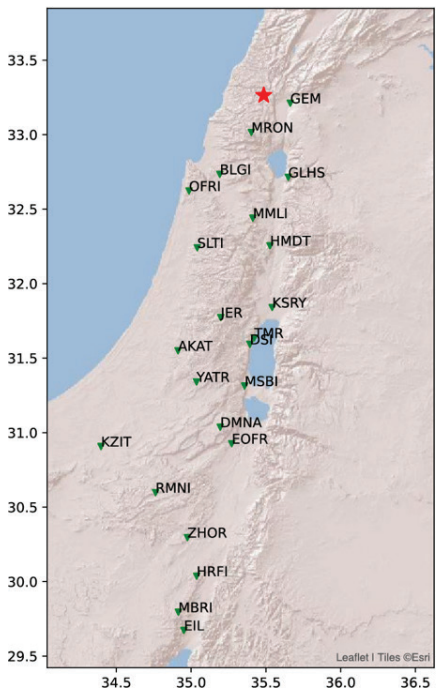
**המכון הגיאולוגי לישראל**
משרד האנרגיה והתשתיות

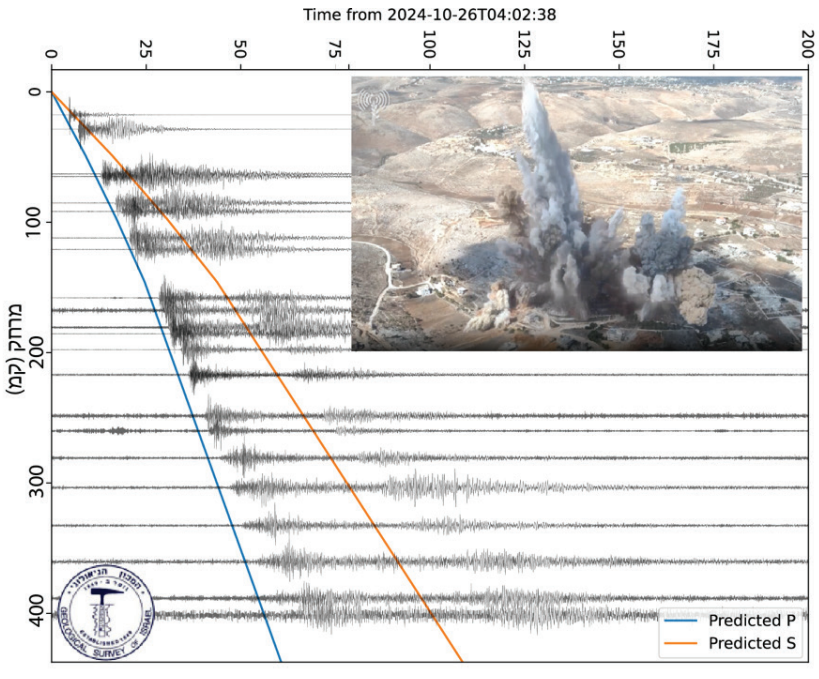
## - תחקיר-

# הפיצוץ שהפעיל את מערכת תרועה

## שבת, 07:02 בבוקר כ"ד בתשרי תשפ"ה, 26.10.2024

**איתי קורזון, לואיס שרדון, רן נוף, הילה נבון,**
**נדב וצלר, מרינה גורשטיין, ורוניק אבירב**




GSI/10/2024

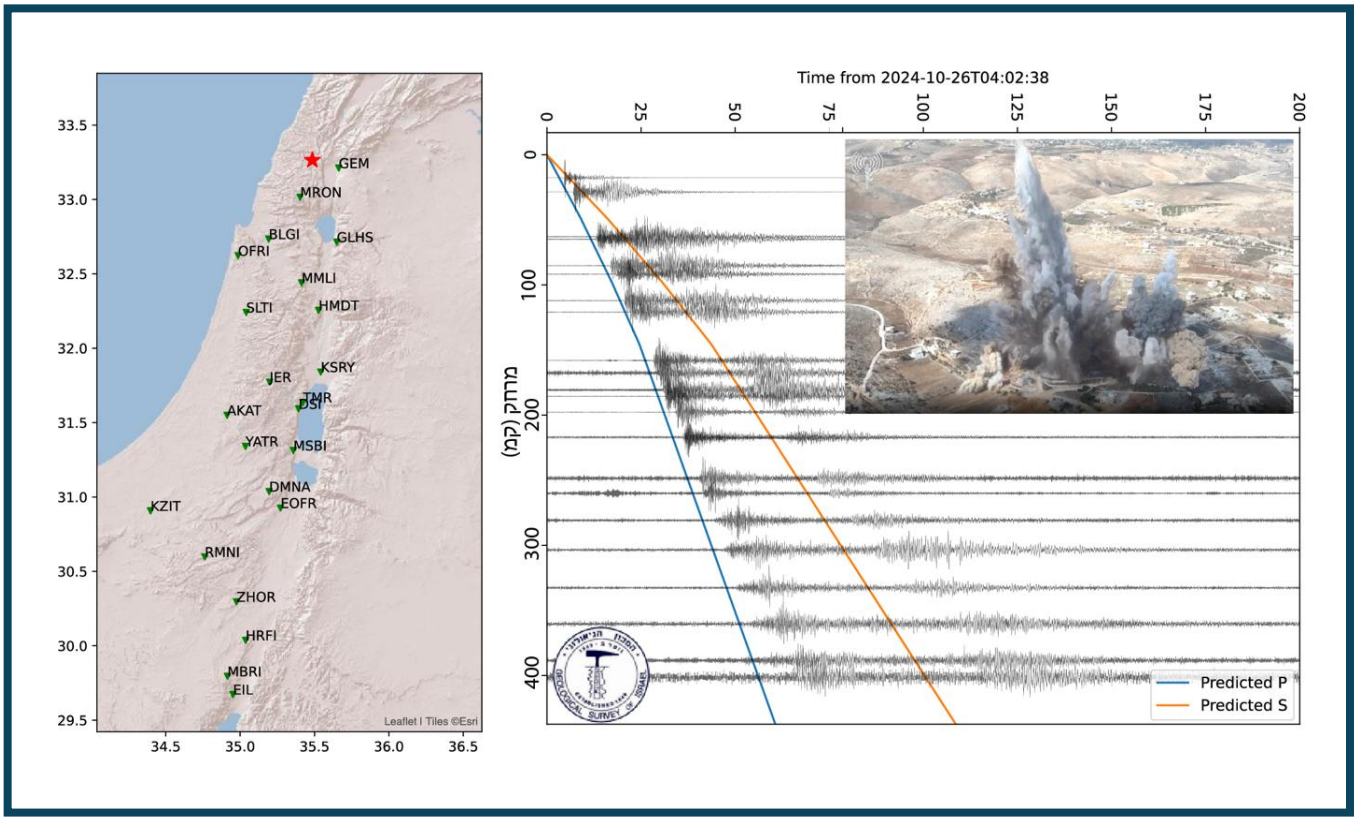
משרד האנרגיה והתשתיות
המכון הגיאולוגי

**- תחקיר-**

# הפיצוץ שהפעיל את מערכת *תרועה*

## שבת, 07:02 בבוקר כ"ד בתשרי תשפ"ה, 26.10.2024

**איתי קורזון, לואיס שרדון, רן נוף, הילה נבון, נדב וצלר, מרינה גורשטיין, ורוניק אבירב**




**דו"ח מספר GSI/10/24**

## תקציר

בשבת בבוקר, כ״ד בתשרי תשפ״ה, ה-26 לאוקטובר 2024, התבצע פיצוץ של 370 טון חומר נפץ, במנהרת פיקוד ושליטה של ארגון הטרור חיזבאללה בדרום לבנון, סמוך לגבול מדינת ישראל. כתוצאה מכך, מערכת *תרועה* הופעלה לראשונה מאז הפיכתה למבצעית. בימים שאחרי האירוע, המכון הגאולוגי ערך תחקיר במטרה להבין מדוע פיצוץ שעוצמתו שקולה למגניטודה של 3.6 הפעיל התרעה שמתוכננת לרעידות אדמה שהמגניטודה שלהן גדולה מ-4.5. כמו-כן נבדקו היבטים נוספים הקשורים למרחק ההתרעה ולתפקוד מערך החירום של המכון הגיאולוגי.

נמצא שמערכת *תרועה* פעלה בדיוק כפי שתוכננה, וכי הערכת היתר של המגניטודה נבעה משילוב חריג של עוצמת הפיצוץ, הקירבה לחיישנים (סנסורים) והעובדה שהאלגוריתם תוכנן ותוכנת עבור רעידות אדמה ולא עבור פיצוצים. חשוב להבין שרעידות אדמה, לרוב, אינן מתרחשות בפני השטח אלא בעומק של אלפי מטרים ושתכולת הגלים של רעידות אדמה שונה משל פיצוצים.

משהתבהרו הדברים הוחלט שלא לערוך שינויים באלגוריתם של *תרועה*, מכיוון שמערכת זו תוכננה עבור רעידות אדמה ולא עבור פיצוצים חריגים של מאות טונות של חומר נפץ. יחד עם זאת, נבחנו פתרונות שונים לצמצום או מניעת הישנות מקרים דומים בעתיד על ידי פעולות הן בפיקוד העורף והן במכון הגיאולוגי במקרה של ידע מוקדם על פיצוץ דומה. הפתרונות יושמו ונבחנו בתנאי אמת של שני פיצוצים מבוקרים נוספים והפכו כבר לחלק מהנוהל המוסכם בין מוקד ה-24-7 של המכון הגאולוגי לבין חמ״ל התרעה של פיקוד העורף.

עוד נמצא שמערך החירום המבצעי (24-7) של המכון הגיאולוגי תפקד בדיוק על פי הנהלים המבצעיים שנקבעו לו ונתן לפקע"ר מענה מדויק תוך 5 דקות. לצד זאת, הוסקו מסקנות לשיפור המענה של המכון הגיאולוגי לתקשורת על אף שאין הודעות אלה חלק מחובותיו המבצעיות של המכון הגיאולוגי, והפצתן נעשית בעצה אחת עם דוברות משרד האנרגיה. אנו מדגישים שהחזרת הציבור לשגרה הינה הוראה שאמורה להתפרסם אך ורק על ידי גורמי הביטחון וההצלה ולעולם לא תיכלל בהודעות המכון הגיאולוגי.

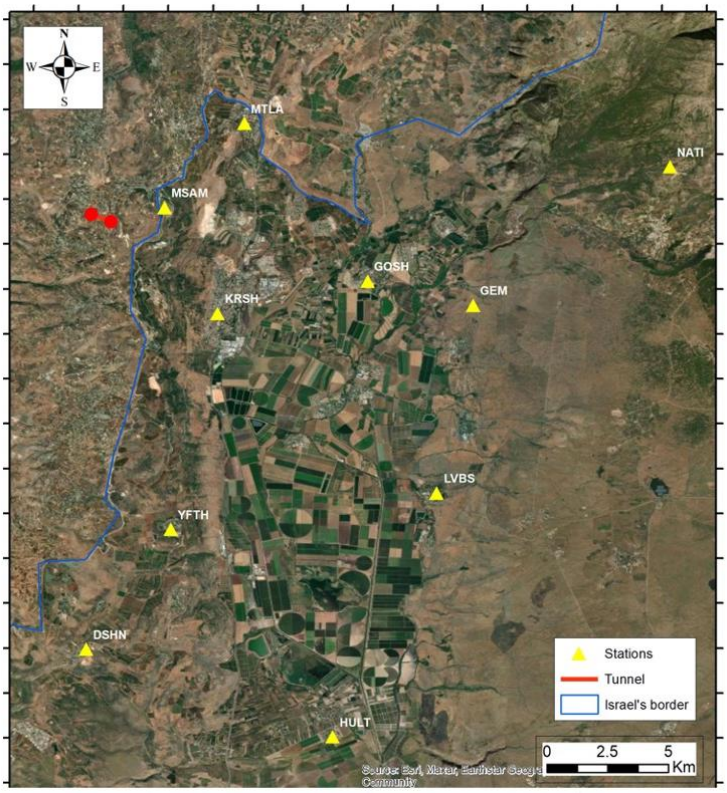
## 1. רקע

הרשת הסיסמית הישראלית מיועדת לניטור ומעקב אחר רעידות אדמה בישראל וסביבתה הקרובה. חלק נכבד מתחנות הרשת משמשות את מערכת *תרועה*, המיועדת להתרעה מוקדמת בפני רעידות אדמה חזקות הצפויות לגרום לנזק. מערכת *תרועה* כוללת רשת חיישנים סייסמים הפזורים בכ- 120 תחנות קצה בכל הארץ ובעיקר לאורך ההעתקים הראשיים (Kurzon et al., 2020). המידע מהחיישנים מועבר למרכזי החישוב של המכון הגיאולוגי ומעובד באמצעות אלגוריתם גילוי וזיהוי רעידות אדמה (Nof and Kurzon, 2021). האלגוריתם עושה שימוש במדידות תזוזת פני השטח שנמדדת בתחנות הקצה בשניות הראשונות שלאחר הגעת הגלים הראשוניים (גלי לחץ, P-wave) וממשיך לעדכן את הערכת המיקום והמגניטודה ככל שנתונים נוספים ממשיכים להגיע למרכז החישובים. מערכת *תרועה* היא אוטומטית ומכוילת למתן התרעה כאשר מתרחשת רעידת אדמה מעל סף מגניטודה של M 4.5. מרחק ההתרעה מוערך על-בסיס חישוב של המרחק בו תנודות הקרקע תעבורנה ערך-סף של 5 גאל (ס"מ לשנייה בריבוע), בו קיים פוטנציאל לגרימת נזק ברכוש או בנפש (Nof et al., 2021). מידע נוסף על מערכת *תרועה* ניתן למצוא בדו"ח המכון הגיאולוגי בנושא (נוף וקורזון 2020).

במכון הגיאולוגי קיים מערך חירום הפועל 7-24, הכולל תורן המאייש את חדר המצב במכון הגיאולוגי וכונן סייסמולוגי-מקצועי בכיר בכוננות קריאה מהבית. הערכת מגניטודה החוצה סף נמוך של M3.5 מפעילה הודעות טלגרם אוטומטיות לכלל אנשי המערך עם פרטי האירוע וכן נוהל בקרה ודיווח המאפשר: (1) אימות האירוע ושלילת זיהוי שווא; (2) בקרה ראשונית על דיוק האיכון והערכת המגניטודה; (3) זיהוי מקור האירוע (רעידת אדמה, פיצוץ, אחר); (4) מענה לפניות והבהרות מפקע"ר, מקבלי החלטות במכון הגיאולוגי ומחוצה לו, גופי תקשורת והציבור הכללי. למערך 7-24 נוהל סדור למתן מענה למקרים ומצבים שונים – רעידות אדמה מורגשות, כאלו שגורמות לנזק או נפגעים, רעידות אדמה רחוקות ועוד (נבון וחוב', 2024). בנוסף למערך, קיימות קבוצות וואטסאפ לתקשורת מהירה בין הצוות הסייסמולוגי המקצועי, הנהלת המכון הגיאולוגי, מקבלי החלטות ודוברות משרד האנרגיה.

בנוסף לרעידות אדמה, הרשת הסיסמית הישראלית מקליטה מקורות סיסמיים שאינם טבעיים לרבות פיצוצי מחצבות, ופעילות צבאית וביטחונית במרחב. למעשה, כמות הפיצוצים הנקלטים ברשת הסיסמית הישראלית היא לפחות פי שניים מכמות רעידות אדמה. למשל, במהלך שנת 2022, הרשת הסיסמית הישראלית הקליטה 2420 אירועים סיסמיים בשטח ישראל ומתוכם 1591 פיצוצים. החל מה- 7 לאוקטובר 2023 כמות הפיצוצים ממקורות צבאיים אשר נקלטו במערכת עלתה באופן ניכר. חלק מהפיצוצים, בעיקר בצפון ישראל, התרחשו במרחק של מאות מטרים ספורים מהחיישנים של מערכת *תרועה*, ורובם זוהו כאירועים סיסמיים במגניטודות של M 1-2. מספר מצומצם של פיצוצים הגיעו אף למגניטודות של 2.5-2.6. למרות הקרבה בין חיישני *תרועה* לאזור הלחימה, ברוב המקרים, הערכות המגניטודה לא חרגו מערכים הצפויים מבחינת כמות חומר הנפץ שפוצצה. רק בחלק מהמקרים נרשמה הערכת יתר של 0.3-0.4 דרגות מגניטודה, אשר מוכרת ואופיינית למערכת גם במקרים של רעידות אדמה, בעיקר כאשר החיישנים היו קרובים למקור הסיסמי.

למרות שמערכת *תרועה* פעילה ומבצעית כבר כמעט שלוש שנים בישראל, היא לא הופעלה ולא סיפקה התרעות גם לכל אורך מלחמת חרבות ברזל, וגם כשנפלו רקטות וטילים בקרבת החיישנים של המערכת. אפילו פיצוץ יזום חריג בעוצמתו, אשר התרחש ב- 18 לאוקטובר, 2024, בו צה"ל פוצץ 95 טון של חומר נפץ, לצורך השמדת מנהרת טרור בדרום לבנון, לא הפעיל את המערכת. הערכת העוצמה האוטומטית של פיצוץ זה ע"פ מערכת *תרועה* הייתה 3.5 M. עיבוד ידני של הפיצוץ קבע עוצמה של M 3.2, עם חריגה של כ- 0.3-0.4 מגניטודות (בטווח השגיאה).




**<u>איור 1:</u>** תצלום אויר המראה את מיקום המנהרה (פס אדום עם שני עיגולים אדומים), ביחס לקו הגבול (בסגול) ולתחנות רשת *תרועה* (משולשים צהובים); המנהרה משתרעת גיאוגרפית על כ- 750 מ' אווירית, ובאורך תוואי כולל (בתלת מימד) של כ- 1500 מ'.

התחקיר הנוכחי מתמקד בפיצוץ יזום חריג בעוצמתו, שהתרחש ב- 26 לאוקטובר 2024. פיצוץ זה הוביל להערכת מגניטודה שחצתה את סף ההתרעה ולהפצת התרעה מפני רעידת אדמה לציבור בפעם הראשונה. דו"ח זה המבוסס על תחקיר פנימי שבוצע במכון הגיאולוגי במטרה לנתח את האירוע וההתרעה שנשלחה בעקבותיו.

## 2. תיאור הפיצוץ ויומן אירועים

בשבת בבוקר, ה-26 לאוקטובר התבצע פיצוץ של 370 טון חומר נפץ, במנהרת טרור בדרום לבנון, סמוך לגבול הישראלי (Lat/Lon: 33.243/35.525). עוצמת הפיצוץ הייתה כ- 3.6 M. מערכת *תרועה* זיהתה את הפיצוץ לאחר כ- 4 שניות עם הערכת מגניטודה ראשונית של 5.2 M החוצה את סף המגניטודה להתרעה והובילה להפצת התרעה לציבור. האיכון והערכת המגניטודה עודכנו עם הזמן עד להערכת שיא של 5.4 M והפצת התרעה עד למרחק של כ- 94 ק"מ ממוקד הפיצוץ. המערכת התייצבה לפתרון מדויק יותר, הן מבחינת האיכון והן מבחינת המגניטודה, כ- 7 שניות לאחר הפיצוץ. איור 1 מציג את אזור הפיצוץ בכפר כילא בדרום-לבנון, יחד עם התחנות הסיסמיות הקרובות של מערכת *תרועה*. לפי פרסומי הצבא האורך הכולל של תוואי המנהרה שפוצצה היה כ- 1500 מ'.

**יומן אירועים – עיקרי - 26.10.2024**

- 07:02 - מתקבלת התרעת רעידת אדמה באפליקציה של פקע"ר, בצופרים וכהודעת טלגרם פנימית של מערך ה- 24-7 של המכון הגיאולוגי. הערכת המגניטודה M 5.2.
- 07:08 – לאחר בירור ווידוא מהיר מול הנתונים, מול מוקד 24-7 של המכון הגיאולוגי ומול פיקוד צפון, מנהל האגף לסיסמולוגיה במכון הגיאולוגי מוציא הודעה בקבוצת התקשורת של המכון על כך שההתרעה יצאה בעקבות פיצוץ מבוקר בגבול לבנון.
- 07:12 – מנהל האגף לסיסמולוגיה מבקש מחמ"ל התרעה בפקע"ר להוציא במיידי הודעה באפליקציה של פקע"ר שמדובר בפיצוץ מבוקר ולא ברעידת אדמה.
- 07:38 – אחרי דיון בקבוצת התקשורת של המכון הגיאולוגי, יוצאת ההודעה מדוברות משרד האנרגיה:

*מהמכון הגיאולוגי נמסר: בעקבות פיצוץ מבוקר משמעותי בגודלו שבוצע הבוקר באזור הצפון, זיהתה מערכת ההתרעה את הפיצוץ כרעידת אדמה וההתרעה הופצה בהתאם.*

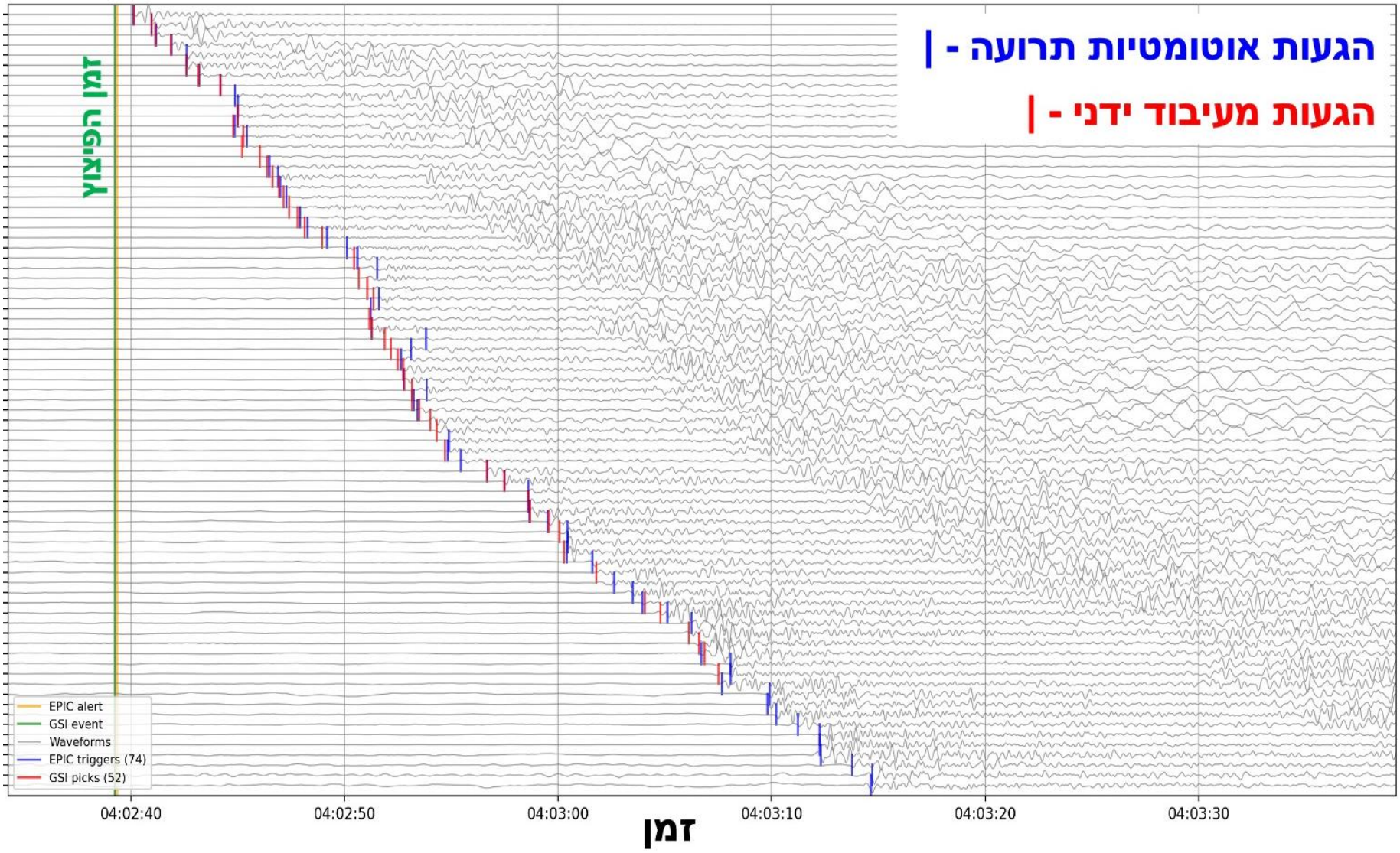
- 08:04 – מנהל האגף לסיסמולוגיה מעדכן את מנהל המכון הגאולוגי.
- 08:50 – מתחיל תהליך ניסוח הסבר לאירוע לפרסום בפייסבוק של המכון הגיאולוגי בפורום מצומצם של הסיסמולוגים של המכון.
- 09:36 – הנוסח שהתקבל נדון בפורום מורחב הכולל את דוברות משרד האנרגיה, מנהל האגף לסיסמולוגיה ומנהל המכון הגיאולוגי.
- 10:07 – המכון מפרסם את הנוסח הסופי של ההסבר להתרחשויות בפייסבוק של המכון הגאולוגי.

## 3. בדיקת תהליך העיבוד האוטומטי של מערכת *תרועה*

הפיצוץ שהתרחש בבוקר ה 26 באוקטובר הוא חריג. כמות חומר הנפץ הגדולה (370 טון), אשר מוערכת כפי 20 מפיצוצי מחצבה, ושוות-ערך לרעידת-אדמה במגניטודה של כ- M 3.6, והפריסה הגאוגרפית של התחנות הסיסמיות ביחס לפיצוץ, יצרו מצב ייחודי אשר גרם למערכת *תרועה* לזהות את הפיצוץ כרעידת אדמה בעוצמה גבוהה מסף ההתרעה. למרות שהפיצוץ נדיר מסוגו, חשוב להבין את הסיבות אשר הובילו להערכת יתר חריגה ולהפעלת מערכת ההתרעה הלאומית. יש חשיבות למנוע מקרים דומים בעתיד, בייחוד בתקופה רגישה ועמוסה באירועים ביטחוניים קיצוניים, אשר עלולים לאתגר את המערכת בתרחישי קיצון דומים. לשם כך נציג באופן מסודר את רכיבי הליך העיבוד האוטומטי באלגוריתם של מערכת *תרועה*. הרכיבים שנבחנו הם: 1. איכות זיהוי זמני הגעות הגלים הראשוניים אל החיישנים; 2. איכות האיכון של הרעידה; ו- 3. איכות הערכת המגניטודה. שני הרכיבים האחרונים נבחנו גם לאור העדכונים של פתרונות המערכת ככל שנתונים נוספים היו זמינים במרכז החישובים עם הזמן.

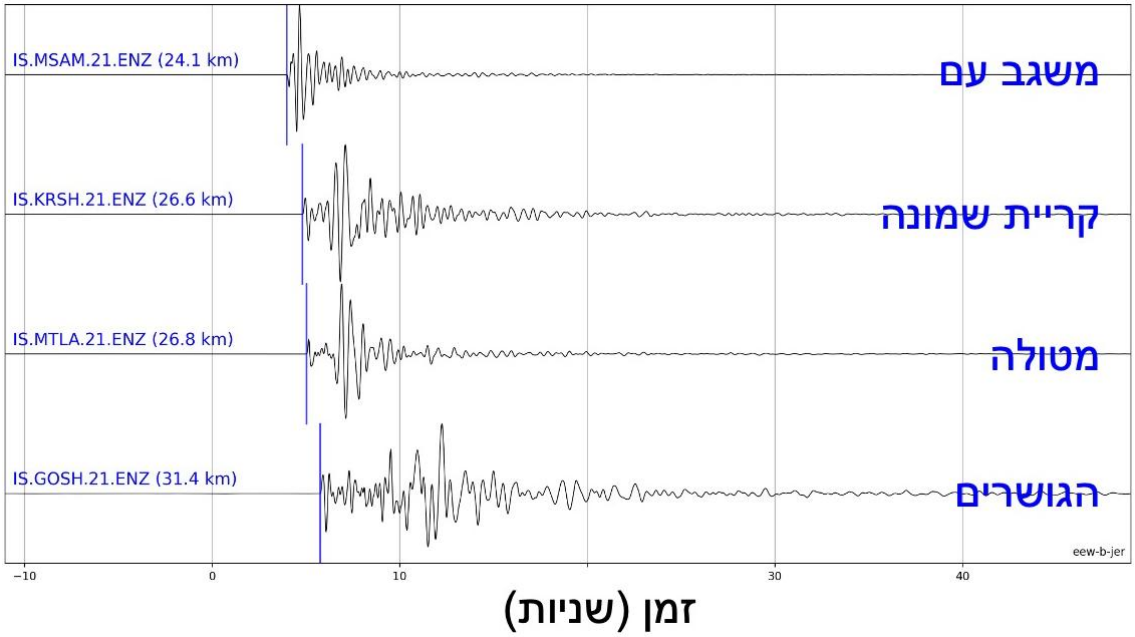
### 3.1 איכות ההגעות של הגלים הסיסמיים - זיהוי הפיצוץ בתחנות *תרועה*

מערכת *תרועה* היא מערכת התרעה מוקדמת בפני רעידות אדמה, אשר תוכננה לספק התרעה מהירה ככל האפשר בהתבסס על זיהוי של הגלים הראשוניים של רעידת אדמה, גלי הלחץ (גלי P), ולהקדים בהתרעה את זמן הגעת גלי הגזירה (גלי S), וגלי השטח שהם בעלי פוטנציאל נזק גבוה יותר. האלגוריתם סורק את כל הסיסמוגרמות האנכיות הנקלטות בזמן אמת בכל אחת מהתחנות הרשת הסיסמית, על-פי סדר ההגעה של המידע למרכזי השליטה והבקרה של המערכת, לצורך זיהוי המופע של גלי ה- P. הזיהוי מבוסס על היחס בין אות לרעש של שני חלונות זמן (Signal to Noise Ratio, SNR), וכשהוא עובר סף מסוים נרשמת הגעה פוטנציאלית של אירוע סיסמי. בהינתן זיהוי מינימום של 4 תחנות פוטנציאליות הניתנות לייחוס (association) לאירוע יחיד, המערכת מאכנת את המקור הסיסמי (location) על בסיס הפרשי זמן ההגעות, מודל המהירויות הסיסמיות, וע"י חיפוש רשתי (grid search) של האיכון עם הטעות הכוללת המינימלית. פרמטרים רבים של מערכת *תרועה* נבדקו ונבחרו לאחר בחינות סטטיסטיות מדוקדקות (Nof & Allen 2016; Nof & Kurzon 2020; Nof et al., 2021) של אירועים רבים ומגוונים במרחב הגאוגרפי של ישראל וסביבתה. זמן מדויק ככל האפשר של ההגעות האוטומטיות הוא קריטי, מאחר שטעויות קטנות בזיהוי ההגעה הסיסמית יכולות להוביל להסטה משמעותית של פתרון האירוע ממקומו האמיתי. מציאת זמני ההגעות נעשית בשלב הראשוני של העיבוד, וניתן לבדוק אותן ביחס לזמני ההגעות הידניות שנעשות כחלק מביצוע הפתרון הידני והמדויק ביותר של האירוע.




**<u>איור 2:</u>** סיסמוגרמות של הערוץ האנכי ביחס למרחק מהפיצוץ. זמן הפיצוץ ניתן הן על-סמך הפתרון של *תרועה* (קו צהוב), והן עפ"י הפתרון הידני (קו ירוק). כמו-כן על כל סיסמוגרמה ניתן לראות הן את ההגעה האוטומטית של אלגוריתם "אפיק" של *תרועה* (בכחול) והן ההגעות המדויקות עפ"י העיבוד הידני. במקרים רבים ההגעות ממש מתלכדות - מה שמעיד על איכות ההגעות האטומטיות של *תרועה*.

בדיקה זו מוצגת באיור 2, כאשר ההגעות האוטומטיות של *תרועה* (בכחול) מסומנות בהשוואה להגעות הידניות המדויקות (באדום). במקרים רבים ניתן לראות שקווים אלה מתלכדים, הן בתחנות הקרובות והן בתחנות הרחוקות יותר אשר מדגימים את יכולת הדיוק של האלגוריתם. בנוסף, הגדלה של 4 התחנות הקרובות (איור 3) שעל-בסיסן נעשה הפתרון האוטומטי הראשוני מראה שההגעות האוטומטיות אכן מסמנות היטב את ההגעה של האירוע הסיסמי אל התחנה.

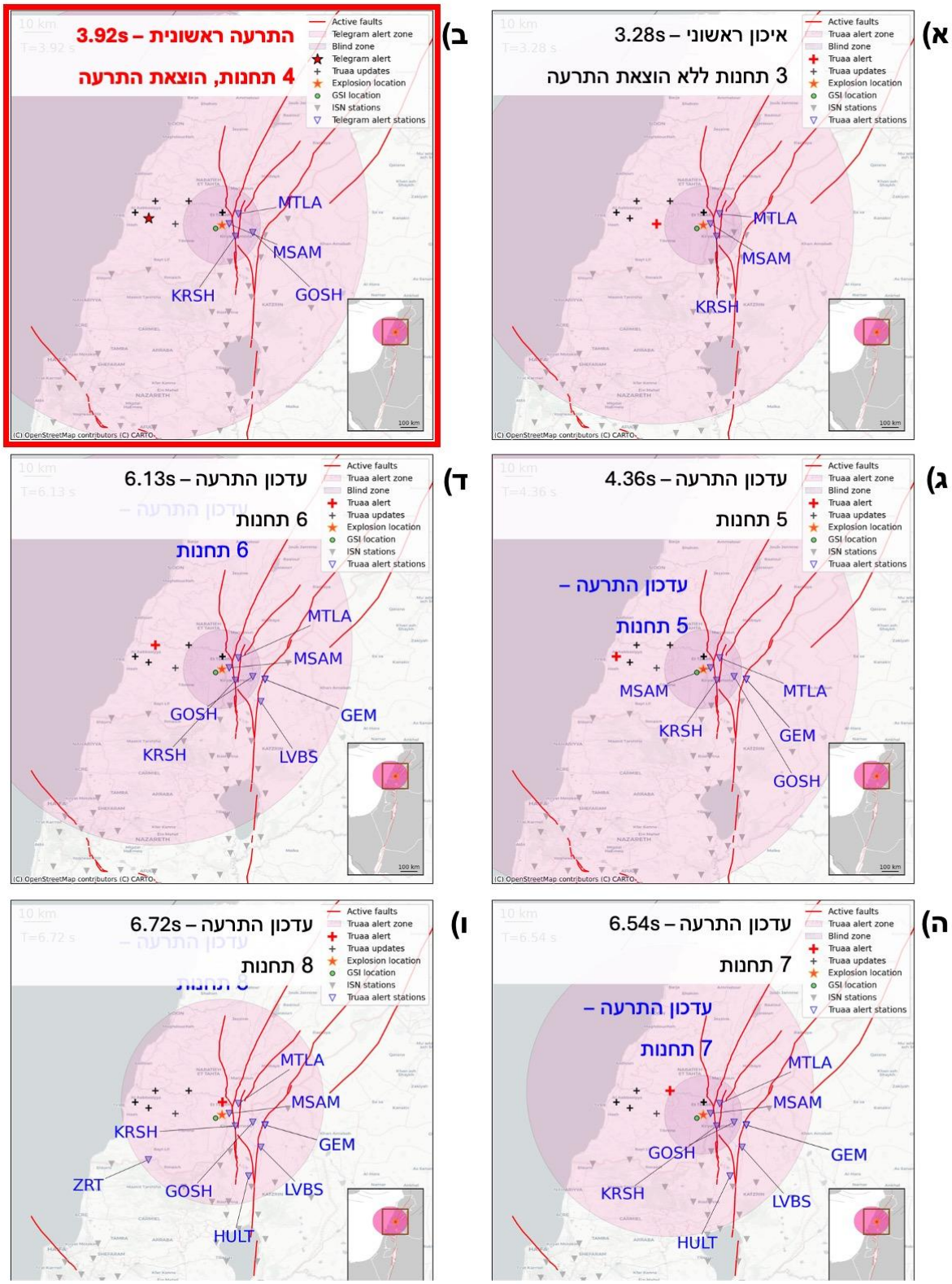



**<u>איור 3:</u>** הגדלה של הסיסמוגרמות של הערוץ האנכי של 4 התחנות הקרובות, על-בסיסן הופעלה ההתרעה של *תרועה*. ניתן לראות הן את דיוק ההגעות האוטומטיות על ארבעת הסיסמוגרמות (קווים אנכיים כחולים).

## <u>3.2 איכות האיכון - חישוב המיקום של הפיצוץ</u>

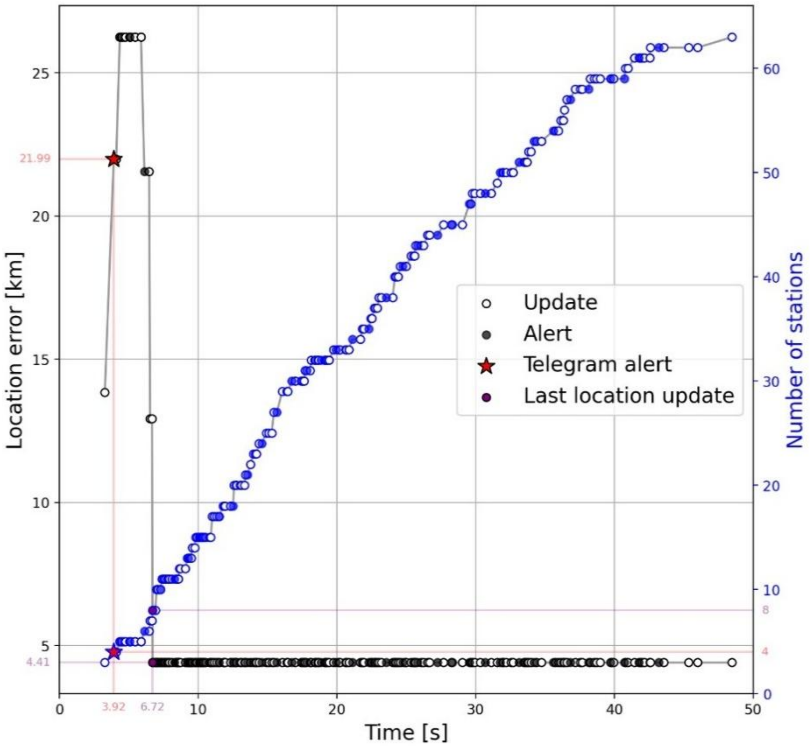
לאחר שבדקנו את ההגעות הסיסמיות ווידאנו שהן בדיוק גבוה, ניתן לבדוק את השלב הבא בתהליך – איכות האיכונים הסיסמיים. תהליך האיכון הוא דינמי ומשתנה בזמן. האיכון הראשוני מבוסס על שלוש תחנות שבהן נקלטו ההגעות הראשוניות המהירות ביותר. ככל שעובר הזמן, המידע מהתחנות מתעדכן ומידע נוסף מגיע מתחנות מרוחקות יותר, והפתרון מתעדכן בהתאם. כיוון שהאלגוריתם מתוכנן לאיכון מהיר ככל האפשר של רעידות אדמה, קיבוע העומק של האירוע מאפשר חיסכון בזמן החישוב, ובמקרה של *תרועה* נקבע עומק של 8 ק"מ. איור 4 מציג את השינוי באיכון האוטומטי של אלגוריתם Epic של מערכת *תרועה* ע"י שימוש בשש פתרונות מזמנים שונים במשך התהליך. איור 4א' מציג פתרון ראשוני, המבוסס על שלוש תחנות: MTLA, MSAM, KRSH. האיכון על-בסיס 3 תחנות אינו נחשב לפתרון יציב, ולא יכול להפעיל את מערכת ההתרעה, אך ניתן לראות שהפתרון מראה על אירוע בסטייה של כ- 15 ק"מ ממערב למקור הפיצוץ. גם לאחר שתחנה נוספת משוקללת בפתרון (איור 4ב'), האיכון לא משתפר, אלא להיפך מתרחק עוד ממקור הפיצוץ. אולם, זה השלב שבו המערכת מקבלת את הפתרון כפתרון מהימן עם 4 הגעות סיסמיות, וזה מתרחש 3.92 שניות לאחר התרחשות הפיצוץ. הגעה נוספת וסך של 5 הגעות עדיין מחריף את טעות המיקום (איור 4ג'), ורק החל מההגעה

השישית (איור 4ד') האיכון מתחיל להתקרב אל המקור, ומגיע לטעות מיקום הקטנה מ- 5 ק"מ בהגעה מהתחנה השמינית, 6.72 שניות לאחר הפיצוץ (איור 4ו'). תמונה כוללת ומסכמת מסופקת באיור 5, בה ניתן לעקוב אחר טעות המיקום עם הזמן, במקביל לעליה במספר התחנות (ההגעות) הנכללות בפתרון.



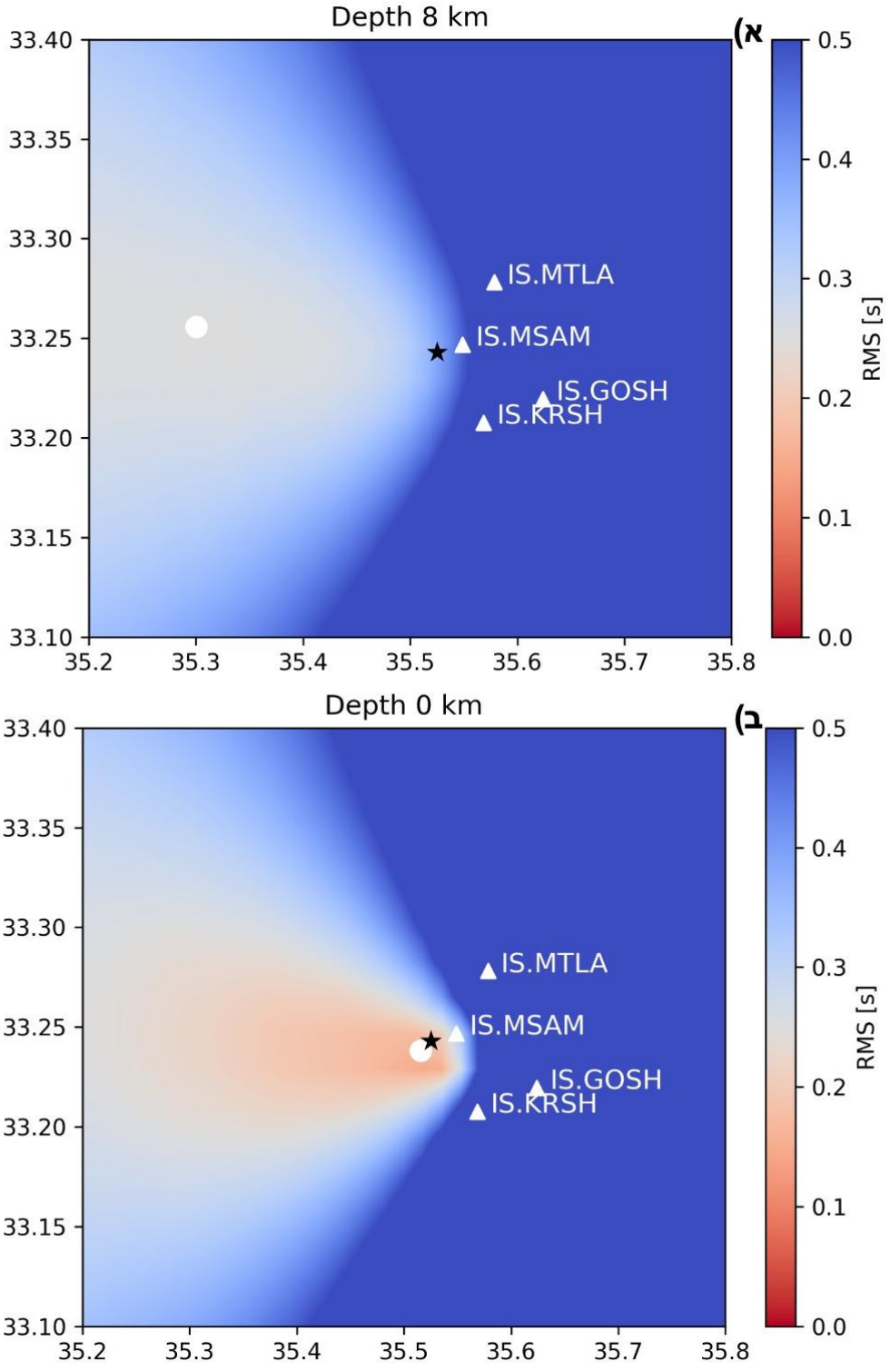

**<u>איור 4:</u>** התפתחות בזמן של מיקום הפיצוץ עלפי אלגוריתם "אפיק" של מערכת *תרועה*. האיכון הראשוני ניתן 3.28 שניות אחרי האירוע (א'),על-סמך 3 תחנות, וההתרעה הראשונית ניתנה אחרי 3.92 שניות, על-סמך 4 תחנות. האיכונים ההתחלתיים היו כ- 20 ק"מ ויותר מהמקור, אך לאחר 6.72 שניות הם כבר התכנסו לפחות מ- 5 ק"מ מהמקור, על-סמך 8 תחנות.

אם כן, נשאלת השאלה מדוע בשניות הראשונות לאחר הפיצוץ, שגיאת המיקום היא כל-כך גדולה? התשובה לכך נרמזת כבר באיור 4א', שם ניתן לראות שהפתרון הראשוני נעשה על-בסיס 3 תחנות, מכיוון שהעומק נלקח כקבוע, בעומק של 8 ק"מ. הסיבה לשימוש בעומק קבוע נעוצה בעיקרון המנחה של אלגוריתם Epic של *תרועה*, המתעדף מהירות על חשבון דיוק. לשם כך, אחד ממאפייני האלגוריתם הוא שימוש בעומק קבוע - למעשה הוצאת העומק מתהליך האיכון, ובכך אנו מרוויחים: א) קיצור הזמן עד קבלת פתרון; ו- ב) הימנעות מאחת מהבעיות הידועות באיכון, חוסר הדיוק המובנה במימד העומק. אולם במקרה של אירוע על פני השטח, ההנחה של עומק מקור ב 8 ק"מ מוסיפה שגיאה מובנית לפתרון אשר מאלצת אותו להתכנס בנקודה מרוחקת יותר על מנת לפצות על ממד העומק. שילוב של תחנות מרוחקות מקטין את השגיאה במיקום ומקרב את הפתרון המתמטי למיקום האמיתי מכיוון שככל שהתחנה רחוקה יותר מהמקור כך העומק נהיה פחות משמעותי לחישוב המרחק הכולל.




**<u>איור 5:</u>** התפתחות בזמן הן של הטעות באיכון (בשחור), ביחס למיקום הפיצוץ, והן ביחס למספר התחנות שנלקחו בחשבון בפתרון (בכחול). גם כאן ניתן לראות את הירידה לטעות איכון של 4.41 ק"מ לאחר 6.72 שניות על-בסיס 8 תחנות.

ההשפעה של העומק על הפתרון מתוארת באיור 6 אשר מדגים את מציאת הפתרון הסיסמי על-סמך 4 תחנות ראשונות, בהינתן: א) עומק קבוע של 8 ק"מ, כפי שקיים במערכת המבצעית, ו- ב) עומק קבוע של 0 ק"מ, כפי שנכון לפיצוץ שארע בעומק מקסימלי של 80 מ'. ההשוואה מראה את מרחב חיפוש הפתרון על-סמך ערכי ה- RMS של השגיאה אשר נקבעת ע"פ ההפרש בין הפרשי הזמן המחושבים (בין התחנות לנקודה ברשת) והפרש הזמן האמיתי (בין זמן הפיצוץ לתחנה). אלגוריתם האיכון מחפש את נקודת המינימום, אשר מתארת את מירב ההתאמה בין המודל לזמני ההגעות – ושם נקבע הפתרון. ניתן לראות שבעוד במקרה של עומק של 8 ק"מ המינימום הוא הרבה פחות חד עם ערך שגיאה של כ- 0.25 שניות בפתרון, ובמרחק של כ- 25 ק"מ מהפיצוץ, במידה ומכניסים עומק קבוע של 0 ק"מ, המינימום הוא חד יותר, יורד לשגיאה של כ- 0.05 שניות בפתרון, והאיכון כבר קרוב מאד למיקום הפיצוץ.




**<u>איור 6:</u>** איכות האיכונים עפ"י מדד ה- RMS לשני מקרי קצה: א) הפתרון המובנה ב*תרועה* עם עומק קבוע של 8 ק"מ; ב) פתרון עם עומק 0, כפי שמתאים לפיצוץ בפני השטח. המיפוי של ערך ה-RMS מראה את תוצאות החיפוש הרשתי (grid search) בו השורש של סכום הריבועים של הפרשי הזמן (זמן ההגעה המדוד פחות זמן ההגעה המחושב, לכל נקודה ונקודה במפה); הפתרון נקבע על-פי ערך המינימום. ניתן לראות שערך המינימום בעומק 0 ק"מ הוא נמוך יותר משמעותית מאשר בעומק 8 ק"מ, והרבה יותר קרוב למיקום האמיתי של הפיצוץ.

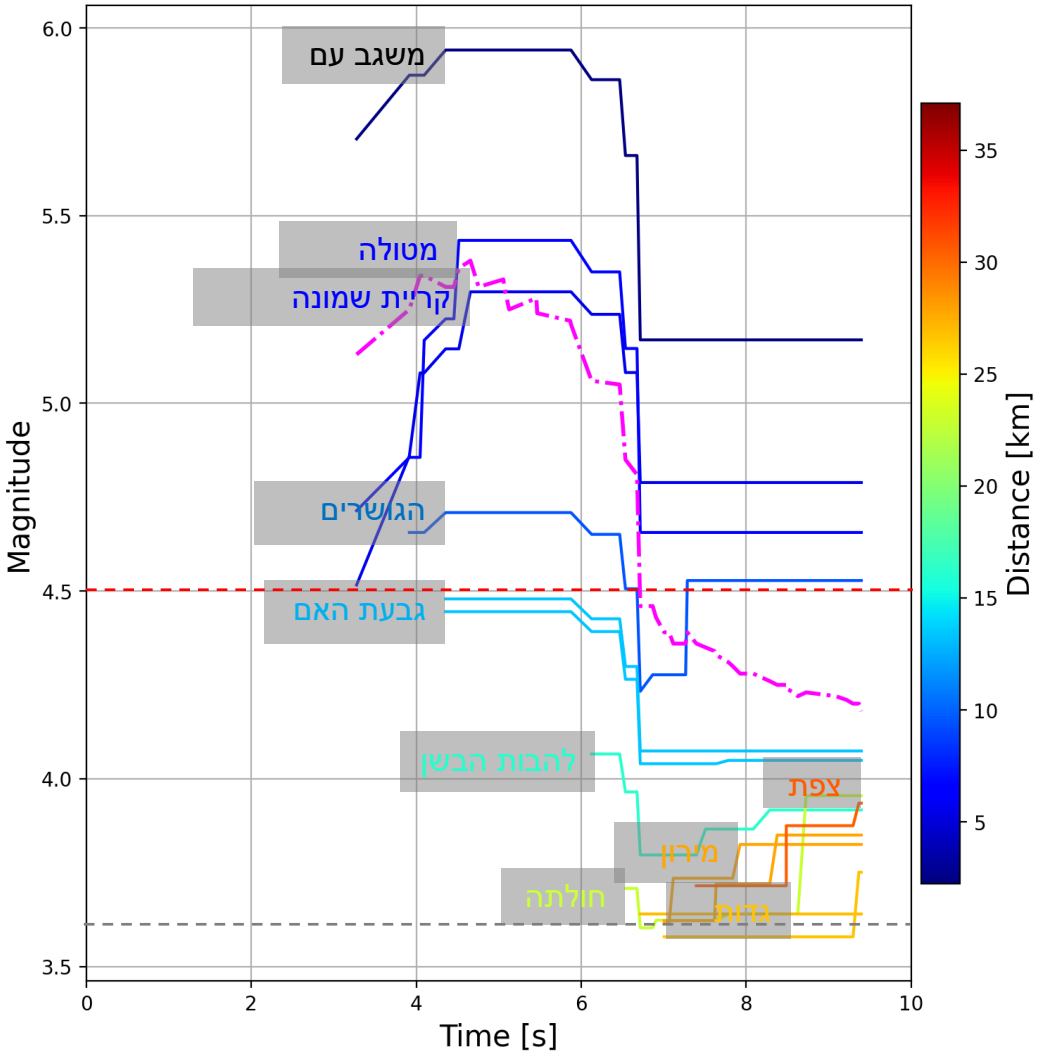
### 3.3 הערכת המגניטודה של הפיצוץ בתחנות *תרועה*

חישוב העוצמה (מגניטודה) של אירוע סיסמי נקבע ע"פ תנודות הקרקע המדודות ומרחק בין התחנה מהמוקד. במקרה של מערכת *תרועה*, החישוב מבוסס על הגלים הראשוניים (גלי P) ומכויל לחישוב עוצמה של רעידות אדמה. באופן תיאורטי, האנרגיה הסיסמית שמשתחררת ברעידת אדמה מחולקת לשני סוגי הגלים הבסיסיים: גלי P וגלי S. גלי ה S כוללים את רוב האנרגיה ברעידות אדמה. לעומת זאת, בפיצוץ, לא נוצרים גלי S במקור ולכן ההגעות הראשוניות של גלי ה P מכילים את מרבית האנרגיה הסיסמית. ע"פ עיקרון זה, חישוב עוצמת אירוע סיסמי המבוסס על הגעות הראשוניות זקוק לתיקון או כיול ספציפי עבור פיצוצים.

עוצמת הרעידה (מגניטודה) מחושבת על בסיס משוואה הקושרת את שיא התזוזה והמרחק עם המגניטודה (Sadeh et al., 2012). המגניטודה מחושבת בנפרד בכל אחת מתחנות הקצה, והערכת עוצמת האירוע נקבעת באמצעות מיצוע משוכלל של המגניטודות בתחנות השונות, הנותן משקל יתר על בסיס כמות המידע הזמין מהתחנה (ככל שקיים יותר מידע, מדידת התזוזה אמינה יותר ובעלת משקל גבוה יותר). הערכת המגניטודה מתעדכנת עם הזמן, ככל שנוסף מידע מארבע התחנות הראשונות, או מתחנות נוספות. אי-הדיוק הממוצע של אלגוריתם *תרועה* הוא כ- 0.35 יחידות מגניטודה. בטבלה 1 ניתן לראות את הערכים לכל אחת מ- 4 התחנות הקרובות. תאוצות הקרקע המקסימליות ב- 4 התחנות הקרובות הן גבוהות ומצויות כולן בתחום המורגש היטב על יד בני-אדם (מעל 2 ס"מ לשנייה בריבוע). בתחנת משגב-עם במרחק של 2.2 ק"מ בלבד מהפיצוץ, נמדדו ערכי תאוצת קרקע גבוהים במיוחד (30 ס"מ לשנייה בריבוע), ותואמים רמת עצימות (Intensity) ברמה של VI בסולם MMI, העשויים להיות מלווים בסדקים לקירות מבנים ולהיות מורגשים בתוך מבנה על ידי אנשים רבים (Worden et al., 2012). על-סמך תנודת הקרקע המקסימלית ועל סמך המרחק המשוער למוקד (עפ"י הפתרון האוטומטי בהינתן עומק 8 ק"מ) ניתן לראות שהערכת המגניטודה נעה בין M 4.66 בקריית-שמונה ל- M 5.87 במשגב-עם. המגניטודה המשוקללת לוקחת בחשבון גם את אורך הסיגנל ממנו נגזר הערך המקסימלי; ככל שהסיגנל ארוך יותר המשקל שלו בהערכה הכוללת של המגניטודה גבוה יותר. ובכל מקרה, עם ערך גבוה במיוחד של תאוצת קרקע במשגב-עם , הערכת המגניטודה בתחנה העלתה את המגניטודה המשוקללת ל- M 5.25. אם במקום לקחת את המרחק מפתרון *תרועה* הלוקה בערכת יתר משמעותית, ניקח את המרחק האמיתי מהפיצוץ, נקבל מגניטודה נמוכה ב- 0.5 עד 0.97 מגניטודות, ונקבל מגניטודה משוקללת של כ-4.5 M , כ- 0.7 מגניטודות מתחת להערכה האוטומטית שהייתה, ועדיין כ- 0.8 מגניטודות מעל ערך המגניטודה ה"אמיתי" של הפיצוץ – M 3.6. כלומר, ניתן לחלק באופן גס את התרומה למגניטודה משני גורמים: 1) תנודות קרקע גבוהות מאד בעיקר, בתחנות הקרובות לפיצוץ, עם תרומה של כ- 0.9 מגניטודות, ו- 2) תרומה נוספת משמעותית מהאיכון השגוי של כ- 0.7 מגניטודות. חשוב לציין שמאחר שמערכת *תרועה* מתעדפת מהירות על חשבון דיוק, שגיאות באיכון של עד כ- 20 ק"מ נלקחות בחשבון במערכת *תרועה*, ועשויות להוביל להערכות יתר או חסר של המגניטודה, אבל בממדים קטנים יותר. הסיבה לכך שהערכת היתר במקרה זה היא משמעותית, היא המרחק הקרוב בין התחנות למוקד: חשיבות השגיאה מוערכת ביחס שבין מרחק הפתרון מהתחנה למרחק האמיתי מהתחנה – במקרה של משגב-עם, יחס של פי 10 מתורגמת לטעות הגדולה ביותר של 0.97 מגניטודות.

**טבלה 1: מרחקים, תאוצות וחישובי מגניטודה**

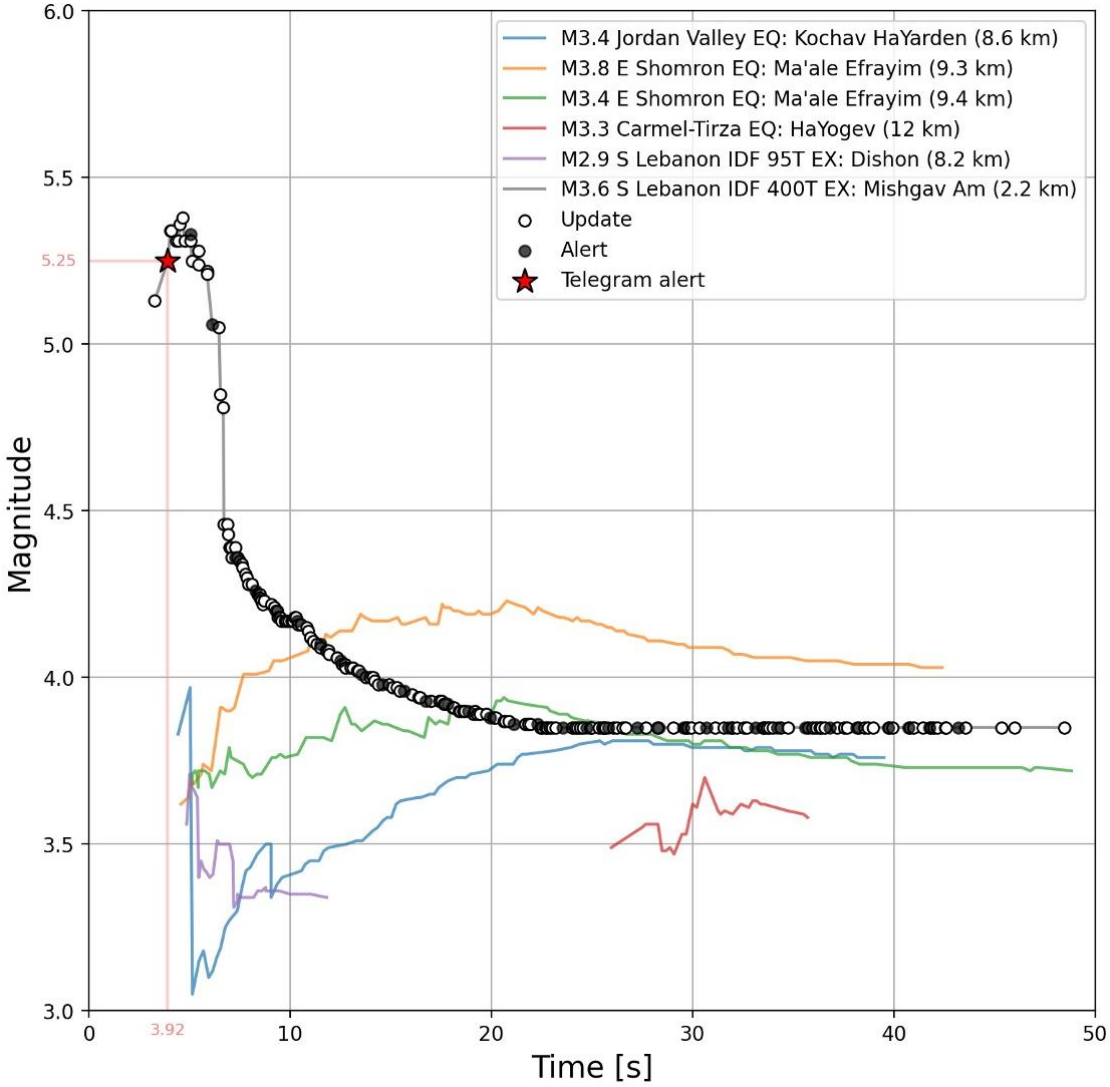
| תחנה | אורך סיגנל לטובת חישוב מגניטודה | מרחק אמיתי מהמקור | מרחק מפתרון "תרועה" | ערך תאוצת קרקע מקסימלית | מגניטודה על-בסיס איכון "תרועה" | מגניטודה על בסיס איכון אמיתי |
|---|---|---|---|---|---|---|
| משגב עם | 2.2 שניות | 2.2 ק"מ | 24.1 ק"מ (פי 10) | 30 gal [30cm/s²] | 5.87 | 4.9 (0.97+) |
| קריית שמונה | 1.5 שניות | 5.6 ק"מ | 26.6 ק"מ (פי 5) | 3.8 gal [3.8cm/s²] | 4.86 | 4.21 (0.65+) |
| מטולה | 1.2 שניות | 6.3 ק"מ | 26.8 ק"מ (פי 4) | 3.8 gal [3.8cm/s²] | 5.17 | 4.25 (0.92+) |
| הגושרים | 0.5 שניות | 9.6 ק"מ | 31.4 ק"מ (פי 3) | 2.4 gal [2.4cm/s²] | 4.66 | 4.16 (0.50+) |




**איור 7:** התפתחות בזמן של ערכי המגניטודות בתחנות הקרובות לפיצוץ, שעל-פיהן חושבה המגניטודה המשוקללת (בסגול מקוטע) של הפיצוץ. ניתן לראות ש- 4 התחנות הראשונות מתחילות במגניטודות מעל 4.5 (סף ההתרעה, אדום מקווקו), ומטפסות עד שמתיישרות לערך גבוה (משגב עם למשל עם יותר מ- 5.8). 6 שניות לתוך האירוע מתחילה ירידה בהערכת המגניטודה בכל התחנות, עד שגם הערך המשוקלל גם יורד מתחת לסף ההתרעה, יחד עם תחנות נוספות רחוקות יותר שנכנסות לשקלול.

### 3.3.1 עדכון המגניטודה עם הזמן

באיור 7 מוצגת ההתפתחות בזמן של ערכי המגניטודות ב- 10 התחנות הראשונות כפי שהתפתחו בזמן. הקו הסגול המקווקו מציין את המגניטודה המשוקללת, וניתן לראות שלאחר כ-6.5 שניות ישנה ירידה משמעותית בהערכת המגניטודה, מתחת לסף ההתרעה (מגניטודה 4.5, אדום מקווקו) כאשר כבר 7 תחנות משוקללות בחישוב. הקו האפור התחתון מציין את המגניטודה הסופית שחושבה, M 3.6 אחרי איכון ידני במערכות האגף לסיסמולוגיה.




**<u>איור 8:</u>** התפתחות בזמן של המגניטודה של הפיצוץ ביחס לאירועים נוספים שהיו במערכת *תרועה*, כולל הפיצוץ של 95 טון שבוע קודם בדרום לבנון. חוסר הוודאות הגבוה בתחילת האירועים הוא ברוב המקרים סביב חצי מגניטודה, ויכול ללכת לשני הכיוונים. הפיצוץ הזה היה חריג במיוחד, כאשר נוצרה הערכת יתר של מגניטודה וחצי בשניות הראשונות. ההתרעה המתגלגלת של מערכת *תרועה* נותנת מענה לכיוון השני - לרעידות אדמה רבות אשר ההערכה הראשונית שלהן היא הערכה בחסר, שיכולה לגדול בעד מגניטודה וחצי, עם התפתחות הרעידה.

באיור 8 אנו מציגים את התפתחות המגניטודה המשוקללת בזמן כפי שתועדה באלגוריתם של *תרועה*, ביחס לרעידות אחרות שהתרחשו מאז מבצוע *תרועה*, כולל ביחס לפיצוץ הנוסף של 95 טון, מה- 18 לאוקטובר 2024. בעוד בשאר האירועים ניתן לראות שגיאה של עד חצי מגניטודה בין המגניטודה הראשונית ב*תרועה* לבין

הערכת המגניטודה הסופית, עבור הפיצוץ החריג השגיאה גדלה באופן משמעותי, עם הערכת יתר של 1.6 יחידות מגניטודה.

## 4. מסקנות עיקריות – מדוע נשלחה התרעה?

הפיצוץ של כ-370 טון חומר נפץ ב- 26 לאוקטובר 2024 היה אירוע חריג בגודלו, השקול לרעידת אדמה עם מגניטודה של כ- 3.6 M. הפיצוץ זוהה על ידי מערכת *תרועה* כרעידת אדמה במגניטודה של כ 5.2 M והתרעה הופצה באופן אוטומטי. השאלות שנבחנו בתחקיר הינן מה הסיבה להערכת הייתר של המגניטודה? האם צריך לערוך שינויים באלגוריתם כדי למנוע הישנות של מקרים דומים? ואם לא לערוך שינויים, מה ראוי לעשות כדי למנוע התרעות שווא בגלל פיצוצים אפשריים בעתיד? לפני שנענה לשאלות אלה ראוי לציין שנכון להיום עדיין אין מערכות אוטומטיות שיודעות להבדיל בזמן אמת בין פיצוצים לרעידות אדמה, לרבות מערכות של התרעה מוקדמת בהן עושים שימוש במדינות אחרות.

הגורמים העיקריים להערכת היתר במגניטודה:

- **<u>משוואת *תרועה* לחישוב המגניטודה מכוילת לרעידות אדמה ולא לפיצוצים</u>** – בעוד שבפיצוצים רוב האנרגיה שמשתחררת היא של גלי לחץ (גלי P, הפאזה הראשונה של הרעידה), ברעידות אדמה רוב האנרגיה שמשתחררת היא של גלי גזירה (גלי S, שהם הפאזה השניה של הרעידה). מערכת *תרועה* מעריכה את המגניטודה של רעידת אדמה על-סמך גלי P, על-מנת להקדים את גלי ה- S שגורמים ליותר נזק ומגיעים בפאזה השניה. כלומר: המערכת מניחה שמדובר ברעידת אדמה, ולכן מעריכה את המגניטודה בהנחה שיגיעו גלי S חזקים יותר משמעותית בהמשך. במקרה של פיצוץ, היא עושה את אותו הדבר בלי "לדעת" שלמעשה גל ה- P המדוד הוא עוצמת הרעידה, ולא יבואו בהמשך גלי S חזקים יותר.
- **<u>תנודות קרקע גבוהות באופן חריג בקרבת הפיצוץ</u>** - 3 תחנות *תרועה* היו "בשדה הקרוב" של הפיצוץ, שם המשוואות בהן משתמשים לא משקפות את כלל שחרור האנרגיה, בעיקר בתדרים הגבוהים. אנרגיה זו נמדדה בתחנות הקרובות ובעיקר בתחנת משגב-עם הנמצאת במרחק של כ-2.2 ק"מ ממקור הפיצוץ. הנחת "השדה הקרוב" נקבעת על-בסיס גודל המקור, במקרה כמו שלנו, בו המקור הוא באורך של כ- 1 ק"מ, השדה הקרוב של האירוע יהיה במרחק של עד פי 5 מהמוקד. מעבר למרחק זה (5 ק"מ) אי הדיוקים הנובעים מקרבת הייתר של החיישן למקור קטנים באופן משמעותי וניתנים להזנחה. הראינו שתנודות הקרקע החריגות תרמו להערכת יתר של כ- 0.9 יחידות מגניטודה, מכלל הערכת היתר.
- **<u>איכון שגוי בשל שימוש במודל מהירות בעל עומק קבוע של 8 ק"מ</u>** – צמצום מספר הנעלמים בפתרון האיכון על ידי הנחת עומק קבוע מאפשרת קבלת פתרון מהיר. העומק של 8 ק״מ מייצג עומק ממוצע של רעידות אדמה, להם מערכת *תרועה* מיועדת. במקרה החריג הנדון כאן, בו הפיצוץ ארע בפני השטח (עומק אפס) ובמרחק של כ-2 ק"מ מהתחנה הקרובה, הזיהוי הראשוני של המרחק שגה בפקטור של פי 10 ונתן מרחק של יותר מ- 20 ק"מ. לשגיאת המרחק הייתה השפעה גם על השגיאה בחישוב הראשוני של המגניטודה, וזו הייתה סיבה נוספת להערכת יתר של המגניטודה שהלכה וקטנה עם הזמן ככל שהאיכון

השתפר. שימוש במודל מהירות מתאים יותר עם עומק של 0 ק״מ, הראה איכון מדויק במסגרת טווח השגיאה הצפוי במערכת עבור רעידות אדמה. הראינו ששגיאת האיכון הוסיפה להערכת היתר כ- 0.7 יחידות מגניטודה.

## 5. המלצות אפשריות לעתיד - האם ניתן למנוע את ההתרעה מפיצוץ גדול?

לפני ששוקלים שינויים אפשריים באלגוריתם של *תרועה*, יש להביא בחשבון קודם לכול את ייעוד המערכת שהינו התרעה מוקדמת בפני רעידות אדמה גדולות. חשוב לזכור שהמערכת מתוכננת בצורה אופטימאלית עבור מטרה זו ולא ראוי לשנות אותה עבור מקרים חריגים בצורה שעלולה לפגוע בתפקודה בזמן אירועי רעידות אדמה חזקות. מסקנתנו היא שלא לשנות דבר באופן החישוב של המיקום וקביעת העוצמה או בפרמטרים שמזינים אותה. אם כן, מה בכל זאת ניתן לעשות?

- **<u>אפשרות 1 – ניתוק וחיבור של המערכת ע"י פיקוד העורף</u>**

אירועים בסדרי גודל כאלה יכולים להיות מתואמים באופן נקודתי בין אגף סיסמולוגיה ופיקוד העורף. בעוד צוותי מוקד ה-7-24 באגף לסיסמולוגיה חייבים לשמור על ניטור והתרעה רציפים של המערכת, פיקוד העורף יכולים לנתק את מערכת ההפצה עליה הם אמונים, למשך מספר שניות לפני ואחרי הפיצוץ. במשך זמן הניתוק נשמור על ערוץ תקשורת (טלפוני) פתוח בין חמ"ל ההתרעה לבין המוקד במכון הגאולוגי, לטובת וידוא סיום הפיצוץ בזמן אמת. במשך זמן זה מערכת *תרועה* תהיה לא מבצעית, אבל אם תיכנס רעידת אדמה גדולה במקביל, תתבצע הפעלה ידנית של מערכת ההתרעה.

**יתרונות:** מאפשר המשך הפעלת מערכת הניטור במכון הגיאולוגי, אינו מאפשר הפצת התרעה בשל הערכת יתר של מגניטודת הפיצוץ, אינו חושף פרטים מבצעיים צבאיים לגוף אזרחי (המכון הגיאולוגי).

**חסרונות:** במקרה של רעידת אדמה חזקה בזמן הניתוק, לא תופץ התרעה באופן אוטומטי והפצה באופן ידני מחייבת תקשורת בין חמ״ל התרעה של פקע״ר לבין תורן 7-24 במכון הגיאולוגי. הפצת התרעה באופן ידני עלולה להיות איטית מידי.

- **<u>אפשרות 2 – ניתוק וחיבור של המערכת ע"י המכון הגאולוגי</u>**

זהה לאפשרות 1, אלא שהניתוק והחיבור מחדש לכיוון פיקוד העורף נעשים במכון הגאולוגי ע"י צוות מערכת *תרועה* של האגף לסיסמולוגיה. אפשרות זו דורשת מידע מוקדם לגבי מועד הפיצוץ.

**יתרונות:** מאפשר המשך הפעלת מערכת הניטור במכון הגיאולוגי, אינו מאפשר הפצת התרעה בשל הערכת יתר של מגניטודת הפיצוץ.

**חסרונות**: מחייב תאום של זמן האירוע בין צה״ל והמכון הגיאולוגי. מחייב בדיקת תקשורת והעברת מסרים לאחר החיבור מחדש. במקרה של רעידת אדמה חזקה בזמן הניתוק, לא תופץ התרעה באופן אוטומטי והפצה באופן ידני מחייבת תקשורת בין חמ״ל התרעה של פקע״ר לבין תורן 7-24 במכון הגיאולוגי. הפצת התרעה באופן ידני עלולה להיות איטית מידי.

- **<u>אפשרות 3 – השהיית עיבוד של תחנות קרובות לפיצוץ ע"י המכון הגאולוגי</u>**

ניתן לקבל מראש את הקואורדינטות של הפיצוץ והזמן המדויק מפיקוד העורף, ולהסיר באופן ממוקד את התחנות הקרובות ביותר לפיצוץ מתהליך העיבוד למשך זמן הפיצוץ. כך מערכת *תרועה* תשמור על מבצעית בכל המרחב מלבד מקטע קטן ומוגבל בקרבת אזור הפיצוץ.

**יתרונות**: מערכת *תרועה* נשארת מבצעית בכל הארץ פרט לאזור הפיצוץ. מאפשר את המשך הפצת ההתרעות מפני רעידות אדמה באופן אוטומטי.

**חסרונות**: חשיפת פרטים מבצעיים על זמן ומיקום הפיצוץ לגוף אזרחי. מצריך הערכות מראש של צוות *תרועה* במכון הגיאולוגי (לא חלק ממערך 7-24). התרעות עבור רעידות אדמה באזור מצומצם הקרוב לפיצוץ (בו הושהו התחנות הקרובות) עשויות להתעכב.

### 5.1 שיקולים עיקריים לבחירה בין שלושת האפשרויות:

בחירת הפתרון המתאים מתבססת על זמינות המידע, מגבלות תאום ומגבלות זמן לביצוע

- בטחון שדה – האם ניתן ו/או כדאי לחשוף בפני המכון הגיאולוגי פרטים מבצעיים ומסווגים?
- אירוע צבאי-בטחוני – האם לא עדיף שהאירוע יתוכלל ע"י הצבא ופקע"ר באופן מוחלט מתחילתו ועד סופו?
- רמת המבצעיות של מערכת *תרועה* - מה עדיף? מבצעיות חלקית זמנית של *תרועה* או איבוד זמני של מבצעיות *תרועה*?
- מורכבות הפתרון והבדיקות הנדרשות בכל שלב
- הזמן הדרוש לתאום והפעלת הפתרון
- זמינות צוותים טכניים ומקצועיים בעיקר במכון הגיאולוגי

על פי החלטת הממשלה, האחריות להפצת ההתרעה נתונה בידי פקע״ר ועל כן כל פתרון יהיה באחריותו המלאה או בשיתוף המכון הגיאולוגי על פי שיקולו.

### 5.2 יישום מסקנות מהתחקיר – אירוע פיצוץ מנהרה ב- 10.11.2024 בשעה 03:47 לפנות בוקר

ב- 09.11.2024 בשעה 22:30 – המכון הגיאולוגי עודכן שבשעה 2:00 בבוקר ה- 10.11.2024 (זמן התארגנות של כ- 3.5 שעות) יתרחש פיצוץ מבוקר של כ- 15 טון כ-1 ק"מ מערבית לגדר הגבול באזור מרגליות; הערכת המגניטודה של פיצוץ 15 טון היא כ- 2.2-2.4.

בהתייעצות עם חמ"ל התרעה של פיקוד העורף, הוחלט לנצל אירוע זה ולהפעיל את כל שלוש הפתרונות במקביל, – חסימת הפצת התרעות על ידי פקע״ר, חסימת תקשורת בין מערכות המכון הגיאולוגי ומערכות פקע״ר וכן השהיה של שלוש תחנות קרובות (במרחק של עד 10 ק"מ מהפיצוץ).

- האפשרות הראשונה בוצעה ע"י חמ"ל התרעה של פיקוד העורף, וכללה חסימה של ההתרעה המתקבלת מהמכון לכיוון מערכות ההפצה (צופרים ואפליקציית פיקוד העורף), כ- 5 דקות לפני הפיצוץ עד מספר דקות לאחריו.
- האפשרות השנייה שכללה חסימת תעבורה בין המכון הגאולוגי לפיקוד העורף נוסתה ונבדקה לפני הפיצוץ, והפרוצדורה לשם עניין זה נרשמה ותועדה. התקשורת חודשה עוד לפני הפיצוץ.
- האפשרות השלישית דרשה התארגנות מפורטת יותר, זמן התארגנות ארוך יותר, וידע מוקדם לא רק לגבי זמן הפיצוץ, כי אם גם מיקום הפיצוץ. כשעתיים לפני מועד הפיצוץ המתוכנן, קיבלנו את המיקום המשוער של הפיצוץ, והפעלנו פרוצדורה ידנית לניטרול שלוש התחנות הקרובות למוקד, ואי הכללתם בחישוב המיקום והמגניטודה של האירוע. הפרוצדורה הידנית ארכה כ- 40 דקות, דרשה ריכוז גבוה, וסדר פעולות ברור על-מנת להקטין את הסבירות לטעויות אנוש. כמספר דקות לאחר הפיצוץ הופעלה שוב הפרוצדורה, הפעם על-מנת לשלב מחדש את התחנות באלגוריתם ההתרעה. גם במקרה זה הפרוצדורה הידנית לשילוב מחדש של התחנות ארכה כ- 40 דקות.

הפיצוץ אירע ב- 10.11.2024 בשעה 03:47 בבוקר.

- חסימת ההפצה לצופרים ולאפליקציה ע"י פקע"ר הופעלה כ- 5 דקות קודם, וחוברה מחדש מספר דקות לאחר הפיצוץ.
- מערכת *תרועה* ללא שלוש התחנות הקרובות נתנה הערכת מגניטודה ראשונית של 2.8 (כחצי מגניטודה מעל המגניטודה הנכונה). במידה ושלוש התחנות הקרובות לא היו מנוטרלות, הערכת היתר הייתה כנראה גבוהה בחצי מגניטודה נוספת (כ- M 3.3). אמנם, זה לא היה עובר את סף ההפעלה של מערכת *תרועה*, אך מוטב לנהוג במשנה זהירות ולא להיות מופתעים שוב מהפעלה מיותרת של ההתרעה.

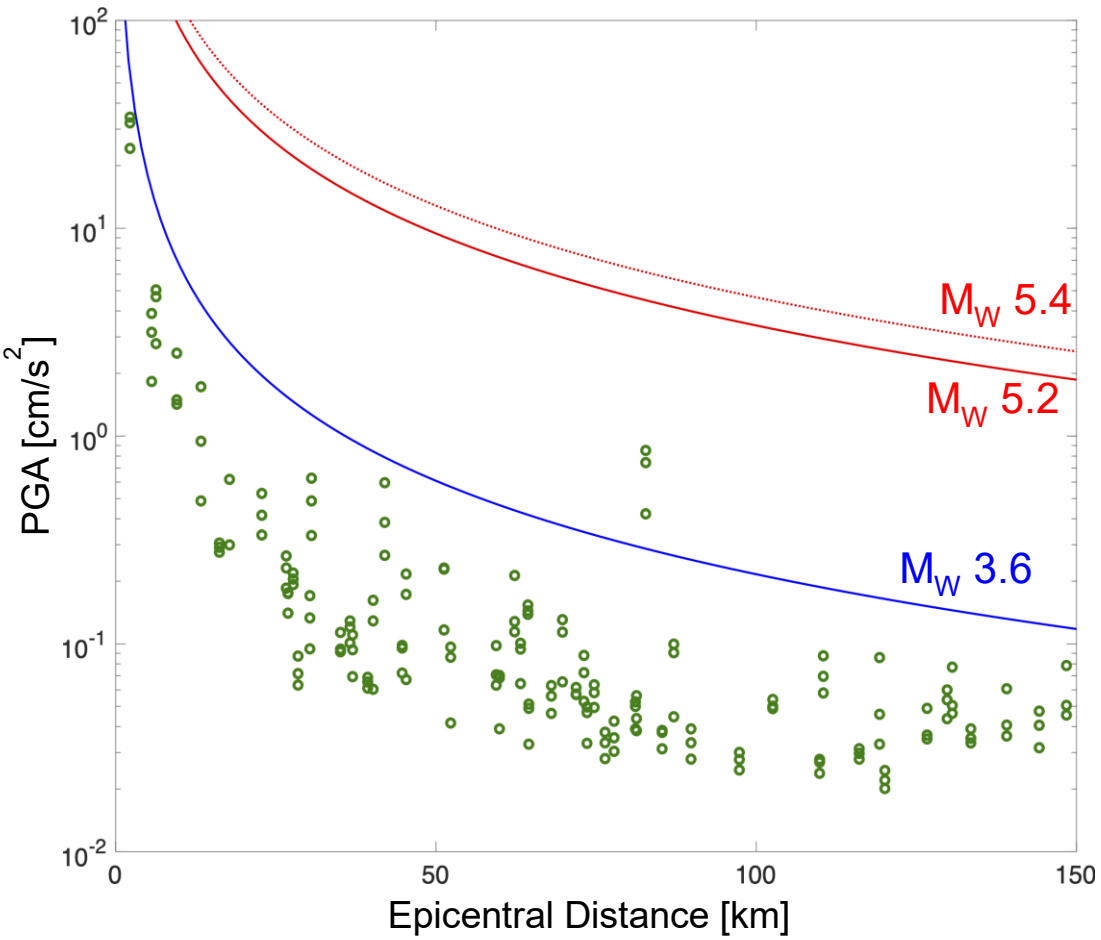
## 6. היבטים נוספים שנבדקו

### 6.1 מרחק ההתרעה

הערכת המגניטודה המקסימאלית של מערכת *תרועה*, במהלך עדכון הנתונים במרכז החישובים, לאחר הפיצוץ, הגיע לערכים של כ-M 5.4. ההתרעה נשלחה למרחק של 96 ק״מ מהמוקד כפי שאוכן על ידי *תרועה* (כ-20 ק״מ מזרחית למיקום הפיצוץ). בחלק זה של התחקיר אנו מציגים את הבדיקה הפנימית שנעשתה באגף לסיסמולוגיה, לגבי המשוואות והמדיניות איתם נקבע מרחק ההתרעה, וכוללת מענה לשאלות הבאות: מהי משוואת הניחות איתה אנו עובדים? לאיזו תאוצה היא מכוונת? והאם היא תואמת את תאוצות הקרקע שנמדדו בתחנות *תרועה* השונות?

משוואת הניחות אותה יישמנו במערכת *תרועה*, על-מנת שתקבע את מרחק ההתרעה ותעדכן אותו באופן מתגלגל, היא משוואה של Lior and Ziv (2018). המשוואה היא משוואת ניחות תיאורטית שאינה מבוססת על רגרסיה סטטיסטית של מדידות קיימות, אשר דרכה הפרמטרים השונים של משוואת הניחות נמדדים. היתרון העיקרי

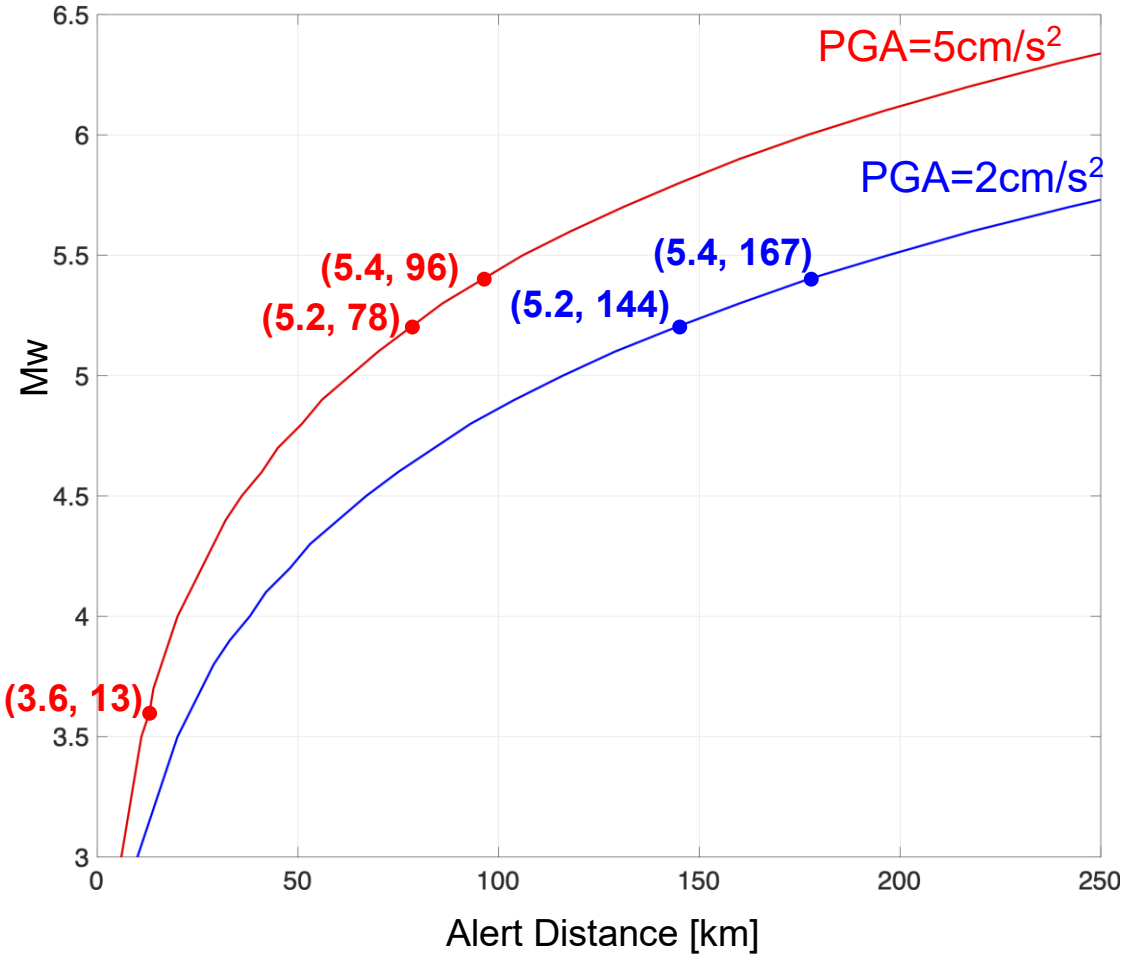
בכך הוא שהמשוואה לא מבוססת על סט נתונים אשר מתוכם נגזרת משוואת הניחות, ובהינתן סט נתונים אחר עלולה להתגלות כלא-רלוונטית, אלא היא בנויה מסט של משוואות ושיקולים פיסיקליים, אשר אינם תלויים בסט הנתונים. המשוואה נבחנה באופן מפורט ב- Nof et al. (2021), והוצגה על-סמך תאוצת סף של 2 גאל (2 ס"מ לשנייה בריבוע), אשר נשקלה להיות מיושמת במערכת *תרועה*. בפועל, ההתרעה מופצת למרחק שבו תאוצת הקרקע צפויה לעבור סף של 5 גאל. סף זה, המורגש על ידי בני-אדם, נקבע על ידי פיקוד העורף ובהמלצת המכון הגיאולוגי עם הפעלת *תרועה* באופן מבצעי.




**<u>איור 9:</u>** משוואות הניחות הפועלות ב*תרועה* לשלוש מגניטודות: 3.6 – המגניטודה של הפיצוץ (כחול רציף), 5.2 – הערכת המגניטודה הראשונית (אדום רציף), 5.4 – הערכת המגניטודה המקסימלית (אדום מקווקו). כמו-כן ניתן לראות את תאוצות הקרקע בתחנות *תרועה* עד מרחק של 150 ק"מ; העקומה של מגניטודה 3.6 מגבילה את רוב תאוצות הקרקע המדידות מלמעלה, כפי שמתבקש. בהתחשב שרוב תחנות *תרועה* מצויות על סלע, משוואת הניחות נותנת מענה גם להגברה הצפויה של קרקעות.

באיור 9 אנו מציגים את ערכי התאוצות המקסימליות (Peak Ground Accelerations, PGA), אשר נמדדו בשלושת הערוצים של מדי התאוצה של תחנות *תרועה*, כפונקציה של מרחק התחנה מהפיצוץ. ערכי התאוצות מסומנים בירוק, והעקומות מציינות את ערכי ה-PGA המצופים לפי 3 מגניטודות: א) המגניטודה של הפיצוץ, M 3.6 בכחול, ב) המגניטודה של ההתרעה הראשונית, M 5.2 באדום רציף, ו- ג) המגניטודה המקסימלית,

M 5.4 באדום מקווקו. ניתן לראות שערכי התאוצות המדודות נתחמות מלמעלה בעקומת המגניטודה של M 3.6, מלבד תחנה אחת אשר מראה ערכי תאוצות גבוהים, כנראה עקב הגברה סיסמית מקומית. כלומר: התאוצות המדודות מראות התאמה טובה עם העוצמה הסיסמית של הפיצוץ, ובאופן משמעותי מתחת לעוצמה הראשונית שחושבה. ניתן לראות שאכן קרוב למקור העקומות מתכנסות, ולכן ערכים גבוהים של תאוצות בקרבת המקור מסתדרים הן עם העוצמה האמיתית של הפיצוץ, והן עם העקומות המציגות את העוצמות שחושבו כתוצאה מהערכת היתר הראשונית של הפיצוץ.




**<u>איור 10:</u>** מרחק ההתרעה לשתי תאוצות שונות עפ"י LZ18: תאוצה של 2 גאל (בכחול), ותאוצה של 5 גאל (באדום). כמו-כן ניתנים ערכי ההתרעה למגניטודות של 5.2 ו- 5.4 לעקומות התאוצה של 2 גאל ו- 5 גאל. מערכת *תרועה* מכוונת על 5 גאל, ואלה הם המרחקים אשר הופעלו בהם התראות. כמו-כן ניתן לראות שבפועל תאוצה של 5 גאל ומעלה הורגשה עד מרחק של לא יותר מ- 13 ק"מ מהפיצוץ.

מתוך עקומות הניחות ניתן לחשב את מרחק ההתרעה עפ"י תאוצת סף שנקבעת. באיור 10 אנו מציגים שתי עקומות המשקפות של הקשר בין המגניטודה למרחק ההתרעה, לשני ספים שונים של תאוצות קרקע: 2 גאל (בכחול), 5 גאל (באדום). שלוש הנקודות על-פני העקומה האדומה של 5 גאל, מציינות את מרחק ההתרעה המתאים למגניטודה בנקודה: ההתרעה הראשונית הייתה על אירוע במגניטודה של כ- M 5.2, הגיעה במקסימום למגניטודה של כמעט M 5.4 ולמרחק התרעה של 96 ק"מ, ולבסוף ירדה והתכנסה לאיטה למגניטודה של M

3.6 ולמרחק התרעה של 13 ק"מ. כמו-כן, ניתן לראות שבמידה והיינו משתמשים בערך הסף של 2 גאל, מרחק ההתרעה היה גדל משמעותית בפקטור של בערך פי 1.5, וגורם להתרעה רחוקה יותר באופן משמעותי (מעל 160 ק"מ מהפיצוץ). לטעמינו השימוש בתאוצת סף של 5 גאל, מספק מרחק התרעה סביר ביותר, בו צפויות תנודות קרקע משמעותיות אשר יורגשו היטב ע"י הציבור, גם אם לא יגרמו לנזקים. התחושה שההתרעה הופצה רחוק מדיי מהמוקד נובעת בחלקה מהערכת היתר החריגה של עוצמת הפיצוץ. במידה ואכן היה מדובר ברעידה בעוצמה של M 5.4, תנודות קרקע היו מורגשות היטב במרחק של כ- 90 ק"מ הרעידה, ולטעמינו, האמינות של המערכת הייתה מתחזקת בעיני הציבור.

### 6.2 מענה אנושי והוצאת ההבהרה המקצועית של המכון הגיאולוגי

אחת מהבעיות שעלו תוך כדי ומייד לאחר האירוע, הייתה הזמן הרב שלקח למכון הגיאולוגי להוציא הודעת הבהרה לציבור, למרות שהבדיקות והאישוש שמדובר בפיצוץ מבוקר של מנהרה הסתיימו כ- 5 דקות לאחר האירוע. ההודעה עצמה יצאה 36 דקות לאחר האירוע בגלל דיונים לגבי הניסוח. בעוד לתרחישים צפויים ישנם נוסחים קבועים, תרחיש זה לא היה בסל התרחישים והנוסחים הקבועים מראש של מערך ה- 7-24. בעקבות התחקיר הפנימי עלו מספר המלצות לשיפור:

- יש להוסיף נוסח הודעה לתרחיש המתאים למקרים של הפעלת *תרועה* ללא צורך (כתוצאה מרעידת אדמה חלשה, רחוקה, או מכל סיבה אחרת).
- יש להוסיף הודעה כללית למענה מהיר במקרים בהם עלולה להתעכב ההודעה מסיבה לא צפויה.
- יש לשפר את זמינות ההודעות והעברתם לקבוצת הווטסאפ של הכוננים הבכירים בצוות ה- 7-24.
- יש לחדד את הצורך בשחרור הודעות מהיר מול דוברות משרד האנרגיה, גם לעיתים על חשבון הניסוח.

בנוסף, התגובות שקיבלנו הן מדוברות משרד האנרגיה והן מפקע"ר בנוגע לפרסום בפייסבוק של המכון היו חיוביות וההסבר שניתן צוטט כמעט במלואו בגופי תקשורת רבים.

**נוסח ההודעה כפי שפורסמה במדיה החברתית:**

***התרעת רעידת אדמה ראשונה בישראל של מערכת תרועה – מה באמת קרה?***

*הבוקר( 26 באוקטובר 2024) בשעה 7:00, רבים בצפון הארץ קיבלו התרעה על רעידת אדמה. זו הייתה הפעם הראשונה שמערכת תרועה להתרעות מפני רעידות אדמה, שפועלת בישראל כבר כמעט שלוש שנים, שלחה התרעה לציבור.*

***אז מה באמת קרה?***

*ההתרעה נשלחה בשל פיצוץ מבוקר שביצע הצבא בגבול הצפון . הפיצוץ, שהיה חריג בעוצמתו, נקלט בסנסורים של המכון הגיאולוגי מדן ועד אילת. מערכת תרועה זיהתה את האירוע כרעידת אדמה והתריעה בהתאם. גם מערכות בינלאומיות אחרות כמו המרכז האירופי לרעידות אדמה Euro-Med Seismological Centre (EMSC) ומערכת ההתרעות של אנדרואיד (גוגל) שלחו התרעות.*

*לא נעים להתעורר בשבת בבוקר להתרעות, במיוחד בזמן מלחמה. אבל זו תזכורת חשובה שרעידות אדמה יכולות להתרחש בכל רגע, ללא קשר למצב על פני הקרקע. זו הזדמנות מצוינת להתרענן בהנחיות פיקוד העורף למקרה של רעידות אדמה.*

***איך עובדת מערכת תרועה?*** 🧐

*המערכת מבוססת על רשת סנסורים (חיישנים סייסמיים) הפרוסה ברחבי הארץ, המנטרת תזוזות קרקע ומזהה אירועים כמו רעידות אדמה, פיצוצים ופעילות אנושית. המערכת פועלת באופן אוטומטי ומהיר, ומיד עם זיהוי האירוע נשלחת התרעה לציבור באמצעות מערכות ההפצה של פיקוד העורף. הפיצוץ היום היה חריג בעוצמתו ונקלט כסימן של רעידת אדמה משמעותית.*

***שתפו אותנו!***

*זו הפעם הראשונה שמערכת תרועה שולחת התרעה לציבור. חשוב לנו לדעת האם קיבלתם את ההתרעה? מה עשיתם כשקיבלתם אותה? האם פעלתם לפי ההנחיות? האם זיהיתם שזו התרעה שונה מהתרעות טילים? ספרו לנו בתגובות או כתבו בפרטי!* 👇

## סיכום

מערכת *תרועה* מותאמת למתן התרעות מהירות עבור רעידות אדמה גדולות, על בסיס הידע המקצועי הקיים ותוך בקרה מול רעידות אדמה בעבר ובהווה. המערכת נמצאת תחת בקרה בצורה רציפה כחמש שנים ופעילה בצורה מבצעית כשלוש שנים. בשבת בבוקר, ה-26 לנובמבר 2024, התרחש פיצוץ של 370 טון חומר נפץ, במנהרת פיקוד ושליטה של ארגון הטרור חיזבאללה בדרום לבנון, סמוך לגבול עם מדינת ישראל. הפיצוץ היה בעוצמה שוות ערך לרעידת-אדמה במגניטודה של כ- 3.6 M. לאחר כארבע שניות, מערכת *תרועה* זיהתה אותו כרעידה במגניטודה של 5.2 M, והתייצבה לפתרון מדויק יותר כ- 7 שניות לאחר הפיצוץ. מאחר שהמגניטודה נקבעה מעל סף ההתרעה של 4.5 M הופעלה מערכת *תרועה* ומערכת ההפצה של פיקוד העורף הפעילה התרעה במרחק של עד 96 ק"מ מהמוקד, בהתאם למגניטודה מקסימלית של 5.4 M.

כפי שהוצג בתחקיר, מערכת *תרועה* הופעלה לראשונה מאז הפיכתה למבצעית ופעלה בדיוק כפי שתוכננה. במהלך שלוש השנים בהם מערכת *תרועה* פועלת באופן מבצעי, אירועים קודמים, הן רעידות אדמה והן פיצוצים לא עברו את סף המגניטודה להתרעה (4.5 M). ממצאי התחקיר קובעים כי המערכת לא מותאמת לאירועי פיצוץ חזקים בשל הנחות היסוד בבסיס האלגוריתם שלה, שנועדו לתת התרעה מוקדמת מהר ככל האפשר. התחקיר נותן מענה מפורט, וכולל ניתוח כמותי של הגורמים אשר הובילו להערכת יתר של 1.6 יחידות מגניטודה, ולהפעלה של ההתרעה בצפון ישראל. הגורמים המרכזיים להערכת היתר כוללים תאוצות קרקע חזקות במיוחד בקרבת החיישנים, איכון שגוי הנובע מהערכת עומק קבוע של 8 ק"מ, וחוסר ההתאמה של האלגוריתם לקביעת עוצמה של פיצוצים. בנוסף, התחקיר מספק את הפתרונות הנדרשים למניעת הפצת התרעה בתרחיש פוטנציאלי כזה בעתיד, הן בחמ"ל התרעה של פיקוד העורף, והן בצוות *תרועה* של המכון הגיאולוגי. בהינתן מידע מדויק יותר של מיקום וזמן הפיצוץ עתידי, צוות תרועה באגף סיסמולוגיה במכון הגיאולוגי פיתח פרוטוקול מסודר לנטרול החיישנים מהמקטע הקרוב לפיצוץ, באלגוריתם ההתרעה, ללא כיבוי ההפצה של כלל המערכת.

כמו-כן, התחקיר בדק ואישש את הקריטריונים על-פיהם נקבע מרחק ההתרעה, ומצא שמרחק ההתרעה סביר גם ביחס למה שמוכר בעולם. בנוסף, התחקיר מעלה המלצות אופרטיביות לטובת שיפור משך הזמן עד להוצאת הודעת הבהרה לציבור מטעם המכון הגיאולוגי.

אירוע חריג זה הוא הפעם הראשונה בה הופצה התרעה מפני רעידות אדמה לציבור. אירועים חריגים מצריכים בחינה מעמיקה של תפקוד המערכת, אך חשוב להימנע מהטיה והתאמת יתר של המערכת להתמודדות עם אירועים חריגים על חשבון יכולת התמודדות עם רעידות אדמה חזקות, הנדירות באזורנו. תהליך הבקרה והבדיקה העלה כי המערכת פעלה כפי שמצופה. זמני הזיהוי תואמים את המצופה, העברת הנתונים מתחנות הקצה למרכז החישובים, עיבוד הנתונים והעברת התרעה לפקע"ר פעלו כפי שתוכנן וזו הפעם הראשונה שניתן לבחון את כל התהליך מקצה לקצה – מהתרחשות אירוע סיסמי ועד לקבלת ההתרעה בציבור.

## רשימת ספרות


Kurzon, I., R. N. Nof, M. Laporte, H. Lutzky, A. Polozov, D. Zakosky, H. Shulman, A. Goldenberg, B. Tatham, and Y. Hamiel (2020). The "TRUAA" Seismic Network: Upgrading the Israel Seismic Network—Toward National Earthquake Early Warning System. *Seismol. Res. Lett.,* 91 (6): 3236–3255, doi: 10.1785/0220200169.

Lior, I., and Ziv, A. (2018). The Relation between Ground Motion, Earthquake Source Parameters, and Attenuation: Implications for Source Parameter Inversion and Ground Motion Prediction Equations. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 123, 5886–5901. doi:10.1029/2018JB015504.

Nof, R. N., and Allen, R. M. (2016). Implementing the ElarmS Earthquake Early Warning Algorithm on the Israeli Seismic Network. *Bull. Seismological Soc. America* 106, 2332 2344. doi:10.1785/0120160010

Nof, R. N. and Kurzon, I. (2021). TRUAA – Earthquake Early Warning System for Israel. Implementation and Current Status. *Seismol. Res. Lett,* 92 (1): 325–341, doi: 10.1785/0220200176.

Nof, R. N. Lior, I. and Kurzon, I. (2021). Earthquake Early Warning System in Israel - Towards an Operational Stage. *Frontiers in Earth Science,* 9, 452.

Sadeh, M., A. Ziv, and H. Wust-Bloch (2014). Real-time magnitude proxies for earthquake early warning in Israel, *Geophys. J. Int.* 196 (2), 939– 950, doi: 10.1093/gji/ggt407.

Worden, C. B., M. C. Gerstenberger, D. A. Rhoades, and D. J. Wald (2012). Probabilistic relationships between ground-motion parameters and modified Mercalli intensity in California, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 102 (1), 204–221, doi: 10.1785/0120110156.

נבון, ה., פולוזוב, א., נוף, ר., וצלר, נ., אבירב, ו. וקורזון, א. (2024). מערך חירום - 24/07 אגף סיסמולוגיה, המכון הגיאולוגי לישראל. דו"ח טכני *TR-GSI/04/2024*, 22 עמ'. המכון הגיאולוגי לישראל, ירושלים.

נוף, ר., קורזון, א., (2020). תרועה – מערכת התרעה קצרת מועד בפני רעידות אדמה בישראל. *דו"ח GSI/07/2020*, 40 עמ'. המכון הגיאולוגי לישראל, ירושלים.

## Abstract

On Saturday morning, October 26, 2024, a 370-ton explosion was detonated in a command and control tunnel of the Hezbollah terrorist organization in southern Lebanon, near the border with the State of Israel. As a result, the *Truaa* system was activated for the first time since becoming operational. In the days following the event, the Geological Institute of Israel conducted an investigation to understand why an explosion equivalent to a magnitude of 3.6 triggered an alert system designed for earthquakes with magnitudes greater than 4.5. Additional aspects related to the alert distance and the performance of the Network Operation Center (NOC) of the Geological Survey were also examined.

It was found that the *Truaa* system operated exactly as designed, and the overestimation of the magnitude resulted from an unusual combination of the explosion's intensity, proximity to sensors, and the fact that the algorithm was designed and programmed for earthquakes rather than explosions. It is important to understand that, in most cases, earthquakes do not occur at the surface but at depths of thousands of meters, and the wave characteristics of earthquakes differ from those of explosions.

Once this was clarified, it was decided not to make any changes to the *Truaa* algorithm, as the system was designed for earthquakes and not for exceptional explosions of hundreds of tons of explosives. Nevertheless, various solutions were examined to reduce or prevent similar occurrences in the future through actions by both the Home Front Command and the Geological Survey in cases of prior knowledge of similar explosions. These solutions were implemented and tested under real conditions in two additional controlled explosions and have already become part of the agreed procedure between the Geological Survey 24-7 NOC and the Home Front Command's NOC.

It was also found that the 24-7 NOC of the Geological Survey functioned precisely according to the operational procedures established for it and provided accurate responses to the Home Front Command within 5 minutes. In addition, conclusions were drawn to improve the Geological Survey’s response to the media, although such announcements are not part of its operational duties, and their dissemination is done in consultation with the Ministry of Energy's spokesperson. We emphasize that a *“back to normal”* announcement to the public is a directive that should only be issued by the security and rescue authorities and will never be included in announcements from the Geological Survey of Israel.