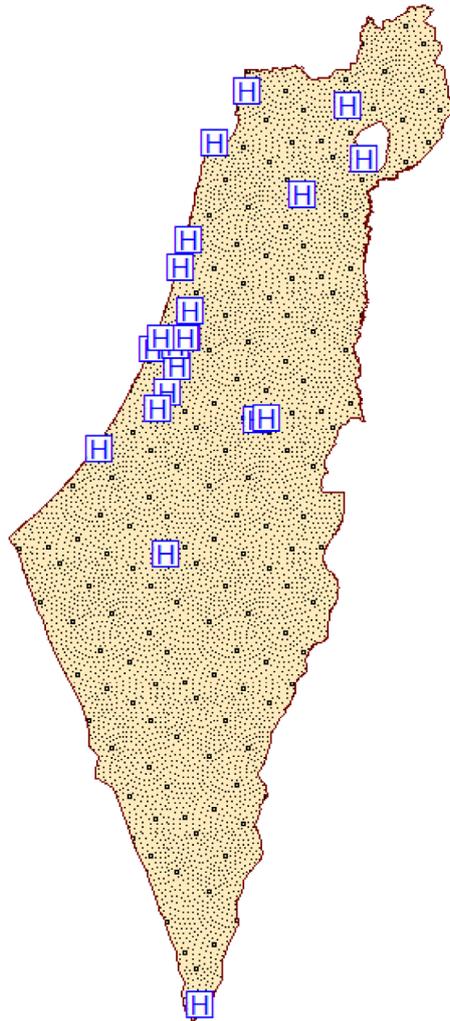




משרד התשתיות הלאומיות  
המכון הגיאולוגי

# הדמיות נזק ראשוניות בבתי חולים מרכזיים ובתחנות עזרה ראשונה במסגרת יישום תוכנת HAZUS לקראת רעידת אדמה חזקה בישראל

צפרייר לוי



מוגש לוועדת ההיגוי הממשלתית להיערכות לרעידות אדמה

הזמנה מס' 210-02-006





משרד התשתיות הלאומיות  
המכון הגיאולוגי

# הדמיות נזק ראשוניות בבתי חולים מרכזיים ובתחנות עזרה ראשונה במסגרת יישום תוכנת *HAZUS* לקראת רעידת אדמה חזקה בישראל

צפריר לוי

מוגש לועדת ההיגוי הממשלתית להיערכות לרעידות אדמה

הזמנה מס' 210-02-006



## תוכן העניינים

### עמוד

1	מבוא.....	1.1
1	יישום תוכנת ה- <i>Hazus</i> בישראל.....	1.1
4	מטרות המחקר.....	1.2
5	אומדני הנזק בבתי חולים ובתחנות העזרה הראשונה.....	2
6	מתודולוגיה.....	3
6	כללי.....	3.1
7	בתי חולים מרכזיים.....	3.2
7	תחנות עזרה ראשונה.....	3.3
8	תוצאות.....	4
8	בתי חולים.....	4.1
8	תחנות עזרה ראשונה.....	4.2
9	דיון.....	5
9	שילוב נתוני תשתיות במערכת ה- <i>Hazus</i> .....	5.1
10	בתי חולים.....	5.2
10	תחנות עזרה ראשונה.....	5.3
11	סיכום.....	5.4
12	תודות.....	6
12	מקורות ספרות.....	7
16	איורים.....	8



## תקציר

מדינת ישראל ממוקמת לאורך טרנספורם ים המלח, שהוא אחד ממערכות ההעתקים הפעילים ביותר במזרח הים התיכון. בהתבסס על מחקרים פלאוסיסמיים ותיעוד סיסמי מודרני נראה שרעידות אדמה חזקות ( $M_w > 6$ ) לאורך טרנספורם ים המלח הן בלתי נמנעות ועלולות להתרחש בכל עת. הניסיון מלמד שרעידות אדמה חזקות יכולות לגרום לנזק רב בתשתיות ובמתקנים חיוניים, דבר שיכול להביא לפגיעה קשה במרקם החיים הסדיר, האנושי והכלכלי במדינה שנפגעה. פיתוח הדמיות נזקים במתקנים חיוניים הנו, על כן, אחד מהכלים החשובים ביותר לתכנון והערכות טובה לפני רעידת אדמה, כמו גם למזעור סיכונים בעת ולאחר הרעידה. למרות החשיבות הרבה בפיתוח תרחישים, בישראל, עדיין לא פותחו תרחישי נזק למתקנים חיוניים כדוגמת בתי חולים ותחנות עזרה ראשונה ברמה הלאומית.

תשתיות חיוניות כדוגמת בתי חולים ותחנות עזרה ראשונה הם מתקנים בעלי חשיבות גבוהה ביותר בכל הקשור במתן עזרה רפואית הכרחית ושיקומית מיד לאחר התרחשותה של רעידת אדמה. למרות החשיבות הרבה מאד בפיתוח של תרחישי נזק בתשתיות, למיטב ידיעתנו עד היום לא פותחו תרחישים לאומיים שחישבו ברמה הארצית את הנזקים בתשתיות חיוניות כדוגמת בתי חולים מרכזיים ותחנות עזרה ראשונה. מעבר לכך, למעשה עד היום לא קיימת בישראל מערכת ממוחשבת אחת אשר ביכולתה לקלוט ולהציג מידע מרחבי מפורט בעת "אירוע אמת" של בתי-החולים המרכזיים ותחנות עזרה ראשונה שמשולב עם תנודות קרקע מחושבות מיד לאחר התרחשותה של רעידת אדמה.

מטרת העבודה הנוכחית אשר מתבצעת במסגרת יישום של תוכנת התרחישים המתקדמת *Hazus*, היא להתחיל את השלב הראשוני בפיתוח של תרחישי נזק לתשתיות חיוניות בישראל. אומדן הנזק בתשתיות החיוניות נעשה בתוכנה על ידי הפעלת אלגוריתמים שונים ברשת פוליגונים ארצית אשר מותאמים לתת תחזית לנזק לסוגים שונים של תשתיות, כולל זמן שיקום מתקן התשתית ונזק כלכלי לאחר התרחשותה של רעידת אדמה.

כדי לבדוק את יכולת התוכנה לקלוט מידע לגבי מערכות תשתית חיוניות ולחשב אומדני נזק במרחבה של מדינת ישראל, הותאמו בקבצי הקלט של התוכנה רשומות מידע של בתי חולים מרכזיים ושל תחנות עזרה ראשונה. במסגרת התאמת התוכנה לישראל ובניית יכולתה החישובית לאומדן נזק לתשתיות חיוניות, הורצו שתי הדמיות של רעידות אדמה סינתטיות באזור יריחו ("תרחיש יריחו") ובאזור החולה ("תרחיש החולה"). עוצמת רעידת האדמה נקבעה ל-  $6.5 = M_w$ , ועומק הרעידה נקבע ל- 10 ק"מ. לאחר קליטת רשומות המידע במערכת והרצת הסימולאציות, התקבלו אומדני הנזק, ואומדני זמן שיקום, עבור כל מתקני התשתיות החיוניות במרחב שנבדק.

תוצאות הסימולאציות מראות בברור שלמיקום המתקן הרפואי החיוני במרחב ועמידותו הסיסמית, ישנה השפעה רבה על מידת הנזק הצפוי למתקן בודד כמו גם לאוסף מתקנים. לדוגמא, ב "תרחיש החולה", בתי חולים אשר ממוקמים עשרות ק"מ ויותר מהמוקד צפויים להיפגע במידה מזערית בלבד. לעומת זאת, במידה ובית החולים שאינו עמיד בפני רעידות אדמה יהיה ממוקם סמוך למוקד הרעידה, אזי ההסתברות שהנזק יהיה לפחות באופן בינוני תגיע ל 52%.

בהתאמה, רמת התפקוד (מוגדרת במונחים של % מתפקוד מלא) של בית החולים צפויה להיות: 27% עבור יום אחד, 28% עבור 3 ימים, 48% עבור 7 ימים, 49% עבור 14 ימים, 79% עבור 30 ימים, ו- 87% עבור 90 ימים. כמו כן לדוגמא רמת התפקוד של תחנת עזרה ראשונה אשר ממוקמת סמוך למוקד רעידת אדמה ("תרחיש יריחו") צפויה להיות: 48% עבור יום אחד, 49% עבור 3 ימים, 68% עבור 7 ימים, 70% עבור 14 ימים, 91% עבור 30 ימים, ו- 95% עבור 90 ימים.

תוצאות השלב הראשון של יישום מתקני התשתיות הרפואיות במערכת ה *Hazus* מראות בברור כי ניתן לאמוד באופן סביר את הנזק הצפוי לבתי החולים המרכזיים ותחנות עזרה ראשונה, לפני ולאחר רעידת אדמה חזקה בישראל. לתוכנה המתקדמת ישנם יתרונות רבים אשר יכולים להיות לעזר רב, לפני רעידת אדמה לצורכי מניעה, היערכות ומזעור נזקים, ולאחר הרעידה כתמיכה לגורמים שמפעילים את "חדר מצב" ובהזרמת מידע מעובד לגורמי התשתיות החיוניות, לגופי החרום, ולדרג המחליט.

יכולותיה ויתרונותיה של פלטפורמת *Hazus* במתן תחזיות נזק למתקני החרום הרפואיים בישראל כפי שהתבררו בעבודה הנוכחית, מלמדות שיישום התוכנה במלואה בישראל הינה משימה הכרחית. בכדי להגדיל את רמת מהימנות וההתאמה של מערכת ה *Hazus* בישראל, חשוב להמשיך ליישם את שאר שלבי הכיול וההתאמה של המערכת בישראל ולחזק את מידת שיתוף הפעולה של גורמי התשתיות עם פרויקט לאומי זה.

# 1. מבוא

## 1.1 יישום תוכנת ה *Hazus* בישראל

מדינת ישראל ממוקמת לאורך טרנספורם ים המלח (למשל, Freund, et al., 1959; Quennell, 1959; Garfunkel, 1981; al., 1968), שהוא אחד ממערכות העתקים הפעילים ביותר במזרח התיכון (למשל, Ben-Menahem, 1991; Garfunkel, 1981). דוגמאות לפעילות לאורך טרנספורם ים המלח הן התרחשותן למשל של שתי רעידות אדמה חזקות שהיו במאה הקודמת, רעידת האדמה (Ms= 6.2) שהייתה ביריחו ב 1927 (Shapira et al., 1993) ורעידת האדמה (Mw= 7.2) שהייתה בנואיבה ב 1995 (למשל, Baer et al., 2008 and Shamir, 1996; Shamir et al., 2003; Marco et al., 2003; Amit, 2003; references therein). בהתבסס על מחקרים פליאו סיסמיים (למשל, Marco et al., 2003; Amit, 2003; et al., 2002) ותיעוד קטלוגי של רעידות אדמה (למשל, Guidoboni et al. 1994; Guidoboni, 2002; Ambraseys 2009; Comastri, 2005) ההנחה המקובלת היא שרעידת אדמה חזקה (Mw= 6-7) יכולה להתרחש בישראל בכל עת. לפי התיעוד ההיסטורי למעשה כמעט כל עיר גדולה בישראל באלפיים השנים האחרונות ניזוקה על ידי רעידות אדמה (למשל, Salamon et al. 2009; Avni, 1999). לכן, ישנו צורך חיוני לפתח שיטות פעולה למזעור כמות הנפגעים, הנוק בתשתיות והגדלת מודעות הציבור באזורים המסוכנים. אחת הדרכים היעילות ביותר להשיג מטרה זו היא פיתוח של מערכת ממחושבת שביכולתה לאמוד לפני הרעידה את רמת הסיכון של המבנים, התשתיות והסיכונים האנושיים במרחב (למשל, Sokhi, 2000; Agrawal, 2004).

רעידות אדמה חזקות יכולות לגרום לנזק רב בתשתיות (למשל, Manos and Clough, 1985; Chang et al., 2003; Byers and Asce, 2003; Fikri, 2009) ובמתקני חרום חיוניים וכתוצאה מכך יכולה להיגרם פגיעה חמורה במרקם החיים האנושי והכלכלי במדינה בה פגעה הרעידה. היום, ניתן להעריך את ההסתברות להתרחשותה של רעידה בזמן ואת עוצמתה (Begin, 2005; Hamiel et al., 2009) אך לצערנו, הידע הגיאולוגי והסיסמולוגי אינו מאפשר קביעה דטרמיניסטית מתי היכן ובאיזו עוצמה תהיה הרעידה, שתפקוד את מתקן התשתית החיוני. לכן מבחינה סטטיסטית, לאורך זמן קיומו של מבנה של בית-חולים או מבנה של תחנת עזרה ראשונה שמתיישנים עם הזמן והם אינם עומדים בתקני בנייה חדשים יכולות לפקוד את המתקנים רעידות אדמה בעוצמות שונות. עקב חוסר ודאות זה התחזית לנזק עבור מתקני תשתיות חיוניות צריכה להתבסס על רעידות אדמה שונות ועל נתונים הנדסיים ספציפיים למתקן, כאשר הם יכולים להיות שונים בין מתקן אחד למשנהו למשל עקב התיישנותו של מתקן מסוים שמביאה להחלשת עמידותו בפני רעידות אדמה. לכן, בכדי לפתח תחזיות נזק מיטביות למתקני תשתיות חיוניות, ישנו צורך בהפעלת מערכת חישובית גמישה אשר ביכולתה לתת תרחישי נזק משתנים בהתבסס על עוצמת רעידות אדמה ונתוני מוקד שונים ועל נתונים הנדסיים (למשל, חוזק הסיסמי של בית חולים) של מתקני התשתית החיוניים במרחב.

בתי חולים מרכזיים ותחנות עזרה ראשונה הם מתקנים בעלי חשיבות גבוהה ביותר בכל הקשור במתן עזרה רפואית הכרחית ושיקומית מיד לאחר התרחשותה של רעידת אדמה. למרות החשיבות שמתקנים אלו יהיו בעלי שרידות הגבוהה ביותר לאחר רעידת אדמה, אגפים רבים של

בתי חולים (למשל, בצפון ישראל) הם ישנים מאוד ואינם בנויים לפי תקני בנייה עדכניים ורובם עלולים לקרוס ברעידת אדמה (לינדנשטראוס, 2011). הנזק הישיר שעלול להיגרם עקב פגיעה ישירה בבתי חולים ובתחנות עזרה ראשונה שאינם עמידים בפני רעידות אדמה יכול להתבטא בקריסה של חלק מאגפי הטיפול, השבתה של חלק ממתקני הטיפול, נזק במלאי התרופות ובמאגרי המידע הרפואיים. בנוסף, צפויים להיות שיבושים באספקת החשמל והמים שיגרמו לפגיעה מידית במתן טיפול רפואי.

להמחשה, במידה ומוקד רעידת האדמה יהיה בצפון ישראל, אגפים שלמים בבתי החולים המרכזיים בצפון המדינה צפויים לקרוס או להינזק במקרה של רעידת אדמה חזקה (לינדנשטראוס, 2011). למשל, בבית החולים "זיו" שבצפת קיים סיכוי רב שאגפים רבים יקרוסו עקב אי עמידותו של המבנה. כמו כן, גם בבית החולים פורייה בטבריה ישנו חשש רב שמבנה המחלקות "טיפול נמרץ", "המיון" ו"מחלקת ילדים" יקרוס עקב חוסר עמידותו הצפויה בעת רעידת אדמה חזקה. קריסת אגף בית חולים או קריסת מבנה שנועד לשמש למתן עזרה ראשונה ילווה בפגיעה חמורה בצנרת החמצן או ברשת החשמל. פגיעה זאת תגרום לכך, שהמתקן הרפואי לא יוכל יותר לתפקד כבית חולים או כמתקן לעזרה ראשונה. משמעות הדבר היא שבמידה והמתקן הרפואי לא יהיה עמיד בפני רעידת אדמה, ישנו סיכוי רב שלאחר רעידת אדמה חזקה לא יהיה בית חולים מרכזי או מבנה לעזרה ראשונה שיוכל לתת טיפול בנפגעים באזור הקרוב יחסית למוקד רעידת האדמה.

לצורך הערכות מדינת ישראל לרעידות אדמה הוכנו בעשור האחרון מספר תרחישים כוללים, שמציגים הערכות שונות לגבי הנזק הצפוי במבנים ופגיעה באוכלוסייה בהתאם לגודל ומיקומה של רעידת האדמה. למרות החשיבות הרבה מאד בפיתוח של תרחישי נזק בתשתיות, למיטב ידיעתנו עד היום לא פותחו תרחישים לאומיים שחישבו ברמה הארצית את הנזקים בתשתיות חיוניות כדוגמת בתי חולים מרכזיים ותחנות עזרה ראשונה.

מעבר לכך, למעשה עד היום לא קיימת בישראל מערכת ממוחשבת אחת אשר ביכולתה לקלוט ולהציג מידע מרחבי מפורט בעת "אירוע אמת" של בתי- החולים המרכזיים ותחנות עזרה ראשונה שמשולב עם תנודות קרקע מחושבות מיד לאחר התרחשותה של רעידת אדמה בישראל.

תוכנת *Hazus* שהיא היום תוכנת התרחישים המתקדמת בעולם, פותחה על ידי עשרות חוקרים מתחומים שונים ב"סוכנות הפדראלית לניהול מצבי חרום (Federal Emergency Management Agency (FEMA)) (FEMA, 1997; FEMA, 2006a,b).

התוכנה מאפשרת בצורה גמישה מאד לפתח תרחישים שונים של רעידות אדמה עם אומדן לנזק, בתשתיות חיוניות ואומדן לנזק כלכלי. התוכנה נבחנה בהצלחה בארה"ב (Buika, 2000; Kircher et al., 2006; Tantal et al., 2008; et al., 2006) ובשנים האחרונות יושמה התוכנה ושיטותיה בארצות שמחוץ לארה"ב (למשל, Erdik et al., 2009; Korkmaz., 2009; Ploeger et al., 2009; Gulati., 2006).

בהשוואה לתוכנות אחרות תרחישים אחרות (למשל, Crowley et al., 2004; KOERI, 2002; Edrik et al., 2010; Molina et al., 2010) תוכנת ה- *Hazus* בנוסף ליכולתה לחשב נזק במבנים, היא יכולה גם לחשב ברמה ארצית נזק עבור מגוון רחב מאד של תשתיות בהתאם לאיכות וסוג המידע שמוכנסים בתוכנה.

יתרונות של התוכנה באומדן של נזק במתקני חרום לאומיים הן בעיקר (FEMA, 2003):

- 1) החישוב של תנודות הקרקע ושל הנזק התשתיתי שנעשה בתאי חישוב (פוליגונים) מרחביים מאפשר לקבל מידע סלקטיבי לגבי הנזק הצפוי במתקן תשתית חיוני בכל אזור נבחר.
- 2) חישוב הנזק בתשתיות החיוניות מתבסס על פונקציות נזק (עקומות שבירות) שמאפשרות לתת תחזית של נזק בחמש רמות שונות.
- 3) בתוכנה קיימים קבצי "קלט" רבים שתוכננו למגוון של מתקני תשתיות חיוניות.
- 4) בתוכנה קיימות עקומות "זמן שיקום" ייחודיות שמאפשרות לתת תחזית לזמן שיקום של מתקן חיוני מסוים לאחר התרחשותה של רעידת האדמה.

תהליך היישום של תוכנת ה-Hazus החל בהמלצתו של דר' גדעון ליאונרד ממרכז סורק שיש ליישם את התוכנה בישראל, לאחר מכן בפיתוח מוצלח של "תרחיש ירושלים" שנעשה בתוכנה זו (Tavron et al., 2007), ולאחר ההחלטה של וועדת ההיגוי לרעידות אדמה לאמץ את תוכנת התרחישים בישראל ופיתוח תרחישים כוללים על כל שטחה של מדינת ישראל (Levi et al, 2010; Levi and Salamon, 2010).

בהתאם להחלטת וועדת ההיגוי, התבצע השלב הראשוני הכללי של יישום תוכנת התרחישים המתקדמת Hazus בישראל (Levi et al, 2010) ובנוסף התבצע השלב הראשוני של הדמיות נזק ראשוניות במתקני המים הרכבת ודלק בישראל (Levi and Salamon, 2010). ההרצות הראשוניות בתוכנת Hazus בדקו את היכולת לקלוט בשטחה של מדינת ישראל רעידת אדמה סינתטית וכמו כן את היכולת של התוכנה בחישוב של תנודות ספקטראליות; נזק בבניינים לפי סוגים שונים במרחב; אומדן נפגעים ומתן תחזית לנזק כלכלי. בנוסף, התבצע ניסיון להטמיע מערכות תשתית ישראליות כדוגמת המתקנים של מערכות המים הרכבת והדלק במערכת של ה-Hazus, ובדיקת יכולותיה החישוביות בהתאם.

התוצאות העידו באופן ברור שלפלטפורמה של ה-Hazus יש את כל היתרונות להיות כלי מודרני ושימושי להערכת נזקים צפויים (בניינים, מתקני תשתית ורכוש) לקראת רעידת אדמה חזקה בישראל.

## 1.2 מטרת המחקר

היישום של מערכת ה-Hazus בישראל הנו תהליך ארוך ומורכב הכולל שלושה שלבים עיקריים: 1) בניית פלטפורמה בסיסית, 2) בניית פלטפורמה לתשתיות ולמתקנים חיוניים ו-3) שלבי כיוול. המטרה הראשית בעבודה הנוכחית כחלק של יישום תוכנת Hazus בישראל, היא לבדוק את יכולת התוכנה בהתאמה והכנסה של נתוני תשתיות חיוניות בישראל לפלטפורמה של ה-Hazus. העבודה הנוכחית התמקדה בתשתיות חיוניות: בתי-חולים מרכזיים ותחנות עזרה ראשונה. מטרת נוספת שהוצבו בעבודה הן בדיקת יכולות החישוב של אומדני הנזק השונים של התשתיות החיוניות שנקלטו במערכת ובחינת יתרונות התוכנה בקשר להערכות מדינת ישראל לקראת רעידת אדמה ככלל ולאירוע בזמן אמת בפרט. מאחר והעבודה נועדה לבדוק את יכולת

היישום של התוכנה בישראל ובהעדף עקומות נזק אופייניות לישראל היא מתבססת על עקומות אמריקאיות, אין ביכולתה בעת הזאת להעריך במדויק את הנזק לבתי חולים ולתחנות עזרה ראשונה במרחב הישראלי, והיא אינה מהווה תחליף למחקר הנדסי בעמידות של מתקני התשתיות החיוניות בפני רעידות אדמה. רקע הנדסי מפורט בנושא של נזק למתקני תשתיות חיוניות מופיע במדריך למשתמש של תוכנת ה-Hazus כולל הפניות לספרות מקצועית נלוות (FEMA, 2003).

## 2. אומדני הנזק בבתי החולים ובתחנות העזרה הראשונה

הנזק במתקני תשתיות חיוניות בעת התרחשותן של רעידות אדמה בדרך כלל נגרם מתנודות הקרקע, אך לעיתים הוא יכול גם להיגרם עקב התפתחות סדקים בפני הקרקע, גלישות קרקע והתנזלות, שיכולים להביא לפגיעה ממשית במתקן. פונקציות הנזק במבני תשתיות חיוניות בדומה לפונקציות הנזק (עקומות שבירות) שפותחו ב-Hazus עבור מבנים ציבוריים ואזרחיים, הן מסוג של *Lognormal-distribution*, שמותאמות לרמת הנזק אליה יכול להגיע מבנה התשתית ובהתאם לתנודת הקרקע (PGA or PGV) או לכשל הקרקע (PGD) הן נותנות מספר דיסקרטי (בין 0 ל 1) הסתברותי לנזק בתשתית. הנזק המחושב במבני תשתיות חיוניות נעשה על ידי הכנסת מספר דיסקרטי מתוך התפלגות תנודות הקרקע והפעלה של פונקציות הנזק בהתאם.

בהתבסס על ניסיון נצבר של נזקים במבני תשתיות חיוניות לאחר רעידות אדמה הותאמו פונקציות הנזק לרמות עמידות סייסמיות שונות: (1) מבנים שאינם בנויים לרעידות אדמה (Pre-code), (2) מבנים שהם בנויים לרעידת אדמה ברמה נמוכה (Low-code), (3) מבנים שבנויים ברמה בינונית (Medium-code) ו (4) מבנים שבנויים ברמה גבוהה (High-code). למשל, מבנה חיוני ישן ושהוא אינו בנוי לפי תקן בנייה סטנדרטי יוגדר כמבנה שאינו עמיד בפני רעידות אדמה.

כל הפרמטרים ההנדסיים שמוכנסים לפונקציות הנזק וגודלם מפורטים במדריך למשתמש של תוכנת ה-Hazus כולל הפניות לספרות מקצועית נלוות (FEMA, 2003).

בהתבסס על הפרמטרים הגיאולוגיים (למשל, יחידה גיאולוגית, רגישות להתנזלות), הפרמטרים ההנדסיים (למשל סוג המבנה או המיכל ואופן העיגון) והפרמטרים הסטטיסטיים מתקבלות על ידי הפעלת פונקציות הנזק חמש רמות נזק כלליות (FEMA, 2003):

1) אין נזק, 2) נזק קל/ לפחות נזק קל, 3) נזק בינוני/לפחות נזק בינוני, 4) נזק מתקדם/לפחות נזק מתקדם ו 5) קריסה.

בהתאם לרמות הנזק שהמבנה התשתיתי יגיע מותאמות בתוכנת ה-Hazus עקומות זמן/שיקום (Restoration functions), שנותנות חיזוי לרמת תפקוד המתקן ושיקומו (%מתפקוד מלא או %פונקציונאליות) לאחר מספר ימים מעת התרחשותה של רעידת האדמה (1, 3, 7, 14, 30 ו 90 ימים) (ATC-13, 1985).

במידת הצורך, שינוי החישוב של זמן השיקום של מיתקן ספציפי יכול להיעשות על ידי שינוי הפרמטרים הסטטיסטיים (ממוצע וסטיית תקן) של כל אחת מהעקומות שמותאמות למתקני התשתית השונים.

### 3. מתודולוגיה

#### 3.1 כללי

הטמעת רשומות בתי החולים ותחנות עזרה הראשונה בפלטפורמה של ה-Hazus ובדיקת היכולת של המערכת החישובית "הישראלית" לתת תחזית לנזק הן כוללות מספר שלבים: (1) זיהוי המתקן החיוני במרחב והתאמת הקאורדינטות של מתקני התשתיות לרשת הקאורדינטות האמריקאית שעליה מושתת תוכנת ה-Hazus, (2) שיוך מתקן התשתית החיוני לתא חישובי מתאים שנמצא במערכת וקביעת קוד זיהוי, (3) קביעת הפרמטרים של פונקציות הנזק ועקומות זמן שיקום, (4) קביעת פרמטרים משניים (כגון, שם בית החולים ושם תחנת העזרה הראשונה, מספר מיטות, ומערכת גיבוי חשמלית), ו (5) סימולאציות של נזק ושל זמן שיקום בהתאם לנתוני מוקד והתשתית הגיאולוגית שמוכנסים בתוכנה.

מאחר ומטרת הדו"ח הנוכחי היא בעיקר לבדוק את היכולת של ה-Hazus להטמיע נתונים של מתקני תשתיות ישראליות ובדיקת היכולת לתת אומדן לנזק בתשתיות אלו, ומאחר ועדיין לא הוגדרו פונקציות נזק למבנים בישראל, נעשה שימוש בפרמטרים של פונקציות הנזק ובפרמטרים של עקומות זמן שיקום כפי שהם נמצאים בתוכנה. בכדי שההדמיות הנזק הראשוניות במתקני התשתיות החיוניות יהיו מחמירות, באופן שרירותי הוגדרו המתקנים בקבצי הקלט כמתקנים שהם אינם עמידים בפני רעידות אדמה (Pre-code).

כדי לבחון את גמישות התוכנה ביחס להגדרות העמידות של מתקני התשתית, נעשו הרצות נוספות בהן הוגדרה עמידות בתי החולים ותחנות העזרה הראשונה לרעידות אדמה כגבוהה (High-code), כאשר שאר הפרמטרים של רעידת האדמה, ושל פונקציות הנזק ועקומות זמן השיקום הושארו ללא שינוי. כך ניתן לבדוק את יכולת המערכת לקבל בעתיד שינויים בפרמטרים השונים שנמצאים בתוכנה, בהתאם לנתונים הקיימים אצל הגופים הממשלתיים השונים ולפי שיפוטו של המשתמש. כאמור, עבור כל אחד מהתרחישים נבדקו חמש רמות של נזק, ממצב של 'אין נזק' ועד לקריסה מוחלטת. כמו כן נבדקו רמות תפקוד של המתקן לאחר 1, 3, 7, 14, 30 ו- 90 ימים מעת התרחשותה של רעידת האדמה.

בכדי לבדוק את גמישות המערכת באומדן הנזק בתשתיות חיוניות, נבחנו שני תרחישים של רעידות אדמה לאורך העתק ים המלח: (1) באזור החולה ("תרחיש החולה") ו (2) באזור יריחו ("תרחיש יריחו"). בשני המקרים נקבעה המגניטודה של הרעידה הסינטטית ל-  $M_w = 6.5$ , ועומק הרעידה נקבע ל- 10 ק"מ (איור 1) בהתאם למדיניות שגובשה בישיבות שנעשו בשנים 2010-2011 בוועדת השרים לרעידות אדמה ובוועדת הטכנולוגיה והמדע.

תנודות הקרקע שחושבו בתוכנה התבססו על משוואת הניחות של Boore et al. (1997) אשר שימשה גם כבסיס למפת התאוצות (Shapira and Hofstetter, 2002) המופיעה בתקן הישראלי לבניה עמידה לרעידות אדמה ת"י 413. חישובי ההגברות של התנודות הסיסמיות התבססו על שיטת Vs30 (FEMA, 1997) אשר מגדירה את מידת ההגברה של התשתית בהתאם למהירות גלי הגזירה הממוצעת ב- 30 המטרים העליונים של פני השטח, ובמקביל מתייחסת גם לסוג הסלע ותכונותיו הגיאוטכניות. היחידות הגיאוטכניות שהוגדרו במערכת של ה-Hazus עבור תכונות התשתית הסלעית בישראל התבססו על המפה הגיאוטכנית שנעשתה על ידי Katz et al. (2008).

### 3.2 בתי חולים מרכזיים

לצורך היישום הראשוני של בתי החולים ב-Hazus, הוכנסו 24 בתי חולים מרכזיים למערכת. לאחר התאמת רשומות המידע של בתי החולים למערכת של ה-Hazus הוכנסו רשומות המידע בקבצי הקלט של ה-Hazus וניתן להם קוד מזהה של המערכת (איור 2).

בהעדר מאפיינים הנדסיים כמותיים לבתי החולים בישראל, הוגדרו בתי החולים בסימולאציות הראשוניות באופן שרירותי, כמבנים עשויים מבלוקים (URML) וכמו כן נקבע שהם אינם עמידים לרעידות אדמה (Pre code). שאר הפרמטרים של פונקציות הנזק ועקומות זמן השיקום הושארו כפי שהוגדרו מלכתחילה ב-Hazus.

### 3.3 תחנות עזרה ראשונה

לצורך היישום הראשוני של תחנות עזרה ראשונה ב-Hazus הותאמו ונקלטו לתוכנה 117 תחנות עזרה ראשונה (איור 3).

בהעדר מאפיינים הנדסיים כמותיים לתחנות עזרה הראשונה בישראל, הוגדרו המתקנים בסימולאציות הראשוניות באופן שרירותי, כמבנים עשויים מבלוקים (URML) וכמו כן נקבע שהם אינם עמידים לרעידות אדמה (Pre code). שאר הפרמטרים של פונקציות הנזק ועקומות זמן השיקום הושארו כפי שהוגדרו מלכתחילה ב-Hazus.

## 4. תוצאות

### 4.1 בתי חולים

כל רשומת בתי החולים המרכזיים שהוכנסו בקבצי הקלט הוטמעו בהצלחה בתוכנה וקיבלו תו זיהוי המעיד על התאמה מלאה בין רשומות הנתונים לתאי החישוב של המערכת (איור 2). לאחר סיום שלב הסימולאציות התקבלו במרחב כל אומדני הנזק ואומדני זמן השיקום.

טווחי הנזקים ההסתברותיים שצפויים להיות במרחב עבור בתי החולים ב "תרחיש יריחו" היו (איור 4): נזק קל 0-20%, נזק בינוני 0-18%, נזק חמור 0-6%, הרס מוחלט 0-1%, לפחות נזק קל 0-46%, לפחות נזק בינוני 0-25%, ולפחות נזק חמור 0-7%. המשמעות של טווחי הנזקים ההסתברותיים היא למשל, שבית חולים מסוים צפוי להינזק במרחב באופן בינוני ב 0 אחוזי הסתברות, ולעומת זאת בית חולים אחר באותה רמת נזק צפוי להינזק ב 18 אחוזי הסתברות. רמות הנזק לפחות נזק קל, לפחות נזק בינוני ולפחות נזק מתקדם הן רמות נזק שכוללות באופן הסתברותי את רמת הנזק הספציפית ואת רמות הנזק החמורות ממנה (ראה פרק 2).

טווחי רמות התפקוד (%פונקציונאליות) במרחב שחושבו עבור בתי החולים ב "תרחיש יריחו" היו (איור 5): 54-100% עבור יום אחד, 54-100% עבור 3 ימים, 75-100% עבור 7 ימים, 75-100% עבור 14 ימים, 93-100% עבור 30 ימים, ו 100% עבור 90 ימים. משמעות טווחי רמות התפקוד היא למשל, שלאחר 3 ימים מהתרחשותה של רעידת האדמה, יהיו במרחב בתי חולים ברמת תפקוד קרובה ל 100%, ולעומת זאת יהיו גם במרחב בתי חולים ברמת תפקוד של 54%. יש להניח, שמצב

תפקודו של בית חולים יהיה לאחר רעידת אדמה רק ~50% כאשר השרות הרפואי צפוי להיות לקוי ביותר.

טווחי הנזקים ההסתברותיים שצפויים להיות עבור בתי החולים ב"תרחיש החולה" היו (איור 6): נזק קל 0-21%, נזק בינוני 0-30%, נזק חמור 0-17%, הרס מוחלט 0-4%, לפחות נזק קל 0-72%, לפחות נזק בינוני 0-51%, ולפחות נזק חמור 0-21%.

טווחי רמות התפקוד (%פונקציונאליות) שחושבו עבור בתי החולים ב"תרחיש החולה" היו (איור 7): 27-100% עבור יום אחד, 28-100% עבור 3 ימים, 48-100% עבור 7 ימים, 49-100% עבור 14 ימים, 79-100% עבור 30 ימים, ו 87-100% עבור 90 ימים.

#### 4.2 תחנות עזרה ראשונה

כל תחנות עזרה הראשונה שהוכנסו בקבצי הקלט הוטמנו בהצלחה בתוכנה וקיבלו תו זיהוי המעיד על התאמה מלאה בין רשומות הנתונים לתאי החישוב של המערכת (איור 3). לאחר סיום שלב הסימולאציות התקבלו במרחב כל אומדני הנזק ואומדני זמן השיקום.

טווחי הנזקים ההסתברותיים שצפויים להיות במרחב עבור תחנות עזרה ראשונה ב"תרחיש יריחו" היו (איור 8): נזק קל 8-20%, נזק בינוני 3-20%, נזק חמור 1-6%, הרס מוחלט 0-1%, לפחות נזק קל 1-50%, לפחות נזק בינוני 3-30%, ולפחות נזק חמור 0-9%. המשמעות של טווחי הנזקים ההסתברותיים היא למשל שתחנת עזרה ראשונה מסוימת צפויה להינזק במרחב באופן בינוני ב 3 אחוזי הסתברות, ולעומת זאת תחנת עזרה ראשונה אחרת באותה רמת נזק צפויה להינזק ב 20 אחוזי הסתברות. רמות הנזק לפחות נזק קל, לפחות נזק בינוני ולפחות נזק מתקדם הן רמות נזק שכוללות באופן הסתברותי את רמת הנזק הספציפית ואת רמות הנזק החמורות ממנה (ראה פרק 2).

טווחי רמות התפקוד (%פונקציונאליות) במרחב שחושבו עבור תחנות עזרה ראשונה ב"תרחיש יריחו" היו (איור 9): 48-88% עבור יום אחד, 49-88% עבור 3 ימים, 68-96% עבור 7 ימים, 70-96% עבור 14 ימים, 91-99% עבור 30 ימים, ו 95-100% עבור 90 ימים. משמעות טווחי רמות התפקוד היא למשל, שלאחר 3 ימים התרחשותה של רעידת האדמה, יהיו במרחב תחנות עזרה ראשונה ברמת תפקוד של 88%, ולעומת זאת יהיו גם במרחב תחנות עזרה ראשונה ברמת תפקוד של 49%.

טווחי הנזקים ההסתברותיים שצפויים להיות עבור תחנות עזרה ראשונה ב"תרחיש החולה" היו (איור 10): נזק קל 7-22%, נזק בינוני 2-32%, נזק חמור 0-25%, הרס מוחלט 0-10%, לפחות נזק קל 9-84%, לפחות נזק בינוני 3-68%, ולפחות נזק חמור 0-35%.

טווחי רמות התפקוד (%פונקציונאליות) שחושבו עבור תחנות השאיבה ב"תרחיש החולה" היו (איור 11): 15-90% עבור יום אחד, 16-90% עבור 3 ימים, 32-97% עבור 7 ימים, 32-97% עבור 14 ימים, 64-100% עבור 30 ימים, ו 77-100% עבור 90 ימים.

## 5. דיון

### 5.1 שילוב של נתוני תשתיות במערכת ה-Hazus

בחנינת התוצאות שהושגו בעבודה הנוכחית מעלה שהמטרות אשר הוגדרו בשלב זה של תהליך היישום מערכת ה-Hazus בישראל הושגו במלואן: (1) בדיקת יכולת ההטמעה של מערכות תשתיות חיוניות ישראליות כדוגמת בתי החולים ותחנות עזרה ראשונה (איורים 2-3); (2) בדיקת יכולת חישוב של מגוון רחב של אומדני נזק, שקיימים בתוכנה עבור המרחב הישראלי (איורים 4-11) ו- (3) בדיקה של יתרונות התוכנה לטובת הערכות המדינה לקראת רעידת אדמה חזקה ומתן המלצות בהתאם. מאחר ומרבית הפרמטרים שהוכנסו בקבצי הקלט הם ברובם סינתטיים, תוצאות הנזק שהתקבלו בסימולציות הן איכותיות בלבד ויש להתייחס אליהן בזהירות מרבית.

למרות זאת, כבר כעת ברור, שניתן לקבל באופן חזותי ומרשים במערכת אחת את המידע על בתי החולים ותחנות עזרה ראשונה, ככל שיהיה מפורט. לא ניתן להפריז ביכולת הקיימת לספק תמונת מידע גיאוגרפית מפורטת של מערכות מתקני התשתיות החיוניות בישראל ביחס למיקום רעידת האדמה ותנודות הקרקע. כבר באמצעות מידע זה, עוד בטרם שנעשו הבדיקות החישוביות, ניתן להצביע על מוקדי הנזק הצפויים בהתאם לסוגי התשתיות החיוניות השונות במרחב. מידע בסיסי זה יכול להיות מועבר באופן אוטומטי לגורמי התשתיות וגופי החרום הממשלתיים בתוך זמן קצר לאחר רעידת האדמה. יתר על כן, כבר כעת אפשר להצביע על מוקדי הנזק העתידיים במתקני החרום הרפואיים במקרה של רעידת אדמה ולמקד את עיקר המאמץ במזעור הנזק מבעוד מועד.

### 5.2 בתי חולים

בהדמיות של "תרחיש יריחו" ו "תרחיש החולה" התקבלו כל אומדני הנזק ואומדני זמן שיקום בבתי החולים המרכזיים בישראל (איורים 4-7). לכן, כבר בעת הזאת ניתן על ידי הפעלת מערכת ה-Hazus לתת תחזיות לנזקים בבתי חולים בישראל עבור כל רעידת אדמה שתתרחש במרחבה של ישראל.

בהתאם להגדרת העמידות הסיסמית של בתי החולים, נראה שאומדני הנזק שהתקבלו בהדמיות הם סבירים. לדוגמא, ניתן לראות שישנו שינוי רב בצפי לנזק בינוני (לפחות) בבתי החולים שאינם עמידים לרעידות אדמה, כתלות במרחק מהמוקד (איור 6). באזור הקרוב מאד למוקד רעידת האדמה ("תרחיש החולה"), למשל, בית חולים הזיו צפוי להינזק לפחות באופן בינוני בהסתברות מרבית של 52%, ולעומת זאת בתי חולים אשר ממוקמים באזור המרכז צפויים להינזק לפחות באופן בינוני בהסתברות מרבית של 6% בלבד.

משמעות אומדני הנזק שהתקבלו, למשל, היא שבתי חולים הקרובים למוקד והם אינם עמידים בפני רעידות אדמה (למשל, בית חולים הזיו או פורייה) צפויים ברמת הסתברות של 52% לאבד באופן בינוני ויותר את מערכת הגיבוי החשמלית (במידה ויש כזו). כמו כן, צפויה להיות פגיעה חמורה במכשור החשמלי, במערכות הנשימה והטיפול הרפואי השוטף.

בהתאם לצפי של הנזק בבתי החולים במרחב, נראה שזמן השיקום של בתי החולים גם הוא סביר (איורים 5,7). למשל, לאחר יום אחד מהתרחשותה של רעידת האדמה באזור החולה (איור 7),

רמת התפקוד (%פונקציונאליות) של בתי החולים הממוקמים סמוך למוקד וצפויות בהסתברות יחסית גבוהה להינזק באופן חמור, מגיעה ל- 28% בלבד כאשר גם לאחר 7 ימים אין שינוי. לעומת זאת, לאחר יום אחד מהתרחשותה של רעידת האדמה ("תרחיש החולה"), רמת התפקוד של בתי חולים הממוקמים רחוק ממוקד רעידת האדמה וצפויים בהסתברות יחסית נמוכה להינזק באופן חמור, מגיעה ל- 87%, כאשר לאחר 3 ימים ולאחר 14 ימים רמת התפקוד צפויה לגדול באחוזים בודדים.

### 5.3 תחנות עזרה ראשונה

בהדמיות של "תרחיש יריחו" ו "תרחיש החולה" התקבלו כל אומדני הנזק ואומדני זמן שיקום ואומדני הנזק הכלכלי בתחנות עזרה הראשונה בישראל (איורים 8-11). לכן, כבר בעת הזאת ניתן על ידי הפעלת מערכת ה *Hazus* לתת תחזיות לנזקים בתחנות עזרה הראשונה בישראל עבור כל רעידת אדמה שתתרחש במרחבה של ישראל.

בהתאם להגדרת העמידות הסיסמית של תחנות העזרה הראשונה, נראה שאומדני הנזק שהתקבלו בהדמיות הם סבירים. לדוגמא, ניתן לראות שישנו שינוי רב בצפי לנזק בינוני (לפחות) בתחנות עזרה הראשונה שאינן עמידות לרעידות אדמה, כתלות במרחק מהמוקד (איור 8). באזור הקרוב מאד למוקד רעידת האדמה ("תרחיש יריחו") תחנות עזרה ראשונה צפויות להינזק לפחות באופן בינוני בהסתברות מרבית של 30%, ולעומת זאת תחנות עזרה ראשונה אשר ממוקמים באזור המרכז צפויים להינזק לפחות באופן בינוני בהסתברות מרבית של 9% בלבד.

משמעות אומדני הנזק שהתקבלו, למשל, היא שתחנות עזרה ראשונה הקרובות למוקד והן אינן עמידות בפני רעידות אדמה צפויות ברמת הסתברות של 30% לאבד באופן בינוני ויותר את מערכת הגיבוי החשמלית (במידה ויש כזו). כמו כן, צפויה להיות פגיעה חמורה במכשור החשמלי ובמערכות הטיפול הרפואי השוטף.

בהתאם לצפי של הנזק בתחנות עזרה הראשונה במרחב, נראה שזמן השיקום של תחנות עזרה הראשונה גם הוא סביר (איורים 9,11). למשל, לאחר יום אחד מהתרחשותה של רעידת האדמה שמוקדה הוא באזור יריחו (איור 11), רמת התפקוד (%פונקציונאליות) של תחנות עזרה הראשונה הממוקמות סמוך למוקד וצפויות בהסתברות יחסית גבוהה להינזק באופן חמור, מגיעה ל- 48%, כאשר רק לאחר 7 ימים רמת התפקוד צפויה להגיע ל 70%. לעומת זאת, לאחר יום אחד מהתרחשותה של רעידת האדמה (תרחיש "יריחו"), רמת התפקוד של תחנות השאיבה הממוקמות רחוק ממוקד רעידת האדמה וצפויות בהסתברות יחסית נמוכה להינזק באופן חמור, מגיעה ל- 77%, כאשר לאחר 7 ימים ולאחר 14 ימים רמת התפקוד צפויה להיות גבוהה מ 90%.

### 5.4 סיכום

השלב הראשון במהלך הארוך של יישום מתקני התשתיות החיוניות במערכת *Hazus* בישראל הסתיים בהצלחה. היום, בהתאם לנתונים שמוכנסים למערכת החישובית (ככל שהמידע יהיה זמין לחישוב) נראה שניתן לאמוד באופן סביר את הנזק הצפוי העלול להיגרם עקב תנודות הקרקע בבתי החולים ובתחנות עזרה ראשונה, לפני ולאחר רעידת אדמה חזקה בישראל.

בחינת הנתונים שהתקבלו בהדמיות הנזק בתשתיות החיוניות במערכת Hazus "הישראלית", מעלה שלתוכנה המתקדמת ישנם יתרונות רבים אשר יכולים להיות לעזר רב לפני רעידת האדמה ולאחריה. יתרונות אלה יעמדו על פי דרישה ובעת הצורך לטובת "חדר מצב" של הגופים נותני המענה לרעידה, בהזרמת מידע מעובד לגורמי התשתיות, לגופי החרום, ולדרג המחליט:

1) ניתן לקבל על גבי צג המחשב באופן חזותי פשוט תמונת מידע כללית ומפורטת של התשתיות הרפואיות החיוניות על גבי מפת תנודות קרקע מרחבית של ישראל.

2) ניתן לחשב את אומדני הנזק השונים בתשתיות הרפואיות החיוניות ולקבל בתוך זמן קצר תחזית לנזק ברמות שונות על צג המחשב. את פלט תוצאות הנזק ניתן להזרים ישירות לגורמים המעוניינים. המידע יכול לשמש לתרגול ולהערכות של גופי החרום והתשתיות לפני רעידת האדמה, כמו גם באירוע אמת.

3) ניתן לאמוד בפרק זמן קצר את זמן השיקום הדרוש לחזרה לתפקוד מלא של התשתיות הרפואיות שנפגעו ולהציג את התוצאות באופן ידידותי על גבי צג המחשב. גם במקרה זה ניתן להזרים את פלט התוצאות ישירות לגורמים השונים, הן לצורכי תרגול והיערכות, לא כל שכן במקרה של לאירוע אמת.

4) ניתן לאמוד בפרק זמן קצר את הנזק הכלכלי הישיר שנגרם לתשתיות הרפואיות החיוניות במרחב של מדינת ישראל. אומדן הנזק יכול להוות מסד תחזיתי חשוב ביותר עבור מקבלי ההחלטות בגופי התשתיות ובדרגים המחלטים הממשלתיים.

בהתאם ליכולות והיתרונות של פלטפורמת ה Hazus "הישראלית" במתן תחזיות נזק לתשתיות הרפואיות החיוניות כפי שנבחנו בעבודה הנוכחית, נראה שיישום התוכנה במלואה בישראל הינה משימה הכרחית ואף אפשרית. בכדי להגדיל את רמת המהימנות וההתאמה של מערכת ה Hazus בישראל ואת יישום השלבים הרלוונטיים לתשתיות, יש להמשיך ליישם את שאר שלבי הכיול וההתאמה של המערכת בישראל ולחזק את מידת שיתוף הפעולה של גורמי התשתיות עם פרויקט לאומי זה.

## 6. תודות

לועדת ההיגוי הממשלתית להיערכות לרעידות אדמה בישראל ולאבי שפירא על התמיכה בעבודה זאת. לחברי האגף לסיכונים גיאולוגיים עודד כץ, יריב חמיאל, רבקה אמית, על התמיכה בקידום הפרויקט. לגדעון ליאונרד וברק טברון על היוזמה ועל תחילת יישומה של ה Hazus בישראל. לעמוס סלמון על מתן הערות שהתקבלו בברכה ולוורניק אבירב על החלפת דעות. ל Douglas Bausch ו Rozelle Jesse מ FEMA על התמיכה המקצועית ביישומה של תוכנת ה HAZUS בישראל. ל שמואל הוילנד על התמיכה במערכת ה GIS. לאנשי ההוצאה לאור במכון הגיאולוגי: בת-שבע כהן, נילי אלמוג וחנה נצר-כהן על השקידה והחריצות בהוצאת הדו"ח לאור.

## 7. מקורות ספרות

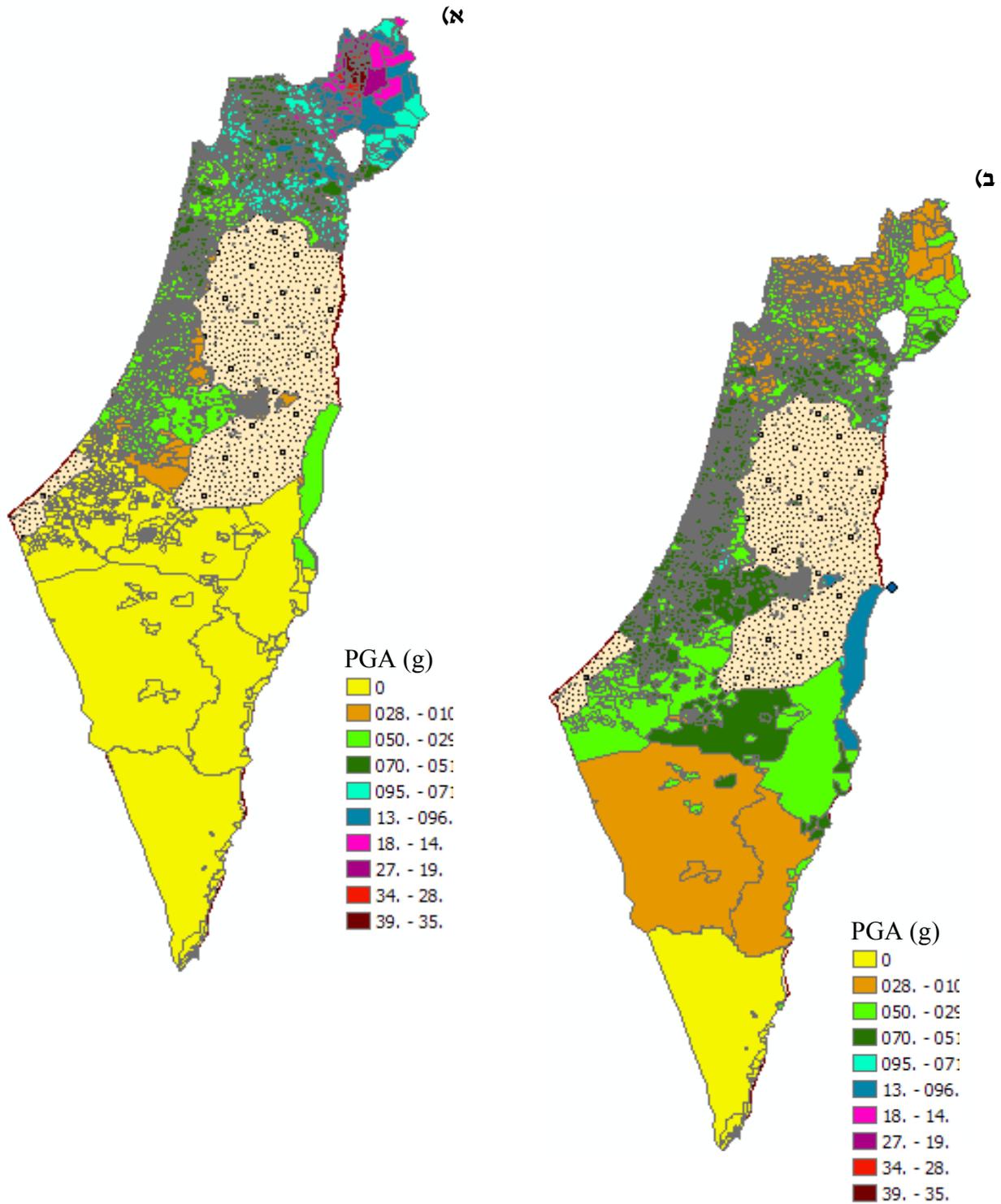
לינדנשטראוס, מ., 2011. דו"ח מבקר המדינה, עמידות מבנים ותשתיות ברעידות אדמה- תמונת מצב.

- 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.
- Avni, R., 1999. The 1927 Jericho earthquake, comprehensive macroseismic analysis based on contemporary sources, Ph.D. thesis, Ben Gurion University of the Negev, Beer-Sheva, Israel (in Hebrew with English abst.)
- 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).
- 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.
- Buika, J.A., 2000. A Public-Private Partnership to Develop the HAZUS Earthquake Risk Assessment Capabilities for the San Francisco Bay Area, California. A paper report in the Federal Emergency Management Agency (FEMA), Mitigation Division.
- Byers, W.G., Asce, F., 2003. Effects of recent earthquakes on railroads. In Proceedings of the Sixth U.S. Conference on Lifeline Earthquake Engineering, August 10-13, 2003, Long Beach, California, edited by Beavers, J. E, p. 266-274.
- Chang, K.C., Kuo, K.Y., Lu, C.H., 2003. Performance of Yen-Feng bridge during the 921 Taiwan Chi-Chi earthquake. In Proceedings of the Sixth U.S. Conference on Lifeline Earthquake Engineering, August 10-13, 2003, Long Beach, California, edited by Beavers, J. E, p. 241-254.

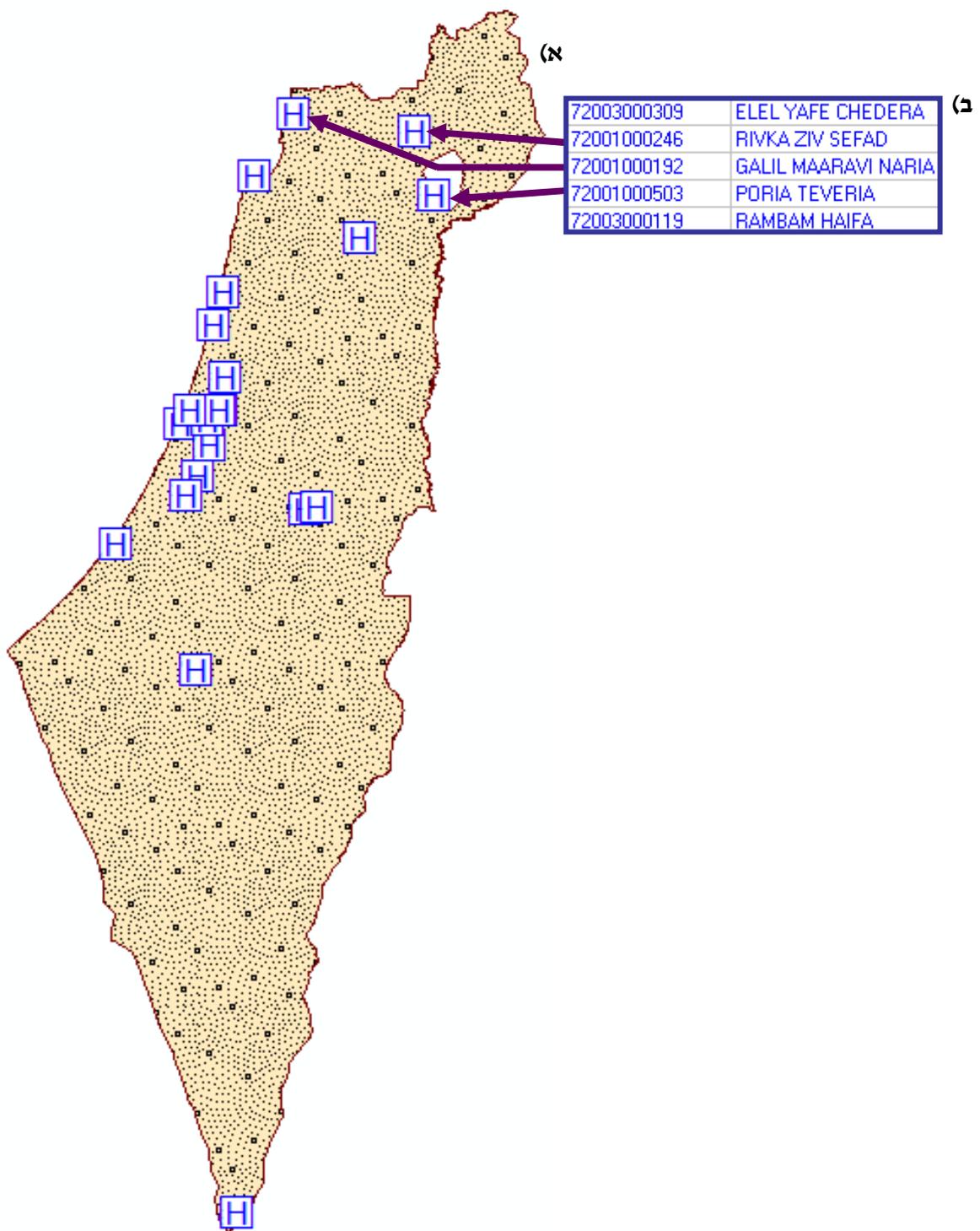
- Crowley, H., Pinho, R., Bommer, J.J., 2004. A Probabilistic Displacement-Based Vulnerability Assessment Procedure for Earthquake Loss Estimation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, v. 26, p. 173-219.
- Erdik, M., Sesetyan, K., Demircioglu, M., Hancilar, U., Zulfikar, C., Cakti, E., Kamer, Y., Yenidogan, C., Tuzun, C., Cagnan, Zehra, 2010. Rapid Earthquake Hazard and Loss Assessment for Euro-Mediterranean Region. *Acta Geophysica*, v. 58, p. 855-892
- 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.
- Fikri, A., 2009. Rapid Damage Assessment of Infrastructure Components in the Central United States, Report No. 09-02, pp 177.
- 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.
- Gulati, B., 2006. Earthquake Risk Assessment of Buildings: Applicability of HAZUS in Dehradun, India. Published master degree in International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation ENSCHEDE, THE NETHERLANDS, pp 112.
- 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.
- Katz, O., Hecht, H., Almog, E., 2008. Geological data base for HAZUS: Geotechnical and landslides susceptibility maps. Geological Survey of Israel, Report GSI/08/08 (in Hebrew).

- Kircher, C.A., Seligson, H.A., Bouabidc, J., Morrow, G.C., 2006. When the Big One Strikes Again – Estimated Losses Due to a Repeat of the 1906 San Francisco Earthquake. In 100th Anniversary 1906 San Francisco Earthquake Conference, 2006.
- KOERI, 2002. Earthquake Risk Assessment for Istanbul Metropolitan Area. Istanbul, Kandilli 20 Observatory and Earthquake Research Institute: 16, 21 [http://www.koeri.boun.edu.tr/depremmuh/EXEC\\_ENG.pdf](http://www.koeri.boun.edu.tr/depremmuh/EXEC_ENG.pdf).
- Korkmaz, K.A., 2009. Earthquake disaster risk assessment and evaluation for Turkey. *Environmental Geology*, v. 57, p. 307–320. Tank damage during the May 1983 Coalinga earthquake. *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, v. 13, p. 449-466.
- 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*.
- Manos, G.C., Clough, R.W., 1985. Tank damage during the May 1983 Coalinga earthquake. *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, v. 13, p. 449-466.
- 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.
- Molina, S., Lang, D.H., Lindholm, C.D., 2010. SELENA – An open-source tool for seismic risk and loss assessment using a logic tree computation procedure. *Computers and Geosciences*, v. 36, p. 257–269.
- Ploeger, S. K., Atkinson, G.M., Samson, C., 2009. Applying the HAZUS-MH software tool to assess seismic risk in downtown Ottawa, Canada. *Natural Hazards*, DOI 10.1007/s11069-009-9408-x.
- Quennell, A.M., 1959. Tectonics of the Dead Sea Rift: 20<sup>th</sup> International Geological Congress, p. 385–405.
- Salamon, A., Katz, O., Crouvi, O., 2009. Zones of required investigation for earthquake-related hazards in Jerusalem. *Natural Hazards*, DOI 9436-6. 10.1007/s11069-009-
- 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.

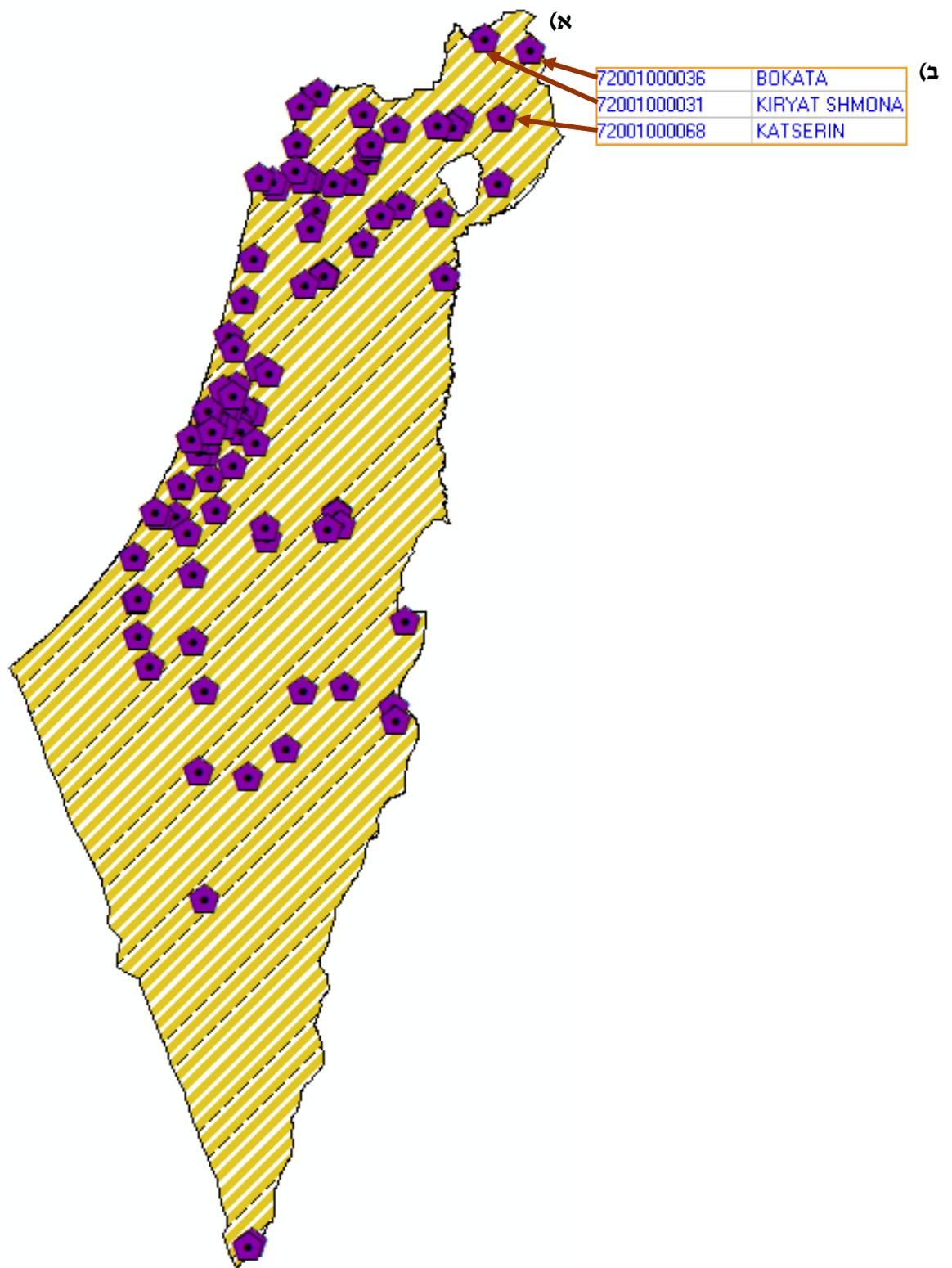
- Shapira, A., Hofstetter., 2002. Seismic parameters of seismogenic zones: Appendix C, in Shapira, A., 2002, An updated map of peak ground accelerations for the Israel Standard 413: Israel Geophysical Institute Report 592/230/02 74 pp. (in Hebrew, with appendices in English).
- Sokhi, B.S., 2000. Fundamental 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.
- Tavron, B., Katz, O., Bar- Lavie, J., Segal, D., Leonard. G., 2007. Earthquake Loss Estimation for the City of Jerusalem: A Pilot Study of Implementing HAZUS Software. Report to the Committee for Earthquake Preparedness pp 41. (in Hebrew).



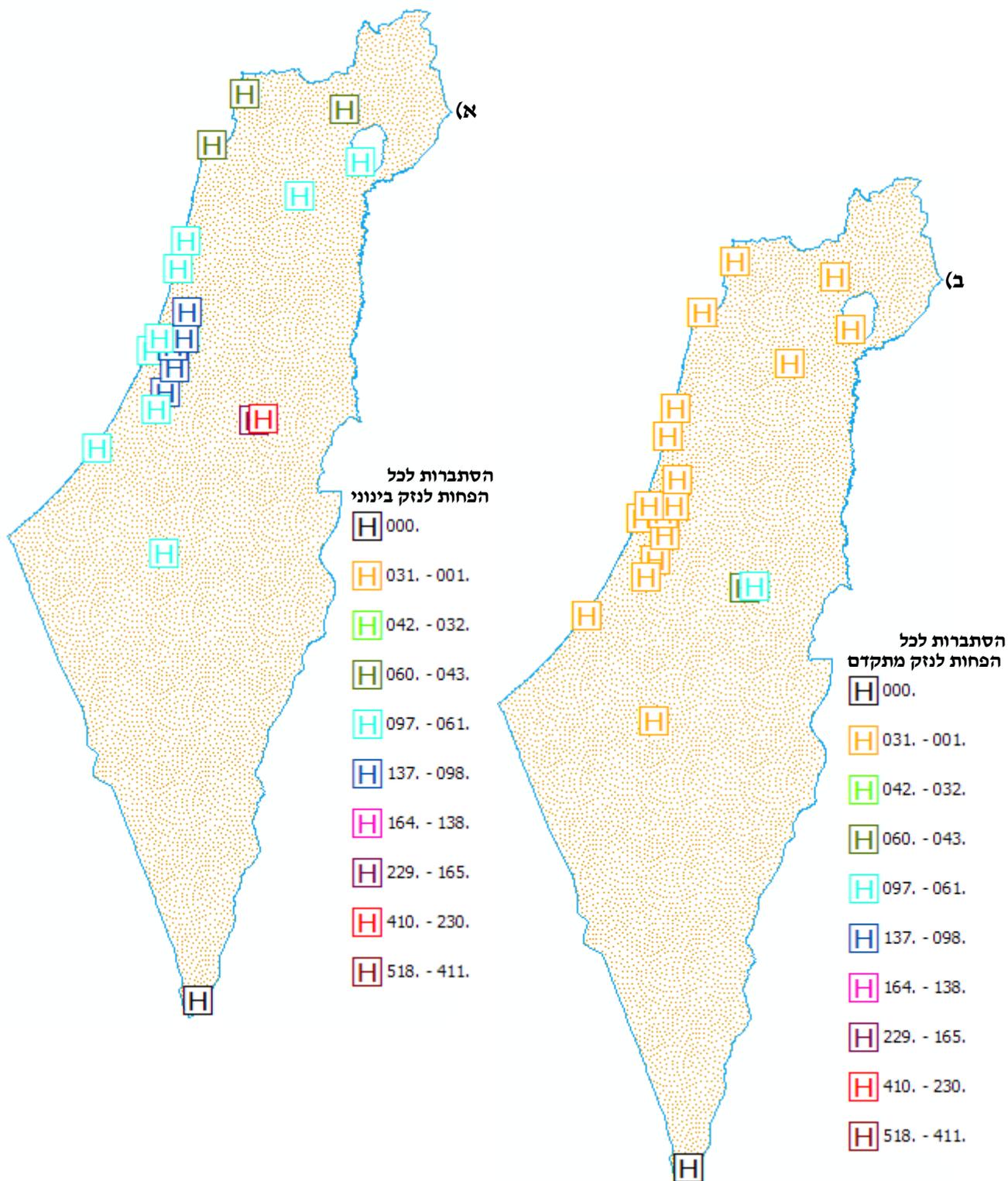
**איור 1.** א) מפת תאוצות הקרקע המרביות (PGA) ב "תרחיש החולה" ; ב) מפת תאוצות הקרקע המרביות (PGA) ב "תרחיש יריחו". בשני התרחישים עוצמת רעידת האדמה נקבעה ל  $M_w=6.5$ , ועומק המוקד נקבע ל-10 ק"מ. תנודות הקרקע שחושבו התבססו על משוואת הניחות של Boore et al. (1997).



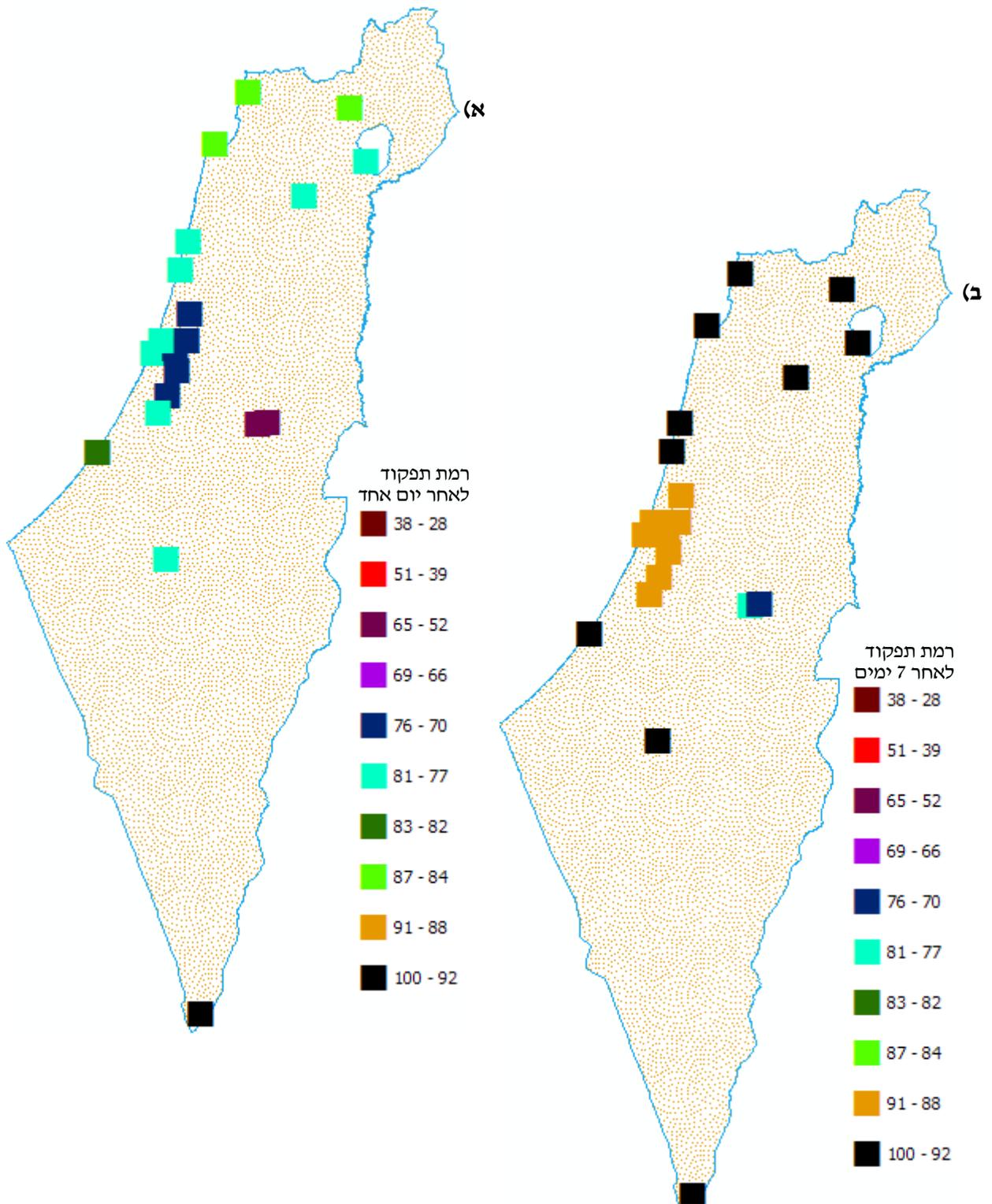
**איור 2.** א) מפת בתי החולים המרכזיים אשר נקלטו במערכת Hazus; ב) דוגמא לחלק של טבלה אשר מציגה מידע עבור רשומת בתי החולים שהותאמה למערכת ה-Hazus. החיצים מראים את מיקום בתי החולים "זיו", "גליל מערבי-נהריה" ופורייה במרחב.



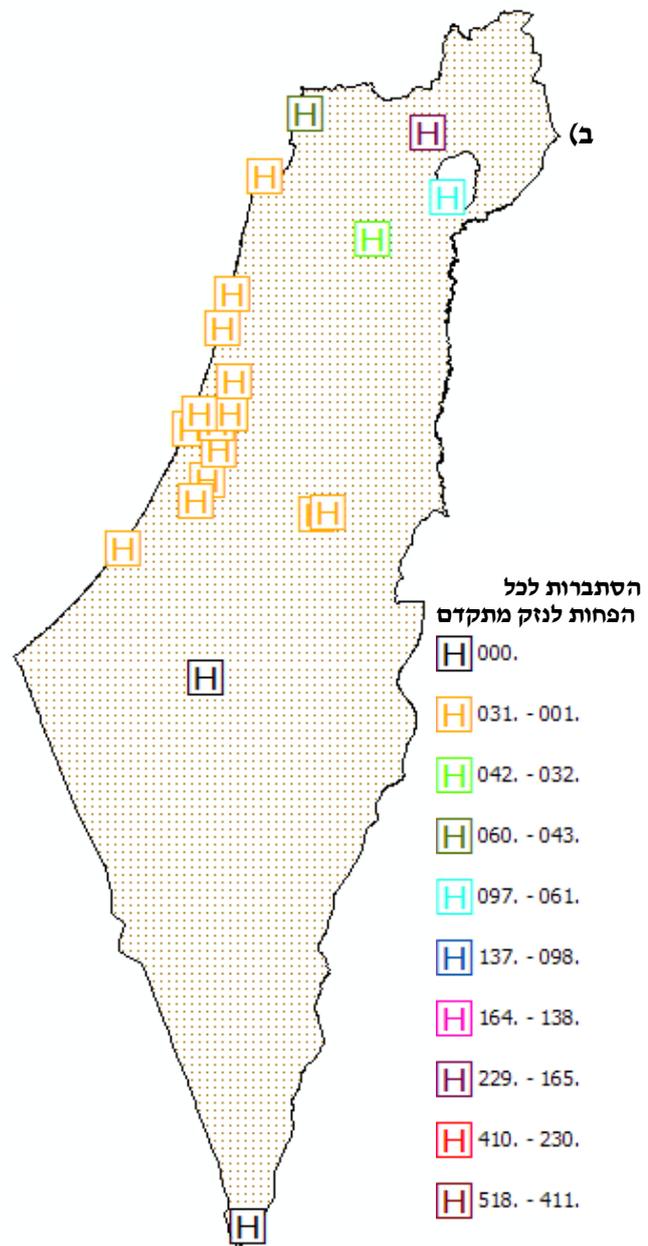
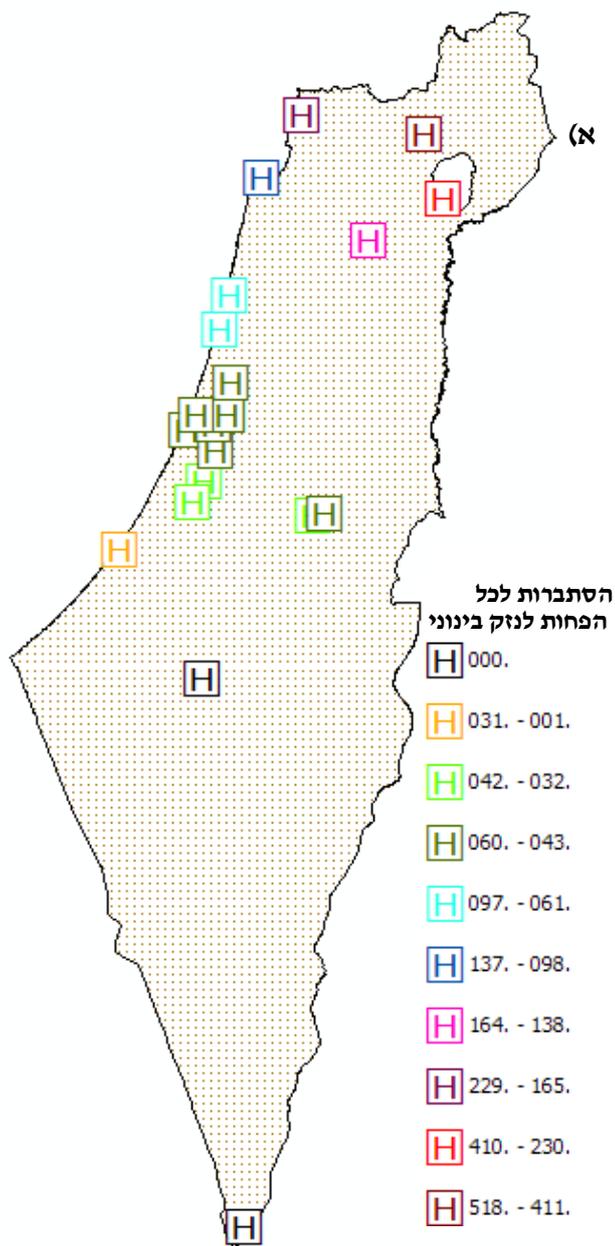
**איור 3. א)** מפת תחנות עזרה ראשונה (מגן דויד אדום), אשר נקלטו במערכת Hazus ; **ב)** דוגמא לחלק של טבלה אשר מציגה מידע עבור רשומת תחנות עזרה ראשונה שהותאמה למערכת Hazus. החיצים מראים את תחנות עזרה הראשונה שממוקמות בערים בוקעתה, קריית שמונה וקצרין.



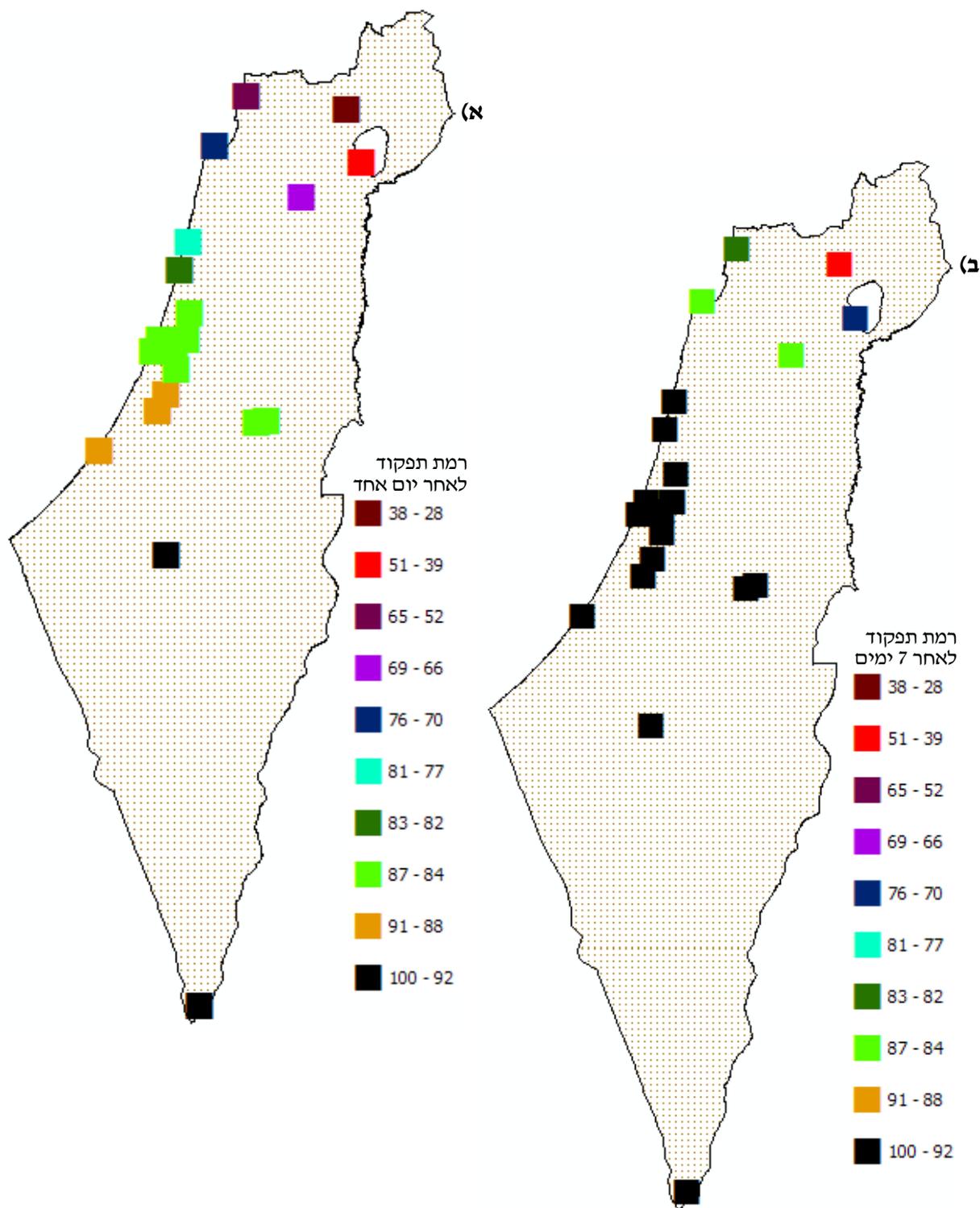
**איור 4.** דוגמא לתוצאות הדמיות נזק ("תרחיש יריחו") בבתי חולים. א) ההסתברות שלכל הפחות בתי החולים יינזקו באופן בינוני ו-ב) ההסתברות שלכל הפחות בתי החולים יינזקו באופן מתקדם



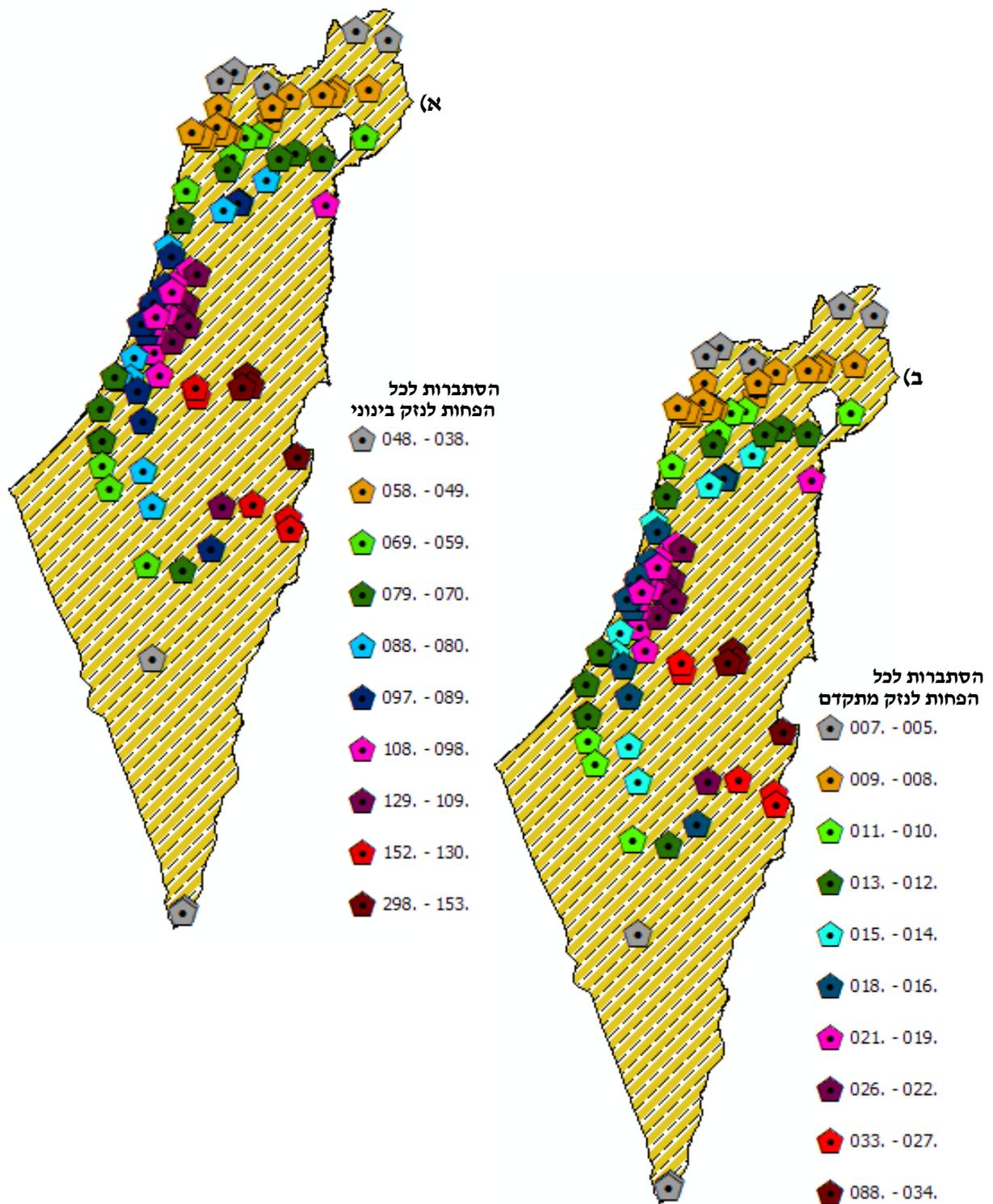
**איור 5.** דוגמא לתוצאות הדמיה של רמת תפקוד (מוגדרת במונחים של % מתפקוד מלא) שצפויה להיות בבתי חולים בישראל ("תרחיש יריחו"). (א) רמת תפקוד של בתי החולים לאחר יום אחד מעת התרחשותה של רעידת אדמה ו-(ב) רמת תפקוד של בתי החולים לאחר 7 מעת התרחשותה של רעידת אדמה. צבע ריבוע מציין את אחוז רמת התפקוד.



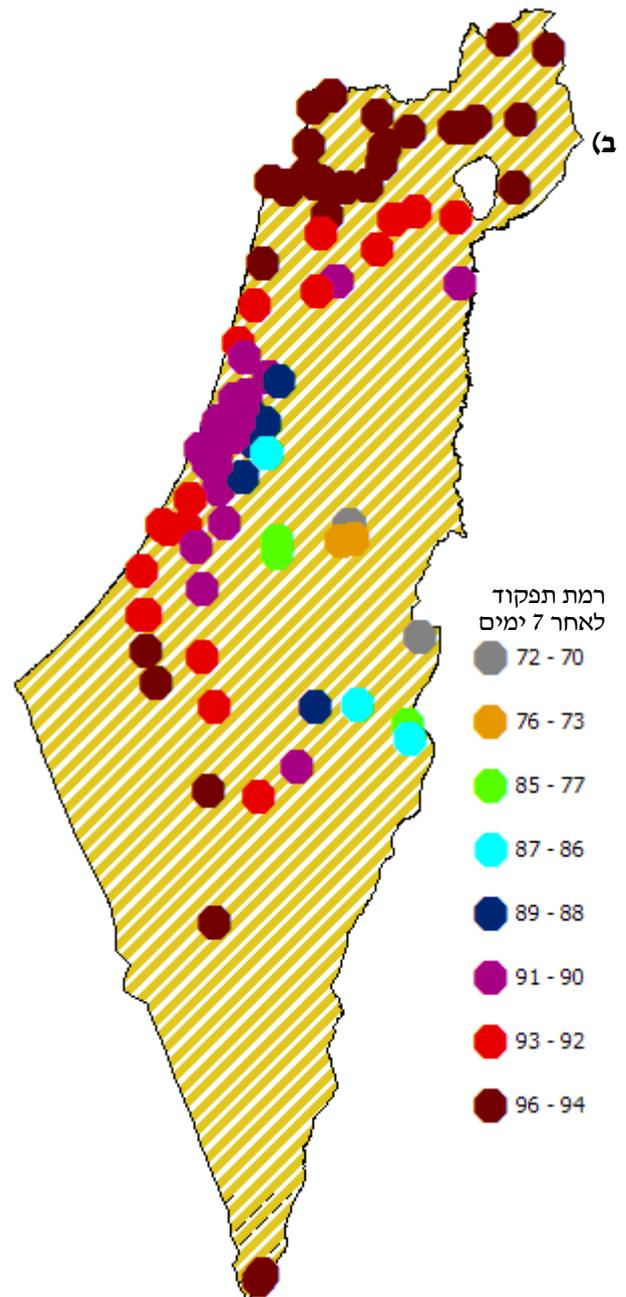
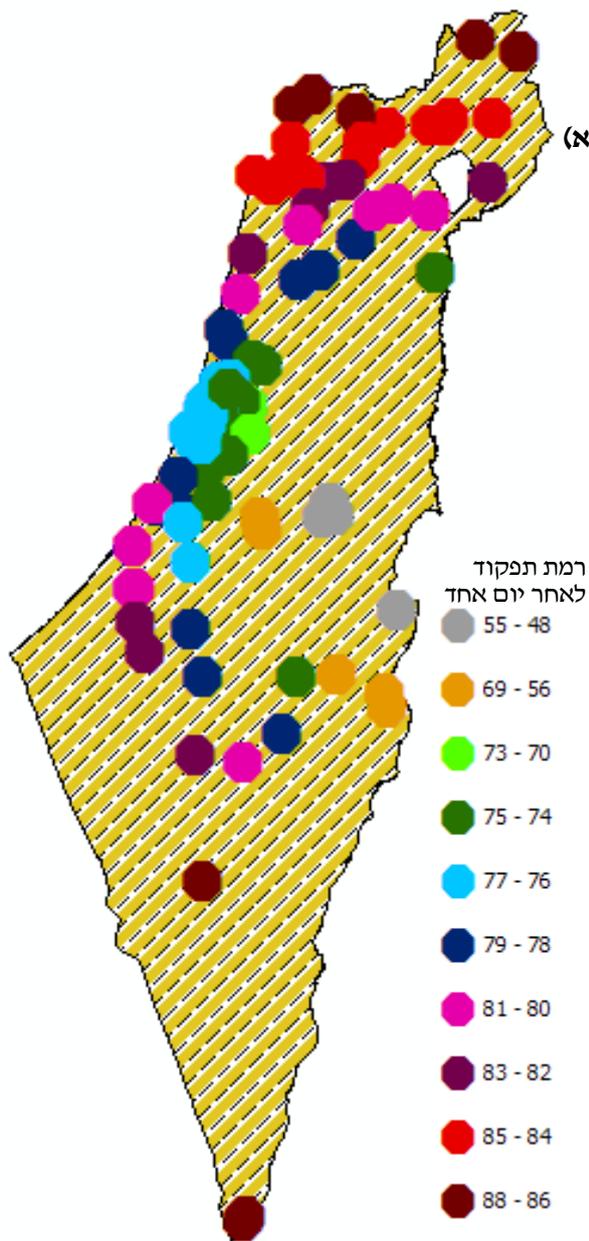
**איור 6.** דוגמא לתוצאות הדמיות נזק ("תרחיש החולה") בבתי חולים. (א) ההסתברות שלכל הפחות בתי החולים יינזקו באופן בינוני ו-(ב) ההסתברות שלכל הפחות בתי החולים יינזקו באופן מתקדם



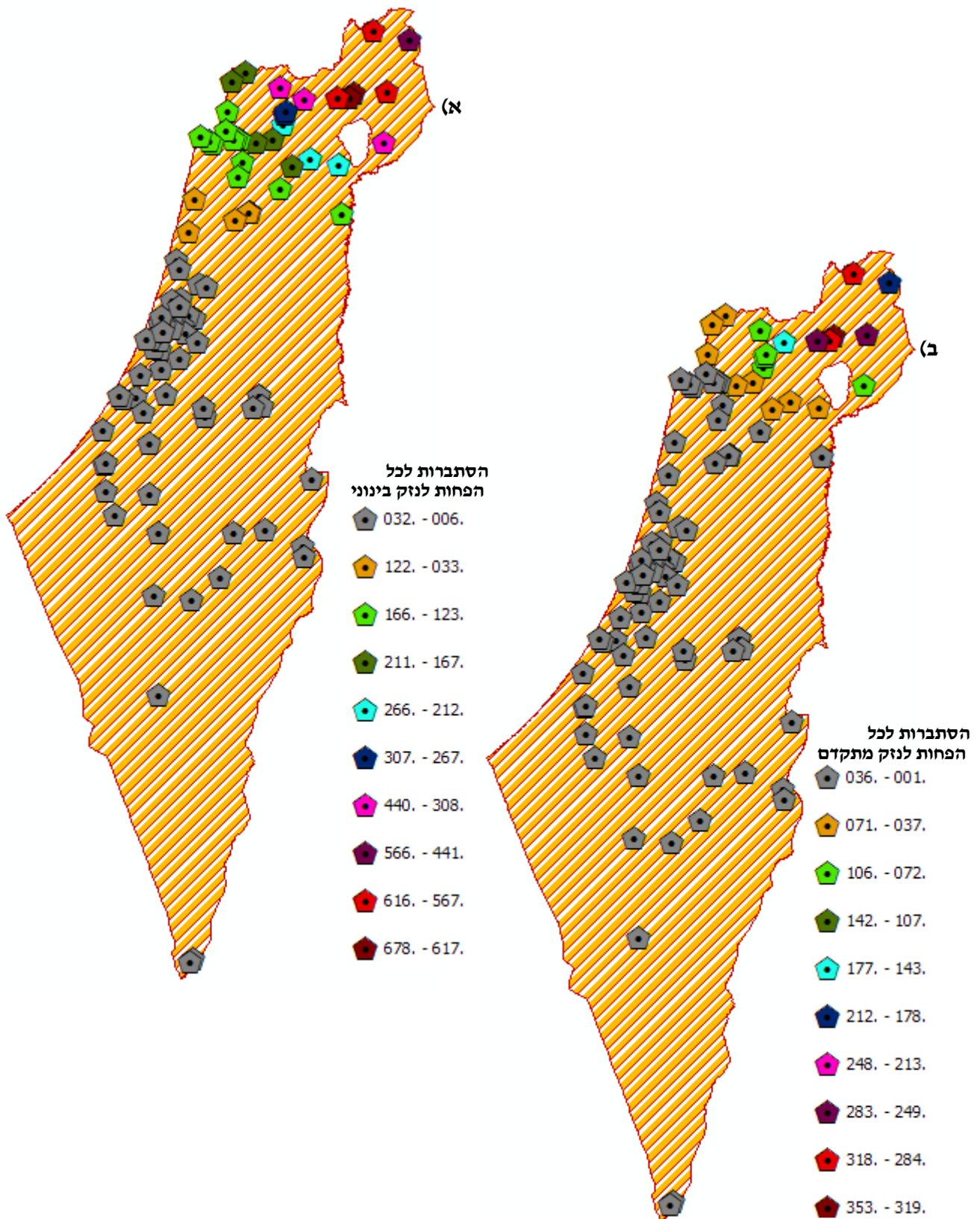
**איור 7.** דוגמא לתוצאות הדמיה של רמת תפקוד (מוגדרת במונחים של % מתפקוד מלא) שצפויה להיות בבתי חולים בישראל ("תרחיש החולה"). (א) רמת תפקוד של בתי החולים לאחר יום אחד מעת התרחשותה של רעידת אדמה ו-(ב) רמת תפקוד של בתי החולים לאחר 7 מעת התרחשותה של רעידת אדמה. צבע ריבוע מציין את אחוז רמת התפקוד. תוצאות ההדמיה של רמת תפקוד בתי החולים יכולים לתת תמונת מצב כתרגיל לפני רעידת אדמה ולאחריה.



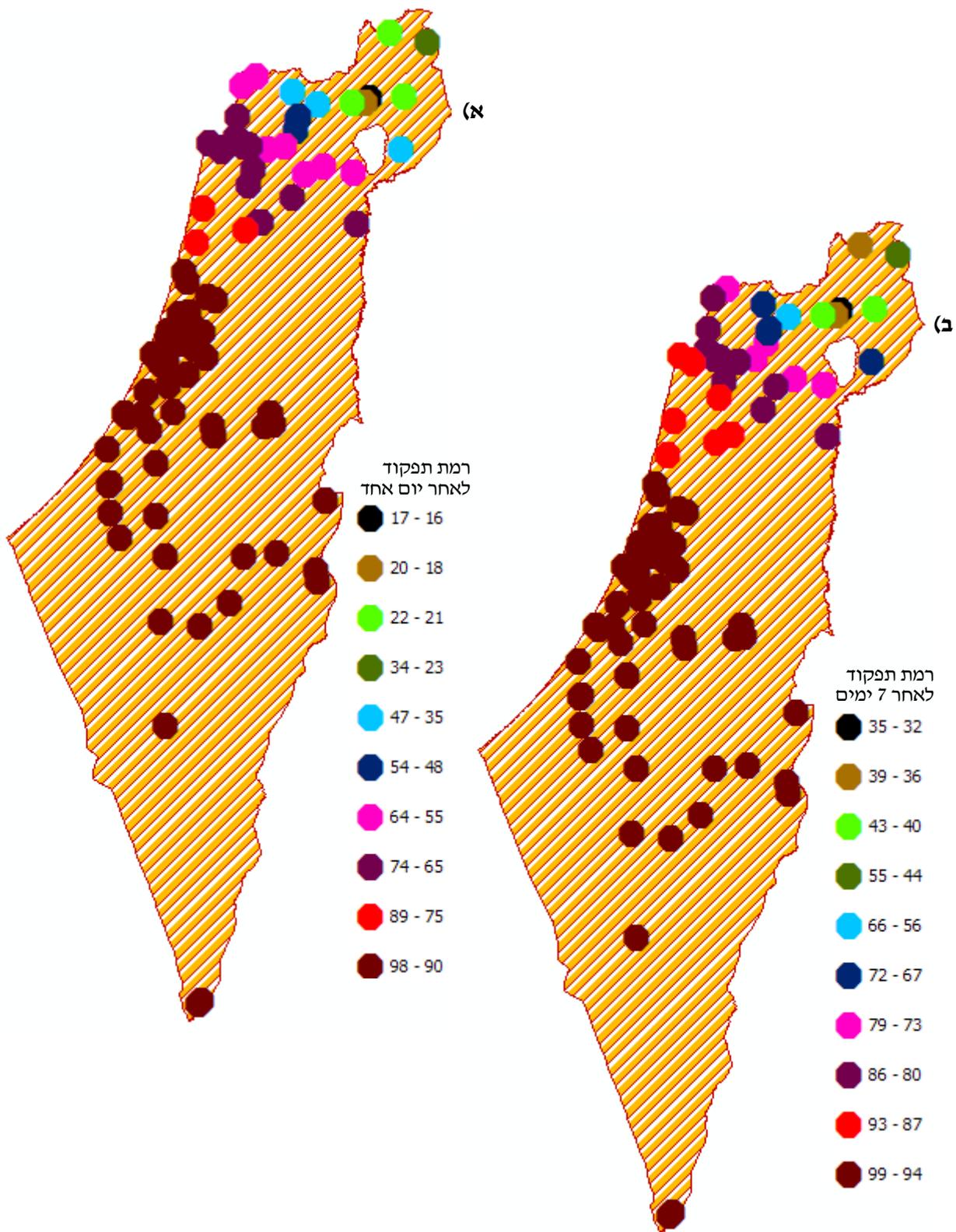
**איור 8.** דוגמא לתוצאות הדמיות נזק ("תרחיש יריחו") בתחנות עזרה ראשונה בישראל. א) ההסתברות שלכל הפחות תחנות עזרה הראשונה ייזקו באופן בינוני ו-ב) ההסתברות שלכל הפחות תחנות עזרה הראשונה ייזקו באופן מתקדם



**איור 9.** דוגמא לתוצאות הדמיה של רמת תפקוד (מוגדרת במונחים של % מתפקוד מלא) שצפויה להיות בתחנות עזרה ראשונה בישראל ("תרחיש יריחו"). (א) רמת תפקוד של תחנות עזרה ראשונה לאחר יום אחד מעת התרחשותה של רעידת אדמה ו-(ב) רמת תפקוד של תחנות עזרה ראשונה לאחר 7 מעת התרחשותה של רעידת אדמה. צבע עיגול מציין את אחוז רמת התפקוד.



**איור 10.** דוגמא לתוצאות הדמיות נזק ("תרחיש החולה") בתחנות עזרה ראשונה (מגן דוד אדום). (א) ההסתברות שלכל הפחות תחנות העזרה הראשונה יינזקו באופן בינוני ו-(ב) ההסתברות שלכל הפחות תחנות העזרה הראשונה יינזקו באופן מתקדם.



**איור 11.** דוגמא לתוצאות הדמיה של רמת תפקוד (מוגדרת במונחים של % מתפקוד מלא) שצפויה להיות בתחנות עזרה ראשונה בישראל ("תרחיש החולה"). (א) רמת תפקוד של תחנות עזרה ראשונה לאחר יום אחד מעת התרחשותה של רעידת אדמה ו (ב) רמת תפקוד של תחנות עזרה ראשונה לאחר 7 מעת התרחשותה של רעידת אדמה. צבע עיגול מציין את אחוז רמת התפקוד. תוצאות ההדמיה של רמת תפקוד בתי החולים יכולים לתת תמונת מצב כתרגיל לפני רעידת אדמה ולאחריה.



single hospital and single medical care station or to the group of hospitals and group of medical care stations.

For example, hospitals located far away from the epicenter of the "**Hula scenario**" were subject to minimal damage only. On the other hand, hospitals located near to the epicenter may reach as much as 52% probability to moderate damage (at least).

Correspondingly, the functionality level (defined as percentage of full functioning) of given hospital near to the epicenter ("**Hula scenario**") is predicted to be: 27% for one day, 28% for three days, 48% for seven days, 49% for 14 days, 79% for 30 days and 87% for 90 days. In addition the functionality level of given medical care station near to the epicenter ("**Jericho scenario**") is predicted to be: 48% for one day, 49% for three days, 68% for seven days, 70% for 14 days, 91% for 30 days and 95% for 90 days.

The *Hazus* software has many advantages, which can be very helpful both before and after an earthquake occurs. Before the earthquake it can help to prevent, or at least minimize, the expected damage in the hospitals and medical care stations.

After the earthquake, the *Hazus* simulations can support these emergency agencies by providing a stream of information of how severely the infrastructure facilities were affected.

The capabilities and advantages of the *Hazus* software in providing infrastructure damage estimates in Israel, as were shown also in this study, indicate that full implementation of the software in Israel is certainly possible and surely is an essential task. In order to increase its reliability and consistency for operating in Israel, it is important to complete the adjustment stages of the system including the calibration of the appropriate parameters relevant to Israel. Furthermore, it is essential to increase the cooperation and collaboration of the authorities that manage the infrastructure facilities with this national project, in order to obtain the full and comprehensive scope of records and data.

## Abstract

Israel is situated along the Dead Sea Transform (DST) which is one of the most active fault systems in the Eastern Mediterranean region. Based on paleoseismological studies and modern seismic records, strong earthquakes ( $M_w > 6$ ) triggered by the DST at any time and cause severe damage in Israel, are inevitable. Experience shows that the resulting damage to essential facilities such as hospitals and emergency medical care stations may further cause severe disruption to normal life aspects, both human and economic in the affected country. Therefore, simulating multi infrastructure damages is one of the most important tools for proper planning and early preparation for possible future earthquakes, as well as for mitigating the expected risks. Nevertheless, scenarios of the potential damage to essential facilities at the national level have not been developed in Israel as of yet.

The purpose of the present study is to apply the advanced *Hazus* software (US made) and develop various damage scenarios for the central hospitals and medical care stations. Other goal is to assess the potential damage in real time by using multiple algorithms on a national polygon network. These algorithms are designed to evaluate the damage to various types of essential facilities (central hospitals and medical care stations); and to predict its post-earthquake recovery time. Last goal is to develop preliminary estimates of damage for the central hospitals and medical care stations in order to train the national emergency systems in preparation for the expected strong earthquake.

In the process of adopting the program for the computer system specific to Israel and developing its capability for damage estimation, two synthetic earthquakes were simulated. The two scenarios were run for the northern Dead Sea region ("**Jericho scenario**") and Hula valley region ("**Hula scenario**"). The two scenarios resemble an  $M_w = 7.0$  earthquake and focal depth of 10 km.

After inputting the two data layers into the system and running the simulations, the *Hazus* software was able to obtain estimates of the expected damage, and recovery time for all of the examined facilities.

The results show clearly that the location and the scenario region of the examined facilities have a major influence on the amount and type of damage, whether caused to





THE MINISTRY OF NATIONAL INFRASTRUCTURES  
GEOLOGICAL SURVEY OF ISRAEL

**Preliminary damage simulations of  
hospitals and medical care stations by the  
*HAZUS* program, in preparation for a  
strong earthquake in Israel**

**Tsafrir Levi**

Prepared for the

Steering Committee for Earthquake Readiness in Israel

Contract No. 210-02-006