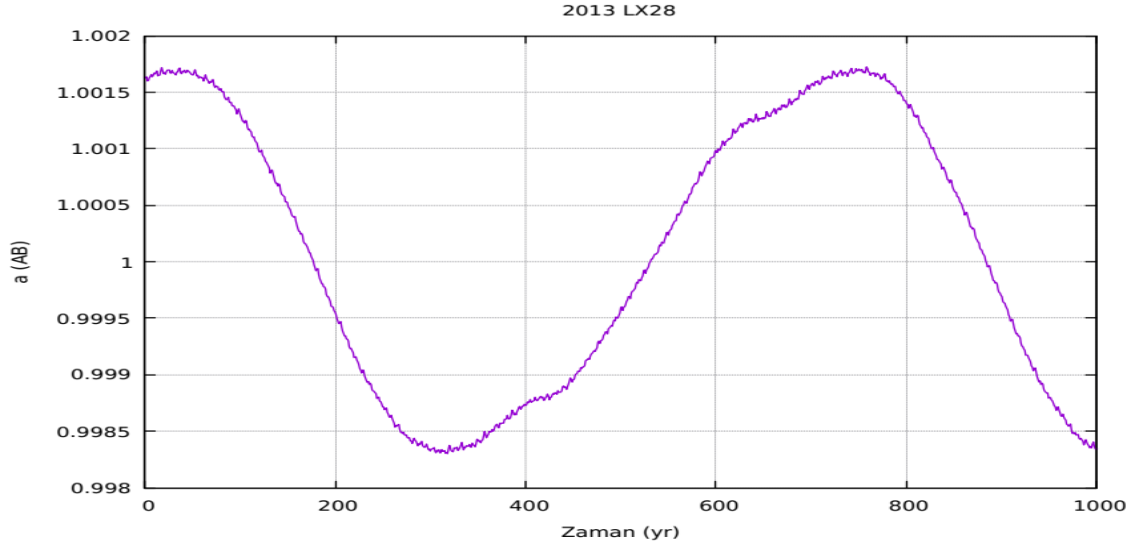
**Şekil 4.5.** 2006 FV35 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği

Şekil 4.3'te yarı-uydu yörüngesine ait 2006 FV35 asteroidi yer almaktadır. Şekilden anlaşılacağı üzere cisim ~800 yıl kadar yarı-uydu yörüngesinde kalacaktır ve sonrasında yörüngesinden ayrılacağı görülmektedir. Yarı uydu yörüngelerindeki cisimlerin yarı büyük eksen uzunlukları genellikle 1'e yakın değerlerde salınım yapmaktadır.



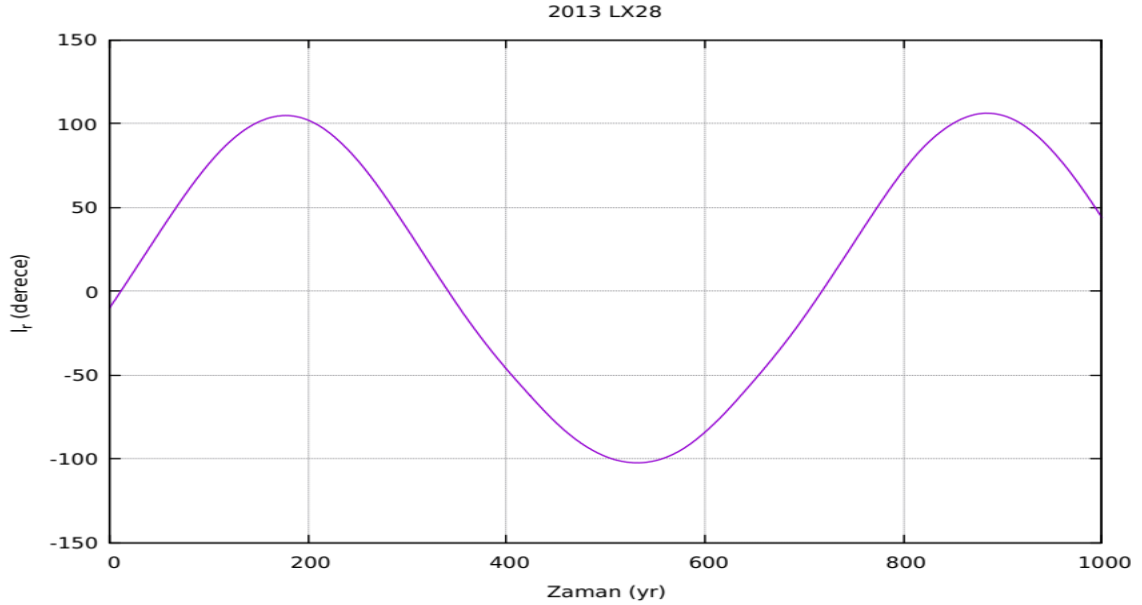
**Şekil 4.6.** 2006 FV35 asteroidine ait zaman-zaman-rölatif ortalama boylam grafiği

Şekil 4.6'da yarı-uydu yörüngesinde bulunan 2006 FV35 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği yer almaktadır. 2006 FV35 cismi günümüzden ~820 yıl boyunca yarı-uydu yörüngesinde kalacaktır. Ancak Şekil 4.5'te yarı büyük eksenin bu süreçte bozulduğu görülmektedir. Bundan dolayı cismin gelecekteki hareketini tahmin etmek için rölatif ortalama boylam grafiğine (Şekil 4.6'ya) bakılır. Yarı uydu yörüngelerindeki cisimlerin rölatif ortalama boylam değerleri  $0^\circ$  civarında salınım yaptığından 2006 FV35 cismi ~820 yıl sonra bu salınımı bozacaktır. Bundan dolayı cisim yarı uydu yörüngesinden ayrılacaktır.



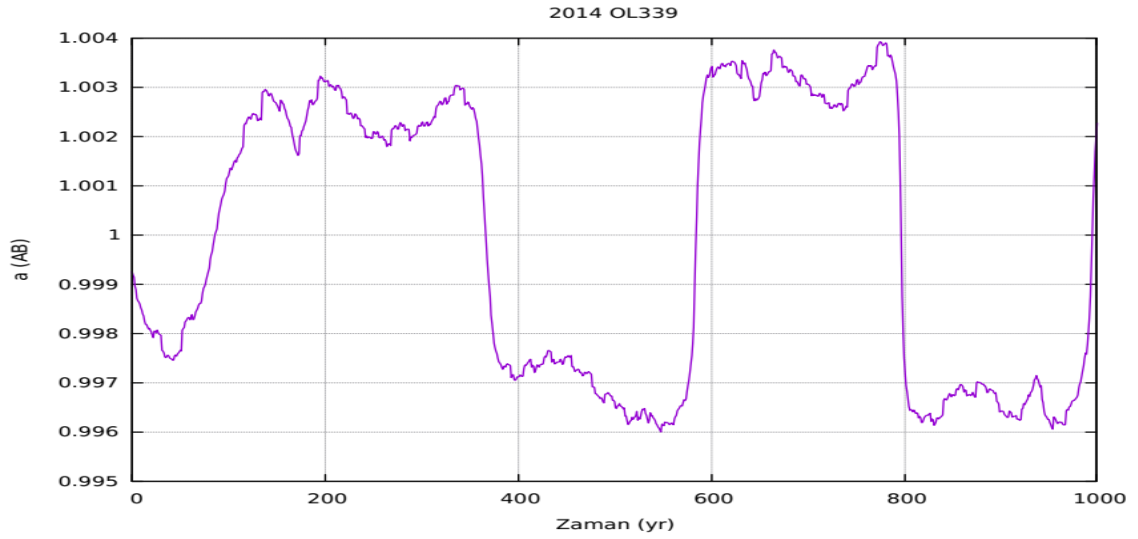
**Şekil 4.7.** 2013 LX28 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği

Şekil 4.7’de yarı-uydu yörüngesine ait 2013 LX28 asteroidi yer almaktadır. Cisim uzun dönemli bir yarı-büyük eksen salınımına sahiptir ve 1000 yıldan fazla yarı uydu yörüngesinde kalacaktır.



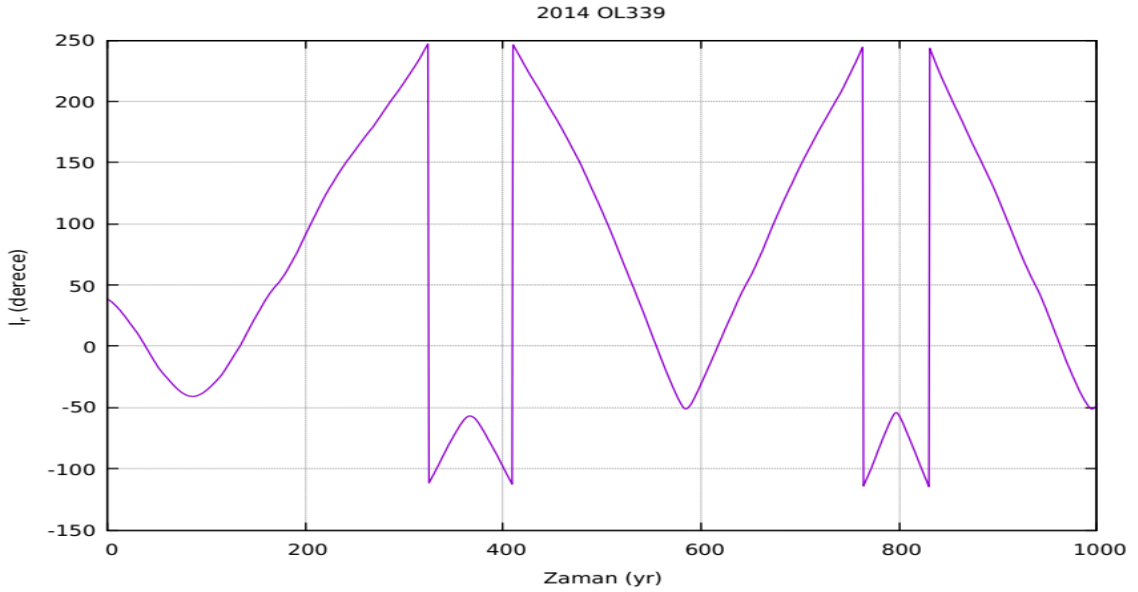
**Şekil 4.8.** 2013 LX28 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği

Şekil 4.8’de yarı-uydu yörüngesinde bulunan 2013 LX28 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği yer almaktadır. Cismin günümüz dahil 1000 yıl kadar daha yarı-uydu yörüngesinde kalacağı görülmektedir. Yarı uydu yörüngesinde bulunan cisimler için rölatif ortalama boylam değeri  $0^\circ$  civarında olmalıdır. Ancak 2013 LX28 asteroidine ait grafikte (Şekil 4.8) salınım aralığı  $\pm 100^\circ$  civarındadır. Benzer grafiği de la Fuente Marcos ve la Fuente Marcos (2014) yaptıkları çalışmada elde etmişlerdir.



**Şekil 4.9.** 2014 OL339 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği

Şekil 4.9'da yarı-uydu yörüngesine ait 2014 OL339 asteroidi yer almaktadır. Cisim günümüz itibari ile yarı-uydu özelliği göstermektedir. Fakat bu süre kısadır (~160-170 yıl). Cismin hareketi ~200 yıldan itibaren at nalı gibi görünse de aslında at nalı yörüngeye geçiş yapmamaktadır.



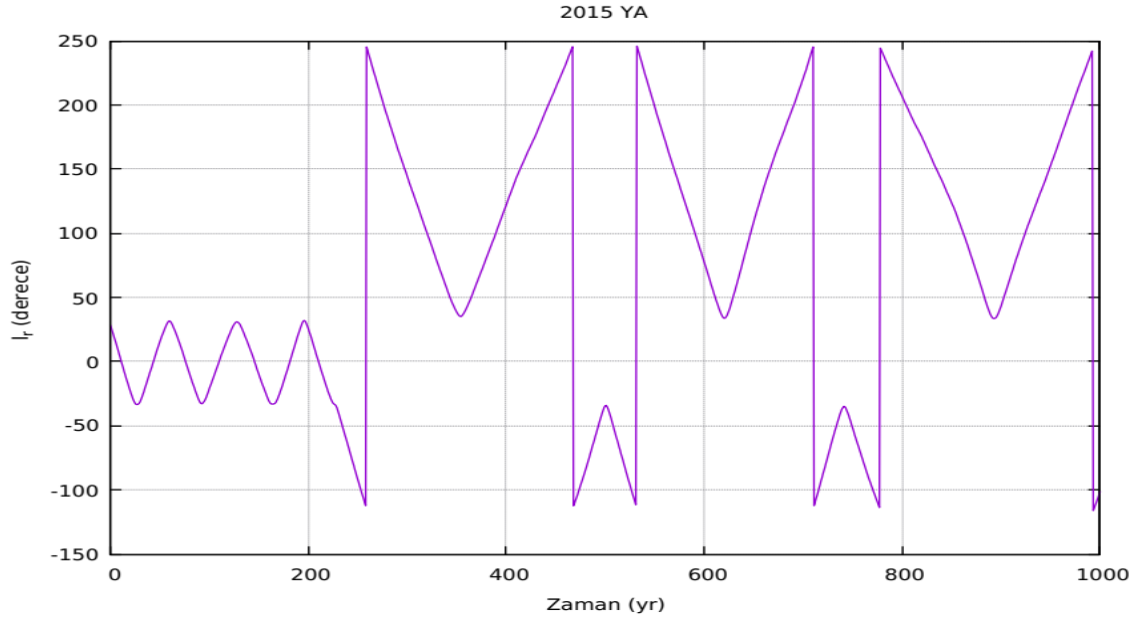
**Şekil 4.10.** 2014 OL339 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği

Şekil 4.10'da yarı-uydu yörüngesine ait 2014 OL339 asteroidi yer almaktadır. Şekil 4.9 ile karşılaştıracak olursak, rölatif ortalama boylam grafiği bize cismin ~350 yıl sonra at nalı yörüngesine geçiş yapacağını göstermektedir. Yarı uydu yörüngelerinde bulunan cisimlerin rölatif ortalama boylam değerleri  $0^\circ$  civarında olmalıdır. Şekil 4.10'da cisim günümüz itibari ile ~200 yıl kadar yarı uydu yörüngesinde salınım yapmaktadır. At nalı yörüngelerindeki cisimlerin rölatif ortalama boylam değerleri  $\pm 180$  civarında olduğu için cismin ~200 yıl sonra at nalı yörüngesine geçiş yapacağı yorumu yapılabilir.



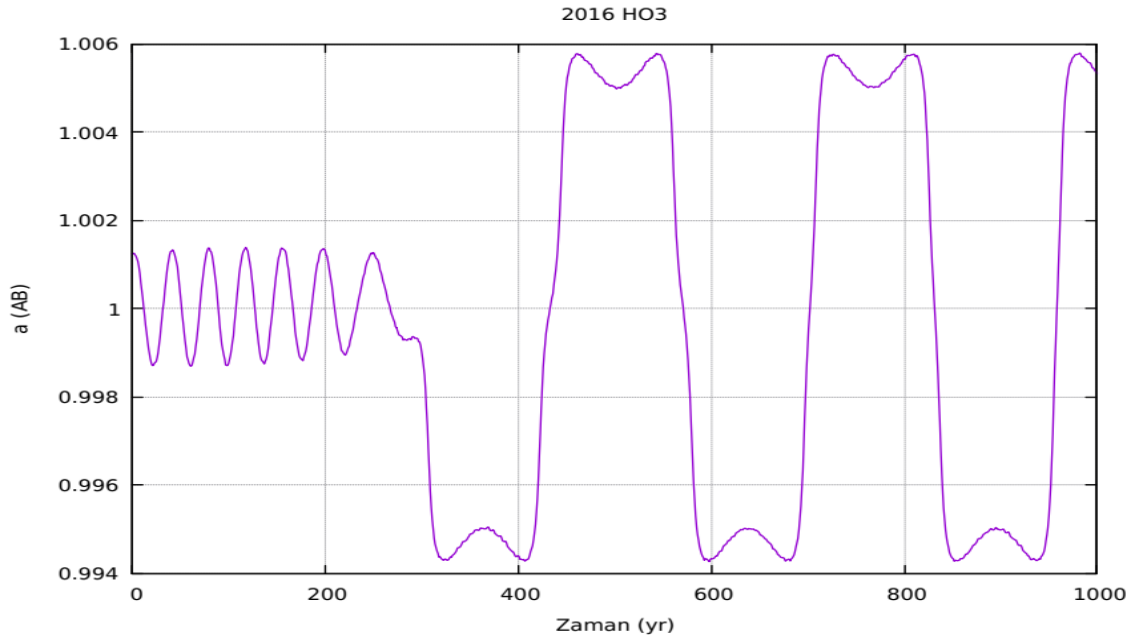
**Şekil 4.11.** 2015 YA asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği

Şekil 4.11’de yarı-uydu yörüngesine ait 2015 YA asteroidi yer almaktadır. Cisim 200 yıl kadar yarı-uydu yörüngesinde kaldıktan sonra ~300 yıl kadar at nalı yörüngesine girmektedir. Bu grafikte 600-700 yılları arasında görülmektedir. Öncesindeki 400 yıl boyunca cisim at nalı yörüngesinde değildir.



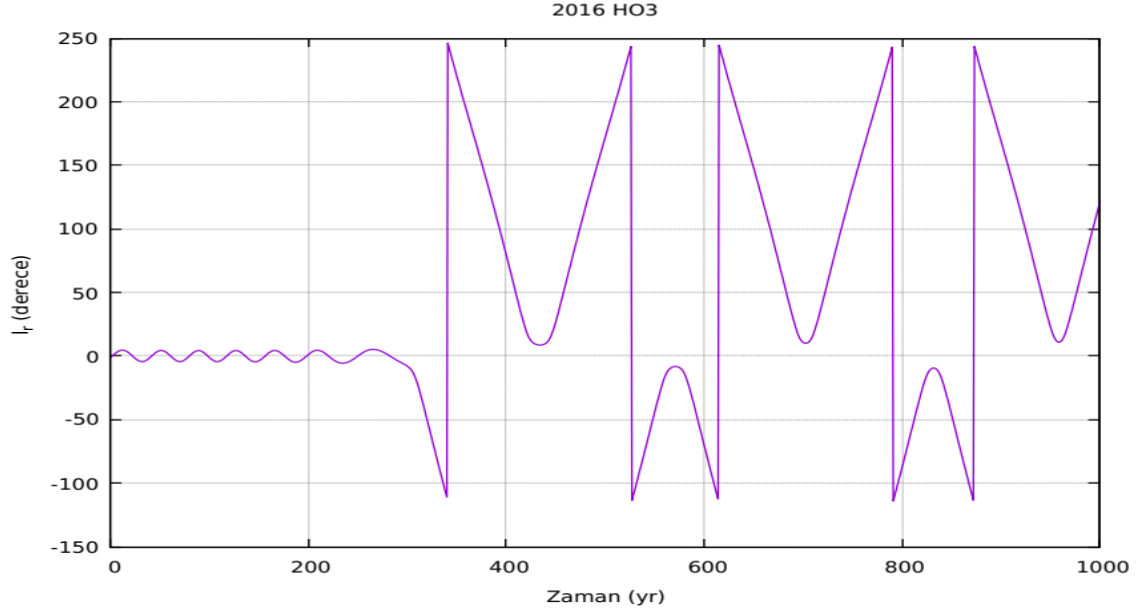
**Şekil 4.12.** 2015 YA asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği

Şekil 4.12’de yarı-uydu yörüngesinde ait 2015 YA asteroidi yer almaktadır. Grafiğe göre cisim ~200 yıl sonra at nalı yörüngesine geçiş yapacaktır ve uzun bir süre bu yörüngede hareketine devam edecektir. Bu durumu Şekil 4.11’de görmekteyiz. Ancak Şekil 4.11’deki at nalı hareketi düzenli bir at nalı hareketi gibi görülmemektedir. Bu durumun sebebi at nalı yörüngelerinde bulunan cisimlerin rölatif ortalama boylam değerleri  $\pm 180^\circ$  civarında olmalıdır. 2015 YA cismi ~200 yıldan sonra böyle bir rölatif ortalama boylam değerinde salınım yapacağından at nalı yörüngesine geçiş yapabileceği sonucuna varılabilir.



**Şekil 4.13.** 2016 HO3 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği

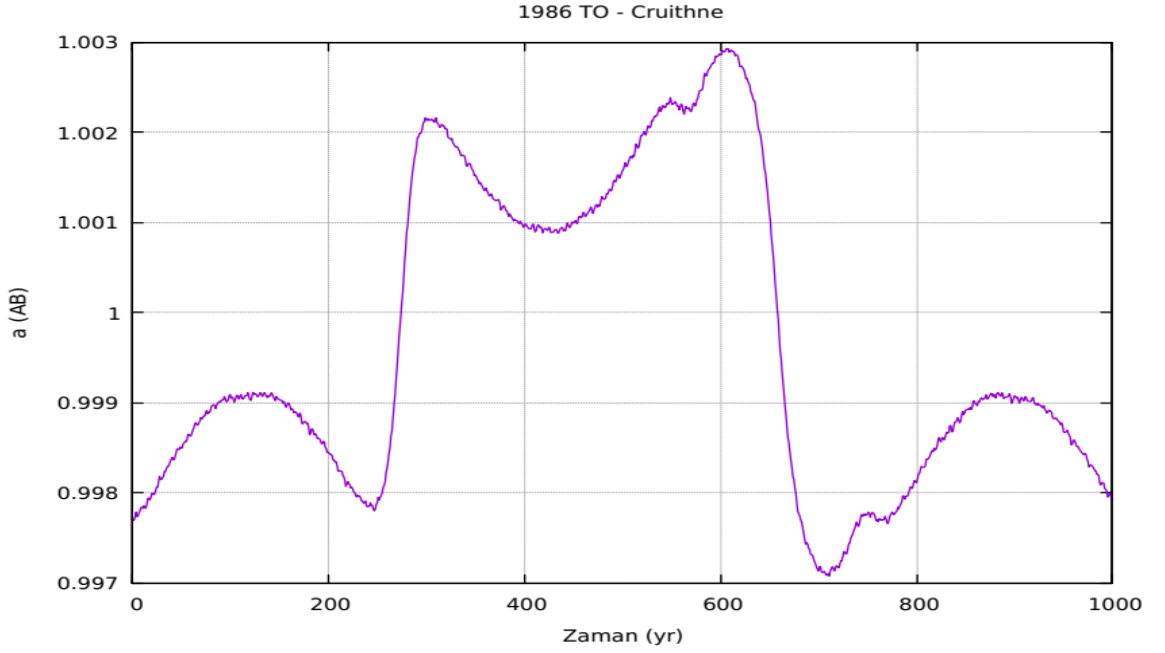
Şekil 4.13’de yarı-uydu yörüngesine ait 2016 HO3 asteroidi yer almaktadır. Cisim ~230-240 yıl yarı-uydu yörüngesinde kaldıktan sonra at nalı yörüngesine geçiş yapmaktadır ve uzun yıllar at nalı yörüngesinde kalacaktır.



**Şekil 4.14.** 2016 HO3 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği

Şekil 4.14’de yarı-uydu yörüngesine ait 2016 HO3 asteroidi yer almaktadır. Cisim ~350 yıldan sonra at nalı yörüngesine geçiş yapmaktadır ve bir süre at nalı yörüngesinde hareketine devam edeceği görülmektedir. Şekil 4.14 ve Şekil 4.12 birbirlerine salınımlar göstermektedir. 2016 HO3 asteroidi ~350 yıl kadar  $0^{\circ}$  civarında salınım yaparken 350 yıldan sonra salınım aralığı  $\pm 180^{\circ}$  civarına çıkmaktadır. Bu durumda cismin ~350 yıl sonra at nalı yörüngesine geçiş yapabileceği sonucuna varılabilir.





**Şekil 4.15.** Cruithne (1986 TO) asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği

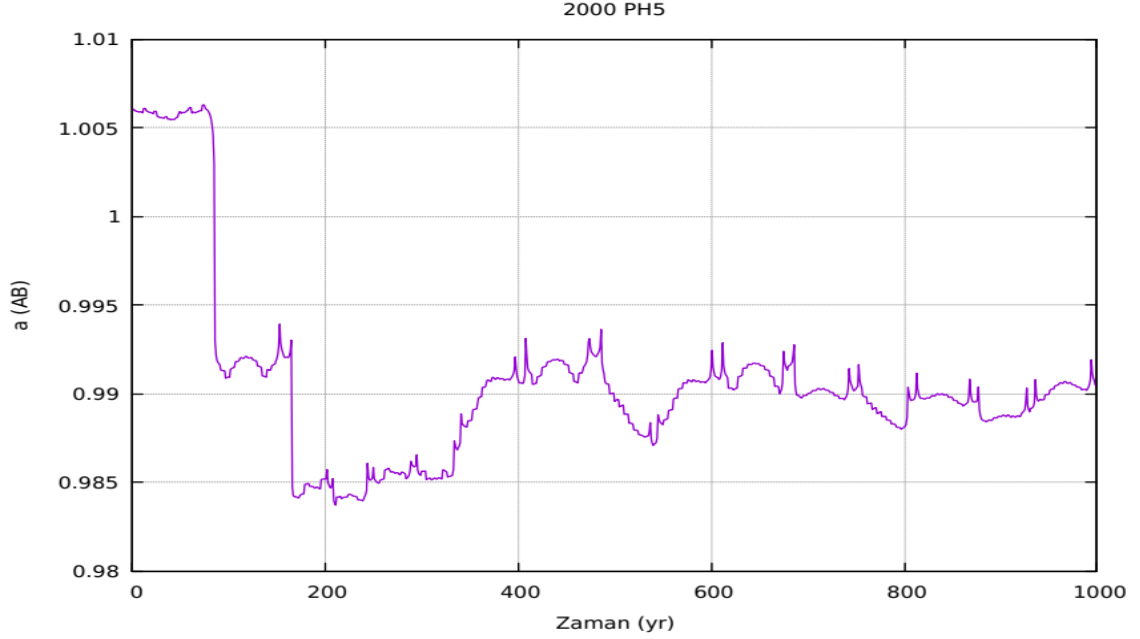
Şekil 4.15'te at nalı yörüngesine ait 1986 TO asteroidi yer almaktadır. Cisim olağandışı at nalı yörüngesi sınıfına aittir. Olağandışı at nalı yörüngesine ait cisimlerin zamana karşı yarı-büyük eksen grafiklerindeki genlikler genellikle uzun ve kısadır. 1986 TO asteroidine ait grafikte hem uzun hemde kısa genlikleri görebilmekteyiz.



**Şekil 4.16.** Cruithne (1986 TO) asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği

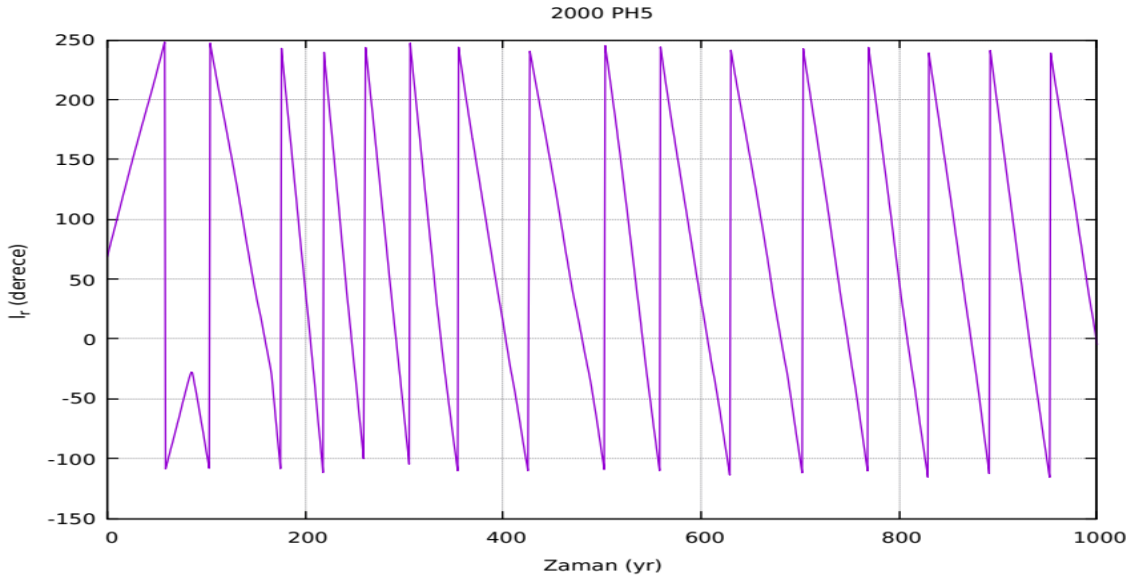
Şekil 4.16'da at nalı yörüngesine ait 1986 TO asteroidi yer almaktadır. 1986 TO asteroidi olağandışı at nalı sınıfına ait bir asteroiddir. At nalı yörüngelerin rölatif ortalama boylam değerleri  $\pm 180^\circ$  civarında olduğundan cismin önümüzdeki 1000 için at

nalı yörüngesinde kalacağı sonucuna varılabilir.



**Şekil 4.17.** 2000 PH5 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği

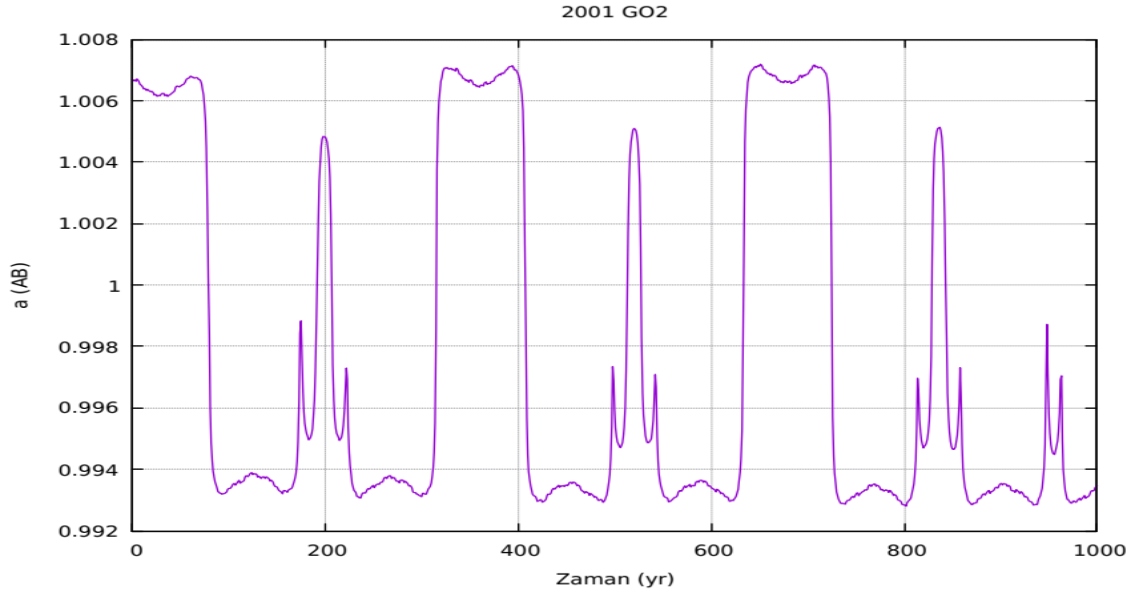
Şekil 4.17’de olağandışı at nalı yörüngesine ait 2000 PH5 asteroidi yer almaktadır. Cisim ~180 yıl kadar at nalı hareketini sürdürdükten sonra yörüngesinin bozulacağı görülmektedir. At nalı yörüngelerindeki cisimlerin yarı büyük eksen değerleri genel olarak  $0.989 < a < 1.013$  aralığında olması gerektiğinden cismin ~180 yıl kadar at nalı yörüngede kalacağı sonucuna varılabilir.



**Şekil 4.18.** 2000 PH5 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği

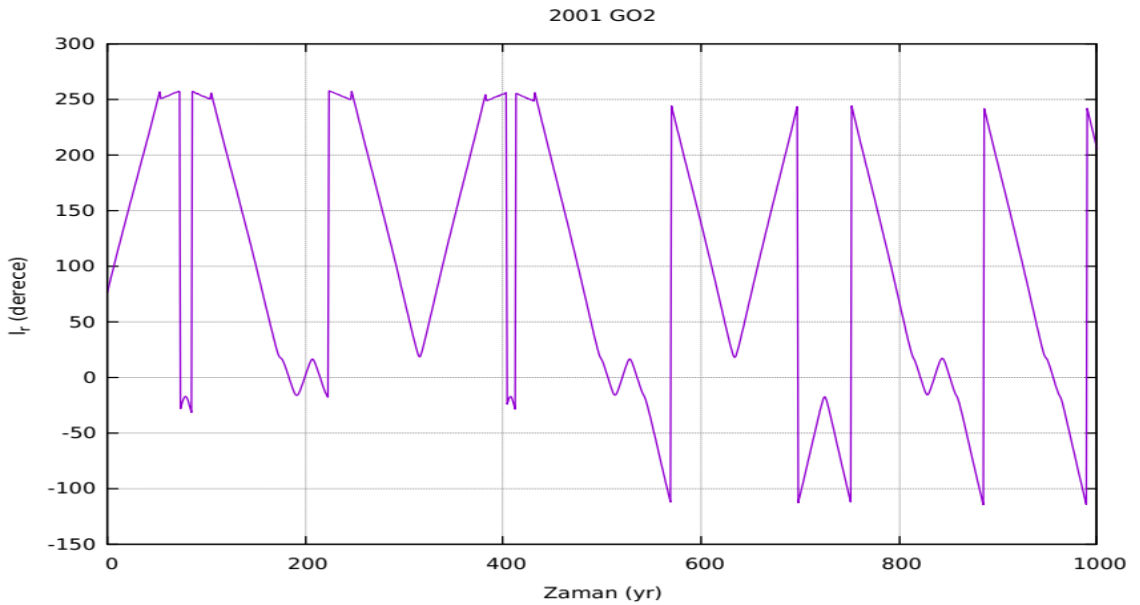
Şekil 4.18’de at nalı yörüngesine ait 2000 PH5 asteroidi yer almaktadır. Cisim

olağandışı at nalı yörüngesi sınıfına aittir.



**Şekil 4.19.** 2001 GO2 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği

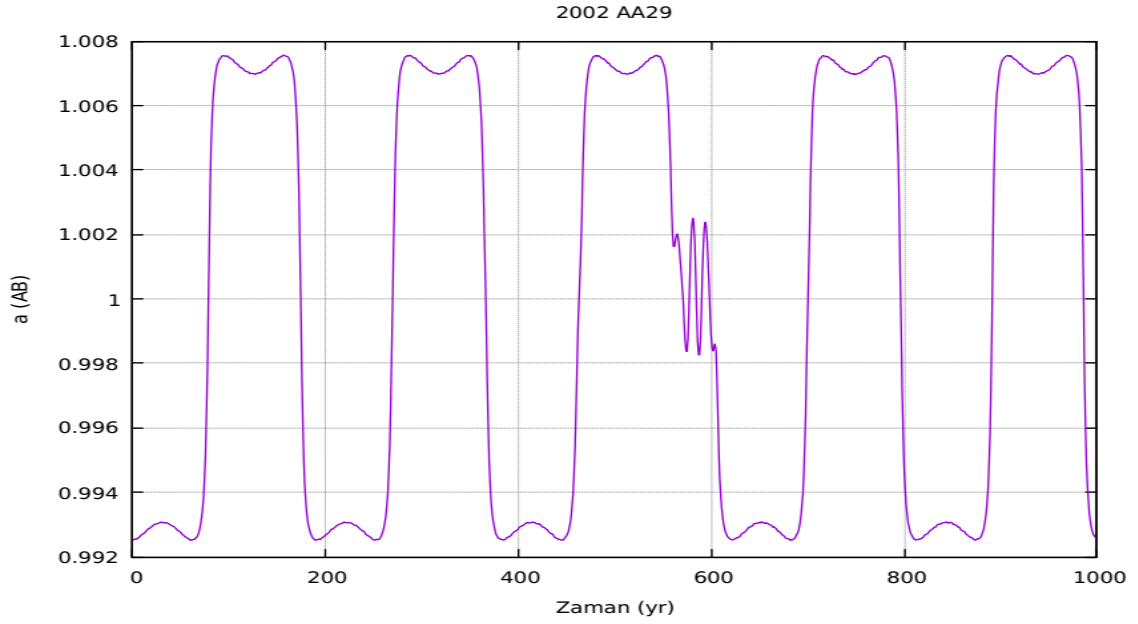
Şekil 4.19’da asimetric at nalı yörüngesine ait 2001 GO2 asteroidi yer almaktadır. Cisim günümüzden ~200 yıl boyunca at nalı yörüngesinde kalacaktır. Ardından yörüngesinin bozulduğu görülmektedir (~170-220. yıl). Bu hareketi ~250 yılda bir tekrar etmektedir.



**Şekil 4.20.** 2001 GO2 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği

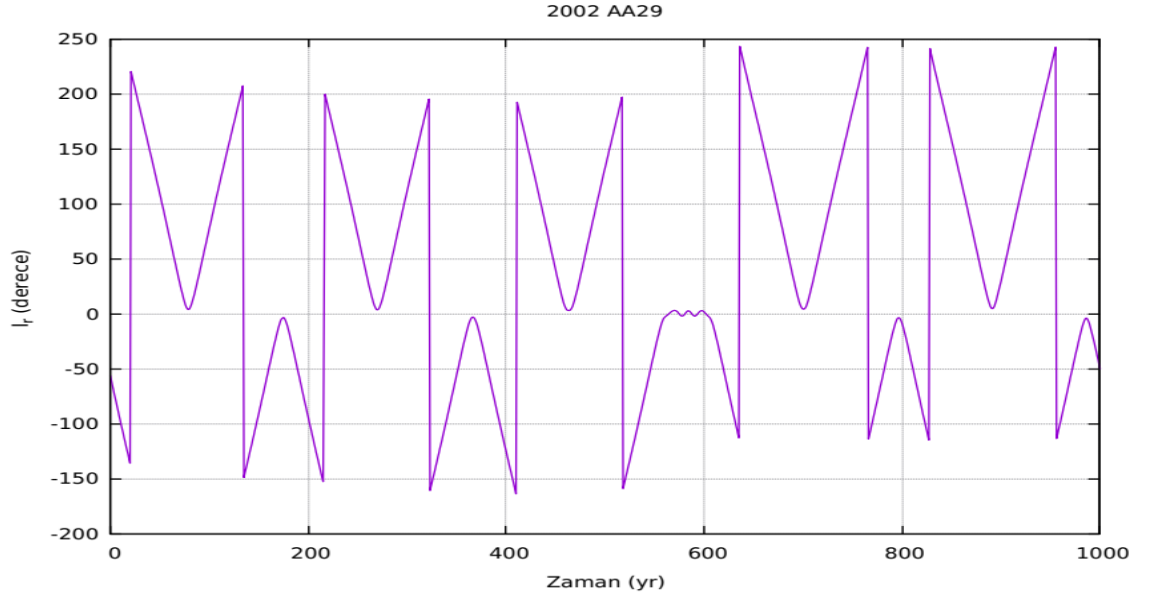
Şekil 4.20’de at nalı yörüngesine ait 2001 GO2 asteroidi yer almaktadır. Cisim asimetric at nalı sınıfına aittir. At nalı yörüngelerinde bulunan cisimler için yarı büyük eksen değeri salınım aralığı  $0.989 < a < 1.013$  arasındadır. Rölatif ortalama boylam değeri aralığı ise  $\pm 180^\circ$  civarındadır. Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de  $a$  ve  $l_r$  salınım

aralıklarının değiştiğini görmekteyiz. Buradan hareketle cismin ~800 yıl sonra yörüngesini terk edeceği sonucuna varılabilir.



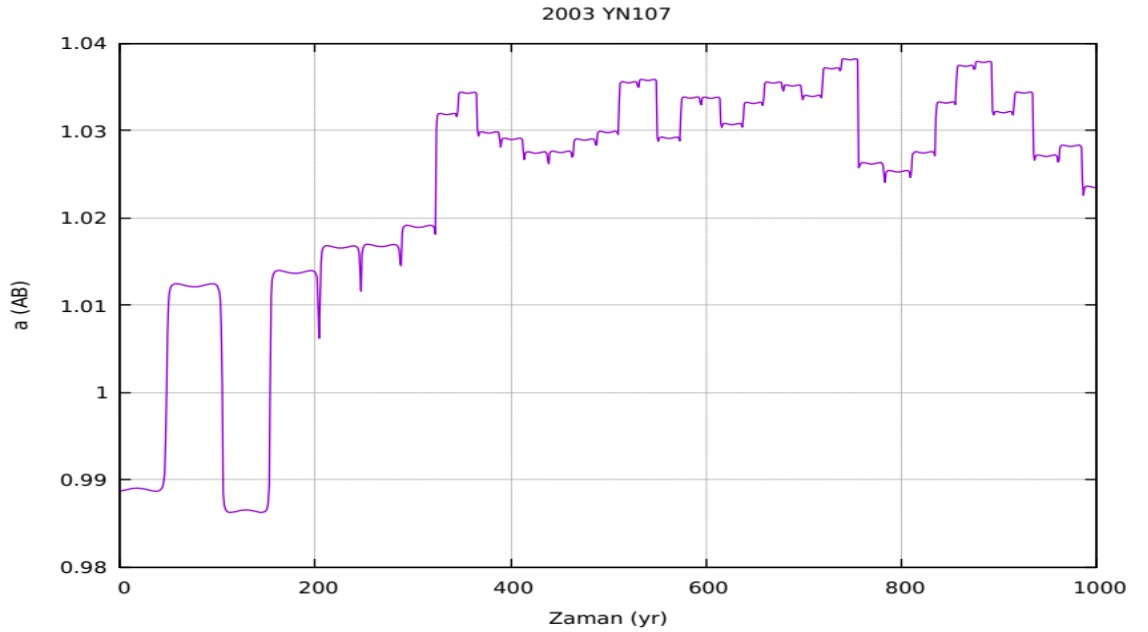
**Şekil 4.21.** 2002 AA29 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği

Şekil 4.21’de neredeyse-simetrik at nalı yörüngesine ait 2002 AA29 asteroidi yer almaktadır. Cisim ~560 yıl kadar at nalı yörüngesinde kaldıktan sonra ~40 yıl kadar yarı-uydu yörüngesine geçiş yapmaktadır. Sonrasında tekrar at nalı yörüngesine geçiş yaparak hareketine devam etmektedir.



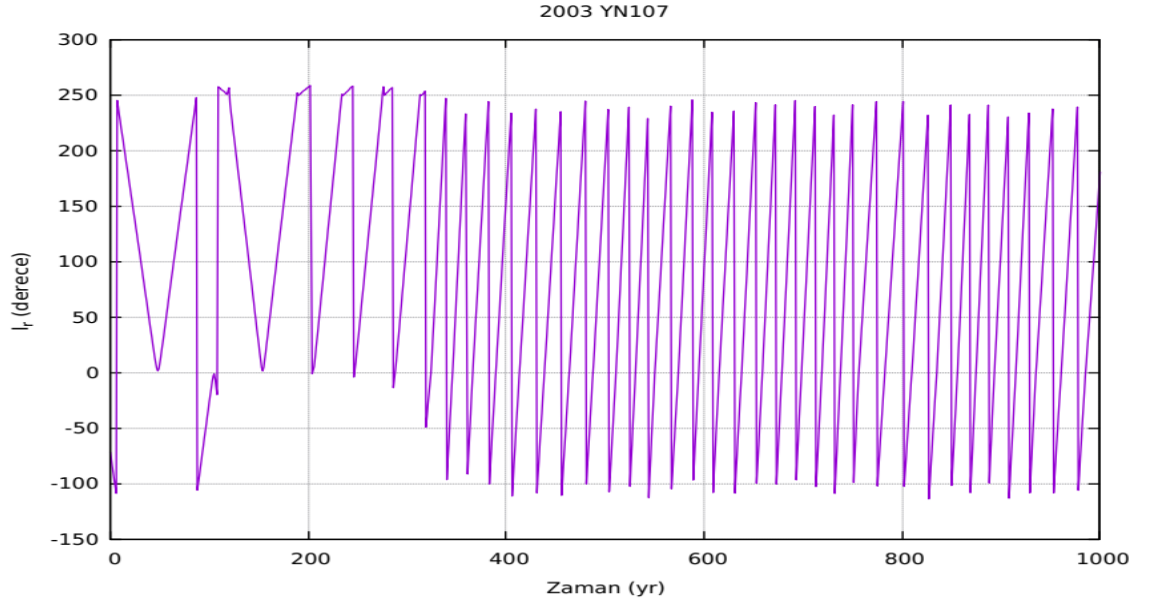
**Şekil 4.22.** 2002 AA29 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği

Şekil 4.22’de at nalı yörüngesine ait 2002 AA29 asteroidi yer almaktadır. Cisim neredeyse-simetrik at nalı yörüngesine aittir. Şekil 4.21 ve 4.22’de görüldüğü gibi ~550 yıl sonra cisim yarı-uydu yörüngesine geçiş yapacaktır. Daha sonra tekrar at nalı yörüngesine geçiş yapıp bir süre daha bu yörüngede hareketine devam edecektir.



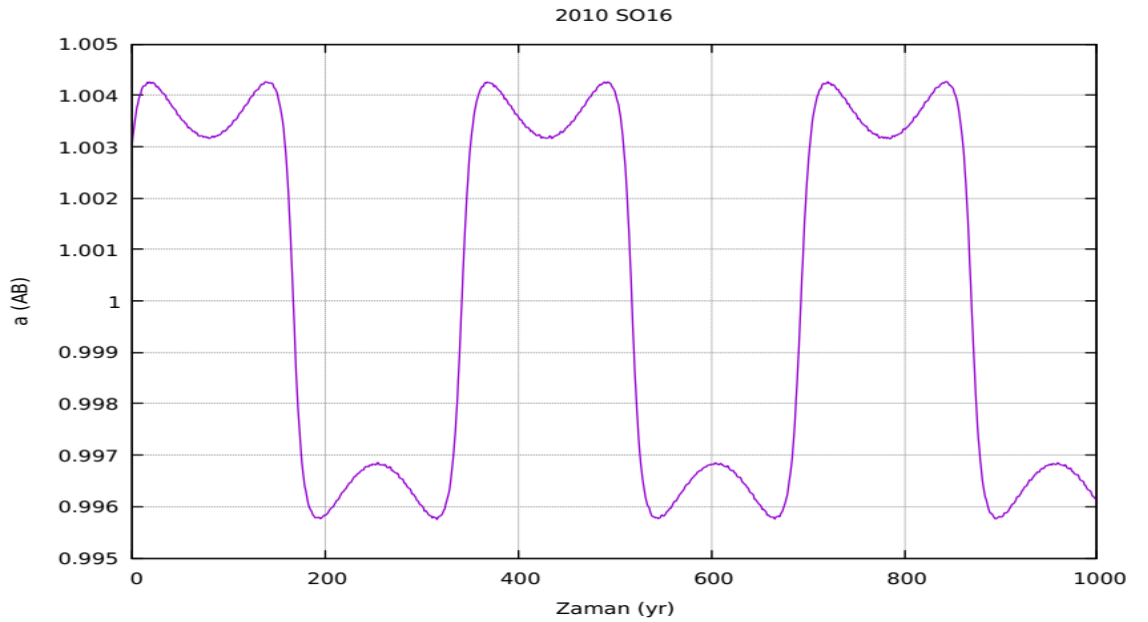
**Şekil 4.23.** 2003 YN107 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği

Şekil 4.23’de neredeyse-simetrik at nalı yörüngesine ait 2003 YN107 asteroidi yer almaktadır. At nalı yörüngelerindeki cisimlerin yarı büyük eksen salınım aralığı  $0.989 < a < 1.013$  olduğundan cismin ~200 yıl sonra yörüngesinden uzaklaşacağı sonucuna varılabilir.



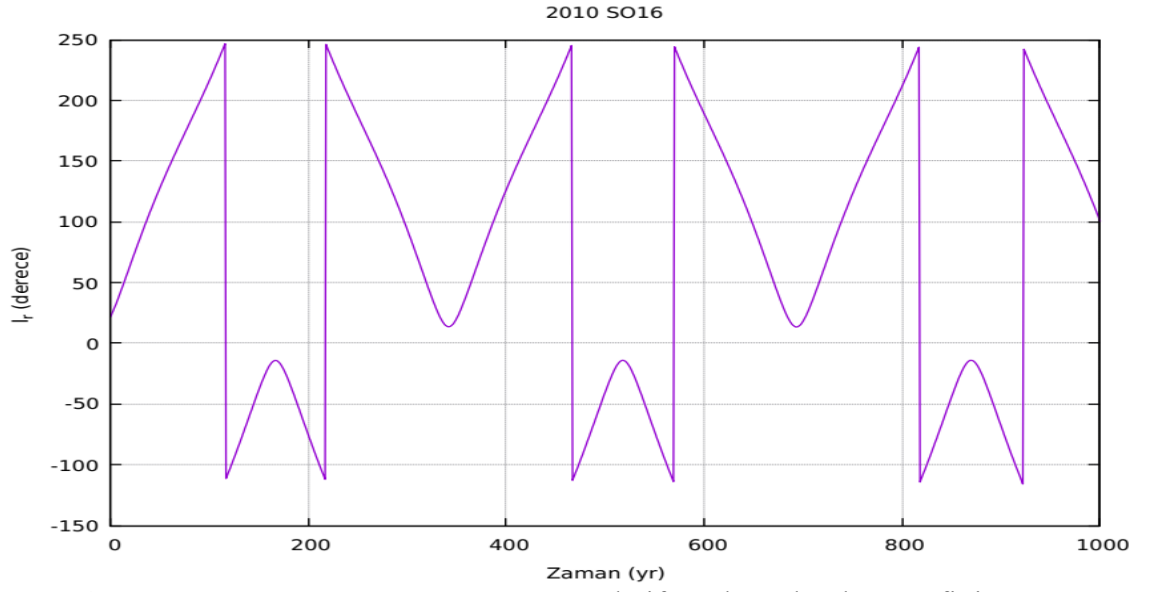
**Şekil 4.24.** 2003 YN107 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği

Şekil 4.24’de at nalı yörüngesine ait 2003 YN107 asteroidi yer almaktadır. Cisim neredeyse-simetrik at nalı yörünge sınıfına aittir. 2003 YN107 asteroidi ~200 yıl sonra yörünge tipinin değişeceği görülmektedir. Bu durumu Şekil 4.23 ve 4.24’de görebilmekteyiz.



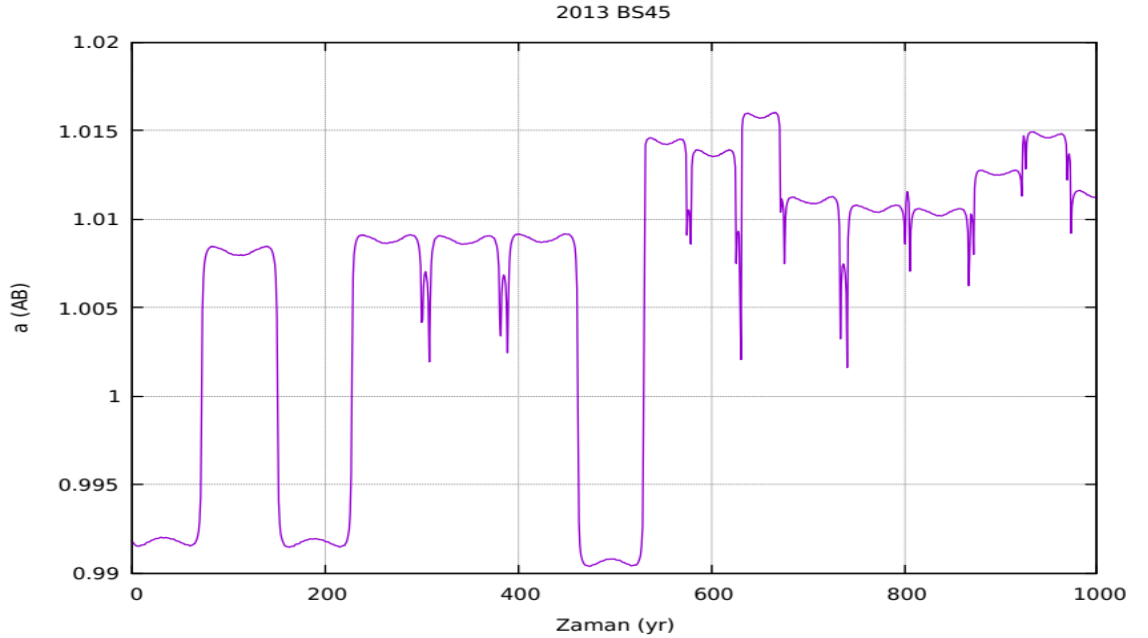
**Şekil 4.25.** 2010 SO16 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği

Şekil 4.25’te neredeyse-simetrik at nalı yörüngesine ait 2010 SO16 asteroidi yer almaktadır. Neredeyse-simetrik at nalı cisimleri için yarı büyük eksen salınım aralığı ( $0.989 < a < 1.013$ ) göz önüne alındığında cismin günümüzden itibaren 1000 yıl kadar at nalı yörüngesinde kalacağı görülmektedir.



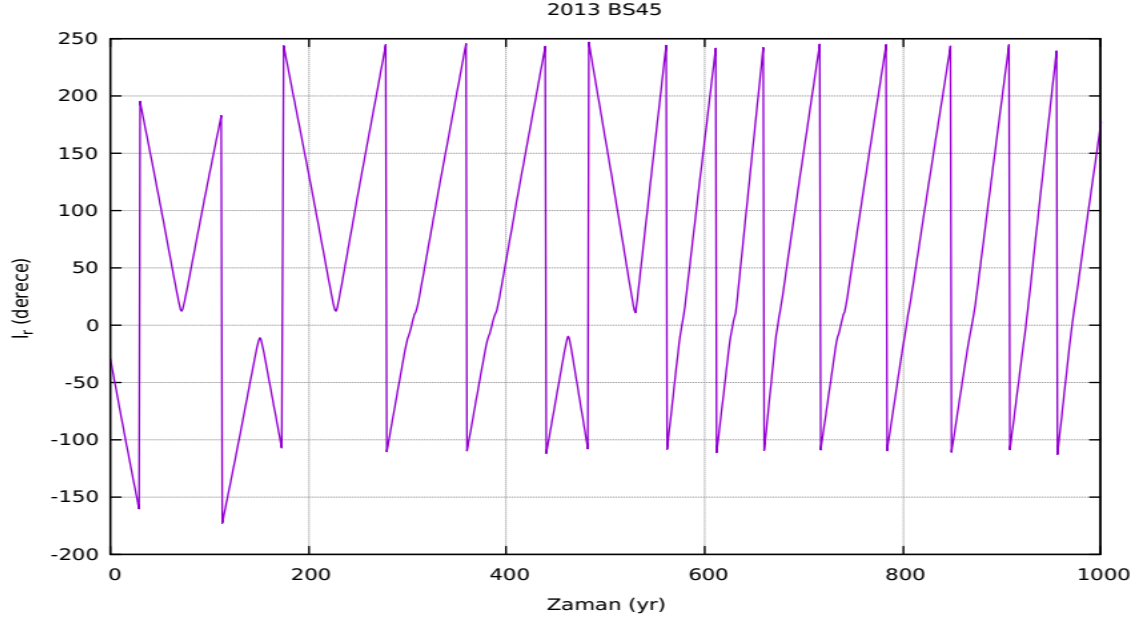
**Şekil 4.26.** 2010 SO16 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği

Şekil 4.26’da at nalı yörüngesine ait 2010 SO16 asteroidi yer almaktadır. Cisim neredeyse-simetrik at nalı yörüngesine aittir. Cisim diğer neredeyse-simetrik at nalı cisimi olan 2002 AA29 asteroidi gibi düzenli bir periyoda sahiptir. İki cisim de ~200 yıllık aralıklarla periyotlarını tamamlamaktadırlar. Günümüzden 1000 yıl kadar bir sürede at nalı yörüngesinde kalacağı görülmektedir.



**Şekil 4.27.** 2013 BS45 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği

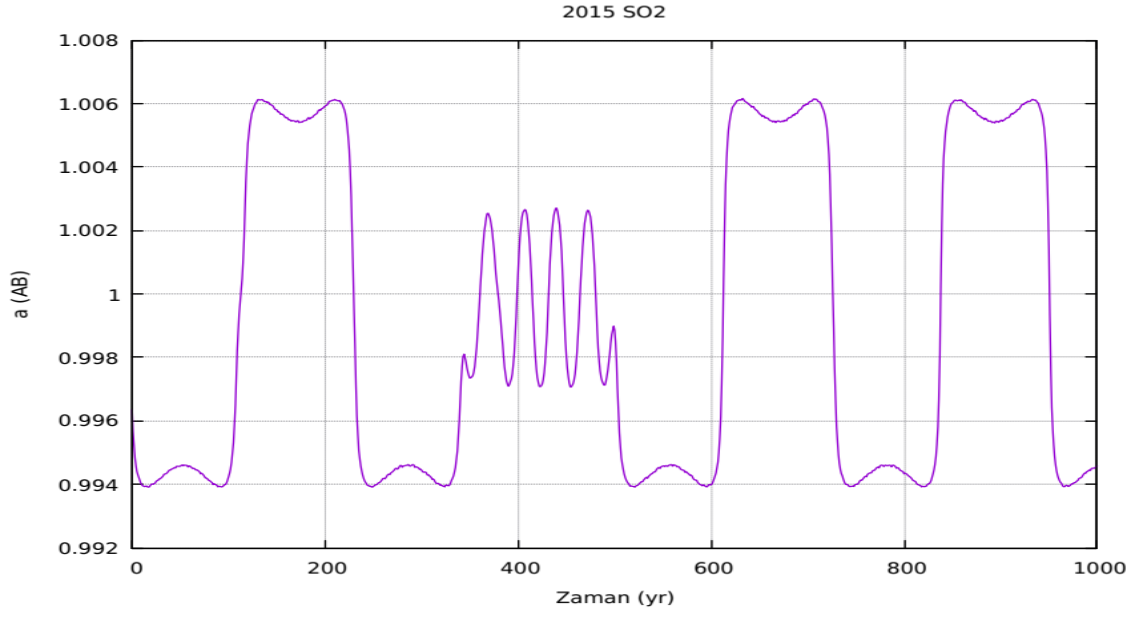
Şekil 4.27’de neredeyse-simetrik at nalı yörüngesine ait 2013 BS45 asteroidi yer almaktadır. Neredeyse-simetrik at nalı yörüngeleri için yarı büyük eksen salınım aralığı ( $0.989 < a < 1.013$ ) göz önüne alındığında, cismin  $\sim 300$  yıl sonra yörüngesinden ayrılacağını ve tekrar kısa süreliğine at nalı yörüngesinde salınım yaptıktan sonra tamamen yörüngesini değiştireceği sonucuna varılabilir.



**Şekil 4.28.** 2013 BS45 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği

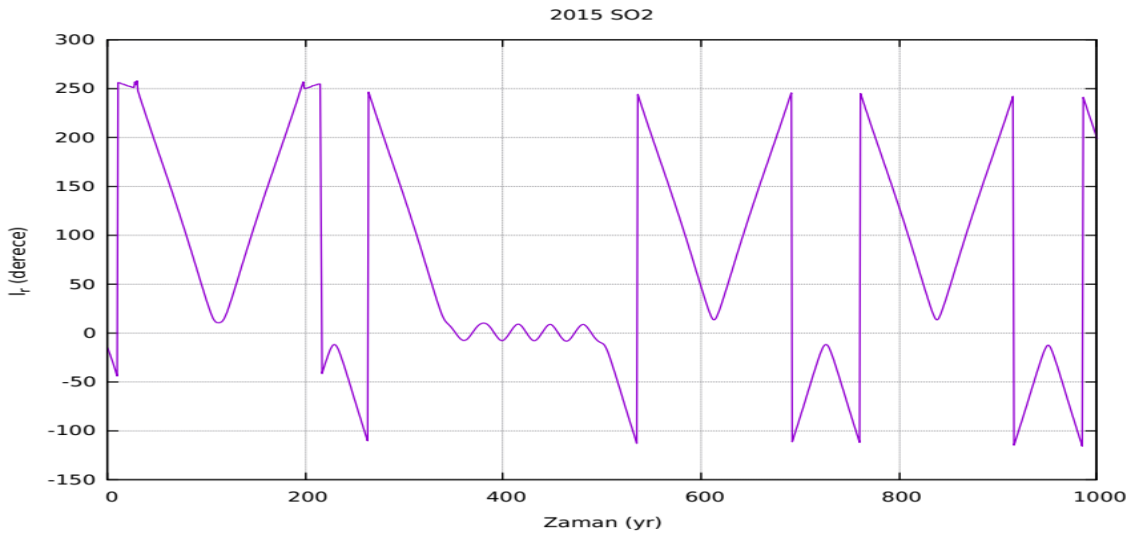
Şekil 4.28’de at nalı yörüngesine ait 2013 BS45 asteroidi yer almaktadır. Cisim neredeyse-simetrik at nalı yörüngesi sınıfına aittir. Neredeyse-simetrik at nalı yörüngelerinde bulunan cisimlerin rölatif ortalama boylam değerleri  $\pm 180^\circ$  civarındadır. Şekil 4.28’de bu değer  $\sim 300$  yıl kadar sonra değişmektedir. Buradan cismin  $\sim 300$  yıl sonra yörüngesinden ayrılacağı sonucunu bizlere vermektedir.





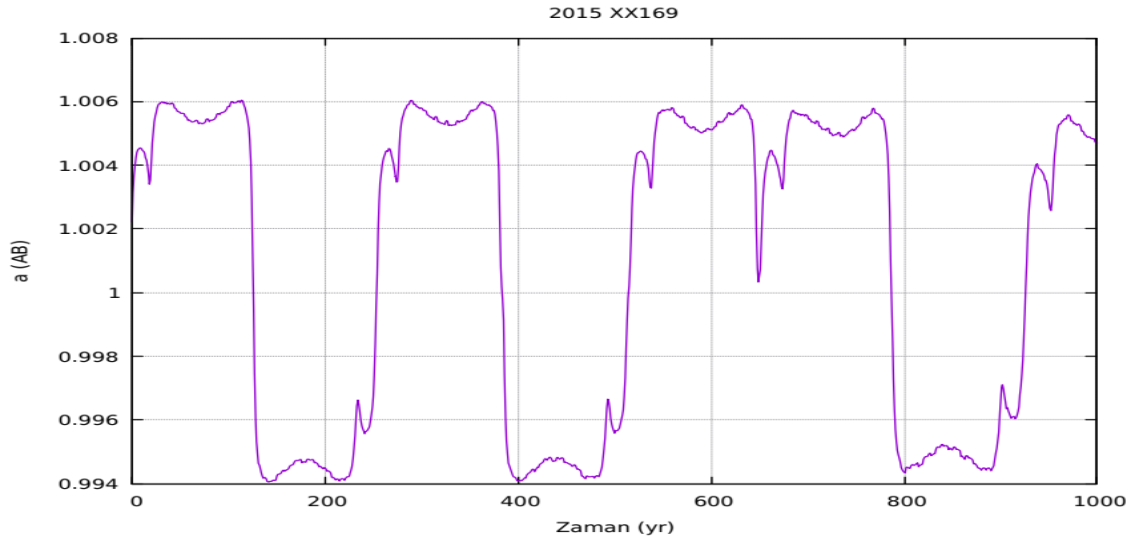
**Şekil 4.29.** 2015 SO2 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği

Şekil 4.29’da neredeyse-simetrik at nalı yörüngesine ait 2015 SO2 asteroidi yer almaktadır. Cisim ~350 yıldan sonra yarı-uydu yörüngesine geçiş yapıp burada 150 yıl kadar hareketine devam etmektedir. Sonrasında tekrar at nalı yörüngesine geçiş yaparak uzun yıllar boyunca hareketine devam edecektir.



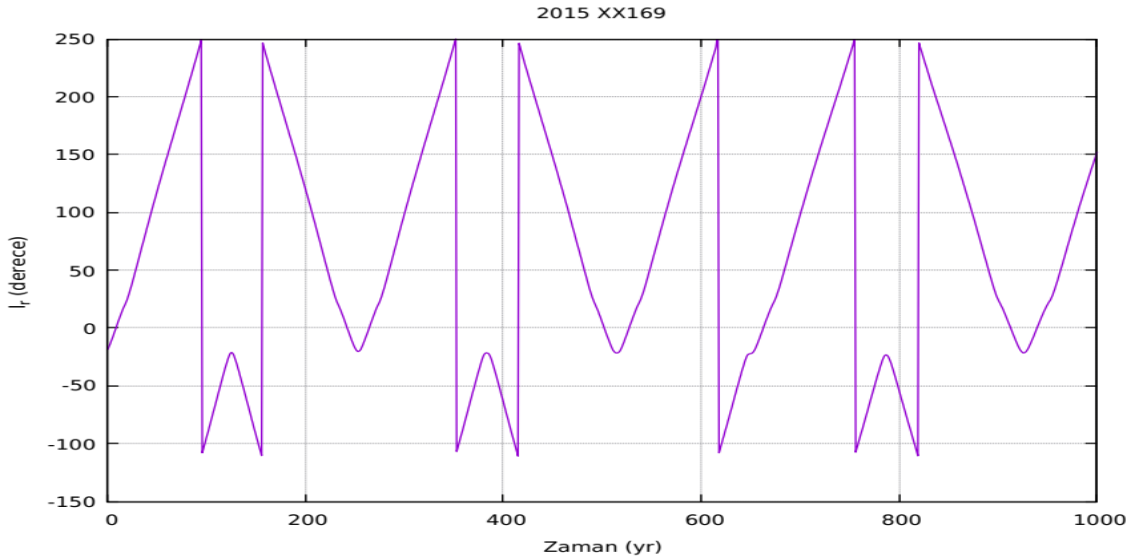
**Şekil 4.30.** 2015 SO2 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği

Şekil 4.30’da at nalı yörüngesine ait 2015 SO2 asteroidi yer almaktadır. Cisim neredeyse-simetrik at nalı sınıfına aittir. Cisim günümüzden ~350 yıl sonra yarı-uydu yörüngesine geçiş yapıp ~200 yıl kadar bu yörüngede kalacaktır. Sonrasında tekrar at nalı yörüngesine dönecektir.



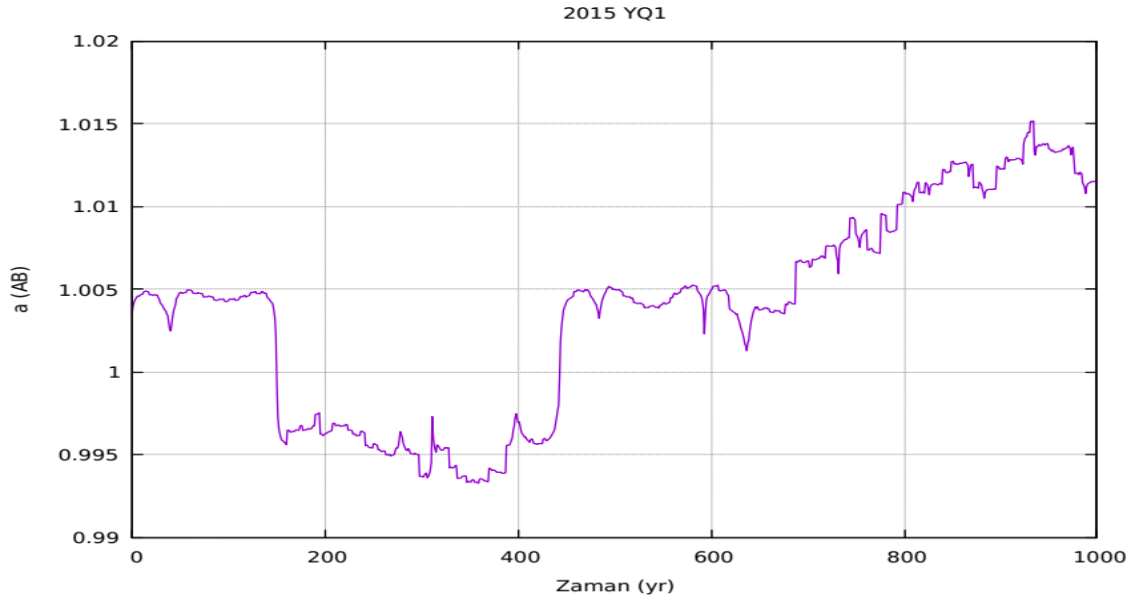
**Şekil 4.31.** 2015 XX169 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği

Şekil 4.31’de asimetrik at nalı yörüngesine ait 2015 XX169 asteroidi yer almaktadır. 2015 XX169 asteroidi izlediği yörünge boyunca Yer’e L4 veya L5 noktalarından birinden daha fazla yaklaştığı için grafikteki küçük pikler oluşmuştur. Tez kapsamında yapılan testler sonucunda cisim ~620 yıl kadar yörüngesinde kalacağı tespit edilmiştir. Ancak literatürde yer alan, de la Fuente Marcos ve de la Fuente Marcos (2016a) yaptıkları bir çalışmada aynı cismin yaklaşık 500 yıl at nalı olarak kalacağını ileri sürmüşlerdir.



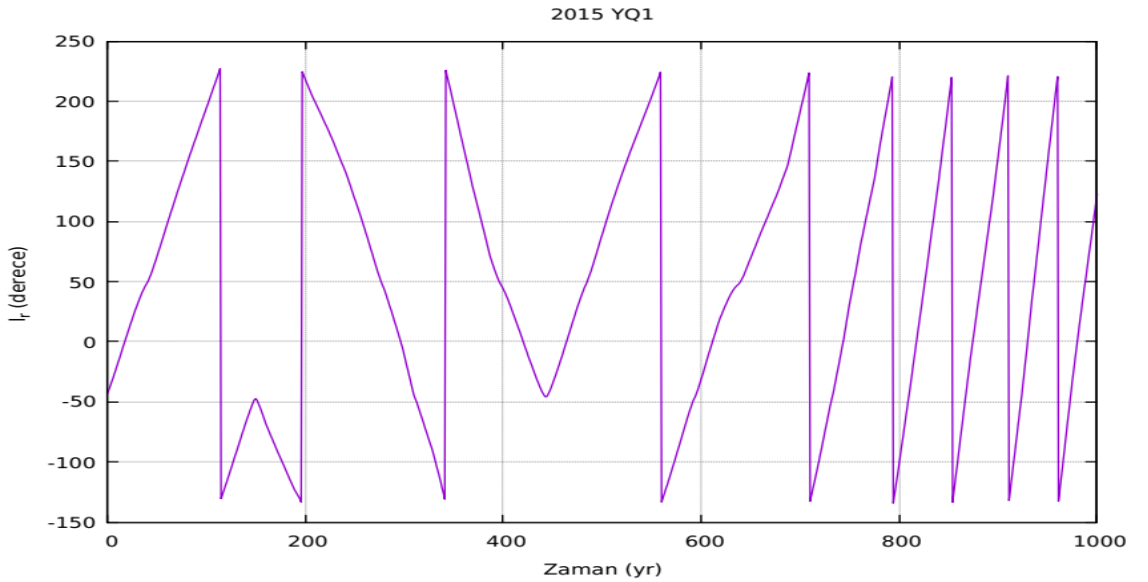
**Şekil 4.32.** 2015 XX169 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği

Şekil 4.32’de at nalı yörüngesine ait 2015 XX169 asteroidi yer almaktadır. Cisim asimetrik at nalı yörüngesi sınıfına aittir. Cismin yörüngesinde ~620 yıl sonra tedirginlik oluşacağı görülmektedir. Şekil 4.32’de ~620. yılda ~50° ortalama boylam değerinde meydana gelen bozulma bu durumu açıklamaktadır.



**Şekil 4.33.** 2015 YQ1 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği

Şekil 4.33’de asimetrik at nalı yörüngesine ait 2015 YQ1 asteroidi yer almaktadır. Asimetrik at nalı yörüngesindeki cisimlerin yarı büyük eksen salınım aralığı ( $0.994 < a < 1.006$ ) göz önüne alındığında cismin ~180yıl sonra yörüngesinin bozulacağı sonucuna varılabilir.

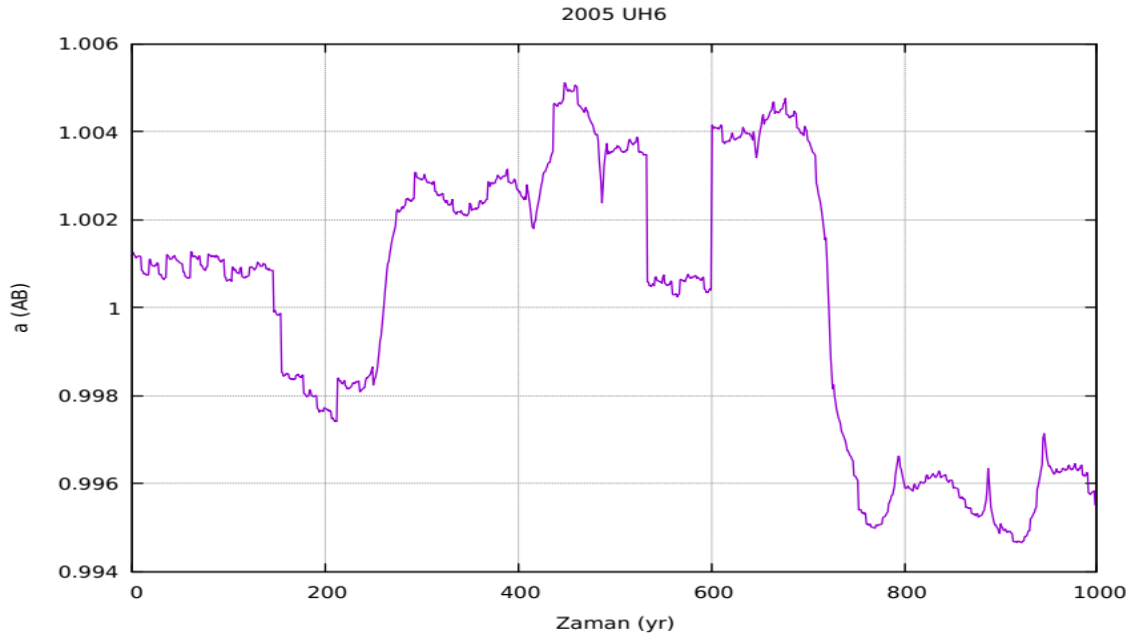


**Şekil 4.34.** 2015 YQ1 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği

Şekil 4.34’de at nalı yörüngesine ait 2015 YQ1 asteroidi yer almaktadır. Cisim asimetrik at nalı yörüngesi sınıfına aittir. Cismin ~180 yıl kadar at nalı olarak kalacağı görülmektedir. ~400. yılda cisim tekrardan at nalı yörüngesinde gibi görünse de at nalı olmayan bir yörüngede hareketine devam edecektir.

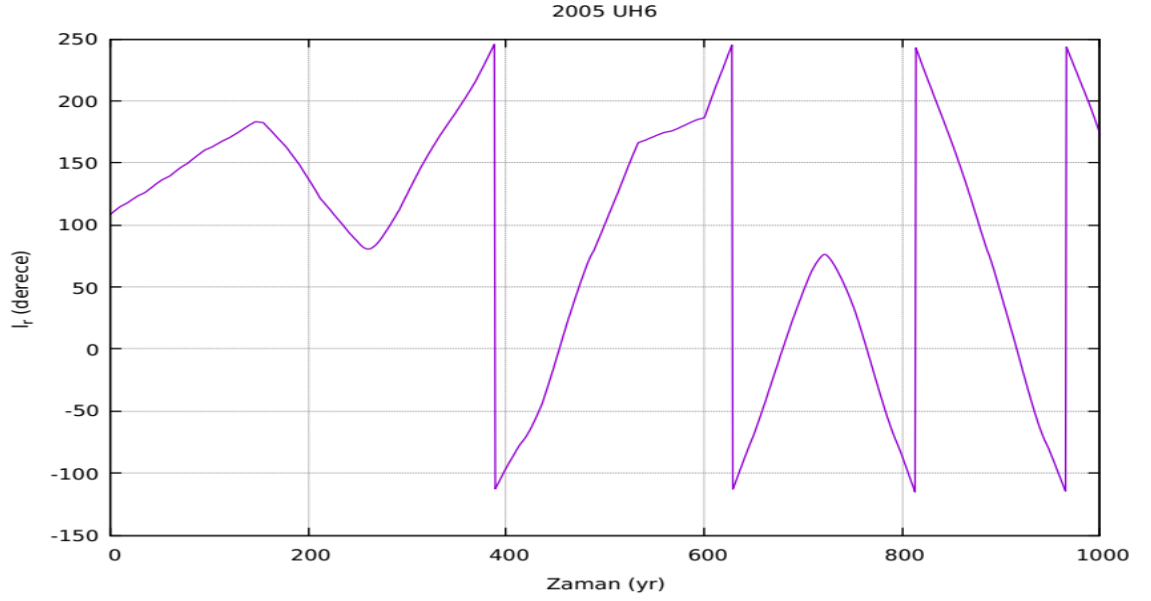
#### 4.2. Yer İle Eş Yörüngede Olduğu Düşünülen Cisimler İçin Yapılan Testler

Bu bölümde, literatürde yer alan çalışmalara ek olarak belirlemiş olduğumuz aralığa ( $0.989 < a < 1.017$ ) giren cisimlerin yörüngelerine bakılmıştır. Belirlenen aralığa giren cisimler, hem uzun zamandan beri incelenmemiş hem de hakkında literatürde detaylı bilgi bulunmayan yeni keşfedilen cisimlerdir. Belilediğimiz aralığa giren pek çok cisim olmasına rağmen 8 tane cisim eş yörünge özelliği göstermektedir. Ayrıca keşfedilen 8 cisim at nalı yörüngesinde yer almaktadır. Bölüm 4.1.'de de olduğu gibi aşağıda keşfedilen cisimlere ait zamana karşı yarı-büyük eksen grafikleri yer almaktadır. Buna ek olarak cisimlerin günümüzdeki hareketlerini anlamak için zaman aralığı 0-1000 yıl olarak seçilmiştir.



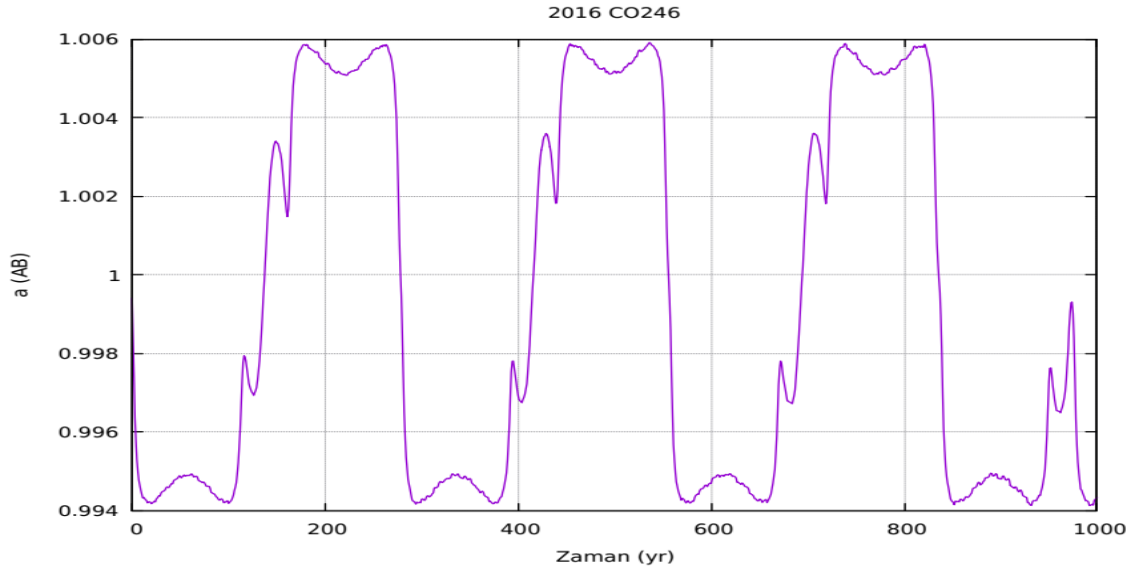
**Şekil 4.35.** 2005 UH6 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği

Şekil 4.35'de olağandışı at nalı yörüngesine ait 2005 UH6 asteroidi yer almaktadır. Cisim günümüz itibari ile ~360 yıl boyunca at nalı yörüngesinde hareketine devam edeceği görülmektedir. Olağandışı at nalı yörüngesindeki cisimlerin yarı büyük eksen salınım aralığı ( $0.992 < a < 1.006$ ) göz önüne alındığında 2005 UH6 cisminin salınımı bu aralığa girmektedir. Ancak olağandışı at nalı yörüngesi için yarı büyük eksen değerleri düzgün bir salınım hareketi göstermemektedir. Bu tür at nalı yörüngeleri için yarı büyük eksen grafiklerinin yanı sıra rölatif ortalama boylam grafiklerine de bakılmalıdır.



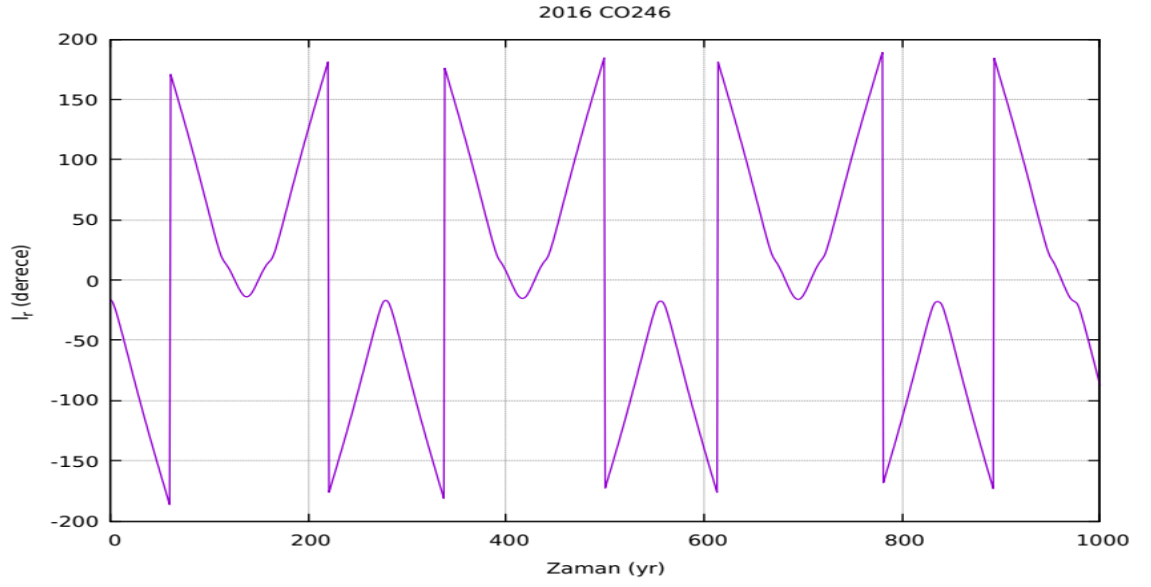
**Şekil 4.36.** 2005 UH6 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği

Şekil 4.36’da at nalı yörüngesine ait 2005 UH6 asteroidi yer almaktadır. Cisim olağandışı at nalı yörüngesi sınıfına aittir. At nalı yörüngelerindeki cisimlerin rölatif ortalama boylam değerleri  $\pm 180^\circ$  civarındadır. Bundan dolayı cisimin 1000 yıl kadar at nalı yörüngesinde kalacağı sonucuna varılabilir.



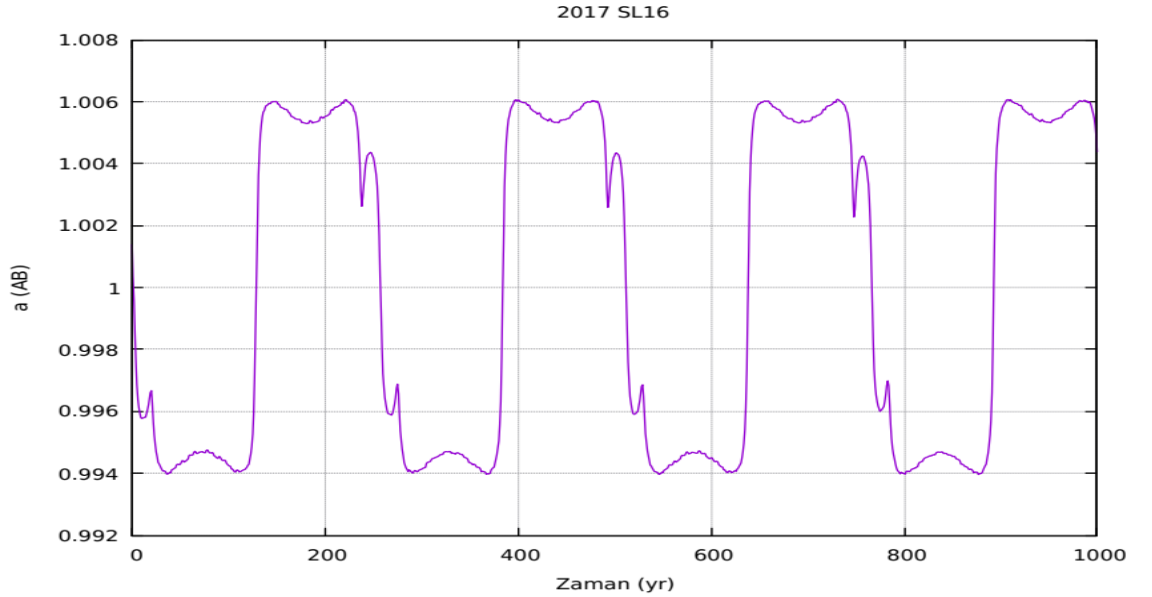
**Şekil 4.37.** 2016 CO246 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği

Şekil 4.37’de asimetric at nalı yörüngesine ait 2016 CO246 asteroidi yer almaktadır. Cisim tıpkı Şekil 4.16’daki gibi bir hareket sergilemektedir. Asimetric at nalı yörüngesindeki cisimlerin yarı büyük eksen salınım aralıkları ( $0.994 < a < 1.006$ ) göz önüne alındığında cismin günümüz itibari ile ~900 yıl kadar at nalı yörüngesinde kalabileceği sonucuna varılabilir.



**Şekil 4.38.** 2016 CO246 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği

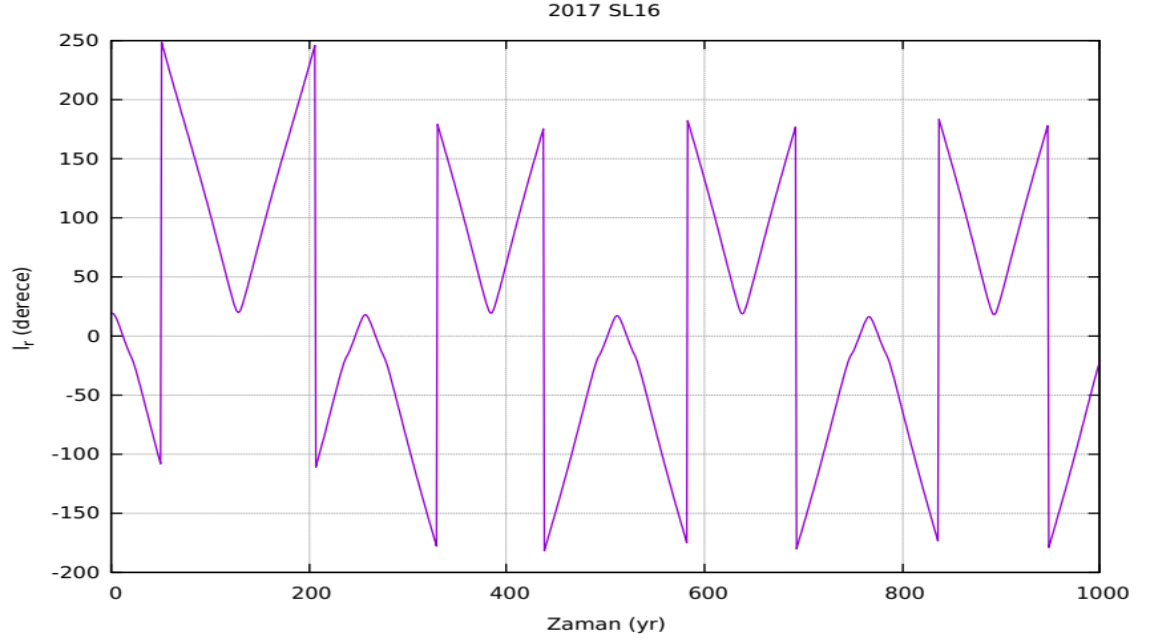
Şekil 4.38’de at nalı yörüngesine ait 2016 CO246 asteroidi yer almaktadır. Cisim asimetrik at nalı yörüngesi sınıfına aittir. At nalı yörüngelerinin rölatif ortalama boylam değeri salınım aralığı  $\pm 180^\circ$  civarındadır. Bu durum ve Şekil 4.37 göz önüne alındığında cismin  $\sim 900$  yıl kadar daha at nalı yörüngesinde kalacağı sonucuna varılabilir.



**Şekil 4.39.** 2017 SL16 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği

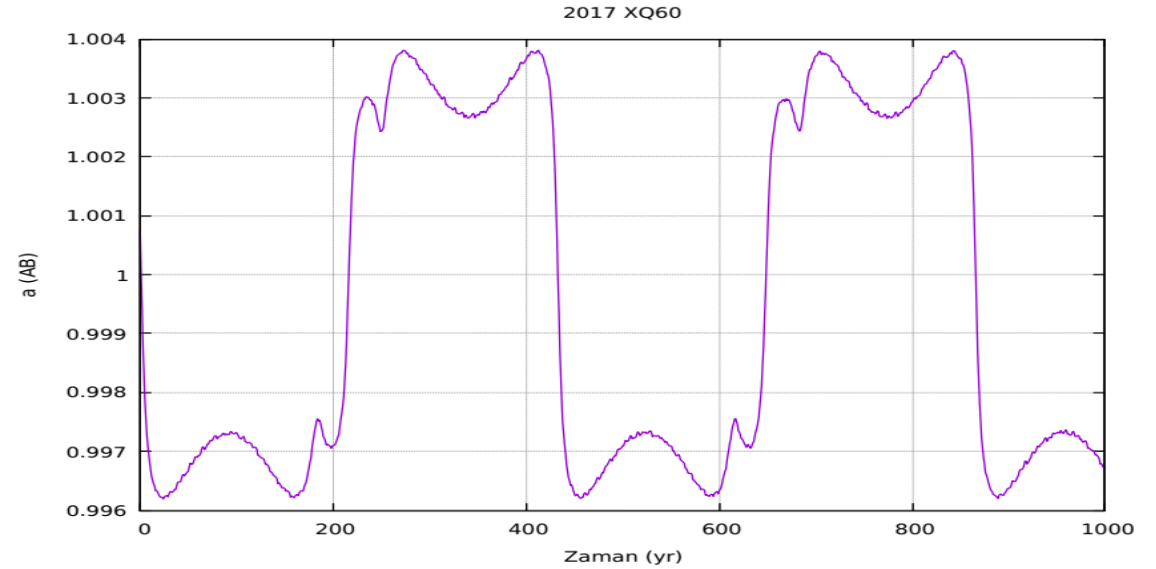
Şekil 4.39’da asimetrik at nalı yörüngesine ait 2017 SL16 asteroidi yer almaktadır. Bu cisim de tıpkı Şekil 4.16’daki gibi bir hareket sergilemektedir. 2017 SL16 asteroidini Şekil 4.16 ve Şekil 4.19’dan ayıran özelliği ise yörüngesinde 1000 yıldan fazla bir sürede hareketine devam edecek olması ve piklerin sağ tarafta olmasıdır.

Bunun sebebi ise diğer cisimler L4 noktasından Yer'i geçip geri dönerken, 2017 SL16 cismi L5 noktasından Yer'i geçip geri dönmektedir.



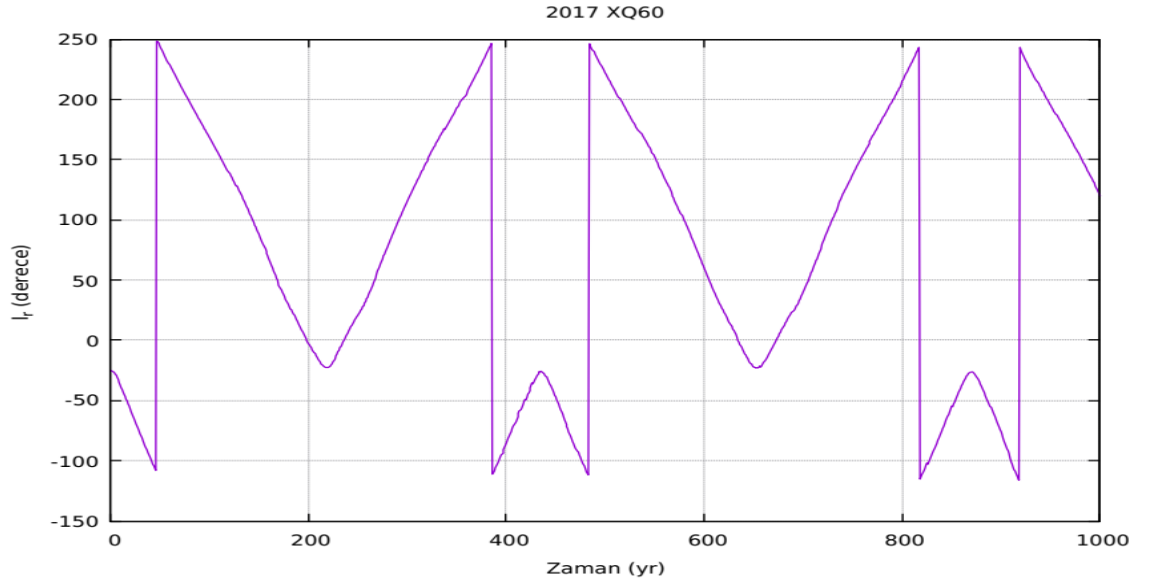
**Şekil 4.40.** 2017 SL16 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği

Şekil 4.40'da at nalı yörüngesine ait 2017 SL16 asteroidi yer almaktadır. Cisim asimetrik at nalı yörüngesi sınıfına aittir. Cisim günümüz itibari ile 1000 yıl kadar at nalı yörüngede hareketine devam edecektir.



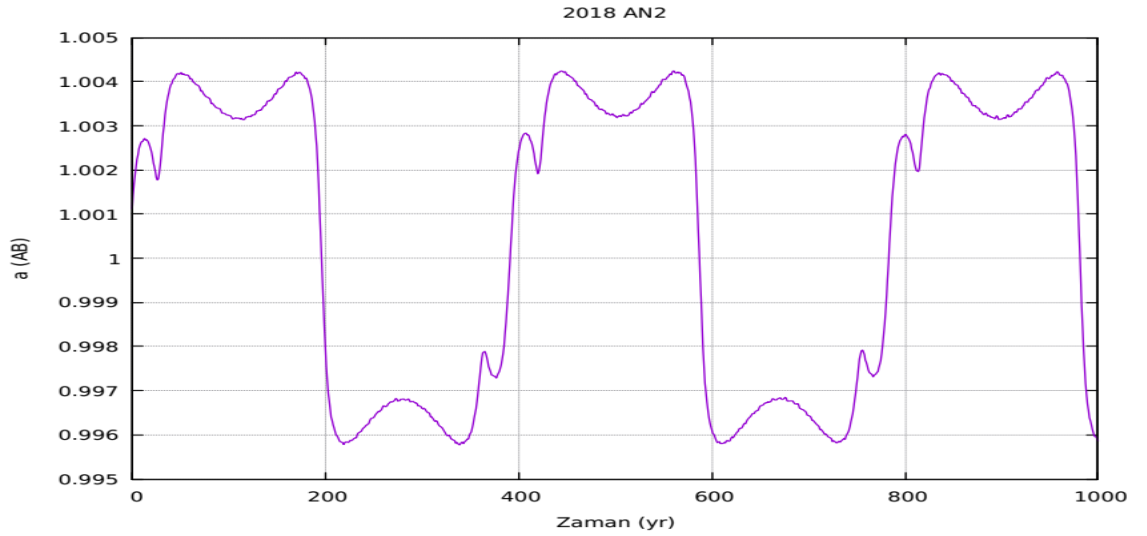
**Şekil 4.41.** 2017 XQ60 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği

Şekil 4.41'de asimetrik at nalı yörüngesine ait 2017 XQ60 asteroidi yer almaktadır. Bu cisim de tıpkı Şekil 4.20'de yer alan 2017 SL16 asteroidi gibi hareketine devam edecektir.



**Şekil 4.42.** 2017 XQ60 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği

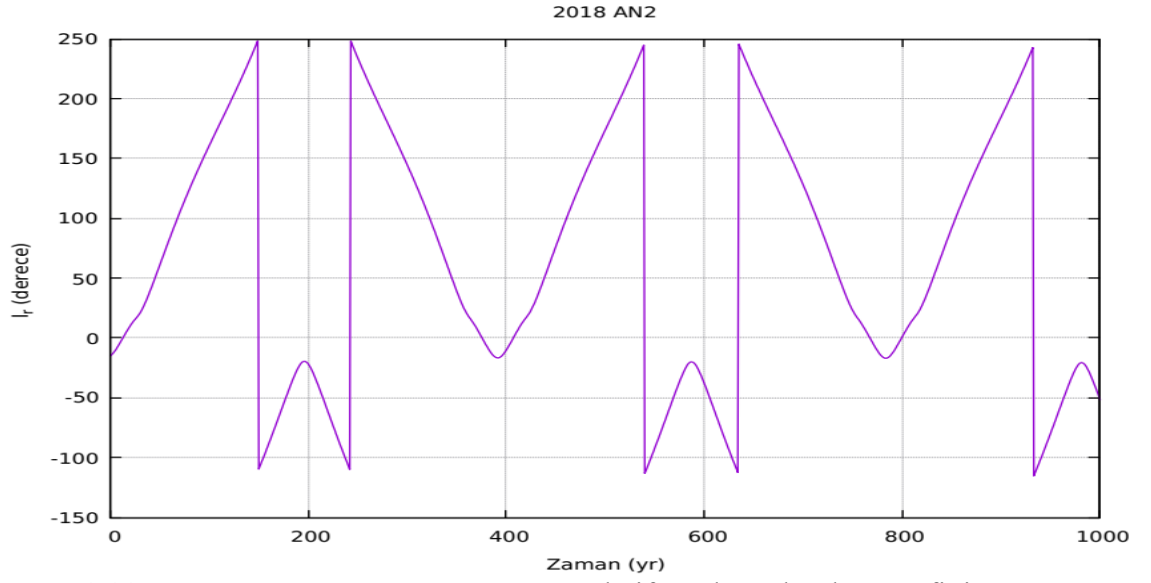
Şekil 4.42’de at nalı yörüngesine ait 2017 XQ60 asteroidi yer almaktadır. Cisim asimetric at nalı yörüngesi sınıfına aittir ve günümüz itibari ile 1000 yıl kadar bu yörüngede hareketine devam edecektir.



**Şekil 4.43.** 2018 AN2 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği

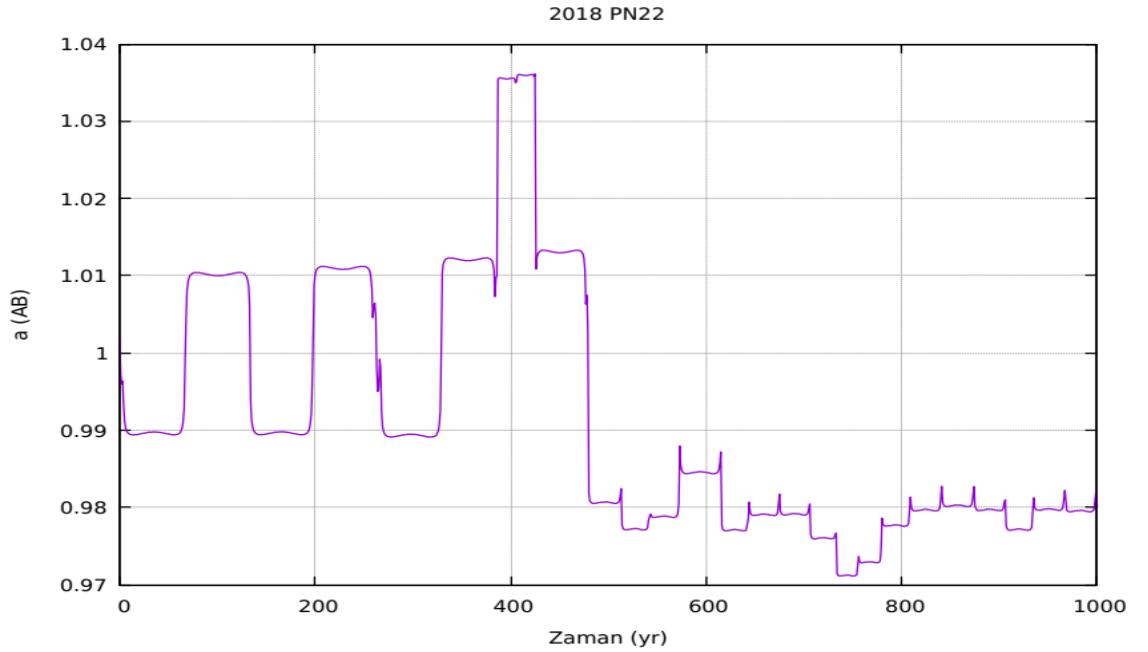
Şekil 4.22’de asimetric at nalı yörüngesine ait 2018 AN2 asteroidi yer almaktadır. Cisim tıpkı kendinden önceki cisimler gibi (2015 XX169, 2017 XQ60 vd. gibi) Yer’i L4 noktasından geçip geri dönerek hareketine devam etmektedir.





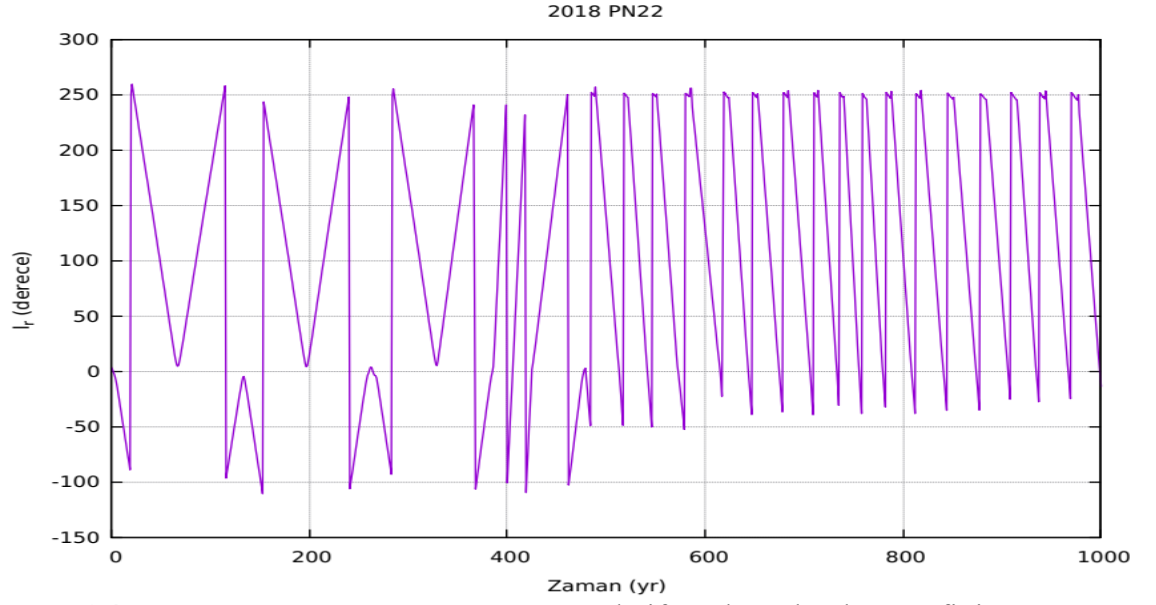
**Şekil 4.44.** 2018 AN2 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği

Şekil 4.44’de at nalı yörüngesine ait 2018 AN2 asteroidi yer almaktadır. Cisim asimetrik at nalı yörüngesi sınıfına aittir ve günümüz itibari ile 1000 yıl kadar bu yörüngede kalacaktır.



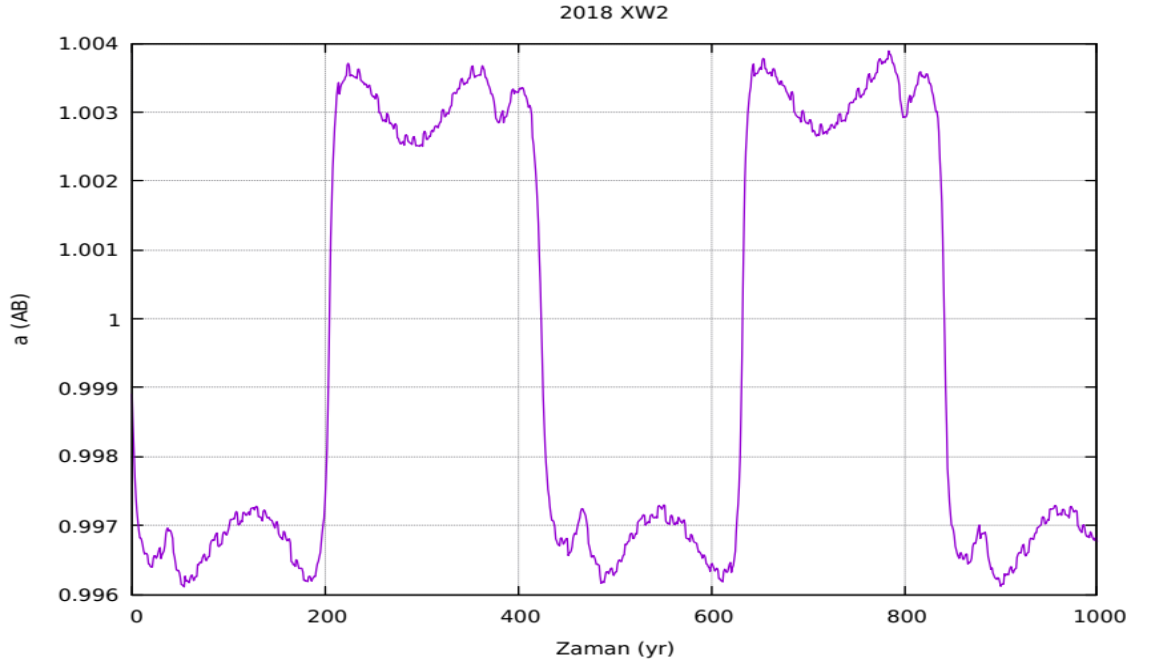
**Şekil 4.45.** 2018 PN22 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği

Şekil 4.45’te neredeyse-simetrik at nalı yörüngesine ait 2018 PN22 asteroidi yer almaktadır. Cismin sergilediği hareket 2002 AA29 asteroidinin hareketine benzemektedir.



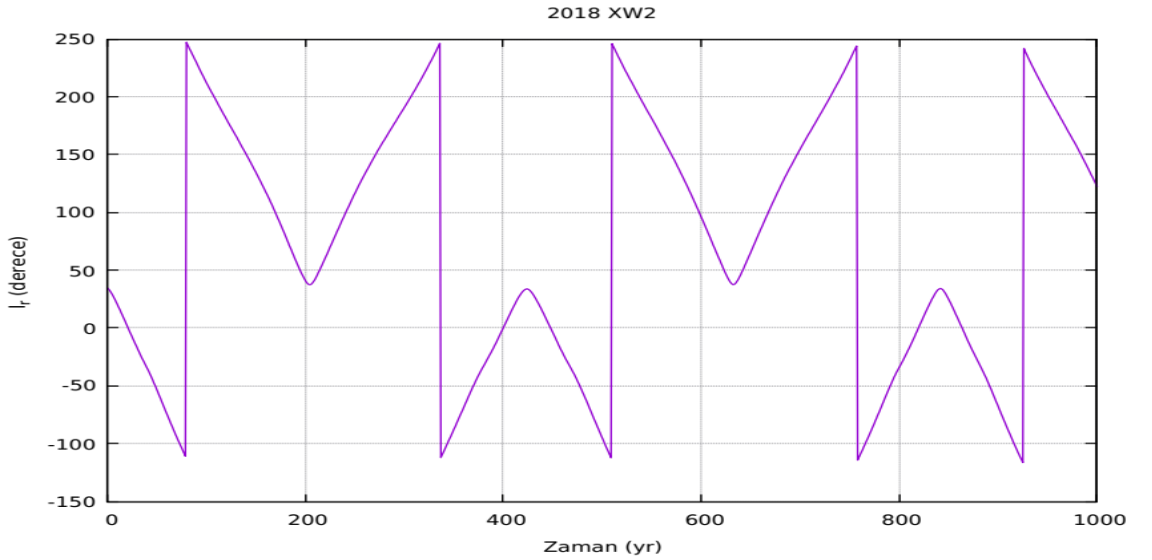
**Şekil 4.46.** 2018 PN22 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği

Şekil 4.46’da at nalı yörüngesine ait 2018 PN22 asteroidi yer almaktadır. Cisim neredeyse-simetrik at nalı yörüngesi sınıfına aittir. At nalı yörüngelerinde bulunan cisimlerin rölatif ortalama boylam değeri salınımı  $\pm 180^\circ$  civarındadır. ~400. yıldan sonra rölatif ortalama boylam değeri salınım aralığı küçülmektedir. Bundan dolayı 2018 PN22 asteroidi günümüzden itibaren ~400 yıl boyunca at nalı yörüngesinde kalacağı sonucuna varılabilir.



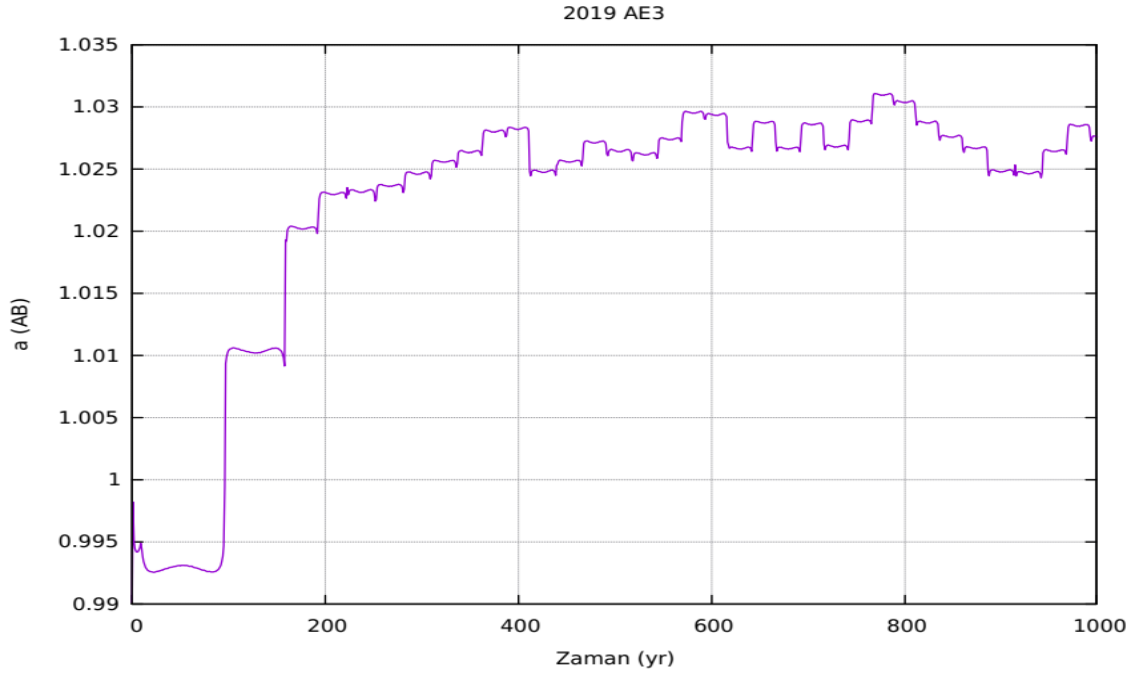
**Şekil 4.47.** 2018 XW2 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği

Şekil 4.47’te asimetric at nalı yörüngesine ait 2018 XW2 asteroidi yer almaktadır. Cisim Şekil 4.31’deki 2015 XX169 asteroidi gibi bir hareket sergilemektedir.



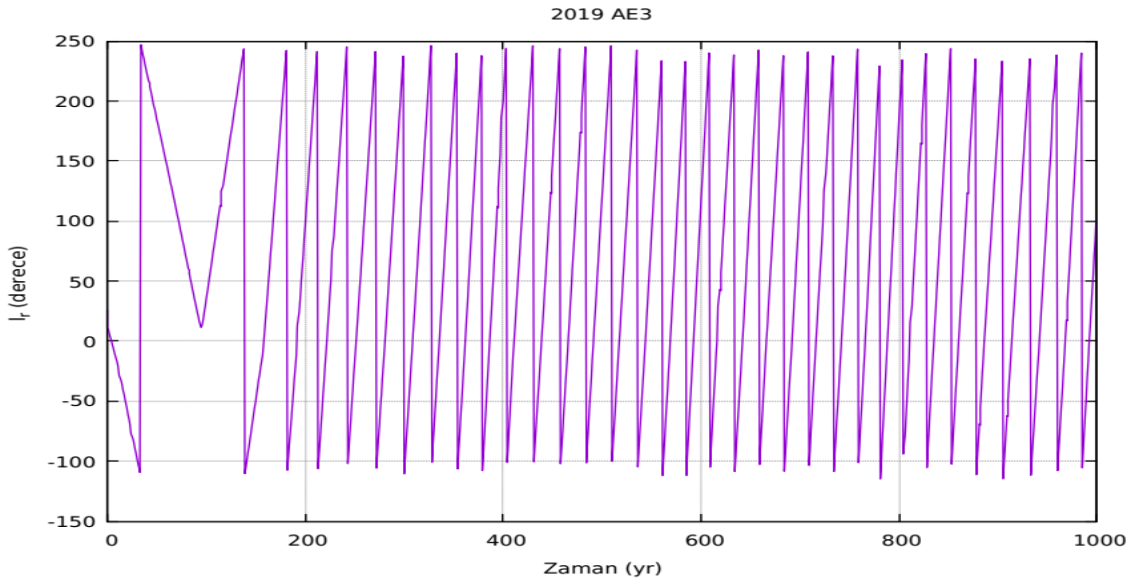
**Şekil 4.48.** 2018 XW2 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği

Şekil 4.48’de at nalı yörüngesine ait 2018 XW2 asteroidi yer almaktadır. Cisim asimetric at nalı yörüngesi sınıfına aittir. At nalı yörüngelerinde bulunan cisimlerin rölatif ortalama boylam salınım değeri  $\pm 180^\circ$  civarındadır. Bundan dolayı 2018 XW2 asteroidi günümüzden itibaren 1000 yıl boyunca at nalı yörüngesinde kalacağı sonucuna varılabilir.



**Şekil 4.49.** 2019 AE3 asteroidine ait zaman-yarı büyük eksen grafiği

Şekil 4.49'te neredeyse-simetrik at nalı yörüngesine ait 2019 AE3 asteroidi yer almaktadır. Cisim hareketine ~180 yıl kadar devam edecek olup sonrasında yörünge tipinin değişeceği görülmektedir. Neredeyse-simetrik at nalı yörüngelerinin içerisinde en kısa yörüngede kalma süresi 2019 AE3 asteroidine aittir.

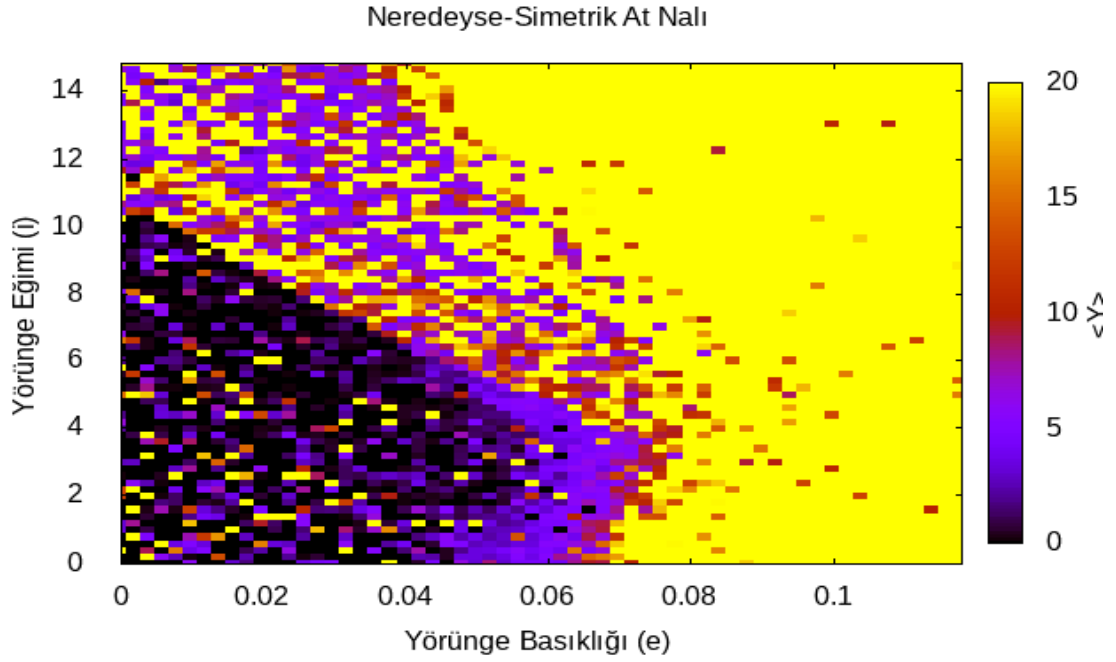


**Şekil 4.50.** 2019 AE3 asteroidine ait zaman-rölatif ortalama boylam grafiği

Şekil 4.50'de at nalı yörüngesine ait 2019 AE3 asteroidi yer almaktadır. Cisim neredeyse-simetrik at nalı yörüngesi sınıfına aittir. At nalı yörüngesine ait cisimlerin rölatif ortalama boylam değeri salınım aralığı  $\pm 180^\circ$  civarındadır. Ancak Şekil 4.50'de bu durum cisim yörüngesini değiştirdiğinde de devam etmektedir. Burada at nalı cisimlerinin bir diğer özelliği göz önünde bulundurulur. Bu tür yörüngelerde bulunan

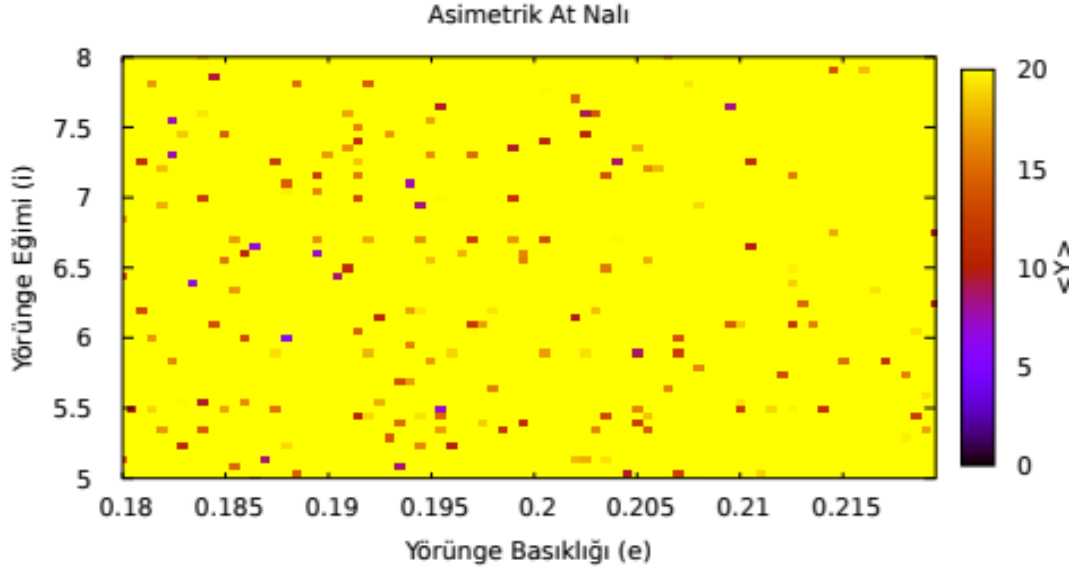
cisimlerin grafiklerinde salınımın yarısında bir dönüm noktası görülmektedir. Bu durum at nalı cisimlerine özgü bir durumdur. Grafikten de görüldüğü üzere ~180 yıl sonra salınımın bozulduğu görülmektedir. Bundan dolayı cismin at nalı yörüngesini terk ettiği sonucuna varılır.

### 4.3. Kararlılık Analizi Testleri



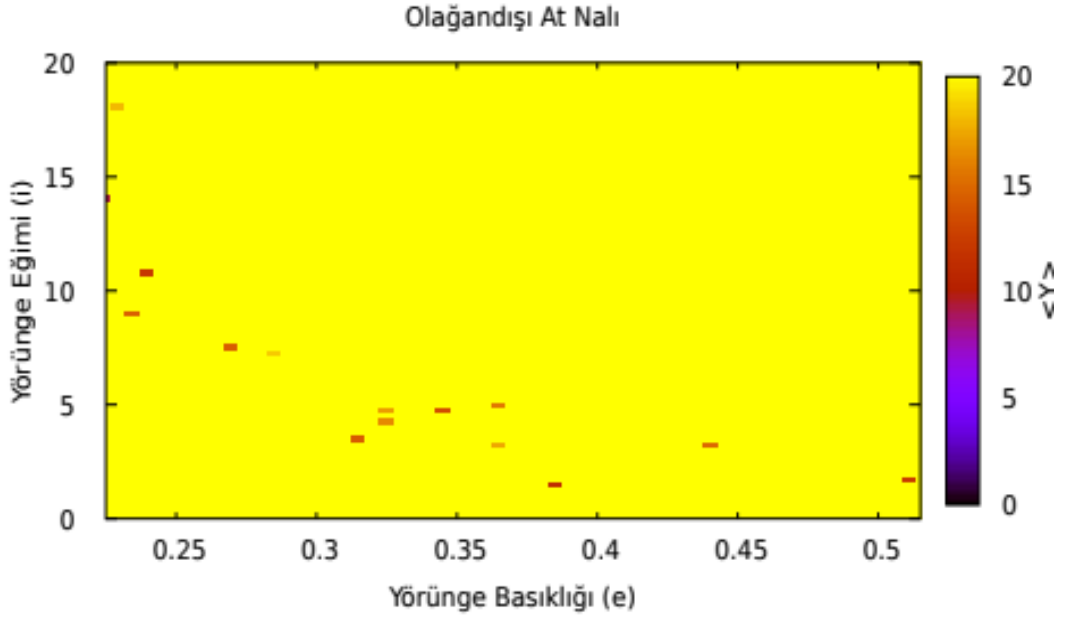
**Şekil 4.51.** Neredeyse-simetrik At nalı yörüngesine ait MEGNO haritası (e,i).  $\omega_0=90^\circ$ ,  $\Omega_0=90^\circ$ ,  $a=0.9925$  AU,  $TA=99.13^\circ$  (buradaki a ve TA değerleri 2002 AA29 asteroidine aittir, epok: 2452435.5)

Şekil 4.51’de neredeyse-simetrik at nalı yörüngesine ait MEGNO haritası yer almaktadır. Haritada bulunan koyu bölgeler yörüngede kararlı alanları belirtmektedir, MEGNO değeri 2’yi geçtikten sonra yörüngedeki kaotiklik artmaya başlamaktadır. Buradan yola çıkılarak neredeyse-simetrik at nalı yörüngesine ait cisimlerin kararlılıklarının diğer at nalı sınıflarına göre daha fazla olduğu sonucuna varılabilir. Yer’e ait neredeyse-simetrik at nalı cisimler 5 tanedir (Çizelge 3.2).



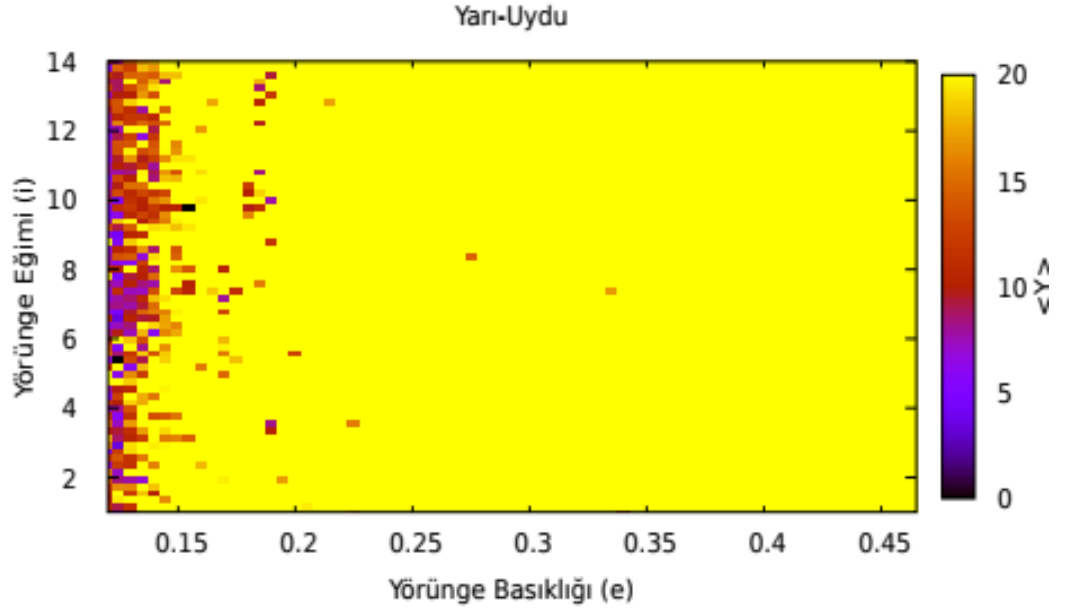
**Şekil 4.52.** Asimetrik At nalı yörüngesine ait MEGNO haritası (e,i).  $\omega_0=90^\circ$ ,  $\Omega_0=90^\circ$ ,  $a=1.0022$  AU,  $TA=109.19^\circ$  (buradaki a ve TA değerleri 2015 XX169 asteroidine aittir, epok: 2457417.5)

Şekil 4.52’de asimetrik at nalı yörüngesine ait MEGNO haritası yer almaktadır. Burada elde edilen sonuçlar daha önceden at nalı yörüngeleri içerisinde alt sınıflara ayırdığımız asteroidlere aittir. Yer’e ait bilinen asimetrik at nalı asteroid sayısı ikidir (Çizelge 3.2). Haritada 2 değerine yakın değerler görülmektedir. Ancak bu değerlere karşılık gelen yörüngelere kararlı gözüyle bakamayız. O yüzden Şekil 4.52’de kararlı yörünge varlığından bahsedemeyiz.



**Şekil 4.53.** Olağandışı At nalı yörüngesine ait MEGNO haritası (e,i).  $\omega_0=90^\circ$ ,  $\Omega_0=90^\circ$ ,  $a=1.0035$  AU,  $TA=133.37^\circ$  (buradaki a ve TA değerleri 2015 YQ1 asteroidine aittir, epok: 2457376.5)

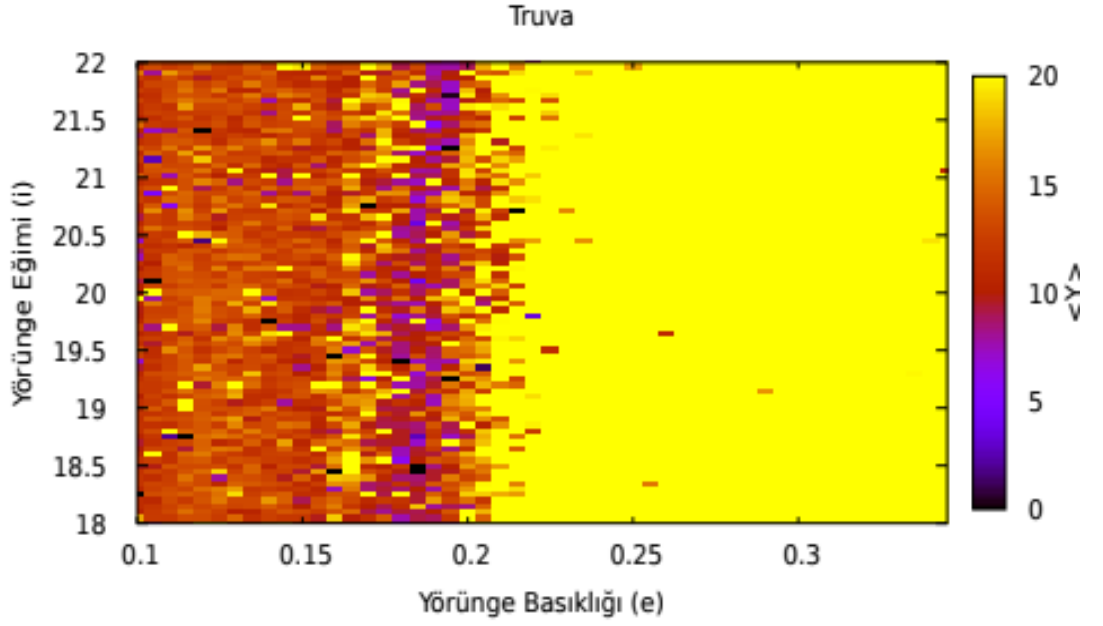
Şekil 4.53’de olağandışı at nalı yörüngesine ait MEGNO haritası yer almaktadır. olağandışı at nalı yörüngesi asteroidleri alışılmış at nalı hareketinden farklı bir hareket sergilemektedir. Bu harekete, cisimlerin Lagrange noktaları arasında daha kısa bir at nalı alanı taramasından dolayı bu isim verilmiştir. Yer’e ait olağandışı at nalı asteroid sayısı üçtür (Çizelge 3.2). Olağandışı at nalı yörüngesinde yer alan cisimler MEGNO haritasından da görüldüğü üzere daha çok kaotik yörüngelere sahip cisimlerdir. Olağan dışı at nalı yörüngelerde bulunan cisimlerin e değerleri yüksek olduğundan bu yörünge türünün kaotik olmasını desteklemektedir.



**Şekil 4.54.** Yarı-uydu yörüngesine ait ait MEGNO haritası(e,i).  $\omega_0=90^\circ$ ,  $\Omega_0=90^\circ$ ,  $a=1.0014$  AU,  $TA=275.65^\circ$  (buradaki a ve TA değerleri 2004 GU9 asteroidine aittir, epok: 2456674.5)

Şekil 4.54’de yarı-uydu yörüngesine ait kararlılık haritası yer almaktadır. Grafikten de görüldüğü gibi bu yörüngeye ait cisimler kararlı cisimler değildir. Ancak  $e = 0.1$  değerine yakın bölgelerde yarı-uydu yörüngeleri kararlılık gösterebilirler. Yer’in yarı-uydu yörüngelerine ait altı cisim vardır (Çizelge 3.2).





**Şekil 4.55.** Truva yörüngesine ait ait MEGNO haritası(e,i).  $\omega_0=90^\circ$ ,  $\Omega_0=90^\circ$ ,  $a=0.999$  AU,  $TA=145.97^\circ$  (buradaki a ve TA değerleri 2010 TK7 asteroidine aittir, epok: 2456214.5)

Şekil 4.55'te truva yörüngesine ait kararlılık haritası yer almaktadır. Grafikten de görüldüğü gibi bu yörüngeye ait cisimler 18-22 derecelik eğim aralığında band gibi bir bölgede kararlılık gösterebilmektedir. Bu durum truva yörüngelerini diğer yörüngelerden ayıran özelliklerden biri olmuştur. Yer için truva yörüngesinde bulunan tek cisim vardır: 2010 TK7. Yukarıdaki grafikte de 2010 TK7'ye ait değerler kullanılmıştır.

## 5. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında ilk olarak Yer ile eş yörüngede bulunan cisimler ayrıntılı bir literatür taraması ile tespit edilmiştir. REBOUND paketinden yararlanarak hazırlanmış olduğumuz kodlar kullanılarak Yer'in eş yörüngesinde cisimler zamanda ileriye ve geriye doğru simüle edilmiştir. Ele alınan cisimlerin yörüngeleri yüksek hassasiyetli (condition number) olmasına dikkat edilmiştir. Daha sonra elde ettiğimiz sonuçları literatürdeki sonuçlar ile karşılaştırıp, hazırlanmış olduğumuz birinci kodun güvenilirliğini belirlemede kullanılmıştır (Bölüm 3).

Birinci kod ile elde ettiğimiz sonuçları literatürle karşılaştırıp kodun doğruluğundan emin olduktan sonra, ikinci kod için üreteceğimiz aralıkların belirlenmede birinci kod kullanılmıştır. Sonrasında aynı cisimler için elde ettiğimiz zaman-yarı büyük eksen, zaman-rölatif ortalama boylam ve rölatif konum grafikleri incelenmiştir. (Bölüm 4). Grafikler sayesinde cisimlerin buldukları yörüngelerde nasıl bir hareket sergiledikleri hakkında incelemeler yapılmıştır. Birinci kod ile literatür cisimleri ve yeni keşfedilen cisimler dahil 25 cisim simüle edilmiştir (Bölüm 4). Grafiklerden elde edilen yörünge elemanları aralıkları ile 17 cisim için kararlılık haritaları oluşturulmuştur. Bu cisimlerden 3 tanesi olağandışı at nalı, 5 tanesi neredeyse-simetrik at nalı, 2 tanesi asimetric at nalı, 1 tane truva, 6 tanesi yarı-uydu yörüngelerine aittirler. Yeni keşfedilen toplamda 8 tane cismin nominal yörüngelerine göre at nalı tipi eş yörüngeleri oldukları tespit edilmiştir.

Kararlılık haritaları için yapılan integrasyon sırasında 100 bin yıllık zaman kısıtlamasının yanında bazı özel kısıtlamalarla da integrasyonlar sonlandırılmıştır. Bu sınırlamalar maksimum MEGNO değeri (0-20 aralığında) ve enerji hassasiyeti ( $10^{-14}$  mertebesinde) durumlarıdır. Kararlılık haritalarında e ve i yörünge elemanlarının değişimi ele alınarak ızgaralar oluşturulmuştur. Daha sonra bu ızgaralar sayesinde kararlılık haritalarını çizdirdik. Genel olarak ızgara sayısı 4500-4800 arasında değişmektedir.

Kararlılık haritaları ile yapılan analizler sonucunda neredeyse simetrik at nalı yörüngelerinin uzun sürede, diğer yörünge türlerine göre nispeten daha kararlı bir yörüngeye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ancak eş yörüngeler sistemdeki diğer gezegenlerden kaynaklı tedirginliklere karşı dirençli yörüngeler değildir. Güneş sisteminde büyük kütleli cisimler küçük kütleli cisimler üzerinde tedirginlik yaratabilirler. Bu duruma örnek olarak, Güneş sisteminde bulunan Jupiter'in diğer gezegenleri ve gezegenlerin etrafındaki cisimleri kütle çekimsel olarak etkilemesi verilebilir. Bu durumda Truva yörüngeleri de aynı etkilere sahip olacaktır. Ancak truva yörüngeleri at nalı yörüngeleri kadar geniş çaplı bir sürüklenme sergilemediğinden at nalı yörüngelerine göre nispeten daha az etkileneceklerdir.

Elde edilen sonuçlar çerçevesinde eş yörüngeler arasında uzun sürelerde en kararlı yörüngeler neredeyse-simetrik at nalı yörüngeleridir. Bu durumu Truva yörüngesi takip etmektedir.

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlardan yola çıkılarak, çalışmanın gelecekte planlanan insanlı uzay uçuşları ve asteroid madenciliği alanlarındaki çalışmalara katkıda bulunacağı öngörülmektedir. Diğer bir sonuç ise, yapılan çalışma eş yörüngeler hakkında detaylı bir kaynak görevi görebilir.

## 6. KAYNAKLAR

- Anonim 1: Center for Near Earth Object Studies. [cneos.jpl.nasa.gov](http://cneos.jpl.nasa.gov) [Son erişim tarihi: 07.09.2019].
- Anonim 2: Center for Near Earth Object Studies. [Cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals](http://Cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals) [Son erişim tarihi 11.09.2019].
- Barbee, B. W., Abell, P. A., Adamo, D. R., Alberding, C. M., Mazanek, D. D., Johnson, L. N., & Friedensen, V. P. 2013. The Near-Earth Object Human Space Flight Accessible Targets Study: An Ongoing Effort to Identify Near-Earth Asteroid Destinations for Human Explorers. In *2013 IAA Planetary Defense Conference, Flagstaff, AZ*.
- Bois, E., Kiseleva-Eggleton, L., Rambaux, N., & Pilat-Lohinger, E. 2003. Conditions of dynamical stability for the HD 160691 planetary system. *The Astrophysical Journal*, 598(2): 1312.
- Brasser, R., Innanen, K. A., Connors, M., Veillet, C., Wiegert, P., Mikkola, S., & Chodas, P. W. 2004. Transient co-orbital asteroids. *Icarus*, 171(1): 102- 109.
- Breiter, S., Melendo, B., Bartczak, P., & Wytrzyszczak, I. 2005. Synchronous motion in the Kinoshita problem-Application to satellites and binary asteroids. *Astronomy & Astrophysics*, 437(2): 753-764.
- Bottke Jr, W. F., Vokrouhlický, D., Rubincam, D. P., & Nesvorný, D. 2006. The Yarkovsky and YORP effects: Implications for asteroid dynamics. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 34, 157- 191.
- Chauan, Y. 2018. Celestial Mechanics. Retrieved from  
[Son erişim tarihi: 07.09.2019].  
[Son erişim tarihi: 22.05.2019]
- Chesley, S. R., Ostro, S. J., Vokrouhlický, D., Čapek, D., Giorgini, J. D., Nolan, M. C., & Chamberlin, A. B. (2003). Direct detection of the Yarkovsky effect by radar ranging to asteroid 6489 Golevka. *Science*, 302(5651), 1739-1742.
- Christou, A. A. 2000. A numerical survey of transient co-orbitals of the terrestrial planets. *Icarus*, 144(1), 1-20.
- Christou, A. A., & Asher, D. J. 2011. A long-lived horseshoe companion to the Earth. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 414(4): 2965-2969.
- Christou, A. A., Borisov, G., Dell’Oro, A., Cellino, A., & Bagnulo, S. 2017. Is the Eureka cluster a collisional family of Mars Trojan asteroids?. *Icarus*, 293, 243-258.
- Cincotta, P. M., & Simó, C. 2000. Simple tools to study global dynamics in non-axisymmetric galactic potentials–I. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 147(2): 205-228.
- Cincotta, P. M., Giordano, C. M., & 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): 151-178.
- Connors, M., Stacey, G., Brassier, R., & Wiegert, P. 2005. A survey of orbits of co-orbitals of Mars. *Planetary and Space Science*, 53(6), 617-624.
- Curtis, H. D. 2013. *Orbital mechanics for engineering students*. Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier. Oxford, UK.
- De la Fuente Marcos, C. D., & de la Fuente Marcos, R. 2013. A resonant family of dynamically cold small bodies in the near-Earth asteroid belt. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 434(1): L1-L5.
- De la Fuente Marcos, C., & de la Fuente Marcos, R. 2014. Asteroid 2014 OL339: yet another Earth quasi-satellite. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 445(3): 2985-2994.
- De la Fuente Marcos, C., & de la Fuente Marcos, R. 2016a. Asteroid (469219) 2016 HO3, the smallest and closest Earth quasi-satellite. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 462(4): 3441-3456.
- De la Fuente Marcos, C., & de la Fuente Marcos, R. 2016b. From horseshoe to quasi-satellite and back again: the curious dynamics of Earth co-orbital asteroid 2015 SO 2. *Astrophysics and Space Science*, 361(1): 16.
- De la Fuente Marcos, C., & de la Fuente Marcos, R. 2017. Dynamical evolution of near-Earth asteroid 1991 VG. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 473(3), 2939-2948.
- Domingos, R. C., & Winter, O. C. 2005. Possibility of collision between co-orbital asteroids and the Earth. *Computational & Applied Mathematics*, 24(1), 99-107.
- Dvorak, R., Lhotka, C., & Zhou, L. 2012. The orbit of 2010 TK7: possible regions of stability for other Earth Trojan asteroids. *Astronomy & Astrophysics*, 541, A127.
- Froeschlé, C., Lega, E., & Gonczi, R. 1997. Fast Lyapunov indicators. Application to asteroidal motion. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 67(1): 41-62.
- Gayon, J., & Bois, E. 2008. Are retrograde resonances possible in multi-planet systems?. *Astronomy & Astrophysics*, 482(2): 665-672.
- Giuppone, C. A., Beaugé, C., Michtchenko, T. A., & Ferraz-Mello, S. 2010. Dynamics of two planets in co-orbital motion. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 407(1): 390-398.
- Goździewski, K., Bois, E., Maciejewski, A. J., & Kiseleva-Eggleton, L. 2001. Global dynamics of planetary systems with the MEGNO criterion. *Astronomy & Astrophysics*, 378(2): 569-586.
- Goździewski, K., Bois, E., & Maciejewski, A. J. 2002. Global dynamics of the Gliese 876 planetary system. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 332(4): 839-855.
- Goździewski, K. 2002. Stability of the 47 UMa planetary system. *Astronomy & Astrophysics*, 393(3): 997-1013.

- Goździewski, K., & Konacki, M. 2004. Dynamical properties of the multiplanet system around HD 169830. *The Astrophysical Journal*, 610(2): 1093.
- Hinse, T. C., Christou, A. A., Alvarellos, J. L., & Goździewski, K. 2010. Application of the MEGNO technique to the dynamics of Jovian irregular satellites. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 404(2): 837-857.
- Kortenkamp, S. J. 2005. An efficient, low-velocity, resonant mechanism for capture of satellites by a protoplanet. *Icarus*, 175(2), 409-418.
- Laskar, J. 1990. The chaotic motion of the solar system: A numerical estimate of the size of the chaotic zones. *Icarus*, 88(2): 266-291.
- Mikkola, S., Brasser, R., Wiegert, P., & Innanen, K. 2004. Asteroid 2002 VE68, a quasi-satellite of Venus. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 351(3): L63-L65.
- Mikkola, S., Innanen, K., Wiegert, P., Connors, M., & Brasser, R. 2006. Stability limits for the quasi-satellite orbit. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 369(1): 15-24.
- Morais, M. H. M., & Morbidelli, A. 2002. The population of near-Earth asteroids in coorbital motion with the Earth. *Icarus*, 160(1), 1-9.
- Morais, M. H. M., & Namouni, F. 2013. Asteroids in retrograde resonance with Jupiter and Saturn. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 436(1): L30-L34.
- Morais, M. H. M., & Namouni, F. 2016. A numerical investigation of coorbital stability and libration in three dimensions. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 125(1), 91-106.
- Murray, C. D., & Dermott, S. F. 1999. *Solar system dynamics*. Cambridge university press.
- Nesvorný, D., Janches, D., Vokrouhlický, D., Pokorný, P., Bottke, W. F., & Jenniskens, P. 2011. Dynamical model for the zodiacal cloud and sporadic meteors. *The Astrophysical Journal*, 743(2), 129.
- O'keefe, J. A. 1976. Tektites and their origin. *NASA STI/Recon Technical Report A*, 77.
- Öpik, E. J. 1951, January. Collision probabilities with the planets and the distribution of interplanetary matter. In *Proceedings of the Royal Irish Academy. Section A*:
- Paddack, S. J. 1974, June. Rotational bursting of small celestial bodies: Effects of radiation pressure. In *Bulletin of the American Astronomical Society* (Vol. 6, p. 390).
- Puspitarini, L., & Dermawan, B. 2010. The Orbital Dynamics of Earth's Co-orbital Asteroids. In *Proceedings of Conference of the Indonesia Astronomy and Astrophysics*.
- Rein, H., & Liu, S. F. 2012. REBOUND: an open-source multi-purpose N-body code for collisional dynamics. *Astronomy & Astrophysics*, 537, A128.
- Rein, H., & Spiegel, D. S. 2014. 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): 1424-1437.
- Rein, H., & Tamayo, D. 2016. Second-order variational equations for N-body simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 459(3), 2275-2285.
- Rubincam, D. P. 2000. Radiative spin-up and spin-down of small asteroids. *Icarus*, 148(1): 2-11.
- Sándor, Z., Érdi, B., Széll, A., & Funk, B. 2004. The relative Lyapunov indicator: an efficient method of chaos detection. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 90(1-2): 127-138.
- Skokos, C., Antonopoulos, C., Bountis, T. C., & Vrahatis, M. N. 2003. How does the Smaller Alignment Index (SALI) distinguish order from chaos?. *Progress of Theoretical Physics Supplement*, 150: 439-443.
- Skokos, C., Bountis, T. C., & Antonopoulos, C. 2007. Geometrical properties of local dynamics in Hamiltonian systems: The Generalized Alignment Index (GALI) method. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 231(1): 30-54.
- Souchay, J. J., & Dvorak, R. (Eds.). 2010. *Dynamics of small solar system bodies and exoplanets* (Vol. 790). Springer.
- Taylor, P. A., Margot, J. L., Vokrouhlický, D., Scheeres, D. J., Pravec, P., Lowry, S. C., ... & Giorgini, J. D. 2007. Spin rate of asteroid (54509) 2000 PH5 increasing due to the YORP effect. *Science*, 316(5822): 274-277.
- Wajer, P. 2010. Dynamical evolution of Earth's quasi-satellites: 2004 GU9 and 2006 FV35. *Icarus*, 209(2): 488-493.
- Zhou, L., Xu, Y. B., Zhou, L. Y., Dvorak, R., & Li, J. 2019. Orbital stability of Earth Trojans. *Astronomy & Astrophysics*, 622, A97.

## ÖZGEÇMİŞ

**SERGEN CENGİZ**  
csergen00@gmail.com



### ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2016-2019	Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Ana Bilim Dalı, Antalya
Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2012-2016	Fen Fakültesi, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Bölümü, Antalya

### Uluslar arası bilimsel toplantılarda sunulan bildiriler

1- Kaplan M. Cengiz S. (2018). Dynamical Analyses for Asteroid 2018 AN2 : A new candidate for Earth Co-orbitals. Turkish Physical Society 34th International Physics Congress