



משרד האנרגיה והמים
המכון הגיאולוגי

תרחישי נזק מרעידות אדמה בישראל כבסיס לתרגיל החרום הלאומי "נקודת מפנה 6"



צפריר לוי, עמוס סלמון, שמואל הוילנד,
יריב חמיאל, עודד כץ ובועז אקרמן

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

עיצוב עטיפה: בת-שבע כהן

שער קדמי:

פינוי ההריסות מבית על הר הזיתים שהתמוטט ברעש בשנת 1927, במהלכו מצאו שלושה אנשים את מותם בבית זה.

(התמונה שייכת לאוסף מאטסון, ולקוחה מארכיון התמונות של הקונגרס האמריקאי).

<http://www.loc.gov/pictures/item/mpc2004004963/PP/>



משרד האנרגיה והמים

המכון הגיאולוגי

תרחישי נזק מרעידות אדמה בישראל כבסיס לתרגיל החרום הלאומי "נקודת מפנה 6"

צפריר לוי, עמוס סלמון, שמואל הוילנד,

יריב חמיאל, עודד כץ ובוועד אקרמן

תקציר

הניסיון ההיסטורי והמידע המחקרי מלמדים שרעידת אדמה חזקה תתרחש בישראל, גם אם לא ניתן לדעת מראש את מיקום המוקד, המגניטודה והעיתוי במדויק. בהתאם לתובנה זאת, מדינת ישראל נערכת לתרגל במסגרת שבוע החירום הלאומי "נקודת מפנה 6" את כל מערכות החרום הלאומיות והגופים הממשלתיים. מאחר ונזק אופייני לרעידת אדמה אינו דומה לנזק ממלחמה או נזקי טבע אחרים, נדרשת התייחסות ממוקדת לתופעה זו באמצעות פיתוח תרחישי נזק ייעודיים. תרגיל החירום הלאומי "נקודת מפנה 6" מהווה הזדמנות ראויה וחשובה לכך.

בעבודה זו מוצגים חמשת גורמי הנזק העיקריים ברעידות אדמה - תנודות קרקע, קריעת פני שטח, כשל במדרון, התנזלות וצונאמי, ופרישתם המרחבית באזור המיועד לתרגיל (פרק 2). בהתאם לכך פותחו במכון הגיאולוגי הדמיות נזק מתקדמות ומפורטות באמצעות תוכנת Hazus (Hazus, mr 2.1, 2012). זוהי התוכנה המובילה כיום בעולם בתחום זה והיא נקלטה בתמיכתה של ועדת ההיגוי להיערכות לרעידת אדמה בישראל (פרק 3). לראשונה בישראל פותחו ושולבו בתרגיל לאומי תרחישי נזק מודרניים מרעידות אדמה בתחומי עניין לאומיים, לרבות נזק במבנים ובמגוון רחב של תשתיות, נזק כלכלי, פגיעה באוכלוסייה, ועוד. צורת החשיבה והמידע המוצגים כאן מאפשרים להבין כיצד עלול להיראות נזק מרעידת אדמה בישראל ומהם מרכיביו, וכיצד פותחו תרחישי הנזק עבור התרגיל הקרוב. בה בעת יאפשר הניסיון הנוכחי לרכוש כלים להתמודדות עם רעידות עתידיות, גם אם תמונת הנזק שם תהיה שונה מהתרחיש הנוכחי.

התרחיש שהורץ לצורך התרגיל ומוצג בדו"ח זה מתייחס לרעידת אדמה חזקה יחסית בעמק החולה שבצפון הארץ (מגניטודה $M_w=7.0$). המתווה המוצע מסתמך על מפות גיאולוגיות ומפות סיכוני רעידות אדמה אשר פותחו ויוצרו במכון הגיאולוגי (פרק 5) ומאפשרות להצביע על התגובה הצפויה של תשתית הקרקע בעת הרעידה ביחס לכל אחד מחמשת גורמי הסיכון האופייניים. חלק ממפות אלו שולב בתוכנת Hazus ומאפשר לזהות בדרך זו כשל קרקע כגון גלישות ונפילת סלעים.

לבקשתה של מנהלת התרגיל ובהעדר מידע כמותי לגבי איכות הבניה בישראל, נקבעה עמידות המבנים בארץ כנמוכה. לצרכי תרגול המענה גם בגוש דן והסביבה המרוחקים מהמוקד, הוחמרה תמונת הנזק בכוונה תחילה על ידי הגדרת המבנים שם כ- "לא עמידים" (הסבר על הנחות אלה בהמשך). בכדי לתרגל את אזור אילת, הורץ תרחיש נפרד של רעידת אדמה בינונית באזור איילות (מגניטודה $M_w=5.6$).

תוצרי ההדמיה של התרחישים הללו כוללים אומדן של נזק במבנים אזרחיים ובמבני ציבור ותעשייה ברמות שונות, נפגעים ברמות שונות וצפי למפונים, נזקים במתקני תשתיות לסוגיהם, ונזק כלכלי (פרק 4). המידע מוצג בעזרת מגוון מפות פרטניות, עד כדי שכונה מבוקשת (המידע הפרטי יפורסם באתר המכון הגיאולוגי במהלך התרגיל <http://www.gsi.gov.il>). ההדמיות הללו תאפשרנה למנהלי התרגיל ולצוותי המענה לפתח את ההיבטים השונים שברצונם לתרגל.

אנו תקווה שהעבודה הנוכחית תביא להבנה טובה יותר כיצד עלול להיראות נזק מרעידת אדמה חזקה יחסית בישראל, לאימוץ והטמעה של שיטות עבודה מקובלות וחדשות בהיערכות לפני הרעידה ובמענה שלאחריה, ובסופו של דבר למזעור אבדות בנפש ונזק לרכוש.

תוכן העניינים

עמוד

1	1. מבוא
2	2. נזקים מרעידות אדמה
7	3. הדמיית נזקים מרעידות אדמה
9	4. תמונת נזק לתרגיל "נקודת מפנה 6" בהתבסס על מערכת Hazus
13	5. סיכונים גיאולוגיים והערכות נזקים
15	6. סיכום והמלצות
16	7. תודות
16	8. מקורות וספרות
20	9. איורים
34	10. נספח – רשומת תיקי מפות

1. מבוא

לקראת תרגיל החירום הארצי "נקודת מפנה 6" אשר יעסוק השנה (2012) בהיערכות ומענה לרעידת אדמה חזקה בישראל, מוצע מתווה להערכת נזקים אשר יתבסס על מיטב הידע והניסיון הקיימים בארץ ובעולם לדימוי נזק מרעידות אדמה. חשוב לציין כי תמונת נזק האופיינית לרעידת אדמה אינה דומה לתמונת נזק המתקבלת בזמן מלחמה או נזקי טבע אחרים ונדרשת התייחסות ייעודית לתופעה זו. לבקשתה של מנהלת התרגיל, המתווה שמוצע כאן משקף תמונת נזק רחבה ומחמירה יותר מהצפוי וזאת כדי להרחיב את מעגל הגופים המתורגלים גם לאזורים גיאוגרפיים המרוחקים מהמוקד.

המתווה המוצע מבוסס בעיקרו על תוכנת התרחישים Hazus בגרסתה החדשה (Hazus mr 2.1,) (2012) אשר פותחה בארה"ב והיא כיום מבין התוכנות המתקדמות ביותר בעולם בתחום הדמיית נזקי רעידות אדמה ונמצאת בשימוש במדינות רבות, כולל באזורנו. תוכנת Hazus מאפשרת קבלת מגוון רחב של נתונים ומספקת תוצרים רבים ברזולוציה מרחבית גבוהה ביותר, עד כדי פרוט לשכונה מבוקשת. תוצרי ההדמיה כוללים אומדן של נזק במבנים בדרגות שונות, מספרי נפגעים ברמות שונות וחסרי קורת גג, נזק ורמות תפקוד במתקני התשתיות לסוגיהן, נזק כלכלי, כמות פסולת בניין צפויה וכדומה.

למעשה, זאת הפעם הראשונה שבתרגיל לאומי מפותחות הדמיות נזקים מתקדמות ובמגוון כה רחב. ראוי לציין כי תוכנת התרחישים Hazus אינה מיועדת לשימוש רק לתרגול, אלא גם לאיתור אזורים ומתקנים המועדים לנזק מבעוד מועד, ולאומדן ראשוני של נזקים מיד לאחר רעידת אדמה.

המתווה המוצע לתרגיל מסתמך על מפות גיאולוגיות ומפות סיכוני רעידות אדמה אשר פותחו ויוצרו במכון הגיאולוגי ומאפשרות להצביע על התגובה הצפויה של תשתית הקרקע בעת הרעידה, לרבות האזורים המועדים לקריעת פני שטח, הגברת תאוצות הקרקע, כשל במדרון, התנזלות וצונאמי. חלק נכבד מנתוני מפות אלו שולב בתוכנת ה-Hazus, כך שהתוכנה מאפשרת לזהות גם כשל קרקע צפוי כגון גלישות קרקע וסלע ונפילת סלעים.

בדו"ח מוצגת שיטת העבודה על פיה נבנתה תמונת הנזקים לתרגיל "נקודת מפנה 6". בשלב הראשון מוצגים הסברים כיצד נראים תגובה וכשל אופייניים לרעידת אדמה (פרק 2), ויכולותיה של תוכנת התרחישים Hazus (פרק 3). לאחר מכן מוצגות הדמיות הנזקים למבנים ותשתיות ופרישה מרחבית אפשרית של כשל מדרונות עבור רעידת אדמה חזקה במגניטודה 7 בעמק החולה ורעידה בינונית במגניטודה 5.6 סמוך לאילת. תמונת הנזק שנבנתה, מאפשרת למנהלי התרגיל ומתורגליו מצד אחד ללמוד כיצד יכולה להיראות תמונת נזקים חמורה לאחר רעידת אדמה בישראל, ומאידך לבחור ולפתח מתוך תמונה זו את ההיבטים שברצונם לתרגל כעת.

אנו מקווים שהשילוב והשימוש במפות הנזקים בתרגיל הערכות של מדינת ישראל לקראת רעידת אדמה חזקה יביאו לאימוץ של שיטות עבודה מקובלות וחדשות של פיתוח ושימוש בתרחישים בזמן אמת, ויתרמו לשיפור המענה לרעידות אדמה ומזעור הנזקים הצפויים.

1.1 רעידות אדמה בישראל

מדינת ישראל ממוקמת לאורך העתק (שבר) טרנספורם ים המלח (e.g., Quennell, 1959; Freund, et al., 1968; Garfunkel, 1981) שהוא הגבול בין הלוחות הטקטוניים של סיני ממערב וערב ממזרח. העתק ים המלח (מכונה גם השבר הסורי-אפריקאי) הוא אחד מבין ההעתיקים הפעילים ביותר במזרח התיכון (ראה למשל, Ben-Menahem, 1991; Garfunkel, 1981, 2011). ההעתק משתרע בישראל ממפרץ אילת בדרום, דרך הערבה, אגן ים המלח, בקעת הירדן, ועד עמק החולה בצפון (איורים 1,2). במאה ה-20 התרחשו 2 רעידות אדמה חזקות לאורך העתק זה: רעידת האדמה במגניטודה $M_s=6.2$ שמוקדה היה באזור צפון ים המלח בשנת 1927 (Shapira et al., 1993) ורעידת האדמה במגניטודה $M_w=7.2$ באזור נואיבה בשנת 1995 (Shamir, 1996; Shamir et al., 2003; Baer et al., 2008).

בהתבסס על מחקרים גיאולוגיים רבים (למשל: Hamiel, 2002; Amit et al., 2003; Marco et al., 2009), תיעוד של רעידות אדמה היסטוריות (למשל Guidoboni et al., 1994; Guidoboni et al., 2009; Ambraseys, 2005; Comastri, 2005) והבנת מנגנון היצירה של רעידות אדמה, יש להניח שרעידת אדמה במגניטודה 6 ואף חזקה ממנה, יכולה להתרחש בישראל בכל עת. לפיכך הצורך החיוני כל כך לפתח שיטות פעולה למזער את כמות הנפגעים והנזק בישראל, להגדיל את מודעות הציבור באזורים המסוכנים, ולהיערך בהתאם. אחת הדרכים החשובות והיעילות ביותר להשיג מטרה זו היא פיתוח של תשתית המבוססת על ידע מדעי אשר ביכולתה לאמוד לפני הרעידה את רמת הסיכון למבנים, תשתיות ובני אדם (למשל: Agrawal, 2004; Sokhi, 2000).

2. נזקים מרעידות אדמה

2.1 גורמי הנזק ברעידת אדמה

רעידות אדמה חזקות עלולות לגרום לנזק רב למבנים ותשתיות חיוניות וכתוצאה מכך לפגיעה חמורה במרקם החיים האנושי והכלכלי באזור ובמדינה בה פגעה הרעידה. ברעידת אדמה נגרמים נזקים ישירים ועקיפים. הנזק הישיר מתבטא בפגיעה בנפש, במבנים ובתשתיות ואילו הנזק העקיף מקורו בתגובת שרשרת מהפגיעה הישירה אשר יכולה לחולל אסונות משנה ופגיעות סביבה שיכולים להעצים את הפגיעה הראשונית במבנים ובנפש. כך לדוגמא, פגיעה במתקני חומרים מסוכנים (חומ"ס) יכולה לגרום לזיהום והרעלה סביבתית אשר יחמירו את היקף ועומק הנזק.

רעידות אדמה מלוות במגוון תגובות ותופעות של כשל קרקע אשר עלולות לגרום לנזקים משמעותיים למבנים ותשתיות: (1) תנודות קרקע והגברה שלהן (איורים 2, 3, 4) עקב תנאים ייחודיים של התשתית הגיאולוגית, (2) קריעת פני שטח במוקד הרעידה (איור 5), (3) כשל מדרונות (איורים 6,7, 4) התנזלות (איור 8) ו- (5) צונאמי (איור 9).

2.1.1 תנודות קרקע

תנודות הקרקע שנגרמות כתוצאה ממעבר גלים סיסמיים בסלע ובקרקע התבררו כגורם הסיכון ההרסני והקטלני ביותר במרבית רעידות האדמה, וזאת עקב התפשטותם של הגלים על פני מרחבים גדולים מסביב למוקד (איור 2). עוצמתן של התנודות תלויה בעיקר במגניטודה של הרעידה ובמרחק מהמוקד, ובגורמים נוספים כגון עומק המוקד בתת הקרקע, המנגנון המכאני של הרעידה וסוג הסלע והקרקע אשר דרכם עוברים הגלים.

ככלל, מבנים מתוכננים לעמוד בעומס אנכי כדי לשאת את משקל הבניין ותכולתו ואולם התברר שרעידת אדמה מפעילה על המבנים גם כוחות אופקיים משמעותיים ביותר אשר במקרים קיצוניים עלולים להגיע לערכים בסדר גודל הדומה לתאוצת הכובד (g). השפעתם ההרסנית של כוחות אלה נענתה בניסוח תקני בניה ייחודיים אשר מנחים את המהנדס כיצד לתכנן כנגד תאוצות הקרקע האופקיות (למשל, מפת תאוצות קרקע מרביות לתכנון בת"י 413, איור 3). למרבה הצער, עמידותם של מבנים שהוקמו לפני שהתקנים הללו קיבלו תוקף מוטלת בספק. בישראל נכללים בקטגוריה זו מבנים שהוקמו לפני שנות השמונים של המאה הקודמת, אשר חלק ניכר מהם נסמך על עמודים דקים ללא מערכת ספיגה כנגד הזעזועים האופקיים.

מזה שנים ידוע שתנאי קרקע ומבנה גיאולוגי עשויים להגביר את תנודות הגלים הסיסמיים ולכן הכרחי להתחשב בהם בשלבי התכנון והבנייה. הקרקע במקרים אלה מגיבה כמגבר אשר תכונותיו תלויות בספקטרום הגלים הסיסמיים שמגיעים ממוקד הרעידה ובאופיין של השכבות בתת הקרקע הרדוד (עשרות עד כמה מאות מטרים), בפרט כאשר שכבות של סלעים רכים (בעלי מהירויות סיסמיות נמוכות) מונחות על גבי סלעים קשים (בעלי מהירויות סיסמיות גבוהות). מבנה כזה גורם להתהודה של הגלים הסיסמיים בשכבה העליונה הרכה, ולהגברה בעוצמתם ובמשך הזמן עד לדעיכתם. גורמי הגברה נוספים הם מבנה מרחבי של השכבות בתת הקרקע (בצורת אגן או תעלה), טופוגרפיה הררית או מצוקית, וכדומה. ניתוח הנזקים ברעידות אדמה, כולל הניסיון שנצבר בישראל באירועים היסטוריים, מראה כי תגובת האתר היא אחד הגורמים המשפיעים ביותר על היקף וחומרת הנזק.

הבנה של התופעה והניסיון שנצבר עם הזמן מאפשרים לאתר מראש, על בסיס הגיאולוגיה והטופוגרפיה המקומיים, את האזורים בהם קיים פוטנציאל להגברת התנודות הסיסמיות, ולהפיק מפות סיכון איכותיות או כמותיות. מיפוי של האזורים הללו בישראל נעשה במכון הגיאולוגי ובמכון הגיאופיסי על ידי גבירצמן וזסלבסקי (2009), כאשר מפה זו הינה כיום חלק מהתקן הישראלי לבניה עמידה לרעידות אדמה (ת"י 413, 1995, תיקון 3) (איור 4).

2.1.2 העתקה וקריעת פני שטח

מקורן של רעידות אדמה בשבירה מהירה של גופי סלע והעתקתם זה ביחס לזה. רוב רעידות האדמה החזקות מתרחשות באזורי המגע בין לוחות טקטוניים שונים. כאמור (סעיף 1.1), הגורם העיקרי לרעידות אדמה באזורינו הוא העתק ים המלח אשר מהווה אזור המגע בין הלוח הערבי במזרח ותת הלוח של סיני במערב (איור 1).

מוקדי רעידות אדמה המתרחשות לאורך העתקים ממוקמים בדרך כלל בעומק גדול מ- 5 ק"מ. כאשר התנועה בין גושי הסלע גדולה מספיק, ההעתק יכול להגיע ולקרוע את פני השטח, ועלול למקד סביבו נזק רב במרחק של עד כמה עשרות מטרים. עם זאת, יש לציין שמרבית רעידות האדמה חלשות יחסית (במגניטודה נמוכה מ-5) ואינן מלוות בקריעת פני השטח שכן התנועה על ההעתק אינה גדולה והיא נבלעת בעומק. קריעת פני השטח ברעידת אדמה יכולה להתבטא בגזירה אופקית, יצירה של מדרגת נוף בגובה של עד מספר מטרים במקרים קיצוניים, ובפעירת סדקים עמוקים לאורך קילומטרים רבים. עוצמת התופעות תלויה בגורמים רבים, כגון: מגניטודת הרעידה, כיוונה, עומק המוקד, סוג הסלע ועוד. קריעה משמעותית של פני השטח יוצרת בעיה הנדסית שאינה פשוטה לפתרון ועל כן תקני הבניה מחמירים ביותר בסוגיה זו ומגבילים את הבניה כמעט לחלוטין במקומות המועדים לכך.

סיכום מצב הידע העדכני בתחום זה בארץ מוצג במפת ההעתקים הפעילים והחשודים כפעילים אשר נערכה במכון הגיאולוגי (איור 5, על פי ברטוב וחוב', 2009) ונכללת בתקן לבניה עמידה לרעידות אדמה בישראל (ת"י 413, 1995). לאחרונה פורסמה הצעה לעדכון המפה (שגיא וחוב', 2012) והיא הועברה לוועדת התקינה.

2.1.3 כשל מדרונות

תנועה מהירה של סלעים ו/או קרקע במורד מדרונות המתרחשת בזמן רעידות אדמה (גלישה או מפולת) היא תופעה הרסנית המוכרת מרעידות אדמה בעולם וגם מדווחת מרעידות אדמה היסטוריות בישראל. תנודות הקרקע בעת רעידת האדמה גורמות לחלקי מדרון או מצוק להתנתק מגוף המדרון ולנוע במורדו, בפרט כאשר סלעי המדרון חלשים מבחינה מכאנית, סדוקים ובלויים. נוכחות מים, למשל כתוצאה מגשמים ושיטפונות, עלולה להגביר את אי היציבות במדרון ואף לגרום בעצמה לכשל. נפח החומר הגולש עלול להגיע למאות ואלפי מטרים מעוקבים, ובמקרים קיצוניים אף ליותר.

תנועת חומר (קרקע או סלע) במורד מדרון בעת רעידת אדמה מאופיינת על ידי מספר טיפוסים עיקריים: גלישה (Slide), זרימה (Flow) ונפילה חופשית (Fall). אופי תנועת החומר מטה תלוי ביחס בין התכונות המכאניות של החומר הנע, תכולת המים והכוחות הפועלים עליו. אין ספק באשר להשפעתה ההרסנית של תופעה זו לגבי מבנים המצויים על גבי המדרון ולמרגלותיו, והנזק כתוצאה מכך עלול להיות חמור ביותר. דוגמא מוכרת לנזקים כתוצאה מכשל מדרונות הם אלו שאירעו ברובע היהודי בצפת ברעידות מהשנים 1759 ו-1837. (Katz and Crouvi, 2007).

כאשר מבקשים לאתר מראש את המדרונות המועדים לכשל יש לבחון את השיפוע הטופוגרפי שלהם וכיצד הוא מתייחס לנטיית השכבות הגיאולוגיות ואת התכונות המכאניות של הסלעים המרכיבים אותם. בחינה מסוג זה נעשתה במכון הגיאולוגי בקנה מידה אזורי עבור ישראל (כץ ואלמוג, 2006; כץ וחוב', 2008), ובקנה מידה מפורט עבור אתרים נבחרים כולל הערים צפת (כץ וכרובי, 2003), ארבל וטבריה (ציון וחוב', 2004), ירושלים (כץ, 2004), חיפה (כץ ואלמוג, 2006) וקריית שמונה (Kanari, 2008), וכן גם עבור נחל שורק לאורך תוואי הרכבת לירושלים (Katz et al., 2011) (איורים 6,7). חשוב לציין שבניה מודרנית על גבי מדרון עלולה להקטין את

יציבותו משום שהחציבה במדרון מגדילה את השיפוע הטבעי שלו, בניה מאסיבית מעמיסה עליו מעבר למשקל שנשא בעבר, ותכולת המים לעיתים גדלה כתוצאה מהשימוש בהם.

אחד האזורים בהם יתכנו גלישות מדרון בעת רעידת אדמה חזקה הוא מדרון היבשת בים התיכון הסמוך לחופי ישראל. גלישות תת-ימיות אלו עלולות ליצור צונאמי מקומי (סעיף 2.1.5).

2.1.4 התנזלות

התנזלות מתרחשת כאשר משקע (סדימנט) חולי, לא מלוכד, רווי במי תהום רדודים, מאבד את חוזקו המכאני בזמן הרעידה ומתנהג כנוזל. בעת התרחשותה של ההתנזלות מבנים כבדים יתחילו לשקוע ואילו מבנים קלים יצופו. התנזלות תועדה ברעידות אדמה חזקות רבות בעולם, כשהאחרונה שבהם היא הרעידה בכריסטצ'רץ', ניו זילנד, 2011, מגניטודה 6.2, שם התופעה הגיעה למימדים עצומים. בישראל התופעה מוכרת מצילום (אתר התמונות של ספריית הקונגרס האמריקאי - <http://www.loc.gov/pictures/resource/matpc.10421>) המראה פריצת חול לאורך סדק (באזור יריחו?) בעקבות רעידת האדמה במגניטודה 6.2 שארעה בצפון ים המלח בשנת 1927 (איור 6) וכן מאזור אילת, לאחר הרעידה בנואייבה בנובמבר 1995, מגניטודה 7.2 (Wust et al., 1997), ובצפון ים המלח לאחר הרעידה בפברואר 2004, מגניטודה 5.2 (Salamon et al., 2004).

הערכה של עמידות הקרקע להתנזלות והסיכונים הנלווים אליה, נשענת במידה רבה על הבנה מכאנית של התופעה, ניסיון העבר והגדרת התנאים לאירוע התנזלות. הגורמים העיקריים המשפיעים על פוטנציאל ההתנזלות בקרקע טבעית הם בעיקר גודל הגרגרים וצפיפותם, עומק מפלס מי התהום מתחת לפני השטח, ואופייה של רעידת האדמה – בעיקר תאוצת השיא ומשך זמן הרעידה. הצבת תנאי הסף הללו על גבי מפה מאפשרת לזהות מבעוד מועד את האזורים בהם קיים פוטנציאל להתנזלות ולהיערך בהתאם.

יחד עם זאת, נמצא שהאזורים הרגישים ביותר להתנזלות הם דווקא מעשה ידי אדם. הכוונה לאזורי ים אשר יובשו באופן מלאכותי לצורך הקמת תשתיות חוף, נמלים, איים מלאכותיים וכד', בדרך כלל בעזרת חול – חומר גלם זמין בסביבה חופית ואידיאלי להתנזלות. כך לדוגמה ארע ברובע המרינה בסן פרנסיסקו בעת רעידת האדמה שהתרחשה שם בשנת 1989 ובקובה שביפן בזמן רעידת אדמה בשנת 1995. אצלנו, חלק ניכר מהעיר התחתית ומתקני הנמל בחיפה נבנו באזור ים שיושב באופן מלאכותי בעזרת חול דיונות שהובא מהמפרץ הסמוך, ולכן האזור הוגדר כבעל פוטנציאל להתנזלות (איור 8).

התנזלות הקרקע מתבטאת במגוון רחב של אופנים ובכללם הזרקת חול ומים אל בין השכבות בתת הקרקע ובעבוע אל פני השטח בצורת משפכי בוץ בודדים ולאורך סדקים. כשל קרקע כתוצאה מהתנזלות כולל סידוק אינטנסיבי, הסטה אופקית של גושי קרקע גדולים, שקיעה של פני הקרקע וכד'. כל אלה עלולים לגרום, מלבד שקיעה או ציפה של מבנים, גם לקריעת תשתיות בפני השטח ובתת הקרקע. המתקנים הרגישים לנוק מהתנזלות הם בעיקר אזורי נמל, תשתיות חוף,

גשרים וסכרים, זאת מאחר והם סמוכים למקווי מים אשר התשתית שלידם היא בדרך כלל רכה וספוגה במי תהום רדודים.

2.1.5 צונאמי

אירועי הצונאמי באוקיאנוס ההודי בשנת 2004 וביפן ב- 2011, לא הותירו כל ספק באשר לפוטנציאל ההרס של גורם סיכון זה (איור 9). לצונאמי מספר מאפיינים שיש בהם עניין לצורך היערכות מונעת ומזעור נזקים. הקהילה המדעית עסוקה באיסוף וניתוח מידע מהשטח כדי לשחזר את האירוע ולכייל את המודלים והערכות הסיכון לאירועים עתידיים. בהעדר מידע מהשטח נעזרים בהרצת תרחישים במחשב.

ככלל, מניחים שהצונאמי נוצר בים במוקד רעידת האדמה, מיד עם התרחשותה. זמן הגעתו של גל הצונאמי לחוף תלוי במרחק של מוקד הרעידה מהחוף ובמהירות התנועה של הגל. למרות זאת, אירוע צונאמי בישראל יכול להתרחש גם בעקבות רעידת אדמה יבשתית. למשל, רעידת אדמה שמוקדה הוא באזור בקע ים המלח עלולה לגרום להתמוטטות גושי סלע במדרון היבשת שבים התיכון בקרבת חופי ישראל, וההתמוטטות היא אשר תגרום ליצירת גלי צונאמי. במקרה זה, גלי הצונאמי צפויים להגיע לחופי ישראל בתוך דקות מזמן התרחשותה של הרעידה (Salamon et al., 2007).

גובה גל הצונאמי בקו החוף הוא נתון חשוב לכיול מודלים ומתקבל מרישום מדי מפלס ים. מאידך, גובה הגל המרבי באזור המוצף ביבשה משוחזר על פי ממצאים מהשטח כדוגמת סימני מים על קירות, שאריות שנלכדו על עצים, וראינו גם מכוניות שהוצבו על גגות בתים. מרחק ההצפה המרבי אל תוך היבשה וגובהו מעל פני הים (runup) מאותרים גם הם בעבודת שטח. מאידך מרחק הנסיגה המרבי של הים קשה לשחזר. לצרכים הנדסיים יש עניין בגובה, מהירות וכיוון זרימת המים כדי לתכנן מבנה עמיד לצונאמי.

בהסתמך על הניסיון שנצבר בעולם ובעזרת אמצעי המחשוב והתקשורת הקיימים, ניתן להעריך מיד לאחר רעידת אדמה באם היא צפויה לחולל צונאמי. כמו כן ניתן לחשב את זמן הגעת גל הצונאמי לחופים ולהוציא התרעה ראשונית למדינות שצפויות להיפגע מהאירוע. במידה וקיימים מדי מפלס בקרבת המוקד בים, ניתן לאשר או לשלול את היווצרותו של הצונאמי ולעדכן את ההתרעה בהתאם. כך אפשר להתריע על בואו של צונאמי לאחר שנוצר אך עוד בטרם הגיעו לחוף (איור 7).

2.2 היקף הנזק ברעידות אדמה

מבין חמשת גורמי הסיכון הסיסמי, זעזועי הקרקע הם בדרך כלל ההרסניים ביותר. אולם, לעיתים מרבית הנזק נגרם דווקא מאחד מארבעת הגורמים האחרים שהוצגו בסעיף 2. כך לדוגמא, כשל המדרון בצפת בזמן רעידת אדמה בשנת 1837, או הצונאמי באוקיאנוס ההודי בשנת 2004 וביפן בשנת 2011. לעיתים הנזק הישיר והראשוני הוא קל יחסית, אך האסון הכבד יכול להיגרם כתוצאה מהתפתחות נזק עקיף כגון שריפה או דליפת חומרים מסוכנים. בשעה שהנזק

למבנים תלוי באיכותם, הפגיעה בנפש תלויה גם במיקום האנשים בעת האירוע ובזמן האירוע: אין דין רעידה בבוקר כאשר תלמידים נמצאים בבית הספר כדין רעידה בלילה כאשר הם בבתיהם, וכך גם ההבדל בין צונאמי בימי חופשת הקיץ לצונאמי בעת סערה חורפית.

3. הדמיית נזקים מרעידות אדמה

לצורך הערכות מדינת ישראל לרעידת אדמה חזקה הוכנו בעשור האחרון מספר תרחישים, אשר מציגים הערכות שונות לגבי הנזק הצפוי למבנים ופגיעה באוכלוסייה, בהתאם לעוצמתה ומיקומה של רעידת האדמה. למרות החשיבות הרבה בפיתוח של תרחישי נזק מתקדמים, עד היום לא פותחו בישראל תרחישים לאומיים, במערכת חישובית אחת, אשר מתבססים על סולם של תנודות קרקע ומצביעים על הנזקים הצפויים למבנים ולתשתיות (למשל, בגשרים, כבישים, שדות תעופה, נמלים, מפעלי תעשייה), ומנבאים את יכולת התפקוד של המתקנים הללו לאחר הרעידה, את הנזקים הכלכליים, ואת הפגיעות בנפש.

3.1 תוכנת התרחישים Hazus

תוכנת Hazus אשר נחשבת כיום כאחת מתוכנות התרחישים המתקדמות ביותר בעולם, פותחה על ידי עשרות חוקרים מתחומים שונים ב- "סוכנות הפדראלית לניהול מצבי חרום" של ארה"ב (Federal Emergency Management Agency - FEMA, 1997, 2003, 2006a,b). התוכנה מאפשרת לפתח תרחישים שונים של אסונות טבע, כולל רעידות אדמה, לחשב פגיעה צפויה בתשתיות חיוניות ולאמוד את הנזק כלכלי. תוכנת Hazus גמישה מאוד ומסוגלת לחשב ברמה ארצית לא רק נזק במבנים, אלא גם פגיעה במגוון רחב מאד של תשתיות, בהתאם לאיכות הנתונים וסוג המידע שמוזנים לתוכה. בנוסף, התוכנה יכולה לחשב את ערכי הסף לכשל מדרונות, התנזלות, ותנועת קרקע (Ground displacement). יתרונותיה של התוכנה באומדן של נזק בתשתיות, במבנים ובהערכה כמותית של סיכונים גיאולוגיים הן בעיקר:

1. חישוב תנודות הקרקע והנזק למבנים ותשתיות נעשה במסגרת של תאי חישוב (פוליגונים) מרחביים ומאפשר לקבל מידע סלקטיבי לכל אזור בנפרד. בנוסף, ניתן לקלוט בתוכנה מפות תנודות קרקע חיצוניות ועל ידי כך לעשות שימוש במגוון שיטות חישוב של תנודות הקרקע.
2. חישוב הנזק מתבסס על פונקציות נזק (עקומות שבירות) רבות ומותאמות, ועל כן ניתן לקבל תחזיות נזק מדרונות בחמש רמות שונות. חישוב הנזק מתבסס באופן ישיר על תנודות הקרקע שנוצרות בעת רעידת האדמה.
3. התוכנה גמישה ומסוגלת לעבד קבצי "קלט" רבים עבור מגוון רב של מתקני תשתיות.
4. בתוכנה קיימות עקומות "זמן שיקום" ייחודיות שניתנות לעדכון וכיול ואשר מאפשרות מתן תחזית לרמת התפקוד של מתקן מסוים עד 90 ימים לאחר התרחשותה של רעידת האדמה, בהתאם למידת הנזק שספג.

5. ביכולת התוכנה לפלח את רמות הנזק במבנים לפי אופן שימושם.
6. בהתאם לדרישות המשתמש, ניתן לקבוע בתוכנה את מידת הנזק והקריסה של המבנה, ואת פילוג רמות הפגיעה בנפש לפי גודל השטח הפגוע ורמת הפגיעה.
7. ביכולת של התוכנה לחשב את כמות ההריסות (משקל) הצפויות כתוצאה מהרעידה.
8. התוכנה מסוגלת לחשב את הנזק הכלכלי של מתקן מסוים או של צבר מתקני תשתית ומבנים במרחב.
9. עוד מסוגלת התוכנה לחשב את הנזק הכלכלי הישיר, למשל לפי איבוד הכנסה צפוי, תכולת מבנה, עלות המבנה, ועוד.

3.2 אומדני הנזק ב- Hazus

3.2.1 נזק במבנים ובתשתיות

ישנן פונקציות נזק רבות שמותאמות לסוגים שונים של מבנים ובעזרתן ניתן לקבוע את רמות הנזקים החזויות של המבנים במרחב, לדוגמא: (1) מבנים חיוניים (בתי חולים, מרפאות, תחנות משטרה, תחנות מכבי אש, בתי ספר ואוניברסיטאות); (2) מתקנים חיוניים (סכרים, תחנות גרעיניות, מתקני צבא); (3) תשתיות תעבורה (כבישים, רכבות, אוטובוסים, אניות, מטוסים); (4) מתקני אספקה (מים, גז, נפט, חשמל, תקשורת); ו- (5) מתקנים שמייצרים חומרים מסוכנים.

בהתבסס על ניסיון נצבר של נזקים כתוצאה מרעידות אדמה בתשתיות ובמבנים (למשל סוגי מבני בטון), הוגדרו בתוכנה פונקציות נזק עבור מגוון רחב של סוגי תשתיות (לדוגמא, מיכלי דלק ותחנות שאיבה) וסוגי מבנים בשילוב עם רמות עמידות סייסמית שונות: (1) מתקנים ומבנים שאינם עמידים לרעידות אדמה; (2) מתקנים ומבנים שעמידותם לרעידת אדמה נמוכה; (3) מתקנים ומבנים שעמידותם בינונית; ו- (4) מתקנים ומבנים שבנויים ברמת עמידות גבוהה. כך למשל, מתקן ישן שאינו בנוי לפי תקן בנייה סטנדרטי יוגדר כמתקן שאינו עמיד. במידת הצורך ניתן להגדיר פונקציות נזק חדשות בתוך התוכנה.

במקביל לדרגות העמידות השונות הוגדרו בתוכנה גם חמש רמות נזק כלליות (FEMA, 2003): (1) אין נזק; (2) נזק קל; (3) נזק בינוני; (4) נזק מתקדם; ו- (5) נזק ללא תקנה. נזק קל בבניינים יכול להתבטא בסדקים קצרים בחלקו הגבוה של המבנה; נזק בינוני יכול לבוא לידי ביטוי בסדקים אלכסוניים בחלקו הגבוה של המבנה; נזק מתקדם בסדקים אלכסוניים בכל המבנה, כולל תנועת גזירה; ונזק ללא תקנה יכול להתבטא בסדקים אלכסוניים ארוכים בכל המבנה כולל תנועת גזירה משמעותית עד למצב של קריסה חלקית או מוחלטת של המבנה. ההבדלים בין חמש רמות הנזק במתקנים מתבטאים בדפורמציה וברמת התפקוד של המתקן לאחר רעידת האדמה. בהתאם לרמות הנזק שהמתקן התשתיתי סופג, מותאמות בתוכנת Hazus (ATC-13, 1985) עקומות זמן שיקום (Restoration functions) אשר חוזות את רמת התפקוד של המתקן (מידת חזרתו לפעילות במונחים של % מתפקוד מלא או % פונקציונאליות) והזמן שיידרש לשקם אותו במונחים של מספר הימים לאחר רעידת האדמה (1, 3, 7, 14, 30 ו- 90 ימים).

על פי הצורך ניתן לכייל את חישוב זמן השיקום, כמו גם כל אחד מהפרמטרים האחרים של מיתקן תשתית מסוים על ידי שינוי הפרמטרים הסטטיסטיים (ממוצע וסטיות תקן) של כל אחת מהעקומות המאפיינות. בהתאם לרמות הנזק שמתקן או מבנה כלשהו עלול לספוג, מותאמות ב-Hazus גם פונקציות נזק כלכליות, כאשר הפרמטר שניתן לשינוי בפונקציות אלו הוא העלות הראשונית של הקמת המתקן או העלות של השטח הבנוי.

4. תמונת נזק לתרגיל "נקודת מפנה 6" בהתבסס על מערכת Hazus

מוקד רעידת האדמה בתרחיש של תרגיל "נקודת מפנה 6" נקבע באזור צפון ישראל בעמק החולה, המגניטודה של הרעידה הסינטטית נקבעה ל- $M_w = 7.0$, עומק הרעידה 10 ק"מ ותנועת ההחלקה אופקית (איור 2 ותיק מפות A מצורף), כצפוי ברעידה שעלולה להתרחש על ההעתק העיקרי של מערכת ים המלח. לתרחיש המקומי של רעידת האדמה באילת (ראה סעיף 4.1 בהמשך) נקבע מוקד באזור איילות בעומק של 10 ק"מ ובמגניטודה $M_w = 5.6$.

תנודות הקרקע שחושבו בתוכנת Hazus עבור נזקים בבניינים התבססו על משוואת הניחות החדשה של Campbell and Bozorgnia (2008) אשר מיושמת בהצעה לתיקון החדש בתקן הישראלי (תיקון 5, ת"י 413). עקב המעבר לגרסה החדשה של תוכנת Hazus (Hazus mr 2.1), עבור מספר מצומצם של מתקני תשתית חושבו תנודות הקרקע בהתבסס על משוואת הניחות של Boore et al. (1997) אשר שימשה גם כבסיס למפת התאוצות של התקן הישראלי לבניה עמידה לרעידות אדמה ת"י 413 (Shapira and Hofstetter, 2002) בגרסתו הנוכחית.

חישובי ההגברות של התנודות הסיסמיות התבססו על שיטת Vs30 (FEMA, 1997; Eurocode, 2004; ת"י 413, 1995). שיטת ה-Vs30 מגדירה את מידת ההגברה של התשתית בהתאם למהירות הממוצעת של גלי הגזירה ב-30 המטרים העליונים של פני השטח, ובמקביל מתייחסת גם לסוג הסלע ותכונותיו הגיאוטכניות. היחידות הגיאוטכניות שהוגדרו במערכת Hazus עבור תכונות התשתית הסלעית בישראל התבססו על המפה הגיאוטכנית שנעשתה על ידי כץ וחובי (2008) (איור 2 ותיק מפות A מצורף).

4.1 הנחות יסוד לפיתוח התרחישים

הטמעת הגיאולוגיה ורשומות המבנים בישראל, כמו גם הדמוגרפיה ומתקני התשתיות, בפלטפורמה של ה-Hazus - "ישראלית" כללו מספר רב של שלבים. נתוני הדמוגרפיה סופקו על ידי הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה ואילו רשומת המבנים, על פי שימושם, סופקה על ידי המרכז למיפוי ישראל. במערכת נקלט מספר רב של מתקני תשתיות לפי שימושם העיקרי: (1) תשתיות חיוניות (בתי חולים מרכזיים, תחנות עזרה ראשונה, מתקני מג"ב, מתקני כיבוי והצלה, מוסדות לימוד); (2) מתקני תעבורה (גשרים ותחנות של רכבת ישראל, תחנות אוטובוס מרכזיות, נמלי ים

ומעגנים, גשרים של מע"צ-בתהליכי קליטה; ו-3) מתקני אספקה (למשל, מתקני שאיבת מים, צנרת מים, מתקנים לטיהור מים, חוות דלק, צנרת גז). פירוט תהליך הקליטה מתואר במספר דוחות של המכון הגיאולוגי ושותפיו לעבודה (טברון וחובי, 2007; Levi et al, 2010, Levi and Salamon, 2010 Levi, 2012 a,b).

מאחר ועדיין לא הוגדרו פונקציות נזק למבנים ולמתקני תשתיות בישראל, נעשה שימוש בפרמטרים של פונקציות הנזק, עקומות זמן שיקום, והגדרות לפילוג של רמת הנפגעים כפי שהוצע במקור על ידי מפתחי התוכנה. למותר לציין, שברירות המחדל שקיימות בתוכנה מבוססות על ניסיון רב ועתיר שנים של חוקרים רבים מתחומים שונים בארה"ב. אם וכאשר יותאמו ויכולו פרמטרים אלה בישראל ניתן יהיה להטמיעם בתוכנה.

בהתאם ליעדי התרגיל ובתיאום עם מנהלת התרגיל, הוגדרו המבנים בישראל באופן מלאכותי כעשויים מבטון עם עמידות סיסמית נמוכה. לצורך תרגול נזקים באזור גוש דן והסביבה במסגרת תרחיש הרעידה בצפון, הוגדרו המבנים שם באופן מלאכותי כעשויים מבטון ובלוקים אשר אינם עמידים לרעידות אדמה. יש להדגיש, שמאחר והרבה מבנים בישראל נבנו לאחר 1995 (השנה בה אומצה הגרסה הנוכחית של התקן הישראלי לבניה עמידה לרעידות אדמה) ייתכן מאוד שהתרחישים שנבנו עבור מנהלת התרגיל מחמירים יחסית. חישוב הנזקים הכלכליים התבסס על עלויות של שטחי בנייה כפי שמפורסמות באתר של הלמ"ס (<http://www.cbs.gov.il/reader>) ועל אלגוריתמים אמריקאיים שנמצאים בתוכנה לחישוב הפסדים כלכליים.

חישוב תנודות הקרקע ודימוי הנזקים התבצע בתוכנה ברשת צפופה של פוליגונים מרחביים סטטיסטיים, שנבנו ונמסרו על ידי המרכז הארצי לסטטיסטיקה (הלמ"ס). התוכנה מאפשרת להפיק הדמיות נזק עבור מבנים ומתקני תשתית במפות כלליות (מפות ארציות) ובמפות ברזולוציה גבוהה (מפות אזוריות). בעזרת מפות אלו ניתן לקבל מידע כללי ומפורט על מספר המבנים שצפויים להינזק במרחב לפי רמות נזק, נזק במתקני תשתית ורמות התפקוד שלהם, מספר עקורים, נזק כלכלי ועוד. ראה פרוט בהמשך.

4.2 מפות הנזק

מפות הנזק מתבססות על הפלט של התוכנה ומתארות את רמת הנזק בבניינים ואת רמת הנזק ורמת התפקוד במתקני התשתיות (ראה איורים 10-14 לדוגמא), כפי שמצוין בכותרת של כל אחת מהמפות. במפות הנזק הארציות, שמשתרעות על כל שטחה של מדינת ישראל, מופיע במקרא מספר המציין את הנזק הכולל (למשל מספר המבנים שצפויים להינזק או משקל ההריסות שצפוי להיצבר במרחב ישראל).

בכל מפות הנזק (למשל, נזק בבניינים, כמות הריסות, נזק כלכלי, פגיעה בנפש ועקורים) מופיע בצד שמאל מקרא הכולל סולם צבעים מדורג כאשר לכל צבע מותאם טווח הנזק (במספרים). מפות הנזק מחולקות למספר רב מאוד של תאי חישוב מרחביים (תאים סטטיסטיים שנבנו ע"י הלמ"ס ומציינים את גודל האוכלוסייה) אשר מאפשרים לאמוד את הנזק ברזולוציה גבוהה. כל תא מרחבי מציין את מספר הבניינים שניזוקו בתחומו בעזרת אחד מהצבעים המופיעים בסולם, בהתאמה לטווח שהצבע מציין. במפות האזוריות מצוין מספר מדויק של המבנים שניזוקו בכל

אחד מתאי החישוב בנפרד (ראה בהמשך). במפות בהן לא מצוין מספר מדויק, מומלץ לאמץ את הערך המרבי מתוך טווח המספרים שמותאם לצבע התא הנדון.

4.2.1 נזק למבנים

מפות הנזק במבנים בישראל אשר פותחו עבור התרגיל הנוכחי מציגות שלוש רמות: (1) נזק קל, (2) נזק בינוני, ו- (3) נזק מתקדם עד הרס מוחלט (תיק מפות B). בכדי להציג את תמונת הנזקים באופן ממוקד יותר, פותחו מפות אשר מציגות את הנזק במבנים בתפרוסת אזורית וממוקדת (איור 11 לדוגמא, תיק מפות C מצורף).

על גבי כל תא חישוב צוין מספר הבניינים שניזוקו בו לפי רמת נזק ספציפית. כך יכול המשתמש לראות את התמונה הכוללת לפי שכונות עיקריות בעיר או ביישוב מתבקש. במטרה לצמצם את מספר המפות פותחה מפת נזקים ארצית מוכללת (נזק קל+נזק בינוני+נזק מתקדם וכבד) בקובץ ממ"ג (GIS) לפי תאי חישוב מרחביים. הנזקים במפה זו מוצגים במדרג צבעים ובאחוזי נזק מ 0% ועד 100%. לדוגמא, כאשר אזור ספציפי המספר הוא 100% (צבע בורדר) המשמעות היא ש- 100% מהמבנים באותו תא צפויים להינזק. ככל שהאזור קרוב יותר למוקד, כך אחוז המבנים שייפגעו בו יהיה גבוה יותר.

מאחר והנתון של מספר המבנים שניזוקו אינו משקף בהכרח את ממדי הנזק (שטחו של מבנה חד קומתי הרוס אינו שקול לשטחו הכולל של מבנה רב קומות הרוס, למרות שכל אחד מהם נמנה כמבנה הרוס אחד), חושבה גם כמות ההריסות המרחבית באלפי טון לתא חישוב מרחבי. תוצאות של כמות ההריסות המרחבית מוצגים במפה מרחבית ארצית (איור 10 לדוגמא, תיק מפות B מצורף). התוכנה מאפשרת לחשב גם את השטח הכולל הבנוי שניזוק ובהתאם גם את הנזק הכלכלי בקנה מידה ארצי, אזורי ומקומי. את הנזק הכלכלי הישיר ניתן להציג במגוון שכבות, למשל: נזק במוסדות לימוד, במבני ציבור, ועוד. לצרכי התרגיל יוצרה מפת נזק כלכלי ישיר (כוללת נזק למבנה, נזק תכולה משוער, ונזק כתוצאה של אובדן עבודה) בקנה מידה ארצי (תיק מפות B מצורף).

4.2.2 נזק למתקני תשתית

בהעדר מידע לגבי עמידותם ורמות תפקודם של מתקני התשתיות, הוגדרו המתקנים כמבנים (בטון-בלוקים) שאינם עמידים בפני רעידות אדמה. זוהי כמובן הנחה **מחמירה** ויש להניח שבמידה והעמידות של המתקנים הללו תהיה בינונית או גבוהה, רמת הנזק בהם תהייה נמוכה מזו שחושבה כאן. עבור כל אחד מהתרחישים נבדקו חמש רמות של נזק, ממצב של 'אין נזק' ועד ל-'נזק ללא תקנה' והרס. כמו כן נבדקה רמת התפקוד של המתקן לאחר יום אחד, 3, 7, ו- 14 ימים מעת התרחשותה של הרעידה.

בכדי להקל על המשתמש פותחו מפות נזק מוכללות (כלומר הנזק בכל מפה מורכב מנזק בינוני, נזק מתקדם והרס) עבור מתקני התשתיות. בהתבסס על השיטה האמריקאית שנהוגה ב FEMA, דורג הנזק עבור מתקני תשתיות מבניים לפי הקטגוריות וסימול הצבע הבאים: (1) אין נזק עד נזק

קל - צבע ירוק (0% - 1%), 2) נזק קל עד בינוני - צבע צהוב (1% - 60%) ו 3) נזק כבד עד הרס - צבע אדום (60% - 100%). האחוזים הללו מציינים את מידת ההסתברות של רמת נזק עבור מתקן התשתית הנדון (איור 13 לדוגמא, ותיק מפות D מצורף).

רמות התפקוד שנגזרות ממידת הנזק חולקו לשתי קטגוריות: 1) מתפקד (60% - 100%), ו- 2) לא מתפקד (0% - 60%), כאשר האחוזים מציינים את רמת התפקוד הצפויה למתקן הנדון במרחב. בהתאם להנחות אלו פותחו מפות אשר מתארות את רמות תפקוד של מתקני התשתיות לאחר יום אחד, 3 ימים, 7 ימים ו- 14 ימים מעת רעידת האדמה (איור 14 לדוגמא, ותיק מפות D מצורף). יש לשים לב שהחלוקה לקטגוריות (מוצגות בצבעים על גבי המפה) הינה גסה ושרירותית, ולמרות שלעיתים רמת התפקוד של שני מתקנים דומים מתוארת באותו הצבע, הם עדיין יכולים להיות ברמות תפקוד שונות שנובעות מדרגות נזק שונות.

4.3 הערכת נזקים

4.3.1 מבנים אזרחיים, הריסות, נפגעים ונזק כלכלי

ניתוח התוצאות במרחב של מדינת ישראל תחת הנחת עמידות מבנים נמוכה, מלמד כי מספר המבנים הצפויים להינזק ללא תקנה הוא כ- 8,000 (תיק מפות A). מאידך, בהנחה שהמבנים בישראל אינם עמידים כלל, מספר המבנים הצפויים להינזק ללא תקנה עולה ל- 15,000. מפות הנזק מלמדות שכך או אחרת, הנזק המשמעותי יתפרש מהאזורים הסמוכים למוקד ועד לישובים שמדרום לבנימינה.

מתברר שיכולת הניתוח של התוכנה לפלח את הנזק הצפוי לפי אזורי משנה עד לרמה של שכונות ספציפיות הוא משמעותי ביותר, ולא ניתן להגזים בחשיבותו לצורך הערכות לקראת רעידות אדמה עתידיות כמו גם ניתוח נזקים בזמן אמת. למשל, ניתן לראות שבאזור עמק זבולון ומפרץ חיפה עשרות מבנים עלולים לספוג נזק מתקדם ועד הרס מוחלט. לעומת זאת בשכונות שבאזור הר הכרמל צפויים רק מספר מבנים להיהרס באופן משמעותי (תיק מפות מס' B).

מספר הנפגעים מדרגה בינונית עד קשה (זקוקים לפינוי לבתי חולים) כפי שעולה מחישובים אלה, יכול להגיע למספר אלפים ומספר ההרוגים יכול להגיע ל- 1000 ויותר (תיק מפות מס' B). מספר האנשים שצפויים להיות ללא קורת גג עומד על כ- 21,000 (איור 12 לדוגמא, ותיק מפות B מצורף).

חישוב משקל ההריסות הצפוי במרחב מלמד שכאשר המבנים מוגדרים כבעלי עמידות נמוכה משקל ההריסות יכול להגיע לכדי 7~ מיליון טון (איור 10 לדוגמא, ותיק מפות B מצורף). פילוח התפלגות ההריסות באזורים כדוגמת שכונות מסוימות בטבריה, מראה שמשקל ההריסות שם יכול להגיע לכ- 100~ אלף טון לאזור. מידע מסוג זה יאפשר כמובן לתרגל מענה הולם לבעיה זו.

הנזק הכלכלי הישיר הצפוי למבנים בעלי עמידות נמוכה כפי שחושב באלגוריתמים הכלכליים הקיימים בתוכנה (ראה סעיף 4.1, "הנחות יסוד"), מגיע ל כ- 29 מיליארד דולר. לעומת זאת, במידה והמבנים הם בעלי עמידות בינונית הנזק הכלכלי הישיר יצטמצם לכדי כ- 5 מיליארד דולר

(תיק מפות B). נתון זה ממחיש את התועלת הכלכלית בחיזוק מבנים, קל וחומר בצמצום נפגעים בגוף ובנפש.

כצפוי ברעידות אדמה, תוכנת HAZUS מצביעה כי מרבית הנזק המשמעותי לבניינים, נזק כלכלי ונזק דמוגרפי יתרכזו בעיקר באזורים שמסביב למוקד ולהעתק שעליו התרחשה הרעידה. במקרה של התרחש הנוכחי, נזקים אלו מתרכזים בצפון ישראל. ראוי לציין שתמונת נזק דומה תתקבל גם באזורים שבסוריה ולבנון הקרובים למוקד בעמק החולה, כמובן כתלות באיכות הבניה שם.

4.3.2 נזק במתקני תשתיות

הדמיות נזקים למתקני התשתיות התקבלו עבור מתקנים חיוניים (בתי חולים, תחנות עזרה ראשונה, תחנות משטרה ותחנות כיבוי אש והצלה, תיק מפות D), עבור מתקני תעבורה (רכבת ישראל, תחנות אוטובוס מרכזיות, מעגנים ושדות תעופה מקומיים, תיק מפות D), מתקני אספקה (מתקני מים, מתקנים לטיפול במי שפכים, מתקני גז ומתקני דלק, תיק מפות D). הנזק המשמעותי במתקני תשתיות צפוי גם הוא להתרכז בעיקר בצפון הארץ, באזורים שסביב המוקד והשבר הטקטוני שגרם לרעידה. ככל שהמתקן קרוב יותר למוקד, וככל שעמידתו נמוכה, כך צפויה בו פגיעה חמורה יותר, ללא יוצא מהכלל. לדוגמא, ניתוח של הנזק בבתי חולים מראה שבמידה והם מוגדרים כאינם עמידים, אלה הסמוכים למוקד יינזקו ללא תקנה וקרוב לוודאי שיצאו מכלל שימוש. במקביל, רמת התפקוד של בתי החולים הללו תהייה נמוכה מאד לאחר יום אחד וגם לאחר שלושה ימים מעת התרחשותה של רעידת האדמה. חישוב זה תואם למסקנה שהנזק בבתי החולים הסמוכים למוקד צפוי להיות ללא תקנה.

דוגמא נוספת לנזק לתשתיות הינה מתקני המים. בסך הכול הוטמעו במערכת החישובית מעל 10,000 מתקני מים וקרוב ל- 11,000 ק"מ של צנרת מים. גם כאן, הערכת הנזק הצפוי בתחנות שאיבה מראה, שבמידה והן אינן עמידות בפני רעידות אדמה, אלה הסמוכות למוקד יפגעו ללא תקנה ובהתאם לכך גם רמת התפקוד שלהן תהייה נמוכה ביותר. זאת בשל הנזק הכבד שצפוי למבנה הפיסי של התחנות ולעזרים המחוברים אליהן (תקשורת, רכיבי חשמל, משאבה, פיקוד ומחשוב...). למותר לציין שיכולת אספקת המים באזור המוקד תפגע מכך אנושות (תיק מפות D).

5. סיכונים גיאולוגיים והערכות נזקים

5.1 הערכת כשל במדרונות על פי HAZUS

מפת רגישות האזורים המועדים לכשל במדרונות ברעידה המתורגלת מראה ריכוז גבוה של כשלים בצפון מזרח ישראל עד לטווח של כ- 60 ק"מ ממוקד הרעידה, לרבות השטח הכלול בערים קריית שמונה, צפת וטבריה (תיק מפות A), שם הכשל עלול לגרום לנזק ונפגעים. כמו כן, המפה מציגה אפשרות לחסימת צירים ראשיים באזור שמסביב למוקד, למשל: הכביש הראשי בקריית שמונה, הצירים שמובילים לעיר צפת, הכביש שמוביל לדיר אל אסד ורמה, כביש סובב כנרת בטבריה, הכבישים (צפון דרום) באזור אשדות יעקב - מנחמיה, הציר שעולה לגולן מצומת כורסי, הצירים

שעולים לגולן מאפיק, גשר אריק, גשר בנות יעקב וגונן, הציר שמחבר בין מלכיה לרמות נפתלי, הציר שמוביל לריחנייה ממערב.

כשל מדרון צפוי גם מעבר לטווח של 60 ק"מ מהמוקד, אך הוא אינו נרחב בשטחו וכולל רק מדרונות תלולים מאוד או מדרונות שבהם חשוף חומר גיאולוגי חלש מאוד. כך למשל במצוקים של נחל שורק שמעל פסי הרכבת לירושלים, כפי שכבר אירע לאחר רעידת האדמה בשנת 1927 (Katz et al., 2010), דבר שעלול להביא לחסימת תנועת הרכבות בנתיב זה (איור 7 לדוגמא, ותיק מפות A).

נציין שבעבודות קודמות (כץ וכרובי, 2003; ציון וחוב, 2004) נמצא שהשטח הכלול בערים צפת וטבריה רגיש מאוד לכשל מדרון, וכל רעידה שמוקדה בצפון הארץ עלולה לגרום לנפגעים ונזק כתוצאה מכך, לרבות ברובע היהודי העתיק של העיר צפת אשר כבר נפגע מגורם זה מספר פעמים בעבר (Katz and Crouvi, 2007).

5.1 הערכת כשל כתוצאה מקריעת פני שטח

מרעידות אדמה חזקות שהתרחשו בעולם (Wells and Coppersmith, 1994) אנו למדים כי רעידת אדמה במגניטודה 7 מסוגלת ליצור קריעת פני שטח לאורך של כ- 45 ק"מ והסטה ממוצעת של כמטר אחד. לפיכך, ולמרות שבהרבה מאוד רעידות תועדו סטיות ניכרות מממוצע זה, מוצע להשתמש בערכים אלו עבור התרגיל הנוכחי "נקודת מפנה 6".

עבור התרחיש באזור עמק החולה, מוצע לתרגל העתקה וקריעת פני שטח לאורך העתק קריית שמונה וההעתק המערבי של עמק החולה. ההעתק הראשון חוצה את העיר קריית-שמונה ואילו השני משתרע לאורך כביש 90 מקריית-שמונה ועד אזור איילת השחר. שני ההעתקים מופיעים במפת ההעתקים הפעילים והחשודים כפעילים של המכון הגיאולוגי עבור ת"י 413 והחשש כי יפעלו במקרה אמת הוא ממשי (איור 5 לדוגמא ותיק מפות A).

5.2 הערכת כשל כתוצאה מהתנזלות

על פי הקשר הניסיוני המוכר בעולם בין מגניטודה של רעידות אדמה למרחק המרבי ממוקד הרעידה שבו התרחשה התנזלות, ניתן לראות שמפרץ חיפה נמצא בתחום ההשפעה של רעידה במגניטודה 7 בעמק החולה. לחילופין, ניתן ללמוד מקשרים אלה שסף מגניטודה מינימלי של רעידה בעמק החולה צריך להיות 6.5 כדי לגרום לתופעות התנזלות בעמק זבולון.

בעמק זבולון ומפרץ חיפה קיימים אזורים רבים בהם מתקיימים תנאים להתנזלות. מוצע לכן לתרגל נזק מהתנזלות באזור זה ובפרט באזור נמל חיפה אשר נבנה על חלקת ים אשר יובשה באופן מלאכותי בעזרת חול ים שהובא מחוף המפרץ הסמוך (איור 8 לדוגמא ותיק מפות A).

5.3 הערכת נזק כתוצאה מצונאמי

עדויות גיאולוגיות והיסטוריות מצביעות שמרבית אירועי הצונאמי אשר פגעו בחוף הים התיכון התרחשו בעקבות רעידת אדמה יבשתית אשר מוקדה היה פחות או יותר ממזרח לאזור שנפגע, ככל שניתן להעריך היכן היה המוקד של רעידה זו. המנגנון שהוצע ליצירת צונאמי מסוג זה מתבסס על גלישות במדרון היבשת מערבית למוקד. במרבית המקרים הפגיעה הצטמצמה לאזור מוגבל. יחד עם זאת, עדיין קיימת אפשרות שמוקד היווצרות הצונאמי יהיה צפונה או דרומה יותר, וכמו כן עלולים להתפתח גלים שישפיעו לטווחים ארוכים יותר. לפיכך, בהינתן מוקד התרחיש בעמק החולה, האזור העיקרי המועד לפגיעה מצונאמי הינו ככל הנראה החוף הצפוני של מדינת ישראל, ושם מוצע לתרגל את האירוע. הערכה של האזור המוצע לתרגול ניתנת במפת האזורים המועדים להצפה במפרץ חיפה (איור 9 לדוגמא ותיק מפות A). לצורכי תרגול ניתן לדמות פגיעת צונאמי גם בחופי תל אביב ואשדוד-אשקלון בהתאם למפות האזורים המועדים להצפה שם.

6. סיכום והמלצות

עבודה זו מציעה מתווה מתקדם ככל שהידע המדעי, הניסיון והשיטות המדעיות שנרכשו בארץ ובעולם מאפשרים לבנייה של תמונת נזק מרעידת אדמה בישראל עבור תרגיל "נקודת מפנה 6". הנזק הצפוי הינו תוצאה של תגובת הקרקע בעת הרעידה והשפעתה על המבנים והתשתיות שבנויים עליה. ככל שניתן לאפיין את תגובת הקרקע הצפויה, לשרטט את פרישת המבנים והתשתיות ולהכיר את עמידותם הסיסמית, כך אפשר לדייק בתחזית הנזק הצפוי.

לצורך התרחיש לתרגיל תוארו בעבודה זו חמשת גורמי הסיכון – תנודות קרקע, קריעת פני שטח, כשל במדרון, התנזלות וצונאמי, ופרישתם המרחבית של האזורים המועדים לכך בשטחה של מדינת ישראל. כמו כן הוצגה היכולת הקיימת כיום בארץ לתיאור מלא ומפורט של נזק למבנים ותשתיות בעזרתה של תוכנת התרחישים Hazus, מהמתקדמות בעולם ואשר נקלטה לאחרונה במכון הגיאולוגי בתמיכתה של ועדת ההיגוי להיערכות לרעידת אדמה בישראל. תוכנת Hazus מאפשרת לקבל אומדן של הרס מבנים ברמות שונות, הרס תשתיות ומבני ציבור, הערכה לגבי מספר נפגעים ומפונים, כמות פסולת בניין צפויה, נזק כספי ועוד. תוצרים אלה מתקבלים ברזולוציה גבוהה ביותר, עד כדי פרוט לשכונה מבוקשת. האומדנים כפי שהתקבלו בעזרת תוכנת התרחישים Hazus עבור התרגיל הנוכחי מוצגים בתיקי מפות (A, B, C, D). המפות הפרטניות יוצגו באתר המכון הגיאולוגי (<http://www.gsi.gov.il>) בשלב המאוחר של התרגיל כדי שלא לפגוע במהלכו הסדיר.

חשוב לציין שתמונת נזק אופיינית לרעידת אדמה אינה דומה לנזק בזמן מלחמה או כתוצאה מנזקי טבע אחרים ונדרשת התייחסות ייעודית לתופעה זו. למיטב הבנתנו, התרחישים שפותחו באופן ייעודי לתרגיל "נקודת מפנה 6" יאפשרו למנהלי התרגיל ומתורגליו ללמוד כיצד עלול להיראות נזק מרעידת אדמה בישראל, ומתוך כך לבחור את ההיבטים שברצונם להתמקד ולתרגל.

7. תודות

אנו מבקשים להודות למנהלת התרגיל ובפרט למאיר בן ישי, איתי פלג, שאול עטיה וגיל פארן, על עזרתם בגיבוש תמונת הנזק לתרגיל. כמו כן אנו מודים ל- Doug Bausch and Mr. Jesse Rozelle, מ-FEMA ארה"ב, על התמיכה המקצועית בהפעלת גרסת ה-HAZUS בגרסתה המתקדמת. תודתנו נתונה גם למנהל המכון הגיאולוגי, דר' איתי גבריאלי, על הדיונים והתמיכה שעזרו רבות בגיבוש "פרויקט פיתוח תרחישים" ובגיבוש התרחישים לתרגיל. תודות לבת שבע כהן מההוצאה לאור במכון הגיאולוגי ששקדה על הפקת הדו"ח, לולרי דודין ולאורי מליק על התמיכה במיחשוב.

העבודה נתמכה במלואה על ידי וועדת ההיגוי הממשלתית להערכות לרעידות אדמה בישראל.

8. מקורות ספרות

- גבירצמן, ז. וזסלבסקי, י., 2009. מפת האזורים החשודים בהגברות שתית חריגות: דברי הסבר. המכון הגיאולוגי, דו"ח GSI/15/2009.
- 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 לוועדת 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, קנ"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, קנ"מ 1:200,000. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/07/2008.
- כץ, ע., הכט, ה., אלמוג, ע., 2008. בסיס נתונים עבור תכנת HAZUS לתרחישי רעידות אדמה בישראל: מפה גיאוטכנית ומפה של רגישות המדרונות לכשל. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/08/2008.
- 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.
- סלמון, ע., צביאלי, ד., רוזנפוט, מ., להמן, ט., היימן, א., אברמוב, ר., 2008. האזורים במישור החוף של ישראל בהם נדרשת חקירת הסיכון להתנזלות. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/34/2008.
- סלמון, ע., 2009. מפת האזורים המועדים להצפה מצונאמי לאורך חופי הים התיכון של ישראל במפרץ חיפה, גוש דן, אשדוד ואשקלון. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/24/2009, מוגש לוועדת ההיגוי הממשלתית להיערכות לרעידות אדמה בישראל, <http://www.gsi.gov.il/Uploads/744GSI-24-2009.pdf>.
- פרידמן, ס., סלמון, ע., צביאלי, ד., ביטון, ר., וכץ, ע., 2007. הערכה גיאוטכנית של פוטנציאל התנזלות בעמק זבולון. מוגש לוועדת ההיגוי הממשלתית להיערכות לרעידות אדמה, המכון הגיאולוגי, דו"ח GSI/09/2007.

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.

שגיא, א. ברטוב, י., סנה, ע. ורוזנפוט, מ., 2012. הצעת המכון הגיאולוגי לישראל לעדכון מפת 'העתקים פעילים' ו'העתקים חשודים כפעילים' בישראל עבור תקן ישראלי 413, שנת 2012. המכון הגיאולוגי, דוח GSI/12/2012.

ת"י (תקן ישראלי) 413, 1995. תכן עמידות מבנים ברעידת אדמה, מכון התקנים לישראל.

Agrawal, S.K., 2004. Microzonation studies as impacted by recent earthquakes in India. In: BMTPC (Editor), World Congress on Natural Disaster Mitigations. Building Material and Technology Promotion Council, New Delhi, 10 pp.

Ambraseys, N.N., 2009. Earthquakes in the Mediterranean and Middle East, A Multidisciplinary Study of Seismicity up to 1900. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 800 pp.

Amit, R., Zilberman, E., Enzel, Y., Porat, N., 2002. Paleoseismic evidence for time dependency of seismic response on a fault system in the southern Arava valley, Dead Sea rift, Israel. Geological Society of America Bulletin, v. 114, p. 192–206.

ATC-13, 1985. Earthquake damage evaluation data for California. Applied, technology council, Redwood City, CA, 492 pp.

Baer, G., Funning, G. J., Shamir, G., Wright, T. J., 2008. The 1995 November 22, Mw 7.2 Gulf of Elat earthquake cycle revisited. Geophysical Journal International, v. 175, p. 1040–1054.

Begin, Z.B., 2005. Destructive earthquakes in the Jordan Valley and the Dead Sea: their recurrence intervals and the probability of their occurrence, of the Geological Survey of Israel Report GSI/12/05, 51 pp. (in Hebrew). Ben-Menahem, A., 1991. Four thousand years of seismicity along the Dead Sea rift. Journal of Geophysical Research, v. 96, p. 812, 20195-20216.

Boore, D.M., Joyner, W.B., Fumal, T.E., 1997. Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from stern North American earthquakes: a summary of recent work. Seismological Research Letters, v. 68 (1), p. 128–153.

FEMA (Federal Emergency Management Agency), 1997. NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings. Developed by the Building Seismic Safety Council (BSSC) for the Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington, D.C.

FEMA (Federal Emergency Management Agency, Department of Homeland Security Emergency Preparedness and Response Directorate), 2003. HAZUS-MH MR3 Technical Manual, pp 93.

FEMA-NIBS (Federal Emergency Management Agency and National Institute of Building Sciences), 2006a. Multi-hazard loss estimation methodology, HAZUS-MH MR2 user manual, prepared for the Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., United States, pp 294.

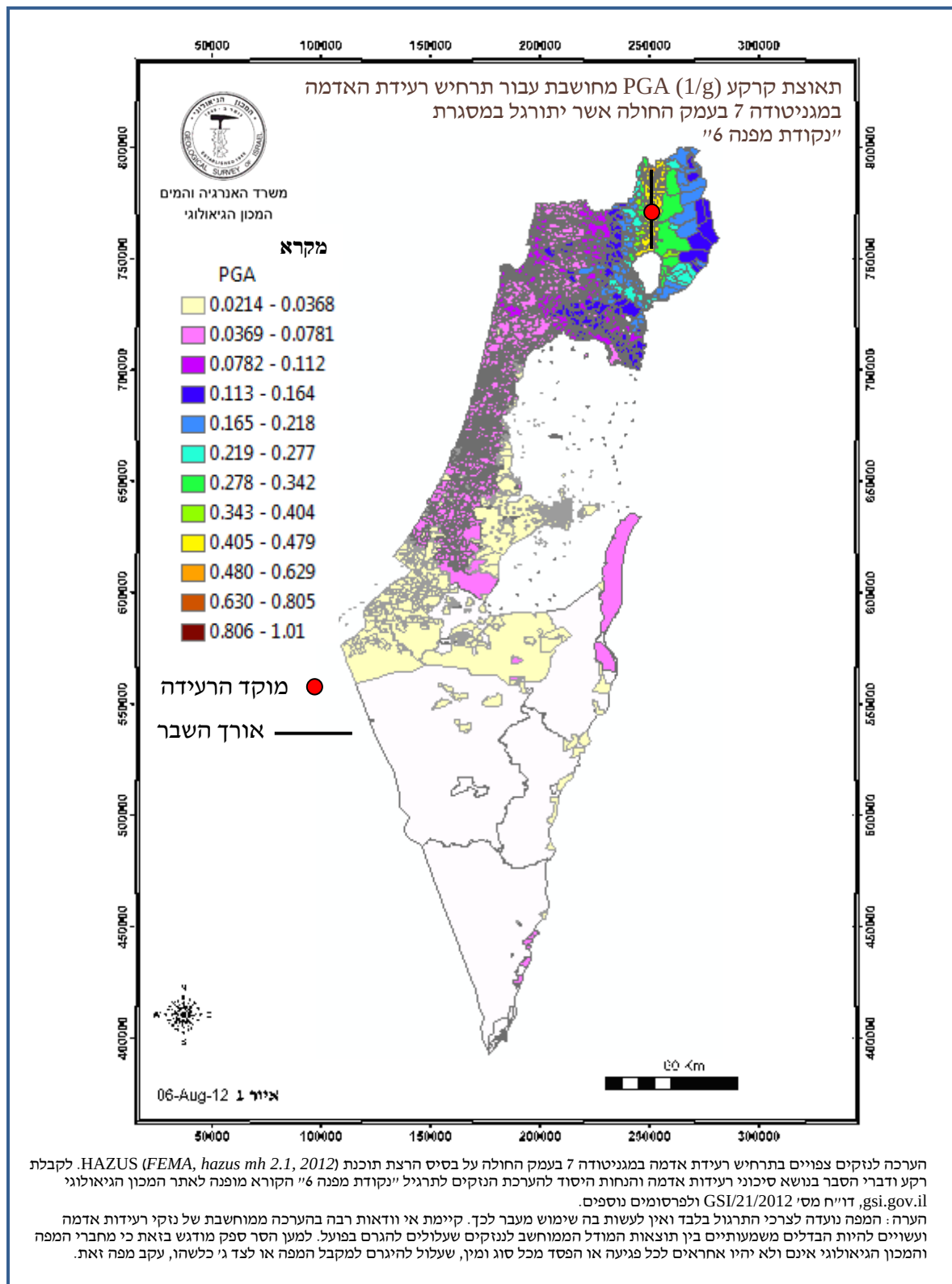
- FEMA-NIBS (Federal Emergency Management Agency and National Institute of Building Sciences), 2006b. Multi-hazard loss estimation methodology, HAZUS-MH MR2 technical manual, prepared for the Federal Emergency Management Agency, Washington DC, United States, pp 727.
- Freund, R., Zak, I., Garfunkel, Z., 1968. Age and rate of sinistral movement along the Dead Sea Rift. *Nature*, v. 220, p. 253-255.
- Garfunkel, Z., 1981. Internal structure of the Dead Sea leaky transform in relation to plate kinematics, *Tectonophysics*, v. 80, p. 81–108.
- Guidoboni, E., Comastri, A., Traina, G. 1994. Catalogue of ancient earthquakes in the Mediterranean area up to the 10th Century. ING, Rome, Italy, pp 504.
- Guidoboni, E., Comastri, A. 2005. Catalogue of earthquakes and tsunamis in the Mediterranean area from the 11th to the 15th Century. ING-SGA, Bologna, Italy, pp 1037.
- Hamiel, Y., Amit, R., Begin, Z.B., Marco, S., Katz, O., Salamon, A., Zilberman, E., Porat, N., 2009. The seismicity along the Dead Sea Fault during the Last 60,000 years. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 99, p. 2020–2026.
- Kanari M., 2008. Evaluation of rock fall hazard to Qiryat Shemona – Possible correlation to earthquakes. Geological Survey of Israel, Report GSI/24/2008.
- 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.
- Katz, O., Reichenbach, P. and Guzzetti, F., 2010. Rock fall hazard along the railway corridor to Jerusalem, Israel, in the Soreq and Refaim valleys. *Nat Hazards*, DOI 10.1007/s11069-010-9580-z.
- Levi, T., Tavron, B., Katz, O., Amit, R., Hamiel, Y., Bar-Lavi, Y., Romach, S., Salamon, A., 2010. Earthquake loss estimation in Israel using the new HAZUS-MH software: preliminary implementation- Final Report, *Isr. Geol. Surv. Report # GSI/11/2010*.
- Levi, T., Salamon, A., 2010. Preliminary damage simulations of infrastructures facilities by the HAZUS program, in preparation for a strong earthquake in Israel-Final Report, *Isr. Geol. Surv. Report # GSI/32/2010*.
- Levi, T., 2012 a. Preliminary damage simulations of hospitals and medical care stations by the HAZUS program, in preparation for a strong earthquake in Israel Report, *Isr. Geol. Surv. Report # **GSI/05/2012***.
- Levi, T., 2012b. Preliminary damage simulations of police and fire and rescue services facilities by the HAZUS program, in preparation for a strong earthquake in Israel Report, *Isr. Geol. Surv. Report # GSI/06/2012*.
- Marco, S., Hartal, M., Hazan, N., Lev, L., Stein, M., 2003. Archaeology, history and geology of the 749 AD earthquake, Dead Sea Transform. *Geology*, v. 31, p. 665-668.
- Quennell, A.M., 1959. Tectonics of the Dead Sea Rift: 20th International Geological Congress, p. 385–405.

- Salamon, A., Abelson, M., Amit, R., Ashkenazi, S., Avni, Y., Baer, G., Begin, Z. B., Zion, C., Crouvi, O., Enzel, Y., Feldman, L., Gavrieli, I., Gvirtzman, Z., Hamiel, Y., Hemo, H., Hofstetter, R., Katz, O., Magdalen, T., Malik, U., Nachmias, Y., Porat, N., Steinberg, J., Steinitz, G., Taymaz, T., Weinberger, R., Yechieli, Y., Yolsal S. and Zilberman, E., 2004. Seismically induced ground effects of the February 11, 2004, ML= 5.2, northeastern Dead Sea earthquake. Geological Survey of Israel, Report GSI/30/04.
- Salamon, A., Rockwell, T., Ward, S. N., Guidoboni, E. and Comastri, A. (2007). Tsunami Hazard evaluation of the Eastern Mediterranean: Historical Analysis and Selected Modeling. Bulletin of the Seismological Society of America, 97: 705-724.
- Shamir, G., 1996. The November 22, 1995, Nuweiba earthquake, Gulf of Elat/Aqaba: mechanical analysis, The Geophysical Institute of Israel, Report 550/87/96(114).
- Shamir, G., Baer, G., Hofstetter, A., 2003, Three-dimensional elastic earthquake modeling based on integrated seismological and InSAR data: The MW = 7.2 Nuweiba earthquake, Gulf of Elat/Aqaba 1995 November: Geophysical Journal International, v. 154, p. 731-744.
- Shapira, A., Avni, R., Nur, A., 1993. New estimate of the Jericho earthquake epicenter of July 11, 1927. Israel Journal of Earth Sciences, v. 42, p. 93-96.
- Shapira, A., Hofstetter, 2002. Seismic parameters of seismogenic zones: Appendix C, in Shapira, A., 2002, An updated map of peak ground accelerations for the Israel Standard 413: Israel Geophysical Institute Report 592/230/02 74 pp. (in Hebrew, with appendices in English).
- Sokhi, B.S., 2000. Fundamental Concept of Hazard Zonation, Indian Institute of Remote Sensing, DeharDun.
- Tantala, M.W., Nordenson, G.J.P, Deodatis, G, Jacob, K., 2008. Earthquake loss estimation for the New York City Metropolitan Region. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, v. 28, p. 812–835.
- Thio, H. K., 2009. Tsunami hazard in Israel. Prepared for the Geological Survey of Israel, by URS Corp., Pasadena, http://www.gsi.gov.il/Eng/_Uploads/264Israel-Tsunami-Hazard.pdf.
- Wust, H., 1997. The November 22, 1995, Nuweiba earthquake, Gulf of Elat (Aqaba), Post-seismic analysis of failure features and seismic hazard implications. Geol. Surv. Isr., Rep. GSI/3/97, 58 p.

9. איורים



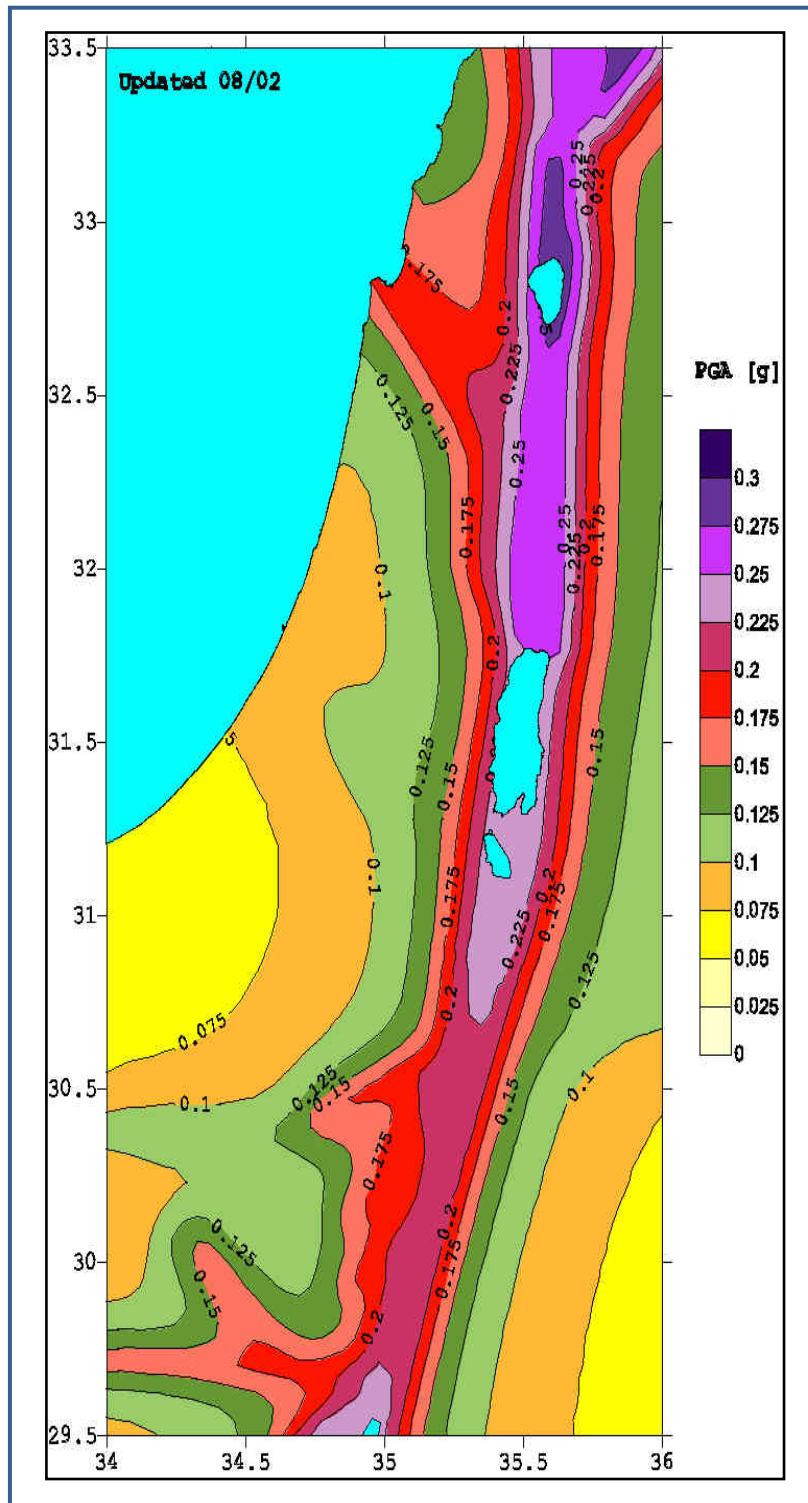
איור 1. מפת התמצאות כללית של אזור התרחיש (מבט מרחבי). העתק ים המלח מסומן באופן סכמתי בקו שחור, ומוקדי הרעידות הסינתטיות ששימשו ל"תרחיש החולה" ול- "תרחיש איילות" מסומנים בעיגול מלא באדום.



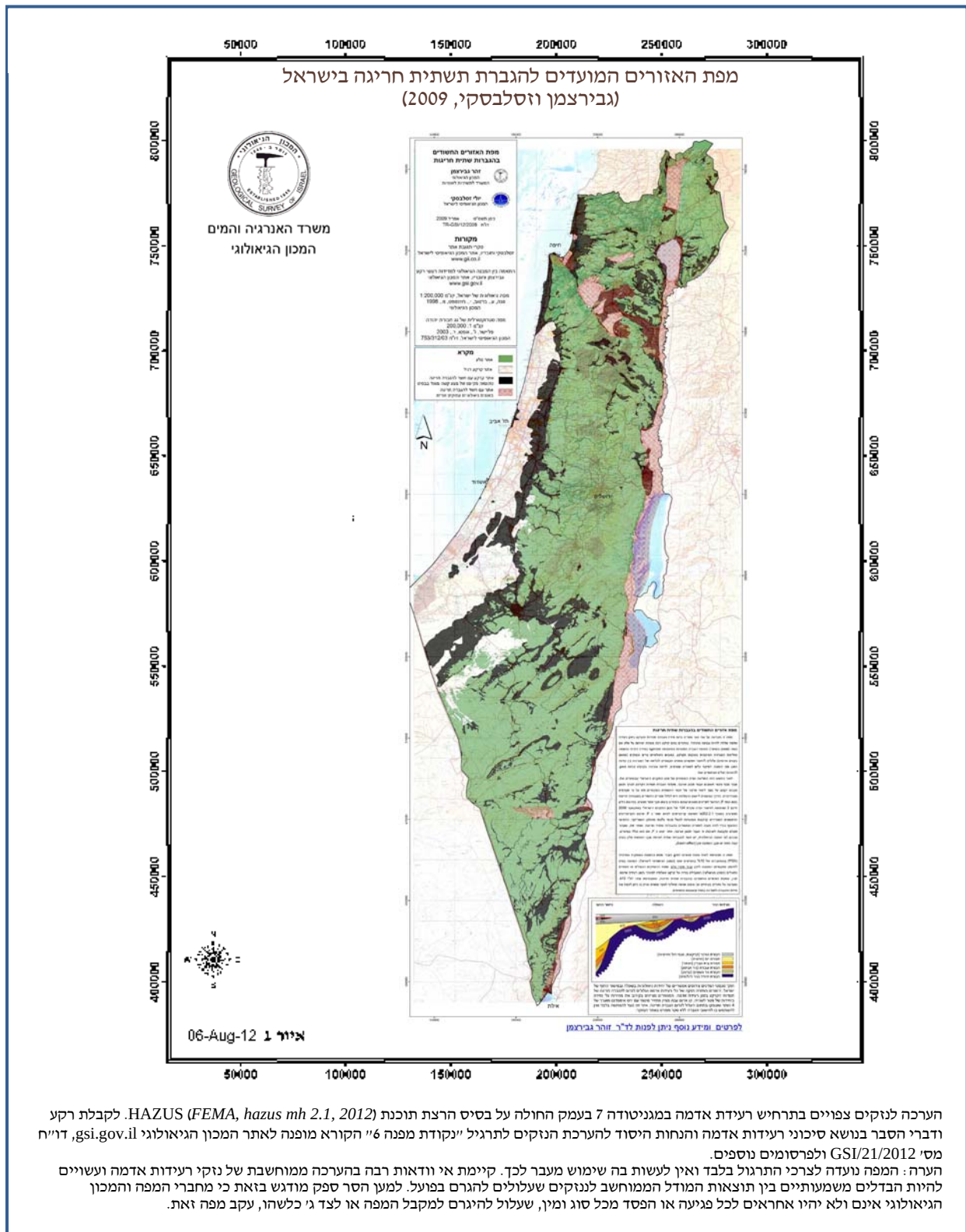
איור 2. דוגמא למפת סיכונים גיאולוגיים שחושבה עבור תרגיל "נקודת מפנה 6", מתוך תיקיית מפות A. במפה מוצגות תאוצות הקרקע המרביות (PGA) המחושבות בישראל סביב אחד העתקים ששייך למערכת העתקי ים המלח. סולם הצבעים משמאל למעלה מציין את טווח תאוצות הקרקע. עיגול אדום וקו שחור בעמק החולה מציינים את מוקד הרעידה ואת ההעתק הטקטוני שעליו מתרחשת הרעידה. ככלל, תאוצות הקרקע דועכות עם המרחק מהמוקד, להוציא במקומות בהם מתרחשת הגברה מקומית כתוצאה מתנאי הקרקע.

מפת התאוצות הסיסמיות לתקן ישראלי 413

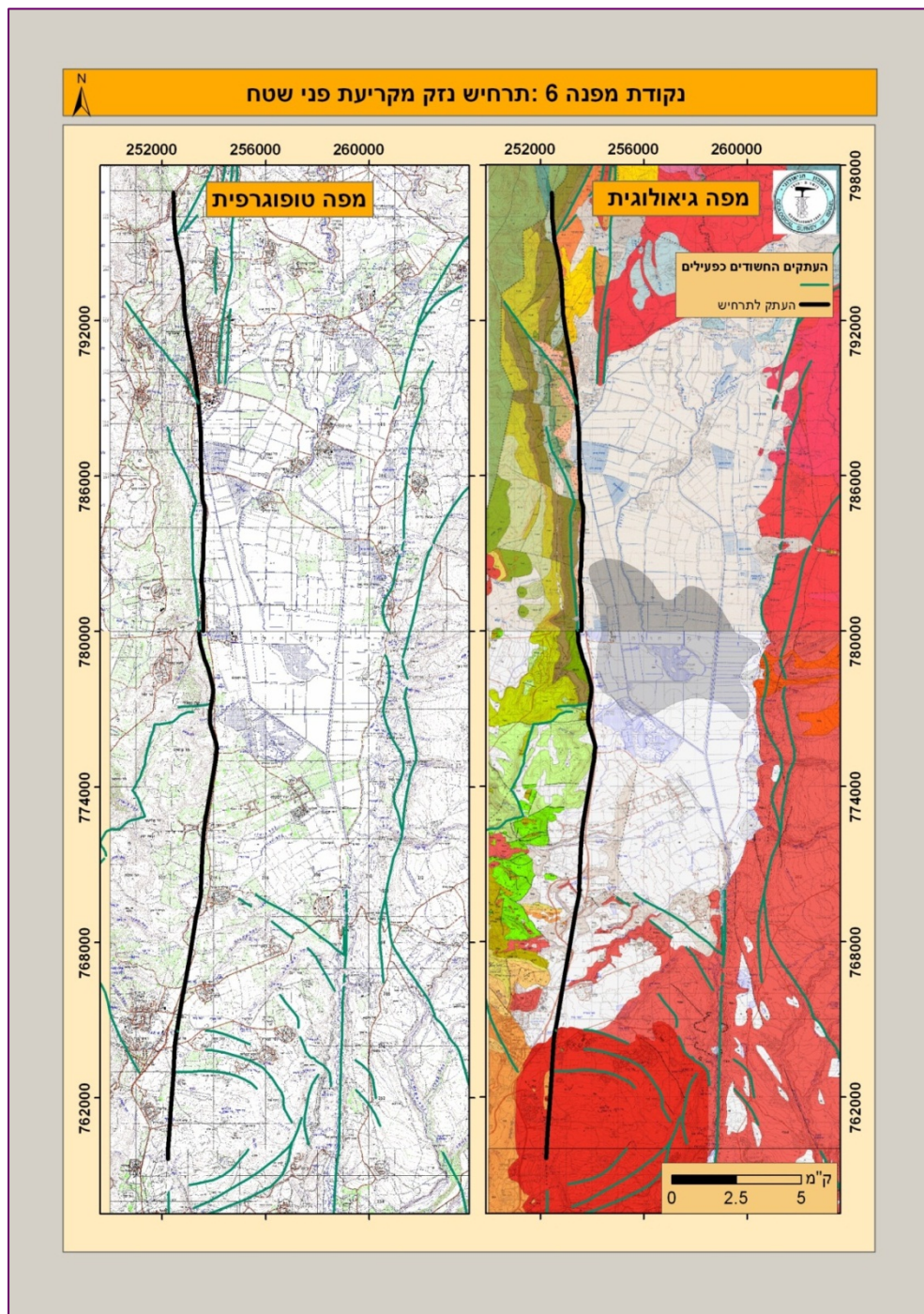
המפה מציגה את ערך המקדם הסיסמי שהוא תאוצת הקרקע האופקית המרבית (PGA) לגביה קיים סיכוי (הסתברות) של 10% שכמותה או גבוהה ממנה תתרחש לפחות פעם אחת בתקופה כלשהי של 50 שנה



איור 3. דוגמא למפת תאוצות קרקע חזויות לתכנון ובניה בישראל. סולם הצבעים מימין למעלה מציין את טווח תאוצות הקרקע החזויות. ככלל, תאוצות הקרקע דועכות עם המרחק מהמוקד, להוציא במקומות בהם מתרחשת הגברה מקומית כתוצאה מתנאי הקרקע (ראה איור 4).



**איור 4. האזורים המועדים להגברת תנודות קרקע חריגה במרחב ישראל.
(גבירצמן וזסלבסקי, 2009). מתוך תיקיית מפות A.**



איור 5. האזור המועד לקריעת פני שטח במתווה המוצע לתרגיל. רעידה במגניטודה 7 צפויה לקרוע את פני השטח לאורך של כ 40 ק"מ ולגרום להעתקה של 1 עד 2 מ' ויותר. מוצע להתייחס להעתק הגבול המערבי של עמק החולה, בין ראש פינה לקריית שמונה. העתק זה מוגדר בת"י 413 כחשוד כפעיל

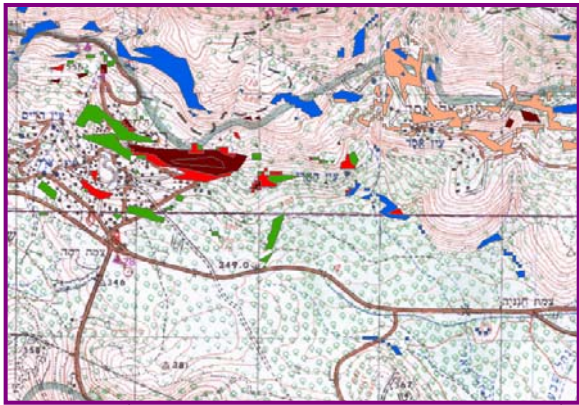
דרגת רגישות

זניחה	
I	
II	
III	
IV	
V	
VI	
VII	
VIII	
IX	
X	
מרכז אוכלוסין	

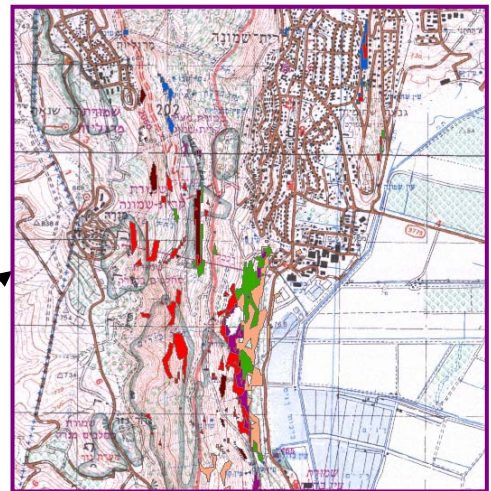
0 10km

Map of Israel showing the degree of urbanization (דרגת רגישות) with a legend, scale bar, and grid. The map displays various urbanization levels across the country, with higher levels (IX and X) concentrated in major urban centers. The legend indicates that levels I through VIII are categorized as 'זניחה' (negligible), while levels IX and X are categorized as 'מרכז אוכלוסין' (population center). The map includes a scale bar for 0 to 10 km and a grid system for spatial reference.

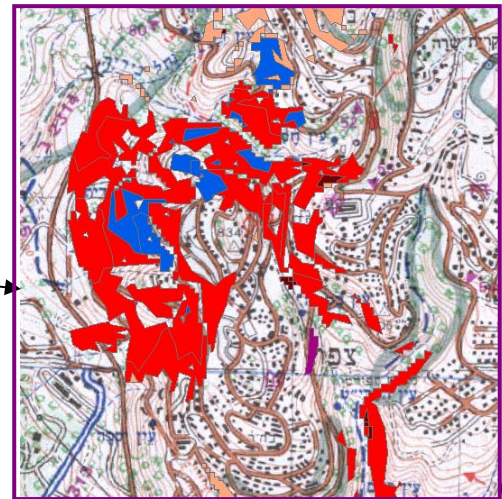
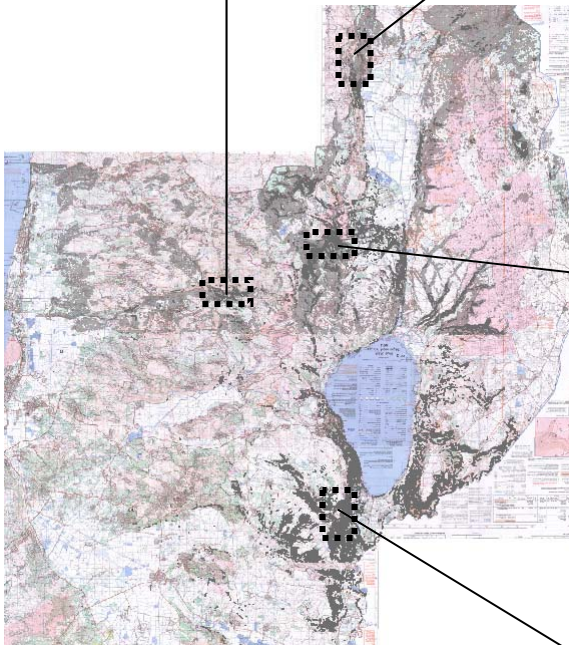
25



(ב) גלישת מדרונות באזור "רמה" ו "עין אל אסד"

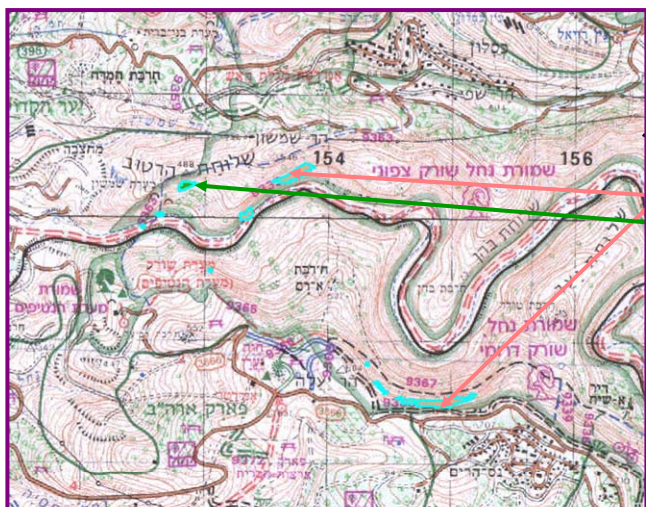


(ג) גלישת מדרונות באזור קריית שמונה



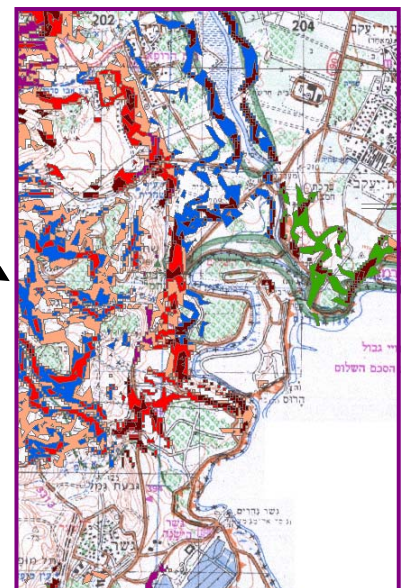
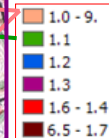
(ד) גלישת מדרונות באזור צפת

(א)



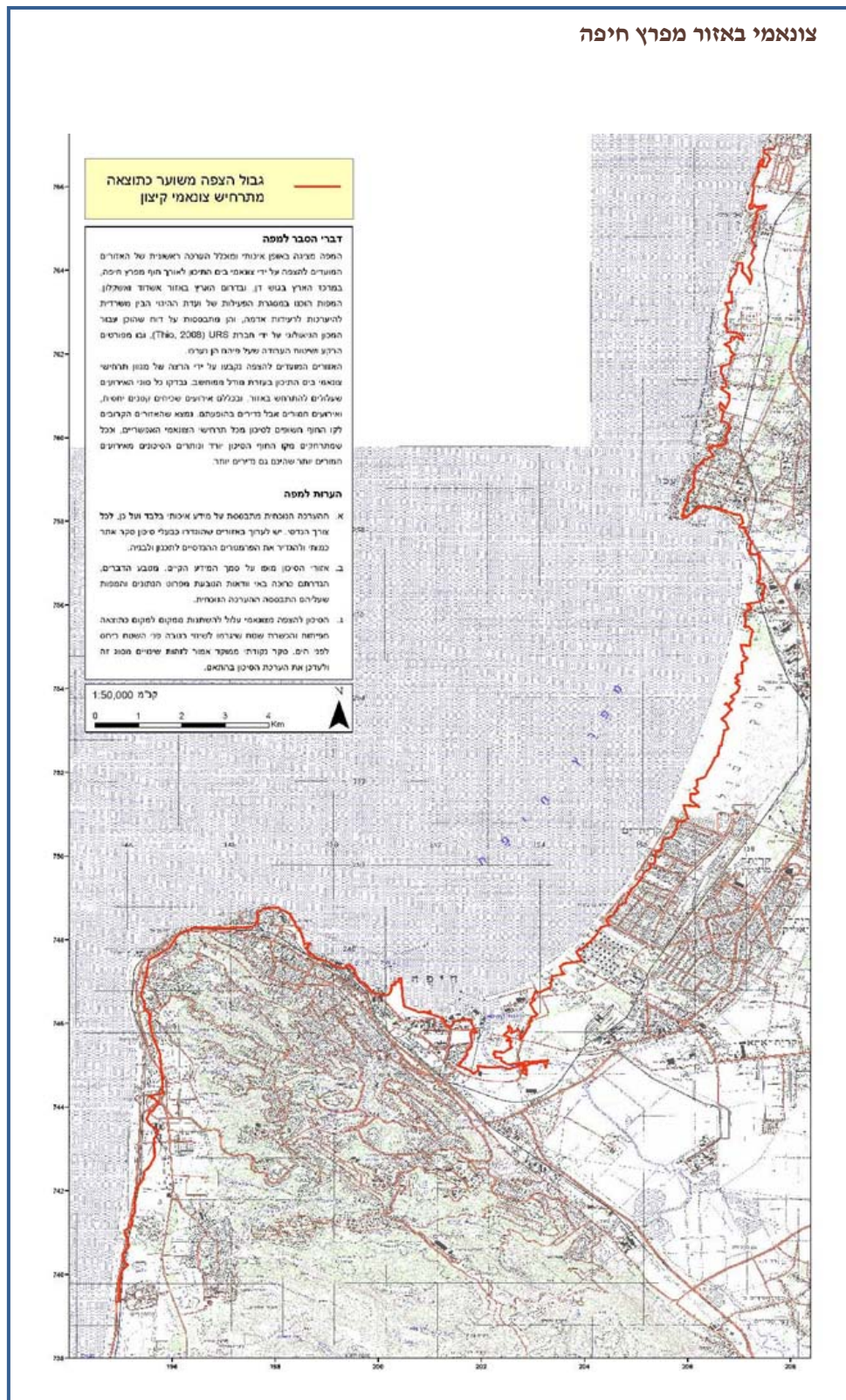
(ה) גלישת מדרונות לאורך נחל שורק

ערך קריטי
לגלישה

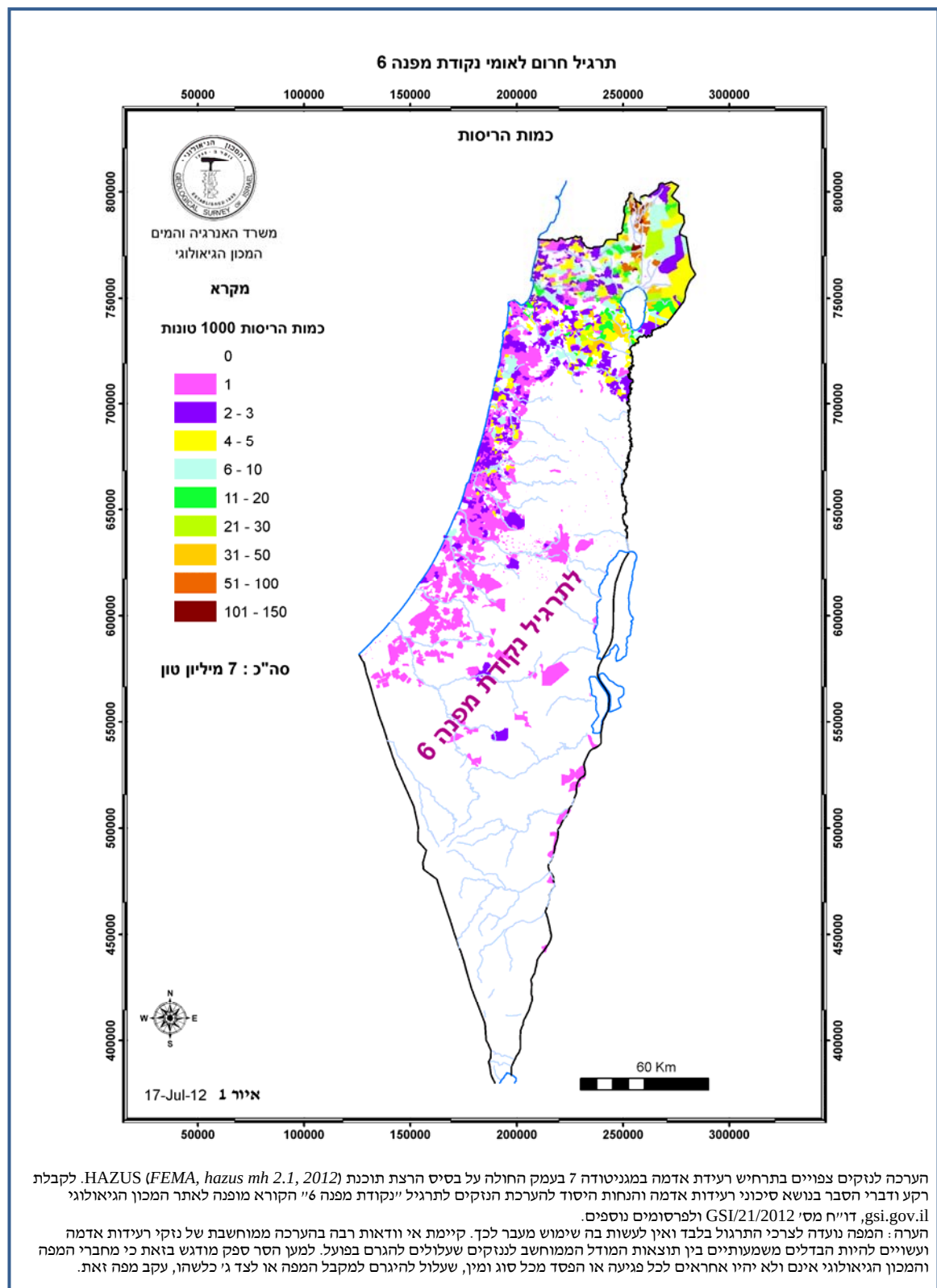


(ו) גלישת מדרונות באזור אשדות יעקב

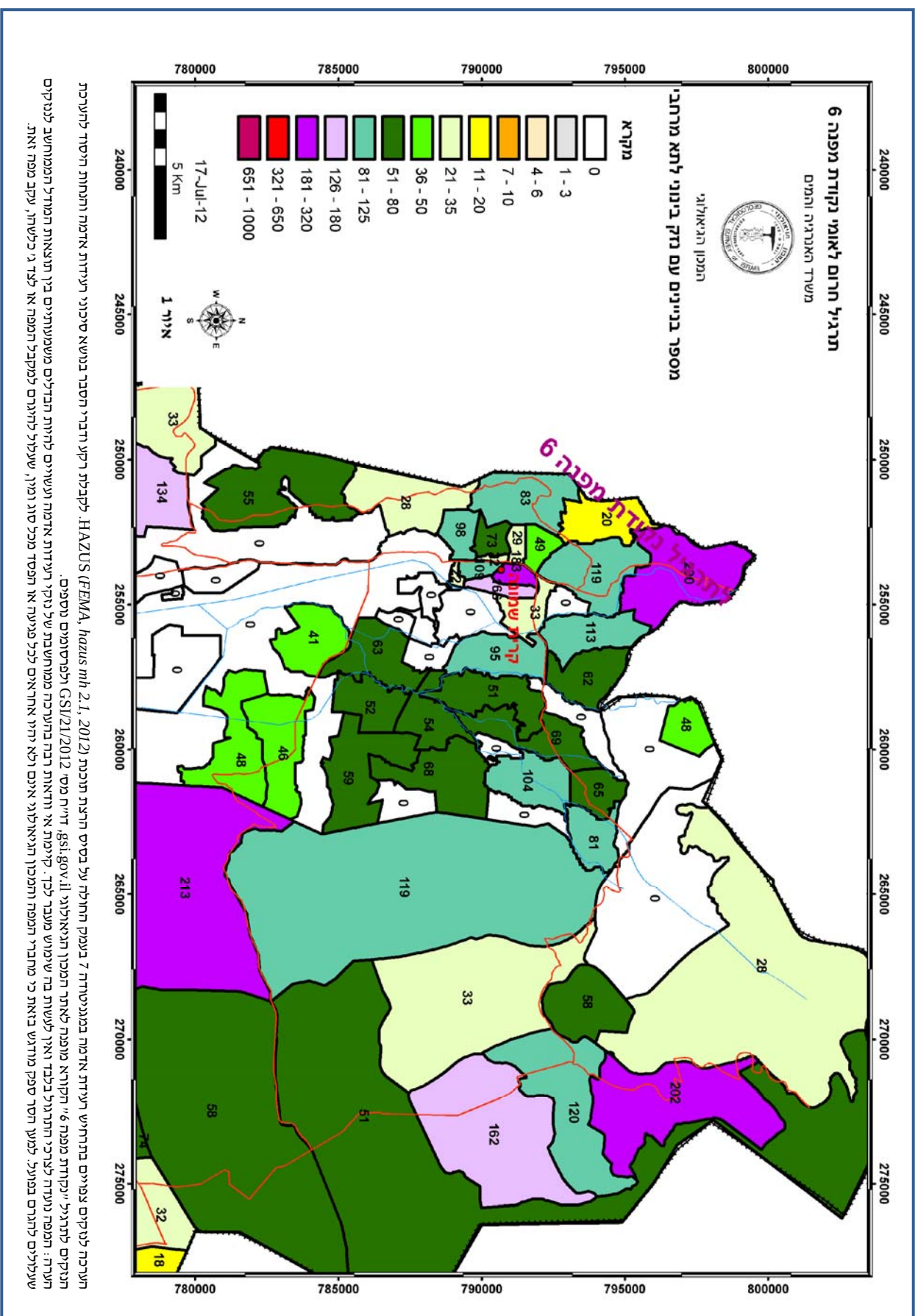
איור 7. מפות דוגמא של האזורים המועדים לכשל מדרונות בצפון ישראל ומרכזה אשר נערכו במסגרת "תרחיש החולה", מתוך תיקיית מפות A. (א) כשל מדרונות בצפון ישראל; (ב), (ג), (ד), (ה) כשל מדרונות באזורים ספציפיים; (ו) כשל מדרונות אפשרי לאורך המצוקים של נחל שורק.



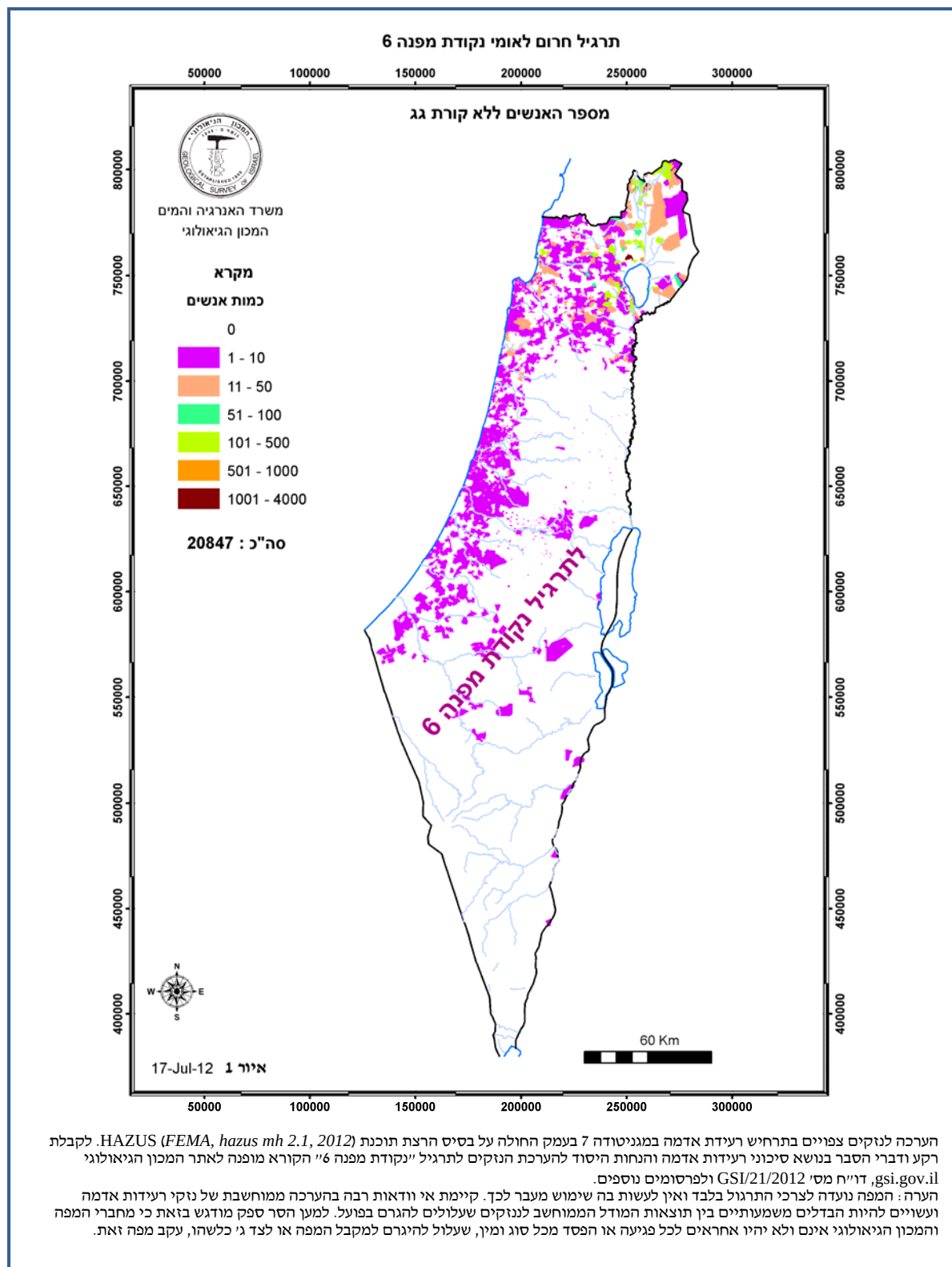
איור 9. גבול האזורים המועדים להצפה (מסומן בקו אדום) מצונאמי באזור מפרץ חיפה. (מתוך: סלמון, 2009). מתוך תיקיית מפות A.



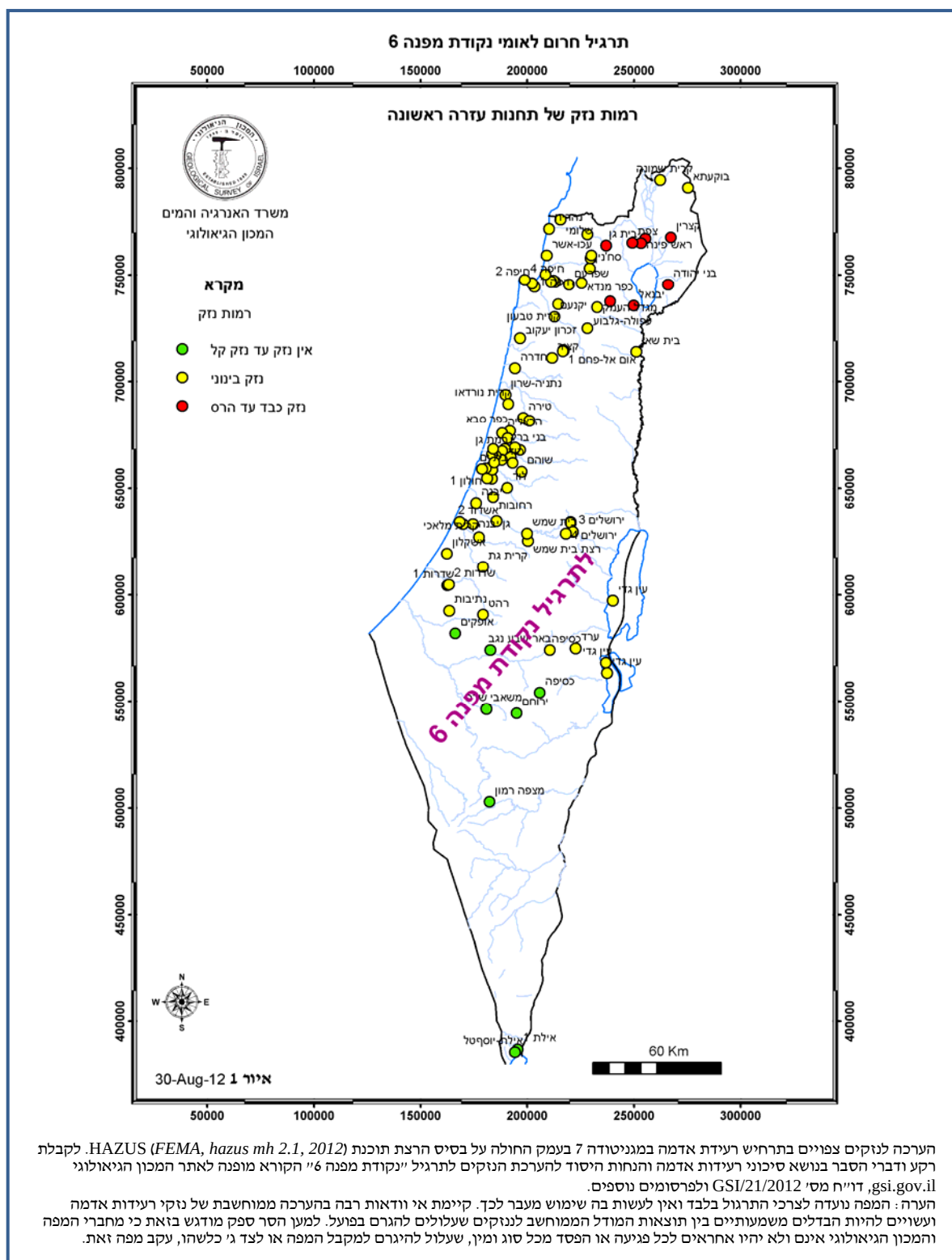
איור 10. דוגמא למפה של כמות ההריסות הצפויה באלפי טון במרחב מדינת ישראל כתוצאה מרעידת אדמה כדוגמת זו המוצגת בתרחיש לתרגיל "נקודת מפנה 6". סולם הצבעים מצד שמאל למעלה מציין את טווח כמות ההריסות באלפי טון. מתוך תיקיית מפות B.



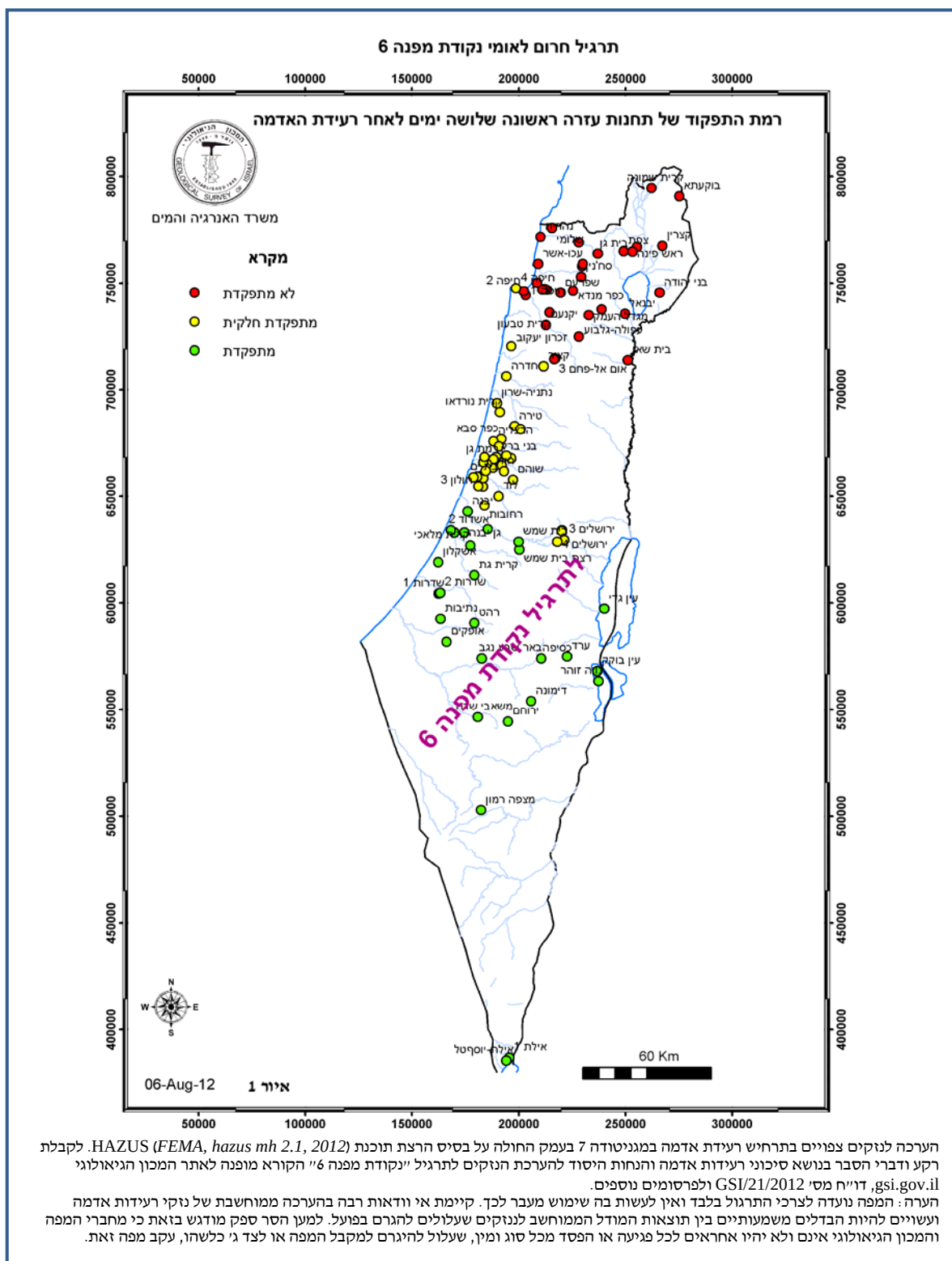
איו 11. מספר הבניינים שעלולים להינזק ברמה בינונית באזור אצבע הגליל וצפון רמת הגולן. סולם הצבעים מצד שמאל מציין את טווח מספר הבניינים שאפויים להיפגע בתא מרחבי נתון. המספרים ע"ג המפה מציינים את מספר הבניינים שאפוי להיפגע בתא הנתון. מתוך תיקיית מפות C.



איור 12. דוגמא למפה ארצית אשר מציגה את הפגיעה האפשרית בדמוגרפיה. מוצגת הערכה לגבי מספר האנשים (~21,000), שצפויים להיות ללא קורת גג לאחר רעידת האדמה במרחב. סולם הצבעים מצד שמאל מציין את הטווח האפשרי של מספר העקורים. מתוך תיקיית מפות B.



איור 13. דוגמא למפה ארצית אשר מציגה את רמות הנזק במתקני תשתית מסוג תחנות עזרה ראשונה לאחר רעידת האדמה במרחב. עגולים מלאים בצבע ירוק, צהוב ואדום מציינים את רמות הנזק: קל, בינוני ומוחלט, בהתאמה. מתוך תיקיית מפות **D**.



איור 14. דוגמא למפה ארצית אשר מציגה את רמת התפקוד של מתקני תשתית שלושה ימים לאחר רעידת האדמה, במקרה זה תחנות עזרה ראשונה. עגולים מלאים בצבע אדום, צהוב וירוק מציינים את רמות התפקוד: לא מתפקדת, מתפקדת באופן חלקי ומתפקדת באופן מלא, בהתאמה. מתוך תיקיית מפות D.

10. נספח - תיק מפות

הנספחים (תיקי המפות) יופצו באתר האינטרנט של המכון הגיאולוגי (<http://www.gsi.gov.il/>) במהלך התרגיל.

תיק מפות A

מפות סיכון גיאולוגיות-גיאופיסיות

1. מפת תאוצות קרקע מחושבות PGA
2. מפת תאוצות קרקע מחושבות SA03
3. מפת תאוצות קרקע מחושבות SA10
4. מפת מהירות קרקע מחושבות PGV
5. מפת האזורים המועדים להגברת תשתית חריגה בישראל
6. מפת העתקים "פעילים" והעתקים "חשודים כפעילים" בישראל
7. ערכת מפות של הערכת כשל מדרונות בצפון ישראל ומרכז
8. מפת רגישות להתנזלות במפרץ חיפה
9. צונאמי באזור מפרץ חיפה

תיק מפות B

מפות נזק ארציות במבנים

רשומת המפות הארציות

1. נזק ללא תקנה עד הרס מוחלט במבנים בישראל
2. נזק בינוני במבנים בישראל
3. נזק קל במבנים בישראל
4. משקל ההריסות במרחב ישראל
5. נזק כלכלי ישיר כולל במרחב ישראל
6. נזק כלכלי ישיר במבנים אזרחיים
7. נזק כלכלי ישיר במבנים ממשלתיים
8. נזק כלכלי ישיר במבני חינוך
6. כמות הנפגעים
7. מספר בעלי בתים מפונים
8. מספר אנשים ללא קורת גג

תיק מפות C

מפות נזק אזוריות במבנים

רשומת המפות באזור הצפון

1. נזק (ללא תקנה עד הרס) באזור עפולה והסביבה
2. נזק (בינוני) באזור עפולה והסביבה
3. נזק (קל) באזור עפולה והסביבה
4. נזק (ללא תקנה עד הרס) באזור כפר תבור והסביבה

5. נזק (בינוני) באזור כפר תבור והסביבה
6. נזק (קל) באזור כפר תבור והסביבה
7. נזק (ללא תקנה עד הרס) באזור זיכרון יעקב והסביבה
8. נזק (בינוני) באזור זיכרון יעקב והסביבה
9. נזק (קל) באזור זיכרון יעקב והסביבה
10. נזק (ללא תקנה עד הרס) באזור חיפה והסביבה
11. נזק (בינוני) באזור חיפה והסביבה
12. נזק (קל) באזור חיפה והסביבה
13. נזק (ללא תקנה עד הרס) באזור קצרין והסביבה
14. נזק (בינוני) באזור קצרין והסביבה
15. נזק (קל) באזור קצרין והסביבה
16. נזק (ללא תקנה עד הרס) באזור קריית שמונה והסביבה
17. נזק (בינוני) באזור קריית שמונה והסביבה
18. נזק (קל) באזור קריית שמונה והסביבה
19. נזק (ללא תקנה עד הרס) באזור נצרת עילית והסביבה
20. נזק (בינוני) באזור נצרת עילית והסביבה
21. נזק (קל) באזור נצרת עילית והסביבה
22. נזק (ללא תקנה עד הרס) באזור כרמיאל והסביבה
23. נזק (בינוני) באזור כרמיאל והסביבה
24. נזק (קל) באזור כרמיאל והסביבה
25. נזק (ללא תקנה עד הרס) באזור צפת והסביבה
26. נזק (בינוני) באזור צפת והסביבה
27. נזק (קל) באזור צפת והסביבה
28. נזק (ללא תקנה עד הרס) באזור טבריה והסביבה
29. נזק (בינוני) באזור טבריה והסביבה
30. נזק (קל) באזור טבריה והסביבה

רשומת המפות באזור המרכז וירושלים

31. נזק (ללא תקנה עד הרס) באזור חדרה והסביבה
32. נזק (ללא תקנה עד הרס) באזור נתניה והסביבה
33. נזק (ללא תקנה עד הרס) באזור תל אביב והסביבה
34. נזק (ללא תקנה עד הרס) באזור מודיעין והסביבה
35. נזק (ללא תקנה עד הרס) באזור בית שמש והסביבה
36. נזק (ללא תקנה עד הרס) באזור ירושלים והסביבה
37. נזק (ללא תקנה עד הרס) באזור אשדוד והסביבה

רשומת המפות באזור אילת והסביבה

38. נזק ללא תקנה עד הרס באזור אילת
39. מספר האנשים ללא קורת גג

תיק מפות D

מפות נזק ארציות במתקני תשתיות

רשומת מפות הנזק הארציות בתשתיות

1. **רמות נזק בבתי חולים מרכזיים**
2. רמת תפקוד בתי החולים לאחר יום אחד מעת התרחשותה של רעידת האדמה
3. רמת תפקוד בתי החולים לאחר 3 ימים מעת התרחשותה של רעידת האדמה
4. רמת תפקוד בתי החולים לאחר 7 ימים מעת התרחשותה של רעידת האדמה
5. רמת תפקוד בתי החולים לאחר 14 ימים מעת התרחשותה של רעידת האדמה
6. **רמות נזק בתחנות עזרה ראשונה**
7. רמת תפקוד בתחנות עזרה ראשונה לאחר יום אחד מעת התרחשותה של רעידת האדמה
8. רמת תפקוד בתחנות עזרה ראשונה לאחר 3 ימים מעת התרחשותה של רעידת האדמה
9. רמת תפקוד בתחנות עזרה ראשונה לאחר 7 ימים מעת התרחשותה של רעידת האדמה
10. רמת תפקוד בתחנות עזרה ראשונה לאחר 14 ימים מעת התרחשותה של רעידת האדמה
11. **רמות נזק בתחנות משטרה**
12. רמת תפקוד בתחנות משטרה לאחר יום אחד מעת התרחשותה של רעידת האדמה
13. רמת תפקוד בתחנות משטרה לאחר 3 ימים מעת התרחשותה של רעידת האדמה
14. רמת תפקוד בתחנות משטרה לאחר 7 ימים מעת התרחשותה של רעידת האדמה
15. רמת תפקוד בתחנות משטרה לאחר 14 ימים מעת התרחשותה של רעידת האדמה
16. **רמות נזק בתחנות כבאות אש והצלה**
17. רמת תפקוד של תחנות כבאות אש והצלה לאחר יום אחד מעת התרחשותה של רעידת האדמה
18. רמת תפקוד בתחנות כבאות אש והצלה לאחר 3 ימים מעת התרחשותה של רעידת האדמה
19. רמת תפקוד בתחנות כבאות אש והצלה לאחר 7 ימים מעת התרחשותה של רעידת האדמה
20. רמת תפקוד בתחנות כבאות אש והצלה לאחר 14 ימים מעת התרחשותה של רעידת האדמה
21. **רמות נזק בחוות דלק**
22. רמת תפקוד בחוות הדלק לאחר יום אחד מעת התרחשותה של רעידת האדמה
23. רמת תפקוד בחוות הדלק לאחר 3-14 ימים מעת התרחשותה של רעידת האדמה
24. **רמות נזק במתקני המים**
25. רמת תפקוד של מתקני המים לאחר יום אחד מעת התרחשותה של רעידת האדמה
26. רמת תפקוד של מתקני המים לאחר 3 ימים מעת התרחשותה של רעידת האדמה
27. רמת תפקוד של מתקני המים לאחר 7 ימים מעת התרחשותה של רעידת האדמה
28. רמת תפקוד של מתקני המים לאחר 14 ימים מעת התרחשותה של רעידת האדמה
29. **רמות נזק בקווי מים שפירים**
30. **רמות נזק במתקנים לטיפול במי שפכים**
31. רמת תפקוד של מתקנים לטיפול במי שפכים לאחר יום אחד מעת התרחשותה של רעידת האדמה
32. רמת תפקוד של לטיפול במי שפכים לאחר 3 ימים מעת התרחשותה של רעידת האדמה
33. רמת תפקוד של לטיפול במי שפכים לאחר 7 ימים מעת התרחשותה של רעידת האדמה
34. רמת תפקוד של לטיפול במי שפכים לאחר 14 ימים מעת התרחשותה של רעידת האדמה

35. רמות נזק בקווי מי שפכים

36. רמות נזק בתחנות אוטובוס מרכזיות

37. רמת תפקוד של תחנות אוטובוס מרכזיות לאחר יום אחד מעת התרחשותה של רעידת האדמה
38. רמת תפקוד של תחנות אוטובוס מרכזיות לאחר 3 ימים מעת התרחשותה של רעידת האדמה
39. רמת תפקוד של תחנות אוטובוס מרכזיות לאחר 7 ימים מעת התרחשותה של רעידת האדמה
40. רמת תפקוד של תחנות אוטובוס מרכזיות לאחר 14 ימים מעת התרחשותה של רעידת האדמה

41. רמות נזק בנמלים ובמעגנים

42. רמת תפקוד של נמלים ומעגנים לאחר יום אחד מעת התרחשותה של רעידת האדמה
43. רמת תפקוד של נמלים ומעגנים לאחר 3 ימים מעת התרחשותה של רעידת האדמה
44. רמת תפקוד של נמלים ומעגנים לאחר 7 ימים מעת התרחשותה של רעידת האדמה
45. רמת תפקוד של נמלים ומעגנים לאחר 14 ימים מעת התרחשותה של רעידת האדמה

46. רמות נזק במתקני שדות תעופה

42. רמת תפקוד של מתקני שדות תעופה לאחר יום אחד מעת התרחשותה של רעידת האדמה
43. רמת תפקוד של מתקני שדות תעופה לאחר 3-14 ימים מעת התרחשותה של רעידת האדמה

44. רמות נזק במתקני הרכבת

45. רמת תפקוד של מתקני הרכבת לאחר 1-14 ימים מעת התרחשותה של רעידת האדמה

תיק מפת נזק מוכללת בקובצי GIS

יופץ בתקליטור במהלך התרגיל