

מכון ויצמן למדע
תוכנית ויצמן- רוטשילד

מדידת זמן מחזור סיבוב של אסטרואיד פרויקט גמר לימודי תואר שני בהוראת המדעים

מגישים:

נזירה טאהא א. דבאי
רעות קינן
דני יוסף

מנחים:

מר אילן מנוליס - מנהל מצפה הכוכבים, מכון ויצמן למדע
דוקטור אמנון חזן - המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע
דוקטור דיאנה לאופר – המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע

תוכן עניינים. Error! Bookmark not defined.

תודות

ברצוננו להודות למנחים שליוו אותנו בשנת העבודה :

1. מר אילן מנוליס – מנהל מצפה הכוכבים במכון וייצמן. אילן ליווה אותנו מתחילת התהליך, לימד אותנו, אתגר אותנו, אירח אותנו במצפה, צילם עבורנו את התמונות, קרא והגיה וקרא שוב ושוב ובעיקר ענה ללא לאות על שאלותינו... תודה רבה, למדנו!
2. ד"ר אמנון חזן – מנחה ומלווה פדגוגי מהמחלקה להוראת המדעים. אמנון בפגישותיו התקופתיות ובדרכו הנעימה חיזק ופרגן כשהתאים ולא שכח גם "לנער" כשהיה צריך... תודה רבה!
3. משפחותינו היקרות שתמכו בנו במהלך התהליך הנ"ל בפרט ובאופן כללי בשנתיים האחרונות ואפשרו לנו ללמוד וללמוד.

תודה לכולכם, מבטיחים להעביר את זה הלאה!

1. מבוא

אסטרואידיים הינם בעיקרם שאריות מתהליך היווצרות מערכת השמש. האסטרואידיים הינם עצמים השייכים לקבוצת העצמים הקטנים של מערכת השמש (minor planets). קבוצה זו כוללת אסטרואידיים, שביטים ומטאורים.

מרבית האסטרואידיים שוכנים בחגורה היקפית בין מסלוליהם של כוכבי הלכת מאדים וצדק, מסלול הנקרא "חגורת האסטרואידיים העיקרית" (main-belt). מרחקה מהשמש נע בין 1.8 ל 3.2 יחידות אסטרונומיות (AU), כאשר יחידה אסטרונומית (AU: ASTONOMICAL UNIT = 150,000,000 ק"מ (המרחק הממוצע בין שמש וכד"א) והיא מכילה יותר מ 10^6 עצמים.

קבוצה נוספת של אסטרואידיים המקיפים את השמש חגה במסלולים אליפטיים והם עלולים להתקרב לאחד מכוכבי הלכת הפנימיים עד כדי אפשרות להתנגשות. כאשר אסטרואידי במסלול כזה חותך את מסלול כדור הארץ הוא מהווה סיכון פוטנציאלי (Potentially Hazardous Asteroid, PHA) ונקרא "עצם קרוב כדור הארץ" (Near Earth Object, NEO).

מציאת מידות האסטרואידי, מסתו ומחזור זמן הסיבוב שלו חשובים לאפיון תכונותיו ומאפייניו. לימוד מדויק של מסלול האסטרואידי יעזור למנוע אפשרות של התנגשות עתידית עם כדור הארץ.

מדידת זמן מחזור הסיבוב העצמי של אסטרואידי, יכולה להתבצע בעזרת ציוד "צנוע" יחסית ולעזור באפיונו. השיטה מתבססת על העובדה כי כל הגופים בחלל לרבות אסטרואידיים מסתובבים סביב לפחות ציר סיבוב אחד. הגוף מחזיר אור שמש בכמות שונה בהתאם לצורתו ומחזור סיבובו. ניתוח כמות האור המוחזרת ממנו יכולה ללמד אותנו על זמן מחזור הסיבוב העצמי, זווית ציר הסיבוב, וזווית נטייתו כלפי הצופה.

בנוסף, ניתן להפיק מנתונים אלו גם גבול תחתון למידותיו של האסטרואידי. חישוב זה מתבסס על אילוצים המגבילים גוף להסתובב מהר יותר ממה שמאפשרות לו מידותיו.

במחקר השתמשנו בשיטה הקרויה פוטומטריה שבאמצעותה עוצמת האור הנפלט מהאסטרואיד הנחקר מושווית לאור הנפלט מכוכב שנתונו יציבים ומוכרים, ונמצא בסמוך לאסטרואיד במהלך הצילום. השוואה זו מאפשרת לקבל את עקומת השתנות עוצמת האור המוחזר מהאסטרואיד כפונקציה של הזמן.

מטרותיו הראשוניות של המחקר שביצענו היו:

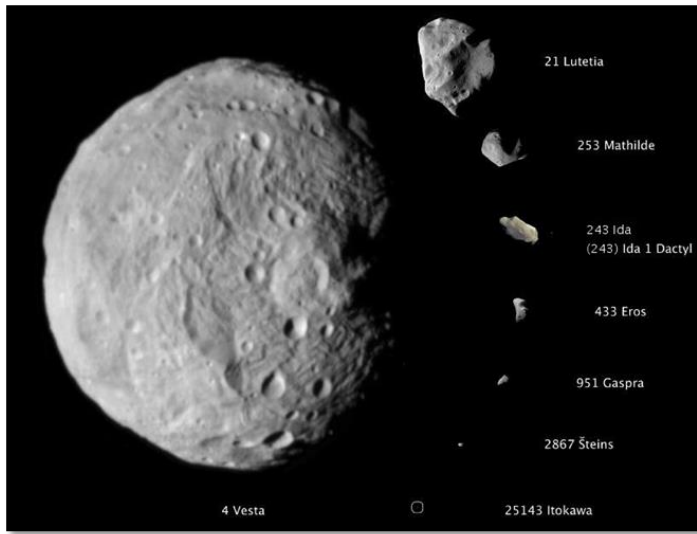
- הפקת והצגת עקומת החזרת אור של אסטרואיד, כפונקציה של הזמן.
- הערכת זמן המחזור שלו מהעקומה הנ"ל.
- הערכת מידות האסטרואיד וצורתו כתוצאה מהנ"ל – אופציונאלי.

2. מידע כללי על אסטרואידים

2.1 אסטרואידים

גופים קטנים סלעיים במערכת השמש שסובבים את השמש ומצויים בעיקר במרחב שבין כוכבי הלכת מאדים לצדק (**main asteroid belt**). ההערכה היא שבמסלולים אלו נמצאים כמיליון וחצי אסטרואידים. מקור האסטרואידים בענן הגז והאבק שממנו נוצרה מערכת השמש (הערפילית השמשית: "השערת הערפילית" (**Nebular hypothesis**)) שהוצעה בשנת 1755 על ידי עמנואל קאנט, ונוסחה בנפרד על ידי פייר סימון לפלס, היא המודל המקובל כיום להסברת התהליכים שהובילו להיווצרות מערכת השמש. משערים שההצעה מבוססת על רעיון ראשוני של עמנואל סוודנבורג משנת 1734. השערת הערפילית גורסת כי מערכת השמש נוצרה כתוצאה מקריסה כבידתית של ענן גזים המכונה ערפילית סולארית (שמשית). קוטרה של ערפילית זו היה אלפי יחידות אסטרונומיות ומסתה הייתה גדולה אך במעט ממסת השמש שנוצרה ממנה. הערפילית הייתה מורכבת בעיקר ממימן ומהליום שמקורם במפץ הגדול, ומעט יסודות כבדים יותר (כ-2%) שמקורם בתהליכי נוקליאוסינתזה בכוכב אשר סיים את חייו בסופרנובה וגם אבק ומולקולות פשוטות. האסטרואידים נוצרו באזור הגבול שבו חום השמש המתהווה נידף את הקרח שהיה מרכיב העיקרי של הערפילית השמשית שממנה נוצרה מערכת השמש. בשל כוחות הגאות של כוכב הלכת הענקי 'צדק', החומר לא התלכד ליצור כוכב לכת והגופים התפזרו. ההערכה היא שהמסה הכוללת כיום של כל האסטרואידים אינה מגיעה לכדי אחוז אחד ממסת הירח שלנו (של כדור הארץ). לחלק מהאסטרואידים יש ירחים קטנים שמקיפים אותם, והאסטרואיד הראשון שהתגלה כבעל ירח משלו היה אידה וירחו דקטיל שהתגלו בשנת 1994. קוטרו של אידה כמה קילומטרים. גודלם של אסטרואידים שנחקרו נע בטווח שבין קוטר של 975 ק"מ (האסטרואיד הגדול ביותר, **Ceres**) לקוטר של מספר מטרים. גודלם הקטן אינו מאפשר לסווגם ככוכבי לכת והם נקראים **minor planets**. האסטרואיד המוכר הגדול ביותר הינו **Ceres** שקוטרו הוא כ- 953 ק"מ (משנת 2006 הוגדר ככוכב לכת ננסי).

על-פי הגדרה **Ceres** הוא גם כוכב לכת ננסי וגם אסטרואיד, מה שעושה את האסטרואיד **Pallas** שקוטרו 544 ק"מ לשני הכי גדול.



איור 1: אסטרואידים שונים. למאות ק"מ.

בתמונה האסטרואיד הגדול הוא Vesta, שגודלו כ- 525 ק"מ

הסוגים השונים של האסטרואידים נוצרו עקב התנגשויות בין האסטרואידים לבין עצמם. הם מתחלקים על פי המבנה שלהם לכמה קבוצות עיקריות:

- קבוצה **C** - כהים ומכילים בעיקר פחמן, עמם נמנים יותר מ- 70% מהאסטרואידים.
- קבוצה **S** - אסטרואידים סלעיים, שהגוון השולט בהם הוא ירקרק ועמם נמנים כ- 15% מהאסטרואידים.
- קבוצה **M** - אסטרואידים המכילים מתכותיות, שעמם נמנים יתר האסטרואידים.

אסטרואידים במסלול "קרוב-ארץ" (**NEAs**) הם תת קבוצה של אסטרואידים שמסלוליהם מתקרבים או חוצים את מסלול כדור הארץ.

תת קבוצה נוספת של אסטרואידים כוללת את היוונים והטרויאניים (גופים שממוקמים בנקודות לגראנז' 4 ו-5 של צדק אשר הן חמש נקודות שבהן יכול גוף קטן, המושפע רק מכוח הכבידה, להישאר באופן יציב, ללא השקעת אנרגיה, בזמן סיבוב שלו ביחס לשני גופים הנעים בהשפעת הכבידה).

קנטאורים (גופים במסלול בין צדק ונפטון), ואובייקטים טרנס נפטוניאנים (מעבר לנפטון). האובייקט הטרנס נפטוני הגדול ביותר (קוטרו גדול מ 2000 ק"מ) גדול בהרבה מהאסטרואיד הגדול ביותר שנחקר ב **Main-Belt**. "אסטרואידים" חיצוניים אלו נוטים להיות פחות סלעיים

וקרחיים אשר הם שאריות חלקיקים מתהליך היווצרות מערכת השמש החיצונית, שהתרחש לפני 4.6 מיליארד שנים. כשכוכבי הלכת במערכת השמש נוצרו, הדבר הראשון שהתקבל הם צבירים זעירים של אבק במערכת השמש הפנימית, ואבק וקרח במערכת השמש החיצונית בגלל השפעת כוח הכבידה החלש של השמש והמרחק ממנה. קבוצה זו של עצמים המכונה "חגורת קויפר" נחשבת כאחד ממאגרי השביטים.

יש חוקרים המפרידים בין **minor planets** לשבריהם, המכונים מטאוריטים וקובעים חסם תחתון של 50 מטרים. חסם זה לקוטר הגוף קשור למידת הנזק שהוא יגרום במפגש אפשרי עם כדור-הארץ: בעוד שגוף הקטן מ-50 מטר יתפרק במעברו באטמוספירה, גוף גדול יותר יוכל לגרום לפגיעה משמעותית בכדור-הארץ וזהו האסטרואיד.

2.2. המוטיבציה לחקר אסטרואידים

העניין המדעי באסטרואידים נובע במידה רבה מכך שהם נחשבים ה"פסולת הקדומה ביותר" מתהליך היווצרות מערכת השמש. כמו כן גובר העניין מאחר שחלק מאובייקטים אלה יכולים להתנגש בכדור הארץ. בנוסף, מהווים האסטרואידים מקור עשיר של חומרים ומינרלים שניתן לנצל לחקר מערכת השמש שלנו.

אסטרואידים מייצגים את שאריות החומר שנותרו מתהליך יצירת כוכבי הלכת הפנימיים, כולל כדור הארץ. אסטרואידים הם גם המקורות של רוב המטאוריטים שפגעו בכדור הארץ, ורבים ממטאוריטים אלה כבר נתונים למחקרים וניתוח כימי ופיסי מפורט. אם ניתן לזהות אסטרואידים מסוימים כמקורות לכמה מהמטאוריטים האלו כי אז הידע מפורט של ההרכב והמבנה של המטאוריט יספק מידע חשוב על התנאים שמהם נוצר כדור הארץ לפני 4.6 מיליארד שנים.

אסטרואידים חשובים גם כי השפיעו וישפיעו בעתיד על שינויים בביוספירה של כדור הארץ (המרכיב הביולוגי של מערכות כדור הארץ) באופן משמעותי. ייתכן שהמולקולות מבוססות פחמן והחומרים הנדיפים ששימשו כאבני הבניין של החיים על כדור הארץ הובאו לכאן באמצעות אסטרואיד והשפעות שביטים.

לכן המחקר של אסטרואידים עשוי להחזיק את המפתח לשאלה כיצד נמסרו אבני הבניין של חיים לכדור הארץ הקדום כלומר הגעתם של שביטים ואסטרואידים לכדור-הארץ הובילה ליחס ההכרחי של חומרים שנדרשו לחיים אורגניים, "אשר בסופו של דבר התפזרו

באוקיאנוסים והתחילו את התהליך הארוך שהוביל להתפתחותם של החיים על פני כדור-הארץ".

בכל יום חודרים לאטמוספירת כדור הארץ טונות של חומר בין-פלנטרי. רבים מהחלקיקים הנכנסים הם כל כך קטנים שהם נשרפים באטמוספירה של כדור הארץ לפני שהם מגיעים לקרקע. חלקיקים אלה נראים לעתים קרובות ומכונים מטאורים או כוכבים נופלים. הרוב המכריע של החומר המגיע לפני השטח של כדור הארץ מקורו בשברי ההתנגשות של אסטרואידים אחד בשני לפני עידנים רבים.

בממוצע כל כ-100 שנים ניתן לצפות שאסטרואידים סלעיים/ברזלים הגדולים יותר מ-50 מטרים יגיעו לפני השטח של כדור הארץ ויגרמו לאסונות מקומיים או לגלי גאות ושפל שיכולים להציף את אזורי החוף הנמוכים.

בממוצע של כל כמה עשרות מיליוני שנים, אסטרואידים גדולים יותר מקילומטר וחצי יכולים לגרום לאסונות גלובליים.

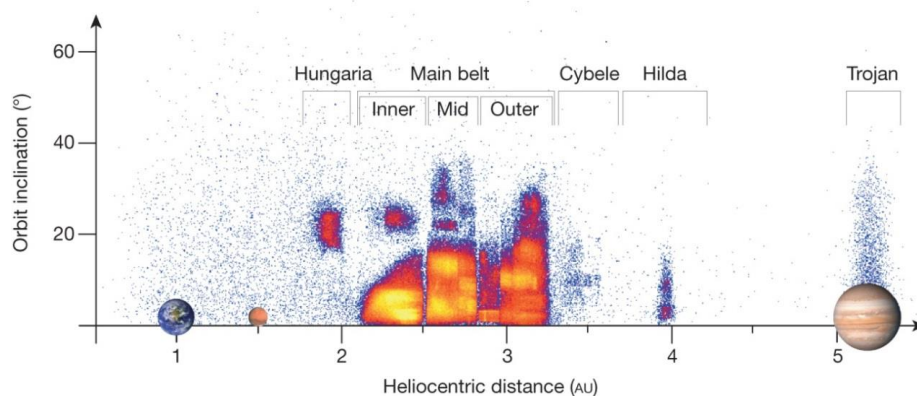
הסיכוי שאסטרואיד יפגע בכדור הארץ ויגרום לנזק חמור היא קטנה מאוד אבל בגלל התוצאות ההרסניות של פעולה כזו אנחנו צריכים ללמוד מקרוב על הסוגים השונים של אסטרואידים ולהבין את המבנה שלהם, גודלם, ומסלוליהם העתידיים.

האסטרואידים שעלולים להיות מסוכנים ביותר משום שהם הקרובים ביותר לכדור הארץ הם גם העצמים שיכולים להיות מנוצלים בקלות רבה ביותר לחקר חומרי גלם. חומרי גלם אלו יכולים לשמש בפיתוח מבנים בחלל וביצירת דלק טילים שיידרשו כדי לחקור וליישב את מערכת השמש שלנו במאה העשרים ואחת. ההערכה היא כי עושר המינרלים בחגורת האסטרואידים (בין מסלולו של מאדים לצדק) שווה ערך לכ-100 מיליארד דולרים עבור כל אדם על פני כדור הארץ היום.

2.3. מסלולי האסטרואידים

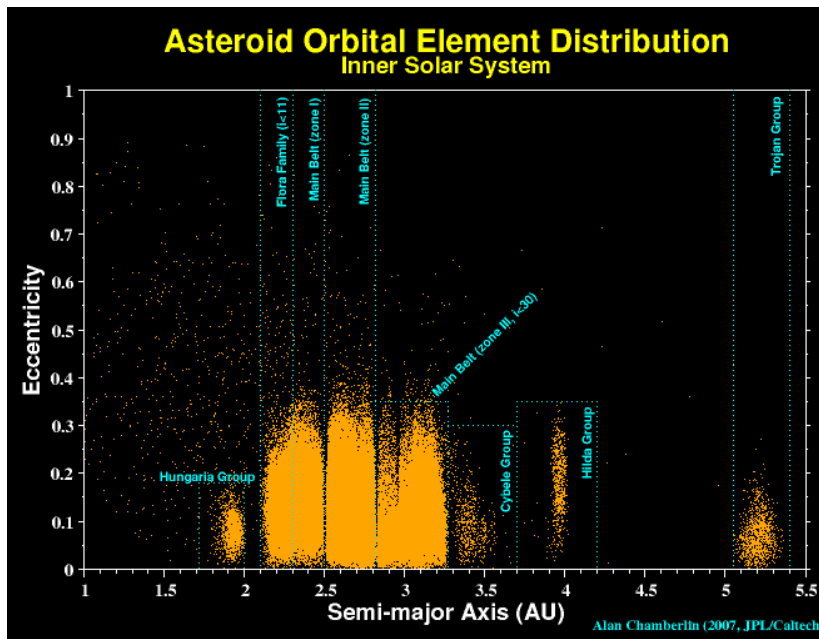
רוב האסטרואידים בחגורת האסטרואידים מקיפים את השמש במסלולים אליפטיים, יציבים, באותו כיוון כמו סיבוב של כדור הארץ ולוקח להם 3-6 שנים כדי להשלים סיבוב מלא סביב השמש.

התרשים הבא מראה את מיפוי האסטרואידים מסלולם סביב השמש. כמו כל הגופים במערכת השמש, מסלולי האסטרואידים אינם עיגולים מושלמים, אלא אליפטיים. האקסצנטריות היא מדד של כמה רחוק מסלול הגוף ממסלול מעגלי, ככל שהמספר קטן יותר כך קרוב יותר המסלול להיות מעגלי. כמו כן מסלולם אינו בקו מישור המלקה (מישור כוכבי הלכת) אלא מפוזר עד זווית של כ-40° ביחס למישור.



איור 2: מיקום והחלוקה לקבוצות של האסטרואידים במערכת השמש. רוב האסטרואידים נמצאים בין מאדים לצדק (DeMeo and Carry, 2014).

הפרעות גרביטציוניות של צדק גרם לחלוקת החגורה לאזורים ולקבוצות מוגדרות (איור 3).



איור 3: התרשים מציג את יחס האליפטיות (e) של מסלולי האסטרואידים כפונקציה של מרחקם הממוצע מהשמש (a).

לפי התרשים ניתן לאפיין קבוצות משנה בחגורת האסטרואידים והוא אף מדגיש את מיקומן של קבוצות נוספות, דוגמת קבוצת הונגריה בין $1.8 \text{ AU} < a < 2.0 \text{ AU}$,

)

קבוצת סיביל בין $3.3 \text{ AU} < a < 3.5 \text{ AU}$,

קבוצת הילדה ב- $a=4.0 \text{ AU}$

קבוצה גדולה נוספת של אסטרואידים טרויאנים נמצאת ב- $a = 5.2 \text{ AU}$, שמהווה גם את המרחק הממוצע של כוכב הלכת צדק מהשמש.

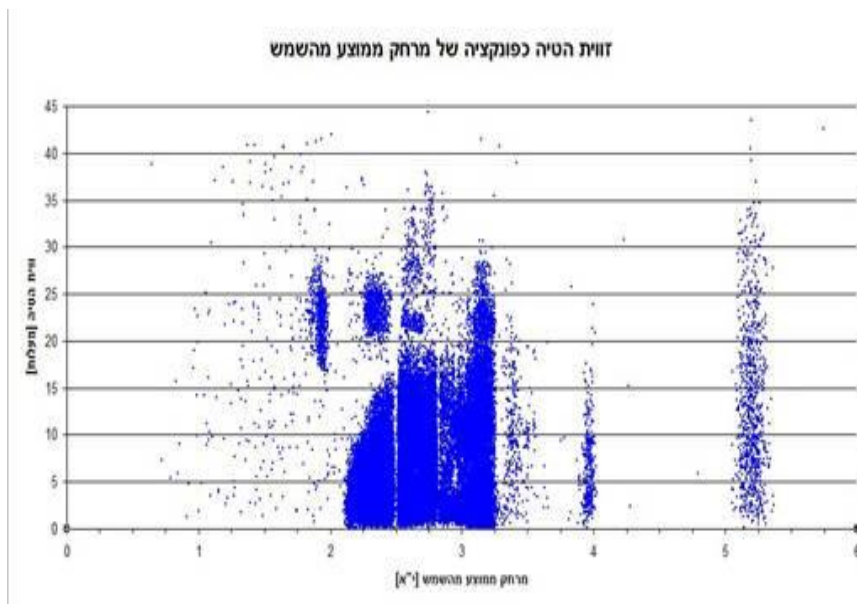
עובדה מעניינת נוספת הנלמדת מהתרשים, הינו ערך האליפטיות הגבוה של האסטרואידים. בעוד ערך האליפטיות הממוצע של כוכבי הלכת (ללא פלוטו) עומד על 0.06 עומד הערך התואם של האסטרואידים על כ- 0.136 - כאשר אלפי אסטרואידים הם בעלי ערך המגיע עד כדי 0.4 .

מסלולים אליפטיים שכאלו מעידים על גופים קטנים ובלתי מסיביים, בעלי מסלולים שמושפעים מגופים בעלי כבידה משמעותית דוגמת השמש וצדק ומהתנגשויות תכופות ביניהם.

התרשים הבא מציג את זווית ההטיה (**i**) **inclination** (במעלות) של מסלולי האסטרואידים כפונקציה של מרחקם הממוצע מהשמש (**a**) ומוסיף ממד נוסף לתפיסת מסלולי האסטרואידים. מגרף זה ניתן ללמוד למשל, שחברי קבוצת הונגריה, הם בעלי הטיה מסלולית גבוהה של 17 עד 27 מעלות ממישור המילקה.

הגרף מאפשר לזהות גם תת קבוצות בתוך חגורת האסטרואידים גופה דוגמת: קבוצת פוקאאה, הנמצאת ב, ($e=0.25$), ($i=230$), ($a=2.4AU$) או קבוצת פלורה, הנמצאת ב ($2.3 < a < 2.06$ א"א), ($0.08 < e < 0.2$), ($i < 100$). שלוש קבוצות נוספות הנמצאות בחלק החיצוני של חגורת האסטרואידים, מוגדרות על-סמך שלוש הפרמטרים המסלוליים (**a, i, e**).

קבוצת קורוניס (**Koronis**) נמצאת ב ($a=2.85$ א"א), ($e=0.05$), ($i=20$).
 קבוצת אאוס (**Eos**) נמצאת ב ($a=3.01$ א"א), ($e=0.17$), ($i=100$).
 וקבוצת ת'מיס (**Themis**) נמצאת ב ($a=3.13$ א"א), ($e=0.15$), ($i=10$).



איור 4: זווית הטיה (במעלות) כפונקציה של מרחק ממוצע מהשמש (בי"א – יחידה אסטרונומית)

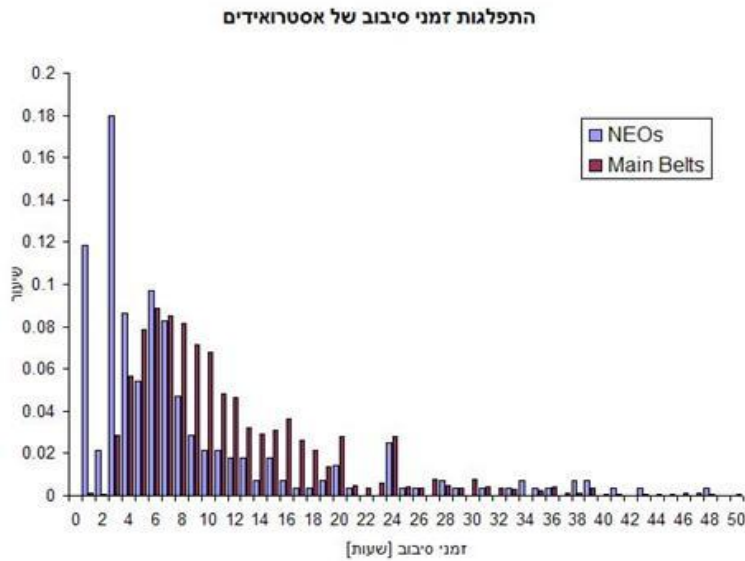
כיום קיימים אמצעים ממוחשבים המציגים את מסלולו של כל אסטרואיד. כמו כן מציגים האתרים בצורה טבלאית פרמטרים רבים הקשורים למסלול האסטרואיד.

משפחות אסטרואידים בחגורה הראשית					
הערות	i במעלות	e ערך האליפטיות	a מרחק ממוצע מהשמש ב"א	אסטרואיד עיקרי	משפחה
	8.3 – 5	0.16 – 0.03	2.48 – 2.26	(4) Vesta	ווסטה
נוצרה לפני כ- חצי מיליארד עד מיליארד שנה	8 - 1.5	0.23 – 0.03	2.35 – 2.15	(8) Flora	פלורה
	6.8 – 3.5	0.19 – 0.09	3.24 – 3.06	(10) Hygiea	הייג'יאה
	15.8 – 11.1	0.22 – 0.08	2.72 – 2.53	(15) Eunomia	אאנומיה
	3 - 0	0.22 – 0.09	3.24 – 3.08	(24) Themis	ת'מיס
	32 - 18	< 0.1	2.5 - 2.25	(25) Phocaea	פוקאאה
	4.3 – 1.5	0.21 – 0.12	2.5 – 2.41	(44) Nysa	ניסה
נמצאת חיצונית לחגורת האסטרואידים	25 - 0	0.3 - 0	3.7 - 3.27	(65) Cybele	סיביל
נמצאת חיצונית לחגורת האסטרואידים	20 - 0	< 0.07	4.2 - 3.7	(153) Hilda	הילדה
נוצרה לפני כ- 2-3 מיליארד שנה	3.5 – 0	0.11 – 0	2.91 – 2.83	(158) Koronis	קורוניס
	17 - 12		2.706 – 2.5	(170) Maria	מריה
	12 - 8	0.13 – 0.01	3.03 – 2.99	(221) Eos	אאוס
נמצאת פנימית לחגורת האסטרואידים	34 - 16	0.18 - 0	2 - 1.78	(434) Hungaria	הונגריה
המשפחה נוצרה בהתנגשות לפני כ-5 מיליון שנה בלבד.				(832) Karin	קארין

3. רקע תיאורטי לעבודת המחקר

3.1. זמן סיבוב של אסטרואידים

כיום ידועים זמני הסיבוב העצמי של יותר מ-1,700 אסטרואידים, מתוכם מעל ל-250 NEOs.



איור 5: התפלגות זמני סיבוב של אסטרואידים סביב צירם

סיבובם של אסטרואידים סביב צירם (**Spin Rotation**) נחשף מתוך תצפיות פוטומטריות. הגוף המופנה אל הצופה משנה את בהירותו באופן מחזורי. העיקרון המנחה הוא כי פאה בעלת שטח פנים גדול המופנה אל השמש תחזיר כמות אור גדולה יותר מפאה בעלת שטח פנים קטן. מכאן ניתן להסיק כי הגוף מחזיר אור שמש בכמות שונה בזמנים שונים בהתאם לצורתו ולמועד המדידה. ניתוח כמות האור המוחזרת מהגוף כפונקציה של הזמן יכולה ללמד אותנו על זמן מחזור הסיבוב העצמי.

ניתן לראות בגרף שלמעלה, התפלגות מקסוול עבור זמן הסיבוב של גופי חגורת אסטרואידים שנמדדו, שלרוב הם גופים גדולים (עשרות ק"מ ומעלה, ביחס ל-NEOs שנמדדו בסדר גודל של ק"מ אחד ומטה). התפלגות כזו מאששת את המחשבה שאת זמני הסיבוב הנוכחיים

סיגלו לעצמם אסטרואידיים של החגורה המרכזית, מתוך תהליכי התנגשות, בדומה להתפלגות מקסוולינית המתקבלת עבור חלקיקי גז אידיאלי. במקביל, ניתן לראות כי התפלגות סיבובם של ה-NEOs איננה מקסוולינית אלא בעלת תבנית שטוחה יותר עם שיא משמעותי בערך של 3 שעות זמן סיבוב. מכאן נולדה ההשערה שמלבד התנגשויות קיים מנגנון נוסף הקובע את זמני הסיבוב של ה-NEOs ו/או הגופים הקטנים.

מעבר לכך, מרכז העקומה המקסוולינית של חגורת האסטרואידיים גדול פי 2 מזה של ה-NEOs ועומד על כ-6 שעות, כלומר המנגנון הנוסף מצליח להאיץ בצורה משמעותית את מהירות הסיבוב של ה-NEOs.

ייתכן ואותו מנגנון המשפיע על זמני הסיבוב העצמי של האסטרואידיים הינו תוצר של תופעת YORP (על-שםם של Yarkovsky – O'Keefe – Radzievskii – Paddack). קרני השמש מחממות את הגוף באופן אסימטרי בגלל צורתו, כך שגם החום נפלט ממנו בצורה אסימטרית ובפעולת "רתע" זו משתנה התנע הזוויתי של הגוף והוא מגדיל, או מקטין (בהתאם לכיוון הסיבוב שלו), את תדירות הסיבוב העצמי ω .

עובדה מעניינת נוספת נלמדת מזמני הסיבוב של האסטרואידיים ומההתייחסות לעובדה כי הגבול התחתון לזמן הסיבוב ($P_{min} = \text{const}$) של גופים גדולים עומד על 2.2 שעות.

אסטרואיד שאיננו גוש אחיד (Monolith) ואיננו מחזיק את עצמו בעזרת חוזק מתיחה בלבד אלא ע"י כוח הכבידה, יתפרק במידה ויסתובב מהר יותר.

מכיוון שגבול זה אכן נמדד בתצפיות, ייתכן והוא מלמד כי אסטרואידיים רבים מאד הינם אוסף של חלקיקים הנעים כגוף אחד בזכות כוח הכבידה שהם מפעילים זה על זה. מבנה כזה מכונה "ערמת חצץ" (Rubble Pile) וכיום הוא מהווה מודל מרכזי בהבנת טבעם של האסטרואידיים.

ייתכן וגופים כאלו, שהסתובבו במהירות רבה מדי, התפרקו למערכת כפולה, משולשת וכדומה. ההתפרקות והתרחקות החלקים זה מזה מקטינה את התנע הזוויתי, כאשר החלקים ממשיכים לנוע סביב מרכז המסה.

60 מערכות כפולות כאלו נצפו בקרב אסטרואידיים כאשר כמעט מחצית מהם, 23 גופים, הינם NEOs. כל ה-NEOs הכפולים משלימים סיבוב עצמי ב-2-4 שעות והמרחק בין חברי

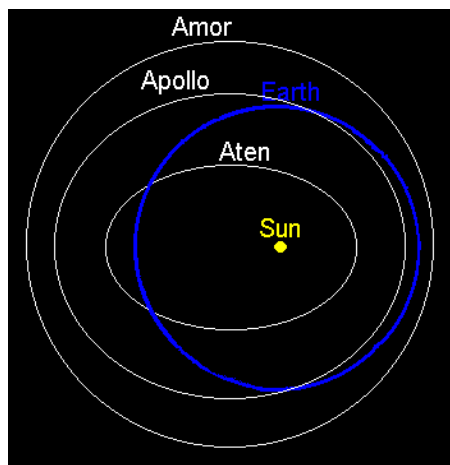
כל צמד הינו קטן יחסית, עובדות התומכות ברעיון שהמדובר בגוף אב במבנה של ערמת חצץ, שהתפרק ולא בגופים שנלכדו זה בכבידתו של זה.

על-אף (החסם התחתון P_{min}), נצפו אסטרואידים הסובבים במהירויות הקטנות משעתיים. מלבד אסטרואידים מהירי סיבוב מוכרים גם גופים איטיים למדי. זמנים אופייניים כאלו נעים בין מספר ימים ארציים ומגיעים גם לשיא של 17.4 ימים עבור **253 Mathilde** ו-50 ימים עבור **288 Glauke**. ניתן לאפיין תת קבוצת האסטרואידים ה-**NEOs** (הקרובה לארץ) המחולקת לשלוש קבוצות אתונה (אטן), אפולו ואמור, לפי מסלול ההקפה שלהם סביב השמש.

קבוצת אמור מאופיינת ע"י מסלולים חיצוניים למסלול כדור הארץ ופנימיים למסלולו של מאדים. אשר ערך מחצית הציר הראשי (a) הוא $a > 1 \text{ AU}$, וערך הפריהליון (q) נע בין $1.0167 < q < 1.3 \text{ AU}$. והיא מהווה 32% מן ה-**NEOs**.

קבוצת אפולו מאופיינת ע"י מסלוליהם החוצים את מסלול כדור הארץ מבחוץ. אשר ערך מחצית הציר הראשי (a) הוא $a > 1 \text{ AU}$, וערך הפריהליון (q) הוא $q < 1.017 \text{ AU}$. והיא מהווה 62% מן ה-**NEOs**.

קבוצת אטן מאופיינת ע"י מסלוליהם החוצים את מסלול כדור הארץ מבפנים. אשר ערך מחצית הציר הראשי (a) הוא $a < 1 \text{ AU}$, וערך האפהליון (Q) הוא $Q > 0.9833 \text{ AU}$. והיא מהווה 6% מן ה-**NEOs**.



איור 6: מסלולו של כדור הארץ ביחס למסלוליהם של שלוש קבוצות של אסטרואידים קרובי ארץ: אמור, אפולו ואטן.

3.2. פוטומטריה ככלי לחקר אסטרואידים

האור המגיע מן האסטרואידים יכול ללמדנו רבות על תכונותיהם השונות. הגודל, הצורה, זמן הסיבוב, זווית ציר הסיבוב, הרכב פני השטח, המבנה הפיסי, הצפיפות – על כל אלה ניתן להסיק מתוך מדידת האור המוחזר מפני האסטרואידים. מדע זה מכונה פוטומטריה (מדידת האור) ובבסיסו, עקומת האור, גרף המציג את בהירותו המשתנה של האסטרואיד כפונקציה של הזמן, כלומר איך משתנה כמות אור השמש המוחזר מהאסטרואיד.

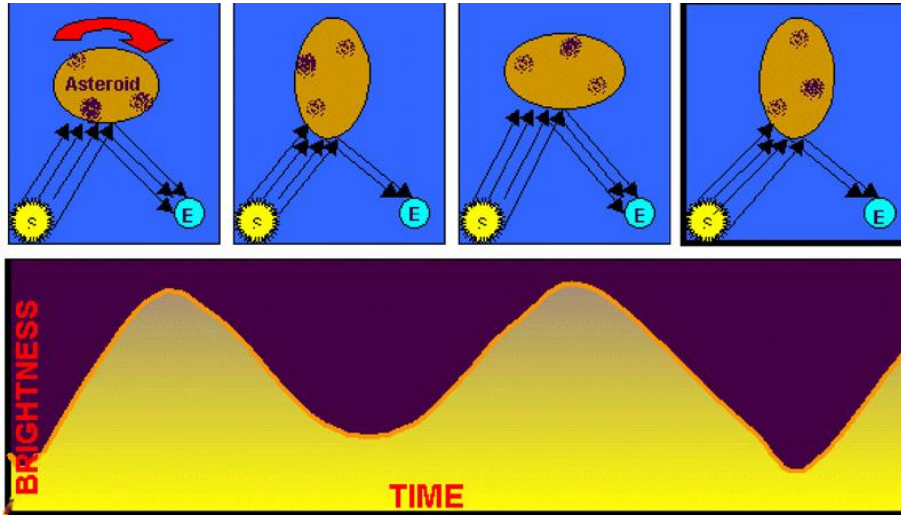
העובדה כי האסטרואיד מסתובב סביב צירו גורמת לשינויים בכמות אור השמש המוחזרת ממנו כלפי הצופה על כדור הארץ.

לעקומת האור, המציגה הבדלים אלו, יש נקודות מקסימום ונקודות מינימום. אם אור השמש מוחזר מפאה גדולה של האסטרואיד נבחין בנקודת מקסימום בעקומת האור. אם האור מוחזר מפאה קטנה של האסטרואיד נבחין בנקודת מינימום.

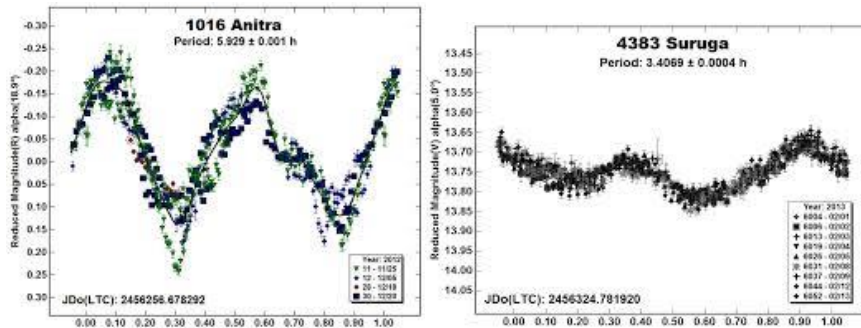
הזמן שלוקח לאסטרואיד להסתובב מפאה בעלת שטח גדול לפאה בעלת שטח קטן מאופיין על ידי הזמן בין נקודת מקסימום לנקודת מינימום בעקומת האור.

במילים אחרות, הבהירות של האסטרואידים משתנה בצורה מחזורית כפונקציה של הזמן. מחזור זה נגרם עקב סיבוב הגוף סביב עצמו הגורם לשינוי מחזורי בגודל שטח החתך של האסטרואיד המופנה אל הצופה. השינוי בשטח החתך הנראה מעלה ומוריד חליפות את שטף הקרינה שמגיע אל הטלסקופ ומאפשר לאסטרונום להעריך את תדירות הסיבוב של האסטרואיד. עקומות אור של אסטרואידים, מציגות בדרך ברורה מחזוריות זו.

התמונה להלן ממחישה את ההסבר לעיל:



איור 7: הדגמה בהירות כפונקציה של זמן ביחס לפאה המוארת



איור 8: דוגמאות לעקומת האור בהירות כפונקציה של הזמן

בנוסף, אזורים שונים על פני הגוף בעלי מאפיינים שונים: גודל, אלבדו: (הוא גודל חסר מימד המבטא את מידת ההחזרה של משטח או גוף. זהו היחס בין כמות הקרינה האלקטרומגנטית המוחזרת מגוף או משטח לכמות אשר פגעה בו. התוצאה אשר לרוב מבוטאת באחוזים בין 0% ל-100% היא מושג חשוב בקלימטולוגיה ואסטרונומיה), מרקם או צבע) יכולים להחזיר את אור השמש בצורה שונה ובכך לייצר מחזוריות במדידת הבהירות (Pravec et al., 1997).

יש שלושה סוגים של פוטומטריה – השוואתית, יחסית ואבסולוטית. פוטומטריה השוואתית, היא המדידה של שינויים בבהירות של אובייקט לאורך זמן; המדידות האלה מופקים לעקומת אור של האובייקט.

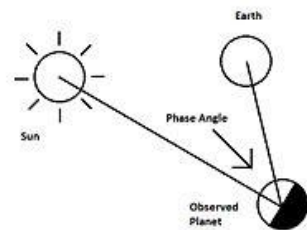
פוטומטריה יחסית, היא מדידת הבהירות של האובייקט ביחס למספר גופים בסביבתו. ואילו פוטומטריה אבסולוטית (מוחלטת) היא מדידת הבהירות הנראית של אובייקט במערכת פוטומטרית סטנדרטית; ניתן להשוות מדידות אלה עם מדידות פוטומטריות מוחלטות אחרות שהושגו ע"י טלסקופים או מכשירים שונים. ברוב המקרים, עם פוטומטריה השוואתית ניתן להגיע לרמת דיוק גבוהה, ואילו פוטומטריה המוחלטת קשה ביותר להגיע על ידי לדיוק.

לצורך המחקר אותו בצענו השתמשנו בשיטה של פוטומטריה השוואתית ויחסית.

3.3 השפעות חיצוניות על מדידת החזרת האור מן האסטרואיד

3.3.1 זווית המופע

בהירות האסטרואידים תלויה בגורם נוסף – זווית המופע – הזווית בין השמש לארץ כפי שהיא נראית מהאסטרואיד.

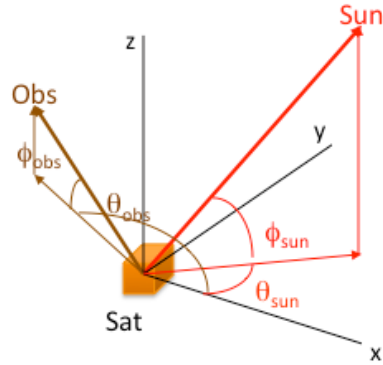


איור 9: דוגמא זווית מופע בין כדור הארץ והשמש כפי שנראית מפלנטה מסוימת

כאשר הזווית שווה לאפס, והאסטרואיד, הארץ והשמש נמצאים על אותו הישר, האסטרואיד נמצא מול השמש ושטח הפנים המואר של האסטרואיד יהיה מרבי מבחינת צופה על הארץ ובהירותו תהיה מרבית.

חישוב זווית המופע:

בהינתן מערכת כמו שמתוארת באיור הבא: שמש פלנטה וגוף נצפה. (באנלוגיה לעבודה שלנו שמש, כדור הארץ והאסטרואיד שצפינו בו).



איור 10: מערכת קואורדינטות עבור גוף נצפה

מציג את 4 זוויות הנדרשות כדי לעקוב אחר עמדות אלה. שתי זוויות נדרשות לתאר מיקום של השמש, ושתי זוויות כדי לתאר את עמדתו של הצופה.

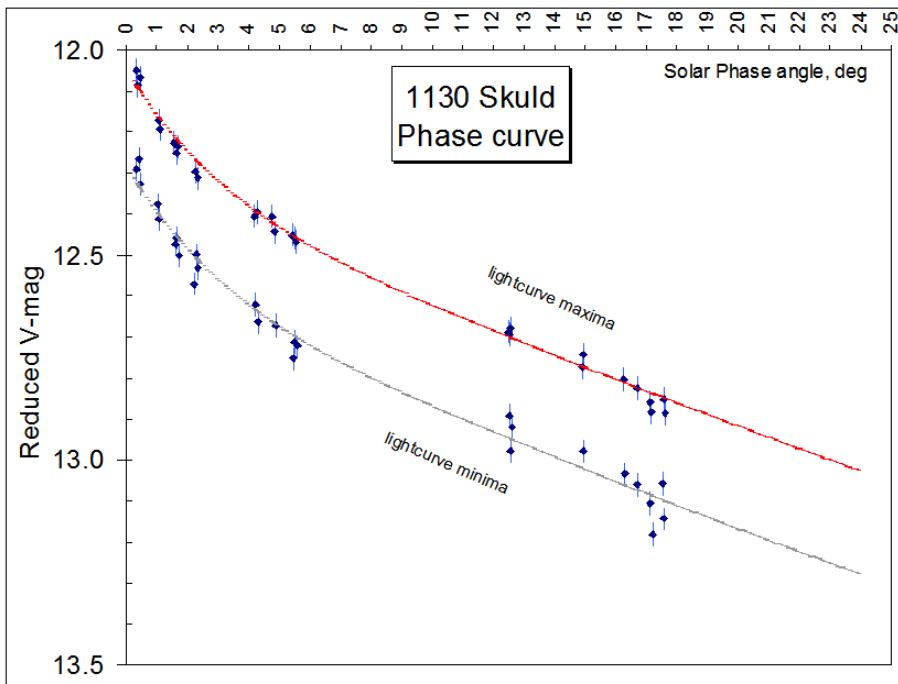
מגדירים המשוואות הבאות:

$$\hat{n}^{Sun}(t) = \cos\theta_{Sun}(t)\cos\phi_{Sun}(t)\hat{x} + \sin\theta_{Sun}(t)\cos\phi_{Sun}(t)\hat{y} + \sin\phi_{Sun}(t)\hat{z}$$

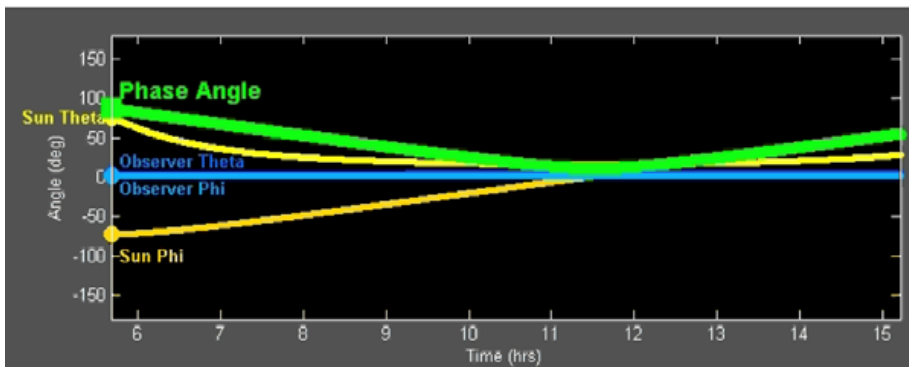
$$\hat{n}^{Obs}(t) = \cos\theta_{Obs}(t)\cos\phi_{Obs}(t)\hat{x} + \sin\theta_{Obs}(t)\cos\phi_{Obs}(t)\hat{y} + \sin\phi_{Obs}(t)\hat{z}$$

$$Phase\ angle(t) = \arccos(\hat{n}^{Sun}(t) \cdot \hat{n}^{Obs}(t))$$

כאשר זווית המופע תגדל, תקטן בהירות האסטרואידי בהתאמה, כפונקציה של שטח הפנים המואר אבל גם כפונקציה של מידת החזרת האור (פונקציית פיזור האור).

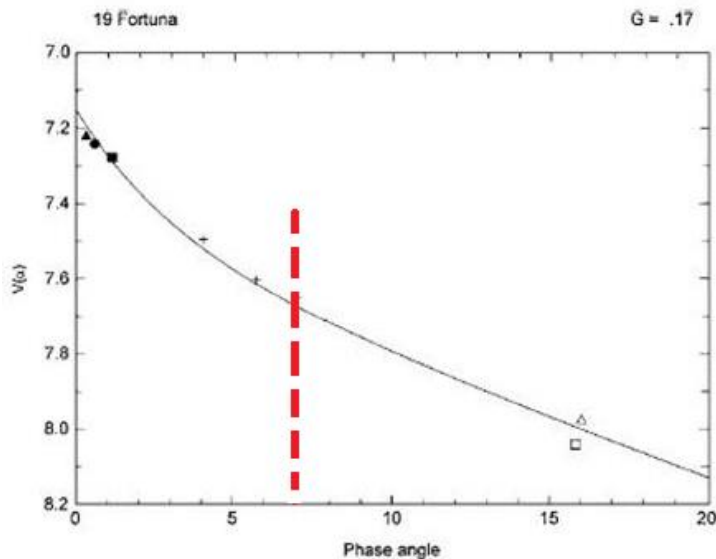


איור 11: זווית המופע כתלות בזמן עבור 1130 Skuld



איור 12: זווית המופע כתלות בזמן

הצגת השינוי בבהירות האסטרואיד כפונקציה של השינוי בזווית המופע מכונה עקומת מופע (**Phase Curve**), ודוגמה מן הספרות (Harris et al., 1999) מוצגת בתרשים הבא עבור האסטרואיד **19 Fortuna** (לרוב מציגים את הבהירות הממוצעת לסיבוב).



איור 13: פונקציית פיזור האור עבור **Fortuna (19)**

ניתן לחלק את עקומות המופע לשני חלקים עיקריים: תחום לנארי בזוויות מופע הגדולות מ-7 מעלות ותחום אקספוננציאלי מ-7 מעלות ומטה. בציר **X** מודדים את זוויות המופע (במעלות), בציר **Y** מודדים את הבהירות המוחלטת (באחוזים), ו-**G** משתנה השיפוע (**Slope Parameter**): והוא משמעותי בתיאור תלות הירידה בבהירות כפונקציה של העלייה בזוויות המופע. בעוד של-**G** אין משמעות פיסיקלית מוגדרת, נמצא כי ניתן להשיג התאמה טובה של **G** ו-**H** לעקומת המופע על חלקיה האקספוננציאלי והליניארי. בהתאם להחלטת ה-**IAU**, מוגדר לכל אסטרואיד ערכי **H** ו-**G** משלו. ערך של **G = 0.15** נבחר כברירת מחדל לגופים שלא נמדד עבורם **G**. ראוי לציין שלרוב ערכי ה-**G** ניתנים בין 0 ל-1, אך גם ערכים שליליים או גדולים מאחד אפשריים.

מידת התלילות של התחום הלינארי קשורה באלבדו הגיאומטרי של הגוף – ככל שהעקומה תלולה יותר כך פונקציית הפיזור מתארת כושר לקוי של החזרת האור בזוויות גדולות (אל הארץ), דבר המצביע על אלבדו נמוך. לחילופין, עקומה מתונה מצביעה על אלבדו גבוה.

הקו האדום הוא מפריד בין שני תחומים בגרף: מזוויות של 0 מעלות עד 7 מעלות, בזוויות 0 מעלות האסטרואיד בשיא בהירותו כי הוא מקביל בצורה שלמה לצופה על כדור הארץ וכל שהזוויות גדלה השינוי בבהירות האסטרואיד הוא בכיוון ירידה אקספוננציאלית.

מזווית 7 מעלות ויותר (בגרף עד 20 מעלות) עדיין הבהירות יורדת אבל בקו לינארי כלומר השיפוע קבוע – שינוי קבוע בבהירות.

ברור שתהיה אחר כך זווית ונקבל בהירות אפס מכיוון שלא נראה את האור המוחזר מהאסטרואיד בגלל השינוי במקומו ביחס לשמש וכדור הארץ.

3.3.2 השפעת השתנות המרחק מהצופה

מחזור הסיבוב העצמי שחושב למעלה הוא המחזור הסינוידי, כלומר המחזור שבו הגוף משלים הקפה אחת סביב עצמו מנקודת ראותו של צופה על הארץ, ולא ביחס לנקודה קבועה עבור המחזור הסינדרלי (תנועת הכוכבים על כפת השמיים). המחזור הסינוידי יכול להשתנות משמעותית עם הזמן עקב המרחק הקצר של אסטרואידים קרובי ארץ לכדור-הארץ ומסלולם האליפטי, הגורמים לשינויים מהותיים במהירות תנועתם סביב השמש. ככל שעובר זמן רב יותר בין ליל התצפית הראשון לאחרון, השינוי במחזור הסינוידי משמעותי יותר, וכך לא יתאפשר חיבור של עקומות האור מתצפיות אלה בגלל הבדל במופע הסיבוב. השפעה זו הינה בסדר גודל שני ולא נתייחס אליה במהלך העבודה המעשית.

3.3.3 הרכב חומרי שונה

חומרים שונים על פני הגוף יחזירו אורכי גל ספקטראליים שונים באופן שונה, כך ששינוי הקרינה של צבע מסוים (אורך גל) יספק מידע על תכונות החומר שעל פני השטח של האסטרואידים ובנוסף יוכל להוסיף אילוצים על חישוב זמן המחזור.

השפעה זו הינה בסדר גודל שלישי או יותר ולא נתייחס אליה במהלך העבודה המעשית.

3.4 צילום CCD

מצלמת **Charge Coupled Device - CCD** היא חיישן אלקטרואופטי שמכיל מעגל משולב ובו מערך של רכיבים בעלי קיבול, שהמטען הנצבר בהם ניתן להזרמה ולקריאה. המצלמה מורכבת ממערך של יחידות הקרויות "פיקסלים" (**Picture Element**), יחידת תמונה). כאשר נופל אור על פיקסל משתחרר אלקטרון הנאגר בבור פוטנציאל. בסוף החשיפה (שבמהלכה מגיע האור למצלמה) נקראים כל הפיקסלים, וכך מתקבלת תמונה המציגה את מספר האלקטרונים שנקראו ממערך הפיקסלים. תמונה זו משחזרת את כמות האור שנפל על כל אחד מן הפיקסלים, בהתאמה.

כל אחד מהתאים במערך התאים פוטו-אלקטריים ממיר את הספק האור הנופל עליו לזרם חשמלי. פיקסלים שאליהם מגיע הספק גבוה פולטים זרם גבוה יותר מאחרים, וכך ניתן

להבחין בין קיום אור מן המקור לבין העדרו ("חושך"), וגם להבחין בין עוצמות שונות של אור המתבטאות ברמות אפור (במקרה של מצלמת ה-**CCD** במצפה של מכון ויצמן – 64,000 רמות של אפור). איכות התמונה המתקבלת תלויה במספר הפיקסלים (הנע בין כמה מאות אלפים במצלמות באיכות נמוכה, ועד יותר מ-10 מיליון במצלמות מקצועיות).

הפיסיקה של **CCD – Charge Coupled Device**:

היא למעשה חיישן מצב מוצק הרגיש לאור. בהיחשפו לאור, האפקט הפוטו-אלקטרי גורם לשחרור אלקטרונים, אשר נאגרים בבורות פוטנציאל. לאחר שהחשיפה הושלמה, בורות הפוטנציאל "מרוקנים", והנתונים נרשמים. המחשב קורא את מספר האלקטרונים ששחררו מכל פיקסל (יחידת שטח קטנה בחיישן).

מספר האלקטרונים פרופורציוני למספר הפוטונים שפגעו בפיקסל בזמן החשיפה.

4. מדידות

4.1. בחירת האסטרואידי

מר מנוליס בחר אסטרואידי למחקר ולא חשף בפנינו את זהותו. השיקולים שהנחו אותו בבחירת האסטרואידי היו:

1. בעל זמן מחזור סיבוב קצר הקטן מ 5 שעות.
2. שינוי משרעת גבוה מסדר גודל **0.4 mag**
3. בהירות המאפשרת קבלת אות ברור הניתן לניתוח בזמני חשיפה סבירים של עד שלוש דקות לתמונה, בסדר הגודל של **10-13 mag**.
4. ליד או במרידיאן בשעת השקיעה על מנת לאפשר מספר שעות צפייה מרבי (~ 19 שעות רדיאן במועד התצפית).
5. נמצא בשדה הראיה של הטלסקופ.

4.2. מקום וזמן

תמונות האסטרואידי צולמו ממצפה הכוכבים אשר במכון וייצמן במהלך שני לילות :

1. בלילה של ה 2/10/2013 צולמו 35 תמונות משעה 18:14:28 ועד שעה 20:01:45. שעות ישראל.
2. בלילה של ה 15/10/2013 צולמו 55 תמונות משעה 16:48:14 ועד שעה 19:06:39. שעות ישראל.

אורך כל תמונה היה 180 שניות (3 דקות).

התמונות צולמו על ידי מר אילן מנוליס מנהל המצפה.

4.3. הטלסקופ

הטלסקופ במצפה הינו מסוג **Schmidt Cassegrain Meade 16" ACF**. טלסקופ עם מצלמת **CCD** ומכשור מתקדם ב-אוטומציה.

טלסקופים קטדיופטריים מבוססים על מערכת אופטית הבנויה מ-3 אלמנטים – עדשה קדמית, מראה ראשית וכן מראה משנית המחזירה את קרני האור אל החלק האחורי של המכשיר.

הטלסקופ בעל מערכת אופטית מטיפוס **Advanced Coma Free**, מפתח הטלסקופ הוא 16 אינץ' (כ- 41 ס"מ). שדה הראייה שלו הוא 11.1×16.6 דקות קשת. רזולוציית העקיבה של הטלסקופ היא חצי דקת קשת.

4.4. המצלמה

מצלמת ה-**CCD** במצפה הינה מסוג **ST8-XME** בעלת רזולוציה $1,020 \times 1,530$ פיקסלים. בדרך כלל כאשר מצלמים אסטרואידיים משתמשים בפילטר מסוג **R (Red)**, בסביבות **658 nm**. מטרתו קליטת אור רב יותר מן האסטרואידיים, מאחר וגופים אלו מחזירים היטב את אור השמש באורכי גל של האור האדום בספקטרום הנראה. במקרה של הצילומים שלנו נעשה שימוש בפילטר מסוג **V (Visual)**, בסביבות **551 nm**, המציג את האובייקטים באורכי גל מסוננים קרובים ככל האפשר לאלו שרואה העין שלנו.

4.5. ביצוע מדידות

במהלך שני הלילות הנ"ל צולם האסטרואיד על רקע כוכבים נוספים כך שהתמונות כללו שדה ראייה (**field of view**) גדול מספיק על מנת לאפשר השוואה בין שינויים בכמות האור המוחזרת מהאסטרואיד לבין שינויים בכמות האור המוחזרת מכוכב. השוואה זו מאפשרת לסנן שינויים בכמות האור שאינם נובעים מסיבוב האסטרואיד אלא מתנאים חיצוניים אובייקטיביים.

הכוכב שלפיו בוצעה ההשוואה מכונה בהמשך העבודה **REF** והאסטרואיד **OBJ**. בלילה של ה-2/10/2013 צולמו 35 תמונות.

בלילה של ה-15/10/2013 צולמו 55 תמונות, ובתמונות קשה להבחין מי מהעצמים הוא האסטרואיד ומי הכוכב.



איור 14: תמונה אמיתית שנלקחה ע"י מר מנוליס לאסטרואידי

ריכזנו את כל התמונות לסרטון וידאו על מנת לאפשר זיהוי קל של האסטרואידי. ניתן לשים לב כי בסרטון כל הכוכבים ברקע נשארים במקום והגוף היחיד שזז הינו האסטרואידי.

ניתן לצפות בסרטון:

(להכניס הסרטונים)

4.6 קליברציה Calibration

המידע המתקבל ממצלמת ה **CCD** חלקו מידע "טוב" המתקבל מהעצם וחלקו "רעש". על מנת לקבל מידע מדויק ככל האפשר יש לחזק את הסיגנל "הטוב" ככל האפשר ולהחליש את ה"רעש". רוב הרעש מגיע מהרקיע (כולל קרינה קוסמית ואופטית), ממצלמת ה CCD (אבק, חום ועוד) ומהטלסקופ.

היחס בין מידע טוב נגדיר אותו **signal** ורעש **noise** נקרא משואת SNR. ואפשר להגדיר:

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}},$$

אשר **P signal** עוצמת המידע הטוב ו- **P noise** עוצמת הרעש.

או ע"י :

$$\text{SNR} = \frac{\mu}{\sigma}$$

אשר μ הוא ממוצע האות או ערך התצפית, ו- σ סטיית התקן של הרעש או הערכתם.

התמונות שקיבלנו בלילה 2/10/2013 עברו תהליך של "ניקוי" מרעשים (**calibration**)

שאינם באמת חלק מה **image** של האסטרואידי באופן הבא :

1. שימוש ב **BIAS frame** – צילום למשך זמן חשיפה קצר ביותר שהמצלמה מאפשרת

על מנת לקבל דמות (**image**) של הרעשים הפנימיים של מצלמת ה **CCD**. צילום

מספר תמונות כאלה ומיצוע שלהן משאיר בידינו דמות הנקראת **master bias**

frame.

2. שימוש ב **dark frame** - צילום המבוצע באותה טמפרטורה ומשך כמו צילום תמונה

אחת של האסטרואידי אך בלי לפתוח את צמצם המצלמה. הצילום קולט רעשים

הנובעים מהתחממות המצלמה במהלך הצילום. כדי ליצור **master dark frame**

עלינו להפחית מכל **dark frame** שצילמנו את ה **master bias frame**. מיצוע

התמונות שהתקבלו משאיר בידינו דמות הנקראת **master dark frame**.

3. שימוש ב **Flat frame** על מנת לפצות על חוסר אחידות בדרך האופטית של קרני

האור.

יצירת ה **Flat field** אמורה להיות מבוצעת על ידי צילום בתנאים זהים לצילום

האסטרואידי אך בפועל נהוג לכוון את הטלסקופ לכיוון מערב (הדמדומים), כשהוא

מופנה באזימוט (גובה) העולה על 45 מעלות. הנ"ל נותן תמונה טובה של ה-

"לכלוכים" בנתיב האופטי, המייצרים "בייגלך" בתוצר הסופי, אותם יש לנקות כדי

לקבל תמונת שדה אחידה.

ה **Flat field** מייצג את תגובת כל המערכת (המצלמה והטלסקופ) וכולל אבק,

החזרות אופטיות, רגישות שונה של פיקסלים ועוד. (ללא שימוש ב **flat field** נוכל

לאתר צורות "בייגלה" על הדמות כתוצאה מגרגירי אבק במערכת).

לסיכום התהליך, תמונה שעברה תהליך קליברציה שלם מכילה את המידע הבא:

$$\text{Calibrated} = (\text{Raw-Bias-Dark})/\text{Master Flat}$$

4.7. עיבוד תמונה

לאחר עיבוד על התמונות עברנו לשלב ניתוח המידע.

התוכנה ששימשה אותנו היא **MaximDL** (<http://www.cyanogen.com>) ניתן להוריד גרסת **evaluation** לתקופת עבודה מוגבלת.

התוכנה מאפשרת לקבל נתונים על עוצמת האור שהגיעה מהגוף הנחקר על ידי: טעינת קבוצה של תמונות לתוכנה.

סימון הגוף המשתנה, **OBJ** (**Object**), במקרה שלנו האסטרואיד) ידנית על ידי המשתמש בשתי תמונות ראשונות בלבד.

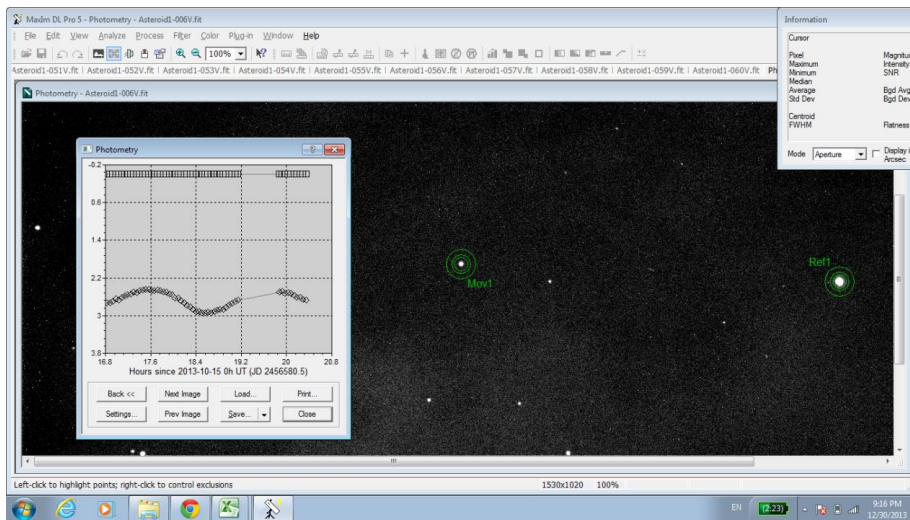
סימון גופים קבועים **REF** (**Reference**), במקרה שלנו כוכבים בולטים באזור האסטרואיד) ידנית על ידי המשתמש על שתי תמונות ראשונות בלבד.

התוכנה סורקת את כל התמונות ומבצעת זיהוי של הכוכבים הקבועים והאסטרואיד בכל יתר התמונות

התוכנה מעבדת את כמות האור בכל תמונה של כל האובייקטים ומחשבת את הפרשי האור בין הגופים הקבועים **REF**, לאסטרואיד **OBJ**.

התוכנה מחזירה למשתמש את עוצמת האור האמיתי שפלט האסטרואיד.

בתמונה ניתן לראות את שלבים 2,3 ו 6 שתוארו להלן.



איור 15: עיבוד התמונה בתוכנה MAXIM DL

עיבוד הנתונים לגרפים בוצע על ידי שימוש בתוכנת אקסל.

התמונה המחזורית שקיבלנו אינה מציגה סיבוב שלם של האסטרואיד.

בהנחה שניתן להשוות את האסטרואיד לתיבה, אזי לכל "פאה" יש מקסימה שונה – סך הכול 4 מקסימה פר מחזור סיבוב שלם, שתיים באמפליטודה גבוהה ושתיים באמפליטודה נמוכה יותר. זה המצב לגבי רוב האסטרואידים. אצל מרבית האסטרואידים יש הבדל בין המקסימום של "הפאה" הארוכה לקצרה, מבחינת האמפליטודה בעקומת האור, מאחר ואורכן הפיזי של "צלעות" האסטרואיד שונה.

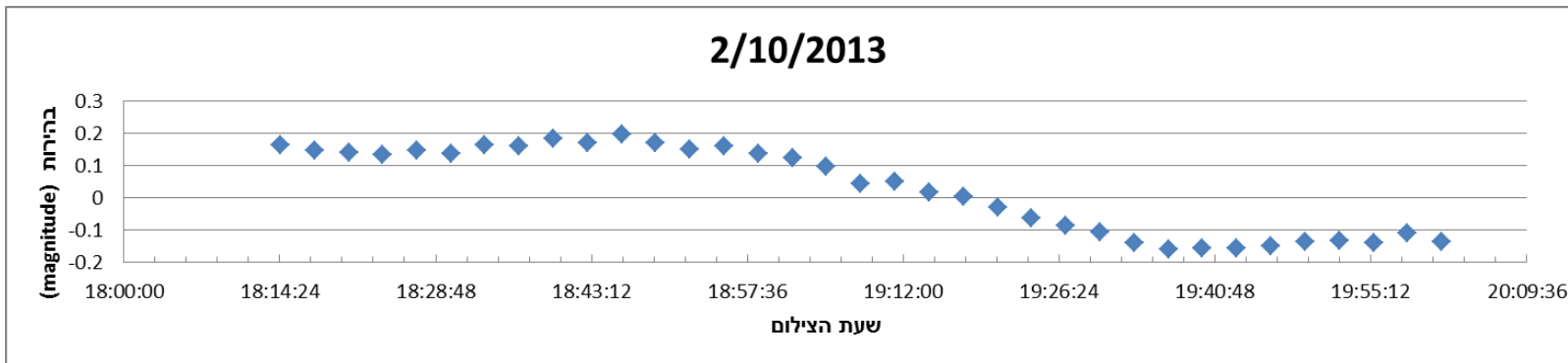
לכן מודדים את פרק הזמן שחלף בין שתי נקודות זהות מבחינת האמפליטודה בעקומת האור ומכפילים פי 2, כגון בין מקסימום גבוה למקסימום הגבוה הבא.

5. הצגת התוצאות

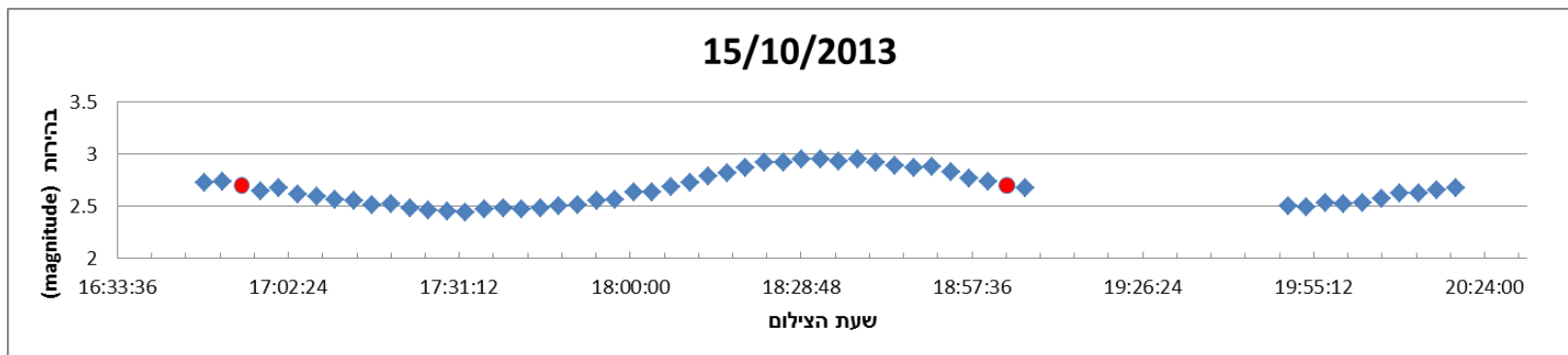
5.1. עקומות האור

בגרפים הבאים מוצגת בהירות האסטרואיד כפונקציה של זמן התצפית. מדובר בהירות יחסית ביחס לכוכב שנבחר ככוכב REF (ראה פרק שיטה). בתמונה הראשונה ניתן להבחין במקסימום אחד ובמינימום אחד בלבד.

בתמונה השנייה ניתן להבחין בנקודת מינימום אחת, נקודת מקסימום אחת ונקודת מינימום שהוחמצה עקב הפסקה בצילום.



איור 16: עקומת האור: הפרש הבהירות של האסטרואיד כפונקציה של הזמן (לילה ראשון)

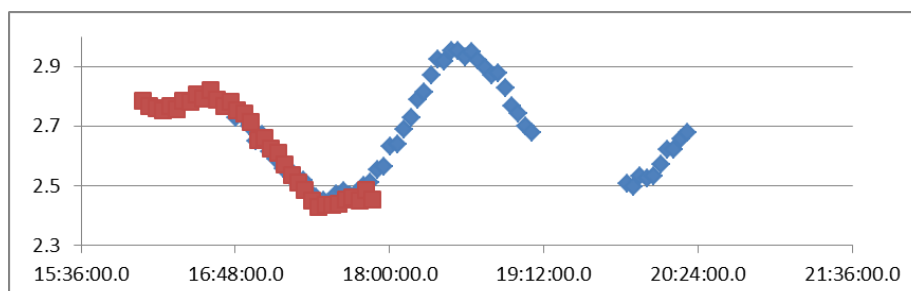


איור 17: עקומת האור: בהירות יחסית של האסטרואיד (ביחס הכוכב הנבחר כ- REF) כפונקציה של הזמן (לילה שני)

המרחק בין נקודת מינימום לנקודת מקסימום בשתי העקומות מוערך על ידינו כשעה [מצד שני אפשר לראות בגרף למעלה – פער הזמן בין כל שתי נקודות זהות באותה הפאזה הוא כשעתיים, למשל: בין הנקודה (16:54:32.0 , 2.699) והנקודה (19:03:30.8 , 2.698) (הנקודות העגולות בצבע אדום בגרף) הזמן שעבר הוא 2:08:58.8]. מכאן הסקנו כי זמן המחזור המלא (בהנחה שלגוף שלנו 4 פאות) הינו כ 4 שעות.

5.2. עקומת אור מאוחדת

על ידי נרמול הנתונים הצלחנו לאחד את שתי העקומות:



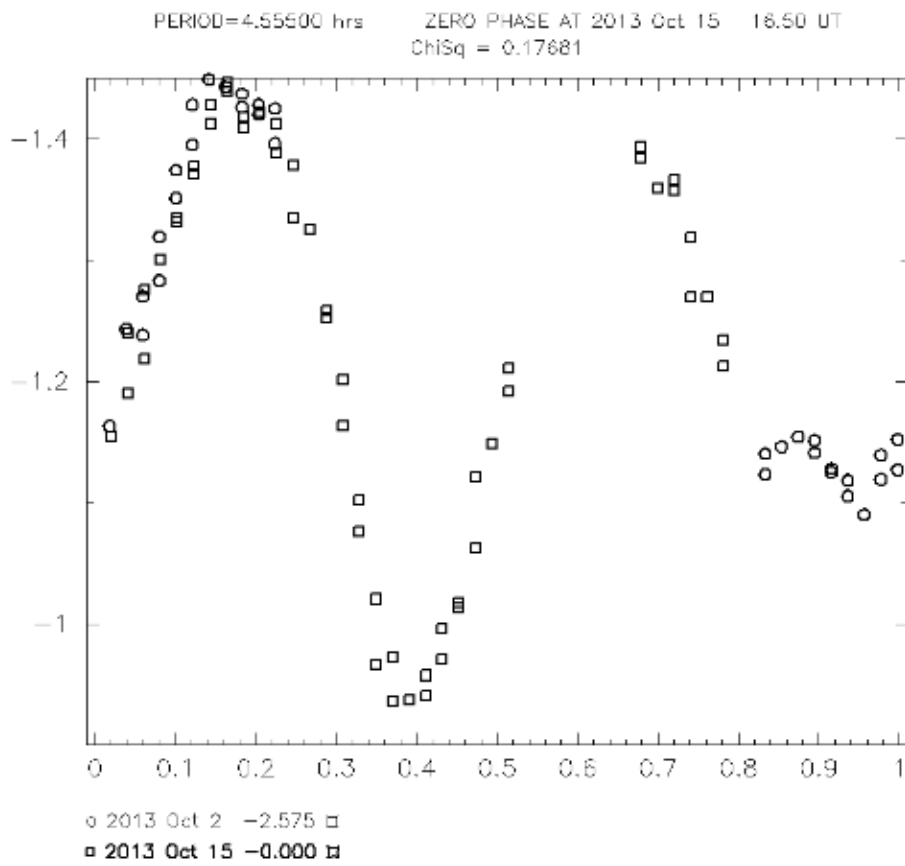
איור 18: עקומת אור מאוחדת (ציר X זמן הצילום ציר Y הבהירות היחסית של האסטרואיד ביחס לכוכב הנבחר כ- REF)

ביצענו את המיזוג על ידי שימוש בתוכנת אקסל אליה הכנסנו את נתוני שני הלילות בעמודות נפרדות. אפשרנו למשתמש לשנות ידנית את הנתונים הבאים:

1. הזזה בזמן של אחת העקומות (ימינה-שמאלה).
2. הזזה בעוצמת הבהירות של אחת העקומות (למעלה-למטה).
3. מתיחת /כיווץ אמפליטודת אחת העקומות

בנוסף במהלך העבודה יצרנו קשר עם חוקרת בפולין בשם **Anna Marciniak**, החוקרת קיבלה מאתנו את התוצאות ואושרה את נכונותם.

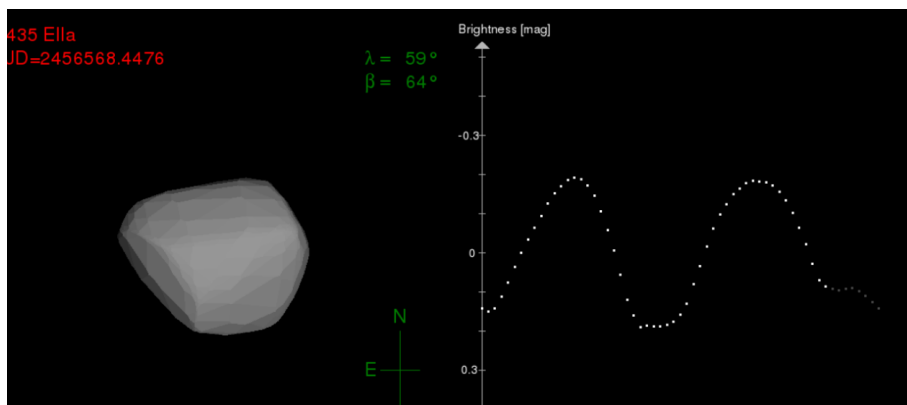
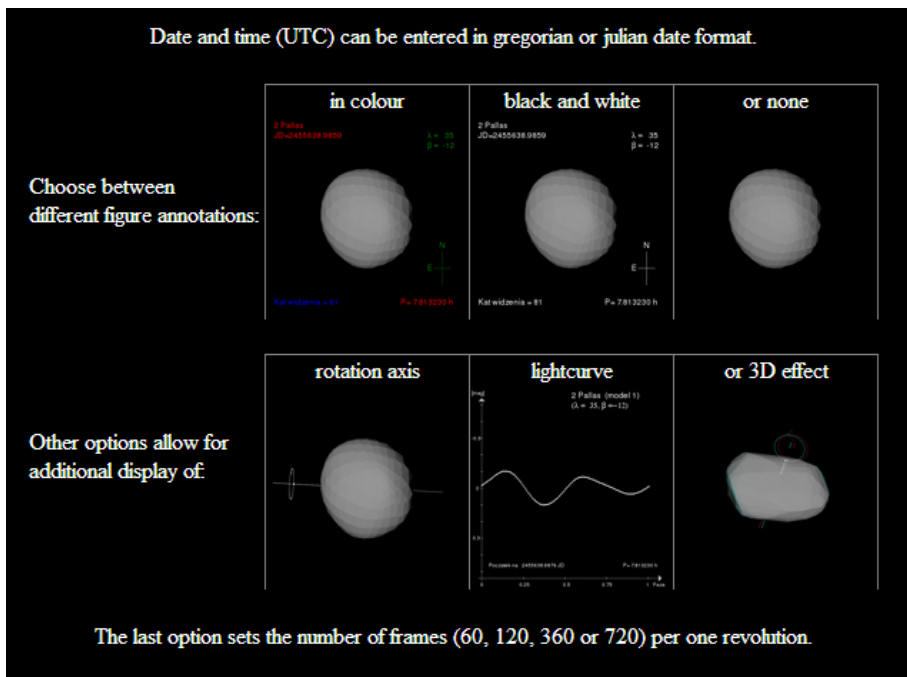
כמו כן סיפקה לנו החוקרת גרף המאחד את שתי המדידות שלנו על ידי נרמול הנתונים ודומה לעקומה שהצלחנו להפיק בעצמנו.



איור 19: עקומת אור מאוחדת (ציר X מייצג מחזור שלם (מחזור שלם= 4.55500 שעות) ציר Y בהירות האסטרואיד ביחס לכוכב נבחר – לא בהכרח מה שבחרנו).

5.3. מודל תלת מימדי של האסטרואיד

בנוסף קיבלנו מהחוקרת הפניה לאתר בו מופיע מודל תלת-מימדי של האסטרואיד כפי שנבנה מניתוח עקומות אור שונות במהלך השנים : <http://isam.astro.amu.edu.pl/>



איור 20: הצורה הגיאומטרית לאסטרואיד (435) Ella על פי המודל והתצפיות

6. סיכום ומסקנות

במהלך השנה האחרונה למדנו ויישמנו את אחד הפרקים המעניינים בחקר אסטרואידים. המחקר כלל רכישת ידע תיאורטי בנושא אסטרואידים ופוטומטריה, ביקור במצפה הכוכבים במכון ויצמן והכרת שיטות העבודה בו, צילום אסטרואיד וניתוח התמונות עד להפקת עקומות אור ומציאת זמן המחזור של הגוף הנחקר.

זהות האסטרואיד הייתה חסויה בפנינו עד שהסקנו את זמן המחזור מהנתונים ורק אז נחשפה בפנינו על ידי מר מנוליס.

מצאנו התאמה בין הנתונים שקיבלנו לבין המידע על האסטרואיד בספרות המקצועית. האסטרואיד שצילמנו נקרא **Ella (435)**.

האסטרואיד מוכר ונתח בעבר על ידי חוקרים שונים.

על פי מדידותינו זמן המחזור של האסטרואיד עומד על 4.5 שעות.

לאחר שחישבנו זמן מחזור זה בדקנו גם במאגרים רשמיים:
(<http://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/LightcurveDat.html>)
וגילינו התאמה לנתון שמצאנו.

(419) Aurelia	10.709	0.00	4	340	474	347	1004	3
				499	736	91	737	
(420) Bertholda	11.017	0.24-0.28	3	1051	503	34		
(421) Zahringia	15.5	0.12	1	749	34			
(422) Berolina	12.79	0.11	2	340	347			
(423) Diotima	4.775	0.06-0.20	4	813	204	1048	1050	31
				724	224	330	675	31
				136	728	240	253	51
(424) Gratia	19.47	0.32	3	260				
(425) Cornelia	17.56	0.16	2	34				
(426) Hippo	34.3	0.22	2	618	719			
(428) Monachia	3.634	0.31	3	1022				
(429) Lotis	13.577	0.24	3	349	34			
(430) Hybris	7.205	0.54	3	872				
(431) Nephela	9.102	0.02-0.13	3	122	214	34		
(432) Pythia	8.252	0.14	3	485	347	91	34	
(433) Eros	5.270	0.04-1.49	4	17	120	746	64	11
				130	152	235	608	61
				685	776	915	911	31
				350	352	354	368	41
				141	248	420		
(434) Hungaria	26.91	0.70	3	340	354			
(435) Ella	4.623	0.38	3	24	676			
(436) Patricia	16.133	0.22	3	978				
(437) Rhodia	5.0	0.38	1	20	74	12		
(438) Zeuxo	8.831	0.13	3	147				
(439) Ohio	19.2	0.24	2	494				
(440) Theodora	4.828	0.43	3	260				
(441) Bathilde	10.447	0.13	3	338	307	637	34	1
(442) Eichsfeldia	11.871	0.38	3	440				
(443) Photographica	16.?	0.3	1	354				
(444) Gyptis	6.214	0.15	3	342	34	561	845	
(445) Edna	19.97	0.21	2	556	34			
(446) Aeternitas	15.85	>0.33	2	260				

במהלך העבודה רכשנו ידע ומיומנויות רבות ובכללן:

1. הכרות עם ציוד אמיתי ומקצועי המשמש למחקר מדעי באסטרונומיה.
2. חשיפה לתחומי המחקר המבוצעים במכון על ידי מר מנוליס ושיתוף הפעולה עם מרכזים נוספים בעולם.
3. שיטות עבודה ויישום בפוטומטריה.
4. עבודה עם תוכנות פוטומטריה שונות בחירת התוכנה הנוחה לנו.
5. שימוש באקסל להצגת התוצאות בייצוגים שונים
6. עבודת סיכום המידע בצורה כתובה אל מול המנחים השונים ודרישותיהם.

בנוסף יישמנו במהלך התקופה עבודת צוות והתמודדנו עם הקשיים במהלך הדרך.

7. ביבליוגרפיה

1. Violante , R., & Leake, M. A. (2012, Deceber 1). Photometry and lightcurve analysis of 7 main belt asteroids. Journal of the southeastern association for research in astronomy(7), pp. 41-44.
2. A Practical Guide to Lightcurve Photometry and Analysis
BRIAN D. WARNER (chapter 3- p.24-25)
3. ABELL'S EXPLORATION OF THE UNIVERSE- SEVENTH EDITION
DAVID MORRISON, SIDNEY WOLF, ANDREW FRAKNOI (chapter18- p. 316-330)
4. A guide to a minor planet photometry
5. <http://www.qrg.northwestern.edu/projects/vss/docs/spaceenvironment/2-how-asteroids-orbit.html>
6. [HYPERLINK "http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/text/asteroids.txt"](http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/text/asteroids.txt)
<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/text/asteroids.txt>
7. [HYPERLINK "http://ssd.jpl.nasa.gov/?asteroids"](http://ssd.jpl.nasa.gov/?asteroids)
<http://ssd.jpl.nasa.gov/?asteroids>
8. [HYPERLINK "http://www.iau.org/public/themes/neo/nea/"](http://www.iau.org/public/themes/neo/nea/)
<http://www.iau.org/public/themes/neo/nea>
9. [HYPERLINK "http://wise-obs.tau.ac.il/~david/Hebrew/PhotometryanalysisHeb.htm"](http://wise-obs.tau.ac.il/~david/Hebrew/PhotometryanalysisHeb.htm) <http://wise-obs.tau.ac.il/~david/Hebrew/PhotometryanalysisHeb.htm>
10. <http://isam.astro.amu.edu.pl>
11. [http://en.wikipedia.org/wiki/Photometry_\(astronomy\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Photometry_(astronomy))
12. <http://www.amostech.com/TechnicalPapers/2010/NROC/Kervin.pdf>
13. [HYPERLINK "http://www.minorplanet.info/ObsGuides/Misc/photometryguide.htm"](http://www.minorplanet.info/ObsGuides/Misc/photometryguide.htm) \t
"_blank"
<http://www.minorplanet.info/ObsGuides/Misc/photometryguide.htm>
14. <http://www.minorplanet.info/ObsGuides/Misc/StandardizingData.htm>
15. [HYPERLINK "http://jsara.org/JSARA-V07/ms0707-Violante+Leake.pdf"](http://jsara.org/JSARA-V07/ms0707-Violante+Leake.pdf) \t
"_blank" <http://jsara.org/JSARA-V07/ms0707-Violante+Leake.pdf>
16. [HYPERLINK "http://www.minorplanet.info/MPB/MPB_40-1.pdf"](http://www.minorplanet.info/MPB/MPB_40-1.pdf) \t
"_blank" http://www.minorplanet.info/MPB/MPB_40-1.pdf

Formatted: No underline, Font color: Auto

Formatted: No underline, Font color: Auto

Formatted: No underline, Font color: Auto

Formatted: No underline, Font color: Auto

Formatted: No underline, Font color: Auto

Formatted: No underline, Font color: Auto

Formatted: No underline, Font color: Auto

17. **HYPERLINK** "http://www.minorplanet.info/MPB/MPB_40-2.pdf" \t
"_blank" http://www.minorplanet.info/MPB/MPB_40-2.pdf

Formatted: No underline, Font color: Auto

18. **HYPERLINK** "http://www.minorplanet.info/mpbdownloads.html" \t
"_blank" http://www.minorplanet.info/mpbdownloads.html

Formatted: No underline, Font color: Auto

19. **HYPERLINK**
"http://www.minorplanet.info/ObsGuides/Misc/photometryguide.htm" \t
"_blank"
http://www.minorplanet.info/ObsGuides/Misc/photometryguide.htm

Formatted: No underline, Font color: Auto

20. **HYPERLINK** "http://britastro.org/asteroids/photometry.htm" \t "_blank"
http://britastro.org/asteroids/photometry.htm

Formatted: No underline, Font color: Auto

21. **HYPERLINK**
"http://britastro.org/asteroids/Asteroid%20light%20curves%20Part%20I.htm"
\t "_blank"
http://britastro.org/asteroids/Asteroid%20light%20curves%20Part%20I.htm

Formatted: No underline, Font color: Auto

22. **HYPERLINK**
"http://britastro.org/asteroids/Asteroid%20light%20curves%20Part%20II.htm"
\t "_blank"
http://britastro.org/asteroids/Asteroid%20light%20curves%20Part%20II.htm

Formatted: No underline, Font color: Auto

23. **HYPERLINK** "http://www.space.bas.bg/astro/Rogen2004/Sol-6.pdf" \t
"_blank" http://www.space.bas.bg/astro/Rogen2004/Sol-6.pdf

Formatted: No underline, Font color: Auto

24. **HYPERLINK**
"http://rkbuchheim.org/yahoo_site_admin/assets/docs/Buchheim_SAS-
2010.147123427.pdf"
http://rkbuchheim.org/yahoo_site_admin/assets/docs/Buchheim_SAS-
2010.147123427.pdf

Formatted: No underline, Font color: Auto

25. http://www.observadores-cometas.com/neos/rotaciones/MPB37-2.pdf

26. האינציקלופדיה של קבוצות הכוכבים- כרך א

ד"ר יגאל פת-אל

עמודים: 18, 19, 21

27. פוטומטריה של אסטרואידים. (אין תאריך). אוחר מתוך

http://wise-obs.tau.ac.il/~david/Hebrew/PhotometryanalysisHeb.htm