



משרד התשתיות הלאומיות
המכון הגיאולוגי

מפת סכנה ארצית לגלישות-מדרון בישראל; גיליון צפוני, קנ"מ 1:200,000

עודד כץ ועדן אלמוג

מוגש לוועדת ההיגוי
להיערכות וטיפול ברעידות אדמה

1. הקדמה

תנועה מהירה של סלעים ואו קרקע במורד מדרונות (גלישת מדרון) המתרחשת בעקבות רעידת אדמה או אירוע מטאורולוגי היא תופעה הרסנית, המוכרת מרעידות-אדמה ואירועים מטאורולוגיים בעולם (למשל, Keefer, 1984; Keefer, 2000; Guzzetti, 2000; Bucknam et al., 2001). התופעה, מוכרת גם בישראל מרעידות-אדמה היסטוריות (Wachs and Levitte, 1981; אבני, 1999; Salamon, Wust-Bloch and Wachs, 2000) ומאירועי גשם קיצוניים (Wiseman et al., 1970). על מנת למזער נזק ונפגעים בגלישות מדרון עתידיות, חשוב לאתר ולמפות אזורים הנמצאים בדרגת סכנה-יחסית גבוהה לגלישות מדרון. בישראל נעשו מספר עבודות למיפוי אזורים הנמצאים בדרגת סכנה-יחסית גבוהה לגלישות מדרון (ראה להלן), אך עדיין חסרה תמונה שלמה ועדכנית של האזורים הללו. ייתכן שקיימים אזורים בסכנה-יחסית גבוהה שעדיין לא זוהו. בנוסף, תקן הבנייה החדש דורש בדיקה של הסכנה הסיסמית בכלל והסכנה להתפתחות גלישות מדרון בפרט בתכנון בנייה חדשה. מטרת העבודה הנוכחית היא עריכה של מפה ארצית המציגה אזורים בסכנה-יחסית גבוהה להתפתחות גלישות מדרון.

בשנים האחרונות נעשו מספר עבודות אזוריות (Regional) להערכת הסכנה להתפתחות גלישות מדרון בישראל, מהן איכותיות תוך שימוש בשקלול של הגורמים הקובעים את יציבות המדרונות (וקס וסימן טוב, 1991; כרובי, 2001; Sneh et al., 2002; סלמון וחובי, 2003; כץ וחובי, 2004; כץ ופנחסי, 2004; אבני וחובי, 2005) ומהן כמותיות תוך שימוש בשיטת Newmark (Newmark, 1965; Jibson et al., 2000) להערכת יציבות מדרון בעת רעידת-אדמה (כץ וכרובי, 2003; כץ, 2004; ציון וחובי, 2004; כץ ואלמוג, 2006). אזור המטרה בעבודות הללו כלל עשרות עד מאות קמ"ר וקנה המידה היה בינוני, בטווח 1:12,500 – 1:50,000. בעבודה הנוכחית, ניתוח הסכנה להתפתחות גלישות מדרון בישראל נעשה בצורה איכותית בקנה מידה של 1:200,000, תוך שקלול הגורמים העיקריים הקובעים את יציבות המדרונות: השיפוע הטופוגרפי, המבנה הגיאולוגי, היחס בין הטופוגרפיה והמבנה וסוג הסלע החשוף (ההתייחסות בשלב זה היא לרעידות אדמה כגורם המפעיל את הגלישות בלבד; הפעלה על ידי גשם תוצג עם המשך העבודה). המפה נערכה על פי שיטת העבודה של תוכנת התרחישים HAZUS¹, תוך התאמה של השיטה לסוג הסלעים החשופים בישראל. הכיול נעשה על בסיס עבודות קודמות בקנ"מ מפורט יותר, שפורטו לעיל. בעתיד, בנוסף על שימושים בתחום התכנון, ניתן יהיה לשלב את המפה בהרצת תכנת התרחישים ליצירת תרחיש נזק נפגעים ברעידת אדמה.

בדוח זה מוצג הגיליון הצפוני של מפת הבסיס הגיאולוגית בקנ"מ 1:200,000 (Sneh et al., 1998), הכולל את אזור הגליל, העמקים הצפוניים וחיפה (השטח הכלול בנ.צ. 180/700 – 290/830 ברשת ישראל חדשה). מפות הסכנה (מפת הרגישות לכשל מדרון ומפת התאוצה הקריטית לכשל) מצורפות בגרסת מ"ג על גבי תקליטור (גב הכריכה האחורית).

קנה המידה של עבודה זו הוא אזורי, התוצאות ומפות הסכנה המובאות בהמשך לא באות להחליף או לייתר סקרים נקודתיים הנדרשים לצרכי פיתוח הנדסי ובנייה. מפות הסכנה יעודכנו מעת לעת ויפורסמו באתר האינטרנט של המכון הגיאולוגי (<http://www.gsi.gov.il>). לפני שימוש במפה יש לבדוק באתר האינטרנט האם קיים עדכון חדש.

¹ Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Department of Homeland Security, Emergency Preparedness and Response Directorate, FEMA, Mitigation Division, Washington DC (<http://www.fema.gov/plan/prevent/hazus/index.shtml>).

1.1 תנועה של חומר במורד מדרון

תנועת חומר (קרקע או סלע) במורד מדרון מאופיינת על ידי ארבעה טיפוסים עיקריים (Ritter et al., 1995): גלישה (Slide), זרימה (Flow), זחילה (Creep) ונפילה (Fall). אופי תנועת החומר מטה נקבע בעיקר על ידי היחס בין החוזק של החומר הנע והכוחות הפועלים עליו. להלן סקירה קצרה של הטיפוסים השונים של תנועת חומר במורד מדרון.

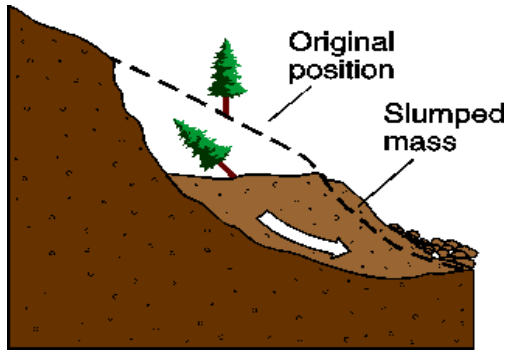
בגלישה נעה יחידת חומר שלימה על מישור מוגדר, לעיתים ללא גזירה פנימית ביחידה הנעה. מישור הגלישה יכול להיות רדוד ומקביל בקירוב לפני השטח כמו בגלישת סלע (rockslide) (איור 1א) או גלישת רסק (debris slide) או עמוק וקעור כמו בגלישה רוטציונית (Slump) (איור 1ב). כאשר בגלישת סלע רק החלק החיצוני של המדרון נכשל נקראת התופעה slab failure, וכאשר כל החומר מעל מישור הגלישה נע מטה נקראת התופעה מפולת סלעים (rock avalanche). בגלישת סלע, מישור הכשל הוא מישור קיים (למשל, מישור שכוב). לעומת זאת בגלישה רוטציונית, מישור הכשל מתפתח ביחידת הסלע הגולשת כתוצאה מתהליך הגלישה. **בזרימה** החומר נע כמו 'זורם צמיג' על ידי גזירה דיפרנציאלית בתוך החומר הנע ללא מישור ברור בתחתיתו. מהירות הזרימה יורדת מפני השטח כלפי מטה. זרימה במדרון מחייבות תכולת מים גבוהה בחומר הנע (איור 1ג, ד). זרימה במדרון היא לעיתים שלב מאוחר של גלישה כאשר החומר הגולש מתפרק לחלקים קטנים ונע במהירות (rock fragment flow). גלישת רסק יכולה להפוך במנגנון דומה לזרימת רסק (debris flow) או מפולת רסק (debris avalanche) אחרי צבירת מהירות והתרחקות החומר. זרימה של קרקע (earth flow) יכולה להיות מהירה כאשר הקרקע רטובה, או איטית כשלב הגעה לשיווי משקל של גלישה. טיפוס כשל נוסף הקשור בזרימה הוא Lateral spreads. הכוונה לתנועה של חומר מעל מישור משופע שעבר התנזלות (כלומר, איבוד זמני של החוזק לגזירה והתנהגות מכאנית כשל נוזל בעת רעידת אדמה). **בזחילת קרקע** (soil creep) מרבית התנועה מטה מתרחשת במנגנון של התנפחות החלק העליון של הקרקע בניצב למדרון והתכווצות אנכית תוך יצירה של רכיב תנועה במורד המדרון (Heave). מנגנון אחר המוביל זחילות הוא העומס העצמי של חתך הקרקע. במנגנון זה גם חלקים עמוקים יותר בחתך יכולים לנוע (איור 1ה). הזחילה היא תנועה איטית במורד מדרון אך יכולה להביא את החומר עד סף, שממנו בשינוי קל של התנאים (הרטבה, עומס, רעידת אדמה) תגרם תופעה משמעותית יותר: גלישה או זרימה. **נפילת סלע** (rock fall) מתרחשת כאשר מסת סלע סדוקה חשופה במדרון תלול (איור 1ו). גושים של סלע נפרדים מהמדרון התלול ונופלים נפילה חופשית כתוצאה מהחלקה על מישור או היפוך (toppling).

בהמשך, יוגדרו תופעות כשל המדרון לפי סוגי תנועות החומר שהוגדרו לעיל, והמונח **גלישת מדרון** יישמש לתיאור כלל תופעות אי היציבות.

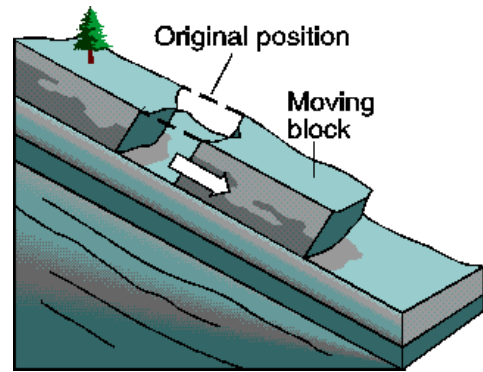
2. שיטת העבודה

שלבי העבודה ליצירת מפת סכנה להתפתחות גלישות מדרון בעת רעידת אדמה הם:

1. חישוב ומיפוי נטיית השיפוע הטופוגרפי והשיפוע של המבנה.
2. חלוקה של יחידות-המיפוי הגיאולוגיות ליחידות-מיפוי גיאוטכניות.
3. ניתוח ומיפוי טיפוס כשל המדרון האפשרי הסביר ביותר.
4. מיפוי הסכנה לגלישת מדרון (תאוצה קריטית לכשל).



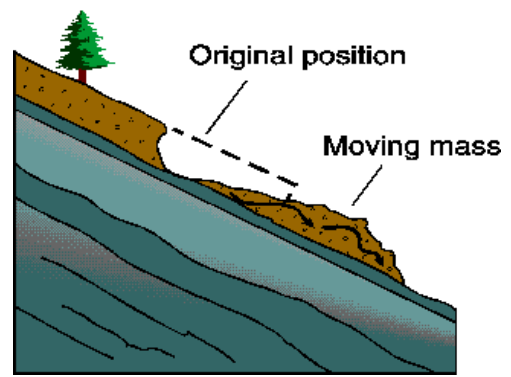
ב. גלישה רוטציונית (Slump)



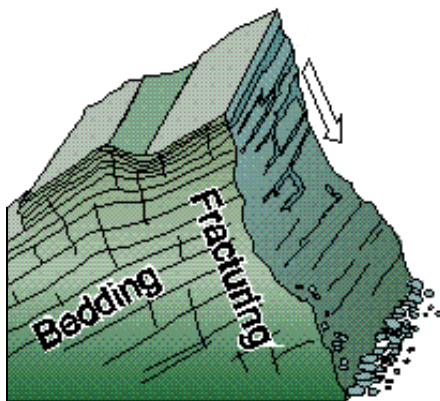
א. גלישת סלע על מישור שטוח



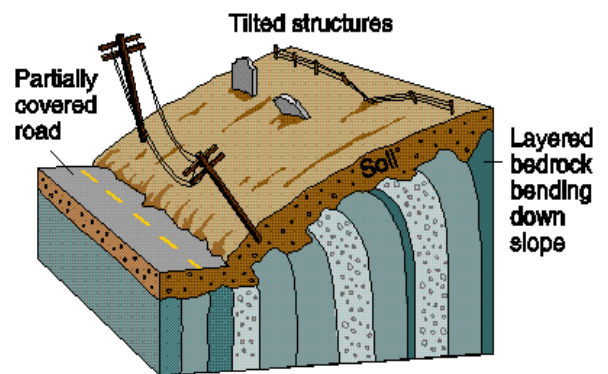
ד. זרימת רסק/קרקע רוויה למים



ג. זרימה של קרקע על מישור שטוח



ו. נפילה של גושי-סלע מתוך יחידת סלע סדוקה, החשופה במדרון תלול



ה. זחילה של קרקע במורד מדרון

2.1 מפות נטיית השיפוע הטופוגרפי והשיפוע של המבנה

בשלב ראשון עורכים מפות (רובדי ממ"ג) של כמות וכיוון שיפוע המדרונות וכמות וכיוון נטיית המבנה הגיאולוגי באזור העבודה. מודל השטח הספרתי (D.T.M) שנערך על ידי Hall (1993) שימש כבסיס טופוגרפי לעבודה הנוכחית. גודל תא הממ"ג (Pixel) במודל זה הוא 625 מ"ר (25 מטר × 25 מטר). הדיוק האופקי 10 - 50 מטר והדיוק האנכי, בהסתברות של כ- 80%, עד ±5 מטר (Hall et al., 1999). עוצמת השיפוע הטופוגרפי של המדרונות באזור העבודה נקבעה על ידי חישוב השיפוע של כל תא ממ"ג אל שמונת התאים שסביבו ולקיחת הערך המקסימאלי (פונקציית slope בממ"ג תכנת ArcView). לאחר החישוב, כל תא ממ"ג קיבל ערך של שיפוע במעלות, בין 0° ל- 90°. מעבודות קודמות ידוע כי שיפוע המחושב ממודל טופוגרפי נוטה להמעיט מערך השיפוע עבור מדרונות תלולים, מעל 60° (Jibson et al., 1998). כיוון השיפוע הטופוגרפי נקבע ככיוון במרחב בו חושבה עוצמת השיפוע המקסימאלית (פונקציית aspect בממ"ג), והוא מקבל בכל תא ממ"ג ערך בין 1° ל- 360° המציין את הכיוון במרחב במעלות (אזימוט).

כמות וכיוון נטיית המבנה הגיאולוגי באזור העבודה חושבו בממ"ג מתוך מערך גיאוגרפי המציג את הגובה (מטרים מעל פני הים) של גג חבורת יהודה, שנערך על ידי Fleischer and Gafsou (2003). ההנחה היא כי האופי הסטרוקטורלי של גג חבורת יהודה מייצג בצורה סבירה את הסלעים החשופים באזור העבודה עד גיל קנומן-טורון (לאזורי חשיפה של סלעים שאינם בטוח גילים זה או אשר אינם מכוסים על ידי המפה של Fleischer and Gafsou, 2003, לא נקבעה נטיית מבנה).

נקודות הדגימה במערך של Fleischer and Gafsou (2003) נמצאות במרחק אופקי של 250 מטר אחת מהשנייה. בשלב ראשון, חושב מודל שטח ספרתי (D.T.M) בעל גודל תא של 250×250 מ"ר ממערך הנקודות של Fleischer and Gafsou (2003), כאשר כל נקודה של המערך נמצאת במרכזו של תא ממ"ג. ממודל השטח הספרתי חושבו כמות וכיוון נטיית המבנה בכל תא ממ"ג בעזרת פונקציות הממ"ג Slope ו- Aspect (אופן הפעולה של הפונקציות פורט לעיל).

ההעתיקים באזור העבודה מסיטים אנכית את סלעי חבורת יהודה וגורמים לאי רציפות במשטח גג חבורת יהודה. העתקה זו משפיעה על נטיית המבנה המחושבת בקרבת ההעתיקים וגורמת לה להיות שגויה. על מנת להתגבר על שגיאה זו, אזור ברוב 50-300 מטר בניצב לכל העתק (כתלות בכמות ההסטה האנכית של כל העתק) נקבע בשלב ראשון כתחום אסור לחישוב של נטיית המבנה. בשלב הבא חושבו מחדש כמות וכיוון נטיית המבנה בעזרת פונקציית הממ"ג IDW, כאשר בכל תא ממ"ג הגובל באזור העתק לא התבצע חישוב נטייה ביחס לתא ממ"ג סמוך המצוי בתחום אזור ההעתק. בהמשך, נטיית המבנה (כמות וכיוון) באזור ההעתק נקבעה על ידי אקסטרפולציה מקצה האזור לעבר ההעתק, עבור כל צד של ההעתק בנפרד. על מנת ליצור התאמה בין רובדי שיפוע המדרונות ונטיית המבנה הגיאולוגי, הרבדים החדשים של כמות וכיוון נטיית המבנה (שחושבו בעזרת פונקציית IDW) בנויים מתאי ממ"ג בגודל 25×25 מ"ר (גודל תא זה הוא מפורט ביתר ביחס למערך הנתונים המקורי של Fleischer and Gafsou (2003), אך פעולה זו עדיפה על ניוון מודל השטח הספרתי של הטופוגרפיה מגודל תא של 25×25 מ"ר ל- 250×250 מ"ר).

2.2 מפת היחידות הגיאוטכניות באזור העבודה.

על מנת לנתח את הסכנה לגלישת מדרון, יש לקבוע את האופי המכאני של הסלעים החשופים בשטח העבודה. לצורך זה, ממירים את מפת הבסיס הגיאולוגית (Sneh et al., 1998) למפה גיאוטכנית על ידי הקצת מספר יחידות-מיפוי גיאולוגיות בעלות אופי מכאני דומה ליחידות-מיפוי גיאוטכניות. יחידות-המיפוי הגיאולוגיות החשופות באזור העבודה חולקו ל- 5 יחידות-מיפוי גיאוטכניות (GT): ביחידה

גיאוטכנית 1 כלולים הסלעים החזקים ביותר: דולומיט וגיר (טבלא 1). ביחידות הגיאוטכניות 2 עד 5 כלולים סלעים בעלי חוזק הולך ויורד, כאשר ביחידה גיאוטכנית 5 קובצו בעיקר קרקעות וחומרים גיאולוגיים בלתי מלוכדים. מפה של היחידות הגיאוטכניות מופיעה באיור 2.

טבלא 1. יחידות גיאוטכניות

יחידות-מיפוי של המפה הגיאולוגית בקנ"מ 1:200,000 (Sneh et al., 1998)	מסלע עיקרי	GT
Bina Fm. (Turonian); Cenomanian - Turonian in Lebanon; Sakhnin and Yanuh Fms. (Cenomanian); Yagurand Kammon Fms. (Albian-Cenomanian); Beer Sheva and Haluza Fms. (Upper Jurassic); Hermon Fm. (Middle Jurassic)	דולומיט, גיר	1
Bar Kokhba Fm. (Middle Eocene); Timrat, Meroz and Yizre'el fms. (Lower - Middle Eocene); Adulam Fm. (Lower Eocene); Eocene; Deir Hanna Fm. and Chalk and limestone rock units in Mt. Carmel (Cenomanian);	גיר (קרטוני)	2
Cover and Dalwe Basalts (Pliocene - Pleistocene) ¹ ; Dalton Basalt (Pliocene); Travertine (Quaternary) ¹ ; Yarmouk, Naharayim, Golan, Raqqad, Hasbani, Yarda Basalt, Wa'ara Basalts (Quaternary) ¹ ; Hordos Fm.; Um Sabune Conglomerate; Kefar Gil'adi Fm. (Miocene) ¹ ; Ziqlag Fm. (Miocene) ¹ ; Lower and part of Intermediate Basalts (Miocene) ¹ ; Conglomerate units, undivided (Neogene - Quaternary) ¹ ; Volcanic rocks, undifferentiated (Miocene and Pliocene) ¹ ; Susita Fm. (Oligocene) ¹ ; Maresha Fm. (Middle Eocene); Mount Scopus Group (Senonian - Paleocene); Mishash Fm. (Campanian) Isfiya Fm. in Carmel (Cenomanian) ² ; Volcanic rocks, undifferentiated (Upper Cretaceous); Kurnub Group (Lower Cretaceous); Basalt flows and volcanoclastics, Tayasir Volcanics (Lower Cretaceous); Intrusions and volcanoclastic rocks (Mesozoic);	קירטון, צור, בזלת, קונגלומרט	3
Gadot, Mishmar HaYarden, Erq el Ahmar and Ubediye Fms. (Pliocene-Pleistocene); Bira, Gesher, Kurdani Fms. (Pliocene); Benot Ya'akov Fm. (Quaternary); Volcanic cone (Quaternary); Calcareous sandstone, "kurkar"(Quaternary); Intrusive and pyroclastic rocks - (Miocene); Ghareb and Taqiye Fms. (Maastrichtian - Paleocene); Nabi Sa'id, Ein el Assad, Hidra, Rama and Kefira Fms. (Lower Cretaceous); Kidod Fm. (Upper Jurassic);	חרסית, חואר, אבני-חול מלוכדות חלש, כורכר, פירוקלאסטים	4
Anthropogenic deposit (Holocene) ³ ; Alluvium and Sand dunes (Holocene); Lisan Fm. (Quaternary); Landslide (Quaternary) ³ ; Red sand and loam, "hamra" (Quaternary);	אלוביום, קרקעות עתיקות, דיונות, חומר בלתי-מלוכד, גלישות	5

1. מופיעים במפה באיור 2 כ- 3a; ראה הערה 3 בטבלא 2.

2. מתוך Karcz (1959).

3. מתוך Katz and Crouvi (2003).

2.3 מפת טיפוס כשל המדרון האפשרי הסביר ביותר

בשלב זה, מנותח האופי הגיאולוגי והטופוגרפי של כל מדרון (למעשה, כל תא ממ"ג) ומוגדר טיפוס כשל המדרון האפשרי הסביר ביותר (טיפוסי הכשל השונים פורטו בסעיף 1.1, לעיל). עבור כל טיפוס כשל, קיימים גורמים אחרים (גיאולוגיים או טופוגרפיים) הקובעים את יציבות המדרון. על כן, יש חשיבות באפיון טיפוס הכשל האפשרי הסביר ביותר בכל מדרון ומדרון כאשר מבצעים חישוב או הערכת יציבות. כך למשל, בגלישת סלע הגורם המכאני העיקרי הקובע את היציבות הוא חוזק מישורי השכוב. לעומת זאת, בגלישה רוטציונית חוזק הסלע עצמו קובע את היציבות.

בפועל, בשלב ראשון נבחן השיפוע הטופוגרפי בכל תא ממ"ג באזור העבודה והמדרונות חולקו לשלוש קבוצות: שיפוע זניח ($<5^\circ$), שיפוע בינוני ($5^\circ-40^\circ$) ושיפוע תלול ($>40^\circ$). בהמשך נקבע טיפוס הכשל האפשרי הסביר ביותר באופן הבא: כאשר חשופים סלעים במדרונות עם שיפוע זניח לא צפוי כשל (טיפוס כשל: **אין כשל**); כאשר חשופים סלעים חלשים (GT-4 – GT-5) במדרונות בעלי שיפוע בינוני, מנגנון הכשל הסביר ביותר הוא **גלישה רוטציונית** (בהנחה שמישורי השכוב, אם קיימים, לא חלשים ממסת הסלע). כאשר חשופים במדרונות אילו סלעים חזקים (GT-1 – GT-2) מנגנון הכשל הסביר ביותר הוא **גלישת סלע** על מישורי השכוב. על מנת שיתרחש כשל כזה נדרשים להתקיים שני תנאים קינמטיים (ובנוסף גם תנאי מכאני, המעריך את חוזק הסלע ביחס למאמצים הפועלים עליו, אשר אינו נבחן במסגרת העבודה הנוכחית): תנאי ראשון: קיים רכיב שיפוע של מישור השכוב, אמיתי (true dip) או מדומה (apparent dip), בכיוון השיפוע הטופוגרפי. תנאי זה מבטיח אפשרות תנועה של מסת סלע במורד מישור השכוב. תנאי שני, עוצמת השיפוע של מישור השכוב (בכיוון המדרון) קטנה משיפוע המדרון. תנאי זה מבטיח חשיפה של מישור הגלישה אל החלל, אליו חומר המדרון יכול לנוע (Day lighting). במצב בו אחד מהתנאים הקינמטיים לא מתקיים, כשל מדרון במנגנון של גלישת סלע לא אפשרי. בפועל, בכל תא ממ"ג, התנאי הקינמטי הראשון מתקיים אם כיוון השיפוע (aspect) של מישור השכוב שווה לכיוון השיפוע הטופוגרפי $\pm 45^\circ$ (עוצמת השיפוע המדומה בכיוון 45° מהשיפוע האמיתי בטווח שיפועי השכוב הקיימים היא כ- 70% מעוצמת השיפוע האמיתי. לעומת זאת, עוצמת השיפוע המדומה בכיוון 60° מהשיפוע האמיתי בטווח שיפועי השכוב הקיימים היא כ- 55% מעוצמת השיפוע האמיתי. על כן נבחר הערך של 45° כהפרש המרבי בין כיוון השיפוע של מישור השכוב וכיוון השיפוע הטופוגרפי בו מתקיים התנאי הקינמטי הראשון). התנאי הקינמטי השני מתקיים כאשר עוצמת השיפוע של השכוב (אמיתי או מדומה) בכיוון שיפוע המדרון קטנה משיפוע המדרון. אם אחד מהתנאים הקינמטיים לא מתקיים מנגנון הכשל האפשרי הוא נפילת סלע או גלישה רוטציונית, אך התנאים להיווצרות הכשל גבוליים שכן המדרונות בתלילות בינונית בלבד ($>40^\circ$) והסלע חזק (GT-1 – GT-2). במצב זה ממופה האזור כבעל **תנאים גבוליים** להיווצרות נפילת סלע או גלישה רוטציונית (כאשר אין נתונים לגבי המבנה טיפוס הכשל ב-GT-1 ו-GT-2 נקבע בצורה שמרנית **כגלישת סלע משוערת**). ב-GT-3, טיפוס הכשל הוא גלישת סלע כאשר מתקיימים התנאים הקינמטיים או גלישה רוטציונית כאשר אחד מהתנאים לא מתקיים (כאשר אין נתונים לגבי המבנה טיפוס הכשל ב-GT-3 נקבע בצורה שמרנית כגלישת רוטציונית). בנוסף, קיימות ב-GT-3 יחידות אשר טיפוס הכשל עבורן הוא גלישה רוטציונית ללא תלות במבנה (מסומנות ב-1) בטבלא 1).

במדרונות תלולים ($>40^\circ$), מנגנון הכשל הסביר ביותר הוא **נפילת סלע** (עבור כל היחידות הגיאוטכניות). מפה של טיפוס הכשל האפשרי הסביר ביותר בכל מדרון באזור העבודה מופיעה באיור 3.

2.4 מפה של התאוצה הקריטית לכשל

בשלב זה עורכים מפה של התאוצה הקריטית לכשל. מפה זו, מציגה את התאוצה האופקית המינימאלית הדרושה על מנת להביא לאי יציבות בכל מדרון (תא ממ"ג) באזור העבודה. המפה משקפת למעשה את הסכנה-היחסית (רגישות) לכשל מדרון מאחר ולמדרונות עם תאוצה קריטית מחושבת נמוכה נדרשת תאוצה נמוכה ממקור סיסמי על מנת ליצור אי יציבות, ואילו מדרונות עם תאוצה קריטית מחושבת גבוהה יהיו יציבים גם ברעידת אדמה חזקה וקרובה.

בנוסף, מפת התאוצה הקריטית מהווה תשתית ליצירת תרחישי רעידות אדמה בשיטת Newmark (Newmark, 1965; Jibson et al., 2000; כץ וקרובי, 2003) או בעזרת תוכנות תרחישים כגון HAZUS (<http://www.fema.gov/plan/prevent/hazus/index.shtm>), (NessQuake או GNA (Almog and Katz, 2007).

תכנת התרחישים HAZUS כוללת תהליך לקביעת התאוצה הקריטית לכשל בכל מדרון (תא ממ"ג) בשטח העבודה (סעיף 4.2.2.2 ב- Technical Manual של HAZUS99), על ידי שקלול של סוג הסלע החשוף (מוצעות שם שלוש דרגות גיאוטכניות) ועוצמת השיפוע הטופוגרפי. במסגרת העבודה הנוכחית נכללו מספר תוספות בתהליך המוצע על ידי HAZUS:

1. הוגדל מספר הדרגות הגיאוטכניות לחמש, על מנת ליצור פירוט רב יותר בתחום הסלעים החזקים.
2. לתהליך קביעת התאוצה הקריטית לכשל הוכנס שקלול של כיוון נטיית המבנה ביחס לטופוגרפיה וכן בחינה של טיפוס כשל המדרון הצפוי הקובע למעשה את הגורמים המשפיעים על כשל המדרון.
3. התבצע כיוול של התהליך תוך השוואה של המיפוי הנוכחי למיפוי תאוצה קריטית לכשל בשיטת Newmark ובקנה מידה מפורט יותר שנעשה על חלקים משטח העבודה.

בטבלא 2 מופיעות דרגות הרגישות (סכנה-יחסית) לגלישת מדרון כתלות בדרגה הגיאוטכנית (יחידות מסלע עיקריות), טיפוס הכשל ושיפוע המדרון או המבנה הגיאולוגי (קיימות עשר דרגות רגישות לכשל מדרון, מ-I המציינת רגישות נמוכה מאוד עד X המציינת רגישות גבוהה מאוד). דרגת הרגישות לכשל מתורגמת לתאוצה קריטית לכשל לפי טבלא 3. ארגון הטבלאות כלל השוואה של תוצרי התהליך הנוכחי עם מפות תאוצה קריטית לכשל של אזור חיפה ואזור צפת (קני"מ 1:50,000) שחושבו בשיטת Newmark (כך וכרובי, 2003; כך ואלמוג, 2006) וכיוול של הנתונים בטבלאות 2 ו-3 (שינוי עדין של הערכים) עד קבלת מתאם מרבי.

במסגרת הכנת מפות התאוצה הקריטית לכשל בקני"מ 1:50,000, נערכה עבודת שדה נרחבת לאיתור וניתוח טיפוסים כשל המדרון האופייניים לצפון ישראל. כיוול התהליך הנוכחי למפות בקני"מ 1:50,000 מכייל את למעשה התהליך לתופעות השדה.

כאשר נטיית שיפוע המדרון זניחה ($< 5^\circ$), לא צפוי כשל מדרון ואין רגישות לגלישת מדרון עבור כל טיפוסים הסלעים (טבלא 2). כאשר נטיית שיפוע המדרון תלולה ($< 40^\circ$), טיפוס הכשל הצפוי הוא נפילת סלע והרגישות לגלישת מדרון היא IX, ו-X עבור הסלעים החזקים (GT-1 עד GT-3) והחלשים (GT-3 עד GT-5), בהתאמה.

כאשר נטיית שיפוע המדרון בינונית ($5^\circ - 40^\circ$) ויש תנאים לגלישת סלע במדרונות בהם חשופים הסלעים החזקים: GT-1 ו-GT-2 (לפירוט התנאים ראה לעיל), דרגת הרגישות עולה עם עליית השיפוע של המבנה מאין רגישות בנטיית מבנה של 10° ל-VIII בנטיית מבנה של 30° ; כאשר התנאים לגלישה גבוליים, אין רגישות לגלישה ב-GT-1 ו-GT-2. עבור הסלעים ב-GT-3, דרגת הרגישות עולה עם עליית השיפוע של המבנה או המדרון: כאשר טיפוס הכשל הוא גלישת סלע הרגישות עולה מאין רגישות בנטיית מבנה של 10° ל-VIII בנטיית מבנה של 30° ; כאשר טיפוס הכשל הוא גלישה רוטציונית הרגישות עולה מ-II בשיפוע מדרון של 10° ל-VIII בשיפוע של 30° . בסלעים החלשים דרגת הרגישות עולה עם עליית השיפוע של המדרון מ-III בשיפוע של 5° ל-IX בשיפוע של 30° ב-GT-IV ומ-IV בשיפוע של 5° ל-X בשיפוע של 30° ב-GT-V.

טבלא 2⁽¹⁾. דרגות רגישות לגלישת מדרון.

GT	מסלע עיקרי	טיפוס הכשל ⁽²⁾	זווית המדרון או המבנה (מעלות)						
			>40	40-30	30-20	20-15	15-10	10-5	5-0
1	דולומיט, גיר ⁽³⁾	גלישת סלע	IX	VIII	IV	III	I	אין	אין
		תנאים גבוליים	IX	אין	אין	אין	אין	אין	אין
2	גיר (קרטוני) ⁽³⁾	גלישת סלע	IX	VIII	V	IV	II	אין	אין
		תנאים גבוליים	IX	אין	אין	אין	אין	אין	אין
3	קירטון, צור, בזלת, קונגלומרט ⁽⁴⁾	גלישת סלע	IX	VIII	VI	V	III	אין	אין
		גלישה רוטציונית	X	VIII	VI	V	IV	II	אין
4	חרסית, חואר, אבני-חול מלוכדות חלש, כורכר, פירוקלאסטים	גלישה רוטציונית	X	IX	VIII	VII	VI	III	אין
5	אלוביום, קרקעות עתיקות, דיונות, חומר בלתי-מלוכד, גלישות	גלישה רוטציונית	X	X	IX	VIII	VII	IV	אין

1. טבלא זו היא הרחבה של טבלא 4.15 ב- Technical Manual של HAZUS-MH MR1.
2. כאשר שיפוע המדרון $> 5^{\circ}$ ו- $< 40^{\circ}$, טיפוס הכשל הוא אין-כשל ונפילת סלע, בהתאמה. אחרת טיפוס הכשל נקבע כפי שהוסבר לעיל.
3. כאשר אין נתונים לגבי המבנה טיפוס הכשל הוא גלישת סלע. אחרת טיפוס הכשל נקבע כפי שהוסבר לעיל.
4. טיפוס הכשל עבור סלעים צעירים מאיאוקן (מופיעים בטבלא 1 עם '(1)') או שאין נתונים לגבי המבנה הוא גלישה רוטציונית. אחרת טיפוס הכשל נקבע כפי שהוסבר לעיל.

טבלא 3⁽¹⁾. תאוצה קריטית לכשל (g) עלפי דרגת רגישות לגלישת מדרון.

דרגת רגישות	אין	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
תאוצה קריטית (g)	אין	0.60	0.50	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05

1. טבלא זו עוקבת אחרי טבלא 4.17 ב- Technical Manual של HAZUS-MH MR1.

3. מפת הסכנה- היחסית לגלישות מדרון

מפת דרגות הרגישות (סכנה-יחסית) לגלישת מדרון של אזור העבודה (גיליון צפוני של המפה הגיאולוגית בקני"מ 1:200,000) מופיעה באיור 3. מפת התאוצה הקריטית לכשל של אזור העבודה (המרה של דרגת הרגישות תוצר טבלא 2 בעזרת טבלא 3) מופיעה באיור 4. ניתן להבחין במספר אזורים עיקריים הנמצאים בסכנה-יחסית גבוהה:

1. הנחלים היורדים מרכס החרמון.
2. צפון רכס רמים.
3. הגולן: התילים הגעשיים והמורדות לכיוון עמק החולה, הירמוך ועמק הירדן.
4. הגליל: אזור צפת, המורדות לכיוון הכנרת, מזרח בקעת בית הכרם, אזור חזון – מעיר ואזור נטופה.
5. מורדות הגלבע לכיוון עמק יזרעאל ועמק בית שאן.
6. רכס הכרמל, המורדות לכיוון מפרץ חיפה, עמק יזרעאל וואדי ערה.

כאמור, מפות הרגישות לגלישת מדרון והתאוצה הקריטית לכשל הן מפות אזורית המציגות את האזורים הנמצאים בסכנה-יחסית גבוהה להתפתחות גלישת מדרון כאשר הגורם המפעיל הוא רעידת אדמה. ייעוד המפות הוא לשמש עזר למתכנן-האזורי על מנת לאפשר חלוקה של ייעודי השטח בהתאמה לסכנה הסיסמית הקיימת. המפה לא באה לייתר או להחליף הערכה פרטנית של הסכנה לגלישות מדרון בשלב תכנון הנדסי של מבנה בודד.

4. אזורי ישוב הנמצאים בסיכון (Risk)

תאוצה קריטית נמוכה מ-0.30g (דרגת רגישות V ומעלה) נקבעה בעבודה הנוכחית כסף הסכנה-היחסית (Relative-Hazard) לקביעה של קיום סיכון (Risk) למרכז אוכלוסין. באזור העבודה נמצאו 202 מרכזי אוכלוסין (ערים, עיירות וכפרים) הכוללים בשטחם מדרונות הנמצאים בסכנה-יחסית מעל סף הסיכון. על מנת להעריך את רמת הסיכון במרכז אוכלוסין מסוים, ניתן להעלות במערכת מידע גיאוגרפי את מפת התאוצה הקריטית (מצורפת בתקליטור בכריכה האחורית) מעל גבי מפת כללית של צפון ישראל.

5. סיכום

בעבודה הנוכחית נותחה הסכנה להתפתחות גלישות מדרון בצפון ישראל בקנה-מידה של 1:200,000, תוך שקלול הגורמים העיקריים הקובעים את יציבות המדרונות: השיפוע הטופוגרפי, המבנה הגיאולוגי, היחס בין הטופוגרפיה והמבנה וסוג הסלע החשוף (ההתייחסות בשלב זה היא לרעידות אדמה כגורם המפעיל את הגלישות בלבד). המפה נערכה על פי שיטת העבודה הכלולה בתוכנת התרחישים HAZUS, תוך התאמה של השיטה לסוג הסלעים החשופים בישראל וכיול על בסיס עבודות קודמות בקני"מ מפורט יותר. מפות הסכנה (רגישות לכשל מדרון ותאוצה קריטית לכשל) מצורפות בגרסת מ"ג על גבי תקליטור (גב הכריכה האחורית). בצפון ישראל נמצאו 202 מרכזי אוכלוסין הכוללים בשטחם מדרונות בדרגת סכנה גבוהה להתפתחות כשל מדרון ברעידת אדמה (תאוצה קריטית: $>0.30g$; דרגת רגישות: V ומעלה). בנוסף על שימושים בתחום התכנון האזורי כפי שתקן הבנייה החדש דורש, ניתן להשתמש במפת התאוצה הקריטית ליצירת תרחיש נזק נפגעים ברעידת אדמה בעזרת תכנות תרחישים או בשיטת Newmark.

קנה-המידה של עבודה זו הוא אזורי, התוצאות ומפות הסכנה המובאות כאן לא באות להחליף או ליייתר סקרים מקומיים מפורטים יותר הנדרשים לצרכי פיתוח הנדסי ובנייה. מפות הסכנה תהינה זמינות לציבור באתר האינטרנט של המכון הגיאולוגי (<http://www.gsi.gov.il>). המפות תעודכנה מעת לעת ומומלץ לפני שימוש במפות לבדוק באתר האינטרנט האם המפות התעדכנו.

7. מקורות

- אבני, י., זילברמן, ע., שירב-שוורץ, מ., כץ, ע., בן משה, ל., 2005. תגובת המערכת הגיאומורפית לרידת מפלס ים המלח וההשלכות על התשתית ההנדסית לאורך חופו המערבי. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/18/04.
- אבני, ר., 1999. רעידת האדמה של שנת 1927; מחקר מאקרוסיימי על בסיס מקורות התקופה. עבודת מוסמך, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב.
- וקס, ד., סימן טוב, ע., 1991. הערכה ראשונית של הסיכון הסיימי בעיר חיפה ובעמק זבולון. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/31/91.
- כץ, ע., כרובי, א., 2003. הערכת הסכנה לגלישות מדרון בזמן רעידת אדמה חלק א: גיליון צפת. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/25/2003.
- כץ, ע., 2004. הערכת הסכנה לגלישות מדרון בזמן רעידת אדמה באזור העיר ירושלים. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/12/2004.
- כץ, ע., פנחסי, ג., 2004. הערכת הסכנה לגלישות מדרון בזמן רעידת אדמה באזור חיפה וצפון הכרמל. המכון הגיאולוגי, דוח TR-GSI/08/2004.
- כץ, ע., וינברגר, ר., פנחסי, ג., 2004. הערכת הסכנה לגלישות מדרון בעת רעידת אדמה בשטח גיליון מטולה של המפה הטופוגרפית (1: 50,000). המכון הגיאולוגי, דוח TR-GSI/12/2004.
- כץ, ע., אלמוג, ע., 2006. הערכת הסכנה לגלישות-מדרון בעיר בחיפה ובצפון רכס הכרמל בעת רעידת אדמה. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/03/2006.
- כרובי, א., 2001. מערכת מידע גיאוגרפי (G.I.S) ככלי להערכת סיכוני גלישה בישראל. החברה הגיאולוגית הישראלית. הכנס השנתי, אילת, 66.
- סלמון, ע., כץ, ע., כרובי, א., 2003. סיכוני רעידות אדמה בירושלים. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/21/2003.
- ציון, כ., כץ, ע., בן אברהם, צ., 2004. הערכת הסכנה לגלישות מדרון בזמן רעידת אדמה בשטח גיליונות ארבל וטבריה של המפה הטופוגרפית (1: 50,000). המכון הגיאולוגי, דוח GSI/26/04.
- Almog, E., Katz, O. 2007. GNA: A GIS based Newmark Analysis tool for evaluation of earthquake-induced landslide hazard in Israel. Geological Survey of Israel: <http://www.gsi.gov.il> (in preparation).
- Bucknam, R. C., Coe, J. A., Chavarria, M. M., Godt, J. W., Tarr, A. C., Bradley, L., Rafferty, S., Hancock, D., Dart, R. L., Johnson, M. L., 2001. Landslides Triggered by Hurricane Mitch in Guatemala -- Inventory and Discussion. U.S. Geological Survey Open-File Report 01-0443.
- Fleischer, L., Gafsou, R., 2003. Top Judea Group digital structural map of Israel. The geophysical Institute of Israel, Report 753/312/03.
- Guzzetti, F., 2000. Landslide fatalities and the evaluation of landslide risk in Italy. Eng. Geol., 58, 89-107.
- Hall, J. K., 1993. The GSI digital terrain model (DTM) completed. In R. Bogoch and Y. Eshet (Eds.), GSI Current Research 8, 47-50.
- Hall, J. K., Weinberger, R., Marco, S., Steinitz, G., 1999. Test of the accuracy of the DTM of Israel. Geological Survey of Israel, Report TR-GSI/1/99.
- Jibson, R. W., Harp, E. L., Michael, J. A., 1998. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps; an example from the Los Angeles, California, area. Open-File Report - U. S. Geological Survey, OF 98-0113.
- Jibson, R. W., Harp, E. L., Michael, J. A., 2000. A method for producing probalistic seismic landslide hazard maps, Eng. Geol., 58, 271-289.
- Karcz, Y., 1959. The structure of the Northern Carmel. The Bulletin of the Research Council of Israel, 8G, 119-130.
- Keefer, D. K., 1984. Landslides caused by earthquakes. Geol. Soc. Am. Bull., 95, 406-421.
- Keefer, D. K., 2000. Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distribution – the Loma Prieta, California event. Eng. Geol., 58, 231-249.
- Newmark, M. N., 1965. Effects of earthquakes on dams and embankments. Geotechnique, 15 (2) 139-160.

- Ritter, D. F., Kochel, R. C., Miller, J. R., 1995. Process geomorphology. William C. Brown communications, 3rd edition.
- Salamon, A., 2005. Natural seismogenic effect of the 11 February 2004, $M_L=5.2$, Dead Sea earthquake. Israel Journal of Earth Sciences 54, 145-170.
- Sneh, A., Bartov, Y., Rosensaft, M., 1998. Geological map of Israel, 1:200,000 scale, Geological Survey of Israel.
- Sneh, A., Rosensaft, M., Hoyland, S., 2002. Ground condition map of Haifa district. Geological Survey of Israel, Current Research 13, 34-37.
- Wachs, D., Levitte, D., 1981. Earthquake induced landslides in the Galilee. Isr. J. Earth Sci., 30, 39-43.
- Wiseman, G., Hayati, G., Frydman, S., Aisenstein, B., David, d., Flexer, A., 1970. A study of landslide in the Galilee, Israel. Technion, Faculty of Civil Engineering. Publication no. 146.
- Wust-Bloch, H., Wachs, D., 2000, Seismic triggering of unstable slopes in northern Israel. Isr. J. Earth Sci., 49, 103-109.