

חלוקה לאזורי זיקה – ביקורת של הגישות הקיימות והצעה של מתודולוגיות רשתית ומבוססת ניתוח אשכולות לחלוקה לקהילות¹

עדו קליין

תקציר

מדינת ישראל מחולקת לרכיבים שונים על ידי גופים רבים למטרות כאלה ואחרות, חלקן עבור צרכים תפעוליים בעיקרם וחלקן עבור צרכים תכנוניים בעיקרם. החלוקה נובעת מהצרכים הרלוונטיים עבור כל אחד מהשחקנים הקיימים, על ידי חלוקה למחוזות/נפות/מרחבי תכנון. ברמה התכנונית, פירוק המרחב למרחבים תפקודיים יכול לסייע בפירוק הבעיה הגדולה של תכנון למספר בעיות קטנות יותר, שהינן ברות פתרון קל יותר ומכילות כמה שפחות סתירות אחת אל מול השנייה. קיימות מספר חלוקות רלוונטיות בהקשר זה – חלוקה למטרופולינים שהתבצעה על ידי הלמ"ס, חלוקה לאזורי תפקוד עירוניים (FUA) שהתבצעה על ידי הלמ"ס בהשראת ארגון ה-OECD, וחלוקה למרחבי תכנון שהתבצעה במסגרת התכנית האסטרטגית המרחבית על ידי מינהל התכנון. כל מערכת מתבססת על מקורות מידע, תהליכי עיבוד והנחות השונים זה מזה. מאמר זה מבקש לבצע הערכה של השיטות הקיימות על כלל שלביהן, להצביע על נקודות תורפה בהן (כמו הנחות לגבי קיום ליבה מטרופולינית, חשיבות של מרחקים אוויריים ורצף עירוני), ולנסות להציע צורת חלוקה חדשה המתבססת על אלגוריתמים ליצירת קהילות וניתוחי אשכולות המנסה להימנע מנקודות התורפה מהן סובלות השיטות הקיימות. תתבצע הערכה של השיטות באמצעות מטריצת מוצא ויעד של הסקר הסלולרי, רשת הדרכים הארצית ומטריצת זמני נסיעה הנגזרת ממנה. לבסוף יתקיים דיון לגבי אתגרים בשיטות שהוצעו ובמקורות הנתונים הקיימים, ותהיות לגבי שימוש במידע קיים בנושא זה.

מילות מפתח
אזורים תפקודיים
אלגוריתמים לזיהוי
קהילות ברשת
מטריצת מוצא-יעד
סקר סלולרי

קליין, ע'. (2026). חלוקה לאזורי זיקה – ביקורת של הגישות הקיימות והצעה של מתודולוגיות רשתית ומבוססת ניתוח אשכולות לחלוקה לקהילות. תכנון, 23 (1).

מבוא

בשנים 2018-2019 התקיים בישראל, ביוזמת ומימון אגף תכנון וכלכלה במשרד התחבורה, ובביצוע חברות מובי וממת, הסקר הסלולרי הארצי.² הסקר התבצע על מנת לספק נתונים עבור המודל הארצי שתוכנן אז.³ סקר זה שאף לתת הערכה של תנועות במרחב המחולק ל-1270 אזורי תנועה, נסיעות של למעלה מ-1.5 ק"מ, של אזרחי ישראל מעל גיל 8, ברמה יומית. הסקר התפרסם לציבור באמצע שנת 2021 באתר דאטה גוב כחבילת נתונים עם קבוצת דוחות המתארות את המתודולוגיה על בסיסה נערך, ממצאים עיקריים של הסקר, וחבילת נתונים הכוללת, עבור ימות השבוע, שישי ושבט, מטריצות מוצא יעד המתארות כמות נסיעות בין אזורי התנועה בישראל בשעות היום השונות.

נתונים אלו הינם ברי חשיבות עליונה בתכנון, לביצוע שלל ניתוחים – החל כחומר גלם ותיקוף עבור מודלים תחבורתיים, עבור במיפויים לצורכי תכנון המבקשים להבין תפקוד של מרחבים כאלה ואחרים, וכלה בתכנון של תשתיות תחבורתיות ושל שימושי קרקע. נתונים אלו משמשים מתכננים רבים הצורכים אותם באמצעות מערכת תלתן של משרד התחבורה, או בצורתם הגולמית בידי חוקרים ואנשי מקצוע.⁴

היצירה של מטריצת מוצא יעד על בסיס נתוני "אמת" היוותה אז (ומהווה עד היום) פריצת דרך. עד אז, מטריצות מוצא יעד נוצרו או בצורה סינטטית – כפלט של שלבי היצירה-משיכה ופילוג של המודלים התחבורתיים (תחת הפרדיגמה של מודל התחבורה הארבע שלבי), באמצעות סקר הרגלי נסיעה הדוגם את הרגלי הנסיעה של אוכלוסייה באזור מסוים המחולק לאזורים ומנופח בשיטות סטטיסטיות שאינן חפות מהנחות, או באמצעות סקרים הדוגמים חלק

אוויר. קביעת האזורים וגבולותיהם נעשתה באופן סכימטי... תוך שילוב הידע המגוון של חברי הוועדה וכמעט ללא ויכוחים. (שם, עמוד 75).

בהמשך המאמר ברוצקוס מתאר את דרך החתחתים הפוליטי שחלוקה זו עברה, החל בפרמולה במינהל התכנון וכלה במעבר דרך הדרג הפוליטי עד קבלתה הסופית ב-1957. ברוצקוס אף מתאר רצון של שינוי קביעת הגבולות של המחוזות והנפות (שלבסוף התקבעו כ-14 נפות אדמיניסטרטיביות; 24 נפות התכנון שהוצעו על ידי אריה שרון בתכניתו "תכנון פיזי בישראל" לא נהפכו ליחידה תכנונית עליה מסתמכים) בעשורים מאוחרים יותר, אך הקשב הפוליטי לתכניות אלו לא היה בנמצא.

ניתן לראות כי החלוקה האזורית דאז התבססה על מומחיות מחד ופוליטיקה מאידך, ולא על תהליך סדור המאפשר לבחון חלוקה זו באמצעות תבחינים כאלו ואחרים.

ברצוני לשים דגש על חלוקות אחרות שבוצעו בשנים האחרונות (כן יש להבין בין "חלוקה" לבין "קביעת גבול"; שתיים מהחלוקות הנ"ל אינן אלא קביעות גבול) המתבססות על שיטה סדורה יותר להגדרת האזורים.

מטרופולינים

ב-2008 התקיים מפקד אוכלוסין על ידי הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה. סקר זה כלל נתונים לגבי יוממות של משקי הבית. הוחלט לאחר סקר זה להגדיר מטרופולינים באמצעות אמות מידה ברות מדידה.⁶ שיטת העיבוד (הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, 2014) עבדה בצורה הבאה: 1. זיהוי מוקדי תעסוקה באמצעות Inverse Distance Weighting (IDW) – שקלול מרחק הפוך (נמצאו 11 מוקדים, מהם נותרו 4 – חיפה, ירושלים, תל אביב ובאר שבע). 2. הגדרת קריטריונים ליוממות לאזורים אלו, ביניהם: א. סף יוממות של 20% מהמועסקים בשוב העובדים באזור התעסוקה של העיר הראשית. ב. רציפות מרחבית. ג. מרחק של למעלה מ-10 ק"מ מקצה רציפות המטרופולין לא נכלל בה. 3. חלוקות פנימיות לגלעין (שטח העיר הראשית), טבעת פנימית (סף יוממות של 30% ומעלה אל הגלעין), תיכונה וחיצוניות, וגזרות שהן חלקים של טבעות לפי רוחות השמיים (ראו איור 1).

אזורי תפקוד עירוניים

במרץ 25 פורסמה המתודולוגיה לחלוקת לאזורי תפקוד עירוניים על ידי הלמ"ס (הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, 2025). המתודולוגיה עליה הלמ"ס התבססה התבססה על הנחיות ארגון ה-OECD (OECD, 2019) להגדרה של FUA (functional urban area).⁷ הגדרה זו הנה פורמליסטית ומכילה שלבי חישוב מרובים, והם מובאים כאן בקצרה: 0. חלוקת המרחב לריבועים של ק"מ על ק"מ. 1. הגדרת מרכז אורבני: אזור הכולל למעלה מ-50,000 תושבים ומכיל ריבועים רציפים בצפיפות אוכלוסיה של 1,500 איש לריבוע או יותר. 2. הגדרת עיר: יחידה מונציפלית אחת או

מזערי מרשת הדרכים דוגמת סקרי חיץ וחגורה של תנועות חוץ חוץ⁵ (למשל באמצעות זיהוי של לוחיות רישוי), או עבור התחבורה הציבורית – סקרי on board השואפים להבין את המוצאים והיעדים של הנוסעים באוטובוס.

עם זאת, כל אחד מסקרים או הערכות אלו היוו דגימה או הערכה של הזיקות בין האזורים בישראל. הסקר הסלולרי, לעומת זאת, על אף שגם כלל ניפוח, התבסס על כמות גדולה מאוד של נתונים, היכולה לסייע בשפיכת אור על אזורים רבים שלא נמצאים בקדמת הבמה של התכנון בישראל.

במאמר זה אני מבקש לעשות שימוש בנתוני הסקר הסלולרי על מנת לנסות ולחלק את ישראל לאזורי זיקה, המהווים יחידות ברות הפרדה עבורן ניתן לבצע תכנון ייעודי או ניהול התואם לצורכי האזור. רבות החלוקות המרחביות הקיימות, המשרדים השונים לא חולקים את אותן גבולות המחוזות, ולכל חלוקה יש את ההיגיון (או את התהליך תלוי המסלול) עליו היא מסתמכת. שימוש בנתוני הסקר הסלולרי הינו הגיוני במיוחד לתכנון תחבורה, אך ככל שאנו מקבלים שרשת התחבורה היא הבסיס לכלל הפעילות האנושית, שימוש זה גם מאפשר תכנון כוללני של שימושי קרקע המיועדים לפעילות האדם.

בחלק הראשון של המאמר אסקור בקצרה חלוקות שונות שבוצעו בעבר בישראל ובעולם, ואפרט לגבי המגבלות השונות שחלוקות אלו סובלות מהן; בחלקו השני של המאמר אציג את שיטת המחקר – הנחות היסוד, מדדי ההערכה (מודולריות וצללית), שיטות החלוקה (לוביין, ליידן, ווקטראפ וניתוח אשכולות היררכי) ותהליך הניתוח; בחלקו השלישי של המאמר אציג את תוצאות חלוקות העבר אל מול התוצאות האלגוריתמיות שהתקבלו; בחלקו הרביעי אסכם ואגע במגבלות שיטות אלו ובשאלות פתוחות להמשך מחקר.

רקע תיאורטי

חלוקות קיימות בישראל

מחוזות ונפות

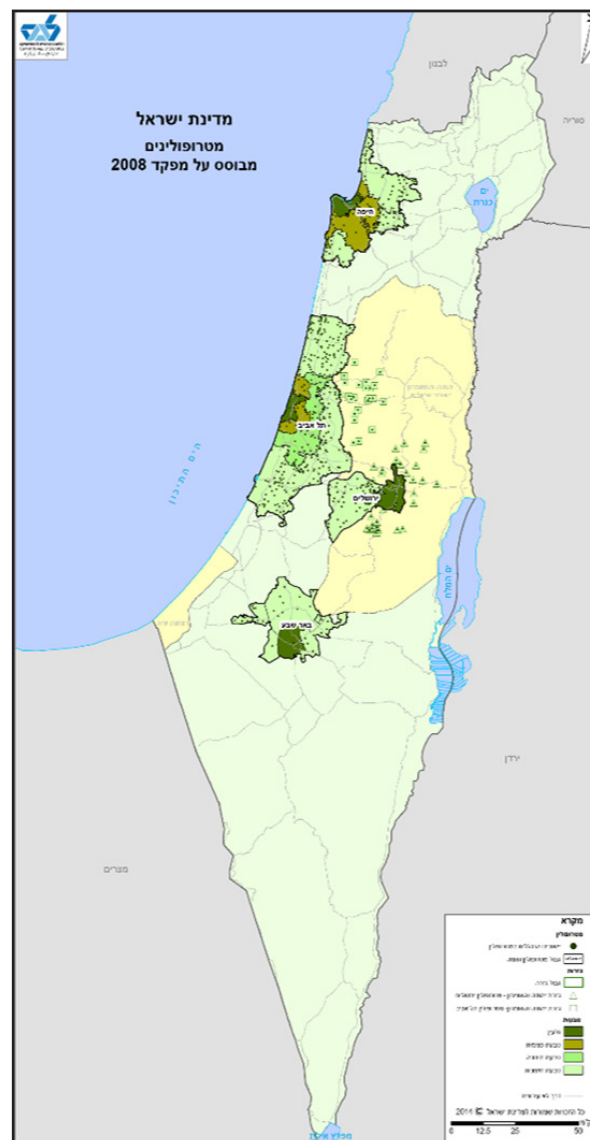
מאמרו של אחד מאבות התכנון העירוני אזורי בישראל, אליעזר ברוצקוס – "קביעת הגבולות של מחוזות ונפות אדמיניסטרטיביים בשנים הראשונות של המדינה" (ברוצקוס, 1988) – מתאר את צורת החלוקה של מרחבי התכנון השונים בישראל – מחוזות, נפות תכנון ונפות אדמיניסטרטיביות, כההליך הכולל, מחד, ידע קודם בתחום ללא טעמים:

ועדה מטעם החוג לרפורמה התישבותית... הכינה הצעה לחלוקת שטח המדינה... אזורים שנראו לוועדה כתאים בסיסיים לארגון האזורי של המדינה החדשה. המלאכה נעשתה במשך שעות ספרות בבית-קפה ברחוב בוגרצ' בתל אביב באחד הימים של סוף מאי 1948, כאשר הדיונים הופסקו פעמיים בגלל אזעקות

איור 2: אזורי התפקוד העירוניים



איור 1: חלוקה למטרופולינים



התכנית האסטרטגית המרחבית

ביוני 2024 התפרסמה התכנית האסטרטגית המרחבית של מינהל התכנון (מינהל התכנון, 2024). תכנית זו מעלה על נס את ה"אזור", שהוא קנה מידה מרחבי הנמצא בין רשות מקומית לבין מטרופולין ומחוז, ו"משקף הזדמנות לתכנון החוצה גבולות אדמיניסטרטיביים ומבוסס על לוגיקה תפקודית של תנועות יום-יומיות ודפוסי חיים". בניגוד לתכניות המוזכרות מעלה, חלוקה זו לא מציינת תבחינים ברורים לתחית אזור אלא משתמשת בעקרונות הבאים:

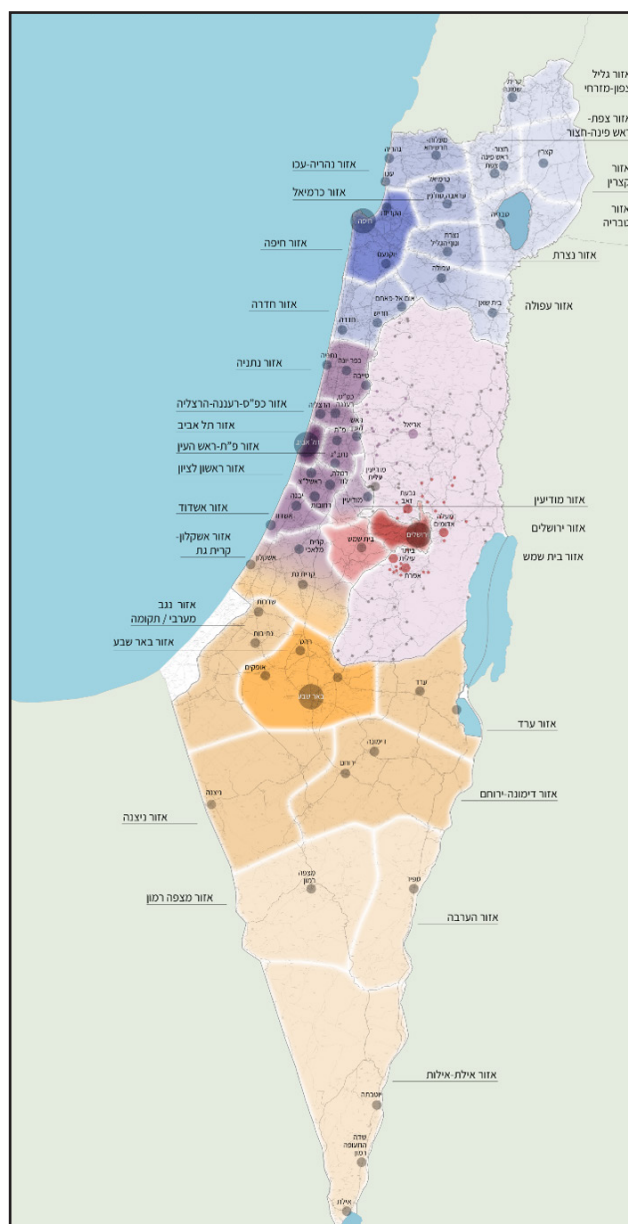
1. רציפות גאוגרפית; 2. קנה מידה מתאים לתפקוד יום יומי

יותר שלפחות חצי מתושביה גרים במרכז אורבני.⁸ 3. הגדרת איזור יוממות: יחידות מוניציפליות/אדמיניסטרטיביות רציפות לעיר מהן 15% מהתושבים עובדים בעיר.⁹ 4. אזור התפקוד העירוני = עיר + איזור היוממות שלה. ביצוע ניתוח זה גילה 14 איזורי תפקוד עירוניים בישראל¹⁰ (ראו איור 2). שתי חלוקות אלו מכסות חלקים משמעותיים מהמדינה; עם זאת, וחשוב מכך – הן מראות תהליך סדור שלא לוקח בחשבון מומחיות (או חלילה, תהליך פוליטי) אלא מנסה לעמוד באמות מידה מוסכמות מראש.

תשתיות תחבורתיות עתידיות דוגמת תחנות רכבת, בדיקת דפוסי יוממות אל המוקדים באמצעות מערכת תלתן¹¹ ובדיקת טווחי נסיעה של חצי שעה אל ומהמוקדים שונים. התכנית נמצאת במודעות לחלוקה שהוזכרה קודם לאזורי תפקוד עירוניים, אך בניגוד אליה מכסה את כלל שטח המדינה ולא רק את האזורים העירוניים. התכנית לא אומרת שאין זיקות בין האזורים אותן היא מחלקת; עם זאת, היא לא באה להכליל את האזורים שחולקו לרמות גבוהות יותר ונמוכות יותר, אלא מתייחסת לאזורים השונים כשווים (ראו איור 3).

סביב מוקדים; 3. מספר תושבים מספק; 4. מספר רשויות לא גבוה מדי; 5. הימצאות מנועי צמיחה, נכסים ועוגנים אזוריים; 6. ייחודיות, זהות מקומית והגדרה עצמית; 7. מאפיינים פיזיים וגאוגרפיים; 8. תשתית של שיתופי פעולה. צעדים 1 ו-2 בוצעו על בסיס שימוש במתודולוגיה קשיחה יותר, אך שלבים 3 עד 8 בוצעו באמצעות ניתוחים נוספים יחד עם סבבי התייעצות עם מומחים ובעלי עניין. שלבים 1 ו-2 בוצעו שלא על מצב קיים אלא על מצב עתידי – מדידת רמת עיור בדומה לאזורי התפקוד העירוניים, ומציאת מוקדים כתוצאה מכך. בנוסף בדיקות אלו כללו זיהוי של

איור 3: התכנית האסטרטגית המרחבית

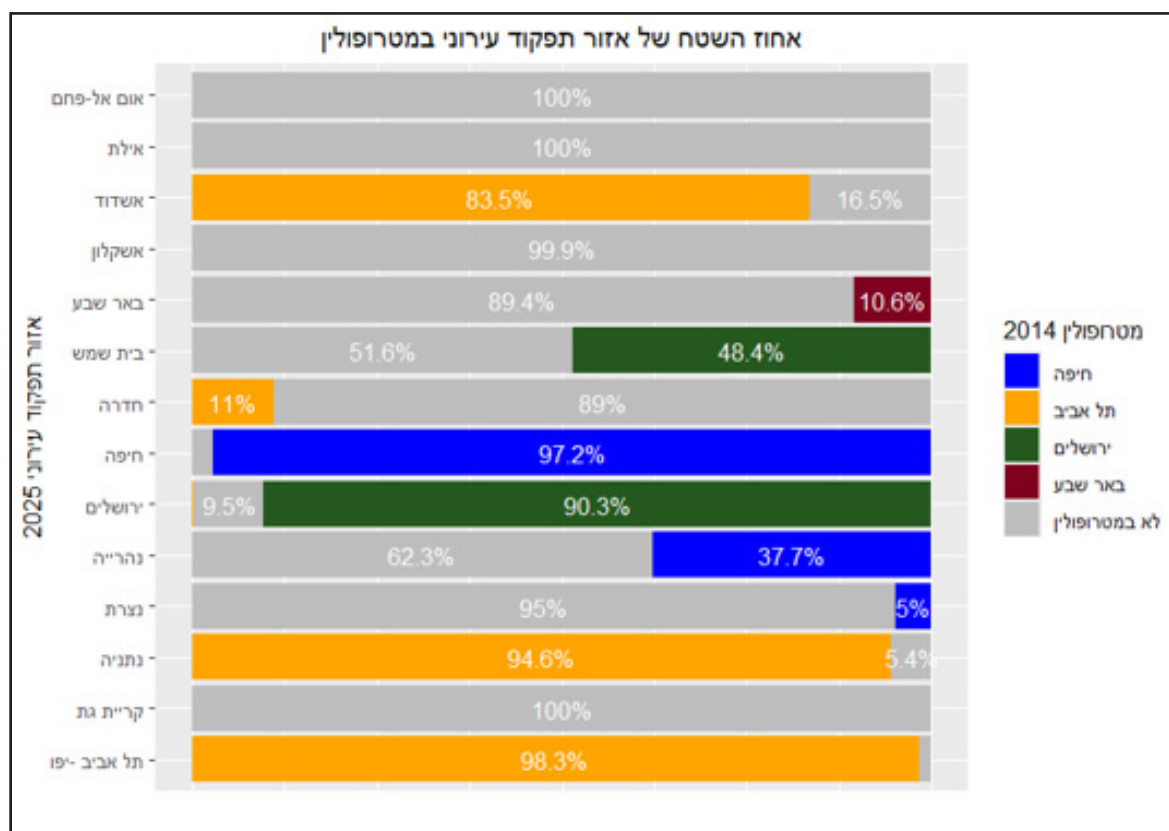


העירוניים. כמו כן, נדמה כי מטרופולין תל אביב נחתך על ידי מרחבי התכנון ל-6 חלקים שונים. בשחור – התכנית האסטרטגית המרחבית, בתכלת – אזורי תפקוד עירוני, באדום – חבולות משותפים בין מרחב תכנון לאזור תפקוד עירוני, בצבעים השונים – שטחי המטרופולין.

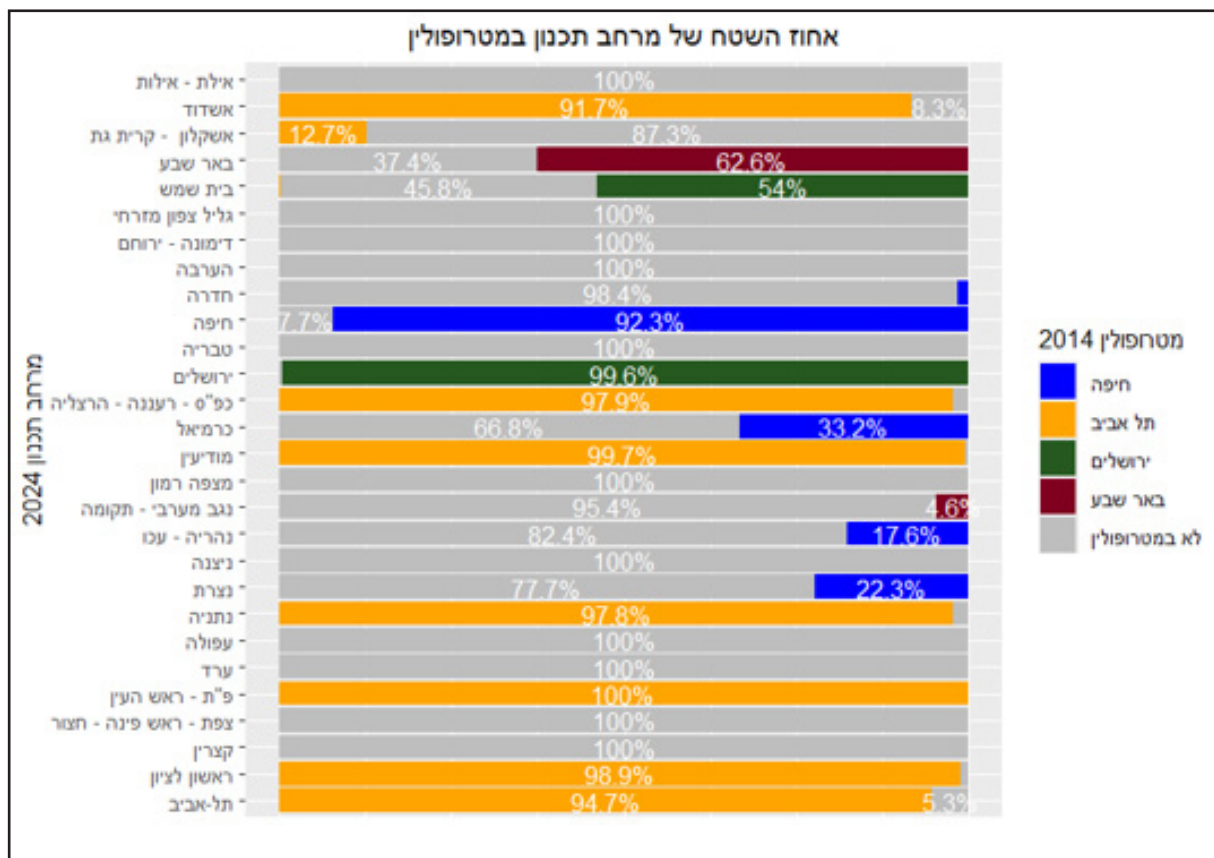
במידה ואנו מנסים להעריך את הדימיון והשוני בין החלוקות השונות, ברמת השטח בלבד, ניתן לראות (ראו איור 4 ואיור 5) כי אזורי התפקוד העירוניים נמצאים או במטרופולין אחד או כלל לא במטרופולין.

כאשר אנו משווים בין 3 השיטות (ראו איור 6), אנו רואים כי מרחבי התכנון בצפון ובדרום הינם מפורטים הרבה יותר מהפירוט המטרופוליני ומהפירוט של מרחבי התפקוד

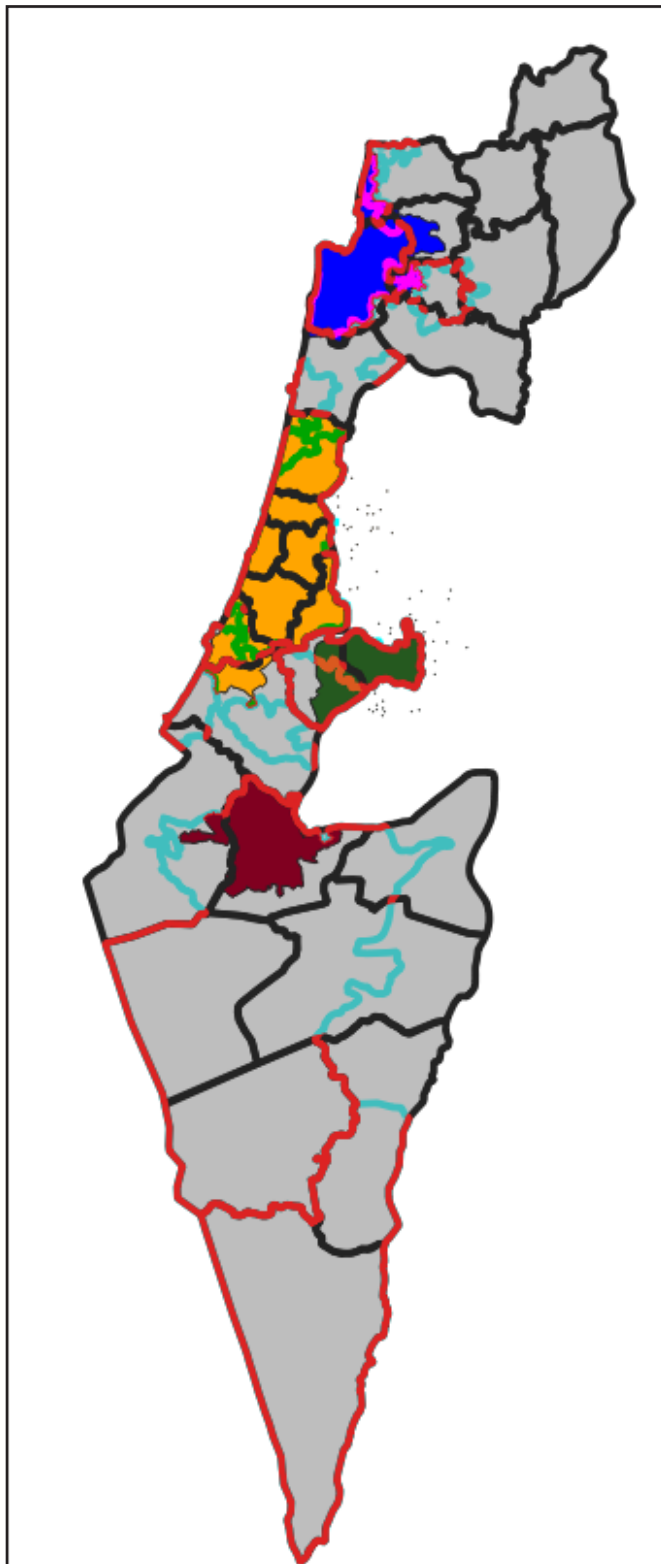
איור 4: חפיפות שטחים בין אזור תפקוד עירוני למטרופולין



איור 5: חפיפות שטחים בין מרחב תכנון למטרופולין



איור 6: השוואת שלוש השיטות. אדום – גבול משותף למרחב תכנון ולאזור תפקודי עירוני, תבלת / ירוק – גבול של אזור תפקודי עירוני בלבד, שחור – גבול של מרחב תכנון בלבד.



שימוש בשיטות רשתיות לחלוקה אזורית בעולם

השימוש באלגוריתמים מתורת הרשתות לחלוקת מרחבים אינו חדש. אלגוריתם לוביין (Blondel et al., 2008) הופעל על מטריצות מוצא יעד בבליגיה (Adam et al., 2008) ובשווייץ (Khiali-Miab et al., 2019) על מנת לבדוק חלוקות שונות של מדינות אלו. בבליגיה, השימוש התבסס על מטריצת היוממות בין רשויות מקומיות. בשווייץ, הנתונים הגיעו מהמודל הארצי התחבורתי. בשני המקרים, השימוש בנתונים מסקר סלולרי, למיטב ידיעת כותב שורות אלו, לא בוצע. מאמר זה מבקש להרחיב גישה זו ולהשתמש בנתוני הסקר הסלולרי הישראלי כמקור הנתונים העיקרי.

ביקורת והערכה של השיטות הקיימות

סוגי שיטות

ניתן לאפיין את החלוקות בכמה מישורים: 1. חלוקה מלאה או חלקית של המרחב. 2. חלוקה מבוססת זיקה למרכז מסוים, או בנויה על קשרים בתוך האזור. 3. חלוקה "אלגוריתמית" או בשיתוף מומחים. נסכם את הגישות שהובאו בטבלה 1.

עם זאת, ניתן לפרוט את ההנחות שכלל החלוקות לקחו בחשבון, ושיש להעמיד אותן בסימן שאלה, מעבר לחסרונות המהותיים הקיימים בחלוקות הקיימות.¹²

הנחת הליבה: כלל החלוקות מניחות מרכז של אזור. עם זאת, אזורים מרובי ליבות (פוליצנטריים) קיימים בעולם, ושיטות אלו לא מאפשרות את מציאתם.

הנחת ליבות מראש: כלל השיטות מציירות חץ מסוים – ליבה עירונית מונחת מראש, ובכך למעשה מניחות את המבוקש. שיטת חלוקת המטרופולינים פוסלת רבים מאזורי התפקוד העירוניים שהונחו מראש. השיטה של אזורי התפקוד העירוניים מניחה כי מרחב צפוף יותר מבחינת

אוכלוסיה ראוי להיחשב כ"עיר", ולכן גם כליבה של אזור, מה שלא בהכרח מתחייב על ידי המציאות.

הנחת יוממות כמגדירת אזור: הן חלוקת המטרופולינים והן חלוקת אזורי התפקוד העירוניים משתמשות ב"יוממות" בתור המגדיר המרכזי של אזור. עם זאת, קיימות נסיעות יומיות לשלל מטרות שאינן בהכרח עבודה, ושאינן בהכרח מתקיימות על ידי אנשים בצורה סדירה אבל בחתך של האוכלוסיה מתקיימות בצורה הסתברותית (כמו למשל צריכת שירותי בריאות). ניתן לחלוק על הצורך להכניסן אבל הוצאתן זקוקה להתייחסות.

הנחת הרציפות: כלל החלוקות מניחות רציפות של המרחב. עם זאת, המרחב לא דווקא מתנהג בצורה רציפה, שכן התנועה בו מתבססת על רשתות כבישים שונות נגישות שונה להזדמנויות לאזורים שיכולים להיות מאוד סמוכים אחד לשני, ובכך "לערבב" ולייצר איים של זיקות לאזורים אחרים.

הנחות היררכיה בין חלוקות: הגישה המטרופולינית מניחה מספר חלוקות – של טבעות שונות/גזרות אל מול הגלעין. עם זאת, כלל האצבע עליו מסתמכים (סף יוממות 30%) על מנת לסמן טבעת פנימית – שרירותי במידת מה. כנ"ל לגבי מרחב תפקוד עירוני – אזור היוממות של 15% גם הוא מונח בצורה שרירותית. מרחבי התכנון לא מכילים על עצמם שום היררכיה, ולדעת הכותב הנ"ל מהווה בעייה, אבל על כך בהמשך.

הנחת המשמעות של גריד קמ"ר: עבור אזור התפקוד העירוניים ומרחבי התכנון, נעשה שימוש בגריד של קמ"ר. עם זאת, המרחב לא מתנהג בצורה קרטזית, ויתכן שהזחה של הגריד הייתה משנה בצורה משמעותית את תוצאות הבדיקה.

טבלה 1: סוגי שיטות חלוקה

שיטה	חלוקה	זיקה	אופי
מטרופולין 2014	חלקית	למרכז	אלגוריתמי
אזור תפקוד עירוני 2025	חלקית	למרכז	אלגוריתמי
מרחבי תכנון 2024	מלאה	למרכז	מבוסס מומחים/אלגוריתמי

שיטה

לאור נקודות התורפה שצוינו בפרק הקודם, אבקש לנסות ולהציע דרך התמודדות חדשה עם חלוקה לאזוריים. דרך התמודדות זו לא חפה מהנחות, אך לדעת כותב שורות אלו הנחות אלו מועטות יותר, מוסכמות יותר ומדידות יותר.

הנחות יסוד

1. כאשר באים להפריד מדינה לאזורי / מרחבי תכנון, יש לנסות עד כמה שיותר לעשות זאת בצורה **פרקנית (מודולרית)**. האקדמיה ללשון עברית מגדירה פרקני כ"שם תואר המציין דבר המורכב מחלקים, פרקים פרקים, שכל אחד מהם עומד בפני עצמו, והם עשויים להצטרף בצורות שונות למבנה אחד גדול"¹³. מציאת המודול – הפרק – היא איפוא המטרה הבסיסית של פעולת האידור.
2. יש משמעות לקשרים ולזיקות התחבורתיות המתקיימות בין אזורים שונים, גם אם קשרים אלו מגיעים בצורה גולמית לפי ימות החול בשבוע, ולא לוקחים בחשבון את מטרות הנסיעה או משקל הכבודה אלא רק את העובדה שבממוצע בוצעה נסיעה בתקופת יום מסוימת בין אזור לאזור.
3. יש משמעות למרחקים בין אזורים שונים, וניתן לייצג אזורי תנועה ברמה הארצית על סמך נקודה מייצגת באזור התנועה.

מדדי הערכה

מודולריות

מודולריות, במובן שמאמר זה משתמש בה, היא מדד הבודק האם חלוקה של גרף מצליחה לשמור עד כמה שיותר קשרים בתוך הקהילות השונות אליהן הגרף הופרד, והאם קשר זה עדיף על "כוח המשיכה" הבסיסי בין שני גורמים.

נסה לפרק משפט זה לחלקים על מנת שיובן:

גרף הוא ייצוג של קבוצה של גורמים שיכולים להיות קשורים זה לזה. הגורמים הם **המוקדים** של הגרף, הקשרים הן **הקשתות** של הגרף.

הסקר הסלולרי מכיל טבלת מוצא יעד, המתארת בשורות את המוצאים, בעמודות את היעדים ובתאי הטבלה את כמויות הנסיעות בין מוצאים ליעדים. טבלה זו (או מטריצה זו) יכולה לשמש למעשה כגרף ממושקל – גרף שקשתותיו יכולות להכיל משקל, המייצג את כמות הנסיעות בין מוצא מסוים ליעד מסוים. למעשה, המוצאים והיעדים הם הגורמים המרכיבים את הגרף, והמשקלים על הקשתות הם המשקלים של הגרף.

ככל שניתן לחבר מספר מוקדים יחדיו, כך שכמות משמעותית של נסיעות הקשורות אליהם מתבצעות ביניהן

בלבד – הצלחנו למעשה "לפרק" את הגרף לגורם משמעותי בודד, שניתן להתייחס אליו ברמה התכנונית כאוטונומי.

בתאוריה, הציון הגבוה ביותר היה מתקבל עבור קבוצה המכילה את כלל המוקדים ברשת – שכן כלל הנסיעות מתבצעות בין כל המוקדים. עם זאת, על מנת להביא למצב בו ניתן לפרש את פלט המדד כמתגמל כמות שונה של קבוצות, במדידת מודולריות יש אלמנט המנסה לקחת בחשבון את כוח המשיכה בין המוקדים השונים, בהינתן כלל הקשרים הקיימים שלהם (הדרגה הממושקלת, במונחי תורת הרשתות) ולראות האם הוא גדול או קטן יותר מהמשיכה הקיימת שלהם. משקל האלמנט הנ"ל נקרא רזולוציה – רזולוציה נמוכה מחזירה מעט קבוצות, ורזולוציה גבוהה מחזירה הרבה קבוצות.

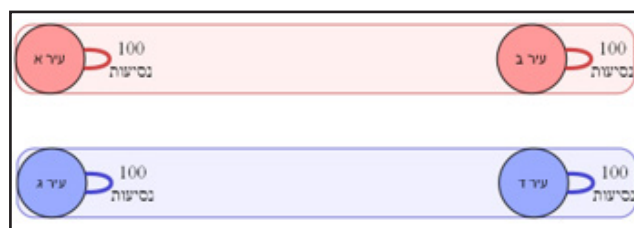
בהינתן מדד זה, ניתן להריץ אלגוריתמים למקסום המדד על מנת לקבל חלוקה אופטימלית. ניתן לחשב את המדד ברמות שונות – ניתן לחשב את תרומת המוקד הבודד למודולריות, את תרומת הקהילה למודולריות ואת המודולריות בכלל הרשת.

דוגמאות היפותטיות למודולריות

על מנת להמחיש את המשמעות של מדד המודולריות, נתבונן בשלושה מצבים:

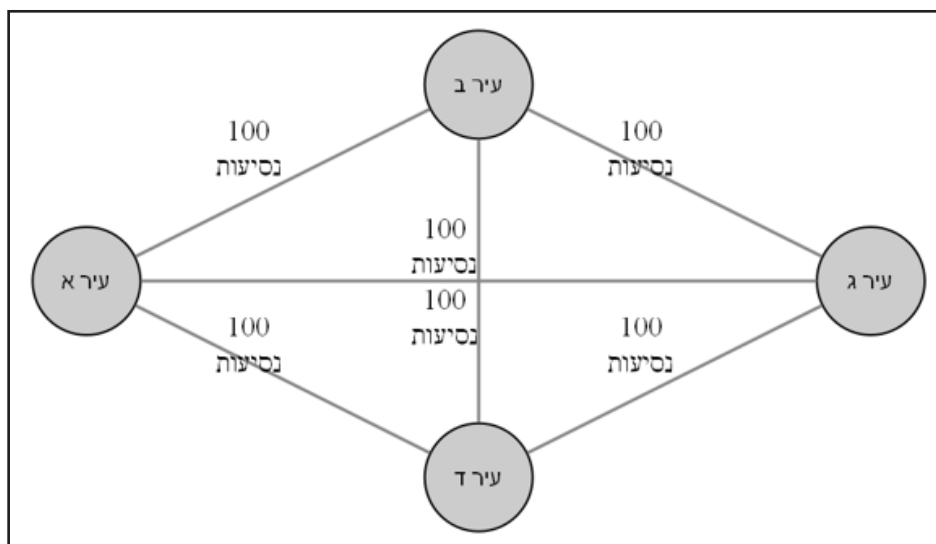
מצב 1 – "איים מבודדים": נניח שקיימות 4 ערים, כאשר כל הנסיעות מתבצעות בתוך כל עיר בלבד ואין נסיעות ביניהן. במקרה זה, המודולריות תהיה מקסימלית (קרובה ל-1) – החלוקה ל-4 קבוצות היא טריוויאלית ומושלמת. זהו המצב האידיאלי מבחינת מודולריות, שכן החלוקה לקבוצות מובהקת.

איור 7: מצב 1 – איים מבודדים: כל הנסיעות פנימיות בלבד ($Q \approx 1$)



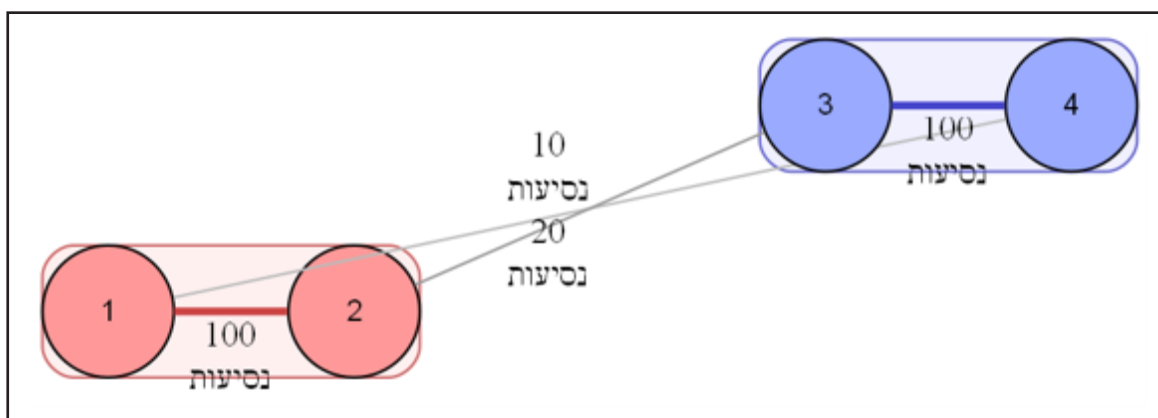
מצב 2 – "תנועה אחידה": נניח שהתנועה בין כל אזורי התנועה היא אחידה לחלוטין – כלומר, אחוז הנסיעות מאזור i לאזור j שווה למכפלת חלקיהם היחסיים בסך הנסיעות הכללי ($k_i \times k_j / 2W$). במקרה זה אין שום הצדקה לחלוקה, שכן אין אזור שמושך אליו נסיעות מעבר למה שהיה צפוי באקראי – והמודולריות תהיה 0.

איור 8: מצב 2 – תנועה אחידה: כל הנסיעות פרופורציונליות למשקל המוצא/יעד ($Q \approx 0$)



מצב 3 – "מצב ביניים ריאליסטי": ברוב המקרים האמיתיים, קיימת חתיכה משמעותית של נסיעות פנימיות (זיקה) המגדירה קבוצות ברורות, אך גם קשרים בין הקבוצות (נסיעות בין-אזוריות). במצב כזה ערך המודולריות נע בין 0 ל-1.

איור 9: מצב 3 – מצב ביניים: נסיעות פנימיות חזקות וקשרים חלשים בין קבוצות ($Q < 1 > 0$)



צללית (Silhouette)

מדד הצללית (silhouette) (Rousseeuw, 1987) מודד, על סמך המרחקים בין גורמים, את נכונות החלוקה של כל גורם לקבוצה בה היא נמצאת (לכידות) ובקבוצות בהן הוא לא נמצא (הפרדה). מדד הצללית נמדד עבור כל גורם בנפרד – אך נהוג לחשבו כממוצע של קבוצה (הנקראת בהקשר זה אשכול), וממוצע של אשכול לממוצע משוקלל של כלל התצפיות.

מדד זה משמש כמדד בדיקה חיצוני (external validation) – הוא אינו מדד אופטימיזציה של שיטות החלוקה, אלא מספק הערכה עצמאית של טיב החלוקה על בסיס מטריצת המרחקים.

שיטות חלוקה

אלגוריתמי מקסום מודולריות (לוביין וליידן)

קיימים שני אלגוריתמים מפורסמים בנושא זה, על שם שתי ערים מערב אירופאיות, בהם האלגוריתם נהגה – לוביין וליידן. האלגוריתמים הינם מרובי שלבים. אלגוריתם לוביין (Blondel et al., 2008) עובד בצורה הבאה:

כל מוקד מתחיל כקהילה בפני עצמו, ציון המודולריות של הגרף הוא בהתאם לחלוקה זו לקהילות. בכל שלב כל קהילה מנסה להתחבר לקהילה אחרת, ובודקת מה המשמעות מבחינת ציון המודולריות של הגרף בהינתן חיבור זה. היא בוחרת את החיבור לקהילה שמעלה בצורה הגבוהה ביותר את המודולריות. לאחר החיבור הראשוני של קהילות, הבדיקה מתבצעת ברמת אגרגטיבית יותר. האלגוריתם הינו סטוכסטי, שכן יש משמעות לסדר העיבוד של המוקדים ולבחירה לאיזה קהילה להתחבר במקרה של שיוויון במדד המודולריות, ולכן יש להריץ אלגוריתם זה מספר פעמים על מנת לקבל תוצאה יציבה.

אלגוריתם ליידין (Traag et al., 2019) מוסיף על לוביין ומכיל גם שלב ביניים הנקרא refinement, הבוחן את המבנה הפנימי של קהילות ומעביר מוקדים שהשתייכו בטעות מקהילה אחת לאחרת.

יש להדגיש כי צורה בדיקה זו לוקחת בחשבון משקולות חיוביים בין מוקדים – מנסה למצוא את הקשרים ביניהם.

אלגוריתם הליכות רנדומליות (ווקטראפ)

מעבר לאלגוריתמי לוביין וליידן, קיים אלגוריתם נוסף לזיהוי קהילות בגרף בשם ווקטראפ (Pons & Latapy, 2005). אלגוריתם זה מבוסס על הליכות אקראיות על גבי הגרף, שבאמצעותן נאמדת הקרבה בין הצמתים: ההסתברות למעבר בין שני צמתים גבוהה יותר ככל שהקשר ביניהם חזק יותר. על סמך ההליכות האקראיות נבנית מטריצת מרחקים בין הצמתים, ולאחר מכן מיושם ניתוח אשכולות

היררכי המייצר חלוקות שונות של הגרף. מבין חלוקות אלו נבחרת החלוקה שמניבה את ערך המודולריות הגבוה ביותר.

ניתוח אשכולות היררכי

בניגוד לבדיקה של קשרים באמצעות גרפים, ניתוח אשכולות מנסה להפריד את הישויות השונות על בסיס המרחקים ביניהם. בין אם מדובר במרחקים אוקלידיים (מה שמתאפשר בשיטות מפורסמות כמו k מרכזים) או מרחקים כלשהם הניתנים לביטוי במטריצת מרחקים. אנו נרצה להתמקד בשיטות של ניתוח אשכולות היררכי. שלבי העיבוד באלגוריתם של ניתוח אשכולות היררכי אגלומרטיבי מזכירים במידת מה את השיטה של לוביין: כל התצפיות מתחילות באשכול נפרד. אבל בשונה מלוביין, בשיטה זו כל אשכול מתחבר אל האשכול הקרוב ביותר אליו ברמת המרחק. הצורה בה מחושב המרחק מאשכול יכולה להיבחר במספר דרכים. עם זאת, פעולת האלגוריתם הינה דטרמינסטית, שכן מדי פעם היא בוחרת למזג את המרחק הקצר ביותר הלא ממוזג הקיים במצב נתון ברשת.

ניתן לבצע את הערכת המרחק שני אשכולות המועמדים לזיווג במספר דרכים: המרחק הקרוב ביותר בין חבריהם, המרחק הרחוק ביותר בין חבריהם, ממוצע כלל המרחקים הנמוך ביותר בין חברי האשכול, המרחק בין הנקודה הממוצעת (בהינתן מרחב אוקלידי) או חציונית¹⁴ בנוסף קיימת גם שיטת וורד (Ward, 1963) המנסה בכל צעד למזער עד כמה שניתן את שונות המרחק בתוך אשכול מסוים על ידי בדיקת צירוף כלל יתרת האשכולות.

ניתן גם לבדוק את המרחקים בין אזורי התנועה השונים הנמצאים בסקר הסלולרי. המרחקים בין אזורי התנועה יכולים לקבל משמעות במספר רב של דרכים – בין אם מרחק בהקשר של סוג האוכלוסיה, הרכב גילאיה, אופי שימושי הקרקע בה – כל דבר הניתן לכימות על ידי מדד ניתן למדידה על ידי מרחק. עם זאת, צורת חלוקה זו מתמקדת בקרבה יחסית ולא דווקא בקשר בין מוקדים, ולכן ניתן להגיד שהשימוש בה יותר מאפיין שוני מאשר קשר. שיטה זו תהיה רלוונטית בהקשר התחבורתי רק עבור דומיין תחבורתי מובהק כמו מרחק או זמן על גבי רשת הכבישים.

אלגוריתמים אחרים לניתוח אשכולות יכולים להיות ניתוח אשכולות היררכי דיביסיבי (DIANA) או חלוקה סביב מדואידים ממקסמת מדד צללית (PAMSIL), הדומה למקסום מדד המודולריות שהוצע עבור החלוקה לקהילות. עם זאת לאור שכיחות האלגוריתמים לביצוע ניתוח אשכולות היררכיים יתבצע שימוש ב-DIANA ולא ב-pamsil.

תהליך הניתוח

הניתוח¹⁵ בוצע בשמונה שלבים מרכזיים (לפירוט המלא כולל הנוסחאות ראו נספח ג):

תוצאות¹⁷

טבלה לחלוקות קיימות ואגרטיביות

בטבלה 2 ניתן לראות את תוצאות המדדים עבור החלוקות הקיימות ומספר חלוקות אגרטיביות שנוצרו על ידי איחוד אזורים סמוכים, מסודרות לפי מודולריות. יש לציין כי הטבלה כוללת חלוקות בטווח רחב של כמויות קבוצות (מ-5 עד עשרות), ולכן יש לפרש השוואות בין חלוקות ברזולוציות שונות בזהירות: מדד המודולריות מושפע מפרמטר הרזולוציה ומכמות הקבוצות, ומדד הצללית נוטה לקבל ערכים גבוהים יותר עבור חלוקות גסות יותר (מעט קבוצות). חזית הפארטו שמוצגת בהמשך מאפשרת להתמודד עם בעיה זו על ידי השוואה של חלוקות על סמך שני המדדים בו-זמנית.

ניתן לראות כי האגרציה של לוביין וליידן ברזולוציה 0.5, 1 ו-2 טובה יותר מכלל החלוקות הקיימות מבחינת מודולריות. החלוקות עם רזולוציה 0.5 מניבות את ציון הצללית הגבוה ביותר, אבל זה קשור לכמות הקבוצות הקטנה שהתקבלה בחלוקות אלו. ניתן לראות כי אזורי מינהל התכנון מניבים ציון מודולריות נמוך יותר מהחלוקה לנפות, מחוזות ואזורי

1. הכנה ועיבוד נתונים – שימוש במטריצת נסיעות מוצא-יעד מהסקר הסלולרי כמשקלות עבור מדידת מודולריות, ושימוש במטריצת מרחקי זמן¹⁶ על רשת הדרכים (ראו נספח ד) לחישוב צללית.
2. חישוב מודולריות (Q) – מודולריות כללית של החלוקה, תרומה פר אזור תנועה ופר קהילה, ויחס תרומה/דרגה.
3. חישוב צללית (S) – פר תצפית, פר קהילה וכממוצע גלובלי על בסיס מטריצת מרחקי זמן.
4. סריקות פרמטרים – לוביין/ליידן: 100 ריצות 5×5 רזולוציות (0.5, 1, 2, 3, 4); ניתוח היררכי: 9 שיטות קישור 2×30 קבוצות.
5. יציבות וקונסנזוס – איחוד אזורים שהופיעו יחדיו ב-75% מהריצות הסטוכסטיות.
6. דיווח תוצאות – ברמה גלובלית, קהילתית ופרטנית.
7. בחירת חלוקות אופטימליות – חזית פארטו בין מודולריות לצללית.
8. מיפוי – חלוקות נבחרות לפי מודולריות, צללית ומטריצת מוצא-יעד.

טבלה 2: השוואת מדדים לחלוקות קיימות ואגרטיביות

אלגוריתם	רזולוציה/חלוקה	כמות קבוצות בהרצה	כמות אזורי תנועה בקבוצה הקטנה	מודולריות	ציון צללית ממוצע לק-בוצות (זמן כמרחק)	ציון צללית מינימלי לק-בוצות (זמן כמרחק)	הערות
לוביין	1	10	11	0.620	0.241	0.126	-
ליידן	0.5	6	11	0.614	0.313	0.212	חלוקה זהה לחלוקה זו התקיימה גם ב-26 הרצות אחרות
לוביין	0.5	6	11	0.611	0.313	0.216	חלוקה זהה לחלוקה זו התקיימה גם ב-27 הרצות אחרות
לוביין	2	23	1	0.588	0.206	-0.735	-
ליידן	2	21	1	0.586	0.243	-0.690	-
ליידן	1	10	1	0.586	0.138	0.000	-
נפות	-	16	8	0.570	0.233	-0.084	-
לוביין	3	29	1	0.566	0.152	-0.711	-
מחוזות	-	7	37	0.566	0.161	-0.056	-
ליידן	3	30	1	0.558	0.218	-0.696	-

טבלה 2 – המשך

אלגוריתם	רזולוציה/ חלוקה	כמות קבוצות בהרצה	כמות אזורי תנועה בקבוצה הקטנה	מודולריות	ציון צללית ממוצע לק- בוצות (זמן כמרחק)	ציון צללית מינימלי לק- בוצות (זמן כמרחק)	הערות
אזורי תפקוד עירוניים	-	15	12	0.548	0.133	-0.528	-
אזורי מינהל התכנון	-	29	2	0.541	0.277	-0.178	-
אזורי על סלולרי 15	-	15	40	0.527	0.184	-0.296	-
לוביין	4	46	1	0.524	0.145	-0.700	-
מטרופולי- נים למ"ס חלוקת על	-	5	72	0.522	0.286	-0.477	-
ליידן	4	42	1	0.512	0.168	-0.704	-
אזורי על סלולרי 33	-	33	8	0.466	0.221	-0.339	-
מטרופולי- נים למ"ס חלוקת לגזרות	-	12	34	0.448	-0.053	-0.528	-

ממצאים אלו מעידים על מתיחות מובנית בין שני המדדים, כפי שמתגלה בבירור בחזית הפארטו שלהלן.

חזית הפארטו בין מודולריות לצללית

חזית פארטו היא קבוצת הפתרונות האופטימליים שלא ניתן לשפר אחד מהם בלי לפגוע בשני. במקרה שלנו, כל נקודה בגרף מייצגת חלוקה שונה, כאשר ציר X מייצג את מודולריות החלוקה וציר Y מייצג את הצללית.

חלוקות הנמצאות על חזית פארטו הן "פתרונות התיקו" – אם נרצה להגדיל את המודולריות, נאבד בצללית, ולהפך. חלוקות שלא על חזית הפארטו הן פחות טובות, שכן קיימת חלוקה אחרת שעדיפה עליהן בשני המדדים בו-זמנית.

חזית הפארטו מכילה 31 חלוקות שונות, המייצגות את החלוקות הטובות ביותר בין מודולריות לצללית, שלא ניתן לשפר את אחת על חשבון השנייה. בטבלה 3 ניתן לראות כי ישנה מתיחות ברורה בין שני המדדים, כאשר ככל שמנסים לשפר את המודולריות יש פגיעה בצללית, ולהפך. ניתן לראות כי החלוקות של לוביין וליידן ברזולוציה 1 נמצאות בחלק הראשון של חזית הפארטו, ולאחר המעבר לווקטראפ מתקבלים בעיקר תוצאות של ניתוח אשכולות. בשלב מסוים ציון המודולריות נהיה נמוך עד כדי חסר משמעות, כפי שניתן לראות בגרף.

תפקוד עירוניים (על אף שהחשוב נערך שלא על בסיס כל הארץ, שכן אזורי התפקוד לא מכסים את כל שטח המדינה). עם זאת, ציון הצללית של אזורי מינהל התכנון הוא גבוה מאוד, השלישי בטיבו בחלוקות הקיימות והארגטיביות.

סיכום חלוקות אלגוריתמיות

סריקת הפרמטרים על פני כלל האלגוריתמים מעלה מספר ממצאים מרכזיים (לטבלאות המלאות ראו נספח א):

- **מודולריות גבוהה ביותר:** הרצות ספציפיות של ליידן ברזולוציה 1 הניבו את ציון המודולריות הגבוה ביותר, עם חלוקה ל-9 קבוצות. עם זאת, חלוקה זו אינה יציבה – תוצאה זהה הושגה רק ב-4 הרצות מתוך 100.
- **צללית גבוהה ביותר:** שיטת ward.D2 על מטריצת מרחקי רשת כבישים, בחלוקה ל-5 קבוצות, הניבה את ציון הצללית הגבוה ביותר (עבור חלוקות עם $Q > 0.5$), אך עם מודולריות נמוכה יחסית.
- **לוביין/ליידן – צללית:** לוביין ברזולוציה 0.5 הניבה את ציון הצללית הגבוה ביותר מבין אלגוריתמי הקהילות, אך עם מודולריות נמוכה משמעותית מהחלוקות המובילות.

טבלה 3: השוואת מדדים בחזית הפארטו

אלגוריתם	רזולוציה	מטריצה	כמות קבוצות בהרצה	כמות אזורי תנועה בק" בוצה הקטנה	מודולריות	ציון צללית ממוצע לקבוצות (זמן כמרחק)	ציון צללית מי" נימלי לקבוצות (זמן כמרחק)	גרעינים
ליידן	1	-	9	11	0.626	0.290	0.182	49
ליידן	1	-	9	11	0.626	0.290	0.182	83
ליידן	1	-	9	11	0.626	0.290	0.182	98
ליידן	1	-	9	11	0.626	0.290	0.182	28
ליידן	1	-	9	11	0.626	0.291	0.182	8
ליידן	1	-	8	11	0.624	0.305	0.185	72
ליידן	1	-	8	11	0.624	0.306	0.193	46
ליידן	1	-	8	11	0.624	0.307	0.185	35
ליידן	1	-	8	11	0.624	0.307	0.192	31
ליידן	1	-	8	11	0.624	0.307	0.192	78
ליידן	1	-	8	11	0.624	0.307	0.192	92
ליידן	1	-	8	11	0.624	0.307	0.192	82
ליידן	1	-	8	11	0.623	0.312	0.171	84
לוביין	1	-	8	11	0.621	0.312	0.181	23
ווקטראפ	13	-	7	13	0.617	0.330	0.221	-
ממוצע	-	מרחק	15	1	0.606	0.323	0.000	-
ממוצע	-	מרחק	16	1	0.606	0.324	0.000	-
וורד_2	-	זמן	10	11	0.603	0.332	0.172	-
וורד	-	מרחק	6	11	0.600	0.341	0.284	-
וורד_2	-	זמן	6	11	0.593	0.362	0.276	-
לוביין	0.5	-	5	11	0.586	0.419	0.232	72
לוביין	0.5	-	5	11	0.586	0.419	0.234	3
לוביין	0.5	-	5	11	0.586	0.419	0.234	47
וורד_2	-	מרחק	5	11	0.551	0.438	0.389	-
רחוק ביותר	-	מרחק	4	11	0.459	0.454	0.388	-
ניתוח אשכנ"ז לות מתחלק	-	מרחק	4	13	0.441	0.464	0.438	-

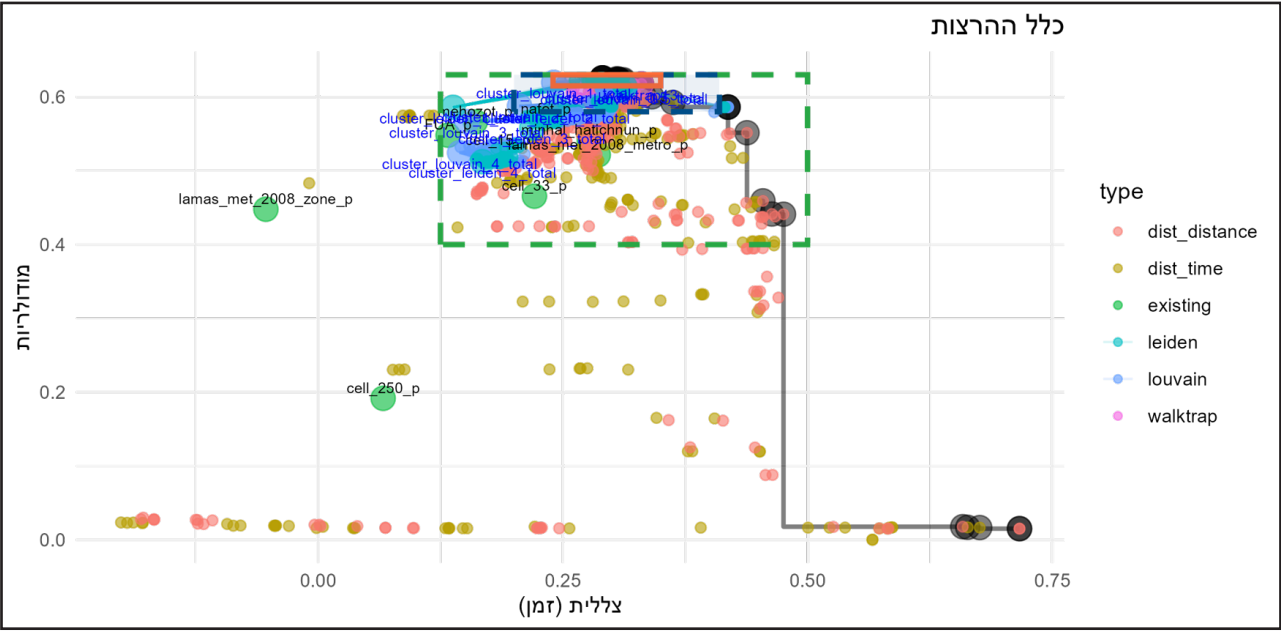
טבלה 3 – המשך

אלגוריתם	רזולוציה	מטריצה	כמות קבוצות בהרצה	כמות תנועה בק- בוצה הקטנה	מודולריות	ציון צללית ממוצע לקבוצות (זמן כמרחק)	ציון צללית מי- נימלי לקבוצות (זמן כמרחק)	גרעינים
ליידן	-	מרחק	3	119	0.441	0.475	0.347	-
ליידן	-	מרחק	2	20	0.018	0.659	0.512	-
ליידן	-	זמן	2	19	0.017	0.664	0.494	-
ליידן	-	זמן	2	17	0.017	0.676	0.599	-
ליידן	-	מרחק	2	11	0.015	0.717	0.716	-
ליידן	-	מרחק	2	11	0.015	0.717	0.716	-

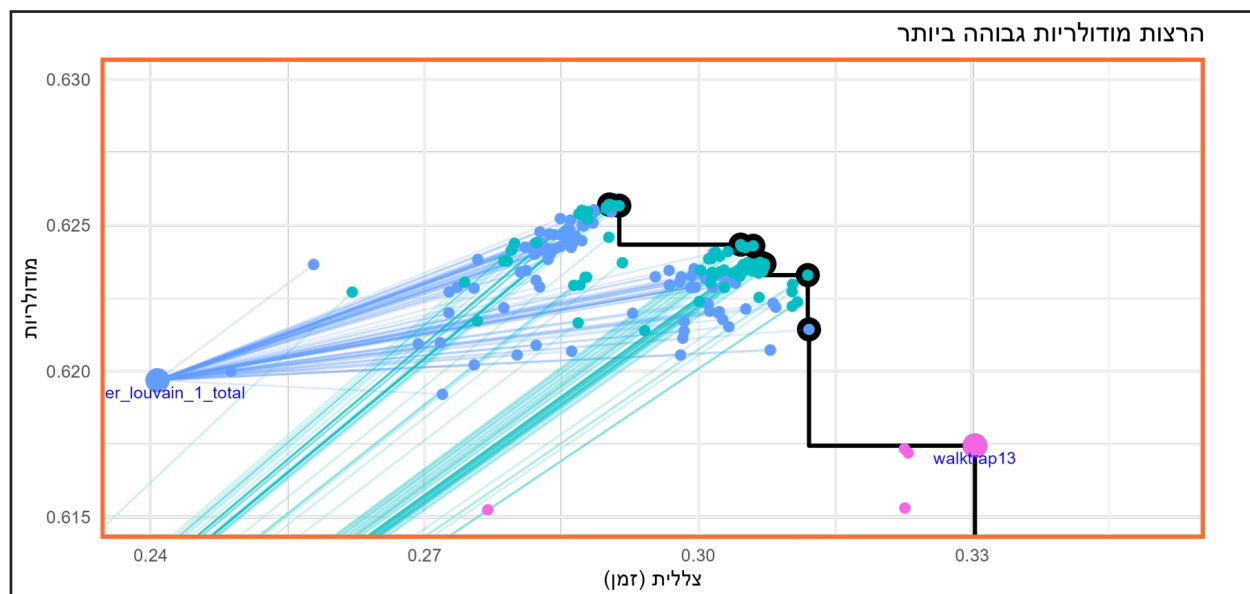
חזית הפארטו מבחינת מודולריות, ולאחריהן ווקטראפ, ובהמשך תוצאות ניתוח אשכולות. הקווים המחברים נקודות בגוון כחול/תכלת לנקודות גדולות יותר מעידים על הקושי ביצירת חלוקה יציבה של ליידן/לוביין.

הקשר בין מודולריות לצללית
קיימת מתיחות ברורה בין שני המדדים: ככל שמנסים לשפר את המודולריות נפגעת הצללית, ולהפך. ניתן לראות זאת בבירור באיור 10 (לרמות זום ביניים ראו נספח ב). החלוקות של לוביין וליידן ברזולוציה 1 נמצאות בקצה העליון של

איור 10: גרף קשר בין מודולריות לצללית



איור 11: זום ממוקד למודולריות גבוהה



- ירוק כהה - צלילית מתחת ל-O, תרומה למודולריות יחסית קטנה מ-1 - פריפריה גאוגרפית לא מושכת.
- אדום - צלילית מעל ל-O, תרומה למודולריות יחסית קטנה מ-1 - לא פריפריה אך לא מושכת דיו.
- חום - צלילית מעל ל-O, תרומה למודולריות יחסית גדולה מ-1 - אזורים מרכזיים עם תרומה משמעותית למודולריות.
- כחול - צלילית מתחת ל-O, תרומה למודולריות יחסית גדולה מ-1 - אזורי קצה המושכים אליהם נסיעות רבות.
- ירוק בהיר - אזורים עם תרומה למודולריות יחסית גדולה מ-1, צלילית מתחת ל-O, ושיעור נסיעות גבוה בתוך האשכול אליו הם משתייכים - אזורים מרכזיים באשכול, המושכים אליהם נסיעות רבות אך לא בהכרח מהאשכול/קהילה.

מדד התרומה למודולריות (איור 12) הוא לא המודולריות הגולמית, אלא התרומה למודולריות שיש לאזור ביחס לכוחו בתוך האשכול - היחס בין החלק הכללי בתרומה למודולריות לבין הדרגה שלו. ניתן להבחין בתופעה מעניינת - בעוד מדד הצלילית מכיל את הציונים הטובים ביותר במרכז האשכול (מה שאמור להיות אינטואיטיבי לאור הקשר בין מרחק אווירי למרחק על רשת הדרכים), מדד התרומה למודולריות מראה כי האזורים עם התרומה הגבוהה ביותר למודולריות נמצאים לאו דווקא בליבה של האשכול, כפי שמצויר במפות המוקפות צהוב ואדום, עבור תל אביב וירושלים, בהתאמה.

היעדר יציבות של לוביין וליידן

אלגוריתמי לוביין וליידן, על אף שהם מניבים את ציוני המודולריות הגבוהים ביותר, סובלים מחוסר יציבות: שינויים קטנים ב-seed משנים את גבולות החלוקה (ראו איור 18, איור 19 בנספח ב). הקטנת הרזולוציה (למשל ליידן ברזולוציה 0.5) מייצרת חלוקה יציבה יותר, אך עם מודולריות נמוכה יותר. היעדר היציבות מקשה על שרטוט גבול יציב בין אזורי הזיקה.

ווקטראפ 13 צעדים - חלוקה מרחבית ברורה, איזון טוב בין מודולריות לצלילית

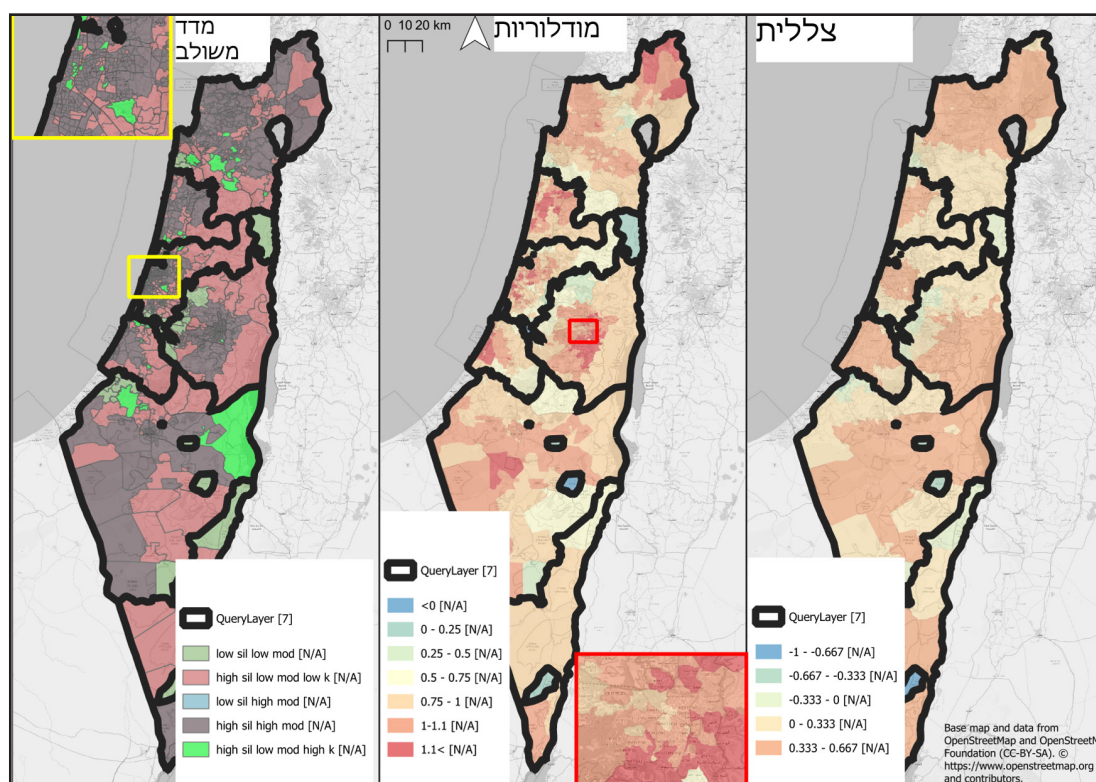
בחזית הפארטו מופיעות רק שתי הרצות של ווקטראפ, 12 ו-13 צעדים (הן זהות מבחינת החלוקה לאזוריים). החלוקה מניבה מודולריות גבוהה יותר מכלל ההרצות למעט לוביין וליידן ברזולוציה 1, ובנוסף גם שיפור משמעותי במדד הצלילית. החלוקה מניבה 7 אזורים, כאשר האזור הקטן ביותר מכיל 13 אזורי תנועה. החלוקה יציבה לחלוטין, שכן ווקטראפ הינו אלגוריתם דטרמינסטי, מה שמקל על מתיחת קווי הגבול. התוצאה המתקבלת היא רציפה כמעט לחלוטין (למעט בסיסי צהל שלא כוללים נסיעות ומסתווגים בצורה אקראית), למעט בית חולים מאיר המשויך בחלוקה זו לקהילה שזוהתה במרחב חדרה - נתניה.

במפות ניתן לראות את ההתייחסות של מדד הצלילית, התרומה היחסית בקהילה למודולריות ומדד משולב בנפרד, עבור כל אזור תנועה, כמדד בודד ולא אגרגטיבי. המדד המשולב מוסבר על ידי:

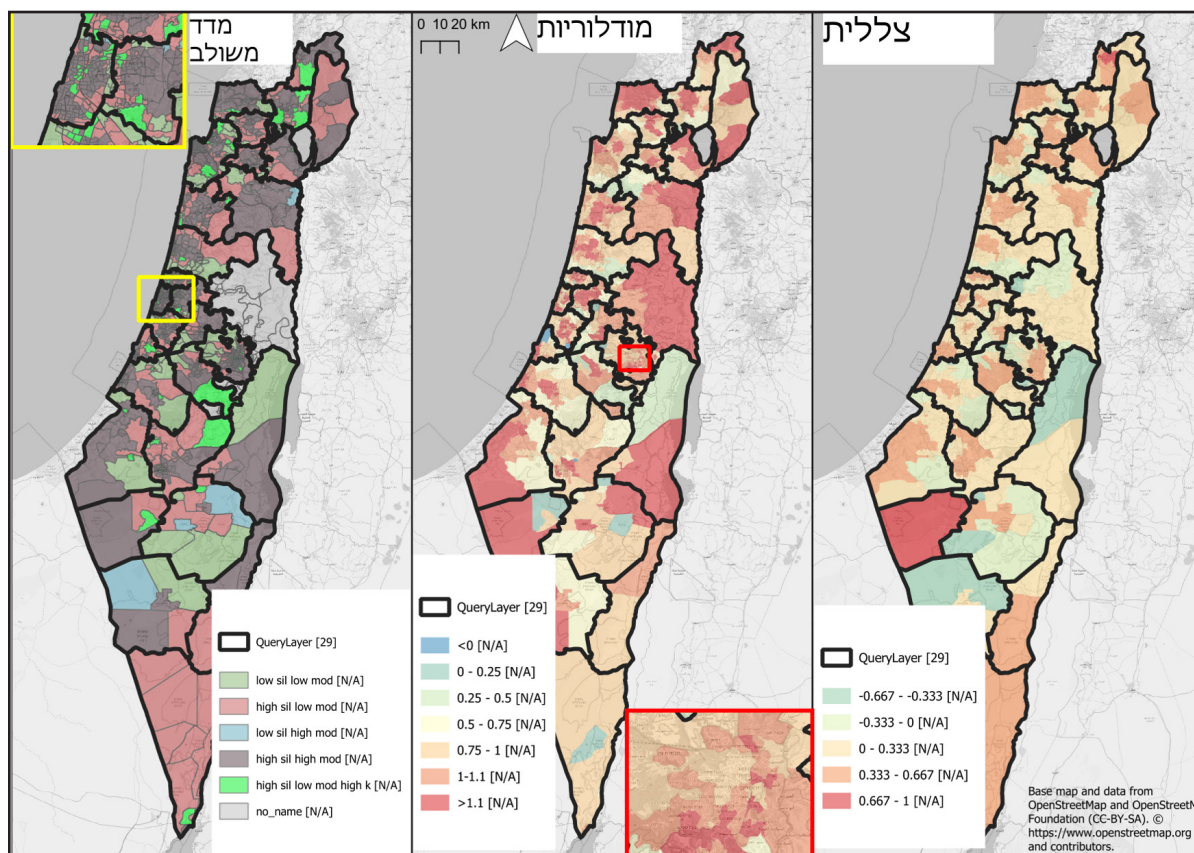
כאשר משווים זאת לחלוקה של מינהל התכנון (איור 13), ניתן לראות כי החלוקות לאזורים קטנים יותר "משווה" בין המרכזיות במודולריות למרכזיות מבחינת מדד הצללית. מה שאומר שחלוקה זו לא לוקחת בחשבון היררכיה מרחבית, כפי שמוצעת על ידי קריסטלר בתאוריה של המקומות המרכזיים, ומנסה לייצר גרף א-היררכי ושטוח יותר.

ניתן להסביר זאת על ידי זה שאזורים מרכזיים אלו לא תורמים למודולריות היחסית כמו אזורים אחרים כי הם מכילים בתוכם מוקדים רבים עם קשרים חזקים לאזורים אחרים, מה שמפחית את התרומה היחסית שלהם למודולריות של האשכול. ניתן לראות כי יש קשר למשיכה יחסית של אזורים, הימצאותם בקרבת צירי תנועה ראשיים, ומיקומם הגיאוגרפי בתוך האשכול.

איור 12: ווקטראפ 13 צעדים – מדדי צללית, תרומה יחסית למודולריות ומדד משולב

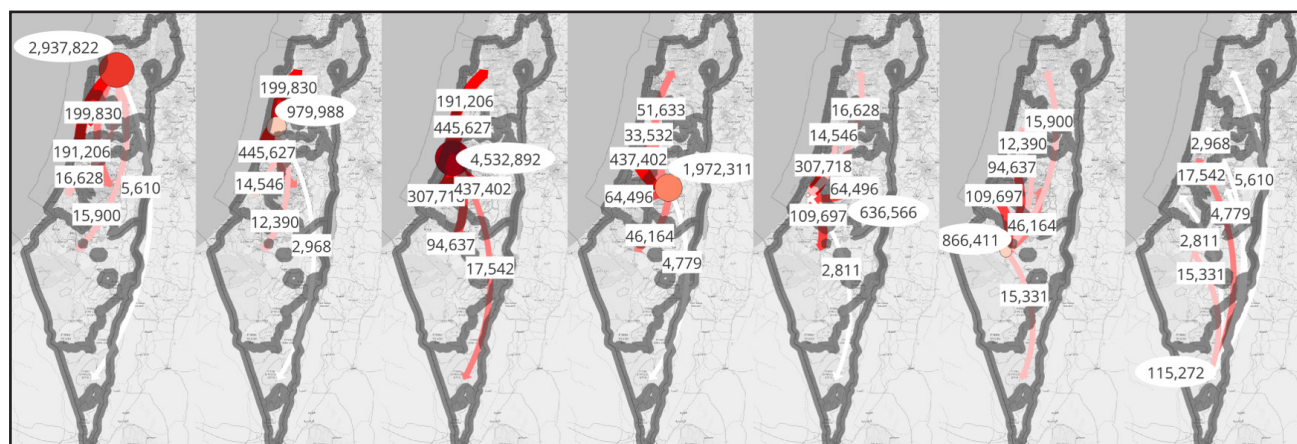


איור 13: מינהל התכנון – התכנית האסטרטגית המרחבית: מדדי צלילית, תרומה יחסית למודולריות ומדד משולב



לסיום, ניתן לראות את מטריצת הנסיעות של ווקטראפ 13 צעדים (איור 14), המראה את כמות הנסיעות בתוך כל קהילה ובין הקהילות. ניתן לראות כי רוב הנסיעות מתבצעות בתוך הקהילות השונות, מה שמסביר את המודולריות הגבוהה של החלוקה.

איור 14: מטריצת נסיעות של ווקטראפ 13 צעדים – כמות הנסיעות בתוך כל קהילה ובין הקהילות



סיכום ומסקנות

מאמר זה הציג סקירה של חלוקות אזוריות שונות שהתקיימו בישראל, ובחן את המגבלות השונות שלהן. לאחר מכן הוצעה מתודולוגיה המבוססת על עקרונות רשתיים וניתוח אשכולות על מנת לבצע חלוקה פרקטית של המרחב הישראלי לאזורי זיקה תחבורתית. המדדים שהוצעו לבחינת החלוקות כללו מודולריות וצללית, והוצגו תוצאות של החלוקות הקיימות והחדשות. נמצא כי החלוקה המתקבלת על ידי ווקטראפ 13 צעדים היא המאוזנת והאופטימלית ביותר בין שני המדדים, ומציעה חלוקה יציבה וברורה של המרחב הישראלי לאזורי זיקה תחבורתית. עם זאת, מחקר זה לא חף ממגבלות, ולכן הוא מסייג את עצמו מלקבוע המלצות מדיניות תכנוניות בהתאם לתוצאה שהתקבלה ממנו. קיום המחקר הזה נועד להציג מתודולוגיה חדשה לבחינת המרחב הישראלי, ולהציע כיווני מחקר נוספים להמשך.

מגבלות המתודולוגיה המוצעת

1. שימוש בנתוני סקר סלולרי בלבד, שאינם כוללים את כלל האוכלוסייה, מוגבלים לנסיעות מעל ק"מ וחצי, מבוססים על מדגם, ואינם עדכניים.
2. שימוש במטריצה של מצב קיים שלא מאפשרת בחינה של זרמים עתידיים או זמני נסיעה עתידיים. עם זאת, ניתן לטעון כי מטריצת הנסיעות המתקבלת מסקר סלולרי מהווה מדד טוב יותר למצב קיים מאשר מודלים תחבורתיים קיימים. כן יש לציין כי שימוש במטריצת מוצא יעד קיימת מנציח דפוסי נסיעה קיימים, ולא מאפשר זיהוי של אזורי חדשים שיכולים להיווצר בעתיד. על מנת לבצע בחינה יותר מעמיקה בנושא זה יש לקחת בחשבון מטריצת מוצא יעד עתידית ורשת כבישים עתידית. ניתן לבצע זאת באמצעות המודל הארצי לתחבורה, אך יש לקחת בחשבון את מגבלות המודל.
3. בחירת הנתונים מהסקר הסלולרי נעשתה על פני כלל יום ממוצע באמצע השבוע, כאשר לא הייתה התייחסות לסופי השבוע, ולא ניתן משקל לשעות היום השונות. עם זאת, ניתן לטעון כי מדד זה הוא מדד אפשרי לבחינה של נושא זה. מי שמעוניין לבצע בחינה נוספת יכול לשנות את הנתונים על מנת שישקפו כל קשר אפשרי בין אזורי.

שאלות פתוחות והמלצות להמשך מחקר

1. כיצד ניתן להימנע מעריצות המטריצה?¹⁸ הנחה חזקה מדי של מטריצה בודדת לא מאפשרת שקלול של מצבים שונים והזדמנויות עתידיות. ביניהן התלות בנתוני הסקר הסלולרי בלבד, היעדר התחשבות במאפיינים דמוגרפיים או כלכליים של האזורי, והצורך בבחינה

מעמיקה יותר של הפרמטרים השונים המשפיעים על החלוקה. עם זאת, מתודולוגיה זו מציעה דרך חדשה לבחון את המרחב הישראלי ולנסות ולהבין את הזיקות התחבורתיות בו בצורה יותר מדויקת.

2. האם יש מקום לייצר היררכיה בין החלוקות השונות? האם ניתן להגדיר חלוקות ברמות שונות, כאשר כל רמה מייצגת זיקה שונה בין האזורי? כיצד ניתן לבצע זאת בצורה מתודולוגית ומדידה?
3. כיצד שיטה זו יכולה לסייע בתכנון תחבורתי עתידי? האם ניתן להשתמש בתוצאות החלוקה על מנת לשפר את התכנון התחבורתי, ולהתאים אותו לצרכים האמיתיים של האוכלוסייה? כיצד ניתן להשתמש בתוצאות החלוקה על מנת להגדיר טוב יותר את היחידות התכנוניות השונות במדינה (כגון מרחבי תכנון, אזורי תפקוד עירוניים ומטרופולינים), על מנת להגדיר היררכיה תכנונית ברורה ומדויקת יותר?

הערות

המאמר מוקדש לעילוי נשמת גיסי היקר, רן הירשהורן ז"ל, שנפטר בזמן תיקון המאמר בטרם עת.

1. מאמר זה הינו הרחבה של שרשור שכתבתי בטוויטר ב-14.3.22. קישור: <https://x.com/idoklein1/status/1503457710636998663>

2. תיעוד הסקר קיים בארבעה מסמכים מרכזיים:
 - (1) קשרי בית עבודה 2018, דוח מספר 2 של מודל ארצי לנסיעות. אגף תכנון כלכלי, משרד התחבורה והבטיחות בדרכים, וחברת מתת, אוקטובר 2019. (אגף תכנון כלכלי, משרד התחבורה וחברת מתת 2019).
 - (2) היקף ופילוג הנסיעות בארץ בשנים 2018-2019, דוח מספר 3 של מודל ארצי לנסיעות. אגף תכנון כלכלי, משרד התחבורה והבטיחות בדרכים, וחברת מתת, יולי 2020. (אגף תכנון כלכלי, משרד התחבורה וחברת מתת 2020).
 - (3) היקף ופילוג הנסיעות בארץ בשנים 2018-2019, דוח מספר 4 מסכם. מודל ארצי לנסיעות. אגף תכנון כלכלי, משרד התחבורה והבטיחות בדרכים, וחברת מתת, ספטמבר 2021. (אגף תכנון כלכלי, משרד התחבורה וחברת מתת 2021).
 - (4) אספקת מידע על תנועות ארציות של נוסעים לפי נתוני טלפונים סלולריים, חברת מובי וחברת קולניק, מאי 2022. (חברת מובי וחברת קולניק 2022). יש לציין כי ב-2007 התבצע סקר סלולרי נוסף על מנת לשמש חומר גלם למודל הארצי שפותח אז. עם זאת, סקר זה היה מדגמי וכלל

Traag, V. A., Waltman, L., & Van Eck, N. J. (2019). From Louvain to Leiden: guaranteeing well-connected communities. *Scientific reports*, 9(1), 5233.

Ward Jr, J. H. (1963). Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American statistical association*, 58(301), 236-244.

[D7%A8%D7%A6%D7%99_%D7%91%D7%A9%D7%A0%D7%99%D7%9D_2018-19.pdf](https://mot-roundtbl.org.il/wp-content/uploads/Library/2021/%D7%A8%D7%A6%D7%99_%D7%91%D7%A9%D7%A0%D7%99%D7%9D_2018-19.pdf)

משרד התחבורה והבטיחות בדרכים. (2021). היקף ופילוג הנסיעות בארץ בשנים 2019-2018 – דוח מספר 4 מסכם, מודל ארצי לנסיעות. משרד התחבורה והבטיחות בדרכים. https://mot-roundtbl.org.il/wp-content/uploads/Library/2021/%D7%A8%D7%A6%D7%99_%D7%91%D7%A9%D7%A0%D7%99%D7%9D_2018-19_%D7%93%D7%95%D7%97_%D7%9E%D7%A1%D7%9B%D7%9D_2021.pdf

פורטל הנתונים הפתוחים של ממשלת ישראל. (2021). נסיעות סלולריות 2019-2018 https://data.gov.il/he/datasets/ministry_of_transport/tripscelular_1819

רשות כבישי ישראל. (2023). מערכת תלתן – מערכת מידע גאוגרפית תחבורתית. אתר אינטרנט. <https://tiltan.ayalohw.co.il/App.aspx>

Adam, A., Delvenne, J. C., & Thomas, I. (2018). Detecting communities with the multi-scale Louvain method: robustness test on the metropolitan area of Brussels: A. Adam et al. *Journal of Geographical systems*, 20(4), 363-386.

Blondel, V. D., Guillaume, J. L., Lambiotte, R., & Lefebvre, E. (2008). Fast unfolding of communities in large networks. *Journal of statistical mechanics: theory and experiment*, 2008(10), P10008.

Khiali-Miab, A., van Strien, M. J., Axhausen, K. W., & Grêt-Regamey, A. (2019). Combining urban scaling and polycentricity to explain socio-economic status of urban regions. *PLoS one*, 14(6), e0218022.

Klein, Ido. (2021). על עריצות המטריצה. Twitter/X. retrieved from <https://x.com/idoklein1/status/1470484147328143363>.

OECD. (2019). The EU-OECD Definition of a Functional Urban Area. OECD. https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2019/12/the-eu-oecd-definition-of-a-functional-urban-area_cef4a128/d58cb34d-en.pdf

Pons, P., & Latapy, M. (2005, October). Computing communities in large networks using random walks. In *International symposium on computer and information sciences* (pp. 284-293). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Pons, P., & Latapy, M. (2006). Computing communities in large networks using random walks. *Journal of graph algorithms and applications*, 10(2), 191-218.

Rousseeuw, P. J. (1987). Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of computational and applied mathematics*, 20, 53-65.

Stack Exchange Contributors. (2023). Choosing the right linkage method for hierarchical clustering. Cross Validated, Stack Exchange. <https://stats.stackexchange.com/questions/195446/choosing-the-right-linkage-method-for-hierarchical-clustering>