

מודל לחיזוי נפח תנועת הולכי הרגל במרחב העירוני בישראל

יצחק אומר¹, יודן רופא², יואב לרמן¹ ויובל כהן²

1. החוג לגאוגרפיה וסביבת האדם, אוניברסיטת תל אביב

2. המכונים לחקר המדבר ע"ש י. בלאושיין, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

(omery@post.tau.ac.il)

המאמר מציג מחקר שמטרתו היתה לפתח מודל לחיזוי התפלגות תנועת הולכי הרגל ברשת הרחובות בערים ושכונות מגורים בישראל, תוך מתן דגש מיוחד על אוכלוסיית הילדים והקשישים. המודל נבנה על פי הגישה המבנית של תחביר המרחב (space syntax), שלפיה מבנה רשת הרחובות הוא המשתנה העיקרי המסביר את התפלגות התנועה בעיר. למחקר נבחרו 14 שכונות מגורים הממוקמות בארבע ערים: אשדוד, באר שבע, כפר סבא ובת ים. השכונות נבדלות זו מזו במבנה רשת הדרכים, בפיזור שימושי קרקע, בצפיפות המגורים ובמיקום השכונה בעיר. המודל מתבסס על משתנים המתארים מרכזיות של קטעי רחובות, שימושי קרקע והרכב דמוגרפי ועל נפח תנועת הולכי רגל שנמדדה בקטעי רחוב נבחרים.

הממצאים מלמדים על רמת חיזוי מספקת ברמת העיר והשכונה (R^2 גבוה מ-0.6). אולם, הניסיון לבנות מודל גנרי לטיפוסי שכונות שונים (יישום שאינו כרוך באיסוף נתוני אמת על תנועת הולכי רגל), שיזה לתיקוף באמצעות 4 שכונות נוספות, מלמד על רמת חיזוי סבירה בשכונות ותיקות אך לא בשכונות חדשות שהוקמו על פי גישת תכנון מודרנית המשלבת התבססות על יחידת שכונות יחד עם רשת רחובות הייררכית. ההבדל בין טיפוסי השכונות ניכר במיוחד כאשר החיזוי נערך לגבי אוכלוסיית הילדים והקשישים.

מילות מפתח: תנועת הולכי רגל, "תחביר המרחב", רשת דרכים, שכונות מגורים, גישות תכנון.

A Prediction Model for Pedestrian Traffic Volume in Urban Space in Israel

Itzhak Omer¹, Yodan Rofe², Yoav Lerman¹, Yuval Cohen² | ¹ The Department of Geography and Human Environment, Tel Aviv University; ² The J. Blaustein Institutes for Desert Research, Ben-Gurion University in the Negev

This paper presents a study aimed at developing a prediction model for the distribution of pedestrian movement in the street network of Israeli cities, with special emphasis on children and elderly population. The model uses the configuration approach of space syntax, in which the structure of the street network is the main variable that explains movement. It was built by analyzing the movement patterns in 14 residential neighborhoods, using variables that describe centrality of street segments, land use and demographic composition as independent variables and pedestrian movement volume that was measured in selected street segments.

The findings show adequate prediction levels at the city and neighborhood scales (R^2 greater than 0.6). However, the attempt to develop a generic model for different neighborhood types (an application that does not require pedestrian movement surveys), which was further validated in 4 additional neighborhoods, shows an acceptable prediction level in the older neighborhoods, but not in the newer neighborhoods, planned in a modern approach combining the neighborhood unit with hierarchical street structure. The difference between the neighborhood types is particularly evident in the prediction models for children and the elderly.

Key Words: pedestrian movement, space syntax, street network, residential neighborhoods, planning concepts.

מבוא¹

מטרת מחקר זה היתה לפתח מודל לחיזוי התפלגות נפח תנועת הולכי רגל בעיר ברמת הרחוב.² מידע על תנועת הולכי הרגל חשוב לגיבוש מדיניות תחבורתית המשלבת אמצעי תחבורה, ובעיקר כזו שתנועת הולכי הרגל מהווה בה מרכיב דומיננטי. במיוחד עשוי מידע זה לסייע לפעולות שמטרתן להפחית את היפגעותם של הולכי רגל בכלל ושל אוכלוסיית ילדים וקשישים בפרט. כך לדוגמא, ניתן יהיה לאתר צמתים וצירי תחבורה מסוכנים עם תנועה ערה של הולכי רגל ילדים וקשישים, ובהם לנקוט פעולות להגברת בטיחות בדרכים כגון התקנת שילוט מתאים, התאמת משך שהות רמזורים, ואמצעים להערכת מרחקים ומהירות תנועה ברחוב.

ניתן לסווג את הניסיונות להסביר ולחזות תנועה בעיר לשתי גישות. גישה אחת מסתמכת על מטריצות מוצא-יעד הנבנות באמצעות מידע לגבי התפלגות המגורים של האוכלוסייה בעיר מצד אחד, ומרחבי התפקוד שלה כגון תעסוקה וקניות מצד שני (ראה למשל: Batty 2005). מטריצות אלו משמשות לבניית מודלים של אינטראקציה מרחבית (spatial interaction models) על פי עיקרון הגריבטיציה, שלפיו ככל שאנשים קרובים יותר לתפקוד במקום מסוים (במרחק או בזמן) וככל שתפקוד זה אטרקטיבי יותר, כך גדל הסיכוי שלהם להעדיף תפקוד זה על פני אחרים. התפלגות התנועה במרחב, תלויה אם כך בחישוב הדרכים הקצרות ביותר (לפי מרחק או בזמן) בין כל המוצאים וכל היעדים בעיר משוקללים לפי מספר התושבים בכל מוצא, ומידת האטרקטיביות של היעד. יתרונה העיקרי של גישה זו הוא בהתבססותה על צרכי התנועה העכשוויים של תושבי העיר, והאפשרות לערוך הבחנה בין קבוצות אוכלוסייה שונות, ומוקדי משיכה שונים. חסרונה העיקרי טמון בצורך באיסוף מידע מפורט על מקום מגורים של התושבים ועל מוקדי התפקוד בהם הם מבקרים (Longley and Batty 1996; Borger and Timmermans 1986), וכן בהתבססותה על פונקציית החלטה (קוצר הדרך או הזמן), אשר בדרך כלל איננה בצורה מדויקת למקבלי ההחלטות על תנועתם.

גישה שנייה לחיזוי תנועה במרחב העירוני היא הגישה המבנית (configurational approach), אשר מסתמכת על התכונות של רשת הדרכים, בהנחה שתכונות אלו כשלעצמן יש בהן כדי להסביר תנועה של בני אדם בעיר (Hillier et al. 1993). בבסיס השיטה נמצאת ההבנה כי התנועה האנושית מבוססת יותר על אפשרות תפיסתה המרחבית, ועל כן היא תלויה יותר בטופולוגיה של הרשת, מאשר במדידת המרחקים המטריים בתוכה (Hillier and Iida 2005). יתרונה של גישה זו מצוי ביכולת לחזות תנועת הולכי רגל או כלי רכב ברחובות העיר על סמך מידע גאוגרפי על מבנה רשת הרחובות, שזמין כיום לכל יישוב בישראל, וזאת מבלי להזדקק לנתונים על מקום המגורים ומרחבי הפעילות של האוכלוסייה, שהם בדרך כלל פחות זמינים וכרוכים בהשקעה רבה יותר של משאבים. לגישה זו יתרון נוסף והוא היכולת לחזות תנועת הולכי רגל בקנה מידה גאוגרפי של אזור מצומצם יחסית, ובמיוחד כזה שאינו מכיל שימושי קרקע תפקודיים רבים. בחירת הגישה לבניית מודל החיזוי תלויה אם כן הן במטרת השימוש של המודל והן בהיקף המרחב העירוני שהמודל נועד לייצג.

במחקר הנוכחי נבנה מודל חיזוי על פי הגישה המבנית שמטרתו לאפשר הערכה של התפלגות נפח תנועת הולכי הרגל במרחב העירוני. על סמך מחקרים קודמים שנערכו במסגרת הגישה המבנית בערים שונות

1 המאמר מבוסס בחלקו על גרסה קודמת שפורסמה בכתב העת: *International Journal of Geographical Information Science*, 29, 2121–2142.

2 המחקר נערך עבור הרשות הלאומית לבטיחות בדרכים, ומומן על ידה.

בעולם הנחנו שתנועת הולכי רגל מושפעת מתכונות הסביבה העירונית ובעיקר ממבנה רשת הדרכים אך גם מהתפלגות שימושי הקרקע וצפיפות האוכלוסייה ברשת. בהתאם לכך, אנו מניחים גם שסביבות מגורים עירוניות בישראל שנבדלות בתכונות אלה תהיינה שונות גם בהתפלגות נפח התנועה של הולכי רגל.

להלן יוצגו מחקרים קודמים שנערכו במטרה לבנות מודלים לחיזוי תנועה בעיר, תוך התרכזות בגישת תחביר המרחב (space syntax). לאחר מכן תוצג שיטת המחקר ובכלל זה הסבר לבחירת שכונות המחקר, דרך איסוף הנתונים וניתוחם. תוצאות המחקר ומסקנותיו יוצגו בחלקו האחרון של המאמר.

הרקע המדעי

לאחרונה הולכת וגוברת המודעות לחשיבותה של תנועת הולכי הרגל במרחב העירוני תוך הכרת יתרונותיה הסביבתיים (Cervero and Radisch 1996; Moudon et al. 1997) והבריאותיים (Frank et al. 2006) ונחיצותה לחינוך הסביבה העירונית ולבטיחות בדרכים (Dumbaugh et al. 2013; Hakkert and Matar 2007; Jacobsen 2003).

לאור זאת נעשו מחקרים רבים כדי לזהות תנאים המעודדים הליכה ברגל בסביבה עירונית כדוגמת עירוב שימושי קרקע ראשוניים (שימושים הנדרשים לצורך חיי היום יום), מבנה עירוני המורכב מבלוקים קצרים וצפיפות מגורים גבוהה (Cervero and Duncan 2003; Kelly et al. 2007), איזון בין מרחב הולכי הרגל למרחב התנועה הממונעת (Appleyard 1981; Bosselman et al. 1999; Jacobs et al. 2002), אסתטיקה, ביטחון, ובטיחות בדרכים (ליפמן 2008; Ozer and Kubat 2007). בנוסף, נבחנה השפעתם של משתנים חברתיים, תרבותיים וסביבתיים (Saelens et al. 2003). מחקרים אלה מתבססים בדרך כלל על השוואה בין סביבות מגורים שונות באופיין ובגישת התכנון לפיה הן הוקמו. מלבד ההבדל בין סביבות מגורים בתנאים המשפיעים על הליכה ברגל, התגלה גם הבדל בדפוסי התנועה ברגל לצורך תפקוד יומיומי ולצורכי פנאי, כמו למשל בין שכונות מגורים פרבריות שהוקמו על פי גישת התכנון של ניוארברניזם (ראו לדוגמה: Baran et al. 2008). על סמך ידע זה נעשים ניסיונות לעצב סביבה עירונית המעודדת הליכה בערים שונות בעולם (Schubert and Skala 2007; Veras and Amorim 2005) ובישראל (משרד התחבורה ומשרד הבינוי והשיכון 2012).

פיתוח מודלים לתנועת הולכי רגל (pedestrian volume modeling) הוא תחום מדעי חדש יחסית. מודלים אלה נועדו לחזות או להעריך נפח התפלגות תנועת הולכי רגל בסביבות עירוניות קיימות (כאשר אין מידע זמין), או בסביבות מתוכננות (Raford and Ragland 2006) ברמה של צמתים, רחובות ואף מקטעי רחובות. לצורך בניית המודל נעשה בדרך כלל שימוש במידע גאוגרפי על רשת הדרכים, שימושי קרקע, דמוגרפיה ותעסוקה בעיר. בניית מודלים מסוג זה אפשרית כיום בזכות התפתחות טכנולוגיית המידע הגאוגרפי וזמינות של מידע גאוגרפי מפורט על רשת הדרכים, על שימושי קרקע ולוונטיים הולכי רגל (כולל מיקומם ברחוב), ועל התכונות הדמוגרפיות והחברתיות (ברמת אזור בעיר). ככלל, בישראל מצוי מידע כזה בידי רשויות ממשלתיות, כדוגמת הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, המרכז למיפוי ישראל ובידי הרשויות המקומיות.

המידע על נפח תנועת הולכי הרגל המתקבל באמצעות מודלים אלה עשוי לסייע הן בהערכת ההשפעה של חלופות תכנון עירוני על תנועת הולכי רגל (Karimi 2012) והן בהערכת רמת הסיכון להולכי רגל בצמתים וברחובות העיר. מידע זה חשוב במיוחד במקומות בהם רבה נוכחות של אוכלוסיות ילדים ו/או קשישים

שהן פגיעות במיוחד בתאונות דרכים בישראל. למשל, שיעור ההרוגים של ילדים הולכי רגל עד גיל 14 מתוך כלל ההרוגים בתאונות דרכים הוא הגבוה ביותר מכל המדינות המפותחות ועומד על 11 אחוזים (ראה: הרשות הלאומית לבטיחות בדרכים 2012: 22).

מודלים שנבנו להערכת נפח תנועת הולכי רגל בעיר מתבססים על הידע שנצבר אודות הקשר בין תכונות הסביבה העירונית להתפלגות הולכי רגל, שחלקו הוצג לעיל. כך לדוגמא, מודל שנבנה לעיר סן פרנסיסקו מבוסס על משתנים תפקודיים המהווים גורמי משיכה לאוכלוסייה כדוגמת מסחר ועירוב שימושי קרקע בכלל, ועל משתנים המייצגים כמות וצפיפות אוכלוסייה ומועסקים, ותחנות של תחבורה ציבורית (Liu and Griswold 2009). ואולם, לאורך זמן גוברת והולכת ההתייחסות לקשירות רשת הרחובות (street connectivity). אחת הגישות המרכזיות לחיזוי תנועה במרחב העירוני על סמך קשירות רשת הרחובות היא הגישה המבנית (configurational approach) המתרכזת בניתוח רשת הרחובות (street network analysis) במטרה לתאר את מרכזיותם ודרגת נגישותם של רחובות ומקטעי רחובות במבנה רשת הרחובות בכללותה (ראה לדוגמא: אומר 2011; Ozbil et al. 2011).

במסגרת הגישה הזאת בולטת השיטה של "תחביר המרחב" (space syntax), המסתמכת על דרגת המרכזיות והנגישות של מקטע ברשת הרחובות הרלוונטית לתנועת הולכי רגל או כלי רכב (Hillier et al. 1993). יתרונה של שיטה זו מצוי ביכולת לחזות תנועה במקטעי רחובות בעיר בהתבסס בעיקר על מבנה רשת הרחובות, מבלי להזדקק לנתונים על מקום המגורים ועל מרחבי הפעילות (והתנועה) של האוכלוסייה, שהם בדרך כלל פחות זמינים וכרוכים בהשקעה רבה יותר של משאבים. בכך ניכר יתרונה העיקרי של גישה זו על פני הגישה המסורתית לחיזוי תנועה שמתבססת על מודלים של אינטראקציה (spatial interaction models), שעושים שימוש במטריצות מוצא-יעד שמייצגות את התפלגות המגורים של האוכלוסייה בעיר מצד אחד, ומרחבי התפקוד שלה כגון תעסוקה וקניות מצד שני (ראה למשל: Batty 2005; Talen 2003). בניית מטריצות מוצא-יעד כרוכה גם בהערכת האטרקטיביות היחסית של תפקודים בעיר וחישוב פונקציית הדעיכה עם המרחק עבור כל אחד מהם.

על אף שיישום הגישה המבנית של תחביר המרחב לצורך חיזוי תנועת הולכי רגל החל רק בתחילת שנות התשעים (Hillier et al. 1993), היא זכתה לשימוש במקומות רבים בהם התקבלה רמת ניבוי (אחוז השונות המוסברת R^2) טובה של התפלגות תנועת הולכי הרגל על סמך מבנה רשת הדרכים. כך למשל שיעור הסבר התפלגות הולכי הרגל נע בטווח של 55%-75% בלונדון, בהתאם לסוג האזור (Hillier et al. 1993; Penn et al. 1998; Jiang 2009), ובטווח של 60%-70% באמסטרדם (Read 1999).

נעשו גם ניסיונות לבנות מודלים לחיזוי נפח תנועה המשלבים בין התכונות המרחביות המבניות של רשת הדרכים לבין התפלגות שימושי קרקע ולתכונות נוספות כדוגמת הרכב דמוגרפי ותחושת ביטחון. במודל שנבנה להסבר תנועת הולכי רגל בלונדון (Desyllas et al. 2003) לדוגמא, נמצא שלתכונות המרחביות שחושבו על בסיס השיטה של תחביר המרחב היתה ההשפעה הרבה ביותר על תנועת הולכי רגל, כאשר הקירבה לתחנות תחבורה ציבורית, רוחב מדרכה ושיעור חזיתות מסחריות בקומת הרחוב, תרמו גם כן ליצירת מודל משולב בעל שיעור הסבר גבוה ($R^2=0.82$). באופן דומה במודל שנבנה לחיזוי תנועת הולכי רגל בשתי שכונות במרכז איסטנבול (Ozer and Kubat 2007) נמצא שנפח תנועת הולכי הרגל הושפע בעיקר מדרגת הקישוריות הכללית של הרחוב, אך גם מתחושת הביטחון של הולכי הרגל וממידת העירוב של

שימושי הקרקע. יישום הגישה של תחביר המרחב בערים בארצות הברית מלמד על מגמה דומה של שליטת התכונות המרחביות של רשת הדרכים. כך לדוגמא, מודל חיזוי נפח תנועת הולכי רגל בעיר אוקלנד מאפשר חיזוי עם שיעור הסבר גבוה מ-70% בהתבסס על תכונות רשת הדרכים ועל משתנים המייצגים צפיפות אוכלוסייה (Raford and Ragland 2004). מודל דומה שנבנה לעיר בוסטון (Raford and Ragland 2006), על סמך תכונות רשת הדרכים ומשתנים המייצגים קירבה לתחנות תחבורה ציבורית ולאתרי תירות. מחקר שנערך לאחרונה לאותה מטרה באטלנטה (Ozbil et al. 2011), מחזק אף הוא את הטענה לפיה לתכונות של קישוריות רשת הדרכים השפעה דומיננטית על התפלגות תנועת הולכי רגל בעיר בהשוואה לשימושי הקרקע.

להוציא מחקרים אחדים אודות הולכי רגל ילדים, ההבחנה בין התפלגות נפח תנועת הולכי רגל של קבוצות אוכלוסייה שונות זכתה להתייחסות מועטה עד כה (Saelens and Handy 2008). כך לדוגמא, נמצא שהתפלגות מרחבית של תנועת הולכי רגל ילדים שונה מזו של מבוגרים בדרגת מרכזיות מרחבית של רחוב או מקטע רחוב (Hillier 1996: 147–154), ובזמנים בהם הם שוהים במקומות אלה לאורך ימי השבוע (Ozer and Kubat 2007).

מכל מקום, המחקרים שנערכו עד כה מצביעים על כך שדרגת מרכזיותם של מקטעי רחובות ברשת הדרכים מהווה משתנה מוביל בהסבר התפלגות נפח תנועת הולכי רגל בסביבות עירוניות שונות. יחד עם זאת, נמצא גם שסביבות אלה נבדלות בסוג המרכזיות והנגישות הנמדדת ברשת הדרכים הרלוונטית במיוחד לתנועת הולכי רגל, בסוג המרחק שבאמצעותו נמדדת מרכזיות ונגישות ברשת דרכים ובצורת הגדרת יחידת הניתוח ברשת הדרכים. לאור זאת וכפי שיפורט בהמשך, ניתנה במחקר המוצג כאן התייחסות להיבטים אלה בתיאור מרכזיות של מקטע רחוב ברשת הדרכים.

שיטת המחקר

במטרה להתחשב בתכונות הסביבה העירוניות שנמצאו בולטות בהסבר התפלגות תנועת הולכי רגל בערים שונות בעולם כפי שדווח במחקרים שנסקרו לעיל, נבחרו למחקר הנוכחי אזורי מגורים המייצגים הבדלים בדגם הרחובות, בהתפלגות שימושי קרקע, במיקומם בעיר ובהרכב הדמוגרפי שלהם. בכל אחד מהאזורים הנבחרים נאספו נתונים על הולכי רגל באמצעות ספירות תנועה מדגמיות בשעות שונות ביום, וזאת תוך הבחנה בין קבוצות גיל.

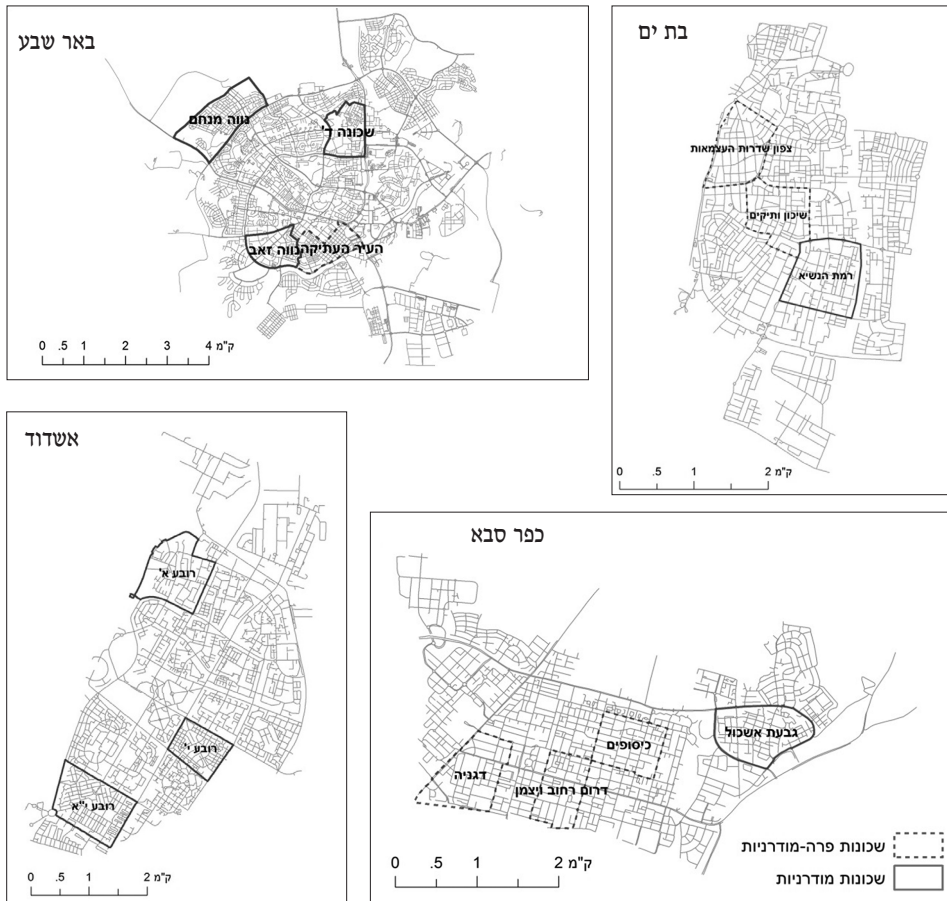
על בסיס המידע שנאסף התנהל תהליך פיתוח מודל לחיזוי התפלגות נפח תנועת הולכי רגל בשני שלבים. בשלב ראשון נבנו מודלים לחיזוי לכל אחת מהערים ושכונות המגורים. בשלב שני, באמצעות ניתוח ואיתור מאפיינים משותפים ושונים של שכונות מגורים, נערך ניסיון לפתח מודלים גנריים לטיפוסי שכונות מגורים שניתן ליישם במגוון שכונות מגורים רק על סמך מידע גאוגרפי, ללא צורך באיסוף נתוני אמת על תנועת הולכי רגל. שלב זה כלל בדיקה לתיקוף המודל באמצעות שכונות מגורים נוספות.

בחירת הערים והשכונות

למחקר נבחרו 4 ערים בינוניות בגודל אוכלוסייתן שנחלקות לשתי קבוצות. קבוצה ראשונה כוללת את הערים כפר-סבא ובת ים שהחלו בהתפתחותן בעשורים הראשונים של המאה העשרים. ערים אלה התפתחו באופן הדרגתי, על בסיס גישת תכנון קדם-מודרנית. הן מתאפיינות במרכז עירוני שהתהווה במהלך התפתחותן

העיר, ושכונות קצה בשולי העיר שהוקמו על פי גישת תכנון מודרנית. בקבוצה השנייה, הערים אשדוד ובאר שבע שנוסדו לאחר קום המדינה (למעט "העיר העתיקה" בבאר שבע), מאופיינות בשכונות שהוקמו בגישת תכנון מודרנית מוטת תחבורה ממונעת (Omer and Zafir-Reuven 2010). גישת התכנון המודרנית מהווה שילוב של שני רעיונות: יחידת השכונות וההיררכיה הפונקציונלית של רשת הרחובות, שלהם השלכות ישירות על התפלגות שימושי קרקע ועל התפלגות דרגת המרכזיות והקישוריות ברשת הרחובות (Rofe and Omer 2012).

המחקר בוצע ב-14 שכונות בסך הכל: ארבע שכונות בכל אחת מהערים כפר-סבא ובאר-שבע; ושלוש שכונות בכל אחת מהערים אשדוד ובת ים (איור 1). מדגם השכונות מייצג הבדל בדגם הרחובות, במערך המרחבי של שימושי קרקע ובמיקום הגאוגרפי של השכונה בעיר – שכונות מרכזיות לעומת שכונות קצה המרוחקות ממרכז העיר.



איור 1: הערים והשכונות הנבחרות תוך הבחנה בין שכונות ותיקות (פרה-מודרניות) לשכונות מודרניות

איסוף נתונים

א. מידע גאוגרפי וסטטיסטי

בכל אחת מהשכונות שנבחרו נאספו הנתונים הבאים:

- מידע גאוגרפי וקטורי (מבוסס על קואורדינטות מדוייקות) על רשת הרחובות שהתקבל מחברת "מפה" וממחלקות ממ"ג בעיריות. מידע זה עודכן על ידי הוספת שבילים להולכי רגל, שחסרו במידע הקיים, בהתבססות על ניתוח תצלומי אוויר ועבודת שדה. מנגד, הוסרו כבישים מהירים האסורים לתנועת הולכי רגל.
- מידע גאוגרפי וקטורי על שימושי הקרקע בכל מקטע רחוב ובכלל זה אלו המתייחסים לילדים וקשישים: בתי ספר, מרכזי קניות שכונתיים, בתי אבות, ועוד. כמות שימושי הקרקע בכל מקטע ומקטע חושבה בעזרת תוכנת ממ"ג. מקור הנתונים: חברת "מפה" ומפ"י (מרכז למיפוי ישראל).
- מידע דמוגרפי על גודל והרכב אוכלוסייה וצפיפות מגורים. בכל התייחסות לממד הדמוגרפי נבחנה אוכלוסיית ילדים (עד גיל 14), קשישים (65+) ושאר האוכלוסייה (14-65). את צפיפות המגורים חישבנו בכל אזור סטטיסטי לכל קבוצת גיל (מקור: הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, מפקד 2008).

ב. נתונים על תנועת הולכי רגל

בכל אחת מהערים התבצעה מדידת (ספירת) תנועה באותן שעות במקביל בכל שכונות המחקר. מדגם ספירות התנועה בכל שכונה בוצע במדגם מקטעי רחוב (סגמנטים) של רחובות ראשיים ומשניים בעלי דרגות מרכזיות שונות והתפלגות שימושי קרקע שונה, באופן שאיפשר כיול מיטבי של המודל (ראה למשל: Raford and Ragland 2006; Lerman and Omer 2013). המדידות נערכו במדגם של 233 מקטעי רחוב בסה"כ: באשדוד 56 מקטעי רחוב ב-3 שכונות; בבית ים 41 מקטעי רחוב ב-3 שכונות, בכפר סבא ובבאר שבע 68 מקטעי רחוב ב-4 שכונות בכל אחת מהן. כל המדידות נערכו בימי חול רגילים בשבוע בתנאי מזג אוויר נוחים, בשעות 12-17³. את המדידות ביצע צוות של מודדים שספרו ידנית במשך חמש שעות במקטעים הנבחרים בשיטת ה"שערים". על פי שיטה זו המודד עומד בנקודה ברחוב וסופר את כל מי שעובר קו דמיוני החוצה את הרחוב במקום. משך המדידה בכל מקטע רחוב הוא 10 דקות, כך שכל מודד מכסה 4-5 נקודות מדידה סמוכות בשעה. בכל מדידה נספרו כלל הולכי רגל תוך הבחנה בין שלוש קבוצות אוכלוסייה: ילדים עד גיל 14, אוכלוסייה מגיל 14 עד 65, אוכלוסייה מעל גיל 65. זיהוי גיל הולכי הרגל נעשה על ידי הערכה של המודדים.

חישוב מדדי מרכזיות ברשת הרחובות

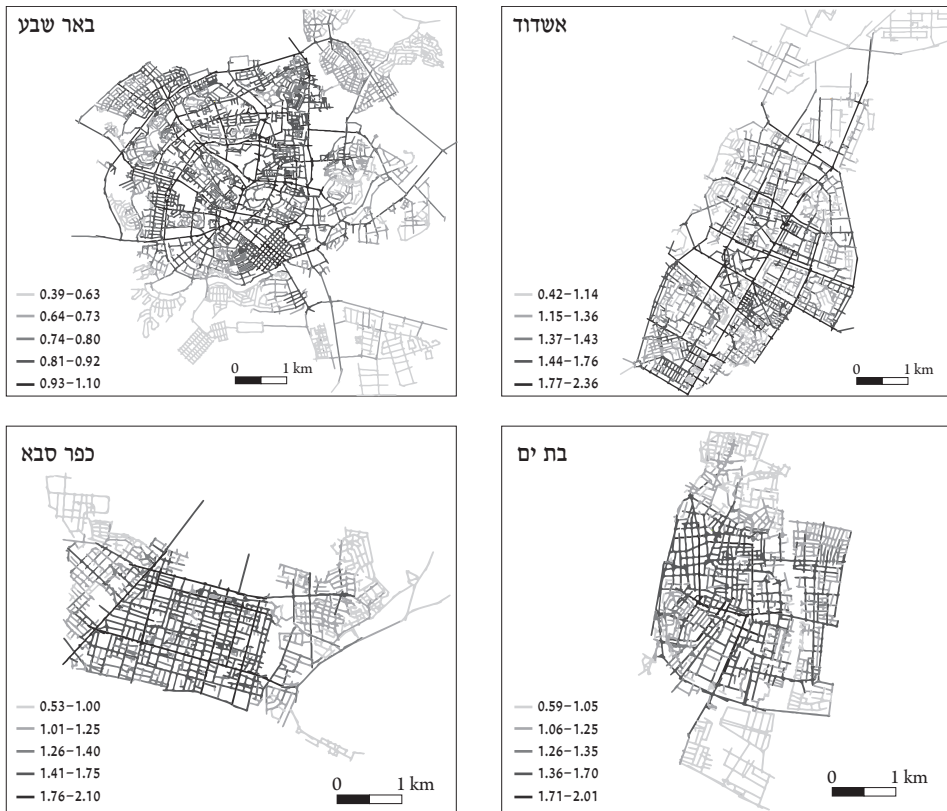
התפלגות המרכזיות ברשת הרחובות נמדדה ונותחה באמצעות השיטה של תחביר המרחב (space syntax). בשלב ראשון חושבו מדדי מרכזיות בהתבסס על מפת קווי ציר (axialmap) תוך שימוש במרחקים טופולוגיים, כנהוג במחקר המסורתי שנערך על פי שיטת תחביר המרחב (Hillier 1996). מדדי מרכזיות נחלקים לשתי קבוצות בסיסיות. בקבוצה ראשונה, המדדים מתארים מרכזיות של קו ציר במובן של פוטנציאל נגישות וקישוריות (integration) מבחינה טופולוגית (מדדי to-movement). הממד הראשון בקבוצה זו הוא מדד החיבוריות (connectivity) המבטא את מספר קווי הציר המצטלבים ישירות עם הקו הנבדק, וערכיו הם

3 המדידות בבית ים נערכו ב-12.11.2011, באשדוד ב-16.01.2012, בכפר-סבא ב-30.04.2012 ובבאר-שבע ב-15.05.2012.

מוחלטים. המדד השני הוא מדד הקישוריות הגלובלית (global integration), הבדוק את המרחק הטופולוגי (מספר הפניות שצריך לבצע) בין קו הציר הנבדק לכלל קווי הציר במפת הצירים.

בקבוצה השנייה, המדדים מתארים מרכזיות של קו ציר במובן של פוטנציאל כמקום מעבר בין קווי הציר במפת הצירים הנבדקת (מדדי through-movement). המדד המרכזי בקבוצה זו הוא מדד הבחירה הגלובלית (Global Choice). מדד זה מבטא את הסבירות שקו ציר מסוים ישמש לצורך מעבר בין כל שני קווי ציר אחרים בעיר בדרך הקצרה ביותר (מבחינת מספר הפניות), דהיינו "עד כמה עוברים דרכו". ערך המדד מחושב על פי מידת הימצאותו של קו ציר מסוים על גבי המסלולים הקצרים ביותר (טופולוגית) בין כל קווי הציר ברשת הנבדקת.

באיור 2 מוצגת התפלגות של ערכי מדד הקישוריות הגלובלית בערים הנבחנו. מיפוי דרגת הקישוריות על גבי מפות צירים ממחיש ומדגיש את ההבדל בין הערים החדשות אשדוד ובאר שבע, שהוקמו על פי גישת תכנון מודרנית שבנויות בצורה היררכית ברורה על פי דגם של "עץ", לערים הוותיקות בת ים וכפר סבא שבהן רשת הרחובות שוויונית יותר עם מדרג רחובות בולט פחות. ביטוי להבדל בין הערים ניתן למצוא



איור 2: התפלגות של ערכי מדד הקישוריות הגלובלית (מדד to-movement) (למעלה) על גבי מפות הצירים (axial maps) של הערים הנבחנו

באפשרות תנועה הקיימת רק בערים ותיקות: מעבר מרחוב קטן עם דרגת מרכזיות נמוכה לרחוב עם דרגות מרכזיות גבוהה ללא תיווך של רחובות עם מרכזיות בדרגת ביניים.

מדד הקישוריות ומדד הבחירה הם מדדים שניתנים לא רק לחישוב גלובלי, המתחשב בכל קווי הציר שבמערכת הרחובות, אלא גם לחישוב מקומי ברדיוסים שונים של מרחק (כלומר במרחק של עד מספר פניות מסוים מהקו הנבדק). מדד קישוריות מקומית ברדיוס 3 ($r=3$) למשל מבטא את קרבתו הטופולוגית של קו ציר מסויים בהתייחס לסביבתו הסמוכה בה נכללים רק קווי הציר המצויים במרחק של עד שלושה צעדים טופולוגיים ממנו. באותו אופן, הן מדד הקישוריות והן מדד הבחירה ניתנים לחישוב לכל קו ציר ברדיוסים שונים, כדי לבטא את דירווגו של קו הציר בקני מידה שונים של המרחב העירוני.

מדד נוסף, המכונה 'נהירות' (intelligibility), מתאר את היחס בין ערכי דרגת החיבוריות ודרגת הקישוריות הגלובלית (קישוריות ברמת העיר בכללותה) של כל ציר. מדידה זו זכתה למנח 'נהירות' או 'מובנות' כיוון שהיא מלמדת עד כמה המבנה הגלובלי של העיר נהיר ומובן לאדם מנקודת המבט המקומית על המרחב העירוני אותו הוא רואה ברמת הרחוב. יש לציין כי בעוד שהמדדים שתוארו למעלה מתארים מרכזיות של קו ציר ברשת נבדקת, מדד הנהירות הוא מדד מסדר שני (Hillier 2002) המתאר בערך יחיד את היחס בין הלוקלי לגלובלי בכל הרשת הנבדקת; אחוז השונות המוסברת (R^2) של ערכי הקישוריות על פי ערכי הקשירות של קווי הציר.

ואולם, במחקרים שפורסמו לאחרונה אין מסתפקים בחישוב מרכזיות שמבוססת על קווי ציר בלבד ומתרבה השימוש בהגדרה מרחבית של מקטעים (segments). כל מקטע הוא חלק מקו ציר אשר נמצא בין שני צמתים בהם קו הציר נפגש עם קווי ציר אחרים. בהתאם לכך, כל קו ציר במערכת ניתן לחלוקה למספר מקטעים בהתאם למספר הצמתים החוצים אותו. השימוש בהגדרה מרחבית של מקטעים מאפשר שתי פעולות חיוניות להבנת תנועה והתנהגות מרחבית בכלל. האחת, לערוך את ניתוח המרכזיות והנגישות של מקומות ברשת הרחובות ברמת רזולוציה גבוהה יותר, והשנייה, לחשב את מדדי המרכזיות באמצעות מרחק מטרי וגם באמצעות מרחק זוויתי/גאומטרי (angular/geometric distance), שנמצא דומיננטי בחיזוי תנועה בעיר (Hillier and Iida 2005).

להבדיל מהמרחק הטופולוגי, המתבסס על מפת קווי הציר ונמדד על פי מספר הפניות בין קו ציר המוצא לציר היעד, כאשר לכל שינוי כיוון, ויהא בזווית הקטנה ביותר, ניתן ערך שווה, מרחק אנגולרי או גאומטרי מבוסס על מפת מקטעים ונמדד על פי סכום זוויות הפנייה בין המקטעים במעבר מקטע מוצא לקטע יעד. המרחק המטרי מבוסס אף הוא על מפת מקטעים ומחושב על פי המרחק הקצר ביותר בין מרכז מקטע נתון לשאר המקטעים ברשת. בהתאם לכך, במחקר הנוכחי חושבו מדדי המרכזיות בהתבסס הן על מפת קווי ציר (axial map) והן על מפת מקטעים (segment map) תוך שימוש במרחק טופולוגי, אנגולרי/גאומטרי ומטרי. בדומה למחקרים קודמים (ראה למשל: Hillier 2009) מדדי המרכזיות ברמת המקטע חושבו ברדיוסים המטריים הבאים: 250, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000, 2500, 3000, 4000, 5000 וברדיוס של כל העיר. בחינה של מדדי מרכזיות רבים ומגוונים נועדה לאתר באופן אמפירי את הדרך לייצוג מרכזיות ברשת דרכים שתהיה המתאימה ביותר להתפלגות תנועה בערים בישראל. גישה זו ננקטה לאור התמונה העולה ממחקרים (שחלקם הוצג בפרק הקודם) בהם נבנו מודלים להערכת התפלגות נפח תנועה בסביבות עירוניות ולפיה סביבות אלה עשויות להיות שונות במדדי המרכזיות הרלוונטיים להסבר התפלגות התנועה

של הולכי הרגל בהן, בצורת הגדרת יחידת הניתוח ברשת הדרכים, בסוג המרחק שבאמצעותם הם מחושבים ובקנה המידה בה נעשית המדידה.

בניית מפת קווי ציר ומפת המקטעים וחישוב מדדי המרכזיות הרלוונטיים נעשו באמצעות תוכנת Depthmap (UCL, v.10.15). ערכי המדדים מופו באמצעות תוכנת ממ"ג (ArcMap (ver. 10.0).

בניית מודל החיזוי

מודל להערכה או חיזוי של התפלגות נפח תנועת הולכי רגל נבנה במחקר זה באמצעות רגרסיה רבת משתנים, שהיא השיטה המקובלת לבניית מודלים מסוג זה לסביבה עירונית (Desyllas et al. 2003). בכל מודל שנבנה, המשתנה התלוי הוא ממוצע נפח תנועת הולכי הרגל במקטעי הרחוב (סגמנט) במשך שעה. המשתנים הבלתי תלויים נחלקים לשלוש קטגוריות: (א) משתנים מרחביים המייצגים את המרכזיות של כל מקטע רחוב ברשת הדרכים, אשר חושבו באמצעות שיטת "תחביר המרחב" שתוארה למעלה בסעיף 3.3; (ב) משתנים המייצגים את שימושי הקרקע הממוקמים במקטע, ו- (ג) משתנים דמוגרפיים (טבלה 1). מכיוון שכל סוג של מדד מרכזיות חושב ברדיוסים מטריים שונים (כמתואר בסעיף 3.3) התקבלו משתנים מרחביים כמספר הרדיוסים שבהם חושבו מדדי המרכזיות. צפיפות מגורי כלל האוכלוסייה, צפיפות מגורי קשישים וצפיפות מגורי ילדים חושבה על פי מספר נפשות בכלל, בקבוצות הגיל 0-14 ו- 65+, בהתאמה, ביחס לשטח האזור הסטטיסטי (מספר נפשות לדונם).

טבלה 1: תיאור המשתנים הבלתי תלויים והתלויים (נפח תנועת הולכי רגל) שנותחו במהלך בניית מודל הרגרסיה וסיווגם לקבוצות

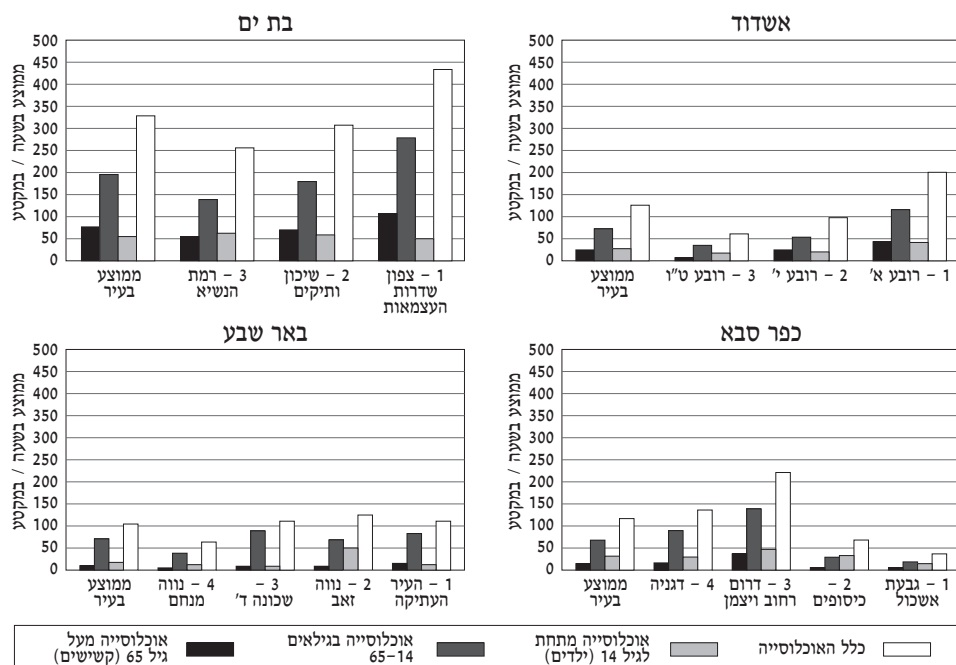
שם משתנה	תאור	סוג
סוג רשת הרחובות (StreetGrid)	מידת הקישוריות של רשת הרחובות (0-2)	מרחבי
חיבוריות (AxCon)	מספר קווי הציר המצטלבים עם המקטע	מרחבי-טופולוגי
קישוריות גלובלית (Integ)	קישוריות גלובלית של קו הציר	מרחבי-טופולוגי
אינטגרציה מקומית (IntegR ³)	קישוריות המקומית (r=3) של קו הציר	מרחבי-טופולוגי
בחירה טופולוגית גלובלית (Choice)	מידת הבחירה הגלובלית של קו הציר	מרחבי-טופולוגי
בחירה מקומית (ChoiceR ³)	מידת הבחירה המקומית של קו הציר (r=3)	מרחבי-טופולוגי
עומק ממוצע גאומטרי גלובלי (MD)	מידת העומק הממוצע הגאומטרי של המקטע על גבי קו הציר	מרחבי-גאומטרי
עומק ממוצע גאומטרי מקומי (MDR#)	כנ"ל מוגבל בחישוב מקומי על בסיס מרחק מטרי	מרחבי-גאומטרי
בחירה גלובלית (Angular Choice)	מידת הבחירה הגלובלית האנגולרית של מקטע על גבי קו הציר	מרחבי-גאומטרי
בחירה גלובלית מקומית (AnCh#)	כנ"ל מוגבל בחישוב מקומי על בסיס מרחק אנגולרי	מרחבי-גאומטרי
עומק ממוצע מטרי גלובלי (MMD)	מידת העומק הממוצע המטרי של המקטע	מרחבי-מטרי
עומק ממוצע מטרי ברדיוס (MMDR#)	כנ"ל מוגבל בחישוב מקומי על בסיס מרחק מטרי	מרחבי-מטרי
מסחר (SegComFront)	סך חזיתות מסחריות במקטע רחוב (0-2)	תפקודי
שימושי קרקע של קשישים (SegEldFront)	סך חזיתות עם שימושי קשישים במקטע רחוב (0-2)	תפקודי
בתי-ספר (SegSchFront)	סך חזיתות של בתי-ספר במקטע רחוב (0-2)	תפקודי
צפיפות מגורים (TOT_DEN_S) - כלל אוכלוסייה; ילדים; קשישים.	צפיפות מגורים באזור הסטטיסטי שבו נמצא המקטע	דמוגרפי
גודל אוכלוסייה (TOT_AB_PO_S)	סך תושבים באזור הסטטיסטי שבו נמצא המקטע	דמוגרפי
תנועת הולכי רגל (SegTotal)	ממוצע סך תנועת הולכי רגל בשעה	משתנה תלוי
תנועת הולכי רגל ילדים (SegKid)	ממוצע סך תנועת הולכי רגל ילדים (0-14) בשעה	משתנה תלוי
תנועת הולכי רגל מבוגרים (SegGen)	ממוצע סך תנועת הולכי רגל מבוגרים (14-65) בשעה	משתנה תלוי
תנועת הולכי רגל קשישים (SegEld)	ממוצע סך תנועת הולכי רגל קשישים (65+) בשעה	משתנה תלוי

תוצאות

התפלגות תנועת הולכי רגל

תוצאות ספירות תנועת הולכי הרגל מוצגות באיור 3 תוך חלוקה בין הערים, השכונות וקבוצות האוכלוסייה שנבחנו. עולה מהן שקיים הבדל ניכר בכמות הכוללת של הולכי הרגל במרחב הציבורי בין הערים. בולטת מבחינה זו העיר בת ים עם ממוצע של כ-330 הולכי רגל בשעה במקטע, לעומת ממוצע של 100-130 הולכי רגל בשעה במקטע בשאר הערים. הבדל זה ניתן לייחס לצפיפות המגורים, לדרגת הקישוריות של רשת הדרכים, להתפלגות שימושי הקרקע, לרמת מינוע ולהתפלגות גילאים. מכל מקום, בשכונות מגורים ותיקות שהוקמו על פי גישת תכנון קדם-מודרנית נפח תנועת הולכי הרגל גדול בהשוואה לשכונות החדשות יחסית, וביטוי מובהק לכך ניתן למצוא בערים הוותיקות כפר סבא ובת ים שמשלבות שכונות חדשות כדוגמת גבעת אשכול ורמת הנשיא, בהתאמה. נפחי תנועת הולכי הרגל של ילדים ושל קשישים מהווים יחדיו כ-40% מכלל נפח תנועת הולכי הרגל בשכונות המגורים שנבדקו, בעוד משקלם בכלל האוכלוסייה עומד על כ-35% (הלשכה מרכזית לסטטיסטיקה 2008). דהיינו, משקלם מכלל תנועת הולכי הרגל גדול מחלקם באוכלוסייה. ואולם, חלקם של ילדים וקשישים בכלל תנועת הולכי הרגל אינו דומה בכל הערים; בכפר סבא ובאר שבע משקלם של הילדים גדול יחסית, ואילו בבית ים גדול יחסית חלקם של הקשישים. באשדוד חלקם של ילדים וקשישים מסך כל התנועה שווה פחות או יותר.

הערים נבדלות גם בהתפלגות תנועת הולכי הרגל בין השכונות שבמסגרתן (איור 4). מבחינה זו בולטת באר שבע בהתפלגות שוויונית יחסית בין השכונות בהשוואה לערים אחרות, ובמיוחד בהשוואה לכפר סבא בה



איור 3: התפלגות נפח תנועת הולכי רגל על פי ערים, שכונות מגורים וקבוצות אוכלוסייה



איור 4: התפלגות תנועת הולכי רגל שנמדדה במדגם מקטעי רחוב (סגמנטים) בערים הנבדקות

קיימת השונות הרבה ביותר בין השכונות. הבדל זה ניתן לייחס בעיקר לחוזקו התפקודי של מרכז העיר בכפר סבא. לעומת זאת בבאר שבע, ובמידה מסוימת באשדוד, תנועת הולכי הרגל נוטה להתפלג בצורה שוויונית יותר בין השכונות אך עם שונות רבה יחסית בין מקטעי רחוב בתוך אותה שכונה. הבדל זה ניתן לייחס להתפלגות המרכזיות של מקטעים ברשת הרחובות ולהתפלגות הפעילות התפקודית בין ובתוך שכונות.

מודל גרסיה לחיזוי התפלגות נפח תנועת הולכי רגל ברמת העיר

פיתוח המודל להערכה וחיזוי של נפח תנועת הולכי רגל נערך בשני שלבים. בשלב ראשון, ניסינו לבנות מודל לחיזוי נפח התנועה על סמך מידע גאוגרפי על רשת הדרכים, התפלגות שימושי הקרקע בעיר וצפיפות אוכלוסייה. ובשלב השני, בניית מודל גנרי תוך שאיפה ליישמו במרחבים עירוניים מגוונים ללא צורך בספירת הולכי רגל. ניתוחי הרגרסיה רבת המשתנים שבאמצעותם נבנו מודלים אלה נערכו בשיטת Stepwise ובשיטת Backward במטרה לתת מענה לבעיה של מולטיקולינאריות – קשר ליניארי בין המשתנים הבלתי תלויים.

בשלב הראשון נערכו ניתוחי רגרסיה רבת משתנים לבחינת ההשפעה של מכלול המשתנים הבלתי תלויים המסבירים את התפלגות תנועת כלל הולכי רגל בכל אחת מהערים. שיערנו שיימצא דמיון בין שכונות

מגורים שהתפתחו באותה עיר כתוצאה מקונטקסט מורפולוגי ותפקודי משותף. כדי לברר את משקלם היחסי של סוגי המשתנים הבלתי תלויים – משתנים המייצגים מרכזיות וקישוריות מרחבית ברשת הדרכים לעומת משתנים של שימושי הקרקע ומשתנים דמוגרפיים – חושבה רגרסיה רבת משתנים לכל סוג בנפרד. תוצאות הניתוח מוצגות בטבלה 2 תוך הבחנה בין סוגי המשתנים הבלתי תלויים.

טבלה 2: רמת ניבוי (אחוז שונות מוסברת R^2) של התפלגות של כלל נפח תנועת הולכי רגל על פי משתנים מרחביים, תפקודיים (שימושי קרקע) ודמוגרפיים. רגרסיה רבת משתנים בשיטת Stepwise ($P < 0.05$).

עיר	משתנים עיקריים מסבירים על פי סדר דומיננטיות	שימוש קרקע ודמוגרפיה	קישוריות מרחבית + שימושי קרקע ודמוגרפיה
אשדוד N=56	עומק ממוצע מטרי ברדיוס 2500 מ', עומק ממוצע גאומטרי ברדיוס של 2500 מ'; עומק ממוצע מטרי ברדיוס 4000 מ'	מסחר; צפיפות מגורים; גודל אוכלוסייה באזורים סטטיסטיים; צפיפות מגורים קשישים (65+)	עומק ממוצע מטרי ברדיוס 2500 מ'; מסחר; עומק ממוצע גאומטרי ברדיוס 2500 מ'; צפיפות מגורים
R^2	0.6	0.6	0.7
בת ים N=41	בחירה גלובלית; עומק ממוצע מטרי ברדיוס 1500 מ'	מסחר	מסחר; בחירה גלובלית; עומק ממוצע מטרי ברדיוס 1500 מ'
R^2	0.504	0.453	0.658
כפר סבא N=68	בחירה מקומית טופולוגית ברדיוס 5000 מ'; בחירה מקומית מטרי ברדיוס 1500 מ'; עומק ממוצע טופולוגי ברדיוס 5000 מ'; עומק ממוצע טופולוגי ברדיוס 1000 מ' / 4000 מ' / 2000 מ'	מסחר; צפיפות מגורי קשישים (65+)	מסחר; בחירה מקומית מטרי ברדיוס 250 מ'; צפיפות מגורים קשישים (65+); עומק ממוצע טופולוגי ברדיוס 1000 מ'
R^2	0.605	0.338	0.6
באר שבע N=68	עומק ממוצע גאומטרי ברדיוס 3000 מ'; עומק ממוצע מטרי ברדיוס 4000 מ'	צפיפות מגורי קשישים (65+); צפיפות מגורי ילדים (עד 14); מסחר	עומק ממוצע גאומטרי ברדיוס 3000 מ'; צפיפות מגורים; מסחר; בתי ספר
R^2	0.55	0.485	0.667

התוצאות מלמדות שככל המשתנים המייצגים מרכזיות וקישוריות מרחבית ברשת הדרכים נוטים להיות משפיעים יותר בהשוואה למשתני שימושי הקרקע ודמוגרפיה, ואולם הערים נבדלות בהרכבם של משתנים אלה. בערים הוותיקות, בת ים וכפר סבא, התפלגות התנועה מושפעת בעיקר ממרכזיותם של מקטעי רחובות כאמצעי מעבר בין מקומות (מדדי through-movement). המדדים הדומיננטיים בבתי ים ובכפר סבא הם בהתאמה מדדי הבחירה הגלובלית (מרכזיות הרחוב כאמצעי מעבר בין כל רחובות העיר) ומדדי הבחירה המקומית ברדיוס של 5,000 מ', שמחושבים על בסיס מרחק טופולוגי. לעומת זאת, בערים אשדוד ובאר שבע, שהוקמו לאחר קום המדינה ותוכננו בגישת תכנון מודרנית, התפלגות התנועה מושפעת יותר מדרגת הנגישות וקישוריות של מקטע רחוב ברשת הדרכים (מדדי to-movement). בשתי הערים המדדים הדומיננטיים הם מדדי עומק ממוצע (קישוריות/נגישות ממוצעת) של מקטעי רחוב שמחושבים על בסיס מרחק מטרי ומרחק גאומטרי ברדיוסים בטווח 2,500–4,000 מ'.

כצפוי מסחר נמצא כבולט מבין שימושי הקרקע בהסבר השונות בהתפלגות של נפח תנועה בין מקטעי רחובות. בכל הערים להוציא את העיר בת ים, צפיפות המגורים נמצאה אף היא כגורם משפיע על התפלגות זו. ניתוח הרגרסיה המשולב שכולל את כל המשתנים הבלתי תלויים מצביע אף הוא על שוני בין הערים הוותיקות לערים החדשות; בערים הוותיקות כפר סבא ובתי ים, המשתנה החזק ביותר הוא של שימוש

קרקע מסחרי, בעוד שבערים החדשות המשתנים המייצגים מרכזיות ברשת דרכים (עומק ממוצע ברדיוס 2,500–3,000 מ') הם החזקים ביותר. הבדל זה ניתן לייחס להיעדר דגם מרחבי אחיד להתפלגות שימושי קרקע בעיר.

רמת הניבוי (אחוז השונות המוסברת R^2) של מודל הרגרסיה לחיזוי התפלגות נפח תנועת הולכי הרגל בכללותו, מצוי בטווח של 60–75%, שמהווה רמה חיזוי סבירה לקנה המידה של עיר. ואולם, ניתוח נפרד שנערך לגבי כל אחת מהאוכלוסיות הנבחנות – כלל האוכלוסייה, קשישים וילדים (טבלה 3) – מלמד שרמת החיזוי נוטה להיות יחסית נמוכה בקרב אוכלוסיות הקשישים והילדים, ובעיקר בקרב הולכי רגל ילדים.

טבלה 3: רמת ניבוי (אחוז שונות מוסברת R^2) של התפלגות נפח תנועת הולכי רגל על פי משתנים מרחביים, תפקודיים ודמוגרפים – השוואה בין ערים וקבוצות אוכלוסייה. רגרסיה רבת משתנים בשיטת Stepwise ($P < 0.05$).

עיר	אוכלוסייה	מרכזיות/קישוריות מרחבית	שימושי קרקע	קישוריות מרחבית + שימושי קרקע
אשדוד N=56	כלל האוכלוסייה	0.616	0.500	0.660
	קשישים	0.534	0.550	0.560
	ילדים	0.378	0.361	0.440
בת ים N=41	כלל האוכלוסייה	0.619	0.477	0.720
	קשישים	0.538	0.406	0.770
	ילדים	0.600	0.415	0.730
כפר סבא N=68	כלל האוכלוסייה	0.484	0.370	0.668
	קשישים	0.279	0.230	0.377
	ילדים	0.084	0.258	0.306
באר שבע N=68	כלל האוכלוסייה	0.590	0.500	0.666
	קשישים	0.560	0.437	0.649
	ילדים	0.196	0.147	0.250

הממצאים העולים מהשוואת המשתנים הנכללים בכל אחת מהגרסיות שנבנו לערים השונות לצורך הסבר התפלגות נפח תנועת הולכי רגל (טבלאות 2–3), מלמדים על שונות רבה במשתנים העיקרים המתארים מרכזיות של מקטע רחוב ברשת הדרכים. הערים נבדלות בדומיננטיות של סוגי מדדי המרכזיות, בסוג המרחק לפיו הן נמדדות (טופולוגי, גאומטרי או מטרי) ובמשקלן היחסי בהשוואה לתכונות שימושי הקרקע והתכונות הדמוגרפיות. הבדלים אלה מצביעים על קושי לבנות מודל גנרי לייצוג וניבוי תנועת הולכי רגל ברמת העיר. דהיינו, מודל אחד שניתן ליישמו בכל עיר.

מודל רגרסיה לחיזוי התפלגות נפח תנועת הולכי רגל על פי טיפוסי שכונות מגורים

כצפוי רמת החיזוי שהתקבלה ממודל רגרסיה לניבוי תנועת הולכי רגל שנבנה לכל אחת מהשכונות היתה גבוהה בהשוואה לרמת העיר – ערך R^2 מעל 0.73 בכל השכונות הנבדקות. את ההבדל ברמת החיזוי בין רמת העיר לרמת השכונה ניתן לייחס לשונות בין השכונות הממוקמות באותה עיר בהרכב המשתנים המסבירים התפלגות תנועת הולכי רגל בתתחומן. ההבדל בין שכונות מגורים בהרכב המשתנים שנכלל במודל החיזוי שנבנה עבורן מרמז על הקושי לבנות מודל גנרי ברמת השכונה. לצורך בניית מודל זה, בה התרכזנו בשלב השני של המחקר, נערכה השוואה בין השכונות במטרה לאתר הבדלים וקווי דמיון ביניהן במשתנים המסבירים את התפלגות התנועה בתתחומן. בחינה ויזואלית וסטטיסטית של התפלגות נפח התנועה של

הולכי רגל ב-14 השכונות ושל מידת התאמתה של התפלגות זו עם התפלגותם המרחבית של שימושי קרקע ושל דרגות מרכזיות ברשת הדרכים הובילה לזיהויין של שלושה טיפוסים שכונות:

- שכונות מטיפוס A – השכונות שהוקמו בגישת תכנון קדם-מודרנית הממוקמות במרכז העיר. להוציא את העיר העתיקה בבאר שבע, שכונות אלו ממוקמות כולן בערים הוותיקות.
- שכונות מטיפוס B – השכונות שהוקמו בגישת תכנון קדם-מודרנית הממוקמות בפריפריה של הערים הוותיקות בת ים, וכפר סבא.
- שכונות מטיפוס C – השכונות שהוקמו בגישת תכנון מודרנית הממוקמות בערים חדשות (הן במרכז והן בפריפריה) וגם שכונות שהוקמו לאחר קום המדינה, והממוקמות בשולי הערים הוותיקות.

לצורך בחינת יכולת הניבוי של כל אחד מטיפוסי השכונות נבנה מודל רגרסיה לינארית רבת משתנים בשיטת Backward. המודל שנבנה בנפרד לכל טיפוס שכונה, ולכל אחת מקבוצות האוכלוסייה (המשתנים התלויים), נועד ליישום בכל הערים. דרך הניתוח המבחינה בין טיפוסים שכונות זכתה לתימוכין כאשר מקדמי הקטגוריות המייצגים טיפוסים שכונות נמצאו מובהקים סטטיסטית ($P < 0.05$).

ערכי R^2 המוצגים בטבלה 4 מלמדים שניתן לחזות את תנועת הולכי הרגל של כלל האוכלוסייה, ושל אוכלוסיית הקשישים, עם רמת חיזוי גבוהה מ-0.6, וזאת בכל טיפוסים השכונות. לעומת זאת, רמת החיזוי של מודל הרגרסיה שנבנה לאוכלוסיית הילדים נוטה להיות נמוכה יותר; מלבד במרכזי הערים הוותיקות (קטגוריה A) שם יכולת הניבוי גבוהה ומספקת בהחלט ($R^2 = 0.75$), הן בפריפריה של הערים הוותיקות (קטגוריה B) והן בשכונות החדשות (קטגוריה C) רמת החיזוי נמוכה יחסית ועומדת על 0.44 ו-0.40 בהתאמה.

הטבלה מלמדת על יכולת חיזוי גבוהה של המודלים שנבנו לטיפוסי השכונות A, B שהוקמו בגישת תכנון קדם-מודרנית וממוקמות בערים הוותיקות ובמיוחד כאלה שנמצאות במרכזן (טיפוס A); רמת החיזוי במרכזי הערים הוותיקות גבוהה מ-0.75 לגבי כל קבוצת אוכלוסייה ובשכונות ותיקות הממוקמות בשולי העיר יכולת החיזוי אף היא גבוהה למעט לגבי אוכלוסיית הילדים. בשכונות חדשות לעומת זאת, יכולת החיזוי נמוכה יחסית לכל קבוצות האוכלוסייה וזאת כאשר רק לגבי אוכלוסיית הקשישים רמת החיזוי גבוהה מ-0.6.

טבלה 4: רמת ניבוי (אחוז שונות מוסברת R^2) של התפלגות נפח תנועת הולכי רגל על סמך משתנים מרחביים, תפקודיים ודמוגרפיים לפי טיפוסים שכונות וקבוצות אוכלוסייה. רגרסיה רבת משתנים בשיטת Stepwise ($P < 0.05$).

טיפוס C	טיפוס B	טיפוס A	
0.472	0.844	0.842	כלל האוכלוסייה
0.604	0.779	0.836	קשישים
0.399	0.439	0.754	ילדים

תיקוף המודלים הגנריים

לשלב התיקוף נבחרו ארבע שכונות מגורים נוספות (איור 5). שתי שכונות ממוקמות בכפר סבא (עיר שנכללה במחקר האמפירי ששימש לבניית מודל גנרי לחיזוי) ושתי שכונות בהוד השרון (עיר שלא נכללה במחקר האמפירי ששימש לבניית מודל גנרי לחיזוי). בכל עיר נבחרה שכונה אחת ותיקה במרכז העיר



איור 5: השכונות הנבחרות לשלב התיקוף בערים כפר סבא והוד השרון

שהתפתחה לפי גישת תכנון פרה-מודרנית (שכונות מטיפוס A) ושכונה אחת חדשה יחסית הממוקמת בקצה העיר שתוכננה בגישת תכנון מודרנית (שכונות מטיפוס C). בהתאם להבחנה בין טיפוסים השכונות, בשכונות הוותיקות במרכזי הערים דגם רשת הרחובות נוטה להיות דגם של "שתי וערב" שרמת הקישוריות בו גבוהה עם חיבור טוב לעיר. לעומת זאת בשכונות הקצה דגם רשת הרחובות נוטה להיות היררכי, מקוטע, ועם חיבור חלש יותר לעיר. לגבי כל אחת מארבע השכונות נאספו נתונים, נותחה רשת הרחובות, חושבה התפלגות שימושי קרקע ונערכה ספירה של הולכי הרגל באותה מתכונת ועל פי אותם שלבים שבוצעו עבור ארבע עשרה שכונות המחקר (כמתואר לעיל).

רמת המתאם בין נפח תנועת הולכי רגל שנמדד בספירות התנועה לבין נפח תנועת הולכי רגל החזוי שמתקבל מיישום מודל הרגרסיה בכל אחת מארבע השכונות מוצגת בטבלה 5. עיון בתוצאות מלמד על הבדל ברור בין טיפוסים השכונות, כלומר רמת הניבוי גבוהה יחסית בשכונות הממוקמות במרכז העיר; כאשר החיזוי נערך לכלל האוכלוסייה מתקבלת רמת ניבוי (R^2) של 0.60 בכפר סבא ו-0.56 בהוד השרון. לעומת זאת, בשכונות הקצה רמת הניבוי נמוכה באופן משמעותי ועומדת על 0.24 ו-0.19, בהתאמה.

טבלה 5: רמת ניבוי (אחוז שונות מוסברת R^2) של תנועת הולכי רגל על פי מרכזיות ברשת הרחובות והתפלגות שימושי קרקע - השוואה בין ערים וקבוצות אוכלוסייה ($P < 0.05$) ($N=68$). רגרסיה רבת משתנים בשיטת Stepwise ($P < 0.05$).

שם שכונה	אוכלוסייה	מתאם פירסון (r)	R^2
שכונת מרכז דרום ויצמן, כפר סבא	כלל האוכלוסייה	0.77	0.60
	קשישים	0.57	0.30
	ילדים	0.55	0.31
שכונת גאולים, כפר סבא	כלל האוכלוסייה	0.49	0.24
	קשישים	0.23	0.05
	ילדים	0.27	0.07
שכונת שרת, הוד השרון	כלל האוכלוסייה	0.74	0.56
	קשישים	0.53	0.28
	ילדים	0.61	0.42
שכונת רמות מנחם, הוד השרון	כלל האוכלוסייה	0.33	0.19
	קשישים	0.48	0.21
	ילדים	0.30	0.14

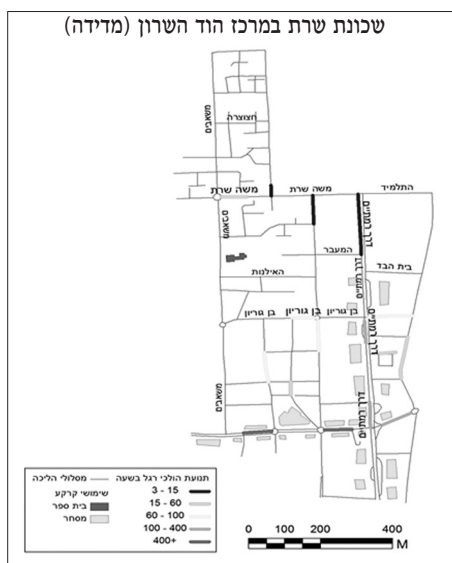
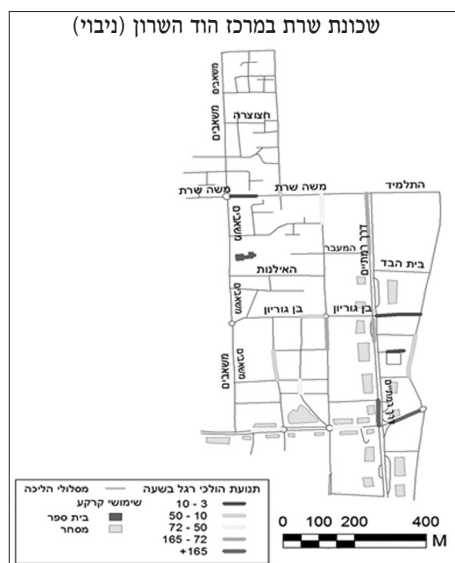
לאחר סיום שלב התיקוף (ורק בסופו) נערך ניתוח רגרסיה לארבע השכונות שנבחנו בשלב התיקוף על סמך הנתונים האמפיריים שנאספו בהם ובדרך דומה למודל שנבנה על בסיס ארבע עשרה השכונות שנבחנו בשלב הראשון. חשוב להדגיש שמדידה זו נערכה ללא קשר למודלים שנבנו לכל טיפוס שכונה. רמת החיזוי (R^2) של מודל הרגרסיה שנבנה לצורך הערכת תנועת כלל האוכלוסייה עומד בשכונות המרכז בכפר סבא על 0.76 ובהוד השרון על 0.88, בהתאמה, בעוד שבשכונות הקצה הוא עומד על 0.62 ו-0.29 בהתאמה. יוצא איפוא, שרמת החיזוי של המודל הגנרי שנבחנה כאן בשלב התיקוף, נמוכה משמעותית מרמת החיזוי האמפירי במיוחד בשכונות הקצה.

הפער ברמת החיזוי בין טיפוסי השכונות מחרף כאשר מדובר באוכלוסיית הקשישים והילדים. R^2 של המודלים שנבנו לאוכלוסיות אלו עומד בהתאמה על 0.30 ו-0.31 בכפר סבא, ועל 0.28 ו-0.42 בהוד השרון. בשכונות הקצה לעומת זאת, נע ערכו של R^2 בטווח של 0.05–0.08, להוציא את אוכלוסיית הקשישים בשכונות רמות מנחם, שם ערכו 0.21. רמת החיזוי הנמוכה יחסית של אוכלוסיות אלה מתחזקת כאשר מדובר על שכונות קצה חדשות שהוקמו בגישת תכנון מודרנית.

ככלל, ניתן לקבוע שרמת החיזוי בשתי השכונות הוותיקות הממוקמות במרכזן של הערים גבוהה יותר בהשוואה לשכונות הקצה החדשות. התפלגויות נפח התנועה הנמדד ונפח התנועה החזוי על פי מודל הרגרסיה בשכונות הוותיקות ובשכונות החדשות מוצגות בהתאמה באיורים 6 ו-7. את ההסבר להבדל בין שני טיפוסי השכונות ברמת החיזוי ניתן לייחס בעיקר למידת ההתאמה בין התפלגות דרגת המרכזיות להתפלגות שימושי הקרקע. כפי שצויין למעלה, לשכונות שהוקמו בגישת התכנון הקדם-מודרנית מאפיינים הקרובים למבנה מורפולוגי-תפקודי המתפתח בתהליך אורגני, שאחד ממרכיביו הבולטים הוא ההתאמה בין התפלגות דרגת המרכזיות ברשת הדרכים להתפלגות שימושי הקרקע המושכים אליהם תנועת הולכי רגל. בהתחשב ביחס התלות בין התפלגות שימושי קרקע לדרגת המרכזיות ברשת הרחובות, תנועת הולכי רגל זוכה להעצמה בזכות מרכזיות הרחוב וגם בזכות שימושי הקרקע, ולכך תרומה ליכולת הניבוי של התפלגות נפח תנועת הולכי רגל. בשכונות קצה שהתפתחו בגישה מודרנית לעומת זאת, ההתאמה בין שתי ההתפלגויות נמוכה יחסית ואפשר ששימושי קרקע אטרקטיביים לתנועת הולכי אינם ממוקמים ברחובות המרכזיים ברשת. כתוצאה מכך, תנועת הולכי רגל תתפלג בחלקים שונים של שכונות המגורים ללא העדפה מובהקת לחלק ממקטעי הרחובות, ולכן עשויות להיות השלכות על רמת החיזוי. אפשר גם שההבדלים נובעים גם מבחירה שונה של אמצעי נסיעה שונים, שעשויה להיות מושפעת מאופיה של הסביבה עירונית בטיפוסי השכונות השונות.

בנוסף לכך, גם לגודל והרכב נפח התנועה עשויה להיות השפעה על רמת החיזוי. נפח התנועה הוא מסימיני ההיכר של אזור מרכז העיר המייחד אותו משאר חלקי העיר והוא האחראי לתנועה יציבה ועקבית יותר בהשוואה לשכונות הקצה בהן רבים מקטעי הרחובות "השקטים" – רחובות עם נפח קטן של תנועת הולכי רגל, העשוי להגיע לכדי הולכי רגל אחדים בלבד בשעה (איור 7). לכך פוטנציאל השפעה על יכולת הניבוי הסטטיסטי בכל אחד משני טיפוסי השכונות הנבחנות כאן. בעיה זו מחרפה כאשר מדובר על תנועת הילדים והקשישים שחלקם בנפח התנועה קטן אף יותר.

הסבר נוסף שמוצע לשוני במידת הניבוי בשכונות קדם מודרניות ומודרניות מתוך נקודת מבט מבנית מייחס את ההבדל ברמת החיזוי לתכונה של נהירות (intelligibility) – מקדם המתאם (R^2) בין הקישוריות ברמה

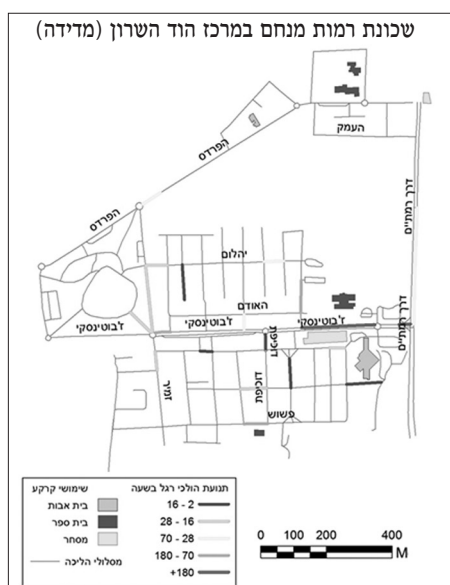
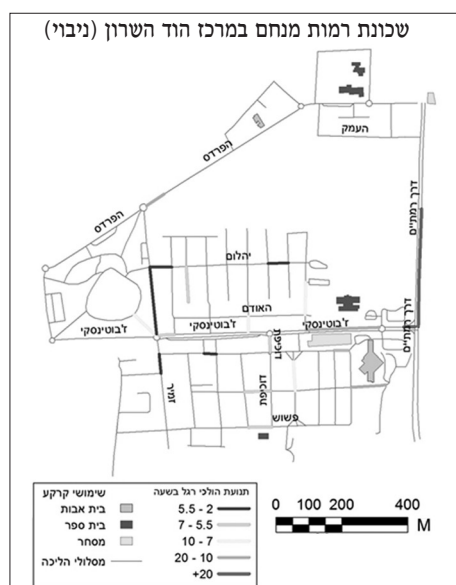


איור 6: תנועת הולכי רגל בשכונות מגורים במרכז העיר – מדידה לעומת מודל ניבוי

הלוקלית (מדד הקשירות) לרמת הקישוריות הגלובלית – (ראה לדוגמה: Zhang et al. 2012). בחינת דרגת הנהירות בשכונות הנבחנות מבססת טענה זו: בשתי השכונות הוותיקות (טיפוס A) שממוקמות במרכזי הערים בכפר סבא ובהוד השרון דרגת הנהירות היא 0.86 ו-0.57 בהתאמה, בעוד בשתי השכונות המודרניות בשולי ערים אלה (טיפוס C), דרגת הנהירות נמוכה יותר וכמעט זהה – 0.53.

מסקנות

במחקר זה נערך ניסיון לפתח מודל לחיזוי תנועת הולכי רגל על פי גישה מבנית של 'תחביר המרחב' בהתבסס על מחקר אמפירי שנערך בשכונות מגורים בישראל שנבדלות במבנה רשת הרחובות, במערך שימושי הקרקע ובמיקום השכונה בעיה. תהליך פיתוח המודל נערך במטרה לאתר הרכב משתנים המייצג את דרגת המרכזיות של מקטעי הרחובות, שימושי הקרקע וצפיפות האוכלוסייה. המודל מאפשר ניבוי מיטבי של התפלגות תנועת הולכי רגל ברחובות העיר על סמך איסוף נתוני תנועת הולכי רגל במדגם מקטעי רחובות.



איור 7: תנועת הולכי רגל בשכונות הקצה – מדידה לעומת מודל ניבוי

תהליך זה כלל ניסיון לבנות מודל גנרי שניתן ליישמו בשכונות מגורים מטיפוס שונה ללא צורך באיסוף נתוני אמת על תנועת הולכי רגל.

ממצאי המחקר מלמדים שלמודל שפותח על פי הגישה המבנית, המסתמך על מידע גאוגרפי שזמין כיום בכל יישוב ועל מדידה של תנועת הולכי רגל במדגם של מקטעי רחובות, יכולת ניבוי סבירה של התפלגות נפח תנועת הולכי רגל ברמת העיר וברמת שכונת המגורים (שוונות מוסברת R^2 גבוהה מ-0.6). מבין המשתנים במודל, נמצאו המשתנים המייצגים דרגת מרכזיות ברשת הרחובות (ממדים של תחביר המרחב) דומיננטיים בהסבר וניבוי התפלגות נפח תנועת הולכי רגל בהשוואה למשתנים המייצגים הרכב וכמות שימושי קרקע וצפיפות אוכלוסייה.

הניסיון לפתח מודל חיזוי גנרי הוביל לבניית מודלים נפרדים לטיפוסי שכונות מגורים בישראל שנבדלות בוותק השכונה ובגישת התכנון לפיה הוקמה ובמיקום השכונה ביחס למרכז העיר. יישום המודלים השונים

מלמד על יכולת חיזוי גבוהה של מודלים שנבנו לטיפוסי השכונות שהוקמו בגישת תכנון קדם-מודרנית וממוקמות בערים הוותיקות, ובמיוחד כאלה שנמצאות במרכזן. בשכונות אלה נמדד גם נפח תנועת הולכי הרגל גדול יותר בהשוואה לשכונות החדשות יחסית.

שלב התיקוף שנערך באמצעות ארבע שכונות נוספות (שתי שכונות בכפר סבא שנכללה במחקר האמפירי ושתי שכונות בהוד השרון שלא נכללה במחקר האמפירי) חיזק מגמה זו: רמת חיזוי סבירה התקבלה בשתי השכונות הוותיקות שהתפתחו על פי גישת תכנון קדם-מודרנית אך לא בשכונות חדשות שהוקמו על פי גישת תכנון מודרנית. ההבדל בין טיפוסי השכונות ניכר אף יותר כאשר החיזוי נערך לגבי אוכלוסיית ילדים וקשישים. מכל מקום, חשובה גם העובדה שחיזוי גנרי אפשרי לשכונה הממוקמת בעיר שלא נכללה במחקר האמפירי שבאמצעותו נבנה מודל החיזוי (כדוגמת הוד השרון).

את ההבדל בין טיפוסי השכונות ניתן לייחס למאפייני הסביבה בשכונות הוותיקות (i) כלומר, התאמה רבה בין דרגת המרכזיות של רחובות להימצאות שימושי קרקע אטרקטיביים בהם; (ii) נפח תנועת הולכי רגל גדול יחסית, ובמיוחד בשכונות שממוקמות במרכזי הערים; ו-(iii) דרגת נהירות גבוהה של מבנה רשת הרחובות (ההתאמה בין דרגות הקישוריות של מקטע רחוב ברמה הלוקלית וברמה גלובלית). יוצא איפוא, ששכונות שבהן נפח תנועת הולכי הרגל גדול יחסית, גם יכולת הניבוי של התפלגות תנועת הולכי רגל גבוהה יחסית. את ההסבר לכך ניתן למצוא אם כן בהעצמה ההדדית בין מרכזיות ברשת הדרכים, התפלגות שימושי קרקע ונהירות מבנה רשת הרחוב בעיני הולכי הרגל.

הממצאים העולים ממחקר זה לגבי הגורמים המעורבים בהתפלגות נפח התנועה עולים בקנה אחד עם ממצאים אמפיריים המתקבלים בערים אחרות בעולם, הן לגבי סוג המשתנים הנכללים במודלים לחיזוי והן לגבי הדומיננטיות היחסית שלהם. יחד עם זאת, לעיר הישראלית ייחוד משלה שניכר בשונות הרבה במאפיינים המורפולוגיים והתפקודיים ביו שכונות מגורים שמקורם העיקרי בגישת התכנון לפיה הוקמו.

המחקר הנוכחי הוגבל לערים בינוניות הממוקמות בשטח מישורי. בכדי להרחיב את מודל החיזוי לכלל המרחב העירוני בישראל נחוץ מחקר אמפירי נוסף במרחב העירוני הערבי והחרדי, במרחב העירוני ביישובים הממוקמים בטופוגרפיות הרריות, ובמרכזי הערים הגדולות. מחקר במרחבים אלה עשוי לגלות ידע נוסף רלוונטי לתנועת הולכי רגל בזכות ייחודם בהרכב הדמוגרפי, בהרכב שימושי הקרקע ובפעילות יומיומית במרחב הציבורי ובמורפולוגיה עירונית שונה.

מקורות

אומר, י' 2011. מבנה טופולוגי של רשת רחובות והתפלגות נפח תנועת כלי רכב בעיר. *תנועה ותחבורה*, 99, 37-41.

הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, פרסומי מפקד האוכלוסין והדיר 2008 (קובץ מסומם של יישובים), ירושלים.

ליפמן, א' 2008. *בטיחות בדרכים והליכה ברגל לבית הספר היסודי*. עבודת גמר לקראת התואר "מוסמך אוניברסיטה", אוניברסיטת תל אביב.

משרד התחבורה ומשרד הבינוי והשיכון. 2012. *הנחיות לתכנון רחובות בערים*.

הרשות הלאומית לבטיחות בדרכים. 2012. *מגמות בבטיחות בדרכים בישראל 2005-2011*.

- Appleyard, D. 1981. *Livable Streets*. Berkeley, CA: University of California Press.
- Baran, P. K., D. A. Rodríguez, and A. J. Khattak. 2008. Space Syntax and Walking in a New Urbanist and Suburban Neighbourhoods. *Journal of Urban Design*, 13(1), 5–28.
- Batty, M. 2005. *Cities and Complexity: Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Borgers, A., and H. J. P. Timmermans. 1986. A model of pedestrian route choice and demand for retail facilities within inner-city shopping areas. *Geographical Analysis*, 18(2), 115–128.
- Bosselmann, P., E. Macdonald, and T. Kronmeyer. 1999. Livable streets revisited. *Journal of the American Planning Association*, 65(2), 168–180.
- Cervero, R., and M. Duncan. 2003. Walking, bicycling, and urban landscapes: Evidence from the San Francisco Bay Area. *American Journal of Public Health*, 93(9), 1478–1483.
- Cervero, R., and C. Radisch. 1996. Travel choices in pedestrian versus automobile oriented neighborhoods. *Transport Policy*, 3(3), 127–141.
- Desyllas, J., E. Duxbury, J. Ward, and A. Smith. 2003. Demand modeling of large cities: An applied example from London. *UCL Centre for Advanced Spatial Analysis*.
- Dumbaugh, E., W. Li, and K. Joh. 2013. The built environment and the incidence of pedestrian and cyclist crashes. *Urban Design International*, 18(3), 217–228.
- Frank, L. D., S. F. James, C. L. Terry, J. E. Chapman, B. E. Saelens, and W. Bachman. 2006. Many pathways from land use to health: Associations between neighborhood walkability and active transportation, body mass index, and air quality. *Journal of the American Planning Association*, 72(1), 75–87.
- Hakkert, A.S., and C. Matar. 2007. Country Report for Israel. *Part of the Pedestrians Quality Needs Cost358 Project*.
- Hillier, B. 1996. *Space is the Machine*. Cambridge, MA: Cambridge University Press.
- Hillier, B. 2002. A theory of the city as object: Or, how spatial laws mediate the social construction of urban space. *Urban Design International*, 7, 153–179.
- Hillier, B. 2009. Spatial sustainability in cities: Organic patterns and sustainable forms. In D. Koch, L. Marcus and J. Steen (eds.), *Proceedings of the 7th International Space Syntax Symposium*, K01:1–20, Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology (KTH).
- Hillier, B., and S. Iida. 2005. Network and psychological effects in urban movement. In: A. G. Cohen and D.M. Mark (eds.), *Proceedings of Spatial Information Theory: International Conference, COSIT 2005*, 475–490, Berlin, Germany: Springer-Verlag.
- Hillier, B., A. Penn, J. Hanson, T. Grajewski, and J. Xu. 1993. Natural movement: Or, configuration and attraction in urban pedestrian movement. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 20(1), 29–66.
- Jacobs, A. B., E. Macdonald, and Y. Rofè. 2002. *The Boulevard Book*. Cambridge, MA: MIT Press.

- Jacobsen, P. L. 2003. Safety in numbers: More walkers and bicyclists, safer walking and bicycling. *Injury Prevention*, 9(3), 205–209.
- Jiang, B. 2009. Ranking space for predicting human movement in an urban environment. *International Journal of Geographical Information Science*, 23(7), 823–837.
- Karimi, K. 2012. A configurational approach to analytical urban design: 'Space syntax' methodology. *Urban Design International*, 17(4), 297–318.
- Kelly, C. E., M. R. Tight, M. W. Page, and F. C. Hodgson. 2007. Techniques for assessing the walkability of the pedestrian environment. *8th International Walk 21 Conference in Toronto*.
- Lerman, Y., and I. Omer. 2013. The effects of configurational and functional factors on the spatial distribution of pedestrians. In: D. Vandenbroucke, B. Bucher and J. Crompvoets (eds.), *Geographic Information Science at the Heart of Europe*, Springer.
- Liu, X., and J. Griswold. 2009. Pedestrian volume modeling: A case study of San Francisco. *Association of Pacific Coast Geographers Yearbook*, 71, 164–181.
- Longley, P., and M. Batty (eds.). 1996. *Spatial Analysis: Modelling in a GIS Environment*. Cambridge, UK.
- Moudon, A. V., P. M. Hess, M. C. Snyder, and K. Stanilov. 1997. Effects of site design on pedestrian travel in mixed-use, medium-density environments. *Transportation Research Record*, 1578, 48–55.
- Omer, I., and O. Zafir-Reuven. 2010. Street patterns and spatial integration of Israeli cities. *The Journal of Space Syntax*, 1(2), 280–295.
- Ozbił, A., J. Peponis, and B. Stone. 2011. Understanding the link between street connectivity, land use and pedestrian flows. *Urban Design International*, 16(2), 125–141.
- Ozer, O., and A. S. Kubat. 2007. Walking initiatives: A quantitative movement analysis. *6th International Space Syntax Symposium in Istanbul*.
- Penn, A., B. Hillier, D. Banister, and J. Xu. 1998. Configurational modeling of urban movement networks. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 25, 59–84.
- Raford, N., and D. R. Ragland. 2004. Space syntax: An innovative pedestrian volume modeling tool for pedestrian safety. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1878, 66–74.
- Raford, N., and D. R. Ragland. 2006. Pedestrian volume modeling for traffic safety and exposure analysis: Case of Boston, Massachusetts. *Transportation Research Board 85th Annual Meeting*.
- Read, S. 1999. Space syntax and the Dutch city. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 26(2), 251–264.
- Rofé, Y., and I. Omer. 2012. How urban grids generate urbanism – examples from Israel. In R. Cavallo, S. Komossa, M. Bergahuser and N. Marzot (eds.), *New Urban Configurations Proceedings of 2012 EAAE/ISUF Conference*, Faculty of Architecture, Delft Institute of Technology, The Netherlands.

Saelens, B. E., and S. Handy. 2008. Built environment correlates of walking: A review. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40(7), 550–566.

Saelens, B. E., J. F. Sallis, and L. D. Frank. 2003. Environmental correlates of walking and cycling: Findings from the transportation, urban design and planning literatures. *Annals of Behavioral Medicine*, 25(2), 80–91.

Schubert, W., and F. Skala. 2007. Encouraging walking, the role of urban design: Experiences of the EU-ECOCITY project. *8th International Walk 21 Conference in Toronto*.

Talen, E. 2003. Neighborhoods as service providers: A methodology for evaluating pedestrian access. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 30(2), 181–200.

Veras, A., and L. Amorim. 2005. New Urbanism: Ideals and urban configuration. *5th International Space Syntax Symposium in Delft*.

Zhang, L., Y. Zhuang, and X. Dai. 2012. A configurational study of pedestrian flows in multi-level Commercial space, Case study Shanghai. *8th International Space syntax Symposium in Santiago de Chile*.