

## תכנון התאוששות עירונית מאסון באמצעות ביג דאטה סינתטי

א. יאיר גרינברגר, מיכל לייכטר, דניאל פלזנשטיין

### תקציר

מאמר זה מדגים כיצד ניתן לייצר נתונים גדולים (Big Data) סינתטיים ממידע אדמיניסטרטיבי סטנדרטי וכיצד ניתן להשתמש בהם בכדי להתמודד עם אתגרי התכנון בעקבות אסון עירוני. ראשית תהליך ייצור המידע הוא בפירוק יחידות אדמיניסטרטיביות באמצעות שכבת מבנים מרחבית לכדי ייצוג של משקי-בית ופרטים. לאחר מכן, משקי-הבית והפרטים מאופיינים באמצעות משתנים סוציו-אקונומיים ומשולבים במודל מבוסס-סוכנים בכדי לייצר דינמיקות עירוניות בזמן ובמרחב. במסגרת המודל, סוכנים, המאופיינים בהכנסה ותכונות סוציו-אקונומיות וממוקמים במבנים, נמצאים באינטראקציה אחד עם השני ועם הסביבה הבנויה. סביבה זו מורכבת ממבנים המאופיינים במונחים של שימושי-קרקע, שטח-רצפה וערך. אינטראקציות אלה מונחות על ידי חוקים התנהגותיים פשוטים ומערכת תמחור מגורים דינמית ומתבטאות בהחלטות מיקום של הסוכנים ובשינויים למערך שימושי הקרקע. תהליך פירוק המידע כולל מעבר ממסד נתונים המתאר מאות או אלפי יחידות מרחביות בלבד, למאגר המכיל מידע על מליוני מבנים ופרטים בזמן ובמרחב. אי לכך, הנתונים שנוצרים בתהליך דו-שלבי זה הנם 'גדולים' במונח של נפח, מגוון ורב-גונית ומאפשרים לאכלס ולהעשיר שכבות שונות של מידע מרחבי עם תכונות סינתטיות. השיטה מודגמת בהקשר של רעידת אדמה היפותטית במרכז ירושלים. הדמית רעידת האדמה יוצרת מאגר נתונים המכיל דינמיקות מרחביות ועיתיות ברזולוציה גבוהה עבור שינויים כלכליים, תפקודיים וחברתיים. בחינת נושאים אלו על בסיס המאגר מאפשרת זיהוי השפעות ארוכות-טווח הנובעות מהזעזוע הזמני ומתרחשות ברמה מיקרו-מרחבית. הנגשת עושר המידע המתקבל ככלי עזר לקבלת החלטות ושיתוף הציבור הרחב מהווה אתגר ואנו מדגימים כיצד ניתן לבצע זאת באמצעות מיטוי דינמי מבוסס-רשת.

### מבוא

הניהול היומיומי של ערים מצריך מידע על מאפייני אוכלוסייה, תשתיות, שימושי קרקע, מחירי דירות, פעילות מסחרית ועוד. בעת התרחשות אסון עירוני (בין אם ממקור אנתרופוגני או טבעי) ולאחריו, מערכות אלו, אשר הן תלויות אחת בשנייה, דורשות תגובה מיידית. עם זאת, בזמן אמת המידע הזמין מתקבל ברזולוציות מרחביות גסות, כגון איזורי תנועה או איזורים סטטיסטיים. בנוסף לכך, מאגרי המידע הזמינים עשויים להיות הטרוגניים מבחינת קנה מידה וגבולות המערכות האדמיניסטרטיביות. מגבלה נוספת תיתכן כאשר איזור ההשפעה של האסון אינו חופף את גבולות החלוקות

האדמינסטרטיביות השרירותיות שעליהן המידע מתבסס. אי לכך, ניהול אסון עירוני דורש מידע שהינו מפורט ודינמי, הן מרחבית והן עתית. הזמינות של ביג דאטה ברזולוציה גבוהה עבור פרטים (ממקורות כגון דיווחי מיקום ברשתות חברתיות, נתונים סלולריים, מעקב באמצעות מכשירי GPS ועוד) הולכת וגדלה. בעוד נתונים אלה אינם כבולים ליחידות מרחביות שרירותיות, הם סובלים מייצוג-יתר של אוכלוסיות הנוטות לשיתוף וייצוג חסר של אוכלוסיות בעלות נגישות ויכולת טכנולוגית מוגבלות. זאת ועוד, הפרופיל הסוציו-אקונומי של הפרט המתקבל ממקורות אלו חסר לעיתים קרובות נתונים דמוגרפיים קריטיים הזמינים בסקרי מפקד.

במאמר זה אנו מדגימים כיצד ניתן להשתמש במידע אדמינסטרטיבי 'קטן' בכדי לייצר נתונים עירוניים גדולים 'סינתטיים' חיוניים לניהול מצבי אסון. מידע זה מיוצר ע"י פירוק של יחידות מרחביות קטנות לכדי ייצוג של משקל-בית ופרטים, יצירת פרופילים סוציו-אקונומיים עבורם והענקת נופך דינמי לאורך ציר הזמן למידע באמצעות שילובו בסימולציה מבוססת-סוכנים. פירוק המידע האדמינסטרטיבי ה'קטן' באמצעות שכבת GIS של מבנים מאפשר ליצור ייצוג של משק-הבית הבודד, של הפרטים החברים בו ולבסוף – למקם אותם מרחבית בתוך בניין, על פי קומות. המידע שנוצר הינו 'גדול' במונחים של נפח, מגוון ורב-גונית. באופן פוטנציאלי, מידע זה מאפשר להגדיר יחידות מרחביות שונות על פי הצורך ולאפיין אותן בצורה סינתטית. תהליך פירוק זה מקדם מעבר ממאגר מידע המתאר מאות או אלפי יחידות מרחביות למאגרים המכילים רשומות המתארות מיליוני בניינים ופרטים בנקודות זמן שונות. התוצאה הנה מערך כוללני של 'נתונים גדולים' מרחביים בהם כל פרט סינתטי בעיר מיוצג ע"י אוסף של מאפיינים סוציו-אקונומיים ודינמיקות בתדירות גבוהה.

גישה פופולארית לשימוש במידע סינתטי שכזה היא הצלבה עם מפות סיכון בכדי לצור ייצוג ויזואלי בעל אופי דינמי של התפתחות אסון. אנו עשינו זאת במסגרת ממשק רשת (web interface) דינמי המשלב מפות סיכון להצפה עם התכונות הסוציו-אקונומיות של האזורים תחת איום ההצפה (Lichter and Felsenstein, 2012). לחילופין, מידע זה יכול לשמש כתשומה למודל דינמי מבוסס-סוכנים של אסונות עירוניים, כפי שמודגם במאמר זה. אנו מיישמים שיטות למיזוג מידע (data fusion) ברמת הבניין הבודד בכדי לייצר מאגר מידע מרחבי המייצג את תנאי הפתיחה לסימולציה מבוססת-סוכנים של אסון עירוני. שיטות אלו מקדמות ניסוח מלמטה-למעלה (bottom-up) של התנהגות המערכת העירונית כולה.

התגובה ההתנהגותית של כל סוכן בסימולציה נובעת מהמאפיינים הסוציו-אקונומיים שלו. לדוגמה – גיל, הכנסה ובעלות על רכב יכולים לפעול כגורמים המעודדים, מגבילים או משפיעים על ניידות, מיקום פעילויות ובחירת מיקום מגורים. בצורה זו, המידע מגלם את מאפייני האוכלוסיה המהווים בסיס לסימולציה דינמית מבוססת-סוכנים של רעידת אדמה בירושלים. הסימולציה מבוססת על סוכנים המייצגים תושבים בודדים ועל האינטראקציה שלהם עם הסביבה הבנויה ועם סוכנים אחרים. במהלך תהליך פירוק המידע, שימושי הקרקע, שטח הרצפה והערך של בניינים מוערך. באותו אופן, סוכנים מאופיינים במונחי הכנסה וסך המאפיינים הסוציו-דמוגרפיים של התושבים מוקצים למבני מגורים. החוקים ההתנהגותיים הפשוטים של הסוכנים

המבוססים על המנעות מסיכון, התנהגות מספקת (satisficing; Simon, 1952) והעדפות בבחירת מיקום מגורים ומערכת תמחור מגורים דינמית המתחשבת בשינויים בשימושי קרקע. אלה מאפשרים ליצור תיאור מפורט של הדינמיקה העתית-מרחבית לאחר האסון.

היישום הנוכחי של מודל סימולציה מבוסס-סוכנים אינו הראשון שבוחן את השפעות אסון. בחלק הבא אנו סוקרים מחקרים בולטים העוסקים באסונות עירוניים ולאחריו אנו מפרטים את תהליך הפיתוח של המחקר הנוכחי והקשרו. בחלק הרביעי של המאמר אנו מתארים כיצד מאגר הנתונים הסינתטיים הגדולים מיוצר וכיצד הוא משולב במודל מבוסס-סוכנים. תוצאות הסימולציה המוצגות בהמשך לכך מתייחסות לשינוי בשימושי הקרקע, ערכי מלאי דיור ומסחר, והמבנה הסוציו-כלכלי של אזור המחקר. בכדי להנגיש את המידע, אנו יוצרים ויזואליזציה של חלק מהתוצרים בצורה של מפות דינמיות מבוססות-רשת. לבסוף, אנו דנים בפיתוחים אפשריים של הגישה שאנו מציעים

### סקירת ספרות; מודלים מבוססי-סוכנים וניהול מצבי אסון

מודלים מבוססי-סוכנים מהווים כלי עזר מתאים לניהול אסונות (Fiedrich and Burgardt, 2007). בעולם מבוסס-הסוכנים, ישויות אוטונומיות (סוכנים) מתנהגות על פי אוסף של כללי החלטה פשטניים המוגדרים מראש. הפעילויות של אוכלוסיית סוכנים יוצרות מערכת בה הפעולות של פרטים משפיעות על פרטים אחרים ועל המערכת כולה. איפיון זה יוצר לעיתים רבות רשת סבוכה של דפוסי התנהגות שאינו ניתן לחזוי ע"י אגרזציה פשוטה של כלל ההתנהגויות הפרטניות (למרות שישנם מקרים בהם ההתנהגות של סוכנים ניתנת לאיפיון באמצעות אגרזציות פשוטות). חשוב מכך, מערכת שכזו ניתנת להדמייה תוך שילוב זעזועים חיצוניים בתוכה. אין זה פלא לכן, שמגוון תרחישי ניהול אסון טופלו במסגרת סימולציות מבוססות-סוכנים, במיוחד במצבים בהם יכולת הארגון האנושית ודפוסי למידה ניתנים לתכנות כחלק מהתגובה ההתנהגותית של סוכנים. יישומים אלו כוללים בין השאר הצפות (Dawson, Peppe and Wang, 2011), שריפות-יער (Chen and Zhan, 2008), מגיפות (Simoos, 2012), הוריקנים (Chen, Meaker and Zhan, 2006), ורעידות אדמה (Crooks and Wise, 2013). התוצרים של מרבית הניסיונות הללו מתרכזים בהתנהגות הקולקטיבית של הסוכנים, כגון הדמייה של ההתערבות של כוחות מגיבים, חיזוי של התנהגות אנושית תחת לחץ ושל עומסי תנועה ותשתיות כתוצאה מדפוסי תנועה של סוכנים, ואף הדמייה של מאמצי סיוע לאחר אסון.

תשומת לב מועטה יותר הוקדשה להדמיית ההשפעה של התנהגות זו על הסביבה הבנויה. ברמת המיקרו של בניינים בודדים ודפוסי תגובה אנושית, Torrens (2014) הראה כיצד השימוש במודל ברמת פירוט גבוהה יכול לצור מידע עשיר לגבי התמוטטות מבנים, אינטראקציות סוכן-סוכן ודינמיקות של פינוי במקרה של רעידת אדמה מדומה. יישום זה עומד בניגוד ל"אופי הפשטני, גס ושטחני" של מודלים מבוססי-סוכנים אחרים (Torrens, 2014, p.965). המנסים ליישב בין תהליכים פיזיים והתנהגותיים. בעוד נפח המידע העצום שנוצר באמצעות הדמיית הדינמיקות העתיות-מרחביות של מצבים שכאלו אינו מזוהה אינטואיטיבית כ'big data', הוא בהחלט מתאים לעולם

זה מבחינת נפח ומגוון<sup>4</sup>. ברמה הכלל-מערכתית הרחבה יותר של האיזור העירוני, Zou ועמיתים (2013) טוענים שהדינמיקות מלמטה-למעלה עוברות תהליך של הומוגניזציה בעת בחינה של תהליכים עירוניים מורכבים כגון זחילה עירונית (sprawl) או ציפוף. הם מציעים אסטרטגיה אלטרנטיבית לזו שנמצאת בשימוש לרב במודלים מבוססי-סוכנים וכוללת 'ניסויים קצרים בעצמות גבוהה' במסגרת של מטא-סימולציה. התוצאה הנה סימולציה מבוססת-סוכנים מואצת המאפשרת מעבר בין קני-מידה עיתיים-מרחביים שונים. בעבודות אחרות אנו מראים כי שינוי עירוני מורכב ברמת המאקרו, כגון התחדשות שימושי-קרקע ושינוי מורפולוגי עירוני לאחר רעידת אדמה, יכול להיות מנותח בצורה נאותה במסגרת סימולציה מבוססת-סוכנים רגילה (Grinberger and Felsenstein, 2014, 2015).

עוד הספרות העוסקת בתוצאות העירוניות של אסונות תוך שימוש במודלים מבוססי-סוכנים הנה מצומצמת, ישנו אוסף רחב יותר של ספרות נלוות ממגוון מקורות הנוגעת בנושא באופן עקיף. Chen and Zhen (2008) משתמשים בסימולציית Paramics המסחרית בכדי להעריך טכניקות פניו שונות על פני תנאים משתנים מבחינת רשת הכבישים וצפיפות אוכלוסייה. גישה אחרת הנה שילוב של יכולות ממיג (מערכות מידע גיאוגרפיות - GIS) עם כלים אנליטיים קיימים כגון חישה מרחוק כאמצעי לזיהוי נקודות כובד של אסונות (Rashed et al., 2007). לחילופין, ממיג ניתן לשילוב עם כלים לניתוח רשתות והדמייה תלת-מימדית בכדי לספק מיקרו סימולציה בזמן-אמת לתגובת חירום ברמת הבניין הבודד או המבטן (Kwan and Lee, 2005). Chang (2003) מציעה ברמה העקרונית, להשתמש במדדי נגישות ככלי להערכת השפעות של רעידת אדמה על מערכות תחבורה.

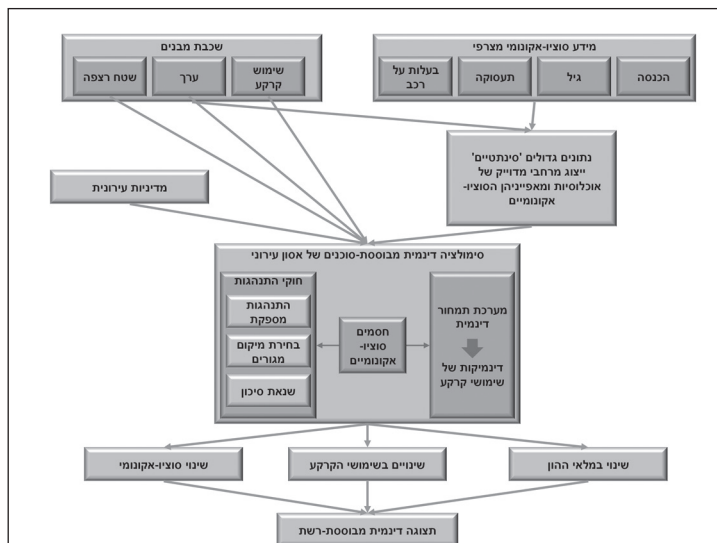
אתגר ייחודי להדמיות למיניהן נובע מהדינמיקות שנכללות במודלים מבוססי-סוכנים ובצורך לייצג אותן ויזואלית הן במימד המרחבי והן במימד העתי. בעולם ה-big data, אתגר זה גדל בשל הצורך להתמודד בזמן אמת עם כמויות גדולות של מידע שמשתנה בתדירות גבוהה. אתגר זה הינו מהמעלה הראשונה ומצריך שימוש נבון בטכניקות מיחשוביות, מאגרי מידע יחסיים וייצוג ויזואלי אפקטיבי. הספרות בתחום זה הינה מצומצמת במיוחד. בסביבה שאינה מבוססת-סוכנים, Keon ועמיתים (2014) מספקים דוגמה נדירה של האופן בו ניתן להשיג אינטגרציה שכזו. הם מציעים מערכת עיבוד מרחבי אוטומטי הכוללת הדמייה של הצפה כתוצאה מצונאמי ותנועת בני האדם בעקבותיה. הם מצוותים מערכת זו עם יכולות תצוגה מבוססות-רשת וכך מייצרים מנשק בו המשתמש יכול באמצעות דפדפן רגיל להגדיר ערכי פרמטרים, להריץ את הסימולציה ולצפות בתוצאות. מגוון של כלי תכנות הן בצד המשתמש והן בצד השרת נמצאים בשימוש במערכת זו בכדי לאפשר למשתמש רמת ואופן פונקציונליות סטנדרטית למיפוי דינמי מבוסס-רשת.

גישתנו מקדמת אינטגרציה זו צעד נוסף קדימה. אין אנו משלבים סימולציה מבוססת-סוכנים עם תצוגה מבוססת-רשת בלבד, אלא גם מייצרים את הביג דאטה הסינתטי המניע את המודל. כאשר נתונים אלו מיוצרים, יש צורך להקצות אותם מרחבית. הספרות מספקת מספר שיטות כגון רישות אוכלוסייה (population gridding; Linard et al., 2011), אינטרפולציה אווירית שבה נוצרים 'מיקומים' (Reibel and Bufalino, 2005) וייצוג דאסימטרי (dasymeric representation) אשר מתבסס על מאגרי מידע נלווים דוגמת

מפות אורות לילה או כבישים בכדי להעריך את מיקום האוכלוסיה (Eicher and Brewer, 2001; Mennis, 2003). גישה שונה, אשר אנו מאמצים, היא פיזור המידע בצורה בדידה ע"י שילוב של מקורות מידע אדמינסטרטיביים וסקרים בכדי לצור פיזור אוכלוסיה, ללא הסתמכות על אינטרפולציה או מיפוי דאסימטרי. תוצאות התהליך מפוזרות במרחב על בסיס שימוש בעוגנים מרחביים מתאימים. השיטה הזו הנה קרובה ביותר לתהליך שמציעים Harper and Mayhew (2012a,b) ובו מידע אדמינסטרטיבי משולב ומשווים מרחבית על פי מקורות מקומיים של מידע בדבר קרקעות ונכסים.

### מסגרת העבודה

בהתאם לעבודה בעולם הנתונים הגדולים, מסגרת העבודה הנה מכוונת-נתונים (data-driven). תהליך זה מתואר באיור 1. מידע סוציו-אקונומי עבור יחידות אדמינסטרטיביות גסות (נתונים קטנים) מפורק ומפוזר במרחב ברמת הפרט על בסיס שכבת GIS של מבנים, כשלאחר מכן פרטים מקובצים ליצירת משקי-בית. המידע הסינתטי הנוצר מאפשר ניסוח פרופילים סוציו-אקונומיים מדויקים של האוכלוסיה באיזור המחקר (בהינתן ההסתייגויות הרגילות הקשורות לפירוק של מידע) שילוב מידע זה עם מודלי סימולציה מבוססת-סוכנים מוסיף דינמיקות מרחביות ועיתיות למידע. התוצאה היא בסיס נתונים רב מימדי המאפשר גמישות מעבר למגבלות שמציבות חלוקות אדמינסטרטיביות מרחביות קונבנציונליות. התוצרים של תהליך זה מתייחסים לתהליכי שינוי במאפיינים הסוציו-אקונומיים, במערך שימושי הקרקע ובמלאי ההון לאחר רעידת אדמה. בכדי לתפוס באופן מלא את עושר המידע, אנו משתמשי בשירותי מיפוי מבוססי-רשת כאמצעי לייצור תוצרים ויזואליים נוספים.



איור 1: מסגרת המודל

### מקרה המחקר

אנו מדמים רעידת אדמה במרכז ירושלים (איור 2). בעוד ירושלים ממוקמת כ-30 ק"מ מדרום-מערב לבקע ים המלח הפעיל, לא פקדה רעידת האדמה משמעותית את העיר מאז 1927. אמנם מרכז העיר שוכן באיזור יציב באופן יחסי מבחינה סייסמית, אך רבים מהמבנים במקום נבנו בטרם נאכפו תקנות בנייה לרעידת אדמה ולכן ישנו בסיס לצפות לנוק במקום בעת רעידה עתידית (Salamon, Katz & Crouvi, 2010). איזור המחקר מאכלס 22,243 פרטים, הוא מכסה 1.45 קמ"ר ומאופיין במיעוט של בניינים רבי-קומות בקרב בנייה נמוכה יחסית. מגוון של שימושי-קרקע קיים באיזור והוא מיוצג ע"י מבנים למגורים (שטח-רצפה כולל של 243,000 מ"ר, 717 מבנים), מבני מסחר (505,000 מ"ר, 119 מבנים) ומבני ציבור ומנהל שונים (420,000 מ"ר, 179 מבנים). בתוך האיזור שוכנות שתי פונקציות מסחריות מרכזיות: שוק מחנה יהודה והמע"ר. שלושה צירים תנועה עיקריים חוצים את האיזור ומובילים לעומסי תנועה: רחובות אגריפס ויפו (תוואי הרכבת הקלה) על ציר צפון-מערב דרום-מזרח ורחוב קינג ג'ורג' המשתרע מצפון לדרום. אי לכך, האיזור מציג אוסף הטרוגני של שימושי קרקע לצד עומסי תנועה גבוהים.

### נתונים גדולים עבור אסונות גדולים

#### יצירת נתונים סינתטיים גדולים

ייצוג מדויק של מידע מרחבי הינו חיוני הן עבור התכנונות למצבי אסון והן עבור טיפול במצבי חירום בזמן-אמת. עם זאת, תופעות מרחביות אינן חופפות לרב לגבולות האדמיניסטרטיביים של המידע המקורי. אי לכך, קיים צורך לפזר באופן מדויק מידע סוציו-אקונומי אלפא-נומרי בין פרטים ומשקי-בית בתוך היחידות המרחביות על פי הן נאסף המידע. אנו משתמשים במערכת מבוססת מ"ג המקצה אוכלוסיות למבנים, על בסיסה נוצר מאגר נתונים מרחבי בו כל פרט מיוצג על ידי רשומה ייחודית. כל ישות במאגר זה הנה בעלת מערך ערכים יחודיים של מאפיינים סוציו-אקונומיים. באופן מצרפי, כל הישויות הפרטניות בתוך יחידה מרחבית מקורית מייצגים בצורה מדויקת את ההתפלגות של המשתנים הסוציו-אקונומיים בתוכה. תהליך הפירוק וההקצאה מאפשר ייצוג שאינו זמין בדרך כלל של ההתפלגות המרחבית של משתנים סוציו-אקונומיים. מאגר זה של נתונים סינתטיים גדולים מניע את הסימולציה מבוססת-הסוכנים ותומך באיפיון היחודי של כל סוכן. איפיון זה מעצב את תהליכי קבלת החלטות של הסוכנים.

המודל מונע על ידי מידע בשלוש רזולוציות שונות: מבנים, משקי-בית ופרטים. המידע המקורי מסופק ברזולוציה של איזורים סטטיסטיים (א"ס) על פי הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה (הלמ"ס)<sup>2</sup>. אנו משתמשים בהליך פירוק בו מידע מרחבי אשר נאסף עבור אוסף מסויים של יחידות מרחביות מוקצה לאוסף יחידות אחר. הקצאה זו ניתנת לביצוע במגוון של דרכים כגון אלגוריתמים מרחביים, טכניקות ממ"גיות, מערכות משקולות מרחביים ועוד (Reibel and Bufalino, 2005). שכבת הממ"ג מספקת את התפרושת הלאומית של מבנים בצירוף שטח הגג שלהם (שטח הפוליגון המייצג את החתימה הדו-ממדית של הבניין), גובה הבניין ושימוש הקרקע העיקרי שלו. מכך ניתן לחשב את שטח הרצפה עבור כל בניין (שטח הגג כפול מספר הקומות) ולאכלס

אותו בדיירים אשר להם מוקצים התכונות הסוציו-אקונומיות הרלוונטיות של הא"ס אליו הם שייכים, בהתאם להתפלגות המקורית של תכונות אלו בתוך הא"ס. באופן זה, נתונים סינתטיים גדולים נוצרים מיחידות מרחביות ברזולוציה גסה יחסית. המשתנים שעל פיהם מאוכלסים המבנים ואשר מניעים את המודל הנם:

- רמת המבנה: שימוש-קרקע, שטח-רצפה, מס' הקומות, ערך המבנה, מספר משקי בית.
- רמת משק הבית: מספר הפרטים, הכנסות, בעלות על רכב.
- רמת הפרט: חברות במשק בית, נכות, השתתפות בכח העבודה, תחום תעסוקה, גיל, מקום עבודה.

משתנים אלו ומשתנים אחרים אשר בשימוש במודל, מקורותיהם ורמת הפירוט שלהם מופיעים בטבלה 1.

**פירוק ברמת הביניים:** הבסיס של תהליך פירוק זה נעוץ בחישוב שטח הרצפה עבור כל בניין על פי שטח גג ושימוש קרקע. אנו מניחים גובה קומה ממוצע של 5 מ' עבור מבנים למגורים ו-7 מ' עבור מבנים לא-למגורים. ערכים אלו הנם התוצר של השוואה בין סך כל שטח הרצפה הארצי הבנוי (עבור כל שימוש קרקע) לבין סך כל השטח שחושב באמצעות שכבת המבנים.

התהליך בשלמותו מתבצע באופן אוטומטי על ידי קוד לעיבוד המידע האלפא נומרי והמרחבי ב-SQL וב-Python והתוצאות המתקבלות בכל שלב מאוחסנות במאגר נתונים מרחבי. התהליך כולל ראשית הקצאה פרופורציונלית של פרטים ומאפיינים סוציו-אקונומיים למבנים, כאשר הערך של משתנה מסויים במבנה (דוגמת אוכלוסיה) הינו פרופורציונלי למשקל של הבניין ביחס לסה"כ בא"ס במונחים של שטח-רצפה. על בסיס תהליך זה, כל פרט מאופיין סוציו-אקונומית. לאחר מכן, הפרטים מקובצים למשקי בית ומתבצע תהליך איפיון של משקי-הבית. פרוצדורה זו משמעותה בהכרח אובדן מידע בשל החלוקה של מספרים שלמים כגון מספר משקי-בית ופרטים בשברים כגון שטח-רצפה עבור חישובי צפיפויות ואחוזים עבור התפלגות מאפיינים סוציו-אקונומיים. בכדי להמנע מאובדן זה ולהגיע לסכומים ברמה הארצית אשר שווים למקור, קטעי הקוד בסביבת ה-SQL כוללים פיצוי עבור אובדן (או תוספת) מידע בעת המעבר מנתונים עשרוניים לערכים שלמים וכך הערכים הכלליים המקוריים תמיד נשמרים.

פירוק ברמת הפרט: המידע ברמת המבנה משרת כבסיס עבור המשך תהליך הפירוק ברמה זו. מאגר המבנים כולל 1,075,904 רשומות, מתוכן 771,226 מייצגות מבנים למגורים שאליהם מוקצים 7,354,200 תושבים. הליך ההקצאה מתחיל עם הענקת מספר זיהוי ייחודי לכל פרט, כך שהוא ייוצג במאגר הנתונים כישות ייחודית המקושרת למבנה ספציפי. לאחר מכן, כל פרט ממוקם בנקודה רנדומלית (קואורדינטה) בתוך המבנה אליו הוא משוייך. בכל מבנה, המאפיינים הדמוגרפיים (השתתפות בכח העבודה, מגזר תעסוקה, נכות וקבוצת גיל) מוקצים לכל פרט, כך שהפרטים ייצגו את התפלגות משתנים האלו במבנה, כאשר התפלגות זו נובעת מההתפלגות בא"ס אליו משוייך המבנה. באותו אופן, ההתפלגות של מקום התעסוקה של פרטים על פי מגזר תעסוקה נגזר מסקר תחבורה מבוסס-GPS שנערך על ידי צוות תוכנית אב לתחבורה בירושלים (Oliveira et al., 2011). הדבר נעשה בכדי

לקבוע את ההתפלגות של התושבים העובדים בתוך או מחוץ לאיזור המחקר על פי מגזר התעסוקה שלהם ולהעניק על פי כך ערכים בינאריים מתאימים לפרטים.

טבלה 1: משתנים בשימוש במסגרת המודל

משתנה	מקור	יחידה מרחבית	ערך	רמת פירוק
ערך מ"ר למגורים	רשות המס 2008-2013	א"ס	ערך ממוצע למ"ר מגורים בש"ח 2008-2013 (ריאלי במונחי 2009)	מבנה
ערך מפעלים לא-מגורים	מידע כספי של רשויות מקומיות (למ"ס)	רשות מקומית	ערך איזורי כולל של מלאי המבנים לא-למגורים בש"ח	מבנה
ערך ציוד ומיכון לא-מגורים	הערכה (Beenstock et al., 2011)	רשות מקומית	ערך איזורי כולל של מלאי ציוד לא-למגורים בש"ח	מבנה
מספר משקי-בית	למ"ס 2008	א"ס	מס' משקי-בית בא"ס	מבנה, משק-בית
מספר תושבים	למ"ס 2008	א"ס	מס' תושבים בא"ס	מבנה, פרט-בית, פרט
הכנסה חודשית ממוצעת של משקי-בית	למ"ס 2008	רשות מקומית	הכנסה חודשית ממוצעת למשק-בית בא"ס	מבנה, משק-בית
השתתפות בכח העבודה	למ"ס 2008	א"ס	עובד / לא עובד	מבנה, פרט-בית, פרט
תעסוקה לפי מגזר	למ"ס 2008	א"ס	מסחרי/ ציבורי/ תעשייתי/ מבוסס-מגורים/ לא ידוע	מבנה, פרט-בית, פרט
אחוז בעלי נכות	למ"ס	א"ס	% בעלי נכות בא"ס	מבנה, פרט-בית, פרט
גיל	למ"ס	א"ס	0-18/19-64/65+	מבנה, פרט-בית, פרט
מקום העבודה	סקר GPS 2014	סקר של פרטים	בתוך האיזור / מחוץ לאיזור	פרט

**התקבצות למשקי-בית והקצאת מאפיינים:** פרטים מוקצים למשקי-בית על פי מספר משקי-הבית במבנה. הקצאה זו יוצרת ישויות חדשות במאגר הנתונים המייצגות משקי-בית, ואשר משוייכות למבנים ופרטים משוייכים אליהן. תהליך זה יוצר הטרונגניות בתוך משק-הבית מבחינת קבוצות גיל במטרה לייצר של"משק-בית מסורת"י הכולל גם מבוגרים וגם ילדים. אלגוריתם איטרטיבי המקצה פרטים על פי סדר של גיל למשקי-בית מבצע את ההקצאה הזו בצורה אוטומטית. בהתאם להתפלגות הגילאים במבנה, האלגוריתם מקבץ פרטים למשקי-בית המייצגים בצורה דומה, אך לא זהה,



אותן שכבות גיל. כל משק-בית מקבל ערך של הכנסה ממוצעת על פי הממוצע בא"ס, וכך גם עבור משתנים אחרים כגון בעלות על רכב. איור 3 מדגים את תהליך פירוק המידע בצורה גרפית.

#### **- שילוב המידע במודל מבוסס-סוכנים**

המידע ברזולוציה גבוהה שנוצר על פי התהליכים שפורטו לעיל משולב עם מודל מבוסס-סוכנים. מכיוון שסוכנים הנם המניעים העיקריים של שינוי במודל ושתהליכי מאקרו מפורקים לכדי פעולותיהם הפרטניות, שילוב זה הופך את המגבלות שנוצרות על ידי חלוקות אדמיניסטרטיביות שרירותיות לחלשות עוד יותר. בהקשר הנוכחי, הדבר מאפשר לנו להתייחס לאופי העתי-מרחבי הייחודי של האסון ולהשפעות ארוכות הטווח שלו. בכדי לעשות זאת, אנו מאפיינים את שלושת המרכיבים הבסיסיים של מודל מבוסס-סוכנים: סוכנים, סביבה וכללים המנחים את האינטראקציות בין סוכן לסוכן ובין סוכן לסביבתו (Macal & North, 2005).

המידע מספק לנו את שני המרכיבים הראשונים כאשר פרטים מהווים את הסוכנים ומבנים מאפיינים את הסביבה העירונית. המודל עצמו משקף את הדינמיקות של המערכת העירונית באמצעות אוסף של כללי התנהגות פשטניים. אלו מנחים את האינטראקציות בתוך המערכת בכל איטרציה (איור 4) אשר מייצגת יום אחד, כאשר בתוך המערכת נכללת גם הפרעה חיצונית המייצגת את רעידת האדמה.

במסגרת הסימולציה נוצרת ישות המייצגת כל פרט, משק בית ובניין וכוללת את המאפיינים הסוציו-אקונומיים שלו. זיהוי מקום העבודה הספציפי עבור כל פרט שמועסק בתוך גבולות איזור המחקר נעשה על בסיס של התנהגות מספקת (satisficing). המבנה הראשון אשר מספק רמת העדפות שהוגרלה רנדומלית במונחים של מרחק ממקום המגורים ונפח שטח-רצפה (בהנחה שפונקציות גדולות יותר מושכות יותר עובדים) וכן הינו בעל שימוש קרקע אשר מווייך למגזר התעסוקה של הפרט נבחר כמקום התעסוקה של הסוכן. דפוס התנהגותי זה נבחר בכדי לייצג את הנטייה האנושית לא לחפש אחר האלטרנטיבה הטובה ביותר, אלא לבחור את האלטרנטיבה הראשונה המספקת סף תועלת מסויים וכיוון שהוא יוצר פחות עומס חשובי במסגרת המודל.

**התנהגות הסוכן (תהליך מלמטה-למעלה):** הסימולציה הנוכחית מאפיינת את העיר כישות מרחבית אשר אירגונה צומח מתוך ההתנהגות המצרפית של כלל תושביה. אי לכך, פרטים ומשקי-בית מזוהים כסוכנים במערכת זו. התנהגותם מופשטת לכדי שתי החלטות: החלטת משקי-הבית בדבר מקום מגורים והחלטת הפרטים בדבר מיקום ורצף פעילויות. הראשונה מבין אלו הנה הסתברותית ומסתמכת על היחס בין ערכים מוגרלים באקראי עבור כל משק בית לבין הסתברויות אקסוגניות להגירה החוצה (הערך מתייחס לרמת העיר) או להגירה פנימית (ערך ברמת הא"ס)<sup>3</sup>. תהליך בחירת מקום מגורים חדש הינו דומה לתהליך הקצאת מקום עבודה, כאשר המבנה הנבחר הוא הראשון אשר עלות המגורים בו שווה או קטנה לשליש מהכנסת משק הבית ואשר ההבדל בין הפרופיל הסוציו-דמוגרפי של סביבתו והפרופיל של מקום המגורים הנוכחי הינו מתחת לרף סובלנות (רמת העדפות) שמוגרל אקראית עבור כל משק-בית. אם לאחר 100 איטרציות לא נמצא מקום מגורים שעומד

בדרישות הללו, משק-הבית עוזב את איזור המחקר. הסוכנים המשוויכים למשק הבית משנים מיקום בהתאם לתוצאת התהליך. המודל מתייחס גם להגירה פנימה, כאשר המספר הפוטנציאלי של משקי-בית חדשים בכל איטרציה הינו פרופורציונלי למספר יחידות הדיור הפנויות ותלוי ביחס אקסוגני בין הגירה פנימה והגירה החוצה. משקי-בית חדשים בעלי 2 חברים או פחות מורכבים ממבוגרים בלבד. אלו עם יותר חברים מכילים לפחות סוכן אחד משכבות גיל מבוגרות ומאפייניהם הסוציו-אקונומיים משקפים את ההתפלגויות ברמה העירונית של תכונות אלו.

בכל איטרציה הסוכנים מבצעים מגוון של פעילויות בתוך איזור המחקר. פעילויות אלו הן חשובות עבור דינמיקות של שימושי קרקע ודפוסי ניידות של שימושים אלו (ראו בהמשך). מספר הפעילויות לסוכן ליום נע בין 0 ל-11 על פי המאפיינים הסוציו-דמוגרפיים של הסוכן והעדפות אקראיות, כאשר ערכים כגון השתתפות בכח העבודה, תעסוקה בתוך האיזור, נכות, בעלות על רכב ושכבת גיל המשתתפת בכח העבודה מעודדים פעילות מרחבית. מיקום הפעילויות (פרט למיקום פעילות העבודה עבור סוכנים המועסקים בתוך האיזור) נקבע בתהליך דומה למקום מגורים ותעסוקה. בתהליך זה, מיקום פעילות נקבע על פי היחס בין העדפות רנדומליות ואטרקטיביות של מיקומים, אשר נקבעת על פי מרחק מהמיקום הנוכחי של הסוכן, נפח שטח-הרצפה והסביבה של המיקום. סביבה בעלת מספר גדול של מבנים ריקים נתפסת כמאיימת ולא אטרקטיבית. התנועה בין שתי נקודות אינה בהכרח במסלול הקצר ביותר. האלגוריתם בו נעשה שימוש הינו פשוטי יותר ומבוסס על מרחק-אווירי בכדי להפחית בעומס עבודת המחשוב ולשקף מאפייני התנהגות מספקת.

**השפעות סביבתיות (תהליכים מלמעלה-למטה):** כתוצאה מאיפיון המערכת כתוצר של התנהגות תושבים, מודלים מבוססי-סוכנים מאופיינים בהדגשה של צד הביקוש. בשוק משוכלל המשמעות היא שהסוכנים מחפשים דיור זול יותר. עם זאת, בצד ההיצע קבלנים ויזמים ייטו לבנות היכן שהמחירים (הרווחים) הנם גבוהים וכך מחירים יעלו עם עלייה בגודל האוכלוסיה וירדו עם עלייה במלאי הדיור. במודלים מבוססי-סוכנים צד ההיצע אינו מובא בחשבון לרב. אנו מנסחים תהליך שפועל מלמעלה בכדי לקבל תמונה מלאה יותר של פעילות בשוק הדיור. לשם כך, אנו מאפיינים יחידות אדמיניסטרטיביות, מבנים ויחידות דיור כ'סוכנים-למחצה'. ישויות שאינן אוטונומיות או ניידות אך כן רגישות לשינויים בסביבתם על פי חוקים מוגדרים של השפעה (Torrens, 2014). הרגישות הגבוהה ביותר היא להתפלגות של הפעילות המסחרית ולערכי מבנים. בתהליך ההשפעה הסביבתי שינויים אגרגטיביים בצד הביקוש (דינמיקות של האוכלוסיה ושל פעילות) מובילים לשינויים במערך שימושי הקרקע ויוצרים השפעות אשר מחלחלות מרמת הא"ס ליחידת הדיור הבודדה ולבסוף לרמת התושב הבודד.

אנו מניחים שככל ששימוש מסחרי הינו גדול יותר במרחבים של שטח-רצפה, כך הוא ידרוש יותר פעילות בכדי להציג ריווחיות. כמו כן, אנו מניחים שנפח הפעילות מיוצג ע"י רמת עומסי התנועה בסביבה הקרובה למבנה. אי לכך, פעילות מסחרית מוצלחת דורשת התאמה פרופורציונלית בין שטח-הרצפה במיקום ונפחי התנועה בסמוך אליו. על פי ניסוח זה, כל פונקצייה מסחרית שעבורה אין התאמה שכזו, לא תשרוד ותהפוך לריקה משימוש בעוד שימושי

מגורים ליד צירים עמוסים יהיו בעלי פוטנציאל להפוך לשימושים מסחריים. במקרה שכזה, הסוכנים הדרים במבנה יאלצו לעבור למיקום אחר או להגר החוצה. בכדי להמנע מאינפלציה של שימושים מסחריים קטנים וחוסן נמוך של שימושים גדולים, ההסתברויות לשינוי מתמתנות לקראת הקצוות.

השינויים בביקוש מובילים לתהליך מלמעלה הגורם לשינויים במחירי יחידות דיור המבוסס על דינמיקות של היצע וביקוש. מחיר ממוצע למ"ר מוגדר בתחילת הסימולציה בכל א"ס עבור מגורים ושימושים אחרים. עם השינויים במערך שימושי הקרקע ובגודל האוכלוסייה, ביקוש והיצע משתנים גם הם וגורמים לתנודות במחירים אלו. אנו מניחים שמחיר ממוצע של מ"ר לא-למגורים מושפע משינויים בהיצע בלבד (עלייה במספר המבנים לא-למגורים תוביל לירידה במחיר). המחיר הממוצע של מ"ר מגורים מושפע גם כן משינויים בפעילות המסחרית, אשר מייצגת קרבה לשירותים, כאשר עלייה בהיצע השירותים תוביל לעלייה במחיר. בנוסף, המחיר למגורים מושפע מגודל האוכלוסייה (ביקוש – קשר ישר) ומספר המבנים למגורים (היצע – קשר הפוך). השינויים במחירים הממוצעים גורמים לשינויים בערכי מבנים בהתאם לנפחי שטח-רצפה. שינוי זה מושפע גם מרמת השירותים (המיוצגת ע"י היחס בין מספר המבנים המסחריים ומספר המבנים למגורים) בסביבת המבנה הספציפי ביחס לרמה הכללית בא"ס. ככל שהרמה באיזור הבניין גבוהה יותר מהממוצע האיזורי, כך עולה ערכו. שינויים אלה ממשיכים לחלחל אל העלות החודשית של מגורים ביחידת הדיור הבודדת, כאשר אנו מניחים אחידות במחירים של יחידות דיור בתוך אותו בניין, כך שהעלות של כל יחידה היא העלות הממוצעת בבניין. עלויות אלו משפיעות על תהליכי קבלת החלטות של סוכנים בהקשר של מיקום מגורים באיטרציה הבאה.

**רעידת האדמה:** רעידת האדמה מנוסחת כזעזוע חד-פעמי המתפשט ממוקד מסוים, כאשר עוצמת ההשפעה פוחתת עם המרחק. הרעידה מתרחשת ביום ה-51 של הסימולציה כך שלמערכת יהיה מספיק זמן לאתחל את עצמה ולתהליכים בתוכה להתייצב. מיקום המוקד נקבע רנדומלית בכדי שהתוצאות הממוצעות על פני הרצות של הסימולציה לא יציגו הטייה מרחבית. ככל שהזעזוע מתפשט, כך הוא זורע הרס בסביבה. ההסתברות שמבנה יתמוטט כתוצאה מהזעזוע הנה פרופורציונלית הן למרחק מהמוקד ולגובה המבנה. כאשר מבנה מתמוטט, הכביש הסמוך אליו נחסם ונשאר כך עד אשר המבנה משוקם. תקופת הבנייה מחדש הנה פרופורציונלית לנפח שטח-הרצפה.

#### הדמייה ותוצאות

התוצאות המוצגות כאן מתייחסות לשלושה נושאים עיקריים: שינוי בשימושי הקרקע, שינוי בערכי מלאי ההון ושינוי סוציו-אקונומי. אלו משקפים שלושה מימדים של פגיעות עירונית לזעזועים לא-צפויים: פגיעות תיפקודית, כלכלית וחברתית בהתאם. התוצאות מציגות את הממוצע של 25 הרצות של הסימולציה, כאשר כל הרצה מתייחסת ל-1000 איטרציות (ימים). כמו כל שינוי קטסטרופלי, ההשפעות המיידיות של רעידת האדמה הן אובדן של אוכלוסייה ונזקים למבנים ותשתיות. אך, כפי שמדגימות התוצאות, נזקים אלו מובילים לסבב שני ועקיף של השפעות הנגרם מהאופן בו הסוכנים מגיבים לתנאים החדשים שנוצרו.

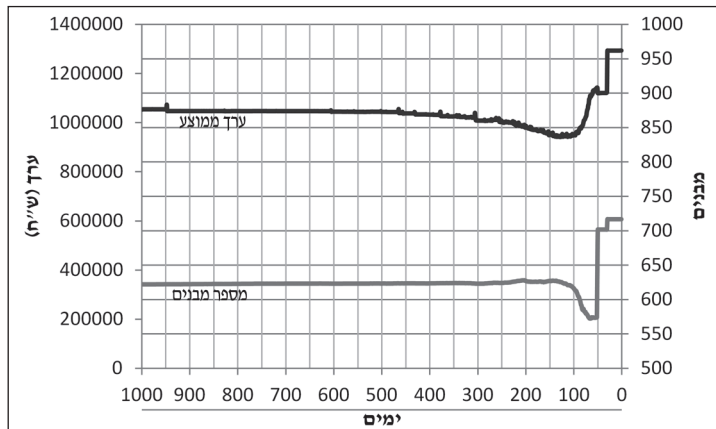
### דפוסי תנועה ושינוי במערך שימושי הקרקע

אנו מציגים סדרה של מפות הממחישות את השינוי בנקודות זמן נבחרות בשימושי הקרקע (ממסחרי למגורים וההיפך) ובהתפלגות של דפוסי התנועה המלווים אותו (איורים 5 ו-6). כפי שניתן לראות, בתקופה שלאחר האסון הצירים המסחריים העיקריים הנעים ממערב למזרח ומצפון לדרום מאבדים מחשיבותם כתוצאה משינויים לדפוסי התנועה. בתוך 50 ימים מיום הרעידה ( $T=100$ ), עומסי התנועה המרכזיים בחלקים הצפון-מערביים של האיזור מוסטים לדרום ובצורה חלשה יותר לצפון-מזרח השטח ולמרכזו. הפעילות המסחרית מגיבה לשינוי ומקבץ חדש של שימושים מסחריים בגודל בינוני מופיעים בדרום-מערב. עם זאת, עד יום 500 התוצאות מראות היפוך של דפוס זה, כאשר ההתאוששות של רשת הדרכים, לצד ההשפעות המעגנות של פונקציות מסחריות גדולות, עוזרות לרחוב אגריפס לחזור למעמדו המרכזי ומובילות ליצירת מקבץ מסחרי חדש בקרבתו. למרות זאת, ההשפעה המיידית כן מובילה לשינוי קבוע. שימושי קרקע מסחריים הופכים לנפוצים יותר בחלק הצפון-מזרחי של האיזור ונראה שמרכזיותו של המע"ר נפגמת חלקית כתוצאה מהתרוקנות שימושים בקרבו. שימושים אלו הנם בעלי נפח שטח-רצפה גדול יחסית למבנים במקבצים החדשים שמופיעים. משמעות הדבר היא שקיימת אפשרות לתוספת גדולה לשוק הדיור במידה ושימושים אלו יהפכו למגורים. כשנה לאחר הזעזוע כמעט ולא ניתן לראות שינוי נוסף כאשר דפוסי התנועה מתייצבים, מבנים ריקים מתמלאים בשימושים והפוטנציאל לשינוי בשימושי קרקע קטן. מהייצוג התלת-מימדי של תדירות השינוי של שימושי קרקע (איור 6) ניתן לזהות את נקודת המפנה בזמן בה מבנים שהיו ריקים מתמלאים. בין יום 500 ויום 1000 שימושי קרקע נוטים להתחדש כאשר מבנים ללא שימוש חוזרים לתפקד.

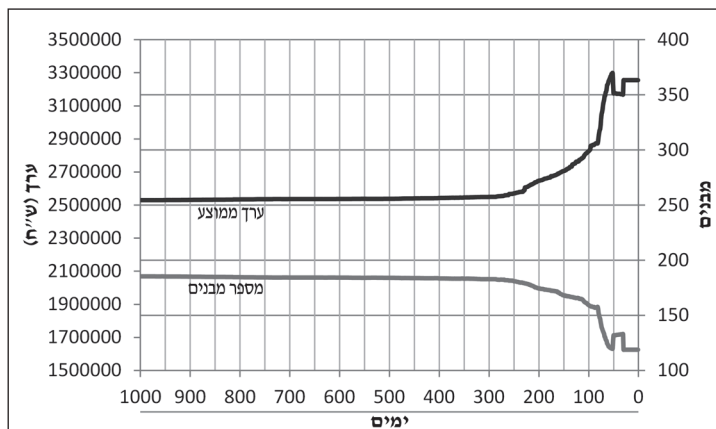
### שינוי בערכי מלאי ההון

התיאוריה הכלכלית-עירונית טוענת שקיים קשר הפוך בין הביקוש למלאי הון (למגורים ולא למגורים) לבין המחיר וקשר ישיר בין היצע מלאי ההון לבין המחיר (Smith 1969) בעולם מבוסס-הסוכנים שלנו, הביקוש משתנה עם שינויים באוכלוסיה וההיצע כתוצאה מהרס מבנים או שינויים בשימושי הקרקע הקשורים לתנועה על הכבישים ונגישות לשירותים. התוצאות הממוצעות של הסימולציה מראות שעבור מלאי הדיור מספר המבנים יורד לכ-600 לאחר כ-100 ימים ואינו מתאושש לאורך זמן (איור 7). מחירי דיור ממוצעים עם זאת, נוטים לעלות רק לאחר 500 ימים לרמה של 90% מהערכים טרום האסון. מאחר והאוכלוסיה לא חוזרת לרמתה המקורית (ראה בהמשך) את ההתאוששות המאוחרת הזו ניתן לזקוף למחסור בהיצע ולעלייה ברמת השירותים שבולטת בשינויים במערך שימושי הקרקע (ראה סעיף 5.1). עם זאת, העובדה שמלאי דיור מצומצם מציג ערכים ממוצעים דומים למצב המקורי מציעה שהשינוי נובע גם משינוי בנפח שטח-הרצפה של המבנים למגורים, אשר עולה ב-12.7%. ממצא זה מצביע על כך שבניינים בעלי נפח גבוה של שטח רצפה שבמקור הכילו שימושים מסחריים הפכו לבנייני מגורים. מלאי השימושים המסחריים מתנהג בצורה שונה לגמרי מכך הוא מציג עלייה מתמדת וארוכת-טווח בגודל לצד ירידה בערכים ממוצעים. בניגוד למלאי הדיור, נקודת המפנה מתרחשת לאחר כשנה (איור 8). בעבודה

אחרת זיהינו זאת כתהליך של פיזור פעילות מסחרית לאחר האסון, ממרכזים גדולים ליחידות שכונתיות קטנות (Grinberger and Felsenstein, 2014). התוצאות הנוכחיות מראות תמונה דומה: מספר היחידות גדל אך ערכם הממוצע קטן שכן המבנים בדרום-מערב ובצפון-מזרח האיזור מציגים נפחי שטח-רצפה נמוכים יותר (ירידה של כ-20% בנפח שטח רצפה ממוצע עבור שימושים מסחריים).



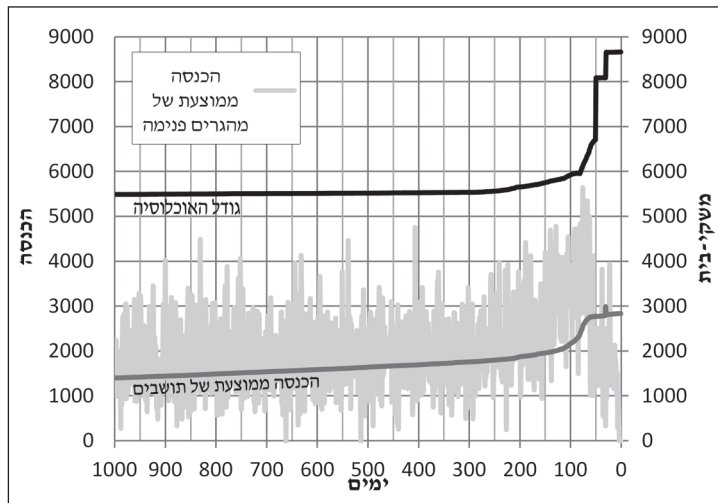
איור 7: שינויים לאורך זמן בגודל וערך ממוצע של מלאי המבנים למגורים



איור 8: שינויים לאורך זמן בגודל ובערך ממוצע של מלאי המבנים המסחריים

**דינמיקות של אוכלוסיה**

האפקט הראשוני של האסון הוא אובדן מיידי של יותר מ-1,300 משקי-בית בממוצע (איור 9). ההגירה החוצה ממשיכה ומתייצבת לאחר כ-200 ימים לאחר רעידת האדמה על גודל אוכלוסייה של כ-5,500 משקי בית. התייצבות זו הנה מקבילה כמעט לגמרי להתייצבות של מלאי השימושים המסחריים. הדבר מצביע על כך שהסבב השני של השפעות על מערך שימושי קרקע מוביל לניידות של האוכלוסיה ומאחר שמלאי המבנים למגורים אינו מתאושש בקצב מספק, אוכלוסייה זו נדחפת אל מחוץ לאיזור. היות ומלאי יחידות הדיור גדל עם שינוי השימוש של מבנים מסחריים גדולים, המשמעות היא שמלאי הדיור הינו רחוק מלהיות מלא. כיוון שהמבנים הגדולים מכילים יותר יחידות דיור, המשמעות של שינוי הייעוד שלהם היא שהעלות הממוצעת של מגורים ביחידת דיור יורדת ולכן ישנו פוטנציאל לניידות בתוך האיזור של משקי-בית ממעמד סוציו-אקונומי נמוך. העובדה שההכנסה הממוצעת של מהגרים פנימה הנה גבוהה יותר באופן עקבי מההכנסה הממוצעת (איור 9) מציעה שהירידה בהכנסה הממוצעת נובעת מכך שאוכלוסיה זו אכן נשארת ורק משנה מקום, בעוד אוכלוסייה עשירה יותר נוטה לעזוב.



**איור 9:** שינויים לאורך זמן בגודל אוכלוסיה והכנסה

מבט אל ההתפלגות המרחבית של תנועות האוכלוסיה בין מבנים לאורך הזמן מאפשר לנסח מדד משוקלל של פגיעות חברתית, תיפקודית וכלכלית. היחס הפשוט בין מספר משקי הבית הנכנסים למשקי-הבית היוצאים ממבנה בכל נקודת זמן בדידה מהווה אינדיקציה עבור נפח התנועה דרך המבנה ועבור יציבות האוכלוסיה בתוכו. איור 10 מציג סיכום של יחס זה. ערך 'משיכה' גבוה אינו בהכרח סממן של יציבות או אף של אטרקטיביות. יתכן שזהו מאפיין של ארעיות וחוסר-יציבות. התמונה הכללית המתקבלת מאיור זה

היא של דינמיקות מגורים לא יציבות. תוצאות הסימולציות מציעות שכמעט אף לא אחד ממבני המגורים המקוריים הינו אטרקטיבי בצורה עקבית עבור אוכלוסייה, כאשר רובם לא שומרים על מספר הדיירים המקורי לאחר רעידת האדמה. עבור רב המבנים הדבר נובע מפגיעה פיזית או משינוי פונקציונלי כגון ממגורים למסחר. נראה שרק שימושי מגורים פונקציונליים חדשים שבמקורם הנם מסחריים מושכים אוכלוסייה באופן עקבי. ההשפעות הישירות והעקיפות של הזעזוע מייצרות תחלופה גבוהה של משקי בית בין המבנים אך ללא אינדיקציה להעדפה של מבנה או חלק ספציפי מאיזור המחקר. סך שטח-הרצפה שעברו נרשמה תנועה פנימה (משיכה חזקה/ חלשה) מהווה 75% מסך שטח-הרצפה עבורו נרשמה תנועה החוצה (דחיקה חזקה/חלשה). עובדה זו רק מדגישה את תהליך השינוי המתמיד באיזור.

#### **פגיעות חברתית-כלכלית**

בחינה מעמיקה יותר של תנועת האוכלוסייה מוצגת באיור 11, כאשר תמונות מצב בנקודות זמן שונות של ההתפלגות המרחבית של פגיעות חברתית מוצגות. בעקבות Lichter and Felsenstein (2012), אנו מודדים פגיעות חברתית באמצעות מדד משוכלל המתחשב במאפיינים סוציו-אקונומיים שונים<sup>4</sup>.

בדומה לדגמי התנועה, דגמי המגורים ביום ה-100 מצייגים תהליך של פיזור בו משקי-בית פחות פגיעים שהיו מרוכזים בתחילה במערב נעים מזרחה. אוכלוסייה זו הנה לרב בעלת הכנסה יותר גבוהה ולכן יותר משאבים זמינים לה בתהליך שינוי מקום המגורים. מכיוון שסוכנים הנם בעלי סובלנות מוגבלת לשינוי חברתי בסביבת המגורים שלהם (ראו סעיף 4.2) אין זה מפתיע לגלות שהיעדים הנבחרים הנם באיזורים שהציגו פגיעות נמוכה יותר מלכתחילה (צבעים ירוקים בהירים ביום ה-50). לאחר היום ה-100, דפוסי המגורים עוברים תהליך התקבצות מחדש, בדומה להתייצבות של דפוסי תנועה ושימושי קרקע. עם זאת, התקבצות זו יוצרת בסיס לדפוס מרחבי חדש כאשר מקבצים קטנים של אוכלוסייה חזקה משמשים כגרעינים להמשך האגלומרציה. המשכה של משקי-בית בעלי מאפיינים סוציו-אקונומיים דומים למקבצים אלו מובילה להרחבתם ולתהליך כללי של התכנסות. תהליך זה קורה ברזולוציה מרחבית גבוהה הרבה יותר מאשר זאת של האזור הסטטיסטי. יצירת ייצוג ויזואלי של תהליך זה מונעת הומוגניזציה של דפוסים. לדוגמה, ניתן לזהות פיזור במהלך הזמן של אוכלוסייה פגיעה יותר כאשר דפוסי הפגיעות על ציר מזרח-מערב בנקודת הזמן לפני הרעידה מתחלפים בתמונה הטרוגנית יותר.

#### **הנגשה מבוססת-רשת של התוצאות**

את עושר התוצאות שהוצגו בסעיף 5 קשה לייצג ולתקשר. הנפח והמגוון של הנתונים הגדולים ששימשו כתבונה מתבטאים במורכבות של תוצרים אלו. יש לציין שמורכבות זו נחשבת גם כן מרכיב של Big Data. תוצרים אלו מיוצרים עבור המשתנים השונים הן עבור יחידות מרחביות שונות והן עבור המימד העתי, כאשר דינמיקות זמן-מרחב אלו מאופיינות בהיותן לא-ליניאריות. אופי זה של המידע הנוצר מצריך טכניקות הצגה המסוגלות להתמודד עם ייצוג מרחבי ועתי של כמות גדולה של נתונים. מצב עניינים

זה קורא לבנייה מתוככמת של מאגר המידע, כזו שתאפשר לא רק תצוגה דינמית אלא גם תשאול של המידע בצורה ידידותית למשתמש. אנו רואים במאמץ להשיג זאת כחוליה קריטית בתהליך הקישור בין תוצרי סימולציה הנוצרים בסביבות מחקריות לבין השימוש הפוטנציאלי שלהם על ידי צרכנים כגון מתכננים, מקבלי החלטות והציבור בכלל.

איך לכך, התוצאות מוצגות באמצעות יישום מבוסס-רשת. הדבר מאפשר להנגיש את התוצאות באופן לא מאיים ואינטואיטיבי (ראה <http://ccg.huji.ac.il/AgentBasedUrbanDisaster/index.html>). תוך שימוש בדפדפן רשת, המשתמש יכול לייצר תוצאות עבור אזורים שונים ונקודות זמן שונות ללא צורך בידע קודם בתחום הממ"ג או בטיפול במידע מרחבי. משתמשים יכולים לבחור להתמקד במשתנה ספציפי, לייצג את השינוי שלו על פני זמן ומרחב ולייצר את המידע תלוי-המקום הרלוונטי שלו הם זקוקים. לשם כך אנו יוצרים מאגר נתונים ייעודי המכיל סדרות עתיות של מגוון הפרמטרים המבטאים דינמיקה עירונית על בסיס מודל הסימולציה. את העיצוב של מאגר זה יש לתכנן בקפידה כך שלעיתים הוא לא יתאים לכללים הנוקשים של עיצוב מאגרי מידע אלא יכיל טבלאות 'שטוחות' של מידע רוחבי שמיועד לתצוגה בגרפים ותרשימים המופיעים על פי תשאול. התצוגה כוללת ייצוג עתי של ניידות אנושית (ברמת משק הבית), שינויים בנפחי תנועה על כבישים, שינויים בשימושי וערכי מבנים, תכונות משקי-בית באיזור המחקר ועוד (איורים 12-13).

אנו משתמשים בממשק תכנות-יישומים (Application Programming Interface - API של Google Maps כפלטפורמת המיפוי תוך שילוב תווכות (middleware) המשמשות כרכיבי ביניים. אלו הן פונקציות אשר אינן מסופקות על ידי ממשק המיפוי אך מתממשקות איתו בכדי לספק יכולות נלוות (Batty et al., 2010) כגון אנימציות מבוססות זמן, מחווי גלילה (sliders), גרפים אינטראקטיביים וכו'. מרכיבי ביניים אלו הנם תכונות של ממשק המשתמש (UI) המאפשרות דרכים שונות לתשאול את המידע בצורה אינטראקטיבית, תוך הסתמכות על מגוון של סיפריות וממשקי תכנות-יישומים של JavaScript. השימוש בערב-רב של כלי התצוגה הללו הינו השלב האחרון בלבד בפיתוח של המפה מבוססת-הרשת. קודמים לו שלב ראשוני של ניתוח מקיף של המידע ומניפולציה של מידע מרחבי מתוצרי המפקד והסימולציה ושלב שניוני של יצירת מאגר הנתונים הייעודי בכדי לאפשר תשאול קל, אינטואיטיבי ולעיתים אף רוחבי של מאגר הנתונים.

### מסקנות וסיכום

מאמר זה מציע תרומות שהנן מתודולוגיות ומהותיות למחקר של דינמיקות עירוניות תוך שימוש בחידושים האחרונים בתחומי הגיאואינפורמטיקה והמידול העירוניים. במונחים מתודולוגיים, אנו מדגימים כיצד הזיווג בין מודל מבוסס-סוכנים ותהליכי פירוק מידע מייצרים ביג דאטה סינתטי בעל יכולת ייצוג סוציו-אקונומית מפורטת ומדוייקת. חיבור זה מוסיף דינמיקות מרחביות ועתיות לנתונים. באופן ייחודי, מודל הסימולציה נותן לסביבה הבנויה תפקיד של סוכנים-למחצה בתהליך ההתפתחות העירונית. אי לכך יותר תשומת לב מוקדשת לדינמיקות של צד ההיצע במסגרת השינוי העירוני מאשר במחקרים אחרים. דגש זה מתבטא ביצירת מערכת מידול הכוללת



תמחור דינמי וצד היצע אקטיבי. אנו גם מדגימים כיצד ניתן להנגיש את התוצאות לבעלי-מקצוע ולציבור הכללי על ידי שימוש במיפוי דינמי מבוסס-רשת בכדי לעודד מעורבות אזרחית ומודעות ציבורית להשלכות האפשריות של זעזוע חיצוני גדול.

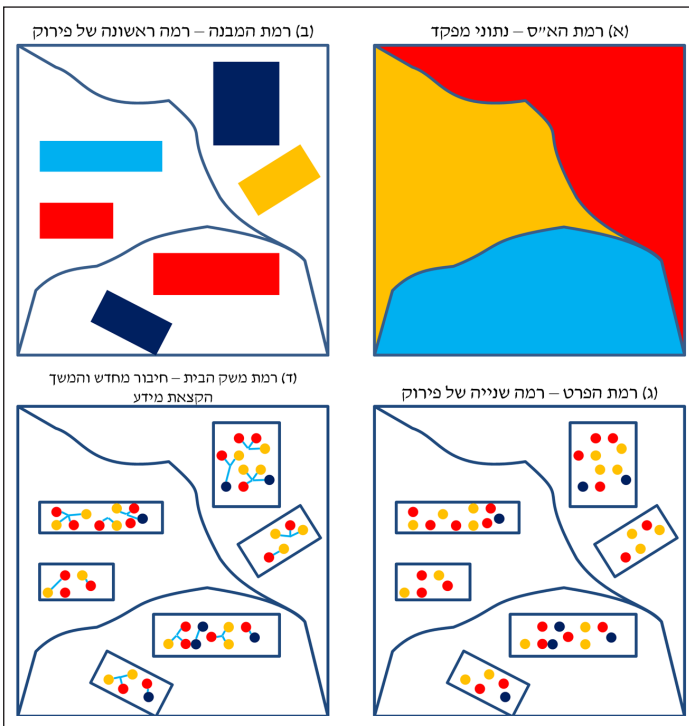
מהבחינה המהותית תוצאות הסימולציה מצביעות על מספר תהליכים עירוניים בעלי השלכות תכנוניות. תהליכים אלו מתייחסים ליכולת של העיר להתאושש ולהתחדש לאחר אסון בלתי-צפוי. הראשון נוגע להתקבעות ההשפעה של זעזוע זמני. תוצאותינו מראות שזעזועים זמניים הנגרמים לדפוס תנועה יכולים להוביל להשפעות ארוכות טווח. בהדמיות שלנו, השפעות אלו מובילות להפחתה בפעילות המסחרית במע"ר. ממצא זה מצביע על הצורך לזהות מתי אפקט שכזה מתקבע ומתי זעזוע זמני מייצר תוצאות קבועות.

התהליך השני נוגע לרמה הגבוהה של תנועת הגירה של משקי-בית במארג הבניי לאחר רעידת האדמה. עובדה ברורה היא שאירוע טרואמטי כגון רעידת אדמה מוביל לחוסר-יציבות באוכלוסייה על ידי הרס של מבני מגורים המאלץ תושבים למצוא פתרונות דיור חלופיים. עם זאת, שיעורי תחלופה גבוהים במבנים מהווים אינדיקציה לבזבז של משאבים אנושיים, חומריים ורגשיים. בשווקים אחרים, כגון שוק העבודה, תחלופה גבוהה יכולה להוות סממן חיובי של נידודת תעסוקתית וכלכלית (Schettkat, 1996). ברם, בהקשר של אסון, יש לשער שזהו תהליך שמדיניות ציבורית נבונה תשאף לצמצם. זאת כיוון שהעלויות החברתיות ועלויות הרווחה הנדרשות בתהליך החיפוש אחר דיור חלופי והניתוק המתקשר להחלפת מקום מגורים יורגשו בעיקר על ידי השכבות החלשות ופגיעות יותר (Felsenstein and Lichter, 2014).

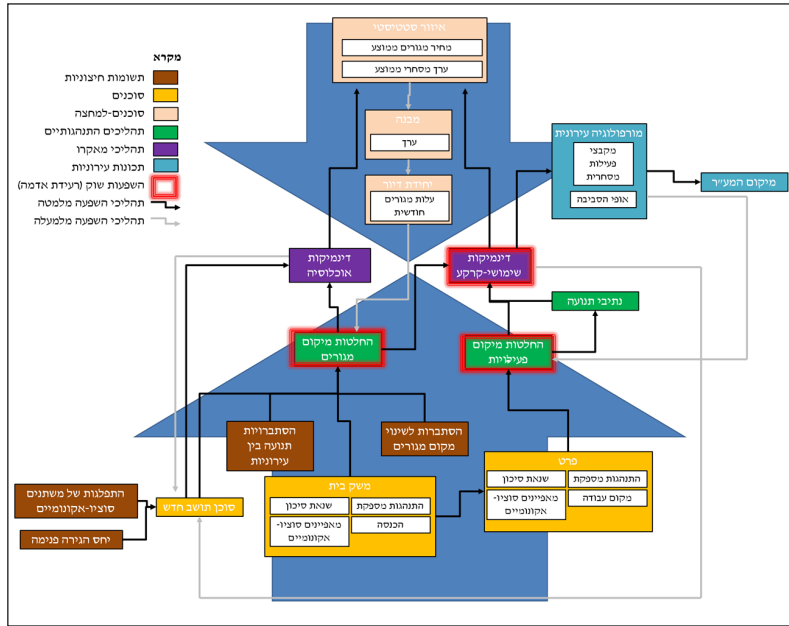
לבסוף, ממצאינו מציעים מבט חדש על הרעיון המוכר של 'פגיעות עירונית'. תוצאות ההדמייה שלנו מראות שקבוצות שהן פחות פגיעות במובן הסוציו-אקונומי 'שורדות את הסערה' באמצעות תהליך של פיזור והתקבצות מחדש לאורך זמן. הדבר מצביע על יכולת ההסתגלות הגבוהה שלהן. אוכלוסיות חזקות יותר הן בעלות יותר משאבים המאפשרים לספוג את ההשפעות השליליות של האסון. פגיעות עירונית הנה לכן ענין של רווחה כלכלית באותה מידה שהיא ענין הנדסי או מורפולוגי. מנקודת מבט סוציו-כלכלית, עוצמת האסון אינה חשובה כמו היכולת להתמודד עם תוצאותיו. לכן 'פגיעות עירונית' הנה מושג יחסי: זעזוע בעוצמה נתונה ישפיע בצורה משתנה על אוכלוסיות שונות. סביר להניח שאוכלוסיות וקהילות חלשות יושפעו בצורה לא-פרופורציונלית על ידי אסונות לא צפויים ולכן הסיכון שאוכלוסיות אלו יגיעו לכדי משבר מהותי הינו גדול יותר ביחס לכלל האוכלוסייה. את מרבית התובנות הללו קשה לזהות ללא בחינה ברמת המיקרו של משק-הבית. הן מיטשטשות במקרים רבים שבהם הבחינה נעשית ברמה האגרגטיבית של העיר כיחידה אחת. בשל כך, השימוש במידע ברזולוציה גבוהה שכולל ייצוג סוציו-אקונומי מפורט ומדוייק הינו קריטי להבנת הפגיעות העירונית במצבי אסון.



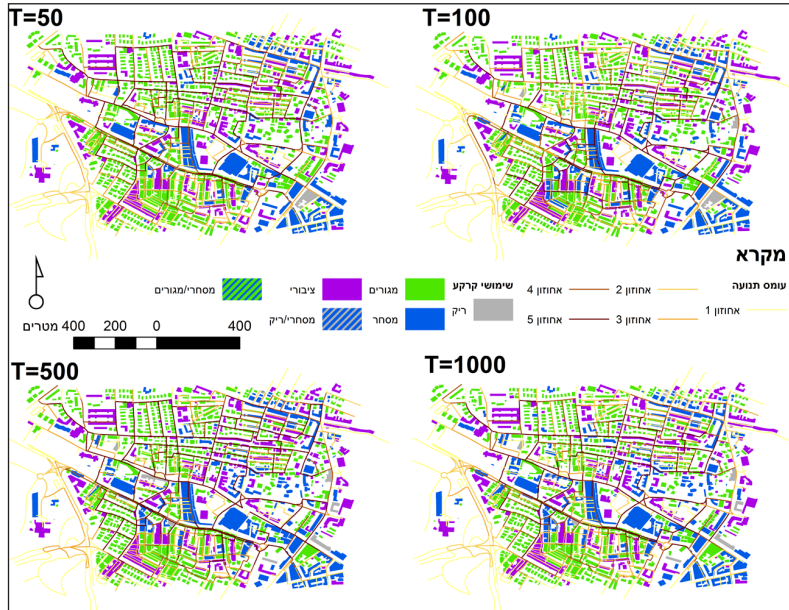
איור 2: איזור המחקר



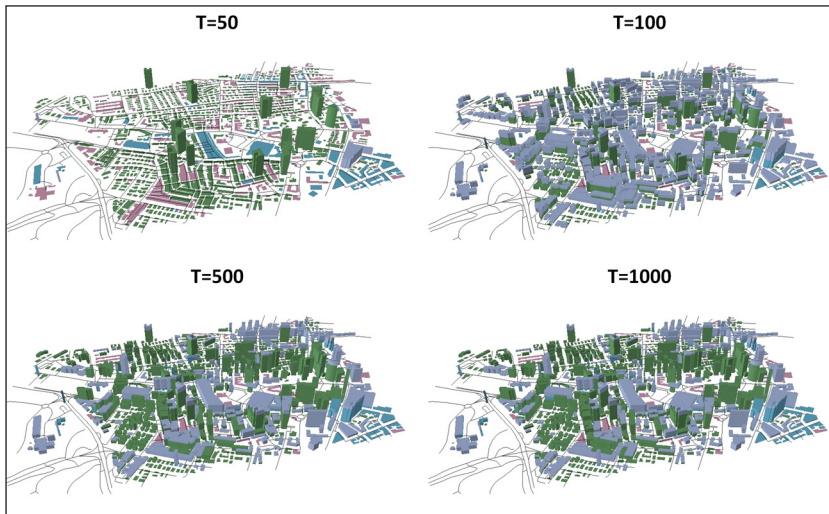
איור 3: שלבי עיבוד המידע



איור 4: ניסוח רעיוני של מודל מבוסס-סוכנים של רעידת אדמה בעיר

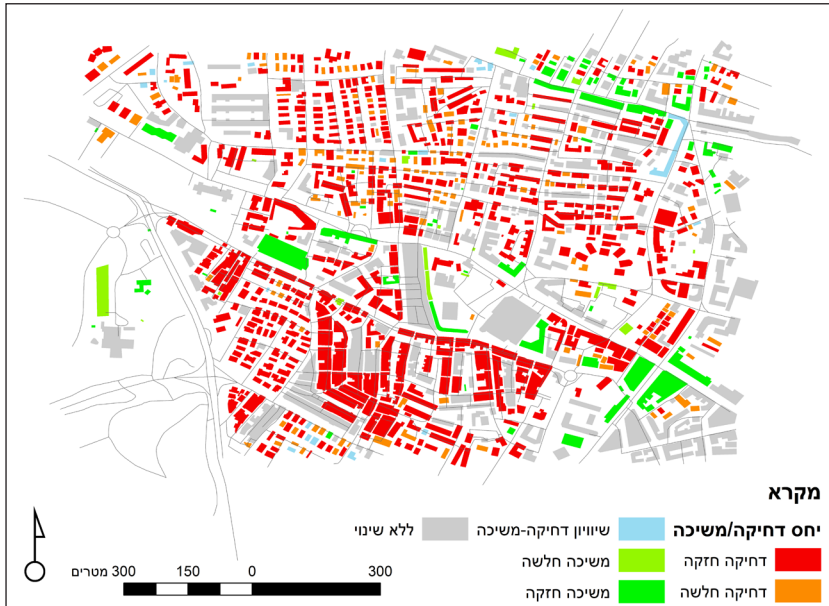


איור 5: שימוש הקרקע השכיח על פני סימולציות לפי מבנה ועומסי תנועה ממוצעים, בנקודת זמן שונות



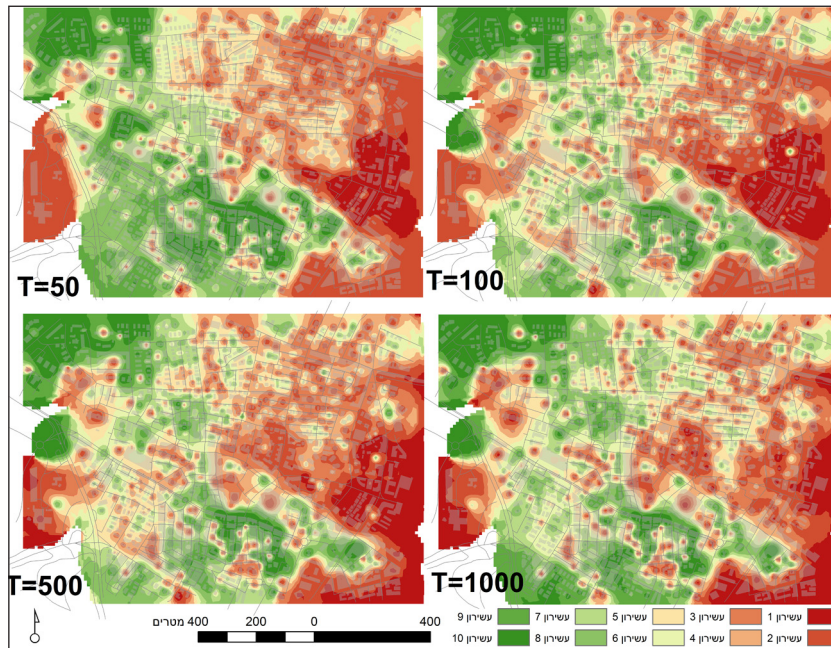
**איור 6:** תדירות ממוצעת על פני סימולציות של שינויים בשימוש קרקע לפי מבנה, בנקודות זמן נבחרות

התדירות מיוצגת על ידי גובה הבניין, בשני נדבכים: צבע הנדבך התחתון מסמל את שימוש-הקרקע המקורי של הבניין וגובהו מסמל את מספר הסימולציות בהן שימוש זה התחלף לשימוש אחר בנקודת זמן זו; גובה הנדבך העליון (צבע אפור) מסמל את מספר הסימולציות בהן מבנה עמד ריק בנקודת זמן זו.



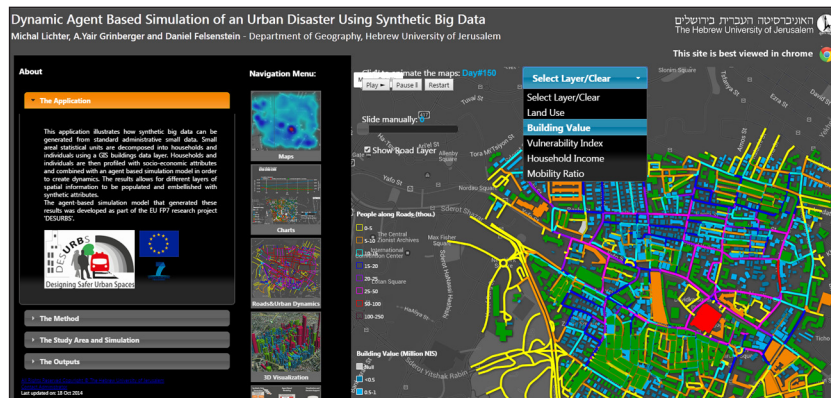
**איור 10:** תנועת משקי-בית בין מבנים

גריןברגר, לייכטר ופלזנשטיין: תכנון התאוששות עירונית באמצעות ביג דאטה



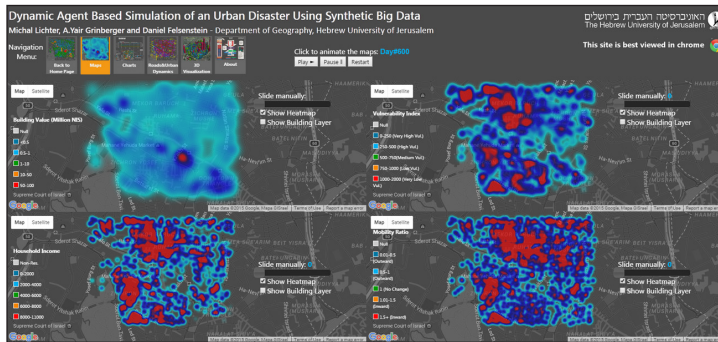
**איור 11: מפות חום של פגיעות חברתית**

הצבעים הירוקים מציינים אוכלוסיה פחות פגיעה בעוד הצבעים האדומים מציינים רמת פגיעות גבוהה. משטחי הערכים הרציפים נוצרו בטכניקת IDW (Inverse Distance Weighting) על בסיס ציון הפגיעות הממוצע למבנה. הפרמטרים לאיטרפולציה זו הם: גודל תא של  $10 \times 10$  מטרים, רדיוס חיפוש של 100 מטרים ופונקצייה חזקה מסדר גודל של 2.



**איור 12: תצוגות מבוססות זמן של מאפיינים סוציו-אקונומיים שונים של משק-הבית במפה דינמית מבוססת-רשת**

ראה <http://ccg.huji.ac.il/AgentBasedUrbanDisaster/index.html>



**איור 13:** תצוגה מבוססת זמן של השינוי במספר הנוסעים על כבישים במפה דינמית מבוססת-רשת

ראה <http://ccg.huji.ac.il/AgentBasedUrbanDisaster/index.html>

### הערות

1. בעוד שאינו מתייחס לכך באופן מפורש כ'big data' (Torrens, 2014) מציין שנפח המידע שנוצר במסגרת הסימולציה כולל סדר גודל של  $10^{14}$ - $10^{12}$  מיקומים/וקטורים שחושבו מחדש עבור אובייקטים שהוזו.
  2. אנו משתמשים גם במידע איזורי גס יותר בדבר מלאי בניינים וצידוד לא-למגורים בכדי לחשב ערך של מבנים לא-למגורים. חישוב האומדנים עבור מידע זה מפורט ב-Beenstock, Felsenstein and Ben-Zeev (2011).
  3. ערכים אלו חושב על פי מידע בדבר הגירה עבור שנת 2012 מתוך השנתון הסטטיסטי של ירושלים 2014 (מכון ירושלים לחקר ישראל).
  4. פגיעות חברתית של משק בית מוגדרת על פי מתן משקולות למשתנים סוציו-אקונומיים וסכימתם תוך נירמול הערכים: הכנסה חודשית (משקל של 0.5), גיל ממוצע (0.2), אחוז החברים במשק-הבית שהנם בעלי נכות (0.2), ובעלות על רכב (0.1). משתנים אלו מייצגים את הניידות של משק הבית ברמות שונות ולכן את יכולת התגובה של חבריו לשינויים בסביבתם.

### מקורות

Batty M, Hudson-Smith A, Milton R, and Crooks A (2010) Map Mashups, Web 2.0 and the GIS Revolution, *Annals of GIS*, 16 (1), 1–13.

Beenstock M, Felsenstein D and Ben Zeev NB (2011) Capital deepening and regional inequality: an empirical analysis, *Annals of Regional Science*, 47, 599-617

Chang, SE (2003). Transportation planning for disasters: An

- accessibility approach, *Environment and Planning A*, 35(6), 1051–1072.
- Chen X, Meaker JW and Zhan FB (2006). Agent-based modeling and analysis of hurricane evacuation procedures for the Florida Keys, *Natural Hazards*, 38, 321–338.
- Chen, X and Zhan, FB (2008). Agent-based modeling and simulation of urban evacuation: Relative effectiveness of simultaneous and staged evacuation strategies, *Journal of the Operational Research Society*, 59, 25–33.
- Crooks AT and Wise S (2013) GIOS and Agent Based Models for Humanitarian Assistance, *Computers Environment and Urban Systems*, 41, 100-111.
- Dawson RJ, Peppe R and Wang M (2011) An agent-based model for risk-based flood incident Management, *Natural Hazards*, 59,167–189.
- Eicher, CL and Brewer, CA (2001) Dasymetric mapping and areal interpolation: implementation and evaluation, *Cartography and Geographic Information Science*, 28 (2), 125-138
- Felsenstein D and Lichter M (2014) Social and Economic Vulnerability of Coastal Communities to Sea Level Rise and Extreme Flooding, *Natural Hazards*, 71, 463-491
- Fiedrich F and Burghardt P. (2007) Agent-based systems for disaster management, *Communications of the ACM*, 50(3), 41–42.
- Grinberger AY and Felsenstein D (2014) Bouncing Back or Bouncing Forward? Simulating Urban Resilience, *Urban Design and Planning*, 167(3), 115-124.
- Grinberger AY and Felsenstein D (2015) A Tale of Two Earthquakes: Dynamic Agent-Based Simulation of Urban Resilience, in Lombard J., Clarke G and Stern E (eds) *Applied Spatial Modeling and Planning*, Routledge (forthcoming).
- Harper G and Mayhew L (2012a) Using Administrative Data to Count Local Populations, *Journal of Applied Spatial Analysis and Policy*, 5 (2), 97–122
- Harper G and Mayhew L (2012b) *Re-thinking households – Using administrative data to count and classify households with some applications*, Actuarial Research Paper, No. 198. Cass Business School, London
- Keon D, Steinberg B, Yeh H, Pancake CM and Wright D (2014) Web-based spatiotemporal simulation modeling and visualization of tsunami inundation and potential human response, *International Journal of Geographical Information Science*, 28(5), 987-1009.

Kwan, MP and Lee J (2005). Emergency response after 9/11: The potential of realtime 3D GIS for quick emergency response in micro-spatial environments, *Computers, Environment and Urban Systems*, 29, 93–113.

Lichter M and Felsenstein D (2012) Assessing the Costs of Sea Level Rise and Extreme Flooding at the Local Level; A GIS-Based Approach, *Ocean and Coastal Management*, 59, 47-62

Linard C, Gilbert M, and Tatem, AJ (2011) Assessing the use of global land cover data for guiding large area population distribution modeling *GeoJournal*, 76 (5), 525-538.

Macal, CM, and North, MJ (2005). Tutorial on agent-based modeling and simulation, in *Proceedings of the 37th conference on Winter simulation*. WSC '05. Winter Simulation Conference, 2-15.

Mennis, J (2003), Generating surface model of population using dasymetric mapping, *The Professional Geographer*, 55(1), 31-42.

Oliveira, MGS, Vovsha P, Wolf J, Birotker Y, Givon D, and Paasche J (2011). Global Positioning System-Assisted Prompted Recall Household Travel Survey to Support Development of Advanced Travel Model in Jerusalem, Israel, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2246(1), 16-23.

Rashed T, Weeks J, Couclelis H and Herold M (2007) An integrative GIS and remote sensing model for place-based urban vulnerability analysis, in Mesev V (ed) *Integration of GIS and Remote Sensing* (pp 199-231). John Wiley & Sons, Ltd.

Reibel M and Bufalino ME (2005) Street-weighted interpolation techniques for demographic count estimation in incompatible zone systems, *Environment and Planning A*, 37,127-139.

Salamon A, Katz O and Crouvi O (2010). Zones of required investigation for earthquake-related hazards in Jerusalem, *Natural Hazards*, 53(2), 375-406.

Schettkat R (1996) *Flows in Labor Markets: Concepts and International Comparative Results*, in Schettkat R (ed) *The Flow Analysis of Labor Markets* (pp. pp 14-36). Routledge London.

Simoes J A (2012) An agent Based/ Network Approach to Spatial Epidemics, in Heppenstall AJ, Crooks AT, See LM and Batty M (eds) *Agent-Based Models of Geographical Systems* (pp 591-610). Springer, Netherlands.

Simon H (1952) A behavioral model of rational choice, *Quarterly Journal of Economics*, 69(1), 99-118.



Smith L.B. (1969) A model of the Canadian housing and mortgage market, *Journal of Political Economy*, 77, 795–816.

Torrens PM (2014) High-resolution space-time processes for agents at the Built-human interface of urban earthquakes, *International Journal of Geographical Information Science*, 28(5), 964-986,

Zou Y, Torrens PM, Ghanem RG and Kevrekidis IG (2012). Accelerating agent-based computation of complex urban systems, *International Journal of Geographical Information Science*, 26(10), 1917-1937.

