



משרד התשתיות הלאומיות

המכון הגיאולוגי

# **בסיס נתונים עבור תכנת HAZUS לתרחישי רעידות אדמה בישראל: מפה גיאוטכנית ומפה של רגישות המדרונות לכשל**

**עודד כץ, הגר הכט ועדן אלמוג**

מוגש לועדת ההיגוי

להיערכות וטיפול ברעידות אדמה

## תוכן העניינים:

### עמוד

1	1. הקדמה
1	2. שיטות העבודה
1	2.1 מפה גיאוטכנית (Site class)
2	2.2 מפה רגישות לכשל מדרון
10	3. תוצאות
10	3.1 מפה גיאוטכנית (Site class)
12	3.2 מפה רגישות לכשל מדרון
12	4. סיכום
14	5. מקורות

## 1. הקדמה

תוכנת HAZUS<sup>1</sup> נחשבת לתוכנה המובילה להערכת נזקי אסונות טבע בכלל ונזקי רעידות אדמה בפרט (לדוגמא, Field et al., 2005; Kricher et al., 2006). התוכנה פותחה ע"י הרשויות האמריקניות: Federal Emergency Management Agency (FEMA) ו-National Institute of Building Sciences (NIBS). הערכות הנזקים כוללות אומדני נזקים ישירים (מבנים, תשתיות וכו'), אומדני נזקים נלווים (השפעת חומרים מסוכנים, שריפות וכו'), אומדני נפגעים ואומדני נזקים כלכליים. מדינות רבות, כגון טורקיה, טייוואן, נורבגיה וספרד, בחרו ליישם את תוכנת HAZUS, או את שיטות התוכנה, במערכי החירום שלהן. בארה"ב השימוש בתוכנה נרחב והוכיח את יעילותו בתכנון, בהערכות ובטיפול במצבי חירום.

בישראל, במסגרת ועדת ההיגוי להערכות וטיפול ברעידות אדמה הוחלט, להכין תרחישי נזק-נפגעים לרעידות אדמה חזקות בישראל בעזרת תוכנת הערכת נזקי אסונות HAZUS. להחלטה, קדמה בדיקת התכנות של הפעלת התכנה בישראל (טברון וחובי, 2007). התרחישים שיתקבלו בעזרת התכנה יוכלו לשמש בסיס לקביעת תרחיש-ייחוס לאומי, וכן להערכת סוג והיקף פעולות החירום שידרשו לאחר רעידת אדמה חזקה.

בדוח זה מוצג בסיס-נתונים גיאולוגיים הנדרש להפעלת התכנה בישראל. בסיס הנתונים מכסה את כל שטח מדינת ישראל והוא כולל מפה גיאוטכנית (Site class) ומפת רגישות לכשל מדרון המשמשת להערכת תגובת מדרונות לרעידת אדמה (המפות מופיעות בגרסת ממ"ג בתקליטור בכריכה האחורית). גרסאות מוקדמות של מפת רגישות לכשל מדרון של צפון ומרכז ישראל הוצגו בכך ואלמוג, 2006 וכך וחובי, 2008.

## 2. שיטות העבודה

### 2.1 מפה גיאוטכנית (Site class)

המפה הגיאוטכנית הוכנה על ידי הקבצה של יחידות המיפוי הגיאולוגיות של Sneh et al. (1998) למפה הכוללת 4 יחידות גיאוטכניות (D – A, ע"פ קטגוריות NEHRP 1997; טבלא 1) המשקפות את אופי הסלע ב-30 המטר העליונים של חתך הסלעים. יחידה גיאוטכנית A כוללת סלעים חזקים ( $V_s > 1500$  m/sec) ויחידה D כוללת סלעים חלשים ( $V_s = 180-360$  m/sec).

<sup>1</sup> 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> ).

**טבלא 1. אפיון היחידות הגיאוטכניות (Site Class) על פי NEHRP (1997). הסלעים החשופים בשטח ישראל כוללים רק יחידות בין A ל-D.**

Site Class	Site Class Description	Shear Wave Velocity (m/sec)	
		Minimum	Maximum
A	<b>HARD ROCK</b> Eastern United States sites only	1500	
B	<b>ROCK</b>	760	1500
C	<b>VERY DENSE SOIL AND SOFT ROCK</b> Untrained shear strength $u_s \geq 2000$ psf ( $u_s \geq 100$ kPa) or $N \geq 50$ blows/ft	360	760
D	<b>STIFF SOILS</b> Stiff soil with undrained shear strength $1000 \text{ psf} \leq u_s \leq 2000$ psf ( $50 \text{ kPa} \leq u_s \leq 100 \text{ kPa}$ ) or $15 \leq N \leq 50$ blows/ft	180	360
E	<b>SOFT SOILS</b> Profile with more than 10 ft (3 m) of soft clay defined as soil with plasticity index $PI > 20$ , moisture content $w > 40\%$ and undrained shear strength $u_s < 1000$ psf (50 kPa) ( $N < 15$ blows/ft)		180
F	<b>SOILS REQUIRING SITE SPECIFIC EVALUATIONS</b> 1. Soils vulnerable to potential failure or collapse under seismic loading: e.g. liquefiable soils, quick and highly sensitive clays, collapsible weakly cemented soils. 2. Peats and/or highly organic clays (10 ft (3 m) or thicker layer) 3. Very high plasticity clays: (25 ft (8 m) or thicker layer with plasticity index $> 75$ ) 4. Very thick soft/medium stiff clays: (120 ft (36 m) or thicker layer)		

ההקבצה של יחידות המיפוי הגיאולוגיות ליחידות הגיאוטכניות נעשתה עבור כל גיליון מפה (1: 200,000) של Sneh et al. (1998) בנפרד (סה"כ ארבעה גיליונות), על מנת לשקף את אופי המסלע המשתנה של יחידות המיפוי על פני מרחב העבודה. פירוט החלוקה של יחידות המיפוי של Sneh et al. (1998) ליחידות הגיאוטכניות מופיע בטבלא 2.

## 2.2 מפה רגישות לכשל מדרון

בניית מפת רגישות להתפתחות גלישות מדרון בעת רעידת אדמה נעשתה בשלבים הבאים:

1. חישוב ומיפוי נטיית השיפוע הטופוגרפי והשיפוע של המבנה הגיאולוגי.
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).

### 2.2.1 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) (Hall, 1993) שימש בסיס טופוגרפי לעבודה הנוכחית. גודל תא הממ"ג (Pixel) במודל זה הוא 625 מ"ר (25 מטר  $\times$  25 מטר). הדיוק האופקי 10 - 50 מטר והדיוק האנכי, בהסתברות של כ- 80%, עד  $\pm 5$  מטר (Hall et al., 1999). השיפוע הטופוגרפי של המדרונות

טבלא 2. יחידות המיפוי הגיאוטכניות בישראל (Site Class על פי NEHRP 1997).

Mapping Unit	Age	Sheet (Sneh et al., 1998)				
		1	2	3	4	
Alluvium	Holocene	D	D	D	D	
Sand dunes		D	D	D	D	
Playa deposits	Quaternary				C	
Landslide		D		D		
Travertine		C		C		
Calcareous sandstone ("kurkar")		C	C	C		
Lisan Fm.		D	D	D		
Red sand and loam ("hamra")		D	D			
Yarmouk Basalt; Naharayim Basalt		B				
Volcanic cone		C				
Hasbani Basalt		B				
Yarda Basalt		B				
Golan Basalt; Raqqad Basalt		B				
Benot Ya`akov Fm.		C				
Zehiha Fm.; Lacustrine deposits		Neogene-Quaternary				C
Conglomerate units, undivided			B	B	B	B
Volcanic rock units, undifferentiated	Neogene	B	B	B		
Intrusive and pyroclastic rocks		C		B		
Samra Fm.	Plio-Pleistocene		D			
Gadot and Mishmar HaYarden fms.; Erq el Ahmar and Ubediye fms.		C				
Cover Basalt and Dalwe Basalt		B				
Sedom and Amora fms.	Pliocene			C		
Yafo Fm.			D			
Bira and Geshar fms.; Kurdani Fm.; Pleshet Fm.; Mazar Fm.		C	C	C		
Dalton Basalt		B				
Lower Basalt and part of Intermediate Basalt	Miocene	B	B			
Hordos Fm.; Um Sabune Conglomerate; Kefar Gil`adi Fm.		B	B	C	C	
Ziqlag Fm.		B	B	A		
Susita Fm.	Oligocene	B	B			
Qeziot and Har Aqrab fms.	Upper Eocene	A	A	B	B	
Timrat Fm.; Meroz and Yizre`el fms.	Lower-Middle Eocene	A	A			
Avedat Group)		x	B	B	B	
Bar Kokhba Fm.	Middle Eocene	A	A			
Maresha Fm.		B	B	B		
Adulam Fm.	Lower Eocene	A	A	A	A	
Nizzana, Horsha, Matred and Nahal Yeter fms.	Lower-Middle Eocene			B	B	
Eocene	Eocene	A				
Haturim Fm. ("Mottled Zone")	Senonian		B	B		
Taqiye Fm.	Paleocene		C	C		
Ghareb and Taqiye fms.	Maastrichtian - Paleocene		C	C	C	
Ghareb Fm.	Maastrichtian		B	B		
Mount Scopus Group -	Senonian - Paleocene	B	B			
Mishash Fm.	Campanian		B	B	B	
Menuha Fm.	Coniacian-Campanian		B	B	B	
Zihor Fm.	Concacion			A	A	
Bina Fm.; Derorim, Shivta and Nezer fms.; Ora and Gerofit fms.	Turonian	A	A	A	A	

Cenomanian - Turonian in Lebanon	Cenomanian-Turonian	A			
Sakhnin and Yanuh fms.; Weradim Fm.; Tamar Fm.	Cenomanian	A	A	A	A
Deir Hanna Fm.; Chalk and limestone rock units in Mt. Carmel; B. Meir, Moza, Amminadav and K. Shaul fms.; En Yorqe'am, Zafit and Avnon fms.		A	A	B	B
Yagur Fm.; Kammon Fm. -	Albian-Cenomanian	A	A	A	A
Hazera Fm. (Sinai); Naur, Fuheis and Hummar fms. (Jordan)					A
Volcanic rock units, undifferentiated	Lower Cretaceous	B			
Nabi Sa'id, Ein el Assad, Hidra, Rama and Kefira fms.		C	C		
Kurnub Group	Lower Cretaceous	B	B	B	B
Basalt flows and volcanics; Tayasir Volcanics		B	B	B	
Upper Jurassic	Upper Jurassic		A		
Be'er Sheva and Haluza fms.		A		B	
Kidod Fm.		C		C	
Hermon Fm.; Mahmal Fm.; Zohar and Matmor fms.	Middle Jurassic	A		B	
Inmar Fm.	Lower Jurassic			B	
Mishhor and Ardon fms.				A	
Mohila Fm.	Upper Triassic			B	
Saharonim Fm.	Middle Triassic			A	
Gevanim Fm.	Lower Triassic			A	
Ra'af Fm.				A	
Intrusions and volcanoclastic rocks	Mesozoic	B		B	B
Shehoret and Netafim Fms.	Cambrian				B
Amudei Shelomo and Timna Fms.					B
Yam Suf Group					B
Elat Conglomerate, Roded Conglomerate	Precambrian				A
Rhyolitic Quartz Porphyry					A
Andesite and Basalt flows					A
Timna Granite; Shahmon Granite; Yehoshafat Granite; Amram Granite Porphyry					A
Elat Granite, Roded Granite Porphyry; Timna Granite Porphyry					A
Syenite, Monzonite and other intermediate rocks					A
Gabbro, diorite and other basic rocks					A
Roded Quartz Diorite					A
Amphibolite (metabasite)					B
Granitic Gneiss					A
Taba Gneiss; Roded Quartz Diorite Gneiss, Schist and Migmatites					A
Elat Schist					B

באזור העבודה נקבע על ידי חישוב השיפוע של כל תא ממ"ג אל שמונת התאים שסביבו ולקיחת הערך המרבי (פונקציית slope בממ"ג תכנת ArcView). לאחר החישוב, כל תא ממ"ג קיבל ערך של שיפוע במעלות, בין  $0^{\circ}$  ל- $90^{\circ}$ . מעבודות קודמות ידוע כי שיפוע המחושב ממודל טופוגרפי נוטה להמעיט מערך השיפוע עבור מדרונות תלולים, מעל  $60^{\circ}$  (Jibson et al., 1998). כיוון השיפוע הטופוגרפי נקבע ככיוון במרחב בו חושבה עוצמת השיפוע המרבי (פונקציית aspect בממ"ג), והוא מקבל בכל תא ממ"ג ערך בין  $1^{\circ}$  ל- $360^{\circ}$  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 המבנה של גג חבורת יהודה מייצג בצורה סבירה את הסלעים החשופים באזור העבודה עד גיל קנומן-טורון (לאזורי חשיפה של סלעים שאינם בטווח גילים זה או שאינם מצויים במפה 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  $250 \times 250$  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. רובד כוון נטיית המבנה בעל גודל תא מקורי של  $250 \times 250$  מ"ר חולק לרובד בעל גודל תא  $25 \times 25$  מ"ר זאת על מנת להתאים לגודל התא במערך הטופוגרפי.

העתקים באזור העבודה מסיטים אנכית את סלעי חבורת יהודה וגורמים לאי רציפות במשטח גג חבורת יהודה. העתקה זו משפיעה על שיפוע המבנה המחושב בקרבת ההעתקים וגורמת לו להיות לשגיאה על כיוון הנטייה של המבנה בעקבות ההעתקה היא קטנה). על מנת להתגבר על שגיאה זו, אזור ברובד  $50 \times 300$  מטר בניצב לכל העתק (כתלות בכמות ההסטה האנכית של כל העתק) הוגדר בשלב ראשון כתחום אסור לחישוב של שיפוע המבנה. בשלב הבא חושב מחדש שיפוע המבנה בעזרת פונקציית הממ"ג Krigging, כאשר בכל תא ממ"ג הגובל באזור העתק לא התבצע חישוב שיפוע ביחס לתא ממ"ג סמוך המצוי בתחום אזור ההעתק. בהמשך, נקבע שיפוע המבנה באזור ההעתק על ידי אקסטרפולציה מקצה האזור לעבר ההעתק, וזאת עבור כל צד של ההעתק בנפרד. שיפוע המבנה (שחושב בעזרת פונקציית Krigging) בנוי מתאי ממ"ג בגודל  $25 \times 25$  מ"ר.

### 2.2.2 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 3). ביחידות הגיאוטכניות 2 עד 5 כלולים סלעים בעלי חוזק יורד והולך, כאשר ביחידה גיאוטכנית 5 קובצו בעיקר קרקעות וחומרים גיאולוגיים בלתי מלוכדים.

החלוקה למפה גיאוטכנית שפורטה בסעיף 2.1 (לפי NEHRP 1997) כוללת רק 4 יחידות בתחום הסלעים החשופים בישראל (טבלא 2) ולכן היא פחות מפורטת.

טבלא 3. יחידות המיפוי הגיאוטכניות בישראל (לצורך חישוב רגישות לכשל מדרונות).

Mapping Unit	Age	Sheet (Sneh et al., 1998)^			
		1	2	3	4
Alluvium	Holocene	5	5	5	5
Sand dunes		5	5	5	5
Playa deposits	Quaternary				4
Landslide		5		5	
Travertine		4		4	
Calcareous sandstone ("kurkar")		4	4	4	
Lisan Fm.		5	5	5	
Red sand and loam ("hamra")		5	5		
Yarmouk Basalt; Naharayim Basalt		3 <sup>1</sup>			
Volcanic cone		4			
Hasbani Basalt		3 <sup>1</sup>			
Yarda Basalt		3 <sup>1</sup>			
Golan Basalt; Raqqad Basalt		3 <sup>1</sup>			
Benot Ya`akov Fm.		4			
Zehiha Fm.; Lacustrine deposits		Neogene-Quaternary			
Conglomerate units, undivided	3		3	3	3
Volcanic rock units, undifferentiated	Neogene	3 <sup>1</sup>	3 <sup>1</sup>	3 <sup>1</sup>	
Intrusive and pyroclastic rocks		4		3 <sup>1</sup>	
Samra Fm.	Plio-Pleistocene		5		
Gadot and Mishmar HaYarden fms.; Erq el Ahmar and Ubediye fms.		4			
Cover Basalt and Dalwe Basalt		3 <sup>1</sup>			
Sedom and Amora fms.	Pliocene			4	
Yafo Fm.			5		
Bira and Geshet fms.; Kurdani Fm.; Pleshet Fm.; Mazar Fm.		4	4	4	
Dalton Basalt		3 <sup>1</sup>			
Lower Basalt and part of Intermediate Basalt	Miocene	3 <sup>1</sup>	3 <sup>1</sup>		
Hordos Fm.; Um Sabune Conglomerate; Kefar Gil`adi Fm.		3 <sup>1</sup>	3	4	4
Ziqlag Fm.		3 <sup>1</sup>	3 <sup>1</sup>	2	
Susita Fm.	Oligocene	3	3 <sup>1</sup>		
Qeziot and Har Aqrab fms.	Upper Eocene	2	2	3	3
Timrat Fm.; Meroz and Yizre`el fms.	Lower-Middle Eocene	2	2		
Avedat Group)		x	3	3	3
Bar Kokhba Fm.	Middle Eocene	2	2		
Maresha Fm.		3	3	3	
Adulam Fm.	Lower Eocene	2	2	2	2
Nizzana, Horsha, Matred and Nahal Yeter fms.	Lower-Middle Eocene			3	3
Eocene	Eocene	2			
Haturim Fm. ("Mottled Zone")	Senonian		3	3	
Taqiye Fm.	Paleocene		4	4	
Ghareb and Taqiye fms.	Maastrichtian - Paleocene		4	4	4
Ghareb Fm.	Maastrichtian		3	3	
Mount Scopus Group -	Senonian - Paleocene	3	3		
Mishash Fm.	Campanian		3	3	3
Menuha Fm.	Coniacian-Campanian		3	3	3
Zihor Fm.	Concacion			2	2
Bina Fm.; Derorim, Shivta and Nezer fms.; Ora and Gerofit fms.	Turonian	1	1	2	2



Cenomanian - Turonian in Lebanon	Cenomanian-Turonian	1			
Sakhnin and Yanuh fms.; Weradim Fm.; Tamar Fm.	Cenomanian	1	1	1	1
Deir Hanna Fm.; Chalk and limestone rock units in Mt. Carmel; B. Meir, Moza, Amminadav and K. Shaul fms.; En Yorqe'am, Zafit and Avnon fms.		2	2	3	3
Yagur Fm.; Kammon Fm. -	Albian-Cenomanian	1	2	2	2
Hazera Fm. (Sinai); Naur, Fuheis and Hummar fms. (Jordan)					2
Volcanic rock units, undifferentiated	Lower Cretaceous	3			
Nabi Sa'id, Ein el Assad, Hidra, Rama and Kefira fms.		4	4		
Kurnub Group	Lower Cretaceous	3	3	3	3
Basalt flows and volcanics; Tayasir Volcanics		3 <sup>1</sup>	3 <sup>1</sup>	3 <sup>1</sup>	
Upper Jurassic	Upper Jurassic		2		
Be'er Sheva and Haluza fms.		1		3	
Kidod Fm.		4		4	
Hermon Fm.; Mahmal Fm.; Zohar and Matmor fms.	Middle Jurassic	1		3	
Inmar Fm.	Lower Jurassic			3	
Mishhor and Ardon fms.				2	
Mohila Fm.	Upper Triassic			3	
Saharonim Fm.	Middle Triassic			2	
Gevanim Fm.	Lower Triassic			2	
Ra'af Fm.				2	
Intrusions and volcanoclastic rocks	Mesozoic	3		3	3
Shehoret and Netafim Fms.	Cambrian				3
Amudei Shelomo and Timna Fms.					3
Yam Suf Group					3
Elat Conglomerate, Roded Conglomerate	Precambrian				2
Rhyolitic Quartz Porphyry					2
Andesite and Basalt flows					2
Timna Granite; Shahmon Granite; Yehoshafat Granite; Amram Granite Porphyry					2
Elat Granite, Roded Granite Porphyry; Timna Granite Porphyry					2
Syenite, Monzonite and other intermediate rocks					2
Gabbro, diorite and other basic rocks					2
Roded Quartz Diorite					2
Amphibolite (metabasite)					3
Granitic Gneiss					2
Taba Gneiss; Roded Quartz Diorite Gneiss, Schist and Migmatites					2
Elat Schist					3

^ . עבור סלעים עם דירוג גיאוטכני <sup>1</sup>, ראה הערה 4 בטבלא 4.

### 2.2.3 מפת טיפוס כשל המדרון האפשרי הסביר ביותר

בשלב זה, מנותח האופי הגיאולוגי והטופוגרפי של כל מדרון (כלומר, 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 שונים (גיאולוגים או טופוגרפים) הקובעים את יציבות המדרון. על כן, יש חשיבות לאפיון טיפוס הכשל האפשרי הסביר ביותר לגבי כל מדרון כאשר מבצעים 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.

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 ( $>40^\circ$ ). טיפוס הכשל האפשרי הסביר ביותר נקבע 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 חייבים 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, שיפוע של מישור השכוב (בכיוון המדרון) קטן 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  $\pm 45^\circ$  (השיפוע המדומה בכיוון  $45^\circ$  מהשיפוע האמיתי בטווח שיפועי השכוב הקיימים היא כ- 70% מהשיפוע האמיתי. לעומת זאת, השיפוע המדומה בכיוון  $60^\circ$  מהשיפוע האמיתי בטווח שיפועי השכוב הקיימים היא כ- 55% מן השיפוע האמיתי. על כן נבחר הערך של  $45^\circ$  כהפרש המרבי בין כיוון השיפוע של מישור השכוב וכיוון השיפוע הטופוגרפי בו מתקיים התנאי הקינמטי הראשון). התנאי הקינמטי השני מתקיים כאשר השיפוע של השכוב (אמיתי או מדומה) בכיוון שיפוע המדרון קטן משיפוע המדרון. אם אחד מהתנאים הקינמטיים לא מתקיים, אזי 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 במצב שאין נתונים לגבי המבנה או שהן צעירות מאי אוקן טיפוס הכשל עבורן הוא גלישת סלע משוערת (מסומנות ב-1) בטבלא 1).

במדרונות תלולים ( $>40^\circ$ ), מנגנון הכשל הסביר ביותר הוא **נפילת סלע** (עבור כל היחידות הגיאוטכניות).

#### 2.2.4 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 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 וכרובי, 2003) או בעזרת תוכנות תרחישים כגון HAZUS (Almog and Katz, 2007) GNA או NessQuake, (<http://www.fema.gov/plan/prevent/hazus/index.shtm>), 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. מספר הדרגות הגיאוטכניות הוגדל לחמש, על מנת ליצור פירוט רב יותר בתחום הסלעים החזקים.
2. נוסף שקלול של כיוון נטיית המבנה ביחס לטופוגרפיה לתהליך קביעת התאוצה הקריטית לכשל וכן נוסף שלב של בחינת טיפוס כשל המדרון הצפוי על מנת לקבוע האם הטופוגרפיה או נטיית המבנה היא הגורם המשפיע על יציבות 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 3 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 ירושלים (קנ"מ 1: 50,000) שחושבו בשיטת Newmark (כץ, 2004) וכיוול של הנתונים בטבלאות 4 ו-5 (שינוי עדין של הערכים) עד קבלת מתאם מרבי.

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

כאשר שיפוע המדרון זניח ( $<5^\circ$ ), לא צפוי כשל מדרון ואין רגישות לגלישת מדרון עבור כל טיפוסים הסלעים (טבלא 3). כאשר שיפוע המדרון תלול ( $<40^\circ$ ), 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 שיפוע המדרון בינוני ( $5^\circ - 40^\circ$ ) 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  $10^\circ$  ל- VIII בנטיית מבנה של  $30^\circ$ ; 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  $10^\circ$  ל- VIII בנטיית מבנה של  $30^\circ$ ; כאשר טיפוס הכשל הוא גלישה רוטציונית הרגישות עולה מ- II בשיפוע מדרון של  $10^\circ$  ל-

VIII בשיפוע של  $30^\circ$ . בסלעים החלשים דרגת הרגישות עולה עם עליית השיפוע של המדרון מ- III בשיפוע של  $5^\circ$  ל- IX בשיפוע של  $30^\circ$  ב- GT-IV ומ- IV בשיפוע של  $5^\circ$  ל- X בשיפוע של  $30^\circ$  ב- GT-V.

#### טבלא 4<sup>(1)</sup>. דרגות רגישות לגלישת מדרון.

GT	מסלע עיקרי	טיפוס הכשל <sup>(2)</sup>	זווית המדרון או המבנה (מעלות)						
			>40	40-30	30-20	20-15	15-10	10-5	5-0
1	דולומיט, גיר <sup>(3)</sup>	גלישת סלע	IX	VIII	IV	III	I	אין	אין
		תנאים גבוליים	IX	אין	אין	אין	אין	אין	אין
2	גיר (קרטוני) <sup>(3)</sup>	גלישת סלע	IX	VIII	V	IV	II	אין	אין
		תנאים גבוליים	IX	אין	אין	אין	אין	אין	אין
3	קירטון, צור, בזלת, קונגלומרט <sup>(4)</sup>	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 משוערת. אחרת טיפוס הכשל נקבע כפי שהוסבר לעיל.
4. טיפוס הכשל עבור סלעים צעירים מאיאוקן (מופיעים בטבלא 3 עם '1') או שאין נתונים לגבי המבנה הוא גלישת סלע משוערת. אחרת טיפוס הכשל נקבע כפי שהוסבר לעיל.

#### טבלא 5<sup>(1)</sup>. תאוצה קריטית לכשל (g) עלפי דרגת רגישות לגלישת מדרון.

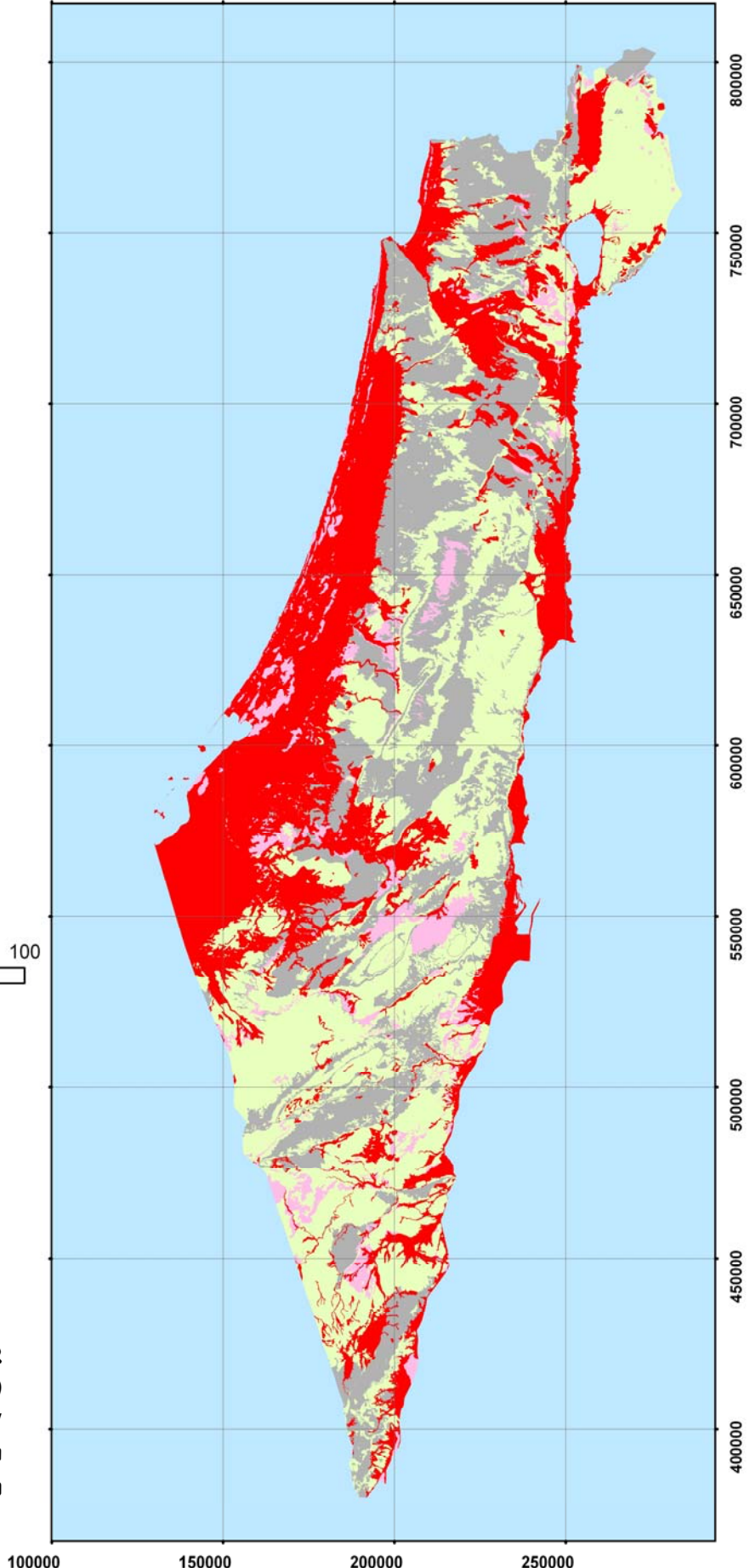
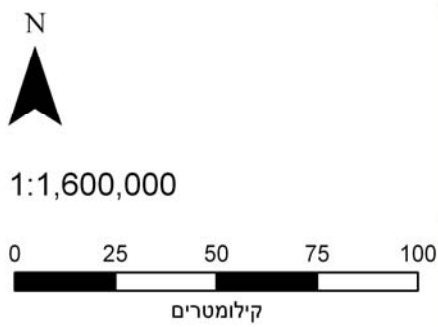
דרגת רגישות	אין	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
תאוצה קריטית (g)	אין	0.60	0.50	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05

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

## 3. תוצאות

### 3.1 מפה גיאוטכנית (Site class)

המפה הגיאוטכנית (ע"פ קטגוריות NEHRP 1997) של ישראל, שתשמש כבסיס להפעלת תכנת ה-HAZUS, מופיעה באיור 1 ועל גבי תקליטור בגב הכריכה האחורית. המפה הגיאולוגית של Sneh et al. (1998) נערכה בקני"מ 1:200,000, ובהתאמה המפה הגיאוטכנית יכולה לשמש להצאת תרחישים ארציים בקנה מידה אזורי בלבד. להצאת תרחישים עבור שטחים קטנים יותר יידרש מיפוי גיאוטכני מפורט יותר.



איור 1. מפה גיאוטכנית של ישראל (Site Class) ע"פ קטגוריות NEHRP הנתונים הגיאולוגי הנדרש להפעלת תכנת התרחישים HAZUS. המפה הוכנה כחלק מבסיס (1997).

## 3.2 מפה רגישות לכשל מדרון

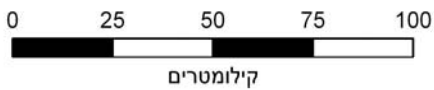
מפה הרגישות לכשל מדרון של ישראל, שתשמש בהפעלת תכנת ה-HAZUS, מופיעה באיור 2 ועל גבי תקליטור בגב הכריכה האחורית. המפה נערכה בקני"מ 1:200,000, והיא יכולה לשמש להרצת תרחישים ארציים בקנה מידה אזורי בלבד. להרצת תרחישים עבור שטחים קטנים יותר יידרש מיפוי מפורט יותר של הרגישות לכשל (לדוגמא כץ, 2004; כץ ואלמוג, 2006; Katz and Crouvi, 2007).

## 4. סיכום

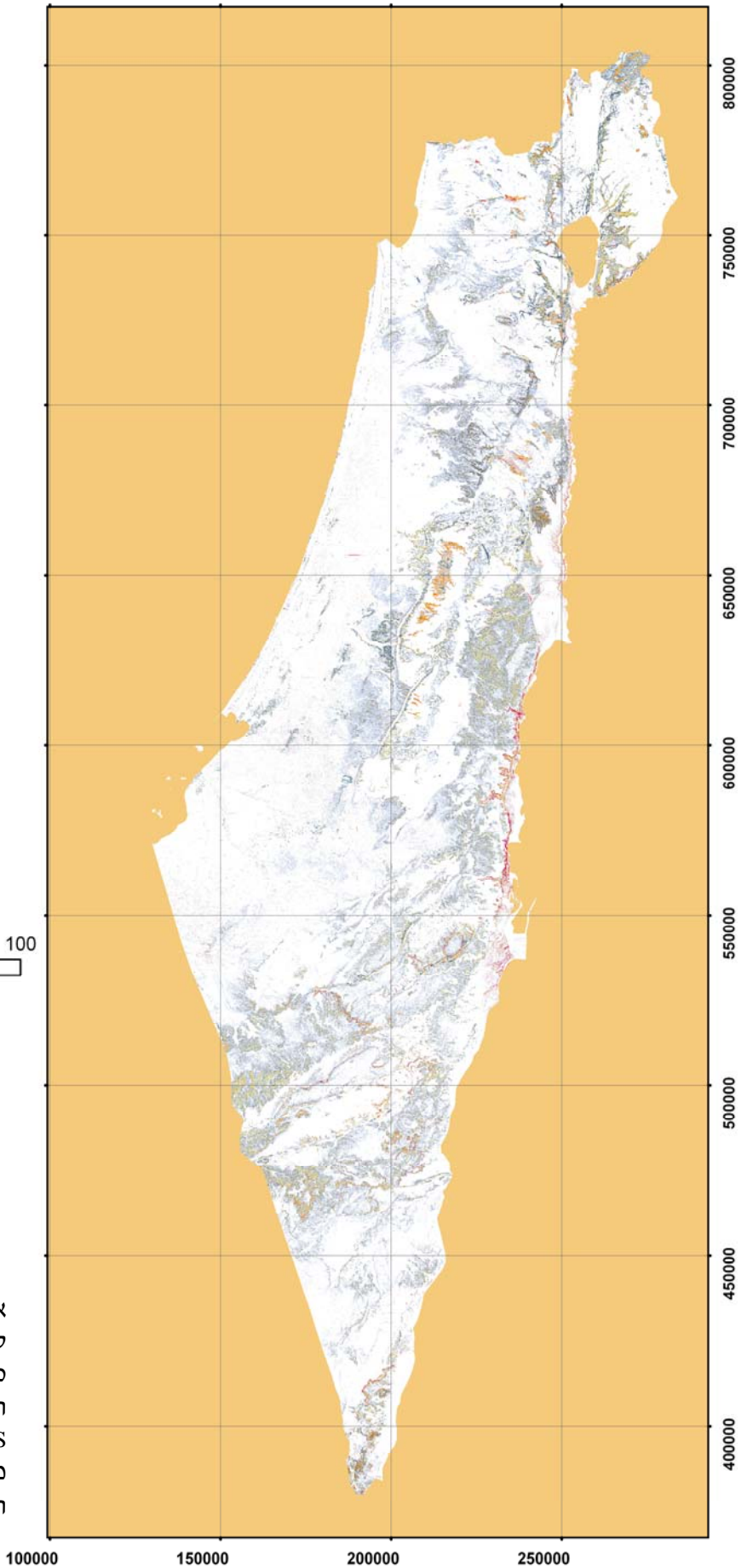
במסגרת דוח זה הוכנו מפות בסיס הנדרשות להפעלת תכנת התרחישים HAZUS. המפות הוכנו על בסיס מפה גיאולוגית בקני"מ 1:200,000 ומיועדות להכנת תרחיש ארצי. עבור הכנת תרחישים מפורטים יותר (למשל, בקני"מ עירוני) נדרשות מפות בסיס מפורטות יותר.



1:1,600,000



איור 2. מפה של דרגת הרגישות לכשל מדרון בישראל. המפה הוכנה כחלק מבסיס הנתונים הגיאולוגי הנדרש להפעלת תכנת התרחישים HAZUS. יחידות הרגישות I – X מתאימות לתאוצות קריטיות לפי המופיע בטבלא 5.



## 5. מקורות

- טברון, ב., כץ, ע., בר לביא, י., רומח, ש., סגל, ד., לאונרד, ג., 2007. יישום תוכנת תרחישי רעידות אדמה HAZUS בישראל, מקרה בוחן ירושלים. דוח מוגש לועדת ההיגוי להערכות וטיפול ברעידות אדמה, 38 ע'.
- כץ, ע., 2004. הערכת הסכנה לגלישות מדרון בזמן רעידת אדמה באזור העיר ירושלים. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/12/2004.
- כץ, ע., כרובי, א., 2003. הערכת הסכנה לגלישות מדרון בזמן רעידת אדמה חלק א: גיליון צפת. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/25/2003.
- כץ, ע., אלמוג, ע., 2006. הערכת הסכנה לגלישות-מדרון בעיר בחיפה ובצפון רכס הכרמל בעת רעידת אדמה. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/03/2006.
- כץ, ע., אלמוג, ע., 2006. מפת סכנה ארצית לגלישות-מדרון בישראל; גיליון צפוני, קני"מ 1:200,000. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/38/2006.
- כץ, ע., הכט, ה., אלמוג, ע., 2008. מפת סכנה ארצית לגלישות-מדרון בישראל; גיליון מרכז, קני"מ 1:200,000. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/07/2008.
- 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).
- Federal Emergency Management Agency, 1997. 1997 NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings, (in press) Washington, D. C., Developed by the Building Seismic Safety Council (BSSC) for the Federal Emergency Management Agency (FEMA).
- Field, E. H., Seligson, H. A., Gupta, N., Gupta, V., Jordan, T. H., Campbell K. W., 2005. Loss Estimates for a Puente Hills Blind-Thrust Earthquake in Los Angeles, California. Earthquake Spectra 21, 329-338.
- Fleischer, L., Gafsoy, R., 2003. Top Judea Group digital structural map of Israel. The geophysical Institute of Israel, Report 753/312/03.
- 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.
- Katz, O., Crouvi, O., 2007. The geotechnical effects of long human habitation (<2000 years): Earthquake induced landslide hazard in the city of Zefat, northern Israel. Engineering Geology 95, 57-78.
- 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.
- Kricher, C. A., Whitman, R. V., Holmes, W., V. 2006. HAZUS Earthquake Loss Estimation Methods. Natural Hazards Rev. 7, 45-59.
- Newmark, M. N., 1965. Effects of earthquakes on dams and embankments. Geotechnique, 15 (2) 139-160.
- Sneh, A., Bartov, Y., Rosensaft, M., 1998. Geological map of Israel, 1:200,000 scale, Geological Survey of Israel.