בס"ד.

הקדמה ומבוא.

1] על מנת לדעת את אורך היום [הזמן שבו השמש מעל האופק] והלילה, וכן את זמן הנץ החמה ושקיעתה, וכן את זמן הצהירה של השמש [הזמן שבו היא בשיא גובהה בשמים באותו יום] שהוא זמן חצות, וכן את אורך הדמדומים [בין השמשות], יש לחשב את מסלול השמש בכיפת השמים באותו יום, [את אורך המסלול, כיוונו האלכסוני, ומהירות התנועה של השמש], ומשיתבררו לנו נתונים אלו נדע את הזמנים הנ"ל, וממילא את כל זמני היום, שכולם תלוים בהם.

2] נתוני המסלול המפורטים [אורך, אלכסון, ומהירות], משתנים מיום ליום ומזמן לזמן, בהתאם להתקדמות המסלול השנתי [ראה להלן] עד סיומו, ואז מתחיל מחזור חדש של המסלול, שחוזר על עצמו בדיוק כמעט מוחלט [ביחס לזמן שמתחילת המסלול, אבל זה לא ביחס לאותם ימים ושעות, כי כל פעם תחילת המסלול בשעה אחרת], וזה נקרא שנת חמה, שהיא בערך 365.25 יום, [וראה להלן].

3] כל השינויים בזמני היום [זמן הנץ\חצות\שקיעה\ביה"ש], וכן באורך היום והלילה, שהימים ארוכים מהלילות בקיץ, וקצרים מהם בחורף, נגרמים מכוח השינויים שבנתוני המסלול היומיים, מיום ליום, ומתקופה לתקופה, [וכן שינויי מזג האוויר בין הקיץ לחורף קשורים לזה, וכן שינויי מסלולי הכוכבים בשמים- כפי שנראה לנו]

4] יש לציין עוד, כי לא משנה לענין החישובים האם האמת היא שכדוה"א מקיף את השמש [ואת עצמו] כפי התפיסה היום, או שהשמש [והכוכבים] הם מקיפים את כדור הארץ [במסלול יומי וגם שנתי], והתוצאה תמיד זהה, ולכן לפעמים החישובים וההסברים מתיחסים לשמש כאילו היא המקיפה, כי במקרים שונים יותר פשוט לחשב ואף לחשוב בצורה כזו.

5] כאמור כדור הארץ מקיף את עצמו ['מסתובב'] סביב צירו סיבוב שלם כל יממה, ולכן נהיה 'לילה' כי בעוד צדו האחד פונה לשמש, צדו השני מוסתר ממנה, ולנו זה נראה ש'שקעה החמה', ומלבד זה הוא מקיף את השמש כל שנה, ולכן משתנים זמני היום [כי משתנה הנטיה האלכסונית ראה להלן], וכן יש לציין כי מסיבה זו אם היינו רואים כוכבים ביום, כל יום היינו רואים את השמש על רקע כוכבים אחרים [במחזור שנתי], כי כל פעם אנו רואים את השמש מצד אחר, [ולכן סמוך לנץ או לשקיעה כל פעם רואים כוכבים שונים].

6] באופן כללי מבצעים את החישוב בשני שלבים, א'] בודקים את המיקום של כדוה"א במסלול השנתי, ע"י שמכפילים את מס' הימים שעברו {מתחילת המסלול} - בקצב של התקדמות כדוה"א במסלול ליום, ב'] מחשבים כאשר כדוה"א במיקום זה מהו אלכסון המסלול – דהיינו כמה מעלות השמש תנוע בכיפת השמים הנצפית לעינינו מהנץ עד לשקיעה, [וראה להלן כיצד מחשבים זאת], ואת מספר המעלות היוצא נכפיל בארבע, כי המהירות היא מעלה ב4 דקות [בקירוב טוב], ונקבל את מספר הדקות שיש באותו יום, ולמשל אם יצא לנו שהשמש צריכה לנוע באותו יום 200 מעלות מאופק לאופק, נכפיל אותם ב4 ויצא 800, זאת אומרת שאורך היום 800 דקות, שהם 13 שעות ו20 דקות.

7] לסיכום נדגיש, שעיקר השינוי בזמני היום, נגרם כתוצאה מהשתנות הזווית האלכסונית של מסלול השמש מיום ליום, ולכן זה הדבר העיקרי שיש לחשב.

8] ישנה אפשרות קלה ופשוטה לחשב בכל שנה ותאריך לועזיים, את מס' הימים שעברו מתאריך לועזי מסוים אחר, ע"י תרגום לימים יוליאניים [ימים בעלי ספירה רציפה שתחילתם בתאריך מסוים ומתחלפים בשעה 12 בצהריים שעון גריניץ'], וזאת באמצעות הנוסחה הבאה.

1] $[9+W] \div 12 = A$.

2] $A \approx\ = G$.

3] $[G+X] \div 4 = K$.

4] $K \times 7 = M$.

5] $M \approx\ = Z$.

6] $[367 \times X]\ -Z = H$.

7] $[275 \times W] \div 9 = P$.

8] $P \approx\ = E$.

9] $H+E+L = Q$.

10] Q+1721013.5+V=™

כאשר:

***W**: החודש הלועזי.*

***X**: השנה הלועזית.*

***L**: היום הלועזי.*

≈ : עיגול המספר כלפי מטה.

***V**: השעה העולמית [בגריניץ']*

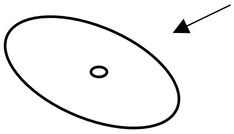
™: הוא היום היוליאני.

בס"ד.

פרק א'.

1] ציר הסיבוב של כדור הארץ סביב עצמו, המשלים סיבוב כל יממה, קרוי 'קו המשוה', דהיינו הרצועה בכדור הארץ שממוקמת באמצע הכדור, אמצע הכדור מוגדר ע"י – המקום שמסתובב במהירות הרבה ביותר בכל סיבוב [כי הוא צריך להקיף הכי הרבה כדי להגיע לצד השני], ואילו המישור שבו כדוה"א מקיף את השמש במסלול השנתי קרוי מישור ההקפה או 'מילקה',

ומכיון שציר הסיבוב [של קו המשוה] אינו באותו כיוון של המסלול השנתי יוצא שמישור ההקפה נטוי כלפי קו המשוה [או שנגדיר הפוך שקו המשוה נוטה ביחס למישור ההקפה], וזה אומר שהמסלול השנתי סביב השמש הוא באלכסון, כשבחלק מהזמן הוא למעלה וחלק מהזמן למטה, ופעמיים במסלול נמצא קו המשוה מול השמש בקו ישר, כמו הצורה הבאה



העיגול באיור הוא המסלול השנתי, והשמש נמצאת במרכזו.

ואכן נטית השמש מקו המשוה משתנית מיום ליום במחזוריות שנתית, וכמו"כ פעמיים בשנה השמש לא נוטה אלא נראית ליושבי קו המשוה מעל הראש ממש, ויום זה נקרא 'יום השויון' או 'נקודת השויון' כי ביום זה היום והלילה שוים 12 שעות בכל העולם, וכשמתחילה לנטות- אמנם ליושבי קו המשוה עדיין היום והלילה שוים לעולם, כי תמיד רואים את כל ה'קשת' של הילוך השמש בשמים מאופק לאופק, וכל הקשתות המקיפות חצי כדור לעולם שוות בגודלם, אבל לשוכנים צפונה או דרומה [תלוי בקיץ או בחורף] לקו המשוה היום מתקצר - כי רואים רק חלק מהקשת של השמש בשמים, מפני שחלקה מוסתר להם בגלל הזוית של נטית השמש ביחס למקום שהם נמצאים בכדור הארץ, וכן על זה הדרך- באותה העת בצד השני של קו המשוה שהשמש נוטה לכיוונו - הימים מתארכים, כי הם נמצאים בזוית המאפשרת ראיה של חלק גדול יותר מהקשת מאשר ביום השויון.

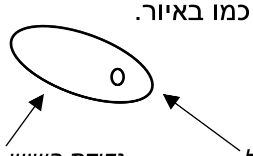
2] ולכן על מנת לדעת את נטית השמש בזמן מסוים, צריך לחשב את הזמן שעבר מנקודת השויון ולחשב כמה משתנית הנטיה בזמן כזה, והנה המסלול כולו מחולק ל4 חלקים שוים, כאשר ברבע א' הנטיה גדלה מיום ליום עד למקסימום, וברבע ב' קטנה עד לשויון, וברבע ג' גדלה לצד השני מיום ליום עד למקסימום שם, ואילו ברבע ד' חוזרת עד לנקודת השויון בשנה החדשה, ולכן צורת החישוב היתה אמורה להיות שנחלק את זוית הנטיה המרבית למספר הימים שיש ברבע שנה, וכך היינו יודעים כמה משתנית הנטיה בכל יום, והיינו יודעים אם כן בכל יום מהי הנטיה, [ואמנם חשבון זה אינו נכון כלל, כי בחשבונות הטריגונומטריים לכל זוית צריך לחשב בנפרד, כי הקצב של השינוי אינו אחיד אף פעם, אבל לשם פשטות ההסבר המחשנו בצורה כזו, ולהלן יתבאר כיצד מחשבים זאת].

3] אבל אין הדבר כך, משום שקצב ההתקדמות של כדוה"א במסלול השנתי אינו קבוע, לפעמים מהר יותר ולפעמים לאט, מה שגורם גם לאי שויון בקצב השתנות נטית השמש מיום ליום, ולכן צריך תחילה לחשב את המיקום של כדוה"א במסלול השנתי כפי שיתבאר להלן, ולאחמ"כ לחשב מהי נטית השמש באותו המקום במסלול [בחישוב טריגונומטרי].

4] ובשביל לדעת את מיקום כדוה"א במסלול השנתי, יש להוסיף כי המרחק של כדור הארץ מהשמש אינו קבוע כל השנה, [מפני שצורת ההקפה שלו איננה במעגל מושלם, אלא היא פחוסה מעט, כמו צורת אליפסה, ובנוסף, השמש אינה במרכז המסלול, אלא באחד מ'מוקדי האליפסה'], ומהירות ההתקדמות במסלול, תלוי במרחק מהשמש, ככל שקרוב לשמש יותר- תנועתו מהירה יותר, וככל שמתרחק ממנה- תנועתו איטית יותר, ומכיון שהמרחק לשמש משתנה כל העת גם המהירות של התנועה משתנית, וממילא גם קצב שינוי הנטיה וכפי שהתבאר.

5] לצורך החישוב אנו מגדירים את המקום במסלול שבו כדור הארץ נמצא בקרבה המרבית לשמש, [ואשר נמצא באמצע הציר הקצר של האליפסה], כתחילת המסלול השנתי, כמו באיור.

ויצוין כי זה **לא** המקום של נקודת השויון, ויש ביניהם הפרש קבוע של כ 103 מעלות [המשתנה בצורה זעירה ביותר מיום ליום], ויבואר עוד להלן בענין זה.



בס"ד.

פרק ב'.

1] ועתה נבוא בס"ד לחישובים עצמם, ותחילה יש להקדים כי בכל פעם שהתוצאה תהיה מעל 360 יש לחסר ממנה עד שיצא פחות מ 360, כי אין לנו ענין לדעת כמה סיבובים היה, אלא היכן המיקום הנוכחי, וכן נציין כי בד"כ משתמשים בשבר עשרוני [של מעלה], ולפעמים מציינים בדקות ושניות, אשר מסומנים ב [′, ″], {דקה היא 1/60 של מעלה, ושניה - 1/60 של דקה}, הכל לפי נוחות החישוב, [בד"כ במחשבון יש פונקציה הממירה משבר עשרוני לדקות ושניות, וכן להיפך], כמו"כ צריך מחשבון שיש בו את הפונקציות הטריגונומטריות הבאות

סינוס =	$\sin$	וכן את הפונקציה ההופכית =	$\sin^{-1}$
קוסינוס =	$\cos$	ואת הפונקציה ההופכית =	$\cos^{-1}$
טנגנס =	$\tan$	ואת הפונקציה ההופכית =	$\tan^{-1}$

[וכיום נפוצו מחשבוני כיס מדעיים שיש בהם את כל הנ"ל, ועוד פונקציות חשובות, כמו למשל הוצאת השורש המסומנת ב $\sqrt{}$, וכן יש בהם אפשרות לתרגילים ארוכים, דבר משמעותי בחישובים כאלה].

2] ועתה נבדוק תחילה כמה ימים עברו מתחילת המסלול [השנתי] ונהפכם לשבר עשרוני [הכולל גם את השעות והדקות שעברו, ע"י חלוקת השעות שעברו ב 24, והדקות שעברו ב 1440], {ולהלן ב'הוספות נחוצות' יתבארו פרטים נוספים המסייעים לחישוב זה}.

את מס' הימים שעברו נסמן ב A

ונבדוק מהי המהירות הזוויתית הממוצעת של ההתקדמות במסלול ליום, ע"י שנחלק את 360 המעלות של העיגול במס' הימים בשנה שהם בערך 365.25, ונקבל שהמהירות הממוצעת היא ...0.9856 מע' יסומן להלן ב B.

ועכשיו נחשב את המיקום במסלול לפי התקדמות ממצעת להלן C $\quad A \times B = C$
אך כפי שהתבאר המהירות משתנית כתלות במרחק מהשמש [דהיינו מתחילת המסלול], ולכן נחשב את המיקום האמיתי לפי המיקום בהתקדמות ממוצעת ע"י הנוסחה הבאה:

$$C + 1.915 \times \sin[\,C] \ + 0.02 \times \sin[C\ \times 2] = D$$

כאשר התוצאה [המסומנת ב D] היא המיקום הזוויתי האמיתי ביחס לתחילת המסלול השנתי [הסבר הנוסחה תמצא ב'נספח המתמטי'], ומכיון שנקודת השוויון אינה בתחילת המסלול, אם נרצה לדעת את המיקום ביחס לנקודת השוויון נצטרך להוסיף את ההפרש ביניהם, שעומד בזמנינו על כ283 מע' יסומן ב E, $\quad D + E = F \quad$ כאשר F הוא המיקום.

2] ובשביל לדעת מהי נטית השמש במקום זה, צריך לדעת מהי הנטיה המרבית, והיא עומדת בזמנינו על פי מדידות מדויקות על כ 23.4367 מע', יסומן להלן ב Y,

ועכשיו נדע את הנטיה ע"י נוסחה טריגונומטרית בסיסית, $\quad \sin^{-1}[\sin Y \times \sin F] = H$
כאשר H היא נטית השמש ליום זה, ומזה נוכל לדעת את אורך הקשת של מסלול השמש ביום זה, וזאת ע"י חישוב הנטיה בנוסחה הנותנת את 'זוית השעה', ויבואר להלן בעז"ה.

3] נוסחאות אלו הם ברמת דיוק של כדקת קשת ל D וממילא כ6 שניות קשת ל H, המספיקה לחשבונות בהם אנו עוסקים, [נפק"מ לפחות מ2 שניות], ודיוקם טוב לפחות לעשרים שנה הקרובות, [לתוספת הסבר עיין בנספח המתמטי].

בס"ד.

פרק ג'.

1] מכיון שידענו את נטיית השמש עפ"י החשבונות בפרק הקודם [*H*], נוכל לחשב את אורך התנועה בשמים הדרוש לה כדי להגיע מאופק לאופק,כי ידוע שכשאין לה נטיה, דהיינו ביום השווין שבו היא זורחת ושוקעת באמצע המזרח [והמערב – בהתאמה], אורך היום 12 שעות וכן הלילה, וחצות [זמן הצהירה מעל ראשנו בקו ישר] באמצע [בשעה 12], וכשנוטה מהמשוה- מסלולה אמנם בקשת שמקבילה לקשת המשוה אך 'נמוכה' יותר לצדדים בכיפת השמים [בשיעור הנטיה], וממילא אורך היום מתקצר כי חלק מהקשת מוסתר [בגלל כדוריותו של כדוה"א] והקשת הנצפית מהמסלול הולכת וקטנה לפי יחס ההתקרבות הזוויתית של קשת המסלול לאופק, ואפשר לחשב בכל נטיה - את ההשפעה על הקשת הנראית לעינינו מהמסלול עפ"י נוסחה טריגונומטרית, הידועה בשם 'זוית השעה', [דהיינו הזוית של התנועה הנראית לנו בשמים, שמידיעתה נסיק את אורך היום בשעות].

2] וכמובן שהדבר תלוי גם בקו הרוחב של המקום המבוקש, כיון שככל שמעלת הרוחב נוטה יותר מהמשוה כך גם ביום השווין הקשת בשמים שם נוטה יותר מהמשוה, ולכן בשאר הימים היום יתקצר או יתארך יותר בהתאם למרחק מהמשוה, ואמנם ליושבי קו המשוה עצמו - אף בשאר השנה שהשמש נוטה מהמשוה אין הדבר משפיע על אורך היום וכמו שנתבאר לעיל, כי כל הקשתות של חצי כדור שוות בגודלם, אך זה דווקא שם כיון שתמיד רואים את כל הקשת של המסלול, ורק הזוית שלה משתנית, אבל בשאר המקומות רק ביום השווין רואים את כל הקשת, אך בחלק מהימים חלקה מוסתר להם מחמת כדוריותו של כדוה"א, והיום מתקצר, ואילו במקומות שנוטים לצד השני של המשוה- היום מתארך, כי רואים יותר מהקשת, ובחלק השני של השנה מתהפכים המקומות שבהם היום .מתארך והמקומות שבהם היום מתקצר.

3] וזה הנוסחה לחישוב זוית השעה, כאשר $\emptyset$ היא מעלת הרוחב של הצופה, ו*G* היא הקשת של חצי יום ביום השווין = 90, [וראה להלן בהוספות נחוצות], ו- *R* היא התוצאה.

$$\cos^{-1}\left[\left[\cos\ G-\sin \mathrm{H}\times\sin\emptyset\right]\ \div\left[\cos H\ \times\cos\emptyset\right]\right]=R$$

4] זוית השעה [*R*] הם המעלות של הקשת הנצפית במיקום וביום הנוכחי, ובנוסחה חושב כל חצי יום בנפרד [לתוספת דיוק, ראה להלן בהוספות נחוצות], ולכן יש להכפיל את המעלות האלו ב 4, כי הזמן שלוקח לשמש לנוע מעלה הוא 4 דקות, [360 ÷ 1440] ויוצא אורך היום מחצות עד השקיעה, וכן מהנץ עד חצות,, והנשאר הוא הלילה.

5] לא נותר לנו אלא לחשב את זמן חצות – שגם הוא משתנה מיום ליום, ותחילה נסביר את הסיבות שהוא משתנה כדי להבין את החישוב של זה,

<u>א'</u> כפי שהתבאר [בעיקר בנספח המתמטי] מהירות המסלול משתנית מיום ליום [בהתאם לקרבה לשמש], והנה כדוה"א משלים הקפה סביב עצמו כל 23 שעות ו56 דקות [בקירוב], אך כיון שבאותו זמן הספיק לשנות את מיקומו ביחס לשמש עליו להסתובב עוד קרוב למעלה כדי להגיע למצב של היום הקודם, ולכן אורך היממה 24 שעות מדויקות, שהרי כל מעלה אורכת 4 דקות, [בעצם זה הפוך, היממה מוגדרת כזמן שבו השמש משלימה סיבוב שלם ביחס לאופק שלנו, וחלקו את היממה ל24 שעות], אך כיון שמהירות ההתקדמות במסלול שסביב השמש אינו קבוע – גם הזוית הדרושה בסיבוב כדוה"א [היומי] כדי לחזור למצב של היום הקודם אינה קבועה, והיא משתנית כפי ההפרש בין מיקום השמש האמיתי [*D*] למיקום השמש לפי ההילוך הממוצע [*C*], וכיון שההפרש המרבי הוא 1.915 כמו שנתבאר, א"כ זמן חצות המאוחר ביותר הוא 7.66 דקות אחרי 12, [$1.915\times4=7.66$], ולכן כל יום נחסר את המיקום לפי ההילוך הממוצע מהמיקום האמיתי, וההפרש היוצא הם המעלות הדרושות לכדור הארץ להסתובב סביב עצמו באותה יממה יותר מאשר ביממה של יום השווין [וכן פחות אם התוצאה היא מינוס], ובהכפלה ב4 יוצא הדקות. [ובזמנינו בשם 'יממה' מתכוונים לימה של היום הממוצע שהיא 24 שעות מדויקות, אך האמת היא שרוב השנה זה מעט יותר או פחות, עד כדי 30 שניות, מה שמצטבר מיום ליום עד לשיא שבו האיחור בזמן חצות מגיע ל- 7.66 דקות, וכפי שהתבאר].

<u>ב'.</u> בכל כדור שמסתובב יש שינוי במהירות הסיבוב בין קו המשוה לבין המעלות שצפוניות לו או דרומיות לו, וככל שנוטים השינוי גדל, ולכן כיון שנטית כדוה"א משתנה כל העת, גם מהירות התנועה הזויתי משתנה, וזה משפיע במקסימום עד כ 9 דקות, חישוב ההשפעה הזאת בנוסחה טריגונומטרית, ע"י:

$\tan^{-1}[\tan D \times \cos Y] = S$, כאשר Y = 23.4367 [כפי שהתבאר לעיל], ו D = המיקום האמיתי.

וכדי לחשב את שתי הסיבות יחד צריך תחילה לחשב את U הנגרמת מכוח סיבה ב', ואז את סיבה א' ע"י $T = S - C$, כאשר התוצאה [מסומנת ב L] היא הגודל הקרוי "משוואת הזמן", משוואת הזמן היא- ההפרש במעלות בין השעה 12 {= זמן חצות ביום השווין}, לבין זמן חצות ביום המבוקש, ולכן נכפיל את התוצאה ב4 ונקבל את מס' הדקות של ההפרש, שיש להוסיף אותו ל12 בכדי לקבל את זמן חצות, ובאם התוצאה היא מינוס - יש להחסיר את הדקות משעה 12, וחצות ביום כזה מקדים לחצות ביום השווין.

[יש לשים לב כי במחשבון שהפונקציה tan ניתנת ביחס ל90 מעלות, צריך להוסיף לתוצאה 180 או 360 מעלות, כדי שהתוצאה תהיה קרובה ל C, ורק אז לחסר ממנה את C, וכך זה בדרך כלל במחשבונים הנפוצים].

6] וחשוב לציין כי החישוב הנ"ל מתאים לאזורים מסוימים בעולם, ולשאר האזורים צריך לתקנו מעט, ונסביר,

כידוע העולם מחולק לקווי אורך, וקווי רוחב, קווי הרוחב נקבעים לפי סיבוב כדוה"א סביב צירו, באופן שקו רוחב 0 הקרוי 'קו המשוה', הוא המקום שבו הסיבוב הרב ביותר בכדור, וככל שמצפינים או מדרימים משתנה היקף הסיבוב, ואנו יודעים בכל מקום מהי מעלת הרוחב הנוכחית עפ"י המרחק מקו המשוה, ולעומתם קוי האורך אין בהם דבר המגדיר מהיכן למנות אותם, כי אין בהם דבר ששונה מאחד לשני, אלא אנו מחליטים להגדיר מקום מסוים כקו אורך 0, ועפי"ז קובעים את קו האורך בכל מקום בכדור, [וזה היה הנידון הידוע היכן הוא 'קו התאריך'],

[יצוין כי ההבדל בין קוי הרוחב השונים הוא לענין אורך היום וזמניו, התלוים בגודל חלק הקשת שלא מוסתר מהאופק, אבל השעה הנוכחית ביממה שווה לכל האורך, דהיינו למשל, שזמן חצות חל באותה שניה בכל אותו קו אורך בעולם, לא משנה מה הקו רוחב, ואילו ההבדל בין קוי האורך הוא, הזמן ביממה שבו הם 'שרוים', כגון בעוד שבקו אורך מסוים חל כעת הנץ, בקו אורך אחר חל עכשיו חצות, וכן ע"ז הדרך, אך אורך היום וזמניו שוים בדיוק, בכל אותו קו רוחב בעולם, ולא משנה מהו קו האורך],

ולכן היה אמור להיות שבכל קו אורך בעולם יכוונו שעון לעצמם, כדי ששעה 12 בצהריים תצא בזמן חצות שבמקומם, ומכיון שהוצרכו להתקין שעון אחיד לאזורים גדולים חלקו את העולם לחלקים גדולים, וקבעו שבכל חלק כזה יונהג שעון אחיד, אפי' שכך יהיה מקומות עם הפרש מועט בין זמן חצות לבין השעה 12, ולכן במקומות אלו זמן חצות ביום השווין הוא אחרי או לפני השעה 12:00 [תלוי לאיזו כיוון הם מרוחקים מהמקום שלפיו נקבעה השעה], בשיעור המרחק שלהם ממעלת האורך של המקום שלפיו נקבעה השעה כפול 4 [כי כמש"נ כל מעלה היא 4 דקות בסיבוב היומי], ולכן למשל בבני ברק [מעלת אורך: 34.8 בקירוב], שמרוחקת מהמקום שעל פיו נקבע השעון בא"י [אלכסנדריה שבמצרים, קו אורך 30], כדי 4.8 מעלות, חצות ביום השווין חל בשעה 11:40.8 בערך, [40.8 = 60-19.2, 4×4.8=19.2], ולכן את משוואת הזמן יש לחשב ביחס לזמן חצות [ביום השווין] המקומי, [ולמשל אם יצא שמשוואת הזמן היא 5 דקות, חצות בבני ברק יהיה בשעה 11:35], וכמובן בעת שמונהג שעון קיץ יש הבדל של שעה נוספת מ11:40.

7] ועכשיו שידענו מתי חצות ביום המבוקש, וידענו מהו אורך חצי היום [עפ"י הנוסחה לעיל של 'זוית השעה'], נדע את זמן הנץ החמה ע"י חיסור אורך חצי היום מזמן חצות, ואת זמן שקיעתה ע"י הוספת אורך חצי היום לזמן חצות, וממילא נדע גם את אורך היום ואורך שעה זמנית, ובשביל לדעת את זמן עלה"ש או צאה"כ יש להוסיף את מס' המעלות שהשמש מתחת לאופק באותו זמן [שזה תלוי בשיטות השונות] ל G לעיל {בנוסחה ל'זוית השעה'}, ולמשל אם אנו רוצים לדעת מתי השמש 16 מעלות מתחת לאופק, אזי יש להציב ב G 106, ונקבל [ע"י הכפלה ל4],את אורך הזמן מחצות עד הזמן המבוקש.

בס"ד.

<u>פרק סיכום.</u>

לסיכום נסדר ברצף את הנוסחאות של החישובים שבפרקים הקודמים,

1] הכפלת מס' הימים שעברו [*A*], בהתקדמות היומית הממוצעת [*B*] **.A × B = C**

2] חישוב המיקום האמיתי במסלול, $\mathbf{C + 1.915 \times \sin[C] + 0.02 \times \sin[C \times 2] = D}$.

3] הוספת ההפרש הקיים בין תחילת המסלול לנקודת השויון, **.D + E = F**

4] חישוב הנטיה עפ"י המיקום [F], $\mathbf{\sin^{-1}[\sin \boldsymbol{Y} \times \sin \boldsymbol{F}] = \boldsymbol{H}}$.

5] חישוב זוית השעה, $\mathbf{\cos^{-1}[[\cos \boldsymbol{G} - \sin H \times \sin \emptyset] \div [\cos \boldsymbol{H} \times \cos \emptyset]] = \boldsymbol{R}}$.

6] אורך חצי היום בדקות, **.R × 4 =**

7] משוואת הזמן, שלב א': $\mathbf{\tan^{-1}[\tan \boldsymbol{D} \times \cos \boldsymbol{Y}] = \boldsymbol{S}}$

שלב ב': S – C = T

שלב ג': .T × 4 = U

8] זמן חצות ביום השויון,
חיסור מעלת האורך המקומית ממעלת האורך של השעון [בא"י 30], הכפלת התוצאה ב 4, חיסור התוצאה מהשעה 12:00.

9] חישוב זמן חצות ביום המבוקש, *חיסור U מחצות ביום השויון [הניתן מחישוב 8].*

10] זמני הנה"ח והשקיעה ע"י הוספת אורך חצי היום מזמן חצות, וזמן הדמדומים ע"י הצבת המעלות המבוקשות ב G [ראה לעיל].

<u>כאשר:</u>

- A- מס' הימים שעברו מתחילת המסלול השנתי בשבר עשרוני [כולל שעות ודקות].
- B- ההתקדמות היומית הממוצעת הניתנת ע"י: 365.2421896698 ÷ 360.
- C- המיקום לפי התקדמות ממוצעת.
- D- המיקום האמיתי במסלול.
- E- ההפרש בזמנינו בין תחילת המסלול השנתי לנקודת השויון, 283, [וראה להלן].
- F- המיקום ביחס למסלול שתחילתו בנקודת השויון.
- Y- זוית נטית השמש המרבית בזמנינו, העומדת על כ- 23.4367.
- H- נטית השמש מקו המשוה ביום המבוקש.
- G- אורך הקשת של המסלול של חצי יום ביום השויון, שהוא 90.
- R- זוית השעה, [המעלות של המסלול בחצי יום הנוכחי].
- S- השפעת זוית הסיבוב על המהירות.
- T- הוספת השפעת מהירות התנועה המשתנית, על הזוית הדרושה להשלמת הסיבוב היומי.
- U- משוואת הזמן בדקות.

[בנוסחה לזוית השעה יש לחשב את קו הרוחב, ובנוסחה של משוואת הזמן את קו האורך, ופי שהתבאר].

ובזה התבארו הדרכים שבהם מחשבים את זמני היום, אך צריך עוד כמה הוספות ושינוים בכדי להגיע לרמת הדיוק הנדרשת, ויבוארו בס"ד ב'הוספות נחוצות', וכן יבואר שם זמן תחילת המסלול, זמן יום השויון, ונתונים נוספים.

בס"ד.

הסבר גאומטרי כללי.

ענין ה'סינוס' וה'קוסינוס' המסומנות ב **sin** ו **cos** הוא היחס בין צלעות המשולש אשר ממנו יודעים את גודל הזוית שבמיתר [האלסון של המשולש], וביתר ביאור, כשם שבכל עיגול בעולם יש יחס קבוע בין קוטרו להיקפו, [הידוע כיום בשם "פאי", ומסומן ב $\boldsymbol{\pi}$,] שהוא: ....3.141592654, [ואינו מספר סברתי, אלא המספר ניתן ע"י מדידות, שבמציאות כך הוא היחס של גודל העיגול], כך בכל משולש יש יחס קבוע בין היחס של צלעות המשולש השונות לבין הזוית שמולם, יחס קבוע זה ניתן ע"י מדידות ידניות בלבד, ואינם ענין של סברא, וכן אין שויון או אחידות בין קצב השתנות יחס צלעות המשולש לגודל השתנות הזוית שמולם, וצריכים למדוד בכל יחס צלעות את הזוית בנפרד, או להיפך בכל זוית את יחס הצלעות שמולה, ומדדו במשך שנים הרבה ציורים של משולשים שונים וזוויותיהם אם באופן ידני ואם ע"י מכשירים מדויקים, והזינו את התוצאות למחשבים כך שתוך רגע אחד יוכלו לקבל את התוצאה המתאימה, [וכמו שעשו ב"פאי"], וקראו ליחס בין הצלע הקצרה לאלכסון סינוס, וליחס בין הצלע הארוכה לאלכסון קוסינוס, והפונקציה של $\sin^{-1}$ וכן $\cos^{-1}$ היא גם כנ"ל אלא שהנתון שבידינו הוא הזוית ורצונינו לדעת את יחס הצלעות, ופונקצית טננגס [**tan**] היא גם היחס בין צלעות המשולש, אבל לא בין האלכסון לאחת מהצלעות, אלא בין צלע א' לב', והנוסחאות שנתבארו בקונטרס עושות שימוש נרחב בחוקים השונים שנמצאו ביחסי הצלעות והזויות, ובפרט במשולשים כדוריים [שהם תלת ממדיים], ולכן קל לחשב במחשבון שיש בו את הפונקציות הנ"ל, ומכונות היום 'נוסחאות טריגונומטריות'],

והרוצה ללמוד נושאים אלו בהרחבה, יכול לעיין בספרים הבאים:

יסוד עולם,

'איל משולש' [להגר"א],

תכונת השמים [לר' רפאל מהנובר],

נאוה קודש,

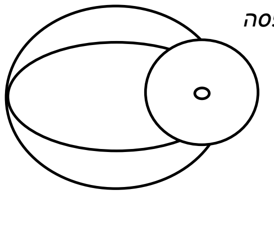
ובחזו"א [על הל' קידוה"ח].

נספח מתמטי.

1] מהירות התנועה במסלול השנתי אינה קבועה, והיא תלויה במרחק מהשמש, ככל שמתקרבים לשמש המהירות הולכת וגודלת, וכשמתרחקים - מתקטנת, היום רגילים לפרש זאת שמאחר והשמש אינה במרכז המסלול- אלא סמוך לאחד מקצותיו, גורם כוח המשיכה לשינוי במהירות, כי בזמנים שוים צריך לכסות שטחים שוים, דהיינו שהשמש 'מושכת' כל הזמן אותו גודל של שטח, רק הצורה של פריסת השטח משתנה, ולכן כשקרוב לשמש עיקר השטח צריך להיות לרוחב, והתנועה גדולה, וככל שמתרחקים מהצד של השמש, אורך השטח גדל, ולכן הרוחב מצטמצם, והתנועה מתקטנת, [הגדרה זו עדיין אינה מדויקת מספיק, עיין בהמשך].

2] צורת המסלול אינה בעיגול, אלא פחוסה מעט מה שקרוי 'אליפסה', [דבר זה קורה בכל כוכב המקיף כוכב אחר, ומסבירים זאת בזמנינו עפ"י תאוריות שנאמרו בכוח המשיכה], וכאמור השמש לא במרכז המסלול אלא באחד ממוקדי האליפסה, לכל זה אין משמעות לענין זוית נטית השמש – שהיא היחס בין קו המשוה הארצי למישור ההקפה ['מילקה'], וזה מחושב לפי עיגול מושלם, אך זה משנה לענין החישובין של מיקום כדוה"א במסלול [וכן לענין 'רקע' הכוכבים שבו נצפית השמש], וכדלהלן.

3] הנוסחה לחישוב המסלול היא, שכשאר נוסיף עיגול מושלם סביב לאליפסה, ונמתח קו מכל מעלה בעיגול לעגולת האליפסה, ועוד נעשה עיגול קטן בתוך האליפסה- באופן שהשמש תהיה במרכזו, ואח"כ



כמו באיור הזה, מסומן עיגול מסביב לשמש, וכן את האליפסה [של המסלול] שהשמש באחד ממוקדיה, וכן מסומן עיגול מסביב לאליפסה שמרכזו הוא מרכז האליפסה.

בס"ד.

נחשב עפ"י חילוק גודל האליפסה [דהיינו 360 מע'], למס' הימים בשנה [365.25 בערך] את המהלך האליפטי הממוצע ליום שהוא ...0.9856 [חלקי 360], ואז נמתח קו ממיקום זה באליפסה לעיגול הקטן שעשינו [סביב השמש], ונראה כמה מעלות זה שם, ואת כמות המעלות שיצא שם נסמן בעיגול הגדול המקיף את האליפסה וממנו נמתח קו חזרה לאליפסה- ושם הוא המקום האמיתי.

4] וההסבר הוא, כי עי"ז יצא את ההילוך הנדרש בשביל שויון השטחים, כי ככל שקרוב יותר לשמש, כל תזוזה מעטה משנה יותר את הזוית במעגל הקטן, וככל שרחוק יותר משנה פחות את הזוית בעיגול הקטן במתחינו את הקו הישר, ולכן כשתרגמנו והעתקנו את הזוית למעגל הגדול, יתורגם ג"כ למהירות גדולה באליפסה במתחינו קו לשם, וקצה המהירות ילך ויגדל עד הגיעו ל 90 מע', ומשם יתקטן חזרה.

5] ואמנם עפ"י ההסבר של שויון השטחים אמור להיות שבהתחלה ההבדל הוא הכי גדול והולך ומתקטן עד 180 מעלות, אך ההגדרה המדויקת של 'כיסוי השטחים השוים' היא ביחס לעיגול המקיף את האליפסה, וכיון שהאליפסה מתנמכת מהמעגל, השטח החסר בין גג האליפסה לקשת המעגל, מתווסף לרוחב המסלול באליפסה, ולכן זה גדל עד הגיעו ל 90 מעלות.

6] ועפ"י כללי החשבון, ניתן לפתח נוסחה לחישוב הזוית עפ"י ההפרש הזויתי המקסימלי- שהוא כאשר המסלול ב90 מעלות, וזה צורת החישוב:

מתחילה יש לדעת גודל הנקרא 'אקסטרניות' /אקסצנטריות, המסלול/האליפסה, שענינו הוא יחס הפחיסות של האליפסה [שהיא כאמור צורת המסלול], גדול זה נקבע עפ"י הנתונים דלהלן:

א'} מרחק קצה האליפסה מאחד המוקדים שלה, [המרחק שווה בשני המוקדים], שהוא בעצם מדת הקרבה המרבית של כדוה"א לשמש, והוא: 147,098,444 ק"מ, יסומן ב *A*.

ב'} המרחק המרבי בין כדה"א לשמש, והוא: 152,097,602 ק"מ, יסומן ב *B*.

ג'} אורך הציר הארוך של האליפסה, הניתן ע"י *[A + B]*, והוא: 299,196,046 ק"מ יסומן ב *C*.

ד'} אורך חצי הציר הארוך, הניתן ע"י $C \div 2$, והוא: 149,598,023, יסומן ב *D*.

ה'} המרחק בין מוקדי האליפסה, הניתן ע"י *B – A* , והוא: 4,999,158 ק"מ, יסומן ב *E*.

ו'} חצי המרחק בין המוקדים, הניתן ע"י $E \div 2$, והוא: 2,499,579 ק"מ, יסומן ב *F*.

ז'} ועכשיו נקבל את גודל האקסטרניות ע"י $F \div D$, והוא: 0.0167086368, יסומן ב *e*.

7] וכיון שהאקצטרניות זה היחס בין צלעות האליפסה, נוכל לחשב לפי"ז את הזוית [ביחס לעיגול], דהיינו שיש להכפיל את האקצטרניות ב 2, [בגלל שצריך לחשב גם את הצד השני של האליפסה, ולא מספיק לחשב את חצי הציר], ולמצוא את הזוית שהיחס בין הצלעות מייצג ע"י פונקצית $\sin^{-1}$, כך: $\sin^{-1}\ [0.03417273] = 1.915025276$, זוהי אם כן הזוית המרבית ביחס ל 90 מעלות, ולכן יש להכפיל אותה בסינוס הזוית המבוקשת, למשל אם המיקום האליפטי לפי התקדמות ממוצעת הוא 30 מעלות, נכפיל 1.915 בסינוס של 30 מעלות, ויצא 0.9575, וזה אומר שמיקום השמש האמיתי הוא 30.9575 מעלות, וכן על זה הדרך, זה החלק הראשון בנוסחה שבפרק ב', והתוספת של 0.02 ניתנת ע"י: $\sin^{-1}\ [e^2 \times 1.25] = 0.01999469$, זוהי אם כן הזוית המקסימלית של השינוי, אלא שכאן זה ביחס ל 45 מעלות, ולכן בשביל לחשב את השפעת שינוי זה על המעלות השונות, עלינו להכפיל תמיד את המיקום הממוצע ב2, [ולכן בחלק השני של הנוסחה מכפילים את *C* ב2], ועי"ז נקבל את התוצאה המתוקנת לפי מדת האקצטרניות המסלולית.

8] גודל האקצטרניות משתנה מעט במשך הזמן, ולכן הדיוק של הנוסחאות מספיק לעשות השנים הקרובות, כמו"כ איננו לוקחים בחשבון את השפעות ה'נוטציה', וכן תנועות זעירות נוספות המושפעות מכוח המשיכה של כוכבי הלכת השונים וגם מהאסטרואידים הגדולים במערכת השמש, וכמו"כ עגלנו את הנוסחאות מעט למען פשטות החישוב, ולכן הדיוק במיקום הוא של כדקת קשת [נפק"מ לכ 1.5 שניות בזמני היום], אך האמת היא שיש כיום נוסחאות מורכבות, ארוכות, ומדויקות מאד, הנותנות את מיקום השמש בדיוק של פחות ממטר אחד בשמים! [שהוא כ 38 חלקי 100 מיליארד של מעלה!].

<u>הוספות נחוצות.</u>

1] לידיעת יום תחילת המסלול, אפשר לבדוק באלמנך אסטרונומי כלשהוא מתי הוא זמן ה"פריהליון" בלשונם, שהוא הזמן שבו הקרבה המרבית של כדוה"א לשמש = תחילת המסלול, וכמו"כ מתי זמן נקודת השויון שגם הוא מצוין במקומות אלו, וברגע שנדע בשנה כלשהיא מתי היו זמנים אלו, נדע אותם לכל השנים עפ"י החישובים שהתבארו,

ונציין כאן נתונים המתאימים לשנת תש"פ:

<u>זמן הפריהליון:</u> ח' בטבת תש"פ [5/1/2020 ל], בשעה: 13:41, יום יוליאני: [2458853.987].

<u>נקודת השויון:</u> כ"ד אדר תש"פ [20/3/2020 ל], בשעה 5:51, יום יוליאני: [2458928.66].

וכדי להקל על החישוב נציין כי ההפרש בין המיקום ביחס לתחילת המסלול לבין המיקום ביחס לנקודת השויון הוא כמעט קבוע, והוא משתנה בשיעור מועט מאד מיום ליום, ולכן מספיק לחשב את המיקום ביחס לתחילת המסלול עפ"י הנוסחה שנתבארה בפרק ב', ואז להוסיף את ההפרש הקבוע ביניהם כדי לקבל את המיקום ביחס לשויון, שעל פיו נדע את נטית השמש,

<u>ההפרש הקבוע הוא:</u> נכון ליום ח' בטבת תש"פ בשעה 13:41 [שכאמור זה היה הזמן של תחילת המסלול בשנת תש"פ], **283.2762**, והוא גדל בשיעור של **0.000047086215** כל יום,

ולכן תמיד נחשב כמה ימים עברו מתחילת המסלול, ומהו מיקום השמש [עפ"י הנוסחה לעיל], ואז נחשב מהו ההפרש הקבוע המתאים לתאריך המבוקש [ע"י שמוסיפים ל 283.2762 את הכפלת מספר הימים שעברו בשיעור גדילת ההפרש כל יום, כגון שאם עברו 10,000 יום ההפרש יהיה 283.7470622] ונוסיף אותו לתוצאה, ונקבל את מיקום השמש ביחס לנקודת השויון,

וכדי לחשב בקלות את מספר הימים המדויק שעבר מהתאריך של תחילת המסלול, כדאי להפוך את שני התאריכים לימים יוליאניים, [שהם ימים הנספרים בספירה רציפה, ואינם מחולקים לחודשים {בעלי אורך ימים שונה אחד מהשני- דבר המקשה על החישובים}], וזאת ע"י הנוסחה שבסוף פרק של 'הקדמה ומבוא', ואז לחסר את היום היוליאני של תחילת המסלול מהיום המחושב ובזה נקבל את מס' הימים שעברו, ואז נכפיל אותם בהתקדמות היומית הממוצעת, וכו'.

2] כפי שנתבאר המהירות הזוויתית הממוצעת ניתנת ע"י חלוקת 360 מע' למספר הימים הקיים בשנה, אורך שנת החמה הממוצעת עפ"י מדידות מדויקות הוא, 365 יום 5 שעות 48 דקות ו 45.1875 שניות, שהם 365.24218967 ימים, ולכן ההתקדמות הממוצעת ליום היא: **0.98564736** מעלות, ואותה יש להכפיל במספר הימים שעברו, [וישנם שינויים מחזוריים זעירים ביותר שלא נלקחו בחשבון כיון שאינם משנים לחישובים כאלה, וכמו"כ אורך השנה הממוצעת מתקטן בשיעור של כשניה כל 200 שנה, שגם זה כמובן לא נפק"מ לחשבונות שלנו...].

3] נטית המילקה [שהיא גם השיעור המקסימלי של נטית השמש] היא קבועה כמעט לגמרי, משתנה בשיעור זעיר מאד מיום ליום, הנטיה בתאריך ח' בטבת היתה: **23.43668874**, והיא מתקטנת בשיעור של כ: 0.00000036 מעלות ליום, דבר שאינו משמעותי לחישובים שלנו, אלא בהפרש של שנים רבות, ולכן א"צ לחשב לכל יום בנפרד את נטית המילקה, ול20 שנה הקרובות לפחות יהיה מספיק מדויק לחשב לפי השיעור האמור, [להסבר מורחב יותר לענינים אלו, עיין בנספח על השפעת הפרסציה].

4] בפרק ג' בנוסחה לזוית השעה, החישובים נקבעו לפי הנחה שאורך הקשת של מסלול השמש ביום השויון הוא 90 מעלות, ההנחה הזאת אמנם נכונה מבחינה עקרונית, אך צריך להוסיף לחשבון עוד כמה נתונים חשובים מאד, שמחמתם הקשת מעט יותר מ90 מע'.

א'} החישוב הוא לפי זריחת/שקיעת מרכז עיגול השמש, ומכיון שהשמש קרובה אלינו [יחסית] היא נראית לעינינו בגודל זוויתי משמעותי של כ0.5 מעלה, ולכן צריך לחשב גם את משך הזמן שבין ראית מרכז העיגול שלה על גבי האופק, לבין הזמן של ראית הקצה העליון של השמש על גבי האופק, [בין בזריחתה ובין בשקיעתה],

זמן זה אינו קבוע משתי סיבות, 1] האלכסון של מסלול השמש [ה'קשת'] בכיפת השמים משתנה מזמן

לזמן, וכפי שנתבאר לעיל באריכות, 2] הקוטר הזוויתי של עיגול השמש משתנה מעט עפ"י המרחק לשמש שהוא גדול בחורף וקטן בקיץ, [וזה יכול להשפיע עד כ12 שניות!],

ולכן יש לחשב תחילה את קוטר השמש באותו יום, ואז להוסיף את התוצאה ל 90 כדי לחשב זאת בנוסחה לזוית השעה, וכך החישוב יכלול את 2 הסיבות האמורות,

חישוב גודל השמש ניתן ע"י נוסחה טריגונומטרית [עפ"י הגודל המרבי/הקטן ביותר, האקצטרניות, והמיקום ביחס לתחילת המסלול],

$$\mathbf{0.271} \div [\mathbf{1} - \mathbf{0.0167086368} \times \mathbf{\cos} \boldsymbol{D}] = \boldsymbol{\nabla}$$

כאשר D זה מיקום השמש האמיתי ביחס לתחילת המסלול, עפ"י החישוב שבפרק ב', והתוצאה המסומנת ב ∇ היא קוטר השמש [במעלות] בזמן המחושב, [במינימום: 0.262, ובמקסימום 0.271],

את התוצאה נוסיף ל90 מעלות, ובכך החישוב יכלול את גודל עיגול השמש,

בצורה דומה נוכל לחשב בכל יום מהו מרחק השמש מכדוה"א בק"מ, ע"י הנוסחה הבאה:

$$\left[\boldsymbol{C} \times \left[\mathbf{1} - \boldsymbol{e}^{\mathbf{2}}\right]\right] \div [\mathbf{1} + \boldsymbol{e} \times \mathbf{\cos} \boldsymbol{D}] = \boldsymbol{\mu}$$

כאשר: C = *אורך חצי הציר הארוך של האליפסה = 149,598,023 ראה בנספח המתמטי.*

e = *אקצטרניות המסלול = 0.0167086368 וכפי שהתבאר בנספח המתמטי.*

D = *מיקום השמש האמיתי ביחס לתחילת המסלול, ראה בפרק ב'.*

μ = *התוצאה, שהיא המרחק בק"מ.*

ב'} תופעת ה"רפקרציה", שהיא שבירת קרני האור באטמוספירה, וביתר ביאור, קרני האור של השמש או הכוכבים נעים לכל הכיוונים בצורה ישרה, אך כשמגיעים למקום שנהיה דחוס יותר למשל באויר, קרני האור מתעקמות ממסלולם, ולכן למשל אם נכניס כפית לכוס שחציה מלא במים, יראה לנו שהכפית עקומה, כי המים מעקמים את כיוון האור שמגיע מהכפית, ולכן גם כשהשמש שקעה מבחינה גאומטרית, עדיין נוסיף לראותה בשיעור הזוית שקרני אורה מתעקמים באטמוספירה, ובאמת גם לפני השקיעה כבר מתעקמים מעט קרני האור ואיננו רואים אותה ממש במקומה האמיתי, אך ככל שהמיקום גבוה מעל האופק שבירת קרני האור מתקטנת עד לא קיימת, אבל בשעת השקיעה השבירה מגיעה לשיאה, כיון שעל קרני האור לעבור את מירב השכבות של האטמוספירה [כי מסלולם הוא באלכסון המרבי], וכן גם לפני הנץ הגאומטרי אנו כבר נראה את השמש מחמת עקימת קרני האור, זה גורם לשינוי בזמני היום של עד כדי שלש דקות הקדמה של הנץ, או איחור של השקיעה,

הרפרקציה היא תופעה מפורסמת המחושבת בכל לוחות השנה, אלא ששיעורה אינו קבוע, כי היא תלויה בכל מקום בעובי האטמוספירה ששם, ובלחץ האויר המשתנה מחמת סיבות רבות, [כמו למשל הרוחות, הגובה, ועוד], וכן בטמפרטורה, כי היא משנה את לחץ וצפיפות האויר, וכן היא תלויה בלחות האויר, ומטעם זה לא יכלו לערוך בלוחות חישובים מדויקים מראש, ונקטו את הערך הממוצע, וכמו"כ בד"כ לא מציינים בלוחות זמנים בדיוק של שניות אלא של דקות, ואף מוסיפים שכדאי להחמיר מעט בדקה שתים ולא לצמצם,

[ובאמת ממילא החישובים שעליהם מתבססים הלוחות לוקים בטעויות שונות, כי הם לא לוקחים בחשבון את כל הנתונים המצוינים כאן, כמו למשל את הזמן המדויק שעבר מתחילת המסלול, קוטר השמש המשתנה, גובה הצופה, מהירות התנועה, ועוד, מה שגורם לפעמים לחוסר דיוק של עד כשלש דקות!, וכמו שכל אחד יכול לראות בעצמו בתצפית פשוטה],

והחוקרים בדקו בתצפיות רבות מאד, ובחישובים שונים, את הערך הממוצע של שבירת קרני האור, כתלות בלחץ האויר, ובטמפרטורה, שהם הגורמים העיקריים לשינוי בזמן הרפרקציה, [ושאר הדברים- כשאין מזג אויר קיצוני במיוחד משפיעים רק בכ3 שניות בא"י, וגם אותם אפשר לחשב בחישובים ארוכים ומסובכים מאד], וזאת בנוסחה הבאה:

$$.0.1594 \times [\ast \div {}^{\circ}\mathrm{C}] = ▩$$

כאשר ⁎ = הלחץ הברומטרי במיליבר = בא"י 1005 בדרך כלל, [ואינו משתנה בא"י ברמה משמעותית לענין זמני היום, ולכן זה מדויק מספיק לחשב תמיד לפי שיעור זה],

℃ = הטמפרטורה במעלות צלזיוס בשעת השקיעה + 273, למשל כשהטמפרטורה היא 18, אז ℃ = 291. [שינוי של כ6 מעלות גורם שינוי של כ 3-4 שניות בערך].

▩ = התוצאה שהיא הזוית במעלות, ואותה צריך להוסיף ל90 בנוסחה לזוית השעה, כדי לקבל גם את הזמן של הרפרקציה.

ג') גובה הצופה, לפי שכל החישובים עד כה היו לפי גובה פני הים, אך בן אדם שעומד על שפת הים יוסיף לראות את החמה עוד כ20 שניות יותר, וכ"ש אדם העומד על הר גבוה יוסיף לראות את השמש אף זמן רב יותר [אך בדוגמה זו הדבר תלוי לפעמים בשיטות השונות, האם מתחשבים בגובה ההר, או שהזמן נקבע לפי מישור, משא"כ בדוגמה הקודמת שלכו"ע הולכים אחרי גובה אדם ממוצע, ולא כמו שטעו בלוחות שנה בזמנינו שלא מחשבים גובה אדם ממוצע],

השפעת גובה הצופה אינה אחידה והיא הולכת ומתקטנת ככל שהגובה עולה, חישוב השפעת הגובה הוא ע"י הנוסחה הבאה: $Z = \sqrt{\cap} \times 0.03533333$. כאשר ∩ = גובה הצופה במטרים, ו Z = התוצאה, שהיא הזוית במעלות שהצופה יוסיף לראות יותר מאשר מי שיראה מגובה פני הים, ולכן מי שנמצא למשל בגובה 1000 מטר, יוסיף לראות עוד 1.117337 מע', וצריך להוסיף שיעור זה ל90 כדי לחשב את הזמן הנוסף שהוא יראה את השמש.

הסבר לנוסחה זו, תמצא בספר "איל משולש" להגר"א, שמבאר זאת מכוח הסיבה שמחמתה החמה שוקעת מעינינו, שזה בגלל שהחמה עברה את החצי של הכדור שלנו, וממילא מוסתרת ע"י החצי השני, ולכן צריך לחשב את קוטר הארץ וכו', יעו"ש.

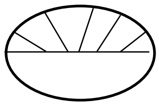
ג' סיבות אלו יחד משנות בצורה משמעותית את הזמנים [לפעמים עד כ10 דקות!], ולכן צריך לחשב את שלשתם ולהוסיף את כולם יחד ל90, ובכך חישוב זוית השעה יהיה מדויק.

5] **כלל גדול וחשוב** בענינים אלו, שהחישוב צריך להיות לשעה המדויקת המבוקשת, כגון חישוב משוואת הזמן צריך להיות לזמן חצות, וחישוב הנץ צריך להיות עפ"י הנתונים של שעת הנץ [המשוערת] וכן לחישוב השקיעה יש לחשב את הנתונים לפי זמן השקיעה המשוער, כי אם נחשב לזמן חצות יהיה הפרש משמעותי שיכול להגיע קרוב לחצי דקה!, ולכן בנוסחה של זוית השעה חישבנו כל חצי יום בנפרד, כי חציו הראשון של היום אינו בהכרח שוה לחציו השני, מפני שעד אז כבר הספיקה נטית השמש להשתנות מעט, אבל מכיון שנטית השמש משתנה כל העת, אם נרצה לקבל את הזמן המדויק ממש של הנץ/השקיעה נצטרך לחשב לפי נטית השמש **הממוצעת** בין חצות לשקיעה, כי לפני השקיעה הנטיה היתה שונה וממילא גם הקשת של המסלול, ולכן החישוב צריך להיות לפי השעה הממוצעת בין חצות לשקיעה, וכגון אם חצות ב12 והשקיעה ב6 החישוב יהיה לפי שעה 3, ובכך החשבון יהיה בדיוק הנדרש.

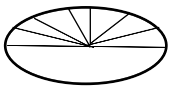
6] כפי שנתבאר, את זוית השעה יש להכפיל ב4, כדי לקבל את הזמן בדקות, כי כל מעלה היא כדקה, חשבון זה נכון בקירוב, אך אינו מדויק, כי יש ימים שהמהירות גדולה במעט יותר ויש ימים שהיא איטית יותר, ענין זה תלוי במהירות ההקפה, והתבאר לעיל לגבי משוואת הזמן, השינוי מחמת חשבון זה יכול להגיע עד לכ9 שניות, והדרך לחשבו היא ע"י חישוב משוואת הזמן ביום שלפני או שאחרי, ובדיקה בכמה שניות היום התארך או התקצר, ואז נחלק את מספר הדקות המדויק [בשבר עשרוני הכולל שניות]

שיש באותה יממה, ב 360 מעלות, ואת התוצאה נכפיל בזוית השעה למשל אם התוצאה היא 3.9986 וזוית השעה היא 104 נכפיל ב3.9986 ויצא שאורך חצי היום הוא 6 שעות ו55 דקות ו51.3 שניות.

7] וכן צריך לחשב את משוואת הזמן לפי קו האורך המדויק של המקום [הגורם את שינוי השעון המקומי מהשעון האזורי, ראה לעיל במשוואת הזמן], ואת זוית השעה לפי קו הרוחב המדויק של המקום, כדי לקבל את הזמן המדויק, ובזה צריך לדעת את קו הרוחב ה**גאוצנטרי** המדויק ולא את זה ה**גאודטי** שנמצא בשימוש היום, וביתר ביאור, צורתו של כדור הארץ, איננה עיגולית לגמרי, אלא פחוסה מעט, שבקו המשוה היקף כדוה"א הוא 6378.137 ק"מ, ואילו בכיוון הקטבים ההיקף הוא 6356.8 ק"מ [אקצטרניות של 0.0818], ולכן בבואנו לקבוע את קווי הרוחב השונים עלינו להחליט כיצד לחשבם, והיה אפשר לחשב כמו בקווי האורך, שנחלק את ההיקף ל 360 חלקים שיהיו שווים בגודלם ומתחילים בקו המשוה, אך מפני טעמים שונים הקשורים להשפעה הייחודית של שינויי קו הרוחב [בשונה מקווי האורך שאין ביניהם חילוק כלל, וכמבואר לעיל בפרק ג' סעיף 6], חלקו בצורה שונה, שקו הרוחב יקבע לפי- מתיחת קו ישר מהמקום המבוקש בכדור, לכיוון של קו המשוה, [לא לכיוון מרכז הכדור, אלא בצורה ישרה למטה, דהיינו בכיוון הזוית של אותו המקום בכדור הארץ], וכמו באיור הזה- והזוית היוצאת- היא מעלת הרוחב של המקום, זוהי איפוא 'מערכת הקורדינאטות הגאודטית' והיא הנמצאת בשימוש הרגיל שלנו, אבל בחישובים שמיימים יש לחשב דווקא לפי 'מערכת הקודינאטות הגאוצנטרית', דהיינו שמעלת הרוחב נקבעת לפי מרכז הכדור, באופן שמותחים קו ממרכז הכדור עד לנקודה המבוקשת, והזוית שנוצרת [בין המישור של קו המשוה למקום], היא מעלת הרוחב הקובעת בענינים אלו, [והסיבה לכך היא מפני שאנו באים לחשב את המיקום של גרמי השמים ביחס לראיה של מקום מסוים המוגדרת ע"י כדוריתו של כדור הארץ, ולכן הדבר תלוי בזוית ביחס לקו המשוה],



איור של הקורדינאטות הגאוצנטריות-



חישוב מעלת הרוחב הגאוצנטרית עפ"י מעלת הרוחב הגאודטית ניתן ע"י הנוסחה הטריגונומטרית הבאה:

$$-0.192428611 \times \ \mathbf{sin}[\emptyset \times 2]$$

$$+0.0003231389 \times \ \mathbf{sin}[\emptyset \times 4]$$

$$+0.0000007222 \times \ \mathbf{sin}[\emptyset \times 6] = \partial$$

כאשר ∂ שהיא התוצאה המתקבלת משלשת האיברים יחד, היא הערך אותו יש להוסיף על קו הרוחב הגאודטי כדי לקבל את קו הרוחב הגאוצנטרי.

נ"ב: דבר זה בעל חשיבות רבה לדיוק בחישובים, ולמשל באזור בני ברק [קו רוחב גאודטי 32.08, וגאוצנטרי כ- 31.9] השפעתו על החישובים יכולה להגיע [כשנטית השמש בשיאה] ל40 שניות, [ובמינימום ל20 שניות].

8] ישנם נתונים נוספים אשר לא נלקחו בחשבון, כגון:

הפרלקסה [השינוי הנראה במיקום הכוכב בין צופה הנמצא במרכז כדוה"א לצופה שנמצא על גביו],

הנוטציה [תנועות נוספות במסלול כדוה"א אשר מתרחשות במחזוריות קצרה, ראה עוד לקמן בנספח על השפעות הפרסציה והנוטציה],

החישוב המדויק של 'משוואת קפלר' [הכולל את חישוב האנומלי' האקצטרנית, הממוצעת, והאמיתית, דבר שאינו מחושב בדיוק מושלם בנוסחה למיקום השמש האמיתי],

השפעת צורת כדור הארץ על החישובים [שמבוססים על הנחה כי צורתו הינה צורת כדור ממש],

למרות האמור, ולמרות שינוים נוספים זעירים ביותר, רמת הדיוק של החישובים שהתבארו די מדויקת, אלא שמכוח מזג האויר יתכנו שינויים של עד כדי 4 שניות בערך, [שאותם גם אפשר תיאורטית לחשב בחישובים ארוכים ומסובכים מאד על מצב האויר בכל שכבות האטמוספירה השונות], וכפי שאפשר לראות את הדיוק בתצפית פשוטה על הנץ או השקיעה, [אם כי ב 60% מהימים לפחות, אין אפשרות לתצפית מדויקת, או בגלל עננות והסתרה, או בגלל מצב הראות הגורם לכך שהשמש 'נמוגה' כבר כשהיא מתקרבת לאופק, ולפעמים צריך הבחנה דקה לדעת אם השמש שקעה או רק נמוגה טרם זמנה, וכן האם זרחה כבר לפני ורק אנו לא ראינוה].

בס"ד. **<u>השפעת הפרסציה והנוטציה על הזמנים.</u>**

1] מישור הסיבוב של הארץ סביב השמש [ביחס למשוה] אינו קבוע במקומו, אלא מתקטן במחזוריות, [כתוצאה מהשפעת כוכבי הלכת על המסלול], וזה גורם שינוי בנטיית השמש, כיון שזוית הנטיה מהמישור במשך השנה משתנה, [אך מיקום נקודת השויון לא מושפע משינוי זה, כיון שנקודת השויון לא תלויה ברמת האלכסון של הסיבוב], דבר זה הוכנס לחישובים שלעיל [בענין 'התקטנות המילקה'].

2] ציר סיבוב כדור הארץ סביב עצמו [שהוא במדינות של קו המשוה], משתנה במחזוריות, מה שמכונה גם בשם 'תנודות הקטבים' [כי זה משפיע גם על מיקומם המדויק של הקטבים], ומזה נגרמים ג' שינוים:

א'} השינוי העיקרי הוא, שינוי המקום של נקודת השויון- שהיא מתרחשת כאשר ציר הסיבוב של כדוה"א [סביב עצמון] מתיישר עם המישור של הסיבוב סביב השמש, וכיון שציר הסיבוב העצמי משתנה במשך השנה נמצא שכבר בהגיע כדוה"א לנקודה מסוימת במסלול -המוקדמת במעט למיקום של נקודת השויון בשנה הקודמת- כבר שם הוא נקודת השויון, [משך הזמן של ההגעה לנקודת השויון הקודמת- עומד על **365.25636** ימים, ואילו משך הזמן עד להגעה לנקודת השויון החדשה הוא **365.2421896698** ימים ומתקטן בכשניה כל 200 שנה], תופעה זו מחולקת לשינוי הקבוע במיקום שהולך ומתקדם משנה לשנה בהפרש קבוע ואשר מכונה בשם ה'פרסציה', ולשינוי נוסף מועט יותר בעל מחזוריות קצרה [של כ18.6 שנה הנגרם מכוח תנועות הירח סביב כדוה"א], וגורם להקדמה או איחור מועטים במיקום ביחס להפרש הקבוע, תופעה זו קרויה 'נוטציה', והיא מגיעה במקסימום לכ9 דקות קשת הקדמה/איחור של מיקום נקודת השויון, וכמובן שגם ההתקדמות של מיקום השמש שנקבעת ביחס לנקודת השויון, משתנה מזמן לזמן, מאחר שכבר הגיע לנקודת השויון בזמן מוקדם יותר, [או מאחר שעדיין לא הגיע לשם], מה שכמובן גורם גם לשינוי בנטיית השמש, וממילא גם בחישוב אורך היום וזמניו, ואנו לקחנו בחשבון את השפעת הפרסציה שהיא משמעותית יותר [כ1.397 מעלה במיקום השמש האמיתי ל100 שנה], אך הנוטציה לא חושבה, מאחר שאינה משמעותית כ"כ לענינו,

ב'} שינוי נוסף בנטיית השמש מצד ההתקטנות הזויתית של המישור ביחס לציר הסיבוב [וכמו בקטע 1 יעוין שם],

ג'} שינוי מיקום המשוה בכדור הארץ, הגורם שינוי במעלת הרוחב שלפיה צריך לחשב, ובזה מחשבים לפי קו המשוה הממוצע, כיון שזה לא כ"כ משנה בענינים אלו.

3] מיקום הפריהליון [ביחס לנקודת השויון] משתנה אף הוא, [משך הזמן הדרוש להגיע למיקום הפריהליון החדש הוא **365.2596**4 ימים], דבר הגורם לשינוי בהתקדמות השמש, ואף הוא נכלל בחישובים לעיל [ראה ב'הוספות נחוצות' סעיף 1].

4] ציר הסיבוב של כדוה"א מאט את מהלכו מזמן לזמן, שזה גם משפיע על מיקום השמש, ועל אורך היממה, והשנה, [אלא שהשינוי זעיר ביותר, כאלפית השניה ביממה], ואינו נפק"מ לעניינינו.

5] השמש גם נעה מעט, דבר הגורם ג"כ לשינוי מועט [מאד] בכל החישובים הללו, וגם הוא אינו משמעותי לזמני היום.

6] כמו"כ האקצטרניות של המסלול משתנה מעט במשך הזמן, ויעוין לעיל [בנספח המתמטי].

הוספות.

1] את קוטר השמש הנראה ניתן גם לחשב ע"י הנוסחה המקורבת הבאה, $\tan^{-1}[\infty \div \mu] = M$ כאשר ∞ הוא חצי קוטר השמש = בערך 696850 ק"מ , μ = המרחק בק"מ לשמש [ראה לעיל דרך לחישוב המרחק], וM = התוצאה, שהיא הגודל ברדיאנים [וכדי להמיר רדיאנים למעלות צריך להכפיל [את הרדיאנים] ב- $180 \div \pi$.

2] כדי לדעת את הנץ הנראה וכן את השקיעה הנראית במקום שהאופק מוסתר ע"י הרים וכדו', יש להחסיר את הגובה הזויתי של ההר מ90 מעלות בנוסחה של זוית השעה, ואם האופק מוסתר ע"י הר שאינו אחיד בגובהו, יש לחשב את האזימוט של הזריחה או השקיעה ולבדוק בכל אזימוט מה גובה ההר [או ע"י מדידות בשיטה הנדסית, או ע"י תצפית של משך הזמן שבו השמש מוסתרת בכל אזימוט במשך 4 שנים], וכך נדע גם את הזמן הנראה לכל השנים, הדרך לחישוב האזימוט [הכיוון על האופק שבו השמש נראית זורחת או שוקעת ביחס לאמצע המזרח] היא ע"י הנוסחה הבאה:
$\cos^{-1}[\sin H \div \cos \emptyset] = \nexists$. כאשר H היא נטיית השמש, ∅ מעלת הרוחב של המקום, והתוצאה המסומנת ב ∄ היא האזימוט.

3] יצוין כי שעה זמנית נקבעת לפי הזמן שבין הנץ החמה המישורי [גובה פני הים] לשקיעה המישורית [כנ"ל], בעוד ששאר הזמנים תלוים בשיטות השונות, אם הקובע הוא הזמן המישורי, או הנראה, [כן דעת פוסקי זמנינו], וכן יצוין כי גובה הצופה אינו משנה את זמני עלה"ש וצאה"כ [כי הם תלוים בהארת הרקיע ע"י החזרת קרני השמש ע"י האטמוספירה], ולכן צריך לחסרם מ90 בנוסחה לזוית השעה אם הנתון המבוקש הוא זמן עלה"ש וצאה"כ.