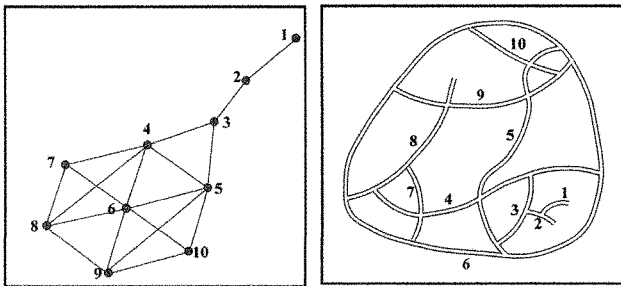


# מבנה טופולוגי של רשת רחובות והתפלגות נפח תנועת כלי רכב בעיר

ד"ר יצחק אומר \*

העיר מוצג כמוקדים (nodes) בעוד ההצטלבויות של רחובות מוצגים כקשרים (edges) בין מוקדים, כפי שמומחש באיור מס' 1.

איור 1: ייצוג גיאומטרי (מימין) וטופולוגי (שמאל) של רשת רחובות היפותטית



גרף הקשירות מהווה בסיס לניתוח מבני באמצעות שלושה מדדי מרכזיות (centrality measures) המאפשרים לתאר את דרגת המרכזיות הטופולוגית של כל אחד מהרחובות: קשירות (Degree), קירבה (Closeness) ותיווך (Betweenness).

מדד הקשירות (Degree) מציין כמה רחובות מחוברים ישירות לרחוב הנבדק ( $V_i$ ), ובאופן פורמלי הוא מחושב כך:

$$C_D(V_i) = \sum_{k=1}^n r(v_i, v_k)$$

כאשר  $V_i$  מציין את הרחוב הנבדק ו- $V_k$  את כל אחד מהרחובות ברשת הרחובות הכוללת  $n$  רחובות בשהיי. בדרך זו מדד הקשירות מתאר את דרגת האינטגרציה של רחוב לסביבתו הקרובה המיידית, וערכיו הם מוחלטים.

מדד הקירבה (Closeness) מתאר את דרגת הקירבה של רחוב  $V_i$  לכל אחד מהרחובות  $V_k$  האחרים במרחב העירוני הנבדק באמצעות חישוב המרחק הטופולוגי ( $d$ ) הקצר אליהם, על פי הניסוח הבא:

$$C_c(V_i) = \frac{n-1}{\sum_{k=1}^n d(V_i, V_k)}$$

במצב בו הרחוב הנבדק מחובר ישירות לכל שאר הרחובות ( $n-1$ ) יתקבל הערך המקסימלי 1. ערך זה יקטן ככל שהמרחקים הטופולוגיים אל הרחובות האחרים גדולים יותר. מדד הקירבה מתאר אם כן את דרגת האינטגרציה של רחוב עם רשת הרחובות בכללותה. מדד התיווך (Betweenness) מתאר עד כמה הרחוב משמש למעבר בין רחובות העיר והוא מנוסח כך:

$$C_B(V_i) = \sum_j \sum_k \frac{P_{jik}}{P_{jk}}$$

כאשר  $P_{jk}$  מציין את המסלולים הקצרים בין כל זוגות הרחובות  $k$ - $j$

## מבוא

זיווי של תנועה בעיר היווה מאז ומתמיד מטרה חשובה בתחום תכנון תחבורה. מודלים לחיזוי נפח תנועת כלי רכב בין חלקי העיר ובין זעיר לסביבתה מסתמכים בדרך כלל על מטריצות מוצא-יעד, הנבנות באמצעות מידע על התפלגות המגורים של האוכלוסיה מצד אחד ועל זרחבי התפקוד שלה כגון תעסוקה, קניות וחינוך מצד שני.

אחרונה נעשים ניסיונות לחיזוי תנועה בעיר בגישה מבנית (structural configurational approach) המסתמכת בעיקר על התכונות הטופולוגיות והגיאומטריות של רשת הדרכים. ככלל, גישה זו מאפשרת זיווי פחות מדויק, אך יתרונה הוא במתן האפשרות לחיזוי תנועה על זמן נתונים של רשת הרחובות בלבד, וזאת מבלי להזדקק לנתונים יל מקום המגורים ומרחבי הפעילות של האוכלוסיה, שהם בדרך כלל זכות זמינים וכרוכים בהשקעה רבה יותר של משאבים. לגישה זו יתרון וסף והוא היכולת לחזות תנועה גם בקנה מידה גיאוגרפי מצומצם של זבנן ושכונת מגורים, ולכך חשיבות רבה על רקע חולשתם של מודלים של תחבורה לחזות נפח תנועת כלי רכב במרחב עירוני לוקאלי (Crane, 2000; Cervero, 2000).

ישה זו יושמה בתחילה לחיזוי נפח תנועת הולכי רגל ברחובות העיר (Hillier et al, 1993) והורחבה בהמשך לחיזוי נפח תנועת כלי רכב. זממצאים העולים ממחקרים אמפיריים בהם יושמה, מלמדים שניתן לחזות ולהסביר את שני סוגי התנועה על סמך תכונות רשת רחובות לבד (ראו למשל: Penna, 2003). מכל מקום, הידע האמפירי שנצבר דך על היחס בין תכונות רשת הרחובות ונפח תנועה בעיר עשוי לשפר את היכולת להעריך ולחזות השפעות של תכנון שימושי קרקע עיצוב עירוני על תנועה בעיר (Scoppa et al., 2009).

מאמר זה נציג את הגישה המבנית לחיזוי תנועה בעיר תוך זתרכוזת בתנועת כלי רכב, ונדון בפוטנציאל ובמגבלות שלה בשאלות המתודולוגיות הניצבות בפני המבקש ליישמה, וזאת תוך הדגמת יישומה בהערכת התפלגות תנועת כלי רכב בערים עננה ואשדוד.

## מהי הגישה המבנית-טופולוגית לחיזוי תנועה ?

הבדיל מהגישה המסורתית לחישוב נגישות שבה נמדדת דרגת נגישות של רחוב בעיר, ושל מקום בכלל, על פי מידת הקירבה ולו למיקומם של תפקודים עירוניים המהווים את היעד לתנועה, גישה המבנית נמדדת דרגת הנגישות של רחוב על פי מידת קירבתו כל הרחובות האחרים במרחב העירוני הנבחן, זאת מבלי להתחשב קיומם של תפקודים עירוניים (Batty, 2009; Kropf, 2009). נגישות ול רחוב (או קטע רחוב) בגישה המבנית נמדדת על פי דרגת מרכזיותו טופולוגית ברשת הרחובות בכללותה. טופולוגיה של רשת רחובות עיר מיוצגת כגרף קשירות (connectivity graph), שבמסגרתו רחובות

החוג לגיאוגרפיה וסביבת האדם, המעבדה לניתוח המרחב העירוני אוניברסיטת תל אביב

באיור 2 למשל, הרחובות 1-1 ו-3 מפותלים יותר מרחוב 2, ולכן נחלקין לקווי ציר אחדים. כתוצאה מכך, מתקבלים שישה קווי ציר במקום שלושה רחובות ומשתנה המבנה הטופולוגי. ההתייחסות לצירי חזותיים נועדה לייצג את האופן בו נתפשת הסביבה בה נע האדכ ניתוח היחס הטופולוגי בין קווי הציר, המהווים את היחידות הבסיסיות של הניתוח, מסתמך ביסודו על שלושת מדדי המרכזיות הטופולוגיות שתוארו למעלה, קשירות (Degree), קירבה (Closeness) ותיווך (Betweenness), אלא שבמסגרת המתודולוגיה של תחביר המרחו מדדים אלה מכונים בהתאמה קשירות (Connectivity), אינטגרציה (Integration) ובחירה (Choice) (Hillier, 1996). בנוסף למדדים אלו נעשה שימוש בממד אינטגרציה לוקאלית (Local integration) המבטא את קרבתו הטופולוגית של קו ציר מסוים בהתייחס לסביבתו הסמוכה (ברדיוס של מרחק טופולוגי קבוע).

מודל לחיזוי נפח תנועת כלי רכב בעיר שנבנה בגישה מבנית מסתמן בדרך כלל על נתוני נפח תנועת כלי רכב הנאספים באמצעות סקר תנועה ברחובות נבחרים או באמצעות מכשירי GPS המותקנים ברכב ועל נתונים מחושבים המייצגים את דרגת המרכזיות הטופולוגית של רחובות או קווי ציר (קטעי רחובות ישרים). ניתוח סטטיסטי באמצעות נוסחת רגרסיה ומקדם קורלציה ( $R^2$ ) מאפשר לברר עד כמה התפלגות דרגת המרכזיות הטופולוגית מסבירה את התפלגות נפח תנועת כלי רכב ברשת הרחובות.

המחקרים האמפיריים שנערכו בגישה המבנית מלמדים על הפוטנציאל שלה להסבר וחיזוי התפלגות נפח תנועת כלי רכב ברשת רחובות. חלק ניכר מהמחקר האמפירי בגישה זו נערך בעיר לונדון. המחקר הראשוני בלונדון נערכו על בסיס מפת צירים (axial map) של העיר (Jiang 2009, Penn et al., 1998), ובהם התגלה מקדם קורלציה גבוה בי נפח תנועת כלי הרכב לבין ערכי המרכזיות הטופולוגית ובמיוחד עם ערך שי אינטגרציה לוקאלית (ברדיוס 5) שנע בין 0.63 ל-0.77. בהתאם לאזורים שונים בעיר. התחשבות ברוחב הרחוב בנוסף לערך המרכזיות הטופולוגית שיפרו את המתאם הסטטיסטי עד לכדי הסבר של 83% מהשונות ( $R^2=0.83$ ) בהתפלגות כלי רכב בכלל האזורים שנבחנו (Penn, 2003).

ממצאים אלה הם לא לגמרי אינטואיטיביים ועשויים אף להפתיע, וזאת בעיקר בהתחשב בעובדה שהניתוח נערך בהסתמך על רשת הרחובות בלבד ותוך התחשבות במרחק טופולוגי ולא במרחק מטרי. נשאל השאלה האם אכן המרחק הטופולוגי הוא המרחק הרלוונטי לתנועה בעיר? בניסיון לברר שאלה זו השתמשו היליר ואידה, Hillier and Iida (2005) בנתוני סקר התנועה שערך בלונדון עליו התבסס המחקר שתואר למעלה (Penn et al., 1998) כדי לבחון את רמת המתאם בין נפח תנועת כלי רכב לבין דרגת המרכזיות ברשת הרחובות על סמך מדידו של שלושת סוגי המרחק - טופולוגי, זוויתי ( $angular$ )<sup>1</sup> ומטרי. בחינו זו נערכה על סמך מקטעי רחובות בארבעה אזורים שונים בלונדון השוואה בין סוגי המרחקים העלתה שברוב המקרים המתאם היה גבוה יותר כאשר המדידה נערכה על פי מרחק זוויתי (מקדם קורלציה של 0.68-0.83) ומרחק טופולוגי (מקדם קורלציה של 0.62-0.82) בהשוואה למדידה על סמך המרחק המטרי (0.47-0.64).

מאוחר יותר העלה טרנר (Turner, 2007) את שאלת נחיצותה של מפת צירים כאשר שאל: מדוע לא להסתמך על מפת רשת הרחובות בלבד לצורך מתן תשובה נערך ניתוח משווה בין רשת צירים לרשת רחובות באזור ברנסברי (Barnsbury) בצפון לונדון. ממצאי מחקר זה מראים שהסתמכות על שמות רחובות (named streets) מאפשרת לנבא נפח תנועת כלי רכב בצורה טובה יותר בהשוואה לקווי ציר. נמצא גם שלהבדיל ממחקרים קודמים ולפיהם התכונה הטופולוגית של קירב (Closeness או Integartion) נמצאה דומיננטית בניבוי תנועת כלי רכב במחקר זה נמצא מדד התיווך (Betweenness) כמנבא טוב יותר. בדומה למחקרים קודמים מדידת המרחק על פי מרחק זוויתי או טופולוגי

שאינם קשורים ישירות, ו-Pjik מציינ את המסלולים הקצרים בין j ו-k העוברים דרך הרחוב הנבדק. בדרך זו נמדדת השתתפותו היחסית של הרחוב הנבדק במסלולים הקצרים המחברים את רחובות העיר, ומתוארת מרכזיותו כרחוב מעבר.

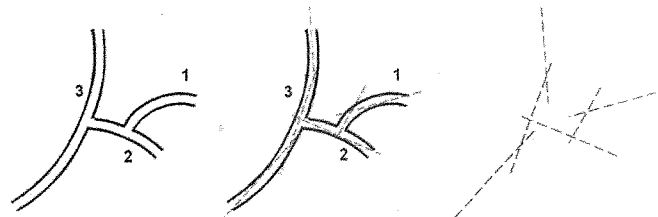
בטבלה 1 מוצגים ערכי מדדי המרכזיות שחושבו לרשת הדרכים המופיעה בדוגמא ההיפותטטית של 'מבנה העפיפון' המוצגת באיור 1. דוגמא זו ממחישה היטב את הנחיצות של כל אחד ממדדי המרכזיות ואת ההבדל ביניהם. רחוב מס' 6 (הרחוב ההיקפי) הוא הרחוב עם ערך קשירות (Degree) הגבוה ביותר; ישנם שישה רחובות שיש לו איתם קשר ישיר. רחובות מס' 4 ו-5 לעומת זאת, מצטיינים בערך קירבה (Closeness) גבוה יחסית (0.64) לכל רחובות העיר (קשר ישיר או עקיף) בזכות המרכזיות הטופולוגית שלהם ברשת הרחובות. לעומתם, רחוב מס' 3 בולט בערך תיווך (Betweenness) הגבוה ביותר (0.39), בעיקר בזכות היותו הרחוב היחיד המשמש למעבר מרחובות 1 ו-2 לכלל רחובות העיר. מדדי המרכזיות מאפשרים איפוא לתאר את מרכזיותו של כל רחוב ברשת הדרכים: עד כמה הוא מקושר ישירות לרחובות אחרים; עד כמה הוא קרוב לכלל רחובות העיר; ועד כמה עוברים דרכו כדי להגיע מרחוב לרחוב בעיר?

טבלה 1: מדדי מרכזיות לרשת הרחובות היפותטטית המוצגת באיור 1

רחוב מס'	Degree	Closeness	Betweenness
1	1	0.31	0.00
2	2	0.43	0.22
3	3	0.60	0.39
4	5	0.64	0.23
5	5	0.64	0.23
6	6	0.60	0.10
7	3	0.50	0.00
8	4	0.53	0.02
9	4	0.53	0.02
10	3	0.50	0.00

במסגרת הגישה המבנית לחיזוי תנועה בעיר בולטת המתודולוגיה המכונה תחביר המרחב (space syntax). גם מתודולוגיה זו מבוססת על ניתוח טופולוגי אך ייחודה הוא שהיא אינה מסתמכת על הרחובות כיחידות הבסיסיות של הניתוח אלא על קווי ציר (axial lines) שנועדו לייצג את הצירים החזותיים בסביבה הבנויה. העיקרון המנחה בניית מפת צירים (axial map) למרחב עירוני הוא כיסוי חללים (בדרך כלל על סמך רשת הרחובות) במינימום קווי ציר (ראו המחשה באיור 2).

איור 2: רשת רחובות (משמאל), כיסוי קווי ציר של רשת רחובות (אמצע) ומפת רשת קווי ציר (מימין)



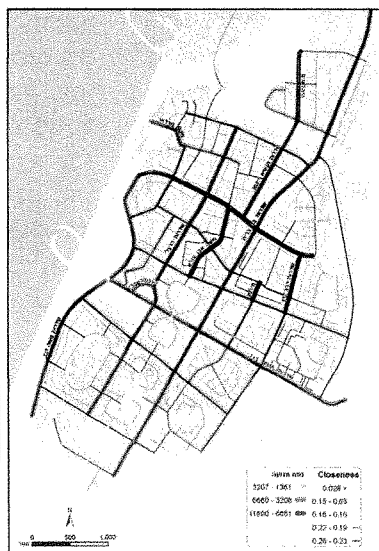
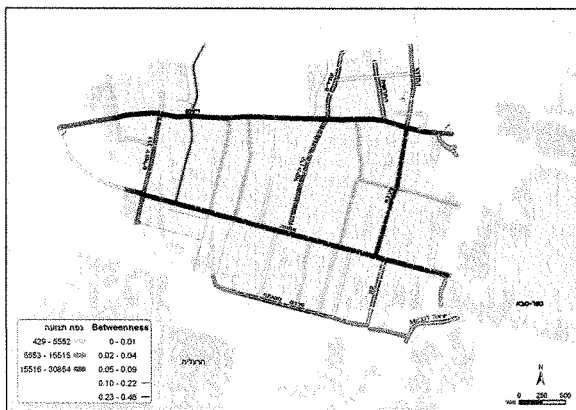
<sup>1</sup> מרחק טופולוגי מוגדר על פי מספר הפניות, כאשר כל פנייה שווה ליחידת מרחק טופולוגי. להבדיל ממרחק טופולוגי שבו כל פנייה, ולא חשוב גודל הזווית שלה, שווה ליחידת מרחק אחת, במרחק זוויתי (או גיאומטרי), יש התחשבות בזווית הפנייה. ככל שהפניות במסלול נתון הן בזווית גדולה יותר כך גדל המרחק. מרחק זוויתי מחושב על פי הצטברות של זוויות הפניות כאשר הצטברות של 90 מעלות שווה ליחידת מרחק אחת. כך לדוגמא, קטע של מסלול שבו יש שתי פניות (שתי יחידות מרחק טופולוגי) שכל אחת מהן שווה ל-45 מעלות, נחשב ליחידת מרחק אחת של מרחק זוויתי.

משלים לראשון, מוצע מפרספקטיבה מערכתית המייחסת את היכולת להסבר תנועה, לעובדה שלרשת הרחובות יש תכונות של עולם קטן (small world). תכונות אלה מעידות ככלל על מבנה יעיל של מעבר אינפורמציה וחומר ברמה הלוקלית והגלובלית (בהשוואה לרשת אקראית או רגולרית), ולכן קיומן ברשת הרחובות מעידה על מבנה יעיל של תנועה. יתירה מכך, רשת הרחובות בעיר מאופיינת לעיתים קרובות גם בהתפלגות גודל לפי חוק החוקה (power law), המכונה רשת חסרת קני"מ (Scale free network), המהווה ביטוי מובהק למבנה יעיל כזה? (ראו למשל: Jiang, 2009).

### יישום הגישה המבנית ברעננה ואשדוד

בניית מודל להערכת נפח תנועת כלי הרכב ברעננה ובאשדוד, מסתמכת על נתונים שנאספו באמצעות סקרי תנועה<sup>3</sup> שבוצעו ביוזמת העיריות בערים אלה, ועל נתונים מחושבים של התפלגות דרגת המרכזיות הטופולוגית של רשת הרחובות. סקרי התנועה נערכו בימי חול בין השעות 6:00-20:00. נתוני נפח התנועה ברעננה מסתמכים על 29 רחובות ובאשדוד על 37 רחובות. הניתוח שיוצג כאן נערך על סמך ממוצע יומי ללא הבחנה בין השעות של היום. במחקר זה בחרנו להתרכז בחישוב דרגת המרכזיות על פי שמות רחובות (כפי שהודגם באיור 1). דרגת המרכזיות הטופולוגית חושבה על פי שלושה מדדים - קשירות (Degree), קירבה (Closeness) ותיווך (Betweenness) - באמצעות התוכנת Pajek. תוצאות המדידה בשתי הערים מוצגות בטבלה 2. ניתן להתרשם מהן שבכל אחת משתי הערים קיים מתאם סטטיסטי משמעותי ומובהק בין התכונות הטופולוגיות לבין נפח התנועה, כאשר בכל אחת מהן ניתן להסביר באמצעות תכונה טופולוגית יחידה כמעט 50% מהשונויות בהתפלגות כלי הרכב ( $R^2=0.48$ ;  $p<.001$ ). מעניין לראות שברעננה התכונה הטופולוגית הדומיננטית היא תיווך (Betweenness) בעוד שבאשדוד התכונה של קירבה (Closeness) דומיננטית יותר. בשתי הערים נמצאה התאמה גבוהה עם התכונה הטופולוגית של קשירות (Degree). עקב ההתאמה הרבה בין ערכי המדדים הטופולוגיים עצמם, אין שיפור בדרגת המתאם כאשר ישנה התחשבות בכלם יחד במסגרת רגרסיה מרובה; באשדוד מקדם הקורלציה ( $R^2$ ) עלה ל-0.52 בעוד שברעננה נותר כמעט ללא שינוי (0.49).

איור 3: מיפוי נפח תנועת כלי הרכב (ממוצע יומי) על רקע התפלגות דרגת המרכזיות הטופולוגית ברשת הרחובות של רעננה ואשדוד. באשדוד (מימין) מוצגת התפלגות ערכי מדד הקירבה (Closeness) וברעננה (משמאל) ערכי מדד התיווך (Betweenness)



זמוגדר על פי דרגת הפיתול או מספר הפניות של רחובות, נמצאה נדיפה על פני מדידת מרחק מטרי.

אחזקרים שנערכו בערים נוספות מחזקים את המגמות המסתמנות לאור זמחקרים שנעשו בלונדון. במחקר שנערך בעיר יבלה בשבדיה, נמצא מקדם קורלציה של 61%-77% בין דרגת המרכזיות הטופולוגית של רחובות לתנועת כלי רכב שהוערכה על סמך נתונים GPS המותקנים במוניות (Jiang et al., 2008). בדומה למחקר הקודם, במחקר זה נמצא מתאם סטטיסטי גבוה יחסית באמצעות דרגת המרכזיות הטופולוגית של מדד התיווך (Betweenness) המחושבת על סמך רשת הרחובות. נמצא דומה התקבל במחקר שנערך בהונג קונג שם נמצא מקדם קורלציה של 0.35-0.69 (Jiang and Liu, 2009) בין דרגת המרכזיות הטופולוגית של רשת הרחובות לבין נפח תנועת כלי רכב. גם במחקר זה נמצא שייצוג טופולוגי של רשת הרחובות על פי שמות הרחובות נדיף על פני ייצוג טופולוגי לפי קווי ציר. ממצאים אלה מצביעים על כך שקווי הציר שנמצאו רלוונטיים להולכי רגל רלוונטיים פחות להתנהגות של נהגים בבחירת מסלולי נסיעה. בזכות אופייה הטופוגרפי זמוגון של הונג קונג גם ניתן היה ללמוד שהיכולת לנבא תנועת כלי רכב באזורים בהם דגם הרחובות הוא מפותל היא פחותה בהשוואה לאזורים בהם דגם הרחובות הוא ישר זווי.

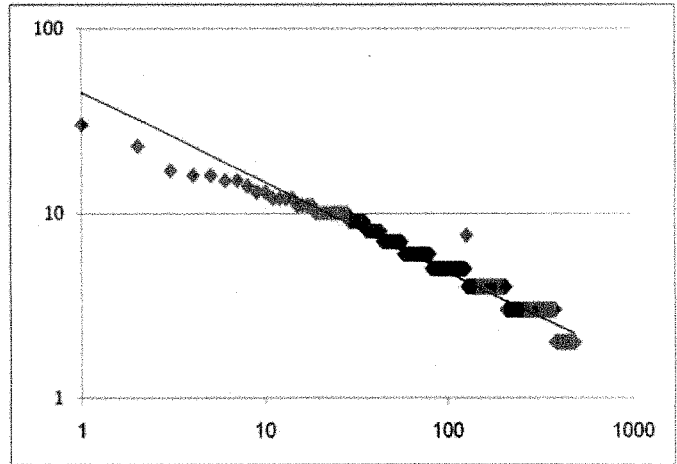
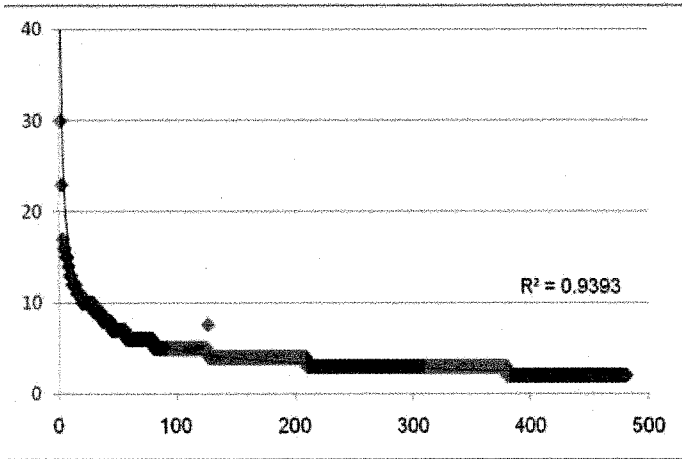
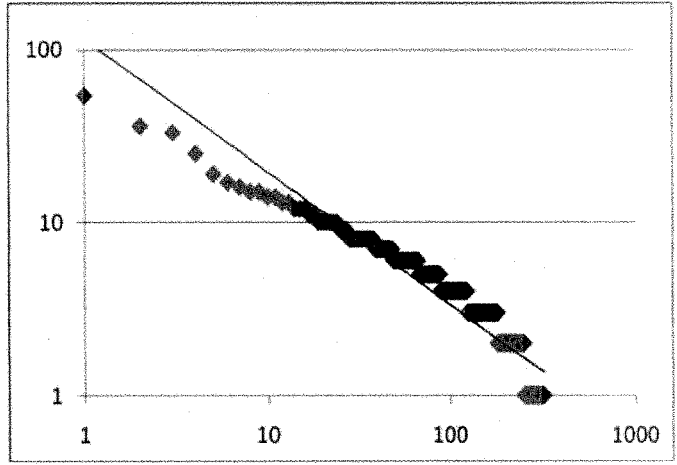
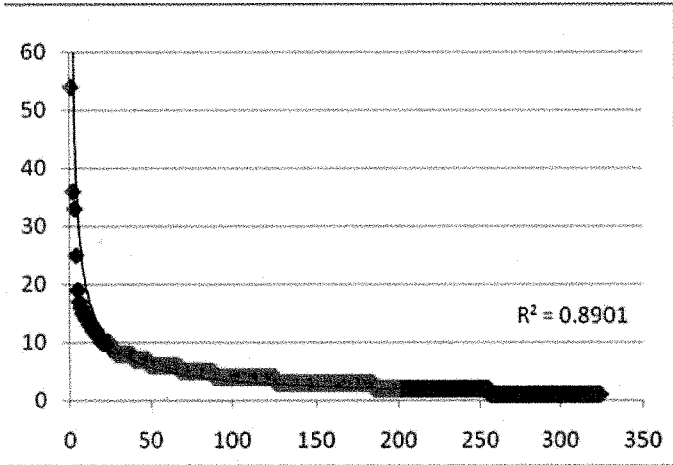
אחזקרים אחרים לא הסתפקו בתכונות הטופולוגיות של רשת הרחובות ולא ניסו לשלבן יחד עם תכונות מרחביות אחרות הרלוונטיות לתנועה של כלי רכב כדי לשפר את רמת החיזוי וההסבר. כך למשל, במחקר שנערך על אזורים שונים במטרופולין של אטלנטה, ארה"ב (Scoppa et al., 2009), נמצא מקדם קורלציה של 0.51 עד 0.55 וברמת מובהקות בווה בהסבר התפלגות של כלי רכב על פי שלושה משתנים: ערך מדד

זתיווך (Betweenness), רוחב הרחוב ומרחק ממרכז העיר. זתמונה המתקבלת היא איפוא שתכונות טופולוגיות של רשת הרחובות שלעצמן עשויות לשמש לניבוי תנועה, וזאת מבלי לכלול מטריצות מוצא עד ואף ללא התחשבות כלל בהתפלגות שימושי קרקע. העמדה המתגבשת אור ממצאים אלה היא שהמבנה המרחבי (spatial configuration) של רשת הדרכים, ובמיוחד כאשר הוא מיוצג בצורה טופולוגית והמרחקים בו מדדים על פי מרחק טופולוגי או זווי, קשור באופן מהותי להתפלגות פח תנועה בעיר. יתר על כן, יש הגורסים שמבנה זה אחראי לא רק לתנועה בעיר אלא גם להתפלגות שימושי קרקע, כאשר יחס הגומלין בין זשניים מבסס את מערך הפעילות בעיר (Hillier, 1996).

זחת השאלות המעניינות בהקשר זה היא: מדוע המבנה המרחבי הטופולוגי של רשת הרחובות מצליח לנבא התפלגות ננועה ברשת זו? הסבר אחד מוצע זהפרספקטיבה של התנהגות הפרט, לפיו הפרט שואף למקסם יעילות על ידי כך שהוא מביא למינימום את מרחקי זתנועה, ומרחקים אלה הם טופולוגיים ייון שהם תואמים את תפיסתו וייצוגו זקווגיטיבי של האדם (Hillier, 1999). כך למשל, מסלול תנועה בין רחובות זמרכזיותם הטופולוגית נמוכה עובר דרך רחובות בעלי מרכזיות טופולוגית גבוהה ותר (Kuipers et al., 2003). הסבר שני,

להכרת התכונות של עולם קטן ורשת חסרת קני"מ ראו: ברבאשי א.ל. (2004). סקרי התנועה באשדוד נערכו בשנת 2005 וברעננה נערכו בשנים 2003-2008. מיפוי רשת הדרכים בשתי הערים הסתמך על שכבות מידע מעודכנות לשנת 2005.

איור 4: התפלגות דרגת המרכזיות הטופולוגית של רחובות בערים רעננה (למעלה) ואשדוד (למטה). בכל ההתפלגויות הציר האופקי מייצג את רחובות העיר, ממויינים על פי ערכי המרכזיות הטופולוגית שלהם (לפי מדד קשירות (Degree)). והציר האנכי את ערכי המרכזיות של הרחובות. משמאל מוצגות ההתפלגויות עם קו מגמה על פי חוק חזקה (power law) ומימין מוצגות ההתפלגויות במערכת צירים לוגריתמית



אי לכך ערכי מדד התיווך (Betweenness) בשני הרחובות, אחוזו וויצמן, גבוהים במיוחד ותואמים את נפח התנועה הגבוה בהם.

**טבלה 2: מקדם הקורלציה ( $R^2$ ) בין ערכי מרכזיות טופולוגית שני רשת זרמים לבין נפח תנועת כלי רכב בערים רעננה ואשדוד**

עיר	Degree	Closeness	Betweenness
רעננה	0.439	0.253	0.484
אשדוד	0.366	0.483	0.272

\* כל הערכים הם ברמת מובהקות של לפחות 0.001 ( $p < 0.001$ )

כחלק מהניסיון להסביר את היכולת לנבא תנועת כלי רכב באמצעות רשת הרחובות, חושבו מדדים המהווים אינדיקטורים למידת היעילות של רשתות הרחובות בערים של רעננה ואשדוד: תכונות של עולב קטן (טבלה 3) והתפלגות דרגת מרכזיות של רחובות העיר (איור 4) כפי שניתן להתרשם מטבלה 3, רשתות הרחובות של רעננה ואשדוד תואמות את שתי התכונות של עולב קטן: א) דרגת הקשר בין הרחובות המצטלבים עם רחוב נתון (Cactual) גבוהה מהצפוי בדגם אקראי אקוויולנטי (Crandom); ב) המרחק הממוצע בין הרחובות (Lactual) גדול מהמרחק הצפוי בדגם אקראי (Lrandom) (לניסוח פורמלי שני המדדים ראו לדוגמה (בראבשי, 2004)). לא רק זאת, התפלגויות דרגת המרכזיות של שתי הערים (המוצגת באיור 4) נוטות להיות תואמות את ההתפלגות לפי חוק החזקה. ככלל, התפלגות מסוג זה מאפיינת

על רקע התפלגות התכונה הטופולוגית הדומיננטית בהסבר התנועה בכל אחת מהן. את ההבדל בין שתי הערים ניתן לייחס להתפלגות התפקודים המהווים מוקדי משיכה לכלי רכב ולדגם הרחובות שלהן. מיקומם של תפקודים עירוניים באשדוד נקבע כבר בשלב תכנונה במרכז העיר, ולכן רחובות שממוקמים במרכז העיר ומאופיינים בערכי קירבה טופולוגית (Closeness) גבוהים יחסית גם נפח התנועה גדול יחסית. הדגם ההיררכי המרחבי המאפיין את רשת הרחובות באשדוד תורם אף הוא למתאם בין נפח התנועה לערכי קירבה טופולוגית. ברעננה לעומת זאת, נפחי התנועה ובמידה מסוימת גם התפקודים שלה, נוטים להתפלג בעיקר לאורך שני רחובות ראשיים, אחוזה ו-ויצמן, החוצים את העיר לכל אורכה ומהווים כמעין שדרה לרשת הרחובות הקרובה לדגם שתי וערב. כתוצאה מכך, לרחובות אלה אין יתרון רב מבחינת קירבה טופולוגית אלא יותר כצירים עיקריים המשמשים למעבר בין חלקי העיר. בנוסף לכך, להבדיל מאשדוד, רעננה סמוכה לערים אחרות וצירים אלה משמשים למעבר לערים אחרות ובין ערים אחרות.

<sup>4</sup> ערך של Cactual מחושב על פי מדד 'דרגת הקלטריות' (Clustering coefficient), ערך של Lactual מחושב על פי מדד 'המרחק הטופולוגי הממוצע' (Average path length) בין הרחובות. הערכים האקוויולנטים בדגם אקראי מחושבים בהתאמה באופן הבא: Crandom =  $\log n / \log m$ ; Lrandom =  $m / n$ ; כאשר הסימן n מייצג את מספר הרחובות בעיר והסימן m את מספר הרחובות שקשורים לרחוב ממוצע בעיר (שווה לערך מדד הקשירות (Degree)).

## References

- ברבאשי א.ל. (2004) קישורים - המדע החדש של רשתות, ידיעות אחרונות וספרי חמד, תל אביב.
- Batty, M., (2009) Accessibility: in search of a unified theory. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36, pp.191-194.
- Cervero, R. (2006) Alternative Approaches to Modeling the Travel-Demand Impacts of Smart Growth. *Journal of the American Planning Association*, 72 (3), 285-295
- Crane, R. (2000) The influence of Urban Form on Travel: An Interpretive Review. *Journal of Planning Literature*, 15 (3), 3-23.
- Hillier B., Penn A., Hanson J., Grajewski T. and Xu J. (1993) Natural movement: or configuration and attraction in urban pedestrian movement, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 20, 29 - 66.
- Hillier, B. (1996) *Space is the machine*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hillier, B. (1999) The hidden geometry of deformed grids: Or, why space syntax works, when it looks as though it shouldn't., *Environment and Planning B: Planning and Design*, 26, 169-191.
- Hillier, B. and Iida, S. (2005) Network and psychological effects in urban movement. In: Cohn, A.G. and Mark, D.M. (eds.), *Proceedings of the International Conference on Spatial Information Theory, COSIT 2005*, Springer-Verlag: Berlin, 475-490.
- Jiang B., Zhao S., and Yin J. (2008) Self-organized natural roads for predicting traffic flow: a sensitivity study, *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, July, P07008.
- Jiang B. (2009) 'Ranking spaces for predicting human movement in an urban environment', *International Journal of Geographical Information Science*, 23 (7), 823-837.
- Jiang B. and Liu C. (2009) 'Street-based Topological Representations and Analysis for Predicting Traffic Flow in GIS', *International Journal of Geographic Information*, 23 (9) 1119-1137.
- Kropf, K. (2009) Aspects of urban form. *Urban Morphology*, 13 (2), 105-120.
- Kuipers, B., Tecuci D, Stankiewicz, B. (2003) The skeleton in the cognitive map: a computational and empirical exploration. *Environment and Behavior*, 35, 81-106.
- Penn, A. (2003) Space syntax and spatial cognition or why the axial line? *Environment and Behavior*, 35(1), 30-65.
- Penn, A., Hillier, B., Banister, D., & Xu, J. (1998) Configurational modeling of urban movement networks. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 25, 59-84.
- Scoppa M., French S., Peponis J. (2009) The effects of street connectivity upon the distribution of local vehicular traffic in metropolitan Atlanta, *Proceedings of the 7th International Space Syntax Symposium*.
- Turner A. (2007) From axial to road-centre lines: a new representation for space syntax and a new model of route choice for transport network analysis, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 34, 539-555.

שת היררכית ומעידה על כך שישנם מעט רחובות בעלי דרגת מרכזיות זהה מאד והרבה רחובות בעלי דרגת מרכזיות נמוכה מאד. תוצאות לה מספקות הסבר, חלקי לפחות, לעצם האפשרות לבוא נפח תנועת לה רכב בערים אלה על סמך רשת הרחובות שלהן בלבד.

### טבלה 3: מקדמים של עולם קטן של רשת הדרכים בערים

#### רעננה ואשדוד

עיר	N	M	Lactual	Lrandom	Cactual	Crandom
רעננה	325	4.129	4.236	4.076	0.196	0.0123
אשדוד	482	4.153	5.267	0.433	0.268	0.0086

קרא: N - מספר הרחובות; M - ממוצע רחובות שכנים; Cactual - דרגת קשר הממוצע בין הרחובות המצטלבים עם רחוב נתון; Crandom - דרגת קשר האקטואלי הממוצע בין הרחובות המצטלבים עם רחוב נתון בדגם קראי אקוויולנטי Cactual; Lactual - מרחק טופולוגי ממוצע מרחוב נתון ל: הרחובות האחרים; Lrandom - מרחק טופולוגי ממוצע מרחוב נתון לכל רחובות האחרים בדגם אקראי אקוויולנטי.

### סיכום ומסקנות

פוטנציאל של הגישה המבנית להערכה וחיזוי של תנועת כלי רכב וזג והודגם במאמר זה באמצעות חקירה אמפירית שנערכה בערים גננה ואשדוד. מהמחקר שנערך בגישה זו עד כה הוברר שייצוג ופולוגי של רשת הדרכים וערכי מרכזיות של רחובות שנמדדים ל פי מרחקים טופולוגיים או זוויתיים, נוטים להיות תואמים ת הכמות היחסית של נפח תנועת כלי הרכב בהם. יחד עם זאת, תוצאות המתקבלות מחקירה של ערים שונות בעולם אינן אחידות זן מותרות מספר שאלות עקרוניות פתוחות בנוגע למרכיבי היסוד ל מודל תחבורה מבני: מהי התכונה הטופולוגית הדומיננטית ל Closenes או Betweenness); כיצד צריך לייצג טופולוגית את שת הרחובות (שמות רחובות או קווי ציר); ומהו סוג המרחק שלפני ריך לחשב את דרגת המרכזיות ברשת הרחובות (טופולוגי, זוויתי ו מטרי)?

תן מענה לשאלות אלה חיוני לגיבושה של גישה מבנית יישומית תכנון תחבורה. לצורך כך נחוצים מחקרים אמפיריים נוספים הם ייבחנו מרכיבי מודל התחבורה המבני במגוון טיפוסים ערים עם אפיינים מורפולוגיים, תפקודיים וגיאוגרפיים שונים. מכל מקום, עובדה שלישום הגישה המבנית נחוץ מידע גיאוגרפי על רשת דרכים בלבד, המצוי כיום בידי כל הרשויות המקומיות ובידי גופים עוסקים בתכנון תחבורה בישראל, מקנה לה כבר כיום יתרון יחסי תכנון תחבורתי בקנה מידה לוקאלי וביישומים שאינם מחייבים זמ חיזוי גבוהה.

מסגרת מחקר המשך למחקר שהוצג כאן, נבדקות דרכים לשיפור מודל המבני שנבנה לערים רעננה ואשדוד באמצעות התחשבות תכונות פיזיות כדוגמת רוחב ואורך הרחוב, במיקומו ביחס למרכז עיר, בהתפלגות המרחבית של שימושי קרקע כדוגמת מסחר ומוסדות יבור, וזאת תוך הבחנה בין שעות שונות של היום. מתוכננת גם רחבתה של בדיקה זו לערים נוספות בישראל, שנבדלות בדגם רחובות, במערך המרחבי של שימושי הקרקע, בטופוגרפיה ובקשר תחבורתי שלהן עם סביבתן.

### הבעת תודה

ני מבקש להודות בזאת למחלקות התנועה בערים רעננה ואשדוד ל העזרה בקבלת נתוני סקרי התנועה, ולשרון מרק ולרן גולדבלט, החוג לגיאוגרפיה באוניברסיטת תל אביב, על עזרתם בארגון ועיבוד נתונים.