

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

**APOLLO ASTEROİDLERİNE KAYNAKLIK EDEN BÖLGELERİN
ARAŞTIRILMASI**

Orhan ERECE

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

2015

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

**APOLLO ASTEROİDLERİNE KAYNAKLIK EDEN BÖLGELERİN
ARAŞTIRILMASI**

Orhan ERECE

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

(Bu tez TÜBİTAK tarafından 113F268 nolu proje ile desteklenmiştir.)

2015

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

**APOLLO ASTEROİDLERİNE KAYNAKLIK EDEN BÖLGELERİN
ARAŞTIRILMASI**

Orhan ERECE

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

Bu tez 25/12/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Murat KAPLAN (Danışman)

Prof. Dr. Zeki EKER

Prof. Dr. Selçuk BİLİR

ÖZET

APOLLO ASTEROİDLERİNE KAYNAKLIK EDEN BÖLGELERİN ARAŞTIRILMASI

Orhan ERECE

Yüksek Lisans Tezi, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Murat KAPLAN
Aralık 2015, 49 Sayfa

Yer'e Yakın Asteroidler (YYA), hem Yer'e çarpma risklerinin araştırılması hem de Yer'e yaklaşma mekanizmalarının öğrenilmesi açısından son yılların oldukça popüler ve önemli bir çalışma alanıdır. 21 Aralık 2015 tarihi itibarıyla YYA sayısı 13677'dür ve bu sayı hızla artmaktadır.

Bu tez çalışmasında, istatistiksel veriler oluşturularak YYA gruplarından en kalabalık olan Apollo grubuna kaynaklık eden bölgeler araştırılmış ve dinamik yollar belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun için asteroidlerin, sayısal yöntemler kullanılarak zamanda geriye 10 milyon yıllık integrasyonu yapılmıştır. İstatistiğin artırılması için her bir Apollo asteroidinin 6 tane klon yörüngesi oluşturulmuş ve toplamda 38175 yörüngenin integrasyonu yapılmıştır. Sayısal integrasyonlar TÜBİTAK ULAKBİM'e bağlı Türk Ulusal Bilim e-Altyapısı'nın (TRUBA) yüksek hızlı işlemcilerle sahip küme hesaplama araçları kullanılarak yapılmıştır.

İntegrasyonlar, asteroidlerin Tisserand parametrelerine göre hazırlanan girdi paketlerine göre yapılmıştır. Sonuçlar, Tisserand parametresinin asteroidin yörünge evrimleri hakkında açıkça bilgi verdiğini göstermiştir. 10 milyon yıllık sonuçlara göre Tisserand parametresi küçük olan cisimlere kaynaklık edecek bölgeler Güneş sisteminin dış kısımlarına uzanırken, büyük olan cisimler daha iç bölgelerden gelmiş olabilir.

Asteroidlerin integrasyon sonucunda, %63.69'unun integrasyon süresinin üst limiti olan 10 milyon yılı tamamladığı görülmüş, %18.44'ünün a değeri 50 AB limitinin dışına çıkmış ve %12.27'sinin yörüngeleri ise hiperbolik olmuştur ($e > 1$). Ayrıca, 10 milyon yıl sonunda %71.79'unun hala YYA olduğu görülmektedir.

Bu tez çalışmasında ortaya çıkan bir diğer sonuç ise Jüpiter ve Venüs'ün, Güneş sistemi içerisinde oldukça belirgin sınır bölgeler oluşturduklarıdır. Bunlar özellikle enöte uzaklığı $Q = 4.61$ AB ve $Q = 0.728$ AB bölgelerini temsil eden doğrulardır. Bu bölgeler sırasıyla Jüpiter yörüngesini kesenler için minimum enöte uzaklık doğrusu ve Venüs'ün enöte uzaklığının doğrularıdır. $Q=4.61$ AB doğrusunun açıkça düşük yörünge basıklığına sahip bölgeler için alt, yüksek yörünge basıklığına sahip bölgeler için üst sınır oluşturduğu anlaşılmaktadır.

ANAHTAR KELİMELELER: Yer'e yakın asteroid, Yörünge mekaniği, Sayısal integrasyon, Güneş sistemi objeleri

JÜRİ: Yrd. Doç. Dr. Murat KAPLAN (Danışman)
Prof. Dr. Zeki EKER
Prof. Dr. Selçuk BİLİR

ABSTRACT

A RESEARCH OF THE SOURCE REGIONS OF APOLLO ASTEROIDS

Orhan ERECE

MSc Thesis in Space Science and Technologies

Supervisor: Asst. Prof. Murat KAPLAN

December 2015, 49 Pages

Near Earth Asteroids (NEAs) is an important and popular subject in both research on the risk of a collision with Earth, and to explore their source mechanisms. Number of NEA population as of December 21st 2015 is 13677, and is increasing.

In this thesis work, source regions of the Apollo asteroids which is the biggest population among NEAs has been studied, and dynamical routes has been tried to determined. For this, orbits were integrated for 10 Myr backward in time. To increase the statistics 6 clone orbits for the each asteroid orbit have been generated. In total, 38175 orbit integrations have been computed. Numerical integrations have been run on TÜBİTAK ULAKBİM-TRUBA clusters.

Input orbits were prepared using each object's Tisserand parameters. Based on 10 Myr backward in time results show that source regions can be outer Solar System for objects have smaller Tisserand parameters and can be inner Solar System for objects have greater Tisserand parameters.

At the end of the integrations 63.69% were terminated within normal integration time limit (10 Myr), 18.44% were terminated as their semi-major axis reached the 50 AU limit, 12.27% were terminated as hyperbolic orbits. Also, after 10 Myr of backward integration 71.79% of the orbits were still in NEA orbit region.

In this thesis work, one other important result shows that there are two restricted regions caused by Jupiter and Venus. These regions are $Q = 4.61$ AU and $Q = 0.728$ AU lines which represents minimum aphelion for Jupiter crossers and Venus aphelion respectively. $Q=4.61$ AU region is also a lower limit for low eccentric orbits and upper limit for high eccentric orbits.

KEYWORDS: Near-Earth asteroids, Celestial mechanics, Numerical integration, Solar system objects

COMMITTEE: Asst. Prof. Murat KAPLAN (Supervisor)

Prof. Dr. Zeki EKER

Prof. Dr. Selçuk BİLİR

ÖNSÖZ

Bu çalışmada bana her türlü desteği sağlayan, bilgisi ve tecrübesi ile yol gösteren, sevgili danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Murat KAPLAN'a, çalışmama öneri ve tavsiyeleriyle destekte bulunan sevgili hocam Prof. Dr. Zeki EKER'e, T100 teleskobunda beraber çalıştığım için çok şanslı olduğum çok değerli hocam Murat KOÇAK'a ve çok sevgili Sıla ERYILMAZ KILIÇ'a, TUG'da beraber çalıştığım diğer tüm çalışanlara, arkadaşlarıma ve hocalarıma, yüksek lisans öğrencisi Oğuzhan SARI'ya, sevgili öğretmenim Aslı Gülsüm ERDOĞAN DÖYEN'e ve diğer tüm arkadaşlarıma çok teşekkür ederim. Ayrıca, çalışmaya verdiği destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Son olarak, hayatım boyunca bana güvenen, her zaman yanımda hissettiğim, maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen aileme çok teşekkür ederim.

Anneme ithafen...

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. Kepler Yörünge Elemanları	4
1.2. Anlık Yörünge Elemanları	6
1.3. Öz Yörünge Elemanlar	7
1.4. Asteroid Aileleri.....	8
2. ASTEROİD YÖRÜNGELERİ AÇISINDAN GÜNEŞ SİSTEMİ'NİN DİNAMİK ÖZELLİKLERİ.....	10
2.1. Yörünge Rezonansları.....	10
2.1.1. Dönme dolanma rezonansı.....	10
2.1.2. Ortalama hareket rezonansı.....	10
2.1.3. Seküler rezonans	13
2.2. Kütle Çekimsel Olmayan Etkiler: Yarkovsky ve YORP Etkisi	15
2.3. Tisserand Parametresi	16
2.4. Hill Küresi	17
3. KURAMSAL BİLGİLER VE KAYNAK TARAMALARI	19
3.1. Sayısal İntegrasyon Çalışmaları	21
4. MATERYAL VE METOT	28
4.1. Girdi Dosyalarının Hazırlanması	28
4.2. Klon Yörüngelerin Oluşturulması	29
4.3. Sayısal İntegrasyon Kriterleri.....	30
4.4. Yöntem.....	30
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	33
5.1. İntegrasyon Süresi Analizi	33
5.2. Yörünge Elemanları (a, e, i) ve T_j Analizi.....	35
5.3. Kaynak Bölgelerinin İncelenmesi	38
5.4. Güneş Sistemi İçerisindeki Dinamik Yollar	41
5.5. Rezonans Bölgelerinin Analizi.....	41
6. SONUÇ	43
7. KAYNAKLAR.....	45
ÖZGEÇMİŞ	

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

a	Yarı büyük eksen uzunluğu
A,B,C	Laplace katsayıları
AB	Astronomik birim
AU	Astronomical unit
a_p	Öz yarı büyük eksen uzunluğu
D	Astreoidin yarıçapı
e	Yörünge basıklık değeri
e_p	Öz yörünge basıklık değeri
g	Enberi noktasının boylamının presesyon hızı
H	Mutlak parlaklık
H_{sec}	Seküler pertürbasyon için Hamilton fonksiyonu
i	Yörünge düzleminin eğikliği
m	Kütle
p	Periyot
q	Yörünge enberi uzaklığı
Q	Yörünge enöte uzaklığı
r_{hill}	Hill küresinin yarıçapı
s	Düğümler boylamının presesyon hızı
$\sin(i_p)$	Öz yörünge eğikliğinin sinüsü
T_j	Tisserand parametresi
v_x, v_y, v_z	Kartezyen koordinatlarda hız vektörleri
x, y, z	Kartezyen koordinatlarda konum vektörleri
α	Yarı büyük eksen uzunlukları oranı
γ	Koç noktası (ilkbahar noktası)
v	Gerçel ayrıklık
ω	Enberi noktasının argümanı
Ω	Çıkış düğümünün boylamı
σ_a	Yarı büyük eksen uzunluğundaki hata değeri
J	Delaunay değişkeni

Kısaltmalar

Gyıl	Milyar yıl
HCM	Hiyerarşik kümeleme metodu
IAU	Uluslararası Astronomi Birliği
IEO	Yer'e göre iç yörünge
ISO	Kızılötesi Uzay Gözlemevi
JFC	Jüpiter ailesi kuyruklu yıldızları
KB	Kuiper kuşağı
MOID	Minimum yörünge kesişim uzaklığı
MVS	Mixed Variable Symplectic
Myıl	Milyon yıl
NASA	Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
NIC	Neredeyse izotropik kuyruklu yıldızlar
PHA	Potansiyel tehlikeli astreoidler
RMVS	Regularized Mixed Variable Symplectic
TRUBA	Türk Ulusal e-Bilim e-Altyapısı
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
ULAKBİM	Ulusal Akademik Ağ ve Bilgi Merkezi
UT	Uluslararası zaman
YYA	Yer'e Yakın Asteroid
YYC	Yer'e Yakın Cisim

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Tüm YYA'lar (Yer'e Yakın Asteroid)	3
Şekil 1.2.	Yer'e Yakın Asteroidlerin Yer ile beraber yörüngeleri. YYA dağılım yüzdeleri 17 Kasım 2015 verilerine göre güncellenmiştir	4
Şekil 1.3.	Kepler yörünge elemanları.....	5
Şekil 1.4.	Yörünge basıklık değerleri farklı olan iki yörüngenin Yer'e göre durumları.....	5
Şekil 1.5.	2005 AT12 asteroidinin, 1000 yıllık, zamanda geriye doğru yarı büyük eksen uzunluğunun değişim grafiği.....	7
Şekil 1.6.	Aynı aileye ait farklı cisimlerin yörünge parametrelerinin, 10 milyon yıllık, zamanda geriye doğru yapılan integrasyon sonucu kesişmesi.....	8
Şekil 1.7.	Öz yörünge elemanlarının gruplaşması ile görülen asteroid aileleri	9
Şekil 2.1.	Apollo grubuna ait 2000 YG29 asteroidinin 1000 yıllık zaman aralığına karşılık yarı büyük eksen uzunluğunun değişimi	11
Şekil 2.2.	2003 MT9 asteroidinin seçilen 900 yıllık zaman aralığına karşılık yarı büyük eksen uzunluğunun değişimi	12
Şekil 2.3.	2003 MT9 asteroidinin seçilen 900 yıllık zaman aralığına karşılık yörünge basıklık değerinin değişimi	12
Şekil 2.4.	Kirkwood boşlukları.....	13
Şekil 2.5.	Yarkovsky ve YORP etkisi.....	15
Şekil 2.6.	Tüm Yer'e Yakın Asteroidlerin yarı büyük eksen uzunluğuna karşılık Jüpiter ile ilişkili Tisserand parametreleri. Hesaplanan T_j değerleri, anlık yörünge elemanlarından hesaplanan değerlerdir. Grafikte, kırmızılar $T_j > 3$, yeşiller $2 < T_j < 3$, maviler ise $T_j < 3$ bölgesindeki YYA'lardır. $2 < T_j < 3$ bölgesindeki YYA'lar tüm YYA'ların %6.25'ini oluşturmaktadır. Bu sonuç kabaca YYA'ların %6.25'inin kuyruklu yıldız kökenli olduklarını söylemektedir (Bölüm 3)	17
Şekil 3.1.	Yer'e Yakın Asteroidlerin yörünge basıklık değerlerine karşılık yörünge yarı büyük eksen uzunlukları (Bottke vd 2002).....	21
Şekil 3.2.	YYA kaynak bölgelerindeki cisimlerin o bölgelerde kalma sürelerinin olasılığı (Bottke vd 2002). Sol üst grafik 3:1 bölgesindeki, sağ üst v_6 bölgesindeki, sol alt Mars yörüngesini kesen asteroidlerin bölgesindeki, sağ alt ise Dış Ana Kuşak bölgesindeki cisimlerin kalma	

	sürelerinin olasılığını göstermektedir. a-e grafiklerindeki sarı çizgiler, Apollo, Amor, Atira ve Aten YYA bölgelerini ayırmakta ve sağ üst çizgiler ise $i=0^\circ$ için $2 < T_j < 3$ göstermektedir.....	24
Şekil 3.3.	Fernandez vd'nin (2014) çalışmasında asteroidal olarak tanımlanan iki farklı yörünge zamanında 10000 yıllık ileriye ve geriye doğru simülasyonları.....	26
Şekil 3.4.	Fernandez vd'nin (2014) çalışmasında kuyruklu yıldızlı (cometary) olarak tanımlanan iki farklı yörünge zamanında 10000 yıllık ileriye ve geriye doğru simülasyonları.....	27
Şekil 4.1.	Tüm Apollo asteroidlerinin a-e düzlemindeki dağılımı. Her bir renk farklı bir girdi dosyasını işaret etmektedir. $a > 2.5$ AB civarındaki mavi noktalar Tisserand parametresi 2-3 aralığında olan cisimleri gösterirken, diğer renkler için Tisserand parametresi 0.1'lik değişimler içermektedir.....	29
Şekil 4.2.	Cisim ve oluşturulan klonların görünümü.....	30
Şekil 5.1.	Oluşturulan her bir T_j paketine karşılık paket içerisinde bulunan cisimlerin sayısı. Her bir noktaya karşılık gelen cisim sayısı değerlerinin toplamı 38175'dir.	33
Şekil 5.2.	Oluşturulan her bir T_j paketine karşılık paket içerisinde bulunan cisimlerin ortalama integrasyon süreleri	34
Şekil 5.3.	Oluşturulan her bir T_j paketine karşılık paket içerisinde bulunan cisimlerin integrasyon sonundaki ve başlangıçtaki ortalama yarı büyük eksen uzunlukları	35
Şekil 5.4.	Oluşturulan her bir T_j paketine karşılık paket içerisinde bulunan cisimlerin integrasyon sonundaki ve başlangıçtaki ortalama yörünge eğiklikleri	36
Şekil 5.5.	Oluşturulan her bir T_j paketine karşılık paket içerisinde bulunan cisimlerin integrasyon sonundaki ve başlangıçtaki ortalama yörünge basıklık değerleri.....	36
Şekil 5.6.	Oluşturulan her bir T_j paketine karşılık paket içerisinde bulunan cisimlerin integrasyon sonundaki ve başlangıçtaki ortalama Tisserand parametreleri	37
Şekil 5.7.	İntegrasyonu yapılan tüm Apollo grubu asteroidlerinin integrasyon sonundaki a-e grafiği	38
Şekil 5.8.	10 milyon yılı tamamlayan cisimlerin Ana Kuşak civarı için e-a grafiği.....	40

- Şekil 5.9. İntegrasyonu yapılan tüm Apollo grubu asteroidlerinin Ana Kuşak civarı için e-a grafiği40
- Şekil 5.10. İntegrasyonu yapılan tüm Apollo grubu asteroidlerinin e-a grafiği ile bazı önemli bölgeleri belirten yaylar ve çizgiler42
- Şekil 5.11. İntegrasyonu yapılan tüm Apollo grubu asteroidlerinin e-a grafiği ile bazı önemli rezonans bölgelerini gösteren çizgiler42

1. GİRİŞ

Güneş sistemi içerisinde büyük gezegenler ve uydularının dışında asteroidler, aktif kuyruklu yıldızlar, sönmüş kuyruklu yıldızlar ve meteoroidler bulunmaktadır. Asteroidler, görece olarak küçük, aktif bir yüzeye sahip olmayan, kaya yapılı cisimlerdir. Aktif kuyruklu yıldızlar, görece olarak küçük, Güneş'e yeteri kadar yaklaştığında üzerindeki buz katmanı buharlaşıp kuyruk oluşturan cisimlerdir. Sönmüş kuyruklu yıldızlar, buz katmanı olmayan ve kuyruk oluşturmamayan cisimlerdir. Bu cisimlere genel olarak *küçük gezegenler* denilmektedir. Meteoroidler ise asteroidlerin ve kuyruklu yıldızların kalıntıları olan daha küçük cisimlerdir. Tüm bu cisimler Güneş etrafında Kepler kanunlarına uygun olarak hareket ederler (Anonim 2015a). Bu cisimlerden asteroidlerin çok büyük çoğunluğu Jüpiter ve Mars arasında kalan ve Ana Kuşak denilen bölgede bulunmaktadır. Kuyruklu yıldızlar genellikle büyük yörüngelere sahiptirler ve yörünge enöte uzaklıkları (Q) Güneş sisteminin dış kısımlarına kadar uzanmaktadır. Ancak tüm bu cisimler, büyük gezegenlerin ve özellikle Jüpiter'in kütle çekimsel etkileri sonucu yörüngeleri üzerinde tedirginlikler yaşamaktadırlar. Bu kütle çekimsel etkiler, zaman zaman bu cisimlerin buldukları yerlerden başka yerlere sürüklenmelerine, Güneş sisteminin dışına atılmalarına ya da Güneş üzerine düşmelerine sebep olabilir.

Ay ve Yer benzeri gezegenler üzerine yapılan araştırmalar sonucunda yüzeydeki kraterlerin kaynağının volkanik olaylardan çok yüzeye çarpan gök cisimleri olduğu anlaşılmıştır (Wilhelms 1993). Buna bağlı olarak, Yer ve Ay ikilisi, Güneş sistemi tarihi süresince sürekli olarak küçük gezegenler tarafından bombalanmıştır. Yer'e yakın geçen veya çarpma tehlikesi olan bu cisimlere Yer'e Yakın Cisimler (YYC) denilmektedir. YYC'ler içerisinde asteroidler, aktif kuyruklu yıldızlar ve sönmüş kuyruklu yıldızlar yer almaktadır (Anonim 2015b). YYC'lerin yörünge enberi uzaklıkları $q < 1.3$ Astronomi Birimi (AB)'dir (Rabinowitz vd 1994) (1 AB = 150 milyon km).

YYC'ler, yörünge parametrelerine göre dinamik olarak alt gruplara ayrılmışlardır (Şekil 1.1). Bunlardan Yer yörüngesini kesenler Apollo ve Aten grubu, Yer yörüngesini kesmeyenler Amor ve Atira grubu cisimleridir. Apollo grubunun yörünge yarı büyük eksen uzunlukları (a) > 1 AB ve $q > 1.0167$ AB, Aten grubunun $a < 1$ AB ve $Q > 0.983$ AB, Amor grubunun 1.0167 AB $< q < 1.3$ AB ve Atira grubunun ise $Q \leq 0.983$ AB'dir. Yer yörüngesini kesmeyen cisimlerden Amor grubu, Yer yörüngesinin dışında kalır ancak neredeyse Yer yörüngesini kesebilecek uzaklıklarda dolanırlar. Atira grubu cisimleri ise Yer yörüngesinin içinde kalırlar ve Yer'e göre iç yörüngede dolanırlar (Şekil 1.2).

Günümüzde bilinen tüm küçük gezegenlerin sayısı 21 Aralık 2015 tarihi itibarı ile 705082 tanedir (Anonim 2015c). Gelişen gözlem teknikleri sayesinde bu sayı her geçen gün hızla artmaktadır. ISO (The Infrared Space Observatory) Deep Asteroid Search çalışmasının sonuçlarına göre, Güneş sisteminde boyutları 1 km ve 1 km üstü olan cisimlerin toplam sayısı yaklaşık 1.5 milyon kadardır. Bilinen YYC sayısı ise çalışmanın başladığı 1 Haziran 2014 tarihinde 10736 iken 21 Aralık 2015 tarihi itibarı ile 13677'dür. Bilinen YYC'ler içerisinde en büyük çoğunluğu Apollo grubu oluşturmaktadır. 1 Haziran 2014 tarihinde sayıları 5953 iken 21 Aralık 2015 itibarı ile sayıları 7264'dir. Popülasyon sayısına göre daha sonra Amor, Aten ve Atira grupları

gelmektedir ve 1 Haziran 2014 tarihinde sayıları sırasıyla 4041, 728, ve 14 iken 21 Aralık 2015 itibarı ile sayıları sırasıyla 5247, 979 ve 16'dır. Bu tez çalışmasında incelenen grup Apollo asteroid grubudur.

¹Yer ile Minimum Yörünge Kesişim Uzaklığı (Earth Minimum Orbit Intersection Distance, Earth MOID) 0.05 AB veya daha az olan ve ²mutlak parlaklığı 22 kadir veya daha parlak olan asteroidlere ise Potansiyel Tehlikeli Asteroidler (Potentially Hazardous Asteroids, PHA) denir. Bu asteroidlerin potansiyel tehlikeli olmaları er ya da geç Yer'e çarpacakları anlamını taşımaz. Sürekli gözlenerek, yörüngelerinin yüksek hassasiyet ile hesaplanması, yakın geçiş ve çarpma istatistiklerinin olası bir çarpışma için yakından takip edilmesi gerekmektedir. Bu durum varsayımları kuvvetlendirecek ve önceden tedbir sağlayacaktır. Günümüzde, bilinen, potansiyel tehlike arz eden asteroid sayısı 21 Aralık 2015 tarihi itibarı ile 1646'dır.

Bilinmeyen YYC'lerin yanı sıra toplam YYC sayısı da zamanla değişmektedir. Güneş sistemi içerisinde hem kütle çekimsel hem de kütle çekimsel olmayan etkiler sebebiyle YYC bölgesine cisim taşınmaktadır. Kütle çekimsel etkiler, büyük gezegenlerin kütle çekimsel etkileri, küçük gezegenlerin birbirleri ile yakın geçişleri sonucunda oluşan yörünge kararsızlıkları ve çarpışmalar sebebi ile olur.

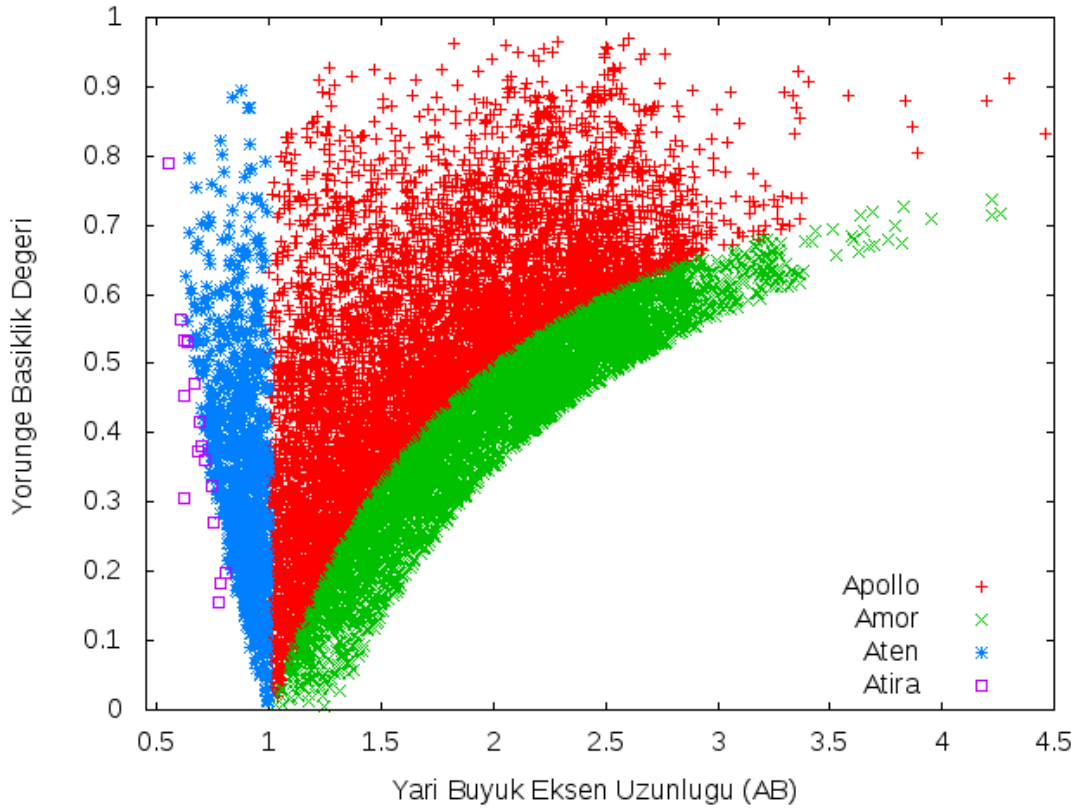
Güneş sistemi içerisinde, küçük gezegenlerin yörüngeleri üzerinde tedirginlik yaratan en önemli cisim en büyük kütleyle sahip olan Jüpiter'dir. Jüpiter'in ve diğer büyük gezegenlerin bu etkileri ile diğer etkiler sonucunda, Güneş sistemi dışındaki yörüngelerde dolanan kuyruklu yıldızlar iç yörüngelere taşınabilir ya da iç yörüngelerde dolanan bir asteroid dış yörüngelere ve hatta Güneş sisteminin dışına dahi atılabilir.

Kütle çekimsel olmayan etkiler, kütle çekimsel etkiler ve çarpışmalar kadar, küçük gezegenlerin yörünge evrimlerinin tam anlamıyla anlaşılabilmesi için göz önüne alınması gereken etkilerdir. Kütle çekimsel etkilere göre, yörünge üzerindeki etkileri çok daha uzun sürelerde görülür (Bottke vd 2006). Bunlar Güneş etrafındaki dolanma periyoduna etki eden Yarkovsky ve dönme periyoduna etki eden YORP (Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack) etkileridir (Bölüm 2.2).

Bundan sonraki bölümlerde tüm küçük gezegenler için çoğunlukla asteroid adı kullanılacaktır.

¹ **Minimum Yörünge Kesişim Uzaklığı (MOID):** İki cismin yörüngeleri üzerindeki hareketleri sırasında, aralarında oluşabilecek en yakın geçişi belirten değerdir. Yer ve asteroidler için MOID hesaplamaları, yaşanabilecek olası çarpışmaların belirlenmesi için oldukça önemlidir. Eğer bir cismin Yer MOID değeri 0.05 AB'den küçük ise (örn. PHA) bu cisim sürekli takip edilerek hassas yörünge hesaplamaları yapılmalı ve olası çarpışmalar önceden belirlenmelidir.

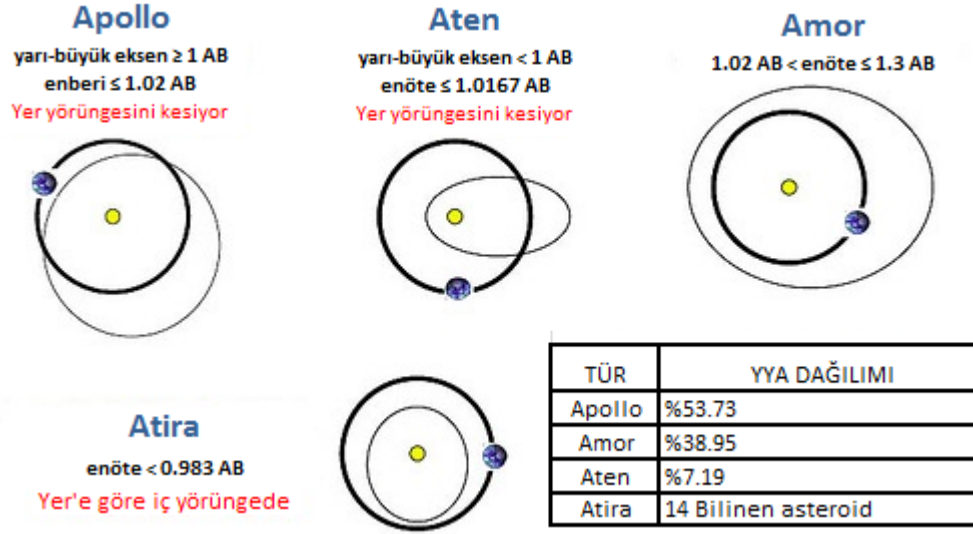
² **Mutlak Parlaklık (H):** Asteroidler için, 0° faz açısında (Yer-asteroid-Güneş) ve Güneş'ten 1 AB uzaklıktaki görünür parlaklıktır. Mutlak Parlaklık, asteroidler için aynı zamanda büyüklük ölçeğidir. Eğer asteroidin albedosu (asteroidin, üzerine gelen Güneş ışığının ne kadarını yansıttığı, yansıtabilirlik) tam olarak biliniyorsa çapı da modeller vasıtasıyla hesaplanabilir. Çoğu asteroidin albedosu tam olarak bilinmemekle beraber 0.05 ve 0.25 aralığındadır. Buna göre, mutlak parlaklığı bilinen bir asteroidin aynı zamanda kabaca büyüklüğü hesaplanabilyordur.



Şekil 1.1. Tüm YYA'lar (Yer'e Yakın Asteroid)

Bu tez çalışmasında Apollo grubu asteroidlerinin yörüngeleri zamanda geriye doğru yapılan integrasyonlar ile incelenecektir. Bu integrasyonlar sırasında temel yörünge elemanları takip edilecek, bu asteroidlere kaynaklık eden bölgeler belirli bir zaman limiti altında (10 Milyon yıl) tespit edilmeye çalışılacaktır. Kaynak bölgelerin araştırılması, bir anlamda, Güneş sistemindeki YYA popülasyonuna katkıda bulunan dinamik yolların tespit edilme çalışmasıdır.

Asteroidlere kaynaklık eden bölgelerin araştırılabilmesi için asteroid yörüngelerinin temel özelliklerinin ve bu temel özellikler üzerindeki başlıca fiziksel etkilerin de tanımlanması gerekmektedir. Bu amaçla Bölüm 1'de önce yörüngelerin temel parametreleri ve bu parametrelerin özellikleri detaylandırılacaktır. Sonrasında Bölüm 2'de Güneş sistemindeki dinamik özelliklerin asteroid yörüngeleri üzerindeki etkileri incelenecektir. Bölüm 3'te literatürde bulunan, konuyla ilgili bazı önemli çalışmalar irdelenecek ve kaynak bölgeleri detaylandırılacaktır. Bölüm 4'te bu tez çalışmasında kullanılan materyal ve yöntemler anlatılacak ve Bölüm 5'te elde edilen sonuçlar ile oluşturulan grafikler üzerine bilgiler verilecektir. Bölüm 6'da ise çalışmanın sonuçlarına yönelik özet bilgi sunulmuştur.



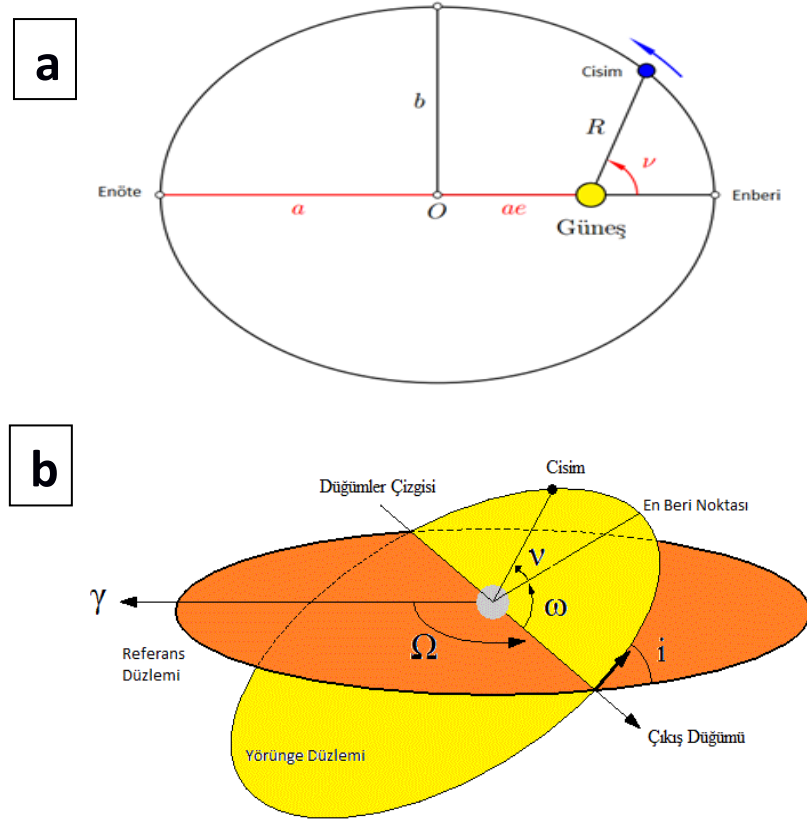
Şekil 1.2. Yer'e Yakın Asteroidler'in Yer ile beraber yörüngeleri. YYA dağılım yüzdeleri 17 Kasım 2015 verilerine göre güncellenmiştir (Anonim 2015d)

1.1 Kepler Yörünge Elemanları

Güneş sistemi içerisinde gezegenler ve kapalı yörüngede dolanan bütün cisimler Kepler kanunlarına uygun olarak hareket ederler ve odaklarından birinde Güneş'in olduğu elips bir yörüngede dolanırlar. Buna göre, elipsin şeklini belirten ik temel yörünge elemanı ve yörünge'nin uzaydaki yönelimini belirten üç temel yörünge elemanı vardır. Elipsin şeklini belirten yörünge elemanları a – yarı büyük eksen uzunluğu ve e – yörünge basıklık değeridir. Yönelimini belirten yörünge elemanları ise i - yörünge düzleminin eğikliği, Ω – çıkış düğümünün boylamı ve ω – enberi noktasının argümanıdır (Şekil 1.3).

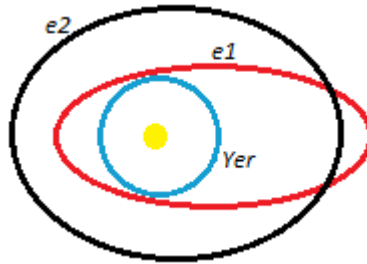
Yörüngede dolanan cismin yörünge üzerindeki konumunu belirten yörünge elemanı ise v - gerçel ayıklıktır. v , cismin o andaki enberi noktasına olan açısal uzaklığını belirtmektedir. Güneş sistemi içerisinde dolanan küçük gezegenler için hesaplanan bu yörünge elemanları anlık yörünge elemanlardır. Öyle ki, küçük gezegenler, kütleleri görece olarak çok büyük olan büyük gezegenlerin kütle çekim etkilerinden dolayı yörüngeleri üzerinde periyodik ya da periyodik olmayan salınımlar yapmaktadır (Bölüm 1.2-2.1.2).

Kepler yörünge elemanlarının tamamen bilinmesi, asteroidlerin yörünge evrimlerinin daha iyi anlaşılması için oldukça önemlidir. Örneğin, Yer'e göre dış yörüngelerde dolanan ve aynı yarı büyük eksen uzunluğuna sahip iki cisimden yörüngesi yeterince basık olan YYA olabilir (Şekil 1.4).



Şekil 1.3. Kepler yörünge elemanları

Şekil 1.3.a’da yörüngeyi belirleyen a – yarı büyük eksen uzunluğu ve e – yörünge basıklık değeri gösterilmektedir. Şekil 1.3.b’de ise yörüngeyi belirleyen, i – yörünge düzleminin eğikliği (referans düzlemi ile yörünge düzlemi arasındaki açı), Ω – çıkış düğümünün boylamı ve ω – enberi noktasının argümanıdır. v – gerçel ayrıklık ise cismin o an daki enberi noktasına olan uzaklığını belirtmektedir. γ – ise koç noktasını (ilkbahar noktası) göstermektedir.



Şekil 1.4. Yörünge basıklık değerleri farklı olan iki yörüngeyi Yer’e göre durumları

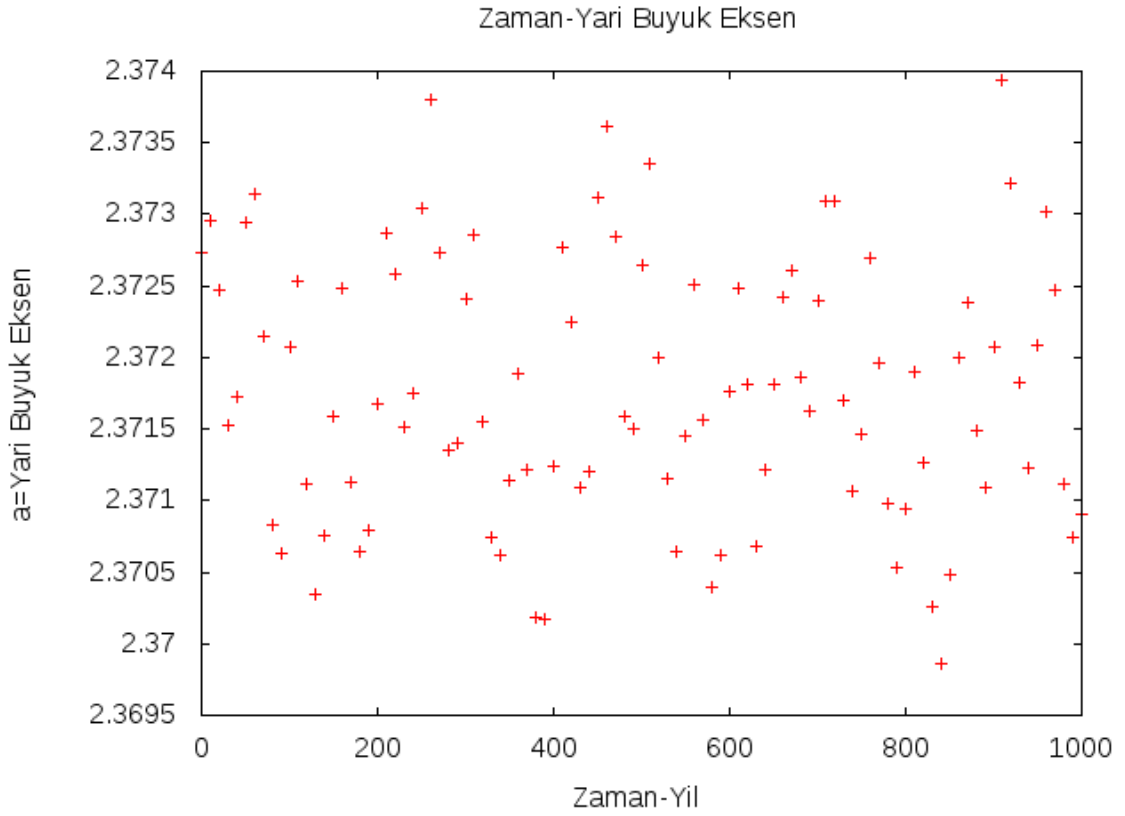
Şekil 1.4’te mavi yörünge Yer’i temsil ederken kırmızı ve siyah yörüngeler basıklığı farklı ancak yarı büyük eksen uzunlukları aynı olan iki cisim temsil etmektedir. Basıklığı büyük olan cisim diğer cisme göre Yer’e yakın olduğu açıkça görülmektedir.

1.2. Anlık Yörünge Elemanları (Osculating elements)

Güneş sistemi, kütle çekimsel ve kütle çekimsel olmayan etkiler sebebiyle dinamik olarak kaotik bir yapıya sahiptir (Sussman ve Wisdom, 1988). Güneş sistemi içerisinde, büyük gezegenlerin ve hatta büyük kütleli diğer asteroidlerin sürekli kütle çekimsel etkileri altında olan asteroidlerin yörünge elemanları da sürekli değişmektedir. Bu yüzden bir asteroidin belirli bir zaman için hesaplanan yörünge elemanları anlık yörünge elemanları olarak adlandırılır. Anlık yörünge elemanlarının salınım genliği ve periyodu bulunduğu bölgeye göre değişiklik gösterir. Örneğin, bu tez çalışmasında yapılan integrasyonlar özel olarak incelendiğinde 3:1 rezonans bölgesindeki bir cismin yarı büyük eksen uzunluğunun maksimum salınım genliği 0.13 AB, 2:1 rezonans bölgesi için 0.31 AB olduğu görülmüştür (Bölüm 2.1.2, Şekil 2.1-2.2). Ancak, yörünge elemanlarının salınımı her zaman o kadar düzgün ve periyodik olmak zorunda değildir. Yalnızca belirli bölgeler için (rezonans bölgeleri vb.) salınımlar periyodik olarak görülmektedir. Asteroidlerin değişen yörüngeleri ile beraber birden fazla büyük gezegen ile etkileşimlerinde bu etkinin daha düzensiz olduğu görülmektedir. Yer'e Yakın Asteroidler bu açıdan kaotik yörünge evrimlerine sahiptirler. Jüpiter dışında Mars, Yer ve hatta Venüs ile yakın geçişlerde buldukları için yörünge elemanlarındaki düzensiz ve ani değişimlerin sıklığı oldukça fazladır. Bunun yanı sıra, büyük gezegenlerin yörünge elemanları da anlık değişmektedir. Ancak kütlelerinin göreceli olarak asteroidler ve diğer küçük gezegenlerden çok büyük olması sebebi ile anlık yörünge elemanlarının maksimum değişim genliği milyon yıl seviyelerinde dahi ihmal edilebilecek düzeydedir. Bu sebeple büyük gezegenlerin yörüngeleri oldukça kararlıdır. Bunun yanı sıra küçük kütleli cisimlerin büyük kütleli gezegenler ile yakın geçiş sıklığı yörüngelerinin düzensizliğini çok daha fazla arttıracaktır. Küçük kütleli cisimlerin yörüngelerindeki bu kararsızlık bu cisimlerin yörünge elemanlarının sürekli hesaplanmasını gerektirir. Yüksek hassasiyetle hesaplanan anlık yörünge elemanları dahi belirli bir zaman sonra kaotikliğin yaratmış olduğu etkiler sonucu istenen hassasiyette olmayacaktır ve geçerliliğini yitirecektir. Bu sebeple, küçük kütleli cisimlerin, özellikle de Yer ile kesişen cisimlerin yörüngeleri sürekli hesaplanarak güncellenmelidir.

Bu tez çalışmasında integrasyonu yapılan 2005 AT12 cisminin 10000 yıllık ve zamanda geriye doğru yapılan integrasyonunu gösteren Şekil 1.5'te, x ekseninde başlangıç değerine (0) karşılık 20 Haziran 2014 tarihi için anlık (salınan) yarı büyük eksen uzunluğu görülmektedir (2.3725 ile 2.373 arasında y-ekseni üzerinde). Grafikte başlangıç tarihinden itibaren bir sonraki değer 10 yılda bir olacak şekilde 100 nokta yer almaktadır. Dağılıma bakıldığında düzenli ve periyodik bir dağılım olmadığı görülmektedir. Ancak yarı büyük eksen uzunluğunun belli bir aralık içerisinde olması sebebiyle yörünge elemanının çok da kararsız bir bölgede olduğu söylenemez.

Ana Kuşak asteroidlerinin anlık yörünge elemanlarının belirli bir değişim aralığında olması sebebi ile bu aralığa uygun olarak belirlenen, yörünge hareketinin ortalama karakteristiğini belirten ve uzun zaman aralığında değişmediği varsayılan öz yörünge elemanları (proper elements) belirlenmiştir (Bölüm 1.3).



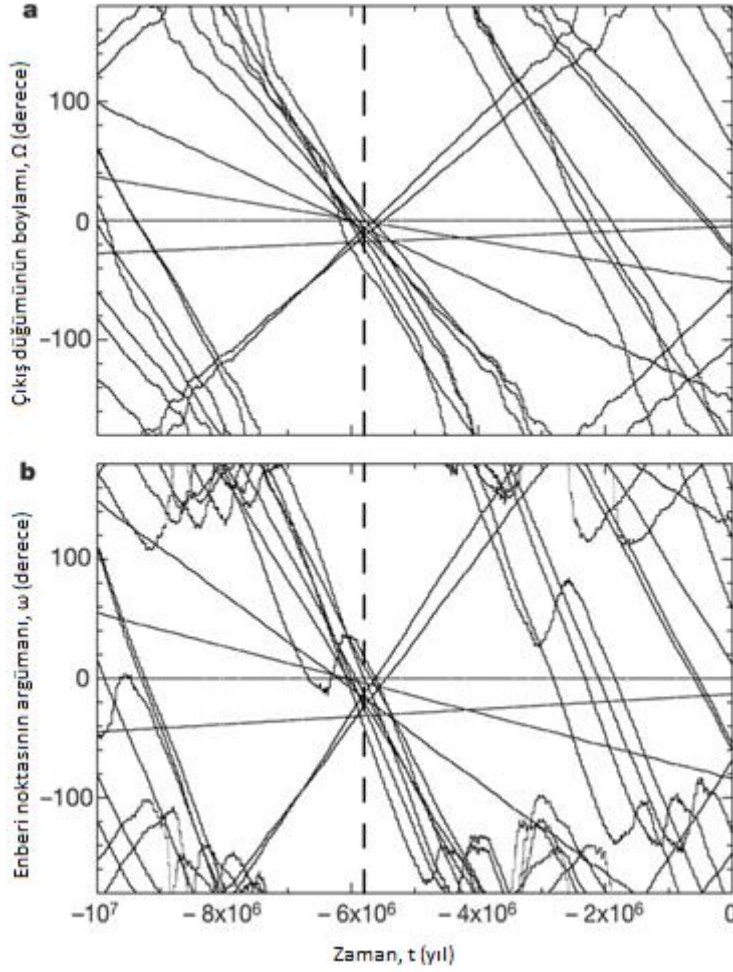
Şekil 1.5. 2005 AT12 asteroidinin, 1000 yıllık, zamanda geriye doğru yarı büyük eksen uzunluğunun değişim grafiği

1.3. Öz Yörünge Elemanları

Öz yörünge elemanları, asteroidlerin kütle çekimsel etkiler sonucu sürekli değişen anlık yörünge elemanları yerine hesaplanan, bu sayede gezegenlerin uzun ve kısa süreli pertürbasyon etkilerinin eliminasyonunun sağlandığı, neredeyse Güneş sisteminin tarihi boyunca değişmediği varsayılan ve yörünge karakteristiğini belirten yörünge elemanlarıdır (Valsecchi vd 1989, Shoemaker vd 1989, Lemaitre 1993, Knezevic ve Milani 1994, Knezevic 1994, Knezevic vd 2002). Öz yörünge elemanları ilk olarak Hirayama (1918) tarafından kullanılmış ve bu sayede asteroid aileleri keşfedilmiştir (Bölüm 1.4).

Öz yörünge elemanlarının kullanılmasında iki temel amaç vardır: i) Asteroid ailelerini belirleyerek asteroidlerin sınıflandırılmasının yapılması ii) Ana Kuşak bölgesinin dinamik yapısının belirlenmesi (Milani ve Knezevic, 1994). Yukarıda yapılan tanımlar çok büyük çoğunlukla Ana Kuşak asteroidleri için geçerlidir. Bu bölgedeki asteroidlerin yörüngelerinin uzun süreli kararlılıkları, öz yörünge elemanlarının hesaplanabilmesini sağlar (Knezevic vd 2002). YYA'lar ise yaşamlarının çoğunu iç gezegenlerin ve Jüpiter'in güçlü kütle çekimsel etkileri altında geçirirler. Bu yüzden, Ana Kuşak asteroidlerine göre çok daha kararsız yörünge elemanlarına sahip olan YYA'ların öz yörünge elemanlarını hesaplamak zordur (Morbidelli vd 2002, Gladman vd 1997). Yalnızca, belirli koşullar altında YYA öz yörünge elemanları doğru

kabul edilebilir: eğer asteroid, büyük gezegenler ile yakın geçiş yapmıyorsa ve aynı zamanda güçlü ortalama hareket rezonansına girmemişse (Schunova vd 2012).



Şekil 1.6. Aynı aileye ait farklı cisimlerin yörünge parametrelerinin, 10 milyon yıllık, zamanda geriye doğru yapılan integrasyon sonucu kesişmesi

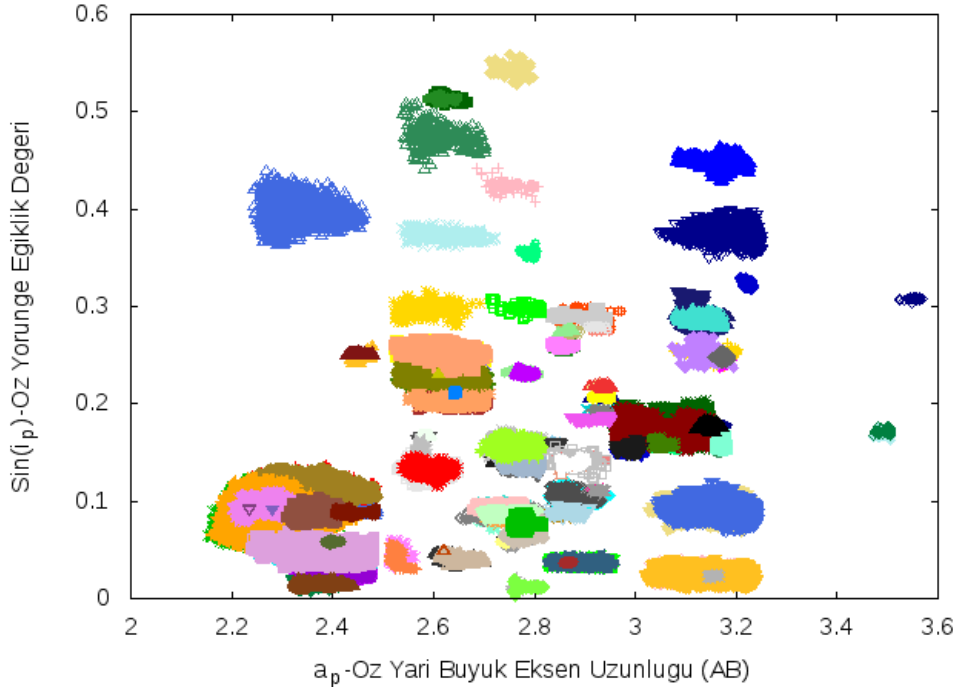
Şekil 1.6’da yapılan çalışmaya göre zamanda geriye doğru integrasyonu yapılan cisimlerin ortak bir yerden 5.8 Milyon yıl önce dağıldığı görülmektedir. Koronis ailesinin alt ailesi olan Karin ailesi, zamanda geriye doğru yapılan integrasyon sonucunda, sayısal analizler ile belirlenmiştir (Nesvorny vd 2002).

1.4. Asteroid Aileleri

Öz yörünge elemanlarının, faz uzayı içerisinde gruplaşması ile asteroid aileleri görülür. Aileler, aileye kaynaklık eden cismin, uzak geçmişte bilinmeyen bir zamanda, yıkıcı bir çarpışma sonucu dağılması sonrasında oluşur (Milani vd 1994). Ana Kuşak asteroid aileleri belirlenirken, yörünge elemanlarının, milyon yıldan milyar yıla kadar olan yörünge benzerlikleri araştırılır ki bu da öz yörünge elemanlarına işaret eder.

Tayfsal çalışmalar ise ailelerin beklenildiği üzere aynı kimyasal kompozisyonda olduğunu gösterir ki bu da dinamik incelemenin sonucunu doğrulamak için gereklidir

(Cellino vd 2002, Ivezic vd 2002). Ana Kuşak asteroid aileleri ile YYA ailelerinin belirlenmesi arasındaki temel fark bir önceki bölümde bahsedildiği üzere yörünge kararlılığıdır. Ana Kuşak için Güneş sistemi tarihi ile karşılaştırılabilir yörünge kararlılığı görülürken, Yer'e yakın olanlar için güçlü kütle çekim etkisi altında kararsız yörüngeler görülür. Bu da dinamik açıdan Yer'e yakın olan asteroidlerin zamanda geriye doğru yörünge elemanlarının incelenmesini ve aralarında bir korelasyon bulunmasını güçleştirir (Schunova vd 2012).



Şekil 1.7. Öz yörünge elemanlarının gruplaşması ile görülen asteroid aileleri

Şekil 1.7'de x-ekseni öz yarı büyük eksen uzunluğu - a_p , y-ekseni ise öz yörünge eğikliği - $\sin(i_p)$ değerini temsil etmektedir. David Nesvorny tarafından Hierarchical Clustering Method (HCM; Zappala vd 1990, 1994) kullanılarak belirlenmiş 99 aile farklı renklerde gösterilmiştir (Nesvorny 2012). Grafikte yalnızca ³ numaralanmış asteroidler kullanılmıştır (Anonim 2012).

Eğer $a_p - e_p$ ve $e_p - \sin(i_p)$ grafikleri çizdirilse bile benzer gruplaşmaların olduğu görülecektir. Bu gruplaşmalar asteroid ailelerini temsil etmektedir. Şu ana kadar Yer'e Yakın Asteroidler içerisinde daha önce belirtilen zorluklar sebebiyle aile bulunamamıştır (Drummond 2000, Schunova vd 2012).

³ **Numaralanmış asteroid:** Asteroid isimlendirmelerinde bazı kurallar vardır. Bir asteroid keşfedildiğinde öncelikle keşif yılını ve hangi ayda kaçınıcı keşfedilen asteroid olduğunu belirten bir isim verilir. Daha sonra yörüngesi yüksek hassasiyet ile belirlendiğinde numara verilir. Numaralanmış asteroid, yörüngesi yüksek hassasiyet ile bilinen asteroid anlamına gelmektedir. Numaralanmamış asteroidler yörünge parametrelerinin daha hassas belirlenmesinin ardından numara alacak ve numaralanmış asteroid olacaktır.

2. ASTEROİD YÖRÜNGELERİ AÇISINDAN GÜNEŞ SİSTEMİ'NİN DİNAMİK ÖZELLİKLERİ

Güneş sisteminin dinamiği, Güneş sistemi içerisindeki tüm cisimlerin, birbirleri üzerindeki etkiler sonucu oluşan dönme ve dolanma değişimleri ile ilgilidir. Bu bölümde, Güneş sistemi dinamiği, asteroid yörüngeleri üzerindeki temel etkiler açısından ele alınacaktır.

2.1. Yörünge Rezonansları

Güneş sistemi dinamiğinin uzun dönemli incelenmesi, yörünge rezonanslarının anlaşılmasını gerektirmektedir. Bu rezonanslar, Güneş sistemi içerisinde hem kararsızlık hem de uzun dönemli kararlılığın sebebi olabilirler (Malhotra 1998).

2.1.1. Dönme – dolanma rezonansı

Eğer bir cismin dönme periyodu ile dolanma periyodu arasında karşılaştırılabilir bir oran var ise dönme – dolanma rezonansı görülür. En tanınmış örnek Ay'dır. Ay'ın hep aynı yüzünü görmemizin sebebi 1:1 dönme-dolanma rezonansında olmasıdır. Bu durum yörüngede çekimsel kilitlenme oluşturur. Güneş sistemindeki çoğu doğal uydu 1:1 rezonansındadır. Örneğin, Pluto'nun uydusu Charon da 1:1 rezonansındadır. Charon'un dönme periyodu ve dolanma periyodu ile Pluto'nun dönme periyodu aynıdır ve 6.387 gündür. Ayrıca Merkür 3:2 dönme-dolanma rezonansındadır. Merkür için bu durumun oluşmasının sebebi yörünge basıklık değerinin 0.206 olmasıdır.

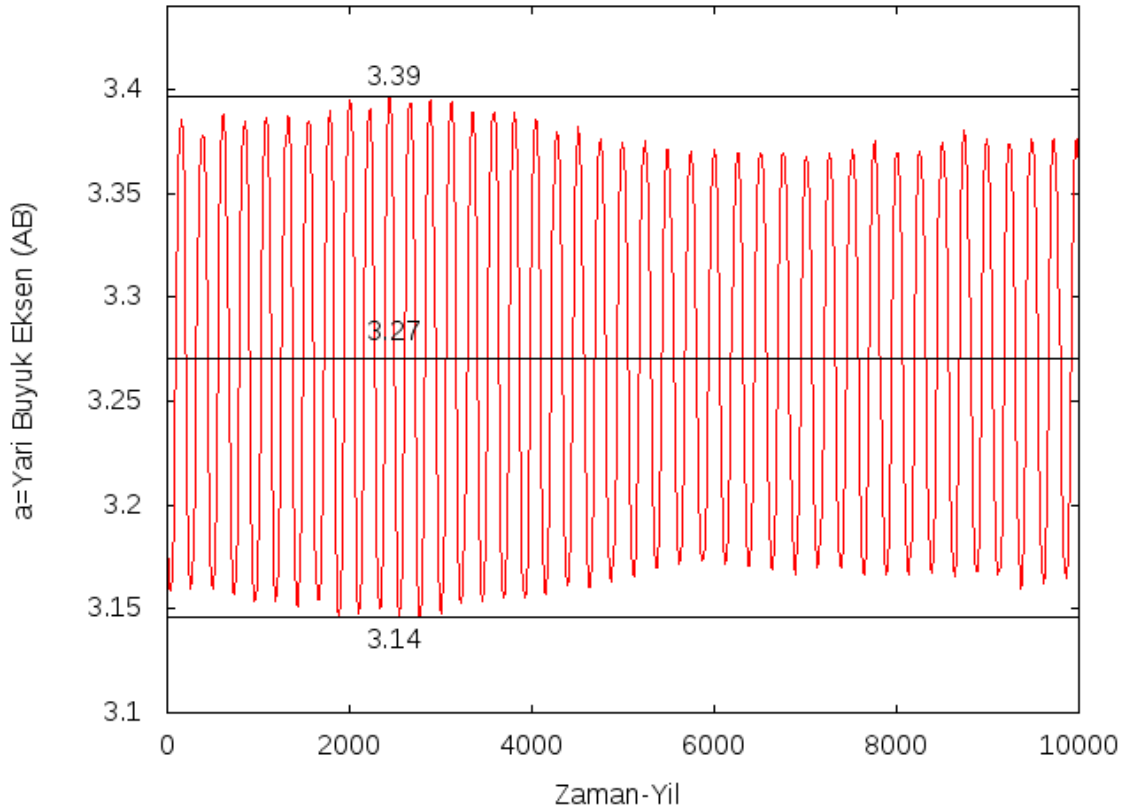
2.1.2. Ortalama hareket rezonansı

Güneş sistemi içerisinde, büyük gezegenlerin, asteroidler üzerindeki kütle çekimsel etkileri, yörünge üzerinde kararsızlıklara sebep olur. Eğer, bu etkiler rastgele zamanlarda değil de periyodik olarak gerçekleşirse, yani asteroid bu etkilere periyodik olarak maruz kalırsa asteroidin yörünge elemanlarının değişimi de periyodik olacak ve belirli bir zaman sonra gezegen tarafından o bölgeden ya iç yörüngeye ya da dış yörüngeye doğru atılacaklardır. Bu periyodik kütle çekimsel etkilerin uygulandığı bölgeler ortalama hareket rezonans bölgeleri olarak adlandırılmaktadır. Asteroidin ve büyük gezegenin Güneş etrafındaki dolanma periyotları arasında tam sayılı bir oran var ise asteroid için o bölge ortalama hareket rezonans bölgesi olacaktır. Güneş sistemi içerisinde en büyük kütleye sahip gezegen Jüpiter olduğu için baskın ortalama hareket rezonans bölgeleri Jüpiter'in dolanma periyodunun tam sayılı oranlarına karşılık gelen bölgelerdir. Jüpiter'in dolanma periyodu ~12 yıldır. Buna göre dolanma periyodu 4 yıl olan bir asteroid Jüpiter ile 3:1 rezonansındadır. Burada 3, Jüpiter'in dolanma periyoduna karşılık gelen oran, 1 ise asteroidin dolanma periyoduna karşılık gelen orandır. Kepler'in 3. yasası gereğince, Güneş etrafındaki her bir dolanma periyoduna karşılık yarı büyük eksen uzunluğu hesaplanabilir. Buna göre dolanma periyodu 4 yıl olan bir asteroidin $\frac{a^3(AB)}{p^2(yıl)} = 1$ bağıntısından yarı büyük eksen uzunluğu ~2.51 AB olacaktır. Yani Jüpiter ile 3:1 rezonansında bulunan bölge $a = 2.51$ AB bölgesidir. Bu bölgede bulunan asteroidler için kütle çekimsel etki periyodik olacağından yörünge elemanlarındaki değişim de bu bölgede bulunduğu sürece periyodik olacaktır (Şekil 2.1-

2.2-2.3). Daha önce belirtildiği üzere ortalama hareket rezonansı sonucunda asteroidler iç ya da dış yörüngeye atılabilirler. İç yörüngeye doğru atılmaları sonucu bu asteroidler Yer'e yaklaşır ve Yer'e Yakın Asteroid olurlar. Ancak 2:1 rezonans bölgesinde yer alan Zhongguo asteroidlerinin Güneş sistemi tarihi süresince (~4 Gyıl) 2:1 rezonans bölgesinde olduğu düşünülmektedir (Roig vd 2002).

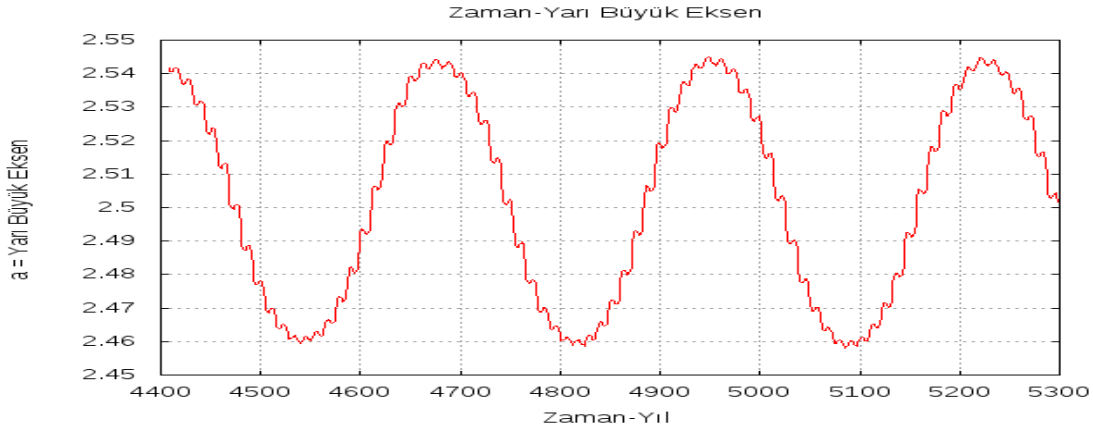
Yer'e Yakın Asteroidler için ortalama hareket rezonans bölgeleri bu asteroidlere kaynaklık eden bölgelerdendir. Bu bölgeler güçlü ve zayıf bölgeler olarak ayrılabilirler. Güçlü bölgeler 4:1, 3:1, 5:2, 7:3 ve 2:1, zayıf bölgeler ise 9:2, 7:2, 7:4, 10:3, 8:3, 8:5, 9:4, 11:5, 11:6, 5:3 ve diğer tam sayı oranlı bölgelerdir. Güçlü ve zayıf olarak ayrılması, bölgenin, asteroidin yörünge parametreleri üzerindeki değişim hızlarına göre belirlenir.

Bu bölgelerin sayısal integrasyonlar sonucu ulaşılan dinamik açıdan ayrıntılı bilgilerine Bölüm 3'te yer verilmiştir.



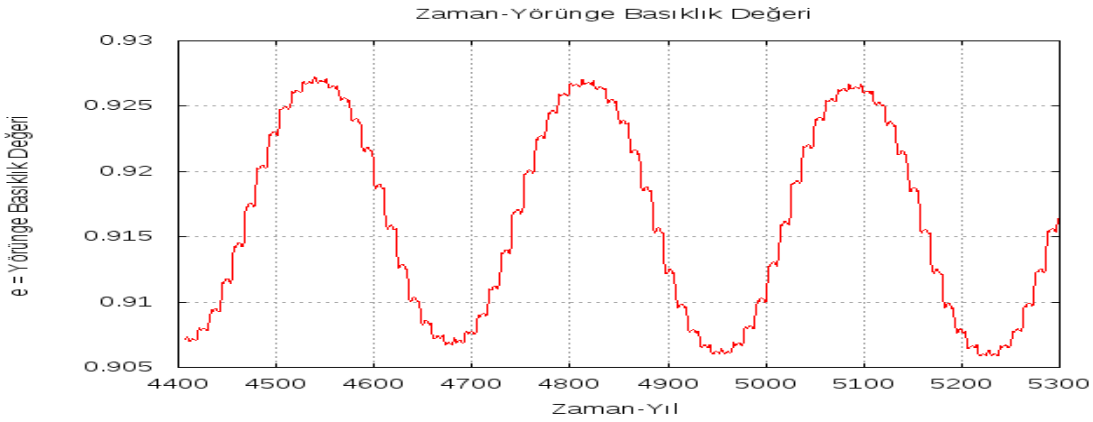
Şekil 2.1. Apollo grubuna ait 2000 YG29 asteroidinin 1000 yıllık zaman aralığına karşılık yarı büyük eksen uzunluğunun değişimi

Şekil 2.1'de bu tez çalışmasında zamanda geriye doğru integrasyonu yapılan Apollo grubuna ait 2000 YG29 asteroidinin başlangıçtan itibaren 1000 yıllık zaman aralığına karşılık yarı büyük eksen uzunluğunun değişimi verilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere salınımın merkezi ~3.27 AB'ye karşılık gelmektedir ve bu bölge 2:1 rezonans bölgesidir. Salınımın genliği ise bu zaman aralığı için maksimum 0.25 AB'dir.



Şekil 2.2. 2003 MT9 asteroidinin seçilen 900 yıllık zaman aralığına karşılık yarı büyük eksen uzunluğunun değişimi

Şekil 2.2’de bu tez çalışmasında zamanda geriye doğru integrasyonu yapılan Apollo grubuna ait 2003 MT9 asteroidinin seçilen 900 yıllık zaman aralığına karşılık yarı büyük eksen uzunluğunun değişimi verilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere salınımın merkezi ~ 2.5 AB’ye karşılık gelmektedir ve bu bölge 3:1 rezonans bölgesidir. Salınımın genliği ise 0.08 AB’dir. Büyük periyodik salınımların yanı sıra küçük periyodik salınımlar da büyük salınım içerisinde görülmektedir.



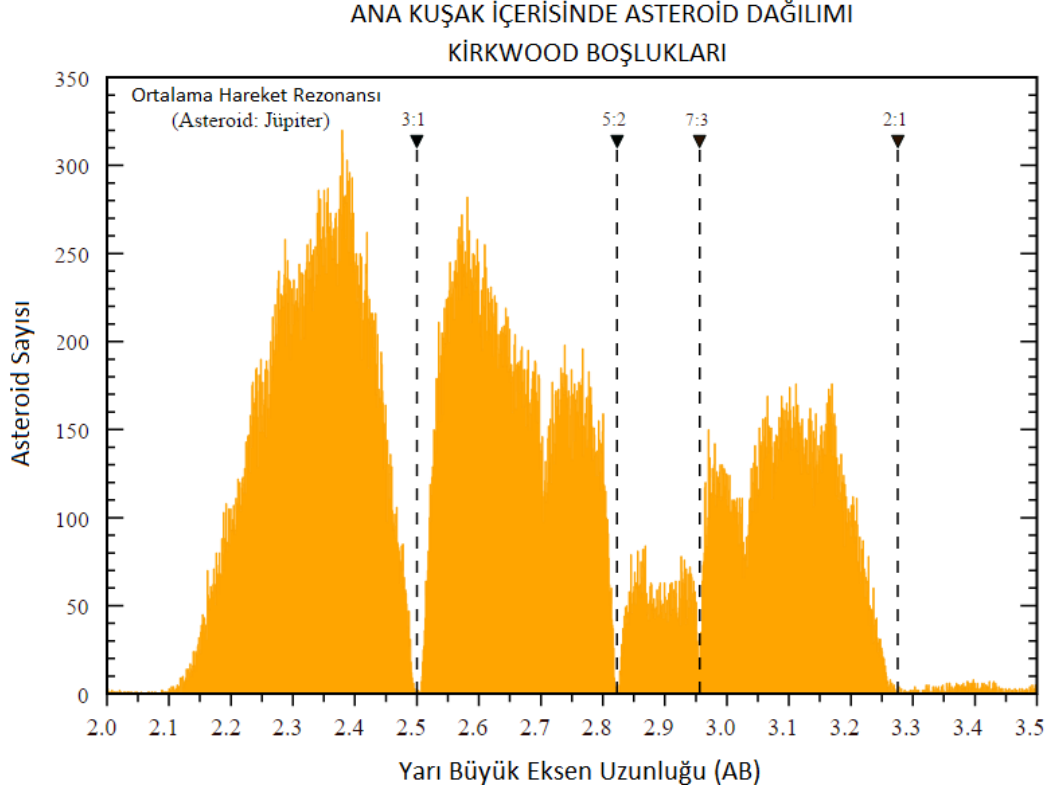
Şekil 2.3. 2003 MT9 asteroidinin seçilen 900 yıllık zaman aralığına karşılık yörünge basıklık değerinin değişimi

Şekil 2.3’te görülen yörünge basıklık değerinin salınımı, Şekil 2.2’de görülen yarı büyük eksen değişiminin salınımı ile aynı frekansta olduğu görülmektedir. Yörünge yarı büyük eksen uzunluğu artarken yörünge basıklığının azaldığı, yörünge yarı büyük eksen uzunluğu azalırken ise yörünge basıklığının arttığı görülmektedir. Bu durum, asteroidin Güneş’e göre enberi noktasının değişimini de belirtmektedir.

Güneş sistemi içerisinde, büyük gezegenlerin, özellikle Jüpiter’in periyodik kütle çekimsel etkileri bu bölgelerdeki asteroidlerin bölge dışına atılmasına sebep

olduğundan bu bölgeler neredeyse boştur. İlk olarak Kirkwood tarafından belirlenen bu bölgelere Kirkwood boşlukları denilmektedir (Kirkwood 1888) (Şekil 2.4).

Şekil 2.4'te yatay eksen yarı büyük eksen uzunluğu, dikey eksen ise asteroid sayısını vermektedir ve boşluklar açıkça görülmektedir. Bu boşluklar güçlü rezonans bölgelerini belirtmektedir (3:1, 5:2, 7:3, 2:1). Grafik Haziran 2007'de Alan Chamberlin tarafından o tarihteki tüm numaralanmış asteroidler kullanılarak hazırlanmıştır (156929 numaralanmış asteroid) (Anonim 2015e).



Şekil 2.4. Kirkwood boşlukları

Ortalama hareket rezonansının sebep olduğu boşluklara bir örnek de Satürn gezegenin halkasında bulunan Huygens ve Maxwell boşlukları gösterilebilir. Halka, dinamik bir sistemdir ve halkayı oluşturan küçük toz, buz ve kaya parçaları gezegenin uyduları gibi gezegen etrafında dolanmaktadır. Halka üzerindeki Huygens ve Maxwell boşlukları sırasıyla Mimas uydusu ile 2:1 ve 3:1 rezonanslarına karşılık gelen bölgelerdir. Güneş sistemi içerisindeki bu ve benzeri boşluklar ortalama hareket rezonansı vb. mekanizmalar sonucu oluşmuştur.

2.1.3. Seküler rezonans

Güneş sistemi ve benzeri sistemlerde, gezegenler arası kütle çekimsel etkileşimlerin sonucu olarak gezegenlerin yörünge elemanları belirli bir frekansta presesyon hareketi yapar. Eğer, asteroidin presesyonunun frekansı ile gezegenin presesyonunun frekansı birbirine eşit veya kıyaslanabilir değerlerde ise seküler rezonans

oluşur (Morbidelli ve Henrard 1991). En önemlileri lineer seküler $v_5 = g - g_5$, $v_6 = g - g_6$ ve $v_{16} = s - s_6$ rezonanslarıdır. g_5 ve g_6 enberi noktasının boylamının ($\varpi = \omega + \Omega$), s_6 ise çıkış düğümünün boylamının (Ω) presesyon hızları ile ilişkilidir. g ve s asteroidin presesyon hızı, g_5 Jüpiter'in, g_6 ve s_6 ise Satürn'ün presesyon hızlarıdır. Lineer olmayan seküler rezonanslardan bazıları ise $g + s - g_5 - s_6$, $g + s - g_6 - s_6$, $2g + s - 2g_6$, $3g + s - 3g_6 - s_6$, $g - 2g_6 + g_5$, $g - 2g_6 + g_7$, $g - 3g_6 + 2g_5$, $s - s_6 - g_5 + g_6$ ve $g + s - g_5 - s_7$ 'dir. Aynı zamanda, gezegenlerin varlığı, kütleleri ihmal edilen asteroidlerin yörüngeleri üzerinde kararsızlık oluşturur ve özellikle presesyon sonucu Ω ve ω değerlerini artırır.

Bilinen en önemli seküler rezonanslardan v_6 rezonansı Ana Kuşak'ın iç sınırında yaklaşık 2.1 AB bölgesine karşılık gelir. Bu bölgede $g_0 = g_6 = 28.25/\text{yıl}$ 'dır. g_0 asteroidin enberi noktasının presesyon hızı iken g_6 Satürn'ün enberi noktasının presesyon hızıdır.

Bir asteroidin yörüngesinin seküler pertürbasyonu Hamilton fonksiyonu ile ifade edilir. Özel olarak v_6 seküler pertürbasyonunun ifadesi aşağıdaki gibidir (Malhotra 1998).

$$H_{sec} = -g_0J + \beta J^2 + \varepsilon\sqrt{2J}\cos(\dot{\omega}_6 - \dot{\omega}) \quad (2.1)$$

Burada,

$$g_0 = \sum_i \frac{2A\alpha_i}{a^{1/2}a_i} m_i \quad (2.2)$$

$$\beta = \sum_i \frac{A(\alpha_i) - 4B(\alpha_i)}{aa_i} m_i \quad (2.3)$$

$$\varepsilon = \sum_i \frac{C(\alpha_i)}{a^{1/4}a_i} m_i E_i^{(6)} \quad (2.4)$$

$$J = \sqrt{a1 - e^2} \quad (2.5)$$

$$B(\alpha) = \frac{1}{128} \alpha^3 \frac{d^2}{d\alpha^2} b_{\frac{3}{2}}^{(1)}(\alpha) \quad a < a_p \text{ ise} \quad (2.6)$$

$$B(\alpha) = \frac{1}{128} \alpha^2 \left(12 + 8\alpha \frac{d}{d\alpha} + \frac{d}{d\alpha^2} \right) b_{\frac{3}{2}}^{(1)}(\alpha) \quad a > a_p \text{ ise} \quad (2.7)$$

$$A(\alpha) = \frac{1}{8} \alpha b_{\frac{3}{2}}^{(1)}(\alpha) \quad (2.8)$$

$$C(\alpha) = \frac{1}{4} \alpha b_{\frac{3}{2}}^{(2)}(\alpha) \quad (2.9)$$

Hamilton fonksiyonu içerisindeki her üç terim de non-lineer osilatörün dinamiğini tanımlayan ifadelerdir. $\alpha = \frac{a}{a_i}$ asteroid ve i. gezegenin yarı büyük eksen uzunluklarının oranı, A,B,C ise Laplace katsayıları olarak ifade edilen α 'nın

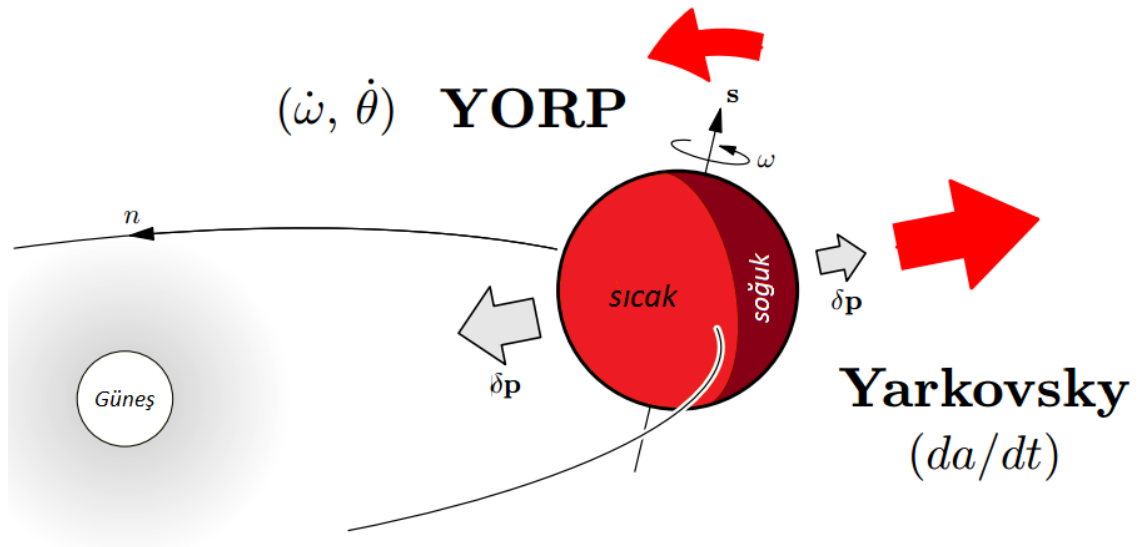
fonksiyonlarıdır. $E_i^{(6)}$ i. gezegenin g_6 modunun genliği, J Delaunay değişkeni, $\dot{\omega}_6$ ve $\dot{\omega}$ sırasıyla gezegen ve asteroidin enberi noktasının argümanıdır.

Yukarıdaki fonksiyonun bir sonucu olarak ν_6 rezonans bölgesi asteroidlerin yörünge basıklık değerlerini arttırmaktadır. Böylece bu asteroidler Yer'e yaklaşırlar ve Yer'e Yakın Asteroid olurlar. Yer'e Yakın Asteroidler için ν_6 rezonans bölgesi en önemli kaynak bölgelerdendir (Morbidelli ve Gladman 1998).

2.2. Kütle Çekimsel Olmayan Etkiler: Yarkovsky ve YORP Etkileri

İnşaat mühendisi olan Ivan Osipovich Yarkovsky (1844–1902) tarafından önerilmiş olan etkidir. Daha sonra geliştirilmiş ve YORP (Yarkovsky-O'Keefe-Radzienski-Paddack) etkisi de ortaya çıkmıştır. Sırasıyla termal radyasyon kuvveti ve tork etkileridir. Yarkovsky, yarı büyük eksen uzunluğunun değişimine sebep olurken YORP, dönme vektörünün değişmesine sebep olan etkidir (Şekil 2.5). Bu etkiler dönme, dolanma, büyüklük, kütle, şekil ve ısısal özellikler gibi bir kaç fiziksel niceliğe bağlıdır (Vokrouhlicky 1999).

Her iki mekanizma da çapı $D < 40 \text{ km}$ olan asteroidlerin Ana Kuşak içerisinde buldukları kaynak bölgelerden rezonans bölgelerine taşınmasına ve bu bölgelerden de YYA bölgesine taşınmalarına, asteroid ailelerinin yayılmasına ve dağılmasına sebep olabilir ve çapı $D < 40 \text{ km}$ olan asteroidlerin dönme periyotlarını ve eksen eğikliklerini değiştirebilir. Ayrıca, asteroidlerin dönme-dolanma rezonansına girmelerini sağlayabilir ki bu dönme vektörlerinin evrimini etkileyerek bu Yarkovsky sürüklenmesine sebep olacak ve yarı büyük eksen uzunluklarının evrimleşmesine sebep olacaktır. Sonuç olarak, kütle çekimsel olmayan etkiler, kütle çekimsel etkiler ve çarpışmalar gibi asteroidlerin yörünge evrimlerinin tamamen anlaşılabilmesi için göz önüne alınması gereken etkilerdir (Bottke vd 2006).



Şekil 2.5. Yarkovsky ve YORP etkisi (Broz 2006)

2.3. Tisserand Parametresi

Tisserand parametresi, gezegenler arası bir cismin (asteroid, kuyruklu yıldız vb.) gezegen ile yakın geçişi boyunca neredeyse korunan dinamik bir niceliğidir. Böylece, yakın geçiş öncesi ve sonrasında yörünge elemanlarındaki dinamik özellikler arasında bir bağlantı kurulmasını sağlar. Tek bir gezegenler arası cisim için tüm gezegenler ile farklı Tisserand parametreleri hesaplanabilir.

Jüpiter, Güneş sisteminin en büyük kütleyle sahip gezegeni olduğundan asteroidler ve kuyruklu yıldızlar üzerindeki en büyük kütle çekim etkisini uygular. Bu sebeple en yaygın olarak Jüpiter ile ilgili Tisserand parametresi hesaplanır ve kullanılır.

Korunumlu üç cisim problemi altında Jüpiter ile ilişkili Tisserand parametresi, T_j ;

$$T_j = \frac{a_j}{a} + 2 \left[(1 - e^2) \frac{a}{a_j} \right]^{\frac{1}{2}} \cos i \quad (2.10)$$

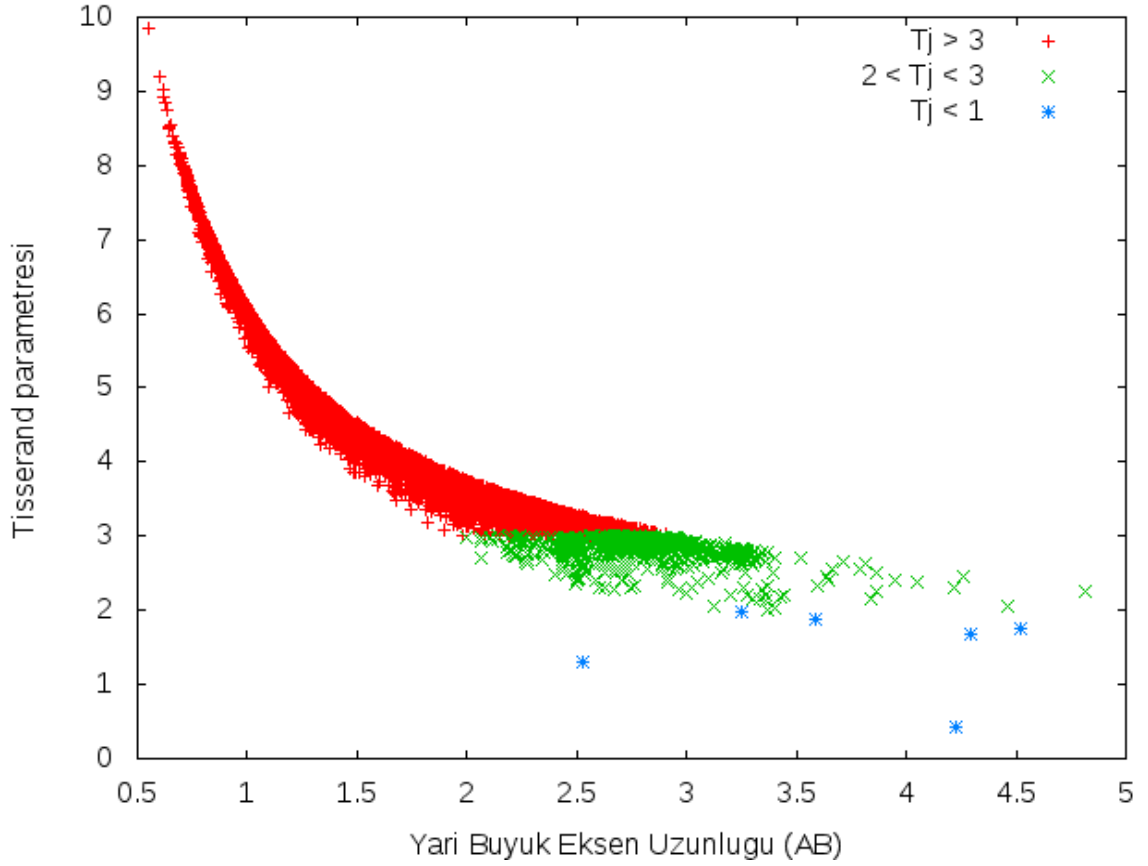
Burada a_j Jüpiter'in yarı büyük eksen uzunluğudur. a, e, i sırasıyla asteroidin yarı büyük eksen uzunluğu, yörünge basıklık değeri ve yörünge eğikliğidir.

Burada belirtilen üç cisim Güneş, Jüpiter ve asteroiddir. Tisserand parametresinin tam geçerli olduğu durum asteroidin Güneş etrafındaki hareketi üzerinde yalnızca Jüpiter'in etkili olduğu, aynı zamanda Jüpiter'in yörüngesinin çember olduğu ve asteroidin kütesinin ihmal edilebileceği durumdur. Görüldüğü üzere tam geçerli olan yalnızca asteroidin kütesinin ihmal edilebilirliğidir. Jüpiter'in yörüngesi çembere çok yakındır. Kütleleri diğer gezegenlere göre çok daha büyüktür ancak asteroid diğer gezegenlerle de etkileşir. Bu durumda T_j kabaca korunuyor demektir. Bu korunum, asteroid ile Jüpiter'in (diğer gezegenler için de hesaplanabilir. Ancak en etkili gezegen Jüpiter'dir.) yakın geçişi sonucunda, Jüpiter'in asteroid yörüngesi üzerindeki etkilerinin incelenmesi için bize bir ölçü sağlar.

T_j 'nin korunumu, aynı zamanda asteroidlerin ya da en genel olarak küçük gezegenlerin dinamik olarak geçmişlerine ışık tutmaktadır. Bu sebeple, Yer'e Yakın Asteroidlerin kaynak bölgelerinin incelenmesi konusunda T_j en önemli referanslardandır. Örneğin, $2 < T_j < 3$ aralığındaki cisimler Jüpiter ailesi kuyruklu yıldızları (Jupiter family comet) olarak adlandırılır ve bu cisimlerin kuyruklu yıldız kökenli olduğu düşünülmektedir. Yer'e Yakın Asteroidler içerisinde T_j 'ye göre kuyruklu yıldız kökenli asteroidler %6.25'tir (Şekil 2.6). Diğer Yer'e Yakın Asteroidlerin çoğu $T_j > 3$ 'tür. Bu değer, asteroidin Güneş sistemi içerisinde (Jüpiter sınırlarına kadar) geldiğini gösterir ve çoğu asteroidin T_j değeri 3'ten büyüktür. Ancak kuyruklu yıldız kökenli cisimlerde $T_j > 3$ olabilir. Çok uzun zamandır Güneş sisteminin içerisinde dolanan bir asteroidin de $T_j < 3$ olabilir. Bunun sebebi diğer gezegenlerin etkileri, kendi aralarındaki yakın geçişler ve kütle çekimsel olmayan etkiler olabilir. Literatürdeki bazı çalışmalarda test cisimleri için yapılan sayısal integrasyonlar sonucunda, Ana Kuşak civarındaki ortalama hareket rezonans bölgelerinin (örn. 3:1)

zaman içerisinde cisimlerin yörünge basıklık ve eğiklik değerlerini $T_j < 3$ ve hatta $T_j < 2$ değerlerine düşürdüğü görülmüştür (Farinella vd 1994, Gladman vd 1997). Bu çalışmada da benzer sonuçlar gözlenmiş ve zaman içerisinde T_j değerinde azalmalar görülmüştür.

Bu tez çalışmasında yapılan sayısal integrasyonlarda kullanılan girdiler Jüpiter ile ilgili Tisserand parametresine göre sıraya konmuş ve girdi paketleri oluşturulmuştur. Öncelikli olarak $2 < T_j < 3$ olan Apollo grubu asteroidleri ile integrasyona başlanmıştır ve $T_j = 3$ 'ten sonra her adımda 0.1 arttırarak girdi paketleri Tisserand parametresinin büyüklüğüne göre sıralı bir şekilde oluşturulmuştur (Bölüm 4.1).



Şekil 2.6. Tüm YYA'ların yarı büyük eksen uzunluğuna karşılık Jüpiter ile ilişkili Tisserand parametreleri. Hesaplanan T_j değerleri, anlık yörünge elemanlarından hesaplanan değerlerdir. Grafikte, kırmızılar $T_j > 3$, yeşiller $2 < T_j < 3$, maviler ise $T_j < 3$ bölgesindeki YYA'lardır. $2 < T_j < 3$ bölgesindeki YYA'lar tüm YYA'ların %6.25'ini oluşturmaktadır. Bu sonuç kabaca YYA'ların %6.25'inin kuyruklu yıldız kökenli olduklarını söylemektedir

2.4. Hill Küresi

John W. Hill (1812–1879) tarafından hesaplanan Hill küresi bir cismin (örn. Yer), daha büyük bir cismin çekim etkisi altındayken (örn. Güneş) kendi çekim etkisinin daha baskın olduğu bölgedir. Örneğin, Ay, Yer'in Hill küresi içerisinde olduğundan Yer'in etrafında da dolanır. Eğer Hill küresinin dışına çıkarsa yalnızca Güneş'in çekim etkisi altında hareket edecektir. Bir cismin Hill küresinin sınırları kendi kütesine, ana cismin kütesine (örn. Güneş) ve ana cisme olan uzaklığına bağlıdır. Hill küresi iki cisim probleminde tanımlanan L_1 ve L_2 Lagrange bölgeleri arasında kalan alandır.

$$r_{\text{hill}} \approx R \sqrt[3]{\frac{m}{3M}} \quad (2.11)$$

Denklemden R ve m, Hill küresi hesaplanan cismin sırasıyla ana cisme uzaklığı ve kütesi, M ise ana cismin kütesidir. Yer için Hill küresi ~1 496 000 km'dir.

Bu tez çalışmasında daha çok istatistiksel çalışma yapılmış ve belirli bir tarihteki (1 Haziran 2014) toplam Apollo popülasyonu gözönünde bulundurulmuştur. Ancak Hill küresi analizi cisimlerin özel analizlerinde oldukça önemlidir. Öyle ki, kütesi görece olarak çok küçük olan asteroidler, büyük gezegenlerin Hill kürelerine girmeden, yakınlarından dahi geçseler hem uzun dönemli hem de kısa dönemli ani olarak yörüngelerinde ciddi değişiklikler olması beklenir. Bu çalışmada belirlenen kriter 3 Hill küresidir. Bu analizin daha sonraki çalışmalarda yapılabilmesi için büyük gezegenlerin 3 Hill küreleri yakınından geçen asteroidlerin geçiş zamanı kaydedilmiştir. Böylece yörüngede ani ve ciddi bir değişiklik oluşmuş ise bu yakın geçişin ne denli etkili olduğunun analizi yapılabilecektir.

3. KURAMSAL BİLGİLER VE KAYNAK TARAMALARI

YYA'lara kaynaklık eden bölgeler uzun yıllar boyunca tartışma konusu olmuştur. 1970'lerde en temel varsayım YYA'ların çoğunluğunun sönmüş kuyruklu yıldız kalıntısı olduğudur. Bunun sebebi Güneş sistemi içerisindeki taşınma (migration) mekanizmasının tam olarak bilinmemesidir (Wetherill 1976). Konuyla ilgili ilk bulgular, rezonans bölgelerinin, Ana Kuşak bölgesindeki asteroidleri gezegen yörüngelerini kesebilecek yerlere taşıyabileceğidir (Wetherill 1979, Wisdom 1983). Bu gelişmeler sonrası yapılan hem analitik hem de nümerik çalışmalar, rezonans bölgelerinin asteroidlerin yörünge basınlığını arttırarak Mars yörüngesini, hatta Yer yörüngesini kesen değerlere ulaştırdığını göstermiştir. Bunun sonucu olarak iki temel bölge belirlenmiştir: v_6 seküler rezonans bölgesi ve 3:1 ortalama hareket rezonans bölgesi. Wetherill (1979, 1985, 1987, 1988) geliştirdiği Monte-Carlo modeli ile Ana Kuşak asteroidlerinin iki temel adım sonucu YYA bölgesine taşındıklarını öne sürmüştür: (i) çarpışmalar sonucu oluşan parçalar rezonans bölgelerine ulaşır ve (ii) rezonans bölgeleri tarafından bu parçalar ~ 1 Myıl ve üzeri zaman ölçeğinde YYA bölgesine taşınır. Daha sonra, Rabinowitz (1997a, b) tarafından bu model güncellenmiş ve Yer - Ay sisteminin krater yapılarıyla ilgili bir sonuca varılmıştır. Buna göre Yer-Ay sistemi son 3 Gyl boyunca kararlı bir yapıdadır (Grieve ve Shoemaker 1994). Buradaki varsayım, çarpışmalar sonucu oluşan parçaların rezonans bölgelerine 3 Gyl öncesinde ulaştığı ve YYA bölgesine taşındığıdır.

1990'larda hızlı işlemcilerden oluşan hesaplama araçlarının ve yeni sayısal integrasyon yöntemlerinin geliştirilmesi (Wisdom ve Holman 1991, Levison ve Duncan 1994) rezonans bölgelerinin dinamik integrasyonlarının daha çok test cismi ile yapılmasına olanak sağlamıştır (Farinella vd 1994, Gladman vd 1997). Yeni sonuçlar, Monte-Carlo modelinin Güneş sistemi içerisindeki cisimlerin kaotik hareketlerini yeterli ölçüde açıklayamadığını ortaya koymuştur.

Bir başka önemli çalışma olan Migliorini vd'nin (1998) çalışması Mars yörüngesini kesen asteroidler üzerinedir. Bu asteroidler YYA değillerdi ($q > 1.3 AB$) ancak v_6 ve 3:1 rezonans bölgelerindeki asteroidlerin YYA olmadan önce geldikleri düşünülen olası bölgelerdeydiler. Morbidelli ve Nesvorny'nin (1999) çalışmasında ise Mars yörüngesini kesen asteroidlerin zayıf ortalama hareket rezonansı sonucunda o bölgeye geldikleri belirtilmiştir. Bu rezonans bölgeleri Ana Kuşak asteroidlerinin yörünge basınlıklarını yavaşça arttırarak Mars yörüngesini kesebilecek bölgelere taşır. Mars yörüngesini kesen asteroidler bir kaç 10 milyon yıl içerisinde YYA olabilirler. Bu durum Mars yörüngesini kesen asteroidlerin v_6 ve 3:1 bölgelerinin yanı sıra birincil YYA kaynak bölgelerinden biri olarak göz önüne alınmasını gerektiğini gösterir.

YYA'lar içerisindeki kuyruklu yıldız kökenli cisimler ise Neptün civarı ve ötesindeki bölgelerden kaynaklıdır. Bunlar Kuiper kuşağı (Levison ve Duncan 1994), Kuiper kuşağı ile ilişkili saçılmış kuyruklu yıldız diski (scattered comet disc associated with KB) (Duncan ve Levison 1997) ve Oort bulutudur (Weissman 1996). İlk iki bölge genellikle beraber anılır ve bu bölgeye Neptün ötesi (Transneptunian) bölge

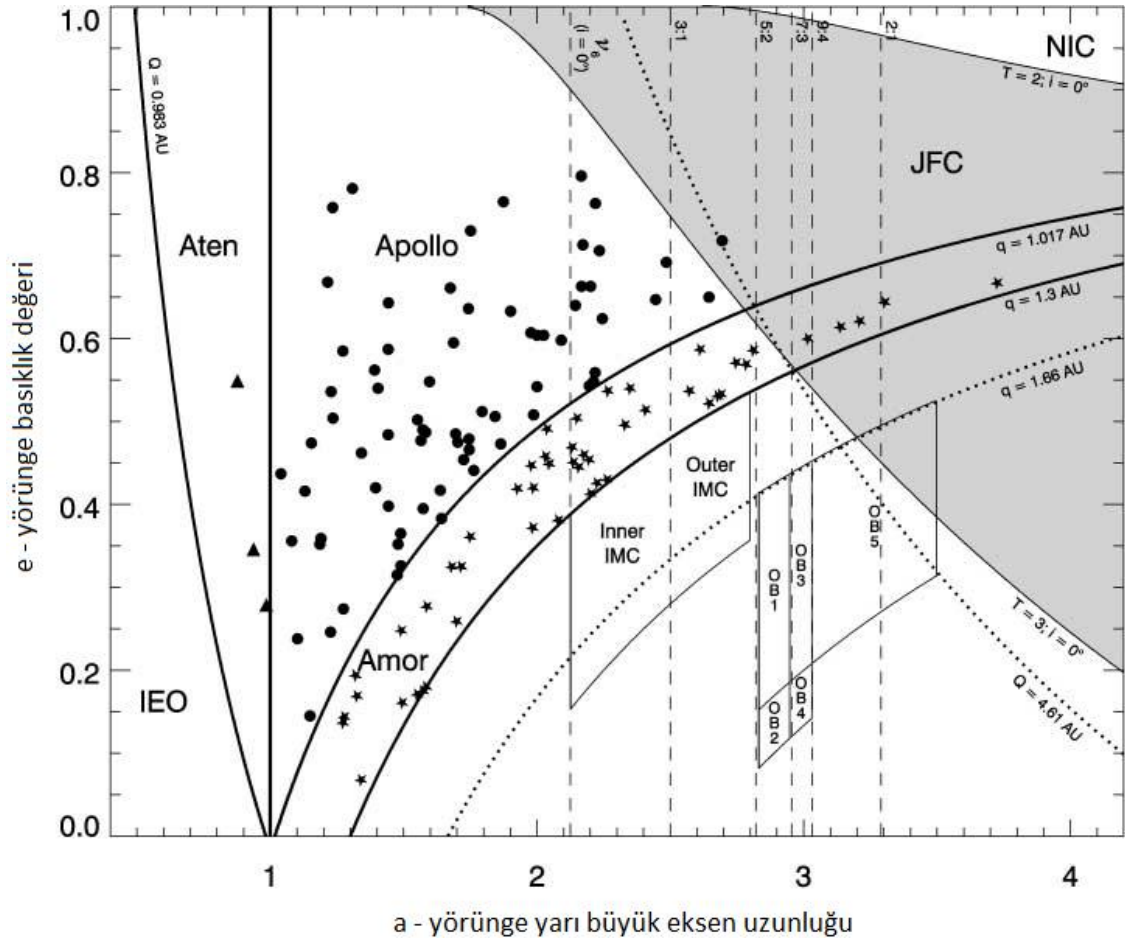
denilmektedir. Bazı kuyruklu yıldız özelliği gösteren cisimlerin ise ⁴Trojan popülasyonundan gelmiş olduğu düşünülmektedir (Levison vd 1997).

Bottke vd (2002) Tisserand parametresini kullanarak kuyruklu yıldızlar ile ilgili bazı tanımlamalar yapmıştır. Buna göre, yörünge eğiklikleri düşük ve $T_j > 2$ olan cisimler için ekliptik kuyruklu yıldız (ecliptic comet), yörünge eğiklikleri yüksek olan ve $T_j < 2$ olan cisimler için ise neredeyse izotropik kuyruklu yıldız (nearly isotropic comet) demişlerdir.

Çeşitli çalışmalarda yapılan sayısal integrasyonlar, ekliptik kuyruklu yıldızların Neptün ötesinde belirli bir bölgeden geldiğini ve Güneş sistemi tarihi süresince dinamik olarak kararsız bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir (Levison ve Duncan 1997, Duncan ve Levison 1997). Jüpiter yörüngesini kesebilecek yerlere gelen ekliptik kuyruklu yıldızlar ise $2 < T_j < 3$ aralığındadır ve bunlara Jüpiter Ailesi Kuyruklu Yıldızları denilmektedir. Bu cisimler Jüpiter ile sıklıkla düşük hızlarda karşılaşır. Bu karşılaşmalar sonucunda iç Güneş sisteminden kolayca dışarıya atılabilirler (~0.1 Myl ve üzeri), ancak az bir kısmı YYA olabilir (Levison ve Duncan 1997). Neredeyse izotropik kuyruklu yıldızlar ise Oort bulutundan gelen, uzun dönemli ve Halley türü kuyruklu yıldızlardır (Weissman 1996). Sayısal integrasyonlar neredeyse izotropik kuyruklu yıldızların yıldızıl ve galaktik pertürbasyonlar sonucu iç Güneş sistemine taşınabileceklerini göstermiştir (Duncan vd 1987).

YYC'ler içerisinde asteroid ve sönmüş kuyruklu yıldız kökenli cisimleri ayırt edebilmek oldukça güçtür. Birçok çalışmada bu ayırım Tisserand parametresi kullanılarak yapılmıştır. $2 < T_j < 3$ olan cisimler Jüpiter'in Hill küresi yakınlarından geçebilir ve Jüpiter'in pertürbasyon etkileri sonucu iç yörüngelere taşınabilir. Bu sebepten dolayı $2 < T_j < 3$ olan cisimler kuyruklu yıldız kökenli olarak kabul edilir ve bazı istisnalar dışında (örn. 2P/Encke) tüm aktif kuyruklu yıldızlar bu kriter uyar. Ancak bazı sayısal integrasyonlar sonucunda, Ana Kuşak ile kesişen rezonans bölgelerinin (Örn. Jüpiter ile 3:1 ortalama hareket rezonans bölgesi) o bölgedeki cisimlerin yörünge basıklık ve eğiklik değerlerini $T_j < 3$ ve hatta $T_j < 2$ olacak şekilde değiştirebileceğini göstermiştir (Farinella vd 1994, Gladman vd 1997). Böyle bir durumda, günümüzde asteroid yapısı gösteren ve $T_j < 3$ olan bir cisim kuyruklu yıldız kökenli değil de gerçekten asteroid olabilir.

⁴ **Trojan Popülasyonu:** Trojanlar, Ana Kuşak asteroidlerinden farklı olarak büyük bir gök cismine bağımlı hareket eden cisimlerdir. Her büyük cismin (gezegen, uydular vb.) trojanları olabilir ancak trojanlar genel anlamda Jüpiter'e bağımlı hareket eden cisimlere verilen isimdir. Bu cisimler L4 ve L5 (Lagrange) bölgelerinde, Jüpiter'in 60° önünde ve arkasında 1:1 ortalama hareket rezonansında bulunurlar. Günümüzde, gözlenebilirlikleri zor olduğundan, L4 bölgesinde keşfedilmiş bir tane Yer trojanı vardır (2010 TK7).



Şekil 3.1. YYA'ların yörünge basıklık değerlerine karşılık yörünge yarı büyük eksen uzunlukları (Bottke vd 2002)

Şekil 3.1'de, bilinen ve mutlak parlaklığı $H < 22^m$ olan 138 YYA'nın $a - e$ grafiği verilmiştir. Apollolar yuvarlak, Amorlar yıldız, ve Atenler üçgen şeklinde gösterilmiştir. $q = 1.3$ AB yayı YYA koşuludur. 2002 yılında verilen bu grafikte henüz Atira asteroidi keşfedilmemiştir ve IEO (Inside Earth's Orbit) ile gösterilmiştir. Jüpiter Ailesi Kuyruklu Yıldızları (Jupiter Family Comet, JFC) Tisserand parametresinin 2 ile 3 aralığında olduğu koyu bölgede verilmiştir. Tisserand parametresinin 2'den küçük olduğu bölge Neredeyse İzotropik Kuyruklu Yıldız bölgesi (Nearly Isotropic Comet, NIC) olarak gösterilmiştir ki bu bölge için $a > 2.6$ AB'dir. $Q = 4.61$ AB kesikli yayı Jüpiter Hill küresi sınırlarını göstermektedir. $q = 1.66$ AB kesikli yayı günümüz için Mars Yörüngesini Kesen Cisimler ile Ana Kuşak sınırını göstermektedir. Dikey kesikli çizgiler ise bazı ortalama hareket rezonans bölgelerini ve $i = 90^\circ$ için v_6 seküler rezonans bölgesini temsil etmektedir.

3.1. Sayısal İntegrasyon Çalışmaları

Günümüzün ve Güneş sisteminin geçmişinin dinamik yapısının incelenmesi, yeni integrasyon şemalarının geliştirilmesiyle büyük bir gelişme göstermiş ve adeta yeni bir çalışma alanı olmuştur. Gözlemsel olarak belirlenen dinamik özellikler sayısal

integrasyonlar ile doğrulanmış ve Güneş sisteminin dinamik özellikleri de belirlenmiştir.

Hem gözlemsel gelişmeler sonucu artan konum hesaplamadaki hassasiyet, hem de sayısal yöntemlerin ve yüksek hızlı küme araçlarının gelişmesi, Yer'e Yakın Asteroidler'in ileri yönlü yapılan integrasyonlarının sonucunda, Yer'e çarpma ihtimallerinin daha geniş bir zaman aralığında ve çok sayıda istatistik veriler ile hassas şekilde hesaplanabilmesini sağlamıştır. İleri yönlü integrasyonlar ile ayrıca bu cisimlerin çarpışma, Güneş sisteminin dışına kaçma gibi olasılıkları da belirlenmiştir. Geri yönlü yapılan integrasyon sonuçları ise farklı bilgiler edinmemize olanak sağlamıştır. Bunların en önemlilerinden bir tanesi asteroid ailelerinin belirlenmesidir. Öz yörünge elemanlarının hesaplanması ile görülen kümelenmeler asteroidlerin yıkıcı bir çarpışma sonucu olduğu ortak cismin yörünge parametrelerine işaret eder (Bölüm 1.4). Ayrıca geri yönlü integrasyonların bir başka kullanım amacı Yer'e Yakın Asteroidler'in kaynak bölgelerinin belirlenmesidir. YYA'ların geri yönlü integrasyonlarında ulaştıkları bölgeler ile ilgili istatistiksel sonuçlar bize Güneş sistemi içerisindeki kaynak bölgelerinin ne denli etkin YYA oluşturan kaynak bölgeler olduğunu göstermektedir. Bu çalışmalar ileri yönlü integrasyonlara yol göstermek ve sonuçları karşılaştırmak açısından da önemli görülmektedir.

90'lı yılların başında Güneş sistemi dinamiğinin incelenmesi için yapılan sayısal integrasyonlarda kullanılan yöntemlerin yüksek bir doğruluk problemi olmamakla birlikte, hızları oldukça yavaştı (Morbidelli 2001). Integrasyonlar için kullanılan tipik zaman skalası milyon yıl civarlarındaydı. Mevcut donanımlar ile makul çalışma sürelerinde, yüksek doğrulukla, daha uzun simülasyon sürelerine ulaşmak mümkün değildi. Bunun için klasik denklemler ve o zamanın özel geliştirilmiş süper bilgisayarları kullanılmaktaydı. Ancak son yıllarda çok cisim problemi için geliştirilmiş yeni sayısal yöntemler ile gezegenlerin ve asteroidlerin daha uzun süreli dönemler için yörünge evrimlerinin incelenmesine olanak sağladı. Örneğin, bunlardan The Mixed Variable Symplectic Metot (MVS) gezegenler ve asteroidlerin yakın geçişlerinde etkisi olmadan dinamik evrimlerinin incelenmesini sağladı (Wisdom ve Holman, 1991). Regularized Mixed Variable şema (Levison ve Duncan 1994) binlerce Yer'e Yakın Asteroid'in ve kuyruklu yıldız'ın kaynak bölgelerinin incelenmesi için kullanıldı. Paket kodlar olan Symba (Duncan vd 1998) ve Mercury (Chambers, 1999) ise büyük kütleli cisimlerin yakın geçişlerini de gözönüne alarak Güneş sisteminin kaotik yapısının incelenmesine olanak sağladı.

YYA'ların kaynak bölgelerinin incelenmesiyle ilgili yapılan en kapsamlı çalışma Bottke vd (2002) tarafından yayınlanmıştır. Çalışmada, YYA'lara kaynaklık edebilecek bölgeler belirlenmiş ve o bölgelere bir kaç bin test cismi konularak ileri yönlü integrasyonları yapılmıştır. Amaç, her bölgenin, asteroidlerin yörüngeleri üzerinde yaratacağı dinamik değişiklikleri incelemektir. Bu sayede o bölgelerin YYA popülasyonuna katkısı hakkında fikir yürütülebilmektedir.

Buna göre, Güneş sistemi içerisinde test cisimlerinin kullanılması için belirlenen kaynak bölgeler Ana Kuşak, Trojan popülasyonu, Neptün ötesi bölge, Oort bulutu,

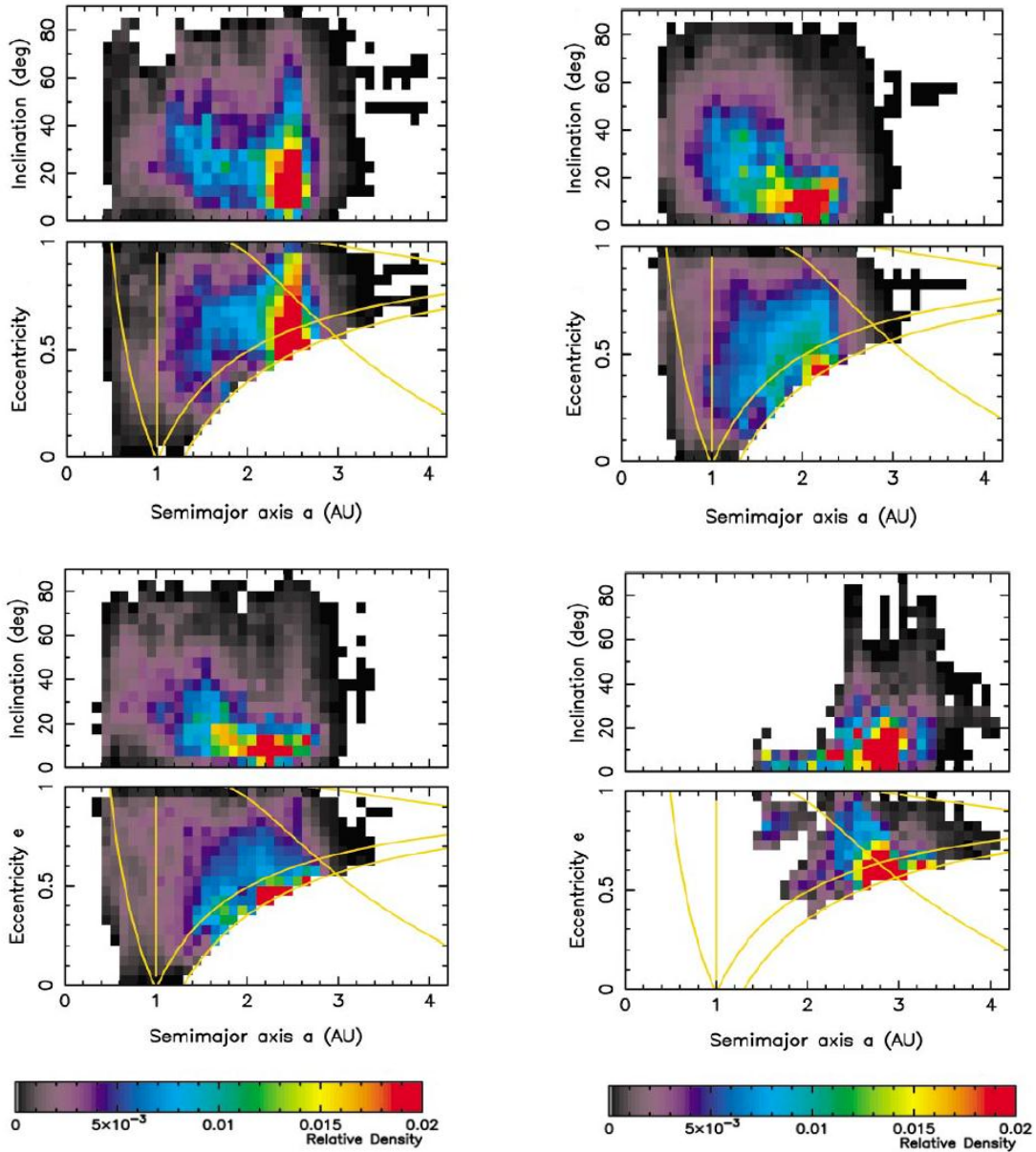
⁵Hungaria asteroidleridir. Bu bölgeler içerisinde, rezonans bölgeleri ve gezegenler ile yakın geçişler cisimlerin YYA olmasını sağlayacak en önemli etkilere sahiptir. Bottke vd (2002) bu durumu göz önüne alarak, oluşturulacak test cisimlerinin yerlerini daha dar bir aralıkta belirlemiştir. Belirlenen bölgeler 3:1 ortalama hareket rezonans bölgesi, v_6 seküler rezonans bölgesi, Mars yörüngesini kesen asteroidlerin bulunduğu bölge, Dış Ana Kuşak bölgesi ($a \geq 2.8$ AB), ekliptik kuyruklu yıldız bölgesi ve neredeyse izotropik kuyruklu yıldızların bulunduğu bölgedir. N-cisim integrasyonu için SWIFT kodunu, şema olarak da RMVS3 (Regularized Mixed Variable Symplectic 3) integrasyon şemasını kullanmışlardır. İntegrasyon, asteroid bölgeleri için en az 100 Milyon yıllık yapılmıştır. İntegrasyon, test cisminin Güneş'e düşmesi, Güneş'ten 10 AB uzaklaşması (genellikle gezegenler ile yakın geçişlerin sonucu) ve gezegen ile çarpışması durumlarında sonlandırılmıştır. Kuyruklu yıldız bölgeleri için ise integrasyon 4 Milyar yıllık yapılmıştır ve Güneş'ten uzaklaşma sınırı ise 1000 AB olarak belirlenmiştir.

3:1 rezonans bölgesinin incelenmesi için 2354 test cismi kullanılmıştır. Başlangıç parametreleri olarak $a = \sim 2.5$ AB, $e < 0.35$ ve $i < 15^\circ$ belirlenmiştir. İntegrasyon sonuçları, 3:1 bölgesinin cisimlerin yörünge basıklık değerlerini artırarak Mars ve hatta Yer yörüngesini kesebilecek değerlere 1 Milyon yıldan az bir sürede ulaştırabildiğini göstermiştir. Ayrıca bu bölgedeki cisimlerin yalnızca %38'inin $a < 2$ AB bölgelerine ulaşabildiği görülmüştür.

v_6 seküler rezonans bölgesinin integrasyonu için 3519 test cismi kullanılmıştır. Başlangıç parametreleri olarak $a = \sim 2.06$ AB ve $i = 2.5^\circ$, $a = \sim 2.08$ AB ve $i = 5^\circ$, $a = \sim 2.115$ AB ve $i = 7.5^\circ$, $a = \sim 2.16$ AB ve $i = 10^\circ$, $a = \sim 2.24$ AB ve $i = 12.5^\circ$, $a = \sim 2.315$ AB ve $i = 15^\circ$ belirlenmiştir. Bu bölgedeki cisimlerin yörünge basıklık değerlerindeki hızlı değişimin sonucu olarak ~ 1 Milyon yılda YYA bölgesine taşındıkları görülmüştür. Ayrıca, v_6 bölgesindeki cisimlerin %70'i $a < 2$ AB bölgesine ulaşabiliyor ki bu da 3:1 bölgesinin neredeyse iki katına karşılık gelmektedir.

Mars yörüngesini kesen asteroid bölgesi diğer bölgelere göre oldukça geniştir. Buna göre bu bölge bir kaç alt gruba ayrılarak incelenmiştir. Bölge, $q > 1.3$ AB ve $2.06 \leq a \leq 2.48$ AB ile $2.52 \leq a < 2.8$ AB, i ise v_6 bölgesinden uzak olacak şekilde $\sim 15^\circ$ ya da daha az olarak belirlenmiştir. Yörünge basıklık değeri ise Mars yörüngesini kesebilecek değerlerden seçilmiştir. 3:1 ortalama hareket rezonansına karşılık gelen bölge Şekil 3.1'de görüldüğü üzere Mars yörüngesini kesen asteroidlerin bulunduğu bölgeyi ikiye ayırmış durumdadır. $a > 2.5$ AB dış Mars yörüngesini kesenlerin bölgesi $a < 2.5$ AB ise iç Mars yörüngesini kesenlerin bölgesi olarak adlandırılmıştır. İlk olarak 1011 test cismi kullanılarak 100 Milyon yıllık integrasyon yapılmıştır. Bu cisimlerden 500 tanesi bu süre aralığında YYA bölgesine girmiştir ($q < 1.3$ AB). Daha sonra 2977 bilinen asteroidin integrasyonu yapılmış ve 755 tanesi aynı süre içerisinde YYA bölgesine girmiştir.

⁵ **Hungaria Asteroidleri:** Ana Kuşak'ın iç kısımlarında (Ana Kuşak ile Mars arasında 1.78 AB $< a < 2.06$ AB) bulunan, düşük yörünge basıklık değerlerine ($e < 0.18$) ve görece yüksek yörünge eğikliği değerlerine ($16^\circ < i < 34^\circ$) sahip Jüpiter ile 9:2, Mars ile 2:3 ortalama hareket rezonans aralıklarında bulunan bir asteroid grubudur. Max Wolf tarafından 1898 yılında keşfedilen 434 Hungaria asteroidi sonrası isimlendirilmiştir.



Şekil 3.2. YYA kaynak bölgelerindeki cisimlerin o bölgelerde kalma sürelerinin olasılığı (Bottke vd 2002). Sol üst grafik 3:1 bölgesindeki, sağ üst v_6 bölgesindeki, sol alt Mars yörüngesini kesen asteroidlerin bölgesindeki, sağ alt ise Dış Ana Kuşak bölgesindeki cisimlerin o bölgede kalma sürelerinin olasılığını göstermektedir. a-e grafiklerindeki x eksenini üzerinden başlayan sarı çizgiler, Apollo, Amor, Atira ve Aten YYA bölgelerini ayırmakta ve sağ üst çizgiler ise $i = 0^\circ$ için $2 < T_j < 3$ göstermektedir

Dış Ana Kuşak bölgesi'nin integrasyonu için 1964 test cisimi kullanılmıştır. $a > 2.8$ AB olarak tanımlanmış bölge içerisine 5:2, 7:3, 9:4, ve 2:1 gibi güçlü ortalama rezonans bölgeleri girmektedir. Bölge, $2.8 < a < 3.5$ AB ve $i < 15^\circ$ olarak belirlenmiş ve 1964 test cisminin 100 Milyon yıllık integrasyonu yapılmıştır. Buna göre bu bölgedeki cisimlerin %18'i YYA bölgesine ulaşmıştır.

Ekliptik Kuyruklu Yıldız bölgesi için 1300 test cisminin düşük yörünge basıklık değeri (0.01 - 0.3) ve düşük yörünge eğikliği (1°) ile 4 Milyar yıl integrasyonu yapılmıştır. 1 Milyar yıl sonunda Neptün ile yakın geçişte bulunan cisimlerin Neptün ötesi bölgeden ayrıldığı varsayılmıştır. Bu cisimler içerisinde 20 tanesi $e = 0.05$ ve $i < 16^\circ$ koşullarına göre seçilmiştir. Daha sonra bu cisimler Neptün ile ilk yakın geçişteki yörünge parametreleri başlangıç parametreleri olacak şekilde klonlanarak toplamda 2200 test cisminin yeniden integrasyonu yapılmıştır. Bu bölge, aynı zamanda Jüpiter Ailesi Kuyruklu Yıldızlarının da kaynak bölgesi olarak kabul edilmektedir. $a < 2.5$ AB'ye ulaşan cisimler 9 kez daha klonlanmıştır. Sonuç olarak bu bölgedeki cisimlerin zamanın büyük çoğunluğunu $a > 32$ AB'de geçirdikleri, kabaca %30'unun $q < 2.5$ AB değerlerine ulaştığı görülmüştür. $q < 2.5$ AB bölgesine gelen cisimlerin ise %99'u Jüpiter Ailesi Kuyruklu Yıldızı olmuştur.

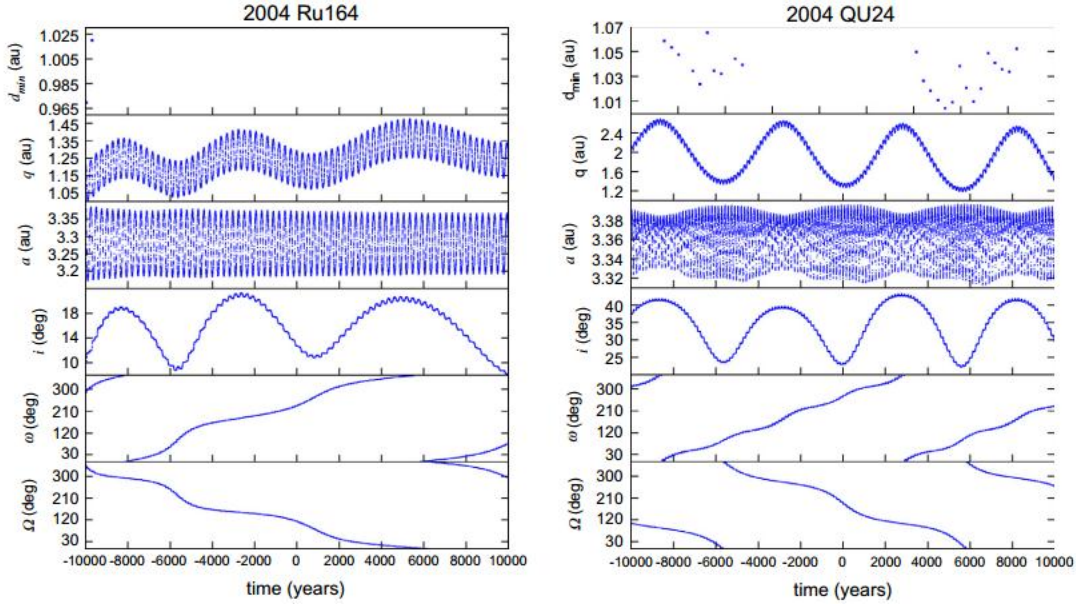
Bottke vd (2002) çalışmasının sonucu olarak Yer'e Yakın Asteroidlerin yaklaşık %61'i Ana Kuşak'ın iç kısmından ($a < 2.5$ AB), %24'ü Ana Kuşak'ın orta bölgesinden ($2.5 < a < 2.8$ AB), %8'i Ana Kuşak'ın dış kısmından ($a > 2.8$ AB) ve %6'lık kısmı ise Jüpiter Ailesi Kuyruklu Yıldız bölgesinden gelmektedir.

Bir diğer önemli ve güncel çalışma ise Fernandez vd'nin (2014) yaptığı çalışmadır. Yer'e Yakın Asteroidler içerisindeki aktif olmayan kuyruklu yıldız popülasyonunu bulabilmek amacıyla $q < 1.3$ AB, $Q > 4.8$ AB, $2 < T_j < 3$ ve $p < 20$ yıl olan 139 Yer'e Yakın Asteroid seçilmiştir. Ayrıca karşılaştırma yapılabilmesi için 42 Jüpiter Ailesi Kuyruklu Yıldızı seçilmiş ve tüm cisimlerin 10000 bin yıllık hem ileriye hem de geriye doğru integrasyonları yapılmıştır. İntegrasyonlar için Mercury (Chambers, 1999) kodu ve Bulirsch-Stoer integrasyon şeması kullanılmıştır. Her cisim için 5 klon yörünge belirlenmiş ve eğer yarı büyük ekseninde ya da enberiye çok büyük değişimler gözlenirse o cisimler için 50 klon yörünge daha belirlenmiştir. Tüm cisimler nokta kaynak olarak kabul edilmiş ve yalnızca tüm büyük gezegenlerin çekim etkileri göz önüne alınmıştır. Kütle çekimsel olmayan etkilerin kullanıldığı ve kullanılmadığı integrasyonlar karşılaştırılmış ve yapılan karşılaştırmada 10000 yıl için istatistiksel bir fark olmadığı görülmüştür. Yarı büyük eksen uzunluğunun 100 AB'den fazla olduğu durumlarda ise kod durdurulmuş.

Fernandez vd'nin (2014) çalışmaları, seçilen YYA'ların çoğunun 10000 yıl geçmişe ya da ileriye götürüldüğünde kararlı yörüngelerde dolaştığını ancak Jüpiter ile yakın geçişlerde bulunan cisimlerin çok daha kararsız yörüngelerde dolaştığını göstermiştir.

Fernandez vd'nin (2014) integrasyonunu yaptığı bir diğer bölge ise Jüpiter ile ilişkili 2:1 rezonans bölgesidir. Bu bölgeyi test etmek için $3.27 < a_p < 3.28$ AB ve $e_p > 0.25$ olacak şekilde 132 cisim seçilmiştir. İntegrasyon için EVORB (Fernandez vd 2002) kodu kullanılmış, integrasyon şeması olarak ise Leapfrog seçilmiş ancak cisim gezegenlere 3 Hill küresi kadar yaklaşırsa şema Bulirsch-Stoer'e döndürülmüştür. İntegrasyon 100 Milyon yıllık zamanda ileriye doğru yapılmıştır. Fernandez vd'nin (2014) bulduğu sonuçlara göre Jüpiter ile ilişkili 2:1 rezonans bölgesi cisimlerin yörünge basıklık değerlerini arttırmaktadır. Bunun sonucunda bu cisimler Yer'e yaklaşmış ve YYA olmuşlardır (~ 7 cisim Milyonyıl⁻¹). Ayrıca, 132 cisimden 19'u ise

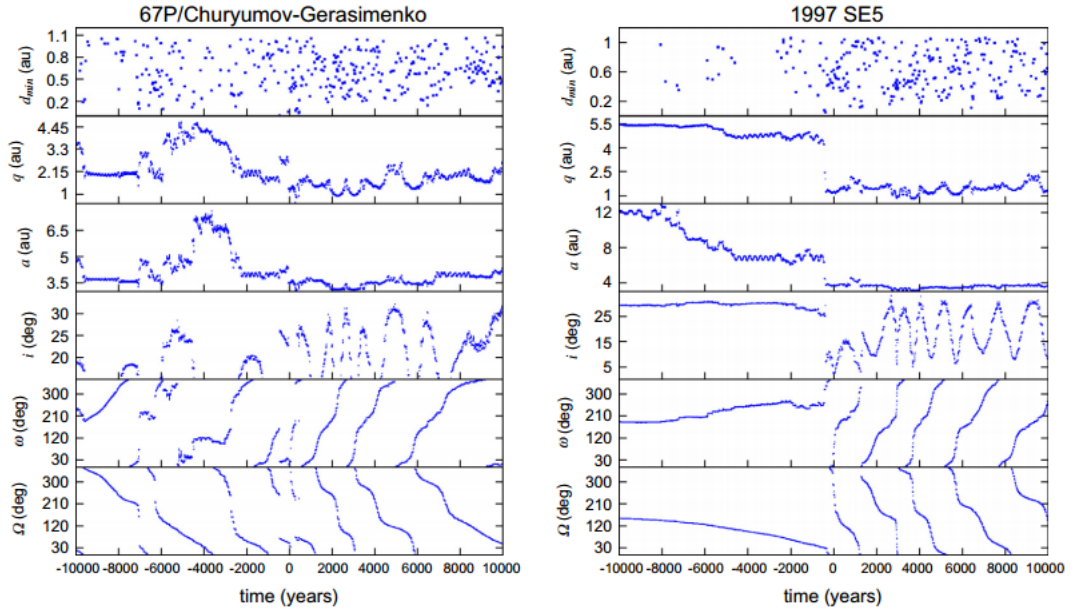
⁶sungrazer olmuştur. Bu sonuca göre yörünge basıklık değerinin artması aynı zamanda enberi noktasının değerini azaltacağından 2:1 bölgesi aynı zamanda sungrazer kaynak bölgesidir.



Şekil 3.3. Fernandez vd'nin (2014) çalışmasında asteroidal olarak tanımlanan iki farklı yörünge zamanında 10000 yıllık ileriye ve geriye doğru integrasyonları

Şekil 3.3'te x-ekseninde zamana karşılık, y-ekseninde 6 yörünge parametresi gösterilmektedir. Her bir blok yukarıdan aşağı sırasıyla Jüpiter ile 3 Hill küresinden daha yakın geçişlerin sıklığı, enberi noktasının değişimi, yarı büyük eksen uzunluğunun değişimi, yörünge eğikliğinin değişimi, enberi noktasının argümanının değişimi, çıkış düğümünün boylamının zamana göre değişimleridir. Grafiğin orta noktası, integrasyonun başlangıç anına karşılık gelir ve +x yönünde zaman artarken -x yönünde zaman azalmaktadır. 2004 Ru164 cisminin aynı zamanda Jüpiter ile 2:1 rezonansında ($a = 3.27$ AB) olduğu görülmektedir. 2004 QU24 cismi ise rezonans bölgelerinde değildir. Görüldüğü üzere her iki cisim de Jüpiter ile oldukça az sayıda yakın geçiş yapmaktadır. Bunun en önemli sonuçlarından bir tanesi yörünge elemanlarının değişiminin oldukça periyodik olarak görülmesidir.

⁶ **Sungrazer:** Güneş'in ışık küresine enberi noktasında neredeyse 50,000 km yaklaşabilen kuyruklu yıldızlardır. Bu cisimler ayrıca sun-grazing comet olarak da bilinir. Bu geçişler sonucunda kuyruklu yıldız kurtulabilir, parçalanabilir ya da Güneş'in üzerine düşebilir. 1890'lı yıllarda Alman astronom Heinrich Kreutz bu cisimlerin büyük çoğunluğunun aynı yörüngeyi takip ettiklerini ve ortak bir yerden geldiklerini keşfetmiştir. Bu cisimler ayrıca 'Kreutz Sungrazers' olarak da bilinir (Anonim 2015h).



Şekil 3.4. Fernandez vd'nin (2014) çalışmasında kuyruklu yıldız (cometary) olarak tanımlanan iki farklı yörünge zamanında 10000 yıllık ileriye ve geriye doğru integrasyonları

Şekil 3.4'te her iki cismin de yörünge elemanlarında görülen düzensiz değişimlerin en büyük nedenlerinden biri Jüpiter ile yakın geçiş sayısının sıklığıdır. 1997 SE5 cisminin Jüpiter ile yakın geçiş sayısının artması ile yörünge parametrelerindeki ani düşüşler ve artışlar görülmektedir. Kuyruklu yıldız benzeri (cometary) yörüngelerin asteroidal yörüngelerden farkı yörünge elemanlarındaki değişimin düzenli ve periyodik olmamasıdır.

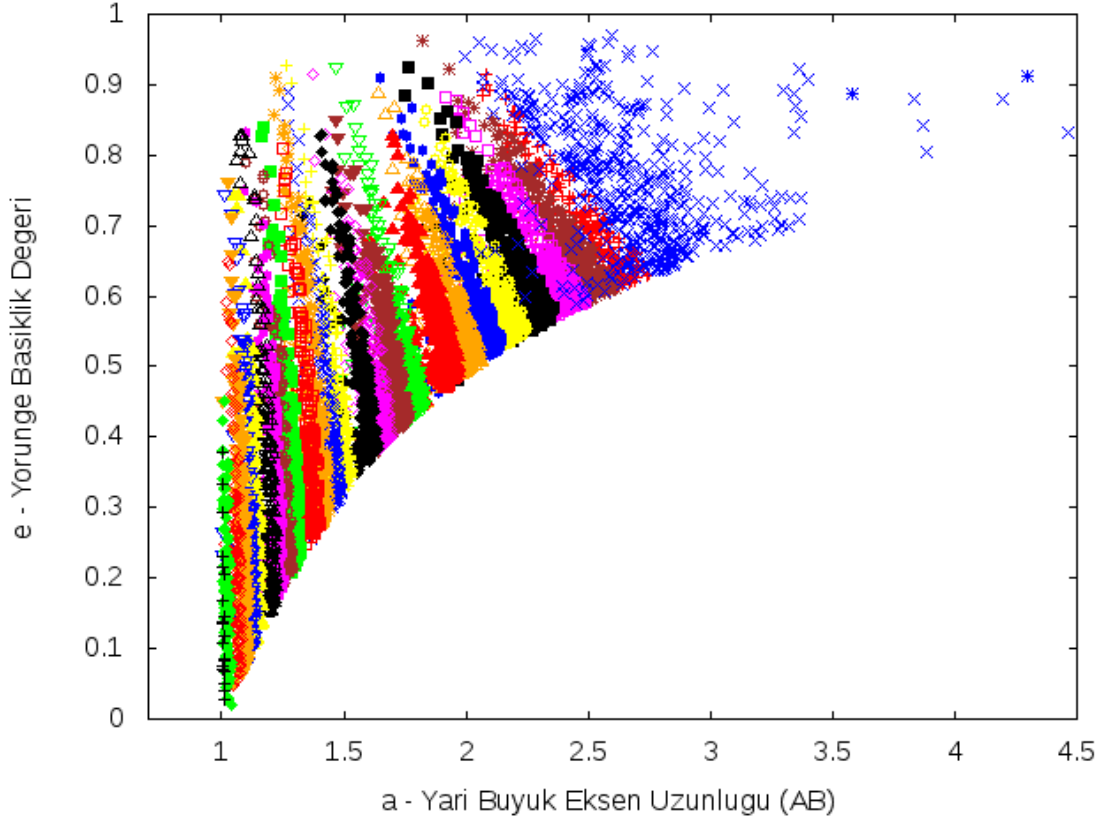
4. MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışmasında amaç, Yer'e Yakın Asteroidlerden Apollo grubu asteroidlerinin kaynak bölgelerinin incelenmesidir. Sayısal integrasyonlar TÜBİTAK ULAKBİM'e bağlı Türk Ulusal Bilim e-Altyapısı'nın (TRUBA) yüksek hızlı işlemcilerle sahip küme hesaplama araçları kullanılarak yapılmıştır. Kullanılan veriler gerçek cisimlere ait verilerdir ve NASA/JPL kataloğundan alınmıştır. Literatürde, bu kadar kapsamlı gerçek cisimlerin kullanıldığı istatistiksel bir çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışmada, Yer'e Yakın Asteroidler'den Apollo grubu asteroidlerinin zamanda geriye doğru 10 milyon yıllık sayısal integrasyonları yapılmıştır. Toplamda, zamanda geriye doğru sayısal integrasyonu yapılan yörünge sayısı 38175 tanedir. Sayısal integrasyon için kullanılan zaman simetrik, ayrık blok zaman adımlı algoritma Kaplan vd (2012) tarafından C dilinde yazılmış ve 2. Dereceden Leapfrog integrasyon şeması kullanılmıştır (Makino vd 2006). Kod'un, öncelikle test cisimleri üzerinde denemeleri yapılmış, ardından benzeri çalışmalar için sıklıkla kullanılan Mercury (Chambers 1999) ve SWIFT (Levison ve Duncan 1994) integrasyon kodları ile karşılaştırması yapılmıştır. Kodun diğer kodlar ile karşılaştırılması Uluslararası Astronomi Birliği'nin (IAU) küçük cisimler sayfasının (MPC, Anonim 2015f) verdiği sonuçlar kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen tüm sonuçlar ile MPC'nin ürettiği sonuçların relatif olarak farklarına bakılmış ve hassasiyetler birbirine oldukça yakın çıkmış hatta bazı durumlarda kullanılan kodun diğer paket kodlara göre daha hassas sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu denemelerin ardından Dr. Kaplan tarafından geliştirilen kod ile integrasyonların yapılmasına karar verilmiştir.

4.1. Girdi Dosyalarının Hazırlanması

İntegrasyonu yapılacak cisimlerin başlangıç kartezyen koordinatları 1 Haziran 2014, 00:00:00 UT (Universal Time, evrensel zaman) tarihinde olacak şekilde NASA/JPL kataloğu (Anonim 2015g) kullanılarak elde edilmiştir. Girdi dosyaları, Tisserand parametrelerine göre sıralanmıştır (Şekil 4.1). Tisserand parametresi 2 ve 3 aralığındaki cisimler tek bir paket şeklinde, 3'ten büyük cisimler için ise Tisserand parametresi 0.1 artacak şekilde 6.1'e kadar paketler şeklinde hazırlanmıştır. Böylece, Tisserand parametrelerine göre de analiz ve değerlendirme kolaylıkla yapılabilecektir. Hazırlanan paket sayısı 32'dir. İstatistiğin artırılması için oluşturulan klon yörüngeler ile beraber toplamda hazırlanan paket sayısı ise 224'tür. İntegrasyonu yapılan toplam yörünge sayısı ise 38175'tir.



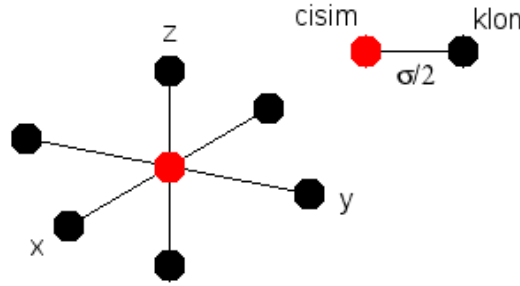
Şekil 4.1. Tüm Apollo asteroidlerinin a-e düzlemindeki dağılımı. Her bir renk farklı bir girdi dosyasını işaret etmektedir. $a > 2.5$ civarındaki mavi noktalar Tisserand parametresinin 2-3 aralığındaki cisimleri gösterirken diğer renkler için Tisserand parametresi 0.1'lik değişimler içermektedir

4.2. Klon Yörüngelerin Oluşturulması

İstatistiğin artırılması adına her bir cismin klonları oluşturulmuştur. Literatürde klon yörüngelerin oluşturulması için sıklıkla kullanılan metot, yörünge parametrelerinin Normal (Gauss) dağılımı içerisinde rastgele değerler seçilmesidir. Bu çalışmada ise her bir cismin yarı-büyük eksen uzunluğundaki hata değerinin (σ_a -sigma) yarısı cismin kartezyen koordinatlarının konum vektörlerine (x, y, z) artı ve eksi doğrultuda olacak şekilde eklenmiştir. Bu durumda her cismin 6 adet klonu oluşturulmuş ve toplamda her cismin 7 farklı konum vektörü elde edilmiştir. Bu durumda bir cisim için oluşan tüm yörüngeler için konum ve hız vektörleri:

- i) x, y, z, v_x, v_y, v_z
- ii) $x + \sigma_a, y, z, v_x, v_y, v_z$
- iii) $x, y + \sigma_a, z, v_x, v_y, v_z$
- iv) $x, y, z + \sigma_a, v_x, v_y, v_z$
- v) $x - \sigma_a, y, z, v_x, v_y, v_z$
- vi) $x, y - \sigma_a, z, v_x, v_y, v_z$
- vii) $x, y, z - \sigma_a, v_x, v_y, v_z$

olacak şekilde 7 yörünge hazırlanmıştır. Hız vektörlerinin hata aralığı ise bu denli bir konum farkı için ihmal edilebilir düzeyde olduğundan değiştirilmemiştir.



Şekil 4.2. Cisim ve oluşturulan klonların görünümü

4.3. İntegrasyon Kriterleri

Hazırlanan girdiler zamanda geriye doğru 10 milyon yıl integre edilmiştir. Maksimum zaman adımı 0.5 gün olacak şekilde belirlenmiş ve Güneş ile tüm diğer büyük gezegenlerin (Merkür, Venüs, Yer-Ay, Mars, Jüpiter, Satürn, Uranüs, Neptün) kütle çekim etkileri eklenmiştir. Yer ve Ay ile beraber diğer tüm gezegenlerin de barisentrik koordinatları alınarak tek bir sistem olarak hesaba eklenmiştir. Asteroidler nokta kaynak olarak göz önüne alınmış ve asteroidler arası yakın geçişler ve kütle çekimsel olmayan etkiler ihmal edilmiştir. Ancak 4 durumda integrasyon sonlandırılmıştır; i) eğer cisim Güneş veya diğer büyük gezegenlere çarparsa, ii) eğer cismin yarı büyük eksen uzunluğu 50 AB'nin üzerine çıkarsa, iii) eğer cismin yörüngesi hiperbolik yörünge olursa, iv) eğer cisim Güneş'e çok fazla yaklaşırsa ($q < 0.008$ AB). Burada cismin Güneş'e ya da büyük gezegenlere yaklaşma sınırı Roche limitine göre belirlenmiştir. Güneş'in Roche limiti başlangıçta 0.008 olarak alınmıştır. Ancak, C/2011 W3 (Lovejoy) kuyruklu yıldızı 16 Aralık 2011 tarihinde enberi noktasından geçerken Güneş'in 0.0055 AB yakınından geçmiş ve kurtulmuştur (Sekanina ve Chodas 2012). Bu durum, diğer başka cisimlerin de bu uzaklıkta Güneş'ten kurtulabileceğini göstermiştir. $2 < T_j < 3$ olan cisimlerden bazıları bu kriter sonucu sonlanmıştır ve böylece limit, $2 < T_j < 3$ olan cisimlerin bu kriter sonucu sonlananları için 0.0055 olarak alınarak tekrarlanmıştır. Diğer cisimlerden bu kriter sonucu sonlanan olmadığı için 0.008 ile devam edilmiştir.

Çıktılar, yörünge elemanları olarak her 10 yılda bir kaydedilmiştir. Ayrıca, konum ve hız vektörleri her 10^5 yılda bir kaydedilmiştir. Olası yakın geçişlerin kontrolünü ve analizini yapabilmek için ise tüm büyük gezegenlerin 3 Hill küresinden daha yakın geçişler de ayrıca kaydedilmiştir.

4.4. Yöntem

İntegrasyon için 2. Dereceden Leapfrog integrasyon şeması kullanılmıştır. Leapfrog, zaman simetrik olması sebebiyle böyle bir integrasyona uygun bir şemadır. Zaman simetrik şemalarda ileri veya geri yönlü aynı zaman adımlarında yapılacak integrasyonlar aynı noktaya tekrar gelebilmeyi sağlar. Örneğin, bir cisim zamanda geriye 10 yıl integre edildikten sonra aynı zaman adımı ile o noktadan 10 yıl ileriye

integre edilirse tam olarak aynı noktaya tekrar dönecektir. Bu özelliğe sahip integrasyon şemaları için toplam enerji korunur ve nümerik hata birikmesi gerçekleşmez. Bu, aynı doğrulukla çok daha uzun süreli integrasyonlar yapabilmeye olanak sağlar. Bu da, yapılan integrasyonun hassasiyetini artırır. Kullanılan şemanın yanı sıra test amaçlı olarak ayrıca, Hermite, Mixed-Variable Symplectic (MVS) ve Bulirsch-Stoer şemaları da denenmiş ve hassasiyet karşılaştırmaları yapılmıştır. Benzeri çalışmalarda sıklıkla kullanılan bu şemaların MPC'nin verdiği sonuçlar ile karşılaştırılmaları yapılmış ve Leapfrog ile elde edilen sonuçların daha hassas olduğu görülmüştür.

Kullanılan zaman adımı için her bir cismin kendine özgü zaman adımı belirlenmiştir (individual time-step). Bunun için her bir cismin anlık konum ve hız vektörlerinin oranına bakılarak zaman adımı her bir adımda değişecek şekilde belirlenmiş ve uygulanmıştır. Güneş'e yakın dolanan cisimler daha hızlı hareket edeceğinden ya da uzak olan cisimler daha yavaş hareket edeceğinden tüm sistem için belirlenecek tek bir zaman adımı böyle bir integrasyonda hatanın artmasına yol açacaktır.

Güneş sistemi içerisinde yapılacak bu denli bir integrasyonun doğruluğu ise enerjinin ve açısal momentumun korunumu prensipleri gereği başlangıçta hesaplanan sistemin toplam enerjisinin ve açısal momentumunun zaman içinde ne denli değiştiğine bakılarak takip edilir. Yapılan integrasyonlarda enerjinin ve açısal momentumun korunumu yeterli düzeyde sağlanmıştır.

Güneş sisteminin dinamik olarak kaotik yapısı sebebiyle daha yüksek doğruluklu istatistiksel sonuçlar elde etmek amacıyla istatistiğin artırılması için oluşturulan klon yörüngeler başlangıç yörüngesine ne kadar yakın olsa da elde edilen sonuçlar çok farklı olabilmektedir. Araştırılan bölgeler Güneş sisteminin asteroidler için oldukça kaotik olan iç kısımlarında olduğundan, başlangıç şartlarına hassas bağlılık söz konusudur. Bu sebeple klon yörüngeler uzun süreli integrasyonlarda birbirinden çok farklı yollar izleyebilmektedir. Örneğin, aynı cismin bir klonunun integrasyonu belirlenen maksimum zamanı (10 milyon yıl) tamamlarken, diğer bir klonunun integrasyonu görece olarak çok kısa bir zamanda sonlanabilmektedir. Oluşturulan klon yörüngeler başlangıç yörüngesine ne kadar yakın olsa dahi başlangıç şartlarına bu denli bağlı olunan bir sistemde çok farklı sonuçlar görülebilecektir.

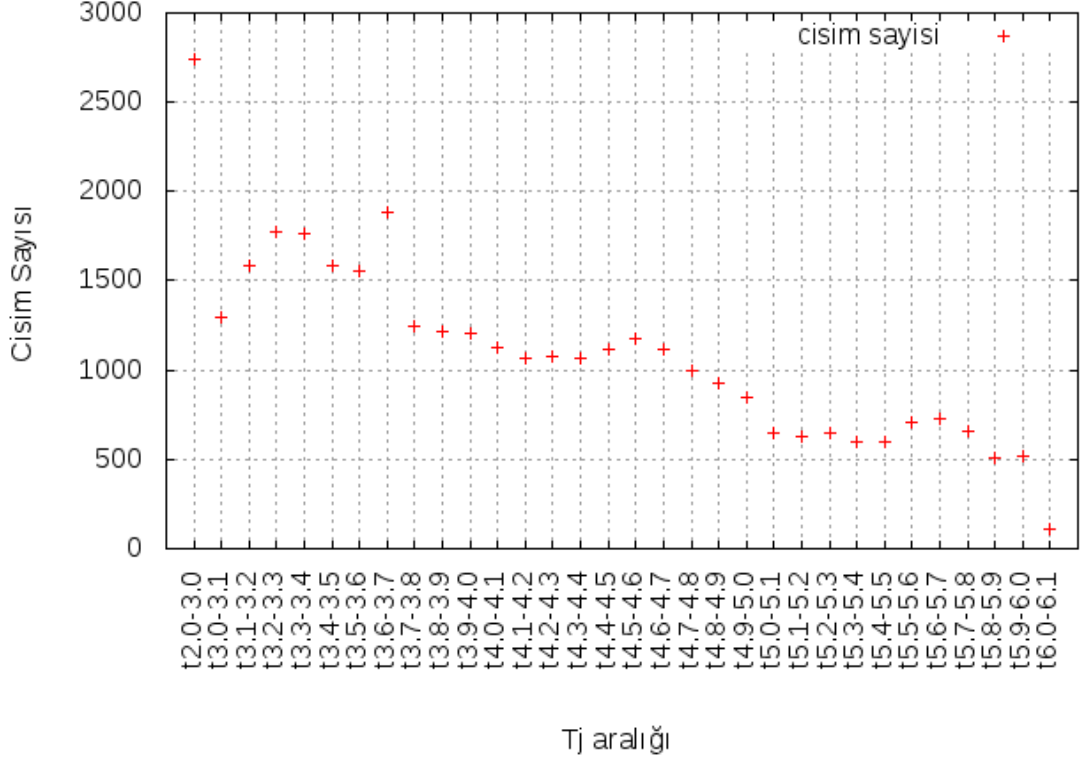
Güneş sistemi içerisinde kütle çekimsel etkiler sonucu farklı bölgeler farklı dinamik özellikler gösterir. Bu sebeple bazı bölgeler daha kaotik iken bazı bölgeler daha kararlı olabilir. Kaotik olan bölgeler için başlangıç şartlarına bağlılık çok daha hassas olacaktır. Gözlemler sonucu elde edilen konum ve hız vektörlerinin hata aralıkları bu hassasiyeti sağlayamayabilir. Bu durumda, o bölgeler için yapılacak uzun süreli integrasyon çalışmalarının doğruluğu güvenilir olmayabilir. Güneş sistemi içerisindeki bölgelere göre yapılabilecek en uzun integrasyon süresini Lyapunov zamanı belirler. Bir bölge için belirlenen Lyapunov zamanı ne kadar uzun ise o bölgede bulunan bir cisim için yapılabilecek güvenilir sayısal integrasyonun süresi de o kadar uzun olabilecektir. Lyapunov zamanı kısa olan bölgeler anlaşılacağı üzere daha kaotik bölgelerdir. Böyle bölgelerde yapılacak uzun süreli integrasyonların doğruluğu çok düşük olabilecektir. Bu bölgelerde ancak Lyapunov zamanına uygun süreler içerisinde güvenilebilir

integrasyonlar yapılabilir. Yapılabilecek diğerk bir yaklaşım da klon yörüngeler ile sayıyı artırarak istatistiksel yaklaşımlarda bulunmaktır.

Lyapunov zamanı belirlenirken birbirine çok yakın yörüngelerin (shadow orbit) integrasyonu yapılarak birbirlerinden uzaklaşma sürelerine bakılır. Beklenen durum yörüngelerin benzer yolları takip etmesi olabilir. Ancak sistem içerisindeki kaotiklik belirli bir zaman sonra yörüngelerin farklı yollar izlediğini gösterir. Lyapunov zamanı yörüngelerin farklı yollar izlemeye başladığı anı gösterir. Bir cisim için Lyapunov zamanının kısa olması integrasyon sürelerinin de kısa olmasını gerektirmektedir. YYA'lar, Yer'e ve diğerk büyük gezegenlere yakın olabilmesi sebebiyle yoğun kütle çekim etkisi altında olduğundan daha kaotik bölgelerdedir ve Lyapunov zamanları kısadır ancak bu çalışmada istatistiksel olarak sonuçlar incelenecektir ve istatistiğın artması için oluşturulan klon yörüngelerin bu durumdan kaynaklanacak hata aralığını düşürmesi beklenmektedir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında 38175 adet yörünge zamanında geriye 10 milyon yıllık integrasyonları yapılmıştır (Şekil 5.1).



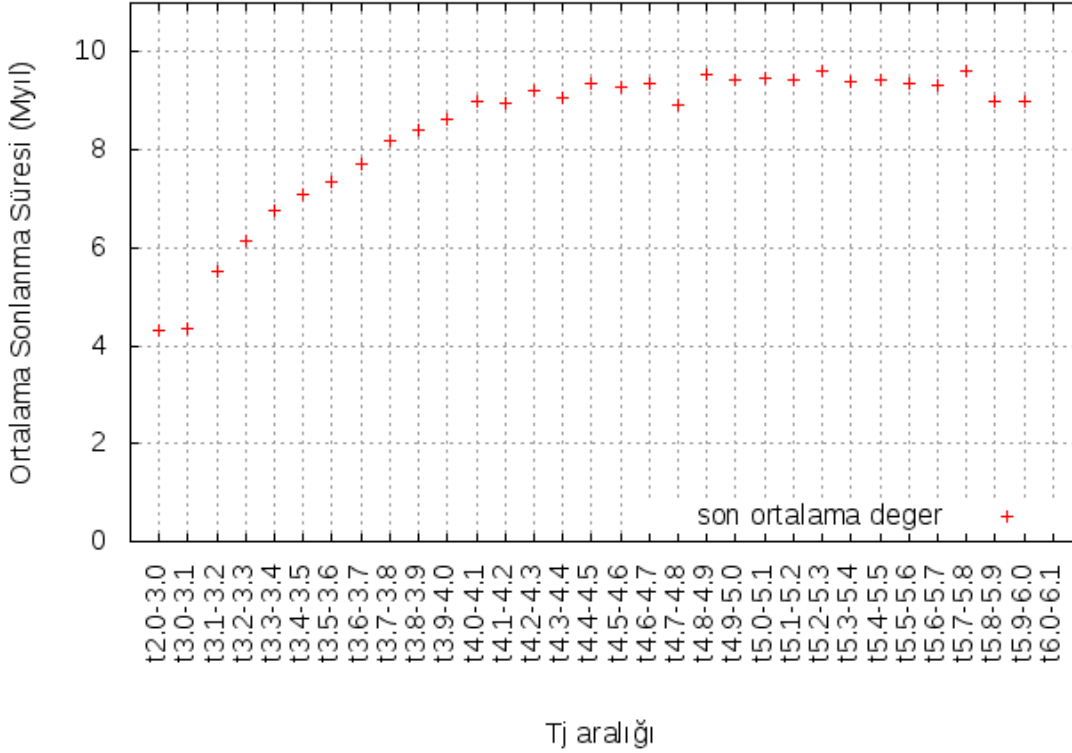
Şekil 5.1. Oluşturulan her bir Tj paketine karşılık paket içerisinde bulunan cisimlerin sayısı. Her bir noktaya karşılık gelen cisim sayısı değerlerinin toplamı 38175'dir

Şekil 5.1'de görüldüğü üzere en fazla cisim sayısı Tj'nin 2 ile 3 aralığında olduğu yerdedir. Ancak belirtildiği üzere yalnızca Tj'nin 2 ile 3 arasında olduğu paket bir bütün halinde integre edilmiş, diğer paketler 0.1'lik aralıklar ile oluşturulmuştur. Tisserand parametresine göre cisim dağılımı oldukça açık bir şekilde görülmektedir. t3.2-3.3'ten itibaren cisim sayısı neredeyse düzenli bir biçimde azalmıştır.

5.1. İntegrasyon Süresi Analizi

İntegrasyon süresi analizi için her bir paketin ortalama integrasyon süreleri alınmıştır. Ortalama integrasyon süresi hesaplanırken her bir paket içerisindeki tüm cisimlerin integrasyonlarını tamamladıkları sürelerin aritmetik ortalamaları hesaplanmıştır. Her bir pakete karşılık ortalama integrasyon sürelerinin grafiğine bakıldığında Tisserand parametresinin cisimlerin yörünge evrimleri hakkında bilgi verdiği anlaşılmaktadır (Şekil 5.2). Buna göre, Tj arttıkça integrasyon süresinin de arttığı açıkça görülmüştür. İntegrasyon süresinin uzaması sebebiyle asteroidin yörüngesinin kütle çekimsel etkilerden daha az etkilendiği ve yörüngesinin daha kararlı bölgelerde bulunduğu gibi bir yorum yapılabilir. Ancak burada beklenti yalnızca

asteroidlerin belirlenen integrasyon kriterlerinin dışına çıkarak integrasyonunun sonlanması değildir. Çünkü, belirlenen kriterler asteroidin Güneş sisteminin dışına çıkması ($a > 50 \text{ AB}$ ve $e > 1$) ve Güneş'e ya da gezegenlere çarpması sonucu sonlanmasını gerektirir. Ancak belirtildiği üzere YYA'lar Güneş sistemi içerisindeki bölgeler için geçerli dinamik mekanizmalar sonucu da YYA olabilir. Bu durumun daha ayrıntılı anlaşılabilmesi için her bir asteroidin yörünge hareketleri ayrıca incelenmelidir.



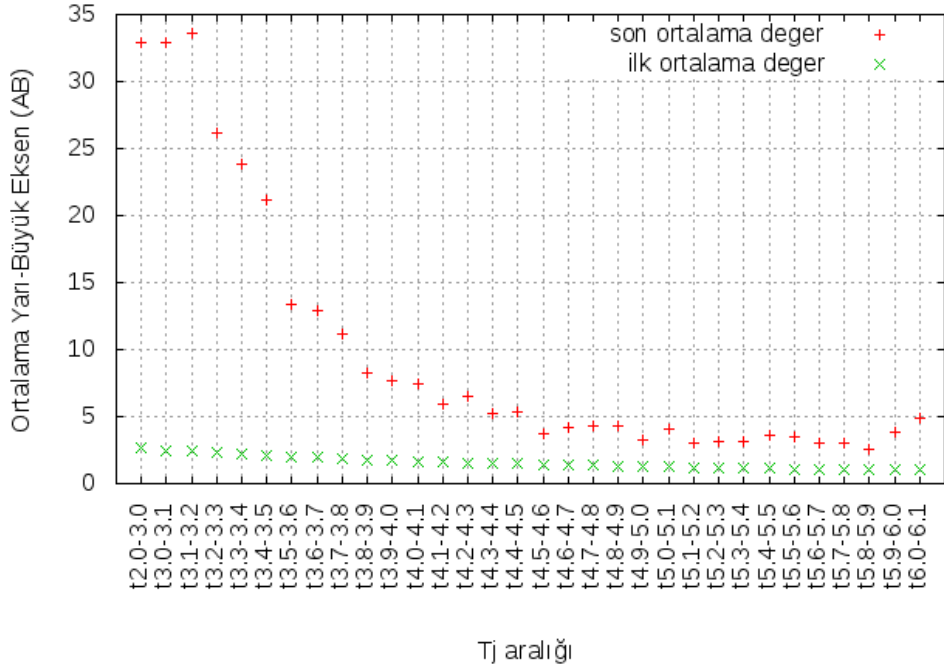
Şekil 5.2. Oluşturulan her bir Tj paketine karşılık paket içerisinde bulunan cisimlerin ortalama integrasyon süreleri

Şekil 5.2'ye bakıldığında en dikkat çeken sonuç Tj'nin artması ile asteroidlerin bulunduğu yörüngelerin kütle çekimsel etkilerden daha az etkilenecek daha kararlı yörüngelerde dolandıklarıdır. Yani bir cismin Tisserand parametresi ne kadar küçük ise o kadar kısa zaman önce cisim YYA olmuş olabilir. Bu sonuç Tisserand parametresinin asteroidlerin yörünge evrimleri ile ilgili önemli ipuçları verdiğini göstermektedir.

T2.0-3.0 aralığındaki cisimlerin en kısa integrasyon süresine sahip olmasının en önemli sebebi Jüpiter'dir. Daha önceki bölümlerde anlatıldığı üzere t2.0-3.0 aralığındaki cisimler Jüpiter Ailesi Kuyruklu Yıldızları'dır (JFC). Bu cisimlerin, yapılan sayısal integrasyonlar sonucu kuyruklu yıldız kökenli olması beklenmektedir. Jüpiter'in kütle çekimsel etkileri sonucu iç yörüngeye taşınmış ve hatta YYA olmuşlardır. Bu cisimler içerisinde Q değeri en küçük olan cisim 4.56 AB'dir. Yani JFC'ler, Jüpiter ile sürekli yakın geçişlerde bulunmaktadırlar. Bu durum beklenildiği üzere JFC'lerin yörünge evrimlerinin kütle çekimsel etkiler sonucu oldukça hızlı olmasını ve Güneş sisteminin dışına çıkmasını gerektirir ve sonuçlar bunu desteklemektedir (Şekil 5.3).

5.2. Yörünge Elemanları (a, e, i) ve T_j Analizi

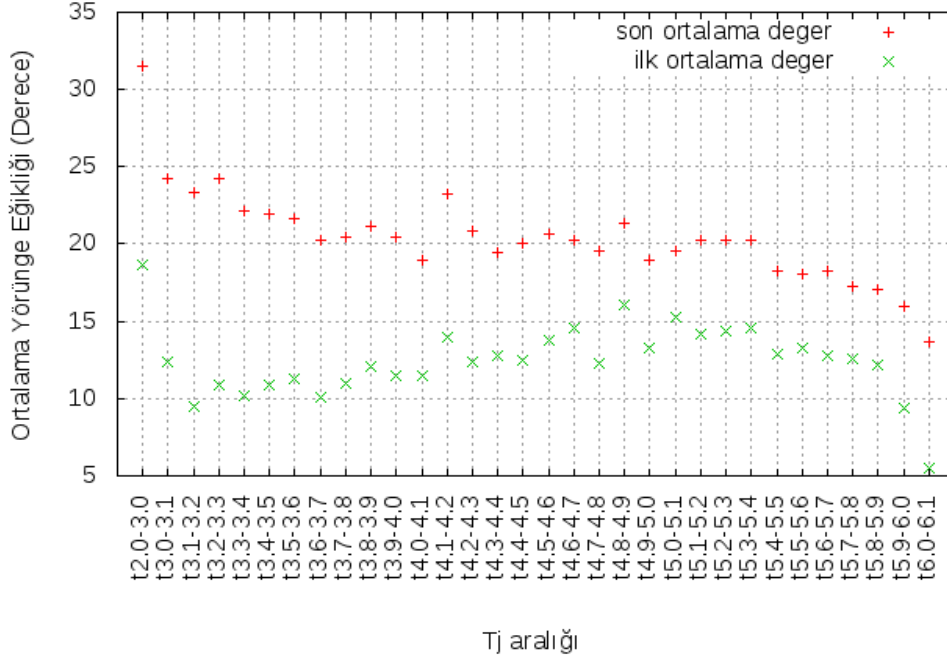
Asteroidlerin yörünge yarı büyük eksen uzunluklarının, yörünge eğikliklerinin, yörünge basıklık değerlerinin ve Tisserand parametrelerinin analizleri için de integrasyon sürelerinin analizine benzer yöntem uygulanmıştır. Her bir paket için aritmetik ortalamalar hesaplanarak grafikler oluşturulmuştur (Şekil 5.3, Şekil 5.4, Şekil 5.5, Şekil 5.6).



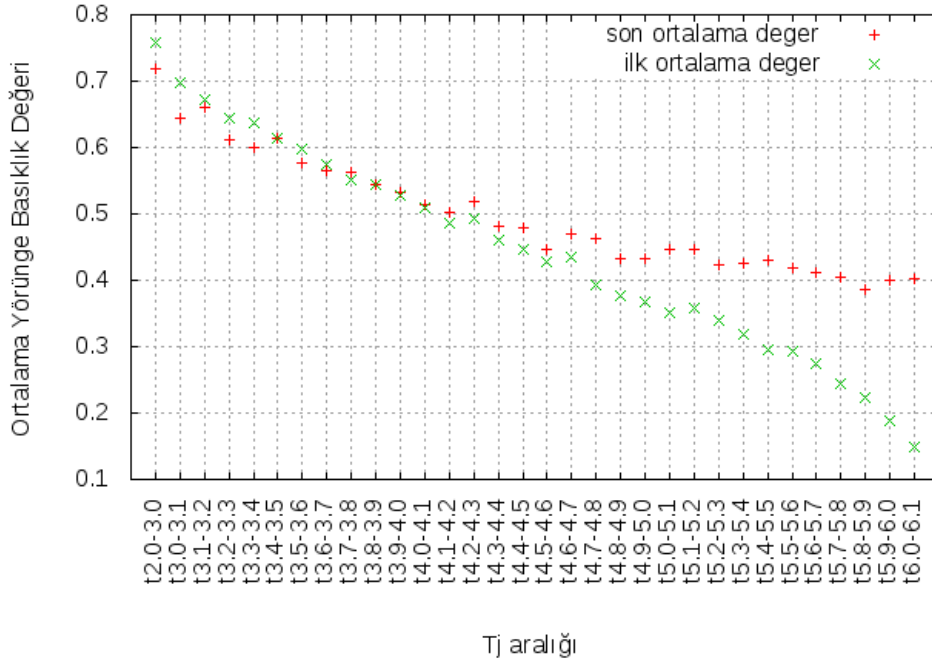
Şekil 5.3. Oluşturulan her bir T_j paketine karşılık paket içerisinde bulunan cisimlerin integrasyon sonundaki ve başlangıçtaki ortalama yarı büyük eksen uzunlukları

Şekil 5.3'e göre Tisserand parametresi ve yörünge yarı büyük eksen uzunluklarının son değerleri arasında açıkça bir ilişki görülmektedir. Grafikte görülen iki farklı renk başlangıçtaki ortalama değerler ile integrasyonun bitiş anındaki ortalama değerleri belirtmektedir. t2.0-3.0 aralığındaki cisimler beklenildiği üzere integrasyonu tamamladığında Güneş sisteminin dış kısımlarına doğru çıkmaktadır. Bu aralıktaki cisimlerin kuyruklu yıldız kökenli olduğu zaten düşünülmekte olduğundan sonuçlar beklenen durum ile uyum içerisinde. Bu aynı zamanda uygulanan yöntemin makul ve güvenilir sonuçlar ürettiğini de göstermektedir. Diğer taraftan, Tisserand parametresi arttıkça cisimlerin Güneş sisteminin iç kısımlarına doğru integrasyonunu tamamladığı anlaşılmaktadır ki bu durum Tisserand parametresine göre cisimlerin kaynak bölgeleri ile ilgili yorum yapılabilmesini gösterir. 10 milyon yıllık sonuçlara göre Tisserand parametresi küçük olan cisimlere kaynaklık edecek bölgeler Güneş sisteminin dış kısımlarına uzanırken, büyük olan cisimler daha iç bölgelerden gelmiş olabilir. Tisserand parametresi büyük olan cisimler için kaynaklık eden bölgelerin daha ayrıntılı bir analizinin yapılabilmesi için 10 milyon yıllık integrasyon süresinin yeterli olmadığı da söylenebilir. Bu asteroidlerin bugünkü konumlarına 10 milyon yıldan çok daha uzun sürede geldiği düşünülmektedir. Bu sonuç da Morbidelli ve Nesvorný'nin (1999)

çalışması ile uyumludur. Daha önce belirtildiği üzere, daha ayrıntılı bilgilere ulaşabilmek için buradan elde edilen bilgiler kullanılarak cisimlerin yörünge analizleri ayrıca yapılmalıdır.



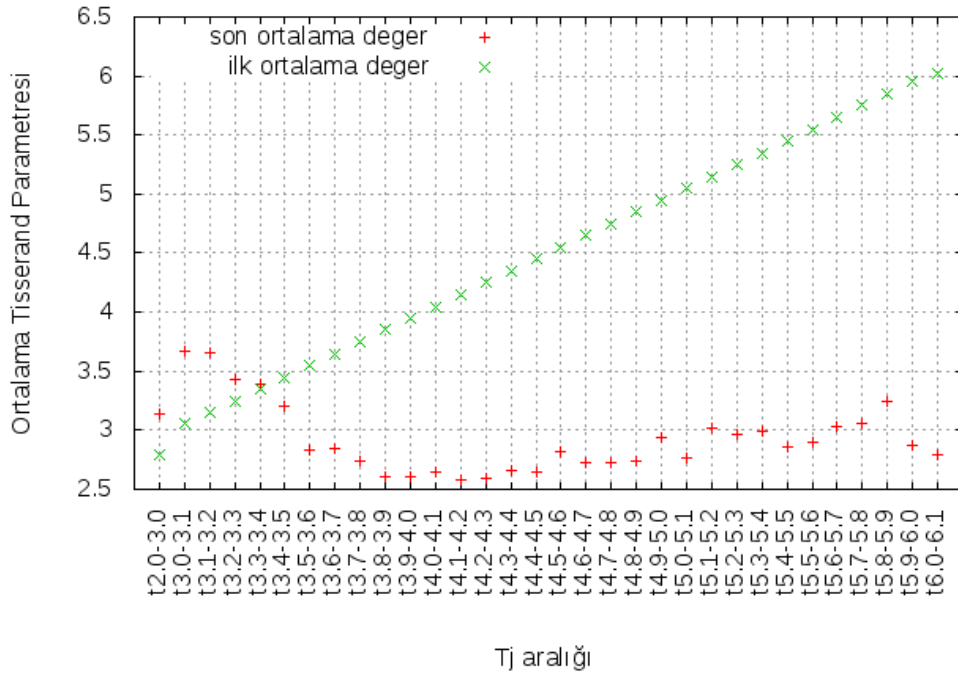
Şekil 5.4. Oluşturulan her bir Tj paketine karşılık paket içerisinde bulunan cisimlerin integrasyon sonundaki ve başlangıçtaki ortalama yörünge eğiklikleri



Şekil 5.5. Oluşturulan her bir Tj paketine karşılık paket içerisinde bulunan cisimlerin integrasyon sonundaki ve başlangıçtaki ortalama yörünge basıklık değerleri

Şekil 5.4'e göre integrasyon sonundaki ortalama yörünge eğiklikleri ile başlangıçtaki ortalama yörünge eğiklikleri arasında bir uyum olduğu görülüyor. Zamanda geriye doğru integrasyonu yapılan cisimlerin ortalama değerleri hiçbir T_j paketi için başlangıç ortalama değerinin altına inmemiş ki bu durum geçmişte cisimlerin daha eğik yörüngelerde dolandığını göstermektedir. Gezegenlerin yörünge eğikliklerinin oldukça düşük olduğu göz önüne alındığında, kütle çekimsel etkiler sonucu bu cisimlerin zaman içerisinde referans düzlemine (Güneş-Yer) yaklaştığı anlaşılmaktadır.

Şekil 5.5'te görülen başlangıç ve son ortalama basıklık değerleri arasında t4.6-4.7 sonrasında belirgin bir ayrılma görülmekte. Buna göre geçmişte t4.6-4.7'den büyük olan cisimler daha basık yörüngelere sahip iken zaman içerisinde yörünge basıklık değerleri düşmüştür ve günümüzde çembere daha yakın yörüngelerde dolanmaktadır.

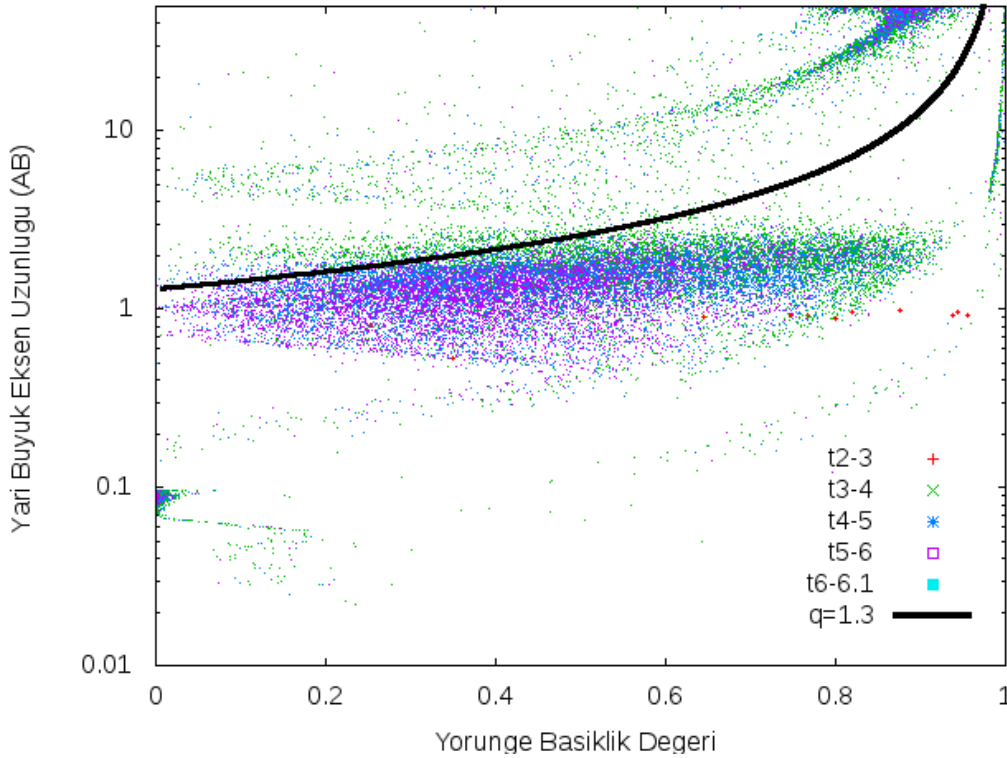


Şekil 5.6. Oluşturulan her bir T_j paketine karşılık paket içerisinde bulunan cisimlerin integrasyon sonundaki ve başlangıçtaki ortalama Tisserand parametreleri

Şekil 5.6'da cisimlerin integrasyon zamanı sonundaki ve başlangıçtaki ortalama Tisserand parametrelerinin girdi paketlerine göre karşılaştırılması gösterilmiştir. Cisimlerin integrasyonunu günümüzdeki Tisserand parametresine göre sıralı bir şekilde gerçekleştirdiğimizden ilk değerleri düzgün bir şekilde artmaktadır. Oysa zamanda geriye doğru gidildiğinde Tisserand parametre değerleri büyük çoğunlukla 3 ve altına inmiştir. Bu sonuç bize günümüzde $T_j > 3$ olan Apollo asteroidlerinin de geçmişte Jüpiter ile daha büyük etkileşime girdiklerini ve bu sayede iç bölgelere doğru hareket ettiklerini düşündürmektedir. Günümüzde $T < 3.3$ olanlar için ise, parametre geçmişe götürüldüğünde nispeten çok daha kısa sürede 3'ün üstüne çıkmıştır.

5.3. Kaynak Bölgelerinin İncelenmesi

Sonuçlar incelenirken asteroidlerin iki farklı zamandaki yörünge değerleri kullanılmıştır. Bunlar, asteroidlerin integrasyonlarını tamamladıkları son değer ile son değerden bir önceki değerdir. Buradaki ilk amaç son değerlerde oluşabilecek hataları engellemektedir. Örneğin, hiperbolik yörüngeye ulaşan bir asteroidin yörünge yarı büyük eksen uzunluğunun değeri negatif olacaktır. Böyle bir değer oluşabilmesi için yörünge yarı büyük eksen uzunluğu bir önceki adımda Güneş sisteminin dış kısımlarına kadar ulaşmış olabilir ya da iç yörüngelerde dolanırken yörünge basıklığı $e > 1$ değerlerine ulaşmış olabilir. Bu farkı görebilmek için sondan bir önceki değerler için grafik oluşturulmuştur (Şekil 5.7). İkinci amaç ise, hiperbolik bir yörünge ile dışarıdan Güneş sisteminin iç bölgelerine ulaşan, bu bölgede gezegenler ile etkileşime girip enerji kaybeden, bu sayede de daha iç yörüngelere hareket eden cisimlerin bu hareketini takip edebilmektir. Böylelikle bu gibi cisimlerin iç yörüngelerin hangi bölgesinden sisteme giriş yaptığını gözleme şansımız olacaktır. Dinamik yollar da bu sayede grafiklerde daha görünür hale gelecektir.



Şekil 5.7. İntegrasyonu yapılan tüm Apollo grubu asteroidlerinin $e - a$ grafiği

Şekil 5.7’de görülen farklı renkler farklı T_j aralıklarını göstermektedir. Görülen siyah eğri ise $q = 1.3$ AB eğrisidir ki bu eğri YYA olma koşuludur. Eğrinin altında kalan cisimler integrasyon sonunda hala YYA olan cisimlerdir. Bunlar toplam cisim sayısının %71.79’una karşılık gelmektedir. Yani 10 milyonluk integrasyon sonucunda cisimlerin büyük bir çoğunluğu hala YYA’dır. YYA’lar içerisinde ise %60.17 Apollo, %11.52 Amor, %11.09 Aten ve %17.85 Atira grubu asteroidleridir. Atira grubunun yüzdesinin, Amor ve Aten grubundan fazla olmasının ise belirli sebepleri olabilir. Atira grubu $Q < 0.983$ AB’dir ve bu koşulu sağlayan tüm asteroidler bu yüzde içerisinde.

Ancak Şekil 5.7’de görüldüğü üzere bazı bölgelerde toplanmalar oluşmuştur (örneğin, $a = 0.1$ AB civarı ve t_2-3 cisimleri için $a = 0.02$ AB ve $0.6 < e < 0.8$ civarı). Bu toplanmaların sebebi ayrıca incelenmelidir.

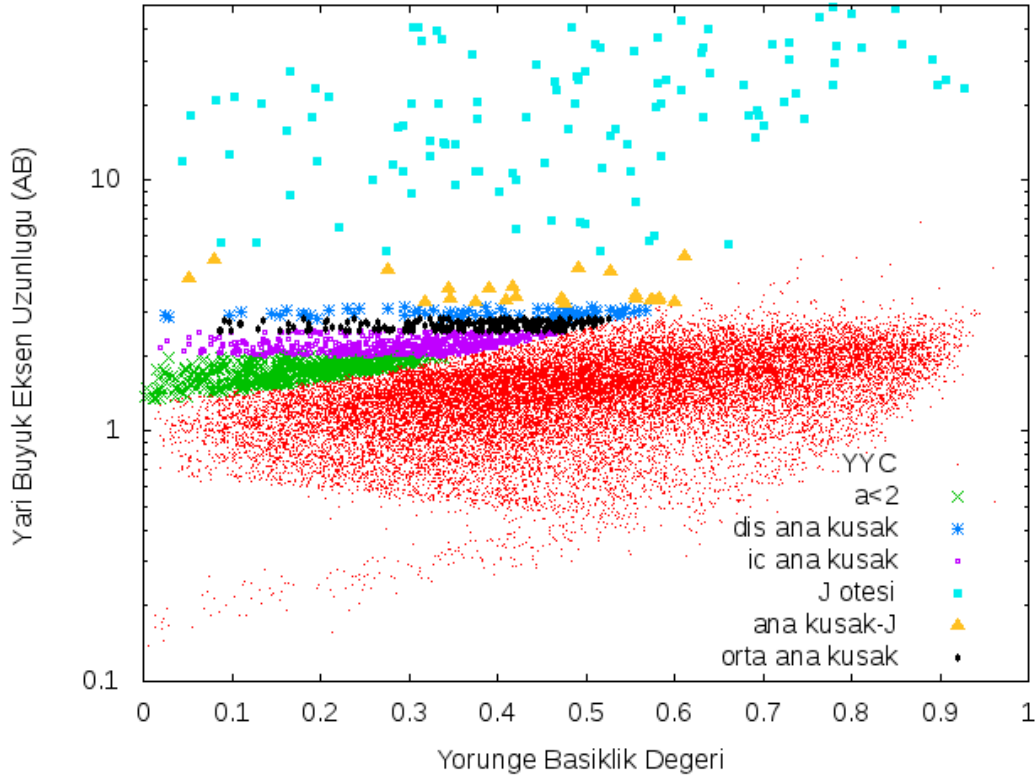
İntegrasyon sonunda sondan bir önceki değerlere göre asteroidlerin %11.83’ü Ana Kuşak içerisinde görülmektedir. Ana Kuşak bölgesi iç ($2 < a < 2.5$), orta ($2.5 < a < 2.82$) ve dış ($2.82 < a < 3.2$) olarak ayrılırsa, İç Ana Kuşak bölgesinde bulunan asteroidler, Ana Kuşak bölgesinde görülen asteroidlerin %76.05’ine, Orta Ana Kuşak bölgesinde bulunan asteroidler %17.20’sine ve Dış Ana Kuşak bölgesinde bulunan asteroidler %6.82’sine karşılık gelmektedir (Şekil 5.9). Venüs ile Ana Kuşak arasındaki asteroidler ise tüm asteroidlerin %50.07’sini oluşturmaktadır.

Asteroidlere, integrasyonun sonlanma durumlarına göre bakıldığında ise %63.69’unun integrasyon süresinin üst limiti olan 10 milyon yılı tamamladığı görülmektedir. %18.44’ünün a değeri 50 AB limitinin dışına çıkmıştır ve %12.27’sinin yörüngeleri ise hiperbolik olmuştur ($e > 1$). Dış yörüngelerden gelmiş gibi görünen cisimlerin bir kısmının aslında dış yörüngelerden gelmediği, kütle çekimsel olmayan etkiler ve çarpışmalar gibi bizim hesaplarımızda ihmal ettiğimiz durumlar sonucunda iç bölgelere yönlendiği düşünülebilir.

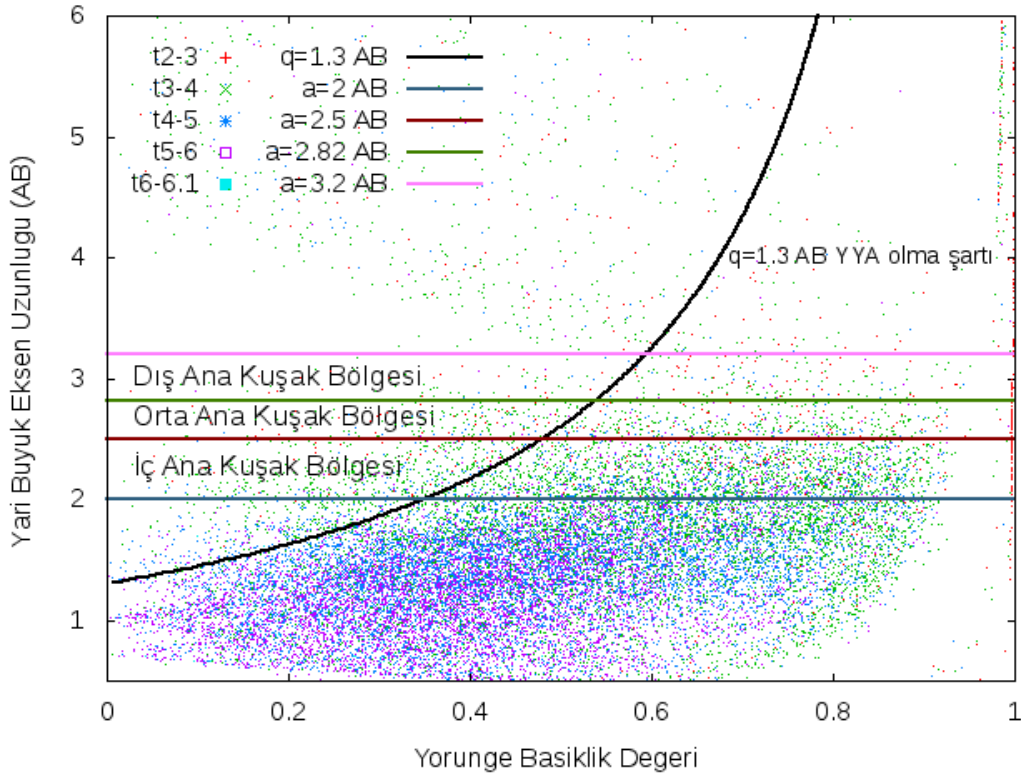
Anlaşılabileceği üzere, hiperbolik yörüngeye ulaşan asteroidler ise 50 AB sınırını aşmadan hiperbolik yörüngeye ulaşmışlardır ki bu sebeple integrasyon sonlanmıştır. Bu cisimler yörüngelerin farklı bölgelerinde büyük gezegenlerce frenlenmiş ve Apollo bölgesine kadar taşınmış olabilirler. Bu yolların en belirginini q (J) = 4.95 AB çizgisinin $e = 0.8$ civarında gözlenmektedir. Bu cisimler oldukça basık yörüngelerdedir. Bu basıklık değeri daha fazla artarak cisimler hiperbolik yörüngeye ulaşmış olabilir.

10 milyon yılı tamamlayan cisimler için ise ayrıca analiz yapılmalıdır. Çünkü bu cisimlerin integrasyonları belirlenen tüm zaman için sorunsuz devam etmiştir. Yapılan analiz sonucu 10 milyon yılı tamamlayan cisimlerin %93.76’sının hala YYA olduğu görülmüştür. Bu sonuca göre bu cisimlerin 10 milyon yıldan daha fazla süreli integrasyonları yapılabilir ve yapılmalıdır. Geriye kalan cisimler ise 10 milyon yılı tamamlayan cisimlerin %6.24’üdür ve bu cisimler YYA değildir. Bu cisimlerin %33.55’i $1.3 < a < 2$, %37.70’i İç Ana Kuşak, %14.56’sı Orta Ana Kuşak, %4.75’ü dış Ana Kuşak, %1.59’i Dış Ana Kuşak sınırı ile Jüpiter arası, %7.85’ü ise Jüpiter ötesindedir (Şekil 5.8). YYA olmayanların sayısı az olduğundan şu an bu bölgeler için güçlü bir istatistik oluşmamaktadır. Bu istatistiğin artırılması için zamanda geriye doğru daha uzun süreli integrasyon yapılarak YYA bölgesinde olan cisimlerin YYA bölgesinden çıkmaları sağlanmalıdır. Ancak 10 milyon yıldan uzun süreli integrasyonlar mevcut çalışmanın sınırlarının ötesindedir. Böyle bir çalışma, bu çalışmanın sonuçlarından hareketle planlanabilir.

Şekil 5.8’de kırmızı bölge 10 milyon yılı tamamlamış ancak hala YYA olan cisimleri göstermektedir. Yeşil, İç Ana Kuşak sınırı olan, a ’nın 2 AB’den küçük olduğu bölge, magenta İç Ana Kuşak bölgesi, siyah Orta Ana Kuşak bölgesi, mavi Dış Ana Kuşak bölgesi, sarı Ana Kuşak ile Jüpiter arasındaki bölge, turkuaz ise Jüpiter ötesi bölgedir. Jüpiter ötesi için beklenti integrasyon süresinin daha fazla olması durumunda cisimlerin Güneş sisteminin dışına, kuyruklu yıldız bölgelerine doğru gitmesi olacaktır.



Şekil 5.8. 10 milyon yılı tamamlayan cisimlerin Ana Kuşak civarı için e-a grafiği



Şekil 5.9 İntegrasyonu yapılan tüm Apollo grubu asteroidlerinin Ana Kuşak civarı için e – a grafiği

5.4. Güneş Sistemi İçerisindeki Dinamik Yollar

Tüm Apollo grubu asteroidlerinin integrasyonlarının sondan bir önceki değerlerinin grafiği oldukça ilginç sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Çıkan sonuçlar Güneş sistemi içerisinde oldukça belirgin dinamik yolların olduğunu göstermektedir (Şekil 5.10). Daha önce belirtildiği üzere böyle bir grafiğin görülebilmesi için integrasyonun sonucunda hesaplanan yörünge parametrelerinin sondan bir önceki değerleri alınmıştır.

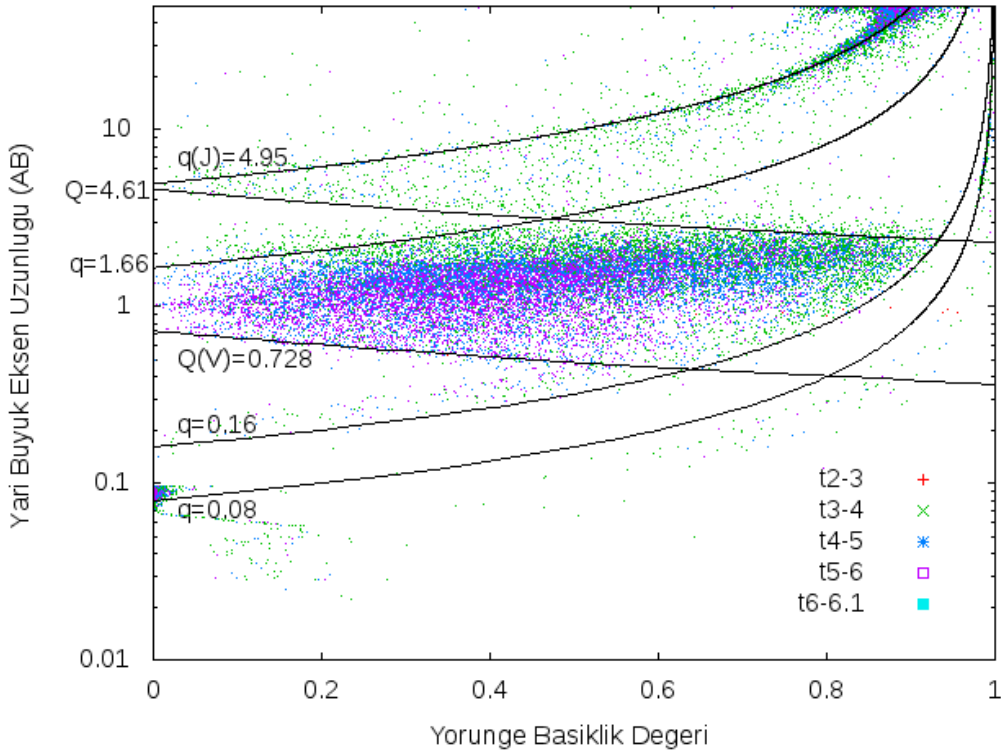
Şekil 5.10'da dinamik yollar oldukça belirgin bir şekilde görülmektedir. Şekil üzerine yerleştirilen eğriler ve doğrular bu bölgelerin birbirinden ayrılmasını sağlamıştır. $Q = 4.61$ AB ve $Q = 0.728$ AB doğruları sırasıyla Jüpiter yörüngesini kesenler için minimum enöte uzaklık doğrusu ve Venüs'ün enöte uzaklığının doğrularıdır. $q = 4.95$ AB eğrisi Jüpiter'in enberi uzaklığıdır. $q = 1.66$ AB eğrisi Mars yörüngesini kesenler için enberi uzaklığıdır. Diğer eğriler ise şekil üzerine oturtulan enberi uzaklık eğrileridir.

Jüpiter'in enberi eğrisinin ($q = 4.95$ AB) çevresinde özellikle basık bölgelere doğru yoğunlaşmalar görülmektedir. Bu durum belirgin bir şekilde Jüpiter'in kütle çekim etkileri sonucu o bölgeden cisimleri YYA olmaya zorladığını göstermektedir. Jüpiter ile ilişkili olan 4.61 AB doğrusu ise açıkça bir sınır oluşturmaktadır. Bu sınır düşük yörünge basınlığına sahip bölgeler için alt, yüksek yörünge basınlığına sahip bölgeler için üst sınırdır. $q = 1.66$ AB eğrisi ile $Q = 4.95$ AB arasında kalan bölgelerde cisim yoğunluklarının oldukça düşük olduğu görülmektedir. Aynı benzerlik $Q = 0.728$ AB eğrisi ile $q = 0.16$ AB eğrisi arasında kalan bölgelerde de görülmektedir. Özellikle $q = 0.16$ AB ile $q = 0.08$ AB eğrileri arasında neredeyse boş olması bu bölgenin dinamik olarak ayrıca incelenmesini gerektirebilir. Günümüzde bu bölgede yalnızca 62 tane cisim bulunmaktadır. Bu denli uzun süreli ve çok sayıda yörünge kullanılan bir integrasyonda bu denli sınırlanmış bir boşluğun korunması, bölgenin dinamik olarak farklı bir özelliği olduğuna işaret etmektedir. Bölgeye konacak test cisimleri ile zamanda ileri ve geri yönlü integrasyonlar yapılarak yörünge üzerindeki etkilerinin araştırmaya değer olduğu düşünülmektedir.

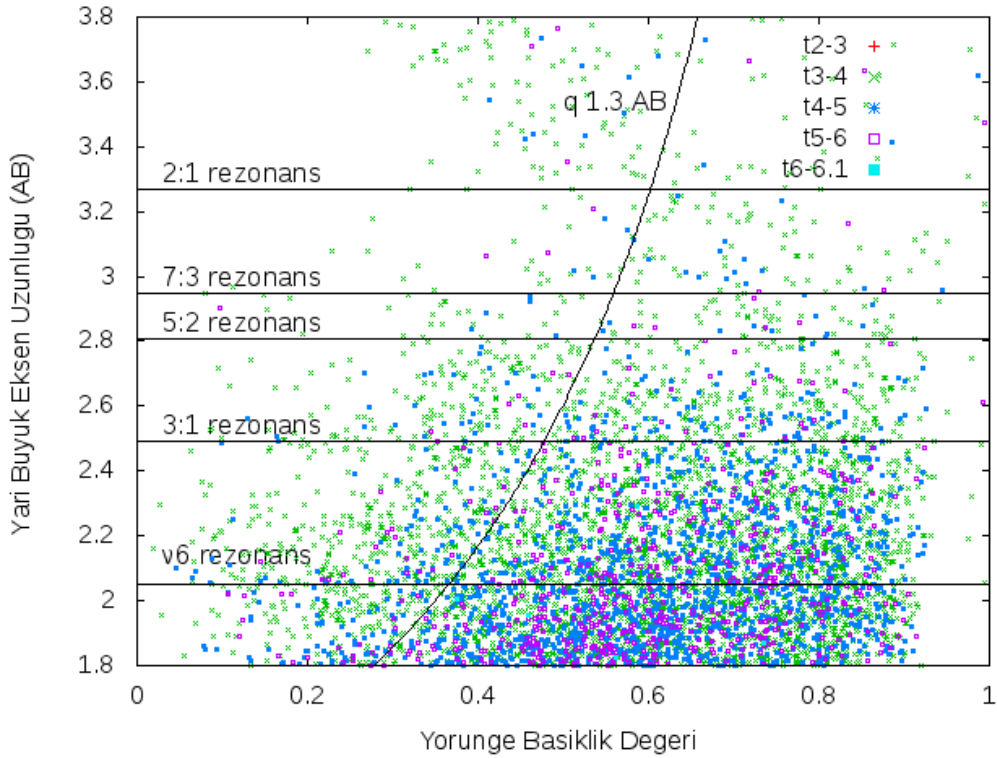
5.5. Rezonans Bölgelerinin Analizi

Rezonans bölgelerinin analizi her bir cismin yörünge evrimlerinin ayrıca incelenmesi ile yapılmalıdır. İntegrasyon süresince YYA olmadıkları zamanlarda rezonans bölgelerinde bulunma süreleri ve ardından izledikleri yol incelenmelidir. Eğer, YYA olmadan önce rezonans bölgesine girmiş ise o zaman rezonans bölgelerinin YYA bölgesine kaynaklık etme durumları incelenebilir. Bu çalışmada tüm cisimlerin son durumları göz önüne alındığından rezonans bölgeleri ile ilgili dikkat çekici sonuçlar elde edilememiştir. Bu bölgelerin analizi için yörünge integrasyonu süresince rezonans etkilerinin ayrıntılı takibi gerekmektedir. Bu çalışmanın kapsamını bir ölçüde aşan böyle bir çalışma da ilgili TÜBİTAK proje ekibi tarafından planlanmaktadır.

Şekil 5.11'de görülen rezonans çizgileri üzerinde integrasyon sonunda o bölgelerde bulunan cisimler görülmektedir. Buna göre, v_6 çizgisi üzerinde cisimlerin daha yoğun bulunduğu ve bu bölgenin YYA'lar için önemli bir kaynak bölgesi olduğu söylenebilir.



Şekil 5.10. İntegrasyonu yapılan tüm Apollo grubu asteroidlerinin $e - a$ grafiği ile bazı önemli bölgeleri belirten yaylar ve çizgiler



Şekil 5.11. İntegrasyonu yapılan tüm Apollo grubu asteroidlerinin $e - a$ grafiği ile bazı önemli rezonans bölgelerini gösteren çizgiler

6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında YYC'ler içerisinde en büyük popülasyona sahip olan Apollo asteroidleri incelenmiştir. Kaynaklık eden bölgelerin tespiti için yörüngelerin zamanda geriye doğru 10 milyon yıllık bir süre limitiyle sayısal integrasyonu yapılmıştır. Bu amaçla belirli bir tarihteki Apollo popülasyonu için yörünge parametreleri ve kartezyen koordinatları kaydedilmiş, sonuçların istatistiksel doğruluğunu artırmak için klon yörüngeler eklenmiştir. Böylelikle asteroidlerin Güneş sistemi içerisinde yörüngelerinin takip edilmesi sağlanmış, mevcut konumlarına hangi dinamik yolları takip ederek geldikleri bilgisine ulaşılmaya çalışılmıştır.

Çalışma sonucunda klon yörüngelerle birlikte toplam 38175 yörüngenin zamanda geriye doğru integrasyonu tamamlanmıştır. Yörüngelerin integrasyonu sırasında 10 milyon yıllık zaman kısıtı yanında bazı özel durumlarda da integrasyonlar sonlandırılmıştır. Bunlar asteroidin Güneş ya da büyük gezegenlerle çarpışması, yarı büyük ekseninin 50 AB'yi aşması, veya enberi mesafesinin 0.008 AB'den küçük olması durumlarıdır.

Yapılan analizler sonucunda Jüpiter ile ilişkili Tisserand parametresinin Apollo asteroid yörüngelerinin analizinde önemli bir kriter olarak öne çıktığı gözlenmiştir. Cisimlerin Tisserand parametresi küçükten büyüğe doğru arttıkça ortalama simülasyon süresinin de oldukça düzgün bir şekilde arttığı görülmüştür. Bu sonuca göre, günümüzde Tisserand parametresi küçük olan Apollo asteroidlerinin buldukları bölgelere nispeten daha kısa sürede geldiğini, Tisserand parametresi büyük olanların ise çok daha uzun sürelerde bu bölgelere taşındıklarını söylemek mümkündür. Daha önceki çalışmalarda Tisserand parametresi 2 ile 3 aralığında olan asteroidlerin kuyruklu yıldız kökenli olduğu ve bu bölgelere ortalama 2-3 milyon yıl süresinde ulaştıkları görüşü mevcuttu. Bu çalışmadaki sonuçlar da bu bilgiyle örtüşmekte, hatta bu süre analizini bütün Apollo asteroidleri için mümkün kılmaktadır. Buradaki tek kısıtımız 10 milyon yıllık simülasyon süresidir.

İntegrasyonlar sonlandığında yörüngelerin %63.69'unun integrasyon süresinin üst limiti olan 10 milyon yılı tamamladığı, %18.44'ünün a değeri 50 AB limitinin dışına çıktığı için durdurulduğu, %12.27'sinin ise hiperbolik yörüngelere dönüştüğü için durdurulduğu görülmüştür.

10 milyon yıllık integrasyon süresini tamamlayan cisimlerin %71.79'u hala YYA yörüngelerinde bulunmaktadır. Oransal dağılımları şu şekildedir; %60.17 Apollo, %11.52 Amor, %11.09 Aten ve %17.85 Atira grubu asteroid yörüngelerindedir. Bu sonuca göre YYA asteroidlerinin kendi aralarında da geçişlerin devam ettiği görülmekte ve bu geçişlerin oransal dağılımı Apollo asteroidleri açısından elde edilmiş olmaktadır. Benzer bir çalışma Amor, Aten ve Atira grupları için de yapıldığında aralarındaki geçişlerin çok daha net bir şekilde gözlenebileceği düşünülebilir.

Çalışmanın önemli görülen bir başka sonucu da Güneş sistemi içerisindeki dinamik yollar hakkında fikir vermesidir. Bu dinamik yollar günümüzdeki Apollo grubu asteroidlerin mevcut konumlarına taşınma mekanizmaları hakkında bilgiler içermektedir. Çizilen a-e grafiklerinde, dinamik yolların büyük gezegenlerin enberi ve

enöte eğrileriyle ilişkisi açıkça ortaya çıkmıştır. Ayrıca, yine bu eğriler arasında oldukça düşük yoğunluklu bölgeler de gözlenmiştir. Bu bölgelerin, asteroidlerin uzun süre kalamadığı, kararsızlığı yüksek, yaşam süresi kısa bölgeler olduğu söylenebilir.

7. KAYNAKLAR

- ANONİM, 2012. <http://sbn.psi.edu/pds/resource/nesvornyfam.html> [Son erişim tarihi: 08.12.2015].
- ANONİM, 2015a. <http://ssd.jpl.nasa.gov/?bodies> [Son erişim tarihi: 08.12.2015].
- ANONİM, 2015b. <http://neo.jpl.nasa.gov/faq/> [Son erişim tarihi: 08.12.2015].
- ANONİM, 2015c. http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi [Son erişim tarihi: 08.12.2015].
- ANONİM, 2015d. <http://neo.jpl.nasa.gov/neo/groups.html> [Son erişim tarihi: 08.12.2015].
- ANONİM, 2015e. http://ssd.jpl.nasa.gov/?histo_a_ast [Son erişim tarihi: 08.12.2015].
- ANONİM, 2015f. www.minorplanetcenter.com [Son erişim tarihi: 08.12.2015].
- ANONİM, 2015g. <http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi> [Son erişim tarihi: 08.12.2015].
- ANONİM, 2015h. <http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/S/Sun-grazing+Comet> [Son erişim tarihi: 08.12.2015].
- BOTTKE, W.F., MORBIDELLI, A., JEDICKE, R., PETIT, J.M., LEVISION, H.F., MICHEL, P. and METCALFE, T. 2002. Debiased orbital and absolute magnitude distribution of the near earth objects. *Icarus*, 156: 399-433.
- BOTTKE, W.F., VOKROUHLICKY, D., RUBINCAM, D. P. and NESVORNY D. 2006. The Yarkovsky and YORP Effects: Implications for asteroid dynamics. *Annual Review of Earth Planetary Sciences*, 34: 157-191.
- BROZ, M. 2006. Yarkovsky Effect and the Dynamics of the Solar System. PhD Thesis, Charles University, 184 p.
- CELLINO, A., BUS, S.J., DORESSOUNDIRAM, A. and LAZZARO, D. 2002. Spectroscopic properties of asteroid families. *Asteroids III*, University of Arizona Press, pp. 633-643, Tucson.
- CHAMBERS, J.E. 1999. A hybrid symplectic integrator that permits close encounters between massive bodies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 304: 793-799.
- DRUMMOND, J.D. 2000. The D-discriminant and Near-Earth Asteroid Streams. *Icarus*, 146: 453-475.

- DUNCAN, M.J., QUINN, T. and TREMAINE, S. 1987. The formation and extent of the Solar System comet cloud. *Astronomical Journal*, 94: 1330-1338.
- DUNCAN, M.J. and LEVISION, H.F. 1997. A scattered comet disk and the origin of Jupiter family comets. *Science*, 276: 1670-1672.
- DUNCAN, M.J., LEVISION, H.F. and LEE, M.H. 1998. A multiple time step symplectic algorithm for integrating close encounters. *The Astronomical Journal*, 116: 2067-2077.
- FARINELLA, P., FROESCHLE, CH., FROESCHLE, CL., GONCZI, R., HAHN, G., MORBIDELLI and A., VALSECCHI, G. 1994. Asteroids falling into the Sun. *Nature*, 371: 314-317.
- FERNANDEZ, J.A. and GALLARDO, T. 2002. Are There Many Inactive Jupiter-Family Comets among the Near-Earth Asteroid Population? *Icarus*, 159: 358-368.
- FERNANDEZ, J.A. SOSA, A., GALLARDO, T. and GUTIERREZ, J. 2014. Assessing the physical nature of near-Earth asteroids through their dynamical histories. *Icarus*, 238: 1-12.
- GLADMAN, B.J., MIGLIORINI, F., MORBIDELLI, A., ZAPPALA, V., MICHEL, P., CELLINO, A., FROESCHLE, C., LEVISION, H.F., BAILEY, M. and DUNCAN, M.J. 1997. Dynamical lifetimes of objects injected into asteroid belt. *Science*, 277: 197-201.
- GRIEVE, R.A.F. and SHOEMAKER, E.M. 1994. The record of past impacts on Earth. In *Hazards Due to Comets and Asteroids*, University of Arizona Press, pp. 417-462, Tucson.
- HIRAYAMA, K. 1918. Groups of asteroids probably of common origin. *Astronomical Journal*, 31: 185-188.
- IVEZIC, Z., LUPTON, R.H., JURIC, M., TABACHNIK, S., QUINN, T., GUNN, J.E., KNAPP, G.R., ROCKOSI, C.M. and BRINKMANN, J. 2002. Color confirmation of asteroid families. *Astronomical Journal*, 124: 2943-2948.
- KAPLAN, M. and SAYGIN, H. 2012. A dynamic era based time-symmetric block time-step algorithm with parallel implementations. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 64 (3): 45-63.
- KIRKWOOD, D. 1888. *The Asteroids or Minor Planets Between Mars and Jupiter*. J.B. Lippincott, Philadelphia, 70 p.
- KNEZEVIC, Z. 1994. In *Seventy-Five Years of Hirayama Asteroid Families: The Role of Collisions in the Solar System History*. Asteroid proper elements: Past and present, pp. 129-139, ASP Conference Series 63.

- KNEZEVIC, Z., LEMAITRE, A. and MILANI A. 2002. The determination of asteroid proper elements. *Asteroids III*, University of Arizona Press, pp. 603-612, Tucson.
- KNEZEVIC, Z., MILANI, A. 1994. Asteroid proper elements: The big picture. International Astronomical Union, symposium no.160, Dordrecht, 143 p.
- LEMAITRE A., 1993. Proper elements: What are they? *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 56: 103-119.
- LEVISION, H.F. and DUNCAN, M.J. 1994. The long-term dynamical behavior of short period comets. *Icarus*, 108: 18-36.
- LEVISION, H.F. and DUNCAN, M.J. 1997. From the Kuiper belt to Jupiter-family comets: The spatial distribution of ecliptic comets. *Icarus*, 127: 12-32.
- LEVISION, H.F., SHOEMAKER, M. and SHOEMAKER, C.S. 1997. The dispersal of the Trojan asteroid swarm. *Nature*, 385: 42-44.
- MAKINO, J., HUT, P., KAPLAN, M. and SAYGIN, H. 2006. A time-symmetric block time-step algorithm for N-body simulations. *New Astronomy*, 12: 124-133.
- MALHOTRA, R., 1998. Orbital resonances and chaos in the solar system. ASP Conference series, vol. 149, Rio de Janeiro, Brazil.
- MIGLIORINI, F., MICHEL, P., MORBIDELLI, A., NESVORNY, D. and ZAPPALA, V. 1998. Origin of Earth-crossing asteroids: A quantitative simulation. *Science*, 281: 2022-2024.
- MILANI, A. and KNEZEVIC Z. 1994. Asteroid proper elements and the dynamical structure of the asteroid main belt. *Icarus*, 107: 219-254.
- MILANI, A., BOWELL, E., KNEZEVIC, Z., LEMAITRE, A., MORBIDELLI, A. and MUNINONEN, K. 1994. A composite catalogue of asteroid proper elements. *Asteroids, Comets, Meteors*, pp. 467-470, Kluwer.
- MORBIDELLI, A. 2001. Modern integrations of Solar System dynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 30: 89-112.
- MORBIDELLI, A. and GLADMAN, B. 1998. Orbital and temporal distribution of meteorites origination the asteroid belt. *Meteoritics and Planetary Science*, 33: 999-1016.
- MORBIDELLI, A. and HENRARD, J. 1991. Secular resonances in the asteroid belt: theoretical perturbation approach and the problem of their location. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 51: 131-167.

- MORBIDELLI, A., and NESVORNY, D. 1999. Numerous weak resonances drive asteroids toward terrestrial planets orbits. *Icarus*, 139: 295-308.
- MORBIDELLI, A., BOTTKE, J.W.F., FROESCHLE, C. and MICHEL, P. 2002. Origin and evolution of near-Earth objects. Asteroids III, University of Arizona Press, pp. 409-422, Tucson.
- NESVORNY, D. 2012. Nesvorny HCM Asteroid Families V2.0. EAR-A-VARGBDET-5-NESVORNYFAM-V2.0. NASA Planetary Data System.
- NESVORNY, D., BOTTKE, J.W.F., DONES, L. and LEVISION, H.F. 2002. The recent breakup of an asteroid in the main-belt region. *Nature*, 417: 720-722.
- RABINOWITZ, D.L. 1994. The size and shape of the near-earth asteroid belt. *Icarus*, 127: 33-54.
- RABINOWITZ, D.L. 1997a. Are main-belt asteroids a sufficient source for the Earth-approaching asteroids? Part I. Predicted vs. observed orbital distributions. *Icarus*, 111: 364-377.
- RABINOWITZ, D.L. 1997b. Are main-belt asteroids a sufficient source for the Earth-approaching asteroids? Part I. Predicted vs. observed orbital distributions. *Icarus*, 130: 287-295.
- ROIG, F., NESVORNY, D. and FERRAZ-MELLO, S. 2002. Asteroids in the 2:1 resonance with Jupiter: dynamics and size distribution. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 335: 417-431.
- SCHUNOVA, E., GRANVIK, M., JEDICKE, R., GRONCHI, G., WAINSCOAT, R. and ABE, S. 2012. Searching for the first near-Earth object family. *Icarus*, 220: 1050-1063.
- SEKANINA, Z. and CHODAS, P.W. 2012. Comet c/2011 W3 (Lovejoy): Orbit determination, outbursts, disintegration of nucleus, dust-tail morphology and relationship to new cluster of bright sungrazers. *The Astrophysical Journal*, 757: 127-160.
- SHOEMAKER, E.M., SHOEMAKER, C.S. and WOLFE, R.F. 1989. Trojan asteroids: Population, dynamical structure and origin of L4 and L5 swarms. Asteroids II, University of Arizona Press, pp. 487-523, Tucson.
- SUSSMAN, G.J. and WISDOM, J. 1988. Numerical evidence that the motion of Pluto is Chaotic. *Science*, 241: 433.
- VALSECCHI, G.B., CARUSI, A., KNEZEVIC, Z., KRESAK, L. and WILLIAMS J. G. 1989. Identification of asteroid dynamical families. Asteroids II, University of Arizona Press, pp. 368-385, Tucson.

- VOKROUHLICKY, D. 1999. A complete linear model for the Yarkovsky thermal force on spherical asteroid fragments. *Astronomy and Astrophysics*, 344: 362-366.
- WEISSMANN, P.R. 1996. The Oort Cloud. In *Completing the Inventory of the Solar System*, ASP Conference Series 107, Astronomical Society of the Pacific, pp. 265-288, San Fransisco.
- WETHERILL, G.W. 1976. Where do the meteorites come from –A re-evaluation of the Earth-crossing Apollo objects as sources of chondritic meteorites. *Geochimica et Comochimica Acta*, 40: 1297-1317.
- WETHERILL, G.W. 1979. Steady state populations of Apollo-Amor objects. *Icarus*, 37: 96-112.
- WETHERILL, G.W. 1985. Asteroidal source of ordinary chondrites. *Meteoritics and Planetary Science*, 20: 1-22.
- WETHERILL, G.W. 1987. Dynamical relations between asteroids, meteorites and Apollo-Amor objects. *Philosophical Transactions Royal Society of London*, 323: 323-337.
- WETHERILL, G.W. 1988. Where do the Apollo objects come from? *Icarus*, 76: 1-18.
- WILHELMS, D.E. 1993. *To a Rocky Moon, A Geologist's History of Lunar Exploration*. University of Arizona Press, Tucson, 477 p.
- WISDOM, J. 1983. Chaotic behavior and the origin of the 3/1 Kirkwood gap. *Icarus*, 56: 51-74.
- WISDOM, J. and HOLMAN, M. 1991. Symplectic maps for the n-body problem. *Astronomical Journal*, 102: 1528-1538.
- ZAPPALA, V., CELLINO, A., FARINELLA, P. and KNEZEVIC, Z. 1990. Asteroid families I: Identification by hierarchical clustering and reliability assessment. *Astronomical Journal*, 100: 2030-2046.
- ZAPPALA, V., CELLINO, A., FARINELLA, P. and MILANI, A. 1994. Asteroid families II: Extension to unnumbered multiopposition asteroids. *Astronomical Journal*, 107: 772-801.

ÖZGEÇMİŞ



Orhan ERECE 1989 yılında İstanbul'un Beyoğlu ilçesinde doğdu. İlköğretim ve lise öğrenimini Antalya'da, Barbaros İlköğretim Okulu ve Aldemir Atilla Konuk Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2007 yılında, Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü'nde lisans öğrenimine başladı. 2012 yılında mezun oldu ve 2013-2014 öğretim yılının bahar döneminde Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2013 yılının Eylül ayından itibaren TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'nde T100 teleskobu gözlem sorumlusu olarak görev yapmaktadır.