

קביעה עובדתית של זמן צאת הכוכבים: מדידות פוטומטריות ותצפיות אנושיות

- א. מבוא
 - ב. תחילת הלילה בהלכה
 - ג. למי נתונה הצפייה בכוכבים
 - ד. הכוכבים שנצפו
 - ה. מערכת התצפיות
 - ו. עיבוד הנתונים
 - ז. תוצאות התצפיות
- נספח: הפרש זמן זיהוי הכוכב ע"י הצופים משקיעת החמה

א. מבוא

לאורך הדורות נעזרו לצורך הגדרת הזמנים בהלכה בתצפיות בגרמי השמים, לצד חישובים. השימוש בתצפיות אלו נועד לקביעת זמני היום בהלכה, כגון: זריחה, שקיעה וצאת הכוכבים, וכן לקביעת זמן מולד הלבנה. תצפיות אלו התבצעו ללא שימוש בכלי הבטה, ועל בסיס אותה הצפייה נקבע הזמן ההלכתי. עד היום לא נמצא קריטריון מדעי-אובייקטיבי הקובע את תנאי ההיראות של שלושה כוכבים בינוניים – זמן תחילת הלילה. מטרת מאמר זה להציג קריטריון מוחלט, כך שכאשר מצב הרקיע נתון ניתן יהיה לחזות מתי יראו שלושה כוכבים בינוניים על ידי צופה. קריטריון זה נקבע בעקבות תצפיות אסטרונומיות שהחלו בשקיעת החמה והסתיימו אחר צאת הכוכבים שנעשו בעזרת מצלמת רקיע המורכבת על גבי טלסקופ, לצד צופים אנושיים. אגב אורחא הרווחנו גם אימות נוסף לקביעה שזמן צאת הכוכבים ההלכתי חל פחות מח"י דקות אחרי השקיעה, שלא כדעתם של כמה מפוסקי הדורות האחרונים שקבעו על פי תצפיותיהם שיעורים מאוחרים יותר¹.

1 ראה הר"מ טוקצינסקי, ספר בין השמשות עמ' מט ועמ' סו; ספר הנברשת ח"ב עמ' מה; בשם החזו"א ב'קונטרס פסקים ודברים ממרן החזו"א' בסוף ספר אמרי יושר, חלק מועד דיני ליל שבת אות יז; ועוד.

ב. תחילת הלילה בהלכה

נשף הערב, המעבר מיום ללילה, מאופיין ברצף מאורעות שמימיים ואסטרונומיים. אחת² ההגדרות לזמן זה מובאת במסכת שבת לה, ב: "אמר רב יהודה אמר שמואל: כוכב אחד - יום, שנים - בין השמשות, שלושה - לילה... אמר רבי יוסי: לא כוכבים גדולים הנראין ביום, ולא כוכבים קטנים שאין נראין אלא בלילה, אלא בינונים".

הרמב"ם בפירוש המשנה ראש השנה ג, א כתב: "אין לילה אצלנו אלא צאת הכוכבים", וכן בפירוש המשנה שבת ב, ו: "דע שמאחרי שקיעת החמה עד שייראו שלושה כוכבים בינוניים בגודלם ואורם הוא זמן בין השמשות, וכשייראו שלושה הרי זה לילה ודאי". וכך גם פסק בהלכות שבת ה, ד: "משתשקע החמה עד שייראו שלושה כוכבים בינוניים הוא הזמן הנקרא בין השמשות בכל מקום; והוא ספק מן היום ספק מן הלילה, ודנין בו להחמיר בכל מקום... וכוכבים אלו לא גדולים הנראים ביום, ולא קטנים שאין נראין אלא בלילה. ומשיראו שלושה כוכבים אלו הבינוניים הרי זה לילה ודאי". בהלכות תרומות ז, ב אף העריך הרמב"ם משך זמן זה: "יצאו שלושה כוכבים בינוניים, וזה העת כמו שליש שעה אחר שקיעת החמה". גם השולחן ערוך בהלכות קריאת שמע, הל' ערבית³, הל' שבת, הל' ספירת העומר, הל' תענית והל' מילה הגדיר הלכה למעשה את תחילת הלילה כמצב אסטרונומי - זמן ראיית שלושה כוכבים בינוניים.

ג. למי נתונה הצפייה בכוכבים

המאירי (שבת לה, ב) כותב, שהגמרא לא הסתפקה בתיאור מצב הרקיע - השחרת הרקיע העליון, כיוון שרוב האנשים מתקשים להבחין בדיוק מתי משתווה הרקיע העליון בשחרותו לרקיע התחתון, ולכן הוסיפה את סימן צאת הכוכבים. היו ממחברי דורנו שהוסיפו עוד שני תנאים לקביעת תחילת הלילה בעזרת ראיית הכוכבים⁴, האחד, בשם ספר אור היום, שצאת הכוכבים ייקבע דווקא ע"י בני אדם הבריאים

2 מצאנו תיאורים נוספים לתיאור מעבר זה: א. מצב הרקיע - הרגע בו משחיר הרקיע העליון, ומשווה בשחרותו לרקיע התחתון; ב. כתיאור זמן - זמן הדרוש למהלך שלשת רבעי מיל (או חצי מיל) מרגע השקיעה. וע"ע בהרחבה בספר 'בין השמשות' לרב יחיאל מיכל טוקצנסקי, ירושלים תרפ"ט.

3 או"ח סי' רלה סע' א: "זמן קריאת שמע בלילה משעת יציאת שלושה כוכבים קטנים...", וביאר הט"ז שאמנם בבית יוסף כתב 'בינונים', אך כיון שאין הכל בקיאים בין בינונים לקטנים צריך ליהדר עד שיראו הקטנים. אמנם מסיים הט"ז: שבס' תקסב לענין תענית כתב הרמ"א בינונים, וצ"ל דבתענית לא הטריחו כולי האי.

4 הרב חיים פ' בניש, הזמנים בהלכה, בני ברק תשנ"ו, עמ' תקא-תקב.

בעיניהם ורואים היטב למרחוק ולא בעזרת "תחבולות חכמה" – כלי עזר; והשני, בשם הרב שלמה זלמן אוירבך זצ"ל, שעיקר קביעת זמן היראות כוכבים בינוניים נתון לבקיאים, במידה מסוימת לפחות, בשמותיהם ובמיקומם של הכוכבים⁵. ברור שלא ניתן לסמוך על ראיית שלושה כוכבים באמצעות כלי הגדלה, מפני שבעזרת כלים אלו ניתן לראות את רוב הכוכבים עוד כשהשמש זורחת כשבוודאי יום. אמנם לא מצאנו התייחסות מפורשת של האחרונים לצפייה בכוכבים דרך כלים אופטיים, אך לצפייה בירח באמצעות כלים אלו מצאנו כמה התייחסויות, כגון על הסתכלות בירח בזמן ברכת הלבנה דרך חלון, ועל ראיית האש בזמן ההבדלה בעששית וכדומה⁶. כמו כן כבר הראינו בעבר כי למרות שחז"ל לא הכירו את התופעות של גליות האור, הם פסלו צפייה בירח באמצעות עששית (=פילטר צבע) או מים (=מקטב), כי הדבר שיפר את הניגודיות בדרכים לא תקינות, ולא על ראייה זו דיברה תורה⁷. ברור אם כן לחלוטין שגם בצפיית הכוכבים לא ניתן להשתמש בטלסקופ או במצלמת רקיע; ברם אם במקביל לצפייה באמצעות ציוד אופטי מתקדם נמצאים גם צופים אנושיים, ניתן יהיה על ידי השוואה מתי הצופה רואה את הכוכב בעיניו לאסוף מספיק מידע על מנת לפתח משוואה מתמטית שתדע לחשב את היחס בין העצם הנצפה לבין הרקע בזמן שהצופה האנושי מזהה את הכוכב, וכך לקבוע קריטריון אובייקטיבי לראייה האנושית.

ד. הכוכבים שנצפו

לצורך הגדרת כוכבים כ'בינוניים' חשוב להדגיש ש'גודל' הכוכב אינו מתייחס לגודלו הפיסי הממשי, אלא לעוצמת האור הנראית לעין למסתכל לכיוונו מכדור הארץ. האור המוחזר מהכוכב ונצפה בעין נקרא בהירות יחסית (או: גודל מדומה). האסטרונומים קבעו סולם בהירויות לכוכבים, בו הכוכב וְגַה משמש כדרגת בהירות 0, ושאר הכוכבים מתייחסים אליו. כוכבים בהירים יותר הוגדרו כמספר שלילי (כגון הירח: -12.5, השמש: -26.5), וכוכבים כהים יותר הוגדרו כמספר חיובי. כפי שנזכר לעיל הכוכבים המוגדרים 'בינוניים' הם כוכבים שנראים רק אחרי השקיעה, ועל פי הגדרה זו הכוכבים המוגדרים כבינוניים הם כאלו שבהירותם היחסית מתחילה ב-0.05 ועד כאלו שבהירותם מגיעה ל-1.06⁸.

- 5 בערוך השולחן או"ח סי' רסא סע' ד כתב שהיודע להבדיל בין כוכב גדול לבינוני רשאי לקרוא שמע של ערבית וקידוש.
- 6 ראה רמ"א או"ח סי' תכו סע' ד; מגן אברהם שם ס"ק ד; ב"י או"ח סי' רצח ובשו"ע סע' טו ובביאור הלכה שם.
- 7 ראה בהרחבה שימוש באופטיקה מודרנית בראיית הירח החדש, תחומין כרך כג (תשס"ג), עמ' 298-309.
- 8 ראה שו"ת מהרי"ף (פראג'י) סי' מו ובשו"ת מלמד להועיל או"ח סי' ל. הרי שהאחרונים שיערו

בתצפיות⁹ שבצענו במשך כשנה וחצי¹⁰ נצפו שמונה כוכבים שניתן בוודאות להגדירם כ'בינוניים' (בסוגריים מופיעה רמת בהירותם היחסית): אלטאיר (0.76), אנטארס (1.06), ארקטורוס (-0.05), וגה (0.03), סיריוס (-1.44),¹¹ קפלה (0.08), ריג'ל (0.18), פרוקיון (0.40).

ה. מערכת התצפיות

מערכת התצפיות מוקמה בקיבוץ יבנה, על יד ישיבת כרם ביבנה (קו רוחב 31.817, קו אורך 34.722). המערכת כללה טלסקופ (הכולל מערכת עקיבה), מצלמה המחוברת אליו, וכן מחשב האוגר את נתוני הצילום. הצבת המערכת התחילה לפני שקיעת השמש, וזאת על מנת לאתר את הכוכב המבוקש קודם השקיעה בעזרת הטלסקופ. יש לציין שגילינו שגודל הכוכב לא השתנה בכל מהלך התצפית, עבור כל הכוכבים שנצפו. המשתנה היחיד היה הרקע המחשיך והולך. לאחר לכידת הכוכב בעינית הטלסקופ ננעלים צירי הכיוון שלו, על מנת לאפשר למערכת העקיבה של הטלסקופ לעקוב אחריו. מרגע זה המצלמה מצלמת כל חצי דקה את כיפת הרקיע. מספר התמונות המקסימלי שצולמו בליל תצפית אחד היה 60, כלומר צילום רציף במהלך 30 דקות. במקביל לזמן הרכבת המצלמה על הטלסקופ, נדרשו צופה או קבוצת צופים שהיו ממוקמים ליד הטלסקופ להפנות את מבטיהם אל הכיוון בו 'נלכד' הכוכב, ולחכות לרגע בו יראה לעין. לכל כוכב הוגדרו מספר לילות תצפית רצופים, עד כמה שזה היה ניתן.

ו. עיבוד הנתונים

בלילות התצפיות צולמו בסך הכל כ-3000 תמונות (כ-100 לילות צילום). תמונות אלו נותחו במחשב על פי בדיקת עוצמת אור הכוכב ביחס לעוצמת אור הרקע עבור כל תמונה, איתור הרגע בו הצופה מזהה את הכוכב ללא אמצעי, ורישום נקודת זמן זו על גבי הגרף.

את הכוכבים הבינוניים על פי בהירותם, אך נראה שלהלכה יש לבדוק האם הכוכב כבר נראה ביום ואז הוא אינו בינוני.

9 תצפיות דומות נערכו ע"י הרב יעקב גרשון וייס, והוא דיווח עליהם במאמרו "תצפיות צאת הכוכבים", 'המעין' טבת תשס"ח (מה, ב) עמ' 37-48. התצפיות שלו נערכו בשנים תשנ"ז-תשנ"ט. ראה עוד לקמן הערה 16.

10 תצפיות אלו בוצעו על-ידי הרב ד"ר שי ואלטר, ראש מכון 'קידוש החודש' בישיבת כרם ביבנה, במהלך מחקר מקיף שקיבל מימון ממשד המודע. את המחקר הובילו הפרופ' עלי מרצבך וכותבי המאמר.

11 בשלב עיבוד נתוני התצפיות כוכב זה נפסל מכיוון שנצפה קודם השקיעה, הרי שהוא כוכב גדול ולא בינוני.

חישוב יחסי הארה של הכוכב על פני הרקע מוצג בנוסחא¹² הבאה:

$$C = \frac{B - B'}{B'}$$

משמעות הפרמטרים: B ערכה הממוצע של בהירות הכוכב, B' הבהירות הממוצעת של הרקיע, ו-C' הניגודיות המחושבת. כאשר מתחילים ביום הבהירות של הרקיע גדולה משל הכוכב, ובכך הניגודיות שלילית. ככל שהרקיע מחשיך הערך B' קטן, ואז ההפרש בין בהירות העצם (הכוכב) לבין בהירות הרקע (B - B') גדל, ובכך הניגודיות הולכת וגדלה עד שנגיע לניגודיות גבולית C_t שבה זוהה הכוכב לראשונה בעין הצופה. חישוב זה מבוצע עבור כל התמונות שבכל ליל תצפית.

ז. תוצאות התצפיות

לכל כוכב מהכוכבים המנויים בפרק ד נבנתה טבלת סיכום של הלילות שנצפו. טבלה זו כוללת: א. תאריך ליל התצפית. ב. מספר התמונות שצולמו בליל התצפית. ג. זמן השקיעה. ד. זמן זיהוי הכוכב לעין הצופה. ה. הפרש הזמן מהשקיעה ועד לזיהוי הכוכב. ו. ערך הבהירות הנראית C_t, המחושב ע"פ זמן זיהוי הכוכב ע"י הצופה (חישוב שנעשה אחר ניתוח הצילומים במחשב). בסיכום כל טבלה מצוין חישוב

כוכב	תאריך	אינדקס	מספר צילומים בליל תצפית	שקיעה	זמן זיהוי הכוכב	הפרש מהשקיעה בדקות	בהירות נראית	הערות
פרוקיון	ז' בניסן תשע"א	108	17	1907	1921	14	2.19	ירח קרוב לפרוקיון
	ט' בניסן תשע"א	110	17	1908	1923	15	1.99	
	כב' בניסן תשע"א	113	35	1917	1933	16	1.88	
	ז' באייר תשע"א	118	18	1928	1941	13	2.04	
	יא' באייר תשע"א	120	22	1931	1945	14	1.77	
	יב' באייר תשע"א	121	35	1931	1952	21	2.05	
	טו' באייר תשע"א	122	36	1933	1950	17	1.89	
	יח' באייר תשע"א	123	35	1935	1953	18	1.88	עננות-אובך
	כב' באייר תשע"א	125	46	1938	1953	15	1.85	
בהירות נצפית (בעין) כוכב פרוקיון: 1.95±0.12								

12 ע"פ מאמרם של רוי עמנואל הופמן וטוביה כאץ, "חיזוי זמן הופעת הירח החדש", יודעי בינה א (ניסן תשס"א) עמ' 115-143.

הערך הממוצע, וסטיית התקן של הבהירות הנראית לעין. לקמן מובאת דוגמה עבור הכוכב פרוקיון¹³.
להלן מוצגת טבלת סיכום התוצאות עבור כל הכוכבים שנצפו:

בהירות הנצפת לעין הצופה	
1.84	אלטאיר:
1.99	אנטרס:
2.06	ארקטורוס:
2.00	וגה:
1.95	פרוקיון:
2.05	קפלה:
1.80	ריגל:
1.96±0.1	ממוצע וסטיית תקן

אם כן, מצאנו קריטריון שעבורו בבהירות 1.96 (וסטיית תקן של: 0.1) תוכל עין אנושית לזהות את הכוכבים הנראים, וזאת היא שעת צאת הכוכבים ההלכתית. נתון זה אינו מותנה בזמן מוחלט מרגע השקיעה אלא ברמת הבהירות של הכוכב על פני כיפת השמים, כלומר במיקום הכוכב ומרחקו מהשמש השוקעת. נתון זה קבוע לכל כוכב, ללא תלות בגודלו ובמרחקו מכדור הארץ¹⁴. בשיטה זו אם ידוע מצב הרקיע ביום נתון (ועננות, אובך, זיהום אוויר וכו') נדע לומר עבור כל כוכב מתי הוא יראה לאדם. פיתחנו אם כן את "דמות צורות לבנות היו לו לרבן גמליאל בקיר בטבלא ובכותל בעלייתו, שבהן מראה את ההדיוטות ואומר הכזה ראית או כזה?" (עבודה זרה מג, א), לראיית הכוכבים בדורנו. כשאנו יודעים את מצב הרקיע ואנו יודעים עבור כל כוכב את עוצמתו, אנו יכולים לחשב את הניגודיות ובכך לקבוע האם ומתי הוא יראה הכוכב הזה בתנאי הראות אלה.
המשמעות ההלכתית של תצפיות אלו היא שישנה אפשרות לצפות את הזמן בו תוכל עין אנושית לראות את הכוכבים ללא כל אמצעי, אחרי שקבענו מהי הבהירות הדרושה לעין הצופה כדי שיוכל לראות שלושה כוכבים בינוניים.

13 את כל הטבלאות עבור כל הכוכבים ניתן למצוא בעבודת המחקר המלאה: דוד בן יעקב, שיטה חדשה לקביעת זמן "צאת הכוכבים" המבוססת על מדידות פוטומטריות תוך השוואה לתצפיות אנושיות, עבודה עבור תואר מוסמך, אוניברסיטת בר אילן, תשע"ה.
14 יוצא מן הכלל היה כוכב ריג'ל שנצפה ברמת בהירות 1.8, נמוכה יחסית לשאר ביחס לשאר הכוכבים. הסיבה לכך היא שהוא כוכב בעל טמפרטורה של 11,000°K, וטמפרטורה זו גבוהה משאר הכוכבים שנצפו, והיא מי שמאפשרת לו להראות מוקדם.

נספח: הפרש זמן זיהוי הכוכב ע"י הצופים משקיעת החמה

להלן מוצגת טבלת סיכום של התצפיות שנעשו ללא כל אמצעי. מעבר לחיזוי הנוסחא שהייתה מטרת העבודה, גם יש בידינו עתה את הנתון מתי נראה כל כוכב על ידי הצופה. לא צפינו ביותר מכוכב אחד כל לילה ולכן אין באפשרותנו לומר מתי נראו שלושה כוכבים בינוניים באותו לילה, אך השווינו עבור כל כוכב את התוצאה שלנו עם התצפיות שביצע הרב יעקב גרשון וייס¹⁵ בשנים תשנ"ו-תשנ"ט, וממוצע הראיה שלנו שווה למסקנת תצפיותיו. העובדה שכוכבים "בינוניים" עשויים להיראות במקומות שונים בארץ ישראל קודם לח"י דקות אחרי השקיעה דווחה גם על ידי אנשים נוספים¹⁶, ונראה שמכאן והלאה אפשר להתייחס אליה כנתון בסיסי ועובדה מוכחת, שלא כמי שהסתפקו בדבר זה בדורות האחרונים.

סיכום זמן זיהוי הכוכב מרגע השקיעה			
חודש לועזי	כוכב נראה	ממוצע הפרש: מהשקיעה ועד רגע זיהוי הכוכב (בדקות)	השוואה לטבלת "תצפיות צאת הכוכבים" מאת הרב יעקב גרשון וייס (ממוצע בדקות)
ינואר-פברואר	קפלה	13	12.8 (נצפה בסוף דצמ')
	ריגל	16.5	13.5
מרץ-אפריל	פרוקיון	15	13.8
	ריגל	10	12.8
מאי-יוני	ארקטורוס	10.5	10.2
	וגה	11.5	14.0
	פרוקיון	16.3	24.9
יולי-אוגוסט	אנטרס	18.5	19.7
	וגה	12.1	14.1
ספטמבר-אוקטובר	אנטרס	15.5	לא נצפה בתקופה זו
	וגה	15	10
נובמבר-דצמבר	אלטאיר	18	18.2
	וגה	12	15.2

15 הובאו במאמרו "תצפיות צאת הכוכבים", עי' לעיל הערה 9.

16 ראה בספר הזמנים בהלכה (לעיל הערה 4) פרק מז (עמ' תצב-תצג) שהביא את עדות כותב המאמר הזה מתצפיות שביצע בהר דב בתקופת תשרי, וכן עדות של יצחק סטרוד שראו שלושה כוכבים בינוניים אחרי י"ד דקות מזמן השקיעה.