T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

GÜNEŞ SİSTEMİ NESNELERİNİN YILDIZ ÖRTÜLME TEKNİĞİ İLE İNCELENMESİ

Yücel KILIÇ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

OCAK 2023

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜNEŞ SİSTEMİ NESNELERİNİN YILDIZ ÖRTÜLME TEKNİĞİ İLE İNCELENMESİ

Yücel KILIÇ

UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

Bu tez 04/01/2023 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Murat KAPLAN (Danışman)

Prof. Dr. Zeki EKER

Prof. Dr. Birol GÜROL

Prof. Dr. Selçuk BİLİR

Prof. Dr. Volkan BAKIŞ

ÖZET

GÜNEŞ SİSTEMİ NESNELERİNİN YILDIZ ÖRTÜLME TEKNİĞİ İLE İNCELENMESİ

Yücel KILIÇ

Doktora Tezi, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Murat KAPLAN

Eş Danışman: Prof. Dr. Felipe BRAGA-RIBAS

Ocak 2023; 179 sayfa

Güneş sistemindeki küçük gezegenlerin önemi Güneş sisteminin evriminin anlaşılması bakımından her geçen gün artmaktadır. Özellikle gelişen teknoloji ile birlikte yer ve uzay tabanlı teleskoplar ve algılayıcılardaki muazzam ilerlemeler keşfedilen küçük gezegen sayısını hızla artırmaktadır. Bu gelişmeler, hali hazırda ana kuşaktaki asteroitlere olan ilginin yanı sıra, Yer'in potansiyel bir asteroit tehlikesine karşı korunması veya asteroit madenciliği gibi çeşitli uzay görevlerine de konu olan amaçlar doğrultusunda, Yer'e Yakın Geçiş Yapan Asteroitler (YYA)'e olan ilgiyi de büyük ölçüde artırmaktadır. Bununla birlikte, Neptün ötesinde bulunan nesneler üzerinde yapılan araştırmalar da, bu nesnelerin Güneş sisteminin ilk evrelerine dair son derece önemli bilgiler barındırması bakımından araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Bu amaç doğrultusunda, bu tezde genellikle Güneş sisteminde küçük gezegenlerin boyutu, biçimi, atmosferik yapısı, halka ve uydu varlığına ilişkin son derece detaylı bilgilerin ortaya çıkarılabildiği yıldız örtülme (stellar occultation) gözlem yönteminden detaylı olarak bahsedilmiştir. Ayrıca bu gözlem yöntemi ile elde edilmiş verilerin analizi, arşivlenmesi ve görselleştirilmesi ile ilgili Occultation Portal (OP) adında web-tabanlı bir platform geliştirilmiş ve bu platformun işleyişi de ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Son olarak, bu platform üzerinde kampanya gözlemleri gerçekleştirilen bir Neptün Ötesi Nesne[1] olan (28978) Ixion ($2001KX_{76}$)'un 13 Ekim 2020 ve 28 Nisan 2021 tarihli gözlem kampanyaları ilk defa bu çalışma ile detaylı olarak incelenmiş ve fiziksel parametreleri belirlenerek tez içerisinde tartışılmıştır. Ayrıca 13 Ekim 2020 tarihli gözlem verileri analiz edilerek örtülen yıldızın fiziksel çapı elde edilmiş ve bulgularımız önceki çalışmalarla kıyaslanmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Asteroitler, Astronomik arşiv sistemi, Astronomik görüntü işleme, Güneş sistemi, Neptün Ötesi Cisimler, Yıldız örtülmesi

[1] trans-Neptunian object (TNO)

JÜRİ: Doç. Dr. Murat KAPLAN

Prof. Dr. Zeki EKER

Prof. Dr. Birol GÜROL

Prof. Dr. Selçuk BİLİR

Prof. Dr. Volkan BAKIŞ

ABSTRACT

INVESTIGATION OF SOLAR SYSTEM BODIES BY STELLAR OCCULTATION TECHNIQUE

Yücel KILIÇ

PhD Thesis in Space Science and Technologies

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Murat KAPLAN

Co-supervisor: Prof. Dr. Felipe BRAGA-RIBAS

January 2023; 179 pages

The importance of minor planets in the Solar System is increasing day by day in order to understand the evolution of the Solar System. Especially with the developing high technology, the enormous advances in the ground and space-based telescopes and detectors are rapidly increasing the number of discovered asteroids. These developments significantly increase the interest in Near-Earth Asteroids are also the subject of various space missions, such as protecting the Earth from potentially hazardous asteroids or asteroids mining, as well as the current interest in asteroids in the main belt. However, studies on objects beyond Neptune also attract the attention of researchers as these objects contain essential information about the early stages of the Solar System. For this purpose, in this thesis, the stellar occultation observation technique, which can reveal extremely detailed information about the size, shape, atmospheric structure, and existence of rings and satellites of minor planets in the Solar System, is described in detail. A web-based platform called Occultation Portal (OP) has been developed for the analysis, archiving and visualization of the data obtained by this observation technique, and the operation and architecture of this platform are explained in detail. Finally, the observations of (28978) Ixion ($2001KX_{76}$), a Trans-Neptune Object on which campaign observations were made on this platform, dated October 13, 2020, and April 28, 2021, were examined in detail for the first time with this study, and its physical parameters were determined and discussed in the thesis. In addition, the stellar diameter of the occulted star was obtained by analyzing the observation data dated October 13, 2020, and our findings were compared with previous studies.

KEYWORDS: Asteroids, Solar System, Astronomical image processing, Data analysis, Data archiving system, Minor planets, Stellar occultations, trans-Neptunian object

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Murat KAPLAN

Prof. Dr. Zeki EKER

Prof. Dr. Birol GÜROL

Prof. Dr. Selçuk BİLİR

Prof. Dr. Volkan BAKIŞ

ÖN SÖZ

Benim manevî mirasım, bilim ve akıldır.
M. Kemal ATATÜRK
(Giritli 1974)

Asteroit B-612'ye...

Her şey küçük bir çocukken yazları muazzam bir gökyüzüne sahip köyümde yıldızları gözlemekle başladı. "Bu yıldızların hepsinin adını bilen birisi var mıdır?" diye sorardım kendi kendime... Daha sonra gökyüzünde görmüş olduğum bir kuyruklu yıldızın[2] aklımı başımdan aldığını dün gibi hatırlıyorum. Yıllar sonra, TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi (TUG) Bakırlıtepe Yerleşkesi'nde bir sabaha karşı NEOWISE (C/2020 F3) kuyruklu yıldızını boylu boyunca gördüğümde çocukluk heyecanımı tekrar yaşadığımı ve özellikle Güneş sistemi öğeleri üzerine araştırmalar yapıyor olmayı tercih etmekle ne kadar doğru bir karar verdiğimi bir kez daha anlamıştım. Elbette bu alana yönelmemde bu anıların etkisi yadsınamaz, fakat bu yolda bana var gücüyle destek olan gerçek bilim insanlarına ve öğretmenlerime teşekkürü borç bilirim.

2011 yılında değerli hocam Prof. Dr. Birol Gürol'un TUG'da düzenlenen *Astrometry Now and in the Future* yaz okulu ve çalıştayına katılımımı desteklemesi ve beni göndermesi sayesinde, akademik hayatımdaki çalışma alanımı belirleyen iki değerli bilim insanı ile tanışmış oldum: Doç. Dr. Murat Kaplan ve Prof. Dr. Felipe Braga-Ribas. Ülkemizdeki Güneş sistemi araştırmaları için son derece önemli ve tarihi bir niteliği olan bu toplantıyı organize eden ve sonrasında kendisi ile de tanışma fırsatı bulduğum ve her defasında Güneş sistemi üzerine yaptığımız çalışmaları önemseyen ve destekleyen değerli hocam Prof. Dr. Zeki Eker'in de bunda katkısı büyüktür.

2015'te başladığım doktora öğrenim hayatım boyunca, Güneş sistemi ve asteroitler üzerine her zaman heyecanla birlikte çalıştığımız; başta danışman hocam Doç. Dr. Murat Kaplan'a ve değerli mesai arkadaşım Orhan Erece'ye bilimsel heyecanımın ve motivasyonumun ana kaynağı oldukları için sonsuz teşekkür ederim.

Bu doktora tezinin ortaya çıkmasında en büyük desteği sağlayan eş-danışman hocam Prof. Dr. Felipe Braga-Ribas'a ve çalışma arkadaşlarına teşekkürümü anlayabilmeleri adına İngilizce devam etmek istiyorum. Throughout this thesis, I cannot thank Prezado Professor Felipe enough for spending time with great patience and detailed explanations for my endless questions whenever I requested. I would also like to thank Prof. Dr Bruno Sicardy, who invited me to Paris Observatory/LESIA within the ERC Lucky Star project (H2020 2014-2021 ERC Grant Agreement no. 669416) and provided outstanding contributions to this thesis and me in a beautiful working environment. I also want to thank Dr Damya Souami, Dr Bruno Eduardo Morgado, Dr Altair Ramos Gomes-Júnior, Dr Gustavo Benedetti Rossi, and Dr Flavia L. Rommel for their support whenever I had difficulties analysing and interpreting scientific results. In

[2]Muhtemelen Hale-Bopp (C/1995 O1)

addition, I sincerely thank International Occultation Timing Association (IOTA) members and amateur or professional astronomers who use the Occultation Portal worldwide to support our stellar occultation campaigns.

Bu tez kapsamında, araştırmalarımı yürütmek amacıyla Paris'te bulunduğum sırada bana yurt özlemini hissettirmeyen Eldivaz Türkoğlu ve Volkan Yıldız'a da teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Her türlü zorluğa rağmen, bilimsel çalışmalarıma devam edebilmem için elde olan tüm imkanları seferber eden başta Murat Dindar ve Dr. Tuncay Özışık olmak üzere, mensubu olmaktan onur duyduğum TUG'a ve her bir çalışma arkadaşıma ayrı ayrı teşekkür ederim. Bu tezin önemli çıktılarından biri olan ve TUG'un tanıtımına da büyük katkı sağlayan Occultation Portal onların desteği olmadan asla kurulamaz ve sürdürülemezdi.

Tüm bu araştırma süresince ne zaman biri ile derinlemesine tartışmak istesem orada olan can dostum Mohammad Shameoni Niaei iyi ki varsın!

Bana olan inançları ile araştırma motivasyonumu sürekli canlı tutan güzel dostlarım Dr. Ekrem Kandemir ve Dr. Fulya Aydın Kandemir'e, tez yazım sürecim boyunca tecrübelerini benimle paylaşarak en az bürokratik işlemle uğraşmamı sağlayan Dr. Gökhan Yücel ve Arş. Gör. Dr. Efecan Tunç'a, her daim evrak işlerinde yardımıma koşan ve köprü olan değerli dostum Zahide Terzioğlu'na ne kadar teşekkür etsem azdır. Ayrıca tezin son haline gelmesinde büyük katkılar sunan juri üyelerine de teşekkür etmek isterim.

Bu tezin ortaya konulmasında en büyük pay eşim Sıla ve oğlum Feza'ya aittir. Onların büyük fedakarlıkları sayesinde bu denli güzel bir çalışmanın ortaya konulduğu inancındayım. Onlara ayıramadığım ve son derece değerli olan bu vakitin, insanlığın bilimsel birikimine katkı sağlamak için kullanıldığı inancı dışında başka bir teselli bulamamaktayım.

Annem, anneannem, babam ve Aysel ablam... Her türlü kararımda bana inandığınız ve desteklediğiniz için size minnetarım. Başta tüm Dünya'ya faydalı olmayı amaçlayan iyi bir insan ve sonra gök bilimci olabildiysem ne mutlu bana... Hepsi sizlerin sayesindedir!

Son olarak, Güneş sistemi nesnelerinin fiziksel özelliklerini ortaya koyabilmek amacıyla en güçlü ve etkili yöntemlerden biri olan yıldız örtülme tekniği ilk defa detaylı olarak ülkemizde bu tez çalışması ile konu edilmiştir. Ayrıca yine bu tez çalışması ile bu alanda geliştirilen ilk web-tabanlı arşiv, analiz ve görselleştirme platformu olan Occultation Portal detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Tüm bunların yanı sıra Güneş sistemi nesnelerinin yıldız örtülme gözlemleri tarihi ile birlikte, büyük bir TNO olan (28978) Ixion'un da nasıl bir şekile sahip olduğu ilk defa bu tez ile ortaya konulmuş ve her bir süreç ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Bu yönüyle de bu tezin yıldız örtülme araştırmalarında bir başvuru kaynağı olacağını ummaktayız.

Bu tez LaTeX ile yazılmıştır.

İÇİNDEKİLER

ÖZET i
ABSTRACT iii
ÖN SÖZ v
AKADEMİK BEYAN ix
SİMGELER VE KISALTMALAR x
ŞEKİLLER DİZİNİ xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ xxi
1. GİRİŞ 1
2. KAYNAK TARAMASI 6
3. MATERYAL VE METOT 44
3.1. Yıldız Örtülme Gözlemleri İçin Web-tabanlı Bir Platform 44
3.1.1. Kullanıcı hizmeti 46
3.1.2. Lucky Star tahmin hizmeti 47
3.1.3. Lucky Star tahmin hizmeti API 48
3.1.4. Veri hizmeti 49
3.1.5. Veri analizi ve indirgeme hizmeti 53
3.1.6. Bildirim hizmeti 61
3.1.7. Yedekleme hizmeti 62
3.2. Yıldız Örtülme Gözlemleri ile Fiziksel Özellik Belirleme 62
3.2.1. SORA: Yıldız örtülme gözlemleri indirgeme ve analiz yazılımı 62
3.2.2. Gözlemlerin tahmini 62
3.2.3. Işık eğrisi analizi 67
3.2.4. Kirişlerin birleştirilmesi ve şekil analizi 73
3.2.5. (28978) Ixion'un yıldız örtülme gözlemleri 82
3.2.5.1. 13 Ekim 2020 gözlemleri 83
3.2.5.2. 28 Nisan 2021 gözlemleri 87
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 91
4.1. Occultation Portal 91
4.2. (28978) Ixion 100
4.2.1. 13 Ekim 2020 gözlemlerinin analizleri ve bulguları 100
4.2.2. 28 Nisan 2021 gözlemlerinin analizleri ve bulguları 116
4.2.3. (28978) Ixion'un 3-Boyutlu şekli üzerine 127

5. SONUÇLAR 130
6. KAYNAKLAR 133
7. EKLER 150
ÖZ GEÇMİŞ

AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum "Güneş Sistemi Nesnelerinin Yıldız Örtülme Tekniği İle İncelenmesi" adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

4 Ocak 2023

Yücel KILIÇ

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a	: Yarı-büyük eksen uzunluğu
Å	: Angstrom
AB	: Astronomi Birimi
α	: Sağ açıklık
b	: Yarı-küçük eksen uzunluğu
χ^2	: Ki kare
D_0	: GSN uzaklığı
$D_\star$	: Yıldızın uzaklığı
d	: Uzaklık
$^\circ$	: Derece
δ	: Dik açıklık
E	: Doğu
e	: Yörünge dışmerkezliği
ϵ	: Görünür basıklık
f	: Fresnel ölçeği
G	: Kütleçekim sabiti
H	: Küçük gezegen mutlak parlaklığı
i	: Yörünge eğim açısı
km	: Kilometre
kpc	: Kiloparsek
λ	: Dalgaboyu
mas	: Mili yay saniyesi
^{m}	: Kadir
m	: Metre
$\mathrm{M}_\odot$	: Güneş kütlesi
M	: Ortalama ayrıklık
mm	: Milimetre
N	: Kuzey
ν	: Gerçek ayrıklık
ω	: Enberi argümanı
Ω	: Çıkış düğümünün boylamı
P	: Yörünge dönemi

pc	: Parsek
px	: Piksel
p_ν	: Geometrik albedo
q	: Enberi konumu
Q	: Enöte konumu
R_{eqv}	: Eş değer yarıçap
$r_\star$	: Yıldızın görünür çapı
$\mathrm{R}_\odot$	: Güneş yarıçapı
S	: Güney
s	: Saniye
σ	: Standart sapma
t_{exp}	: Poz süresi
V_S	: Gölge hızı
W	: Batı
x_c, y_c	: Nesne gölgesinin teğet düzlem üzerindeki merkez koordinatı
ξ, η	: Ortografik projeksiyon koordinatları

Kısaltmalar

2MASS	: Two Micron All Sky Survey
AAV	: Astro Analogue Video
ACROSS	: Asteroid Collaborative Research via Occultation Systematic Survey
ADV	: Astro Digital Video Data Format
API	: Application Programming Interface
ASCII	: American Standard Code for Information Interchange
AVI	: Audio Video Interleave
CA	: Closest Approach
CCD	: Charge-coupled device
CCKBO	: Cold Classical Kuiper Belt Object
CMOS	: Complementary metal-oxide-semiconductor
CNEOS	: Center for Near-Earth Object Studies
DART	: Double Asteroid Redirection Test
DES	: Deep Ecliptic Survey
DESTINY+	: Deep Space Exploration Technology Demonstrator
ERC	: European Research Council
ESA	: European Space Agency
ESO	: European Southern Observatory
FITS	: Flexible Image Transport System
Gaia EDR3	: *Gaia* Early Data Release 3
GNU GPLv3	: The GNU General Public License v3.0
GPS	: Global Positioning System
GSN	: Güneş sistemi Nesnesi
IOTA	: International Occultation Timing Association
IOTA-VTI	: IOTA Video Time Inserter
IRAF	: Image Reduction and Analysis Facility
IVOA	: International Virtual Observatory Alliance
J2000	: J2000.0 zamanındaki Konvansiyonel Gök Referans Sistemi
JAXA	: Japan Aerospace Exploration Agency
JPL	: Jet Propulsion Laboratory
JS9	: astronomical image display everywhere
LC	: Işık eğrisi
LIADA	: Liga Iberoamericana de Astronomia
LORRI	: LOng Range Reconnaissance Imager
LSST	: Large Synoptic Survey Telescope
MPC	: Minor Planet Center
MTD	: Mean Tolerable Downtime

NACO	: Nasmyth Adaptive Optics System - Near-Infrared Imager and Spectrograph
NAS	: Network Attached Storage
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
NEAs	: Near-Earth Asteroids
NIMA	: Numerical Integration of the Motion of an Asteroid
NTT	: New Technology Telescope
OCR	: Optical Character Recognition
OP	: Occultation Portal
OW Cloud	: Occult Watcher Cloud
PA	: Positional Angle
PTA	: Potansiyel Tehlikeli Asteroitler
RECON	: Research and Education Collaborative Occultation Network
RMS	: Root mean square
ROIBOX	: Region of Interest Box
SMTP	: Simple Mail Transfer Protocol
SNR	: Signal-to-noise ratio
SORA	: Stellar Occultation Reduction and Analysis
TNOs	: Trans-Neptunian Objects
TUG	: TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi
Tycho-2	: The Tycho-2 Catalogue
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
ULAKBİM	: Ulusal Akademik Ağ ve Bilgi Merkezi
USNO	: United States Naval Observatory
UT	: Universal Time
VLT	: Very Large Telescope
YYA	: Yer'e Yakın Asteroitler

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Bilinen YYA'ların zamana bağlı olarak kümülatif keşif sayıları (Chamberlin 2022) 2

Şekil 1.2. Önceki kataloglar ile *Gaia*'nın astrometrik duyarlılıklarının karşılaştırılması (ESA) 3

Şekil 1.3. Bir yıldız örtülme olayının geometrisi 4

Şekil 2.1. ϵ Gem'in Mars tarafından örtülme esnasında 4500 Å'de elde edilmiş ışık eğrisi. Her bir nokta 1 saniyelik entegrasyon zamanını ifade etmektedir. Ortadaki parlama ise gezegen atmosferinden geçen yıldız ışığının simetrik olarak kırılması ile oluşmuştur (Elliot vd. 1977) 7

Şekil 2.2. Yıllara göre [1958 - 2022] gözlenen pozitif asteroit yıldız örtülme gözlemleri. Grafik üzerinde 2018 yılında ciddi bir artış gözlenmektedir. Bu *Gaia DR2* kataloğu ile yıldız örtülme gözlemlerinde daha iyi bir tahmin yapıldığını göstermektedir (Ferreira vd. 2022). Özellikle *Gaia* EDR3 ile beraber gelen başarılı yıldız örtülme sayısındaki sıçrayış *Gaia*'nın sonraki veri sürümlerinde de görüleceğini göstermektedir. Veriler *Occult* yazılımından alınarak görselleştirilmiştir 9

Şekil 2.3. Bir asteroidin yörüngesini belirlemek için kullanılan yer tabanlı teleskop verileri ve *Gaia* uydusu verileri. Bu verilerden arşiv verileri mavi, *Gaia* DR2 verileri kırmızı ile gösterilmektedir. Tüm *Gaia* DR2 (Data Release 2) veri noktaları, önceki verilerden yaklaşık 300 kat daha küçük ve kırmızı ile belirtilen 1 mas'den küçük bir daireye dağılmıştır. Bu fark, DR2'nin getirdiği doğrulukta tipik, dramatik bir artışı göstermektedir (Gaia Collaboration vd. 2018) 12

Şekil 2.4. *Gaia* EDR3 kataloğundaki 585 milyon kaynak için elde edilmiş 5-parametreli astrometrik çözüm özeti (Lindegren, L. vd. 2021) 12

Şekil 2.5. *Occult* yazılımı veri tabanında kayıtlı olan pozitif yıldız örtülme gözlemlerinin parlaklık aralığına göre sınıflandırılmış hali 13

Şekil 2.6. **a)** *Occult* veri tabanında kayıtlı, aynı örtülme olayı için farklı konumlardan 10 ve üzerinde pozitif raporlanmış gözleme sahip (kiriş sayısı) olay sayısının yıllara göre değişimi; **b)** 1958-2022 yılları arasında raporlanan pozitif yıldız örtülme gözlemlerinin gerçekleşen kiriş sayısına göre sınıflandırılması 14

Şekil 2.7. İkili asteroit (90) Antiope'nin 19 Temmuz 2011 tarihinde ABD'de gerçekleştirilen bir yıldız örtülme gözlemi. Kirişler arasındaki ortalama mesafe 1 km (Herald vd. 2020) 15

Şekil 2.8. İkili asteroit (90) Antiope'nin 2004 yılında Very Large Telescope (VLT) ile yapılmış gözlemleri (ESO) 17

Şekil 2.9. Chariklo ve halka sistemi (Braga-Ribas vd. 2014) 18

Şekil 2.10. Chariklo sisteminin yıldız örtülme gözlemi sonucunda elde edilen ışık eğrisi (Braga-Ribas vd. 2014) 19

Şekil 2.11. Haumea yıldız örtülme gözleminde örtülme olayını gözlemleyen istasyonları gösteren harita (Yeşil noktalar: Pozitif, Kırmızı noktalar: Negatif) (Ortiz vd. 2017) 20

Şekil 2.12. Haumea yıldız örtülme örtülme gözleminden elde edilen ışık eğrileri (Ortiz vd. 2017) 21

Şekil 2.13. Haumea ve halka geometrisi (Ortiz vd. 2017) 22

Şekil 2.14. Arrokoth'un biçim modeli ve örtülme kirişlerinin karşılaştırılması (Buie vd. 2020) 23

Şekil 2.15. 2002 MS_4 yıldız örtülme kampanyasına katılan istasyonların konumları (F. L. Rommel) 24

Şekil 2.16. 2002 MS_4'ün gözlemler sonucunda oluşturulan şekli (Rommel vd. 2021) 25

Şekil 2.17. 2008OG19 nesnesi için NIMA ve diğer efemeris hesaplama yöntemlerinin karşılaştırılması (Desmars vd. 2015) 26

Şekil 2.18. (3200) Phaethon ilk kampanya gözleminden sonra elde edilen iz düşümsel şekli (Dunham vd. 2019) 27

Şekil 2.19. (99942) Apophis yıldız örtülme gözlemlerinin Yarkovsky ivmesinin iyileştirmesine katkıda bulunduğunu gösteren 29/03/2021 tarihli ESA'nın haftanın görseli olarak seçilmiş grafik (Tanga vd. 2021) 30

Şekil 2.20. 18 Ekim 2022 tarihinde Granada, İspanya'da kaydedilen Didymos asteroidinin yıldız örtülme gözlemi (Sanchez 2022) 31

Şekil 2.21. Yıldız örtülme gözlemleri yapılan nesnelerin **a)** yarı-büyük eksen uzunlukları - dışmerkezlik; **b)** yarı-büyük eksen uzunlukları - yörünge eğim açısı grafikleri (Braga-Ribas vd. 2019) 35

Şekil 2.22. Büyük plutinolar ve Ixion (2002 KX_{12} nesnesi referans olması için konulmuştur. *Plutino* değildir) (Eurocommuter 2022) 36

Şekil 2.23. 5 Şubat 2006 tarihinde Hubble Uzay Teleskobu ile alınmış Ixion'un görüntüsü (Hubble Uzay Teleskobu/Michael E. Brown) 37

Şekil 2.24. Ixion'un (yeşil) ve Plüton'un (mavi) karşılaştırmalı yörüngeleri. Her iki cisim için de enberi konumu (q) ve enöte konumu (Q) üzerindeki tarihleri yaklaşık olarak gösterilmiştir. Görsel JPL'nin $Orbit\ Viewer$ aracı temel alınarak oluşturulmuştur 40

Şekil 2.25. Bazı TNO'lar için Verbiscer vd. (2022)'nin elde ettiği Yörünge faz açısı (°) - normalize parlaklık eğrileri (Verbiscer vd. 2022) 42

Şekil 3.1. Occultation Portal'ın mimarisi (Kilic vd. 2022) 45

Şekil 3.2. Ağustos 2020 - Ekim 2022 tarihleri arasında OP üzerinden duyurulan nesnelerin dinamik sınıflarının istatistiği. Grafikte %1'in altında katkı sağlayan sınıflar gösterilmemiştir (Kilic vd. 2022) 47

Şekil 3.3. curl ile Lucky Star tahminlerine erişim komutu (Kilic vd. 2022) 49

Şekil 3.4. OP kullanıcılarının konum ekleme alanı 50

Şekil 3.5. 8 Ağustos 2020'de Ixion gözlem kampanyasına veri sağlayan bir gözlemcinin veri yükleme ve rapor sayfası (Kilic vd. 2022) 51

Şekil 3.6. Bir kampanya gözleminde raporlanmış tüm gözlemlere ait bilgilerin OP üzerinde özetlenmiş hali (Kilic vd. 2022) 52

Şekil 3.7. 20 Mayıs 2021 tarihinde Paul D. Maley tarafından Ixion kampanya gözlemi için OP'ye yüklenmiş AVI formatında bir gözlem verisi görseli 55

Şekil 3.8. OP Analiz sekmesinin bir görünümü 56

Şekil 3.9. OP Analiz sekmesi ışıkölçüm parametreleri girdileri 58

Şekil 3.10. OP'de bir gözlem verisinin ışık eğrisinin oluşturulduğuna dair sistem bildirimi 59

Şekil 3.11. Işıkölçümü yapılan *ROIBOX* bölgeleri 61

Şekil 3.12. Ixion'un **a)** NIMAv12 efemerisi ile hesaplanan sağ açıklık (α) ve dik açıklıklarındaki (δ) artıklar. Grafikteki renkler, fit işleminden yaysaniyesi biriminde elde edilen ve ağırlık olarak kullanılan duyarlılığı belirtmektedir; **b)** NIMAv12 ile JPL18 efemerislerinin zamana bağlı farkları. Sağ açıklık ($\cos\delta$) ile ağırlıklandırılmıştır. Gri alan ise NIMA efemerisindeki 1-σ değerindeki belirsizliği belirtmektedir. Yeşil noktalar DES gözlemlerini belirtmektedir (Desmars 2022). 64

Şekil 3.13. Bir örtülme olayı geometrisi (Gomes-Júnior vd. 2022) 66

Şekil 3.14. λ= 700 nm için Fresnel kırınımı dikkate alınarak oluşturulmuş 2-Boyutlu model ve ışık eğrisi modelleri **a)** 2B Fresnel kırınım modeli; **b)** Simüle edilmiş ışık eğrileri (Gomes-Júnior vd. 2022) 68

Şekil 3.15. SORA ile merkezi bir kiriş için farklı parametrelerle oluşturulmuş bazı ışık eğrisi modelleri (Gomes-Júnior vd. 2022) 70

Şekil 3.16. Yaklaşık 700 km çapına sahip bir GSN'nin yıldız örtülme gözlemleri sonrası oluşturulmuş kirişleri ve elips fitleri 74

Şekil 3.17. 13 Ekim 2020 tarihli Ixion kaynaklı örtülme gözleminde gözlemcilerin konumları ve rapor durumları (OP'den alınmıştır) 84

Şekil 3.18. 28 Nisan 2021 tarihli Ixion kaynaklı örtülme gözleminde gözlemcilerin konumları ve rapor durumları (OP'den alınmıştır) 88

Şekil 4.1. Ağustos 2020 ila Ekim 2022 arasında OP'de yürütülen yıldız örtülme kampanya gözlemlerinin genel istatistiği 91

Şekil 4.2. Ağustos 2020 ila Ekim 2022 arasında OP'de kampanyaları yürütülen GSN'lerin dinamik sınıflarının istatistikleri. %0.8'den küçük olan dinamik sınıflar gösterilmemiştir 92

Şekil 4.3. 25 Ekim itibarıyla OP gözlemcilerinin raporladıkları toplam 493 adet gözlem konumunun (kırmızı noktalar) Dünya haritası üzerindeki dağılımı 94

Şekil 4.4. 25 Ekim itibarıyla OP gözlemcilerinin ülkelere göre dağılımı. %1'den küçük katkısı olan ülkeler gösterilmemiştir 95

Şekil 4.5. 25 Ekim itibarıyla OP üzerinde kayıtlı teleskop açıklıklarının dağılımı . 96

Şekil 4.6. 25 Ekim itibarıyla OP üzerinde düzenlenen kampanyalara parlaklık düzeyinde katılım dağılımı 97

Şekil 4.7. 25 Ekim itibarıyla OP'de kayıtlı olan kameraların sensör türüne göre dağılımı 98

Şekil 4.8. *Veri analiz ve indirgeme hizmeti* ile *photutils* ve *PyMovie*'nin fotometrik indirgeme sonuçlarının kıyaslanması (Kilic vd. 2022) 99

Şekil 4.9. OP sunucusunun 25 Ekim 2022 itibarıyla uptime/downtime durumu. Sunucu adı ve kullanıcı adı güvenlik amacıyla gizlenmiştir 100

Şekil 4.10. 13 Ekim 2020 tarihli Ixion'un Scottsdale ışık eğrisi üzerinde göreli yıldız çapı tarama işlemi 102

Şekil 4.11. 13 Ekim 2020 tarihli Ixion gözlemlerindeki her bir kirişin ışık eğrisinden elde edilmiş yıldız görünür çapları 103

Şekil 4.12. 13 Ekim 2020 Running Springs ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model 106

Şekil 4.13. 13 Ekim 2020 TiMo ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model 107

Şekil 4.14. 13 Ekim 2020 Glendale ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model . . . 107

Şekil 4.15. 13 Ekim 2020 Carefree ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model . . . 108

Şekil 4.16. 13 Ekim 2020 Scottsdale ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model . . 108

Şekil 4.17. 13 Ekim 2020 Fountain Hills ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model 109

Şekil 4.18. 13 Ekim 2020 Tempe ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model 109

Şekil 4.19. 13 Ekim 2020 Tucson ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model 110

Şekil 4.20. 13 Ekim 2020 Gardnerville ışık eğrisi 110

Şekil 4.21. 13 Ekim 2020 Clear Lake Shores ışık eğrisi 111

Şekil 4.22. Işık eğrisi analizlerinden sonra elde edilmiş giriş ve çıkış zamanları ile çizdirilmiş Ixion gövdesi 112

Şekil 4.23. 13 Ekim 2020 tarihli tüm kiriş giriş ve çıkış zamanlarına yapılmış elips fitleri 114

Şekil 4.24. Yapılan elips fiti üzerindeki gölge dikine hızlarının radyal dispersiyonları 115

Şekil 4.25. 13 Ekim 2020 tarihli Ixion kaynaklı yıldız örtülme gözlemine Levine vd. (2021)'nin LDT ve TiMo (Mars Hill/Lowell Gözlemevi) kirişlerine yaptığı çembersel fit 115

Şekil 4.26. 28 Nisan 2021 *Prompt6* ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model . . . 118

Şekil 4.27. 28 Nisan 2021 *CTIO One-Meter* ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model 119

Şekil 4.28. 28 Nisan 2021 *CTIO One-Meter* ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model 119

Şekil 4.29. 28 Nisan 2021 *La Canelilla* ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model . 120

Şekil 4.30. 28 Nisan 2021 *Reconquista* ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model . 120

Şekil 4.31. 28 Nisan 2021 *ASH-Cerro Burek* ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model 121

Şekil 4.32. 28 Nisan 2021 *TRAPPIST-South* ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model 122

Şekil 4.33. 28 Nisan 2021 *Cruz del Sur* ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model . 122

Şekil 4.34. 28 Nisan 2021 *A.A.A.A* ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model . . . 123

Şekil 4.35. 28 Nisan 2021 *Observatorio El Catalejo* ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model 124

Şekil 4.36. 28 Nisan 2021 *Observatorio Los Cabezones* ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model 124

Şekil 4.37. Işık eğrisi analizlerinden sonra elde edilmiş giriş ve çıkış zamanları ile çizdirilmiş Ixion gövdesi 125

Şekil 4.38. 28 Nisan 2021 tarihli tüm kiriş giriş ve çıkış zamanlarına yapılmış elips fitleri 126

Şekil 4.39. 28 Nisan 2021 tarihli kirişlere yapılan elips fiti üzerindeki gölge dikine hızlarının radyal dispersiyonları 127

Şekil 4.40. Küresel denge şekli ($a = b = c$) 128

Şekil 4.41. MacLaurin küresi ($a = b > c$) 128

Şekil 4.42. Jacobi elipsoidi ($a > b > c$) 129

Şekil 7.1. Occultation Portal anasayfası 150

Şekil 7.2. Occultation Portal ışık eğrisi görüntüleme sayfası 151

Şekil 7.3. **(a)** 17 Ağustos 2020 tarihli Ixion'un öngörülen örtülme hattı haritası (NIMAv8); **(b)** 17 Ağustos 2020 tarihli Ixion'un örteceği öngörülen yıldız (Aladin Sky Atlas, PanSTARRS DR1 z) 152

Şekil 7.4. **(a)** 13 Ekim 2020 tarihli Ixion'un öngörülen örtülme hattı haritası (NIMAv10); **(b)** 13 Ekim 2020 tarihli Ixion'un örteceği öngörülen yıldız (Aladin Sky Atlas, PanSTARRS DR1 z) 153

Şekil 7.5. **(a)** 28 Nisan 2021 tarihli Ixion'un öngörülen örtülme hattı haritası (NIMAv10); **(b)** 28 Nisan 2021 tarihli Ixion'un örteceği öngörülen yıldız (Aladin Sky Atlas, PanSTARRS DR1 z) 154

Şekil 7.6. **(a)** 20 Mayıs 2021 tarihli Ixion'un öngörülen örtülme hattı haritası (NIMAv11); **(b)** 20 Mayıs 2021 tarihli Ixion'un örteceği öngörülen yıldız (Aladin Sky Atlas, PanSTARRS DR1 z) 155

Şekil 7.7. **(a)** 17 Ağustos 2021 tarihli Ixion'un öngörülen örtülme hattı haritası (NIMAv11); **(b)** 17 Ağustos 2021 tarihli Ixion'un örteceği öngörülen yıldız (Aladin Sky Atlas, PanSTARRS DR1 z) 156

Şekil 7.8. **(a)** 2 Haziran 2022 tarihli Ixion'un öngörülen örtülme hattı haritası (NIMAv11); **(b)** 2 Haziran 2022 tarihli Ixion'un örteceği öngörülen yıldız (Aladin Sky Atlas, PanSTARRS DR1 z) 157

Şekil 7.9. **(a)** 20 Haziran 2022 tarihli Ixion'un öngörülen örtülme hattı haritası (NIMAv11); **(b)** 20 Haziran 2022 tarihli Ixion'un örteceği öngörülen yıldız (Aladin Sky Atlas, PanSTARRS DR1 z) 158

Şekil 7.10. (28978) Ixion 13 Ekim 2020 gözlemi *Running Springs* OP fotometrik sonuç sayfası (**Pozitif**) 159

Şekil 7.11. (28978) Ixion 13 Ekim 2020 gözlemi *TiMo/Lowell Gözlemevi* OP fotometrik sonuç sayfası (**Pozitif**) 160

Şekil 7.12. (28978) Ixion 13 Ekim 2020 gözlemi *Glendale* OP fotometrik sonuç sayfası (**Pozitif**) 161

Şekil 7.13. (28978) Ixion 13 Ekim 2020 gözlemi *Carefree* OP fotometrik sonuç sayfası (**Pozitif**) 162

Şekil 7.14. (28978) Ixion 13 Ekim 2020 gözlemi *Scottsdale* OP fotometrik sonuç sayfası (**Pozitif**) 163

Şekil 7.15. (28978) Ixion 13 Ekim 2020 gözlemi *Fountain Hills* OP fotometrik sonuç sayfası (**Pozitif**) 164

Şekil 7.16. (28978) Ixion 13 Ekim 2020 gözlemi *Tempe* OP fotometrik sonuç sayfası (**Pozitif**) 165

Şekil 7.17. (28978) Ixion 13 Ekim 2020 gözlemi *Tucson* OP fotometrik sonuç sayfası (**Pozitif**) 166

Şekil 7.18. (28978) Ixion 13 Ekim 2020 gözlemi *Gardnerville* OP fotometrik sonuç sayfası (**Negatif**) 167

Şekil 7.19. (28978) Ixion 13 Ekim 2020 gözlemi *Clear Lake Shores* OP fotometrik sonuç sayfası (**Negatif**) 168

Şekil 7.20. (28978) Ixion 28 Nisan 2021 gözlemi *Prompt6* OP fotometrik sonuç sayfası (**Pozitif**) 169

Şekil 7.21. (28978) Ixion 28 Nisan 2021 gözlemi *CTIO One-Meter* OP fotometrik sonuç sayfası (**Pozitif**) 170

Şekil 7.22. (28978) Ixion 28 Nisan 2021 gözlemi *Observatorio do Pico dos Dias* OP fotometrik sonuç sayfası (**Pozitif**) 171

Şekil 7.23. (28978) Ixion 28 Nisan 2021 gözlemi *La Canelilla* OP fotometrik sonuç sayfası (**Pozitif**) 172

Şekil 7.24. (28978) Ixion 28 Nisan 2021 gözlemi *Reconquista* OP fotometrik sonuç sayfası (**Pozitif**) 173

Şekil 7.25. (28978) Ixion 28 Nisan 2021 gözlemi *ASH-Cerro Burek* OP fotometrik sonuç sayfası (**Pozitif**) 174

Şekil 7.26. (28978) Ixion 28 Nisan 2021 gözlemi *TRAPPIST-South* OP fotometrik sonuç sayfası (**Negatif**) 175

Şekil 7.27. (28978) Ixion 28 Nisan 2021 gözlemi *Cruz del Sur* OP fotometrik sonuç sayfası (**Negatif**) 176

Şekil 7.28. (28978) Ixion 28 Nisan 2021 gözlemi *A.A.A.A* OP fotometrik sonuç sayfası (**Negatif**) 177

Şekil 7.29. (28978) Ixion 28 Nisan 2021 gözlemi *Observatorio El Catalejo* OP fotometrik sonuç sayfası (**Negatif**) 178

Şekil 7.30. (28978) Ixion 28 Nisan 2021 gözlemi *Observatorio Los Cabezones* OP fotometrik sonuç sayfası (**Negatif**) 179

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 21. Tarihsel asteroit yıldız örtülme gözlemleri (Maley 1982). Maley (1982) çalışmasındaki bazı referanslar düzeltilmiştir 8

Çizelge 22. *Occult* veri tabanında bulunan tüm zamanların asteroit örtülme olayları istatistiği 10

Çizelge 23. Ixion'un farklı araştırmalardan elde edilmiş çapları 38

Çizelge 24. Ixion'un NIMA v12 (Desmars vd. 2015) ile elde edilmiş yörünge parametreleri ve efemeris bilgileri 39

Çizelge 25. Ixion'a ait genel bilgiler 41

Çizelge 31. Kullanıcı gruplarının OP hizmetlerine erişim yetkileri ve seviyeleri . 46

Çizelge 32. Ixion'un NIMA v12 (Desmars vd. 2015) ile elde edilmiş efemeris kalitesinin zamana bağlı değişimi 65

Çizelge 33. Ixion'un Occultation Portal üzerinde kayıtlı yıldız örtülme kampanya gözlemleri. Vurgulanan satırlar analizlerde kullanılmıştır. 83

Çizelge 34. 13 Ekim 2020 tarihli örtülme bilgileri 85

Çizelge 35. 13 Ekim 2020 Ixion gözlemleri OP kayıtları 86

Çizelge 36. 28 Nisan 2021 tarihli örtülme bilgileri 87

Çizelge 37. 28 Nisan 2021 Ixion gözlemleri OP kayıtları 89

Çizelge 41. Ixion'un 13 Ekim 2022 tarihli ışık eğrisi analizi sonucunda elde edilmiş örtülme giriş çıkış zamanları 105

Çizelge 42. Tüm kirişlerden alınan giriş ve çıkış zamanlarına yapılan en iyi elips fiti sonucu Ixion'un fiziksel parametreleri 113

Çizelge 43. Ixion'un 28 Nisan 2020 tarihli ışık eğrisi analizi sonucunda elde edilmiş örtülme giriş çıkış zamanları 117

Çizelge 44. Tüm kirişlerden alınan giriş ve çıkış zamanlarına yapılan en iyi elips fiti sonucu Ixion'un fiziksel parametreleri 126

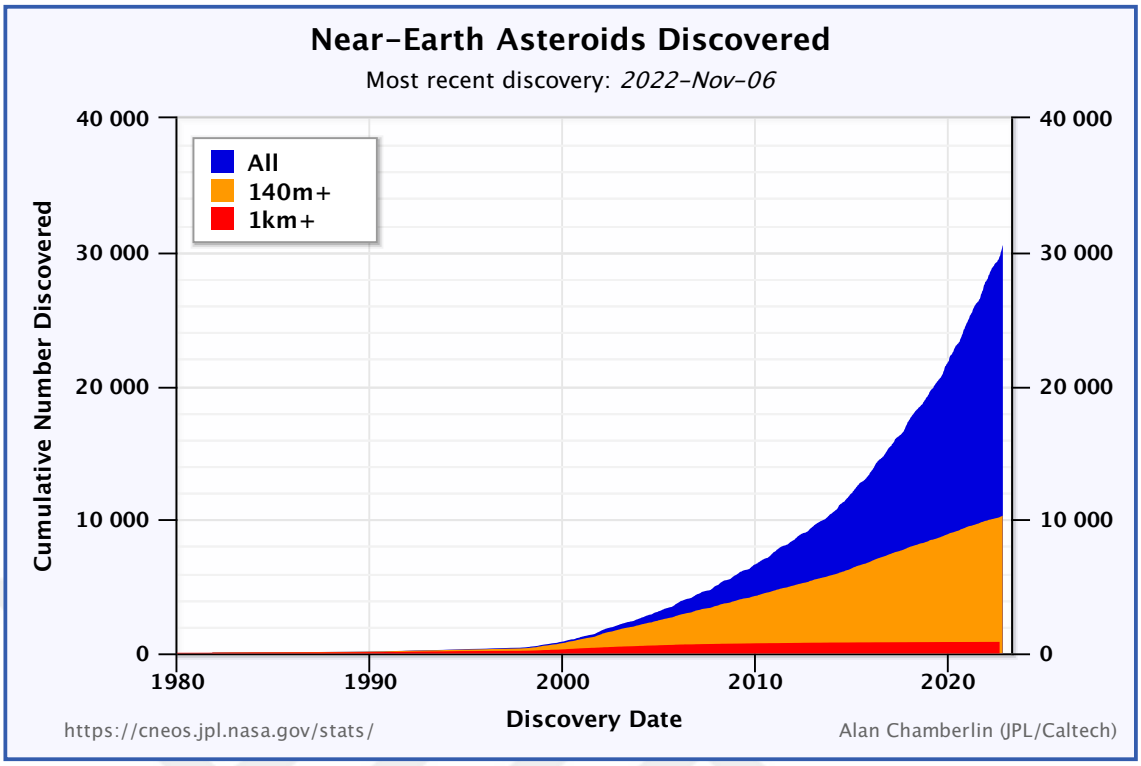
1. GİRİŞ

İnsanlığın bilişsel devrimi (Harari 2015) ile birlikte gökyüzünü anlama ve anlamlandırma çabaları sonucunda en eski bilim dalı olan astronomi bilimi doğmuştur. Hiç süphesiz ki, ilk zamanlardan bu yana en merak edilen gök cisimleri Güneş ve Ay'dan sonra gezegenler olmuştur. Galileo Galilei'nin 1609 yılından sonra teleskobu astronomik amaçlar için kullanması ile modern astronomi doğmuş ve evreni daha detaylı anlayabilmemiz için muazzam bir gözlemsel alet olan teleskop astronominin vazgeçilmezi olmuştur. Fen ve mühendislik alanları geliştikçe teleskopların çapları büyümüş ve yeni gezegenlerle birlikte Güneş sisteminin daha küçük nesneleri de keşfedilmeye başlanmıştır. Bunlardan ilki Giuseppe Piazzi tarafından 1 Ocak 1801 tarihinde keşfedilen (Piazzi 1802) ve asteroit kuşağındaki açık ara en büyük gökcismi[3] olan (1) Ceres olmuştur. Daha sonra Ceres'i, 28 Mart 1802 tarihinde Heinrich Wilhelm Matthäus Olbers'in keşfi ile (2) Pallas (Herschel 1802) ve 1 Eylül 1804 tarihinde de Karl Ludwig Harding'in keşifi ile (3) Juno (Cunningham 2017) takip etmiştir. Tüm bu devam eden keşifler sonucunda bu sayı günümüzde 1 224 670'e kadar ulaşmıştır[4]. Ayrıca sayıları her geçen gün artan Yer'e Yakın Asteroitlerin (YYA) sayısı da her geçen gün artmaktadır (bkz. Şekil 1.1)[5].

[3] 939.4 km (Park vd. 2016)

[4] 27 Ağustos 2022 tarihli JPL Solar System Veri tabanı kayıtı. Bu sayıya KBO (Kuiper Belt Objects)'lar ve TNO (trans-Neptunian objects)'lar da dahildir: https://ssd.jpl.nasa.gov/ [Son erişim tarihi: 03.01.2023]

[5] Bu sayı 9 Kasım 2022 tarihi itibarıyla 30502'ye ulaşmıştır.



Şekil 1.1. Bilinen YYA'ların zamana bağlı olarak kümülatif keşif sayıları (Chamberlin 2022)

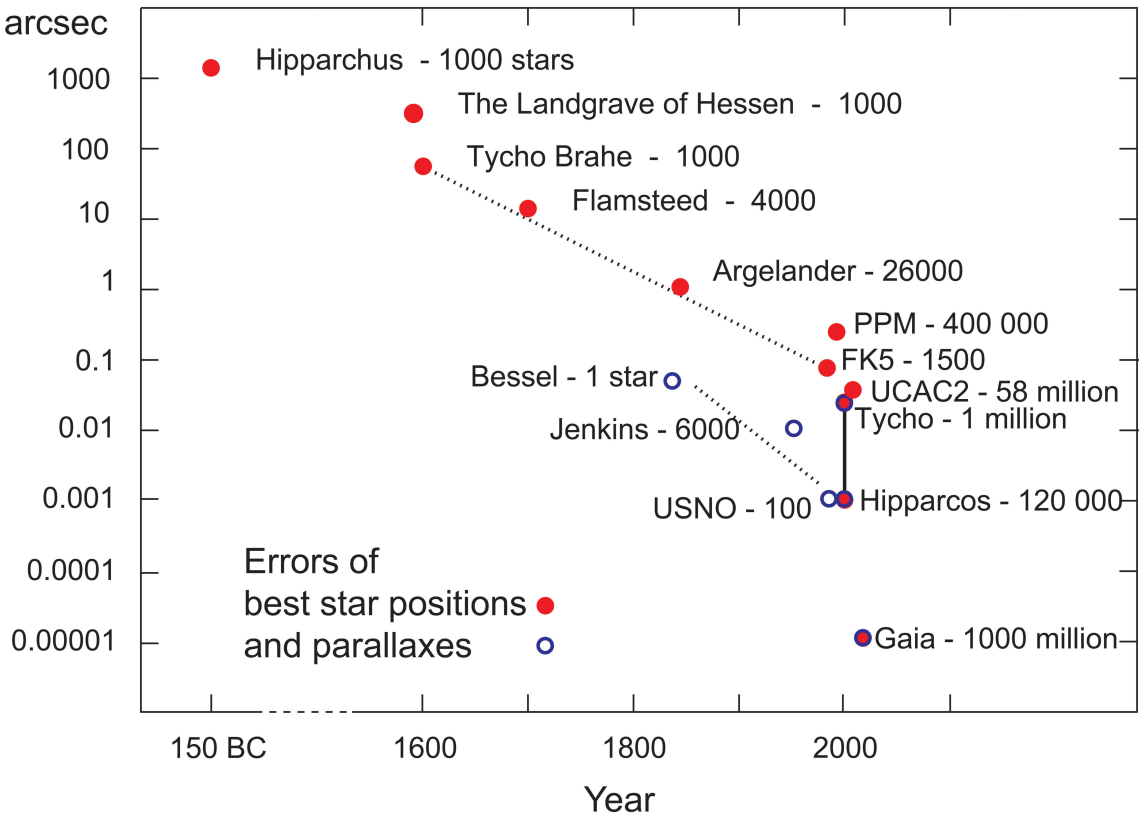
Sovyetler Birliği tarafından 4 Ekim 1957'de uzaya fırlatılan ilk uydu *Sputnik 1* ile birlikte başlayan uzay yarışı neticesinde ivmelenen uydu ve uzay aracı teknolojileri de Güneş sistemini anlamamız konusunda büyük katkılarda bulunmuştur. Özellikle 2 Mart 1972'de *Pioneer 10* ile başlayan küçük gezegenleri[6] de içeren uzay görevleri, bu nesneleri yakından tanımak konusunda insanlığın ne kadar ciddi olduğunu göstermiştir. *Galileo*, *Stardust*, *Hayabusa 1-2*, *Rosetta*, *New Horizons*, *OSIRIS-REx*, *Lucy*, *DART*, *Hera* vb. gibi çoğunlukla asteroitleri ziyaret eden veya yakın geçiş yapan/yapacak uzay aracı görevleri ise küçük gezegenlerle ve Güneş sistemi ile ilgili doğrudan kritik bilgiler sağlamaktadır. Her ne kadar uzay aracı görevleri bizlere Güneş Sistemi nesneleri ile ilgili doğrudan bilgi sağlasalar da bu görevleri gerçekleştirmek için gerekli ortamı, insan gücünü ve maddi olanakları bulmak en gelişmiş ülkeler için dahi güç olabilmektedir. Ayrıca gerçekleştirilecek görevlerin hedef listesinde bulunan Güneş sistemi nesnelerinin önceden yer tabanlı veya uzay tabanlı teleskoplar ile sürekli gözlenip iyice araştırılması görevin başarıya ulaşması açısından büyük önem taşımaktadır. Örneğin *DART* (Double Asteroid Redirection Test) görevinin hedefi olan (65803) Didymos ve uydusu Dimorphos için *Gaia* uzay gözlemevi[7] ile hesaplanan astrometrik konumların daha

[6]Cüce gezegenler, asteroitler, Neptün ötesi nesneler, kuyruklu yıldızlar ve Kuiper Kuşağı nesneleri

[7]Global Astrometric Interferometer for Astrophysics resmi sayfası: https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Gaia [Son erişim tarihi: 03.01.2023]

hassas hale getirilmesi için Côte d'Azur Gözlemevi (Fransa) tarafından yürütülen ACROSS (Asteroid Collaborative Research via Occultation Systematic Survey) projesi kapsamında yıldız örtülme kampanya gözlemleri yapılmaktadır[8].

Her ne kadar küçük gezegenleri doğrudan inceleyebileceğimiz yöntemlerin başında uzay araçları ile yerinde gözlem veya radyo teleskoplar ile radar gözlemleri gelse de, Güneş sistemi nesnelerinin çaplarının yer tabanlı gözlemlerle belirlenmesi günümüzde yıldız örtülmesi (stellar occultation) denilen çok güçlü ve duyarlı ölçüm yapmaya olanak veren bir gözlem tekniği ile de mümkündür. Bu gözlem tekniği özellikle son yıllarda ESA'nın *Gaia* uzay gözlemevinden yapılan gözlemler ile yüksek astrometrik duyarlılıkla oluşturulan Gaia Data Release 1, 2 ve 3. sürümlerinin yayınlanması ile son derece yaygın olarak uygulanmaya başlanmış ve başarılı sonuçların alınabilmesi mümkün hale gelmiştir. Şekil 1.2'de *Gaia*'nın diğer kataloglara göre ne kadar üstün bir astrometrik duyarlılığa sahip olduğu net bir şekilde gösterilmektedir.

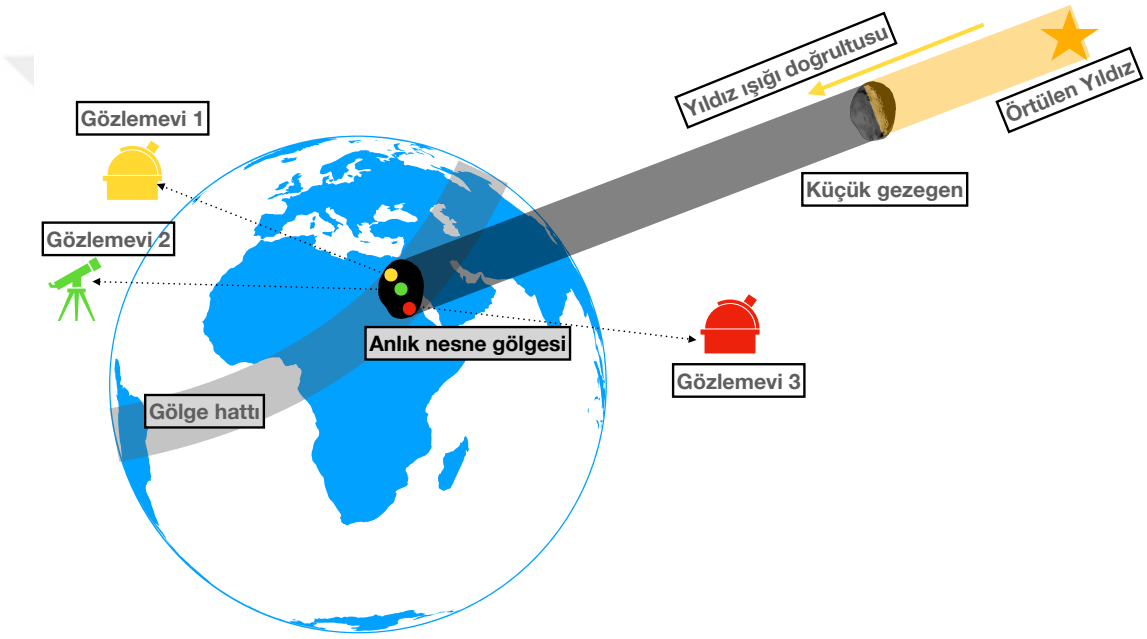


Şekil 1.2. Önceki kataloglar ile *Gaia*'nın astrometrik duyarlılıklarının karşılaştırılması (ESA)

Yıldız örtülme gözlem tekniği ile; gezegenlerin, uyduların ve ayrıca küçük

[8] https://lagrange.oca.eu/fr/home-across [Son erişim tarihi: 03.01.2023]

gezegenlerin çapları kilometrik hassasiyette ölçülebilir ve dolayısıyla şekilleri ve albedoları çok daha duyarlı belirlenebilir. Hatta nano-bar seviyesine kadar atmosferin varlığı bile gösterilebilmektedir (Elliot 1979; Elliot ve Young 1992; Elliot ve Olkin 1996). Yıldız örtülme tekniği temel olarak yörüngesi çok iyi bilinen (tahmin edilen) bir Güneş sistemi nesnesinin, yine astrometrik olarak konumu çok iyi bilinen bir yıldızın ışığını engellemesi sırasında, yıldız akısının farklı bir veya birkaç konumdan gözlenebilmesi prensibine dayanmaktadır. Bu teknik, gezegenler ve uydular için ve ayrıca büyük ana kuşak asteroitleri için iyi bir şekilde uygulanabilir bir yöntemdir. Ancak TNO'ların açısal çaplarının çok küçük olması, yörüngelerindeki ve yıldız kataloglarındaki belirsizliklerin fazla olması sebebiyle bu nesnelerin sebep olduğu örtülme olaylarının önceden tahminlerini yapmak son derece zordur!



Şekil 1.3. Bir yıldız örtülme olayının geometrisi

Şekil 1.3'te bir yıldız örtülme olayının geometrisi gösterilmektedir. Yer üzerinde sarı, yeşil ve kırmızı olarak gösterilmiş noktaların her biri bir gözlem noktasını temsil etmektedir. Bu gözlem noktalarında bulunan gözlemciler bir süreliğine küçük gezegenin yıldız ışığını bloke etmesinden dolayı yıldızı göremeyeceklerdir. Bu olaya *yıldız örtülme olayı*[9] adı verilmektedir. Yıldız örtülme olayının gerçekleştiği her bir konum *kiriş* (chord) olarak anılmakta ve *pozitif* gözlem olarak nitelendirilmektedir. Yıldız örtülme olayının gerçekleşmediği gölge hattı dışında kalan gözlem noktaları ise *negatif* gözlem olarak nitelendirilmektedir.

Küçük gezegenin gölge hattının Yer üzerinde tam olarak nerelerden geçeceğinin

[9]Stellar occultation

tahmin kalitesi, nesnenin yörünge parametreleri ile yıldızın astrometrik konumunun duyarlılığına bağlıdır. Bir yıldız örtülme olayında örtülme hattı üzerinde ne kadar fazla gözlemci varsa, hedef küçük gezegene ait o kadar fazla ayrıntılı bilgi edinilebilir.

Bu tez çalışması ile yıldız örtülme gözlem tekniği ve uygulamaları detaylı analizleri ile birlikte ülkemizde ilk defa kapsamlı bir şekilde konu edilmiştir. Tüm Dünya'da yıldız örtülme gözlem ve araştırmalarının daha hızlı, etkili ve verimli bir şekilde yürütülebilmesine olanak sağlayan; veri arşivi, yönetimi, analizi ve görselleştirilmesi gibi konularda büyük bir eksikliği gideren web-tabanlı *Occultation Portal* (OP) aldı bir platform ilk defa bu tez kapsamında geliştirilmiş ve Kilic vd. 2022 çalışmasında da yayımlanmıştır. Tüm bunların yanı sıra, gözlem kampanyaları OP üzerinde yürütülen ve büyük bir TNO olan (28978) Ixion'un 13 Ekim 2020 ve 28 Nisan 2021 tarihli yıldız örtülme gözlemlerinin detaylı analizleri bu tez kapsamında yapılmış ve bu nesnenin iki ve üç-boyutlu şekillerine dair detaylı bulgular ilk defa bu tez ile ortaya konulmuştur.

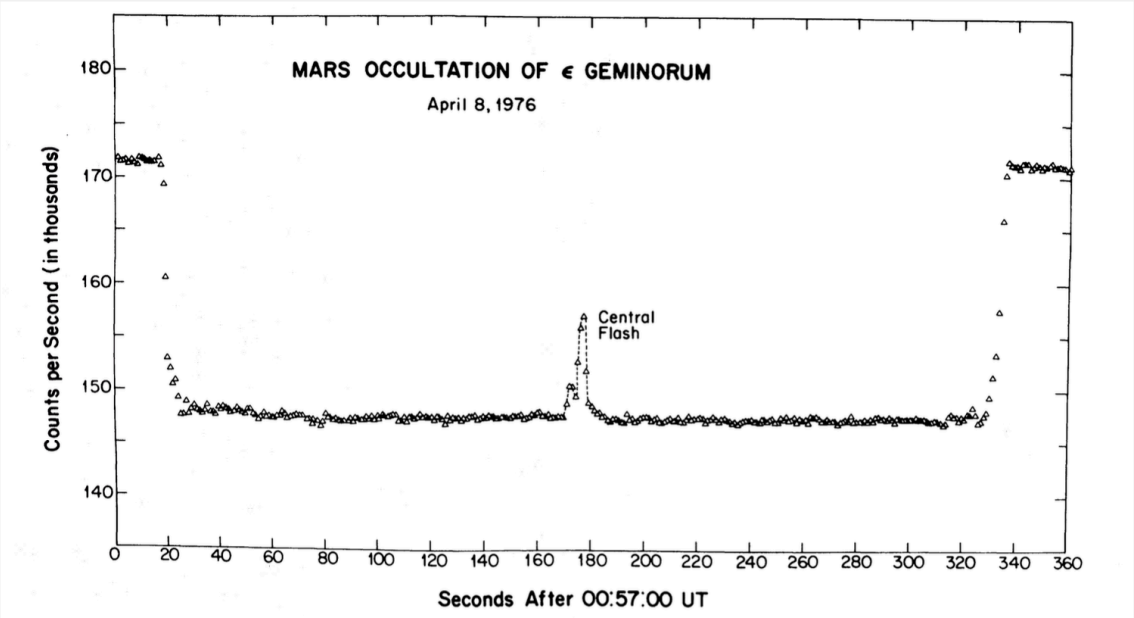
Bu kapsamda, bu tezin 1. Bölüm'ünde yıldız örtülme olayının ayrıntılı tanımı ve geometrisi üzerinde durulmuş, tezin 2. Bölüm'ünde önceki yıldız örtülme gözlemlerinin ve araştırmalarının kapsamlı bir tarihçesine yer verilmiştir. 3. Bölüm'de, *Occultation Portal*'ın yazılım mimarisi ve her bir hizmet bileşeninin nasıl ve ne amaçla çalıştığı detaylı olarak anlatılmıştır. Yine 3. Bölüm'ün bir alt başlığı olan 3.2. Bölüm'ünde ise, bir Güneş sistemi nesnesinin tekli ya da çoklu yıldız örtülme gözlemlerinin *SORA* (Stellar Occultation Reduction and Analysis) (Gomes-Júnior vd. 2022) ile nasıl analiz edileceği ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

Tezin 4. Bölüm'ünde OP'nin hizmet vermeye başladığı 8 Ağustos 2020 tarihinden itibaren *Occultation Portal*'dan elde edilen bulguların genel bir istatistiği, detaylı bir şekilde irdelenerek verilmiştir. Sonrasında ise tezin 4.2. Bölüm'ünde, (28978) Ixion'un 13 Ekim 2020 ve 28 Nisan 2021 tarihli gözlemlerinin detaylı analizlerinden elde edilen bulguları verilerek tartışılmıştır. Tezin son bölümü olan 5. Bölüm'de de, elde edilen tüm bulguların genel bir değerlendirmesine, geleceğe yönelik planlara ve yapılması gerekenlere yer verilmiştir.

2. KAYNAK TARAMASI

Yıldız örtülme yöntemi ve uygulamaları ile ilgili tartışmalar bir asırdan daha önce özellikle 1903 yılında Anton Pannekoek'un (Pannekoek 1903) ve sonrasında 1929 yılında Charles Fabry (Fabry 1929)'in çalışmalarıyla başlamıştır. O zamanlardaki gözlemsel algılayıcılardaki yetersiz duyarlılık ve kataloglardaki büyük konumsal hatalar nedeniyle bir yıldız örtülme olayını kayıt altına almak neredeyse imkansızdı. Bu durum 29 Kasım 1952'de σ Arietis'in Jüpiter tarafından örtülmesinin fotoelektriksel yöntemle kayıt altına alınması ile tamamen değişti (Baum ve Code 1953). Bu durumu 7 Temmuz 1959 tarihinde Venüs'ün α Leonis'i örtmesi (de Vaucouleurs ve Menzel 1960) ve 13 Mayıs 1971 tarihinde de Jüpiter'in β Scorpi'yi örtmesi olayları takip etti (Veverka vd. 1972; Vapillon vd. 1973; Wasserman ve Veverka 1973).

Yıldız örtülme gözlemleri ile ilgili tecrübeler ile birikte, algılayıcılar ve zaman kayıt cihazlarındaki teknolojik gelişmelerin artmasıyla tarihsel olarak en önemli yıldız örtülme gözlemlerinden biri 10 Mart 1977 tarihinde Kuiper Airborne Gözlemevi (KAO) üzerindeki 91-cm ayna çaplı teleskop ile yapılmıştır. Bu tarihteki gözlemde SAO 158687 yıldızını Uranüs'ün örtmesi sayesinde Uranüs'ün halkalarının varlığı ilk defa doğrulanmış oldu (Elliot vd. 1977). Diğer yandan 8 Nisan 1976 tarihli ϵ Geminorum'un Mars tarafından örtülmesi olayı (Taylor 1976) ile de ilk merkezi parlama (central flash) Şekil 2.1'deki gibi tespit edilmiş ve Mars atmosferi hakkında detaylı bilgi edinilerek bu sonuçlar *Viking 1*'in elde ettiği sonuçlar ile kıyaslanmıştır (Elliot vd. 1977).



Şekil 2.1. ϵ Gem'in Mars tarafından örtülme esnasında 4500 Å'de elde edilmiş ışık eğrisi. Her bir nokta 1 saniyelik entegrasyon zamanını ifade etmektedir. Ortadaki parlama ise gezegen atmosferinden geçen yıldız ışığının simetrik olarak kırılması ile oluşmuştur (Elliot vd. 1977)

Gezegen atmosferlerine ilişkin çarpıcı sonuçların alınması ile birlikte 15 Ağustos 1980 tarihinde KM 12'nin[10] Uranüs tarafından örtülmesi Cerro Tololo InterAmerican Gözlemevi (4.0 metre), Avrupa Güney Gözlemevi (3.6 metre) ve Cerro Las Campanas Gözlemevi (2.5 metre)'nden eş zamanlı gözlenerek, Uranüs'ün üst atmosferlerindeki değişimin izotropik türbülans modeline uymadığı ortaya konulmuştur (French vd. 1982). Aralarında 140 km'den daha fazla mesafe bulunan gözlemevlerinden elde edilen ışık eğrilerindeki sivri çıkıntıların (spike) uyumu, ışık eğrisindeki spikeların sebebinin sadece türbülans olamayacağını ortaya koyan ilk örtülme olayı olması bakımından önem arz etmektedir (Elliot ve Olkin 1996). Daha sonra 19 Ağustos 1985 tarihinde Wise Gözlemevi'nden 12.8 kadir parlaklığa sahip bir yıldızı Plüton'un örttüğü gözlenmiş ve bu gözlem sonucunda Plüton'un bir atmosfere sahip olduğu yıldız örtülme yöntemi ile doğrulanmış oldu (Brosch 1995). Ayrıca 1983 - 1990 yılları arasında yapılan 9 farklı yer tabanlı yıldız örtülme gözlemleri ile Neptün'ün üst atmosferinin yapısı detaylı olarak incelenebilmiş ve sonuçlar Voyager verileri ile karşılaştırılmış ve ölçümlerin tutarlı olduğu ortaya konulmuştur (Roques vd. 1994).

[10]Klemola ve Marsden 1977'in yıldız örtülme tahmin listesindeki 12 numaralı yıldız

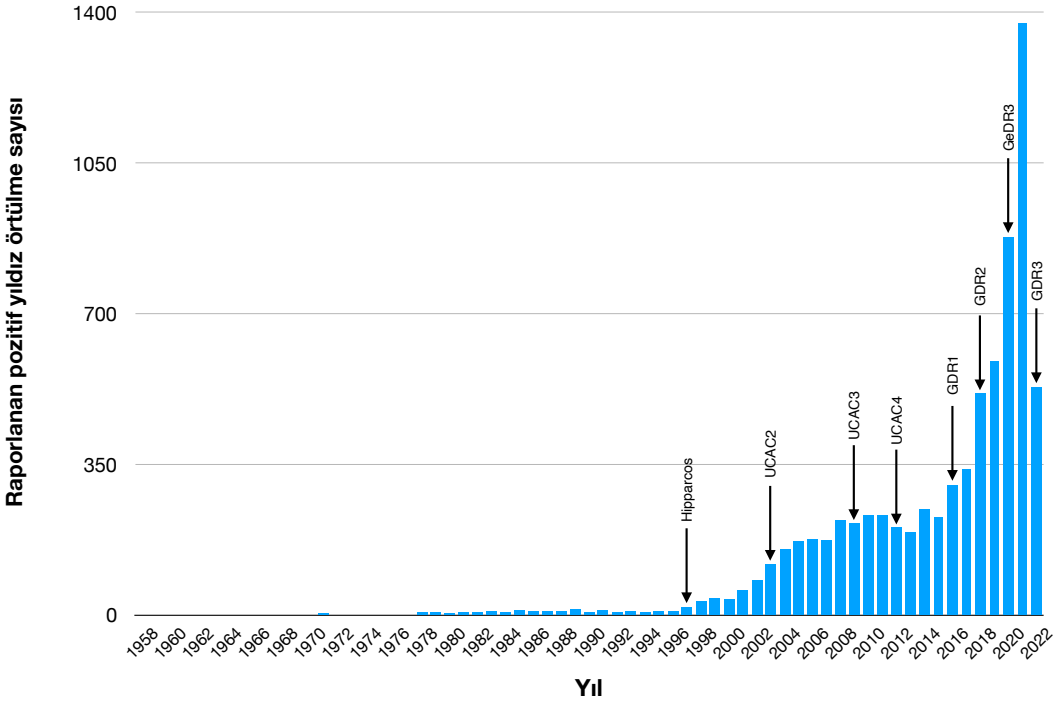
Çizelge 21. Tarihsel asteroit yıldız örtülme gözlemleri (Maley 1982). Maley (1982) çalışmasındaki bazı referanslar düzeltilmiştir

No.	Tarih	Asteroit	Yıldız	Konum	Yöntem	Toplam Kiriş	İkincil Olay	Kaynak	Notlar
1	19/02/1958	(3) Juno	BD+6° 808	İsveç	V	1	0	(Taylor 1962)	A
2	02/10/1961	(2) Pallas	BD-5° 5863	Hindistan	P	1	0	(Taylor 1962)	B
3	02/06/1973	(2) Pallas	BD+2° 2913	ABD, Kanada	P	1	0	(Binzel ve van Flandern 1979)	D
4	10/12/1974	(124) Antigone	SO 097913	ABD	V	0	1	(Binzel ve van Flandern 1979)	
5	01/25/1975	(433) Eros	κ Gem	ABD	P, V	8	2	(Oleary vd. 1976)	
6	10/10/1976	(2) Pallas	SAO 153844	ABD	V	0	1	(Binzel ve van Flandern 1979)	
7	05/03/1977	(6) Hebe	γ Ceti	ABD	V	5	1	(Taylor ve Dunham 1978)	
8	29/05/1978	(2) Pallas	SAO 85009	ABD	P	7	1	(Wasserman vd. 1979)	
9	07/06/1978	(532) Herculina	SAO 120774	ABD	P, V	3	6	(Bowell vd. 1978)	E
10	19/07/1978	(3) Juno	SAO 144070	İsrail	V	2	1	(Dunham ve Sheffer 1979)	
11	25/10/1978	(12) Victoria	SAO 161878	ABD	P, V	2	1	(Dunham 1979)	
12	11/12/1978	(18) Melpomene	SAO 114159	ABD	P, V	8	2	(Williamon 1980)	
13	06/04/1979	(39) Laetitia	BD+10° 465	ABD	V	1	0	(Dunham 1979)	
14	17/08/1979	(51) Nemausa	SAO 14417	SSCB	P	2	0	(Kristensen 1981)	
15	17/10/1979	(65) Cybele	BD+19° 1399	SSCB	P, V	3	1	(Dobrovol'Skij vd. 1980)	
16	08/12/1979	(27) Euterpe	SAO 77426	Finlandiya	V	0	1	(Dunham 1980)	
17	11/12/1979	(9) Metis	SAO 80950	Venezuela	V, C	1	1	(Dunham ve Hirose 1979)	F
18	11/12/1979	(3) Juno	SAO 115946	ABD, Çin	P, V	15	0	(Millis vd. 1981)	G
19	04/09/1980	(78) Diana	SAO 75392	ABD	V	10	0	(Dunham 1981)	H
20	10/10/1980	(216) Kleopatra	SAO 128066	ABD, Kanada	P, V	9	1	(Dunham 1981)	I
21	24/11/1980	(134) Sophrosyne	SAO 74963	ABD	V	5	0	(Dunham 1981)	
22	10/12/1980	(739) Mandeville	SAO 118438	Japonya	V	1	1	(Maley 1982)	
23	08/01/1981	(44) Nysa	SAO 119165	Fransa	V	1/2	0	(Dunham 1981)	
24	19/03/1981	(48) Doris	SAO 118832	ABD Kanada	P, V	3	0	(Maley 1982)	
25	04/04/1981	(91) Aegina	SAO 158864	ABD	V	0	2	(Maley 1982)	
26	14/06/1981	(9) Metis	SAO 184440	SSCB	V		0	(Maley 1982)	J
27	07/08/1981	(18) Melpomene	SAO 145972	ABD, Avustralya	P, V	3	0	(Maley 1982)	
28	05/10/1981	(105) Artemis	BD-0° 2683	Güney Afrika	P	1	0	(Maley 1982)	
29	07/10/1981	(88) Thisbe	SAO 187124	ABD	P, V, C	11	0	(Millis vd. 1982)	H

Açıklamalar: **P**: Fotometrik gözlem, **V**: Görsel/teleskobik gözlem, **C**: Fotografik gözlem, **A**: İlk görsel gözlem, **B**: İlk fotoelektrik gözlem, **D**: İki farklı konumdan yapılmış gözlem ve yalnızca bir adet rapor mevcut, **E**: Fotoelektrik ve görsel gözlemlerin ikincil olayları zamansal olarak tutarlı, **F**: İlk fotografik asteroit yıldız örtülme gözlemi, **G**: Bu tarihe kadar kaydedilmiş en kaliteli asteroit yıldız örtülme gözlemi

Venüs (de Vaucouleurs ve Menzel 1960), Mars (Taylor 1976), Jüpiter (Veverka vd. 1972; Vapillon vd. 1973; Wasserman ve Veverka 1973), Uranüs (Elliot vd. 1977) ve Neptün (Taylor 1970) gibi büyük gezegenlerden kaynaklı yıldız örtülme gözlemlerinin yanı sıra asteroitler de aynı zamanda gözlenmeye başlanmışlardır. Literatürde yıldız örtülme yöntemi ile başarılı olarak ilk gözlenen asteroit 19 Şubat 1958 tarihinde (3) Juno olmuştur (Taylor 1962). Bu gözlem görsel olarak İsveç'te gerçekleştirilmiştir. Bu gözlemi sırasıyla Çizelge 21'de verilen asteroit gözlemleri izlemiştir. Astrometrik hessasiyetleri artırma çabalarıyla birlikte (3) Juno gözleminden sonraki 19 yıl boyunca sadece 5 adet asteroitin başarılı yıldız örtülme gözlemleri gerçekleştirilse de 1977 ile 1981 arasında bu sayı 29'a çıkarak %500'lük bir artış göstermiştir (Maley 1982; Dunham vd. 2002). Bu sayının ciddi bir şekilde artmasında en etkili olan olay şüphesiz ki Uranüs'ün halkalarının yıldız örtülme gözlemi ile keşfedilmesidir. Bu keşif Güneş sistemi araştırmalarında yıldız örtülme gözlemlerini hem amatör hem de profesyonel astronomlar için ilgi çekici hâle

getirmiştir [11].



Şekil 2.2. Yıllara göre [1958 - 2022] gözlenen pozitif asteroit yıldız örtülme gözlemleri. Grafik üzerinde 2018 yılında ciddi bir artış gözlenmektedir. Bu *Gaia DR2* kataloğu ile yıldız örtülme gözlemlerinde daha iyi bir tahmin yapıldığını göstermektedir (Ferreira vd. 2022). Özellikle *Gaia* EDR3 ile beraber gelen başarılı yıldız örtülme sayısındaki sıçrayış *Gaia*'nın sonraki veri sürümlerinde de görüleceğini göstermektedir. Veriler *Occult* yazılımından alınarak görselleştirilmiştir

Şekil 2.2'de görüldüğü üzere asteroitlerin yıldız örtülme gözlemlerinde ilk artışlar özellikle *HIPPARCOS* kataloğunun 1997 yılında yayınlanmasından sonra başlamaktadır. Bu tarihten önce pozitif bir örtülme olayını gözlemek, örtülecek yıldızın konumundaki belirsizliğin büyük olmasından dolayı son derece zordu (Dunham vd. 2002). Özellikle 2016 yılından sonra yayınlanan *Gaia* DR1, DR2, EDR3 ve DR3 katalogları ile birlikte örtülecek kaynaklara ait duyarlı konumsal bilgilere erişilmesi başarılı pozitif gözlemlerin artmasında son derece etkili oldu (Gaia Collaboration vd. 2016; Gaia Collaboration vd. 2018; Gaia Collaboration vd. 2021; Gaia Collaboration vd. 2022; Ferreira vd. 2022).

Aynı zamanda *Occult* yazılımının yazarı olan Dave Herald, Herald vd. (2020)

[11] Bu tablonun güncel hali: http://www.johnstonsarchive.net/astro/asteroidmoonsall.html [Son erişim tarihi: 03.01.2023]

çalışmasında, 40 yılda, 3300 farklı gözlemcinin katıldığı 4400 gözlem kampanyasında 15000'den fazla tekil örtülme gözleminin gerçekleştirildiğini ifade etmiştir. 25 Eylül 2022 tarihi itibarıyla güncel veriler Çizelge 22'deki gibi olmuştur. Yıldız örtülme gözlemlerindeki zamana bağlı artışı yakından anlayabilmek adına Occult (v4.2022.9.11) yazılımı[12] veri tabanını ayrıntılı incelememizde yarar vardır. Occult veri tabanında 1958'de yapılan (3) Juno gözleminden beri raporlanan tüm gözlemlerin kaydı bulunmaktadır.

Çizelge 22. *Occult* veri tabanında bulunan tüm zamanların asteroit örtülme olayları istatistiği

Açıklama	**Adet**
Toplam örtülme sayısı	7492
Toplam gözlenen asteroit sayısı	2159
Örtülen çift yıldız	112
Çift asteroit	42
Toplam tekil gözlem sayısı	25432

Çizelge 22'de de görüldüğü üzere 1958-2022[13] yılları arasında 2159 farklı asteroidin toplam 7492 adet en az bir konumdan pozitif yıldız örtülme gözlemi yapılmıştır. Bu yıllar arasında sonucun pozitif veya negatif olup olmadığına bakılmaksızın toplam 25432 adet tekil gözlem yapılmıştır. Bu gözlemlerin 112 adedi çift yıldız örtülmesi, 112 adedi de çift asteroitlerin örtme olayları ile ilgilidir. Şekil 2.2 ve Çizelge 22 ışığında şunu rahatlıkla söyleyebiliriz ki önümüzdeki 10 yılda[14] başarılı yıldız örtülme gözlemlerinde sıra dışı bir artışın devam etmesi olasıdır (Braga-Ribas vd. 2019). Tüm bunlarla beraber bir başka etken de Vera Rubin Gözlemevi'ndeki LSST'dir[15]. Bu gözlemevi ve teleskobun da devreye girmesi ile çok ciddi miktarda astronomik veri üretilecek (büyük veri) ve özellikle asteroitler üzerine çalışmalar son derece artış gösterecektir (Ivezić vd. 2019).

Güneş sisteminde bulunan gezegenler ve asteroitlerin yanı sıra Jüpiter ve Satürn'ün bazı uyduları da yıldız örtülmesi yöntemi ile gözlenmiştir. Jüpiter'in Galileo uydularından yalnızca Ganymede (Carlson vd. 1973; D'Aversa vd. 2017) ve Europa'nın (Morgado vd. 2019) yıldız örtülme gözlemleri gerçekleştirilebilmiştir. Satürn'ün uydularından Titan (Sicardy vd. 1990) ve (Saturn IX) Phoebe'nin (Gomes-Júnior vd. 2019) yıldız örtülme gözlemleri de tarihsel açıdan önemli gözlemler arasındadır.

[12] http://www.lunar-occultations.com/iota/occult4.htm [Son erişim tarihi: 03.01.2023]. Bu tezde kullanılan tüm istatistikler bu sürüm ile oluşturulmuştur.

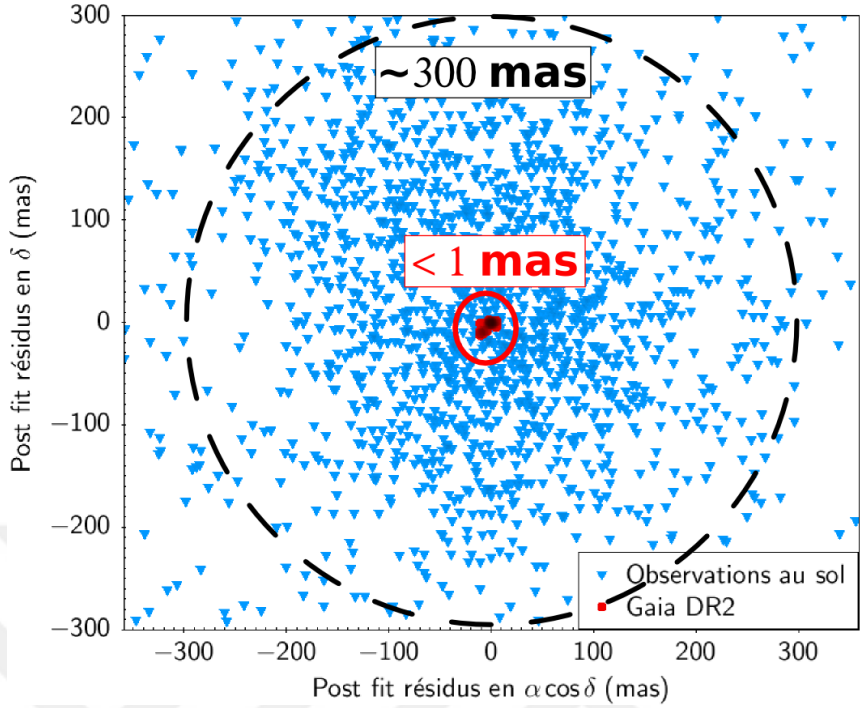
[13] 1 Ekim 2022 tarihine kadar.

[14] Database on Stellar Occultations by Small Outer Solar System Objects.

[15] Large Synoptic Survey Telescope (LSST)

Tüm bu araştırmalardan da görüleceği üzere yıldız örtülme tekniği ile yapılan gözlemler için *Gaia* uydusu yeni bir çağ başlatmıştır (Ferreira 2020). Yer tabanlı yıldız örtülme gözlemleri ile elde edilmiş en duyarlı astrometrik konumun hatası $\sim$20 mas'dir (Ferreira 2020). *Gaia* kataloğunun yıldız örtülme gözlemlerinde kullanılması ile birlikte bu duyarlılık mas seviyesine düşmüştür. Ana Kuşak Asteroitleri'nde bu durumun çaptaki karşılığı kilometre hassasiyetidir. *Gaia*'nın ne denli iyi bir konum bilgisi sağladığı Şekil 2.3'te çarpıcı bir şekilde gösterilmektedir. Şekil 2.3'te kullanılan yer tabanlı gözlemsel verilerin yalnızca yıldız örtülme gözlemlerinden oluşmadığı da göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca *Gaia* kataloğunun astrometrik hassasiyeti üzerine yapılan güncel çalışmalar, *Gaia* EDR3 ile birlikte konum duyarlılığının son derece arttığını göstermektedir. *Gaia* EDR3 kataloğunda konum belirsizliği $G < 15$ kadir için 0.01-0.02 mas, $G = 17$ kadir için 0.05 mas, $G = 20$ kadir için 0.4 mas ve $G = 21$ kadir için 1.0 mas olarak verilmektedir[16]. Lindegren, L. vd. (2021)'ın 585 milyon kaynak için yapmış olduğu 5-parametreli astrometrik çözümler Şekil 2.4'de detaylı olarak incelenebilir.

[16] https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/earlydr3 [Son erişim tarihi: 03.01.2023]

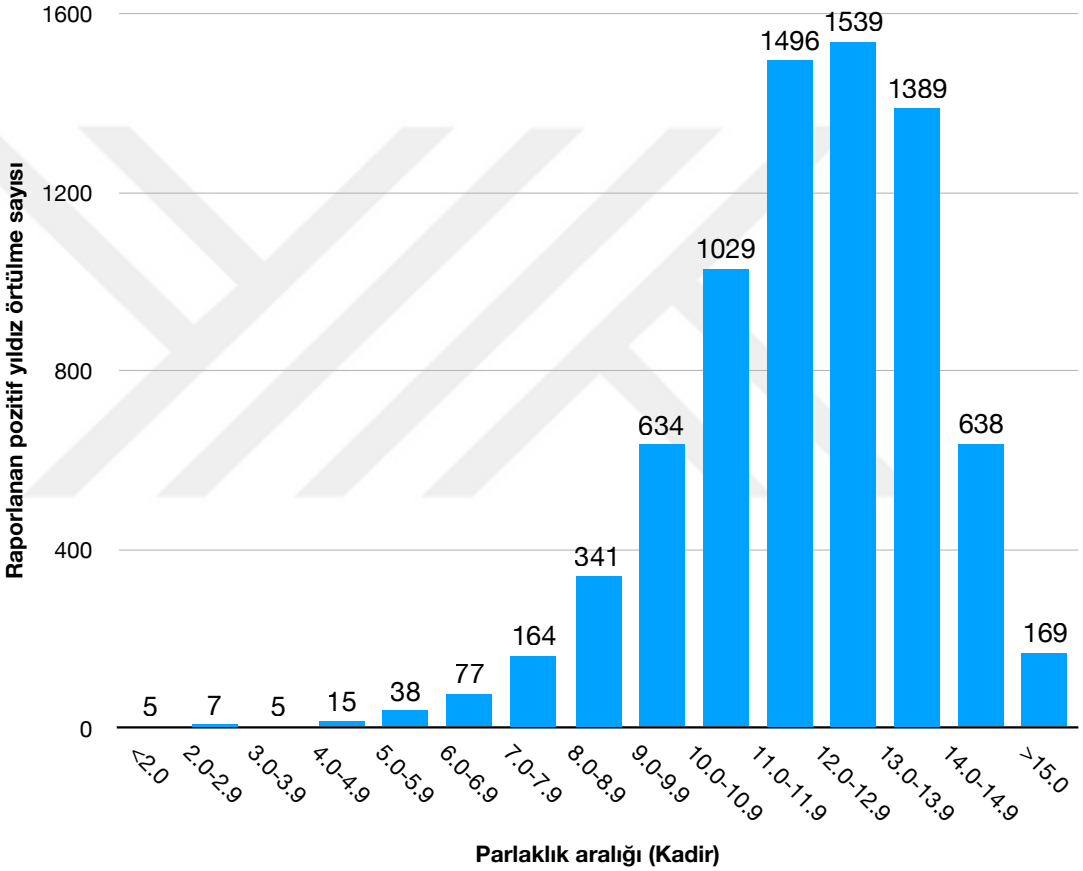


Şekil 2.3. Bir asteroidin yörüngesini belirlemek için kullanılan yer tabanlı teleskop verileri ve *Gaia* uydusu verileri. Bu verilerden arşiv verileri mavi, *Gaia* DR2 verileri kırmızı ile gösterilmektedir. Tüm *Gaia* DR2 (Data Release 2) veri noktaları, önceki verilerden yaklaşık 300 kat daha küçük ve kırmızı ile belirtilen 1 mas'den küçük bir daireye dağılmıştır. Bu fark, DR2'nin getirdiği doğrulukta tipik, dramatik bir artışı göstermektedir (Gaia Collaboration vd. 2018)

	Value at G =										
Quantity	9–12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	Unit
Fraction of sources with 5-param. solution	92.9	97.0	97.1	96.7	93.8	87.5	76.7	49.7	14.5	1.4	%
Median standard uncertainty in α ($\sigma_{\alpha*}$) at J2016.0	0.014	0.012	0.015	0.022	0.034	0.054	0.094	0.175	0.374	1.006	mas
Median standard uncertainty in δ (σ_δ) at J2016.0	0.013	0.011	0.013	0.019	0.030	0.049	0.086	0.161	0.335	0.977	mas
Median standard uncertainty in ϖ (σ_ϖ)	0.018	0.015	0.019	0.027	0.042	0.069	0.120	0.221	0.459	1.320	mas
Median standard uncertainty in $\mu_{\alpha*}$ ($\sigma_{\mu\alpha*}$)	0.018	0.016	0.019	0.028	0.044	0.071	0.123	0.229	0.487	1.445	mas yr^{-1}
Median standard uncertainty in μ_δ ($\sigma_{\mu\delta}$)	0.016	0.014	0.017	0.024	0.038	0.063	0.111	0.208	0.428	1.401	mas yr^{-1}
Median renormalised unit weight error (RUWE)	1.039	1.023	1.016	1.013	1.012	1.011	1.010	1.010	1.010	1.016	
Fraction with significant excess source noise	97.3	59.4	19.2	16.8	13.8	10.6	7.5	5.0	5.0	11.7	%
Median excess source noise (when significant)	0.113	0.089	0.188	0.224	0.285	0.409	0.606	0.976	1.801	3.668	mas
Mean number of visibility periods used	20.9	21.0	20.9	20.8	20.7	20.7	20.7	20.5	19.2	13.1	
Mean number of FoV transits used	43.7	43.7	43.6	43.4	43.2	43.2	43.4	42.6	38.7	20.5	
Mean number of good CCD observations AL	378	378	377	376	374	374	376	368	334	175	
Mean fraction of bad CCD observations AL	1.2	0.4	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.5	0.6	%
Median `ipd_gof_harmonic_amplitude`	0.018	0.021	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.022	0.029	0.073	
Mean `ipd_frac_multi_peak`	1.9	1.5	1.5	1.7	0.9	0.6	0.3	0.2	0.1	0.9	%
Mean `ipd_frac_odd_win`	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.8	%

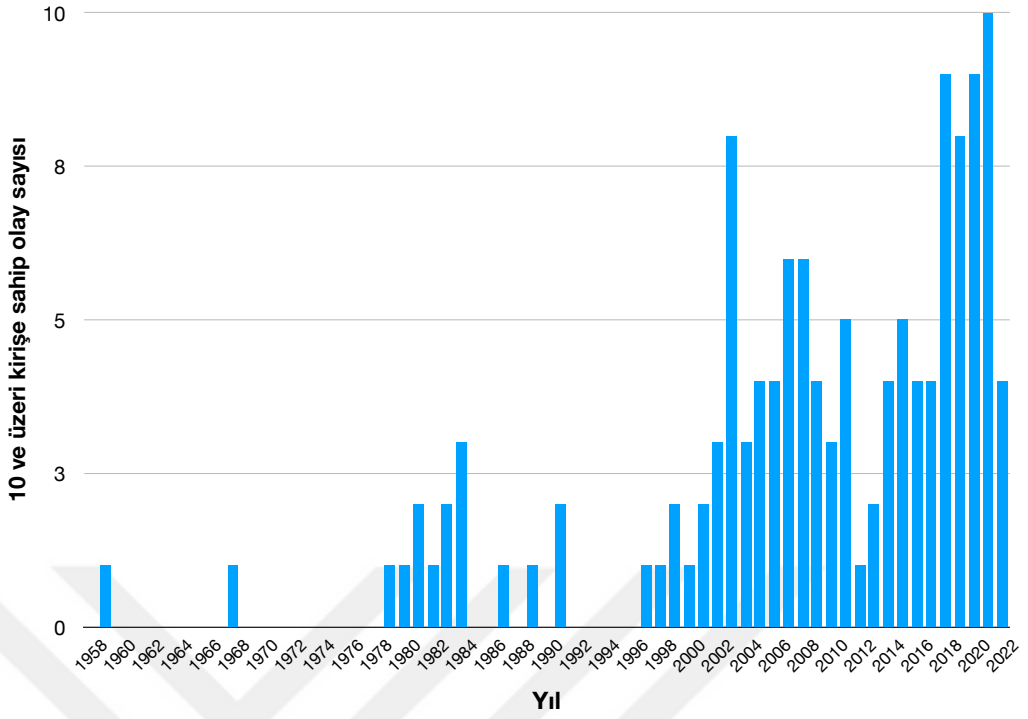
Şekil 2.4. *Gaia* EDR3 kataloğundaki 585 milyon kaynak için elde edilmiş 5-parametreli astrometrik çözüm özeti (Lindegren, L. vd. 2021)

Şekil 2.5'te *Occult* veri tabanında kayıtlı olan pozitif raporlanmış yıldız örtülme gözlemleri parlaklık aralığına göre sınıflandırılmıştır. Günümüze kadar yapılan bu gözlemlerde yıldızların %98'inin 15 kadirden parlak olduğu görülmektedir. Yıldız örtülme gözlemlerinin neden çoğunlukla 15 kadirden daha parlak yıldızlara ait olduğu bu çalışmayı da ilgilendiren bir konu olduğu için ilerleyen bölümlerde detaylı bir şekide tartışılacaktır. Şekil 2.3 ve Şekil 2.5 birlikte değerlendirildiğinde yıldız örtülme gözlemlerinin *Gaia* devri sonrası neden hızlı bir artış gösterdiği açık bir şekilde görülebilir ve gelecekte de bu artışın hızlı bir biçimde devam edeceği rahatlıkla söylenebilir.

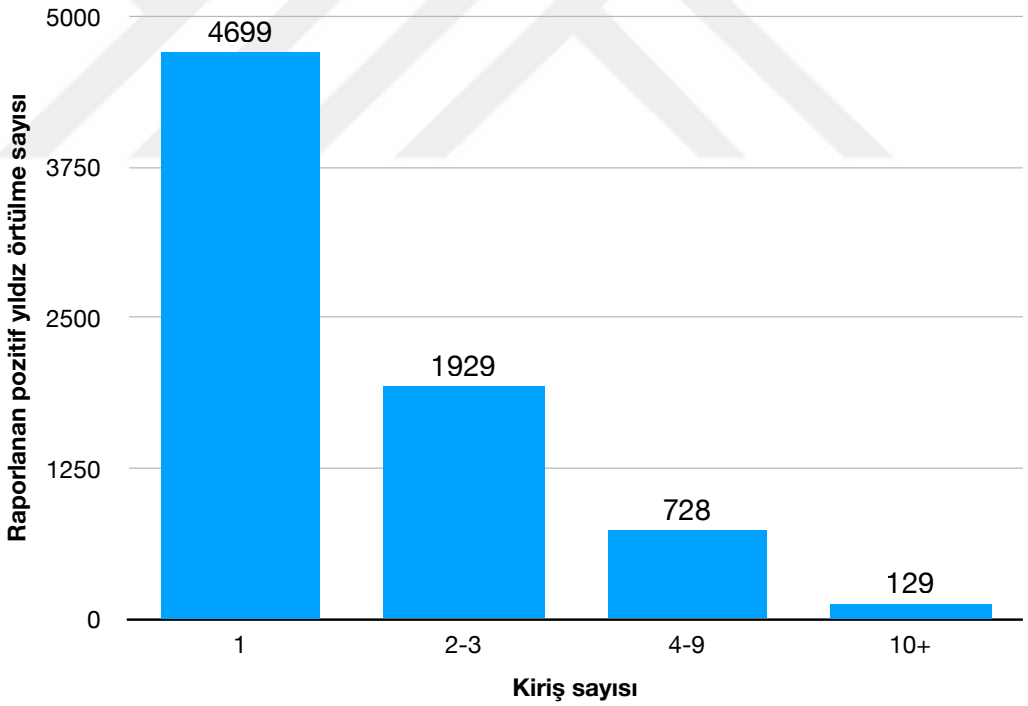


Şekil 2.5. *Occult* yazılımı veri tabanında kayıtlı olan pozitif yıldız örtülme gözlemlerinin parlaklık aralığına göre sınıflandırılmış hali

Şekil 2.2'de de gösterildiği gibi uydu verilerinden elde edilen kataloglardan sonra başarılı yıldız örtülme gözlemleri tartışmasız bir şekide artış göstermiştir. Bu artış, yalnızca tekil gözlemlerin değil, aynı zamanda aynı gözlem kampanyasına ait farklı konumlardan yapılan başarılı gözlemlerin de artış göstermesini barındırmaktadır. Bu durumu yine detaylı ortaya koymak gerekirse *Occult* veri tabanından elde edilen Şekil 2.6 incelenebilir.



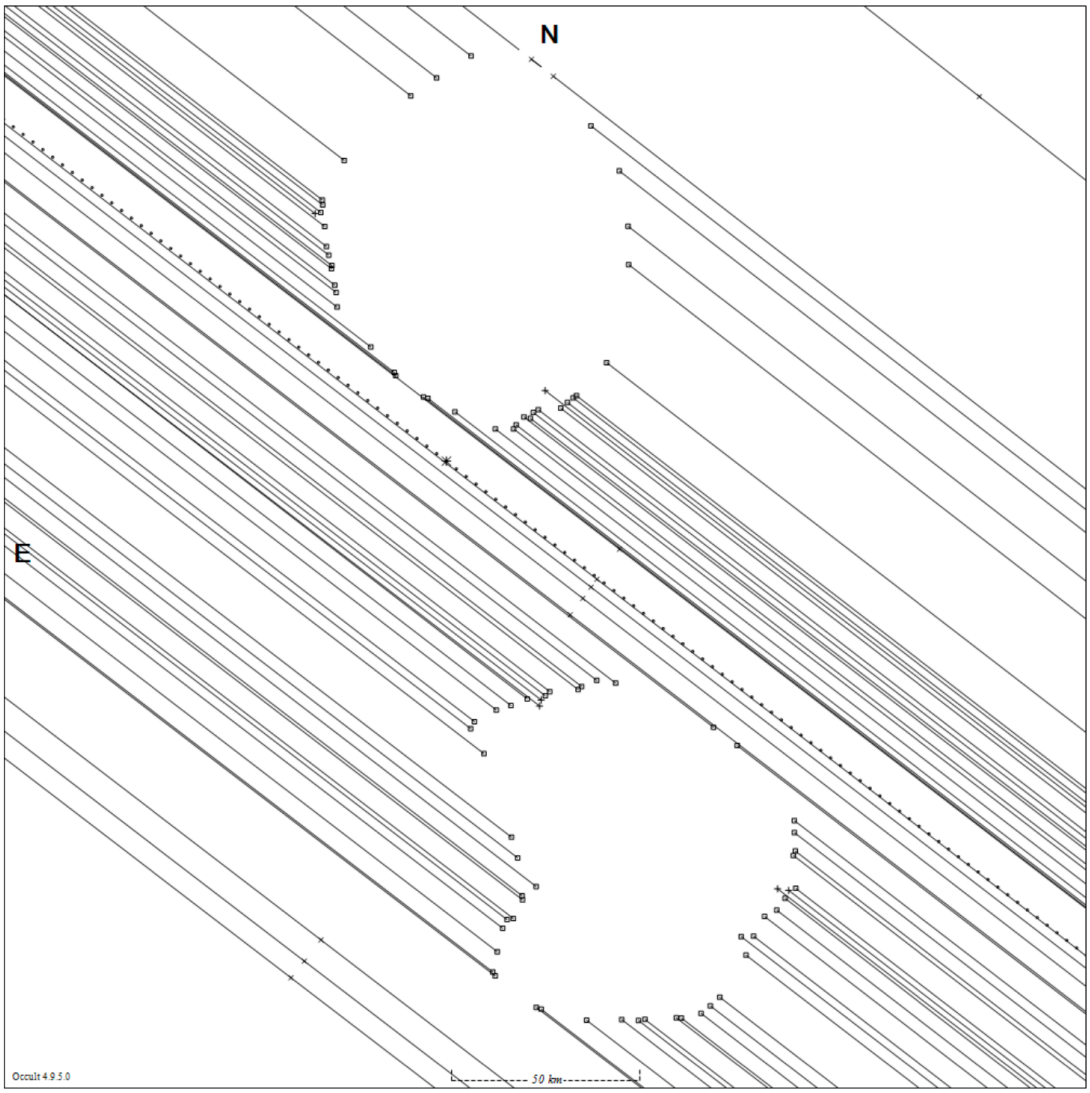
(a)



(b)

Şekil 2.6. **a)** *Occult* veri tabanında kayıtlı, aynı örtülme olayı için farklı konumlardan 10 ve üzerinde pozitif raporlanmış gözleme sahip (kiriş sayısı) olay sayısının yıllara göre değişimi; **b)** 1958-2022 yılları arasında raporlanan pozitif yıldız örtülme gözlemlerinin gerçekleşen kiriş sayısına göre sınıflandırılması

Aynı anda farklı konumlardan yapılan çoklu yıldız örtülme gözlemleri sayesinde asteroitlerin ve Neptün ötesi cisimlerin çoklu sistem olup olmadıkları, atmosfer, uydu veya halka sahibi olup olmadıkları gibi detaylar açıkça belirlenebilir hale gelmiştir. Hatta çoklu gözlemlerin artması ile nesnelerin topografik yapısı hakkında da detaylı bilgilere erişilebileceği pek çok araştırma ile gösterilmiştir (Leiva vd. 2017; Dias-Oliveira vd. 2017; Rommel vd. 2021).



Şekil 2.7. İkili asteroit (90) Antiope'nin 19 Temmuz 2011 tarihinde ABD'de gerçekleştirilen bir yıldız örtülme gözlemi. Kirişler arasındaki ortalama mesafe 1 km (Herald vd. 2020)

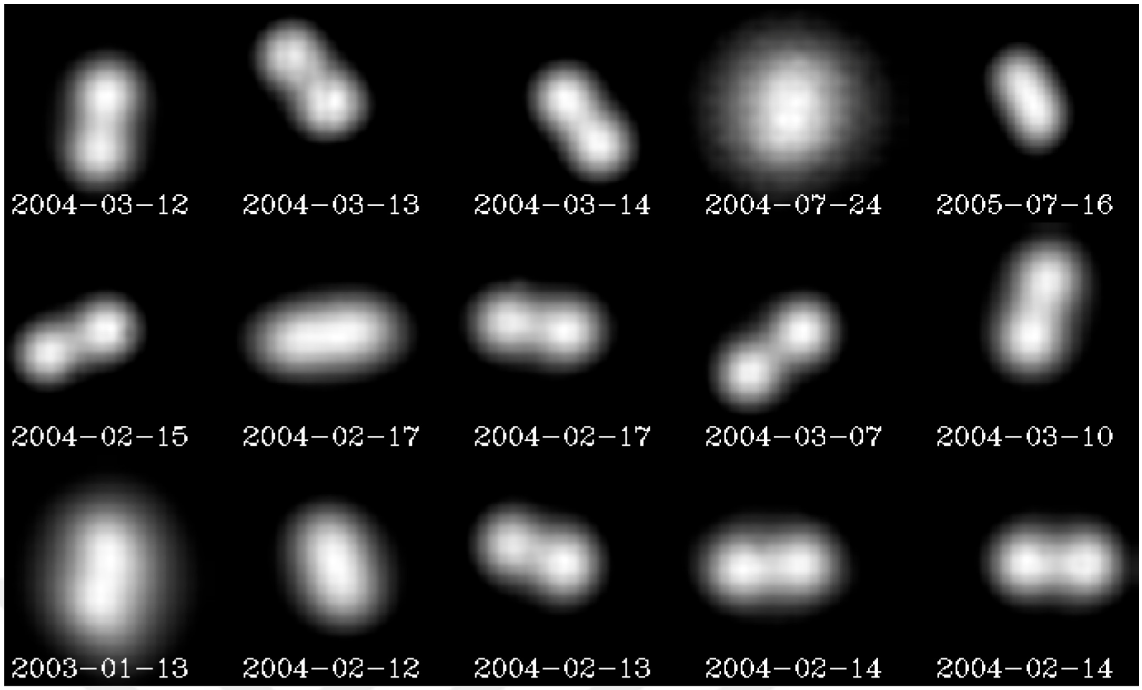
Şekil 2.7'de çoklu asteroit yıldız örtülme gözlemlerinin ne derece etkili bir yöntem olduğunu gösteren bir görsel bulunmaktadır. (90) Antiope'nin 19 Temmuz 2011 tarihinde ABD'nin batı kesiminde gerçekleşen bu örtülme olayını gözlemleyebilmek için toplam 56

farklı istasyon örtülme hattı boyunca konuşlanmıştır. Bu gözlem noktalarından 46 tanesi pozitif gözlem gerçekleştirirken, 11 gözlem noktası örtülme olayını kaçırmış (negatif), bazı gözlemciler ise bulutlu hava nedeniyle gözlem yapamadığını raporlamışlardır. Bu gözlemler sonucunda çiftin biri[17] üzerindeki büyük boşluk (krater) doğrulanmıştır (Colas vd. 2012).

Şekil 2.8'de ise ESO (European Southern Observatory)'da bulunan Dünya'nın günümüzdeki en gelişmiş optik teleskoplarından biri olan VLT (Very Large Telescope, 8.2 metre) ile gerçekleştirilmiş gözlemler sonucunda elde edilmiş görüntüler verilmiştir. Bu gözlemler asteroidin iki bileşenini de net bir biçimde ortaya koyabilmek ve yörüngesini hassas olarak tayin edebilmek adına NACO (Nasmyth Adaptive Optics System (NAOS) – Near-Infrared Imager and Spectrograph (CONICA)) adaptif optik enstrümanı ile gerçekleştirilmiştir. Bu gözlemler sonucunda bileşenler arasındaki mesafe 171 km olarak bulunmuştur ve bileşenlerin yörünge dönemi 16.5 saat olarak tespit edilmiştir. Şekil 2.8'in alındığı görselin kaynağı olan ESO'nun internet sitesinde açıkça şu ifadeye yer verilmiştir: *[Asteroidin] adaptif optik gözlemlerinin gerçekleştirilmesine rağmen bileşenlerin boyutları çok küçük olmasından dolayı tekil olarak şekilleri çözümlenememiştir*[18]. Bu ifade ile birlikte şunu rahatlıkla söyleyebiliriz ki, çoklu yıldız örtülme gözlemleri asteroitlerin şekillerinin yer tabanlı optik gözlemlerle ortaya konulabileceği tek gözlem yöntemidir. Şekil 2.7'deki gibi bir sonuca günümüz gözlemsel imkanları ile ancak bir uzay aracı ile ulaşabiliriz.

[17] Şekil 2.7'deki görselde altta verilen asteroit

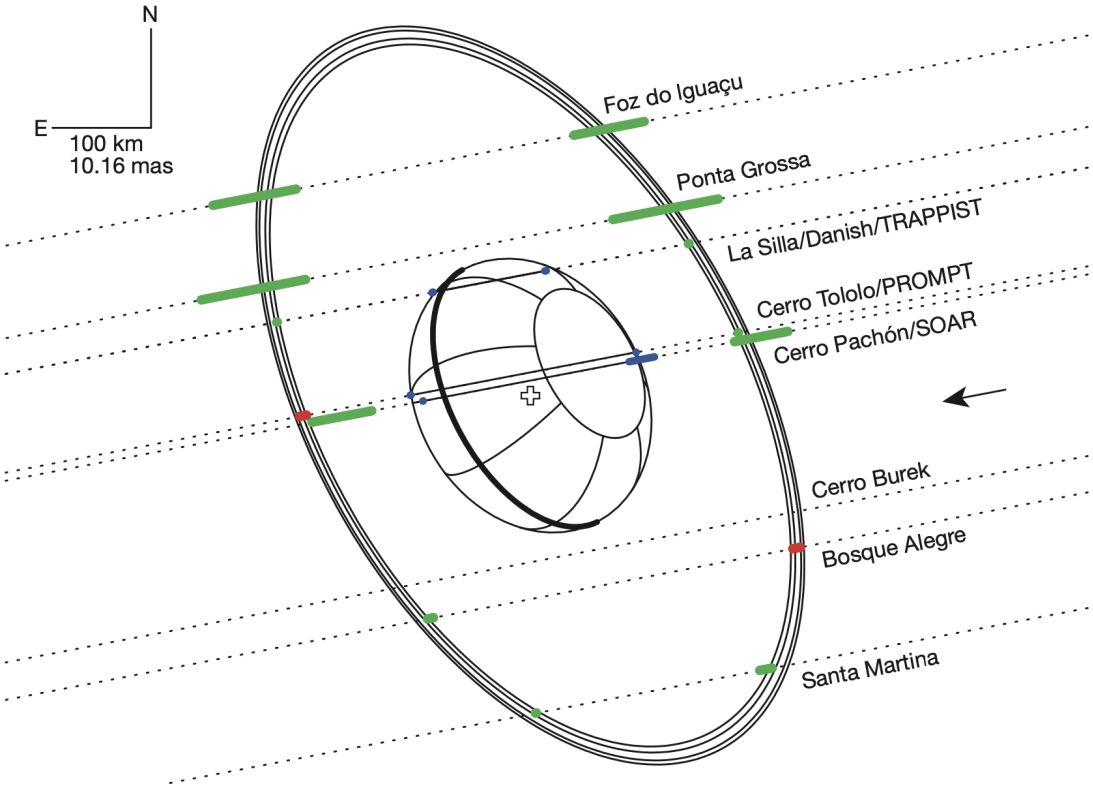
[18] https://www.eso.org/public/images/eso0718b/ [Son erişim tarihi: 03.01.2023]



Şekil 2.8. İkili asteroit (90) Antiope'nin 2004 yılında Very Large Telescope (VLT) ile yapılmış gözlemleri (ESO)

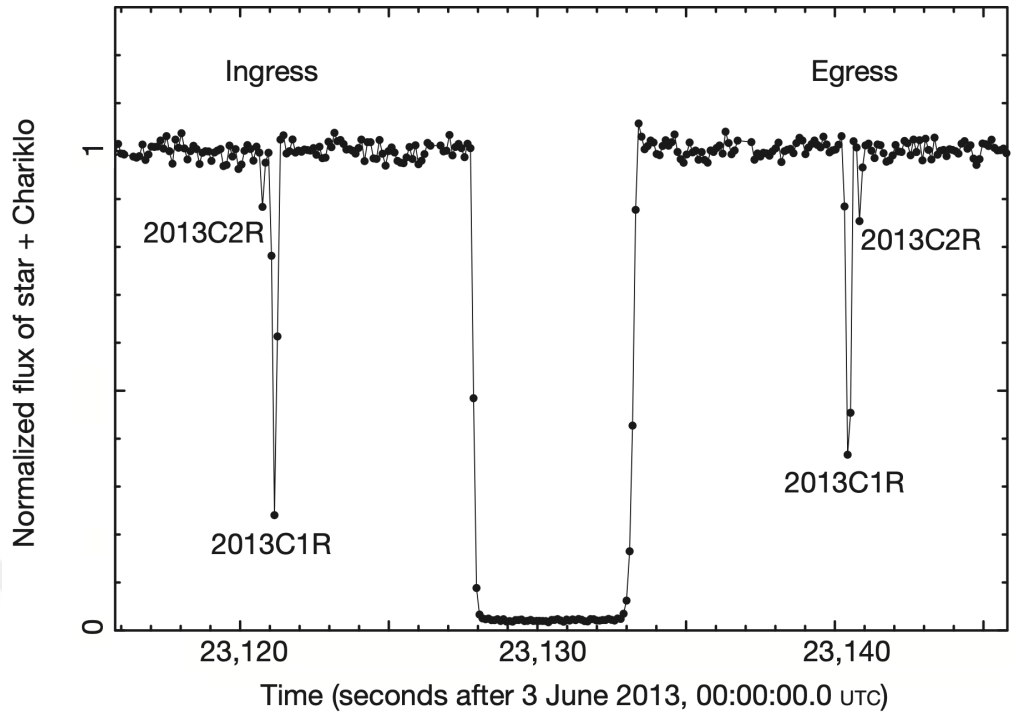
Çoklu yıldız örtülme gözlemleri ile elde edilen sıra dışı keşiflerden biri de, ilk defa Braga-Ribas vd. (2014) çalışması ile, Güneş sisteminde ana gezegenlerin dışında bir Centaur[19] olan (10199) Chariklo'nun etrafında bir halkanın varlığının gözlemsel olarak doğrulanması ile yapıldı. 3 Haziran 2013'te Güney Amerika'da bulunan 17 farklı gözlem istasyonunun katıldığı gözlem kampanyasında 4 farklı istasyon hem ana gövdeden hem de halkadan kaynaklı örtülmeyi tespit ederken, 6 farklı konum ise yalnızca halka varlığını doğrulayabilmiştir. 3 farklı konum ise örtülme hattı dışında kaldıklarından örtülme olayını gözleyememiştir. Diğer istasyonlar ise bulutlu hava nedeniyle gözlem yapamamışlardır. Bu gözlemler sonucunda Şekil 2.9'daki görsel elde edilmiştir (Braga-Ribas vd. 2014). Şekil 2.9'daki ok (10199) Chariklo'nun gökyüzü düzlemindeki hareket yönünü, yeşil segmentler tespit edilen pozitif örtülme olaylarını, kırmızı segment ise örtülme olayının tespit edilemediğini nitelemektedir.

[19]Jüpiter ve Neptün yörüngeleri arasında bulunan hem asteroit hem de kuyruklu yıldız özellikleri gösteren Güneş sistemi nesneleri



Şekil 2.9. Chariklo ve halka sistemi (Braga-Ribas vd. 2014)

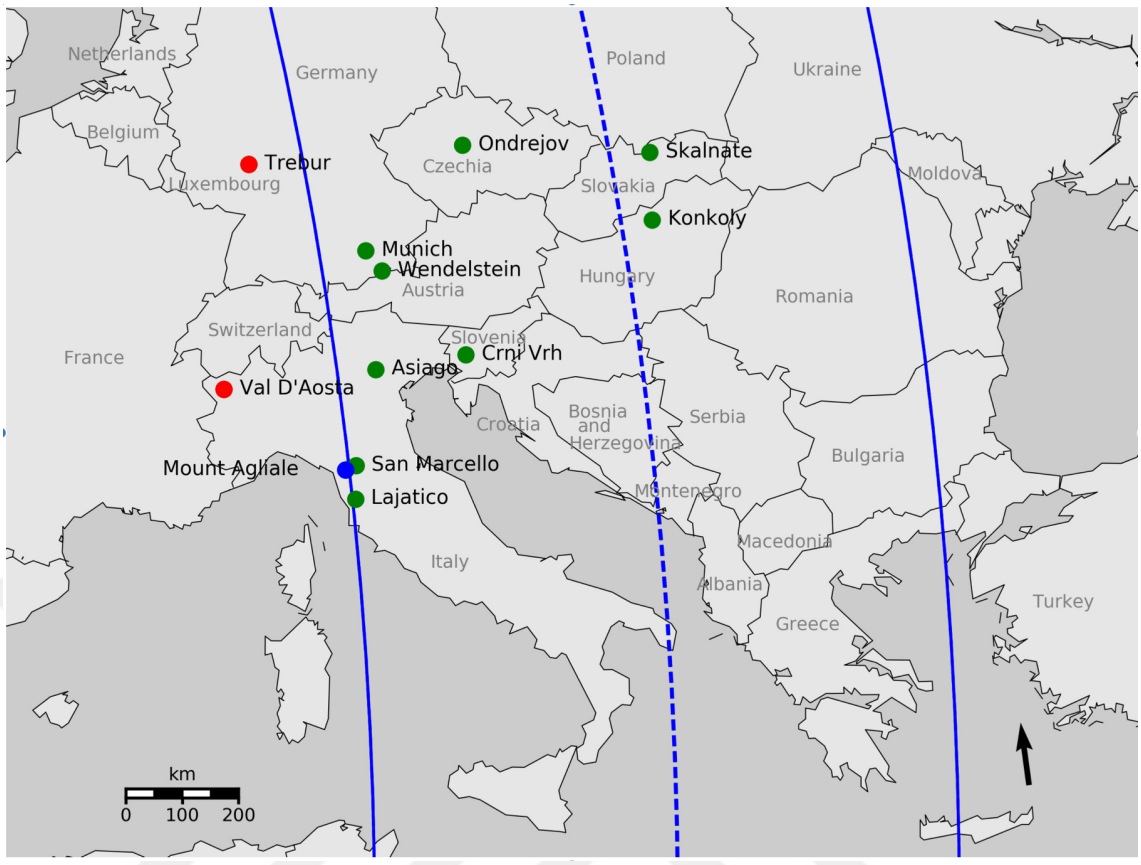
Bu örtülme olayında ESO La Silla'da bulunan 1.54 metre ayna çaplı Danish Teleskobu ve 10 Hz görüntü alma özelliğine sahip Lucky Imager camera sistemi ile yapılan gözlem (10199) Chariklo'daki halkaların ayrıntılı yapısına kadar ortaya çıkarılmasında kritik rol oynamıştır. Yıldız örtülme gözlemlerinde yeterli bir Sinyal/Gürültü oranı (SNR) elde edilebilmesi ile birlikte dengeli bir seri görüntü alınabilmesine olanak sağlayan bu teleskop/kamera sistemi ile yapılan bu gözlem diğerlerinden çarpıcı bir şekilde ayrılmaktadır. Bu teleskop ve kamera sisteminden elde edilen ışık eğrisi Şekil 2.10'da verilmiştir. Şekil 2.10'da 2013C1R, 2013C2R ifadeleri ile gösterilen simetrik ikincil örtülme olayları halkanın yapısı hakkında detaylı bilgiler içermektedir. Braga-Ribas vd. (2014)'ne göre C2R2, C1R'den %40 daha dar bir halkadır ve 12 kat daha az materyal barındırmaktadır. İki boşluk arasında ise bir maddedin tespit edilemediği belirtilmiştir.



Şekil 2.10. Chariklo sisteminin yıldız örtülme gözlemi sonucunda elde edilen ışık eğrisi (Braga-Ribas vd. 2014)

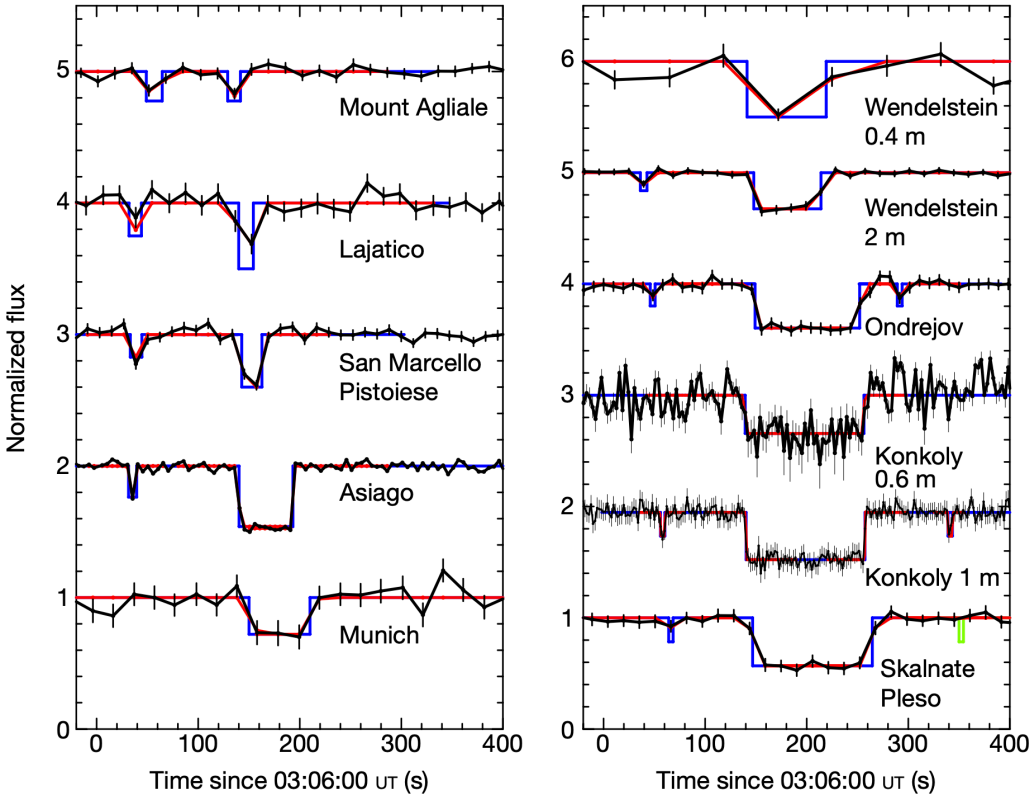
Daha sonraki çalışmalar bir başka Centaur olan (2060) Chiron'da da halka olabileceğini ortaya koysa da (Ortiz vd. 2015) Güneş sistemindeki en şaşırtan keşiflerden birine yine çoklu örtülme kampanya gözlemleri ile 21 Ocak 2017'de 17.97 kadirlik (V) bir yıldızın cüce gezegen Haumea tarafından örtülmesi sonucunda imza atıldı. Yine Braga-Ribas vd. (2014)'nin keşfinde olduğu gibi *Nature*'da yayımlanan bu gözlem kampanyasının sonucunda ilk defa bir cüce gezegenin etrafında halka varlığı keşfedilmiş oldu (Ortiz vd. 2017). Şekil 2.11'de de görüldüğü üzere örtülme hattının Türkiye'nin yakınlarından geçmesi nedeniyle bu gözlem kampanyasına Türkiye'den araştırmacılar ve gözlemevleri de dahil olmuştur fakat herhangi bir olay tespit edilememiştir. Ortiz vd. (2017) çalışması, ülkemizin yer aldığı ilk uluslararası yıldız örtülme gözlem kampanyası olmuştur[20]. Daha sonra ülkemizin de dahil olduğu bu ve buna benzer kampanya gözlemlerinden elde edilen tecrübe ve birikimlerin, bu tezin de konusunu oluşturan Occultation Portal'ın doğmasında önemli katkıları olmuştur.

[20]**Not:** Ülkemizde yapılan ilk yıldız örtülme gözlemleri TUG bünyesinde Uluç vd. (2007) tarafından, seçilen 11 Ana Kuşak asteroidi için yapılmış fakat hiçbirinde pozitif gözlem elde edilememiştir. Uluç vd. (2007)'nin bu çalışması, pozitif gözlem olasılığını artırmak için Türkiye genelindeki küçük teleskoplar ile amatör ve profesyonel astronomların organize edilmesini öneren ülkemizdeki ilk çalışmadır. Ulusal ve uluslararası boyutta ülkemizden tespit edilen ilk pozitif örtülme gözlemi ise, bir TNO olan Huya kampanyası kapsamında 18 Mart 2019 tarihinde yapılmış ve Santos-Sanz vd. (2022) çalışmasında yayımlanmıştır.



Şekil 2.11. Haumea yıldız örtülme gözleminde örtülme olayını gözlemleyen istasyonları gösteren harita (Yeşil noktalar: Pozitif, Kırmızı noktalar: Negatif) (Ortiz vd. 2017)

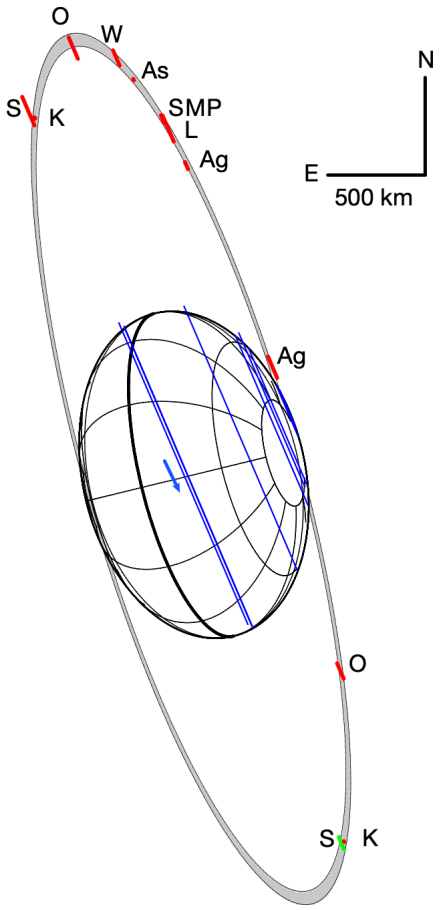
Şekil 2.12 incelendiğinde görülmektedir ki, Haumea etrafında halka varlığı 11 farklı istasyonda doğrulanmasına rağmen, Braga-Ribas vd. (2014) makalesinde ortaya konulan ve Şekil 2.10'daki gibi halka yapısına ait ayrıntılı bir bilgi elde edilememiştir. Ayrıca Skalnaté Pleso Gözlemevi'ndeki 1.3 metrelik teleskop ile alınan kaliteli veriden halka çıkış simetriğinin tespit edilememesi (bkz. Şekil 2.12 ve 2.13'te verilen yeşil segmentler), halkanın yapısında bir düzensizlik olabileceğini veya algılayıcı kameradaki 5.503 saniyelik okuma süresi içerisinde halkanın kaçırılmış olabileceği düşünülmektedir (Ortiz vd. 2017).



Şekil 2.12. Haumea yıldız örtülme örtülme gözleminden elde edilen ışık eğrileri (Ortiz vd. 2017)

Güneş sisteminde dev gezegenler dışında halkaların varlığı çoklu yıldız örtülme gözlemleri ile art arda yapılan bu keşifler sayesinde ortaya konulduktan sonra, araştımacıların dikkati özellikle Centaur'lar üzerinde yoğunlaşmıştır. Asteroit ana kuşağında henüz bir halkalı asteroide rastlanmaması ve en büyük iki Centaur olan Chariklo ve Chiron'da halkanın tespit edilmesi Jüpiter ötesinde bulunan nesnelerde halka varlığının ortak bir özellik olduğunu düşündürmektedir (Ortiz vd. 2015; Ortiz vd. 2017). Ayrıca her iki nesnenin de halkalarının çoban uydular [21] tarafından sınırlandırıldığı da düşünülmektedir (Braga-Ribas vd. 2014; Ortiz vd. 2015).

[21]GSN halkasındaki meteryalleri bulunduğu halkada tutan veya halka boşluklarını temizleyen doğal uydu.

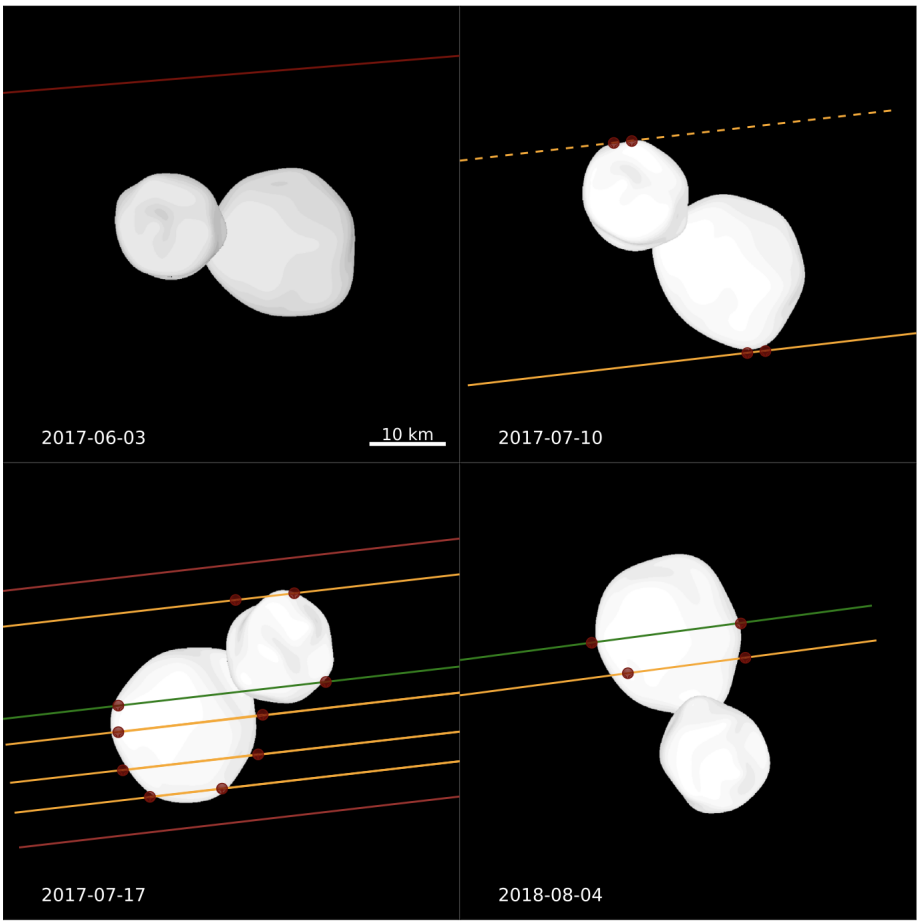


Şekil 2.13. Haumea ve halka geometrisi (Ortiz vd. 2017)

Gaia uydusu çağında, eş zamanlı çoklu yıldız örtülme gözlemlerinin Jüpiter sonrası nesnelerin fiziksel özelliklerini ortaya çıkarmak için en etkili yöntemlerden biri olduğu açıkça anlaşılmaktadır. 2009 yılında, *Gaia* öncesinde bile bir Haumea çarpışma ailesi üyesi olan ve ilk defa başarılı çoklu yıldız örtülme gözlemi yapılan TNO 2002 TX_{300}'ün (Kuiper kuşağı nesnesi) sonuçları (Elliot vd. 2010) dahi *Gaia*'nın yeni oyun kurucu olacağını göstermekteydi. Bu savımızı destekleyecek en önemli çoklu yıldız örtülme kampanya gözlemlerinden ilki, 3 Haziran 2017'de 25 gözlem istasyonu, 10 Temmuz 2017'de 1 gözlem istasyonu[22], 17 Temmuz 2017'de 24 gözlem istasyonu ve 4 Ağustos 2018'de 22 gözlem istasyonu ile bir Kuiper kuşağı nesnesi olan (486958) Arrokoth (2014 MU_{69})'un Güney Afrika ve Güney Amerika'dan yapılan gözlemleri olmuştur. Bu kadar uzakta bulunan $36x20x10$ km (Spencer vd. 2020) boyutlarındaki bu kadar küçük bir nesnenin dahi çoklu yıldız örtülme gözlemlerinin yapılabilmesi, yıldız örtülme gözlemlerinde çığır açmıştır. Şekil 2.14'te gösterildiği üzere nesnenin ikili bir sistem olduğu bu yıldız örtülme gözlemleri ile gösterilmiştir (Buie vd. 2020). 2017 ve

[22]Gözlem, Bir hava gözlemevi olan The Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy (SOFIA) gerçekleştirilmiştir.

2018'de yapılan bu gözlemlerle, (486958) Arrokoth'un halihazırda *New Horizons* görevinin yakın geçişi (flyby) sırasında alınan verileri ile birleştirildiğinde nesnenin şekline ilişkin daha derin bir bakış açısı ortaya konulmuştur (Stern vd. 2019; Buie vd. 2020). Bu tarihsel çoklu yıldız örtülme gözlemleri ile özellikle Kuiper kuşağı nesnelerinin de kökeni ve dinamik sınıflarının araştırılması için eşsiz bir kapı aralanmış oldu.



Şekil 2.14. Arrokoth'un biçim modeli ve örtülme kirişlerinin karşılaştırılması (Buie vd. 2020)

Gaia katalogları kullanılarak yapılan örtülme zamanı ve örtülme hattı tahminlerinin ne denli etkili olduğunun diğer bir kanıtı olan çoklu yıldız örtülme gözlemi de, 8 Ağustos 2002 tarihinde bir Neptün-ötesi nesne olan 2002 MS_4'ün 14.6 kadir (*Gmag*) bir yıldızı örtmesi sırasında tarihe geçmiştir. Örtülme hattı yine Türkiye'den de geçen bu yıldız örtülme kampanyası, bu tezin de ortaya çıkmasında büyük katkısı olan The European Research Council Lucky Star Projesi[23]'nin çağrısı üzerine düzenlemiştir[24].

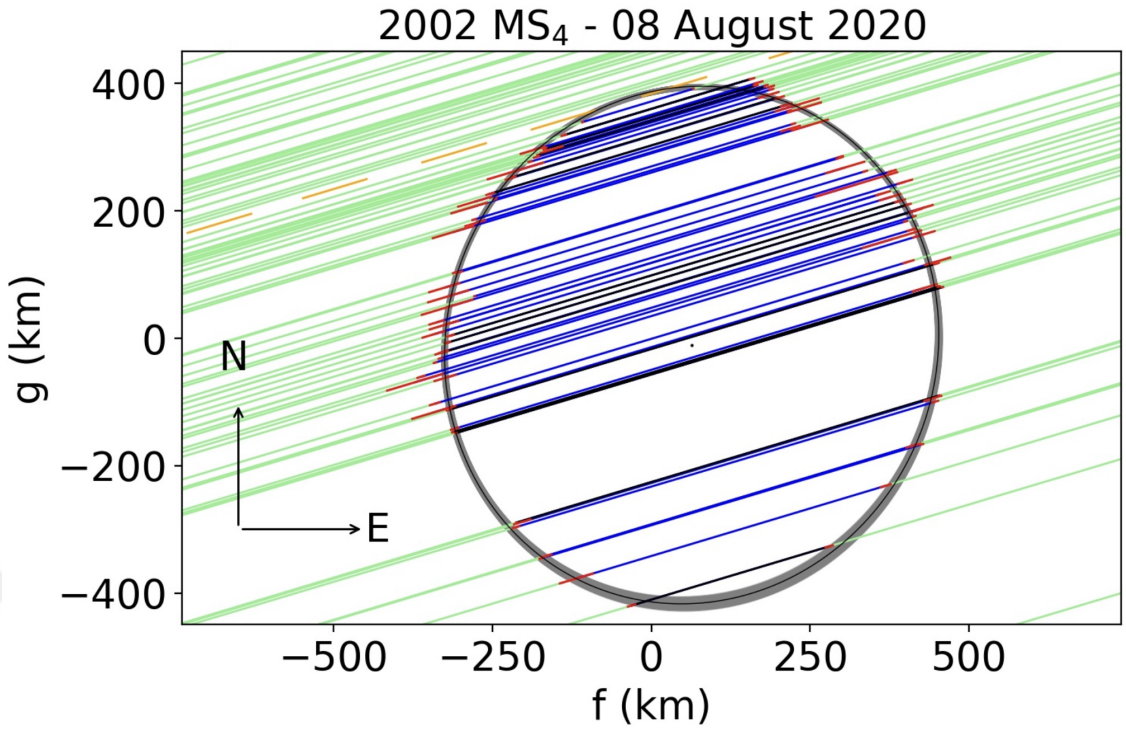
[23] https://lesia.obspm.fr/lucky-star/ [Son erişim tarihi: 03.01.2023]

[24] https://lesia.obspm.fr/lucky-star/campaigns/2020-08-08_2002MS4.html [Son erişim tarihi: 03.01.2023]

Şekil 2.15. 2002 MS_4 yıldız örtülme kampanyasına katılan istasyonların konumları (F. L. Rommel)

Şekil 2.15'te gösterildiği gibi, ERC Lucky Star ekibinin bu yıldız örtülme kampanya gözlemi çağrısına öngörülen örtülme hattı üzerindeki toplam 116 farklı gözlem istasyonu katılım sağlamış ve bu şimdiye kadar gerçekleştirilen en çok katılımlı ve başarılı yıldız örtülme olayı olarak tarihe geçmiştir (Rommel vd. 2021). Bu örtülme olayında en az 61 adet pozitif gözlem bulunmaktadır[25]. Sevindirici olan şudur ki, böylesine tarihi bir gözlem kampanyasına ülkemizden de farklı gözlemevlerinden katılım gerçekleşmiştir. Özellikle Çanakkale Üniversitesi Astrofizik Araştırma Merkezi ve Ulupınar Gözlemevi'nde bulunan İstanbul Üniversitesi'ne ait İST60 Robotik Teleskobu ile kaydedilen gözlem bu tarihi kampanyaya son derece kritik bir veri sağlamıştır. İST60 ile yapılan bu gözlem, 2002 MS_4'ün teğet düzlem üzerindeki şeklinin sınırlandırılması için kullanılan en güneyindeki pozitif gözlem verisidir.

[25] https://vimeo.com/457736164 [Son erişim tarihi: 03.01.2023]



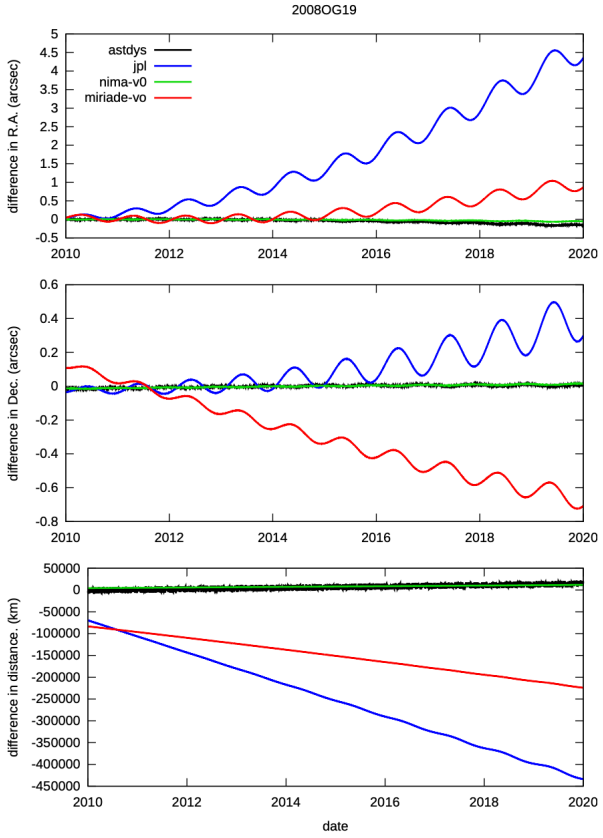
Şekil 2.16. 2002 MS_4'ün gözlemler sonucunda oluşturulan şekli (Rommel vd. 2021)

2002 MS_4'ün *Spitzer Uzay Teleskobu* ve *Herschel Uzay Teleskobu*'ndan elde edilen veriler ile hesaplanan eşdeğer çapı 934 ± 47 km'dir (Vilenius vd. 2012). Rommel vd. (2021) ise yapmış olduğu çalışmada bu muazzam katılımlı çoklu yıldız örtülme kampanyası ile çok daha küçük hata ile eşdeğer çapını 800 ± 24 km olarak hesaplamıştır. Ayrıca nesnenin kuzey iz düşümsel bölgesinde 20 km civarında topografik özellikler barındırdığını vurgulamaktadır.

Görüldüğü üzere Neptün-ötesi nesnelerin başarılı çoklu yıldız örtülme gözlemlerinin yapılabilmesi günümüzde dahi büyük bir çaba gerektirmektedir. Bu cisimlerin arka plan yıldızlarının önünden geçiş yaptıkları süreler genellikle fiziksel çaplarının büyük olması ve uzay hızlarının yavaş olması nedeniyle daha uzundur. Örtülme süresinin uzun olmasının getirdiği avantaj ile eğer örtülen yıldız da parlak bir kaynak ise küçük teleskoplarla dahi gözlemlerin, uzun poz süreleri verilerek tespit edilebilmesi olasıdır.

Fakat, konu TNO'lar olunca önümüze başka sorunlar çıkmaktadır: yörünge parametrelerinin güvenilirliği! Yani öngörülen konumda bulunma kestirilebilirliği Güneş'ten uzaklaştıkça azalmaktadır. Bunun sebebi çoğu nesne için yeterince uzun bir zaman aralığında astrometrik gözlemlerinin henüz yapılamamış olmasıdır. Desmars vd. (2011)'ne göre, minimum yörünge efemeris belirsizliği elde etmek için gerekli astrometrik gözlem süresi 8000 günün üzerindedir. Bu sebeple çoğu TNO için bir yıldız

örtülme zamanı tahmini ve Yer üzerinde bir örtülme hattının tahmini (prediction) oldukça zordur. ERC Lucky Star Projesi hedefleri arasında bulunan Centaur'lar ve TNO'ların yıldız örtülme gözlemlerindeki başarıyı artırma amaçlı NIMA (Numerical Integration of the Motion of an Asteroid) adında özgün bir yörünge tayin prosedürü geliştirilmiştir (Desmars vd. 2015).



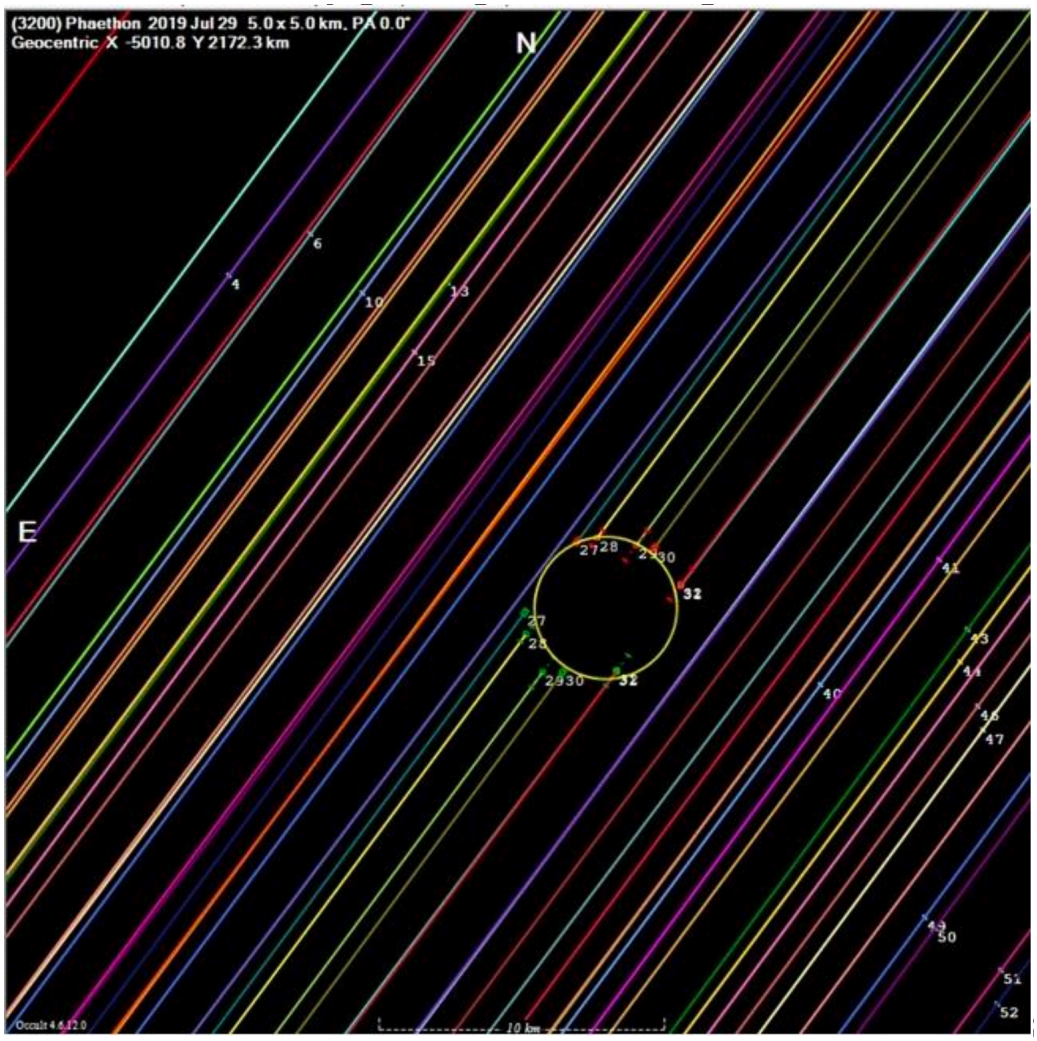
Şekil 2.17. 2008OG19 nesnesi için NIMA ve diğer efemeris hesaplama yöntemlerinin karşılaştırılması (Desmars vd. 2015)

Şekil 2.17'de NIMA'nın; AstDys[26], JPL Horizons System[27] ve VO-Miriade[28] ile efemeris karşılaştırmaları (470599) 2008 OG_{19} TNO'su için verilmiştir. Çarpıcı bir şekilde NIMA ile yapılan efemeris hesaplarının diğerlerinden daha duyarlı olduğu Desmars vd. (2015) tarafından gösterilmiştir. 382 seçilmiş Centaur ve TNO için bu efemerisler ERC Lucky Star Projesi internet sitesi üzerinden sunulmaktadır[29].

Jüpiter-ötesinde bulunan nesnelerin yıldız örtülme yöntemi ile heyecan verici gözlemleri sonucunda gerçekleştirilen keşiflerin yanı sıra, Güneş sisteminde bir başka

[26] https://newton.spacedys.com/astdys/, Asteroids Dynamic Site [Son erişim tarihi: 03.01.2023]
[27] https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/app.html [Son erişim tarihi: 03.01.2023]
[28] http://vo.imcce.fr/webservices/miriade/ [Son erişim tarihi: 03.01.2023]
[29] https://lesia.obspm.fr/lucky-star/nima.php [Son erişim tarihi: 03.01.2023]

tarihsel gözlem ise 29 Temmuz 2019'da gerçekleştirilmiştir. Bu tarihte gerçekleştirilen gözlem ile ilk defa bir Yer'e Yakın Asteroit olan (3200) Phaethon'un yıldız örtülme yöntemi gözlemi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. (3200) Phaethon bu tarihte 7.3 kadir olan SAO 40261 yıldızını örtmüş ve IOTA'nın[30] bu gözlem kampanyasına toplam 52 farklı istasyon katılım sağlamıştır. Şekil 2.18'de görüldüğü üzere 6 istasyon Phaethon'dan kaynaklanan örtülmeyi tespit edebilmişlerdir.



Şekil 2.18. (3200) Phaethon ilk kampanya gözleminden sonra elde edilen iz düşümsel şekli (Dunham vd. 2019)

(3200) Phaethon bu gözlem için rastgele seçilmiş bir nesne değildir. Bu asteroidin Geminid meteor yağmurlarının görünen kaynağı olduğu bilinmektedir ancak çoğu meteor yağmurlarının kaynağının kuyruklu yıldızlar olduğu düşünülünce Phaethon'un durumu bir bilinmezlik yaratmaktadır (Dunham vd. 2019). Ayrıca

[30]International Occultation Timing Association (IOTA)

Phaethon, Japonya Uzay Araştırma Ajansı (JAXA)'nın *DESTINY+* görevinin[31] yakın geçiş listesinde bulunmaktadır (Sommer vd. 2020). Her ne kadar Phaethon'un şekli, Aralık 2017'deki radar gözlemlerinden iyi derecede elde edilmiş olsa da, JAXA tarafından NASA ve IOTA'dan 27 Temmuz 2019'da gerçekleşecek bu örtülme gözlemi için talepte bulunulmuştur (Dunham vd. 2019). JAXA bu gözlem ile Phaethon'un şeklindeki belirsizliği gidermeyi ve ayrıca elde edilecek hassas astrometrik konum ile yörünge iyileştirmesi yapmayı amaçlamıştı. Fakat bir sorun vardı. Böylesine küçük ve yakın bir nesnenin daha önce yıldız örtülme gözlemi yapılmamıştı. Ayrıca nesnenin yörüngesi üzerindeki belirsizlik dolayısı ile Yer üzerindeki örtülme hattı çok iyi tahmin edilemeyebilirdi. Tahminler doğru olsa bile konumların hepsi mobil olmak zorundaydı. Tüm bunların arasında en ciddi sorun ise örtülmenin yaklaşık 0.5 saniye sürecek olmasıydı. Bu durum gözlemlerin video fortmatta ya da çok hızlı görüntüler alan kameralarla yapılmasını şart koşuyordu. Neyse ki, tüm bunlara rağmen IOTA'nın gerçekleştirmiş olduğu bu gözlem kampanyası ile muazzam bir iş başarıldı ve 6 istasyonda pozitif gözlem gerçekleştirildi ve (3200) Phaethon yıldız örtülme gözlemi gerçekleştirilen ilk Yer'e Yakın Nesne olmuş oldu[32].

Görüldüğü üzere Jüpiter-ötesi -büyük- nesnelerin gözlemsel zorluklarından farklı olarak Yer'e Yakın Nesnelerin gözlemlerinde de örtülme zamanının kısalığından dolayı büyük bir zorluk vardır. Örtülme zamanının son derece kısa olması, yeterince hızlı bir kameranın olmaması durumunda gözlemi imkansız hale getirmektedir. Şunu da mutlaka eklemek gerekir ki, en önemli ekipmanlardan birinin hızlı kamera olmasına rağmen örtülecek yıldızın da küçük/amatör teleskoplarla da gözlenebilecek kadar "parlak" olması gerekmektedir.

JAXA'nın *DESTINY+* görevine katkı sağlamak amacıyla gerçekleştirilen tarihi (3200) Phaethon yıldız örtülme gözleminden henüz iki yıl bile geçmeden bir başka nefes kesen yıldız örtülme gözlemi de bir Potansiyel Tehlikeli Asteroit (PTA) olan tüm zamanların en korkulan asteroitlerinden (99942) Apophis için 7 Mart 2021 ve 11 Mart 2022 tarihlerinde yapıldı. Boyutu yaklaşık 340 ± 0.04 km (Brozović vd. 2018) olan bir PTA'nın yıldız örtülme gözleminin yapılabilmesi olağanüstü bir başarıdır. Gözlem kampanyası hem ERC Lucky Star Projesi hem de ACROSS Projesi (Asteroid Collaborative Research via Occultation Systematic Survey)[33] tarafından Occultation

[31] Demonstration and Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage with Phaethon fLyby and dUst Science

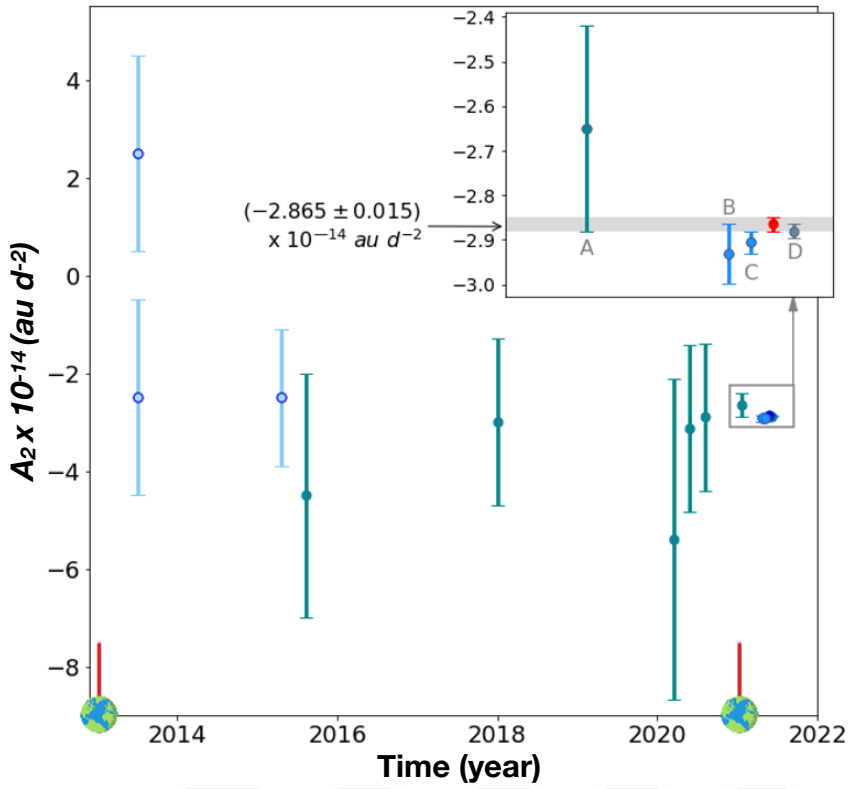
[32] (3200) Phaethon'un bir sonraki en geniş katılımlı yıldız örtülme gözlem kampanyası 3 Ekim 2021 tarihinde Güney Kore ve Japonya'dan toplam 72 gözlemcinin desteği ile 36 farklı konumdan gerçekleştirilmiştir. Yapılan gözlemler sonucunda 18 istasyonda yıldız örtülme olayı pozitif tespit edilmiştir. Bu sayıyla birlikte (3200) Phaethon, böylesine küçük bir asteroitte ($6.12 \pm$ km $0.07 \times 4.14 \pm 0.07$ km) tek seferde en çok pozitif olayın tespit edildiği ilk asteroit olmuştur (Yoshida vd. 2022).

[33] https://lagrange.oca.eu/fr/home-across [Son erişim tarihi: 03.01.2023]

Portal[34] üzerinden yürütülmüştür. Bu iki tarihte gerçekleştirilen gözlem kampanyalarında aralarında 8-cm ayna çapına sahip teleskobun da bulunduğu 40'tan fazla gözlem istasyonu Kuzey Amerika'da ABD üzerindeki örtülme hattı boyunca dağılarak gözlemleri gerçekleştirmişlerdir. 7 Mart 2021'de gerçekleştirilen gözlem 8.6 kadirlik ($Gmag$) NY Hydrae yıldızının örtülmesi ile gerçekleştirilmiş iken, 11 Mart tarihinde gerçekleştirilen gözlem 9.3 kadir ($Gmag$) parlaklığında UCAC4 436-049782 yıldızının örtülmesi ile gerçekleştirilmiştir. Bu denli küçük bir PTA'nın gözlenebilmesinde *Gaia* kataloğundan elde edilmiş örtülme hattı ve zamanı tahminlerinin katkısı yadsınamaz boyuttadır (Tanga vd. 2021). Bu örtülmenin başarısını bir analoji ile anlatmamız gerekirse; böylesine küçük bir asteroidin örtülme hattının nereden geçebileceğini tahmin edebilmek 1000 km ötedeki 50 Kuruş'un tam olarak nerede olduğunu kestirmek ile eşdeğer bir konum hassasiyeti gerektirmektedir. Ayrıca 7 Mart 2021 tarihindeki nominal örtülme süresi 0.1 saniye ve 11 Mart 2021 tarihinde örtülme süresi 0.035 saniyedir[35]! Bu gözlemlerin yapılabilmesi için birim zamanda çok yüksek kare kaydeden kameralar gereklidir ve bu gözlemler bu özellikteki kameralar ile yapılmıştır.

Başarılı olarak gerçekleştirilmiş tekil veya çoklu yıldız örtülme gözlemlerinden yalnızca nesnenin fiziksel özellikleri ile ilgili kritik bilgiler elde etmeyiz. Aynı zamanda nesnenin astrometrik konumuna dair çok önemli bir bilgi elde ederiz. Nitekim, (99942) Apophis'in 7 Mart 2021 tarihli gözlemi sonrası hesaplanan ≈ 0.3 miliyaysaniyelik (mas) hassasiyete sahip astrometrik konumu ile düzeltilen yörünge parametreleri sayesinde, örtülme hattındaki 1.6 km (1σ) olan belirsizlik hattı sadece 25 metreye (1σ) düşürülebilmiştir (Tanga vd. 2021).

[34] https://occultation.tug.tubitak.gov.tr/ [Son erişim tarihi: 03.01.2023]
[35] https://asteroid-obs.oca.eu/foswiki/bin/view/Main/Apophis [Son erişim tarihi: 03.01.2023]

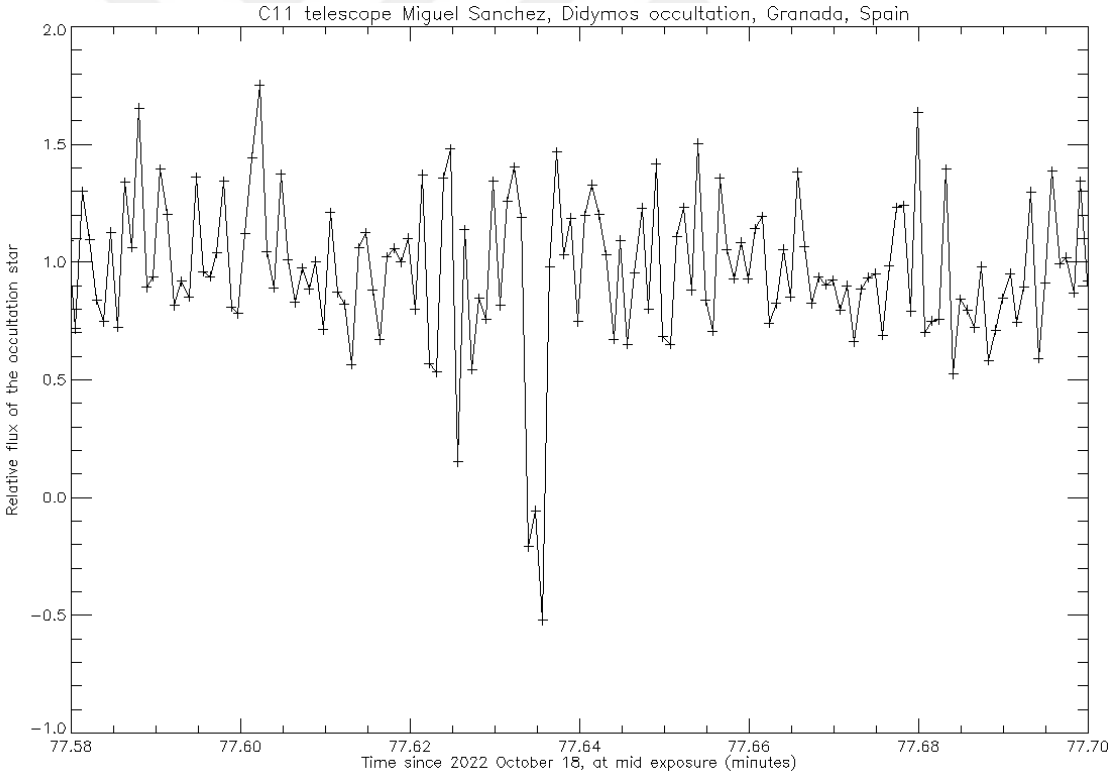


Şekil 2.19. (99942) Apophis yıldız örtülme gözlemlerinin Yarkovsky ivmesinin iyileştirmesine katkıda bulunduğunu gösteren 29/03/2021 tarihli ESA'nın haftanın görseli olarak seçilmiş grafik (Tanga vd. 2021)

Şekil 2.19'daki grafik (99942) Apophis üzerindeki Yarkovsky ivmesi hakkındaki bilgimizin zaman içindeki evrimini göstermektedir. Şekil 2.19 üzerinde açık mavi ile gösterilen noktalar teorik modelden hesaplanan verileri, diğer veriler ise optik ve radar astrometri verilerinden elde edilmiş noktaları göstermektedir. Grafik üzerindeki küçük kutunun içinde kalan kısımlar hesaplanan son verileri içermektetir. Bu kısım büyütülerek Şekil 2.19 içinde ayrı bir grafik olarak verilmiştir. Grafik içerisindeki Yer simgeleri Apophis'in yakın geçişini temsil etmektedir. Grafik içindeki kırmızı nokta 15 Mart 2021 tarihine kadar mevcut olan tüm gözlemler ve 7 Mart 2021 tarihindeki yıldız örtülme gözleminden elde edilmiş astrometrik konum ile hesaplanmış veriyi temsil etmektedir. (A) 2021 Ocak ayındaki en iyi ölçümlerden hesaplanmış veriyi, (B) yakın geçişler sırasında elde edilmiş verilerin de eklenmiş halini, (C) radar gözlemlerinin de eklenmiş halini ve (D) ise JPL'den bağımsız olarak kırmızı nokta ile kıyaslanabilmesi için hesaplanmış Yarkovsky ivmesi verisini ifade etmektedir. Böylece bu harikulade yıldız örtülme gözlem kampanyası sayesinde (99942) Apophis üzerindeki Yarkovsky ivmesinin değeri %0.5 hata ile ölçülebilmiştir (Tanga vd. 2021). Bu değerin bu yıldız örtülme gözleminden sadece birkaç ay öncesine kadar 20 kat daha büyük olduğu göz önünde bulundurulduğunda, yıldız örtülme kampanya gözlemlerinin ne denli önemli

olduğu bir kez daha çok iyi bir şekilde anlaşılmaktadır (Tanga vd. 2021).

Bir diğer tarihi yıldız örtülme gözlemi de *DART* ve *Hera* görevlerinin hedefi olan Didymos ikili asteroidinin yıldız örtülme gözlemidir. İlk olarak 15 Ekim 2022 tarihinde beşi Roger Venable tarafından ve biri de Robert Dunford tarafından organize edilen toplam altı teleskop ile gözlenmiş ve Robert Dunford tarafından yıldızın 0.13 saniye boyunca örtüldüğü açıkça tespit edilebilmiştir (09:02 CEST). Bu süre öngörülen maksimum örtülme süresinden çok az kısadır. Didymos'un en belirgin yıldız örtülme gözlemi ise 18 Ekim 2022 tarihinde İspanya Endülüs Astrofizik Enstitüsü[36] araştırmacısı Jose-Luis Ortiz'in toplam beş teleskop ile organize ettiği gözlem kampanyası ile yapılmıştır. Bu teleskoplardan sadece biri pozitif gözlem yakalayabilmiştir. Didymos örtülme olayının pozitif gözlemi, Miguel Sánchez González tarafından Granada/İspanya'da 28-cm'lik bir teleskop ve Player One Apollo-M Max (CMOS) kamera ile öngörülen gölge hattı üzerinde Şekil 2.20'de açık bir şekilde görüldüğü üzere kayıt altına alınabilmiştir. Her iki örtülme gözlemi de ACROSS Projesi kapsamında Occultation Portal'a raporlanmış ve verileri kayıt altına alınmıştır.



Şekil 2.20. 18 Ekim 2022 tarihinde Granada, İspanya'da kaydedilen Didymos asteroidinin yıldız örtülme gözlemi (Sanchez 2022)

Yıldız örtülme gözlem tekniği ile edinilen tüm bu muazzam başarıların arkasında

[36]Instituto de Astrofisica de Andalucia-CSIC

tek başına *Gaia* görevinin olduğunu söylemek haksızlık olur. *Gaia*'nın muazzam astrometrik ölçümlerinin yanı sıra, NIMA gibi yörünge tayin algoritmalarının (Desmars vd. 2015) nesne efemeris hesabında ne kadar başarılı olduğundan da daha önce bahsetmiştik. Tüm bunlarla beraber kaliteli gözlem ekipmanlarının (teleskop, kamera, filtre seti, GPS cihazı vb.) amatörler tarafından da daha uygun fiyatlara alınabiliyor olmasının da etkileri yadsınamaz boyuttadır. Örneğin, Buie vd. (2020), QHY-174M-GPS marka/model kameraların yıldız örtülme gözlemleri için fiyat-performans ve bununla birlikte zaman duyarlılığı açısından ne kadar büyük bir teknolojik katkı sağladığını (486958) Arrokoth gözlemleri ile ortaya koymuştur. Ayrıca amatörlerin tercih ettiği astronomik ekipmanlara dair bulgular Occultation Portal çalışması (Kilic vd. 2022) ile de detaylandırılmış ve güncel bulgular da bu tezde Bölüm 4.1'de sunulmuştur. Tüm bunlara ek olarak, tüm Dünya'da internet altyapısının gelişmesi ve bulut servislerine yapılan yatırımların artması (Paunov vd. 2019; Murray ve Smith 2021) ile birlikte bant genişliğinin de artması üretilen/transfer edilen veri boyutunun ciddi miktarda artmasında etkili rol oynamıştır. Tüm bu gelişmeleri birlikte ele aldığımızda yıldız örtülme kampanya gözlemlerindeki artışın sebeplerini doğru bir şekilde ortaya koymuş oluruz.

Tüm bu gelişmelere dayanarak amatör astronomlardaki bu potansiyeli, yıldız örtülme kampanyalarına aktarabilmek adına pek çok profesyonel araştıma grupları oluşturulmuştur. Bunlardan en bilinenlerini sıralayacak olursak; Fransa, İspanya ve Brezilya'dan araştırmacıların yer aldığı, Centaur türü bir nesne olan (10199) Chariklo'nun (Braga-Ribas vd. 2014) ve cüce gezegen (136108) Haumea'nın (Ortiz vd. 2017) etrafındaki halkaların keşfi gibi çığır açan keşiflere imza atan ERC Lucky Star Projesi, ABD'den yine çığır açıcı bir gözlem olan TNO (486958) Arrokoth'un gözlenmesine (Buie vd. 2020) imza atan RECON[37] ve yine ilk defa bir PTA'nın -(99942) Apophis- yıldız örtülme gözlem tekniği ile gözlenebilmesine olanak sağlayan (Tanga vd. 2021) Fransa'daki Côte d'Azur Gözlemevi'nin bir projesi olan ACROSS'u en başlarda sayabiliriz. Bu gruplar ilgilendikleri Güneş sistemi nesnesini yıldız örtülme gözlem yöntemi ile yakalayabilmek adına; International Occultation Timing Association (IOTA)[38], IOTA-Avrupa (IOTA-ES)[39], The Trans Tasman Occultation Alliance (Avustralya, Yeni Zellanda), Japanese Occultation Information Network (Japonya), Liga Iberoamericana de Astronomia - LIADA (Orta Amerika), euraster.net (Asteroidal Occultation Sites)[40], Hindistan, Kuzey ve Güney Afrika yıldız örtülme yerel ağları gibi organizasyonlarla iletişime geçerek onlardan gözlemsel destek talebinde bulunmaktadır. Günümüzde bu gruplar genellikle yıldız örtülme kampanya gözlemi duyurularını ERC

[37] http://tnorecon.net/ Research and Education Collaborative Occultation Network [Son erişim tarihi: 03.01.2023]

[38] https://occultations.org/ [Son erişim tarihi: 03.01.2023]

[39] https://www.iota-es.de/ [Son erişim tarihi: 03.01.2023]

[40] 1 Ocak 2023 tarihinden itibaren SODIS (Stellar Occultation Data Input System) https://sodis.iota-es.de/ [Son erişim tarihi: 03.01.2023] üzerinden hizmet verecektir.

Lucky Star'ın internet sitesinde olduğu gibi[41] ana projelerin internet sitelerinden veya *Occult* yazılımından takip etmektedirler. Ayrıca *Occult*'un çevrim içi versiyonu Occult Watcher Cloud[42] üzerinden de çeşitli grupların kampanya duyuruları takip edilebilmektedir (Pavlov 2018; Pavlov 2018).

Bu tez çalışmasının bir kayda değer katkısı da, bir profesyonel araştırma grubunun duyurduğu bir Güneş sistemi nesnesi için gözlem kampanyası yapılırken, tüm bu dağınık grupları organize edecek ve veri bütünlüğünü sağlayacak merkezi bir platformun oluşturulmasını sağlamasıdır. Daha önceden de Rommel vd. (2021)'nin çalışması ile bahsedildiği üzere; Avrupa, Kuzey Afrika ve Batı Asya boyunca örtülme hattının geçtiği 8 Ağustos 2022'de organize edilen 2002 MS4'ün gözlem kampanyasına 116 farklı konumdan katılım sağlanmıştı. Görüldüğü üzere; artık yıldız örtülme kampanya gözlemlerinin organizasyonu, yönetimi, koordinasyonu, verilerin toplanması, arşivlenmesi ve analizi gibi konularda yeni ve pratik bir bakış açısının getirilmesinin kaçınılmaz olduğu görülmektedir.

Günümüzde her bir yıldız örtülme kampanyası, dünyanın her yerinden katılan gözlemcilerin olağanüstü bir koordinasyonunu gerektirmektedir. Bu tür bir katılımın sistematik olarak izlenmesi, verilerin başarılı ve verimli bir şekilde yorumlanması ve en iyi bilimsel sonucun elde edilebilmesi için her bir gözlemcinin katkısının garanti altına alınması sağlanmalıdır. Bunun için dağınık grupların sistematik ve bütünleşik olmayan gözlemsel bilgi toplama araçları olsa da, gelişen teknoloji ile birlikte bu yöntemler daha önce detayları ile bahsettiğimiz gözlemci hacmi için son derece yetersiz kalmaktaydı. Ayrıca yıldız örtülme gözlemleri için kampanya koordinasyonu, veri toplama, veri arşivi, analiz ve görselleştirme özelliklerinin bir arada bulunduğu bir ortam henüz bulunmamaktaydı.

Bu tez çalışması ile geliştirilen platformdan önce, genel olarak, bir araştırmacı tüm kampanya katılımcılarıyla e-posta yoluyla iletişim kurar ve çeşitli bulut hizmetleri aracılığıyla gözlemcilerden tüm gözlemsel bilgi ve verileri bu şekilde toplamaya çalışırdı. Her bir gözlemciden e-posta yoluyla gözlem koşullarının, ayrıntılı ekipman bilgisinin ve en önemlisi gözlem verilerinin bu şekilde toplanması, araştırmaların gecikmesine sebep olmakta ve ayrıca gözlemsel verinin/bilginin kaybolması/zarar görmesi veya eksik toplanması olasılığı taşımaktadır. Bunun yanı sıra, profesyonel gözlemevleri genellikle FITS formatında veri üretirken, amatör gözlemcilerin çoğu video formatını tercih etmektedirler. Bu verilerin boyutu kimi gözlem kampanyanlarında onlarca GigaByte'ı bulabilmektedir. Araştırmacılar tarafından talep edilen gözlem süresi bazen saatleri bulabilmektedir. Bu sebeple, gözlemciler tarafından üretilen veri boyutu, ücretsiz veri paylaşımlı bulut hizmetlerinin kotalarını aşabilmektedir. Ayrıca verileri

[41] https://lesia.obspm.fr/lucky-star/ [Son erişim tarihi: 03.01.2023]
[42] https://cloud.occultwatcher.net/ [Son erişim tarihi: 03.01.2023]

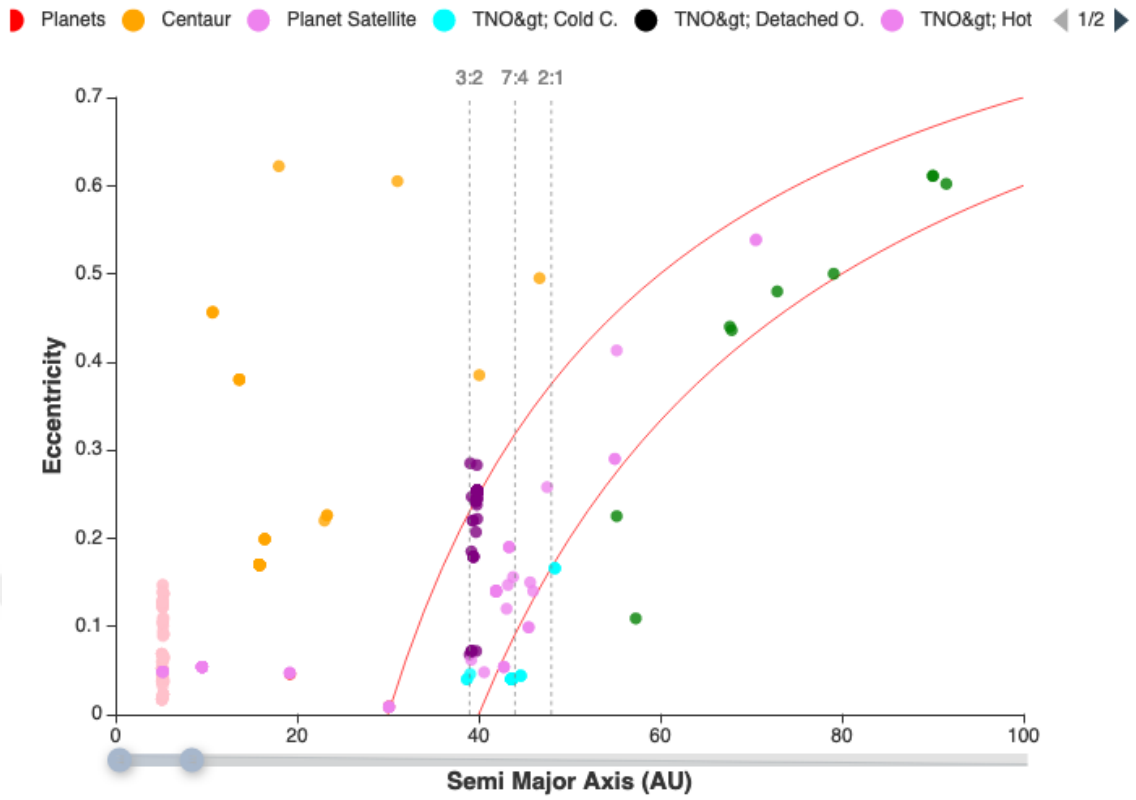
toplayan araştırmacı, onlarca hatta yüzlerce gözlemciden gelen verileri arşivleme sorunuyla karşı karşıya kalabilmektedir.

Tüm bu sorunları sistematik, pratik ve uygun maliyetli bir şekilde çözmek amacıyla ve yıldız örtülme kampanyalarına katılan her bir gözlemcinin bilimsel yayınlarda yer almalarını garanti altına almak için; ihtiyaç duyulan verilerin toplandığı, arşivlendiği ve analiz edildiği (ışık eğrileri üreten) ortak bir çevrim içi platformun geliştirilmesi elzem hale gelmiştir. Bu sebeplerle, ERC Lucky Star Projesi ve ACROSS Projesi gözlem kampanyalarını etkili, verimli ve ekonomik bir şekilde yönetmek için Occultation Portal (OP)[43] adında daha önce bu amaçla üretilmemiş bir platform geliştirilmiştir (Kilic vd. 2022).

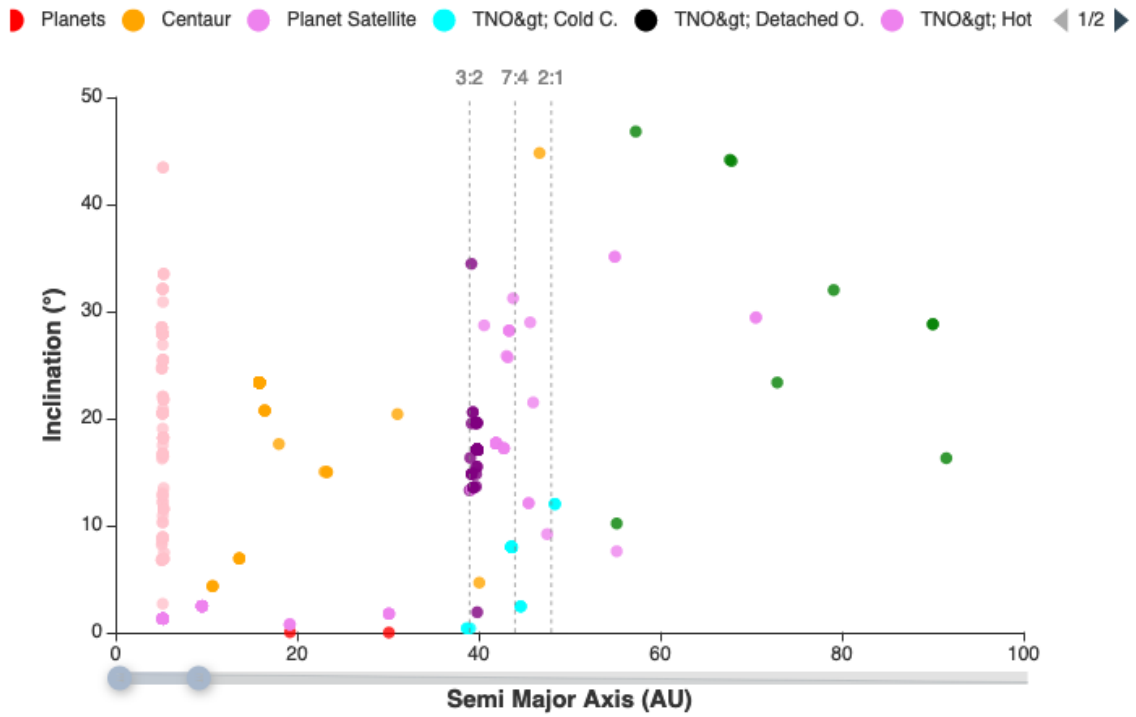
Lucky Star Projesi'nin internet sitesinde[44] de açık bir şekilde ifade edildiği üzere projenin temel amacı, yıldız örtülme tekniğini kullanarak TNO'ların şekillerini, olası atmosferlerini ve halkalarını kilometre-altı ile bin kilometrelere kadar boyutlarını ortaya çıkarabilecek yıldız örtülme gözlemleri yapabilmektir. Bu nesneler Güneş sisteminin ilk safhalarına ait korunmuş materyaller barındırmaktadır (Lykawka ve Mukai 2008; Morbidelli vd. 2008). Bu nedenle Güneş sisteminin kökenini, yapısını ve evrimini anlayabilmemiz açısından TNO nesneleri Lucky Star Projesi'nin hedef nesneleridir. Şekil 2.21a'da görüldüğü üzere bu nesnelerin çoğunun enöte konumları (Q) 30-40 AB arasında öbeklenmektedir ve pembe eğriler ile temsil edilmiştir. Bu nesnelerden biri olan (28978) Ixion'un detaylı fiziksel özellikleri ve şekli ilk defa Occultation Portal (OP) üzerinde yürütülen kampanya gözlemleri ile ortaya konabilmiştir. Bu sebeple de bu tezin kapsamı içerisine dahil edilmiştir.

[43] https://occultation.tug.tubitak.gov.tr/ [Son erişim tarihi: 03.01.2023]. OP alternatif olarak https://occultationportal.org/ [Son erişim tarihi: 03.01.2023] adresinden hizmet vermektedir.

[44] https://lesia.obspm.fr/lucky-star/ [Son erişim tarihi: 03.01.2023]



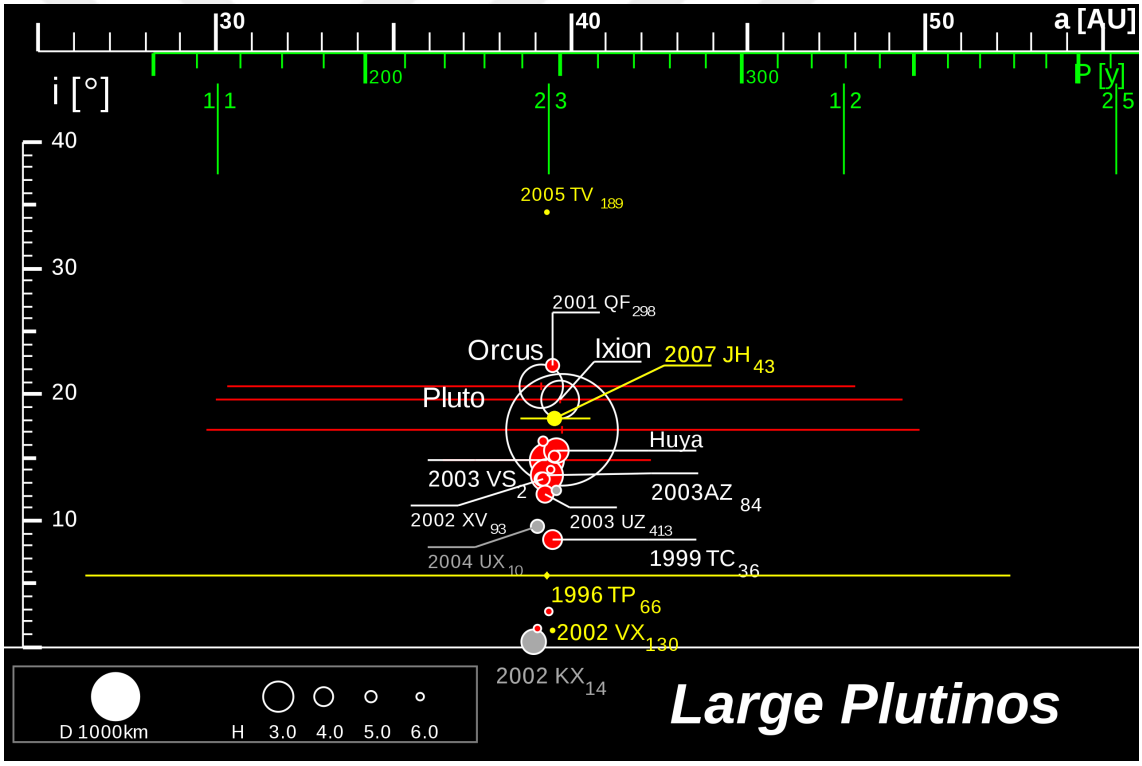
(a)



(b)

Şekil 2.21. Yıldız örtülme gözlemleri yapılan nesnelerin **a)** yarı-büyük eksen uzunlukları - dışmerkezlik; **b)** yarı-büyük eksen uzunlukları - yörünge eğim açısı grafikleri (Braga-Ribas vd. 2019)

(28978) Ixion ya da IAU (Uluslararası Astronomi Birliği)'nun geçici isimlendirmesi ile 2001 KX_{76} adı verilen bu cisim büyük bir TNO olarak kabul edilmiştir[45]. Kuiper kuşağında bulunan buzlu nesnelerden biridir. Yörüngesi Neptün ile 2:3 ortalama-hareket-rezonansı (mean-motion-resonance) bölgesinde bulunan Ixion (bkz. Şekil 2.21 ve Şekil 2.22), aynı bölgenin ana cisminin Plüto olması sebebiyle bir *plutino* olarak sınıflandırılmaktadır (Johnston 2022). Ixion'un en son elde edilen çapı 709.6 ∓ 0.2 km'dir (Levine vd. 2021). Çapı göz önüne alındığında Ixion dördüncü büyük plutinodur ve diğer plutinolar ile kıyaslanması Şekil 2.22'de verilmiştir. Şekil 2.22'de seçilmiş büyük plutinolar, yarı-büyük eksen uzunluklarına (a) karşılık yörünge eğim açıları (i) ile gösterilmiştir. Çemberlerin boyutları birkaç büyük nesne için güncel çap bilgisini ifade etse de, diğer nesneler için çemberler mutlak parlaklığı (H) ifade etmektedir. Yeşil belirteçler Neptün'e göre belli başlı ortalama-hareket-rezonanslarını göstermektedir. Nesnelerin yörünge basıklıkları dolaylı olarak çizgi uzunlukları (enberi-sol, enöte-sağ) ile ifade edilmektedir.

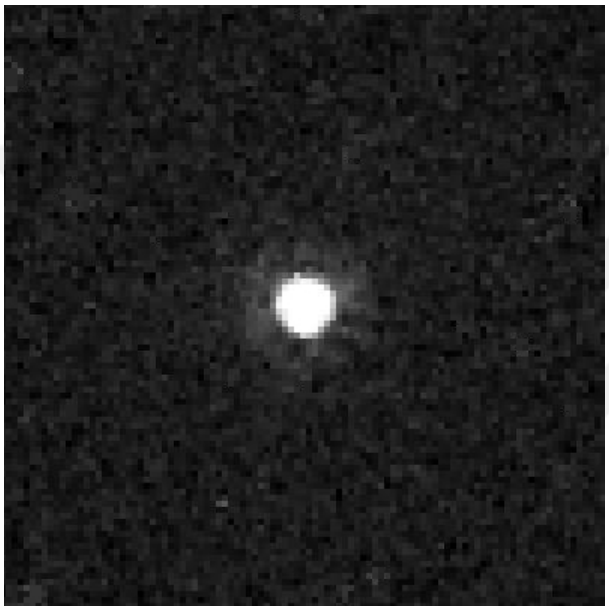


Şekil 2.22. Büyük plutinolar ve Ixion (2002 KX_{12} nesnesi referans olması için konulmuştur. *Plutino* değildir) (Eurocommuter 2022)

Ixion, 2001 yılının Mayıs ayında Cerro Tololo Inter-American Gözlemevi'nde

[45]Ixion keşfedildiğinde bilinen en büyük TNO'ydu (Licandro vd. 2002). Hatta keşfin ilk duyurulduğu haber ve metinlerde, Ixion'un %4 albedo değeri göz önünde bulundurulduğunda 1270 km çapa sahip olabileceği ve bu boyutun cüce gezegen Ceres'ten (∼946 km) büyük ve Plüto'nun uydusu Charon (∼1200 km) ile kıyaslanabilir olduğundan bahsedilmektedir (Hahn vd. 2001; Millis vd. 2001)

Deep Ecliptic Survey gözlemlerini yürüten astronomlar tarafından 4-metre ayna çapına sahip Victor M. Blanco Teleskobu ile Akrep takımyıldızındayken keşfedilmiştir[46]. Nesneye daha sonra E. K. Elliot'un önerisiyle, Yunan mitolojisinde efsanevi bir kavim olan Lapithler'in kralı *Ixion*'un ismi verilmiştir. Ixion'un bu keşfi, boyutları Plüton ile kıyaslanabilir uzak TNO'ların varlığını desteklemiş ve Plüton'un "ana" bir gezegen mi yoksa "küçük" bir Güneş sistemi nesnesi olarak mı kabul edilmesi gerektiği ile ilgili tartışmaları körüklemiştir (Hahn vd. 2001). Gerçekten de Ixion'un keşfi sonrasında cüce gezegenler Haumea (2004), Eris (2005) ve Makemake (2005) gibi büyük TNO'ların keşifleri yapılmıştır (Brown 2022).



Şekil 2.23. 5 Şubat 2006 tarihinde Hubble Uzay Teleskobu ile alınmış Ixion'un görüntüsü (Hubble Uzay Teleskobu/Michael E. Brown)

Şekil 2.23'te 5 Şubat 2006 tarihinde Hubble Uzay Teleskobu ile alınmış görüntüde görüldüğü üzere Ixion'un etrafında bir uyduya rastlanmamış ve literatürde uydu varlığı ile ilgili bir bulguya erişilememiştir. Çizelge 23'te gösterildiği üzere farklı çalışmalardan elde edilen çap bilgisi göz önünde bulundurulduğunda muhtemel bir cüce gezegen olduğu (Tancredi ve Favre 2008; Brown 2022) ve biçimsiz küçük Güneş sistemi nesneleri ile küresel şekilli cüce gezegenler arasında bir ara geçiş nesnesi olabileceği değerlendirilmektedir (Grundy vd. 2019). Yine bu tez çalışmasının konularından biri olan 13 Ekim 2022 tarihli yıldız örtülme gözlemini gerçekleştiren başka bir ekip tarafından elde edilen 709.6 $\pm$ 0.2 km (Levine vd. 2021)'ı ele aldığımızda Ixion dördüncü büyük plutino olmaktadır.

[46] https://www.minorplanetcenter.net/iau/ECS/MPCArchive/2002/MPC_20020328.pdf [Son erişim tarihi:01.10.2022]

Çizelge 23. Ixion'un farklı araştırmalardan elde edilmiş çapları

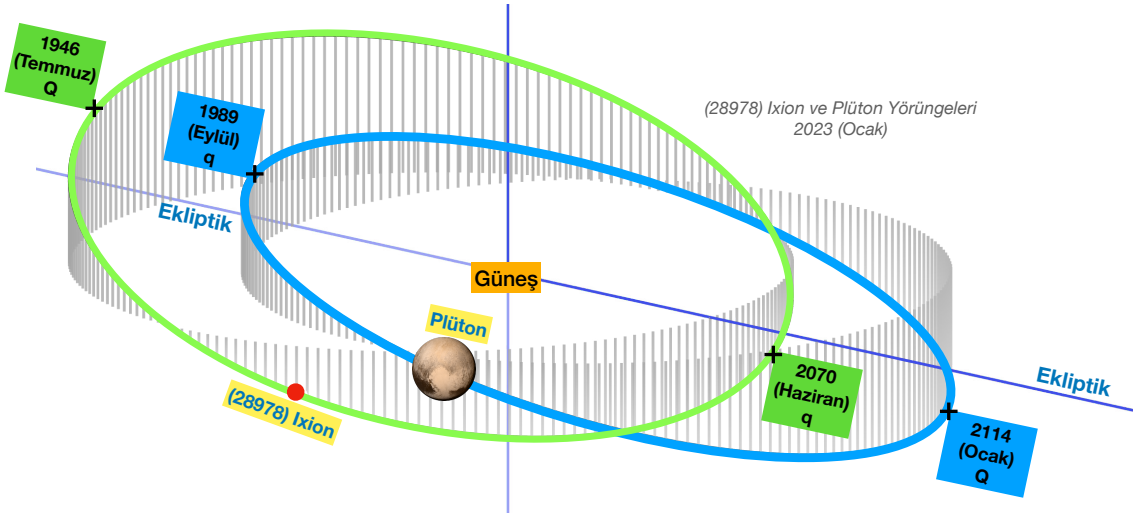
Yıl	Çap (km)	Yöntem	Kaynak
2002	1055±165	Radyo-fotometri	(Bertoldi, B. vd. 2002)
2003	<804	Radyo-fotometri	(Altenhoff vd. 2004)
2004	<822	Optik+Termal	(Grundy vd. 2005)
2005	475±75	Termal	(Stansberry vd. 2005)
2007	480^{+152}_{-136}	Termal + Radyo-fotometri	(Cruikshank vd. 2007)
2008	650^{+260}_{-220}	Termal (Spitzer)	(Stansberry vd. 2008)
2008	590±190	Termal	(Brown 2008)
2013	~ 549	Termal	(Mommert 2013)
2013	617^{+19}_{-20}	Termal (Herschel-Spitzer)	(Lellouch vd. 2013)
2021	709.6±0.2	Yıldız örtülmesi	(Levine vd. 2021)

Ixion'un Neptün ile 2:3 ortalama-hareket-rezonansı, Neptün'ün Güneş etrafında her üç dolanmasına karşılık Ixion'un da iki dolanma gerçekleştirdiğini ifade etmektedir. Çizelge 24'de de verildiği üzere Ixion'un yarı-büyük eksen uzunluğu 39.66 AB, yörünge dönemi ise 249.81 yıldır. Plüton'a benzer şekilde, Ixion'un yörüngesi de basık ($e = 0.247$) ve tutulum düzlemi ile eğimlidir ($i = 19.64°$). Hatta Ixion'un yörünge eğimi yaklaşık Plüto'dan $2.6°$ daha fazladır. Ixion'un Güneş'e enberi noktasındaki uzaklığı 29.862 AB, enöte konumundaki uzaklığı da ~ 49.468 AB'dir (Johnston 2022).

Çizelge 24. Ixion'un NIMA v12 (Desmars vd. 2015) ile elde edilmiş yörünge parametreleri ve efemeris bilgileri

Epoch (Julian Date)	2459800.5
Yarı-büyük eksen (a)	39.664021 ± 0.000175 AB
Dış merkezlik (e)	0.247144023 ± 0.000002490
Eğim açısı (i)	19.643362059 ± 0.000014942°
Çıkış düğümünün boylamı (Ω)	71.059914 ± 0.000015°
Enberi argümanı (ω)	299.168262 ± 0.000708°
Ortalama ayrıklık (M)	291.227260 ± 0.000893°
Yörünge dönemi (P)	249.81 yıl
Efemeris sürümü	NIMAv12
Gözlem dosyası	omc_ast_NIMAv12.txt
bsp dosyası	28978_Ixion_nima_v12.bsp
İlk gözlem tarihi	1982-07-17
Son gözlem tarihi	2021-04-28
Fit için kullanılan gözlem adedi	447
Kullanılmayan gözlem adedi	2
DES gözlem adedi	0
MPC gözlem adedi	194
Yayımlanmamış gözlem adedi	255
Gözlemlerin RMS değeri	0.199 arcsec

Şekil 2.24'te verildiği üzere Ixion ile Plüton'un yörüngeleri birbirine benzer olmalarına karşın Ixion'un yörünge düzlemi ile Plüto'nun yörünge düzlemi aynı doğrultuda değildir. Tutulum düzlemi üzerinde Ixion'un enöte konumu Plüto'nun üzerinde kalmaktadır. Ixion yörüngesinde enöte konumuna doğru yol almaktadır ve 2070 yılında bu konumda olacaktır. *Deep Ecliptic Survey* kapsamında yapılan yörünge simülasyonları Ixion'un önümüzdeki 10 milyon yıl boyunca 27.5 AB'lik bir enberi uzaklığına (q_{min}) sahip olabileceğini göstermektedir (Buie 2022).



Şekil 2.24. Ixion'un (yeşil) ve Plüton'un (mavi) karşılaştırmalı yörüngeleri. Her iki cisim için de enberi konumu (q) ve enöte konumu (Q) üzerindeki tarihleri yaklaşık olarak gösterilmiştir. Görsel JPL'nin $Orbit\ Viewer$ aracı temel alınarak oluşturulmuştur

Ixion'un dönme dönemi ile ilgili birbirini destekleyen çalışmalara rastlanmamıştır. Ixion'un dönme dönemini elde etmeye yönelik ilk çalışma Ortiz vd. (2003) tarafından yapılmış fakat <0.15^m'lik bir genliğe sahip ışık eğrisi üzerinde herhangi bir dönme dönemi tespit edilememiştir. Daha sonra Sheppard ve Jewitt (2003) çalışması ile Ixion'un dönme dönemi araştırılmış fakat bu çalışmada da herhangi bir ışık değişimi tespit edilemese de nesnenin ışık eğrisinin genliği 0.05^m ile sınırlandırılmıştır. Bu değer Ortiz vd. (2003)'nin bulduğu değerden çok daha düşük olması sebebiyle önem taşımaktadır. Dönme döneminin elde edildiği ilk çalışma ESO'da 3.58-metre ayna çapına sahip NTT (New Technology Telescope) ile 2010 yılında yapılmıştır (Rousselot ve Petit 2010). Bu çalışmada Ixion'un dönme dönemi, $0.06^m \mp 0.03^m$ genliğe sahip bir ışık eğrisinden 15.9 ∓ 0.5 saat olarak hesaplanmıştır (Rousselot ve Petit 2010). Galiazzo vd. (2016) de Las Campanas Gözlemevi'ndeki 1 metre ayna çapına sahip Swope teleskobu ile yaptıkları gözlemler sonrasında Ixion'un dönme dönemini 12.4 ∓ 0.3 saat olarak bulduklarını belirtmişlerdir.

Çizelge 25. Ixion'a ait genel bilgiler

Özellik	Değer	Kaynak
Çap	709.6 ± 0.2 km	(Levine vd. 2021)
Dinamik sınıfı	plutino	(Johnston 2022)
Mutlak parlaklık (H_V)	$3.774^m \pm 0.021^m$	(Alvarez-Candal vd. 2016)
Geometrik albedo (p_v)	0.108 ± 0.002	(Verbiscer vd. 2022)
B-V	$1.03^m \pm 0.03^m$	(Doressoundiram vd. 2007)
V-R	$0.61^m \pm 0.03^m$	(Doressoundiram vd. 2007)
Dönemi	$12.4^h \pm 0.3^h$	(Galiazzo vd. 2016)

Çizelge 25'te verilen Ixion'un $B-V$ ve $V-R$ renkleri ve geometrik albedo değeri bir TNO olan Quaoar[47]'a yakındır. Oysa ki Quaoar, Ixion'dan daha büyük bir TNO'dur. Quaoar'ın yüzeyinde kristalize su varlığı doğrulanmıştır (Schaller ve Brown 2007) fakat Ixion yüzeyinde doğrudan su buzu tespit edilememiştir (Licandro vd. 2002). Boehnhardt vd. (2004)'nin yapmış olduğu çalışmada ise Ixion'un yakın-kırmızıöte tayfı incelenmiş ve oluşturulan model sonrası yüzeyin %65 amorf karbon, %13 Titan tholin, %20 buz tholin ve %2 su buzu karışımı olduğunu belirtilmiştir. Barkume vd. (2008)'nin çalışmasında ise Ixion'un yüzeyinde muhtemel su buzu tespit edilmiştir.

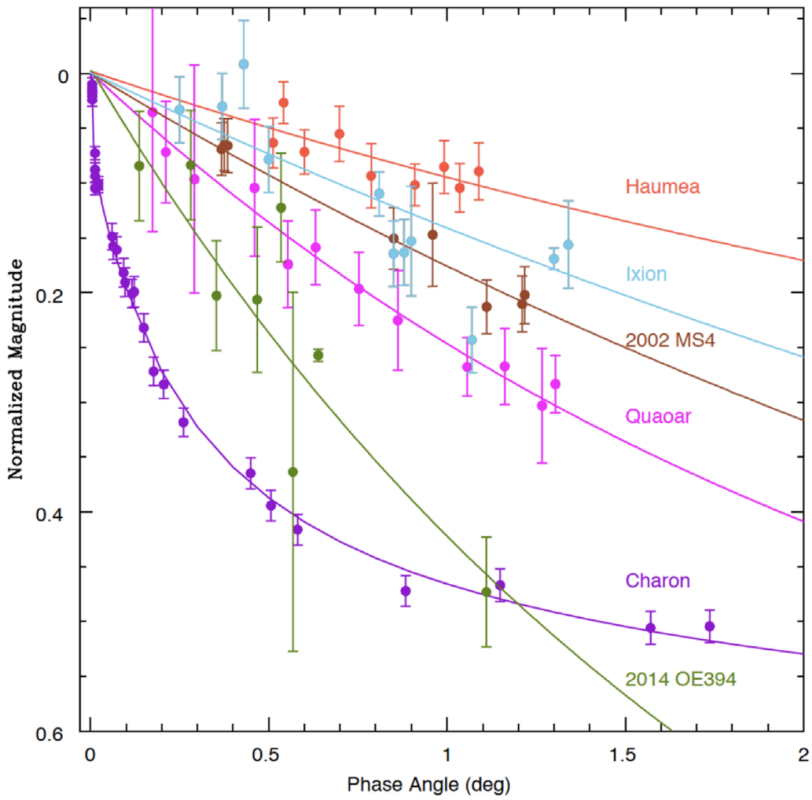
2006 yılında Uluslararası Astronomi Birliği'nin 26. Genel Kurulu tarafından kabul edilen 5 numaralı önergede[48] "Güneş Sisteminde Gezegen Tanımı"nda temel olarak; gezegenleri "cüce gezegenler"den ayıran dinamik bir kriter, "cüce gezegenleri" de "küçük Güneş sistemi nesneleri"nden ayıran jeofiziksel bir kriter bulunmaktadır (Tancredi 2010). Bu kriterler baz alınarak yapılan Tancredi ve Favre (2008) ve Tancredi (2010) çalışmalarında "cüce gezegen" olabilme prensipleri ortaya koyulmuş ve bu çalışmalarda Ixion'un; yoğun buzlu bileşiminin hidrostatik dengede kalabilecek minimum çaptan (450 km) büyük olması ve ışık eğrisindeki değişimin 0.15^m'den küçük olması (küreselliğe işaret etmektedir) gibi sebeplerden dolayı *muhtemel* "cüce gezegen" olarak sınıflanmıştır. Ancak, Grundy vd. (2019), Ixion'a benzer boyutlardaki (229762) 2007 UK_{126} TNO çifti üzerinde yapmış olduğu çalışmada 400 km - 1000 km arasında çapa sahip TNO'ların katı nesneler oluşturacak şekilde çökemediğini, bu nesnelerin düşük yoğunluklu, pürüzlü (porous) nesnelerle, cüce gezegenler gibi parlak, yoğun ve jeolojik katmanlaşma geçirmiş gök cisimleri arasında bir geçiş nesnesi olduğunu ileri sürmüştür. Grundy vd. (2019)'a göre bu gibi nesneler jeolojik katmanlaşma geçirmemişlerdir ve geçirseler bile sadece derin çekirdek bölgesinde bir katmanlaşma olabileceğini ve bunun yüzeye doğru bir erime ve birleşme şeklinde devam

[47] p_v = 0.109 ± 0.007 (Braga-Ribas vd. 2013), B-V = 0.939±0.008 (Grundy 2022), V-R = 0.65±0.01 (Grundy 2022)

[48] IAU RESOLUTION B5 Definition of a Planet in the Solar System [Son erişim tarihi: 03.01.2023]

edemeyeceğini ileri sürmüştür. Bu sebeple, bu nesnelerin iç kısımları çökse bile yüzeyleri oldukça soğuk ve sıkıştırılmamış olabilir. Grundy vd. (2019)'ın çalışması göz önünde bulundurulursa Ixion'un hidrostatik dengede olamayabileceği sonucu çıkarılabilir.

Ixion, asıl amacı Plüton'a yakın geçiş yapmak olan *New Horizons* (Yeni Ufuklar) uzay aracı tarafından 13 ve 14 Temmuz 2016 tarihlerinde gözlenmiştir. Fakat, ne yazık ki, 13 Temmuz 2016'da alınan veriler bir arka plan kaynağı tarafından baskılanmış ve Verbiscer vd. (2022) çalışmasında kullanılamamıştır. Verbiscer vd. (2022), *New Horizons*'un LORRI[49] aygıtı ile 14 Temmuz 2016'da alınan veriler ile literatürdeki Yer-tabanlı V-bandı gözlem verilerini kullanarak, faz açısı (α) - parlaklık diagramını oluşturmuştur. Fakat bazı Yer-tabanlı gözlemlere, literatürdeki dönme dönemlerindeki hatanın çok yüksek olmasından dolayı parlaklık düzeltmesi eklemediğini belirtmiştir. Verbiscer vd. (2022), Şekil 2.25'de gösterilen Ixion verileri üzerindeki (soluk mavi) saçılmanın bundan kaynaklandığını belirtmiştir.



Şekil 2.25. Bazı TNO'lar için Verbiscer vd. (2022)'nin elde ettiği Yörünge faz açısı (°) - normalize parlaklık eğrileri (Verbiscer vd. 2022)

Verbiscer vd. (2022), Şekil 2.25'te ayrıca cüce gezegenlerin (Haumea, Quaoar ve

[49]LOng Range Reconnaissance Imager

Charon) H_2O-zengini olduğunu ve Ixion'un ise uçucu gazlar bakımından fakir (volatile-poor) olduğunu belirtmektedir. Diğer taraftan, 2002 MS_4 ve 2014 OE_{394} nesnelerinin ise yüzeyleri ile ilgili bir tespit yapılamadığını belirtmiştir.

Son olarak, Verbiscer vd. (2022), New Horizons uzay aracı verilerini kullanarak yaptığı analizlerde Ixion'un renginin Quaoar ve soğuk ilkel Kuiper kuşağı nesneleri (CCKBO[50]) ile benzerlik gösterdiğini ifade etmiştir. Bu sebeple, Ixion verilerine (486958) Arrokoth[51] için elde edilen renk düzeltmesini (Weaver vd. 2020) uyguladığını belirtmiştir. Eğer Ixion'un yüzeyi Arrokoth gibi nesnelerde olduğu gibi gelişmemiş ve karanlık ise, Verbiscer vd. (2022)'nin bulguları Grundy vd. (2019)'ni desteklemektedir.

Ixion'u önemli bir hedef yapan sebeplerden biri de bir uzay aracı yörünge görevinin hedeflerinden biri olmasıdır (Gleaves 2012). Ixion'un hedef olarak seçilmesi durumunda fırlatma Kasım 2039'da yapılırsa, Jüpiter'in de kütleçekimi yardımıyla yolculuğun 20-25 yıl süreceği hesaplanmıştır (Gleaves 2012). Gleaves (2012)'nin gerçekleştirdiği bu çalışmada, Huya ve Ixion'un uzay aracını yörüngeye yerleştirmek için en az manevra gerektiren TNO nesneleri olmasından dolayı en uygun hedefler olarak belirtmişlerdir.

Bu tez çalışmasında kapsamlı olarak verilen önceki yıldız örtülme gözlemleri ve araştırmaları göz önünde bulundurulduğunda, tüm bu gözlemlerin merkezi bir platform üzerinden sürdürülebilir bir şekilde koordine edilmesi, yönetilmesi, gözlem verileri ile birlikte arşivlenmesi ve analiz edilmesinin ne kadar gerekli olduğu açıkça görülmektedir. Bu sebeple, bu eksikliği gidermek amacıyla geliştirilen web-tabanlı platform Occultation Portal (OP) da Kilic vd. (2022) çalışmasında detaylı olarak anlatılmıştır. Ayrıca yine bu bölümde, OP üzerinde kampanyaları yürütülen ve literatürde fiziksel özelliklerine dair bilgilerin çok az olduğu, büyük bir TNO olan (28978) Ixion'a dair tüm bulgular bu bölümde kapsamlı olarak verilmiştir.

[50]Cold Classical Kuiper Belt Object

[51]Önceki kısımlarda Arrokoth'un yıldız örtülme gözlem kampanyasından detaylıca bahsedilmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Yıldız Örtülme Gözlemleri İçin Web-tabanlı Bir Platform

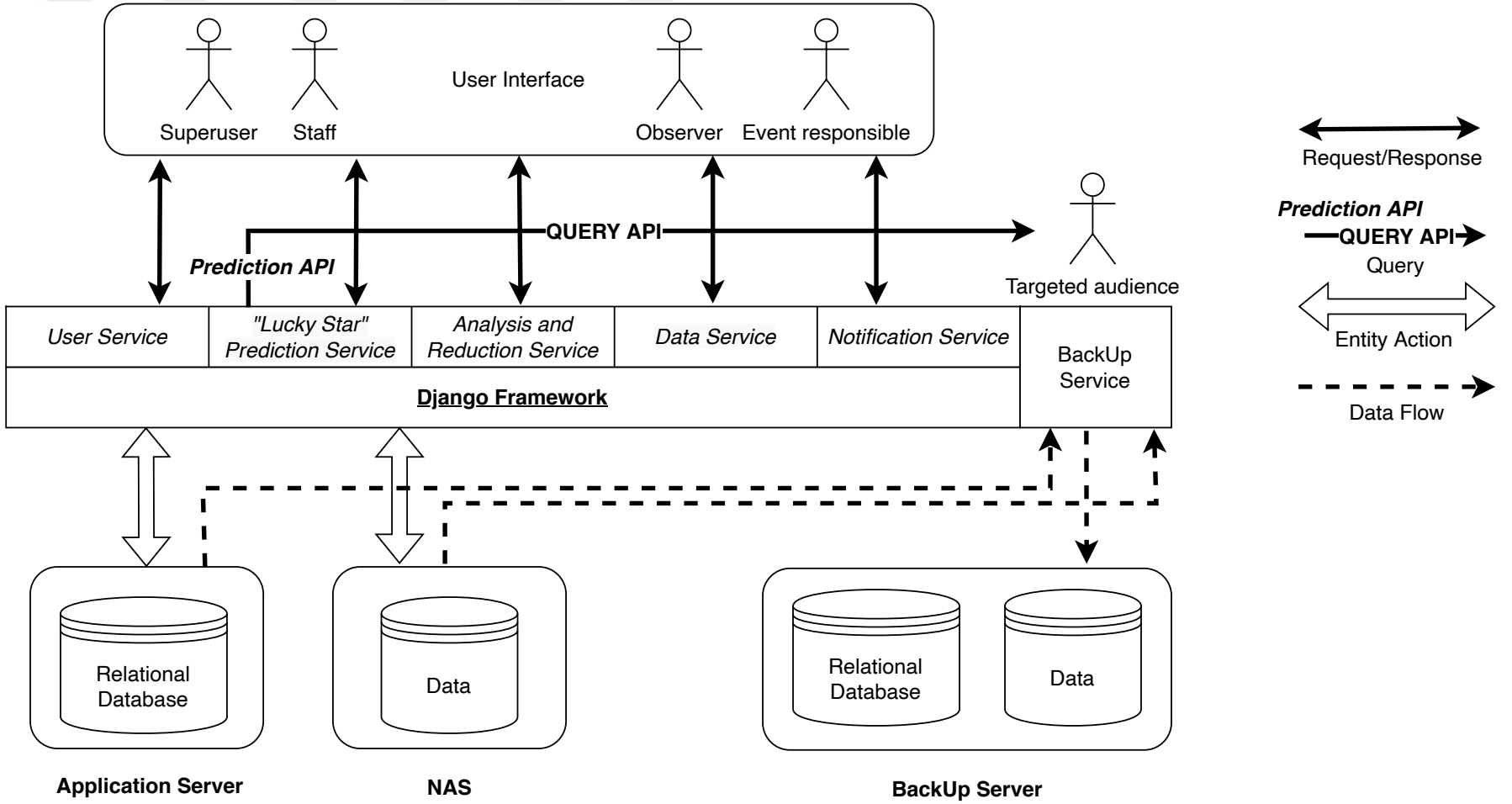
Occultation Portal (OP), birincil hedefi olan ERC Lucky Star ve ACROSS Projesi'nin gözlemsel kampanyalarının yürütülmesine sistematik olarak yardımcı olmak için oluşturulmuş bir veri arşivleme, analiz ve görselleştirme portalıdır. Web tabanlı portalın tamamı Şekil 3.1'de gösterildiği gibi; Kullanıcı hizmeti (*User service*), Tahmin hizmeti (*Prediction service*), Analiz ve indirgeme hizmeti (*Data analysis and reduction service*), Veri hizmeti (*Data service*), Bildirim hizmeti (*Notification service*) ve Yedekleme hizmetinden (*Backup service*) oluşmaktadır.

Şekil 3.1'de altı farklı hizmetin nasıl gerçekleştirildiği ve bunların çevre ile nasıl bir etkileşim içerisinde bulundukları gösterilmektedir. İki yönlü sürekli oklar, hizmetler ve kullanıcılar arasındaki arz/talep ilişkisinin web arayüzü üzerinden gerçekleştirildiğini ifade etmektedir. Tek yönlü sürekli ok ise, tahmin API[52] (Application Programming Interface) hizmeti ile, bu hizmeti kullanan hedef kullanıcının API anahtarıyla yaptığı sorguyu temsil etmektedir. Tek yönlü kesikli oklar da veri tabanının veri akış yönünü ve *Yedekleme hizmeti* tarafından yedeklenen gözlemsel verileri göstermektedir. Son olarak, içi boş iki yönlü oklar ise Django framework'e gelen veri tabanı ve gözlem verisi *Varlık Eylemlerini* (Entity Actions) temsil etmektedir.

Bu hizmetler aracılığıyla ve kullandıkları moda bağlı olarak kullanıcılar, örtülme tahmini ekleme, gözlem aracı ve gözlem istasyonları ekleme, listelenen herhangi bir kampanyayla ilişkili verileri yükleme, kampanyaları yönetme, belirli kampanyalar hakkında bilgi edinme vb. işlemleri gerçekleştirirler. Ayrıca kullanıcılar, web arayüzü üzerinden erişim seviyelerine bağlı olarak veri analizi ve görselleştirme için özel olarak geliştirilmiş araçları kullanabilirler. Tüm bu altyapı ve üst yapıyı oluşturmak için, OP'nin back-end ve front-end'inin gelecek perspektiflerimiz açısından hızlı bir şekilde, iş birliğine açık geliştirilmesine olanak sağladığı için Python programlama dili ve onunla mükemmel olarak uyumlu olan Django framework[53] tercih edilmiştir.

Tezin bu bölümünde hem OP'nin ayrıntılı olarak nasıl çalıştığı hem de bu tez için özel olarak belirlenmiş ve tüm kampanya gözlemleri OP üzerinden yürütülmüş Neptün-ötesi bir nesne olan (28978) Ixion'un yıldız örtülme gözlemlerinin nasıl gerçekleştirildiği ve analizlerin nasıl yapıldığı ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

[52] prediction API
[53] https://www.djangoproject.com/ [Son erişim tarihi: 03.01.2023]



Şekil 3.1. Occultation Portal'ın mimarisi (Kilic vd. 2022)

3.1.1. Kullanıcı hizmeti

OP'nin en kritik hizmetlerinden biri olan *Kullanıcı hizmeti*, sistemin ve OP'ye yüklenen verilerin güvenliğinin sağlanmasından sorumlu hizmettir. *Kullanıcı hizmeti*; *admin*, *ekip*, *gözlemci* (standart kullanıcılar) ve *gözlem sorumlusu* olmak üzere dört farklı kullanıcı yetki grubu bulunmaktadır ve her bir kullanıcı grubunun OP üzerindeki hizmetlere erişim seviyesi birbirinden farklıdır. İlk üç seviye, built-in Django kimlik doğrulama sistemi yardımıyla eklenirken, *Gözlem Yetkilisi* herhangi bir *Gözlemci*'ye özel kampanyaları yönetme yetkisi verebilmek için bu tez kapsamında eklenmiştir.

Çizelge 31 OP'deki her kullanıcının erişim düzeylerini ve yetki gruplarını göstermektedir. *Gözlemci* seviyesinin üzerindeki tüm kullanıcı gruplarına geçiş yalnızca *admin*'ler tarafından yapılabilir. Herhangi bir kampanya gözlemi için yetkili bir kullanıcıyı (*gözlem sorumlusu*), *ekip* yetkisine sahip kullanıcı grubundan bir kullanıcı da atayabilmektedir.

Çizelge 31'de OP'de bulunan birincil hizmetler, *Özellik* olarak listelenmektedir. *Evet*, bir kullanıcı grubunun ilgili hizmete erişim ve yönetim yetkisine sahip olduğunu, *Hayır* ise tam tersini ifade etmektedir. *Salt okunur*, bir hizmete yönetici yetkisi olmadan salt okunur modda (yalnızca görüntüleme) erişebilen bir kullanıcı grubunu ifade etmektedir. *Adminler* tüm hizmetlerde erişim ve yönetim yetkisine sahiptirler. *Ekip* kullanıcı grubundakiler çoğunlukla bir *admin* tarafından belirlenen orta derecede sınırlı kontrollere sahip genellikle Lucky Star veya ACROSS Projesi araştırmacılarıdır. Bu kullanıcı grubunun en önemli özelliği *Analiz ve indirgeme hizmeti*'ne erişim yetkilerinin olması ve *Gözlem sorumlusu* atayabilme yetkileridir. *Gözlemciler*, OP'nin birincil grubudur ve yalnızca veri ve bilgi sağlamak için bir olayı raporlamakla yetkilidir. *Gözlem sorumlusu*, bir *admin* veya *Ekip* grubu kullanıcısı tarafından atanan özel bir kampanya gözleminin tüm süreçlerini yönetebilen araştırmacıları ifade etmektedir.

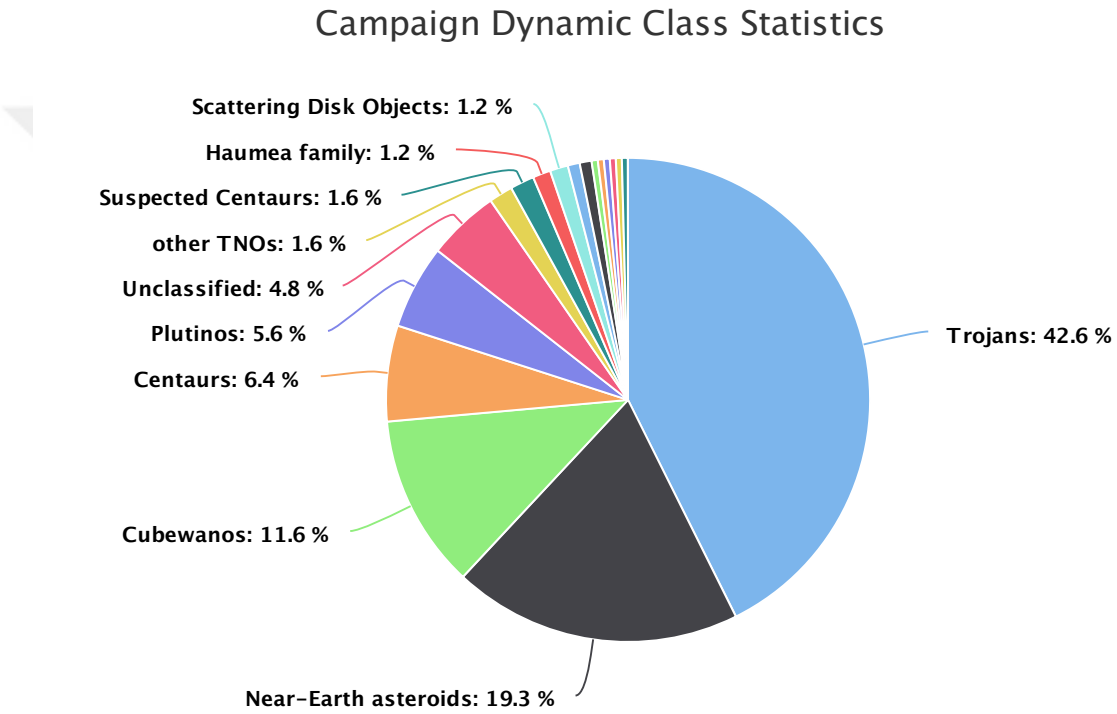
Çizelge 31. Kullanıcı gruplarının OP hizmetlerine erişim yetkileri ve seviyeleri

Özellik	Admin	Ekip	Gözlemci	Gözlem Sorumlusu
Kullanıcı hizmeti	Evet	Hayır	Hayır	Hayır
Tahmin hizmeti	Evet	Evet	Salt-okunur	Hayır
Analiz & indirgeme hizmeti	Evet	Evet	Hayır	Evet
Veri hizmeti	Evet	Evet	Hayır	Evet
Bildirim hizmeti	Evet	Evet	Hayır	Hayır
Yedekleme hizmeti (*)	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır

(*) Bu hizmet yalnızca sistem yöneticisi tarafından koşturulabilir.

3.1.2. Lucky Star tahmin hizmeti

Occultation Portal'da Rio de Janeiro, Meudon ve Granada'da bulunan araştırmacıların talepleri doğrultusunda, Lucky Star Projesi kapsamında gözlem listesine alınan yıldız örtülme tahminleri yapılan Güneş sistemi nesneleri genelde TNO'lar, Centaurlar ve asteroitlerden (çoğunlukla Jüpiter Trojanları) oluşmaktadır. ACROSS Projesi kampsamında OP'ye eklenmesi talep edilen nesnelerin tahminleri ise Cote d'Azur Gözlemevi araştırmacıları tarafından yapılmaktadır. Ayrıca OP üzerinde düzenlenen yıldız örtülme kampanya gözlemlerinin hangi nesnelerden oluştuğunun istatistiği bu çalışmanın sonuçlarından biridir ve Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Ağustos 2020 - Ekim 2022 tarihleri arasında OP üzerinden duyurulan nesnelerin dinamik sınıflarının istatistiği. Grafikte %1'in altında katkı sağlayan sınıflar gösterilmemiştir (Kilic vd. 2022)

Yıldız örtülme gözlemlerinde kullanılan teknik ifade İngilizce'de *prediction* olduğu için, tezin bundan sonrasında *tahmin* olarak adlandırılacaktır. OP veri tabanında Plüton sistemi için Assafin vd. (2010), TNO'lar için Assafin vd. (2012) ve ayrıca TNO'lar ve Centaurlar için Camargo vd. (2014) çalışmaları esas alınmaktadır. Seçilen nesnelerin efemeris hesapları için Desmars vd. (2015) çalışmasında detayları açıklandığı gibi NIMA yazılımı kullanılmaktadır ve düzenli olarak güncellenmektedir. Bu hesaplamalar yapılırken kullanılan gözlem verileri aşağıda listelenen veri kaynaklarından alınmaktadır.

- MPC (Minor Planet Center[54]);
- ESO (Lucky Star Gözlemleri)
- Pic du Midi Gözlemevi (Lucky Star Gözlemleri)
- Calar Alto Gözlemevi (Lucky Star Gözlemleri)
- Sierra Nevada Gözlemevi (Lucky Star Gözlemleri)
- Pico dos Dias Gözlemevi (Lucky Star Gözlemleri)
- Dark Energy Survey'i astrometrik verileri (Banda-Huarca vd. 2019)
- TNO'ların uydularının efemeris verileri: Genoid Projesi (Vachier vd. 2012)
- *Gaia* EDR3 Kataloğu (yıldızların konum ve paralaksları) (Gaia Collaboration vd. 2022)

Bu kaynaklar kullanılarak hesaplanan ve oluşturulan her bir Lucky Star tahmini veri tabanında bir Occultation ID (occ_id) taşımaktadır. Bu occ_id yetkili kullanıcılar tarafından OP'deki *Tahmin sekmesi* aracılığıyla aynı zamanda OP veri tabanında eklenebilmektedir. Eklenen bu *tahmin* Çizelge 31'de bulunan yetkili kullanıcılar tarafından artık istenilen zamanda bir yıldız örtülme kampanya çağrısına dönüştürülebilir ve dileyen kullanıcı OP'nin arayüzünde bulunan takvim üzerinden bu kampanyayı seçip katılım sağlayabilmektedir (bkz. EK-1). Bu aşamadan sonra, duyurulan bu *tahmin* için OP yöneticileri, kayıtlı kullanıcılar arasından bir kullanıcıyı bu kampanya için "gözlem sorumlusu" olarak atayabilir ve seçilen "gözlem sorumlusu" artık bu olayla ilgili tüm bilgilere erişim yetkisi kazanır ve OP'deki verileri yönetebilir. ACROSS Projesi'nin talebi üzerine Occult Watcher Cloud üzerinde duyurulan bir tahmin de OP veri tabanına aynı şekilde eklenebilmektedir.

3.1.3. Lucky Star tahmin hizmeti API

Lucky Star tüm tahminlerini kendi web sitesinden, sadece son kullanıcılar için sunmaktadır. Çoğu profesyonel veya amatör astronom bu web sitesi üzerinden dilediği tahmine ulaşabilir. Ancak, bir web arayüzü son kullanıcılar için doğru bir tercih olsa da, daha detaylı bilgilere ulaşmak isteyen programcılar, geliştiriciler veya çoğu araştırmacı için pratik bir çözüm sunmaz. Bu sebeple Lucky Star internet sitesi *tahmin*ler için Occultation Portal, Occult Watcher veya Occult Watcher Cloud kadar doğru ve pratik bir kanal değildir. Fakat OP'nin tüm bu sistemlerden farkı veri tabanındaki *tahmin*leri bir

[54] https://www.minorplanetcenter.net [Son erişim tarihi: 03.01.2023]

API (Application Programming Interface) framework (Django Ninja[55]) üzerinden de servis edebilmesidir. Bu amaçla Lucky Star'ın tüm veri tabanı OP ile düzenli olarak (1 ay) paylaşılmaktadır. Böylece, Occultation Portal üzerinden Lucky Star tahmin veri tabanına bir API anahtarı verilen herkes, dilediği nesne için, talep edilen konum için, talep edilen tarih aralığında ve talep edilen parlaklık aralığı içerisinde Şekil 3.3'te verildiği gibi erişim sağlayabilmektedir.

```
yucelkilic@ixion ~> curl -k -X GET "https://occultation.tug.tubitak.gov.tr/api/predictions?start_date=2022-10-01&end_date=2022-10-10
&mag_min=10&mag_max=18&object_name=Hektor&page=1" -H "X-API-Key:[redacted]5"|
 jq '.[0].data'
  % Total    % Received % Xferd  Average Speed   Time    Time     Time  Current
                                 Dload  Upload   Total   Spent    Left  Speed
100  2422  100  2422    0     0  10943      0 --:--:-- --:--:-- --:--:-- 12049
[
  {
    "occ_id": 99444,
    "julian_date": 2459858.7120580673,
    "tt_utc": 69.184,
    "occ_date": "2022-10-06T05:04:12Z",
    "obj_number": "624",
    "obj_name": "Hektor",
    "idspk": 2000624,
    "typ": "tro",
    "radius1": 112.5,
    "dist_moon": 123.084194012594,
    "phase_moon": 47.617735137305,
    "elongation": 103.529498316393,
    "ca": 0.035843854035,
    "pa": 300.168948904517,
    "max_dur": 23.081717298091,
    "t_min": -10.901006385684,
    "t_max": 10.902842357755,
    "vit_r": 9.747974862278,
    "ephemeris": "NIMAv5",
```

Şekil 3.3. curl ile Lucky Star tahminlerine erişim komutu (Kilic vd. 2022)

Bir API hizmetinden terminal üzerinden veri çekmenin en pratik yollarından biri *curl* programı[56] olduğu için tercih edilmiştir. Şekil 3.3'te OP üzerinde bir API anahtarı ile tahmin sorgusu yapan bir kullanıcı örneklenmiştir. Burada *start_date* sorgulanmak istenilen tahminin başlangıç tarihini, *end_date* bitiş tarihini, *min_mag* en düşük parlaklık değerini, *max_mag* en yüksek parlaklık değerini, *object_name* nesne adını ve son olarak *page* argümanı ise talep edilen sayfa numarasını ifade etmektedir. Bu argümanların hepsi Şekil 3.1'de ifade edilen *Targeted audience* (Hedef kitle) tarafından değiştirilebilir.

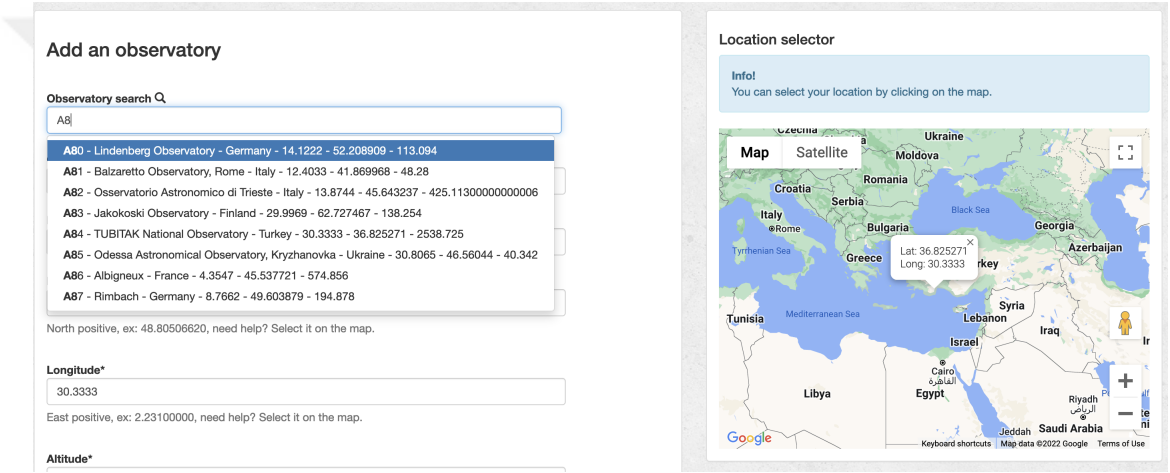
3.1.4. Veri hizmeti

OP üzerindeki tüm gözlemsel veriler, duyurulan kampanyalara katılan gözlemciler tarafından sağlanmaktadır. Bir kampanya katılımcısı (*gözlemci*) OP'de duyurulan bir yıldız örtülme kampanyasına veri sağlamadan önce; mevcut teleskop, kamera, kullanılan filtre seti ve zaman kayıt cihazı veya yöntemi ve gözlem yaptığı konum bilgisini detaylı bir şekilde istenilen formatta OP'ye kayıt etmelidir. OP bu

[55] https://django-ninja.rest-framework.com/ [Son erişim tarihi: 03.01.2023]
[56] https://curl.se/ [Son erişim tarihi: 03.01.2023]

bilgileri sistematik bir şekilde kaydeder. Böylece OP'ye kayıtlı yetkili kullanıcılar bu bilgilere organize edilmiş bir şekilde tablolar halinde veya OpenStreetMap[57] üzerinden görselleştirilmiş halde erişebilmektedirler.

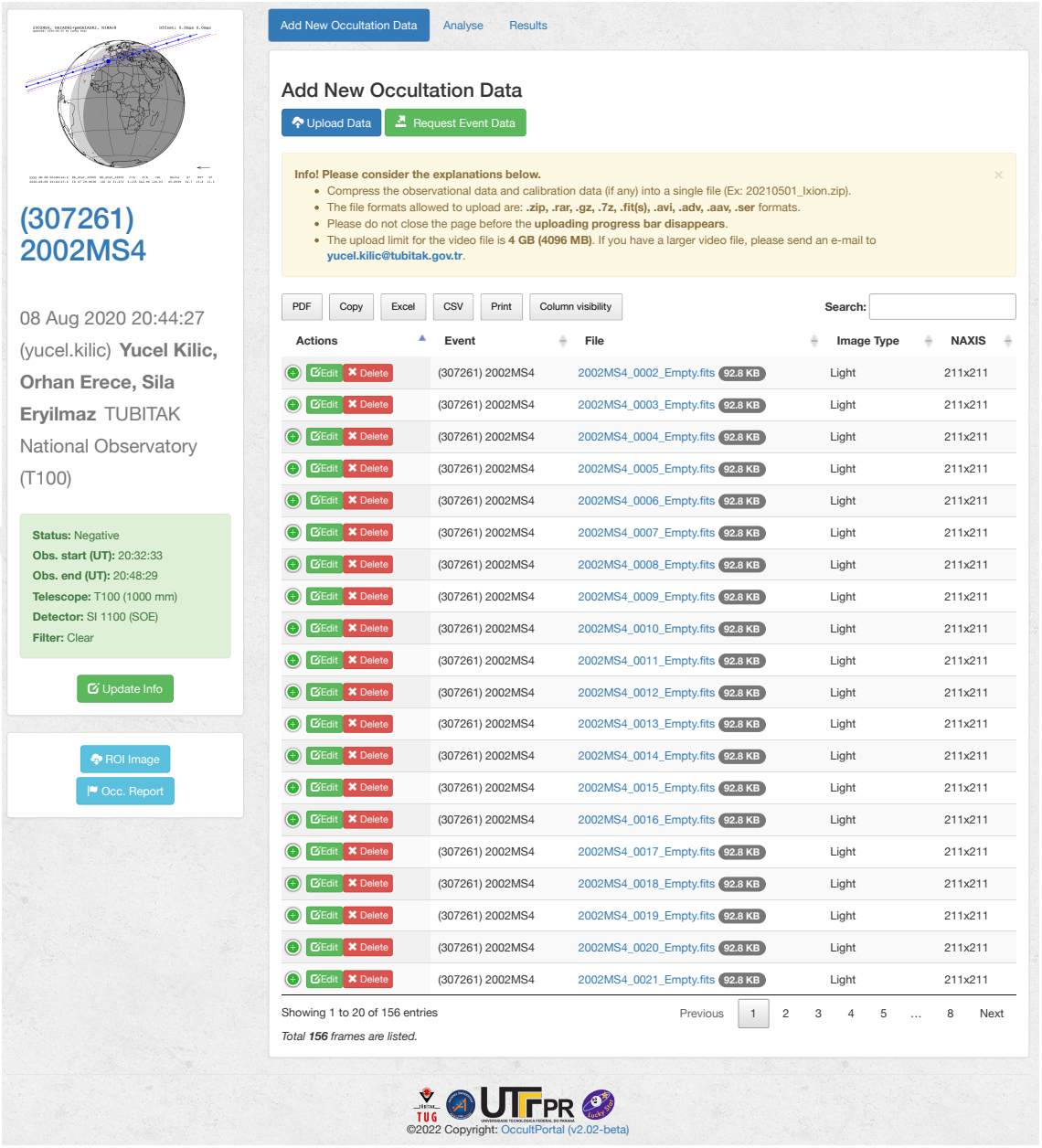
Yıldız örtülme gözlemlerinde gözlemcinin sağladığı en kritik bilgi, gözlem yapılan yerin duyarlı konum bilgisidir. Gözlemlerden sonra bu bilgi analiz sürecinde hayati önem taşımaktadır. Bu nedenle OP üzerinde gözlemciler konum bilgisi girerken hatanın en aza indirilmesi için, tüm IAU (The International Astronomical Union)'ya kayıtlı gözlemevleri OP veri tabanına eklenmiştir. Ayrıca kullanıcılar diledikleri konumu bir harita üzerinden de Şekil 3.4'teki gibi kolayca seçebilmektedirler. Kullanıcıların konum bilgilerinin işlenmesi için arka planda astropy (Astropy Collaboration vd. 2013; Astropy Collaboration vd. 2018) ve geopy[58] kullanılmıştır.



Şekil 3.4. OP kullanıcılarının konum ekleme alanı

Kullanıcılar bir raporlama yapabilmek için gerekli tüm bilgileri doldurduktan sonra Şekil 3.5'te gösterildiği gibi gözlemsel verileri yükleyebileceği bir alana sistem tarafından yönlendirilir.

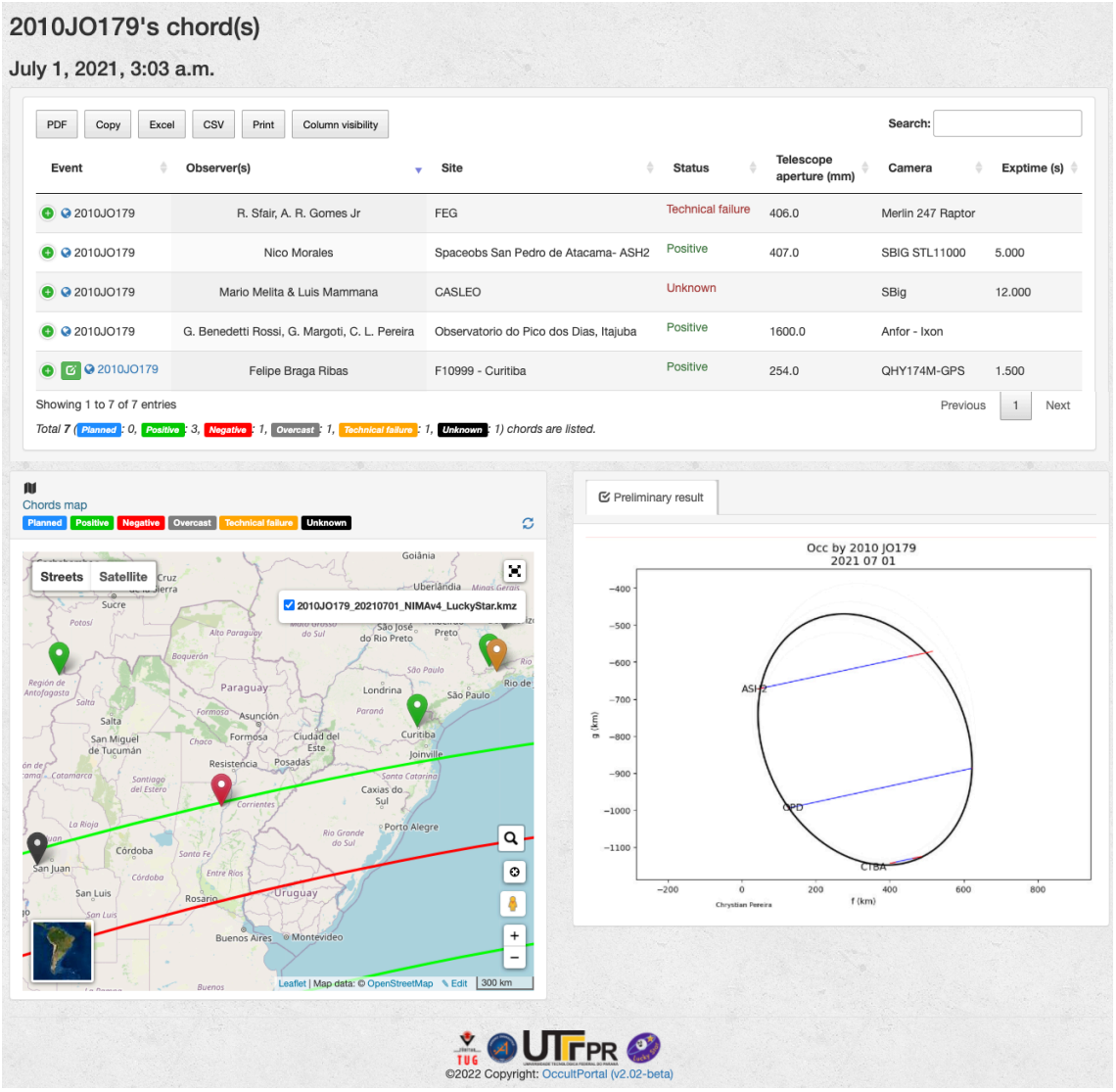
[57] https://www.openstreetmap.org [Son erişim tarihi: 03.01.2023]
[58] https://github.com/geopy/geopy [Son erişim tarihi: 03.01.2023]



Şekil 3.5. 8 Ağustos 2020'de Ixion gözlem kampanyasına veri sağlayan bir gözlemcinin veri yükleme ve rapor sayfası (Kilic vd. 2022)

Bu alanda yalnızca *.fit(s)*, *.zip*, *.rar*, *.gz*, *.7z*, *.avi*, *.adv*, *.aav* ve *.ser* uzantılı dosyaların sisteme yüklenmesine izin verilmektedir. Sisteme girilen her türlü bilgi ve yüklenen her türlü veri Lucky Star Projesi araştırmacıları (*ekip*) ve onaylı ortakları (*gözlem sorumlusu*) tarafından kampanya bazlı görüntülenebilmektedir. Bu durumu daha iyi ifade etmek adına, Şekil 3.6'da örnek olarak OP'de yürütülmüş TNO sınıfı (574372) 2010 JO179'un 1 Temmuz 2021 tarihli başarılı bir yıldız örtülme kampanyası gösterilmektedir. Her gözlemci, Çizelge 31'de listelenen *Veri hizmeti* izinleri doğrultusunda rapor edilen diğer gözlemlerin bilgilerini görebilir ve daha önce girmiş

olduğu kendi bilgilerini de düzenleyebilmektedir. Sol alt panelde, bildirilen her bir raporun durumunu temsil eden renklerle birlikte, öngörülen gölge hattı boyunca gözlemcilerin konumlarını gösteren bir harita gösterilmektedir. Sağ alt panelde de, *ekip* veya *gözlem sorumlusu* tarafından analiz sonucu yüklenmiş bir görsel sunulmaktadır. Genellikle, bu panelde bu kampanya gözleminden elde edilmiş bir ön sonuç buradan gözlemcilere bildirilmektedir.



Şekil 3.6. Bir kampanya gözleminde raporlanmış tüm gözlemlere ait bilgilerin OP üzerinde özetlenmiş hali (Kilic vd. 2022)

Herhangi bir kampanya ile ilişkili bir gözlem raporuna ait gözlemsel verilere erişmek isteyen yetkili bir kullanıcı, Şekil 3.5'te gösterildiği gibi *Request Event Data* butonuna tıklayarak bu talebini sunucuya gönderir. OP, veri tabanındaki bu rapor ile ilgili tüm verileri sorgular ve bir ZIP dosyası oluşturarak, talep eden kullanıcının yetki alanında

olan bir konuma bu arşiv dosyasını bırakır. Bu işlem tamamlandığında OP *Kullanıcı bildirim servisi* güvenlik amacıyla hem talep eden kullanıcıya hem de sistem yöneticisine bir e-posta bildirimi gönderir. Oluşturulan bu ZIP dosyası içerisinde;

- Gözlemci tarafından yüklenmiş tüm gözlemsel dosyalar
- Yüklenmişse ek dosyalar (ön analiz sonuç dosyaları, görselleri vb.)
- Örtülen yıldızın alınmış örnek bir veri üzerindeki konumunu gösteren bir görsel dosyası (Region of Interest file)
- OP tarafından otomatik oluşturulan Asteroidal Occultation Report[59] dosyası

bulunmaktadır ve bu ZIP dosyası sunucuda Nginx tarafından servis edilmektedir[60].

3.1.5. Veri analizi ve indirgeme hizmeti

Occultation Portal'ın en kritik ve en önemli hizmeti tartışmasız *Veri analiz ve indirgeme hizmeti*'dir. OP'ye yüklenen gözlemsel veya gözlemsel olmayan her türlü veri OP üzerinde kampanya ve kullanıcı tabanlı bir şekilde sistematik olarak depolanmaktadır. Ayrıca OP üzerindeki her bir verinin konumu OP veri tabanında özel bir alanda saklanmaktadır. Böylece veri işleme ile ilgili oluşturulacak her hizmet bu verilere mümkün olan en kısa sürede erişebilecektir. OP'nin geliştirme evresinin ilk başında; sunucu güvenliğini, performansını ve optimizasyonunu en kararlı seviyede tutabilmek amacıyla; *Veri analiz ve indirgeme hizmeti*'ni sadece Çizelge 31'de izin verilen kullanıcı grupları kullanabilmektedir.

OP üzerinde veri indirgeme ve analizinin yapılabilmesi için öncelikle verilerin Flexible Image Transport System (FITS) formatında (Wells vd. 1981; Harten vd. 1988; Pence, W. D. vd. 2010) olması gerekmektedir. Fakat kampanya gözlemcileri zaman kazanmak ve yüklenilen veri boyutunu azaltmak amacıyla gözlemsel verilerini genellikle *.zip*, *.rar*, *.gz*, *.7z* vb. formatlarında sıkıştırarak yüklemeyi tercih etmektedirler. Bu sebeple çoğunlukla yüklenen verilerin arşiv dosyasından çıkartılması ve analize uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Yüklenen veri eğer sıkıştırılmış bir arşiv dosyası ise OP üzerinde bu çıkarma işlemi arka planında bir *python* paketi olan *pyunpack*'in[61] kullanıldığı *extract_arch* adında özel bir fonksiyon ile yapılmaktadır.

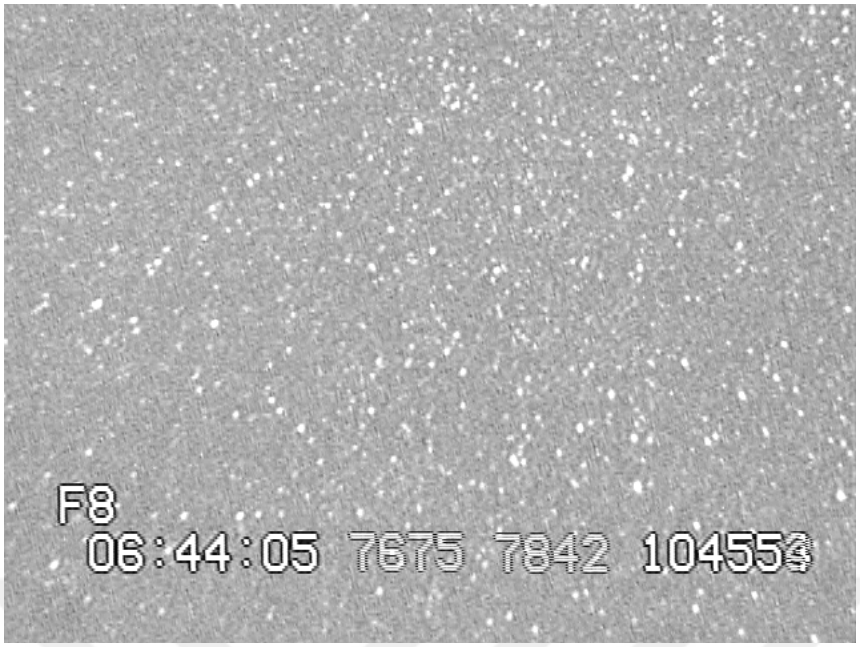
[59] https://www.occultations.org.nz/planet/AsteroidReportFormTextV2.txt [Son erişim tarihi: 03.01.2023]
[60] https://www.nginx.com/ [Son erişim tarihi: 03.01.2023]
[61] https://github.com/ponty/pyunpack [Son erişim tarihi: 01.01.2022]

OP'nin fotometrik indirgeme ve analizleri yapabileceği dosya formatının yalnızca *.fit(s)* formatı olduğundan bahsetmiştik. Fakat yıldız örtülme kampanya gözlemlerine katılan amatörlerin büyük bir kısmı çok farklı video formatlarında veri üretmektedirler. Bu video formatları çoğunlukla; kullanılan kayıt ekipmanına göre değişmekte ve Audio Video Interleave (AVI), Astro Digital Video Data Format (ADV) (Pavlov vd. 2020), Astro Analogue Video (AAV) (Barry vd. 2015), SER[62] gibi dosya fortmatlarında olabilmektedir. Bu sebeple, OP'ye yüklenen farklı video formatlarında olan bu verilerin zamana bağlı kareler halinde FITS dosyalarına dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu amaçla OP arka planında *video-to-fits* donüşümünü yapan *video2fits* adında bir modül geliştirilmiştir. Geliştirilen bu modül henüz arayüze entegre edilmemiş olsa da sistem yöneticisi tarafından çalıştırılabilmektedir. Bu modül Anderson (2019)'un geliştirmiş olduğu *stacker.py* modülü baz alınarak geliştirilmiştir. Fakat Şekil 3.7[63] örneğinde gösterildiği gibi video veriler üzerindeki zaman damgalarının doğru bir şekilde tespit edilip, FITS görüntü başlığına uygun bir şekilde yazdırılması gerekmektedir. Bu işlemi gerçekleştirmek için PyMovie'nin OCR (Optical Character Recognition) modülü ciddi bir yapay sinir ağı veri seti eğitimi gerektirdiği için kullanışlı değildir. Bu sebeple, OP üzerinde bulunan *video2fits* modülü, gözlemsel video kareleri üzerine yapıştırılmış zaman damgalarını (timestamps), PyMovie'nin OCR modülü yerine, kullanımı daha hızlı ve pratik bir modül olan *easyOCR*[64] modülü ile yapmaktadır.

[62] https:// free- astro.org/index.php/SER [Son erişim tarihi: 03.01.2023]

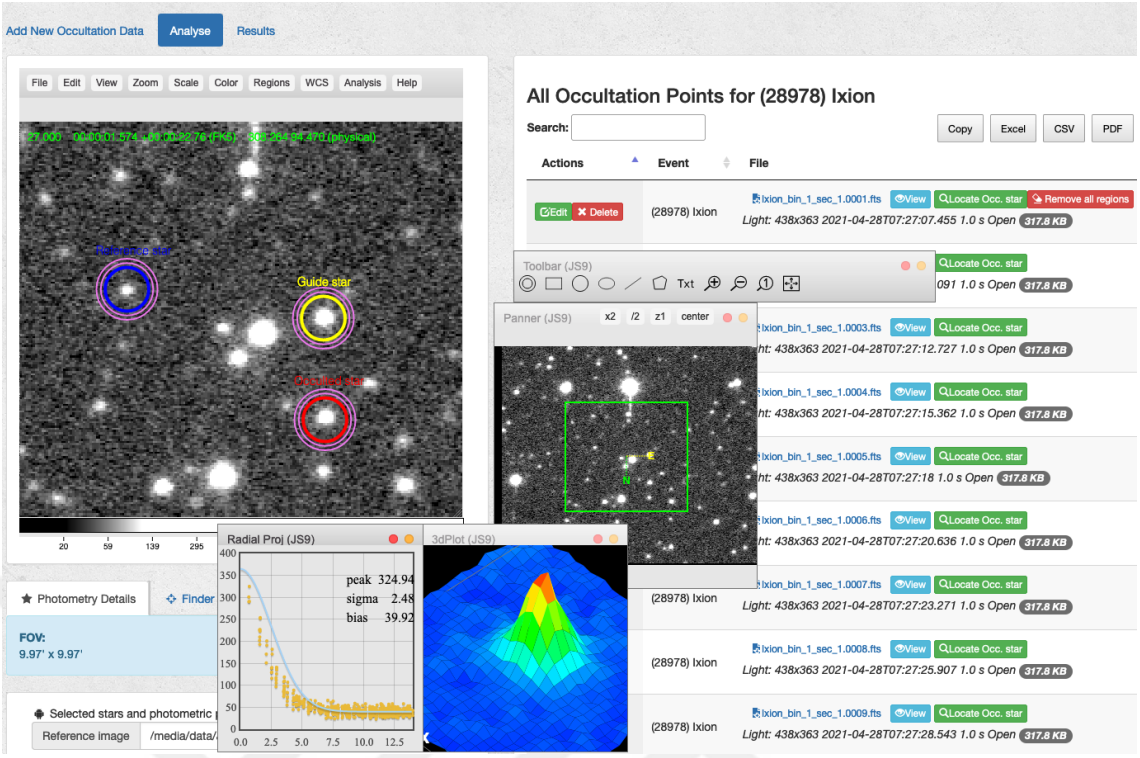
[63] Görseldeki **F8**, zaman düzeltmesinin kaç adet GPS uydusu ile yapıldığını belirtmekedir. HH:MM:SS kısmı, UT'ye göre gözlem zamanını, **7675** ve **7842** kısımları ise sırasıyla SS.ssss saniye birimindeki ilk ve ikinci video alanlarının V-Sync sinyali zamanlarını belirtmektedir. En son kısımda görünen 104553/4 sayısı da IOTA-VTI cihazının çalıştırıldığı veya resetlendiği zamandan beri kayıt ettiği video alan sayısını belirtmektedir.

[64] https://github.com/JaidedAI/EasyOCR [Son erişim tarihi: 03.01.2023]



Şekil 3.7. 20 Mayıs 2021 tarihinde Paul D. Maley tarafından Ixion kampanya gözlemi için OP'ye yüklenmiş AVI formatında bir gözlem verisi görseli

Veriler FITS formatında yüklendikten veya videodan FITS formatına dönüştürüldükten sonra, Şekil 3.8'de gösterildiği gibi OP'nin *Analyse* sekmesi altında, *JS9* aracıyla (Mandel ve Vikhlinin 2020) incelenmeye hazır olarak listelenmektedir. Şekil 3.8'de *Analyse* sekmesinin sadece bir kısmı gösterilebilmiştir.



Şekil 3.8. OP Analiz sekmesinin bir görünümü

Analyse sekmesi altında listelenen görüntülerin, OP tarafından ön-indirgemesinin ve indirgemesinin otomatik olarak yapılmasına başlamadan önce; örtülen yıldız (hedef nesne), mukayese ve takip yıldızının listelenen görüntüler arasından en kolay bulunabileceği ve en iyi görüşe sahip (best-seeing image) referans bir görüntünün seçilmesi gerekmektedir (Alard ve Lupton 1998; Huckvale vd. 2014). Bazen gözlem bölgesinin çok kalabalık olmasından dolayı örtülen nesneyi bulmak kolay olmayabilir. Bu gibi durumların önüne geçmek ve zaman kazanmak için OP'ye *astrometry.net*[65] (Lang vd. 2010) ile alanın astrometrik çözümünü yapan bir özellik eklenmiştir. *astrometry.net*, görüntü üzerinde tespit edilen yıldızlardan oluşturulan dörtlü veya beşli geometrik kayıtları önceden indekslenmiş desenlerle karşılaştıran ve görüntünün astrometrik çözümünü yapan çok pratik ve açık kaynak kodlu/özgür bir yazılımdır. *astrometry.net*'in web sitesi üzerinden sunduğu hizmette *USNO-B1* kataloğu kullanılırken, açık kaynak kod ile yerel sunucular üzerinden kullanılması halinde 2MASS ve Tycho-2 kataloğu ile oluşturulmuş indeks dosyaları ile astrometrik çözümü yapmaktadır. Bu durum OP'de değiştirilmiştir. OP'de hali hazırda Kilic vd. (2018) ile yapmış olduğumuz bir çalışma sonrasında *astrometry.net* ile uyumlu *Gaia DR1* kataloğundan oluşturduğumuz indeks dosyaları kullanılmaktadır. Böylece kalabalık bir alan içerisinden hedef nesnemizin tespiti çok daha duyarlı bir katalog ile daha hızlı yapılabilmektedir. Dahası, OP üzerinde indirgeme aşamasına eğer görüntülerin dosya

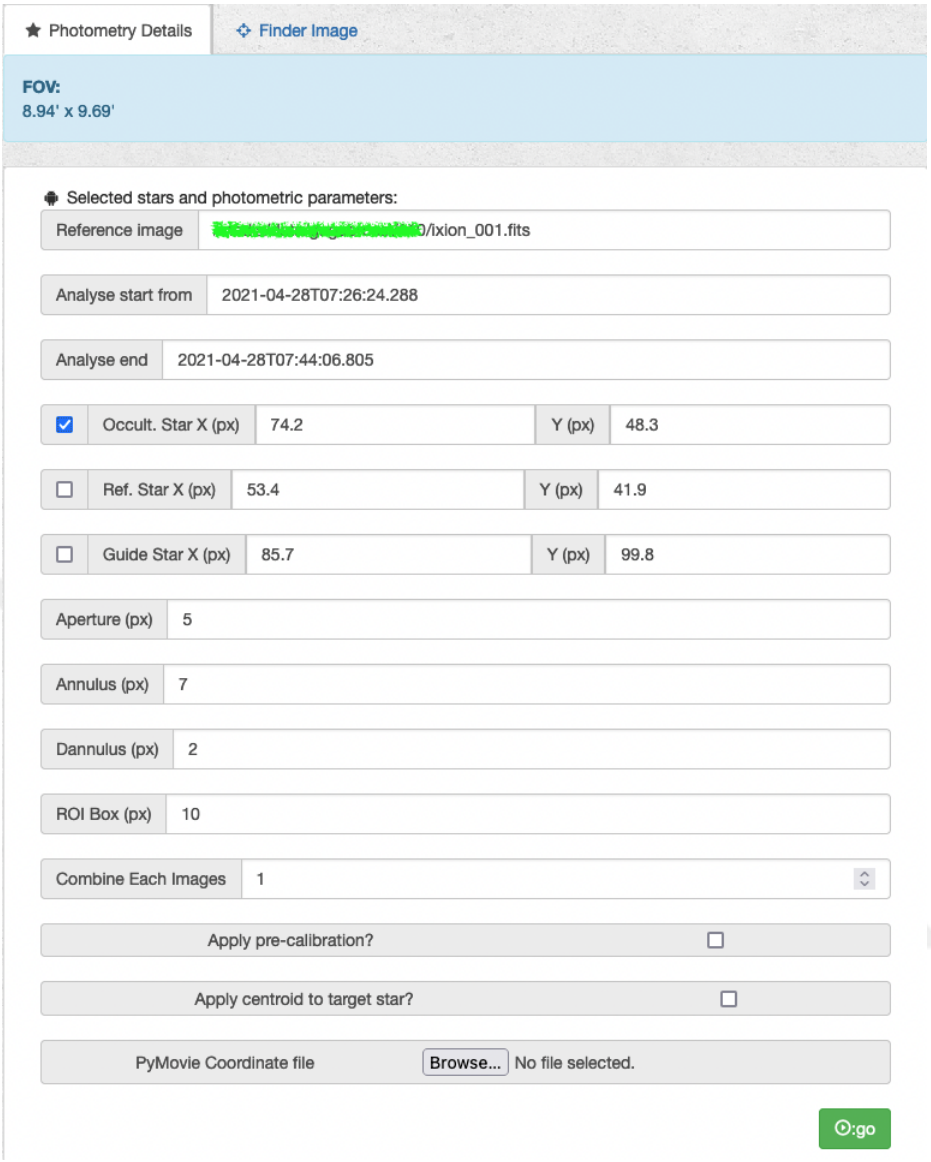
[65] http://astrometry.net/ [Son erişim tarihi: 03.01.2023]

adında veya görüntü başlıklarında *IMAGETYP* anahtarı değerinde; *Bias*, *Dark*, *Flat* ibareleri mevcutsa ön-indirgeme işlemi otomatik olarak yapılmaktadır.

OP üzerinde en çetrefilli ve karmaşık olan süreçlerden biri de ön-indirgeme sonrası görüntülerin hizalanması işlemidir. Hedef nesne, mukayese ve takip yıldızının ışıkölçümünün iyi yapılabilmesi için görüntülerin çok iyi bir şekilde hizalanması gerekmektedir. Bu amaçla OP üzerinde tek bir hizalama metodu yoktur. Görüntüler pek çok hizalama algoritmasına tabi tutulurlar ve başarılı olan algoritma sonrasında ışıkölçüm aşamasına geçilmektedir. Görüntüleri hizalamak amacıyla uygulanan ilk yöntem *alipy*[66] yöntemidir. Görüntüleri hizalamak için Lang vd. (2010) algoritmasını kullanan bu paket başarısız olursa, Beroiz vd. (2020)'nin geliştirmiş olduğu *astroalign* paketi kullanılmaktadır. *Astroalign* paketi de görüntüleri hizalamada başarısız olursa, OP üzerinde eklenen başka bir hizalama metodu tetiklenmektedir. *find_source_in_roi* adını verdiğimiz bir fonksiyon ile kullanıcının seçtiği takip yıldızının etrafında belirlenen bir *ROIBOX* limitleri içerisinde ve bütün görüntüler üzerinde bu takip yıldızının bulunmasına dayalı bir hizalama yöntemi işletilmektedir. Eğer tüm bu hizalama yöntemleri de başarısız olursa, OP, görüntülerinin her birinin ne kadar kaymaya uğradığını belirten bir koordinat dosyası ile de hizalama yapabilmektedir. Örneğin OP, PyMovie (Anderson 2019) gibi yerel bilgisayarlarda çalışan bir yıldız örtülme ışıkölçüm yazılımının çıktısı olan bir sonuç dosyasını okuyabilecek şekilde geliştirilmiştir.

Görüntü hizalama işlemi sonrasında OP ışıkölçüm aşamasına geçmektedir. Işıkölçüm, OP arka planında *IRAF*'ın *phot* taskı (Tody 1986; Stetson 1987) ile *myraflib* (Kilic vd. 2016) kütüphanesi aracılığı ile yapılmaktadır. Işıkölçüm parametrelerini kullanıcılar Şekil 3.9'da gösterildiği gibi *Analyse* sekmesinde bulunan bir arayüz üzerinden belirlemektedirler.

[66] https://github.com/japs/alipy [Son erişim tarihi: 03.01.2023]

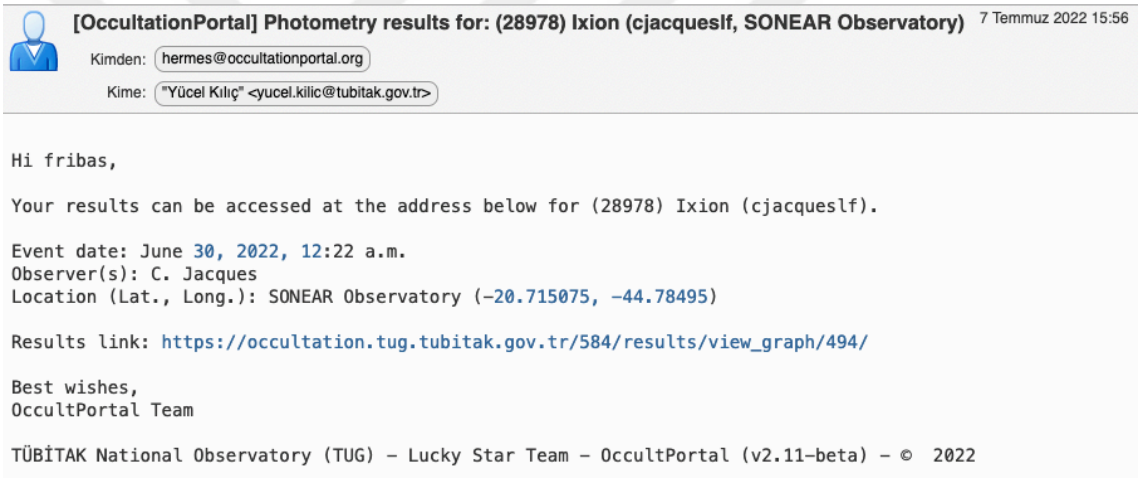


Şekil 3.9. OP Analiz sekmesi ışıkölçüm parametreleri girdileri

Şekil 3.9'da da görüldüğü üzere *ekip* grubunda bulunan kullanıcılar ışıkölçümü yapılması hedeflenen kaynakların *aperture*, *annulus* ve *dannulus* gibi parametreler ile birlikte, olası hizalama yapılamaması durumlarında devreye girecek olan *ROIBOX* parametresini de belirleyebilmektedir. Hedef yıldız, mukayese ve takip yıldızının görüntü üzerindeki konumları *JS9* penceresinden tıklanarak veya otomatik olarak bulunan yıldızların numaraları seçilerek belirlenebilmektedir. Kullanıcıya en son olarak, el ile de veri girmesine olanak sağlayan bu pencere, analiz yapan kullanıcıya olabildiğince yardımcı araçları ek olarak sunmaktadır.

Hedef yıldız bazı görüntülerde çok sönük olabilmektedir. Bu sebeple hedef yıldızın konumunun tespit edilmesi çok küçük alanlar için astrometri ile de zor

olacağından bir başka seçenek daha sunulmaktadır: *Finder Image*. *Ekip* kullanıcı bu seçenek ile dilediği kadar görüntüyü üst üste bindirerek SNR (Signal-to-noise ratio) değerini artırabilir. Eğer hedef yıldız yeterince SNR değerine *N* adet görüntünün toplamı ile ulaşırsa *Combine Each Images* parametresini fotometrik parametre olarak OP'ye verebilir. Böylece her *N* adet görüntü toplandıktan sonra ışıkölçüm işlemine tabi tutulacaktır. *OP Analiz sekmesi* içerisinde kullanıcı dilerse ön-indirgeme seçeneğinin yapılıp yapılmamasını veya OP'ye ekstra eklenen hedef yıldızın konumunun belirtilen konumdan farklı olarak merkezleme algoritması ile sistem tarafından seçilmesini/belirlenmesini talep edebilmektedir. Tüm bu parametreler belirlendikten sonra Şekil 3.9'da gösterilen *:go* tuşuna basılır ve ilgili gözleme ait analiz talebi sunucuya iletilir. *Ekip* kullanıcısı, *Kullanıcı bildirim hizmeti* tarafından analizin sunucuda tamamlanması sonrasında Şekil 3.10'da gösterildiği gibi bir e-posta bildirimi almaktadır. Yapılan analiz sonrası oluşturulan ışık eğrisi e-posta içerisinde kullanıcıya özel olarak sunulan bağlantı üzerinden Highcharts[67] ile görselleştirilmektedir (bkz. Şekil 7.2).



Şekil 3.10. OP'de bir gözlem verisinin ışık eğrisinin oluşturulduğuna dair sistem bildirimi

EK-1'de Şekil 7.2 ile gösterilen üç farklı ışık eğrisi aşağıda içeriği detaylıca verilen Denklem (3.1), (3.2) ve (3.3) ile oluşturulmaktadır.

$$F_{T(i)} = \frac{f_{T(i)}}{\overline{f_T}} \tag{3.1}$$

Denklem (3.1)'de $F_{T(i)}$ örtülen (hedef) yıldızın her bir i görüntüsü üzerinden hesaplanan normalize akısını, $f_{T(i)}$ hedef yıldızın her bir i görüntüsü üzerindeki aletsel akısını ve $\overline{f_T}$ ise örtülen yıldızın bütün görüntülerden hesaplanan akısının ortanca (median) değerini ifade etmektedir.

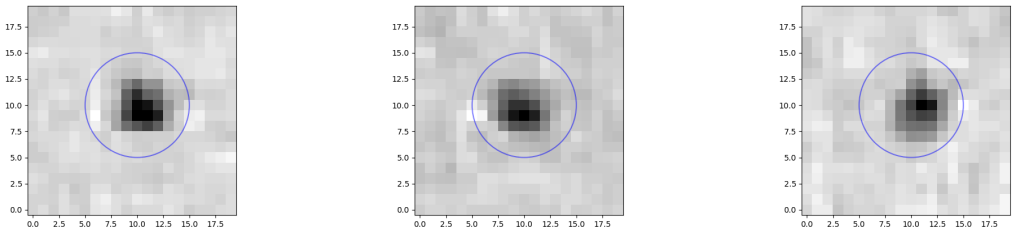
[67] https://www.highcharts.com/ [Son erişim tarihi: 03.01.2023]

$$F_{R(i)} = \frac{f_{R(i)}}{\overline{f_R}} \tag{3.2}$$

Denklem (3.2)'de $F_{R(i)}$ mukayese yıldızının her bir i görüntüsü üzerinden hesaplanan normalize akısını, $f_{R(i)}$ mukayese yıldızının her bir i görüntüsü üzerindeki aletsel akısını ve $\overline{f_R}$ ise mukayese yıldızının bütün görüntülerden hesaplanan akısının ortanca (median) değerini ifade etmektedir.

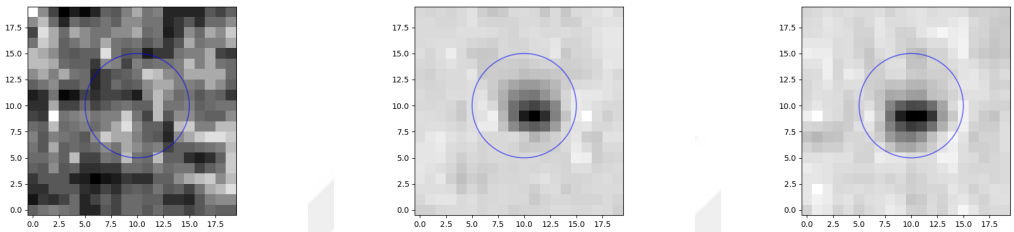
$$F_{N(i)} = \frac{F_{T(i)}}{F_{R(i)}} \tag{3.3}$$

Denklem (3.3)'de $F_{N(i)}$ ifadesi her bir görüntüdeki $F_{T(i)}$ ve $F_{R(i)}$'nin oranını ifade etmektedir. Şekil 7.2'te gösterilen ilk ve en önemli grafik Denklem (3.3) ile oluşturulmaktadır. $F_{N(i)}$ oranı hedef nesne üzerinde gerçekleşen parlaklık düşmelerinin örtülme kaynaklı olup olmadığını anlamada kritik öneme sahiptir. Eğer $F_{N(i)}$ oranı ile oluşturulan grafikte bir parlaklık değişimi -özellikle azalması- aynı zamanda $F_{R(i)}$ grafiğinde de varsa o zaman parlaklığın atmosferik veya aletsel etkilerden dolayı değiştiği çıkarımında bulunabiliriz. Fakat, parlaklıktaki değişim sadece $F_{N(i)}$ grafiğinde var ise o zaman örtülme kaynaklı bir parlaklık değişimi (düşmesi) olduğundan bahsedebiliriz. Yine de yıldız örtülme gözlemlerinde bu parlaklık düşmesinin (çoğu zaman yıldızın kaybolması olayının) görsel olarak doğrulanma ihtiyacı doğmaktadır. Bu sebeple OP'ye, Şekil 7.2'de gösterilen ışık eğrileri üzerindeki her bir noktaya tıklayarak ışıkölçümünün yapıldığı *ROIBOX* bölgesinin görsel olarak incelenebileceği bir özellik eklenmiştir. Bu sayede araştırmacılar örtülmenin gerçekten *pozitif* olup olmadığını doğrulayabilmektedirler (bkz. Şekil 3.11).



Hedef yıldız Mukayese yıldızı Takip yıldızı

(a)



Hedef yıldız Mukayese yıldızı Takip yıldızı

(b)

Şekil 3.11. Işıkölçümü yapılan *ROIBOX* bölgeleri

Şekil 3.11'de *ekip* kullanıcısının teyit işlemini kolaylaştırmak için sistem tarafından üretilmiş hedef yıldız, mukayese yıldızı ve takip yıldızının 20 piksel^2'lik *ROIBOX* alanları görüntülenmektedir. Şekil 3.11a'da gösterilen üçlü sette hedef yıldızın parlaklığında bir değişim gerçekleşmediği için herhangi bir örtülme olayından bahsedilememektedir. Fakat ışık eğrisinde parlaklığın azaldığı/düştüğü yere tıklandığında Şekil 3.11b'deki gibi üçlü bir set ile karşılaşılırsa ve mukayese ve takip yıldızları görünüyorken hedef yıldız görünmüyorsa, hedef yıldız bir Güneş sistemi nesnesi tarafından örtülmüş ve verilen poz süresi içerisinde tespit edilememiş demektir.

Tüm bu işlemler ve doğrulama sürecinden sonra *ekip* kullanıcısı dilerse ışık eğrilerinin çıktılarını ASCII dosyası veya grafik dosyası formatında alabilir. ASCII formatında üretilen ışık eğrisi dosyası örtülen nesne üzerine daha detaylı araştırmalar yapabilmek adına özellikle SORA (Stellar Occultation Reduction and Analysis) yazılımı (Gomes-Júnior vd. 2022) ile uyumlu çalışabilecek bir şekilde üretilmektedir.

3.1.6. Bildirim hizmeti

Bildirim hizmeti, OP'de çalışan çoğu işlemin başlangıcında veya sonunda ilgili kullanıcılara ve/veya yöneticilere bildirim gönderen bir hizmettir. Kullanıcı yönetimi

(kayıt, aktivasyon, hesap güncelleme vb.), arşiv veri talepleri, veri analiz süreçleri, duyurular, kullanıcı sorun takibi, sunucu bildirimleri gibi tüm bildirimler, *Bildirim hizmeti* tarafından SMTP (Simple Mail Transfer Protocol) sunucusu ve bir işlemsel (transactional) e-posta servisi üzerinden e-postalar aracılığıyla yürütülmektedir.

3.1.7. Yedekleme hizmeti

OP'de gerçekleşen veri yedekleme işlemlerinin tamamı Şekil 3.1'de gösterildiği gibi gerçekleştirilmektedir. OP uygulama sunucusu üzerinde bulunan verilerin tamamı ve Django-dbbackup[68] ile üretilen veri tabanı yedeği *rsync*[69] ile günlük olarak TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'nde bulunan bir NAS (Network-attached storage) sunucuya yedeklenmektedir.

3.2. Yıldız Örtülme Gözlemleri ile Fiziksel Özellik Belirleme

Bu kısımda, yıldız örtülme gözlemlerinin tahmin mekanizması, ışık eğrisi analizi ve bu analizlerin birleştirilmesi sonucunda bir Güneş Sistemi Nesnesi'nin (GSN) şeklinin ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi aşamaları ve bu aşamalar sırasında dikkat edilmesi gereken hususlar detaylı bir şekilde anlatılmaktadır. Ayrıca Bölüm 2'de literatür bilgisi detaylı bir şekilde verilen Ixion'un bu tez kapsamında, SORA (Gomes-Júnior vd. 2022) yazılımı ile yapılan analizlerinin bilimsel arka planı detaylandırılmaktadır. Son olarak Ixion'un OP üzerinde gerçekleştirilen gözlem kampanyaları hakkında bilgiler verilecektir.

3.2.1. SORA: Yıldız örtülme gözlemleri indirgeme ve analiz yazılımı

SORA (Stellar Occultation Reduction and Analysis), Gomes-Júnior vd. (2022) tarafından, *Python3* programlama dili ile yıldız örtülme gözlem verilerinin indirgeme ve analizlerini yapabilmek için geliştirilmiş nesne-tabanlı bir yazılım kütüphanesi ve aracıdır. SORA içerisinde bulunan modüller kullanılarak, bir GSN'nin yıldız örtülme olayının tahminleri, boyut ve şekil analizleri ve astrometrik konum hesaplamaları yapılabilmektedir[70].

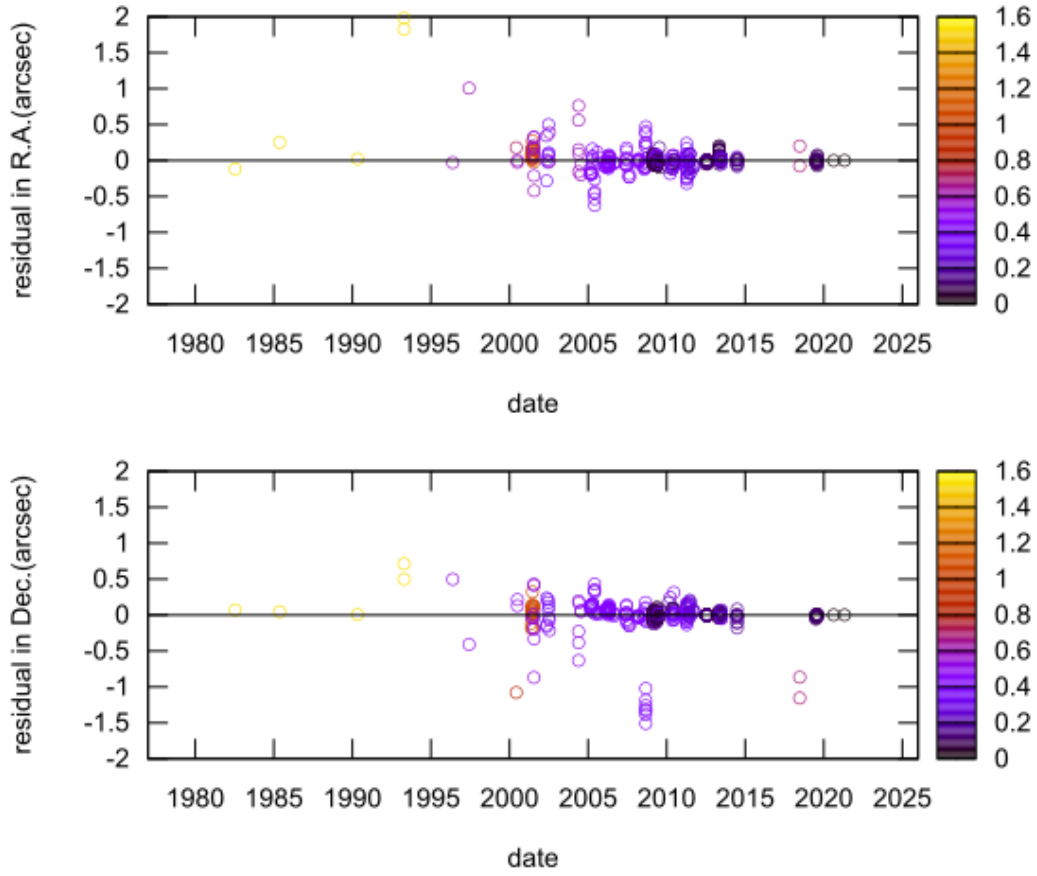
3.2.2. Gözlemlerin tahmini

Ixion'un 2020 ile 2022 yılları arasında gerçekleştirilen yedi (7) farklı başarılı yıldız örtülme kampanya gözlemlerinin yürütülmesi için aktif bir şekilde Occultation

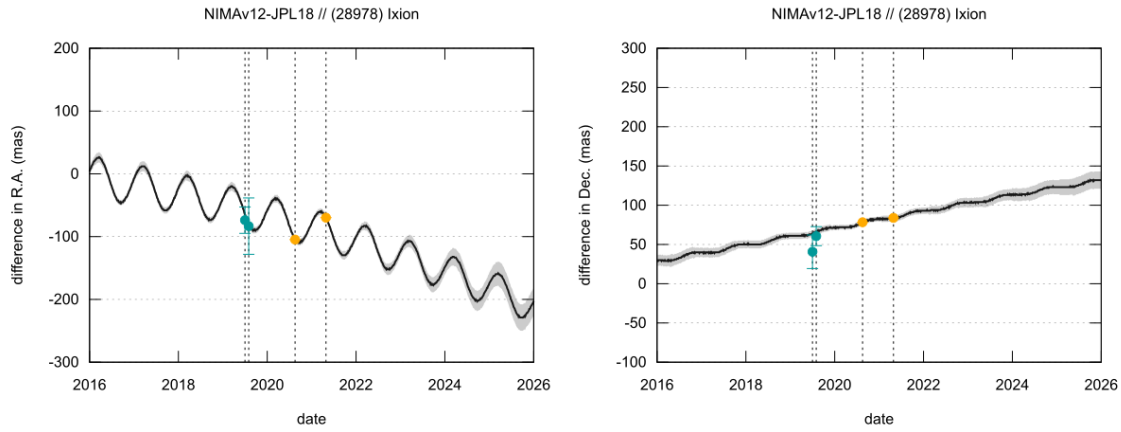
[68] https://github.com/jazzband/django-dbbackup [Son erişim tarihi: 03.01.2023]
[69] https://rsync.samba.org/ [Son erişim tarihi: 03.01.2023]
[70] https://sora.readthedocs.io/ [Son erişim tarihi: 03.01.2023]

Portal kullanılmıştır. Herhangi bir GSN için OP üzerinden sunulan tahmin mekanizmasının nasıl işlediği Bölüm 3.1.2 kısmında detayları ile verilmiştir.

Bir yıldız örtülme olayını gözleyebilmek için, bakış doğrultusu üzerindeki hedef Güneş sistemi Nesnesi'nin yine aynı doğrultu üzerindeki yıldızın önünden geçebileceği bir geometrinin oluşması gerekmektedir. Hedef nesne gökyüzü düzlemi üzerinde ne kadar kalabalık bir bölgeden geçerse o kadar fazla yıldız örtülme olayının gerçekleşme şansı artmaktadır (Gomes-Júnior vd. 2016). Bu sebeple, Ixion'un bu çalışma dönemi aralığında gökyüzünde bulunduğu konum örtme olayı olasılığı bakımından avantaj sağlamaktadır.



(a)



(b)

Şekil 3.12. Ixion'un **a)** NIMAv12 efemerisi ile hesaplanan sağ açıklık (α) ve dik açıklıklarındaki (δ) artıklar. Grafikteki renkler, fit işleminden yaysaniyesi biriminde elde edilen ve ağırlık olarak kullanılan duyarlılığı belirtmektedir; **b)** NIMAv12 ile JPL18 efemerislerinin zamana bağlı farkları. Sağ açıklık ($\cos\delta$) ile ağırlıklandırılmıştır. Gri alan ise NIMA efemerisindeki 1-σ değerindeki belirsizliği belirtmektedir. Yeşil noktalar DES gözlemlerini belirtmektedir (Desmars 2022).

Yıldız örtülme gözlemlerinde tespit edilen her bir pozitif gözlem, nesnenin yörünge parametrelerinin iyileştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Böylece yeni efemerislerin daha duyarları hesaplanabilmesine katkı sağlanarak sonraki tahminlerin gerçekleştirilebilme olasılığı artmaktadır (Desmars vd. 2019). Şekil 3.12 ve Çizelge 32'de detaylıca gösterildiği üzere, Ixion'un bu çalışma kapsamında yıldız örtülme kampanya gözlemlerinden elde edilmiş iki astrometrik konumunun da ilave edilmesi ile hesaplanan efemerisin kalitesi gösterilmiştir[71]. Yapılan sonraki gözlemler, Desmars vd. (2015) çalışması ile üretilen ve kullanılan bu efemeris sayesinde son derece başarılı olarak gerçekleştirilmiştir. Yine de gerçekleştirilen bu astrometrik indirgeme yöntemlerine rağmen çoğu yıldız örtülme gözlemlerinde Güneş sistemi nesnesinin konumundaki belirsizlikler 10 - 100 mas arasında değişebilir (bkz. Çizelge 32). Bazen bu değer Güneş sistemi nesnesinin açısal boyutundan dahi büyük olabilmektedir.

Çizelge 32. Ixion'un NIMA v12 (Desmars vd. 2015) ile elde edilmiş efemeris kalitesinin zamana bağlı değişimi

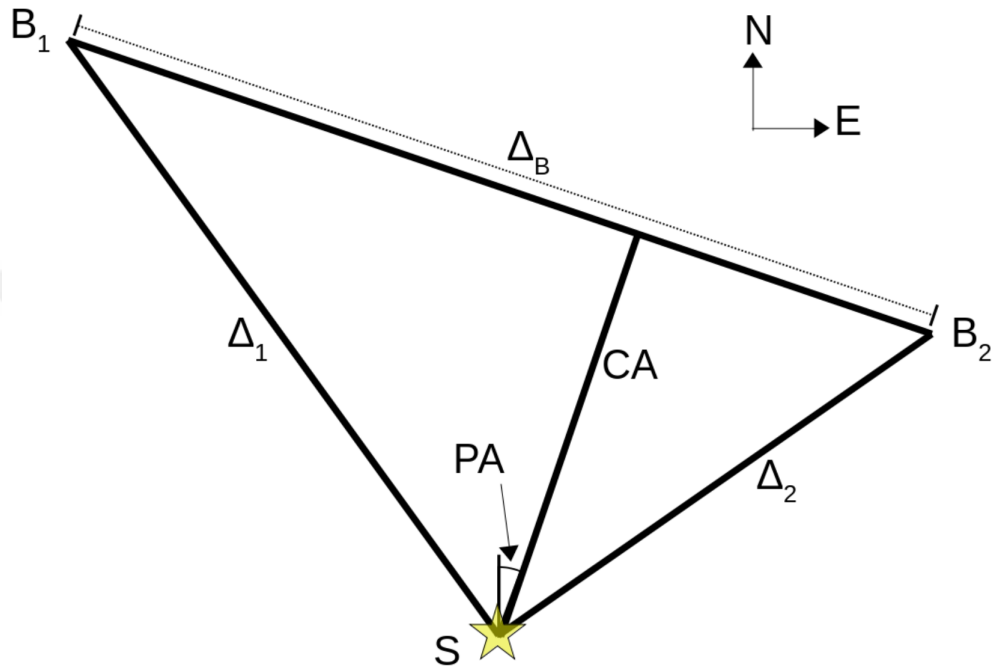
Tarih	σ_α **(arcsec)**	σ_δ **(arcsec)**
2022-01	0.005	0.004
2022-07	0.007	0.005
2023-01	0.008	0.006
2023-07	0.010	0.007
2024-01	0.012	0.008
2024-07	0.015	0.009
2025-01	0.017	0.009
2025-07	0.021	0.011
2026-01	0.023	0.011

Bir örtülme olayı tahmini yapabilmek için GSN'nin efemerisi ile yıldız konumlarının efemeris tarihindeki konumlarının bilinmesi gerekmektedir. Bu iki konum arasındaki farkın minimum olduğu konuma en yakın yaklaşma konumu (CA) adı verilmektedir. Örtülme olayının tespit edilebilmesi için CA değerinin yıldızın açısal yarıçapından küçük olması gerekmektedir. Eğer kullanılan efemerisin belirsizliği biliniyorsa, bu değer potansiyel örtülme olaylarının taranması için bir aralık değeri olarak kullanılabilir. Örtülme olaylarının tahmini gözlemcinin Yer üzerindeki topografik konumuna göre yapılmaktadır. Bu sebeple Yer'in yarıçapı da bu aralık değerine eklenmelidir. Böylece Yer üzerinden örtülmenin görülebileceği bütün bir gölge hattı çıkarılabilir. Aksi halde sadece Yer merkezi için bir örtülme tahmini yapılabilir.

Bir örtülme olayının süresi örten nesnenin, örtülecek yıldız ve gözlemciye göre

[71] https://lesia.obspm.fr/lucky-star/obj.php?p=953 [Son erişim tarihi: 03.01.2023]

göreli hızına bağlıdır. Bu da genellikle birçok örtülme olayı için bir dakikanın altında sürmektedir. Örneğin sadece Yer'in ortalama yörünge hızı olan 29.78 km s^{-1}'i hesaba katsaydık, GSN'nin gölgesi yer üzerini 7 dakikada süpürürdü. Buradan örtülme olayı sırasında örten nesnenin doğrusal gölge hareketinin gözlemciye göre göreli olduğu çıkarımında bulunabiliriz ve örtülme parametrelerini kolaylıkla hesaplayabiliriz. Şekil 3.13'te bir örtülme olayının geometrisi detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 3.13. Bir örtülme olayı geometrisi (Gomes-Júnior vd. 2022)

Assafin vd. (2010)'dan alınarak tekrar Gomes-Júnior vd. (2022) tarafından oluşturulan Şekil 3.13'te CA bir nesnenin örtülme potansiyeli oluşturabileceği en yakın uzaklığı, PA da konum açısını belirtmektedir. Ayrıca;

- S potansiyel örtülme yıldızının konumunu
- B_1 ve B_2 sırasıyla nesnenin t_1 ve t_2 zamanlarındaki efemerislerini
- Δ_1 ve Δ_2 yıldızın sırasıyla B_1 ve B_2 konumlarındaki açısal uzaklığını
- Δ_B efemerisler arasındaki açısal uzaklığı
- N ve E harfleri de Kuzey gök kutbunun ve Doğu yönünün doğrultularını

ifade etmektedir.

Nesnenin B_1 ve B_2 konumlarındaki zamanlardan $t_2 > t_1$ olmalıdır ve S'ye en yakın olan konumdaki yani CA'daki zamanı t_0 Denklem (3.4) ve (3.5) ile hesaplanmaktadır.

$$CA = \sqrt{\Delta_1^2 - \left(\frac{\Delta_1^2 - \Delta_2^2 + \Delta_B^2}{2\Delta_B}\right)^2} \tag{3.4}$$

$$t_0 = t_1 + (t_2 - t_1)\sqrt{\frac{\Delta_1^2 - (CA)^2}{\Delta_B^2}} \tag{3.5}$$

Δ_B elde edildikten sonra gölge hızı (V_S) da Denklem (3.6) ile hesaplanabilmektedir.

$$V_S = \frac{D_0 \sin(\Delta_B)}{t_2 - t_1} \tag{3.6}$$

Denklem (3.6)'daki D_o örten nesnenin dikine uzaklığını ifade etmektedir. Son olarak t_0 zamanındaki PA artık kolayca hesaplanabilir.

3.2.3. Işık eğrisi analizi

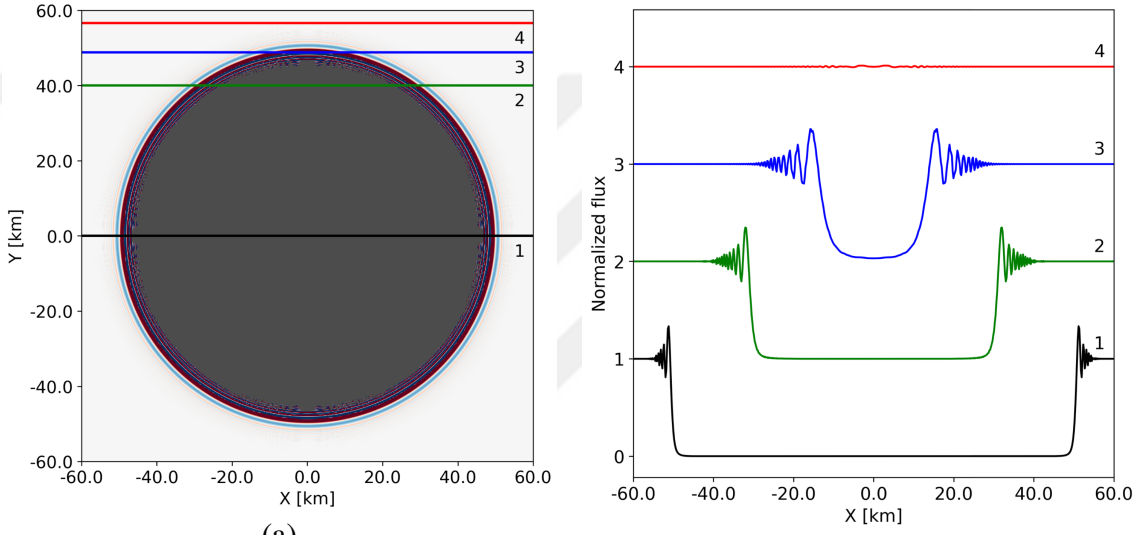
OP üzerinden ışık eğrilerinin nasıl elde edildiği Bölüm 3.1.5'te detaylıca anlatılmıştı. OP ile SORA formatında çıktıları alınan Ixion gözlemlerinin analizleri SORA yazılımı ile yapılmıştır.

Temel olarak SORA yazılımı, ışık eğrisi analizinde, girdi olarak verilen ışık eğrilerine Roques vd. (1987) çalışması ile özel olarak yıldız örtülmesi gözlemleri için geliştirilmiş ışık kırınım modellerini fit ederek örtülme başlama (kaybolma) ve bitme (tekrar görünme) zamanlarını bulmaktadır. SORA'da oluşturulan bu ışık eğrisi modelleri Şekil 3.14'teki gibi üretilmektedir. Şekil 3.14'te gösterilen $D_o = 20$ AB uzaklıktaki ve $R_0 = 50$ km yarıçapa sahip bir GSN üzerinde gösterilen her bir yatay çizgi gözlemcinin bakış doğrultusundaki bir yıldız örtülme olayını temsil etmektedir. (1) merkezi bir kirişi, (2) ortalama bir kirişi, (3) yıldızın GSN'yi sıyırdığı bir kirişi göstermektedir (grazing chord). Bu model üzerindeki kırınımların oluşması için gerekli Fresnel ölçeği (f) 1.02 km'dir. Model üzerinden de görüleceği üzere ışık eğrisinin biçimi kirişin bulunduğu konuma göre farklılıklar göstermektedir. Örneğin, GSN'nin gölge kenarına neredeyse teğet olan bir kirişin örtülme olayı daha yavaş gerçekleşir, çünkü yıldızın giriş ve çıkış zamanlarındaki hızı nesnenin gölge kenarına dik olan göreli hareket doğrultusuna bağlıdır. Nesne gölge kenar yüzeyine dik olan bu örtülme hızı $V_N = \vec{V}_S \cdot \vec{N}$ denklemi ile bulunabilir. Buradaki $\vec{N}$ birim normal vektörünü ifade etmektedir.

Bu sebeple model ile gerçek ışık eğrileri üzerinde fit işlemi gerçekleştirilirken çok dikkatli olunmalıdır. Bir λ dalgaboyunda ve D_o mesafesinde gerçekleşen bir örtülme olayındaki Fresnel kırınımından kaynaklanan gölge genişlemesi Fresnel ölçeği ile Denklem (3.7)'deki gibi ifade edilir.

$$f = \sqrt{\frac{\lambda D_0}{2}} \tag{3.7}$$

Örneğin plutinolar ($D_o = 39.5$ AB) için görünür bölgede gerçekleştirilen ($\lambda \sim$ 550 nm) tipik bir örtülme gözleminde Fresnel ölçeği 1.2 km'dir.



(a) (b)

Şekil 3.14. λ= 700 nm için Fresnel kırınımı dikkate alınarak oluşturulmuş 2-Boyutlu model ve ışık eğrisi modelleri **a)** 2B Fresnel kırınım modeli; **b)** Simüle edilmiş ışık eğrileri (Gomes-Júnior vd. 2022)

Bir yıldız örtülme gözleminde elde edilen ışık eğrisinin yapısına etki eden bir diğer fiziksel etki de örtülen yıldızın örten GSN uzaklığındaki iz düşümsel boyutudur. Eğer yıldızın iz düşümsel boyutu kayda değer miktarda büyükse, örtülme esnasında GSN arkasından yavaşça kaybolur ve bu esnada oluşan yarı gölge ışık eğrisi üzerinde tespit edilebilir. Örneğin bu etkiler Widemann vd. (2009) çalışmasında Uranüs'ün uydusu Titania'nın 0.54 mas açısal çapa (iz düşümsel çap 7.5 km) sahip bir yıldızı örtmesi esnasında ve yine bu tezde tartışılan başka bir çalışma olan Levine vd. (2021)'de (28978) Ixion'un $\sim$ 20 km iz düşümsel çapa sahip bir yıldızı örtmesi esnasında tespit edilmiştir.

SORA'da oluşturulan ışık eğrisi modelleri için kullanılan yıldız çapları için başlangıç değeri *Gaia* EDR3 içinde mevcut olmadığından, *Gaia* DR2 kataloğundan

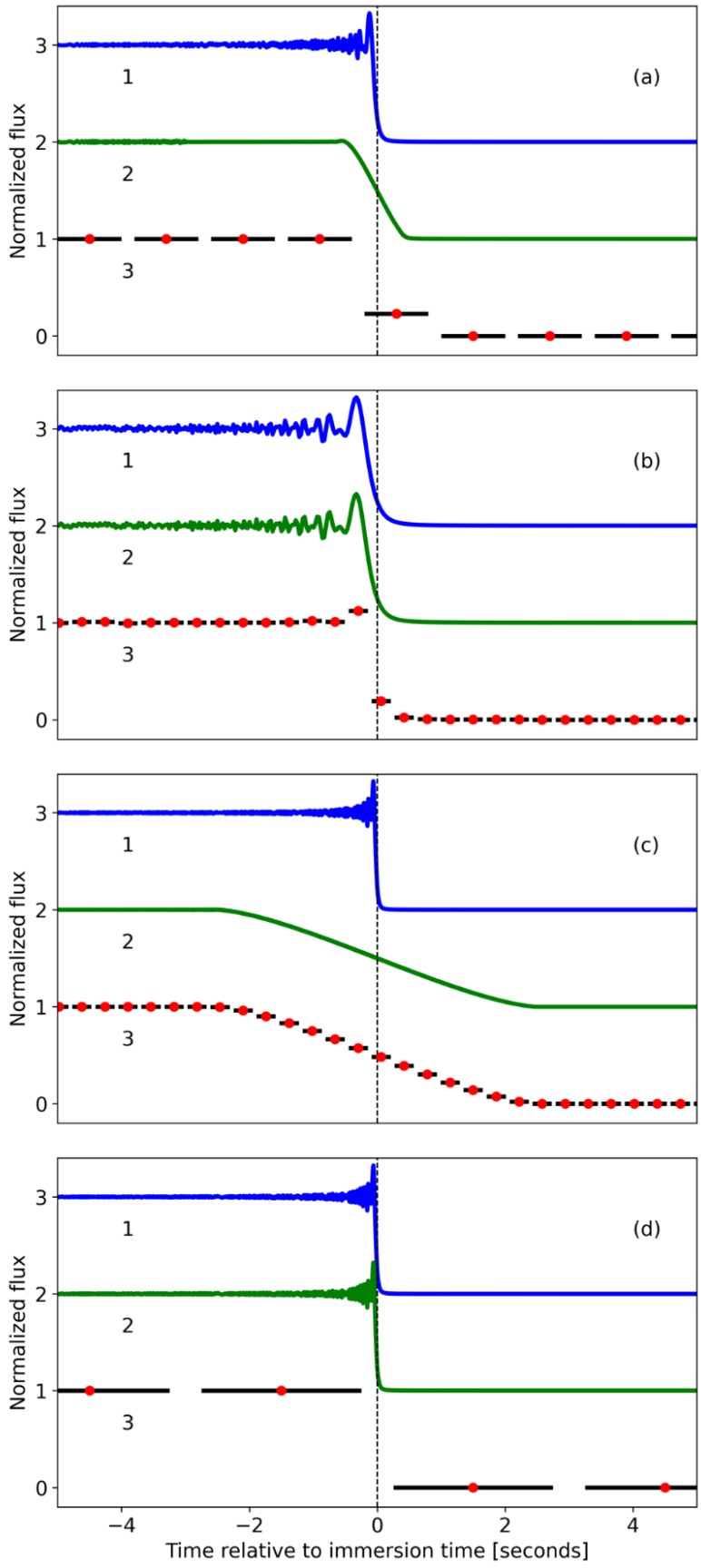
alınmaktadır. *Gaia* DR2'de 77 milyon yıldız için bu değerler mevcuttur (Andrae vd. 2018). *Gaia* DR2'de bulunan görünür açısal çaplar dikkate alınarak verilen bir uzaklık için iz düşümsel yıldız çapı Denklem (3.8) ile hesaplanmaktadır. Denklem (3.8)'de verilen $r_\star$ yıldızın görünür yarıçapını, $R_\star$ fiziksel yarıçapını, D_0 GSN'nin uzaklığını ve $D_\star$ da yıldızın uzaklığını ifade etmektedir. Fakat *Gaia* DR2 kataloğunda paralaks hesaplamasından kaynaklı bir hata bulunduğu için SORA'ya Bailer-Jones vd. (2018) düzeltmelerinin uygulanması planlanmaktadır. Görünür açısal çapları bilinmeyen yıldızlar için de SORA içinde deneysel bir yaklaşım olan van Belle (1999) ve Kervella vd. (2004) çalışmalarındaki modeller kullanılmaktadır. Her iki çalışmada da yıldızların açısal çaplarının tahmini için $B-V$ ve K-genişbant parlaklıkları kullanılmaktadır. van Belle (1999)'nin modeli sonucunda yıldızın anakol, dev veya süperdev bir yıldız olmasına göre 3 farklı parametre seti sağlanmaktadır. Kervella vd. (2004) modeli ise yalnızca cüce ve altdev yıldızları için geçerlidir.

$$r_\star = D_0 \frac{R_\star}{D_\star} \tag{3.8}$$

Yıldız örtülme gözlemlerinde gerçekleşen olayı en detaylı şekilde görebilmek amacıyla S/N oranının yeterli olacağı en kısa poz süresi (t_{exp}) seçilmelidir. Yıldız örtülme gözlemcisinin analizler yapılırken verilen bu poz süresinin konumsal bir dönüşüme tabi tutulacağını dikkate alması zorunludur. Poz süresinin konumsal karşılığı $r_t = V_S \cdot t_{exp}$ denklemi ile elde edilmektedir. Eğer yeterince kısa poz süresi verilmezse Fresnel kırınımı (f) ve yıldızın görünür çapından ($r_\star$) kaynaklı yarı gölge örtülmesi poz süresi dolayısıyla domine edildiği için tespit edilemeyecektir.

Özetle, bir yıldız örtülme gözlemi ışık eğrisini en iyi şekilde modelleyebilmek için Fresnel kırınımı, yıldız iz düşümsel çapı, gölge kenarına dik hız vektörü ve poz süresi (+veri okuma süresi, ölü zaman)[72] gibi parametrelerin belirlenebilmesi kritik öneme sahiptir. Bu sebeple, yine Şekil 3.15'teki $R_0 = 50$ km yarıçapına sahip ve değişken parametrelerle oluşturulmuş bir GSN'nin ışık eğrisi modellerini incelemekte yarar vardır.

[72]Poz süresi ve veri okuma süresi bir poz döngüsünü ifade eder



Şekil 3.15. SORA ile merkezi bir kiriş için farklı parametrelerle oluşturulmuş bazı ışık eğrisi modelleri (Gomes-Júnior vd. 2022)

Şekil 3.15'te gösterilen (1): sadece $\Delta\ \lambda\ =\ 300$ nm dalgaboyu aralığındaki bir gözlem ile birleştirilmiş Fresnel kırınımını (mavi), (2): (1) modeli ile yıldızın görünen çapı birleşimini (yeşil), (3): (2) modeli ile poz süresinin (kırmızı) birleşiminden oluşturulmuş ışık eğrisi modelini nitelemektedir. Kırmızı noktaların üzerindeki her bir siyah çizginin genişliği "poz süresi" kadardır. Her iki siyah çizgi arasındaki boşluk iki veri arasındaki "ölü zamanı" ifade etmektedir. Ayrıca panel (a): $D_o = 20$ AB, $r_\star = 5.0$ km ve $t_{exp} = 1$ s ile çizilmiş temel modeli, panel (b): $D_o = 150$ AB, $r_\star = 0.05$ km ve $t_{exp} = 0.3$ s ile çizilmiş Fresnel kırınımını, (c): $D_o = 5$ AB, $r_\star = 25$ km ve $t_{exp} = 0.3$ s ile çizilmiş yıldız iz düşümsel çapını, panel (d): $D_o = 5$ AB, $r_\star = 0.05$ km ve $t_{exp} = 2.5$ s ile çizilmiş okuma sürelerini ve veri alınmayan bölgeleri vurgulamak için çizdirilmiştir.

Gözlem verilerine modellerin fit işlemi sonucunda elde edilecek giriş ve çıkış zamanları poz süresinin altındaki bir zaman duyarlılığında elde edilmelidir. Şekil 3.15'te (a) panelinde bulunan (3) modelinde *baseflux*[73] ile *bottomflux*[74] arasında bir gözlem noktası ele aldığımızı varsayalım. Eğer örtülme olayı poz başlangıcı zamanına denk gelirse bu durumda orta noktanın göreli akısının *bottomflux* olarak değerlendirilmesi veya poz bitiş zamanına denk gelmesi halinde de *baseflux* olarak değerlendirilmesi söz konusu olabilir. Bu sebeple, örtülmenin meydana geldiği bölgede geçen poz süresi, göreli akı düşüşünün oranı ile orantılıdır ($\Delta f\ =\ baseflux\ -\ bottomflux$). Böylece örtülme zamanındaki belirsizlik, ışık eğrisindeki göreli akı belirsizliği σ_{LC} de kullanılarak kabaca Denklem (3.9)'dan hesaplanabilir.

$$\sigma_t = \frac{\sigma_{LC}}{\Delta f} t_{\rm exp} \tag{3.9}$$

Denklem (3.9) sadece orta noktalar için geçerli değildir. Orta noktaların belirsiz olduğu ve yıldız örtülme olayının poz başlangıcında veya sonunda gerçekleştiği durumlarda da poz süresinin altında bir belirsizlik değeri elde edebiliriz. Fakat diğer taraftan, örtülme olayı, okuma zamanı veya ölü zaman içerisinde gerçekleşirse anlık olarak örtülme olayının nerede başladığını tespit etmek imkansızlaşır. Bu durumda örtülme olay anının belirsizliğini okuma süresi de arttırmış olur. Eğer yıldız örtülme olayı görünür açısal çapı büyük bir yıldızda gerçekleşirse ışık eğrisi üzerine kenar kararması etkisinin de binmiş olabileceği göz ardı edilmemelidir. Bu sebeple SORA yazılımı ile Hanbury Brown vd. (1974)'nin yaklaşımı kullanılarak kenar kararmasının ışık eğrisi üzerine etkisi de Denklem (3.10) ile incelenebilmektedir. Denklem (3.10)'da bulunan b kenar kararma katsayısını θ ise gözlemcinin bakış doğrultusunun yıldızın yüzey normali ile arasında yaptığı açıyı ifade etmektedir.

[73] Hedef yıldız ile GSN'nin toplam akısı

[74] Yalnızca GSN'nin akısı veya arka plan (gök) akısı

$$I(\theta) = (1 - b) + bcos(\theta) \tag{3.10}$$

SORA ile bir ışık eğrisi üzerindeki herhangi bir örtülme olayı, esasında ötegezegenlerin dönemsel geçişlerini tespit edebilmek adına geliştirilmiş bir yöntem olan $box - fitting\ least\ squares$ (kutu fit etme en küçük kareler) yöntemi (Kovács vd. 2002) ile otomatik olarak taranmakta ve çoğunlukla çok hızlı ve başarılı sonuçlar alınmaktadır. Bu yöntemle ışık eğrisi üzerinde bir örtülme tespit edildikten sonra bir başlangıç parametre seti ile bir ön model fit edilmektedir. Fakat elde edilen modelde giriş ve çıkış zamanlarının belirsizliği çok yüksektir ve bu sebeple Roques vd. (1987)'nin kırınım modeli ile üretilen modelde *baseflux* = 1 ve *bottomflux* = 0 olduğu için gözlemsel ışık eğrisinin de bu değerlere normalize edilmesi gerekmektedir. Neyse ki, bizim verilerimizde bu işlem OP tarafından otomatik yapılmaktadır. Gözlemsel ışık eğrisi (ϕ_{obs}) ve modelin (ϕ_{cal}) *baseflux* ve *bottomflux* değerleri aynı olduğunda artık kıyaslama işlemine geçilmekte ve her bir i veri noktası üzerindeki farklar hesaplanmaktadır. Son olarak da χ^2 istatistiği Denklem (3.11) ile hesaplanmaktadır. Denklem (3.11)'de kullanılan σ_i her bir veri noktasının belirsizliğini, N de toplam veri sayısını ifade etmektedir.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N} \frac{(\phi_{i,obs} - \phi_{i,cal})^2}{\sigma_i^2} \tag{3.11}$$

SORA Denklem (3.11)'i kullanarak en küçük χ^2 değerine sahip olan ϕ_{cal} modelini aşağıdaki prosedürü uygulayarak aramaktadır (Gomes-Júnior vd. 2022).

(i) Örtülme giriş (immersion) ve çıkış (emersion) zamanları Monte Carlo yaklaşımı (Mooney 1997) ile kullanıcının belirlediği bir zaman aralığında taranır.

(ii) Bu bölümde detayları anlatıldığı üzere, her iki giriş ve çıkış zamanları için de ışık eğrisi çubuk şeklinde örtülme modeli ile (Roques vd. 1987); örtülme yüzey normali hızı, ışık kırınımı, yıldızın görünür çapı, poz süresi ve kenar kararması etkileri göz önünde bulundurularak araştırılır.

(iii) Denklem (3.11) kullanılarak gözlemsel ışık eğrisi ile üretilen model arasındaki fark istatistiği yapılır.

(iv) Gözlemsel ışık eğrisi ile en küçük χ^2 değerine sahip modelden giriş ve çıkış zamanları belirlenir.

(v) Gözlemsel ışık eğrisi ile global en küçük χ^2 değerine sahip modelden giriş ve çıkış zamanları belirlenir (Press vd. 2007).

(vi) SORA içerisinde aranan her bir parametrenin güvenilirliği Press vd. (2007) çalışmasında detayları verildiği üzere sabit χ^2 sınırları içerisindeki bir marjinal dağılım ile hesaplanır. SORA içerisinde bu dağılımın sınırı ön tanımlı olarak 1-σ'dır ($\Delta\chi^2$). Her bir parametrenin hatası $\chi^2 < \chi^2_{min} + \Delta\chi^2$ formülü ile hesaplanır.

SORA yazılımı giriş ve çıkış zamanlarının yanı sıra aynı metodu kullanan *ChiSquare* nesnesi yardımıyla en iyi *baseflux*, *bottomflux*, *örtülme yüzey normal hızı*, *yıldızın göreli görünür çapı* gibi parametreleri de belirleyebilmeye olanak sağlamaktadır.

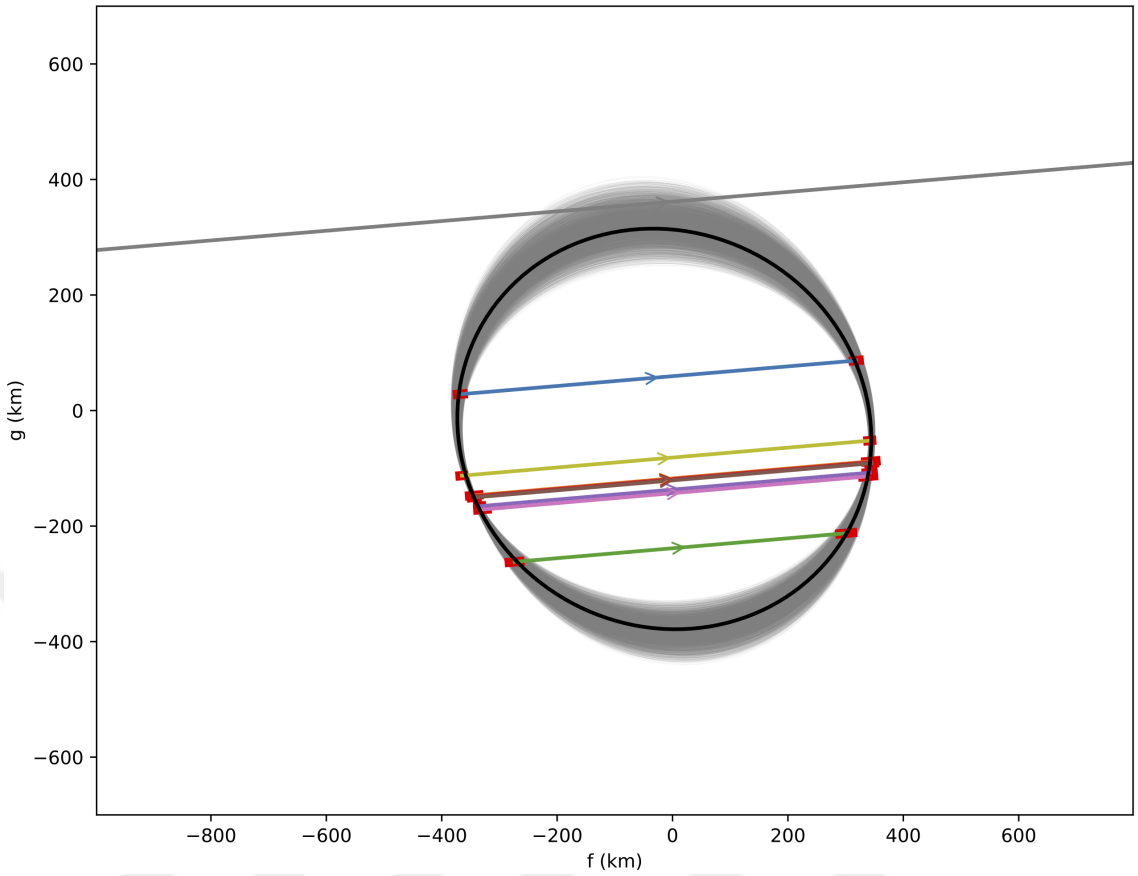
3.2.4. Kirişlerin birleştirilmesi ve şekil analizi

Her yıldız örtülme gözlemi teğet düzlem üzerinde iki nokta oluşturur. Aynı konumda veya aynı örtülme hattı üzerinde bulunan gözlemciler teğet düzlem üzerinde GSN gövdesini oluştururken aynı kirişin oluşmasına katkı sağlayacaklardır. Bir yıldız örtülme gözleminde bir adet kiriş tespit edilebildiyse GSN boyutu hakkında en az bilgiye sahip olunacaktır. Bir GSN kiriş uzunluğundan daha küçük boyutlu olamayacağından dolayı, nesnenin olabileceği en küçük ebatın en büyük boyutu ve astrometrik konumu elde edilmiş olur.

Eğer iki veya daha fazla gözlem konumunda örtülme olayı tespit edilmişse, teğet düzlem üzerindeki nokta sayısı artar ve bu kiriş uçlarındaki noktalara elips fiti artık yapılabilir. Kiriş uç noktalarına elips fiti yapılırken aranan parametreler şunlardır: görünür yarı-büyük eksen uzunluğu ($a^{'}$), görünür yarı-küçük eksen uzunluğu ($b^{'}$), görünür basıklık ($\epsilon = 1 - b^{'}/a^{'}$), yarı-küçük eksen uzunluğunun konum açısı (PA_b)[75] ve merkez konumu (x_c, y_c).

Büyük ve yoğun GSN'lerin çoğu 3 boyutlu elipsoidal yapıdadırlar ve bu nesneler eğer hidrostatik dengede iseler Jacobi elipsoidleri veya Maclaurin küreleri şeklinde tanımlanabilirler (Chandrasekhar 1987; Tancredi ve Favre 2008). Bu sebeple pek çok kiriş elde edilse bile nesnenin görünür ortalama şekli elips olarak değerlendirilebilir.

[75] Kuzey gök kutbuna göre ölçülen göreli açı, sağ açıklık yönüne doğru pozitif olarak artar.



Şekil 3.16. Yaklaşık 700 km çapına sahip bir GSN'nin yıldız örtülme gözlemleri sonrası oluşturulmuş kirişleri ve elips fitleri

Şekil 3.16'da bu tez kapsamında[76] Ixion'un 13 Ekim 2020 tarihinde elde edilmiş kirişleri üzerine fit edilmiş elipsler görünmektedir. Kirişler üzerindeki kırmızı bölgeler zamandaki belirsizliği ifade etmektedir. Ayrıca en üstte elde edilmiş negatif gözlem ise GSN'nin şekil analizinde yapılan elips fitlerini sınırlamakta ve GSN'nin boyutundaki belirsizliği gidermeye yardımcı olmaktadır. Kiriş üzerindeki ok işaretleri ise zamanın akış yönünü ifade etmektedir. Kirişlere yapılan elips fitlerinin oluşturduğu gri bölgeler 1σ aralıktaki marjinal dağılımı yani elde edilen çözümün kalitesini (belirsizliğini) göstermektedir. En iyi eliptik modelden, potansiyel topografik özellikler hakkında önemli bilgiler elde edilebilir. Örneğin, bir kiriş bir kraterde veya dağda bulunuyorsa, büyük bir artık (hata, kırmızı bölge) bekleriz. Ayrıca, birbirine yakın kirişler varsa ve bu kirişlerin gözlemleri zaman duyarlılığı yüksek bir aygıtla yapılmışsa, benzer değerlere sahip olmaları gerekir ve ayrıca bir topografik özelliğin irdelenmesini gerektirir. Fakat çoğu zaman bu mümkün olmayabilir ve kaydırılması/düzeltilmesi ya da çıkartılması gerekebilir.

[76]Detayları Bölüm 4'te tartışılacaktır.

Örneğin; Gomes-Júnior vd. (2015) çalışmasında bir kiriş diğer kirişlerden 1 dakikalık zaman farkı olan bir konumda bulunmasından dolayı kenar fiti (limb fit) işleminde kullanılmamıştır. Çünkü diğer kirişlerin yine de yeterli bir sonuç verebilecek miktarda olacağı sonucuna varılmıştır. Ortiz vd. (2020) çalışmasında ise güvenlir olmayan gözlem zamanlarına sahip bir kiriş, yapılan elips fitinin merkezine taşınmış ve bu kiriş için en iyi kayma miktarı bulunmuştur. Bu nesnenin elipsoidal bir şekle sahip olma durumu varsayılarak bu işlem yapılmıştır. Böylece merkezi kiriş düz bir çizgi formunda olacaktır.

Yıldız örtülme gözlemlerinin önemli bir sonucu da elde edilen astrometrik konumdur. Bu bölümde daha da detaylandırılacağı üzere elips fiti işlemleri sonucunda elde edilen teğet düzlemin merkezi (x_c, y_c), örtülme anındaki efemeris farkını (efemeris offset) vermektedir. Nesnenin örtülme zamanındaki astrometrik konum belirsizliği, yıldızın konumundaki belirsizlik ve teğet düzlem merkezinin belirsizlik değerleri birleştirilerek hesaplanır. Bu durum sadece bir veya iki kirişli örtülme gözlemlerinde de geçerlidir. Örneğin Rommel vd. (2021), TNO'ların, literatürde önceki örtülme gözlemlerinden ve radyometrik verilerden elde edilmiş eşdeğer yarıçap bilgilerini kullanmış ve dairesel bir fit kullanarak sadece GSN merkezlerini bulmuştur. Gomes-Júnior vd. (2019) tek kirişli Phoebe verisine 3-boyutlu model fiti gerçekleştirmiş ve efemeris kaymasını hesaplayabilmiştir. Bu gibi durumlarda eğer nesnenin boyutu kiriş uzunluğundan büyükse kirişin, merkezin kuzeyinde veya güneyinde bulunmasına göre iki adet çözüm bulunmaktadır. Eğer pozitif kirişe çok yakın bir negatif kiriş varsa o zaman nesne merkezini oldukça düşük bir belirsizlikle elde etmek olasıdır.

GSN'nin görünür şekli ve konumu yıldız örtülme gözlemlerinin doğrudan bir sonucudur. Eğer mevcutsa, diğer gözlem yöntemleri ile elde edilmiş verilerle bu sonuçların birleştirilmesi gövdenin fiziksel parametrelerinin iyileştirilmesini sağlamaktadır. Örneğin, Ortiz vd. (2017) ve Benedetti-Rossi vd. (2019) çalışmalarında örtülme anına yakın zamanlarda alınmış dönemsel ışık eğrisi verilerinden örtülme anının mutlak parlaklığın minimum zamanına denk geldiğini bulmuştur. Bu sayede GSN'nin 3-eksenli şeklini ortaya koyabilmişlerdir. Ek olarak, Morgado vd. (2021) de yaptığı çalışmada Centaur türü bir nesne olan Chariklo'nun 3-eksenli görünür şeklini bulmak amacıyla farklı yıldız örtülme gözlemlerinden elde ettiği şekilleri birleştirmiştir.

Eğer bir GSN'nin mutlak parlaklığı bilinirse geometrik albedosu Sicardy vd. (2011) çalışmasında gösterildiği gibi hesaplanabilir. Aynı şekilde kütlesi de bilinirse nesnenin yoğunluğu da tahmin edilebilir (Souami vd. 2020). Fakat nesnenin kütlesi bilinmiyor ve dönme dönemi biliniyorsa, Maclaurin küresi veya Jacobi elipsoidi yaklaşımları (Tancredi ve Favre 2008; Braga-Ribas vd. 2013) ile nesnenin hidrostatik dengede olması koşuluyla muhtemel yoğunluk aralığı hesaplanabilmektedir.

Örtülme gözlemlerinde çoğunlukla pozitif kirişlerin tespit edilmesine odaklanılsa da negatif kirişlerin (gözlemlerin) de elde edilmesi son derece önemlidir. Eğer negatif kiriş nesne gövdesine (kenarına) yakınsa nesnenin sınırlarının belirlenmesine ve astrometrik konum belirsizliğinin giderilmesine/düşürülmesine ciddi katkılar sunmaktadır. Ayrıca ışık eğrileri üzerinde karakteristik değişimlerin olmayışı bize nesne gövdesi etrafındaki yapıların mevcudiyeti hakkında da değerli bilgiler sağlar (halka varlığı, toz, uydu vb.). Eğer bir yıldız örtülme gözleminde sadece negatif gözlemler elde edilmişse, bu durum efemeris belirsizliği haritasının kontrolünü gerektirir ve gelecek olaylardaki nesnenin konumunun sınırlandırılması konusunda da yardımcı olur.

Bir GSN'nin çoklu bir yıldız örtülme gözleminde elde edilen her bir kiriş (chord) aslında o nesneye ait bir kesite erişmemize olanak sağlar (bkz. Şekil 3.16 ve Şekil 2.16). Bölüm 3.2.3'te de detaylı bir şekilde anlatılan yıldız örtülme olayının giriş (immersion) ve çıkış (emersion) zamanları verilen poz süresinden çok daha küçük hatalar ile hatta bazen bir milisaniyenin onda biri hassasiyette hata ile belirlenebilmektedir. Bu gibi gözlemler ancak çok iyi zaman senkronizasyonu yapılmış gözlem aletleri ile elde edilebilmektedir. Bunun yanı sıra, bir gözlemcinin veya uzay aracının konumu da yüksek hassasiyet ile bilinmelidir. Aksi halde farklı gözlemcilerin elde ettiği sonuçları en az hata ile bir araya getirmek mümkün olmayacaktır.

Bir örtülme gözlemcisinin giriş ve çıkış anları gözlemi yapılan GSN'nin iz düşümsel gövdesinin yalnızca bakış doğrultusuna denk gelen kısımlarından oluşur. Bu sebeple bu anlardaki GSN ile yıldızın gözlemcinin bakış doğrultusuna dik olan düzlemindeki göreli konumlarının GSN merkezine olan uzaklıkları bir kenarın uzaklığını vermektedir (limb distance). Böylece artık, orijini GSN'nin merkezi olan ICRS tabanlı 2-boyutlu bir offset düzlemi (x, y) tanımlanabilir. Bu düzlem üzerindeki gözlemcinin konumu Denklem (3.12) ile hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} x &= D_0 \sin(\alpha_\star - \alpha_0) \cos\delta_0 \\ y &= D_0 \sin(\delta_\star - \delta_0) \end{aligned} \tag{3.12}$$

Denklem (3.12)'de verilen D_0 GSN'nin radyal uzaklığını, ($\alpha_\star$, $\delta_\star$) ve (α_0, δ_0) ifadeleri örtülme olayının ortasındaki zamanda, sırasıyla yıldızın ve GSN'nin ICRS koordinatlarına karşılık gelmektedir. Denklem (3.12) GSN'nin konumunun bilinmesini zorunlu kılmaktadır fakat *Gaia* çağında henüz GSN'lerin konumundaki belirsizlikler yıldızlarınkinden fazladır. Bu problemi gidermek için (α_0, δ_0) değerleri efemeris üzerindeki nümerik olarak hesaplanan yeni konum olarak yeniden tanımlanır. Böylece gökyüzüne teğet olan düzlem (teğet düzlem) üzerindeki GSN'nin merkezindeki (x_c, y_c) değişimlerin efemeristen kaynaklandığı yorumlanabilir ve bu bilgi GSN'nin astrometrik bilgisini iyileştirmek için kullanılabilir.

Denklem (3.12) ile yapılan hassas hesaplamalarda her bir Yer-tabanlı gözlemcinin veya uydu teleskobunun konumu göz önünde bulundurularak yıldızın konumuna paralaks düzeltmesi yapılmalıdır. Genellikle Yer-tabanlı gözlemlerde Yer merkezcil yıldız koordinatı yeterli olsa da, yakın yıldızların uzak GSN'ler tarafından örtüldüğü olaylarda toposentrik yıldız koordinatı daha anlamlı olacaktır. Bunun sebebi, farklı konumlardaki gözlemcilerin gözlemci-yıldız bakış doğrultularının artık paralel olmamasından kaynaklanmaktadır. Hatta bu durum yeni yeni yapılmaya başlanan uzay tabanlı örtülme olaylarının (Morgado vd. 2022) da artmaya başlamasıyla ve bunların Yer-tabanlı gözlemlerle birleştirilmesi işlemlerinde dikkate alınması kaçınılmaz olacaktır.

Çoğu yıldız örtülme gözlemlerinde yıldızın uzaklığı dikkate alınmaz ve sonsuzda kabul edilir. Bu durumlarda Denklem (3.15) ile ifade edilen (x, y) koordinatları, Yer-merkezli yıldız konumu doğrultusuna dik olan Ortografik Projeksiyon[77] üzerindeki Yer merkezli gözlemci ve GSN koordinatları arasındaki fark olarak temsil edilebilir ve sırasıyla Denklem (3.13) ve (3.14) ile ifade edilirler.

$$\begin{aligned} \xi_\lambda &= D_\lambda \cos\delta_\lambda \sin(\alpha_\lambda - \alpha_\star) \\ \eta_\lambda &= D_\lambda[\cos\delta_\star \sin\delta_\lambda - \sin\delta_\star \cos\delta_\lambda \cos(\alpha_\lambda - \alpha_\star)] \end{aligned} \tag{3.13}$$

$$\begin{aligned} \xi_0 &= D_0 \cos\delta_0 \sin(\alpha_0 - \alpha_\star) \\ \eta_0 &= D_0[\cos\delta_\star \sin\delta_0 - \sin\delta_\star \cos\delta_0 \cos(\alpha_0 - \alpha_\star)] \end{aligned} \tag{3.14}$$

$$\begin{aligned} x &= \xi_\lambda - \xi_0 \\ y &= \eta_\lambda - \eta_0 \end{aligned} \tag{3.15}$$

Denklem (3.13) ve Denklem (3.14)'de verilen (ξ_λ, η_λ) ve (ξ_0, η_0) ortografik projeksiyon koordinatları sırasıyla, teğet düzlem üzerindeki gözlemci ve GSN koordinatlarını ifade etmektedir. Teğet düzlem üzerinde, sağ açıklığın (ICRS) artış yönü ξ pozitif ile dik açıklığın (ICRS) artış yönü de η pozitif ile tanımlanmıştır. D_λ, Yer merkezli gözlemcinin dikine uzaklığını, α_λ ve δ_λ da sırasıyla ICRS üzerindeki azimuth açısını (sağ açıklık) ve ICRS kutup açısını (dik açıklık) ifade etmektedir. Bu yaklaşım Sicardy vd. (2011), Braga-Ribas vd. (2013) ve Benedetti-Rossi vd. (2019) gibi çalışmalarda başarıyla uygulanmıştır. Fakat yine de topografik koordinatları olan gözlemler üzerinde Yer merkezli yaklaşımda bulunulurken çok dikkatli olunmalıdır. Yıldızın uzaklığının esasında önemli olduğu ve yakın yıldızlarda bu durumun dikkate alınması gerektiği unutulmamalıdır. Aynı zamanda Yer merkezi ve topografik gözlemci

[77] https://acikders.ankara.edu.tr/mod/resource/view.php?id=41932 [Son erişim tarihi: 03.01.2023]

arasındaki mesafe farkından dolayı ışık-zaman etkisinin de dikkate alınması gereken durumlar olabilir (ortalama Yer yarıçapı için bu etki ∼0.021 s). Hızlı görüntüleme yapan ve duyarlı zaman ve konum ölçüm aygıtı üzerinde olan kameraların yıldız örtülme gözlemlerinde ne kadar önemli olduğu Dunham vd. (2019), Tanga vd. (2021) ve Buie vd. (2020) çalışmalarında gösterilmiştir (bkz. Bölüm 2). Bu dikkate alınarak gelecekte, özellikle YYA'lar gibi küçük GSN'ler için, 0.021 saniyenin[78] altında zaman çözünürlüğüne ve yeterli S/N değerine sahip yıldız örtülme gözlemlerinin artık kaçınılmaz olacağını söyleyebiliriz.

SORA'da her bir kirişin bilgilerini barındırmak ve $Occultation$ nesnesi ile ilişkilendirmek için $Chord$ (kiriş) nesnesi kullanılmaktadır. $Chord$ nesnesi teğet düzlemi üzerinde her bir kirişi Denklem (3.12) ile ve Denklem (3.15) ile projekte etmektedir. Denklem (3.12), Denklem (3.15)'e göre daha hassas projeksiyon yapabilmektedir. Kirişlerin projeksiyon işlemi bittiğinde $SORA$ her bir pozitif kiriş merkezinden bir doğru fiti geçirerek bazı kirişlerde olabilecek en iyi zaman kaymalarını tespit edebilmektedir. Eliptik bir şekil fiti yapabilmek için, kiriş merkezlerini birleştiren hattın düz bir çizgi üzerinde uzanması gerekmektedir. Fakat nesne yüzeyinde belirgin bir topografik özellik varsa, o kiriş üzerindeki zaman kaydırması topografik özelliğin maskelenmesine yol açabilir. Bu sebeple bu özellik kullanılırken çok dikkatli olunmalıdır. Her bir kirişteki düzenlemeler bittikten sonra, kiriş uç noktalarından geçecek en iyi eliptik şeklin fiti yapılır ve bu şekil nesne yüzeyinin ortalamasını temsil etmektedir. SORA'da $Occultation$ nesnesi 5 farklı parametreyi belirlemektedir: görünür yarı-büyük eksen uzunluğu, görünür basıklık, görünür yarı-büyük eksen uzunluğunun pozisyon açısı, ve merkezin konumu. Bu parametreler belirlenirken aşağıdaki prosedürler çalışır:

(i) Her bir parametrenin belirlenmesi için bu işlemlerde de Monte Carlo yaklaşımı (Mooney 1997) ile kullanıcının belirlediği δ aralığında taramalar yapılır. Fakat bu kısımdaki simülasyon çok sayıda parametre ile şekil fiti yapılmasından dolayı kritiktir ve çok fazla zaman alabilir. Bu sebeple kullanıcı dilerse yapılacak elips şekil fiti sayısını sınırlandırabilir.

(ii) Kiriş uç noktaları ile yapılan elips fiti arasındaki dikine mesafelerin farkları hesaplanır ve χ^2 değeri Denklem (3.16) ile hesaplanır.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N} \frac{(r_{i,obs} - r_{i,cal})^2}{\sigma_i^2 + \sigma_{model}^2} \tag{3.16}$$

[78] Teğet düzlem üzerinde $\sim$ 600 metreye karşılık gelmektedir. Bu boyut küçük GSN'ler için önemlidir.

Buradaki $(r_{i,obs} - r_{i,cal})$ her bir *i.* kiriş ucunun test edilen elips ile arasındaki farkı ifade etmektedir. σ_i de her bir *i.* kiriş ucunun belirsizliğini ifade etmektedir. Kiriş doğrultusundaki belirsizlik genellikle zamandaki belirsizlikten kaynaklanmaktadır. Gözlemcinin konumundaki belirsizlik dikine doğrultudaki parametrelendirme dolayısıyla göz ardı edilmektedir. Bu yaklaşım σ_{model}'deki doğrultunun olduça iyi, kolay ve hızlı belirlenmesini sağlamaktadır. Beklentinin aksine, Yer üzerinde farklı enlemlerde bulunan gözlemciler arasındaki göreli hızlar Yer'in dönmesinden dolayı farklılıklar gösterirler ve kirişler birbirine paralel olamazlar. Hatta aynı kirişin iki ucu dahi birbirinden farklı doğrultuları gösterebilirler. Özellikle yavaş gerçekleşen örtülme olaylarında bu daha da belirginleşir ve kirişlerin teğet düzlem üzerindeki yansıması artık doğru ile ifade edilemezler. Bu durumlar $SORA$'nın mevcut sürümünde bulunmadığı için yapılan analizlerde göz önünde bulundurulmamıştır.[79] (Gomes-Júnior vd. 2022).

Bazı durumlarda, kirişin teğet düzlemdeki konumu yüksek hassasiyete (kilometre altı) sahip olabilir (Dias-Oliveira vd. 2017; Schenk ve Moore 2020). Bu kirişlerin belirsizlik miktarı topografik özelliklerin boyutları ile kıyaslanabilmektedir. Bu gibi durumlarda kiriş uçlarına yapılan ortalama elips yüzey fiti doğru olmayacaktır. Çok düşük belirsizlik değerine sahip bu noktalar, çözümde ağırlık olarak çok daha etkili olacağından dolayı gerçek şekil üzerinde yanılgıya sebep olacaktır. Bu sorunu aşmak için $SORA$'ya Morgado vd. (2021) çalışmasında uygulanan gerçek şekil ile elips model arasındaki fark σ_{model} olarak eklenmiştir ve düşük belirsizlik değerine sahip kirişlerin ağırlıklarını azaltmak için -isteğe bağlı- kullanılmaktadır. Çünkü genellikle, σ_{model}, dikine doğrultudaki *beklenen topografik yüzeyin* tipik bir boyutudur.

(iv) Son olarak, Bölüm 3.2.3'tekine benzer şekilde, χ^2 marjinal dağılımı bütün elipsler kullanılarak belirlenir ve global minimum değerindeki (Press vd. 2007) χ^2 değerine sahip elips en uygun fit olarak seçilir.

(v) Her bir parametrenin hata barı yine $\chi^2 < \chi^2_{min} + \Delta\chi^2$ formülü ile hesaplanır. Hesaplamalarda ön tanımlı $\Delta\chi^2 = 1$ olarak alınır ve marjinal hata barı 1σ'yı ifade etmektedir. Parametre fiti yapılırken χ^2 dağılımının parabolik bir şekil ortaya çıkarması beklenmelidir.

$Occultation$ nesnesine eklenen kiriş uçları üzerinde taranan elips sayısı ön tanımlı olarak 10 milyon adettir ve bu değer genellikle uygun sayıda parametreye erişmek için yeterlidir. Bunun yanı sıra analizler yapılırken negatif kirişler de elipslerin sınırlarını belirlemek için kullanılmaktadır. Bu sebeple örtülme gözlemlerinde GSN'nin şeklinin sınırlandırılması için kritik öneme sahiptir. İşlemler sonucunda GSN kiriş uçları ile en iyi uyum sağlayan elips bulunur ve yüzeye dik olan gölge hızı da elde edilmiş olur.

[79] Gelecek sürümlerde bu özelliğin eklenmesi planlanmaktadır.

Bu aşamada kullanıcı dilerse (gerekli ise), elde edilen yeni hız değerlerini ışık eğrisi analizi kısmında yeniden girerek, örtülme anlarını taramak için yeni bir fit işlemi gerçekleştirebilir. $SORA$'da kirişin elips fiti sonrası uç noktalarının dikine gölge hızlarını bulmak için klasik çember yaklaşımı uygulanmaktaydı. Fakat gerçek gövdeye yapılan fitlerin eliptik olmasından dolayı gerçekte dikine gölge hızı çemberden çok farklı olacaktır. Bu durum aşağıdaki matematiksel yöntem ile $SORA$'ye eklenmiş ve iyileştirme bu tez çalışması ile yapılmıştır.

Elips üzerindeki herhangi bir noktaya teğet geçen doğrunun denklemi (3.17) ile ifade edilmektedir. Denklem (3.17)'de verilen x_1 ve y_1 ifadeleri gözlemcinin teğet düzlem üzerine çizilmiş elips üzerindeki kartezyen konumlarını, a elipsin yarı-büyük eksen uzunluğunu (GSN'nin ekvatoral yarıçapı), b de yarı-küçük eksen uzunluğunu ifade etmektedir.

$$\frac{x_1}{a^2}x + \frac{y_1}{b^2}y = 1 \tag{3.17}$$

Daha sonra bu elipse teğet geçen doğrunun eğimi (m) denklem (3.18) ile çekilir.

$$\begin{aligned} y &= (1 - \frac{x_1}{a^2}x)(\frac{b^2}{y_1}) \\ y &= (\frac{-x_1 b^2}{a^2 y_1}x) + (\frac{b^2}{y_1}) \\ m &= \frac{-x_1 b^2}{y_1 a^2} \end{aligned} \tag{3.18}$$

Şimdi teğet doğrusunun elips üzerindeki açısı (p) (3.19) ile bulunabilir.

$$p = \arctan(\frac{-x_1 b^2}{y_1 a^2}) \tag{3.19}$$

(3.19) elde edildikten sonra bu açıda bulunan teğet doğrusuna dik olan doğru (3.20) ile bulunur.

$$p^{\perp} = \arctan(\frac{-x_1 b^2}{y_1 a^2}) + \frac{\pi}{2} \tag{3.20}$$

Gölge hızına dik olan bileşenin birim vektörü $(\vec{p^{\perp}})$, (3.21)'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$\vec{p^{\perp}} = \begin{bmatrix} cos(p) \\ sin(p) \end{bmatrix} \tag{3.21}$$

Birim vektör bulunduktan sonra, dikine hız da gölge hızının ($\vec{v}$), $\vec{p^{\perp}}$ birim vektör iz düşüm yönündeki skaler büyüklüğü (3.21) ile hesaplanabilir.

$$proj_{\vec{p^{\perp}}}\vec{v} = \frac{\vec{v} \cdot \vec{p^{\perp}}}{\|\vec{p^{\perp}}\|} \tag{3.22}$$

$SORA$'nın bu kısmında elipsteki dönmeler dikkate alınmamaktadır (pozisyon açısı). $SORA$'ya elipsteki dönme durumu da en kısa zamanda eklenecektir.

Çoklu örtülme gözlemlerini yapan çoğu gözlemci örtülme olayını farklı zamanlarda tespit ederler. Tüm bu gözlemlerin birleştirilip nesnenin astrometrik konumunu elde etmek için efemeris farklarının belirli bir gözlem aralığı boyunca sabit olduğu varsayımında bulunulur. Yapılan elips fitinden elde edilen teğet düzlemi merkezi, nesnenin uzaklığındaki efemeris farkını vermektedir. Bu nedenle astrometrik konum bu efemeris farkının efemerise eklenmesi ile hesaplanmaktadır. Kullanıcı, elde edilen efemeristeki bu kayma miktarını kullanarak dilediği konum ve anın astrometrik konumunu kullanabilir. Fakat gözlem anlarının dışında ve konumdan çok uzakta bir astrometrik hesaplama yapılmamalıdır.

Yıldız örtülme gözlemleri ile elde edilen nesnenin boyutu ve şekli, GSN'nin diğer fiziksel parametrelerini iyileştirmek için de kullanılabilir. Örneğin, GSN mutlak parlaklığı (H) biliniyorsa, $SORA$ ile nesnenin albedosu (p_v) da (3.23) bağıntısından hesaplanabilir. Denklem (3.23)'te verilen $m_{\odot}$ ifadesi Güneş'in görünür parlaklığını (-26.74^m), R_{eqv} fit edilen elipsin eşdeğer yarıçapını ($\sqrt{a \times b}$) ve d Yer-Güneş arasındaki ortalama uzaklığı (1 AB)[80] ifade etmektedir.

$$p_v = 10^{m_{\odot}-H} \times (\frac{d}{R_{eqv}})^2 \tag{3.23}$$

Tüm bu işlemler bittikten sonra $Occultation$ nesnesi tarafından yeni üretilen ve güncellenen parametreler ile yeni örtülme haritası çizdirilir ve pozitif/negatif belirteçleri ile birlikte gözlem konumları Yer üzerindeki örtülme hattında gösterilmektedir.

[80] 149597870.7 km, https://www.iau.org/static/resolutions/IAU2012_English.pdf [Son erişim tarihi: 03.01.2023]

3.2.5. (28978) Ixion'un yıldız örtülme gözlemleri

28978 Ixion'un Occultation Portal üzerinde düzenlenmiş toplam yedi (7) farklı yıldız örtülme kampanyası bulunmaktadır. Çizelge 33'te de görüldüğü üzere 17 Ağustos 2021 (16.4^m Gmag) tarihi[81] ve 2 Haziran 2022 (15.3^m Gmag) tarihindeki[82] yıldız örtülme olaylarında yalnızca 1 kiriş tespit edilebilmiştir. Bu tez çalışmasında Ixion'un yalnızca çoklu örtülme olayları üzerinde durulacağından dolayı, 17 Ağustos 2021 ve 2 Haziran 2022 tarihli gözlem verileri analizlere dahil edilmemişlerdir. 17 Ağustos 2020 (14.0^m Gmag) tarihli[83] gözlem kampanyasına da katılım çok düşüktür[84]. Ayrıca bu tarihli gözlemlerden birinin giriş zamanı tespit edilememiştir. Diğer verilerde de SNR çok düşüktür. Bu sebeple 17 Ağustos 2020 tarihli gözlemler de bu tez çalışmasına dahil edilememiştir. 20 Mayıs 2021 (14.2^m Gmag) tarihli[85] örtülme kampanyasına ise 5 farklı konumdan katılım sağlanmış ve 4 adet pozitif kiriş elde edilmiştir. Ancak, bu konumların birbirlerine çok yakın olmasından dolayı, kirişler gövdenin şekline katkı sağlayacak düzeyde ayrık değildirler. Bu tarihli gözlemler tek bir kiriş gibi kabul edilebilir ve bu sebeple tezin içine dahil edilmemiştir. 30 Haziran 2022 (15.2^m Gmag) tarihli[86] gözlem kampanyasından 4 farklı -ayrık- konumdan pozitif gözlemler elde edilmiştir ve analizleri devam etmektedir. Düşük SNR ve yüksek zaman belirsizliğine sahip gözlem verileri barındırmasından dolayı, güvenilir sonuçların üretilmesi için zaman ve ekstra efor gerekmektedir. Gelecek çalışmalara dahil edilmesi planlanmaktadır ve bu sebeple yalnızca elde ettiğimiz sonuçlar Bölüm 4 kısmında tartışılacaktır.

Ixion'un şekil analizi ve fiziksel parametrelerini ortaya koyabilecek yeterliğe sahip olduğunu düşündüğümüz; *13 Ekim 2020* (10.3^m Gmag) tarihli[87] ve *28 Nisan 2021* (14.8^m Gmag) tarihli[88] gözlem verileri bu tez çalışmasında kullanılmıştır.

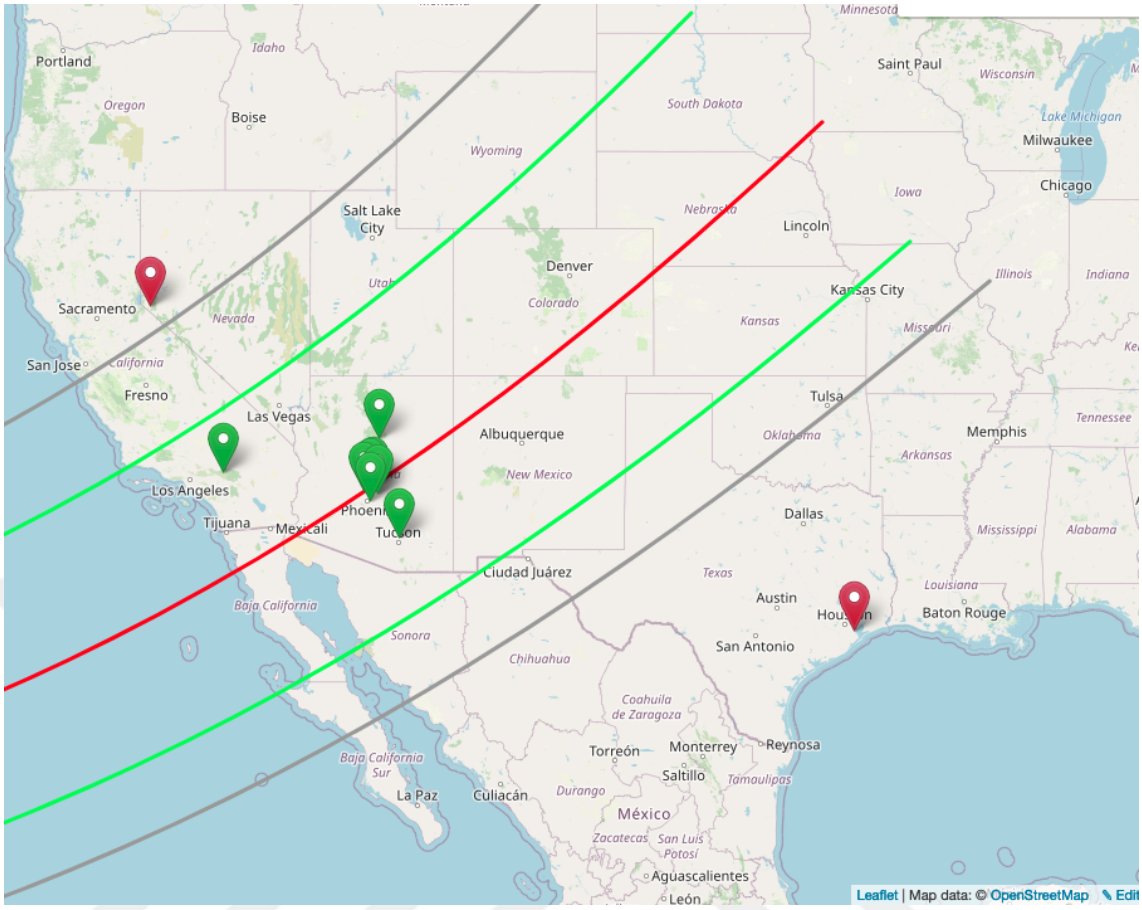
[81] https://lesia.obspm.fr/lucky-star/occ.php?p=74025 [Son erişim tarihi: 03.01.2023]
[82] https://lesia.obspm.fr/lucky-star/occ.php?p=80362 [Son erişim tarihi: 03.01.2023]
[83] https://lesia.obspm.fr/lucky-star/occ.php?p=34950 [Son erişim tarihi: 03.01.2023]
[84] Amatörlerin yoğun olduğu bölgede katılımın düşük olması birçok parametreye bağlı olabilir fakat genellikle ana sebebi örtülecek yıldızın çok sönük olmasından dolayıdır.
[85] https://lesia.obspm.fr/lucky-star/occ.php?p=73896 [Son erişim tarihi: 03.01.2023]
[86] https://lesia.obspm.fr/lucky-star/occ.php?p=80390 [Son erişim tarihi: 03.01.2023]
[87] https://lesia.obspm.fr/lucky-star/occ.php?p=41312 [Son erişim tarihi: 03.01.2023]
[88] https://lesia.obspm.fr/lucky-star/occ.php?p=43590 [Son erişim tarihi: 03.01.2023]

Çizelge 33. Ixion'un Occultation Portal üzerinde kayıtlı yıldız örtülme kampanya gözlemleri. Vurgulanan satırlar analizlerde kullanılmıştır.

Tarih (UT)	Koordinat (J2000)	Kiriş	Parlaklık (Gmag)	Dinamik Sınıfı	Harita
30 Haziran 2022 00:22:52	18 06 53.6126 -30 46 56.529	7	15.2	plutino	Şekil 7.9
02 Haziran 2022 18:09:33	18 09 36.9353 -30 43 37.051	1	15.3	plutino	Şekil 7.8
17 Ağustos 2021 11:36:12	17 56 18.8133 -30 17 43.765	1	16.4	plutino	Şekil 7.7
20 Mayıs 2021 06:43:23	18 04 05.2351 -30 13 44.647	5	14.2	plutino	Şekil 7.6
28 Nisan 2021 07:35:37	18 05 34.6800 -30 09 09.741	16	14.8	plutino	Şekil 7.5
13 Ekim 2020 02:02:18	17 50 20.3597 -29 43 33.083	10	10.3	plutino	Şekil 7.4
17 Ağustos 2020 01:42:15	17 49 53.5833 -29 48 12.597	3	14.0	plutino	Şekil 7.3

3.2.5.1. 13 Ekim 2020 gözlemleri

Şekil 3.17'den de görüleceği üzere, Kuzey Amerika'dan ABD'nin batı kısmında gerçekleştirilen bu örtülme gözlem kampanyasına çoğunluğunun IOTA ve/veya üyesi olan amatör astronomlar destek vermiştir. Bu gözlem kampanyasına toplam 10 farklı konumdan katılım sağlanmıştır. Gözlemlerin 8 tanesinden pozitif, 2 tanesinden negatif gözlem verisi elde edilmiştir.



Şekil 3.17. 13 Ekim 2020 tarihli Ixion kaynaklı örtülme gözleminde gözlemcilerin konumları ve rapor durumları (OP'den alınmıştır)

Daha önce Bölüm 3.1.4'te anlatıldığı üzere Şekil 3.17'de verilen ve sonraki gözlem tarihlerinde de sunulacak harita OP'de üretilen OpenStreetMap[89] haritasıdır. Bu harita üzerinde gösterilen yeşil eğriler, örtülme/gölge hattının tahmini nesne boyutuna göre alt ve üst sınırlarını, kırmızı eğri ise tahmini örtülme hattı merkezini ifade etmektedir. Gri çizgi(ler) ise nesne boyutunun 1σ kadarlık belirsizlik sınırını ifade etmektedir. Örtülme olayı da doğudan batıya doğru gerçekleşmektedir. Ayrıca harita üzerinde gösterilen renkli işaretler aşağıdaki anlamlara gelmektedir.

- **Mavi (Planlandı)**: Gözlemci gözlem yapmak için plan yaptı fakat henüz gözleme dair veri girişi yapmadı.
- **Yeşil (Pozitif)**: Gözlemci örtülme olayını tespit etti.
- **Kırmızı (Negatif)**: Gözlemci örtülme olayını tespit edemedi.

[89] https://www.openstreetmap.org [Son erişim tarihi: 03.01.2023]

- **Gri (Olumsuz hava koşulları)**: Gözlemci olumsuz hava koşulları nedeniyle gözlem yapamadı.
- **Turuncu (Teknik arıza)**: Gözlemci teknik arıza(lar) nedeniyle gözlem yapamadı.
- **Siyah (Belirsiz)**: Gözlemci veri sağladı fakat gözlemin sonucu henüz bilinmiyor.

Ixion'un bu araştırma kapsamında yapılan en önemli yıldız örtülme gözlem kampanyası 13 Ekim 2020 tarihinde olmuştur. Bu gözlemde Ixion, 10.311^m bir yıldızı örtmektedir. Parlak bir yıldızın örtülmesi sebebiyle, gözlemciler daha düşük poz sürelerinde daha fazla SNR elde edebilme imkanı bulmuşlardır. Bu da gözlemde zaman çözünürlüğünün artmasını sağlamıştır. Ayrıca bu denli parlak bir yıldızın örtülme olayının gözlenebilmesi yıldızın, Ixion'un olduğu mesafedeki iz düşümsel çapını hesaplayabilmemize olanak sağlamıştır. Bu sebeple gözlemler arasında analizleri üzerinde en fazla durulan bu tarihli gözlemlerdir.

Çizelge 34. 13 Ekim 2020 tarihli örtülme bilgileri

Olay Bilgileri (NIMAv10)	
Tarih & Zaman	2020-10-13 01:57:46 +/ $\pm$ 162 s UT
Konumdaki belirsizlik	$\Delta\alpha\cos(\delta) = 7.3\ mas$, $\Delta\delta = 6.0\ mas$
Uzaklıktaki belirsizlik	166.5 km
Geosentrik gölge hızı	16.12 km s^{-1}
Maksimum örtülme süresi	34 s
Parlaklık düşmesi	9.4^m
Geosentrik en yakın geçiş Ixion-star	$(117 \pm 5.8)\ mas$
Örtülen Yıldız (*Gaia*-EDR3)	
Gaia ID	4056440205544338944
RA (J2000)	$17\ 50\ 20.35955 \pm 0.0400\ mas$
DEC (J2000)	$-29\ 43\ 33.0870 \pm 0.0311\ mas$
G-mag / RP parlaklığı	10.311^m / 8.9^m
Ixion mesafesindeki yıldız görünür çapı	28.09 km
Örtülme zamanında Ixion	
Geosentrik uzaklık	39.7 AB
Görünür çap	19.3 mas (556 km)
Görünür parlaklık	19.7^m

Çizelge 35'te görüldüğü gibi gözlemlerin tamamı video gözlem metodu ile yapılmıştır. Lowell Gözlemevi Mars Hill Yerleşkesi'nden (Flagstaff, AZ, ABD) yapılan gözleme örtülme olayının ortasından başlanmıştır ve olayın tamamı gözlenememiştir.

Ayrıca, Titan Monitoring Teleskobu ile elde edilen bu gözlem verileri aynı zamanda Levine vd. (2021) çalışmasında da kullanılmıştır. Levine vd. (2021), sadece Lowell Gözlemevi yerleşkelerinden alınan gözlemlerle analizlerini yapmıştır. Levine vd. (2021) çalışmasında Ixion'un şeklini elde edecek kadar çoklu gözlem verileri bulunmasa da, örtülme merkezine çok yakın bir konumdan (Happy Jack, AZ, ABD) 4.3 metre ayna çapına sahip Lowell Discovery Teleskobu (LDT) ile gözlem yapılmış olması bakımından önemlidir. Bu sebeple analizlere bu çalışmadan elde edilen sonuçlar da dahil edilmiştir.

Çizelge 35. 13 Ekim 2020 Ixion gözlemleri OP kayıtları

Yerleşke	Enlem (N) Boylam (W) Rakım (m)	Açıklık (mm) Algılayıcı Teleskop	Poz süresi (s) Poz döngüsü (s)	Gözlemci(ler)	Durum
Tempe	33°23′24.3” 111°57′20.6” 358	280.0 RunCam NEA	0.134 0.134	Wayne Thomas	Pozitif
Scottsdale	33°49′00.1” 111°52′07.3” 843	300.0 Watec 910HX	0.033 0.033	Tony George	Pozitif
Fountain Hills	33°37′21.0” 111°43′35.0” 515	200.0 Watec 910HX	0.033 0.033	Ted Blank	Pozitif
Running Springs	34°13′07.9” 117°07′52.4” 1874	203.0 Watec 910HX	0.033 0.033	Robert Jones	Pozitif
Carefree	33°48′42.9” 111°57′08.0” 654	200.0 Watec 910HX	0.033 0.033	Paul D. Maley	Pozitif
Tucson	32°18′28.3” 110°57′46.6” 50	235.0 RunCam NEA	0.067 0.067	Norman Carlson	Pozitif
TiMo	35°12′10.4” 111°40′01.5” 2198	318.0 Point Grey BFLY	0.049 0.049	Michael Collins	Pozitif
Glendale	33°41′39.0” 112°12′46.0” 400	254.0 RunCam NEA	0.033 0.033	David A. Kenyon	Pozitif
Clear Lake Shores	29°32′55.5” 95°02′06.6” 52	203.0 Watec 910BD	0.034 0.334	Phil C. Stuart	Negatif
Gardnerville	38°53′23.5” 119°40′20.3” 1524	304.8 Watec 910HX	0.033 0.334	Jerry Bardecker	Negatif

Notlar: NEA, RunCam kamerasında Night Eagle Astro modelini ifade etmektedir. **TiMo:** Lowell Gözlemevi Mars Hill Yerleşkesi/Titan Monitoring Telescope

3.2.5.2. 28 Nisan 2021 gözlemleri

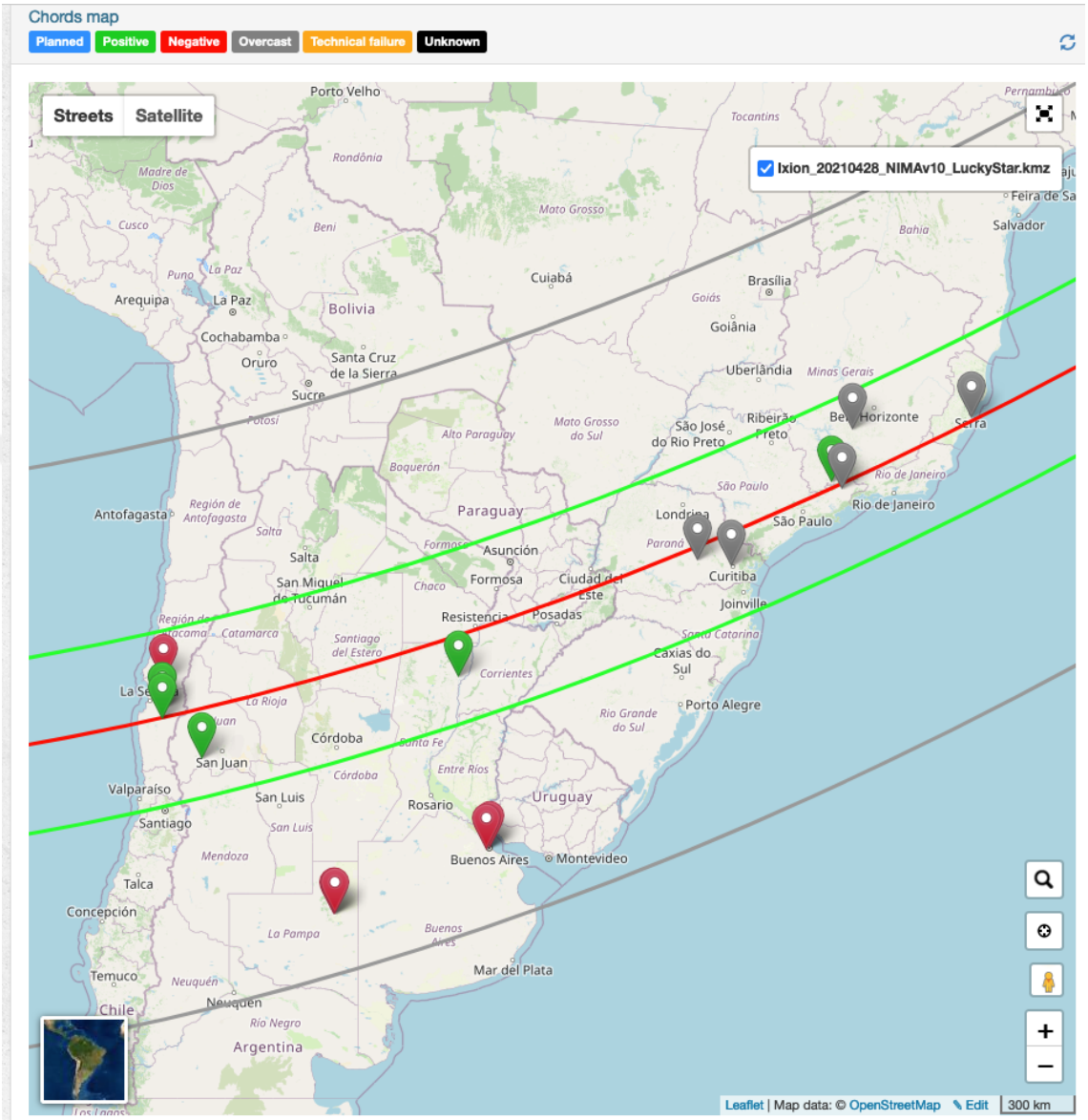
Çizelge 36'da detayları ayrıntılı olarak verilen Ixion'un bu gözlem kampanyası, çok parlak olmayan bir yıldızın (14^m Gmag) örtülmesi ile gerçekleşmiş olsa da, örtülme hattının genellikle profesyonel gözlemevleri üzerinden geçiyor olması sebebiyle önemlidir.

Çizelge 36. 28 Nisan 2021 tarihli örtülme bilgileri

Olay Bilgileri (NIMAv10)	
Tarih & Zaman	2021-04-28 07:35:37 +/ $\pm$ 144 s UT
Konumdaki belirsizlik	$\Delta\alpha\cos(\delta) = 74.5\ mas$, $\Delta\delta = 5.6\ mas$
Uzaklıktaki belirsizlik	694.7 km
Geosentrik gölge hızı	-13.53 km s^{-1}
Maksimum örtülme süresi	45.6 s
Parlaklık düşmesi	4.8^m
Geosentrik en yakın geçiş (Ixion-yıldız)	$(11 \pm 25.1)\ mas$
Örtülen Yıldız (*Gaia*-EDR3)	
Gaia ID	4050000576486883840
RA (J2000)	$18\ 05\ 34.68138 \pm 0.0337\ mas$
DEC (J2000)	$-30\ 09\ 09.7025 \pm 0.0296\ mas$
G-mag / RP parlaklığı	14.842^m / 13.7^m
Ixion mesafesindeki yıldız görünür çapı	1.43 km
Örtülme zamanında Ixion	
Geosentrik uzaklık	39.7 AB
Görünür çap	22.3 mas (642 km)
Görünür parlaklık	19.6^m

Öngörülen örtülme hattı Şekil 3.18'den de görüleceği üzere, Güney Amerika kıtasından Brezilya, Arjantin, Uruguay, Paraguay ve Şili üzerinden geçiş yapmıştır. OP'ye raporlanan bu gözlemler incelendiğinde 6 adet pozitif gözlem, 5 adet negatif gözlem ve 5 adet de olumsuz hava koşulları nedeniyle yapılamamış gözlemler olduğu netleştirilmiştir. Öngörülen örtülme hattı içerisinde bulunan Trappist-South Teleskobu ile (0.60 metre), pozitif gözlem yapılan kuzey konumlara yakın negatif bir gözlem yapılması da nesnenin boyutunu teğet düzlem üzerinde sınırlaması açısından önemlidir. Aynı şekilde Arjantin'den; A.A.A.A. (0.25 metre), Observatorio Los Cabezones (0.20 metre), Cruz del Sur (0.20 metre) ve Observatorio El Catalejo (0.20 metre) konumlarından yapılan gözlemler de nesneyi güney yönünden sınırlaması açısından önemlidir. Ayrıca diğer pozitif gözlem konumları ile birlikte, Cerro Tololo Inter-American Gözlemevi'nde bulunan SMARTS teleskoplarından 1 metre çaplı

teleskop (CTIO One-Meter) ile yüksek SNR ve zaman çözünürlüğüne sahip verilerin alınması bu kampanya gözlemini değerli hale getirmektedir (bkz. Çizelge 37).



Şekil 3.18. 28 Nisan 2021 tarihli Ixion kaynaklı örtülme gözleminde gözlemcilerin konumları ve rapor durumları (OP'den alınmıştır)

Çizelge 37. 28 Nisan 2021 Ixion gözlemleri OP kayıtları

Yerleşke	Enlem (N) Boylam (W) Rakım (m)	Açıklık (mm) Algılayıcı Teleskop	Poz süresi (s) Poz döngüsü (s)	Gözlemci(ler)	Durum
CAS	31°47′13.2” 69°18′23.9” 2591	457.0 SBIG STL11000	10.00 12.060	N. Morales J.L. Ortiz	Pozitif
LCN	30°32′03.0” 70°47′45.0” 1548	520.0 ZWO1600	0.501 0.501	Michel Meunier Bernard Laurent Bernasconi	Pozitif
PR6	30°10′03.7” 70°48′18.8” 2166	400.0 FLI ProLine	1.000 1.000	JPollock Vladimir Kouprianov	Pozitif
CTIO-1m	30°10′07.8” 70°48′21.7” 2201	1000.0 FLI ProLine	1.000 2.636	JPollock, TLinder	Pozitif
OPD	22°32′07.8” 45°34′57.5” 1810.714	1574.0 IXon	0.1502 0.164	Gustavo Rossi Giuliano Margoti Viviane Peixoto	Pozitif
RECT	29°08′25.2” 59°38′36.6” 50	305.0 QHY174M	5.000 5.300	Ariel Stechina	Pozitif
OEC	36°38′16.0” 64°19′27.5” 182	200.0 QHY174M GPS	2.000 2.001	Julio Spagnotto	Negatif
TS	29°15′16.6” 70°44′21.8” 2315	600.0 FLI ProLine	2.500 3.690	Emmanuel Jehin	Negatif
4A	34°36′18.7” 58°26′04.6” 39.4	250.0 SBIG ST9e	5.000 7.000	C.Cebral M,Konishi Y.Olivera Cuello	Negatif
CDS	34°40′10.6” 58°34′24.3” 39	200.0 QHY174M-GPS	6.000 6.000	Andres Chapman	Negatif
OLC	36°38′08.3” 64°17′16.8” 180	200.0 QHY174M-GPS	5.000 5.001	A. Wilberger	Negatif

(Devamı arkada)

Çizelge 37. 'in devamı

Yerleşke	Enlem (N) Boylam (W) Rakım (m)	Açıklık (mm) Algılayıcı Teleskop	Poz süresi (s) Poz döngüsü (s)	Gözlemci(ler)	Durum
FEG	22°48′06.0” 45°11′25.6” 540	406.0 Merlin 247 Raptor	- -	R. Sfair A. R. Gomes-Jr	Olumsuz hava
GOA	20°18′02.0” 40°19′02.0” 24	304.0 Canon 600D	- -	M. Malacarne	Olumsuz hava
FC	25°26′10.4” 49°20′23.7” 1024	254.0 QHY174M-GPS	- -	Felipe Braga Ribas	Olumsuz hava
IMB	25°13′39.5” 50°36′41.3” 968	305.0 Raptor	- -	Chrystian L. Pereira	Olumsuz hava
SO	20°42′54.3” 44°47′05.8” 1113	450.0 QHY600	- -	C. Jacques	Olumsuz hava

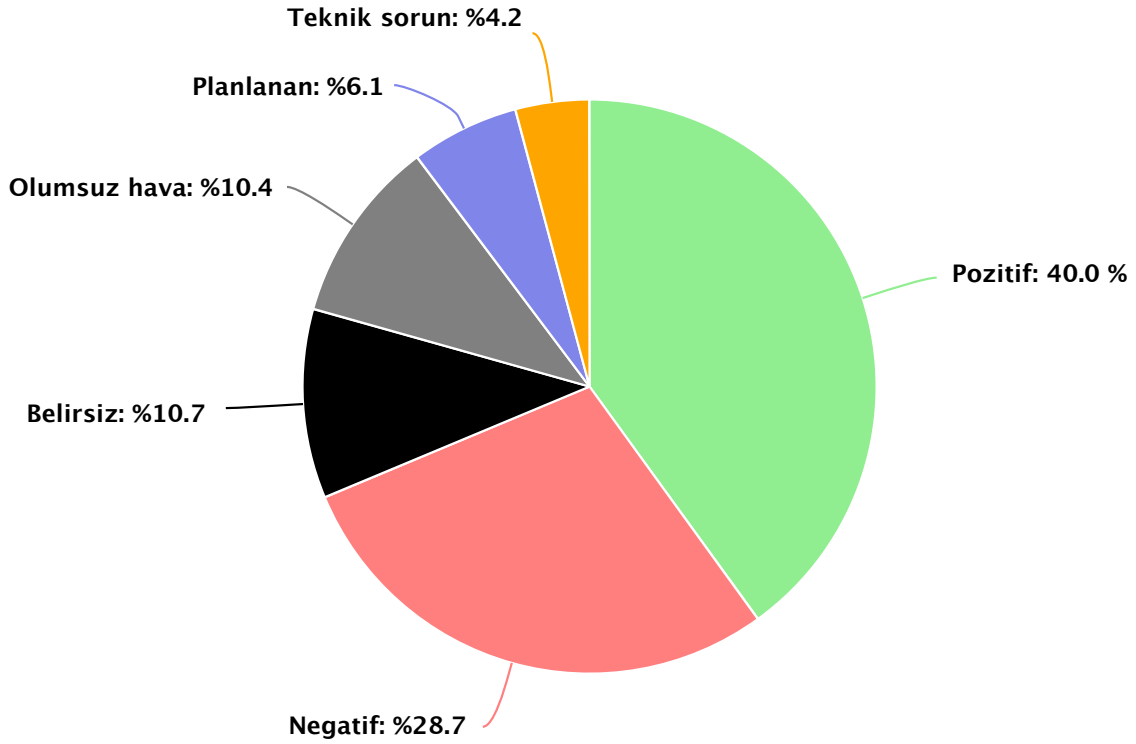
Notlar. **CAS**: ASH-Cerro Burek, Argentina, **LCN**: La Canelilla, Şili, **PR6**: Prompt6, Tololo, Şili, **CTIO1m**: CTIO One-Meter, Tololo, Şili, **OPD**: Observatorio do Pico dos Dias, Itajuba, Brezilya, **RECT**: Reconquista, Reconquista-Santa, Argentina, **OEC**: Observatorio El Catalejo, Santa Rosa, Arjantin, **TS**: TRAPPIST-South, La Silla, Şili, **4A**: A.A.A.A, Arjantin, **CDS**: Cruz del Sur, Arjantin, **OLC**: Observatorio Los Cabezones, La Pampa, Arjantin, **FEG**: FEG, Guaratingueta, SP, Brezilya, **GOA**: GOA, Vitória, Brezilya, **FC**: F10999 - Curitiba, Curitiba, Brezilya, **IMB**: Imbituva, Paraná, Brazil, **SO**: SONEAR Observatory, Y00, Brezilya. Açıklamalar OP veri tabanında bulunan formları ile verilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Occultation Portal

Bu tez çalışmasının ana çıktısı olan Occultation Portal (OP), ilk olarak -test amaçlı- 8 Ağustos 2020 tarihinde düzenlenen 2002 MS_4 TNO'sunun yıldız örtülme kampanyası ile devreye alınmıştır. Bu test kampanya gözlemi sorunsuz bir şekilde işletilmiş ve sonrasında OP, Lucky Star Projesi ve ACROSS Projesi kapsamında yütütülen tüm yıldız örtülme kampanya gözlemlerinin veri arşiv ve analiz merkezi haline gelmiştir[90].

OP'de, kullanılmaya başlandığı ilk andan itibaren muazzam bir veri arşivi oluşmaktadır ve bu verilerin hem sistemin gelecek projeksiyonu ve ölçeklemesi açısından hem de yıldız örtülme tekniğinin geliştirilmesine sunabileceği katkılar bakımından yorumlanması zaruridir. Bu sebeple, OP'nin yarattığı yaygın etki ölçülebilir metriklerle bu bölümde ayrıntılarıyla sunulmaktadır.

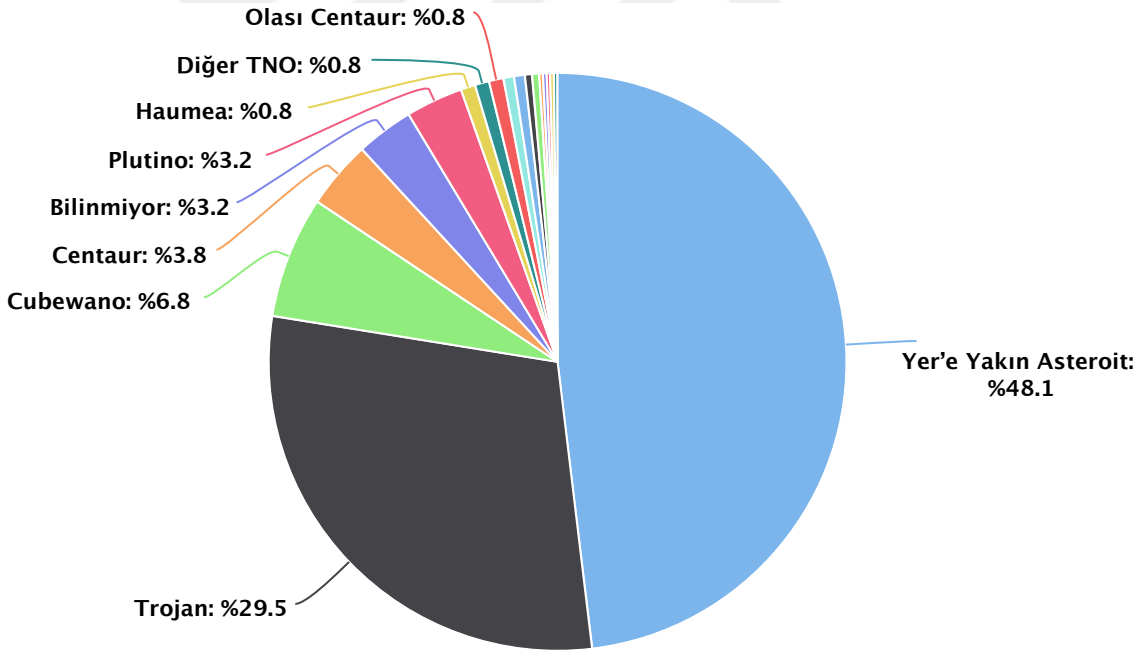


Şekil 4.1. Ağustos 2020 ila Ekim 2022 arasında OP'de yürütülen yıldız örtülme kampanya gözlemlerinin genel istatistiği

25 Ekim 2022 tarihi itibarıyla OP üzerinden kampanyası sürdürülen 499 adet yıldız örtülme tahmini bulunmaktadır. Çağrısı bulunan bu 499 örtülme tahmininden 187

[90] https://occultation.tug.tubitak.gov.tr/about/ [Son erişim tarihi: 03.01.2023]

adedine en az bir adet (kiriş) raporlama yapılmıştır. Olumsuz hava koşulları, duyarlılığı düşük olan örtülme tahminleri, hedef yıldızın yeterince parlak olmayışı, gözlemcinin örtülme hattının dışında bulunması ve teknik problemler gibi sebeplerden dolayı bu raporlar her zaman örtülme olayı verisi barındıramamaktadır. Şekil 4.1'de OP'nin devreye alındığı 8 Ağustos 2020 tarihinden 25 Ekim 2022 tarihine kadarki raporların genel istatistiği sunulmaktadır. Şekil 4.1'de belirtilen grafikte *Pozitif*: Gözlem verileri içerisinde örtülme olayının barındırıldığını, *Negatif*: Gözlem verileri içerisinde örtülme olayı tespit edilemediğini, *Planlandı*: Gözlemcinin gözlemi planladığını fakat henüz veri girişi yapmadığını, *Teknik sorun*: Gözlemcinin gözlem esnasında teknik bir sorun yaşadığını, *Olumsuz hava*: Gözlemcinin olumsuz hava koşulları sebebiyle gözlem yapamadığını, *Belirsiz*: Gözlemcinin veri sağlamasına rağmen örtülme sonucunun henüz belirsiz olduğunu belirtmektedir. Şekil 4.1'de de gösterildiği gibi OP'ye girilen raporların %40'ı pozitiftir. Yani örtülme olayının tespit edildiği gözlemlerdir. Bu oranın, Bölüm 2'de de detaylı bir şekilde anlatıldığı üzere; *Gaia* kataloğu verilerinin efemeris hesaplarında kullanılmaya başlanması, duyarlı gözlem ekipmanlarının amatörlerin edinebileceği ölçüde ekonomik hale gelmesi ve yaygınlaşması ve ayrıca tüm dünyada iyileşen bilişim altyapısı sebebiyle artış göstereceği tahmin edilmektedir.



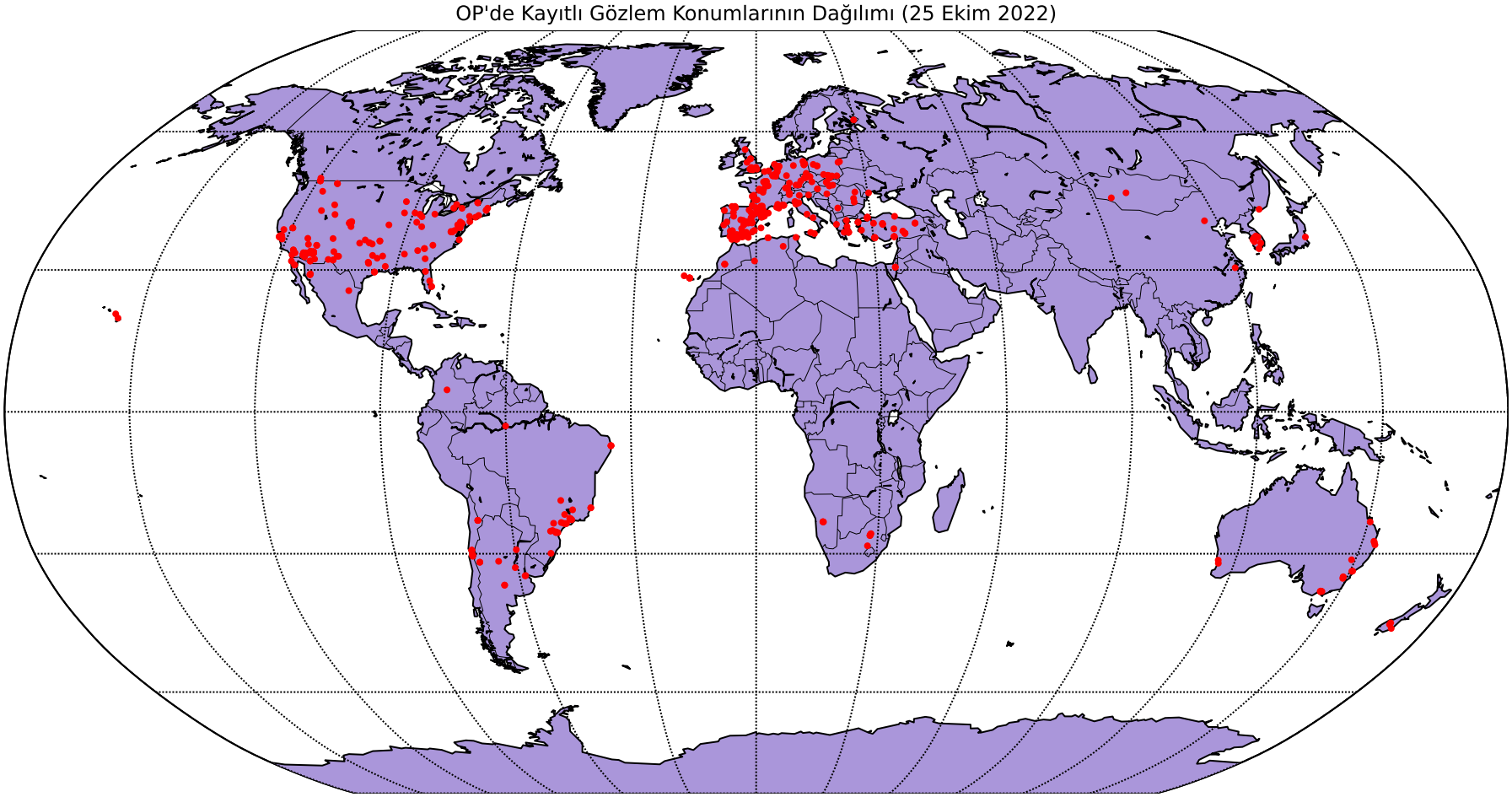
Şekil 4.2. Ağustos 2020 ila Ekim 2022 arasında OP'de kampanyaları yürütülen GSN'lerin dinamik sınıflarının istatistikleri. %0.8'den küçük olan dinamik sınıflar gösterilmemiştir

OP üzerinde yürütülen yıldız örtülme kampanyaları ile ilgili bir diğer önemli istatistik ise, GSN'lerin dinamik sınıflarıdır. Şekil 4.2'de de açıkça görülebildiği üzere OP üzerinde kampanyası yürütülen nesnelerin büyük bir çoğunluğu Ana Kuşak ötesindeki nesnelerdir. Bunun en önemli sebebi Lucky Star'ın Güneş sisteminin ilk

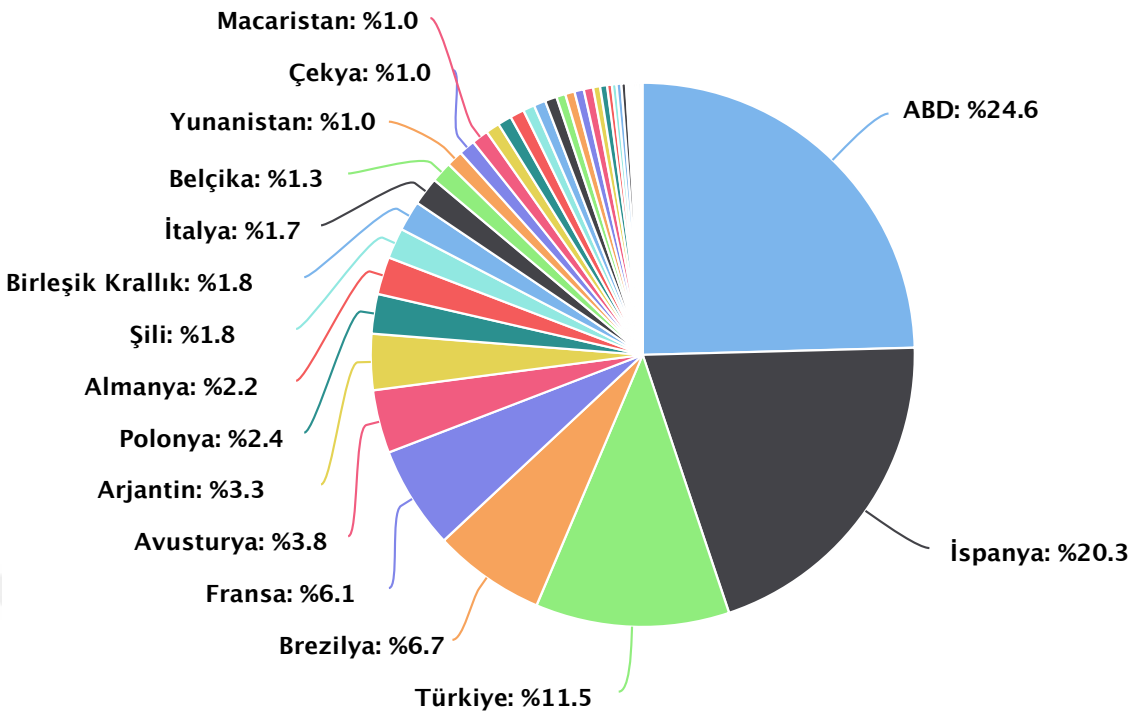
evrelerindeki *protoplanetary* diskindeki halen korunmuş halde olabilecek GSN'lere odaklanmasından dolayıdır. Bu gibi bilgilerin edinilmesi Güneş sisteminin evrimi ile ilgili son derece kritik bilgiler sağlamaktadır (Lykawka ve Mukai 2008; Morbidelli vd. 2008). Diğer yandan YYA'ların oranı da $\sim \%48$'dir ve bu oran her geçen gün, ACROSS Projesi'nin de Occultation Portal'ı kampanya yürütme, veri toplama ve analiz merkezi olarak kullanmasından dolayı artmaktadır. Bölüm 2'de detaylıca anlatıldığı üzere, YYA'ların yakın ve küçük GSN'ler olmasından dolayı başarılı örtülme gözlemlerinin yapılması -*Gaia* kataloğuna rağmen- günümüzde dahi oldukça zordur. Olduça fazla konumsal mobilizasyon gerektirmektedir. Neyse ki bu nesneler, gökyüzü düzleminde çok hızlı yer değiştirirler ve çok fazla yıldızı örtme ihtimalleri vardır. Bu sebeple ACROSS[91] Projesi araştırmacıları çok fazla örtülme tahminleri yaparak bu olasılığı artırmayı hedeflemektedirler. ACROSS tarafından yapılan bu tahminler düzenli olarak ACROSS araştırmacıları tarafından OP'ye yüklenmektedir.

Ağustos 2020 ila Ekim 2022 tarihleri arasında OP'de düzenlenen bir kampanya gözlemine katılım en fazla 11 Kasım 2021 tarihinde TNO türü (84522) 2002 TC_{302} nesnesine yapılmıştır. Bu kampanya gözlemine toplamda 56 farklı lokasyondan katılım sağlanmıştır. Başarılı geçen böylesine büyük bir yıldız örtülme kampanyası OP'nin yıldız örtülme gözlemleri için ne denli önemli bir platforma dönüştüğünün göstergesi olmuştur. 25 Ekim 2002 tarihi itibarıyla OP üzerinde kayıtlı kullanıcı sayısı 426'dır. Bu kullanıcıların her birinin gözlemlerini gerçekleştirdikleri konum sayısı 493'tür. Bu gözlem konumlarının dağılımı Şekil 4.3'te harita üzerinde gösterilmektedir. Haritadan da görüleceği üzere OP'yi gözlemcilerin çoğu Avrupa ve Kuzey Amerika'da yoğunluk göstermektedir. Sonrasında dağılım; Kuzey Afrika, Güney Amerika, Doğu Asya ve Avustralya'nın doğu kısımlarında yoğunlaşmaktadır. OP 'yi kullanan tüm gözlemcilerin ülkelere göre dağılımı ise Şekil 4.4'te detaylı olarak verilmiştir.

[91] Asteroid Collaborative Research via Occultation Systematic Survey



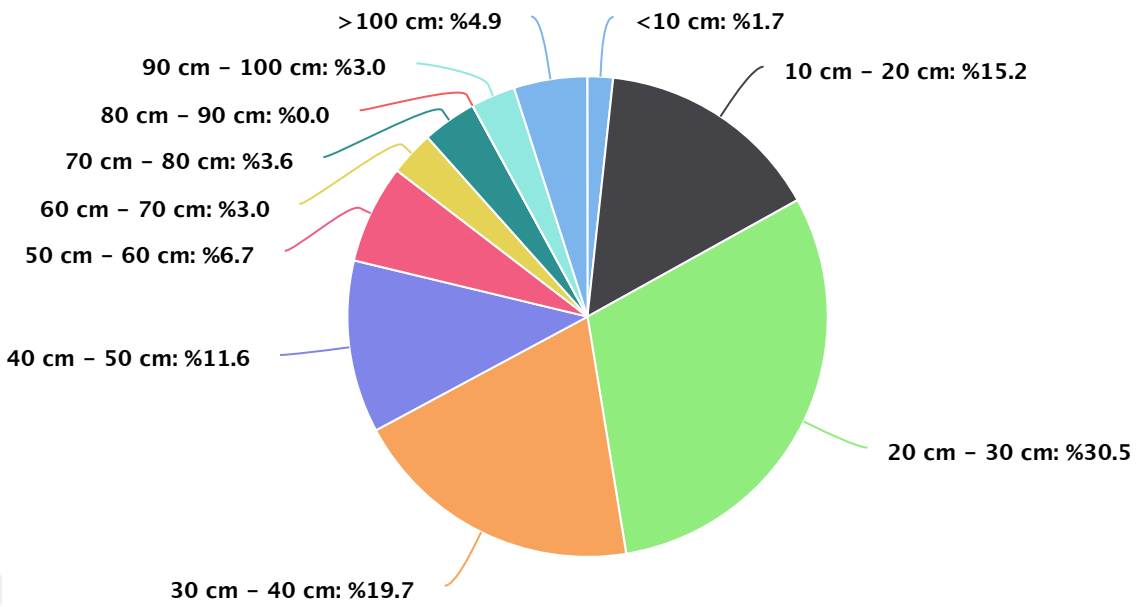
Şekil 4.3. 25 Ekim itibarıyla OP gözlemcilerinin raporladıkları toplam 493 adet gözlem konumunun (kırmızı noktalar) Dünya haritası üzerindeki dağılımı



Şekil 4.4. 25 Ekim itibarıyla OP gözlemcilerinin ülkelere göre dağılımı. %1'den küçük katkısı olan ülkeler gösterilmemiştir

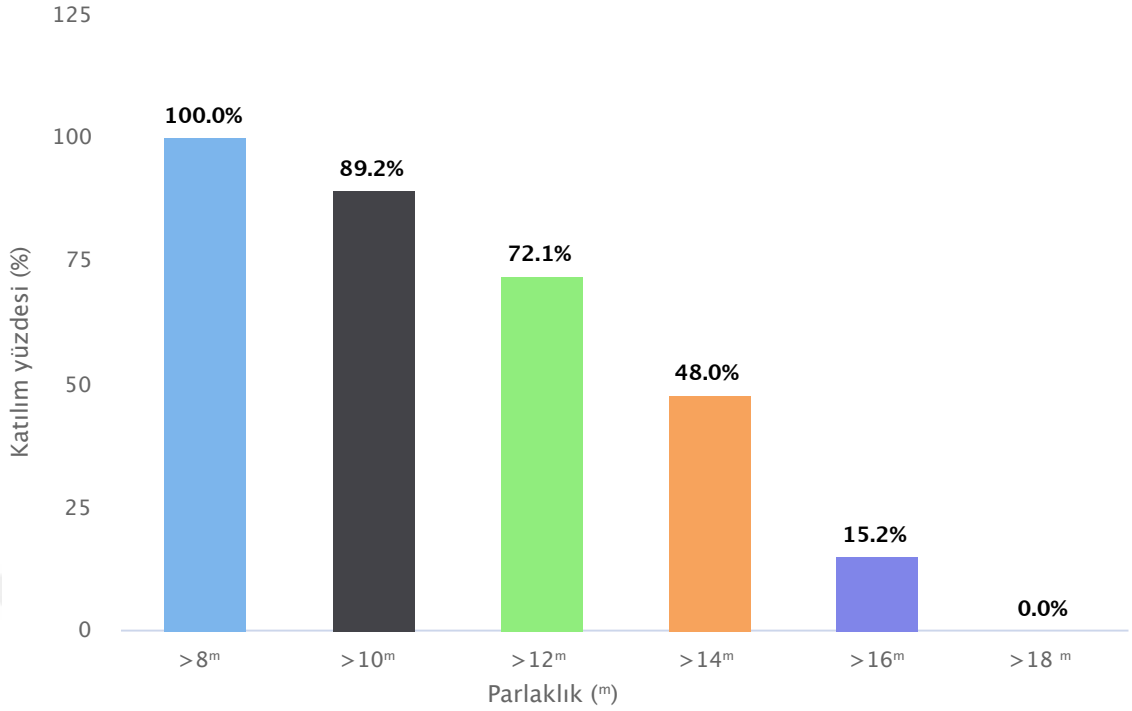
OP'nin mevcut kullanıcı sayısı (426) ve Şekil 4.3'te verilen lokasyon dağılımı, OP'nin tüm Dünya'dan gözlemcilerin etkin bir şekilde kullandıkları bir platforma dönüştüğünü çarpıcı bir şekilde göstermektedir. Ayrıca harita üzerinde Avrupa ve Kuzey Amerika'dan sonra ülkemizde de yıldız örtülme gözlemlerine ilginin artmış olduğu görülmektedir ve bu durum memnuniyet vericidir. Bu sonuçlar doğrultusunda OP kullanımının gelecekte de belirgin bir şekilde artacağını tahmin etmekteyiz.

OP veri tabanından çıkarabileceğimiz bir diğer önemli sonuç da, yapılan örtülme gözlemlerinde kullanılan teleskopların boyut bilgileridir. 25 Ekim 2022 tarihi itibarıyla OP'de kayıtlı 426 kullanıcıya ait 466 teleskoptan elde edilmiş sonuçlar Şekil 4.5'te verilmiştir. Görüldüğü üzere OP kullanıcıları en fazla *20 cm - 30 cm* aralığında açıklığa sahip teleskoplar kullanmaktadır ve bu oran tüm veri tabanında kayıtlı olan teleskopların $\sim$%31'ine karşılık gelmektedir. Ayrıca OP veri tabanında kayıtlı olan teleskopların $\sim$%79'u 50 cm'den küçük ayna çapına sahiptir.



Şekil 4.5. 25 Ekim itibarıyla OP üzerinde kayıtlı teleskop açıklıklarının dağılımı

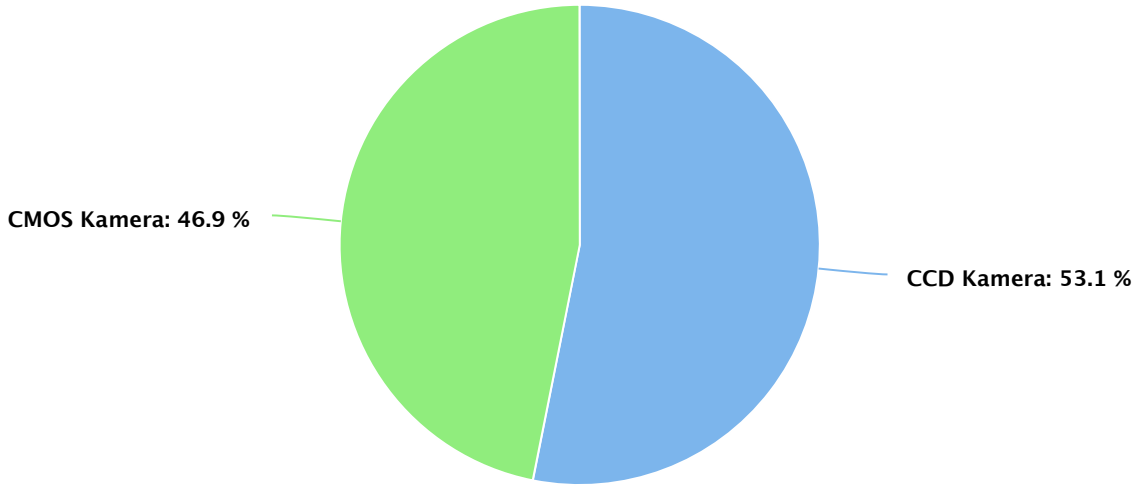
Açıkça belirtilebilir ki, örtülecek hedef yıldız yeterince parlak olduğu sürece, nispeten küçük açıklıklı teleskopların kampanya gözlemlerine katılımı artmaktadır. Bu aynı zamanda kampanyalara katılan önemli sayıdaki katılımcının amatör astronomlar olduğunun da açık bir göstergesidir. Bu sebeple Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 birbiri ile ilişkilidir ve beraber yorumlanmalıdır. Bir yıldız örtülme kampanya gözleminde, örtülecek yıldız küçük teleskoplar için yeterince parlaksa, elde edilecek maksimum bilimsel verimi alabilmek için amatör astronomlara ulaşmak ve onlara gözlem ile ilgili teknik bilgileri aktarmak hayati önem taşımaktadır. Ayrıca gözlem sonrasında da üretilen verileri hızlı bir şekilde toplayabilmek, analiz edebilmek ve arşivleyebilmek için de OP gibi bir platformun olması bilimsel çıktının hızlı bir şekilde ortaya konması bakımından çok önemlidir.



Şekil 4.6. 25 Ekim itibarıyla OP üzerinde düzenlenen kampanyalara parlaklık düzeyinde katılım dağılımı

Şekil 4.6'da görüldüğü üzere OP üzerinde 18^m'den daha sönük bir yıldızın örtülme kampanya gözlemine henüz katılım sağlanmamıştır. 25 Ekim 2022 tarihi itibarıyla OP'de gözlenen örtülme olayları 8.4^m ila 17.7^m aralığındadır[92]. Ayrıca 14^m'den daha sönük kampanyalara katılım oranı %48'den %15.2'ye dramatik bir şekilde düşmektedir. Bu da yine OP gözlemcilerinin büyük bir çoğunluğunun amatör astronomlardan veya küçük teleskop sahibi profesyonel astronomlardan oluştuğunu gösteren bir başka belirteçtir.

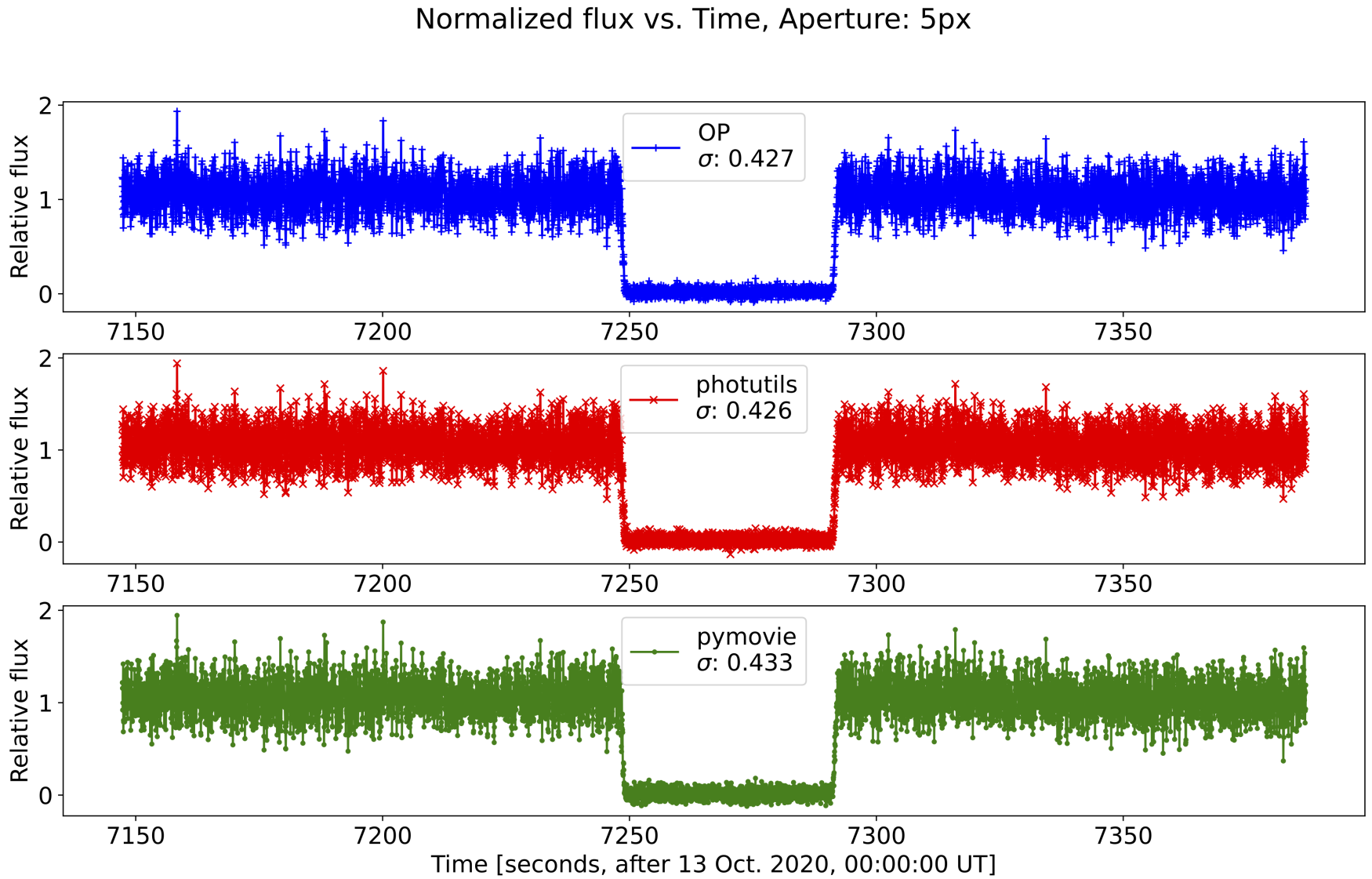
[92]Güncel istatistiklere OP'den erişilebilir: https://occultation.tug.tubitak.gov.tr/statistics/ [Son erişim tarihi: 03.01.2023]



Şekil 4.7. 25 Ekim itibarıyla OP'de kayıtlı olan kameraların sensör türüne göre dağılımı

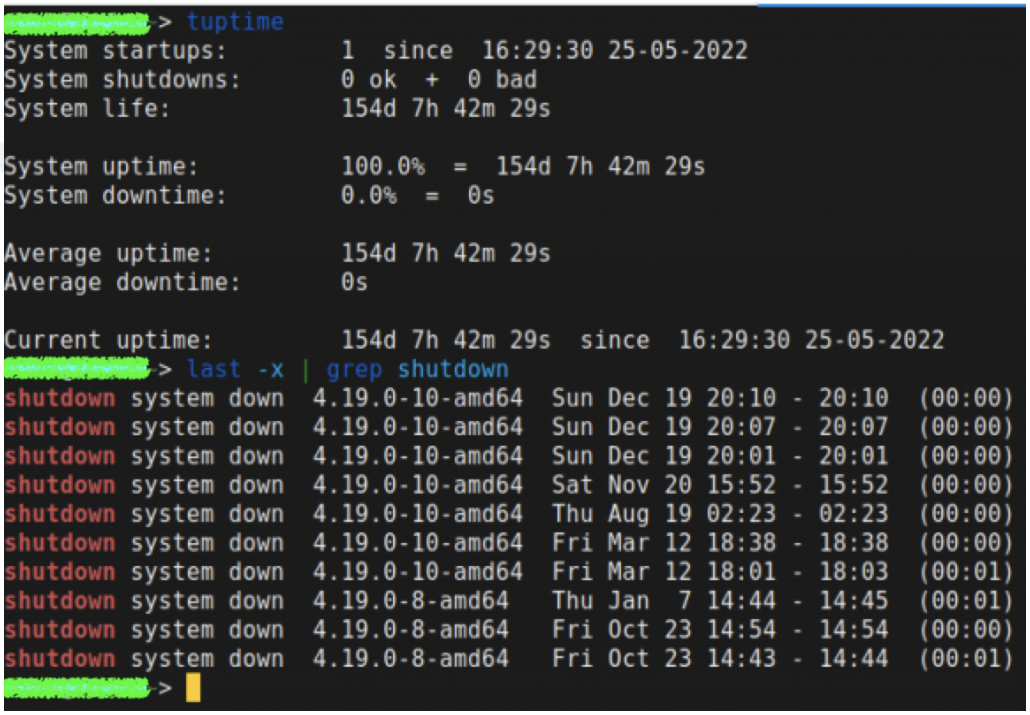
25 Ekim 2022 itibarıyla, OP veri tabanında kayıtlı olan 382 adet kameranın %53.1'i CCD (Charge-coupled device) sensöre sahip kameralardan, %46.9'u da CMOS (Complementary metal-oxide-semiconductor) sensöre sahip kameralardan oluşmaktadır (bkz. Şekil 4.7). CCD sensöre sahip kameraların yaklaşık %30'u Watec marka video kameralardan oluşmaktadır. CMOS sensöre sahip kameraların da %45'i QHY marka kameralardan oluşmaktadır. Bu markalar, düşük ışığı algılayabilecek özellikte, yıldız örtülme gözlemleri için özelleştirilmiş ve de düşük maliyetli dedektörler oldukları için, çoğu amatör ve profesyonel astronom tarafından tercih edilmektedir. Şekil 4.7'de de görüldüğü üzere CCD kameralar ile CMOS kameralar arasındaki oran birbirine yakındır. Özellikle CMOS sensörlü kameralardaki artışın, CMOS sensör teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, astronomik amaçlarla üretilen yüksek kuantum etkinliğine sahip bu kameraların daha uygun maliyetlerle edinilebilmesinden kaynaklanmaktadır. Örneğin, QHY marka CMOS sensörlü kameraların, bütünleşik GPS modülü barındırmaları ve bu ürünlerin Buie vd. (2020) gibi çalışmalarda etkin bir şekilde kullanılmasının da etkisi büyüktür.

OP'nin en önemli hizmetlerinden biri olan ve daha önce Bölüm 3.1.5'te detaylı olarak anlatılan *Veri analiz ve indirgeme hizmeti*'nin güvenilirliği aynı alanda sıklıkla kullanılan *photutils* (Bradley vd. 2020) ve *PyMovie* (Anderson 2019) yazılımları ile kıyaslanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.8'de sunulmuştur. Fotometrik analizler için kullanılan veri seti için 13 Ekim 2020 tarihli Ixion'un bir yıldız örtülme gözlem verileri seçilmiş ve elde edilen ışık eğrilerinin standart sapma (σ) değerleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucu, elde edilen σ değerleri birbirlerine çok yakın çıkmış ve OP'nin *Veri analiz ve indirgeme hizmeti* ile yapılan fotometrik indirgemenin ve ışıkölçümünün en az diğer araçlar kadar iyi olduğu gösterilmiştir.



Şekil 4.8. *Veri analiz ve indirgeme hizmeti* ile *photutils* ve *PyMovie*'nin fotometrik indirgeme sonuçlarının kıyaslanması (Kilic vd. 2022)

OP, TÜBİTAK ULAKBİM (Ulusal Akademik Ağ ve Bilgi Merkezi) tarafından geliştirilen ve Debian-tabanlı bir GNU/Linux olan Pardus (19.3) üzerinde çalışmaktadır. Şekil 4.9'da da görüldüğü üzere 8 Ağustos 2020 tarihinden itibaren etkin olarak devrede olan OP'nin MTD'si (Mean Tolerable Downtime)[93] 1 saatten azdır ve tüm kapalı kalma zamanları (downtime) sunucu üzerindeki kayıtlara göre 10 (on) adettir (25 Ekim 2022) ve bu kayıtların hepsi TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi (TUG) veya ULAKBİM altyapısındaki planlı bakım çalışmaları nedeniyle olmuştur. OP sunucusunun 25 Ekim 2022 tarihi itibarıyla uptime'ı 154 gündür ve bu durum OP'nin ve sunucusunun kararlı bir altyapıya sahip olduğunu ve çalıştığını göstermektedir.



Şekil 4.9. OP sunucusunun 25 Ekim 2022 itibarıyla uptime/downtime durumu. Sunucu adı ve kullanıcı adı güvenlik amacıyla gizlenmiştir

4.2. (28978) Ixion

4.2.1. 13 Ekim 2020 gözlemlerinin analizleri ve bulguları

Çizelge 35'te gözlemcileri ve ekipmanları detaylı olarak verilen her bir kirişin fotometrik analizleri OP üzerinde yapılmış ve ışık eğrileri üretilmiştir. Üretilen ışık eğrilerine uygun en iyi model SORA (v1.0) ile üretilmiş ve bu ışık eğrilerinden her bir kirişin örtülme başlangıç (giriş) ve bitiş (çıkış) zamanları belirlenmiştir (bkz. Çizelge 41).

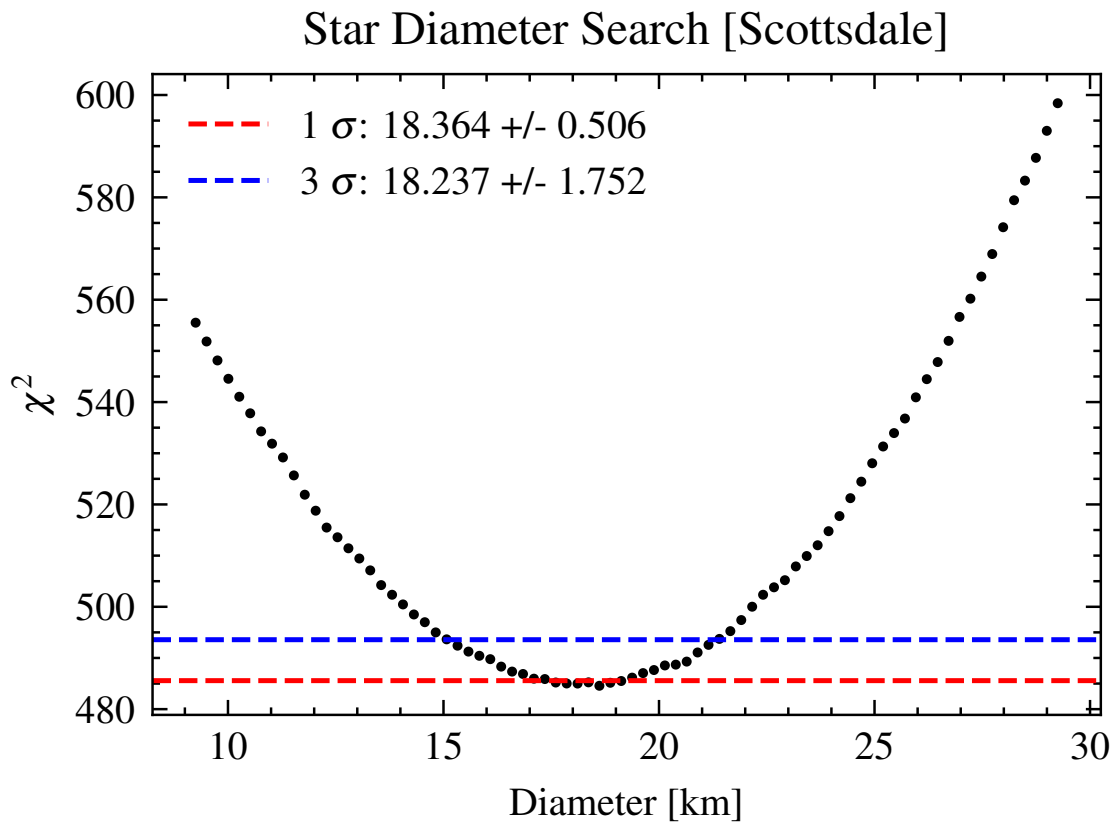
[93] Ortalama Tolere Edilebilir Kapalı Kalma Süresi

Bölüm 3.2.3'te detayları verildiği gibi, 13 Ekim 2020 tarihinde gerçekleşen örtülme olayı Ixion'un nispeten parlak bir yıldızın ($10^m.311$) önünden geçmesi sonucu gerçekleşmiştir. Bu sebeple analizler yapılırken Ixion'un uzaklığındaki (39.25707 AB) örtülen yıldızın göreli açısal çapının (bundan sonra yıldız çapı olarak anılacaktır) dikkate alınmasını gerektirmektedir. Ayrıca OP'ye yüklenen her bir gözlem verisi farklı gözlem ekipmanları kullanılarak ve çoğunlukla küçük çaplı teleskoplarla alındığı için, farklı S/N değerlerine sahiptir. Bu sebeple her bir kirişin ışık eğrisinden hesaplanan yıldız çapları birbirlerine yakın olmakla birlikte farklı sonuçlar vermektedir. Diğer taraftan her bir gözlemci teğet düzlem üzerinde nesnenin farklı bir kenarı üzerinde giriş ve çıkış anlarını yakalayacağından dolayı teğet düzleme dik gölge hızları da birbirinden farklı olacaktır. Yani her bir gözlemciye göre örtülme hızları da birbirinden farklı olacaktır. Modellemeler yapılırken bu hızlar dikkate alınmıştır[94]. Bu hızları ideal olarak bulabilmek için her bir gözlemcinin giriş ve çıkış zamanları kabaca hesaplanmalı ve sonra nesneye yine kabaca elips fiti uygulandıktan sonra her bir gözlemcinin "giriş" ve "çıkış" anlarındaki dikine hızları SORA *check_velocities* fonksiyonu ile kontrol edilmelidir. Bu işlem sonucunda elde edilen dikine hızlar ışık eğrisi modellemede kullanılmıştır ve Çizelge 41'de her bir kiriş için ayrı ayrı verilmiştir.

Her bir kiriş için ışık eğrisine en iyi uyan yıldız çapını belirlemek için de en küçük kareler yönteminin kullanıldığı (bkz. Denklem (3.11)) bir python modülü (*radius_finder*) geliştirilmiş ve Şekil 4.11'de ve Çizelge 41'de verilen yıldız çapları da bu modül kullanılarak elde edilmiştir. Bu modül ile yine her bir ışık eğrisi için, Şekil 4.10'daki grafikte gösterildiği gibi, belirli bir $\Delta d_\star$ adımında ve aralığında[95] taramalar yapılmış ve $\chi^2 < \chi^2_{min} + \Delta\chi^2$ denklemi ile 3σ altındaki χ^2'ye sahip değerlerden ideal yıldız çapı hesaplanmıştır.

[94]Detayları Bölüm 3.2.3'te anlatılmıştır

[95]Bu örnek özelinde $9.25\ km \leq d_\star \leq 29.25\ km$ aralığında $\Delta d_\star = 0.25\ km$ adımlarla tarama yapılmıştır.

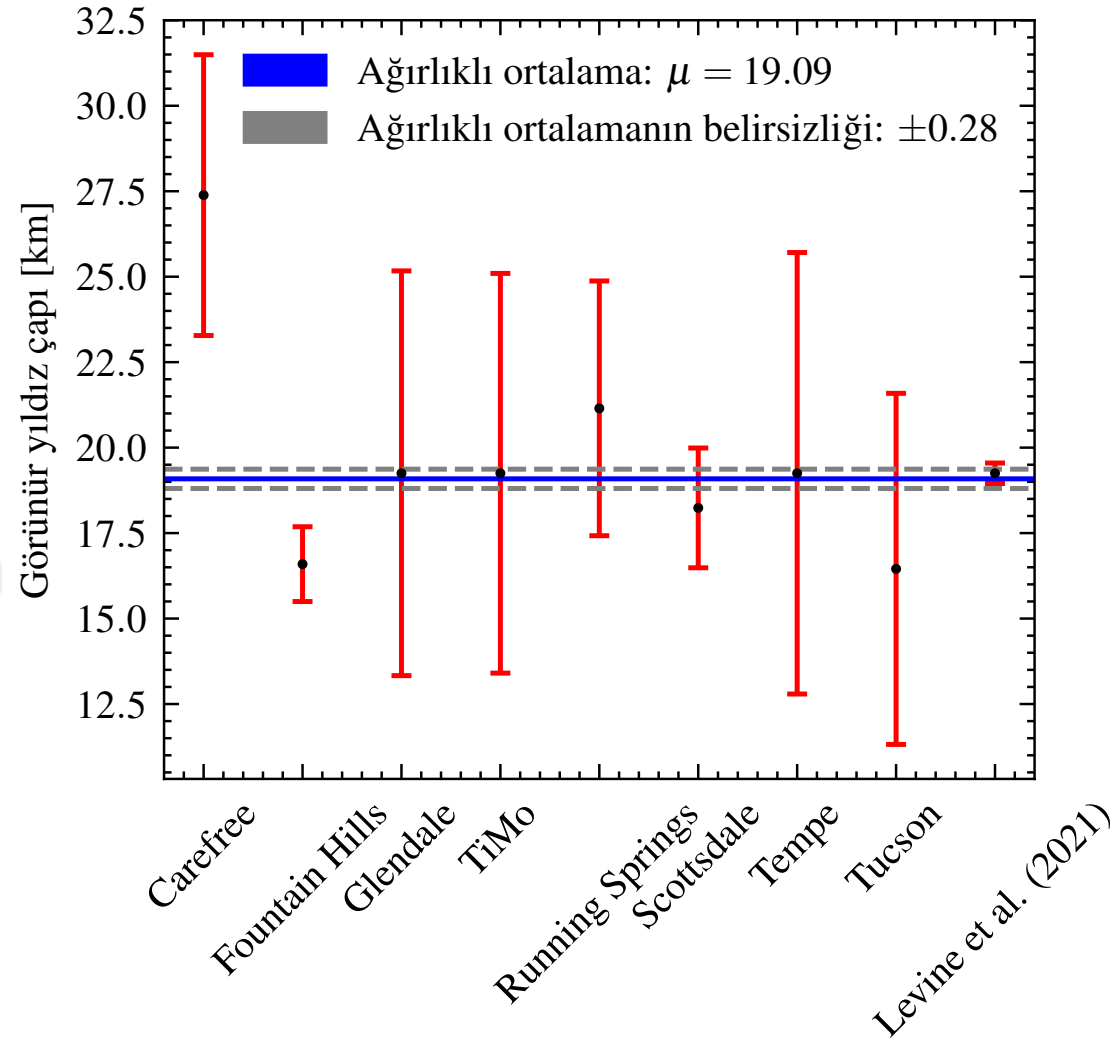


Şekil 4.10. 13 Ekim 2020 tarihli Ixion'un Scottsdale ışık eğrisi üzerinde göreli yıldız çapı tarama işlemi

Çizelge 41'de verilen her bir göreli yıldız çapı ve hata değerleri kullanılarak ağırlıklı göreli yıldız ortalama çapı ise Denklem (4.1) kullanılarak hesaplanmıştır. Çap değerinin belirsizliği için Denklem (4.2) kullanılarak standart hata hesaplanmıştır. $d_\star$ kiriş ışık eğrisinden hesaplanmış en iyi göreli yıldız çapını, i her bir ışık eğrisini, n de toplam ışık eğrisi sayısını ifade etmektedir. σ_i ise her bir ışık eğrisinden hesaplanmış göreli yıldız görünür çapının hatasını ve $\sigma_\star$ da ağırlıklı ortalamadaki standart hatayı (belirsizliği) ifade etmektedir.

$$d_\star = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\sigma_i^2}} \tag{4.1}$$

$$\sigma_\star = \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\sigma_i^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \tag{4.2}$$



Şekil 4.11. 13 Ekim 2020 tarihli Ixion gözlemlerindeki her bir kirişin ışık eğrisinden elde edilmiş yıldız görünür çapları

Şekil 4.11'de görüldüğü üzere en düşük belirsizliğe sahip olan kiriş Levine vd. (2021) çalışması ile 4.3 metrelik ayna çapına sahip teleskop (LDT) ile elde edilmiştir. Levine vd. (2021)'nin LDT ile elde ettiği ışık eğrisindeki göreli akıdaki saçılma < 0.1'dir ve göreli yıldız çapındaki hata en düşük bu noktadadır. Bu sebeple yıldız görünür çapı ağırlıklı ortalamasına en büyük katkıyı bu nokta yapmaktadır. Ixion'un Lucky Star çerçevesinde kullanılan amatör ve küçük teleskopların çapları ise 20 cm ila $\sim$30 cm arasında değişmektedir (bkz. Çizelge 35). 10.311^m (*Gaia* EDR3 4056440205544338944) parlaklığındaki bu yıldızın 39.26 AB uzaklıktaki göreli çapı 19.09 ± 0.28 km (0.670 ± 0.010 mas) bulunmuştur. Bu değer Levine vd. (2021)'in bulduğu 19.25 ± 0.3 km değerini doğrulaması bakımından son derece önemlidir. Ayrıca *Gaia EDR3* 4056440205544338944 yıldızının paralaksı 0.5645 ± 0.0417 mas'tır. Bu değer ve bulduğumuz görünür yıldız çapı değerini kullanarak hesapladığımız yıldızın

gerçek çapı ise $128 \pm 25 R_{\odot}$ olarak bulunmuştur. Bu değer de Levine vd. (2021)'nin bulduğu $130^{+20}_{-17} R_{\odot}$ değerini doğrulamaktadır. Bulduğumuz bu çap değeri ile *Gaia EDR3* 4056440205544338944 yıldızı, Levine vd. (2021)'nin bahsettiği gibi, kırmızılaşmış orta-M devler sınıfı ile uyum göstermektedir. Doğrulanan ve doğrudan ölçülen bu değer, yine Levine vd. (2021)'nin bahsettiği gibi, M III türünden çok az sayıda yıldız için mevcuttur (White ve Feierman 1987; Nordgren vd. 1999; Baines vd. 2016; Baines vd. 2018) ve bir çoğundan daha uzakta bulunmaktadır (1.7 kpc).

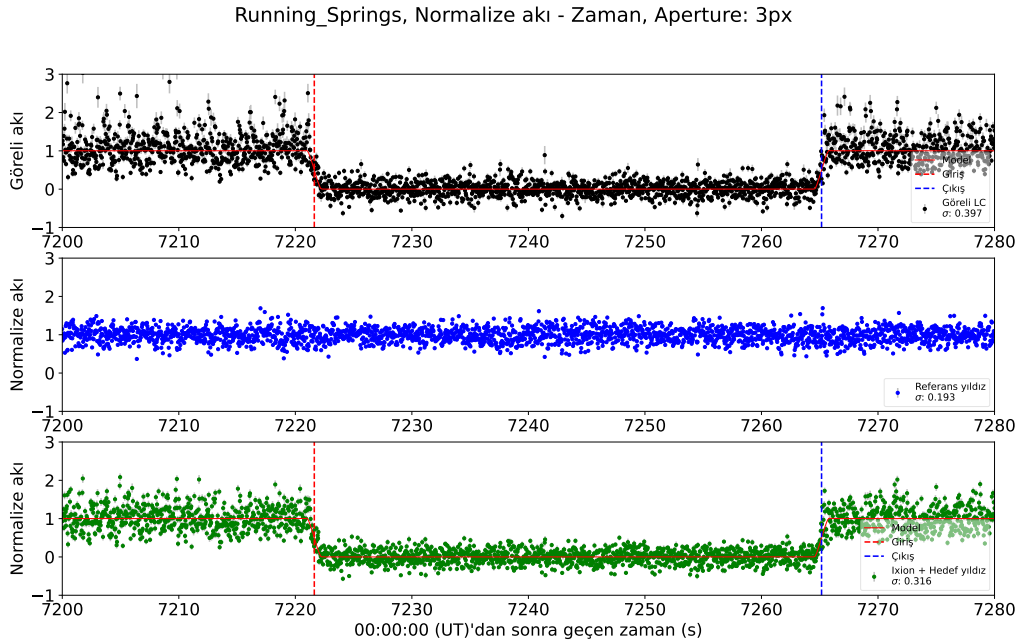
Çizelge 41. Ixion'un 13 Ekim 2022 tarihli ışık eğrisi analizi sonucunda elde edilmiş örtülme giriş çıkış zamanları

Site	Giriş Zamanı (UT)	Çıkış Zamanı (UT)	Kiriş Süresi (s)	Kiriş uzunluğu (km)	LC (σ)	Yıldız çapı (km), 3σ	Dikine hız (km/s)	LC
Pozitifler								
RS	02:00:21.627 $\pm$ 0.043	02:01:05.157 $\pm$ 0.045	43.54 $\pm$ 0.06	654.49 $\pm$ 2.61	0.316	21.149 $\pm$ 3.726	15.032	Şekil 4.12
TiMo	-	02:01:30.601 $\pm$ 0.060	-	-	0.391	19.250 $\pm$ 5.846	-	Şekil 4.13
LDT	02:00:47.760 $\pm$ 0.021	02:01:32.624 $\pm$ 0.021	44.86 $\pm$ 0.03	701.97 $\pm$ 1.35	<0.1	19.20 $\pm$ 0.300	15.648	Levine vd. (2021)
GLD	02:00:46.035 $\pm$ 0.094	02:01:29.653 $\pm$ 0.080	43.62 $\pm$ 0.12	666.69 $\pm$ 5.23	0.256	19.250 $\pm$ 5.920	15.284	Şekil 4.14
CFR	02:00:46.833 $\pm$ 0.052	02:01:30.673 $\pm$ 0.039	43.84 $\pm$ 0.07	669.48 $\pm$ 3.07	0.269	27.386 $\pm$ 4.107	15.271	Şekil 4.15
SCT	02:00:47.299 $\pm$ 0.024	02:01:31.103 $\pm$ 0.024	43.80 $\pm$ 0.03	667.77 $\pm$ 1.31	0.258	18.237 $\pm$ 1.752	15.246	Şekil 4.16
FH	02:00:48.585 $\pm$ 0.016	02:01:31.614 $\pm$ 0.017	43.03 $\pm$ 0.02	645.88 $\pm$ 0.86	0.179	16.592 $\pm$ 1.094	15.010	Şekil 4.17
TMP	02:00:48.157 $\pm$ 0.051	02:01:30.639 $\pm$ 0.052	42.48 $\pm$ 0.07	632.87 $\pm$ 2.97	0.161	19.250 $\pm$ 6.457	14.898	Şekil 4.18
TCN	02:00:57.689 $\pm$ 0.074	02:01:34.344 $\pm$ 0.064	36.65 $\pm$ 0.10	456.62 $\pm$ 3.67	0.365	16.453 $\pm$ 5.135	12.459	Şekil 4.19
Negatifler								
GRD	-	-	-	-	0.218	-	-	Şekil 4.20
CLS	-	-	-	-	0.268	-	-	Şekil 4.21

Notlar. **RS:** Running Spring, **TiMo:** Titan Monitoing Telescope/Lowell Gözlemevi, **LDT:** Lowell Discovery Channel Telescope (Levine vd. 2021), **GLD:** Glendale, **CFR:** Carefree, **STD:** Scottsdale, **FH:** Fountain Hills, **TMP:** Tempe, **TCN:** Tucson, **GRD:** Gardnerville, **CLS:** Clear Lake Shores. **LC:** Işık Eğrisi.

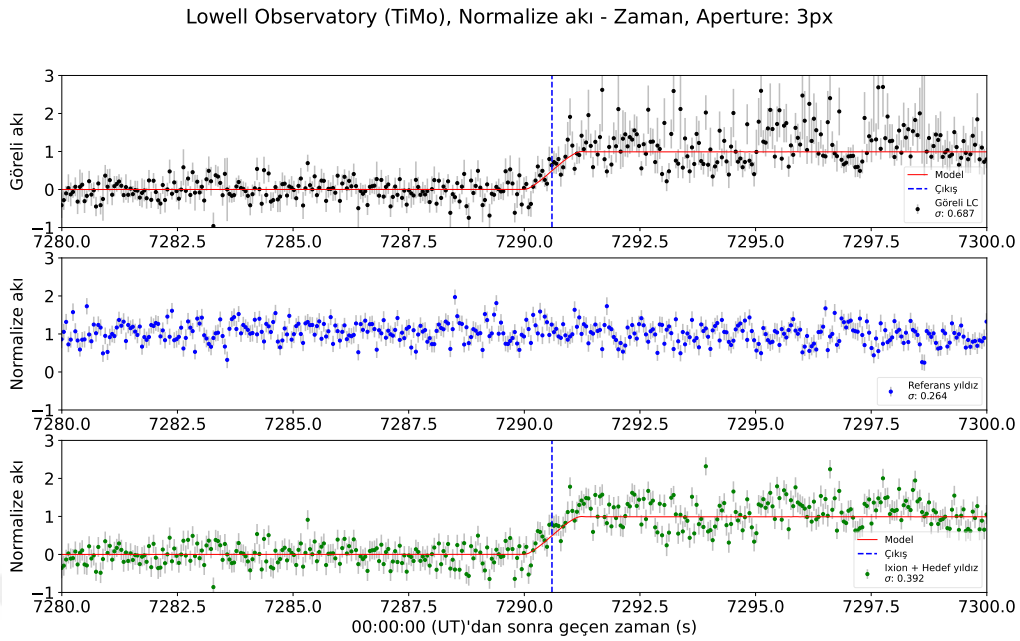
Çizelge 41'de 13 Ekim 2020 tarihinde Ixion'un örtülme gözlem kampanyasından elde edilen tüm kirişlere ait ışık eğrilerinin SORA (v1.0) ile analiz sonuçları bulunmaktadır. Çizelge 41'de verilen sıralama gözlemcilerin kuzey enlemlerden güney enlemlere doğru yerleşim sırasına göredir. Çizelge 41'in son sütununda yer alan ışık eğrisi (LC) kolonu her bir kirişe ait ışık eğrisinin hangi şekil üzerinde gösterildiğini belirtmektedir. Verilen şekiller üzerindeki her bir kirişe ait bu grafiklerde; Ixion + Hedef yıldızın (alttaki yeşil grafik) ve Referans yıldızın (ortadaki mavi grafik) normalize akıları ile bu akıların oranından elde edilmiş (üstteki siyah grafik) ışık eğrileri bulunmaktadır. Çözüm için her bir ışık eğrisi üzerindeki en düşük σ'ya sahip ışık eğrisi kullanılmış ve Çizelge 41'e işlenmiştir.

Running Springs konumundan elde edilen ışık eğrisine yapılan fit Şekil 4.12'de verilmiştir. Bu konumun OP üzerindeki indirgeme kaydı EK-3'te Şekil 7.10 ile verilmiştir.



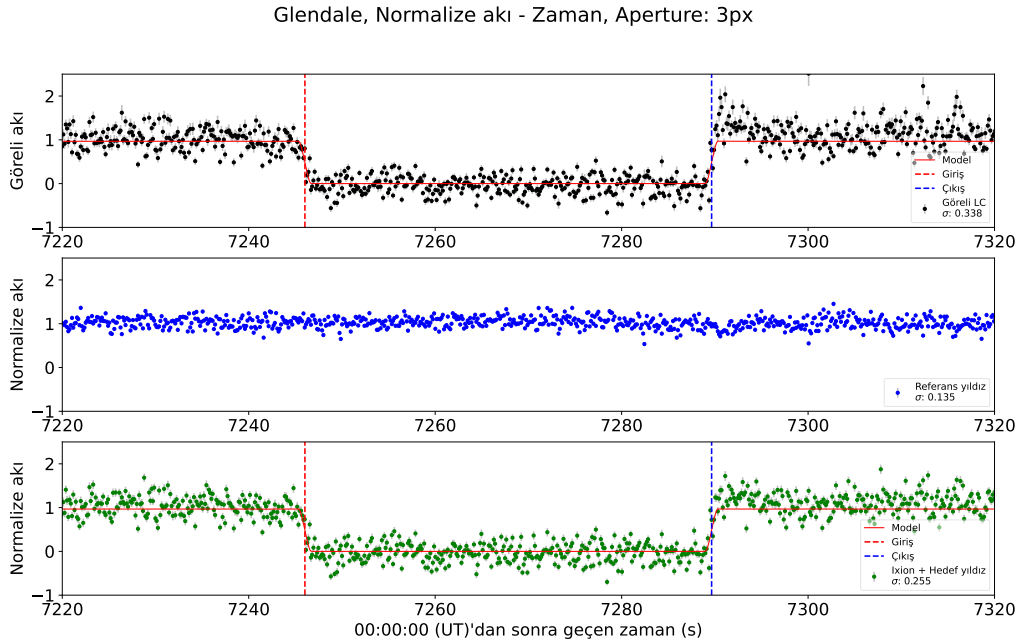
Şekil 4.12. 13 Ekim 2020 Running Springs ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model

TiMo konumundan elde edilen ışık eğrisine yapılan fit Şekil 4.13'te verilmiştir. Bu konumun OP üzerindeki indirgeme kaydı EK-2'te Şekil 7.11 ile verilmiştir.



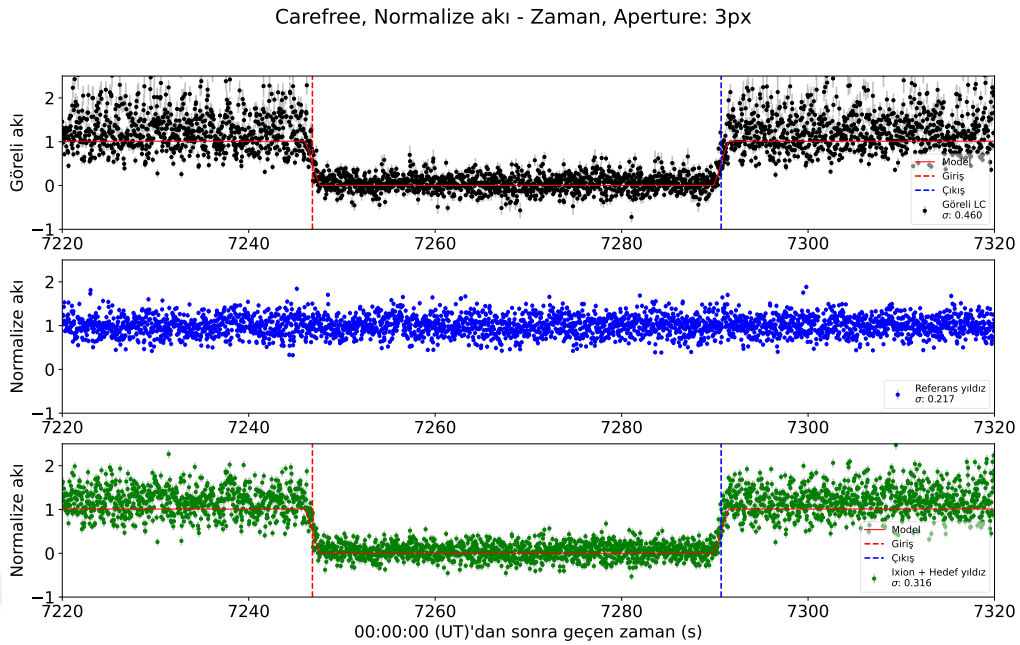
Şekil 4.13. 13 Ekim 2020 TiMo ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model

Glendale konumundan elde edilen ışık eğrisine yapılan fit Şekil 4.14'te verilmiştir. Bu konumun OP üzerindeki indirgeme kaydı EK-3'te Şekil 7.12 ile verilmiştir.



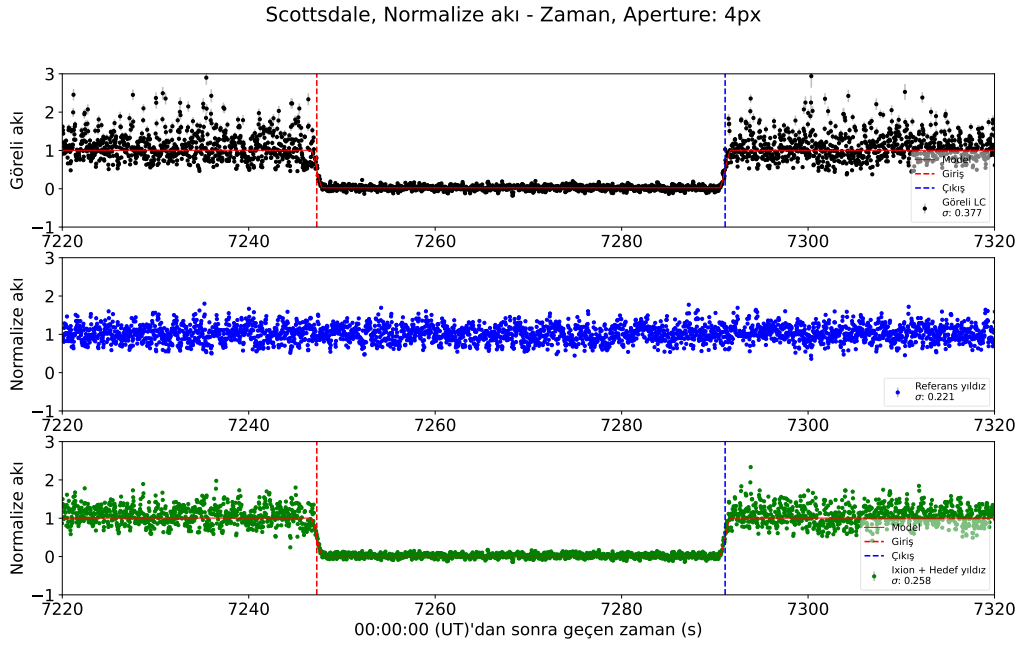
Şekil 4.14. 13 Ekim 2020 Glendale ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model

Carefree konumundan elde edilen ışık eğrisine yapılan fit Şekil 4.15'te verilmiştir. Bu konumun OP üzerindeki indirgeme kaydı EK-3'te Şekil 7.13 ile verilmiştir.



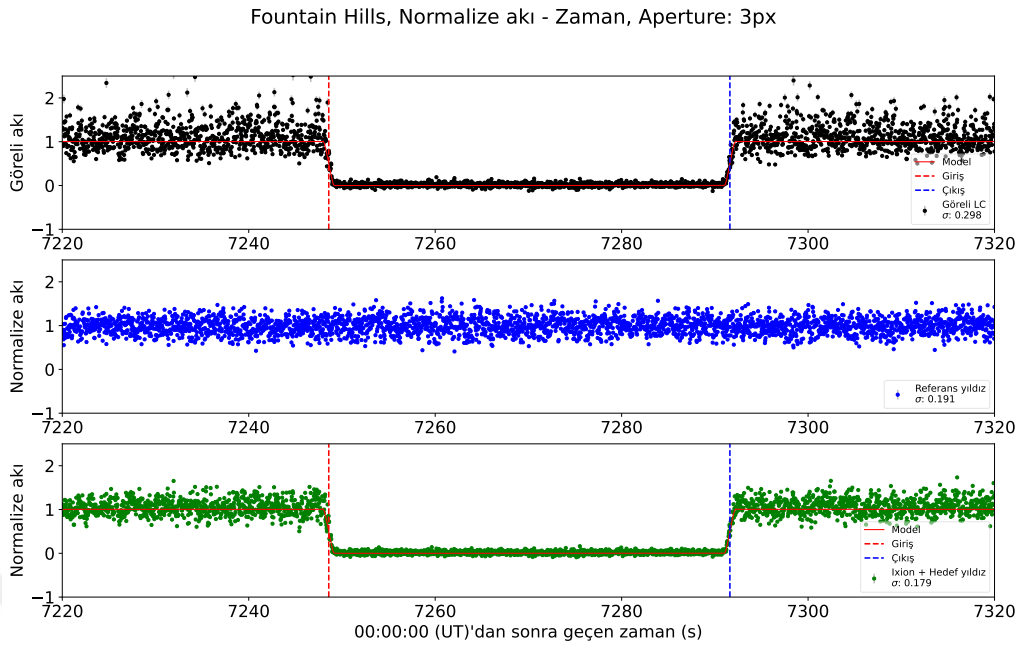
Şekil 4.15. 13 Ekim 2020 Carefree ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model

Scottsdale konumundan elde edilen ışık eğrisine yapılan fit Şekil 4.16'da verilmiştir. Bu konumun OP üzerindeki indirgeme kaydı EK-3'te Şekil 7.14 ile verilmiştir.



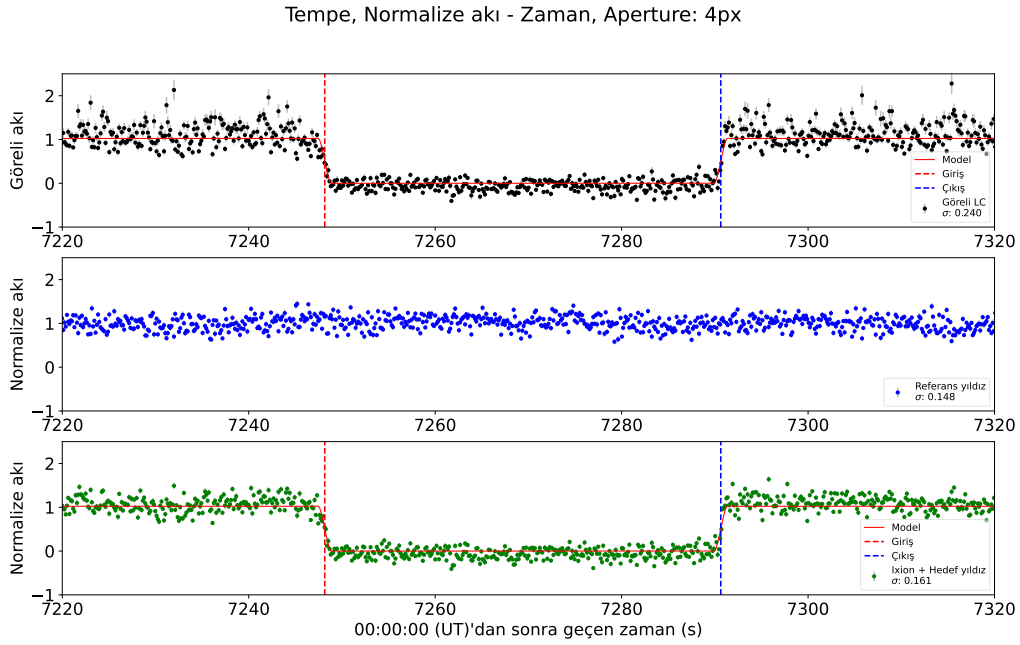
Şekil 4.16. 13 Ekim 2020 Scottsdale ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model

Fountain Hills konumundan elde edilen ışık eğrisine yapılan fit Şekil 4.17'de verilmiştir. Bu konumun OP üzerindeki indirgeme kaydı EK-3'te Şekil 7.15 ile verilmiştir.



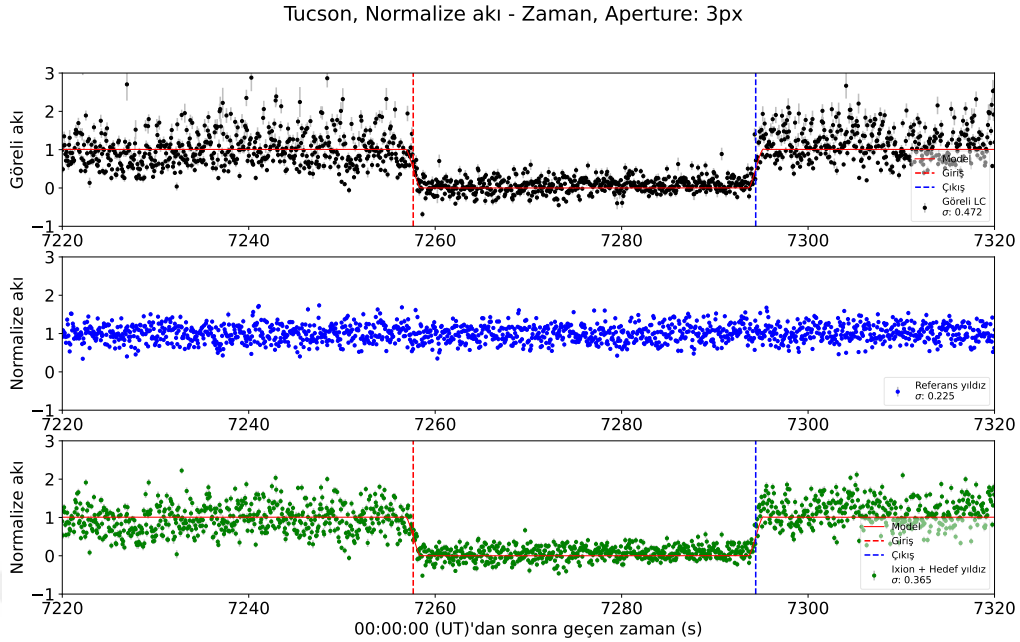
Şekil 4.17. 13 Ekim 2020 Fountain Hills ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model

Tempe konumundan elde edilen ışık eğrisine yapılan fit Şekil 4.18'de verilmiştir. Bu konumun OP üzerindeki indirgeme kaydı EK-3'te Şekil 7.16 ile verilmiştir.



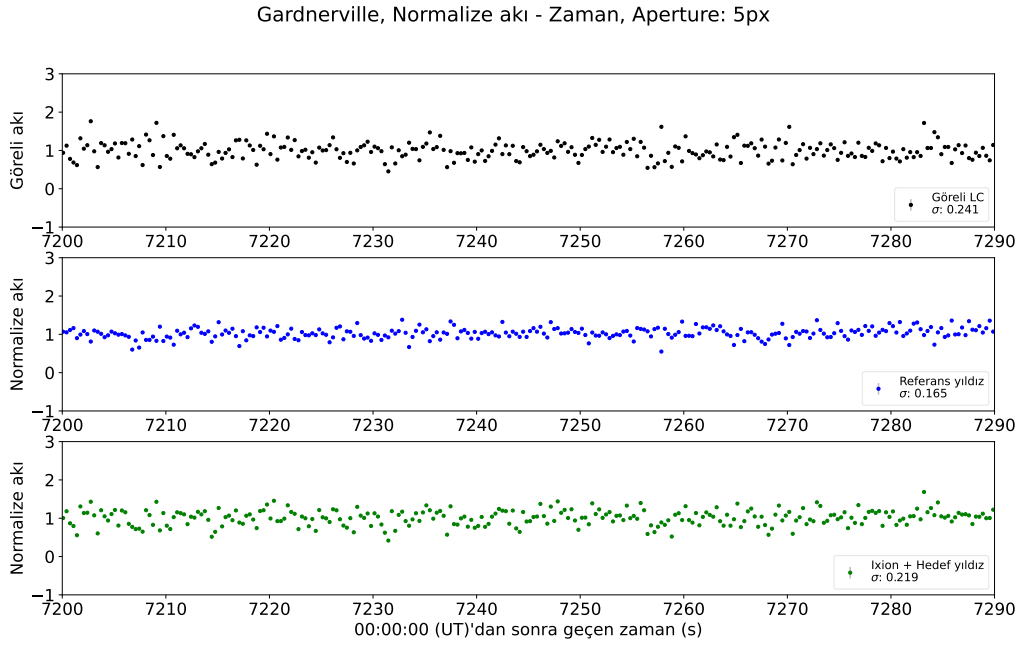
Şekil 4.18. 13 Ekim 2020 Tempe ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model

Tucson konumundan elde edilen ışık eğrisine yapılan fit Şekil 4.19'da verilmiştir. Bu konumun OP üzerindeki indirgeme kaydı EK-3'te Şekil 7.17 ile verilmiştir.



Şekil 4.19. 13 Ekim 2020 Tucson ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model

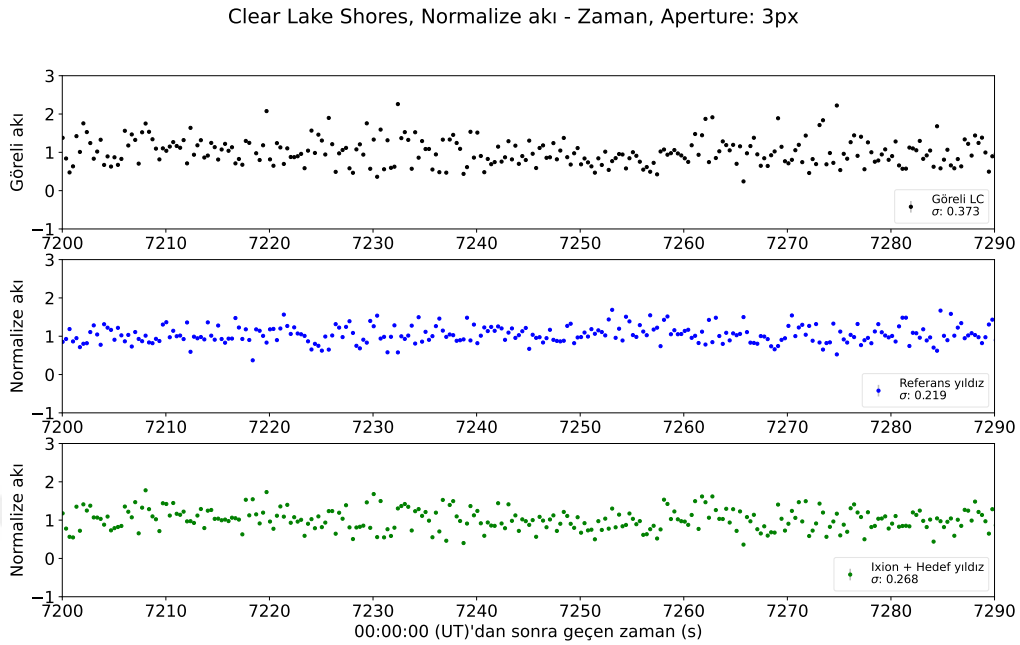
Gardnerville konumundan elde edilen ışık eğrisine yapılan fit Şekil 4.20'de verilmiştir. Bu konumun OP üzerindeki indirgeme kaydı EK-3'te Şekil 7.18 ile verilmiştir.



Şekil 4.20. 13 Ekim 2020 Gardnerville ışık eğrisi

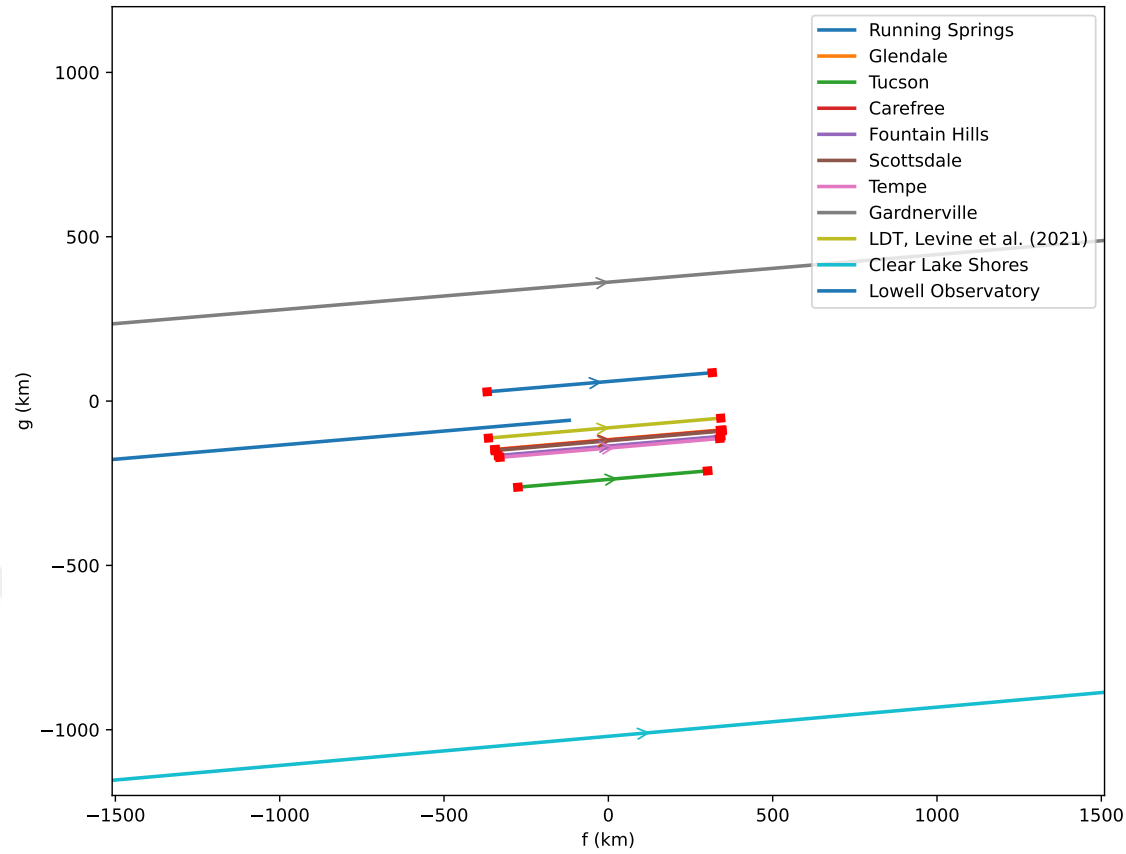
Clear Lake Shores konumundan elde edilen ışık eğrisine yapılan fit Şekil 4.21'de verilmiştir. Bu konumun OP üzerindeki indirgeme kaydı EK-3'te Şekil 7.19 ile

verilmiştir.



Şekil 4.21. 13 Ekim 2020 Clear Lake Shores ışık eğrisi

13 Ekim 2020 tarihinde tüm lokasyonlardaki ışık eğrilerinin analizi sonrası elde edilmiş giriş ve çıkış zamanları Şekil 4.22'de çizdirilmiştir. Bu çizimden dahi Ixion'un nasıl bir şekile sahip olduğu kestirilebilmektedir. Şekil 4.22'de görülen sürekli çizgiler *Negatif* gözlemleri, yani yıldızın sürekli görüldüğünü, orta kısımda bulunan kısa ve devamlılığı olmayan çizgiler ise *Pozitif* gözlemleri ifade etmektedir. Çizgiler üzerindeki kırmızı kutucuklar zamandaki belirsizliğin teğet düzlem üzerindeki karşılığını ifade etmektedir. Çizgilerin üzerindeki okun yönü ise zamanın akış yönünü temsil etmektedir. Yani okun başlangıç ucu hesaplanan örtülme başlangıç zamanını (giriş), bitiş ucu da hesaplanan örtülme bitiş zamanını ifade etmektedir.



Şekil 4.22. Işık eğrisi analizlerinden sonra elde edilmiş giriş ve çıkış zamanları ile çizdirilmiş Ixion gövdesi

Şekil 4.22'de çizdirilen bu başlangıç ve bitiş zamanlarına en uygun elips SORA (v1.0)'da bulunan *Occultation* sınıfı içerisindeki *fit_ellipse* fonksiyonu ile araştırılmıştır. Bu fonksiyon yardımı ile bu giriş ve çıkış zamanlarına 1 000 000 adet elips fiti yapılmış ve bu elipslerden en küçük χ^2_{min} değerine sahip 30 000 adedi Monte Carlo yöntemi ile çizdirilmiştir. Daha önce, Braga-Ribas vd. (2013), Benedetti-Rossi vd. (2016) ve Benedetti-Rossi vd. (2019), Dias-Oliveira vd. (2017), Ortiz vd. (2017) ve Souami vd. (2020) çalışmalarında olduğu gibi bu elipslerden de $\chi^2 < \chi^2_{min} + 1$ (1-σ, siyah bölge) kriterine ve $\chi^2 < \chi^2_{min} + 9$ (3-σ, gri bölge) kriterlerine uyan bütün elipslerden en uygun elips hesaplanmış ve Şekil 4.23'teki gibi çizdirilmiştir. 1-σ kriterine uyan en uygun elipslerden hesaplanmış Ixion'un fiziksel parametreleri de Çizelge 42'de sunulmuştur. Elipsler toplam 16 nokta üzerinde taranmış ve yansız (unbiased) bir serbestlik derecesi[96] $\chi^2_{pdf} = \chi^2/(N - M)$ ifadesi ile denetlenmiştir. Denklemdeki N toplam veri sayısını M ise serbest bırakılan (aranan) parametrelerin sayısını ifade etmektedir. Yapılan fitlerdeki χ^2_{pdf}'nin tatmin edici en küçük değeri $\chi^2_{min_{pdf}} = (N - M)/M = 1$'dir ve yapılan tarama sonucunda ulaşılan $\chi^2_{pdf} = 1.065$ olmuştur. Bu da yapılan fitin son derece tatmin edici

[96]per degree freedom

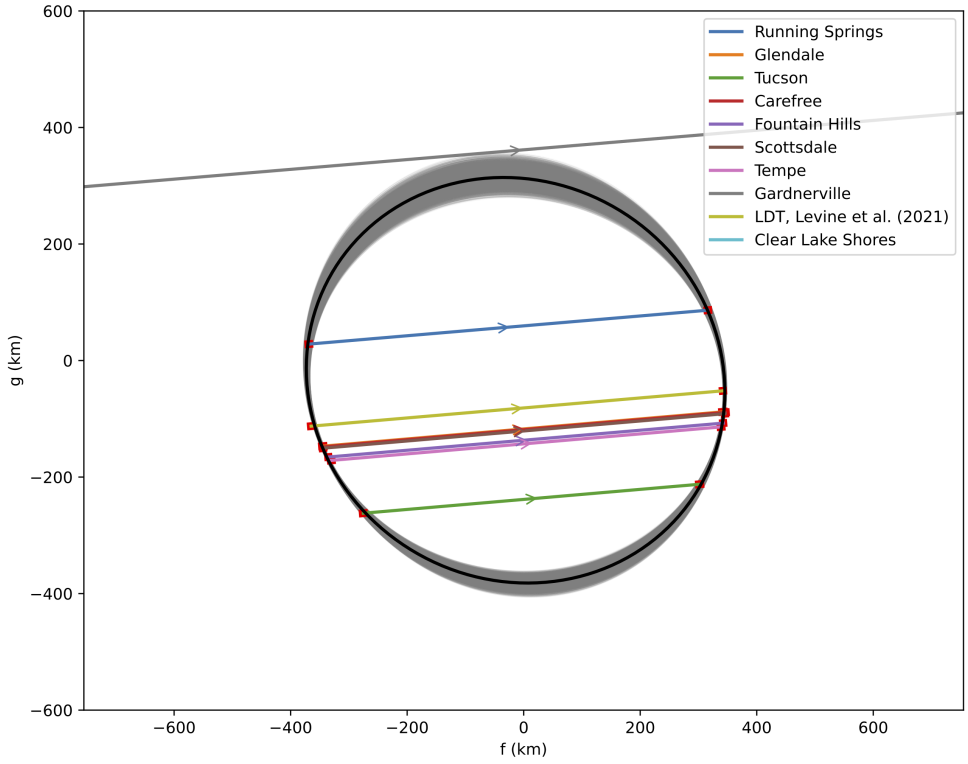
olduğunu göstermektedir.

Çizelge 42. Tüm kirişlerden alınan giriş ve çıkış zamanlarına yapılan en iyi elips fiti sonucu Ixion'un fiziksel parametreleri

Ekvatoral yarıçap	$a' = 365.413 \pm 3.623$ km
Görünür basıklık	$\epsilon' = 0.063 \pm 0.013$
Kutupsal yarıçap	$R'_{\rm polar} = 342.319 \pm 16.310$ km
Eşdeğer yarıçap	$R'_{\rm equiv} = 353.377 \pm 20.361$ km
Geometrik albedo	$p_v = 0.147 \pm 0.034$
NIMAv12, RA düzeltmesi (X)	$f_c = -13.539 \pm 1.039$ km
NIMAv12, DEC düzeltmesi (Y)	$g_c = -33.898 \pm 3.057$ km
NIMAv12, RA düzeltmesi	$\Delta\alpha \cdot cos\delta = -0.476 \pm 0.036\ mas$
NIMAv12, DEC düzeltmesi	$\Delta\delta = -1.191 \pm 0.107\ mas$
Konum açısı	$P' = 31.921 \pm 11.948$ deg
En iyi fit χ^2	$\chi^2_{\rm min} = 11.716$
En iyi fit $\chi^2_{\rm pdf}$	$\chi^2_{\rm pdf} = 1.065$
2020-10-13 01:57:45.800 (UT) tarihindeki	**Ixion J2000 jeosentrik konumu**
RA	17 50 20.3584903 $\pm$ 0.235 mas
Dec	-29 43 32.90621 $\pm$ 0.162 mas

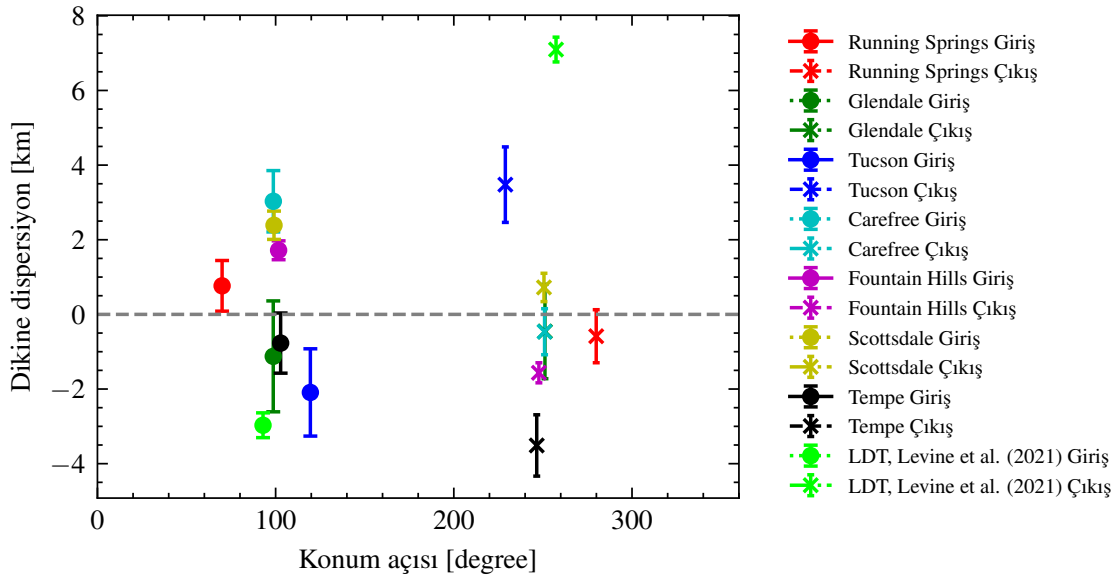
Yapılan kenar fiti neticesinde, Şekil 4.23'te Ixion'un şimdiye kadar elde edilmiş en ayrıntılı şekli bulunmaktadır. Bu çalışmadan önce elde edilmiş tek şekil, Levine vd. (2021) çalışmasında sadece LDT ve TiMo kirişleri kullanılarak oluşturulmuştur ve çembersel bir varsayım ile kenar birleştirilmesi yapılmıştır (bkz. Şekil 4.25). Levine vd. (2021) Ixion'un ekvatoral çapını 709.6 ± 0.2 km olarak bulmuştur. Levine vd. (2021)'nin kullandığı 4.3 metrelik LDT teleskobunun konumu, büyük bir şans eseri olarak Ixion'un gölge hattının merkezine çok yakın geçmesinden dolayı bu varsayım yararlı olabilmiştir fakat yine de Ixion'un ekvatoral çapını ortaya koyabilmek adına yeterli olamayacağını düşünmekteyiz. Levine vd. (2021)'nin elde LDT ile elde ettiği giriş ve çıkış zamanları da dahil toplam 16 nokta kullanılarak bu çalışma ile elde edilen ekvatoral çap daha büyüktür (730.826 ± 7.246 km) ve Ixion'un teğet düzlem üzerindeki şekli eliptik olarak elde edilmiştir. Yalnız şunu da ifade etmek gerekir ki, 4.3 metrelik LDT ile alınan verilerin S/N değeri oldukça yüksektir. Ayrıca Levine vd. (2021), 0.3365 saniyelik poz döngüleri ile görüntü almıştır ve bulduğu giriş ve çıkış zamanlarının belirsizliği 0.021 saniyedir. Bu nedenle LDT verilerinin güvenilir bir konumdan elde edilmesi sebebiyle, bu kiriş üzerinde herhangi bir kaydırma işlemi yapılmamıştır ve LDT kirişi üzerindeki giriş ve çıkış kısımlarındaki sapmaların Ixion üzerindeki topografik özelliklerden kaynaklandığı düşünülmektedir (bkz. Şekil 4.23 ve Şekil 4.24). LDT kirişinin giriş kısmında Ixion üzerinde bir yükselti, çıkış kısmında ise bir derinlik/krater

ya da ova olma ihtimali bulunmaktadır. Yapılan bu elips fiti sonucunda her bir giriş ve çıkış anının Ixion yüzeyinde ne gibi bir sapmaya uğradığı Şekil 4.24'te verilmiştir. Eğer Ixion yüzeyi kusursuz bir elips olsaydı[97] tüm bu giriş ve çıkış anlarının gölge dikine hızları 0'a çok yakın bir konumda olurdu. Fakat, Şekil 4.24'teki bu saçılma Ixion yüzeyinin topografik özellikler barındırdığını göstermektedir. Yine de bu savımızı doğrulayabilmek adına yüksek S/N değerine ve zaman çözünürlüğüne sahip gözlemsel verilere ihtiyaç duyulmaktadır.

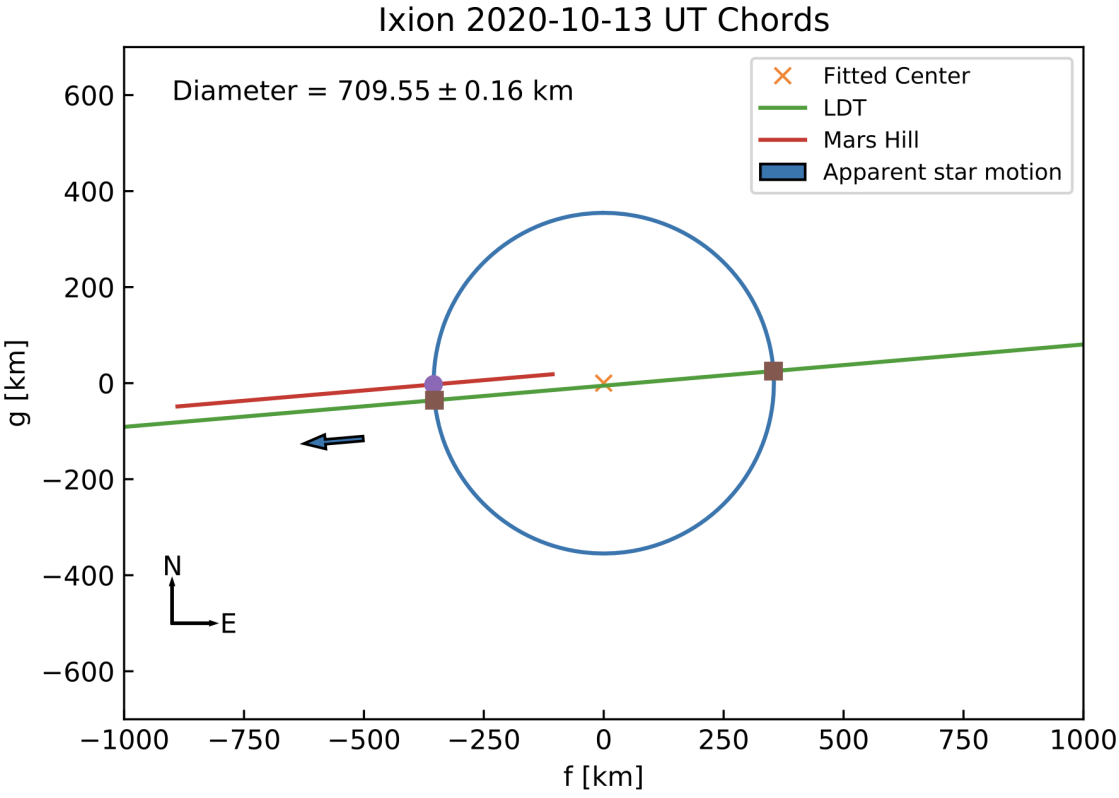


Şekil 4.23. 13 Ekim 2020 tarihli tüm kiriş giriş ve çıkış zamanlarına yapılmış elips fitleri

[97] Ölçüm hatalarının olmadığı varsayımı ile ancak bu geçerli olabilir.



Şekil 4.24. Yapılan elips fiti üzerindeki gölge dikine hızlarının radyal dispersiyonları



Şekil 4.25. 13 Ekim 2020 tarihli Ixion kaynaklı yıldız örtülme gözlemine Levine vd. (2021)'nin LDT ve TiMo (Mars Hill/Lowell Gözlemevi) kirişlerine yaptığı çembersel fit

4.2.2. 28 Nisan 2021 gözlemlerinin analizleri ve bulguları

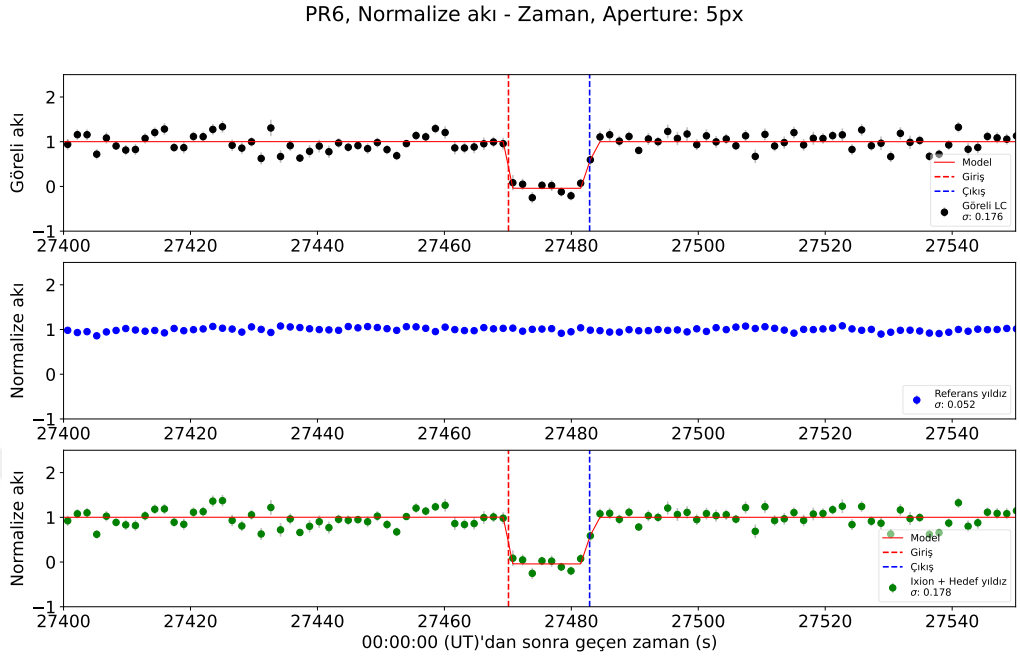
Ixion, bu kampanya gözleminde 14.842^m kadir (Gmag) bir yıldızı örtmesinden dolayı zaman çözünürlüğü yüksek olan veriler yoğunlukta değildir. Fakat kiriş verilerinin büyük bir bölümünün (%60) 40 cm üzeri teleskoplar ile sağlanması Ixion'a kenar fiti yapılabilmesine olanak sağlamıştır. Diğer taraftan, örtülen yıldızın parlaklığının sönük olmasından dolayı, Ixion'un bulunduğu mesafedeki göreli yıldız çapı empirik olarak; 1.433 km (Kervella vd. 2004) ila 2.144 km (van Belle 1999) arasında değişmektedir. Bu sebeple ışık eğrilerinde yıldız görünür çapından kaynaklı örtülme etkisi 13 Ekim 2020 tarihindeki gibi belirgin bir şekilde görülememiştir ve göreli yıldız çapı taraması yapılmamıştır. Kervella vd. (2004)'nin formülü ile hesapladığımız 1.43 km değeri ışık eğrilerinin analizleri yapılırken girdi parametresi olarak kullanılmıştır. 13 Ekim 2020 tarihinde olduğu gibi, 28 Nisan 2021 tarihli tüm kirişlerin ışık eğrileri SORA (v1.0) ile analiz edilmiş ve elde edilen bütün sonuçlar Çizelge 43'te verilmiştir.

Çizelge 43. Ixion'un 28 Nisan 2020 tarihli ışık eğrisi analizi sonucunda elde edilmiş örtülme giriş çıkış zamanları

Site	Giriş Zamanı (UT)	Çıkış Zamanı (UT)	Kiriş Süresi (s)	Kiriş uzunluğu (km)	LC (σ)	Yıldız çapı (km)	Dikine hız (km/s)	LC
Pozitifler								
PR6	07:37:50.149 $\pm$ 0.457	07:38:02.837 $\pm$ 0.103	12.69 $\pm$ 0.47	43.79 $\pm$ 1.62	0.176	1.43	3.451	Şekil 4.26
CTIO-1m	07:37:49.806 $\pm$ 0.783	07:38:03.102 $\pm$ 0.781	13.30 $\pm$ 1.11	52.44 $\pm$ 4.37	0.033	1.43	3.944	Şekil 4.27
OPD	07:34:38.466 $\pm$ 0.004	07:34:56.404 $\pm$ 0.014	18.22 $\pm$ 0.01	91.75 $\pm$ 0.05	0.060	1.43	5.035	Şekil 4.28
LCN	07:37:44.602 $\pm$ 0.146	07:38:09.710 $\pm$ 0.191	25.11 $\pm$ 0.24	173.40 $\pm$ 1.66	0.607	1.43	6.906	Şekil 4.29
RECT	07:36:21.493 $\pm$ 0.736	07:37:02.965 $\pm$ 0.688	41.47 $\pm$ 1.01	517.03 $\pm$ 12.56	0.157	1.43	12.467	Şekil 4.30
CAS	07:37:26.033 $\pm$ 1.430	07:38:14.030 $\pm$ 1.306	48.00 $\pm$ 1.94	643.69 $\pm$ 25.98	0.153	1.43	13.411	Şekil 4.31
Negatifler								
TS	-	-	-	-	0.042	-	-	Şekil 4.32
CDS	-	-	-	-	0.322	-	-	Şekil 4.33
4A	-	-	-	-	0.513	-	-	Şekil 4.34
OEC	-	-	-	-	0.403	-	-	Şekil 4.35
OLC	-	-	-	-	0.250	-	-	Şekil 4.36

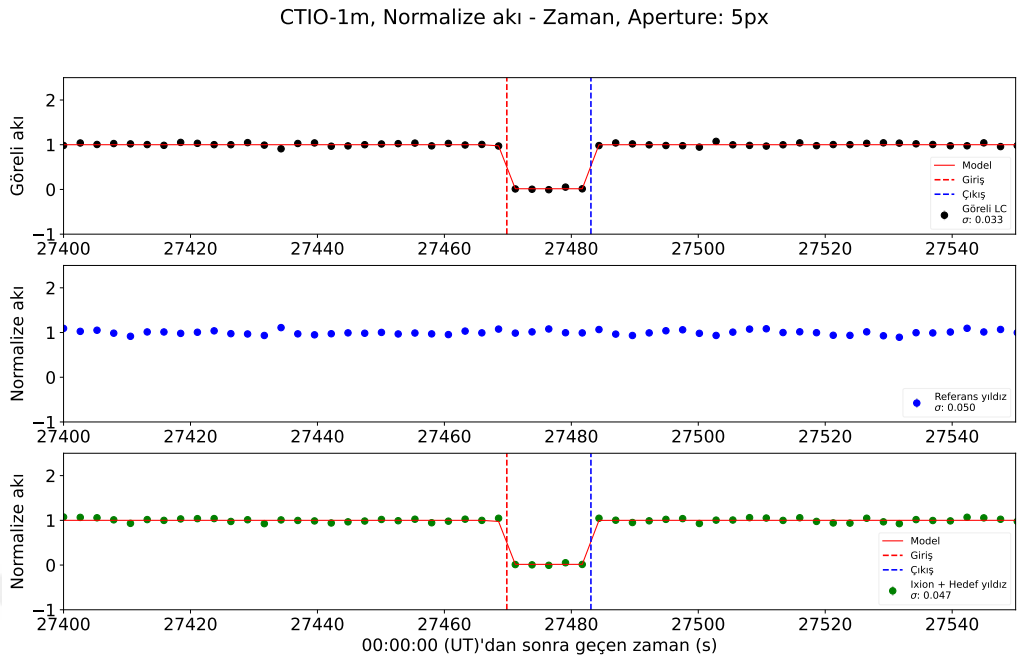
Notlar. CAS: ASH-Cerro Burek, Argentina, **LCN**: La Canelilla, Şili, **PR6**: Prompt6, Tololo, Şili, **CTIO1m**: CTIO One-Meter, Tololo, Şili, **OPD**: Observatorio do Pico dos Dias, Itajuba, Brezilya, **RECT**: Reconquista, Reconquista-Santa, Argentina, **OEC**: Observatorio El Catalejo, Santa Rosa, Arjantin, **TS**: TRAPPIST-South, La Silla, Şili, **4A**: A.A.A.A, Arjantin, **CDS**: Cruz del Sur, Arjantin, **OLC**: Observatorio Los Cabezones, La Pampa, Arjantin. Açıklamalar OP veri tabanında bulunan formları ile verilmiştir.

Prompt6 konumundan elde edilen ışık eğrisine yapılan fit Şekil 4.26'de verilmiştir. Bu konumun OP üzerindeki indirgeme kaydı EK-4'te Şekil 7.20 ile verilmiştir.



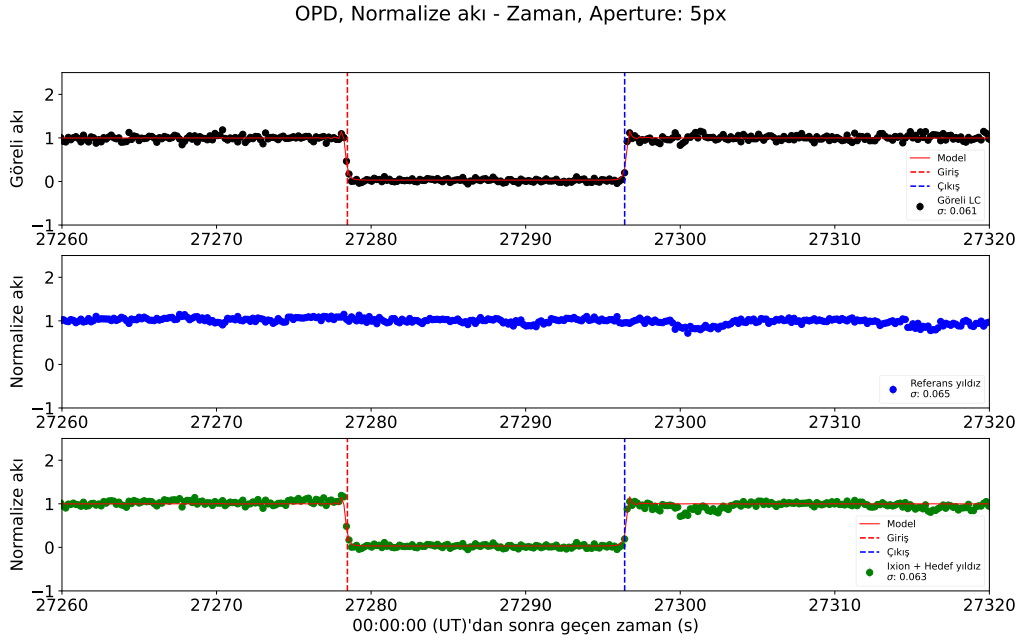
Şekil 4.26. 28 Nisan 2021 *Prompt6* ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model

CTIO One-Meter konumundan elde edilen ışık eğrisine yapılan fit Şekil 4.27'de verilmiştir. Bu konumun OP üzerindeki indirgeme kaydı EK-4'te Şekil 7.21 ile verilmiştir.



Şekil 4.27. 28 Nisan 2021 *CTIO One-Meter* ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model

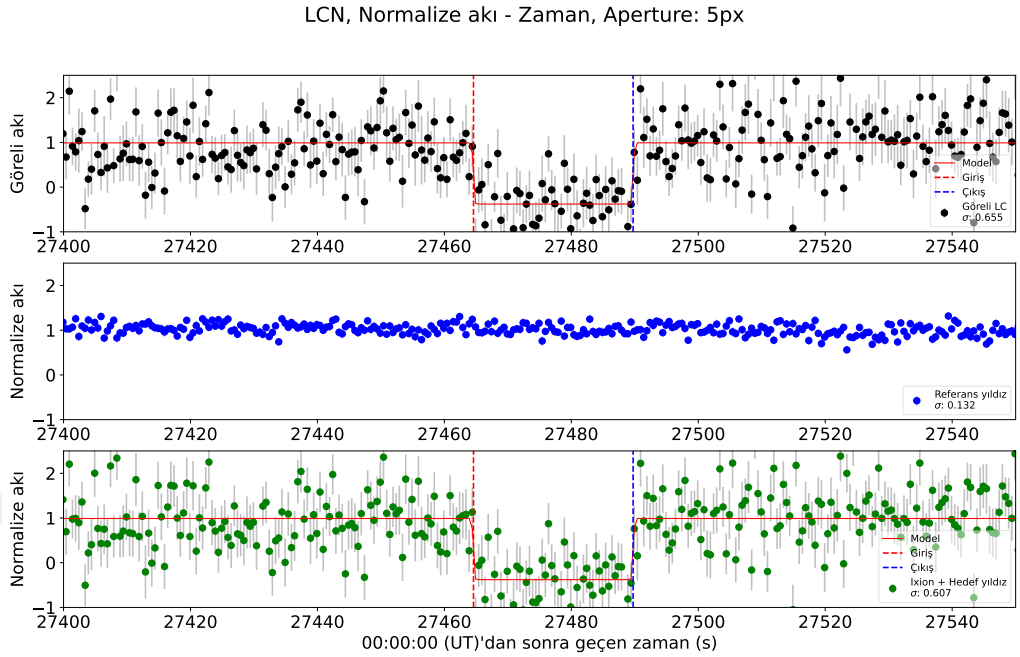
Observatorio do Pico dos Dias konumundan elde edilen ışık eğrisine yapılan fit Şekil 4.28'de verilmiştir. Bu konumun OP üzerindeki indirgeme kaydı EK-4'te Şekil 7.22 ile verilmiştir.



Şekil 4.28. 28 Nisan 2021 *CTIO One-Meter* ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model

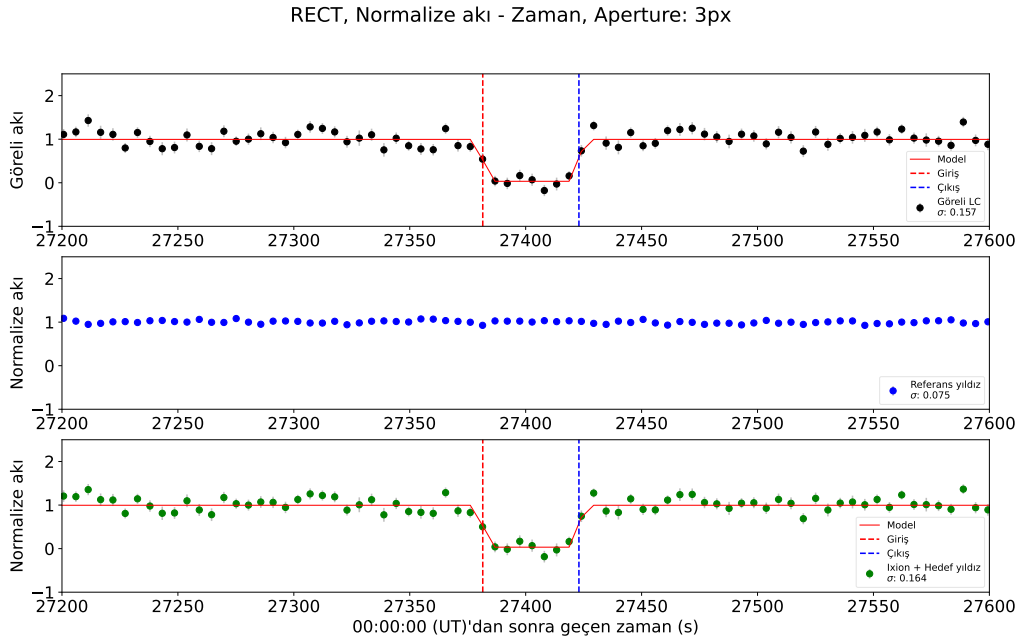
La Canelilla konumundan elde edilen ışık eğrisine yapılan fit Şekil 4.29'de verilmiştir.

Bu konumun OP üzerindeki indirgeme kaydı EK-4'te Şekil 7.23 ile verilmiştir.



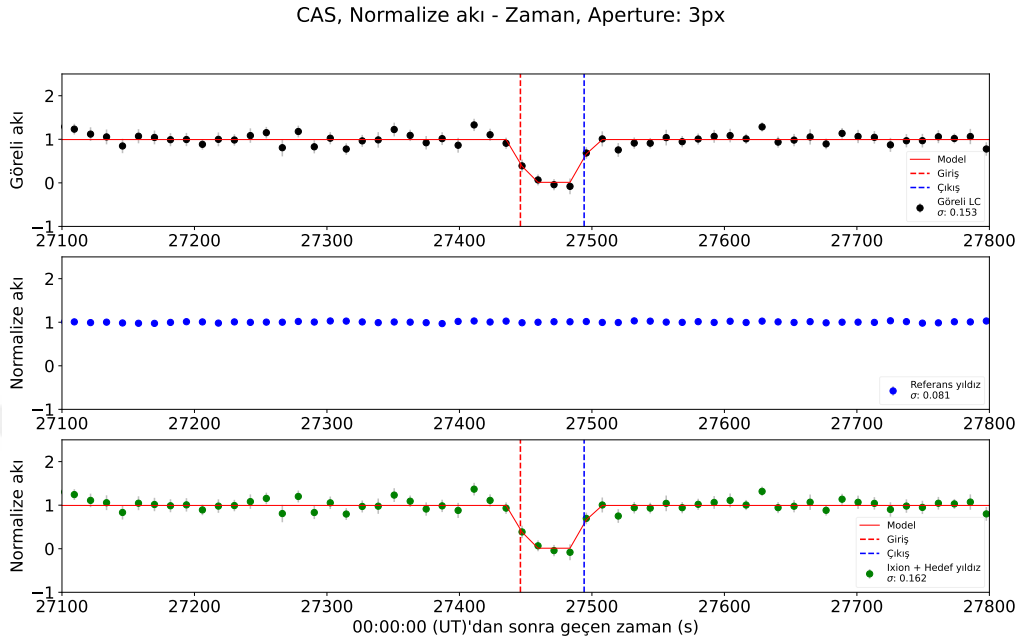
Şekil 4.29. 28 Nisan 2021 *La Canelilla* ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model

Reconquista konumundan elde edilen ışık eğrisine yapılan fit Şekil 4.30'de verilmiştir. Bu konumun OP üzerindeki indirgeme kaydı EK-4'te Şekil 7.24 ile verilmiştir.



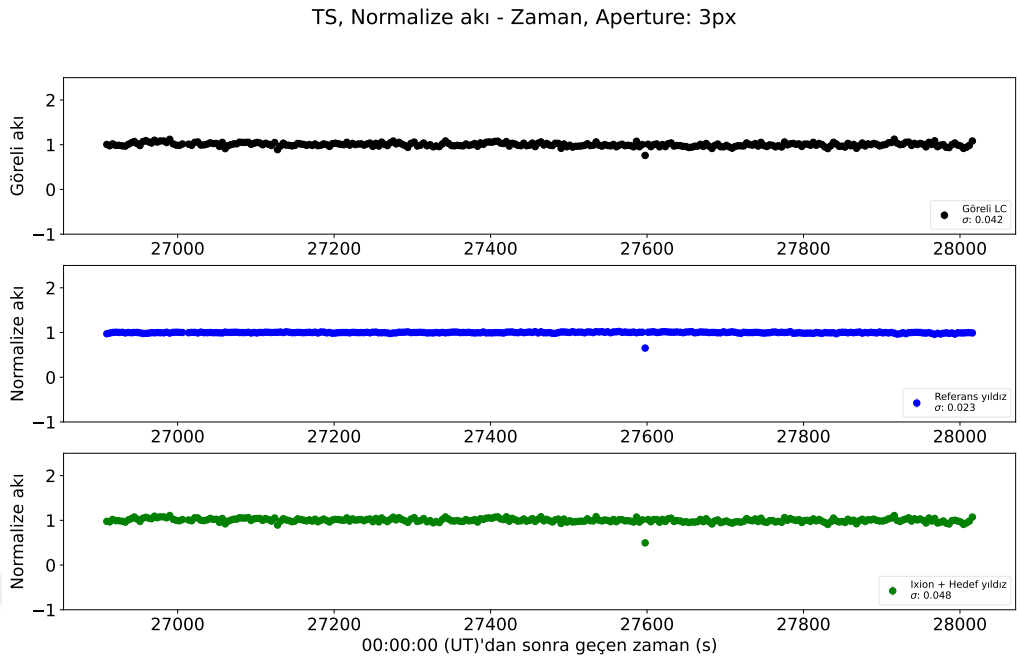
Şekil 4.30. 28 Nisan 2021 *Reconquista* ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model

ASH-Cerro Burek konumundan elde edilen ışık eğrisine yapılan fit Şekil 4.30'de verilmiştir. Bu konumun OP üzerindeki indirgeme kaydı EK-4'te Şekil 7.25 ile verilmiştir.



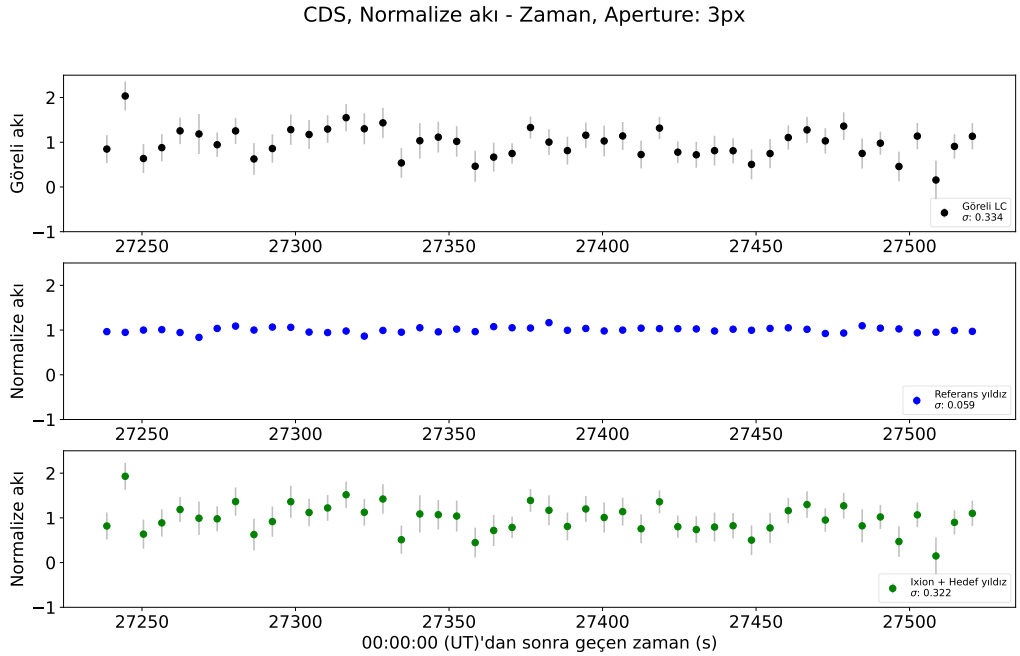
Şekil 4.31. 28 Nisan 2021 *ASH-Cerro Burek* ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model

TRAPPIST-South konumundan elde edilen ışık eğrisine yapılan fit Şekil 4.32'de verilmiştir. Bu konumun OP üzerindeki indirgeme kaydı EK-4'te Şekil 7.26 ile verilmiştir.



Şekil 4.32. 28 Nisan 2021 *TRAPPIST-South* ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model

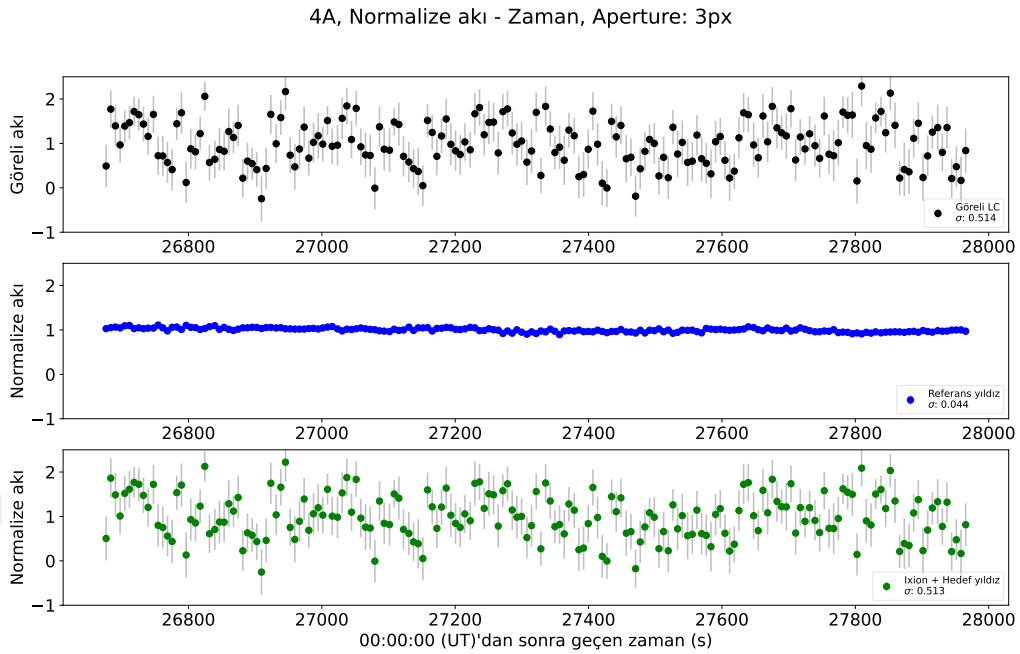
Cruz del Sur konumundan elde edilen ışık eğrisine yapılan fit Şekil 4.32'de verilmiştir. Bu konumun OP üzerindeki indirgeme kaydı EK-4'te Şekil 7.27 ile verilmiştir.



Şekil 4.33. 28 Nisan 2021 *Cruz del Sur* ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model

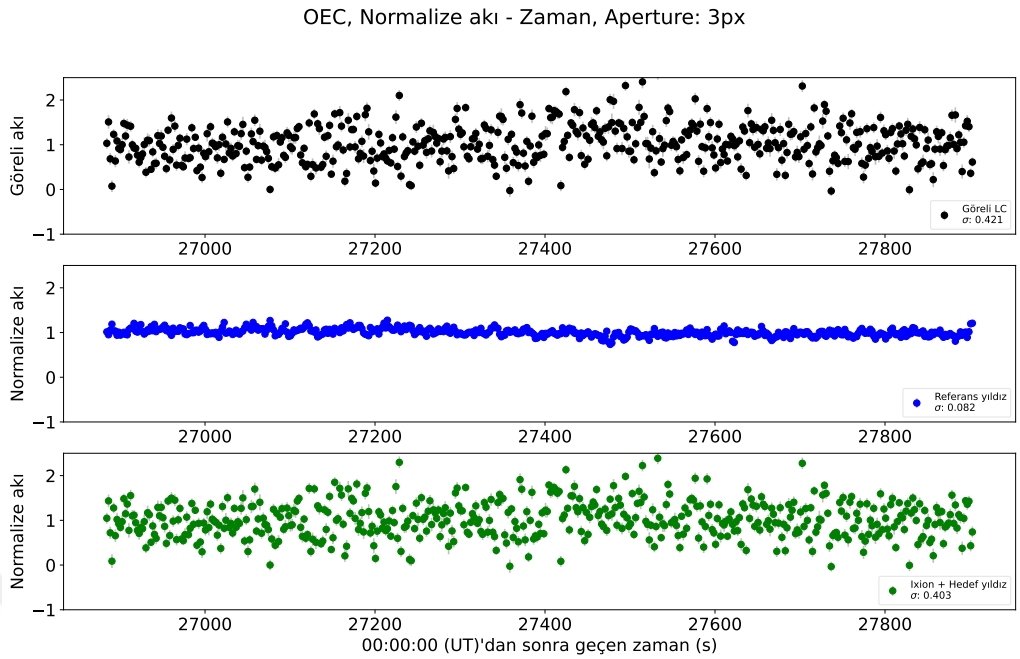
A.A.A.A konumundan elde edilen ışık eğrisine yapılan fit Şekil 4.34'de verilmiştir. Bu

konumun OP üzerindeki indirgeme kaydı EK-4'te Şekil 7.28 ile verilmiştir.



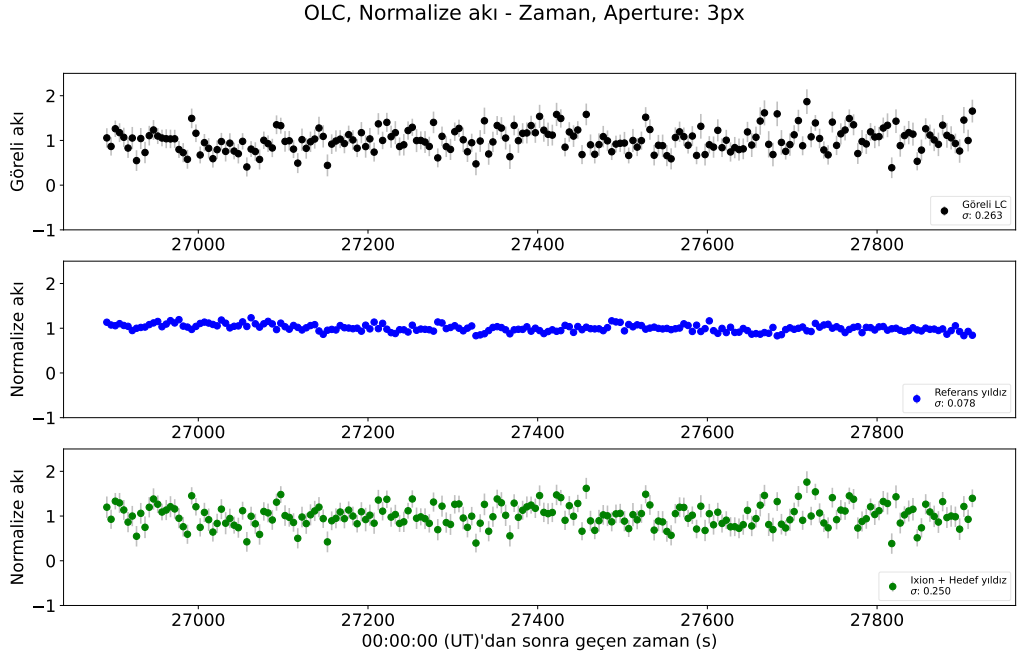
Şekil 4.34. 28 Nisan 2021 *A.A.A.A* ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model

Observatorio El Catalejo konumundan elde edilen ışık eğrisine yapılan fit Şekil 4.35'de verilmiştir. Bu konumun OP üzerindeki indirgeme kaydı EK-4'te Şekil 7.29 ile verilmiştir.

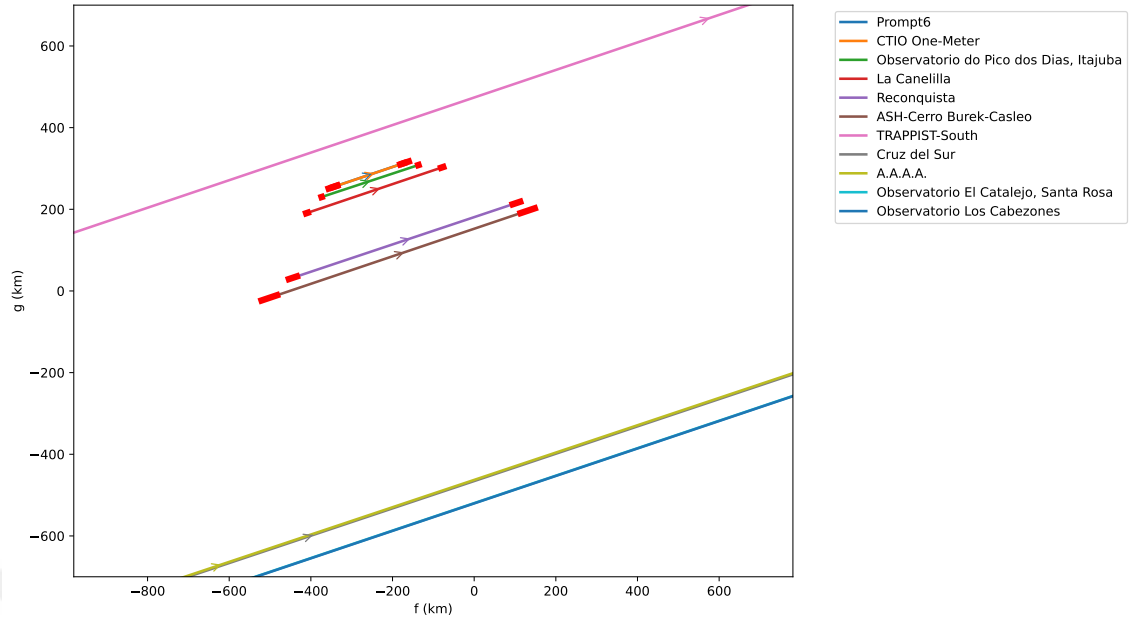


Şekil 4.35. 28 Nisan 2021 *Observatorio El Catalejo* ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model

Observatorio Los Cabezone konumundan elde edilen ışık eğrisine yapılan fit Şekil 4.36'de verilmiştir. Bu konumun OP üzerindeki indirgeme kaydı EK-4'te Şekil 7.30 ile verilmiştir.



Şekil 4.36. 28 Nisan 2021 *Observatorio Los Cabezones* ışık eğrisi ve SORA ile elde edilen model



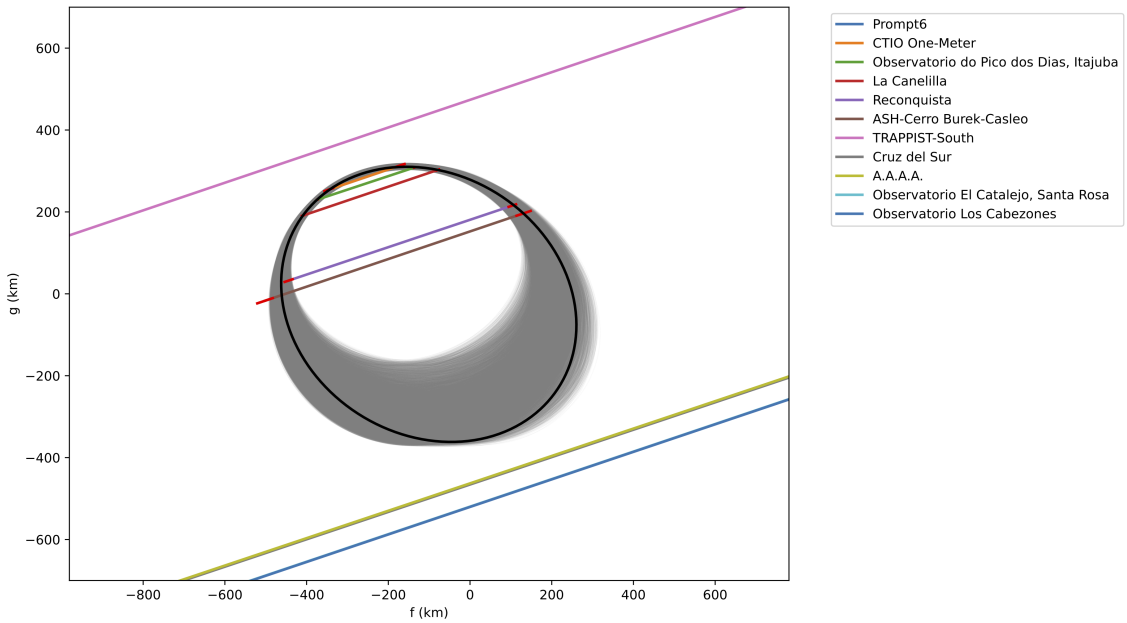
Şekil 4.37. Işık eğrisi analizlerinden sonra elde edilmiş giriş ve çıkış zamanları ile çizdirilmiş Ixion gövdesi

Şekil 4.37'de çizdirilen başlangıç ve bitiş zamanlarına en uygun elips, SORA (v1.0)'nın *Occultation* sınıfı içerisinde bulunan *fit_ellipse* fonksiyonu ile araştırılmıştır. Bu fonksiyon yardımı ile 28 Nisan 2021 tarihli tüm giriş ve çıkış zamanlarına 10000000 adet elips fiti yapılmış ve bu elipslerden en küçük χ^2_{min} değerine sahip 30000 adedi Monte Carlo yöntemi ile çizdirilmiştir. Daha önce, 13 Ekim 2020 tarihli gözlemlerde yapıldığı gibi bu elipslerden de $\chi^2 < \chi^2_{min} + 1$ (1-σ, siyah bölge) kriterine ve $\chi^2 < \chi^2_{min} + 9$ (3-σ, gri bölge) kriterlerine uyan bütün elipslerden en uygun elips hesaplanmış ve Şekil 4.38'deki gibi çizdirilmiştir. 1-σ kriterine uyan en uygun elipslerden hesaplanmış Ixion'un fiziksel parametreleri de Çizelge 44'de sunulmuştur. Elipsler toplam 12 nokta üzerinde taranmış ve yansız (unbiased) bir serbestlik derecesi[98] $\chi^2_{pdf} = \chi^2/(N - M)$ ifadesi ile denetlenmiştir. Denklemdeki N toplam veri sayısını M ise serbest bırakılan (aranan) parametrelerin sayısını ifade etmektedir. Yapılan fitlerdeki χ^2_{pdf}'nin tatmin edici en küçük değeri $\chi^2_{min_{pdf}} = (N - M)/M = 1$'dir ve yapılan tarama sonucunda ulaşılan $\chi^2_{pdf} = 1.061$ olmuştur. Bu da yapılan fitin son derece tatmin edici olduğunu göstermektedir.

[98] per degree freedom

Çizelge 44. Tüm kirişlerden alınan giriş ve çıkış zamanlarına yapılan en iyi elips fiti sonucu Ixion'un fiziksel parametreleri

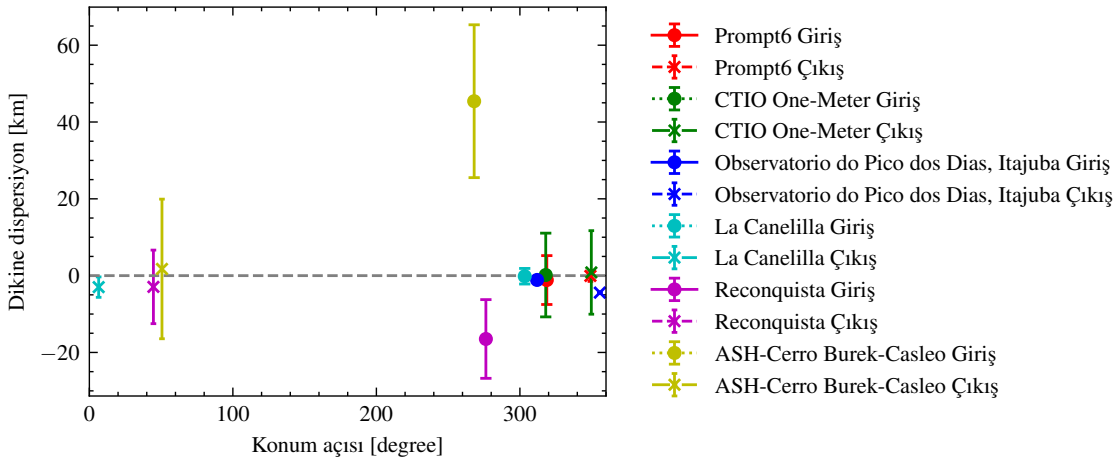
Ekvatoral yarıçap	$a' = 357.145 \pm 26.791$ km
Görünür basıklık	$\epsilon' = 0.139 \pm 0.041$
Kutupsal yarıçap	$R'_{\rm polar} = 307.421 \pm 75.467$ km
Eşdeğer yarıçap	$R'_{\rm equiv} = 331.352 \pm 106.596$ km
Geometrik albedo	$p_v = 0.168 \pm 0.269$
NIMAv12, RA düzeltmesi (X)	$f_c = -111.361 \pm 19.469$ km
NIMAv12, DEC düzeltmesi (Y)	$g_c = 0.228 \pm 28.007$ km
NIMAv12, RA düzeltmesi	$\Delta\alpha \cdot cos\delta = -4.024 \pm 0.704\ mas$
NIMAv12, DEC düzeltmesi	$\Delta\delta = 0.008 \pm 1.012\ mas$
Konum açısı	$P' = 23.805 \pm 14.277$ deg
En iyi fit χ^2	$\chi^2_{\rm min} = 7.425$
En iyi fit $\chi^2_{\rm pdf}$	$\chi^2_{\rm pdf} = 1.061$
2021-04-28 07:36:49.520 (UT) tarihindeki	**Ixion J2000 jeosentrik konumu**
RA	18 05 34.6795735 $\pm$ 0.737 mas
Dec	-30 09 09.742778 $\pm$ 1.022 mas



Şekil 4.38. 28 Nisan 2021 tarihli tüm kiriş giriş ve çıkış zamanlarına yapılmış elips fitleri

Şekil 4.38'de de görüldüğü üzere ASH-Cerro Burek (CAS) kirişi şekil üzerinde bir belirsizliğe yol açmaktadır. CAS konumu son derece düşük diyebileceğimiz bir zaman çözünürlüğü olan 10 saniyelik poz süresi ile 12.06 saniyelik poz döngüsü ile veri

kaydetmiştir. CAS'ın giriş zamanındaki belirsizlik 1.430 saniye ve çıkış zamanındaki belirsizlik ise 1.306 saniyedir. OP üzerindeki notlar kısmında zaman ölçümü ile ilgili bir uyarıya rastlanılmamasına rağmen bu kirişteki sapmanın topografik bir özellikten kaynaklandığını söylemek çok güçtür. Diğer taraftan *Reconquista (RECT)* ve *CAS* konumları haricinde Ixion gövdesine yapılan kenar fiti son derece uyumludur. Şekil 4.39'da da görüldüğü üzere *CAS* ve *RECT*'in yüksek değerli radyal dispersiyonları belirgin bir şekilde göze çarpmaktadır. Şimdiye kadar, Uranüs'ün 5 ana uydusu üzerinde 10 km seviyelerinde (Schenk ve Moore 2020) ve Plutino (208996) 2003 AZ_{84} üzerinde 13 km seviyelerinde topografik yüzeyler gözlendiği göz önünde bulundurularak > 40 km seviyelerinde topografik yüzeyin olması şüphe ile yaklaşılması gereken bir durumdur. Ayrıca *RECT* konumundaki gözlem de düşük zaman çözünürlüğü ile (poz döngüsü 5.30 s) yapılmıştır. Gözlem zaman senkronizasyonu ise bilgisayar üzerinden SNTP[99] ile yapılmıştır. Bu sebeple duyarlı bir zaman ölçümünün yapıldığını teyit edebileceğiniz yakın bir kiriş/kirişler olmamasından dolayı bu sapma da topografik özellik olarak yorumlanamamaktadır.

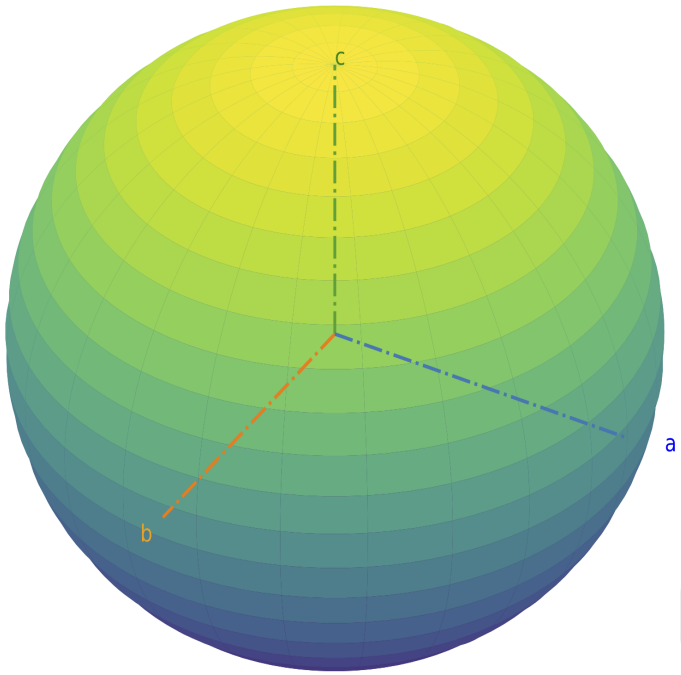


Şekil 4.39. 28 Nisan 2021 tarihli kirişlere yapılan elips fiti üzerindeki gölge dikine hızlarının radyal dispersiyonları

4.2.3. (28978) Ixion'un 3-Boyutlu şekli üzerine

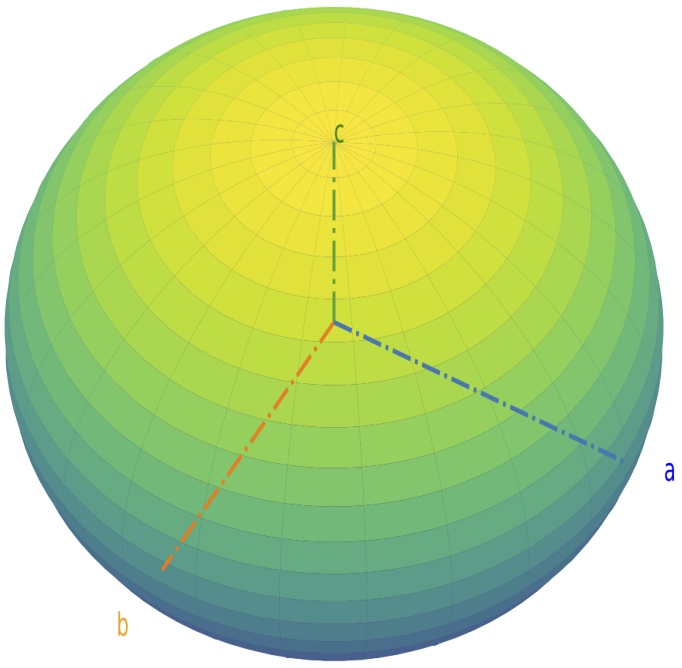
(28978) Ixion'un 3-boyutlu şeklinden söz edebilmek için öncelikle hidrostatik denge altında ele alabileceğimiz homojen yapıdaki 3 farklı denge şeklinden bahsetmekte yarar vardır. Bunlardan ilki Şekil 4.40'da da gösterildiği gibi yarı-eksenleri $a = b = c$ olmak üzere açısal momentumu olmayan ($L = 0$) *küresel denge* şeklidir.

[99] Simple Network Time Protocol



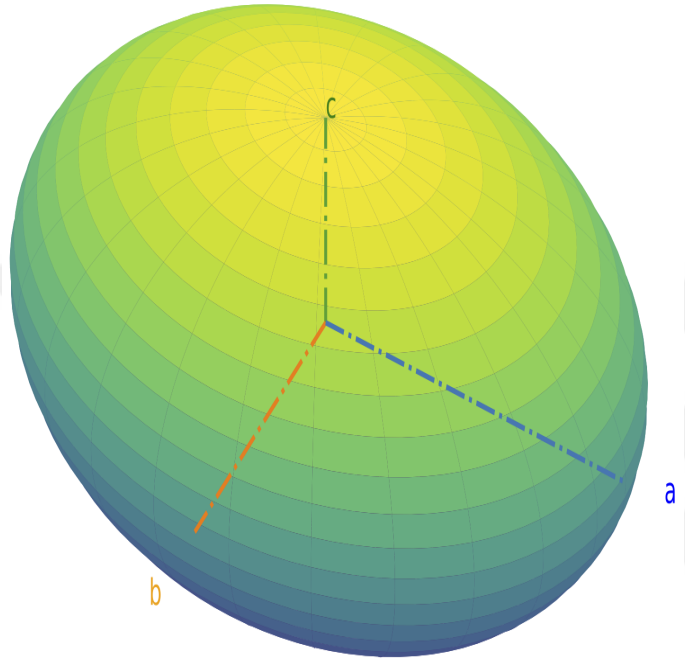
Şekil 4.40. Küresel denge şekli ($a = b = c$)

Hidrostatik dengedeki bir akışkan kendi ekseni etrafında dönmeye başlayınca ($L \neq 0$) Şekil 4.41'deki gibi MacLaurin küresi şeklini alır ($a = b > c$).



Şekil 4.41. MacLaurin küresi ($a = b > c$)

MacLaurin küresi şekli için, açısal momentum $L = 0.302 \times (GM^3\bar{a})^{1/2}$ değerine kadar korunur. Burada G kütleçekim sabitini, M akışkanın kütlesini ve $\bar{a}$ da $(a^2c)^{1/3}$ veya $(abc)^{1/3}$ ifadelerinden elde edilen küre ortalama çapını ifade etmektedir (Fernández-Valenzuela 2022). Bu noktadan sonra akışkan, matematiksel formülasyonu Chandrasekhar (1987)'da detaylandırıldığı üzere Jacobi elipsoidi şeklini alır ($a > b > c$) (bkz. Şekil 4.42).



Şekil 4.42. Jacobi elipsoidi ($a > b > c$)

13 Ekim 2020 ve 28 Nisan 2021 tarihlerinde elde edilen 2 boyutlu elips fitlerinden elde edilen parametreler, Ixion'un 3-boyutlu şekli hakkında küre veya MacLaurin küresi yaklaşımında bulunamayacağımızın işaretini vermektedirler. Her iki tarihten de elde edilen 2 boyutlu elipsler birbirlerinden farklıdır. Bu iki tarih aralığındaki geçen sürede Ixion'un kutup yöneliminde belirgin bir değişim olamayacağını varsayabiliriz. Bu şartlar altında, Ixion'un tıpkı Haumea (Ortiz vd. 2017) gibi 3-eksenli (triaxial) bir Jacobi elipsoidi şeklinde olduğu düşünülmektedir. Fakat, Ixion'un literatürde verilen dönemlerindeki büyük belirsizliklerin yanı sıra kutup koordinatları da henüz belli değildir. Bu durum, 13 Ekim 2020 ve 28 Nisan 2021 tarihlerinde elde ettiğimiz iki boyutlu elipsler arasında 3-boyutlu bir korelasyon yapmayı da imkansız hale getirmektedir.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen Occultation Portal (OP)'ın tüm teknik ve bilimsel özellikleri detayları ile birlikte anlatılmıştır. OP, *Veri hizmeti* ve *Veri analiz ve indirgeme hizmeti* ile yıldız örtülmeleri[100] alanında hizmet veren uluslararası ilk ve tek platform olmuş ve bu alandaki araştırmacı ve gözlemciler tarafından yaygın bir şekilde kullanılmaya başlamıştır (bkz. Bölüm 4.1). 8 Kasım 2022 tarihi itibarıyla, tüm dünyaya dağılmış 435 kullanıcı, 500'ün üzerinde tahmin ve 200'e yakın en az bir gözlemcinin katıldığı yıldız örtülme kampanyaları ile görülmektedir ki OP, yıldız örtülme kampanyaları için etkili ve verimli bir platform haline dönüşmüştür. Bölüm 4.1'de detaylıca verildiği üzere OP üzerinde gerçekleştirilen yıldız örtülme kampanyalarının güncel istatistiklerine yine https://occultation.tug.tubitak.gov.tr/statistics/ adresinden de erişilebilmektedir. OP'nin bu denli kullanılması ve rağbet görmesi, gelecekte çok daha fazla ve farklı bilişim altyapılarına ve özellikle veri bilimi yaklaşımlarına ihtiyaç duyulacağını göstermektedir. Özellikle *Gaia* kataloglarının yeni sürümleri ve *Rubin Gözlemevi (Eski adıyla LSST)* gibi muazzam büyük veri sağlayıcılarının çoğalması ile başarılı yıldız örtülme tahmin ve gözlemlerinin artacağı bu çalışma ile de bir kez daha gösterilmiştir. Bu sebeple OP'nin gelecekte IVOA[101] standartlarında (Arviset vd. 2010) veri arşivleyecek ve sunacak duruma getirilmesi yerinde bir seçenek olarak durmaktadır.

Başlangıçta OP sadece Lucky Star Projesi'nin gözlem kampanyalarını yönetebilmek için tasarlanmış özel bir platform olsa da, esnek yazılımsal mimarisi sayesinde Bölüm 2'de bahsedildiği gibi herhangi bir kurum ya da kuruluşun da kullanabileceği bir yıldız örtülme gözlemi veri arşiv ve analiz platformu haline dönüşmüştür. Buna en iyi örnek ACROSS Projesi verilebilir. Hatta bu amaçla, bu tez çalışması tamamlandığında OP'nin kaynak kodlarının, tüm bu grupların kendi başına (stand-alone) kullanabilmesi için özgür bir yazılım lisansı ile dağıtılması planlanmaktadır (ör. GNU GPLv3).

OP, TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi sunucuları üzerinden tüm dünyaya hizmet vermektedir. Fakat gelecekte, veri boyutunun artması ile, farklı kıta ve ülkelerdeki kullanıcıların bu verileri çok daha hızlı yükleyebilmesi veya erişebilmesi için yine farklı ülkelere (Brezilya, Fransa, İspanya) OP yansılarının kurulması da planlar arasında bulunmaktadır. Ayrıca diğer bir seçenek de, OP'nin yüksek erişilebilirlik[102] ve yüksek hata tolerans[103] değerlerinin sürdürülebilirliği için bulut platformlarına taşınabilmesi ihtimal dahilindedir. Fakat bu planların hepsi sürdürülebilir bir mali destek ile teknik ve bilimsel insan gücüne ihtiyaç duymaktadır.

[100] stellar occultations
[101] The International Virtual Observatory Alliance (IVOA)
[102] high availability
[103] fault tolerance

Yıldız örtülme kampanya gözlemleri için küçük teleskopların ne kadar önemli olduğu yine bu tez çalışmasıyla bir kez daha ortaya konmuştur. OP veri tabanında kayıtlı olan teleskopların $\%79$'unun 50 cm'den daha küçük açıklığa sahip olması bunun en iyi göstergelerinden biridir. Ayrıca OP veri tabanının yine detayları Bölüm 4.1'de verildiği üzere kullanıcı sayısı, konumu, GSN türü, örtülen yıldız parlaklıkları, teleskop çapı, teleskop türü, kamera türü gibi pek çok bilgileri barındırdığı bu çalışma ile gösterilmiştir. Ek olarak, dünyanın dört bir yanına dağılmış amatör ve profesyonel astronomu ortak bir platform üzerinde aynı bilimsel amaç doğrultusunda birleştiren OP'nin, küçük teleskopların yaptığı gözlemlerin değerlendirilmesine katkı sağlayarak toplum biliminin gelişmesine de olumlu bir katkı sağladığı düşünülmektedir. Diğer taraftan OP, GSN'lerin fiziksel özelliklerinin yıldız örtülmesi ile belirlenmesine yaptığı katkıların yanı sıra, GSN'lerin astrometrik konum bilgilerinin daha duyarlı hale getirilmesine de büyük katkı sağlamaktadır. Böylece, GSN'lerin yörünge parametreleri de iyileştirilmekte ve bu yörünge parametreleriyle üretilen efemerislerle, her geçen gün daha duyarlı yıldız örtülme gözlem tahminleri yapılması ihtimali artmaktadır.

OP'nin etkili ve verimli bir şekilde kullanıldığının tekil örneklerinden biri de bir Neptün-ötesi nesne olan (28978) Ixion'dur. Bu tez çalışması kapsamında Ixion'un OP üzerindeki 7 farklı yıldız örtülme gözlem kampanya gecesi incelenmiş ve bu gecelerden en fazla katılımlı iki gece olan 13 Ekim 2020 ve 28 Nisan 2021 tarihlerindeki tüm lokasyonların verileri OP ve SORA (v1.0) yazılımları ile analiz edilmiştir. Bu analizler sonucunda ilk defa (28978) Ixion'un nasıl bir şekle sahip olduğu bu çalışma ile detaylı bir şekide ortaya konulmuştur. Ixion'un ekvatoral çapı 13 Ekim 2020 ve 28 Nisan 2021 tarihli gözlemlere yapılan analizler ile sırasıyla 730.826 ± 7.246 km ve 714.290 ± 53.682 km bulunmuştur. Bu tez çalışmasında bulunan bu ekvatoral çaplar, daha önce Levine vd. (2021)'ın bulduğu 709.6 ± 0.2 km değerinden daha büyüktür. Levine vd. (2021)'ın elde ettiği kirişin de gözlem verilerine dahil edildiği bu çalışmada Ixion verileri ilk kez elde edilen bütüncül bir "şekil" ile yorumlanmış ve Ixion'un elipsoid bir yaklaşımla daha büyük bir boyuta sahip olduğu bulunmuştur. Diğer taraftan, 13 Ekim 2020 tarihinde Ixion tarafından örtülen, 10.311^m (*Gaia* EDR3 4056440205544338944) parlaklığındaki yıldızın 39.26 AB uzaklıktaki göreli yıldız çapı 19.09 ± 0.28 km (0.670 ± 0.010 mas) bulunmuştur. Bu değer Levine vd. (2021)'nin bulduğu 19.25 ± 0.3 km değerini doğrulamaktadır. *Gaia EDR3* 4056440205544338944 yıldızının paralaksı 0.5645 ± 0.0417 mas değerini ve bulduğumuz görünür yıldız çapı değerini kullanarak hesapladığımız yıldızın gerçek çapı ise 128 ± 25 $R_\odot$ olarak bulunmuştur. Bu değer de Levine vd. (2021)'nin bulduğu 130^{+20}_{-17} $R_\odot$ değerini doğrulamaktadır. Doğrudan ölçülen ve Levine vd. (2021)'ni doğruladığımız bu çap değeri M5 III türünden çok az sayıdaki ve uzaktaki yıldız için mevcut olduğundan önem taşımaktadır.

Son olarak, Ixion'un 13 Ekim 2020 tarihli ve 28 Nisan 2021 tarihli gözlemlerine yapılan iki boyutlu elips fitleri sonucunda farklı yüzey şekilleri elde edilmiştir. Bu

durum, Ixion'un tıpkı Haumea (Ortiz vd. 2017) gibi 3-eksenli bir Jacobi elipsoidi şeklinde olma ihtimalini güçlendirmektedir. Ayrıca özellikle 13 Ekim 2020 tarihli gözlemlerden elde edilen sonuçlarda, hem veri kalitesi hem de zaman duyarlılığındaki belirsizliklerin azlığından dolayı, Ixion'un yüzeyinde topografik özelliklere rastlanıldığı düşünülmektedir. 28 Nisan 2021 tarihli gözlemlerdeki zaman belirsizliğinin düşük olmasından dolayı bu savımızı güçlendirememekteyiz. Fakat OP üzerindeki diğer 5 gözlem kampanyası ve ayrıca gelecekte gerçekleştirilmesi planlanan yıldız örtülme kampanyalarıyla birlikte, hem bu savımızı destekleyecek hem de Ixion'un 3-boyutlu şekilini daha iyi ortaya koyabilecek bulgulara erişebileceğimizi düşünmekteyiz.

6. KAYNAKLAR

Alard, C. and Lupton, R. H. 1998. A Method for Optimal Image Subtraction. *The Astrophysical Journal*, 503.1, pp. 325–331.

Altenhoff, W. J., Bertoldi, F., and Menten, K. M. 2004. Size estimates of some optically bright KBOs. *Astronomy and Astrophysics*, 415, pp. 771–775.

Alvarez-Candal, A., Pinilla-Alonso, N., Ortiz, J. L., Duffard, R., Morales, N., Santos-Sanz, P., Thirouin, A., and Silva, J. S. 2016. Absolute magnitudes and phase coefficients of trans-Neptunian objects. *Astronomy and Astrophysics*, 586, A155, A155.

Anderson, B. 2019. PyMovie - A Stellar-Occultation Aperture-Photometry Program. *Journal for Occultation Astronomy*, 9.4, pp. 9–13.

Andrae, R. et al. 2018. Gaia Data Release 2. First stellar parameters from Apsis. *Astronomy and Astrophysics*, 616, A8, A8.

Arviset, C., Gaudet, S., and IVOA Technical Coordination Group. 2010. *IVOA Architecture Version 1.0*. IVOA Note 23 November 2010.

Assafin, M., Camargo, J. I. B., Vieira Martins, R., Andrei, A. H., Sicardy, B., Young, L., da Silva Neto, D. N., and Braga-Ribas, F. 2010. Precise predictions of stellar occultations by Pluto, Charon, Nix, and Hydra for 2008-2015. *Astronomy and Astrophysics*, 515, A32, A32.

Assafin, M., Camargo, J. I. B., Vieira Martins, R., Braga-Ribas, F., Sicardy, B., Andrei, A. H., and da Silva Neto, D. N. 2012. Candidate stellar occultations by large trans-Neptunian objects up to 2015. *Astronomy and Astrophysics*, 541, A142, A142.

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

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

Bailer-Jones, C. A. L., Rybizki, J., Fouesneau, M., Mantelet, G., and Andrae, R. 2018. Estimating Distance from Parallaxes. IV. Distances to 1.33 Billion Stars in Gaia Data Release 2. *Astronomical Journal*, 156.2, 58, p. 58.

Baines, E. K., Armstrong, J. T., Schmitt, H. R., Zavala, R. T., Benson, J. A., Hutter, D. J., Tycner, C., and van Belle, G. T. 2018. Fundamental Parameters of 87 Stars from the Navy Precision Optical Interferometer. *Astronomical Journal*, 155.1, 30, p. 30.

Baines, E. K., Döllinger, M. P., Guenther, E. W., Hatzes, A. P., Hrudkovu, M., and van Belle, G. T. 2016. Spectroscopic and Interferometric Measurements of Nine K Giant Stars. *Astronomical Journal*, 152.3, 66, p. 66.

Banda-Huarca, M. V. et al. 2019. Astrometry and Occultation Predictions to Trans-Neptunian and Centaur Objects Observed within the Dark Energy Survey. *The Astronomical Journal*, 157.3, 120, p. 120.

Barkume, K. M., Brown, M. E., and Schaller, E. L. 2008. Near-Infrared Spectra of Centaurs and Kuiper Belt Objects. *Astronomical Journal*, 135.1, pp. 55–67.

Barry, M. A. T., Gault, D., Pavlov, H., Hanna, W., McEwan, A., and Filipović, M. D. 2015. A Digital Video System for Observing and Recording Occultations. *Publications of the Astron. Soc. of Australia*, 32, e031, e031.

Baum, W. A. and Code, A. D. 1953. A photometric observation of the occultation of σ ARIETIS by Jupiter. *The Astronomical Journal*, 58, pp. 108–112.

Benedetti-Rossi, G. et al. 2016. Results from the 2014 November 15th Multi-chord Stellar Occultation by the TNO (229762) 2007 UK_{126}. *Astronomical Journal*, 152.6, 156, p. 156.

Benedetti-Rossi, G. et al. 2019. The Trans-Neptunian Object (84922) 2003 VS_2 through Stellar Occultations. *Astronomical Journal*, 158.4, 159, p. 159.

Beroiz, M., Cabral, J., and Sanchez, B. 2020. Astroalign: A Python module for astronomical image registration. *Astronomy and Computing*, 32, p. 100384.

Bertoldi, B., Altenhoff , W., and Junkes, N. 2002. *Beyond Pluto: Max-Planck radioastronomers measure the sizes of distant minor planets*. https://astro.uni-bonn.de/~bertoldi/press/kbo/pr_kbo_e.html. [Son erişim tarihi: 03.01.2023].

Binzel, R. P. and van Flandern, T. C. 1979. Minor Planets: The Discovery of Minor Satellites. *Science*, 203.4383, pp. 903–905.

Boehnhardt, H., Bagnulo, S., Muinonen, K., Barucci, M. A., Kolokolova, L., Dotto, E., and Tozzi, G. P. 2004. Surface characterization of 28978 Ixion (2001 KX_{76}). *Astronomy and Astrophysics*, 415, pp. L21–L25.

Bowell, E., McMahon, J., Horne, K., A'Hearn, M., Dunham, D., Penhallow, W., Taylor, G. E., Wasserman, L. H., and White, N. M. 1978. "A Possible Satellite of Herculina." *Bulletin of the American Astronomical Society*. Vol. 10, p. 594.

Bradley, L. et al. 2020. *astropy/photutils: 1.0.0*. Version 1.0.0.

Braga-Ribas, F. et al. 2013. The Size, Shape, Albedo, Density, and Atmospheric Limit of Transneptunian Object (50000) Quaoar from Multi-chord Stellar Occultations. *The Astrophysical Journal*, 773.1, 26, p. 26.

Braga-Ribas, F. et al. 2014. A ring system detected around the Centaur (10199) Chariklo. *Nature*, 508.7494, pp. 72–75.

Braga-Ribas, F. et al. 2019. "Database on detected stellar occultations by small outer Solar System objects." *Journal of Physics Conference Series*. Vol. 1365. Journal of Physics Conference Series, 012024, p. 012024.

Brosch, N. 1995. The 1985 stellar occultation by Pluto. *Monthly Notices of the RAS*, 276.2, pp. 571–578.

Brown, M. E. 2008. "The Largest Kuiper Belt Objects." *The Solar System Beyond Neptune*. Ed. by M. A. Barucci, H. Boehnhardt, D. P. Cruikshank, A. Morbidelli, and R. Dotson, p. 335.

Brown, M. 2022. *How many dwarf planets are there in the outer solar system? (updates daily)*. http://www.johnstonsarchive.net/astro/tnoslist.html. [Son erişim tarihi: 03.01.2023].

Brozović, M. et al. 2018. Goldstone and Arecibo radar observations of (99942) Apophis in 2012–2013. *Icarus*, 300, pp. 115–128.

Buie, M. 2022. *Orbit Fit and Astrometric record for 28978*. https://www.boulder.swri.edu/~buie/kbo/astrom/28978.html. [Son erişim tarihi: 03.01.2023].

Buie, M. W. et al. 2020. Size and Shape Constraints of (486958) Arrokoth from Stellar Occultations. *The Astronomical Journal*, 159.4, 130, p. 130.

Camargo, J. I. B., Vieira-Martins, R., Assafin, M., Braga-Ribas, F., Sicardy, B., Desmars, J., Andrei, A. H., Benedetti-Rossi, G., and Dias-Oliveira, A. 2014. Candidate stellar occultations by Centaurs and trans-Neptunian objects up to 2014. *Astronomy and Astrophysics*, 561, A37, A37.

Carlson, R. W., Bhattacharyya, J. C., Smith, B. A., Johnson, T. V., Hidayat, B., Smith, S. A., Taylor, G. E., O'Leary, B., and Brinkmann, R. T. 1973. An Atmosphere on Ganymede from Its Occultation of SAO 186800 on 7 June 1972. *Science*, 182.4107, pp. 53–55.

Chamberlin, A. 2022. *Near-Earth Asteroids (NEAs) versus time, Cumulative Totals*. https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html. [Son erişim tarihi: 03.01.2023].

Chandrasekhar, S. 1987. *Ellipsoidal Figures of Equilibrium*. Dover Books on Mathematics. Dover.

Colas, F. et al. 2012. "Shape and Size of (90) ANTIOPE Derived from an Exceptional Stellar Occultation on July 19, 2011." *Asteroids, Comets, Meteors 2012*. Ed. by LPI Editorial Board. Vol. 1667. LPI Contributions, 6427, p. 6427.

Cruikshank, D. P., Barucci, M. A., Emery, J. P., Fernández, Y. R., Grundy, W. M., Noll, K. S., and Stansberry, J. A. 2007. "Physical Properties of Transneptunian Objects." *Protostars and Planets V*. Ed. by B. Reipurth, D. Jewitt, and K. Keil, p. 879.

Cunningham, C. J. 2017. "The Discovery of Juno." *Bode's Law and the Discovery of Juno: Historical Studies in Asteroid Research*. Cham: Springer International Publishing, pp. 37–61.

D'Aversa, E., Oliva, F., Sindoni, G., Hinse, T. C., Plainaki, C., Aoki, S., Person, M. J., Carlson, R. W., and Orton, G. S. 2017. "A stellar occultation by Ganymede." *European Planetary Science Congress*, EPSC2017-850, EPSC2017–850.

de Vaucouleurs, G. and Menzel, D. H. 1960. Results of the Occultation of Regulus by Venus, July 7, 1959. *Nature*, 188.4744, pp. 28–33.

Desmars, J., Bancelin, D., Hestroffer, D., and Thuillot, W. 2011. "Statistical analysis on the uncertainty of asteroid ephemerides." *SF2A-2011: Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics*. Ed. by G. Alecian, K. Belkacem, R. Samadi, and D. Valls-Gabaud, pp. 639–642.

Desmars, J. et al. 2015. Orbit determination of trans-Neptunian objects and Centaurs for the prediction of stellar occultations. *Astronomy and Astrophysics*, 584, A96, A96.

Desmars, J. et al. 2019. Pluto's ephemeris from ground-based stellar occultations (1988-2016). *Astronomy and Astrophysics*, 625, A43, A43.

Desmars, J. 2022. *NIMA ephemeris for selected TNOs and Centaurs*. https://lesia.obspm.fr/lucky-star/obj.php?p=953. [Son erişim tarihi: 03.01.2023].

Dias-Oliveira, A. et al. 2017. Study of the Plutino Object (208996) 2003 AZ_{84} from Stellar Occultations: Size, Shape, and Topographic Features. *Astronomical Journal*, 154.1, 22, p. 22.

Dobrovol'Skij, O. V., Kiselev, N. N., Narizhnaya, N. V., Chernova, G. P., Gerasimenko, S. I., Rakhimov, V., Najmov, O., Tup'eva, F. A., and Masumi, F. 1980. Occultation of AGK3 +19 599 by (65) Cybele. *IAU Cirulars*, 3439, p. 2.

Doressoundiram, A., Peixinho, N., Moullet, A., Fornasier, S., Barucci, M. A., Beuzit, J. .-., and Veillet, C. 2007. The Meudon Multicolor Survey (2MS) of Centaurs and Trans-Neptunian Objects: From Visible to Infrared Colors. *Astronomical Journal*, 134.6, pp. 2186–2199.

Dunham, D. W. 1979. Early 1979 asteroidal occultations. *Occultation Newsletter, International Occultation Timing Association (IOTA)*, 2, pp. 56–57.

— 1979. Other late 1978 asteroidal occultations. *Occultation Newsletter, International Occultation Timing Association (IOTA)*, 2, pp. 24–25.

— 1980. Asteroidal occultations. *Occultation Newsletter, International Occultation Timing Association (IOTA)*, 2, pp. 84–87.

— 1981. Recently-observed planetary occultations. *Occultation Newsletter, International Occultation Timing Association (IOTA)*, 2, pp. 139–143.

Dunham, D. W., Dunham, J. B., Buie, M., Preston, S., Herald, D., and Farnocchia, D. 2019. "(3200) Phaethon, First Successful Occultation Observations of a Small Near-Earth Object." *Asteroid Science in the Age of Hayabusa2 and OSIRIS-REx*. Vol. 2189. LPI Contributions, 2062, p. 2062.

Dunham, D. W., Goffin, E., Manek, J., Federspiel, M., Stone, R., and Owen, W. 2002. Asteroidal occultation results multiply helped by Hipparcos. *Mem. Societa Astronomica Italiana*, 73.3, p. 662.

— 2002. Asteroidal occultation results multiply helped by Hipparcos. *Mem. Societa Astronomica Italiana*, 73.3, p. 662.

Dunham, D. W. and Hirose, T. 1979. Satellites of (9) Metis? *Occultation Newsletter, International Occultation Timing Association (IOTA)*, 2, pp. 34–35.

Dunham, D. W. and Sheffer, Y. 1979. Juno larger than expected: probable graze by distant satellite. *Occultation Newsletter, International Occultation Timing Association (IOTA)*, 2, p. 12.

Elliot, J. L. 1979. Stellar occultation studies of the solar system. *Annual Review of Astron and Astrophys*, 17, pp. 445–475.

Elliot, J. L., Dunham, E., and Mink, D. 1977. The rings of Uranus. *Nature*, 267.5609, pp. 328–330.

Elliot, J. L., French, R. G., Dunham, E., Gierasch, P. J., Veverka, J., Church, C., and Sagan, C. 1977. Occultation of epsilon Geminorum by Mars. II. The structure and extinction of the Martian upper atmosphere. *The Astrophysical Journal*, 217, pp. 661–679.

Elliot, J. L. and Olkin, C. B. 1996. Probing Planetary Atmospheres with Stellar Occultations. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 24, pp. 89–124.

Elliot, J. L. and Young, L. A. 1992. Analysis of Stellar Occultation Data for Planetary Atmospheres. I. Model Fitting Application to Pluto. *Astronomical Journal*, 103, p. 991.

Elliot, J. L. et al. 2010. Size and albedo of Kuiper belt object 55636 from a stellar occultation. *Nature*, 465.7300, pp. 897–900.

Eurocommuter. 2022. *Orbits and sizes of the larger plutinos (and the reference non-plutino 2002 KX14)*. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TheKuiperBelt_60AU_LargePlutinos.svg. [Son erişim tarihi: 03.01.2023].

Fabry, C. 1929. Le rôle des Atmosphères dans les Occultations par les Planètes. *Journal des Observateurs*, 12, p. 1.

Fernández-Valenzuela, E. 2022. Modeling Long-Term Photometric Data of Trans-Neptunian Objects and Centaurs. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 9.

Ferreira, J. F., Tanga, P., Spoto, F., Machado, P., and Herald, D. 2022. Asteroid astrometry by stellar occultations: Accuracy of the existing sample from orbital fitting. *Astronomy and Astrophysics*, 658, A73, A73.

Ferreira, J. 2020. A new approach to stellar occultations in the Gaia era. *Doktora Tezi*, pp. 1–232.

French, R. G., Elliot, J. L., Sicardy, B., Nicholson, P., and Matthews, K. 1982. The upper atmosphere of Uranus: A critical test of isotropic turbulence models. *Icarus*, 51.3, pp. 491–508.

Gaia Collaboration et al. 2016. Gaia Data Release 1. Summary of the astrometric, photometric, and survey properties. *Astronomy and Astrophysics*, 595, A2, A2.

Gaia Collaboration et al. 2018. Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties. *Astronomy and Astrophysics*, 616, A1, A1.

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

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

Galiazzo, M., de la Fuente Marcos, C., de la Fuente Marcos, R., Carraro, G., Maris, M., and Montalto, M. 2016. Photometry of Centaurs and trans-Neptunian objects: 2060 Chiron (1977 UB), 10199 Chariklo (1997 CU_{26}), 38628 Huya (2000 EB_{173}), 28978 Ixion (2001 KX_{76}), and 90482 Orcus (2004 DW). *Astrophysics and Space Science*, 361.7, 212, p. 212.

Giritli, İ. 1974. *Kemalist Devrim ve İdeolojisi*. Atatürk Devrimleri Araştırma Enstitüsü Yayınları. İstanbul Üniversitesi Atatürk Devrimleri Araştırma Enstitüsü.

Gleaves, A. M. 2012. *A Survey of Mission Opportunities to Trans-Neptunian Objects – Part II*. https://trace.tennessee.edu/utk_chanhonoproj/1503/. [Son erişim tarihi: 03.01.2023].

Gomes-Júnior, A. R. et al. 2019. The first observed stellar occultations by the irregular satellite Phoebe (Saturn IX) and improved rotational period. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 492.1, pp. 770–781.

Gomes-Júnior, A. R., Assafin, M., Beauvalet, L., Desmars, J., Vieira-Martins, R., Camargo, J. I. B., Morgado, B. E., and Braga-Ribas, F. 2016. New orbits of irregular satellites designed for the predictions of stellar occultations up to 2020, based on thousands of new observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 462.2, pp. 1351–1358.

Gomes-Júnior, A. R., Morgado, B. E., Benedetti-Rossi, G., Boufleur, R. C., Rommel, F. L., Banda-Huarca, M. V., Kilic, Y., Braga-Ribas, F., and Sicardy, B. 2022. SORA: Stellar occultation reduction and analysis. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 511.1, pp. 1167–1181.

Gomes-Júnior, A. R. et al. 2015. Results of two multichord stellar occultations by dwarf planet (1) Ceres. *Monthly Notices of the RAS*, 451.3, pp. 2295–2302.

Grundy, W. 2022. *Quaoar and Weywot (50000 2002 LM60)*. http://www2.lowell.edu/users/grundy/tnbs/50000_2002_LM60_Quaoar.html. [Son erişim tarihi: 03.01.2023].

Grundy, W., Noll, K., Buie, M., Benecchi, S., Ragozzine, D., and Roe, H. 2019. The mutual orbit, mass, and density of transneptunian binary G!kúnll'hòmdímà (229762 2007 UK126). *Icarus*, 334. The Trans-Neptunian Solar System, pp. 30–38.

Grundy, W., Noll, K., and Stephens, D. 2005. Diverse albedos of small trans-neptunian objects. *Icarus*, 176.1, pp. 184–191.

Hahn, G., Muinonen, K., Claes-Ingvar, L., Christensen, L. L., and West, R. 2001. *Virtual Telescope Observes Record-Breaking Asteroid*. ESO Press Release, 08/2001.

Hanbury Brown, R., Davis, J., Lake, R. J. W., and Thompson, R. J. 1974. The Effects of Limb Darkening on Measurements of Angular Size with an Intensity

Interferometer. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 167.3, pp. 475–484.

Harari, Y. 2015. *Sapiens: A Brief History of Humankind*. HarperCollins.

Harten, R. H., Grosbol, P., Greisen, E. W., and Wells, D. C. 1988. The FITS tables extension. *Astronomy and Astrophysics, Supplement*, 73.3, pp. 365–372.

Herald, D. et al. 2020. Precise astrometry and diameters of asteroids from occultations – a data set of observations and their interpretation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 499.3, pp. 4570–4590.

Herschel, W. 1802. Observations on the Two Lately Discovered Celestial Bodies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series I*, 92, pp. 213–232.

Huckvale, L., Kerins, E., and Sale, S. E. 2014. Reference image selection for difference imaging analysis*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 442.1, pp. 259–272.

Ivezić, Ž. et al. 2019. LSST: From Science Drivers to Reference Design and Anticipated Data Products. *The Astrophysical Journal*, 873.2, 111, p. 111.

Johnston, W. R. 2022. *List of Known Trans-Neptunian Objects*. http : / / www . johnstonsarchive . net / astro / tnoslist . html. [Son erişim tarihi: 03.01.2023].

Kervella, P., Thévenin, F., Di Folco, E., and Ségransan, D. 2004. The angular sizes of dwarf stars and subgiants. Surface brightness relations calibrated by interferometry. *Astronomy and Astrophysics*, 426, pp. 297–307.

Kilic, Y. et al. 2022. Occultation portal: A web-based platform for data collection and analysis of stellar occultations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 515.1, pp. 1346–1357.

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

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

Klemola, A. R. and Marsden, B. G. 1977. Predicted occultations by the rings of Uranus, 1977 - 1980. *Astronomical Journal*, 82, pp. 849–851.

Kovács, G., Zucker, S., and Mazeh, T. 2002. A box-fitting algorithm in the search for periodic transits. *Astronomy and Astrophysics*, 391, pp. 369–377.

Kristensen, L. K. 1981. The Size of 51 NEMAUSA. *Astronomy and Astrophysics, Supplement*, 44, pp. 375–377.

Lang, D., Hogg, D. W., Mierle, K., Blanton, M., and Roweis, S. 2010. Astrometry.net: Blind astrometric calibration of arbitrary astronomical images. *The Astronomical Journal*, 137. arXiv:0910.2233, pp. 1782–2800.

Leiva, R. et al. 2017. Size and Shape of Chariklo from Multi-epoch Stellar Occultations. *Astronomical Journal*, 154.4, 159, p. 159.

Lellouch, E. et al. 2013. "TNOs are Cool": A survey of the trans-Neptunian region. IX. Thermal properties of Kuiper belt objects and Centaurs from combined Herschel and Spitzer observations. *Astronomy and Astrophysics*, 557, A60, A60.

Levine, S. E., Zuluaga, C. A., Person, M. J., Sickafoose, A. A., Bosh, A. S., and Collins, M. 2021. Occultation of a Large Star by the Large Plutino (28978) Ixion on 2020 October 13 UTC. *Astronomical Journal*, 161.5, 210, p. 210.

Licandro, J., Ghinassi, F., and Testi, L. 2002. Infrared spectroscopy of the largest known trans-Neptunian object 2001 KX_{76}. *Astronomy and Astrophysics*, 388, pp. L9–L12.

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

Lykawka, P. S. and Mukai, T. 2008. An Outer Planet Beyond Pluto and the Origin of the Trans-Neptunian Belt Architecture. *The Astronomical Journal*, 135.4, pp. 1161–1200.

Maley, P. D. 1982. Asteroid Occultations - A 1981 Status Report. *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica*, 5.3, p. 213.

Mandel, E. and Vikhlinin, A. 2020. ericmandel/js9 v3.0 upgrade to ES6, add rot90, flip, and more. *Zenodo*, v3.0.

Millis, R. L., Wasserman, L. H., Franz, O. G., and Bowell, E. 1982. "The Occultation Diameter of 88 Thisbe." *Bulletin of the American Astronomical Society*. Vol. 14, p. 725.

Millis, R. L. et al. 1981. The diameter of Juno from its occultation of AG + 0 deg 1022. *The Astronomical Journal*, 86, pp. 306–313.

Millis, R., Elliot, J., Wasserman, L., and Isbell, D. 2001. *Kuiper Belt Object Found Possibly as Large as Pluto's Moon*. https://noirlab.edu/public/news/noao0110/. [Son erişim tarihi: 03.01.2023].

Mommert, M. 2013. "Remnant Planetesimals and their Collisional Fragments." PhD thesis.

Mooney, C. Z. 1997. *Monte Carlo simulation*. Thousand Oaks, Calif. : Sage Publications, [1997] ©1997.

Morbidelli, A., Levison, H. F., and Gomes, R. 2008. "The Dynamical Structure of the Kuiper Belt and Its Primordial Origin." *The Solar System Beyond Neptune*. Ed. by M. A. Barucci, H. Boehnhardt, D. P. Cruikshank, A. Morbidelli, and R. Dotson. arXiv, p. 275.

Morgado, B. et al. 2019. First stellar occultation by the Galilean moon Europa and upcoming events between 2019 and 2021. *Astronomy and Astrophysics*, 626, L4, p. L4.

Morgado, B. E. et al. 2021. Refined physical parameters for Chariklo's body and rings from stellar occultations observed between 2013 and 2020. *Astronomy and Astrophysics*, 652, A141, A141.

Morgado, B. E. et al. 2022. A stellar occultation by the transneptunian object (50000) Quaoar observed by CHEOPS. *Astronomy and Astrophysics*, 664, L15, p. L15.

Murray, B. and Smith, A. 2021. *Global Cloud Services spend hits record US$49.4 billion in Q3 2021*. https://www.canalys.com/newsroom/global-cloud-services-q3-2021. [Son erişim tarihi: 03.01.2023].

Nordgren, T. E. et al. 1999. Stellar Angular Diameters of Late-Type Giants and Supergiants Measured with the Navy Prototype Optical Interferometer. *Astronomical Journal*, 118.6, pp. 3032–3038.

Oleary, B., Marsden, B. G., Dragon, R., Hauser, E., McGrath, M., Backus, P., and Robkoff, H. 1976. The Occultation of κ Geminorum by Eros. *Icarus*, 28.1, pp. 133–146.

Ortiz, J. L., Duffard, R., Pinilla-Alonso, N., Alvarez-Candal, A., Santos-Sanz, P., Morales, N., Fernández-Valenzuela, E., Licandro, J., Campo Bagatin, A., and Thirouin, A. 2015. Possible ring material around centaur (2060) Chiron. *Astronomy and Astrophysics*, 576, A18, A18.

Ortiz, J. L., Gutiérrez, P. J., Casanova, V., and Sota, A. 2003. A study of short term rotational variability in TNOs and Centaurs from Sierra Nevada Observatory. *Astronomy and Astrophysics*, 407, pp. 1149–1155.

Ortiz, J. L. et al. 2017. The size, shape, density and ring of the dwarf planet Haumea from a stellar occultation. *Nature*, 550.7675, pp. 219–223.

Ortiz, J. L. et al. 2020. The large trans-Neptunian object 2002 TC_{302} from combined stellar occultation, photometry, and astrometry data. *Astronomy and Astrophysics*, 639, A134, A134.

Pannekoek, A. 1903. Über die Erscheinungen, welche bei einer Sternbedeckung durch einen Planeten auftreten. *Astronomische Nachrichten*, 164.1, p. 5.

Park, R. S. et al. 2016. A partially differentiated interior for (1) Ceres deduced from its gravity field and shape. *Nature*, 537.7621, pp. 515–517.

Paunov, C., Guellec, D., El-Mallakh, N., Planes-Satorra, S., and Nüse, L. 2019. On the concentration of innovation in top cities in the digital age. *OECD Science, Technology and Industry Policy Papers*, 85.

Pavlov, H. 2018. Becoming an Expert OccultWatcher User - Part 1. *Journal for Occultation Astronomy*, 8.2, pp. 12–15.

Pavlov, H. 2018. Becoming an Expert OccultWatcher User - Part 2. *Journal for Occultation Astronomy*, 8.3, pp. 8–12.

Pavlov, H., Anderson, R., Barry, T., Gault, D., Glover, R., Meister, S., and Schweizer, A. 2020. The Astronomical Digital Video (ADV) Data Format. *Journal for Occultation Astronomy*, 10.3, pp. 8–12.

Pence, W. D., Chiappetti, L., Page, C. G., Shaw, R. A., and Stobie, E. 2010. Definition of the Flexible Image Transport System (FITS), version 3.0. *Astronomy and Astrophysics*, 524, A42.

Piazzi, G. 1802. *Della scoperta del nuovo pianeta Cerere Ferdinandea, ottavo tra i primari del nostro sistema solare*.

Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., and Flannery, B. P. 2007. *Numerical Recipes 3rd Edition: The Art of Scientific Computing*. 3rd ed. USA: Cambridge University Press.

Rommel, F. L. et al. 2021. "Evidence of topographic features on (307261) 2002 MS4 surface." *European Planetary Science Congress*, EPSC2021-440, EPSC2021–440.

Roques, F., Moncuquet, M., and Sicardy, B. 1987. Stellar occultations by small bodies - Diffraction effects. *Astronomical Journal*, 93, pp. 1549–1558.

Roques, F. et al. 1994. Neptune's upper stratosphere, 1983-1990: ground-based stellar occultation observations III. Temperature profiles. *The Astronomy and Astrophysics*, 288, pp. 985–1011.

Rousselot, P. and Petit, J. 2010. "Photometric Study Of 28978 Ixion At Small Phase Angle." *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #42*. Vol. 42. AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts, 40.19, p. 40.19.

Sanchez, M. 2022. *Didymos occultation*. https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2022/10/Didymos_occultation. [Son erişim tarihi: 03.01.2023].

Santos-Sanz, P. et al. 2022. Physical properties of the trans-Neptunian object (38628) Huya from a multi-chord stellar occultation. *Astronomy and Astrophysics*, 664, A130, A130.

Schaller, E. L. and Brown, M. E. 2007. Detection of Methane on Kuiper Belt Object (50000) Quaoar. *Astrophysical Journal, Letters*, 670.1, pp. L49–L51.

Schenk, P. M. and Moore, J. M. 2020. Topography and geology of Uranian mid-sized icy satellites in comparison with Saturnian and Plutonian satellites. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, 378.2187, 20200102, p. 20200102.

Sheppard, S. S. and Jewitt, D. C. 2003. Hawaii Kuiper Belt Variability Project: An Update. *Earth Moon and Planets*, 92.1, pp. 207–219.

Sicardy, B. et al. 1990. Probing Titan's atmosphere by stellar occultation. *Nature*, 343.6256, pp. 350–353.

Sicardy, B. et al. 2011. A Pluto-like radius and a high albedo for the dwarf planet Eris from an occultation. *Nature*, 478.7370, pp. 493–496.

Sommer, M. et al. 2020. "Destiny+ Dust Analyzer - Campaign & timeline preparation for interplanetary & interstellar dust observation during the 4-year transfer phase from Earth to Phaethon." *European Planetary Science Congress*, EPSC2020-342, EPSC2020–342.

Souami, D. et al. 2020. A multi-chord stellar occultation by the large trans-Neptunian object (174567) Varda. *Astronomy and Astrophysics*, 643, A125, A125.

Spencer, J. R. et al. 2020. The geology and geophysics of Kuiper Belt object (486958) Arrokoth. *Science*, 367.6481, eaay3999.

Stansberry, J., Grundy, W., Brown, M., Cruikshank, D., Spencer, J., Trilling, D., and Margot, J. .-. 2008. "Physical Properties of Kuiper Belt and Centaur Objects: Constraints from the Spitzer Space Telescope." *The Solar System Beyond Neptune*. Ed. by M. A. Barucci, H. Boehnhardt, D. P. Cruikshank, A. Morbidelli, and R. Dotson, p. 161.

Stansberry, J. A., Cruikshank, D. P., Grundy, W. G., Margot, J. L., Emery, J. P., Fernandez, Y. R., and Rieke, G. H. 2005. "Albedos, Diameters (and a Density) of Kuiper Belt and Centaur Objects." *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #37*. Vol. 37. AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts, 52.05, p. 52.05.

Stern, S. A. et al. 2019. Initial results from the New Horizons exploration of 2014 MU_{69}, a small Kuiper Belt object. *Science*, 364.6441, aaw9771, aaw9771.

Stetson, P. B. 1987. DAOPHOT: A Computer Program for Crowded-Field Stellar Photometry. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 99, p. 191.

Tancredi, G. 2010. "Physical and dynamical characteristics of icy "dwarf planets" (plutoids)." *Icy Bodies of the Solar System*. Ed. by J. A. Fernandez, D. Lazzaro, D. Prialnik, and R. Schulz. Vol. 263, pp. 173–185.

Tancredi, G. and Favre, S. 2008. Which are the dwarfs in the Solar System? *Icarus*, 195.2, pp. 851–862.

Tanga, P. et al. 2021. *Apophis' Yarkovsky acceleration improved through stellar occultation*. https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/iow_20210329. [Son erişim tarihi: 03.01.2023].

Tanga, P., Tsiganis, K., Spoto, F., Ferreira, J., Souami, D., and Bouquillon, S. 2021. "Stellar occultations by NEAs: challenges and opportunities." *7th IAA Planetary Defense Conference*, 116, p. 116.

Taylor, G. E. 1962. Diameters of minor planets. *The Observatory*, 82, pp. 17–20.

— 1976. Oblateness of the atmosphere of Mars. *Nature*, 264.5582, pp. 160–161.

Taylor, G. E. and Dunham, D. W. 1978. The size of minor planet 6 Hebe. *Icarus*, 34.1, pp. 89–92.

Taylor, G. E. 1970. The occultation of B.D. -17'4388 by Neptune on April 7, 1968. *Monthly Notices of the RAS*, 147, p. 27.

Tody, D. 1986. "The IRAF Data Reduction and Analysis System." *Instrumentation in astronomy VI*. Ed. by D. L. Crawford. Vol. 627. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, p. 733.

Uluç, K., Khamitov, I., Özişik, T., Bikmaev, I., Aslan, Z., and Tunca, Z. 2007. "First Results from Photometry and Astrometry of Selected Minor Planets at TÜBITAK National Observatory." *Solar and Stellar Physics Through Eclipses*. Ed. by O. Demircan, S. O. Selam, and B. Albayrak. Vol. 370. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, p. 358.

Vachier, F., Berthier, J., and Marchis, F. 2012. Determination of binary asteroid orbits with a genetic-based algorithm. *Astronomy and Astrophysics*, 543, A68, A68.

van Belle, G. T. 1999. Predicting Stellar Angular Sizes. *Publications of the ASP*, 111.766, pp. 1515–1523.

Vapillon, L., Combes, M., and Lecacheux, J. 1973. The beta Scorpii occultation by Jupiter. II. The temperature and density profiles of the Jupiter upper atmosphere. *Astronomy and Astrophysics*, 29, p. 135.

Verbiscer, A. J. et al. 2022. The Diverse Shapes of Dwarf Planet and Large KBO Phase Curves Observed from New Horizons. *The Planetary Science Journal*, 3.4, 95, p. 95.

Veverka, J., Elliot, J., Sagan, C., and Wasserman, L. 1972. Jupiter Occultation of Beta Scorpii: Are the Flashes Time-symmetric? *Nature*, 240.5380, pp. 344–345.

Vilenius, E. et al. 2012. "TNOs are Cool": A survey of the trans-Neptunian region. VI. Herschel/PACS observations and thermal modeling of 19 classical Kuiper belt objects. *Astronomy and Astrophysics*, 541, A94, A94.

Wasserman, L. and Veverka, J. 1973. On the reduction of occultation light curves. *Icarus*, 20.3, pp. 322–345.

Wasserman, L. H. et al. 1979. The diameter of Pallas from its occultation of SAO 85009. *The Astronomical Journal*, 84, pp. 259–268.

Weaver, H. A. et al. 2020. In-flight Performance and Calibration of the LOng Range Reconnaissance Imager (LORRI) for the New Horizons Mission. *Publications of the ASP*, 132.1009, 035003, p. 035003.

Wells, D. C., Greisen, E. W., and Harten, R. H. 1981. FITS - a Flexible Image Transport System. *Astronomy and Astrophysics, Supplement*, 44, p. 363.

White, N. M. and Feierman, B. H. 1987. A Catalog of Stellar Angular Diameters Measured by Lunar Occultation. *Astronomical Journal*, 94, p. 751.

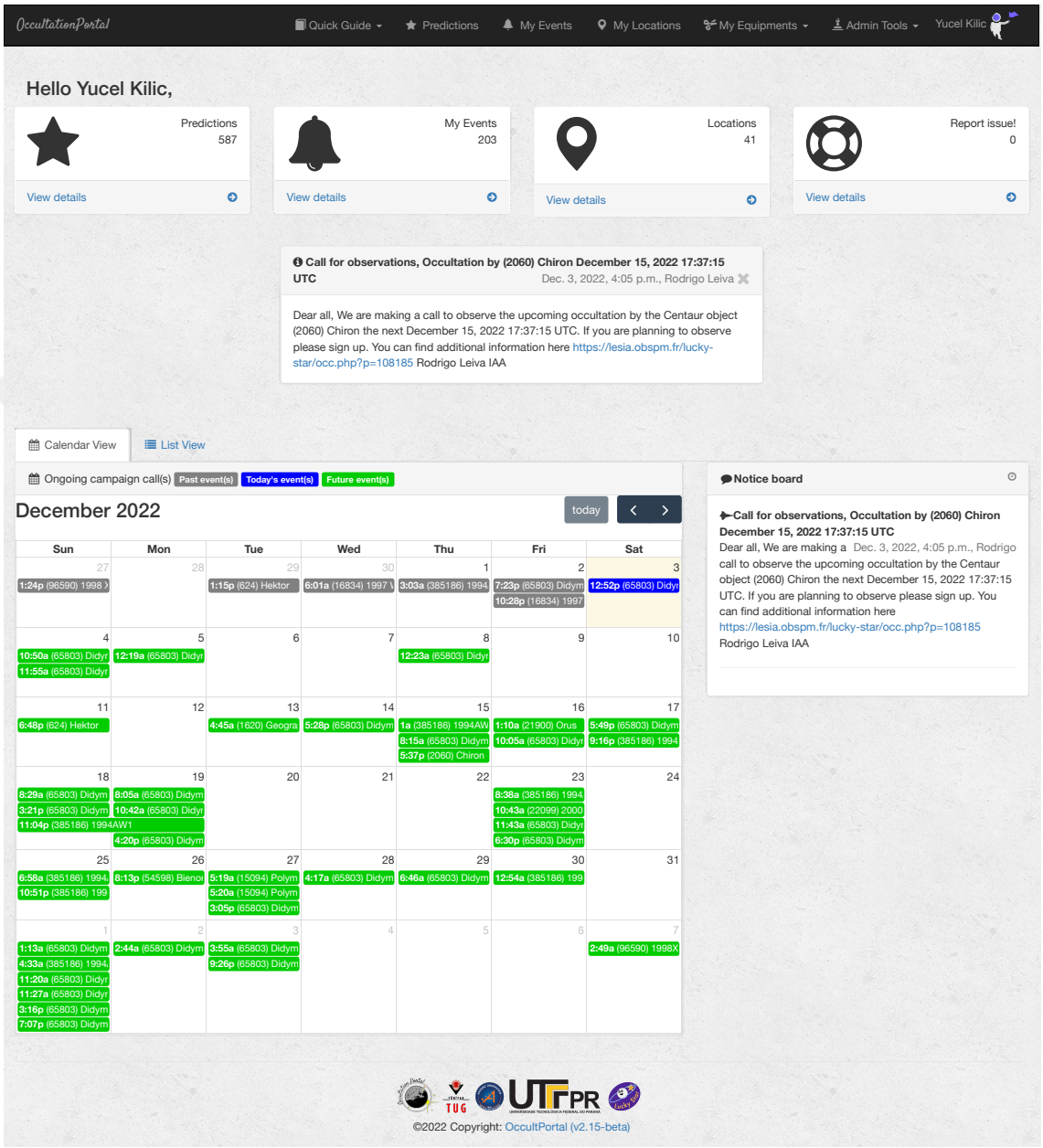
Widemann, T. et al. 2009. Titania's radius and an upper limit on its atmosphere from the September 8, 2001 stellar occultation. *Icarus*, 199.2, pp. 458–476.

Williamon, R. M. 1980. Observation of a secondary extinction during the occultation of SAO 114159 by (18) Melpomene. *The Astronomical Journal*, 85, pp. 174–176.

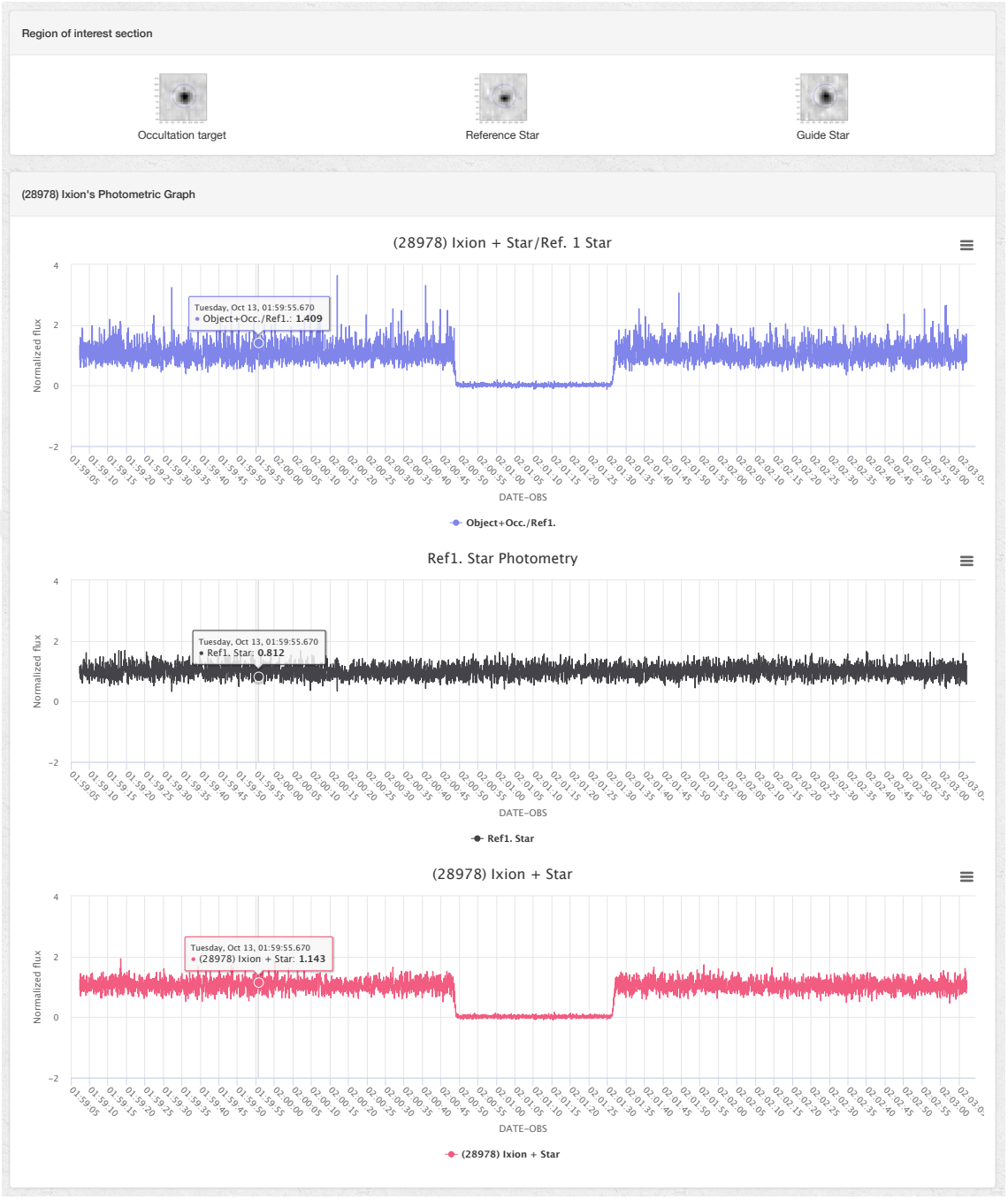
Yoshida, F. et al. 2022. Multi-chord observation of stellar occultation by the near-Earth asteroid (3200) Phaethon on 2021 October 3 (UTC) with very high accuracy. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, psac096.

7. EKLER

EK-1. Occultation Portal güncel sürümü (v2.15-beta) görselleri

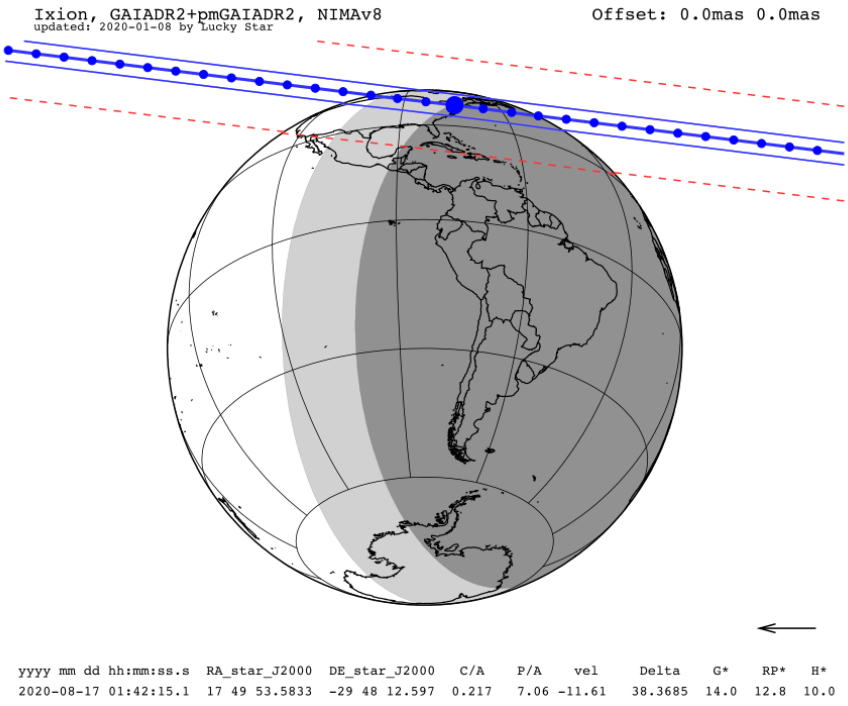


Şekil 7.1. Occultation Portal anasayfası

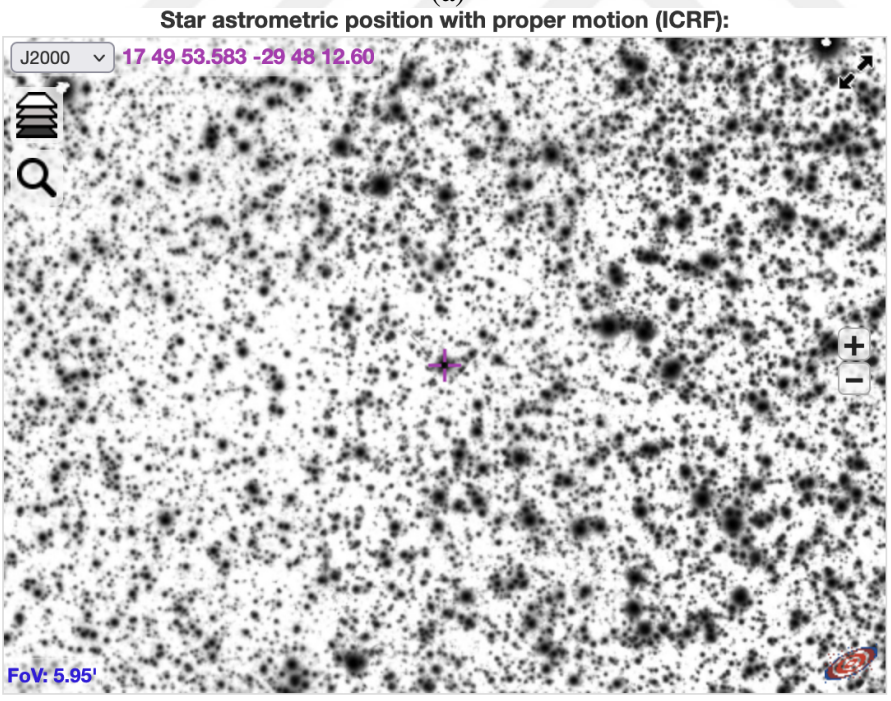


Şekil 7.2. Occultation Portal ışık eğrisi görüntüleme sayfası

EK-2. (28978) Ixion'un öngörülen örtülme hattı haritaları

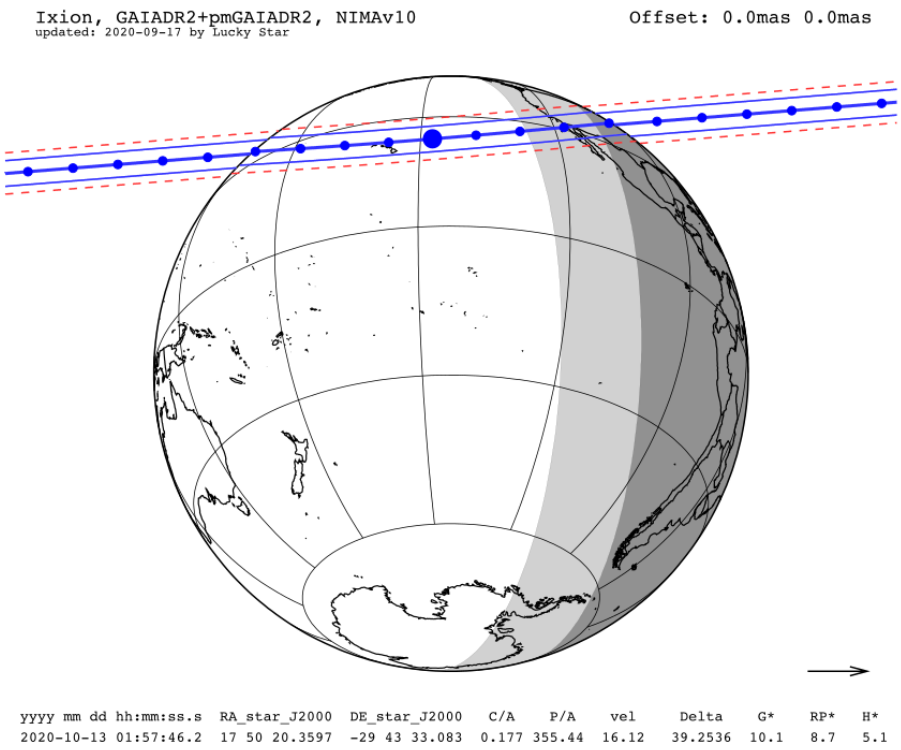


(a)

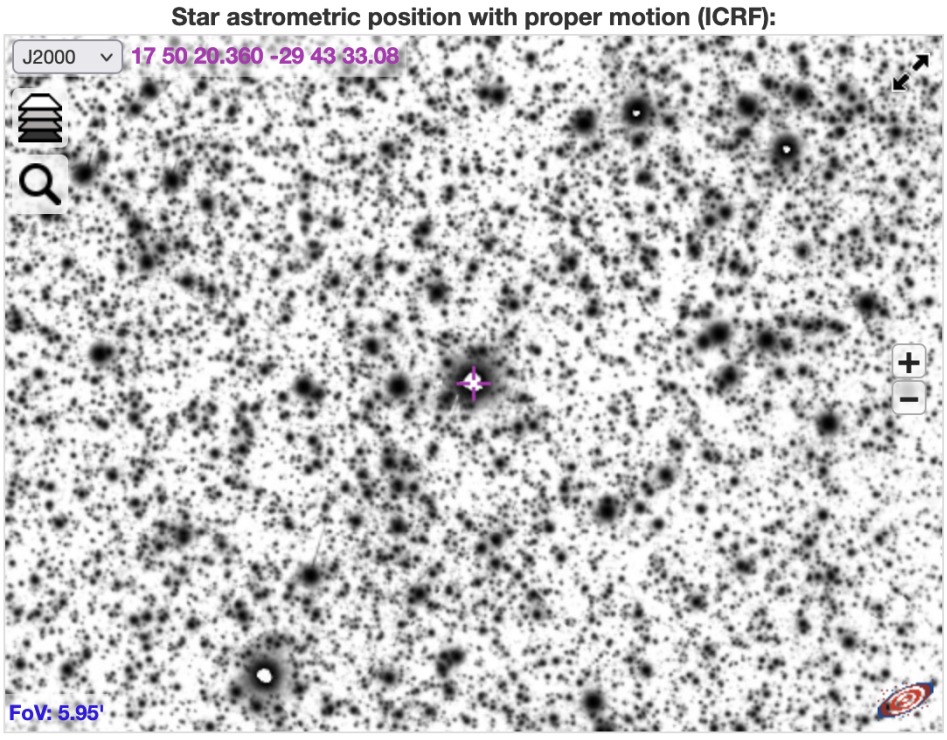


(b)

Şekil 7.3. **(a)** 17 Ağustos 2020 tarihli Ixion'un öngörülen örtülme hattı haritası (NIMAv8); **(b)** 17 Ağustos 2020 tarihli Ixion'un örteceği öngörülen yıldız (Aladin Sky Atlas, PanSTARRS DR1 z)

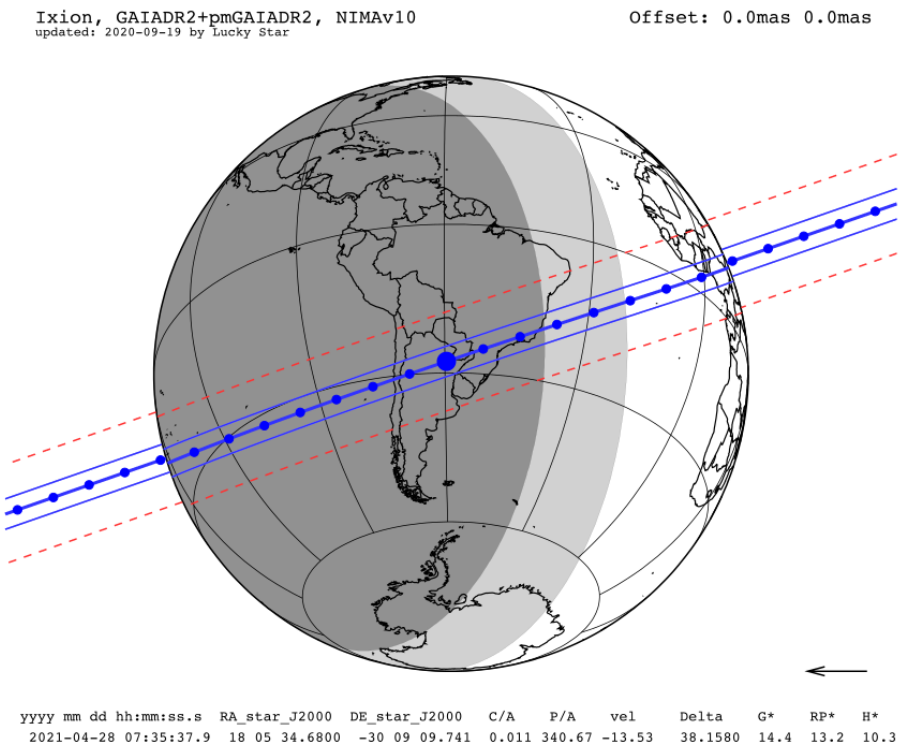


(a)

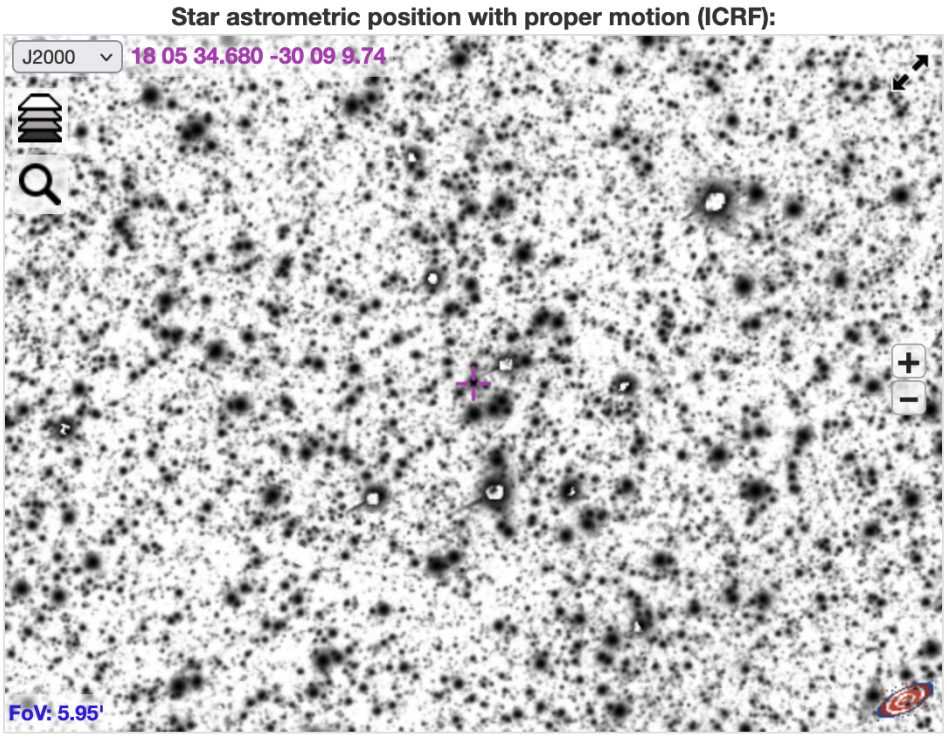


(b)

Şekil 7.4. **(a)** 13 Ekim 2020 tarihli Ixion'un öngörülen örtülme hattı haritası (NIMAv10); **(b)** 13 Ekim 2020 tarihli Ixion'un örteceği öngörülen yıldız (Aladin Sky Atlas, PanSTARRS DR1 z)

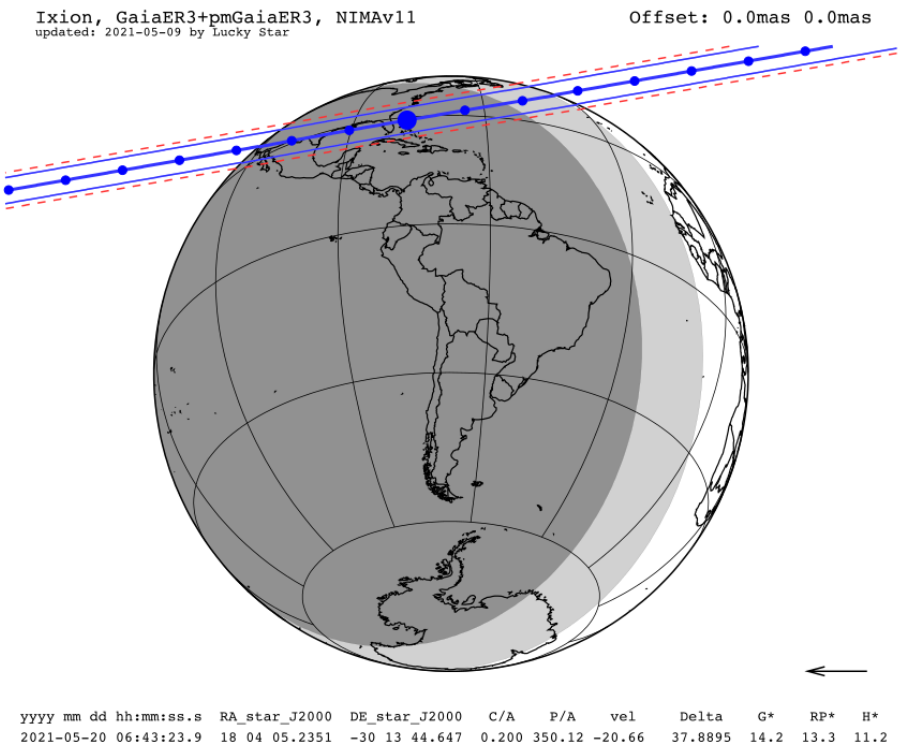


(a)

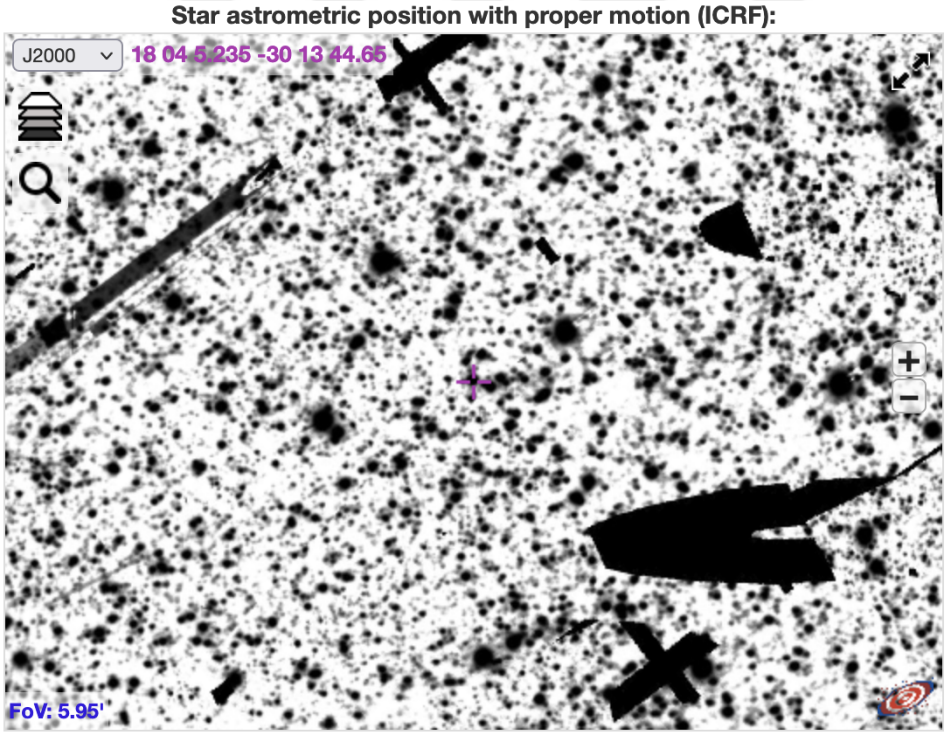


(b)

Şekil 7.5. **(a)** 28 Nisan 2021 tarihli Ixion'un öngörülen örtülme hattı haritası (NIMAv10); **(b)** 28 Nisan 2021 tarihli Ixion'un örteceği öngörülen yıldız (Aladin Sky Atlas, PanSTARRS DR1 z)

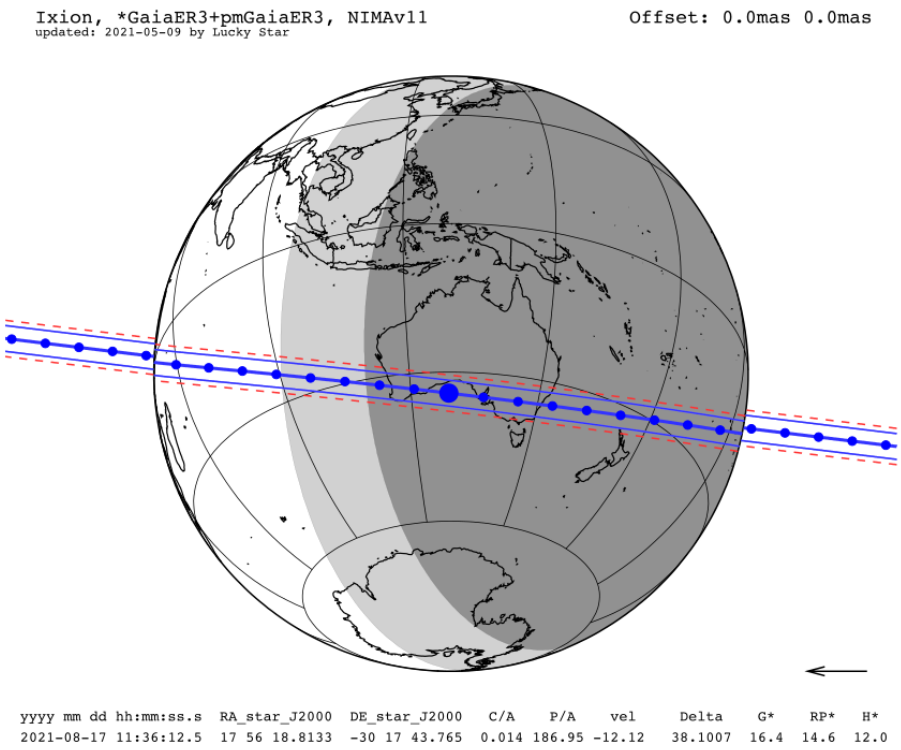


(a)

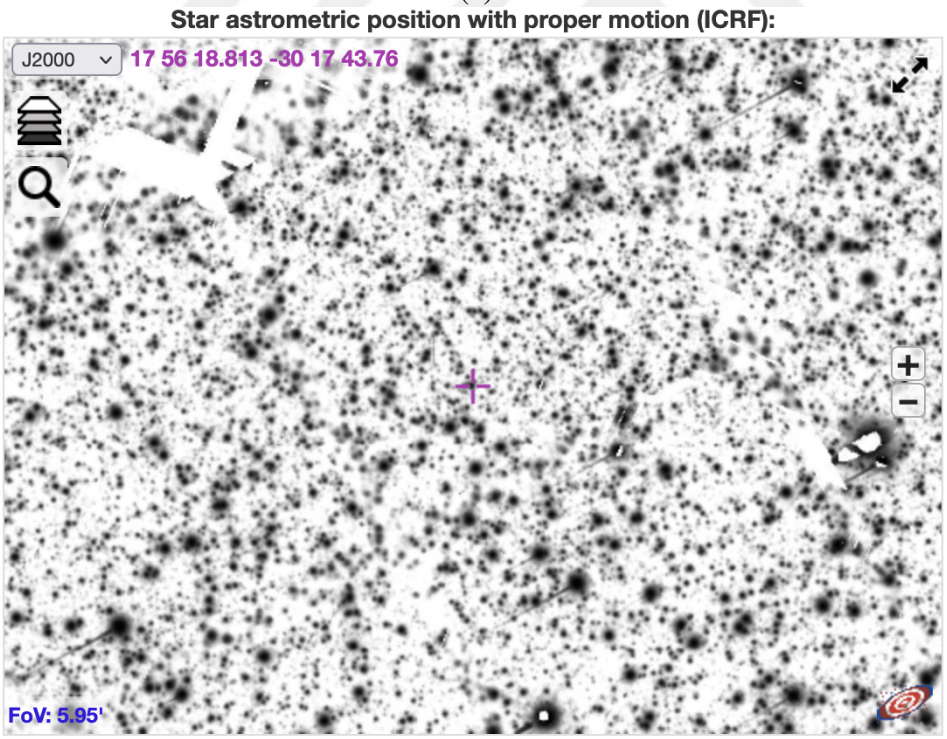


(b)

Şekil 7.6. **(a)** 20 Mayıs 2021 tarihli Ixion'un öngörülen örtülme hattı haritası (NIMAv11); **(b)** 20 Mayıs 2021 tarihli Ixion'un örteceği öngörülen yıldız (Aladin Sky Atlas, PanSTARRS DR1 z)

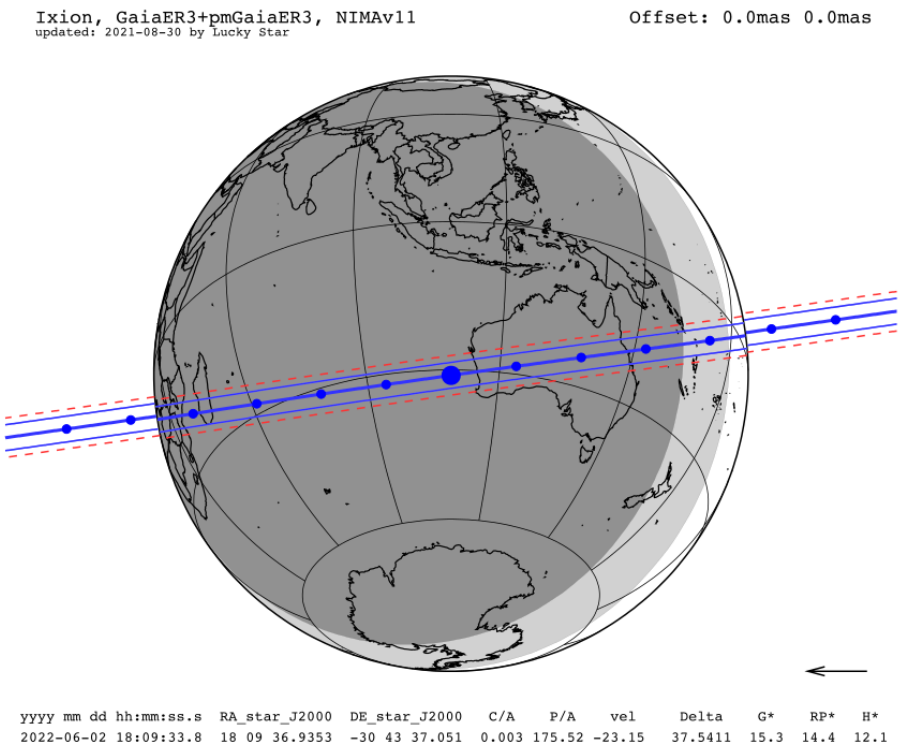


(a)

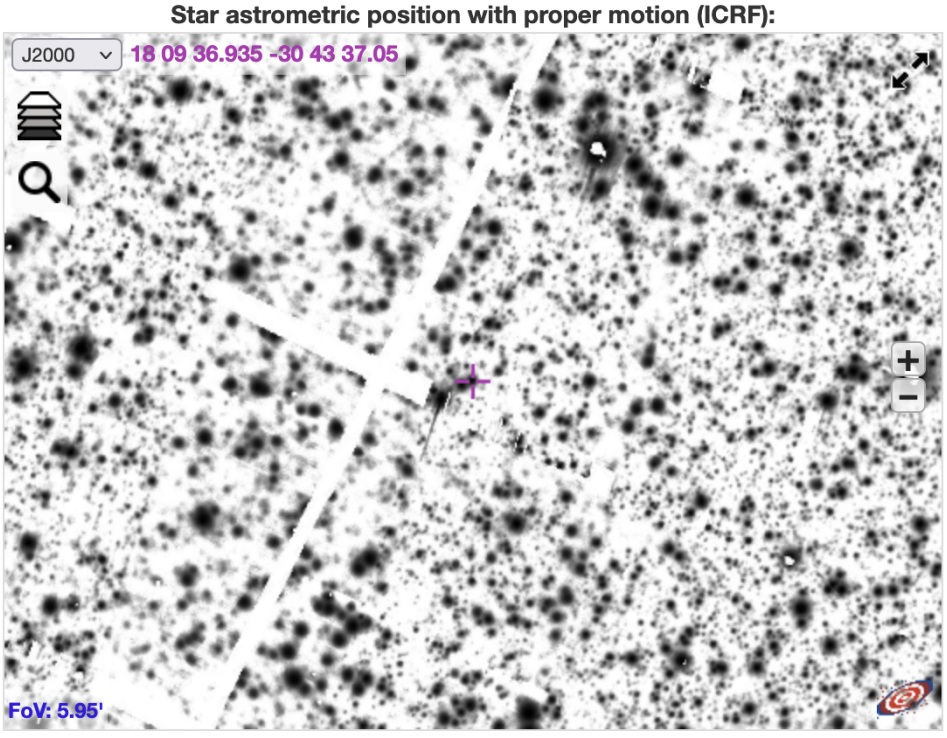


(b)

Şekil 7.7. **(a)** 17 Ağustos 2021 tarihli Ixion'un öngörülen örtülme hattı haritası (NIMAv11); **(b)** 17 Ağustos 2021 tarihli Ixion'un örteceği öngörülen yıldız (Aladin Sky Atlas, PanSTARRS DR1 z)

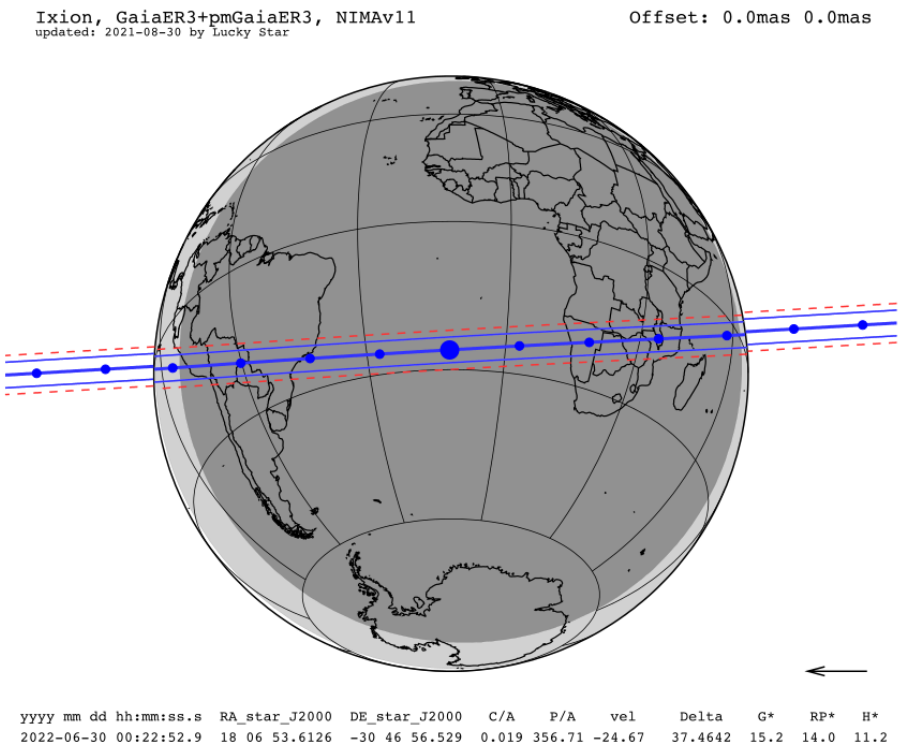


(a)

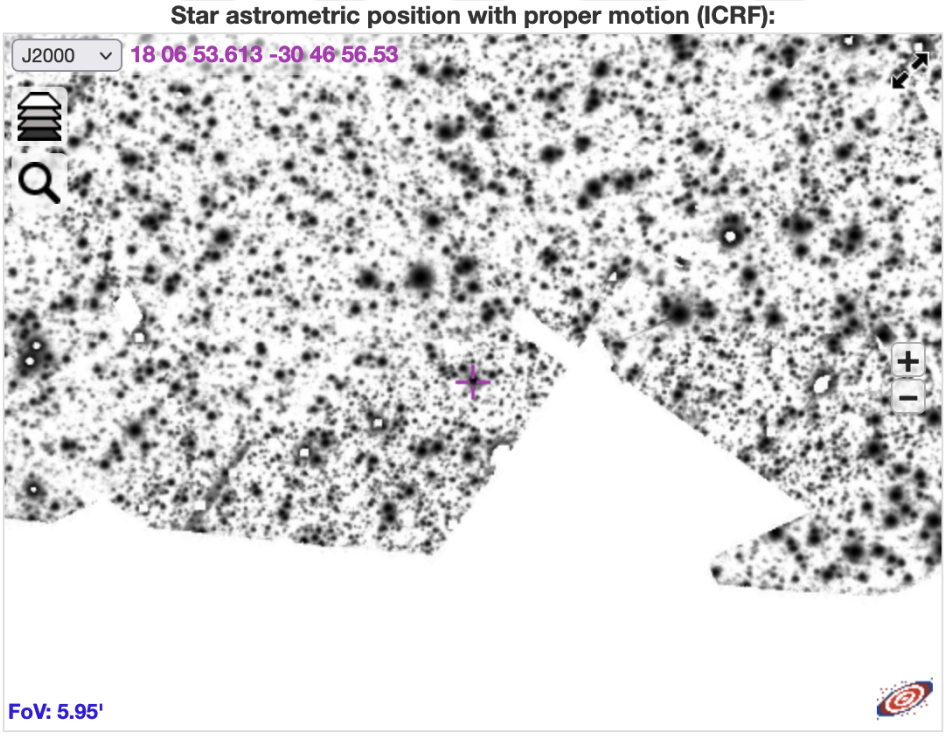


(b)

Şekil 7.8. **(a)** 2 Haziran 2022 tarihli Ixion'un öngörülen örtülme hattı haritası (NIMAv11); **(b)** 2 Haziran 2022 tarihli Ixion'un örteceği öngörülen yıldız (Aladin Sky Atlas, PanSTARRS DR1 z)



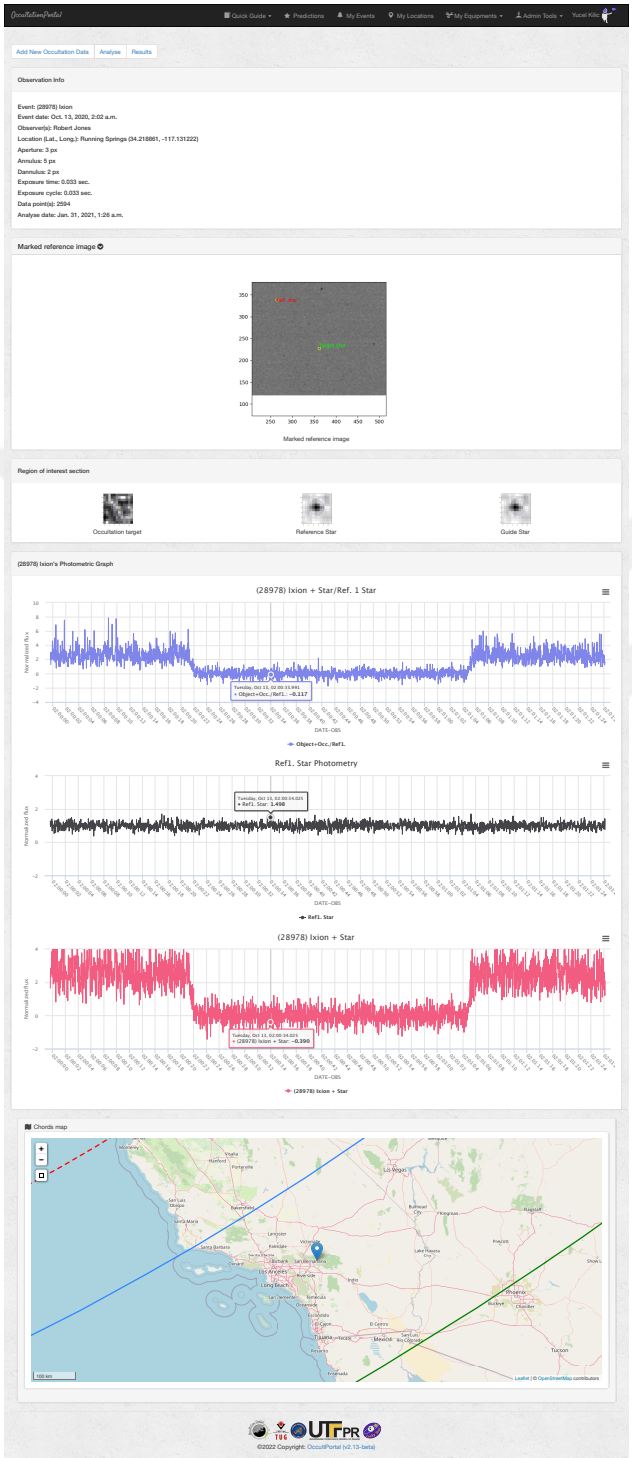
(a)



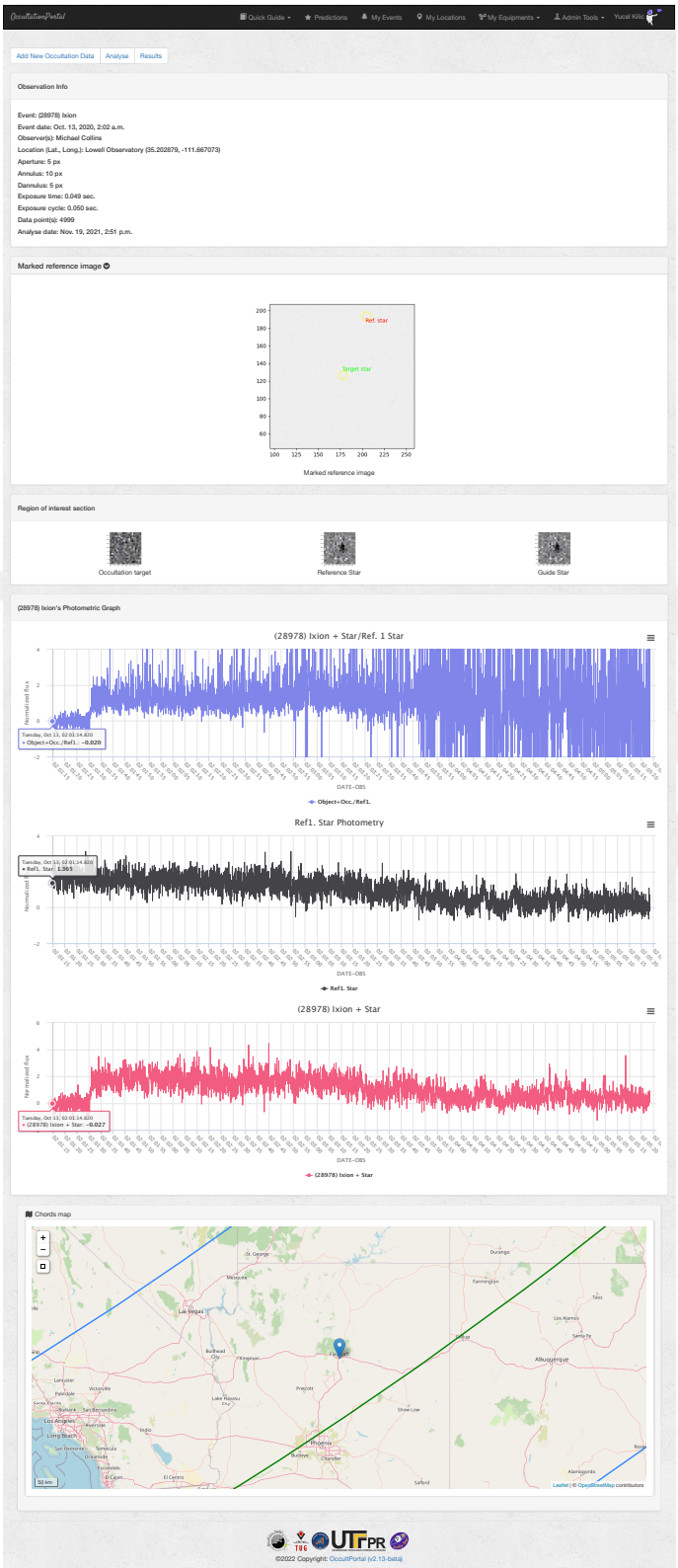
(b)

Şekil 7.9. **(a)** 20 Haziran 2022 tarihli Ixion'un öngörülen örtülme hattı haritası (NIMAv11); **(b)** 20 Haziran 2022 tarihli Ixion'un örteceği öngörülen yıldız (Aladin Sky Atlas, PanSTARRS DR1 z)

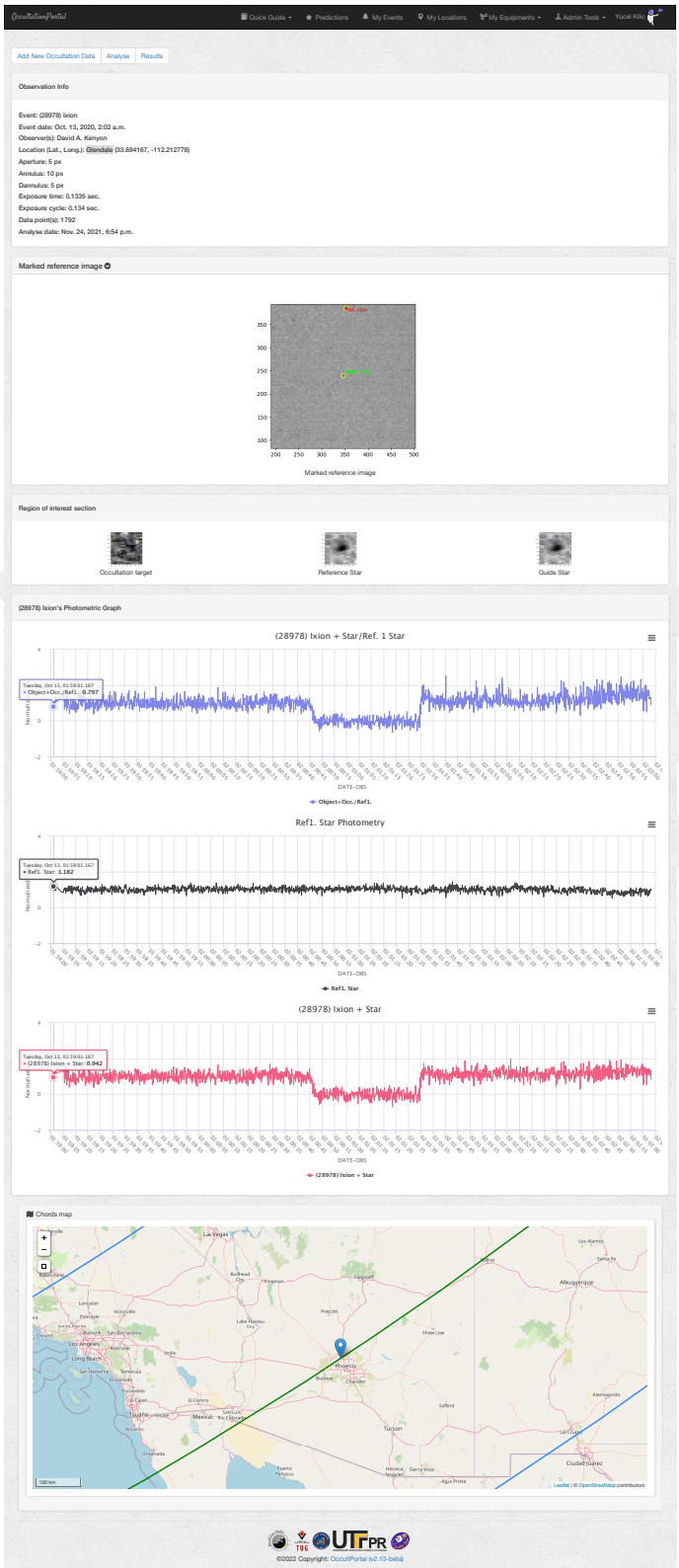
EK-3. (28978) Ixion'un 13 Ekim 2020 tarihli gözlemlerinin OP üzerinde elde edilen ışık eğrileri ve fotometrik sonuç sayfası



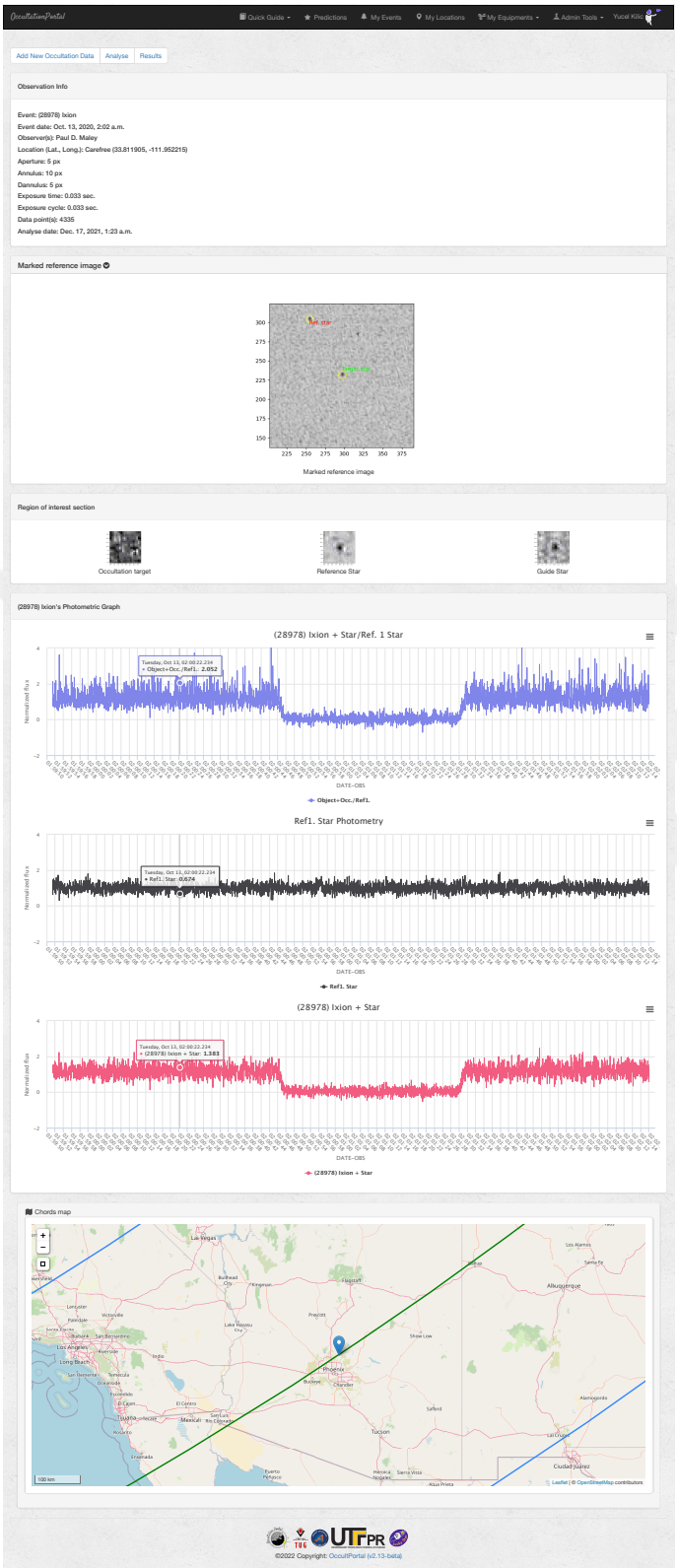
Şekil 7.10. (28978) Ixion 13 Ekim 2020 gözlemi *Running Springs* OP fotometrik sonuç sayfası (**Pozitif**)



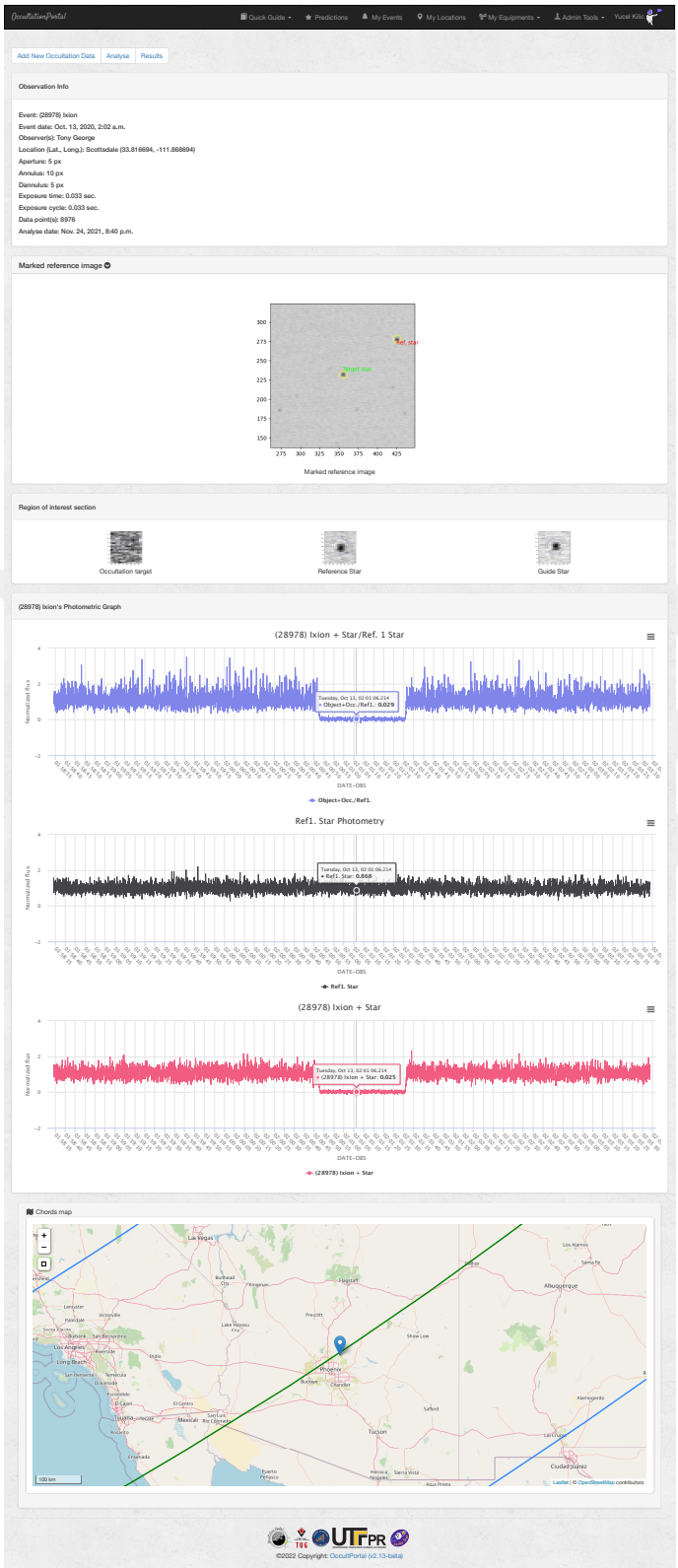
Şekil 7.11. (28978) Ixion 13 Ekim 2020 gözlemi *TiMo/Lowell Gözlemevi* OP fotometrik sonuç sayfası (**Pozitif**)



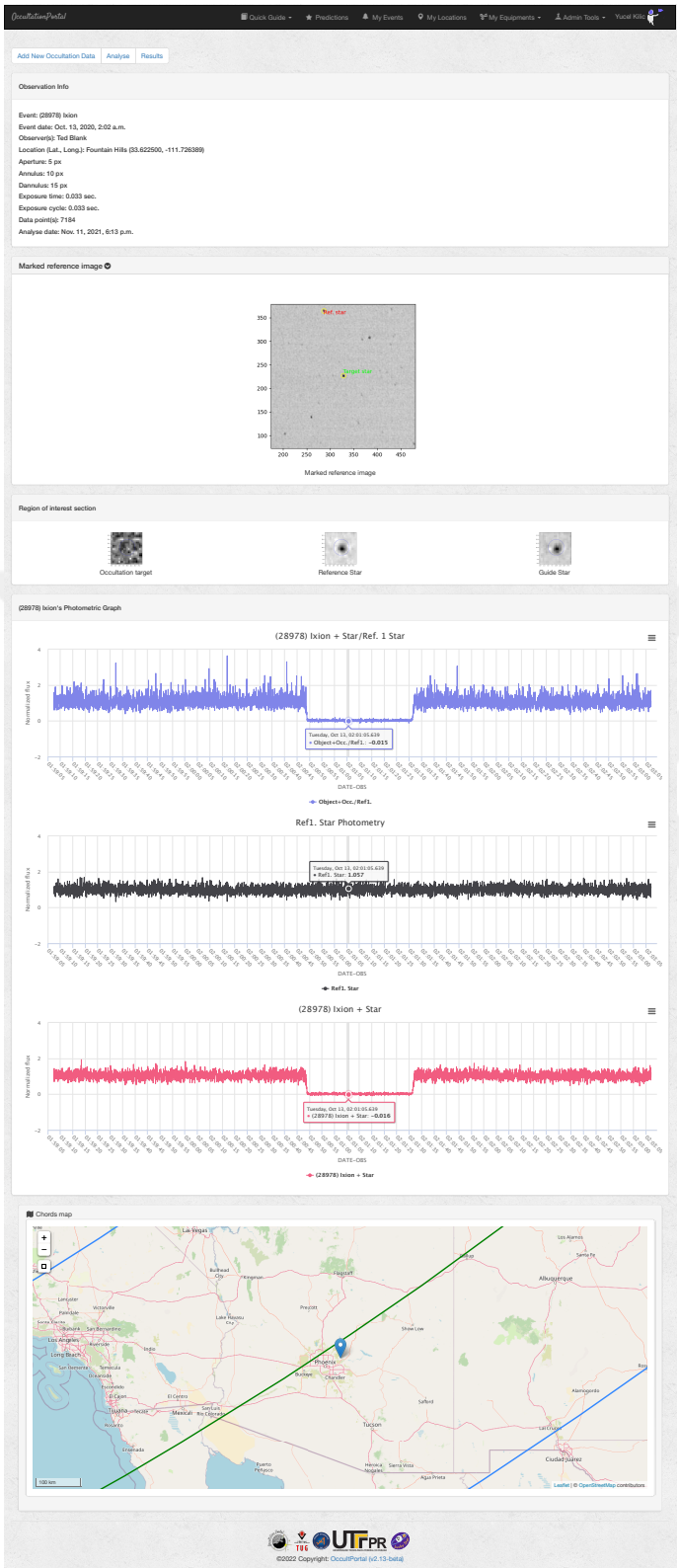
Şekil 7.12. (28978) Ixion 13 Ekim 2020 gözlemi *Glendale* OP fotometrik sonuç sayfası (**Pozitif**)



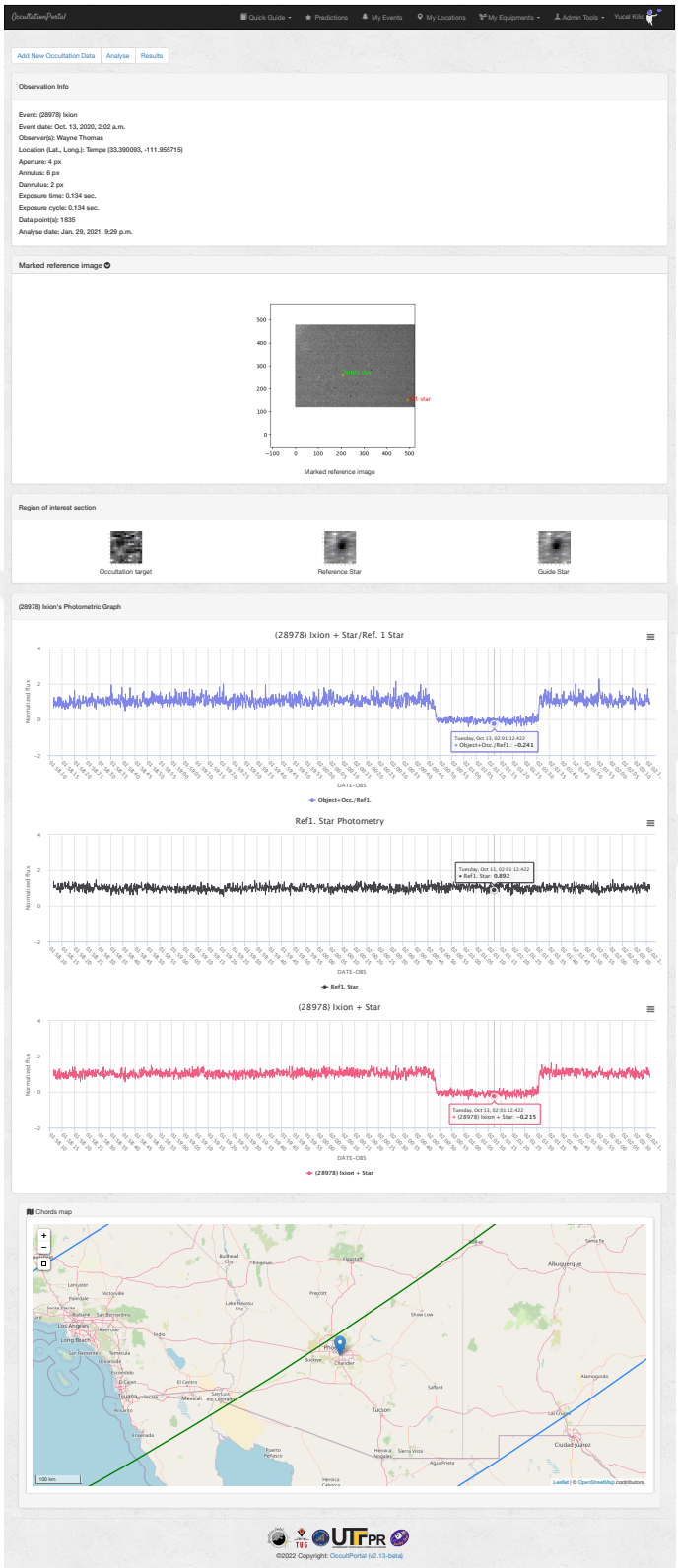
Şekil 7.13. (28978) Ixion 13 Ekim 2020 gözlemi *Carefree* OP fotometrik sonuç sayfası (**Pozitif**)



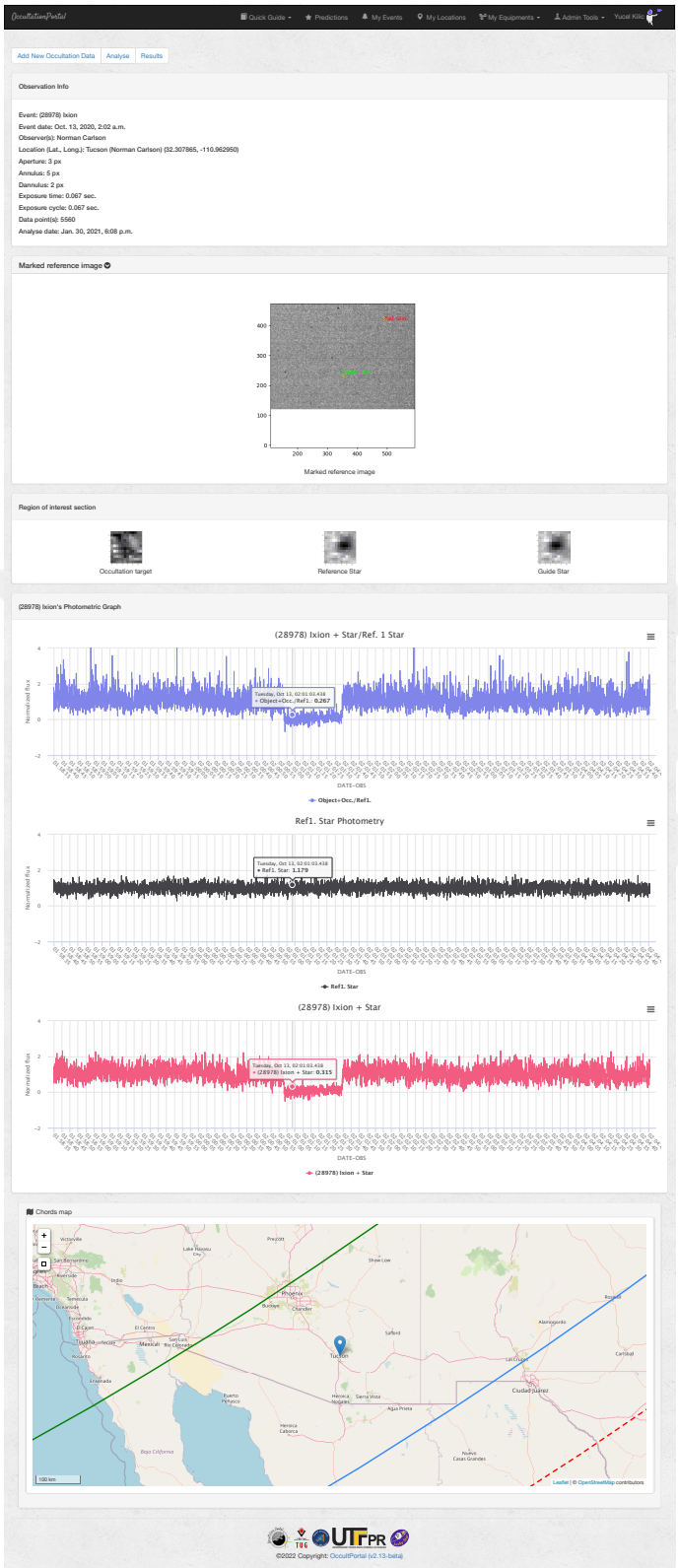
Şekil 7.14. (28978) Ixion 13 Ekim 2020 gözlemi *Scottsdale* OP fotometrik sonuç sayfası (**Pozitif**)



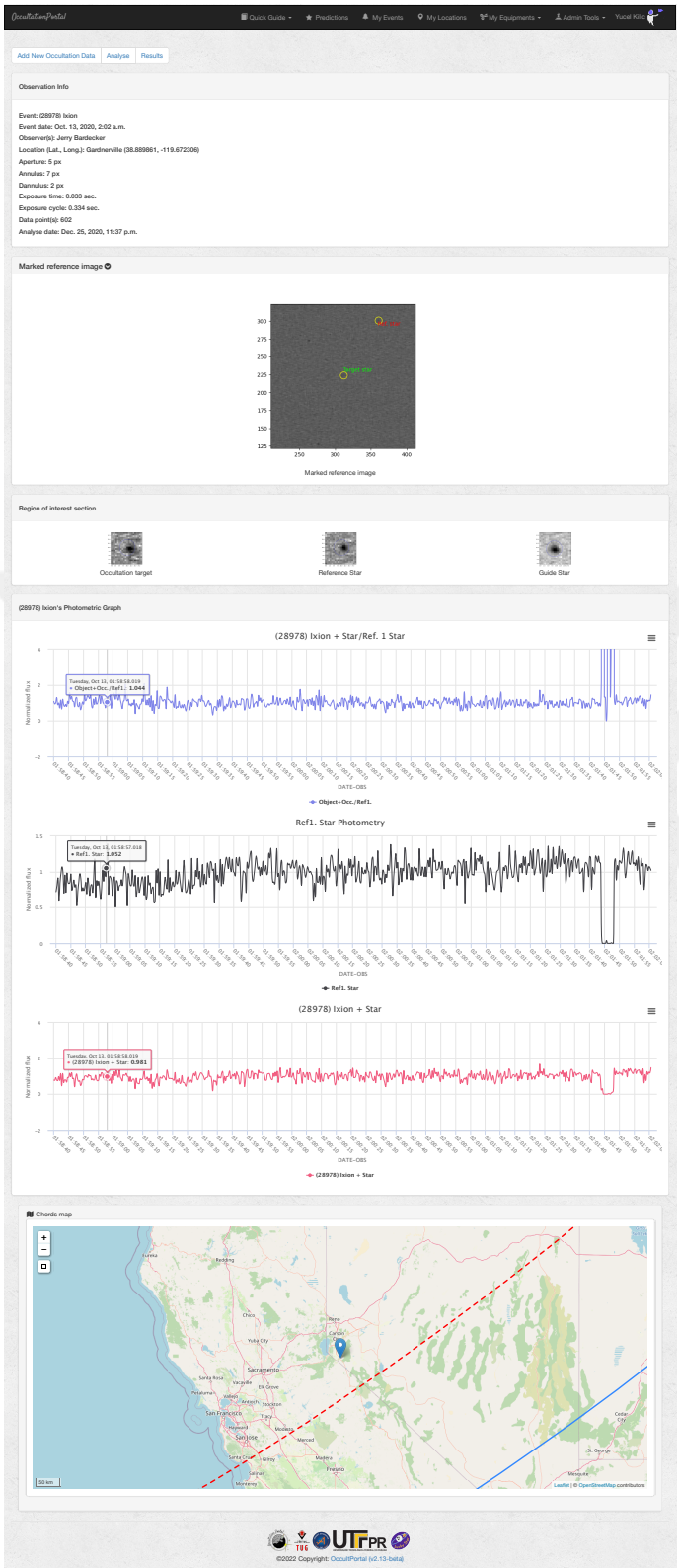
Şekil 7.15. (28978) Ixion 13 Ekim 2020 gözlemi *Fountain Hills* OP fotometrik sonuç sayfası (**Pozitif**)



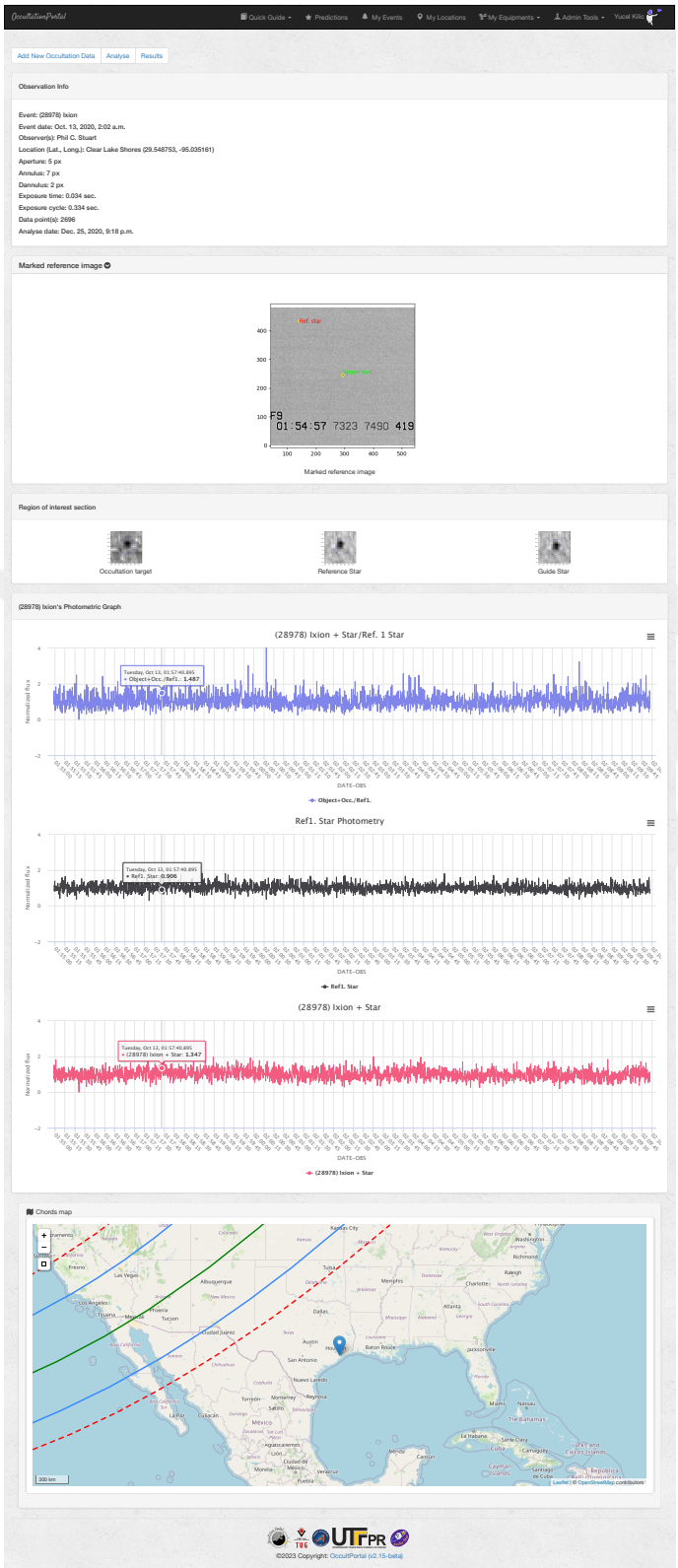
Şekil 7.16. (28978) Ixion 13 Ekim 2020 gözlemi *Tempe* OP fotometrik sonuç sayfası (**Pozitif**)



Şekil 7.17. (28978) Ixion 13 Ekim 2020 gözlemi *Tucson* OP fotometrik sonuç sayfası (**Pozitif**)

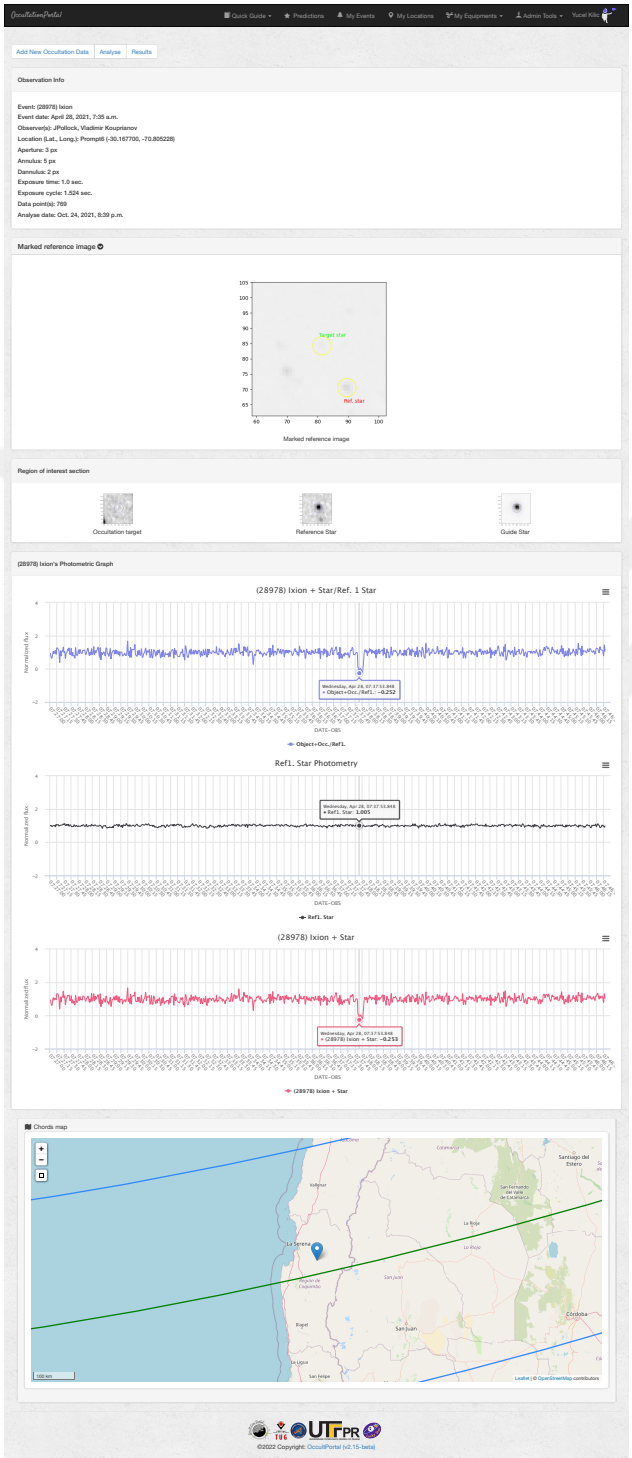


Şekil 7.18. (28978) Ixion 13 Ekim 2020 gözlemi *Gardnerville* OP fotometrik sonuç sayfası (**Negatif**)

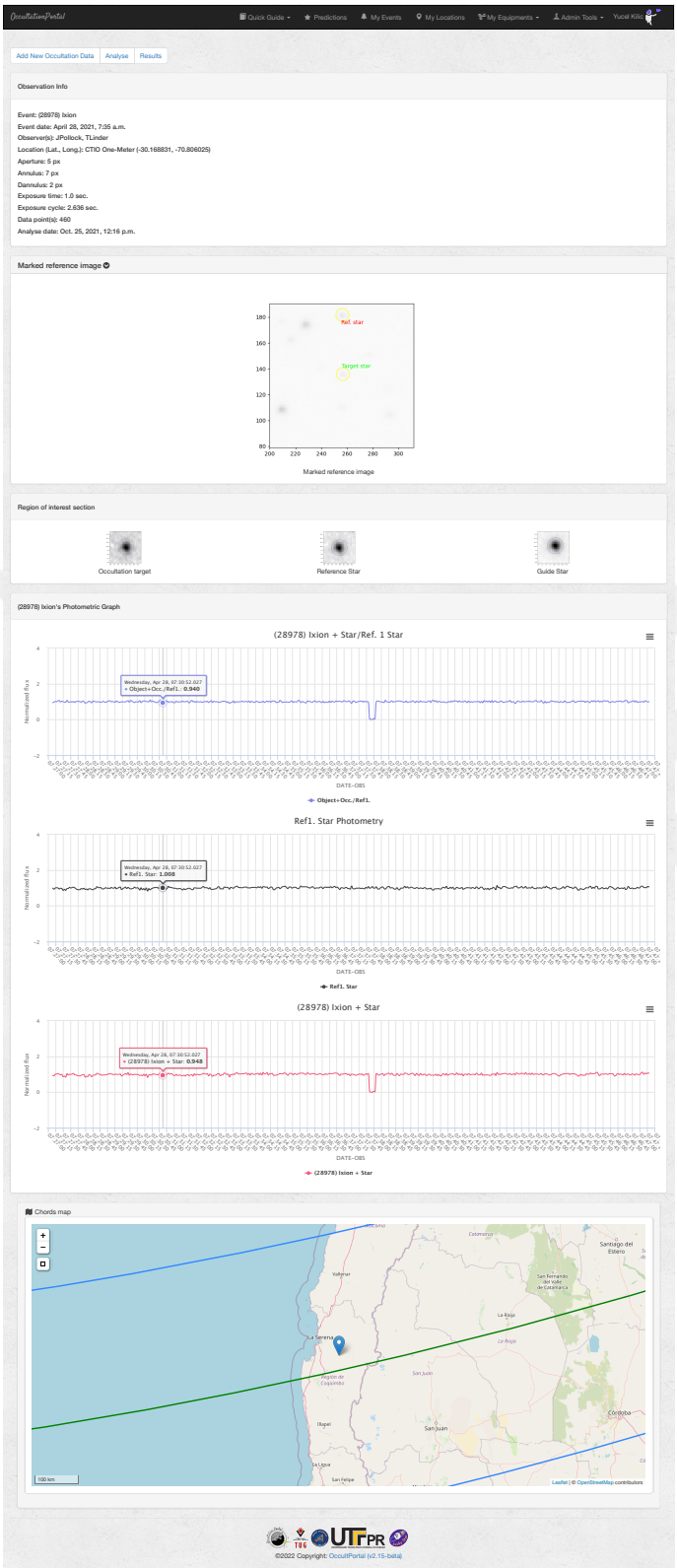


Şekil 7.19. (28978) Ixion 13 Ekim 2020 gözlemi *Clear Lake Shores* OP fotometrik sonuç sayfası (**Negatif**)

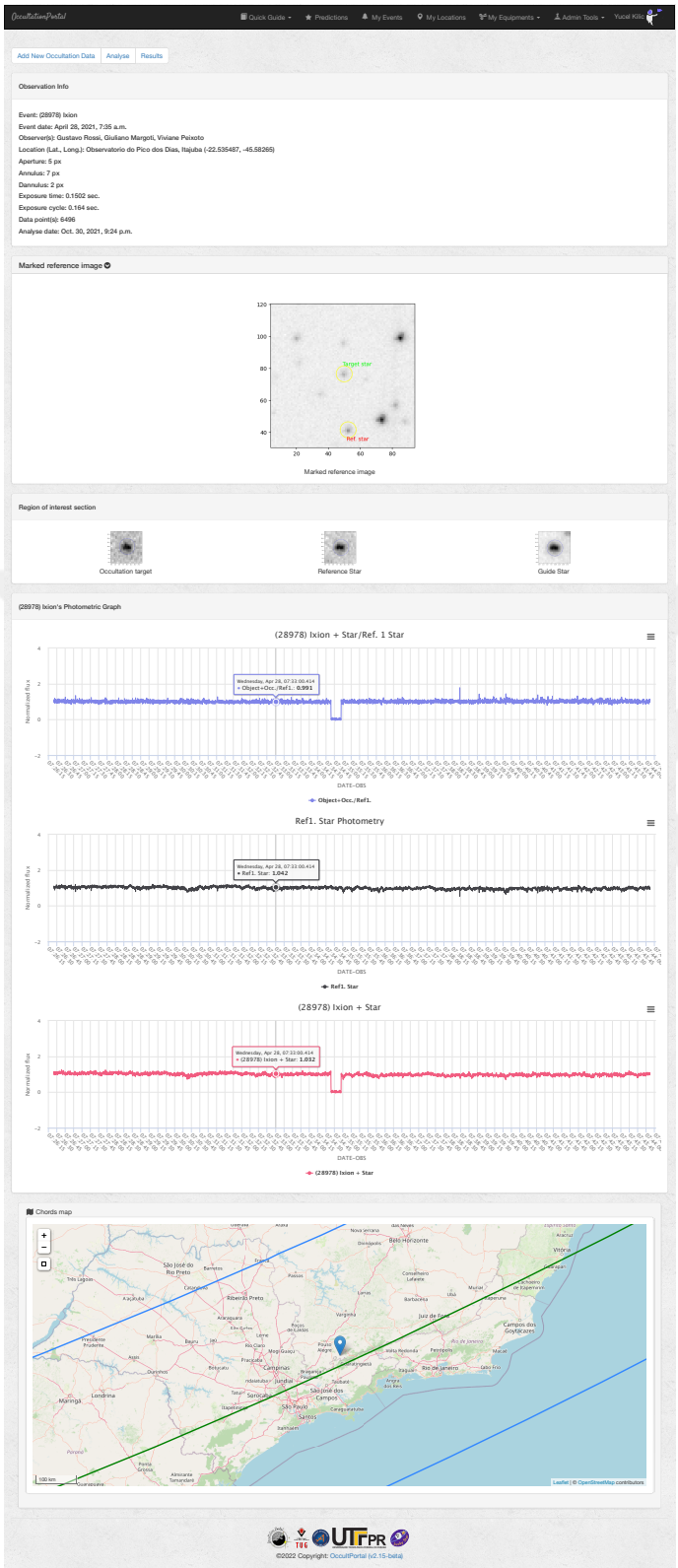
EK-4. (28978) Ixion'un 28 Nisan 2021 tarihli gözlemlerinin OP üzerinde elde edilen ışık eğrileri ve fotometrik sonuç sayfası



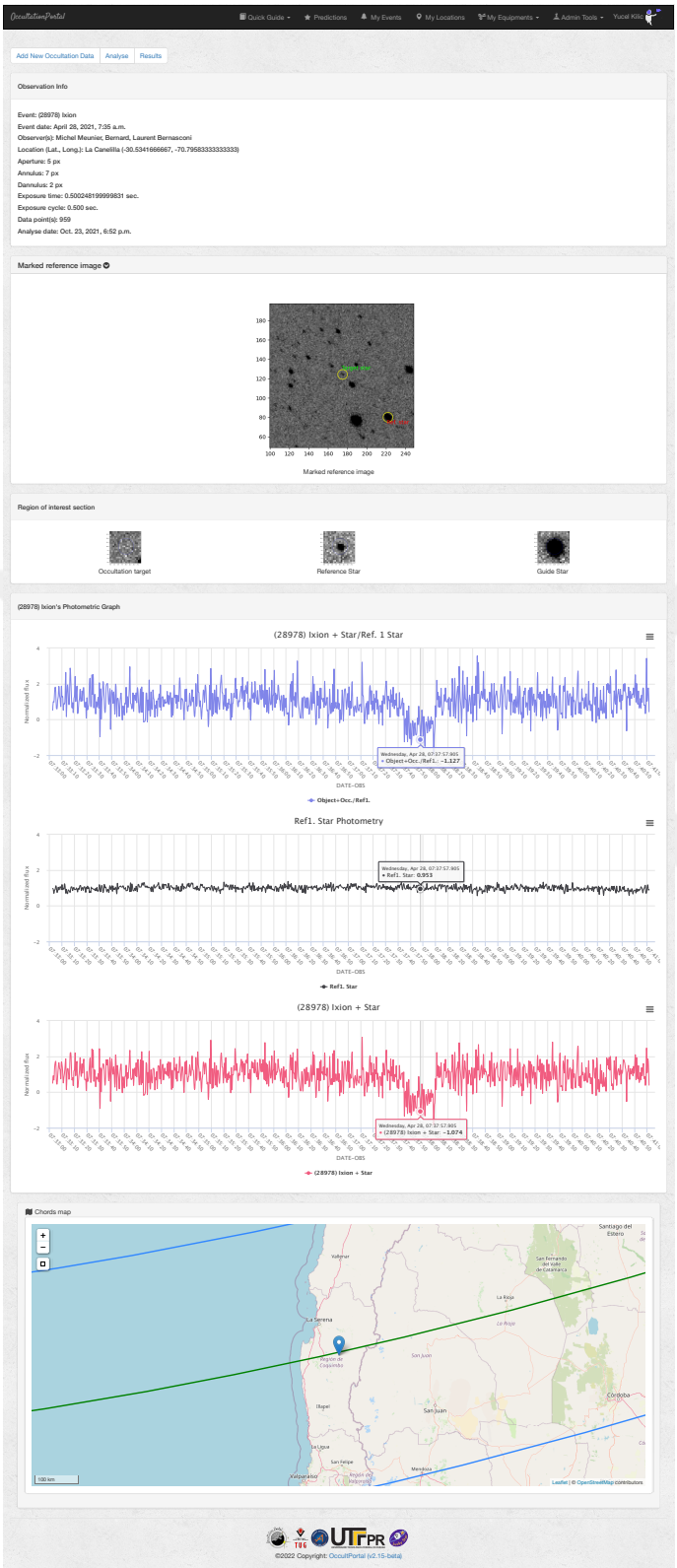
Şekil 7.20. (28978) Ixion 28 Nisan 2021 gözlemi *Prompt6* OP fotometrik sonuç sayfası (**Pozitif**)



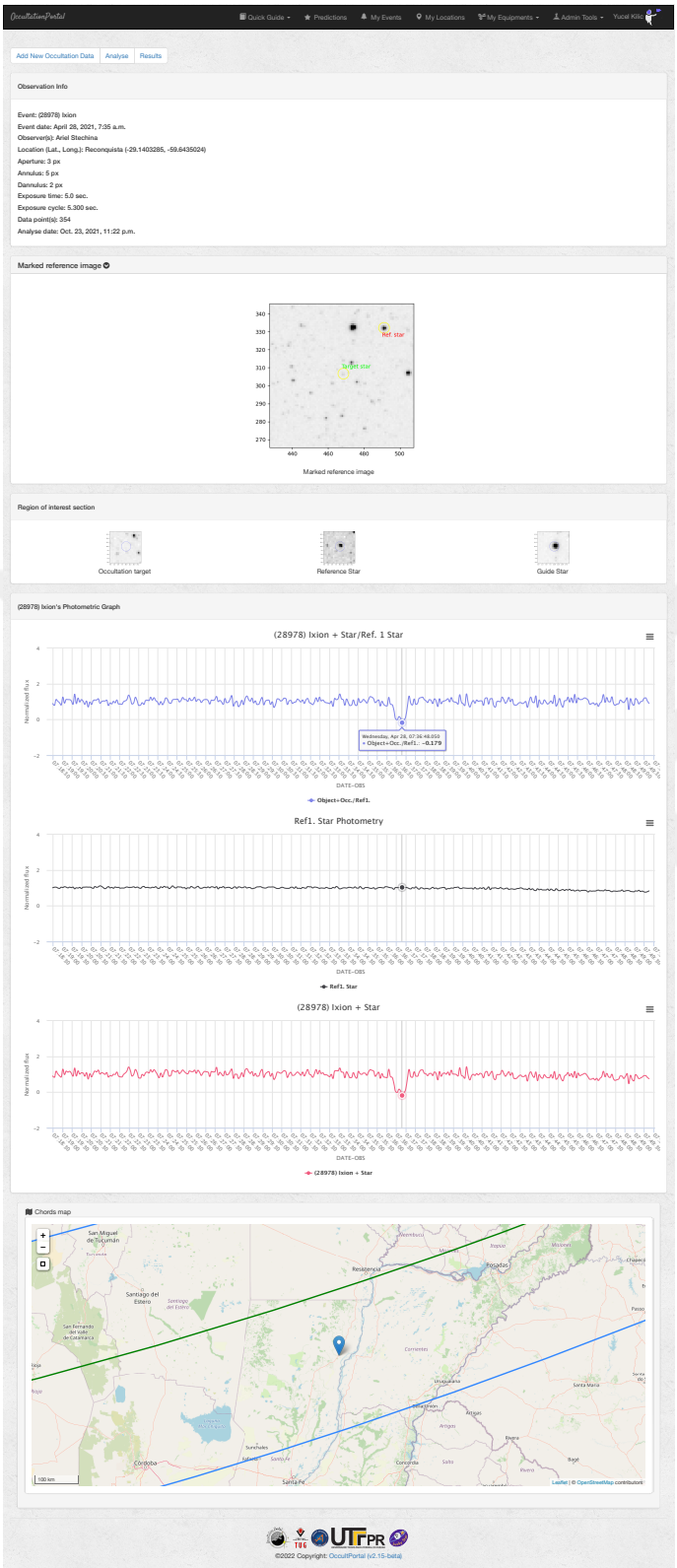
Şekil 7.21. (28978) Ixion 28 Nisan 2021 gözlemi *CTIO One-Meter* OP fotometrik sonuç sayfası (**Pozitif**)



Şekil 7.22. (28978) Ixion 28 Nisan 2021 gözlemi *Observatorio do Pico dos Dias* OP fotometrik sonuç sayfası (**Pozitif**)

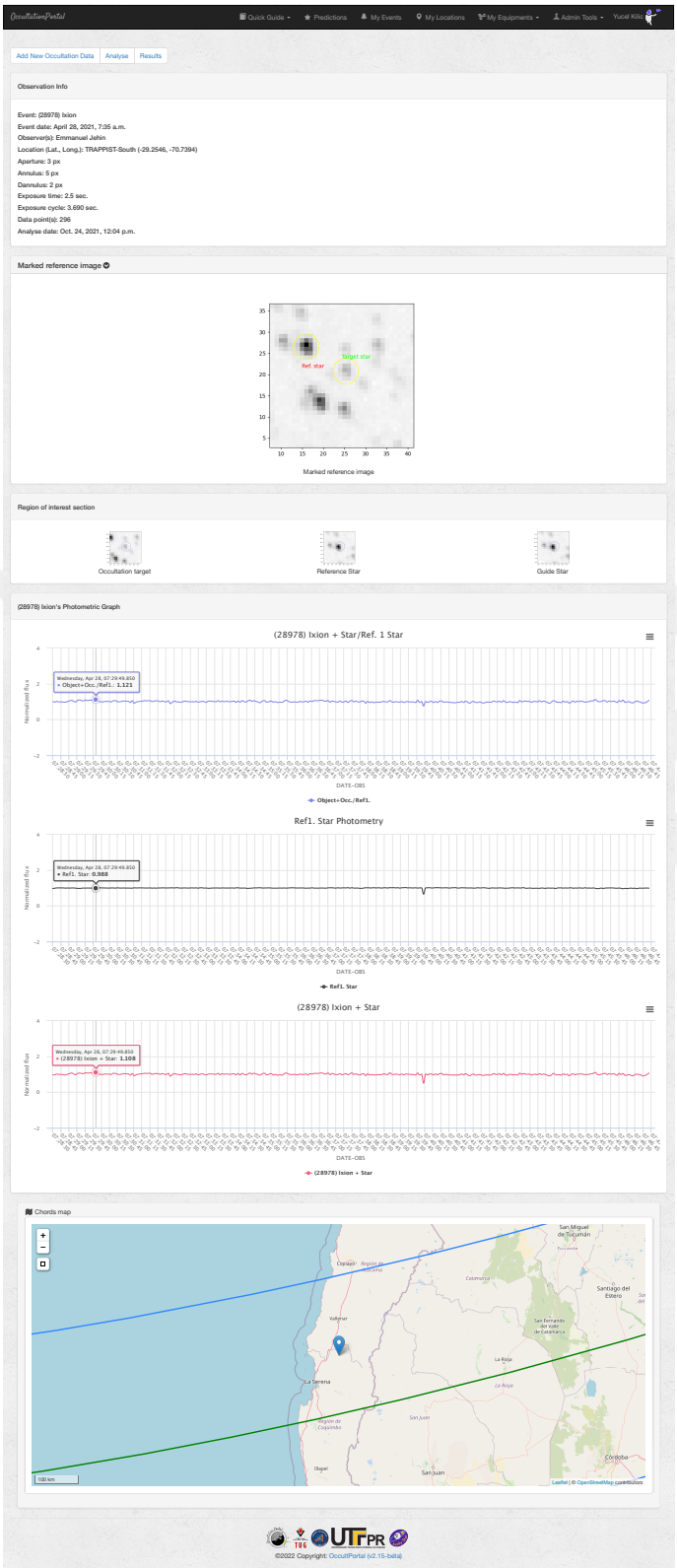


Şekil 7.23. (28978) Ixion 28 Nisan 2021 gözlemi *La Canelilla* OP fotometrik sonuç sayfası (**Pozitif**)

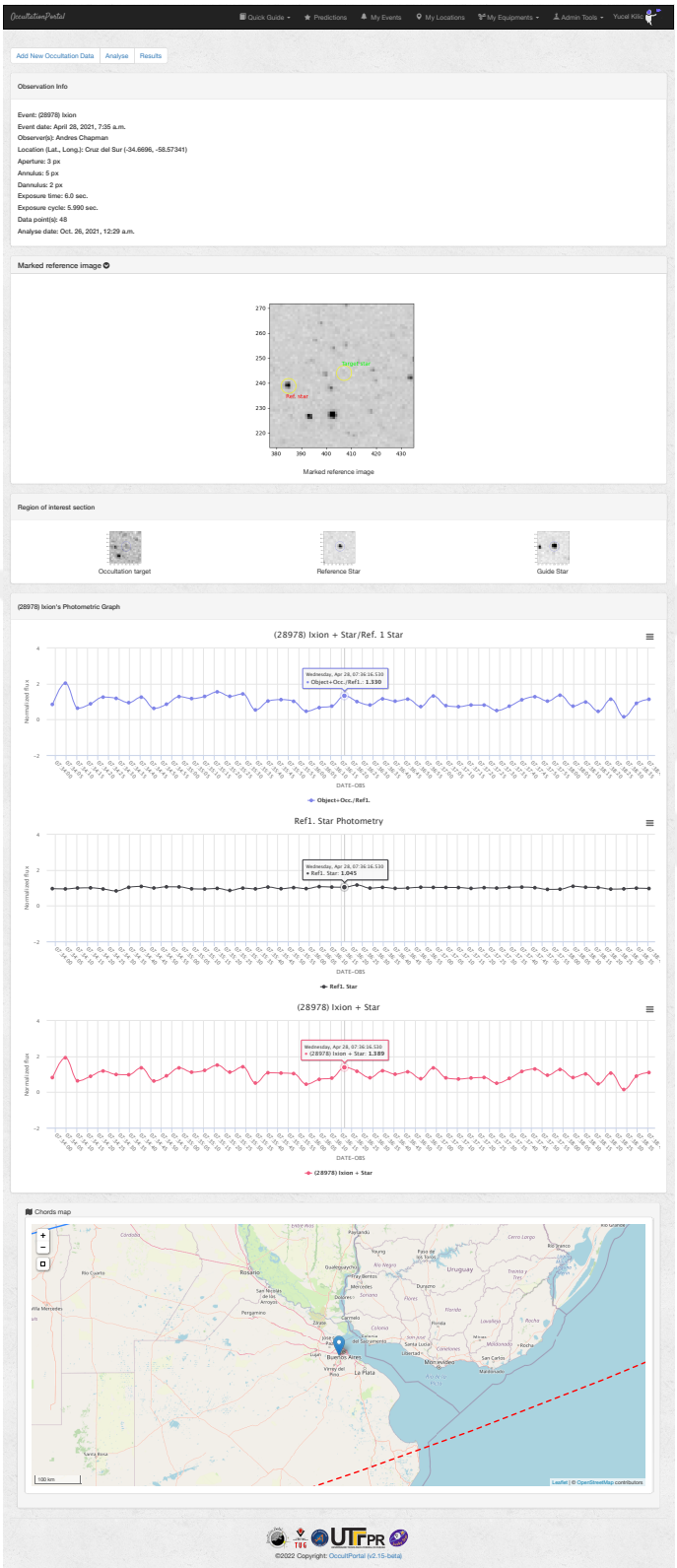


Şekil 7.24. (28978) Ixion 28 Nisan 2021 gözlemi *Reconquista* OP fotometrik sonuç sayfası (**Pozitif**)

Şekil 7.25. (28978) Ixion 28 Nisan 2021 gözlemi *ASH-Cerro Burek* OP fotometrik sonuç sayfası (**Pozitif**)

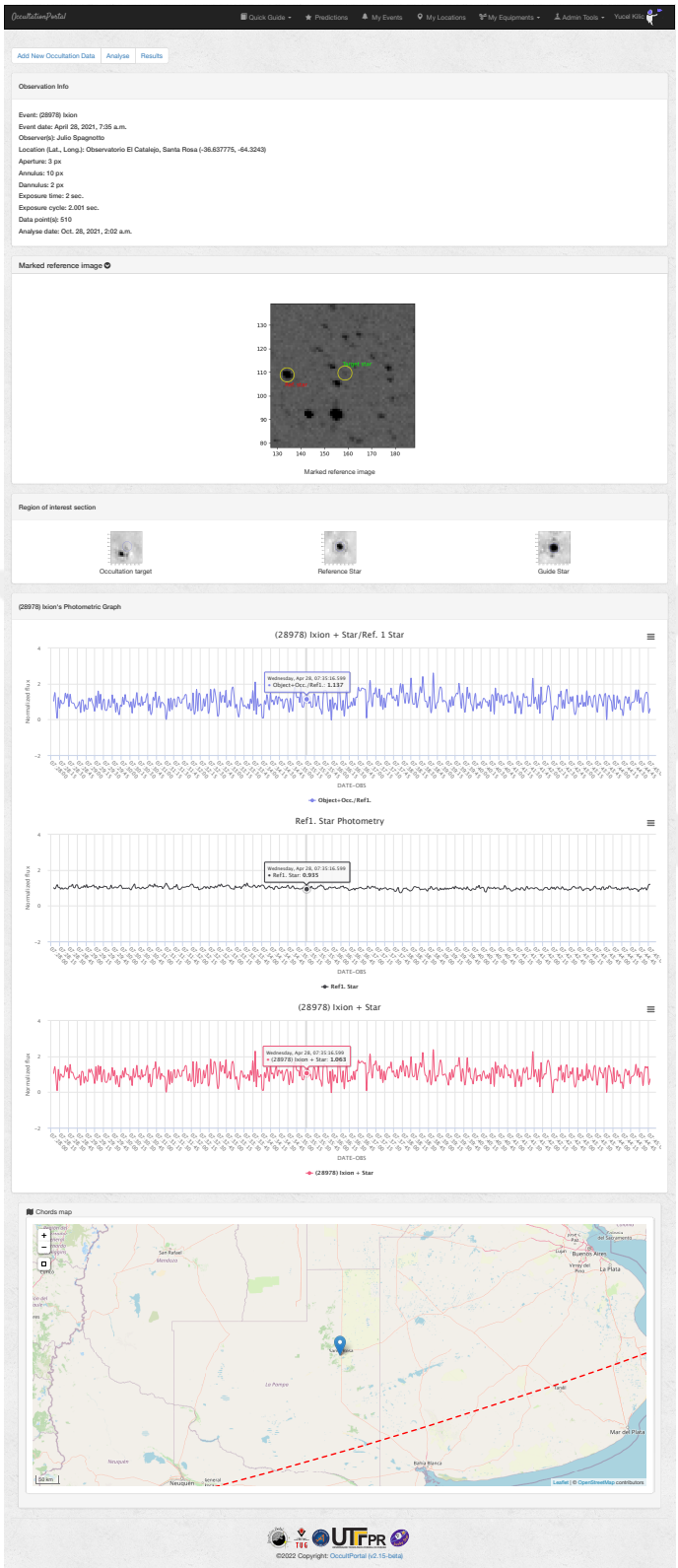


Şekil 7.26. (28978) Ixion 28 Nisan 2021 gözlemi *TRAPPIST-South* OP fotometrik sonuç sayfası (**Negatif**)

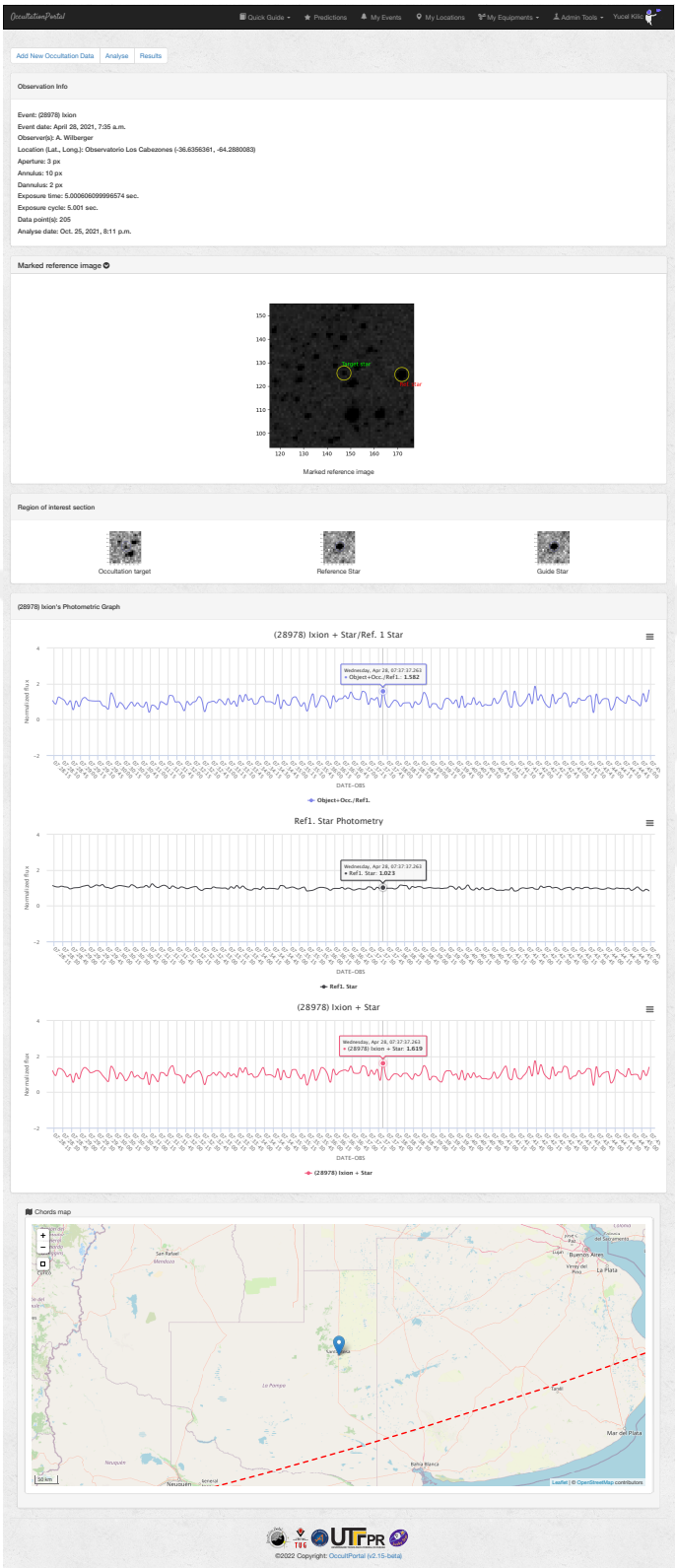


Şekil 7.27. (28978) Ixion 28 Nisan 2021 gözlemi *Cruz del Sur* OP fotometrik sonuç sayfası (**Negatif**)

Şekil 7.28. (28978) Ixion 28 Nisan 2021 gözlemi *A.A.A.A* OP fotometrik sonuç sayfası (**Negatif**)



Şekil 7.29. (28978) Ixion 28 Nisan 2021 gözlemi *Observatorio El Catalejo* OP fotometrik sonuç sayfası (**Negatif**)



Şekil 7.30. (28978) Ixion 28 Nisan 2021 gözlemi *Observatorio Los Cabezones* OP fotometrik sonuç sayfası (**Negatif**)

ÖZ GEÇMİŞ

YÜCEL KILIÇ

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora 2015 - 2023	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Uzay Bilimleri ve Teknolojileri ABD, Antalya
Yüksek Lisans 2010 - 2013	Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Astronomi ve Uzay Bilimleri ABD, Ankara
Lisans 2005 - 2010	Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, Ankara

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Kıdemli Uzman 2017 - Devam Ediyor	TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi Antalya
Astronomi ve Uzay Bilimleri Öğretmeni 2014 - 2017	Antalya Sınav Koleji Antalya
Uzman Astronom 2012 - 2014	Atatürk Üniversitesi Astrofizik Araştırma ve Uygulama Merkezi Erzurum

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

1- Santos-Sanz, P. vd. 2022. Physical properties of the trans-Neptunian object (38628) Huya from a multi-chord stellar occultation. *Astronomy and Astrophysics*, 664, A130, A130.

2- Kilic, Y. vd. 2022. Occultation portal: A web-based platform for data collection and analysis of stellar occultations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 515.1, pp. 1346–1357.

3- Gomes-Júnior, A. R., Morgado, B. E., Benedetti-Rossi, G., Boufleur, R. C., Rommel, F. L., Banda-Huarca, M. V., Kilic, Y., Braga-Ribas, F. ve Sicardy, B. 2022. SORA: Stellar occultation reduction and analysis. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 511.1, pp. 1167–1181.

4- Wyrzykowski, Ł. vd. 2020. Full orbital solution for the binary system in the northern Galactic disc microlensing event Gaia16aye. *A&A*, 633, A98.

5- Atay, T., Kaplan, M., Kilic, Y. ve Karapinar, N. 2016. A-Track: A new approach for detection of moving objects in FITS images. *Computer Physics Communications*, 207, pp. 524–530.

6- Terzioglu, Z. vd. 2015. Minima Times of Some Eclipsing Binary Stars. *Information Bulletin on Variable Stars*, 6128.

7- Gursoytrak, H. vd. 2013. New times of minima for some eclipsing binary stars. *Information Bulletin on Variable Stars*, 6075.

8- Demircan, Y. vd. 2012. Times of Minima of some eclipsing binary stars. *Information Bulletin on Variable Stars*, 6041.

9- Gokay, G. vd. 2012. Minima times of some eclipsing binary stars. *Information Bulletin on Variable Stars*, 6039.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

1- Kretlow, M. vd. 2022. “The 11 November 2021 multi-chord stellar occultation by trans-Neptunian object (119951) 2002 TC302”. *European Planetary Science Congress*, EPSC2022-172, EPSC2022–172.

2- Ortiz, J. L. vd. 2022. “The Trans-Neptunian Object (19521) Chaos as seen from stellar occultations and photometry observations”. *European Planetary Science Congress*, EPSC2022-520, EPSC2022–520.

3- Vara-Lubiano, M. vd. 2022. “The first multichord stellar occultation by the trans-Neptunian Binary (82075) 2000 YW134”. *European Planetary Science Congress*, EPSC2022-1048, EPSC2022–1048.

4- Khamitov, I. M. vd. 2022. “Multi-object spectroscopy in the observational complex of the RTT150”. *Astronomy at the Epoch of Multimessenger Studies*, pp. 56–58.

5- Vara-Lubiano, M. vd. 2021. “Physical properties of the cubewano 19521 Chaos from a multi-chord stellar occultation”. *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*. Vol. 53. AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts, 307.11, p. 307.11.

6- Dindar, M., Kilic, Y., Tat, A., Dindar, S. ve Kandemir, E. 2021. “New Improvements at TUG-T60 Robotic Telescope”. *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*. Vol. 53. Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series, pp. 18–22.

7- Rommel, F. L. vd. 2021. “Evidence of topographic features on (307261) 2002 MS4 surface”. *European Planetary Science Congress*, EPSC2021-440, EPSC2021–440.

8- Santos-Sanz, P. ve Ortiz, J. L. 2019. “The multi-chord stellar occultation by the Transneptunian object (38628) Huya on March 18th 2019”. *EPSC-DPS Joint Meeting 2019*. Vol. 2019, EPSC-DPS2019-666, EPSC-DPS2019–666.

9- Halicioglu, K., Albayrak, M., Basoglu, B. ve Kilic, Y. 2019. “Modelling star trailed images of DZCS to improve the astro-geodetic geoid of Istanbul”. *EGU General Assembly Conference Abstracts*. EGU General Assembly Conference Abstracts, 11305, p. 11305.

10- Albayrak, M., Halicioglu, K., Basoglu, B. ve Kilic, Y. 2018. “Investigating the Function of the Star Trails to Improve the Determination of Gravity Field”. *AGU Fall Meeting Abstracts*. Vol. 2018, G51F-0529, G51F–0529.

11- Kilic, Y., Dindar, M., Ozisik, T., Ozkan, M. T. ve Ozdemir, S. 2018. GRB180809B TUG T60 observations. *GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 23127, #1 (2018/August-0)*, 23127.

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

13- Kilic, Y., Kaplan, M. ve Eker, Z. 2018. A new pipeline for astrometry and photometry of asteroids. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 14.A30, pp. 43–43.

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

15- Shameoni Niaei, M., Kilic, Y., Yildiran, B. E., Yüzlükoglu, F. ve Yesilyaprak, C. 2016. “A New Effort for Atmospherical Forecast: Meteorological Image Processing Software (MIPS) for Astronomical Observations”. *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*. Vol. 48. Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series, pp. 40–41.

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

17- Gucsav, B. B., Kilic, Y. ve Shameoni, M. N. 2014. “ATA50 telescope: software”. *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*. Vol. 45. Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series, pp. 30–31.

18- Yeşilyaprak, C. vd. 2014. “ATA50 telescope: hardware”. *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*. Vol. 45. Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series, pp. 28–29.

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

1- Niaei, M. S. ve Kilic, Y. 2020. Camiryo Projesi. *Turkish Journal of Astronomy and Astrophysics*, 1.1, pp. 435–436.

2- Nasıroğlu, İ., Güney, Y., Kılıç, Y., Niaei, M. S. ve Tozoğlu, B. 2020. Atatürk Üniversitesi Kampüsünün Gökyüzü Kalite Ölçümü (Işık Kirliliği). *Turkish Journal of Astronomy and Astrophysics*, 1.1, pp. 431–432.

3- Yeşilyaprak, C. vd. 2020. Doğu Anadolu Gözlemevi (DAG) Altyapı ve Üstyapı Çalışmaları. *Turkish Journal of Astronomy and Astrophysics*, 1.1, pp. 437–438.

4- Kilic, Y. ve Shameoni Niaei, M. 2013. "EUMETSAT Verilerinin İşletim Sistemi Bağımsız Yorumlanması ve Görüntülenmesi". *I. Meteorolojik Uzaktan Algılama Çalıştayı Bildiri Kitabı*. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, pp. 359–367.

5- Kilic, Y., Ozdemir, S., Aydin, E., Okuyan, O., Bagiran, N. ve Sahin, S. 2012. "DIBRED: Canon 550D Kamerası Görüntülerinden FITS Formatlı Astronomik Görüntülere Dönüşüm ve Fotometri Yazılımı". *XVIII. Ulusal Astronomi ve Uzay Bilimleri Kongresi Bildiri Kitabı*. İnonü Üniversitesi, pp. 449–454.

6- Niaei, M. S., Kilic, Y., Gunseli, E., Cakir, T. ve Karagoz, G. 2010. "Astrofotoğrafçılık". *XVII. Ulusal Astronomi Kongresi Bildiri Kitabı*. Çukurova Üniversitesi, pp. 748–770.