



משרד התשתיות הלאומיות
משרד האנרגיה והמים
המכון הגיאולוגי

מסלולי נפילת סלעים במדרון: הערכת הסכנה לנפילות סלעים לעבר שטח הקיבוצים חפצי-בה ובית אלפא

יובל לוי



© הוצאה לאור ע"י המכון הגיאולוגי, רח' מלכי ישראל 30, ירושלים 95501

עיצוב עטיפה: בת-שבע כהן

תמונת השער: המדרון הנחקר במורדות הר הגלבוע מעל הקיבוצים חפצי-בה ובית אלפא



משרד התשתיות הלאומיות
האנרגיה והמים
המכון הגיאולוגי

מסלולי נפילת סלעים במדרון: הערכת הסכנה לנפילות סלעים לעבר שטח הקיבוצים חפצי בה ובית אלפא

יובל לוי

עבודה זו הוגשה כחיבור לקבלת תואר שני באוניברסיטה העברית בירושלים

העבודה נעשתה בהדרכתם של:
דר' עודד כץ, המכון הגיאולוגי, ירושלים
פרופ' אמוץ עגנון, המכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה העברית בירושלים

העבודה המוצגת כאן הינה הערכה גיאולוגית אשר אינה יכולה להיחשב כחוות דעת הנדסית. העבודה לא באה לייתר או להחליף חקירה הנדסית לצרכי הקטנת או מניעת הסכנה לנפילת סלעים לעבר שטח הקיבוצים חפצי-בה ובית אלפא. שימוש בחומר ובתוצאות המוצגים כאן מחייב הבנה של המגבלות והשגיאות שנובעות משיטת העבודה והוא על דעת ואחריות המשתמש בלבד.

תודות

ברצוני להודות למנחי עודד ואמוץ על ההדרכה והקשב, על הרעיונות והחופש שנתנו לי במהלך המחקר, על העצות אשר ילוו אותי בהמשך דרכי, וכמובן על כך שאיפשרו לי לעבוד על אחד המדרונות היפים ביותר בארץ. תודה רבה.

ברצוני להודות מקרב לב לחברי עוז הראל ולאחי אורי שעזרו לי להתמודד עם כתיבת הקוד בתוכנת המטלאב. תודה לכל מי הסכים להזיע או להירטב איתי בשדה: ידידיה גלמן, חנן צוקר, ענר פלדור, אחי מיכאל, גלה פירשטיין, ניר בט וענת פלג. תודה לשליו סימן טוב, מור כנרי וזאב רכס על הייעוץ והעזרה שהגישו לי. תודה לקרן יוסף על העזרה ברגעי הסיום.

תודה לאנשי המכון שעזרו: הלל לוצקי שסייע במדידות בשדה, נעמי פורת אשר הקדישה מזמנה ואיפשרה לי לעבוד במעבדת ה-OSL, וכמובן תודה לבת שבע ונילי על העזרה בעיצוב ובדפוס.

תודה מיוחדת לאנשי קיבוץ חפצי-בה רוני קופמן ויורם סייג שאיפשרו את קייומה של העבודה וסייעו לי תמיד בכל פעם אשר פנית אליהם.

תקציר

נפילת סלעים, תופעה המאפיינת מדרונות סלע תלולים, מסכנת חיי אדם ורכוש באזורים שונים ברחבי העולם. בקיבוצים חפציבה ובית אלפא, למרגלות מדרונות הרי הגלבוע, תועדו בעבר מקרי נפילות של סלעים אשר סיכנו חיי אדם. כדי למזער פגיעה עתידית ברכוש ונפש, הערכנו את הסכנה הנשקפת לקיבוצים מנפילות סלעים. הערכנו את התנאים שיובילו לנפילת סלעים, וחישבנו בעזרת תוכנה מסחרית ייעודית את מסלולי הסלעים והמהירות שלהם במורד המדרון. בנוסף, חישבנו בעזרת מודל חישובי אשר תכנתנו ב MatLab את טווח הסכנה ובחנו הנחות מקובלות במודלים להערכת סכנה. על מנת לאמוד את מסלולי הסלעים במדויק מיפנו ברזולוציה גבוהה את גאומטריית המדרון, את המקורות ואזורי עצירת הסלעים ואספנו נתונים נוספים הרלוונטיים לחישובים. מצאנו כי הסלעים נמצאים במצב לא יציב אך הם נבלמים על ידי זיזים במדרון, במידה והזיזים יכנעו למאמץ הפועל עליהם, עקב רעידת אדמה או בלייה, הסלעים יפלו במורד המדרון. להערכתנו, השטח הדרומי של קיבוץ חפציבה נמצא בטווח הסכנה של נפילות הסלעים, קיבוץ בית-אלפא אינו נמצא בסכנה מנפילות סלעים. בניגוד לצפוי מצאנו כי המהירות ההתחלתית של הסלעים אינה משפיעה על המרחק המירבי אותו הם עשויים לעבור, אלא רק על פיזורם לאורך המדרון. כמו כן אנו מציעים כי היחס האל-מימדי בין חיספוס המדרון לגודל הסלע הנופל משפיע על אופי התנועה של הסלעים ובכך משפיע על הערכת הסכנה: סלע גדול לא בהכרח יגיע רחוק יותר במורד המדרון. תוצאות העבודה תורמות לתכנון צעדים למניעת פגיעה בנפש ורכוש. המודל שפיתחנו יכול להוות בסיס לבחינת השפעתם של גורמים נוספים על תהליך נפילת הסלעים, וניתן להיעזר בו ובתבונות שפיתחנו לצורך מחקרים דומים בצורה יעילה ומדויקת יותר בעתיד.

מקרא

2	תודות
3	תקציר
8	1. מבוא
9	1.1 רקע גאולוגי ועדויות לנפילות סלעים
14	2. מטרת המחקר
15	3. חומרים ושיטות
15	3.1 התנאים לנפילת סלעים
18	3.2 חישוב מסלולי הסלעים במורד המדרון
18	3.2.1 מודל MATLAB
24	3.2.2 תוכנת CRSP
26	3.3 בחינה אנליטית של התהליך וההנחות במודלים
27	3.4 הגדרת התנאים לנפילות על ידי תארוך נפילות היסטוריות
28	4. תוצאות
28	4.1 חישוב יציבות הסלעים והגדרת תנאי ההתחלה לנפילת סלעים
28	4.1.1 אומדן זווית החיכוך הפנימית
29	4.1.2 חישובי יציבות
32	4.1.3 תיארוך נפילות
34	4.2 איסוף תשומות המודל וכיוון
36	4.2.1 גודל הסלעים וצורתם
39	4.2.2 מדידת גאומטרית החתכים
40	4.2.3 חספוס
41	4.2.4 כיוול מקדמי התקומה והחיכוך בתוכנת ה CRSP
42	4.3 בדיקת רגישות למהירות התחלתית
46	4.4 הערכת הסכנה בשטח הקיבוצים
48	4.4.1 מרחק עצירה וההסתברות לחציית הגדר
52	4.4.3 מהירות מקסימלית לאורך החתכים
52	4.4.4 גובה קפיצה מקסימלי לאורך החתכים
55	4.4.5 פיזור לאורך החתך
63	5. דיון
63	5.1 אזור העבודה

63.....	5.1.1 יציבות הסלעים ותנאי ההתחלה.
63.....	5.1.2 תיארוך נפילות והערכת הגורם המפעיל
64.....	5.1.3 תנועת הסלעים במורד המדרון
64.....	5.2 בחינת הנחות המודל והגורמים המשפיעים על תנועת הסלע במדרון.
64.....	5.2.1 מודל המטלאב
65.....	5.2.2 מהירות התחלתית
66.....	5.2.3 גאומטרית המדרון וחספוס המדרון
69.....	5.3 הערכת הסיכון לנפילות סלעים.
70.....	6. סיכום
71.....	7. מימון
71.....	8. רשימת ספרות
77.....	נספחים
77.....	נספח 1 – קודים אשר שימשו בתוכנת MATLAB
77.....	1.1 הקוד אשר שימש להערכת הסכנה
83.....	1.2 הקודים אשר שימשו להערכת מהירות סופית על גבי מדרון ישר
88.....	1.3 בחינות לקוד
93.....	נספח 2. תיעוד מדידת הסלעים
97.....	Abstract

רשימת איורים

9.....	איור 1. מפת מיקום.
11.....	איור 2. תצלום פנורמי של שטח העבודה
12.....	איור 3. הגיאולוגיה והטופוגרפיה של אזור העבודה.
12.....	איור 4. סלע מתצורת סכנין שנחשף בבסיס המדרון במהלך עבודת התשתית של הרחבת קיבוץ חפציבה.
13.....	איור 5. מפה סטרוקטורלית גג חבורת יהודה (Hatzor & Reches, 1990).
16.....	איור 6. סלעים בשלבי ניתוק סופיים במדרון מעל חפציבה.
16.....	איור 7. המאמצים הפועלים על הסלע בעת ארוע גשם.
20.....	איור 8. גרף המציג את מסלול הסלע לאורך מדרון ישר במודל המטלאב.
23.....	איור 9. איור הממחיש את תנאי העצירה
23.....	איור 10. איור הממחיש את אופן חישוב מיקום מרכז המסה בשלבי הגילגול.
24.....	איור 11. מפה המציגה את מיקום חתכי הכיול
26.....	איור 12. החספוס S
28.....	איור 13. ניסוי שדה למדידת זווית החיכוך הפנימי.
28.....	איור 14. איור המדגים את ניסוי המעבדה למדידת זווית החיכוך הפנימי.
30.....	איור 15. צילום של סלע אשר נבלם על ידי זיז

- איור 16. איור הממחיש את הכוחות הפועלים על הזיז בזמן רעידת אדמה.....30
- איור 17. תמונה של סידוק אופייני לאורך מחשוף של קיר סלע בתצורת סכנין.....32
- איור 18. מפת מקורות וחתכים.....35
- איור 19. מפה המציגה את השטח בו נמדדו סלעים ואת המקורות האפשריים לנפילת סלעים.....36
- איור 20. התפלגות צורת הסלעים.....37
- איור 21. היסטוגרמה המציגה את כמות הסלעים לפי טווח נפחים.....37
- איור 22. גרף המציג שכיחות מצטברת לפי נפח סלע.....38
- איור 23. תצלומים המציגים סלעים בנפחים של כ-100 מטרים מעוקבים.....38
- איור 24. תצלומים שונים המציגים את המדידות בעזרת מכשיר ה-GPS-RTK במורד המדרון.....39
- איור 25. גרפים המציגים את תוצאות מדידת חתך 4 בעזרת מכשיר ה-GPS-RTK.....40
- איור 26. גרף המציג את גודל וקטור המהירות לאורך המדרון כפי שמתקבל ממודל המטלאב.....44
- איור 27. גרף המציג את גודל וקטור המהירות הקווית של סלע לפי שיפועים שונים.....45
- איור 28. המהירות המקסימלית, לאחר התייצבות המהירות באמפליטודה קבועה.....46
- איור 29. מרחק העצירה המקסימלי של סלעים מתחילת החתך.....47
- איור 30. גרף ההסתברות של סלעים בנפחים שונים לחצות את קו הגדר.....48
- איור 31. מפת קווי העצירה לפי תוצאות מודל המטלאב.....49
- איור 32. מפת קווי העצירה לפי תוצאות תוכנת CRSP.....49
- איור 33. מפת קווי עצירה עבור סלעים בנפח של 1.5 מטר מעוקב.....50
- איור 34. מפת קווי עצירה עבור סלעים בנפח של 4 מטר מעוקב.....51
- איור 35. מפת קווי עצירה עבור סלעים בנפח של 30 מטרים מעוקבים.....52
- איור 36. המהירות המקסימלית לאורך החתכים כפי שהתקבלה בתוכנת CRSP.....53
- איור 37. גובה הקפיצה המקסימלי לאורך החתכים כפי שהתקבל בתוכנת CRSP.....54
- איור 38. התפלגות הסלעים לאורך החתכים כפי שהתקבלה בתוכנת CRSP.....56
- איור 39. התפלגות מצטברת של עצירת הסלעים לאורך החתכים כפי שהתקבלה בתוכנת CRSP.....58
- איור 40. מפת קווי עצירה לפי הסתברות עבור סלעים בנפח של 1.5 מטר מעוקב.....60
- איור 41. מפת קווי עצירה לפי הסתברות עבור סלעים בנפח של 4 מטרים מעוקבים.....61
- איור 42. מפת קווי עצירה לפי הסתברות עבור סלעים בנפח של 30 מטרים מעוקבים.....62
- איור 43. אופני תנועה של סלע לפי שיפוע ממוצע (after Dorren, 2003).....67
- איור 44. איור סכמתי המדגים כי סלע גדול יותר עשוי לפגוע במדרון בזווית נמוכה יותר תוך כדי גילגול.....68
- איור 45. גרפים שהתקבלו ממדידות EDM.....69
- איור 46. מהירות לאורך מדרון קבוע עבור סלע כדורי קטן.....88
- איור 47. השוואה של חישוב זווית בליסטית לפי שיפוע מדרון לפי פתרון אנליטי למחזור גבול והקוד אשר שימש להערכת הסכנה במטלאב.....90
- איור 48. גרף המציג את גובה הסלע לפי זמן למקרה בו הסלע קופץ על גבי מישור אופקי.....91
- איור 49. גרף סכמתי של התנגשויות הסלע בקרקע (Falcon et al., 1998).....91
- איור 50. בגרף זה ניתן לראות השוואה בין המהירות לפי המרחק לאורך המדרון כאשר קו מייצג משוואות ניחות במהירות ממקור אחר.....92

רשימת טבלאות

24.....	טבלה 1. טבלת מהירות זוויתית קריטית.
29.....	טבלה 2. תוצאות המדידות וחישובי היציבות השונים. ה.
31.....	טבלה 3. תוצאות חישוב התנאים לחוסר יציבות של סלע מספר 2.
33.....	טבלה 4. תוצאות תיארוך OSL.
40.....	טבלה 5. תוצאות מדידת החספוס, R-רדיוס הסלע הנופל.
41.....	טבלה 6. ערכי המקדמים המתאימים לשטח העבודה.
42.....	טבלה 7. תאוצת הקרקע לפי מקורות שונים.
91.....	טבלה 8. השוואה בין נקודת עצירה לפי תאוצות כובד שונות.

רשימת משוואות

17.....	משוואה 1.
17.....	משוואה 2.
17.....	משוואה 3.
19.....	משוואה 4.
20.....	משוואה 5.
20.....	משוואה 6.
21.....	משוואה 7.
21.....	משוואה 8.
22.....	משוואה 9.
22.....	משוואה 10.
25.....	משוואה 11.
29.....	משוואה 12.
42.....	משוואה 13.

1. מבוא

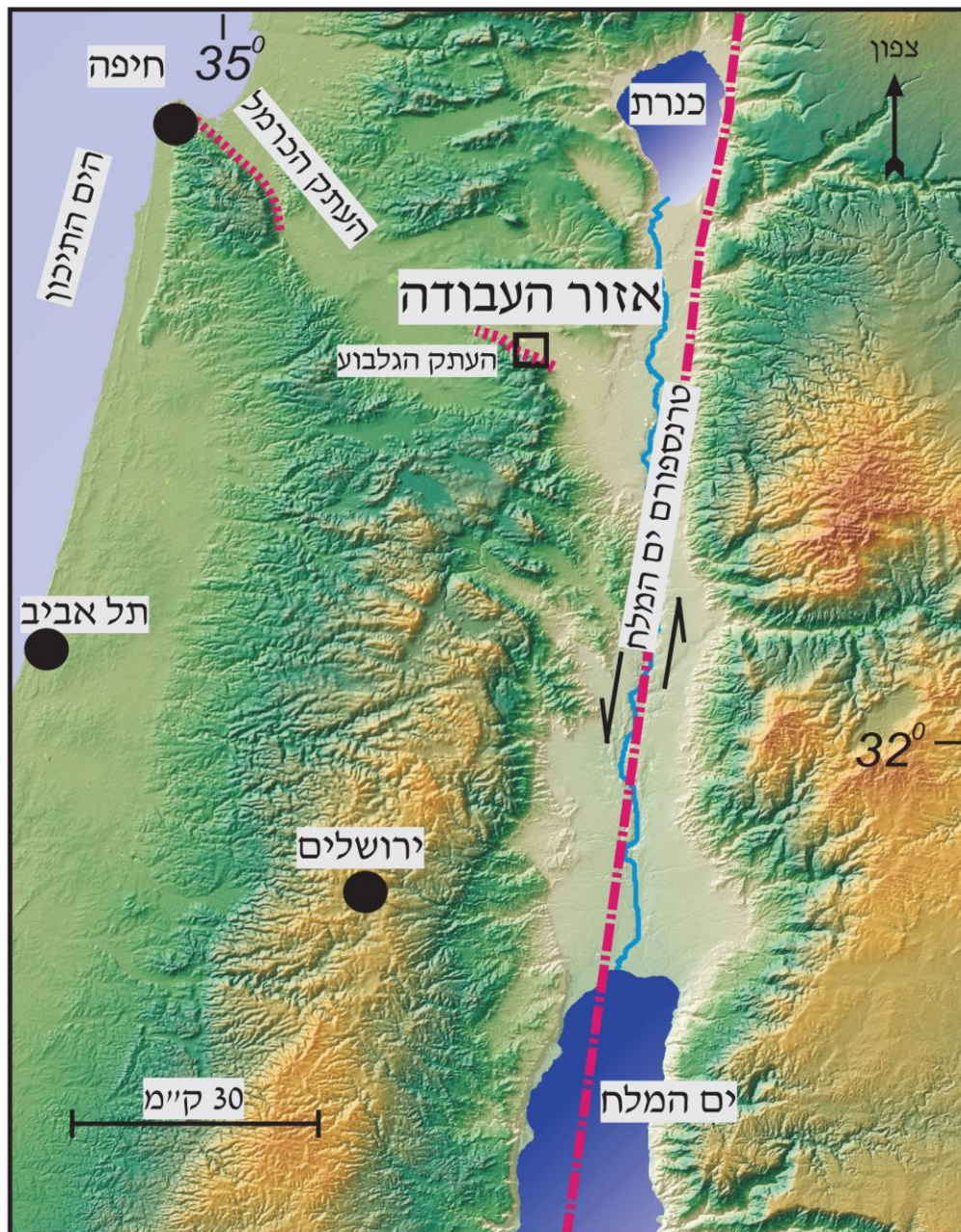
נפילת סלעים (RockFall) היא תופעה טבעית המאפיינת מדרונות תלולים ומצוקים בהם חשופים סלעים קשים (Dorren, 2003; Whalley, 1984) או קירות חצובים כגון אלה הנמצאים בצדי דרכים או מחצבות (Whalley, 1984). התופעה נשלטת על ידי גורמים גאולוגיים וגאומטריים המשפיעים על היקף, סוג ועוצמת התופעה (Luckman, 1976). הגורמים המפעילים (Triggers) כוללים תופעות מטאורולוגיות (Luckman, 1976), ורעידות אדמה (Kobayashi et al., 1990; Ambraseys, 1991). הסלעים הנופלים יכולים להגיע לנפחים של מאות מטרים מעוקבים. תחום הנפחים האופייניים (characteristic) לנפילות הוא 10^{-2} – 10^2 מטר מעוקב (Crosta & Agliardi, 2004). התפלגות הנפיצות מאופיינת בדעיכה מעריכית בתחום הנפחים של 10^2 – 10^{10} מטרים מעוקבים (Dussauge et al., 2003; Malamud et al., 2004). בזמן הנפילה הסלעים מגיעים למהירויות של עד עשרות מטרים בשניה (Bourrier et al., 2012). תופעה זו מסכנת חיי אדם ורכוש (Evans & Hungr, 1993). על מנת למזער את הנזק הצפוי מנפילות סלעים עלה הצורך להבין ולכמת את התופעה.

Ritchie (1963) היה הראשון שהציע שיטה להערכת הסכנה ותכנון הגנות מפני סלעים הנעים במורד המדרון לאחר ניתוקם. בעבודתו הוא התבסס בעיקר על ניסויים בשדה וחישוב אנרגית ומסלול הסלעים במורד המדרון. בנוסף הוא גם הגדיר על סמך תצפיות את אופי התנועה בהתאם לשיפועים השונים. הפעולות למזעור הנזק שקדמו לעבודתו התמקדו במניעת ניתוק הסלעים ממקומם. במהלך השנים הסיכונים מנפילות סלעים נסקרו ומופו ברחבי העולם (Guzzetti et al., 2004; Palma et al., 2012; Chiessi et al., 2010) ובארץ (Katz et al., 2011; Kanari, 2008). כיום תוכנות מחשב אשר מריצות מודלים דו מימדיים (Jones et al., 2000), ותלת מימדיים (Hengxing, Derek, & Lim, 2007; Agliardi & Crosta, 2003; Guzzetti et al., 2002), משמשות לאיתור אזורים העלולים להיפגע ולהערכת הסכנה. תוכנות אלה מדמות את מסלול נפילת הסלעים בהינתן משתנים המתארים את הגיאומטריה, התכונות הפיזיקליות של המדרון ושל הסלע הנופל ותנאי ההתחלה של מסלול הנפילה. הקושי העיקרי בעבודות מסוג זה הוא כימות או הערכה של מקדמי התקומה (restitution) והחיכוך, המייצגים את תכונות החומר של המדרון, מכיוון שקשה למדוד אותם מדידה ישירה. במספר רב של עבודות נחקרו ונאמדו המקדמים בניסויים במעבדה (Chau et al., 2002; Peng, 2000; Buzzi et al., 2012) ובשדה (Spadari et al., 2012; Azzoni & de Freitas, 1995). במקרים בהם מדידת המקדמים לא התאפשרה כוילו המקדמים לפי מסלולים של נפילות קודמות על בסיס חישוב לאחור - back analysis (Katz et al., 2011). העבודה הנוכחית אומדת את הסכנה מנפילת סלעים לעבר שטח הקיבוצים חפצי-

בה ובית-אלפא הממוקמים למרגלות רכס הגלבע. באזורים אלו קיימות עדויות היסטוריות וגאולוגיות לנפילות סלעים בעבר. אומדן הסכנה מתבסס על ניתוח גאולוגי ומכני בשדה תוך שימוש בתוכנת הדמייה פיזיקלית דו-מימדית של תנועת סלעים במורד מדרון, ובהתבסס על הערכה של מקדמי תקומה וכיול המודל לשטח לפי מסלולים של נפילות קודמות.

1.1 רקע גאולוגי ועדויות לנפילות סלעים

שטח העבודה, הקיבוצים חפצי-בה ובית-אלפא, משתרע למרגלות המדרון הצפון מזרחי של הגלבע (איור 1).



איור 1. מפת מיקום. שטח העבודה, מסומן במלבן שחור (פירוט באיור 2).

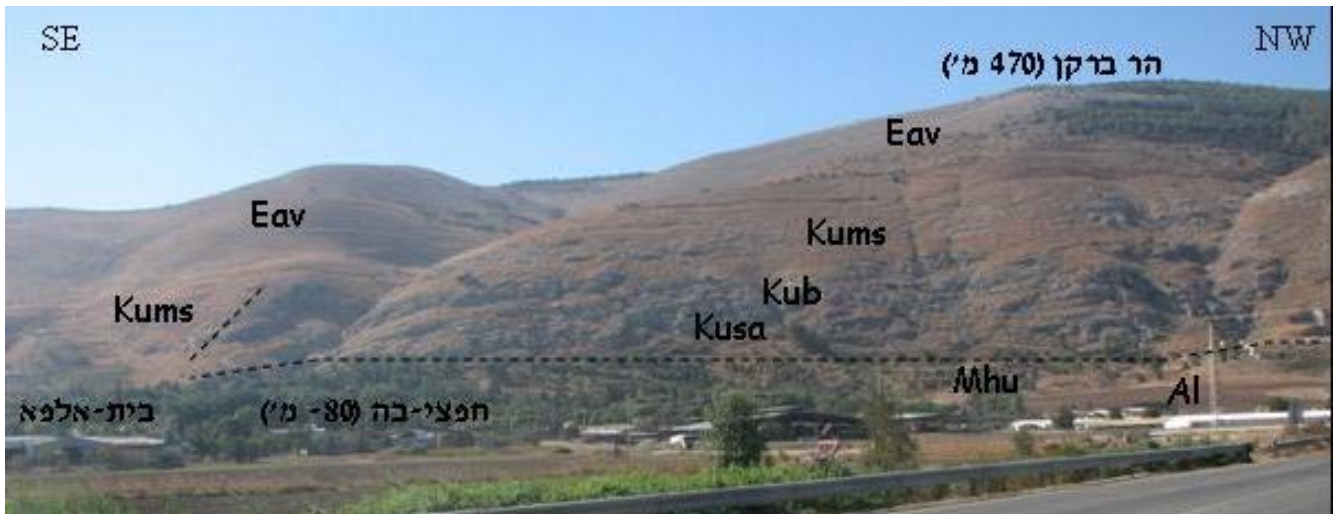
מדובר ברצועה ברוחב של 1-2 ק"מ המקשרת בין מורדות הר ברקן (גובה 457 מטרים מעל פני הים) לבין עמק חרוד (85- מ') (איור 2). שיפוע המדרונות באזור העבודה תלול ומגיע עד לכ- 60° (איור 3). במדרונות מתחתרים נחלים, לכיוון צפון, בעלי אפיק צר ותלול. בשטח העבודה ובקרבתו נחשפות תצורות סחנין ובעינה מחבורת יהודה, מנוחה, מישאש, ע'רב וטקיייה מחבורת הר הצופים, מרוז ויזרעאל מחבורת עבדת והורדוס מחבורת טבריה (איורים 2 ו-3), (חצור י', 1991). התצורות הרלוונטיות לעניין נפילות הסלעים הן סחנין (מגיל קנומן) החשופה במעלה המדרון והורדוס (מגיל מיוקן) החשופה בבסיס המדרון. תצורות סחנין, הבנויה סלעי דולומיט, מהווה את המקור לסלעים הנופלים לעבר הקיבוצים. תצורה זו מאופיינת בשכוב גס, דרגשיות ומצוקים של 7-10 מטרים. תצורת הורדוס, בנויה קונגלומרט תמוך חלוקים, ומכוסה בטלוס או קרקע בשטח העבודה. המגע בין התצורות הוא של העתקה. ההעתק הוא העתק הגלבווע, העתק נורמלי בעל סטריק ממוצע לכיוון 300° , נטיית מישור ההעתק היא $55-60^{\circ}$ וכיוון הנטייה משתנה בין $005-052^{\circ}$. הזריקה היא של כ- 750 מטרים מול מרכז הגלבווע ודועכת לצדדים. שיפוע המדרון מעל ההעתק $35-60^{\circ}$ בחלק בו חשופה תצורת סחנין ובין 10° ל 35° מעלות במדרון מתחת להעתק, בחלק בו נחשפת תצורת הורדוס (איור 3).

אזור העבודה בגבולו הצפון מזרחי של גוש הגלבווע (איור 5). גוש הגלבווע נמצא במפגש של שלושה מחוזות סטרוקטורליים (Hatzor & Reches, 1990). ראשית, הקצה הצפון מזרחי של אזור צפון השומרון שהמבנים השולטים בו הם קמטים והעתקים נורמלים המשתייכים למבני הקשת הסורית מגיל קרטיקון עליון עד האאוקן המוקדם - ציר הקמטים בתוך גוש הגלבווע בכיוון צפון-צפון-מזרח. שנית, הקצה הדרום מערבי של הגליל התחתון המזרחי בו שולטים העתקים בכיוון מזרח מערב, גושים נטויים ומסובבים מגיל אאוקן-נאוגן. והשלישי הוא השוליים המערביים של בקע ים המלח. העתקי השוליים המערביים של הבקע הם העתקים נורמלים בעלי זווית חדה עם כיוון צפון דרום. זמן החזרה לרעידות אדמה על בקע ים המלח אינו חד משמעי. בספרות ניתן למצוא הערכות לזמן חזרה של רעידות אדמה במגניטודה 5 - 7 של עשרות עד אלפי שנים בהתאמה (Marco et al., 1996; Ken-Tor et al., 2001; Kagan et al., 2011; Begin et al., 2005; Hamiel, et al., 2009; et al., 2005). כאשר רעידת אדמה במגניטודה 5 ומעלה עלולה לגרום לנפילות סלעים (Keefe, 1984).

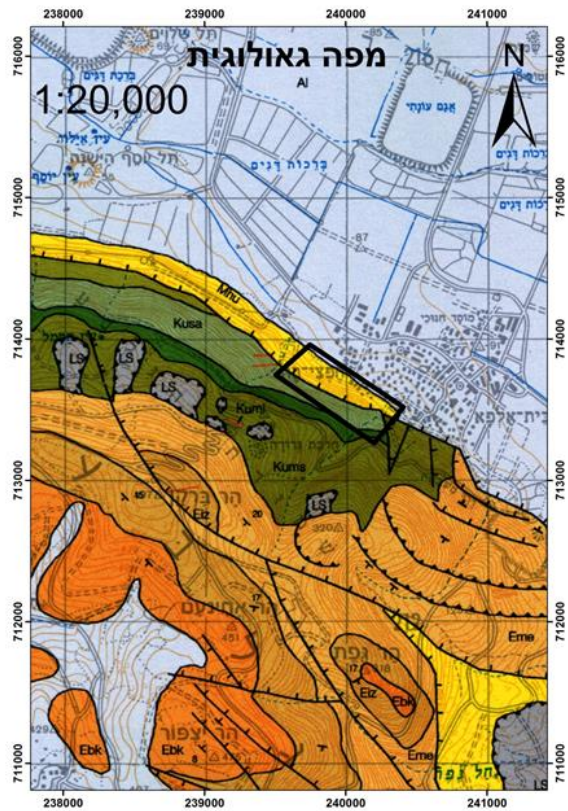
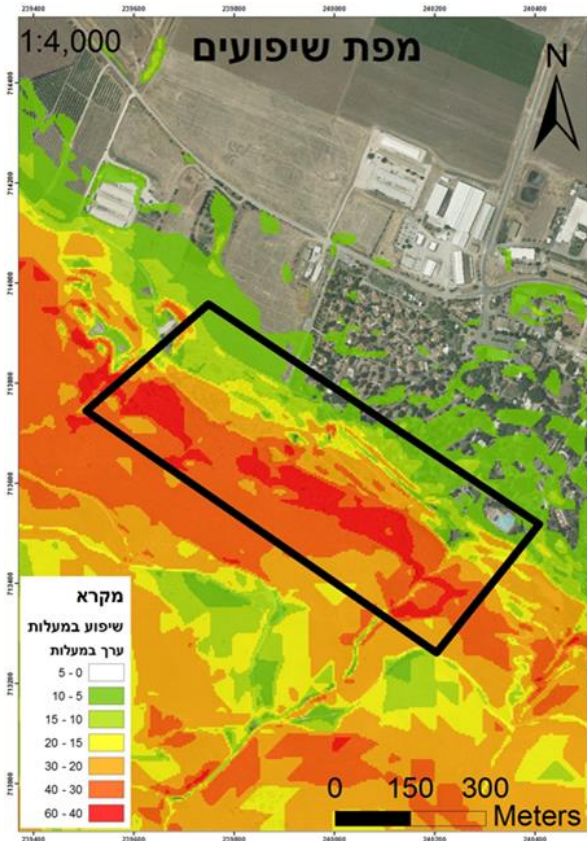
במדרון מעל הקיבוצים, במחשוף של תצורת סחנין, מצויים מצוקים שבהם סלעים בהפרדות מלאה או חלקית מסלע האם. סלעים אלו מועדים לנפילה במורד המדרון. על פי עדויות התושבים בשנים האחרונות אירעו לפחות שתי נפילות סלעים לתוך שטח קיבוץ חפצי-בה אשר סיכנו חיי אדם ורכוש. האירוע הראשון התרחש בחורף הגשום של 1991-2 והשני בתחילת שנות ה-2000. התושבים מספרים על סלעים נוספים בקרבת גדר הקיבוץ שנפלו

בשנים האחרונות. בשטח קיבוץ חפצי-בה פזורים סלעים בנפחים של מטרים מעוקבים אשר ככל הנראה הגיעו מהמדרון במנגנון נפילת סלע. מעדויות של ותיקי הקיבוץ עולה כי השטח שעליו בנויים כיום בתי הקיבוץ היה זרוע בעבר בסלעים גדולים, אשר סוקלו במהלך השנים. במהלך עבודות התשתית להרחבת הקיבוץ ממערב לו נחשף מספר גדול של סלעים דלומיטיים בנפחים של מספר מטרים מעוקבים, הצפים בתוך החומר האלוביאלי (קרקע), שהגיעו גם הם ככל הנראה ממדרון הגלבווע (איור 4).

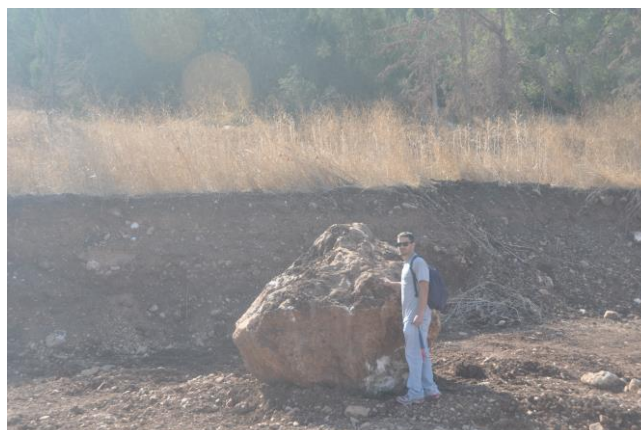
לסיכום, התנאים הגיאולוגיים והגיאוגרפיים שנסקרו לעיל מאפשרים נפילות סלעים ובכך מעלים את החשש כי שטח הקיבוצים חפצי-בה ובית אלפא בבסיס המדרון (איור 3). נמצא תחת סכנה לפגיעה מנפילות סלעים.



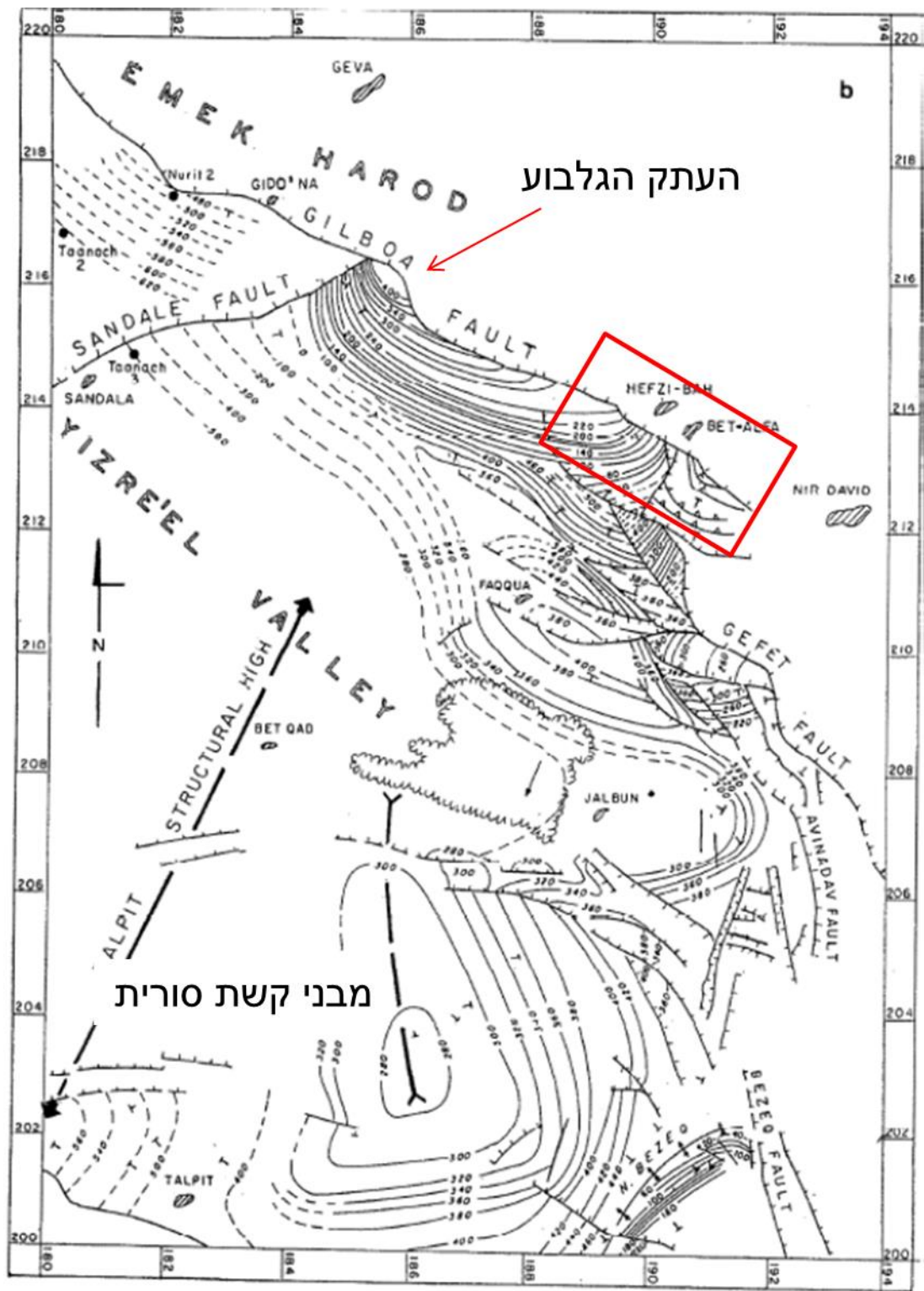
איור 2. תצלום פנורמי של שטח העבודה, הקיבוצים חפצי-בה ובית אלפא. גיאולוגיה (אחרי חצור, 2000):
 Kusa – תצורת סכנין; Kub – תצורת בינה; Kums – חבורת הר הצופים; Eav – חבורת עובדת; Mhu – תצורת הורדוס; Al – אלוביום; קו מקווקו מציין העתק.



איור 3. הגיאולוגיה והטופוגרפיה של אזור העבודה. מימין מפה גיאולוגית (חצור י' ח', 2000): Kusa - תצורת סחנין; Kub - תצורת בינה; Kums - חבורת הר הצופים; Eme - תצורת מרוז; Eiz - תצורת יזרעאל; Ebk - תצורת בר כוכבא; Mhu - תצורת הורדוס; LS - גלישת קרקע; קו עם קווים ניצבים מציין העתק, קו עם משולשים מציין גלישה. הפוליוגון מסמן את שטח העבודה. משמאל מפת שיפועים של אזור העבודה, השיפועים חושבו על בסיס מודל שטח ספרתי בשריג של 4 מטרים (מקור מרכז מיפוי ישראל), בתוכנת ArcGIS. ניתן לראות כי השיפועים הגדולים ביותר הם בתצורת סחנין.



איור 4. סלע מתצורת סחנין שנחשף בבסיס המדרון במהלך עבודת התשתית של הרחבת קיבוץ חפציבה.



איור 5. מפה סטרוקטורלית גג חבורת יהודה (Hatzor & Reches, 1990). שטח העבודה מסומן במלבן אדום, ניתן לראות במפה את צירי הקמטים המשוייכים לקשת הסורית וכמו כן את ההעתיקים השונים. ההעתק העיקרי החוצה את שטח העבודה הוא העתק הגלבוע.

2. מטרת המחקר

מטרת המחקר היתה הערכת הסכנה לנפילות סלעים לעבר שטח הקיבוצים חפצי-בה ובית-אלפא, כאשר הערכת הסכנה מוגדרת כ- (א) איתור ומיפוי של אזורים בשטח הקיבוצים הנמצאים בסכנה יחסית גבוהה לפגיעה מנפילת סלעים; (ב) אפיון התנאים הטופוגרפיים והגאולוגיים הקריטיים לנפילות סלעים; (ג) חישוב של מהירות הסלעים הנופלים וגובה התנועה שלהם מעל הקרקע בגבול השטח המיושב – תרומה לתכנון הגנות למניעת או הקטנת הנזק הצפוי.

בנוסף נבחנו וחושבו תנאי הסף הגורמים לנפילות סלעים, הערכת הסכנה חולקה למספר שלבים:

1. מיפוי של מסלולי הסלעים בנפילות סלעים היסטוריות ובכלל זה איתור של מקור הסלעים במעלה המצוק ונקודות העצירה בבסיס המדרון.
 2. הגדרת התנאים הקריטיים שיובילו לנפילות סלעים (Trigger) בעקבות רעידת אדמה או גשם.
 3. מדידה של גדלי הסלעים שנפלו במורד המדרון על מנת לאפיין את התפלגות גודל הסלעים הצפויה בנפילות סלעים עתידיות.
 4. מדידה בשדה של נתונים טופוגרפיים, גאולוגיים ומכאניים הנדרשים לחישוב מסלולי הסלעים האפשריים במורד המדרון.
 5. כיוול של המודל הממוחשב לתנאים בשדה לאורך מספר מדרונות, על ידי הרצה של המודל עד קבלת התאמה בין התוצאות החישוביות לתנאים בשדה (מסלולי הסלעים שחושבו במודל חופפים לאלו שמופו בשדה).
 6. חישוב אנליטי של מסלולי תנועת הסלעים במורד המדרונות בשטח העבודה.
 7. הערכת הסיכון באזורים השונים בשטח הקיבוצים על ידי ביצוע הדמיות מכוילות בצפיפות גבוהה של מסלולים אפשריים לנפילת סלעים, ומיפוי קווי העצירה של הסלעים בהדמיות אלו.
- מטרה נוספת היתה בחינה של התהליך ושל מספר הנחות בתוכנה המסחרית אשר שימשה להערכת הסכנה.

החידוש בעבודה היא ראשית, באיתור אזורי הסכנה בשטח הקיבוצים ובמתן נתונים פיזיקליים לגבי תנועת הסלעים במורד המדרון אשר בעזרתם ניתן יהיה לתכנן הגנה מתאימה מנפילות סלעים. שנית במסגרת העבודה נבדקו בצורה אנליטית מרכיבים שונים של תנועת הסלעים במורד המדרון אשר בדרך כלל מוזנחים בחישובי סכנה בעזרת תכנת מחשב

ייעודית. פעולות אלו, אשר אינן נעשות באופן תדיר, יתרמו באופן כללי להערכות סכנה דומות מנפילות סלעים במקומות אחרים בארץ ובעולם.

3. חומרים ושיטות

3.1 התנאים לנפילת סלעים

הערכת התנאים לנפילת סלעים משפיעה על תנאי ההתחלה בחישובים המשמשים להערכת הסיכון. תנאי ההתחלה הם: (א) נקודת ההתחלה, כלומר המיקום הגיאוגרפי של מקור הסלעים הנעים. נקודה זו נקבעת בהתאם לאתרים בשטח בהם סלעים מנותקים או מצוקים סדוקים ומצולקים. מצוק מצולק הוא מצוק אשר נראה כי נותק ממנו סלע בזמן האחרון ונחשפו פני סלע טריים. (ב) רכיבי המהירות ההתחלתית של הסלע הנע. מהירות הסלע ההתחלתית יכולה להיות אפסית במקרה בו הגורם לנפילה מטאורולוגי או גבוהה יחסית במקרה בו הגורם לנפילה הוא רעידת אדמה, והסלע מואץ ממוקומו, במקרה זה המהירות ההתחלתית תשתנה בהתאם לעוצמת הרעידה.

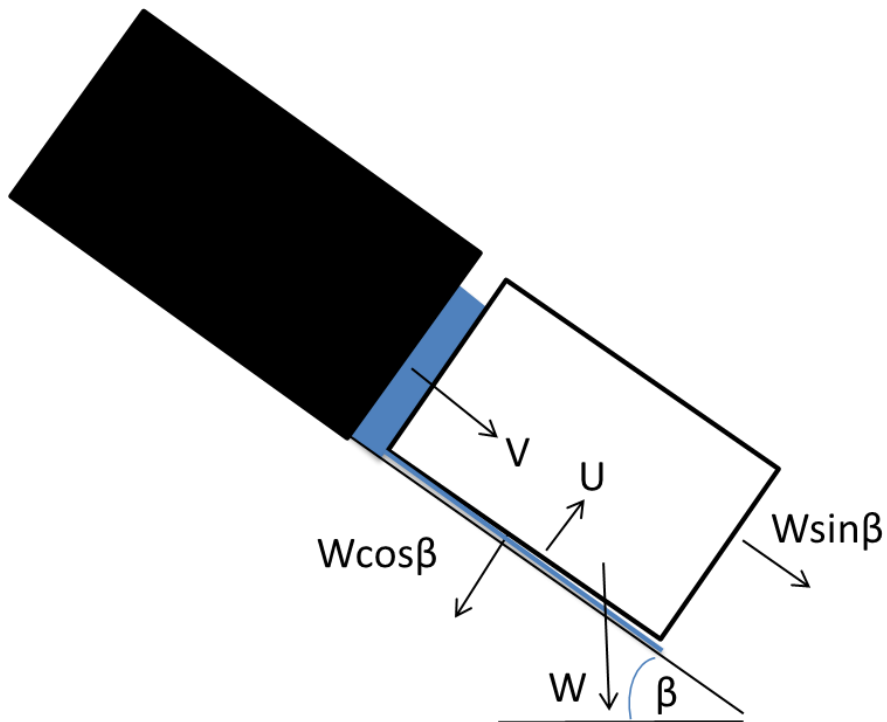
בשטח העבודה, הגורמים המפעילים נפילות סלעים הם גשם לפי מקרים ידועים, ויתכן שגם רעידות אדמה. כדי להגדיר את התנאים בצורה מדוייקת יותר, שתהווה בסיס לתנאי ההתחלה של ההדמיות, חושבה יציבות הסלעים על המדרון במספר אתרים נבחרים בהם הסלעים בשלבי ניתוק סופיים (איור 6).

מנגנון הכשל ניתן לתאור לפי הנוסחה של יציבות מדרון אינסופי (Graham, 1984; Skempton, 1949). בחישובים אלו בודקים את היחס בין מאמץ הגזירה בכשל לבין חוזק הגזירה הקיים ($F = \frac{\text{shear strength}}{\text{actual shear stress}}$) כאשר F , מקדם הבטיחות, שווה או קטן מ-1 תהיה החלקה.

כדי להגדיר את תנאי ההתחלה במקרים שנבחנו, חושב בשלב ראשון מקדם הבטיחות (משוואה 1) שאמור להיות גדול מ-1, שכן הסלעים במצב יציב. על מנת לבדוק התכנות מקרה של ניתוק סלע כתוצאה מגשם חושב לחץ מי הנקבים בבסיס הסלע, ובפני הסלע בצמוד למצוק שיביאו לניתוק הסלע (איור 7).



איור 6. סלעים בשלבי ניתוק סופיים במדרון מעל חפציבה.



איור 7. המאמצים הפועלים על הסלע בעת ארוע גשם. U - לחץ מי הנקבים, V - לחץ המים בסדק מאחורי הסלע, β - זווית המדרון, ϕ - זווית החיכוך הפנימי W - מסה ליחידת גובה. סימון כחול מסמל מים.

$$F = \frac{\bar{C} + (W \cos \beta - u) \tan \phi}{W \sin \beta + V} \text{ משוואה 1.}$$

מקדם הבטיחות (F) למדרון בעת ארוע גשם (עבור חישוב יציבות ללא נוכחות מים יש להזניח את לחץ מי הנקבים).

U- לחץ מי הנקבים, V-לחץ המים בסדק מאחורי הסלע (מוגדר לפי שליש גובה עמודת המים), \bar{C} - קוהזיה (ניתן להזניח במקרה של סלע מנותק), β -זווית המדרון, ϕ - זווית החיכוך הפנימי W- מסה ליחידת גובה (כיוון שמניחים משטח אינסופי).

כאשר מזניחים את הקוהזיה ואין מים במערכת מקדם הביטחון שווה ליחס בין זווית החיכוך הפנימי לזווית המדרון:

$$F = \frac{\tan \phi}{\tan \beta} \text{ משוואה 2.}$$

כדי לקבוע את זווית החיכוך הפנימי של תצורות סחנין נערך ניסוי הכולל הרמה בזווית של שני משטחי סלע טבעיים מתצורה זו המונחים אחד על השני, ובנוסף ניסוי על גבי משטחי סלע בשדה. הזווית שבה התרחשה החלקה בין שני משטחי הסלע היא זווית החיכוך הפנימי. קשר זה מתקבל מתוך המשוואה של יציבות מישור סלע יבש ללא קוהזיה (Graham, 1984).

יציבות הסלעים ברעידת אדמה הוגדרה על ידי חישוב תאוצת קרקע קריטית (משוואה 3), לתנועה על מישור הכשל לפי שיטת ניומארק בדומה למחקרים קודמים של סכנה לגלישת מדרון בעקבות רעידת אדמה (Katz & Crouvi, 2007; Jibson et al., 2000).

$$a_c = (F-1) \sin \beta \text{ משוואה 3.}$$

חישוב תאוצת קרקע קריטית (a_c), ביחידות של תאוצת הכובד [g].

תאוצות הקרקע הצפויות במקרה של רעידת אדמה חושבו בהתבסס על מחקרים קודמים שפיתחו משוואות אמפיריות לקשר רעידות אדמה - תנודות קרקע (Meirova et al., 2008; Boore et al., Somerville et al., 2001; Abrahamson & Silva, 1997; Campbell, 2003). בעזרת משוואות אלו ניתן לחשב את תאוצת הקרקע הצפויה בהתבסס על הערכות של מרחק המוקד ועוצמת הרעידה. לבסוף ניתן להשוות את התוצאות לתאוצת הקרקע הקריטית ולהעריך אם רעידת אדמה אכן עלולה לגרום לנפילות סלעים.

3.2 חישוב מסלולי הסלעים במורד המדרון

מסלולי הסלעים והסכנה לנפילות סלעים הוערכו בעזרת קוד מטלאב (MATLAB), הפותר פתרון אנליטי מקרה של נפילת סלע, ותוכנת Colorado Rockfall Simulation Program (Jones et al., 2000) (CRSP). המודלים הללו מדמים נפילת סלעים בחתכים דו ממדיים כסדרה של קפיצות על המדרון. בכל פגיעה של הסלע הנע במדרון מהירות הסלע מחושבת מחדש בהתאם לזווית הפגיעה ומקדמי התקומה והחיכוך המאפיינים את ספיגת האנרגיה של פני השטח ביחס לאנרגיה הקינטית של הסלע הנע. התנועה באויר, בין הנקודות בהן יפגע הסלע במדרון מחושבת לפי תנועה בנפילה חופשית של גוף נקודתי (מרכז המסה). בזמן הפגיעה צורת הסלעים נלקחת בחשבון לחישוב השינוי במהירות (זוויתית וקווית). טרם הערכת הסכנה בעזרת התוכנות, כויילו ערכים המייצגים את המאפיינים השונים של המדרון והסלעים הנעים לאורכו לשטח העבודה (כפי שיפורט בהמשך). ההדמיות בתוכנות סיפקו מידע על המהירות, גובה הקפיצות והתפלגות העצירה של הסלעים במסלולם מהמקור לאורך מורד המדרון ועד לבסיסו. בעזרת המידע שהתקבל מופו אזורי הפגיעה האפשריים לפי פיזור הסתברותי בהתאם לגודל הבולדר המכסימלי והאופייני שנמדדו בשדה. מידע זה נדרש לתכנון הנדסי יעיל של הגנה למניעת או צמצום הפגיעה הצפויה בנפש וברכוש.

3.2.1 מודל MATLAB

מודל המטלאב פותר בצורה אנליטית מקרה נפילת סלע במורד המדרון ומחשב את המרחק אותו הסלע יעבור. מודל זה מדמה נפילה של סלע הנע כנקודה במרחב דו מימדי. התנועה במורד המדרון מתוארת כסדרה של קפיצות. ברגע הפגיעה הניחות במהירות מחושבת בעזרת מקדמי התקומה והחיכוך (משוואות 4 ו-5). מקדם התקומה מתאר את יחס המהירויות הנורמליות למדרון לפני ואחרי התנגשות. מקדם החיכוך מתאר את אובדן המהירות בכיוון משיק למדרון. מקדמים אלו מוגדרים כקבועים בעבודות נוספות (Chatterjee, 2000; Jones et al., 2011; Volkweim, et al., 1997). המקדמים אשר משמשים לחישוב במודל הוערכו מהספרות ועל פי המוצע בתוכנת CRSP אשר תתואר בהמשך. בחישוב אובדן המהירות המשיקית מימדי הסלע והמהירות הזוויתית נלקחים בחשבון. כאשר הסלע עובר מרחק הקטן מהרדיוס שלו המודל מדמה גילגול כסדרה של קפיצות, במקרה זה המודל מזיז אותו מרחק השווה לרדיוס הסלע במורד המדרון. את נקודות המגע של הסלע עם המדרון המודל מחשב בעזרת חישוב המסלול הבליסטי של הסלע לפי משוואות התנועה וחיתוך שלהן עם משוואה המתארת את המדרון. כאשר המהירות הזוויתית של הסלע יורדת מתחת לסף מסויים הסלע נעצר, סף המהירות לעצירה חושב תחילה על ידי השוואה של האנרגיה הפוטנציאלית לאנרגיית הסיבוב (Rotational Energy), הדרושה לגילגול סלע בצורות ובמידות הסלעים השונים. לאחר מכן הערך כוייל בהתאם לנקודות ומסלולי נפילות היסטוריות כפי שהוערכו בשטח (הקוד מצורף בנספח 1). בחינות שונות לקוד ניתן למצוא בנספח 1.3.

3.2.1.1 תשומות במודל המטלאב.

התשומות אותן יש להזין למודל מתארות את תנאי ההתחלה, התכונות הפיזיקליות והגאומטריה של המדרון והסלע. ערכים אלו מתארים את שטח העבודה והם מפורטים להלן.

3.2.1.2 גאומטריה המדרון

תנועת הסלע במודל המטלאב מחושבת במורד מדרונות שונים. מכיוון שבאזור העבודה מדובר על מדרון המחולק לשתי תצורות התוכנה מחשבת את התנועה לפי משוואת מדרון המתאימה למדרון של תצורות אלו. למדרון של כל תצורה תותאם משוואה אשר תתאר אותו בצורה הטובה ביותר. ההתאמה חושבה בעזרת תוכנת EXCEL לנתונים אשר נמדדו בשטח בעזרת GPS RTK. תחילה המודל מחשב את המהירות בקו ההעתק (קו המגע סכנין – הורדוס, איור 2), ולאחר מכן את נקודת העצירה על גבי המדרון של תצורת הורדוס (החלק התחתון של המדרון- איור 2).

3.2.1.3 תכונות המדרון והסלעים

את התכונות הפיזיקליות המתארות את המדרון והסלעים מייצגים מקדמי התקומה והחיכוך. תכונות אלו הוערכו לפי הספרות (Jones et al., 2000), ולפי כיול של תוכנת CRSP. בנוסף את הסלעים ייצגו צפיפות שנמדדה, ומידות אשר התאימו לצורות האופייניות שנצפו בשטח, בשטח העבודה.

3.2.1.4 תנאי התחלה

תנאי ההתחלה כוללים את נקודת התחלה אשר תוארה בתור נקודה בגובה אופייני של קירות הסלע החשופים. כמו כן הוזנו מהירויות התחלתיות למודל. המהירות הזווית והמהירות בציר הגובה הוזנו בתור אפס. המהירות בציר האופקי חושבה לפי הקשר בין תאוצת הקרקע הצפויה ברעידת אדמה למהירות, חישוב זה יפורט בסעיף 5.2.6.

3.2.1.5 תנועת הסלע במודל המטלאב

תנועת הסלעים מדומה במודל כסדרה של קפיצות במורד המדרון. בשלב המעוף בין שתי נקודות פגיעה, מסלול תנועת הסלעים מתואר כתנועה בליסטית לפי חוקי התנועה של ניוטון, כאשר החיכוך עם האוויר מוזנח (משוואות 4 ו- 5). בשלב ראשון הסלע יוצא מנקודת ההתחלה, ונקודות החיתוך בין המשוואות המתארות את המדרון ותנועת הסלע מחושבת. כאשר הנקודה בעלת ערך ה-X הגדול יותר היא נקודת הפגיעה במדרון (משוואה 6).

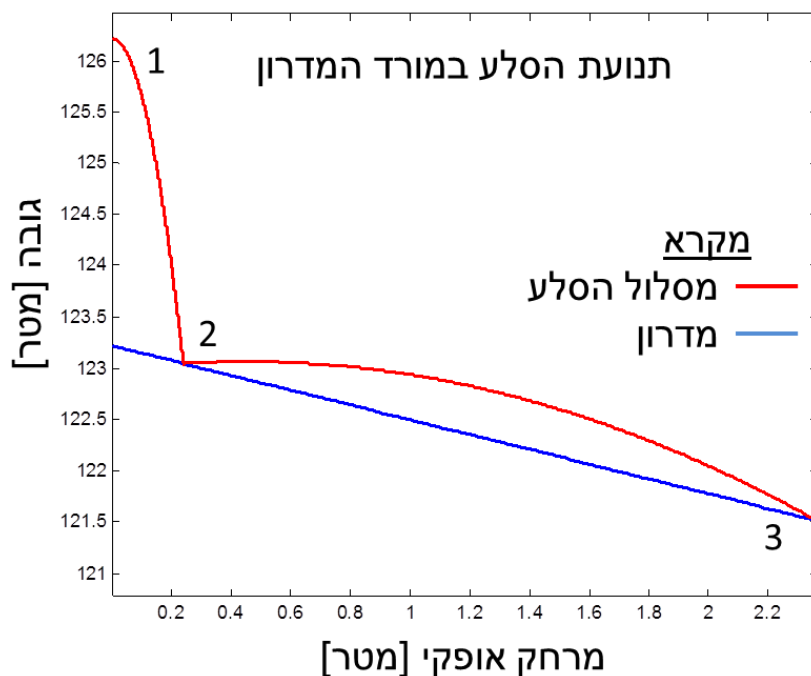
$$x = x_i + v_x t \quad \text{משוואה 4}$$

$$y = y_i + v_y t + \frac{gt^2}{2} \text{ משוואה 5.}$$

X- מתאר את מיקום הסלע על ציר אופקי, $-x_i$ מתאר את נקודת המוצא של הסלע, $-v_x$ מהירות בציר האופקי ברגע היציאה מהתנגשות, t - זמן, y - מתאר את מיקום הסלע על ציר אנכי, $-y_i$ מתאר את נקודת המוצא של הסלע, $-v_y$ מהירות בציר האנכי ברגע היציאה מהתנגשות, g-תאוצת הכובד. כאשר מבדדים את t במשוואה 4 ומציבים במשוואה 5 מקבלים:

$$y = \frac{g}{2v_x^2} x^2 + x \left(\frac{v_y}{v_x} - \frac{gx_0}{v_x^2} \right) + \left(\frac{v_y x_0}{v_x} + \frac{x_0^2 g}{2v_x^2} + y_0 \right) \text{ משוואה 6.}$$

את משוואה 6 פותרים לפי פיתרון משוואה ריבועית כאשר מציבים בצד שמאל של השיוויון (Y), את משוואות המדרון בהתאם לקירוב למשוואה המתארת את המדרון (סעיף 4.2.2). כך מחושבות גם קפיצות הסלע הבאות, כאשר שתי הנקודות שמתקבלות מתארות את נקודת המוצא של הסלע ונקודת הפגיעה הבאה (איור 8). באיור 8 ניתן לראות כי נקודות 2 ו-3 יחשבו עבור מסלול פגיעת הסלע בנקודה 3, חיתוך פרבולה עם קו ישר. הכוח היחיד שפועל על הסלעים באויר הוא כוח הכובד, חיכוך האויר הוזנח.



איור 8. גרף המציג את מסלול הסלע לאורך מדרון ישר במודל המטלאב. 1- נקודת המוצא. 2- נקודת פגיעה ראשונה של הסלע במדרון. 3- נקודת פגיעה שנייה של הסלע במדרון.

המהירות אותה צובר הסלע מחושבת בהתאם למרחק אותו הוא עובר. בגלל צורת הסלעים הופעל אילוץ במידה והסלע עובר מרחק קטן מאורכו. האילוץ קובע שהמרחק המינימלי אותו הסלע יעבור שווה לאורכו. אילוץ זה מתאר מצב של גילגול בו למעשה הסלע מתקדם בקפיצות קטנות השוות לאורכו, בדומה למצופה מסלע אי רגולרי המתגלגל על משטח אי רגולרי (Jones et al., 2000). אילוץ דומה פועל גם בתוכנת CRSP (Pfeiffer, 1989). במידה והסלע נע על שיפוע קבוע הוא יגיע למצב יציב, כפי שיוצג בסעיף 4.3 ובדומה למתואר בעבודתם של Dippel et al. (1996). המודל מזניח את המרחק אותו הסלע עובר בהחלקה. המהירות לאחר הפגיעה מחושבת לפי מקדמי תקומה בכיוון משיק ונורמלי למדרון. גישה זו נפוצה במרבית המודלים להערכת סכנה מנפילות סלעים (Volkweim, et al., 2011), ומשמשת אף במודלים אחרים המתארים התנגשות בהם מקדמים אלו הם קבועים (Chatterjee, 1997; Cross, 2005). במודל זה המהירות הנורמלית למדרון לאחר הפגיעה מחושבת בהתאם למקדם התקומה ומהירות הפגיעה במדרון (משוואה 7). במשוואה 8 מחושבת המהירות החדשה בכיוון משיק למדרון לפי משוואת שימור אנרגיה. במודל שפותח על ידי Garwin (1969), ניתן למצוא התייחסות לאנרגיה קינטית הכוללת את המהירות הזוויתית ורכיב המהירות האופקית. משוואה זו דומה למשוואת אובדן המהירות בכיוון משיק אשר פותחה עבור תוכנת CRSP (Pfeiffer, 1989), שעודכה עם השנים. בעבודה זו שימשה גרסתה ה-4 (Jones et al., 2000). תוכנת CRSP נבחנה (Pfeiffer, 1989; Jones et al. 2000;), שימשה בעבודות להערכת סכנה (Guzzettiet al., 2002; Giani et al., 2004; Peng, 2000), והשימוש בה נפוץ במספר גדול של מנפילות סלעים (Palma et al., 2012; Kanari, 2008), רשויות בארצות הברית (Pierson et al., 2001). המשוואות הרלוונטיות במדריך למשתמש הן 2.1 ו-3 (Jones et al., 2000). במשוואות אלו ישנם גורמים משני גודל (Scale factors), והחיכוך מחושב כפונקציה המכילה את המקדם המשיק. במודל המתואר כאן מקדם התקומה והחיכוך הם קבועים. בנספח 1 ניתן למצוא את הקוד אשר שימש לחישוב המרחק אותו סלע צפוי לעבור.

$$v_{n2} = R_n v_{n1} \text{ : משוואה 7}$$

$$\frac{1}{2} I \omega_2^2 + \frac{1}{2} m v_{t2}^2 = R_t^2 \cdot \left(\frac{1}{2} I \omega_1^2 + \frac{1}{2} m v_{t1}^2 \right) \text{ : משוואה 8}$$

R_t - מקדם החיכוך, R_n - מקדם התקומה הנורמלי. m - מסת הסלע. I - מומנט האינרציה. v_{t1} - מהירות בכיוון משיק למדרון לפני פגיעה. v_{t2} - מהירות בכיוון משיק למדרון אחרי פגיעה. v_{n1} - מהירות בכיוון נורמלי למדרון לפני פגיעה. v_{n2} - מהירות בכיוון נורמלי למדרון אחרי פגיעה. ω_1 - מהירות זוויתית לפני פגיעה. ω_2 - מהירות זוויתית אחרי פגיעה.

פגיעה. את המהירות הזוויתית החדשה מחשבים לפי משוואה 9 עבור המהירות הזוויתית המתקבלת לאחר הפגיעה.

$$\omega_2 = V_{t2}/r \text{ . משוואה 9}$$

כאשר ω_2 היא המהירות הזוויתית, r הוא רדיוס הסלע ו- V_{t2} היא המהירות המשיקית אחרי פגיעה. קשר זה מתאר מצב של גילגול בזמן הפגיעה. תצפיות הראו כי סלעים הקופצים במורד מדרון עוזבים אותו עם מהירות זוויתית ללא קשר למהירות הזוויתית ההתחלתית (Cross, 2002; Jones et al., 2000). הקשר המופיע במשוואה 9 ומשמש לפיתרון משוואה 8 מופיע במדריך למשתמש בתוכנת CRSP (Pfeiffer, 1989), ובא לתאר מצב בו הסלע מתגלגל ולא מחליק.

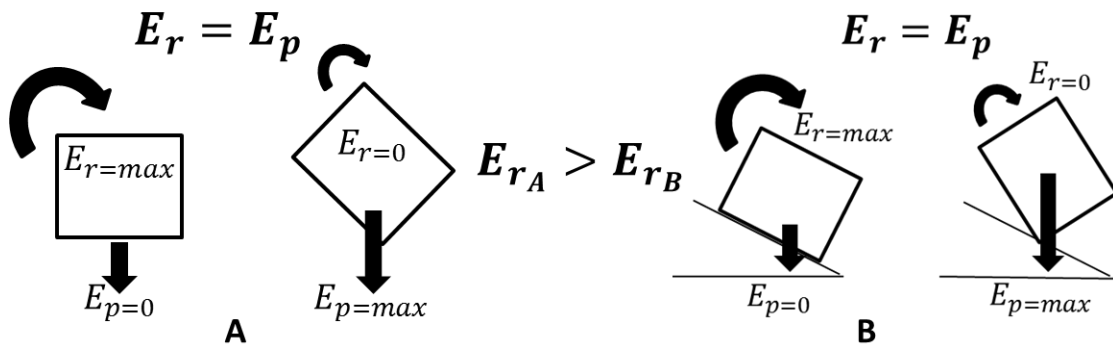
3.2.1.6 קריטריון העצירה

קריטריון העצירה נבחר להיות המהירות הזוויתית המינימלית הדרושה לגלגול סלע. קריטריון זה נבחר מכיוון שתנועת הסלע לפני עצירה במודל היא גילגול, בחרנו להזניח את החלקת הסלע מכיוון שהסלעים אינם צפויים לעבור מרחק רב בהחלקה. חיזוק להשערה זו, ולבחירה בקריטריון עצירה זה ניתן לראות בצילום וידאו של מקרה אמת שתועד בטיוואן (<http://www.youtube.com/watch?v=jRNDNC1ypZE>). את המהירות הזוויתית הדרושה לגילגול חישבנו לפי השוואה בין האנרגיה הפוטנציאלית של מרכז המסה בנקודה הגבוהה שלו במהלך הגילגול לאנרגיית הסיבוב כאשר פני הסלע נושקים למדרון (איור 9). המשוואה אשר שימשה לחישוב היא משוואה 10.

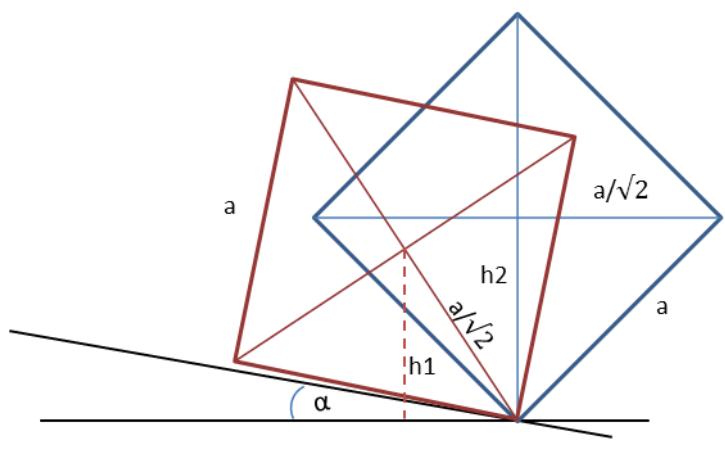
$$\frac{1}{2} I \omega^2 = mgh \text{ . משוואה 10}$$

כאשר ω -המהירות הזוויתית, I -מומנט האינרציה, m -מסת הסלע, g -תאוצת הכובד, h -גובה הפרש הגובה של מרכז המסה מנקודת ההתחלה (איור 10).

מכיוון שצורת הסלעים היא בקירוב תיבה זוהי הצורה אשר שימשה לחישובים השונים. בחישוב לקחנו בחשבון גם מקרים של מישור משופע מכיוון שהאנרגיית הסיבוב הדרושה לגילגול על מישור משופע נמוכה יותר (איור 9). התוצאות שהתקבלו לא תאמו את התצפיות בשטח ולכן מהירות העצירה כויילה כך שתתאים לתצפיות (טבלה 1). בכיול המודל, לכל גודל אופייני חושבה המהירות הזוויתית של הסלע שעבר את המרחק הגדול ביותר מאותו הנפח לפי המרחקים שנצפו בשדה לאורך חתכי הכיול (איור 11), המהירות חושבה במרחק המתאים ונקבעה להיות המהירות הזוויתית הקריטית בהדמיות אשר שימשו להערכת בעזרת המודל במטלאב.



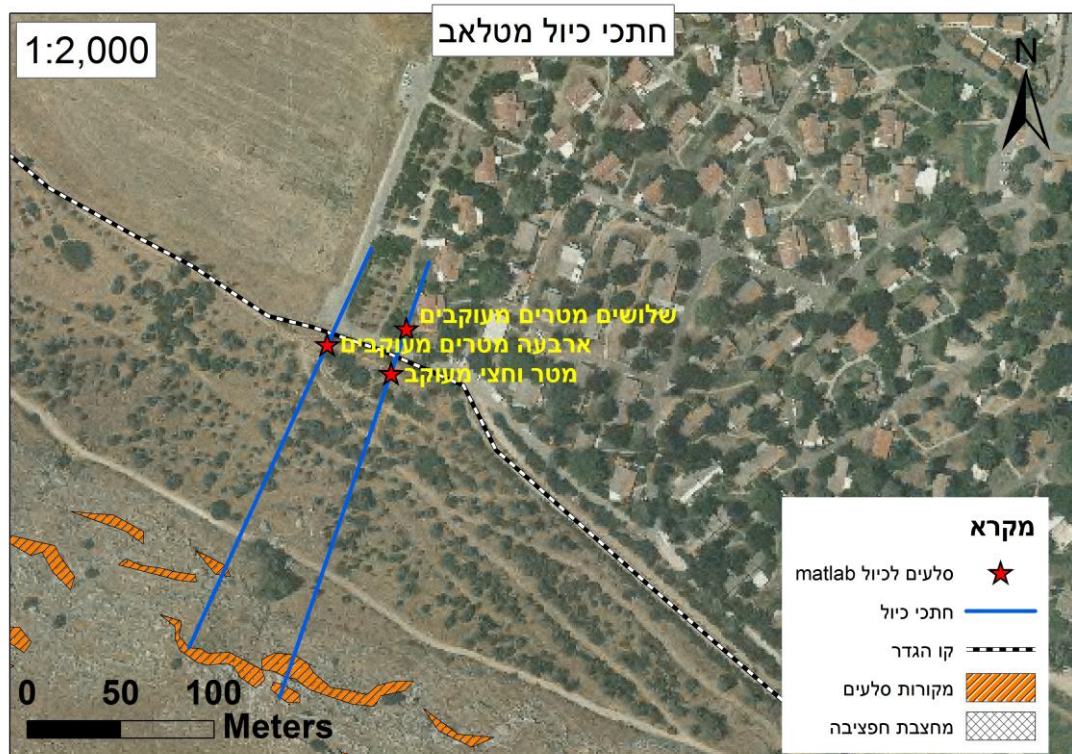
איור 9. איור הממחיש את תנאי העצירה, שוויון בין האנרגיית הסיבוב (Rotational Energy) לאנרגיית הפוטנציאלית. בצד שמאל (A), מודגם המצב עבור סלע על גבי מישור ללא שיפוע. בצד ימין (B), מודגם המצב עבור סלע המתגלגל על גבי מישור משופע. E_r -אנרגיית הסיבוב, E_p -אנרגיית הפוטנציאלית.



$$h1 = a/\sqrt{2} \times \sin(45 + \alpha)$$

$$h2 = a/\sqrt{2}$$

איור 10. איור הממחיש את אופן חישוב מיקום המסה בשלבי הגילגול. הפרש משמש לחישוב האנרגיית הפוטנציאלית.



איור 11. מפה המציגה את מיקום חתכי הכיול, המקורות ונקודות העצירה הרחוקות ביותר לסלעים מהנפחים השונים.

מהירות זוויתית קריטית במודל [1\שניה]	מהירות זוויתית קריטית מחושבת לפי נתוני שדה [1\שניה]	נפח סלע [מטר מעוקב]
1.36	3.47	1.5
1	3.16	4
0.54	2.27	30

טבלה 1. טבלת מהירות זוויתית קריטית. בטבלה מוצגות המהירויות הזוויתיות הקריטיות, לפי נפח, המחושבת לפי משוואה 10, וזו אשר שימשה במודל המטלאב להערכת הסכנה. סף מהירות זה מהווה את תנאי העצירה במודל המטלאב.

3.2.2 תוכנת CRSP

CRSP היא תוכנה מסחרית להערכת מסלולים של נפילת סלעים על גבי מדרון (Jones et al., 2000). התוכנה נמכרת על ידי המכון הגאולוגי של קולורדו. מודל התוכנה מדמה את נפילות הסלעים בצורה דומה למודל המטלאב כפי שתואר לעיל. מודל ה CRSP נבדל ממודל המטלאב בכך שהוא בונה את המדרון כסדרה של תאים בעלי שיפוע ישר, כאשר לכל תא מזינים את ערכים של מקדמי התקומה והחיספוס. הבדל נוסף הוא ואופן חישוב נקודות

הפגיעה בין הסלע למדרון. את נקודות המגע המודל מחשב באיטרציות של הזמן עד למגע. אופן גילגול הסלע דומה לאופן הגילגול כפי שמתואר במודל המטלאב. תנאי העצירה של מודל זה אינו מפורט במדריך למשתמש. לתוצאות במודל CRSP יש פיזור סטטיסטי הנובע מאופן הגדרת החיספוס (יתואר בהמשך).

3.2.2.1 תשומות בתוכנת CRSP

אל התוכנות מוזנים מספר ערכים המאפיינים את המדרון הנחקר, את סוג הסלע החשוף לאורכו ואת הסלעים הנעים במורדו, זאת על מנת שההדמיה במחשב תאפיין את המדרון והתוצאות תהיינה משמעותיות לשטח המחקר. להלן פירוט של המשתנים השונים הנדרשים על מנת לדמות את אופי ומסלולי נפילת סלעים במורד מדרון.

3.2.2.2 תכונות הסלע הנע

צורת וגודל הסלע הנופל מוזנים לתוכנה וכך גם הצפיפות שלהם. זאת כדי לקבוע את מסת הסלע הנע. צורת הסלע משפיעה על מומנט האינרציה. בתוכנת ה-CRSP, את צורת הסלע ניתן לתאר בתור כדור, גליל או דיסק בלבד. בנוסף המהירות ההתחלתית של הסלעים מוזנת לציר אפקי וציר אנכי.

3.2.2.3 גיאומטרית המדרון בתוכנת CRSP

הפרופיל הטופוגרפי של המדרון הנחקר מחולק במחשב למספר תאי חישוב. עבור תא מזינים נקודת התחלה וסיום לאורך פרופיל המדרון הנחקר. השיפוע של התא מחושב כקו ישר בין נקודת ההתחלה והסיום של התא. טווח הזוויות האפשרי לפגיעת הסלע במדרון מחושב על ידי שיפוע המדרון והחספוס (סעיף 3.2.2.4). על מנת לדמות בצורה מדוייקת את מסלולי הנפילה, צפיפות השריג הגיאוגרפי (גודל התא), המשמש בהדמיה צריך להיות מתאים לשינויי השיפוע שנמדדו בשדה.

מסד הנתונים הטופוגרפי נערך בתכנת GIS ESRI-ARCMAP והוא מתבסס על מודל השטח הספרתי (DTM) של המכון הגאולוגי בצפיפות שריג של 25 מטרים רבועים (Hall, 1993) ובנוסף נמדד מסד נתונים בדיוק גבוה יותר בשטח תוך שימוש ב-GPS RTK.

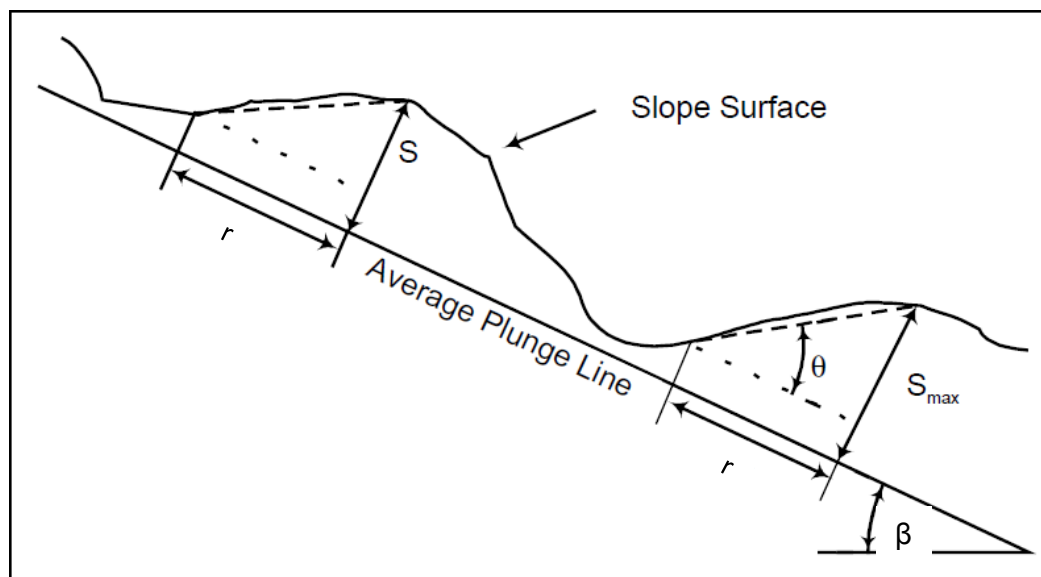
3.2.2.4 חספוס בתוכנת ה-CRSP

החספוס מייצג את השינוי מקו השיפוע הממוצע במדרון. ערך החספוס נמדד בשדה כמרחק הגדול ביותר (S), מקו שיפוע המדרון בתוך מרחק השווה לרדיוס הסלע (r). בעזרת ערכים אלו מחושבת זווית השינוי המקסימלית (θ), משיפוע המדרון (β), (איור 12).

$$\theta = \tan^{-1}(S/r) \text{ .11 משוואה}$$

את החספוס מזינים לכל תא במודל בנפרד והוא נמדד עבור גודל סלע מסויים. החספוס קובע את זווית המדרון האפקטיבית (α), כאשר $\beta - \theta < \alpha < \beta + \theta$. בהדמיית המחשב, השוני בין

מסלולי הנפילה של מספר סלעים בעלי תנאי התחלה שווים מתקבלת משינויים אקראיים בזווית הפגיעה במדרון (α) עקב החספוס. שינויים מקומיים בחספוס יכולים לגרום להבדל משמעותי במסלול בולדרים זהים הניתקים מאותה נקודה על אותו מדרון (Giani et al., 2004). החספוס נמדד בשדה בעזרת סרט מידה לאורך החתכים השונים.



איור 12. החספוס S נמדד לפי השינוי האנכי מקו השיפוע הממוצע (הנקבע לפי β) לאורך מרחק השווה לרדיוס הסלע r . זווית השינוי המקסימלית θ נקבעת לפי S ו- r (after Jones, et al., 2000).

3.2.2.5 מקדם התקומה והחיכוך

תכונות החומר של המדרון והסלע משפיעות על הדיפת הסלע לאחר כל פגיעה במדרון. מקדמי התקומה מהווים תאור כמותי של תכונות החומר של המדרון. המודל מתייחס לשני מקדמים כאלו: המקדם הנורמלי (R_n) מתאר את מידת האלסטיות בהתנגשות בכיוון הנורמלי למדרון והמקדם המשיק (R_t) את מידת התנגדות החיכוך לתנועה בכיוון המשיק למדרון. כפי שתואר עבור המודל האנליטי (סעיף 3.2.1.5).

3.3 בחינה אנליטית של התהליך וההנחות במודלים

הרגישות למהירות ההתחלתית בהדמיית נפילת הסלעים הוגדרה עד כה בצורה איכותית. על מנת לבחון את הנחות התוכנה, האילוצים והרגישות לתשומות השונות בצורה כמותית נפתרו מקרים שונים של נפילות סלעים בעזרת מודל ה-MatLab שפותח. נבחנה הרגישות לשינויים בגודל המהירות ההתחלתית.

3.4 הגדרת התנאים לנפילות על ידי תארוך נפילות היסטוריות

על מנת להעריך האם מרבית הנפילות ההיסטוריות בשטח התרחשו במסגרת ארועים בודדים המתאימים לרעידות אדמה היסטוריות (Guidoboni, 1994; Amiran et al., 1994) או לארועי גשם קיצוניים, נאספו דוגמאות קרקע מתחתית הסלעים בשדה ולאחר מכן תוארכו בשיטת (Aitken, 1998) Optically Stimulate Luminescence (OSL) במעבדה במכון הגאולוגי (Porat, 2006). הנחת העבודה היא שדוגמא זו מייצגת את גיל הנפילה, כלומר הקרקע לא הופרעה ולא נחשפה לקרינת השמש מרגע עצירת הסלע עליה. שיטת התארוך בלומינסנציה מתבססת על תכונות הלומינסנציה של מינרלים שונים (קוורץ, פלדספר). הסדימנט מתפקד כמד מינון קרינה. במהלך הקבורה סדימנט נחשף לקרינה מייננת פנימית וחיצונית הנוצרת מדעיכה של יסודות רדיואקטיביים וקרינה קוסמית. הקרינה מביאה ללכידתם של אלקטרונים בפגמים (מלכודות) הקיימים בשריג המינרלים. ככל שמשך חשיפת הסדימנט לקרינה יהיה ארוך יותר כך יתמלאו יותר מלכודות. כאשר המינרלים נחשפים לאנרגיה חיצונית, אור או חום, האלקטרונים משתחררים מהמלכודות ומאפסים את הסיגנל. לכן תוך כדי הדגימה והכנת הדוגמא יש להימנע מחשיפת הדוגמא לאור שיגרום לאיפוס הדוגמא. בעקבות שחרור האלקטרונים מהמלכודת נפלטים פוטונים. כאשר מודדים את גיל הדוגמא במעבדה משחררים את האלקטרונים מהמלכודות על ידי חשיפה לאור או חימום, ומודדים את כמות הפוטונים. את גיל הדוגמא מחשבים בעזרת מנת הקרינה ושטף הקרינה אליה המינרל נחשף. כדי למדוד את מנת הקרינה הנאגרת במינרל משווים בין הסיגנל הטבעי לבין סיגנל שנמדד לאחר הקרנת הדוגמא בזמנים שונים. את שטף הקרינה מחשבים באמצעות ריכוז המינרלים הרדיואקטיביים בסביבת הדוגמא ובעזרת מדידת מונה גמא וקרינה קוסמית בשדה. שיטה זו שימשה בהצלחה במחקרים דומים קודמים שנערכו בארץ (Kanari, 2008; Rinat, et al., in press; 2009, סימן טוב).

4. תוצאות

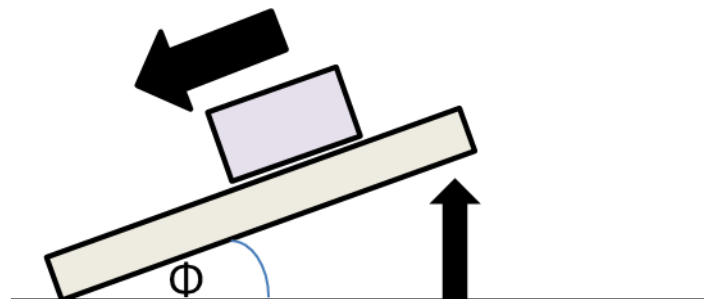
4.1 חישוב יציבות הסלעים והגדרת תנאי ההתחלה לנפילת סלעים

4.1.1 אומדן זווית החיכוך הפנימית

לצורך חישוב יציבות הסלעים נמדדה תחילה זווית החיכוך הפנימית במספר ניסויים בשדה ובניסוי במעבדה. בשדה אותרו מספר משטחי סלע בעלי שיפוע בטווח הצפוי של זווית החיכוך הפנימית של דולומיט. לאחר מכן הונח בולדר דולומיט (איור 13), על גבי משטחים אחדים בשיפוע עולה, כאשר הסלע החליק הבולדר הונח על משטח בזווית קטנה יותר ולהפך כאשר הבולדר לא החליק. במעבדה סלע הונח על משטח סלע, במצב טבעי, ללא ניסור או החלקה שלהם. משטח הסלע הורם עד הזווית בה התקבלה החלקה (איור 14). בשני אתרים שונים בשדה ובניסוי במעבדה נמצא כי זווית החיכוך הפנימי היא $41^{\circ} \pm 0^{\circ}$. בכל אתר ובמעבדה נערכו חמש מדידות ובכל המקרים התקבלה אותה תוצאה. ערך זה מתאים לערך זווית החיכוך הפנימי בספרות עבור דולומיט (Hall et al., 1994; Arkin & Ecker, 2007).



איור 13. ניסוי שדה למדידת זווית החיכוך הפנימי. הסלע המחליק מוקף בעיגול אדום.



איור 14. איור המדגים את ניסוי המעבדה למדידת זווית החיכוך הפנימי. משטח הסלע התחתון הורם עד אשר הסלע אשר הונח עליו החליק, ואז זווית המשטח נמדדה.

4.1.2 חישובי יציבות.

על מנת להעריך את יציבות הסלעים בשדה ולבדוק את התנאים בהם הם עלולים לנוע במורד המדרון, נמדדו 4 סלעים ונטיית המשטח עליו הם מונחים. הסלעים מנותקים כמעט באופן מלא מהמשטח ונראה כי זיזי סלע קטנים מונעים מהם להחליק (איור 15). בעזרת הנתונים שנאספו לעיל חושבה יציבות הסלעים לפי המשוואות המופיעות בסעיף 3.1. התוצאות מראות כי מרבית הסלעים אינם יציבים, מקדם הביטחון נמוך מ-1 (טבלה 2). מקדם הביטחון לחלק מהסלעים נמוך מאוד, תוצאה זו מעידה ככל הנראה כי הזיז עליו הם יושבים מונע מהם להחליק על המשטח ולנוע במורד המדרון. המאמץ הפועל על הזיז (איור 16), ומונע מהסלע ליפול חושב לפי מאמץ הגזירה שהסלע מפעיל – $Wg\sin\beta$, לאחר מכן הוספנו גם את המאמץ האופקי אשר נוסף בזמן רעידת אדמה בעקבות תאוצת הקרקע, כך שהמאמץ הכולל מחושב לפי:

$$Wg\sin\beta + Wa_g\cos\beta = T \quad \text{משוואה 12.}$$

T- המאמץ הפועל על הזיז, W- המסה ליחידת גובה, g-תאוצת הכובד, β -זווית המדרון, a_g - תאוצת הקרקע ביחידות [g], פירוט על חישוב תאוצת קיים בסעיף 4.3, כאשר התאוצה הגבוהה ביותר נלקחה בחשבון (2.9g).

התוצאות המוצגות בטבלה 2, מראות כי המאמץ נמוך מטווח מאמצי הכניעה אשר נמדד על ידי (Palchik & Hatzor, 2000) 62-274 MPa. כלומר הזיזים לא צפויים להיכנע במקרה של רעידת אדמה. כך ניתן להסביר כיצד סלעים בעלי מקדם ביטחון נמוך מ-1 יציבים.

מספר סלע	נקודת ציון [רשת ישראל החדשה]	דיפ [מעלות]	גובה [מטר]	נפח [מעוקב]	מקדם ביטחון	מאמץ הגזירה הפועל על זיז הסלע [MPa]	מאמץ הגזירה הפועל על זיז רעידת אדמה [MPa]
1	713496/240125	49	1.2	6.70	0.76	7.6	9.6
2	713496/240125	32	1.5	13.95	1.39	3.2	4.7
3	713557/239914	55	1.6	27.23	0.61	16.4	19.7
4	713557/239914	56	0.15	0.43	0.59	0.6	0.8

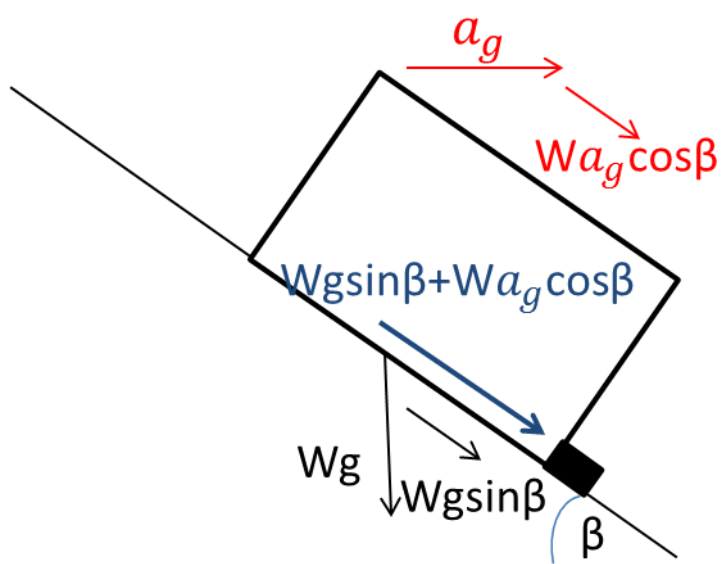
טבלה 2. תוצאות המדידות וחישובי היציבות השונים. מוצגים: מספר הסלע, דיפ המסלע עליו

הוא מונח, גובה הסלע, נפחו, מקדם הביטחון המחושב לפי $F = \frac{\tan\phi}{\tan\beta}$, מאמץ הגזירה הפועל על

זיז הסלע – חושב לפי מאמץ הגזירה, מאמץ הגזירה הפועל על זיז הסלע בזמן רעידת אדמה.



איור 15. צילום של סלע אשר נבלם על ידי זיז, כפי שניתן לראות בצילום התקריב בפינה הימנית העליונה.



איור 16. איור הממחיש את הכוחות הפועלים על הזיז בזמן רעידת אדמה W -המסה ליחידת רוחב, g -תאוצת הכובד, a_g -תאוצת הקרקע ביחידות $[g]$, β -זווית המדרון.

עבור סלע מספר 2, אשר לו מקדם ביטחון גדול מ-1, חושבו התנאים אשר יובילו לנפילה שלו במידה והיזז לא יבלום אותו (טבלה 3), כלומר מהם התנאים אשר יורידו את מקדם הביטחון אל מתחת לסף היציבות. במידה ולחץ המים מקסימלי בינו ובין הקיר מאחוריו וגובה עמודת המים בינו לבין משטח הסלע עליו הוא מונח תהיה 2 סנטימטרים (מפלס שהוערך על סמך תצפית על משטחי הסלע בשדה), מיכיוון שמקדם הביטחון יורד למספר הקרוב לאחד יתכן כי במקרה של ארוע אקלים קיצוני הסלע יפול. התאוצה הקריטית שהתקבלה לפי משוואה 3 עבור חוסר היציבות היא 2 מטר לשניה בריבוע. בסעיף 4.2.6 אנו מראים כי תאוצה זו אכן אפשרית בעת רעידת אדמה. זמן החזרה לרעידה שתביא לתאוצה זו הוא 100 שנים (Hough & Avni, 2010).

מספר סלע	מקדם ביטחון בזמן ארוע גשם	תאוצה קריטית ב-g [מטר לשניה בריבוע]
2	1.09	0.21

טבלה 3. תוצאות חישוב התנאים לחוסר יציבות של סלע מספר 2.

תצורת סכנין, באזוריה התלולים, מראה סידוק אשר יכול להוביל לניתוק סלע מקירות אלו (איור 17). במידה ויתנתקו סלעים יתכן והם ינועו במורד המדרון. סלעים אלו לא נראים מנותקים, אלא חלק מקיר הסלע. רעידות אדמה וגשמים יכולים להאיץ את תהליכי הבלייה והסידוק ולהוביל לנפילת סלעים מקירות אלו.



איור 17. תמונה של סידוק אופייני לאורך מחשוף של קיר סלע בתצורת סכנין

4.1.3 תיארוך נפילות

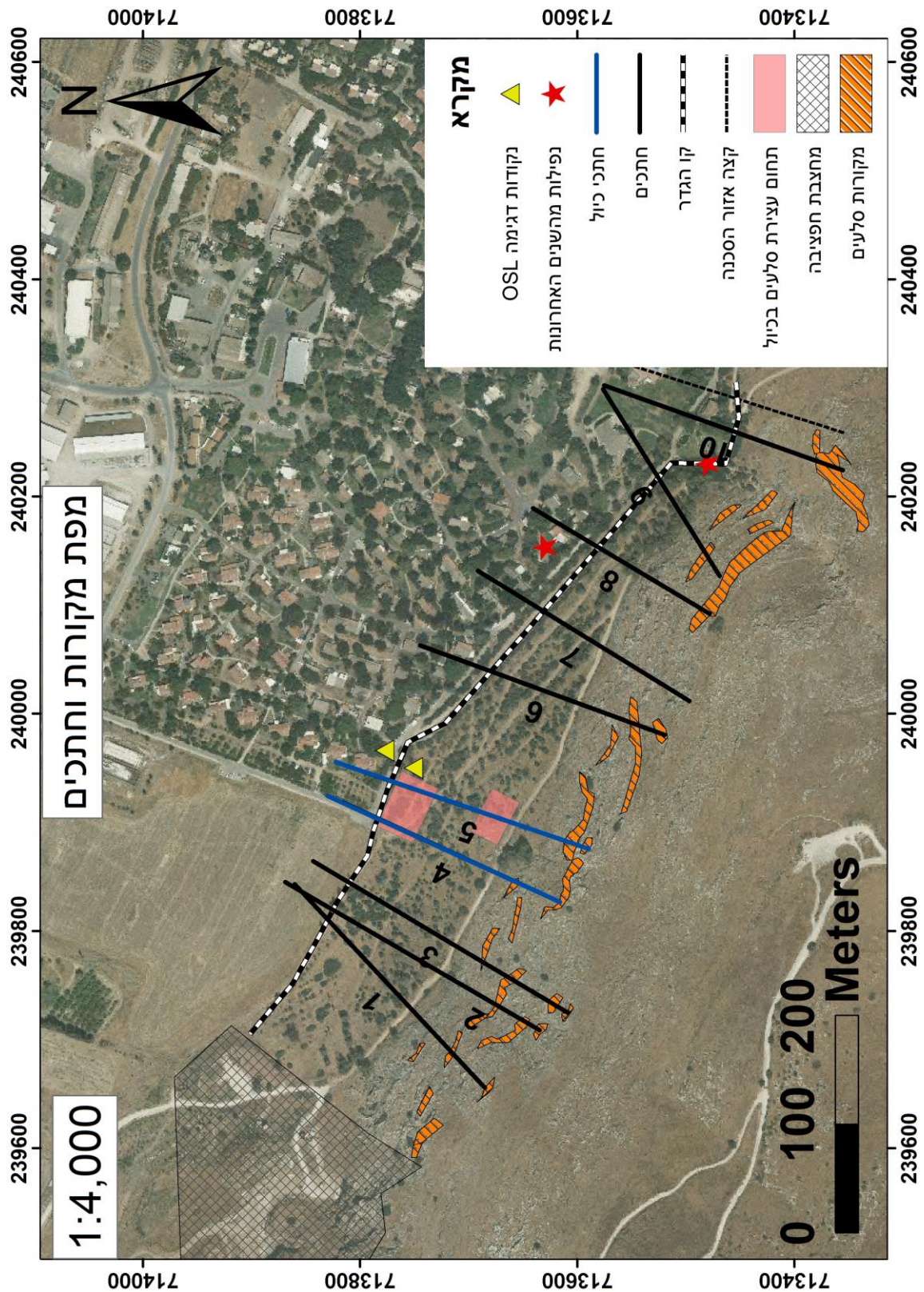
לצורך נסיון לתיעוד מועדי נפילות סלעים נאספו ותוארכו שלוש דוגמאות (טבלה 4). שתי דוגמאות קרקע (UVL1-2) נאספו מתחת לשני סלעים שונים הנמצאים בשטח הקיבוץ (איור 18), דוגמא שלישית נדגמה מהשוחה ליד ובעומק זהה לדוגמא UVL2 אבל לא מתחת לסלע. הגילאים שהתקבלו הם 5.1 ± 0.4 ו- 5.7 ± 1.5 16.3 ± 1.8 אלף שנה בהתאמה. מהתוצאות הללו לא ניתן להצביע על התקבצות סביב אירוע מסוים בגלל טווח השגיאה. דוגמא UVL2 מראה חוסר הומוגניות (טווח שגיאה גדול. עבור הדוגמא השלישית (UVL3) ההנחה הייתה שהדוגמא תהיה בעלת גיל דומה לדוגמא 2 אך הגיל שהתקבל הוא 16.3 ± 1.8 אלף שנה.

מספר דוגמא	עומק	גודל גרגר ממ	אחוז מים משקלי %	K (%)	U ppm	Th ppm	Ext. α $\mu\text{Gy/a}$	Ext. β $\mu\text{Gy/a}$	Ext. γ +Cosmic $\mu\text{Gy/a}$	Dose rate $\mu\text{Gy/a}$	No. of Discs	De (Gy)	גיל Age (ka)
UVL1	1 \pm 0.05	88- 125	3.3	0.46 \pm 0.02	2.3 \pm 0.1	5 \pm 0.5	2 \pm 0	660 \pm 21	772 \pm 26	1434 \pm 43	17	7.3 \pm 0.56	5.1 \pm 0.4
UVL2	0.7 \pm 0.05	88- 125	3.2	0.42 \pm 0.02	2.6 \pm 0.1	3.9 \pm 0.39	2 \pm 0	647 \pm 20	754 \pm 22	1402 \pm 39	17	8 \pm 2.1	5.7 \pm 1.5
UVL3	0.7 \pm 0.05	88- 125	3.2	0.83 \pm 0.04	1.7 \pm 0.09	7.8 \pm 0.78	3 \pm 1	901 \pm 33	933 \pm 39	1836 \pm 66	17	30 \pm 3.1	16.3 \pm 1.8

טבלה 4. תוצאות תיארוך OSL. בטבלה מוצגים מספר דוגמת הקרקע, גודל הגרגר, אחוז המים המשקלי, ריכוזי איזוטופים רדיואקטיביים, שטפי הקרינה השונים, מספר הדוגמאות מכל דוגמת קרקע שנבדקו, מנת הקרינה וגיל מחושב.

4.2 איסוף תשומות המודל וכיולן

על מנת למפות מסלולים אפשריים של סלעים במורד המדרון הנחקר, תחילה מופו מקורות ונפילות הסלעים כדי לדעת מהן נקודות ההתחלה והעצירה האופייניות על גבי המדרון בשטח העבודה. חלק זה הסתמך על גישה רגלית בעזרת GPS, מפה ותצלומי אוויר. סלעים שנפללו סומנו, נמדדו וצורתם תוארה באופן איכותי. מקורות לסלעים דוגמת מדפי סלע בולטים, סלעים הנראים מנותקים או לקראת ניתוק וקירות סדוקים, מסומנים גם הם על המפה בתור מקור אפשרי לנפילות (איורים 18-19). חתכים טופוגרפיים נבחרים בין מקור הסלעים לנקודות העצירה נמדדו בעזרת GPS-RTK, על מנת להזין את גאומטריית המדרון למודלים השונים (איור 18). צפיפות סלעי סכנין נמדדה במעבדה והיא 2.77 קילוגרם למטר מעוקב. באיור 18 ניתן לראות גם קו אשר מוגדר בתור קצה איזור הסכנה, קו זה סומן לאחר שבסיוור שטח לא נראו מקורות אפשריים לנפילת סלעים ממזרח לו. אזור המחצבה סומן גם הוא ולא נבחן מכיוון שהמחצבה בנויה בצורה כזו שסלעים הנופלים מקירותיה או מעליהם לא צפויים להמשיך אל מחוץ לשטחה.



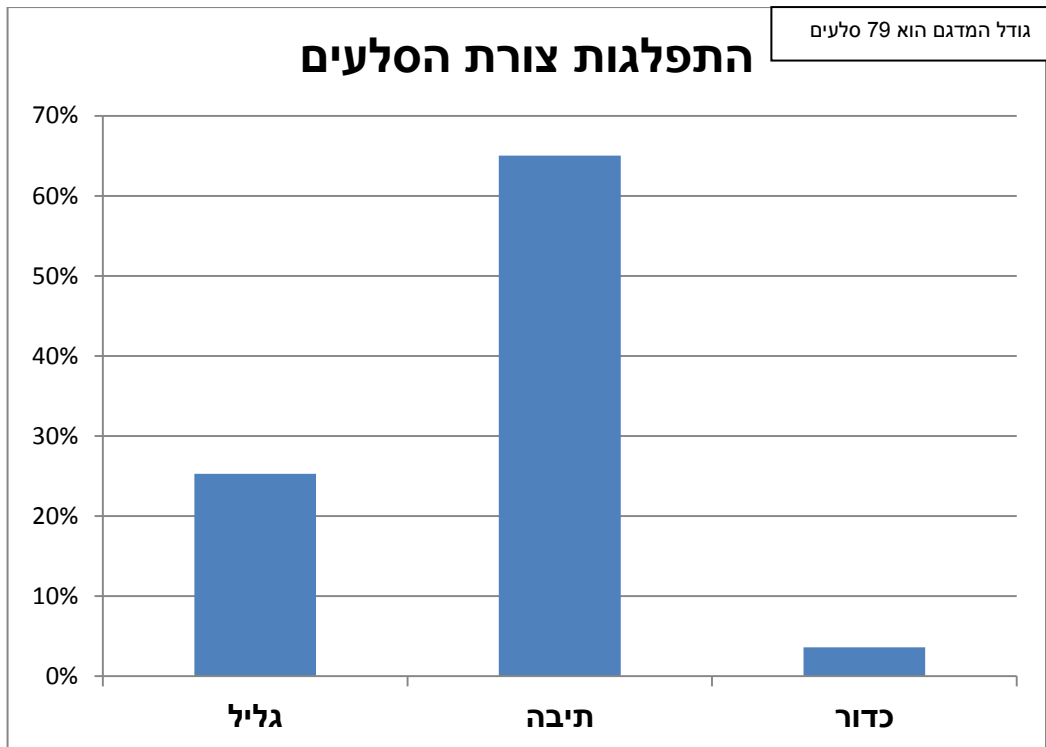
איור 18. תצלום אווירי ועליו מסומנים שטח המחצבה, המקורות האפשריים לסלעים, נקודות אליהן נפלו סלעים, החתכים השונים, ונקודות דיגום ל OSL. בנוסף מסומן קו מקוקו, בחלק המזרחי של המדרון, אשר ממזרח לו לא נצפו מקורות אפשריים לסלעים.

4.2.1 גודל הסלעים וצורתם

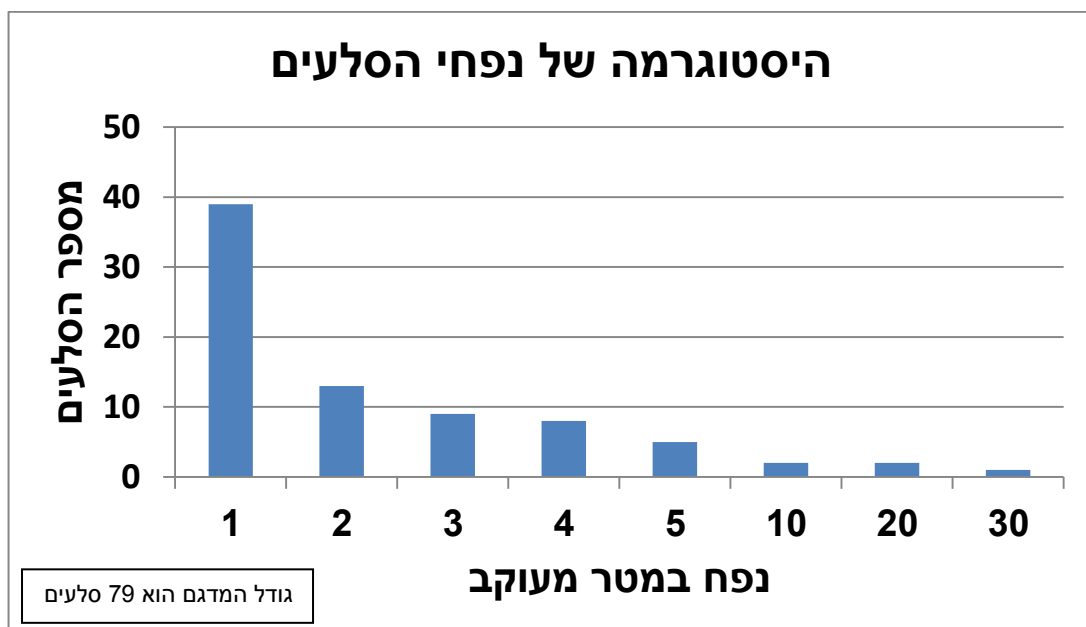
התפלגות גודל הסלעים נמדדה בתוך אזור מוגדר אשר שטחו הוא 68,000 מטרים רבועים (איור 19). נפח של 1 מטר מעוקב נבחר כגודל המינימלי למיפוי (סלעים קטנים יותר ינועו מרחק קצר מאשר סלע גדול מהם). טבלה המציגה את תוצאות המדידה ניתן למצוא בנספח 2. מתוך מאה עשרים סלעים שנמדדו בשטח זה 79 סלעים היו בנפח של מטר מעוקב אחד או יותר (סלעים 40-118 בנספח 2). באיור 20 ניתן לראות את התפלגות הצורות, הצורה הנפוצה ביותר היא תיבה. איורים 21 ו-22 מציגים את התפלגות הנפחים: 50% מהסלעים הם בנפח של עד 1.5 מטר מעוקב, כל הסלעים בנפח עד 4 מטרים מעוקבים מהווים 85% מהסלעים שנצפו בשטח. הגודל המקסימלי הוא של 30 מטר מעוקב. מכיוון שצורה זו לא קיימת בתוכנת ה-CRSP, הצורה שנבחרה להדמיות בתוכנה זו היא של גליל. יתכן וישנה הטייה מסויימת בהתפלגות הגדלים הנובעת מעיבוד השטח מאז קום הקיבוץ בשנת 1922. לדוגמא בעבודות התשתית של פרויקט הרחבת הקיבוץ סלעים רוסקו ושימשו לבניית תשתיות.



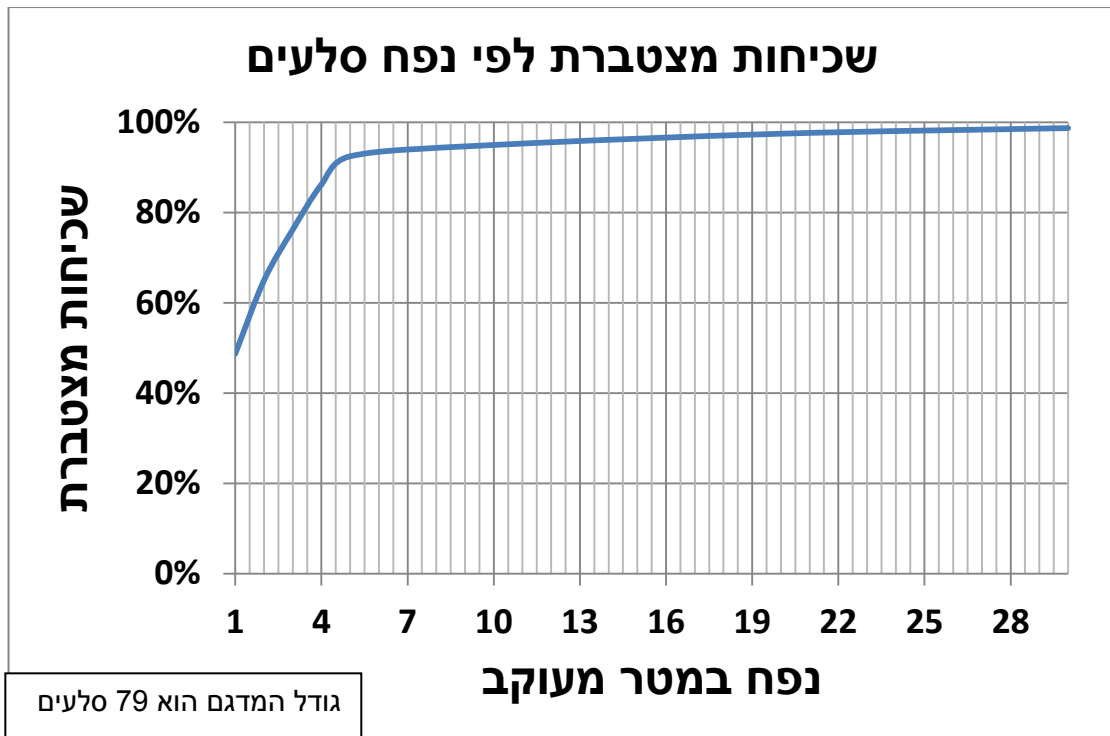
איור 19. מפה המציגה את השטח בו נמדדו סלעים ואת המקורות האפשריים לנפילת סלעים. בתמונה בפינה השמאלית מוצג תצלום הממחיש את המדידה בשדה.



איור 20. התפלגות צורת הסלעים. הצורה השכיחה היא תיבה. גודל המדגם הוא 79 סלעים.



איור 21. היסטוגרמה המציגה את כמות הסלעים לפי טווח נפחים. גודל המדגם הוא 79 סלעים.



איור 22. גרף המציג שכיחות מצטברת לפי נפח סלע. הגודל המינימלי הוא 1 מטר מעוקב, הגודל המקסימלי הוא 30 מטרים מעוקבים וגודל המדגם הוא 79 סלעים.



איור 23. תצלומים המציגים סלעים בנפחים של כ-100 מטרים מעוקבים. (א') – צילום המציג סלע בנפח של מעל 100 מטרים מעוקבים אשר עצר בקרבת ההעתק. (ב') תצלום של סלע בנפח של כ-100 מטרים מעוקבים אשר נראה בשלבי ניתוק מתקדמים, סלע זה ממקום מעל הגן היפני בקיבוץ חפצי-בה.

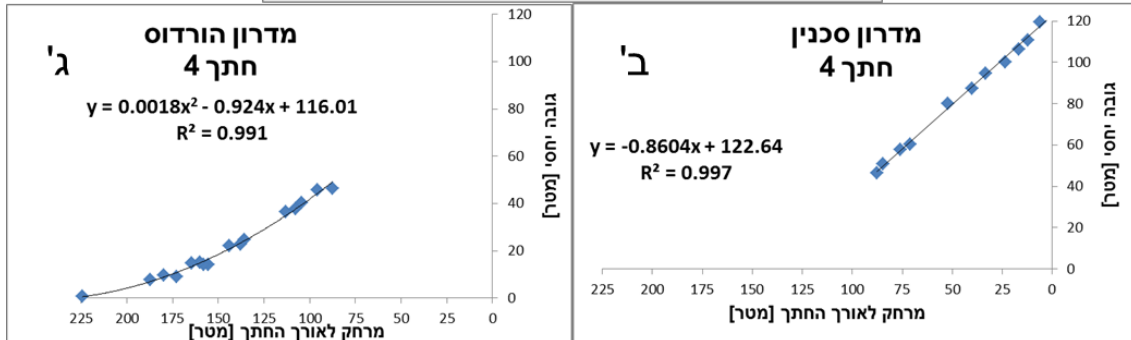
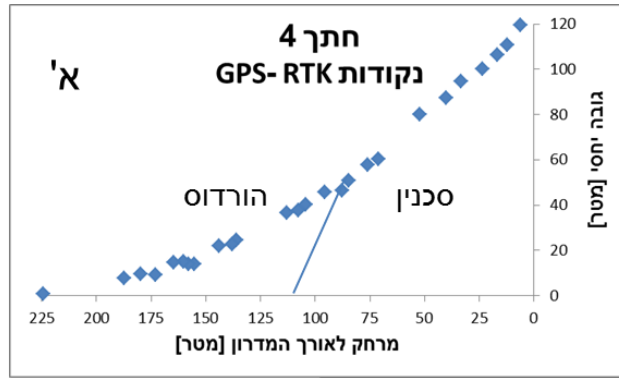
בנוסף לסלעים הללו מונחים 3 סלעים בנפח של כ- 100 מטרים מעוקבים בקרבת ההעתק. סלע באותו הגודל מופיע במצוק שמעל מזרח הקיבוץ (איור 23). מכיוון שלא נצפו סלעים באותו הגודל במורד המדרון, במרחק גדול יותר מההעתק, אנו מניחים שכאשר סלע בגודל הזה נופל הוא מחליק ולא מקפץ למטה. ניתן להסביר זאת על ידי כך שסלע בגודל הזה אינו נופל נפילה חופשית לאורך המדרון מכיוון שמדרגות הסלע קטנות מדי. במצב זה הסלע יפול לפי מנגנון המתאים לשיפוע הממוצע ולא יאיץ כאשר השיפוע מקומי גדול יותר. במידה והסלע היה מאיץ באותו האופן בו הסלעים האחרים מאיצים היינו מצפים למצוא אותו במרחק גדול יותר מהסלעים האחרים, זאת משיקולי שימור תנע. לפיכך סלעים מגודל זה לא נכללו בניית הסכנה.



איור 24. תצלומים שונים המציגים את המדידות בעזרת מכשיר ה-GPS-RTK במורד המדרון.

4.2.2 מדידת גאומטרית החתכים

החתכים הטופוגרפיים השונים עליהם חושבה תנועת הסלעים במורד המדרון (איור 18), נמדדו בעזרת GPS-RTK (איור 24). כאשר המדידה החלה בראש החתך כלפי מטה. כיוון הירידה הוא בכיוון השיפוע הטופוגרפי הגדול ביותר. כאשר חל שינוי כלשהו בזווית המדרון נמדדה נקודה בעזרת ה-GPS, שינויים מקומיים במדרון לא נמדדו אלא נמדדו בתור חספוס. שינויים מקומיים יכולים להיות מדרגות או שינויים במרחק של מספר מטרים בודדים. המדידות הוזנו לתוכנת CRSP ליצירת החתכים בתוכנה זו. לתוך תוכנת CRSP לא ניתן להזין ערכים שליליים של גובה מעל פני הים ולכן היה צורך להתאים את ערכי הגובה שנמדדו. כל ערכי הגובה שנמדדו הותאמו כך שהנקודה הנמוכה ביותר בכל חתך היא האפס היחסי. בנוסף הנתונים שימשו לבניית חתכים לכל מדרון בתוכנת EXCEL (איור 25). לכל חלק במדרון הותאמה משוואה המתארת את המדרון, זאת כדי להזין את המשוואות המתאימות לתוך מודל המטלאב. כפי שניתן לראות באיור 25, לחלק המדרון של תצורת סכנין הותאמה משוואה לינארית, ולחלק המדרון של תצורת הורדוס הותאמה משוואת פולינום.



איור 25. גרפים המציגים את תוצאות מדידת חתך 4 בעזרת מכשיר ה-GPS-RTK. א'- גרף המציג את פרופיל המדרון בחתך 4 לאחר תיקון עבור הגובה כך שלא יתקבל גובה שלילי. ב'- פרופיל המדרון בחתך 4 בחלק בו נחשפת תצורת סכנין, לנתונים הותאם מדרון בהתאמה לינארית. ג'- פרופיל המדרון בחתך 4 בחלק בו נחשפת תצורת הורדוס, לנתונים הותאם מדרון בהתאמה פולינומית.

4.2.3 חספוס

החספוס האופייני נמדד בשטח בעזרת סרט מדידה על גבי תצורת סכנין והורדוס, כפי שהוסבר בפרק שיטות (סעיף 3.2.2.4). החספוס מוצג ביחידות אורך של מטר. על גבי תצורת סכנין חיספוס גבוה נמדד במדרגות סלע. על גבי תצורת הורדוס ישנם מספר שבילים אשר גורמים גם הם לדירוג במקומות. התוצאות מוצגות בטבלה 5.

חספוס כאשר $r < 1$ (מ')	חספוס כאשר $r > 1$ (מ')	תצורה/ גודל בולדר
0.5-0.7	0.3-0.4	סכנין
0.5-0.8	0.4-0.6	הורדוס

טבלה 5. תוצאות מדידת החספוס, r-רדיוס הסלע הנופל.

4.2.4 כיוול מקדמי התקומה והחיכוך בתוכנת ה CRSP

על מנת לכייל את הערכים של מקדמי החיכוך והתקומה נבחרו בשדה שני מדרונות אשר לאורכם פזורים סלעים - תוצרי נפילת-סלע, ואשר ניתן להגדיר היטב את נקודת ההתחלה ונקודת העצירה של תנועת הסלעים במורד (איור 17 – חתכי הכיול). נקודות ההתחלה נבחרו על סמך צלקות טריות במצוקי תצורת סחנין על פני אזור אשר הוגדר כמקור אפשרי לנפילות סלעים. כיווני תנועת הסלעים בשדה ובהדמיה נבחרו בהתאם לכיוון השיפוע בשדה. צורת הסלעים נבחרה להיות גלילית, כאשר גדלי הסלעים שנבחרו היו בהתאם לסלעים שנמדדו לאורך המסלול בשכיחות מצטברת של 50% (1.5 מטרים מעוקבים), 85% (4 מטרים מעוקבים) והסלע הגדול ביותר (30 מטרים מעוקבים). המהירות התחלתית שהוזנה לתוכנה היתה מהירות השואפת ל 0 בציר האופקי (אילוץ בתוכנה), ואפס בציר האנכי. לתוכנה הוזנו כל הערכים הנדרשים, כאשר ערכי מקדמי התקומה והתחלתיים נבחרו לפי המדריך למשתמש בהתאם לסלע חשוף עבור סכנין, ולקרקה קשה עבור הורדוס (Jones et al., 2000). הערכים הותאמו מחדש בכל פעם עד שהתקבלו תוצאות המראות כי הסלעים נעצרו במרחק המתאים לתצפיות (איור 17). הערכים המופיעים בטבלה 6 מייצגים את הערכים של הרצות התוכנה בהן נעצרו סלעים מן הגדלים והצורות שתועדו בשטח במרחק המתאים. ערכים אלו מתאימים לטווח הערכים שניתן על ידי התוכנה ומעט גבוהים מערכים שכיילו בעבודה דומה באזור קרית שמונה (Kanari, 2008) עבור מדרון גיר ומתחתיו מדרון חול מכוסה קרקע. בשלב זה המודל מכויל וניתן להשתמש בו בשטח העבודה לבדיקה של מסלולים אפשריים של נפילות סלעים, ולמיפוי אזורי הסכנה. מקדמים אלו שימשו גם עבור ההדמיות במודל אשר יושם במטלאב.

תצורה	ערכי מקדם התקומה R_n	ערכי מקדם החיכוך R_t
סכנין	0.33	0.65
הורדוס	0.18	0.60

טבלה 6. ערכי המקדמים המתאימים לשטח העבודה.

4.3 בדיקת רגישות למהירות התחלתית

המהירות ההתחלתית של הסלעים, במקרה של רעידת אדמה, חושבה לפי תאוצת הקרקע ותדירות הגלים לפי הקשר

$$v = \frac{a}{f} \cdot 13$$

כאשר a היא התאוצה הסייסמית במטר לשנייה בריבוע, f היא התדירות 1Hz, ו- v היא המהירות במטר לשנייה. תחילה חושבה תאוצת הקרקע לפי מספר משוואות אמפיריות (Abrahamson & Silva, 1997; Campbell, 2003; Somerville et al., 2001; Boore et al., 1997). נבדקו שני תרחישים אפשריים: (1) רעידת אדמה באזור הבקע במגניטודה של 6.8, זמן החזרה הוא של 100 שנים (Hough & Avni, 2010), ובמרחק של 15 קילומטרים משטח העבודה. (2) מוקד באזור הגלבווע עם מגניטודה של 5.5 ובמרחק של קילומטר אחד (Amiran et al., 1994). רעידות אדמה גורמות לגלים בתדירות של 1-10 הרץ (Scholz, 2002). התדירות לשני המקרים נקבעה ל-1 הרץ על מנת להעריך את המקרה החמור ביותר. התוצאות המוצגת בטבלה 7 הן סכום התוצאה וטווח השגיאה, סכימה זו נועדה להעריך את המקרה החמור ביותר.

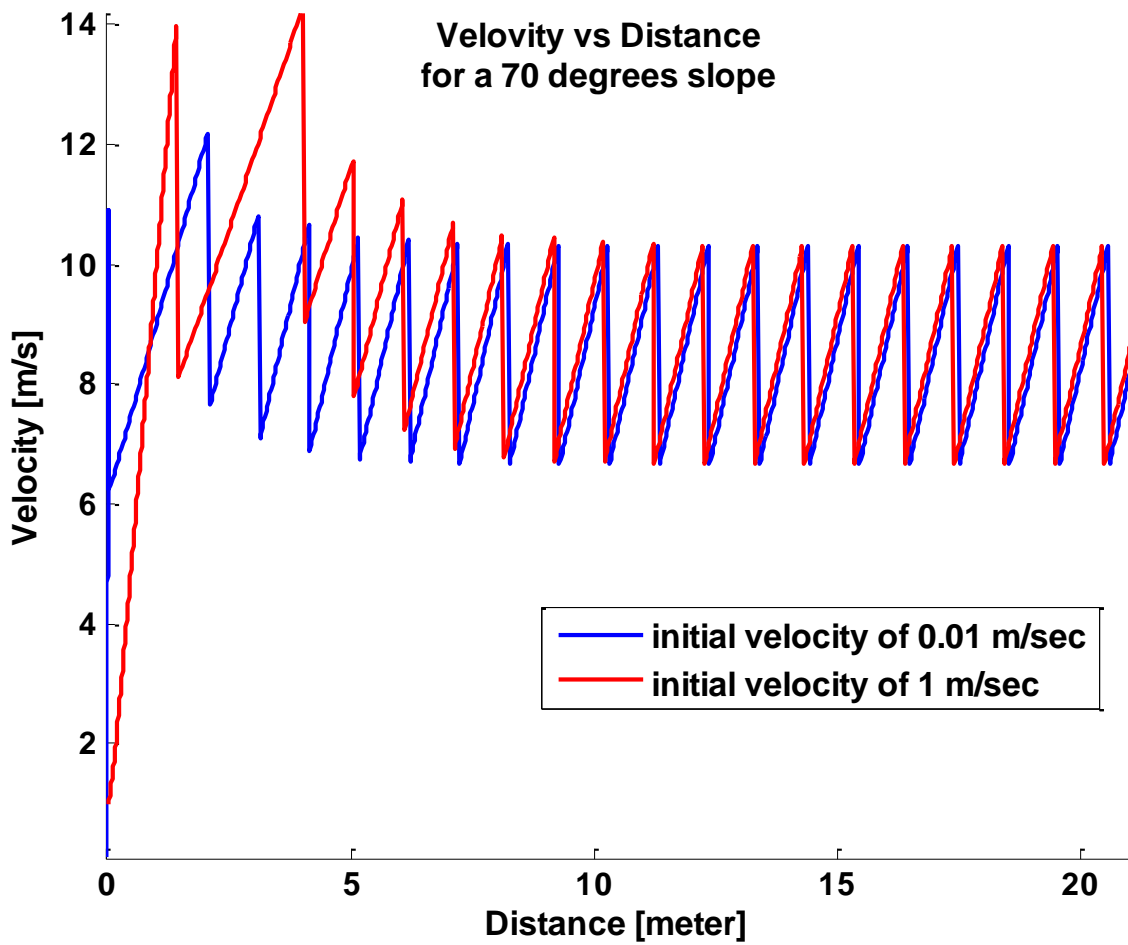
תאוצת הקרקע הגבוהה ביותר היא 0.29 g לפי Boore. בפתרון משוואה 13 מקבלים מהירות התחלתית של 2.9 מטרים בשנייה. לפי התוצאות בסעיף 4.1.2 תאוצת קרקע של 0.21 מספיקה כדי להפעיל נפילת סלע (טבלה 3).

מקור	תאוצת קרקע לפי מוקד בבקע ים המלח [g]	תאוצת קרקע לפי מוקד בהעתק הגלבווע [g]
Somerville et al.	0.19	0.20
Campbell	0.23	0.15
Abramson and Silva	0.21	0.21
Boore	0.17	0.29

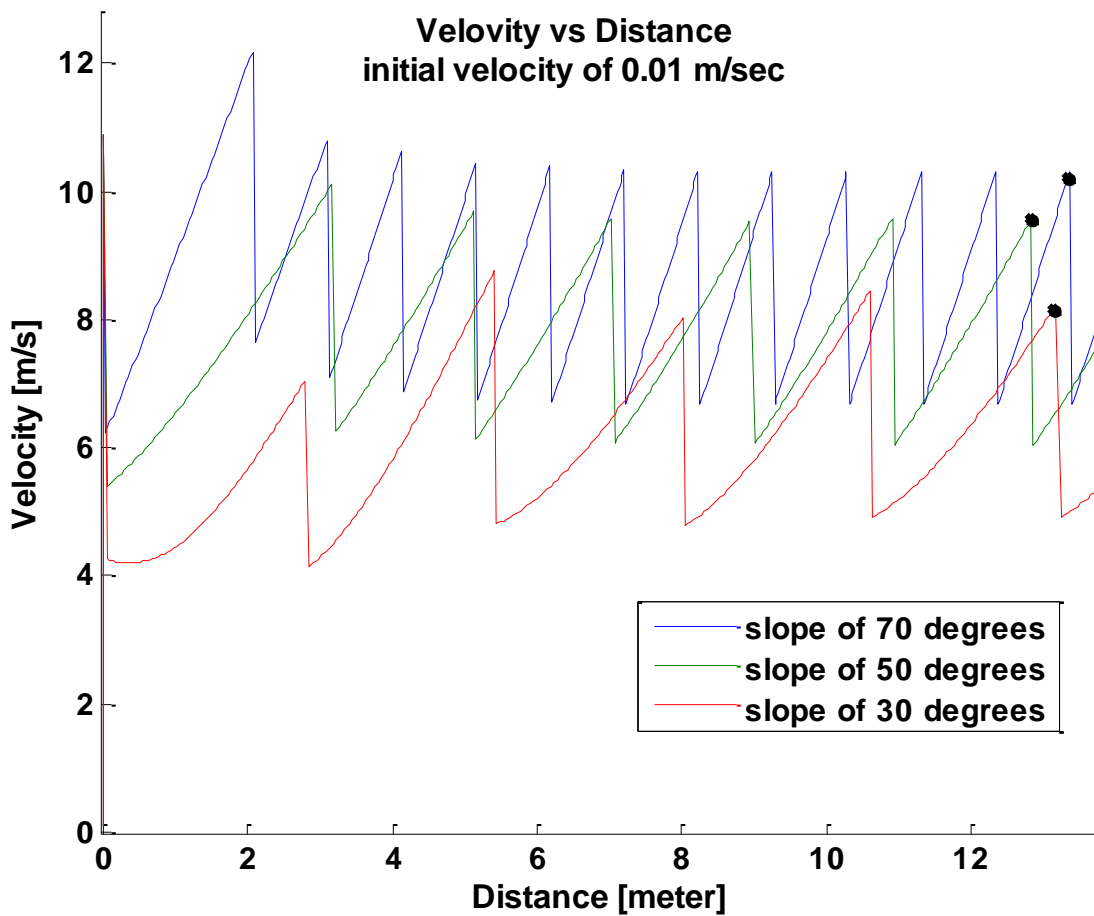
טבלה 7. תאוצת הקרקע לפי מקורות שונים. התוצאות מוצגות עבור שני מוקדים, אחד בבקע ים המלח והשני בהעתק הגלבווע. כל מקור מייצג משוואה אמפירית אחרת. תאוצת הקרקע מוצגת ביחידות g (תאוצת הכובד).

במודלים השונים נבדקה הרגישות למהירות התחלתית. **בתוכנת ה-CRSP** נערכו הדמיות עם המהירות האופקית התחלתית המחושבת של 2.9 מטר לשניה. התוצאות מראות כי מהירות התחלתית זו לא מגדילה את המרחק הסופי של תנועת הסלעים ביחס למהירות התחלתית השואפת לאפס, אלא משפיעה על הפיזור בתוך החתכים (תוצאה זו מוצגת בסעיף 5.3.4 פיזור לאורך החתך). **במודל המטלאב** נראה שלמהירות ההתחלתית אין השפעה על המרחק הסופי. תוצאה זו מתקבלת מכיוון שהמהירות הסופית המתקבלת לכל מדרון ישר אינה מושפעת מהמהירות ההתחלתית. זהו המצב שנצפה לקבל בהתאם להנחות המודל ומצב של תנועת גוף במורד מדרון. Dippel et al. (1996), מצאו כי במורד מדרון דיסק יגיע למצב יציב. במקרה של המודל בעבודה זו הסלע יגיע למהירות ממוצעת קבועה לאורך מדרון בשיפוע קבוע. תוצאה זו נובעת מהתנאי שעל הסלע לעבור מרחק מינימלי השווה לרדיוס שלו בכל צעד מרחק במורד המדרון. תנאי זה קיים גם בתוכנת ה-CRSP. מצב זה המדמה גילגול, מביא את הסלע לטווח מהירות קבוע. בהדמיות שנערכו בתוכנת ה-CRSP נמצא כי מהירות התחלתית משפיעה מעט על התפלגות נקודות העצירה של סלעים לאורך מסלול הנפילה – יותר סלעים יגיעו לקצה המסלול האפשרי. כלומר רעידות אדמה משפיעות על התפלגות הסלעים בתוך מסלול הנפילה אבל לא על המרחק הסופי המירבי שמתקבל בהדמייה. במידה ולסלע יש מהירות התחלתית הסיכויים שיעצר על האזורים המדורגים באמצע המדרון של תצורת סכנין קטן יותר, ולכן הסיכוי שיגיע לבסיס המדרון ויסכן את הקיבוצים יגדל.

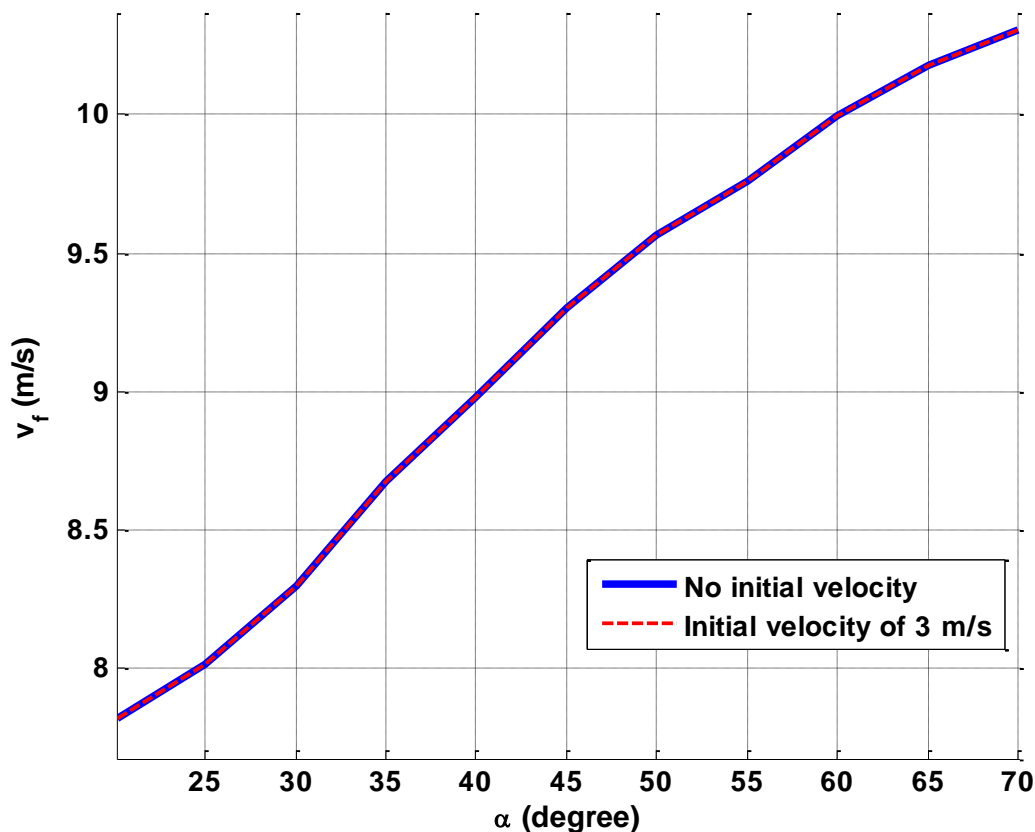
בקוד המטלאב נבחנה השפעת המהירות ההתחלתית על המהירות לאורך מדרון ישר באורך של 100 מטרים. כפי שניתן לראות באיור 26 אשר מציג את גודל וקטור המהירות לפי המרחק לאורך המדרון, הסלעים מאיצים ומאטים בפתאומיות. ההתנהגות זו צפויה מכיוון שמדובר על סדרה של קפיצות, הסלע מאיץ בנפילה ואז מאט בפתאומיות כאשר הוא פוגע במדרון. לאחר מרחק קצר אוסילצית המהירות מתייצבת על אמפליטודה מסויימת, כלומר הסלע עובר להתגלגל. כפי שניתן לראות באיור 26 כאשר ישנה מהירות התחלתית הסלע צריך לעבור מרחק גדול יותר כדי שהאמפליטודה תתייצב על אותו ערך כמו במקרה של מהירות התחלתית אפסית. כאשר הסלע מתגלגל במודל, הוא עובר את אותו המרחק בין הפגיעות בקרקע ולכן מגיע למהירות סופית שאינה תלויה במהירות ההתחלתית. בנוסף, חישבנו את המהירות לפני הפגיעה בקרקע עבור כל שיפוע, כפי שמסומן באיור 27 בנקודות שחורות. התוצאה מוצגת באיור 28 המציג את המהירות המקסימלית, לאחר התייצבות המהירות, כתלות בשיפוע המדרון. כמצופה ככל שהשיפוע עולה כך גם המהירות.



איור 26. גרף המציג את גודל וקטור המהירות הקווית לאורך המדרון כפי שמתקבל ממודל המטלאב. המדרון הוא בשיפוע של 70 מעלות. כל קו מייצג תנועה עם מהירות התחלתית שונה, כפי שניתן לראות במקרא.



איור 27. גרף המציג את גודל וקטור המהירות הקווית של סלע אשר נע על גבי מדרונות בעלי שיפועים שונים. הנקודות השחורות מייצגות את המהירות המקסימלית לאחר התייצבות המהירות על אמפליטודה קבועה. זו המהירות (V_f), המוצגת באיור 28.

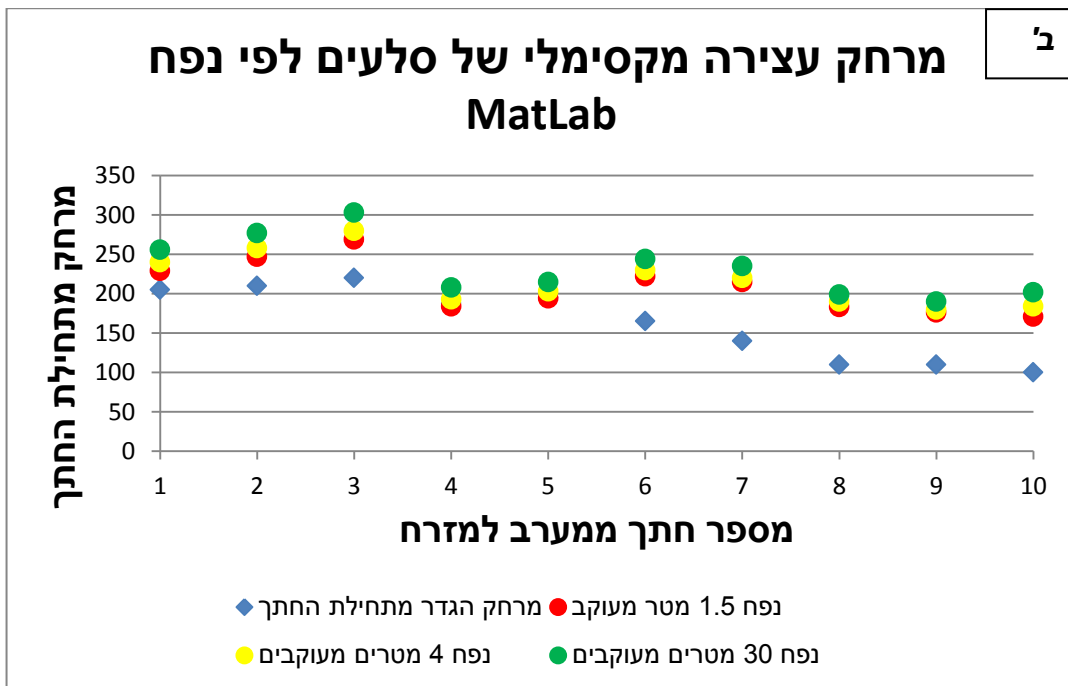
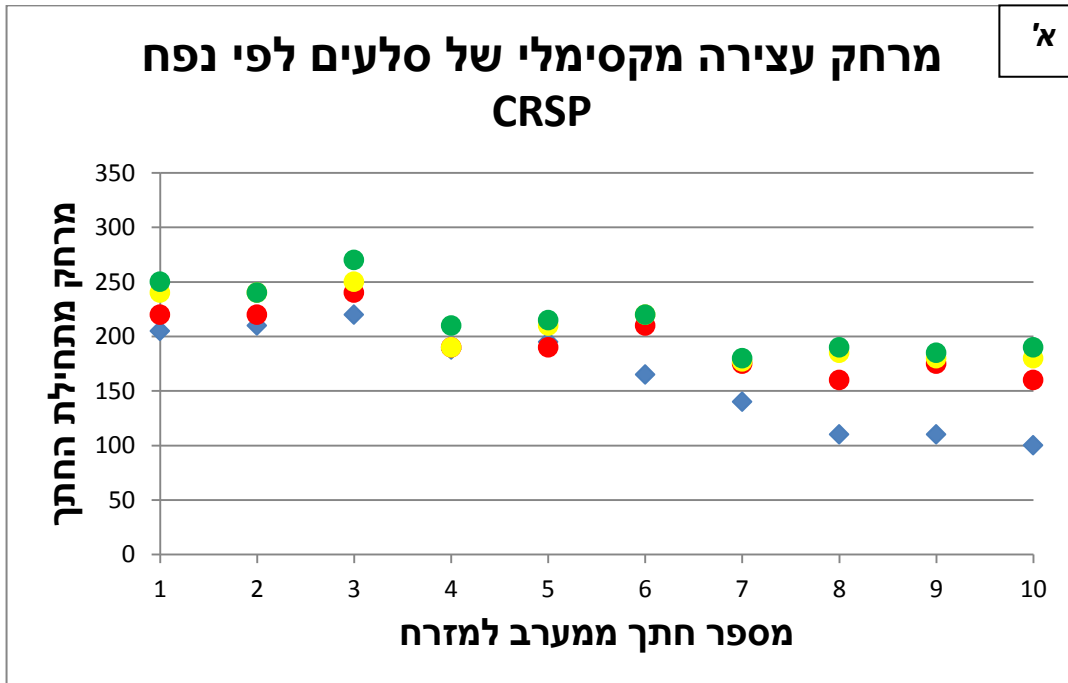


איור 28. המהירות המקסימלית, לאחר התייצבות המהירות באמפליטודה קבועה, לפי שיפוע. בגרף ניתן לראות כי אין קשר בין המהירות אליה יגיע הסלע לאורך המדרון למהירות ההתחלתית.

4.4 הערכת הסכנה בשטח הקיבוצים

הסכנה לנפילת סלעים בשטח הקיבוצים חפצי-בה ובית אלפא הוערכה בעזרת התוכנות השונות בכל חתך טופוגרפי אשר נמדד. מקוד המטלאב התקבל המרחק המקסימלי מתחילת החתך אשר נמצא בטווח נפילות הסלעים. מתוכנת CRSP התקבלו: ההסתברות לעצירת סלעים לאורך המדרון, המרחק המקסימלי אותו סלע יכול לעבור, המהירות המקסימלית לאורך החתך, גובה הקפיצה המקסימלי לאורך החתך, ולבסוף גובה הקפיצה בקו הגדר וההסתברות שסלע יעבור את קו זה. בשתי התוכנות ההדמיות בחנו שלושה נפחי סלעים: 1.5, 4 ו- 30 מטרים מעוקבים בכל חתך. נפחים אלו מהווים את הנפח המכסימלי לכל אחוזון לפי 50%, 85% ו- 100% בהתאמה (איור 22). הדמיות בתוכנת ה-CRSP מדמות נפילות של 1000 סלעים כדי לכסות מספר גדול של אפשרויות שונות בגאומטרית המדרון ולקבל תוצאה בעלת אופי סטטיסטי. כמו כן, בתוכנת ה-CRSP הורצו הדמיות עם וללא מהירות התחלתית אופקית. המהירות ההתחלתית היתה 2.9 מטר לשניה לפי החישוב בתת פרק 5.2.5. באזור המחצבה לא הוערכה הסכנה, זאת מתוך הבנה כי סלעים אשר יפלו מקירותיה לא יסכנו את

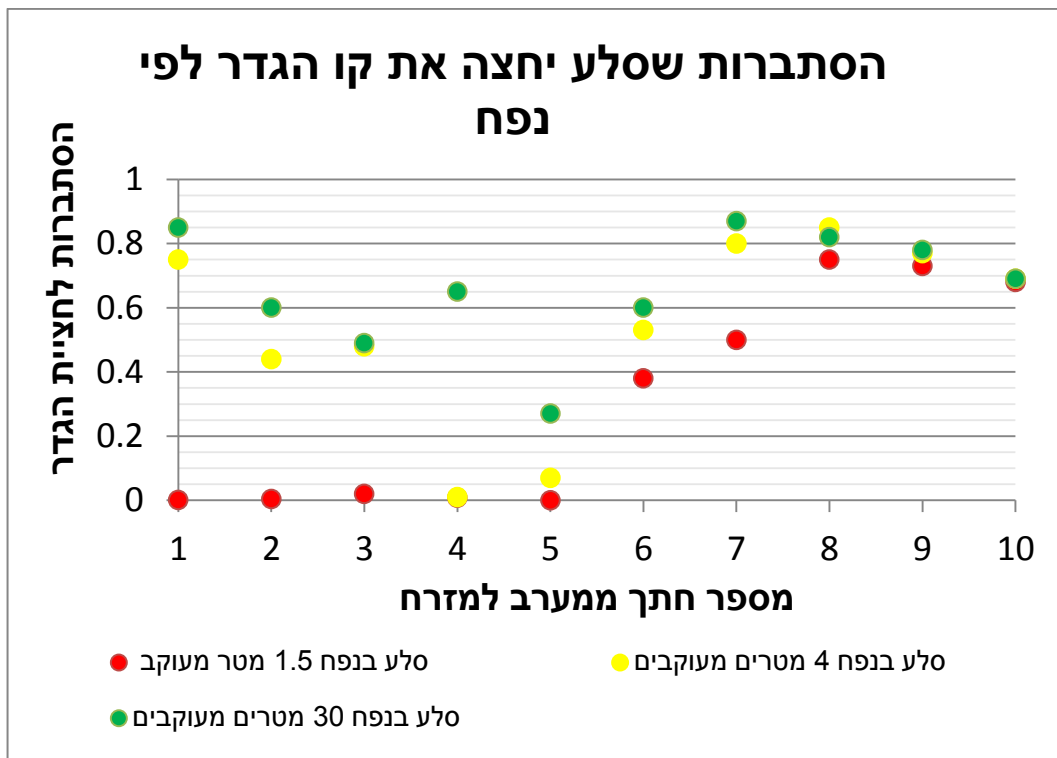
הקיבוץ. התוצאות מוצגות בסימון אחיד עבור כל נפח סלעים אשר התייחסנו אליו: 1.5, 4 ו- 30 מטרים מעוקבים מסומנים באדום, צהוב וירוק בהתאמה. ניתן לראות דוגמא לכך באיור 29.



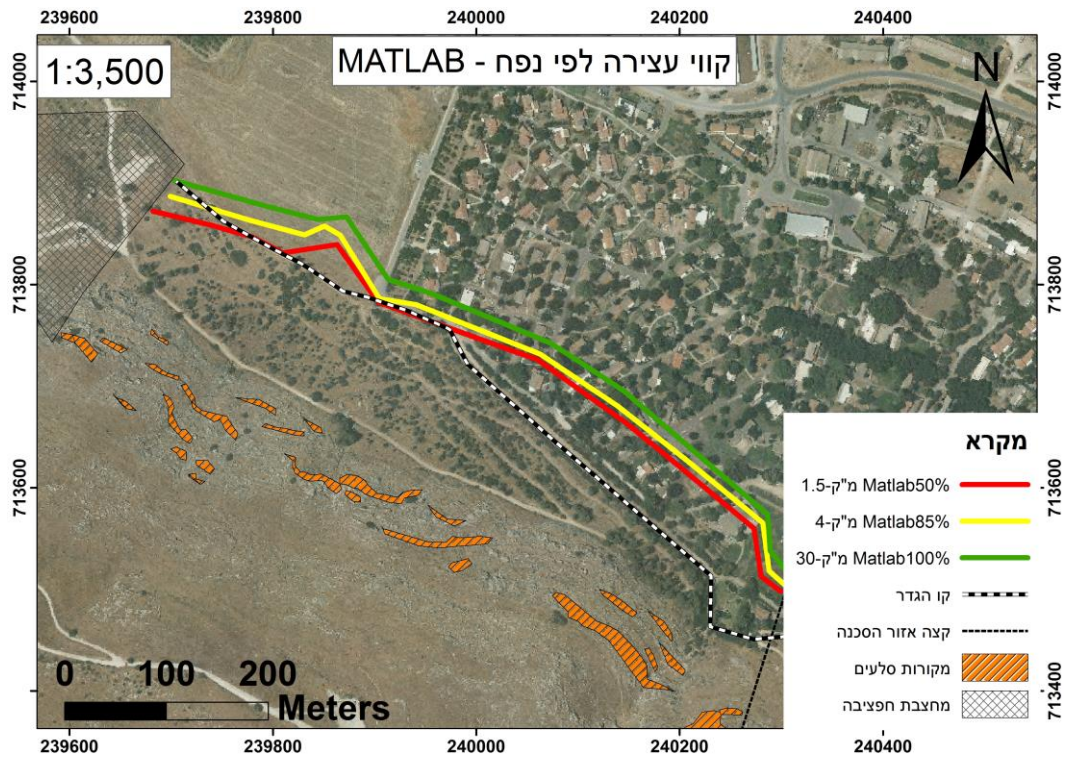
איור 29. מרחק העצירה המקסימלי של סלעים מתחילת החתך עבור כל חתך כפי שהתקבל בתוכנת CRSP (גרף א'), ובמטלאב (גרף ב'). מיקום הגדר מוצג גם כן עבור כל חתך. מיקום החתכים מוצג באיור 18. הצבעים השונים מייצגים נפחים שונים לפי המקרא בגרף ב'.

4.4.1 מרחק עצירה והסתברות לחציית הגדר

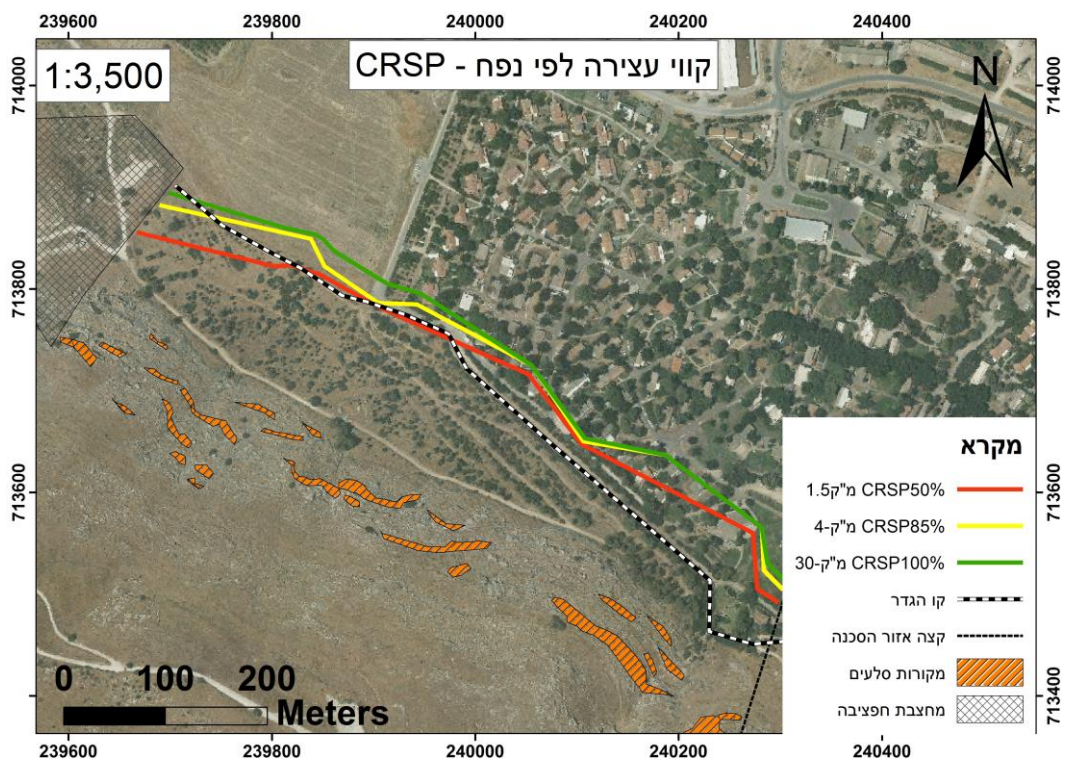
ניתן לראות באיור 29 כי החלק המזרחי של חפצי-בה נמצא בטווח הפגיעה של כל גדלי הסלעים. בתוכנת CRSP התקבלו תוצאות המציגות את מספר הסלעים הצפויים לעבור מרחק מסויים. החלק היחסי של הסלעים אשר חצו את קו הגדר מוצג בגרף ההסתברות לחציית הגדר. הגדר לפי נפח לכל חתך (איור 30). ניתן לראות כי בחלק המזרחי (חתך מספר 9-6), הסתברות גבוהה יחסית לכל גדלי הסלעים בעוד שבחלקים המערביים (חתך מספר 5-1) ההסתברות שסלעים בנפח של 1.5 מטר מעוקב ומטה יחצו את הגדר כמעט אפסית. באיורים 31-32, מוצגות מפות המציגות קווי העצירה לפי גדול הסלע. כאמור 50% מהסלעים הם בנפח של עד 1.5 מטר מעוקב, הסלעים בנפח של עד 4 מטרים מעוקבים מהווים 85% מהסלעים שנצפו בשטח והגודל המכסימלי הוא של 30 מטרים מעוקבים. כל קו מייצג את הגבול אותו לא יחצו סלעים אשר נפחם שווה או קטן לנפח המיוצג על ידי אותו הקו. סימון הקווים במפה נעשה תוך מדידת מרחקים מכסימליים מהמקורות השונים לפי המרחק שחושב עבור החתכים המייצגים בכל אזור.



איור 30. גרף ההסתברות של סלעים בנפחים שונים לחצות את קו הגדר. הסתברות זו התקבלת מהדמיות בתוכנת CRSP.



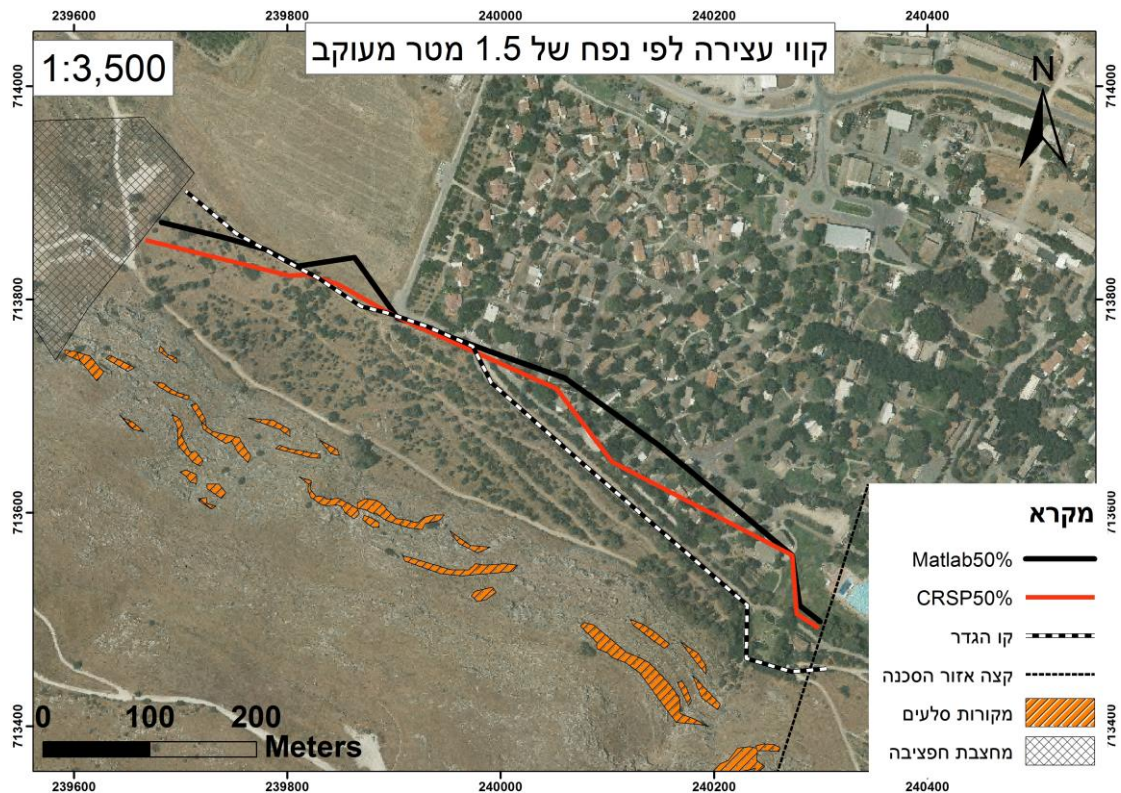
איור 31. מפת קווי העצירה לפי תוצאות מודל המטלאב. כל קו מייצג גבול אשר סלעים מהנפח המיוצג, או חלק יחסי מתכולת הסלעים, אינם צפויים לחצות.



איור 32. מפת קווי העצירה לפי תוצאות תוכנת CRSP. כל קו מייצג גבול אשר סלעים מהנפח המיוצג או חלק יחסי מתכולת הסלעים, אינם צפויים לחצות.

4.4.2 השוואה בין התוכנות

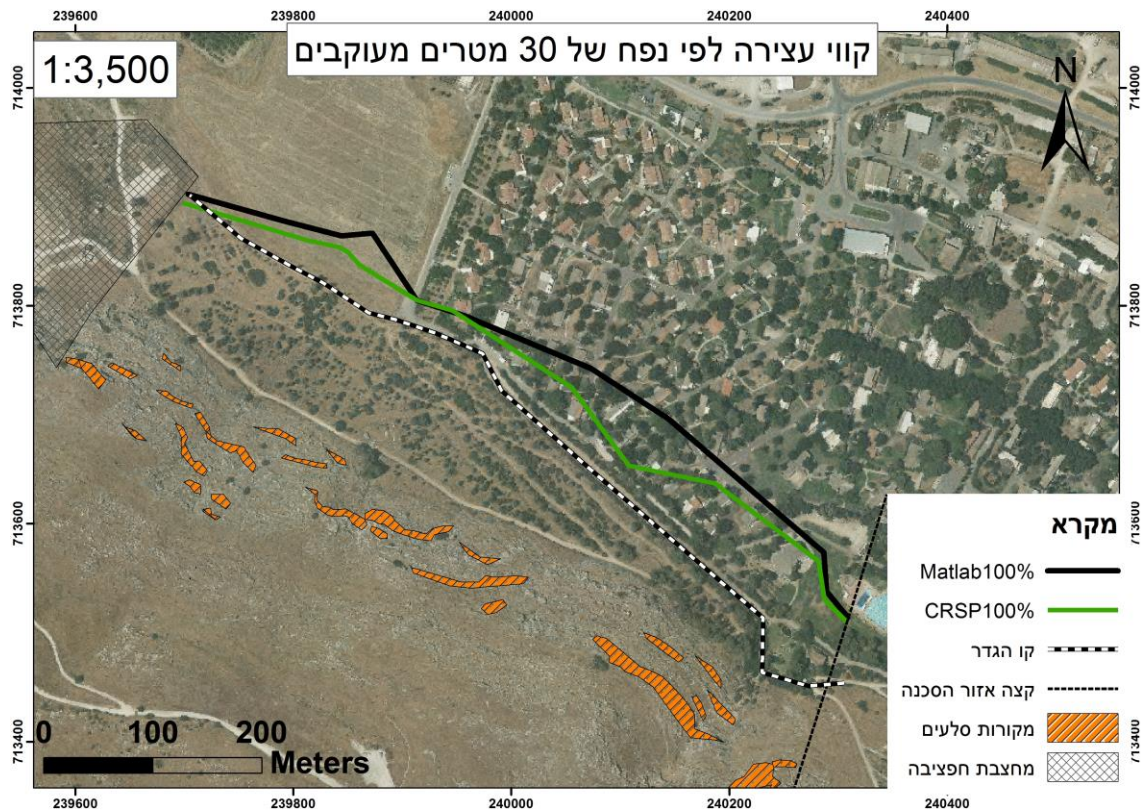
באיורים 33-35 ניתן לראות השוואה בין התוצאות אשר התקבלו במודל המטלאב לבין התוצאות שהתקבלו בתוכנת CRSP. ניתן לראות שהתוצאות דומות מלבד אזורים מסויימים בהם תוצאות מודל המטלאב מחשבות מרחק גדול יותר. את הדימיון הרב ניתן להסביר בכך שאופן התנועה המתואר במודלים זהה. ייתכן וההבדל בחלק מהמקרים נובע משוני בתנאי העצירה. תנאי העצירה של תוכנת CRSP אינו מפורט במדריך למשתמש, והנסיגות לברר מהו בהתכתביות העלו חרס.



איור 33. מפת קווי עצירה עבור סלעים בנפח של 1.5 מטר מעוקב, 50% מתכולת הסלעים, כפי שהתקבלה בתוכנות השונות. קוד המטלאב מציג במקומות הערכה מעט גדולה יותר למרחק המקסימלי.



איור 34. מפת קווי עצירה עבור סלעים בנפח של 4 מטר מעוקב, 85% מתכולת הסלעים, כפי שהתקבלה בתוכנות השונות. ברוב השטח ההערכה היא זהה, מלבד במקומות מסויימים בהם קוד המטלאב מציג הערכה מעט גדולה יותר למרחק המקסימלי.



איור 35. מפת קווי עצירה עבור סלעים בנפח של 30 מטרים מעוקבים, 100% מתכולת הסלעים, כפי שהתקבלה בתוכנת השנות. קוד המטלאב מציג במקומות הערכה מעט גדולה יותר למרחק המקסימלי.

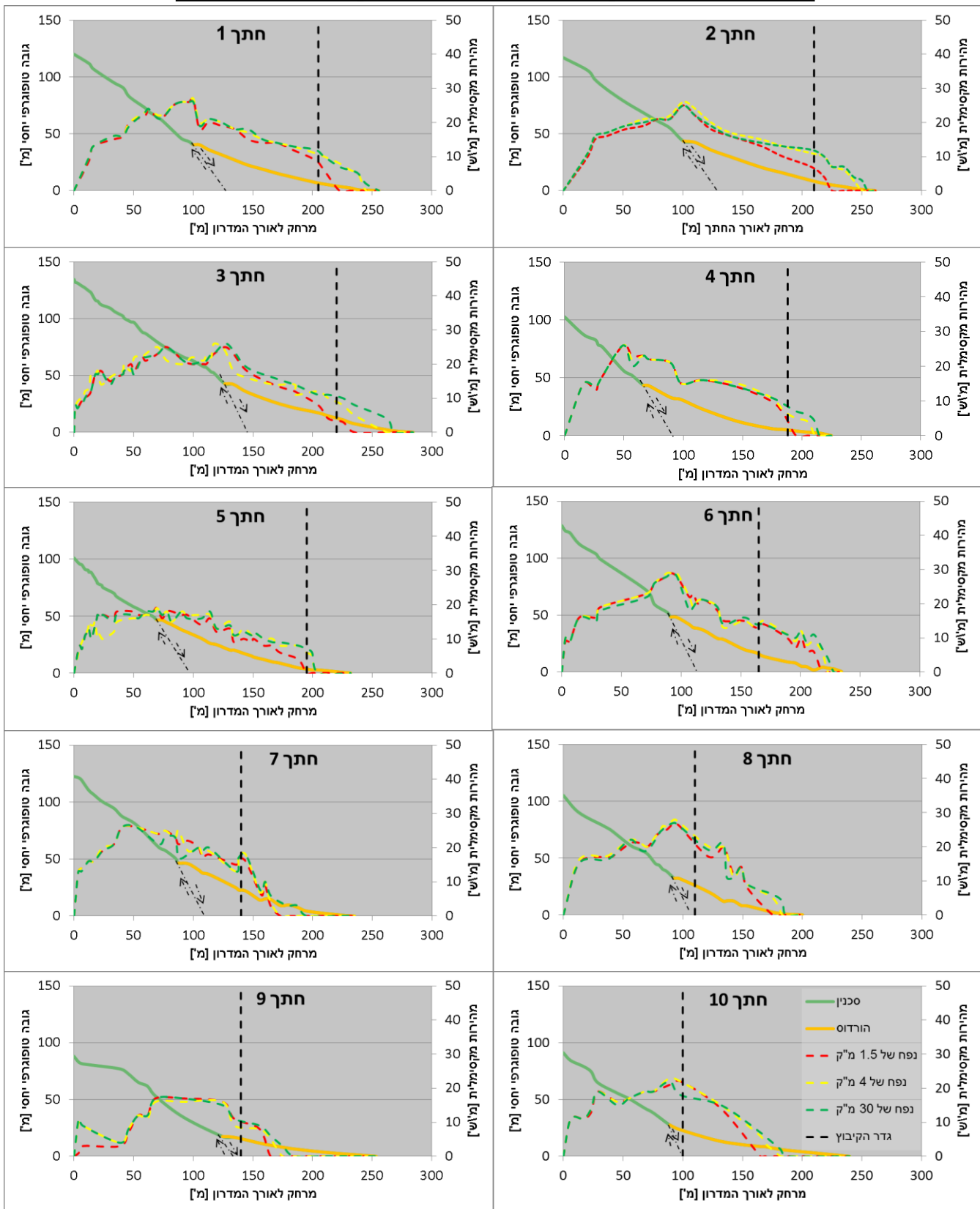
4.4.3 מהירות מקסימלית לאורך החתכים

תוצאות המהירות המקסימלית, כפי שהתקבלה בתוכנת CRSP, לאורך החתכים השונים מוצגות באיור 36. המהירות המקסימלית לאורך החתכים מתנהגת באופן דומה, האצה לאורך סכנין, האצה נוספת בנפילה במורד העתק הגלבוה שמהווה את קו המגע בין תצורת סכנין להורדוס, והאטה לאורך הורדוס עד לעצירה. בחתכים בהם השיפוע נשאר יחסית קבוע לאורך סכנין יש הגעה למהירות מקסימלית בדומה למודל המטלאב, ניתן לראות דוגמה יפה לכך בחתכים 5 ו-9. בחתכים בהם יש שינוי במהירות ניתן לראות כי גם השיפוע משתנה.

4.4.4 גובה קפיצה מקסימלי לאורך החתכים

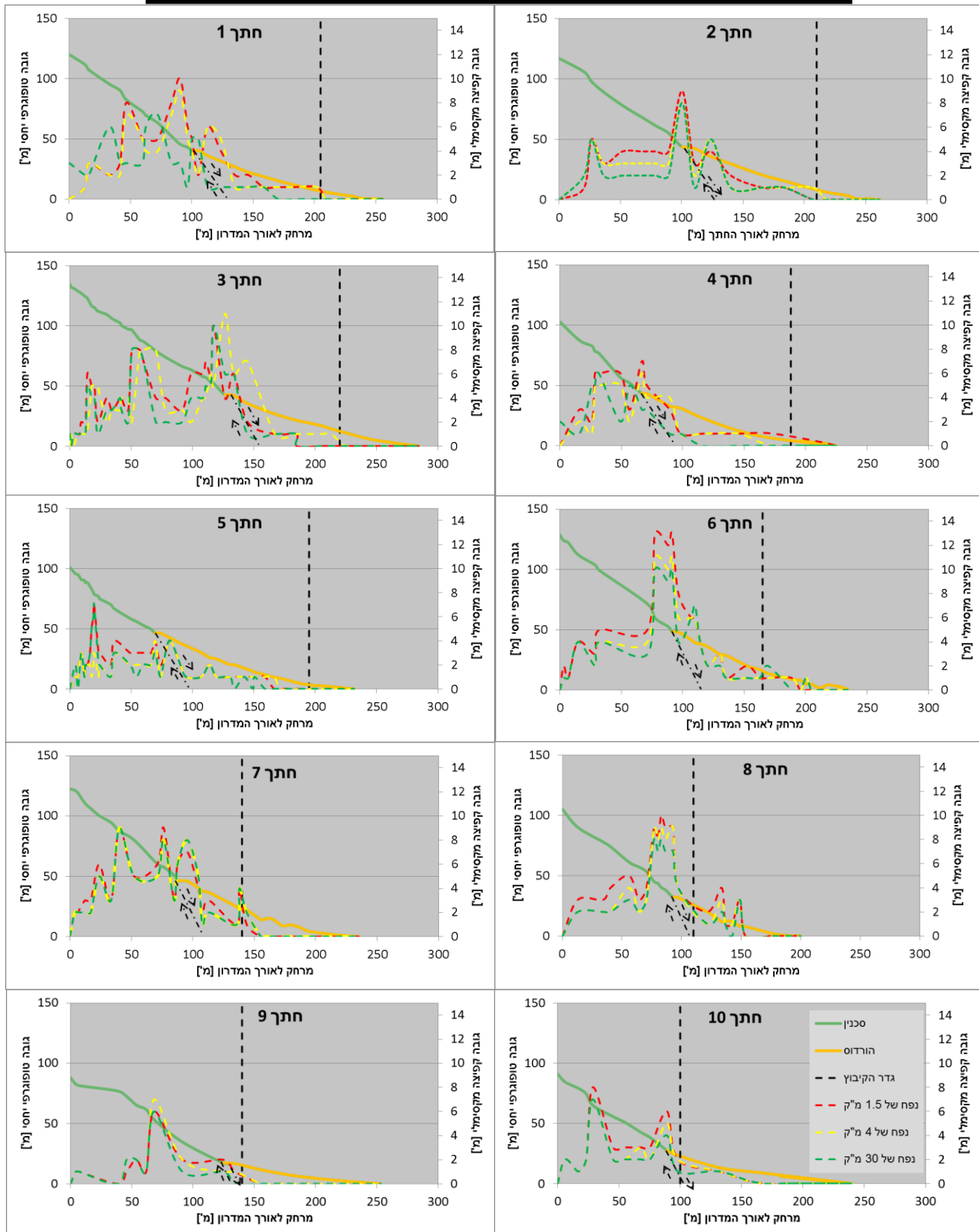
תוצאות גובה הקפיצה המקסימלי, כפי שהתקבל בתוכנת CRSP, לאורך החתכים השונים מוצגות באיור 37. גובה הקפיצה המקסימלי גבוה משמעותית על גבי תצורת סכנין. כנראה שמדרגות הסלע על גבי המדרון של תצורת סכנין גורמות לתופעה הזו. בנוסף, יתכן כי על גבי הורדוס הסלעים מתגלגלים יותר מאשר קופצים. כפי שניתן לראות בקרבת גדר הקיבוץ גובה הקפיצה המקסימלי יורד משמעותית לגובה נמוך מ-2 מטרים, מלבד בחתכים 6-8 אשר מציגים גובה קפיצה מקסימלי של כ-2-4 מטרים.

מהירות מקסימלית לאורך החתכים



איור 36 – המהירות המקסימלית לאורך החתכים כפי שהתקבלה בתוכנת CRSP (מקרא בחתך 10). הקו הרציף מסמן את המדרון כאשר החלק הירוק הוא מתצורת סכנין והחלק הצהוב הוא מתוצרת הורדוס. על המגע ביניהן מסומן ההעתק. הקו השחור המקווקו האנכי מסמן מיקום את גדר הקיבוץ. הקווים המקווקים הצבעוניים מסמלים את המהירות המקסימלית לאורך המדרון (ציר Y ימני).

גובה קפיצה מקסימלי לאורך החתכים



איור 37- גובה הקפיצה המקסימלי לאורך החתכים כפי שהתקבלה בתוכנת CRSP (מקרא בחתך 10). הקו הירוק מסמן את המדרון כאשר החלק הירוק הוא מתצורת סכנין והחלק הצהוב הוא מתוצרת הורדוס. על המגע ביניהן מסומן ההעתק. הקו השחור המקווקו האנכי מסמן את מיקום גדר הקיבוץ. הקווים המקווקוים הצבעוניים מסמלים את הגובה הקפיצה המקסימלית לאורך המדרון (ציר Y ימני).

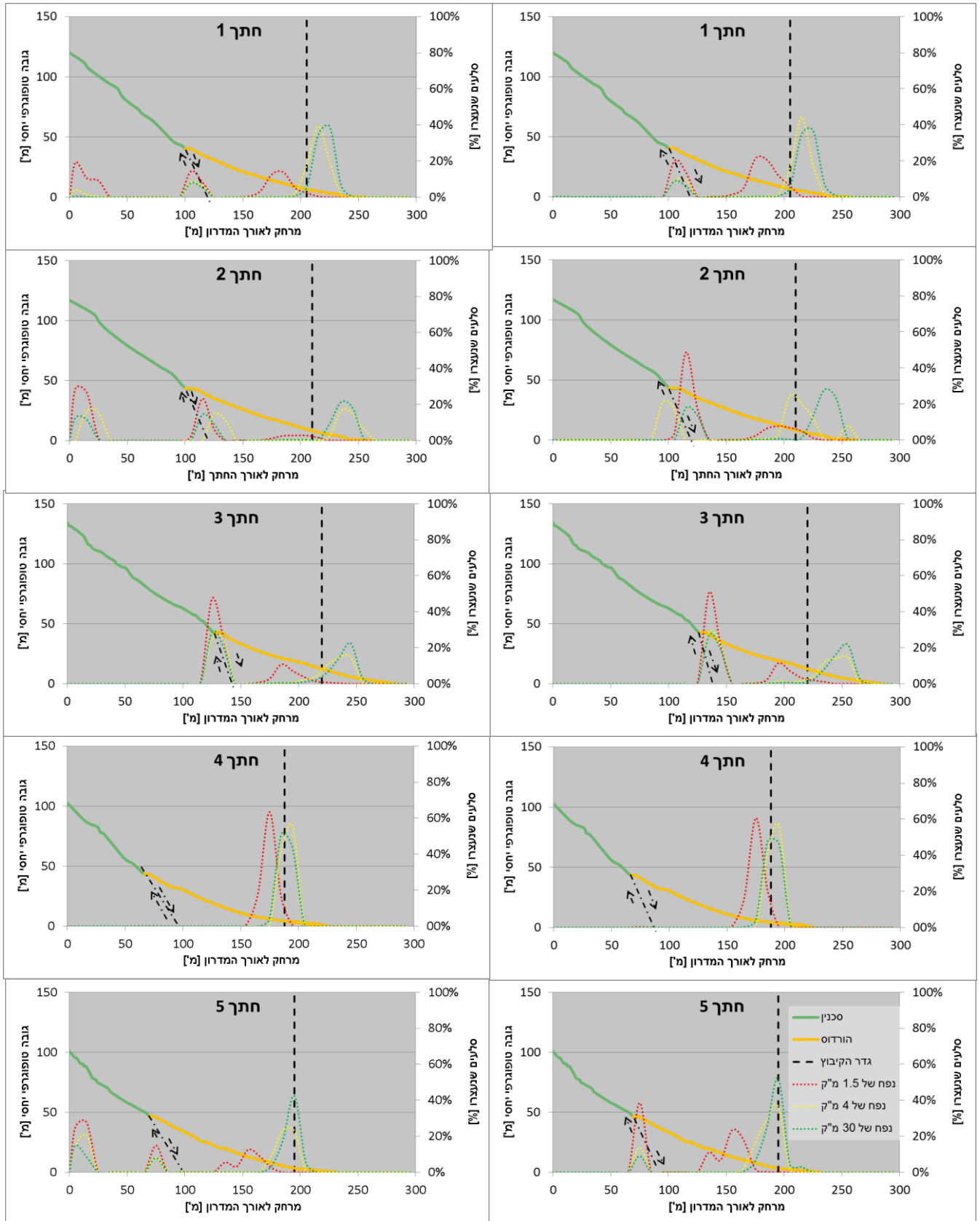
4.4.5 פיזור לאורך החתך

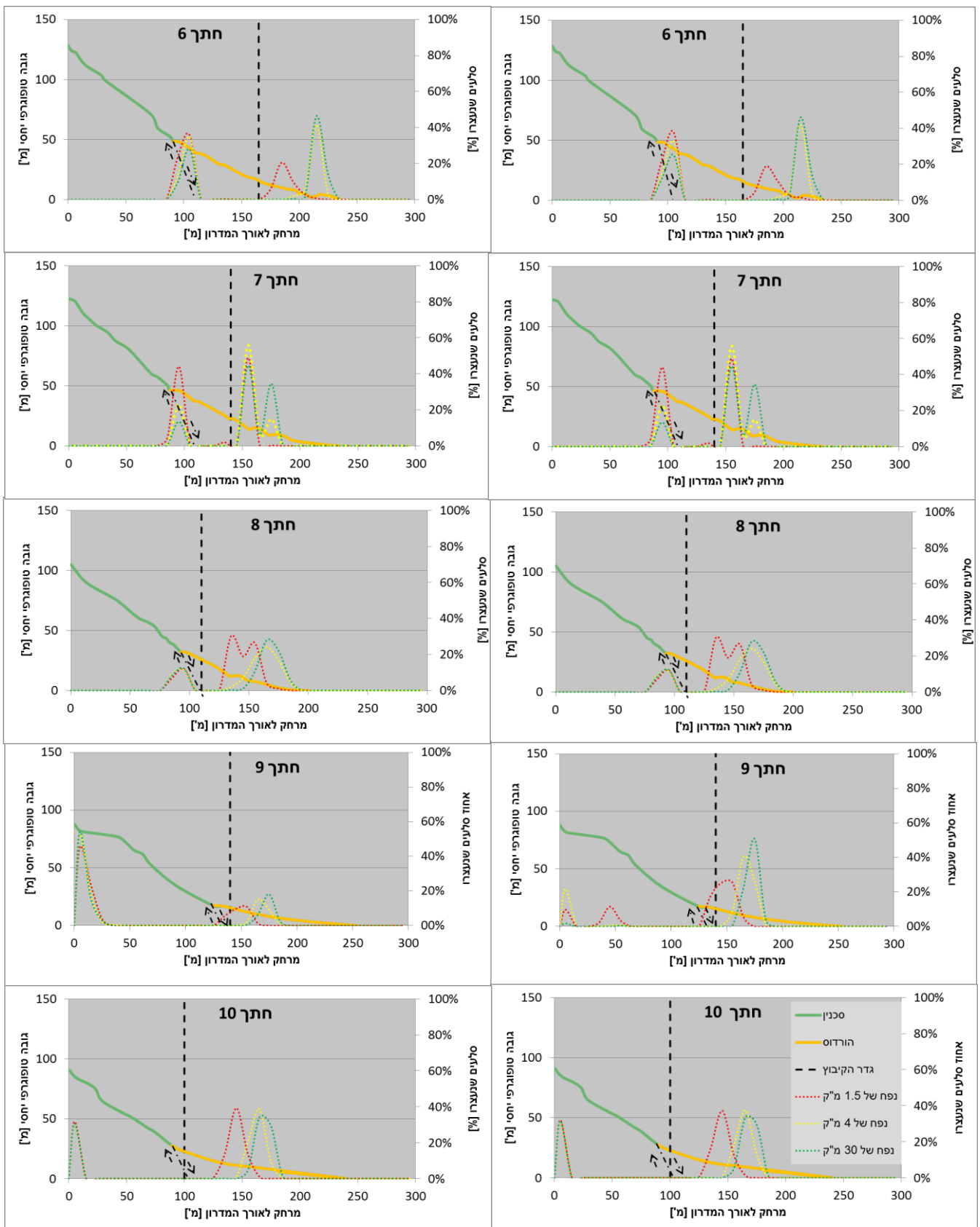
פיזור הסלעים, כפי שהתקבל בתוכנת CRSP, לאורך החתכים בהדמיות השונות מוצג באיורים 38 ו-39, עם וללא מהירות התחלתית, לפי הסתברות לעצירת הסלעים לאורך החתך, ולפי הסתברות מצטברת. בחלק מהחתכים ניתן לראות כי קיימים הבדלים בפיזור עם וללא מהירות התחלתית, לדוגמא חתכים 1 ו-2, בפיזור הסלעים לאורך החתכים בין התוצאות שהתקבלו עם מהירות התחלתית וללא מהירות התחלתית, ישנם חתכים אשר בהם המהירות ההתחלתית לא משפיעה על פיזור הסלעים, לדוגמא חתכים 4 ו-6. למרות ההבדלים הללו אין למהירות ההתחלתית השפעה על המרחק הסופי המקסימלי אותו הסלעים צפויים לעבור, כלומר אין השפעה על קווי העצירה. ברור מהגרפים של ההתפלגות כי הסלעים עוצרים באזורים בהם השיפוע נמוך. ההבדל בין התוצאות בחתך 4 וחתך 10 לשאר החתכים ניכר, בחתך 4 הסלעים מתרכזים בנקודה אחת ובשאר החתכים בולטת בי-מודליות בגרפים של הפיזור, כאשר חלק מהסלעים עוצרים מעט לאחר ההעתק והשאר עוצרים בחלק התחתון של המדרון. לאחר ההעתק ישנו חלק עם שיפוע מתון או מקטע מישורי. מישור זה לא קיים בחתך 10 ובחתך 4 חלק זה קצר מאד. בחתכים 10 ו-9 ניתן לראות כי בתחילת החתך השיפוע מתון יחסית וישנו ריכוז של סלעים שנעצרו בחלק זה של המדרון.

התפלגות עצירת הסלעים לאורך החתך

ללא מהירות התחלתית

עם מהירות התחלתית



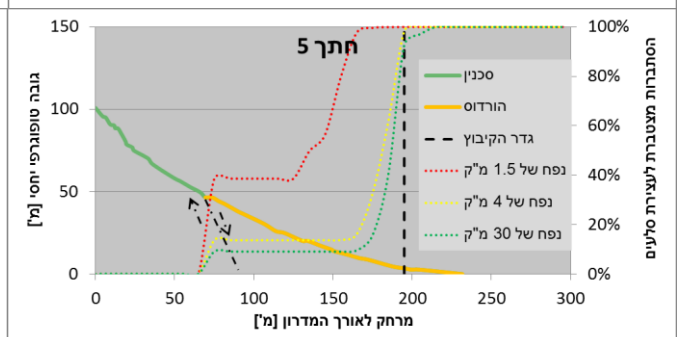
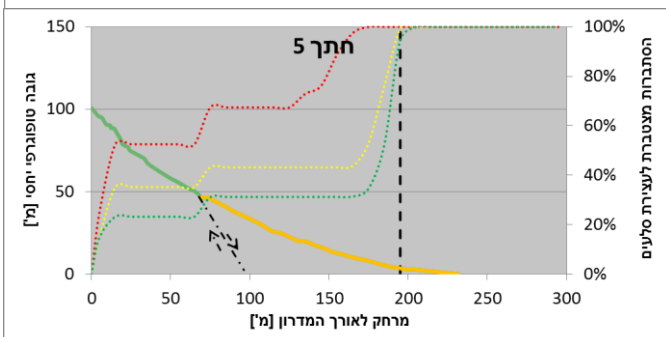
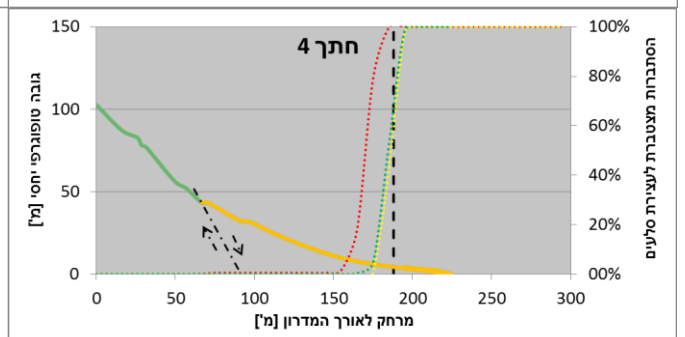
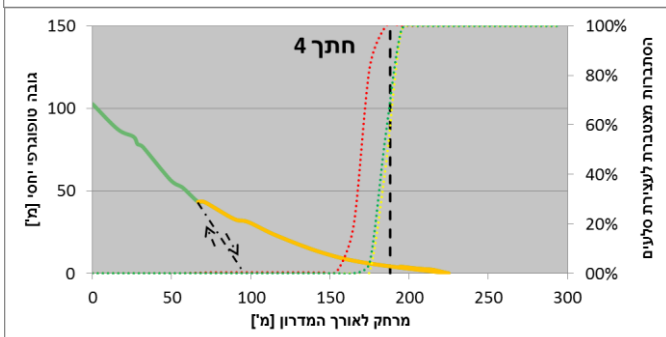
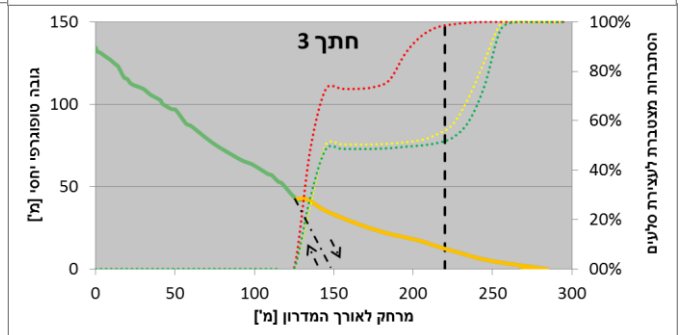
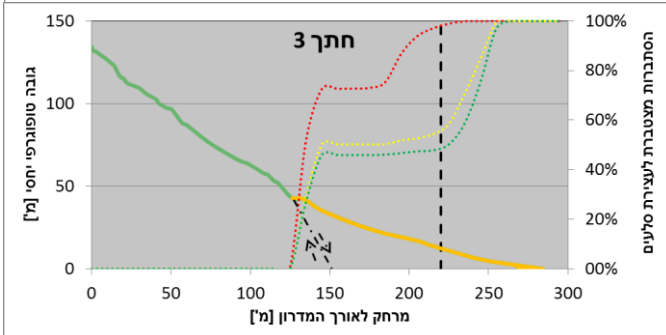
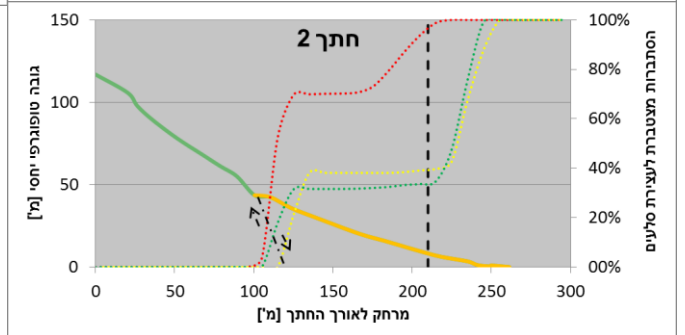
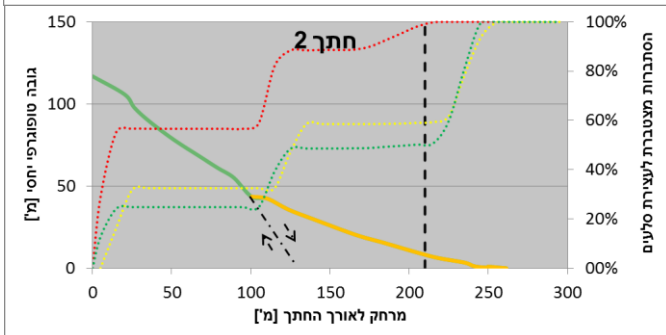
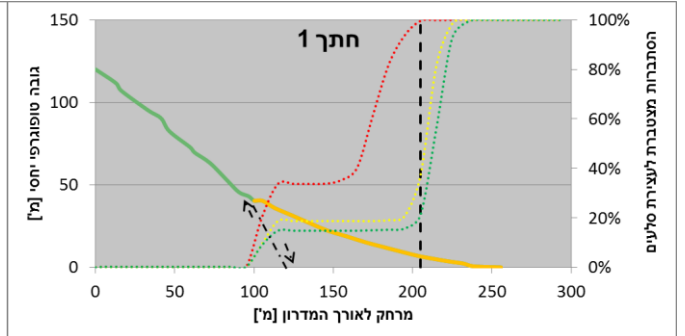
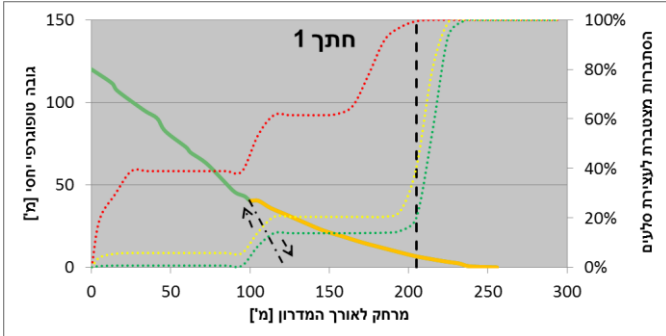


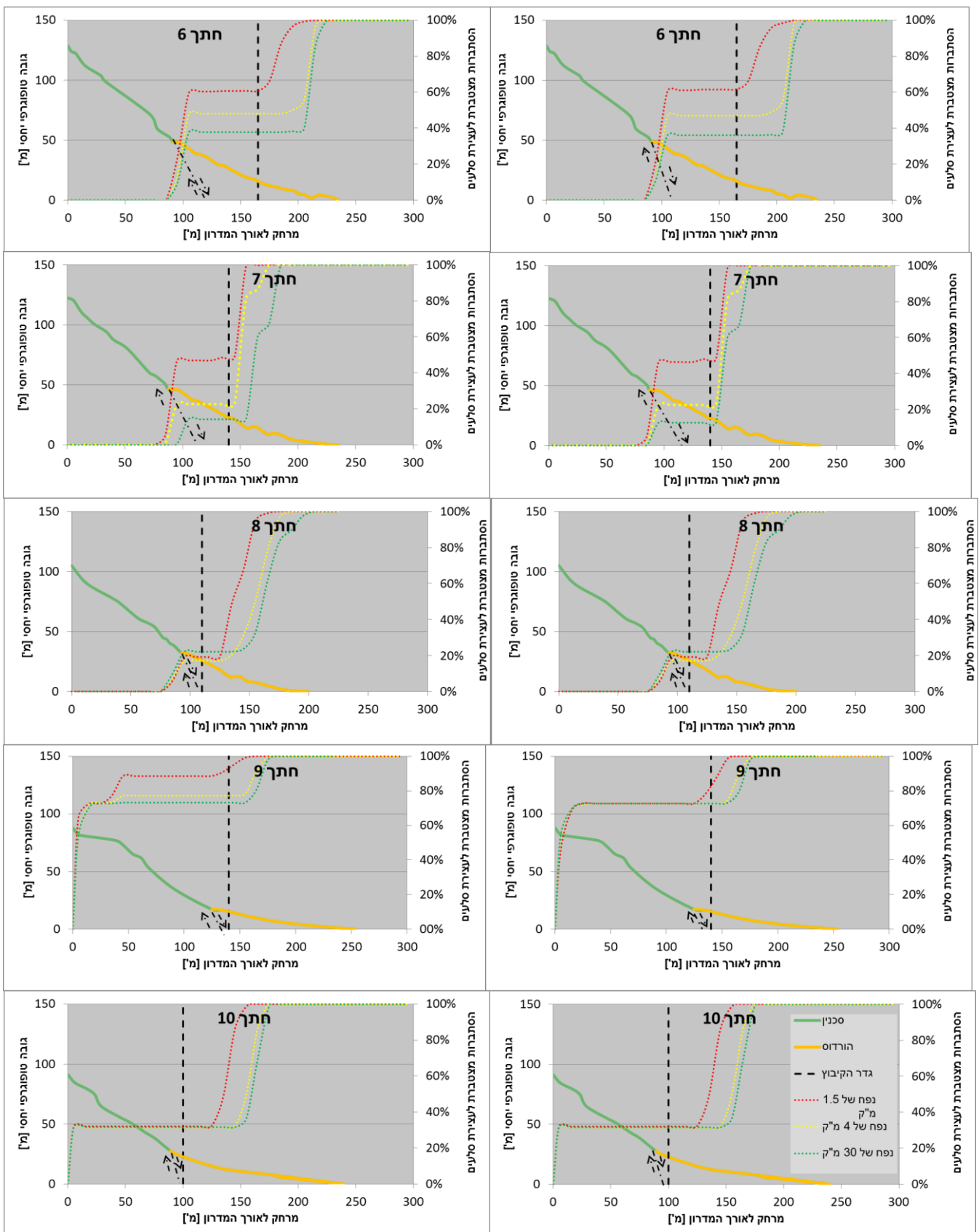
איור 38 – התפלגות הסלעים לאורך החתכים כפי שהתקבלה בתוכנת CRSP. הקו הירוק מסמן את המדרון כאשר החלק הירוק הוא מתצורת סכנין והחלק הצהוב הוא מתצורת הורדוס. על המגע ביניהן מסומן ההעתק. הקו השחור המקווקו האנכי מסמן את מיקום גדר הקיבוץ. הקווים המקווקוים הצבעוניים מסמלים את אחוז הסלעים שנעצרו לאורך המדרון (ציר Y ימני) לפי מרחק מתחילת המדרון.

התפלגות מצטברת של עצירת הסלעים לאורך החתך

ללא מהירות התחלתית

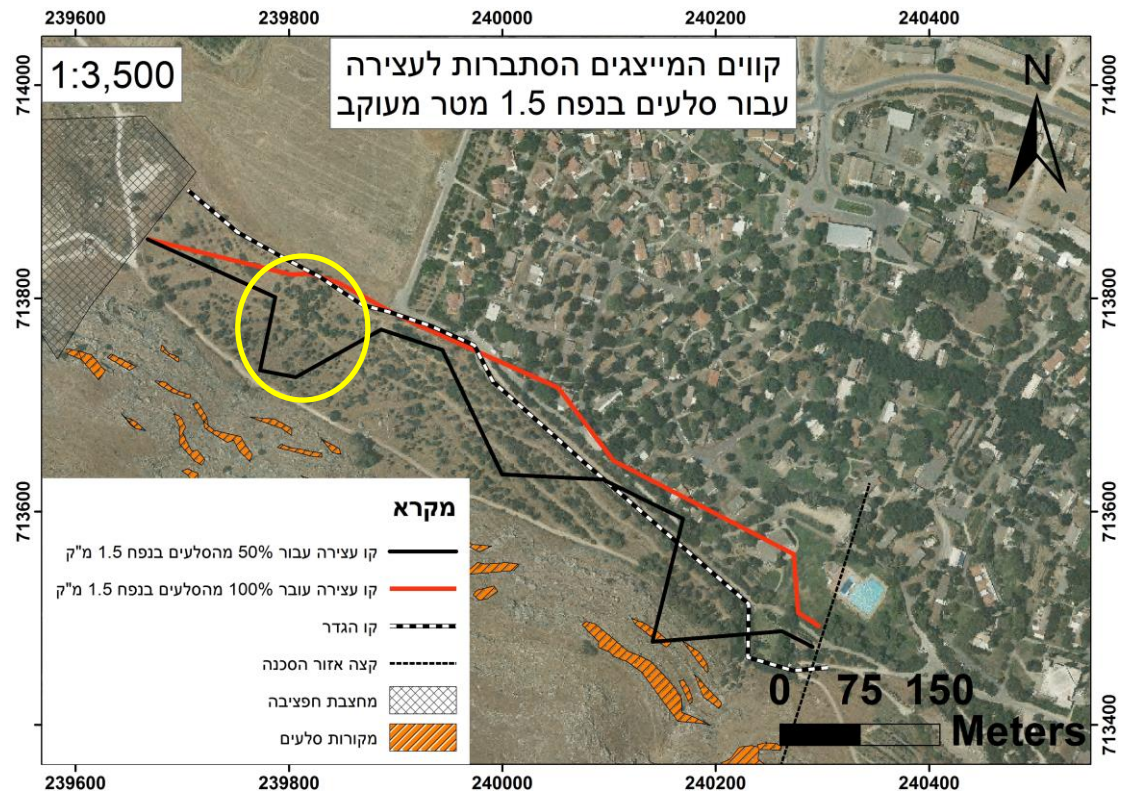
עם מהירות התחלתית



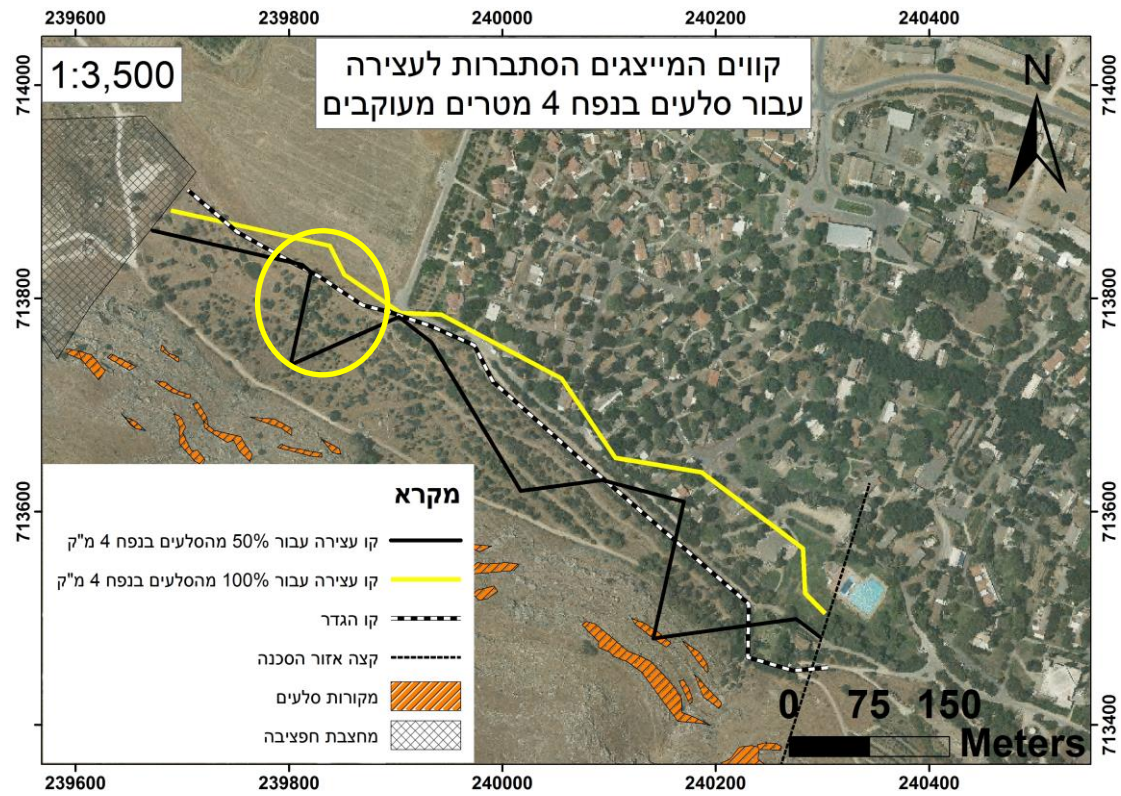


איור 39 – התפלגות מצטברת של עצירת הסלעים לאורך החתכים כפי שהתקבלה בתוכנת CRSP. הקו הציף מסמן את המדרון כאשר החלק הירוק הוא מתצורת סכנין והחלק הצהוב הוא מתוצרת הורדוס. על המגע ביניהן מסומן ההעתק. הקו השחור המקווקו האנכי מסמן מיקום את גדר הקיבוץ. הקווים המקווקוים הצבעוניים מסמלים את אחוז הסלעים שנעצרו לאורך המדרון (ציר Y ימני) לפי מרחק מתחילת המדרון.

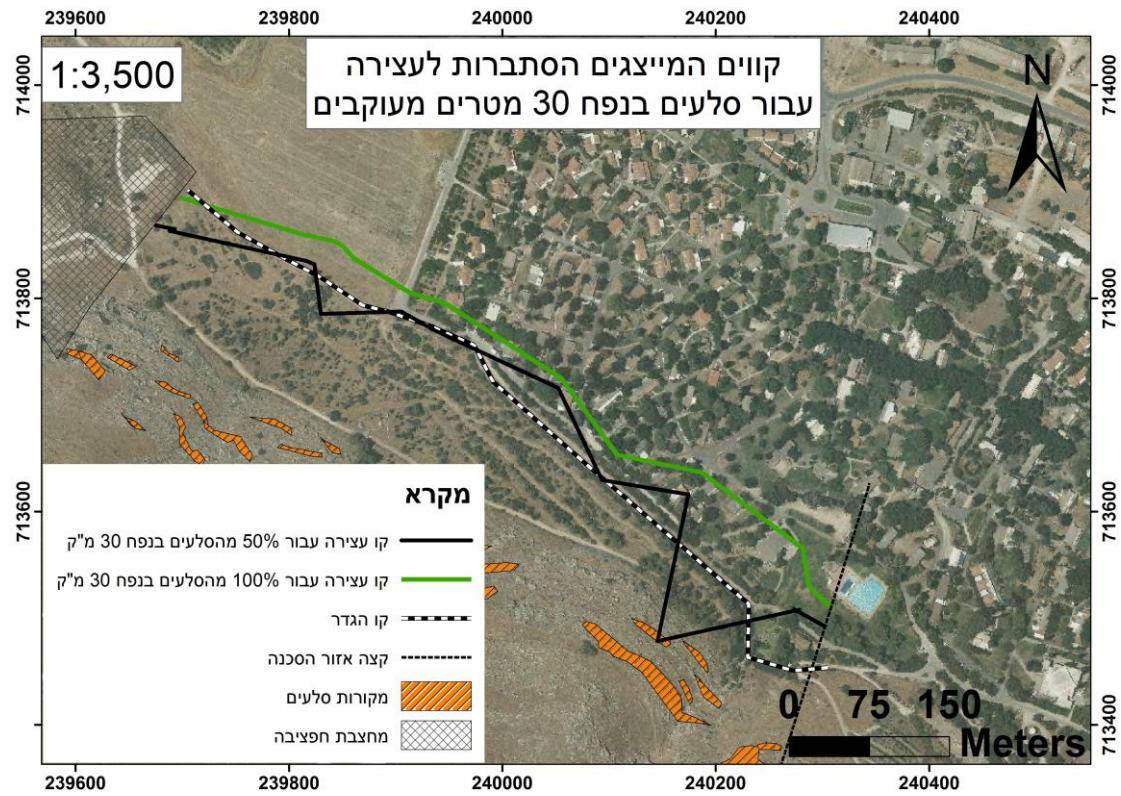
ההסתברות לעצירה, כפי שהתקבלה מתוצאות ההדמיות בתוכנת CRSP, מוצגת באיורים 40-42 על גבי מפה לפי קווי עצירה. הקווים מייצגים את הגבול אותו לא יחצו 50% מהסלעים באותו הגודל עצירה לכל גודל נתון וקו העצירה המקסימלי. קו העצירה עבור 50% מהסלעים באותו הגודל, עבור הנפחים הקטנים, קרוב יותר להעתק באזור בו מתפתח ערוץ (האזור המסומן בצהוב באיורים 40-41), מדובר בחלק מתון בחתך בחלק המדרון של תצורת הורדוס הקרוב להעתק. באזור המזרחי מדובר על מדרגה ישרה יחסית העוצרת את הסלעים. כך גם באזורים האחרים.



איור 40. מפת קווי עצירה לפי הסתברות עבור סלעים בנפח של 1.5 מטר מעוקב. ההסתברות שסלע, בנפח זה, אשר נע במורד המדרון יחצה את הקו שחור היא 50%. סלעים מנפח זה אינם צפויים לחצות את הקו האדום. העיגול הצהוב מסמן אזור בו מתפתח ערוץ.



איור 41. מפת קווי עצירה לפי הסתברות עבור סלעים בנפח של 4 מטרים מעוקבים. ההסתברות שסלע, בנפח זה, אשר נע במורד המדרון יחצה את הקו השחור היא 50%. סלעים מנפח זה אינם צפויים לחצות את הקו הצהוב. העיגול הצהוב מסמן אזור בו מתפתח ערוץ.



איור 42. מפת קווי עצירה לפי הסתברות עבור סלעים בנפח של 30 מטרים מעוקבים. ההסתברות שסלע, בנפח זה, אשר נע במורד המדרון יחצה את הקו השחור היא 50%. סלעים מנפח זה אינם צפויים לחצות את הקו הירוק.

5. דיון

5.1 אזור העבודה

5.1.1 יציבות הסלעים ותנאי ההתחלה.

הגורמים המפעילים נפילות סלעים לפי מחקרים קודמים (Luckman, 1976; Ambraseys,) הם רעידות אדמה או גורמים הקשורים לארועים מטאורולוגיים. עם זאת לעיתים הגורם המפעיל אינו ידוע (Wieczorek & Jager, 1996). בשטח העבודה ידוע על ארועים של נפילות סלעים אשר בהם הגורם המפעיל היה מטאורולוגי, וכמו כן תועדה בשדה דוגמא לסלע אשר צפוי ליפול במקרה של רעידה חזקה (סעיף 4.1.2), בנוסף, יש מספר סלעים אשר היו בתחום אי היציבות ורק זיז בתחתית הסלע מונע מהם ליפול. ניסינו לבדוק אם המאמץ שמפעיל הסלע על הזיז אכן נמוך ממאמץ הכניעה כדי לאשש את ההשערה כי אכן הזיז בולם את הסלע. בהשוואה בין המאמץ הפועל על הסלע ומאמץ הכניעה ללדולומיט סכנין (Palchik & Hatzor, 2000), מצאנו כי המאמץ הפועל על הסלע היה נמוך יותר ממאמץ הכניעה (סעיף 4.1.2 וטבלה 2). עם זאת, מצד אחד תהליכי הבלייה הפועלים על הזיז צפויים להחליש אותו, ומצד שני רעידת אדמה יכולה להגדיל את המאמץ הפועל על הזיז בעקבות תנודה של הסלע. שני התרחישים האפשריים הללו הובילו אותנו למסקנה כי סלעים אלו יפלו כאשר הזיז יתבלה או יכנע למאמץ הפועל עליו. סלעים אלו נמצאים בטווח הנפחים הצפויים ליפול, ולכן אנו משערים שבמוקדם או במאוחר סלעים אלו צפויים ליפול ולסכן את הקיבוץ. אנו מסיקים מכך שישנם סלעים אשר נמצאים מתחת לגבול היציבות ונבלמים על ידי זיזים, וכי גורם הבלייה הוא הגורם העיקרי לנפילות סלעים, גשם ורעידות אדמה הם רק גורמים מפעילים לנפילות סלעים אשר הינם קרובים מאד לגבול היציבות.

5.1.2 תיארוך נפילות והערכת הגורם המפעיל

לפי הספרות רעידות אדמה במגניטודה 5 ומעלה עלולות לגרום לנפילות סלעים (Keefer, 1984). אנו חישבנו כי רעידות בבקע במגניטודה 6.8 או 5.5 באזור הגלבוע אכן עלולות לגרום לנפילות סלעים (סעיפים 4.1.2 ו-4.3). רעידת אדמה תפעיל נפילות על ידי הגברת המאמץ הפועל על הזיזים העוצרים את הסלעים עד לכניעתם, ובנוסף על ידי הורדת מקדם הבטחון עקב תאוצות הקרקע בזמן רעשי האדמה.

כאשר תיארכנו את נפילות הסלעים (תוך שימוש בשיטת OSL) ציפינו להיות מסוגלים לקשור נפילות סלעים לרעידות אדמה היסטוריות. ועל ידי כך לכייל את המודל בצורה טובה יותר. מטרה נוספת היתה להבין את הקשר בין ארועי רעידות אדמה לנפילות סלעים. מציאת הקשר בין רעידות אדמה לנפילות היסטוריות במסגרת העבודה הנוכחית לא התאפשר מכיוון

שגודל השגיאה של שיטת התארוך הוא גדול בסדר גודל מזמן החזרה של ארועי קיצון מטאורולוגיים או רעידות אדמה. כפי שצינו היו שני מקרים של נפילות סלעים בשלושים השנים האחרונות, טווח השגיאה של שיטת התארוך בה השתמשנו הוא מסדר גודל של מאות ואלפי שנים. הבדל זה בסדרי הגודל בזמן אינו מאפשר לקשור בין האירועים. למרות זאת גיל של 5000 שנה שהתקבל מאחד הסלעים מוכר מארועי נפילות סלעים במקומות אחרים לאורך הבקע (Rinat, et al., in press).

5.1.3 תנועת הסלעים במורד המדרון

מספר חתכים לאורך המדרון בשטח העבודה העבודה נבחרו כמייצגים בצורה טובה את סביבתם בהיבט השיפוע, שיקול נוסף היה מקורות אפשריים לנפילות במעלה החתכים או לאורכם. מכיוון שלא זוהו מקורות לסלעים מעל לקיבוץ בית אלפא, הנחנו שהסכנה באזור זה זניחה ועל כן לא הערכנו אותה בצורה כמותית. מבחינת המהירות לאורך החתכים (איור 24), הסלעים מאיצים לאורך חלק המדרון של סכנין ומאיטים על גבי חלק המדרון של הורדוס. בנוסף, בתוצאות הפיזור לאורך החתכים (איורים 38-39), ישנה התפזרות בי-מודלית כאשר החלק המישורי בתחתית העתק הגלבוט מביא לעצירה של מספר גדול של סלעים. בחתכים מסויימים כגון חתך 9 ההתנהגות שונה מעט, זאת בגלל שוני גאומטרי בפרופיל המדרון. חתך זה מצטיין באזור עם שיפוע נמוך בתחילת המדרון אשר סלעים עשויים לעצור עליו. גודל הסלעים אשר צפויים לסכן את הקיבוץ נע בין מטר מעוקב לשלושים מטרים מעוקבים. סלעים קטנים יותר אינם צפויים לסכן את שטח הקיבוץ. סלעים גדולים יותר צפויים לעבור מרחק קטן יותר, אזור העצירה שנצפה בשטח הנפחים של מעל מאה מטרים מעוקבים היה על קו ההעתק. את תצפית זו ננסה להסביר בסעיף 5.2.3.

5.2 בחינת הנחות המודל והגורמים המשפיעים על תנועת הסלע במדרון.

5.2.1 מודל המטלאב

בעזרת המודל החישובי המפושט אשר יישמנו בקוד בתוכנת מטלאב הגענו למספר תובנות עיקריות לגבי תהליך נפילות הסלעים והדמייתו. מכיוון שמדובר בתהליך מורכב אשר מושפע ממספר גדול של מרכיבים בחרנו להניח הנחות מפשטות לגבי התהליך. ההנחה העיקרית היתה לגבי אופן תנועת הסלע. כאמור תנועת הסלע מתוארת כסדרה של קפיצות, כאשר הסלע עובר מרחק קטן מאורכו הוא עובר לתנועת גילגול, כאשר גם עובר גילגול הסלע במורד המדרון הסלע מדלג במרחקים קבועים שווים לאורכו. אילוץ זה עובר הגילגול, גורם לכך שסלע המתגלגל במורד מדרון ישר ינוע בטווח מהירויות קבוע. מצב זה משקף מצב דומה עבור גוף נופל בתווך צמיג אשר יגיע למהירות סופית. תובנה נוספת קשורה לתנאי העצירה. כאשר ניסינו לחשב את תנאי העצירה בצורה אנליטית (סעיף 3.2.1.6), ולהזין אותו לתוכנה קיבלנו תוצאות שאינן מתאימות לתצפיות בשדה. אנו מבינים כי ישנו פער בין תאור

התהליך בצורה פיזיקלית פשטנית לבין התהליך המורכב אשר מתרחש במציאות. לאחר שסלע מתחיל להתגלגל על אחת מהתצורות הגאולוגיות במודל (איור 25), הוא ימשיך להתגלגל עליה עד למעבר לתצורה הבאה או עד לעצירה. אילוץ זה גורם לירידה במהירות הזוויתית עם הירידה בזווית המדרון. סביר שבמצב אמת סלע נופל עובר לסרוגין ממצב של גילגול לקפיצות. בעקבות זאת, נאלצנו להתאים את תנאי העצירה בצורה אמפירית לתצפיות בשדה כדי להיות מסוגלים לתת הערכה לסכנה הנשקפת לקיבוצים. בדומה במדריך למשתמש של תוכנת CRSP דווח על התאמות אמפיריות למשוואות המשמשות לחישוב השינוי במהירות (Jones et al., 2000). תיאור פיזיקלי מדוייק עבור תהליך תנועת הסלע ועצירתו יגזול זמן חישוב רב, ולכן כיוול תוכנות אשר מתארות את התהליך בצורה חלקית הוא פתרון טוב עבור הערכת סכנה. עם זאת יש לקחת בחשבון כי יכולות להיות סטיות מהתוצאות בגלל הפערים בין המציאות למודל.

5.2.2 מהירות התחלתית

איור 26, המציג את גודל וקטור המהירות כתלות במרחק לאורך מדרון עם וללא מהירות התחלתית, מראה כי מהירות התחלתית של סלע אינה משפיעה בצורה משמעותית על מהירותו בקצה מדרון משופע, לפי התוצאות שהתקבלו מהמודל אשר מיישם בתוכנת מטלאב. תוצאות הפיזור שהתקבלו בתוכנת CRSP (איורים 38-39), מראות כי פיזור הסלעים לאורך המדרון המרחק הסופי שעובר סלע נופל לא צפוי להיות גדול יותר במקרה ויש לסלע מהירות התחלתית. תוצאה זו אמנם סותרת את האינטואיציה הראשונית אבל תואמת את מנגנון התנועה. תנועת הסלע במורד המדרון מרוסנת, ככל שהמהירות תהיה גבוהה יותר כך הריסון יגדל (כפי שמתואר בסעיף 3.2.2), תוצאה שנצפה לקבל בעקבות השפעת כוח החיכוך ומקדם התקומה. תוצאה זו מושפעת כמובן מאופן הדמית הגילגול (אופן תנועת הסלע במודל). Dippel et al. (1996), הגיעו לתוצאות דומות בהדמיות של כדור אשר נע במורד מדרון המורכב מכדורים, והגיע למצב יציב נע בסדרה של קפיצות שוות במורד המדרון. בשני המודלים אשר שימשו להערכת הסכנה גילגול הסלע מתואר כתנועה בצעדי מרחק שווים התלויים בגודל הסלע, אילוץ זה קיים גם בתוכנת CRSP ומדמה מצב של גילגול סלע אי רגולרי על משטח אי רגולרי (Jones et al., 2000). המשמעות של תוצאה זו היא שהמהירות ההתחלתית, אשר תלויה בגורם המפעיל, אינה מהווה גורם המשפיע על המרחק הסופי המקסימלי המחושב ולכן אינה משפיע על כיוול המודלים השונים.

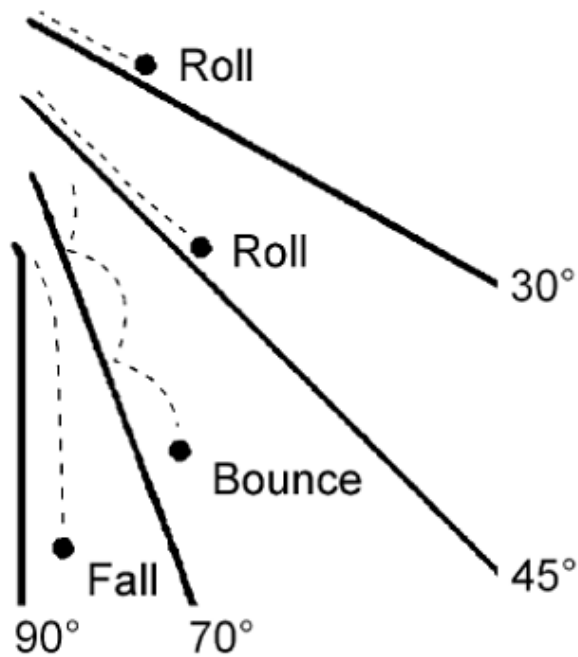
בתוצאות המוצגות בסעיף 4.5.2, המהירות ההתחלתית משפיעה על מהירות הסלע בתחילת החתך, מכך ניתן להסיק כי המהירות ההתחלתית מגדילה את סיכויי הסלע לעבור את המרחק המקסימלי. כלומר ההסתברות שהסלע יעצור בתחילת הדרך נמוכה יותר. כפי שניתן לראות

בגרפים המתארים את פיזור הסלעים לאורך המדרון (איור 38-39), המהירות התחלתית משפיעה בחתכים מסויימים על פיזור הסלעים לאורך החתך. תוצאה זו מתקבלת מכיוון שבחלקים מסויימים במדרון ישנם אזורים עם שיפוע נמוך יחסית, אזורים אלו מאטים משמעותית את הסלעים הנופלים, ובמידה ולסלע אין מהירות התחלתית הוא עשוי לעצור באזור עם שיפוע נמוך. לעומת זאת בחתכים מסויימים אין הבדל בין ההדמיות עם וללא מהירות התחלתית. תוצאה המעידה על כך שגאומטרית המדרון היא גורם משמעותי יותר מאשר מהירות התחלתית בתהליך נפילת הסלעים.

5.2.3 גאומטרית המדרון וחספוס המדרון

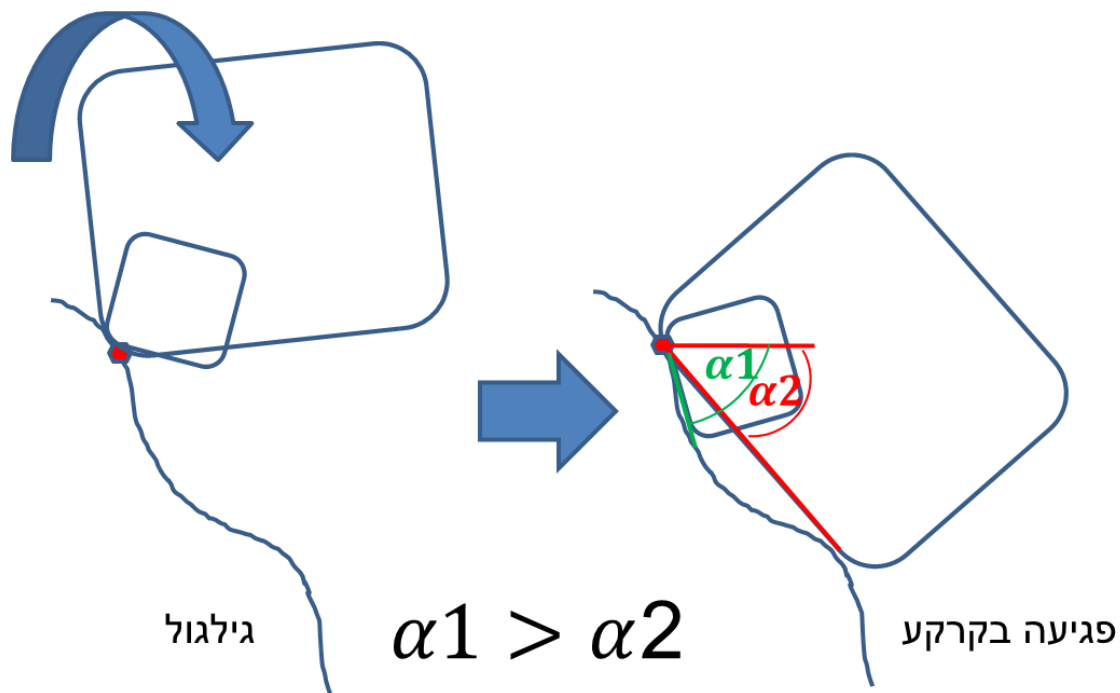
בעבודה זו עולה כי גאומטרית המדרון היא הגורם המשמעותי ביותר המשפיע על נפילת הסלעים, מסקנה זו עלתה בעבודות נוספת (Jones et al., 2000). מספר תוצאות תומכות במסקנה זו. תחילה, מבדיקת הרגישות למהירות התחלתית עולה כי המהירות המקסימלית אליה יגיע סלע נופל תלויה בשיפוע המדרון כפי שניתן לראות בגרף המהירות (איור 26). בנוסף בגרפים של התפלגות הסלעים לאורך המדרון (איורים 38-39) רואים התפלגות בי-מודלית כאשר החלק המישורי בתחתית העתק הגלבוץ מביא לעצירה של מספר גדול של סלעים, אך מכיוון שגם החספוס וגאומטרית הסלע יכולים להשפיע על זווית הפגיעה אין להתייחס למדרונות אשר בהם ישנו אזור מסויים שאינו משופע כמדרונות אשר בהם בהכרח הסכנה נמוכה יותר.

Ritchie (1963), ערך תצפיות בשדה והגדיר אופני תנועה לשיפועים שונים (איור 43), אופני תנועה אלו הוגדרו עבור שיפועים ממוצעים ולכן אינם בהכרח מתאימים עבור מדרון ללא חספוס. באיור אין התייחסות לתנועת החלקה אך זהו גם כן חלק מאופן מתנועת הסלעים במורד המדרון. אופני התנועה המתוארים באיור מתארים סלעים אשר התחילו את תנועתם בנפילה חופשית. במקרה של המדרון מעל חפצי-בה אנו מעריכים כי הסלעים יכולים להתחיל את התנועה בהחלקה. במקרה זה הסלע המחליק יכול לשנות את אופן התנועה שלו לגילגול, קפיצות או נפילה חופשית במידה וגאומטרית המדרון תשתנה. לדוגמא אם הסלע יחליק אל מעבר למדרגה או מצוק תלול.



איור 43. . אופני תנועה של סלע לפי שיפוע ממוצע (after Dorren, 2003).

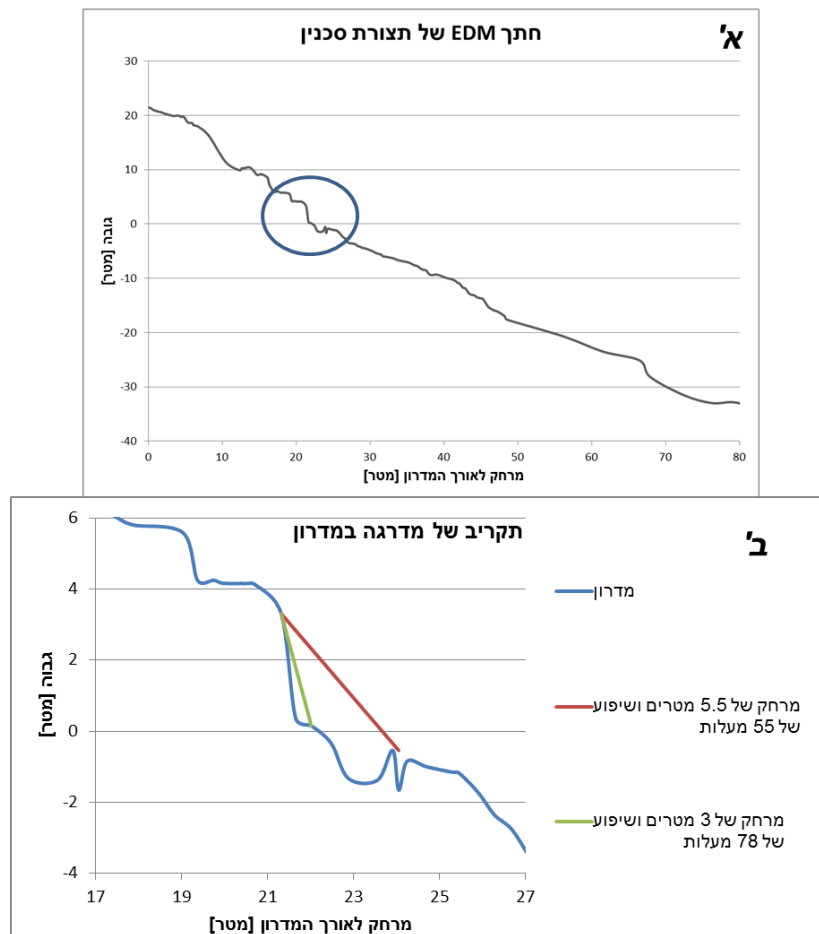
בסעיף 2.5.2 (גודל הסלעים וצורתם), דיווחנו על סלעים בנפחים של מעל מאה מטרים מעוכבים. סלעים אלו נעצרו בקרבת ההעתק ולא המשיכו עד לתחתית המדרון. משיקולי שימור תנע, ניתן היה לצפות כי סלעים אלו יעברו מרחק גדול יותר מסלעים קטנים יותר אשר נצפו במורד המדרון. אנו מעריכים כי סלעים אלו אינם מאיצים כסלעים אחרים בגלל שגאומטריית המדרון משפיעה עליהם אחרת מאשר סלעים קטנים יותר. אנו מעריכים כי השיפוע המשפיע על תנועתם הוא נמוך יותר. תחילה השיפוע הממוצע אשר ישפיע על תנועתם צפוי להיות נמוך יותר (איור 44), ולכן הם צפויים לצבור פחות מהירות. בנוסף גם אופן התנועה שלהם עשוי להיות שונה, הם צפויים לנוע בהחלקה, ואולי גם בגילגול, ולכן יצברו מהירות נמוכה יותר מסלעים אשר נפילות יהיו חלק מתנועתם. אנו מעריכים כי הם אינם נופלים נפילה חופשית במדרגות סלע בגלל גודלם ואינם מאיצים כמו סלעים קטנים יותר, או שאינם עוברים מהחלקה לגילגול ולכן מאיצים פחות על גבי חלק המדרון של תצורת סכנין.



איור 44. איור סכמתי המדגים כי סלע גדול יותר עשוי לפגוע במדרון בזווית נמוכה יותר תוך כדי גילגול.

מכיוון שהמדרון בנוי מדרגות סלע נדגים את הרעיון על מדרגות סלע מסויימת, בחתך הטופוגרפי שנמדד (איור 45), מוצג חישוב שנעשה על מדרגה אמיתית. כאשר סלע יתגלגל אל עבר מדרגה כזו זווית הפגיעה יכולה להיות שונה עבור סלעים בגדלים שונים. סלעים קטנים מאד עשויים לעצור בחלקים המישוריים שנוצרים בתחתית המדרגה וסלעים גדולים מאד יפגעו במדרון בזווית נמוכה יותר (איור 44). זווית הפגיעה משפיעה על השינוי במהירות, ככל שהשיפוע יהיה נמוך יותר מהירות הסלע לאחר פגיעה תהיה נמוכה יותר. תרחיש נוסף הוא החלקה של הסלע אל עבר מדרגה שכזו, במידה והמדרגה מספיק גדולה ביחס לסלע, הסלע יעבור לנפילה חופשית ואז קיימת האפשרות שסלע זה יעבור לתנועת קפיצות או גילגול, כפי שמוצג באיור 43. אנו מסיקים כי ישנו קשר בין החספוס למהירות אותה הסלעים צוברים ולאופן התנועה שלהם. מכיוון שסלעים אלו עשויים לצבור פחות מהירות לאורך המדרון עליו שאר הסלעים מאיצים, כאשר הם מגיעים לאזור בו השיפוע נמוך משמעותית הם יעצרו מהר יותר. להערכה זו יכולה להיות השלכה משמעותית על הערכות לסכנה מנפילות סלעים וכמו כן על הסעת סדימנט. אנו מציעים לקחת בחשבון לא רק את האמפליטודה ביחס לרדיוס הסלע אלא גם את היחס לאורך הגל של החספוס. במקרה בו ארוך הגל יהיה קצר משמעותית מאורך הסלע הנופל נצפה שהסלע יושפע מהשיפוע הממוצע בלבד ולא יאיץ בנפילות מקומיות. במקרה בו אורך הגל גדול והאמפליטודה גדולה נצפה שסלעים קטנים יעצרו בחלק המתון של המדרגה. את הקשר הזה בין אורך הסלע ואורך הגל

יש לחקור בעתיד בעזרת מודל אשר ידמה את הסלע הנופל כגוף בעל נפח בכל שלבי התנועה.



איור 45. גרפים שהתקבלו ממדידות EDM על גבי המדרון בו נחשפת תצורת סכנין. (א') חתך ה EDM כפי שנמדד מוצג כגרף Excel, העיגול מסמן את אזור התקריב המוצג בגרף ב'. (ב') תקריב של מדרגה במדרון. ניתן לראות כי כאשר מותחים קווים באורכים שונים מקבלים שיפועים שונים. שיפועים אלו מייצגים את זווית הפגיעה אותה יפגוש סלע באורך המיוצג על יד הקו.

5.3 הערכת הסיכון לנפילות סלעים.

הערכת הסיכון כוללת שני שלבים, (1) הערכה של ההסתברות לנפילה של סלעים עד נפח מסויים ו- (2) ההסתברות של הסלעים להגיע לקו עצירה מסויים.

המידע שהושג במסגרת המחקר הנוכחי כולל: הערכה של המהירות וגובה הקפיצה המקסימאליים לאורך החתכים השונים. בנוסף צירפנו מפות המחולקות לשני קווי עצירה (איור 42-40), במפות אלו אנו מציגים את פיזור הסלעים לאורך המדרון ככלי נוסף להבנה כמותית של הסכנה לנפילות סלעים לעבר הקיבוצים.

באופן כללי מצאנו כי החלק המזרחי של אזור העבודה (תחום קיבוץ חפצי-בה), נמצא בסיכון גבוה יותר (איור 30), שם הסיכוי לחציית הגדר על ידי סלע הנע במורד המדרון גבוה יותר, בנוסף ניתן לראות כי המרחק אותו סלע יעבור לאחר חציית קו הגדר גדול יותר בחלק המזרחי של אזור העבודה (איור 29). קיבוץ בית אלפא אינו נמצא בטווח נפילת הסלעים אלא רק קיבוץ חפצי-בה.

המפות והחלוקה לנפחים מספקים מידע שימושי עבור קבלת ההחלטה לגבי אופן הפעולה למניעת פגיעה בנפש וברכוש.

6. סיכום

מטרת המחקר היתה להעריך את הסכנה לנפילות סלעים לעבר שטח הקיבוצים חפצי-בה ובית-אלפא. הערכת הסכנה בעבודה זו מספקת מפות של מקורות הסלעים ואזורי הסיכון, הערכה של התנאים לנפילת סלעים ומידע על מהירות וגובה קפיצת הסלעים לאורך חתכים מייצגים. התוצאות מראות כי לקיבוץ בית אלפא לא נשקפת סכנה, בעוד שהסכנה הנשקפת לקיבוץ חפצי-בה מוצגת בצורה מפורטת. תוצאות העבודה מספקות תמונה מלאה של הסכנה הנשקפת לקיבוץ חפצי-בה ותורמת לתכנון צעדים דרושים כדי למנוע פגיעה ברכוש ונפש.

בנוסף, במסגרת העבודה נבדקה בצורה אנליטית השפעת המהירות ההתחלתית על תנועת הסלעים במורד המדרון. גילינו כי המהירות ההתחלתית אינה משפיעה על המרחק המקסימלי האפשרי אותו סלע עשוי לעבור. המהירות ההתחלתית תלויה בגורם המפעיל את הנפילה. מכאן נובע כי לא ניתן לזהות מהו הגורם המפעיל של סלעים אשר נפלו בעבר, כפי שניסינו לעשות בעבודה זו.

אנו מציעים כי בעתיד יחקר הקשר בין החספוס לגודל הסלע הנופל. אנו מעריכים בהסתמך על הנסיון שצברנו והתצפיות בשדה כי פיתוח קשר כזה ישפר את הערכת טווח גדלי הסלעים אשר צפויים לעבור את המרחק הגדול ביותר ובכך לשפר עבודות להערכת הסכנה ברחבי העולם.

7. מימון

העבודה מומנה על ידי: מנהל המחקר למדעי האדמה והים במשרד האנרגיה והמים, מחקר 211-17-027, ועדת ההיגוי הבין-משרדית להיערכות לרעידות אדמה והקרן הלאומית למדע (מענק מספר 1181.12 לא. עגנון).

8. רשימת ספרות

- Abrahamson, N. A., & Silva, W. J. (1997). Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes. *Seismological Research Letters*, 68(1), 94-127.
- Agliardi, F., & Crosta, G. B. (2003). High resolution three-dimensional numerical Modelling of rockfalls. *International Journal of rock Mechanics & Mining Sciences*, 40, 455-471.
- Ambraseys, N. N. (1991). Earthquake hazard in the Kenya Rift: the Subukia earthquake 1928. *Geophys. J. Int.*, 105, 253-269.
- Amiran, D., Arieh, E., & Turcotte, T. (1994). Earthquakes in Israel and Adjacent Areas: Macroseismic Observations since 100 B.C.E. *Israel Exploration Journal*, 44(3/4), 260-305.
- Arkin, Y., & Ecker, A. (2007). *Geotechnical and Hydrogeological Concerns in Developing the Infrastructure Around Jerusalem*. Jerusalem: GEOLOGICAL SURVEY OF ISRAEL.
- Azzoni, A., & de Freitas, M. H. (1995). Experimentally Gained Parameters Decisive for Rock Fall Analysis. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 111-124.
- Begin, Z. B., Steinberg, D. M., Ichinose, G. A., & Marco, S. (2005). A 40,000 year unchanging seismic regime in the Dead Sea rift. *Geology*, 33(4), 257-260.
- Boore, D. M., Joyer, W. B., & Fumal, T. E. (1997). Equations for Estimating Horizontal Response Spectra And Peak Acceleration from Western North American Earthquakes: A Summery of Recent Work. *Seismological Research Letters*, 127-153.
- Bourrier, F., Berger, F., Tardif, P., Dorren, L., & Hungr, O. (2012). Rockfall rebound: comparison of detailed field experiments and alternative modelling approaches. *EARTH SURFACE PROCESSES AND LANDFORMS*, 37, 656-665.
- Buzzi, O., Giacomini, A., & Spadari, M. (2012). Laboratory Investigation on High Values of Restitution Coefficients. *Rock Mech. Rock Eng.*, 45, 35-43.
- Campbell, K. W. (2003). Prediction of Strong Ground Motion Using the HYbrid Empirical Method and Its Use in the Development of Ground-Motion (Attenuation) Relations in Eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(3), 1012-1033.

- Chatterjee, A. (1997). *RIGID BODY COLLISIONS SOME GENERAL CONSIDERATIONS, NEW COLLISION LAWS, AND SOME EXPERIMENTAL DATA*. Cornell University.
- Chau, K. T., Wong, R., & Wu, J. J. (2002). Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, 39, 69-77.
- Chiessi, V., D'Orefice, M., Mugnozza, G. S., Vitale, V., & Cannese, C. (2010). Geological, geomechanical and geostatistical assessment of rockfall hazard in San Quirico Village (Abruzzo, Italy). *Geomorphology*, 119, 147-161.
- Cross, R. (2002, November). Grip-slip behavior of a bouncing ball. *Am. J. Phys.*, 70(11), 1093-1102.
- Cross, R. (2005). Bounce of a spinning ball near normal incidence. *Am. J. Phys.*, 914-920.
- Crosta, G. B., & Agliardi, F. (2004). Parametric evaluation of 3D dispersion of rockfall trajectories. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, 583-598.
- Dippel, S., Batrouni, G. G., & Wolf, D. E. (1996, DECEMBER). Collision-induced friction in the motion of a single particle on a bumpy inclined line. *PHYSICAL REVIEW E*, 54(6), 6845-6856.
- Dorren, L. (2003). A review of rockfall mechanics and modeling approaches. *Progress in Physical Geography*, 27(1), 69-87.
- Dussauge, C., Grasso, J. R., & Helmstetter, A. (2003). Statistical analysis of rockfall volume distributions: Implications for rockfall dynamics. *J. Geophys. Res.*, 108(B6), 2286.
- Evans, S. G., & Hungr, O. (1993). The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 30, 620-636.
- Falcon, E., Laroche, C., Fauve, S., & Cosate, C. (1998). Behavior of one inelastic ball bouncing repeatedly o. *THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL B*, 45-57.
- Garwin, R. L. (1969). Kinematics of an Ultraelastic Rough Ball. *American Journal of physics*, 88-92.
- Giani, G. P., Giacomini, A., Migliazza, M., & Segalini, A. (2004). Experimental and Theoretical Studies to Improve Rock Fall Analysis and Protection Work Design. *Rock Mech. Rock Engng.*, 37(5), 369-389.
- Giani, G. P.; Giacomini, A.; Migliazza, M.; Segalini, A. (2004). Experimental and Theoretical Studies to Improve Rock Fall Analysis and Protection Work Design. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 37(5), 369-389.
- Graham, J. (1984). Methods of stability analysis. In D. Brunsten, & D. B. Prior, *Slope Instability* (pp. 171-215). John Wiley & Sons Ltd.

- Guidoboni, E., Comastri, A., & Traina, G. (1994). *Catalogue of ancient earthquakes in the Mediterranean area up to the 10th Century*. Italy: ING-SGA.
- Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R., & Agliardi, F. (2002). STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls. *Computer Geosciences*, 1079-1093.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., & Ghigi, S. (2004). Rockfall hazard and risk assessment in the Nera River Valley, Umbria Region, central Italy. *Environmental Management*, 34, 191-208.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., & Wieczorek, G. F. (2002). Rockfall hazard and risk assessment in the Yosemite Valley. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 491-503.
- Hall, D. E., Long, M. T., & Remboldt, M. D. (1994). *Slope stability reference guide for National Forests in the United States*. Washington, D.C.: United States Department of Agriculture.
- Hall, J. K. (1993). The GSI digital terrain model (DTM) completed. (I. R. Eshet, Ed.) GSI.
- Hamiel, Y., Amit, R., Begin, Z. B., Marco, S., Katz, O., Salamon, A., et al. (2009). The Siesmicity Along the Dead Sea Fault during the Last 60,000 Years. *Bulletin of the Seasmological Society of America*, 99(3), 2020-2026.
- Hatzor, Y., & Reches, Z. (1990). Stucture and paleostresses in the Gilboa' region, western margins of the central Dead Sea rift. *Tectenophysics*, 180, 87-100.
- Hengxing, L., Derek, M., & Lim, C. H. (2007). Rockfall analyst: A GIS extension for three-dimensional and spatially distributed rockfall hazard modeling. *Computers & Geosciences*, 33, 262-279.
- Hough, S. E., & Avni, R. (2010). The 1170 and 1202 ce Dead Sea Rift earthquakes and long-term magnitude distribution of the Dead Sea Fuault zone. *Isr. J. Earth Sci.*, 58, 295-308.
- Jibson, R. W., Harp, E. L., & Michael, J. A. (2000). A methhod for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps. *Engineering Geology*, 58, 271-289.
- Jones, C. L., Higgins, J. D., & Andrew, R. D. (2000). *Colorado Rockfall Simulation Program, Version 4.0 Manual*. Denver: Colorado Department of Transportation.
- Kagan, E. J., Agnon, A., Bar-Matthews, M., & Ayalon, A. (2005, April). Dating large infrequent earthquakes by damaged cave deposits. *Geology*, 33(4), 261-264.
- Kagan, E., Stein, M., Agnon, A., & Neuman, F. (2011). Intrabasin paleoearthquake and quiescence correlation of the late Holocene Dead Sea. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 116, B04311.
- Kanari, M. (2008). *Evaluation of rockfall hazard to Qiryat Shemona - possible correlation to eathquakes*. Geological Survey of Israel.

- Katz, O., & Crouvi, O. (2007). The geotechnical effects of long human habitation (2000<years): Earthquake induced landslides hazard in the city of Zefst, northern Israel. *Engineering Geology*, 95, 57-78.
- Katz, O., Reichenbach, P., & Guzzetti, F. (2011). Rock fall hazard along the railway corridor to Jerusalem Israel, in the soreq and refaim valleys. *Natural Hazards*, 56, 649-665.
- Keefer, D. K. (1984). Landslides caused by earthquakes. *Geological society of America Bulletin*, 95, 406-421.
- Ken-Tor, R., Agnon, A., Enzel, Y., Stein, M., Marco, S., & Negendank, J. J. (2001, FEBRUARY 10). High-resolution geological record of historic earthquake in the Dead Sea basin. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 106(B2), 2221-2234.
- Kobayashi, Y., Harp, E. L., & Kagawa, T. (1990). Simulation of Rockfalls Triggered by Earthquakes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 23, 1-20.
- Luckman, B. (1976). ROCKFALL INVENTORY DATA:SOME OBSERVATIONS FROM SURPRISE VALLEY, JASPER NATIONAL PARK, CANADA. *EARTH SURFACE PROCESSES*, VOL. 1, 287-298.
- Malamud, B. D., Turcotte, D. L., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2004). LANDSLIDE INVENTORIES AND THEIR STATISTICAL PROPERTIES. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29, 687-711.
- Marco, S., Hartal, M., Hazan, N., Lev, L., & Stein, M. (2003). Archaeology, history, and geology of the A.D. 749 earthquake, Dead Sea Transform. *Geology*, 31(8), 665-668.
- Marco, S., Stein, M., Agnon, A., & Ron, H. (1996). Long-term earthquake clustering: A 50,000-year paleoseismic record in the Dead Sea Graben. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 101(B3), 6179-6191.
- Meirova, T., Hofstetter, R., Ben-Avraham, Z., Steinberg, D. M., & Malagnini, L. (2008). weak motion-based attenuation relationships for Israel. *Geophysics*, 1127-1140.
- Palchik, V., & Hatzor, Y. H. (2000). Correlation between mechanical strength and microstructural parameters of dolomites and limestones in the Judea Group-Israel. *Isr. J. Earth Sci.*, 49, 65-79.
- Palma, B., Parise, M., Reichenbach, P., & Guzzetti, F. (2012). Rockfall hazard assessment along a road in the Sorrento Peninsula, Campania, southern Italy. *Nat Hazards*, 61, 187-201.
- Peng, B. (2000). *Rockfall Trajectory Analysis - Parameter Determination and Application*. Canterbury: University of Canterbury.
- Pfeiffer, T. J. (1989). *Rockfall Hazard Analysis Using Computer Simulation of Rockfalls*. Colorado School of Mines.

- Pierson, L. A., Gullixson, C. F., & Chassie, R. G. (2001). *ROCKFALL CATCHMENT AREA DESIGN GUIDE*. Oregon Department of Transportation - Research Group and Federal Highway Administration.
- Porat, N. (2006). Use of magnetic separation for purifying quartz for luminescence dating. *Ancient TL*, 33-36.
- Rinat, Y., Matmon, A., Arnold, M., Aumaitre, M., Bourles, D., Keddadouche, K., et al. (in press). Holocene rockfalls in the southern Negev Desert, Israel and their relation to Dead Sea fault earthquakes. *Quaternary Research*.
- Ritchie, A. M. (1963). Evaluation of Rockfall and its Control. *Highway Research Record* (pp. 13-28). Washington, DC: National Academy of Sciences-National Research Council.
- Scholz, C. H. (2002). The Mechanics of Earthquakes and Faulting. *Cambridge Univ. Press, New York*, 471.
- Skempton, A. W. (1949). Alexandre Collin. A note on his pioneer work in soil mechanics. *Geotechnique*(1), 216-221.
- Somerville, P., Collins, N., Abrahamson, N., Graves, R., & Saikia, C. (2001). *GROUND MOTION ATTENUATION RELATIONS FOR THE CENTRAL AND EASTERN UNITED STATES*. San Francisco: URS.
- Spadari, M., Giacomini, A., Buzzi, O., Fityus, S., & Giani, G. P. (2012). In situ rockfall testing in New South Wales Australia. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 49, 84-93.
- Volkweim, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., et al. (2011). Rockfall characterisation and structural protection - a review. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2617-2651.
- Whalley, W. B. (1984). Rockfalls. In d. Brunnsden, & D. B. Prior (Eds.), *Slope Instability* (pp. 217-256). JOHN WILEY & SONS.
- Wieczorek, G. F., & Jager, S. (1996). Triggering mechanisms and depositional rates of postglacial slope-movement processes in the Yosemite Valley, California. *GEOMORPHOLOGY*, 17-31.
- Wieczorek, G. F., Stock, G. M., Reichenbach, P., Snyder, J. B., Borchers, J. W., & Godt, J. W. (2008). Investigation and hazard assessment of the 2003 and 2007 Staircase Falls rock falls National Park, California, USA. *Natural Hazard and Earth System Sciences*, 421-432.
- חצור, י'. (1991). הגיאולוגיה של אזור הגלבוע. ירושלים: המכון הגיאולוגי ישראל.
- חצור, י' ח'. (2000). מפה גיאולוגית של ישראל 1:50,000 גליון 6-11, בית שאן. ירושלים: מדינת ישראל, משרד התשתיות הלאומיות.

סימן טוב, ש'. (2009). בחינת התנאים הגיאומורפיים והמכניים לנפילת סלעים מצוקים: צוק ראמה, מתלול צורים. ירושלים: משרד התשתיות הלאומיות, המכון הגאולוגי.

נספח 1 – קודים אשר שימשו בתוכנת MATLAB

1.1 הקוד אשר שימש להערכת הסכנה

```

close all;
clear;
clc
%%
% Simulation Parameters for collision
% -----

rho = 2770; % [kg/m^3] density of the boulder

% shape of boulder [uncomment and insert the sizes]

% cylinder
%-----
% L=3.4;
% R=1.5;
% M=pi*R^2*L;
% I=M*R^2/2;

% sphere
%-----
%R = 1; % radius [m]
%M = rho * (4/3)*pi*R^3; %mass [kg]
%I = (2*M*R^2)/5; %inertia

% box
%----
width=3.3; % [m]
depth=2.9; % [m]
hieght=3.1; % [m]
R = (depth+hieght)/2; % rolling step distance
M = rho * width*depth*hieght; %mass [kg]
I = 1/12 * M * (depth^2 * hieght^2); % moment of
inertia

```

```

%slope parm. [ for sakhnin slope]
%-----
Rn = 0.33; % restitution coefficient
Rt = 0.65; % friction coefficient

h = 3;% cliff hight (origin of rock)
fault_wall=2;%hight of fault wall (gilboa fault)
horizontal_length = 89; %length of sakhnin slope from
source
B = -0.6955 ; %Slope
alpha=abs(atan(B)); %slope [angle]
C = 89.223+fault_wall; % y axis intersect

%% initial parameters for center mass movement
g = -9.81; % gravity acceleration
N = 1000; % sampling interval of x, y
y0 = zeros(1,N);
x0 = zeros(1,N);
vx0 = zeros(1,N);
vy0 = zeros(1,N);
t0 = zeros(1,N);
x0(1) = 0;
y0(1) = C + h; %starting point
t0(1) = 0;
count = 0; % when = 1 ---> rolling

%initial velocities
%-----
w1 = 0; %initial rotational velocity
vx0(1) = 0.3; %initial x velocity [m/s]
vy0(1) = 0; %initial y velocity [m/s]

%plotting sakhnin
figure(1)
x=-1:0.01:horizontal_length;
plot(x,B.*x+C);

%stop and rolling switches
slop_flag=0;
rolling_s=0;
rolling_h=0;

for i=2:N

    if slop_flag==0

```

```

if rolling_s==0

    %bouncing on saknin
    %-----

    %% quadratic equation coef. to find next x
    %-----
    a_0=g / (2*vx0(i-1)^2);
    b_0=vy0(i-1)/vx0(i-1);
    c_0=y0(i-1);

    a_new=a_0;
    b_new=b_0-2*a_0*x0(i-1);
    c_new=a_0*x0(i-1)^2-b_0*x0(i-1)+c_0;

    a = a_new;
    b = b_new-B;
    c = c_new-C;

    % solving quadric equation
    %-----
    x2 = (-b-sqrt(b^2-4*a*c))/(2*a);
    x1 = (-b+sqrt(b^2-4*a*c))/(2*a);

    %next x,y,t

    x0(i)=max([x2,x1]); % find next contact point x
coordinate

    x=x0(i-1):0.001:x0(i);
    figure(1)
    hold on
    plot(x,a_new.*x.^2+b_new.*x+c_new,'r');

    y0(i) = B*x0(i)+C; % find next contact point y
coordinate

    t0(i) = (x0(i)-x0(i-1)) / vx0(i-1) + t0(i-1);
%calculate time

end

```

```

%rolling on skhnin slope
%-----

    if ((x0(i) - x0(i-1))^2 + (y0(i) - y0(i-1))^2 <=
R^2 || rolling_s==1 )
        rolling_s=1;
        x0(i)=x0(i-1)+R*cos(alpha);
        y0(i)=y0(i-1)-R*sin(alpha);
        t0(i) = (x0(i)-x0(i-1)) / vx0(i-1) + t0(i-1);
%calculate time

    end

end

%hordos slope
%-----

    if (x0(i) >= horizontal_length || slop_flag~=0)

        slop_flag=i;

        %slope coef. for hordos slope
        %-----
        Rn = 0.18; % restitution coefficient
        Rt = 0.6; % friction coefficient
        A = 0.001; %mekadem of X^2
        B = -0.4953; %mekadem of X
        C = 63.01; %mekadem C

        figure(1)
        hold on;
        x=horizontal_length:0.01:250;
        horizontal_length=1000;
        plot(x,A.*x.^2+B.*x+C);

        %bouncing on hordus
        %-----

            if rolling_h==0

%% quadric equetion parameters to find x
%-----

                a_0=g / (2*vx0(i-1)^2);
                b_0=vy0(i-1)/vx0(i-1);
                c_0=y0(i-1);

                a_new=a_0;

```

```

b_new=b_0-2*a_0*x0(i-1);
c_new=a_0*x0(i-1)^2-b_0*x0(i-1)+c_0;

a = a_new-A;
b = b_new-B;
c = c_new-C;

% solving quadric equation
%-----
x2 = (-b-sqrt(b^2-4*a*c))/(2*a);
x1 = (-b+sqrt(b^2-4*a*c))/(2*a);

%next x,y,t

x0(i)=max([x2,x1]); % find next contact
point x coordinate

x=x0(i-1):0.001:x0(i);
figure(1)
hold on
plot(x,a_new.*x.^2+b_new.*x+c_new,'r');

y0(i) = A*x0(i)^2+B*x0(i)+C; % find next
contact point y coordinate

t0(i) = (x0(i)-x0(i-1)) / vx0(i-1) +
t0(i-1); %calculate time

alpha = abs(atan(2*A*x0(i) + B)); %impact
angle

end

%rolling n hordus
%-----
if ((x0(i) - x0(i-1))^2 + (y0(i) - y0(i-1))^2
<= R^2 || rolling_h==1 )

rolling_h=1;
alpha = abs(atan(2*A*x0(i-1) + B));
x0(i)=x0(i-1)+R*cos(alpha);
y0(i)=A*x0(i)^2+B*x0(i)+C;
t0(i) = (x0(i)-x0(i-1)) / vx0(i-1) + t0(i-1);
%calculate time

end

```



```

end

%stopping condition
%-----
if (w1 <= 0.54 && rolling_h==1)

    % insert stopping rotational velocity
    % -----
    % w1=0.54 for 30 m^3 rock
    % w1=1 for a 4 m^3 roc
    % w1=1.36 for 1.5 m^3 rock

    disp(['stopping distance = '
num2str(x0(i))]);
    break

end

%new contact velocity
vx_rock = vx0(i-1);
vy_rock = g*(t0(i) - t0(i-1)) + vy0(i-1);

% calculate velocities after impact
%-----
% Normal-Tangent coordinate system
vt = vx_rock * cos(alpha)-vy_rock*sin(alpha); %
Tangent velocity before impact
vn = vy_rock * cos(alpha)+vx_rock*sin(alpha); %
Normal velocity before impact

% Velocities after impact
vn2 = Rn*vn;
vt2 = sqrt((Rt^2 *( M*vt^2+I*w1^2))/(M+I/R^2));

%velocities for next calculation
w1 = vt2/R; % rotational velocity
vt = vt2; % new tangent velocity
vn = -vn2; % new normal velocity

% new xy velocities
vx0(i) = vt*cos(alpha)+vn*sin(alpha);
vy0(i) = (vn*cos(alpha)-vt*sin(alpha));

```

end

1.2 הקודים אשר שימשו להערכת מהירות סופית על גבי מדרון ישר

הקוד המצורף משמש עבור סלע כדורי, עבור צורות סלעים אחרות יש להתאים את הקוד לצורה הרלוונטית.

```
1 % clear;
2 % close all;
3 % clc;
4
5 % Simulation Parameters for colision
6 % -----
7 params.rho = 2770; % [kg/m^3] density
8 params.R = 3; % radius [m]
9 params.M = params.rho * (4/3) * pi * params.R^3;
   %mass [kg]
10 params.I = (2 * params.M * params.R^2) / 5;
   %inertia
11 params.w1 = 0; %initial rotational velocity
12 params.Rn = 0.3; % restitution coefficient
13 params.Rt = 0.6; % friction coefficient
14
15 % Simulation Variables
16 % -----
17 alpha = 20*pi/180 : 5*pi/180 : 70*pi/180; %
   slope[degrees]
18 %alpha = 30*pi/180;
19 vf = zeros(size(alpha));
20
21
22 % Simulation for each alpha value
23 % -----
24 for k = 1:length(alpha)
25     V = getVelocity(alpha(k), params);
26     pks = findpeaks(V(:));
27     pks = sort(pks, 'descend');
28     pks = pks(20:30);
29     vf(k) = median(pks);
30 end
31
32
33 % Plot maximal velocity vs. slope
34 % -----
35
36 %figure;
```

```

37 hold all
38 plot(alpha, vf);
39 grid on;
40 xlabel('\alpha (degree)');
41 ylabel('v_f (m/s)');
42 set(gca, 'XTick', alpha, 'XTickLabel',
    (180/pi*alpha).')
43
44


---


45 function V = getVelocity(alpha, params)
46
47 R = params.R;
48 M = params.M;
49 I = params.I;
50 w1 = params.w1;
51 Rn = params.Rn;
52 Rt = params.Rt;
53
54
55 %slope parameters
56
57 h = 3;% cliff hight
58 horizontal_length = 100;
59 B = -tan(alpha); %Slope
60 C = tan(alpha)*horizontal_length; % Y axis
    intersect
61
62
63 % initial parameters for center mass movement
64 %% initial parameters for center mass movement
65 g = -9.81; % gravity acceleration [m/s^2]
66 N = 1000; % sampling interval of x, y
67 y0 = zeros(1,N);
68 x0 = zeros(1,N);
69 vx0 = zeros(1,N);
70 vy0 = zeros(1,N);
71 t0 = zeros(1,N);
72 x0(1) = 0;
73 y0(1) = tan(alpha)*horizontal_length + h;
    %starting point
74 w1 = 0; %initial rotational velocity
75 vx0(1) = 3; %initial x velocity [m/s]
76 vy0(1) = 0; %initial y velocity [m/s]
77 t0(1) = 0;
78 count = 0; % when = 1 ---> rolling
79
80 % calculation of next contact point
81

```

```

82 rolling=0;
83 for i=2:N
84     if rolling==0
85 %% quadric equation parameters to find x
86     %-----
87     a_0=g / (2*vx0(i-1)^2);
88     b_0=vy0(i-1)/vx0(i-1);
89     c_0=y0(i-1);
90
91     a_new=a_0;
92     b_new=b_0-2*a_0*x0(i-1);
93     c_new=a_0*x0(i-1)^2-b_0*x0(i-1)+c_0;
94
95     a = a_new;
96     b = b_new-B;
97     c = c_new-C;
98
99     % solving quadric equation
100    %-----
101    x2 = (-b-sqrt(b^2-4*a*c))/(2*a);
102    x1 = (-b+sqrt(b^2-4*a*c))/(2*a);
103
104    x0(i)=max([x2,x1]); % find next contact point
    x coordinate
105
106    y0(i) = B*x0(i)+C; % find next contact point y
    coordinate
107
108    t0(i) = (x0(i)-x0(i-1)) / vx0(i-1) + t0(i-1);
    %calculate time
109
110
111    if x0(i) >= horizontal_length
112        spx=vx0(i-1);
113        stoptime=(horizontal_length-x0(i-
114        1))/vx0(i-1);
114        vy_final=vy0(i-1)+g*stoptime;
115        disp(['rotational velocity = '
116        num2str(w1)]);
116        disp(['vx final = ' num2str(spx) ]);
117        disp(['vy final = ' num2str(vy_final)]);
118        break
119    end
120 end
121 y0(i)=-
    tan(alpha)*x0(i)+horizontal_length*tan(alpha); %
    find next contact point y coordinate
122

```

```

123     %in case of small distance -> rolling of the
        rock
124     if ((x0(i) - x0(i-1))^2 + (y0(i) - y0(i-1))^2
        <= R^2 || rolling==1 )
125         rolling=1;
126         x0(i)=x0(i-1)+R*cos(alpha);
127         y0(i)=B*x0(i)+C;
128         t0(i) = (x0(i)-x0(i-1)) / vx0(i-1) + t0(i-
        1); %calculate time
129
130
131     end
132
133
134
135     %new contact velocity
136     %-----
137     vx_rock = vx0(i-1);
138     vy_rock = g*(t0(i)-t0(i-1))+vy0(i-1);
139
140     % calculate velocities after impact
141     %-----
142     % Normal-Tangent coordinate system
143     vt = vx_rock * cos(alpha)-vy_rock*sin(alpha);
        % Tangent velocity before impact
144     vn = vy_rock * cos(alpha)+vx_rock*sin(alpha);
        % Normal velocity before impact
145
146     % Velocities after impact
147     vn2 = Rn*vn;
148     vt2 = sqrt((Rt^2 * (
        M*vt^2+I*w1^2)) / (M+I/R^2));
149
150     %velocities for next calculation
151     w1 = vt2/R; % rotational velocity
152     vt = vt2; % new tangent velocity
153     vn = -vn2; % new normal velocity
154
155     % new xy velocities
156     vx0(i) = vt*cos(alpha)+vn*sin(alpha);
157     vy0(i) = (vn*cos(alpha)-vt*sin(alpha));
158
159     if sqrt(vx0(i)^2+vy0(i)^2) <= 0
160         speedx = 1;
161         break
162     end
163 end
164

```

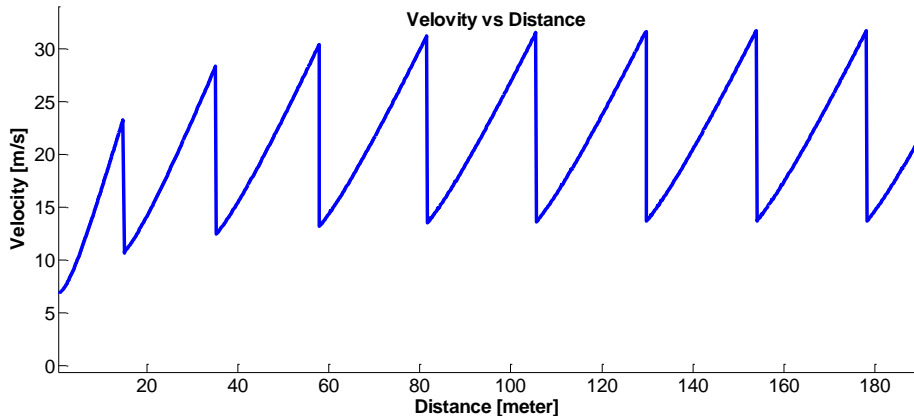
```

165% calculate velocity as a function of time
166%-----
167Time_interval=0.01;
168
169for i = 1:99
170    delta_t = t0(i+1) - t0(i);
171    Time_from_impact = 0;
172    C = round(delta_t/Time_interval); % can cause
    inaccuracy due to rounding
173    for j = 1:C
174        Time_from_impact =
    Time_from_impact+Time_interval;
175        locx(j,i) =
    (x0(i)+vx0(i)*Time_from_impact);
176        V(j,i) =
    sqrt(vx0(i)^2+(vy0(i)+g*Time_from_impact)^2);
177    end
178end
179
180
181
182dist = locx(:);
183dist(dist==0) = [];
184vel = V(:);
185vel(vel==0) = [];

```

1.3 בחינות לקוד

1. בחנו מקרה בו הסלע הנופל הוא בעל גודל קטן מאד והזנחנו את מומנט האינרציה. מקדם התקומה המשיק שווה ל 1, כלומר אין אובדן מהירות בכיוון נורמלי למדרון אבל המהירות משנה כיוון. הסלע מגיע למצב יציב בדומה למתואר בסעיף 4.3. התוצאה מוצגת באיור 46.



איור 46. מהירות לאורך מדרון קבוע עבור סלע כדורי בעל רדיוס של 10^{-6} , ללא מומנט אינרציה וכאשר מקדם התקומה הנורמלי שווה ל 1. ניתן לראות כי הסלע מתייצב על תנודות קבועות במהירות.

חישבנו את הזווית הבלסטית של המהירות כאשר הסלע עוזב את המדרון לפי שיפוע המדרון והשוונו את התוצאה לפתרון אנליטי של מצב יציב בו השוונו בין הפרש האנרגיה הקינטית לפני ואחרי התנגשות להפרש האנרגיה הפוטנציאלית בין יציאה מהתנגשות להתנגשות הבאה. ההנחות הן אותן הנחות כמו בפתרון המודל. בפתרון האנליטי חישבנו את שיפוע המדרון לפי הזווית הבלסטית:

מבחן אנליטי לאבן המתגלגלת במדרון בעל שיפוע α .

שיפוע קבוע α ופתרון עבור מחזור גבול (Limit Cycle). המסלול נקבוע על ידי זוג משוואות

$$x = u_i t + \frac{g \sin \alpha}{2} t^2 \quad (1)$$

$$y = v_i t - \frac{g \cos \alpha}{2} t^2 \quad (2)$$

כאשר t הזמן מנקודת הפגיעה הקודמת; x העתקה לאורך המדרון ו- y ניצב לו. רכיבי המהירות התואמים u, v (כיתוב תחתי מציין התחלת מחזור, לאמור אחרי פגיעה), נתונים ע"י זוג המשוואות:

$$u = u_i + g \sin \alpha t \quad (3)$$

$$v = v_i - g \cos \alpha \cdot t \quad (4)$$

נשתמש בכיתוב תחתי f לציין נקודת פגיעה ונציב במשוואה (2):

$$0 = v_i t_f - \frac{g \cos \alpha}{2} t_f^2 \quad (5)$$

נחלץ את משך מחזור הגבול

$$t_f = \frac{2v_i}{g \cos \alpha} \quad (6)$$

נציב את משך מחזור הגבול לפי משוואה 6 במשוואה 3:

$$u_f = u_i + 2v_i \tan \alpha \quad (7)$$

ובמשוואה 1:

$$x_f = \frac{2u_i v_i + 2v_i^2 \tan \alpha}{g \cos \alpha} \quad (8)$$

הפרש הגובה במחזור הגבול:

$$h = \frac{2}{g} (u_i v_i \tan \alpha + v_i^2 \tan^2 \alpha) \quad (9)$$

והפרש האנרגיה הפוטנציאלית:

$$\Delta E_p = m(2u_i v_i \tan \alpha + 2v_i^2 \tan^2 \alpha) \quad (10)$$

אנרגיה קינטית אחרי פגיעה

$$E_{ki} = \frac{m}{2} (u_i^2 + v_i^2) \quad (11)$$

אנרגיה קינטית לפני פגיעה

$$E_{kf} = \frac{m}{2} (u_f^2 + v_f^2) \quad (12)$$

בהנחה שעבור המהירות הנורמלית מתקיים הקשר

$$v_f = -v_i \quad (13)$$

ועבור המהירות המשיקית

$$R_t u_f = u_i \quad (14)$$

נשווה את הפרש אנרגיה הקינטית לפוטנציאלית

$$\Delta E_k = \Delta E_p \quad (15)$$

בפירוק האנרגיה למרכיבים (ולפי הקשר במשוואה 14), מקבלים:

$$\frac{m}{2} v_f^2 + \frac{m}{2} u_f^2 - \frac{m}{2} v_i^2 - R_t^2 \frac{m}{2} u_f^2 = \Delta E_p \quad (16)$$

נציב את משוואה 7 ונשתמש בקשר שמופיע במשוואה 13:

$$\frac{m}{2} v_i^2 + \frac{m}{2} (u_i^2 + 4u_i v_i \tan \alpha + 4v_i^2 \tan^2 \alpha) - \frac{m}{2} v_i^2 - \quad (17)$$

$$\frac{m}{2} (u_i^2 + 4u_i v_i \tan \alpha + 4v_i^2 \tan^2 \alpha) R_t^2 = \Delta E_p$$

לאחר הצבה של משוואה 10 וצמצום אברים מקבלים:

$$2v_i^2 R_t^2 \tan^2 \alpha + 2u_i v_i R_t^2 \tan \alpha + \frac{u_i^2}{2} (R_t^2 - 1) = 0 \quad (18)$$

נכתוב את המהירות לפי גודל וקטור זווית בליסטית β :

$$u_i = V \cos \beta \quad (19)$$

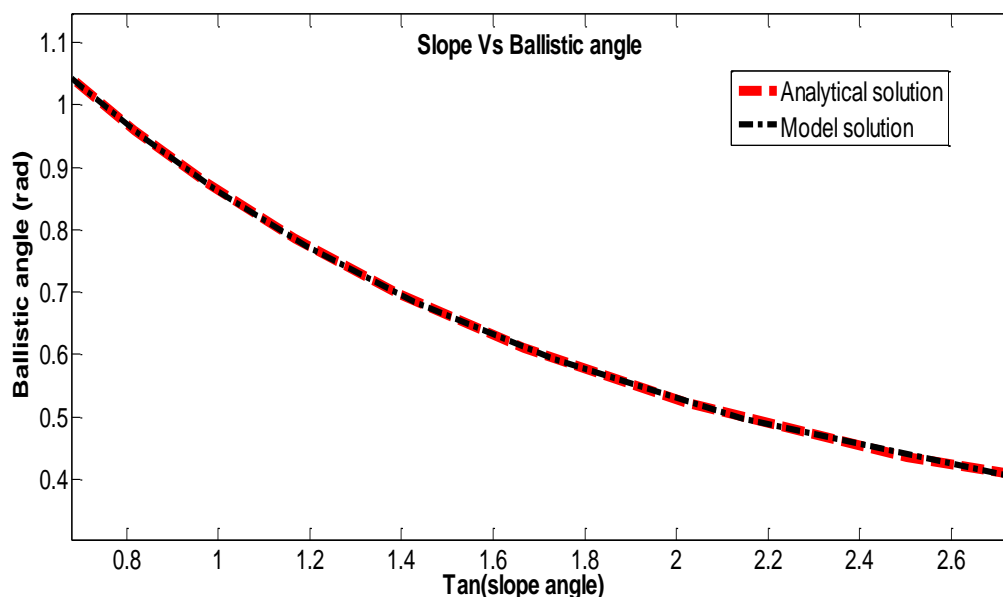
$$v_i = V \sin \beta \quad (20)$$

נציב במשוואה 18:

$$(21)$$

$$2V^2 \sin^2 \beta R_t^2 \tan^2 \alpha + 2V^2 \sin \beta \cos \beta R_t^2 \tan \alpha + \frac{V^2 \cos^2 \beta}{2} (R_t^2 - 1) = 0$$

פתרנו את המשוואה הריבועית של $\tan \alpha$ כפונקציה של הזווית הבליסטית β . התוצאות שהתקבלו מהקוד ומאחד הפתרונות של המשוואה הריבועית זהות (איור 47).

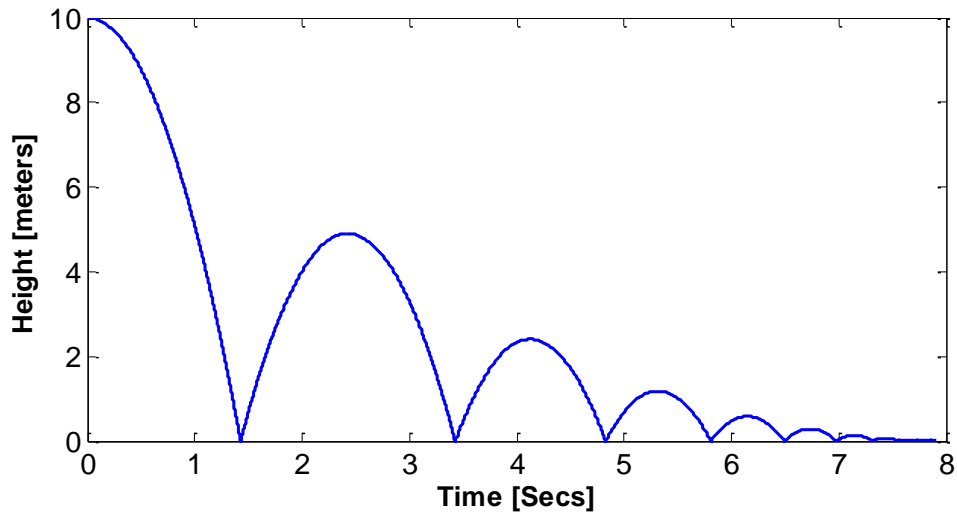


איור 47. השוואה של חישוב זווית בליסטית לפי שיפוע מדרון לפי פתרון אנליטי למחזור

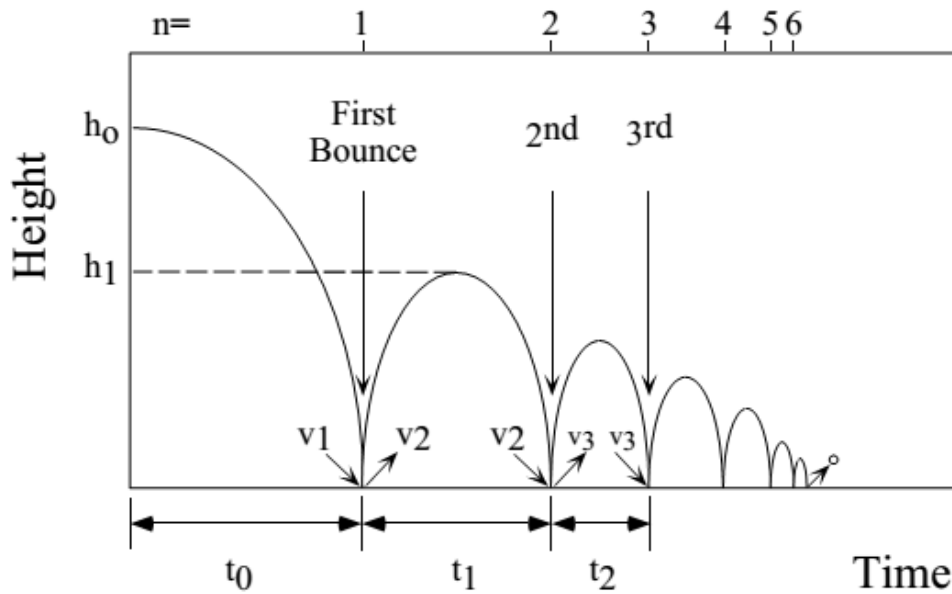
גבול מוצג לפי הקו האדום (משוואה 21), והקוד אשר שימש להערכת הסכנה בנוסף

.CRSP-L

2. נבדק מקרה בו הסלע קופץ על גבי משטח אופקי (איור 48):



איור 48. גרף המציג את גובה הסלע לפי זמן למקרה בו הסלע קופץ על גבי מישור אופקי כאשר מקדם התקומה שווה 0.7. התוצאה דומה לזו המוצגת באיור 49.



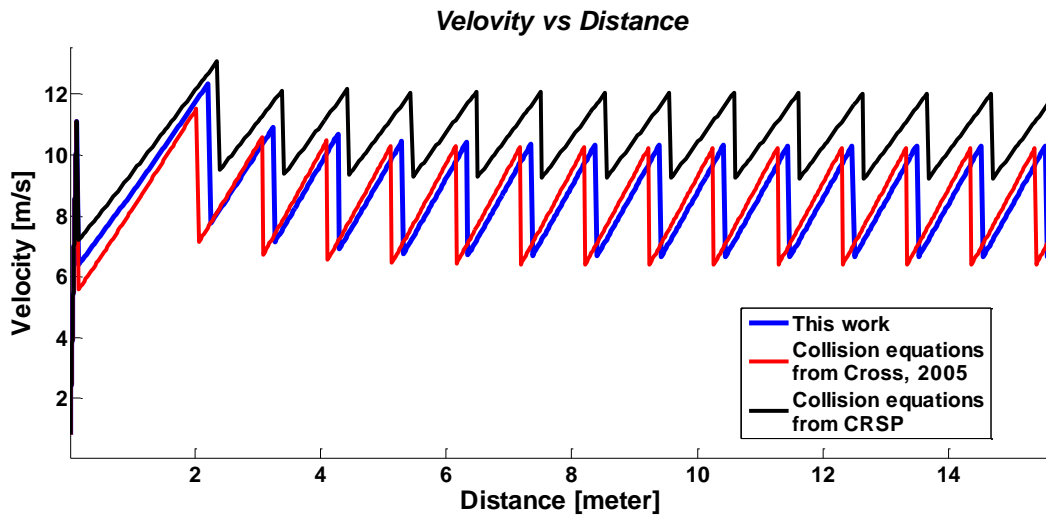
איור 49. גרף סכמתי של התנגשויות הסלע בקרקע (Falcon et al., 1998).

3. נבחן מקרה בו התנאים נשמרים ותאוצת הכובד משתנה. כצפוי, במידה ותאוצת הכובד נמוכה יותר כך גם המרחק אותו עובר הסלע (טבלה 8).

מספר חתך	נקודת עצירה לפי g	נקודת עצירה לפי 0.5g
1	256	212
2	277	226
3	303	246

טבלה 8. השוואה בין נקודת עצירה לפי תאוצות כובד שונות.

4. בחינה של נפילת סלע במורד מדרון ישר כאשר כל קו מייצג משוואות ניחות במהירות ממקור אחר. השימוש הוא באותו הקוד אבל בכל סימולציה המשוואות אשר שימשו לחישוב הניחות במהירות נלקחו ממקור אחר.



איור 50. בגרף זה ניתן לראות השוואה בין המהירות לפי המרחק לאורך המדרון כאשר קו מייצג משוואות ניחות במהירות ממקור אחר. הקו הכחול חושב לפי המשוואות אשר שימשו במודל המטלאב (משוואות 7 ו-8). הקו האדום מייצג את החישוב לפי משוואות 1,3 ו-4 מ-Cross (2005). הקו השחור מייצג את החישוב לפי המשוואות מתוכנת CRSP (Jones et al., 2000).

נספח 2. תיעוד מדידת הסלעים

מספר סלע	צורה	קוטר/אורך [מטר]	אורך/קוטר [מטר]	אורך [מטר]	נפח [מטר מעוקב]
1	גליל	0.5	1.2		0.2
2	גליל	0.5	1.2		0.2
3	תיבה	0.6	0.4	1	0.2
4	תיבה	0.6	0.4	1	0.2
5	כדור	0.8			0.3
6	כדור	0.8			0.3
7	תיבה	1.1	0.5	0.8	0.4
8	גליל	0.7	1.2		0.5
9	גליל	0.7	1.2		0.5
10	כדור	1			0.5
11	כדור	1			0.5
12	תיבה	0.9	1	0.6	0.5
13	תיבה	0.9	1	0.6	0.5
14	תיבה	0.9	1	0.6	0.5
15	גליל	1	0.7		0.5
16	גליל	1	0.7		0.5
17	תיבה	0.9	0.7	0.9	0.6
18	תיבה	0.9	0.7	0.9	0.6
19	תיבה	0.9	0.7	0.9	0.6
20	תיבה	0.9	0.7	0.9	0.6
21	גליל	1.1	0.6		0.6
22	גליל	1.1	0.6		0.6
23	גליל	1.2	0.6		0.7
24	גליל	1.2	0.6		0.7
25	תיבה	0.5	1.7	0.8	0.7
26	תיבה	0.5	1.7	0.8	0.7
27	כדור	1.1			0.7
28	כדור	1.1			0.7
29	תיבה	1.2	1.3	0.5	0.8
30	תיבה	1.2	1.3	0.5	0.8
31	תיבה	1.2	1.3	0.5	0.8
32	תיבה	1	0.6	1.4	0.8
33	תיבה	1	0.6	1.4	0.8
34	תיבה	1	0.6	1.4	0.8
35	גליל	1	1.1		0.9
36	גליל	1	1.1		0.9
37	תיבה	0.9	0.8	1.2	0.9
38	תיבה	0.9	0.8	1.2	0.9
39	גליל	0.8	1.9		1.0
40	גליל	0.8	1.9		1.0
41	גליל	0.8	2		1.0

1.0		2	0.8	גליל	42
1.0	0.6	2	0.8	תיבה	43
1.0	0.7	1	1.5	תיבה	44
1.0	1.5	0.5	1.4	תיבה	45
1.1		2.1	0.8	גליל	46
1.1	1.1	0.8	1.3	תיבה	47
1.1	1.1	0.8	1.3	תיבה	48
1.1	1.7	0.4	1.6	תיבה	49
1.1	0.8	0.9	1.5	תיבה	50
1.1	0.8	1	1.4	תיבה	51
1.1	0.9	1	1.2	תיבה	52
1.1	0.7	1.8	0.9	תיבה	53
1.2			1.3	כדור	54
1.2	0.7	0.9	1.9	תיבה	55
1.2	0.7	0.9	1.9	תיבה	56
1.2	1.1	0.8	1.4	תיבה	57
1.2	1.1	0.8	1.4	תיבה	58
1.2	1.1	0.7	1.5	תיבה	59
1.2	1.1	0.7	1.5	תיבה	60
1.2	0.9	1.1	1.2	תיבה	61
1.3	0.8	1.6	1	תיבה	62
1.3	0.8	1.6	1	תיבה	63
1.3	0.7	2.2	0.8	תיבה	64
1.3	0.7	2.2	0.8	תיבה	65
1.4	0.9	0.9	1.2	תיבה	66
1.4	0.9	1.5	1	תיבה	67
1.4	0.8	1.7	1	תיבה	68
1.4	0.7	1	2	תיבה	69
1.4			1.4	כדור	70
1.5	0.8	1.3	1.4	תיבה	71
1.5	0.8	1.9	1	תיבה	72
1.5		3	0.8	תיבה	73
1.5	1.5	1.1	0.9	תיבה	74
1.5	1.4	1.2	0.9	תיבה	75
1.5		1.6	1.1	גליל	76
1.5		1.6	1.1	גליל	77
1.6	0.8	2	1	תיבה	78
1.6		1.4	1.2	גליל	79
1.7		1.8	1.1	גליל	80
1.8	0.8	2.3	1	תיבה	81
1.8		1.6	1.2	גליל	82
1.9		2	1.1	גליל	83
1.9		2	1.1	גליל	84
2.0	0.8	2.5	1	תיבה	85
2.0	1	1.7	1.2	תיבה	86
2.1	0.9	1.9	1.2	תיבה	87
2.2	0.9	2	1.2	תיבה	88

2.3		2	1.2	גליל	89
2.4		1.2	1.6	גליל	90
2.6	0.9	2.6	1.1	תיבה	91
2.6	1	2.2	1.2	תיבה	92
2.9	0.7	2.6	1.6	תיבה	93
2.9	1.3	1.5	1.5	תיבה	94
3.0	1	2.3	1.3	תיבה	95
3.1		2.7	1.2	גליל	96
3.1	1.1	2	1.4	תיבה	97
3.3	2.4	0.6	2.3	תיבה	98
3.4		3	1.2	גליל	99
3.6			1.9	כדור	100
3.7	1.1	2.4	1.4	תיבה	101
3.7		2.1	1.5	גליל	102
4.0	1.9	2.1	1	תיבה	103
4.0	1	2	2	תיבה	104
4.4	2	1.1	2	תיבה	105
4.5		3.4	1.3	גליל	106
4.7	1.3	1.8	2	תיבה	107
5.0		2.5	1.6	גליל	108
5.8	1.2	3.2	1.5	תיבה	109
6.4	3.5	1.3	1.4	תיבה	110
6.7	1.8	1.7	2.2	תיבה	111
7.3	5.1	0.6	2.4	תיבה	112
8.7		2.5	2.1	גליל	113
12.2		3.2	2.2	גליל	114
19.2	2.4	2	4	תיבה	115
19.2	4	2	2.4	תיבה	116
30.6	2.9	3.4	3.1	תיבה	117
92.4	4.8	5.2	3.7	תיבה	118
115.2	4.9	5.6	4.2	תיבה	119
116.6	5.4	6	3.6	תיבה	120

In addition, our results show that the initial velocity, which is related to triggering factor, had a negligible effect on the maximal stopping point but rather on the distribution of rocks' halting point along the slope. We also suggest that the relation between the rock size and the roughness of the slope affect the mode of movement of the rocks down the slope, and that bigger rocks might endanger smaller areas than smaller rocks .

This work can contribute to plan defenses for the people of the kibbutzim and their property and to similar risk assessments in the future.

Abstract

Rock fall is a natural hazard typical of cliffs and steep slopes. The trajectories of the falling rock-blocks down the slope are controlled by the geological and geometrical properties of the falling-rock and the slope surfaces. The frequency of rock fall events is generally controlled by the frequency of the triggering events such as extreme-weather and seismic activity. The kibbutzim Hefziba and Beit-alpha (hereafter the studied area), located at the foot of the Gilboa Mountains, are in the range of falling rocks originated from the steep slopes above it. Two cases of rain induced falling rocks were documented during the last 20 years. In this work we study the rock fall hazard in this area, focusing on the conditions for rock fall triggering, the expected rock-block size distribution and the down slope rock trajectories. This work will contribute to reduce casualties and damage induced by rock falls within the studied area and will enable planning of engineering protection measures.

To accomplish the above we use the Colorado Rockfall Simulation Program (CRSP) and an in-house MatLab code, with a special emphasis on the calibration of the program to field conditions. We first mapped the origin of rock falls, measured size distribution of historical falling rocks, mapped the slope geology and geometry and measured roughness in-situ. We then derived the mechanical properties of the slope surface and the rocks by back analysis of historical rock falls. We found that the common rock size which is likely to fall and endanger the populated area is of volume of a cubic meter. The maximal volume that was observed was of volume of 30 cubic meters. We found that the rock-blocks in the upper part of the slope are not stable and are being held by a ledge of rock, we propose that erosion, and in some cases combined with increase in stress due to earthquakes, will trigger rock fall in this area. We found that the southernmost part of the inhabited area in Hefziba is under high rock fall hazard, Beit –Alpha is out of the danger zone. The results of the simulations enable us to draw a map of the area under high hazard and provide an assessment of the velocity and the height of jumps along the blocks' track .



Ministry of National Infrastructures
Energy and Water Resources
Geological Survey of Israel

**Rock fall trajectories on a slope:
Rock fall hazard evaluation down the Gilboa
fault slope: Hefziba and Beit-alfa
(Northern Israel)**

Yuval Levy

This thesis was submitted for the degree "Master of Science" to the senate of The Hebrew University of Jerusalem, Israel.

The study was carried out under the supervision of:

Dr. Oded Katz, Geological Survey of Israel

Prof. Amotz Agnon, Institute of Earth Sciences, the Hebrew University of Jerusalem, Israel