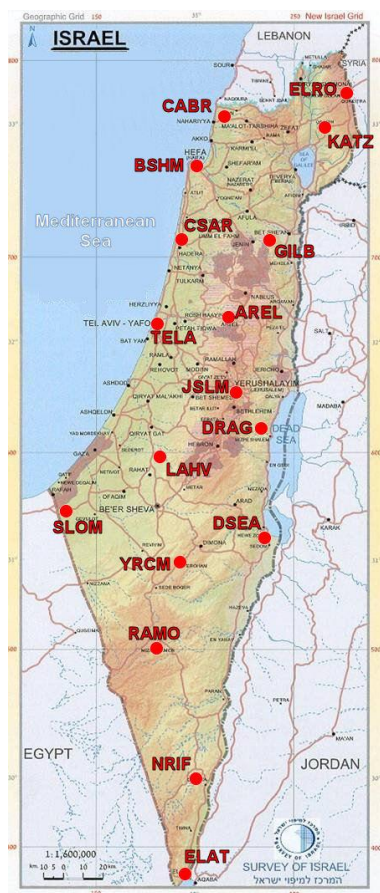


פרויקט בגיאודזיה ומדידות 1 (014867) סמסטר חורף תשע"ג

דו"ח סופי-

חקר תופעת הרב נתיב ברשת תחנות הקבע של ישראל



באיר: פריסת התחנות הקבועות כפי שפורסם על ידי המרכז למיפוי ישראל

תוכן עניינים

מבוא:

3	מדידות בעזרת לוויינים ותופעת הרב נתיב – <i>Multipath</i>
5	רקע מתמטי

עיבוד המדידות:

8	יום מדידה 322 עבור כל תחנות הרשת
11	חקר תופעת הרב נתיב בתחנת SLOM
16	חקר תופעת הרב נתיב בתחנת CSAR
21	חקר תופעת הרב נתיב בתחנת ELRO

דיון והסקת מסקנות:

27	סיכום ומסקנות
28	ביבליוגרפיה

Multipath – הרב נתיב ותופעת לוויינים

מערכת ה-GPS הינה מערכת ניווט מבוססת לוויינים שנועדה לספק נתוני מיקום, מהירות וזמן כמעט בכל מקום על פני כדור הארץ בכל זמן ובכל תנאי מזג אוויר.

תנועת הלוויינים במסלולם בחלל מאפשרת כיסוי מלא בכל רגע נתון על פני כדור הארץ (Green et al., 1989). מציאת המיקום מתבססת על מדידת טווחים מדומים (Pseudorangers) בין לווייני ה-GPS לבין המקלט בשטח. מציאת המיקום כרוכה בפתרון ארבעה נעלמים: נעלמי המיקום X, Y, Z ושגיאת השעון T הנובעת מחוסר סנכרון בין שעון הלוויין לשעון המקלט.

לווייני ה-GPS משדרים שני גלים נושאים למטרת קביעת מיקום: גל $L1$ בתדירות 1575.75 MHz ואורך גל של כ- 19 ס"מ, וגל נוסף $L2$ בתדירות של 1227.60 MHz ואורך גל של כ- 24 ס"מ. תשדורת הלוויינים נשלטת בידי שעונים אטומיים המבטיחים דיוק גבוה של האות הנשלח. השידור בשני גלים נושאים נועד בכדי לאפשר חילוף שגיאות כתוצאה מהפרעות יונוספריות. על הגל $L1$ מאופננים שני תדרי קוד בינאריים C/A code ו- P code המשמשים לחישוב טווח מדומה. על הגל הנושא $L2$ מאופננים ה- P code ונתונים על מסלול הלוויין וחיזוי התיקון לשעון.

הודות ליכולת הדיוק הגבוהה של המערכת מתאפשר השימוש בה לצרכים הנדסיים ואזרחיים כאחד: שימושי מערכת ה-GPS רבים וכוללים ניווט כלי טייס, שייט ורכב, מדידת רשתות גיאודטיות לצרכים הנדסיים, אנליזת דפורמציות בגשרים ומבנים ועוד. אמנם, דיוק המערכת מוגבל על ידי רעשים, השפעות טרופוספירה, יונוספירה ותופעת הרב נתיב – Multipath (MP).

ה-MP היא תופעה שבה האות מגיע אל האנטנה של ה-GPS דרך מספר נתיבים כתוצאה משבירה והחזרה. מקלט ה-GPS מחשב את המרחק בין האנטנה לבין כל לווין על ידי חישוב הזמן שלקח לאות להגיע מהלוויין אל האנטנה כפול מהירות האור. האות המשודר מהלוויין אינו בעל נתיב בודד וישיר אלא מופץ בנתיבים רבים שחלקם פוגעים ומוחזרים אל האנטנה מעצמים סמוכים. נתיב אות שנשבר ומוחזר יהיה תמיד ארוך יותר מאשר נתיב של האות המגיע ישירות מהלוויין, ולכן יפגע משמעותית במדידת המרחק.

מטרתי בפרויקט זה הייתה לבחון השפעת ה-MP על רשת תחנות הקבע של המרכז למיפוי ישראל (מפ"י) – הנקראות גם "תחנות רשת APN", ולנסות לבודד את הגורמים, לבד מסוג האנטנה, המשפיעים על התופעה בנקודות אלו. ברשת ה-APN מתוחזקות כיום 19 תחנות האגורות נתונים במשך 24 שעות ביממה לאורך כל השנה (Shaked, 2007).

עיבוד ימי המדידה התבצע בתוכנת ה-TEQC. תוכנה זו מחשבת את ה-MP המתקבל על ה-P-code של הגל הנושא $L1$ (MP1) ואת ה-MP המתקבל על ה-P-code של הגל הנושא $L2$ (MP2) על ידי שימוש בנתוני ה-Pseudorange וה-carrier phase כדי לבטל את השגיאות הנובעות מהפרשי הזמנים בין שעון המקלט ושעון הלוויין, והעיכוב היונוספריים והטרופוספריים. כברירת מחדל התוכנה מחשבת ה-pseudorange multipath תוך שימוש בנתוני התצפיות של $P1$ ו- $P2$. במידה ונתון $P1$ אינו קיים, התוכנה מחשבת את ה-MP המתקבל על C/A code של $L1$ (MP-C1) בגלל הבדלי המקלטים בין התחנות, לא כולן מודדות את קוד $P1$ (למעשה רק שש מהתחנות מודדות קוד $P1$) ולכן, בכדי ליצור אחידות לצרכים השוואתיים הורדנו את מדידות $P1$ מקבצי ה-RINEX של כל התחנות שבהן הוא כן נמדד, וחישבנו רק את ה-MP של C/A code. ולכן, מעתה והלאה, כל התייחסות ל-MP1 הינה התייחסות ל-MP-C1.

בשלב הראשון של הפרויקט נבחר בצורה שרירותית יום מדידה 322 בשנת 2012 ומדידה של 1440 דקות (24 שעות) באינטרוול מדידה של 30 שניות נלקחה מכל התחנות. לאחר עיבוד קבצי ה-RINEX וחישוב נתוני ה-MP עבור שני הגלים הנושאים בכל אחת מהתחנות, נבחרו שתי התחנות בעלות ערכי ה-MP הגבוהים ביותר, הן SLOM ו-ELRO, ותחנה נוספת בעלת MP נמוך, היא CSAR. בכל אחת משלושת התחנות שנבחנו לעומק לא הוחלפה אנטנה לאורך כל זמן פעולתה של התחנה. נתון זה עזר לבטל את רכיב השפעת האנטנה על ה-MP שנבחנו לאורך השנים בכל אחת מהתחנות ועזר להתמקד בגורמים האחרים המשפיעים על התופעה.

בשלב הבא של הפרויקט, נבחנו ערכי ה-MP של כל אחת משלוש התחנות מימי המדידה הראשונים של התחנה, ועד לחודש דצמבר 2012. עבור כל תחנה נלקחו ארבעה ימי מדידה בשנה: יום מדידה בחודש אפריל, יום מדידה בחודש אוגוסט, נובמבר ודצמבר. הבחירה בפריסה זו לא הייתה שרירותית לחלוטין: בגלל שתופעת ה-MP הינה מחזורית עבור כל יום כוכבי (קרי, 11 שעות ו-56 דקות). כלומר, על פני מרווח זמן של ארבעה חודשים יש לנו חפיפה רק של שמונה שעות בין מעבר אותו לווין בשמים. בגלל שלקחנו מערכות מדידה של 24 שעות, הבטחנו כי ישנה חפיפה מספקת בין הלוויינים וכי ניתן להשוות בין ערכי ה-MP של ימי המדידה שמתקבלים ללא תלות בלוויינים עצמם.

בכל אחד משלבי הפרויקט, מעבר לערכי ה-MP1 ו-MP2 יצוינו גם סוג האנטנה והמקלט בזמן יום המדידה בכל תחנה, מספר התצפיות שהתוכנה עשתה בהן שימוש בתהליך החישובי שלה, ומס' ה-cycle slips עבור לווויינים הגבוהים והנמוכים מ-25 מעלות. אלו הם הגורמים שנבחנו כמשפיעים על תופעת ה-MP ברשת ה-APN במסגרת פרויקט זה.

רקע מתמטי

כפי שנאמר לעיל, דיוק מערכת ה-GPS מוגבל על ידי רעשים, השפעות טרופוספירה, יונוספירה ותופעת הרב נתיב. GPS דיפרנציאלי יכול להוריד בצורה משמעותית את השגיאות הנובעות מעיכוב האות באטמוספירה, מסלול תנועת הלוויין והסנכרון של שעון הלוויין והמקלט. אך את השגיאות הנובעות מתופעת ה-MP לא ניתן לקזז בעזרת הגיש הדיפרנציאלית מכיוון שה-MP היא תופעה מקומית.

Multipath היא תופעה שבה האות מגיע לאנטנה דרך מספר נתיבים כתוצאה משבירה והחזרה.

האותות המגיעים אל האנטנה ניתנים לביטוי על ידי:

$$(1) \quad A \cos \varphi - \text{direct signal} \\ \beta A \cos(\varphi + \Delta\varphi) - \text{indirect signal}$$

כאשר:

A – אמפליטודת האות הישיר.

φ – מופע האות הישיר.

$\Delta\varphi$ – הפרש המופע של האות המוחזר.

β – מקדם הדיכוי של האות המוחזר.

הסופרפוזיציה של האות הישיר והאות המוחזר מוצגת על ידי:

$$(2) \quad A \cos \varphi + \beta A \cos(\varphi + \Delta\varphi)$$

מפתיחת הסוגריים של ה-cos נקבל:

$$(3) \quad A \cos \varphi + \beta A \cos \varphi \cdot \cos \Delta\varphi - \beta A \sin \varphi \cdot \sin \Delta\varphi$$

לאחר ביצוע סידור מחדש לביטוי:

$$(4) \quad (1 + \beta \cos \Delta\varphi) A \cos \varphi - (\beta \sin \Delta\varphi) A \sin \varphi$$

ניתן להציג את הביטוי גם כך: כאשר ה-M מסמנת Multipath.

$$(5) \quad \beta_M A \cos(\varphi + \Delta\varphi)$$

מפתיחת הסוגריים של ה-cos נקבל את הביטוי:

$$(6) \quad (\beta_M \cos \Delta\varphi_M) A \cos \varphi - (\beta_M \sin \Delta\varphi_M) A \sin \varphi$$

נשווה בין המקדמים של $A \cos \varphi$ ו- $A \sin \varphi$ במשוואות (3) ו-(5):

$$(7) \quad \beta_M \sin \Delta\varphi_M = \beta \sin \Delta\varphi$$

$$\beta_M \cos \Delta\varphi_M = 1 + \beta \cos \Delta\varphi$$

מפיתוח משוואות אלה למציאת הגדלים הרצויים β_M ו- $\Delta\varphi_M$ נקבל:

$$(8) \quad \beta_M = \sqrt{1 + \beta^2 + 2\beta \cos \Delta\varphi}$$

$$(9) \quad \tan \Delta\varphi_M = \frac{\beta \sin \Delta\varphi}{1 + \beta \cos \Delta\varphi}$$

מקדם הדיכויו β משתנה בין 0 ל-1. עבור הצבת $\beta=0$ (כלומר, אין MP) במשוואות (7) ו-(8) נקבל: $\Delta\varphi_M = 0$ ו- $\beta_M = 1$. כלומר האות המתקבל זהה לאות הישיר.

ההחזר החזק ביותר מתקבל עבור $\beta=1$. בהצבת ערך זה במשוואות (7) ו-(8) נקבל:

$$(10) \quad \beta_M = 2 \cos \frac{\Delta\varphi}{2}$$

$$(11) \quad \Delta\varphi_M = 0.5\Delta\varphi$$

ניתן לבטא את הפרש הפאזה $\Delta\varphi$ כפונקציה של תוספת המרחק ΔS , במקרה של החזר מרפלקטור אנכי כגון קיר:

$$(12) \quad \Delta\varphi = \frac{\Delta S}{\lambda} = \frac{2d}{\lambda} \cos \beta$$

כאשר d הינו המרחק בין מיקום האנטנה לקיר.

תדירות ה-MP היא:

$$(13) \quad f = \frac{\partial(\Delta\varphi)}{\partial t} = \frac{2d}{\lambda} \sin \beta \cdot \frac{\partial\beta}{\partial t}$$

מכיוון שה-MP היא תופעה מחזורית ניתן למצע את ההפרעה על ידי ביצוע מדידות סטטיות בפרק זמן ארוך.

התנהגות ערכי ה-MP המתקבלים על הקוד דומה מאוד לזו המתקבלת על הפאזה, מלבד שהערכים המתקבלים הם בכמה סדרי גודל גדולים יותר. מכיוון ששגיאת ה-MP המתקבלת תלויה באורך הגל היא בערך פי 100 יותר גדולה עבור מדידות הקוד מאשר מדידות הפאזה (Byun, 2002). כמו כן, בגלל שאורך הגל של L2 קצר יותר מזה של L1, ערכי ה-MP שנקבל יהיו גבוהים יותר ב-P2 code, כמו גם ה-MP בגלל זה יהיה יותר רגיש לסביבתו הרחוקה.

מכיוון שהרב נתיב הוא תופעה מקומית, השיטות להקטנתו ניתנות על ידי עיבוד האות במקלט ואנטנה מתוכננת היטב. קודם הגיעו אל המקלט עובר האות דרך האנטנה, האנטנה מזהה את הגל האלקטרומגנטי מהלוויין וממירה את אנרגיית הגל לזרם חשמלי, מגבירה את עוצמת האות ומעבירה אותו למקלט. האנטנות הקימות כיום אינם מקבלות את האותות בצורה שווה מכל הכיוונים. למעשה, בכמה סוגי אנטנות ישנו "דוחה multipath חלקי", המתוכנן על ידי עיצוב של תבנית ההגבר של האנטנה. היות ורוב ה-MP מגיעים מזוויות הקרובות לאופק ניתן להפחית אותו על ידי עיצוב תבנית הגברה שתיצור הגבר נמוך מכיוונים אלו.

טכניקת עיבוד האות במקלט לא ניתנת לביצוע עבור אותות מוחזרים בהם המרחק בין האות המוחזר לאות הישיר הוא פחות ממספר מטרים – ללא התחשבות אם האות המגיע אל האנטנה הגיע מתחת או מעל האופק. ברוב המקרים המרחק בין האות הישיר לאות המוחזר עבור אותות מוחזרים אל מעל אופק האנטנה גדול ממספר מטרים ולכן ניתן להנחיתו על ידי עיבוד במקלט (Shaked, 2007).

יום מדידה 322 עבור כל תחנות הרשת

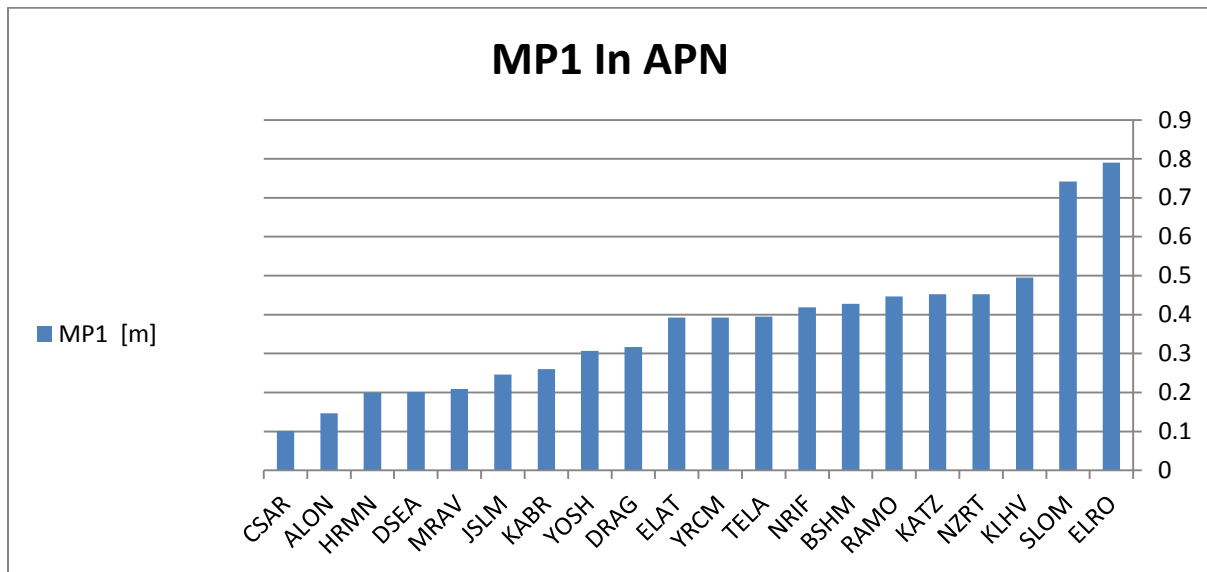
נלקח יום מדידה 322 בשנת 2012 עבור כל תחנות רשת ה-APN וחושבו ערכי ה-MP1 ו-MP2 ומס' התצפיות.

Station	Moving average MP1 (C1) [m]	Moving average MP2 [m]	MP obs > 10	Receiver Type	Antenna Type
ALON	0.146298	0.195771	24883	LEICA GRX1200GGPRO	LEIAT504 LEIS
BSHM	0.427589	0.264626	24753	JPS EGGDT	TRM59800.00 SCIS
CSAR	0.101244	0.179517	24868	LEICA GRX1200GGPRO	TRM29659.00
DRAG	0.316685	0.41011	24886	LEICA GRX1200PRO	ASH700936D_M SNOW
DSEA	0.200584	0.238725	24670	LEICA GRX1200GGPRO	LEIAT504 LEIS
ELAT	0.392205	0.293255	22921	LEICA GRX1200GGPRO	TPSCR4 CONE
ELRO	0.790415	0.857742	24803	Javad Triumph-1	ASH700936D_M SNOW
HRMN	0.199346	0.289578	24891	LEICA RS500	ASH701945C_M SNOW
JSLM	0.245907	0.335368	23818	LEICA GRX1200PRO	ASH701945B_M SNOW
KABR	0.259998	0.276776	24719	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945C_M SNOW
KATZ	0.452358	0.425084	23387	ASHTECH Z-XII3	Topcon CR-4
KLHV	0.495494	0.619711	24586	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945C_M SNOW
MRAV	0.208866	0.291914	24473	LEICA GRX1200GGPRO	LEIAT504GG LEIS
NRIF	0.418777	0.756282	25806	ASHTECH UZ-12	LEIAT504 LEIS
NZRT	0.452793	0.473858	24196	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945B_M SNOW
RAMO	0.446497	0.75232	25812	JAVAD TRE_G3T DELTA	ASH701945B_M SNOW
SLOM	0.741564	0.870233	24489	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945D_M SNOW
TELA	0.394551	0.452617	25335	LEICA GRX1200PRO	LEIAT504GG LEIS
YOSH	0.306531	0.336094	24925	LEICA GRX1200GGPRO	LEIAT504 LEIS
YRCM	0.392368	0.432445	25376	TPS NETG3	LEIAT504 LEIS

טבלה מס' 1: עיבוד יום מדידה 322 בשנת 2012 בכל תחנות רשת ה-APN

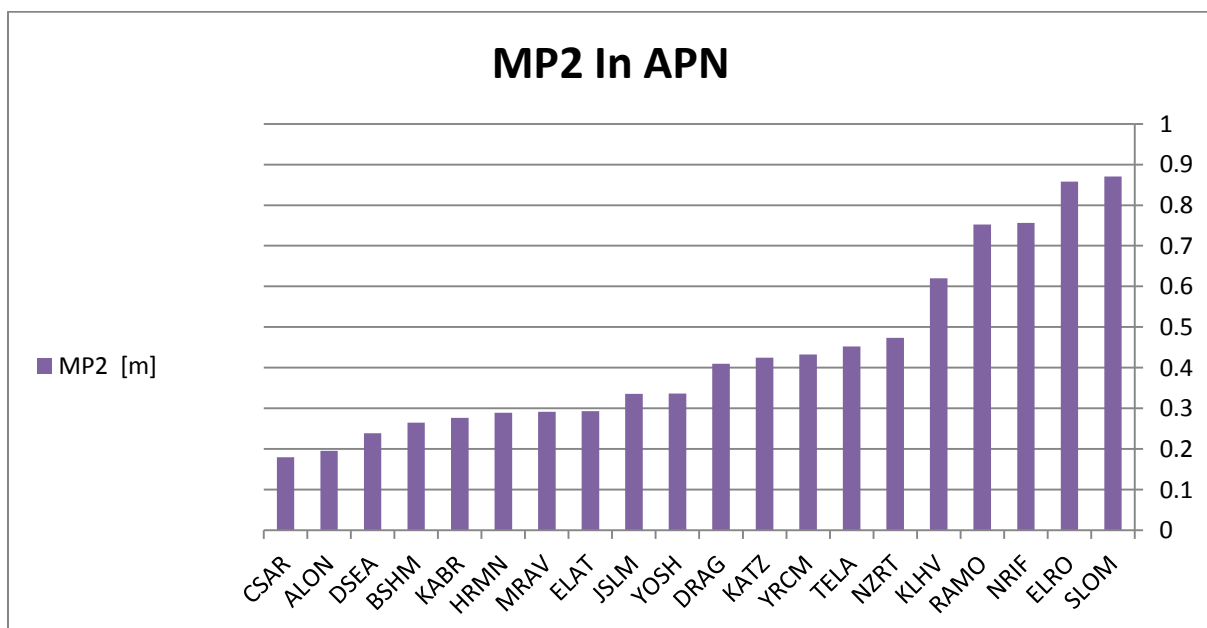
לפי סדרי הגודל של מספר התצפיות ניתן לראות כי, לא התרחש דבר חריג בתחנות ביום מדידה זה וניתן להתייחס אליו כאל מייצג התמונה הכללית של ערכי ה-MP ברשת תחנות ה-APN כיום.

נסדר את התחנות לפי סדר יורד של ערכי ה-MP1 ו-MP2:



איור מס' 1: סידור התחנות לפי סדר יורד של ערכי הרב נתיב על קוד CA המאופנן על גבי הגל הנושא L1

ניתן לראות כי על פי ערכי ה-MP של קוד C/A בלבד, ELRO ו-SLOM בעלות ערכים הגבוהים כמעט פי 2 מהערך הממוצע של הרב נתיב ברוב תחנות הרשת.



איור מס' 2: סידור התחנות לפי סדר יורד של ערכי הרב נתיב על קוד P2 המאופנן על גבי הגל הנושא L2

ניתן לראות כי על פי ערכי ה-MP של קוד P2 בלבד, ELRO ו-SLOM הן גם הפעם בעלות הערכים הגבוהים ביותר, וגם כאן ערכים אלו הם כפי 2 מהערך הממוצע של הרב נתיב ברוב תחנות הרשת.

בנוסף, התחנה בעלת ערכי ה-MP הנמוכים ביותר, גם עבור MP1 וגם עבור MP2 היא CSAR. לאחר בחינה מעמיקה, כשבידנו יומני כל התחנות המכילים את המידע לגבי שינויי אנטנה ומקלט שנעשו בתחנות לאורך השנים, החלטנו להמשיך ולחקור לעומק את שתי התחנות יוצאות הדופן בערכיהן: SLOM ו-ELRO. כדוגמה לתחנה בה ערכי ה-MP נמוכים נלקח את CSAR. הסיבה ש-CSAR נבחרה על פני תחנות אחרות בעלות ערכי MP נמוכים (כמו DSEA או BSHM) היא שלאורך כל תקופת הפעילות של התחנה, כמו גם של SLOM ו-ELRO, אנטנת התחנה מעולם לא הוחלפה. עובדה זו מאפשרת לנו לבחון את הגורמים המשפיעים על תופעת הרב נתיב מבלי השפעות שינויי אנטנה – שכידוע, האנטנה היא אחד הגורמים שמשפיעים בצורה המשמעותית ביותר על ערכי ה-MP.

חקר תופעת הרב נתיב בתחנת SLOM

קצת על התחנה: תחנת SLOM ממוקמת בקיבוץ כרם שלום. כרם שלום הינו קיבוץ בחולות חלוצה השייך למועצה האזורית אשכול. הקיבוץ נקרא בשמו בשל מיקומו בקרבת גבול מצרים-ישראל ותמיכת מתיישביו בכינון שלום באזור. הקיבוץ נמצא קרוב לרפיח והוא היישוב המערבי ביותר במדינת ישראל. התחנה הוקמה בשנת 2004 ויום מדידה 201 הוא יומה הראשון שבה עבדה התחנה, התחנה ממוקמת על גג חדר האוכל של הקיבוץ.



איור מס' 3: מפת ישראל עם סימון מקורב למיקום קיבוץ כרם שלום, בו ממוקמת תחנת SLOM

התחנה הוקמה עם אנטנה מסוג SNOW ASH701945D_M ומקלט מסוג ASHTECH Z-XII3, ניתן לומר כי במהלך שנים אלו עבדה בצורה טובה, אם גובה ערכי ה-MP הוא אינדיקציה לטיב פעולתה של התחנה. בתחילת שנת 2006 הוחלף המקלט של התחנה למקלט מסוג LEICA GRX1200GGPRO, איתו פועלת התחנה עד עצם היום הזה.



איור מס' 4: מימין, חדר האוכל של קיבוץ כרם שלום. משמאל, תמונה של הגג בלבד עם אנטנת התחנה.

נלקחו מדידות מיום הקמת התחנה בתחילת שנת 2004 במרווחים של כ-4 חודשים ממדידה למדידה. תוך כדי התחשבות במידע חסר באתר SOPAC, ממנו נלקחו המדידות הישנות, ומגבלות של ימי עבודה במתכונת מצומצמת של התחנה, ייתכנו שינויים בחלק מהשנים (מדידה ביום 200 במקום ביום 108), אמנם, הפריסה מייצגת ואחידה ככל הניתן בין השנים.

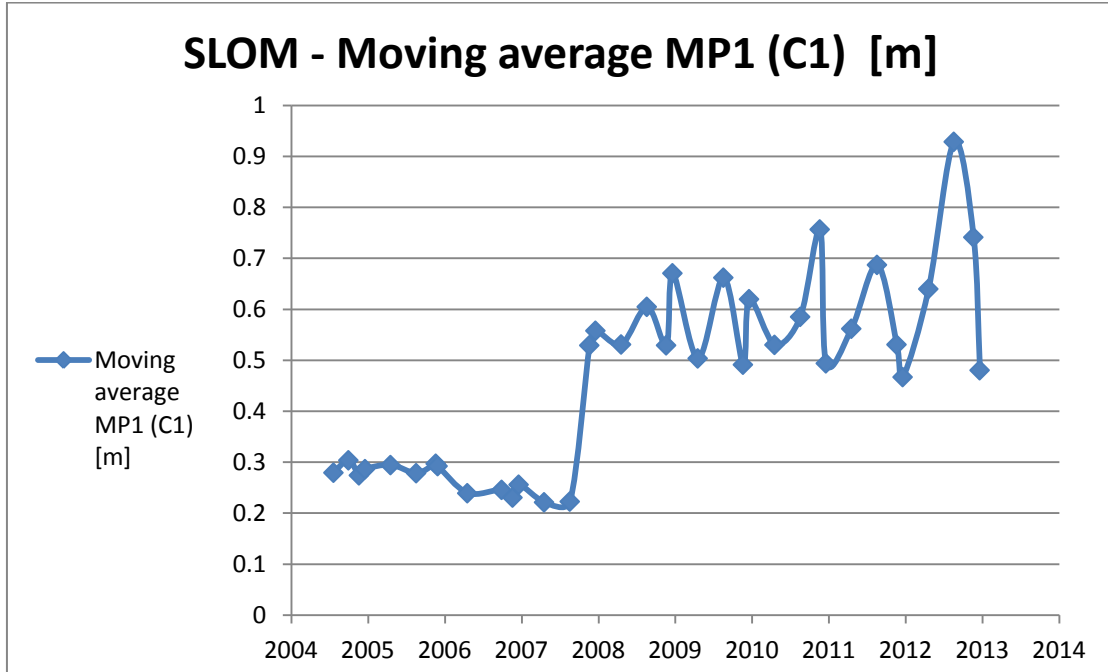
Day	Year	Moving average MP1 (C1) [m]	Moving average MP2 [m]	MP1 obs > 10	MP2 obs > 10	qc MP1 slips < 25	qc MP1 slips > 25	qc MP2 slips < 25	qc MP2 slips > 25	% of Slips MP1	% of Slips MP2	Receiver Type	Antenna Type
201	2004	0.280	0.280	21895	21895	11	1	26	1	0.05	0.12	ASHTECH Z-XII3	ASH701945D_M SNOW
272		0.304	0.305	21830	21830	23	1	21	4	0.11	0.10	ASHTECH Z-XII3	ASH701945D_M SNOW
322		0.274	0.259	21674	21674	10	1	18	3	0.05	0.08	ASHTECH Z-XII3	ASH701945D_M SNOW
351		0.287	0.260	22761	22761	2	1	25	2	0.01	0.11	ASHTECH Z-XII3	ASH701945D_M SNOW
107	2005	0.295	0.283	20981	20981	9	1	27	4	0.04	0.13	ASHTECH Z-XII3	ASH701945D_M SNOW
229		0.279	0.267	20961	20961	29	0	22	3	0.14	0.10	ASHTECH Z-XII3	ASH701945D_M SNOW
322		0.297	0.233	21053	21053	17	1	24	3	0.08	0.11	ASHTECH Z-XII3	ASH701945D_M SNOW
331		0.293	0.261	20984	20984	19	1	27	2	0.09	0.13	ASHTECH Z-XII3	ASH701945D_M SNOW
107	2006	0.239	0.505	20615	20615	36	1	38	1	0.17	0.18	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945D_M SNOW
270		0.246	0.572	18082	18082	44	3	44	3	0.24	0.24	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945D_M SNOW
322		0.231	0.551	20231	20231	41	1	41	1	0.20	0.20	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945D_M SNOW
351		0.256	0.517	21573	21573	45	2	46	2	0.21	0.21	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945D_M SNOW
107	2007	0.222	0.565	20315	20315	41	2	50	2	0.20	0.25	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945D_M SNOW
229		0.223	0.517	18952	18952	48	5	48	11	0.25	0.25	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945D_M SNOW
322		0.529	0.491	24012	24012	264	4	374	5	1.10	1.56	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945D_M SNOW
351		0.558	0.494	23057	23057	219	2	311	3	0.95	1.35	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945D_M SNOW
108	2008	0.531	0.549	24759	24759	236	1	345	1	0.95	1.39	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945D_M SNOW
230		0.605	0.636	23894	23894	317	0	462	0	1.33	1.93	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945D_M SNOW
322		0.530	0.815	24599	24599	337	8	391	11	1.37	1.59	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945D_M SNOW
352		0.671	0.688	24847	24847	234	1	338	1	0.94	1.36	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945D_M SNOW
107	2009	0.504	0.614	24174	24174	247	0	324	0	1.02	1.34	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945D_M SNOW
229		0.662	0.590	24019	24019	288	0	456	0	1.20	1.90	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945D_M SNOW

322		0.492	0.634	23111	23111	236	1	289	0	1.02	1.25	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945D_M SNOW
351		0.620	0.569	24144	24144	221	0	298	0	0.92	1.23	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945D_M SNOW
107	2010	0.530	0.497	24241	24241	274	0	384	0	1.13	1.58	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945D_M SNOW
229		0.585	0.573	23998	23998	328	0	487	0	1.37	2.03	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945D_M SNOW
322		0.757	0.886	24570	24570	294	2	397	0	1.20	1.62	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945D_M SNOW
351		0.494	0.439	24591	24591	254	0	338	0	1.03	1.37	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945D_M SNOW
107	2011	0.562	0.502	24486	24486	321	2	440	2	1.31	1.80	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945D_M SNOW
229		0.687	0.573	23671	23671	313	1	441	2	1.32	1.86	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945D_M SNOW
322		0.531	0.472	23282	23282	254	8	347	9	1.09	1.49	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945D_M SNOW
351		0.467	0.446	24590	24590	306	0	416	0	1.24	1.69	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945D_M SNOW
108	2012	0.640	0.402	24719	24719	314	0	498	0	1.27	2.01	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945D_M SNOW
229		0.929	0.817	24730	24730	549	0	549	0	2.22	2.22	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945D_M SNOW
322		0.742	0.870	24489	24489	391	1	541	1	1.60	2.21	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945D_M SNOW
352		0.481	0.759	24595	24595	374	0	466	0	1.52	1.89	LEICA GRX1200GGPRO	ASH701945D_M SNOW

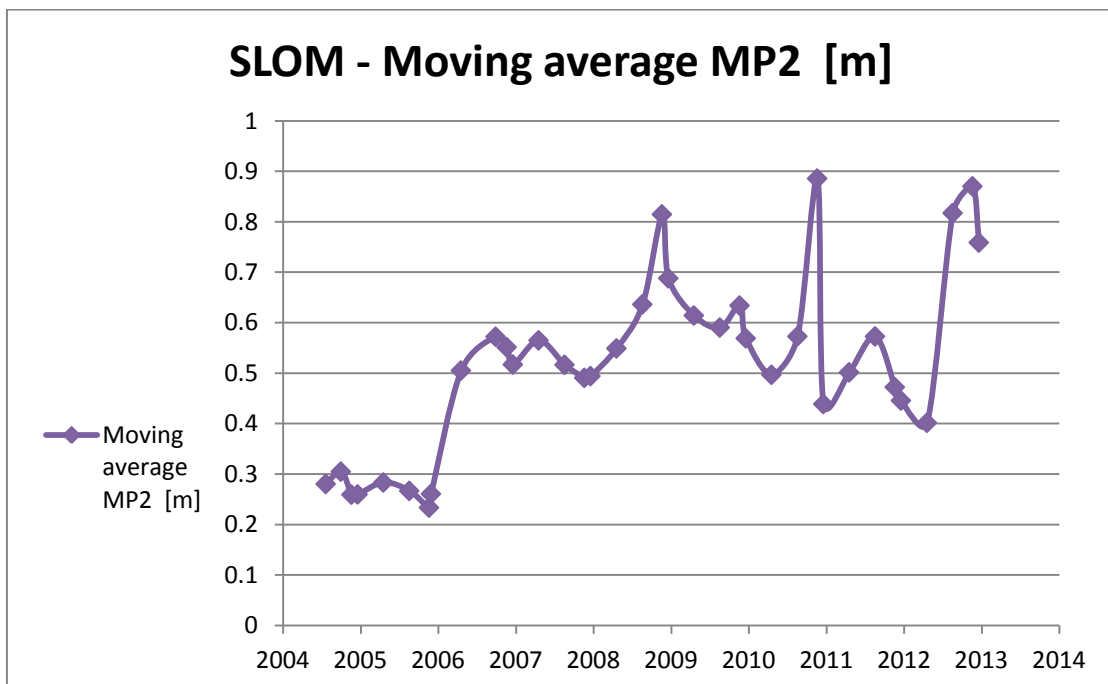
טבלה מס' 2: עיבוד ימי מדידה כל ארבעה חודשים בתחנת SLOM. מתוארים להלן ערכי MP1, ערכי MP2, מס' התצפיות שנעשה בהם שימוש לתהליך החישוב של MP1 ו-MP2, מס' ה-*cycle slips* עבור לוווינים בעלי זווית גובה מ-25° ומס' ה-*cycle slips* עבור לוווינים בעלי זווית גובה הקטנה מ-25° עבור MP1, MP2 בנפרד. בנוסף, מחושב אחוז ה-*cycle slips* עבור לוווינים בעלי זווית גובה הקטנה מ-25°, עבור MP1 ו-MP2.

לפי מספר התצפיות ניתן לראות כי מבחינת סדר גודל, לא התרחש דבר חריג בתחנה בימי המדידה. עוד ניתן לראות (לפי מס' התצפיות) כי עם השנים התווספו לוויינים, דבר שהגיוני באופיו. אם נסתכל על אופן התנהגות ערכי הרב נתיב, גם בגל L1 וגם בגל L2 ניתן לראות עלייה עם השנים.

נציג את שינויי ערכי ה-MP בכל אחד מהגלים הנושאים:



איור מס' 5: אופן התנהגות ה-MP על פני הגל הנושא L1 עבור ה-C/A code על פני שנות פעולתה של תחנת SLOM



איור מס' 6: אופן התנהגות ה-MP על פני הגל הנושא L2 עבור ה-P code על פני שנות פעולתה של תחנת SLOM

באירורים מס' 5 ו-6 ניתן לראות שלוש תופעות בולטות:

1. בתחילת שנת 2006 גדלו ערכי MP2 פי 2. (מסומן בטבלה בצבע סגול)
2. בסוף שנת 2007 גדלו ערכי MP1 כמעט פי 2. (מסומן בטבלה בצבע כחול)
3. בשנת 2012 ניתן לראות קפיצות מאוד גדולות בערכי ה-MP בשני הגלים הנושאים, שאינם אופייניים לאופן פעולת התחנה עד כה. (מסומן בטבלה בצבע ירוק)

בסגול: אם נסתכל בערכים הטבלאיים שהתקבלו בנייתוח קבצי ה-RINEX בתוכנת ה-TEQC נוכל לראות קפיצה מאוד משמעותית בערכי MP2; 0.261 מ' ביום 331 בשנת 2005 וארבעה חודשים אחר כך ערך ה-MP עמד על 0.505 מ' ביום 107 בשנת 2006. אם נבחן את שאר הפרמטרים המופיעים בטבלה נוכל לראות כי אמנם הייתה קפיצה בערכי ה-cycle slips, כמו גם באחוזם ביחס לכלל התצפיות אבל עליה זו אינה נמדדת בסדר גודל, אלא רק בכמה תצפיות בודדות ואחוזים בודדים, ולכן לא ניתן לייחס עלייה זו בערכים אל ה-cycle slips. אם נבחן יותר לעומק את הפרמטרים בטבלה, נוכל להסיק כי הסיבה לתופעה היא השינוי במקלט. במהלך ארבעת החודשים שעברו בין שתי התצפיות, השינוי המשמעותי היחיד שהתרחש בתחנה הינו החלפת המקלט שבה ממקלט ה-ASTECH המקורי שאיתו החלה התחנה את פעילותה, למקלט LEICA, איתו פועלת התחנה עד היום.

בכחול: אם נסתכל בערכים הטבלאיים שהתקבלו בנייתוח קבצי ה-RINEX בתוכנת ה-TEQC נוכל לראות קפיצה מאוד משמעותית בערכי MP1; 0.223 מ' ביום 229 בשנת 2007 וארבעה חודשים אחר כך ערך ה-MP עמד על 0.529 מ' ביום 322 בשנת 2007. אם נבחן את שאר הפרמטרים המופיעים בטבלה נוכל לראות כי לא התחרש שינוי במקלט וכי לא ניתן לייחס קפיצה זו בערכי ה-MP למקלט. אמנם, אם נבחן את ערכי ה-cycle slips, ניתן לראות קפיצה הנמדדת בסדר גודל בערכיהם, גם ב-MP1 וגם ב-MP2. 48 slips ביום 229 לעומת 264 slips ביום 322. עם הקפיצה בערכי ה-slips ניתן לראות גם קפיצה הנמדדת כמעט באחוז. 0.25% ביום 229 לעומת 1.1% ביום 322. מכאן שנסיקי כי גם ערכי ה-cycle slips הם בעלי השפעה על ערכי ה-MP.

בירוק: אם נסתכל בערכים הטבלאיים שהתקבלו בנייתוח קבצי ה-RINEX בתוכנת ה-TEQC נוכל לראות קפיצות מאוד משמעותיות בערכי MP1 והן בערכי MP2. נבחן את ערכי הפרמטרים הטבלאיים האחרים שהשתנו בתאריכים אלו בכדי לנסות להבין את שהתרחש בתחנה וכבר ממבט ראשון ניתן לראות כי המקלט נשאר זהה. אם נבחן את ערכי ה-cycle slips נוכל לראות שבימים שבהם ערכי ה-MP היו הגבוהים ביותר, כך היו גם ערכי ה-slips ושעם ירידה במספר ה-cycle slips הגיעה גם ירידה בערכי ה-MP. לדוגמה, ביום 108 בשנת 2012 נמדדו ערכי MP העומדים על 0.4 ב-MP2 ו-0.64 ב-MP1 לעומת ערכי cycle slips העומדים על 498 ו-314 בהתאמה. ארבעה חודשים לאחר מכן התקבלו ערכי MP העומדים על 0.82 מ' ב-MP2 ו-0.93 מ' ב-MP1 ואיתם גל עלייה במספר ה-slips: 549 בשני הגלים הנושאים. בכדי לחדד טענתנו זו, ניתן דוגמה אחת נוספת: ביום מדידה 322 לא התרחשה עלייה משמעותית בערכי MP2 ביחס ליום 229: נמדד ערך 0.87 מ', ואיתו ניתן לראות כי גם מספר ה-cycle slips נשאר כמעט זהה: 541 עבור גל נושא L2. לעומת ירידה שהורגשה ב-MP1: 0.74 מ' עם מספר slips שירדו גם הם ושעומדים על 391.

חקר תופעת הרב נתיב בתחנת CSAR

קצת על התחנה: תחנת CSAR ממוקמת בקיסריה, בראשו על עמוד על גג בניין הקרוב לים. קיסריה היא עיר נמל שהוקמה באמצע המאה הראשונה לפני הספירה ושימה כבירת ארץ ישראל בתקופה הרומית. קיסריה נקראה על שמו של אוגוסטוס קיסר. התחנה הוקמה במרץ 2004 ופעילה עד עצם היום הזה.



איור מס' 7: מפת ישראל עם סימון מקורב למיקום העיר קיסריה, בה ממוקמת תחנת CSAR

התחנה הוקמה עם אנטנה מסוג TRM29659.00 ומקלט מסוג TRIMBLE 5700. לאורך כל שנות פעילות התחנה ערכי ה-MP שהתקבלו בה היו נמוכים, וגם שינוי המקלט בשנת 2007 למקלט מסוג LEICA GRX1200GGPRO לא השפיע בצורה חדה על עליית ערכי ה-MP, נהפוך הוא. עם מקלט זה פועלת התחנה עד היום. CSAR בפרויקט זה מהווה הדוגמה לתחנה שערכי ה-MP בה היו נמוכים מיומה הראשון, ולמרות שינוי במקלט, ערכים אלו נשארו נמוכים. CSAR תשמש מקור להשוואה להתנהגות MP בעל ערכים נמוכים בתחנה שבה התרחשו שינויי מקלט עם השנים.



איור מס' 8: תמונה של גג הבניין עם האנטנה עליו ממוקמת תחנת CSAR

נלקחו מדידות מיום הקמת התחנה בתחילת שנת 2004 במרווחים של כ-4 חודשים ממדידה למדידה. תוך כדי התחשבות במידע חסר באתר SOPAC, ממנו נלקחו המדידות הישנות, ומגבלות של ימי עבודה במתכונת מצומצמת של התחנה, ייתכנו שינויים בחלק מהשנים (מדידה ביום 200 במקום ביום 108), אמנם, הפריסה מייצגת ואחידה יחסית בין השנים.

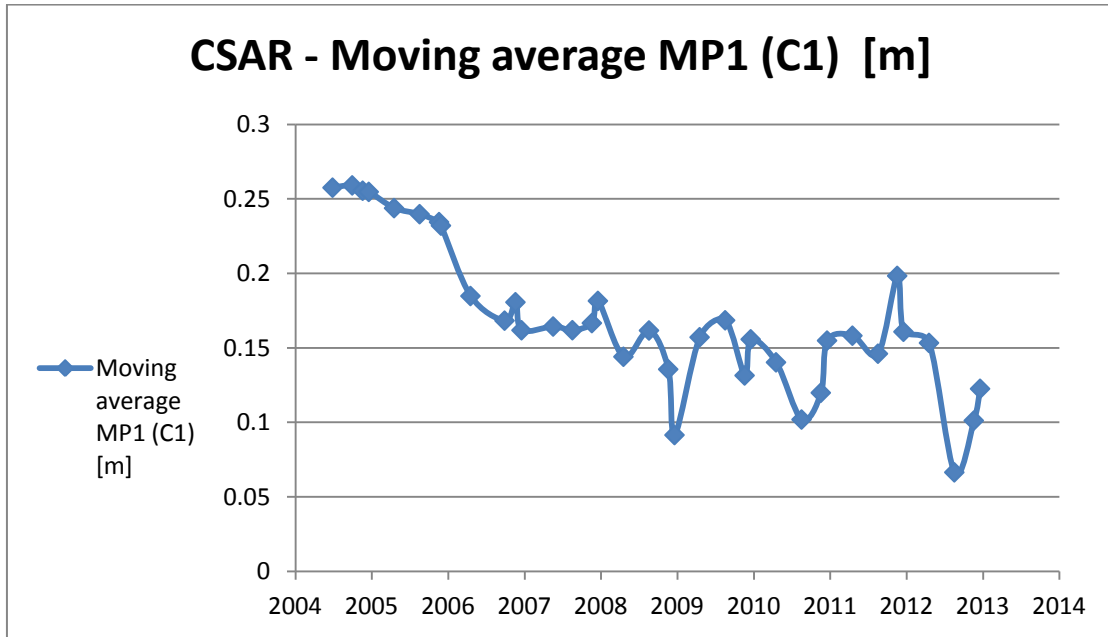
Day	Year	Moving average MP1 (C1) [m]	Moving average MP2 [m]	MP1 obs > 10	MP2 obs > 10	qc MP1 slips < 25	qc MP1 slips > 25	qc MP2 slips < 25	qc MP2 slips > 25	% of Slips MP1	% of Slips MP2	Receiver Type	Antenna Type
178	2004	0.258	0.315	22775	22775	94	234	98	234	0.41	0.43	TRIMBLE 5700	TRM29659.00
272		0.259	0.321	23446	23446	101	230	103	230	0.43	0.44	TRIMBLE 5700	TRM29659.00
322		0.256	0.311	23162	23162	95	199	97	199	0.41	0.42	TRIMBLE 5700	TRM29659.00
351		0.255	0.306	24286	24286	86	197	86	197	0.35	0.35	TRIMBLE 5700	TRM29659.00
107	2005	0.244	0.300	22580	22580	82	190	84	190	0.36	0.37	TRIMBLE 5700	TRM29659.00
229		0.240	0.294	22468	22468	26	76	26	76	0.12	0.12	TRIMBLE 5700	TRM29659.00
322		0.234	0.283	22485	22485	0	0	0	0	0.00	0.00	TRIMBLE 5700	TRM29659.00
331		0.232	0.285	22565	22565	0	0	0	0	0.00	0.00	TRIMBLE 5700	TRM29659.00
107	2006	0.185	0.231	23483	23483	27	0	28	0	0.11	0.12	TRIMBLE 5700	TRM29659.00
270		0.168	0.220	22685	22685	25	1	25	1	0.11	0.11	TRIMBLE 5700	TRM29659.00
322		0.181	0.237	23592	23592	10	1	7	1	0.04	0.03	TRIMBLE 5700	TRM29659.00
351		0.162	0.222	24377	24377	16	0	16	0	0.07	0.07	TRIMBLE 5700	TRM29659.00
137	2007	0.164	0.171	24181	24181	2	0	5	0	0.01	0.02	LEICA GRX1200GGPRO	TRM29659.00
229		0.162	0.167	23347	23347	0	1	1	1	0.00	0.00	LEICA GRX1200GGPRO	TRM29659.00
322		0.167	0.169	24371	24371	1	0	1	0	0.00	0.00	LEICA GRX1200GGPRO	TRM29659.00
351		0.182	0.170	23477	23477	2	1	3	1	0.01	0.01	LEICA GRX1200GGPRO	TRM29659.00
108	2008	0.144	0.164	25092	25092	2	0	2	0	0.01	0.01	LEICA GRX1200GGPRO	TRM29659.00
230		0.162	0.161	24213	24213	6	0	8	0	0.02	0.03	LEICA GRX1200GGPRO	TRM29659.00
322		0.136	0.094	25034	25034	1	0	2	0	0.00	0.01	LEICA GRX1200GGPRO	TRM29659.00
352		0.092	0.100	25107	25107	0	0	0	1	0.00	0.00	LEICA GRX1200GGPRO	TRM29659.00
107	2009	0.157	0.155	24432	24432	0	0	1	0	0.00	0.00	LEICA GRX1200GGPRO	TRM29659.00
229		0.169	0.149	24415	24415	0	0	1	0	0.00	0.00	LEICA GRX1200GGPRO	TRM29659.00

322		0.132	0.147	23548	23548	1	0	1	0	0.00	0.00	LEICA GRX1200GGPRO	TRM29659.00
351		0.156	0.152	24513	24513	1	0	1	0	0.00	0.00	LEICA GRX1200GGPRO	TRM29659.00
107	2010	0.140	0.154	24584	24584	0	0	0	0	0.00	0.00	LEICA GRX1200GGPRO	TRM29659.00
229		0.102	0.154	24403	24403	0	0	0	0	0.00	0.00	LEICA GRX1200GGPRO	TRM29659.00
321		0.120	0.210	25010	25010	0	0	1	0	0.00	0.00	LEICA GRX1200GGPRO	TRM29659.00
351		0.155	0.195	24855	24855	2	0	2	0	0.01	0.01	LEICA GRX1200GGPRO	TRM29659.00
107	2011	0.158	0.279	25049	25049	10	1	12	1	0.04	0.05	LEICA GRX1200GGPRO	TRM29659.00
229		0.146	0.141	24046	24046	3	1	5	1	0.01	0.02	LEICA GRX1200GGPRO	TRM29659.00
321		0.198	0.345	23636	23636	15	5	23	8	0.06	0.10	LEICA GRX1200GGPRO	TRM29659.00
351		0.161	0.261	24903	24903	2	0	4	0	0.01	0.02	LEICA GRX1200GGPRO	TRM29659.00
108	2012	0.153	0.198	25130	25130	4	0	11	0	0.02	0.04	LEICA GRX1200GGPRO	TRM29659.00
229		0.067	0.095	25077	25077	4	1	6	1	0.02	0.02	LEICA GRX1200GGPRO	TRM29659.00
322		0.101	0.180	24868	24868	17	0	23	0	0.07	0.09	LEICA GRX1200GGPRO	TRM29659.00
352		0.123	0.114	24993	24993	5	0	8	0	0.02	0.03	LEICA GRX1200GGPRO	TRM29659.00

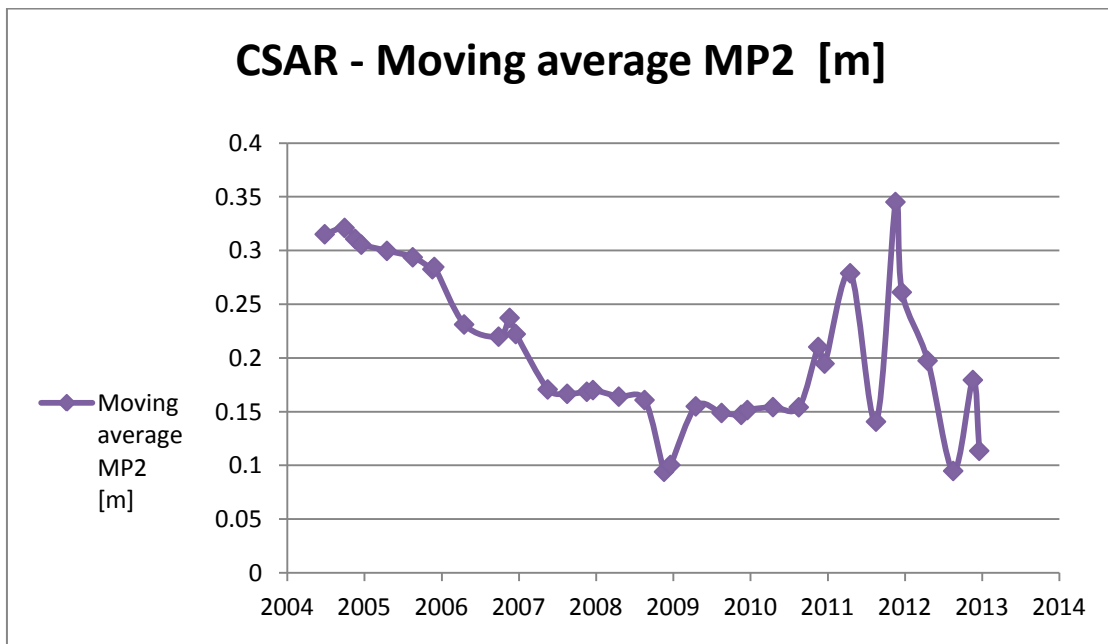
טבלה מס' 3: עיבוד ימי מדידה כל ארבעה חודשים בתחנת CSAR. מתוארים להלן ערכי MP1, ערכי MP2, מס' התצפיות שנעשה בהם שימוש לתהליך החישוב של MP1 ו-MP2, מס' ה-cycle slips עבור לוויינים הגבוהים מ-25° ומס' ה-cycle slips עבור לוויינים בעלי זווית גובה הקטנה מ-25° עבור MP1, MP2 בנפרד. בנוסף, מחושב אחוז ה-cycle slips עבור לוויינים בעלי זווית גובה הקטנה מ-25°, עבור MP1 ו-MP2.

לפי מספר התצפיות ניתן לראות כי מבחינת סדר גודל, לא התרחש דבר חריג בתחנה בימי המדידה. עוד ניתן לראות כי עם השנים התוספו לוויינים, דבר שהגיוני באופיו וראינו שהתרחש גם בתחנת SLOM. אם נסתכל על אופן התנהגות ערכי הרב נתיב, גם בגל L1 וגם בגל L2 ניתן לראות עלייה עם השנים בשנות פעולתה הראשונות של התחנה. אמנם, לאחר שינוי המקלט ירדו הערכים בהדרגה ובימים מסוימים אף נמדדו ערכי MP מילימטריים.

נציג את שינויי ערכי ה-MP בכל אחד מהגלים הנושאים:



איור מס' 9: אופן התנהגות ה-MP על פני הגל הנושא L1 עבור ה-C/A code על פני שנות פעולתה של תחנת CSAR



איור מס' 10: אופן התנהגות ה-MP על פני הגל הנושא L2 עבור ה-P code על פני שנות פעולתה של תחנת CSAR

באירורים מס' 9 ו-10 ניתן לראות ארבע תופעות בולטות:

1. בשנתיים הראשונות לפעולתה של התחנה, ערכי ה-MP היו הגבוהים ביותר שנמדדו בה. (בירוק)
2. ישנה ירידה חדה בערכי MP2 בתחילת שנת 2007 ומשם הערכים מתייצבים. (בסגול)
3. בשנת 2011 יש קפיצה חד פעמית, אך חדה בערכי MP2. (בצהוב)
4. בתחילת שנת 2012 ישנה ירידה חד פעמית וחדה בערכי MP1. (בכחול)

בירוק: אם נביט בערכים הטבלאיים שהתקבלו בניתוח קבצי ה-RINEX בתוכנת ה-TEQC נוכל לראות כי בשנת פעולתה הראשונה של התחנה ערכי ה-MP שהתקבלו בה היו מהגבוהים ביותר. לאור העובדה שמקלט התחנה נותר כמו שהוא, נותר לנו רק לנתח את ערכי ה-MP כנגד ערכי ה-cycle slips. ואכן ניתן לראות ירידה במספר ה-slips כאשר ערכי ה-MP נמוכים ולהיפך. כדוגמה ניתן את יום 178 עם ערכי MP העומדים על 0.315 מ' ב-L2 ו-0.258 מ' ב-L1, עם מספר slips העומדים על 98 ו-94 בהתאמה. לעומת יום 272, בו ערכי ה-MP שהתקבלו היו 0.321 מ' ב-MP2 ו-0.259 מ' ב-MP1 ומספר cycle slips של 103 ו-101 בהתאמה.

בסגול: אם נסתכל בערכים הטבלאיים שהתקבלו בניתוח קבצי ה-RINEX בתוכנת ה-TEQC נוכל לראות ירידה בערכי MP2 בין יום 351 בשנת 2006 ליום 135 בשנת 2007. בחמשת החודשים המפרידים בין שני ימי המדידה ניתן להבחין בשני שינויים: הראשון הוא החלפת מקלט ה-TRIMBLE במקלט מסוג LEICA. והשני, למרות שהוא פחות משמעותי, הינו ירידה בערכי ה-cycle slips. ניתן להבחין כי אמנם נרשמה ירידה בערכי MP2, אך ערך MP1 נותר כשהיה. **מכאן שניתן להסיק כי ההבדלים בין המקלטים, הנובעים מתוכנות עיבוד שונות להתמודדות עם תופעת הרב נתיב, קריטיות יותר ל-MP על הגל הנושא L2 מאשר ל-MP על הגל הנושא L1.**

בצהוב: ניתן לראות עלייה חדה בערכי MP2, הנמדדת בערך כפול ביום מדידה 321 בשנת 2011 לעומת יום מדידה 229 באותה השנה. בעוד שביום 229 ערך MP2 עמד על 0.141 מ', ביום 321 עמד ערך זה על 0.345 מ'. לאור העובדה שלא התחולל שינוי במקלט, ניתן לנתח רק את התנהגות ה-cycle slips באותם ימים. ואכן, אם נבחן את אחוזי ה-cycle slips על הגל הנושא L2 נראה כי ערכים אלו גדלו פי חמישה: 0.02% ביום 229 לעומת 0.10% ביום 321.

בכחול: ניתן לראות כי נרשמה ירידה חדה בערכי MP1 ביום מדידה 229 בשנת 2012 לעומת יום מדידה 108 באותה השנה. ניתן לראות כי ביום מדידה 229 נרשמו ערכי MP הנמדדים בסנטימטרים בודדים הן ב-MP1 והן ב-MP2. אמנם, לעומת יום מדידה 108 אין הפרשים גדולים במספר ה-slips, אבל ניתן לראות כי מספר ה-slips אכן קטנו ביום 229 לעומת 108 ומבחינת אחוזים, אף קטנו בחצי. מה שמחזק את הטענה כי מס' ה-cycle slips משפיע על גובה ערכי הרב נתיב המתקבלים.

חקר תופעת הרב נתיב בתחנת ELRO

קצת על התחנה: תחנת ELRO ממוקמת בקיבוץ אל-רום. אל-רום הוא קיבוץ בצפון רמת הגולן הממוקם כשני ק"מ ממערב להר החרמון. הקיבוץ נוסד בתחילת שנות ה-70 של המאה הקודמת על ידי גרעין של המחנות העולים "בית הערבה". תחנת הקבע הוקמה בפברואר 2000 באזור פתוח בפאתי הקיבוץ.



איור מס' 11: מפת ישראל עם סימון מקורב למיקום קיבוץ אל-רום, בו ממוקמת תחנת ELRO

התחנה הוקמה עם אנטנה מסוג SNOW ASH701945D_M ומקלט מסוג ASHTECH Z-XII3. במרץ 2007 הוחלף מקלט התחנה למקלט LEICA RS500, במרץ 2010 הוחלף שוב המקלט, הפעם למקלט TPS NETG3 ובסוף מרץ 2012 הוחלף המקלט ל-Javad Triumph-1. בינואר 2013 הוחלף מקלט ה-Javad למקלט של Topcon מדגם net-G3A איתו פועלת התחנה עד היום.



איור מס' 12: תמונה של השדה עם האנטנה בו ממוקמת תחנת ELRO

נלקחו מדידות החל מאפריל 2000 במרווחים של כ-4 חודשים ממדידה למדידה. תוך כדי התחשבות במידע חסר באתר SOPAC, ממנו נלקחו המדידות הישנות, ומגבלות של ימי עבודה במתכונת מצומצמת של התחנה, ייתכנו שינויים בחלק מהשנים (מדידה ביום 200 במקום ביום 108), אמנם, הפריסה מייצגת ואחידה יחסית בין השנים.

Day	Year	Moving average MP1 (C1) [m]	Moving average MP2 [m]	MP1 obs > 10	MP2 obs > 10	qc MP1 slips < 25	qc MP1 slips > 25	qc MP2 slips < 25	qc MP2 slips > 25	% of Slips MP1	% of Slips MP2	Receiver Type	Antenna Type
107	2000	0.395	0.467	21512	21512	0	1	0	0	0.00	0.00	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M SNOW
229		0.277	0.295	20619	20619	9	0	11	0	0.04	0.05	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M SNOW
322		0.358	0.343	21827	21827	2	0	2	0	0.01	0.01	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M SNOW
352		0.308	0.265	22467	22467	0	0	0	0	0.00	0.00	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M SNOW
107	2001	0.294	0.339	22094	22094	0	0	2	0	0.00	0.01	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M SNOW
229		0.283	0.297	21870	21870	5	0	7	0	0.02	0.03	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M SNOW
320		0.377	0.424	22046	22046	1	1	1	1	0.00	0.00	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M SNOW
352		0.300	0.301	22178	22178	0	0	0	0	0.00	0.00	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M SNOW
107	2002	0.313	0.392	21777	21777	1	2	1	2	0.00	0.00	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M SNOW
230		0.338	0.440	22115	22115	3	0	18	0	0.01	0.08	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M SNOW
322		0.333	0.358	20517	20517	2	0	1	0	0.01	0.00	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M SNOW
352		0.305	0.285	20678	20678	2	0	0	0	0.01	0.00	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M SNOW
121	2003	0.243	0.215	44353	44353	9	0	25	0	0.02	0.06	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M SNOW
230		0.249	0.212	44056	44056	19	0	40	0	0.04	0.09	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M SNOW
322		0.269	0.207	42320	42320	6	0	24	0	0.01	0.06	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M SNOW
351		0.262	0.205	44052	44052	17	0	37	0	0.04	0.08	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M SNOW
178	2004	0.234	0.199	21710	21710	7	0	17	0	0.03	0.08	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M SNOW
229		0.291	0.238	22182	22182	26	0	30	0	0.12	0.14	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M SNOW
321		0.319	0.266	22349	22349	13	0	18	0	0.06	0.08	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M SNOW
352		0.282	0.237	23401	23401	20	0	23	0	0.09	0.10	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M SNOW
107	2005	0.281	0.235	21790	21790	13	0	20	0	0.06	0.09	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M SNOW
227		0.267	0.211	21407	21407	27	0	14	0	0.13	0.07	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M SNOW

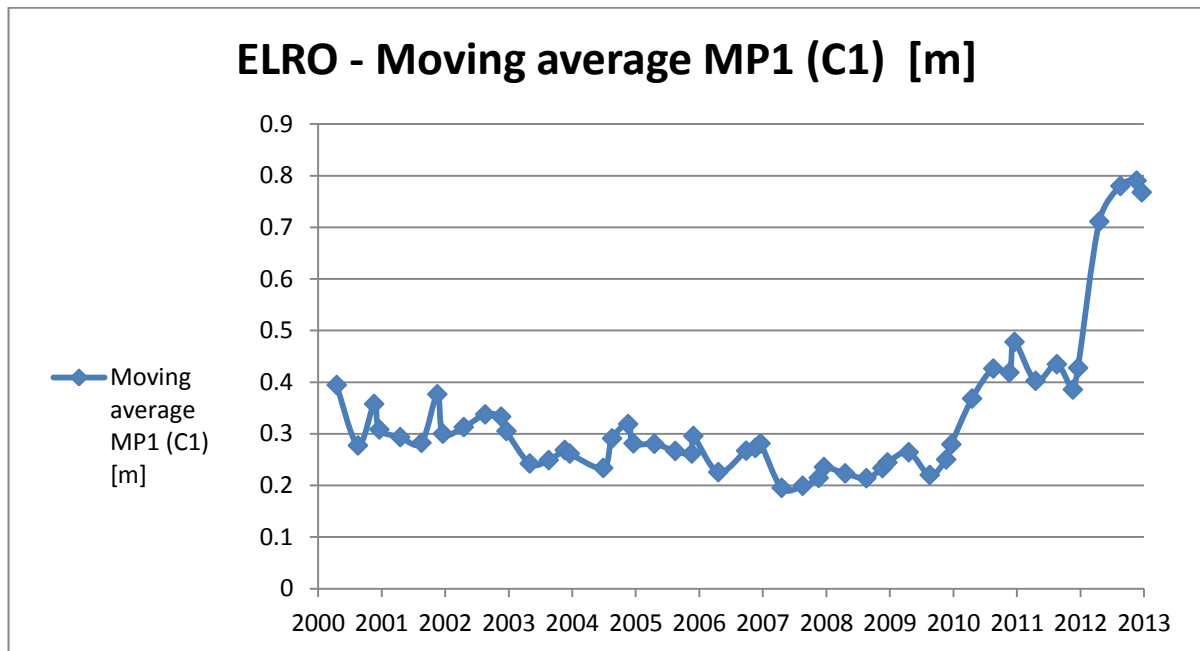
322		0.262	0.221	21503	21503	25	0	23	0	0.12	0.11	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M SNOW
331		0.296	0.223	21392	21392	30	0	27	0	0.14	0.13	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M SNOW
109	2006	0.226	0.221	22527	22527	27	0	14	0	0.12	0.06	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M SNOW
269		0.267	0.255	21426	21426	31	0	34	0	0.14	0.16	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M SNOW
322		0.273	0.253	22110	22110	42	0	32	0	0.19	0.14	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M SNOW
352		0.281	0.224	22958	22958	30	0	29	0	0.13	0.13	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M SNOW
108	2007	0.195	0.295	23044	23044	16	0	18	0	0.07	0.08	LEICA RS500	ASH700936D_M SNOW
229		0.199	0.327	21591	21591	25	2	30	2	0.12	0.14	LEICA RS500	ASH700936D_M SNOW
321		0.215	0.332	23055	23055	26	0	37	0	0.11	0.16	LEICA RS500	ASH700936D_M SNOW
351		0.236	0.340	22216	22216	27	2	40	3	0.12	0.18	LEICA RS500	ASH700936D_M SNOW
108	2008	0.223	0.334	23923	23923	28	1	36	1	0.12	0.15	LEICA RS500	ASH700936D_M SNOW
230		0.214	0.348	22673	22673	22	1	33	1	0.10	0.15	LEICA RS500	ASH700936D_M SNOW
322		0.234	0.356	23613	23613	26	0	38	0	0.11	0.16	LEICA RS500	ASH700936D_M SNOW
351		0.245	0.354	23700	23700	27	7	40	9	0.11	0.17	LEICA RS500	ASH700936D_M SNOW
108	2009	0.264	0.328	23013	23013	26	1	46	1	0.11	0.20	LEICA RS500	ASH700936D_M SNOW
229		0.220	0.361	22712	22712	41	0	56	0	0.18	0.25	LEICA RS500	ASH700936D_M SNOW
323		0.250	0.373	22080	22080	43	1	55	1	0.19	0.25	LEICA RS500	ASH700936D_M SNOW
353		0.280	0.359	22106	22106	28	1	38	1	0.13	0.17	LEICA RS500	ASH700936D_M SNOW
107	2010	0.368	0.501	24087	24087	10	0	38	0	0.04	0.16	TPS NETG3	ASH700936D_M SNOW
229		0.426	0.514	24634	24634	10	0	40	0	0.04	0.16	TPS NETG3	ASH700936D_M SNOW
321		0.419	0.556	24309	24309	26	0	67	0	0.11	0.28	TPS NETG3	ASH700936D_M SNOW
351		0.478	0.538	24617	24617	16	0	35	0	0.06	0.14	TPS NETG3	ASH700936D_M SNOW
107	2011	0.403	0.526	24487	24487	43	0	89	0	0.18	0.36	TPS NETG3	ASH700936D_M SNOW
229		0.435	0.532	24076	24076	14	18	66	18	0.06	0.27	TPS NETG3	ASH700936D_M SNOW
321		0.386	0.560	22971	22971	69	0	137	0	0.30	0.60	TPS NETG3	ASH700936D_M SNOW
351		0.428	0.603	23512	23512	44	0	105	0	0.19	0.45	TPS NETG3	ASH700936D_M SNOW

108	2012	0.711	0.840	24942	24942	60	0	39	0	0.24	0.16	Javad Triumph-1	ASH700936D_M SNOW
229		0.780	0.875	24969	24969	92	7	86	7	0.37	0.34	Javad Triumph-1	ASH700936D_M SNOW
322		0.790	0.858	24803	24803	98	0	91	0	0.40	0.37	Javad Triumph-1	ASH700936D_M SNOW
352		0.768	0.854	24847	24847	82	5	92	9	0.33	0.37	Javad Triumph-1	ASH700936D_M SNOW

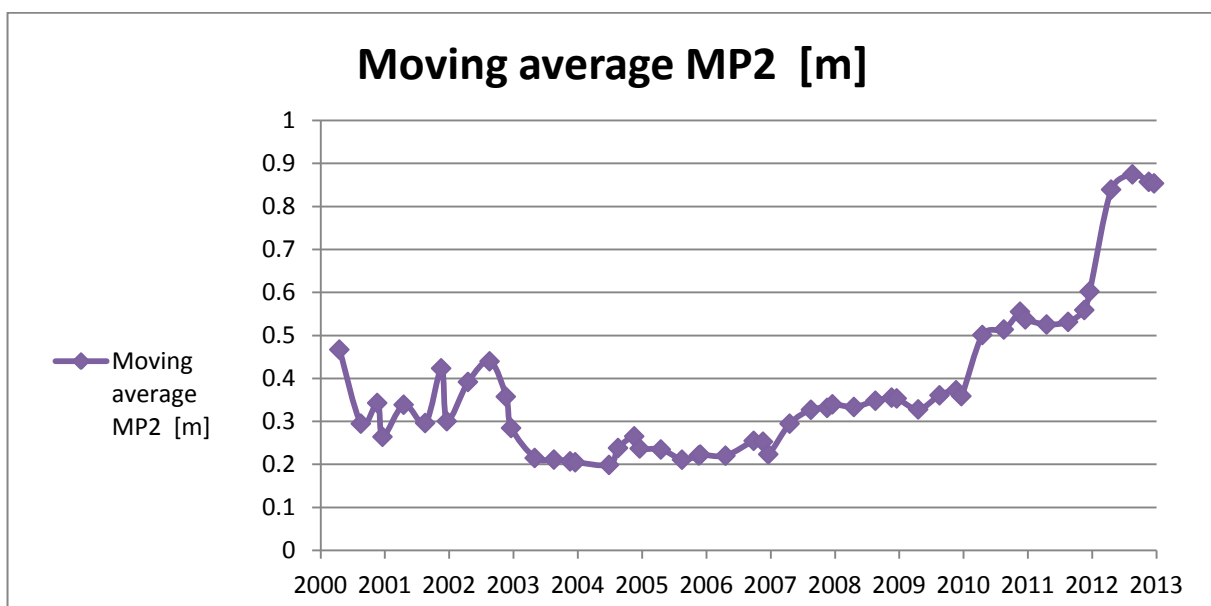
טבלה מס' 4: עיבוד ימי מדידה כל ארבעה חודשים בתחנת ELRO. מתוארים להלן ערכי MP1, ערכי MP2, מס' התצפיות שנעשה בהם שימוש לתהליך החישוב של MP1 ו-MP2, מס' ה-cycle slips עבור לוווינים הגבוהים מ-25° ומס' ה-cycle slips עבור לוווינים בעלי זווית גובה הקטנה מ-25° עבור MP1, MP2 בנפרד. בנוסף, מחושב אחוז ה-cycle slips עבור לוווינים בעלי זווית גובה הקטנה מ-25°, עבור MP1 ו-MP2.

לפי מספר התצפיות ניתן לראות כי מבחינת סדר גודל, לא התרחש דבר חריג בתחנה בימי המדידה. עוד ניתן לראות כי עם השנים התווספו לוויינים, דבר שהגיוני באופיו וראינו שהתרחש גם בתחנות CSAR-ו SLOM. אם נסתכל על אופן התנהגות ערכי הרב נתיב, גם בגל L1 וגם בגל L2 ניתן לראות עלייה עם השנים בשנות פעולתה הראשונות של התחנה, אמנם עד לשנת 2012 עם התחלפות מקלט Topcon- למקלט Javad, הערכים היו בתחום סביר, ואז קפצו לפי שתיים, והתייצבו על ערכים אלו במהלך כל השנה האחרונה.

נציג את שינויי ערכי ה-MP בכל אחד מהגלים הנושאים:



איור מס' 13: אופן התנהגות ה-MP על פני הגל הנושא L1 עבור ה-C/A code על פני שנות פעולתה של תחנת ELRO



איור מס' 14: אופן התנהגות ה-MP על פני הגל הנושא L2 עבור ה-P code על פני שנות פעולתה של תחנת ELRO

באיורים מס' 13 ו-14 ניתן לראות שלוש תופעות בולטות:

1. בתחילת שנת 2007 נרשמה ירידה בערכי MP1. (בכחול)
2. ישנה עלייה ניכרת גם בערכי MP1 וגם בערכי MP2. (בסגול)
4. בשנת 2012 התרחשה קפיצה נוספת בערכי הרב נתיב בשני הגלים הנושאים. (בירוק)

בכחול: אם נביט בערכים הטבלאיים שהתקבלו בניתוח קבצי ה-RINEX בתוכנת ה-TEQC נוכל לראות כי החלה מגמת עלייה בערכי MP2 בין יום מדידה 352 בשנת 2006 ליום מדידה 108 בשנת 2007. ביום 352 עמדו ערכי MP2 על 0.224 מ' ואילו ארבעה חודשים מאוחר יותר, ביום 108 התקבל ערך רב נתיב בגודל 0.295 מ'. אם נבחן לעומק את השינויים שהתרחשו בין שני ימי המדידה הנ"ל בתחנה נראה כי התחלף מקלט ה-ASHTECH שהיה בתחנה למקלט מסוג LEICA.

בסגול: ניתן לראות עלייה משמעותית בערכי MP1 כמו גם בערכי MP2 בין ימי המדידה 353 בשנת 2009 לבין יום מדידה 107 בשנת 2010. אם נשווה בין הערכים: ביום מדידה 353 ערכי הרב נתיב עמדו על 0.359 מ' ב-MP2 ו-0.280 מ' ב-MP1 לעומת יום מדידה 107 בו התקבלו הערכים 0.501 מ' ב-MP2 ו-0.368 מ' ב-MP1. אם נבחן מקרוב את שאר הפרמטרים בטבלה נראה כי במהלך ארבעת החודשים שעברו בין שני ימי המדידה התחלף מקלט ה-LEICA שהיה בתחנה למקלט TPS. ניתן לראות כי עם החלפת המקלט החלו ערכי הרב נתיב להתייב על ערכים כמעט כפולים משהיו כשפעל בתחנה מקלט ה-LEICA.

בירוק: ניתן לראות כי כל עוד פעלה התחנה עם מקלט ה-TPS ערכי הרב נתיב אמנם גדלו בשני הגלים הנושאים, אך הם התייבבו במהלך השנתיים שבהם פעל המקלט על ערכי רב נתיב ממוצעים כשאר תחנות רשת ה-APN (בסביבות 0.5 מ'). אמנם, עם החלפת מקלט ה-TPS למקלט מסוג JAVAD במרץ 2012 חלה קפיצה משמעותית בערכי הרב נתיב בתחנת ELRO. החל מיום מדידה 108 התייבבו ערכי ה-MP על 0.840 מ' בגל נושא L2 ו-0.711 מ' בגל נושא L1. ערכי הרב נתיב בשנת 2012 נותרו יציבים סביב ה-0.8 מ' ב-MP2 ו-0.7 מ' ב-MP1.

סיכום ומסקנות

כפי שממחיש הניתוח של כל אחת משלוש התחנות שנבחנו SLOM, CSAR ו-ELRO מעבר להשפעת האנטנה על ערכי הרב נתיב, אחד הגורמים המשפיעים ביותר הוא המקלט גם כן. כאשר ניתחנו כל עלייה או ירידה בערכי הרב נתיב בתחנה מסוימת הבחנו כי השינוי נבע בעיקר משינויים במקלט.

תחנת ELRO ממחישה בצורה הטובה ביותר כמה חשוב העיבוד הפנימי במקלט בקשר לערכי הרב נתיב המתקבלים. בתחנה זו הוחלפו ארבעה מקלטים עם השנים וכפי שהוכחנו כבר לעיל בפרק המתאר את היסטוריית התחנה, בכל פעם שהוחלף מקלט חלו שינויים ניכרים בערכי הרב נתיב, ובתחנה זו הם היו לרעה. אותה תופעה התרחשה גם בתחנת SLOM, עם החלפת מקלט ה-ASHTECH שפעל בתחנה מיומה הראשון, וכל עוד הוא פעל ערכי ה-MP היו נמוכים יחסית (בממוצע עמדו על 0.2 בשני הגלים הנושאים), במקלט ה-LEICA שהביא לקפיצה חדה בערכי MP2 עם תחילת פעילותו, והחל להתייצב בשלב מסוים על ערכים גבוהים אף יותר.

בכל אחת מהתחנות ראינו כי השינוי במקלט משפיע בעיקר על ערכי MP2. גם ב-CSAR, בה ערכי הרב נתיב היו נמוכים מיומה הראשון ונותרו נמוכים למרות שינויי המקלט, הבחנו כי בשנת 2007 כשהתחלף מקלט ה-TRIMBLE למקלט ה-LEICA נרשמה ירידה חדה בערכי הרב נתיב על הגל הנושא L2.

גורם נוסף המשפיע על תופעת הרב נתיב שאת השפעתו חקרנו במסגרת פרויקט זה היה מספר ה-cycle slips. ואכן ב-SLOM כמו גם בתחנת CSAR ראינו כי בימים בהם מס' ה-cycle slips עבור לוויינים הנמצאים בזווית גובה הקטנה מ-25 מעלות היו גדולים מאוד (נמדדים במאות) ערכי הרב נתיב בגל הנושא שבו התרחשה התופעה גדלו בצורה משמעותית. יתרה מזאת, כאשר בחנו את השפעת מס' ה-cycle slips על ערכי הרב נתיב ראינו כי בהעדר שינוי מקלט או אנטנה, זהו הגורם המשפיע השלישי המשמעותי ביותר. דוגמה מובהקת לכך היא תחנת SLOM, שבשנת 2007, למרות שלא התרחש שינוי במקלט ערכי הרב נתיב בה גדלו פי 2. כאשר חקרנו יותר לעומק את התופעה גילינו כי מספר ה-slips גדלו בסדר גודל (מ-50 ל-300 slips בממוצע).

תחנה יוצאת דופן במובן זה היא ELRO, שבה ניתן לזקוף את כל הקפיצות בערכי הרב נתיב לטובת שינויי המקלט התכופים יחסית בתחנה זו. אמנם, השינויים הללו שהביאו לעלייה הדרגתית בערכי הרב נתיב בתחנה רק מחזקים את הטענה כי לבד מהאנטנה, היא הגורם המשפיע העיקרי על ערכי הרב נתיב, המקלט גורם משפיע שני בחשיבותו, ומספר ה-cycle slips, בעלי השפעה ככל שיהיו רק שניים בהשפעתם למקלט.

במסגרת מחקר דומה שנעשה בארה"ב על רשת תחנות ה-CORS, היא המקבילה האמריקאית של רשת תחנות ה-APN הישראלית (Hilla and Cline, 2004) נבחנה השפעת סוג האנטנה על ערכי ה-MP שהתקבלו בתחנות הרשת. במסגרת המחקר הגיעו החוקרים למסקנה כי אנטנות מסוג choke ring מקטינות בצורה משמעותית את ערכי הרב נתיב שהתקבלו. אמנם, מסקנתם המשנית, וזו היותר רלוונטית לפרויקט זה, הייתה כי בתחנות בהם הוצבו מקלטים חדישים התקבלו ערכי MP נמוכים יותר גם שם. כלומר, המקלט מסייע בצורה משמעותית להקטנת ה-MP.

ביבליוגרפיה

1. *Shaked, D. 2007. Multipath Effect on GPS Antennas, Research thesis for partial fulfillment of the requirements for the degree of "Master of Science in Mapping and Geo-Information Engineering", Technion, Haifa.*
2. *Green, G. B., P. D. Massat and N. W. Rhodus. 1989. The GPS 21 primary satellite constellation. Navigation (USA), Vol. 36 (1).*
3. *Byun, H.Sung, George A. Hajj and Lawrence E. Young. 2002. GPS Signal Multipath A Software Simulator. GPS World, Vol. 11, pp. 40-49.*
4. *Hilla, S. and M.Cline. 2004. Evaluating pseudorange multipath effects at station in the National CORS Network. GPS Solution 253-267.*