

אוניברסיטת בן-גוריון בנגב
הפקולטה למדעי הטבע
המחלקה למדעי הגיאולוגיה והסביבה

הערכת פוטנציאל ההתנזלות בחוף ים המלח המערבי-סקירה רגיונלית וניתוח
גיאוטכני של שני קידוחים

חיבור זה מהווה חלק מהדרישות לקבלת התואר "מוסמך למדעי טבע" (M.Sc.)

מאת : אלחנן לבנה
בהנחיית : פרופ' יוסף ח. חצור
ד"ר עמוס סלמון

אוניברסיטת בן-גוריון בנגב
הפקולטה למדעי הטבע
המחלקה למדעי הגיאולוגיה והסביבה

הערכת פוטנציאל ההתנזלות בחוף ים המלח המערבי-סקירה רגיונלית וניתוח
גיאוטכני של שני קידוחים

חיבור זה מהווה חלק מהדרישות לקבלת התואר "מוסמך למדעי טבע" (M.Sc.)

מאת : אלחנן לבנה
בהנחיית : פרופ' יוסי חצור
ד"ר עמוס סלמון

_____ : תאריך	_____ : חתימת הסטודנט
_____ : תאריך	_____ : חתימת המנחה
_____ : תאריך	_____
_____ : תאריך	_____ : חתימת יו"ר הועדה המחלקתית

אב תשע"ב

תקציר

באזור ים המלח התרחשו רעידות אדמה רבות בעבר ההיסטורי ובעבר הרחוק. ברעידות אלה נוצרו כשלים בקרקע במנגנונים שונים, כאשר אחד מהם הוא התנזלות. הניסיון בעולם מלמד שכשל קרקע מסוג זה מהווה סיכון משמעותי למבנים ותשתיות ועל כן הצורך לבחון גורם סיכון זה לאורך חופי ים המלח ובפרט באזורים המבונים והמיועדים לפיתוח.

בחינת הפוטנציאל להתנזלות בעקבות רעידת אדמה חזקה באזור החוף המערבי של ים המלח המוצגת בעבודה הנוכחית נעשתה במסגרת פרויקט הערכת יציבות התשתית באגן ים המלח. ההנחה המקובלת היא שבמידה שמתקיימים תנאים גיאולוגיים, הידרולוגיים וסיסמיים מתאימים, כי אז קיים גם פוטנציאל להתנזלות. במקרה שכזה יש לערוך בדיקות גיאוטכניות מתקדמות כדי להעריך את הסיכון באופן כמותי. העבודה הנוכחית התמקדה בבחינת הגיאולוגיה, הידרולוגיה והתנאים הסיסמיים לאורך חופי ים המלח המערביים כדי לאתר את האזורים הרגישים להתנזלות, על בסיס מידע ונתונים קיימים. זהו למעשה תהליך סינון ראשוני (screening) והוא איכותי במהותו.

במסגרת ההערכה הגיאולוגית נמצא כי המסלע המרכיב את תצורות הלשון (ליסאן) וצאלים מגיל פליסטוקן מאוחר והולוקן, בהתאמה, עלול להיות רגיש להתנזלות. מופע (פציאס) מניפות הסחף במוצאי הנחלים המתנקזים ממדבר יהודה לים המורכב ברובו ממשקעים קלסטיים בלתי מלוכדים מגוונים בגודלם הוערך כרגיש יותר להתנזלות מהמופע האגמי בשולי האגן המורכב מסדימנטים דקים ומשקעים כימיים. בהתאם לכך מופו מוצאי הנחלים ומניפות הסחף לאורך שולי החוף המערבי של ים המלח על גבי תצ"א בתוכנת מ"מ"ג (GIS).

לצורך הערכת התנאים ההידרולוגיים נעשה חישוב בתוכנת מ"מ"ג של מפלס מי התהום המשוער לפי גרדיינט קבוע כפי שנמצא במחקרים אחרים באזור, ועל בסיס מפלס ים המלח כפי שנמדד בתאריך 17.01.2005. לאחר מכן חושב במ"מ"ג העומק מפני השטח למפלס מי התהום. מפלס הסף של מי התהום המוצע בספרות לקיום התנזלות הוא 20 מ' מתחת לפני השטח. בהתאם לכך סומן בעזרת התוכנה האזור המתאים להתנזלות מבחינה הידרולוגית בו מפלס מי התהום רדוד מ-20 מ'. בעוד באגן ים המלח הצפוני מפלס הים יורד בקצב מהיר, המפלס באגן הדרומי עולה בקצב איטי. באזור זה חושב מפלס סף עמוק יותר. חופי ים המלח נמשכים בצמוד ובסמוך לטרנספורם ים המלח והעתקי השוליים של אגן ים המלח אשר נחשבים כגורמים פעילים לרעידות אדמה חזקות. בשל כך הרי שכל האזורים בתחומי אגן ים המלח חשופים לתאוצות קרקע גבוהות העלולות לגרום להתנזלות.

השלכת המפה המתארת את אזורי התפוצה של מניפות הסחף הפעילות וגם הקדומות של נחלים שהתנקזו לים המלח על גבי מפת אזור החוף המערבי בו העומק למפלס מי התהום רדוד מ-20 מ', מאפשרת לזהות את אזורי הרגישות להתנזלות. במפה מופיעים ארבעה אזורים בדרגות רגישות שונות:

אזור 1: משקעי מניפות סחף ומפלס מי התהום רדוד מ-20 מ'. באופן יחסי, זהו האזור בו הרגישות להתנזלות היא הגבוהה ביותר לאורך חופי ים המלח.

אזור 2: משקעים אגמיים בשולי האגן ומפלס מי התהום רדוד מ-20 מ'. באזור זה הרגישות להתנזלות נמוכה באופן יחסי.

אזור 3: משקעי מניפות סחף ומפלס מי התהום עמוק מ-20 מ'. הרגישות להתנזלות באזור זה זניחה.

אזור 4: משקעים אגמיים בשולי האגן ומפלס מי התהום עמוק מ-20 מ'. בשל סוג הקרקע ועומק מי התהום האזור אינו רגיש להתנזלות.

האזור בו מתקיימים התנאים ההכרחיים וקיים פוטנציאל להתנזלות הוא **אזור 1** בו המסלע הרדוד אינו מלוכד ברובו ומפלס מי התהום רדוד דיו. גם **באזור 2** מי התהום רדודים אך המסלע דק מאוד ועל כן הפוטנציאל להתנזלות נמוך יותר. בהתאם לכך, בתכנון הנדסי באזורים אלה נדרשת חקירה גיאוטכנית מתקדמת.

לצורך בחינה כמותית של הסיכון להתנזלות נעשו באזור רגישות 1 ובאזור המעבר מרגישות 1 ל-2 שני קידוחים גיאוטכניים. האחד במניפת הסחף (אזור 1) ליד מלוונות עין בוקק, EB3E, שם נמצא חתך המורכב בעיקר מקלסטים גסים, חלוקים וחול. השני בשולי מניפת הסחף (אזור מעבר א' - ב') של נחל דרגה ליד חוף מינרל, MN5E, כאשר החתך בקידוח זה מורכב ברובו מקלסטים דקים, טין וחרסית, עם שכבות מעורבות גם בחלוקים. בשני הקידוחים תועד החתך בפרוטרוט, נעשו בדיקות SPT ונמדדו מהירות גלי גזירה (S) ולחיצה (P) סיסמיים. בדוגמאות הקרקע מהקידוחים נעשו בדיקות מעבדה לקביעת גבולות הסומך, צפיפות, תכולת רטיבות והגדרה לפי שיטת המיון האחידה, USCS. על בסיס המידע והנתונים שנאספו בוצע ניתוח תגובת אתר בשני הקידוחים בעזרת תוכנה SHAKE2000 לפי רשומות תאוצה מרעידות אדמה שונות.

ניתוח תגובת האתר העלה הגברות משמעותיות בעיקר בחתך עין בוקק, EB3E, בעיקר בזמני מחזור קצרים. כך גם ניכרה הגברה בתאוצת השיא, a_{max} , בחתך.

הערכת מקדם ביטחון כנגד התנזלות נעשתה בשני הקידוחים לפי השיטה המפושטת, Simplified Procedure, במספר גישות שונות הקיימות בספרות העדכנית, בהתאם לממצאים שהתקבלו מניתוח תגובת האתר. נמצא כי לפי בדיקות SPT מקדם הביטחון קטן לעיתים מ-1, בעוד שלפי מדידות מהירות גלי גזירה, V_s , מקדם הביטחון גבוה מ-3. השיטה המפושטת תואמת בעיקר קרקעות חוליות וחלוקים, כמו בחתך עין בוקק, EB3E. חתך חוף מינרל, MN5E, החרסיתי-טיני נמצא בטוח ברוב התרחישים בשיטה המפושטת, אך רגיש להחלשות עד כשל הקרקע כתוצאה ממחזורי גזירה בעת רעידת אדמה עקב תכולת הרטיבות הגבוהה בקרקע, גם מעל מפלס מי התהום. כשל זה גם כשאינו מוגדר כהתנזלות עלול לגרום לנזקים לתשתיות.

מניתוח הקידוחים עולה כי האתר המייצג את אזור 1 במפת הרגישות, EB3E, נמצא בטוח מהתנזלות לפי מהירות גלי הגזירה אך קיימת סכנת התנזלות לפי בדיקת SPT (הפחות אמינה בחתך חלוקים). עקב כך באזור 1 במפת הסיכון יש לבחון את סכנת ההתנזלות באופן נקודתי לפני תכנון הנדסי. האתר המייצג את אזור 2 במפת הרגישות, MN5E, נמצא רגיש בעיקר לכשל בגזירה במנגנון שונה מהתנזלות. אזור 2 במפת הסיכון צריך להיבדק גם הוא לפני תכנון הנדסי לשלילת כשל קרקע ברעידת אדמה. במקומות מסוימים באזור 4, כאשר תכולת הרטיבות גבוהה, יש לבחון גם כן את פוטנציאל הכשל בגזירה ברעידת אדמה.

תודות

ברצוני להודות לשני המנחים בעבודה זו על הנחייה בלתי מתפשרת ודרישה לטוב יותר, על עצות ותמיכה לפרופ' יוסי חצור שהדריך אותי בנבכי הגיאולוגיה ההנדסית, ותמיד היה נכון להסביר וללמד, ולד"ר עמוס סלמון על הדרכה מקצועית, דרבון מתמיד ועידוד בעת הצורך

תודה מיוחדת לד"ר מיכאל אזרסקי על תמיכתו בפרויקט הקידוחים שלא היו מתקיימים בלעדיו

תודות לד"ר מיכאל צרסקי על הוראה, שיחות ועצות רבות

תודות לאנשי המכון הגיאולוגי, לד"ר מוטי שטיין וד"ר צפיר לוי על סיורים והדרכות בים המלח

לד"ר יוסי יחיאלי, ד"ר רני קלבו, ד"ר עינת מגל ולד"ר מרסלו רוזנזפט על עזרה בתוכנות, נתונים ועצות טובות.

להלל לוצקי ואיאד סואעד על עזרה בסיורים, קידוחים ועל ארוחות משותפות

תודות ל"קבוצה ההנדסית" לדורותיה איליה, דגן, גוני ועומר, יובל, יעל, גיא וקסניה על עזרה בלימודים, במחקר, בקידוחים ועל חברה טובה

תודה לרבקה עיני ולצהלה שרעבי על ניהול הבירוקרטיה הנלווית ועל טיפול מהיר בבעיות

תודה רבה למשפחתי המורחבת ולחברים שתמכו ועזרו במהלך התואר

תודה מיוחדת לאשתי האהובה הילה ולילדי החמודים רען וסמדר שסבלו מחסרוני, עזרו, תמכו ונתנו לי סיבה טובה להמשיך לכל אורך הדרך

תוכן

1	מבוא	1
1	רעידות אדמה והתנזלות בים המלח	1.1
2	מטרות המחקר	1.2
3	רקע מדעי	2
3	הסבר מכאני לתופעת ההתנזלות	2.1
3	התנזלות כתוצאה ממעבר גלי גזירה בקרקע	2.1.1
4	נוקים כתוצאה מהתנזלות	2.1.2
5	התנזלות כתוצאה ממעבר גלי לחץ בקרקע	2.1.3
5	שיטות להערכת פוטנציאל ההתנזלות	2.2
5	הערכה רגיונלית	2.2.1
8	הערכה מקומית	2.2.2
8	השיטה המפושטת (Simplified Procedure)	2.2.3
26	קרקעות טין וחרסית	2.2.4
28	ניתוח הסתברותי	2.2.5
30	רקע גיאולוגי	3
31	סטרטיגרפיה מפורטת של התצורות הצעירות	3.1
31	תצורת הלשון	3.1.1
32	תצורת צאליים	3.1.2
34	שיטות מחקר	4
34	הערכה רגיונלית	4.1
34	הערכה גיאולוגית	4.1.1
34	הערכה סיסמית	4.1.2
34	הערכה הדרולוגית	4.1.3
35	הערכה מקומית גיאוטכנית	4.2
35	בדיקות שדה	4.2.1
38	בדיקות מעבדה	4.2.2
41	ניתוח תגובת אתר	4.2.3
42	תוצאות – הערכה רגיונלית	5

42	הערכה גיאולוגית	5.1
43	הערכה הידרולוגית	5.2
43	רקע	5.2.1
45	מפת מפלס ממוחשבת	5.2.2
50	הערכה סיסמית	5.3
52	מפת סיכון מסכמת	5.4
53	דיון במפת הרגישויות והנחיות לשימוש במפה	5.4.1
55	סיכונים סיסמיים נוספים	5.4.2
56	תוצאות - הערכה גיאוטכנית בקידוחים	6
56	קידוח עין בוקק EB3E	6.1
61	קידוח חוף מינרל MN5E	6.2
66	ניתוח תגובת אתר	6.3
66	מודל חתך תת הקרקע	6.3.1
72	נתוני רעידת אדמה	6.3.2
76	דיון בניתוח תגובת אתר	6.3.3
77	דיון	7
77	חישוב מקדם ביטחון כנגד התנזלות בקידוחים	7.1
77	פרמטרים גיאוטכניים בקידוחים	7.1.1
78	יחס התנגדות מחזורי CRR	7.1.2
80	יחס מאמצים מחזורי CSR	7.1.3
81	מקדם ביטחון כנגד התנזלות	7.1.4
85	כשל קרקע בחתך חרסיתי-טיני	7.1.5
86	חישוב הסתברותי לפוטנציאל התנזלות	7.2
87	הערכה רגיונלית של רגישות להתנזלות	7.3
87	הערכה רגיונלית על בסיס הקידוחים	7.3.1
88	מפות הרגישות המסכמת	7.3.2
89	סיכום	8
93	רקע תיאורטי לתוכנה לניתוח תגובת אתר SHAKE2000	נספח
100	רשימת מקורות	

רשימת איורים

1. איור 1.1 : עקבות בעבוע חול מתוך סדק לאחר רעידת האדמה בים המלח ב-1927.....
2. איור 1.2 : עקבות בעבוע חול בשלולית לאחר הרעידה בים המלח ב-2004.....
3. איור 2.1 : תוצאות ניסוי גזירה ישירה בחול צפוף ובחול תחוח.....
4. איור 2.2 : נזקים אפשריים בעת התנזלות.....
7. איור 2.3 : המרחק מהמוקד כנגד המגניטודה במקרי התנזלות.....
8. איור 2.4 : הערכת פוטנציאל ההתנזלות לפי מחזורים קבועים של גזירה בקרקע.....
10. איור 2.5 : השתנות תאורטית של מאמץ הגזירה לאורך חתך קרקע לפי מקדם הפחתה r_d
12. איור 2.6 : השתנות מקדם הפחתה עם העומק בהתאם למגניטודת רעידת האדמה.....
14. איור 2.7 : הערכת יחס התנגדות מחזורי, CRR, לפי בדיקות SPT (Seed et al., 1985).....
15. איור 2.8 : הערכת יחס התנגדות מחזורי, CRR, לפי בדיקות SPT (Seed et al., 2003).....
- איור 2.9 : הערכת יחס התנגדות מחזורי, CRR, לפי בדיקות SPT (Idriss & Boulangerl.,).....
16. (2006).....
- איור 2.10 : מקדם C_R לנרמול מספר הקשות בבדיקת SPT (Seed et al., 2003).....
- איור 2.11 : חישוב יחס התנגדות מחזורי, CRR, לפי ערכי בדיקת CPT מנורמלים.....
- איור 2.12 : חישוב יחס התנגדות מחזורי, CRR, לפי מהירות גלי הגזירה המנורמלת.....
- איור 2.13 : קשר אמפירי בין תוצאות בדיקת BPT לערכים אקוויולנטים של בדיקת SPT.....
- איור 2.14 : מקדם התאמה MSF למגניטודת רעידת האדמה (Youd et al., 2001).....
- איור 2.15 : מקדם התאמה למגניטודת רעידת אדמה (Seed et al., 2003).....
- איור 2.16 : מקדם התאמה MSF למגניטודת רעידת האדמה (Idriss & Boulanger 2006).....
- איור 2.17 : מקדם התאמה עבור עומק קבורה גדול (Seed et al., 2003).....
- איור 2.18 : מאמצי גזירה סטטיים במדרון לעומת מישור.....
- איור 2.19 : 3 אזורי רגישות לכשל התנזלות בעת רעידת אדמה כתלות בתכולת הרטיבות, w_c , בדיאגרמת פלסטיות.....
31. איור 3.1 : חתך סכמטי של שפך נחל יעלים בקצה הצפוני של בריכות האידוי.....
32. איור 3.2 : מחשוף של הפציאס האגמי בתצורת הלשון, מישור מצדה.....
32. איור 3.3 : מחשוף של פציאס השוליים בתצורת הלשון, מישור מצדה.....
33. איור 3.4 : מחשוף של הפציאס האגמי בתצורת צאלים, נחל חבר.....
33. איור 3.5 : מחשוף של פציאס השוליים בתצורת צאלים, נחל דוד.....
- איור 4.1 : שינוי מפלס ים המלח והשפעתו על מפלס מי התהום בחוף.....
36. איור 4.2 : ציוד בדיקת SPT.....
37. איור 4.3 : חתך סכמטי של מדידת מהירות גלים סיסמיים בשיטת DownHole.....
39. איור 4.4 : שטיפת דוגמאות במשפך עם נייר סינון.....
40. איור 4.5 : בדיקת גבול פלסטיות.....
41. איור 4.6 : בדיקת גבול נזילות.....

איור 5.1 :	מחשוף מעורב בתצורת הלשון, נחל קדם	42
איור 5.2 :	מפה של מניפות הסחף ונחלים רצנטיים על גבי אורתופוטו בתוכנת GIS	44
איור 5.3 :	מפת העומק למפלס מי התהום באזור קיבוץ מצפה שלם וחוף מינרל	47
איור 5.4 :	מפת העומק למפלס מי התהום באזור עין גדי	48
איור 5.5 :	מפת העומק למפלס מי התהום בנחל קדם, חמי מזור, עין בוקק ונווה זוהר	49
איור 5.6 :	(a) מפת מקדמים סיסמיים לתקן ישראלי 413 לעמידות מבנים ברעידת אדמה	51
איור 5.7 :	מרחק סף אמפירי מאפיצנטר הנדרש ליצירת התנזלות	51
איור 5.8 :	מפת רגישויות מסכמת	54
איור 6.1 :	מפת מיקום של שני קידוחים גיאוטכניים, EB3E ו-MN5E	56
איור 6.2 :	מפת מיקום של קידוח EB3E ליד מלוונות עין בוקק	57
איור 6.3 :	לוג קידוח עין בוקק, EB3E	58
איור 6.4 :	תוצאות מדידת מהירות גלים סיסמיים, Vs ו-Vp, בקידוח עין בוקק	59
איור 6.5 :	חתך רפרקציה סיסמית ליד קידוח עין בוקק	60
איור 6.6 :	מפת מיקום של קידוח חוף מינרל, MN5E	62
איור 6.7 :	תוצאות מדידת מהירות גלים סיסמיים, Vs ו-Vp, בקידוח חוף מינרל	62
איור 6.8 :	לוג קידוח חוף מינרל, MN5E	63
איור 6.9 :	חתך רפרקציה סיסמית ליד קידוח חוף מינרל	65
איור 6.10 :	דעיכה של מודול הגזירה, ועליה במנת הריסון בסלע לעומת עיבור הגזירה	66
איור 6.11 :	דעיכה של מודול הגזירה, ועליה במנת הריסון בחלוקים לעומת עיבור הגזירה	67
איור 6.12 :	דעיכה של מודול הגזירה, ועליה במנת הריסון בחרסיות לעומת עיבור הגזירה	68
	(PI=0)	
איור 6.13 :	דעיכה של מודול הגזירה, ועליה במנת הריסון בחרסיות לעומת עיבור הגזירה	69
	(PI=15)	
איור 6.14 :	מודל חתך תת הקרקע של קידוח עין בוקק, EB3E, כפי שהוזן בתוכנה SHAKE2000	70
איור 6.15 :	מודל חתך תת הקרקע של קידוח חוף מינרל, MN5E, כפי שהוזן בתוכנה SHAKE2000	71
איור 6.16 :	רשומת תאוצה של רעידת האדמה בנואייבה, 1995	73
איור 6.17 :	רשומת תאוצה של רעידת האדמה בנואייבה, 1995, לפי חישוב דה-קונבולוציה של רשומת התאוצה בעיר אילת לסלע האם	73
איור 6.18 :	רשומת תאוצה מרעידת האדמה ב-Chalfant, קליפורניה ב-1986	74
איור 6.19 :	רשומת תאוצה של רעידת האדמה ב-Duzce, טורקיה ב-1999	74
איור 6.20 :	רשומת תאוצה של רעידת האדמה ב-Imperial Valley, קליפורניה ב-1979	75
איור 6.21 :	רשומת תאוצה של רעידת האדמה ב-Supetition Hills, קליפורניה ב-1987	75
איור 7.1 :	תוצאות בדיקות SPT בשני קידוחי המחקר	77
איור 7.2 :	פרופיל מהירות גלי גזירה בשני קידוחי המחקר	78

איור 7.3 : פרופיל יחס מאמצים מחזורי, CRR, בשני קידוחי המחקר לפי בדיקות SPT ולפי מהירות גלי גזירה.....	79
איור 7.4 : פרופיל יחס מאמצים מחזורי, CSR, בשני קידוחי המחקר לפי 3 רשומות תאוצה.....	80
איור 7.5 : מקדם ביטחון כנגד התנזלות בקידוח עין בוקק לפי רשומת תאוצה מהרעידה בנואיבה.....	81
איור 7.6 : מקדם ביטחון כנגד התנזלות בקידוח חוף מינרל לפי רשומת תאוצה מהרעידה בנואיבה.....	82
איור 7.7 : מקדם ביטחון כנגד התנזלות בקידוח עין בוקק לפי רשומת תאוצה בתחנת Bishop מהרעידה ב-Chalfant.....	82
איור 7.8 : מקדם ביטחון כנגד התנזלות בקידוח חוף מינרל לפי רשומת תאוצה בתחנת Bishop מהרעידה ב-Chalfant.....	83
איור 7.9 : מקדם ביטחון כנגד התנזלות בקידוח עין בוקק לפי רשומת תאוצה בתחנה Lemont 1062 מהרעידה ב-Duzce.....	83
איור 7.10 : מקדם ביטחון כנגד התנזלות בקידוח חוף מינרל לפי רשומת תאוצה בתחנה Lemont 1062 מהרעידה ב-Duzce.....	84
איור 7.11 : מיקום דוגמאת מקידוח חוף מינרל, MN5E, ומקידוח עין בוקק, EB3E בדיאגרמת פלסטיות של Seed et al., 2003.....	85
איור 7.12 : חישוב הסתברות להתנזלות בחתך עין בוקק, EB3E, ובחתך חוף מינרל, MN5E.....	87

נספח

תרשים 1 : חתך מייצג של שכבות קרקע, הכולל צפיפות, מודול גזירה ומנת ריסון.....	93
תרשים 1 : מחזור אופייני של עיבור גזירה בניסוי גזירה מרחבית.....	94
תרשים 3 : עקום שינוי במודול הגזירה ומנת הריסון ביחס לעיבור הגזירה.....	95

רשימת טבלאות

- טבלה 2.1 : רגישות קרקעות להתנזלות לפי סוג המשקע וגיל הקרקע. (מעובד בעקבות Youd, 2003).....6
- טבלה 2.2 : רגישות קרקע להתנזלות לפי עומק מפלס מי התהום. (בעקבות Youd, 2003).....7
- טבלה 2.3 : מקדמי תיקון שונים עבור בדיקת SPT לפי ציוד הבדיקה (בעקבות Youd et al., 2001).....17
- טבלה 2.4 : מספר מחזורי גזירה אקוויולנטים לרעש במגניטודות שונות עם מקדם התאמה עבור המגניטודות השונות (בעקבות Seed & Idriss, 1982).....21
- טבלה 5.1 - אזורי הרגישות להתנזלות בהתאם להצלבה של תפוצת המשקעים לאורך חופי ים המלח עם העומק למפלס מי התהום.....52
- טבלה 6.1 : פרמטרים גיאוטכניים של קידוח עין בוקק, EB3E. תוצאות SPT והחזר (Recovery ו-RQD) מהקידוח.....59
- טבלה 6.2 : פרמטרים גיאוטכניים של קידוח חוף מינרל, MN5E. תוצאות SPT והחזר (Recovery ו-RQD) עם בדיקות בלתי מופרות, Shelby, ומכנף גזירה מהקידוח.....64
- טבלה 6.3 : פרטי רעידות אדמה ותחנות שונות בהן נקלטו.....72
- טבלה 7.1 : רגישות לכשל של דוגמאות קרקע מקידוח חוף מינרל, MN5E, ומקידוח עין בוקק, EB3E.....86

1 מבוא

אזור ים המלח יודע בשנים האחרונות פגיעת תשתיות קשה הקשורה בירידת מפלס הים, בעיקר ביצירת בולענים לאורך החוף ופגיעה בכבישים וגשרים כתוצאה מהתחתרות מהירה לאחר של נחלים. הדבר גרם לשיבוש כל פעולות הפיתוח הנוכחיות באזור, כמו גם לעצירת תכניות הפיתוח העתידיות של היישובים, התעשייה ומפעלי התיירות.

המכון הגיאולוגי התבקש להכין תוכנית מחקר ארוך-טווח, מקיף ומפורט לגבי שלל התופעות של אי-יציבות התשתית שמקורן בירידת מפלס ים המלח כפי שעולה ממחקרי המכון בשנים האחרונות. נוסף על כך, כולל המחקר את מגוון הסיכונים הישירים והעקיפים הנובעים מרעידות האדמה בים המלח, וביניהן סכנת תופעת התנזלות קרקע ברעידות אדמה.

1.1 רעידות אדמה והתנזלות בים המלח

לאורך ים המלח ישנם מספר העתקים פעילים המהווים חלק מטרנספורם ים המלח (Garfunkel et al., 1981, Shapira et al., 1992). באזור אף התרחשו בעבר ההיסטורי מספר רעידות אדמה חזקות כאשר האחרונה שבהן התרחשה ב-1927, נקלטה בתחנות מדידה והוערכה במגניטודה של $M_s=6.2$ (Ben-Menahem et al., 1976).

Marco & Agnon (2005) תיארו מעוותים בשכבות בתצורת הליסאן ובתצורת צאליס באיזור ים המלח המתעדים רצף של רעידות אדמה בעשרות אלפי השנים האחרונות עד לרעידות בהיסטוריה הקרובה. Agnon et al. (2006) תיארו את מנגנון היווצרות המעוות הקשור בהתנזלות או הרחפה של סדימנט רך בקרקעית האגם. Levi, et. al. (2006) בחנו דייקים קלסטיים בתצורת הליסאן במישור עמיעז והציעו שתהליך הווצרותם קשור בהתנזלות ובחדירה בלחץ של סדימנט חרסיתי-טיני. באיור 1.1 ניתן לראות עקבות בעבוע חול לאורך סדק ובחורים בודדים לאחר רעידת האדמה במגניטודה של $M_s=6.2$ באיזור יריחו ב-1927. עקבות אלה מהווים סימן מובהק לתופעת התנזלות בתת הקרקע.



איור 1.1: עקבות בעבוע חול מתוך סדק לאחר רעידת האדמה בים המלח ב-1927. צולם באיזור יריחו על ידי צלמי המושבה האמריקאית בירושלים

בעבודת השדה שלאחר רעידת האדמה בצפון ים המלח שהתרחשה ב- 11 לפברואר, 2004, במגניטודה של $M_L=5.2$, נמצאו עדויות להתנזלות בקנה מידה קטן סמוך לחוף ים המלח באזור קליה ועין פשחה (Salamon et al., 2004). באיור 1.2 ניתן לראות עקבות של בעבוע חול בקנה מדה קטן.



איור 1.2: עקבות בעבוע חול בתוך שלולית, סימן להתנזלות. סימני רטיבות מסביב לחלוק נחל מעידים על עליית מים בלחץ גבוה מלמטה, תופעה הגורמת להתנזלות. צולם לאחר הרעידה בים המלח ב-2004.

1.2 מטרות המחקר

במחקר זה נבחן הפוטנציאל להתנזלות לאורך החוף המערבי של ים המלח, אחד מהגורמים האפשריים לכשל קרקע בעת רעידות אדמה. פוטנציאל ההתנזלות נבחן בקנה מידה רגיונלי תוך יצירת מפות סיכון עם אזורי רגישות שונים. בנוסף לכך נערכו שני קידוחים בשני אתרים שונים באזורים הרגישים במפת הסיכון. בקידוחים נערכו בדיקות גיאוטכניות מתקדמות המשמשות לחישוב פוטנציאל ההתנזלות לצורך בדיקת המפה וכיול רמות הרגישות באופן כמותי יותר.

2 רקע מדעי

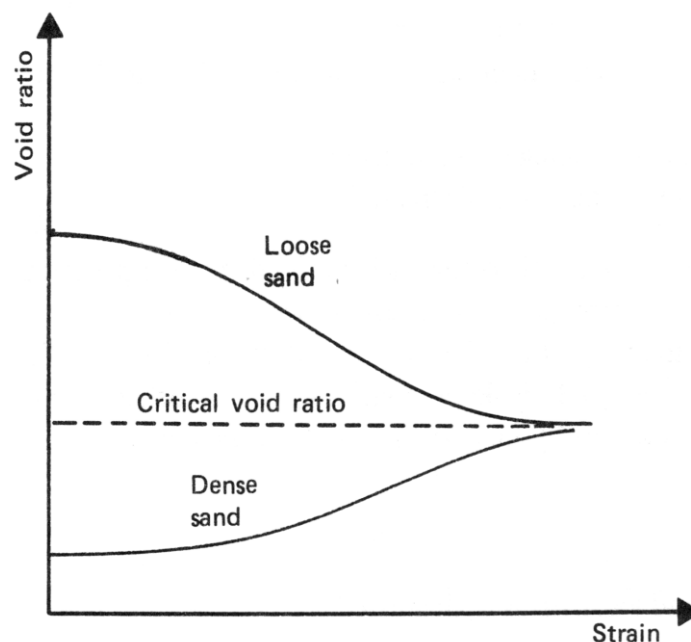
בין הגורמים לכשל קרקע ונזקים למבנים ותשתיות כתוצאה מרעידת אדמה תופסת ההתנזלות מקום נכבד. תופעה זו הייתה מוכרת עוד בתחילת המאה העשרים, אך תשומת לב מיוחדת הופנתה אליה לאחר שתי רעידות האדמה הרסניות בשנת 1964. האחת, רעידת האדמה של אלסקה במגניטודה של $M_w 9.2$, אשר גרמה לנזקים נרחבים בעיר Anchorage. השנייה בעיר Niigata ביפן. שתי הרעידות גרמו להתנזלות בקנה מידה נרחב ובעקבותיה שקיעה וקריסת תשתיות. באלסקה נגרמו בעקבות ההתנזלות גם גלישות קרקע רחבות מימדים (Seed & Idriss, 1982).

2.1 הסבר מכאני לתופעת ההתנזלות

2.1.1 התנזלות כתוצאה ממעבר גלי גזירה בקרקע

התנזלות מתרחשת כאשר שכבת קרקע מוצקה עוברת להתנהג כנוזל אשר אינו יכול לשאת מאמצי גזירה. התופעה מתרחשת בעיקר בחול תחוח רווי במים. בעקבות רעידות אדמה גלי גזירה מתפשטים במעלה עמודת הקרקע ומתפתחים מאמצי גזירה מחזוריים. עם הגזירה המחזורית מתערער מבנה שלד הקרקע וגרגרים יכולים לנוע אחד ביחס לשני, תוך שינויים בנפח הכולל. השינויים בנפח, תפיחה או דחיסה, תלויים בצפיפות הקרקע ובמצב המאמצים הראשוני.

בבדיקות מעבדה בגזירה ישירה של קרקע חולית ניתן לראות שינויים בנפח הדוגמה במהלך הניסוי. באיור 2.1 מופיעה דוגמה לתוצאות בדיקת גזירה ישירה בחול צפוף ובחול תחוח. השינוי במנת החללים, מדד לנפח הדוגמה, מוצג כנגד העיבור הגדל עם התקדמות הניסוי.



איור 2.1: תוצאות ניסוי גזירה ישירה בחול צפוף ובחול תחוח (בעקבות Das, 1983)

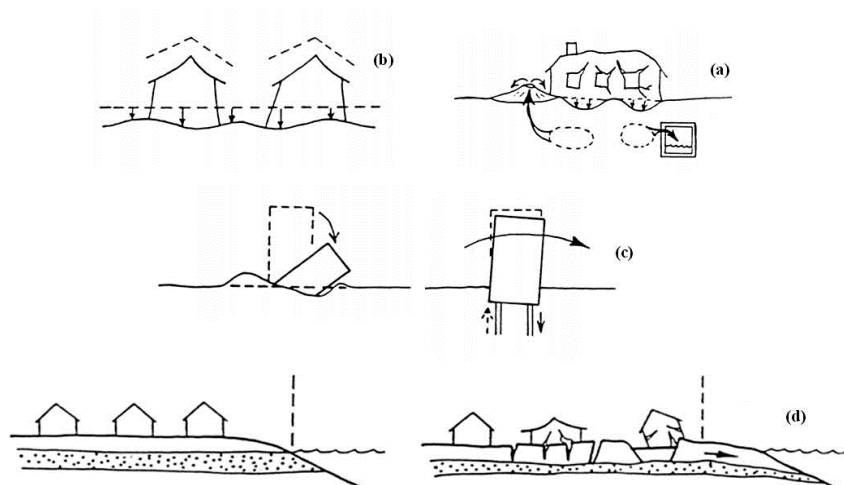
במהלך הבדיקה חול תחוח נוטה להידחס ולהקטין את נפחו בעוד חול צפוף נוטה לתפוח ולהגדיל את נפחו. Casagrande הראה כי עבור כל מאמץ כליאה מסוים, ישנו מצב ביניים המוגדר על ידי מנת חללים קריטית בו גזירה לא תשנה את נפח הקרקע. כאשר קרקע חולית בצפיפות נמוכה ממנת החללים הקריטית עוברת גזירה מחזורית חזקה, הקרקע תיטה להקטין את נפחה. כאשר הקרקע רוויה, ולא מתאפשר ניקוז של המים הדחיסה הצפויה לא יכולה להמשך. בתגובה, השלד חוזר לנפחו המקורי ומאמץ שקודם לכן נישא על ידי שלד הקרקע עובר למי הנקבים. לחץ מי הנקבים עולה ואיתו קטן המאמץ האפקטיבי בהתאם למשוואה של Terzaghi (1943):

$$\sigma' = \sigma_{total} - u$$

כאשר σ' - מאמץ אפקטיבי, σ_{total} - לחץ כליאה טוטאלי ו- u - לחץ מי הנקבים. עם כל מחזור גזירה נוסף הקרקע נוטה להידחס עוד, ובתגובה עולה עוד לחץ מי הנקבים. כאשר לחץ מי הנקבים מגיע לערך של לחץ הקבורה המקורי, המאמץ האפקטיבי משתווה ל-0 ומתחילה התנזלות. בקרקע חולית צפופה יותר ממנת החללים הקריטית יכולה להתרחש דחיסה, אם כי לאחר עיבור מסוים הקרקע מפתחת חוזק שיורי, ועם המשך מחזורי הגזירה הקרקע נוטה לתפוח ולהקטין את לחץ מי הנקבים כך שהמאמץ האפקטיבי גדל והקרקע מתחזקת (Idriss & Boulanger, 2008). למעשה עמידות קרקע תלויה גם בגורמים נוספים כגון עוצמת רעידת האדמה, סידור מבנה הגרגרים, גיל הקרקע ועוד, כך שקשה לקבוע את התנהגות הקרקע על בסיס מנת חללים קריטית בלבד.

2.1.2 נזקים כתוצאה מהתנזלות

כאשר לחץ מי הנקבים עולה עד לאיפוס המאמץ האפקטיבי והתנזלות מתחילה, יכולים להיגרם נזקים שונים. באיור 2.2 ניתן לראות דוגמה לנזקים השונים.



איור 2.2: נזקים אפשריים בעת התנזלות. (a) הזרקת חול לפני השטח. (b) שקיעת קרקע דיפרנציאלית. (c) שקיעת מבנים ברטציה. (d) התפשטות רוחבית כלפי מישור חופשי (בעקבות Seed et al., 2003)

לחץ מי הנקבים העודף יכול לגרום לזרימה בלחץ של חול "נוזלי" לפני השטח דרך סדקים בקרקע. הזרימה יכולה לפגוע בתשתיות בקרקע או בפני השטח (a). הזרקת חול לפני השטח יוצרת "בעבוע" חול אופייני בפני

השטח (איור 1.1). כתוצאה מהזרקת חול לפני השטח או לחללים נוספים, מסת קרקע יכולה להעלים ולגרום לשקיעות דיפרנציאליות (b). תהליך הפיכת קרקע לנוזל פוגעת בתסבולת היסודות ועלולה לגרום לכשל חלקי או מלא עם שקיעה של מבנים. השקיעה יכולה להיות גם ברוטציה עם נזקים למבנים (c). כאשר שכבה שלמה של חול במדרון עוברת התנזלות עלולה להיווצר התפשטות אופקית עד גלישות קרקע בהיקפים שונים (d). כאשר מזהים באתר מסוים קיומה של שכבה שיש חשש שתעבור התנזלות יש להיערך לסוג הכשל האפשרי באתר.

2.1.3 התנזלות כתוצאה ממעבר גלי לחץ בקרקע

ההסבר המקובל בספרות ההנדסית קושר בין גלי גזירה בקרקע, קריסת שלד הקרקע ועלייה בלחץ מי הנקבים. מנגנון נוסף אפשרי ליצירת התנזלות הוא גלי לחץ המשנים ישירות את לחץ מי הנקבים ללא השפעה על שלד הגרגרים. בעת האחרונה הצטבר מגוון של תצפיות ומחקרים אשר דנו באפשרות זו: Lin (1997) הראה מקרי התנזלות בעקבות רעידת האדמה של קובה (Kobe), יפן, בשנת 1995. עקבות בעבות חול של התנזלות נקטעו על ידי קרע בפני השטח שנוצר ברעידת האדמה ולא נראו בהעתק עצמו. תופעה זו נובעת, כנראה, מהתנזלות אשר נוצרה בגלי P הראשונים, עוד בטרם קריעת פני השטח והגעתם של גלי הגזירה לאתר זה.

Bachrach et al. (2001) ניתחו באופן תיאורטי מקרה של שכבת קרקע לינארית והראו שבתנאים מסוימים תהודה של גלי P בתוך השכבה יכול לגרום לעליית לחץ מי הנקבים עד ליצירת התנזלות. Hatzor et al. (2009) אף ערכו ניסוי בפיצוץ תת קרקעי והראו תופעת התנזלות שנוצרה עם גלי ההלם מהפיצוץ. Wang (2007) ניתח שינויים במפלס מי תהום בעת רעידות אדמה, והציע שני מנגנונים שונים להתנזלות. בטווח הקרוב להעתק (בערך עד מרחק השווה לאורך הקרע של ההעתק) האנרגיה הסיסמית מספיקה לקריסת שלד הקרקע ועליית לחץ מי הנקבים כתוצאה מכך. בטווח הרחוק יותר האנרגיה הסיסמית לא מספיקה לגרום ישירות נזק לקרקע, אך מספיקה לשינוי בחדירות (פרמאביליות). עלייה בחדירות מאפשרת חדירת מי תהום בלחץ רב מאקוויפר מנותק, ויצירת התנזלות באופן ישיר על ידי העלאת לחץ מי הנקבים בשכבת חול.

הערכת הסיכון להתנזלות כפי שבוצעה בעבודה הנוכחית התבססה בעיקר על שיטות אמפיריות המבוססות על ניסיון שהצטבר במגוון רחב של אירועי התנזלות בעולם. ניתוח הקידוחים, לפי "השיטה המפושטת" מבוסס על התאוריה הקושרת בין התנזלות לגלי גזירה בקרקע.

2.2 שיטות להערכת פוטנציאל ההתנזלות

קיימות שיטות להערכת רגישות להתנזלות בקנה מידה גדול, בדרך כלל לצורך יצירת מפות סיכון. בקנה מידה קטן יותר ישנן שיטות מתקדמות למדידה כמותית של הרגישות להתנזלות על בסיס בדיקות גיאוטכניות וגיאופיזיות בקידוחים או בשטח מצומצם.

2.2.1 הערכה רגיונלית

התנזלות לא תתרחש אלא בתנאים סדימנטריים, סיסמולוגיים והידרולוגיים מסוימים. כאשר עורכים סינון ראשוני של סכנת ההתנזלות בשטחים נרחבים, יש לבחון באם מתקיימים שלושת התנאים הללו.

סדימנט גרנולרי תחוח וחסר קוהזיה עלול להיות רגיש להתנזלות. ככל שהסדימנט עתיק יותר, כך בדרך כלל, הליכוד בין הגרגרים חזק יותר. עם העלייה בגיל, לרוב, גדל גם עומק הקבורה, ואיתו המאמץ האפקטיבי. על כן, ככל שסדימנט צעיר יותר הוא עשוי להיות רגיש יותר להתנזלות. מאידך, ככל שהעומק גדל, וגיל הסדימנט עולה, החשש להתנזלות קטן. במקביל, האנרגיה הסיסמית ברעידת אדמה צריכה להיות גדולה דיה כדי ליצור התנזלות. מבחינה הידרולוגית, כדי שתתרחש התנזלות הסדימנט צריך להיות רווי, ומפלס מי התהום צריך להיות מספיק רדוד (פחות מעשרים מ' מתחת לפני השטח) ומעל שכבת הקרקע הנבחנת.

בטבלה 2.1 מוצגים משקעים שונים בהתאם לסביבות השקעה שונות כנגד גיל הקרקעות (Youd, 2003). על פי סוג המשקע וגילו ניתנת הערכה כללית לגבי הסבירות להתנזלות. בעזרת טבלה זו ניתן למפות קרקעות על פי סביבות ההשקעה וגיל הקרקעות, וכך להגדיר אזורים נפרדים בהם משתנה הסבירות להימצאות שכבות רגישות להתנזלות.

הסבירות שקרקע לא מלוכדת ורוויה תהיה רגישה להתנזלות, בהתאם לגיל המשקע				תפוצת חומר לא מלוכדת במשקע	סוג המשקע
צעיר מ-500 שנה	הולקן	פלייסטוקן	קדום לפלייסטוקן		
משקעים יבשתיים					
גבוהה מאוד	גבוהה	נמוכה	נמוכה מאוד	מקומית, משתנה	ערצי נחלים
גבוהה	בינונית	נמוכה	נמוכה מאוד	מקומית, משתנה	מישורי הצפה
בינונית	נמוכה	נמוכה	נמוכה מאוד	רחבה	מינפות ומישורי סחף
--	נמוכה	נמוכה מאוד	נמוכה מאוד	רחבה	טרסות ימיות
גבוהה	בינונית	נמוכה	נמוכה מאוד	רחבה	דלתא ומוצא נחלים
גבוהה	בינונית	נמוכה	נמוכה מאוד	משתנה	משקעי אגם ופליה
גבוהה	בינונית	נמוכה	נמוכה מאוד	משתנה	קולוביום
נמוכה	נמוכה	נמוכה מאוד	נמוכה מאוד	רחבה	טאלוס
גבוהה	בינונית	נמוכה	נמוכה מאוד	רחבה	דיונות
גבוהה	גבוהה	גבוהה	--	משתנה	לס
נמוכה	נמוכה	נמוכה מאוד	נמוכה מאוד	משתנה	משקעי קרחונים
נמוכה	נמוכה	נמוכה מאוד	נמוכה מאוד	נדירה	טוף
נמוכה	נמוכה	נמוכה מאוד	נמוכה מאוד	נדירה	קרקעות שאריות
גבוהה	בינונית	נמוכה	נמוכה מאוד	מקומית, משתנה	סבחה
משקעים חופיים					
גבוהה מאוד	גבוהה	נמוכה	נמוכה מאוד	רחבה	דלתא
גבוהה	בינונית	נמוכה	נמוכה מאוד	מקומית, משתנה	אסטואר
בינונית	נמוכה	נמוכה מאוד	נמוכה מאוד	רחבה	אנרגית גלים גבוהה
גבוהה	בינונית	נמוכה	נמוכה מאוד	רחבה	אנרגית גלים נמוכה
גבוהה	בינונית	נמוכה	נמוכה מאוד	רחבה	לגונה
גבוהה	בינונית	נמוכה	נמוכה מאוד	רחבה	חוף קדמי
מילוי מלאכותי					
גבוהה מאוד	--	--	--	משתנה	לא מהודק
נמוכה	--	--	--	משתנה	מהודק

טבלה 2.1: רגישות קרקעות להתנזלות לפי סוג המשקע וגיל הקרקע. (מעובד בעקבות Youd, 2003)

ניתן למפות את עומק מפלס מי התהום ובעקבות כך להגדיר את אזורי הרגישות השונים. Youd (2003) הציע לדרג את סכנת ההתנזלות על פי עומק מי התהום (טבלה 2.2). כאשר עומק מי התהום גדול מ-15 מ' הסיכון להתנזלות זניח עקב הסבירות הנמוכה להתנזלות בעומק זה. בעקבות זאת ניתן להבחין בין האזור

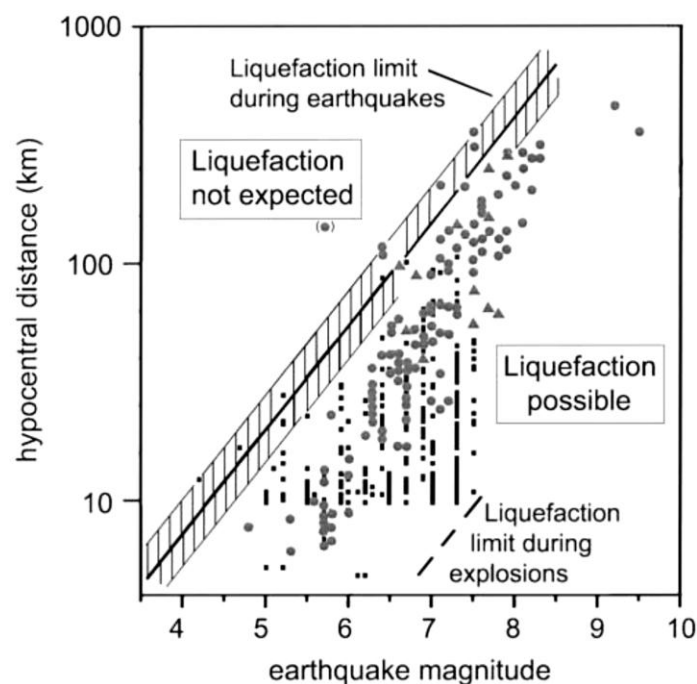
שבו המפלס רדוד מ- 15 מ' ויש סכנת התנזלות, לבין האזור בו מפלס מי התהום עמוק מ-15 מ' ובו אין סכנת התנזלות ממשית.

רגישות יחסית להתנזלות	עומק למפלס מי התהום (מ')
גבוהה מאוד	< 3
גבוהה	3 – 6
בינונית	6 - 10
נמוכה	10 - 15
נמוכה מאוד	> 15

טבלה 2.2: רגישות קרקע להתנזלות לפי עומק מפלס מי התהום. (בעקבות Youd, 2003)

עקב מקרים רבים של התנזלות בעומקים גדולים יותר, המליץ המכון הגיאולוגי של מדינת קליפורניה (Parish, 2008) להגדיר אתר כמסוכן כאשר מפלס מי התהום מגיע עד לעומק של 20 מ'. בהתחשב בכך יש להתוות את הגבול במפת הסיכון בעומק מפלס של 20 מ'.

ככל שמתרחקים ממקור רעידת האדמה האנרגיה הסיסמית קטנה והסיכוי להתנזלות קטן. Wang (2007) הציע מרחק סף המבוסס על מקרי עבר של התנזלות בעקבות רעידות אדמה במגניטודות שונות. באיור 2.3 ניתן לראות מקרים רבים של רעידות אדמה במגניטודות שונות עם קו גבול של צפיפות אנרגיה מסוימת שמעבר אליו קטן מאוד הסיכוי להתנזלות. על כן, במיפוי אזורי סיכון להתנזלות יש לזהות את ההעתקים העלולים לייצר רעידות אדמה, ובהתאם למגניטודות הצפויות על גבי העתקים אלה ניתן למפות את השטח הנמצא בטווח האפשרות של התרחשות התנזלות.



איור 2.3: מקרי התנזלות ברחבי העולם בעקבות רעידת אדמה. המרחק מהמוקד בכל אירוע מוצג כנגד המגניטודה של רעידת האדמה. בנוסף מוצגים קווים שווים צפיפות אנרגיה של רעידת האדמה. ניתן לראות כי מתחת לקו מסוים מקרי ההתנזלות מועטים ושם נקבע מרחק הסף. (בעקבות Wang, 2007)

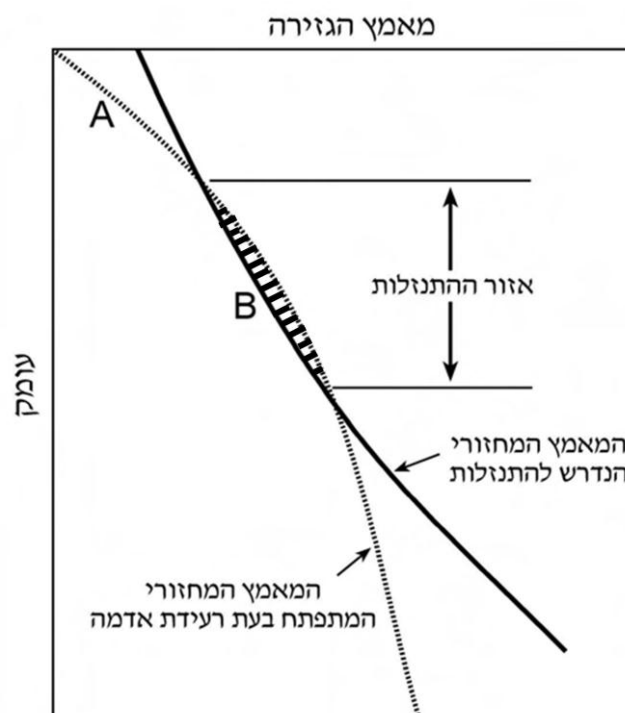
האזורים בהם מצויים משקעים גרנולרים לא מלוכדים וצעירים בגילם בעלי סבירות גבוהה להיות רגישים להתנזלות, מפלס מי התהום רדוד מ- 20 מ', והאזור חשוף לתאוצות סיסמיות גבוהות, ניתנים להגדרה כבעלי סף להתרחשות של להתנזלות, כלומר, באזור זה קיים פוטנציאל להתנזלות. בעת ניתוח אתר ספציפי באזור שנמצא בעל פוטנציאל להתנזלות יש לבצע הערכה גיאוטכנית על סמך בדיקות מתקדמות הכוללות בדיקות שדה in situ, כגון SPT, מהירות גלי גזירה ועוד, יחד עם בדיקות מעבדה מתאימות.

2.2.2 הערכה מקומית

עם השנים נעשה ניסיון רב ליצור קריטריונים אמפיריים לאפשרות שקרקע תעבור התנזלות בהתאם לבדיקות גאוטכניות באתרים בהם התנזלות התרחשה. נעשו מספר נסיונות לקבוע את רגישות הקרקע להתנזלות לפי הצפיפות היחסית של החול או פרמטרים מכניים אחרים. במחקר זה יעשה שימוש בעיקר בשיטה המפושטת.

2.2.3 השיטה המפושטת (Simplified Procedure)

שיטה זו מבוססת על התפתחות התנזלות בעקבות מחזורי העמסה שעוברת הקרקע בעת רעידת אדמה. בשיטה זו מעריכים את מאמץ הגזירה המחזורי בקרקע בעת רעידת אדמה, וממירים אותו במספר מחזורים של מאמץ גזירה קבוע בעומקים שונים בחתך הקרקע (Seed & Idriss, 1982). ניתן לשרטט פרופיל של מאמץ צפוי ברעידת אדמה כנגד העומק כמתואר בקו השבור באיור 2.4.



איור 2.4: שיטה כללית להערכת פוטנציאל ההתנזלות בחתך קרקע מסוים לפי מחזורים קבועים של גזירה בקרקע. (בעקבות Seed & Idriss, 1982)

בנוסף לכך יש לבדוק את מחזורי הגזירה בכל שכבה בקרקע העלולים לגרום להתנזלות. בדיקות אלה יכולות להיערך במעבדה על ידי הפעלת מחזוריים של גזירה בדוגמאות בלתי מופרות או בעזרת נתונים של בדיקות שדה, in-situ. כעת ניתן לשרטט פרופיל של מאמץ סף העלול לגרום להתנזלות בחתך הקרקע. פרופיל זה מופיע באיור 2.4 בקו המלא.

בהשוואת שני הקווים ניתן לאתר את האזור בחתך הקרקע בו עלולה להתרחש התנזלות בתנאי רעידת האדמה החזויים.

עם השנים נעשה מאמץ רב לפתח שיטה להגדרה טובה של המאמצים הצפויים בעת רעידת אדמה, ולהגדרת המאמצים העלולים לגרום התנזלות. שני פרמטרים הוגדרו:

יחס מאמצים מחזורי, CSR, הוגדר כפרמטר המאפיין את מאמץ הגזירה בקרקע בעת רעידת אדמה (Cyclic Stress Ratio).

יחס התנגדות מחזורי, CRR, הוגדר כפרמטר המאפיין את מאמץ הסף לגרימת התנזלות בעת רעידת אדמה (Cyclic Resistance Ratio).

בעזרת שני הפרמטרים ניתן לחשב את מקדם הביטחון המוגדר כך: $FS = CRR/CSR$ (Youd et al., 2001). פרמטרים אלה יתוארו בפירוט בפרקים הבאים.

2.2.3.1 יחס מאמצים מחזורי CSR

מאפיין הנדסי נוח למדידה של רעידת אדמה הוא תאוצת השיא האופקית בפני השטח, a_{max} (PGA). הרכיב האופקי של תאוצת הקרקע בדרך כלל גדול מהרכיב האנכי. בהנחה שעמודת הקרקע קשיחה ניתן יהיה לתאר את מאמץ הגזירה המקסימלי המתפתח בעומק מסוים על פי תאוצת השיא בפני השטח בהתאם למשוואה 2.1 (Seed & Idriss, 1971):

$$(\tau_{max})_r = \frac{\gamma \cdot h}{g} \cdot a_{max} \quad 2.1$$

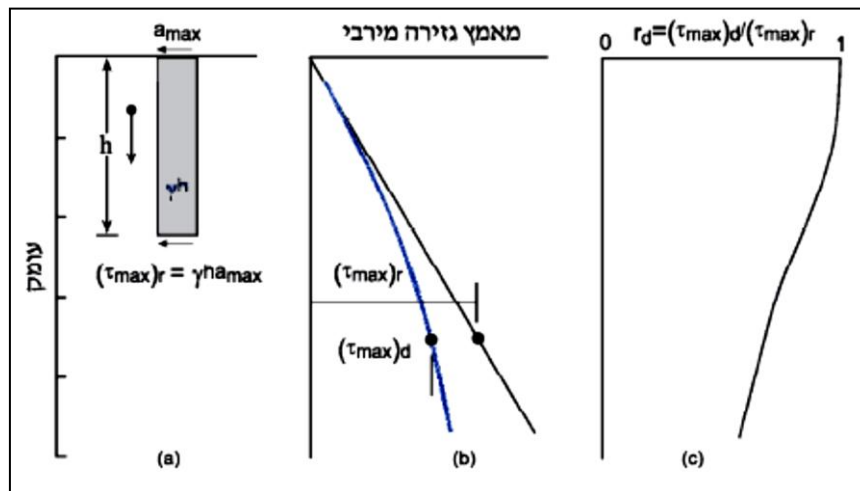
כאשר $(\tau_{max})_r$ - מאמץ גזירה מקסימלי בעומק מסוים כאשר הקרקע קשיחה, γ - משקל מרחבי של הקרקע, h - עומק מפני השטח לנקודה הנמדדת, g - תאוצת הכובד של כדור"א ו- a_{max} - תאוצת השיא האופקית בפני השטח. דוגמה לחישוב זה מוצגת באיור 2.5(a) את המשקל המרחבי, γ , ועומק הנקודה, h , ניתן להחליף במאמץ אנכי טוטאלי, σ_0 , לפי משוואה 2.2:

$$\sigma_0 = \gamma \cdot h \quad 2.2$$

למעשה הקרקע איננה קשיחה והיא עוברת דפורמציה בעת מעבר גלי הגזירה לפני השטח, כך שתאוצת השיא בתוך עמודת הקרקע תהיה בדרך כלל נמוכה מתאוצת השיא בפני השטח. בהתאם לכך גם מאמץ הגזירה המקסימלי מופחת בעומק החתך כמתואר באופן סכמטי באיור 2.5(b). כדי להעריך את מאמץ הגזירה בפועל בכל עומק הציעו Seed & Idriss (1982) מקדם הפחתה, r_d , לפי משוואה 2.3:

$$(\tau_{max})_d = r_d \cdot (\tau_{max})_r \quad 2.3$$

כאשר $(\tau_{max})_d$ - מאמץ גזירה מחזורי מקסימאלי בקרקע העוברת דפורמציה בעת רעידת אדמה, ו- $(\tau_{max})_r$ - מאמץ גזירה מחזורי מקסימאלי בקרקע (תיאורטית) קשיחה. דוגמה קונספטואלית להשתנות מקדם ההפחתה עם העומק ניתן לראות באיור 2.5(c).



איור 2.5: מאמץ גזירה מקסימאלי לפי תאוצת שיא בפני השטח: (a) מאמץ הגזירה בעומק h כאשר הקרקע קשיחה, (b) $(\tau_{max})_r$ מאמץ הגזירה המקסימאלי בקרקע העוברת דפורמציה, $(\tau_{max})_d$ מופחתה עם העומק לעומת מאמץ גזירה מקסימאלי בקרקע קשיחה, (c) $(\tau_{max})_r$ מקדם הפחתה ממוצע, r_d , קטן עם העומק. (בעקבות Seed & Idriss 1982)

בהשוואה לבדיקות מעבדה נוח להתייחס לרעידת אדמה כאל מספר מסוים של מחזורי גזירה בעלי ערך של מאמץ גזירה אחיד. Seed & Idriss (1971) חקרו מקרים רבים של רעידות אדמה והעריכו כי בדרך כלל ניתן להעריך את מאמץ הגזירה המחזורי הממוצע בכל רעידת אדמה לפי משוואה 2.4:

$$\tau_{average} = 0.65 \cdot \tau_{max} \quad 2.4$$

כאשר τ_{max} - מאמץ גזירה מקסימאלי ו- $\tau_{average}$ - מאמץ גזירה ממוצע. את מאמץ הגזירה הממוצע מנרמלים ללחץ השכבות, מאמץ אנכי אפקטיבי σ'_0 , וכך מתקבל יחס מאמצים מחזורי במשוואה 2.5. משוואה זו של מאמץ גזירה מנורמל ממוצע לרעידת האדמה נתונה מהווה בסיס לכל החישובים בשיטה המפושטת:

$$CSR = \frac{\tau_{average}}{\sigma'_0} = 0.65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_0}{\sigma'_0} \cdot r_d \quad 2.5$$

Seed & Idriss (1971) ניתחו מספר רב של רעידות אדמה והציגו טווח אפשרי של מקדם ההפחתה עם העומק. עקב גודל הטווח בעומקים גדולים ההמלצה היא להשתמש בערך הממוצע עד עומק של 9-12 מ'. אמנם רוב אירועי ההתנזלות ההרסניים התרחשו בעומק נמוך מטווח זה.

Yoo et al. (2001) הציעו נוסחה לא רציפה לעומקים שונים המתארת את ערך r_d הממוצע בתרשים של Seed & Idriss (1982). בנוסף הם הציעו נוסחה אחת רציפה למקדם ההפחתה לפי העומק, z, לכל הקו לפי משוואה 2.6:

$$r_d = \frac{(1-0.4113z^{0.5}+0.04052z+0.001753z^{1.5})}{(1-0.4177z^{0.5}+0.05729z-0.006205z^{1.5}+0.001210z^2)} \quad 2.6$$

עם זאת, על פי המלצתם לא ניתן להשתמש בנוסחה כערך מדויק מעבר לעומק של 15 מ' עקב חוסר הוודאות הגדול.

Seed et al. (2003) פתחו נוסחה מסובכת להערכת מקדם ההפחתה התלויה גם בתאוצת הקרקע בפני השטח, קשיחות הקרקע ועוצמת רעידת האדמה, ומתוארת במשוואה 2.7:

$$r_d = \left[\frac{1 + \frac{-23.013 - 2.949a_{max} + 0.99M_w + 0.016V_{s,40}^*}{16.258 + 0.201e^{0.104(-d+0.0785V_{s,40}^*+24.888)}}}{1 + \frac{-23.013 - 2.949a_{max} + 0.99M_w + 0.016V_{s,40}^*}{16.258 + 0.201e^{0.104(0.0185V_{s,40}^*+24.888)}}} \right] \pm \sigma_{\varepsilon_{rd}} \quad d < 65ft (= 20m) \quad 2.7$$

$$r_d = \left[\frac{1 + \frac{-23.013 - 2.949a_{max} + 0.99M_w + 0.016V_{s,40}^*}{16.258 + 0.201e^{0.104(-65+0.0785V_{s,40}^*+24.888)}}}{1 + \frac{-23.013 - 2.949a_{max} + 0.99M_w + 0.016V_{s,40}^*}{16.258 + 0.201e^{0.104(0.0185V_{s,40}^*+24.888)}}} \right] - 0.0014(d - 65) \pm \sigma_{\varepsilon_{rd}} \quad d \geq 65ft$$

$$\sigma_{\varepsilon_{rd}}(d) = d^{0.850} \cdot 0.0072 \quad , d < 40ft (= 12m)$$

$$\sigma_{\varepsilon_{rd}}(d) = 40^{0.850} \cdot 0.0072 \quad , d \geq 40ft (= 12m)$$

כאשר M_w - מגניטודת מומנט של רעידת אדמה צפויה, $V_{s,40}^*$ - מהירות גלי גזירה ממוצעת ב-40 הרגל (ft) העליונים בחתך (בערך 12 מ'), d - עומק מפני השטח ו- $\sigma_{\varepsilon_{rd}}$ - טווח הטעות המבטא חוסר וודאות בתכונות המכאניות והליתולוגיות של הקרקע.

לעומת זאת, Idriss & Boulanger (2006) הציעו נוסחה פשוטה יותר המתחשבת בנוסף לעומק, z , רק במגניטודת המומנט של רעידת אדמה חזויה. משוואה 2.8 מתארת שני טווחים שונים. טווח אחד עד עומק של 34 מ', והשני בעומק רב יותר.

$$\ln(r_d) = \alpha(z) + \beta(z)M_w \quad , z \leq 34m$$

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \cdot \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right)$$

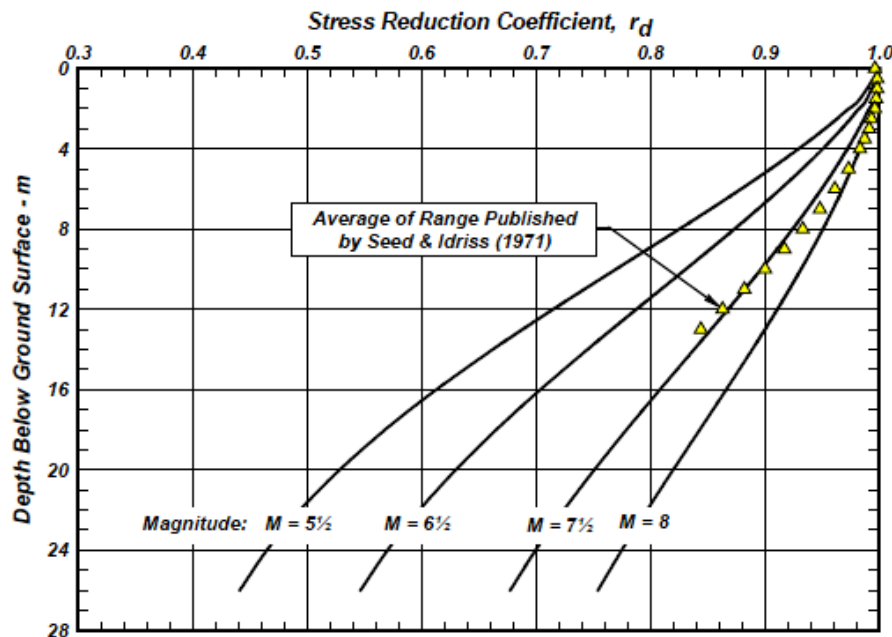
2.8

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \cdot \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right)$$

$$r_d = 0.12 \cdot \exp(0.22M_w) \quad , z > 34m$$

Idriss & Boulanger (2006) הטילו ספק במהימנות השימוש בפרמטרים רבים אצל Seed et al. (2003), וטענו כי דיוק כזה אינו אמין בהתבסס על הנתונים הקיימים. על פי המלצתם די בנוסחה שהציעו, המבוססת על עומק ומגניטודת מומנט, וגם בה יש להשתמש עד לעומק של 20 מ'. מעבר לכך תופעת התנזלות נגרמת רק בתנאים מיוחדים ולכן מומלץ להשתמש בניתוח תגובת אתר המתוכנן לאתר ספציפי ומאפשר חישוב מדויק יותר. באיור 2.6 ניתן לראות את מקדם ההפחתה, r_d , לפי Idriss & Boulanger

(2006) בהתאם לרעידות אדמה במגניטודות שונות לעומת הערך הממוצע כפי שהוצע על ידי Seed & Idriss (1971).



איור 2.6: מקדם הפחתה הקטן עם העומק. הערכים שונים עבור רעשים במגניטודה שונה (בעקבות Idriss & Boulanger, 2006)

דרך שונה להערכה של מאמץ הגזירה הממוצע, τ_{ave} , היא ניתוח תגובת אתר באמצעות תוכנת מחשב. בדרך זו מוזינים רקורד של רעידת אדמה כפי שצפוי להיות בסלע האם. לאחר מכן נעשה חישוב של תגובת שכבות הקרקע השונות למעבר גלי הגזירה מהסלע עד לפני השטח. תוכנות מסוג זה, כגון תוכנת SHAKE מאפשרות חישוב ישיר של מאמץ הגזירה הממוצע או CSR. אמנם, בדרך כלל, גם בתוכנות אלה מחושב המאמץ המקסימאלי בעוד המאמץ הממוצע מחושב לפי משוואה 4.

2.2.3.2 יחס ההתנגדות מחזורי CRR

יחס זה מוגדר כמאמץ גזירה ממוצע קריטי, $\tau_{average, cr}$, הדרוש ליצירת התנזלות בקרקע מנורמל במאמץ האנכי האפקטיבי כפי שמתואר במשוואה 2.9:

$$CRR = \frac{\tau_{average, cr}}{\sigma'_0} \quad 2.9$$

את יחס ההתנגדות המחזורי ניתן להעריך באמצעות בדיקות מעבדה של דוגמאות קרקע בלתי מופרות, או במבחני שדה in-situ בקידוח או בפני השטח.

2.2.3.3 בדיקות מעבדה

שני סוגים של בדיקות מעבדה קיימים לבדיקת כשל התנזלות בדוגמאות קרקע, בדיקת גזירה פשוטה, Simple Shear, ובדיקת גזירה מרחבית, Tri-axial Shear (Seed & Idriss, 1982).

בבדיקת גזירה פשוטה הדוגמה מועמסת בעומס נורמלי קבוע, σ'_0 . לאחר מכן מועמסת הדוגמה במחזוריים של מאמץ גזירה אחיד. מחזורי הגזירה נמשכים עד ליצירת התנזלות. מתוצאות הניסויים ניתן לחלץ את יחס המאמצים, τ_h/σ'_v , הדרוש ליצירת התנזלות בדוגמה. מתברר כי בפועל המאמץ הנדרש בקרקע להתנזלות קטן ב-10% מהמאמץ המתקבל בבדיקת המעבדה עקב השפעה של כיווני גזירה שונים המתקבלים ברעידת אדמה אמיתית (Seed & Idriss, 1982).

בדיקת גזירה מרחבית נעשית במכשש טריאקסיאלי. לחץ הכליאה מועלה לערך אקוויוולנטי לעומק מסוים, σ_a . לאחר מכן מופעל מאמץ דיוויאטורי מחזורי, σ_{dc} , עד לכשל הדוגמה. גם כאן מתקבל יחס המאמצים בכשל, σ_{dc}/σ_a (מאמץ הגזירה המירבי בכשל שווה לחצי המאמץ הדיוויאטורי). בדיקה זו מאפשרת שימוש בדוגמאות קרקע בלתי מופרות

ברם, ההשוואה לכשל הצפוי בשדה איננה מיידיית ויש צורך במקדם התאמה. Seed & Idriss (1982) הציעו משוואה 2.10 עבור מקדם התאמה C_r המבוססת על מקדם לחץ העפר במנוחה, K_0 :

$$\left(\frac{\tau_h}{\sigma'_v}\right)_{l-field} \approx C_r \left(\frac{\sigma_{dc}}{2\sigma_a}\right)_{l-triaxial}$$

2.10

$$C = \begin{cases} 0.57 & \text{for } K_0 = 0.4 \\ 0.9 \text{ to } 1 & \text{for } K_0 = 1 \end{cases}$$

הדוגמאות בבדיקת המעבדה צריכות להיות בלתי מופרות, אך כל דגימה מפרה במשהו את מבנה הקרקע. דבר זה משפיע משמעותית על תוצאות הבדיקות ולכן יש לדגום את הקרקע באמצעות טכניקות מתקדמות, כגון הקפאת קרקע ודגימתה (Seed & Idriss, 1982). עקב העלות הגבוהה והסרבול של בדיקות אלה המליצו Youd et al. (1997) לזנוח שיטה זו בשימוש שוטף לצרכי תכנון הנדסי.

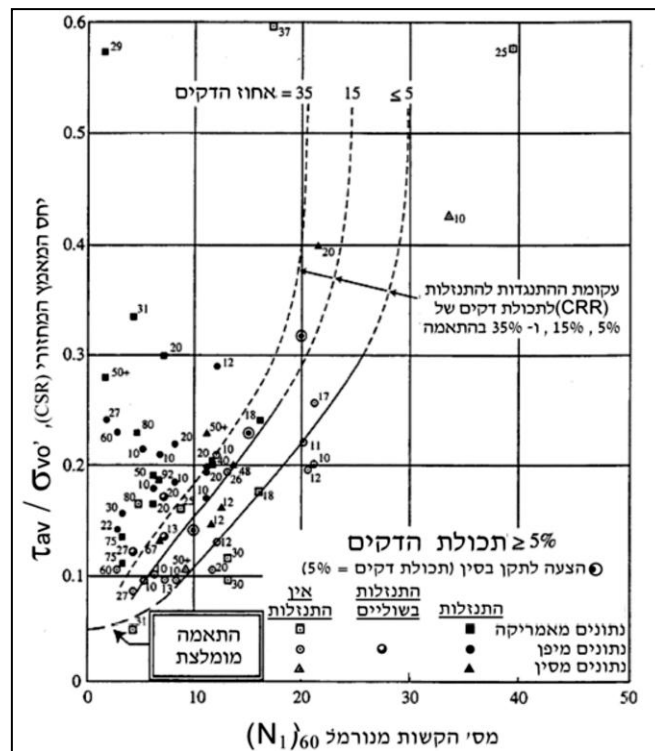
2.2.3.4 בדיקות שדה

בהשוואת נתונים מקידוחים ברחבי העולם באזורים בהם התרחשו רעידות אדמה חזקות מתברר כי ישנו קשר בין תוצאת מבחני שדה, בדיקת SPT, CPT או מהירות גלי גזירה לבין עמידות הקרקע כנגד התנזלות.

בדיקת החדרה תקנית - SPT

בדיקה זו (Standard Penetration Test) משמשת כבר משנת 1927 להערכת תכונות קרקע לביסוס (Bowels & Guo, 1996). קיימות קורלציות רבות בין תוצאות בדיקות SPT לצפיפות יחסית של קרקעות לא קוהזיביות. בדיקות SPT מושפעות בעיקר מהצפיפות היחסית של חול, אך מושפעת גם מפרמטרים נוספים, כגון מבנה הקרקע, גיל הקרקע וצמנטציה, מקדם לחץ העפר והיסטוריה סייסמית של הקרקע. כל אלה גורמים המשפיעים גם על עמידות הקרקע כנגד התנזלות. Seed et al. (1985) אספו נתונים מקידוחים בהם יש נתוני בדיקות SPT וידוע שהתנזלות התרחשה בעקבות רעידת אדמה, או לא התרחשה למרות אירוע של רעידת אדמה. כאשר מציגים בגרף את יחס המאמצים המחזורי, CSR, שהתפתח בכל אתר כנגד מספר ההקשות של בדיקת SPT בקידוח, מנומלל ללחץ השכבות, ניתן לראות כי ישנו תחום בו מצויים האירועים בהם התרחשו מרבית אירועי ההתנזלות, ותחום אחר בו מצויים מרבית האירועים בהם לא התרחשה התנזלות, למרות רעידת האדמה. באיור 2.7 ניתן לראות את פיזור המקרים השונים מרחבי

העולם ואת קו הגבול שניתן לשרטט בין מקומות בהם התרחשה התנזלות לבין מקומות בהם הקרקע עמדה במחזורי הגזירה בעת רעידת האדמה.



איור 2.7: תרשים להערכת יחס ההתנגדות מחזורי, CRR, על בסיס בדיקות SPT. מוצגות תוצאות עבור אחוז דקים משתנה. עקום CRR בחול נקי (אחוז דקים קטן מ-5%) ממשיך עד ציר ה-Y לפי (Yuod et al., 2001) בעקבות (Seed et al., 1985).

קו גבול זה מהווה את יחס ההתנגדות המחזורי, CRR. במקור שורטט הקו עבור אחוז דקים קטן מ-5% אך הוא מותאם גם עבור אחוז דקים גבוה. עקב מיקום עקום ה-CRR ניתן לראות כי בערכים גבוהים של בדיקת SPT מנורמלת (בערך מעל 35) כבר לא קיימת סכנת התנזלות ממשית. Youd et al. (2001) הציעו את משוואה 2.11 לתיאור הקו הבסיסי של חול נקי עד 5% דקים.

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{[10 \cdot (N_1)_{60} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad 2.11$$

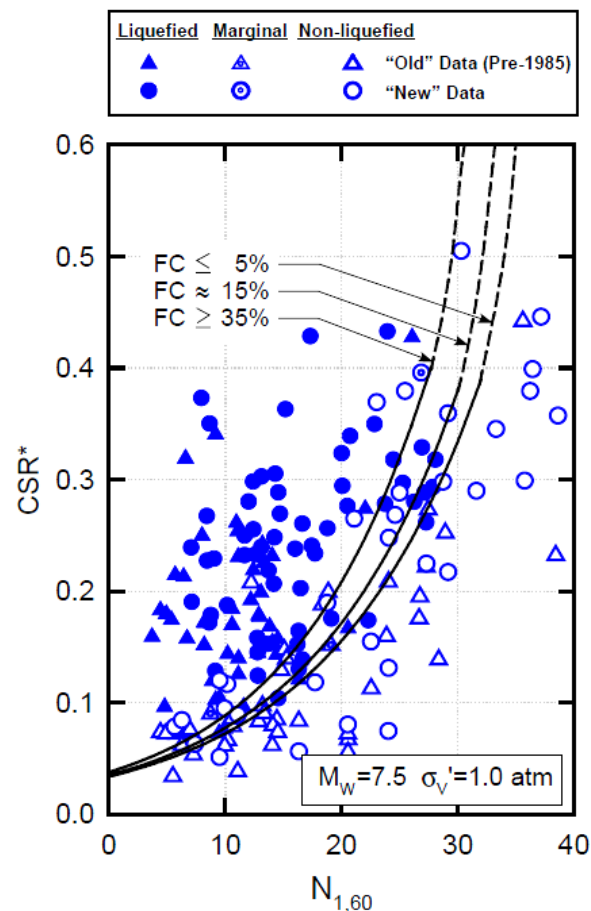
כאשר $CRR_{7.5}$ - יחס ההתנגדות מחזורי עבור רעידת אדמה במגניטודה של 7.5 ו- $(N_1)_{60}$ - מספר הקשות במבחן SPT מנורמל ללחץ השכבות ולאנרגיית הפטיש. בנוסף הם הציעו תיקון מדויק עבור אחוז הדקים, FC - אחוז הגרגרים הקטנים מ-0.075 מ"מ, שבא לידי ביטוי במספר ההקשות המנורמל $(N_1)_{60cs}$, כפי שמתואר במשוואה 2.12:

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta(N_1)_{60} \quad 2.12$$

$$\alpha = \begin{cases} 0 & \text{for } FC \leq 5\% \\ \exp \left[1.76 - \left(\frac{190}{FC^2} \right) \right] & \text{for } 5\% < FC < 35\% \\ 5 & \text{for } FC \geq 35\% \end{cases}$$

$$\beta = \begin{cases} 1 & \text{for } FC \leq 5\% \\ \left[0.99 + \left(\frac{FC^2}{1000} \right) \right] & \text{for } 5\% < FC < 35\% \\ 1.2 & \text{for } FC \geq 35\% \end{cases}$$

Seed et al. (2003) ניתחו מחדש את מסד הנתונים ששימש את הקורלציות הקודמות תוך נתינת משקל לאמינות הנתונים. הם הוסיפו לניתוח נתונים מרעידות אדמה שהצטברו בשנים שחלפו, והציגו תרשים דומה, איור 2.8. שיטתם של Seed et al. מבוססת על חישוב הסתברות ותואר בהמשך.



איור 2.8: תרשים להערכת יחס התנגדות מחזורי, CRR. עקומים שונים עבור אחוז דקים שונה. (בעקבות Seed et al., 2003) שיטה זו מבוססת על גישה הסתברותית. עקום CRR בתרשים זה תואם להסתברות של 15% להתרחשות התנזלות בקרקע.

תיקון עבור אחוז הדקים מופיע גם כאן לפי משוואה 2.13:

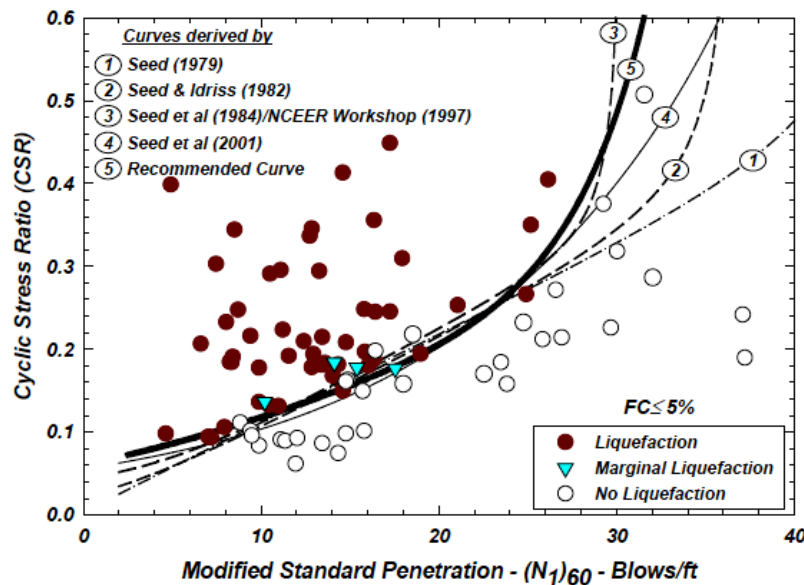
$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} \cdot \left[(1 + 0.004FC) + 0.05 \left(\frac{FC}{(N_1)_{60}} \right) \right] \quad 2.13$$

Idriss & Boulanger (2006) ניתחו מחדש את בסיס הנתונים של Seed et al. לפי התאמות אמפיריות שונות והציעו את משוואות 2.14-2.15 לחישוב CRR בהתאם למספר הקשות מנורמל ומותאם לאחוז דקים, FC:

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \exp \left(1.63 + \frac{9.7}{FC+0.1} - \left(\frac{15.7}{FC+0.1} \right)^{20} \right) \quad 2.14$$

$$CRR = \exp \left\{ \frac{(N_1)_{60cs}}{14.1} + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{126} \right)^2 - \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{23.6} \right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{25.4} \right)^4 - 2.8 \right\} \quad 2.15$$

באיור 2.9 ניתן לראות דוגמה לעקום המוצע בחול נקי עם אחוז דקים קטן מ-5%.



איור 2.9: הערכת יחס התנגדות מחזורי, CRR, בחול נקי בו אחוז הדקים קטן מ-5%. העקום מוצג עם מקרי החקר לעומת עקומים שהוצעו במחקרים קודמים, המבוססים על אותם מקרים (בעקבות Idriss & Boulanger 2006)

מקדמי תיקון עבור בדיקות SPT

כדי ליצור סטנדרטיזציה של בדיקות SPT שתאפשר קורלציה בין נתונים מרחבי העולם הוצעו עם השנים מספר מקדמים אמפיריים המאפשרים להמיר את מספר ההקשות בקידוח בפועל לערך התואם את הקורלציות לפיהן מוערך יחס CRR.

Seed & Idriss (1982) הציעו מקדם תיקון, C_N , עבור לחץ השכבות בנקודת הבדיקה. הם גם קבעו את צורת הבדיקה הדרושה להערכה מדויקת אך לא קבעו מקדמי התאמה נוספים.

Liao & Whitman (1986), במקביל Skempton (1986) ואחר כך Liao et al. (1988) הגדירו מקדמי התאמה עבור לחץ השכבות, אנרגיית הנפילה של הפטיש ועוד. תוצאות עבודתם עובדו על ידי Youd et al. (2001) למשוואה 2.16:

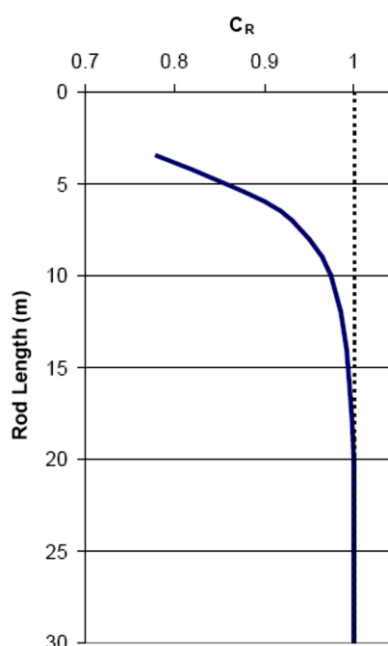
$$(N_1)_{60} = N \cdot C_N \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_R \cdot C_S \quad 2.16$$

כאשר N - מספר הקשות שנמדד בקידוח, C_N - תיקון עבור לחץ השכבות במקום הבדיקה, C_E - תיקון עבור האנרגיה שמנוצלת מנפילת הפטיש להקשה, יחסית לניצול של 60%, C_B - תיקון עבור קוטר הקידוח, C_R - תיקון עבור אורך המוט בכל בדיקה ו- C_S - תיקון עבור סוג צינור ההחדרה לקרקע. את המקדמים יש לחשב מתוך טבלה 2.3 הכוללת את כל המקדמים. C_N מחושב לפי המאמץ האפקטיבי האנכי, σ'_{v0} , מנורמל בלחץ של אטמוספירה אחת, P_a .

Factor	Equipment Variable	Term	Correction
Overburden Pressure	-	C_N	$2.2/(1.2+\sigma'_{v0}/P_a)$, $C_N \leq 1.7$
Energy Ratio	Donut hammer	C_E	0.5-1.0
Energy Ratio	Safety hammer	C_E	0.7-1.2
Energy Ratio	Automatic-trip Donut type hammer	C_E	0.8-1.3
Borehole Diameter	65-115 mm	C_B	1.0
Borehole Diameter	150 mm	C_B	1.05
Borehole Diameter	200 mm	C_B	1.15
Rod Length	< 3 m	C_R	0.75
Rod Length	3-4 m	C_R	0.8
Rod Length	4-6 m	C_R	0.85
Rod Length	6-10 m	C_R	0.95
Rod Length	10-30 m	C_R	1.0
Sampling Method	Standard sampler	C_S	1.0
Sampling Method	Sampler without liners	C_S	1.1-1.3

טבלה 2.3: מקדמי תיקון שונים עבור בדיקת SPT לפי ציוד הבדיקה (בעקבות Youd et al., 2001)

Seed et al. (2003) הוסיפו תרשים עבור מקדם התיקון לאורך המוט, איור 2.10. בתרשים מוצג C_R באופן רציף ביחס לאורך המוט שבקידוח. החל מעומק של 18 מ' כבר אין משמעות לתיקון.



איור 2.10: מקדם C_R לנרמול מספר הקשות בבדיקת SPT. המקדם משתנה לפי אורך הסדן. הסדן נמצא בתוך הקידוח מעל צינור הדגימה, ומעביר את אנרגיית הנפילה של הפטיש הפוגע בו. (בעקבות Seed et al., 2003)

Idriss & Boulanger (2006) ניתחו מחדש ניסויים של בדיקות SPT עם מדי לחץ על הסדן למדידת האנרגיה בנפילת הפטיש, וכן נתונים נוספים והגיעו למשוואה 2.17 לתיאור C_N

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^\alpha \leq 1.7$$

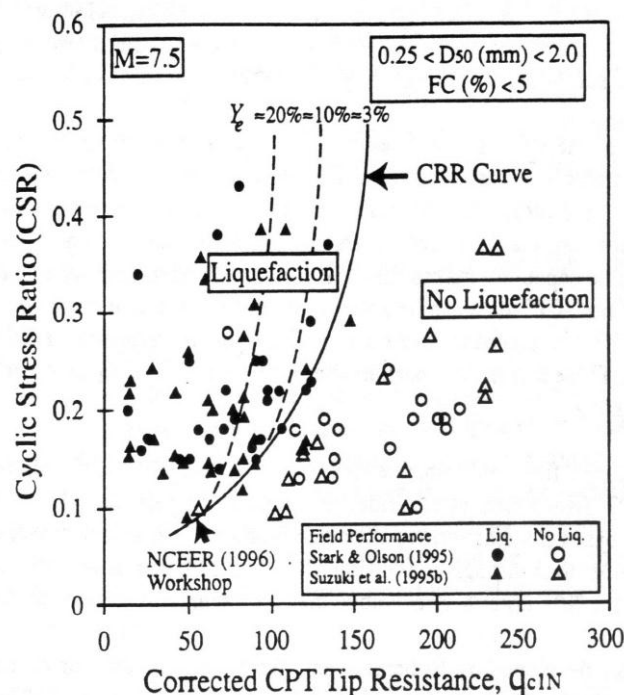
2.17

$$\alpha = 0.784 - 0.0768 \cdot \sqrt{(N_1)_{60}}$$

ניתן לראות כי ערך C_N תלוי בערך $(N_1)_{60}$. מאידך, $(N_1)_{60}$ תלוי במקדם C_N . עקב כך קביעת מקדם התיקון C_N ו- $(N_1)_{60}$ מצריכה מספר איטרציות עד לקבלת ערכים סבירים.

CPT

כלי נוסף של בדיקות שדה in-situ להערכת יחס התנגדות מחזורי, CRR, הוא בדיקות CPT (Cone Penetration Test). בבדיקת CPT מוחדר לקרקע חרוט בקוטר של 3.6 ס"מ והתנגדות הקרקע להחדרה נמדדת ביחידות של מאמץ. תוצר בדיקה זו הוא פרופיל התנגדות רציף של כל עמודת הקרקע המהווה מדד לחוזק הקרקע ומאפשר קורלציה לתכונות נוספות. Seed & Idriss (1982) העריכו כי במקרים רבים מומלץ להשתמש באמצעי זה שמאפשר פרופיל מלא של הקרקע, פחות רגיש לטעויות ומהיר יותר מבדיקת SPT. עקב חוסר בנתוני בדיקות CPT ממקרי חקר ניתן לקשור בין תוצאות בדיקות CPT לתוצאות בדיקות SPT באמצעות בדיקות באתר או באמצעות קורלציות אמפיריות שפורסמו, וכך להעריך את ההתנגדות להתנזלות באמצעות קורלציה של מספר הקשות מנורמל לחוזק הקרקע, כמתואר בשיטה המפושטת.



איור 2.11: חישוב יחס התנגדות מחזורי, CRR, לפי ערכי בדיקת CPT מנורמלים. (בעקבות Youd et al., 2001)

Youd et al. (2001) כבר הציעו קורלציה ישירה להערכת CRR לפי ערכי CPT מנורמלים. באיור 2.11 ניתן לראות תרשים של יחס CRR המבוסס של ערכי CPT בחולות נקיים, כאשר העקום של CRR מוצג גם ביחסי עיבור גזירה מחזוריים שונים. מאמץ ההתנגדות בבדיקת CPT, q , מנורמל כך שניתן להגיע לערך q_{c1N} בתרשים. גם בתרשים זה ישנו ערך סף שמעבר אליו כבר אין סכנת התנזלות ממשית. הערך תלוי באחוז הדקים אך לא גבוה מ- $q_{c1N} \approx 170$.

Seed et al. (2003) ו-Idriss & Boulange (2006) עדכנו את התרשים בעקבות מקרי חקר חדשים והוסיפו תיקונים גם עבור אחוז הדקים בקרקע.

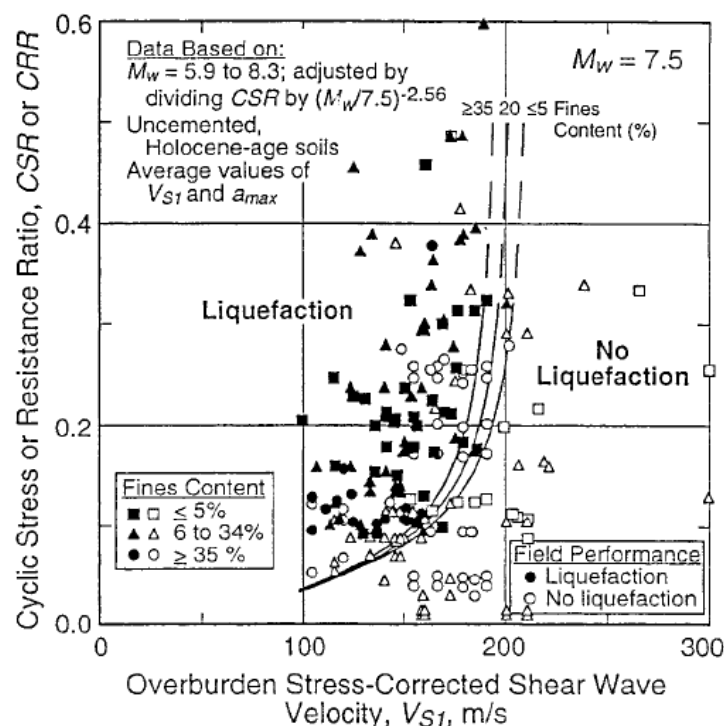
במחקר זה לא נעשה שימוש בבדיקת CPT.

מהירות גלי גזירה, V_s

מהירות גלי הגזירה בעיבורים קטנים בקרקע ניתנת למדידה בבדיקות כגון Down-Hole או Cross-Hole בקידוחים, והיא מייצגת פרמטרים חשובים להערכת התנזלות בקרקע, כגון מנת חללים, לחץ הקבורה, היסטוריית מאמצים וגיל גאולוגי. בדיקה זו מאפשרת הערכת יחס CRR כאשר בדיקות SPT או CPT קשות לביצוע, בעיקר בקרקע גסות גרגר כגון חלוקים.

Stoke et al. (1988) הציעו דרך לחישוב פוטנציאל ההתנזלות בהתבסס על ניתוח עיבור גזירה באתרים בהם ידועה מהירות גלי הגזירה, V_s , של השכבות.

Youd et al. (2001) כבר הציעו תרשים אמפירי להערכת CRR דומה לזה של בדיקות SPT ו-CPT. באיור 2.12 מוצג תרשים של יחס CRR המבוסס על מדידות מהירות גלי גזירה.



איור 2.12: חישוב יחס התנגדות מחזורי, CRR, לפי מהירות גלי הגזירה המנורמלת. (בעקבות Youd et al.,

(2001)

התרשים מיוצג במשוואה 2.18 :

$$CRR = a \left(\frac{V_{S1}}{100} \right)^2 + b \left(\frac{1}{V_{S1c} - V_{S1}} - \frac{1}{V_{S1}} \right) \quad 2.18$$

כאשר a, b - מקדמים אמפיריים. הערכים המתאימים ביותר הם: a=0.022, b=2.8

V_{S1c} - תיקון עבור אחוז הדקים. נע בין 200 m/sec, עבור אחוז דקים של 35% או יותר, לבין 215 m/sec עבור אחוז דקים של 5% או פחות

V_{S1} - מהירות גלי גזירה מנורמלת במאמץ האפקטיבי לפי משוואה 2.19 :

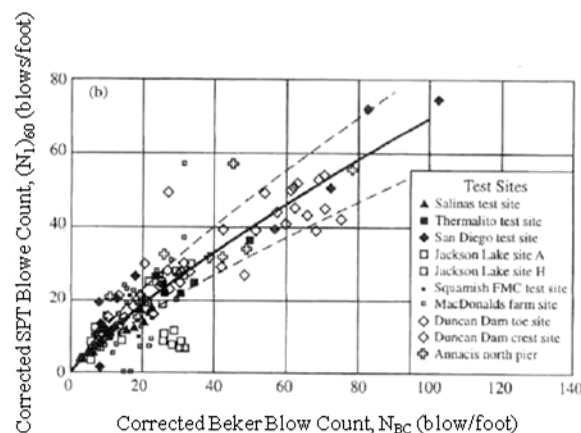
$$V_{S1} = V_S \left(\frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.25} \quad 2.19$$

כאשר V_S - מהירות גלי גזירה הנמדדת באתר ו- P_a - לחץ של 100kPa, בערך אטמוספירה אחת. עקב מיעוט מקרי חקר במהירויות נמוכות, העקום של CRR מוצע רק החל מערך של $V_{S1}=100$ m/sec ומעלה. ניתן לראות כי מעבר לערך של $V_{S1} \approx 215$ m/sec כבר אין כל חשש ממשי להתנזלות.

Seed et al. (2003) ו- Idriss & Boulanger (2006) ציינו כי לא הושגה התקדמות המאפשרת לעדכן את התרשים. בנוסף, קבעו כולם כי בקורלציה של מהירות גלי גזירה יש אי וודאות רבה ולכן יש להתייחס לתוצאות בזהירות. ההמלצה היא להשתמש במהירות גלי גזירה רק להערכה כללית של האתר הנבדק, לצורך בדיקה אם אין כל סכנה של התנזלות או שבוודאות יש סכנה רבה.

BPT

בדיקת Becker Penetration Test, BPT, נעשית על יד צינור בקוטר של 16.8 ס"מ המוחדר לקרקע על ידי פטיש המונע במנוע דיזל כאשר מונים את מספר ההקשות. הפטיש מכונה פטיש בקר ועל שמו הבדיקה. עקב גודל הציוד המשמש בבדיקה היא מיועדת בעיקר לקרקעות גסות גרגר בגודל חלוקים ומעלה. עד כה לא היה בסיס נתונים רחב מספיק כדי ליצור קורלציה בין מספר הקשות בפטיש בקר לבין עמידות להתנזלות. Youd et al. (2001) הציגו במקום זאת קורלציה בין מספר הקשות של פטיש בקר לבין מספר הקשות מנורמל בבדיקת SPT המתוארת באיור 2.13 :



איור 2.13: קשר אמפירי בין תוצאות בדיקת BPT לערכים אקוויולנטים של בדיקת SPT לצורך חישוב יחס התנגדות מחזורי, CRR. (בעקבות Youd et al., 2001)

לאחר מכן ניתן לעשות את הקורלציה הרגילה בין מספר הקשות מנורמל של SPT לבין יחס CRR. במחקר זה לא נעשה שימוש בבדיקות BPT.

2.2.3.5 מקדם תיקון עבור מגניטודת רעידת אדמה

כל העבודות שתוארו עד כה עסקו ברעידות אדמה במגניטודה של 7.5, וכך גם כל התרשימים שהוצגו. בניתוח מקרי עבר בהם המגניטודה הייתה שונה נעשה שימוש במקדמי התאמה עבור מגניטודות שונות. ניתן להציג את מקדם ההתאמה עבור מקדם הבטחון במשוואה 2.20:

$$FS = (CRR_{7.5}/CSR)MSF \quad 2.20$$

כאשר $CRR_{7.5}$ - יחס התנגדות מחזורי בהתאם לרעידת אדמה במגניטודה של 7.5, MSF - מקדם התאמה עבור מגניטודה שונה של רעידת אדמה.

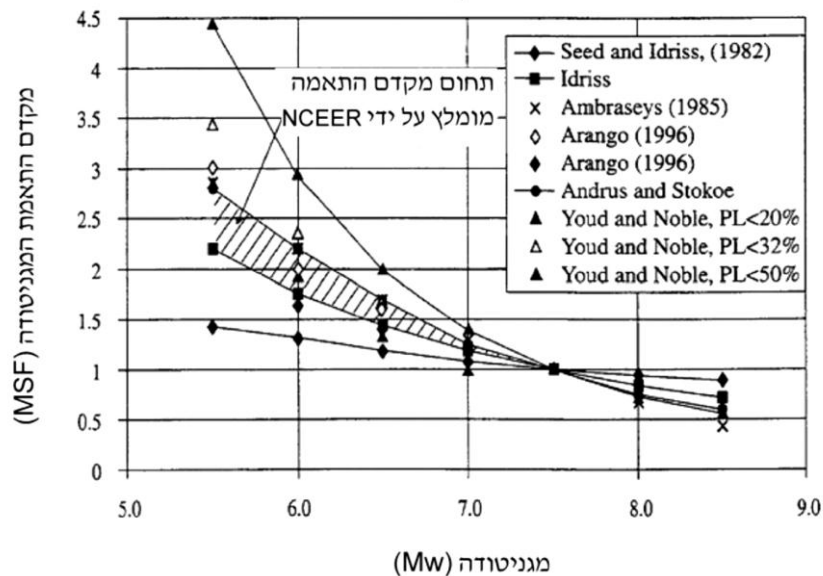
המקדם MSF יכול להיות מותאם עבור יחס CSR או עבור יחס CRR. בחישוב מקדם הבטחון התוצאה תהיה זהה.

Seed & Idriss (1982) קשרו בין מגניטודת רעידת אדמה לבין מספר מחזורי העמסה אקוויולנטים ל- $0.65\tau_{max}$. בהתאם לכך הציגו את טבלה 2.4 ובה מקדם המוכפל ב-CRR לקבלת ערך מותאם יותר.

M, מגניטודת רעידת אדמה	מספר מחזורי העמסה של מאמץ גזירה השווה ל- $0.65\tau_{max}$	$CRR/CRR_{M=7.5}$ (MSF)
8.5	26	0.89
7.5	15	1.0
6.75	10	1.13
6	5-6	1.32
5.25	2-3	1.5

טבלה 2.4: מספר מחזורי גזירה אקוויולנטים לרעש במגניטודות שונות עם מקדם התאמה עבור המגניטודות השונות (בעקבות Seed & Idriss, 1982)

Youd et al. (2001) בקבוצת העבודה של NCEER (National Center for Earthquake Engineering Research) סיכמו את המקדמים שהציעו חוקרים שונים, כולל עדכון של Idriss (1999), והציעו טווח אפשרי של MSF עבור מגניטודות שונות של רעידות אדמה. באיור 2.14 מוצג תרשים הכולל את העבודות שנעשו עד אז עם הטווח האפשרי המוצע על ידי הקבוצה.



איור 2.14: מקדם התאמת מגניטודה, MSF , לפי מגניטודת רעידת האדמה. מוצגים ערכים שהוצעו על ידי חוקרים שונים. ברעידות אדמה במגניטודה של $M > 7.5$ מומלץ טווח ערכים אפשרי. ברעידות אדמה במגניטודה של $M > 7.5$ מומלץ להשתמש בערכים של Idriss (ריבועים מלאים) (בעקבות Youd et al., 2001)

המלצתם היא להעריך עד כמה החישוב צריך להיות שמרני ולפי זה לבחור ערך מתאים בטווח. טווח הערכים ממופיע ברעידות אדמה במגניטודה קטנה מ-7.5. ברעידות אדמה חזקות יותר ההמלצה היא להסתמך על הנתונים של Idriss בתרשים. Seed et al. (2003) חישובו מחדש את בסיס הנתונים הקיים על בסיס שיטות סטטיסטיות שונות והגיעו לערכים מעט שונים המוצגים באיור 2.15:

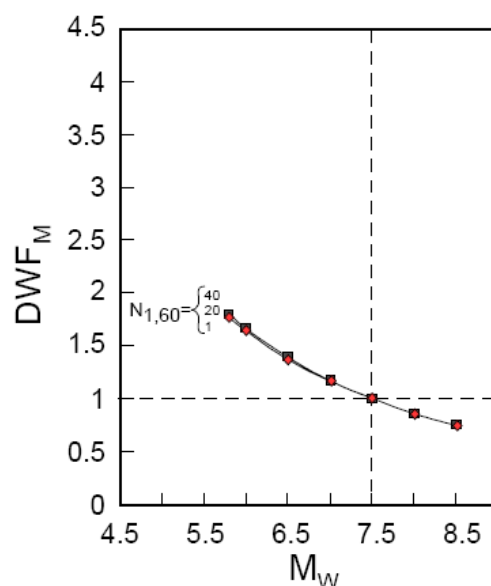


Fig. 13: Recommended Magnitude-Correlated Duration Weighting Factor as a Function of $N_{1,60}$

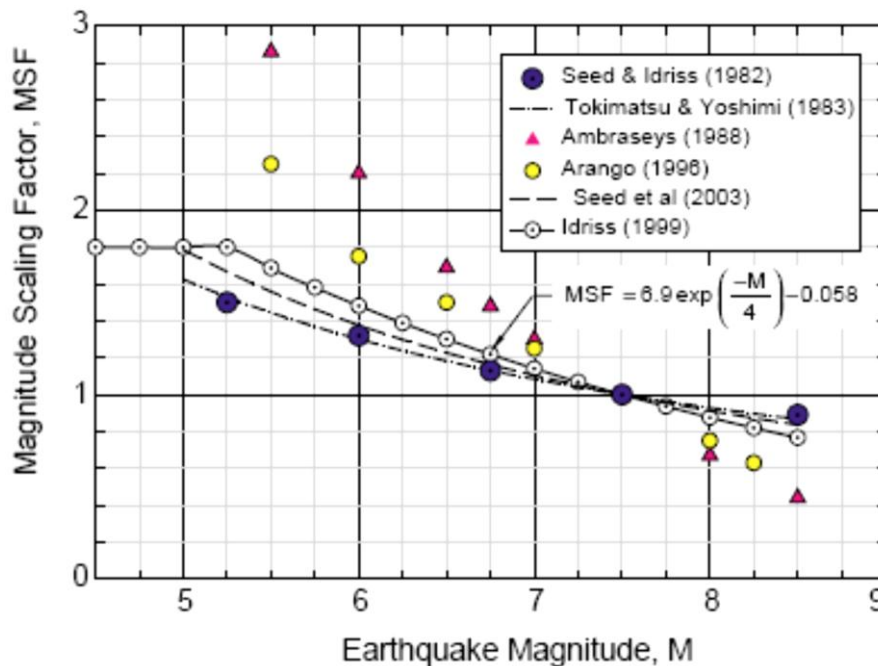
איור 2.15: מקדם התאמה למגניטודת רעידת אדמה. מוצגות תוצאות עבור ערכים שונים של $(N_1)_{60}$, אך ניתן לראות שאין לכך השפעה רבה על התוצאות. (בעקבות Seed et al., 2003)

Idriss (1999) ניתח מחדש את הקשר בין מגניטודה לבין מספר מחזורי העמסה אקוויוולנטיים והציע בעקבות כך את משוואה 2.21 המופיעה אצל Idriss & Boulanger (2006) בסיכומם את השיטות השונות

$$MSF = 6.9 \cdot \exp\left(\frac{-M}{4}\right) - 0.058 \quad 2.21$$

כאשר M - מגניטודת רעידת האדמה הצפויה.

תרשים של המלצתם לעומת עבודות קודמות מוצג באיור 2.16:



איור 2.16: מקדם התאמה עבור מגניטודת רעידת אדמה, MSF . מוצגות תוצאות של חוקרים שונים עם התוצאות המומלצות של Idriss משנת 1999. (בעקבות Idriss & Boulanger 2006)

ניתן לראות כי ברעידת אדמה במגניטודה פחותה מ-5.25 כבר אין שינוי במקדם. הדבר נובע מכך שמקדם התיקון, MSF , תלוי במספר מחזורי הגזירה. מספר מחזורי הגזירה בעוצמה גבוהה לא יכול להיות פחות מ-1, כך שגם ברעידות חלשות המספר לא ישתנה.

2.2.3.6 מקדם תיקון עבור עומק קבורה גדול

השיטה המפושטת פותחה והתבססה על עומקים רדודים יחסית, עד עומק של 15 מ'. בעקבות ניסויי מעבדה התברר כי עם העלייה בלחץ המקיף ישנה ירידה בעמידות החול כנגד התנזלות, למרות שעלייה בלחץ המקיף מגדילה את הצפיפות, וכך, עקרונית, גם את העמידות כנגד התנזלות (Hynes et al., 1998). בהתייחסות לתופעה זו הוצע מקדם, K_σ , עבור יחס התנגדות מחזורי, CRR , להתאמת עומקי קבורה גדולים. Youd et al. (2001) סיכמו את הקורלציות השונות שהוצעו עד אז ואימצו את משוואה 2.22 התולה את מקדם ההתאמה עבור עומקי קבורה גדולים במאמץ האפקטיבי האנכי ובפרמטרים נוספים.

$$K_{\sigma} = \left(\frac{\sigma'_{v0}}{P_a} \right)^{(f-1)}$$

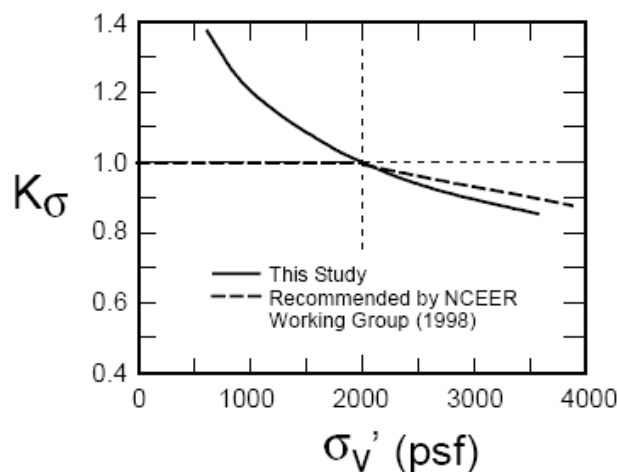
2.22

$$f = \begin{cases} 0.7 - 0.8 & \text{for } 40\% \leq D_r \leq 60\% \\ 0.6 - 0.7 & \text{for } 60\% \leq D_r \leq 80\% \end{cases}$$

כאשר P_a - לחץ של אטמוספירה אחת, ביחידות של המאמץ האפקטיבי ו- f - מקדם התלוי בגורמים שונים כגון צפיפות יחסית, היסטוריה סייסמית וגיל גאולוגי. במשוואה זו מוצג טווח ערכים לפי הצפיפות היחסית, D_r .

המשוואה נקבעה בעקבות ניסויי מעבדה בקרקעות של חול נקי, חול סילטי ואף חלוקים ומתאימה לשימוש בקרקעות אלה. הערכים מייצגים ערך מינימום שמרני.

Seed et al. (2003) ניתחו מחדש את הנתונים הקיימים והציעו מקדם די דומה שאינו מוגבל לערך 1 במקרים של מאמץ אפקטיבי אנכי נמוך, איור 2.17:



איור 2.17: מקדם התאמה עבור עומק קבורה גדול. עקב הסתמכות הקורלציות הקיימות על נתונים מעומק קבורה בו המאמץ האפקטיבי שווה ל-2000 psf מוצע תיקון גם לעומקים רדודים יותר. (Seed et al., 2003) (בעקבות 2003)

על פי המלצתם במקומות מעבר לגבולות התרשים, כאשר המאמץ האפקטיבי האנכי גדול מ-2 אטמוספרות, יש להשתמש בהמלצת קבוצת העבודה של NCEER (Seed et al., 2001).

Idriss & Boulanger (2006) תלו את מקדם ההתאמה במספר הקשות מנורמל מדיקת SPT בנוסף למאמץ האפקטיבי, והציעו את משוואה 2.23:

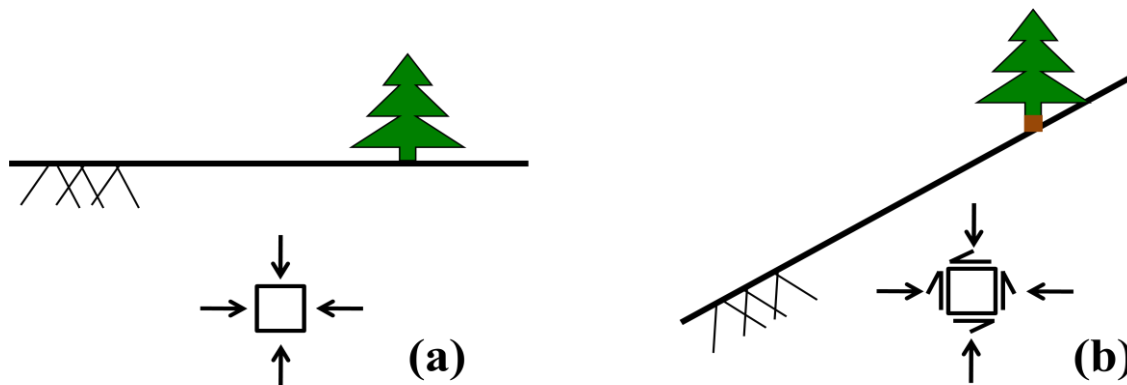
$$K_{\sigma} = 1 - C_{\sigma} \cdot \ln \left(\frac{\sigma'_{v0}}{P_a} \right) \leq 1$$

2.23

$$C_{\sigma} = \frac{1}{18.9 - 2.55 \cdot \sqrt{(N_1)_{60}}}$$

2.2.3.7 מקדם תיקון עבור קרקע במדרון

כאשר קרקע נמצאת במדרון כיוון המאמצים הראשיים איננו אנכי ואופקי, בכיוונים אלה יש מאמצי גזירה כמתואר באיור 2.18.



איור 2.18: מצב המאמצים הסטטיים במדרון לעומת מישור. במישור (a) המאמצים האופקיים הם המאמצים הראשיים בעוד במדרון (b) למאמץ האופקי הנורמלי מתלווה מאמץ גזירה

מאמצי גזירה סטטיים אלה יכולים להשפיע על תגובת הקרקע לגלי הגזירה ועל יצירת התנזלות (Youd et al., 2001). את מאמץ הגזירה הסטטי ניתן לנרמל במאמץ האפקטיבי האנכי ולקבל יחס מאמצים, $\alpha = \tau_{st}/\sigma'_{v0}$, ביחידות זהות ל-CSR. בעקבות יחס זה ניתן לקבוע מקדם תיקון K_α לקביעת יחס התנגדות מחזורי מתוקן CRR_α לפי משוואה 2.24:

$$CRR_\alpha = K_\alpha \cdot CRR \quad 2.24$$

Youd et al. (2001) לא הצליחו להגיע לדרך אמינה לחישוב המקדם על פי יחס מאמצי הגזירה הסטטיים, α , והמליצו להמשיך במחקר לחישוב מאמצים במדרון ולהבנת השפעתם על הקרקע. Idriss & Boulanger (2008) הציעו קורלציה מורכבת בין α ל- K_α המבוססת על פרמטר הקשור לצפיפות הקריטית של החול, פרמטר המצב היחסי המוגדר במשוואה 2.25:

$$\xi_R = D_{R,CS} - D_R \quad 2.25$$

כאשר ξ_R - פרמטר מצב יחסי, $D_{R,CS}$ - צפיפות יחסית של החול במצב קריטי ו- D_R - צפיפות יחסית של החול. את פרמטר המצב היחסי ניתן לחשב באמצעות גם באמצעות משוואה 2.26:

$$\xi_R = \frac{1}{Q - \ln\left(\frac{100(1+K_0)\sigma'_{v0}}{3P_a}\right)} - \sqrt{\frac{(N_1)_{60}}{46}} \quad 2.26$$

כאשר Q - פרמטר מינרלוגי של הגרגרים. למשל 10 בקוורץ או 8 באבן גיר.

מקדם התיקון ל-CRR מחושב במשוואה 27 :

$$K_\alpha = a + b \cdot \exp\left(\frac{-\xi_R}{c}\right)$$

$$a = 1267 + 636\alpha^2 - 634\exp(\alpha) - 632\exp(-\alpha)$$

$$b = \exp(-1.11 + 12.3\alpha^2 + 1.31 \cdot \ln(\alpha + 0.0001))$$

$$c = 0.138 + 0.126\alpha + 2.52\alpha^3$$

2.27

2.2.4 קרקעות טין וחרסית

תופעת ההתנזלות מתרחשת בקרקע חולית או קרקע חלוקים כאשר ישנו אחוז מסוים של דקים. גם בקרקעות המוגדרות כסילטיות או חרסיתיות עלולה להיגרם החלשות קרקע בעקבות רעידת אדמה אך תופעה זו איננה מוגדרת תמיד כהתנזלות. הקורלציה האמפירית של השיטה המפושטת המתוארת לעיל איננה עוסקת בקרקעות מסוג זה, ובקרקעות אלה יש צורך בבדיקות אחרות ישירות של חוזק הקרקע. בשיטות המתוארות בפרק זה לא תמיד ברורה ההבחנה בין סוגי הכשל השונים.

Wang (1979) הציג נתונים הכוללים גבולות אטרברג, לפי שיטת USGS, של קרקעות דקות גרגר שעברו התנזלות. Seed & Idriss (1982) התבססו על מקרים אלה והגדירו את הקריטריון הסיני לפיו קרקעות הנמצאות מעל ה-A-line בתרשים הפלסטיות עלולות להיות רגישות להתנזלות (או כשל קרקע בגזירה) כאשר הן מאופיינות ב:

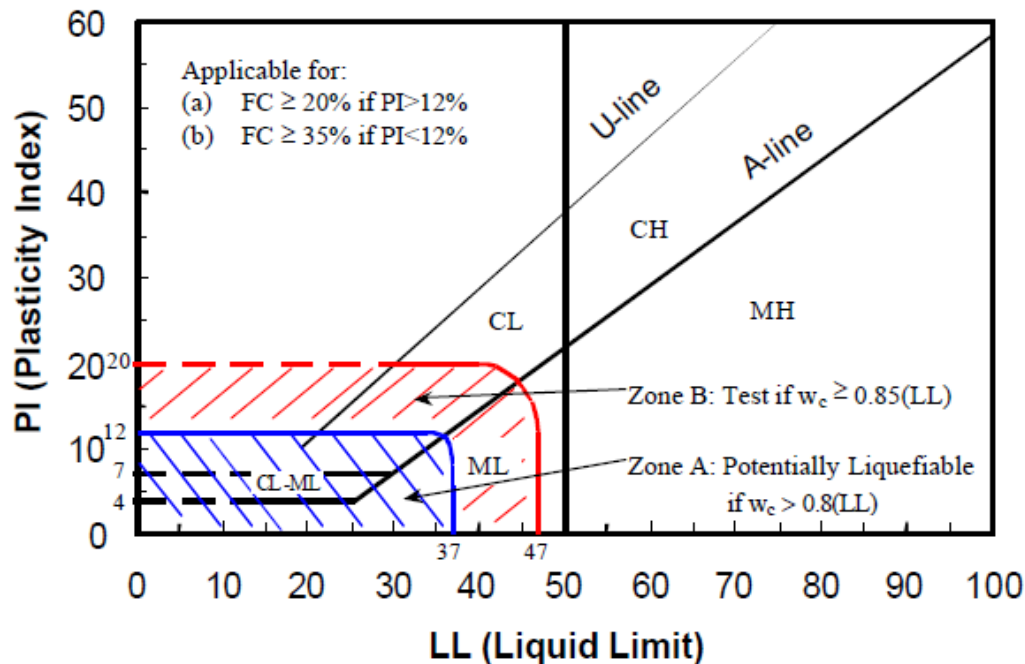
- אחוז דקים קטנים מ-0.005 מ"מ (גודל חרסית) קטן מ-15%
- גבול נזילות של $LL < 35$
- תכולת רטיבות של $w > 0.9LL$

במקרים אלה יש לערוך בדיקות מעבדה לקביעת פוטנציאל התנזלות. קרקעות בהן אחוז הדקים הקטנים מ-0.005 מ"מ גדול מ-20% אינן רגישות להתנזלות, אלא אם כן מדובר בחרסיות רגישות ביותר. קרקעות חרסיתיות בהן תכולת הרטיבות היא $w < 0.9LL$ אינן רגישות להתנזלות, גם אם מדובר בחרסית חולית.

Andrews & Martin (2000) ניתחו נתונים חדשים, עדכנו את השיטה בהתאם לבדיקות סטנדרטיות מקובלות בארה"ב, והציגו גבולות מעט שונים, אך לפי אותם הפרמטרים.

Seed et al. (2003) הראו בעקבות מחקרים שונים כי השיטה, כולל העדכוניים שנעשו בה עם השנים, איננה מתאימה לנתונים מרעידות אדמה חדשות. הם המליצו לזנוח אותה, בעיקר עקב חוסר ההשפעה של אחוז החרסיות לעומת המינרלוגיה המשפיעה על הפלסטיות. הצעתם מסתמכת גם היא על גבולות אטרברג, וכוללת שלושה אזורים שונים בתרשים הפלסטיות, איור 2.19.

באזור A נמצאות קרקעות העלולות לעבור התנזלות הניתנת לחיזוי בעזרת השיטה המפושטת. באזור B ישנו תחום מעבר. באזור C (השטח הלבן שלא נמצא ב-A או ב-B) נמצאות קרקעות שלא צפויות להיכשל בהתנזלות מהסוג הקלאסי, אך עלולות לעבור החלשת חוזק ואף לפתח לחץ מי נקבים שיגביר את הדפורמציה. כשל מסוג זה יש להעריך בבדיקות מעבדה מתאימות.



איור 2.19: דיאגרמת פלסטיות הכוללת 3 אזורי רגישות לכשל התנזלות בעת רעידת אדמה כתלות בתכולת הרכיבות, w_c , אזור A, כחול, בו הרגישות גבוהה יותר. אזור B, אדום, בו ישנה פחות רגישות. אזור C, לא צבוע, בו לא צפוי כשל מסוג התנזלות אך עלול להיות כשל אחר במנגנון דומה. (בעקבות Seed et al., 2003)

Bray & Sancio (2006) ערכו בדיקות מעבדה בדוגמאות קרקע בלתי מופרות באיכות גבוהה שנדגמו באתרים שונים בעיר אדפזרי לאחר רעידת האדמה בקוויאלי, טורקיה, (1999). בניתוח הבדיקות שללו גם הם את השימוש בקריטריון הסיני והציעו מודל דומה לזה של Seed et al., (2003). במודל זה ישנם שלושה תחומים לפי גבולות אטרברג. אזור א', אינדקס פלסטיות של $PI < 12$, ויחס תכולת רטיבות לפי גבולות אטרברג. $w_c/LL > 0.85$. באזור זה הקרקעות רגישות להתנזלות. אזור ב', אינדקס פלסטיות של $12 < PI < 18$, ויחס תכולת רטיבות לגבול נזילות של $w_c/LL > 0.8$. באזור זה הקרקעות רגישות להתנזלות באופן בינוני, ורק רעש חזק עם מספר מחזורי גזירה גדול יכול ליצור התנזלות. אזור ג', אינדקס פלסטיות של $PI > 18$, ויחס תכולת רטיבות לגבול נזילות של $w_c/LL < 0.8$. באזור זה לא צפויה התנזלות, אם כי גם במקרים בהם אינדקס הפלסטיות (PI) גדול מ-18 עלולה להיגרם החלשות קרקע כתוצאה מהעיבור בעת רעידת אדמה.

Boulabger & Idriss (2006) ניתחו את אופי יחסי עיבור-גזירה בקרקעות דקות גרגר בבדיקות מעבדה רבות וחילקו את תגובת קרקעות ברעידת אדמה לשני סוגים. סוג א', קרקע חולית, בה יכולה להתפתח התנזלות קלאסית אותה יש לבדוק בשיטה המפושטת המקובלת. סוג ב', קרקע חרסיתית, אותה יש לבדוק בבדיקות מעבדה להערכת החוזק בגזירה. ניתן לחלק את הקרקעות על פי גבולות אטרברג. בקרקעות עם אינדקס פלסטיות של $PI \geq 7$ צפויה תגובה של קרקע חרסיתית ויש להעריך את חוזק הקרקע בבדיקות מתאימות. בקרקעות מסוג CL-ML, על פי הגדרת USCS, יש להוריד את הסף לטווח של $PI \geq 5$. טווח הערכים של $PI = 3-6$ הוא תחום ביניים בו מומלץ לבדוק את הקרקע גם בבדיקות מעבדה מתאימות, בנוסף

לבדיקות in-situ של SPT או בדיקות דומות. כאשר אינדקס הפלסטיות נמוך יותר יש להתייחס לקרקע כחולית ולבדוק את סכנת ההתנזלות בשיטה המפושטת "הרגילה".
 Idriss & Boulanger (2008) הציעו מספר קורלציות בין פרמטרים של קרקע חרסיתית לבין יחס התנגדות מחזורי. משוואה 2.28 קושרת בין יחס טרום דחיסה לבין CRR

$$CRR_{M=7.5} = 0.80 \cdot S \cdot OCR^M \quad 2.28$$

כאשר $CRR_{M=7.5}$ - יחס התנגדות מחזורי ברעידה במגניטודה של 7.5 ו-S, m - מקדמים אמפיריים. בחרסיות הומוגניות ניתן להניח $m=0.8$, $S=0.22$, משוואה 2.29 קושרת בין חוזק הגזירה הלא מנוקז של הקרקע לבין יחס התנגדות מחזורי

$$CRR_{M=7.5} = 0.80 \frac{S_u}{\sigma'_{v0}} \quad 2.29$$

כאשר S_u - חוזק גזירה לא מנוקז כפי שנמדד בבדיקות שונות. את חוזק הגזירה הלא מנוקז ניתן לבדוק בבדיקות מעבדה או בבדיקות שדה, in-situ.

2.2.5 ניתוח הסתברותי

השיטה המפושטת בבסיסה הינה דטרמיניסטית. בהשוואת היחסים CSR ו-CRR ניתן לקבוע אם תהיה התנזלות או לא, או לקבוע מקדם בטחון. עם הזמן נעשה ניסיון להגדיר הסתברות להתרחשות התנזלות. לראשונה הוצע קריטריון הסתברותי על ידי Liao et al. (1988), כאשר Youd et al. (1997) הציעו משוואה (2.30) דומה לחישוב CRR עבור הסתברות מסוימת להתרחשות התנזלות לפי מגניטודת מומנט, מספר הקשות מנורמל ויחס CRR:

$$\ln(P_L/(1 - P_L)) = -7.0351 + 2.1738M_w - 0.2678(N_1)_{60cs} + 3.0265 \cdot \ln CSR \quad 2.30$$

כאשר P_L - ההסתברות שתתרחש התנזלות ו- $(1-P_L)$ - ההסתברות שלא תתרחש התנזלות משוואה זו מיועדת עבור רעידות במגניטודה של $M_w < 7.5$.
 Seed et al. (2003) עיבדו מחדש את כל הנתונים שהיו קיימים בהתאם לתיקונים שהציעו ופיתחו משוואה מעט מסובכת, 2.31, של פונקצית התפלגות מצטברת סטנדרטית המציגה את ההסתברות להתרחשות התנזלות כפונקציה של פרמטרים רבים כמו אחוז דקים, מגניטודה, מספר הקשות מנורמל ויחס CSR:

$$P_L = \Phi \left[\frac{(N_1)_{60} \cdot (1 + 0.004FC) - 13.32 \cdot \ln(CSR) - 29.53 \cdot \ln(M_w) - 3.70 \cdot \ln(\sigma'_{v0}) + 0.05FC + 44.97}{2.7} \right] \quad 2.31$$

ניתן גם להציג את המשוואה ההופכית, 2.32, לחישוב ישיר של יחס CRR עבור הסתברות מסוימת להתרחשות התנזלות:

$$CRR = \exp \left[\frac{(N_1)_{60} \cdot (1 + 0.004FC) - 29.53 \cdot \ln(M_w) - 3.70 \cdot \ln(\sigma'_v) + 0.05FC + 44.97 + 2.7 \cdot \Phi^{-1}(P_L)}{13.32} \right] \quad 2.32$$

כאשר P_L – ההסתברות שתרחש התנזלות, Φ – פונקצית התפלגות מצטברת נורמלית ו- Φ^{-1} – הפונקציה ההופכית להתפלגות מצטברת סטנדרטית.

3 רקע גיאולוגי

אגן ים המלח התפתח לאורך העתקי טרנספורם ים המלח מזמן המיוקן ועד ההווה (Garfunkel et al., 1981 והפניות נוספות שם). באגן זה הצטברו משקעים בעובי ניכר מתצורת חצבה, ובעיקר אוופוריטים וקלסטים השייכים לחבורת ים המלח ובהן תצורות סדום, עמורה-סמרה, תצורת הלשון (ליסאן) וצאלים. התצורות השונות שקעו בגופי מים מלוחים בעלי השתרעות שונה לאורך הזמן.

תצורת סדום מגיל פלייוקן – פליסטוקן, מורכבת בעיקר מאבפוריטים, שכבות מלח עבות, אנהדריט, גבס ודולומיט. קיימות גם מספר שכבות קלסטיות קטנות. התצורה נחשפת בעיקר בהר סדום (זק, 1967).

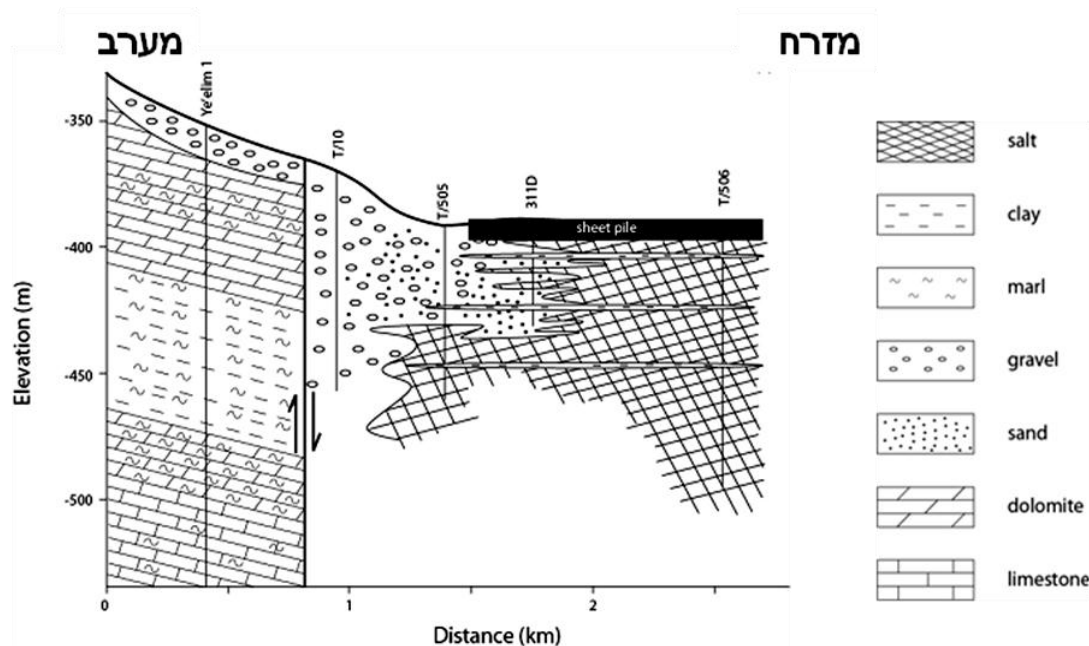
תצורת עמורה מגיל פלייסטוקן, מורכבת מחואר, אנהדריט וגבס ומקלסטים דקים או גסים. התצורה נחשפת גם היא בהר סדום, כמו גם באתרים אחרים במקומות בהם מצוק ההעתקים רחוק מקו החוף (Kaufman et al., 1992). "תצורת" סמרה היא הפרט העליון בתצורת עמורה (ברטוב, 1999).

תצורת הלשון מגיל פליסטוקן, מורכבת בעיקר מחואר, אך גם מגבס וקלסטים דקים או גסים. התצורה נחשפת לאורך כל חופי ים המלח (Begin et al., 1974).

תצורת צאלים מגיל הולוקן מורכבת בעיקר מקלסטים דקים או גסים ששקעו באגם הדומה לים המלח (Yechieli, 1993). עקב ירידת המפלס הדרמטית של ים המלח בשנים האחרונות התצורה נחשפת לאורך כל חופי ים מלח בשטחים שהתייבשו.

התצורות שחשופות כיום בפני השטח לאורך חופי ים המלח הן בעיקר תצורת הלשון וצאלים, הן קיימות גם בתת הקרקע הרדוד ובהן נבדק החשש ההתנזלות. במקומות מועטים, כגון במישור מצדה, ישנה גם הופעה מצומצמת של הפרט העליון בתצורת עמורה-סמרה.

תצורות אלה שקעו באי התאמה על גבי התצורות שקדמו להן בזמן (ברטוב, 1999). בחלק המערבי, קרוב למצוק ההעתקים, שקעו היחידות הללו גם על גבי סלעים קרבונטים מחבורת יהודה (רוח יותר בתצורת הלשון). במספר מקומות מציבים העתקים נורמליים מאוחרים תצורות אלה מול הסלעים הקרבונטים של חבורת יהודה (גרדוש, 1987). דוגמא ליחסי שדה אלה מוצגת באיור 3.1 (בעקבות שלו וחובי, 2005) בעזרת חתך רוחב סכמטי בכיוון מזרח-מערב בנחל יעלים, באגן הדרומי של ים המלח. החתך נעשה על סמך קידוחים במקום והוא כולל את תצורות הלשון וצאלים ממזרח להעתק. ניתן להבחין בחילופין של חול וחלוקים עם חרסיות הניצבים מול סלעים קרבונטים כשהעתק מפריד ביניהם (ישנה גם הופעה נרחבת של מלח).



איור 3.1: חתך סכמטי של שפך נחל יעלים לים המלח בקצה הצפוני של בריכות האידוי (בעקבות שלו וחבריו, 2005)

3.1 סטרטיגרפיה מפורטת של התצורות הצעירות

3.1.1 תצורת הלשון

תצורת הלשון (ליסאן) הושקעה בפליסטוקן המאוחר, 70,000 עד 15,000 שנים לפני ההווה (Kaufman, 1971; Haase-Schrammet al., 2004). התצורה מונחת באי התאמה על גבי תצורת עמורה-סמרה. עובי התצורה לאורך החוף מגיע לכ-35 מ' ובתוך האגן אף יותר, למשל בקידוח בחצי האי ליסאן הגיע העובי ל-145 מ' (ברטוב, 1999).

בתצורת הלשון ישנם שני פציאסים עיקריים: אגמי ושוליים:

הפציאס האגמי (איור 3.2 לדוגמא) שקע במרכז אגם הלשון. ההרכב העיקרי הוא חילופי למינות דקות של ארגוניט ודטריטוס בגודל סילט וחרסית, וכמו כן ישנה הופעה של מספר שכבות גבס. הפציאס האגמי שקע גם קרוב לחוף באזורים בהם אנרגיית הזרם נמוכה. החילופין העדינים בין למינות בהירות של ארגוניט לבין למינות כהות של דטריטוס מייצגים שינויים עונתיים בין משקעי קיץ אבפוריטיים לבין משקעי חורף קלסטיים (Begin et al., 1974).

פציאס השוליים (איור 3.3 לדוגמא) שקע בעיקר במניפות סחף בשולי האגם. פציאס זה מורכב מקלסטים בגדלים שונים, מסילט וחול ועד בולדרים בגודל 1 מ' ויותר מעורבים בבוצ. ישנם גם מספר רכסי חוף עם חלוקים השייכים לפציאס זה, ומעידים על מיקום מפלס האגם הקדום. פציאס זה יתואר בהמשך גם כפציאס מניפות הסחף.



איור 3.2: מחשוף של הפציאס האגמי בתצורת הלשון, מישור מצדה



איור 3.3: – מחשוף של פציאס השוליים בתצורת הלשון, מישור מצדה

3.1.2 תצורת צאלים

תצורה זו הצטברה בטווח הזמן של 10,000 השנים האחרונות בגוף מים דומה לים המלח הנוכחי (Yechieli, 1993), באי התאמה על גבי תצורת הלשון. בתת הקרקע קיימות בבסיס התצורה שכבת מלח, מסיבית ברובה, המגיעה לעובי של כ-20 מ', וגבול ההשתרעות שלה נמצא מערבה מקו החוף הנוכחי. שכבות מלח אלה נמצאו קשורות בתהליך יצירת בולענים (וקס וחובריו, 2000).

תצורת צאלים ניתנת גם היא לחלוקה לפציאס אגמי ופציאס שוליים.

הפציאס האגמי (איור 3.4 לדוגמא) שקע במרכז האגם, או בשוליים בחופים שקטים, מורכב מדטריטוס חום, אפור ושחור בגודל חרסית וסילט עם הופעה מקומית של למינות דקות של ארגוניט בהירה. כמו כן ישנן בחתך מעט שכבות מלח דקות.



איור 3.4: מחשוף של הפציאס האגמי בתצורת צאלים, נחל חבר

פציאס השוליים (איור 3.5 לדוגמא) שקע בשולי האגם, במניפות סחף ואף ברכסי חוף. מורכב מקלסטים בגודל משתנה מסילט וחול ועד בולדרים. ההפרדה בין הפציאסים השונים אינה מוחלטת והם אף מופיעים ביחסי אצבוע במקומות רבים.



איור 3.5: מחשוף של פציאס השוליים בתצורת צאלים, נחל דוד

4 שיטות מחקר

4.1 הערכה רגיונלית

הערכה רגיונלית של סיכון התנזלות של חוף ים המלח המערבי נעשתה לכל אורכו לצורך יצירת מפת סיכון שתשמש לתכנון עתידי של פיתוח באזור ים המלח. ההערכה הרגיונלית ממוקדת בסינון ראשוני של האזורים בהם קיימת אפשרות להתרחשות התנזלות. הגדרת אזורים אלה היא של "אזור בו נדרשת חקירה מתקדמת לבחינת פוטנציאל התנזלות". ההערכה נעשתה בהיבט גיאולוגי, סיסמולוגי והדרולוגי. גבולות הסקר הם ים המלח עצמו ממזרח, או קו הגבול עם ירדן. ממערב נתחם הסקר בסלעים הקשים של מצוק ההעתקים. מצפון ומדרום ממשיך הסקר קילומטרים ספורים מקו החוף.

4.1.1 הערכה גיאולוגית

במסגרת הערכה זו נערכו סיורים רגליים לאורך חופי ים המלח להבנת החתך הגאולוגי ופיזור היחידות השונות. בנוסף, לצורך הכרת תת הקרקע, נסקרו קידוחים שנעשו באזור. נסקרו קידוחים שבוצעו על ידי המכון הגאולוגי במסגרת פרויקט הבולענים וקידוחים הנדסיים שונים. מפות גיאולוגיות שימשו גם הן ככלי לבחינת השתרעות התצורות השונות. בשלב זה הוגדרו היחידות בהן יכולה להתרחש התנזלות.

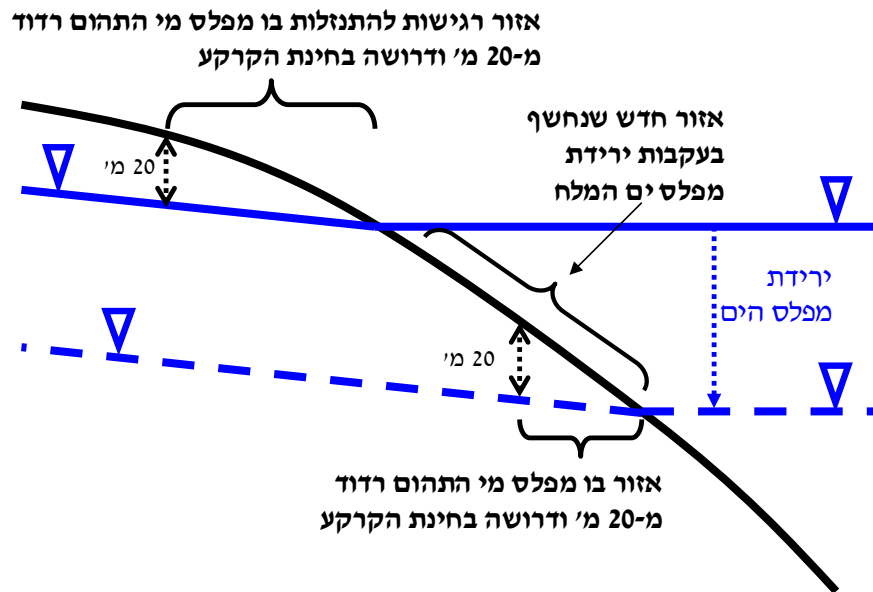
4.1.2 הערכה סיסמית

בהערכה זו נבחנו תאוצות קרקע אפשריות באזור על פי פרסום המכון הגאופיסי לת"י 413, ופיזור רעידות אדמה היסטוריות ובעת האחרונה לפי הערכות שונות. בהתאם לכך נקבע אזור הסיכון לפי מרחק ממוקדי רעידות.

4.1.3 הערכה הדרולוגית

חישוב של מפלס מי התהום באזור נעשה לפי גרדיינט קבוע של 0.05 קרוב לחוף ו-0.007 רחוק יותר באקוויפר המקומי בהתבסס על ערכים דומים בעבודות קודמות (פרק 5.2.1). נבחנה התאמה למפלס מי התהום המדוד בקידוחים המנוטרים על ידי המכון הגאולוגי. הניתוח נעשה בממ"ג (GIS) מסוג ArcView של חברת ESRI, גרסה 9.1.

העומק למפלס מי התהום חושב בממ"ג לפי שכבת ראסטר של פני שטח הטופוגרפיים (Hall, 1993). מתוך ההנחה שהתנזלות לא תתרחש בדרך כלל מעבר לעומק של 20 מ' ומתנאי הסף שהתנזלות מתרחשת בקרקעות רוויות חושבו בממ"ג האזורים בהם עומק מפלס מי התהום מפני השטח רדוד מ-20 מ' לאיתור האזור בו קיים תנאי סף להתנזלות כמתואר באיור 4.1. באגן הצפוני של ים המלח ישנה ירידה מהירה של מפלס מי הים ובעקבות כך משתנה גם האזור בו מפלס מי התהום רדוד מ-20 מ' כמתואר באיור 4.1. בעבודה זו נעשה החישוב לפי המפלס ב-17.01.2005 עקב ריבוי של נתוני מדידת מפלס מים בקידוחים באותו תאריך.



איור 4.1: שינוי מפלס ים המלח והשפעתו על מפלס מי התהום בחוף

4.2 הערכה מקומית גיאוטכנית

בנוסף להערכה הרגיונלית נעשו בדיקות גיאוטכניות וגיאופיסיות בשני קידוחים באתרים שונים בחוף ים המלח המערבי. הקידוחים נעשו במקומו המייצגים את חתך תת הקרקע של חופי ים המלח באזורי רגישות גבוהה לפי ההערכה הרגיונלית. קידוח אחד נעשה במניפת הסחף של נחל בוקק, ליד מלוונות עין בוקק ב-נ.צ. 567970 234630 ברשת ישראל החדשה. קידוח זה נעשה בחתך קרקע המכיל קלסטים מגודל בוך ועד בולדרים. קידוח שני נעשה בחוף מינרל, סמוך למצפה שלם ב-נ.צ. 606400 237920 ברשת ישראל החדשה. קידוח זה נעשה בשולי מניפת הסחף של נחל חצצון, אך כאן אחוז הדקים גבוה הרבה יותר, ובקלסטים הגסים יש בעיקר חלוקים. בשני הקידוחים נערכו בדיקות שדה in-situ, ובדוגמאות קרקע שהוצאו מתוך הקידוח נערכו בדיקות מעבדה.

4.2.1 בדיקות שדה

4.2.1.1 SPT

מבחן החדרה סטנדרטי, Standard Penetration Test - SPT, נערך במהלך הקידוחים בשני האתרים. הבדיקה נעשתה לפי תקן ASTM D-1586 האמריקאי משנת 1994. בבדיקה זו מונח צינור דגימה סטנדרטי בתחתית קידוח בעומק אותו רוצים לדגום. הצינור בקוטר פנימי של 3.8 ס"מ, קוטר חיצוני של 5.08 ס"מ ובאורך של 78 ס"מ. אל הצינור חוברו מוטות הארכה ואליהם הוצמד סדן הבולט מפני השטח. על הסדן נפל בנפילה חופשית פטיש מסוג Donut במשקל של 63 ק"ג מגובה של 76 ס"מ. הפטיש הופעל במערכת של נפילה לאורך מוט.



איור 4.2: ציוד בדיקת SPT. למעלה הפטיש, הסדן והמוט שלאורכו נופל הפטיש. למטה צינור הבדיקה לאחר פתיחתו עם דוגמת חומר מתוך חור הקידוח

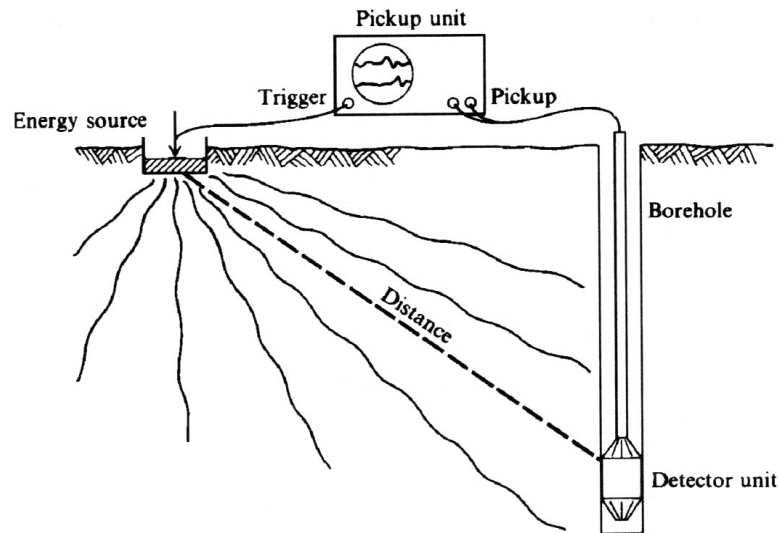
באיור 4.2 ניתן לראות את הפטיש עם המוט לאורכו הוא נופל יחד עם צינור הדגימה. מיקום הצינור מסומן וסופרים את מספר ההקשות הנדרש להחדרת הצינור בשלשה מקטעים רצופים של 15 ס"מ. המקטע הראשון נדרש לייצוב צינור הדגימה ומספר ההקשות המשמש לקורלציה הוא מספר ההקשות הנדרש להחדרת 30 הס"מ האחרונים. האנרגיה בנפילת הפטיש, E_{in} , המשמשת להחדרת צינור הדגימה ניתנת לחישוב במשוואה 4.1:

$$E_{in} = m \cdot g \cdot h = 63.5_{kg} \cdot 9.81_{m/sec^2} \cdot 0.76_m = 473.4_{Joul} \quad 4.1$$

כאשר m - משקל הפטיש, g - תאוצת הכובד ו- h - גובה הנפילה. התיקונים השונים להערכת האנרגיה המתקבלת בפועל ולתנאי הבדיקה השונים נעשו לפי הטבלה של קבוצת NCEER (Youd et al., 2001), טבלה 2.3. עדכונים נוספים לתיקונים חושבו בהתאם למחקרים מאוחרים יותר (Seed et al., 2003, Idriss & Boulanger, 2008). לאחר כל בדיקה נפתח צינור הדגימה (הצינור מתפצל לאורכו לשניים) ודוגמאות הקרקע נלקחו לבדיקות מעבדה. דוגמאות באורך מדוד נלקחו להערכת צפיפות הקרקע. מספר ההקשות המנורמל בבדיקת SPT משמש להגדרת יחס התנגדות מחזורי, CRR.

4.2.1.2 מהירות גלים סיסמיים

מדידת מהירות הגלים הסיסמיים בקרקע נערכה בקידוחים בשיטת Down-Hole לפי תקן ASTM D-7400. המדידות נעשו על ידי צוות המכון הגיאופיזי בראשות ד"ר מיכאל יזרסקי (Ezersky, 2011). בשיטה זו גיאופון מונח בתוך חור קידוח בעומק מסוים ומוצמד לקירות הקידוח. בנקודה קרובה לקידוח מפעילים מקור אנרגיה, על ידי מכה בפטיש. אנרגיית ההקשה הופכת לגלים סיסמיים המתפזרים בקרקע ונקלטים על ידי הגיאופון. הגלים הנקלטים הם גלי לחיצה, V_p , המגיעים ראשונים וגלי גזירה, V_s . הגיאופון מחובר למקלט הרושם את זמן יצירת הגל ואת זמן הגעתו אל הגיאופון.



(b) Down-hole method with test at some depth z_i .

איור 4.3: חתך סכמטי של מדידת מהירות גלים סיסמיים בשיטת DownHole. דרך הגלים ממקור האנרגיה אל הגאופון בקידוח מסומנת בקו שבור. (בעקבות Bowels, 1997)

באיור 4.3 ניתן לראות חתך סכמטי של קידוח במדידת Down-Hole יחד עם ציוד הדגימה. מקור האנרגיה מפזר גלים סיסמיים לכל המרחב, אך דרך הגלים אל הגאופון מסומנת בקו ישר. מהירות הגל מחושבת לפי משוואה 4.2:

$$V_{s/p} = \frac{D_H}{T_H} \quad 4.2$$

כאשר $V_{s/p}$ - מהירות גלים סיסמיים, גלי לחץ, p , או גלי גזירה, s . D_H - המרחק שעוברים הגלים בדרך לגאופון. T_H - הזמן שחולף בין ההקשה, יצירת הגלים, לבין הקליטה בגאופון תהליך זה נשנה מספר פעמים כאשר בכל פעם הגאופון ממוקם בטווח של 1 מ' מנקודת המדידה הקודמת. עיבוד של מהירות הגלים בכל אחד מהאלכסונים של הדרך אל הגאופון מאפשר יצירת פרופיל מהירות גלי גזירה וגלי לחיצה בחתך הקרקע הסמוך לקידוח. גלי הגזירה משמשים לחישוב מודול הגזירה לפי משוואה 4.3:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad 4.3$$

כאשר V_s - מהירות גלי גזירה, G - מודול הגזירה של הקרקע ו- ρ - צפיפות הקרקע. מודול הגזירה משמש בניית תגובת האתר בתוכנת SHAKE. מהירות גלי הגזירה משמשת גם להערכה של יחס ההתנגדות המחזורי, CRR. בנוסף למדידת מהירות הגלים בקידוח נעשה קו רפרקציה סיסמית לתיאור חתך תת הקרקע וקביעת יחידות שונות, בעיקר שכבות המלח.

4.2.2 בדיקות מעבדה

4.2.2.1 משקל מרחבי ותכולת רטיבות

לבדיקת המשקל המרחבי נלקחו דוגמאות בנפח מדוד מתוך צינור המדגם בבדיקת SPT. הדוגמאות נאטמות מיד עם הוצאתן מן הצינור לקביעת המשקל המרחבי בתכולת הרטיבות המקורית. המשקל המרחבי משמש להערכת המאמץ האפקטיבי בכל נקודה בחתך. המאמץ האפקטיבי משמש לצורך נירמול וחישובים שונים בשיטה המפושטת (Simplified Procedure), כמו גם חישובים בתוכנת ניתוח אתר SHAKE. הדוגמאות נשקלו והמשקל המרחבי חושב לפי משוואה 4.4:

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad 4.4$$

כאשר γ - משקל מרחבי, W - משקל הדוגמה (מסה*תאוצת הכובד - $m \cdot g$) ו- V - נפח הדוגמה כפי שנמדד בשדה לפני ההוצאה מצינור הדגימה. לאחר השקילה נשטפו הדוגמאות במים מזוקקים כדי למנוע התגבשות מלח בזמן הייבוש בתנור. יצירת גבישי מלח כולאת מי חללים בקרקע ומונעת אפשרות למדידה מדויקת של משקל דוגמה יבשה (Frydman et al., 2008). הדוגמאות נשטפו עד שבמי השטיפה נמדדה צפיפות של מים מתוקים. השטיפה נעשתה במשפך עם נייר סינון, איור 4.4, או על ידי השריית דוגמת הקרקע במיכל מים מתוקים. בהשרייה במים מתוקים, לאחר ערבוב והמתנה שדוגמת הקרקע תשקע בתחתית הכלי, נשאבו המים מלמעלה באמצעות סיפון (גישתה). לאחר מכן הוכנסו מים נוספים לכלי והתהליך חזר עד שמי השרייה הראו צפיפות של מים מתוקים.

לאחר מכן יובשו הדוגמאות בתנור בחום של 105°C למשך 24 שעות. בתום הייבוש נשקלו שוב הדוגמאות לקביעת תכולת הרטיבות לפי משוואה 4.5:

$$\omega_{\%} = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100 = \frac{W_t - W_s}{W_s} \cdot 100 \quad 4.5$$

כאשר $\omega_{\%}$ - תכולת רטיבות באחוזים, W_w - משקל מי הנקבים בדוגמה, W_s - משקל המוצקים בדוגמה - משקל הדוגמה לאחר הייבוש ו- W_t - משקל הדוגמה הטוטאלי בתכולת הרטיבות המקורית.



איור 4.4: שטיפת דוגמאות במשפך. נייר סינון מונח בתחתית המשפך ומשאבה שואבת את המים בעוד הדוגמה נשארת במשפך.

4.2.2.2 מיון קרקע

מיון הקרקע בוצע לפי שיטת המיון האחידה, (Unified Soil Classification System) USCS, ובהתאם לתקן ASTM D-2487 האמריקאי. בשיטה זו נערך דירוג גודל גרגר בקרקע במערכת נפות, ובפרקציה הדקה נקבעים גבולות אטרברג. המיון נעשה בדוגמאות הקרקע שיצאו בבדיקות SPT. בשלב הראשון אופיינה כל דוגמה באופן ויזואלי. לאחר שטיפה (מתוארת בבדיקת תכולת רטיבות) הדוגמה יובשה בתנור למשך 24 שעות בחום של 105°C . החומר המיובש נשקל ולאחר מכן נשטף חלק מהחומר דרך נפה #200 (גודל של 0.075 מ"מ). החומר שנשאר על הנפה יובש שוב באותו אופן בתנור ונשקל בשנית. אחוז הדקים נקבע על ידי משוואה 4.6:

$$FC = \frac{W_t - W_{\#200}}{W_t} \cdot 100 \quad 4.6$$

כאשר FC - Fines Content, אחוז הדקים - אחוז הגרגרים הקטנים מ-0.075 מ"מ, W_t - משקל הדוגמה לפני הניפוי ו- $W_{\#200}$ - משקל החומר הנשאר בנפה #200 לאחר הניפוי, גדול מ-0.075 מ"מ. שארית הדוגמה עם גרגרים גדולים מ-0.075 מ"מ מועברת במערכת נפות סטנדרטית. הנפות מוצבות במתקן תנודה עד להתפלגות הגרגרים בנפות השונות. משקל החומר שנותר על כל נפה נשקל ואחוז הגודל נקבע בדומה לקביעת אחוז הדקים.

מדוגמת הקרקע השטופה נלקח חלק נוסף לקביעת גבולות אטרברג לפי תקן ASTM D-4318. גבולות אלה הותאמו על ידי Casagrande להגדרת גבולות הסומך של קרקעות (Bowels & Guo, 1996). בגבולות אלה נקבעת תכולת הרטיבות בה הקרקע הופכת להיות פלסטית, וכן גם תכולת הרטיבות בה הקרקע הופכת לנוזלית. גבולות הסומך מושפעים מהפרקציה העוברת נפה #40, קטנה מ-0.425 מ"מ. חלק הדוגמה המיועד לבדיקת גבולות הועבר דרך נפה #40. חלק מהפרקציה העוברת נפה #40 מרטיבים ומגלגלים בידיים לצורות צינור ארוך בקוטר של 3 מ"מ. התהליך נשנה באותו חומר עד שבקוטר זה ה"צינור" התחיל להתפורר. שלב זה מוגדר כגבול הפלסטיות, PL, והדוגמה נשקלה, יובשה בתנור, ונשקלה שוב לקביעת תכולת הרטיבות בהתאם למשוואה 4.5. באיור 4.5 ניתן לראות דוגמת קרקע בצורת צינור ולאחר שהתפוררה.



איור 4.5: בדיקת גבול פלסטיות. ה"צינור" מגולגל בלחיצה עדינה עד שהוא מתפרק למספר חלקים.

חלק נוסף מהפרקציה העוברת נפה #40 נלקח לצורך בדיקת גבול הנזילות, LL. הדוגמה הורטבה והונחה במכשיר תקני למדידת גבול הנזילות. כאשר הדוגמה מונחת בתוך קערה קטנה במתקן נעשה חריץ בדוגמה בעזרת חורץ תיקני. בשלב זה מקישים בקערה במתקן בקצב קבוע ומוודדים את מספר ההקשות הדרוש לסגירת החריץ. התהליך נשנה מספר פעמים בערכים שונים של תכולת רטיבות. תוצאות הבדיקות הושלכו בגרף חצי לוגריתמי של תכולת רטיבות כנגד log מספר ההקשות. קו התאמה לינארי הותאם עבור התוצאות, ותכולת הרטיבות המתאימה ל-25 הקשות היא גבול הנזילות, LL. אינדקס הפלסטיות חושב לפי משוואה 4.7:

$$PI = PL - LL \quad 4.7$$

כאשר PI - Plasticity Index, אינדקס הפלסטיות, PL - Plastic Limit, גבול פלסטיות ו-LL - Liquid Limit, גבול הנזילות. באיור 4.6 ניתן לראות את ציוד הבדיקה לגבול נזילות.



איור 4.6: בדיקת גבול נזילות. הדוגמה נחרצה למעלה בחורץ. לאחר מספר הקשות החריץ נסגר לאורך של כ-13 מ"מ, למטה.

4.2.3 ניתוח תגובת אתר

ניתוח תגובת אתר של שני אתרי הקידוחים נעשה בתוכנת SHAKE2000. התוכנה, שפותחה במקור על ידי Schnabel (1972), מדמה מעבר של גלים סיסמיים בתווך ויסקו-אלסטי (נספח). בעזרת פונקציית מעבר בקרקע משוכבת אופקית מתקבלת התזוזה האופקית של הקרקע ברעידת אדמה, וממנה מחושב מאמץ הגזירה בכל שכבה ותאוצת הקרקע.

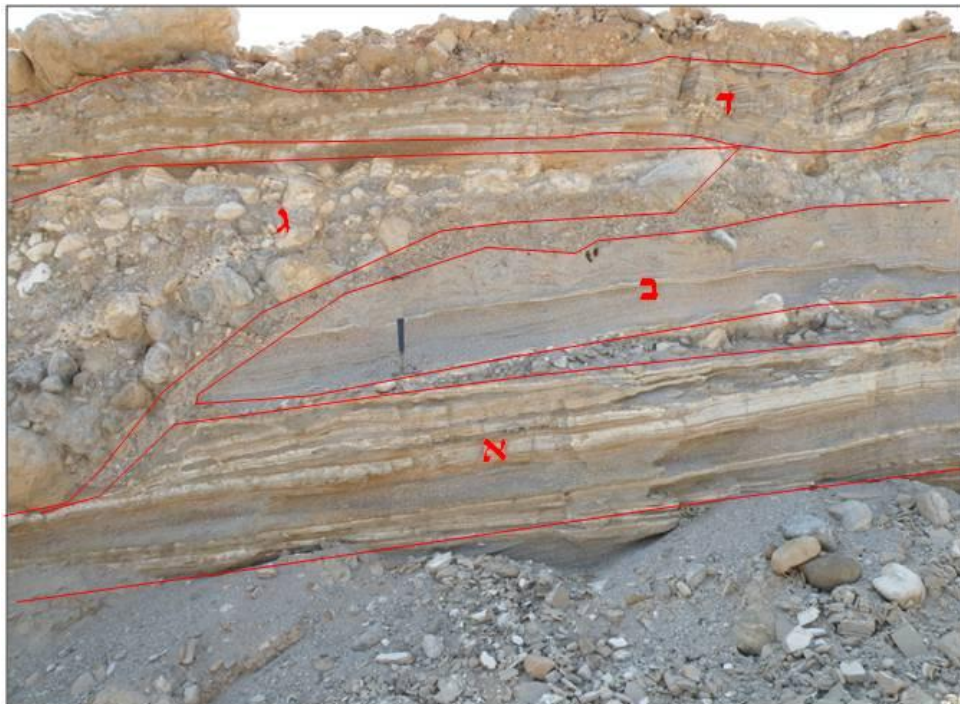
הניתוח בעבודה זו נעשה לפי רשומת תאוצה (אקסלרוגרמה) של רעידת האדמה בנואייבה ב-1995 ולפי רשומות תאוצה של רעידות שונות ברחבי העולם בעלי אופי דומה של Strike-Slip. בניתוח מתקבלת תאוצת הקרקע המקסימלית, a_{max} , בכל שכבה בקרקע ממנה אפשר לחשב ישירות את יחס המאמצים המחזורי CSR.

5 תוצאות – הערכה רגיונלית

5.1 הערכה גיאולוגית

הניסיון מאירועי התנזלות ברחבי העולם מלמד כי התופעה מתרחשת בקרקעות חוליות בעלות אחוז דקים משתנה, לרוב נמוך (Seed & Idriss 1982). עקב כך באזור ים המלח קרקעות העלולות להיות רגישות להתנזלות יהיו בפצאס השוליים של תצורות הלשון וצאלים, בעיקר במניפות סחף קדומות שהתקיימו בזמן השקעת התצורה. הסבירות להתנזלות במשקע כזה, על פי המוצג בטבלה 2.1 היא בינונית כאשר המשקע צעיר מ-500 שנים ונמוכה כאשר המשקע הוא מגיל הולוקן או פלייסטוקן מאוחר, גיל תצורות צאלים והלשון. בפצאס האגמי יש בעיקר טין וחרסיות קוהזיביים הנחשבים ללא רגישים להתנזלות. תצורת צאלים, מגיל הולוקן, הצעירה יותר תהיה רגישה יותר (בפצאס המתאים) מתצורת הלשון מגיל פלייסטוקן.

בפועל, הופעת הפצאס המגוונת והחילופים המהירים בין סוגי החומר במרחב האנכי והאופקי מקשים על הערכה פשוטה של הסיכון. באיור 5.1 ניתן לראות שינויים בין הפצאסים השונים במחשוף בתצורת צאלים. בתחתית התמונה, בשכבה א, מבחינים בפצאס האגמי עם שכבות של בוץ דטריטי ואף הופעה נרחבת מהרגיל של למינות ארגוניט לבנות; במרכז התמונה, אזור ב, ישנה הופעה של פצאס השוליים המיוצג על ידי חול; משמאל, באזור א, נראית שכבה של פצאס השוליים הגודעת את שתי השכבות הקודמות, כאשר הפעם הגודל הוא חלוקים עד בולדרים. למעלה, אזור ד, שוב ישנה הופעה של הפצאס האגמי עם שכבות בוץ ולמינות ארגוניט. תמונה זו ממחישה את הקושי במיפוי מדויק של גבולות ההשתרעות של הפצאסים השונים, ועל כן יש להסתפק במיפוי כללי של מניפות הסחף.



איור 5.1: מחשוף מעורב בתצורת הלשון, נחל קדם

תצורות הלשון וצאלים קרובות להווה, סוף הפלייסטוקן עד ההולוקן, כך שתואי הנחלים בהם הושקעו מניפות הסחף דומה לנחלים שנשפכים כיום לים המלח. נתון זה מאפשר למפות את אזורי מניפות הסחף העכשוויות כאזורים החשודים בהמצאות פציאס השוליים של מניפות הסחף בתת הקרקע. אזורים אלה יהיו בעלי סבירות גבוהה יותר להתנזלות.

המיפוי נעשה באמצעות תצלומי אויר מיושרים (אורטופוטו) בממ"ג. מכיוון שגבולות הפציאסים בתת הקרקע משוערים, הוכללו באזורים המועדים גם שטחים סמוכים בהם לא זורם הנחל כיום אך ניתן לשער שזרם בהם בתקופות קדומות יותר.

השפעה נוספת על הרכב החומר של מניפות הסחף היא מרחק המניפה ממצוק ההעתקים. הסלעים הקשים מחבורת יהודה במצוק ההעתקים ובמדבר יהודה הם הספקים העיקריים של ה"חומר" הקלסטי בנחלים. באופן צפוי, ככל שמניפת הסחף רחוקה יותר ממקור החומר מתקבל חתך עם גודל גרגר קטן יותר. במניפות הסחף הקרובות למצוק ההעתקים, כמו בנחל דוד, ישנה הופעה מרובה של חלוקים גדולים ועד בולדרים. במניפות סחף רחוקות יותר, כגון בנחל צאלים, גודל הגרגר קטן יותר, בעיקר חול. תופעה זו מתגלית גם בהשוואת חתכי קידוחים שונים שחדרו את אותה מניפת סחף במרחקים שונים ממצוק ההעתקים. בניגוד למקובל בעבר, כיום מניחים שגם קרקעות המכילות חלוקים עלולות להתנזל (Youd, 2001). עקב כך מופו כל מניפות הסחף באופן זהה, ללא התחשבות במרחקן ממצוק ההעתקים.

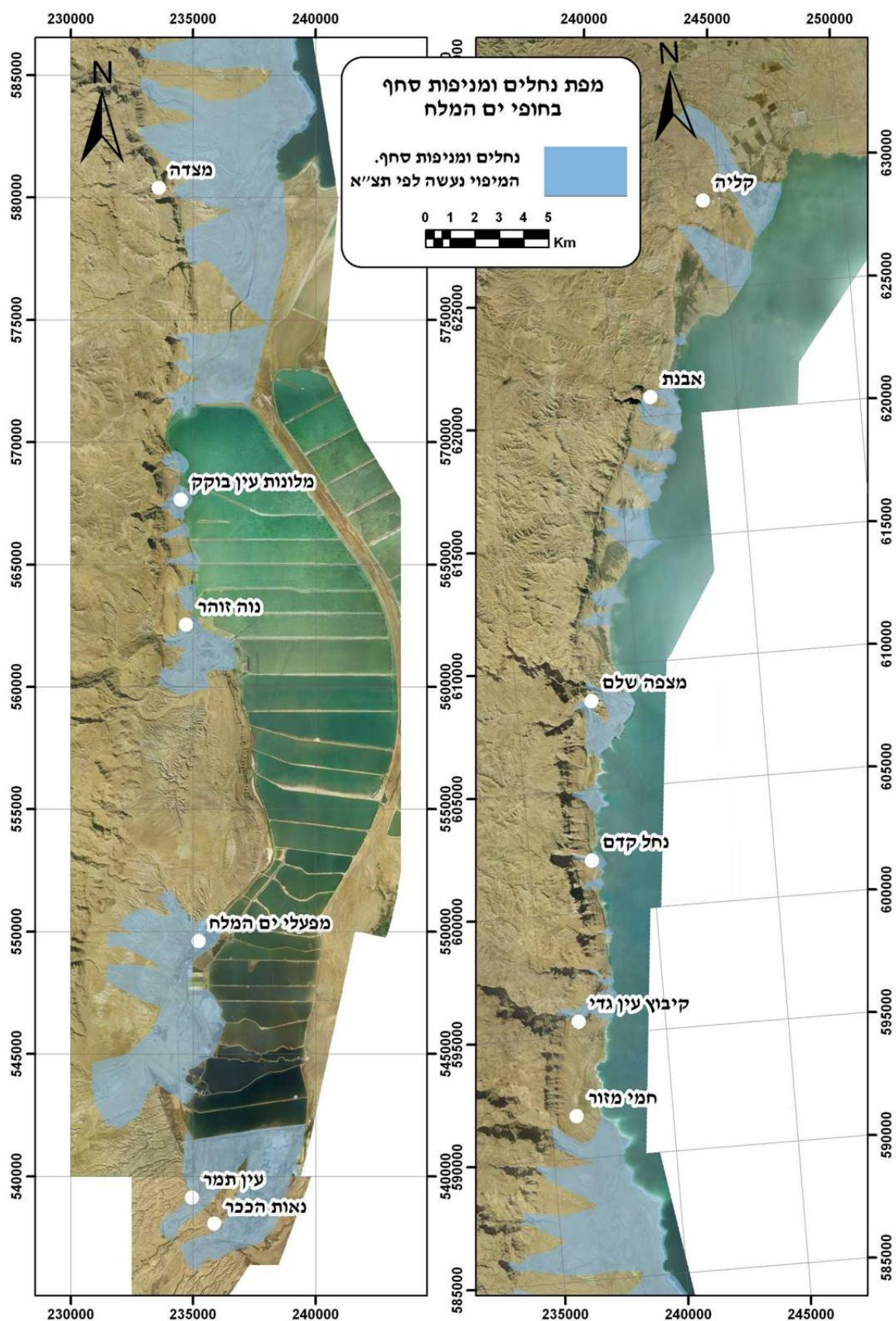
באיור 5.3 ניתן לראות את מפת מניפות הסחף העיקריות. במפה סומנו מניפות הסחף והנחלים העכשוויים ממזרח למצוק ההעתקים. כאמור, האזור המסומן חורג במעט מתחומי המניפות הנוכחיות מכיוון שבתת הקרקע השתרעות מניפות הסחף עלולה להיות מעט שונה. מאחר שהמיפוי נעשה בעיקר לפי תצלומי אויר, והמעברים בין הפציאסים השונים חריפים על פני טווחים קצרים, יתכנו אי דיוקים במיפוי תפוצת מניפות הסחף. משום כך יתכנו הופעות של הפציאס האגמי באזור מניפות הסחף, ובמקביל, באזורים שאינם קרובים למניפות סחף ניתן למצוא לעיתים גם יחידות מפציאס השוליים של המשקע האגמי.

5.2 הערכה הידרולוגית

5.2.1 רקע

בסביבות ים המלח קיימים שלשה אקוויפרים עיקריים. אקוויפר חבורת כורנוב ואקוויפר חבורת יהודה בסלעים הקשים לאורך שדרת ההר, ואקוויפר האלוביום בסדימנטים הרכים הממלאים את הבקע (קירו, 2007). אקוויפר האלוביום בחופי ים המלח מנקז את מי התהום של אקוויפר חבורת יהודה לכיוון ים המלח.

מפלס ים המלח משתנה בקצב מהיר מאוד בעשרות השנים האחרונות. באגן העמוק של ים המלח הצפוני מפלס הים צונח בקצב של למעלה מ-1 מ' לשנה (יחיאלי ושל, 2008). האגן הדרומי הרדוד מנוצל על ידי מפעלי ים המלח, ומורכב למעשה מברכות אידיי גדולות בהן נשמר עומק מים אחיד. עקב שקיעת מלחים לא מנוצלים בברכות, עולה מפלס המים בהתמדה אך בקצב איטי יותר של כ-20 ס"מ לשנה (יחיאלי וחוברי, 2007).



איור 5.2: מפה של מניפות הסחף ונחלים רצנטיים. המפה נעשתה על גבי תצ"א – אורתופוטו – בתוכנת GIS

מי התהום באקוויפר האלוביום עוקבים אחר השינויים במפלס הים. ניטור מפלס מי התהום בקידוחים באזור בשנים האחרונות מלמד שירידת המפלס בקידוחים דומה לירידה במפלס ים המלח, אם כי הקצב מעט נמוך יותר. לעומת זאת, קידוחים ליד האגן הדרומי לא הראו ירידת מפלס ולעיתים אף עלייה הדומה בכמות ובקצב לעלייה במפלס בריכות האידוי (יחיאלי וחובריו, 2007).

באזורים מסוימים בארץ, כגון במישור החוף, קיימים קידוחי מים רבים המנוטרים באופן קבוע כך שניתן ליצור מפה של מפלס מי התהום המיוצג בקידוחים. המפה הינה מפה "טופוגרפית" המציינת את הגובה של מפלס מי התהום מעל פני הים. בעזרת מפות דומות חושבו אזורים במישור החוף בהם מפלס מי התהום רדוד מספיק עד לדרישה לבדוק סכנה להתנזלות (סלמון וחובריו, 2008). חוף ים המלח, לעומת זאת, הוא ארוך וצר, ובו מספר מצומצם של קידוחים שאינו מספיק ליצירת מפה אמינה של מפלס מי התהום לאורך החוף.

הפתרון שנהגה היה יצירת מפה משוערת של מפלס מי התהום שמרני בעזרת חישוב (בממ"ג) של גרדיינט הידראולי קבוע. על פי חישובים של גובה מפלס מי תהום בקידוחים לעומת מרחק הקידוחים מקו החוף, מוערך הגרדיינט ההידראולי באקוויפר האלוביום ב-0.002-0.007. בקרבת החוף הגרדיינט גדול יותר בסדר גודל (Yechieli, 2000 ; קירן, 2007). חישוב זה של הגרדיינט נעשה לפי מדידה של מפלס מי התהום במספר קידוחים, בעיקר באזור עין גדי. בפועל הגרדיינט נחל ערוגות קרוב יותר לטווח הנמוך, 0.002. במרחק של כמה עשרות מטרים מהחוף הגרדיינט גדול יותר. לעומת זאת באזורים שאינם בערוץ נחל וחתך תת הקרקע חרסיתי יותר נשמר בדרך כלל מפלס גבוה יותר והגרדיינט גדול יותר.

5.2.2 מפת מפלס ממוחשבת

5.2.2.1 מפלס מי התהום באגן הצפוני

הקו המייצג את חוף ים המלח חושב בממ"ג לפי ראסטר של פני השטח הטופוגרפיים מעל פני הים (Hall, 1993). החישוב מתייחס למפלס ים המלח בתאריך 17.01.2005 אשר היה באותה העת בגובה של 417.6- מ' מפני הים. נוח היה להתייחס לתאריך זה בשל ריבוי נתונים של מדידות מפלס בקידוחים באותו היום. עקב מגבלות הדיוק של קובץ הראסטר, קו החוף המחושב חורג לעיתים מקו החוף הנראה בתצלומי אוויר מיושרים (אורתופוטו), אך נמצא שהחריגות מעטות ולא משמעותיות.

מפלס מי התהום המייצג של אקוויפר האלוביום חושב כמשטח אחיד שתחילתו בקו החוף של ים המלח והמשכו בשיפוע קבוע מערבה, ללא התחשבות בתנאי השטח. בקרבת קו החוף חושב המפלס על פי גרדיינט הידראולי של 0.05 ומערבה יותר, במרחק של כ-200 מ', על פי גרדיינט של 0.007. גרדיינט זה גבוה, לעיתים משמעותית, מהגרדיינט הקיים אך עקב חוסר הוודאות הגדול במיפוי לאורך כל קו החוף ננקטה גישה שמרנית.

בשלב הבא חושב העומק מפני השטח, המיוצגים בשכבת ראסטר, למפלס מי התהום. על פי ההנחה שהעומק המקסימלי של מפלס מי התהום מפני השטח בו תתכן התנזלות הוא 20 מ' (Parish, 2008) חושבו בממ"ג האזורים בהם מפלס מי התהום רדוד מ-20 מ', וסומנו כאזור נפרד בו דרושה חקירה לשלילת סכנת התנזלות.

השוואה של מפה זו עם עומק המפלס בקידוחים קיימים המנוטרים על ידי המכון הגיאולוגי העלתה שקיימת ביניהם התאמה די טובה (איורים 5.3-5.5). הסטייה לא עולה על מטרים ספורים ובדרך כלל הינה שמרנית, המפלס המדוד עמוק מהמחושב.

כאמור, השיטה בה נערכה מפת עומק למפלס הנוכחית מתייחסת למי התהום כאל אקוויפר אחיד ויחיד. למעשה ישנן עדויות לתת-אקוויפרים שונים (אם כי אקוויפרים כלואים) הנבדלים לעיתים גם במליחות המים (יחיאלי ושל 2008). לפיכך בעת תכנון עתידי יש לשלול את קיומם של אקוויפרים נוספים, כגון אקוויפרים שעונים הפורצים לעיתים במעינות.

עקב ירידת המפלס המהירה באגן הצפוני נסוג קו החוף מזרחה ושטחים חדשים שאינם מצוינים במפה נחשפים. מפלס מי התהום משתנה יחד עם מפלס הים כך שהאזור בו מפלס מי התהום רדוד נע מזרחה גם הוא יחד עם קו החוף (איור 4.1). שינוי מתמיד זה הופך כל מפה של האזור הרדוד למפה זמנית הנכונה למפלס מסוים בזמן נתון. כתוצאה מכך מוצע להתייחס לכל השטח החדש שנחשף כאזור בו מפלס מי התהום רדוד מ-20 מ'. האזור המסומן במפה כאזור מפלס רדוד הופך בחלקו לאזור "בטוח" בו מפלס מי התהום עמוק מ-20 מ', אך במפה יישאר כאזור סיכון תוך נקיטת גישה שמרנית כאשר ירידת המפלס אינה ודאית דיה באזור זה.

5.2.2.2 מפלס מי התהום באגן הדרומי

האגן הדרומי של ים המלח מורכב למעשה מברכות אידי מוקפות סוללות. ברכות האידי קולטות בקרקעיתן את המלחים השוקעים תוך כדי תהליך האידי ובתוך כך הולכות ומתמלאות. בכדי לשמור על הקיבולת הנחוצה של הברכות בתהליך הפקת המלחים, מגביהים את הסוללות שמסביבן ועקב כך גם עולה מפלס המים שבתוכן. עלייה זו גוררת גם עליה במפלס מי התהום שסביב לברכות (יחיאלי וחוברי, 2007).

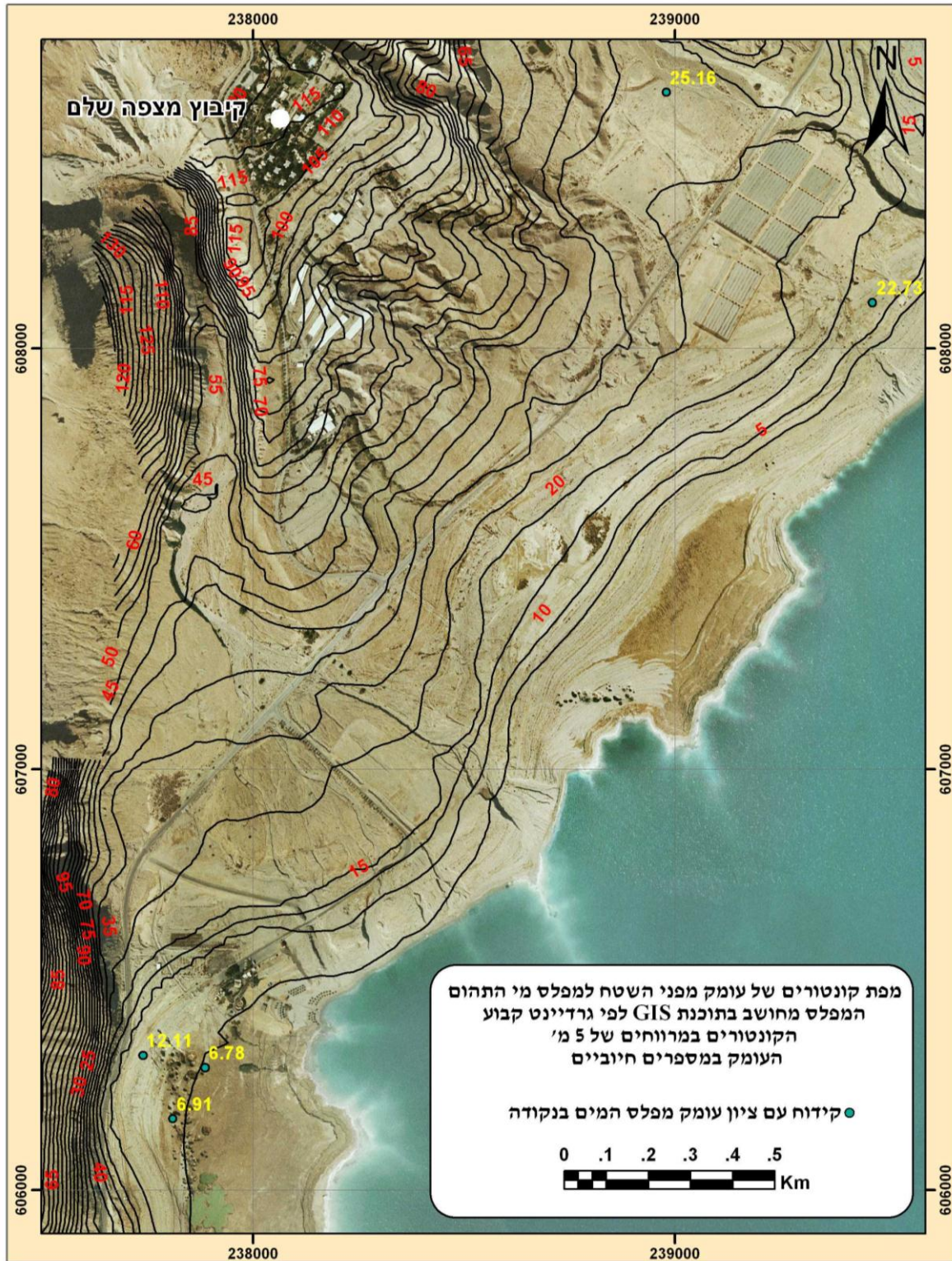
במקרה של עליית המפלס באגן הדרומי, גם כאשר קו החוף נשאר קבוע עם הגבהת הסוללות מפלס מי התהום הקרוב לחוף עולה. במקרה זה מתרחב האזור בו מפלס מי התהום רדוד מעבר לתחום המסומן במפה כאזור בטוח בו מפלס מי התהום עמוק מ-20 מ'. לשם כך נבחר מראש עומק סף של 25 מ' שיכלול את השטח בו מפלס מי התהום יכול להגיע לעומק 20 מ' לאחר עליית מפלס.

חשוב לציין כי בקרבת האגן הדרומי של ים המלח מצויים בתי מלון ותשתיות בעין בוקק ובנווה זוהר קרוב לחוף, למעשה לאורך ברכות האידי הסמוכות. במציאות זו יש חשש לנזק משמעותי למבנים ולתשתיות במקום כתוצאה מעליית המפלס, לא כל שכן במקרה של רעידת אדמה. בעת האחרונה נבחנות תכניות שונות לטיפול בבריכות האידי כדי להקטין את קצב עליית המפלס, ועדיין לא ברור כיצד יושפע מכך קצב עליית מפלס מי התהום בעתיד.

בקרבת הר סדום ונאות הכיכר מצויות בריכות אידי חדשות יותר החורגות בחלקן מתחומי ים המלח ההיסטורי. קרקעית בריכות אלה גבוהה יותר וכך גם מפלס המים בבריכות. לצורך הערכה שמרנית הנחנו כי גם בחוף הסמוך לבריכות אלה מפלס מי התהום עולה בשיפוע קבוע בשיעור דומה לחופי בריכות האידי הצפוניות יותר. בשל השינויים בגובה פני המים בברכות האידי השונות, חולק קו החוף באזור זה למקטעים שונים והמפלס המשוער של מי התהום שם חושב בהתאם למפלס הברכה המוערך.

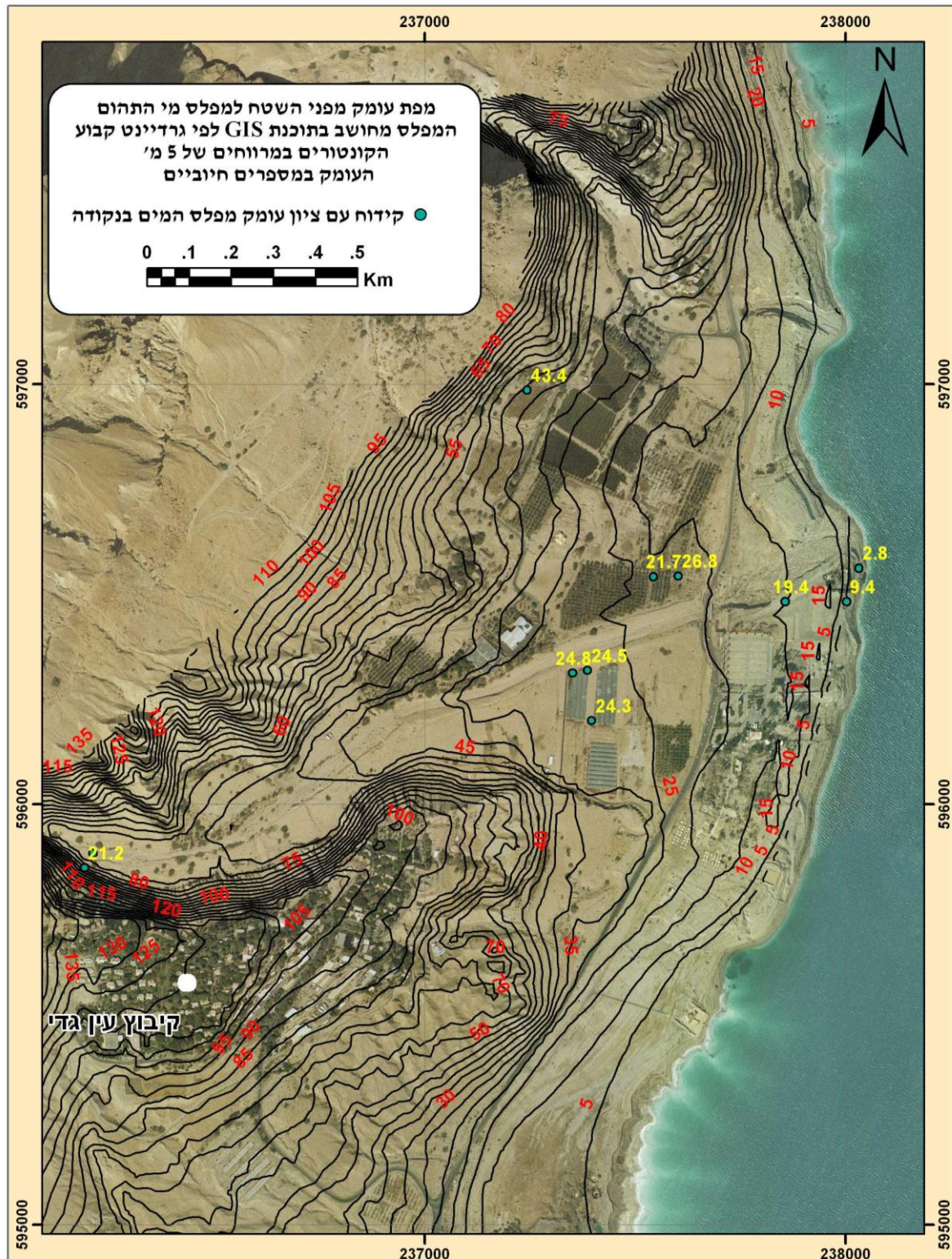
באיורים 5.3-5.5 ניתן לראות את מפות העומק של מפלס מי התהום מפני השטח. במפה מוצגים גם קידוחים ובהם העומק מפני השטח למפלס המים שנמדד בקידוח ב-17.01.2005. מפלס זה מייצג את מפלס מי התהום במקום. ניתן לראות כי בדרך כלל מפלס מי התהום המצוין בקידוחים עמוק יותר מהמפלס המחושב במפה, ובאופן כזה החישוב הינו שמרני דיו.

מפת עומק מפני השטח למפלס מי התהום



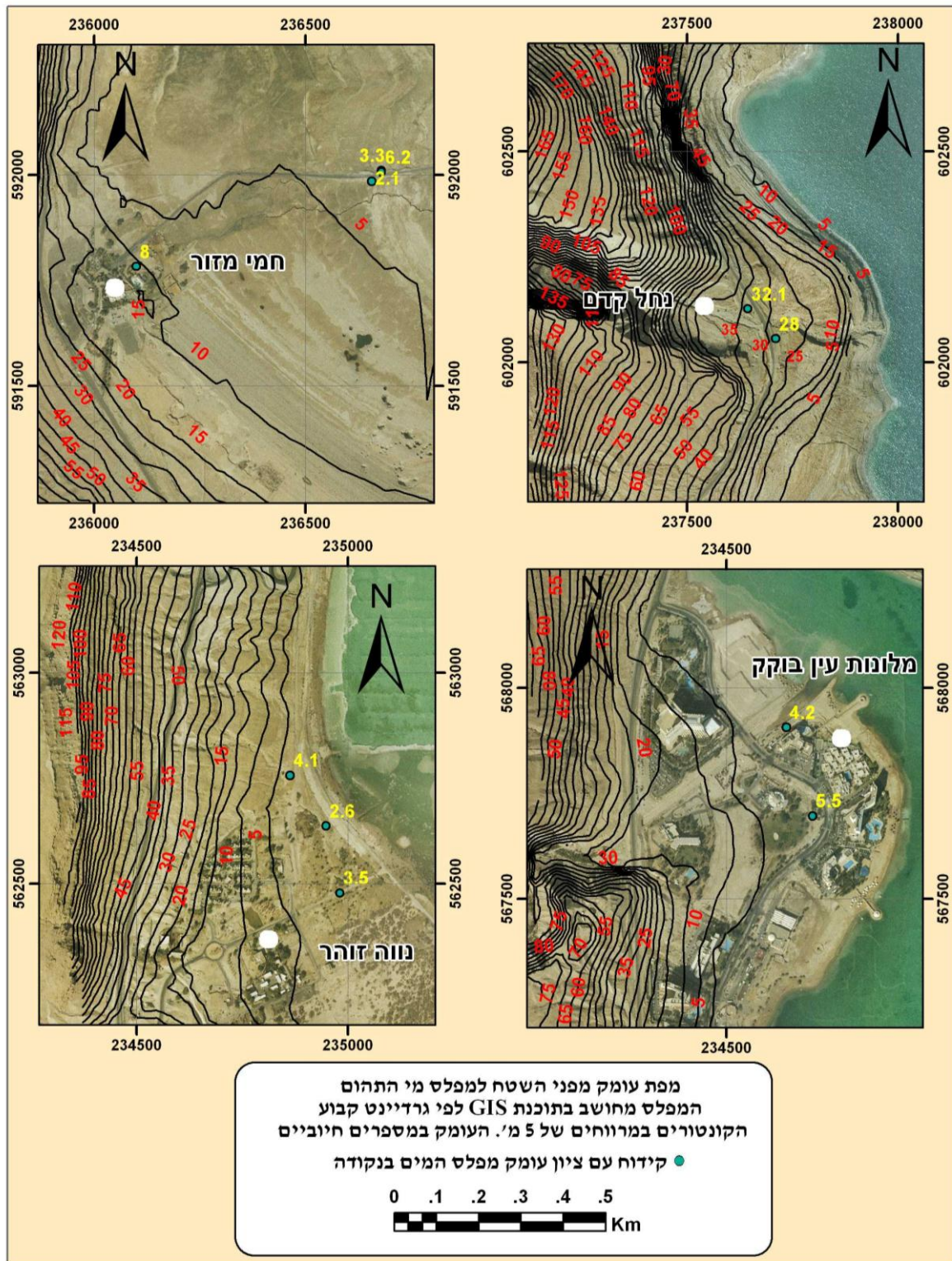
איור 5.3: מפת העומק למפלס מי התהום באזור קיבוץ מצפה שלם וחוף מינרל. קיימת התאמה די טובה בין עומק המים המחושב לעומק המדוד בקידוחים.

מפת עומק מפני השטח למפלס מי התהום



איור 5.4: מפת העומק למפלס מי התהום באזור עין גדי. ההתאמה בין עומק המפלס המחושב למדוד בדרך כלל די טובה למעט קידוח אחד מצפון מערב לקיבוץ עין גדי.

מפת עומק מפני השטח למפלס מי התהום



איור 5.5: מפת העומק למפלס מי התהום בארבעה אזורים שונים. נחל קדם וחמי מזור באגן הצפוני. עין בוקק ונווה זוהר באגן הדרומי.

חריגה מסוימת ניכרת באזור עין גדי (איור 4.4). בשני הקידוחים המצויים מצפון מערב לקיבוץ מפלס מי התהום המצוין בקידוח רדוד בהרבה מהמחושב. חריגה זו יש לתלות בכך שהקידוחים עצמם ממוקמים בקרקעית ערוץ נחל ערוגות, קרוב לסכר תת קרקעי שמשמש את שאיבת מי התהום באזור. יתכן שהמפלס במקום מושפע מזרימת שיטפונות שנחל כך שניתן לראות בו חריגה מקומית (יחיאלי וחובריו, 2007). יחד עם זאת המפלס המדוד באתר נמצא בטווח הבטוח, עמוק מעט מ-20 מ'.

5.2.2.3 מפלס מי התהום באזור הביניים

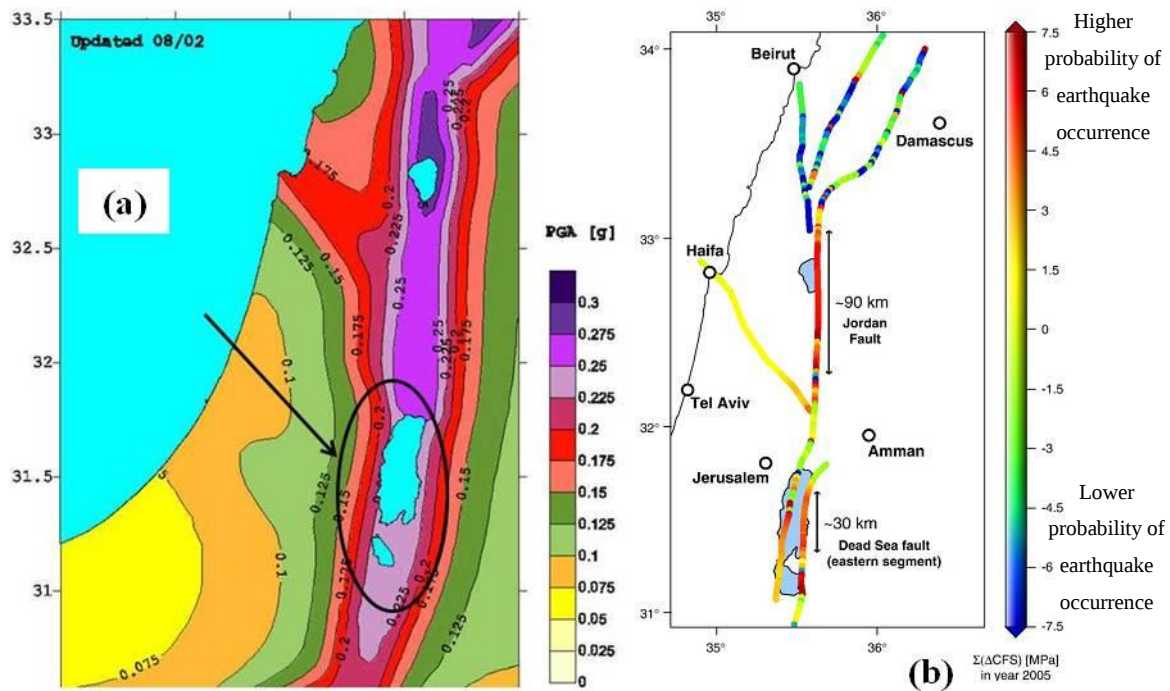
באזור המעבר שבין האגן הדרומי לאגן הצפוני, מול חצי האי לשעבר, הלשון, ים המלח התייבש ולא "שוחזר" בבריכות אידוי. במקום זה אין קו חוף ויש הבדל במשטר מי התהום בין הקצה הגובל באגן הדרומי לבין הקצה הגובל באגן הצפוני. כתוצאה מכך, קשה להעריך את מפלס מי התהום שם. בהתאם לגישה השמרנית הנהוגה בעבודה זו, הוערך מפלס מי התהום על פי הנתון באגן הדרומי והחישוב נעשה בהנחה שהאזור מוצף על לגובה 390- מ' הוא גובה המים בבריכות האידוי הדרומיות. האזור ה"מוצף" נחשב גם הוא לתחום בו מי התהום רדודים.

5.3 הערכה סיסמית

באגן ים המלח עובר טרנספורם ים המלח המהווה גבול לוחות פעיל (Garfunkel, 1981) שייצר בעבר רעידות אדמה רבות וחזקות ואף צפוי להמשיך בכך בעתיד. בעבר הקרוב, 1927, אירעה רעידת אדמה חזקה באזור ים המלח במגניטודה של $M_s=6.2$ (Ben-Menahem et al., 1976, Shapira et al., 1993). רעידות אדמה חזקות נוספות התחוללו לאורך טרנספורם ים המלח בעבר ההיסטורי, ואף בעבר הפרה-היסטורי (בגין, 2005 והפניות נוספות שם). בעקבות כך נערכו מחקרים להערכת הסיכון הסיסמי באזורינו (Shapira et al., 2007). באיור 5.6(a) מוצגת מפת המקדמים הסיסמיים לת"י 413 לעמידות מבנים לרעידות אדמה (בהסתברות השגה של 10% ל-50 שנה), וניתן לראות שאזור ים המלח חשוף לתאוצות קרקע גבוהות של $0.25 - 0.2$ g. ערכים אלה מותאמים לצפוי בסלע קשה ובסדימנטים רכים עוד צפויה הגברה של תאוצות הקרקע. תאוצות בסדר גודל שכזה מספיקות דיין ליצור התנזלות (Youd 2003).

Heidbach & Ben-Avraham (2007) ערכו ניתוח של שחרור והצטברות מאמצים בעקבות רעידות אדמה היסטוריות לאורך טרנספורם ים המלח וההעתקים הנלווים אליו. ניתוח זה העלה כי שני מקטעים של טרנספורם ים המלח מועדים כעת לרעידת אדמה. להערכתם, במקטע שבאזור הכנרת צפויה רעידה במגניטודה של 7.4 בעוד שבמקטע במזרח ים המלח צפויה רעידת אדמה במגניטודה של 6.8. ניתוח הרעידות הצפויות נובע ממצב המאמצים הנוכחי. אם אחת הרעידות תתרחש ישתנה מצב המאמצים ויהיה צורך בניתוח מחודש, כך שהתחזית צופה שאחת משתי הרעידות תתרחש. איור 5.6(b) מציג את הסבירות לרעידת אדמה חזקה לאורך טרנספורם ים המלח לפי Heidbach & Ben-Avraham (2007). אמנם בסיס הנתונים של רעידות אדמה היסטוריות בו הם השתמשו אינו מדויק ושנוי במחלוקת, אך יש בכך כדי להעריך את טווח מגניטודות סביר. במקרה של רעידת אדמה בחלקו המזרחי של ים המלח המרחק של חופי ים המלח המערביים מהמוקד יהיה פחות מ-20 ק"מ.

הערכת פוטנציאל ההתנזלות בחוף ים המלח המערבי-סקירה רגיונלית וניתוח גיאוטכני של שני קידוחים/אלחן לבנה



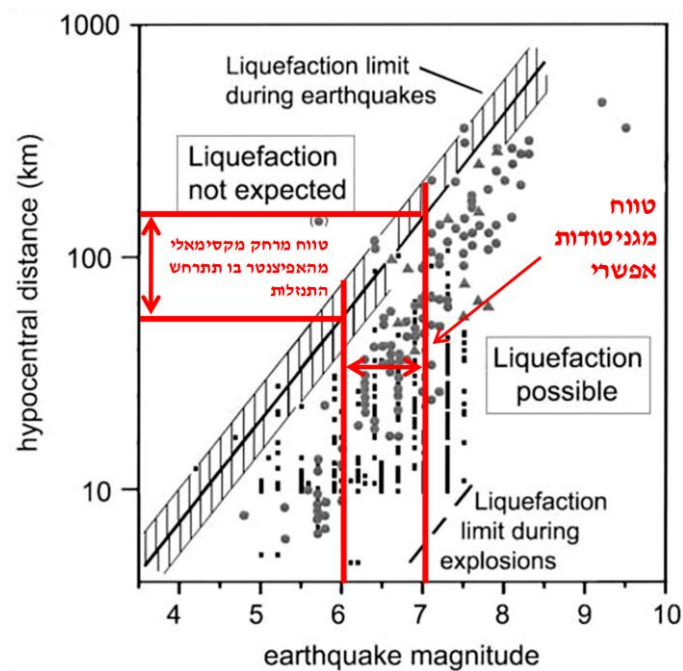
איור 5.6: (a) מפת מקדמים סיסמיים לתקן ישראלי 413 לעמידות מבנים ברעידת אדמה. מעודכן ל-2002 מאתר

המכון הגיאופיזי <http://www.gii.co.il>. המקדמים הסיסמיים מותאמים לסלע. באגן ים המלח בו חתך

סדימנטים עבה צפויה הגברה משמעותית

(b) מפת הסתברות להתרחשות רעידת אדמה בסגמנטים של טרנספורם ים המלח המבוססת על ניתוח הצטברות

מאמצים בעקבות רעידות אדמה חזקות קודמות (בעקבות (Heidbach & Ben-Avraham, 2007)



איור 5.7: מרחק סף אמפירי מאפיצנטר הנדרש ליצירת התנזלות. בטווח המגניטודות הצפוי בים המלח התנזלות

יכולה להתרחש גם במרחק של 100 ק"מ, הרחק מעבר לחופי ים המלח (בעקבות (Wang, 2007)

באיור 5.7 ניתן לראות את האפשרות ליצירת התנזלות בהתאם למגניטודת הרעידה ולמרחק מהמוקד שלה על פי Wang (2007). בהסתמך על רעידות האדמה ההיסטוריות באזור ים המלח ובהתאם להערכות בדבר רעידת אדמה עתידית שם, נבחן טווח מגניטודות של 6 – 7 ונמצא שחופי ים המלח אכן נמצאים בטווח בו צפויה התנזלות. גם רעידות אדמה חזקות מספיק באזור הכנרת עלולות לגרום להתנזלות בחופי ים המלח, לפחות בחלקו הצפוני. ברעידות אדמה חלשות יותר המתרחשות באגן ים המלח קיים עדיין טווח סכנה באזורים קרובים לרעידה

5.4 מפת סיכון מסכמת

שילוב של מפת תפוצת הקרקעות העלולות להיות רגישות להתנזלות עם מפות העומק למפלס מאפשר ליצור מפת סיכון כללית לחופי ים המלח תוך הצלבת נתונים בממ"ג. מפת המשקעים הרגילים כוללת שני מופעים. האחד של מניפות סחף של נחלים המתנקזים לאגן, והשני של משקעי אגם בשוליו. מפת העומק למפלס חולקה לשני אזורים. באחד מפלס מי התהום המחושב עמוק מ-20 מ', ובשני המפלס רדוד יותר. חישוב זה נעשה באגן הצפוני. באגן הדרומי נקבע עומק סף של 25 מ', תוספת של 5 מ' כמקדם ביטחון כנגד עליית מפלס עתידית. לגבי תאוצות הקרקע החזויות ניתן להעריך שהסיכון זהה וקיים לכל אורך חופי ים המלח.

בהצלבה של מפת תפוצת הקרקעות עם מפת העומק למפלס מתקבלים ארבעה אזורי רגישות שונים (טבלה 5) אותם ניתן לדרג באופן יחסי, מהאזור בו הסבירות להתנזלות היא הגדולה ביותר (1) לאזור בו הסבירות הנמוכה ביותר (4). להלן הגדרת אזורי הרגישות:

מופע מניפות סחף	מופע משקעי אגם
מפלס מי תהום רדוד מ-20 מ'	1
מפלס מי תהום עמוק מ-20 מ'	3
	2
	4

טבלה 1.5 - אזורי הרגישות להתנזלות בהתאם להצלבה של תפוצת המשקעים לאורך חופי ים המלח עם העומק למפלס מי התהום

אזור רגישות 1 בו מפלס מי התהום רדוד מ-20 מ' באגן הצפוני או 25 מ' באגן הדרומי. אזור זה הוא מניפת סחף המורכבת משקעים גרנולרים במגוון גדלים, צעירים ולרוב לא מלוכדים. באזור זה הרגישות להתנזלות היא הגבוהה ביותר באופן יחסי באזור הסקר - הסבירות שקרקע תעבור התנזלות בעת רעידת אדמה היא הגבוהה ביותר. באזור זה נדרשת חקירה גיאוטכנית לצורך הערכה כמותית של הסיכון.

אזור רגישות 2 בו מפלס מי התהום רדוד מ-20 מ' באגן הצפוני או 25 מ' באגן הדרומי. הקרקעות שייכות לפציאס האגמי המורכב משכבות דקות של חומר דק סילטי וחרסיתי בחילופין עם שכבות דקות של ארגוניט. באזור זה הרגישות להתנזלות נמוכה.

אזור רגישות 3 בו מפלס מי התהום עמוק מ-20 מ' באגן הצפוני או 25 מ' באגן הדרומי, בסביבת השקעה של מניפות סחף. הרגישות להתנזלות באזור זה זניחה.

אזור רגישות 4 בו מפלס מי התהום עמוק מ-20 מ' באגן הצפוני או 25 מ' באגן הדרומי והמשקעים אגמיים. למעשה אין רגישות להתנזלות שם.

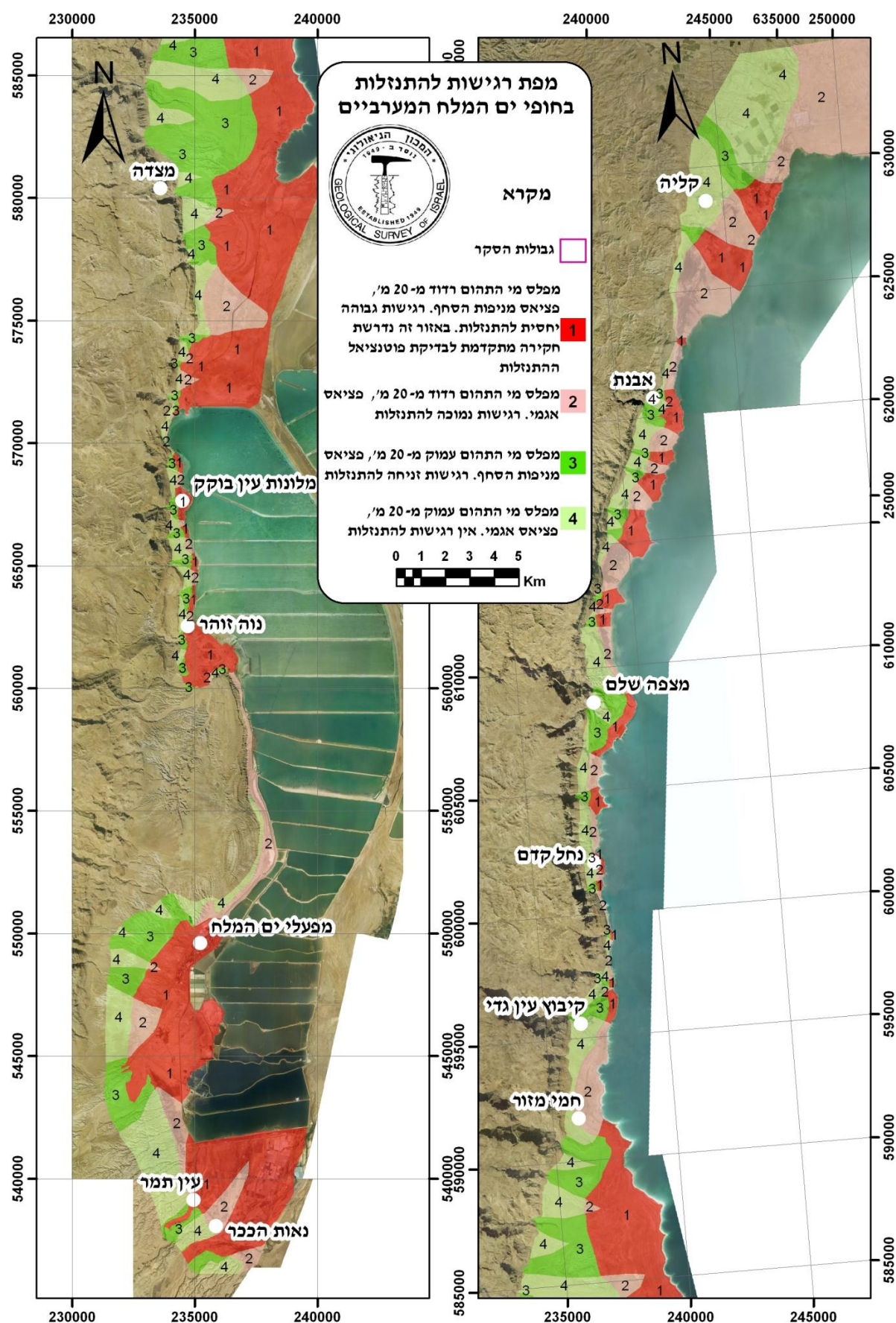
מפת הרגישויות המסכמת מציגה באופן איכותי את האזורים לאורך החוף המערבי של ים המלח בהם קיימים תנאים גיאולוגיים, הידרולוגיים וסיסמיים להתנזלות בעת רעידת אדמה חזקה. באיור 5.8 ניתן לראות את מפת הרגישויות המסכמת בקנה מידה של כ-200,000:1. לא ניתן לכמת את מידת הסיכון במונחים של מקדם ביטחון, למשל, כמו שניתן לעשות באתר ספציפי לאחר חקירה גיאוטכנית, ועל כן הדירוג כאן נעשה בסדר יחסי, על בסיס סוג המסלע (מניפת סחף או משקע אגמי) והעומק למפלס מי התהום.

5.4.1 דיון במפת הרגישויות והנחיות לשימוש במפה

באזורי הסיכון להתנזלות אשר מופו בעבודה זו מצויים תנאים המעידים על פוטנציאל להתנזלות בעת רעידת אדמה חזקה. הערכת זו הינה איכותית בלבד ועל כן בעת תכנון הנדסי באזורי רגישות 1 ו-2, בהם קיימת סבירות להתנזלות, יש לבצע בדיקות גיאוטכניות מתקדמות יותר לצורך הערכה כמותית של הסיכון. בדיקות אלה נעשות בעיקר בקידוחים שלעיתים נעשים כבר ממילא לצורכי ביסוס. במידה שבאתר ספציפי נמצאה קרקע רגישה להתנזלות יש לשקול שימוש באמצעים לשיפור הקרקע ומניעת נזקים בעת התנזלות ברעידת אדמה ולעיתים אף לשקול שינוי במיקום הפרויקט.

מכיוון שהמיפוי הנוכחי מביא לידי ביטוי את הקיים בתת הקרקע בכלים אמפיריים ובגישה שמרנית, יתכנו אי דיוקים ואף טעויות מקומיות הן בהערכת העומק למפלס מי התהום והן בסוג הקרקעות הקיים בתת הקרקע. מסיבה זו חולקה מפת הסיכון לארבעה אזורים, בשניים מהם קיימים תנאי סף להתנזלות ברמת סבירות כלשהיא (אזורים 1, 2) ובשניים האחרים הסיכון זניח (אזורים 3, 4). באזורים בהם מפלס מי התהום על פי המפה עמוק דיו ניתן לבדוק שמא יש אקוויפר שעון מקומי או תת אקוויפר חריג. באזורים בהם הקרקע איננה חשודה כרגישה להתנזלות ניתן לבדוק הופעות חריגות של שכבות קלסטים גסי גרגר. הבדיקות יכולות להיערך לפי שיקולו של גיאולוג או יועץ הקרקע בשטח.

באופן זה ניתן לדרג את האזורים השונים כדרגות סיכון יחסי עוקבות, מאזור 4 בו סכנת ההתנזלות נמוכה ביותר ולמעשה זניחה, עד לאזור 1 בו סכנת ההתנזלות היא הגבוהה ביותר באופן יחסי. ישנה, אומנם, אי וודאות בתיחום המעבר מאזור 1 לאזור 2 או מאזור 3 לאזור 4 (המעבר מאזור מניפת סחף המכילות משקעים גרנולרים לאזור משקעים אגמיים דקים), ולכן חלוקה משמעותית יותר היא בין האזורים בהם מפלס מי התהום רדוד לאזורים בהם המפלס עמוק מדי להתנזלות.



איור 5.8: מפת רגישויות מסכמת של האזורים בהם נדרשת חקירה מתקדמת לבדיקת פוטנציאל ההתנזלות. המפה מתייחסת להתנזלות ולא לסוגי כשל אחרים. שני הקידוחים, EB3E ו-MN5E ונקודות יישוב נוספות מסומנים בנקודות.

5.4.2 סיכונים סיסמיים נוספים

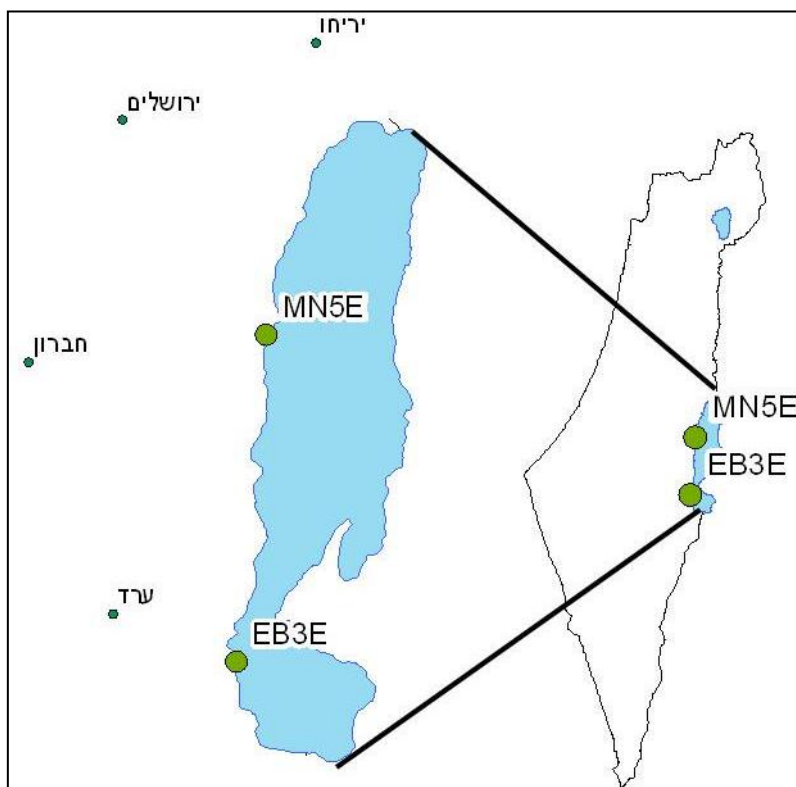
בחינת המסלע וסביבות ההשקעה שלאורך חופי ים המלח מעלה חשש שתשתיות קרקע עלולות להגיב באופן לא לינארי ברעידת אדמה חזקה ואולי אף להיכשל. ישנן עדויות רבות למעוות מסוגים שונים, רובם אומנם התרחשו בעת שהסדימנט היה רווי במים וככל הנראה בזמן שהיה עדין שקוע בקרקעית האגם, אך מנגנון הכשל עדיין אינו ברור דיו. על כן נדרשת התייחסות מיוחדת לקרקעות אלה, למשל בדומה למשל להמלצות הנהוגות בארה"ב לגבי קרקעות מסוג F (NEHRP, 1997 ; ISO/DIS 23469, 2004).

כך לדוגמא יש להתחשב בחוזק הקרקעות החרסיות. הגדרת ההתנזלות הקלאסית עוסקת בחולות וחלוקים, אם כי בספרות מצוין כי גם בטיין ובחרסיות תתכן החלשות קרקע בעת רעידת אדמה עד אובדן חוזק מסוים הדומה להתנזלות (Youd 2001). ישנם קריטריונים אמפיריים הקושרים בין חוזק הגזירה של קרקע חרסית לבין יכולת העמידה בפני החלשות בעת רעידת אדמה הדומה לתהליך ההתנזלות (Idriss & Boulanger, 2008). מנתוני הקידוחים שנערכו בחוף מתברר כי ישנן שכבות של חרסית עם תכולת רטיבות גבוהה הגורמת לחוזק נמוך ביותר. במקרים כאלה גם אם האתר כביכול "בטוח" כנגד התנזלות יתכן כשל קרקע במנגנון מכאני אחר בעת רעידת אדמה העלול לגרום נזקים לתשתיות. מוצע על כן לבחון אזורים אלה באופן פרטני ולהעריך את תגובתם לתאוצות סיסמיות חזקות, כל זאת בנפרד מהחקירה הנדרשת לברור של הפוטנציאל להתנזלות.

קרקעות חרסיות שיש לבדוק את חוזקן ברעידת אדמה מצויות בעיקר במשטחי בוץ של תצורת צאלים שנחשפו עם ירידת המפלס באגן הצפוני של ים המלח. אזורים אלה מופיעים במפת הרגישות בעיקר כאזורים בטוחים בהם לא צפויה התנזלות עקב הימצאות קרקע קוהזיבית, ויש לשים לב לאפשרות הכשל השונה שצריכה להיבחן אף היא. בבדיקת כשלים בקרקעות טיין וחרסית תכולת הרטיבות משפיעה רבות על חוזק הקרקע. עקב כך סומן במפת הסיכון אזור רגישות 2, בו מפלס מי התהום רדוד, בגוון אדום בהיר. בתצורת הלשון החשש קיים פחות. התצורה קדומה יותר, ולכן בדרך כלל הקרקע מלוכדת יותר. בנוסף, תכולת הרטיבות בקרקעות תצורה זו קטנה בהרבה מקרקעות בוציות מתצורת צאלים שעד לפני שנים לא רבות היו בחלקן מוצפות, ועוד שומרות על תכולת רטיבות גבוהה, גורם המחליש את חוזק הקרקע.

6 תוצאות - הערכה גיאוטכנית בקידוחים

על סמך מפת הסיכון נבחרו שני אתרים בהם רמת הסיכון היא הגבוהה ביותר. אתר אחד נמצא במניפת סחף בה קיימות שכבות חול או חלוקים בתת הקרקע, והשני בשולי מניפת סחף באזור אגמי יותר. בשני הקידוחים נעשו בדיקות גיאוטכניות להערכה כמותית מדויקת של מידת הסיכון להתנזלות באתרים מייצגים מהם ניתן להשליך במידה מסוימת על השטחים במפות הסיכון. באיור 6.1 מוצג מיקום שני הקידוחים. האחד במניפת הסחף ליד מלונות עין בוקק, EB3E. השנה בשולי מניפת הסחף ליד חוף מינרל, MN5E.



איור 6.1: מפת מיקום של שני קידוחים גיאוטכניים, EB3E ו-MN5E. הקידוחים מסומנים בעיגולים ירוקים

6.1 קידוח עין בוקק EB3E

הקידוח נערך במניפת הסחף של נחל בוקק סמוך לבתי המלון נ.צ. 234630 567970. באיור 6.2 ניתן לראות את מפת אזור הקידוח עם סימון של קו חתך הרפרקציה שנעשה במקום (Ezersky, 2011). הקדיחה נעשתה בספירלה לעומק 9 מ' עם בדיקות SPT עד שראש המקדח נתקע עקב מפולת. לאחר מכן הועתק הקידוח מטר אחד הצידה והקידוח המשיך בספירלה לעומק של 4.5 מ'. מעומק זה הקידוח בוצע ב-Rock Bit עם שטיפה בבנטוניט עד לעומק של 26.3 מ'. צינור מגן הוחדר תוך כדי הקדיחה עקב מפולות בקידוח. בדיקות SPT נעשו גם בחלק זה, סה"כ 13 בדיקות. מעומק זה עד עומק של 35.1 מ' נקדחו גלעינים במלח עם שטיפה במי ים המלח שנשאבו מברכות האידוי. הקדיחה ארכה 9 ימים, לוותה בתקלות רבות והיתה בדרך כלל איטית, גורם שהשפיע על איכות המדגמים. צינור מגן שהוחדר במקביל למקדח מנע מפולות בתחתית חור הקידוח אך לא תמיד הוחדר צינור המגן מייד עם הקדיחה. לעיתים, לפי שיקול דעתו של

הקודח, קדחו לעומק מסוים עם שטיפה בבנטונית ללא צינור מגן עד שהקידוח נתקע (לרוב ראש המקדח נסתם בחול). לאחר



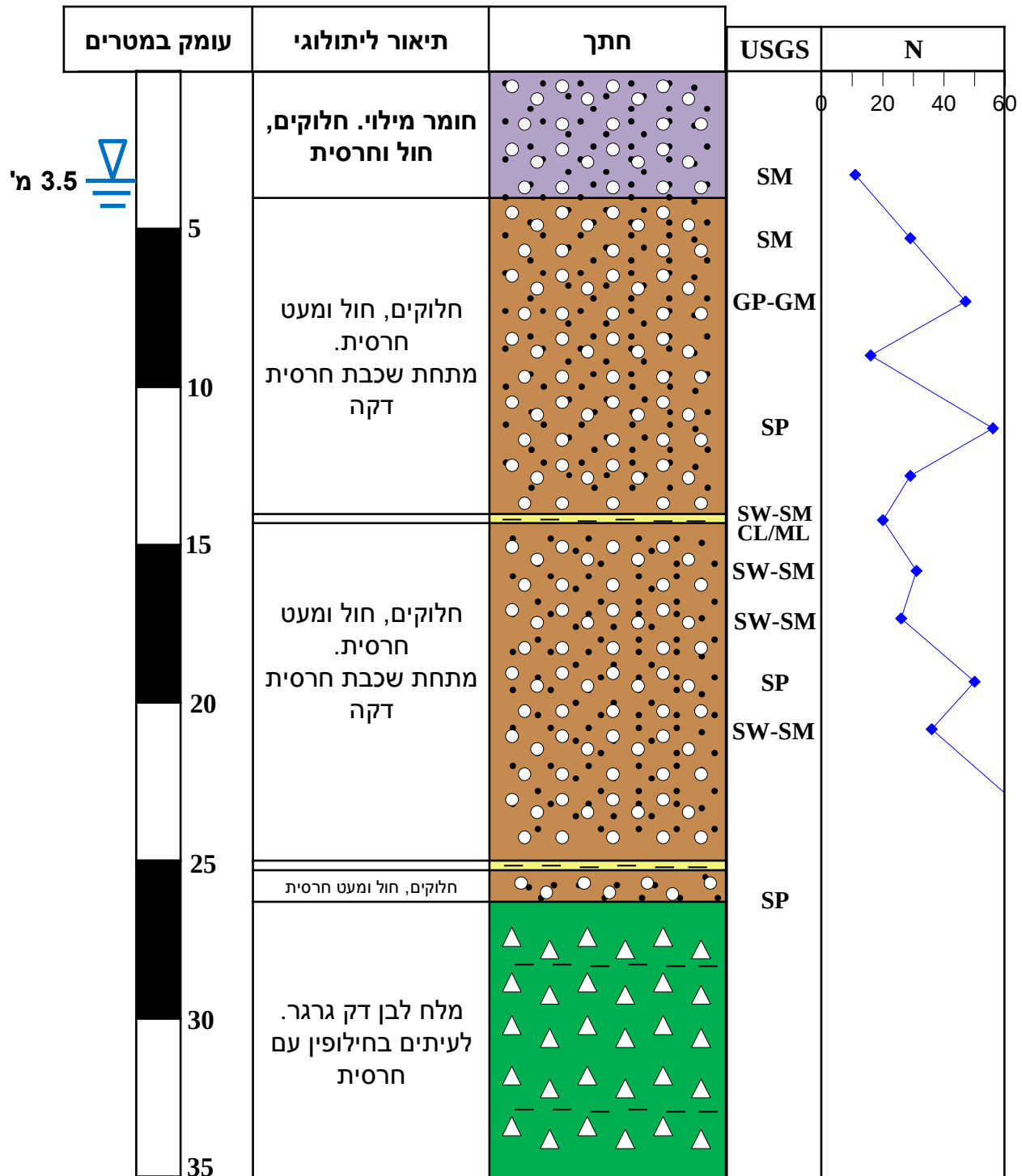
איור 6.2: מפת מיקום של קידוח EB3E ליד מלונות עין בוקק. הקידוח מסומן בעיגול ירוק, וקו הרפרקציה הסיסמית מסומן בקו אדום.

ניקיון המקדח קדחו שוב לאותו העומק עם צינור המגן. לעתים קרובות השטיפה לא העלתה את מטחן הקידוח לפני השטח וזרם הבנטוניט נספג כנראה בתת הקרקע. קדיחות חוזרות ונשנות אלה גרמו לעיתים לשחיקה גבוהה של מרכיבי השכבות כך שמטחן שיצא בשטיפה היה מורכב מגרגרים בגודל חול שנטחנו עד דק משברי חלוקים גדולים יותר.

הקידוח עבר ברובו בשכבות של חלוקים, חול ואחוז מסוים של בוץ. החלוקים והחול מורכבים מצור וסלעים קרבונטים כגיר ודולומיט. באיור 6.3 ניתן לראות את לוג הקידוח כולל פרטים של בדיקות מעבדה שנערכו בדוגמאות שהתקבלו בבדיקות SPT. בטבלה 6.1 מפורטות בדיקות שנעשו בקידוח ותוצאות בדיקות מעבדה שנעשו בדוגמאות קרקע מהקידוח.

מהירויות גלי גזירה, V_s , וגלי הלחיצה, V_p , בקידוח מתוארים באיור 6.4 החל מעומק 2 מ' עד לגג שכבת המלח. העלייה במהירות הגלים הסיסמיים הדרגתית יחסית.

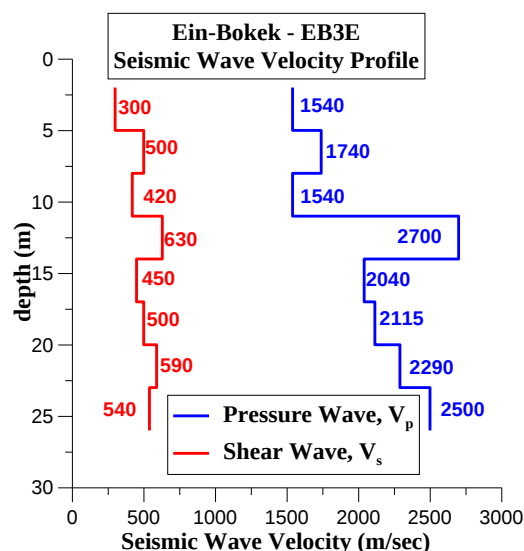
חתך רפרקציה סיסמית לפי גלי גזירה ולפי גלי לחיצה מוצג באיור 6.5. החתך מחולק לשכבות באופן פחות מפורט מהקידוח. השכבות תת אופקיות עם נטיה קלה מאוד צפונה.



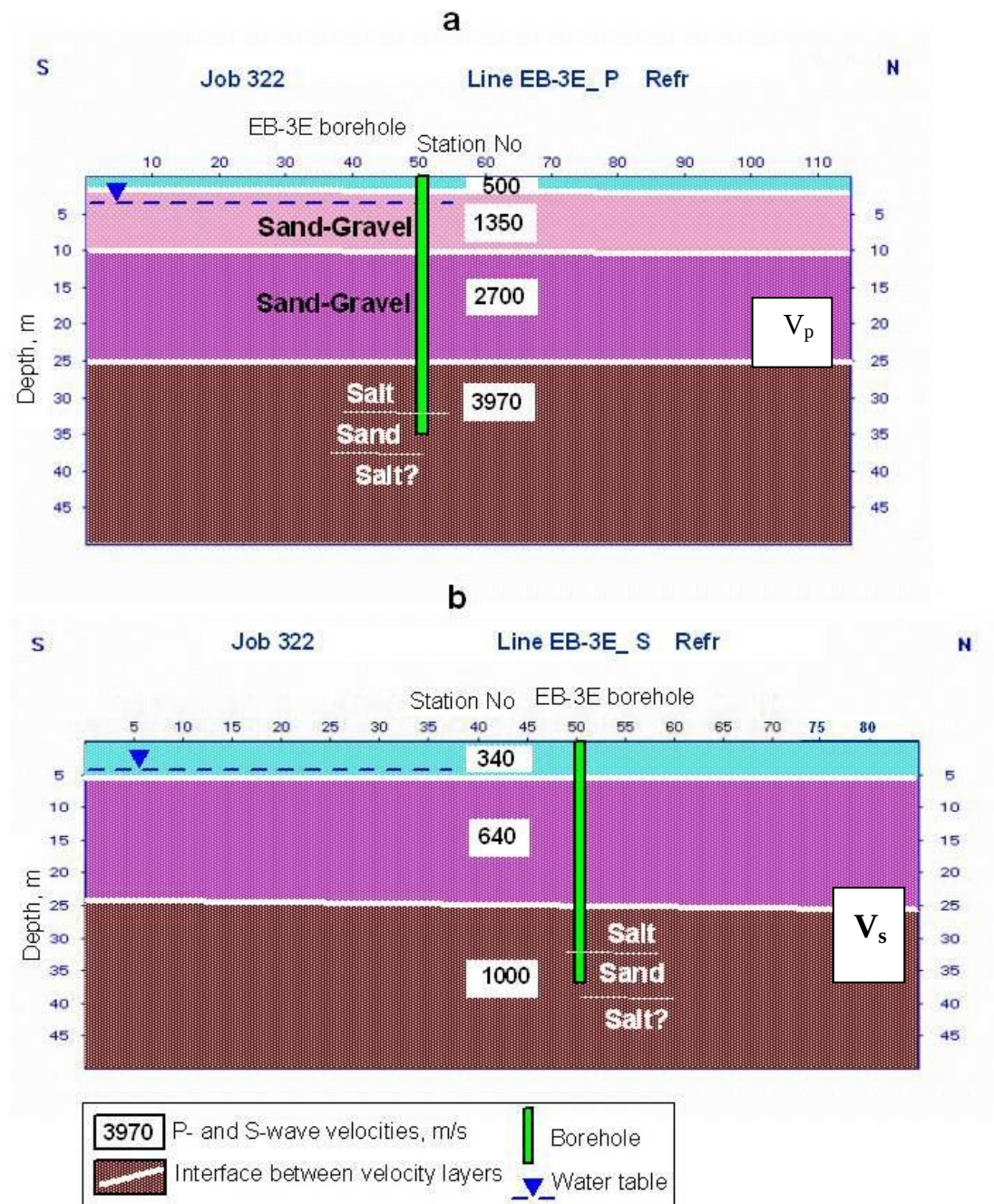
איור 6.3: לוג קידוח עין בוקק, EB3E. הלוג כולל תיאור ליתולוגי, הגדרת דוגמאות קרקע לפי שיטת המיון האחידה, USGS, ותוצאות N מבדיקות SPT.

עומק	N	FC	ω_c	γ_t	PL	LL	USCS	RQD	Recovery
3.3	11	18.8	9				SM		
5.3	29	14.5	15.6				SM		
7.3	47	8	21.2	19.3			GP-GM		
9	16								
11.3	56	2.5	19.8				SP		
12.8	29								
14.2	20	6.6	17	22.9			SW-SM		
14.4		53.5	53.9		24.9	37.7	CL/ML		
15.8	31	6.6	14.9	17.3			SW-SM		
17.3	26	5.8	16.9	19			SW-SM		
19.3	50	3	20.5	16.6			SP		
20.8	36	9	18.6	19.3			SW-SM		
23.8									
26.2	לא חדר	4	24.6	16.9			SP		
26.3-27.8								63	93
27.8-29.3								45	89
29.3-31.8								80	93
31.8-32.1								59	63
32.1-33.6								0	0
33.6-35.1								0	0

טבלה 6.1: פרמטרים גיאוטכניים של קידוח עין בוקק, EB3E. תוצאות SPT והחזר (Recovery ו-RQD) מהקידוח. מוצגות גם תוצאות בדיקות מעבדה של אחוז דקים, תכולת רטיבות, משקל מרחבי, גבולות סומך והגדרה לפי שיטת המיון האחידה.



איור 6.4: תוצאות מדידת מהירות גלים סיסמיים, V_p ו- V_s , בקידוח (בעקבות 2011, Ezersky)



איור 6.5: חתך רפרקציה סיסמית ליד קידוח EB3E. a- מהירות גלי לחיצה, V_p . B- מהירות גלי גזירה, V_s . מיקום הקידוח מסומן בקו ירוק. החתך בכיוון כללי של צפון-דרום (בעקבות 2011, Ezersky).

קידוח EB3E מאופיין בחתך של חלוקים וחול בכמויות משתנות ללא הבדל ברור בין שכבות שונות למעט שכבות דקות של חרסית. המטרים העליונים בחתך הם מילוי מלאכותי, כנראה מהודק, בהרכב דומה מקרקע שנכרתה באזור. המלח בתחתית החתך משוכב באופן מסיבי עם שכבות דקות של חרסית. בתחתית שכבות המלח התקבל החזר (Recovery) אפסי, ויצא רק מטחן של מלח. יתכן שמדובר בחלל או בשכבות רכות.

עקב המפולות התכופות חדרו לעיתים בדיקות SPT מפולות ולא רק שכבות בלתי מופרות של תת הקרקע. בעת בדיקת החומר בצינור הדגימה נעשה ניסיון לזהות את החומר שמקורו במפולת, וכאשר דוגמה מסוימת נחשדה כמורכבת ממפולת נלקח הדבר בחשבון באמינות תוצאות הבדיקות.

בדיקות SPT הראו בדרך כלל ערכים גבוהים מאוד. הבעיה בבדיקות אלה בקידוח היא גודל החלוקים, שלעיתים קרובות היה גדול יותר מקוטר צינור הדגימה. עקב כך קטע הקרקע המופיע בצינור הדגימה לא תמיד מייצג את כל חתך תת הקרקע.

קביעת המשקל המרחבי נעשתה לפי מדידת נפח הקרקע בצינורית הדגימה של בדיקת SPT. למרות שבבדיקה זו הקרקע מופרת התוצאה המתקבלת מדויקת מספיק לצורך חישוב משקל עמודת הקרקע המשמש בהערכת פוטנציאל ההתנזלות.

הגדרת רוב החתך לפי שיטת USCS היא חול, SM/SW/SP. הדבר נובע מהגדרה מעט שונה של גודל חול, עד 4.5 מ"מ.

מהירות גלי הגזירה שונה מעט בין המדידה בתוך בור הקידוח לבין חתך הרפרקציה, כאשר בחתך הרפרקציה המהירויות מעט גבוהות יותר. ההבדל נובע בחלקו מרמת הדיוק הפחותה, יחסית, בחתך רפרקציה לעומת מדידה בקידוח, וניתן להזניח אותו.

בחתך הרפרקציה ניתן לראות שהשכבות די אופקיות ולא משתנות בטווח של עשרות מטרים. באופן זה הקידוח מייצג היטב את תת הקרקע לפחות בסביבה הקרובה, וניתן יהיה להשליך מתוצאות הערכה כמותית של סכנת ההתנזלות בקידוח לסביבה הקרובה.

6.2 קידוח חוף מינרל MN5E

הקידוח נערך סמוך למניפת הסחף של נחל חצצון ליד אתר הנופש "חוף מינרל" ב.צ. 606388 237929. באיור 6.6 ניתן לראות את מפת אזור הקידוח. הקידוח נקדח בספירלה עד לעומק של 22.5 מ'. בעומק זה הגיעו לשכבת מלח. המלח נקדח בגלעינים עד לעומק של 36.4 מ' עם שטיפה במי ים המלח. הקדיחה היתה מהירה וללא תקלות וארכה שני ימי עבודה לא רצופים. בקידוח נעשו 8 בדיקות SPT. נעשתה דגימה בלתי מופרת (Shelby) מוצלחת אחת ועוד שלוש לא מוצלחות בהן לא נתפס חומר בצינור עקב שימוש בציוד ללא תוספת ליצירת ואקום. שתי בדיקות מכנף גזירה (Shear Vane Test) נעשו בקידוח, אם כי הבדיקות נעשו בקצב מהיר מידי, לא לפי התקן ובקרקע שאיננה רוויה במים. חתך הקרקע היה מורכב ברובו מסילט או חרסיות עם מעט חלוקים או חול של צור וסלעים קרבונטים, גיר או דלומיט.

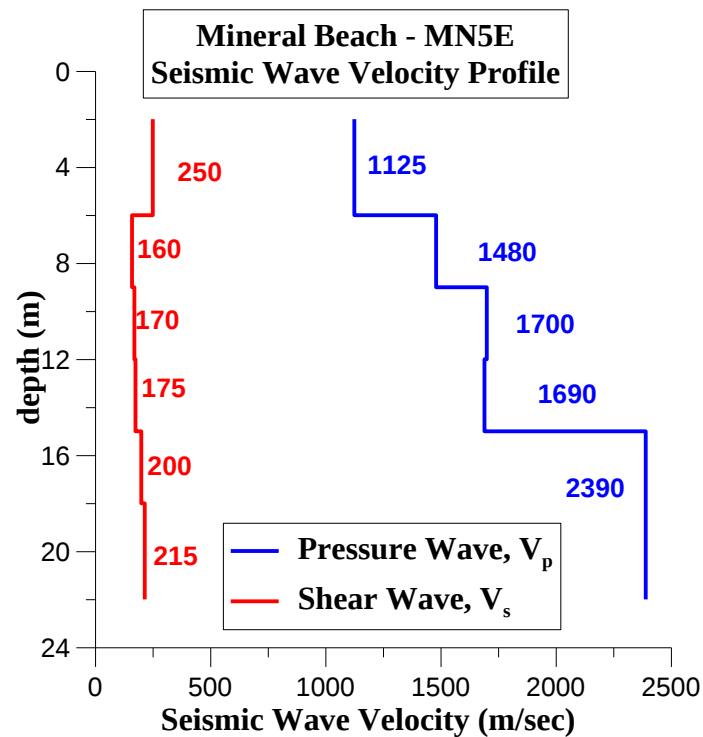
במהלך הקדיחה הופיעה רטיבות רבה בקידוח בעומק 7 מ', אם כי 4 ימים לאחר מכן, מפלס המים היה בעומק 18 מ'. מדידות המפלס נעשו לפי זיהוי רטיבות בציוד הקידוח ולא בציוד מדידת מפלס ייעודי.

מהירויות גלי גזירה וגלי הלחיצה בקידוח מתוארים באיור 6.7 החל מעומק 2 מ' עד לגג שכבת המלח. העלייה במהירות הגלים הסיסמיים הדרגתית יחסית אם כי יש בהתחלה ירידה במהירות, כנראה כתוצאה משכבות עם אחוז גבוה יותר של טין וחרסיות.

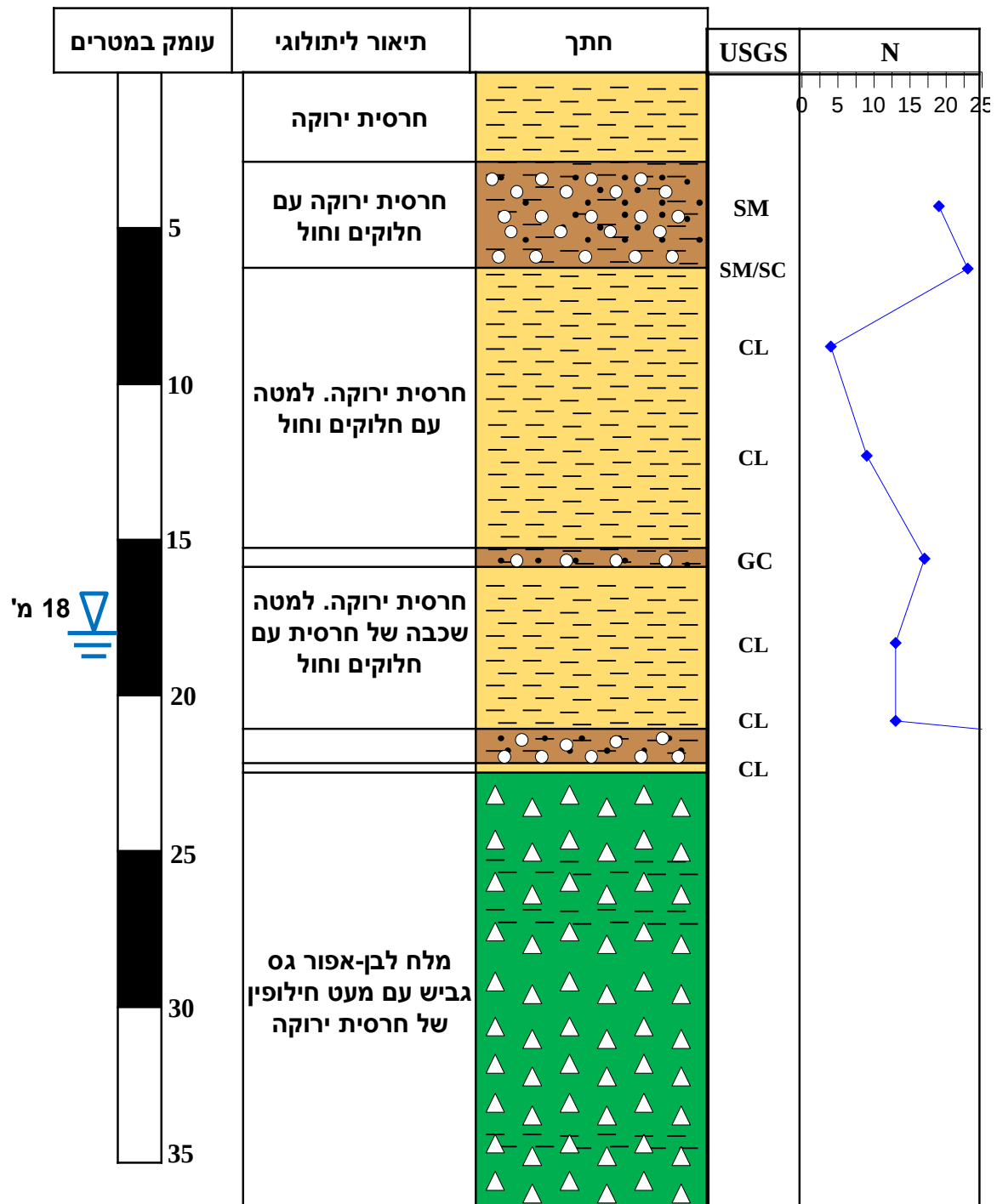
באיור 6.8 ניתן לראות תיאור מפורט של הקידוח כולל פרטים של בדיקות מעבדה שנערכו בדוגמאות שהתקבלו בבדיקות SPT. בטבלה 6.2 מפורטים הפרמטרים הגיאוטכניים שבקידוח, תוצאות בדיקות בקידוח עצמו ובדיקות מעבדה.



איור 6.6: מפת מיקום של קידוח חוף מינרל, MN5E, מסומן בירוק. קו הרפרקציה הסיסמית שנעשה באתר מסומן בקו אדום



איור 6.7: תוצאות מדידת מהירות גלים סיסמיים, V_p ו- V_s , בקידוח (בעקבות Ezersky, 2011)



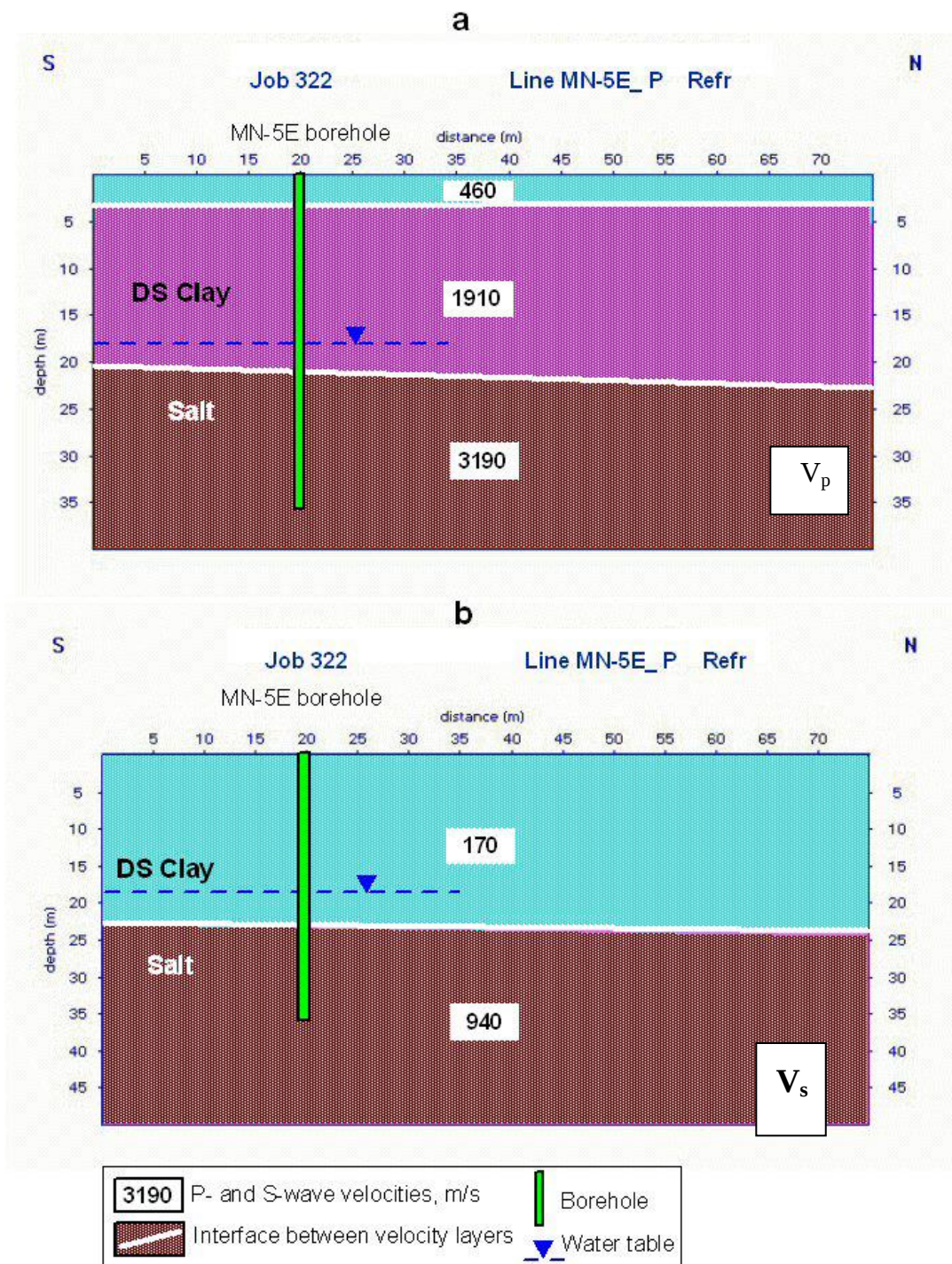
איור 6.8: לוג קידוח חוף מינרל, MN5E. הלוג כולל תיאור ליתולוגי, הגדרת דוגמאות קרקע לפי שיטת המיון האחידה, USGS, ותוצאות N מבדיקות SPT.

מזגם בלתי מופר	Shear Vane Test	Recovery	RQD	USCS	LL	PL	γ_t	ω_c	FC	N	עומק
	35/15										3.1
70 cm											2-2.9
				SM			16.3	11.1	17.2	19	4.3
				SM/SC	34.9	24.4	21.1	24.1	36.6	23	6.3
0											8-8.5
				CL	34.2	20.2	16.7	38.8	85.6	4	8.8
	5/0										10.5
0											11-12
				CL	30.4	19.2		37.3	83.7	9	12.3
				GC	27.9	18.5		18.6	31.8	17	15.6
				CL	21.7	19.3	30.4	34.9	82.4	13	18.3
0											19.5-20.5
				CL	36	20.6	28.5	33.3	72.9	13	20.8
				CL	31.5	19.3	15.2		76.8	לא חדר	22.3
		63	55								22.3-23.8
		68	31								23.8-25.3
		91	70								25.3-26.8
		100	53								26.8-28.4
		100	86								28.4-29.9
		100	33								29.9-31.4
		100	71								31.4-32.9
		97	35								32.9-34.4
		75	31								34.4-35
		91	61								35-36.4

טבלה 6.2: פרמטרים גיאוטכניים של קידוח חוף מינרל, MN5E. תוצאות SPT והחזר (Recovery ו-RQD) עם בדיקות בלתי מופרות, Shelby, ומכנף גזירה מהקידוח. מוצגות גם תוצאות בדיקות מעבדה של אחוז דקים, תכולת רטיבות, משקל מרחבי, גבולות סומך והגדרה לפי שיטת המיון האחידה.

חתך רפרקציה סיסמית לפי גלי גזירה, Vs, ולפי גלי לחיצה, Vp, מוצג באיור 6.9. החתך מחולק לשכבות באופן פחות מפורט מהקידוח. השכבות תת אופקיות עם נטיה קלה מאוד צפונה.

הערכת פוטנציאל ההתנזלות בחוף ים המלח המערבי-סקירה רגיונלית וניתוח גיאוטכני של שני קידוחים/אלחנן לבנה



איור 6.9: חתך רפרקציה סיסמית ליד קידוח MN5E. a- מהירות גלי לחיצה, V_p . B- מהירות גלי גזירה, V_s . מיקום הקידוח מסומן בקו ירוק. החתך בכיוון כללי של צפון-דרום (בעקבות Ezersky, 2011).

החתך הקלסטי בקידוח מורכב בעיקר מחרסיות/טיין עם חילופים של שכבות חלוקים ואף חול, כצפוי בשולי מניפת סחף. קדיחה נוספת נעשתה במרחק של כ-15 מ' מהקידוח הנוכחי בניסיון להפיק דוגמאות בלתי מופרות עם ציוד מתאים. הקידוח המשיך לעומק של 9.5 מ', והחתך היה עשיר יותר בחלוקים ובחול, כך שלא הייתה אפשרות להחדיר את צינור ה-Shelby. ההבדל מדגים יפה את שינויי הפציאס התכופים הקיימים בעיקר באזור מניפות הסחף.

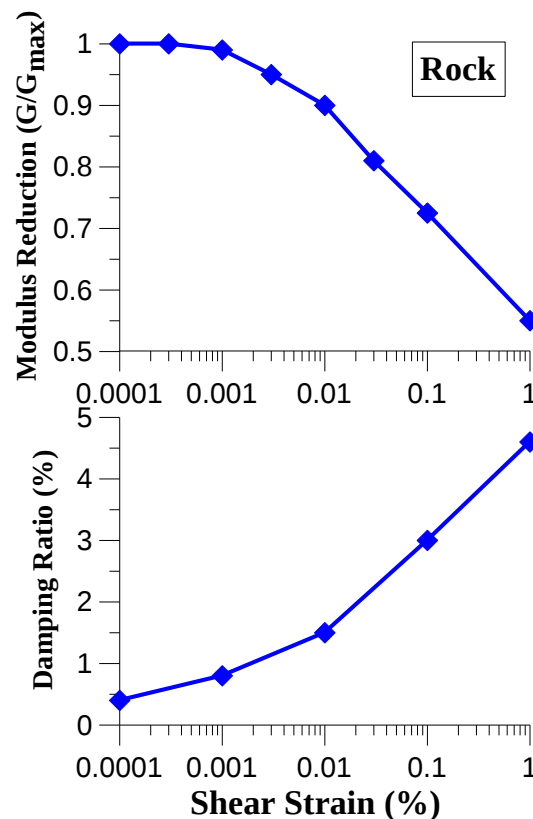
בחתך הרפרקציה ישנה עלייה גדולה במהירות גלי הלחיצה בערך בעומק של 4 מ'. שינוי זה לא נצפה במדידה בקידוח וגם לא במהירות גלי הגזירה. בחתך הקידוח ישנה עלייה משמעותית (פחות מזו שבחתך הרפרקציה) בעומק 6 מ' במהירות גלי הלחיצה לעומת ירידה במהירות גלי הגזירה. תופעה זו יכולה להעיד על מפלס מי התהום, אם כי עלייה משמעותית נוספת קיימת בעומק 15 מ' (אמנם ללא ירידה במהירות גלי הגזירה), ומפלס המים נמדד בעומק 18 מ' באותו יום בו נעשו מדידות מהירות הגלים הסיסמיים.

6.3 ניתוח תגובת אתר

6.3.1 מודל חתך תת הקרקע

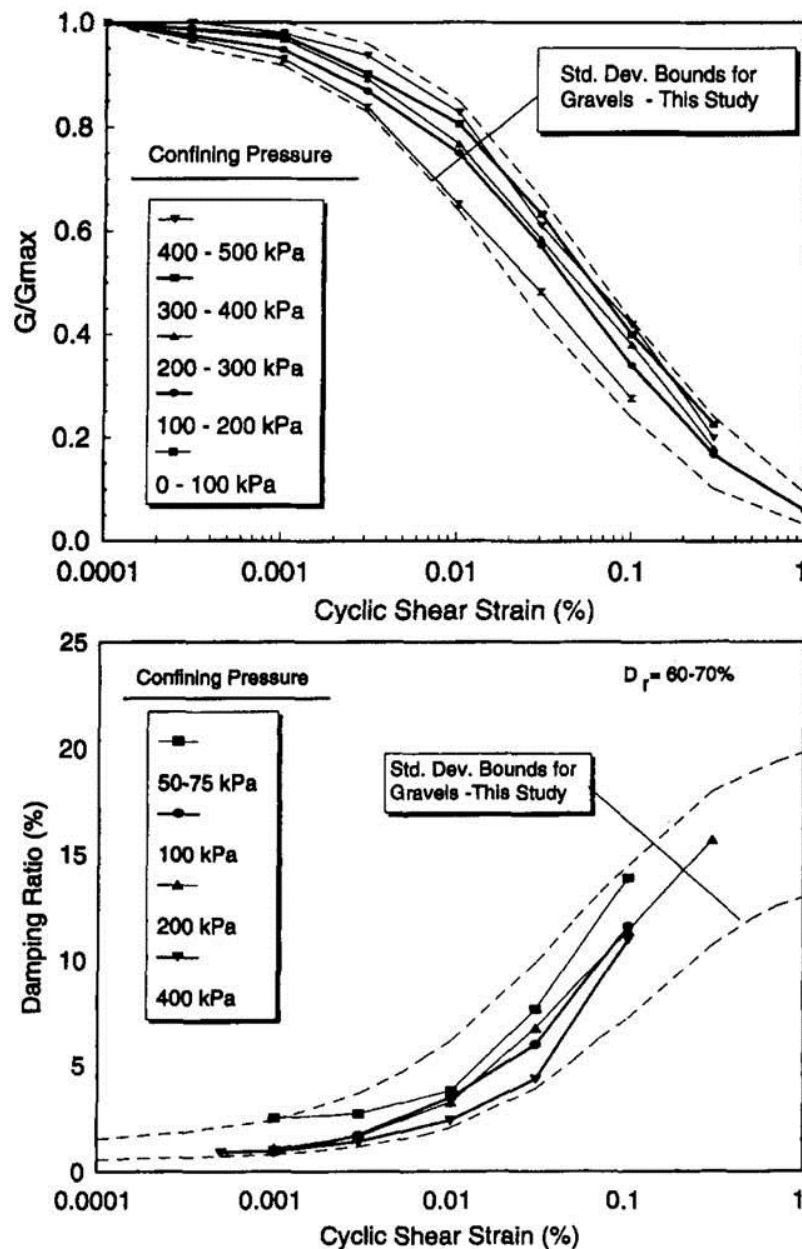
מודל של חתך תת הקרקע נבנה בהתאם לתוצאות הקידוח, בדיקות המעבדה והבדיקות הגיאופיסיות בשני אתרי הקידוחים. שכבות הקרקע השונות נקבעו לפי ממצאי הקידוח בקדיחה עצמה, במטחן ובמדגמי ה-SPT, ולפי חתך מהירות הגלים הסיסמיים. שכבת המלח בתחתית החתך הוגדרה כסלע הבסיס בו נמדדות תאוצות הקרקע שברשומת התאוצה (אקסלוגרמה) המוזנת. מתחת לשכבת המלח קיימים סדימנטים קשים למחצה, בעיקר מחבורת ים המלח, לגביהם אין לנו נתונים. שימוש ברשומות תאוצה שונות שנקלטו על גבי מילוי סדימנטרי מדמה למחצה מצב זה של הגברה בחלק העליון של החתך הבאה בעקבות הגברה קודמת.

עקומי דעיכה של מודול הגזירה ושל שינוי מנת הריסון הוזנו בתוכנה לפי מודלים שונים. התנהגות סלע המלח בתחתית החתך נלקחה מ-Schnabel (1972). באיור 6.10 ניתן לראות את עקום הדעיכה של מודול הגזירה לפי העיבור לעומת העלייה במנת הריסון.



איור 6.10: מודל דעיכה של מודול הגזירה עם עליה במנת הריסון בסלע לעומת עיבור הגזירה. הותאם עבור שכבת המלח בתחתית החתך (בעקבות Schnabel, 1972)

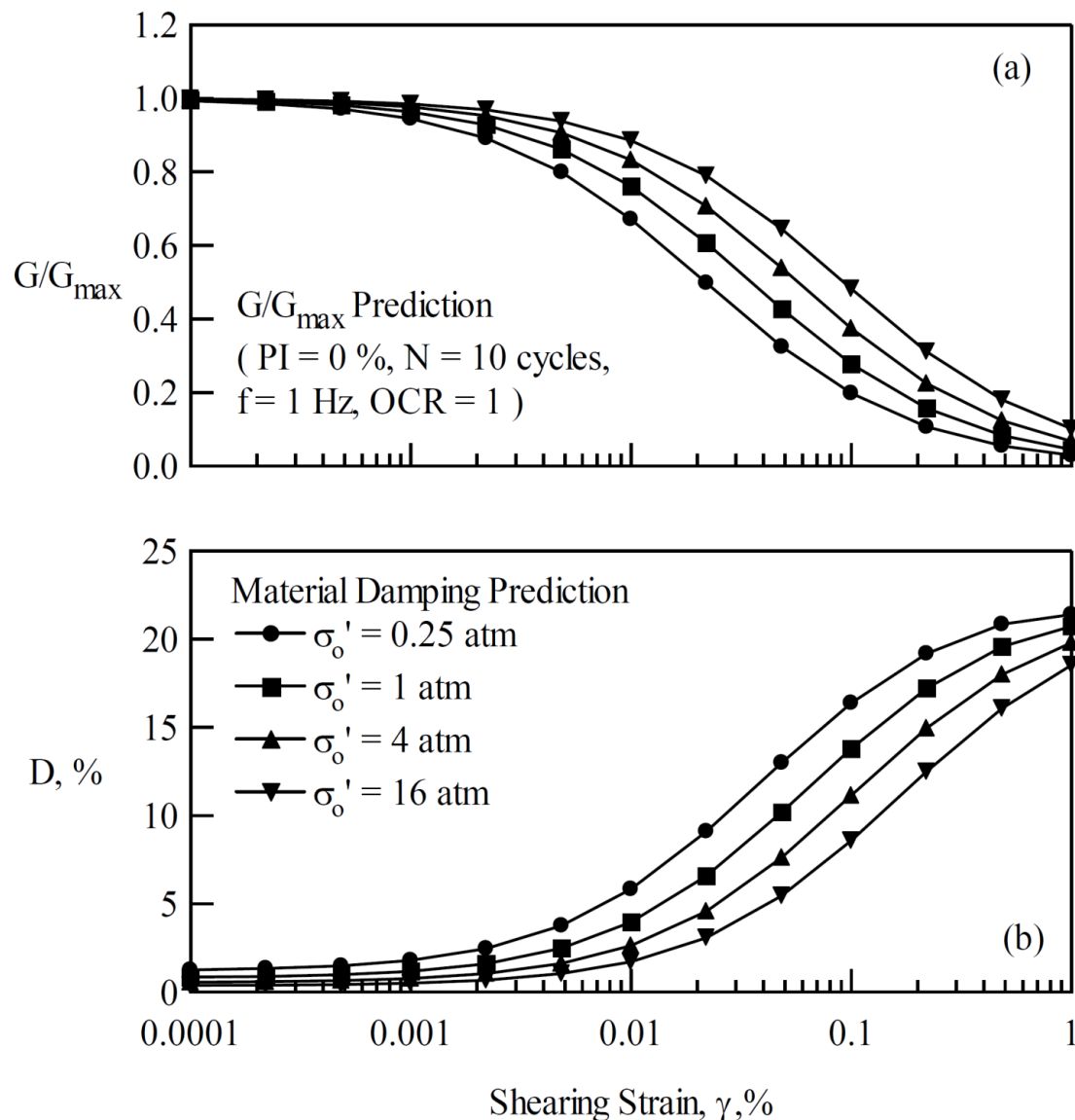
שכבות החלוקים בחתך הותאמו למודל של Rollins et al. (1998) בו יש השפעה גם ללחץ המקיף בכל שכבה. באיור 6.11 ניתן לראות את עקומי הדעיכה של מודול הגזירה לפי העיבור בהתאם ללחץ הכליאה. מוצגים גם גבולות סטיית התקן ממוצע כל בדיקות המעבדה שנאספו במחקר זה. עקום דומה מוצג גם לעלייה במנת הריסון.



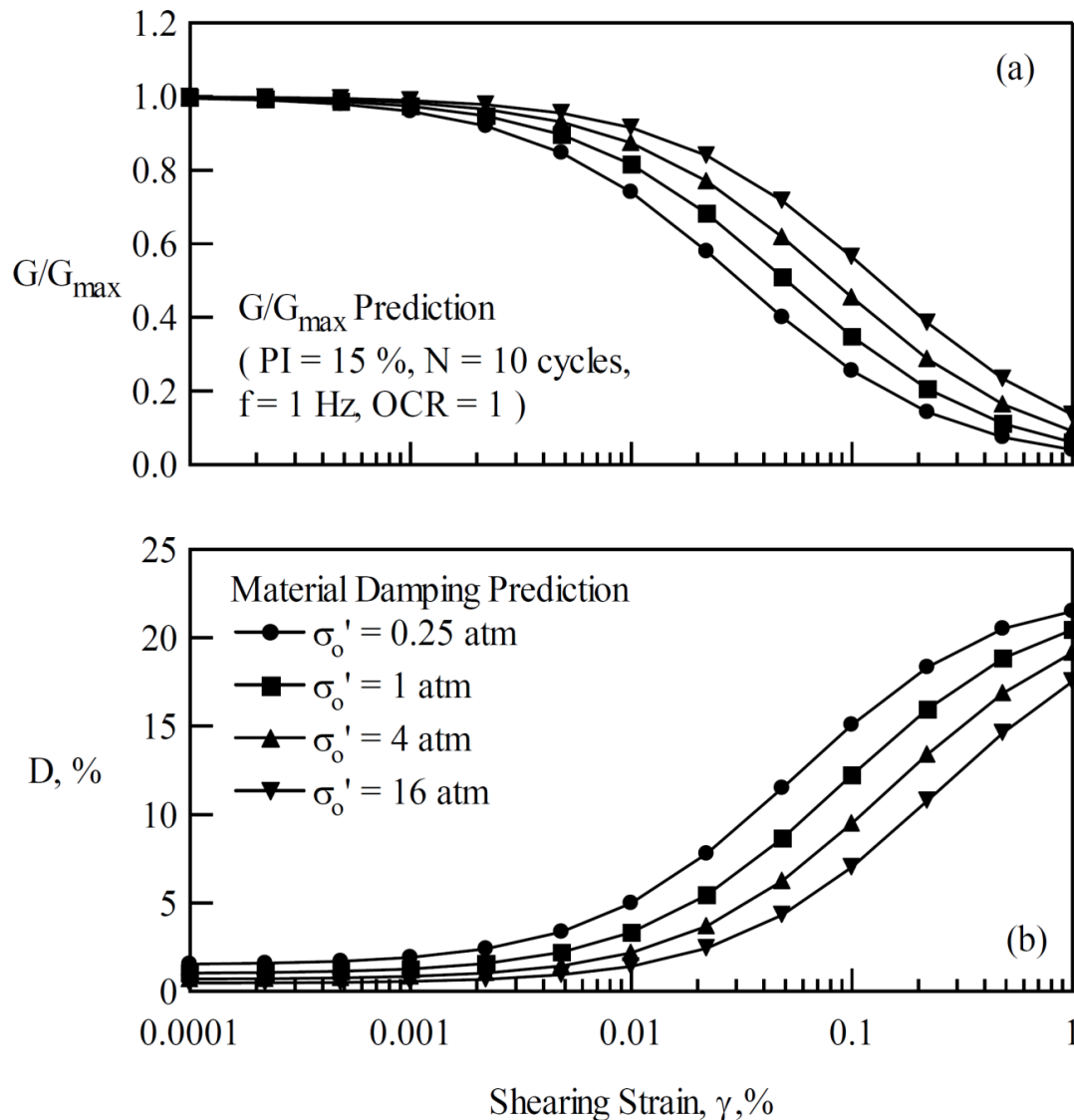
איור 6.11: דעיכה של מודול הגזירה ועליה במנת הריסון בקרקע לעומת שינוי לוגריתמי בעיבור הגזירה עבור שכבות החלוקים בחתך. מבוסס על בדיקות מעבדה בקרקע חלוקים. (בעקבות Rollins et al., 1998)

שכבות החרסית הוגדרו לפי עבודתו של Darendeli (2001) שהתאים עקומי דעיכה בעקבות ניסויי מעבדה לאינדקס הפלסטיות (PI) ולחץ המקיף בכל דוגמה. באיור 6.12-6.13 ניתן לראות את עקומי הדעיכה של

מודול הגזירה והשינוי במנת הריסון. מוצגים העקומים המתאימים לערכי אינדקס הפלסטיות ולחץ מקיף הקיימים באתרי הקידוחים.



איור 6.12: דעיכה של מודול הגזירה ועליה במנת הריסון לעומת שינוי לוגריתמי בעיבור הגזירה. מבוסס על בדיקות מעבדה בקרקעות שונות. העקומים תלויים בתכונות הקרקע, אינדקס פלסטיטיות-PI, ובלחץ הכליאה האפקטיבי. מודל זה תואם חרסיות רזות עם אינדקס פלסטיט נמוך מאוד ($PI=0$) והוא הותאם עבור חלק משכבות הטין והחרסית, בעיקר בקידוח חוף מינרל, MN5E (בעקבות Darendeli, 2001). המודל נבחן בחרסית דחוסה נורמלית ($OCR=1$) אך ניתן להניח שחרסית באתר דחוסה נורמלית ולא הועמסה מעבר לנצפה היום.

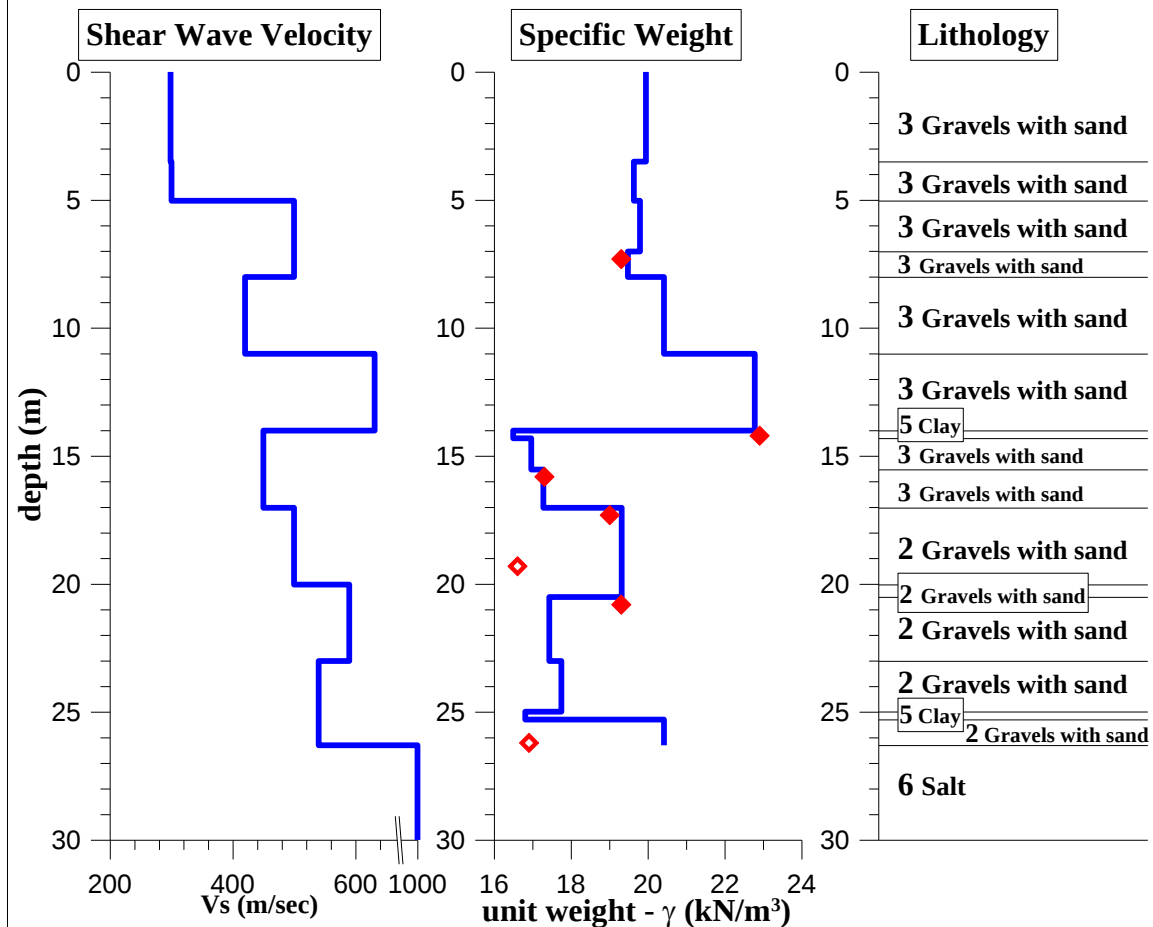


איור 6.13: דעיכה של מודול הגזירה ועליה במנת הריסון לעומת שינוי לוגריתמי בעיבור הגזירה. מבוסס על בדיקות מעבדה בקרקעות שונות. העקומים תלויים בתכונות הקרקע, אינדקס פלסטיטיות-PI, ובלחץ הכליאה האפקטיבי. מודל זה תואם חרסיות רזות עם אינדקס פלסטיטיות נמוך (PI=15) והוא הותאם עבור חלק משכבות הטיין והחרסית, בעיקר בקידוח חוף מינרל, MN5E (בעקבות Darendeli, 2001) המודל נבחן בחרסית דחוסה נורמלית (OCR=1) אך ניתן להניח שחרסית באתר דחוסה נורמלית ולא הועמסה מעבר לנצפה היום.

באיורים 6.14-6.15 מוצג חתך של שני הקידוחים עם כל הפרמטרים שהוזנו לתוכנה SHAKE2000 לצורך ניתוח תגובת האתר. בכל חתך מוצג פרופיל ליתולוגי ממוספר כאשר כל מספר מייצג מודל שונה לדעיכה במודול הגזירה ועליה במנת הריסון לפי המודלים המוצגים לעיל. מהירות הגלים הסיסמיים הותאמה בדיוק רב יותר מהמידות בקידוח לשכבות השונות. המשקל המרחבי מבוסס על תוצאות בדיקות המעבדה אך גם על ערכים שונים המוצגים בספרות.

קידוח עין בוקק – EB3E

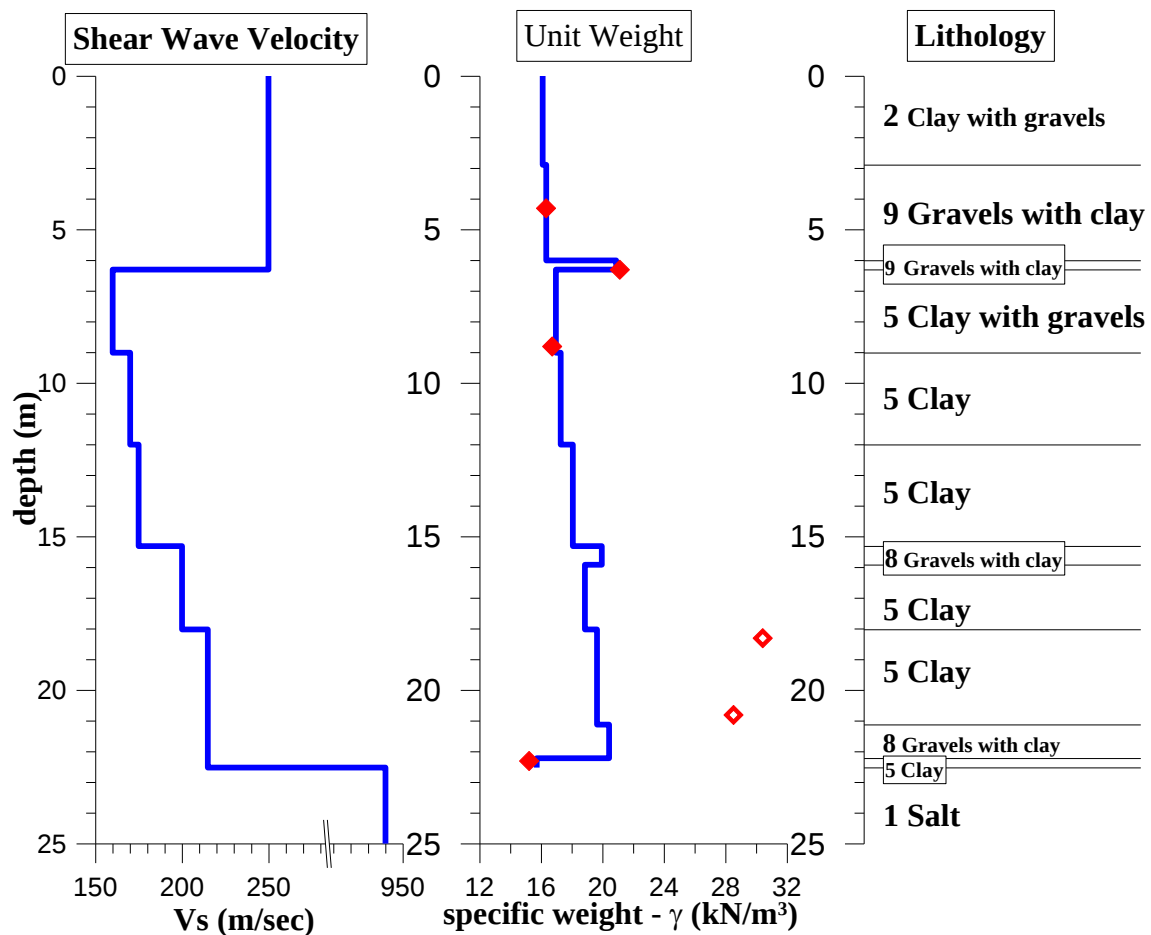
2. Gravels. Confining Pressure 200-300 kPa (Rollins et al., 1998)
3. Gravels. Confining Pressure 0-100 kPa (Rollins et al., 1998)
5. Clay. PI=15%, $\sigma'_v=1$ atm (Darendeli, 2001)
6. Rock (Schnabel, 1972)



איור 6.14: מודל חתך תת הקרקע של קידוח עין בוקק, EB3E, כפי שהוזן בתוכנה SHAKE2000. פרופיל המשקל המרחבי מבוסס בחלקו על תוצאות בדיקות מעבדה (מעויינים אדומים). שתי תוצאות לא אמינות עקב טיב החומר - ברובו מפולת-הוזנחו (מעויינים ריקים). האחת בעומק 19.3 מ' מושפעת מחלוק צור גדול שנשבר בבדיקה וחדר לצינורית הדגימה. השנייה, בעומק 26.2 מ' מושפעת ממפולת בקידוח. בחתך זה ישנן שכבות חלוקים משני סוגים, לחץ כליאה של 0-100kPa ו-200-300 kPa. שכבת חרסית מסוג אחד בו $PI=15$ והמאמץ האנכי האפקטיבי $\sigma'_v=1atm$. שכבת המלח בתחתית החתך הוגדרה כסלע.

קידוח חוף מינרל – MN5E

1. Rock (Schnabel, 1972)
3. Clay. $PI=0$, $\sigma'_v=0.25$ atm (Darendeli, 2001)
5. Clay. $PI=15$, $\sigma'_v=1$ atm (Darendeli, 2001)
8. Gravels. Confining Pressure = 200-300 kPa (Rollins et al., 1998)
9. Gravels. Confining Pressure = 0-100 kPa (Rollins et al., 1998)



איור 6.15: מודל חתך תת הקרקע של קידוח חוף מינרל, MN5E, כפי שהוזן בתוכנה SHAKE2000. פרופיל המשקל המרחבי מבוסס בחלקו על תוצאות בדיקות מעבדה (מעויינים אדומים). תוצאות לא אמינות עקב ערכים גבוהים מידי שאינם קיימים בחרסיות דומות (מעויינים ריקים) הוזנחו. בחתך זה ישנן שכבות חלוקים משני סוגים, לחץ כליאה של 0-100kPa ו-200-300 kPa. שתי שכבות חרסית. באחת $PI=15$ והמאמץ האנכי האפקטיבי $\sigma'_v=1$ atm. בשניה $PI=0$ והמאמץ האנכי האפקטיבי $\sigma'_v=0.25$ atm. שכבת המלח בתחתית החתך הוגדרה כסלע.

6.3.2 נתוני רעידת אדמה

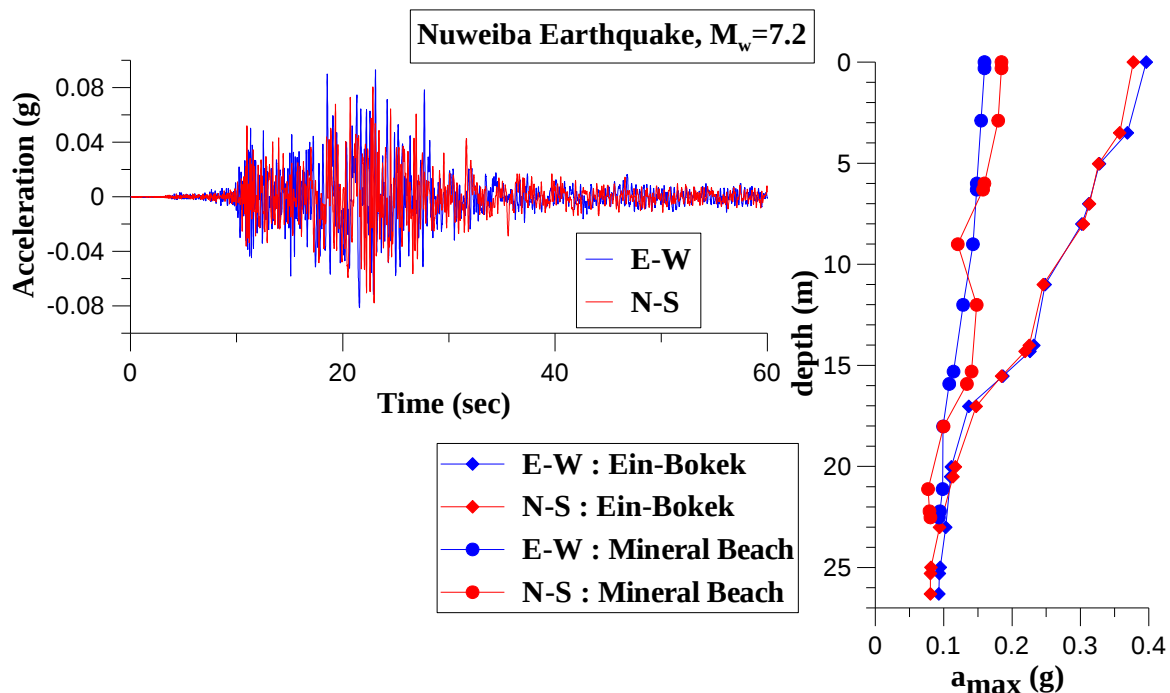
רעידות האדמה הצפויות בטרנספורם ים המלח יהיו בעלות רכיב עיקרי של Strike Slip (Hamiel, 2009), אם כי תתכן רעידות בעלות רכיב נורמלי. לפי המתואר בהערכה הסייסמית נראה שטווח המגניטודות הצפוי עשוי להגיע לכדי 7.5, כפי שהוערך ברעידות היסטוריות שאירעו לאורך טרנספורם ים המלח, ובהתאמה להערכה שניתנה על ידי Heidbach & Ben-Avraham (2007). באזור ים המלח לא התרחשו בעת האחרונה רעידות אדמה חזקות שאפשר היה למדוד בהן את תאוצת הקרקע, ולכן החישובים בתוכנה נעשו לפי רשומות של רעידות אדמה חזקות שונות ברחבי העולם ובמפרץ אילת. רעידות האדמה שנבחרו הינן מסוג Strike Slip ובטווח המגניטודות האמור כדי לייצג את רעידת האדמה האופיינית שתשפיע באזור ים המלח.

נתוני רעידות האדמה נלקחו מאתר <http://peer.berkeley.edu/smcat/> של PEER, Pacific Earthquake Engineering Research Senter, למעט נתוני רעידת האדמה בנואייבה, מפרץ אילת, שהתקבלו מהמכון הגיאופיסי עם עדכונים של Hofstetter et al. (2003). עיבוד של רקורד רעידת האדמה באילת, דה-קונבולוציה לתגובת סלע בתחתית חתך הקרקע, נעשה על ידי Zaslavsky & Shapira (2000) ורקורד זה הוזן גם הוא בחישובים. בטבלה 6.3 מוצגים פרטי רעידות האדמה שנותחו.

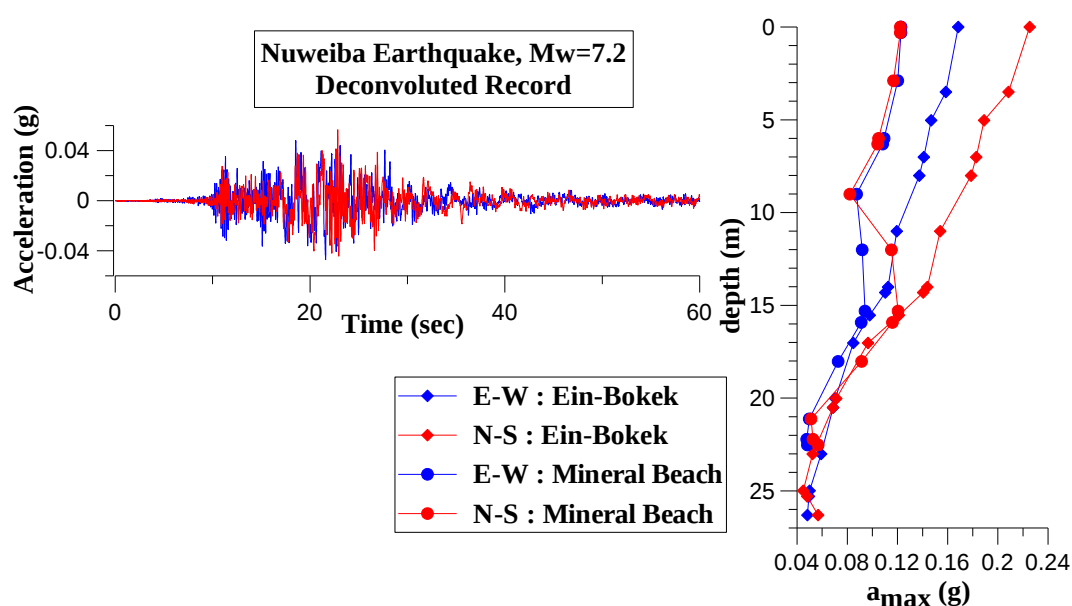
רעידה	מגניטודה	תחנה	מרחק תחנת המדידה מהמוקד או מאזור הקריעה הקרוב (ק"מ)	רכיב
Nuweiba, Gulf of Aqaba, 1995	$M_w = 7.2$	אילת	95	S-N, E-W
Chalfant Valley, California, 1986	6.2	Benton	37.2	270, 360
		Bishop - Paradise Lodge	23	070, 160
		Bishop - LADWP South St	9.2	180, 270
		Lake Crowley - Shehorn Res	36	009, 099
Duzce, Turkey, 1999	$M_w=7.1$	Lemont 531	11.4	E-W, N-S
		Lemont 1062	13.3	E-W, N-S
Imperial Valley, California, 1979	6.5	6610 Victoria	54.1	075, 345
		EC County Center	7.6	002, 092
		5057 El Centro	9.3	140, 230
		117 El Centro	8.3	180, 270
Superstition Hills, California, 1987	6.7	5061 Calipatria Fire Station	28.3	225, 315
		5062 Salton Sea Wildlife Refuge	27.1	225, 315

טבלה 6.3: פרטי רעידות אדמה ותחנות שונות בהן נקלטו. בניתוח תגובת אתר הוזנו רשומות תאוצה מתחנות אלה.

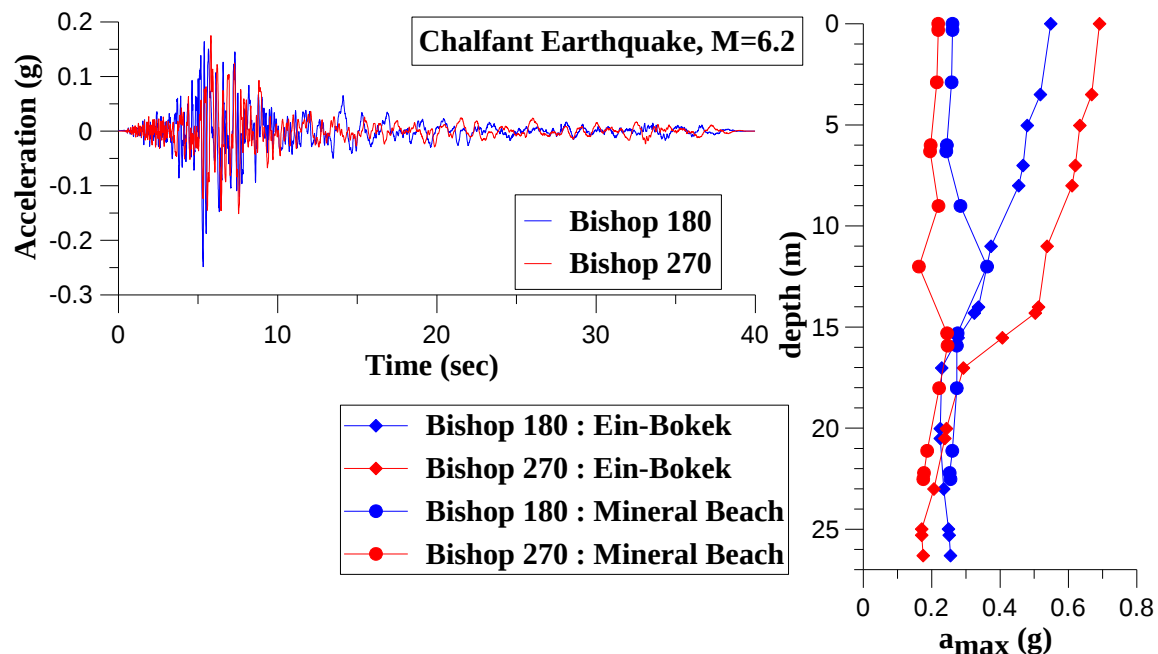
הערכת המרחק מאזור קריעה בעייתית, בעיקר ברעידות חזקות בהן שטח הקריעה נרחב. באיורים 6.16-6.21 מוצגות רשומות תאוצה, אקסלוגרמות, של חלק מרעידות האדמה המפורטות בטבלה. בכל רעידה מוצגת רשומת תאוצה מתחנה אחת בשני הכיוונים האופקיים (בצבע אדום וכחול) עם פרופיל תאוצת שיא (a_{max}) בחתך עומק של שני הקידוחים, עין בוקק וחוף מינרל (עין בוקק-מעויין, חוף מינרל-עיגול).



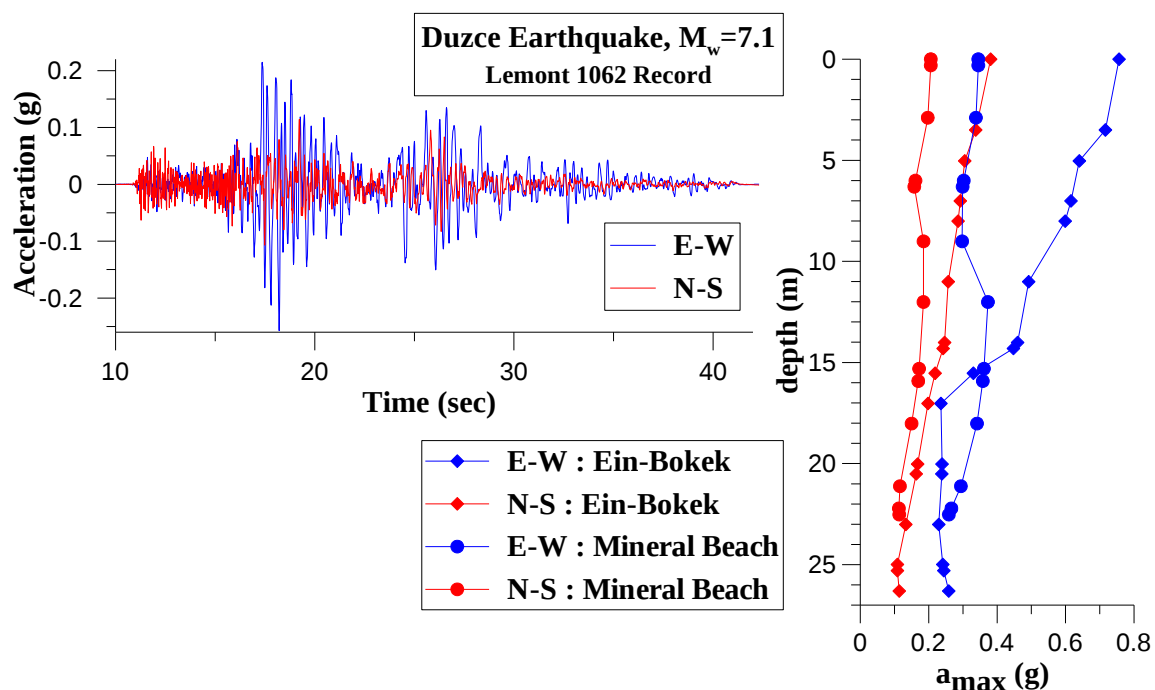
איור 6.16: רשומת תאוצה של רעידת האדמה בנואיבה, 1995, בכיוון צפון-דרום ומזרח-מערב כפי שנקלטה על גבי מילוי של כ-50 מ' מעל סלע קשה בעיר אילת. פרופיל תאוצת השיא כפי שחושב בתוכנה מוצג מימין עבור שני הקידוחים ובשני הכיוונים.



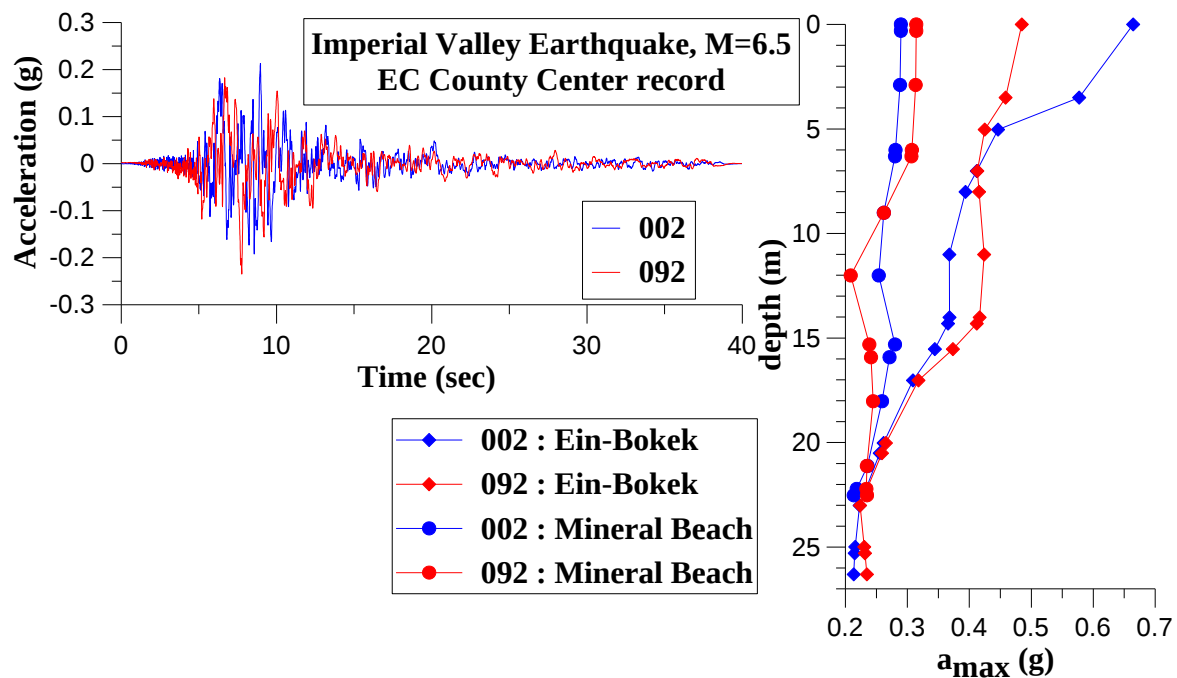
איור 6.17: רשומת תאוצה של רעידת האדמה בנואיבה בכיוון צפון-דרום ומזרח-מערב לפי חישוב דה-קונבולוציה של רשומת התאוצה בעיר אילת לסלע האם (בעקבות Zaslavsky & Shapira, 2000). פרופיל תאוצת השיא כפי שחושב בתוכנה מוצג מימין עבור שני הקידוחים ובשני הכיוונים.



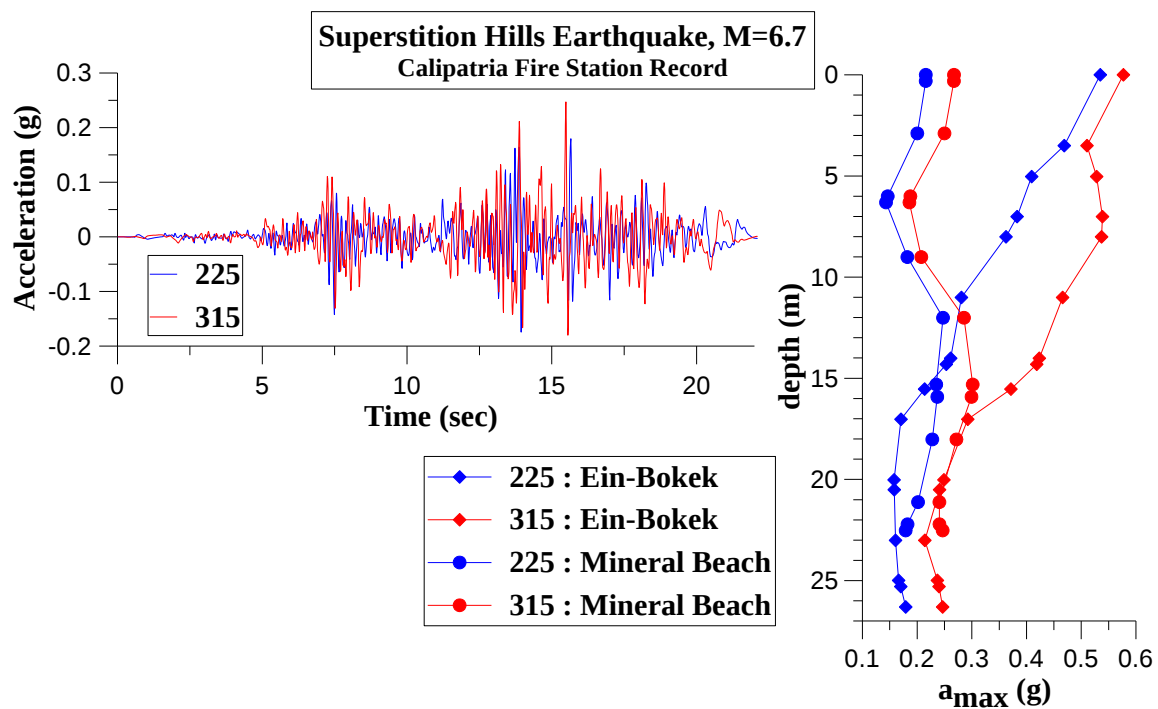
איור 6.18: רשומת תאוצה מרעידת האדמה ב-Chalfant, קליפורניה ב-1986. תוצאות תאוצת השיא בשני הקידוחים מוצגות מימין.



איור 6.19: רשומת תאוצה של רעידת האדמה ב-Duzce, טורקיה ב-1999. תוצאות השיא מוצגות בצד ימין



איור 6.20: רשומת תאוצה של רעידת האדמה ב-Imperial Valley, קליפורניה ב-1979. תאוצות השיא מוצגות בצד ימין



איור 6.21: רשומת תאוצה של רעידת האדמה ב-Supestition Hills, קליפורניה ב-1987. תאוצות השיא מוצגות בצד ימין

6.3.3 דיון בניתוח תגובת אתר

ניתן לראות בחתך עין בוקק הגברה משמעותית של תאוצת הקרקע לאורך החתך עד ערכים של פי 4 בפני השטח. לעומת זאת בחוף מינרל ההגברות ברוב ההרצות אינן גדולות ולעיתים לא ניכרות כלל. בעין בוקק מגיעות התאוצות בפני השטח לערכים גבוהים, עד 0.8 g ברשומה אחת מהרעידה ב-Duzce (איור 6.19). אך ברוב ההרצות הערך נמוך מ- 0.5 g . העלייה בתאוצת השיא של הקרקע עם העלייה בחתך הינה הדרגתית בחתך עין בוקק בדומה לפרופיל המוצג בספרות (איור 2.5 בפרק 2.2.3.1). בחתך חוף מינרל תאוצת השיא משתנה בצורה פחות קבועה ובמספר הרצות ישנה ירידה בתאוצת השיא בקטעים מסוימים בחתך.

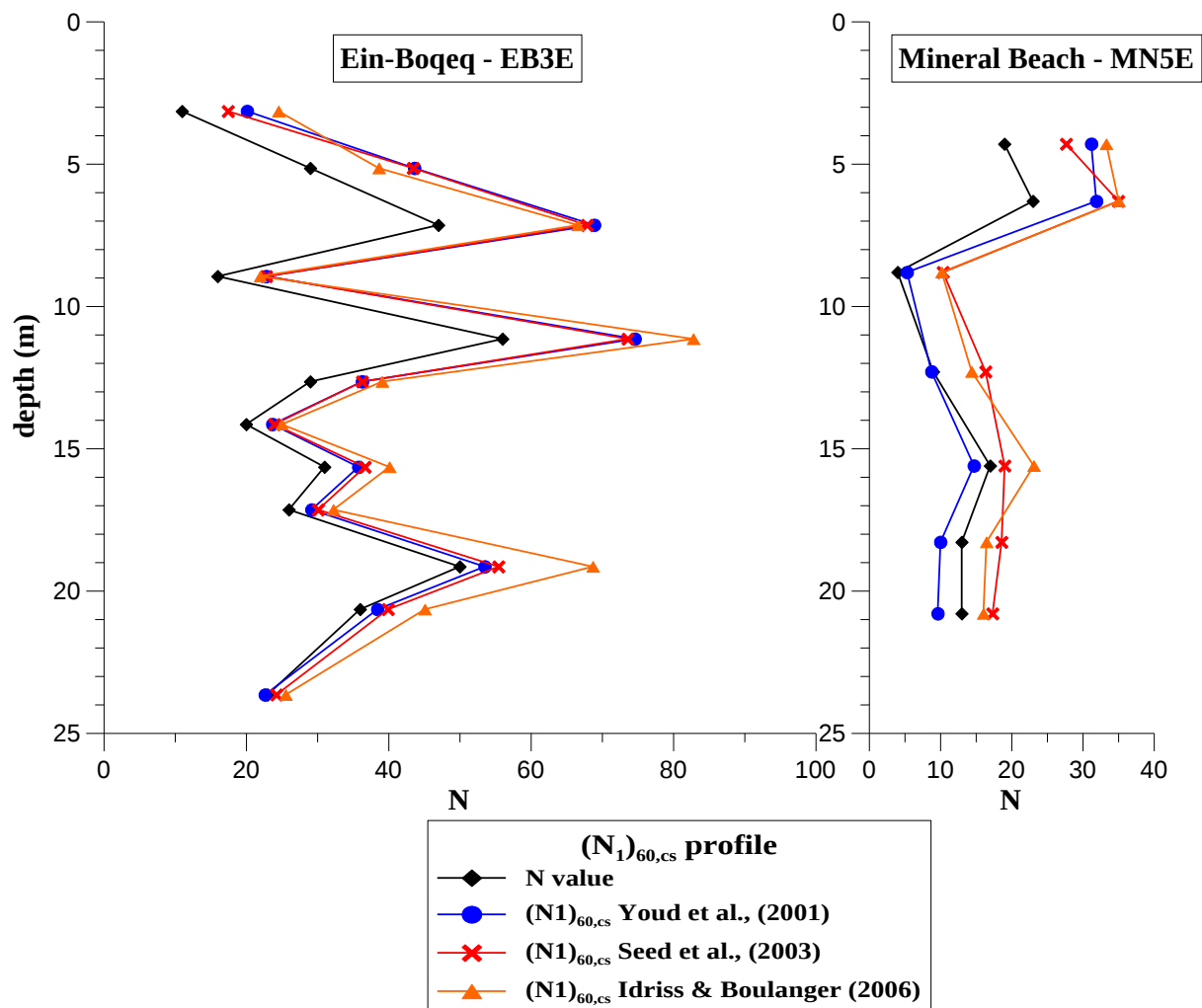
7 דיון

7.1 חישוב מקדם ביטחון כנגד התנזלות בקידוחים

7.1.1 פרמטרים גיאוטכניים בקידוחים

הבדיקות שנעשו במהלך הקידוחים, SPT ומהירות גלים סיסמיים מעלות תוצאות אותן צריך לנרמל לפרמטרים שונים כגון עומק הבדיקה, מאמץ אפקטיבי ועוד.

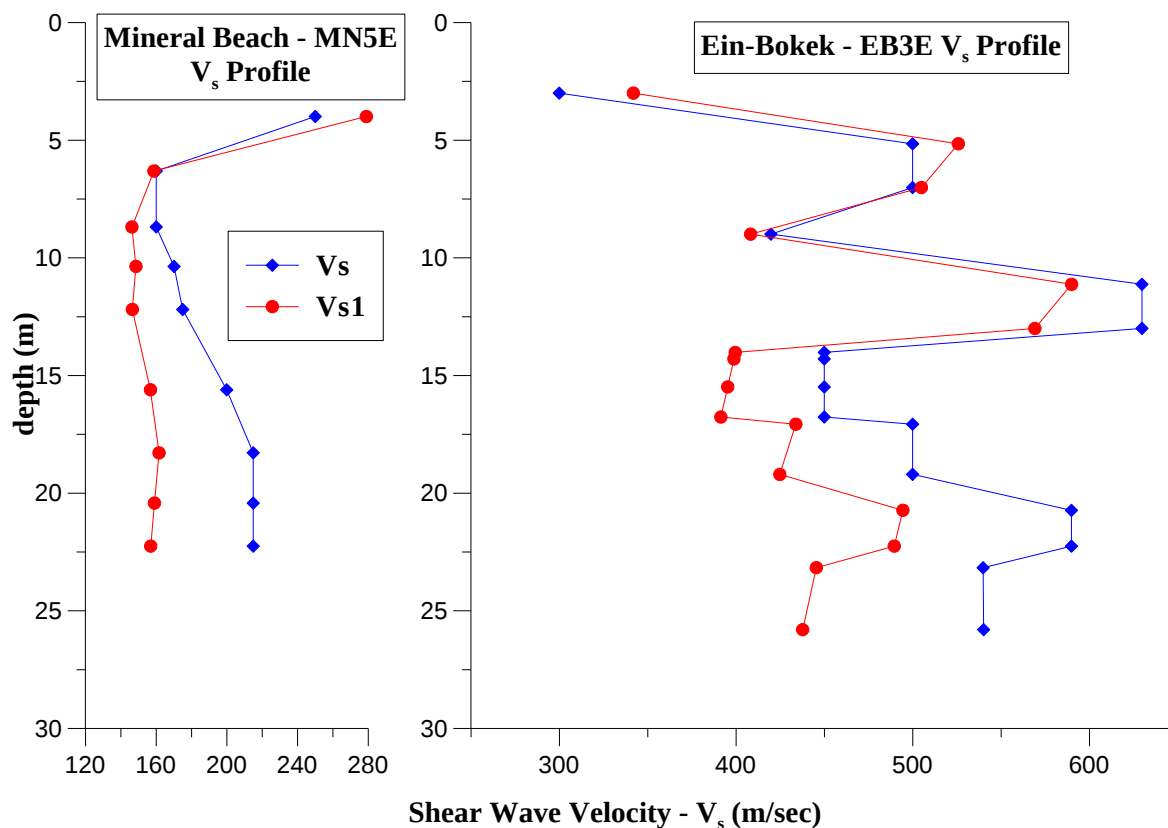
תוצאות בדיקת SPT מנורמלות משני הקידוחים מוצגות באיור 7.1 לפי 3 הגישות העיקריות המוצגות בפרק 2.4.3.4. הנרמול כולל גם את אחוז הדקים בקרקע. שיטת קבוצת העבודה NCEER (Youd et al., 2001) שיטתם של Seed et al. (2003) ושיטתם של Idriss & Boulanger (2006). למעשה, שלושת הגישות דומות. ההבדלים הם בעיקר בערכים המספריים בהם יש לנרמל הנובעים מבסיס נתונים מעט שונה, או מעובד באופן שונה.



איור 7.1: תוצאות נרמול בדיקות SPT בשני הקידוחים. התוצאות הגולמיות מוצגות ב-N ועיבוד התוצאה לקבלת ערך $(N_1)_{60,cs}$ לפי שיטות שונות.

ניתן לראות כי בקידוח עין בוקק ישנם ערכים גולמיים יותר של SPT עקב קרקע החלוקים הקשה יותר מהקרקע בחוף מינרל. לקרקע זו ניתן גם לייחס את ההבדלים הגדולים בתוצאות הבדיקה לאורך החתך. פגיעה אקראית בחלוק גדול יכולה לשנות משמעותית את תוצאות הבדיקה. לעומת זאת בחוף מינרל החתך הוא בעיקר חרסיתי-טיני ורך יותר. רק במטרים העליונים ישנה הופעה מסוימת של חול וחלוקים הגורמים לעלייה בחוזק הקרקע ולערכים גבוהים יותר של SPT.

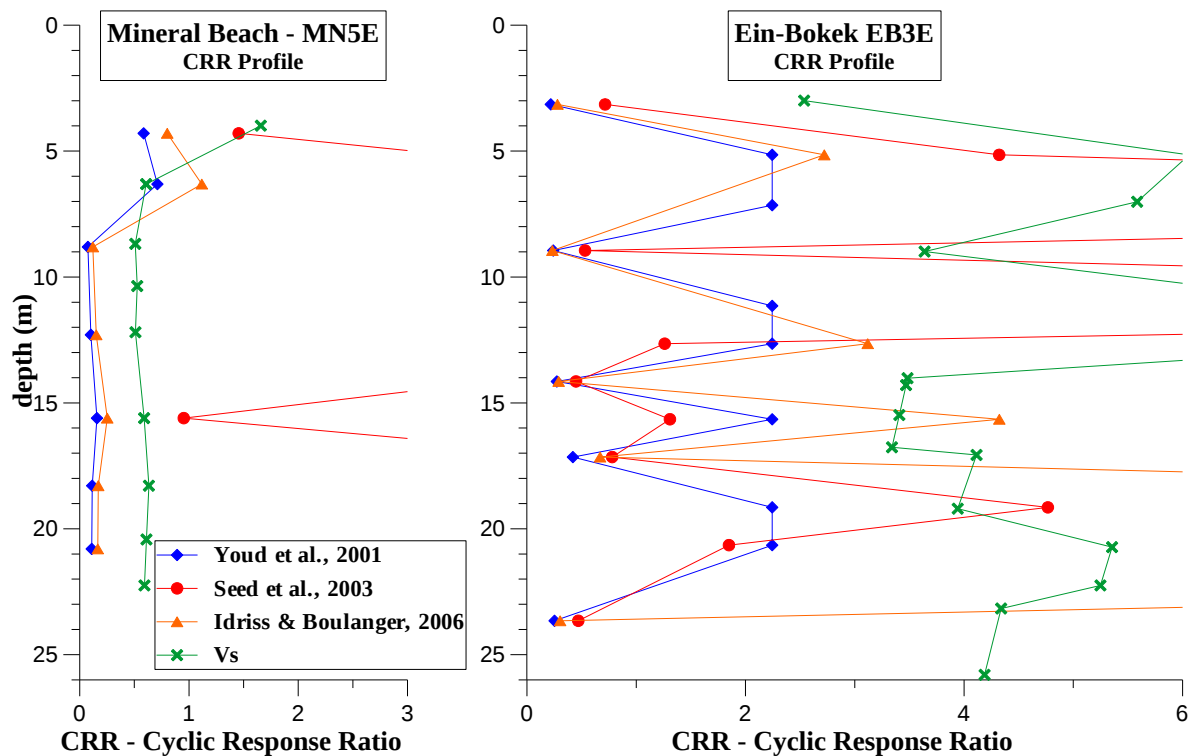
תוצאות מדידת מהירות גלי הגזירה משני הקידוחים מוצגות באיור 7.2. המהירות מנורמלת במאמץ הקבורה האפקטיבי בכל שכבה. ניתן שוב להבחין בהבדל בין החתך המגוון יותר בעין בוקק לעומת החתך המונוטוני בחוף מינרל למעט החלק העליון בו הקרקע קשה יותר. בשני הקידוחים ההבדל ניכר עם העליה בעומק וכתוצאה מכך בלחץ הקבורה.



איור 7.2: פרופיל מהירות גלי גזירה בשני הקידוחים. מוצגת המהירות הגולמית, V_s , והמנורמלת, V_{s1} .

7.1.2 יחס התנגדות מחזורי CRR

חישוב יחס התנגדות מחזורי, CRR, נעשה לפי שלושת השיטות המוזכרות לעיל. תוצאות החישוב לפי בדיקות SPT ולפי מהירות גלי הגזירה מוצגות באיור 7.3. לפי חלק מהגישות מתקבלים לעיתים ערכים גבוהים מאוד ולא סבירים של CRR. ערכים אלה מתקבלים, ככל הנראה, עקב חישוב לפי נוסחה המתאימה בדרך כלל לערכים נמוכים יותר של SPT. בערכים גבוהים של SPT, בהם גם לא קיימת סכנת התנזלות ממשית, יחס CRR עולה חדות.



איור 7.3: פרופיל יחס מאמצים מחזורי, CRR, בעומק שני הקידוחים לפי בדיקות SPT ולפי מהירות גלי גזירה. שיטתם של Seed et al., 2003 מבוססת על חישוב הסתברותי. בקביעת יחס CRR החישוב נעשה לפי הסתברות של 15% להתרחשות התנזלות. חלק מהערכים גבוהים מאוד ונמצאים מחוץ לסקלה.

ניתן לראות, שוב, את השינויים הגדולים בחתך עין בוקק לעומת חתך חוף מינרל. בחתך עין בוקק מתקבלים ערכים גבוהים של CRR, לעיתים גם מעל $CRR=1$. ערכים אלה מצויים בטווח גבוה מעקום CRR בתרשימים האמפיריים המבוססים על מקרי עבר של התנזלות, כך שלמעשה בנקודות אלה אין חשש להתנזלות קרקע – ערכי SPT המנורמלים בנקודות אלה גבוהים מערך הסף של התנזלות ($(N_1)_{60} > 35$). לאורך החתך יחס CRR לפי מהירות גלי גזירה נשאר גבוה מאוד גם בנקודות בהן יחס CRR לפי בדיקות SPT נמוך. יתכן שהבדל זה נובע מכך שמדידת מהירות הגלים הסיסמיים מחושבת בתווך הטרוגני הכולל חלוקים גדולים, חול וטין, בעוד בדיקת SPT מותאמת בעיקר לחול/טין. כאשר יש בקרקע חלוקים גדולים יחסית לצינור הבדיקה דגימת הציוד של SPT אינה מייצגת את כלל חתך הקרקע. עקב כך, נראה שהמדד המדויק יותר לחוזק הקרקע ועמידות הקרקע כנגד התנזלות בחתך עין בוקק יתקבל ממהירות גלים סיסמיים.

חתך חוף מינרל די הומוגני למעט חלקו העליון, בהתאם למגמה שנראתה במדידות SPT ומהירות גלי גזירה. גם כאן מתקבל ממהירות גלי הגזירה יחס CRR גבוה יותר בדרך כלל, אם כי כאן בדיקות SPT אמינות יותר. לפי Seed et al., (2003) מתקבל יחס CRR הגבוה ביותר. הדבר נובע מכך שאחוז הדקים הוא גורם משפיע מאוד בחישוב CRR, ואחוז הדקים הגבוה בחתך הטה את התוצאה לערכים של קרקעות חזקות ביותר.

עקב אחוז הדקים הגבוה בחתך חוף מינרל חישוב יחס CRR הוא בעייתי. בקרקעות חרסיות או טיניות ההמלצה היא להשתמש בשיטות שונות להערכת עמידות הקרקע להתנזלות (פרק 2.4.4).

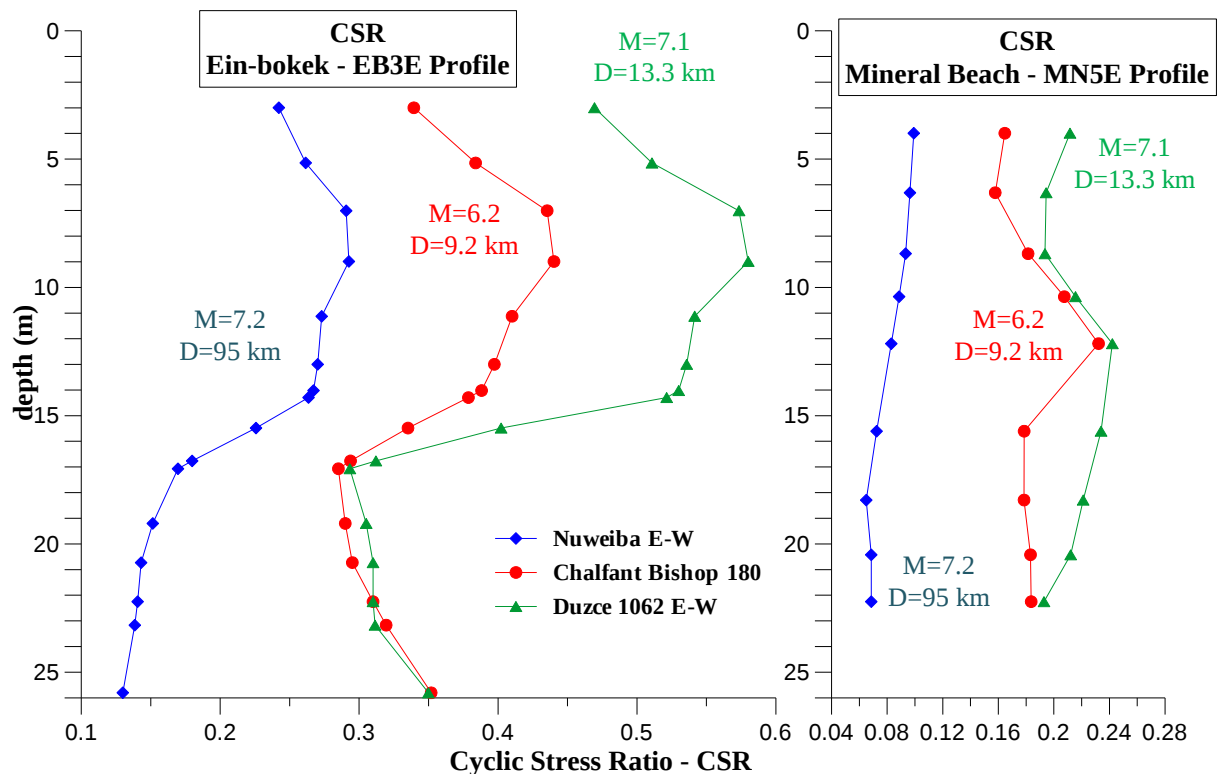
7.1.3 יחס מאמצים מחזורי CSR

ספקטרום התגובה משמש בעיקר לחישוב תאוצות צפויות במבנים לפי זמני מחזור. לחישוב יחס CSR יש צורך בערך בודד של תאוצת הקרקע המקסימאלית, a_{max} , בכל שכבה בקרקע.

חישוב תאוצת קרקע נעשה בניתוח תגובת האתר לפי רשומות תאוצה רבות של מספר רעידות אדמה, כפי שמוצג בפרק 6.3.2 (איורים 6.16-6.21). לצורך חישוב מקדם הביטחון כנגד התנזלות נבחרו רק דוגמאות ספורות עם הערכים הגבוהים ביותר של תאוצת קרקע מקסימאלית.

באיור 7.4 מוצג פרופיל של יחס CSR בחתך עין בוקק ובחתך חוף מינרל לפי ערכים מירביים של רשומת תאוצה, משלוש רעידות שונות, רעידת האדמה בנואיבה ($M_w=7.2$, 1995), רעידת האדמה ב-Chalfant ($M=6.2$, 1986), ורעידת האדמה ב-Duzce ($M_w=7.1$, 1999). בכל רעידה החישוב מוצג רק עבור הכיוון

בו תאוצת השיא, a_{max} , גבוהה יותר.



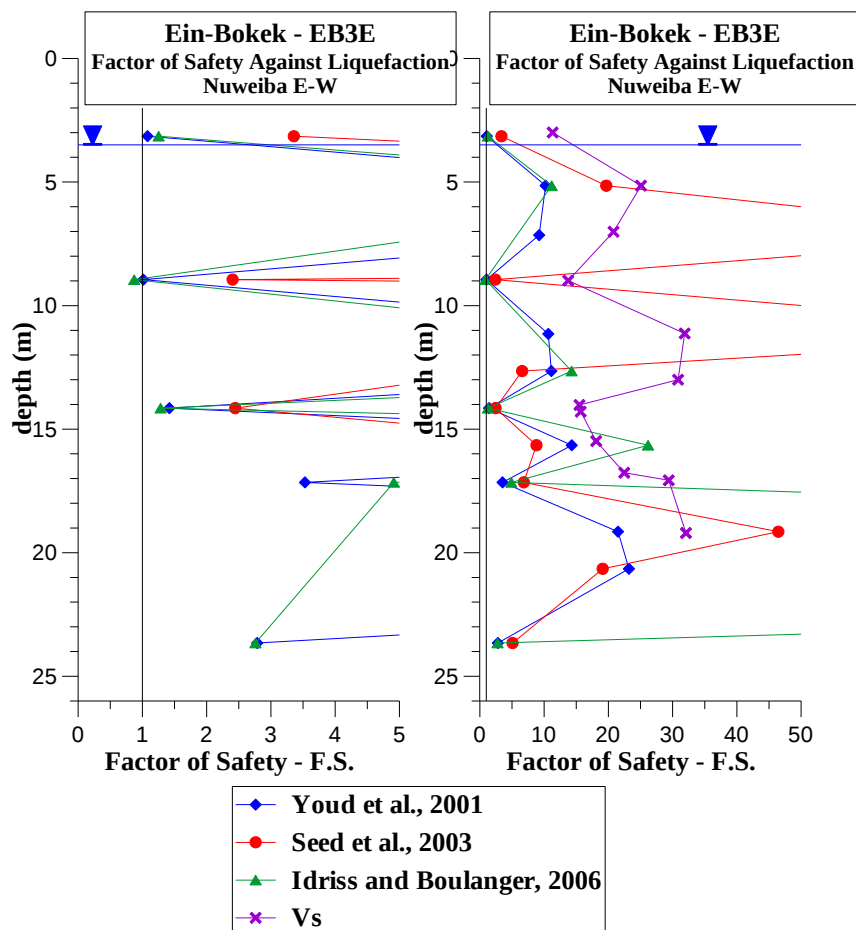
איור 7.4: פרופיל יחס מאמצים מחזורי, CSR, בשני הקידוחים לפי 3 רשומות תאוצה. כיוון מזרח-מערב מהרעידה בנואיבה. כיוון 180 (צפון-דרום) בתחנת Bishop מהרעידה ב-Chalfant. כיוון מזרח-מערב בתחנת Lemont 1062 מהרעידה ב-Duzce. ליד כל איור מוצגת מגניטודת הרעידה והמרחק מהמוקד או מאזור הקריעה הקרוב

ניתן לראות בחתך עין בוקק שברעידה חזקה, כדוגמת הרעש ב-Duzce, ניתן להגיע לערכים גבוהים מאוד של CSR במרחק לא רב מהרעידה, כ-15 ק"מ. ערכים אלה, מעל 0.6, גבוהים אף מהמתואר בתרשימים

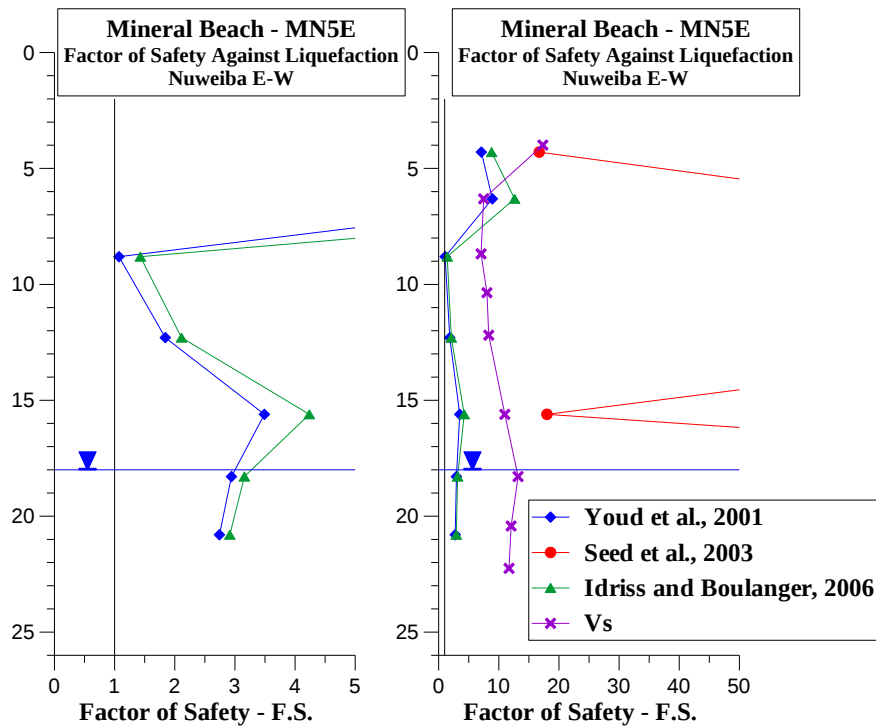
האמפיריים של השיטה המפושטת (איור 2.7, פרק 2.2.3.4). במרחקים גדולים יותר, כגון רעידת האדמה בנואיבה הממוקמת כ-100 ק"מ ממקום המדידה, או ברעידות חלשות יותר, כגון הרשומה מ-Chalfant שנקלטה במרחק של כ-10 ק"מ אך מגניטודת הרעידה קטנה יותר, הערכים נמוכים יותר אך עדיין משמעותיים. באזור ים המלח ניתן לצפות לכל אחת מהאפשרויות.

7.1.4 מקדם ביטחון כנגד התנזלות

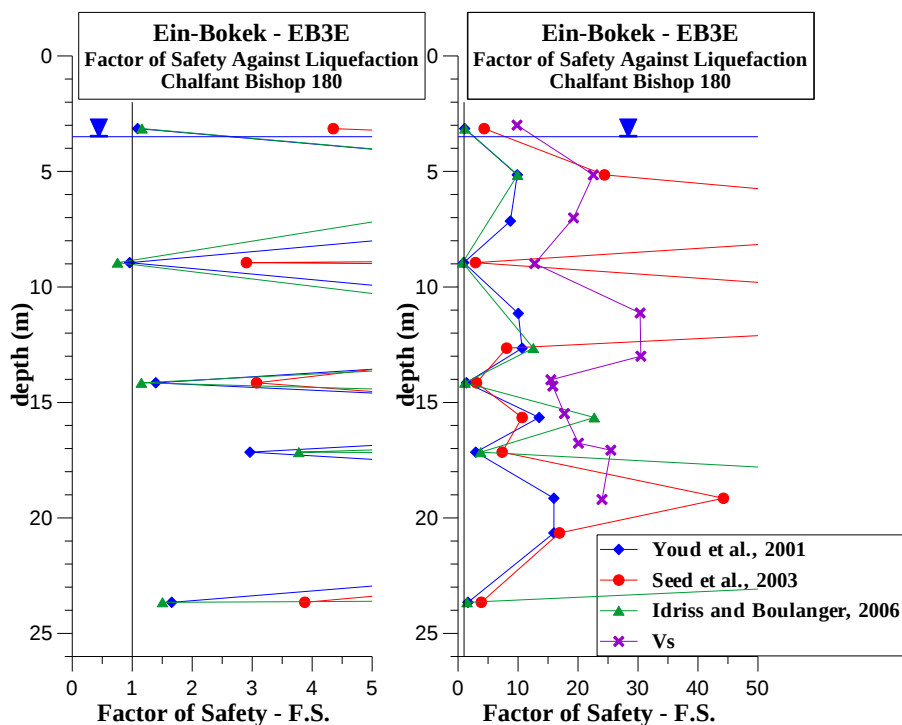
חישוב מקדם הביטחון נעשה על בסיס בדיקות SPT ומהירות גלי גזירה, V_s , ובהתאם לשלוש הגישות העדכניות בשיטה המפושטת (פרק 2.4.3.4). בנוסף להבדלים בין הגישות הקיימים בחישוב יחס CRR קיימים הבדלים גם בחישוב מקדם ההתאמה עבור מגניטודת רעידת האדמה, MSF, ועבור עומק הקבורה, K_σ . מקדמים אלה חושבו לפי המתואר בפרק 2.4.3. באיורים 7.5-7.10 מוצג פרופיל מקדם הביטחון בחתך עין בוקק ובחתך חוף מינרל. מקדם הביטחון מוצג בשתי סקלות שונות עבור כל פרופיל עקב הערכים הגבוהים המתקבלים בחלק מהמקומות



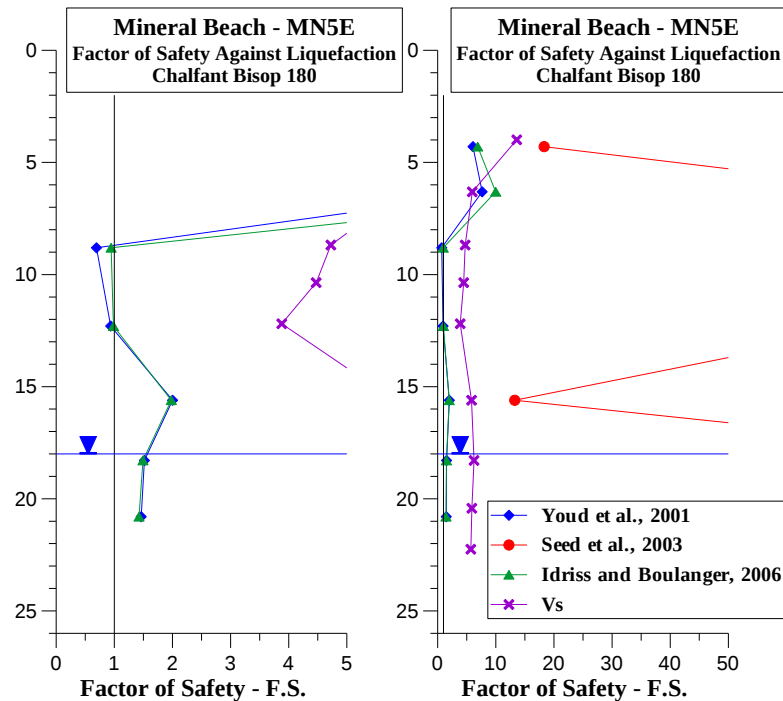
איור 7.5: מקדם ביטחון כנגד התנזלות בקידוח עין בוקק לפי רשומת תאוצה מזרח-מערב מהרעידה בנואיבה. החישוב מוצג לפי בדיקות SPT (כחול, אדום וירוק) בהתאם לגישות השונות בספרות המוצגות בפרק זה, ולפי מהירות גלי גזירה (סגול). התוצאות מוצגות בקנה מידה גדול מימין ובקנה מידה קטן משמאל. התנזלות מתרחשת רק בקרקע רוויה, מתחת למפלס מי התהום המיוצג בקו כחול. הערכים מעל קו זה אינם רלוונטיים לסכנת התנזלות במפלס הנוכחי.



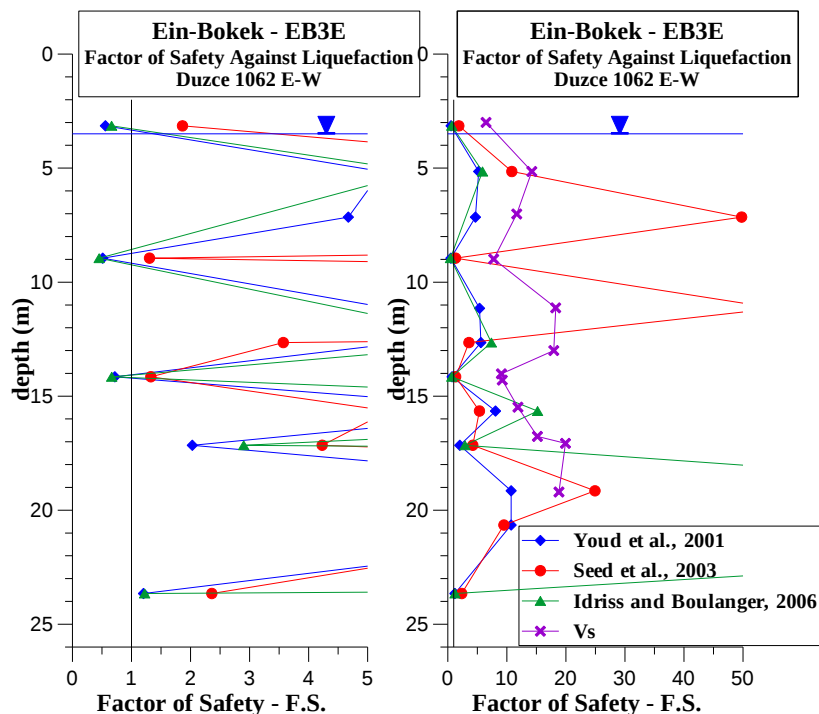
איור 7.6: מקדם ביטחון כנגד התנזלות בקידוח חוף מינרל לפי רשומת תאוצה מזרח-מערב מהרעידה בנואיבה. החישוב מוצג לפי בדיקות SPT (כחול, אדום וירוק) ולפי מהירות גלי גזירה (סגול) בהתאם לשיטה המפושטת, למרות שאיננה תואמת חתך חרסיתי-טיני. התוצאות מוצגות בקנה מידה גדול מימין ובקנה מידה קטן משמאל. התנזלות מתרחשת רק בקרקע רוויה, מתחת למפלס מי התהום המיוצג בקו כחול. הערכים מעל קו זה אינם רלוונטיים לסכנת התנזלות במפלס הנוכחי.



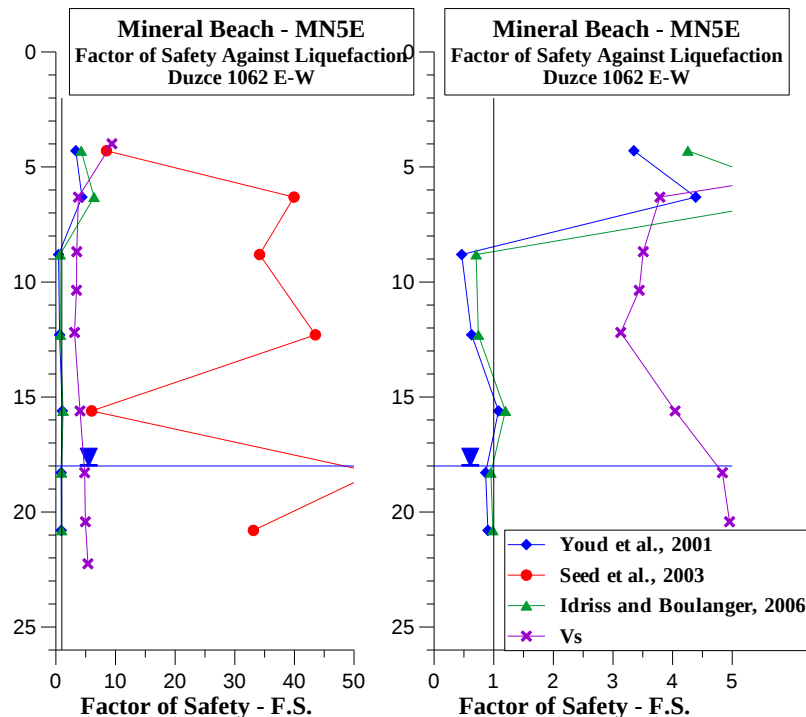
איור 7.7: מקדם ביטחון כנגד התנזלות בקידוח עין בוקק לפי רשומה בכיוון 180 (צפון-דרום) בתחנת Bishop Chalfant. החישוב מוצג לפי בדיקות SPT (כחול, אדום וירוק) בהתאם לגישות השונות בספרות המוצגות בפרק זה, ולפי מהירות גלי גזירה (סגול). התוצאות מוצגות בקנה מידה גדול מימין ובקנה מידה קטן משמאל. התנזלות מתרחשת רק בקרקע רוויה, מתחת למפלס מי התהום המיוצג בקו כחול. הערכים מעל קו זה אינם רלוונטיים לסכנת התנזלות במפלס הנוכחי.



איור 7.8: מקדם ביטחון כנגד התנזלות בקידוח חוף מינרל לפי רשומה בכיוון 180 (צפון-דרום) בתחנת Bishop מהרעידה ב-Chalfant. החישוב מוצג לפי בדיקות SPT (כחול, אדום וירוק) ולפי מהירות גלי גזירה (סגול) בהתאם לשיטה המפושטת, למרות שאיננה תואמת חתך חרסיתי-טיני. התוצאות מוצגות בקנה מידה גדול מימין ובקנה מידה קטן משמאל. התנזלות מתרחשת רק בקרקע רוויה, מתחת למפלס מי התהום המיוצג בקו כחול. הערכים מעל קו זה אינם רלוונטיים לסכנת התנזלות במפלס הנוכחי.



איור 7.9: מקדם ביטחון כנגד התנזלות בקידוח עין בוקק לפי רשומת תאוצה מזרח-מערב בתחנת Lemont 1062 מהרעידה ב-Duzce. החישוב מוצג לפי בדיקות SPT (כחול, אדום וירוק) בהתאם לגישות השונות בספרות המוצגות בפרק זה, ולפי מהירות גלי גזירה (סגול). התוצאות מוצגות בקנה מידה גדול מימין ובקנה מידה קטן משמאל. התנזלות מתרחשת רק בקרקע רוויה, מתחת למפלס מי התהום המיוצג בקו כחול. הערכים מעל קו זה אינם רלוונטיים לסכנת התנזלות במפלס הנוכחי.



איור 7.10: מקדם ביטחון כנגד התנזלות בקידוח חוף מינרל לפי רשומות תאוצה מזרח-מערב בתחנה Lemont 1062 מהרעידה Duzce-ב. החישוב מוצג לפי בדיקות SPT (כחול, אדום וירוק) ולפי מהירות גלי גזירה (סגול) בהתאם לשיטה המפושטת, למרות שאיננה תואמת חתך חרסיתי-טיני. התוצאות מוצגות בקנה מידה גדול מימין ובקנה מידה קטן משמאל. התנזלות מתרחשת רק בקרקע רוויה, מתחת למפלס מי התהום המיוצג בקו כחול. הערכים מעל קו זה אינם רלוונטיים לסכנת התנזלות במפלס הנוכחי.

בחתך עין בוקק בעומק 7, 14 מתקבל מקדם ביטחון של 1 לפי בדיקות SPT. באיור 7.5, על בסיס רעידת האדמה בנואיבה, בעומק 7 מ' בלבד מקדם הביטחון נמוך מ-1 וצפויה התנזלות, אך בעומק 14 מ' מקדם הביטחון לא גבוה, 1.35. באיור 7.9, על בסיס רעידת האדמה ב-Duzce, מקדם הביטחון נמוך מ-1 גם בעומק 14 מ' וקיימת סכנת התנזלות. בעומק 23 מ' מקדם הביטחון קרוב ל-1. לעומת זאת לפי מהירות גלי הגזירה מקדם הביטחון גבוה בכל אחד מהתרחישים לרעידת אדמה.

שיטת ההערכה לפי מהירות גלי הגזירה בספרות פחות מבוססת ופחות ודאית מההערכה לפי בדיקות SPT. הגישה העדכנית במחקר (פרק 2.4.3) היא לראות בחישוב לפי מהירות גלי גזירה הערכה גסה של טווח הביטחון בו נמצאים. מקדם הביטחון הנמוך ביותר שחושב לפי מהירות גלי הגזירה גבוה מ-7, וזה רק בתרחיש של רעידת אדמה חזקה ($M_w=7.1$) במרחק של פחות מ-20 ק"מ מהאתר (איור 7.9). בהתאם לכך החתך נראה כלא רגיש להתנזלות. בדיקות SPT אינן תואמות קרקעות חלוקים, הניתנות למדידה אמינה יותר על ידי מהירות גלי גזירה, ובהתאם לכך יוגדר החתך כלא רגיש להתנזלות. עדיין לא ניתן לשלול לחלוטין את רגישות החתך עקב בדיקות SPT, שאמנם לא תואמות לסוג הקרקע אך עדיין הטעות תהיה בדרך כלל בערכים גבוהים מידי. כאשר ערכי SPT נמוכים (ומקדם הביטחון נמוך) יתכן שהם אמינים אף בקרקע של חלוקים.

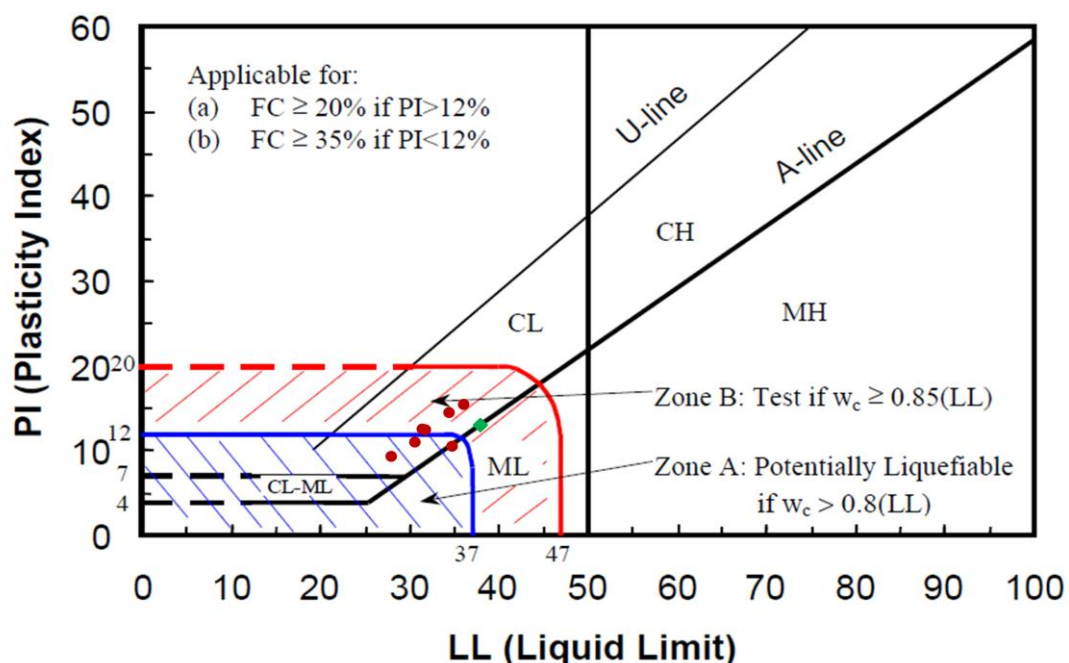
בנקודות מעל מפלס מי התהום לא צפויה התנזלות. במידה שמפלס המים יעלה תהיה לנקודות אלה משמעות אם כי שינוי המפלס גם ישפיע על המאמץ האפקטיבי וישנה את יחס CRR ואף את יחס CSR.

תוצאות חישוב מקדם הביטחון של חתך חוף מינרל מוצגות באיורים לעיל, למרות הבעייתיות בשימוש בשיטה המפושטת בקרקעות אחוז דקים גבוה. לפי השיטה המפושטת מקדם הביטחון בחוף מינרל גבוה בהתבסס על מהירות גלי הגזירה ונמוך מ-1 (בחלק מהתרחישים) בהתבסס על בדיקות SPT, אך בפועל שיטה זו בעייתית בחתך חוף מינרל חרסיתי-טיני. בחתך זה יש לבדוק את האפשרות לכשל בגזירה לפי גישה שונה, אם כי יתכן שבשכבות מסוימות בחתך זה בהן אחוז החלוקים/חול גבוה השיטה המפושטת מתאימה.

7.1.5 כשל קרקע בחתך חרסיתי-טיני

לפי Seed & Idriss (1982) רגישות קרקע חרסיתית תלויה בתכולת הרטיבות, בגבול הנזילות ובאחוז החרסית (הקריטריון הסיני). לפי Frydman et al. (2008) מרבית קרקעות הבוץ מהרביעון באזור ים המלח הינן טיניות ולא חרסיתיות, כך שתנאי אחד של אחוז חרסיות קטן ככל הנראה מתקיים בחתך חוף מינרל (בדוגמאות החומר בקידוחים נבדק אחוז הדקים ללא קביעת אחוז חרסית). בנוסף נבדקו שני הקריטריונים האחרים. בטבלה 6 מוצגות תוצאות הבדיקה בחתך חוף מינרל. בחתך עין בוקק נבדק אופק חרסיתי אחד שלא נמצא רגיש להתנזלות. לפי שיטה זו ישנם מספר אופקים בהם עלולה להתרחש התנזלות (או כשל קרקע בגזירה). לא ניתן לתלות את הרגישות באופי רעידת האדמה.

Seed et al. (2003) תולים את הרגישות במיקום הקרקעות בדיאגרמת הפלסטיות. באיור 7.11 מוצגות דוגמאות הקרקע מחתך חוף מינרל ודוגמה אחת מחתך עין בוקק בדיאגרמת הפלסטיות המחולקת לשלושה אזורי סיכון. תוצאות הערכת הרגישות באופקים השונים מוצגות גם הן בטבלה 7.1.



איור 7.11: מיקום דוגמאות מקידוח חוף מינרל, MN5E, ודוגמה אחת (בצבע ירוק) מקידוח עין בוקק, EB3E בדיאגרמת הפלסטיות של Seed et al., 2003. הדוגמאות נמצאות בתחום הפלסטיות בו עלולה להתרחש התנזלות לפי תכולת הרטיבות הגבוהה

Bray & Sancio (2006) הציעו סולם מדורג יותר של רגישות הקרקע. תוצאות הערכה לפי שיטה זו מוצגות גם הן בטבלה 7.1.

בשיטות אלה לא תמיד ברורה ההבחנה בין סוגי כשל אפשריים ברעידת אדמה. הגדרת הכשל בקרקע חרסיתית-טינית בפרק זה היא בהתאם ל-Idriss & Boulanger (2008) ושונה מהתנזלות במנגנון הקלאסי.

לפי כל השיטות ישנם לפחות מספר אופקים בקידוחים שנבדקו בהם יתכן כשל של הקרקע בעת רעידת אדמה חזקה, לפיכך נראה שגם אם אין חשש להתנזלות בהגדרתה הקלאסית עדיין יש חשש לכשל דומה ברעידת אדמה. חשש זה קיים בעיקר בחתך חוף מינרל החרסיתית-טיני, אך גם בחתך עין בוקק בו יש אופקים דקים של חרסית. כאשר יש כשל, גם בשכבה דקה, שכבות מעל שלא נפגעו מהרעידה עצמה עלולות לגלוש על גבי אזור הכשל ולגרום להתפשטות לטרלית (Youd, 2003). בחוף ים המלח קיימת תשתית של חרסיות-טין בעלי חוזק גזירה נמוך, בעיקר עקב שטיפת מלחים בקרקע במים מתוקים.

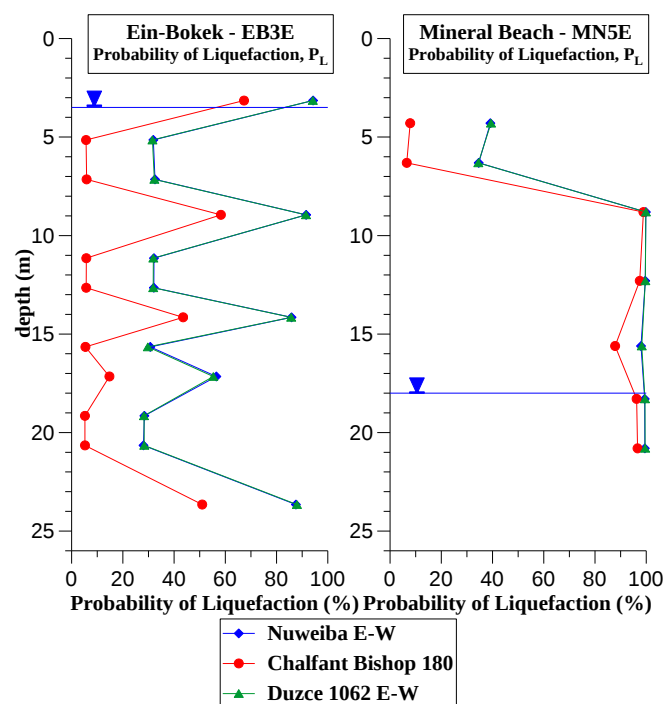
רגישות לכשל קרקע בהתנזלות או במנגנון דמוי התנזלות ברעידת אדמה			
Bray & Sancio	Seed et al	Seed & Idriss	עומק (מ')
לא רגיש	לא רגיש	לא רגיש	6.2
רגישות בינונית	רגיש	רגיש	8.8
רגיש	רגיש	רגיש	12.2
לא רגיש	לא רגיש	לא רגיש	15.6
רגישות בינונית	רגיש	רגיש	18.3
רגישות בינונית	רגיש	גבולי	20.8
רגישות בינונית	רגיש	רגיש	22.3
רגישות בינונית	רגיש	לא רגיש	EB3E – 14.2

טבלה 7.1: רגישות לכשל של דוגמאות קרקע מקידוח חוף מינרל, MN5E, ודוגמה אחת מקידוח עין בוקק, EB3E מעומק 14.2 מ'.

7.2 חישוב הסתברותי לפוטנציאל התנזלות

חישוב מקדם הביטחון נעשה לפי השיטה הדטרמיניסטית. ישנו ערך סף להתרחשות התנזלות, CRR, שניתן לחלק ביחס CSR הצפוי. חישוב הסתברות להתנזלות לפי המתואר בפרק 2.2.5 מוצג באיור 7.12 המבוסס על שלוש רשומות התאוצה שחושב לפיהן מקדם הביטחון. כיוון מזרח – מערב מהרעידה בנואיבה, כיוון 180 (צפון-דרום) בתחנה ב-Bishop מהרעידה ב-Chalfant וכיוון מזרח-מערב בתחנה Lemont 1062 מהרעידה ב-Duzce. החישוב נעשה לפי Youd et al., 2001. ניתן לראות שבמספר מקומות בחתך עין בוקק ישנה הסתברות בינונית עד גבוהה להתנזלות, בדומה למקדם הביטחון שאינו גבוה. בחתך חוף מינרל ההסתברות להתנזלות באיזור הרווי גבוהה מאוד, אם כי כנראה שגישה זו של הערכת הסיכון לא מתאימה לחתך חרסיתית-טיני בדומה לקביעת מקדם הביטחון.

בדומה לחישוב מקדם הביטחון, גם כאן משמעות ההסתברות קיימת רק בחלק הרווי. מעל למפלס מי התהום לא צפויה התנזלות (בהגדרה הקלאסית) והערכים מוצגים כחישוב תיאורטי בלבד. בחישוב ההסתברות להתנזלות מגניטודת רעידת האדמה משמעותית יותר מיחס המאמצים המחזורי, CSR. עקב כך ההסתברות לפי רעידת האדמה בנואיבה ולפי הרעידה ב-Duzce כמעט זהות. המגניטודה בנואיבה היא $M_w=7.2$ בעוד ב-Duzce $M_w=7.1$, מעט נמוך יותר כך שלמרות שתאוצות הקרקע ב-Duzce גבוהות בהרבה עקב הקרבה למקור הרעידה, ההסתברות דומה. לעומת זאת המגניטודה ב-Chalfant, 6.2, קטנה בסדר גודל. למרות תאוצות הקרקע הגבוהות מהרעידה בנואיבה ההסתברות להתנזלות קטנה. חישוב ההסתברות להתנזלות מבוסס על ערך $(N_1)_{60,cs}$ של בדיקות SPT. בדומה למקדם הביטחון הנמוך במספר שכבות בהתאם לבדיקות SPT מתקבלת הסתברות גבוהה להתנזלות. נראה ששיטה הסתברותית המבוססת על מהירות גלי הגזירה הייתה מעלה הסתברויות נמוכות בהרבה.



איור 7.12: חישוב הסתברות להתנזלות בחתך עין בוקק, EB3E, ובחתך חוף מינרל, MN5E. החישוב מוצג לפי 3 רשומות שונות אך הערכים לפי רעידת האדמה בנואיבה ולפי הרעידה ב-Duzce כמעט זהים. התנזלות מתרחשת רק בקרקע רוויה, מתחת למפלס מי התהום המיוצג בקו כחול. הערכים מעל קו זה אינם רלוונטיים במפלס הנוכחי.

7.3 הערכה רגיונלית של רגישות להתנזלות

7.3.1 הערכה רגיונלית על בסיס הקידוחים

שני חתכי הקידוחים מייצגים את שני הפציאסים הקיימים בתצורת צאלים ההולוקנית. חתך חוף מינרל, על אף שנמצא באזור מעבר ממניפת סחף למישור חוף שקט, מייצג ברובו את הפציאס האגמי של דטריטוס חרסיתי-טיני, בעוד חתך עין בוקק מייצג את פציאס השוליים, מניפות הסחף. הן בחתך עין בוקק והן בחתך חוף מינרל הופיעו אופקים של הפציאס האחר כתוצאה מייחסי האצבוע והשינויים הלטרליים המהירים בתצורה.

מתוצאות קידוח נקודתי לא ניתן להסיק במדויק לגבי מקדם הביטחון בתצורת צאלים לאורך כל חופי ים המלח אך ניתן להסיק הערכה כללית.

מקידוח עין בוקק עלה כי בחתך זה לא קיים חשש ברור להתנזלות (על בסיס מהירות גלי גזירה), אם כי לא ניתן לשלול לחלוטין את האפשרות לכך (על בסיס בדיקות SPT). כתוצאה מכך לא ניתן לקבוע באופן גורף שבפציאס השוליים לא קיימת סכנת התנזלות.

מקידוח חוף מינרל עולה כי לא קיים באתר חשש להתנזלות רגילה, אם כי קיים סיכון להחלשות וכשל בגזירה קרקע בעת רעידת אדמה. לפי חלק מהשיטות סוג כשל זה בקרקע חרסיתית-טינית מוגדר גם הוא כהתנזלות קרקע. חתך קרקע דומה של הפציאס העמוק נצפה גם במחשופים ובקידוחים רבים ורגישות דומה צפויה גם בחתכים דומים, כאשר גורם משתנה המשפיע על רגישות הקרקע להחלשות וכשל בגזירה ברעידת אדמה הוא תכולת הרטיבות.

7.3.2 מפות הרגישות המסכמת

מפת הרגישות מבוססת, למעשה, על חיתוך של שני קריטריונים, עומק מפלס מי התהום וסוג הקרקע. קריטריון שלישי, סיסמי, זהה בכל אזור ים המלח. הקריטריון של סוג הקרקע מבוסס על הבחנה בין קרקע חרסיתית לקרקע של חול או חלוקים. מניתוח הקידוחים עולה הגדרה בעייתית. בחתך עין בוקק לפי גישה אחת (מהירות גלי גזירה) מקדם הביטחון כנגד התנזלות גבוה, בעוד לפי גישה אחרת (SPT) מקדם הביטחון קטן מ-1 במספר תרחישים. נראה כי בהשלכה לאזור בו נמצא הקידוח במפת הרגישות, אזור 1 (איור 5.8), לא ניתן לשלול את הרגישות להתנזלות. בתכנון הנדסי באזור זה יש לערוך חקירה מתקדמת באתר לשלילת פוטנציאל ההתנזלות.

בחתך חוף מינרל קיים חשש לכשל בגזירה בעת רעידת אדמה, אם כי כנראה כשל זה שונה מהתנזלות. הקידוח ממוקם בגבול אזור 1 ואזור 2 (איור 5.8) אך דומה יותר לחתך הקרקע באזור 2, הפציאס האגמי. מפת הרגישות מתייחסת להתנזלות במנגנון הקלאסי המתרחש בעיקר בקרקעות חוליות או בקרקעות חלוקים. עקב כך אזור זה סומן כאזור בעל רגישות נמוכה להתנזלות. מנגנוני כשל בגזירה אחרים צפויים להתרחש באזור 2 ויש להתייחס אליהם בעת תכנון הנדסי.

רגישות החתך החרסיתית-טיני בפציאס האגמי לכשל בגזירה בעת רעידת אדמה תלויה מאוד בתכולת הרטיבות בקרקע. די בתכולת רטיבות גבוהה בכדי שתתקיים סכנת רגישות גם מעל למפלס מי התהום. בעקבות זאת ניתן לחלק את מפת הרגישות לשני אזורים עיקריים:

- האזור בו קיימת סכנה הנדסית ממשית של התנזלות או סוג כשל אחר בגזירה בעת רעידת אדמה כולל את אזור 1 ואת אזור 2 (גוני אדום במפת הרגישות).

- האזור הפחות מסוכן הכולל את אזור 3 ואת אזור 4 (גוני ירוק במפת הרגישות).

אזור 2 נכלל באזור המסוכן יותר עקב קרבת מפלס מי התהום לפני השטח. בהנחה שקרקעות מעל מפלס מי התהום היו רוויות במי תהום או מי ים והתייבשו עקב ירידת המפלס הרי שקרקע קרובה יותר למפלס מי התהום הייתה רוויה בעתיד הקרוב יותר. יחד עם זאת יכולים להיות גם באזור 4 חרסיות עם תכולת רטיבות גבוהה, למשל באזורים של זרימה מעל מפלס מי התהום (Yecheili et al., 1993). עקב כך גם באזור 4 יש לשקול בחינת תכונות הקרקע ורגישותה לכשל בגזירה במידה וקיים חשש לרטיבות גבוהה בקרקע.

8 סיכום

בעבודה זו הוערך פוטנציאל ההתנזלות בחוף ים המלח המערבי. פוטנציאל ההתנזלות הוערך הוערך תחילה בקנה מידה אזורי בגישה איכותית ולאחר מכן התמקד בבחינה נקודתית בשני קידוחי בדיקה באופן כמותי. באופן רגיונלי נבחנו תנאי סף להתרחשות התנזלות מבחינה סיסמית, גיאולוגית והידרולוגית. אזור ים המלח כולו חשוף לפעילות סיסמית חזקה. תנאי סף גיאולוגיים קיימים במניפות סחף רצנטיות שמופן בתוכנת ממ"ג. תנאי הסף ההידרולוגיים הוערכו לפי עומק סף של 20 מ' למפלס מי התהום המחושב בתוכנת ממ"ג. בשילוב מיפוי מניפות הסחף עם מיפוי עומק הסף למפלס מי התהום יוצרה מפת רגישות להתנזלות בחופי ים המלח. מפת הרגישות דורגה ב-4 דרגות מהאזור הרגיש ביותר בו נדרשת חקירה גיאוטכנית מתקדמת לבדיקת פוטנציאל ההתנזלות לאזור הפחות רגיש בו לא צפויה סכנת התנזלות.

בקנה מידה מקומי נעשו שני קידוחים גיאוטכניים לעומק של 35 מ' בשני חתכים מייצגים. קידוח EB3E במלונות עין בוקק בחתך של חלוקים וחול במניפת סחף. קידוח MN5E בחוף מינרל בחתך מעורב של חרסית וטין עם מעט חלוקים וחול. ניתוח תגובת אתר נעשה בקידוחים בתוכנת SHAKE2000 לחישוב תאוצת הקרקע המקסימאלית ברעידת אדמה. בעזרת נתונים אלה חושב מקדם הביטחון כנגד התנזלות בשני הקידוחים על בסיס בדיקות SPT ומהירות גלי גזירה, V_s , בשיטה המפושטת (Simplified Procedure) לפי הגישות השונות בספרות העדכנית.

נמצא בקידוח EB3E כי על בסיס בדיקות SPT קיימים מספר אופקים רגישים להתנזלות במספר תרחישים של רעידת אדמה. שיטה לקביעת הסתברות להתנזלות המבוססת על בדיקות SPT קובעת גם היא הסתברות גבוהה להתנזלות במספר שכבות. לעומת זאת על בסיס מהירות גלי גזירה לא צפויה התנזלות בחתך אף ברעידות אדמה חזקות במיוחד. נראה שעל אף שבסיס הנתונים של בדיקות SPT רחב יותר והקורלציות האמפיריות הקשורות בו וודאיות יותר במקרה של חתך קרקע של חלוקים מדידות מהירות גלי גזירה אמינות יותר והחתך ככל הנראה לא רגיש להתנזלות. יחד עם זאת לא ניתן לשלול לחלוטין את אמינות בדיקות ה-SPT ויתכן שקיימת רגישות מסוימת להתנזלות.

בקידוח MN5E נמצא כי עקב תכולת הטיין-חרסית הגבוהה השיטה המפושטת לא תואמת את החתך (לפי השיטה המפושטת חוזר הדפוס של אזור בטוח לפי מהירות גלי גזירה אך קיימת סכנה לפי בדיקות SPT) והקרקע נבדקה בגישה שונה. נמצא כי חתך זה רגיש לכשל בגזירה בקרקע בעת רעידת אדמה במספר אופקים. כשל זה שונה מהתנזלות (לפחות לפי חלק מהגישות בספרות)

מפת הרגישויות מתארת רגישות להתנזלות. נמצא שאזור 1 אכן עלול להיות רגיש להתנזלות קרקע ויש לערוך בדיקות מתאימות בעת תכנון הנדסי. אזור 2 כנראה אינו רגיש להתנזלות אך עלול להיות רגיש לכשל קרקע בגזירה, במידה שתכולת הרטיבות גבוהה דיה. גם אזור זה יש לבדוק בעת תכנון הנדסי. באזורים 3 ו-4 לא קיימת סכנת התנזלות ממשית, אך יתכן שאתרים מסוימים באזור 4 בהם קיימת תכולת רטיבות גבוהה ישנה רגישות לכשל בגזירה. גם אזורים אלה יש לבחון בהתאם לתכולת הרטיבות בקרקע.

נספח: רקע תיאורטי לתוכנה לניתוח תגובת אתר SHAKE2000

רקע תיאורטי

גלי הגזירה הנוצרים ברעידת אדמה יוצאים ממקור הרעידה ומגיעים מלמטה לפני השטח במסלול הנקבע לפי המסלע ומשפיע על אופי הגלים. כאשר בין הסלע לפי השטח מצטברים סדימנטים ישנו שינוי נוסף באופי ובעוצמת גלי הגזירה אותו ניתן לחשב בתוכנת ניתוח תגובת אתר (Seed & Idriss, 1982). תאור הפיתוח האנליטי ואופן פעולת תוכנת SHAKE מבוסס על (Ordonez 2008) ועל (Bardet et al. 2000). קרקע מגיבה לגלי הגזירה כתווך ויסקואלסטי בו מאמץ הגזירה, τ , הוא פונקציה של עיבור הגזירה, γ , ושל קצב העיבור-הנגזרת לפי הזמן, $\dot{\gamma}$, לפי משוואה 1:

$$\tau = G\gamma + \eta\dot{\gamma} \quad 1$$

כאשר G מוגדר כמודול הגזירה, ו- η מקדם הריסון הנובע מויסקוזיות הקרקע. במקרה של התקדמות אנכית של גלי הגזירה בחתך ניתן להציג את התנודות כתזוזה אופקית המשתנה בזמן ובעומק:

$$u = u(x, t) \quad 2$$

במקרה זה עיבור הגזירה ונגזרת העיבור בזמן יוגדרו לפי התזוזה האופקית:

$$\gamma = \frac{\partial u(x, t)}{\partial x}, \quad \dot{\gamma} = \frac{\partial \gamma(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x \partial t} \quad 3$$

מאמץ הגזירה מוגדר גם הוא לפי התזוזה האופקית:

$$\tau = G \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} + \eta \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x \partial t} \quad 4$$

ניתן לראות בגלי הגזירה בקרקע אוסף של תנועות הרמוניות בעלות תדירות זוויתית ω . את התזוזה, העיבור וקצב העיבור ניתן להציג בעזרת משוואות מרוכבות:

$$u(x, t) = U(x)e^{i\omega t}, \quad \gamma(x, t) = \frac{du}{dx}e^{i\omega t} = \Gamma(x)e^{i\omega t}, \quad \dot{\gamma}(x, t) = i\omega\gamma(x, t) \quad 5$$

כאשר $U(x)$ הוא משרעת התזוזה האופקית, ו- $\Gamma(x)$ משרעת עיבור הגזירה. גלי גזירה סיסמיים מצייתים למשוואת הגלים:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau}{\partial x} \quad 6$$

כאשר ρ – צפיפות הקרקע בכל שכבה. בהצבה של משוואה 4 במשוואה 6 מתקבלת המשוואה הדיפרנציאלית:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} + \eta \frac{\partial^3 u(x, t)}{\partial x^2 \partial t} \quad 7$$

בכדי שהתזוזה תתאר תנועה הרמונית יש להציב את משוואה 5 במשוואה 7. את התוצאה ניתן להציג במשוואה דיפרנציאלית מרוכבת :

$$(G + i\omega\eta) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \rho\omega^2 U \quad 8$$

פתרון כללי למשוואה הדיפרנציאלית יהיה בצורה הבאה :

$$U(x) = Ee^{ikx} + Fe^{ikx} \quad 9$$

כאשר k , מספר הגל המרוכב, מוגדר באופן הבא :

$$k^2 = \frac{\rho\omega^2}{G+i\omega\eta} = \frac{\rho\omega^2}{G^*} \quad 10$$

מודול הגזירה המרוכב, G^* , מוגדר בהתאם למודול הגזירה, מקדם הריסון ותדירות הגל :

$$G^* = G + i\omega\eta \quad 11$$

מנת הריסון הקריטית, ξ , תלויה גם היא בתדירות הזוויתית ובמקדם הריסון לפי משוואה 12 :

$$\xi = \frac{\omega\eta}{2G} \quad 12$$

בהתאם לכך ניתן להציג את מודול הגזירה המרוכב ללא תלות בתדירות הזוויתית :

$$G^* = G(1 + 2i\xi) \quad 13$$

בהצבת פתרון משוואת הגלים במשוואה 5 לתזוזה אופקית מתקבלת התזוזה כתוצאה מגל בתדירות מסוימת :

$$u(x, t) = Ee^{i(kx+\omega t)} + Fe^{i(kx-\omega t)} \quad 14$$

הרכיב הראשון מבטא את גלי הגזירה המגיעים מהמקור הסיסמי ועולים בעמודת הקרקע. הרכיב השני מבטא את הגלים החוזרים מפני השטח ויורדים בעמודת הקרקע. מאמץ הגזירה במקרה זה יינתן לפי הצבה של משוואה 14 במשוואה 4 :

$$\tau(x, t) = ikG^*(Ee^{ikx} - Fe^{ikx})e^{i\omega t} \quad 15$$

תאוצת הקרקע בכל שכבה יכולה להיות מחושבת מנגזרת התזוזה בזמן לפי משוואה 14 :

$$\ddot{u}(x, t) = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\omega^2(Ee^{i(kx+\omega t)} + Fe^{i(kx-\omega t)}) \quad 16$$

עיבור הגזירה מחושב לפי נגזרת התזוזה בחתך לפי משוואה 14 :

$$\gamma(x, t) = \frac{\partial u}{\partial x} = ik(Ee^{i(kx+\omega t)} - Fe^{i(kx-\omega t)}) \quad 17$$

ערכים אלה נכונים עבור כל שכבה בחתך. ניתן כעת להניח שכבה בגובה m בתוך עמודת הקרקע. התזוזה בראש השכבה ובתחתיתה המוגדרת לפי מערכת קואורדינטות מקומית לשכבה נתונות על ידי שימוש במשוואה 14 :

$$u_m(x=0) = (E_m + F_m)e^{i\omega t} \quad 18$$

$$u_m(x=h_m) = (E_me^{ik_m h_m} + F_me^{-ik_m h_m})e^{i\omega t}$$

מאמץ הגזירה בראש ובתחתית אותה שכבה מחושב לפי משוואה 15 :

$$\tau_m(x=0) = ik_m G_m^*(E_m - F_m)e^{i\omega t} \quad 19$$

$$\tau_m(x=h_m) = ik_m G_m^*(E_me^{ik_m h_m} - F_me^{-ik_m h_m})e^{i\omega t}$$

מאמץ הגזירה, כמו גם התזוזות האופקיות צריכים להיות רציפים בעמודת הקרקע כך שהתזוזה או מאמץ הגזירה בתחתית שכבה שווה לתזוזה או מאמץ הגזירה בראש השכבה מתחתיה. בעזרת משוואות 18-19 ניתן להציג את המקדמים של כל שכבה m ביחס למקדמים בשכבה $m+1$ מתחתיה :

$$E_{m+1} + F_{m+1} = E_me^{ik_m h_m} + F_me^{-ik_m h_m} \quad 20$$

$$E_{m+1} - F_{m+1} = \frac{k_m G_m^*}{k_{m+1} G_{m+1}^*} (E_me^{ik_m h_m} - F_me^{-ik_m h_m})$$

חילוץ המקדמים של שכבה $m+1$ מאפשר להציג כל מקדם בנפרד :

$$E_{m+1} = \frac{1}{2}E_m(1 + \alpha_m)e^{ik_m h_m} + \frac{1}{2}F_m(1 - \alpha_m)e^{-ik_m h_m} \quad 21$$

$$F_{m+1} = \frac{1}{2}E_m(1 - \alpha_m)e^{ik_m h_m} + \frac{1}{2}F_m(1 + \alpha_m)e^{-ik_m h_m}$$

כאשר α_m , מקדם התנגדות מרוכב בין שכבות מוגדר לפי משוואה 22 :

$$\alpha_m = \frac{k_m G_m^*}{k_{m+1} G_{m+1}^*} = \sqrt{\frac{\rho_m G_m^*}{\rho_{m+1} G_{m+1}^*}} \quad 22$$

על סמך משוואה 21 ניתן להגדיר פונקציית מעבר בין שתי שכבות רציפות m ו- $m+1$ מתחתיה המתאימה לתזוזה או לתאוצה :

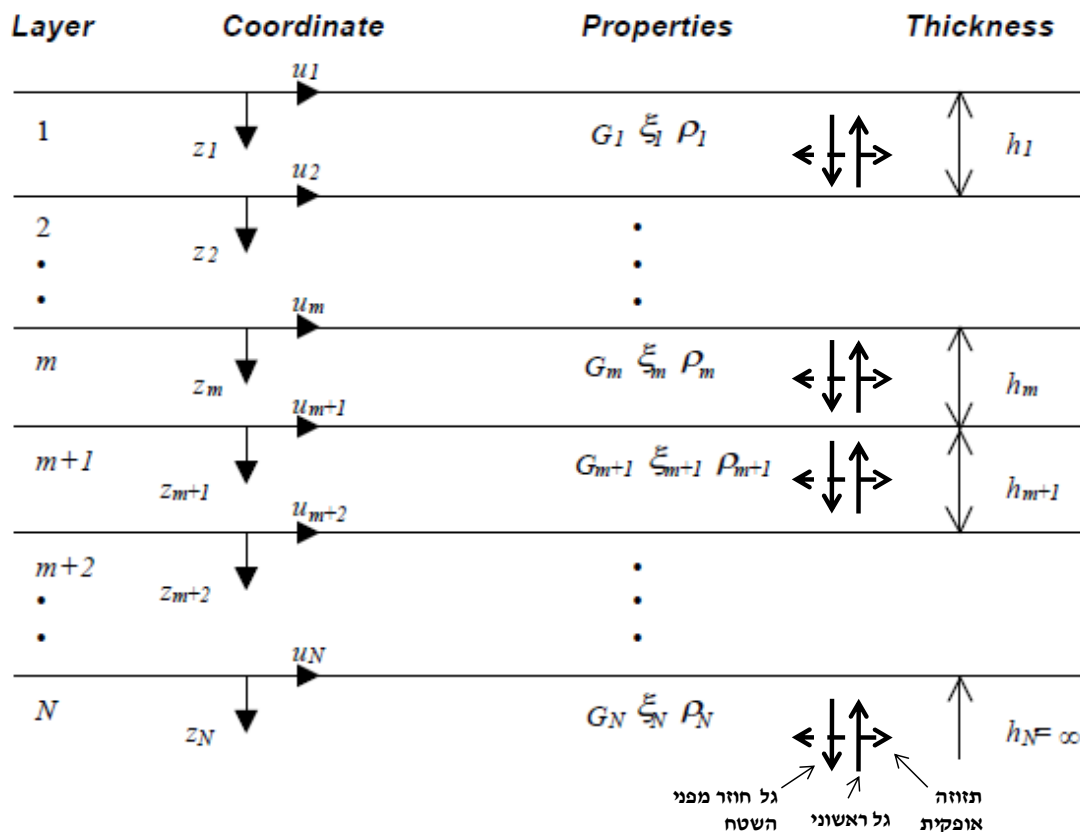
$$A_{m,n}(\omega) = \frac{u_m}{u_n} = \frac{\ddot{u}_m}{\ddot{u}_n} = \frac{E_m + F_m}{E_n + F_n} \quad 23$$

פני השטח הם מישור חופשי בו מאמץ הגזירה שווה ל-0. במקרה זה יהיו מקדמי השכבה זהים :

$$E_1 = F_1$$

24

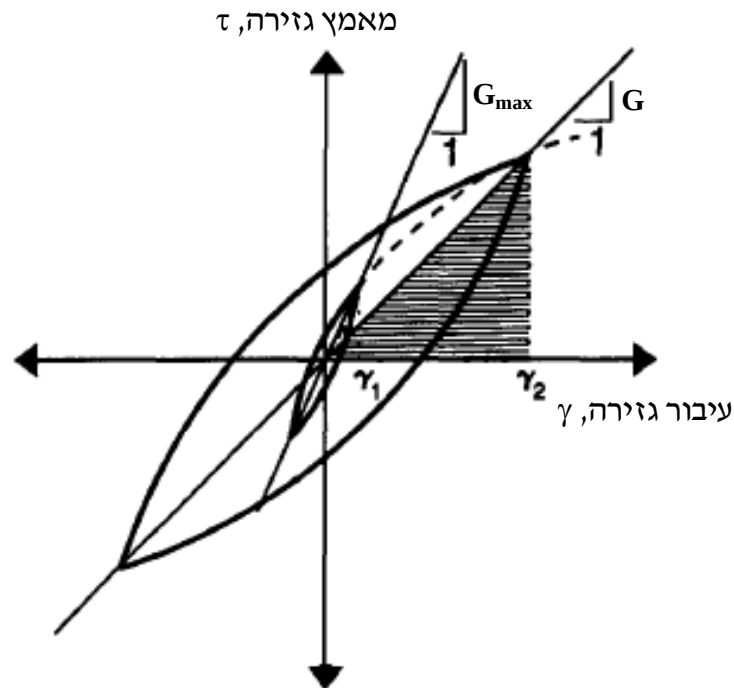
משוואה 21 מופעלת מפני השטח לעומק החתך בשכבה n על ידי פונקציית המעבר כך שהתזוזה מחושבת בכל שכבה. בנוסף לתזוזה ניתן לחשב בעזרת משוואות 16-17 גם את התאוצה ואת עיבור הגזירה בכל שכבה. בתרשים 1 ניתן לראות חתך מייצג של עמודת קרקע עם הנתונים המוזנים בתוכנה לפתירת משוואות התזוזה.



תרשים 2: חתך מייצג של שכבות קרקע. כל שכבה מאופיינת בצפיפות, מודול גזירה ומנת ריסון. עבור כל שכבה מוגדרת מערכת קורדינטות שונה. (בעקבות Schnabel, 1972)

קירוב אקווילנטי לינארי ליחסי מאמץ-עיבור בקרקע

המשוואה הקושרת בין מאמץ לעבור מתייחסת למודול גזירה קבוע G . למעשה התנהגות מאמץ הגזירה ביחס לעיבור הגזירה בקרקע במחזורי העמסה מחזורית איננה לינארית. בתרשים 2 ניתן לראות התנהגות היסטריזית של מאמץ הגזירה במהלך מחזור העמסה אחד.



תרשים 3: מחזור אופייני בניסוי גזירה מרחבית. ניתן לראות שבעיבורים קטנים הקרקע כמעט לינארית וניתן להגדיר מודול גזירה G_{max} . כאשר העיבור גדל מודול הגזירה קטן. השטח הכלוא בלולאה הגדולה – A_{loop} . שטח המשולש המקוקו – W_s , אנרגיית העיבור המקסימלית. (בעקבות Rollins et al., 1998)

בעיבורים קטנים הקרקע כמעט לינארית וניתן לקבוע ערך מקסימלי של עיבור הגזירה G_{max} . נוח לקבוע ערך זה באמצעות מדידת מהירות גלי גזירה בקידוח, בה העיבורים קטנים דיים. מודול הגזירה יקבע במקרה זה לפי משוואה 25:

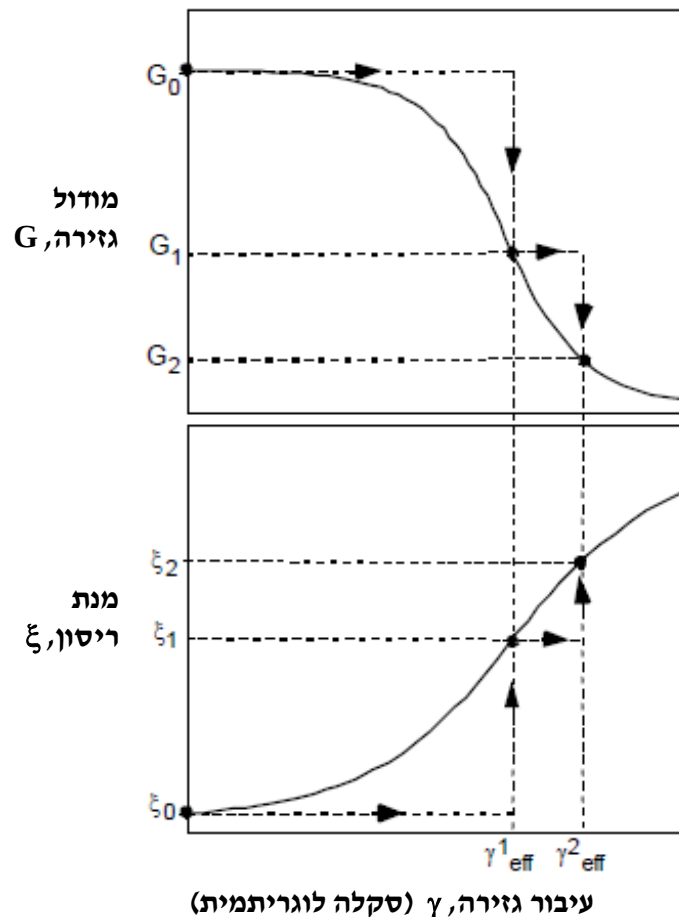
$$G_{max} = \rho \cdot V_s^2 \quad 25$$

כאשר העיבורים גדולים יותר נקבע מודול גזירה אקווילנטי לינארי לפי מיתר החוצה את לולאת ההעמסה בעיבור המירבי כמתואר בתרשים 2.

האנרגיה האובדת בחיכוך במהלך מחזור העמסה, W_D , שווה לשטח הכלוא בלולאת העמסה, A_{loop} , המתוארת בתרשים 2. אנרגיית העיבור המקסימלית, W_s , האצורה במערכת מתוארת במשולש המקוקו בתרשים 2. כך ניתן להגדיר את מנת הריסון לפי העיבור במשוואה 26:

$$\xi = \frac{W_D}{4\pi W_s} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{A_{loop}}{G\gamma^2} \quad 26$$

בסדרת ניסויי מעבדה של גזירה מחזורית בעיבורים שונים ניתן ליצור עקום השתנות של מודול הגזירה האקווילנטי, G , ושל מנת הריסון, ξ , כפונקציה של עיבור הגזירה כמתואר בתרשים 3.



תרשים 4: עקום שינוי במודול הגזירה ומנת הריסון ביחס לעיצור הגזירה. עם העלייה בעיצור הגזירה מודול הגזירה דועך בעוד מנת הריסון גדלה. העקום נקבע עבור כל סוג קרקע בעקבות סדרת ניסויי מעבדה. (בעקבות (Bardet et al., 2000)

מקור התזוזה

המשוואות המתארות את תנועת גלי הגזירה מתייחסות לתנועה הרמונית קבועה. בפועל רשומת תאוצה של רעידת אדמה הנקלטת באקסלרוגרף מורכבת מאוסף תנודות אקראיות בלתי מחזוריות. בעזרת התמרת פורייה ניתן לקרב את התנועה האקראית לאוסף של תנודות הרמוניות בתדירות קבועה. באופן זה ניתן להגדיר את ערכי התאוצה, $\ddot{u}_j(j \cdot \Delta t)$, $j=0, \dots, n-1$, ברשומת תאוצה של n ערכים כסכום של תנודות הרמוניות לפי משוואה 27:

$$\ddot{u}(t) = \sum_{s=0}^{n/2} (a_s e^{i\omega_s t} + b_s e^{-i\omega_s t}) \quad 27$$

כאשר כל תדירות מוגדרת באופן הבא:

$$\omega_s = \frac{2\pi}{n \cdot \Delta t} s, \quad s = 0, \dots, n/2 \quad 28$$

מקדמי פורייה המרוכבים a_s ו- b_s מוגדרים לפי משוואה 29:

$$a_s = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \ddot{u}(t) e^{-i\omega_s t} , \quad b_s = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \ddot{u}(t) e^{i\omega_s t} \quad 29$$

מקדמי פורייה מחושבים בתוכנת SHAKE בעזרת אלגוריתם של התמרת פורייה מהירה (למשל Cooley & Tukey, 1965).

שלבי פעולת התוכנה הם לפי הסדר הבא :

1. הגדרת ערכים התחלתיים G_0 ו- ξ_0 של מודול הגזירה ומנת הריסון. הערכים נקבעים לפי עקום השינוי לפי העיבור כמתואר בתרשים 3 על בסיס בדיקות מעבדה.
2. חישוב תגובת הקרקע לאוסף של תנודות הרמוניות לפי הפתרונות האנליטיים שתוארו לעיל, וחילוף עיבור הגזירה המקסימלי, $\gamma_{\max}$.
3. חישוב עיבור הגזירה האפקטיבי, γ_{eff} לפי משוואה 30 :

$$\gamma_{i_{\text{eff}}} = R_\gamma \gamma_{i_{\text{eff}}} \quad 30$$

כאשר היחס R_γ קבוע עבור כל השכבות

4. חישוב מודול הגזירה G_1 ומנת הריסון ξ_1 לפי העיבור האפקטיבי כמתואר באיור 3.
5. ניתוח נוסף של תגובת הקרקע לאוסף התנודות ההרמוניות, הפעם לפי מודול הגזירה ומנת הריסון האפקטיביים שחושבו בשלב הקודם.
6. שלבים 1-5 חוזרים מספר פעמים עד שערכי מודול הגזירה ומנת הריסון בשתי איטרציות עוקבות קרובים מספיק. בתרשים 3 ניתן לראות שתי איטרציות. מתחילים ללא עיבור במנת ריסון ומודול גזירה התחלתיים. לאחר חישוב תגובת הקרקע מתקבל עיבור גזירה γ_{eff}^1 , ולפיו נקבעים מחדש מודול הגזירה ומנת הריסון. באיטרציה הבאה מחושב עיבור נוסף γ_{eff}^2 הקובע מודול אלסטיות ומנת ריסון חדשים.

בסיום הניתוח ניתן לקבל רשומת תזוזות או תאוצות בכל אחת מהשכבות בעמודת הקרקע. בנוסף לכך ניתן להפיק בתוכנה מהחישובים רשומה של מאמץ הגזירה ושל העיבור והשתנותם עם העומק.

רשימת מקורות

- בגין, ז. ב., 2005. רעידות אדמה הרסניות בעמק הירדן וים המלח – תקופות חזרתן והסתברות להתרחשות. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/12/05.
- ברטוב, י., 1999. הגיאולוגיה של תצורת הלשון במישור מצדה וחצי האי ליסאן. עבודה לתואר מוסמך, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- גרדוש, מ., 1987. סטרטיגרפיה וטקטוניקה צעירה באגן ים המלח. עבודה לתואר מוסמך, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- וקס, ד., יחיאלי, י., שטיבלמן, ו., איתמר, א., בר, ג., גולדמן, מ., רז, א., ריבקוב, מ., שטנר, א., 2004. היווצרות הבולענים לאורך חופי ים המלח. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/41/2000.
- זק, י., 1967. הגיאולוגיה של הר סדום. עבודה לתואר דוקטור. האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- יחיאלי, י., שלו, א., חמו, ח., 2007. מפלסי מי תהום בקידוחים באזור ים המלח - פרויקט הבולענים. המכון הגיאולוגי, דוח TR-GSI/09/2007.
- יחיאלי, י., שלו, א., 2008. ממצאים גיאולוגיים והידרולוגיים בקידוחים באזור עין גדי, חמי מזור ונחל צאלים. המכון הגיאולוגי, דוח TR - GSI/14/2008.
- סלמון, ע., צביאלי, ד., רוזנזפט, מ., להמן, ט., היימן, א., אברמוב, ר., 2008. האזורים במישור החוף של ישראל בהם נדרשת חקירת הסיכון להתנזלות. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/34/2008.
- קירו, י., 2007. ההשפעה של ירידת מפלס ים המלח על מערכת מי התהום באקוויפר האלוביאלי בקרבתו. עבודה לתואר מוסמך, האוניברסיטה העברית, ירושלים, המכון הגיאולוגי, דוח GSI/05/07.
- שלו, א., יחיאלי, י. וביין, ע., 2005. המערכת ההידרוגאולוגית באזור נחל פרסה- נחל יעלים: השלכתה על בריכות האידוי ועל האפשרות ליצירת בולענים בקרבתן. המכון הגיאולוגי, דוח TR-GSI/04/2005.
- Agnon, A., Migowski, C., Marco, S., 2006. Intraclast breccias in laminated sequences reviewed: Recorders of paleo-earthquakes. Geological Society of America; Special Paper 401, 195–214.
- American Colony (Jerusalem) Photo Dept. July 1927 Earthquake, Palestine.
- Andrews, D. C. A., Martin, G. R., 2000. Criteria for liquefaction of silty soils. Proceedings, 12th World Conference on Earthquake Engineering.
- ASTM, 1994. Annual book of ASTM standards. Section 4, Vol. 04.08, Soil and Rock.
- Bachrach, R., Nur, A. and Agnon, A., 2001. Liquefaction and dynamic poroelasticity in soft sediments. Journal of Geophysical Research, 106, 13:515–513.
- Bardet, J. P., Ichii, K., Lin, C. H., 2000. EERA – A computer program for equivalent-linear earthquake site response analysis of layered soil deposits. University of Southern California.
- Begin, Z. B., Ehrlich, A., and Nathan, Y., 1974. Lake Lisan: the Pleistocene precursor of the Dead Sea. Ministry of Commerce and Industry, Geological Survey of Israel.
- Ben-Menahem, A., Nur, A., 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, 12, 1-50.
- Bowles, J. E., Guo Y., 1996. Foundation analysis and design. McGraw-Hill New York.
- Bray, J. D., Sancio, R. B., 2006. Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils. J. Geotech. Geoenviron. Eng, 132(9):1165-1177.

- Darendeli, M. B., 2001. Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves. Ph.d thesis, University of Texas, Austin.
- Das, Braja M., 1983. Advanced soil mechanics. Hemisphere Pub. Corp., Washington.
- Ezersky, M., 2011. Geophysical survey at two drilling sites of the Sead Sea area: Ein-Boqeq and Shalem 2 (Mineral Spa). The Geological Survey of Israel, Reporn No. 322/562/11.
- Frydman, S., Charrach, J., Goretsky, I., 2008. Geotechnical properties of evaporite soils of the Dead Sea area. Engineering Geology, 101, 236–244
- Gardosh, M., Reches, Z., and Garfunkel, Z., 1990. Holocene tectonic deformation along the western margins Dead-Sea. Tectonphysics, 180, 123-137.
- Garfunkel, Z., 1981. Internal structure of the Desd Sea leaky transform (Rift) in relation to plate kinematics. Tectonophysics, 80, 81-108.
- Garfunkel, Z., Zak, I. and Freund, R., 1981. Active faulting in the Dead Sea rift. Tectonophysics, 80, 1-4:1-26.
- Haase-Schramm, A., Goldstein, S. L., and Stein, M., 2004. U-Th dating of Lake Lisan (late Pleistocene Dead Sea) aragonite and implications for glacial East Mediterranean climate change. Geochimica et Cosmochimica Acta, 68, 5:985-1005.
- Hall, J. K., 1997. Landforms of Israel and adjacent areas, 1:500,000 scale. Geological Survey of Israel.
- Hamiel, Y., Amit, R., Begin, Z. B., Marco, S., Katz, O., Salamon, A., Zilberman, E., Porat, N., 2009. The seismicity along the Dead Sea fault during the last 60,000 years. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 99, No. 3, pp. 2020-2026.
- Hatzor, Y. H., Gvirtzman, H., Wainshtein, I., and Orian, I., 2009. Induced liquefaction experiment in relatively dense, clay-rich sand deposits. Journal of Geophysical Research, 114, B2:B02311.
- Heidbach, O. and Ben-Avraham, Z., 2007. Stress evolution and seismic hazard of the Dead Sea Fault System. Earth and Planetary Science Letters, 257, 1-2:299-312.
- Hofstetter, A., Thio, H. K., Shamir, G., 2003. Source mechanism of the 22/11/1995 Gulf of Aqaba earthquake and its aftershock sequence. Journal of Seismology 7, 99–114.
- Hynes, M. E., Olsen, R. S., Yule, D. E., 1998. The influence of confining stress on liquefaction resistance. Proceedings of the Joint Meeting of the U.S.-Japan Cooperative Program in Natural Resources Panel on Wind and Seismic Effects. Pp. 167-181.
- Idriss, I. M., 1999. An update to the Seed-Idriss simplified procedure for evaluating liquefaction potential. Proc., TRB Workshop on New Approaches to Liquefaction, January, Publication No. FHWA-RD-99-165, Federal Highway Administration.
- Idriss, I. M., Boulanger, R. W., 2008. Soil liquefaction during earthquakes. Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, CA, United States. MNO-12.
- Kaufman, A. 1971. U-series dating of Dead Sea basin carbonates. Geochimica et Cosmochimica Acta 35, no. 12:1269-1281.
- Levi, T., Weinberger, R., Aifa, T., Eyal, Y., Marco, S., 2006. Injection Mechanism of clay-rich sediments into dikes during earthkuakes. Geochemistry, Geophysics, Geosystems 7, Q12009:1-20.

- Liao, S. S. C., Veneziano, D., Whitman, R. V., 1988. Regression models for evaluating liquefaction probability. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 114 (4), p. 389-411.
- Liao, S. S. C., Whitman, R. V., 1986. Overburden correction factors for SPT in sand = Facteurs de correction dus à la couverture pour les essais de pénétration standard dans du sable. *J. Geotech. Eng.*, 112(3):373-377.
- Lin, A., 1997. Instantaneous-shaking liquefaction induced by the M=7.2 1995 Southern Hyogo Prefecture earthquake, Japan. *Geology* 25, 5:435.
- Marco, S. Agnon, A., 2005. High-resolution stratigraphy reveals repeated earthquake faulting in the Masada Fault Zone, Dead Sea Transform. *Tectonophysics*, 408, 1-4:101-112.
- Ordonez, G. A., 2008. SHAKE2000 a computer program for 1-D analysis of geotechnical earthquake engineering problems, user manual.
- Parish, J. G., 2008. Guidelines for evaluation and mitigating seismic hazards in California. Vol. 117A. California Geological Survey.
- Rollins, K. M., Evans, M. D., Diehl, N. B., Daily, W. D., 1998. Shear Modulus and Damping relationship for gravels, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124, No. 5.
- Salamon, A., Abelson, M., Amit, R., Ashkenazi, S., Avni, Y., Baer, G., Begin, Z. B., Zion, C., Crouvi, O., Enzel, Y., Feldman, L., Gavrieli, I., Gvirtzman, Z., Hamiel, Y., Hemo, H., Hofstetter, R., Katz, O., Magdalen, T., Malik, U., Nachmias, Y., Porat, N., Steinberg, J., Steinitz, G., Taymaz, T., Weinberger, R., Yechieli, Y., Yolsal S. and Zilberman, E., 2004. Seismically induced ground effects of the February 11, 2004, ML= 5.2, northeastern Dead Sea earthquake. Geological Survey of Israel, Report GSI/30/04.
- Schnabel, P. B., Lysmer, J., Seed, H. B., 1972. SHAKE: a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. UCB/EERC-72/12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley (480/S36/1972).
- Seed, H. B., Idriss, I. M., 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97(9):1249-1273.
- Seed, H. B., Idriss, I. M., 1982. Ground motions and soil liquefaction during earthquakes. Edited by I. M. Idriss. Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, CA, United States. Vol. 5.
- Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., Chung, R. M., 1985. The Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 111, No. 12, pp. 1425-1445.
- Seed, R. B., Cetin, K. O., Moss, R. E. S., Kammerer, A. M., Wu, J., Pestana, J. M., Riemer, M. F., Sancio, R. B., Bray, J. D., Kayen, R. E., Faris, A., 2003. Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework.
- Shapira, A., Avni, R., Nur, A., 1993. A new estimate for the epicenter of the Jericho earthquake of 11 July 1927. *Israel Journal of Earth-Sciences*, Vol. 42, pp. 93 – 96.
- Shapira, A., Hofstetter, A., Abdala, A. F., Debbeek, J., Hays, Walter., 2007. Earthquake hazard assessment for building codes. Final report. P. No. M18-057, U.S. Agency for International Development, Bureau for Economic Growth, Agriculture and Trade.

- Skempton, A. W., 1986. Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation. *Geotechnique*, 36(3):425-447.
- Stokoe, K. H., Roeset, J., Bierschwalle, J., Aouad, M., 1988. Liquefaction potential of sands from shear wave velocity. *Proceedings, 9nd World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo, Japan. Vol. 3.
- Terzaghi, K., 1943. *Theoretical soil mechanics*. Wiley.
- Wang, C. Y., 2007. Liquefaction beyond the near field. *Seismological Research Letters*, 78, 5:512-517.
- Wang, W. S., 1979. Some findings in soil liquefaction. *Earthquake Engineering Dept., Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute, Beijing (China)*.
- Yechieli, Y., 1993. The effects of water level changes in closed lakes (Dead Sea) on the surrounding groundwater and country rocks. Ph.D. Thesis.
- Yechieli, Y., 2000. Fresh-Saline Ground Water Interface in the Western Dead Sea Area. *Ground Water*, 38, 4:615-623.
- Yechieli, Y., Magaritz, M., Shatkay, M., Ronen, D., Carmi, I., 1993. Processes affecting interstitial water in the unsaturated zone at the newly exposed shore of the Dead Sea, Israel. *Chemical Geology*. Volume 103, Issues 1-4. Pages 207-225.
- Youd, T. L., 2003. Liquefaction mechanisms and induced ground failure. *International Geophysics Series 81B*, B:1159-1174.
- Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Finn, W. D. L., Harder, L. F., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Liao, S. S. C., Marcuson, W. F., Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., Seed, R. B., Stoke, K. H., 2001. Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127, 4:297-313.
- Youd, T. L., Noble, S. K., 1997. Liquefaction criteria based on statistical and probabilistic analyses. *Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*.
- Zaslavsky, Y., Shapira, A., 2000. Questioning nonlinear effects in Eilat during Mw=7.1 Gulf of Aqaba Earthquake. XXVII General assembly of the European Seismological Commission (ESC), 343-347.

BEN- GURION UNIVERSITY OF THE NEGEV
THE FACULTY OF NATURAL SCIENCES
DEPARTMENT OF GEOLOGICAL AND
ENVIRONMENTAL SCIENCE

**Evaluation of the Liquefaction Potential along the Dead-
Sea Western Shores - Regional Screening and
Geotechnical Analysis of Two Boreholes**

THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENTS FOR THE MASTER OF SCIENCES DEGREE

Elhanan Livne

UNDER THE SUPERVISION OF: Prof. Yossef H. Hatzor

Dr Amos Salamon

July 2012

BEN- GURION UNIVERSITY OF THE NEGEV
THE FACULTY OF NATURAL SCIENCES
DEPARTMENT OF GEOLOGICAL AND
ENVIRONMENTAL SCIENCE

**Evaluation of the Liquefaction Potential along the Dead-
Sea Western Shores - Regional Screening and
Geotechnical Analysis of Two Boreholes**

THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENTS FOR THE MASTER OF SCIENCES DEGREE

Elhanan Livne

UNDER THE SUPERVISION OF: Prof. Yossef H. Hatzor

Dr Amos Salamon

Signature of student: _____

Date: _____

Signature of supervisor: _____

Date: _____

Signature of supervisor: _____

Date: _____

Signature of chairperson

Of the committee for graduate studies: _____

Date: _____

July 2012

Abstract

Many earthquakes took place in the Dead-Sea basin during historic times and the distant past. One of the soil failure mechanisms during such earthquakes is liquefaction. The experience with liquefaction cases around the world shows that such failures may cause severe damage to buildings and facilities, therefore it is necessary to examine this seismic hazard along the Dead-Sea shore, especially near buildings and expected development zones.

The evaluation of the liquefaction potential caused by strong earthquakes along the western shore of the Dead-Sea presented in this work was produced as part of an infrastructure stability evaluation project in the Dead-Sea area funded by Israel Ministry of Tourism through the Geological Survey of Israel.

Liquefaction potential exists only in accordance with the presence of suitable geological, hydrological and seismological conditions. In this case advanced geotechnical investigations must be performed to evaluate the risk quantitatively.

The work presented in this thesis is divided into two stages. First, primary screening to examine the geologic, hydrologic and seismic conditions with the purpose of locating the zones of required investigation for liquefaction potential with quantitative methods. Second, drilling two geotechnical boreholes in representative sites, and calculating the factor of safety against liquefaction.

Two formations that may be sensitive to liquefaction were found in the geological screening phase: Alluvial fans in the Lisan and Ze'elim formations that consist of clastic sediments, mainly un-cemented gravels and sands, which may be susceptible to liquefaction. The fine grained lacustrine sediments in these formations are less susceptible to liquefaction according to its usual definition. Accordingly, alluvial fans were mapped on orthophoto maps using a GIS software package. The regional groundwater table was computed in the GIS program to define shallow saturated soil layers, a prerequisite to enable liquefaction. The water table was computed with a constant gradient, as described in the literature, and depth to the water table was calculated in GIS. All the zones where the depth to the water table is shallower than 20m, the limit depth to enable liquefaction, were tagged as "potentially liquefiable". The Dead-Sea shore is continuous along the Dead-Sea transform and its margin faults, which is considered as a source of strong earthquakes. Therefore the entire area of the Dead-Sea basin is susceptible to high ground acceleration that may cause liquefaction.

Projection of the alluvial fan map on the map of shallow water table enables to distinguish sensitivity zones, as follows:

Zone 1: Alluvial fan sediments and water table shallower than 20 m: Most sensitive to liquefaction.

Zone 2: lacustrine fine grained sediments and water table shallower than 20 m: Less sensitive to liquefaction.

Zone 3: Alluvial fans sediments and water table deeper than 20 m: Low sensitivity to liquefaction.

Zone 4: lacustrine fine grained sediments and water table deeper than 20 m: Not sensitivity to liquefaction.

The zone where all the conditions of liquefaction exist is zone 1, alluvial fans sediments and water table shallower than 20 m, and the soil is potentially liquefiable. In zone 2 the water table is shallow, thus there is at least low sensitivity to liquefaction.

Two boreholes were drilled in zone 1 and in a transition area between zones 1 and 2. The first was drilled in the alluvial fan near the hotels of Ein-Bokek, zone 1 (EB3E). The section consists mainly of coarse clastics, gravels and sands. The second was drilled in the margin of an alluvial fan near Mineral Beach, transition between zone 1 and 2 (MN5E). This section consists mainly of fine grain sediments, silts and clays with few interlayers of gravels. In both boreholes a Standard Penetration Test (SPT) was carried out in addition to *in-situ* seismic wave velocity measurements using the down hole method. Samples from the boreholes were tested in the laboratory to determine density, water content, Atterberg limits and USGS classification. Based on the data of the boreholes, site response analysis was performed using SHAKE2000 program to determine the peak ground acceleration (a_{max}) profile.

The factor of safety (FS) against liquefaction was calculated with the data of the boreholes and site response analysis results using the Simplified Procedure according to several methods in the literature. Based on the SPT profile few layers were found to be susceptible to liquefaction with $FS < 1$. On the other hand based on the shear wave velocity (V_s) profile the analyzed strata proves to be less susceptible to liquefaction with $FS > 3$ along most of the section. Although we believe that in Gravelly soils V_s measurements are more reliable, the low factor of safety against liquefaction obtained on the basis of the SPT profile must be taken into consideration when estimating the seismic risk associated with the studied areas. The Simplified Procedure is more

suitable for sandy and gravelly soils, such as in Ein-bokek borehole, EB3E. Silts and clays have to be tested by different methods. The Mineral Beach section, comprised primarily of silts and clays, was found to be vulnerable to strength failure due to very low undrained shear strength, should such conditions develop during an earthquake.

Borehole analysis shows that the representative sites of zone 1 are safe against liquefaction according to the more reliable method but a potential liquefaction risk may exist in light of the low factor of safety values obtained from SPT. The fine grained, clayey sediments in zone two may be sensitive to other modes of failure, such as shear failure should underdrained conditions evolve at the site during strong shaking.

Table of Contents

1. Introduction.....	1
1.1 Earthquakes and Liquefaction in the Dead-Sea.....	1
1.2 Reasearch Goals.....	2
2. Scientific Background.....	3
2.1 Mechanical Description of Liquefaction.....	3
2.1.1 Liquefaction Due to Shear Waves Transfer in the Ground.....	3
2.1.2 Liquefaction Possible Damage.....	4
2.1.3 Liquefaction Due to Pressure Waves Transfer in the Ground.....	5
2.2 Methods for Liquefaction Potential Evaluation.....	5
2.2.1 Regional Evaluation.....	5
2.2.2 Local Evaluation.....	8
2.2.3 The Simplified Procedure.....	8
2.2.4 Silt and Clay Soils.....	26
2.2.5 Probability Analysis.....	28
3. Geological Background.....	30
3.1 Dedailed Stratigraphy of Young Formations.....	31
3.1.1 Lisan Formation.....	31
3.1.2 Ze'elim Formation.....	32
4. Research methods.....	34
4.1 Regional Evaluation.....	34
4.1.1 Geological Evaluation.....	34
4.1.2 Seismological Evaluation.....	34
4.1.3 Hydrological Evaluation.....	34
4.2 Local Geotechnical Evaluation.....	35
4.2.1 Field Tests.....	35
4.2.2 Laboratory Tests.....	35
4.2.3 Site Response Analysis.....	41
5. Results - Regional Evaluation	42
5.1 Geological Evaluation.....	42
5.2 Hydrological Evaluation.....	43
5.2.1 Background.....	43
5.2.2 Computed Water Table Map.....	45

5.3	Seismological Evaluation.....	50
5.4	Conclude Risk Map.....	52
5.4.1	Discussing The Risk Map and Instructions for use.....	53
5.4.2	Other Seismical Hazard.....	55
6.	Results – Boreholes Geotechnical Evaluation.....	56
6.1	Ein-Bokek Borehole EB3E.....	56
6.2	Mineral Beach Borehole MN5E.....	61
6.3	Site Response Analysis.....	66
6.3.1	Underground Section Model.....	66
6.3.2	Earthquakes Data.....	72
6.3.3	Discussing the Site Response Analysis.....	76
7.	Discussion.....	77
7.1	Factor of Safety Against Liquefaction Evaluation in the Boreholes.....	77
7.1.1	Geotechnical Parameters in the Borholes.....	77
7.1.2	Cyclic Resistance Ratio CRR.....	78
7.1.3	Cyclic Stress Ratio CSR.....	80
7.1.4	Factor of Safety Against Liquefaction.....	81
7.1.5	Ground Failure in Silt-Clay Section.....	85
7.2	Probability of Liquefaction Calaulation.....	86
7.3	Regional Evaluation of Liquefaction Sensitivity.....	87
7.3.1	Regional Evaluation According to the Boreholes.....	87
7.3.2	Concluded Sensitivity Map.....	88
8.	Summary.....	89
	Apendix: Background for SHAKE2000, a Site Response Analysis Program.....	93
	Reference.....	100