



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

הערכת הסכנה הסייסמית במזרח הכנרת באמצעות ניתוח לאחור של כשלים טבעיים ומבניים עקב הטרחה סייסמית

חיבור לשם קבלת תואר "מגיסטר" בפקולטה למדעי הטבע

מאת גוני יגודה - בירן

הערכת הסכנה הסייסמית במזרח הכנרת באמצעות ניתוח לאחור של כשלים טבעיים ומבניים עקב הטרחה סייסמית

חיבור לשם קבלת התואר "מגיסטר" בפקולטה למדעי הטבע

מאת : גוני יגודה-בירן

מנחים : פרופ' יוסף ח. חצור

ד"ר רבקה אמית

ד"ר עודד כץ

המחלקה למדעי הגיאולוגיה והסביבה

הפקולטה למדעי הטבע

אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

_____תאריך	_____חתימת המחבר
_____תאריך	_____אישור המנחים : ח.ח
_____תאריך	_____כאן מ/א
_____תאריך	_____
_____תאריך	_____אישור יו"ר ועדה מחלקתית

הערכת הסכנה הסייסמית במזרח הכנרת באמצעות ניתוח לאחור של כשלים

טבעיים ומבניים עקב הטרחה סייסמית

מאת גוני יגודה-בירן

עבודת גמר לתואר "מגיסטר"

המחלקה למדעי הגיאולוגיה והסביבה

אוניברסיטת בן גוריון בנגב, 2008

תקציר

אזור הכנרת, בבקע ים המלח, נתון תחת פעילות סייסמית וככזה, ישנו צורך הולך וגובר להעריך את הסכנה הסייסמית באזור, בכדי להיערך נכון לרעידת אדמה חזקה.

כיום הדרך היחידה להערכת הסכנה הסייסמית באזור היא על בסיס מפת התאוצות המופיעה כחלק מהתקן הישראלי לבניה 413, ומציגה באזור מזרח הכנרת תאוצות אופקיות לסלע של כ- 0.3 g . תקן בניה 413 מסתמך בין היתר על מודל ניחות אשר פותח עבור אזור העתק הסן אנדריאס במערב ארה"ב, שכן מודל ניחות מייצג ומוסכם עדיין לא קיים עבור אזור ישראל.

בעבודה זו נערך ניסיון להערכת הסכנה הסייסמית באזור מזרח הכנרת בשתי שיטות בלתי תלויות: האחת על ידי ניתוח פסיאודוסטטי לאחור של גלישת קרקע רוטציונית עתיקה במדרונות המזרחיים של הכנרת באזור עין גב באמצעות פתרון בשיטת שיווי משקל גבולי (LEM – Limit Equilibrium Method), והשנייה על ידי ניתוח דינמי מלא לאחור של כשל עמודים ביזנטיים באתר הארכיאולוגי בסוסיתא באמצעות שיטה נומרית עבור אלמנטים דיסקרטיים (DEM – Discrete Element Method).

בסקר רפלקציה בהפרדה גבוהה שנערך לאורכה של שלוחת הגלישה זוהו מספר מישורי אי-רציפות אשר פוענחו כהעתקים צעירים אשר הסיטו את שלוחת הגלישה. כמו כן זוהו מספר מישורי אי-רציפויות תלולים בחלקם הקרוב לפני השטח, והופכים רדודים יותר בעומק של כמה עשרות מטרים, בדומה להעתקים ליסטרניים. מישורי אי-רציפויות אלה יכולים לייצג משטחי גלישה האופייניים למבנה של גלישה רוטציונית. כמו כן, על גבי שלוחת הגלישה נחפרה תעלה, באזור בו העתק חוצה את הגלישה, ובה זוהו שלוש יחידות קולוביום כאשר פרופילי קרקע מפרידים ביניהן. גיל יחידות הקולוביום הוא, מהצעירה לעתיקה, 4000, 6000 ו-60,000 שנה בהתאמה. תצפית זו מעידה על כך שהיו לפחות שלושה מחזורי תנועה של חומר במורד המדרון, ותקופות שקטות ביניהם, שאפשרו היווצרות קרקע.

אזור הגלישה מופה בפירוט רב וסלעים המרכיבים את חתך הגלישה נדגמו ונבדקו בבדיקות מעבדה, למציאת הפרמטרים של חוזק הגזירה של הסלע. לאחר מכן נבדקה יציבות המדרון תחת צירופים שונים של

פרמטרים אלו, והשלוחה נמצאה יציבה תחת עומס סטטי, גם בתנאי רוויה. תצפית זו מוליכה למסקנה שדרוש כוח חיצוני, כגון רעידת אדמה, על מנת להוציא את המדרון משיווי משקל גבולי. באנליזות הפסיאודוסטטיות נמצא כי בהינתן חוזק גזירה שיורי יונע המדרון תחת תאוצת קרקע אופקית מזערית של 0.37 g .

הגיאומטריה של העמודים בכנסיה הביזנטית באתר הארכיאולוגי בסוסיטא נמדדה, ונערך אימות של שיטה נומרית למדיום בלתי רציף (DDA – Discontinuous Deformation Analysis) באמצעות פתרון אנליטי קיים עבור הבעיה הדינמית של עמוד חופשי מתנדנד. נמצא ששיטת DDA זו מתאימה לפתרון בעיה דינמית מורכבת זו. על העמודים הופעלה תאוצה מחזורית בצורת סינוס, וכן תאוצה תלוית זמן מרשומות אמיתיות של רעידות אדמה. בהפעלת תאוצות בצורת סינוס, התאוצה האופקית המרבית הדרושה להפלת העמוד הראתה תלות גדולה בתדר התאוצה, ומכיוון שלעמוד חופשי אין תדר עצמי, לא ניתן היה לצמצם את טווח ה-PGA (Peak Ground Acceleration), והוא מצוי בטווח שבין 0.2 g ל- 1 g . לעומת זאת, שימוש בתאוצות מרשומות סייסמיות של רעידות אדמה אמיתיות מאזורים שונים צמצמו את טווח התאוצות המזעריות האפשריות ל- 0.2 g עד 0.4 g . נראה שתוצאות אלו מהימנות יותר, ולמרבה הפלא גם מכילות את תחזית תקן 413 עבור אזור זה – 0.3 g .

על סמך תוצאות עבודה זו ה-PGA הצפוי ברעידות אדמה באזור הוא בממוצע 0.3 g . ערך זה מתאים לרעידות אדמה חזקות, במגניטודה 6 ומעלה, כתלות במרחק ממוקד הרעידה. כמו כן הצפי לרעידה החזקה הבאה שתפקוד את האזור הוא שחלק מהמדרונות המערביים של רמת הגולן עלולים לגלוש, כתלות בקיומם של מספר תנאים: מבנה הנוטה מערבה, קיומן של יחידות ליתוסטרטיגרפיות חלשות, והתפתחות מפלס מי תהום גבוה יחסית במדרונות.

הבעת תודה

ברצוני להודות לכל האנשים שעזרו לי בהכנת עבודה זו :

לפרופ' יוסי חצור, שהנחה אותי עוד מן התואר הראשון, ותמך בי במהלך התואר בכלל והמחקר בפרט.

לד"ר רבקה (קיקי) אמית על שגילתה סבלנות רבה והנחתה אותי במהלך מחקר זה.

לד"ר עודד כץ על שהנחה אותי בצעדי הראשונים בנבכי האקדמיה, על שיחות שברומו של גלגל ועל ייעוץ עסקי לא רע.

לד"ר Gen-Hua Shi, על העזרה והתמיכה עם תכנת ה-DDA והבעת האמון ברעיון.

לד"ר נעמי פורת על חלקה בעבודה, ובהנחייתי בעבודת המעבדה.

לבני מדבדיב מהמכון הגיאופיסי על פענוח, ניתוח וכוס קפה.

לד"ר יולי זסלבסקי מהמכון הסייסמולוגי על עזרתו בנתונים סייסמולוגיים.

לד"ר יורי קרינסקי מהמכון הלאומי לחקר הבניה על הזמן, הסבלנות והרעיונות.

ליעקב רפאל ורמי מדמון על העזרה בשטח.

למיכאל אייזנברג מהמכון לארכיאולוגיה ע"ש זינמן, אוניברסיטת חיפה, על הסבלנות.

לרבקה עיני וצהלה שרעבי על התמיכה והדאגה לתלמיד הקטן.

לדגן, איליה ועומר על ארוחות צהרים משותפות והפסקות קפה ארוכות, על עזרה רעיונית, חישובית,

מחשבית, ותודה מיוחדת על סחיבת מדגמי סלע כבדים במיוחד וחילוץ טנדרים בעת צרה.

לרוני קמאי על שיחות וייעוץ .

להורי, אחי ואחותי, שכל-כך דאגו שלעולם לא אתחיל ללמוד, ולכן היו מוכנים לסבול ולספוג הכל כשכבר התחלתי.

למשפחתי המורחבת שהביעה עניין ותמיכה.

ולבסוף – לעומר – שלא רק סחב סלעים, לא רק חטף גשם של עצבים, לא רק נתן רעיונות, ולא רק ניגב דמעות.

לעומר שפשוט חי איתי – וזה לא תמיד פשוט.

תוכן עניינים

1. מבוא	1
1.1 אזור המחקר	2
1.1.1 גיאוגרפיה וגיאומורפולוגיה	2
1.1.2 סטרטיגרפיה	2
1.1.3 מבנה	6
1.1.4 פעילות סייסמית וקצבי תזוזה	13
1.1.5 זמני חזרה של רעידות	14
1.2 מטרת המחקר ויעדיו	15
2. רקע מדעי	16
2.1 ניתוח לאחור של כשל מדרון לצורך הערכת תאוצות קרקע צפויות באזור המחקר	16
2.1.1 שיווי משקל גבולי (Limit equilibrium)	17
2.1.2 שיטת הפרוסות	19
2.2 פתרונות נומריים ו-DDA	21
2.2.1 שיטות נומריות	21
2.2.2 עקרונות שיטת ה-DDA	22
2.2.3 משוואות ה-DDA	23
2.2.4 הפעלת התכנה	24
2.3 תיארוך תנועה על העתקים צעירים	25
2.4 הערכת מגניטודה של רעידות עבר	26
2.5 הערכת סיכון סייסמי	27
3. שיטות מחקר	33
3.1 שיטות שדה	33
3.1.1 מיפוי	33
3.1.2 תעלה פליאוסייסמית	33
3.1.3 דגימה של סלעים	34
3.1.4 סקר סייסמי	34
3.2 בדיקות מעבדה	34
3.2.1 אפיון הנדסי של סוג הקרקע	34
3.2.2 בדיקות במכבש גזירה ישירה	36
3.3 מידול המדרון באמצעות תכנת SLOPE/W 2004	40

41	3.4 מידול כשל מבנה באמצעות DDA
41	3.4.1 האתר הארכיאולוגי בסוסיתא
42	3.4.2 מדידות שדה
	3.4.3 אימות, כיוול ואופטימיזציה של ה-DDA עבור בעיית עמוד חופשי מתנדנד (rocking of a free standing column)
43	
52	4. תוצאות
52	4.1 מיפוי מורפוטקטוני
54	4.2 סקר סייסמי
58	4.3 מבנה הגלישה ואפיונה
58	4.3.1 מיפוי אזור הגלישה
61	4.3.2 חתכים גיאולוגיים והשוואה בין השלוחות
62	4.3.3 החתך הרדוד של הגלישה
67	4.4 ניתוח יציבות הגלישה הנבחרת
68	4.4.1 בדיקות מעבדה
71	4.4.2 ניתוח לאחור של כשל המדרון באמצעות תכנת SLOPE/W
76	4.5 תוצאות ניתוח נפילת העמודים בסוסיתא
76	4.5.1 תוצאות אנליזה דינמית של הזנת תאוצה תלוית זמן במרכז העמוד
78	4.5.2 תוצאות אנליזה דינמית של הזנת רשומת רעידת אדמה
79	4.5.3 דיון בתוצאות
81	5. דיון
82	5.1 תאוצת קרקע צפויה באזור המחקר
82	5.2 הערכת עצמת רעידות אדמה באזור
87	5.3 השלכות לגבי עוצמתה של רעידת האדמה ב-749
88	5.4 צפי לרעידה החזקה הבאה
89	5.5 המשך עבודה
91	6. סיכום ומסקנות
92	נספח א: סקר גיאופיסי
94	נספח ב: הוכחה מתמטית לחוסר קיום של תדר עצמי בלתי תלוי עבור עמוד חופשי מתנדנד
97	מקורות ספרותיים

רשימת תרשימים

2	תרשים 1-1 מפה של מיקום אזור העבודה.....
3	תרשים 1-2 מפה גיאולוגית של אזור העבודה.....
5	תרשים 1-3 חתך עמודי מוכלל של אזור העבודה.....
7	תרשים 1-4 מבנה הכנרת.....
9	תרשים 1-5 מפת ההעתקים באזור הכנרת.....
10	תרשים 1-6 חתכי רוחב של המדרונות המערביים של רמת הגולן.....
14	תרשים 1-7 אירועים סייסמיים באזור הכנרת משנת 1900 ועד היום.....
16	תרשים 2-1 תרשים סכמתי של גלישה רוטציונית.....
17	תרשים 2-2 תרשים הכוחות הפועלים על מדרון אשר לגביו מונח כשל בגלישה רוטציונית.....
19	תרשים 2-3 הערכת תזוזת המדרון באמצעות אינטגרציה בשיטת ניומרק.....
19	תרשים 2-4 תרשים סכמתי של ניתוח יציבות בשיטת הפרוסות.....
28	תרשים 2-5 מפת תאוצות הקרקע Z לתקן הבניה הישראלי 413.....
29	תרשים 2-6 עקומת פונקציית power law.....
30	תרשים 2-7 התפלגות מספר הרעידות $N(m)$ כנגד מגניטודת הרעידות עבור אזור ישראל.....
36	תרשים 3-1 מכבש הגזירה הישירה.....
37	תרשים 3-2 מבט מקרוב על מערכת הגזירה.....
38	תרשים 3-3 ניסור והכנה של דגם יחידת חול לבדיקת גזירה ישירה.....
38	תרשים 3-4 יציקת הבטון לקופסת הפלדה התחתונה.....
39	תרשים 3-5 דגם של יחידת חול מצולם לצורך מדידת שטח (לאחר הגזירה).....
39	תרשים 3-6 הכנת המדגם ליציקה עליונה.....
41	תרשים 3-7 מישור הכשל שנבחר לניתוח יציבות המדרון.....
42	תרשים 3-8 אזור הקתדרלה באתר הארכיאולוגי סוסיטא.....
43	תרשים 3-9 תרשים סכמתי ממבט על של העמודים הנפולים באתר הקתדרלה בסוסיטא.....
44	תרשים 3-10 תרשים סכמתי של הבלוק המתנדנד וסימנים מוסכמים.....
46	תרשים 3-11 מודל העמוד לאנליזות הוולידציה בתכנת ה-DDA.....
48	תרשים 3-12 אנליזת אימות עבור פונקציית הזנה של חצי סינוס בעלת אמפליטודה $a_p = 5.43 \text{ m/s}^2$
48	תרשים 3-13 אנליזת אימות עבור פונקציית הזנה של חצי סינוס בעלת אמפליטודה $a_p = 5.44 \text{ m/s}^2$
49	תרשים 3-14 אנליזת אימות עבור פונקציית הזנה של סינוס שלם בעלת אמפליטודה $a_p = 4.426 \text{ m/s}^2$
49	תרשים 3-15 אנליזת אימות עבור פונקציית הזנה של סינוס שלם בעלת אמפליטודה $a_p = 4.429 \text{ m/s}^2$
50	תרשים 3-16 מודל העמוד לאנליזות הדינמיות בסוסיטא בתכנת DDA.....
51	תרשים 3-17 אופטימיזציה של פרמטר $g\theta$ - קשיחות הקפיצים.....
53	תרשים 4-1 מפה מורפוטקטונית של אזור העבודה.....
54	תרשים 4-2 תוואי סקר הרפלקציה שבוצע על הגלישה.....
55	תרשים 4-3 חתך זמן של הגלישה.....
	תרשים 4-4 מפת מיקום הפרעות שזוהו בסקר הסייסמי, ביחס לליניאמנטים שמופו וסומנו על תצלומי אוויר.....
56	
57	תרשים 4-5 מודל המהירויות שחושב עבור החתך הסייסמי על הגלישה, על ידי המכון הגיאופיזי לישראל.....

תרשים 4-6	חתך עומק של הגלישה, שנערך על-פי מודל המהירויות	57
תרשים 4-7	מפת אזור העבודה, על בסיס מיפוי של מיכלסון ומור (1985), ושל גבעון (1984)	59
תרשים 4-8	חתך גיאולוגי של השלוחה הדרומית	62
תרשים 4-9	חתך גיאולוגי של השלוחה הצפונית	62
תרשים 4-10	פרופיל שלוחת הגלישה	62
תרשים 4-11	השוואה בין פרופיל השלוחה הדרומית לפרופיל הגלישה	62
תרשים 4-12	המשכו של הליניאמנט הנחקר על הגלישה, כשהוא חוצה ומעתיק את השלוחה הצפונית לגלישה	63
תרשים 4-13	מיפוי התעלה שנחפרה על הגלישה	64
תרשים 4-14	גושי סלע בזלת בלויים מאוד בחתך התעלה	64
תרשים 4-15	שלושת פרופילי הקרקע, כפי שהם נחשפים בתעלה	65
תרשים 4-16	קרקע A1	65
תרשים 4-17	קרקע A2	66
תרשים 4-18	קרקע A3	66
תרשים 4-19	גרף דירוג קרקעות עבור דגימת היחידות מאזור העבודה	69
תרשים 4-20	גרף מאמץ גזירה כנגד תזוזה בבדיקת גזירה ישירה, וגרף תפיחה ממוצעת של הדגם בבדיקה	70
תרשים 4-21	קריטריון הכשל של Coulomb-Mohr עבור יחידת המיפוי PSS1	71
תרשים 4-22	מציאת חוזק הלחיצה החד-צירי של הסלע	71
תרשים 4-23	פירוט הכוחות הפועלים על פרוסה מספר 19	72
תרשים 4-24	מאמץ הגזירה המייצב ומאמץ הגזירה המניע (ב- kPa) כנגד מספר הפרוסה	73
תרשים 4-25	יציבות סטטית של המדרון במודל, תחת צירופים שונים של קוהזיה וזווית חיכוך	74
תרשים 4-26	תוצאות אנליזות יציבות פסיאודוסטטית	75
תרשים 4-27	תוצאות אנליזות DDA עבור יציבות העמוד תחת מחזור העמסה של סינוס אחד	77
תרשים 4-28	תוצאות אנליזות DDA עבור יציבות העמוד תחת העמסה של שלושה מחזורי סינוס	77
תרשים 4-29	תוצאות אנליזות DDA עבור הנעת העמוד על פי רשומות של רעידות אדמה	79
תרשים 5-1	מפת מיקום גלישות קרקע סביב הכנרת	81
תרשים 5-2	קשר הניחות של Boore et al. (1997) עבור תאוצות הקרקע המרביות שנמצאו בעבודה זו	83
תרשים 5-3	מפת קונטורים של מגניטודות שונות במרחקים שונים, שייצרו תאוצות קרקע של $0.3g$ באזור המחקר	84
תרשים 5-4	אנליזת ניומרק עבור ערכי תאוצות הקרקע המרביות שנמצאו בעבודה זו	85
תרשים 5-5	מפת אזורים סייסמוגניים באזור ישראל	86
תרשים 5-6	מפת סכנה לגלישות קרקע באזור העבודה	90
תרשים א	מקור אנרגיה מסוג digipulse של המכון הגיאופיסי לישראל	92

רשימת טבלאות

טבלה 2-1	פירוט השיטות העיקריות בשיטת הפרוסות	20
טבלה 3-1	מערכת נפות סטנדרטית	35
טבלה 3-2	נתוני העמודים באתר הקתדרלה בסוסיתא	43
טבלה 4-1	רשומות רעידות האדמה ששימשו באנליזות ה-DDA	78

1. מבוא

אזור הכנרת ממוקם בבקע ים המלח (שולמן, 1962), כאשר הכנרת הינה חלק מהמקטע הצפוני של הבקע (תרשים 1-1). במזרח הכנרת זוהו עדויות רבות ומגוונות לפעילות סייסמית, למשל עדויות מורפולוגיות ביניהן צלקות העתקה צעירות היוצרות מדרגות בנוף, וגלישות מדרון שיתכן שהונעו בזמן פעילות סייסמית. בנוסף, ישנן עדויות היסטוריות וארכיאולוגיות לפעילות סייסמית באזור זה: חלק מחומות מצד עתרת, הנמצא בקניון הירדן מצפון לכנרת, הוסט אופקית בשיעור של 2.1 מטרים (Marco et al., 1997) ביחס למיקומו המקורי בעקבות שתי רעידות אדמה: ב- 1202 וב- 1759 לספירה (Marco et al., 1997); אתר גלי כנרת, במערב הכנרת, שניזוק קשה מאוד ברעידת האדמה של 749 לספירה (Marco et al., 2003); אתר סוסיתא, במזרח הכנרת שניזוק קשה ברעידת האדמה של 749 לספירה (Segal, www.hippos.haifa.ac.il).

בנוסף, משנת 1900 ועד היום אירעו באזור הכנרת לפחות 43 רעידות אדמה במגניטודה שבין 2-4.5 (המכון הגיאופיסי לישראל, www.gii.co.il), עדות התומכת בכך שאזור זה פעיל סייסמית.

על אף העדויות הרבות לפעילות סייסמית, אין כיום די מידע לגבי תאוצות הקרקע הצפויות באזור זה בעת רעידת אדמה חזקה בשל העובדה שלא נרשמה בשנים האחרונות רעידת אדמה חזקה באזור הכנרת. המודעות ההולכת וגוברת במדינת ישראל לרעידות אדמה, לאובדן חיים ולנזק הכלכלי הרב שהן גורמות, והחשש מרעידת אדמה גדולה קרובה, מדגיש את הצורך ללמוד ולחקור את נושא הסיכונים הסייסמיים הצפויים באזורים המועדים לפורענות. חשוב לציין כי כיום אין אפשרות לחזות את מועד ההתרחשות של רעידת אדמה, וכן את עוצמתה, וזמני החזרה מחושבים כולם בצורה סטטיסטית על-פי קטלוג רעידות אדמה. עם זאת, Ferry et al. (2007) מעריכים כי על סמך קצב התזוזה הממוצע שחושב על ידם עבור מקטע עמק הירדן של העתק ים המלח, והעובדה כי רעידת האדמה הגדולה האחרונה על מקטע זה התרחשה בשנת 1033 לספירה, ישנו חסך של עד 5 מטרים בתזוזה על ההעתק, אשר יכול התבטא ברעידת אדמה הרסנית במגניטודה 7.4.

בעבודה זו יערך ניתוח לאחור של כשלים מבניים טבעיים ומעשה ידי אדם במזרח הכנרת, לצורך הערכת תאוצות קרקע מרביות ופרמטרים נוספים של רעידות האדמה אשר גרמו לכשלים אלו. פרמטרים אלו יעזרו בהבנת הסיכונים הסייסמיים במזרח הכנרת, ובתקווה שגם בשיפור המוכנות והגברתה לקראת רעידת אדמה חזקה.

1.1 אזור המחקר

1.1.1 גיאוגרפיה וגיאומורפולוגיה

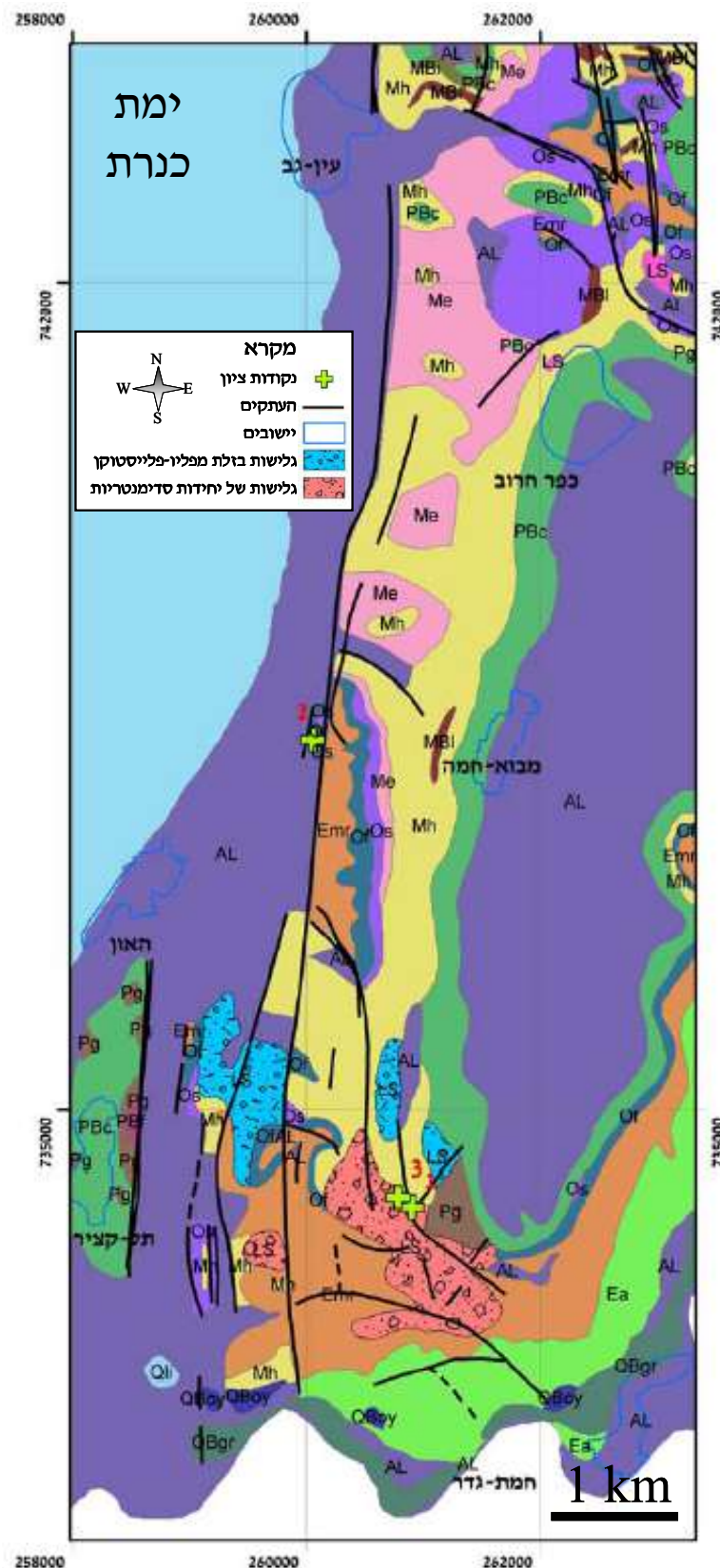
אזור העבודה כולל את דרום רמת הגולן ומדרונותיה היורדים אל הכנרת, ואת חופה המזרחי של הכנרת, בקטע התחום מדרום על ידי קו הרוחב של קיבוץ תל קציר (735), ומצפון על ידי האתר הארכיאולוגי סוסיתא (743) (תרשים 1-1). הפרשי הגבהים באזור זה הינם כ-550 מטר בין רמת הגולן המצויה בגובה של כ-350 מטר מעל פני הים, ובין חופה המזרחי של דרום הכנרת וצפון עמק הירדן המצוי בגובה של כ-200 מטר מתחת לפני הים. שיפועי המדרונות גדולים, ויכולים להגיע עד 40° , מאחר שהפרש הגובה הטופוגרפי בין רמת הגולן לכנרת מצטבר לאורך מרחק אופקי קטן יחסית. הנחלים המנקזים מדרונות אלו הם נחלים בעלי אגן ניקוז קטן, והם בעלי שיפוע תלול מאוד במעלה המדרון, ומתמתנים ככל שהגובה הטופוגרפי יורד, לעיתים עד כדי יצירת מניפות סחף באזור המתמתן לעבר חוף הכנרת.



תרשים 1-1: מפה של מיקום אזור העבודה.

1.1.2 סטרטיגרפיה

באזור העבודה חשופים סלעים סדימנטריים מגיל איאוקן עד רביעון (Mor and Sneh, 1996) המורכבים מחווארים, חולות, סדימנטים פלוביאליים ואגמיים, וכן בזלות מגיל מיוקן עד פלייסטוקן. מפה גיאולוגית של האזור בתרשים 1-2.



תרשים 1-2: מפה גיאולוגית של אזור העבודה (אחרי Mor and Sneh, 1996). בנוסף מופיעים העתקים מהמפה של מיכלסון ומור (1985). סימוני התצורות: AL – אלוביום, Pβc – בזלת הכיסוי, Mh – הורדוס, Mβl – בזלת תחתונה, Me – עין גב, Os – סוסיתא, Of – פיק, Em – פרט מרשה, Ea – פרט עדולם.

הטור הסטרטיגרפי המתואר בעבודה מבוסס על עבודתו של מיכלסון (1972), וחתך עמודי מוכלל של אזור העבודה ניתן לראות בתרשים 1-3א). להלן פירוט היחידות:

תצורת צרעה (איאוקן). התצורה הקדומה ביותר הנחשפת בדרום רמת הגולן. מורכבת מקירטון וחואר עם אופקי גיר וצור, עובייה כ-380 מ'. התצורה מחולקת לשני פרטים: פרט עדולם מגיל איאוקן תחתון-תיכון, בעל עובי מרבי חשוף של 200 מ'; ופרט מרשה מגיל איאוקן תיכון-עליון, שעוביו המרבי מגיע לכ-180 מ'.

תצורת פיק (איאוקן עליון - אוליגוקן). בחלקה התחתון בנויה התצורה מגיר גלאוקוניטי ודטריטי עשיר בעיקר במיקרופאונה. בחלקה העליון מאופיינת התצורה בעיקר על ידי קירטון, חואר ועדשות צור. התצורה מונחת באי התאמה על פרט מרשה ועובייה כ-45 מ'.

תצורת סוסיתא (אוליגוקן - מיוקן תחתון). התצורה מונחת בהתאמה מעל תצורת פיק ומורכבת ממגוון סלעים: גיר, חואר, דולומיט חולי גלאוקוניטי הכולל מאובנים, צור וחול בעובי מרבי של 145 מ'. התצורה חשופה בעובי מרבי באזור סוסיתא, ומתדקקת לכיוון מצוקי האון. באזור סוסיתא ניתן לחלק את התצורה לשני פרטים: פרט האון שהוא בעל הופעה מצוקית ומורכב מדולומיט, חואר וגיר ומגיע לעובי של 100 מ', ופרט נוקיב המאופיין בחילופי אופקים של גיר קירטוני, חולי במקצת, עם גיר ליתוגרפי המכיל אופקי חול לא מלוכד, המגיע לעובי של 45 מ'.

תצורת עין גב (מיוקן תחתון - תיכון). התצורה מורכבת בעיקרה מחולות צהובים המלוכדים לעיתים על ידי קרבונט. החולות הם בעיקרם דקי גרגר (ראה פרק 4.4.1.1), ומורכבים בעיקר מקוורץ, על אף שניתן למצוא גם מעט גיר, קלציט וגלאוקוניט (מיכלסון, 1979). כאשר אבן החול מלוכדת היטב על ידי קלציט, מתקבלת אבן חול גירנית, היוצרת לעיתים נוף מצוקי. כמו כן ישנם מספר אופקי ביניים של גיר למינרי, גיר קירטוני או חוארי המכיל לעיתים גרגרי קוורץ (מיכלסון, 1979). יחידות אלו יוצרות דרגשים דקים בנוף. התצורה מונחת באי התאמה אירוזיבית וזוויתית מעל תצורת סוסיתא ועובייה כ-90 מ'.

גבעון (1984) אפיין בעבודתו את החלק העליון של תצורת עין גב באזור העבודה. הוא ערך מספר חתכים של התצורה במקומות שונים, ואפיין אותם עד רמה של אופקים בתצורה. על פי עבודתו, החלק העליון של תצורת עין גב מורכב מחילופין של אבן חול וגיר, כאשר עוביים של אופקי הגיר קטן (עד מטר אחד), ועוביים של אופקי אבן החול יכול להגיע עד 10 מטרים. חתכים עמודיים של החלק העליון של תצורת עין גב שנערכו בשני מקומות בשטח העבודה על ידי גבעון (1984), מופיעים בתרשים 1-3 ב, עם הקורלציה ביניהם. שמות היחידות המופיעים בתרשים 1-3 ב ניתנו בעבודה זו.

תצורת הורדוס (מיוקן תיכון). תצורה זו הינה העבה ביותר ובעלת התפוצה הרחבה ביותר מבין התצורות הסדימנטריות החשופות באזור המחקר. היחידה היא יבשתית ומורכבת מחואר, חרסית וגיר בחילופין עם סדימנטים קלסטיים כגון קונגלומרטים וחולות. מבחינת המסלע תצורת הורדוס הינה תצורה מגוונת למדי,

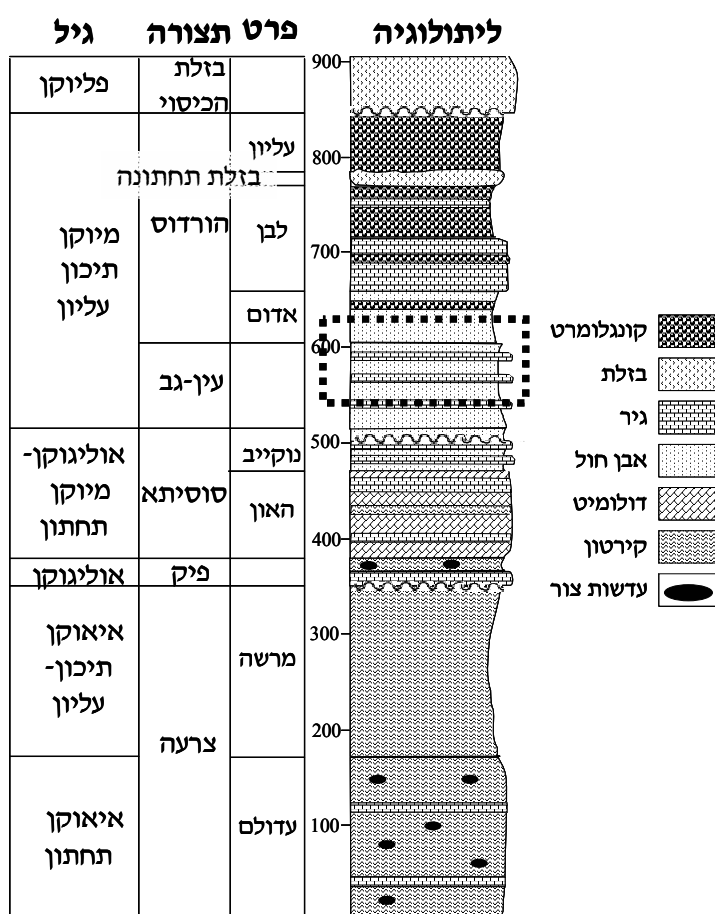
עקב שינויים פציאלים רבים במרחב. חתך התצורה אינו רציף והיא מתאצבעת במספר מקומות עם זרמי הבזלת התחתונה. התצורה מונחת באי התאמה על גבי יחידות מגילים שונים. עובי התצורה 80 - 240 מ'.

באזור המחקר ניתן לחלק את התצורה לשלושה פרטים: פרט תחתון אדום: אבני חול גיריות וחואריות, וביניהן אופקי קונגלומרט; עובי הפרט כ-55 מטרים. פרט תיכון לבן: גירים קרטוניים חוארים בחילופין עם אופקי קונגלומרט, ומעליהם קונגלומרט גס עם אופקי ביניים גיריים. פרט עליון: זרם בזלת תחתונה ומעליו קונגלומרט גס ומעט אבן חול גירית, חואר וגיר. העובי הגדול ביותר שנמדד לפרט זה הוא 240 מ' בצוקי האון.

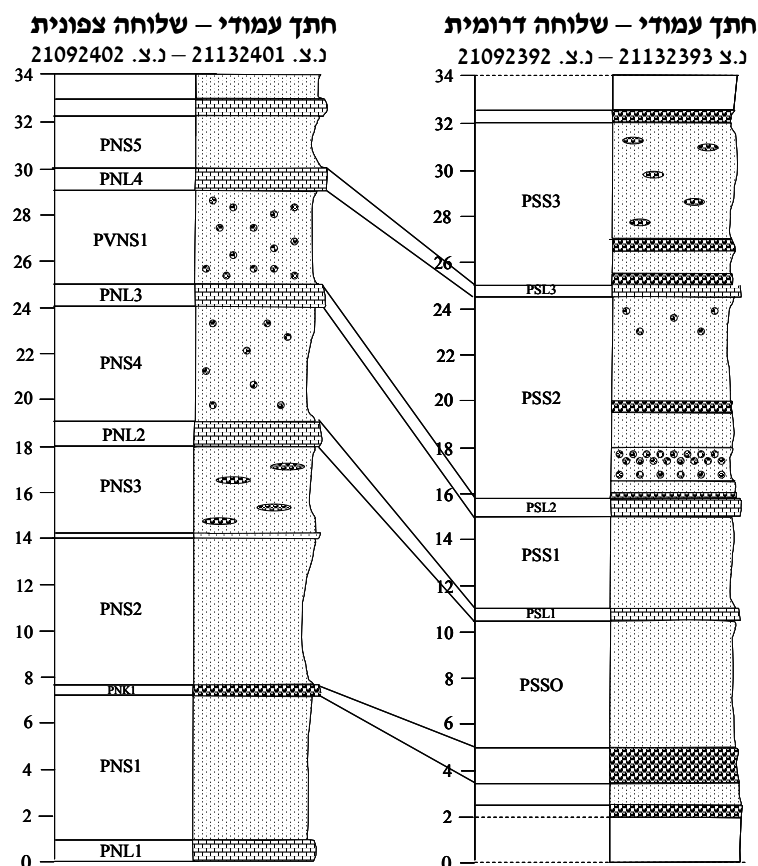
בזלת תחתונה (מיוקן תיכון). הבזלת התחתונה מתאצבעת עם תצורת הורדוס, ומורכבת מזרמי אוליבין בזלת בלויים ופריכים ללא פירוקלסטים. עובי הזרמים נע בין 30-5 מ', ופריסתם הלטרלית מוגבלת.

בזלת הכיסוי (פליוקן עליון). בזלת הכיסוי מורכבת מסלעי אוליבין בזלת בה גבישי האוליבין מוחלפים לאידנגזיט וכוללת אופקי פליאוסולים ובזלת בלויה. התצורה מונחת על כלל התצורות החשופות בשטח העבודה.

בנוסף חשופות באזור העבודה בזלות צעירות יותר מגיל פליוקן - פלייסטוקן תחתון (בזלות איטר ודלווה) וכן בזלות מגיל פלייסטוקן (בזלות ירמוך ורוקד).



תרשים 1-3: א) חתך עמודי מוכלל של אזור העבודה, מבוסס על מיכלסון (1979). האזור המסומן במסגרת מקווקוות מוגדל בעמוד הבא.



(ב) שני חתכים עמודיים באזור העבודה, על פי עבודתו של גבעון (1984). מוצגת קורלציה בין החתכים. שמות היחידות ניתנו בעבודה זו.

1.1.3 מבנה

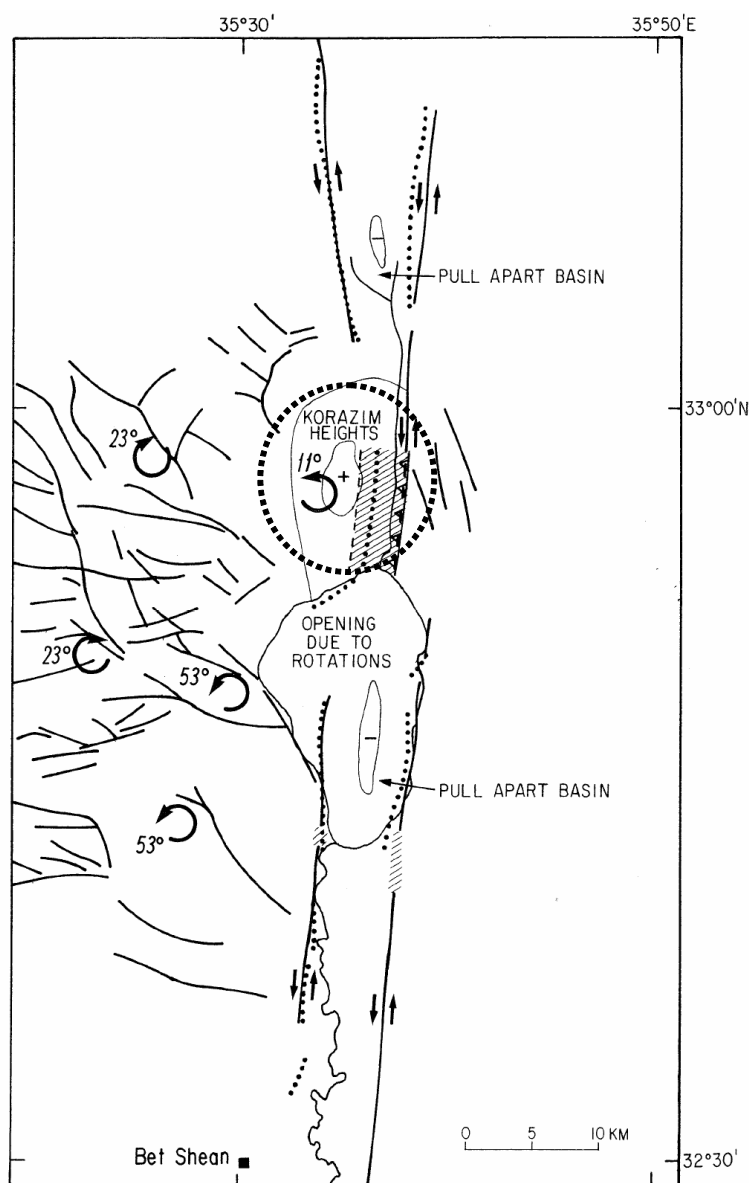
אזור המחקר נמצא בשוליו של בקע ים המלח, העתק מסוג טרנספורם המהווה גבול בין הלוח הערבי ממזרח ותת-הלוח של סיני ממערב. העתק זה מחבר מדרום את אזור הים האדום בו מתרחשת פתיחה של אוקיינוס צעיר (sea floor spreading) עם אזור התנגשות יבשות בהרי הטאורוס בצפון (Garfunkel, 1981). הגזירה לאורך ההעתק נגרמת בשל הפתיחה של הים האדום, והתרחקות של הלוח הערבי מן האפריקאי (Kashai and Crocker, 1987).

אורכו של הטרנספורם הינו כ-1000 ק"מ, כיוונו הכללי צפון - דרום, והוא מורכב ממקטעים רבים בעלי רכיב תנועה אופקית שמאלית, מדורגים במבנה של en-echelon (Garfunkel et al., 1981). תחילת פעולתו של הטרנספורם מוערכת במיוקן (Bartov et al., 1980, Garfunkel et al., 1981), וסך כל התנועה לאורכו מוערכת בכ- 105 ק"מ (ברטוב, 1974), המדודים על סמך גופים ויחידות סלע מוסטות משני עברי ההעתק (ברטוב, 1974, Freund et al., 1970).

לאורכו של בקע ים המלח קיימים מספר מבנים המיוחסים לגיאומטריה של ההעתק. מכיוון שההעתק אינו רציף אלא מורכב ממספר מקטעים מדורגים, באזורים בהם התנועה על ההעתק עוברת ממקטע אחד לשני נוצרים מבנים, בהתאם לכיוון הדירוג. התנועה על טרנספורם ים המלח היא שמאלית, ולכן במקומות בהם

הדירוג הינו שמאלי ייווצרו מבני מתיחה ושקעים טופוגרפיים (pull-apart basins או rhomb-shaped grabens) (Garfunkel et al., 1981) כדוגמת ים המלח, בקעת כנרת-בית שאן ועמק החולה (Rotstein et al., 1992). במקומות בהם הדירוג הוא ימני ייווצרו מבני לחיצה ואזורים מוגבהים טופוגרפית, כגון אוכף ראש פינה והחרמון (Rotstein and Bartov, 1989).

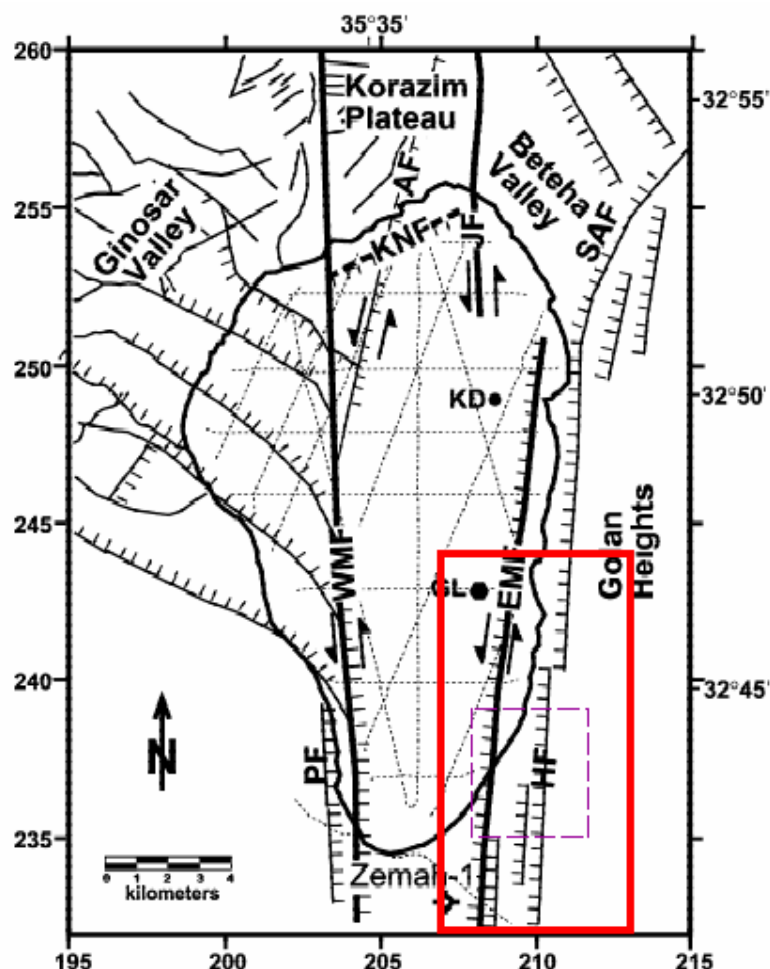
אזור העבודה ממוקם לאורך חופה הדרום-מזרחי של הכנרת, הנמצאת בחלק הצפוני של אגן כינרת-בית שאן, המוערך גם הוא כאגן pull apart. אף על פי כן מיוחס לכנרת מבנה מורכב יותר מאשר pull apart, הקשור במערכות העתקה נוספות. סקרי כבידה שנערכו על ידי Ben Avraham et al. (1996) מצאו כי הכנרת מחולקת לשתי יחידות (תרשים 1-4).



תרשים 1-4: מבנה הכנרת. החלק הדרומי הינו pull apart basin בין העתקי הגבול המזרחי והמערבי של הבקע, ומהווה את המשך אגן כנרת. החלק הצפוני נוצר על ידי תנועה רוטציונית של בלוק כורזים (מסומן במעגל מקווקו, רוטציה מופיעה כחצים מעגליים) ועל ידי העתקים רוחביים הנמשכים מן גליל התחתון. מתוך Ben Avraham et al. (1996).

היחידה הדרומית היא אכן pull apart basin, ומהווה את ההמשך של בקעת כינרות. אגן זה, יחד עם בקעת כינרות הוא אגן סימטרי, המצביע על כך שהוא תחום ממזרח וממערב על ידי שברי Ben (strike slip) (Avraham et al., 1996). היחידה הצפונית נוצרה ככל הנראה על ידי תנועה רוטציונית של בלוק כורזים הצפוני לכנרת, והעתקים נורמליים רוחביים הנמשכים מהגליל התחתון ויוצרים מבנה של בלוקים נטויים (Ben Avraham et al., 1996). לאגן זה מבנה של חצי גרבר, והוא אסימטרי למזרח (Hurwitz et al., 2002). נתונים בתימטריים מצביעים על כך שאגן זה הינו אגן צעיר הפעיל טקטונית וחווה שקיעה גם כיום (Ben Avraham et al., 1996, Ben Avraham et al., 1981).

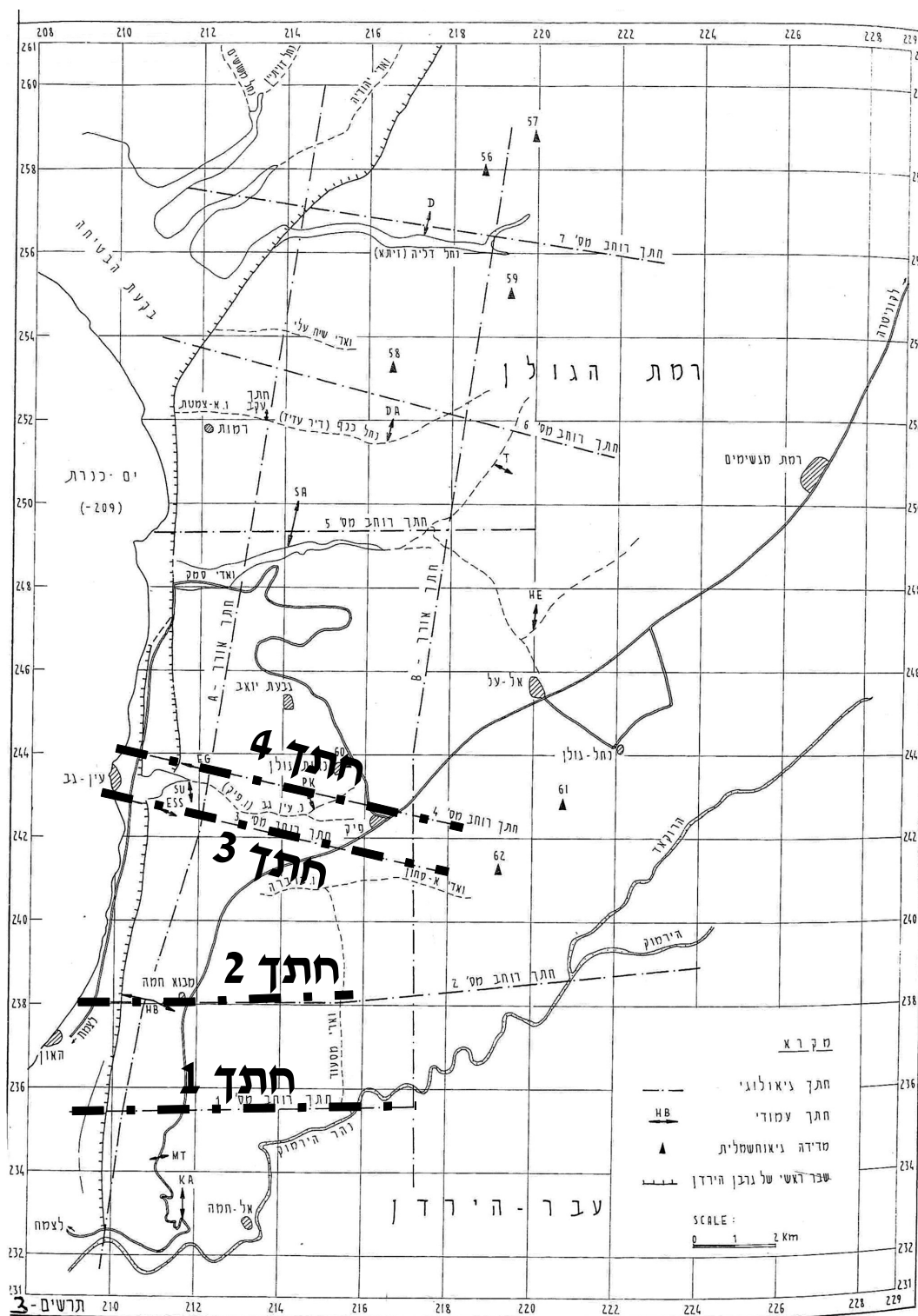
אין הסכמה בין החוקרים השונים באשר למיקומו המדויק של הגבול בין הלוחות באזור הכנרת (תרשים 1-5). כיוונו של העתק הגבול המזרחי של בקעת כינרות-בית שאן הוא צפון-דרום, והוא נמשך דרומה. בצפון אגם הכנרת ההעתק משנה את כיוונו לצפון מזרח, ונקרא העתק שיח' עלי (מיכלסון, 1972). המקטע של שיח' עלי גווע לאחר כחמישה ק"מ. התנועה בין הלוחות מועברת מהעתק הגבול המזרחי אל העתק הגבול המערבי החופף לו. מצפון לכנרת עובר העתק עמק הירדן (Jordan Fault), שעליו ישנה תנועה אופקית שמאלית מובהקת המסיטה אלמנטים במצד עתרת בשיעור של כשני מטרים (Marco et al., 1997, Marco et al., 2003). מקטע זה מקובל כגבול הלוחות, אך המשכו לכיוון דרום אינו ברור. (Hurwitz et al., 2002) טוענים שהעתק הגבול המערבי של הכנרת נמשך לכל אורכו של האגם, והמשכו הישיר לכיוון צפון הוא העתק אלמגור (ענף של העתק עמק הירדן). (Rotstein and Bartov, 1989) טוענים כי מצפון לכנרת התנועה מפוזרת על רצועת העתקה שרוחבה כשני ק"מ, וקשה לאתר גבול חד. צפונה יותר רוחב רצועת ההעתקה מצטמצם. עוד הם טוענים שהעתק הגבול המערבי של הכנרת מעביר את התנועה להעתק הגבול המזרחי של עמק החולה. (Ben Avraham et al., 1996) טוענים כי העתק הגבול המערבי אינו ממשיך לכל אורך האגם, והוא מוגבל לחלקו הדרומי. התנועה בצפון אגן הכנרת מתבצעת לטענתם על ידי דפורמציה שאינה קשיחה (crushed zone) או על ידי רוטציה של בלוקים על העתקים ניצבים או מלוכסנים לתנועת הלוחות. (Kashai and Crocker, 1987) טוענים כי העתק פוריה נמשך דרומה מדרום מערב הכנרת אל מערב בקעת בית שאן וצפונה דרך אגם הכנרת עד להתחברותו אל העתק עמק הירדן.



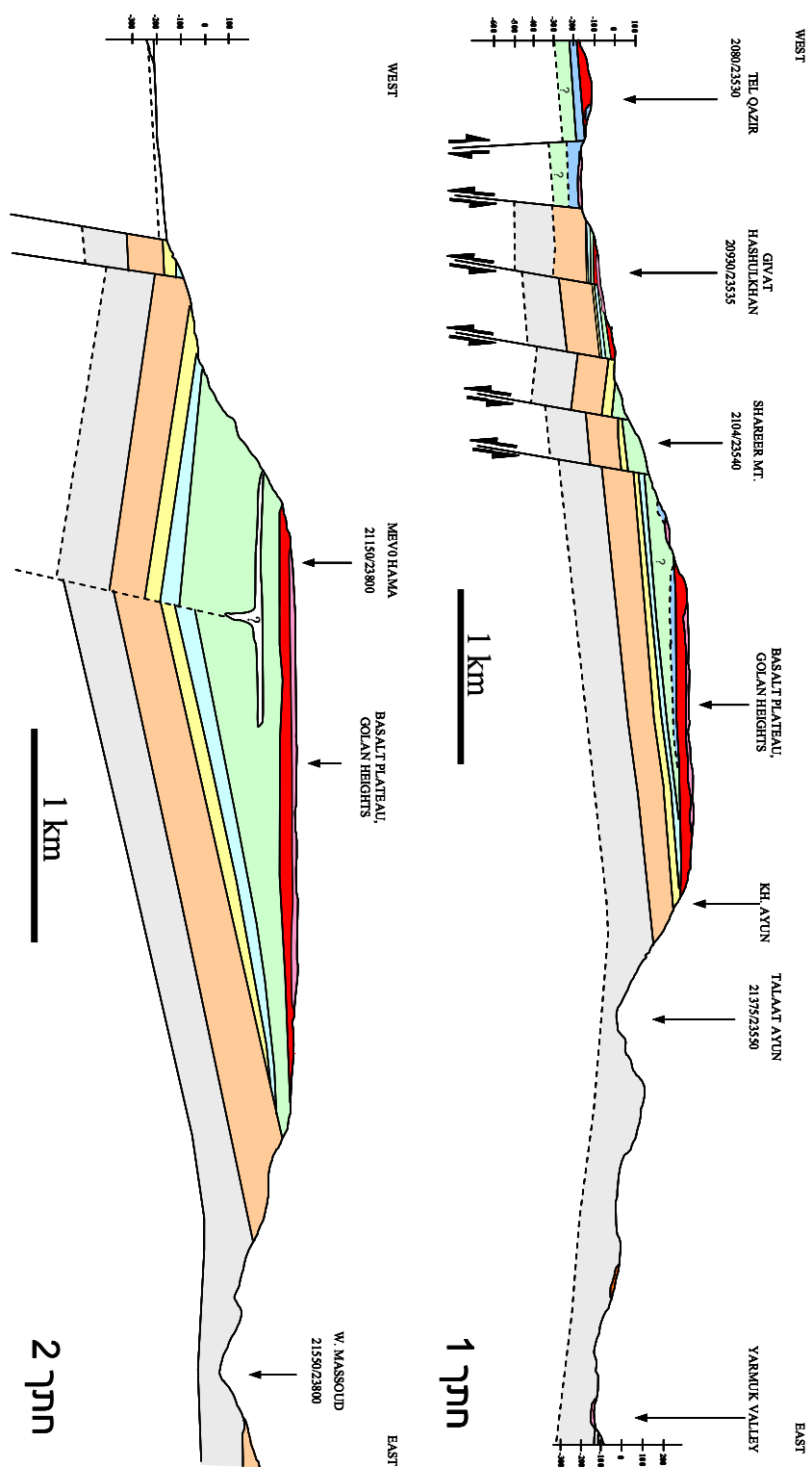
תרשים 1-5: מפת ההעתקים באזור הכנרת, מתוך Hurwitz et al. (2002). במסגרת – אזור העבודה. ברקע העתקי הגבול המזרחי (EMF) והמערבי (WMF) של בקע ים המלח באזור הכנרת, והעתקים נוספים שמופו בים (סקר סייסמי) וביבשה. JF: העתק הירדן; HF: העתק האון; PF: העתק פוריה; AF: העתק אלמגור; KNF: העתק כפר נחום; SAF: העתק שיח עלי.

המבנה הגיאולוגי של רמת הגולן קשה לפענוח בשל בזלת הכיסוי, המכסה על כל הרמה. בדרום רמת הגולן ישנו ציר סינקלינאלי בכיוון צפון-דרום הממוקם מזרחית למבוא חמה (מיכלסון, 1979) (תרשים 1-6, חתך 2). המצאותו של ציר זה גורמת לכך שהיחידות הסדימנטריות בחלק הדרומי של אזור המחקר (אזור מצוקי האון) תצורות פיק, סוסיטא ועין גב נחשפות כי הן נוטות מזרחה בנטייה של עד כדי 15 מעלות (מיכלסון, 1979) (תרשים 1-6, חתך 2). לצפון, מתחלף כיוון נטיית השכבות למערב-צפון מערב, כך שרק היחידות הצעירות יותר נחשפות – תצורות הורדוס ועין גב (תרשים 1-6, חתכים 3,4). יש לציין שהתצורות הנ"ל מכוסות בבזלת הכיסוי שנטייתה אופקית פחות או יותר וניכר בה שמילאה תבליט. במקומות, גם לבזלת הכיסוי נטייה קטנה מאוד מערבה. על-פי חתכים שנעשו על-ידי מיכלסון (1979) (תרשים 1-6) אפשר להסביר את השתנות כיווני הנטיות של היחידות הסדימנטריות על ידי שבירה והטיה של בלוקים כתוצאה מהנמכת בסיס אגן הבקע. ואכן, לאורך המדרונות זהו מספר רב של העתקים אשר כיוונם צפון דרום, כאשר ברובם הבלוק הירוד הוא המערבי והזריקה לאורך רצועת השבירה היא בסדר גודל של מאות מטרים על העתקי הגבול הראשיים, ועשרות מטרים עד מטרים על ההעתקים המשניים (מיכלסון ומור, 1985). סדרת ההעתקים יוצרת

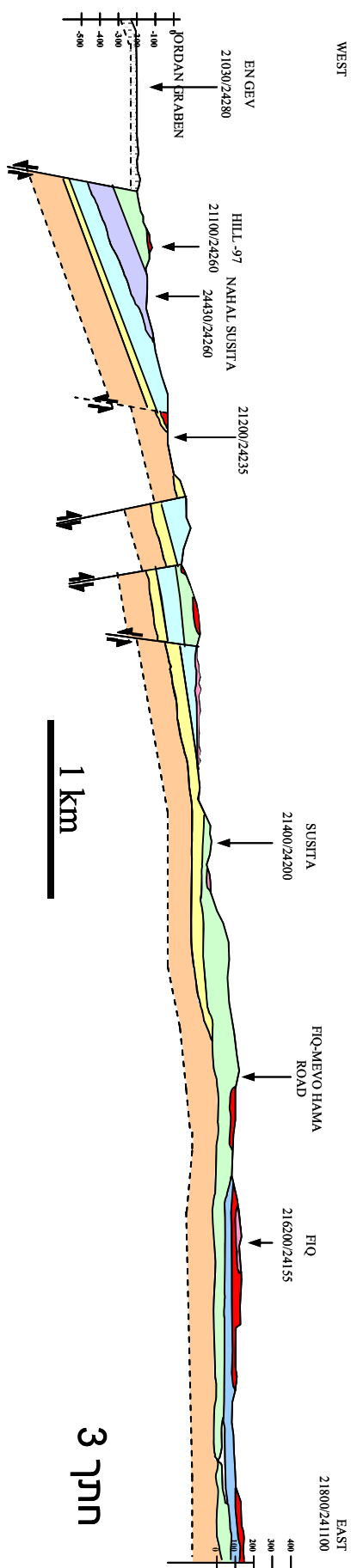
מבנה של בלוקים אשר בחלקם נטיית השכבות הפוכה לכיוון הנטייה הסינקלינאלי, כלומר הם נוטים לכיוון מערב. כפי שניתן לראות בחתכים 1, 3 ו-4 בתרשים 1-6, השלוחות באזור העבודה מופרעות על ידי מספר העתקים כל אחת, ועקב כך המבנה שלהן הוא של בלוקים נטויים לכיוון מערב, בנטיית משתנות.



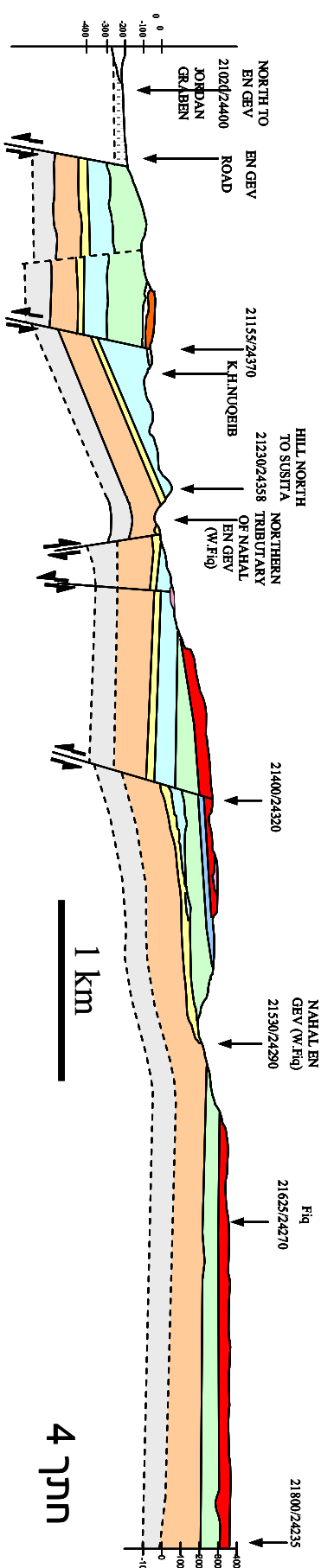
תרשים 1-6: חתכי רוחב של המדרונות המערביים של רמת הגולן (מכלסון, 1979). בעמוד זה מוצגת מפת מיקום החתכים, בעמודים הבאים מוצגים ארבעה חתכי רוחב.



WEST



EAST

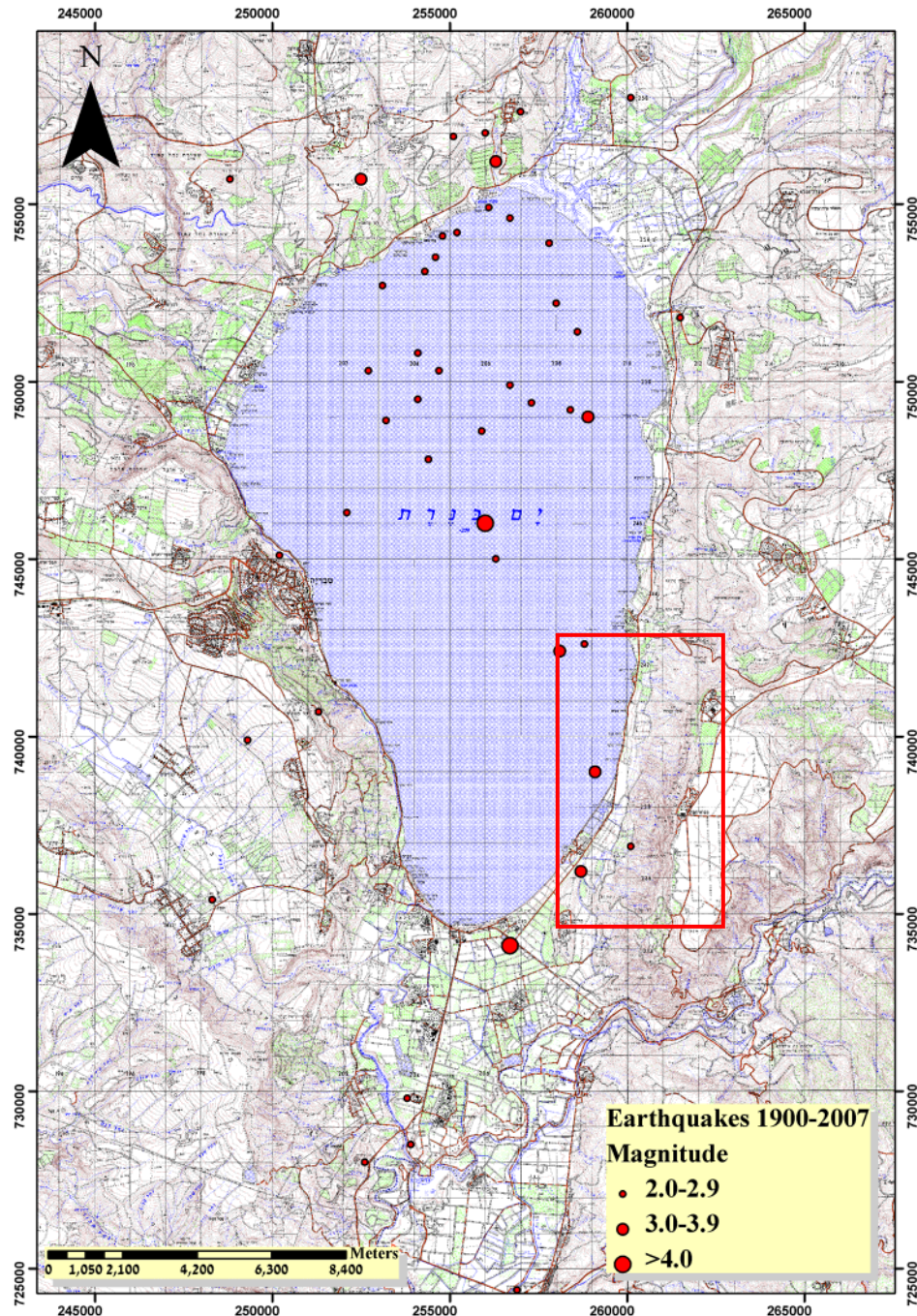


1.1.4 פעילות סייסמית וקצבי תזוזה

טרנספורם ים המלח פעיל סייסמית, לכך יש עדויות גיאולוגיות, היסטוריות, ארכיאולוגיות וסייסמולוגיות המצביעות על רעידות אדמה גדולות אשר התרחשו לאורכו (למשל Marco, Amit et al., 2002, et al., 1997). ב-4000 השנים האחרונות התרחשו בטרנספורם ים המלח, לכל אורכו, 42 רעידות במגניטודות מוערכות $6.7 < M_w < 7.3$ (Ben-Menahem, 1991). רעידות גדולות נרשמו בין היתר בשנים 31, 759, 1200, 1356, 2600 לפני הספירה, ובשנים 363, 746/9, 859, 1033, 1201/2, 1456, 1546, 1759, 1837, 1927 לספירה (Ben-Menahem, 1981, Ben-Menahem, 1991, Amiran et al., 1994). עדויות להעתקה שמאלית ניתן לראות במספר אתרים ארכיאולוגיים. הסטה של 2.1 מ' נמדדה במצד עתרת הממוקם סמוך מאוד לערוץ הירדן, מצפון לכנרת. 1.6 מ' מן ההעתקה מיוחסים לרעידת האדמה של 1202, ועוד 0.5 מ' לרעידות האדמה של 1759 ו/או 1837 (Marco et al., 1997, Ellenblum et al., 1998). עדויות פליאויסיסמיות לרעידות גדולות שהתרחשו בעבר נמצאו דרומית ליריחו, והן מיוחסות לרעידות של 31 לפנה"ס ו-749 לספירה (Reches and Hoexter, 1981). עדויות פליאויסיסמיות נוספות נמצאו בבקעת בית צידה, בהן הסטה אופקית שמאלית של 2.2 מ' המיוחסת לרעידה של 1202, והסטה נוספת של 0.5 מטרים המיוחסת לרעידה של 1759 (Marco et al., 2005).

קצב התנועה הממוצע על הטרנספורם המחושב מתוך 105 ק"מ תזוזה מאז המיוקן הוא כ-5 מ"מ בשנה (Bartov et al., 1980). קצב תזוזה ממוצע דומה, של 4.9 ± 0.2 מ"מ בשנה עבור 50 אלף השנים האחרונות, הוערך גם על ידי Ferry et al. (2007). Garfunkel et al. (1981) טענו כי ב-1500 השנים האחרונות קצב התזוזה הסייסמי הוא 1.5-3.5 מ"מ לשנה, כאשר בפליוקן-פלייסטוקן קצבי התזוזה היו 7-10 מ"מ לשנה. יתכן שמקור ההפרש בין הקצבים טמון בשינוי קצב התנועה, או שכיום חלק גדול מהתנועה מתבצע בזחילה ולא על ידי החלקה סייסמית (Garfunkel et al., 1981), או שחלק מן התנועה נאגר במקום כלשהו. Ben-Menahem (1981) טוען שככל שמתקדמים צפונה על הטרנספורם קצבי התנועה הסייסמית מתגברים. באזור המחקר (צפון ישראל) התנועה הסייסמית מהווה רק כשליש מסך כל התנועה, בקצב של 1.9-2.2 מ"מ לשנה (Ben Menahem, 1981), ואילו באזור טורקיה התנועה כולה נעשית על ידי החלקה סייסמית. מעדויות פליאויסיסמיות בבקעת בית צידה עולה כי קצב התנועה בסוף תקופת ההולוקן הוא 4 ± 1 מ"מ לשנה (Marco et al., 2005). על-פי מדידות GPS, קצבי התנועה הכוללת (סייסמית וא-סייסמית) לאורך ההעתק מוערכים ב- 3.7 ± 0.4 מ"מ בשנה (Wdowinski et al., 2004). בחלקו הצפוני של הטרנספורם, בצפון סוריה, קצבי התזוזה הם 6.9 ± 0.1 מ"מ לשנה (Meghraoui et al., 2003).

רעידות אדמה נרשמות במכשירי הרשת הסייסמית של ישראל באופן תדיר, ובתרשים 1-7 ניתן לראות את הפעילות הסייסמית באזור הכנרת מ-1900 ועד היום (המכון הגיאופיסי לישראל, www.gii.co.il). רוב הרעידות הן חלשות, למעט רעידה בינונית בקרבת מסדה בשנת 1973 במגניטודה 4.5.



תרשים 1-7: אירועים סייסמיים באזור הכנרת משנת 1900 ועד היום. על פי נתוני המכון הגיאופיסי www.gii.co.il. במלבן אדום – אזור העבודה.

1.1.5 זמני חזרה של רעידות

זמני החזרה של רעידות בעצמות שונות באזור בקע ים המלח מוערכים באמצעות שיטות שונות ומקורות שונים. פירוט נרחב ניתן על-ידי בגין (2005). זמנים אלו מוערכים על פי אקסטרפולציה של נתוני

רעידות אדמה במאה השנים האחרונות (Shapira et al., 2004), שימוש בתיעוד היסטורי של רעידות אדמה (Ben Menahem, 1981, Ben Menahem, 1991), שימוש בתיעוד גיאולוגי של רעידות אדמה פרה-היסטוריות (Kagan et al., 2005, Marco et al., 2003, Zilberman et al., 2004), ושימוש בנתונים גיאולוגיים על מאזן המעוות לאורך העתק ים המלח (Marco et al., 2005, Wdowinski et al., 2004), על-פי ניתוח רישומי רעידות אדמה היסטוריות מאז שנת 31 לפנה"ס, וגם על-פי האומדן הסייסמולוגי המשמש גם בתקן לבניה (Shapira et al., 2004) תקופת חזרה ממוצעת של רעידות חזקות ממגניטודה 6.2 באזור המחקר היא 400 שנה (בגין, 2005).

על-פי האומדן הסייסמולוגי תקופת החזרה של רעידות במגניטודה גבוהה מ-7 היא 3000 שנה באזור המחקר (Shapira et al., 2004). תקופת החזרה עבור רעידות גדולות מ-7.3 היא 10000, גם על-פי האומדן הסייסמולוגי וגם על-פי (Kagan et al., 2005), אשר מצאו על-פי שבירה של נטיפים במערות שורק זמן חזרה של כ- 10000 שנה עבור רעידות במגניטודה של 7.7 ועד 8.

1.2 מטרת המחקר ויעדיו

מטרת המחקר :

תרומה לידע אודות רעידות אדמה גדולות (מגניטודה צפויה וזמני חזרה) במזרח הכנרת, על מנת לשפר את ההיערכות לרעידה חזקה, ולהפחית את הנזק והסיכון הצפויים להתרחש ברעידה כזו.

יעדי המחקר :

1. מיפוי העתקים וליניאמנטים חשודים כהעתקים פעילים באזור המחקר.
2. ניתוח גלישת מדרון נבחרת תוך לימוד והכרת היחידות הסטרטיגרפיות, הבנת המבנה הגיאולוגי של האזור והבנת הגיאומטריה של הגלישה.
3. הערכת התכונות המכניות והפיסיקליות של היחידה הגיאולוגית שגרמה לכשל של הגלישה הנבחרת.
4. ניתוח לאחור של יציבות סטטית ופסיאודו-סטטית של המדרון שכשל.
5. ניתוח לאחור של כשל מבנה ארכיאולוגי באתר סוסיתא בשיטה דינמית, להערכת תאוצת הקרקע המרבית ברעידת האדמה, ומתוך כך המגניטודה והמרחק של רעידה אפשרית.
6. שילוב של הידע החדש והידע הקיים להבנה שלמה יותר של הסכנה הסייסמית הצפויה באזור המחקר והערכתו, לאור הסיכון המוערך כיום על-בסיס מפת התאוצות הסייסמיות לתקן הישראלי 413.

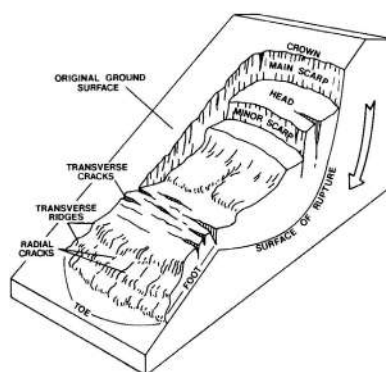
2. רקע מדעי

2.1 ניתוח לאחור של כשל מדרון לצורך הערכת תאוצות קרקע צפויות באזור המחקר

גלישת מדרון (landslide) מוגדרת כתנועת סלע, קרקע או רסק (debris) במורד מדרון, בהשפעת כוח הכובד (Smith, 1996). האפשרות לגלישות מדרון מהווה גורם סיכון כאשר תזוזה ניכרת של חומר במורד המדרון הקיים עלולה לסכן חיי אדם, רכוש או לגרום נזק לתשתיות. האזור המושפע מגלישת מדרון אינו רק האזור הסמוך מיידית למדרון. הגלישה יכולה לפגוע באזורים רחוקים על ידי חסימת נחלים וגרימת הצפות (McCarthy, 2002). מדרונות קיימים שהיו יציבים במשך תקופה ארוכה יכולים לעבור כשל ולחוות תנועה ניכרת, תחת השתנות התנאים הטבעיים או השפעת האדם. השתנות תנאים טבעיים יכולה לכלול רעידות אדמה, קריסה של חללים תת-קרקעיים, בליה, היווצרות סדקי מתיחה בחומר המדרון, השתנות עומד מי התהום ועוד (McCarthy, 2002). גלישות מדרון כתוצאה מרעידות אדמה תועדו כבר מהמאה הרביעית לפנה"ס (Keefer, 1984), וגרמו למותם של עשרות אלפי בני אדם ולנזקים כלכליים עצומים במאה הקודמת (Keefer, 1984).

ישנם מספר סגנונות אופייניים לתנועת מדרונות, שיתוארו להלן (Cruden and Varnes, 1992):

גלישה רוטציונית (rotational slide) – המסה הנעה מוגדרת ונבדלת מן התשתית באמצעות משטח החלקה מוגדר היטב. משטח ההחלקה הוא האזור לאורכו מתרחשים הכשל וההחלקה, וזהו האזור בו כוח הגזירה הפועל על החומר גבוה מחוזק הגזירה המרבי שלו. סגנון כשל זה מקובל למצוא במדרונות טבעיים, הבנויים סלעים חלשים יחסית ו/או קרקע, והמורפולוגיה שתקבל כתוצאה מסגנון זה היא משטח החלקה מעגלי, כאשר המסה שכשלה מוערמת (slumped) בבסיס המדרון המקורי, באזור הנקרא בוחן הגלישה (toe). באזור העליון, ממנו נעה המסה, תופיע צלקת בצורת חצי מעגל (scarp) (תרשים 2-1).



תרשים 2-1: תרשים סכמתי של גלישה רוטציונית, הכולל את האלמנטים השונים במבנה – בראש הגלישה – הצלקת (scarp), בתחתיתה – הבוחן (toe). מתוך www.gsa.state.al.us/gsa/geologicalhazards/landslides/ROTate.jpg.

גלישת העתקה (*translational slide*) – סגנון כשל זה מאפיין יחידות משוכבות ונטויות. עיקר התזוזה מתרחשת לאורך השיכוב או לאורך מישור חולשה המקביל לכיוון נטיית השכבות.

כשל בלוקים (*block, wedge failure*) – סגנון כשל אופייני לסלע קשיח המכיל מישורי אי-רציפות, או בקרקעות קשיחות שהתפתחו בהן מישורי אי-רציפות.

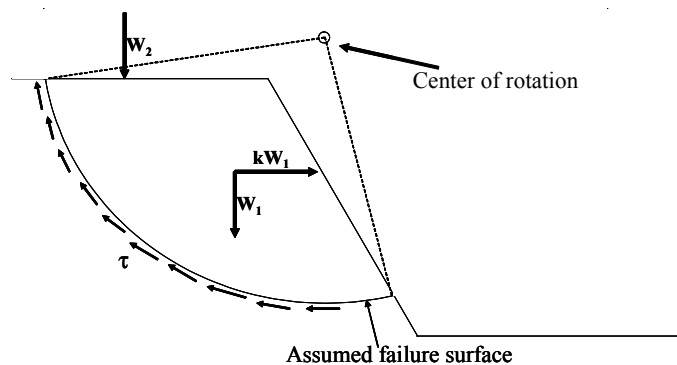
זרימת קרקע (*earth flow/mud flow*) – סגנון כשל האופייני לחומרים המאבדים את קשיחותם בנוכחות מים. הכשל הוא איטי, ומתרחש כתנועה לטרלית של קרקע המגיעה למצב של צמיגות הדומה לנוזל.

התפשטות קרקע (*earth spread*) – כשל המתרחש כאשר קרקע סדוקה מתפרקת לבלוקים הנעים לכיוונים שונים.

הגלישה שתנוחת בעבודה זו זוהתה כגלישה רוטציונית על פי האלמנטים המורפולוגיים המופיעים בשטח – הימצאותם של צלקת (*scarp*), ובסיס הגלישה שהוא בעל הופעה ברורה של toe. בסעיפים הבאים יפורט ניתוח יציבות המדרון עבור סגנון כשל של גלישה רוטציונית.

2.1.1 שיווי משקל גבולי (Limit equilibrium)

ניתוח יציבות המדרונות בעבודה זו מתבסס על שיטת שיווי המשקל הגבולי (*limit equilibrium*), ומציאת מקדם ביטחון כנגד כשל. מושג מקדם הביטחון (*Factor of Safety*) נקבע כיחס שבין סכום הכוחות/מומנטים המייצבים (*resisting*), ובין סכום הכוחות/מומנטים המניעים (*mobilizing*). במקרה של גלישה רוטציונית, מקדם הביטחון הוא היחס בין המומנטים המייצבים המסופקים על-ידי כוח החיכוך (τ) (בתרשים 2-2), לבין המומנטים המניעים אותם, המסופקים על-ידי משקל החומר שמעל מישור הגלישה (W_1) (בתרשים 2-2), ועומס חיצוני אם קיים – סטטי, כגון מבנה (W_2 בתרשים 2-2) או פסיאודוסטטי כגון רעידת אדמה (kW_1 בתרשים 2-2).

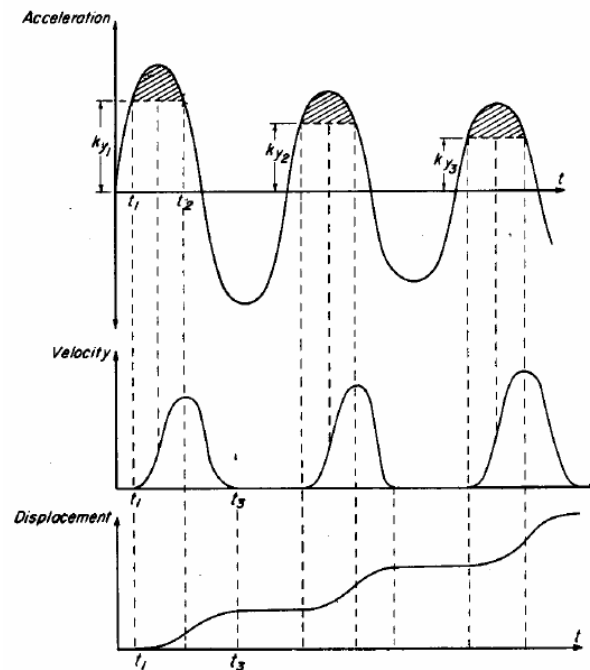


תרשים 2-2: תרשים הכוחות הפועלים על מדרון אשר לגביו מונח כשל בגלישה רוטציונית. τ – ההתנגדות לגזירה הפועלת בבסיס משטח ההחלקה, W_1 – משקל החומר הכושל, W_2 – כוח חיצוני אפשרי, כגון בניין שנמצא מעל המדרון, kW_1 – עומס פסיאודוסטטי, כתוצאה מרעידת אדמה.

מקדם ביטחון השווה ל-1 מציין מצב של שיווי משקל גבולי שבו המומנטים המייצבים והמניעים שווים בגודלם. מקדם ביטחון גבוה מ-1 מציין מצב יציב, ונמוך מ-1, מצב שאינו יציב, המוביל לכשל. יש לציין כי לשיטת שיווי המשקל הגבולי, על אף היותה פשוטה ובאופן יחסי קלה לביצוע, ישנם חסרונות, ביניהם הצורך להניח מראש את צורת משטח הכשל במדרון; חוסר התייחסות לכמות התזוזה של המדרון (כל הפרה של שיווי המשקל היא כשל מוחלט, Jibson and Keefer, 1993); קביעת מקדם בטחון אחיד לכל מסת המדרון. עם זאת, שיטה זו, בגישה הדו-ממדית, היא עדיין מהמקובלות ביותר בניתוח יציבות מדרונות. השימוש המפורט בשיטת שיווי המשקל הגבולי, על ידי שיטת הפרוסות, יתואר ביתר פירוט בסעיף הבא.

ישנן מספר גישות לניתוח יציבות מדרון:

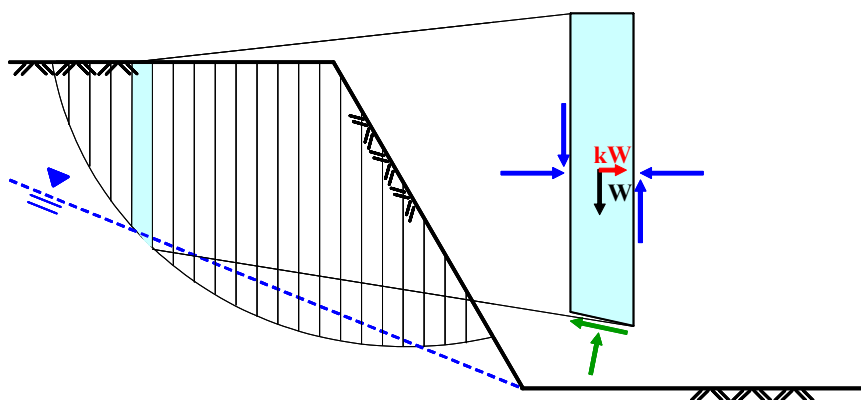
- ניתוח סטטי – ניתוח יציבות המדרון כאשר הכוחות הפועלים עליו הם כוחות הגוף של מסת הסלע, עומס חיצוני כגון מבנה המוסיף משקל, וכוחות החיכוך. הכוח המייצב בגישה זו הוא כוח החיכוך, והכוחות המניעים הם מסת הגוף הגולש, ועומס חיצוני אם קיים. במקרה זה המדרון יישמר יציב רק אם חוזק הגזירה המסופק על ידי כוח החיכוך עולה על מאמץ הגזירה המסופק ע"י כוחות הגוף של המסה הגולשת.
- ניתוח פסיאודוסטטי - הניתוח הבסיסי ביותר לקביעת יציבות מדרון בעת רעידות אדמה. בניתוח זה, מתווסף כוח נוסף על אלו שבניתוח הסטטי. כוח זה הינו כוח סייסמי **סטטי**, שיכול להיות בעל רכיב אנכי ואופקי גם יחד, והוא מדמה את כוחות האינרציה הפוטנציאליים הנוצרים כתוצאה מתאוצת קרקע ברעידת אדמה. הכוחות הסייסמיים הסטטיים הינם פרופורציוניים למשקל המסה הנעה, והם קשורים אליה בקבוע פרופורציה k אשר מהווה את היחס בין תאוצת הסף הדרושה להנעת המסה לבין g (תאוצת הכובד). בצורת ניתוח זו, כל מקדם ביטחון הנמוך מ-1 יהווה כשל, ללא התייחסות לכמות התזוזה של המדרון (Jibson and Keefer, 1993).
- ניתוח בשיטת ניומרק (Newmark's Displacement Method (Newmark, 1965) – שיטה זו הינה למעשה הרחבה מסוימת של השיטה הפסיאודוסטטית, ומשמשת למציאת **תזוזות** המדרון. שיטה זו מניחה מספר הנחות לגבי התנהגותו של החומר וכיוון תנועתו. לאחר מציאת קבוע הפרופורציה k מהשיטה הפסיאודוסטטית, ובחירת רישום תאוצה (seismogram) של רעידת אדמה מתאימה לאזור ולמסה הגולשת, מבצעים אינטגרציה כפולה על כל אותם אזורים בהם תאוצת הקרקע עברה את תאוצת הסף (k_{yi} בתרשים 2-3), ומקבלים את תנועת המדרון. תרשים המראה את דרך הפעולה בשיטת ניומרק מוצג בתרשים 2-3. בשיטה זו ניתן להגדיר ככשל כל תזוזת מדרון שהיא מעל ערך מסוים, ועל-ידי כך להביא בחשבון באופן מסוים את אלמנט התלות בזמן של התאוצות.



תרשים 2-3: הערכת תזוזת המדרון באמצעות אינטגרציה בשיטת ניומרק. אינטגרציה כפולה מבוצעת ביחס לתאוצות הגבוהות מתאוצת הסף k_{yi} , ומתקבלת תזוזת המדרון. לקוח מתוך (Goodman and Seed, 1966).

2.1.2 שיטת הפרוסות

בסיס הרעיון של שיטת הפרוסות הוא חלוקת המסה הגולשת למספר (n) "פרוסות" קטנות, כאשר כל פרוסה כזו מנותחת כיחידה בודדת (תרשים 2-4). באופן כזה, פיזור המאמץ הנורמלי האפקטיבי לאורך מישור הגלישה ידוע, דבר הכרחי לצורך חישוב הכוח המניע את המסה הגולשת. כל פרוסה כזו מושפעת ממערכת כוחות הכוללת את משקל הפרוסה, כוח החיכוך, כוח הנובע מלחץ מי הנקבים בתחתית הפרוסה (אם קיים), כוחות אינרציה אופקיים ואנכיים הנובעים מרעידת אדמה וכוחות בין-פרוסתיים (תרשים 2-4).



תרשים 2-4: תרשים סכמתי של ניתוח יציבות בשיטת הפרוסות. המסה הגולשת מחולקת לפרוסות שכל אחת מהן מתפקדת כבלוק נפרד. קו כחול – מפלס מי התהום. בהגדלה: פרוסה אחת והכוחות הפועלים עליה. חץ שחור – משקל הפרוסה; חץ אדום – כוח אינרציה אופקי; חצים כחולים אופקיים ואנכיים – כוחות בין-פרוסתיים נורמליים וכוחות גזירה, בהתאמה; חץ ירוק תת אופקי – חיכוך בבסיס הפרוסה; חץ ירוק תת-אנכי – כוח המופעל על ידי לחץ מי הנקבים (אם קיים) (Krahn, 2004, ע"פ).

בשיטה זו ישנן 4n משוואות, ו-2n-6 נעלמים, עובדה שהופכת בעיה מעין זאת לבלתי מסוימת סטטית. סדרה של הנחות מאפשרת לפתור בעיות מסוג זה, וקיימות מספר שיטות שכל אחת מהן מניחה הנחות מסוימות, ומקיימת תנאים מסוימים. בטבלה 2-1 מוצגות השיטות השונות, והתנאים שהן מקיימות:

טבלה 2-1: פירוט השיטות העיקריות בשיטת הפרוסות. עבור כל שיטה מפורטים התנאים אותם היא מקיימת, וההנחות שבשימוש כל שיטה. על פי Abramson et al. (1995).

השיטה	קיום שיווי משקל של כוחות בציר האופקי	קיום שיווי משקל של כוחות בציר האנכי	קיום שיווי משקל של מומנטים	הנחות
Ordinary method of slices (Fellenius, 1936)	לא	לא	כן	אין כוחות בין-פרוסתיים. יתרונה הוא בפשטותה.
Bishop's simplified (Bishop, 1955)	כן	לא	כן	יש כוחות בין-פרוסתיים נורמלים, אך לא כוחות גזירה.
Janbu's simplified (Janbu, 1954)	כן	כן	לא	יש כוחות בין-פרוסתיים נורמלים, אך לא כוחות גזירה.
Corps of Engineers (Corps of Engineer's, 1982)	כן	כן	לא	קיימים כל הכוחות הבין-פרוסתיים. הנורמלים מקבילים לפני השטח של הפרוסה, או לקו הדמיוני המחבר את שני קצוות המדרון.
Lowe and Karafiath (Lowe and Karafiath, 1960)	כן	כן	לא	קיימים כל הכוחות הבין-פרוסתיים. הנורמלים פועלים בזווית שהיא הממוצע בין הנטייה של פני השטח של הפרוסה ונטיית בסיס הפרוסה.
Janbu's generalized (Janbu, 1954)	כן	כן	לא	קיימים כל הכוחות הבין-פרוסתיים, ומיקומם נקבע.
Bishop's rigorous (Bishop, 1955)	כן	כן	כן	מניח כוחות גזירה בין-פרוסתיים, ומציג שקול כוחות בין-פרוסתיים שמקיים שיווי משקל של מומנטים.
Spencer (1967)	כן	כן	כן	שקול הכוחות הבין-פרוסתיים הינו בעל שיפוע קבוע.
Sarma (1973)	כן	כן	כן	מחשבת את מקדם התאוצה הסייסמית הדרוש בכדי להביא את המסה למצב של שיווי משקל גבולי. הכוחות הבין-פרוסתיים ממוקמים על ידי פונקצית פיזור.
Morgenstern and Price (1965)	כן	כן	כן	מיקום הכוחות הבין-פרוסתיים נקבע על-ידי פונקצית פיזור.

בניתוח היציבות בעבודה זו נבחרה לשימוש שיטת Morgenstern-Price (1965) המופעלת על ידי תכנת המחשב SLOPE/W 2004. יתרונות שיטת Morgenstern-Price (1965) הם שהיא מביאה בחשבון כי בין הפרוסות קיימים גם כוחות נורמלים וגם כוחות גזירה, שהיא מקיימת שיווי משקל של כוחות ומומנטים, ושהיא מגדירה את היחס בין כוחות הגזירה לכוחות הנורמלים הבין-פרוסתיים כפונקציה שניתנת לבחירה על-ידי המשתמש. כמו כן, שיטות אחרות שלא מביאות בחשבון את כל הכוחות הבין-פרוסתיים ולא מקיימות את כל משוואות שיווי המשקל יכולות לעתים להיות פחות מחמירות (Krahn, 2004).

2.2 פתרונות נומריים ו-DDA

2.2.1 שיטות נומריות

שיטות נומריות משמשות ככלי עזר לפתרון במקרים בהם לא קיים פתרון אנליטי לבעיה, או שהוא מסובך במידה שאינה מאפשרת פתרון בכלים סטנדרטיים. במקרים כאלו, בעזרת מידול הבעיה ושימוש בשיטה נומרית מסוימת, ניתן למצוא פתרון נומרי לבעיה, תוך ידיעה והבנה של מגבלות השיטה. השיטות הנומריות הופכות כיום שימושיות יותר ויותר בתחום של מכניקת סלע וקרקע מכיוון שבעיות גיאוטכניות הן לרוב בעיות סבוכות, הפרמטרים בהן רבים והגיאומטריה לעתים אי-רגולרית, ולפיכך אינן ניתנות לפתרון בצורה אנליטית. הצורך בתכנון והבנה של מצבים מורכבים מצד אחד, והיכולת להשתמש במודלים מתמטיים בשילוב נתונים גיאולוגיים, פיסיקליים ומבניים מצד שני, הביאו להתקדמות גדולה בתחום זה בשני העשורים האחרונים. בפרק זה אתייחס בעיקר לשיטה הנומרית בה השתמשתי במחקר זה, שיטת ה-DDA (Discontinuous Deformation Analysis). רקע כללי על שיטות נומריות ויישומן במכניקת הסלע ניתן למצוא אצל Jing (2003), שם ישנה גם התייחסות לשיטת DDA בהקשר הרחב יותר של שיטות נומריות בכלל.

השיטות הנומריות נחלקות לשיטות המשמשות לניתוח מרחב רציף (continuum) ומרחב שאינו רציף (discontinuous). בגישת המרחב הרציף, האידיאל הוא חלוקת מרחב הבעיה לאינסוף אלמנטים. למעשה, מחולק המרחב למספר גדול אך סופי של אלמנטים סטנדרטיים, ולכן מספר גדול אך סופי של דרגות חופש. השיטה הפופולארית ביותר בגישת המרחב הרציף היא שיטת האלמנטים הסופיים (finite elements method - FEM). גישת המרחב הבלתי רציף, המתארת מרחב הבנוי מאלמנטים דיסקרטיים (discrete element method - DEM) מתאימה למערכות פיסיקליות שאינן רציפות, ומכילות מספר גופים או יחידות ואי-רציפויות ביניהם, כדוגמת סדקים, שברים ומישורי אי-רציפות. בשיטה זו מחולק המרחב לאלמנטים, המייצגים את הגופים השונים או היחידות השונות. תכונותיהם המכניות של הגופים השונים ידועות, וכן התכונות המכניות של המגעם. המרחב מיוצג למעשה על-ידי מספר סופי של בלוקים קשיחים ודפורמביליים, כאשר המגעם ביניהם מחושבים ומעודכנים במשך כל תהליך הדפורמציה, ומיוצגים על-ידי מודלים מתאימים. תזוזות גדולות הנגרמות עקב תנועה או רוטציה של גוף קשיח ופתיחה לאורך סדקים הן בעיות פשוטות יחסית עבור שיטת האלמנטים הדיסקרטים (DEM), בעוד שבגישת הרצף אלו הן בעיות מסובכות לפתרון.

חלוקה נוספת של שיטות נומריות שונות היא בין שיטות ישירות (explicit) ולשיטות עקיפות (implicit). שיטה נקראת שיטה ישירה כאשר ניתן לחשב את המשתנים התלויים בצורה ישירה. לעומת זאת, כאשר המשתנים התלויים מוגדרים על-ידי משוואות צמודות, והפתרון מושג על-ידי איטרציות, השיטה נקראת שיטה עקיפה. שיטה זו אמנם קשה יותר לתכנות ודורשת כוח חישוב גדול יותר, אך במהלך החישוב היא מאפשרת לצעדי הזמן להיות גדולים יותר, דבר המביא לקיצור זמן החישוב.

שיטת אלמנטים דיסקרטים (DEM) בגישה העקיפה (implicit) מיוצגת בעיקר על-ידי שיטת DDA שפותחה על-ידי Shi (1993). DDA היא מהמובילות בשיטות ה-DEM העקיפות מבחינת ההתפתחות והיישומים האפשריים (Jing, 2003). בעבודה זו כל האנליזות הנומריות הדינמיות יבוצעו על-ידי הקוד המקורי של ה-DDA, אשר נכתב על ידי ד"ר Shi.

2.2.2 עקרונות שיטת ה-DDA

בפרק זה תסקר שיטת ה-DDA בקצרה. פירוט רחב יותר של השיטה מופיע ב- Shi (1988,1993). תכנת ה-DDA ממדלת חומר בלתי רציף כמערכת של בלוקים נפרדים המסוגלים לעבור דפורמציה, ונעים עצמאית. על אף שמקורה של השיטה היא במשפחת ה-discrete element method, היא דומה מאוד לשיטת האלמנטים הסופיים (finite element method), ומהווה למעשה הכללה שלה (Shi, 1993). החוק העומד בבסיס השיטה הוא החוק השני של התרמודינמיקה, הקובע כי מערכת שפועל עליה כוח חיצוני תעבור דפורמציה בצורה כזו שבסופו של התהליך למערכת כולה תהיה אנרגיה פוטנציאלית מזערית. שימוש ב-DDA מאפשר הן אנליזות סטטיות, והן דינמיות. בשני סוגי האנליזות (סטטית ודינמית) יש שימוש בתכנית צעדי זמן (time-steps) ואלגוריתם עקיף (implicit). ההבדל בין אנליזה סטטית לדינמית הוא שבסטטית מהירות הבלוקים מתאפסת בתחילת כל צעד-זמן, בעוד שבדינמית מהירות הבלוקים בתחילת כל צעד זמן היא מהירותם בסוף צעד הזמן הקודם. ישנן שתי מגבלות על יכולת התנועה של הבלוקים ב-DDA: בין הבלוקים לא מתאפשרת חדירה ואף לא מתיחה. יישום מגבלות אלו נעשה על-ידי שימוש בקפיצים וירטואליים המותקנים כביכול בכל מגע בין שני בלוקים. חדירה בין הבלוקים או מתיחה ביניהם תביא להתכווצות או מתיחה של הקפיץ, פעולה שדורשת אנרגיה, ולכן הפתרון עם מינימום האנרגיה הוא זה ללא מתיחה וחדירה של הבלוקים.

אחד היתרונות הגדולים של השיטה הוא שאין צורך להניח מראש את סגנון הכשל של המבנה, כמו בשיטות אחרות בגיאומכניקה. סגנון הכשל הוא חלק מתוצאות האנליזה ב-DDA. באמצעות DDA נוח למדל בלוקים בעלי גיאומטריות מורכבות המוכתבות מנטיות מישורי אי-רציפות במסת הסלע והמרווחים ביניהם,

כי הבלוקים ב-DDA אינם מוגבלים לגיאומטריות סטנדרטיות, בניגוד לשיטת אלמנטים סופיים (FEM), בהם כל האלמנטים בעלי גיאומטריה קבועה.

חסרונות השיטה הם שהמאמצים והעיבורים בכל בלוק הינם קבועים ומחושבים למרכז המסה שלו. יחד עם זאת, שיטה חדשה (mm - manifold method), שאינה בשימוש בעבודה זו, מאפשרת לשלב עם רשת ה-DDA (שהיא רשת פסיקלית – הגבולות הפסיקליים של הבעיה) רשת של אלמנטים סופיים (רשת מתמטית), על מנת לקבל את התפלגות המאמצים בתוך הבלוקים.

2.2.3 משוואות ה-DDA

תזוזה (u, v) של נקודה (x, y) בבלוק i על פני המישור מיוצגת על-ידי ששה משתנים, המרכיבים את וקטור התזוזה של הבלוק $[D_i]$:

$$[D_i] = (u_0 \quad v_0 \quad r_0 \quad \varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \gamma_{xy})^T \quad \text{משוואה 2-1}$$

שלושת המשתנים הראשונים הינם תזוזות ורוטציה של גוף קשיח, ושלושת האחרונים הינם עיבורים נורמליים ועיבור גזירה בבלוק.

התזוזה המלאה של הבלוק ניתנת להצגה בצורה הבאה:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -(y-y_0) & (x-x_0) & 0 & (y-y_0)/2 \\ 0 & 1 & (x-x_0) & 0 & (y-y_0) & (x-x_0)/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \\ r_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad \text{משוואה 2-2}$$

על ידי משוואה זו ניתן לחשב תזוזה של כל נקודה (x, y) בבלוק, בהנחה שהתזוזות בנקודה (x_0, y_0) ידועות, וכן העיבורים ידועים.

בהנחה שמערכת הבעיה מכילה מספר n של בלוקים, משוואות שיווי המשקל הבו-זמניות של הבלוקים הן מהצורה:

$$\begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdots & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdots & K_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \cdots & K_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ \vdots \\ D_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_n \end{pmatrix} \quad \text{משוואה 2-3}$$

כל קבוע K_{ij} מוגדר על-פי המגעים בין בלוק i לבלוק j , וכאשר $i = j$ הוא מוגדר על-פי תכונות הבלוק. מכיוון שלכל בלוק שש דרגות חופש $(u_0 \quad v_0 \quad r_0 \quad \varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \gamma_{xy})$, כל קבוע K_{ij} הוא למעשה מטריצה בגודל 6×6 . D_i ו- F_i הם וקטורים של 1×6 כאשר D_i הוא וקטור משתני התזוזה של בלוק i , ו- F_i הוא וקטור העומסים על בלוק i .

משוואות שיווי המשקל נגזרות תוך שמירה על תנאי מינימום אנרגיה פוטנציאלית Π המיוצרת על-ידי כוחות ומאמצים. השורה ה- i של מטריצת משוואות שיווי משקל (משוואה 2-3) מכילה למעשה שש משוואות ליניאריות:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial d_{ri}} = 0, \quad r = 1, \dots, 6 \quad \text{משוואה 2-4}$$

כאשר d_{ri} הוא משתנה הדפורמציה של בלוק i . סך כל האנרגיה הפוטנציאלית Π הוא סכום של כל מקורות האנרגיה – מאמצים וכוחות.

2.2.4 הפעלת התכנה

אנליזת DDA מורכבת למעשה מהפעלה של מספר קודים במספר שלבים עוקבים: DL, DC, DF, ו-DG, המפורטים להלן (בעקבות Young, 1996).

קוד DL (DDA lines) – מייצר קווים התוחמים את הבעיה, ומהווים את אי-הרציפויות או הסדקים בבעיה. הקווים מיוצרים בצורה סטטיסטית על-ידי קביעת המרווח הממוצע בין סדקים, אורך ממוצע, מידת חפיפה בין סדקים (Shi and Goodman, 1989) ומידת האקראיות של הופעתם. בשלב זה ניתן גם להזין קווים שאינם סטטיסטיים.

קוד DC (DDA cut) – יוצר את מערכת הבלוקים הנוצרת מחיתוך הקווים שהוגדרו על ידי ה-DL. לאחר חישוב של כל נקודות החיתוך של הקווים, אותם מקטעי קווים שלא תורמים ליצירת בלוקים סגורים נמחקים. הקוד שומר את קואורדינטות הבלוקים ושטחם. בנוסף, בשלב זה ניתן להוסיף אלמנטים נוספים למרחב האנליזה, כגון נקודות קבועות, נקודות מדידה, נקודות העמסה ועוד.

קוד DF (DDA force) – מבצע את האנליזה הסטטית או הדינמית על המרחב שהוגדר בקוד DC. בשלב זה פרמטרים פיסיקליים נוספים מוזנים אל המרחב, כמו תכונות החומר, עומסים נקודתיים, כוחות גוף, מאמצים התחלתיים ומהירות התחלתית. כמו כן בשלב זה מוגדרים - הפרמטרים הנומריים $g1, g2, k01$ ו- $g0$:

$k01$ - פרמטר השליטה הדינמי (dynamic control parameter) – מגדיר את סוג האנליזה. ערך הפרמטר נע בין 0 ל-1, כאשר 0 מציין אנליזה סטטית, ו-1 מציין אנליזה דינמית מלאה. כל מספר בין 0 ל-1 קורלטיבי למידת הריסון הקינטי באנליזה, למשל 0.95 קורלטיבי לריסון קינטי של 5%.

▪ $g2$ – יחס התזוזה המרבית (assumed maximum displacement ratio) - התזוזה המחושבת עבור כל צעד זמן מוגבלת על-ידי ערך מרבי, על מנת למלא אחר התנאים של תזוזות אינפיניטסימאליות בכל צעד זמן. ערך מרבי לתזוזה בצעד זמן אחד הוא $g2 * W$, כאשר W הוא מחצית המימד האנכי של מרחב האנליזה.

▪ gl – גבול עליון של צעד הזמן (upper limit of step size) – גודל צעד הזמן המרבי היכול לשמש בצעד זמן אחד.

▪ $g0$ – קשיחות הקפיצים (contact spring stiffness) – הקשיחות המיוחסת לקפיצים אשר "מותקנים" במגעם בין הבלוקים. בכל צעד זמן מחושבים כל המגעים בין הבלוקים השונים. משוואות שיווי המשקל מחושבות בצורה איטרטיבית, תוך שימוש באיטרציות מסוג "open-close", עד שאין מתיחה או חדירה בין הבלוקים. בסוף צעד הזמן כל הבלוקים מקיימים שיווי משקל.

קוד DG (DDA graph) – קוד המייצר תמונות קפואות (snap shots) מתוך האנליזה, וכן קבצי postscript להדפסה. כמו כן הקוד מייצר תמונה גרפית של המאמצים הראשיים בבלוקים עם תום האנליזה.

העובדה ששיטת DDA לא מצריכה כל הנחה לגבי מנגנון הכשל, אלא מניבה אותו כתוצאה של האנליזה, מאפשרת ומחייבת לערוך אימותים של תוכנה זו עם פתרונות אנליטיים, תוכנות אחרות, כשלים נצפים ו/או ניסיונות מעבדה. מחקרי אימות רבים כאלו נעשו בשנים האחרונות, כפי שנסקרו על ידי (Maclaughlin and Doolin, 2005), ושיטת DDA נמצאה במחקרים אלו כמתאימה ביותר לבעיות גיאוטכניות והנדסיות.

2.3 תיארוך תנועה על העתקים צעירים

אזור בקעים המלח הוא אזור פעיל סייסמית (למשל, Arie, 1967, Ben Menahem, 1981, 1991, van Eck and Hofstetter, 1990, Marco et al., 1997, Amit et al., 2002), ועבודות רבות נעשו על מנת למצוא את גילי הפעילות וכמות ההסטה/תזוזה על העתקים צעירים, המציינת את גודל רעידת האדמה שהסיטה העתקים אלו. התחום של מציאת פרמטרים סייסמיים של רעידות אדמה עתיקות נקרא

פליאוסייסמולוגיה. פרמטרים שניתן להשיג בשיטת הניתוח הפליאוסייסמי הינם גיל הרעידה והמגניטודה שלה.

ישנן מספר שיטות לתיארוך תזוזה על העתקים, כלומר אירועי רעידות אדמה. אחת השיטות לתיארוך תזוזה על העתקים צעירים היא OSL (Optically Stimulated Luminescence). שיטה זו מתארכת את הזמן בו נחשף מינרל (לרוב קוורץ או פלדספר) בסדימנט לאור השמש בפעם האחרונה. חשיפה לאור מאפסת את פליטת הקרינה של המינרל, ועם הזמן במצב בו המינרל אינו חשוף לאור, מתגבר אות פליטת הקרינה שלו, הנוצר על-ידי עירור המינרל. את האות הזה ניתן למדוד בתנאי מעבדה, ואותו לתרגם לגיל קבורת המינרל. פירוט השיטה מופיע אצל Stokes (1999), Lian and Roberts (2006), Aitken (1998). שיטה זו מתאימה לתיארוך של גילים ממספר שנים, ועד גילים של כמה מאות אלפי שנים (Lian and Roberts, 2006). בין יתרונותיה של שיטה זו הם הנפיצות של המינרלים שהיא מתארכת, קבלת גילים קלנדאריים שאין צורך להמירם, והעובדה ששיטה זו אינה תלויה בהימצאותו של חומר אורגני, כמו בשיטת פחמן 14.

2.4 הערכת מגניטודה של רעידות עבר

הערכת מגניטודה של רעידת אדמה עתיקה אפשרית מתוך הערכת כמות התזוזה על העתק שזוהה. על מנת לקרוע פני שטח, דרושה מגניטודה של 6 ויותר (Bonilla et al., 1984). מתוך התזוזה המרבית לאורך ההעתק ניתן לקבוע בעזרת קשרים אמפיריים את המגניטודה (Bonilla et al., 1984, Wells and Coppersmith, 1994).

Amit et al. (2002) מצאו כי באזור צפון מפרץ אילת התרחשו לפחות 15 רעידות אדמה במגניטודה 6 ומעלה, במהלך הפלייסטוקן המאוחר וההולוקן. חלק מן ההעתקים יצרו הסטה של 1.5-1 מ' בפני השטח, ועל כן מוערכות הרעידות במגניטודות בין 6.7 לבין 7. כמו כן הם מצאו ירידה הן במגניטודות הרעידות והן בזמני החזרה עם הזמן ככל שמתקרבים להווה.

Enzel et al. (2000) מצאו במניפת הסחף של נחל דרגה (צפון ים המלח) עדויות לתזוזות חוזרות על העתקים, שחלקן מסיטות חתך סדימנטרי שלם שגילו מ-10,000 שנה לפני הספירה ועד היום. המגניטודות המוערכות לרעידות אלו הן בין 5.5 לבין 6.8.

Zilberman et al. (2000) מצאו כי העתק עזז, העתק הגבול המזרחי של עמק החולה, הינו העתק פעיל ב-14,000 השנים האחרונות. ההסטה האנכית המרבית לאורכו היא 20 מ', מהם 15 מ' שהוסטו ב-4000 5000 השנים האחרונות. לפחות שלוש רעידות אדמה חזקות בעלות מגניטודה 7 התרחשו לאורך העתק עזז, עם

זמני חזרה שבין 2000-3000 שנה. עוד הם מצאו כי במהלך ההולוקן התגברה הפעילות הסייסמית על העתק עז, וזמני החזרה של רעידות במגניטודות 6.5-6 היו 200-300 שנה.

Wechsler (2005) קובעת בעבודתה כי מזרח אגן כנרת הוסט טקטונית ב-26,000 השנים האחרונות.

Marco et al. (2005) הראו שבאתר מצד עתרת שבקניון הירדן הוסטה חומת המצד בשיעור של כשני

מטרים על ידי שתי רעידות אדמה: האחת בשנת 1202 שהוערכה במגניטודה 7.6 והסיטה את החומות ב-1.6 מ', ורעידה שנייה בשנת 1759 שהוערכה במגניטודה 7.4 והסיטה את החומות ב-0.5 מ' נוספים.

Katz et al. (2007) מצאו כי באזור העבודה של מחקר זה התרחשו מספר אירועים של קריעת פני

שטח, במגניטודה מוערכת של 7.

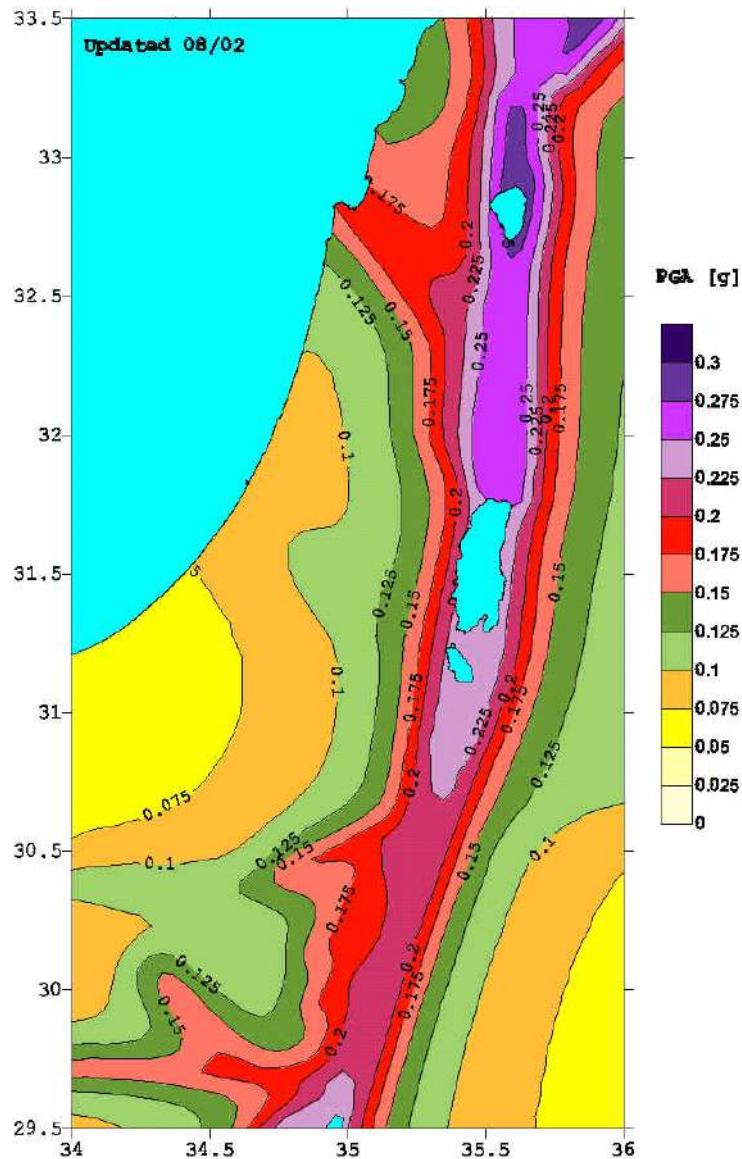
2.5 הערכת סיכון סייסמי

סכנה סייסמית (seismic hazard) היא כל מקור או מנגנון הקשור ברעידת אדמה ויכול להשפיע על האדם ולהזיק לו, כגון קריעת פני השטח, תזוזות קרקע, גלישות, התנזלות, דפורמציה טקטונית, גלי צונאמי ועוד; סיכון סייסמי (seismic risk) הוא ההסתברות להתרחשות של רעידת אדמה בעצמה מסוימת, בפרק זמן מוגדר (Smith, 1996).

הפעילות הסייסמית בישראל מוגדרת כנמוכה עד בינונית (Shapira, 1989; Ariei and Rabinowitz, 1983). יחד עם זאת, ישנן עדויות להתרחשות של לפחות כ-40 רעידות אדמה חזקות, במגניטודה מוערכת בין 6.7 לבין 7.3 במהלך 4000 השנים האחרונות (Ben Menahem, 1991). הגידול באוכלוסיה והצורך לשכן אותה במרכזי מגורים מחד, והסכנה לחיי אדם ורכוש מפגיעה ברעידת אדמה מאידך, הביאו ליצירת תקן ישראלי לבניה. התקן הישראלי לבניה 413, כולל מפת תאוצות סייסמיות (תרשים 2-5).

מפת התקן הוכנה לראשונה בשנת 1975, ועודכנה מאז מספר פעמים ולאחרונה בשנת 2003, בעקבות רעידת האדמה שהתרחשה במפרץ אילת ב-1995 (שפירא, 2002). המפה מחלקת את ישראל למספר אזורים סייסמוגניים, שידונו בהמשך.

מפת התקן מספקת למהנדס המתכנן ערך מקדם סייסמי Z שהינו תאוצת הקרקע האופקית המרבית (horizontal PGA) לגביה ישנה הסתברות של 10% שכמותה או גבוהה ממנה תתרחש לפחות פעם ב-50 שנה (שפירא, 2002). תאוצות אלו, המוצגות במפה, הינן תאוצות שיתרחשו בבסיס הבניין, בהנחה שהוא ממוקם על סלע.



תרשים 2-5: מפת תאוצות הקרקע Z לתקן הבניה הישראלי 413 (מתוך www.gii.co.il).

הערך Z נקבע ע"פ המשוואה

$$P_t(Z) = \sum_{j=1}^k \int_{M_{\min}}^{M_{\max}} P_t(M) \int_{r=R_0}^{R_{\max}} P(r) [P(A \geq Z) | M, r] dM dr \quad \text{משוואה 2-5}$$

רכיבי המשוואה $P(A \geq Z)$, $P(r)$, $P_t(M)$ ודרכי חישובם יפורטו להלן (שפירא, 2002):

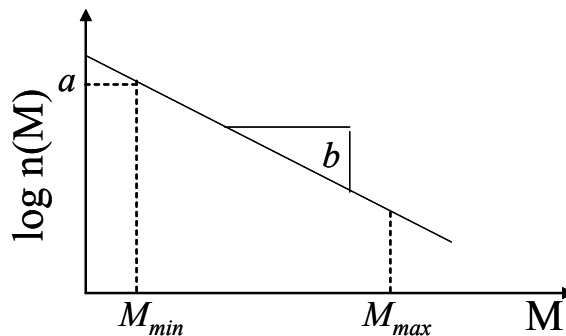
$P_t(M)$ היא ההסתברות שבאזור סייסמוגני j תתרחש רעידת אדמה במגניטודה M בפרק זמן t .

ההסתברות $P_t(M)$ מחושבת מתוך משוואות תדירות לאזור j . משוואות התדירות בשימוש היא של גוטנברג

ורייכטר:

$$\log n(M) = a - bM \quad M_{\max} \geq M \geq M_{\min} \quad \text{משוואה 2-6}$$

כאשר $n(M)$ הוא המספר השנתי של רעידות האדמה במגניטודה M ומעלה כאשר M מוגדרת כ- $M \pm dM$, ולרוב $dM = 0.1$). משוואה זו הינה מהצורה של power law, והצגתה הגרפית מוצגת בתרשים 2-6. M_{min} היא מגניטודת הסף, לפיה מחושב הערך a , ו- M_{max} היא המגניטודה המרבית שיכולה להתרחש באזור סייסמווגני j . b הוא שיפוע העקומה.



תרשים 2-6: עקומת פונקציית power law. M – מגניטודה; $n(M)$ – מספר רעידות האדמה הגדולות ממגניטודה M המתרחשות באזור סייסמווגני בפרק זמן (שנה); M_{min} ו- M_{max} הן מגניטודות הסף התחתון והמגניטודה המרבית שיכולה להתרחש באזור סייסמווגני מסוים, בהתאמה; a הוא מדד למספר רעידות האדמה המתרחשות באזור סייסמווגני מסוים בפרק זמן (שנה); b הוא שיפוע העקומה, ומדד ליחס שבין רעידות קטנות לגדולות.

ההסתברות $P_t(M)$ מחושבת על פי מודל פואסוני:

$$P_t(M) = 1 - \exp\left[-\frac{t}{n(M)}\right] \quad \text{משוואה 2-7}$$

בכדי למצוא את $P_t(M)$ יש למצוא את $n(M)$, כלומר את הפרמטרים a, M_{max}, M_{min} ו- b .

תהליך מציאת הפרמטרים הנ"ל יפורט בשלבים הבאים:

א. עידכון קטלוג רעידות האדמה וייצור קטלוג שלם של רעידות שהתרחשו באזור ב-2000 השנים האחרונות.

ב. קביעת אזורים סייסמווגניים מוגדרים על ידי שילוב של נתונים גיאולוגיים, ביניהם מיקום העתקים פעילים, ונתוני קטלוג רעידות האדמה באזור (Shamir et al., 2001). לכל אחד מן האזורים הסייסמווגניים נקבעה מגניטודה מרבית (M_{max}) העלולה להתרחש בו. עבור רוב האזורים הסייסמווגניים מגניטודה זו נקבעה ל-7.5, מלבד אזור שבר הימנה, שם נקבעה מגניטודה מרבית של 7.75 (Shapira and Hofstetter, www.gii.co.il).

ג. חילוץ הפרמטרים בצורה גרפית:

המשוואה המתארת את N , התדירות המצטברת, או מספר רעידות האדמה בשנה בעלות מגניטודה M או גבוהה ממנה, היא:

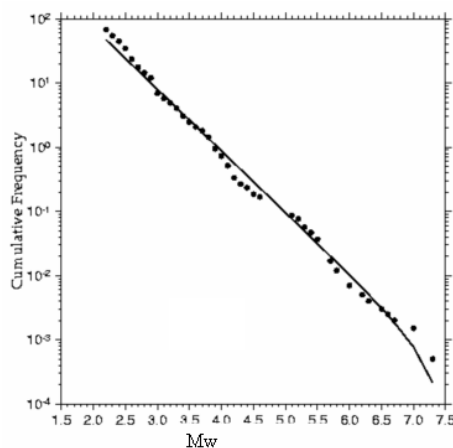
$$N(M) = \alpha \frac{\exp[-\beta(M - M_{\min})] - \exp[-\beta(M_{\max} - M_{\min})]}{1 - \exp[-\beta(M_{\max} - M_{\min})]}$$

משוואה 2-8

הקשר בין β ל- b הוא $\beta = b \ln 10$. גם כאן הפרמטר α מתייחס למגניטודת הסף $M_{\min}$. גם $N(M)$ מראה התנהגות של power law.

עבור כל אזור סייסמוגני נקבעו פרמטרי התדירות $N(M)$ המתאימים לו. השלב הראשוני הוא קביעת ערך b לישראל כולה, מתוך קטלוג רעידות האדמה של כל ישראל, בהנחה שאותם תנאים סייסמו-טקטוניים שוררים בכל האזור. תרשים 2-7 מדגים התפלגות של $N(M)$ עבור האזור של ישראל, מתוך קטלוג של רעידות היסטוריות ואלו שנרשמו במכשירים. ניתן לראות כי ההתפלגות מתאימה בצורה טובה לקו ישר, ששיפועו, כלומר ערך ה- b שלו, מעט נמוך מ-1, בדומה למחקרים קודמים, באזורים מצומצמים יותר.

לרוב האזורים הסייסמוגניים הותאם ערך b של 0.96 (Shapira and Hofstetter, www.gii.co.il). לאזורים הסייסמוגניים קפריסין ומפרץ סואץ חושבו ערכי b של 0.98 ו-1.07 בהתאמה (Shapira and Hofstetter, www.gii.co.il). חשוב לציין כי b הוא השיפוע הן של הפונקציה $\log n(M)$, והן של הפונקציה $\log N(M)$.



תרשים 2-7: התפלגות מספר הרעידות $N(m)$ כנגד מגניטודת הרעידות עבור אזור ישראל, מתוך קטלוג רעידות היסטוריות ורשומות. סקאלת ציר y היא לוגריתמית, ועל כן הנתונים מתלכדים עם קו ישר, ששיפועו $b = 0.96$. מתוך אתר המכון הגיאופיסי לישראל www.gii.co.il.

ד. לאחר קביעת ערך b , עבור כל אזור סייסמוגני נבדק מספר האירועים (N) המתרחשים בו במשך שנה, במגניטודות שבין 2-7.5. עבור כל אזור מחולק מספר האירועים (N) באורך האזור. אורך האזור מוגדר כאורך הפיסי של האזור הסייסמוגני, או של ההעתק העיקרי בו. באזורים בהם לא ניתן לשייך את הפעילות הסייסמית למערכת העתקים מסוימת, מחולק מספר האירועים N בשטח האזור הסייסמוגני. לאחר מכן מחושב ממוצע הערכים של אירועים ואורך, ומתקבל ערך ממוצע של 0.26.

אירועים\שנהק"מ לכלל האזורים הסייסמוגניים (Shapira and Hofstetter, www.gii.co.il).
האזורים הסייסמוגניים בהם העתקים המסתעפים מבקע ים המלח, כגון אזור העתק הכרמל, הינם בעלי ערך ממוצע נמוך יותר.

ה. לאחר קביעת הערך של 0.26 אירועים\שנהק"מ, מחושב הערך α עבור כל אזור סייסמוגני, על ידי הכפלת הערך הממוצע 0.26 באורך האזור הסייסמוגני (הערך α מהווה מדד למספר רעידות האדמה בעלות מגניטודה גבוהה מ-2, המתרחשות באזור סייסמוגני בשנה אחת). מתוך כך נמצא גם הפרמטר a , הזהה ל- α .

ו. לאחר מציאת כל הפרמטרים של $n(M) : a, b, M_{max}$, חישוב $P_t(m)$ נעשה תוך אינטגרציה עבור מגניטודות גדולות מ-4.0 ($M_{min} = 4$).

$P(r)$ היא ההסתברות שרעידת האדמה במגניטודה M תתרחש באזור סייסמוגני j במרחק r מהאתר הנבדק (x, y) . בחישובים אלו הונח כי קיימת הסתברות $P(r)$ למיקום מוקד של רעידת אדמה כלשהי בתוך האזור הסייסמוגני j . כלומר, עבור אזור סייסמוגני נתון, ישנה הסתברות $P(r)$ להיתרחשות של רעידת אדמה במרחק r ($R_{max} \geq r \geq R_{min}$) מהאתר הנבדק (x, y) .

$P(A \geq Z)$ היא ההסתברות שרעידת האדמה במגניטודה M ובמרחק r תיצור באתר הנבדק תאוצות קרקע A ברמה Z או גבוהות ממנה. את ההסתברות $P(A \geq Z)$ מעריכים מתוך משוואת ניחות. משוואת ניחות היא משוואה אמפירית אשר מבטאת את תאוצת הקרקע במקום המבוקש, הנגרמת על ידי רעידת אדמה במגניטודה מסוימת במרחק מסוים. במחקרים שונים נמצא שערך ה-PGA המתקבל מרעידה במגניטודה M ובמרחק r מתפלג בצורה לוג-נורמלית. סטיית התקן של משוואת הניחות מאפשרת את הקביעה של $P(A \geq Z)$ (שפירא, 2002).

מכיוון שהפעילות הסייסמית של בקע ים המלח מוגדרת כבינונית, אין די נתונים על מנת לפתח משוואת ניחות המייחדת את ישראל, ומתעורר הצורך להשתמש בקשרים אמפיריים שנמצאו באזורים אחרים (Leonov, 2002). הקשר האמפירי שנמצא מתאים ביותר עבור אזורינו (מזרח הים התיכון EMR) הוא זה של (Boore et al. (1997, Leonov, 2002). קשר זה מביא בחשבון את המגניטודה, המרחק, מהירות גלי הגזירה הממוצעת בשלושים המטרים העליונים של האתר ואת סוג ההעתק (fault mechanism). הערך שנבחר

למהירות גלי הגזירה הוא $V_s = 620 \frac{m}{sec}$ המתאים להגדרה של סלע "כללי" על ידי Boore et al. (1997) (שפירא, 2002). משוואת הניחות המתאימה לישראל, הכוללת את ערך מהירות גלי הגזירה ואת מנגנון ההחלקה הצפוי כהחלקה אופקית (strike-slip), היא:

$$\ln A = -0.055 + 0.525(M - 6) - 0.778 \ln r \quad r^2 = R^2 + 31.02 \quad \text{משוואה 2-9}$$

A היא תאוצה ביחידות של g , M היא המגניטודה M_w ו- R הוא המרחק בק"מ אל מישור ההעתק שפעל. סטיית התקן עבור $\ln(A)$ היא 0.52.

על בסיס מפת התקן, באזור מזרח הכנרת צפוי ערך Z של g 0.3 עבור סלע קשה. אולם הסלעים והסדימנטים באזור העבודה הינם רכים ועל כן סביר להניח כי צפויה הגברה של הגלים. בעבודה זו ייבדק ערך ה-PGA המתאים עבור הכשלים שנצפו במספר שיטות בלתי תלויות: ניתוח לאחור של גלישה שאירעה באזור, למציאת תאוצת הקרקע שגרמה לכשל, בגישה פסיאודוסטטית; ניתוח לאחור של כשל במבנה למציאת תאוצת הקרקע שגרמה לכשל, בגישה דינמית. ערך/ערכי ה-PGA שיימצאו בעבודה זו יושו עם ערך ה- Z הצפוי באזור זה, על בסיס מפת התקן.

נעשו ניסיונות אחרים להעריך סיכון סייסמי בשיטות אחרות, בלתי תלויות. שיטה אחת, שפותחה על ידי Brune (2002), עושה שימוש בסלעים אשר יציבותם גבולית. סלעים אלו נקראים precariously balanced rocks, והרעיון שעומד מאחורי שיטה זו הוא שהסלעים האלו, על אף יציבותם הגבולית, עומדים על תילם ולא איבדו את היציבות. עובדה זו יכולה להציב סף עליון לעוצמות רעידות האדמה שהתרחשו בעבר באזור בו ממוקמים הסלעים, ולכן לסייע בהערכת הסיכון הסייסמי. עוד חשוב לציין כי האנליזה שנעשתה עבור סלעים אלו הינה אנליזה פסאודו-סטטית, בדומה לאנליזה שתוצג בעבודה זו עבור גלישת הקרקע, ולכן הינה מוגבלת. שיטה נוספת שפותחה לאחרונה על-ידי Kamai and Hatzor (in press), עושה שימוש בכשל מתועד באתרים ארכיאולוגיים בישראל (ראה גם Kamai, 2006). Kamai and Hatzor (in press) מצאו כשל של אבן הראשה בקשת באתר הנבטי בממשית בנגב, וכן כשל של אבן מאבני קשת בקלעית-נמרוד ברמת הגולן. על-ידי הפעלת פונקציית סינוס באנליזה דינמית הם מצאו את ה-PGA, התדר והמשך האופייניים לסוגי הכשלים שנצפו. עוד הם מצאו כי באזור ממשית ה-PGA שגרם ככל הנראה לנזק הוא $g \pm 0.2$ 0.5, לעומת g 0.11 שצופה התקן, ובקלעית נמרוד ה-PGA שגרם לנזק שנצפה הוא $g \pm 0.2$ 1, לעומת g 0.25 שצופה התקן. יש לציין כי הערכים שנמצאו נכונים לראש המבנה עצמו, ויש לקחת בחשבון הגברות (הגברה של המבנה עבור שני האתרים, והגברה טופוגרפית עבור קלעית נמרוד) המקרבות את תוצאות האנליזה של Kamai and Hatzor (in press) אל התאוצות הצפויות בתקן.

3. שיטות מחקר

שיטות המחקר בעבודה זו כוללות עבודת שדה, עבודת מעבדה, ומידול באמצעות תוכנות מחשב. בנוסף, במסגרת העבודה נערך סקר גיאופיסי על ידי המכון הגיאופיסי לישראל.

3.1 שיטות שדה

3.1.1 מיפוי

המיפוי בעבודה זו נחלק לשני סוגים:

א) **מיפוי גיאולוגי** של יחידות הסלע. שטחים נבחרים באזור העבודה מופו ברמת פירוט גבוהה מאוד, עד לרמת האופק בתצורה (רזולוציה של כחצי מטר). המיפוי כלל שני שלבים: א. מיפוי פוטוגיאולוגי שכלל ניתוח תצלומי אוויר ישנים (1945) וחדשים (2004) לצורך זיהוי של היחידות הסטריגרפיות שהוגדרו על-ידי גבעון (1984), ומיכלסון (1972); ב. מיפוי שדה באמצעות מכשיר GPS בעל דיוק של כ-5 מ'. תוצאות מיפוי השדה הוזנו לתכנת arcview 9.1 GIS של חברת ESRI, וסומנו על גבי מפה טופוגרפית בקנה-מידה 1:50,000.

ב) **מיפוי מורפוטקטוני**, הכולל מיפוי ליניאמנטים, העתקים, גלישות ומערכות ניקוז. המיפוי נעשה באמצעות זיהוי האלמנטים השונים בתצלומי אוויר ישנים (1945) וסימונם בתכנת arcview 9.1 של חברת ESRI.

3.1.2 תעלה פליאוסייסמית

על מנת ללמוד את המבנה הרדוד של גלישת הקרקע, נחפרה תעלה לניתוח פליאוסייסמי. העיקרון העומד מאחורי שיטת המחקר באמצעות תעלות פליאוסייסמיות הוא שהתעלות הנחפרות חוצות העתקים (או ליניאמנטים החשודים כהעתקים), ומתוך בדיקת הסדימנטים בתוך התעלה, מידת ההסטה שלהם לאורך מישורי העתקה ומציאת גיל הסדימנטים, ניתן ללמוד על אופיו של ההעתק - זמני רעידות אדמה על ההעתק, קצב החלקה עליו וכמות החלקה (ממנה ניתן להסיק על עצמת רעידות). לפירוט השיטה ראה McCaillin (1996). מיקום התעלה נקבע אחרי בחינת תצלומי אוויר ומיפוי שדה של ההעתקים והליניאמנטים באזור המחקר.

חפירת התעלה נעשתה באמצעות טרקטור, ולאחר פתיחת התעלה נבחר אחד הקירות לצורך מיפוי מפורט. הקיר רושט במערכת חוטים אופקיים ואנכיים המהווים את קווי הייחוס (datum lines) והמיפוי נעשה בעזרת העברת נתונים ידנית לשרטוט על גבי נייר מילימטרי, בקנה-מידה שנקבע בשדה.

3.1.3 דגימה של סלעים

קרקע וסלעים נדגמו לצורך קביעת סוג הקרקע ובדיקות נוספות לצורך מציאת תכונות מכניות, פיסיקליות וחוזק לגזירה של החומר. המדגמים שנלקחו לבדיקות סוג הקרקע היו של יחידות חול, שנדגמו כסדימנט בתפזורת. המדגמים שנלקחו לצורך בדיקות גזירה היו גושי סלע.

3.1.4 סקר סייסמי

סקר סייסמי בוצע במסגרת עבודה זו על מנת לחקור את מבנה תת-הקרקע באזור העבודה, לאתר העתקים המגיעים קרוב לפני השטח, ומישורי ניתוק תת-אופקיים (בסיס גלישות). הסקר בעבודה זו בוצע על ידי המכון הגיאופיסי לישראל. השיטה שהייתה בשימוש בסקר זה היא שיטת הרפקלציה הרדודה בהפרדה גבוהה. פירוט השיטה בנספח א.

3.2 בדיקות מעבדה

לצורך ניתוח יציבות המדרונות באזור המחקר, הוערכו במעבדה התכונות המכניות של הסלעים המרכיבים את גלישת המדרון שנותחה. דוגמאות קרקע/סלע שנדגמו באזור המחקר נבדקו להגדרת התפלגות גודל גרגר וגבולות סומך של דוגמאות הקרקע ולבדיקת חוזק לגזירה ישירה של דוגמאות הסלע. תוצאות הבדיקות ישמשו לבניית מודל נכון לצורך ניתוח יציבות המדרונות. כל בדיקות המעבדה בוצעו במעבדת הנגב למכניקת הסלע, אוניברסיטת בן-גוריון.

3.2.1 אפיון הנדסי של סוג הקרקע

לצורך הבנה של האופי המכני של הקרקעות המרכיבות את החתך באזור הגלישה התבצע מיון הקרקעות על-פי שיטת המיון האחידה. בפועל נלקחו מדגמים מהיחידות החוליות אשר מופו בחתך על-פי גבעון (1984). כל יחידת חול עברה בדיקת דירוג של הקרקע על פי נוהל 13.104 של מכון התקנים, כדי לקבוע את כמות החומר הדק אשר נופה בנפה 75 מיקרומטר (נפה #200). כמו כן, במקרה הצורך נערכה בדיקת גבולות סומך על-פי נוהל 13.105.

תהליך דירוג הקרקע

המדגם דורג ע"פ השלבים הבאים (נוהל 13.101):

א. ייבוש המדגם באוויר.

ב. שקילת המדגם.

ג. ניפוי רטוב של המדגם דרך נפה #200. הניפוי הרטוב נעשה על-מנת לפורר את המדגם לחלוטין ולפרק את צבירי הגרגרים באבן החול.

ד. ייבוש המדגם בתנור שחומם ל- 110°C , למשך 24 שעות לפחות.

ה. ניפוי המדגם דרך מערכת נפות סטנדרטית (טבלה 3-1)

טבלה 3-1: מערכת נפות סטנדרטית איתה בוצעו בדיקות דירוג הקרקע.

שם הנפה	גודל נקב
ASTM #3"	3 אינץ'
ASTM #2"	2 אינץ'
ASTM #1 1/2"	1.5 אינץ'
ASTM #3/4"	0.75 אינץ'
ASTM #3/8"	0.375 אינץ'
ASTM #4	4750 מיקרון
ASTM #10	2000 מיקרון
ASTM #40	425 מיקרון
ASTM #60	250 מיקרון
ASTM #80	160 מיקרון
ASTM #200	74 מיקרון

קביעת גבולות סומך (אטרברג)

הסומך של קרקעות פלסטיות (סילט וחרסיות) משתנה עם שינוי תכולת הרטיבות שלהן. על ידי ייבוש הדרגתי עובר בוץ דליל למצב פלסטי, ועם המשך הייבוש למצב מוצק. תכולת הרטיבות בהן חלים השינויים הנ"ל נקראות גבולות הסומך (גבולות אטרברג).
תכולת רטיבות מוגדרת בצורה הבאה:

$$\omega(\%) = \frac{W_{\text{water}}}{W_{\text{solid}}} \cdot 100\% \quad \text{משוואה 3-1}$$

כאשר W_{water} הוא משקל המים במדגם הקרקע, ו- W_{solid} הוא משקל המוצקים בקרקע (כלומר משקל המדגם לאחר ייבוש מלא). הגבול הראשון הוא גבול הנזילות (ω_L או L_L), המוגדר כתכולת הרטיבות של הקרקע במעבר ממצב נוזלי לפלסטי. בבדיקות מעבדה גבול זה נקבע כתכולת הרטיבות שבה חריץ טרפזואידי ברוחב 13 מ"מ הנחרץ בקרקע לחה המונחת בקערה תקנית נסגר לאחר 25 הקשות. הגבול השני הוא גבול הפלסטיות (ω_P או P_L) המוגדר כתכולת הרטיבות של הקרקע במעבר ממצב פלסטי למוצק. בבדיקות מעבדה גבול זה

נקבע כתכולת הרטיבות בה הקרקע מתחילה להיסדק ולהתפרק כאשר היא מגולגלת לגליל בקוטר 3 מ"מ. בדיקות הגבולות מבוצעות על מקטע המדגם העובר נפה מספר 40 (גודל נקב 425 מיקרון). ההפרש המספרי בין גבול הנזילות לגבול הפלסטיות נקרא מדד הפלסטיות של הקרקע (PI או I_p):

$$PI = LL - PL$$

משוואה 3-2

מדגם שעברו לא ניתן למצוא את גבול הפלסטיות מוגדר כלא-פלסטי (non plastic), ועברו לא נמצא מדד הפלסטיות. פירוט שיטה זו בנחה 13.105.

3.2.2 בדיקות במכש גזירה ישירה

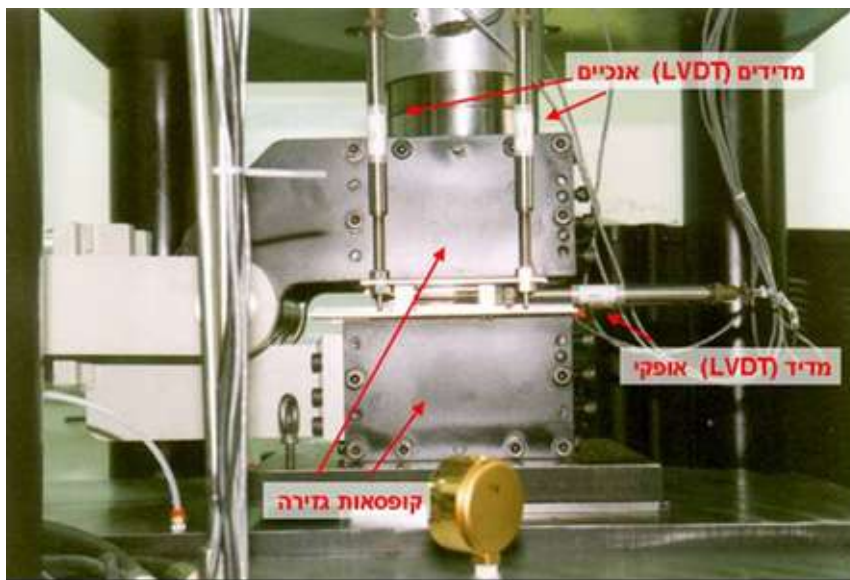
3.2.2.1 מערכת הבדיקה

לצורך מציאת תכונות מכניות ופיסיקליות של הסלעים במחקר זה בוצעו בדיקות במכש גזירה ישירה. במחקר זה נעשה שימוש במערכת הידראולית לבדיקות גזירה בסלעים (TerraTek DS – 4250) הפועלת תחת בקרת סרוו במעגל סגור. למערכת שתי בוכנות הידראוליות: בוכנה בכוון האנכי (ה'נורמלי') בעלת כוח מרבי של 1000KN, ובוכנת גזירה בכוון האופקי בעלת כוח גזירה מרבי של 300KN. מסגרת ההעמסה (Load Frame) בעלת קשיחות גבוהה מאד: 7.0MN/m, המושגת באמצעות ארבע מוטות קשיחים ודרכים בין לוחות ההעמסה (תרשים 3-1). תזוזת הבוכנות מנוטרת באופן רציף. עומס הבוכנות נרשם באמצעות מד עומס (Load Cell) הממוקם בכל בוכנה. הלינאריות של כל אחד ממדי העומס היא 0.5% לכל טווח העומסים.



תרשים 3-1: מכש הגזירה הישירה.

הבדיקה מבוצעת בתוך שתי קופסאות גזירה עשויות פלדה קשיחה במימדים של $150 \times 150 \times 150$ מילימטר כל אחת (תרשים 3-2). ניתן לבדוק הן מדגמים רציפים והן מדגמים המכילים מישור אי-רציפות העובר בין שתי הקופסאות. תזוזת הגזירה נרשמת באמצעות שני מדי תזוזה רגישים מטיפוס LVDT (Macro SensorsTM model GHSA-750-1000) הממוקמים על קופסת הגזירה במקביל לכוון הגזירה (תרשים 3-2). התזוזה האנכית (דחיסה או תפיחה) נרשמת באמצעות ארבעה מדי LVDT הממוקמים בארבע פינות הקופסא (תרשים 3-2). טווח התזוזה המרבי במדי התזוזה הוא 50 מילימטר והסטייה מליניאריות של כל מדיד היא עד כדי 0.25% לכל טווח התזוזה.



תרשים 3-2: מבט מקרוב על מערכת הגזירה: הדגם נמצא בתוך קופסאות הגזירה, ואליו מחוברים מדידים שקוראים תזוזה אנכית ואופקית.

3.2.2.2 הכנת המדגם

דוגמת הסלע מוכנסת למכשיר הגזירה בתוך קופסאות פלדה (תרשים 3-2). צורת המדגם צריכה להיות כזו שתאפשר קביעה נוחה של נפח ושטח הדוגמא. הנפח נדרש לחישוב משקל מרחבי של הדוגמא והשטח נדרש על מנת לקבוע את המאמצים המופעלים על הדוגמא. מאמץ מחושב ככוח ליחידת שטח ($\sigma = F/A$), כאשר σ -מאמץ, F - כוח ו- A - שטח עליו מופעל הכוח), ולכן חישוב מדויק של השטח חיוני לקביעת מאמץ הגזירה, ובעקבות זאת את חוזק הגזירה של המדגם. גודל קופסת הגזירה מאפשר ביצוע בדיקות בשטח חתך רחב יותר מהמקובל בבדיקות קרקע סטנדרטיות, עד שטח חתך של 225 סמ"ר. ראשית, המדגם מנוסר לצורה קרובה ככל האפשר למצולע (תרשים 3-3), תוך השארת שטח מרבי לגזירה. מדידת השטח נעשית בשלב מאוחר יותר של הכנת המדגם.



תרשים 3-3: ניסור והכנה של דגם יחידת חול לבדיקת גזירה ישירה.

לאחר הכנת מדגם בגודל מתאים, נלקחת דוגמא מן הסלע ממנו הוכן המדגם לצורך בדיקת תכולת רטיבות לפני יציקת הבטון. השלב הבא הוא קיבוע הדוגמא לקופסאות הפלדה באמצעות יציקת בטון, לקבלת אחיזה מרבית של המדגם. קופסאות הפלדה בהן ניצוק הבטון נמרחות בגריז, על מנת להקל בתהליך שליפת המדגם לאחר הבדיקה. הבטון שהיה בשימוש בעבודה זו הוא צמנט פורטלנד 250 רגיל מתוצרת מפעלי נשר רמלה. תוך כדי הכנת הצמנט יש לשמור על יחס מים-צמנט נמוך ככל הניתן, וזאת משתי סיבות: רוב הסלעים הנבדקים הם אבן חול, שלה נטייה לספוח מים מן הצמנט, דבר המביא להיחלשות הדוגמא; סיבה נוספת היא שבמהלך ייבוש הצמנט המים מתאדים והבטון מתכווץ, דבר הגורם להיווצרות מאמצי מתיחה לא רצויים בדוגמא.

לאחר הכנת הצמנט יוצקים חלק ממנו אל קופסת הפלדה התחתונה, ואז מטביעים לתוכו את הדוגמא, תוך שמירה על כיוון הגזירה הנכון (במקביל למישורי השכוב). ראה תרשים 3-4.



תרשים 3-4: יציקת הבטון לקופסת הפלדה התחתונה. משמאל: דגם יחידת החול מוטבע בבטון בכדי לקבל אחיזה טובה.

מכיוון שהסלע הנבדק הינו אבן חול, קשה מאוד להפיק ממנו מדגם בצורה קרובה למצולע. חשיבותה של מדידת השטח הנגזר בדוגמא היא רבה, והופכת להיות קשה יותר כאשר צורת המדגם אינה פשוטה. בבדיקות שנערכו מדידת השטח התנהלה בצורה הבאה: לאחר יציקת המדגם בקופסת הפלדה התחתונה, נמדד השטח שלו על ידי קליבר דיגיטלי, לצורך חישוב מוערך של השטח. צורת המדגם בדרך-כלל שואפת למרובע, ולכן על-ידי מדידת אורכו של כל מימד (אורך ורוחב) במרווחים קבועים לאורך הדוגמא וחישוב ממוצע אורך של כל מימד נותנת את השטח הראשוני. זהו השטח שיוזן אל המערכת, על מנת לקבוע כמה כוח להפעיל בכדי

להשיג מאמץ רצוי. מדידת שטח מדויקת יותר נעשית לאחר הגזירה, על ידי צילום של השטח שנגזר בקנה-מידה, וחישוב השטח בתכנת מחשב (Autocad) (ראה תרשים 3-5).



תרשים 3-5: דגם של יחידת חול מצולם לצורך מדידת שטח (לאחר הגזירה).

לאחר המתנה של 24 שעות עד להתייבשות חלקית של הצמנט בקופסא התחתונה, אפשר להמשיך ליציקת הקופסא העליונה. יש ליצור הפרדה בין שתי הקופסאות על מנת להשאיר אזור ללא צמנט שיוכל להיגזר. זאת עושים באמצעות שכבת קלקר שממקמים סביב המדגם. לאחר התאמת הקלקר, מחברים את קופסת הפלדה העליונה (תרשים 3-6) באמצעות מחברי פלדה וברגים, ויוצקים צמנט לקופסא העליונה עד למילוייה. המילוי מיושר בעזרת פלס. לאחר יציקת הקופסא העליונה ממתינים כשבעה ימים להתקשות מלאה של הצמנט.



תרשים 3-6: הכנת המדגם ליציקה עליונה. מימין: הדגם מוקף בקלקר על מנת ליצור הפרדה בין הקופסא התחתונה לעליונה. משמאל: הדגם מוכן ליציקת הקופסא העליונה.

3.2.2.3 מהלך הבדיקה

בדיקת גזירה ישירה מתבצעת לצורך קביעת חוזק לגזירה של הסלע הנבדק. בדיקות אלו בוצעו בשני מקטעים: מקטע ראשון של העמסה נורמלית לערך מאמץ מוגדר מראש תוך שמירה על מיקום קבוע של בוכנת הגזירה, ומקטע שני של העמסת גזירה בקצב קבוע תוך שמירה על מאמץ נורמלי קבוע במהלך מקטע הגזירה. קביעת תנאי גבול אלו אפשרה ניטור של תנועות התפיחה (dilation) המתפתחות במהלך הגזירה. קצב הפעלת העומס הנורמלי במקטע הראשון היה 6.89 kPa/sec , קצב התקדמות הגזירה במקטע השני היה 0.0254 mm/sec .

3.3 מידול המדרון באמצעות תכנת SLOPE/W 2004

השלוחה שנבחרה לניתוח היא השלוחה הדרומית לגלישה הגדולה, מתוך הנחת עבודה שהפרופיל המקורי של שלוחת הגלישה, לפני שגלשה, היה דומה לזה של השלוחה הדרומית, ומשטח הכשל האפשרי שנותח (בתוך המדרון הדרומי) דומה מבחינה סטריגרפית למשטח הכשל של הגלישה שאירעה בעבר ושרידיה נראים היום. חשוב לציין כי בין השלוחה הדרומית לגלישה אין העתקים, וכן ישנה קורלציה בין מסלע השלוחה הדרומית ומסלע השלוחה הצפונית (תרשים 1-3 ב), ולכן ההנחה היא כי המסלע דומה.

ראשית גיאומטריית המדרון על-פי חתך השלוחה הדרומית שנערך על-פי מפה טופוגרפית בקנה-מידה 1:50,000 הוזנה לתוכנה (SLOPE/W 2004). על מנת לפשט את המודל חתך זה הינו פרופיל פחות מפורט של המדרון מאשר החתך הטופוגרפי.

לאחר הגדרת גיאומטרית המדרון הוגדרו תכונות החומר של המדרון, כפי שנמצאו בבדיקות המעבדה (בניתוח זה תכונות החוזק של החומר הן על-פי המודל של קולומב-מוהר, כלומר, זווית החיכוך הפנימי של החומר והקוהזיה שלו). בנוסף מוזן גם המשקל המרחבי של החומר. ראש המדרון הוגדר כסלע בלתי חדיר, שכן הגלישה לא פגעה בבזלת הכיסוי, ושאר החתך הוגדר על פי תכונות האופק שנבדק בחולות עין גב. בנוסף הוגדרו פני מי התהום, ובמודל זה קו המים נקבע על פי שלוש נקודות: נביעות של שני מעיינות הקיימים באזור, ומפלס הכנרת. חיבור שלוש נקודות הוא על בסיס הנחה, ולא על סמך נתוני קידוחים. המגמה בהעברת פני מי התהום הייתה העלאת המפלס כמה שיותר קרוב אל פני הקרקע, בכדי ליצור את המצב החמור ביותר מבחינת יצירת תנאים לגלישה.

כפי שצוין בסעיף 2.1.1, על מנת לקבוע את מקדם הביטחון עבור כשל במדרון שנבחר לניתוח בשיטת שיווי המשקל הגבולי, יש לבחור ראשית את צורת משטח הכשל. בעבודה זו התכנה חיפשה את מישור הכשל בשיטת autosearch. התכנה בחרה 1000 מישורי כשל אפשריים, ועבור כל אחד מהם חישה את מקדם הביטחון. מתוך 1000 המישורים שעלו, נבחר אחד שנראה כמתאים ביותר עבור המקרה הנוכחי. בחירת המישור המתאים נעשתה מתוך התחשבות בשלושה שיקולים: (1) נקודת הכניסה של מישור הכשל (קצה עליון); (2) נקודת היציאה שלו (קצה תחתון); (3) עומק אל משטח הגלישה. נקודת הכניסה של המשטח נבחרה על פי מיקום הצלקת הנראה בשטח היום. נקודת היציאה של משטח הגלישה ברורה באופן יחסי, והיא נבחרה כנקודה בה נראות השכבות העליונות ביותר של חול וגיר **באתר** בשלוחת הגלישה בשדה. אלו למעשה הסלעים העליונים ביותר שלא נחתכו על-ידי משטח הגלישה, ולכן לא הוזזו ממקומם. העומק אל משטח הגלישה, או עובי הגלישה, חושב מתוך הגיאומטריה שלה. (Huvius et al. (1997 מצאו קשר בין גיאומטריית גלישה לנפחה, ולכן לעובייה. עבודתם מתבססת על סטטיסטיקה של כ-5000 גלישות קרקע באלפים הדרומיים בניו-

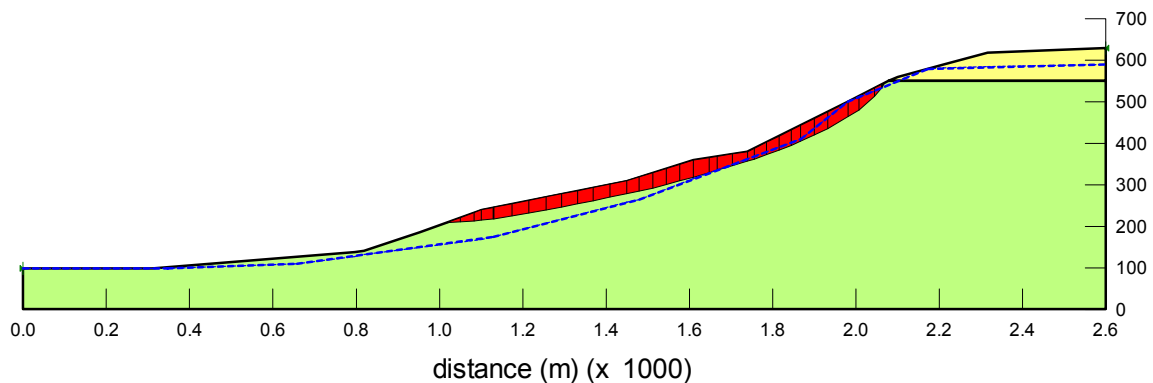
זילנד. בעבודתם הם מראים כי לרוב הגלישות שהם חקרו צורה דמוית אליפסה (במבט מפה) בעלת יחס קרוב ל-2 בין הציר הארוך לקצר. בנוסף נמצא שהמימד הקצר של האליפסה הוא קירוב של שורש שטח האליפסה:

$$w \approx \sqrt{A} \quad \text{משוואה 3-3}$$

כאשר w הוא רוחב הגלישה (המימד הקצר), ו- A הוא שטח הגלישה. מוצע יחס בין רוחב הגלישה לשטחה ולעובייה. הקשר בין הרוחב לעובי הוא ליניארי, ומוצג בצורה הבאה:

$$t(w) = \varepsilon w \quad \text{משוואה 3-4}$$

כאשר t הוא עובי הגלישה, ו- ε הוא קבוע שמתוך מדידות של גלישות באלפים הדרומיים ערכו נע בין 0.03 ל-0.07. רוחב הגלישה הוא כ-450 מטרים ושטחה כ-450 מטרים רבועים. על פי קשר זה נמצא כי עובי הגלישה באזור עין גב המוערך לפי Huvius et al. (1997) נע בין 30 ל-60 מטרים. בתרשים 3-7 מובא מודל המדרון שיציבותו נותחה, וכן מישור הכשל שנבחר לניתוח.



תרשים 3-7: מודל המדרון לצורך ניתוח יציבות. מישור הכשל שנבחר הוא המגע בין האזור הצבוע ירוק לזה הצבוע אדום. האזור האדום הוא המסה הגולשת. האזור הירוק הינו החומר המוגדר על פי תכונות יחידת PSS1 בחולות עין גב. האזור הצהוב מוגדר כסלע בלתי חדיר. הקו הכחול הינו פני מי התהום המוערכים. הציר האנכי אינו מכויל לגובה פני הים. נעשה על ידי תכנת SLOPE/W 2004.

3.4 מידול כשל מבנה באמצעות DDA

3.4.1 האתר הארכיאולוגי בסוסיתא

באתר הארכיאולוגי בסוסיתא, שחפירות ארכיאולוגיות מתקיימות בו זה מספר שנים (למשל Segal et al., 2004) נצפו כשלי מבנים רבים, ביניהם עמודי אבן גדולים השוכבים על הקרקע. עמודי האבן שוכבים שלמים ומקבילים האחד לשני בכיוון דרום מערב (תרשים 3-8). העובדה כי העמודים שלמים, ושוכבים מקבילים על הקרקע מלמדת כי הם ככל הנראה נפלו ברעידת אדמה ולא באופן טבעי, באירוע הרס או ונדליזם, ולא הונעו ממקומם מאז. בשני אזורים באתר נמצאו עמודים שוכבים על הקרקע. באתר הקתדרלה נמצאו עמודים רבים יותר מאשר באתר הפורום, וסידורם במרחב היה מובהק, ולכן הוא שנבחר לניתוח דינמי

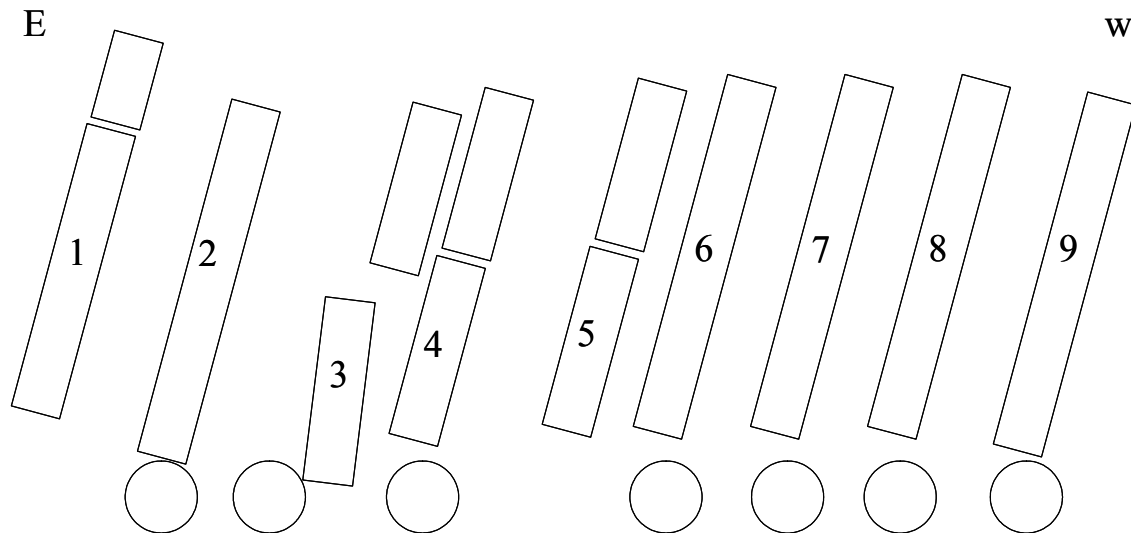
לאחור של כשל העמודים. באתר הקתדרלה נצפו עמודים העשויים משלושה סוגי סלע – ארבעה עמודי גרניט אפורה, שלושה עמודי גרניט אדומה ושני עמודי שיש (תרשים 3-8). עמודי הגרניט האדומה נשברו כולם, ועל כן לא ניתן לדעת האם הם שוכבים בדיוק במצב בו נפלו. אחד מעמודי השיש נשבר אף הוא. לעומתם, כל עמודי הגרניט האפורה נותרו שלמים, ולכן שימשו למדידות. בסיסי העמודים עשויים שיש. ההנחה העומדת בבסיס השיטה שתוצג בעבודה זו להערכת התאוצה האופקית המרבית היא שהעמודים היו עמודים חופשיים (free standing), ולא היו מחוברים לבסיסם או לגג.



תרשים 3-8: אזור הקתדרלה באתר הארכיאולוגי סוסיתא. העמודים שוכבים מקבילים על הקרקע בכיוון דרום מערב. אורכם של העמודים כ-4.7 מטרים.

3.4.2 מדידות שדה

לצורך מידול נכון של בעיית כשל העמודים בסוסיתא, נערכו בשדה מדידות של מידות העמודים, מידות הבסיסים ומיקום העמודים במרחב (תרשים 3-9). מיקום העמודים על הקרקע מלמד כי הם נפלו במרחק של כ-60-90 ס"מ מבסיסיהם. כמו כן ציר העמודים איננו נמשך אל בסיסם, אלא במרחק הסטה קטן מהם, כמו התגלגלו על הקרקע מעט לאחר שנפלו. מרחקי ההסטה הם 35-80 ס"מ. בטבלה 3-2 מפורטות מידות ההסטה וההתרחקות של העמודים מבסיסיהם, על פי המספרים שניתנו להם בתרשים 3-9.



תרשים 3-9: תרשים סכמתי ממבט על של העמודים הנפולים באתר הקתדרלה בסוסיטא. התרשים אינו לפי קנה-מידה.

טבלה 3-2: נתוני העמודים באתר הקתדרלה בסוסיטא. מספרים על פי תרשים 3-9.

# עמוד	התרחקות מהבסיס (ס"מ)	הסטה (ס"מ)	הערות	מסלע העמוד
1	לא נמדדה	לא נמדדה	שבור	שיש
2	0	0		שיש
3	לא נמדדה	לא נמדדה	שבור	גרניט אדום
4	לא נמדדה	לא נמדדה	שבור	גרניט אדום
5	לא נמדדה	35	שבור	גרניט אדום
6	90	80		גרניט אפור
7	82	55		גרניט אפור
8	62	45		גרניט אפור
9	לא נמדדה	לא נמדדה	לא מונח על הקרקע	גרניט אפור

3.4.3 אימות, כיול ואופטימיזציה של ה-DDA עבור בעיית עמוד חופשי מתנדנד (rocking of a free

standing column)

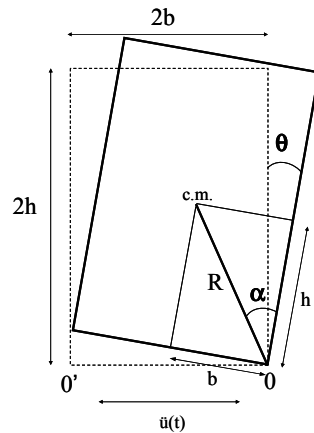
3.4.3.1 פתרון אנליטי

(Kamai (2006) הציגה פתרון אנליטי עבור בעיה של החלקה בין בלוקים. בבעית העמודים בסוסיטא

המצב הוא שונה, התנועה של הבלוקים קשורה ברוטציה ולא בהחלקה, ולכן הפתרון האנליטי הדרוש שונה.

(Makris and Roussos (2000) הציגו פתרון אנליטי לבעיה של עמוד חופשי מתנדנד. הפתרון האנליטי הוא דו-

ממדי, ולכן העמוד ממודל כבלוק מלבני, המוצג בתרשים 3-10.



תרשים 3-10: תרשים סכמתי של הבלוק המתנדנד וסימנים מוסכמים.

ממדי הבלוק הם עובי $2b$ וגובה $2h$; זווית הבלוק α מוגדרת על ידי הנוסחה $\alpha = \arctan \frac{b}{h}$; θ היא זווית

הסיבוב של הבלוק (rotation angle); R הוא "רדיוס" הבלוק $R = \sqrt{b^2 + h^2}$; ו- $\ddot{u}(t)$ היא תאוצת הקרקע הפועלת על בסיס הבלוק. פתרון אנליטי זה מניח כי הבלוק הוא דק דיו ($2b \ll 2h$), כלומר α קטנה מספיק בכדי שהבלוק יכנס למצב של נדנוד, אך החיכוך בבסיס הבלוק גבוה דיו כך שתמנע החלקה של הבלוק על בסיסו. ללא החלקה, הפתרון מניח שכל התאוצה הפועלת על הבסיס עוברת אל הבלוק, ולמעשה מוזנת אל מרכז הכובד שלו (מצוין על ידי c.m. בתרשים 3-10).

משוואות התנועה למצב זה הינן:

$$I_0 \ddot{\theta} + mgR \sin(-\alpha - \theta) = -m\ddot{u}_g R \cos(-\alpha - \theta), \theta \leq 0 \quad \text{משוואה 3-5}$$

$$I_0 \ddot{\theta} + mgR \sin(\alpha - \theta) = -m\ddot{u}_g R \cos(\alpha - \theta), \theta \geq 0 \quad \text{משוואה 3-6}$$

כאשר I_0 הוא מומנט האינרציה הקוטבי של הבלוק, ונתון על ידי $I_0 = \frac{4}{3}mR^2$, $\ddot{u}_g(t)$ היא התאוצה המוזנת למרכז הבלוק ושאר הפרמטרים מוגדרים בתרשים 3-10. הצבת ההגדרה של מומנט האינרציה לתוך משוואות 3-5 ו-3-6, תיתן:

$$\ddot{\theta}(t) = -p^2 \left\{ \sin(\alpha \operatorname{sgn}[\theta(t)] - \theta(t)) + \frac{\ddot{u}_g}{g} \cos(\alpha \operatorname{sgn}[\theta(t)] - \theta(t)) \right\} \quad \text{משוואה 3-7}$$

כאשר $p = \sqrt{\frac{3g}{4R}}$ נקרא פרמטר התדירות, והוא מדד למאפיינים הדינמיים של הבלוק. בזמן נדנוד הבלוק,

כאשר ציר הרוטציה שלו מתחלף מ- θ ל- θ' (זוהי גם נקודת הפגיעה – impact), חוק שימור תנע זוויתי מכתוב

שהיחס בין המהירות הזוויתית לאחר הפגיעה ($\dot{\theta}_2$) לזו שלפני הפגיעה ($\dot{\theta}_1$) נתון על ידי קבוע ההחזרה r (coefficient of restitution):

$$r = \frac{\dot{\theta}_2^2}{\dot{\theta}_1^2} = \left[1 - \frac{3}{2} \sin^2 \alpha \right]^2 \quad \text{משוואה 3-8}$$

המשמעות של שימוש בקבוע ההחזרה הנתון במשוואה 3-8 היא שאובדן האנרגיה בזמן הפגיעה הוא בשל שימור תנע זוויתי בלבד, ואין מנגנוני איבוד אנרגיה נוספים, כגון שבירת הבלוק, חיכוך ועוד. זהו הערך הגבוה ביותר של קבוע ההחזרה שיכול להתקבל עבור בלוק בעל זווית α .

עבור זוויות α קטנות, משוואות 3-5 ו-3-6 יכולות לעבור ליניאריזציה, ואז סינוס הזוויות מתחלף בזוויות עצמן, וקוסינוס הזוויות מתחלף ב-1. תאוצת הקרקע מוגדרת כפונקציה סינוס מהצורה: $\ddot{u}_g(t) = a_p \sin(\omega_p t + \psi)$ כאשר a_p ו- ω_p הן האמפליטודה והתדר בהתאמה, ו- ψ היא הפאזה כאשר תנועת

$$\text{הנדנוד מתחילה, ומוגדרת כ-} \psi = \sin^{-1} \left(\frac{\alpha g}{a_p} \right).$$

לאחר הנחת הלינאריזציה, וההצבה של פונקצית תאוצת הקרקע, משוואות 3-5 ו-3-6 נראות כך:

$$\ddot{\theta}(t) - p^2 \theta(t) = -\frac{a_p}{g} p^2 \sin(\omega_p t + \psi) + p^2 \alpha, \theta \leq 0 \quad \text{משוואה 3-9}$$

$$\ddot{\theta}(t) - p^2 \theta(t) = -\frac{a_p}{g} p^2 \sin(\omega_p t + \psi) - p^2 \alpha, \theta \geq 0 \quad \text{משוואה 3-10}$$

פתרון של משוואות אלו ייתן ביטוי עבור זווית הרוטציה θ :

$$\theta(t) = A_1 \sinh(pt) + A_2 \cosh(pt) - \alpha + \frac{1}{1 + (\omega_p^2/p^2)} \frac{a_p}{g} \sin(\omega_p t + \psi), \theta \leq 0 \quad \text{משוואה 3-11}$$

$$\theta(t) = A_3 \sinh(pt) + A_4 \cosh(pt) + \alpha + \frac{1}{1 + (\omega_p^2/p^2)} \frac{a_p}{g} \sin(\omega_p t + \psi), \theta \geq 0 \quad \text{משוואה 3-12}$$

כאשר קבועי האינטגרציה הם:

$$A_1 = A_3 = \frac{\dot{\theta}_0}{p} - \frac{\omega_p/p}{1 + \omega_p^2/p^2} \frac{a_p}{g} \cos(\psi) = \frac{\dot{\theta}_0}{p} - \alpha \frac{\omega_p/p}{1 + \omega_p^2/p^2} \frac{\cos(\psi)}{\sin(\psi)} \quad \text{משוואה 3-13}$$

$$A_2 = \theta_0 + \alpha - \frac{1}{1 + (\omega_p^2/p^2)} \frac{a_p}{g} \sin(\psi) = \theta_0 + \alpha - \frac{\alpha}{1 + \omega_p^2/p^2} \quad \text{משוואה 3-14}$$

$$A_4 = \theta_0 - \alpha - \frac{1}{1 + (\omega_p^2/p^2)} \frac{a_p}{g} \sin(\psi) = \theta_0 - \alpha - \frac{\alpha}{1 + \omega_p^2/p^2} \quad \text{משוואה 3-15}$$

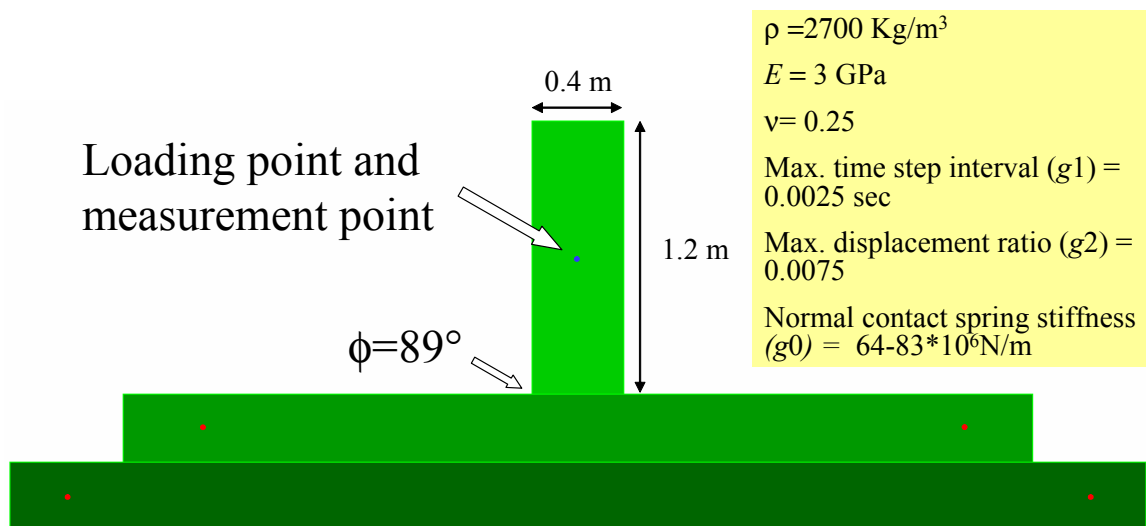
גזירה של משוואות 3-11 ו-3-12 תיתן ביטוי עבור המהירות הזוויתית של הבלוק:

$$\dot{\theta}(t) = pA_1 \cosh(pt) + pA_2 \sinh(pt) + \frac{\omega_p}{1 + (\omega_p^2/p^2)} \frac{a_p}{g} \cos(\omega_p t + \psi), \theta \leq 0 \quad \text{משוואה 3-16}$$

$$\dot{\theta}(t) = pA_3 \cosh(pt) + pA_4 \sinh(pt) + \frac{\omega_p}{1 + (\omega_p^2/p^2)} \frac{a_p}{g} \cos(\omega_p t + \psi), \theta \geq 0 \quad \text{משוואה 3-17}$$

3.4.3.2 אימות ה-DDA בעזרת הפתרון האנליטי

אימות תכנת ה-DDA נעשה על ידי שימוש במודל זהה לזה של הפתרון האנליטי. בתרשים 3-11 ניתן לראות את המודל על-פיו נערכו אנליזות האימות. מידות העמוד זהות למידות הבלוק בפתרון האנליטי. שני הבלוקים השוכבים בתרשים 3-11 קבועים במקומם ולא יכולים לזוז. אל הבלוק העומד, הוא העמוד, מוזנת התאוצה בצורה של כוח אל מרכז המסה (loading point). אותה נקודה גם מהווה נקודת מדידה, עברה נרשמת היסטוריית הזמן של רוטציית הבלוק. זוית החיכוך בין הבלוק לבסיסו נקבעה כ-89 מעלות, על מנת לקיים את ההנחות של הפתרון האנליטי (אין החלקה).



תרשים 3-11: מודל העמוד לאנליזת הוולידציה בתכנת ה-DDA. הבלוק הניצב מדמה את העמוד, הבלוק האופקי העליון מדמה את בסיס העמוד והבלוק האופקי התחתון מדמה את הקרקע.

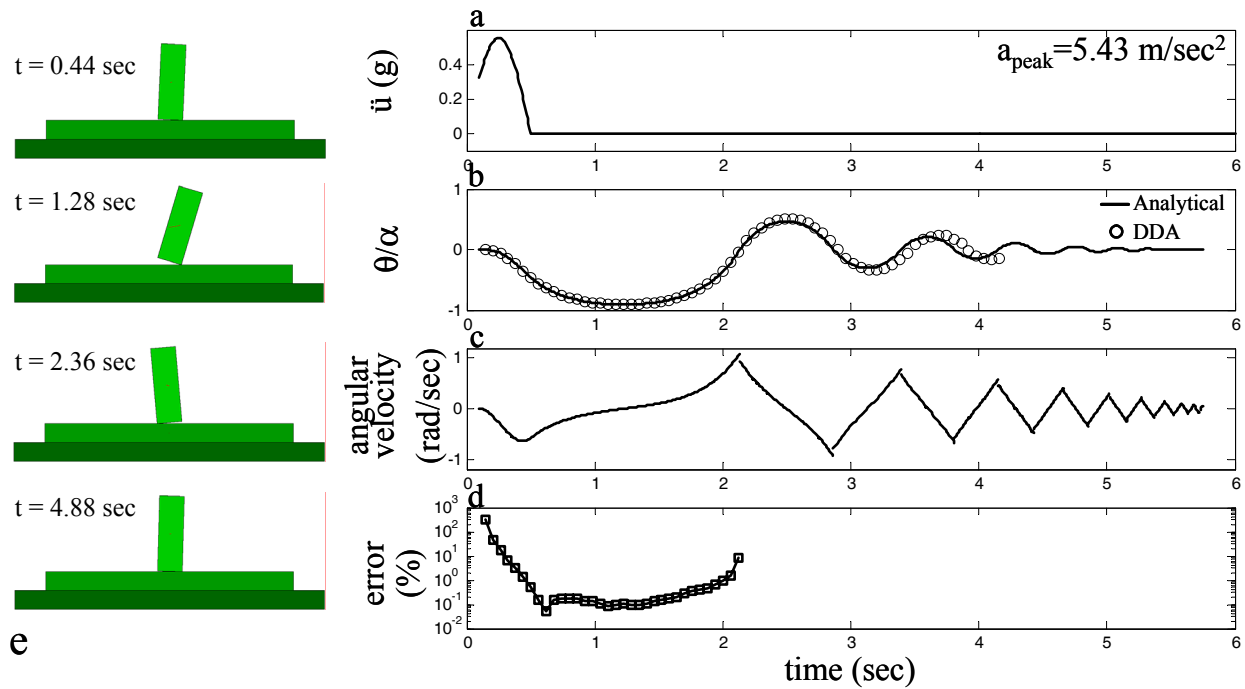
הפרמטרים המוזנים למודל $g1$ ו- $g2$ נבחרו כ-0.0025 sec ו-0.0075 בהתאמה, על-פי מחקר האופטימיזציה של Tsesarisky et al. (2005). מודול האלסטיות (E) נקבע כ-3 GPa, מקדם פואסון (ν) כ-0.25. פרמטר נוסף המוזן למודל הוא $g0$, קשיחות הקפיצים במגע. זהו פרמטר נומרי לחלוטין ללא משמעות פיסיקלית, אך השפעתו על התוצאות ניכרת. על מנת למצוא את הערך האופטימאלי לפרמטר זה, נערכו מספר ניסיונות של ניסוי וטעייה, כשהמטרה הייתה למצוא את הערך שיניב התנהגות זהה לזו של הפתרון האנליטי; כלומר – הערך שיפיל את הבלוק באמפליטודה מסוימת לעומת ישאיר אותו יציב באמפליטודה קטנה ממנה, בערכי

אמפליטודה הזחים לאלו שנבדקו בפתרון האנליטי. לאחר שנמצא ערך אופטימאלי עבור g/l , נבדקה ההתאמה בין הפתרונות. בתרשימים 3-12 עד 3-15 ניתן לראות מספר השוואות שונות בין הפתרון האנליטי לנומרי של DDA. בתרשימים 3-12 ו-3-13 פונקצית התאוצה המוזנת אל הבלוק היא פונקציה חצי סינוס, בעלת תדירות $f = 1\text{Hz}$ ואמפליטודות $a_p = 5.43 \text{ m/s}^2$ ו- $a_p = 5.44 \text{ m/s}^2$, בהתאמה. ניתן לראות מן התרשימים שבאמפליטודה של 5.43 m/s^2 הבלוק נותר יציב, ואילו באמפליטודה של 5.44 m/s^2 הבלוק נופל. כמו כן ניתן לראות התאמה טובה מאוד בין שני הפתרונות. העקומה התחתונה בתרשימים 3-12 ו-3-13 מראה את השגיאה היחסית שבין הפתרון האנליטי לנומרי. הגדרת שגיאה יחסית היא על-פי

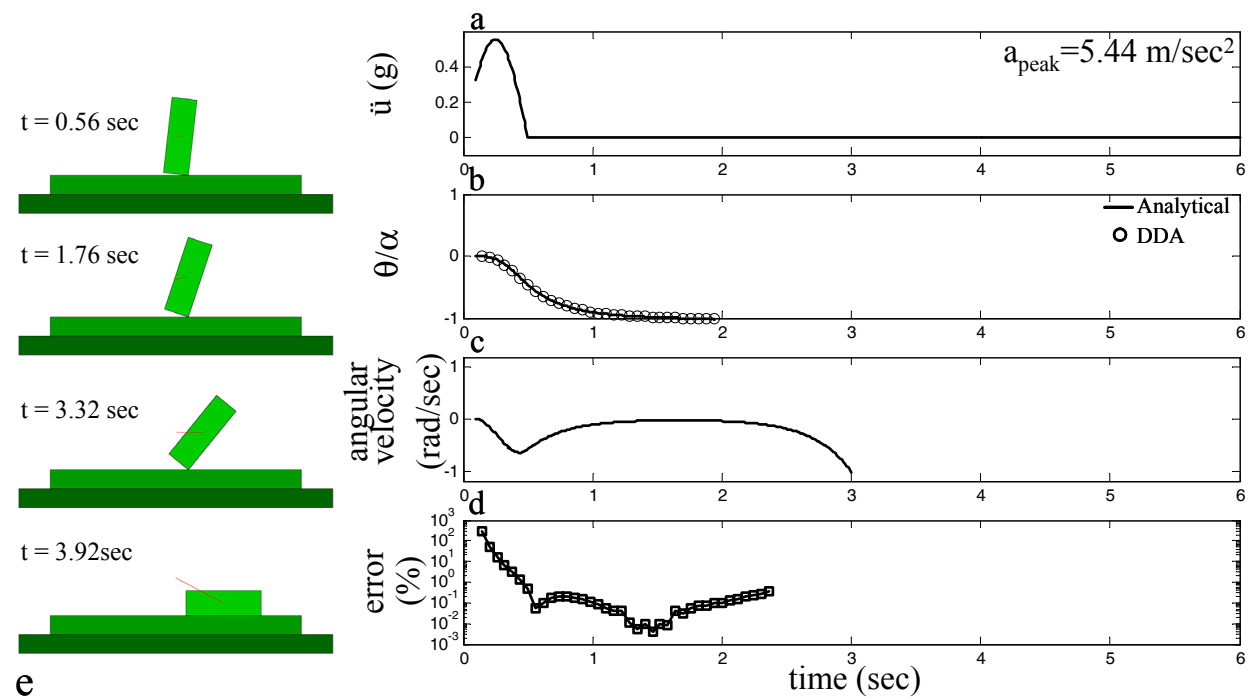
$$error(\%) = \frac{\theta_{analytical} - \theta_{numerical}}{\theta_{analytical}} * 100$$

מעצם הגדרה זו, ברור שכאשר זווית הרוטציה קטנה מאוד, כמו למשל בתחילת האנליזה, השגיאה תהיה גדולה מאוד, על אף ההתאמה הטובה בין הפתרונות. כך למשל בתרשימים 3-12, ניתן לראות בהתחלה שגיאה גבוהה מ-100%, בעוד שהעקומה המראה את זווית הרוטציה מראה התאמה טובה מאוד גם באזור זה. בתרשימים 3-12 שני הפתרונות מתחילים להתרחק האחד מן השני לאחר כשתי שניות, לאחר נקודת הפגיעה הראשונה של הבלוק. ההסבר לתופעה זו יכול להיות נעוץ בעובדה ששני הפתרונות מרסנים את התנועה על-ידי מנגנונים שונים: הפתרון האנליטי על-ידי ריסון אנרגטי, ואילו הפתרון הנומרי על-ידי ריסון אלגוריתמי.

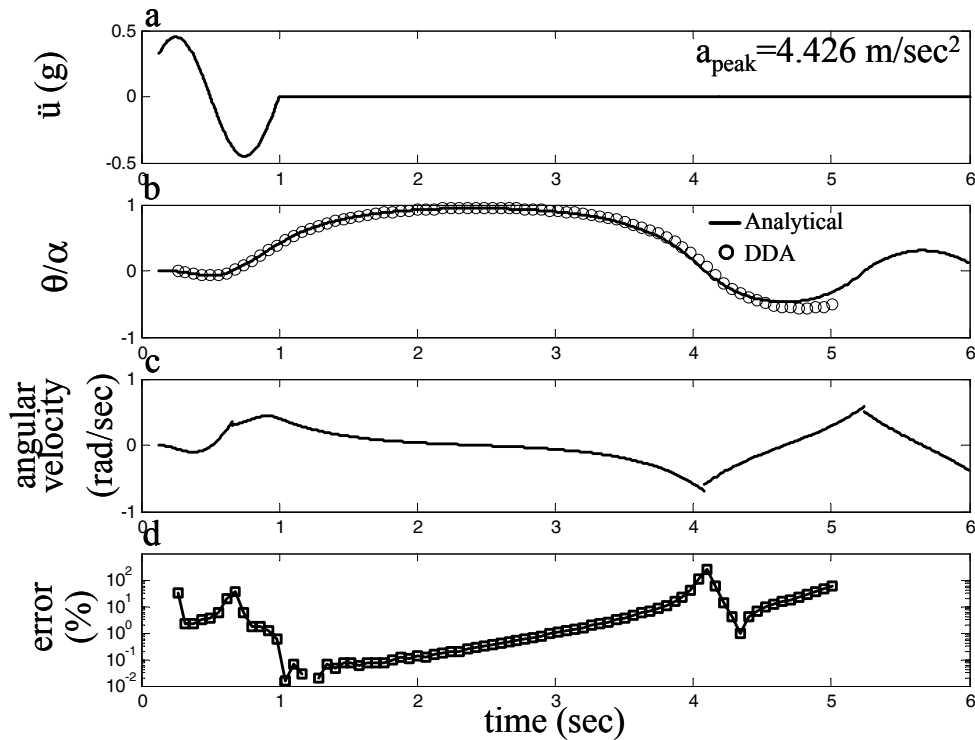
בתרשימים 3-14 ו-3-15 פונקצית התאוצה המוזנת היא סינוס שלם, בעלת תדירות $f = 1\text{Hz}$ ואמפליטודות $a_p = 4.426 \text{ m/s}^2$ ו- $a_p = 4.429 \text{ m/s}^2$, בהתאמה. מן התרשימים ניתן לראות כי באמפליטודה של 4.426 m/s^2 הבלוק נותר יציב, ואילו באמפליטודה של 4.429 m/s^2 הבלוק מאבד את יציבותו ונופל. ההתאמה בין הפתרונות האנליטי והנומרי בהרצות אלו גם היא טובה, אך יש לשים לב שבמקרה זה נקודת הפגיעה הראשונה של הבלוק אירעה כבר בכ-0.7 שניות, ולכן כל התנועה לאחר זמן זה כבר נמצאת בתחום בו שני פתרונות אמורים להתרחק האחד מן השני. אכן ניתן לראות שעל אף השגיאה הקטנה בהתחלה, היא הולכת וגדלה באופן הדרגתי מזמן של 1 שנייה.



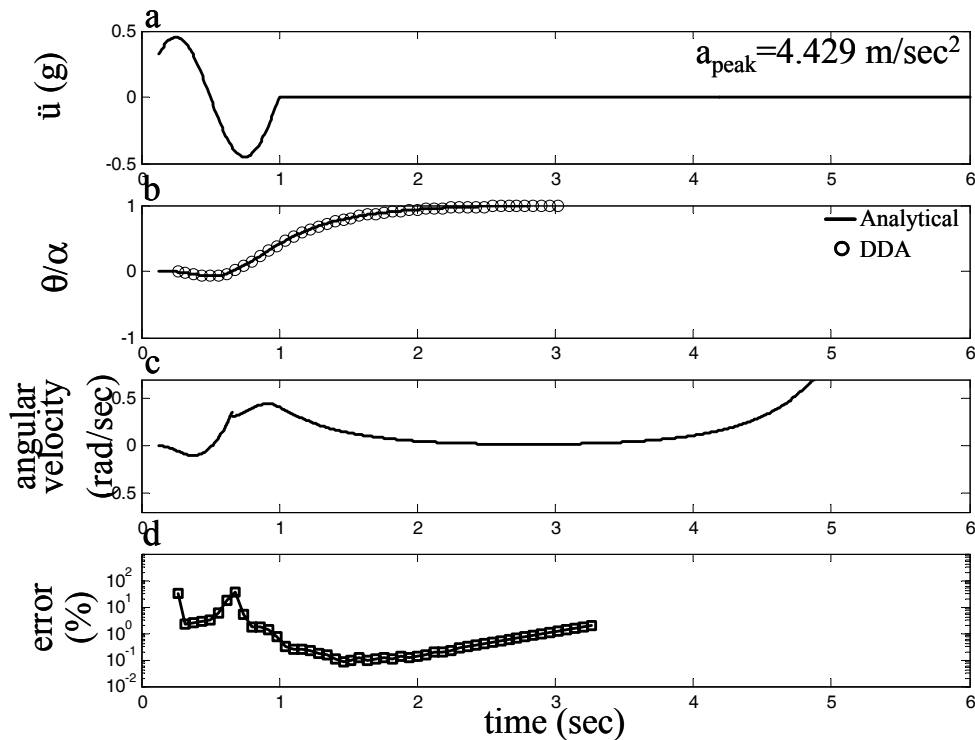
תרשים 3-12: אנליזת אימות עבור פונקציית הזנה של חצי סינוס בעלת תדירות $f = 1\text{Hz}$ ואמפליטודה $a_p = 5.43\text{ m/s}^2$. באימות זה הבלוק נותר יציב. a - פונקציית ההזנה; b - זווית הרוטציה θ מנורמלת בזווית הבלוק α . כאשר העקומה מגיעה לערך מוחלט θ/α של 1, הבלוק נופל. הקו הרציף - פתרון אנליטי. עיגולים - פתרון נומרי של DDA; c - מהירות זוויתית של הבלוק; d - השגיאה היחסית של הפתרון הנומרי. e - תמונות קפואות מההרצה.



תרשים 3-13: אנליזת אימות עבור פונקציית הזנה של חצי סינוס בעלת תדירות $f = 1\text{Hz}$ ואמפליטודה $a_p = 5.44\text{ m/s}^2$. באימות זה הבלוק מתהפך. a - פונקציית ההזנה; b - זווית הרוטציה θ מנורמלת בזווית הבלוק α . כאשר העקומה מגיעה לערך מוחלט θ/α של 1, הבלוק נופל. הקו הרציף - פתרון אנליטי. עיגולים - פתרון נומרי של DDA; c - מהירות זוויתית של הבלוק; d - השגיאה היחסית של הפתרון הנומרי. e - תמונות קפואות מההרצה.



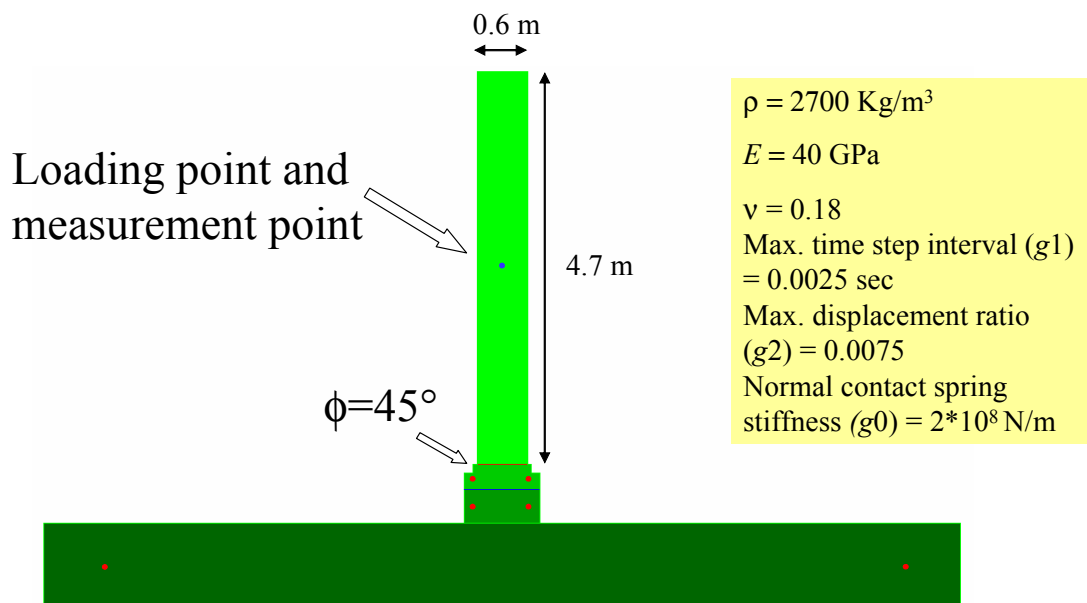
תרשים 3-14: אנליזת אימות עבור פונקציית הזנה של סינוס שלם בעלת תדירות $f = 1\text{Hz}$ ואמפליטודה $a_p = 4.426\text{ m/s}^2$. באימות זה בלוק נותר יציב. a - פונקציית ההזנה; b - זווית הרוטציה θ מנורמלת בזווית הבלוק α . כאשר העקומה מגיעה לערך מוחלט θ/α של 1, הבלוק נופל. הקו הרציף – פתרון אנליטי. עיגולים – פתרון נומרי של DDA; c - מהירות זוויתית של הבלוק; d - השגיאה היחסית של הפתרון הנומרי.



תרשים 3-15: אנליזת אימות עבור פונקציית הזנה של סינוס שלם בעלת תדירות $f = 1\text{Hz}$ ואמפליטודה $a_p = 4.429\text{ m/s}^2$. באימות זה הבלוק מתהפך. a - פונקציית ההזנה; b - זווית הרוטציה θ מנורמלת בזווית הבלוק α . כאשר העקומה מגיעה לערך מוחלט θ/α של 1, הבלוק נופל. הקו הרציף – פתרון אנליטי. עיגולים – פתרון נומרי של DDA; c - מהירות זוויתית של הבלוק; d - השגיאה היחסית של הפתרון הנומרי.

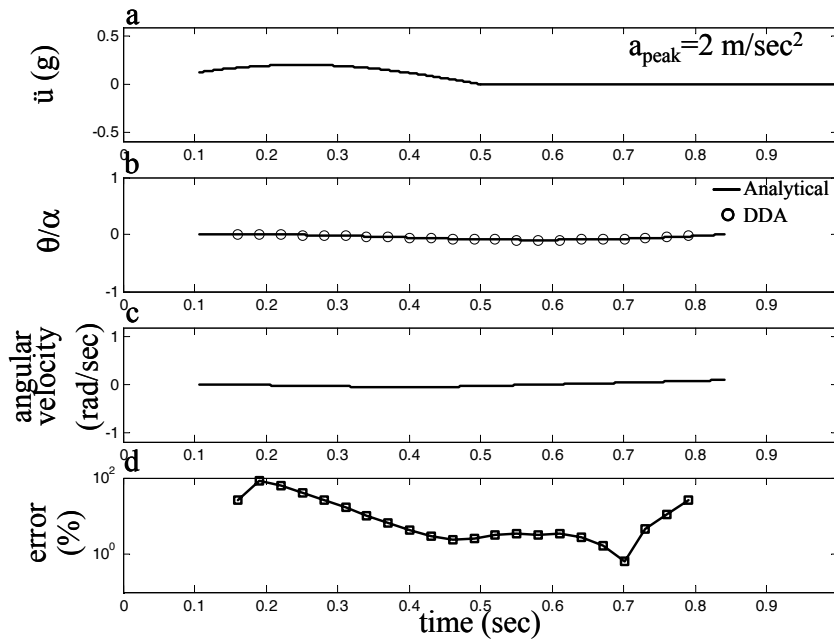
3.4.3.3 מודל עבור העמודים בסוסיתא ואופטימיזציה של הפרמטרים

מידות המודל לאנליזת העמודים בסוסיתא הן על-פי המידות שנמדדו בשטח (תרשים 3-16). קוטר העמוד נלקח כרוחב הבלוק, שכן המודל הוא דו-ממדי. הערכים עבור הפרמטרים האלסטיים ומאפייני הבלוק נבחרו על-פי ערכים אופייניים לגרניט (חצור י., בע"פ). לא ניתן היה לדגום חומר שכן מדובר בממצאים ארכיאולוגיים, ולכן הפרמטרים הוערכו. צפיפות הסלע נלקחה כ- 2.7 גרסמ"ק, מודול האלסטיות (E) כ- 40 GPa, ומקדם פואסון ν 0.18. זווית החיכוך בין העמוד לבסיסו הוערכה כ- 45 מעלות. יש לציין כי האנליזות אינן רגישות לפרמטרים אלו. ערכי הפרמטרים המוזנים למודל, $g1$ ו- $g2$, נשארו זהים לאלו בהרצות האימות.



תרשים 3-16: מודל העמוד לאנליזות הדינמיות בסוסיתא בתכנת DDA. הבלוק הניצב מדמה את העמוד, מתחתיו שני בלוקים המדמים את הבסיס והבלוק האופקי התחתון מדמה את הקרקע.

ערך הפרמטר $g0$ נמצא שוב בתהליך של ניסוי וטעייה על מנת להגיע לערך אופטימלי: נמצא הפתרון האנליטי המתאים למודל של הבלוק בסוסיתא ולתאוצת קרקע של חצי סינוס בעל אמפליטודה של 2 m/s^2 . האמפליטודה הנמוכה נבחרה על מנת להביא את העמוד להתנדנד רק מעט, ולמנוע החלקה שלו על הבסיס. לאחר מכן בוצעה אנליזת DDA עבור אותו מודל ואותה תאוצה. קשיחות הקפיצים שנבחרה הייתה זו שהביאה להתקרבות מרבית של שני הפתרונות. בתרשים 3-17 ניתן לראות את התאמת הפתרונות עבור אנליזה בקשיחות הקפיצים שנבחרה. ההתאמה בין זוויות הרוטציה טובה מאוד, אך גם במקרה זה, בשל אופן הגדרת שגיאה יחסית, גרף השגיאה מראה שגיאות גדולות בתחילת היסטורית התנועה.



תרשים 3-17: אופטימיזציה של פרמטר $g\theta$ - קשיחות הקפיצים. פונקצית ההזנה היא חצי סינוס בעלת תדירות $f = 1\text{Hz}$, ואמפליטודה $a_p = 2\text{m/s}^2$. ההתאמה בין הפתרונות טובה, על אף השגיאה הגבוהה יחסית, עקב אופן הגדרת שגיאה נומרית יחסית. a - פונקצית ההזנה; b - זווית הרוטציה θ מנורמלת בזווית הבלוק α . כאשר העקומה מגיעה לערך מוחלט θ/α של 1, הבלוק נופל. הקו הרציף - פתרון אנליטי. עיגולים - פתרון נומרי של DDA; c - מהירות זוויתית של הבלוק; d - השגיאה היחסית של הפתרון הנומרי.

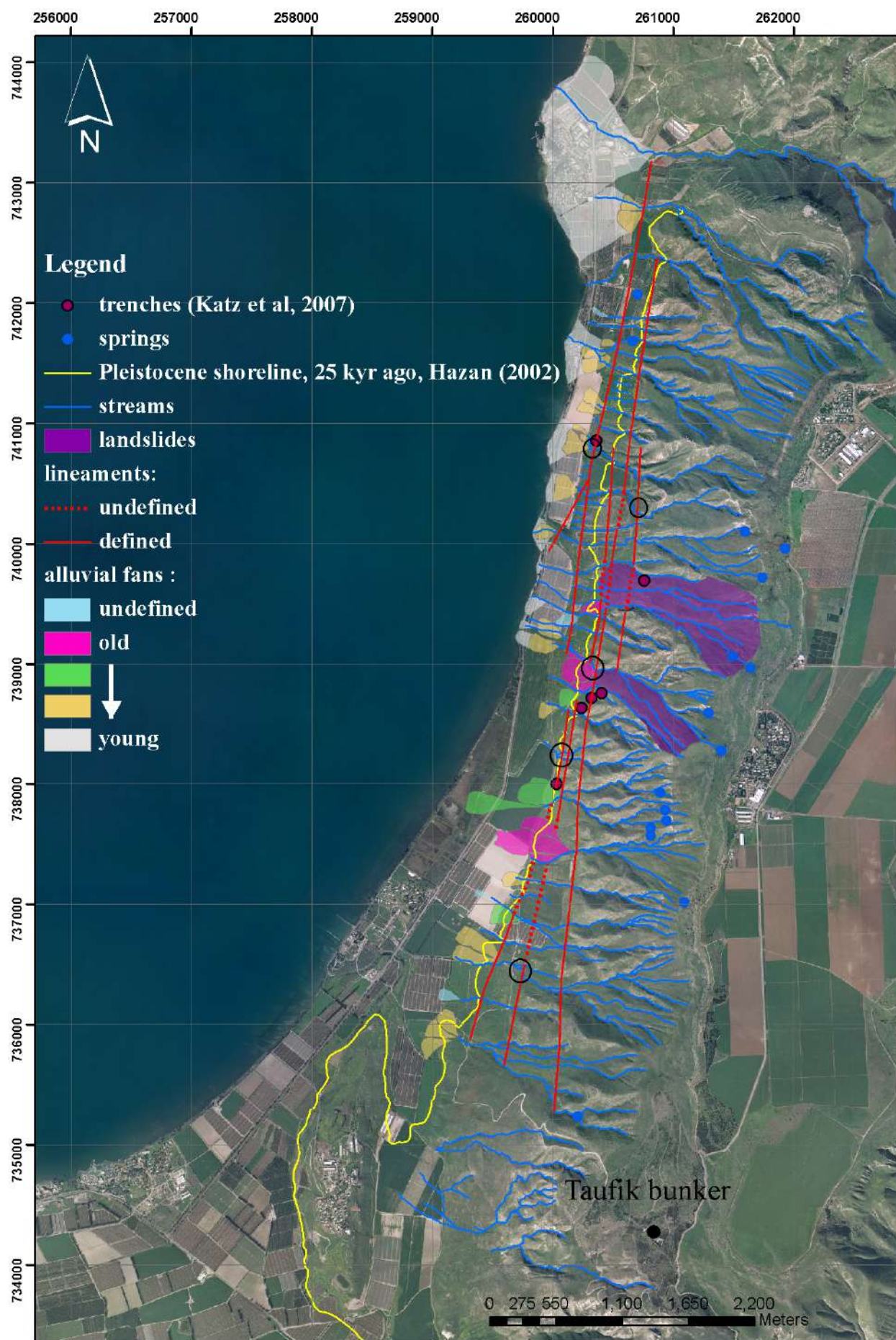
לאחר אופטימיזציה של הפרמטרים וכיולם, בוצעו אנליזות דינמיות של הבלוק בסוסיתא.

4. תוצאות

4.1 מיפוי מורפוטקטוני

כפי שצוין, באזור דרום מזרח הכנרת נצפו אלמנטים מורפולוגיים רבים אשר יתכן כי הם מעידים על פעילות טקטונית צעירה באזור. לצורך הבנת ההיסטוריה של הפעילות הטקטונית נערך מיפוי תצלומי אוויר ושדה שתוצאתו היא מפה מורפוטקטונית הכוללת את האלמנטים השונים (תרשים 4-1). במפה מוצגים ליניאמנטים (החשודים כהעתקים), גלישות קרקע, מערכות ניקוז, מעיינות (על-פי מפה 1:50,000), מניפות סחף על דורותיהן, וקו החוף הגבוה ביותר של הכנרת, שהתקיים כ-25 אלף שנה לפני ההווה, בגובה 176 מטרים מתחת לפני הים (חזן, 2002). כפי שניתן לראות מן המפה, אזור העבודה מכיל מספר ליניאמנטים שכיוונם צפון-דרום, בהתאם לכיוון הכללי של בקע ים המלח. מספר נחלים באזור העבודה מוסטים עשרות בודדות של מטרים (בעיקר בהסטה ימנית) – תצפית שמעידה על הפרעה בתוואי זרימת הנחלים. ניתן להבחין בשלושה דורות של מניפות סחף: העתיק (צבע ורוד בתרשים 4-1) ביותר והרחוק ביותר מקו החוף, הממוקם קרוב מאוד אל בסיס השלוחות, שני דורות ביניים (צבעים כתום וירוק בתרשים 4-1) הממוקמים בין בסיס השלוחות לבין קו חוף הכנרת הנוכחי, והדור הצעיר ביותר (צבע לבן בתרשים 4-1) הממוקם בסמוך לקו החוף הנוכחי של הכנרת. כפי שניתן ללמוד מדור המניפות הצעיר ביותר, הן מתייחסות למעשה אל קו החוף, ומהוות את פתיחת ערוצי הזרימה אל בסיס הניקוז. הדורות הקדומים מתייחסים לקווי השבירה ולקו החוף הפלייסטוקני של הכנרת.

מניפות הסחף שמתייחסות אל הליניאמנטים (כל דור מניפות מתחיל למעשה בליניאמנט מסוים או בקבוצת ליניאמנטים הנראים המשכיים) מורות על כך שהנחלים/ערוצים הגיבו לשינוי הטופוגרפי שחל בעקבות ההעתקה והגלישות. אלמנט מורפולוגי נוסף שנצפה הינן גלישות - קרקע. באזור העבודה זוהו שתי גלישות - קרקע גדולות (מסומנות בצבע סגול בתרשים 4-1). לצורך הערכת התאוצה של רעידת אדמה היסטורית במסגרת מחקר זה נותחה הגלישה הצפונית והגדולה מבין השתיים (נ"צ 2605/7395), מכיוון שניתן לזהות בה מורפולוגיה מובהקת של גלישה רוטציונית (ראה פרק 2.1). כמו כן גלישה זו נחצית על ידי ליניאמנט (תרשים 4-1), כך שניתן לנתח ולהבין את יחסי השדה שבין הגלישה לבין אותו ליניאמנט החשוד כהעתק, ולבדוק האם תנועה על ההעתק עלולה הייתה להיות מנגנון ההפעלה של הגלישה. הימצאותם של אלמנטים מורפוטקטוניים ובעיקר ליניאמנטים החשודים כהעתקים באזור סמוך כל-כך לבקע ים המלח מעידים על התרחשותן של רעידות אדמה באזור המחקר בעבר, ומחייבים המשך לימוד של הנושא. בעבודה זו בחרתי להתמקד בלימוד של גלישות בכלל וגלישה אחת בפרט, וכן בניתוח כשל של מבנה ארכיאולוגי באזור העבודה. חקירה ולימוד מפורט של ההעתקים נעשתה במקביל על ידי Katz et al. (2007).

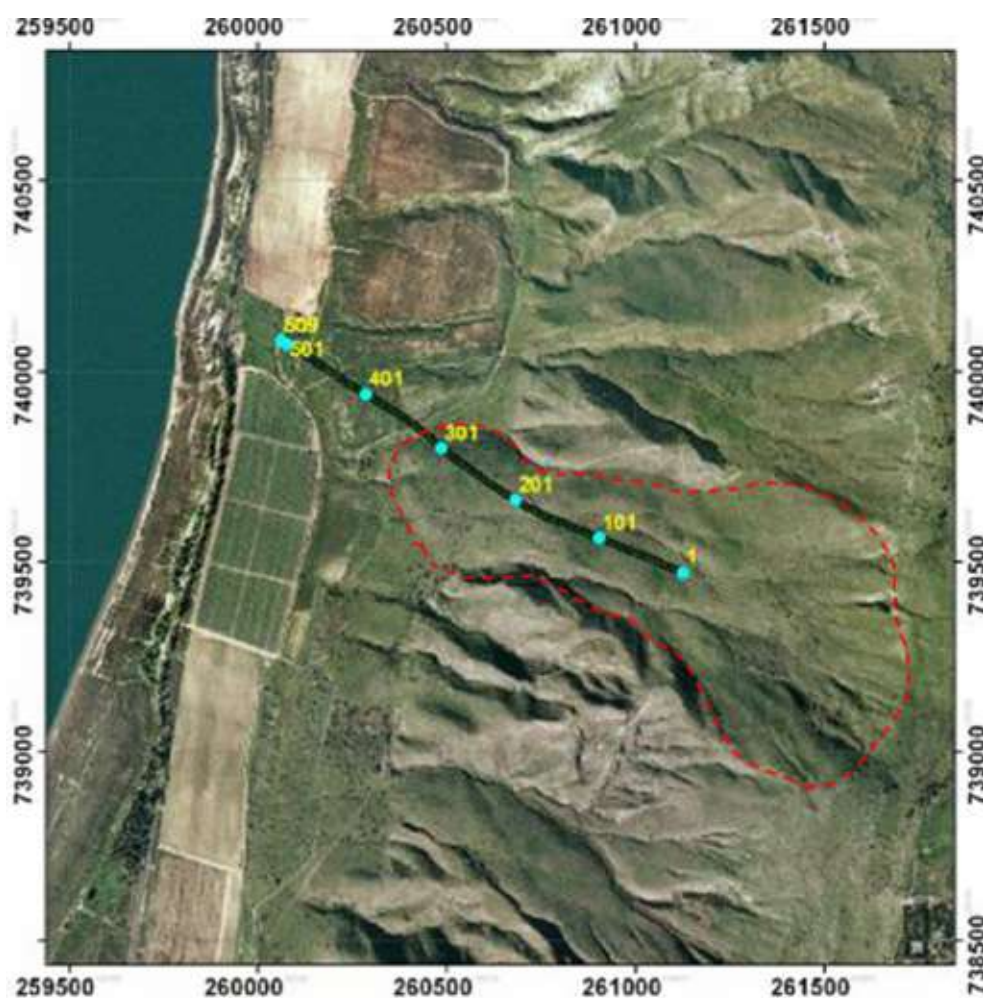


תרשים 4-1: מפה מורפוטקטונית של אזור העבודה

4.2 סקר סייסמי

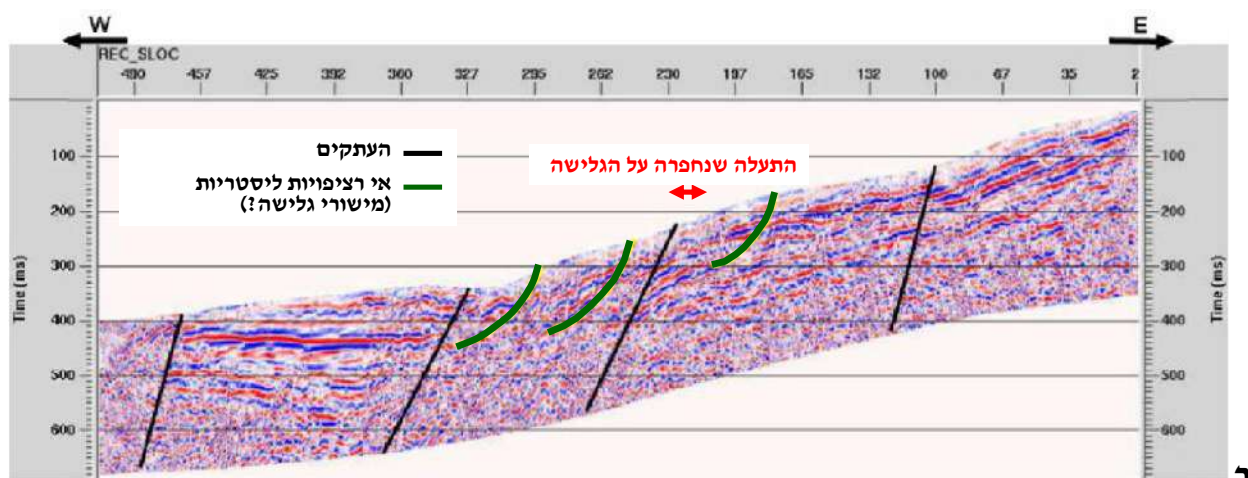
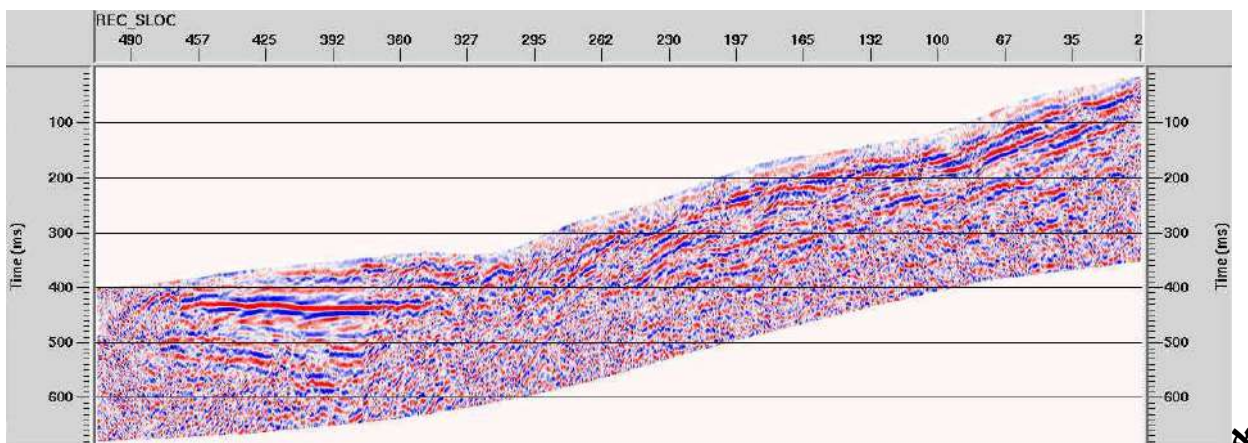
לאחר שבמיפוי המורפוטקטוני זוהו ליניאמנטים רבים החשודים כהעתקים, ובפרט זהו ליניאמנטים המופיעים בהקשר של גלישות הקרקע, הוחלט לבצע סקר סייסמי לצורך לימוד המבנה התת-קרקעי של הליניאמנטים החשודים כהעתקים.

נערך סקר רפלקציה בהפרדה גבוהה על גבי הגלישה הנבחרת, החל במעלה הגלישה בני"צ 261135/739467 וכלה בשדות החקלאיים בסמוך לכביש סובב כנרת בני"צ 260068/740077. המרחק בין תחנה (גיאופון) לתחנה היה 2.5 מ', ובסקר היו 500 תחנות קולטים, כלומר אורכו היה כ-1250 מ'. תוואי הסקר בתרשים 4-2.



תרשים 4-2: תוואי סקר הרפלקציה שבוצע על הגלישה. המספרים הם מספרי התחנות.

החתך המתקבל מן הפענוח הישיר הוא חתך אופקי שאינו מיושר לטופוגרפיה, אך מכיוון שתוואי הסקר היה בעל טופוגרפיה חריפה, בוצע יישור של החתך, ויוצג החתך המיושר. בתרשים 4-3 ניתן לראות חתך זמן מיושר לטופוגרפיה ללא פענוח ומפוענח על ידי מדבדיב (2006).

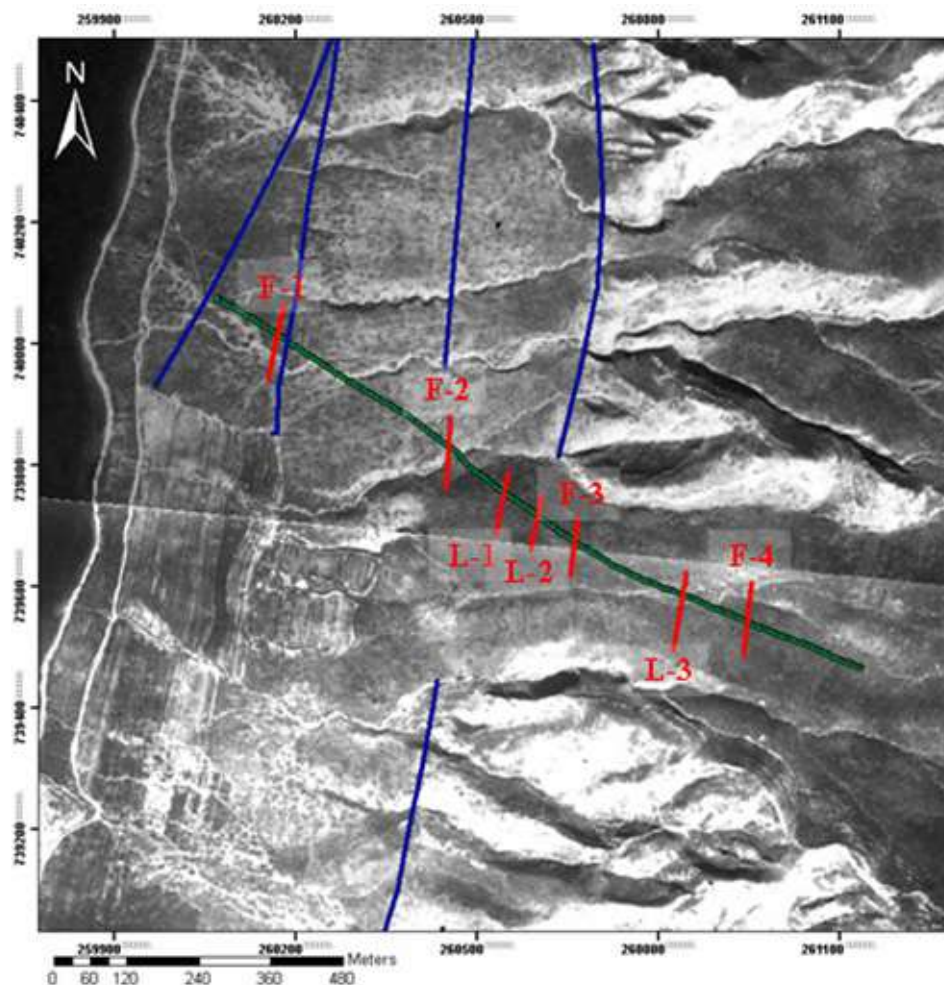


ב

תרשים 4-3: חתך זמן של הגלישה. הציר האופקי הוא מספר תחנות המדידה. בין כל שתי תחנות המרחק הוא 2.5 מטרים. (א) חתך מיושר לטופוגרפיה, לא מפוענח. (ב) חתך מיושר לטופוגרפיה, מפוענח על ידי המכון הגיאופיסי (מדבדיב, 2006).

אי-רציפויות מובהקות בהמשכיותם של הרפלקטורים בחתך הסייסמי זהו באזור התחנות 110, 220, 320 ו-460. אי-רציפויות אלו מקורן בהעתקים. כמו כן זהו שלוש אי-רציפויות ליסטיות (אי-רציפויות קעורות, אשר כמות הנטייה שלהן קטנה עם העומק) באזור שבין התחנות 180 ל-320. בניגוד להעתקים, אי-רציפויות אלו אינן נמשכות לעומק החתך והן מסתיימות בעומק רדוד יחסית.

נמצאה התאמה בין מיקום הליניאמנטים שמופו ומסומנים במפה המורפוטקטונית (תרשים 4-1) לבין אלו שזוהו בחתך הסייסמי כהעתקים. התאמה זו ניתן לראות בתרשים 4-4. בכחול מסומנים ליניאמנטים שזוהו בתצלומי אוויר, ובאדום אי-הרציפויות שזוהו בחתך הסייסמי. ניתן לראות ששלוש מאי-הרציפויות שזוהו כהעתקים בחתך הסייסמי (קווים שחורים בתרשים 4-3) זהו גם כליניאמנטים החשודים כהעתקים צעירים בתצלומי האוויר.

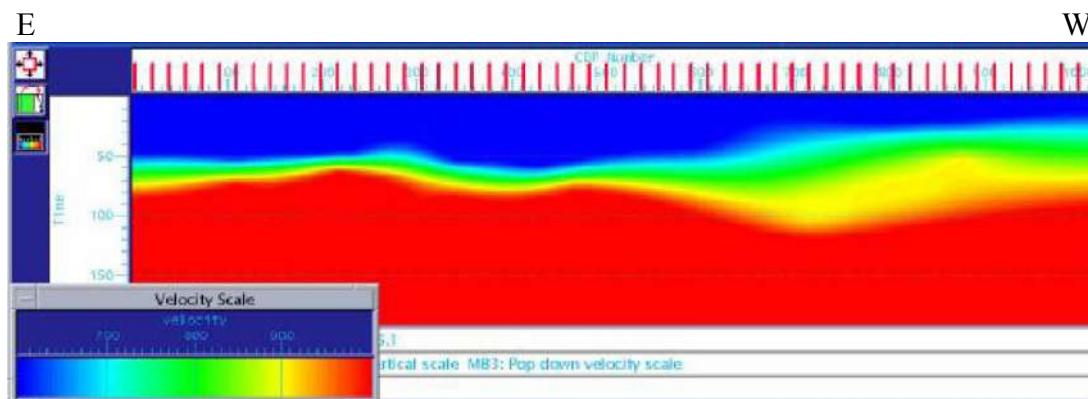


תרשים 4-4: מפת מיקום הפרעות שזוהו בסקר הסייסמי, ביחס לליניאמנטים שמופו וסומנו על תצלומי אוויר. בירוק – תוואי הסקר הסייסמי. בכחול – ליניאמנטים שזוהו בתצלומי אוויר ובשדה, באדום – הפרעות שזוהו בחתך הסייסמי. ב-F מסומן העתק, ב-L מסומנת אי-רציפות ליסטריית (מישור גלישה?). מספור האלמנטים מתאים לתרשים 4-6.

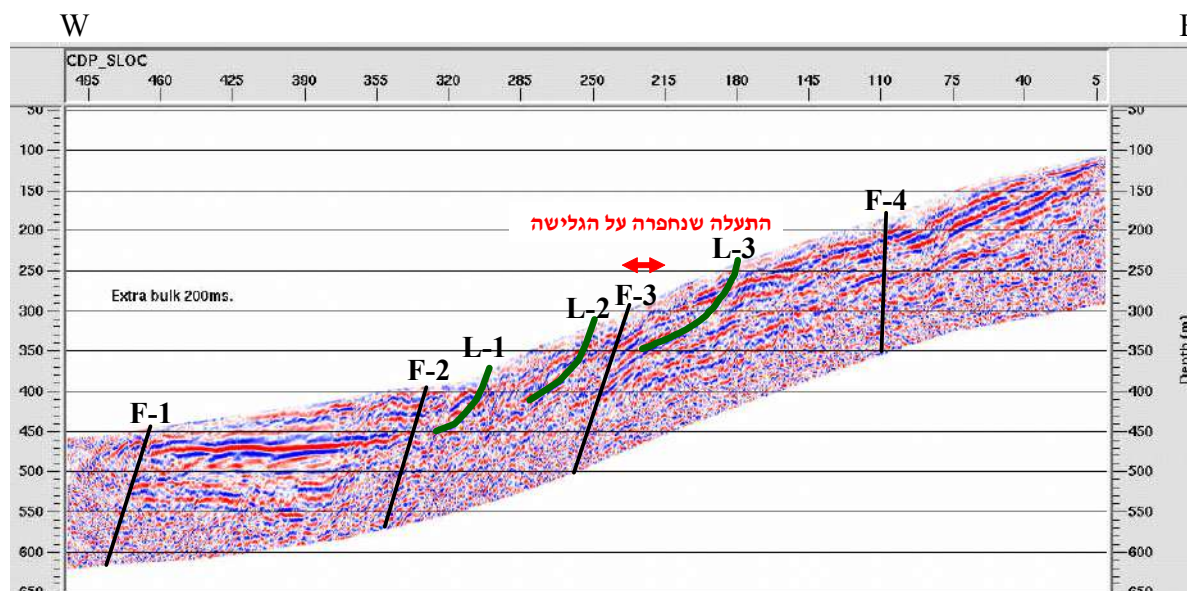
המרת חתך הזמן לחתך עומק מצריכה ידיעה של מהירות היחידות השונות בעומק. המהירויות נמדדות בדרך כלל באופן ישיר בקידוח, או בבדיקות מעבדה על ידי גלים אולטרא-סוניים. במקרה זה לא התבצע קידוח למדידת מהירויות, ולא ניתן היה למדוד אותן במעבדה בעזרת דוגמאות סלע, בשל קשיים טכניים הנובעים מאופי הסלע עצמו. בשל כך המרת חתך הזמן לחתך עומק נעשתה באמצעות מודל המהירויות שחושב עבור החתך הסייסמי (מדבדיב, 2006). מודל זה אינו מודל פיסיקלי, והוא מציג את המהירויות שנתנו את השגיאה הקטנה ביותר. בתרשים 4-5 מוצג מודל המהירויות שהיה בשימוש בחתך הסייסמי הנתון.

מודל המהירויות מציג שלוש קבוצות של מהירויות: היחידה העליונה ביותר, מפני השטח ועד לזמן החזרה של כ-50 מילישניות. היחידה עבה במזרח ומתדקקת לכיוון מערב. מהירות היחידה היא כ-600 מטר/שניה; היחידה האמצעית, נמצאת ב"עומק" של 50-70 מילישניות במזרח ו-30-90 מילישניות במערב, ומהירותה כ-850 מטר/שניה; היחידה התחתונה מתחילה בעומק של כ-90 מילישניות לכל רוחב החתך, ומהירותה 1000 מטר/שניה. למעשה מהירות זו אינה מייצגת מהירות סלע, והיא תוצר לוואי של תהליך עיבוד

הנתונים. בעזרת מודל המהירויות שהוצג בתרשים 4-5 נעשתה המרה של חתך הזמן מתרשים 4-3 (ב) לחתך עומק (תרשים 4-6).



תרשים 4-5: מודל המהירויות שחושב עבור החתך הסייסמי על הגלישה, על ידי המכון הגיאופיסי לישראל.



תרשים 4-6: חתך עומק של הגלישה, שנערך על-פי מודל המהירויות. באדום מופיע מיקום התעלה שנחפרה על הגלישה, סימוני ההעתקים ואי-הרציפויות הליסטיות תואמים את אלו שבתרשים 4-4.

מחתך העומק שנעשה על פי מודל המהירויות בתרשים 4-5, ניתן לראות כי אי-הרציפויות הליסטיות שזוהו מתיישרות אל כיוון הרפלקטורים הנטויים בעומקים של עשרות מטרים בלבד (בין 50-100 מ'). מבנה זה הוא מבנה אופייני לגלישות רוטציוניות הפועלות במספר שלבים עד להתייצבות המדרון (Skempton and Hutchinson, 1969) (תרשים 2-1). תצפית זו מחזקת את הסברה שניתן לראות באי-רציפויות אלו משטחי גלישה קטנים, אשר מתפתחים על גבי מישור ניתוק גדול יותר ומסתיימים אליו. מישור הניתוק הגדול הזה, אשר על-פי התיישרות אי-הרציפויות הליסטיות נמצא בעומק של כמה עשרות מטרים, מתאים להערכה שמשטח הגלישה הגדולה הוא בעומק של בין 30-60 מטרים, כפי שפורט בפרק 3.3. יש לציין כי שיטת הרפלקציה, בה נעשה שימוש בעבודה זו, מתאימה יותר לאזורים מישוריים ואופקיים, בעוד שבמקרה זה

הסקר נעשה על תוואי של שלוחה, כלומר שינויי טופוגרפיה חריפים. עקב כך סקר זה נמצא למעשה בגבול היכולות של השיטה.

4.3 מבנה הגלישה ואפיונה

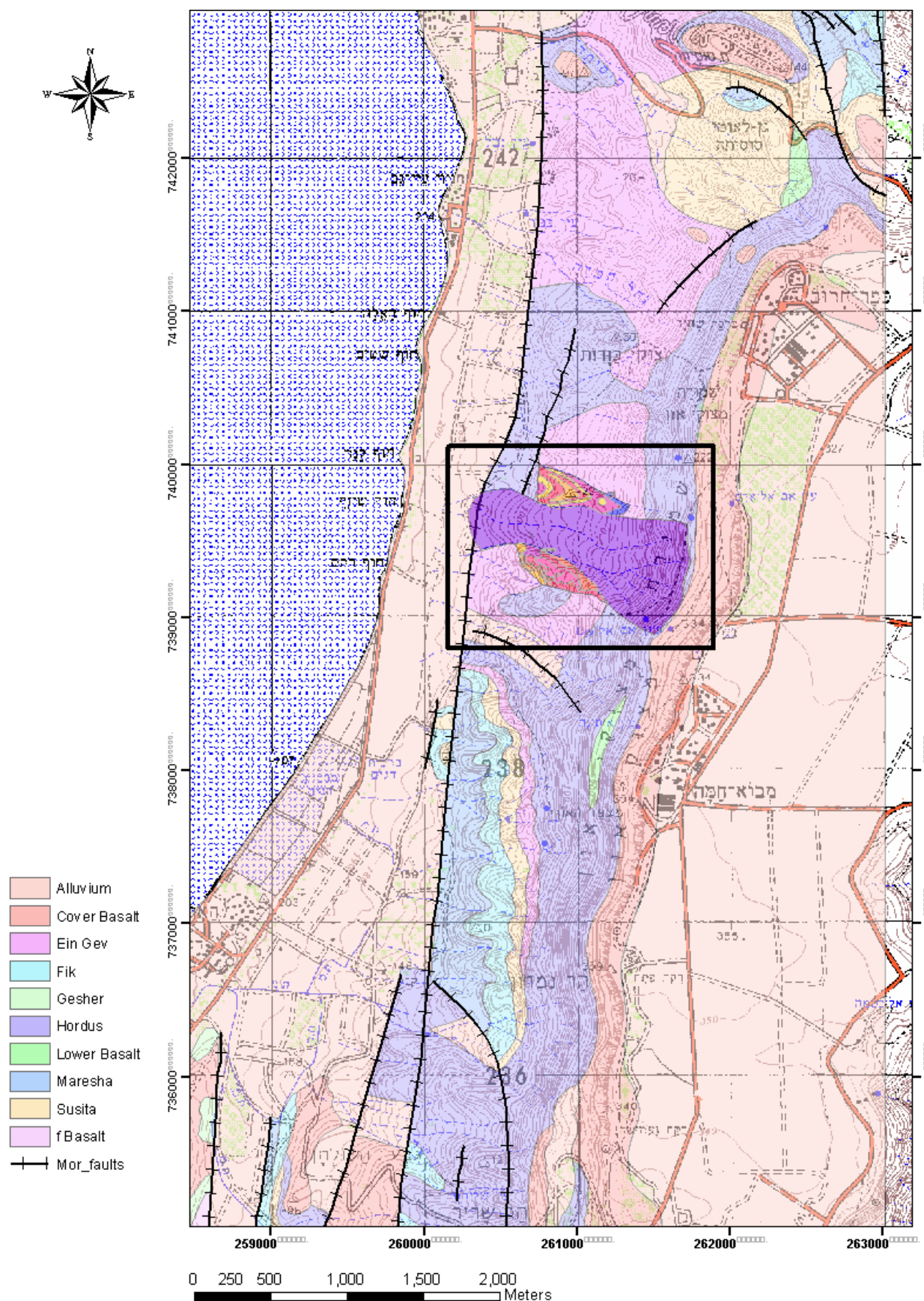
4.3.1 מיפוי אזור הגלישה

במהלך המיפוי המורפוטקטוני זוהו באזור העבודה שתי גלישות (תרשים 4-1), ומהן הגלישה הצפונית והגדולה מבין השתיים (נ.צ. 2605/7395) נבחרה לניתוח יציבות פרטני, והערכת התאוצה האופקית הדרושה ליצירת אי-יציבות. תאוצה אופקית זו מייצגת תאוצה סייסמית שהתרחשה ברעידה היסטורית, ומלמדת על התאוצות הסייסמיות האפשריות באזור העבודה. בסיס הגלישה שאורכה כ-1500 מטרים נמצא בגובה 220 מטר מתחת לפני הים, וחלקה העליון בגובה 300 מ' מעל לפני הים. בסיס הגלישה ממוקם בתצורת עין גב, והצלקת חושפת את בזלת הכיסוי. גושים של סלע בזלתי חשופים על גבי הגלישה עד למרגלותיה. גושים כאלו מצויים בכמות פחותה משמעותית בשלוחות מדרום ומצפון לגלישה.

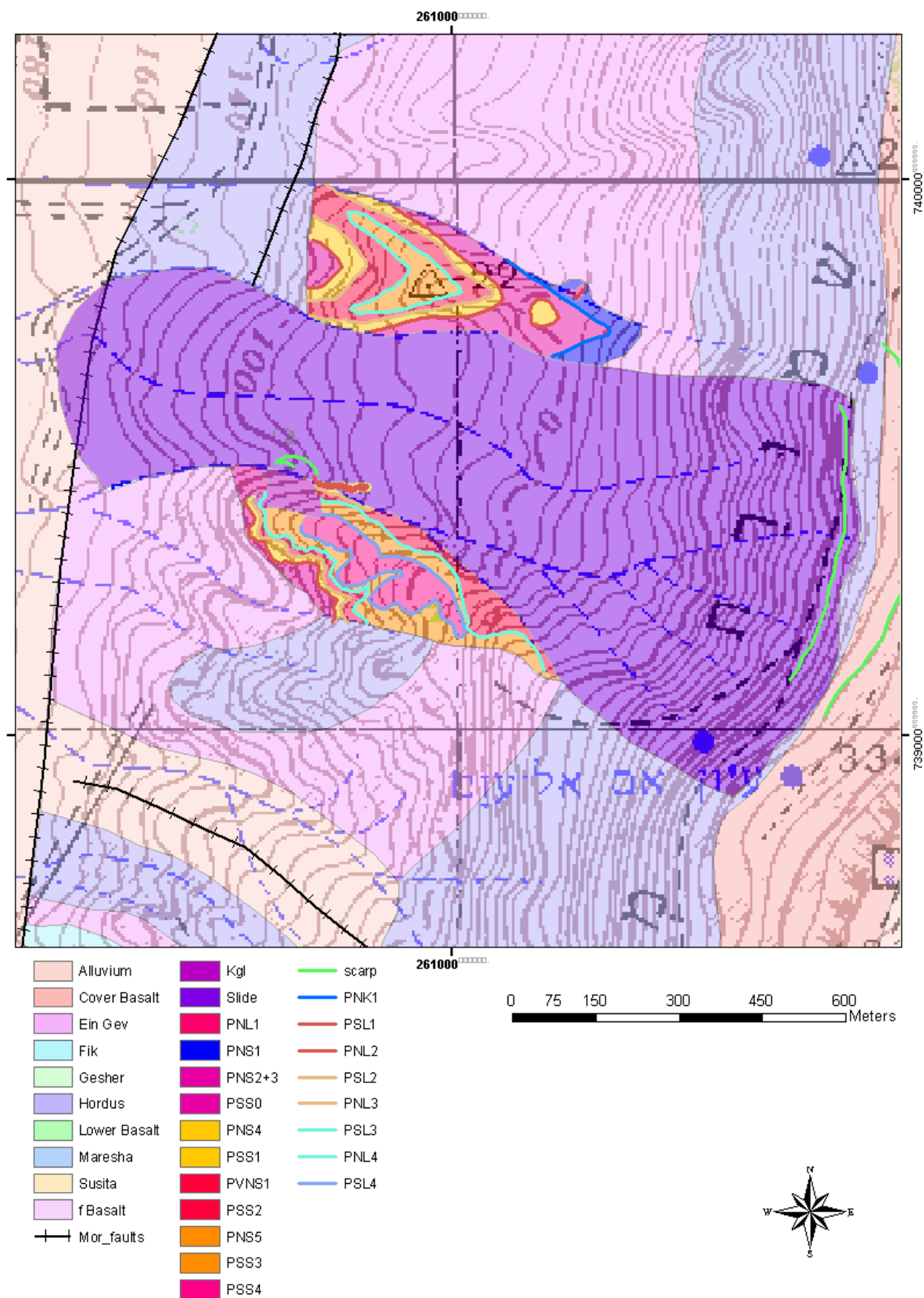
לצורך הבנה עמוקה יותר של מבנה הגלישה ותכונותיה, נערך מיפוי גיאולוגי מפורט של שלוחת הגלישה ושל האזור הסמוך לה. באזור הגלישה, השלוחה הצפונית (להלן השלוחה הצפונית) והשלוחה הדרומית (להלן השלוחה הדרומית), חשופה בעיקר תצורת עין גב, והפרט התחתון של תצורת הורדוס (הפרט האדום). תצורת עין גב חולית בעיקרה, אך ישנם שלושה אופקי גיר (גבעון, 1984). עוביים של אופקי הגיר הוא כחצי מטר בלבד לעומת עובי יחידות החול הנמצאות ביניהם המגיע לכמה מטרים, ועל כן במיפוי אופקי הגיר מופיעים כמגעים בין יחידות החול. על גבי שלוחת הגלישה לא ניתן להבחין ביחידות סדימנטריות כלל עקב כסוי הקרקע וגושי הבזלת. בערוץ בין הגלישה לשלוחה הדרומית זוהו יחידות סדימנטריות מתחתית החתך של תצורת עין גב (גבעון, 1984) החשופות ברציפות בין השלוחה הדרומית לגלישה. היחידות שנצפו הן. היחידה הצעירה ביותר שמופיעה באתרה בחתך הגלישה היא יחידה PSS1 (המקבילה ליחידה PNS4 בשלוחה הצפונית – תרשים 1-3). יחידה זו היא החשודה כיחידה שכשלה והביאה להיווצרות הגלישה, שכן היא היחידה העליונה ביותר המופיעה באתרה בשלוחת הגלישה, ומעליה מונח חומר המדרון שאינו מוגדר.

על הגלישה נמצאו אלמנטים מורפולוגיים היכולים להעיד על תנועת חומר במורד: תת-צלקות המעידות על כך שיתכן שהן שייכות לגלישה או למספר מחזורי תנועה של הגלישה (תרשים 4-7 ב) וגלישות קטנות יותר השונות בכיוון מן הגלישה הגדולה (למשל, בחלק הדרומי של הגלישה תנועת החומר היא במורד אל הנחל התוחם את הגלישה מדרום (תרשים 4-7 ב)).

לאחר המיפוי בשטח, עובדו הנתונים בתוכנת GIS ומפת אזור המחקר מובאת בתרשים 4-7 א.



תרשים 4-7 א. מפת אזור העבודה, על בסיס מיפוי של מיכלסון ומור (1985), ושל גבעון (1984). האזור שמופה בעבודה זו מסומן במלבן, ומוצג בהגדלה בעמוד הבא.



ב. הגדלת אזור הגלישה. אופקי הגיר מסומנים כקווים, והם מהווים מגעים בין יחידות החול.

4.3.2 חתכים גיאולוגיים והשוואה בין השלוחות

מתוך המיפוי המפורט שהוצג בסעיף הקודם, ניתן לבנות חתך גיאולוגי של השלוחות הצפונית והדרומית (תרשימים 4-8 ו-4-9, בהתאמה).

על מנת לוודא ולאשש את הטענה כי אכן מדובר במדרון שכשל בגלישה, בוצע ניתוח גיאומטרי של חתכי שלוחת הגלישה והשלוחות הסמוכות לה (תרשימים 4-10, 4-8 ו-4-9 בהתאמה). ניתוח זה בוצע מתוך ההשערה ששלוחת הגלישה דמתה לשכנותיה לפני שכשלה, מבחינת המבנה הגיאולוגי וכן מבחינת הפרופיל הטופוגרפי.

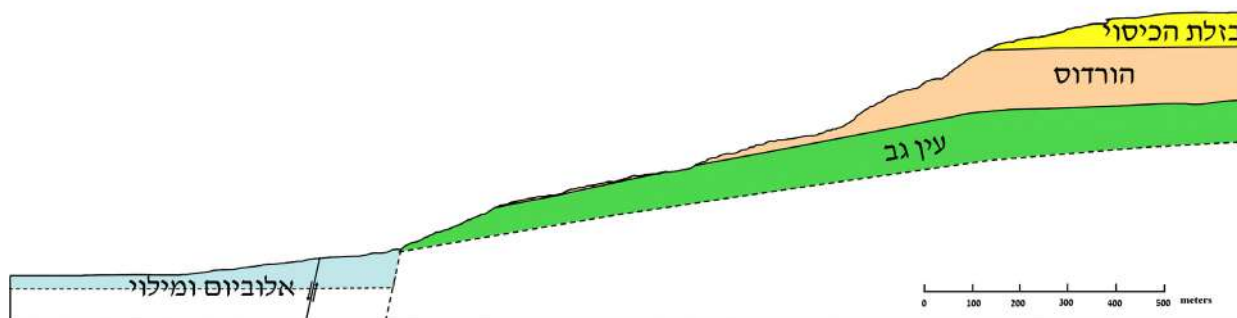
לחתכי השלוחות הצפונית והדרומית לגלישה מאפיינים דומים (תרשימים 4-8 ו-4-9). המבנה הטופוגרפי של שתיהן מורכב מחלק עליון תלול בזווית של כ – 25-30 מעלות, חלק מרכזי, מעין כתף, הבנוי מצמד אחד של אוכף וכיפה לפחות (בשלוחה הצפונית ישנן שתי כיפות), וחלק תחתון מתון בשיפוע של עד 15 מעלות, שמסתיים בהעתק. לחלק המרכזי של השלוחות שיפוע כללי מתון (כ- 10 מעלות), ושיפועים מקומיים גדולים יותר בשל השינוי הטופוגרפי בין האוכפים והכיפות. החתך הגיאולוגי של השלוחות גם הוא דומה מאוד: תחתית השלוחות בנויה מתצורת עין גב נטויה לכיוון מערב, מעליה חתך של תצורת הורדוס, נוטה אף הוא מערבה, ומעל, בראש השלוחה, בזלת הכיסוי כמעט ללא נטייה.

חלקה העליון של שלוחת הגלישה (תרשים 4-10) משופע בתלילות של עד 25 מעלות, וחלקה התחתון בשיפוע כללי של עד 15 מעלות. החלק התחתון של הגלישה בנוי ממספר מדרגות. בין החלק העליון לתחתון לא קיים רצף של אוכפים וכיפות, בניגוד לשלוחות התוחמות את הגלישה.

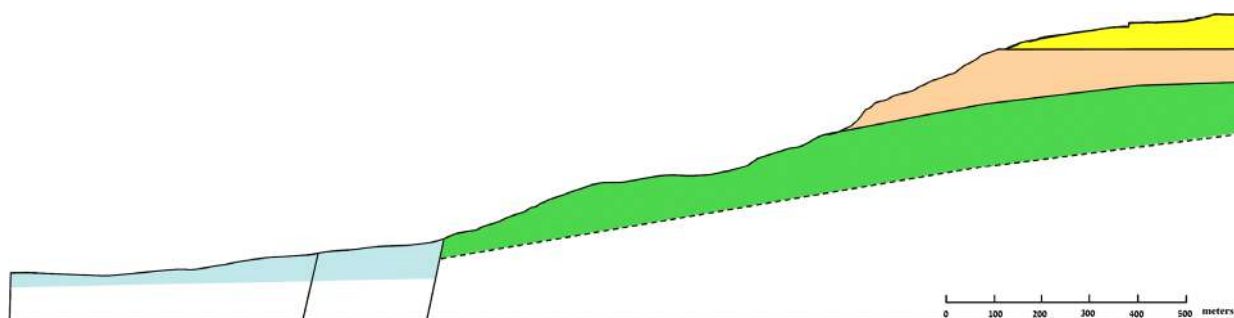
השוואה בין פרופיל הגלישה (קו אדום מקוטע) לזה של השלוחה הדרומית (הסמן המשווה בין הפרופילים נלקח כקו המגע בין תצורת הורדוס לבזלת הכיסוי - תרשים 4-11) מראה חסר של חומר בפרופיל הגלישה באזור האוכפים והכיפות, ועודף של חומר בפרופיל הגלישה במורד או באזור הצבירה (toe). תצפית זו, יחד עם המורפולוגיה הנצפית בשטח, יכולה להעיד באופן ברור על הסעת חומר במורד המדרון, כלומר גלישת מדרון.

מערב

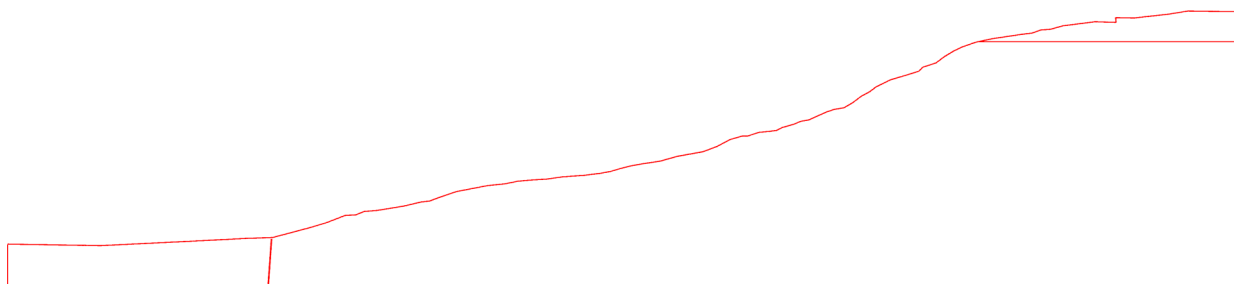
מזרח



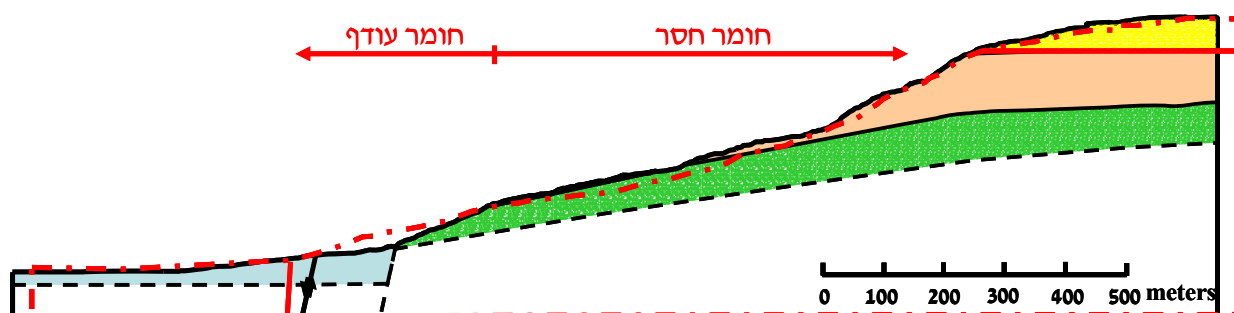
תרשים 4-8: חתך גיאולוגי של השלוחה הדרומית.



תרשים 4-9: חתך גיאולוגי של השלוחה הצפונית.



תרשים 4-10: חתך שלוחת הגלישה.



תרשים 4-11: השוואה בין חתך השלוחה הדרומית לחתך הגלישה.

4.3.3 החתך הרדוד של הגלישה

בכדי להבין את יחסי השדה בין ליניאמנט (העתק, למעשה) והגלישה, נחפרה תעלה במעלה הגלישה באזור בו, על בסיס סריקת תצלומי אוויר, סיור שדה, והחתך הגיאופיסי הגלישה חוצה ליניאמנט (תרשים 4-6)

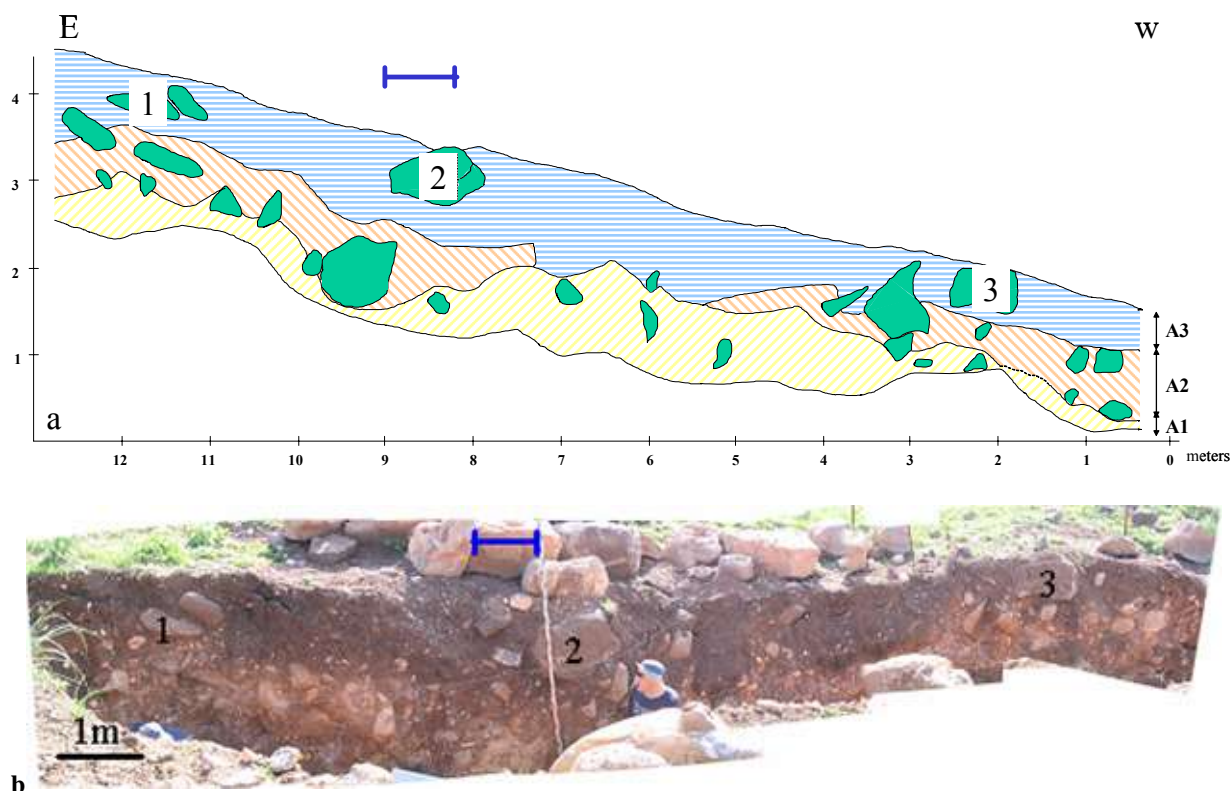
(שזוהה כהעתק נורמלי על השלוחות מצפון ומדרום לגלישה (תרשים 4-12)). באזור המפגש המשוער בין הגלישה והליניאמנט שיפוע מדרון הגלישה נעשה תלול יותר. אורכה של התעלה כ-13 מטרים, כיוונה מזרח-מערב בניצב לליניאמנט, ועומקה מגיע עד כ-2 מטרים. יש לציין כי בעת החפירה נמצאו בתת-הקרקע גושי בזלת גדולים מאוד שגרמו לקשיים טכניים בחפירה.



תרשים 4-12: המשכו של הליניאמנט הנחקר על הגלישה, כשהוא חוצה ומעתיק את השלוחה הצפונית לגלישה. בחצים מסומנת התנועה על השבר. היחידה מימין היא תצורת חולות עין גב, ומשמאל תצורת הורדוס.

4.3.3.1 תיאור התעלה

בקיר הדרומי של התעלה שתואר הוגדרו שלושה פרופילי קרקע שהתפתחו בקולוביום המרכיב את הגלישה בתקופות זמן שונות (תרשים 4-13). פרופיל קרקע A1 בתחתית התעלה מופיע בצורה רציפה לכל אורך התעלה, והופעתו היא מקבילת מדרון (תרשים 4-13). פרופיל קרקע A2 אינו רציף לכל אורך התעלה, הוא נעלם באזור המטר החמישי, ושב ומופיע באזור המטר השביעי של התעלה (תרשים 4-13). פרופיל הקרקע A3 חשוף בפני השטח, רציף לכל אורך התעלה ומקביל מדרון (תרשים 4-13). יש לציין שבאזור שבו נחפרה התעלה זוהו הפרעות לאורך המדרון ומילוי שקעים טופוגרפיים.



תרשים 4-13: (a) מיפוי התעלה שנחפרה על הגלישה. בירוק מסומנים גושי סלע גדולים. הקו הכחול מסמן את האזור בו חוצה התעלה את הליניאמנט שזוהה כהעתק. המספרים מציינים מראי מקום להשוואה עם תמונת התעלה בחלק הבא של תרשים זה. (b) תמונת פנורמה המציגה את קיר התעלה. הסלעים המונחים על פני השטח אינם באתרם, והוזזו לצורך חפירת התעלה. הקו הכחול מסמן את האזור בו חוצה התעלה את הליניאמנט שזוהה כהעתק (ראה חלק ראשון של תרשים זה). המספרים מציינים מראי מקום להשוואה עם הלוג המשורטט בחלק א של תרשים זה.

הקיר הממופה זרוע כולו בגושי בזלת בגדלים שונים (מ-10 ס"מ ועד מטר) שמקורם בבזלת הכיסוי

מראש המצוק. ריכוזים משמעותיים של גושים גדולים מאוד (בגודל של כ-1 מטר) קיימים בשני שקעים

טופוגרפיים שנחשפו בתעלה: באזור בו חוצה הגלישה את הליניאמנט, ובמורד הגלישה (תרשים 4-13), שם לא

ניתן היה להעמיק את החפירה בשל גוש-סלע גדול במיוחד בתחתית התעלה.

רוב גושי הסלע המצויים בקיר התעלה בלויים בדרגות שונות, עד כדי התפוררות (תרשים 4-14).



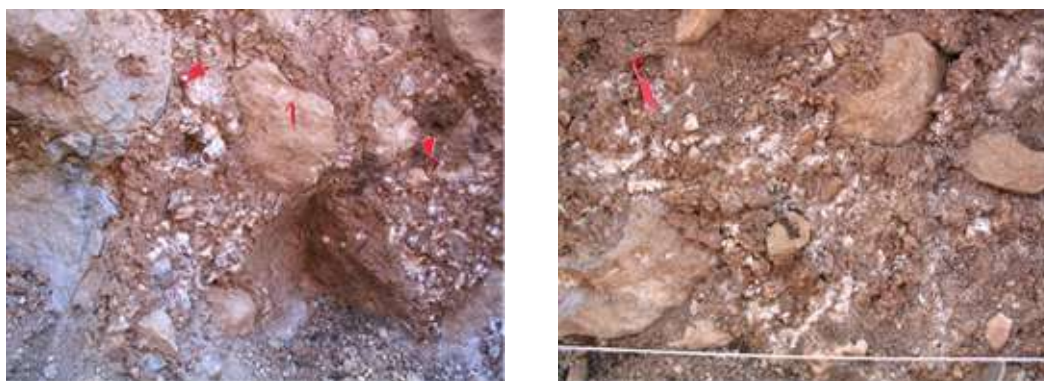
תרשים 4-14: גושי סלע בזלת בלויים מאוד בחתך התעלה.

4.3.3.2 תיאור פרופילי קרקע

זוהו שלושה פרופילי קרקע בתעלה (תרשים 4-15). פרופילים אלה הינם של קרקעות חרסיות קלציות הנמצאות בשלבי התפתחות שונים, כאשר שני הפרופילים התחתונים הינם פליאוסולים.



תרשים 4-15: שלושת פרופילי הקרקע, כפי שהם נחשפים בתעלה. הפרופיל העליון ביותר הוא הצעיר.
הקרקע התחתונה והעתיקה ביותר (A1) הינה קרקע קלצית חרסיתית (תרשים 4-16), ומכילה כמות גדולה של תצבירי קרבונט שהצטברו במטריקס החרסיתי. החלוקים בקרקע זו מהווים כ- 10% מהנפח, הם צפים במטריקס ומצופים קרומי קרבונט.



תרשים 4-16: קרקע A1.

הקרקע האמצעית (A2), הינה קרקע קלצית בדרגת התפתחות בינונית (תרשים 4-17). אחוז החלוקים בה כ- 40% מהנפח, והם צפים בתוך מטריקס חרסיתי. חלוקים בקוטר 2-3 מ"מ מהווים 80% מכלל החלוקים, ומקורם כנראה בתצורת עין גב ובזלת הכיסוי. חלקו העליון של הפרופיל גדוע. הפרופיל מכיל תצבירים קרבונטיים וקרומי קרבונט המצפים את החלוקים. כמו כן הפרופיל מכיל חלוקי בזלת בלויים מאוד.



תרשים 17-4: קרקע A2 (מסומנת בחץ שחור).

הקרקע העליונה המצפה את המדרון (קרקע A3) הינה קרקע חרסיתית-סילטית עם כ- 20% חלוקים בגודל ממוצע של 3 ס"מ (תרשים 18-4). חתך הקרקע נראה אחיד: ללא אופקים, מבנה רגבי-עמודי, ללא תצבירי קרבוט. החלק האמצעי הפרופיל מכיל חלוקים גדולים (עד 10 ס"מ), הצפים במטריקס חרסיתי. חלקו התחתון של הפרופיל נראה פחות חרסיתי.



תרשים 18-4: קרקע A3 (מסומנת בחץ שחור).

עצם העובדה שניתן היה להפריד את החתך לשלושה פרופילי קרקע אשר התפתחו בחומר קולוביאלי בלתי אחיד תומך בהנחה שתנועת הגלישה התרחשה בכמה שלבים/מחזוריים.

4.3.3.3 תיארוך פרופילי הקרקע

שלושת פרופילי הקרקע נדגמו ותוארכו בשיטת OSL על ידי ד"ר נעמי פורת מהמכון הגיאולוגי. הגילים שנמצאו הם:

קרקע A1: 58 ± 7 אלף שנים, 62 ± 7 אלף שנים (נדגמה בשני מקומות).

קרקע A2: 6.0 ± 0.4 אלף שנים.

קרקע A3: 4.2 ± 0.3 אלף שנים.

4.3.3.4 מסקנות לגבי תעלת הבדיקה בגלישה

שלושת פרופילי הקרקע מצביעים על אפשרות שהיו לפחות שלושה מחזורים של תנועת חומר במורד המדרון. דרגת התפתחות הקרקע, המתבטאת בעיקר בהצטברות הקרבונט, מצביעה על תקופות חשיפה שונות לתהליכי פני שטח. כמו כן המעברים החדים בין הפרופילים והשוני בצבעי הקרקע גם הם תורמים למסקנה כי לא מדובר בתהליך רציף של יצירת קרקע לאחר התרחשות הגלישה, אלא תהליך שהתבצע במספר מחזורים של תנועת חומר במורד המדרון, והתפתחות קרקע בשלב שבו המדרון יציב ואין תנועת חומר משמעותית. העובדה שלא כל פרופילי הקרקע מקבילי מדרון יכולה להצביע על אפשרות שכל גלישה הגיבה לטופוגרפיה קיימת שונה.

התעלה נחפרה בניצב לליניאמנט שזוהה כהעתק המסיט את פני השטח מצפון ומדרום לגלישה. בתעלה, שמסיבות טכניות הינה רדודה ביותר, לא זוהה ההעתק, אך זוהה אזור מופר, שקע טופוגרפי שבו מתרכזים גושי סלע גדולים במיוחד, וחוסר רציפות בהופעה של פרופיל הקרקע A2 (תרשים 13-4). לאור התצפיות הקיימות, המסקנה היא שההעתק יצר מדרגה בגלישה קדומה, שהתבטאה ביצירת שקע טופוגרפי. תנועת חומר מאוחרת התווספה לגלישה וגרמה לשקיעת חומר מדרוני הכולל גושי בזלת גדולים וחומר חרסיתי, בשקע שנוצר. תוצאות תיארוך הפרופילים תומכות אף הן בהערכה שכל פרופיל התפתח בתקופת זמן שונה - אירוע גדול אירע ככל הנראה ב - 58-62 אלף שנים לפני ההווה, ואחר כך אירעו שני אירועים נוספים בחלוקן.

כנרי (Kanari et al., 2007, ודברים בע"פ) תיארוך בעבודתו נפילות של גושי סלע גדולים מאוד ממצוק מנרה לעבר אזור העיר קריית שמונה. הערכתו היא כי הגושים נפלו עקב רעידות אדמה, והוא מצא מקבץ גילים סביב 60 אלף שנה, וכן סביב 4000 שנה. Kagan et al. (2005) מצאה כי גילים של אירועים סייסמיים בהם ניזוקו משקעי מערות במערת שורק התרחשו בין היתר לפני כ-6000 שנה, וכ-50,000 שנה. Amit et al. (2002) מצאו על-ידי חפירת תעלות ותיארוך תזוזות על העתקים באזור דרום הערבה מקבץ אירועים לפני כ-5000 שנה. יתכן שהאירועים הסייסמיים שהביאו לתנועת חומר במורד מדרון הגלישה באזור המחקר בעבודה זו, היו רעידות אדמה גדולות, או חלק ממקבץ רעידות, שהשפיעו על אזורים אחרים לאורכו של בקע ים המלח.

4.4 ניתוח יציבות הגלישה הנבחרת

לצורך ניתוח יציבות הגלישה שנבחרה, ומציאת תאוצת הקרקע האופקית אשר גרמה לכשל הנצפה, יש צורך באפיון תכונות החומר הבונה את המדרון. אפיון זה דורש סדרה של בדיקות מעבדה לצורך הערכת האופי ההנדסי של סוג הקרקע: התכונות הפיסיקליות של החומר (משקל מרחבי) וחוזק החומר. לאחר קביעת

תכונות הסלעים ניתן להשתמש בתכנה לניתוח יציבות מדרונות, ולהשתמש בתכונות החומר שנמצאו, הנדרשות על-ידי התכנה, בכדי להעריך את התאוצה האופקית אשר גרמה לכשל המדרון.

4.4.1 בדיקות מעבדה

4.4.1.1 אפיון הנדסי של סוג הקרקע

היחידה הצעירה ביותר שנצפתה באתרה (in-situ) בחתך הגלישה היא PSS1, והמקבילה לה בשלוחה הצפונית היא PNS4 (תרשים 3-1). יחידות אלו הן החשודות כיחידות שכשלו בגזירה והביאו לגלישת המדרון. עם זאת, כל יחידות החול שזוהו על ידי גבעון (1984) נבדקו למציאת הסיווג ההנדסי שלהן, לצורך הבנת תכונות החומר הבונה את חתך הגלישה. אף על פי שיחידות החול מופיעות בחתך כאבני חול ולא כחול מפוזר, בדיקת הסיווג נעשתה על-פי סיווג קרקעות, על מדגם של חול מפוזר מאותה יחידה נבדקת. תוצאות בדיקות דירוג הקרקע מובאות בתרשים 4-19.

יחידה PSS1

יחידת החול העליונה ביותר החשופה באתרה בחתך הגלישה (בהמשך ליחידות המרכיבות את השלוחה הדרומית לגלישה). היחידה מורכבת ברובה מחול צהוב. הקרקע מוגדרת כ-SM : חול סילטי. החומר אינו פלסטי (non-plastic).

יחידה PNS1

יחידת החול התחתונה ביותר בשלוחה הצפונית (חתך 5, גבעון 1984). צבע החול : לבן- צהבהב. הקרקע מוגדרת כ-SP-SM : חול סילטי מדורג גרוע. החומר אינו פלסטי (non-plastic).

יחידה PNS2

חול לבן-צהבהב. הקרקע מוגדרת כ-SM : חול סילטי. החומר אינו פלסטי (non-plastic).

יחידה PNS3

חול לבן צהבהב. הקרקע מוגדרת כ-SW-SM : חול סילטי מדורג היטב. החומר אינו פלסטי (non-plastic).

יחידה PNS4

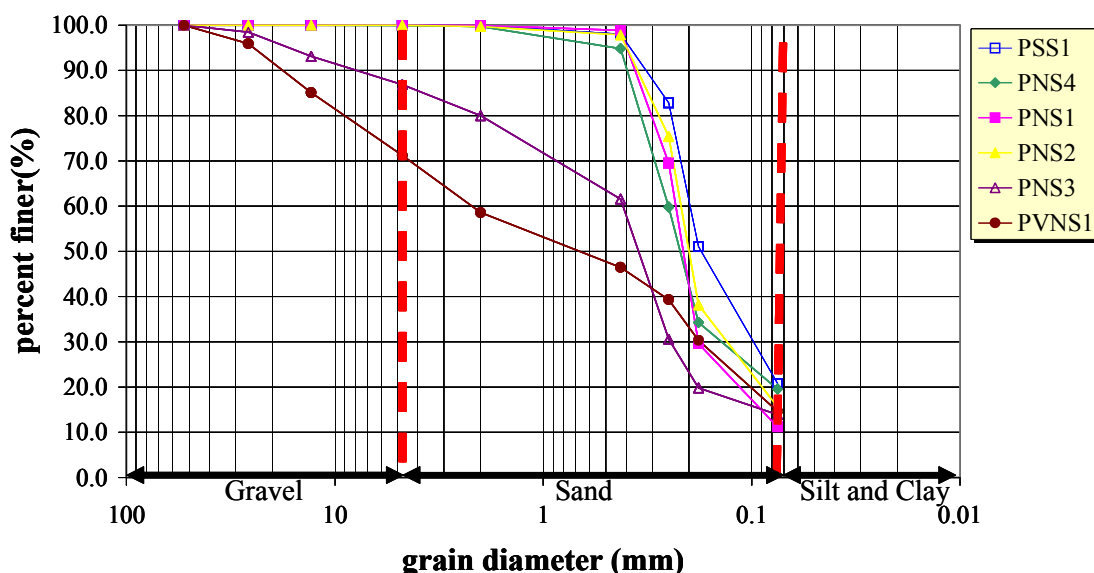
היחידה החשודה כיחידה הנכשלת, חשופה בשלוחה הצפונית לגלישה (חתך 5, גבעון 1984). חול צהוב-אפרפר. הקרקע מוגדרת כ-SM : חול סילטי. החומר אינו פלסטי (non-plastic).

יחידה PVNS1

יחידת חול אדמדמה שנדגמה מהשלוחה הצפונית (חתך 5, גבעון, 1984). לאחר ניפוי בנפה #200 נשארו צבירי גרגרים, שככל הנראה הליכוד שלהם חזק מן הרגיל, ולכן הם טופלו כגודל בפני עצמו. הקרקע מוגדרת כ-SP-SM: חול סילטי מדורג גרוע. החומר אינו פלסטי (non-plastic).

כל היחידות שנבדקו הינן יחידות חוליות, בעלות פלסטיות נמוכה מאוד, רובן ממוינות היטב. כל היחידות מכילות כ- 20% של חומר דק בלבד, עובדה המשפיעה על הפלסטיות הנמוכה של הדוגמאות. לשם השוואה, חול מוגדר כגודל גרגר שבין 5 מ"מ ל- 0.074 מ"מ, הגבול התחום בקווים אדומים בתרשים 4-19. ניתן לראות שרובן הגדול של היחידות אכן מראות ריכוז גבוה של גודל גרגר באזור של חול, ולכן מאופיינות כחול. סילט וחרסיות מוגדרים כגודל גרגר הקטן מ-0.074 מ"מ, אך לא ניתן להבחין בגודל זה בבדיקות אלו, שכן החומר לא מנופה דרך נפה הדקה מ-0.074 מ"מ.

Soil classification



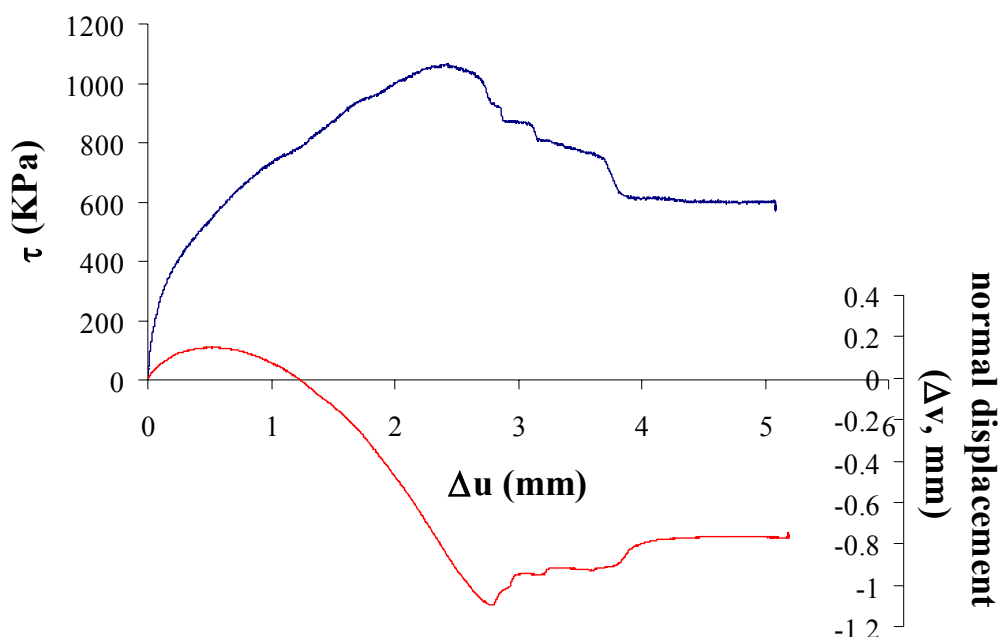
תרשים 4-19: גרף דירוג קרקעות עבור דגימת היחידות מאזור העבודה. קווים אדומים תוחמים את האזור בו גודל הגרגר מוגדר כחול.

4.4.1.2 הערכת החוזק לגזירה

בוצעו שש בדיקות גזירה בסלעים שנדגמו מהיחידה PSS1, שהיא יחידת אבן חול (תרשים 1-3).

כל הבדיקות בוצעו על חומר יבש לחלוטין, כלומר במצב מנוקז.

התוצאות מוצגות במספר אופנים. בתרשים 4-20 העקומה הכחולה מציגה את מאמץ הגזירה כנגד תזוזת הדגם (shear stress-shear displacement) עבור אחת הבדיקות שבוצעו. ניתן לראות שבשלב ראשון עולה מאמץ הגזירה באופן שאינו ליניארי עקב "התארגנות" המערכת וסגירת חופשים. בהמשך עולה המאמץ בצורה ליניארית (התנהגות אלסטית של הסלע) עד להגעה לערך חוזק מרבי, ואחרי התרחשות הכשל יורד מאמץ הגזירה לערך חוזק שיורי, הנשאר קבוע עד להפסקת התזוזה. חוזק שיורי מוגדר כחוזק החומר לאחר שנכשל.



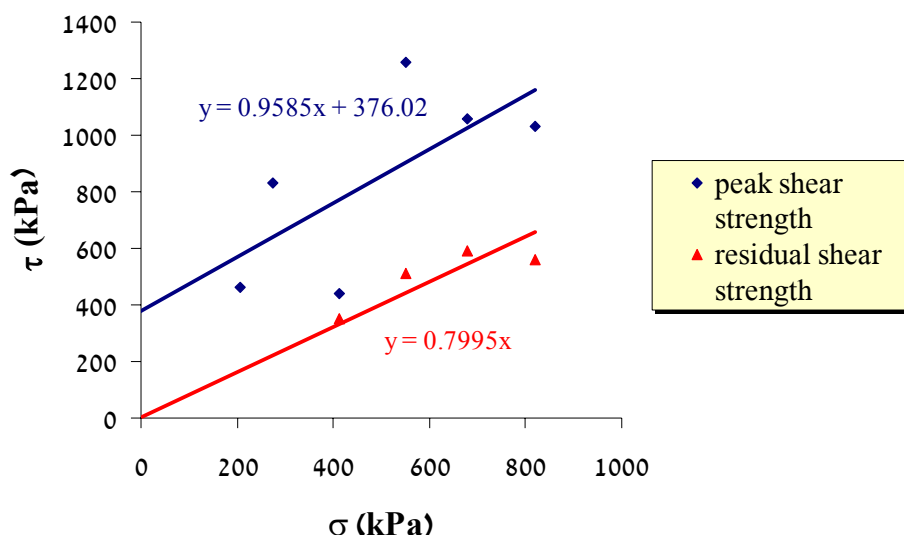
תרשים 4-20: גרף מאמץ הגזירה כנגד התזוזה של דגם PSS1-6 בבדיקת גזירה ישירה (עקומה כחולה וציר y שמאלי), וגרף תפיחה ממוצעת של הדגם בבדיקה (עקומה אדומה וציר y ימני). עבור עקומת מאמץ הגזירה (עקומה כחולה), תוך כדי העלייה לערך מרבי הדגם מגיב אלסטית (מקטע ליניארי), מגיע לערך מרבי ואז מאמץ הגזירה יורד לערך שיורי בו הוא נשאר. הגזירה מתבצעת לאחר כ-2.5 מ"מ, והגעה לערך שיורי לאחר כ-4 מ"מ. קצב הגזירה: 0.0254 מ"מ לשנייה. עבור עקומת התפיחה (עקומה אדומה), ערכים חיוביים מציינים התקצרות, ושילילים תפיחה. בתחילה הדגם מתכווץ תחת הלחיצה, אך לאחר כמ"מ וחצי של תזוזה הדגם מתחיל לתפוח. גרף התפיחה מהווה כמעט תמונת ראי של גרף המאמץ.

בזמן גזירת הדגם, הנפח שלו גדל בשל פתיחת סדק לרוחבו. הגדלת נפח זו, הנקראת "תפיחה"

(dilation), באה לידי ביטוי בהתארכות המדידים האנכיים. התארכות מבוטאת במספרים שליליים, וגרף

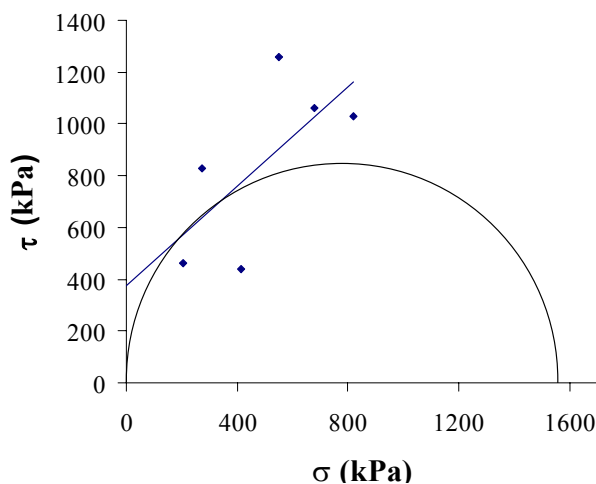
תפיחה של בדיקה של דגם PSS1-6 מוצג בעקומה אדומה בתרשים 4-20.

בין תכונות הסלע אותן מחשבים מבדיקות אלו נמצא החוזק לגזירה של הסלע. אם נניח שקריטריון הכשל של Coulomb-Mohr תקף, אזי חוזק הגזירה ניתן לביטוי על ידי הקוהזיה וזווית החיכוך הפנימי של החומר. כל בדיקה נותנת נקודה אחת על גרף החוזק המרבי של הסלע, ונקודה אחת על גרף החוזק השיורי. השגיאה בתוצאות אלו נובעת מן השגיאה בליניאריות של המדידים, והיא 0.25% לכל טווח התזוזות והעומסים. לאחר מספר בדיקות ניתן להעביר קו רגרסיה ליניארית בין תוצאות שש הבדיקות, ולקבל את הקוהזיה של הסלע, וזווית החיכוך הפנימי מתוך משוואת קו הרגרסיה. קו הרגרסיה מהווה למעשה את קריטריון הכשל, בהנחה שקריטריון קולומב-מוהר תקף. בתרשים 4-21 מוצגות תוצאות שש הבדיקות. זווית החיכוך המתקבלת עבור החוזק המרבי היא 43° , וקוהזיה של 376 קילו-פסקל. מקדם ההתאמה של הרגרסיה הליניארית כ-0.5, אינו אידיאלי, ונובע מהניסיון להתאים את קריטריון קולומב מוהר הליניארי לתוצאות הניסיוניות. הפרמטרים עבור החוזק השיורי מתקבלים מארבע נקודות בלבד, שכן בשתי בדיקות הדגם לא נגזר מרחק מספיק להגעה לחוזק שיורי. קו הרגרסיה עבור החוזק השיורי אולץ לעבור דרך ראשית הצירים, שכן ההנחה היא שלאחר שהסלע נגזר המשך התזוזה יהיה על ממשק אי-הרציפות שנוצר, והממשק מחוסר קוהזיה. זווית החיכוך שהתקבלה עבור הממשק (החוזק השיורי) הינה 38° .



תרשים 4-21: קריטריון הכשל של Coulomb-Mohr עבור יחידת המיפוי PSS1, החשודה כיחידה שכשלה בגלישה. בכחול: חוזק הגזירה המרבי של הסלע; באדום: חוזק הגזירה השירוי.

מתוך הצגה זו ניתן להעריך גם את חוזק הלחיצה החד-צירי של הסלע: חוזק זה ייוצג על ידי נקודת החיתוך של חצי מעגל שמשיק לעקומת החוזק המרבי עם ציר ה- x , ונקודת החיתוך השנייה שלו היא ראשית הצירים (תרשים 4-22). חוזק הלחיצה החד-צירי עבור סלע זה הוא כ-1600 קילו-פסקל. לשם השוואה, חוזק הלחיצה החד-צירי של הקרקעות הלסיות באזור רפיח הוא בממוצע 1.5 מגה-פסקל (חצור וגבירצמן, 2004). סלע חזק מאוד, כגון הדולומיט במצדה, הוא מעל 315 מגה-פסקל (Hatzor et al., 2004).



תרשים 4-22: מציאת חוזק הלחיצה החד-צירי של הסלע. חוזק הלחיצה מוגדר כנקודת החיתוך עם ציר ה- x (כאשר $\sigma \neq 0$) של המעגל המשיק לקריטריון הכשל של קולומב-מוהר, שהוא העקומה המאפיינת את חוזק הסלע, ונקודת החיתוך השנייה שלו עם ציר המאמץ הנורמלי היא ראשית הצירים.

4.4.2 ניתוח לאחר של כשל המדרון באמצעות תכנת SLOPE/W

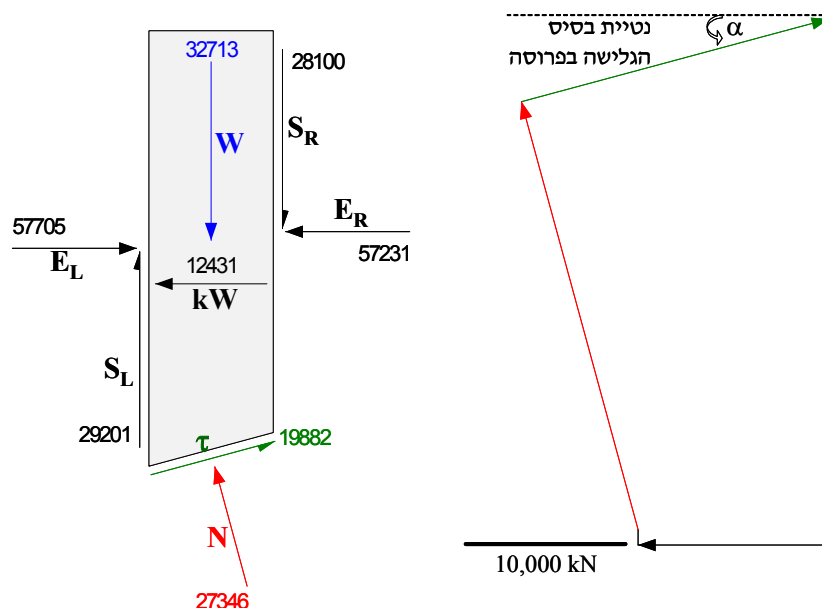
תכנת SLOPE/W מאפשרת ניתוח יציבות דו-ממדי של בעיה מוגדרת לאחר שהוזנו הגיאומטריה, תכונות החומר, גובה פני מי התהום ועוד. הזנת הגיאומטריה נעשתה על-פי מפת 1:50,000, תכונות החומר נקבעו במעבדה כפי שפורט בסעיף הקודם, פני מי התהום נקבעו מתוך מיקום מעיינות וחוף הכנרת, ומשטח הכשל נקבע על-פי תצפיות. תהליך הזנת הנתונים מתואר ביתר פירוט בפרק 3.3 של שיטות המחקר.

מודל המדרון מורכב משני חומרים (תרשים 3-7): בחלק העליון של החתך הוגדר חומר אחד כ"בלתי חדיר", כלומר משטח הגלישה לא יכול לעבור דרכו. חומר זה מייצג את בזלת הכיסוי, שעל פי ההערכה ותצפיות השדה משטח הגלישה לא עבר דרכה. החומר השני הוגדר על פי תכונות החומר של אופק PSS1 בתצורת עין גב, שכבר צוין כחומר החשוד שכשל. אמנם החתך בשטח מורכב יותר, והוא מכיל שלושה אופקי גיר בעובי של כחצי מטר כל אחד, אך בבדיקת רגישות התוצאות בתכנת ה- SLOPE/W להימצאותם של אופקים אלו עלה כי השפעתם זניחה, אך נוכחותם מסבכת את המודל, עקב כך הוחלט לוותר על אופקים אלו בבניית המודל.

4.4.2.1 הערכת PGA

כפי שצוין בפרק 2.1.2, על-פי שיטת הפרוסות חולקה המסה הכושלת במדרון ל-33 פרוסות שכל אחת מהן טופלה כיחידה בפני עצמה (תרשים 2-4).

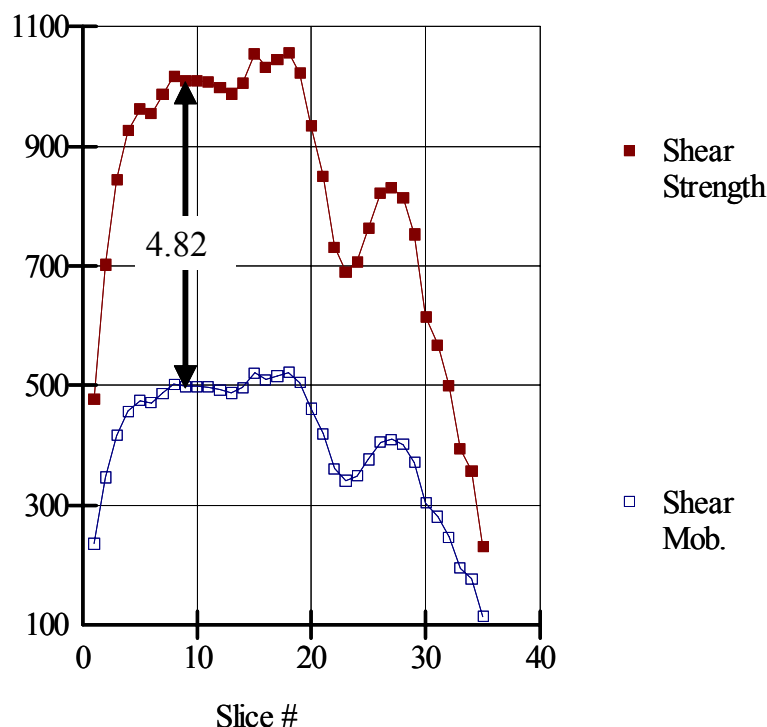
לאחר פתרון הבעיה על ידי התכנה וחישוב מקדם הביטחון, ניתן לקבל את פירוט הכוחות הפועלים על כל פרוסה, ואת פוליגון הכוחות. מידת הסגירות של פוליגון הכוחות (כלומר האם הפוליגון סגור לחלוטין, או שהוא נותר פתוח לאחר הבאה בחשבון של הכוחות כולם) מעידה על מידת הגעה לשיווי משקל של כוחות. בתרשים 4-23 ניתן לראות לדוגמא את פרוסה מספר 19, ופירוט הכוחות הפועלים עליה. המספרים המופיעים ליד החיצים הם ביחידות של קילו- ניוטון. ניתן לראות שפוליגון הכוחות סגור לחלוטין, וזאת בשל הבחירה בשיטת Morgenstern-Price.



תרשים 4-23: פירוט הכוחות הפועלים על פרוסה מספר 19. משמאל: הכוחות הפועלים על הפרוסה. סימנים מוסכמים: W – משקל הפרוסה; kW – כוח פסיאודוסטטי; ER, EL – כוחות נורמליים בין-פרוסתיים שמאלי וימני, בהתאמה; SR, SL – כוחות גזירה בין-פרוסתיים שמאלי וימני, בהתאמה; N – כוח נורמלי בבסיס הפרוסה, מביא בחשבון לחץ מי נקבים אם יש; τ – כוח גזירה בבסיס הפרוסה. כל הכוחות בקילו- ניוטון. מימין: פוליגון הכוחות.

4.4.2.1.1 אנליזה סטטית

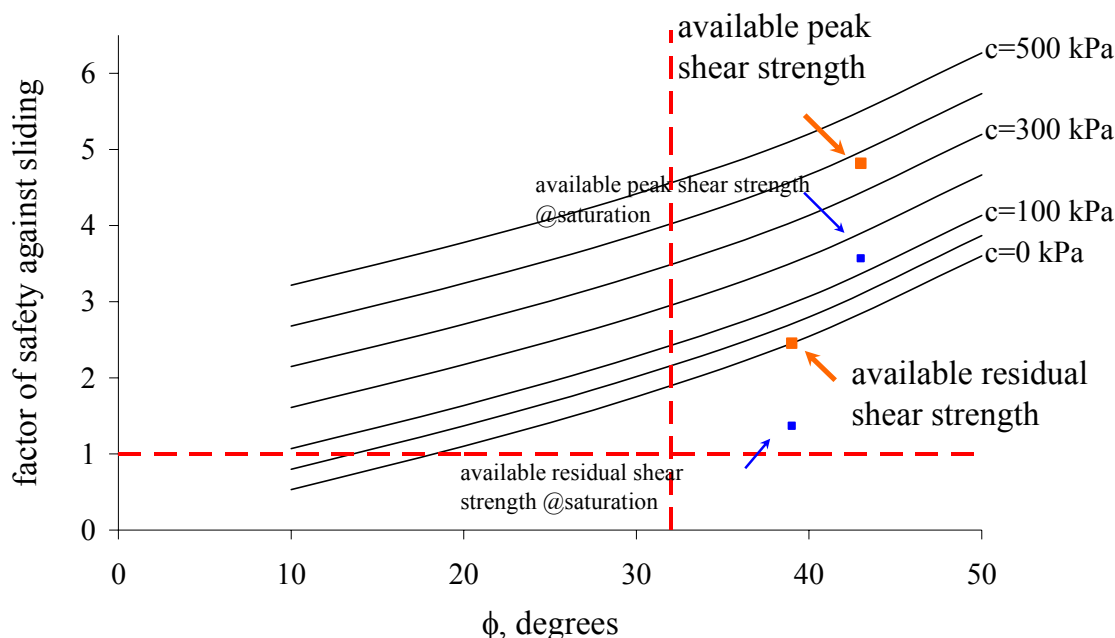
מקדם הביטחון שנמצא עבור כשל במצב סטטי, כלומר ללא השפעה של תאוצה סייסמית, הוא 4.82. בתרשים 4-24 ניתן לראות את ההתנגדות לגזירה כנגד מס' פרוסה. התוכנה קובעת מקדם ביטחון זהה עבור כל הפרוסות, והיחס בין נקודות מתאימות על שתי העקומות הוא בדיוק מקדם הביטחון שנקבע. מקדם ביטחון של 4.82 הוא גבוה מאוד, ומעיד על כך שבתנאים סטטיים המדרון רחוק מאוד מחוסר יציבות.



תרשים 4-24: מאמץ הגזירה המייצב ומאמץ הגזירה המניע (ב-kPa) כנגד מספר הפרוסה. לכל הפרוסות נקבע מקדם ביטחון זהה, ולכן היחס בין מאמץ הגזירה המייצב לזה המניע הוא קבוע, וערכו הוא מקדם הביטחון. במקרה המוצג בתרשים זה מאמץ הגזירה המייצב גבוה מזה המניע, ולכן המסה יציבה.

בכדי לבדוק את הנחת העבודה כי הגלישה באזור אירעה כתוצאה מרעידת אדמה, נבדקה יציבותו של המדרון תחת צירופים שונים של זווית חיכוך וקוהזיה של החומר. התוצאות מוצגות בתרשים 4-25. האזור בגרף המוגדר כלא יציב (unsafe) הוא זה בו מקדם הביטחון נמוך מ-1. בתרשים 4-25 ניתן לראות שרוב העקומות נמצאות מעל קו מקדם הביטחון שערכו 1, ולכן נמצאות באזור היציב. אמנם במקרים המחמירים יותר, בהם הקוהזיה היא 0 או 50 קילו-פסקל, ערך מקדם הביטחון יורד מתחת ל-1, אך זה קורה בזוויות חיכוך של מתחת ל-20 מעלות, שהינן נמוכות מזוויות התנוחה של חול (32°). כלומר עבור החומר ממנו בנוי המדרון, אבן חול, גם ללא קוהזיה, זווית החיכוך היא לפחות 32° , כלומר החומר ימצא באזור הבטוח. מכאן נובע שבמצב סטטי, אפילו כאשר לחומר נותר חוזק שיורי בלבד (ריבוע גדול נמוך בתרשים 4-25): קוהזיה 0 וזווית חיכוך של 38° , כפי שנתקבלו בבדיקות המעבדה, המדרון יציב. כדי לבסס את טענת היציבות הסטטית ביתר שאת, בוצעו אנליזות סטטיות עבור מצב בו המדרון רווי לחלוטין, כלומר מפלס מי התהום מגיע לפני השטח (זאת בהנחה שמצב הרוויה של החומר לא שינה את הקוהזיה וזווית החיכוך הפנימי שלו). תוצאות אנליזות אלו

מסומנות בתרשים 4-25 בריבועים קטנים עבור חוזק מרבי ושיורי. ניתן לראות בבירור שגם עבור מצב זה, המדמה מצב בו כמות המשקעים גדולה יותר מזו שבהווה, ו/או עליה משמעותית של מפלס הכנרת, המדרון עדיין יציב במצב סטטי. תוצאות אלו תומכות במסקנה שהגלישה אכן הונעה תחת תנאים שאינם סטטיים, כלומר כתוצאה מהרעדת הקרקע ברעידת אדמה.



תרשים 4-25: יציבות סטטית של המדרון במודל, תחת צירופים שונים של קוהזיה וזווית חיכוך. קו מקווקו אופקי: קו שווי המשקל הגבולי ($FOS = 1$). קו מקווקו אנכי: קו 32° (זווית תנוחה של חול מפוזר). ריבועים גדולים: תוצאות אנליזות היציבות עבור פרמטרי החוזק המרבי והשיורי שנמצאו בבדיקות המעבדה. ריבועים קטנים: תוצאות אנליזות היציבות עבור פרמטרי החוזק המרבי והשיורי שנמצאו בבדיקות המעבדה, במקרה בו מפלס מי התהום עובר בפני השטח, כלומר רוויה של המדרון.

4.4.2.1.2 אנליזה פסיאודוסטטית

ההבדל בין אנליזה סטטית לפסיאודוסטטית הוא שבאחרונה מתווספים שני כוחות למערכת הכוחות הפועלים על המסה: כוח אופקי וכוח אנכי המייצגים כוחות אינרציה של רעידת אדמה. כוחות אלו מחושבים כך:

$$F_h = \frac{a_h W}{g} = k_h W$$

$$F_v = \frac{a_v W}{g} = k_v W$$

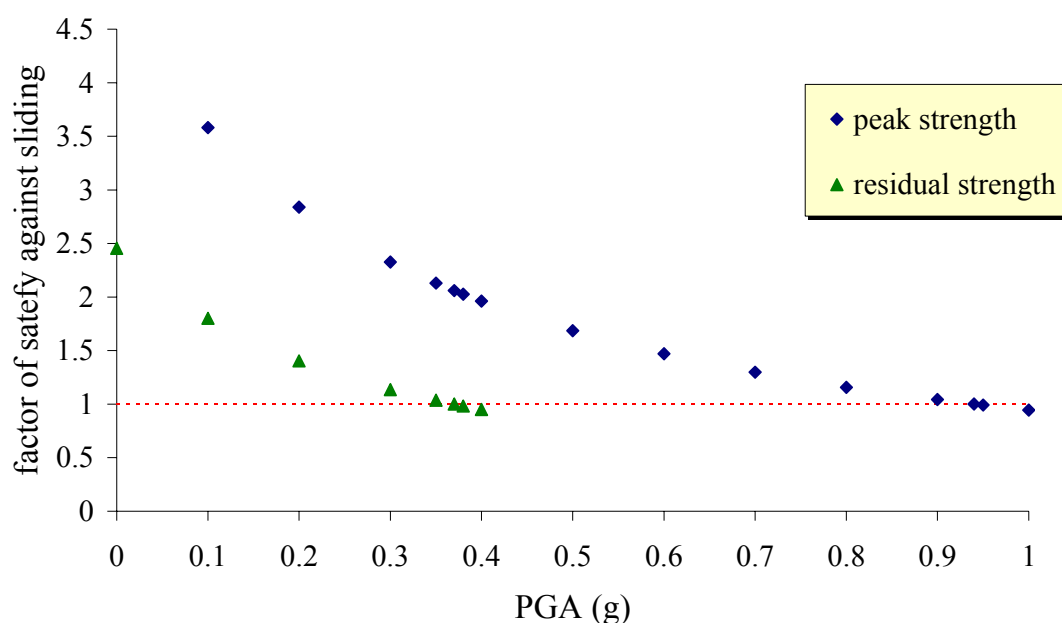
משוואה 1-4

כאשר a_h ו- a_v הן התאוצות הפסיאודוסטטיות האופקית והאנכית בהתאמה, g הוא תאוצת הכובד ו- W הוא משקל הפרוסה. הכוחות הפסיאודוסטטים מתווספים ככוחות המנומרים למשקל הפרוסה, והם נקבעים על ידי קביעת המקדם k . למקדם האנכי k_v יש השפעה מועטה על מקדם הביטחון, שכן הוא אמנם מגדיל את משקל הפרוסה, שהוא הכוח המניע, אך הוא גם מגדיל את כוח החיכוך, שהוא הכוח המייצב (Krahn, 2004).

בשל כך מקדם הכוח הפסיאודוסטטי האנכי בכל האנליזות יהיה 0.0 (Skempton and Petley 1967) מראים בעבודתם כי לאורך מישורי אי-רציפות כגון משטחי גלישות קרקע, חוזק הגזירה מגיע לערך שיורי כבר לאחר תזוזה קטנה מאוד של המדרון, ועל כן האנליזות הפסיאודוסטטיות בוצעו על המדרון כאשר החומר הוא בעל חוזק גזירה מרבי (peak shear strength), וכן כאשר הוא בעל חוזק גזירה שיורי (residual shear strength).

תוצאות האנליזות הפסיאודוסטטיות עבור חוזק מרבי ושיורי מוצגות בתרשים 4-26.

בתרשים 4-26 ניתן לראות כשל בתאוצה אופקית של 0.94 g , כאשר החוזק הוא המרבי. ערכים אלו הם ערכי תאוצה אופקית גבוהים מאוד, אך יש לזכור שבשל אילוצים של בדיקות המעבדה, תכונות החומר הבונה את המדרון באנליזות אלו (הסטטיות והפסיאודוסטטיות) נמצאו **במצב יבש**. כאשר לחומר יש תכולת רטיבות גבוהה יותר, הוא מאבד מהחוזק שלו עקב היחלשות מגעים ויחסי דחייה, ולכן חוזק הגזירה יורד – כלומר תאוצת הקרקע שתידרש להניע את המסה תהיה נמוכה יותר. תחת חוזק שיורי המדרון כושל בתאוצת קרקע נמוכה בהרבה – 0.37 g , ערך קרוב לערך המוצג כיום במפת התאוצות לתקן הבניה 413 (תרשים 5-2) – 0.3 g .



תרשים 4-26: תוצאות אנליזות יציבות פסיאודוסטטית. מעוינים: מקדם ביטחון עבור חוזק מרבי; משולשים: מקדם ביטחון עבור חוזק שיורי; קו מקווקו – קו שווי המשקל הגבולי.

אמנם בכדי להניע את המסה כולה בפעם הראשונה יש צורך בתאוצת קרקע גבוהה מאוד, אך היא יכולה להתקיים זמן קצר מאוד בכדי להניע את המסה מרחק קטן, להביא את חוזק הגזירה לאורך מישור הכשל לערך שיורי, והמשך התנועה על אותו משטח כשל כבר יתקיים בתנאים שיוריים. כמו כן - ההגעה לערך חוזק שיורי לא חייבת להתרחש בהכרח באותו אירוע – יתכן כי אירוע סייסמי בהיסטורית המדרון הביא אותו לחוזק שיורי, ואירוע אחר גרם לכשל כולל של המדרון. כפי שניתן ללמוד מממצאי התעלה שנחפרה על

הגלישה, הגלישה מורכבת ממספר אירועים שאינם בו-זמניים של תנועת חומר במורד המדרון. כמו כן נצפו באזור העבודה מספר צלקות על גבי הגלישה, שיתכן ומעידות על גלישות במספר מחזורים. ממצאים אלו מחזקים את הטענה שיתכן שהחומר אכן כשל תחת תנאים שיוריים.

4.5 תוצאות ניתוח נפילת העמודים בסוסיתא

סימולציה נומרית של נדנוד העמוד בסוסיתא על פי המודל שהוצג בפרק 3.4.3.3 נעשתה בשני אופנים; האחד על-ידי הזנה של תאוצה בצורת כוח נקודתי במרכז המסה של העמוד, בדומה לפתרון האנליטי שהוצג בפרק 3.4.3.1; השני על-ידי הזנת רשומה של תאוצות קרקע ברעידת אדמה אמיתית, אל מרכזי המסה של כל אחד מן הבלוקים במערכת. במצב זה העמוד ובסיסו אינם מקובעים, לכן שניהם מסוגלים להגיב לתאוצות שמופעלות עליהם. כיוון נוסף למחקר המשך בנושא זה יהיה להניע את ה"קרקע" במודל בעזרת רשומה של תזוזות ברעידת אדמה, וזהו למעשה יהיה המצב המדמה בצורה הקרובה ביותר את המציאות.

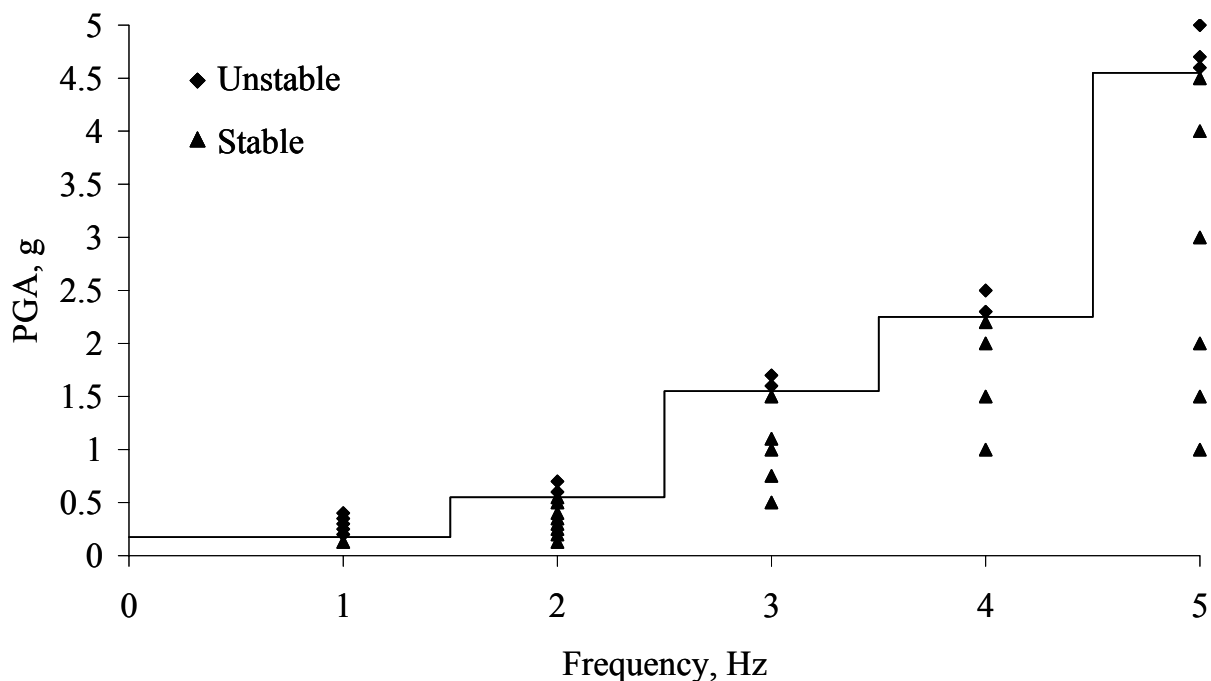
4.5.1 תוצאות אנליזה דינמית של הזנת תאוצה תלוית זמן במרכז העמוד

תאוצה הוזנה במרכז הכובד של העמוד כפונקציית סינוס, פעם כפונקציה של מחזור אחד של סינוס ופעם כפונקציה של שלושה מחזורי סינוס. בסימולציות השונות שונו תדירויות הפונקציות בטווח שבין הרץ אחד לחמישה הרץ. תוצאות הסימולציות מוצגות בתרשים 4-27 עבור מחזור סינוס אחד ובתרשים 4-28 עבור שלושה מחזורי סינוס.

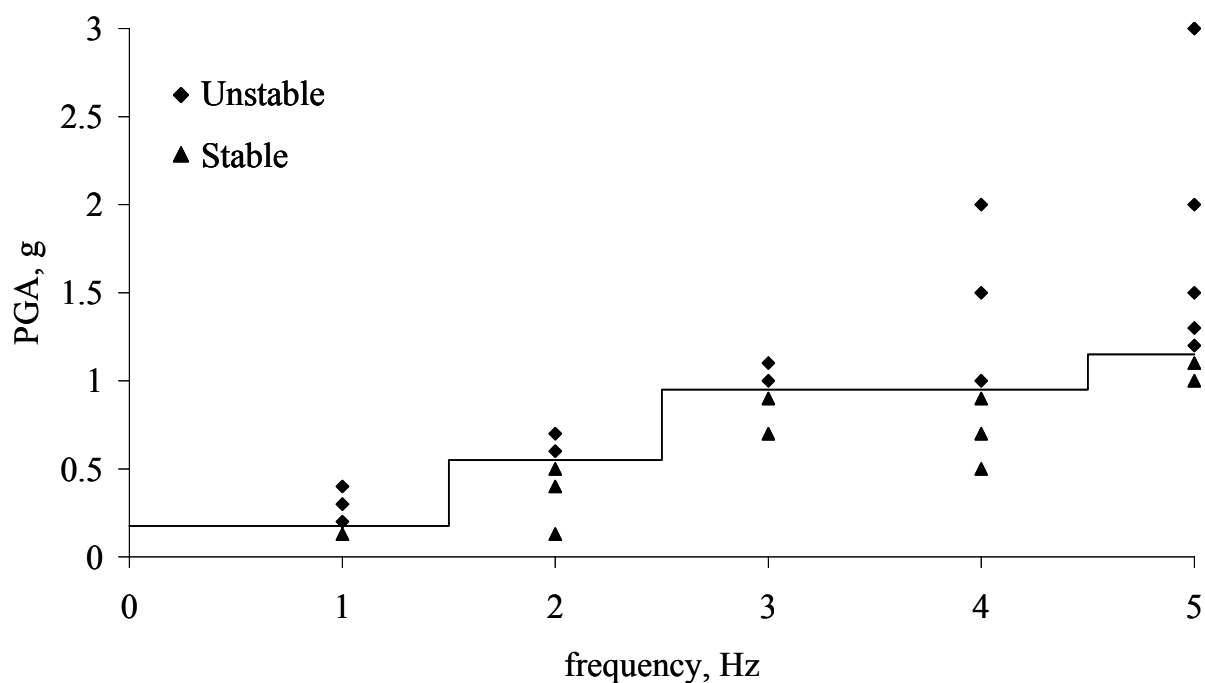
בתרשים 4-27, המתאר את תוצאות ההעמסה על-ידי מחזור סינוס אחד, ניתן לראות כי ה-PGA הדרוש להפלת העמוד תלוי מאוד בתדר התאוצה. ככל שתדר התאוצה גדל, כך גדלה גם תאוצת הקרקע המרבית הדרושה להפלת העמוד, עד לערכים לא ריאליים לאזור המחקר. כך למשל, בתדר של 1 הרץ דרושה תאוצה מרבית של $0.2 g$, ערך שהוא ריאלי לאזור המחקר ודומה לערך הצפוי ממפת התאוצות של תקן 413. בתדר של 2 הרץ, דרושה תאוצה מרבית של $0.6 g$, הגבוהה פי 2 מהערך הצפוי ממפת התאוצות. ערך זה אפשרי כאשר הגברות בשל הפרש גובה טופוגרפי חריף באזור סוסיתא, ובשל האינטראקציות בין המבנה לקרקע נלקחות בחשבון. לעומת זאת, בתדר של 5 הרץ תאוצת הקרקע המרבית הדרושה להפלת העמוד היא כ- $4.5 g$, שהיא גבוהה בהרבה מהתאוצה הצפויה ממפת התאוצות, ועל כן לא ריאלית.

גם בתרשים 4-28, המתאר את תוצאות ההעמסה על-ידי שלושה מחזורי סינוס, ניתן לראות תלות של ה-PGA בתדר התאוצה, אך התלות חלשה יותר. בתדרים הנמוכים של 1 ו-2 הרץ העמוד מתנהג כפי שהתנהג במקרה של העמסה במחזור אחד של סינוס, אך בתדרים הגבוהים יותר ניתן לראות שערך תאוצת הקרקע

המרבית המפילה את העמוד מתייצב פחות או יותר סביב הערך של 1 g , שהוא בוודאי ערך גבוה לאזור, אך יכול להיות ריאלי אם מדובר על הגברות משמעותיות.



תרשים 4-27: תוצאות אנליזות DDA עבור יציבות העמוד תחת מחזור העמסה של סינוס אחד. ככל שתדר ההעמסה גבוה יותר, אמפליטודת ההעמסה, או תאוצת הקרקע המרבית, הדרושה להפלת העמוד, גדלה.



תרשים 4-28: תוצאות אנליזות DDA עבור יציבות העמוד תחת העמסה של שלושה מחזורי סינוס. בתדרים הגבוהים מ-2 הרץ ישנה התייצבות על ערך תאוצה מרבית של כ- 1 g , הדרוש להפלת העמוד.

4.5.2 תוצאות אנליזה דינמית של הזנת רשומת רעידת אדמה

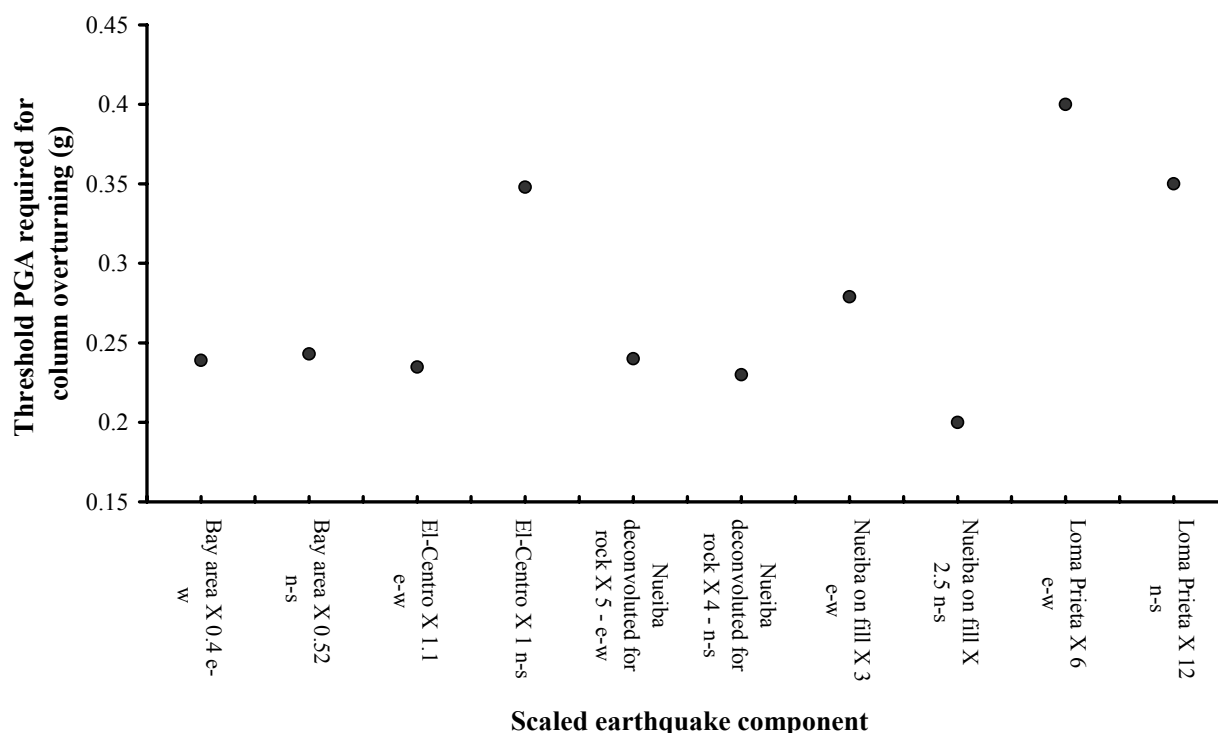
במקרה זה מוזנת רשומת תאוצות של רעידת אדמה אל מרכזי המסה של כל הבלוקים במרחב האנליזה (תרשים 3-16). כל הבלוקים מלבד העמוד ובסיסו קובעו, ולכן רק שני בלוקים אלו מסוגלים להגיב לתאוצות המופעלות עליהם. העמוד הורעד על-ידי חמש רעידות אדמה שונות, כאשר בכל אחת מן הרעידות הורעד העמוד פעם תחת הרכיב בכיוון צפון-דרום של התאוצה, ופעם תחת הרכיב בכיוון מזרח-מערב של התאוצה. בכל האנליזות העמוד הורעד גם תחת הרכיב האנכי של התאוצה. מנגנון התנועה של כל הרעידות הוא תנועה אופקית (strike-slip). פירוט הרעידות בהן נעשה שימוש מוצג בטבלה 4-1:

טבלה 4-1: רשומות רעידות האדמה ששימשו באנליזות ה-DDA.

רעידה	מגניטודה	מרחק תחנת המדידה מהמוקד (ק"מ)	רכיב	מקור
נואיבה, על מילוי (22.11.1995)	$M_w = 7.2$	כ- 60	0-180	Hofstetter et al. (2003)
			90-270	
נואיבה, אחרי דה קונבולוציה לסלע (22.11.1995)	$M_w = 7.2$	כ- 60	0-180	Zaslavsky and Shapira (2000)
			90-270	
,Loma Prieta נמדד ב- Yerba Buena (17.10.1989)	6.9	כ- 80	0-180	http://peer.berkeley.edu
			90-270	
רישום סינטטי של רעידת אדמה המתאימה להעתק הסן-אנדריאס, $M_w = 8$ ו- $M_w = 8$ PGA=0.7 g .	$M_w = 8$		0-180	Law and Lam (2003)
			90-270	
,Imperial Valley נמדד ב- El Centro	$M_L = 6.5$	11.6	0-180	http://peer.berkeley.edu
			90-270	

מטרת האנליזות הייתה למצוא את סף תאוצת הקרקע המרבית (PGA) בה נופל העמוד. לצורך כך לעתים היה צורך להגביר את הרעידה או להחלישה. הגברה או החלשה נעשתה על-ידי הכפלת כל ערכי התאוצות בסקלר. מכפלה זו שינתה את גודל התאוצות, אך לא שינתה את תכולת התדרים המקורית של הרעידה.

בתרשים 4-29 מוצגות תוצאות עשר האנליזות (חמש רעידות, שני רכיבים עבור כל רעידה). ניתן לראות כי על אף שמדובר ברשומות שונות שחלקן נמדדו על סלע וחלקן על מילוי, וכן מאזורים שונים בעולם, ובעלות תדרים דומיננטיים שונים, טווח סף תאוצות הקרקע המרביות הדרושות להפלת העמוד הינו מצומצם, ונע בין 0.2 g ל- 0.4 g. כזכור, תחזית ה-PGA בתקן הישראלי לבניה עבור אזור זה היא 0.3 g.



תרשים 4-29: תוצאות אנליזות DDA עבור הנעת העמוד על פי רשומות של רעידות אדמה. מוצג ערך התאוצה המרבית ברשומת הרעידה, כפונקציה של רכיב הרעידה וההגברה/החלשה שלו. יש לשים לב שאף כי מדובר בחמש רעידות שונות מאזורים שונים, הערכים מתכנסים לטווח בין 0.2 g ל- 0.4 g .

4.5.3 דיון בתוצאות

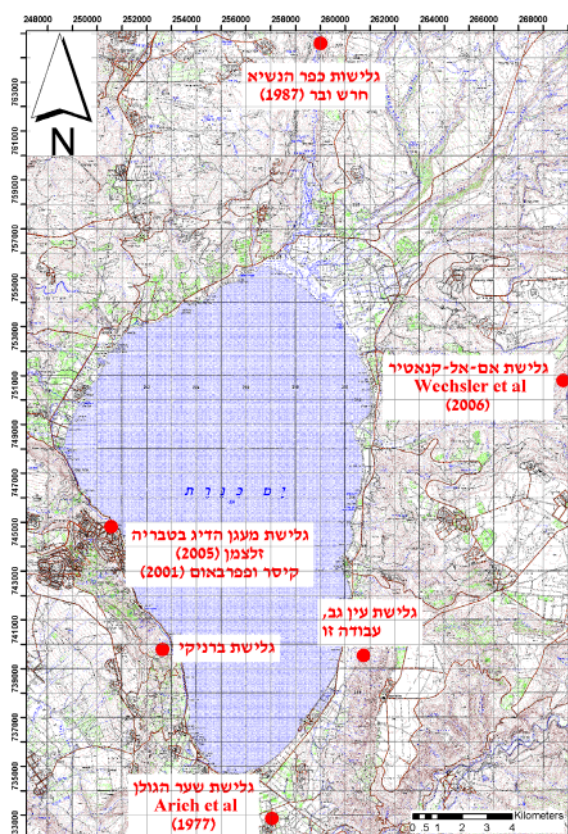
תוצאות האנליזות בהן הוזנה תאוצה בצורת סינוס במחזור אחד ובשלושה מחזורים מראות תלות גדולה בתדר התאוצה המוזנת. בהזנה של מחזור סינוס אחד טווח ה-PGA נע בין 0.2 g ל- 4.5 g , ואילו בהזנה של שלושה מחזורי סינוס נע הטווח בין 0.2 g לכ- 1 g . (Psycharis et al. (2000) טוענים כי בתדרים נמוכים מהרץ, ה-PGA הנחוץ להפלת העמוד אינו תלוי במספר מחזורי ההזנה, שכן העמוד ייפול במהלך המחזור הראשון, ולכן הזנה של מחזור סינוס אחד הינה מספקת. לעומת זאת, בתדרים הגבוהים מהרץ אחד, פונקציית הזנה של שלושה מחזורי סינוס מייצגת טוב יותר ערכי-סף של רעידות אדמה להפלת העמוד. התוצאות מראות כי בתדרים 1-2 הרץ הזנה של מחזור סינוס אחד ושלושה מחזורי סינוס נותנת תוצאות זהות, ולכן באופן כללי ניתן לאמץ את התוצאות שהתקבלו מהזנה של שלושה מחזורי סינוס. את טווח התוצאות ניתן היה לצמצם אילו ניתן היה למצוא תדר עצמי של מבנה העמוד. תדר עצמי, או תדר תהודה, הינו תדר בו תגובת המבנה היא החזקה ביותר, ולכן גם המסוכנת ביותר. ניתן להראות בדרך פשוטה כי למבנה העמוד בבעיה זו, עמוד חופשי (free-standing), לא קיים תדר עצמי. בתרשים 3-12 ניתן לראות תגובת עמוד לתאוצה של חצי סינוס. כפי שמוצג בחלק b של התרשים, כל גל הוא למעשה זמן חצי-מחזור של תנודה, ואפשר להבחין בזמני-חצאי המחזורים הולכים ומתקצרים ככל שהזמן מתקדם, בשל הריסון האנרגטי של התנועה. מכיוון שתדר הינו ההופכי של זמן מחזור, הרי שאם זמן המחזור מתקצר, התדר מתארך, ולכן אינו קבוע במהלך האנליזה. כמו

כן זמן חצי המחזור הראשון תלוי בחוזק התאוצה המופעלת, ועל כן גם התדר הראשון בתנועה אינו קבוע. הוכחה מתמטית לכך שזמן המחזור אינו קבוע מופיעה בנספח ב.

טווח ה-PGA שנמצא על-ידי הזנת רישומי תאוצות של רעידות אדמה במרכזי המסה של כל הבלוקים, בין 0.2 g ל- 0.4 g , מצומצם בהרבה מן הטווח המתקבל מהזנת רישומי תאוצות של פונקציות סינוס. תוצאה זו מתקבלת ככל הנראה בשל העובדה כי ברשומת תאוצות של רעידת אדמה אמיתית מוזנת גם תאוצה אנכית המשפיעה על העמוד, וכן בשל העובדה שרשומה סייסמית מכילה טווח תדרים גדול. התוצאות המתקבלות באנליזות אלו הן ריאליות יותר, ואף קרובות בערכן לערך שצופה התקן הישראלי 413 – 0.3 g . על כן כתוצאות מהימנות של פרק זה נלקח טווח ה-PGA שנמצא על-ידי הזנת רישומים סייסמיים אמיתיים.

5. דיון

אזור המחקר נמצא בבקע ים המלח שהוא גבול לוחות טקטוניים פעיל ואשר מתרחשות לאורכו רעידות אדמה באופן תדיר. חלק מתוצאות רעידות אלו הם כשלים שנגרמים למבנים טבעיים ומעשה ידי אדם. מספר גלישות קרקע נצפו מסביב לכנרת, מלבד הגלישות שזוהו בעבודה זו (תרשים 5-1); חרש ובר (1987) זיהו מספר גלישות קרקע משני עבריו של ערוץ הירדן, מצפון לכנרת באזור כפר הנשיא, וייחסו אותן לרעידות אדמה; (Arieh et al. (1977 דיווחו על גלישות קרקע בתצורת הליסאן בשער הגולן, בנהריים ובנווה אור מדרום לכנרת, שאירעו עקב רעידת אדמה $M = 4.5$ בשנת 1973; (Wechsler et al. (2006, זיהו גלישת קרקע באתר הארכיאולוגי אום-אל-קנאטיר ברמת הגולן, שגרמה להסטת מבנה ונגרמה ככל הנראה על-ידי רעידת האדמה של שנת 749; באזור מעגן הדיג בטבריה ישנה גלישה גדולה (קיסר ופפרבאום, 2001; זלצמן, 2005); במערב הכנרת, באזור חוף ברניקי, מצפון לכביש העולה לפורייה זוהתה גלישת קרקע גדולה; בעבודה זו זוהו במזרח הכנרת שתי גלישות. הגורם לחלק מגלישות אלו זוהו בוודאות כגורם סייסמי. הגלישה שנחקרה בעבודה זו הוכחה כיציבה סטטית, זאת אפילו תחת תנאים מחמירים של מפלס כנרת ומפלס מי תהום קדומים גבוהים, ולכן כפי הנראה הכשל ביציבות מדרון זה נגרם כתוצאה מרעידת אדמה. הבנת המנגנון המניע גלישות אלו יכולה לשפוך אור על מאפייני רעידות האדמה הצפויות באזור, למשל קביעת ערכי PGA וזמני חזרה, ולשפר את המוכנות לרעידות אדמה עתידיות באזור זה.



תרשים 5-1: מפת מיקום גלישות קרקע סביב הכנרת.

5.1 תאוצת קרקע צפויה באזור המחקר

תאוצת הקרקע הצפויה באזור המחקר על-פי התקן הישראלי לבניה 413 היא כ- 0.3 g . ערך זה מחושב על-ידי הפעלת מודל ניחות שמקורו בקליפורניה (פירוט בפרק 2.5). מלבד הערך הצפוי על ידי מפת תאוצות התקן, נעשו באזור הכנרת מספר עבודות המנתחות כשלי מדרון לצורך מציאת התאוצות שגרמו לכשל. חרש ובר (1987) מצאו כי תאוצת הקרקע האופקית שהייתה דרושה להנעת שתי גלישות קרקע בערוץ הירדן באזור כפר הנשיא היא $0.2\text{--}0.3 \text{ g}$. עבודה נוספת נעשתה באזור על-ידי Wechsler et al. (2006) בהריסות האתר "אם-הקשתות" (אום- אל- קנאטיר) בסמוך ליישוב נטור ברמת הגולן, מרחק של כ-10 ק"מ מן הבקע. באתר זה, שהוקם במאה השישית לספירה, חרבו היישוב ובית הכנסת ברעידת אדמה, ודפנות בריכה ששמשה לתעשיית אריגים הוסטו בשיעור של מטר אחד. מכיוון שלא התגלה העתק במקום, ההערכה של Wechsler et al. (2006) היא שהבריכה הוסטה על-ידי גלישת קרקע. בניתוח פסיאודוסטטי לאחר של גלישה זו הוערכה תאוצת הקרקע האופקית הנדרשת להנעת הגלישה בערך ממוצע של 0.47 g .

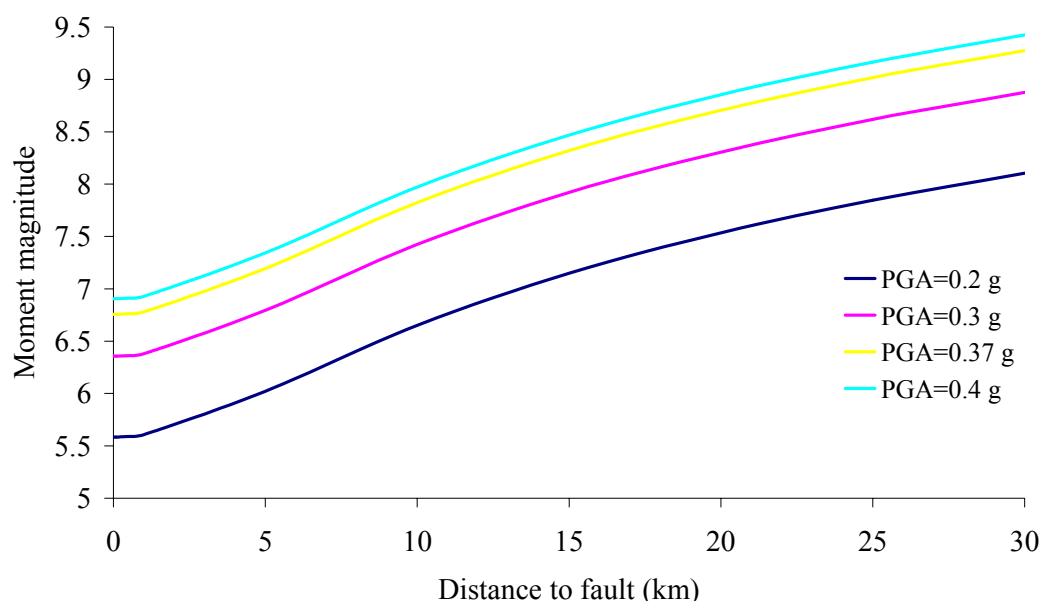
בעבודה זו נעשה ניסיון למצוא את ערך התאוצה האופקית המרבית הצפויה באזור על-ידי ניתוח לאחר של גלישה עתיקה במורדות המזרחיים של הכנרת, ושל כשל עמודים באתר הארכיאולוגי בסוסיתא, המצוי כשלושה ק"מ צפונית לגלישה. התוצאות שהתקבלו מניתוחים אלו הן בלתי תלויות האחת בשנייה. תאוצת הקרקע האופקית המרבית שנמצאה על-ידי ניתוח לאחר של הגלישה הגדולה היא 0.37 g . תאוצה זו נמצאה מתוך חישוב פסיאודוסטטי, כאשר החומר נמצא בחוזקו השיורי. תאוצת הקרקע האופקית המרבית שנמצאה על-ידי ניתוח לאחר של כשל העמודים בסוסיתא נעה בטווח בין 0.2 g ל- 0.4 g . תאוצה זו נמצאה מתוך חישוב דינמי מלא. יש לציין שערכים אלו עבור תאוצת הקרקע האופקית המרבית הינם ערכים מחושבים **לאחר עצמו**. אם ישנן הגברות הנובעות מטופוגרפיה או אינטראקציה בין קרקע/סלע למבנה, הן לא נלקחו בחשבון, ועל כן יתכן וערכים אלו המצוינים כאן הינם מחמירים ושמרניים.

5.2 הערכת עצמת רעידות אדמה באזור

על-פי תאוצות הקרקע המרביות שנמצאו בניתוח לאחר של שני הכשלים שנצפו באזור העבודה, נערך ניסיון להעריך את עוצמת רעידות האדמה הצפויות באזור. ישנם קשרים אמפיריים רבים הקושרים פרמטרים שונים של רעידות אדמה (למשל, Wells and Coppersmith, 1994). משוואות ניחות רבות קושרות את תאוצת הקרקע המרבית עם מגניטודת הרעידה והמרחק אל המוקד/ההעתק (למשל, Boore et al., 1997). משוואות ניחות המתאימות לישראל עדיין לא קיימות (ניסיון חלוצי לפיתוח מודל ניחות ישראלי נעשה על-ידי Meirova, 2007), ולכן אומצו משוואות ניחות המתאימות לאזורים שהסייסמיות שלהם או מנגנון הרעידות

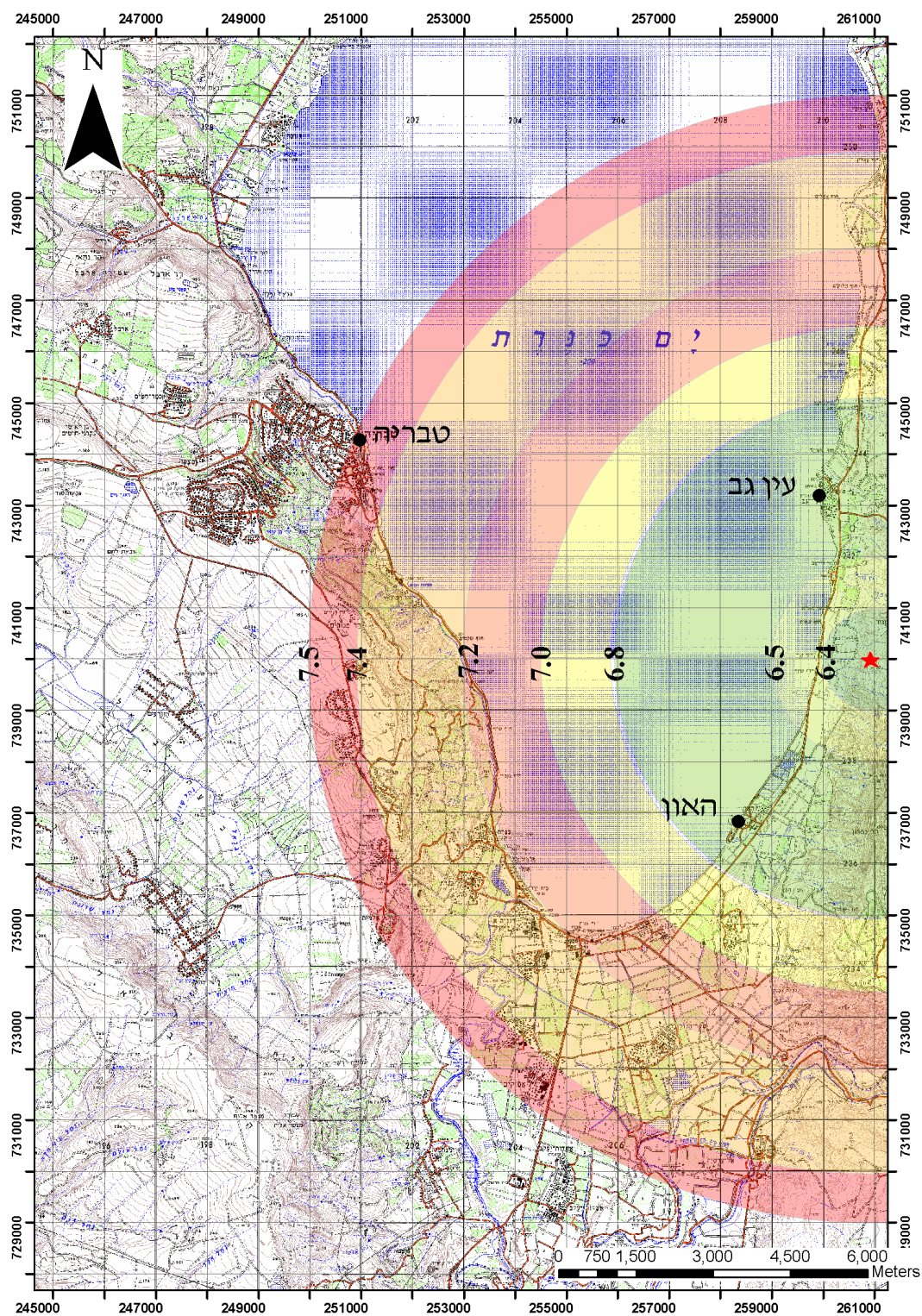
שלהם דומה. ניסיון ההערכה של עוצמות רעידות האדמה בעבודה זו יעשה בשתי דרכים: באמצעות משוואת ניחות, ובשיטת Newmark.

משוואת הניחות של Boore et al. (1997) מתאימה לאזור העתק הסן-אנדריאס במערב ארצות הברית, ובעזרתה חושבו התאוצות הצפויות בתקן הישראלי 413 (Leonov, 2002). פירוט המשוואה נמצא בפרק 2.5. בתרשים 5-2 ניתן לראות את קשר הניחות של Boore et al. (1997), לפי תאוצות הקרקע המרביות השונות שנמצאו בעבודה זו.



תרשים 5-2: קשר הניחות של Boore et al. (1997) עבור תאוצות הקרקע המרביות שנמצאו בעבודה זו. 0.2 g הוא הגבול התחתון של טווח תאוצות הקרקע שנמצאו באנליזה הדינמית, 0.4 g היא הגבול העליון של טווח זה, 0.37 g היא התאוצה שנמצאה באנליזה הפסיאודוסטטית עבור חוזק שיווי- 0.3 g היא הערך הממוצע.

על-פי משוואת הניחות של Boore et al. (1997), מגניטודת המומנט המזערית (כלומר במרחק אפסי ממוקד הרעידה) שגורמת לתאוצת קרקע מרבית של 0.2 g , ערך הקצה התחתון של הטווח שנמצא בעבודה זו, היא 5.5 . מגניטודת המומנט המזערית שתביא לתאוצת קרקע מרבית של 0.37 g , הערך שחושב באנליזה הפסיאודו-סטטית, היא 6.7 . מגניטודת המומנט המזערית שתביא לתאוצת קרקע מרבית של 0.4 g , ערך הקצה העליון בטווח הערכים שנמצא בעבודה זו, היא 6.9 . אם נבחר להתבונן למשל בערך התאוצה האופקית המרבית **הממוצע**, 0.3 g , אזי מגניטודת מומנט מזערית של 6.4 מתאימה. תוצאות אלו מראות שתאוצות הקרקע שגרמו לכשלים שנצפו נגרמו מרעידות אדמה חזקות, ככל הנראה במגניטודת מומנט של 6.5 ומעלה (בוודאי כתלות במרחק). חשוב לציין כי אם באתרים שנבדקו (הגלישה, סוסיתא) מתקיימים תנאי הגברה, אזי המגניטודות הנדרשות ליצירת הכשלים הינן נמוכות יותר. מפת קונטורים של רעידות במגניטודות שונות ובמרחקים שונים מהאזור שייצרו תאוצת קרקע של 0.3 g (ערך ממוצע) באזור המחקר על-פי המודל של Boore et al. (1997) מוצגת בתרשים 5-3.



תרשים 3-5: מפת קונטורים של מגניטודות שונות במרחקים שונים מהאזור, שייצרו תאוצת קרקע של $0.3 g$ באזור המחקר (מסומן בכוכב). על-פי מודל הניחות של Boore et al. (1997).

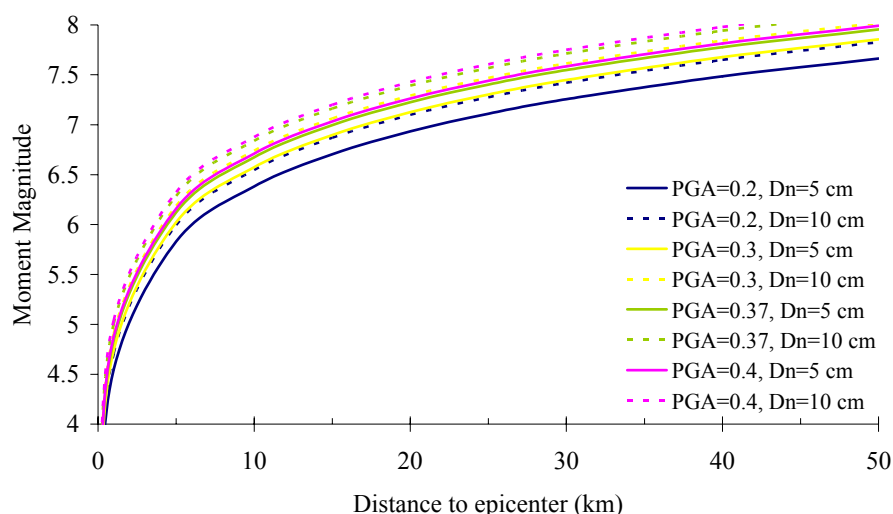
בשיטת Newmark, שתוארה בפרק 2.1.1, מחושבות תזוזות של המדרון בכשל. פירוט של שיטה זו ניתן למצוא אצל Newmark (1965). על-פי שיטה זו, המדרון מתחיל לזוז רק כאשר הוא חווה תאוצה הגבוהה מתאוצת הסף הדרושה להנעתו (a_c או PGA). בשיטה זו על מנת לבצע ניתוח קפדני (Rigorous Newmark's analysis) יש צורך ברשומת תאוצה, ובאינטגרציה כפולה על רשומה זו. בכדי להימנע מהצורך לבצע אינטגרציה, פותחה על ידי Jibson et al. (2000) שיטת ניתוח פשטנית יותר (Simplified Newmark analysis), על בסיס קשר אמפירי בין תזוזת המדרון D_N בס"מ (תזוזת ניומרק), תאוצת הסף של המדרון a_c ביחידות של g , ופרמטר נוסף I_a שנקרא עצמת Arias (Arias intensity) המבטא עצמת רעידת אדמה ביחידות של מטרים לשנייה, והוא יוסבר בהמשך. המשוואה המתארת את תזוזת ניומרק הינה:

$$\log D_n = 1.521 \log I_a - 1.993 \log a_c - 1.546 \quad \text{משוואה 5-1}$$

עצמת Arias (Arias, 1970) היא אינטגרציה של ריבוע היסטורית התאוצה של הרעידה. ישנם קשרים אמפיריים שפותחו על ידי Wilson and Keefer (1985) הקושרים את עצמת Arias (I_a) עם מגניטודת המומנט M_w והמרחק אל מוקד הרעידה R . קשר כזה המותאם לאזור בקע ים המלח מבוטא על ידי המשוואה הבאה (ציון, 2004):

$$\log I_a = 1.2 M_w - 2.2 \log R - 4.9 \quad \text{משוואה 5-2}$$

נהוג להניח כי תזוזת ניומרק שנחשבת ככשל מדרון היא 5-10 ס"מ (Jibson and Keefer, 1993). הצגת שיטת ניומרק עבור תאוצות הקרקע השונות שנמצאו בעבודה זו ניתן לראות בתרשים 5-4. הקשר בין מגניטודת המומנט למרחק מוצג גם עבור תזוזת ניומרק של 5 ס"מ וגם עבור תזווה של 10 ס"מ.

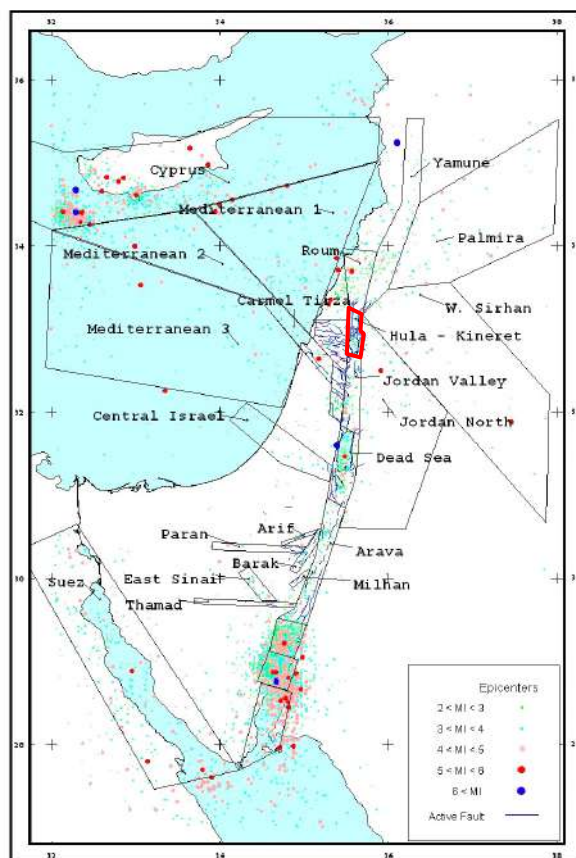


תרשים 5-4: אנליזת ניומרק עבור ערכי תאוצות הקרקע המרביות שנמצאו בעבודה זו. $0.2 g$ היא הגבול התחתון של טווח תאוצות הקרקע שנמצאו באנליזה הדינמית, $0.4 g$ היא הגבול העליון של הטווח, $0.37 g$ היא התאוצה שנמצאה באנליזה הפסיאודוסטטית עבור חוזק שיורי ו- $0.3 g$ היא הערך הממוצע. עבור כל ערך תאוצה שתי עקומות – קו רציף היא עקומה עבור תזוזת ניומרק של 5 ס"מ (גישת שמרנית), וקו נקודות היא עקומה עבור תזוזת ניומרק של 10 ס"מ.

ניתן לראות שברעידה המתרחשת על העתק סמוך מאוד לאזור, די במגניטודת מומנט של 4-5.5 בכדי לגרום לתאוצות הקרקע שנמצאו כגורמות לכשלים שנצפו. כאשר המוקד רחוק כדי 5 ק"מ ומעלה מהאזור, מגניטודות גבוהות מ-6 דרושות בכדי ליצור את תאוצות הקרקע הגורמות לכשלים שנצפו. עבור הערך הממוצע, 0.3 g , במרחק 5 ק"מ מהמוקד דרושה מגניטודת מומנט 6.2.

שתי השיטות האמפיריות למציאת מגניטודת הרעידה שגרמה לכשלים שנצפו מצביעות על כך שכשלים אלו נגרמו בעקבות רעידה חזקה, במגניטודת מומנט גבוהה מ-6.

שתי שיטות אלו, כלומר משוואת הניחות של Boore et al. (1997) ושיטת Newmark, קושרות את מגניטודת הרעידה למרחק. ברור שצמצום טווח המרחק האפשרי אל מקור הרעידה יצמצם את טווח המגניטודות. לצורך הערכת הסיכון הסייסמי בישראל, חולקה מדינת ישראל והאזורים הסובבים אותה לאזורים סייסמוגניים שונים (תואר בפרק 2.5). חלוקה זו מבוססת על הגיאומטריה, הקינמטיקה והתכונות המכניות של ההעתיקים הפעילים, וכן על פיזור הפעילות הסייסמית במרחב (Shamir et al., 2001). אזור המחקר משתייך לאזור סייסמוגני מטיפוס A, בו הפעילות הסייסמית קשורה בהעתיקים פעילים, ומשתרע מעמק החולה בצפון ועד בקעת כנרת בדרום (Shamir et al., 2001). מפת האזורים הסייסמוגניים בישראל מוצגת בתרשים 5-5.



תרשים 5-5: מפת אזורים סייסמוגניים באזור ישראל, (Shamir et al., 2001). באדום מסומן האזור הסייסמוגני של חולה-כנרת, אליו משתייך אזור העבודה. מתוך אתר המכון הגיאופיסי לישראל www.gii.co.il.

במטרה לצמצם את טווח המגניטודות הצפויות באזור המחקר, הוחלט לבחון מהי המגניטודה המרבית של רעידה המתרחשת באזור הסייסמוגני אליו משתייך אזור העבודה, הדרושה ליצירת התאוצות שנצפו. המרחק המרבי בין אזור העבודה להעתק פעיל באזור הסייסמוגני חולה-כנרת הוא כ-50 ק"מ. מכאן, המגניטודה הנדרשת ליצירת תאוצת הקרקע הממוצעת, 0.3 g , שנמצאה בעבודה זו מפעילות על העתקים באזור הסייסמוגני חולה-כנרת היא על-פי משוואת הניחות של Boore et al. (1997) מעל 8.5. על-פי שיטת Newmark, דרושה רעידה במגניטודה של 7.5.

5.3 השלכות לגבי עוצמתה של רעידת האדמה ב-749

הכשל באתר הארכיאולוגי סוסיתא מיוחס לרעידת האדמה שהתרחשה בשנת 749 לספירה (Segal, www.hippos.haifa.ac.il/Decapolis), אחת ממטרות הניתוח הדינמי לאחר של כשל העמודים הינה לברר בצורה בלתי תלויה מה עוצמת הרעידה שגרמה לנפילת העמודים. בספרות מוצגות הערכות שונות לגבי עוצמת רעידת האדמה שהתרחשה בשנת 749. עדויות לקריעת פני שטח המיוחסת לרעידה זו נמצאו הן ביריחו (Reches and Hoexter, 1981) והן באתר גלי כנרת (Marco et al., 2003), שני אתרים המרוחקים האחד מהשני כ-110 ק"מ בבקע ים המלח. העובדה ששני אתרים אלו ניזוקו באותה רעידת אדמה, יכולה להעיד על אחת משתי אפשרויות: האחת שמדובר ברעידה חזקה מאוד אשר קרעה פני שטח באורך של כמאה ק"מ, בה תומכים Marco et al (2003). על-פי הקשר האמפירי בין מגניטודת מומנט ואורך קריעת פני השטח של Wells (1994) and Coppersmith, נמצא שלצורך קריעת פני שטח באורך של יותר מ-100 ק"מ דרושה רעידת אדמה במגניטודת מומנט של לפחות 7.5. האפשרות השנייה לתופעות שהתגלו היא קיומן של שתי רעידות אדמה או יותר, הסמוכות בזמן אך לאו דווקא במרחב, ואשר הקרבה שלהן בזמן לא מאפשרת הפרדה ברורה ביניהן במקורות ההיסטוריים. גישה זו מציג Karcz (2004), ועדויות תומכות לכך עולות מניתוח פליאוסייסמי של העתקים בעמק בית שאן – תל רחוב (Zilberman et al., 2004). הם מצאו שטווח המגניטודות האפשרי לרעידה זו הינו 6.5-6. הכרעה בשאלה זו חשובה מאוד להבנה של עוצמות הרעידות הגדולות שיכולות להתרחש בבקע.

על-פי העבודה הנוכחית לא ניתן להכריע חד-משמעית בסוגיה זו, ולקבוע האם מדובר ברעידה אחת גדולה או בשתיים קטנות יותר. רעידה במגניטודת מומנט של 7.5 (זמן חזרה מעל 10,000 שנה, בגין, 2005) ובמרחק של 11 ק"מ מהאזור תיצור תאוצת קרקע מרבית של 0.3 g (על-פי מודל הניחות של Boore et al., 1997) אשר אכן יכולה לגרום לנזק שנצפה באתר סוסיתא, אך גם רעידה קרובה מאוד במגניטודה 6.5 (זמן

חזרה של כ- 400 שנה, בגין, 2005) יכולה לגרום לכשל זה, כלומר אין צורך ברעידה $M > 7$ על מנת לגרום לכשל הנצפה בסוסיתא.

5.4 צפי לרעידה החזקה הבאה

על בסיס ניתוח הגלישות באזור המחקר נמצא שהרעידה הדרושה להנעת המדרונות באזור היא חזקה ($6 <$). כמו כן נמצא שלמרות שאורך האזור הכולל את מדרונות רמת הגולן הפונים אל הכנרת הוא כ-20 ק"מ, גלישות ברורות אירעו רק בשני מקומות, הסמוכים מאוד זה לזה במקטע מוגדר באורך כשני ק"מ. באזור בו אירעו הגלישות המבנה נוטה עם כיוון המדרון, ולכן סביר שמבנה זה מועדף להיווצרות גלישות. בנוסף, החומר המרכיב את המדרונות שגלשו מורכב ממשקעים פלוביאלים, בעיקרם אבני חול מלוכדות וקונגלומרטים, ויתכן כי אלו החומרים המועדפים להתפתחות משטח גלישה. כמו כן בחלק זה של אזור העבודה נובעים מספר מעיינות. הנוכחות המוגברת של המים מעלה ככל הנראה את לחץ מי הנקבים, דבר הגורם להקטנת המאמץ האפקטיבי ובעקבות כך את התנגדות החומר לגזירה.

באזור שמצפון למבוא חמה ועד צפון הכנרת נראה כי המבנה נוטה לכיוון מערב, כלומר עם כיוון המדרונות, ועל כן תומך בכשל המדרונות. עד כפר חרוב נראה כי המבנה רציף יחסית, אך מכפר חרוב וצפונה המבנה מופר על-ידי העתקים רבים. נראה כי המצב המועדף להיווצרות גלישה, כלומר מבנה הנוטה לכיוון המדרון, קיים בין מבוא חמה לכפר חרוב. יחד עם זאת, לא מן הנמנע כי גלישה תוכל להתפתח צפונה מאזור זה, על אף היותו מופר על-ידי העתקים, ואולי בשל כך.

אבני החול והקונגלומרטים שהיוו את החומר העיקרי בגלישה העתיקה מצויות וחשופות באזור בצורה נרחבת ממבוא חמה וצפונה. לכן ניתן לומר כי החומר שעלול להיכשל אינו ייחודי לאזור בו אירעה הגלישה, אלא קיים בכל האזור. עם זאת יש לזכור כי יחידות אלו, תצורות עין גב והורדוס, הינן יחידות בעלות השתנות לטרלית נרחבת, ולכן יתכן שהיחידה המסוימת שנבדקה אופיינית לאזור הגלישה בלבד.

ההתיישבות ברמת הגולן עלולה לגרום לכך שבעתיד, בתנאים הנ"ל, המדרונות יהיו אף יותר רגישים ביחס לאפשרות כשל. היישובים מבוא חמה, כפר חרוב, נאות גולן, גבעת יואב, רמות ועוד, ממוקמים כולם בקצה המערבי של רמת הגולן, עוסקים בגידולים חקלאיים, ושדות רבים נמצאים באזור הקרוב למדרונות. נוכחות היישובים, על מערכות המים, הביוב וההשקיה שלהם, קרוב לוודאי מוסיפים מים לחתך המרכיב את מדרונות רמת הגולן ומחלישים את חוזק החומר לגזירה, ויתכן שישמשו כגורם מאיץ לכשל המדרונות בעתיד.

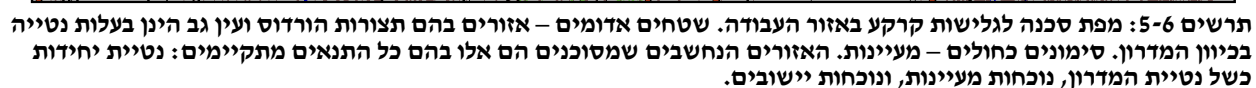
בתרשים 5-6 מוצגת מפת סכנה לגלישות קרקע באזור המחקר. השטחים הצבועים באדום מציינים את השתרעות התצורות עין גב והורדוס, במקומות בהם נטיית היחידות זהה בכיוונה לנטיית המדרון. כמו כן בנקודות כחולות מסומנים המעיינות, אשר מגבירים את האפשרות לעליית לחץ מי נקבים באזור. בשל הגורמים שהוזכרו להלן, הכוללים את נטיית המבנה, הליתולוגיה ונוכחות מים, נראה כי מאזור מבוא חמה

וצפונה הסיכויים להיווצרות גלישות קרקע במקרה של רעידת אדמה חזקה גבוהים, ובמיוחד במדרונות הסמוכים ליישובים ולשדות החקלאיים. כמו כן לא ניתן לפסול את האפשרות כי המדרונות שכבר גלשו בעבר יגלשו שוב, שכן באזור זה ידוע כי מתקיימים כל התנאים להיווצרות גלישה, וכן הוכח על-ידי חפירת תעלה על הגלישה וחקירתה, כי בעבר אירעו מספר מחזורים של תנועת חומר במורד המדרון.

עוד יש לציין כי הגלישות ככל הנראה לא מתייחסות למפלס הכנרת, על אף שבעבר היה גבוה יותר. בדיקת היציבות הסטטית של המדרונות בזמן שמפלס הכנרת היה גבוה ומפלס מי התהום הגיע לפני השטח מראה כי המדרון יציב גם במצב זה. יחד עם זאת, אם מפלס הכנרת יעלה בעתיד ויביא לעליית מפלס מי התהום במדרונות, תידרש תאוצת קרקע נמוכה יותר על מנת להניע את המדרונות ולהוציא אותם משיווי המשקל (תרשים 20-4).

5.5 המשך עבודה

בעבודה זו לא ניתן היה לחקור לעומק את כל הנושאים האפשריים על מנת להבין לעומק את יחסי השדה בין הגלישות וההעתקים הקיימים בשטח. כעבודת המשך יש לנתח בצורה מפורטת את ההעתקים שזוהו ומופו באזור העבודה, על מנת לזהות את אירועי רעידות האדמה ולהגדיר את המאפיינים הסייסמיים. בימים אלו, על בסיס עבודה זו, מתבצעת עבודת המשך העוסקת בלימוד ההעתקים ובניתוחם, ויתכן ותוכל לשפוך אור נוסף על מנגנוני ההנעה של הגלישות שנצפו, על הסכנה הצפויה בעתיד מגלישות באזורים אלו ועל האופי הסייסמי של האזור והרעידות הצפויות בו. כמו כן מתוכננת עבודה שמטרתה המשך לימוד הגלישות באתרים נוספים גם במערב הכנרת, וכן המשך ניתוח של כשל העמודים באתר סוסיתא, בדו-מימד ויתכן שגם בתלת-מימד.



6. סיכום ומסקנות

בעבודה זו נעשה ניסיון להעריך בצורה בלתי תלויה את הסכנה הסייסמית באזור הכנרת על ידי ניתוח לאחור של שני כשלים שונים במהותם שנצפו באזור העבודה – כשל מדרון בגלישת קרקע רוטציונית באזור עין גב, וכשל מבנה ביוזנטי בקריסה, בסוסיתא.

על מנת לנתח לאחור את הגלישה נערך מיפוי מורפוטקטוני וגיאולוגי מפורט של אזור העבודה. כמו כן נדגמו סלעים ונבדקו בבדיקות מעבדה למציאת התכונות הפיסיקליות והחוזק לגזירה. ניתוח לאחור של מודל הגלישה באמצעות תכנת SLOPE/W הראה כי שלוחת הגלישה יציבה במצב סטטי. גם בתנאים של רוויה, המדמים מפלס מי תהום ו/או מפלס כנרת גבוהים, המדרון נותר יציב תחת עומס סטטי. בהעמסה פסיאודוסטטית, המדמה רעידת אדמה, כושל המדרון בתנאים של חוזק שיורי תחת תאוצת קרקע אופקית מרבית (PGA) של 0.37 g.

על מנת לנתח לאחור את כשל העמודים בקתדרלה הביזנטית בסוסיתא, נערך אימות של שיטת DDA באמצעות פתרון אנליטי קיים עבור עמוד חופשי מתנדנד. תכנת ה-DDA נמצאה מדויקת ומתאימה לפתרון בעיה זו. ניתוח לאחור של כשל העמודים באמצעות הזנה של תאוצה בצורת פונקציית סינוס הראתה תלות גדולה של תאוצת הסף הדרושה להפלת העמודים בתדר התאוצה. טווח התאוצות המרביות (PGA) שהתקבל עבור ניסוי זה הינו גבוה ומצוי בטווח ערכים של 0.2 g עד 1 g. יש לציין שלא ניתן לצמצם טווח ערכים זה על ידי השוואה לתדר עצמי של עמוד חופשי, מכיוון שזה אינו קבוע. ניתוח לאחור של כשל העמודים באמצעות הזנת תאוצות מרעידות אדמה אמיתיות הביא לצמצום הטווח לערכים של 0.2 g עד 0.4 g. זאת על אף שנתוני הרעידות שנלקחו לחישוב הינם ממקומות שונים בעולם אשר נמדדו על סלעים בחוזק שונה והכילו טווח תדרים מגוון. שיטה זו, של ניתוח לאחור של כשלים ברוטציה בשיטת DDA, יכולה להיות מיושמת באתרים רבים בעולם, בהם נצפה כשל סייסמי, לצורך הערכת הסיכון הסייסמי באתר.

על סמך תוצאות עבודה זו תאוצת הקרקע המרבית האופקית הצפויה באזור היא בממוצע 0.3 g, בדומה לערך המוצע בתקן הישראלי לבניה 413. תאוצה זו מתאימה לרעידות אדמה חזקות, במגניטודה 6 ומעלה, כתלות במרחק אל מוקד הרעידה.

בהמשך לעבודה זו יערך ניתוח דומה של גלישות בצידה המערבי של הכנרת, לצורך קבלת תמונה כוללת של אזור הכנרת.

נספח א: סקר גיאופיסי

הסקר הסייסמי שבוצע בעבודה זו על ידי המכון הגיאופיסי בוצע בשיטת הרפלקציה הרדודה בהפרדה גבוהה. העיקרון עליו מתבססת השיטה הוא החוק הפיסיקלי הקובע כי קרן הפוגעת במשטח וחוזרת ממנו, נעה באותו תווך לפני הפגיעה ואחריה, ולכן גם באותה מהירות (חוק סנל). על ידי מדידת הזמן שלוקח לקרן לפגוע במשטח החזרה (רפלקטור) עד לחזרתה ממנו, ניתן להעריך את עומק המשטח ממנו הקרן חזרה. רפלקטורים הינם מישורי אי-רציפות עבור הקרניים, למשל מעברים בין סוגי סלע שונים בעלי מהירויות גלים שונות ומישורי אי-רציפות אחרים כגון העתקים ומישורי גלישות.

א.1 איסוף הנתונים (Telford et al., 1990)

הגלים הסייסמיים המשמשים בסקר נוצרים בצורה מלאכותית על ידי שימוש במקור אנרגיה מסוג digipulse (תרשים א). לאורך מסלול הקו הסייסמי נפרשים גיאופונים – קולטים הרושמים את הגלים לאחר חזרתם מן הרפלקטורים. המרחק בין שני קולטים סמוכים בסקר זה הינו 2.5 מטרים (הפרדה גבוהה) ומאפשר לחקור עומקים רדודים יחסית.



תרשים א: מקור אנרגיה מסוג digipulse של המכון הגיאופיסי לישראל. הפטיש המכה בקרקע מורכב על משאית קטנה המתקדמת מתחנה לתחנה לאורך קו המדידה.

א.2 עיבוד הנתונים (Telford et al., 1990)

אל כל תחנת מדידה מגיעה הקרן החוזרת, ומציינת את ה- two way time – הזמן שלקח לקרן להגיע מן המקור בפני השטח אל הרפלקטור בעומק וחזרה לפני השטח אל הקולט. כאשר קולט נמצא ליד המקור, מדידת זמן (t_0) תלויה ביחס ישר לעומקו של הרפלקטור. ככל שמיקום הקולט רחוק מן המקור, זמן ההגעה שמתקבל גדל בצורה לא ליניארית, (מרחק ה"הלך-חזור" שהקרן עוברת בתווך הולך וגדל), ולפיכך עקומת זמן כנגד מרחק תתקבל בצורת היפרבולה. עקומת זמן בריבוע כנגד מרחק בריבוע תיתן קו ישר ששיפועו הוא

ההופכי של ריבוע מהירות התווך. באופן זה ניתן למצוא את המהירות, ולכן גם את העובי של התווך הנמצא בין פני השטח לרפלקטור הראשון.

כל סדרת הגלים הנקלטים על-ידי הקולטים כתוצאה מהפעלת מקור אחת מכונה רשומה סייסמית, או common shot gather. לצורך ארגון מרחבי של כל הרשומות הסייסמיות, מגדירים נקודה הממוקמת באמצע המרחק שבין כל מקור לקולט, המכונה CMP (Common midpoint). את זמני ההגעה של הקרניים היוצאות מהמקור ומוחזרות מהרפלקטורים השונים אל הקולטים, מסדרים לפי ה-CMP, המבטאת את ההשלכה על פני השטח של נקודת הפגיעה המקורבת ברפלקטור. מאסף של נקודות CMP, בעלות מיקום משותף, שמקורן בכלל ה-shots שבוצעו במהלך הסקר, מכונה CMP gather.

לאחר יצירת רשומות CMP, מבצעים תהליך שנקרא יצירת חתך stack, שהוא למעשה ריכוז של מאספי CMP ומיקומם במרחב – כלומר מיקום ה-CMP בהתאם למיקומן הפיסי לאורך החתך. לפירוט נוסף ראה Telford et al. (1990).

א.3 פענוח הנתונים (Telford et al., 1990)

פענוח חתך ה-stack מתבצע על ידי תכנת מחשב, ועל-פי מודל מהירויות. מודל המהירויות נחוץ לפענוח נכון של המידע, ומחושב על-ידי תיקון התוספת בזמן ההגעה של האות (normal move-out), כתוצאה מהתרחקות הקולט מהמקור.

מטרת הפענוח היא מציאת רפלקטורים ברורים שניתן לראות האם הם רציפים והמשכיים, או שישנה אי-רציפות הקוטעת אותם. הפענוח הגיאולוגי צריך להינתן תוך הכרות עם השטח, הסלעים והיחידות הבונות את החתך והתופעות הגיאולוגיות והמורפולוגיות הצפויות באזור.

נספח ב: הוכחה מתמטית לחוסר קיום של תדר עצמי בלתי תלוי עבור עמוד חופשי מתנדנד*

הפתרון האנליטי שהוצג בפרק 3.4.3 מתאר תנועה של עמוד חופשי. נניח כי העמוד מתחיל בזמן $t = 0$ ממצב של מנוחה, כלומר $\theta_0 = 0$, ומתחיל להתנדנד עקב קבלת מהירות התחלתית מסוימת $\dot{\theta}_0$. התאוצה $a_p = 0$ ולכן קבועי האינטגרציה הם:

$$A_1 = A_3 = \frac{\dot{\theta}_0}{P} \quad \text{משוואה א}$$

$$A_2 = \theta_0 + \alpha = \alpha \quad \text{משוואה ב}$$

$$A_4 = \theta_0 - \alpha = -\alpha \quad \text{משוואה ג}$$

כעת נפתור את משוואות התנועה של הבלוק:

$$\begin{aligned} \theta(t) &= A_1 \sinh(pt) + A_2 \cosh(pt) - \alpha \\ &= \frac{\dot{\theta}_0}{P} \sinh(pt) + \alpha \cosh(pt) - \alpha = -\alpha(1 - \cosh(pt)) + \frac{\dot{\theta}_0}{P} \sinh(pt) \quad \theta \leq 0 \end{aligned} \quad \text{משוואה ד}$$

$$\begin{aligned} \theta(t) &= A_3 \sinh(pt) + A_4 \cosh(pt) + \alpha \\ &= \frac{\dot{\theta}_0}{P} \sinh(pt) - \alpha \cosh(pt) + \alpha = \alpha(1 - \cosh(pt)) + \frac{\dot{\theta}_0}{P} \sinh(pt) \quad \theta > 0 \end{aligned} \quad \text{משוואה ה}$$

נגדיר

$$\frac{\dot{\theta}_0}{P} = \beta \quad \text{ו-} \quad pt = p\Delta t = \tau \quad \text{משוואה ו}$$

בהתנגשות הראשונה לאחר תחילת התנועה, בה $\theta = 0$,

$$0 = -\alpha(1 - \cosh(\tau)) + \beta \sinh(\tau) \Rightarrow \alpha \cosh(\tau) + \beta \sinh(\tau) = \alpha \quad \theta \leq 0 \quad \text{משוואה ז}$$

$$0 = \alpha(1 - \cosh(\tau)) + \beta \sinh(\tau) \Rightarrow \alpha \cosh(\tau) - \beta \sinh(\tau) = \alpha \quad \theta > 0 \quad \text{משוואה ח}$$

פתרון של צמד המשוואות ז ו-ח הוא:

* בפיתוח הוכחה זו נעזרתי בשיחות עם ד"ר יורי קרינסקי, המכון הלאומי לחקר הבניה, הטכניון.

$$\alpha \cosh(\tau) = \mp \beta \sinh(\tau) + \alpha \quad \text{משוואה ט}$$

נעלה בריבוע:

$$\alpha^2 \cosh^2(\tau) = (\alpha \mp \beta \sinh(\tau))^2 \quad \text{משוואה י}$$

$$\left[\cosh^2(\tau) = 1 + \sinh^2(\tau) \right] \quad \text{מתוך זהות טריגונומטרית}$$

$$\alpha^2 + \alpha^2 \sinh^2(\tau) = \alpha^2 \mp 2\alpha\beta \sinh(\tau) + \beta^2 \sinh^2(\tau) \quad \text{משוואה יא}$$

$$(\alpha^2 - \beta^2) \sinh^2(\tau) = \mp 2\alpha\beta \sinh(\tau) \quad \text{משוואה יב}$$

נזכור ש $\sinh(\tau) = 0 \Leftrightarrow \tau = 0$ הוא פתרון למשוואה, ונחלק ב- $\sinh(\tau)$:

$$(\alpha^2 - \beta^2) \sinh(\tau) = \mp 2\alpha\beta \quad \text{משוואה יג}$$

$$\sinh(\tau) = \mp \frac{2\alpha\beta}{(\alpha^2 - \beta^2)} \quad \text{משוואה יד}$$

נזכר שוב בזהות הטריגונומטרית $\left[\cosh^2(\tau) = 1 + \sinh^2(\tau) \right]$ ונציב את משוואה יד:

$$\begin{aligned} \cosh(\tau) &= \sqrt{1 + \frac{4\alpha^2\beta^2}{(\alpha^2 - \beta^2)^2}} = \sqrt{\frac{\alpha^4 - 2\alpha^2\beta^2 + \beta^4 + 4\alpha^2\beta^2}{(\alpha^2 - \beta^2)^2}} \\ &= \sqrt{\frac{(\alpha^2 + \beta^2)^2}{(\alpha^2 - \beta^2)^2}} = \pm \frac{\alpha^2 + \beta^2}{\alpha^2 - \beta^2} \end{aligned} \quad \text{משוואה טו}$$

ממשוואה יד נובע:

$$\tau = p \Delta t = \arcsin h \frac{2\alpha \frac{\dot{\theta}_0}{p}}{\alpha^2 - \left(\frac{\dot{\theta}_0}{p} \right)^2} \quad \text{משוואה טז}$$

ממשוואה טו נובע:

$$\cosh(\tau) = \frac{\alpha^2 + \left(\frac{\dot{\theta}_0}{p} \right)^2}{\alpha^2 - \left(\frac{\dot{\theta}_0}{p} \right)^2} \quad \text{משוואה יז}$$

נבדוק שבמקטע הנדנד הראשון המהירות הזוויתית בתחילת המקטע ובסופו זהה:

$$\theta(t) = pA_3 \cosh(\tau) + pA_4 \sinh(\tau) = p \frac{\dot{\theta}_0}{p} \frac{\alpha^2 + \left(\frac{\dot{\theta}_0}{p}\right)^2}{\alpha^2 - \left(\frac{\dot{\theta}_0}{p}\right)^2} - \frac{p\alpha 2\alpha \left(\frac{\dot{\theta}_0}{p}\right)}{\alpha^2 - \left(\frac{\dot{\theta}_0}{p}\right)^2}$$

משוואה יח

$$= \dot{\theta}_0 \frac{\alpha^2 + \left(\frac{\dot{\theta}_0}{p}\right)^2 - 2\alpha^2}{\alpha^2 - \left(\frac{\dot{\theta}_0}{p}\right)^2} = -\dot{\theta}_0$$

בתחילת הקטע τ (כאשר $t = 0$) ובסופו (כאשר $t = t_0$) המהירות הזוויתית זהה והפוכה בסימנה, ולכן:

$$t_0 = \frac{\tau}{p}$$

משוואה יט

זמן המחזור של התנודה הראשונה הוא

$$T = 2t_0 = \frac{2\tau}{p}$$

משוואה כ

ולכן התדר של התנודה הראשונה הוא:

$$\omega = \frac{1}{T} = \frac{p}{2\tau} = \frac{p}{2\alpha \frac{\dot{\theta}_0}{p} \frac{2 \arcsin h \frac{p}{\alpha^2 - \left(\frac{\dot{\theta}_0}{p}\right)^2}}{2 \arcsin h \frac{p}{\alpha^2 - \left(\frac{\dot{\theta}_0}{p}\right)^2}}}$$

משוואה כא

וממשוואה זו ברור כי התדר של התנודה הראשונה תלוי במהירות ההתחלתית $\dot{\theta}_0$ ולכן אינו קבוע.

מקורות ספרותיים

- בגין, ב.ז., 2005. רעידות אדמה הרסניות בעמק הירדן וים המלח – תקופות חזרתן וההסתברות להתרחשותן. המכון הגיאולוגי לישראל, דו"ח מס' GSI/12/05, ירושלים, 51 עמודים.
- ברטוב, י., 1974. השברים ומבני הכיפות של מרכז סיני - בעיות סטרוקטורליות ופליאוגיאוגרפיות. *חיבור לשם קבלת תואר דוקטור לפילוסופיה*, האוניברסיטה העברית בירושלים, 143 עמודים.
- גבעון, מ., 1984. מחקרים פליאוגיאוגרפיים: תצורות הורדוס וחולות עין-גב במזרח הכנרת. *עבודת גמר לתואר מוסמך במדעי הטבע*, האוניברסיטה העברית, ירושלים, 86 עמודים.
- זלצמן, ע., 2005. סקר גיאולוגי הנדסי, טבריה כביש 348, קטע כביש צפוני, אזור הגלישה. *ד"ר עוזי זלצמן, גיאולוגיה הנדסית והנדסת סלע*, 24 עמודים, כולל נספחים.
- חזן, נ., 2002. שחזור מפלסים של אגם הכנרת ב 40,000 בשנים האחרונות. *עבודת גמר לתואר מוסמך במדעי הטבע*. המכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה העברית בירושלים, 61 עמודים.
- חצור, י. וגבירצמן, ח., 2004. השמדת מנהרות בקרקע לס באמצעות התנזלות יזומה. דו"ח של מעבדת דייכמן למכניקת הסלע, אוניברסיטת בן גוריון בנגב, BGU-RM/31/04, 108 עמודים.
- חרש, א. ובר, י., 1987. צומת העתקים: גלישות וסיכונים סייסמיים בגיא הירדן – אזור אלמגור. *תהל מהנדסים יועצים*, תל-אביב, 10 עמודים.
- מדבדיב, ב., 2006. סקר רפלקציה סייסמית בהפרדה גבוהה במצוק האון, רמת הגולן. *המכון הגיאופיסי לישראל*, דו"ח 631/238/06, 9 עמודים.
- מיכלסון, ח., 1972. ההידרוגיאולוגיה של דרום רמת הגולן. *HR/72/037, תכנון המים לישראל בע"מ*, 89 עמודים.
- מיכלסון, ח., 1979. הגיאולוגיה והפליאוגיאוגרפיה של רמת הגולן. *חיבור לשם קבלת תואר דוקטור לפילוסופיה*. אוניברסיטת תל אביב, 163 עמודים.
- מיכלסון, ח. ומור, ד., 1985. גמלא, מפה גיאולוגית, קני"מ 50,000:1. *המכון הגיאולוגי, ישראל*.
- נוהל בדיקה 13.101, מכון התקנים הישראלי (מע"צ והטכניון), 1995.
- נוהל בדיקה 13.104, מכון התקנים הישראלי (מע"צ והטכניון), 1995.
- נוהל בדיקה 13.105, מכון התקנים הישראלי (מע"צ והטכניון), 1995.
- ציון, כ., 2004. הערכת הסכנה לגלישות מדרון בזמן רעידת אדמה במזרח הגליל התחתון ובמרחב העיר טבריה. *עבודת גמר לתואר מוסמך*, אוניברסיטת תל-אביב, 137 עמודים.
- קיסר, י. ופפרבאום, ש., 2001. גלישה בכביש 90 ק"מ 416-417, ניתוח היציבות והגדרת הבעיה. *הכנס הארצי השני לבניה ותשתיות בישראל*, ע"מ 342-346.
- שולמן, נ., 1962. הגיאולוגיה של עמק הירדן המרכזי. *חיבור לשם קבלת תואר דוקטור לפילוסופיה*, האוניברסיטה העברית בירושלים, 103 עמודים.
- שפירא, א., 2002. דברי הסבר למפה המעודכנת של תאוצות השיא לתקן הישראלי 413. www.gii.co.il.
- Abramson, L.W., Lee, T.S., Sharma, S. and Boyce, G.M., 1995. Slope stability and stabilization methods. *John Wiley & Sons, INC.*, 629 pp
- Aitken, M.J., 1998. An introduction to optical dating: the dating of Quaternary sediments by the use of photon-stimulated luminescence. *Oxford, UK, Oxford University Press*, 267 pp.

- Amiran, D.H.K., Ariei, E. and Turrotte, T., 1994. Earthquakes in Israel and adjacent areas: Macro seismic observations since 100 BCE. *Israel Exploration Journal*, **44**, 260-305.
- Amit, R., Zilberman, E., Enzel, Y. and Porat, N., 2002. Paleoseismic evidence for time dependency of seismic response on a fault system in the southern Arava Valley, Dead Sea rift, Israel. *The Geological Society of America Bulletin*, **114** (2), 192-206.
- Arias, A., 1970. A measure of earthquake intensity, in Hansen, R.J., ed., Seismic design for nuclear power plants. Cambridge, Massachusetts Institute of Technology Press, 438-483.
- Ariei, A., 1967. Seismicity of Israel and adjacent areas. *Geology Survey of Israel Bulletin*, **43**, 1-4.
- Ariei, E. and Rabinowitz, N., 1989. Probabilistic assessment of earthquake hazard in Israel. *Tectonophysics*, **167**, 223-233.
- Ariei, E., Peled U. and Kafri, U., 1977. The Jordan Valley earthquake of September 2, 1973. *Israel Journal of Earth Sciences*, **26**, 112-118.
- Bartov, Y., Steinitz, G., Eyal, M. and Eyal, Y., 1980. Sinistral movement along the Gulf of Aqaba – its age and relation to the opening of the red sea. *Nature*, **285**, 220-222.
- Ben Avraham, Z., Ginzburg, A. and Yuval, Z., 1981. Seismic reflection and refraction investigations of Lake Kinneret – central Jordan Valley, Israel. *Tectonophysics*, **80**, 165-181.
- Ben-Avraham, Z., ten-Brink, U., Bell, R. and Reznikov, M., 1996. Gravity field over the Sea of Galilee; evidence for a composite basin along a transform fault. *Journal of Geophysical Research*, **101** (B1), 533-544.
- Ben-Menahem, A., 1981. Variation of slip and creep along the Levant Rift over the past 4500 years. *Tectonophysics*, **80**, 183-197.
- Ben- Menahem, A., 1991. Four thousand years of seismicity along the Dead Sea Rift. *Journal of Geophysical Research*, **96** (B12), 20,195- 20,216.
- Bishop, A.W., 1955. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, **5** (1), 7-17.
- Bonilla, M.G., Mark, R.K. and Lienkaemper, J.J., 1984. Statistical relations among earthquake magnitude, surface rupture length, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **74**, 2379-2411.
- Boore, D.M., Joyner, W.B. and Fumal, T.E., 1997. Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western North American earthquakes: A summary of recent work. *Seismological Research Letter*, **68**, 127-153.

- Brune J. N., 2002. Precarious-rock constraints on ground motion from historic and recent earthquakes in southern California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **92** (7), 2602-2611.
- Corps of Engineers, 1982. Slope Stability Manual EM-1110-2-1902, *Washington, D.C.: Department of the Army*, Office of the Chief of Engineers.
- Cruden. D.M. and Varnes, D.J., 1992. Landslide types and processes, Landslides: investigation and mitigation. *Washington, DC: Transportation Research Board, National Academy of Science*, Chapter 3, July.
- Ellenblum, R., Marco, S., Agnon, A., Rockwell, T. and Boas, A., 1998. Crusader Castle torn apart by earthquake at dawn, 20 May 1202. *Geology*, **26** (4), 303-306.
- Enzel, Y., Kadan, G. and Eyal, Y., 2000. Holocene earthquakes inferred from a fan-delta sequence in the Dead Sea graben. *Quaternary Research*, **53**, 34-48.
- Fellenius, W., 1936. Calculation of stability of earth dams. *Transactions, 2nd Congress Large Dams*, Washington, D.C., **4**, 445-462.
- Ferry, M., Meghraoui, M., Abou Karaki, N., Al-Taj, M., Amoush, H., Al-Dhaisat, S. and Barjous, M., 2007. A 48-kyr-long slip rate history for the Jordan Valley segment of the Dead Sea Fault. *Earth and Planetary Science Letters*, **260**, 394-406.
- Freund, R., Garfunkel, Z., Zak, I., Goldberg, T., Weissbrod, T. and Derin, B., 1970. The shear along the Dead Sea Rift. *Philosophical Transactions of the Royal Society, London*, **267**, 107-130.
- Garfunkel, Z., 1981. Internal structure of the Dead Sea leaky transform (rift) in relation to plate tectonics. *Tectonophysics*, **80**, 81-108.
- Garfunkel, Z., Zak, I. and Freund, R., 1981. Active faulting in the Dead Sea Rift. *Tectonophysics*, **80**, 1-26.
- Goodman, R.E. and Seed, H.B., 1966. Earthquake-induced displacements in sand embankments. *J. Soil Mech. Foundation Div, ASCE*, **90** (SM2), 125-146.
- Hatzor, Y.H., Arzi, A.A., Zaslavsky, Y. and Shapira, A., 2004. Dynamic stability analysis of jointed rock slopes using the DDA method: King Herod's Palace, Masada, Israel. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **41**, 813-832.
- Hofstetter, A., Thio, H. K. and Shamir, G., 2003. Source mechanism of the 22/11/1995 Gulf of Aqaba earthquake and its aftershock sequence. *Journal of Seismology*, **7**, 99-114.
- Hurwitz, S., Garfunkel, Z., Ben-Gai, Y., Reznikov, M., Rotstein, Y. and Gvirtzman, H., 2002. The tectonic framework of a complex pull-apart basin: seismic reflection observations in the Sea of Galilee, Dead Sea transform. *Tectonophysics*, **359** (3-4), 289-306.

- Huvius, N., Stark, C. P. and Allen, P.A., 1997. Sediment flux from a mountain belt derived by landslide mapping. *Geology*, **25**, 231-234.
- Janbu, N., 1954. Application of composite slip surface for stability analysis. *European Conference on Stability of Earth Slopes*, Stockholm, Sweden.
- Jibson, R.W. and Keefer, D.K., 1993. Analysis of the seismic origin of landslides: examples from the New Madrid seismic zone. *Geological Society of America Bulletin*, **105**, 521-536.
- Jibson, R.W., Harp, E.L. and Michael, J.A., 2000. A method for producing probabilistic seismic landslide hazard maps. *Engineering Geology*, **58**, 271-289.
- Jing, L., 2003. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modeling for rock mechanics and rock engineering. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **40**, 283-353.
- Kagan, E.J., Agnon, A., Bar-Matthews, M. and Ayalon, A., 2005. Dating large infrequent earthquakes by damaged cave deposits. *Geology*, **33**, 261-264.
- Kamai, R., 2006. Estimation of Historical Seismic Ground-Motions Using Back Analysis of Structural Failures in Archaeological Sites. M. Sc. thesis, *Ben-Gurion University of the Negev*, Beer-Sheva, p. 127.
- Kamai, R. and Hatzor, Y.H., in press. Numerical analysis of block stone displacements in Ancient masonry structures: A new method to estimate historic ground motions. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*.
- Kanari, M., Katz, O., Weinberger, R. and Marco, S., 2007. Evaluation of rockfall hazard and risk for Qiryat Shemona (Northern Israel). *Israel Geological Society, Annual Meeting*, Neve Zohar, Israel.
- Karcz, Y., 2004. Implications of some early Jewish sources for estimates of earthquake hazard in the Holy Land. *Annals of Geophysics*, **47** (2/3), 759-792.
- Kashai, E.L. and Crocker, P.F., 1987. Structural geometry and evolution of the Dead Sea-Jordan rift system as deduced from new subsurface data. *Tectonophysics*, **141**, 33-60.
- Katz, O., Amit, R., Yagoda, G., Hatzor, Y.H. and Porat, N., 2007. Seismic history of the southeastern Sea of Galilee margins, Dead Sea Rift, Israel. *American Geophysical Union, Fall Meeting*.
- Keefer, D.K., 1984. Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, **95**, 406-421.
- Krahn, J., 2004. Stability modeling with SLOPE/W[®], an engineering methodology. *Calgary, GEO-SLOPE International*, 396 pp.

- Law, H. K., and Lam, I. P., 2003. Evaluation of seismic performance for tunnel retrofit project. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **129**, 575-589.
- Leonov, J., 2002. Horizontal Peak Ground Acceleration Attenuation Relationship: Way and argumentation of its choice. www.gii.co.il
- Lian, O.B. and Roberts, R.G., 2006. Dating the Quaternary: progress in luminescence dating of sediments. *Quaternary Science Reviews*, **25**, 2449–2468.
- Lowe, J. and Karafiath, L., 1960. Stability of earth dams upon drawdown. *Proceedings of the 1st Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City, 537-552.
- MacLaughlin, M.M. and Doolin, D.M., 2005. Review of validation of the Discontinuous Deformation Analysis (DDA) method. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **29**.
- Makris, N. and Roussos, Y.S., 2000. Rocking response of rigid blocks under near-source ground motions. *Geotechnique*, **50 (3)**, 243-262.
- Marco, S., Hartal, M., Hazan, N., Lev, L. and Stein, M., 2003. Archaeology, history, and geology of the 749 AD earthquake, Dead Sea Transform. *Geology*, **31**, 665-668.
- Marco, S., Rockwell, T.K., Heimann, H., Frieslander, U. and Agnon, A., 2005. Late Holocene activity of the Dead Sea Transform revealed in 3D paleoseismic trenches on the Jordan Gorge segment. *Earth and Planetary Science Letters*, **234**, 189-205.
- Marco, S., Agnon, A., Ellenblum, R., Eidelman, A., Basson, U. and Boas. A., 1997. 817-year-old walls offset sinistrally 2.1 m by the Dead Sea Transform, Israel. *Journal of Geodynamics*, **24(1-4)**, 11-20.
- McCalpin, J.P., 1996. Paleoseismology. *San Diego, Academic Press*, 588 pp.
- McCarthy, D.F., 2002. Essentials of soil mechanics and foundations: basic geotechnics, 6th edition. *Prentice-Hall*, 788 pp.
- Meghraoui, M., Gomez, F., Sbeinati, R., Van der Woerd, J., Mounty, M., Darkal, A.N., Radwan, Y., Layyous, I., Al Najjar, H., Darawchah, R., Hijazi, F., Al-Ghazzi, R. and Barazangi, M., 2003. Evidence for 830 years of seismic quiescence from palaeoseismology, archaeoseismology and historical seismicity along the Dead Sea fault in Syria. *Earth and Planetary Science Letters*, **210**, 35-52.
- Meirova, T., 2007. Ground motion scaling in Israel, *Ph.D. thesis, Dept. of Geophysics and Planetary Sciences*, Tel Aviv University, 121p.
- Mor, D. and Sneh, A., 1996. Complementary mapping of Plio-Pleistocene basalt units and landslides in the southern Golan and the Yarmouk Valley and its bearing on the

- geomorphological history of the area. *Geological Survey of Israel, Current Research* **10**, 28-31.
- Morgenstern, N.R. and Price, V.E., 1965. The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, **15** (1), 79.
- Newmark, N.M., 1965. Effects of earthquakes on dams and embankment. *Geotechnique*, **15** (2), 129-160.
- Psycharis, I.N., Papastamatiou, D.Y. and Alexandris, A.P., 2000. Parametric investigation of the stability of classical columns under harmonic and earthquake excitations. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **29**, 1093-1109.
- Reches, Z. and Hoexter, D.F., 1981. Holocene seismic and tectonic activity in the Dead Sea area. *Tectonophysics*, **80**, 235-254.
- Rotstein, Y. and Bartov, Y., 1989. Seismic reflection across a continental transform: an example from a convergent segment of the Dead Sea Rift. *Journal of Geophysical Research*, **94**, 2902-2912.
- Rotstein, Y., Bartov, Y. and Frieslander, U., 1992. Evidence for local shifting of the main fault and changes in the structural setting, Kinarot basin, Dead Sea transform. *Geology*, **20**, 251-254.
- Sarma, S.K., 1973. Stability analysis of embankments and slopes. *Geotechnique*, **23** (3), 423-433.
- Segal, A., Mlynarczyk, J., Burdajewicz, M., Schuler, M. and Eisenberg, M., 2004. Hippos – Susita – Fifth season of excavations and summary of all five seasons. *University of Haifa, Zinman Institute of Archaeology*, 163 pp.
- Segal, A. The Decapolis: an historical-archeological survey. *The Zinman Institute of Archeology, University of Haifa*. www.hippos.haifa.ac.il.
- Shamir, G., Bartov, Y., Sneh, A., Fleischer, L., Arad, V. and Rosensaft, M., 2001. Preliminary seismic zonation, *GSI Report No. GSI/12/2001*.
- Shapira, A., 1983. Potential earthquake risk estimation by application of a simulation process. *Tectonophysics*, **95**, 75-89.
- Shapira, A. and Hofstetter, A. Seismicity Parameters of Seismogenic Zones. www.gii.co.il.
- Shapira, A., Abdallah, A.F., Dabbeek, J. and Hays, W., 2004. Earthquake hazard assessments for building codes. *The Geophysical Institute of Israel Report 537/059/04*, 30 pp.
- Shi, G.-H., 1988. Discontinuous Deformation Analysis – a new numerical method for the statics and dynamics of block system. *Ph.D. thesis*, Department of Civil Engineering, University of California, Berkley, 378 pp.

- Shi, G.-H., 1993. Block system modelling by Discontinuous Deformation Analysis. Topics in Engineering, 11, *Computational Mechanics Publications*, 209 pp.
- Shi, G.-H., and Goodman, R.E., 1989. The key blocks of unrolled joint traces in developed maps of tunnel walls. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **13**, 131-158.
- Skempton, A.W. and Petley, D.J., 1967. The shear strength along structural discontinuities in stiff clays. *Proc. Geotech. Conf. (Oslo)* 2, p. 29-46.
- Skempton, A.W. and Hutchinson, J.N.J., 1969. Stability of natural slopes and embankment foundations. 7th *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City*, State of the art volume, 291-340.
- Smith, K., 1996. Environmental hazards, 2nd edition. Assessing risk and reducing disasters. *Routledge*, London and New York, p 5-7, 182-194.
- Spencer, E., 1967. A method of Analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. *Geotechnique*, **17**, 11-26.
- Stokes, S., 1999. Luminescence dating applications in geomorphological research. *Geomorphology*, **29**, 153–171.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E., 1990. Applied Geophysics. 2nd edition, *Cambridge, Cambridge University Press*.
- Tsesarsky, M., Hatzor, Y. H. and Sitar N., 2005. Dynamic displacement of a block on an inclined plane: analytical, experimental, and DDA results. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **38**(2), 153 – 167.
- van Ech, T. and Hofstetter, A., 1990. Fault geometry and spatial clustering of microearthquakes along the Dead Sea-Jordan rift fault zone. *Tectonophysics*, **180** (1), 15-27.
- Wdowinski, S., Bock, Y., Baer, G., Prawirodirdjo, L., Bechor, N., Naaman, S., Knafo, R., Forrai, Y. and Meltzer, Y., 2004. GPS measurement of currant crustal moverments along the Dead Sea Fault. *Journal of Geophysical Research*, **109** (B5), B05403, 16 pp.
- Wechsler, N., 2005. Paleoseismology in the eastern Kinnarot Basin, Dead Sea transform. *M.Sc. thesis*, Tel-Aviv University, p.78.
- Wechsler, N., Katz, O. and Marco, S., 2006. Estimating historical earthquakes parameters using archeology and geology in Um-El-Kanatir, Dead Sea Transform. *Seismological Society of America*, Annual Meeting.
- Wells, D.L. and Coppersmith, K.J., 1994. New empirical relationship among magnitude, ruptures length, rupture width, rupture area and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**, 974-1002.

- Wilson, R.C. and Keefer, D.K., 1985. Predicting area limits of earthquake-induced landsliding. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 1360, 317-345.
- Young, R. M.-C., 1996. Discontinuous Deformation Analysis Programs, version 96, *User's manual*.
- Zaslavsky, Y., and Shapira, A., 2000. Questioning nonlinear effects in Eilat during MW=7.1 Gulf of Aqaba Earthquakes. *XXVII General assembly of the European Seismological Commission (ESC)*, 343-347.
- Zilberman, E., Amit, R., Heimann, A. and Porat, N., 2000. Changes in Holocene paleoseismic activity in the Hula pull-apart basin, Dead Sea Rift, northern Israel. *Tectonophysics*, **321**, 237-252.
- Zilberman, E., Amit, R. Bruner, I. And Nahmias, Y., 2004. Neotectonic and paleoseismic study – Bet Shean Valley. Geological Survey of Israel report GSI/15/04, 37 pp.



**Ben Gurion University of the Negev
Faculty of Natural Sciences
Department of Geological and Environmental Sciences**

Seismic Hazard Estimation along Eastern Margins of Sea of Galilee by Back Analysis of Seismically Induced Natural and Structural Failures

Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
M.Sc. Degree in the Faculty of Natural Sciences

by Gony Yagoda-Biran

January, 2008

Shvat, 5768

Seismic Hazard Estimation along Eastern Margins of Sea of Galilee by Back Analysis of Seismically Induced Natural and Structural Failures

Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
M.Sc. Degree
in the Department of Geological and Environmental Sciences
Faculty of Natural Sciences
Ben Gurion University of the Negev

by Gony Yagoda-Biran

Under Supervision of Prof. Yossef H. Hatzor

**Dr. Rivka Amit
and Dr. Oded Katz**

Author _____

Date _____

Supervisor Y. Hatzor _____

Date _____

Supervisor Rivka Amit _____

Date _____

Supervisor Oded Katz _____

Date _____

Chairman of graduate

studies committee _____

Date _____

Seismic Hazard Estimation along Eastern Margins of Sea of Galilee by Back Analysis of Seismically Induced Natural and Structural Failures

Gony Yagoda-Biran

Abstract

The Sea of Galilee is located in a northern segment of the Dead Sea Transform, a seismically active rift zone. Investigating the seismic potential of this area has become an increasingly important issue in seismic hazard prediction for Israel. This work is attempting to assess the seismic hazard for the eastern margins of the Sea of Galilee through two different and independent methods of analysis: 1) backward, pseudo-static analysis using the limit equilibrium method (LEM) for an ancient rotational landslide, and 2) backward, fully dynamic analysis using a numerical distinct element approach (DDA) of collapsed Byzantine columns in the archeological site of Susita (Hippos).

The study area was mapped for geological units and structural features thus producing a morphotectonic map which presents all lineaments, landslides, alluvial fans, lake shore, fluvial system and springs. The largest landslide was selected for a detailed analysis. In addition, a high resolution seismic reflection survey along the landslide was conducted. The seismic reflection survey results indicate several faults that are aligned with mapped lineaments on the surface. In addition, several listric-like slip surfaces tens of meters deep, were interpreted within the landslide mass. A 3m deep trench exposed three colluvial units with soil profile at the top of each unit composing the landslide. The different colluvial units and the development of the three soil profiles implies cyclic down-slope movement of material and quiescent periods between movement episodes, allowing soil profile formation. The sedimentary and pedogenic

disturbances detected in the trench, are spatially associated with a mapped fault. The colluvial units dated (young to old) 4000, 6000 and 60,000 years, accordingly.

Based on the detailed mapping of the landslide area, samples representing the sheared rock were taken for laboratory tests. Drained direct shear tests were performed on "undisturbed" samples at natural water content to determine peak and residual shear strength. Slope stability was analyzed under different combinations of available cohesion and friction angles. The slope was found to be stable under static conditions, even when saturated. That observation led to the conclusion that an external force, such as an earthquake, is needed for destabilizing the slope. Results of a pseudo static analysis suggest that under a horizontal PGA of 0.37 g the slope will fail in shear along a slip surface with residual shear strength.

At Susita, the cathedral columns were mapped and measured. First the DDA method was validated using an existing analytical solution for dynamic rocking of a free standing column. The columns were then subjected to periodic acceleration sine functions as well as real earthquake accelerograms. When subjected to cyclic sine input the obtained threshold PGA for column collapse shows high frequency dependence. Since a free standing column has no natural frequency, the range of PGA remains within relatively large bounds: 0.2 g -1 g. When the columns were subjected to real accelerograms however, the critical PGA was restricted to confined bounds: 0.2 g -0.4 g, with an average of 0.3 g.

Based on the work presented here, the critical PGA found for this area is 0.3 g, similar to seismic risk predicted by Israel seismic building code for this region. Such a strong ground motion could be generated by an earthquake of Magnitude 6.0 and above, depending on the distance from the site.

Table of Contents

1. Introduction	1
1.1 Research Area	2
1.1.1 Geography and Geomorphology	2
1.1.2 Stratigraphy	2
1.1.3 Structure	6
1.1.4 Seismic Activity and Rate	13
1.1.5 Reoccurrence Intervals of Earthquakes	14
1.2 Research Goals	15
2. Scientific Background	16
2.1 Backward Analysis of Slope Failure for Expected PGA Assessment	16
2.1.1 Limit Equilibrium Method	17
2.1.2 The Method of Slices	19
2.2 Numerical solutions and DDA	21
2.2.1 Numerical Methods	21
2.2.2 Basic Concepts of the DDA Method	22
2.2.3 DDA Formulations	23
2.2.4 Working with DDA	24
2.3 Age Determination of Slip Along Young Faults	25
2.4 Paleo –Magnitudes Evaluation	26
2.5 Seismic Risk Assessment	27
3. Research methods	33
3.1 Field Methods	33
3.1.1 Mapping	33
3.1.2 Trenching	33
3.1.3 Rock Sampling	34
3.1.4 Seismic Reflection Survey	34
3.2 Laboratory Tests	34
3.2.1 Soil Classification	34
3.2.2 Direct Shear Tests	36

3.3	Slope Modeling with SLOPE/W 2004	40
3.4	Masonry Structure Failure Modeling with DDA	41
3.4.1	The Archeological Site of Susita.....	41
3.4.2	Field Measurements	42
3.4.3	Validation, Calibration and Optimization of the DDA	43
4.	Results	52
4.1	Morphotectonic Mapping	52
4.2	Seismic Reflection Survey	54
4.3	Landslide Sub-Surface Structure.....	58
4.3.1	Landslide Mapping.....	58
4.3.2	Geological Cross Section Comparison.....	61
4.3.3	Landslide Shallow Structure	62
4.4	Stability Analysis of the Landslide	67
4.4.1	Laboratory Tests.....	68
4.4.2	Backward Analysis of the Slope Failure Using SLOPE/W	71
4.5	Column Collapse Analysis at Susita	76
4.5.1	Results for Dynamic Analysis with Acceleration in the Form of a Periodical Sine Function	76
4.5.2	Results for Dynamic Analysis with Acceleration from Real Earthquakes	78
4.5.3	Discussing the Results.....	79
5.	Discussion.....	81
5.1	Expected PGA in the Research Area.....	82
5.2	Magnitude Evaluation for Strong Earthquakes in the Research Area.....	82
5.3	Implications on the Magnitude of the 749 Earthquake	87
5.4	Hazard Assessment for the Next Strong Earthquake in the Area	88
5.5	Further Research	89
6.	Summary and Conclusion	91
	Appendix A: Geophysical Survey	92
	Appendix B: Mathematical Proof for the Lack of a Constant Natural Frequency of a Free Standing Column	94
	References	97