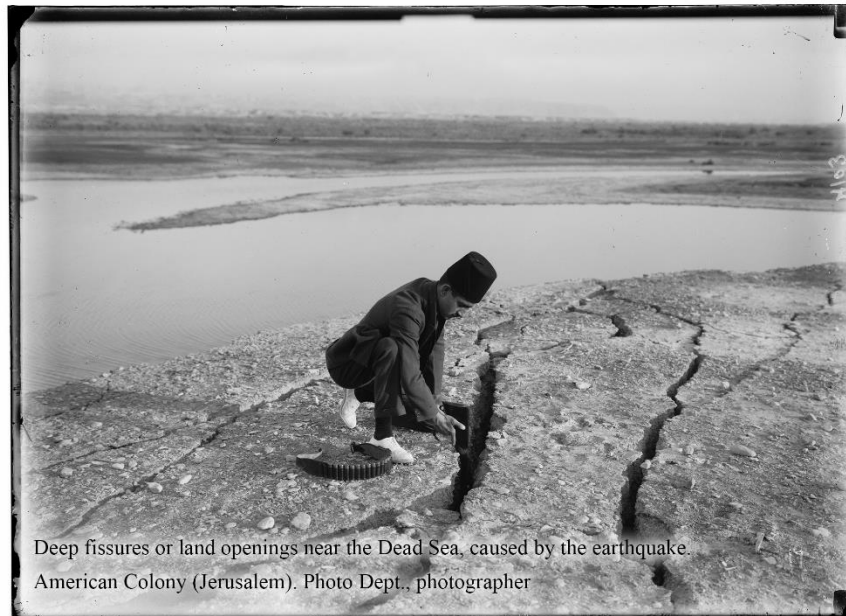


כיוול עקומת נוחות לישראל לפי מדידת דיספרסיה של גלי שטח באתרים שניזוקו ברעידת האדמה של שנת 1927



Deep fissures or land openings near the Dead Sea, caused by the earthquake.
American Colony (Jerusalem). Photo Dept., photographer

עבודת גמר לתואר מוסמך במדעי הטבע
מוגשת על ידי:
יניב דרבסי

בהדרכת:
פרופ' אמוץ עגנון

אוקטובר 2016
תשרי התשע"ז

החוג לגיאולוגיה
המגמה למדעי כדור הארץ
הפקולטה למדעי הטבע
האוניברסיטה העברית בירושלים

תקציר

ביולי 1927 רעידת אדמה במגניטודה 6.25 בסולם ריכטר זיעזעה את ישראל. מוקד הרעידה בצפון ים המלח גבה מעל ל-500 הרוגים ונזק רב נגרם לרכוש, אפילו במרחק מעל 150 קילומטר ממוקד הרעידה. הליתולוגיה המקומית, דרך השפעתה על מהירות גלי הגזירה, יכולה להגביר (amplify) או להנחית (de-amplify) את הגלים באתר. כאשר מהירות גלי הגזירה בעשרות המטרים העליונים של תת הקרקע נמוכה (מתחת ל-600 מטר לשניה) העוצמה הסייסמית המקומית באזורים רחוקים ממוקד הרעידה יכולה להיות מעל המצופה לפי המגניטודה של המקור והמרחק ממנו.

במחקר זה השתמשתי בשיטת Multi Analysis of Surface Waves (MASW) להערכת ממוצע מהירות גלי הגזירה בעומק 30 המטרים הראשונים (Vs30) ב-20 אתרים בישראל. יחד עם ניתוח תוצאות המכון הגיאופיזי שהתבססו על שיטות אחרות (רפרקציה ו-Downhole) חילצתי Vs30 עבור חמישה אתרים נוספים ויצרתי משוואת ניחות חדשה המבוססת על משוואתם של האף ואבני (Hough and Avni, 2011) ומכילה את תוספת האיבר המושפע מ-Vs30:

$$MMI = -0.64 + 1.7M - 0.00448d - 1.67 \cdot \log(d) - 1.82 \cdot \ln\left(\frac{Vs30}{600}\right)$$

מהנתונים שנאספו למחקר זה, 72% מהאתרים עבורם חילצתי Vs30 מתאימים למשוואה (עם גבול ניבוי 60%). בכדי לתקף משוואה זו, מומלץ למדוד באתרים נוספים ולבדוק אם תוצאותיהם מתאימות למשוואה.

המחקר לוקח בחשבון רק את הליתולוגיה המקומית ובכך מזניח אספקטים אחרים: כיוון רעידת האדמה, איכות הבנייה, טופוגרפיה וכדומה. למרות זאת, המידע שהתקבל מהווה בסיס לעבודות המשך ורצוי לגלם את התוצאות במפות הסיכון הסייסמיות.

תודות

ראשית דבר תודה גדולה על ההזדמנות שנתנה לי על ידי פרופסור אמוץ עגנון לעבוד עם המערכת הסייסמית ולחקור את נושא ההגברות בישראל. דרך הידע והניסיון הרב יחד עם הקשרים עם האנשים הנכונים והשפה הנשמרת בקינאה, הדריך אותי והתווה לי את הדרך בשנתיים האחרונות.

לג'ון הול על תמיכתו במרכז ניב ובסטודנטים הפעילים בו. על עזרתו, תרומתו וגישתו יוצאת הדופן המעוררת בכך את הרצון לחקור את הדברים המעניינים.

לדר' נטע וכסלר, מתן שוסטק, עדי יורמן ופבל סינצין מאוניברסיטת תל אביב ומר עמית רונן מחברת גאוטק בע"מ על הקדשת זמנם בלימוד הבסיס הסייסמי ועזרתם בתפעול המערכת הסייסמית.

לדר' רון אבני מאוניברסיטת בו גוריון על עבודתו המקיפה ועל הסכמתו לשיתוף הנתונים.

למשה פוליטי ודר' בני מדבדב מהאוניברסיטה העברית על העזרה במהלך המחקר ועל הרעיונות שהובילו להתפתחות המחקר.

לחברי הועדה: פרופסור משה רשף ודוקטור רון שער, על העזרה והביקורת במהלך המחקר.

לפרופסור מיכאל וובר, דוקטור כריסטאן הברלנד, מנפרד שטילר ושאר מחלקת Geophysical Deep Sounding ב-GFZ על האירוח והכרת התכנה ProMax.

תודה רבה לחבריי שעזרו במדידות המרובות והיו חלק חשוב בעיצוב העבודה:

אלי רם, אסנת ברנע, אביתר כהן, עידו סירוטה, יוסי סרי לוי, יבגני קרייסרמן, אינגה בוג'ינגו, נדב נבון, יונתן קינן, ארז אהסול, ומשה (קוקו) ארמון.

ואחרונים כראשונים, תודה למשפחתי היקרה:

ממי, פפי ניר ואור שתמיד עזרו, ייעצו, העירו ותמכו.

תוכן עניינים

4.....	מילון מונחים	1
5.....	רקע	2
5.....	תגובת אתר	2.1
6.....	חיזוי תנודות קרקע	2.2
7.....	מהירות ממוצעת – Vs30	2.3
9.....	מפת סיכונים סייסמים – מפות תאוצה	2.4
10.....	יריחו 1927	2.5
13.....	אתרים למדידות תגובת אתר	2.6
16.....	מטרות המחקר	3
17.....	שיטות	4
17.....	MASW – Multi Analysis of Surface Waves	4.1
17.....	השיטה	4.1.1
20.....	אופן העבודה	4.1.2
23.....	עיבוד נתונים מסקרים קודמים של המכון הגיאופיזי	4.2
23.....	שיטת הריבועים הפחותים (Least Squares Fitting)	4.3
23.....	ציוד	4.4
23.....	חומרה	4.5
24.....	תוצאות	5
24.....	עיבוד הנתונים	5.1
26.....	מציאת המקדם – C ₄	5.2
27.....	עיבוד תוצאות סקרי המכון הגיאופיזי	5.3
28.....	דיון	6
28.....	איסוף נתונים	6.1
30.....	מודל מהירויות	6.2
30.....	יחס פואסון וצפיפות	6.2.1
31.....	מספר שכבות	6.2.2
31.....	עובי שכבות	6.2.3
32.....	עומק המדידה	6.2.4
32.....	סקרי המכון הגיאופיזי	6.3
36.....	סקרים שלא נפלו בקנה אחד עם התצפיות	6.4
37.....	השוואה עם רפרקצית גלי P	6.5
40.....	סיכום ומסקנות	7
43.....	ביבליוגרפיה	8
46.....	נספחים	9
46.....	איתור אתרים למדידת תגובת אתר	9.1
47.....	תוצאות המדידות	9.2
96.....	נתונים מעבודותו של רון אבני (Hough and Avni, 2011)	9.3
98.....	נתונים של זוהר ומרקו (Zohar and Marco, 2012)	9.4
101.....	נתוני המכון הגיאופיזי (Aksinenko and Hofstetter, 2012)	9.5
104.....	משוואת ניהות של אבני עבור ליתולגיה אחידה (אבני, 1999)	9.6
105.....	קוד מאטלאב לשיטת הריבועים הפחותים	9.7

רשימת איורים

- איור 1.1 - סולם MSK (Medvedev et al., 1965).....4
- איור 1.2 - סולם מרקאלי (www.earthquake.usgs.gov).....4
- איור 2.1 - שרטוט המתאר את הגברת הגלים.....6
- איור 2.2 - דוגמא לעקומת ניחות ממערב צפון אמריקה (Boore et al, 1997).....6
- איור 2.3 - קטלוג מהירויות סייסמיות על פי NEHRP.....8
- איור 2.4 - מפת סיכון סייסמי לישראל עם סיכוי חזרה אחת ל-475 שנים (המכון הגיאופיזי).....9
- איור 2.5 - דיווחי רעידת האדמה בעיתונות.....10
- איור 2.6 - מפת מוקדים אפשריים.....11
- איור 2.7 - נזקי רעידת האדמה בארמון החורף ביריחו.....12
- איור 2.8 - עקומות ניחות עבור רעידת האדמה של 1927 (Hough and Avni, 2011).....13
- איור 2.9 - פיזור העוצמה הסייסמית כפונקציה של המרחק (אבני, 1999).....13
- איור 2.10 - פיזור העוצמה הסייסמית כפונקציה של המרחק ממוקדם של זוהר ומרקו (2012).....14
- איור 4.1 - הגלים הסייסמים העיקריים (modified from Pearson Prentice Hall, Inc. 2005).....17
- איור 4.2 - תנועת גל ריילי (Lowrie, 2007).....17
- איור 4.3 - חדירות הגל כפונקציה של התדר (Foti et al., 2014).....18
- איור 4.4 - הפעולות להפקת פרופיל Vs (Foti et al., 2014).....19
- איור 4.5 - משמאל פרישת גאופונים, מימין הפעלת מקור אנכי - פטיש.....20
- איור 4.6 - גרף נפיצות לדוגמא (Radexpro).....21
- איור 4.7 - ניקוי רעשים.....21
- איור 4.8 - מודל Vs30 תחילי.....22
- איור 4.9 - פרופיל מהירויות סופי.....22
- איור 5.1 - עיבוד הסקרים הסייסמים.....24
- איור 5.2 - 20 האתרים שהניבו תוצאות.....26
- איור 5.3 - מפת סקרי המכון הגיאופיזי.....27
- איור 6.1 - מיקום האתרים על פי האף ואבני (2011) וזוהר ומרקו (2012).....29
- איור 6.2 - השפעת יחס פואסון והצפיפות על Vs30, בנתוני לוד.....30
- איור 6.3 - השפעת מספר השכבות על Vs.....31
- איור 6.4 - השוואת תוצאות המכון הגיאופיזי עם סקרים סמוכים שלי.....33
- איור 6.5 - 25 התוצאות מאתרים שסקרתי ומVs30 שחילצתי מסקרי המכון הגיאופיזי.....36
- איור 6.6 - Picking בעקומת זמן מרחק מאתר ג'סר מאג'מי.....37
- איור 6.7 - Picking בעקומת זמן מרחק מאתר באר שבע.....38
- איור 6.8 - השוואה בין תוצאות שיטת הרפרקציה לבין שיטת MASW.....38
- איור 6.9 - דוגמא למודל עם היפוך מהירויות.....39
- איור 6.10 - דוגמא למודל עם שכבה דקה בעומק.....39
- איור 9.1 - מפת עכו.....48
- איור 9.2 - תוצאות עכו.....49
- איור 9.3 - מפת אשקלון.....50
- איור 9.4 - תוצאות אשקלון.....51
- איור 9.5 - מפת באר שבע.....52
- איור 9.6 - תוצאות באר שבע.....53
- איור 9.7 - מפת בית אלפא.....54
- איור 9.8 - תוצאות בית אלפא.....55
- איור 9.9 - מפת בית הכרם.....56
- איור 9.10 - תוצאות בית הכרם.....57
- איור 9.11 - מפת בנימינה.....58
- איור 9.12 - תוצאות בנימינה.....59
- איור 9.13 - מפת גבעתיים.....60

61	איור 9.14 - תוצאות גבעתיים
62	איור 9.15 - מפת הר טוב
63	איור 9.16 - תוצאות הר טוב
64	איור 9.17 - מפת הרצליה
65	איור 9.18 - תוצאות הרצליה
66	איור 9.19 - מפת ג'סר מאג'מי
67	איור 9.20 - תוצאות ג'סר מאג'מי
68	איור 9.21 - מפת לוד
69	איור 9.22 - תוצאות לוד 1
70	איור 9.23 - תוצאות לוד 2
71	איור 9.24 - מפת מוצא
72	איור 9.25 - תוצאות מוצא 1
73	איור 9.26 - תוצאות מוצא 2
74	איור 9.27 - מפת הר הצופים
75	איור 9.28 - תוצאות הר הצופים 1
76	איור 9.29 - תוצאות הר הצופים 2
77	איור 9.30 - מפת נהלל
78	איור 9.31 - תוצאות נהלל
79	איור 9.32 - מפת נהריה
80	איור 9.33 - תוצאות נהריה
81	איור 9.34 - מפת פקעין
82	איור 9.35 - תוצאות פקעין
83	איור 9.36 - מפת רמת רחל
84	איור 9.37 - תוצאות רמת רחל
85	איור 9.38 - מפת רמלה
86	איור 9.39 - תוצאות רמלה 1
87	איור 9.40 - תוצאות רמלה 2
88	איור 9.41 - מפת צמח
89	איור 9.42 - תוצאות צמח 1
90	איור 9.43 - תוצאות צמח 2
91	איור 9.44 - מפת צרעה
92	איור 9.45 - תוצאות צרעה
93	איור 9.46 - מפת יבנה
94	איור 9.47 - תוצאות יבנה 1
95	איור 9.48 - תוצאות יבנה 2

רשימת טבלאות

25	טבלה 1 - תוצאות Vs30 מהסקרים
32	טבלה 2 - Vs30 על פי עבודות המכון הגיאופיזי (Aksinenko and Hofstetter, 2012)
33	טבלה 3 - שונות Vs30 בסקרי המכון הגיאופיזי במרחקים עד 550 מטרים
35	טבלה 4 - תיקון Vs30 באתרים השונים

נספחים

46	נספח 1 - אתרים למדידה על פי ארבעת המוקדים האפשריים
98	נספח 2 - נתוניו של אבני (Hough and Avni, 2011)
100	נספח 3 - נתונייהם של זוהר ומרקו (Zohar and Marco, 2012)
104	נספח 4 - חישוב Vs30 על פי עבודות המכון הגיאולוגי
104	נספח 5 - עקומת ניחות סטנדרטית בליטולוגיה הומוגנית
106	נספח 6 - קוד מטלאב לשיטת הריבועים הפחותים

1 מילון מונחים

עוצמה סייסמית מקומית – עוצמת הנזק שתוארה במקום ספציפי באחת מהסולמות מטה.

מגניטודה – עוצמת רעידת האדמה (בעבודה זו המגניטודה על פי סולם ריכטר).

MSK – Medvedev – Sponheuer – Karnik Intensity scale (איור 1.1)

- I. Only recorded by seismographs.
- II. Only felt by individual people at rest.
- III. Only felt by a few people.
- IV. Felt by many people. Dishes and doors rattle.
- V. Hanging objects swing, many sleeping people awake.
- VI. Slight damages in buildings and small cracks in plaster.
- VII. Cracks in plaster, gaps in walls and chimneys.
- VIII. Wide gaps in masonry, parts of gables and cornices fall down.
- IX. In some buildings walls and roofs collapse, landslips.
- X. Collapses of many buildings, cracks in ground up to widths of 1 m.
- XI. Many cracks in ground, landslips and falls of rocks.
- XII. Strong changes in the surface of the ground.

איור 1.1 - סולם MSK (Medvedev et al., 1965).

MMI – Modified Mercalli Intensity scale (איור 1.2)

Intensity	Shaking	Description/Damage
III	Weak	Felt quite noticeably by persons indoors, especially on upper floors of buildings. Many people do not recognize it as an earthquake. Standing motor cars may rock slightly. Vibrations similar to the passing of a truck. Duration estimated.
IV	Light	Felt indoors by many, outdoors by few during the day. At night, some awakened. Dishes, windows, doors disturbed; walls make cracking sound. Sensation like heavy truck striking building. Standing motor cars rocked noticeably.
V	Moderate	Felt by nearly everyone; many awakened. Some dishes, windows broken. Unstable objects overturned. Pendulum clocks may stop.
VI	Strong	Felt by all, many frightened. Some heavy furniture moved; a few instances of fallen plaster. Damage slight.
VII	Very strong	Damage negligible in buildings of good design and construction; slight to moderate in well-built ordinary structures; considerable damage in poorly built or badly designed structures; some chimneys broken.
VIII	Severe	Damage slight in specially designed structures; considerable damage in ordinary substantial buildings with partial collapse. Damage great in poorly built structures. Fall of chimneys, factory stacks, columns, monuments, walls. Heavy furniture overturned.
IX	Violent	Damage considerable in specially designed structures; well-designed frame structures thrown out of plumb. Damage great in substantial buildings, with partial collapse. Buildings shifted off foundations.
X	Extreme	Some well-built wooden structures destroyed; most masonry and frame structures destroyed with foundations. Rails bent.

איור 1.2 - סולם מרקאלי (www.earthquake.usgs.gov).

2 רקע

2.1 תגובת אתר

בעת רעידת אדמה בוקעים גלים סייסמים הנעים במהירות גבוהה במעטפת ובקרום כדור הארץ. גלים אלו מרעידים את הסלעים הנחשפים בפני השטח ואת הקרקעות והסדימנטים שהצטברו עליהם. עוצמת (Amplitude) הגלים בפני השטח מושפעת מתכונות החומר שבין סלע התשתית לפני השטח. תווך זה נקרא לעיתים "עמודת הקרקע" (Soil column). בתווך זה הגלים נעים במהירות נמוכה יותר ביחס לסלעי התשתית, ועוצמתם גדולה יותר ויכולה להסב נזק גדול מהמצופה. לכן, לליתולוגיה חשיבות מכרעת להערכה של השפעת הגלים באתר. תופעה זו של הגברת תנודות הקרקע כתוצאה מתשתית סלעית רכה מוכרת עוד מהמאה הקודמת (Milne, 1898).

התופעה האחראית להגברת התנועה בפני השטח היא לכידת גלים סייסיים (reverberations) בשכבות הקרקע העליונות כתוצאה מהבדלי עכבה (Impedance) בין שכבת קרקע רכה לבין סלע קשה תחתיה. העכבה היא מידת ההתנגדות למעבר גל גזירה סייסי, או, התנגדות חלקיק לתנועה ומוגדרת עבור קרן נורמלית:

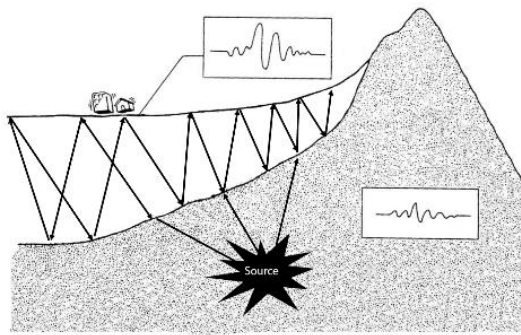
$$I = \rho V \quad (1)$$

כאשר ρ צפיפות ו- V מהירות הגל.

ככל שהעכבה קרובה בין תווך אחד לסמוך, יותר אנרגיה סייסמית עוברת ביניהם. לכן, בסלע הומוגני, בו העכבה זהה, האנרגיה חודרת את כל התווך ולא מתקבלות החזרות. כאשר הבדלי העכבה גבוהים ישנו מחסום אנרגטי הגורם לחלק מהאנרגיה לחזור (רפלקציה - Reflection). זאת על פי מקדמי הרפלקציה והמעבר לאמפליטודה, בהתאמה (משוואות 2 ו-3 עבור המקרה הפשוט בו זווית הפגיעה נורמלית):

$$R_c = \frac{A_r}{A_i} = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1}, \quad T_c = \frac{A_t}{A_i} = 1 - R_c = \frac{2\rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} \quad (2, 3)$$

מהירות הגלים בסלעים "קשים" גבוהה מאשר בסלעים "רכים". האנרגיה נתונה לפי ריבוע האמפליטודה. לכן, האנרגיה של גל סייסי המגיע לפני השטח מוחזרת כמעט במלואה (בהזנחת עכבת האוויר). במעבר בין סלעים מלוכדים לקרקע או סדימנט בלתי מלוכד, רוב האנרגיה מועברת לקרקע או לסדימנט ונלכדת שם. כאשר אנרגיה זו חוזרת למגע עם הסלע ה"קשה" חלק מהאנרגיה מוחזרת ולא מועברת (על פי מקדמי ההחזרה והמעבר). התוצאה של תהליך זה היא לכידת אנרגיה סייסמית בשכבות הקרקע הרדודות, יצירת תבניות תהודה (resonance) כתלות בתדר המבנה, ובכך הגברת עוצמת הטלטול (איור 2.1).

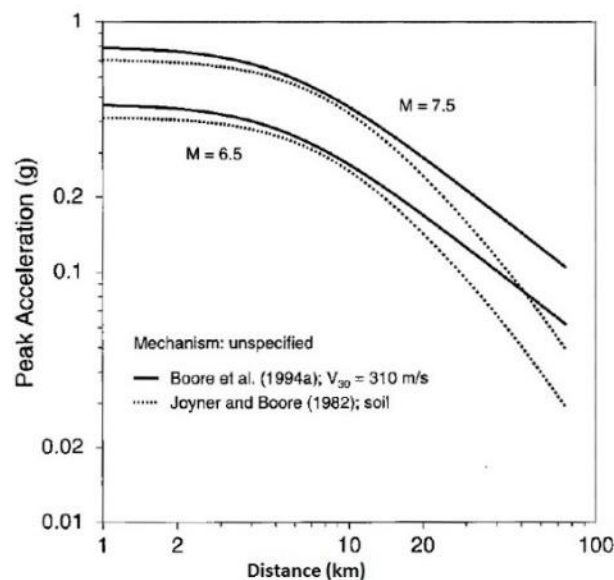


איור 2.1 - שרטוט המתאר את הגברת הגלים.

אפקט ההגברה נחקר במקומות רבים ובין המוכרים: רעידת האדמה במקסיקו סיטי בשנת 1985 (Singh et al., 1988), רעידת האדמה בארמניה בשנת 1989 (Borcherdt et al., 1989), רעידת האדמה בסן פרנסיסקו בשנת 1989 (Hough et al., 1990), רעידת האדמה בלוס אנג'לס בשנת 1994 (Hall et al., 1994) ורעידת האדמה בקובה (Kobe) שביפן בשנת 1995 (Aguirre and Irikura, 1997).

2.2 חיזוי תנודות קרקע

עוצמת תנודות הקרקע, כפי שנמדדות למשל כתאוצה אופקית מקסימלית (PGA – Peak Ground Acceleration) באתר, תלויות במגניטודת הרעידה, מרחק מן המקור, ותנאי האתר. בכדי לכמת משתנים אלו ולחזות תנודות קרקע משתמים בפונקציות חיזוי (prediction functions) הידועות גם כמשוואות ניחות (attenuation equations), המציגות כיצד עוצמת תנודות הקרקע דועכת עם המרחק ממוקד הרעש (איור 2.2). פונקציות אלו אמפיריות ומבוססות על ניתוח רגרסיה של תנודות קרקע באזור נתון ומתעדכנות כל כמה שנים, בדרך כלל לאחר רעש אדמה חזק.



איור 2.2 - דוגמא לעקומת ניחות ממערב צפון אמריקה (Boore et al, 1997). שני סטים של עקומות: אחד עבור רעידה במגניטודה 7.5 ואחד עבור 6.5. ההבדל בין הקווים הבולטים למקווקים הוא בהגדרת תנאי האתר.

האנרגיה הסייסמית המשתחררת ברעש אדמה בתווך איזוטרופי מתפזרת במרחב התלת מימדי וכך דועכת עם המרחק מהמקור. בנוסף, חלק מהאנרגיה מומרת לאנרגית חום ולשבירת קשרים כימיים בשל החיכוך במעבר בין גופים גיאולוגיים (כגון: גרבנים, הורסטים, שכבות וכדומה), ובין גרגירים. תהליכים אלו גורמים לדעיכת האנרגיה הסייסמית עם המרחק.

כיום, מקדמי משוואות הניחות נקבעים בעזרת נתונים מרעידות מכשיריות חזקות (Strong motion data), אשר בעזרתן מודדים את תאוצת הקרקע. בעבר, ובמקומות נעדרי האמצעים הטכנולוגיים, לא ניתן למדוד את תאוצות הקרקע באופן ישיר. לכן, עבור רעידות אדמה היסטוריות מקובל ליצור גרף ניחות לפי עוצמת הרעידה (Intensity) המעידה על חומרת הפגיעה של רעידת האדמה.

בעבודה זו אשתמש בסולם העוצמה המקומית MMI (Modified Mercalli Intensity scale) (איור 1.2), אשר בחלק מהעבודות הוא נחשב שקול לסקאלה של MSK (Medvedev – Sponheuer – Karnik scale) (איור 1.1).

2.3 מהירות ממוצעת – Vs30

עקב החשיבות הקריטית של מבנה המהירויות בתווך הרדוד לכליאת אנרגיה סייסמית ניסו חוקרים לאפיין במשתנה יחיד. מצב הרסני עלול להווצר כאשר תדר התהודה בשכבה עליונה איטית קרוב לתדרי התהודה של בניינים. תדר התהודה נמצא ביחס ישיר למהירות ממוצעת בשקלול זמן מעבר הגלים בשכבה (משוואה 4) (Finn, 1994; Beresnev and Abee, 1998).

$$f = \frac{V_s}{4H} \quad (4)$$

כאשר f תדר התהודה, V מהירות ממוצעת בשכבה ו- H עובי השכבה. תדרי תהודה של מבנים נתונים לרוב בעשירות שניה (על פי כלל אצבע – זמן המחזור שווה למספר הקומות מחולק ל-20), בעוד שמהירויות קרוב לפני השטח נתונות במאות מטר לשניה. לכן מקובל להניח שהמהירות בעשרות המטר העליונים אחראית להגברה.

Vs30 מתאר את המהירות הממוצעת של גלי הגזירה עד עומק 30 מטר. הממוצע משוקלל לפי הזמן שלוקח לגל הגזירה להגיע מעומק 30 מטר עד לפני הקרקע (משוואה 5):

$$\bar{V}_s^{30} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{s_i}}} \quad (5)$$

כאשר, h_i - עובי היחידה ה- i , V_{s_i} - מהירות גלי הגזירה בשכבה ה- i . על סמך התאמות אמפיריות זהו אחד המשתנים המרכזיים לחישוב תגובת אתר, בו משתמשים גופי הבנייה החשובים בכל מדינה על מנת לקטלג את עמודת הקרקע ולקבוע את תקני הבנייה האזוריים. בארה"ב הגוף הקובע הוא NEHRP - National Earthquake Hazards Reduction Program (איור 2.3), באירופה UBC – Uniform Building Code ובישראל התקן הוא לפי מכון התקנים (תקן מס' 413). קטלוג זה נועד בכדי שמהנדסים ידעו לכמת את הקטגוריות השונות למשתנים הנחוצים בעת בנייה: עומק יסודות, סוג בטון, עובי בטון וכדומה. מכך יוכלו לתכנן את המבנים כך שיעמדו בזעזועים המקסימליים הצפויים בעת רעידת אדמה.

TABLE 4. Definition of NEHRP site classes (BSSC, 1994)	
Site Class	Range of Shear Velocities*
A	greater than 1500 m/sec
B	760 m/sec to 1500 m/sec
C	360 m/sec to 760 m/sec
D	180 m/sec to 360 m/sec
E	less than 180 m/sec

* Shear velocity is averaged over the upper 30 m.

איור 2.3 - קטלוג מהירויות סייסמיות על פי NEHRP. (Building Seismic Safety Council, 2001).

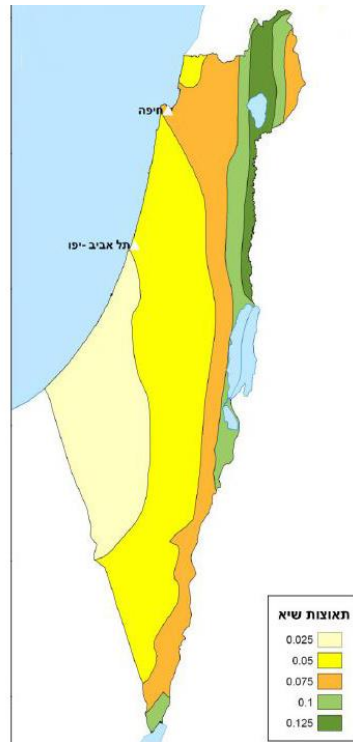
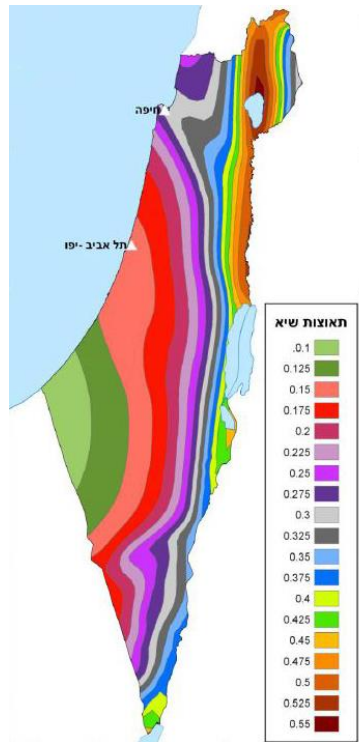
בעזרת V_{s30} ניתן לאמוד את תגובת האתר אשר מגולמת באחד האברים במשוואות הניחות. לדוגמא על פי משוואתו של Boore et al (1997) (משוואה 6):

$$\ln Y = b_1 + b_2(M - 6) + b_3(M - 6)^2 + b_5 \ln(r) + b_v \ln\left(\frac{V_s}{V_A}\right) \quad (6)$$

כאשר Y - תאוצת הקרקע האופקית בערכי g , M - מגניטודת המומנט הנמדדת, r - מרחק מהמוקד, b ו- V_A קבועים לפי זמני מחזור אשר נקבעו אמפירית על פי שיטות סטטיסטיות ו- V_s - ממוצע מהירות גלי הגזירה עד עומק 30 מטרים.

2.4 מפת סיכונים סייסמיים – מפות תאוצה

מפות סיכון סייסמיות מתארות את פוטנציאל התאוצה עבור רעידות אדמה עתידיות באזורים השונים (איור 2.4). המפה מציגה את ההסתברות שתרחש תאוצת קרקע אופקית (PGA – Peak Ground Acceleration) פעם אחת בתקופה מוגדרת של מספר שנים, באזור מסוים. לדוגמא, באיור 2.4 שמאלי, עבור

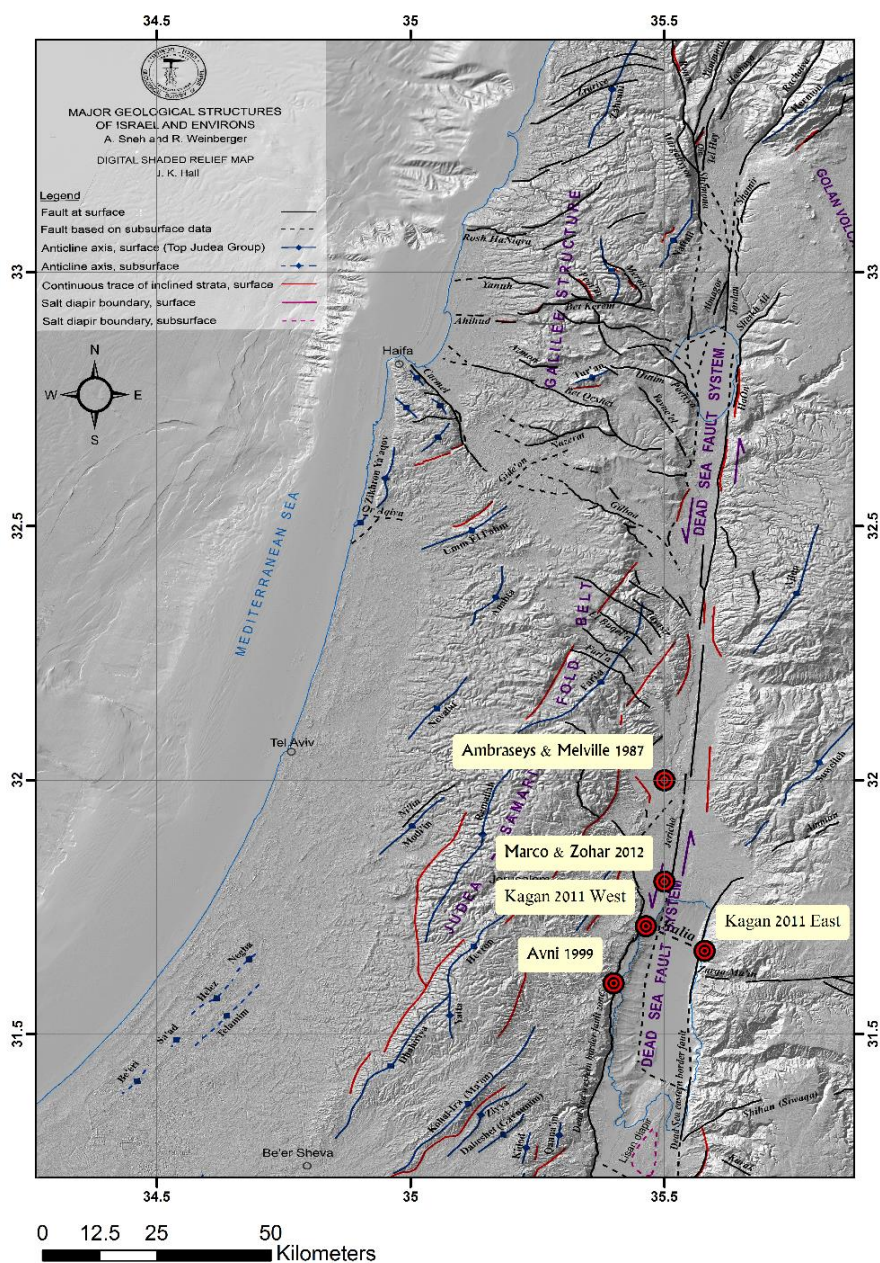


רעידת אדמה שהסתברותה פעם ב-475 שנה, בתל אביב, תאוצת הקרקע האופקית המקסימלית תהיה 0.15 מערכו של g, כלומר תאוצה של 1.47 מטר לשנייה בריבוע (~9.8 מטר לשנייה בריבוע). תאוצת הקרקע היא התאוצה שתפתח בבסיס הבניין בהנחה שהבניין ממוקם על סלע תשתית (bedrock) בעל מהירות סייסמית קבועה, 620-750 מטר לשנייה. על פי זאת, אין נלקחת בחשבון הליתולוגיה המקומית עבור כל אתר, לכן, חישוב תגובות אתר יוסיף דיוק למפות הסיכון.

איור 2.4 - מפת סיכון סייסמי לישראל עם סיכוי חזרה אחת ל-475 שנים וניחות (Damping) של 5%. משמאל עבור מחזור של 0.2 שניות, ומימין עבור מחזור של שניה אחת (המכון הגיאופיזי).



ב-11.7.1927 התרחשה רעידת האדמה החזקה וההרסנית ביותר אודותיה קיימים נתונים סייסמוגרפיים הפזורים על פני כמאה תחנות ברחבי העולם (I.S.S., 1927) יחד עם עדויות היסטוריות רבות (איור 2.5). גודל הרעידה חושב ל-6.25 במגניטודה מקומית (Ben-Menahem et al., 1976). הוצעו מספר מוקדים לרעידה זו, לאחרונה על ידי אבני וזוהר ומרקו (אבני, 1999; Zohar and Marco, 2012). קייגן ושות' (Kagan et al., 2011) שיערו שמקור הרעש בהעתק קליה הסוגר את הגראבן העמוק של ים המלח מצפון, וחוצה את העתק השוליים המערבי במחצית הדרך בין המוקד לפי אבני (1999) למוקד לפי זוהר ומרקו (2012) (איור 2.6).

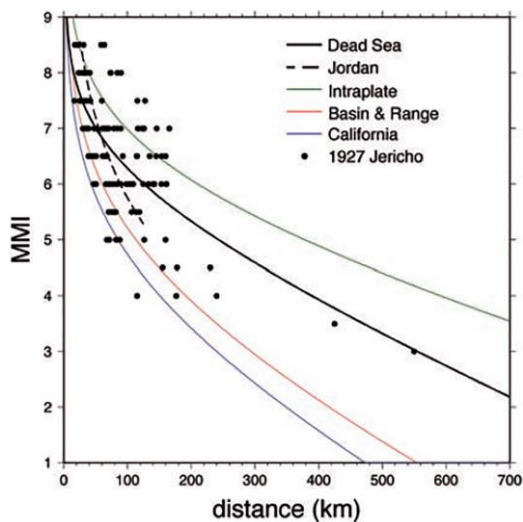


איור 2.6 - מפת מוקדים אפשריים.

נזקי הרעידה היו קשים בעיקר באזורים קרובים למקור, אך לא רק: בשכם היו כ-60 הרוגים ו-474 פצועים, ויותר מ-700 מבנים שנהרסו, או היו במצב שחייב את הריסתם באופן יזום. רובם היו בנויים על סלעים רכים (Blankenhorn, 1927; Willis, 1928). ברמלה ולוד נהרגו ונפצעו עשרות ונהרסו מאות בתים (ברור, 1928). בעוד שכם מרוחקת מהמקור כ-70 ק"מ, ירושלים קרובה יותר – 30 ק"מ. ירושלים נפגעה בעיקר במבניה ולא בנפש, בודדים נהרגו ומספר הפצועים לא עלה על עשרות. אך עם זאת, הר הזיתים והר הצופים נפגעו קשה יותר באזור בירושלים (Abel, 1927; ברור, 1928). ביריחו נהרסו בתים רבים (איור 2.7). העדויות על מספר ההורגים הכולל נעות בין 350-500 (Amiran, 1951; Arie, 1967; Ambraseys and Melville, 1988; Ben-Menahem, 1991). גדות הירדן גלשו לאורך הנהר וחסמו את זרימתו ליד דמיא לכ-21.5 שעות (Amiran, 1951; Ben-Menahem et al., 1976). בים המלח נוצר גל בגובה של כמטר אחד (Abel, 1927; Blankenhorn, 1927). יש עדויות כי הרעידה הורגשה עד 700 ק"מ ממוקדה (Ben-Menahem, 1991), אך יש גם פרשנות סותרת לפיה הרעידה הורגשה רק עד כ-300 ק"מ ממוקדה (Ambraseys and Melville, 1988).



איור 2.7 - נזקי רעידת האדמה בארמון החורף ביריחו (צלמי המושבה האמריקאית, אוסף ספריית הקונגרס).



איור 2.8 - עקומות ניחות עבור רעידת האדמה של 1927
(Hough and Avni, 2011).

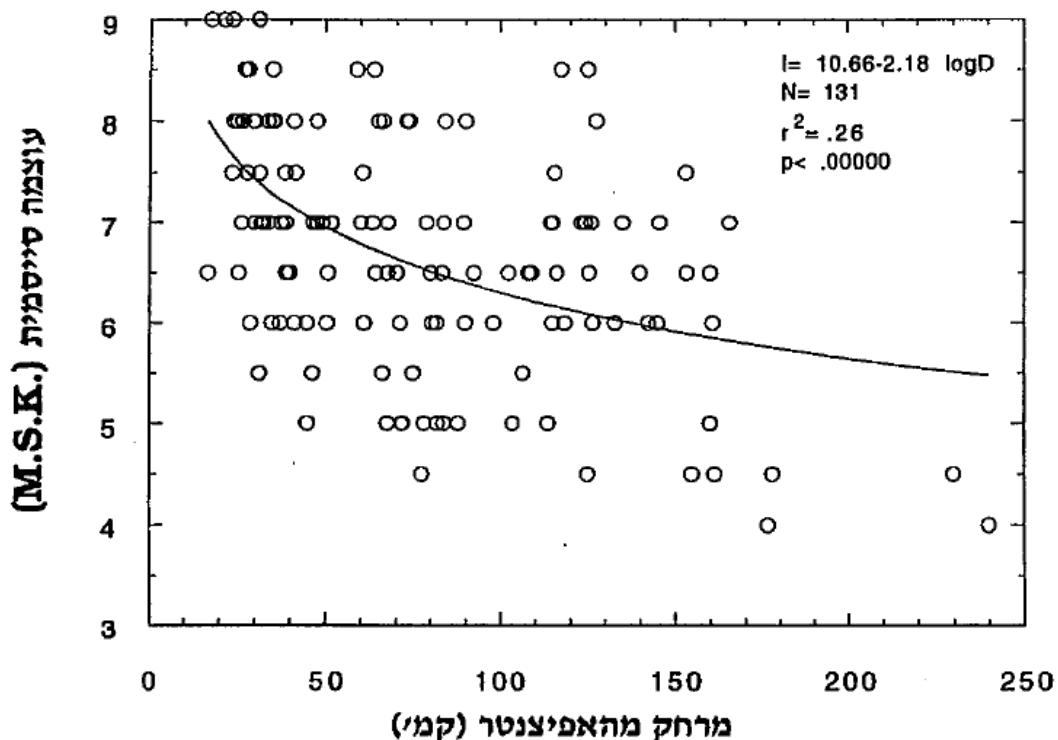
בעבודתם מ-2011 קבעו האף ואבני (Hough and Avni, 2011) גבול עליון של 550 ק"מ מרחק אפיצנטרלי להרגשה של הרעידה (איור 2.8). השפעת נתוני עוצמה מקומית נמוכה על עקומת הניחות מוגבלת עקב מיעוט הנתונים עבור מרחקים אלו ואי הוודאות הרבה האופפת אותם.

2.6 אתרים למדידות תגובת אתר

האתרים למדידות תגובת אתר נבחרו על פי נתונים שקיבץ רון אבני לעבודת דוקטורט באוניברסיטת בן גוריון (אבני, 1999) (נספח 2). את העוצמה הסייסמית אבני מקטלג על פי סולם MSK, ובעבודתו

עם האף (Hough and Avni, 2011) סקאלה זו נלקחת כשקולה לסקאלה MMI – Modified Mercalli Intensity.

על פי נתוניו של אבני, פיזור העוצמה הסייסמית עם המרחק מניב גרף ניחות המסביר רק 26% מהתוצאות עבור 133 האתרים הנמדדים (איור 2.9).



איור 2.9 - פיזור העוצמה הסייסמית כפונקציה של המרחק על פי עבודתו של אבני (אבני, 1999).

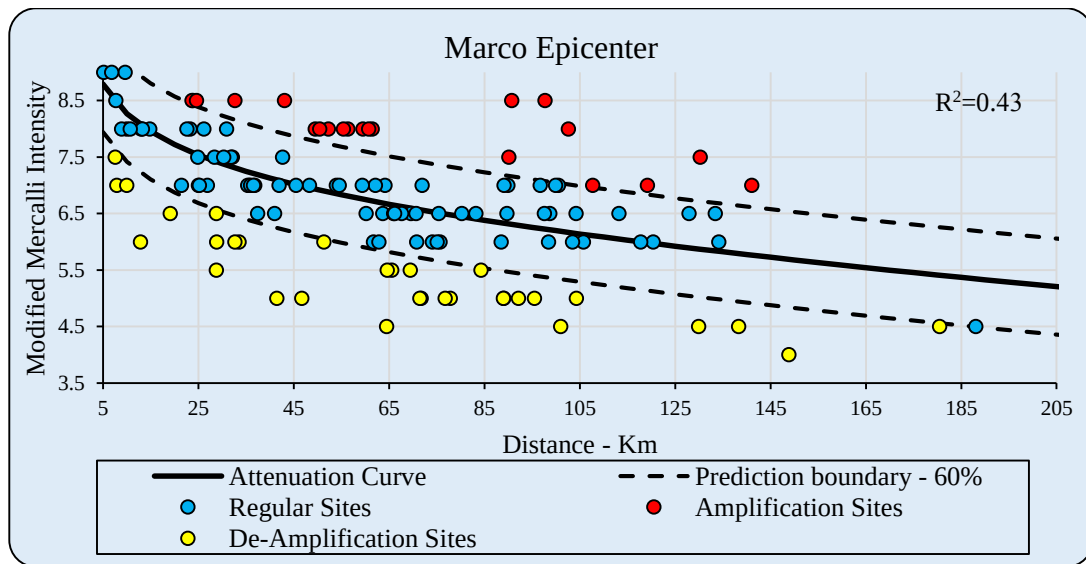
משוואות המציגות את העוצמה הסייסמית כפונקציה של המרחק d ועבור מגניטודה M מיוצגות על פי משוואה 7 (Bakun, 2006):

$$MMI(M, d) = C_0 + C_1 M + C_2 d + C_3 \log(d) \quad (7)$$

על פי האף ואבני (Hough and Avni, 2011) המשוואה המתאימה לאזור ים המלח:

$$MMI(M, d) = -0.64 + 1.7M - 0.00448d - 1.67 \log(d) \quad (8)$$

משוואה 8 מניבה על פי מוקדו של אבני (אבני, 1999) התאמה של 32%. Kagan et al (2011) הציעו את העתק קליה כמקור לרעידה זו ולכן חישבתי עוד שתי עקומות: אחת עבור מרחקי האתרים (בהם אבני העריך עוצמה סייסמית) מגבולו המזרחי של העתק, והשני מגבולו המערבי. עבור שני מקרים אלו ההתאמה היא 39%. זוהר ומרקו (Zohar and Marco, 2012) מיקמו את מוקד הרעידה כ- 10 ק"מ צפונית למוקדו של אבני. חישוב מרחק האתרים ממוקד זה והצבתם במשוואה 7 מניב גרף עם ההתאמה הטובה ביותר, 43% (איור 2.10).



איור 2.10 - פיזור העוצמה הסייסמית כפונקציה של המרחק ממוקדם של זוהר ומרקו (2012).

בכדי לבחור את האתרים לסקירת תגובת אתר, שרטטתי גבול עליון ותחתון לכיסוי 60% מכלל התוצאות עבור כלל המוקדים. הנקודות החריגות כלפי מעלה, ולכן החשודות בהגברה (amplification), מסומנות בצבע אדום והנקודות החריגות כלפי מטה, החשודות בהנחתה (de-amplification) בצבע כחול (איור 2.10). מתוך אתרים חשודים אלו (נספח 1), סיננתי את האתרים הנמצאים בשטח הרשות הפלסטינית וירדן בהם לא נוכל למדוד תגובות אתר והתקבלה הרשימה הבאה:

אתרים החשודים בהגברה: עכו, ג'סר מאג'מי, לוד, מע'אר, ריינה, רמלה, טבריה, צרעה, הר הצופים, צמח, נצרת מצדה, ארמון הנציב, עובדייה.

אתרים החשודים בהנחתה: באר שבע, בית אלפא, בית הכרם, בנימינה, גבעתיים, גדרה, הרצליה, מוצא, נהלל, נהרייה, פתח תקווה, פקעין, הר טוב, יבנה, אשקלון ורמת רחל.

- יש לציין כי אבני ניתח בעבודתו גם את הליתולוגיה בצורה איכותית על פי מפות גאולוגיות ותצפיות של המכון הגיאולוגי והצליח להגיע לעקומה עם התאמה של 0.365. תצפיות אלו אינן מדידות ישירות בעיקרון, אלא הערכות (נספח 5).

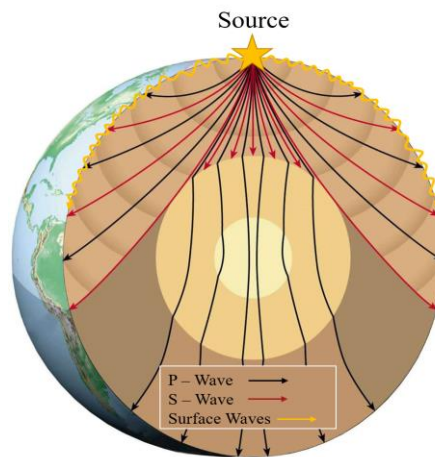
3 מטרות המחקר

- בניית משוואת ניחות עם נתוני הגברה/הנחתה בכדי לייצג גרף ניחות אמין יותר.
- הוספת נתונים למאגר הנתונים של $\bar{V}_s^{30}$ במדינת ישראל.
- הפקת מידע לגבי רעידות ונזקים עתידיים.

MASW – Multi Analysis of Surface Waves 4.1

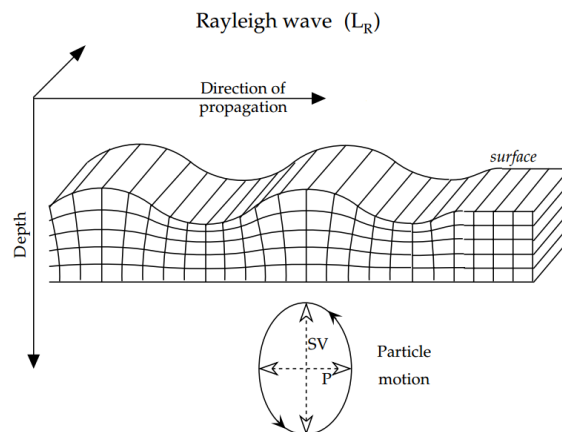
4.1.1 השיטה

מקורות סייסמים הבוקעים קרוב, או בפני השטח, יוצרים בעיקר גלי גוף מסוג P ו-S וגלי שטח מסוג ריילי ולאב (Rayleigh & Love). בעוד גלי הגוף מתקדמים בכל עומק התווך, גלי השטח מתקדמים בעיקר בפני השטח ובקרבת (איור 4.1).



איור 4.1 - הגלים הסייסמים העיקריים (modified from Pearson Prentice Hall, Inc. 2005).

מסלול החלקיק בגל ריילי אליפטי בכיוון הפוך לכיוון התקדמות הגל עבור התווך הרדוד (איור 4.2). לכן, בפרישת גאופונים המקליטים רכיב אנכי ובהפעלת מקור אנכי (דפיקת פטיש לדוגמא) נקלוט את רכיב ה-SV של גלי ריילי.



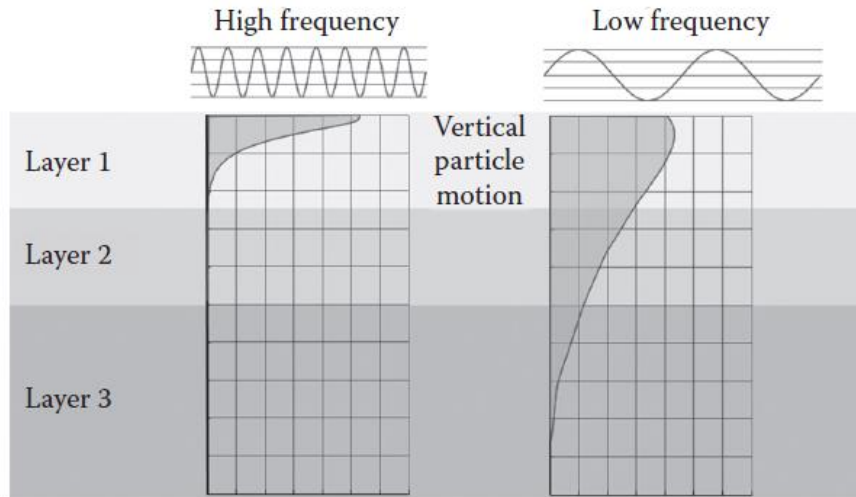
איור 4.2 - תנועת גל ריילי (Lowrie, 2007).

מהירות התקדמות גלי ריילי בתווך הטרוגני היא פונקציה של התכונות המכניות של תת הקרקע התלויות בתדר (נפיצות – dispersion). לכן, בהפעלת מקור המכיל טווח של תדרים, פונקציית מהירות הפאזה תייצג

מהירויות שונות לפי תכולת התדרים. נפיצות זו של גלי ריילי כתוצאה מהתקדמות הגלים בתווך הטרוגני מהווה את הבסיס למדידות גלי שטח וניתוחם.

כוון שאורכי גל נמצאים ביחס ישיר לתדירות ההופכית (משוואה 8), בגלים הרמוניים תדרים גבוהים מעידים על שכבות רדודות ותדרים נמוכים על שכבות עמוקות (איור 4.3).

$$\lambda = \frac{1}{f} V \quad (8)$$



איור 4.3 - חדירות הגל כפונקציה של התדר (Foti et al., 2014).

מהירות ההתקדמות עבור כל אורך גל, מהירות הפאזה (phase velocity) (Bath, 1973) תלויה בעיקר במהירות גלי הגזירה (V_s) במדיום בו הם עוברים, ותלויה פחות בגלי P (או ביחס פואסון) ובצפיפות. לכן מדידת מהירות גלי השטח מאפשרת אומדן אמין של מהירות גלי הגזירה (Park et al., 1997). מקובל להניח שמהירות הפאזה של גלי השטח מהווה 92% מ- V_s (Stokoe II et al., 1994) והיחס משתנה בין 0.88-0.95 בהתאם ליחס פואסון שבדרך כלל ערכו 0.2-0.3 (Gudmundsson, 2011). ניתן להגיע לערכים תאורטיים של מהירות פאזה של אורכי גל שונים על ידי פתרון משוואת הגל האלסטית (elastic wave equation) עם תנאי שפה המתאים למודל שכבות (Haskell, 1953).

בשיטה זו ישנם שלושה שלבים עיקריים:

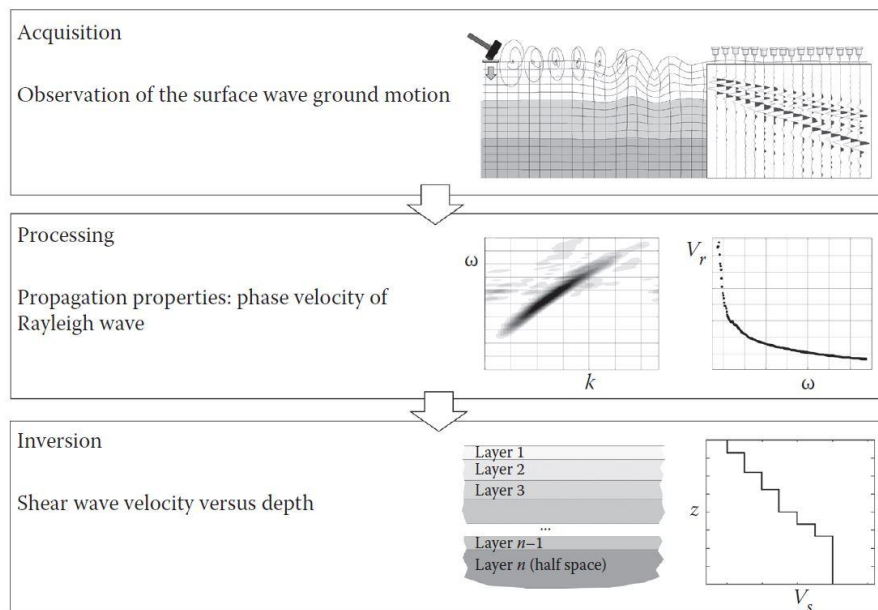
א. איסוף נתונים (איור 4.4 - acquisition) – הקלטת נתונים סייסמים על ידי הפעלת מקור וקליטת הגלים על ידי גאופונים.

ב. בניית עקומת נפיצות (dispersion curve) המציגה את המהירות כפונקציה של התדר (איור 4.4 - processing) – בכדי לבנות עקומת נפיצות יש לזהות תחילה את גלי השטח. תהליך הזיהוי יחסית פשוט כיוון שאלו הגלים האנרגטיים ביותר (מעל 2/3 מכלל האנרגיה הסייסמית) בהפעלת מקור אנכי

(Heisey et al., 1982). עקומה זו מחושבת באמצעות התמרת פורייה (Fourier transform) הממירה ממרחב הזמן (time domain) למרחב התדר (frequency domain). גלים הרמוניים יכולים להתנדנד בכמה אופנים (modes) לכן ייתכן ויהיו כמה עקומות נפיצות: עקומה פונדמנטלית (fundamental mode), 1, 2 וכדומה.

ג. בניית פרופיל Vs30 (איור 4.4 - inversion) – על פי עקומת הנפיצות ניתן "לחשב לאחור" (אינברסיה) ולבנות פרופיל Vs עבור העומק שנדגם. תחילה יוצרים פרופיל ראשוני המייצג את Vs עם העומק ולאחר מכן מנסים לקרב את המודל לתוצאות השדה, בשאיפה להגיע לשורש ממוצע ריבועים (RMS), של הסטיות, נמוך ככל האפשר.

- פתרונות אינברסיה לא מתכנסים לפתרון יחיד, כלומר עבור נתונים מאתר מסוים נקבל תוצאה מעט שונה עבור כל מודל.



איור 4.4 - הפעולות להפקת פרופיל Vs (Foti et al., 2014).

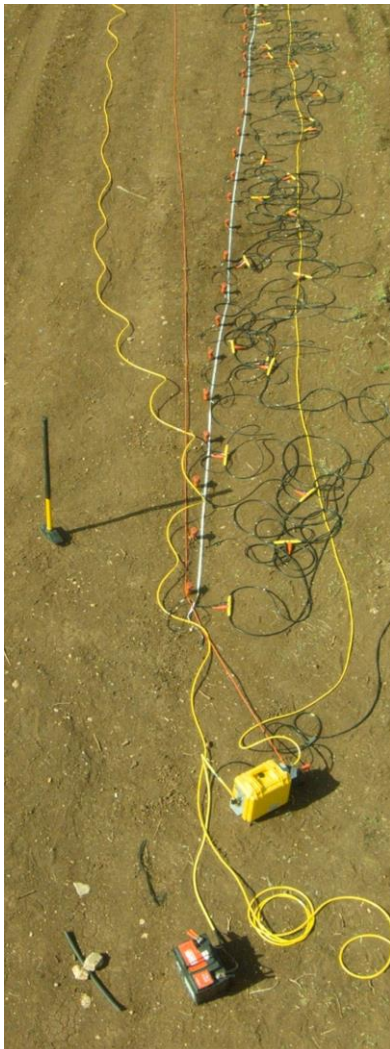
בהיבט הנדסי V_s הינו נתון חשוב מאוד, שכן לפיו ניתן לחשב את מודול הגזירה (shear modulus) הקובע את המאמץ המרבי בה הקרקע יכולה לעמוד ומעבר לו תגור. הקשר בין V_s למודול הגזירה על פי משוואה 9:

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \Rightarrow \mu = V_s^2 \rho \quad (9)$$

כאשר ρ הצפיפות ו- V_s מהירות גלי הגזירה. השינוי בצפיפות החומר עם העומק קטן ביחס לשינוי במודול הגזירה, ולכן בדרך כלל מתעלמים מהשינוי הזה או שמנחשים אותו (Park et al., 1997). ומכאן חשיבותו של V_s .

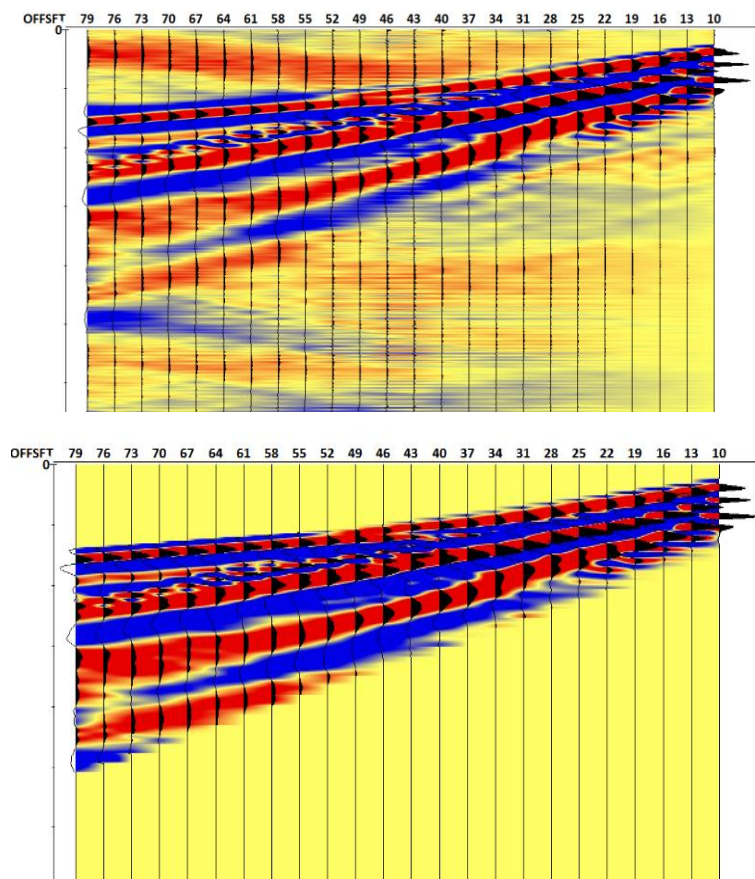
4.1.2 אופן העבודה

1. פרישת 24 גאופונים אנכיים בתדר 4.5 הרץ במרווחים של 1-3 מטרים (תלוי במהירויות הסייסמויות באתר) (איור 4.5 שמאלי).
2. הנחת מקור (פטיש 5 ק"ג) על לוח אלומיניום גורמת לסגירת מעגל חשמלי. הליך חשוב כוון שאנו רוצים להקליט החל מהפעלת המקור ולא לפני. מנחיתים את המקור 5-10 פעמים באותה נקודה (כתלות ברעשי הרקע באזור הסקר) (איור 4.5 ימין), במרחקים (offsets) של 5,10,15,20,25,30 מטרים משני קצוות הקו הסייסמי. לעיתים במרחקים קרובים יותר כאשר המהירויות הסייסמיות גבוהות (מעל 750 מטר לשניה).



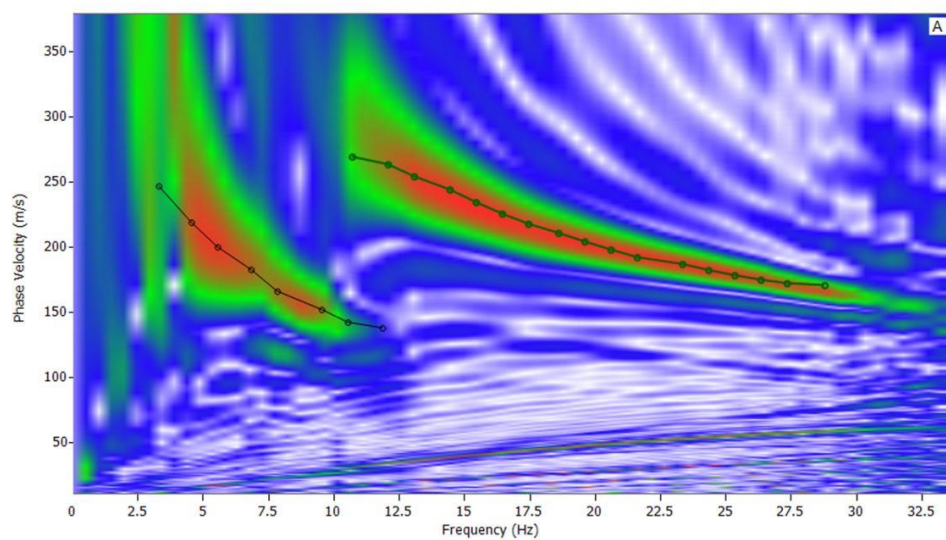
איור 4.5 - משמאל פרישת גאופונים, מימין הפעלת מקור אנכי - פטיש.

3. הקלטת נתונים: מרווח דגימה 0.125 מילישניה, זמן הקלטה 0.5-2 שניות.
4. עיבוד הנתונים:
 - א. הזנת גיאומטריה – הגדרת מיקום הגיאופונים והמקורות במהלך הסקר.
 - ב. סינון רעשים לפני זמן הגעת גלי השטח ולאחר (איור 4.7).



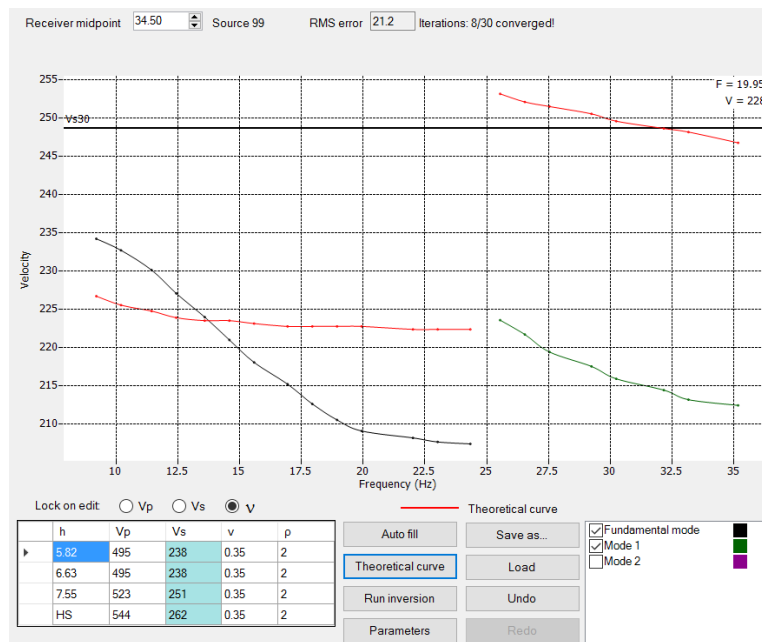
איור 4.7 - ניקוי רעשים.

ג. התמרה לגרף נפיצות (dispersion curve) – מהירות הפאזה כפונקציה של תדירות. התאמת עקומה פונדמנטלית ואם ישנן גם התאמה לשאר האופנים (איור 4.6).



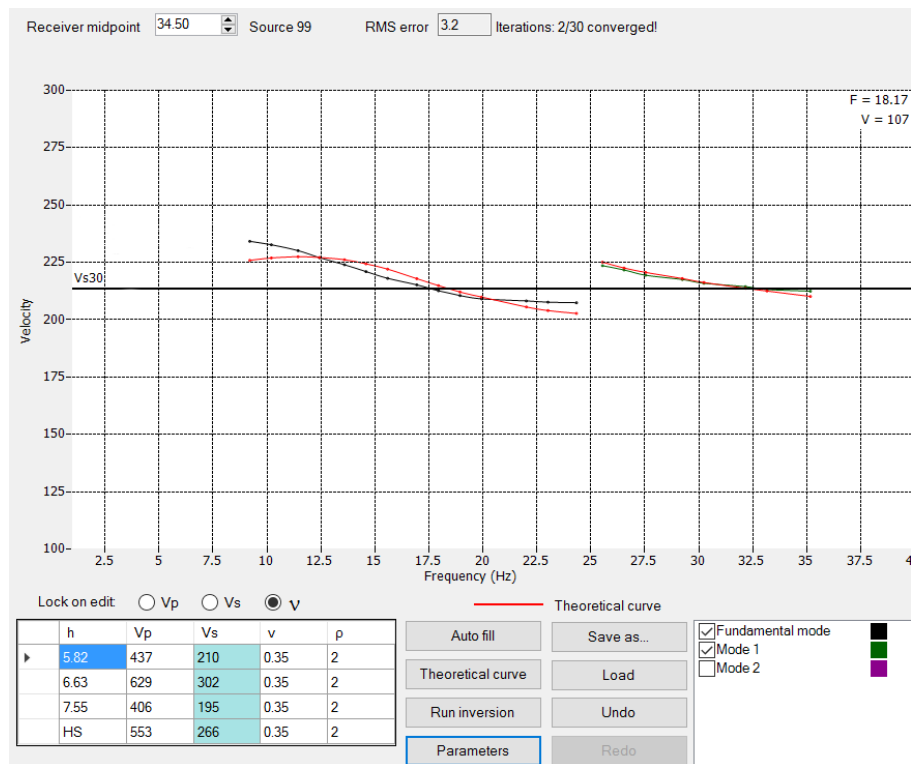
איור 4.6 - גרף נפיצות לדוגמא (Radexpro).

ד. יצירת מודל Vs30 תחילי (איור 4.8).



איור 4.8 - מודל Vs30 תחילי. ניתן לראות בשחור את העקומה הפודמנטאלית, בירוק את המוד הראשון ובאדום את העקומות התיאורטיות. RMS ראשוני 21.2.

ה. אינברסיה ממודל תחילי עד הגעה למודל Vs30 סופי בעל RMS הנמוך ביותר (איור 4.9).



איור 4.9 - פרופיל מהירויות סופי. ניתן לראות כי עקומות המודל השחור והירוק נמצאות במרחק הרבה יותר סביר מהמודל התחילי (איור 4.8), RMS 3.2. הקו השחור העבה מייצג Vs30.

4.2 עיבוד נתונים מסקרים קודמים של המכון הגיאופיזי

על פי דוח המכון הגיאופיזי (Aksinenko and Hofstetter, 2012) נמדדו תגובות אתר בסביבות 30 ערים בישראל. בדוח נאסף המידע הזמין מתחומי הגיאולוגיה, טופוגרפיה, גיאופיסיקה, גיאוטכניקה וקידוחים (נספח 4).

4.3 שיטת הריבועים הפחותים (Least Squares Fitting)

שיטה מתמטית למציאת העקומה המתאימה ביותר לפיזור הנתונים. זאת על ידי הקטנה למינימום את סכום ריבועי המרחק (residuals) בין נקודות המדידה לעקומה המנובאת:

$$\sum_{i=1}^n (\text{Observed}_i - \text{Predicted}_i)^2 \quad (10)$$

בעבודה זו אשתמש בשיטה זו בכדי למצוא את המקדם לאיבר התלוי ב-Vs30 (C4).

4.4 ציוד

ציוד הסייסמיקה שעמד לרשות המחקר מטעם המכון למדעי כדור הארץ:

- מקליט סייסמי מדגם Geode של חברת Geometrics (2 יחידות).
- גאופונים אנכיים 4.5Hz של חברת R.T. Clark (26 יחידות).
- גאופונים אנכיים 28Hz של חברת R.T. Clark (52 יחידות).
- גאופונים אופקיים 4.5Hz של חברת Geospace (12 יחידות).
- מקור סייסמי – פטיש 5 ק"ג.

4.5 חומרה

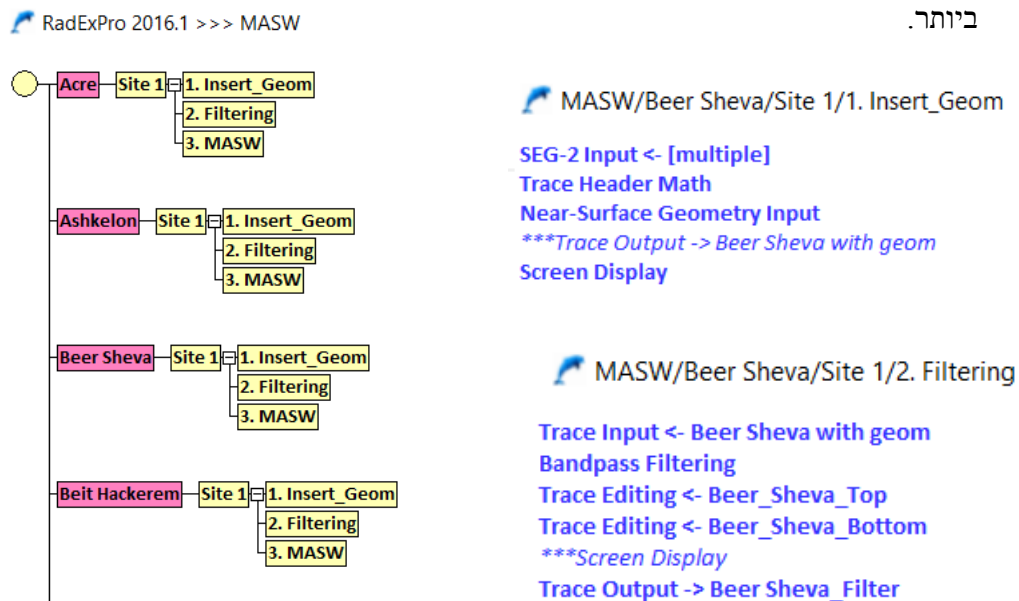
- חבילת התוכנות של SeisImager מבית היוצר של Geometrics:
 - Pickwin - Pick First Breaks or Dispersion Curves
 - Plotrefa - Refraction Analysis
 - Surface Wave Analysis Wizard
 - WaveEq - Surface Wave Analysis
 - Radexp - Seismic software

5 תוצאות

5.1 עיבוד הנתונים

תהליך איסוף הנתונים ועיבודם לא היה אחיד בכל הסקרים. הרצון היה לשמור על נתוני פרישה קבועים כפי שכתבתי בפרק שיטות (פרק 4.1.2) אך לא תמיד תוואי השטח אפשר זאת. רצף הפעולות הכללי (flow) אותו יצרתי מורכב משלושה שלבים (איור 5.1 שמאלי):

1. בדיקה נתונים כללית והכנסת גאומטריה (ימני עליון).
2. ניקוי רעשים: ניקוי מזמן 0 ועד הגעת גלים ראשונים (גלי רפרקציה), ניקוי גלים המגיעים לאחר גלי השטח, פלטור תדרים נמוכים מ-2 הרץ וגבוהים מ-100 הרץ (איור 5.1 ימני תחתון).
3. בניית עקומת דיספרסיה ובחירת העקומה הברורה ביותר, זו הניתנת לסימון (Picking) הברור ביותר.



איור 5.1 - עיבוד הסקרים הסייסמים. למעלה מימין - צפייה בנתונים והזנת גאומטריה. למטה מימין - סינון רעשים. משמאל - כל רצף הפעולות.

עבור כלל הסקרים וכלל השכבות במודל, הצפיפות ויחס פואסון הוגדרו ל - 2 גרם/ס"מ³ ו - 0.3, בהתאמה. לא בכל הסקרים הצלחתי להגיע לעומק 30 מטרים ולכן לכל אתר יש V_{s_i} משלו (טבלה 1). כאשר i מייצג את העומק המקסימלי אליו המקור חדר. ניתן לשער את העומק המרבי באמצעות משוואה 11:

$$\frac{\left(\frac{Velocity_{f_{min}}}{f_{min}} \right)}{n} \quad (11)$$

כאשר n בין 2 ל-3 (Foti et al., 2014; Moro, 2015).

נסקרו 27 סקרים ב-21 אתרים ומתוכם הצלחתי לחלץ V_{Si} עבור 20 אתרים (טבלה 1).

ID	Site	Max depth [m]	Vs [m/sec]	Mean Vs [m/sec]	RMS
1	Acre	15	260	260	4.3
2	Ashkelon	30	475	475	7.4
3	Be'er Sheva	30	375	375	7.5
4	Beit Hakerem	30	1450	1450	11.7
5	Beit Alfa	15	225	225	8.2
6	Binyamina	30	325	325	4.7
7	Givatayim	30	410	410	4.9
8	Herzliya	30	315	315	6.4
9	Hartuv	-	-	-	-
10	Jasar-Majami	20	275	275	7.3
11	Lod 1	20	305	278	1.7
12	Lod 2	10	250	278	1.8
13	Motza 1	25	1100	1005	12.7
14	Motza 2	25	910	1005	8.5
15	Mt. Scopus 1	15	590	565	5.9
16	Mt. Scopus 2	15	540	565	3.3
17	Nahalal	20	370	370	6.4
18	Nahariya	30	840	840	4.4
19	Peqi'in	30	1425	1425	7.8
20	Ramat Rachel	20	455	455	6.2
21	Ramleh 1	15	370	368	2.9
22	Ramleh 2	15	365	368	0.97
23	Tzemach 1	15	245	238	0.97
24	Tzemach 2	15	230	238	0.95
25	Tzora	15	270	270	8.1
26	Yavneh 1	-	-	-	-
27	Yavneh 2	20	390	390	10

טבלה 1 - תוצאות V_{s30} מהסקרים.

5.2 מציאת המקדם – C₄

על פי משוואת הניחות האזורית (Hough and Avni, 2011):

$$MMI = -0.64 + 1.7M - 0.00448d - 1.67 \log(d) \quad (8)$$

והוספת איבר התלוי ב-Vs₃₀ ממשוואתו של בור (Boore et al., 1997):

$$C_4 \cdot \ln \left(\frac{Vs_{30}}{Vs_{bedrock}} \right)$$

כאשר Vs (Bedrock) ו-C₄ קבועים. נקבל משוואת ניחות חדשה:

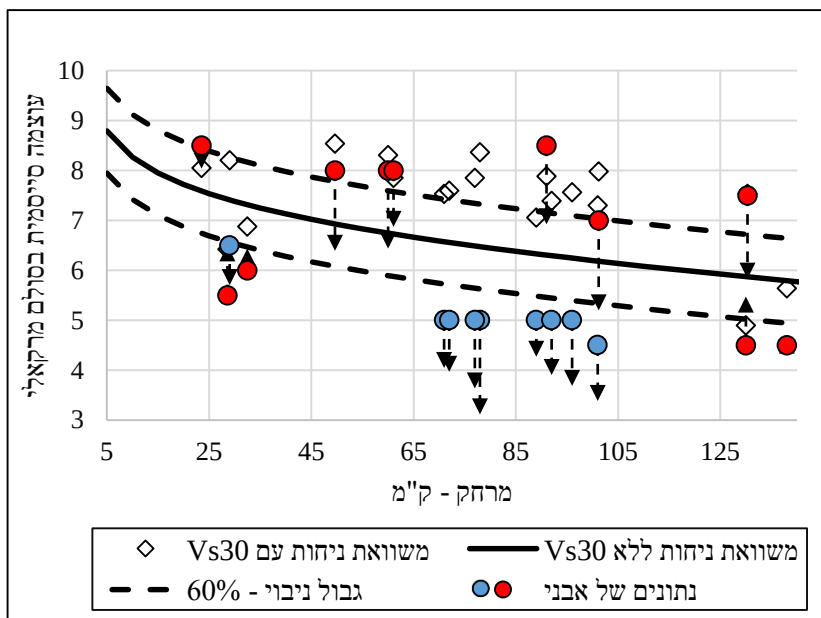
$$MMI = -0.64 + 1.7M - 0.00448d - 1.67 \log(d) + C_4 \ln \left(\frac{Vs_{30}}{Vs_{bedrock}} \right) \quad (12)$$

כאשר Vs₃₀ גבוה מ-Vs (Bedrock) הגלים מונחתים וכאשר נמוך ממנו הגלים מוגברים באתר. על פי תקן בניה 413 (מכון התקנים הישראלי, 2013), Vs_{Bedrock}=760 m/sec ולכן מתוך 20 אתרים שהניבו תוצאות, 11, המהווים 55%, הוגברו/הונחתו לפי הגדרה זו.

חישוב המקדם על פי שיטת הריבועים הפחותים (נספח 6) מניב את המשוואה:

$$MMI = -0.64 + 1.7M - 0.00448d - 1.67 \log(d) - 1.552 \ln \left(\frac{Vs_{30}}{760} \right) \quad (13)$$

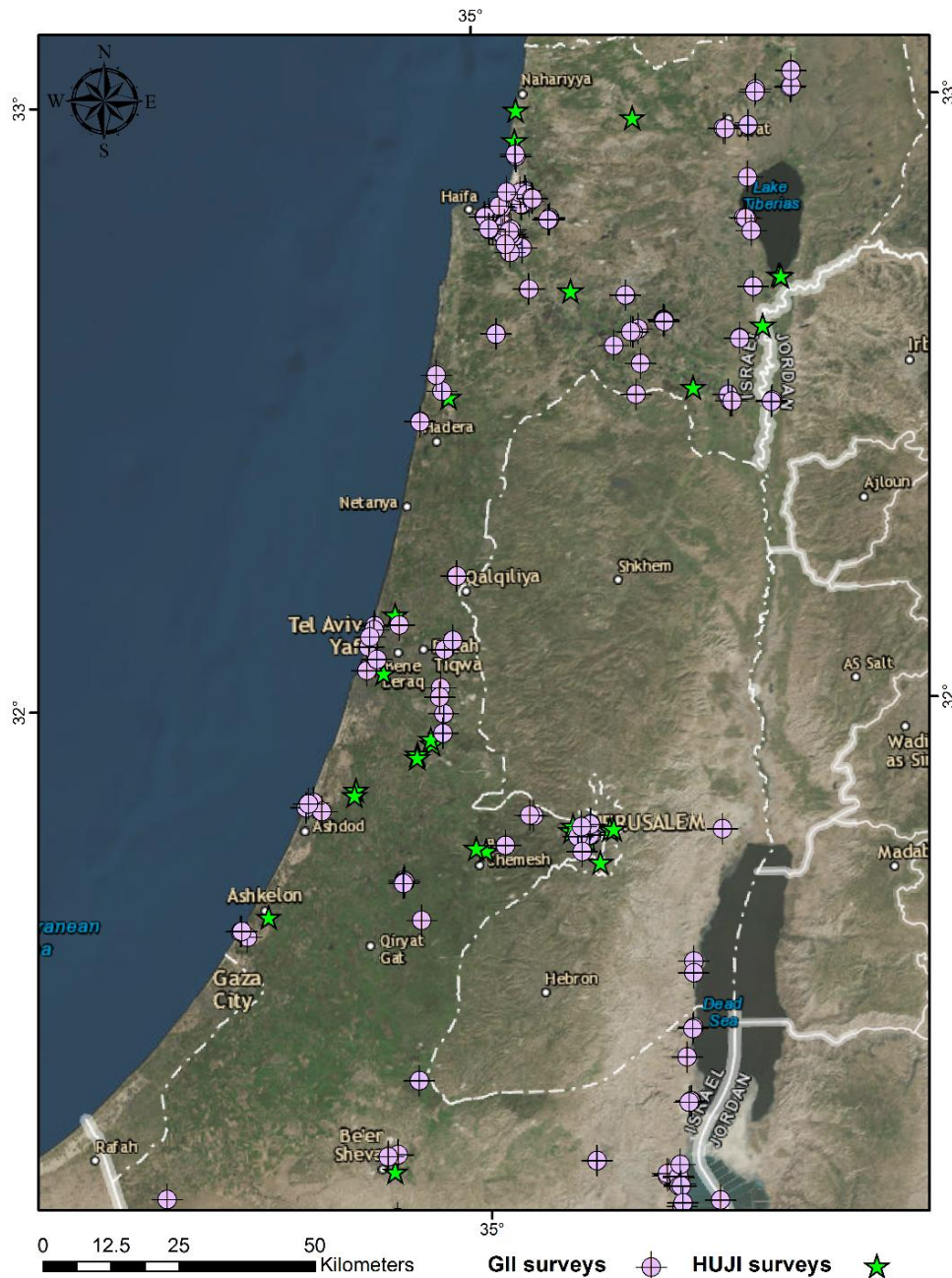
איור 5.2 מראה את פיזור העוצמות הסייסמיות עם המרחק כאשר העיגולים מסמנים את העוצמות הסייסמיות אותן אבני העריך באתרים השונים (באדום 11 שהונחתו/הוגברו לפי צפי התקן), המעויינים השקופים הם הערכים שהתקבלו ממשוואה 13 והחיצים מייצגים היכן הנקודות של אבני היו נמצאות ללא השפעת Vs₃₀.



איור 5.2 - תוצאות כלל הסקרים. בעיגולים העוצמות הסייסמיות שאבני העריך באתרים השונים. באדום אתרים המתנהגים לפי הצפי ובכחול אתרים המתנהגים הפוך מהצפוי. במעויינים שקופים עוצמות סייסמיות על פי משוואת הניחות (משוואה 13). החיצים מייצגים היכן העוצמות שאבני העריך היו נמצאות כאשר מחסירים את השפעת הליתולוגיה (Vs₃₀).

5.3 עיבוד תוצאות סקרי המכון הגיאופיזי

בעבודת המכון הגיאופיזי (Aksinenko and Hofstetter, 2012), יש מידע סייסמי מסקרי רפרקציה וקידוחים סביב 30 ערים בישראל. בעבודתם חילצו מהירות גלי גזירה עבור השכבות השונות. על פי משוואה 5 חישבתי Vs30 עבור 186 אתרים (איור 5.3) אשר רובם ממצעים Vs לעומק 30 מטרים ומעלה (טבלת מהירויות בנספח 4).



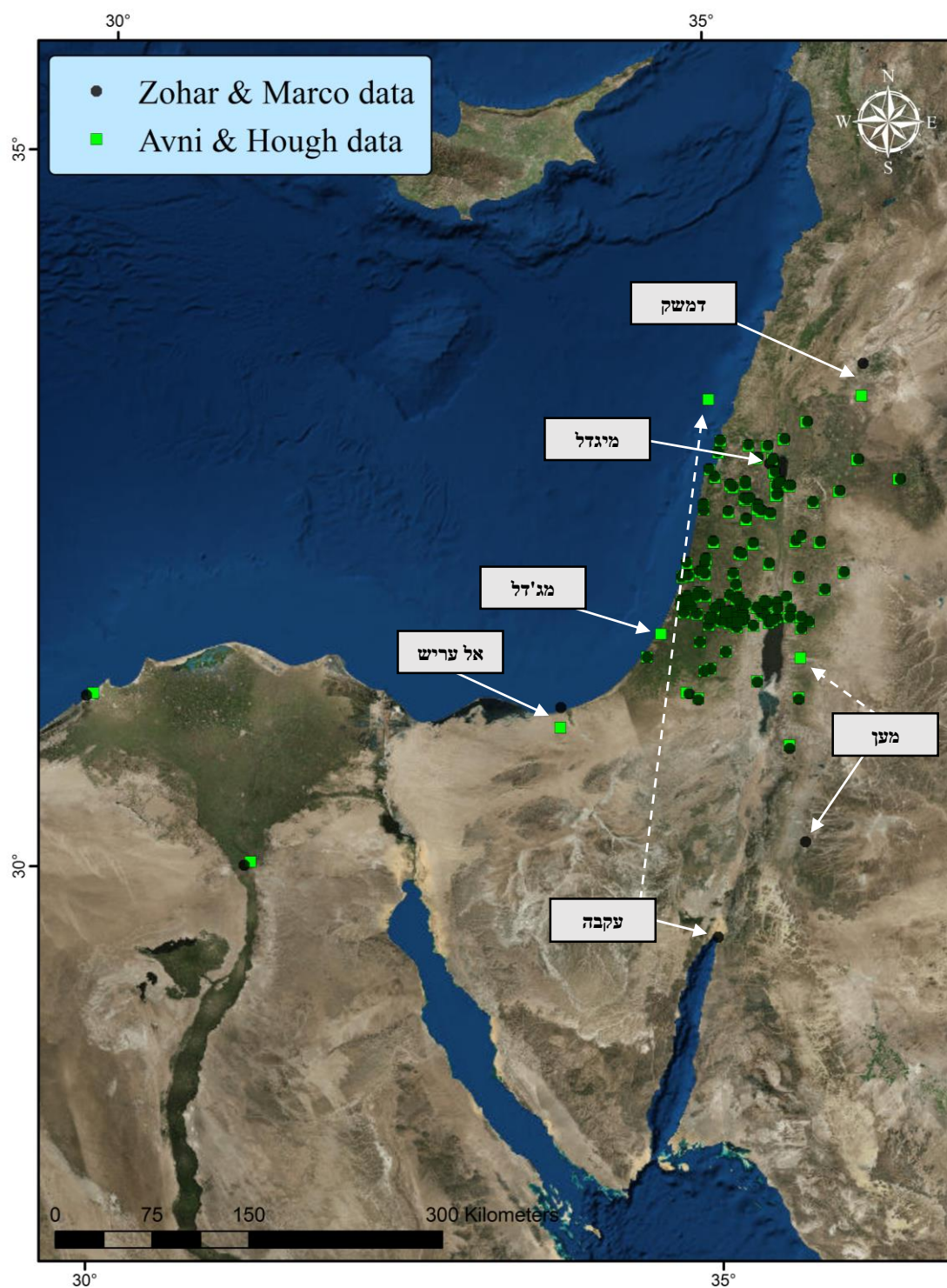
איור 5.3 - מפת סקרי המכון הגיאופיזי.

6.1 איסוף נתונים

נקודות הסקר בכל אתר נבחרו על פי השאיפה לסקור קרוב ככל האפשר לנקודת הציון אותה האף ואבני ציינו בעבודתם (Hough and Avni, 2011). בחלק מהאתרים נקודות הציון לא היו מדויקות ולעיתים נמצאו מאות קילומטרים מהאזור שתוארו. בכדי לאמת את מיקום הנקודות השלכתי את הנתונים על מפה ובנוסף אימתי אותם עם הנתונים של זוהר ומרקו (Zohar and Marco, 2012) (איור 6.1). מרחקי נקודות הציון של מען ועקבה בהשוואת שתי העבודות 145 ו- 416 ק"מ, בהתאמה. דמשק ואל עריש רחוקות 25 ו-15 ק"מ, בהתאמה בין שתי העבודות. על פי זוהר ומרקו (Zohar and Marco, 2012) יש תאור לאתר בשם Migdal, מושבה מערבית לכנרת בעוד אצל האף ואבני (Hough and Avni, 2011) יש תאור לאתר בשם Majdal. עיר ערבית שעל חורבתייה הוקמה אשקלון. בעבודתי עקבה ומען מוקמו על פי זוהר ומרקו ודמשק ואל עריש מוקמו על פי מיקומן במפה. מיקום מ'גדל נקבע על פי האף ואבני (איור 6.1) על פי העדויות בעבודתו של אבני (אבני, 1999).

לפני כל סקר בחנתי את האתר המיועד מכמה זוויות. תחילה, בדקתי את העדויות מעבודותיו של אבני (אבני, 1999). כאשר אלו לא היו מספיקות, בדקתי בספרות אליה מפנה אבני. בדרך כלל היו עדויות על מבנים ספציפיים שנפגעו. את מבנים אלו ניסיתי לאתר תוך הסתכלות על מפות היסטוריות (1927-1945). לרוב, האזורים עליהם תוארו הנזקים היו באזור שלא ניתן לסקור ולכן סקרתי באזורים סמוכים, בהם היה ניתן לפרוש קו סייסמי.

הושגו תוצאות עבור 20 אתרים מתוך 30 שתוכננו. זאת כיוון שהנתונים מהסקר בהר-טוב היו רועשים מאוד ולא ניתן היה לחלץ מהם Vs30; בגדרה לא נמצא מקום מתאים לפרישת קו סייסמי ולכן לא נמדדה. מצדה לא נמדדה בשל העובדה שלא היה ניתן למדוד בפסגתה. פתח תקווה, ריינה, נצרת, טבריה, מא'ער, ארמון הנציב ועובדייה לא נסקרו כיוון שהוחלט שישנם מספיק נתונים.



איור 6.1 - מיקום האתרים על פי האף ואבני (2011) וזוהר ומרקו (2012).

6.2 מודל מהירויות

המודל בסקרים שלי מייצג מהירויות בחתך חד מימדי ומזניח שינויים לטרליים. מספר המשתנים הבלתי תלויים עבור מודל משוכב ארבעה עבור כל שכבה: צפיפות, עובי, ושני משתנים אלסטיים. מכך, מספר המשתנים שווה ל- $4n-1$ כאשר n מספר השכבות. כאשר קובעים יחס פואסון וצפיפות מספר המשתנים יורד ל- $2n-1$. בשלב הבא בודקים את רגישות התוצאה להנחה זו.

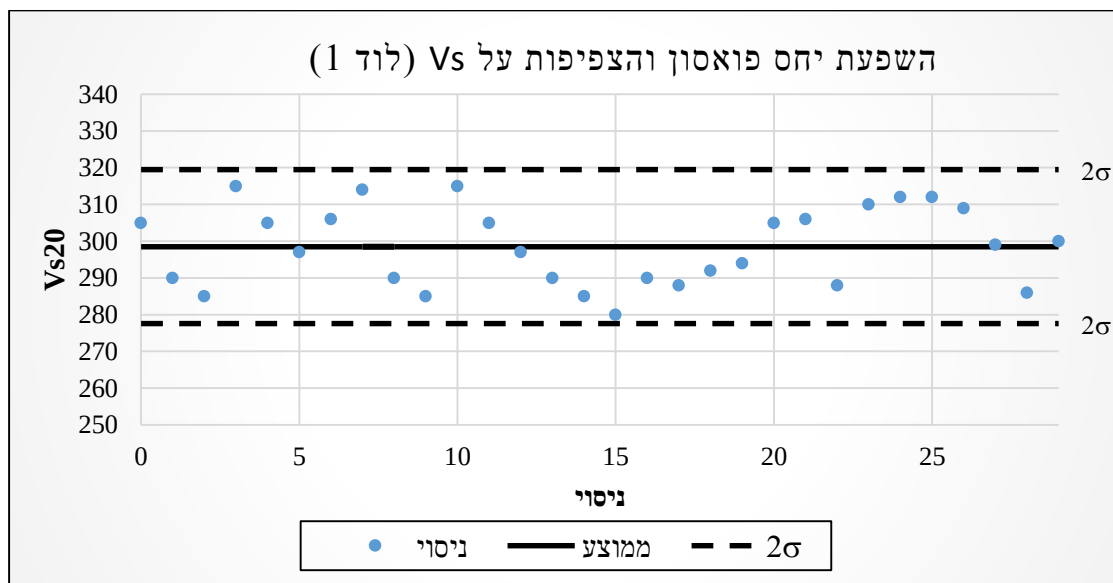
6.2.1 יחס פואסון וצפיפות

יחס פואסון והצפיפות הוגדרו 0.3 ו-2 גרם/ס"מ³ בהתאמה לכלל השכבות עבור כלל האתרים שנסקרו. כאשר מניחים יחס פואסון צריכים לקחת בחשבון את גובה מי התהום באתר. זאת כיוון שמתחת לגובה זה, בתווך מי הנקבובים גלי S לא מתקיימים ולכן יחס פואסון קרוב מאוד ל-0.5 על פי המשוואה:

$$\nu = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)} \quad (14)$$

מעל גובה מי התהום יחס פואסון 0.2-0.3 (Foti et al., 2014). מכאן, כאשר בסקרים לא היה ידוע גובה מי התהום, וכן גם לא היה מידע לגבי צפיפות השכבות השונות, שיערתי ערכים אלו על פי המקובל בספרות (Foti et al., 2014).

בכדי לבדוק את השפעת הצפיפות והיחס פואסון בסקרים שלי, הרצתי מודלים עם יחס פואסון וצפיפות שונים (0.2-0.4 ו-1-3 גרם/ס"מ³, בהתאמה). הרצתי את המודל פעם עבור ערכים קבועים לכלל השכבות ופעם עבור ערכים שונים לכל שכבה. בכל המקרים היה שוני במהירות Vs עבור כל שכבה, אך, Vs לא השתנה ביותר מ-7% מהמוצע (איור 6.2).

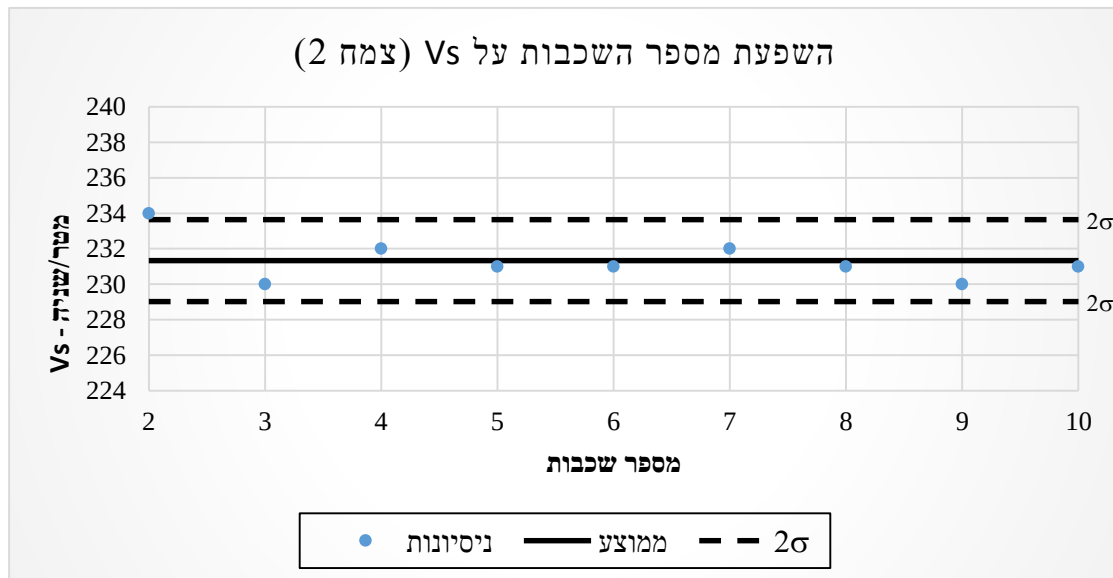


איור 6.2 - השפעת יחס פואסון והצפיפות על Vs30, בנתוני לוד 1.

6.2.2 מספר שכבות

רגישות (Sensitivity) השיטה דועכת עם העומק ולכן הרזולוציה של סקר MASW דועכת באותה צורה. לכן, הגדרת שכבות דקות קרוב לפני השטח הגיונית כיוון שברוב המקרים קיימים אורכי גל המניבים מידע על שכבות אלו. אך אין הדבר נכון עבור שכבות דקות בעומק, שם רק שינויים משמעותיים יכולים להתגלות (Foti et al., 2014).

בכדי לבדוק את השפעת מספר השכבות על Vs30 הרצתי מודלים בכמה אתרים עם שינוי מספר השכבות מ-2 ל-10. התוצאות חד משמעיות ומראות כי Vs_i כמעט ולא משתנה ($\pm 2\%$ מהמוצע) (איור 6.3).



איור 6.3 - השפעת מספר השכבות על Vs.

6.2.3 עובי שכבות

בהעדר קידוחים, או חתך סטרטיגרפי באזור הסקר לא ניתן לקבוע את עובי השכבות. אחד מכללי האצבע בשיטת MASW הוא לקבוע עוביים גדלים עבור כל שכבה עמוקה יותר (Foti et al., 2014). זאת בהתאם לרזולוציית הסקר הדועכת עם העומק. במודלים שהרצתי עובי השכבות נקבע על ידי המחשב ותמיד גדל עם העומק.

6.2.4 עומק המדידה

- שונות עומק ממוצע גלי הגזירה, V_{Si} , באתרים השונים נובע מכמה סיבות:
1. ברוב האתרים מדדנו בשטחים חקלאים בהם עמודת הקרקע עבה. באתרים מסויימים הקרקע המעובדת הגיע עד עומק 3 מטרים. בתווך מסוג זה המהירויות הסיסמיות נמוכות מאוד (100-300 מטר לשניה). מהירויות אלו עבור עומק זה משפיעות על V_{Si} ויכולות לגרור תוצאה נמוכה משמעותית, בבוודאי כאשר עומק חדירת המקור הוא נמוך (12-20) מטרים.
 2. בסקרים השתמשנו בפטיש 5 קילוגרם וסכמנו 5 מכות. לעיתים האנרגיה לא הייתה מספקת בכדי לחדור לעומק 30 מטר ולכן לא התקבל מידע עבור עומק זה.
 3. באתרים מסויימים לא היה ניתן לפרוש את הגיאופונים במרווחים מעל 2 מטרים ובכך הקו הסיסמי עמד על 46 מטרים. לכן, ישנה הגבלה לאורכי גל ארוכים ומכך יש פגיעה בעומק המדידה.
 4. בכל האתרים בהם צפינו להגברה (V_{s30} נמוך מ-760 מטר לשניה) הן התקבלו, אך, לא כך הדבר עבור האתרים להם צפינו הנחתה (V_{s30} גבוה מ-760 מטר לשניה). על פי משוואה 11 ככל שהמהירות הסיסמית של התדר הנמוך גבוהה יותר כך ישנם נתונים עבור עומק רב יותר. לכן, כאשר המהירויות הסיסמיות נמוכות עבור התדרים הנמוכים, קשה יותר לקבל נתונים מהעומק. בהנחה שישנה נפיצות ברורה עבור תדר 5 הרץ והמהירות איטית (200-300 מטר לשניה) נקבל חדירות לעומק 12 עד 20 מטרים. לכן בהרבה מהמקרים חסר לנו כ-33-60% מידע מ- V_{s30} .

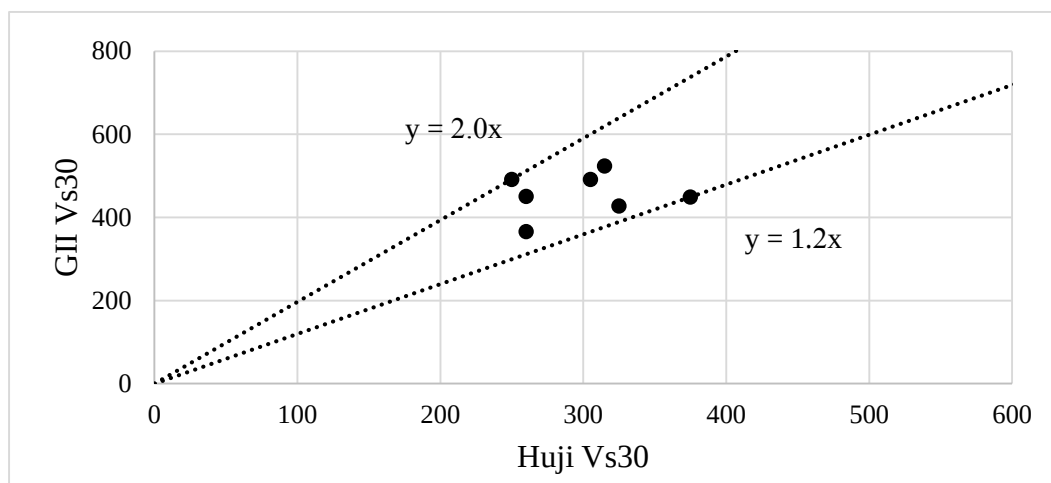
6.3 סקרי המכון הגיאופיזי

בכדי לבחון את תוצאות הסקרים, השווינו אותם עם תוצאות סמוכות של המכון הגיאופיזי. בעזרת התכנה GIS סיננת אתרים במרחק מקסימלי של 3 ק"מ מהאתרים שסקרתי. במידה והיו סקרים של המכון הגיאופיזי בטווח זה בדקתי את ה- V_{s30} שלהם, את מרחקם מהסקר שלי ואת השונות בין התוצאות (טבלה 2).

ID	Site	V_{Si} [m/sec]	Line Name	V_{s30} [m/sec]	Distance [km]	Difference
1	Acre 1	260	A1	366	2.5	41%
2	Acre 2	260	A2	451	2.86	73%
3	Binyamina	325	HPHB_RL1	428	1.63	32%
4	Herzliya	315	GL_RHSH	524	2	66%
5	Lod 1	250	LV_BS4	492	2.48	97%
6	Lod 2	305	LV_BS4	492	2.77	61%
7	Be'er Sheva	375	HBS	449	2.99	20%

טבלה 2 - V_{s30} על פי עבודות המכון הגיאופיזי (Aksinenko and Hofstetter, 2012).

על פי טבלה 2 השוונות המקסימלית 97% (Lod 1). הנתונים נופלים בין שני קווים עם שיפועים 1.2 ו-2 ועוברים בראשית (איור 6.4). במבט ראשון, שונות זו נראית גבוהה אך, על פי סיווג קרקעות בתקנים בנלאומיים ובישראלי (איור 2.3) בכל דרגה (class) יש טווח גדול של ערכים, עבור כל דרגה הערך המקסימלי גדול כמעט פי שניים מהערך המינמלי ועם הבדלים של עד 36% מהממוצע. לכן, נתונים מסקרים אזוריים יכולים להיות שימושיים, כיוון שנופלים בטווח השונות, אך יש לוודא את השפעת השונות על ההגדרה המחושבת.



איור 6.4 - השוונות תוצאות המכון הגיאופיזי עם סקרים סמוכים שלי.

בכדי להתחשב בשונות Vs30 במרחקים קרובים (עד מאות מטרים), בדקתי לעומק את סקרי המכון הגיאופיזי. מ-186 האתרים שעבורם חילצתי Vs30 יש עשרה אזורים בהם שני סקרים שמרחקם לא עולה על 550 מטר והשוונות בערכי Vs30 משמעותית. עבור זוגות אתרים אלו אני מציג בטבלה 3 את מהירויות גלי הגזירה, מרחק הדדי, וסטייה הדדית. על פי הטבלה השגיאה המרבית היא בתחנת טורבינות הגז סמוך לאלון תבור ועומדת על 83%. ממצאים אלו מראים שוב כי ההבדלים גדולים, אך, עדיין בטווח הדרגות הקיימות בתקנים השונים.

Area	Site 1	Vs30 [m/sec]	Site 2	Vs30 [m/sec]	Dist – [m]	Difference
Qiryat Shemona	QSH_R-15	611	QSH_BH2	388	523	57%
Tsfat	NAZ1	854	NAZ2	594	345	44%
Emek Zvolon	DS_R196_2	148	DS1	243	547	64%
Sdot Yam	Well_BL50	220	HPS1	343	84	56%
Afula	AT2	1116	Well_AT18	610	221	83%
Gesher	KJ_L19	240	KJ_L34	380	167	58%
Tel Aviv	TA_BH-673	320	TA_BH-648	524	509	64%
Jerusalem	J_KL2	1750	Well_TB-27	2758	470	58%
Newe Zohar	PDS_BH71	1520	PDS_NP3	940	418	62%

טבלה 3 - שונות Vs30 בסקרי המכון הגיאופיזי במרחקים עד 550 מטרים.

בכדי לדלות עוד תוצאות בדקתי אם ישנם סקרים של המכון הגיאופיזי במרחק עד 3 ק"מ מאתרים של אבני שלא סקרתי. כך קבעתי Vs30 עבור טבריה, הר-טוב, עובדייה, נצרת, ופתח תקווה. מתוך אתרים אלו טבריה, עובדייה (החשודים בהגברה) עם Vs30 385 ו-360 מטר לשניה, בהתאמה, והר טוב (חשוד בהנחתה) בעל Vs30 2029 מטר לשניה, עונים על הציפייה. כעת, עבור 14 מתוך 25 אתרים, המהווים 56%, משוואת הניחות המתקבלת על פי שיטת הריבועים המופחתים היא:

$$MMI = -0.64 + 1.7M - 0.00448d - 1.67 \log(d) - 1.579 \ln\left(\frac{Vs30}{760}\right) \quad (15)$$

כאשר $Vs_{(Bedrock)}$ משתנה חופשי, המשוואה בעלת סכום הריבועים הפחותים המניבה את הערך המינמלי ביותר (3.155 לעומת 5.267 במשוואה 14) ומניבה את משוואה 16, מהווה את משוואת הניחות העדכנית בעבודה זו:

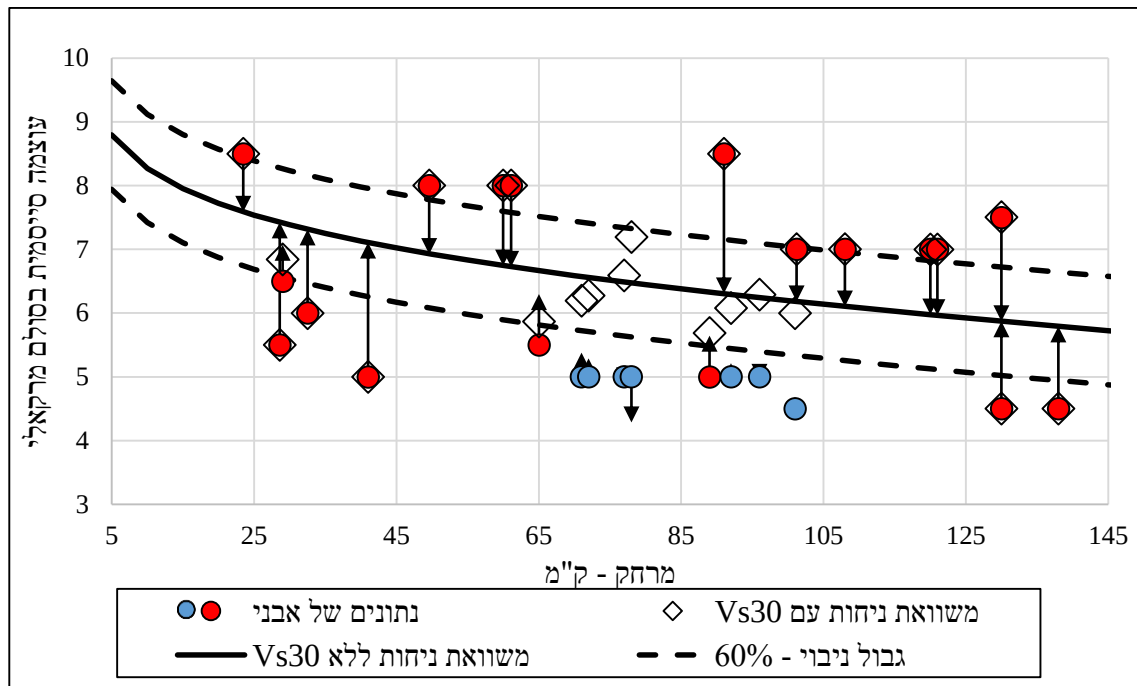
$$MMI = -0.64 + 1.7M - 0.00448d - 1.67 \log(d) - 1.82 \ln\left(\frac{Vs30}{600}\right) \quad (16)$$

בהתחשב שהפרש התוצאות יכול להגיע עד פי 1.83 עבור אתרים סמוכים (טבלה 3) ועד פי 2 על פי טבלת הדרגות בתקן הישראלי, בדקתי כמה אתרים מסך התוצאות (כולל חמשת התוצאות מסקרי המכון הגיאופיזי), עבור ערכים עד $\pm 80\%$ מערך Vs30 המקורי, מתאימים למשוואת הניחות (משוואה 16). 22 מתוך 25 האתרים, המהווים 88% מונחתים ומוגברים בהתאם לציפייה (טבלה 4).

בית אלפא, בנימינה והרצליה הונחתו על פי נתוניו של אבני (אבני, 1999), אך על פי משוואת הניחות שלי (16) אתרים אלו מוגברים בשל Vs30 קטן מ-600 מטר לשניה (חיצים כלפי מטה באיור 6.5). גבעתיים, יבנה, באר שבע, ונהלל נמצאות במרחק של עוצמה סייסמית אחת לפחות מהנתונים של אבני (צבועות באפור בטבלה 4) ולכן לא אמינות והסרתי אותן. בסופו של דבר 18 מתוך 25 אתרים, המהווים 72%, תואמים את צפי המשוואה.

Site	Distance [m]	Corrected Vs30 [m/sec]	MMI with Vs30 [m/sec]	Avni MMI	Measured Vs30 [m/sec]	Diff
Mt. Scopus	23.5	364	8.5	8.5	565	36%
Beit HaKerem	28.6	1728	5.5	5.5	1450	19%
Ramat Rachel	29	821	6.8	6.5	455	80%
Motza	32.5	1236	6.0	6.0	1005	23%
Hartuv	41	1911	5.0	5.0	2029	6%
Tzora'h	49.6	333	8.0	8.0	270	23%
Lod	60	301	8.0	8.0	278	8%
Ramleh	61.1	298	8.0	8.0	368	19%
Petach tikva	65	930	5.9	5.5	517	80%
Givatyim	71	740	6.2	5.0	410	80%
Yavneh	72	703	6.3	5.0	390	80%
Herzliya	77	567	6.6	5.0	315	80%
Beit alfa	78	405	7.2	5.0	225	80%
Ashkelon	89	855	5.7	5.0	475	80%
Jasar-Majami	91	180	8.5	8.5	275	35%
Be'er Sheva	92	675	6.1	5.0	375	80%
Binyamina	96	585	6.3	5.0	325	80%
Nahalal	101	665	6.0	4.5	370	80%
Tzemach	101.2	383	7.0	7.0	238	61%
Tiberias	108	367	7.0	7.0	368	0%
Ubadiya	120	342	7.0	7.0	526	35%
Nazareth	121	340	7.0	7.0	976	65%
Peqi'in	130	1275	4.5	4.5	1425	11%
Acre	130	245	7.5	7.5	260	6%
Nahariya	138	1221	4.5	4.5	840	45%

טבלה 4 - תיקון Vs30 באתרים השונים. אדום עבור אתרים מוגברים וצהוב לאתרים מונחתים. Site – שם האתר. Distance – מרחק האתר ממוקד הרעידה (מוקדם של זוהר ומרקו). Corrected Vs – תיקון ל-Vs30. MMI with Vs30 – העוצמה הסייסמית על פי משוואה 16. Avni MMI – העוצמה הסייסמית אותה העריך אבני (אבני, 1999). Vs30 – Measured Vs30 – שנימדד בסקרים שלי או על ידי המכון הגיאופיזי. Diff – ההבדל בין Corrected Vs30 לבין Measured Vs30 באחוזים. באפור מסומנים האתרים בהם העוצמה הסייסמית על פי משוואתי רחוקה בלפחות עוצמה אחת מעומדנו של אבני (אבני, 1999).



איור 6.5 - 25 התוצאות מאתרים שסקרתי ומ Vs30 שחילצתי מסקרי המכון הגיאופיזי. נק' אדומות – עוצמות סייסמיות שאבני העריך. מעוינים שקופים – עוצמות סייסמיות על פי משוואת הניחות (משוואה 16). החיצים מייצגים היכן העוצמות שאבני העריך היו נמצאות כאשר מחסירים את השפעת הליתולוגיה (Vs30). עיגולים כחולים – אתרים שלא נפלו בקנה אחד עם הציפייה (חיצים בכיוון הפוך למצופה) או שהפרש העוצמה הסייסמית בתוצאותי שונה לפחות ב-1 מנתוני של אבני.

6.4 סקרים שלא נפלו בקנה אחד עם התצפיות

בכל הסקרים בהם התוצאות לא נופלות בקנה אחד עם הציפיות (באר שבע, בית אלפא, בנימינה, גבעתיים, הרצליה, נהלל ויבנה) מדובר על אתרים שצפיתי ל-Vs30 גדול מ-760, או 600 מטר לשניה על פי משוואת הניחות העדכנית שלי (משוואה 16) אך, בפועל התקבלה מהירות נמוכה מערך זה. עבודה זו מתבססת על נתונים שהעריך אבני על פי מסמכים היסטוריים, ישנם אתרים אמינים יותר וישנם פחות. כאשר מציבים במשוואת הניחות של האף ואבני (Hough and Avni, 2011) את מרחקי אתרים אלו ומשווים אותם לערך הממוצע (I mean) שהעריך אבני מתקבל כי בית אלפא, בנימינה, נהלל ויבנה אינם מוגברים באופן החורג מגבול 60% התוצאות. הממוצע מתאר את "מרכז" העוצמות הסייסמיות עבור כל אתר ומהגדרתו מכיל את כלל הערכים כולל הקיצונים שבהם. לכן, התייחסות לממוצע פחות נכונה כוון שזו לא העוצמה השכיחה שנצפתה באתר. אך כפי שכבר כתבתי השוני בערכי Vs30 יכול להיות גדול במרחקים קצרים וייתכן שאתרים אלו מיוצגים נכונה יותר על ידי הערך הממוצע ולא השכיח. מספר הערכות העוצמה הסייסמית בבאר שבע והרצליה נמוך (N): 2, 1 בהתאמה. כלומר, להרצליה יש עדות אחת לגבי העוצמה הסייסמית המקומית, ולבאר שבע שניים. מכך, העוצמה השכיחה (I mode) והממוצעת זהות ולכן, אין שינוי בתוצאות עבור ערים אלו.

6.5 השוואה עם רפרקצית גלי P

בכדי לראות אם ישנה קורלציה בין תוצאות Vs30 משיטת MASW לבין רפרקצית גלי P לקחתי שני מקרי בוחן: ג'סר מאג'מי ובאר שבע. בדקתי עבור שני אתרים אלו את מהירות גלי P עבור השכבה הראשונה והשניה (מסומנת בשחור ובתכלת בהתאמה באיור 6.6 ואיור 6.7), מרחק החיתוך בין העקומות (Xco-Crossover) ועל פי המשוואה (Burger et al., 2006):

$$Z = \frac{Xc}{2} \cdot \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} \quad (17)$$

חישבתי את עומק המגע בין השכבות, Z.

מתוך קבועי לאמה (Lame constant) עבור חומרים הומוגנים ואיזוטרופיים:

$$\mu = \frac{M(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \quad (18)$$

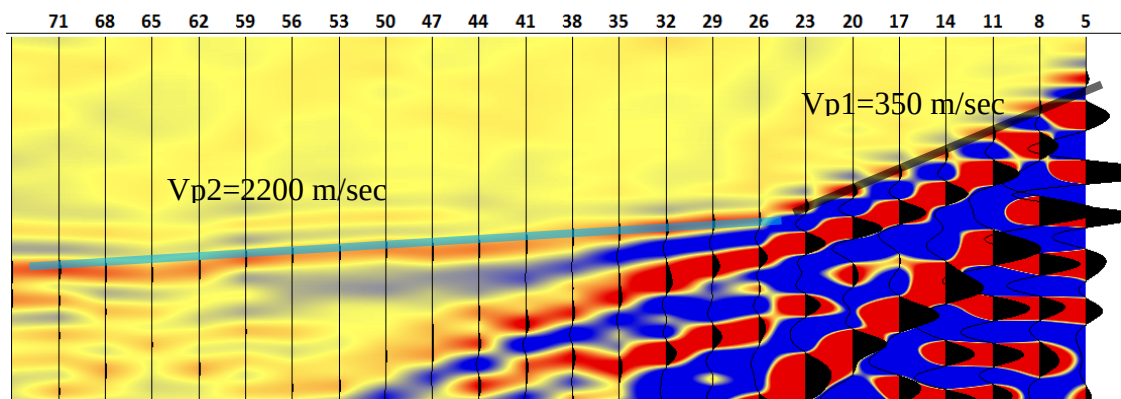
כאשר M מודול גלי P וערכו:

$$M = \rho V_p^2 \quad (19)$$

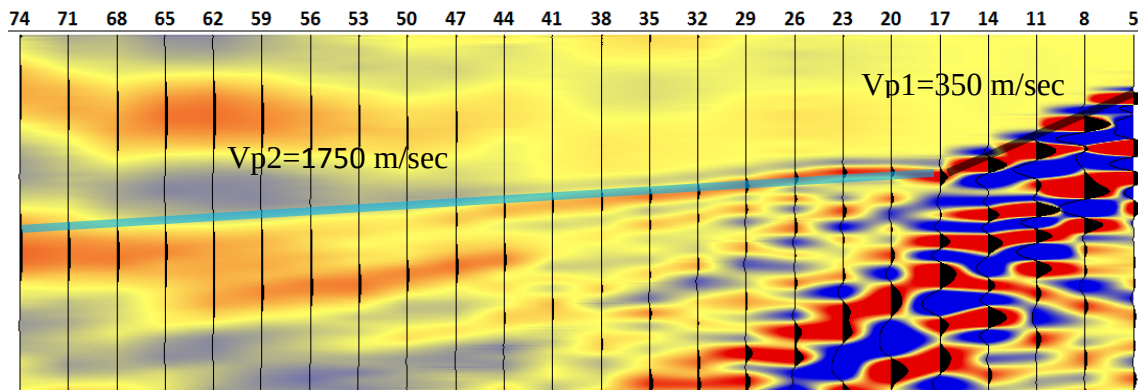
ו- μ , מודול הגזירה על פי משוואה 9 שווה ρV_s^2 . בהצבת הערכים והנחת פואסון 0.3 כפי שהנחתי במודל MASW מתקבלת המשוואה:

$$V_s = \sqrt{0.286} \cdot V_p \quad (20)$$

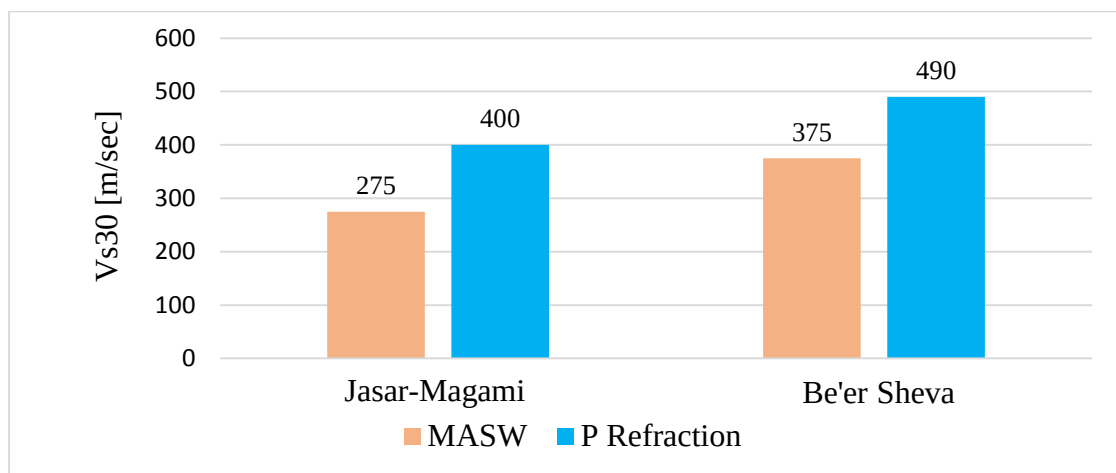
לאחר חישוב מהירות גלי S בשני התווכים (על פי משוואה 20) חישבתי Vs30 (על פי משוואה מספר 5) והתקבלו התוצאות הבאות: באר שבע כ-490 מטר לשניה (30% מעל מודל MASW שהניב 375 מטר לשניה) וג'סר מאג'מי כ-400 מטר לשניה (כ-45% מעל מודל MASW שהניב 275 מטר לשניה) (איור 6.8).



איור 6.6 - Picking בעקומת זמן מרחק מאתר ג'סר מאג'מי. המספרים מעלה מייצגים את המרחק מהמקור. בשחור מהירות גלי P של השכבה הראשונה ובתכלת מהירות גלי P של השכבה השניה.



איור 6.7 - Picking בעקומת זמן מרחק מאתר באר שבע. המספרים מעלה מייצגים את המרחק מהמקור. בשחור מהירות גלי P של השכבה הראשונה ובתכלת מהירות גלי P של השכבה השנייה.

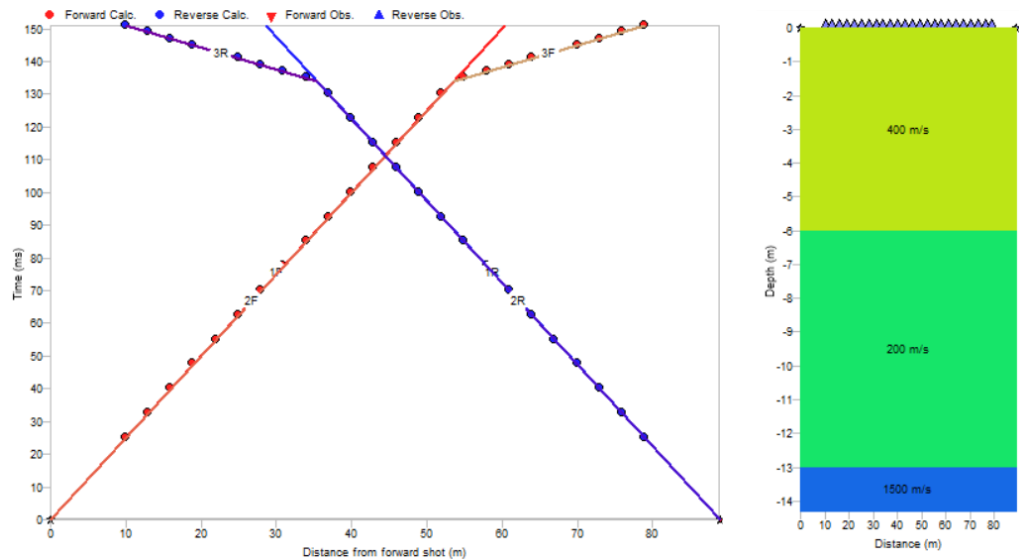


איור 6.8 - השוואה בין תוצאות שיטת הרפרקציה לבינ שיטת MASW.

להבנת ההשוואה לתוצאות גלי רפרקציה יש לעמוד על מספר נקודות:

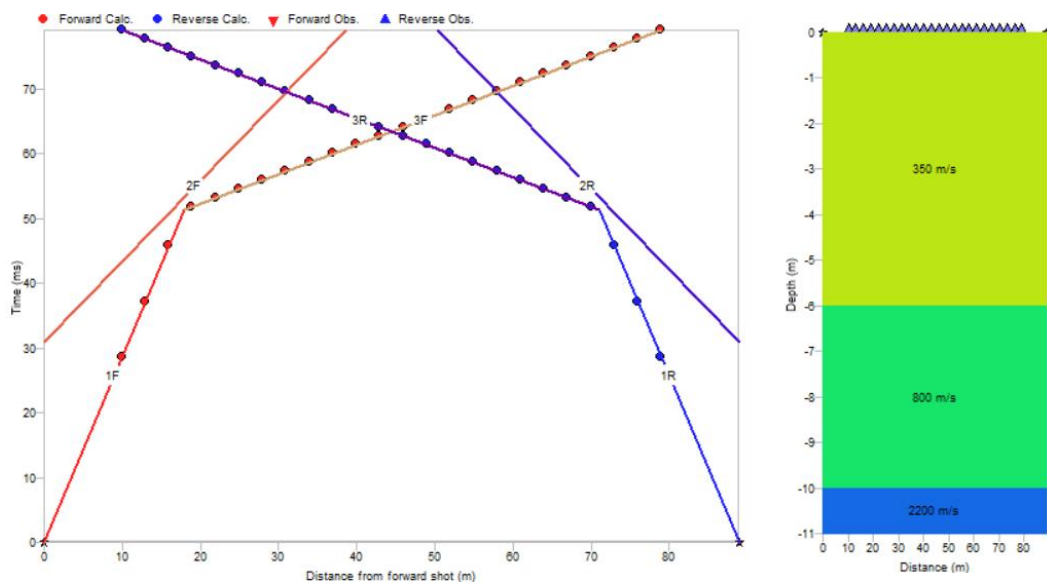
1. בתהליך איסוף הנתונים לא נאספו נתונים בצורה הקלאסית לעיבוד רפרקציה. לא הפעלתי מקורות בתוך הקו הסייסמי, כך שחסר מידע על השכבות הרדודות.
2. בתהליך עיבוד הנתונים שינוי קל בשיפוע עקומת המהירות (קו שחור ותכלת באיור 6.6 ואיור 6.7) מייצג שינוי במהירות גלי P של השכבה. שינויים אלו יכולים להגיע עד 500 מטר לשניה (בעיקר עבור השכבה העמוקה יותר) דבר הגורר שינוי בכ-250 מטר לשניה בגלי ה-S.
3. בשתי הדוגמאות, ג'סר מאג'מי ובאר שבע, ייתכן והשכבה הראשונה היא גל הדף מהפעלת המקור ואיננו מייצג נכונה את השכבה הראשונה. זאת על פי העובדה שהמהירות שהתקבלה קרובה מאוד למהירות הקול באוויר (330 מטר לשניה).
4. שיטת הרפרקציה הסייסמית בעייתי כאשר אין מדובר בעלייה במהירות הסייסמית עם העומק (velocity inversion). במצב זה לא יתקבלו החזרות מהשכבות העמוקות כיוון שרפרקציה קריטית

לא מתרחשת. לכן, ייתכנו מצבים עם שכבות בעלות מהירות נמוכה מזו שמעליהם ואותן לא נראה בעקומת זמן – מרחק (איור 6.9).



איור 6.9 - דוגמא למודל עם היפוך מהירויות. מימין החתך הגיאולוגי למודל ומשמאל עקומת זמן מרחק שבה השכבה האמצעית "נעלמת" (Burger et al., 2006).

5. בהינתן שכבה דקה בעומק ייתכן ולא נראה עדות לה בעקומת זמן – מרחק כיוון שהגעות הרפרקציה משכבה תחתיה יכולות להגיע לפנייה (איור 6.10). מצב זה יגרור שגיאה והשכבה השלישית תמודל כשכבה שנייה. ייתכן וזהו המצב עבור באר שבע וג'סר מאג'מי שבשתייה התקבלו מהירויות גבוהות ממודל MASW כך שייתכן וישנה שכבה בעלת מהירות סייסמית נמוכה יותר שאותה לא זהיתי ברפרקציה הסייסמית.



איור 6.10 - דוגמא למודל עם שכבה דקה בעומק. מימין החתך הגיאולוגי ומשמאל עקומת זמן – מרחק שבה השכבה האמצעית מופיע מאוחר יותר מהשכבה השלישית ולכן איננה תלקח בחשבון בתהליך ה-picking (Burger et al., 2006).

- במחקר זה סקרתי הגברות והנחתות מקומיות באתרים שונים ברחבי מדינת ישראל. על פי מחקרים קודמים (Aki, 1988; Joyner and Boore, 1988; Borchardt, 1994; Field and Jacob, 1995; Boore, 2003) התבססה ההנחה כי הליתולוגיה המקומית יכולה להגביר או להנחית את עוצמת הגלים המגיעים אל פני השטח כתוצאה מרעידת אדמה. רעידת אדמה מורכבת מאוד ולא ניתנת לפישוט למכת פטיש כפי שקרה בעבודתי. מעבר מממוקד רעידה למכת פטיש מצריך הזנחות רבות ואין בהכרח הנכון שניתן להסיק מסקנות מהמהקרה הפרטי, פטיש 5 קילוגרמים, למקרה הכללי, רעידת אדמה. נוסף על כך, העוצמה הסייסמית המקומית מושפעת ממשתנים נוספים מלבד הליתולוגיה: איכות הבנייה, עומק יסודות, טופוגרפיה, כיוון ההתקדמות ההפרעה, סוג ההפרעה וכדומה. מתוך שלל משתנים אלו, בדקתי רק את השפעת אספקט אחד של פטרופיסיקה שנמצא בקורלציה מסוימת לליתולוגיה.
- מדדתי Vs30 ב-20 אתרים בישראל. בנוסף, חילצתי Vs30 מעבודות קודמות בישראל. לעיתים התגלו הבדלים של עד פי 1.8 ב-Vs30 עבור אזורים סמוכים. התקנים הבינלאומיים, וכן גם הישראלי, מחולקים לדרגות אשר טווח הערכים בכל דרגה מגיע עד פי 2. לכן, שונות זו קבילה למרות ההבדלים הגדולים. צריך לשים לב כי לעיתים Vs30 יכול להיות בדרגה מסוימת אך במרחק כמה מאות מטרים ממנו הערך יכול להיות פי 1.8 ובכך להיות בדרגה אחרת. המסקנה ברורה: שימוש במפה גיאולוגית ככלי לניבוי Vs30 הוא דבר בעיית של תמיד נוכל לסמוך עליו. ניתן להעריך Vs30 על פי הליתולוגיה כאשר ישנו חתך עומק של 30 המטרים הראשונים אך לא על סמך מפה בלבד. כאשר ישנה התייחסות ספציפית, נקודת ציון מסוימת, כדאי לסקור אותה ולחלץ "ישירות" את Vs30 ולא להעריך. זאת בכדי להקטין את השגיאה.
- בחלק מהאתרים ישנה אי ודאות לגבי האופנים השונים, כלומר ישנה עקומת דיספרסיה שלא ניתן לומר בסבירות גבוהה על איזה אופן מדובר או להפריד בין האופנים השונים. בכדי לחלץ Vs30 אמין צריכה להיות הפרדה ברורה בין האופנים ולזהותם בצורה נכונה: מי הפודמנטאלי, מי הראשון וכדומה. בכדי שיהיו נתונים נוספים ככלי השוואה רצוי לשלב שיטות שונות (joint inversion): רפרקציה סייסמית בגלי S (כפי שתוכנן במקור, אך בפועל לא קרה במחקר זה) וגלי P, יחסי H/V, גלי לאב (LWMs), קידוחים וכדומה. דבר נוסף שהיה יכול להניב תוצאות נרחבות וברורות יותר הוא סקירה גלי ריילי בשיטה הפאסיבית (Passive MASW). בשיטה זו מקליטים רעשי סביבה למשך זמן ארוך (20-30 דקות). בשיטה זו ניתן לקלוט תדרים נמוכים יותר מהשיטה האקטיבית. כזכור, תדרים נמוכים נותנים מידע לגבי עומק רב יותר.

- לרוב פעולות העיבוד לא היו מורכבות והניבו גרף נפיצות יחסית ברור שממנו ניתן לחלץ Vs30. אך, היו מקרים בהם היו הפרעות מקומיות בזמן הסקר (טרקטור בסביבה, משאבת מים באזור ועוד...) הרעש גרר הפרעות רבות בגלי השטח. בכדי לנטרל השפעות אלו יש צורך בשימוש מעמיק יותר בסל אפשרויות העיבוד. התמקצעות בעיבוד סייסמי תועיל מאוד במקרים אלו, או בכלל בכדי לחלץ יותר מהנתונים שהוקלטו בשטח.
- במחקר זה לא יחסתי חשיבות לעומק Vs וכל התוצאות שהתקבלו, גם אם היו עבור עומק רדוד מ-30 מטרים, עובדו והופקו כ-Vs30. משתנה זה, Vs30, הגיע מהתקן האמריקאי והאירופאי. שם נמצא אמפירית כי 30 מטרים הם עומק מספיק ונמצא ביחס ישיר לעומק רב יותר וכן גם עבור עומק רדוד יותר (Boore et al., 2011). בישראל הדעות חלוקות לגבי אימוץ עומק זה. ישנם מחקרים בנושא בכדי לאשש או לסתור זאת. בתקן הישראלי (מכון התקנים הישראלי, 2013) העומק הנדרש הוא 30 מטרים כמו בתקנים הבנלאומיים. לכן בהעדר הוכחה כי צריך להשתמש בערך אחר, זהו הערך שעלינו למדוד ולכן הוא זה ששאפנו למדוד במחקר זה.
- בתקן הישראלי (413), מהירות הייחוס ($V_{Sbedrock}$) מוגדרת 760 מטר לשניה. בעבודתי, על פי שיטת הריבועים נמצאה התאמה טובה יותר לערך 600 מטר לשניה. בכדי לדייק יותר בבמשוואת הניחות אין הנכון להגדיר ערך אחד בלבד אלא להגדיר משתנה המוגדר על פי מהירות גלי הגזירה בסלע התשתית (bedrock). זאת ניתן לעשות על ידי סקרי רפרקציה של גלי S או על ידי הנחת יחס פואסון וסקירת רפרקציה של גלי P.
- 55% מתוצאות העבודה תואמים את הציפיות, ו-72% לאחר מניפולציות על התוצאות. אחוז זה נמוך ולא מספק. נתון זה מוביל למסקנה כי עבודות נוספות צריכות לקחת חלק בתחום. הבנת השפעת הליתולוגיה התבססה כמשפיעה על הנזק הסייסמי ולכן מחקר מעמיק נחוץ בישראל. התקן בארץ מחייב שימוש ב-Vs30 תוך הנחה שמה שנכון באירופה ובארצות הברית נכון גם לישראל. אך, לא בהכרח הנכון הוא שזהו הדבר הנכון (Zaslavsky, 2012).
- בשל נדירות ברעידות אדמה הרסניות (לא שיש תלונות על כך), אין מספיק נתונים עבור משוואת ניחות מודרנית הכוללת Vs30 כפי שיש בארצות הברית או ביפן (באזורים מוכי רעידות אדמה). רק כשהיו לנו מספיק נתונים תהיה אפשרות למצוא משוואת ניחות שבאמת תנבא משהו לגבי תאוצות קרקע או עוצמות סייסמיות. בשורה תחתונה, עד שרעידת אדמה עדכנית לא תגיע ותזעזע את ישראל (עוצמה 6 ומעלה) לא נוכל לאמת או למצוא משוואת ניחות עדכנית.

- עבודות מודרניות למציאת משוואת ניחות מתאימה מתפרסמות בימינו (Abrahamson et al., 2014). בנוסף, הגוף האמון על נושא ההערכות בזמן רעידת אדמה (ועדת ההיגוי הבין-משרדית להיערכות לרעידות אדמה) משקיע משאבים בכדי שישראל תהיה מוכנה לאירוע קיצוני. כחלק מהיערכות מוזנקים מחקרים בכדי לקמט את המשתנים המשפיעים על העוצמה הסייסמית למשוואה אחת שעליה נוכל להתבסס.
- בעבודה זו ניסיתי לחלץ משוואת ניחות עדכנית לרעידה היסטורית. כאשר אין נתוני תאוצת קרקע אלא רק עוצמות סייסמיות דיוק המשוואה יורד כיוון שמדובר בהערכות סייסמיות שבני אדם נתנו על סמך קריטריונים סובייקטיביים ולא על פי מכשור המודד ערכים מדויקים. לכן משוואת הניחות העדכנית בעבודה זו אמנם מראה הגברות והנחתות כתלות ב-Vs30 והמרחק, אך לא לוקחת בחשבון שום משתנה אחר. מהיותה כזו, איננה מומלצת לשימוש ככלי לניבוי העוצמות הסייסמיות בישראל. בכדי שכן תהיה אחת כזו, רצוי למדוד תגובות אתר בכל 133 האתרים בהם אבני העריך עוצמה סייסמית יחד עם ניתוח כלל התוצאות של המכון הגיאופיזי.

- Abel, F., 1927, No Le Recent Tremblement de Terre en Palestine: *Revue Biblique*, v. 36, p. 571–578.
- Abrahamson, N.A., Silva, W.J., and Kamai, R., 2014, Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions: *Earthquake Spectra*, v. 30, no. 3, p. 1025–1055.
- Aguirre, J., and Irikura, K., 1997, Nonlinearity, liquefaction, and velocity variation of soft soil layers in Port Island, Kobe, during the Hyogo-ken Nanbu earthquake: *Bulletin of the Seismological society of America*, v. 87, no. 5, p. 1244–1258.
- Aki, K., 1988, Local site effects on ground motion: *Earthquake Engineering and Soil Dynamics II-Recent Advances in Ground Motion Evaluation*, Geotechnical Special Publication, v. 20, p. 103–155.
- Aksinenko, T., and Hofstetter, A., 2012, 1-D semi-empirical modeling of the subsurface across Israel for site effect evaluations.:
- Ambraseys, N.N., and Melville, C.P., 1988, An analysis of the eastern Mediterranean earthquake of 20 May 1202: *Historical seismograms and earthquakes of the world*, p. 181–200.
- Amiran, D.H., 1951, A Revised Earthquake-Catalogue of Palastine: *Israel Exploration Journal*, v. 2, p. 48–65.
- Arieh, A., 1967, Seismicity of Israel and Adjacent Area: Ministry of Development, v. 43, p. 1–14.
- Bakun, W.H., 2006, MMI attenuation and historical earthquakes in the basin and range province of western North America: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 96, no. 6, p. 2206–2220, doi: 10.1785/0120060045.
- Ben-Menahem, A., 1991, Four thousand years of seismicity along the Dead Sea Rift: *Journal of Geophysical Research*, v. 96, no. B12, p. 20195, doi: 10.1029/91JB01936.
- Ben-Menahem, A., Nur, A., and Vered, M., 1976, Tectonics, seismicity and structure of the Afro-Eurasian junction — the breaking of an incoherent plate: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, v. 12, no. 1, p. 1–50, doi: 10.1016/0031-9201(76)90005-4.
- Beresnev, I.A., and Abeelee, V. Den, 1998, Magnitude of Nonlinear Sediment Response in Los Angeles Basin during the 1994 Northridge, California, Earthquake: v. 88, no. 4, p. 1079–1084.
- Blankenhorn, M., 1927, Das Erdbeben in Juli 1927 in Palestina: *Zeitschr.D.Pal*, , no. 51, p. 123–125.

- Boore, D.M., 2003, Simulation of ground motion using the stochastic method: Pure and applied geophysics, v. 160, no. 3–4, p. 635–676.
- Boore, D.M., Joyner, W.B., and Fumal, T.E., 1997, Equations for Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Acceleration from Western North American Earthquakes: A Summary of Recent Work: Seismological Research Letters, v. 68, no. 1, p. 128–153, doi: 10.1785/gssrl.68.1.128.
- Boore, D.M., Thompson, E.M., and Cadet, H., 2011, Regional correlations of V_{s30} and velocities averaged over depths less than and greater than 30 meters: Bulletin of the Seismological Society of America, v. 101, no. 6, p. 3046–3059, doi: 10.1785/0120110071.
- Borcherdt, R.D., 1994, Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification): Earthquake spectra, v. 10, no. 4, p. 617–653.
- Borcherdt, R., Glassmoyer, G., Andrews, M., and Cranswick, E., 1989, Effect of site conditions on ground motion and damage: Earthquake spectra, v. 5, no. S1, p. 23–42.
- Burger, H.R., Sheehan, A.F., and Jones, C.H., 2006, Introduction to applied geophysics: Exploring the shallow subsurface: WW Norton.
- Ewing, W.M., 1957, Elastic waves in layered media: McGraw-Hill, New York.
- Field, E.H., and Jacob, K.H., 1995, A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent: Bulletin of the seismological society of America, v. 85, no. 4, p. 1127–1143.
- Finn, W.D.L., 1994, Issues in Urban Earthquake Risk, in Tucker, B.E., Erdik, M., and Hwang, C.N. eds., Springer Netherlands, Dordrecht, p. 35–77.
- Foti, S., Lai, C., Rix, G., and Strobbia, C., 2014, Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization: CRC Press.
- Hall, J.F., Holmes, W.T., and Somers, P., 1994, Northridge earthquake, January 17, 1994: Preliminary reconnaissance report.
- Hough, S.E., and Avni, R., 2011, The 1170 and 1202 CE Dead Sea Rift earthquakes and long-term magnitude distribution of the Dead Sea Fault Zone: Israel Journal of Earth Sciences, v. 58, no. 3, p. 295–308, doi: 10.1560/IJES.58.3-4.295.
- Hough, S.E., Friberg, P.A., Busby, R., Field, E.F., Jacob, K.H., and Borcherdt, R.D., 1990, Sediment-induced amplification and the collapse of the Nimitz Freeway: Nature, v. 344, no. 6269, p. 853–855.
- Joyner, W.B., and Boore, D.M., 1988, Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion:
- Kagan, E., Stein, M., Agnon, A., and Neumann, F., 2011, Intrabasin paleoearthquake

- and quiescence correlation of the late Holocene Dead Sea: *Journal of Geophysical Research*, v. 116, no. B4, p. B04311, doi: 10.1029/2010JB007452.
- Milne, J., 1898, *Seismology*: London: Kegan Paul, Trench, Truber,.
- Moro, G.D., 2015, *Surface Wave Analysis for Near Surface Applications*:
- Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J., 1997, *Multi-Channel Analysis of Surface Waves (MASW)* prepared by.:
- Singh, S.K., Lermo, J., Dominguez, T., Ordaz, M., Espinosa, J.M., Mena, E., and Quaas, R., 1988, The Mexico earthquake of September 19, 1985-A study of amplification of seismic waves in the valley of Mexico with respect to a hill zone site: *Earthquake spectra*, v. 4, no. 4, p. 653–673.
- Stokoe II, K.H., Wright, S.G., Bay, J.A., and Roesset, J.M., 1994, Characterization of geotechnical sites by SASW method: *Geophysical characterization of sites*, p. 15–25.
- Willis, B., 1928, Earthquakes in the Holy Land: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 18, no. 2, p. 73–103.
- Zaslavsky, Y., 2012, Questioning the applicability of soil amplification factors as defined by NEHRP (USA) in the Israel building standards: *Natural Science*, v. 4, no. 28, p. 631–639, doi: 10.4236/ns.2012.428083.
- Zohar, M., and Marco, S., 2012, Re-estimating the epicenter of the 1927 Jericho earthquake using spatial distribution of intensity data: *Journal of Applied Geophysics*, v. 82, p. 19–29, doi: 10.1016/j.jappgeo.2012.03.004.
- אבני, ר., 1999, רעידת האדמה של שנת 1927 - מחקר מאקרוסייסמי על בסיס מקורות התקופה: אוניברסיטת בן גוריון בנגב.
- ברור, א.י., 1928, מקרי הרעש בא"י מיולי 1927 עד אוגוסט 1928: ירושלים. עמ' שיו'-שכה'.
- מכון התקנים הישראלי, 2013, תכן עמידות מבנים ברעידות אדמה, ת"י 5.413

9.1 איתור אתרים למדידת תגובת אתר

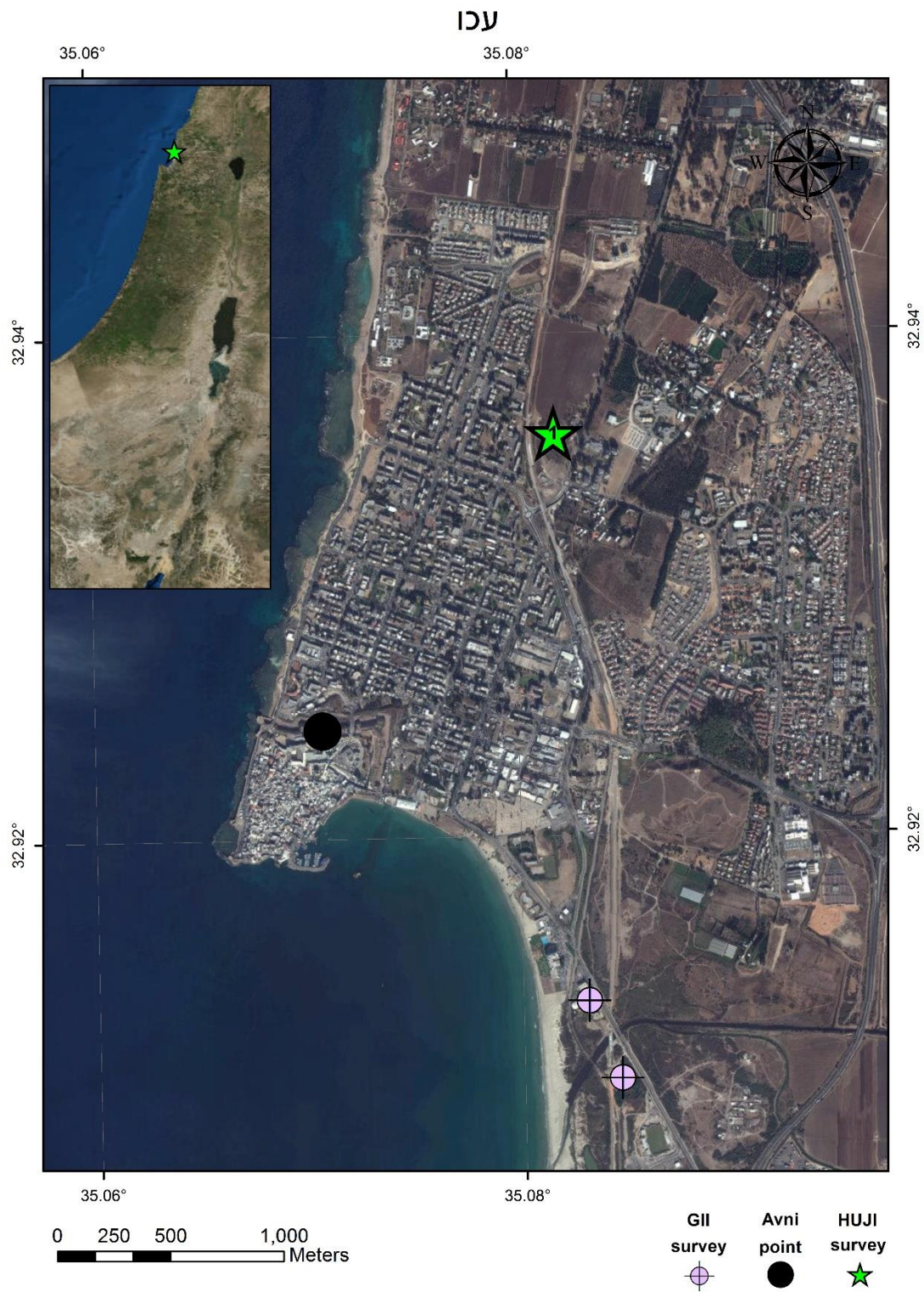
ID	Avni's epicenter	Zohar & Marco epicenter	Kagan's east epicenter	Kagan's west epicenter	Sites to survey
1	Abu-Tlul	Abu-Tlul	Abu-Tlul	Abu-Tlul	Aco
2	El Arish	Um-el-Fahm	A-Salt	El Arish	Beer Sheva
3	A-Salt	A-Salt	Irbid	A-Salt	Bet Alfa
4	Irbid	Irbid	Beer Sheva	Irbid	Bet HaKerem
5	Beer Sheva	Beer Sheva	Bira	Beer Sheva	Binyamina
6	Bira	Bira	Bet Alfa	Bira	Borochoy Nei.
7	Bet Alfa	Bet Alfa	Bet HaKerem	Bet Alfa	Gedera
8	Bet Gimal	Bet Gimal	Bet Sorik	Bet Gimal	Herzelia
9	Bet HaKerem	Bet HaKerem	Binyamina	Bet HaKerem	Jeser Magmi
10	Bet Sorik	Bet Sorik	Gedera	Bet Sorik	Lod
11	Binyamina	Binyamina	JalJulia	Binyamina	Moza
12	Gedera	Gedera	Jeser Magmi	Gedera	Mrar
13	JalJulia	JalJulia	Daharia	JalJulia	Nahalal
14	Jeser Magmi	Jeser Magmi	Zeitim Mountain	Jeser Magmi	Naharia
15	Alenbi Bridge	Daharia	Toov Mountain	Daharia	Petah Tikva
16	Daharia	Demaskus	Zofim Mountain	Toov Mountain	Pki'in
17	Toov Mountain	Zeitim Mountain	Herzelia	Herzelia	Ramle
18	Herzelia	Toov Mountain	Zarka Maein	Tiberias	Reina
19	Tiberias	Zofim Mountain	Tiberias	Tapila	Tiberias
20	Tapila	Herzelia	Tapila	Yavneh	Toov Mountain
21	Yavneh	Tiberias	Yavneh	Jericho	Yavneh
22	Kafaringi	Tapila	Armon-HaNatziv	Kafaringi	Migdal
23	Lod	Yavneh	Kafaringi	Lod	Tzora (KE, KW, ZM)
24	Migdal	Armon-HaNatziv	Lod	Migdal	Zofim Mountain (KE)
25	Moza	Jericho	Migdal	Moza	Tzemach (AH, KW, KE)
26	Maa'n	Kafaringi	Moza	Maa'n	Ramat Rachel (AH, KW, ZM)
27	Mrar	Lod	Maa'n	Mrar	Nazeret (AH, KW, KE)
28	Mar-sava	Migdal	Mrar	Masada	Masada (KW, KE, ZM)
29	Meslovia	Moza	Masada	Mar-sava	Armon-HaNatziv (KE, ZM)
30	Nahalal	Maa'n	Mar-sava	Meslovia	Abadia (AH)
31	Naharia	Maa'yan Elisha	Meslovia	Nabi – Musa	
32	Nazeret	Mrar	Nahalal	Nahalal	
33	Sweida	Masada	Naharia	Naharia	
34	Abadia	Mar-sava	Nazeret	Nazeret	
35	Ajloon	Meslovia	Sweida	Sweida	
36	Aco	Nabi – Musa	Abadia	Ajloon	
37	Akaba	Nahalal	Ajloon	Aco	
38	Pki'in	Naharia	Aco	Akaba	
39	Petah Tikva	Sweida	Akaba	Pki'in	
40	Tzemach	Ajloon	Pki'in	Petah Tikva	
41	Kunetra	Aco	Petah Tikva	Tzemach	
42	Amman	Pki'in	Tzemach	Tzora	
43	Reina	Petah Tikva	Tzora	Kunetra	
44	Ramle	Tzora	Kunetra	Amman	
45	Ramat Rachel	Kunetra	Amman	Reina	
46	Refidie	Amman	Reina	Ramle	
47	Borochoy Nei.	Reina	Ramle	Ramat Rachel	
48	Nablus	Ramle	Refidie	Refidie	
49	Dead sea North 1	Ramat Rachel	Borochoy Nei.	Borochoy Nei.	
50	Dead sea North 2	Refidie	Nablus	Nablus	
51	Dead sea North 3	Borochoy Nei.	Dead sea North 2	Dead sea North 2	
52	Jordan Bank	Nablus	Jordan Bank	Jordan Bank	
53	Yarmuch fall	Yarmuch fall	Yarmuch fall	Yarmuch fall	

נספח 1 - אתרים למדידה על פי ארבעת המוקדים האפשריים (איור 2.6). בעמודה האחרונה האתרים שנבחרו למדידת תגובת אתר. צהוב צפי להנחתה ובאדום צפי להגברה. האותיות בסוגריים מייצגות עבור אילו מוקדים האתר חרג מגבול 60% התוצאות. כאשר האתרים ללא האותיות חרגו עבור כל ארבעת המוקדים (AH-Avni, Zm-Zohar & Marco, KE-Kagan east, KW-Kagan) (west).

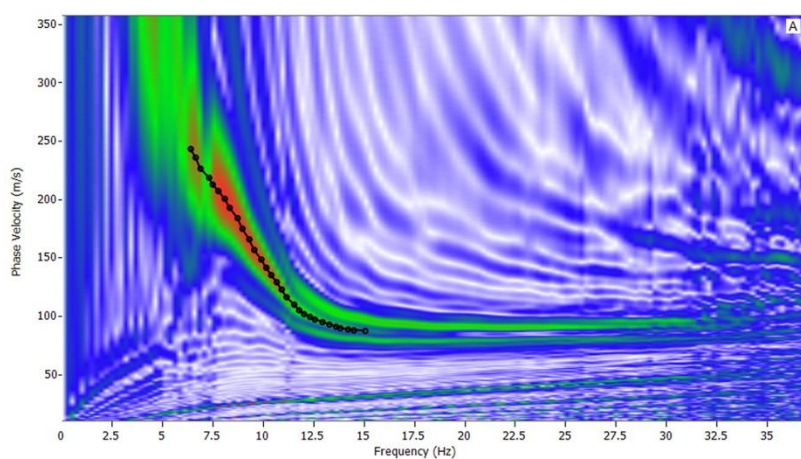
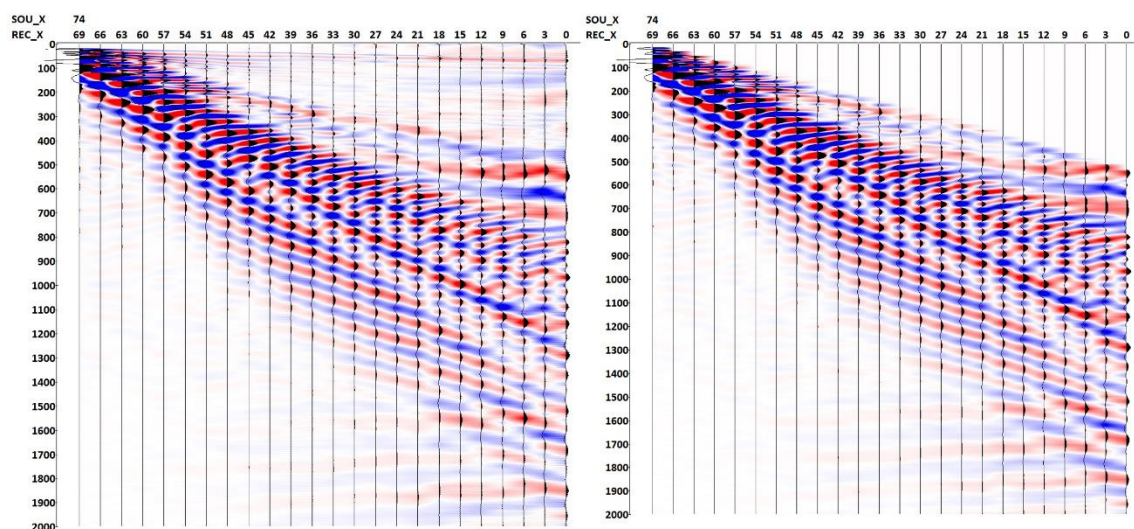
9.2 תוצאות המדידות

עבור כל סקר מוצגת מפה ובה מופיעים: אזור הסקר (כוכב צהוב), נקודת הציון מעבודתם של האף ואבני (Hough and Avni, 2011) (עיגול שחור). אם פורסמו סקרים של המכון הגיאופזי (Aksinenko and Hofstetter, 2012) באזור גם הם מופיעים (עיגול עם צלב תכלת). נוסף לכך, מצורף עמוד עבור כל סקר ובו מופיעים עקומת זמן – מרחק (Shot gather) ראשונית (Raw data) המייצגת ביותר (צד שמאל למעלה), אותה עקומת זמן – מרחק לאחר עיבוד הנתונים (גרף ימני עליון), עקומת נפיצות (גרף צבעוני באמצע) ובתחתית העמוד מודל מהירויות סופי. בעמוד זה מוצגים פרטי איסוף הנתונים.





איור 9.1 - מפת עכו



אתר: עכו

נ.צ: 32.936/35.082

תאריך: 30.5.16

גובה: 4 מטר

מרווח גאופונים: 3 מטר

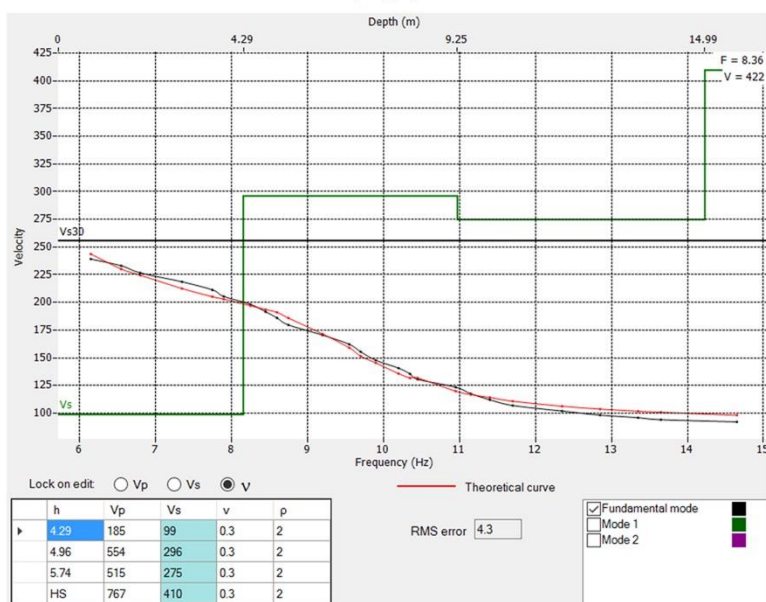
מרווח דגימה: 0.125 מילישניה

זמן הקלטה: 2 שניות

מרחקי הפעלת מקור:

-15, -10, -5, 74, 79, 84, 89, -20

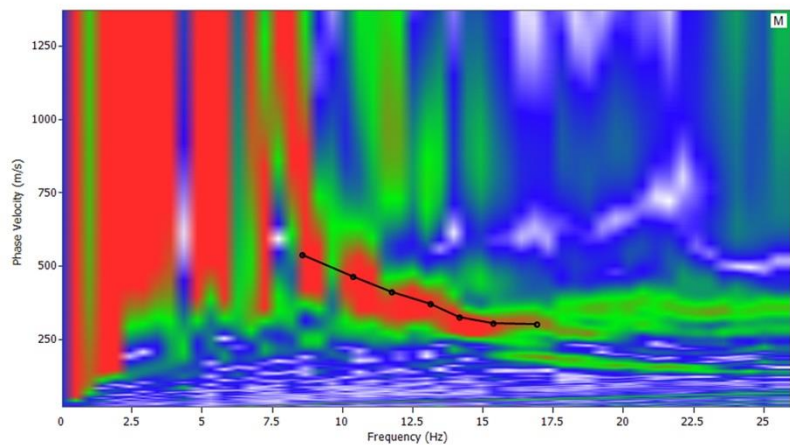
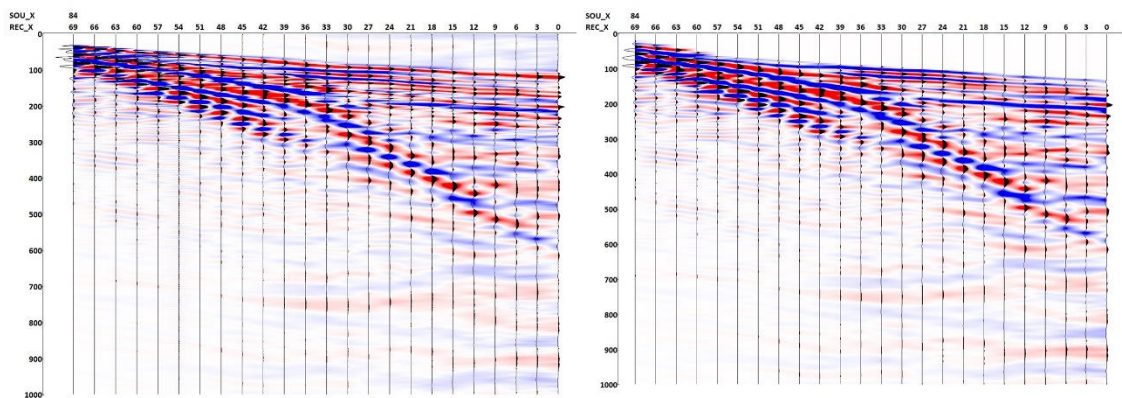
Vs15:260m/s



איור 9.2 - תוצאות עכו

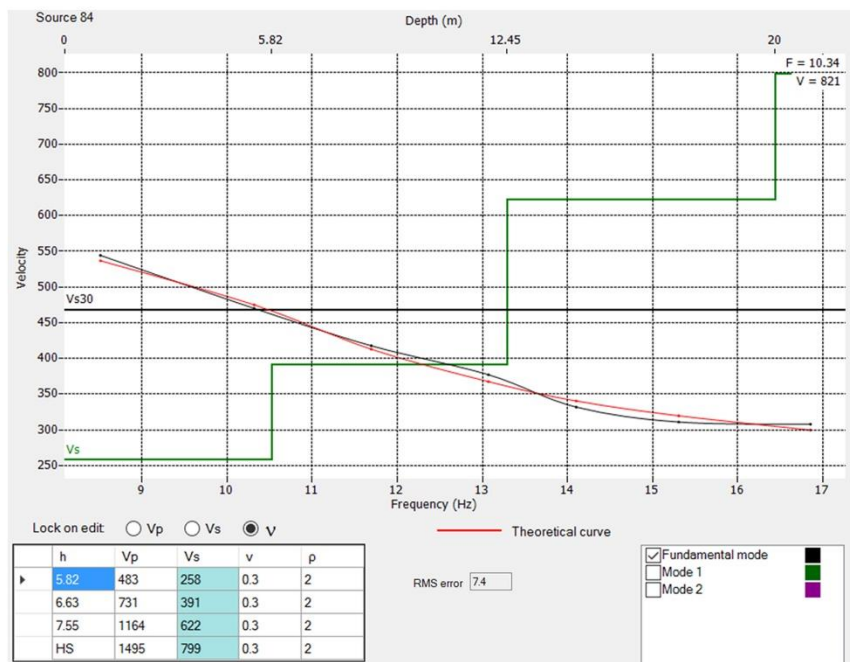


איור 9.3 - מפת אשקלון

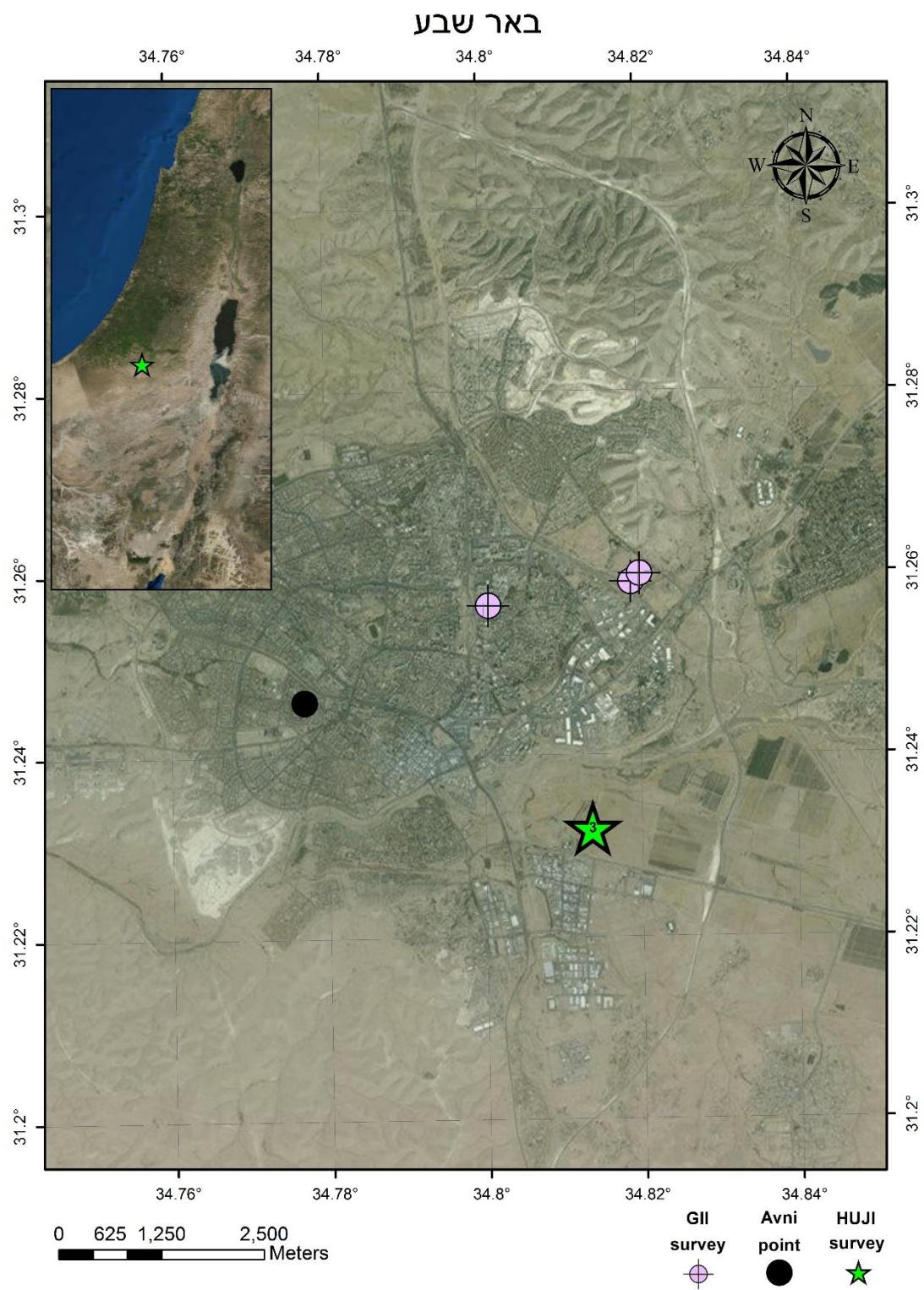


אתר: אשקלון
 תאריך: 7.4.16
 נצ: 31.6571/34.5765
 גובה: 36 מטר
 מרווח גאופונים: 3 מטר
 מרווח דגימה: 0.125 מילישניה
 זמן הקלטה: שניה
 מרחקי הפעלת מקור:
 -1, -3, -5, -10, -15, -19, 74, 79, 84, 89

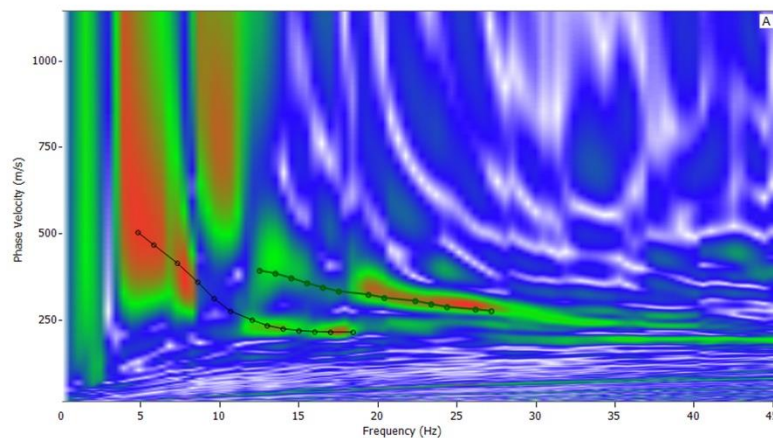
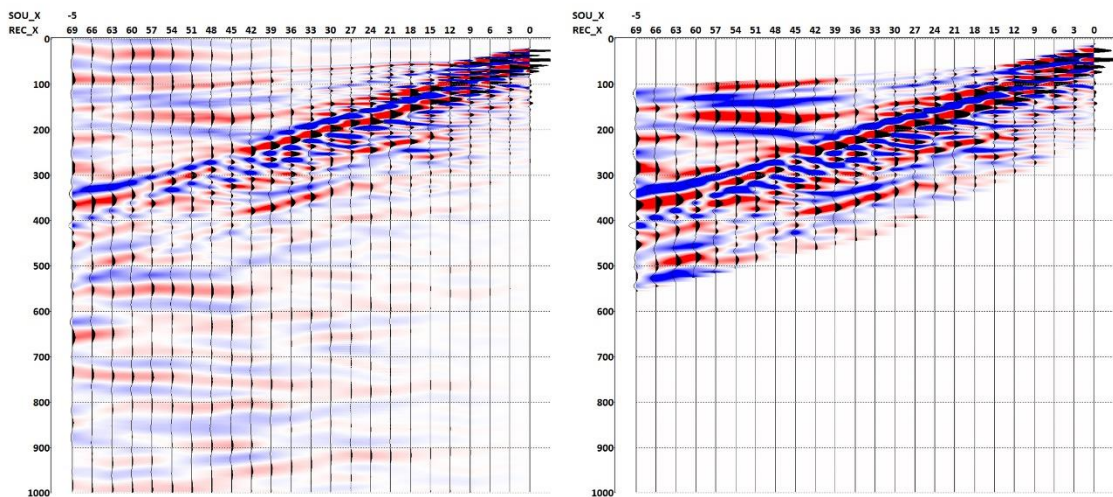
Vs20:475m/s



איור 9.4 - תוצאות אשקלון

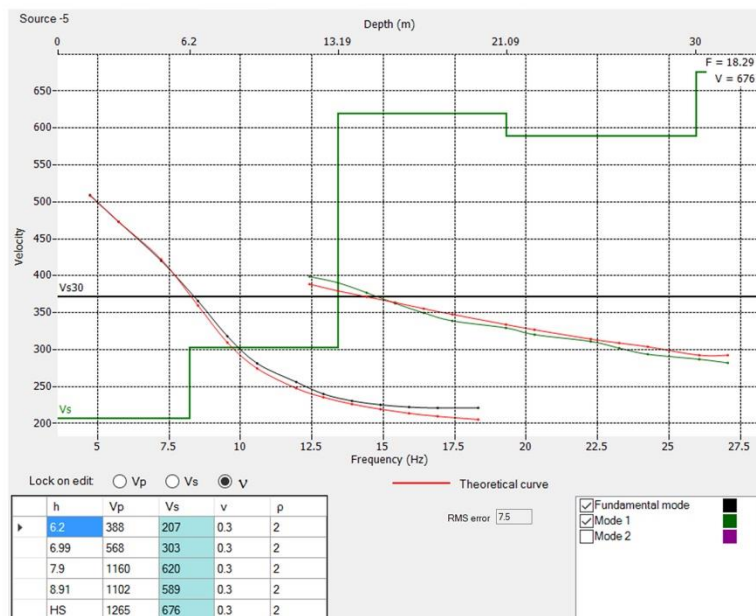


איור 9.5 - מפת באר שבע



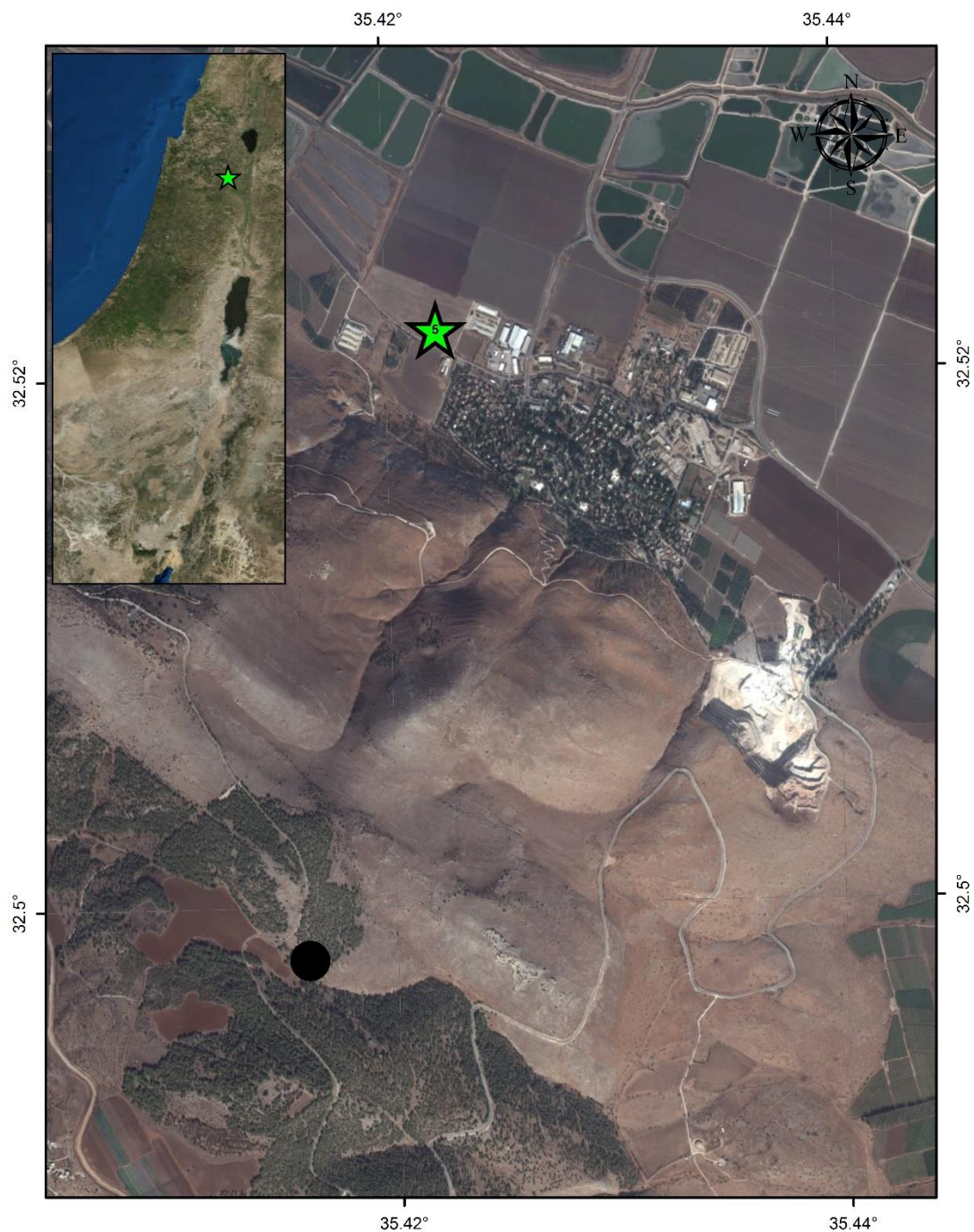
אתר: באר שבע
 תאריך: 14.3.16
 נ.צ: 31.2320/34.8136
 גובה: 274 מטר
 מרווח גאופונים: 3 מטר
 מרווח דגימה: 0.125 מילישניה
 זמן הקלטה: שניה
 מרחקי הפעלת מקור:
 -25, -20, -15, -10, -5

Vs30:375m/s



איור 9.6 - תוצאות באר שבע

בית אלפא

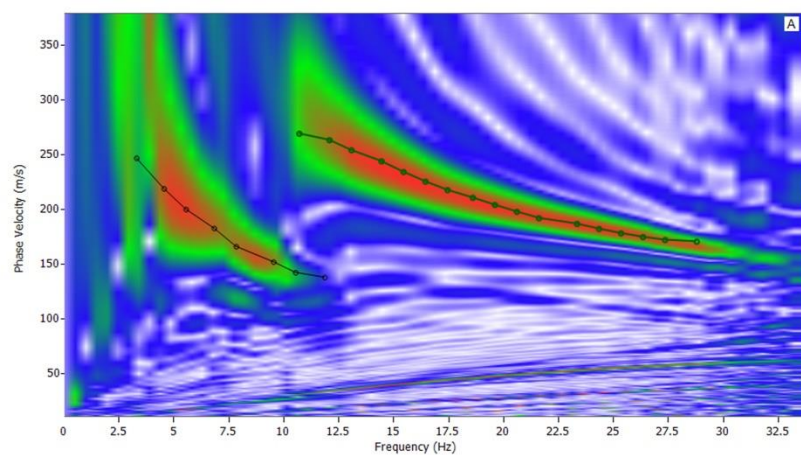
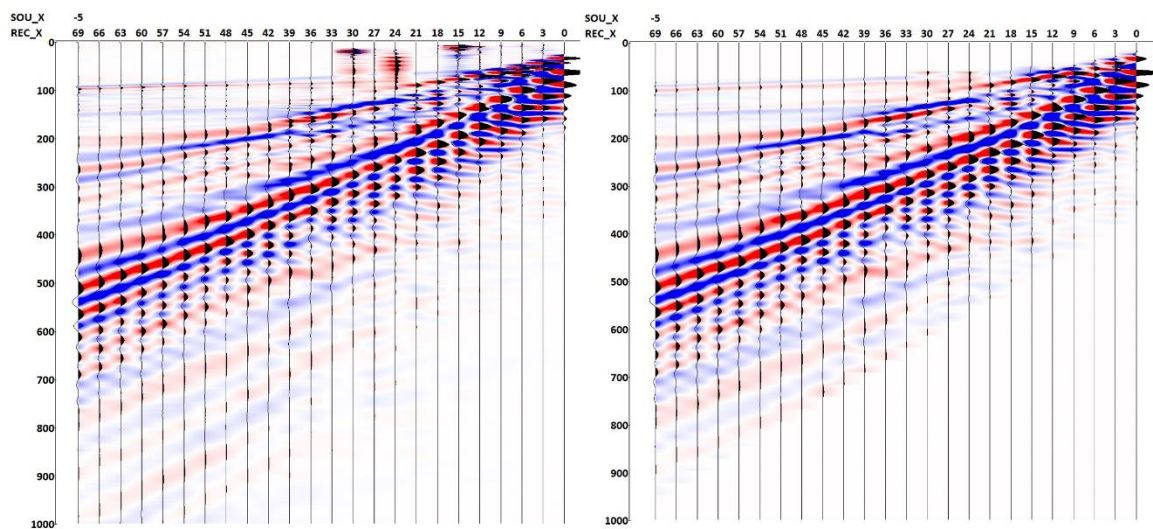


0 250 500 1,000 Meters

GII survey Avni point HUJI survey

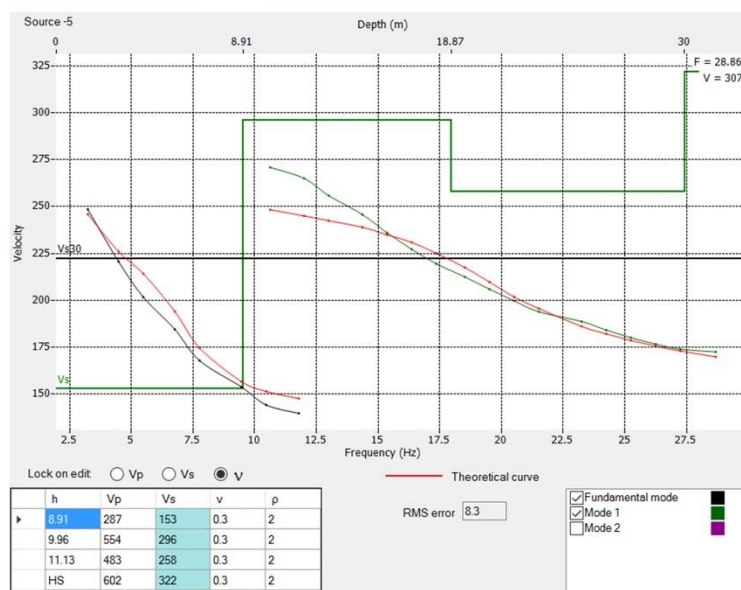


איור 9.7 - מפת בית אלפא



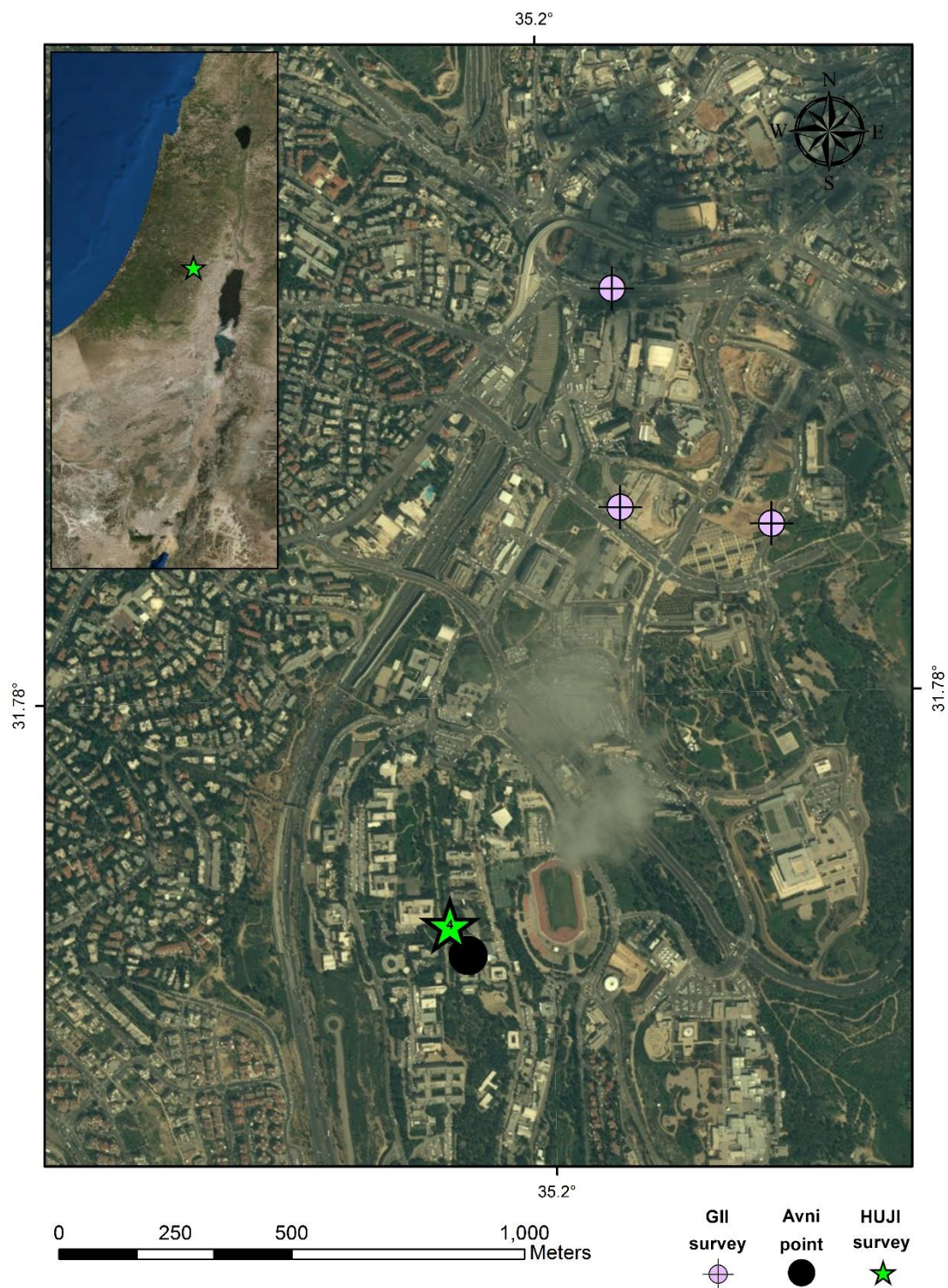
אתר: בית אלפא
 תאריך: 29.5.16
 נ.צ: 32.5217/35.4222
 גובה: 85 מטר
 מרווח גאופונים: 3 מטר
 מרווח דגימה: 0.125 מילישנייה
 זמן הקלטה: שנייה
 מרחקי הפעלת מקור:
 10, 15, 20, -5, -10, -15, -20
 5

Vs30:225m/s

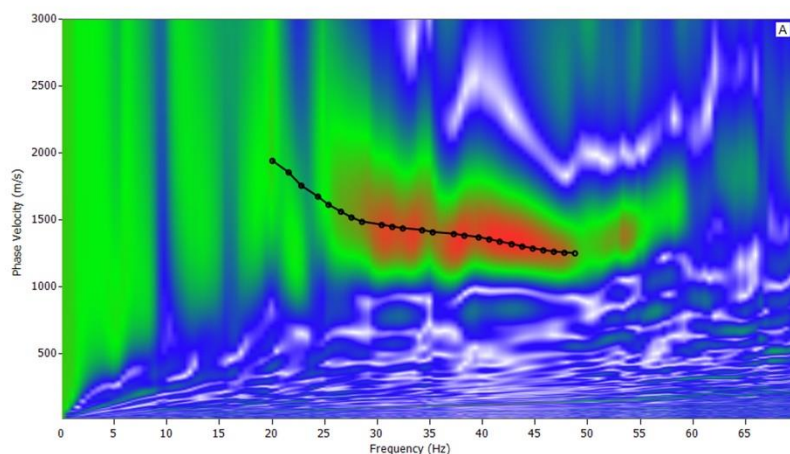
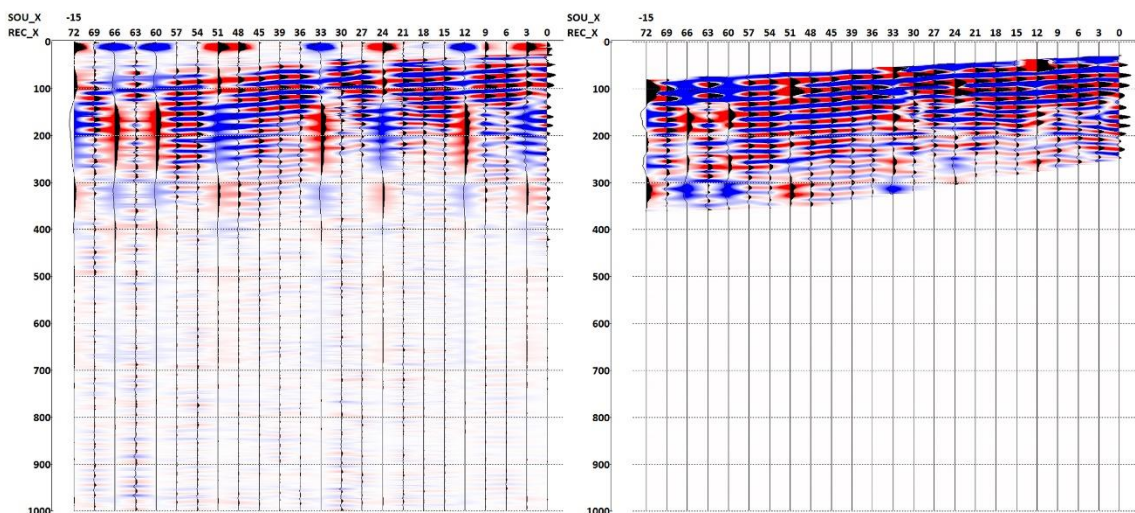


איור 9.8 - תוצאות בית אלפא

בית הכרם

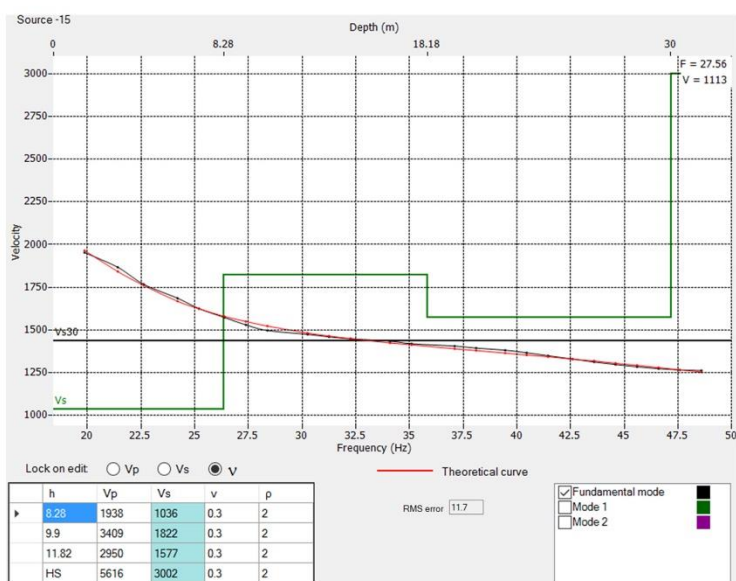


איור 9.9 - מפת בית הכרם



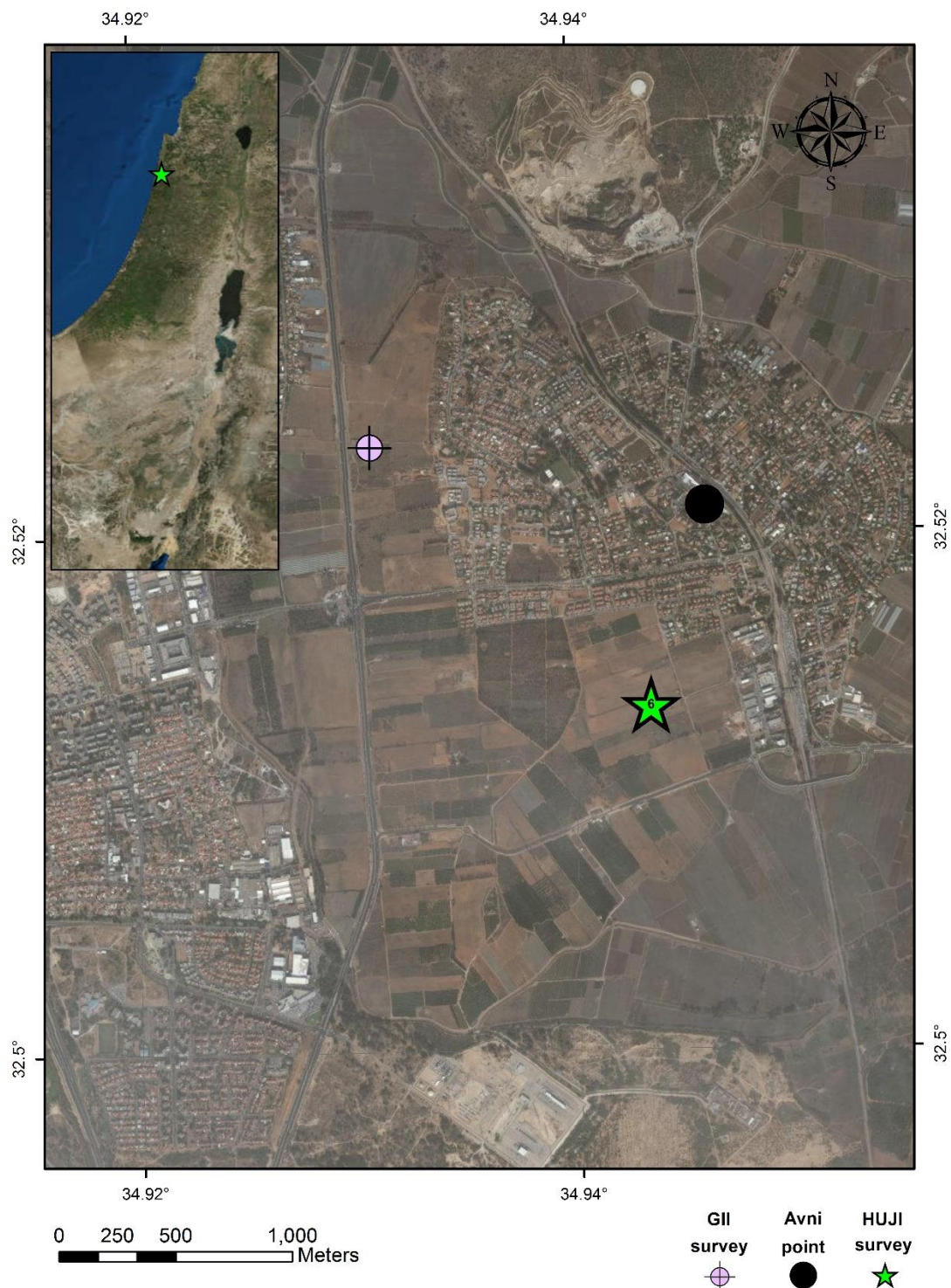
אתר: בית הכרם
 תאריך: 27.2.16
 נ.צ: 31.7756/35.1976
 גובה: 780 מטר
 מרווח גאופונים: 3 מטר
 מרווח דגימה: 0.125 מילישנייה
 זמן הקלטה: שנייה
 מרחקי הפעלת מקור: 92, 88, 82, 77, -5, -10, -15

Vs30: 1450 m/s

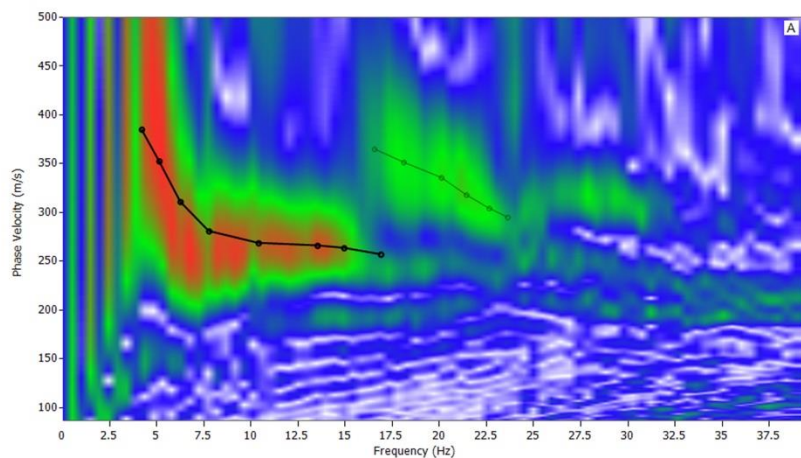
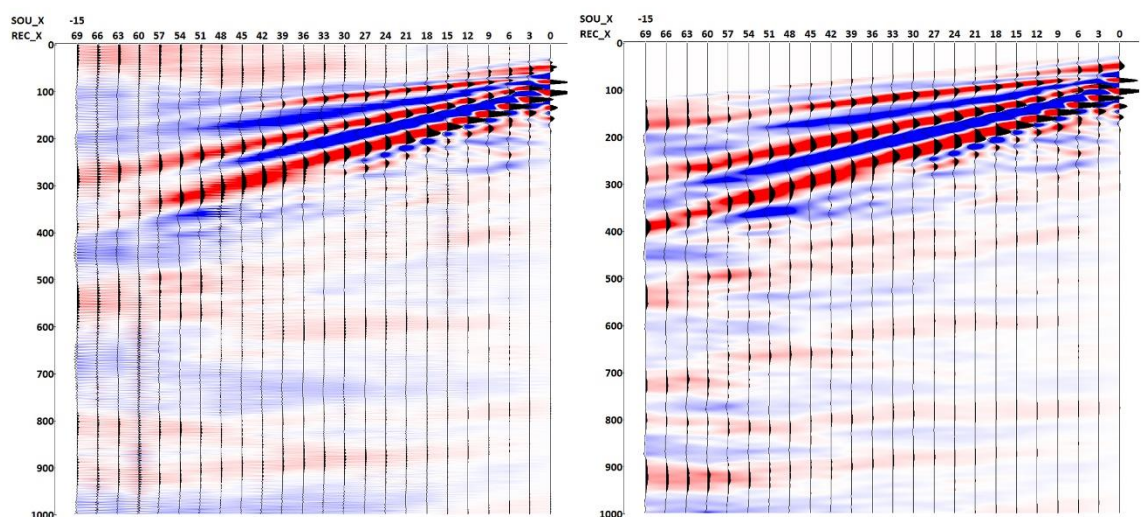


איור 9.10 - תוצאות בית הכרם

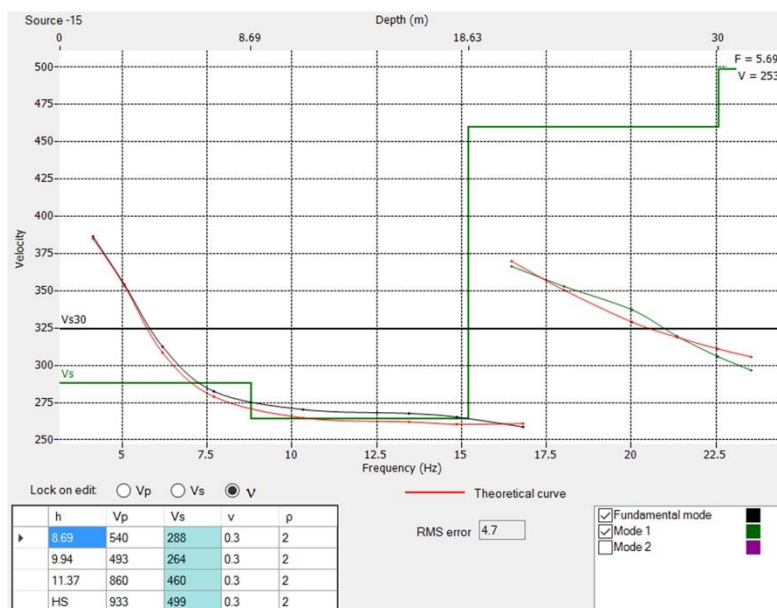
בנימינה



איור 9.11 - מפת בנימינה



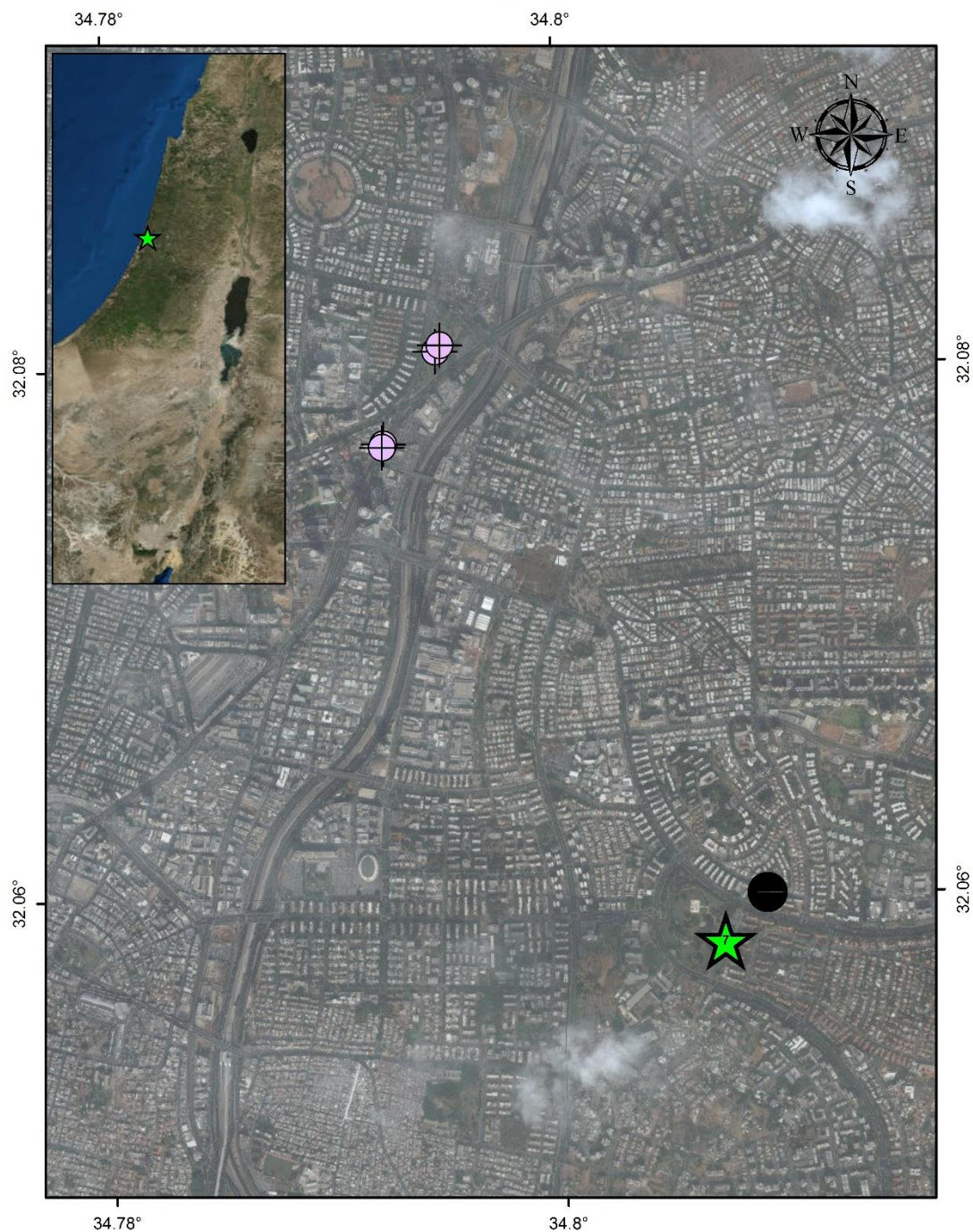
אתר: בנימינה
 תאריך: 24.7.16
 נ.צ: 32.5239/34.94338
 גובה: 27 מטר
 מרווח גאופונים: 3 מטר
 מרווח דגימה: 1 מילישניה
 זמן הקלטה: שנייה
 מרחקי הפעלת מקור:
 -15, -10, -5, -2, 2, 5, 8, 9, 15, 86



Vs30:325m/s

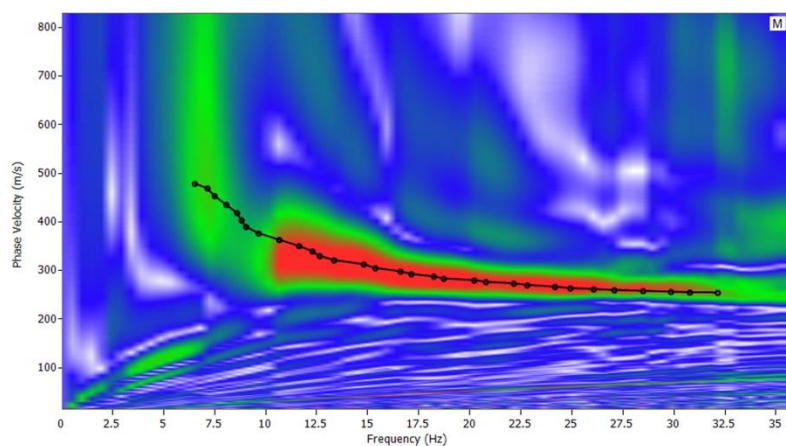
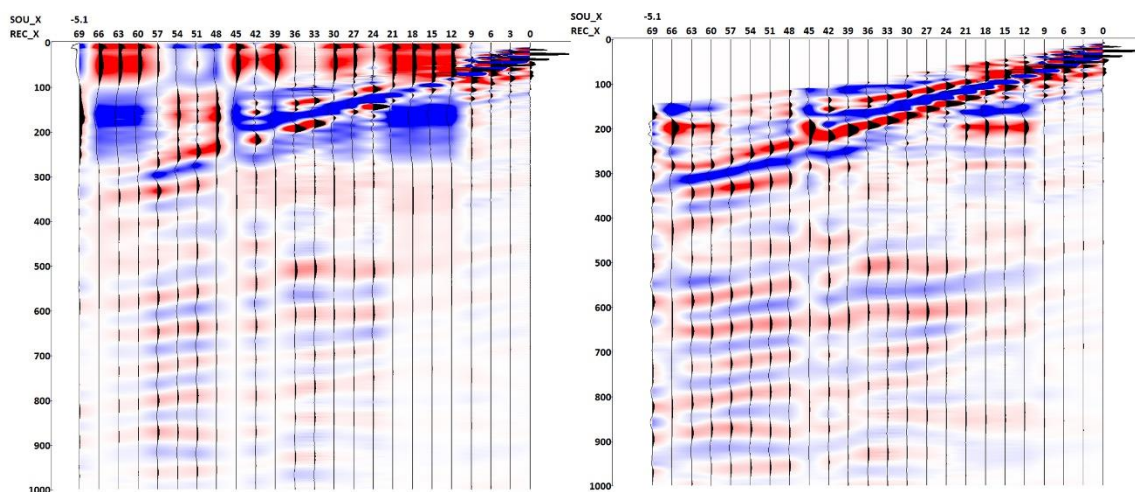
איור 9.12 - תוצאות בנימינה

גבעתיים



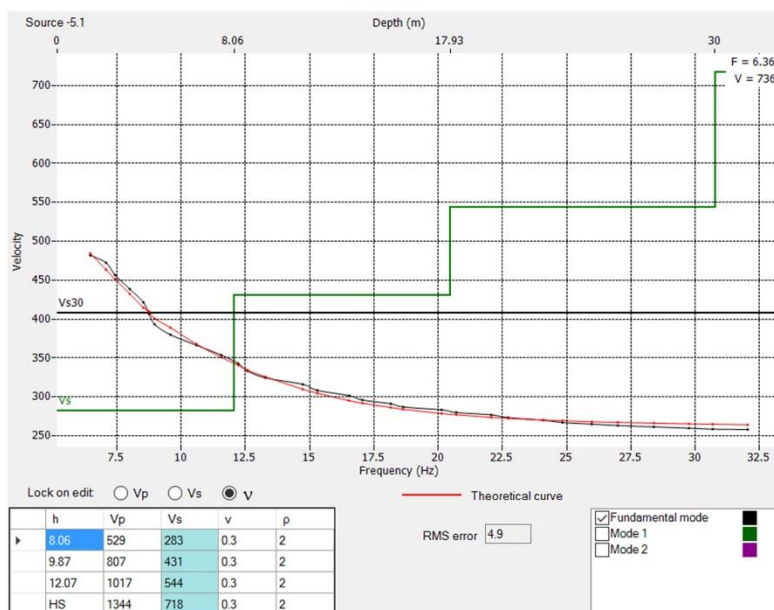
GII
survey
 Avni
point
 HUJI
survey

איור 9.13 - מפת גבעתיים



אתר: גבעתיים
 תאריך: 18.4.16
 נ.צ: 32.0582/34.8071
 גובה: 49 מטר
 מרווח גאופונים: 3 מטר
 מרווח דגימה: 0.125 מילישניה
 זמן הקלטה: שנייה
 מרחקי הפעלת מקור:
 4.7, 10, -5.1, -5, -10, -15

Vs30:410m/s

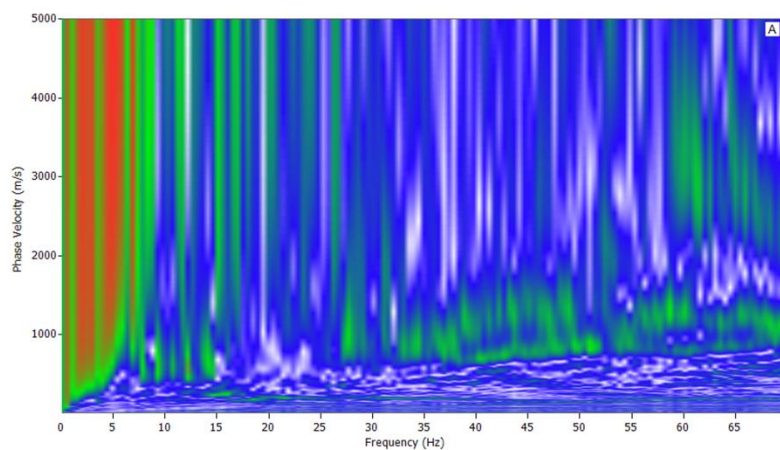
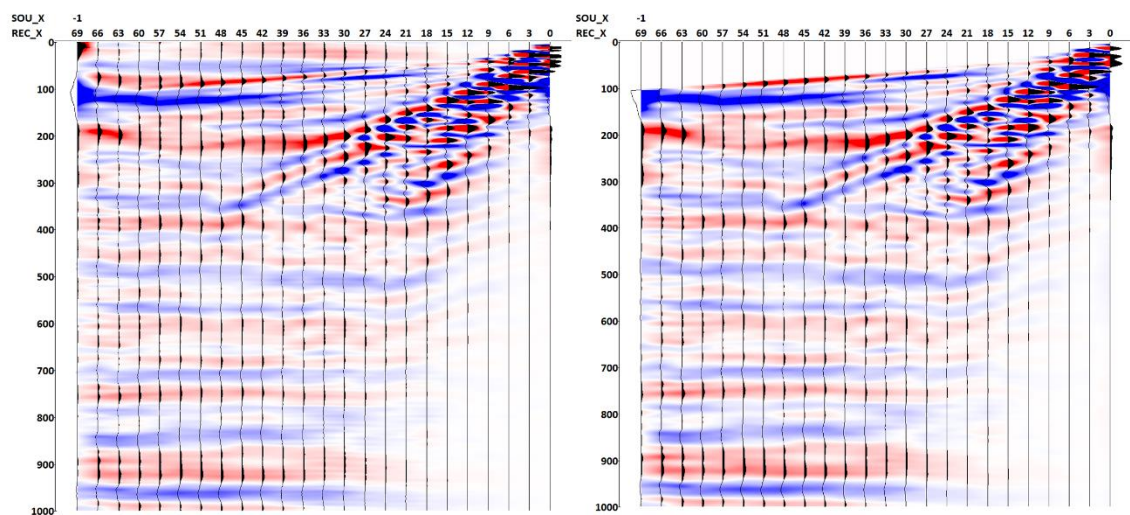


איור 9.14 - תוצאות גבעתיים

הרטוב



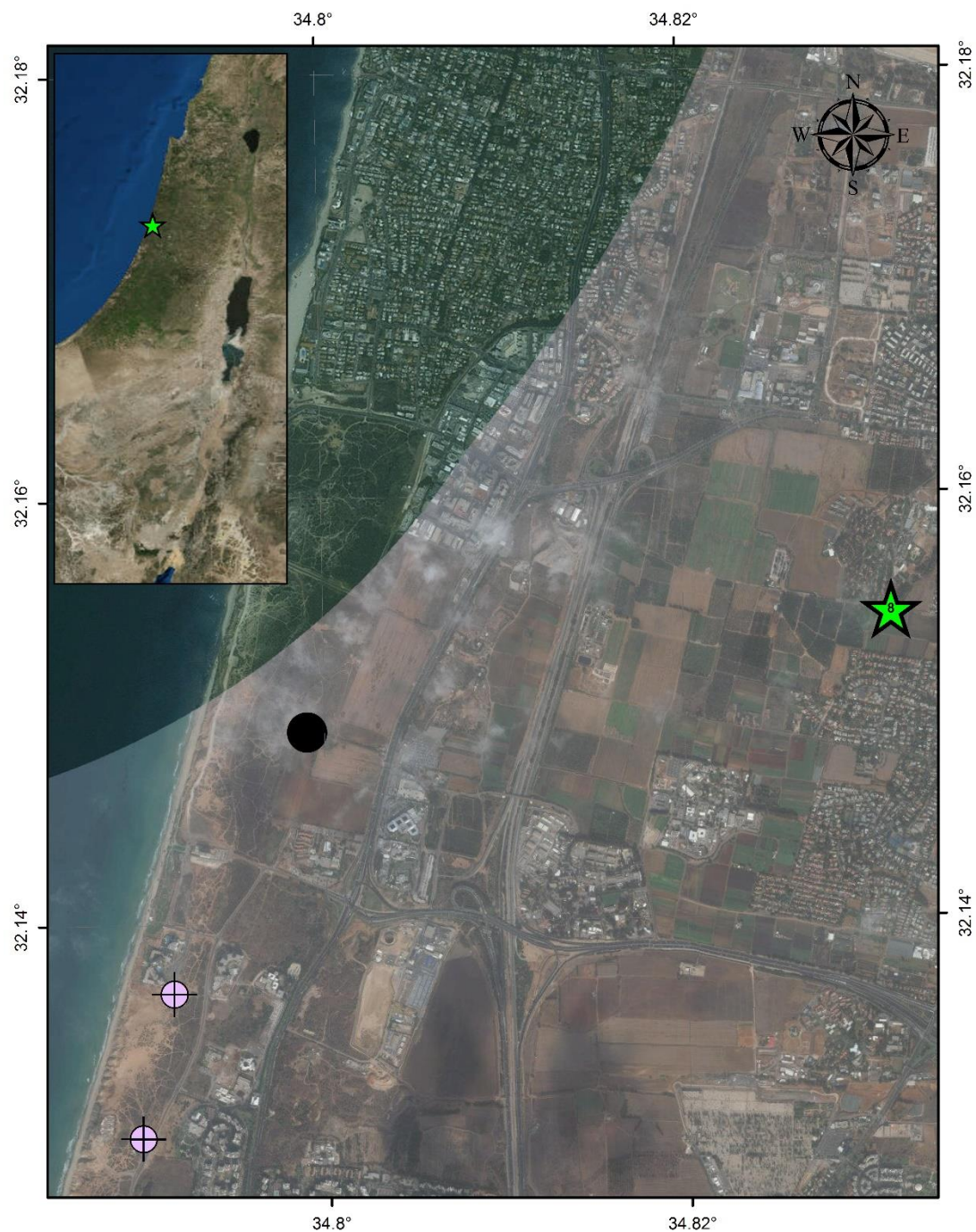
איור 9.15 - מפת הר טוב



אתר: הר טוב
 תאריך: 7.4.16
 נצ: 31.7611/35.0005
 גובה: 230 מטר
 מרווח גאופונים: 3 מטר
 מרווח דגימה: 0.125 מילישניה
 זמן הקלטה: שנייה
 מרחקי הפעלת מקור:
 -1, -3, -5, -10, -15, -70, -72,
 74, 79

איור 9.16 - תוצאות הר טוב

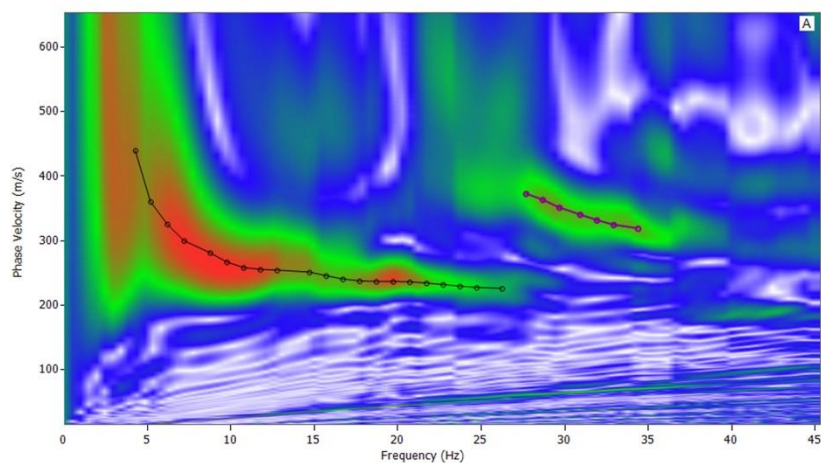
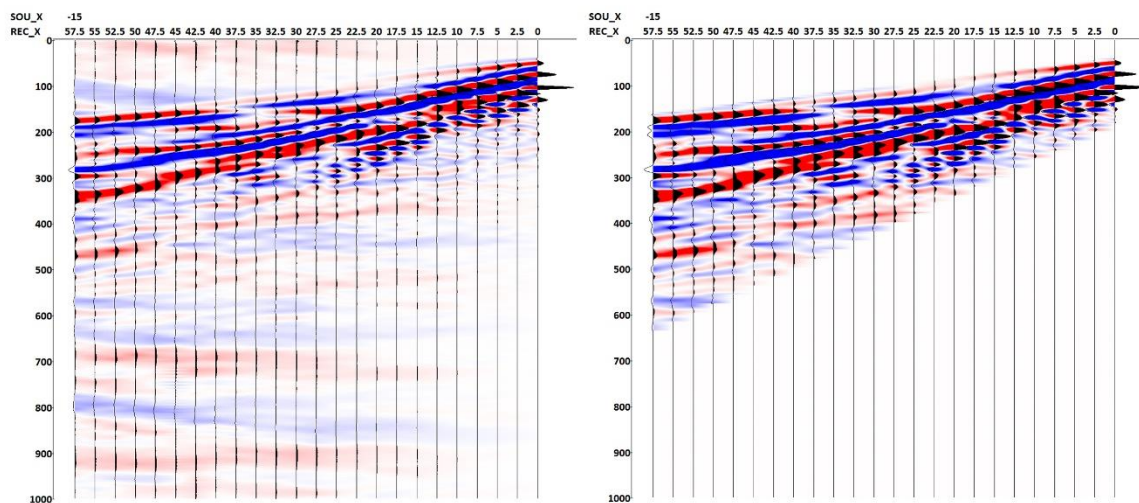
הרצליה



0 250 500 1,000
Meters

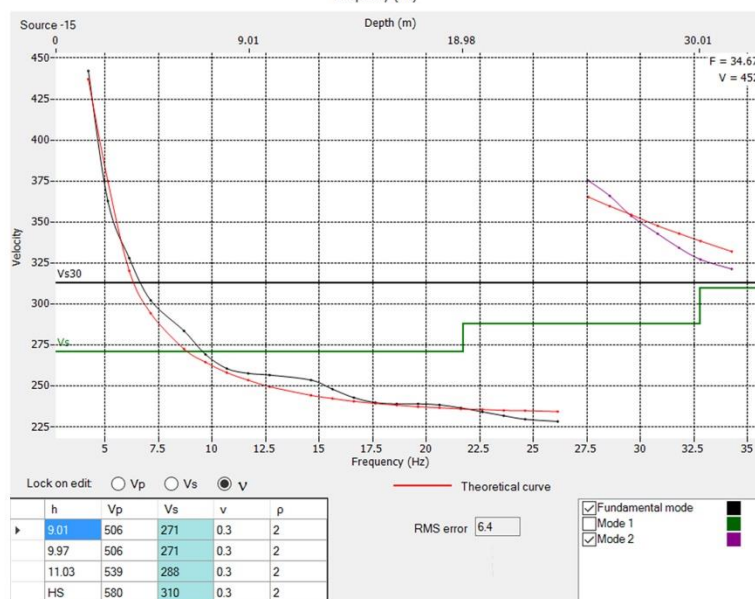
GII survey
Avni point
HUJI survey

איור 9.17 - מפת הרצליה



אתר: הרצליה
תאריך: 18.4.16
נ.צ: 32.1544/34.8315
גובה: 37 מטר
מרווח גאופונים: 2.5 מטר
מרווח דגימה: 0.125 מילישניה
זמן הקלטה: שנייה
מרחקי הפעלת מקור:
62.5, 67.5, 72.5, -5, -10, -15

Vs30: 315 m/s

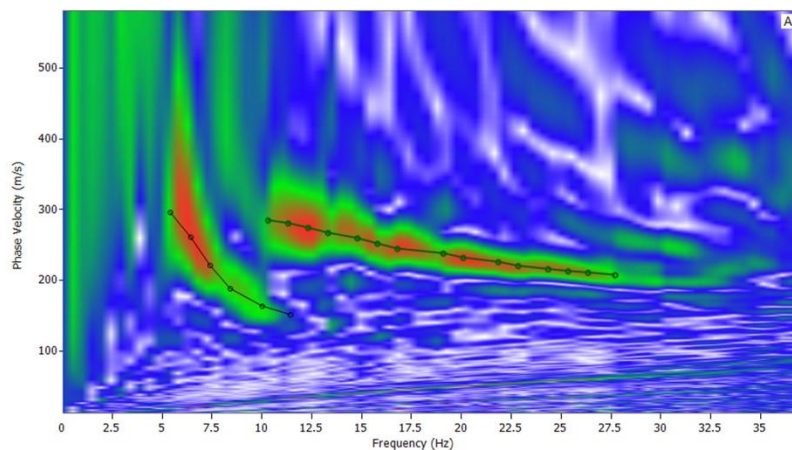
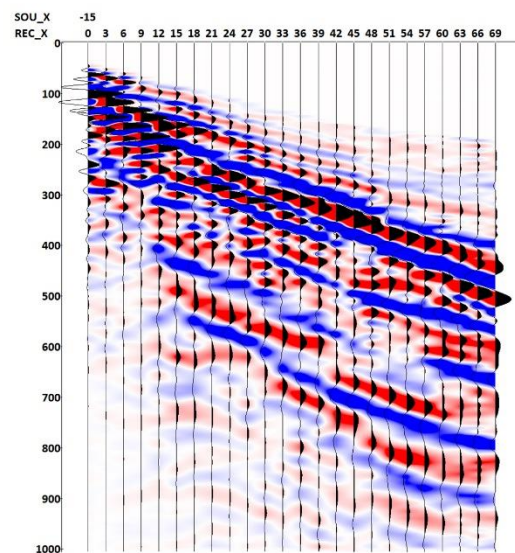
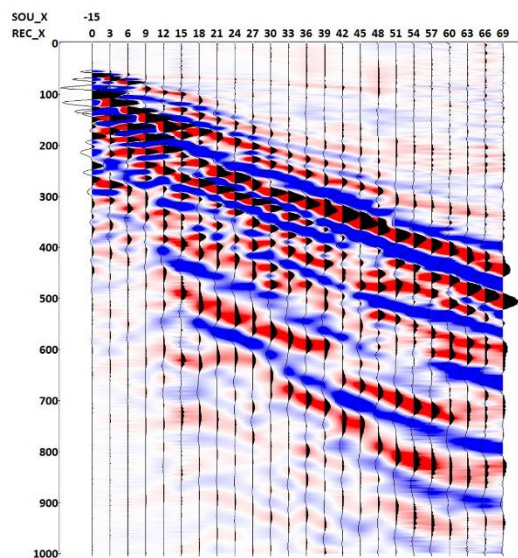


איור 9.18 - תוצאות הרצליה

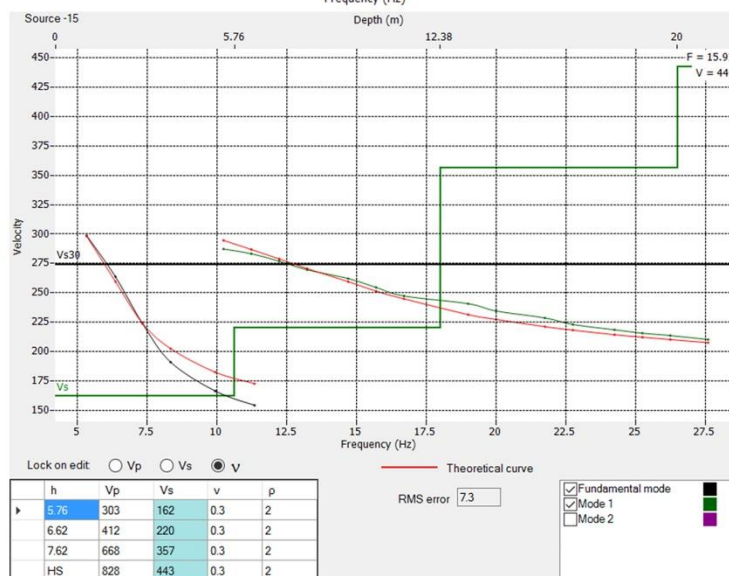
ג'סר מאג'מי



איור 9.19 - מפת ג'סר מאג'מי



אתר: ג'סר מאג'מי
 תאריך: 29.5.16
 נ.צ: 32.622/35.561
 גובה: -236 מטר
 מרווח גאופונים: 3 מטר
 מרווח דגימה: 0.125 מילישניה
 זמן הקלטה: שנייה
 מרחקי הפעלת מקור:
 84, 79, 74, -5, -10, -15, -20
 89



Vs20: 275 m/s

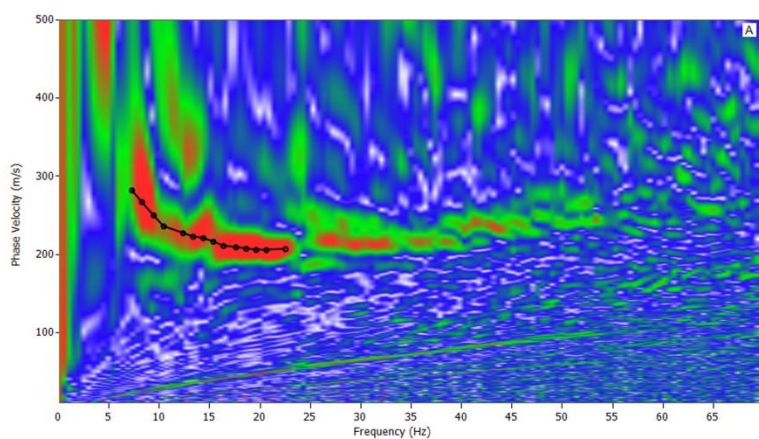
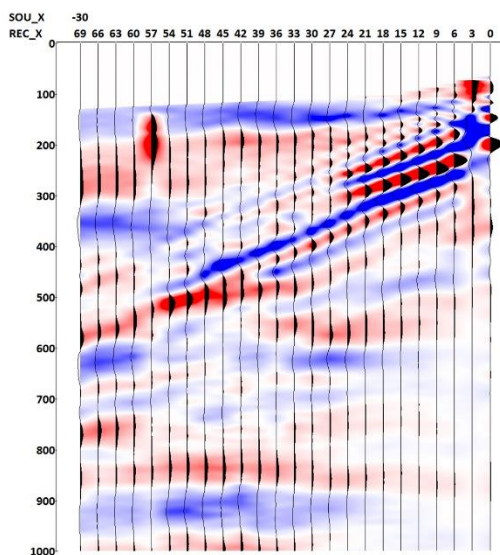
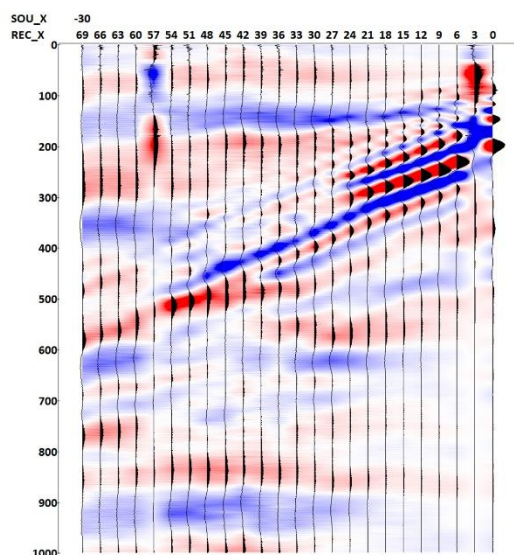
איור 9.20 - תוצאות ג'סר מאג'מי

לוד

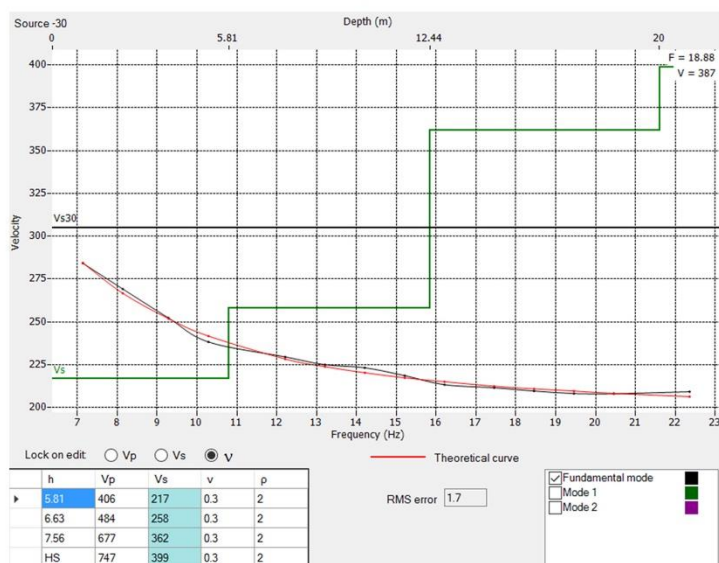


GII survey
Avni point
HUJI survey

איור 9.21 - מפת לוד

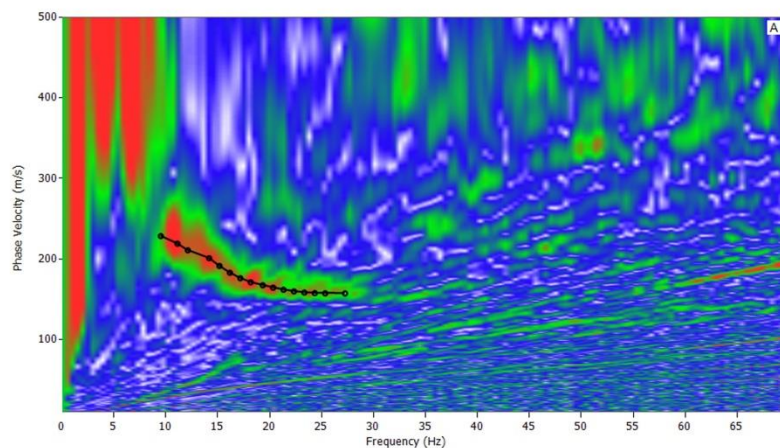
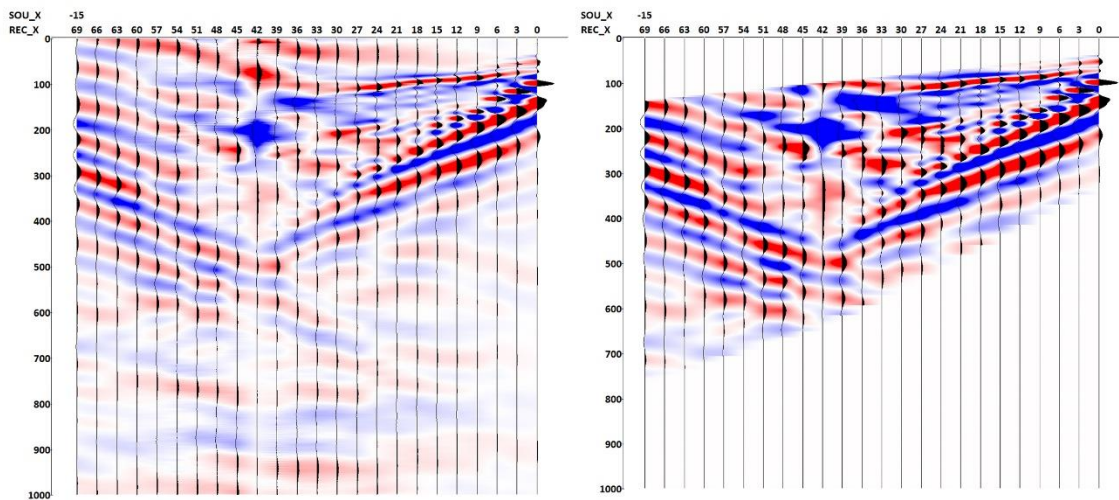


אתר: לוד 11
 תאריך: 31.1.16
 נצ: 31.9398/34.8993
 גובה: 58 מטר
 מרווח גאופונים: 3 מטר
 מרווח דגימה: 0.125 מילישניה
 זמן הקלטה: שנייה
 מרחקי הפעלת מקור:
 -30, -25, -20, -15, -10, -79,
 84, 89, 94, 99



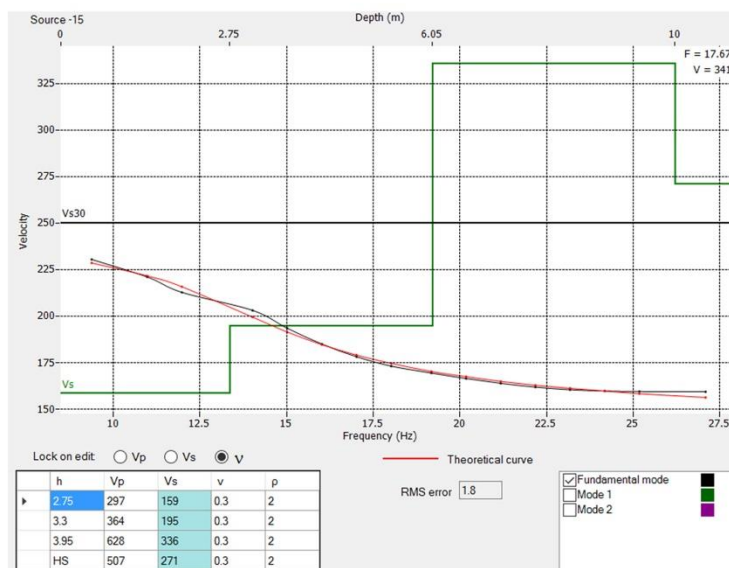
Vs20: 305 m/s

איור 9.22 - תוצאות לוד 1



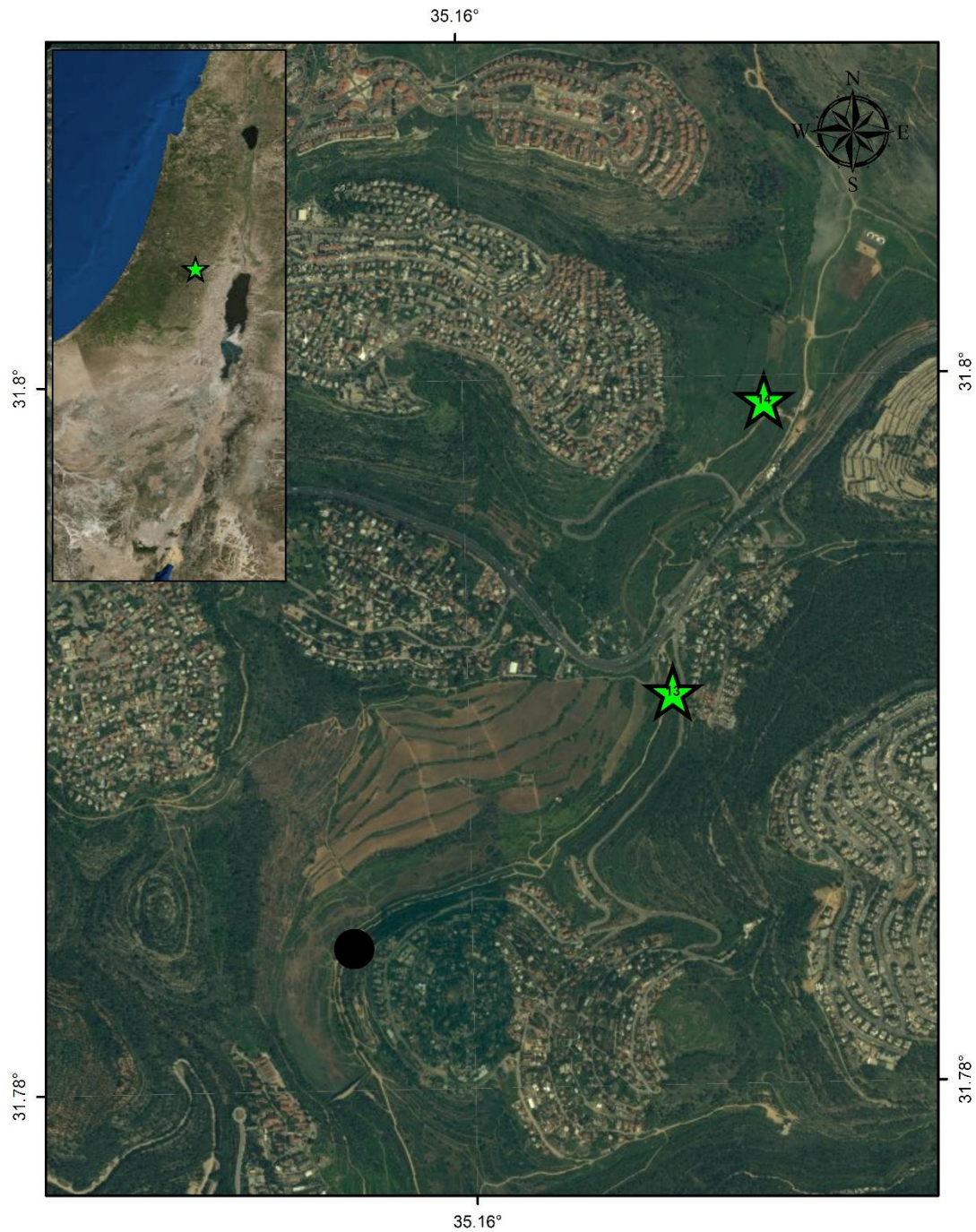
אתר: לוד 12
 תאריך: 31.1.16
 נ.צ: 31.9477/34.8969
 גובה: 73 מטר
 מרווח גאופונים: 3 מטר
 מרווח דגימה: 0.125 מילישנייה
 זמן הקלטה: שנייה
 מרחקי הפעלת מקור:
 79, -10, -15, -20, -25, -30
 94, 89, 84

Vs10: 250 m/s



איור 9.23 - תוצאות לוד 2

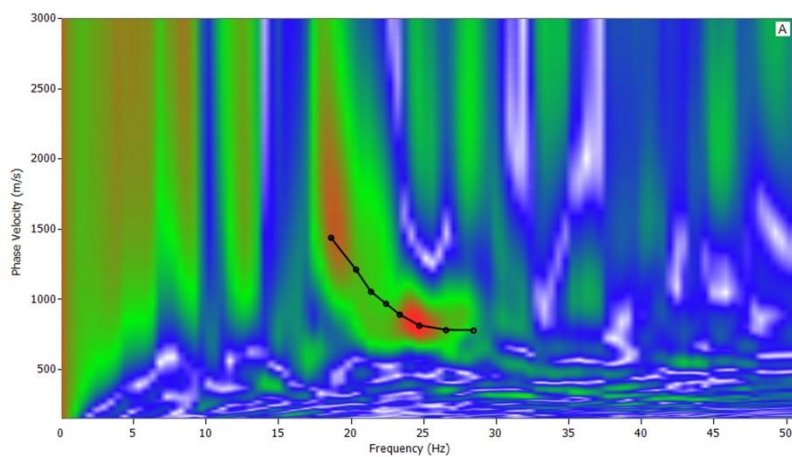
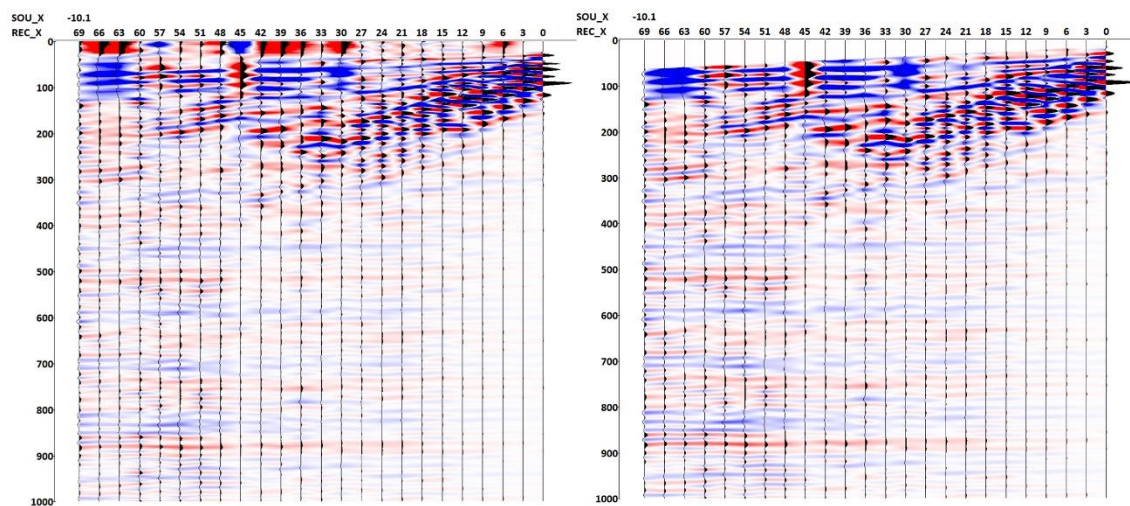
מוצא



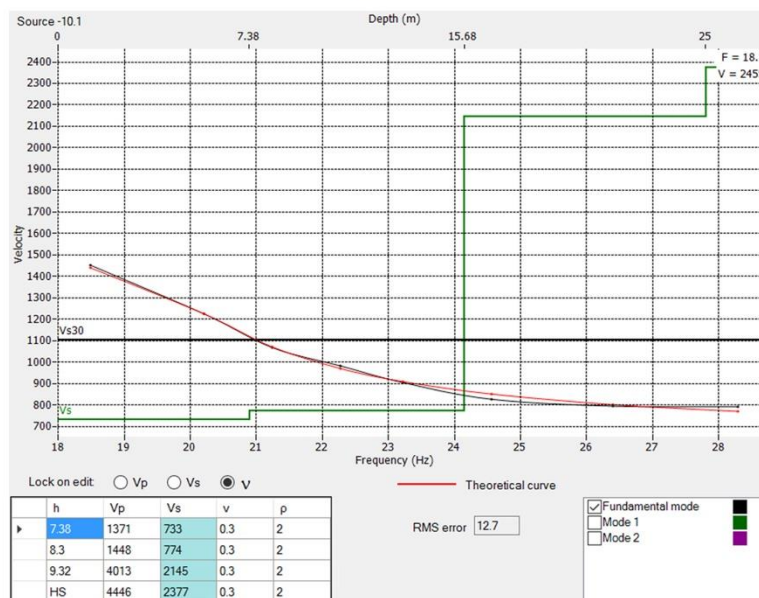
0 250 500 1,000 Meters

GII survey
Avni point
HUJI survey

איור 9.24 - מפת מוצא

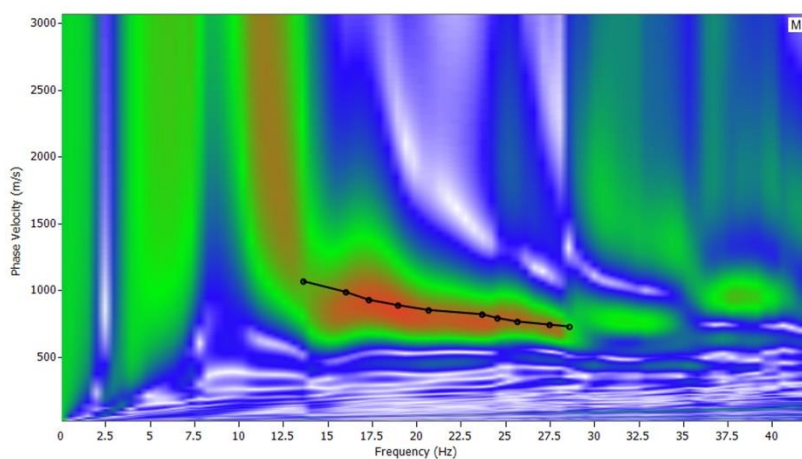
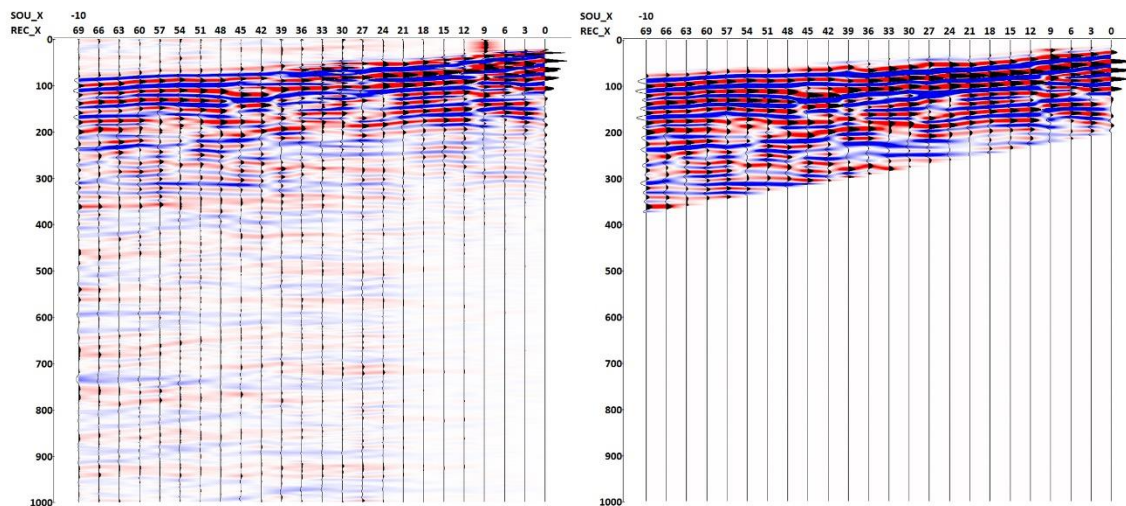


אתר: מוצא 13
 תאריך: 1.2.16
 נ.צ: 31.7911/35.1667
 גובה: 568 מטר
 מרווח גאופונים: 3 מטר
 מרווח דגימה: 0.125 מילישניה
 זמן הקלטה: שנייה
 מרחקי הפעלת מקור:
 94, -10.1, -10, -15, -20, -25
 79, 84



Vs25: 1100 m/s

איור 9.25 - תוצאות מוצא 1



אתר: מוצא 14

תאריך: 1.2.16

נ.צ: 31.7993/35.1699

גובה: 577 מטר

מרווח גאופונים: 3 מטר

מרווח דגימה: 0.125 מילישניה

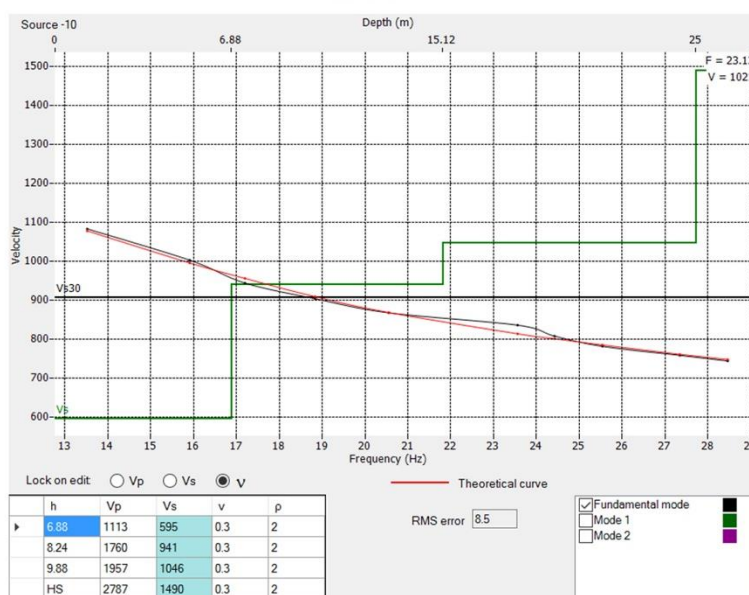
זמן הקלטה: שנייה

מרחקי הפעלת מקור:

94, -10, -15, -20, -25, -30

79.1, 79, 84, 89

Vs25: 910 m/s

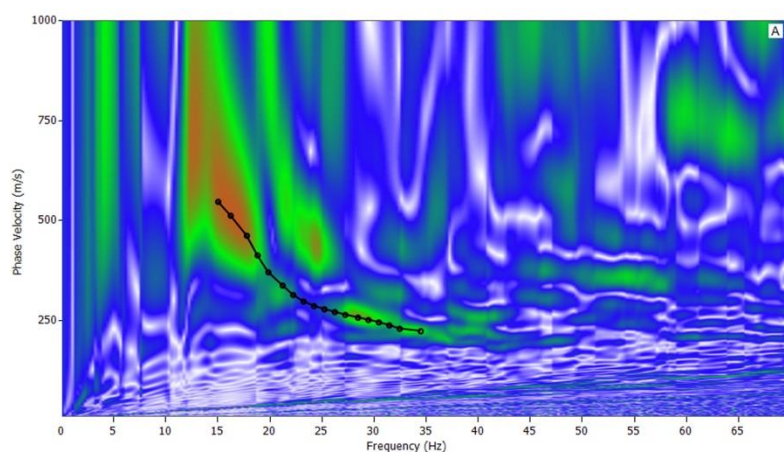
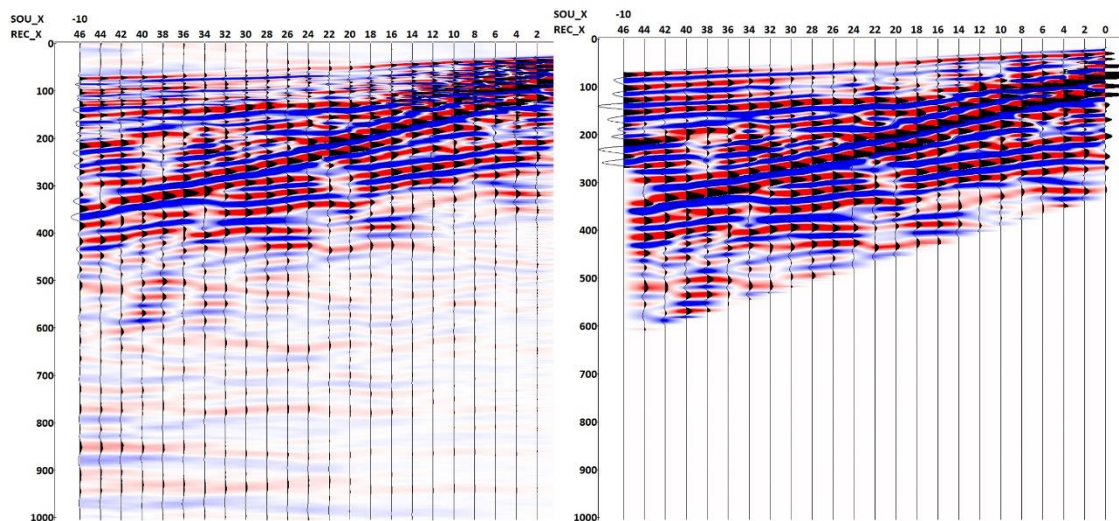


איור 9.26 - תוצאות מוצא 2

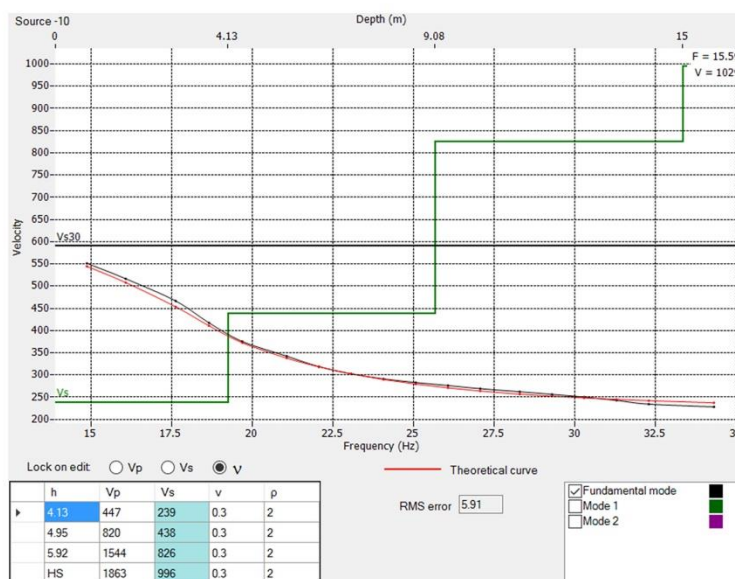
הר הצופים



איור 9.27 - מפת הר הצופים

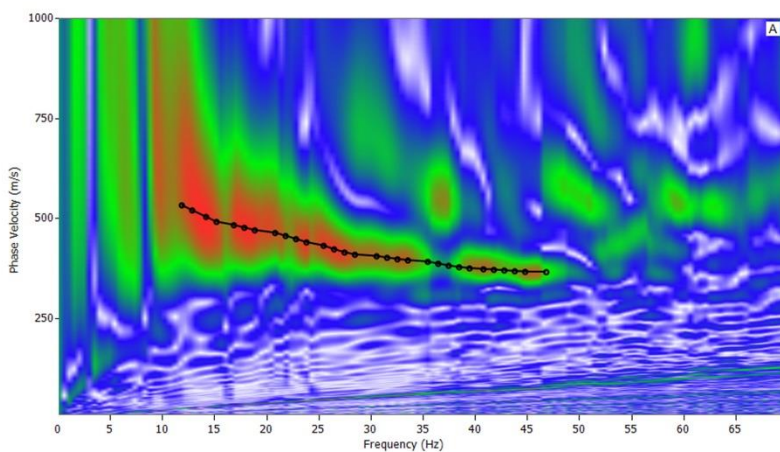
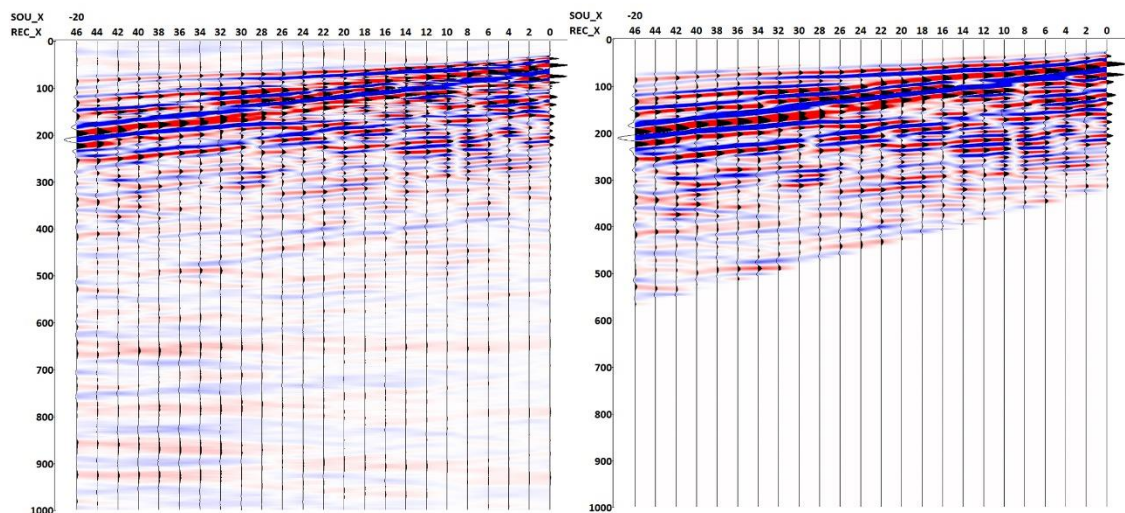


אתר: הר הצופים 15
 תאריך: 24.12.15
 נצ: 31.7924/35.2418
 גובה: 811 מטר
 מרווח גאופונים: 2 מטר
 מרווח דגימה: 0.125 מילישניה
 זמן הקלטה: 2 שניות
 מרחקי הפעלת מקור:
 -5, -10, -15, -20, -51, -56, 61,
 66, 71, 76

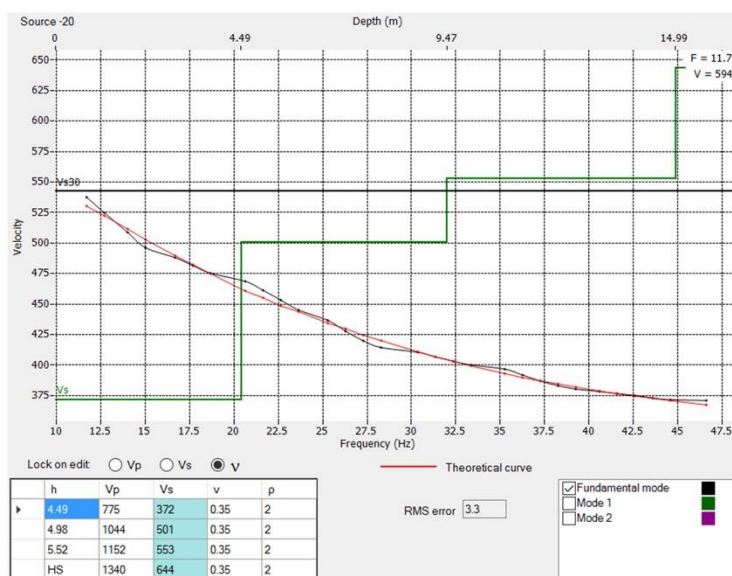


Vs15: 590 m/s

איור 9.28 - תוצאות הר הצופים 1



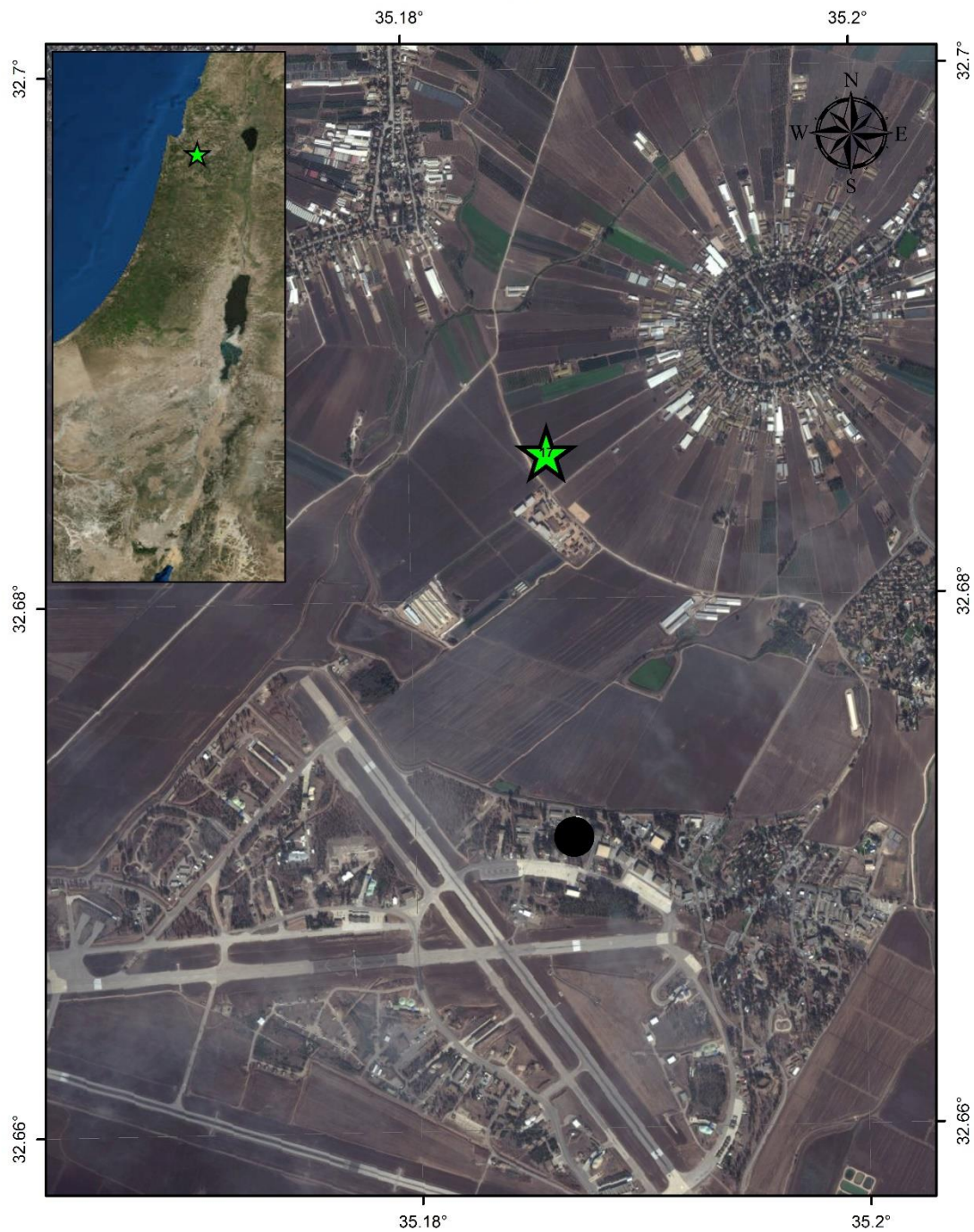
אתר: הר הצופים 16
 תאריך: 24.12.15
 נ.צ: 31.7930/35.2489
 גובה: 780 מטר
 מרווח גאופונים: 2 מטר
 מרווח דגימה: 0.125 מילישנייה
 זמן הקלטה: 2 שניות
 מרחקי הפעלת מקור:
 -20, -15, -10, -5, 56, 61, 66, 71



Vs15: 540 m/s

איור 9.29 - תוצאות הר הצופים 2

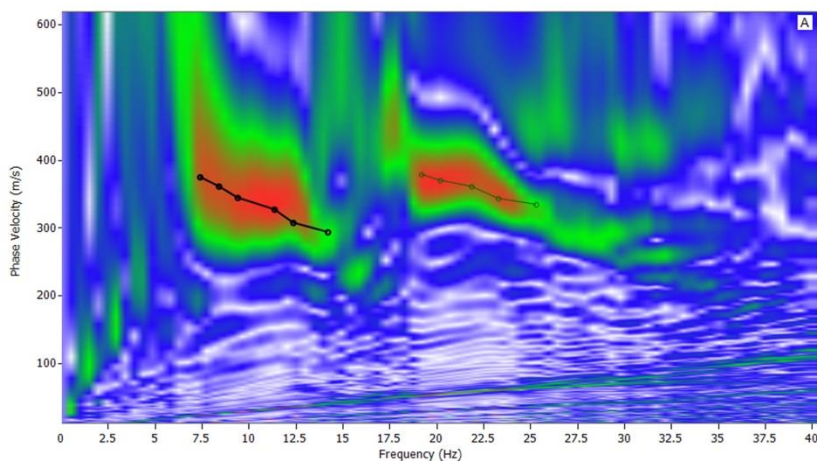
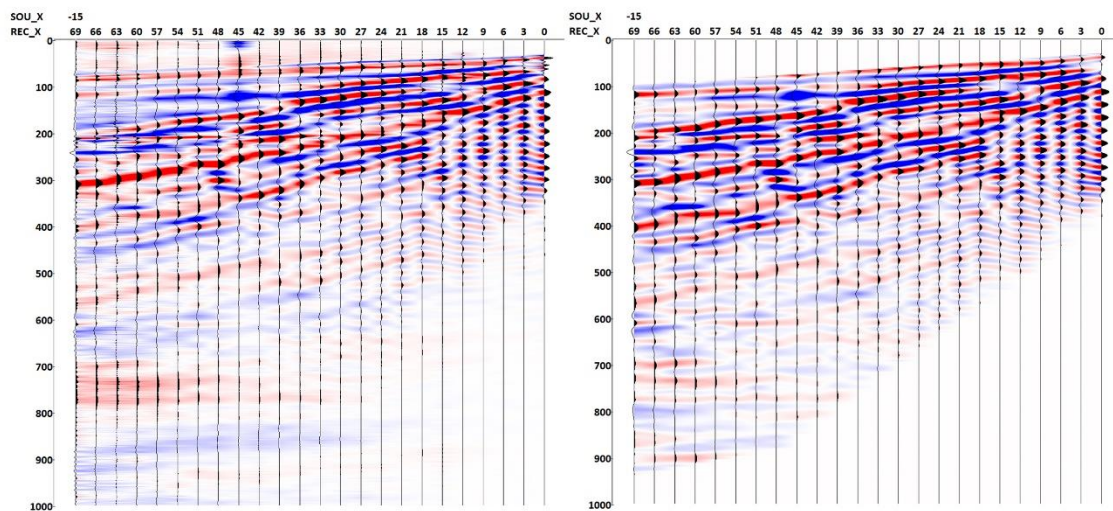
נהלל



0 250 500 1,000 Meters

GII survey
Avni point
HUJI survey

איור 9.30 - מפת נהלל



אתר: נהלל

תאריך: 24.7.16

נצ: 32.6855/35.1861

גובה: 66 מטר

מרווח גאופונים: 3 מטר

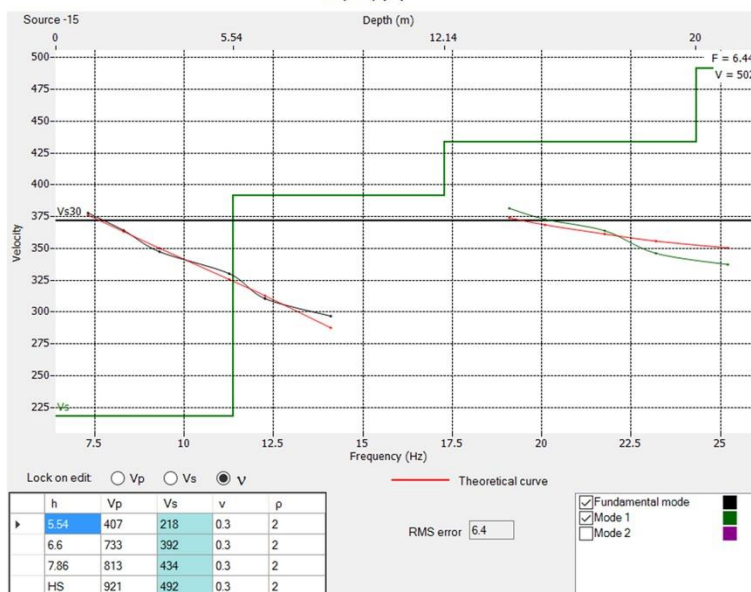
מרווח דגימה: 1 מילישניה

זמן הקלטה: שנייה

מרחקי הפעלת מקור:

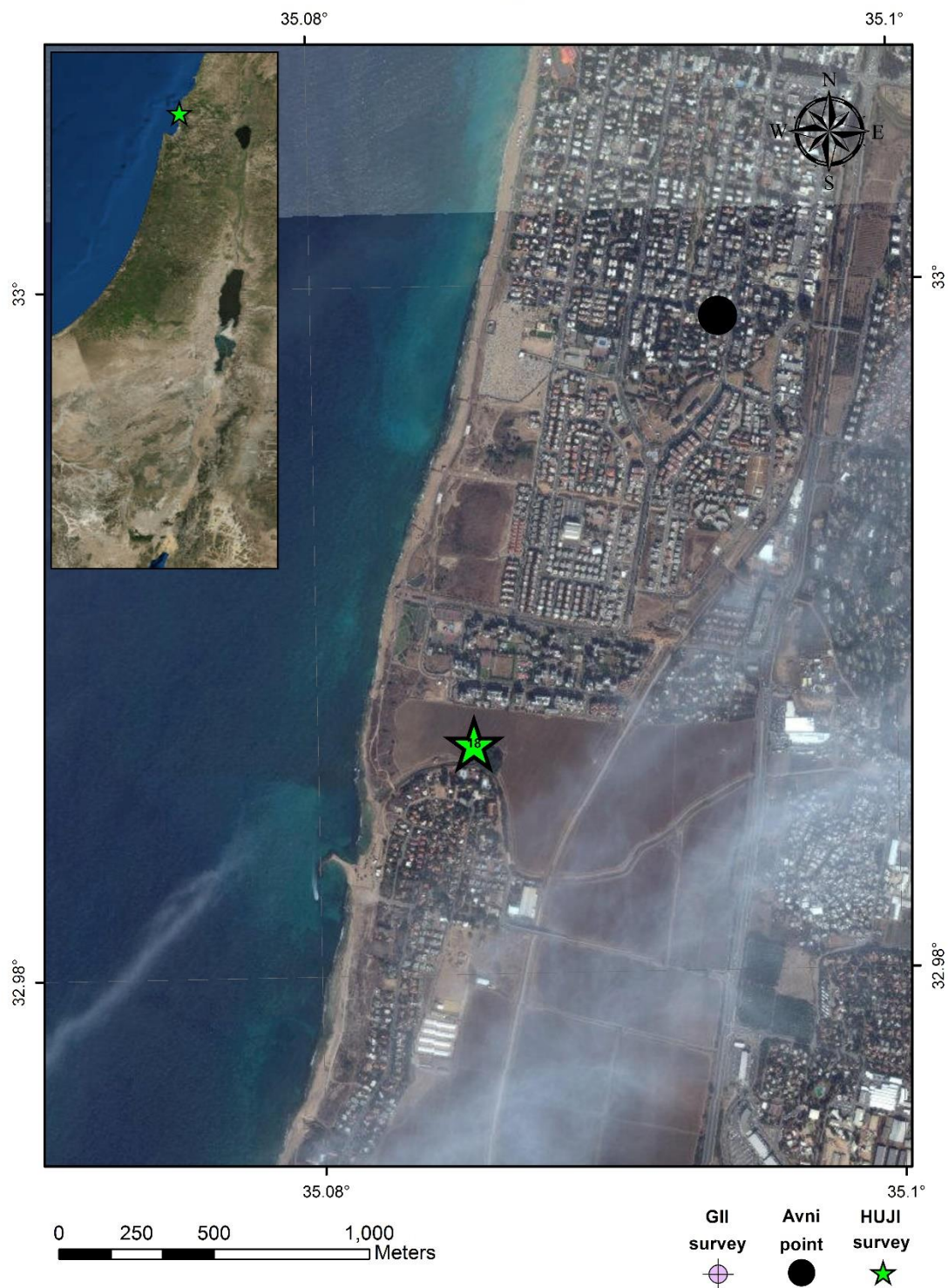
94, 89, 86, -2, -5, -10, -15, 99

Vs20: 370 m/s

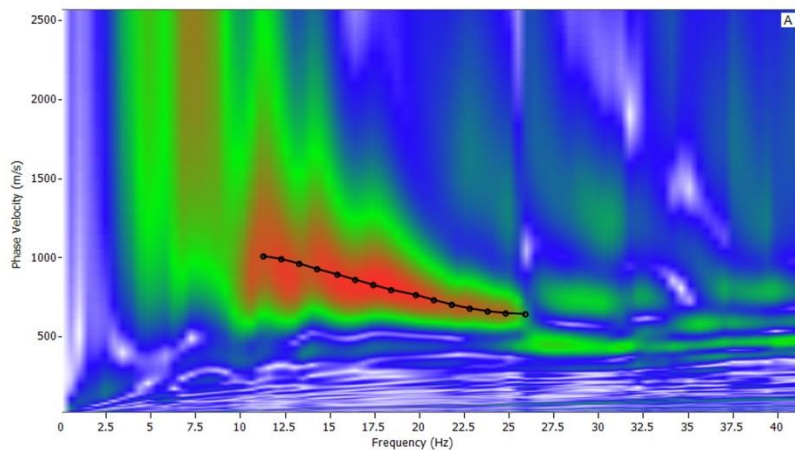
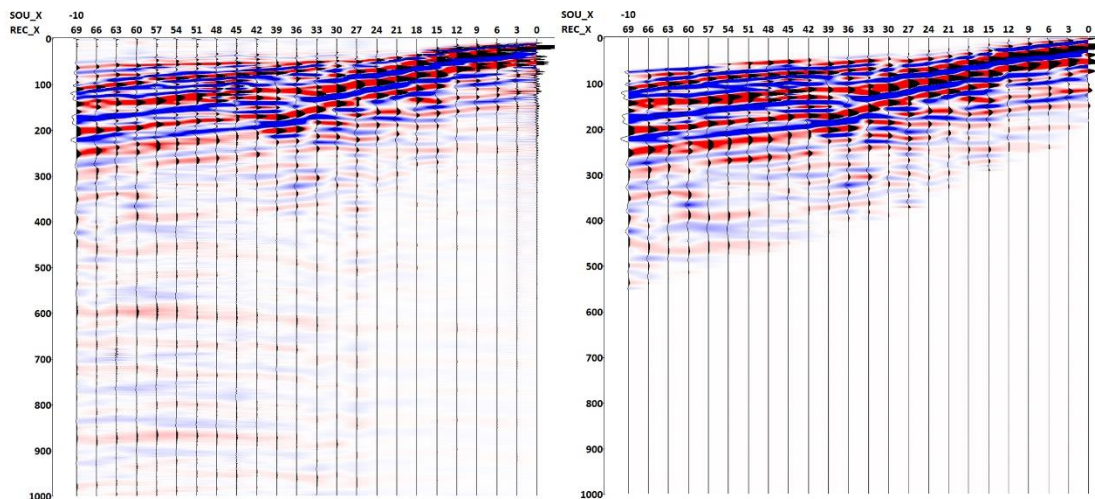


איור 9.31 - תוצאות נהלל

נהריה

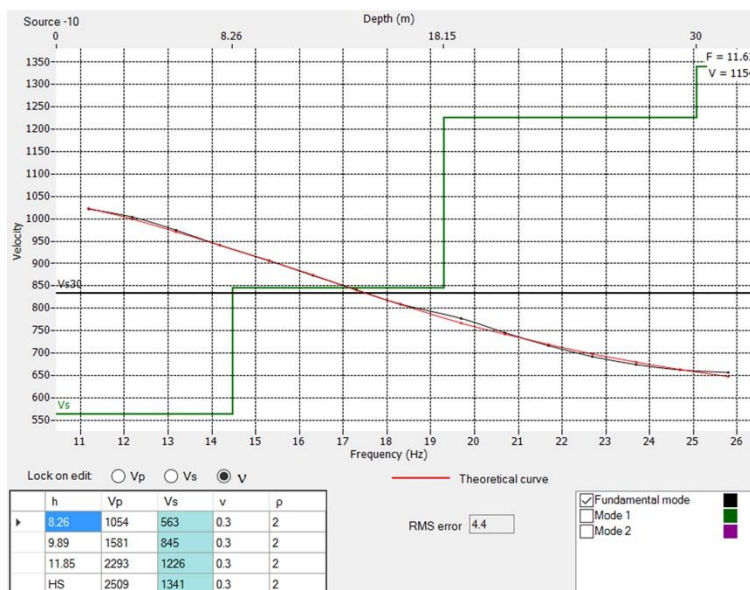


איור 9.32 - מפת נהריה



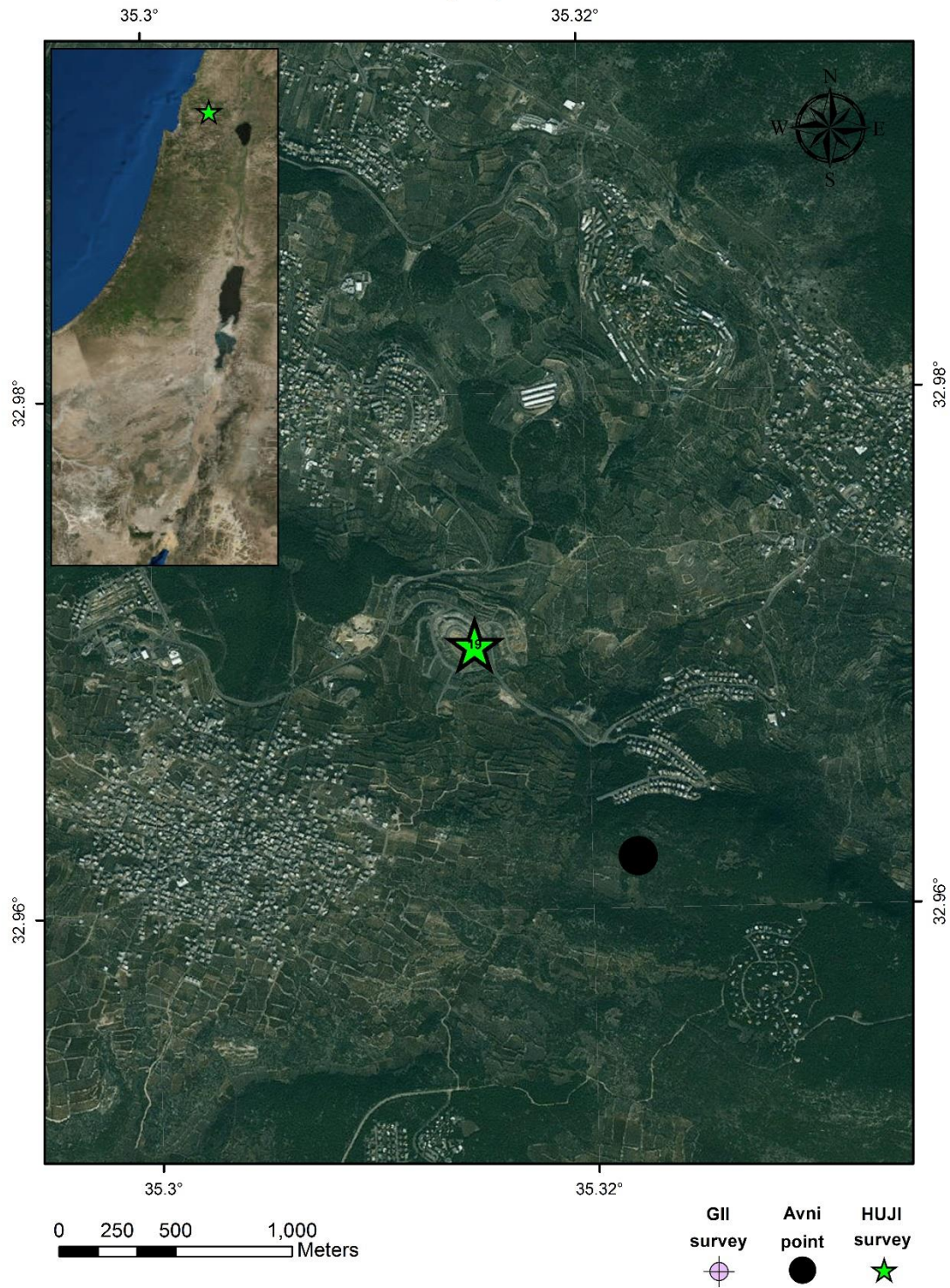
אתר: נהריה
 תאריך: 30.5.16
 נ.צ: 32.9867/35.0853
 גובה: 4 מטר
 מרווח גאופונים: 3 מטר
 מרווח דגימה: 1 מילישנייה
 זמן הקלטה: שנייה
 מרחקי הפעלת מקור:
 -10, -15, -20, 74, 79, 84, 89
 -2, -5

Vs30: 840 m/s

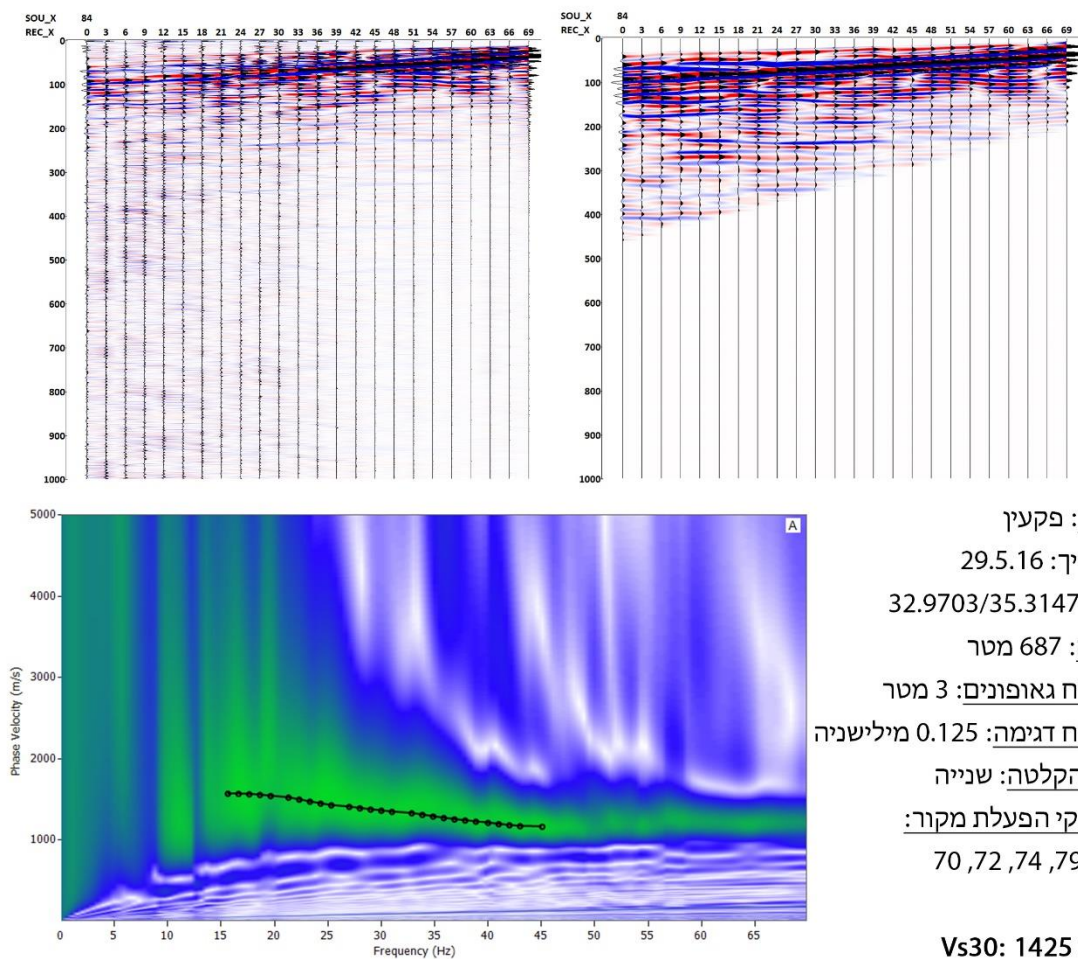


איור 9.33 - תוצאות נהריה

פקיעין

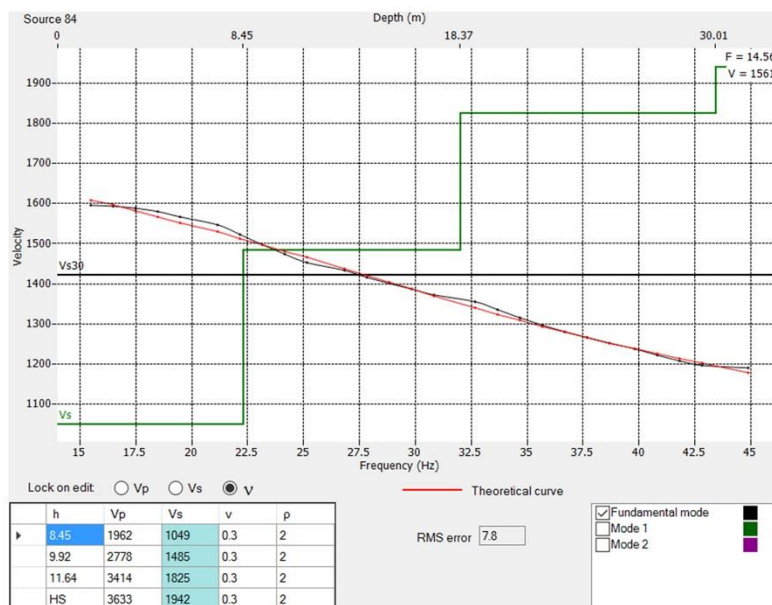


איור 9.34 - מפת פקיעין



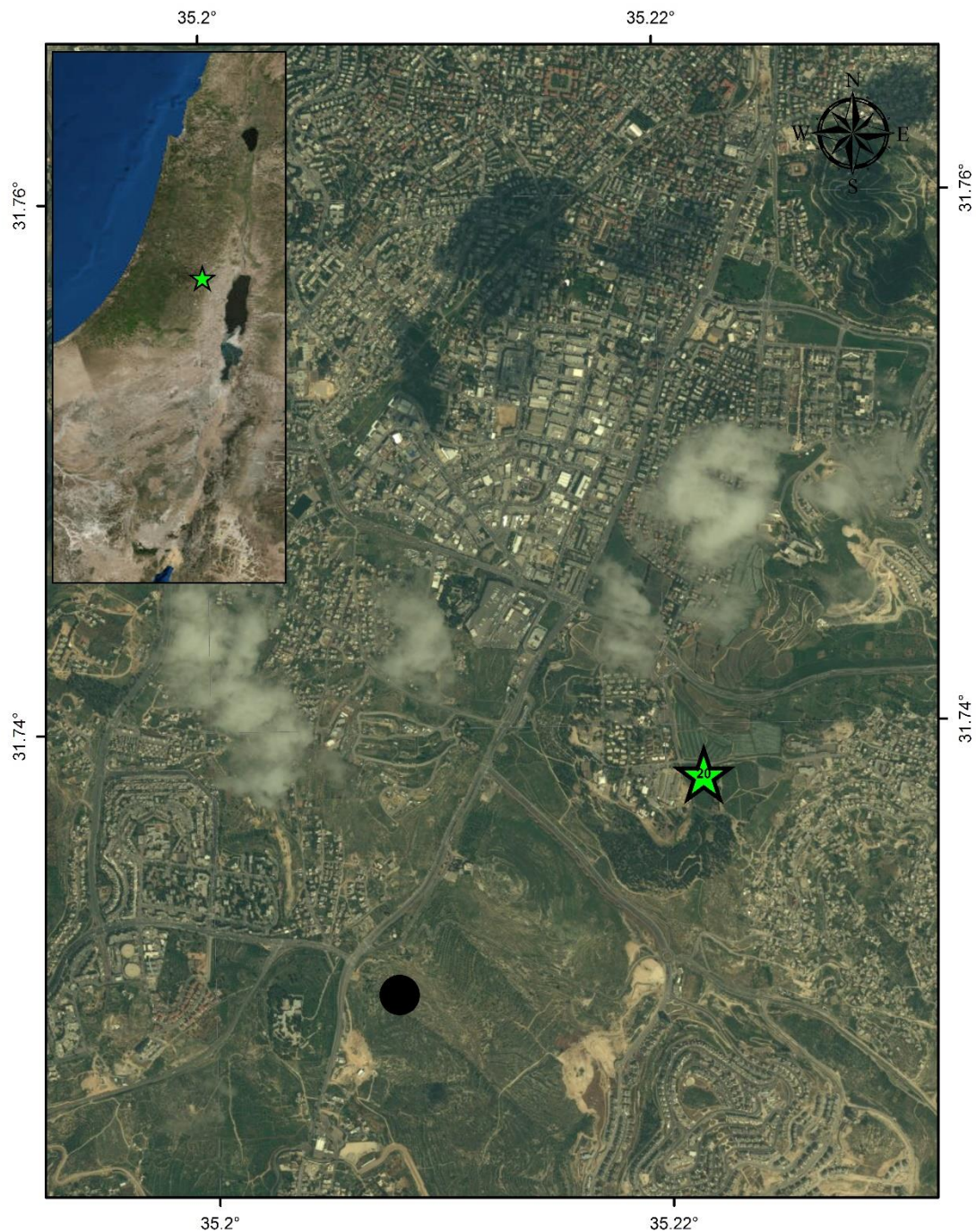
אתר: פקעין
 תאריך: 29.5.16
 נ.צ: 32.9703/35.3147
 גובה: 687 מטר
 מרווח גאופונים: 3 מטר
 מרווח דגימה: 0.125 מילישנייה
 זמן הקלטה: שנייה
 מרחקי הפעלת מקור:
 70,72,74,79,84

Vs30: 1425 m/s



איור 9.35 - תוצאות פקעין

רמת רחל

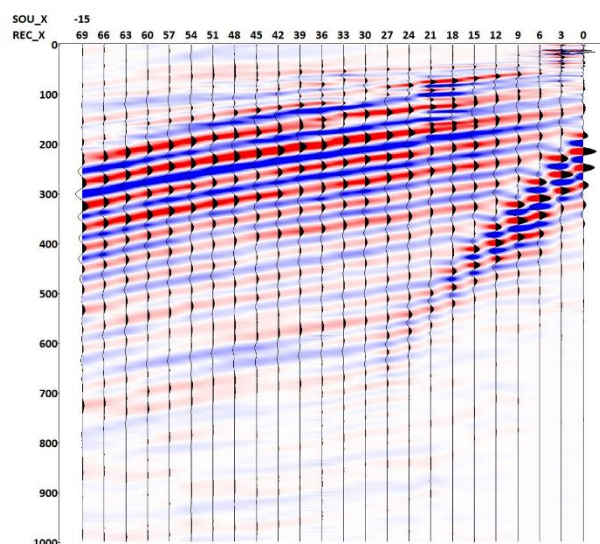


0 250 500 1,000 Meters

GII survey
Avni point
HUJI survey

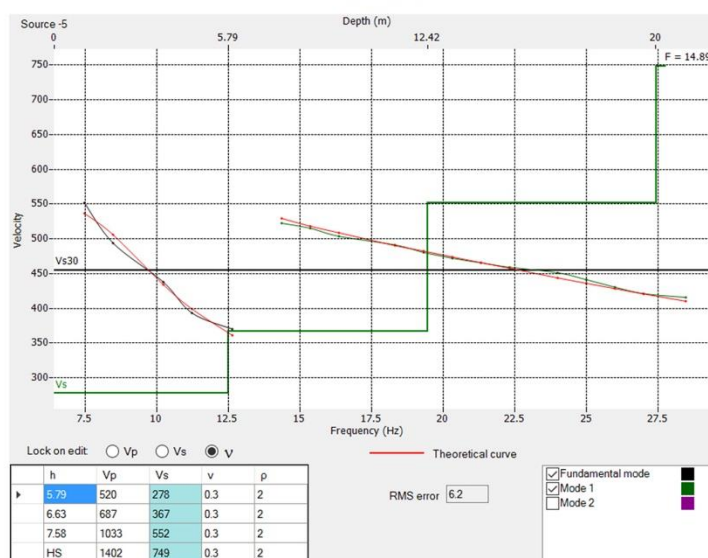
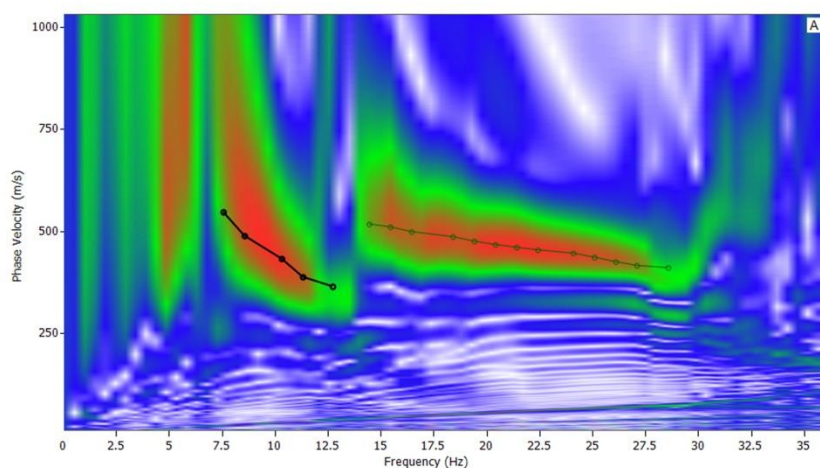


איור 9.36 - מפת רמת רחל



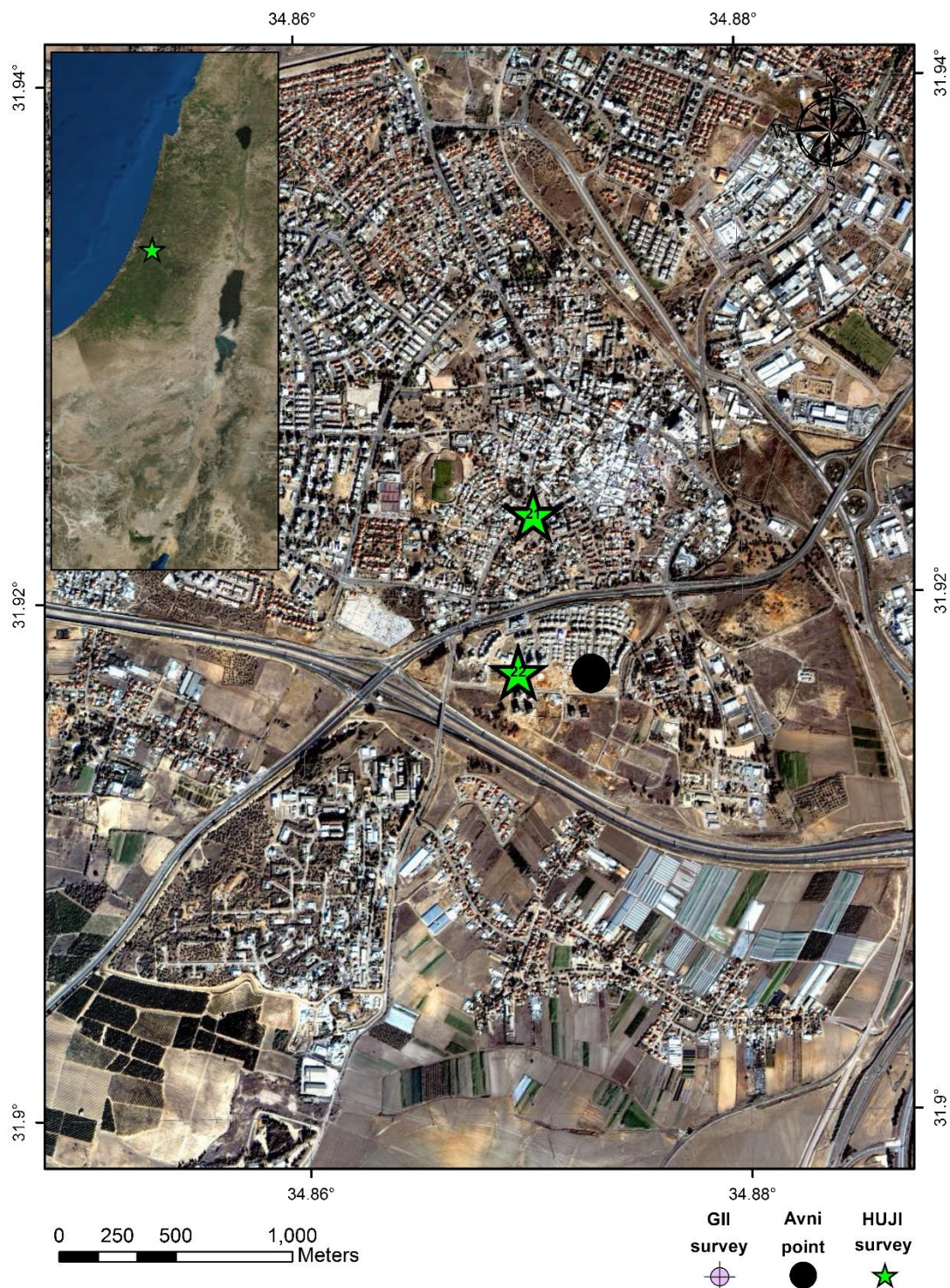
אתר: רמת רחל
 תאריך: 14.7.16
 נ.צ: 31.7381/35.2216
 גובה: 803 מטר
 מרווח גאופונים: 3 מטר
 מרווח דגימה: 1 מילישנייה
 זמן הקלטה: שנייה
 מרחקי הפעלת מקור:
 79, 74, 70, -1, -5, -10, -15, 84

Vs20: 455 m/s

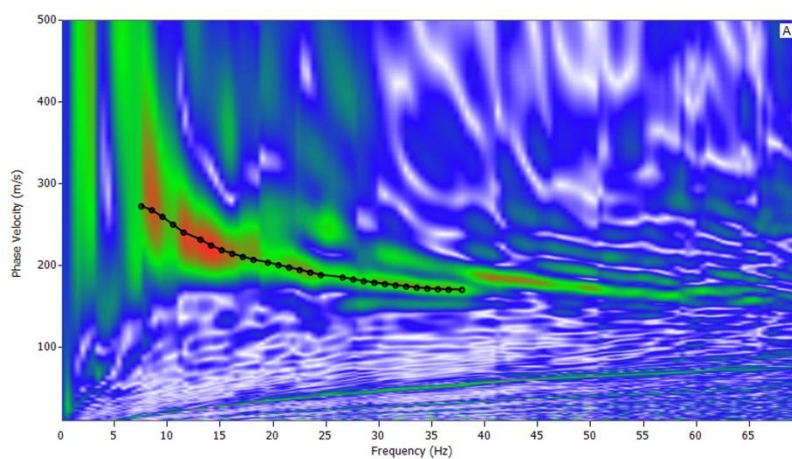
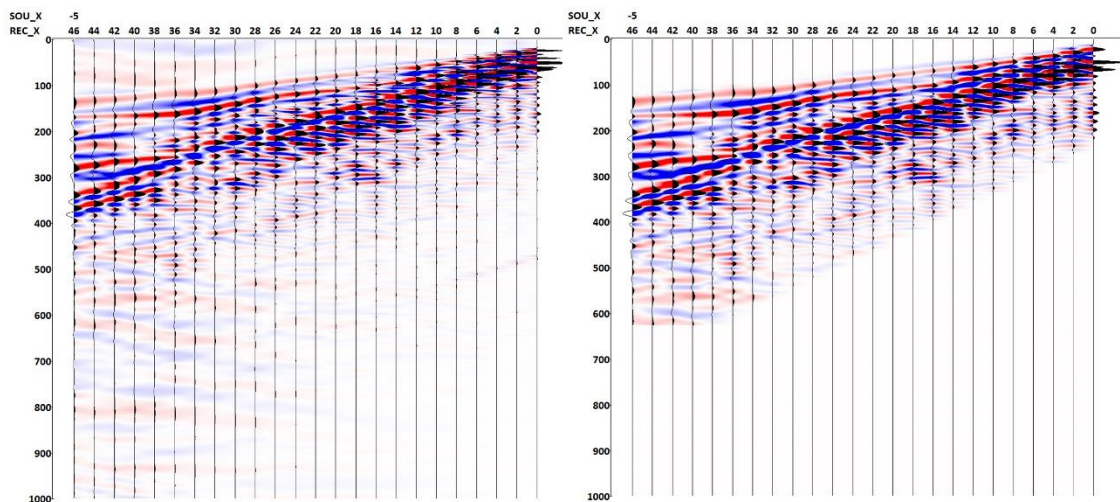


איור 9.37 - תוצאות רמת רחל

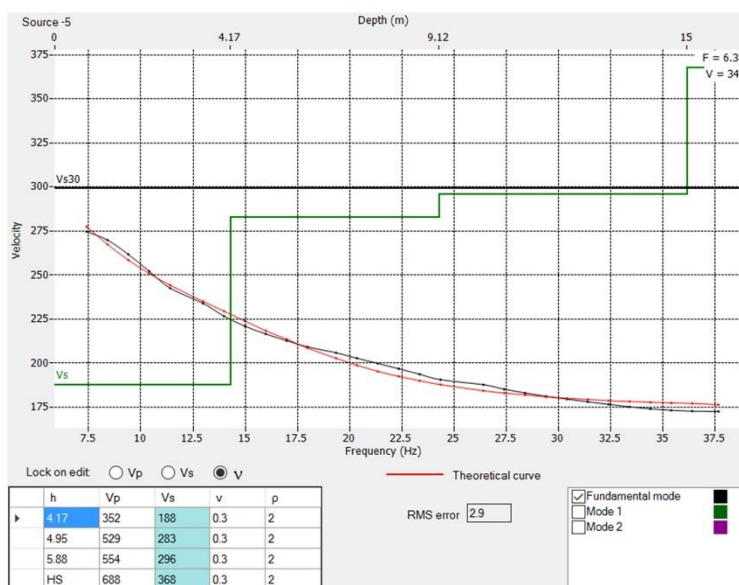
רמלה



איור 9.38 - מפת רמלה

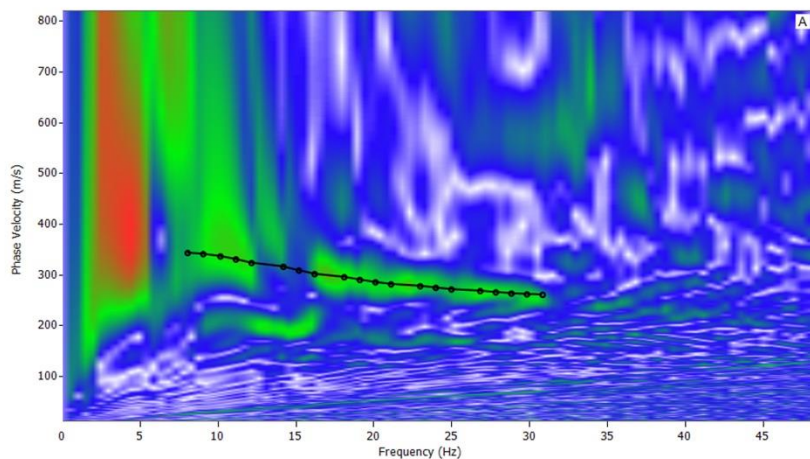
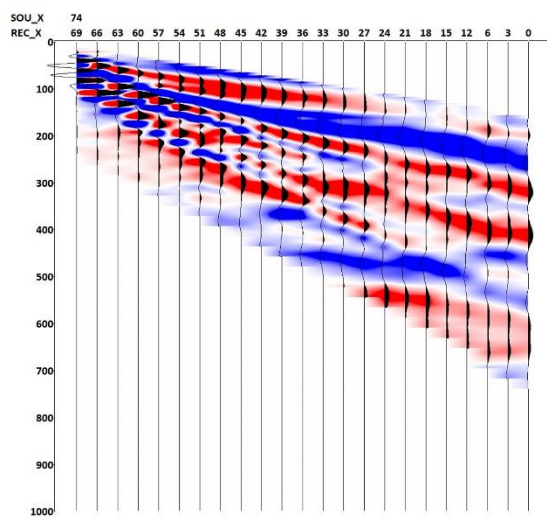
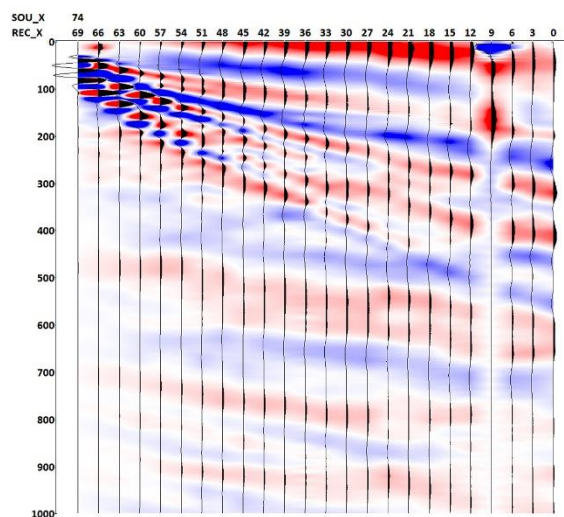


אתר: רמלה 21
 תאריך: 25.2.16
 נ.צ: 34.8705/31.9232
 גובה: 83 מטר
 מרווח גאופונים: 2 מטר
 מרווח דגימה: 0.125 מילישנייה
 זמן הקלטה: שנייה
 מרחקי הפעלת מקור:
 5, -10, -15, -15.1, -20, 51, 66, 61, 56



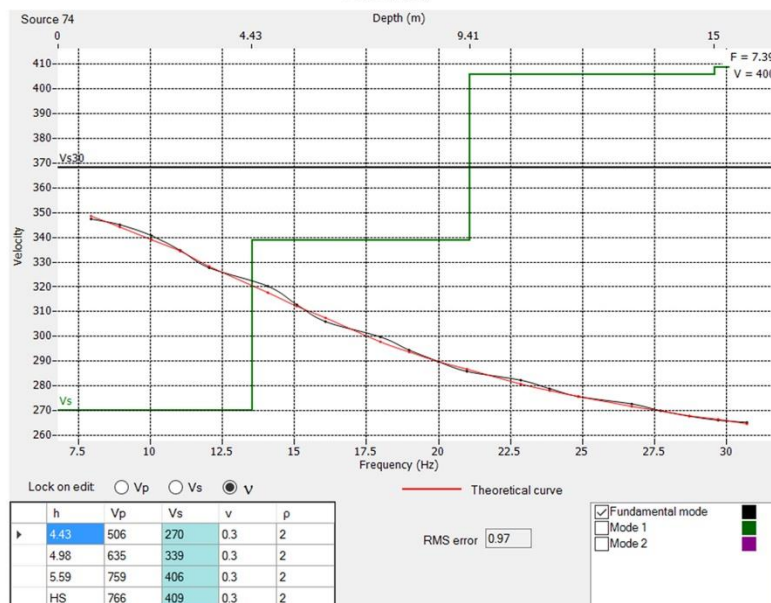
Vs15: 300 m/s

איור 9.39 - תוצאות רמלה 1



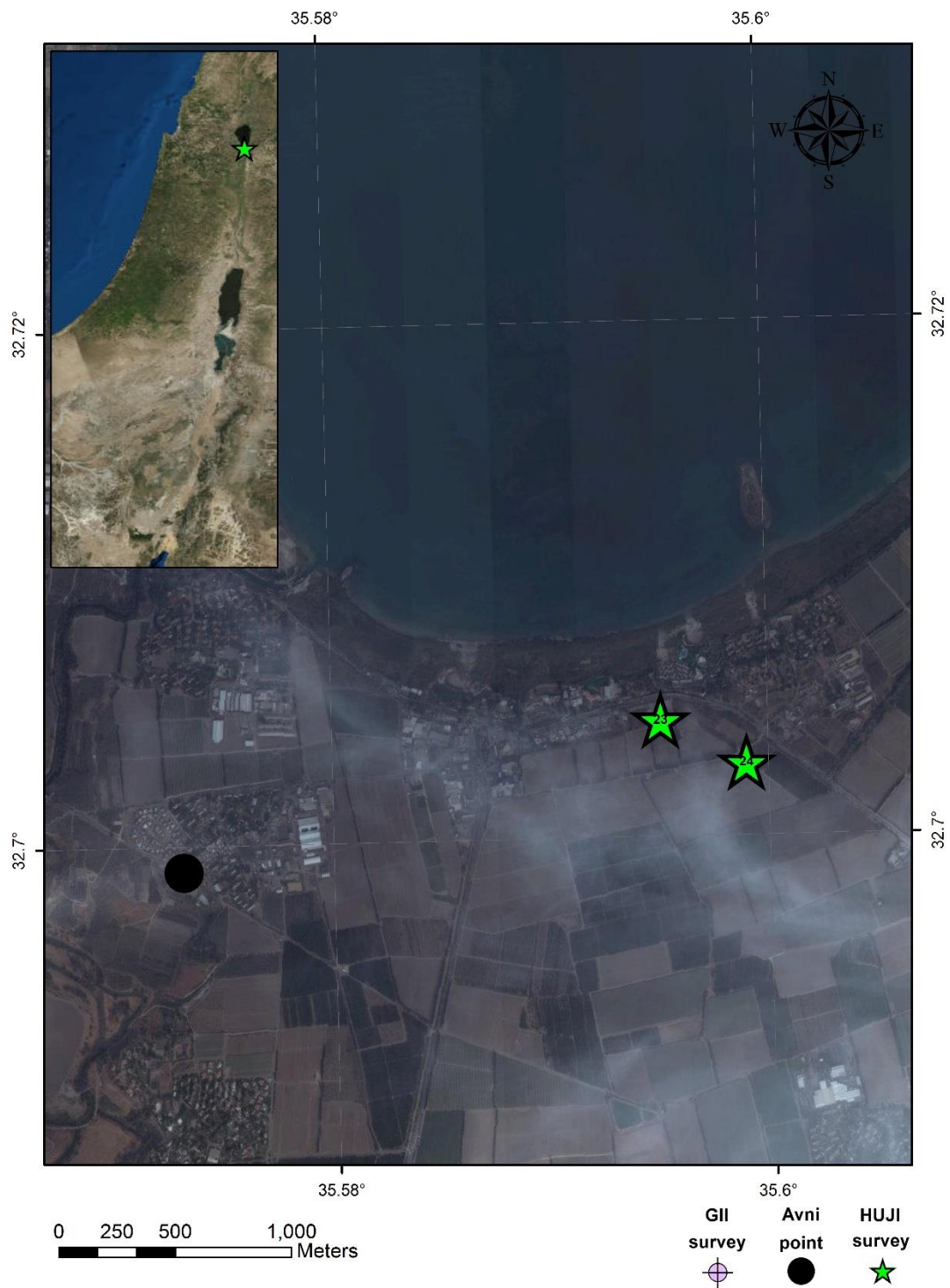
אתר: רמלה 22
 תאריך: 25.2.16
 כ.צ: 34.8697/31.9171
 גובה: 75 מטר
 מרווח גאופונים: 3 מטר
 מרווח דגימה: 0.125 מילישניה
 זמן הקלטה: שנייה
 מרחקי הפעלת מקור:
 -15, -10, -5

Vs15: 370 m/s

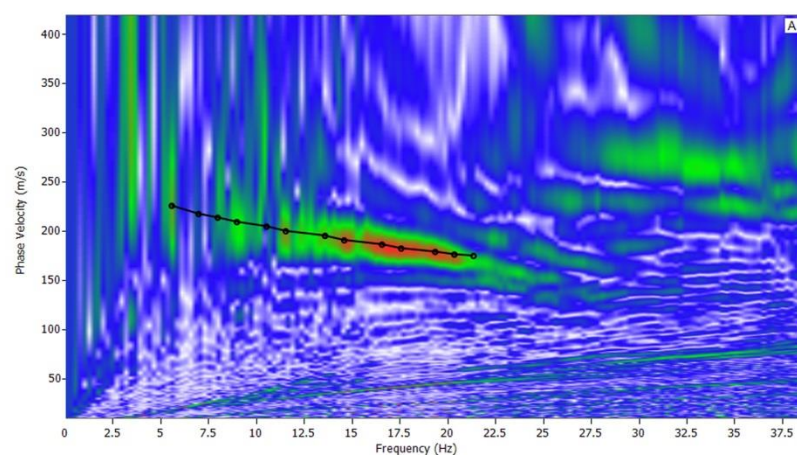
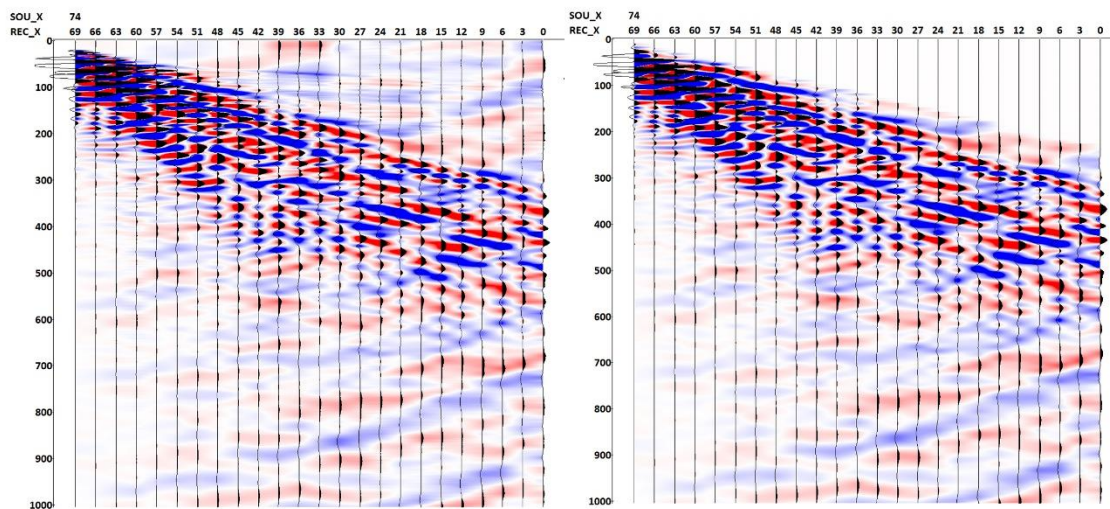


איור 9.40 - תוצאות רמלה 2

צמח

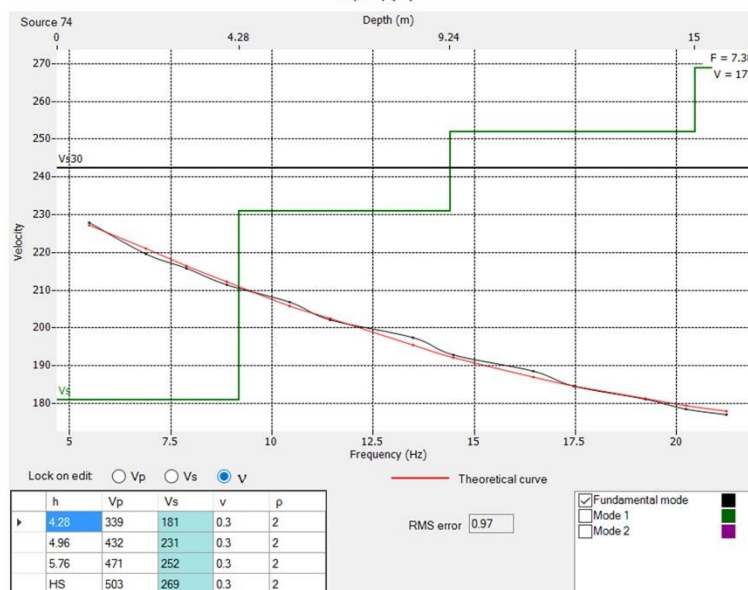


איור 9.41 - מפת צמח

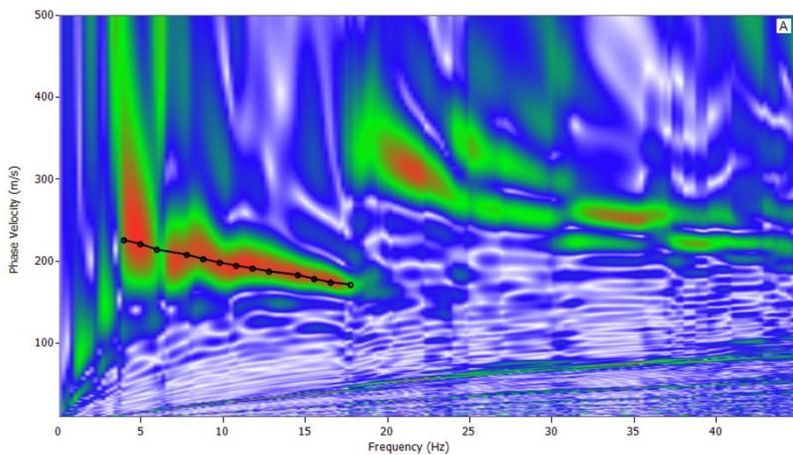
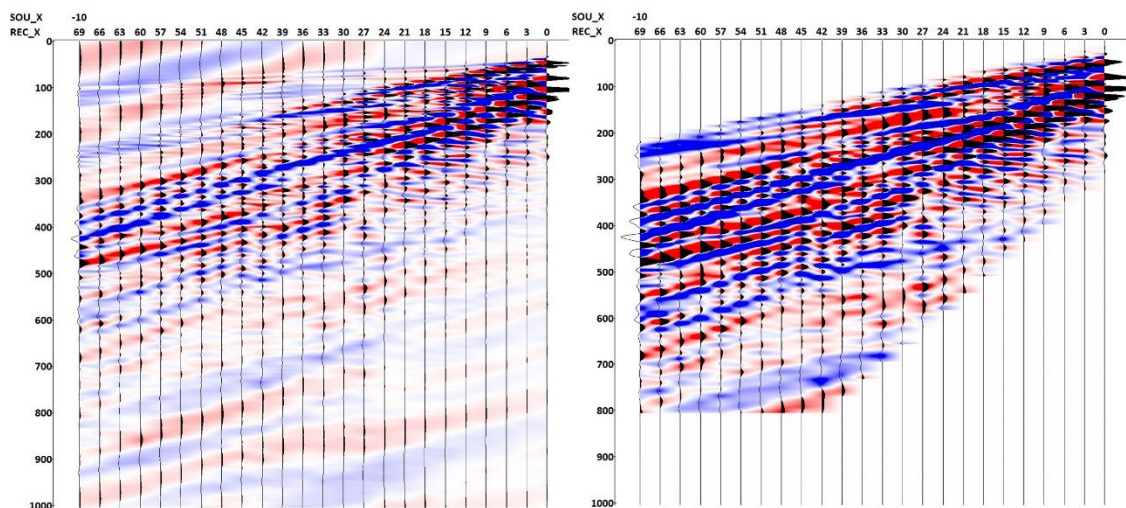


אתר: צמח 23
 תאריך: 18.5.15
 נ.צ: 32.7048/35.5949
 גובה: 200- מטר
 מרווח גאופונים: 3 מטר
 מרווח דגימה: 0.125 מילישניה
 זמן הקלטה: שנייה
 מרחקי הפעלת מקור:
 90,84,79,74

Vs15: 245 m/s

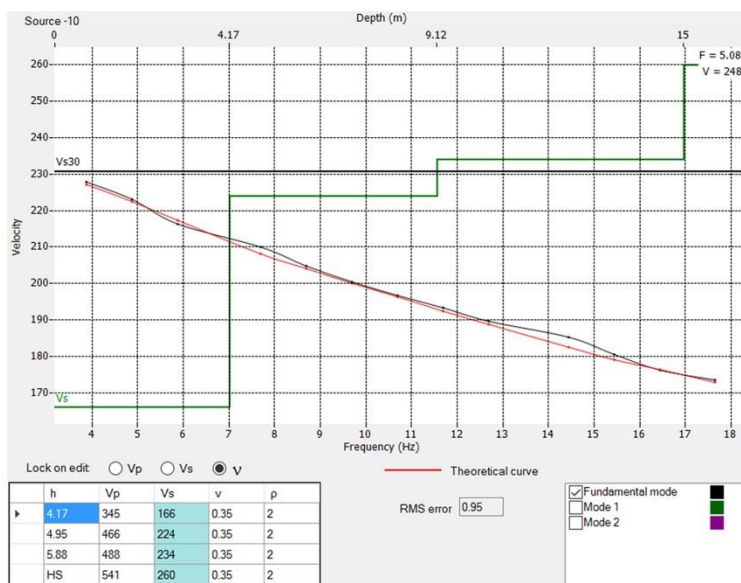


איור 9.42 - תוצאות צמח 1



אתר: צמח 24
 תאריך: 19.8.15
 נ.צ: 32.7027/32.5990
 גובה: 195- מטר
 מרווח גאופונים: 3 מטר
 מרווח דגימה: 0.125 מילישניה
 זמן הקלטה: שנייה
 מרחקי הפעלת מקור:
 -5, -10, -15, 84, 79, 74

Vs15: 230 m/s

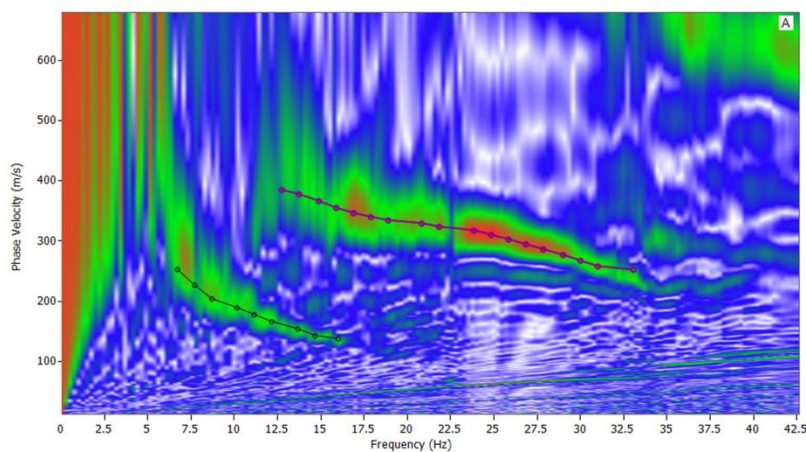
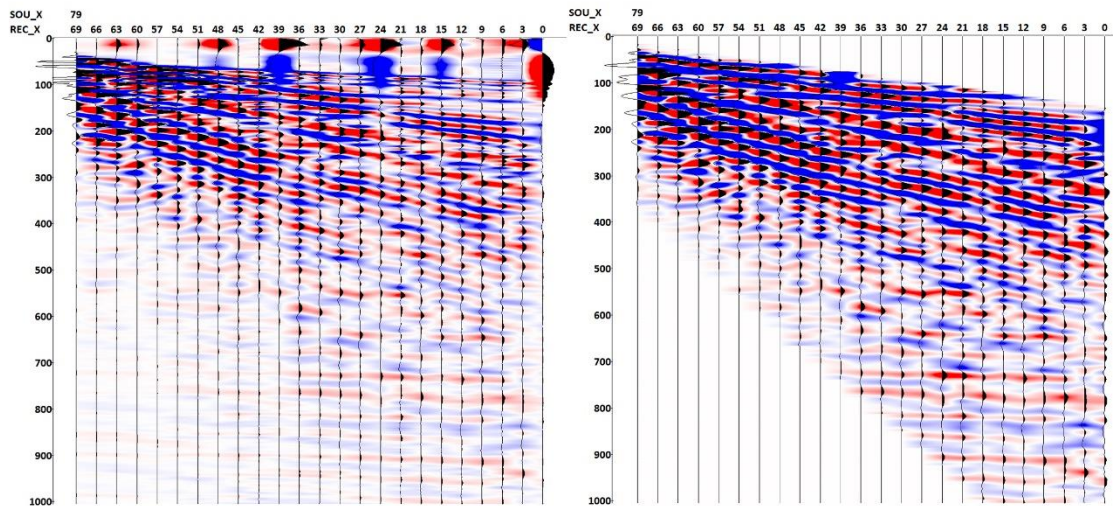


איור 9.43 - תוצאות צמח 2

צרעה



איור 9.44 - מפת צרעה



אתר: צרעה

תאריך: 17.12.15

נ.צ: 31.7653/34.9815

גובה: 230 מטר

מרווח גאופונים: 3 מטר

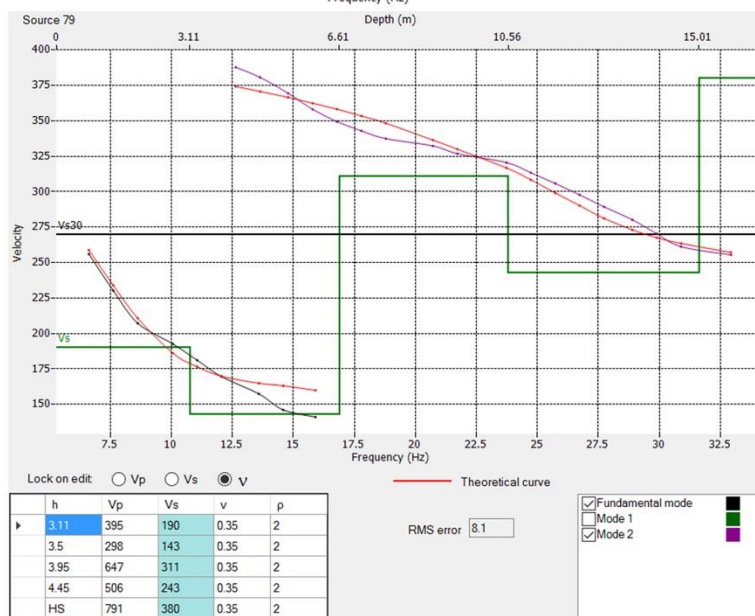
מרווח דגימה: 0.125 מילישנייה

זמן הקלטה: 2 שניות

מרחקי הפעלת מקור:

84, 79, 74, -20, -15, -10, -5, 99, 94, 89

Vs15: 265 m/s

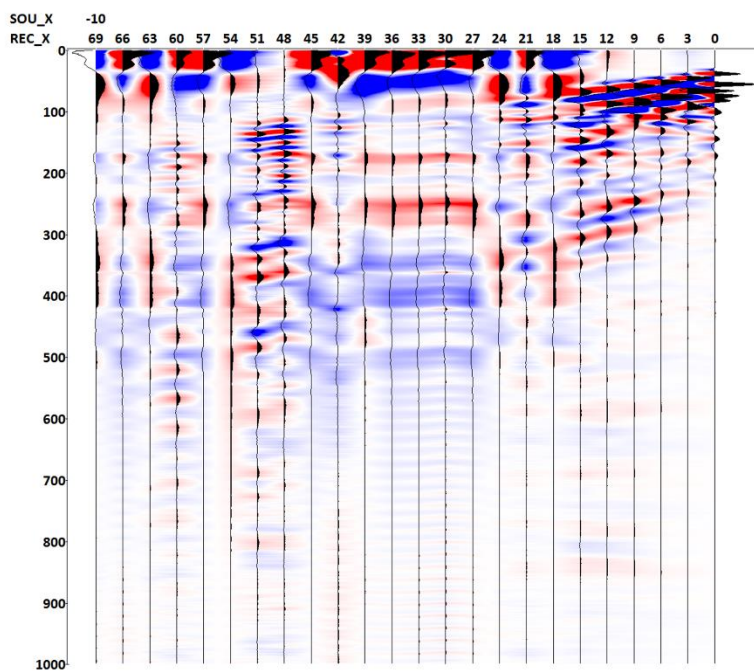


איור 9.45 - תוצאות צרעה

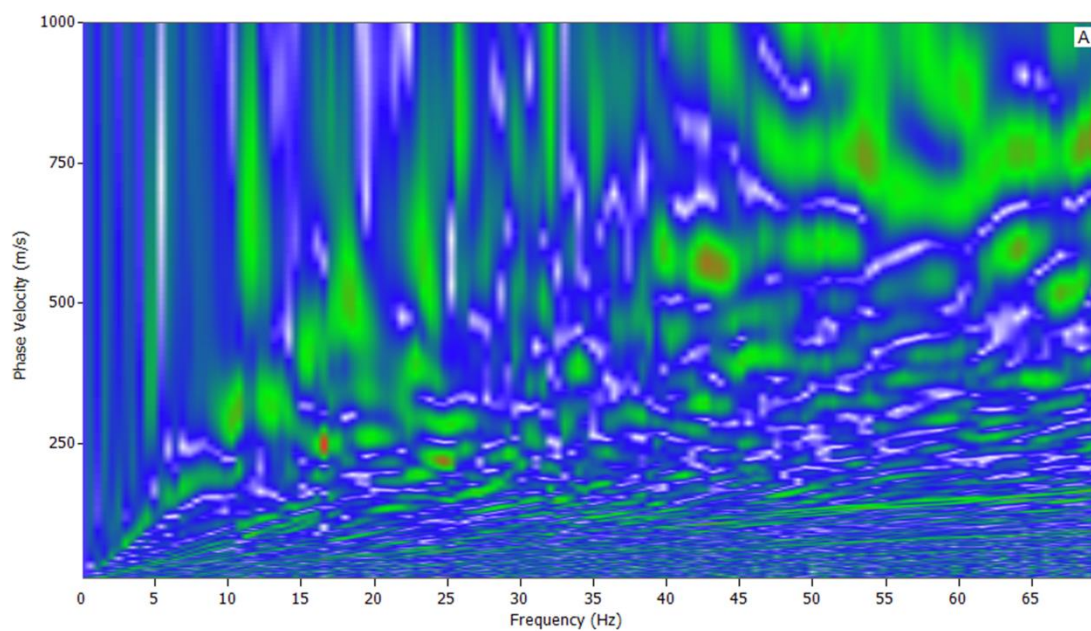
יבנה



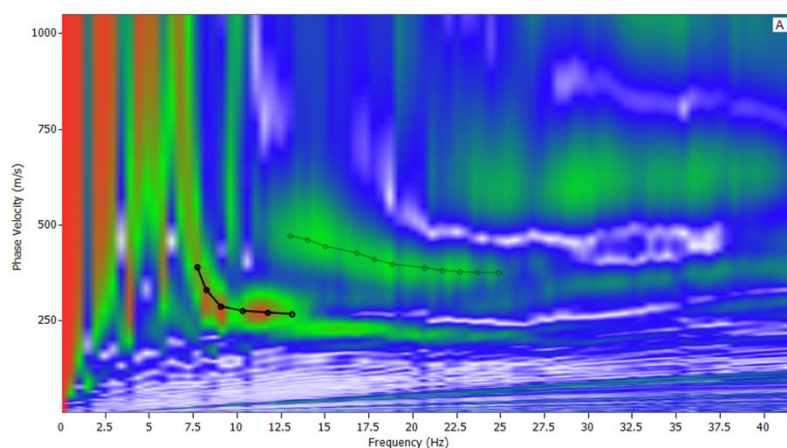
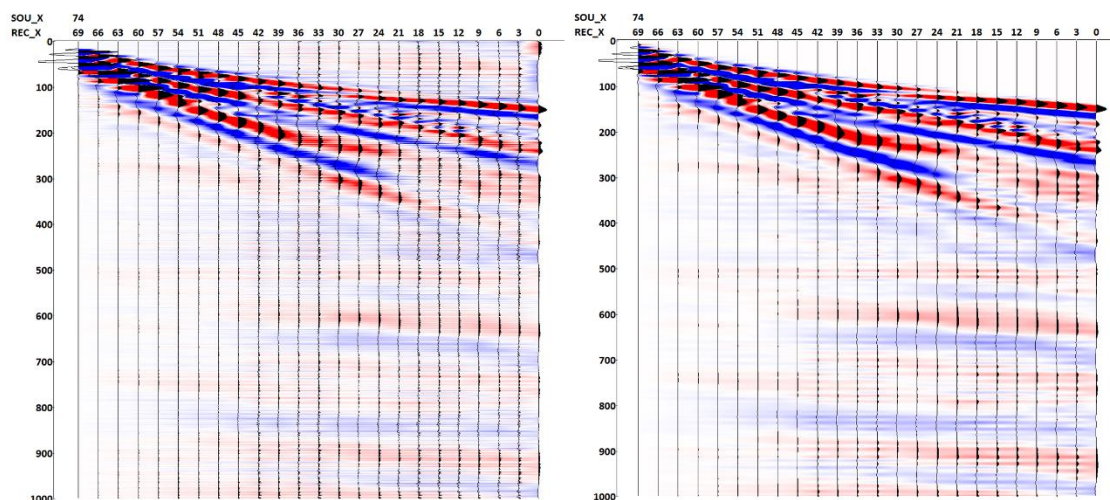
איור 9.46 - מפת יבנה



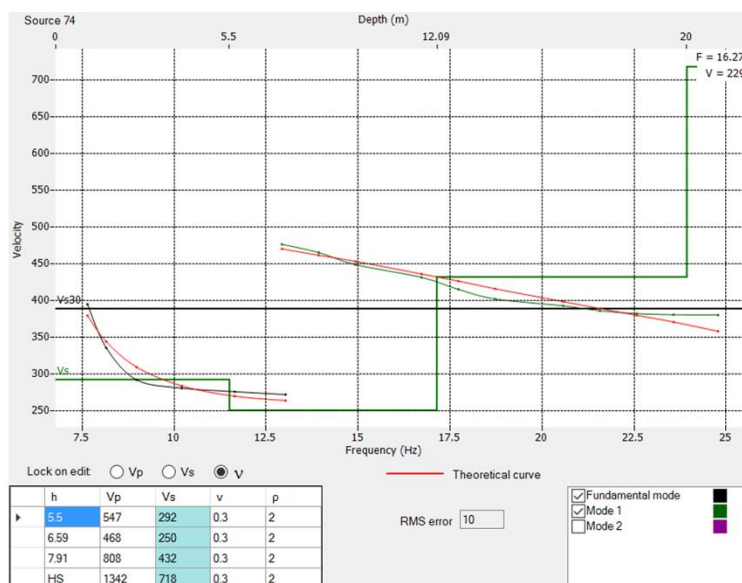
אתר: יבנה 26
 נ.צ: 31.8653/34.7495
 תאריך: 17.2.16
 גובה: 30 מטר
 מרווח גאופונים: 3 מטר
 מרווח דגימה: 0.125 מילישניה
 זמן הקלטה: שנייה
 מרחקי הפעלת מקור:
 94, 89, 84, 79, -15, -10, -5



איור 9.47 - תוצאות יבנה 1



אתר: יבנה 27
 נ.צ: 31.8567/34.7467
 תאריך: 17.2.16
 גובה: 32 מטר
 מרווח גאופונים: 3 מטר
 מרווח דגימה: 0.125 מילישניה
 זמן הקלטה: שנייה
 מרחקי הפעלת מקור:
 10, -15, -20, -25, 74, 79, 89, 94, 84



Vs20:390m/s

איור 9.48 - תוצאות יבנה 2

9.3 נתונים מעבודותיו של רון אבני (Hough and Avni, 2011)

Location	Long	Lat	Distance	I mode	I mean	N
Abu-Ghosh	35.105	31.793	39	6.5	6.5	10
Abu-Diss	35.26	31.757	25	8	7.5	11
Abu-Tlul	34.873	31.203	67.5	5	5	2
Umm-El Fachm	35.146	32.498	106.7	5.5	5.5	1
Um-Ghuni	35.552	32.689	125.5	6.5	7	7
El-Chama	35.647	32.671	125.5	6.5	7	5
El-Arish	33.749	31.012	177.8	4.5	4.5	1
Alexandria	29.95	31.22	550	3	3	1
A-Salt	35.711	32.033	58.8	8.5	8.5	1
Irbid	35.85	32.556	115.5	7.5	7.5	1
A-Ram	35.229	31.846	35.5	8	7	13
Beer-Sheba	34.777	31.246	71.7	5	5	2
Bireh	35.218	31.899	41.4	6	7.5	5
Beith-Alfa	35.416	32.498	103.7	5	6	4
Beith Jalla	35.177	31.712	28	7.5	7.5	12
Beith-Ghubrin	34.894	31.597	50.5	6	6	1
Beith-Ghimal	34.968	31.712	44.8	6	6.5	4
Beith-Ha'kerem	35.198	31.775	31.5	5.5	7	16
Beith-Lehem	35.198	31.695	26.3	8	7.5	10
Beith-Likya	35.062	31.855	46.5	7	6.5	5
Beith-Sha'an	35.489	32.48	102.5	6.5	6	2
Beith-Surik	35.146	31.81	37.5	6	7	11
Benyamina	34.946	32.521	113.7	5	5.5	2
Batir	35.135	31.721	31.8	7	7	11
Gedera	34.767	31.802	66.3	5.5	6	4
Gimzoo	34.947	31.917	60	7	7.5	4
Jiftlik	35.468	32.131	63.2	7	7	1
Jaljulya	34.947	32.14	77.5	4.5	6	5
Jenin	35.291	32.444	98.2	6	6	1
Jasar-Majami	35.552	32.617	117.5	8.5	7	6
Jarash	35.891	32.273	89.5	7	7	1
Gesher	35.541	32.608	116.2	6.5	7	5
Alenby-Bridge	35.531	31.864	35	8.5	8	5
Benot-Ya'akov Bridge	35.615	32.999	160	6.5	6.5	1
Dahariya	34.979	31.412	46.5	5.5	6	2
Dir-A-Shich	35.073	31.739	40	6.5	6.5	9
Damascus	36.273	33.29	230	4.5	4.5	1
Dara'a	36.061	32.626	133	6	6	1
Mount of Olives	35.25	31.775	27.5	8.5	7.5	14
Har-Tuv	35.01	31.757	45	5	6.5	5
Mount Carmel	35.042	32.744	140	6.5	6	2
Mount Scopus	35.25	31.793	28.2	8.5	7.5	13
Herzeliya	34.799	32.149	88	5	5	1
Vadi-Shueib	35.605	31.899	41	8	8	2
Zarka	36.082	32.06	83.7	7	7	1
Zichron-Ya'akov	34.947	32.553	118.5	6	5.5	2
Zarka-Maeen	35.721	31.677	32.7	7	7.5	2
Hebron	35.104	31.526	30	7	7	1
Haifa	35	32.799	142.5	6	6	2
Tabcha	35.52	32.862	145	6	6.5	2
Tiberias	35.531	32.771	135	7	6.5	2
Tul-Karem	35.021	32.291	90	6	6	1
Tfileh	35.605	30.864	83.8	5	5	1
Yalo	35.021	31.828	49	7	7	7
Yavneh	34.746	31.864	72	5	6	5

Location	Long	Lat	Distance	I mode	I mean	N
Jafa	34.756	32.051	81.7	6	5.5	3
Jerusalem	35.218	31.775	30	7	7	250
Jerusalem	35.25	31.739	27	8.5	7.5	12
Temple Mount	35.239	31.775	27.8	7.5	7.5	15
Jericho	35.447	31.855	32.5	7	8	10
J-Jericho Rd.*	35.395	31.793	24	8	8	8
J-Jericho Rd.*	35.406	31.802	26.7	8	7.5	7
A-J River Rd.*	35.637	31.81	35	8	8	4
Kfar Michmash	35.27	31.855	35.7	8	7.5	6
Kfar Ha'shiloach	35.239	31.757	26.3	7	7.5	14
Kafaringhi	35.69	32.282	84	8	8	2
Karak	35.69	31.194	50.8	6.5	6.5	1
Luda	34.894	31.944	65	8	7	6
Majdal	34.576	31.659	82	5	5	1
Majdal-Yaba	34.947	32.069	70.5	6.5	5.5	4
Madaba	35.785	31.721	38.7	7.5	7	3
Motza	35.156	31.784	35	6	7.5	16
Ma'an	35.711	31.473	160	5	5	1
Elisha Stream	35.426	31.864	34	7	7.5	7
Ma'ar	35.395	32.871	145.7	7	7	1
Mezadah	35.354	31.316	30	8	8	1
Merchavya	35.302	32.58	115	6	6.5	4
Mar-Saba	35.333	31.704	16.8	6.5	7.5	3
Masslubiya	35.626	31.757	29	6	8	4
Nebi-Musa	35.426	31.775	23.5	7.5	8	7
Na'halal	35.187	32.671	125	4.5	6	3
Nahariya	35.094	32.999	161.3	4.5	6	2
Nachal Shorek	34.873	31.793	61	7	6.5	5
Ness-Ziona	34.799	31.917	70.3	6.5	7	5
Nazareth	35.291	32.689	124.3	7	7	4
Salfit	35.177	32.069	60.5	7.5	7	2
Suieda	36.559	32.699	165.5	7	7	1
Ubadiya	35.541	32.671	123.2	7	7	6
Ajlun	35.732	32.318	90	8	8	2
Gaza	34.459	31.499	92.5	6.5	6.5	1
Azra'a	36.22	32.844	160.8	6	6	1
Atara	35.198	31.988	51.7	7	7	4
Ein-El-Kelt	35.364	31.828	29.5	8	7.5	9
Ein-Doc	35.426	31.873	33.7	8	7.5	7
Ein-Charod	35.385	32.544	109	6.5	6	5
Ein-Karem	35.166	31.766	31.3	7.5	7	18
Ayun-Musa	35.721	31.757	37.5	7	7	3
Ein-Kinya	35.146	31.917	47.5	7	7	5
Ein-Fara	35.343	32.273	78.7	7	7	1
Acre	35.073	32.917	153.3	7.5	6	2
Anab	34.926	31.394	83.2	6.5	6	2
Afula	35.281	32.589	115	7	6.5	4
Aqaba	35	33.29	240	4	4	1
Ekron	34.83	31.846	64.3	6.5	6.5	7
Pkie'in	35.322	32.962	155	4.5	4.5	1
Petach-Tikva	34.905	32.086	75	5.5	5.5	5
Tsemach	35.573	32.699	126	7	7	7
Zephath	35.478	32.953	153.5	6.5	6.5	1
Tsor'ah	34.979	31.766	47.5	8	6.5	5
Kubab	34.746	31.882	67.5	7	7	7
Cairo	31.25	30.065	425	3.5	3.5	1
Kunetra	35.806	33.117	176.5	4	4	1

Location	Long	Lat	Distance	I mode	I mean	N
Kalkilya	34.958	32.175	80	6.5	5.5	3
Kiryat-Anavim	35.114	31.802	38.8	7	7	11
Ramalla	35.198	31.89	41.5	7.5	7.5	5
Rosh-Ha'ayin	34.926	32.086	71.2	6	6	5
Amman	35.923	31.944	63.7	8.5	8.5	1
Rehovot	34.809	31.89	67.6	6.5	6.5	6
Reyneh	35.291	32.708	127.5	8	7.5	2
Ramleh	34.873	31.917	66.3	8	7	7
Ramat-Yishay	35.166	32.689	126.5	6	5	2
Ramat-Rachel	35.208	31.73	25.5	6.5	7.5	14
Rafidi'yeh	35.229	32.211	73.7	8	8	2
Shunem	35.322	32.589	114.5	7	6.5	5
Giv'atayim	34.809	32.06	78.3	5	5.5	4
Nablus	35.25	32.202	73	8	8	2
Tel-Aviv	34.767	32.06	80.5	6	5.5	3
Tel-Yosef	35.385	32.517	108.2	6.5	6	3
Dead-Sea North	35.52	31.757	23.7	9	8.5	4
Dead-Sea North	35.458	31.721	17.5	9	8.5	4
Dead-Sea North	35.489	31.739	21.3	9	8.5	4
Jordan River	35.531	31.819	31.2	9	8.5	6
Yarmuch-Fall	35.658	32.671	125	8.5	7	4

נספח 2 - נתוניו של אבני (Hough and Avni, 2011). Long & Lat – נקודת הציון של האתר. Distance – מרחק האתר ממוקד הרעידה (מוקדו של אבני). I mode – עוצמה סייסמית שכיחה. I mean – עוצמה סייסמית ממוצעת. N – מספר הערכות עבור כל אתר.

9.4 נתונים של זוהר ומרקו (Zohar and Marco, 2012)

Name	Lon	Lat	Md	Mn	N.Mn	Mx	C1.Md	C2.Md
Abu-Gosh	35.104	31.798	6.5	6.5	10	6.5	6.5	6.5
Abu-Dis	35.263	31.762	8	7.5	11	8	8	8
Abu-Tlul	34.874	31.194	5	5	2	5	5	5
Um-el-Fahm	35.146	32.511	5.5	5.5	1	5.5	5.5	5.5
Um juni	35.562	32.7	6.5	7	7	6.5	5.5	4.5
El hama	35.658	32.681	6.5	7	5	6.5	6.5	6.5
El arish	33.755	31.152	4.5	4.5	1	4.5	3.5	2.5
Alexandria	29.897	31.203	3	3	1	3	2	1
A-Salt	35.718	32.041	8.5	8.5	1	8.5	8.5	8.5
Irbid	35.849	32.563	7.5	7.5	1	7.5	6.5	5.5
A-Ram	35.231	31.852	8	7	13	8.5	8	8
Beer sheva	34.8	31.238	5	5	2	5	5	5
Bira	35.22	31.907	6	7.5	5	6	6	6
Bet alfa	35.423	32.511	5	6	4	5	5	5
Bet jala	35.178	31.717	7.5	7.5	12	7.5	7.5	7.5
Bet govrin	34.894	31.6	6	6	1	6	7	8
Bet gimal	34.967	31.717	6	6.5	4	6	6	6
Bet hakerem	35.199	31.78	5.5	7	16	5.5	6.5	7.5
Bet lehem	35.199	31.699	8	7.5	10	8	8	8
Bet likia	35.062	31.861	7	6.5	5	7	7	7
Bet shean	35.497	32.492	6.5	6	2	6.5	6.5	6.5
Bet sorik	35.146	31.816	6	7	11	6	5	4
Binyamina	34.944	32.519	5	5.5	2	5	4	3
Batir	35.136	31.726	7	7	11	7	6	5
Gedera	34.766	31.807	5.5	6	4	5.5	6.5	7.5
Gimzoo	34.945	31.924	7	7.5	4	7	8	9

Name	Lon	Lat	Md	Mn	N.Mn	Mx	C1.Md	C2.Md
Jiftlik	35.475	32.141	7	7	1	7	6	5
JalJulia	34.945	32.15	4.5	6	5	4.5	3.5	2.5
Genin	35.295	32.457	6	6	1	6	6	6
Jeser magm	35.561	32.627	8.5	7	6	8.5	7.5	6.5
Jeresh	35.9	32.283	7	7	1	7	7	7
Gesher	35.551	32.618	6.5	7	5	6.5	6.5	6.5
Alenbi bridge	35.537	31.87	8.5	8	5	9	8.5	8.5
Bnot yakov	35.627	33.006	6.5	6.5	1	6.5	6.5	6.5
Daharia	34.978	31.41	5.5	6	2	5.5	4.5	3.5
Dir-a-Shech	35.073	31.744	6.5	6.5	9	7	6.5	6.5
Demaskus	36.297	33.516	4.5	4.5	1	4.5	3.5	2.5
Daraa'	36.073	32.634	6	6	1	6	5	4
Zeitim mountain	35.252	31.78	8.5	7.5	14	9	7.5	6.5
Toov mountain	35.009	31.762	5	6.5	5	5	5	5
Carmel mountain	35.039	32.754	6.5	6	2	6.5	5.5	4.5
Zofim mountain	35.252	31.798	8.5	7.5	13	8.5	7.5	6.5
Herzelia	34.796	32.158	5	5	1	5	5	5
Vadi Shueib	35.611	31.906	8	8	2	8	7	6
Zarka	36.089	32.066	7	7	1	7	6	5
Zichron Yaa'kov	34.944	32.565	6	5.5	2	6	5	4
Zarka Maein	35.727	31.68	7	7.5	2	7	6	5
Hebron	35.104	31.528	7	7	1	8	6	5
Haifa	34.996	32.808	6	6	2	7	6	6
Tabha	35.53	32.871	6	6.5	2	6	6	6
Tiberias	35.541	32.781	7	6.5	2	7	7	7
Tool-Karem	35.019	32.303	6	6	1	6	6	6
Tapila	35.607	30.842	5	5	1	5	5	5
Yalo	35.02	31.834	7	7	7	7	6	5
Yavne	34.745	31.87	5	6	5	5	5	5
Jafa	34.754	32.059	6	5.5	3	6	5	4
Jerusalem	35.22	31.78	7	7	250	8.5	7	7
Armon-HaNatziv	35.252	31.744	8.5	7.5	12	8.5	9.5	10.5
Holly Mountain	35.241	31.78	7.5	7.5	15	7.5	7.5	7.5
Jericho	35.453	31.861	7	8	10	8	6	5
Jru. Jericho Road 1	35.4	31.798	8	8	8	8	7	6
Jre. Jericho Road 2	35.41	31.807	8	7.5	7	8	8	8
Amman Jordan Rd	35.643	31.816	8	8	4	8	7	6
Michmach	35.273	31.861	8	7.5	6	8	7	6
Shiloach	35.241	31.762	7	7.5	14	7.5	8	9
Kafaringi	35.698	32.293	8	8	2	8	8	8
Karach	35.692	31.184	6.5	6.5	1	6.5	5.5	4.5
Lod	34.892	31.951	8	7	6	8	7	6
Migdal	35.498	32.835	5	5	1	5	5	5
Migdal yava	34.945	32.078	6.5	5.5	4	6.5	7.5	8.5
Midba	35.79	31.725	7.5	7	3	7.5	6.5	5.5
Moza	35.157	31.789	6	7.5	16	6	7	8
Maa'n	35.717	30.188	5	5	1	5	4	3
Maa'yan Elisha	35.432	31.87	7	7.5	7	7	6	5
Mrar	35.402	32.88	7	7	1	7	7	7
Masada	35.357	31.311	8	8	1	8	6	4
Merhavia	35.306	32.592	6	6.5	4	6	6	6
Mar-sava	35.336	31.708	6.5	7.5	3	6.5	6.5	6.5
Meslovia	35.632	31.761	6	8	4	6	5	4
Nabi Musa	35.431	31.78	7.5	8	7	7.5	7.5	7.5
Nahalal	35.188	32.682	4.5	6	3	4.5	4.5	4.5
Naharia	35.092	33.007	4.5	6	2	4.5	3.5	2.5
Sorek River	34.872	31.798	7	6.5	5	7	7	7

Name	Lon	Lat	Md	Mn	N.Mn	Mx	C1.Md	C2.Md
Nes-Ziona	34.797	31.924	6.5	7	5	6.5	6.5	6.5
Nazeret	35.295	32.7	7	7	4	7.5	7	7
Salfit	35.178	32.078	7.5	7	2	7.5	5.5	3.5
Sweida	36.575	32.702	7	7	1	7	6	5
Abadia	35.551	32.682	7	7	6	7	6	5
Ajloon	35.741	32.329	8	8	2	8	8	8
Gaza	34.462	31.499	6.5	6.5	1	7	5.5	4.5
Azraa'	36.235	32.849	6	6	1	6	5	4
Atara	35.199	31.997	7	7	4	7	7	7
Ein-el-Kelt	35.368	31.834	8	7.5	9	8	7	6
Ein Dok	35.432	31.879	8	7.5	7	8	6	4
Ein Harod	35.391	32.556	6.5	6	5	6.5	6.5	6.5
Ein Karem	35.168	31.771	7.5	7	18	7.5	6.5	5.5
Ein Musa	35.727	31.761	7	7	3	7	5	3
Ein Kinia	35.146	31.925	7	7	5	7	7	7
Ein Fara'	35.348	32.285	7	7	1	7	7	7
Aco	35.071	32.925	7.5	6	2	8	5.5	3.5
Anab	34.926	31.392	6.5	6	2	6.5	6.5	6.5
Afula	35.284	32.601	7	6.5	4	7	7	7
Akaba	35.003	29.534	4	4	1	4	3	2
Ekron	34.829	31.852	6.5	6.5	7	6.5	6.5	6.5
Pki'in	35.327	32.971	4.5	4.5	1	4.5	5.5	6.5
Petah Tikva	34.903	32.096	5.5	5.5	5	6	5.5	5.5
Tzemach	35.583	32.709	7	7	7	7	7	7
Safed	35.488	32.961	6.5	6.5	1	6.5	6.5	6.5
Tzora	34.978	31.771	8	6.5	5	8	9	10
Kabab	34.745	31.888	7	7	7	7	6	5
Cairo	31.201	30.04	3.5	3.5	1	3.5	2.5	1.5
Kunetra	35.821	33.122	4	4	1	4	3	2
Kalkilia	34.955	32.186	6.5	5.5	3	6.5	5.5	4.5
Kiriat Anavim	35.115	31.807	7	7	11	7	8	9
Rammala	35.199	31.897	7.5	7.5	5	7.5	7.5	7.5
Rosh Ha'ayin	34.924	32.096	6	6	5	6	6	6
Amman	35.929	31.95	8.5	8.5	1	9	8.5	8.5
Rehovot	34.808	31.897	6.5	6.5	6	6.5	6.5	6.5
Reina	35.295	32.718	8	7.5	2	8	7	6
Ramle	34.871	31.924	8	7	7	8	7	6
Ramat Yishai	35.167	32.7	6	5	2	6	6	6
Ramat Rachel	35.21	31.735	6.5	7.5	14	6.5	7.5	8.5
Refidie	35.231	32.222	8	8	2	8	7	6
Shunam	35.327	32.601	7	6.5	5	7	6	5
Borochoy Nei.	34.807	32.068	5	5.5	4	5	5	5
Nablus	35.252	32.213	8	8	2	8.5	7	6
Tel aviv	34.765	32.068	6	5.5	3	6	6	6
Tel yosef	35.391	32.529	6.5	6	3	6.5	5.5	4.5
Dead sea north 1	35.526	31.762	9	8.5	4	9	8	7
Dead sea north 2	35.463	31.726	9	8.5	4	9	8	7
Dead sea nort 3	35.495	31.744	9	8.5	4	9	7	5
Jordan bank	35.537	31.825	9	8.5	6	9	8	7
Yarmuch fall	35.668	32.681	8.5	7	4	8.5	7.5	6.5

נספח 3 - נתונים של זוהר ומרקו (Zohar and Marco, 2012). Lon & Lat – נקודת הציון. Md – עוצמה סייסמית שכיחה
באתר. Mn – עוצמה סייסמית ממוצעת באתר. N.Mn – מספר הערכות עבור האתר. Mx – עוצמה סייסמית מקסימלית שניתה
לאחר. C1.Md – תיקון מסדר ראשון ו-C2.Md – תיקון מסדר שני.

9.5 נתוני המבחן הגיאופיזי (Aksinenko and Hofstetter, 2012)

Line_Name	x	y	Vs30	Total Depth	Lithology
Well_TB-27	219250	632836	2758	30	dolomite
Well_TB-17	209050	636050	2350	30	dolomite
J_B1	219582	632325	2127	30	dolomite
J_B4-5	203762	630789	2029	30	Limestone
PL_RP-50	251073	762177	1900	25	Limestone
Well_TB-16	208334	636236	1797	30	Limestone
J_KL2	219258	632366	1750	30	dolomite
RIB1	219484	634375	1730	30	dolomite
Sapir4	250769	752605	1564	30	Alluvium
RIB2	219477	634291	1550	30	dolomite
PDS_BH71	232322	569481	1520	7	Chalk-Chert
GL_Irsh	217150	632118	1471	30	Marl-Chalk
Well_TB-25	217814	633902	1409	30	Marl-Chalk
PDS_BH76	232724	569673	1300	12	dolomite
AT2	234959	726620	1116	30	bazalt
HG2	203961	724753	1105	30	Chalk
HG1	203929	724748	1083	30	Chalk
HL2	217871	629365	1080	30	Marl-Chalk
Well_HPS307	203933	724803	1039	30	Chalk
AT1	234783	726789	1027	30	bazalt
Well_HPS318	203937	724688	1014	30	Chalk
MRN_RP-52	227934	731387	1000	30	Calcareous SS
QS_L3	254948	792837	972	30	bazalt
RHPS_BH-7	182570	562632	972	28	Chalk
HG1	252557	768726	966	30	Conglomerate
SO3	214266	745874	954	30	Marl-Chalk
MRN_RP-51	227879	731393	951	30	Calcareous SS
PDS_NP3	232303	569899	940	30	Marl-Chalk
RHPS_BH-2	182572	562749	929	26	Marl-Chalk
Well_AT3	234714	726726	876	28	bazalt
NAZ1	246530	761682	854	30	Clay-Marl
NZ_RP-124	237007	583148	853	30	gravel-clay
Well_AT1	234720	726732	839	28	bazalt
ZAF1S	185007	624768	836	30	Calcareous SS
RP-057	188085	617324	830	21	Conglomerate
Well_ZPS_BH58	185040	624469	819	30	Calcareous SS
AF2_Hosp	230086	725127	812	30	bazalt
AT4	234868	726416	808	30	bazalt
AR-2	219413	572540	805	30	Calcareous SS
HG2	252476	768255	798	30	Conglomerate
AF1_Hosp	230100	725155	797	30	bazalt
NZ_RP-122	236868	583115	775	30	Conglomerate
DAM-2_R-10	241973	564850	770	9	Calcareous SS
TRD_R-8	218942	552241	770	30	Calcareous SS
AT3	234785	726627	761	30	bazalt
NZ_RP-123	236616	582912	750	30	Conglomerate
QS_L2	255931	793504	747	30	Travertine
QS_L8	253831	790547	745	30	Alluvium
RP-056	230406	718794	743	30	Alluvium
AT5	234822	726463	733	30	bazalt
SO2	214192	745575	731	30	Marl-Chalk
Well_ZPS_BH8	185171	624395	704	20	Calcareous SS
PDS_NP4	234303	569151	698	20	Alluvium
Q_SL2	210532	748970	688	30	Alluvium
DSC_ES_837-2	236383	591241	672	30	gravel-clay

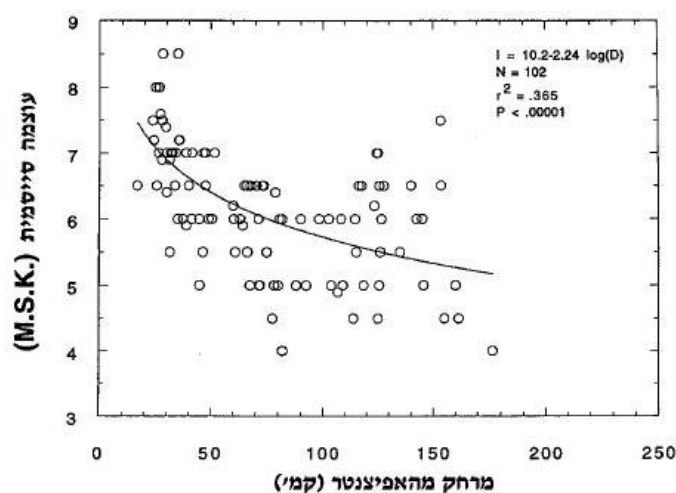
Line_Name	x	y	Vs30	Total Depth	Lithology
Well_ZPS_BH17	185106	624432	667	30	Calcareous SS
DM-4	203027	553983	651	30	Calcareous SS
ZPS1	185117	624426	645	30	Calcareous SS
BSH_BH1	247093	711533	640	21	gravel
Well_AT9	234853	726444	636	30	bazalt
SO1	213963	745533	635	30	Marl-Chalk
ZAF2	184855	624122	635	30	Alluvium
DM-2	203291	554565	626	30	Alluvium
NARG_RP-067	237717	596683	621	30	gravel-clay
QSH_R-15	253368	790303	611	30	Alluvium
Well_AT18	234914	726404	610	17	bazalt
Af2	229142	724596	605	30	Alluvium
LV_TR3	192928	655189	600	30	Alluvium
ALMG_R-14	243712	633001	595	30	Aragonite_mudstone
NAZ2	246852	761558	594	30	Clay-Marl
NARG_RP-066	237547	596419	594	30	gravel-clay
Af1	228724	724654	583	30	Alluvium
HZR-2	234949	563819	576	30	gravel-clay
EBR-1	234691	567949	570	28	Alluvium
PDS_NP1	234471	569123	556	30	Alluvium
RTB4	155984	614851	555	30	Calcareous SS
TB_R1	249966	745212	550	30	marl
PDS_NP5	234385	569332	550	30	Alluvium
MSLM_R-11	237983	608804	540	20	gravel-clay
HGSH_BH2	258579	791683	530	21	Travertine
Q_SL4B	209195	748359	528	30	Alluvium
BZ_EJ1	251403	732538	526	30	marl
GL_RHSH	185079	671644	524	30	Clay-Sand
TA_BH-648	180607	664986	524	30	Calcareous SS
BR2	182801	574253	523	30	Alluvium
BS1	246743	711612	520	30	Alluvium
RPS_D4	179360	667716	518	30	Alluvium
L-2	193306	666941	517	30	Alluvium
BS2	246422	712784	514	30	Travertine
BG1A	210112	732890	512	30	Alluvium
TY1	140255	566940	511	30	Alluvium
BY2	258948	768999	507	30	Alluvium
BG1B	210171	732876	507	30	Alluvium
HGSH_R-17	258584	791688	506	29	
LHV_R-7	187087	587874	499	30	Chalk
BR1	182908	574354	494	30	Alluvium
LV_BS4	192716	651599	492	30	Alluvium
MR_B108-3	216507	552110	491	18	Alluvium
TB_R2	250526	745054	490	30	marl
Q_SL6E	208916	750503	486	30	Sand
TA_BH-647	180602	664972	480	30	Calcareous SS
EBR-4	234469	567578	479	30	gravel-clay
DSEA1	234729	571500	471	30	Alluvium
MHMFL_R-9	234911	550779	468	30	Alluvium
HGSH_R-18	258607	791681	466	30	
DKH9_10	205345	747442	458	30	Sand
A_BZ1	168727	639261	454	30	Clay-Sand
Q_SL4A	208976	748460	453	30	Alluvium
A2	208303	757317	451	30	Alluvium
A_BZ2	168661	639297	451	30	Clay-Sand
BSH_R-16	247098	711528	450	15	Alluvium
HBS	181064	573986	449	23	Alluvium

Line_Name	x	y	Vs30	Total Depth	Lithology
RTB1	154754	615840	445	30	Calcareous SS
Q_SL3A	209811	750978	444	30	Alluvium
TA_BH-525	178951	663381	437	30	Calcareous SS
DM-5	201097	552204	432	30	gravel
EBR-2	234839	567556	431	30	Alluvium
Q_SL3B	209795	750747	429	30	Alluvium
HPHB_RL1	193808	714432	428	30	Clay-Sand
DM-1	202303	552882	420	30	gravel
TB-2	250279	745078	417	30	marl
BY3	259157	769156	404	30	Alluvium
QS_L1	255057	790400	391	30	Alluvium
QSH_BH2	252881	790144	388	13	Alluvium
DKH11_12	205340	747481	387	30	Sand
EPS_BF-22	167677	639188	384	30	Sand
HZR-1	235108	564456	381	30	gravel-clay
DKH1_2	205464	747916	380	30	Sand
KJ_L34	248739	723157	380	30	Alluvium
Q_SL8	209075	740475	374	30	Alluvium
Eshkl1	167734	639159	371	30	Clay-Sand
TB-1	251246	742758	368	30	Alluvium
A1	208164	757660	366	30	Alluvium
Q_SL6N	208874	750652	362	30	Sand
MN-5	237920	606679	362	30	Alluvium
NTA2	180552	671597	360	30	Clay-Sand
DKH3_4	205461	747953	357	30	Sand
CK_ZV2	203085	746860	356	30	Sand
Well_1A	195758	680473	354	30	Alluvium
NTA1	180374	670843	352	30	Clay-Sand
DKH5_6	204975	748210	350	30	Sand
DKH7_8	205003	748220	345	30	Sand
L-3	194854	668615	345	30	Alluvium
HPS1	189666	708964	343	30	Alluvium
LV_AT1	192430	659969	342	30	Alluvium
RK-1A	195761	680464	340	30	Alluvium
Eshkl2	167283	638432	339	30	Sand
HB-3	254468	711418	337	30	Alluvium
TA_BH-672	180833	665370	328	30	Sand
HB-4	254481	711587	326	30	Alluvium
RK-1	195836	680412	323	30	Alluvium
Q_SL7N	206413	750766	320	47	Sand
NZ1	207452	742443	320	30	Alluvium
TA_BH-673	180851	665396	320	30	Alluvium
RPS_D1	179619	669535	317	22	Sand
AS_B2	170117	637659	314	12	Sand
Q_SL1_E	210049	750241	308	30	Alluvium
RTB2	154995	615919	302	30	Sand
LV_AT2	192231	658273	300	30	Sand
HB-1	254323	711331	297	30	Alluvium
HPS2	189702	708949	289	30	Alluvium
HPS1	202241	746297	284	30	Sand
EPS_BF-12	167711	639121	276	30	Sand
Q_SL5B	210995	749606	274	30	Alluvium
HPS2	202353	746292	250	30	Sand
DS1	207064	743089	243	30	Alluvium
Af3	225574	722199	243	30	Alluvium
KJ_L19	248711	722992	240	30	Alluvium
JLM3	229438	713146	229	30	Alluvium

Line_Name	x	y	Vs30	Total Depth	Lithology
Well_BL50	189642	708884	220	30	Sand
QS_L6	256061	789742	213	30	Alluvium
BG4	203745	743860	211	30	Alluvium
H_BZ1	205940	744676	195	30	Alluvium
Q_SL5A	211174	749459	191	35	Alluvium
DS2	206849	742830	190	30	Alluvium
DS_R196_1	207098	743873	174	30	Alluvium
BG2	206820	739683	172	30	Alluvium
H_MB1	205273	743168	161	30	Alluvium
H_MB2	205615	743068	159	30	Alluvium
DS_R196_2	206763	743546	148	30	Alluvium
BG3	206002	741169	145	30	Alluvium
PK_PR-061	259134	772155	140	45	Alluvium
HF3	203087	743936	130	30	Alluvium
HF2	203031	744094	120	30	Alluvium
PQ1	259168	771985	119	38	Alluvium
HPHB_RL2	192815	717391	117	30	Alluvium

נספח 4 - חישוב Vs30 על פי עבודות המכון הגיאולוגי. Line Name – שם הקו הסייסמי או הקידוח. Y ו- X נקודת הציון של הקו. Vs30 – ממוצע מהירות גלי הגזירה עבור 30 מטרים ראשונים. Total Depth – עומק חדירה מקסימלי. Lithology – מסלע בפני השטח.

9.6 משוואת ניחות של אבני עבור ליתולוגיה אחידה (אבני, 1999).



נספח 5 - עקומת ניחות סטנדרטית בליתולוגיה הומוגנית. עקומה זו יפה לחיזוי העוצמה הצפויה ברעידת אדמה מסוג זה, בכל אתר בישראל, ובהתעלם מהתנאים הליתולוגיים שלו.


```

clc
close all
clear all
AllData='Velocities.xlsx';
VsDepth=xlsread(AllData,'Huji','B:B');
Vs=xlsread(AllData,'Huji','C:C');
d=xlsread(AllData,'Huji','F:F');
Iobs=xlsread(AllData,'Huji','G:G');

i=1;
SumD=[];
c=[];
c4=-4;
Norm=800;
NormVector=[];
z=1;
Final=[];
TT=[];
Cvector=[];

while c4<3;
    Ipre=-0.64+1.7*6.25-0.00448.*d-
1.67.*log10(d)+c4*log(Vs./Norm);
    DeltaI=(Iobs-Ipre).^2;
    SumD(i)=sum(DeltaI);
    c(i)=c4;
    i=i+1;
    c4=c4+0.01;

    if c4>3 && Norm>200
        Ref=ones(1,length(c));
        Ref=Ref*Norm;
        TT(:,z)=SumD;
        NormVector(1,z)=Norm;
        i=1;
        SumD=[];
        c=[];
        c4=-4;
        Norm=Norm-10;
        z=z+1;
    end
end
c=transpose(c);
[X,Y]=meshgrid(NormVector,c);
figure(1);
surf(X,Y,TT)

```

```

figure(2);
grid on
contour3(X,Y,TT,2000)

MinVal = min(min(TT));
XatMin = X(find(TT == MinVal));
YatMin = Y(find(TT == MinVal));

xlabel('Vs ref')
ylabel('C4')
zlabel('\Sigma(Obs Intensity - Pre Intensity)^2')

annotation('textbox',[0.15 0.62 0.10 0.10],...
    'String',{ 'C4:', [num2str(YatMin)] , ' ', [''] , 'Vs
ref:', [num2str(XatMin)] },...
    'FontSize',14,...
    'FontName','Arial',...
    'LineStyle','- ',...
    'EdgeColor',[0 0 0],...
    'LineWidth',1,...
    'BackgroundColor',[0.9 0.9 0.9],...
    'Color',[0.84 0.16 0]);

```

נספח 6 - קוד מטלאב לשיטת הריבועים הפחותים.

Abstract

On 11 July 1927 a crustal rupture generated a moderate 6.25 earthquake in the northern part of the Dead Sea, Israel. Up to five hundred people were killed and extensive destruction was recorded, even at places as far as 150 km from the focus. We consider local near-surface properties, in particular the shear wave velocity, as an amplification factor. Where the shear wave velocity is low, the seismic intensity at places far from the focus might be greater than expected from a standard attenuation curve. In this work I used the Multi Analysis of Surface Waves (MASW) method to estimate seismic wave velocity at anomalous sites in Israel.

In order to allow for site effect in the equation of Hough and Avni (2011), I incorporate an additional term (logarithmic with Vs30) with two coefficients.

These coefficients (a pre-logarithmic factor and a reference velocity) are constrained by a fit to Vs30 measured from 25 anomalous sites (twenty from the present work and five from GII reports). The amended equation is:

$$MMI = -0.64 + 1.7M - 0.00448d - 1.67 \cdot \log(d) - 1.82 \cdot \ln\left(\frac{Vs30}{600}\right)$$

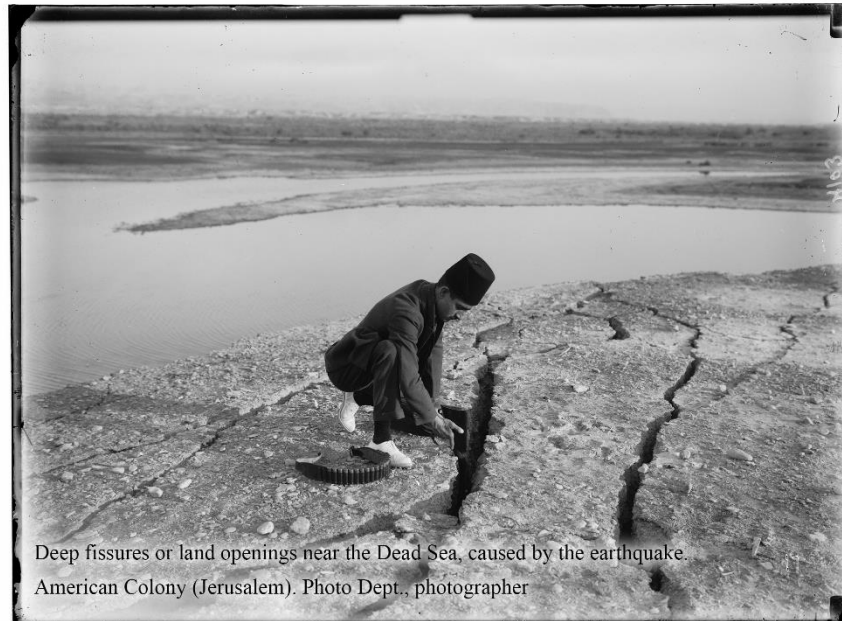
Of the measured sites 72% are fitting to the equation (with 60% prediction boundary).

To validate this new equation, we need to measure a more significant number of sites and see whether they fit the equation.

This research considers only site conditions, meaning that there is no reference to other issues such as: rupture directivity, building quality, topography, etc.

Despite this, the data collected is useful for further research and also should be taken into consideration for improving maps of seismic risk.

Calibrating a new attenuation curve for Israel using dispersion of surface waves measured in sites damaged by the 1927 earthquake



Thesis for the Degree of Master of Science
submitted by:

Yaniv Darvasi

Under the supervision of:

Prof. Amotz Agnon

October 2016

Department of Geology
Division of Earth Sciences
Faculty of Mathematics and Natural Sciences
The Hebrew University of Jerusalem