

יישום של Big Data מרחבי לחישוב והערכת הנגישות לתחבורה ציבורית בעיר תל-אביב-יפו

ערן בן-אליא, יצחק בננסון, יודן רופא, אלי ספרא וזימטרי גייזרסקי

תקציר

נגישות, בעיקר לתחבורה ציבורית מהווה נדבך חשוב במדיניות תחבורה מקיימת. מרבית המדדים להערכת נגישות בספרות מבוססים על רזולוציה מרחבית גסה יחסית של שכונות או אזורי תנועה. באמצעות כלי חדש מבוסס ממיג, אנו מראים כיצד ניתן להעריך נגישות מבית לבית, הדומה יותר לתפיסת האדם את הניידות במרחב. אנו מחשבים את הנגישות היחסית בין רכב פרטי לתחבורה ציבורית על בסיס זמני ומסלולי הנסיעה, כולל זמני הליכה והמתנה בתחנות. כל זאת ברזולוציה מרחבית של בניין בודד. היישום מנצל את התכונות המתמטיות של בסיס נתונים מבוסס גרף לצורך בניית מפות נגישות ברמת רזולוציה גבוהה לכל עיר במטרופולין תל-אביב. אנו מראים את היישום עבור ניתוח של הנגישות בעיר תל-אביב-יפו והשוואת הנגישות היחסית לפני ואחרי הרפורמה ברשת התחבורה הציבורית של 2011. התוצאות מראות כי ללא התחשבות ברזולוציה הגבוהה לא ניתן לבצע הערכה נכונה ולא מוטה של תרומת הרפורמה לנגישות בגלל רמת השונות הגבוהה בתוך אזורי התנועה. בנוסף אנחנו מראים כי היישום מאפשר חישוב של שוויוניות בנגישות באמצעות מדדי שוויוניות. אלו מראים כי הרפורמה תרמה להעלאת הנגישות הממוצעת לנסיעות בעיר תל-אביב-יפו, ושיפור קל בשוויוניות, בעיקר עבור משכי נסיעה ארוכים יותר.

מבוא

המושג נגישות (accessibility) משמש במספר תחומים מדעיים כגון תכנון תחבורה, תכנון עירוני, וגאוגרפיה. בצורתה הפשוטה, נגישות מוגדרת כיכולת של האדם להגיע ליעדים הכרחיים ורצויים באמצעות אמצעי הנסיעה הקיימים במערכת התחבורה (Geurs and Ritsema van Eck, 2001; Garb and Levine, 2002; Handy, 1997). בספרות המדעית הבין-לאומית שיפור הנגישות נחשב כקריטריון מרכזי להערכת האיכות של מדיניות תחבורה ופיתוח שימושי הקרקע (Kenyon et al., 2002; Bristow et al., 2009). זאת בניגוד למקובל בפרקטיקה התכנונית שבה אפשרו הניידות, קרי חסכון בזמני הנסיעה ובעלויות תפעול כלי הרכב מהווים מדדים להצלחת תכנון התחבורה. מדדי נגישות משמשים להערכת התרומה של השקעות בתשתית תחבורתית לניידות של אנשים וסחורות ומכאן לפעילות כלכלית יעילה. נגישות היא אמת מידה חיונית להערכת שלושת עמודי התמך של פיתוח בר-קיימא: פיתוח כלכלי, איכות הסביבה ושוויוניות חברתית (Bruinsma, Nijkamp et al. 1990; Bertolini, 2005; Kwok and Yeh 2004; Feitelson, 2002). נגישות,

לפיכך, משמשת כאינדיקטור להיקף שבו כלל הקבוצות באוכלוסייה יכולות להשתתף בפעילויות הנחשבות נורמליות לחברה כגון גישה למקומות עבודה ולשירותים חיוניים (Farrington and Farrington, 2005; Martens, 2012; Lucas, 2012). בכל הממדים הללו, נגישות היא אמת מידה חשובה למדיניות תכנון מרחבי, ומדדי נגישות חשובים לשם תכנון עירוני ומדיניות תחבורה מתאימים.

למרות שאין חולקים על חשיבות ההתייחסות לנגישות ביעדי תכנון ומדיניות עירוניים, בהיעדר הגדרה ברורה, לעיתים קרובות, קיימת חוסר הבנה, ושגיאות במדידתה. הספרות מציגה מגוון רחב של גישות למדידת נגישות. גישות אלו שונות זו מזו בחישוב מרחקי או זמני הנסיעה, השילוב וההשוואה בין אמצעי הנסיעה השונים, קנה המידה המרחבי של הניתוח ומידת ההתחשבות בפירוט רשת הדרכים והתחבורה הציבורית. בשל הבדלים אלו, נהוג לאפיין את ממדי הנגישות בצורה רחבה לשתי קטגוריות – מדדים מבוססי מיקום ומדדים מבוססי נוסע. (Geurs and van Wee (2004), מגדירים ארבעה מדדים חופפים במידה מסוימת: מדדים מבוססי תשתית (מהירות ממוצעת על הרשת); מדדים מבוססי מיקום (מספר מקומות העבודה ברדיוס של 30 דקות נסיעה), מדדים מבוססי פרט (מספר הפעילויות בהם בן אדם יכול לקחת חלק בפרק זמן נתון) ומדדים מבוססי תועלת (התועלת הכלכלית הנובעת מנגישות למקום). הגדרה פחות חופפת מציעים Liu and Zhu (2004): מדדים מבוססי הזדמנות על בסיס מספר היעדים שניתן להגיע במרחק או בזמן נתונים (לדוגמה: Mavoa et al. 2011; Benenson et al, 2012; O'Sullivan et al. 2000; Witten et al. 2003;2011; Ferguson et al. 2008; Martin et al. 2013). מדדים מבוססי פוטנציאל (למשל: Alam et al. 2010; Grengs et al. 2008; Minocha et al. 2010); מדדים מבוססי תועלת הקושרים נגישות עם עודף הצרכן ותועלות המשתמשים בתחבורה (למשל: Ben-Akiva and Lerman, 1979; מדדים המבוססים על טווח ותדירות הפעילויות שיכול אדם לבצע תחת אילוצי מרחב-זמן (למשל: Neutens et al. 2010; Miller, 1999).

העניין הגובר בקשר בין פיתוח בר קיימא וניידות מחזק את הצורך בהערכה של הנגישות בתחבורה ציבורית (Kaplan et al., 2014; Tribby and Zandbergen). נגישות היא בעיקרה מדד יחסי. הפער בין נגישות ברכב פרטי ובתחבורה ציבורית מעיד על מידת התלות ברכב פרטי במרחב העירוני (Benenson et al, 2011; Ferguson et al. 2013; Grengs et al. 2010; Mao and Nekorchuk, 2013; Mavoa et al. 2012; Blumenberg and Ong, 2001; Hess, 2005; Martin et al. 2008; רבים היא חד משמעית, במרבית המקרים רמת הנגישות בתחבורה ציבורית נמוכה יותר משמעותית לעומת הרכב הפרטי. (Kawabata 2009; Salonon and Toivonen 2013).

יחד עם זאת, למרות מגוון רחב של מדדים, הספרות אינה מספקת הדרכה מספקת כיצד לבחור ולהפעיל את המדדים השונים בתכנון וניתוח מדיניות. יתר על כן, קיים פער בין תפיסתה הפיזי-פיננסית של הנגישות המוצגת בספרות, כדבר שניתן לשיפור או פתרון דרך תכנון או תמחור נכונים, לבין האופן שבו בני אדם, תושבי העיר, תופסים את חוויות הניידות היומיומיות שלהם. נקודה זו הוצגה היטב על ידי Kwan (1999: 210): "חוויות הנגישות

של אנשים בחיי היומיום שלהם הינן בדרך כלל מורכבות הרבה יותר ממה שניתן למדוד עם מדדי נגישות קונבנציונליים" (תרגום המחברים).

חסרון בולט של המאמצים הקודמים להעריך את הנגישות, הוא התאמת הרזולוציה המרחבית של הניתוח לקנה המידה שבו בדרך כלל בני אדם מקבלים החלטות על ניידותם, קרי מעבר ממבנה אחד במוצא למבנה אחר ביעד תוך כדי ניווט דרך סבך מערכת התחבורה, המורכבת מאמצעי נסיעה שונים, קווים ותחנות. עד עתה לא היה ניתן ליצור מודל תחבורתי ברזולוציה בה בני אדם מקבלים החלטות משתי סיבות עיקריות, האחת חוסר קשר בין נתוני רשתות הדרכים ותחבורה ציבורית לבין המבנים בהם נמצאים הנוסעים הפוטנציאליים, והשנייה מגבלות על אפשרויות החישוב של הכמות העצומה של המסלולים האפשריים בין מבנים בתוך אזור עירוני. כתוצאה מכך, הנגישות הוערכה בצורה מרחבית אגרטיבית ויחסית גסה – ברמת רשויות מקומיות (Ivan et al., 2013), אזורי בחירה (Karner and Niemeier, 2013), אזורי תנועה (Black and Conroy, 1977; Shen, 1998; Bhandari et al., 2009; Ferguson et al., 2013; Foth et al., 2013; Rashidi and Mohammadian, 2011; Haas et al., 2008; Burkey, 2012; Lao and Liu, 2009; Grengs et al., 2010; Kaplan et al., 2014), או שכונות (Witten et al. 2011). הניתוח האגרטיבי מניח שנקודות המוצא והיעד הן מרכזי האזורים, ובסופו של דבר התוצאה היא מפת מדדי נגישות לא רציפה הדומה יותר לשמיכת טלאים, שבה רמת הנגישות משתנה באופן חד בגבול בין שני אזורים שכנים. זאת למרות שמבחינה מעשית אין הבדל מהותי במעבר של אותו גבול. יתר על כן, כיון שבדרך כלל גבולות האזורים הם הרחובות הראשיים, שבהם נוסעים בדרך כלל רוב אמצעי התחבורה הציבורית, סוג זה של ניתוח מחמיץ את הפער בין אזורים הקרובים לרחובות הראשיים ואלו המרוחקים מהם. רק מחקרים מעטים ניסו ליצור מודל נגישות ברמה של חלקות, וגם אם עשו זאת, אזי את התוצאות איחדו לצורכי הניתוח הכמותי (Mavoa et al. 2012; Tribby and Zandbergen, 2012; Welch 2013; Salonen and Toivonen, 2013).

בעוד שעבור ניתוח של הנגישות ברכב פרטי, ניתוח מצרפי עשוי להספיק, הרי שעבור ניתוח של נגישות בתחבורה ציבורית, ניתוח מצרפי נוטה להערכת חסר או הערכת יתר של הנגישות. יתר על כן, מרכיבים חשובים בנגישות בתחבורה ציבורית כגון זמני הליכה לתחנות עליה ומתחנות ההורדה ובין תחנות בעת החלפת קו יחד עם זמני ההמתנה, אינם נלקחים בדרך כלל בחשבון בצורה מפורשת בניתוח מצרפי בחישוב של זמן הנסיעה הכולל מדלת לדלת.

ניתוח מרחבי מפורש ברזולוציה גבוהה יוצר אילוצים חישוביים משמעותיים. מטרופולין טיפוסית, עם אוכלוסייה של כמה מיליוני תושבים, יכולה בין חצי-מיליון למיליון מבנים. דבר המצריך חישוב של מאות מיליוני צמדי מוצא-יעד. הנסיעות עצמן כוללות עיבוד של מאות אלפי קטעי רחובות ומאות קווי תחבורה ציבורית (Benenson et al., 2010; 2011). לפיכך, החישובים דורשים עיבוד של היקפי מידע גולמי עצומים (ומכאן הצורך בטכנולוגיות של Big Data). לדוגמה במטרופולין תל-אביב יש אוכלוסייה של 2.5 מיליון תושבים, בערך 300 אלף מבנים ולמעלה מ-300 קווי אוטובוס. עד לא מזמן, הניסיון לנתח את הנגישות ברמה זו של נתונים היה עקר, ולא הייתה ברירה אלא לבצע אגרזיה של הנתונים. אולם, התפתחויות באלגוריתמים לעיבוד

מידע מעל בסיסי נתונים מבוססי גרף יחד עם מחשוב מקבילי, מהווים פתרון אפשרי לבעיה (Buerli, 2012).

במאמר זה, אנו עושים שימוש ביישום חדש מבוסס מ"ג בשם CTgraph. מאפשר חישובי נגישות ברזולוציה של מבנים במהירות רבה. היישום מנצל את נתוני המ"ג ברזולוציה גבוהה, ומספק הערכות מדויקות בזמן ובמרחב של הנגישות בתחבורה הציבורית. לפיכך, ניתן להעריך את מערכת התחבורה בכל מקום ולכל שעות היום. היישום מממש את העקרונות שהוצעו על ידי Benenson et al. (2011), ואת הפיתוחים האחרונים של (Benenson et al., 2014).

יתר המאמר מאורגן בצורה הבאה: בחלק 2, מוצגת הגישה האנליטית ששימשה לחישובי הנגישות, חלק 3 מציג את עקרונות היישום CTgraph, חלק 4 מציג את הפעלת CTgraph להערכת הנגישות היחסית בתחבורה ציבורית בעיר תל-אביב-יפו והשוואה בין הנגישות לפני ואחרי הרפורמה ברשת התחבורה הציבורית ב-2011. חלק 6 מנתח את השווינויות בנגישות ובוחן מי נהנה מהשינוי שיצרה הרפורמה חלק 6 מסביר, מדוע יש לדעתנו הצדקה לבצע את ניתוחי הנגישות ברמת רזולוציה גבוהה ולא להסתפק רק ברזולוציה של ניתוח סטטיסטי קונבנציונלי על בסיס אזורי תנועה. חלק 7, מסכם ומציע רעיונות להמשך המחקר ולפרקטיקת המתכננים.

הגישה האנליטית להערכת נגישות

נגישות היא פונקציה של שלושת המרכיבים של המערכת העירונית:

- התפלגות מרחבית של שימושים עירוניים כמו מקומות העבודה, בילויים ופעילויות אחרות, צפיפות ומאפיינים סוציו-כלכליים של האוכלוסייה;
- מערכת התחבורה הכוללת את רשת הדרכים, אמצעי הנסיעה, זמן, עלות ועכבת הנסיעות, אל ומכל מקום במרחב המטרופוליני;
- הרצון של המשתמשים לבצע נסיעות ממקומות המגורים לשאר הפעילויות.

אילו חוקי הפעולה של שלוש המערכות היו ידועים, ניתן היה לשחזר מערכת קו-אבולוציונית עירונית בה שימושי הקרקע והתחבורה מתאימים עצמם באופן הולם יותר ל פריסתם המרחבית של המשתמשים ולצרכיהם השונים (למשל לאנשים עם מגבלות ניידות). אולם, כל מערכת יש קצב השתנות והסתגלות שונה מרעותה. מתאר הרחובות, המבנים ושימושי הקרקע משתנים בקצב איטי – לאורך שנים בתגובה לשינויים תרבותיים, דמוגרפיים, כלכליים ותשתיות התחבורה. לכן בהקשר של מחקר זה אנו מניחים כי אלו קבועים באופן יחסי. מנגד, הנוסעים - תושבי העיר - מגיבים במהירות יחסית, לכל שינוי שחל בתחבורה או בשימושי הקרקע. יחד עם זאת, קשה לנבא את ההתנהגות של הנוסעים הבודדים, הפועלים לעיתים בצורה לא רציונלית ולא צפויה בתנאי אי-וודאות תמידית ובתגובה למידע חלקי (Ben-Elia and Avineri, 2015). לפיכך, במחקר זה אנו מתייחסים ואומדים את הנגישות כמייצגת את שיקולי הניידות הפוטנציאלית (potential mobility) של הנוסעים ולא חושים את החלטותיהם או תנועותיהם המפורשות במרחב-זמן, כפי שמקובל בקרב מתכנני התחבורה. הואיל ומערכת התחבורה רגישה יותר לשינויי מדיניות ולהשקעות בתשתיות לעומת שימושי הקרקע. בחרנו

לעסוק בשלב זה, באומדן הנגישות הפוטנציאלית (potential accessibility), כאשר הכוונה היא לאילו פעילויות או שימושים, כגון מספר מקומות העבודה, ניתן להגיע בפרק זמן נתון מכל מקום במרחב. מדד זה מהווה מעין אומדן לשיוויון ההזדמנויות המרחבי. לאור זאת, אנו מתמקדים בהערכת ההשלכות של שינויים בתת-מערכת זו על פוטנציאל הנגישות של התושבים לשימושי קרקע קבועים. רצוי כמובן גם לבחון את המשמעות של בחינת הנגישות על פי הביקוש בפועל לנסיעות (על בסיס מטריצת מוצא-יעד או מתוך סקר הרגלי נסיעה). זהו מדד שונה בתכלית מהנגישות הפוטנציאלית, המבטא את תפרוסת הנסיעות בפועל - או ליתר דיוק את זמני הנסיעה ושעות הנוסע. את זאת, אנו משאירים זאת להמשך המחקר בתחום.

מלבד ההתמקדות בנגישות הפוטנציאלית, אנו מתייחסים לנגישות כאל מדד יחסי - קרי, הערך הנצבר של שימוש קרקע או פעילויות מסוים (מספר מקומות עבודה, שטח מסחרי וכו') אילו יכול נוסע להגיע בפרק זמן נתון (למשל 30 דקות נסיעה) תוך שימוש באמצעי נסיעה נתון (בדרך כלל תחבורה ציבורית ורכב פרטי, אולם ניתן להרחיב את המסגרת גם לאופניים ולהליכה ברגל). לאחר שחושבה הנגישות הפוטנציאלית עבור אמצעי נסיעה מסוים, אנו מחשבים את הנגישות היחסית (פי כמה הפוטנציאל בתחבורה ציבורית שונה לעומת הרכב הפרטי). הואיל וכמעט ברוב המצבים, לרכב הפרטי תהיה נגישות פוטנציאלית גבוהה יותר מאשר לתחבורה הציבורית, מכאן החשיבות שהניתוח יכלול התייחסות מפורשת ליחס בין רכב פרטי ותחבורה ציבורית באומדן הנגישות.

אנו מיישמים את מדדי הנגישות הפוטנציאלית ברזולוציה מרחבית גבוהה של בניין בודד, כפי שהציעו Benenson et al (2011). מדדים אלו מבוססים על הערכה מדויקת של זמני הנסיעה ממוצא ליעד ומוגדרים לאמצעי נסיעה נתון. בנוסף, אומדני הנגישות מתבססים על שני מושגים - אזורי גישה (Access Area) ואזורי שירות (Service Areas): נגדיר את MTT כזמן נסיעה באמצעי $M(ode)$ ואת $S(space)$ כמרחב התכנון.

אזור גישה: בהינתן מוצא O , אמצעי M וזמן נסיעה t , נגדיר את אזור הגישה באמצעי M כ: $MAA_O(t)$ - מספר מספר מבני היעד D שניתן להגיע אליהם ממוצא O באמצעי M בזמן $t \leq MTT$.

אזור שירות: בהינתן יעד D , אמצעי נסיעה M וזמן נסיעה t , נגדיר את אזור השירות באמצעי M כ: $MSA_D(t)$ - מספר מבני המוצא O שמהם ניתן להגיע ליעד D באמצעי M בפרק זמן של $t \leq MTT$.

חשוב לציין שהנגישות תלויה בהגדרות של אזור התכנון S וככל שמוצא או יעד מסוימים נמצאים קרוב לגבולות של S , כך גדל הסיכון לסטייה של האומדן, הואיל ונקודות היעד או המוצא נמצאות מחוץ לגבולות של S , אינם נכללות בניתוח. כדי להימנע ממצב זה, רצוי שהגדרת השטח S , לא תחתוך את המרקם הרציף של התנועות בין נקודות מוצא ויעד. בתחום תכנון התחבורה נהוג לפצות על בעיה זו באמצעות הוספת נסיעות חיצוניות לנסיעות הקיימות במטריצת הביקוש. כאשר מדובר על פוטנציאל, פתרון זה לא ישים. לכן בהמשך, אנו בוחנים את הנגישות הפוטנציאלית מאזורי מוצא במרחב העיר תל-אביב יפו לאזור יעד בשאר המטרופולין, באופן שאף נסיעה מעבר לפרק זמן של 45 ד' לא תחרוג מגבול המטרופולין, המוגדר כמרחב התכנון במחקר. חשוב לציין כי ראיית הנגישות כמושג יחסי, מקטינה במידה מסוימת את

בעיית קביעת הגבולות שתוארה לעיל, מאחר שגם אם נחתכות תנועות מסוימות, לא צפוי שינוי משמעותי ביחסים בין רכב פרטי לתח"צ. זאת מאחר שהגבלה של אזור התכנון משפיעה על כל נסיעות ללא קשר לאמצעי הנסיעה (Mode). אם, למשל, נקודת המוצא נמצאת בגבול האזור אז נסיעות מעבר לגבול לא נלקחות בחשבון באף אחד מהאמצעים ואז היחס ביניהם עדיין משקף יתרונות או חסרונות יחסיים, במיוחד כשהנסיעות לא מוגבלות על ידי הגבול שבו נמצאים נקודות מוצא אלא על ידי אזור גדול בהרבה כגון העיר תל-אביב-יפו מול מטרופולין תל-אביב כולו כפי שנעשה במאמר זה. ברם, מאמר זה לא נכנסנו לפרטים נוספים, הקשורים להגבלת אזור התכנון והתייחסנו לכל מדד נגישות כמדד מוחלט או יחסי בתוך האזור הנתון.

כפי שנאמר לעיל, במחקר זה אנו מתמקדים באומדן הנגישות ברכב פרטי ובתחבורה הציבורית. לפיכך, אנו מחשבים לאזורי גישה ולאזורי שירות את הנגישות היחסית בין תחבורה ציבורית לרכב פרטי כדלקמן:

בהינתן מוצא O , היחס בין אזורי הגישה תחבורה ציבורית לאזור הגישה ברכב פרטי הוא:

$$AA_O(t) = BAA_O(t)/CAA_O(t) \quad (1)$$

בהינתן יעד D , היחס בין אזור השירות בתחבורה ציבורית לאזור השירות ברכב פרטי הוא:

$$SA_D(t) = BSA_D(t)/CSA_D(t) \quad (2)$$

את משוואות (1) ו-(2), ניתן בקלות גם להגדיר לכל סוג של יעד (k) מתוך כלל נקודות יעד D_k או מוצא O_k . כמו כן ניתן לקחת בחשבון את הקיבולות השונות באזור הגישה (למשל מספר מקומות העבודה בתעשיות עתירות ידע, מספר מקומות העבודה עם שכר מינימום) או השירות (מס. דירות במחיר בר השגה, או מספר הקשישים באזורי השירות מבתי חולים וכדומה).

יישום

בעוד שיישומים אחרים המשמשים בתכנון תחבורה יכולים לבצע הערכת נגישות ברמת אזור תנועה, ניתוח ברמת מבנים דורש יישום מיוחד. היישום שפותח במסגרת מחקר זה - CTGraph - עושה שימוש חדשני בבסיס נתונים מבוסס גרף הפועל על אלגוריתם במחשוב מקבילי (Crauser et al, 1998; Buerli, 2012). התוצאות מוצגות במפות אינטראקטיביות אותן ניתן לייצא לכל תוכנת GIS.

- נתוני קלט ופלט

בסיס הנתונים הנדרש כולל:

- שכבה של דרכים עם המאפיינים לבנייה של הרשת (קטעים, מוקדים ואיסורי פניה)
- שכבה של תחנות התחבורה הציבורית מכל הסוגים: רכבת, מטרו, רק"ל, אוטובוסים
- טבלת לוחות זמנים ליציאה והגעה של כל קו בכל אמצעי תחבורה הציבורית לכל אחת מהתחנות לאורך המסלול שלו (בזמנים מוחלטים או תדירויות)

- שכבה של נקודות מוצא ויעד כולל קיבולות : מבנים ושימושי הקרקע שלהם : מגורים, מסחר, משרדים, תעשייה, פארקים ונופש. אלו מאפשרים חישוב של הנגישות לפי שימושי קרקע ספציפיים בהתחשב במספר התושבים בהם או המועסקים בהם.

את נתוני התח"צ ניתן לקחת מקבצי GTFS של Google Transit. GTFS (General Transit Feeder Specification) זו חבילת קבצים, שניתן להוריד מאתר Google במספר רב של מדינות. הקבצים כוללים נתונים על מסלולי קווים, לוחות זמנים של כל קו בכל תחנה ומיקום של תחנות. בישראל, נתונים אלו נאספים עבור משרד התחבורה, ובכל עת שמתעדכן לוח זמנים או קו כלשהם, יוצאת גרסה חדשה לרשת.

לפני הרצת המודל על המשתמש לקבוע פרמטרים שונים : מרחקי הליכה מקסימליים, זמני המתנה מקסימליים, פרק זמן של התחלת הנסיעה, משך הנסיעה מקסימלי, אלו מפורטים בטבלה 1.

טבלה 1: פרמטרים בסיסיים לניתוח נגישות בתחבורה ציבורית

| פרמטר | ערך |
|---|-------------|
| מרחק הליכה מקסימלי לתחנה (לפי קו אווירי) | 400 מ' |
| פרק זמן שהנוסע יכול לעלות על האוטובוס/רכבת | בין 7:30-15 |
| מעברים בין קווים | מותרים |
| מרחק הליכה מקסימלי בין תחנות למעבר בין קווים | 200 מ' |
| זמן מקסימלי של המתנה לאוטובוס/רכבת בתחנת המעבר | 10 דק' |
| משך נסיעה מקסימלי (כולל ההליכה ממוצא לתחנה ומתחנה ליעד) | 45 דק' |
| זמן הליכה מנקודת מוצא לחניה | 0 דק' |
| זמן חיפוש חניה והליכה מחניה ליעד | 5 דק' |

הפלט של המודל כולל סדרה של מפות נגישות ברזולוציה גבוהה לכל יחידה מרחבית והטבלאות ותרשימים התואמים.

- תרגום רשתות התחבורה לגרף

ביישום נעשה שימוש בבסיס נתונים מסוג גרף (Graph database). רשתות הדרכים והתחבורה הציבורית מתורגמות לגרף מכוון (directed graph). רשת הדרכים מתורגמת בצורה סטנדרטית: צמתים למוקדים, מקטעי רחובות לקטעים (קטעים דו כיווניים מתורגמים לשני קטעים נפרדים) וזמני נסיעה ממוצעים לעכבה. כדי לקבל גרף מלא אנו קושרים בגרף את כל המבנים לצמתי הרחובות הקרובים אליהם, כאשר העכבה כאן היא זמן ההליכה למקום החניה של הרכב הפרטי

זמן נסיעה ברכב פרטי (CTT) מחושב בצורה הבאה :

זמן הליכה מבינין המוצא לחנייה + זמן נסיעה ברכב + [זמן חיפוש חנייה] + זמן הליכה מנקודת החנייה ליעד

מסלול הנסיעה של הרכב הפרטי, נקבע דטרמיניסטית לפי המסלול הקצר בזמן בין מוצא ליעד על פי האלגוריתם של Dijkstra (1959). בשלב זה המודל שלנו אינו מתחשב בזמני גודש, אלא מקבל כקלט חיזוני את זמני הנסיעה

הממוצעים בכל אחד מקטעי הרשת ולפי זמן זה מחשב את המסלול הכי קצר מבניין לבניין. בהיעדר נתונים אחרים, זמן חיפוש החנייה וההליכה ליעד נקבע כ-5 דק'.

זמן נסיעה בתחבורה הציבורית (BTT) מחושב שצורה הבאה:

זמן הליכה ממוצא לתחנה 1# + זמן המתנה לקו 1# + זמן נסיעה בקו 1# + [זמן הליכה למעבר לקו 2# + זמן המתנה לקו 2# + זמן נסיעה בקו 2#] + [מרכיבי מעבר לקוים נוספים] + זמן הליכה מתחנה סופית ליעד. סוגריים מרובעים מתייחסים למרכיבים אופציונליים.

מסלול הנסיעה נקבע באופן דטרמיניסטי לפי לוחות הזמנים הרשמיים של הקווים השונים (או התדירות במקרה של חיזוי לעתיד) והמסלול ממוצא ליעד נבחר לפי המסלול הקצר ביותר בזמן הכולל מדלת לדלת. מאחר שאנו לא בוחנים את ההתנהגות הפרטנית של הנוסעים, איננו מסתכלים על התפלגות בין מספר אפשרויות נסיעה כפי שמקובל במודלים של תכנון תחבורה ציבורית.

בתוך החישוב כלולות מספר הנחות ביחס למספר המעברים וזמני ההליכה המקסימליים שאותם מוכן הנוסע הממוצע לקבל. הגרף של התחבורה הציבורית (TGraph) תלוי בלוחות הזמנים ולכן בנוי עבור חלון זמנים נתון. בהינתן קווי התח"צ, תחנות ולוח זמנים, מוקד N של גרף תחבורה ציבורית מוגדר כרביעייה (quadruple) הכוללת את מספר הקו (PT_LINE_ID), זמן היציאה מנקודת המוצא של הקו (TERMINAL_DEPARTURE_TIME), מספר התחנה (STOP_ID), זמן ההגעה לתחנה (STOP_ARRIVAL_TIME). כך:

$N = \langle PT_LINE_ID, TERMINAL_DEPARTURE_TIME, STOP_ID, STOP_ARRIVAL_TIME \rangle$

שני מוקדים N1 ו-N2 של גרף התח"צ

$N1 = \langle PT_LINE_ID1, TERMINAL_DEPARTURE_TIME1, STOP_ID1, STOP_ARRIVAL_TIME1 \rangle$

וגם

$N2 = \langle PT_LINE_ID2, TERMINAL_DEPARTURE_TIME2, STOP_ID2, STOP_ARRIVAL_TIME2 \rangle$

מחוברים על ידי קטע L12 בשני מקרים: כאשר כלי רכב של אותו קו תח"צ נע מ-STOP_ID1 ל-STOP_ID2, כלומר: $PT_LINE_ID1 = PT_LINE_ID2$, וגם: $TERMINAL_DEPARTURE_TIME1 = TERMINAL_DEPARTURE_TIME2$. וכן: $STOP_ID1 \neq STOP_ID2$ עוקב אחרי STOP_ID1 על קו PT_LINE_ID1 ואז: העכבה על הקטע L12 שווה במקרה זה ל-STOP_ID1 ל-STOP_ID2. $STOP_ARRIVAL_TIME1 \leq STOP_ARRIVAL_TIME2$. כאשר נוסע יכול להחליף קו בין N1 ל-N2 – ירידה מכלי הרכב בתחנה STOP_ID1 ועליה על קו אחר בתחנה STOP_ID2. מעבר יכול להתרחש אם זמן ההליכה W12 בין STOP_ID1 ל-STOP_ID2 קטן או שווה לזמן ההליכה המקסימלי שהוגדר בפרמטרים (WALKMAX), וכן אם הזמן בין עצירת הקו הראשון בתחנה (STOP_ARRIVAL_TIME1) לעצירת הקו השני בתחנה 2 (STOP_ARRIVAL_TIME2) גדול או שווה לזמן ההליכה בין התחנות (W12), וקטן או שווה לזמן ההליכה בין התחנות וזמן ההמתנה המקסימלי שהוגדר

בן אליא ואחרים : הערכת נגישות לתחבורה ציבורית באמצעות יישומי ביג דאטה

בפרמטרים (W_{max}) זמן ההליכה מחושב לפי מהירות הליכה קבועה של 3.6 קמ"ש.

$$W_{12} \leq W_{max}$$

וגם: $W_{12} \leq STOP_ARRIVAL_TIME_2 - STOP_ARRIVAL_TIME_1 \leq W_{12} + W_{max}$

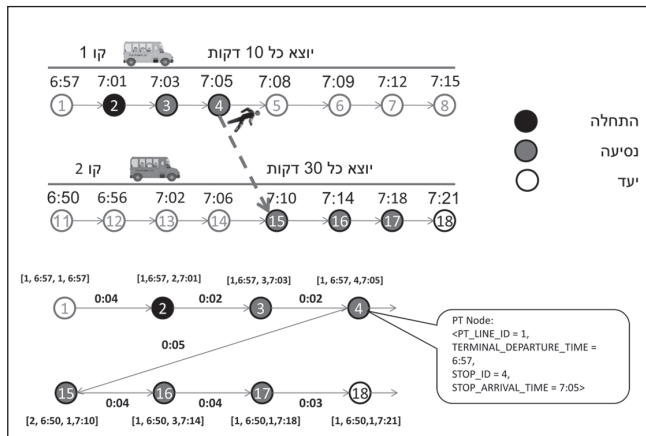
על מנת לקבל גרף מלא, אנו מרחיבים את TGraph כדי שישלול את כל המבנים והחיבורים בין המבנים ותחנות התחבורה הציבורית הקרובות אליהם. בשני המקרים כל מבנה B מוגדר כמוקד המחובר למוקד תחנה N אם זמן ההליכה ממנו קצר מ- W_{max} . העכבה בין B ל-N שווה לזמן ההליכה ביניהם. ב-TGraph, מוקד B מחובר למוקד N:

$N = \langle PT_LINE_ID, TERMINAL_DEPARTURE_TIME, STOP_ID, STOP_ARRIVAL_TIME \rangle$

בתלות בשעת היציאה מנקודת המוצא T_{start} אם זמן ההליכה ביניהם קטן לפחות מ- W_{max} וגם:

$$T_{start} + W_{max} < STOP_ARRIVAL_TIME < T_{start} + W_{max} + W_{max}$$

תחנה N מחוברת למבנה B אם זמן ההליכה ביניהם קטן לפחות מ- W_{max} . העכבה של קטע בין מוקד B ל-N על גרף תח"צ שווה לזמן ההליכה בין B ל-N וזמן ההמתנה להגעת הקו לתחנה. העכבה של קטע בין מוקד N ל-B היא רק זמן ההליכה מהתחנה למבנה. איור 1 מציג תיאור של נסיעה טיפוסית בתחבורה ציבורית ממוצא ליעד בסדרה של מקטעים מחוברים.



איור 1: תיאור סכימטי של תרגום נסיעה בתח"צ לגרף

חקר אירוע: השפעת הרפורמה בתח"צ על הנגישות בתל-אביב-יפו

את השיטה אנו מיישמים לבחינת הנגישות מכלל המבנים ברחבי העיר תל-אביב-יפו (המוצאים) לכלל המבנים במטרופולין (היעדים) תחת שני תרחישים: לפני הרפורמה של התחבורה הציבורית ב-2011 ולאחריה. במסגרת הרפורמה שונו מתארי הקווים ברחבי המטרופולין, בוטלו קווים ונוספו קווים חדשים.

איור 2 מציג את הנגישות למקומות עבודה במטרופולין בשעת שיא בוקר בחתכי נסיעה של 15, 30 ו-45 דקות נסיעה ברכב פרטי. איור 3 מציג את הנגישות למקומות עבודה במטרופולין בשעת שיא בוקר לפני הרפורמה בחתכי נסיעה של 15, 30 ו-45 דקות בנסיעה בתחבורה הציבורית. איור 4 מציג את אותם נתונים למתאר הקווים לאחר יישום הרפורמה.

איורים 5 ו-6 מציגים את הנגישות היחסית (היחס בין מס' מקומות העבודה הנגישים בתחבורה ציבורית לעומת רכב פרטי) לפני הרפורמה ולאחריה. איור 7 מציג את ההפרשים בנגישות היחסית בין שני התרחישים.

ניתן לראות מהמאיורים, כי השפעת הרפורמה היא בעיקרה חיובית ככל שמשך הנסיעה עולה, הנגישות היחסית משתפרת, כך שב-45 דקות כמעט בכל רחבי תל-אביב-יפו ישנה נגישות יחסית גבוהה של יותר מ-0.5 (כלומר מספר מקומות העבודה הנגישים מת"א בתח"צ הוכפל). אולם השיפור אינו אחיד על פני כל העיר וישנם אזורים שבהם הנגישות ירדה יחסית. יש לציין שעם הגידול באורך הנסיעה אזורים שבהם הרשת החדשה לא הביאה לשיפורים בנגישות הולכים ומצטמצמים. הסיבה לכך, בנוסף לעליה בשיעור זמן נסיעה בתוך כלי הרכב וירידה בשיעור זמן הליכה בזמן הכולל של הנסיעה, היא עליה בשיעור הנסיעות עם מעבר מקו לקו.

טבלה 2 מסכמת את השינויים בנגישות היחסית בהתאם לזמני הנסיעה בשעה 15: 07. מן הטבלה עולה כי הנגישות היחסית אכן השתפרה וכי השיפור הגדול ביותר הוא עבור נסיעות ארוכות יותר.

טבלה 2: שינויים בנגישות היחסית בחתכי זמן שונים: סטטיסטיקה תיאורית

| משך הנסיעה בדקות | 15 | 30 | 45 |
|--|--------|-------|-------|
| ממוצע השינויים במספר מקומות העבודה הנגישים | 0.0033 | 0.047 | 0.078 |
| סטית תקן | 0.096 | 0.102 | 0.086 |
| מינימום | -0.73 | -0.40 | -0.49 |
| מקסימום | 1.11 | 0.74 | 0.75 |

הערכת ההשפעה של שינויים בנגישות על השוויוניות

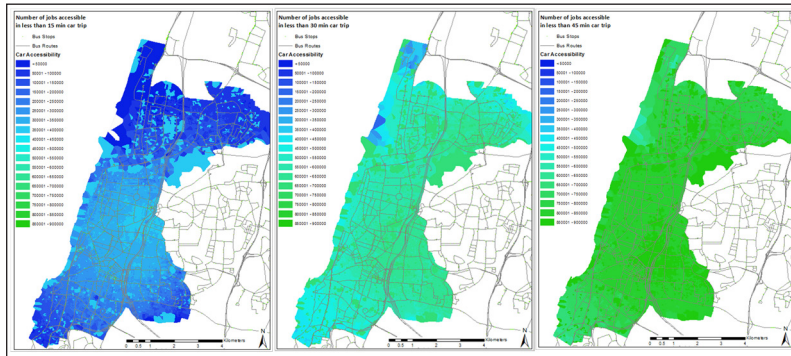
על מנת להעריך עד כמה השינוי בנגישות הוא שוויוני, חישבנו את עקומת לורנץ ומדד גייני לנגישות היחסית. עקומת לורנץ (Lorenz, 1905), מציגה את ההתפלגות המצטברת של מדד מדורג (למשל ההכנסה מהקטנה ביותר לגדולה ביותר) ביחס לדירוג האוכלוסייה. כאשר השוויוניות מלאה, אזי התצפיות מסתדרות על קו ישר (קו השוויון, אחוז האוכלוסייה שווה גם לאחוז ההכנסה, למשל). ככל שרמת אי השוויון גדלה, אזי התצפיות מתרחקות מהקו הישר (למשל 70% מהאוכלוסייה מקבלים רק-25% מההכנסה). את עקומת לורנץ משלים מדד גייני (Gini, 1912), המייצג את היחס בין

ההתפלגות המצטברת במצב של שוויון מלא להתפלגות האמפירית (היחס בין השטח הכלוא בין עקומת לורנץ לקו השוויון ביחס לכל המשולש מתחת לקו השוויון). לפיכך, מדד גייני הוא תמיד בין 0-1 כאשר, 0 מייצג שוויון מוחלט ו-1 אי-שוויון מוחלט (1% מהאוכלוסייה מחזיק 99% מההכנסה). סטטיסטית מדד גייני מייצג את ההבדל הממוצע היחסי (mean relative difference) בין שתי התפלגויות אקראיות – סוג של אומדן לפיזור תופעה באוכלוסייה (כמו סטיית התקן). מדד גייני מאפשר לבחון את ההבדל בין שתי עקומות לורנץ (למשל לפני הרפורמה ולאחריה), ולהעריך את השפעת שינוי חיצוני על אי-השוויון. חשוב לזכור כי מדדי אי-השוויון הם בלתי תלויים בגודל המוחלט של הנגישות. כפי שעולה מטבלה 1, בממוצע הנגישות היחסית למקומות העבודה מתוך תל-אביב-יפו השתפרה בעקבות הרפורמה.

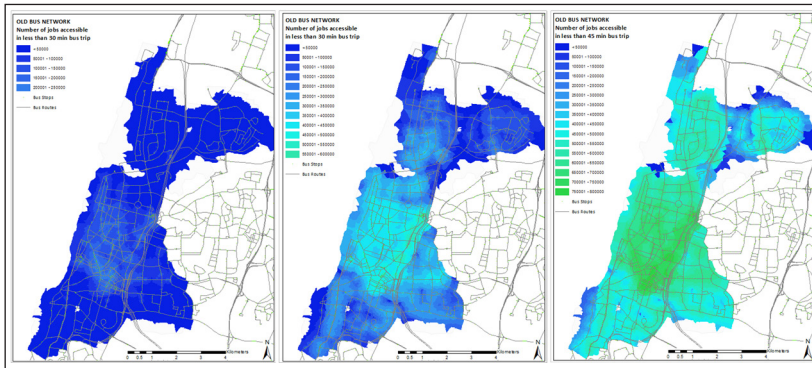
יישמנו את עקומת לורנץ ומדד גייני להתפלגות של אומדן הנגישות היחסית ממבנים שבמוצאים בעיר תל-אביב-יפו (בין אוטובוס לרכב פרטי) עבור נסיעות לעבודה בשעה 7:15 למשך 15, 30 ו-45 דקות. איור 8, מציג את עקומות לורנץ ומדדי גייני להתפלגות הנגישות לפני הרפורמה ברשת התח"צ ולאחריה. התוצאה מעידה כי הנגישות המחושבת לרשת התח"צ לאחר הרפורמה, היא קצת יותר שוויונית לעומת המצב לפני הרפורמה. אולם כאשר מסתכלים על משכי הנסיעה, רמת השוויוניות עולה ככל שאלו עולים. הסיבה לכך היא שהרפורמה בעיקר שנתה את מסלולי הקווים, אולם לוחות הזמנים ומיקומי התחנות השתנו פחות ולכן ככל שמשך הנסיעה קצר יותר קטעי ההליכה וההמתנה גדלים, ואלו לא השתנו. חשוב כעת לבדוק בהמשך מהי התפלגות משכי הנסיעה לנסיעות בתחבורה הציבורית שמוצאן בעיר תל-אביב-יפו. סביר להניח שרובן לא נופלות בקטגוריה של 45 דקות ולכן בעיית השוויוניות בנגישות היחסית בתוך העיר ממשיכה.

על מנת להבין טוב יותר את התמונה שהתקבלה נתחנו את התפלגות רמות הנגישות היחסית ברמת המבנה הבודד לפני הרפורמה ואחריה. כפי שניתן לראות באיור 9, במשכי נסיעה של 15 ד', אין שינויים בנגישות היחסית הממוצעת או בהתפלגות. עבור משך נסיעה של 30 ד', הרפורמה שיפרה את הנגישות הממוצעת וגם סטית התקן קטנה. תמונה דומה רואים עבור משך של 45 ד'. נראה כי הרפורמה הקטינה את השונות בנגישות היחסית, אולם הקטנה זו באה לידי ביטוי במשכי הנסיעה מעל 30 ד'.

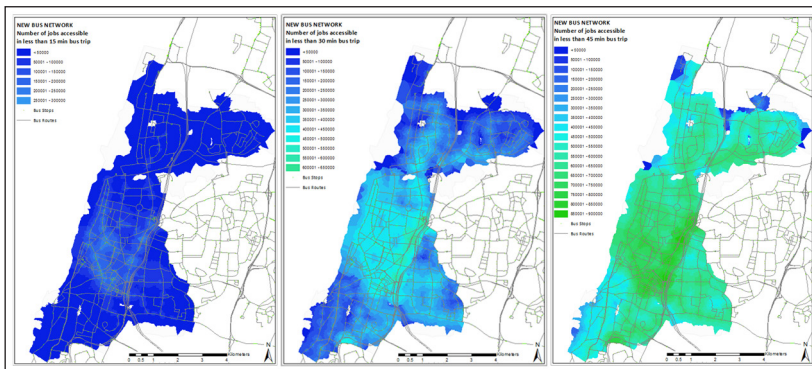
ניתוח נוסף שבוצע הוא בחינת הקשר בין הנגישות היחסית לפני הרפורמה ואחריה. הניתוח בוצע באמצעות דיאגרמות פיזור ורגרסיה מקומית מסוג LOESS - locally estimated scatterplot smoothing (Cleveland and Devlin, 1988). LOESS היא רגרסיה א-פרמטרית, המתאימה עקום רגרסיה על בסיס תת קבוצות של נתונים, הנקבעות לפי אינדקס השכן הקרוב. החיסרון של השיטה היא היעדר של מדד להערכת טיב ההתאמה. בניתוח שלנו עשינו שימוש בהתפלגות נורמלית סביב התצפיות למרחקים של עד 50% מכל תצפית באופן שהתקבלה עקומה חלקה יחסית. התוצאות עבור משכי הנסיעה השונים, מוצגות באיור 10. באיור מוצג הקשר בין הנגישות היחסית לפני הרפורמה ואחוז השינוי בנגישות היחסית אחרי הרפורמה. התוצאות מראות כי קיים קשר יורד בין אחוז השינוי לבין הנגישות היחסית לפני הרפורמה. כלומר, ככל שהנגישות היחסית לפני הרפורמה היתה גבוהה יותר, השינוי אחרי הרפורמה הוא קטן יותר בממוצע. המשמעות היא שהרפורמה אכן היטיבה במידה מסוימת אם אלו שהיו בעלי נגישות יחסית נמוכה למפרע. כמו כן ניתן לראות כי ההטבה היא בעיקר למשכי הנסיעה הארוכים יותר.



איור 2: נגישות למקומות עבודה ברכב פרטי בשעה 07:15 לנסיעה במשך 15 ד' (שמאל), 30 ד' (מרכז), 45 ד' (ימין)

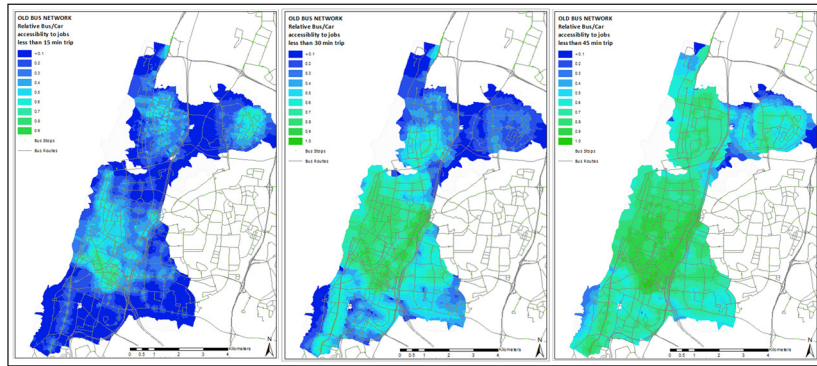


איור 3: נגישות למקומות עבודה לפני הרפורמה בשעה 07:15 לנסיעה במשך 15 ד' (שמאל), 30 ד' (מרכז), 45 ד' (ימין)

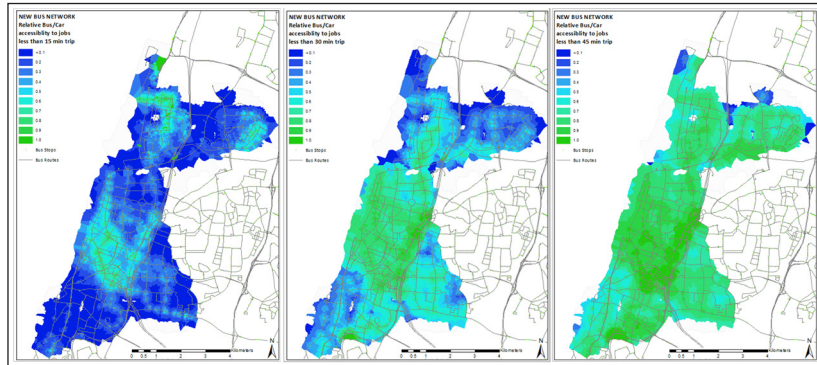


איור 4: נגישות למקומות עבודה אחרי הרפורמה בשעה 07:15 לנסיעה במשך 15 ד' (שמאל), 30 ד' (מרכז), 45 ד' (ימין)

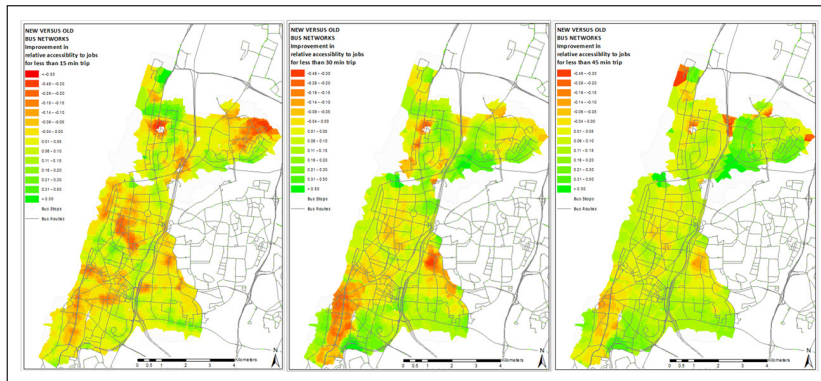
בן אליא ואחרים : הערכת נגישות לתחבורה ציבורית באמצעות יישומי ביג דאטה



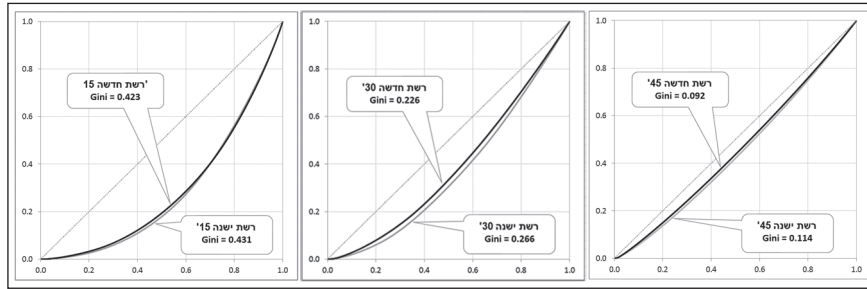
איור 5: נגישות יחסית למקומות עבודה לפני הרפורמה בשעה 07:15 לנסיעה במשך 15 ד' (שמאל), 30 ד' (מרכז), 45 ד' (ימין)



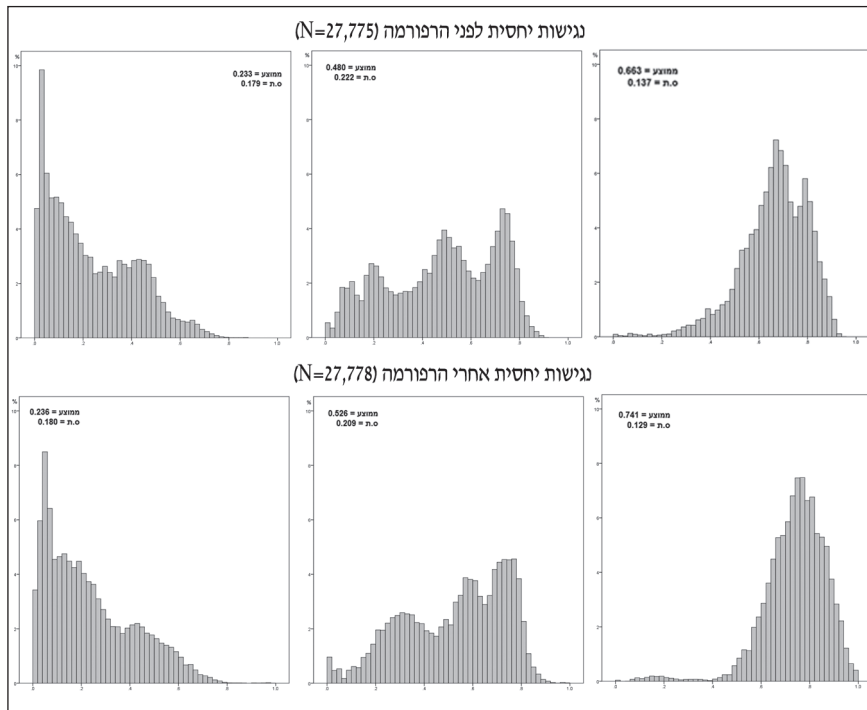
איור 6: נגישות יחסית למקומות עבודה אחרי הרפורמה בשעה 07:15 לנסיעה במשך 15 ד' (שמאל), 30 ד' (מרכז), 45 ד' (ימין)



איור 7: שינויים בנגישות היחסית כתוצאה מהרפורמה בשעה 07:15 לנסיעה במשך 15 ד' (שמאל), 30 ד' (מרכז), 45 ד' (ימין)

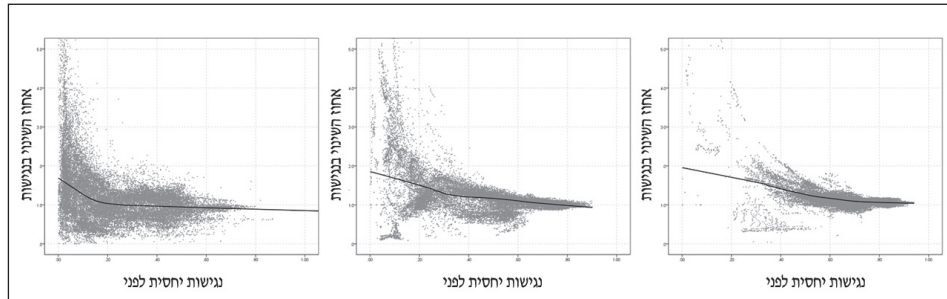


איור 8: בחינת השוויוניות בנגישות לפני ואחרי הרפורמה ברשת התח"צ, עקומות לורנץ ומדד גיני

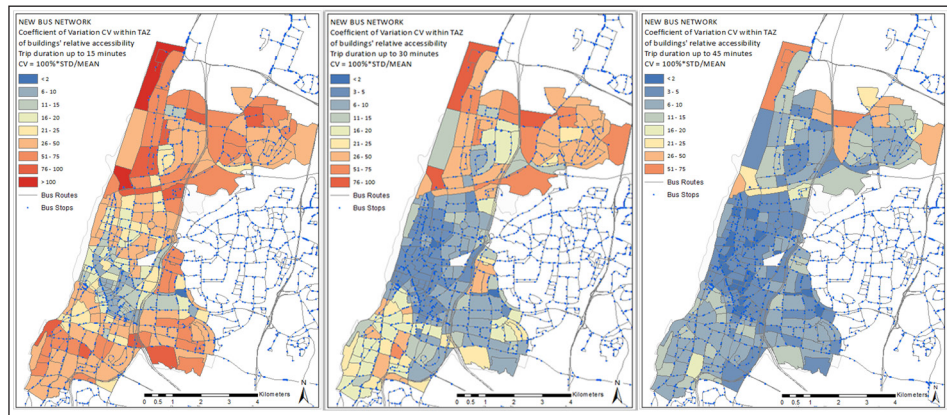


איור 9: התפלגות הנגישות היחסית לפי משכי נסיעה של 15, 30 ו-45 דקות, לפני הרפורמה ואחריה

בן אליא ואחרים: הערכת נגישות לתחבורה ציבורית באמצעות יישומי ביג דאטה



איור 10: הקשר בין הנגישות היחסית לפני הרפורמה ואחוז השינוי בה אחרי הרפורמה עבור משכי נסיעה של 15 ד' (שמאל), 30 ד' (מרכז) ו-45 ד' (ימין)



איור 11: מקדם השונות (CV) של הנגישות היחסית בתוך אזורי התנועה ברשת תח"צ החדשה - לנסיעה במשך 15 ד' (שמאל), 30 ד' (מרכז), 45 ד' (ימין)

הצדקת השימוש ברזולוציה גבוהה בחישובי נגישות

כפי שכתבנו במבוא, מרבית ניתוחי הנגישות המופיעים בספרות, מבוצעים ברמה של אזורי תנועה. אזור תנועה הוא אגרגט הכולל בממוצע כ-300 מבנים. במרחב העיר תל-אביב-יפו יש כ-600 אזורי תנועה. השימוש באזורי תנועה נפוץ הן מסיבות של זמינות נתונים (איסוף נתונים סטטיסטיים על ידי הרשויות כמו הלמ"ס) והן עקב מגבלות חישוב. למשל ברשת מטרופולין תל-אביב קיימים 1200 אזורי תנועה. מן הסתם, את כל חישובי הנגישות שבצענו ברמת המבנה, ניתן היה לעשות גם ברמת אזור התנועה, נשאלת השאלה, מדוע אם כן יש חשיבות, לרזולוציה הגבוהה בהערכת נגישות לתחבורה ציבורית? הסיבה נעוצה בשונות פנימית גבוהה בתוך אזורי התנועה. ניתן לראות זאת באיור 11, המציג את מקדם השונות (CV) שהוא היחס בין סטיית התקן בתוך אזור התנועה לממוצע הנגישות היחסית המחושבת מכל מבנה באזור תנועה בתל-אביב-יפו. ניתן לראות כי ככל שזמן הנסיעה מתארך, מקדם השונות יורד. קרי, לנסיעות הקצרות, זמני ההליכה וההמתנה (זמן מחוץ לרכב) תופסים נתח גדול יותר ביחס לזמן הנסיעה נטו (בתוך הרכב). עבור זמן כולל של 15 דקות מקדם השונות הממוצע

בתוך האזור היא כ-15% ועבור זמן של 45 ד' כ-6%. ניתן לראות באיור כי עבור מרבית אזורי התנועה בתל-אביב-יפו השונות הפנימית היא גבוהה הרבה יותר מערכים אלו.

המשמעות של השונות הפנים-אזורית היא שבאותו אזור תנועה, לתושבים במבנים שונים, תהיה חווית נגישות שונה. כאשר לא לוקחים את השונות בחשבון, אזי הנגישות זהה בתוך האזור. כתוצאה מכך, בעיקר לנסיעות הקצרות, תהיה נטייה להערכת יתר של פוטנציאל השימוש בתחבורה ציבורית, בעיקר של תושבי תל-אביב-יפו, שעבורם הנסיעות למקומות העבודה אינן צפויות להיות ארוכות מדי. לכן, יש השלכות כבדות משקל בהערכה של השקעות בפיתוח תחבורה ציבורית.

סיכום והמשך מחקר

במאמר זה הצגנו שיטה ומודל לחישוב אומדני נגישות בתחבורה ציבורית ברזולוציה מרחבית גבוהה תוך שימוש בטכנולוגיות Big Data ובנתונים עירוניים הקיימים בממ"ג ו-GTFS. בעוד שהרציונל של מדדי הנגישות אינו חדש, הממצאים מעידים על החשיבות הרבה של הסתכלות על נסיעות בעיר ברזולוציה התואמת את החלטות הניידות היומיומיות של הנוסעים. רזולוציה זו שונה למדי מהמקובל בעבודה הסדירה של מתכנני התחבורה בארץ ובכלל. ברם, חישובים ברזולוציה גבוהה דורשים יכולת מחשוב לא סטנדרטית. אנו הראינו כיצד תכונותיו של בסיס נתונים מבוסס גרף מאפשרות להתגבר על חלק מהמגבלות הקיימות. ניתוח השונות הפנים אזורית מראה כי קיימת מידה רבה של שונות בנגישות בתוך אזורי התנועה, בעיקר לנסיעות קצרות יחסית. לכן ניתן לקבוע, כי ניתוח אגרטיבי המתעלם מהשונות הזאת, יביא להערכות מוטעות של הנגישות בתחבורה ציבורית.

המודל הומחש בחקר אירוע של אומדן הנגישות היחסית בשעת שיא בוקר, מכלל המבנים ברחבי העיר תל-אביב-יפו לכל מקומות העבודה ברחבי המטרופולין תוך השוואה בין הנגישות לפני יישום הרפורמה ברשת התח"צ של 2011 ולאחריה. הניתוח הראה כי אמנם הרפורמה תרמה לנגישות הכללית ברחבי העיר הרפורמה אכן היטיבה במידה מסוימת אם בעלי נגישות יחסית נמוכה למפרע. אולם, ההטבה היא בעיקר למשכי הנסיעה הארוכים יותר ואילו משכי הנסיעה הקצרים יותר, המאפיינים את הנסיעות מתוך שטח העיר תל-אביב-יפו נשארו פחות שוויוניים לעומת משכי הנסיעה הארוכים יותר, גם אחרי הרפורמה.

המשך המחקר כולל מספר כיוונים חלקם נמצאים כבר בעבודה אבל הם נושא למאמר נפרד. ראשית, כפי שראינו, שיטת חישוב הנגישות ברזולוציה גבוהה מתאימה במיוחד למידת אי-השוויון בנגישות. בנוסף למדדים המוכרים של עקומות לורנץ ומדד ג'יני, בנינו מדדים נוספים של התפלגות השוויוניות בנגישות המבוססים על חישוב הנגישות המופסדת (באופן יחסי וכולל), לאותן אוכלוסיות התלויות בתחבורה הציבורית לניידותן. לצורך כך נבנה גם מדד של מידת התלות בתחבורה הציבורית, על בסיס המאפיינים הסוציו-כלכליים והדמוגרפיים של אזורי התנועה ברחבי המטרופולין.

שנית, שילבנו נתוני ביקוש באמצעות מטריצת נסיעות ממוצא-ליעד. בצורה זו מדדי הנגישות הפכו ממבוססי מספר מקומות עבודה למבוססי זמן מסע

(או פוטנציאל שעות-נוסע). באופן זה אנו יכולים לתת משקל יתר בחישובי הנגישות לאזורים בעיר שבהם יש יותר תנועות ומצד שני למצוא מקומות שלמרות שאינם מייצרים היקפים גדולים של תנועה, עדיין סובלים מבעיות נגישות והעדר שוויון. את מטריצת נסיעות מוצא-יעד ניתן יהיה בעתיד הלא רחוק להפיק גם מנתונים של כרטיס חכם (רב-קו) ואפילו מנתונים של תנועות אנשים לפי טלפונים סולרניים.

שלישית, כפי שהצגנו ניתן לבצע את חישובי הנגישות גם מנקודת המבט של היעדים של הנסיעות (אזורי שירות). חישוב כזה מאפשר לחשב, עד כמה נגישות בתחבורה הציבורית תחנות הרכבת, בתי החולים, עיריות ומרכזים לשירותים ממשלתיים, ומאיזה אזורים נדרש לשפר את השירות כדי להנגיש מקומות אילו לכלל הציבור.

רביעית, כיום החישובים מבוססים על זמני נסיעה מתוכננים לתחבורה ציבורית וממוצעים לרכב פרטי. השלב הבא יהיה שילוב של זמני נסיעה אמיתיים, המתחשבים בגודש התנועה. ניתן להשתמש לשם כך בנתונים של זמני הגעה של האוטובוסים לתחנות בזמן אמת (הנמצאים ברשות משרד התחבורה) והערכת הפער בין הזמן המתוכנן לפי לוח הזמנים וזמן ההגעה בפועל בין התחנות. כרגע הניתוח המתבסס על זמן מתוכנן הוא אופטימי (מניח רמת שירות טובה יותר בתח"צ מאשר בפועל).

חמישית, ניתן לשלב את חישובי הנגישות לתוך הערכה כלכלית (עלות-תועלת) של פרויקטים תחבורתיים (נוהל פרי"ת). כך למעשה ניתן לשלב שלושה גורמים בהערכה כוללת של התרומה חברתית-כלכלית של השקעה בתשתיות תחבורה: (1) שיפור הנגישות סה"כ (קרי, האם תועלות הפרויקט משפרות את הנגישות או לאו ובכמה במוצא); (2) השוויוניות של שיפור הנגישות (קרי, האם התועלת מההשקעה גם משפרת את הנגישות בצורה שוויונית או שרק חלק מסוים מהנוסעים נהנה ממנה); (3) אומדני היעילות הכלכלית המקובלים (יחס עלות-תועלת, ערך נוכחי נקי וכדומה). או אז, ניתן לדבר, על מציאת גבול פארטו להשקעות, הקושר בין יעילות, רמת הנגישות הממוצעת והשוויוניות בנגישות ולדרג פרויקטים שונים בתכנית השקעות על בסיס תרומתם לכל אחד מהממדים הללו. הדבר יאפשר הסתכלות תכנונית שלמה יותר על התרומה הפוטנציאלית של השקעות בתחבורה, הן למשק הלאומי והן לציבור הנוסעים.

שישית, בעתיד ניתן יהיה לשלב את שיטת חישובי הנגישות ביחד עם סימולציה מבוססת סוכנים (agent-based simulation) ולמעשה לעבור לדור חדש של מודלים דינמיים של תכנון תחבורה, המבוססים על יחידות אוטונומיות, הפועלות ברזולוציות שדומות הרבה יותר לאילו של אדם הנע במרחב העירוני. MATSim (Balmer et al., 2006), היא דוגמה לסימולציה כזו שבה כל נוסע מקבל החלטות בהתאם לתכנית הפעילויות היומית שלו, המייצגת את השאיפה למלא את הפעילויות השונות בסדר היום האישי בצורה מיטבית. בהתאם לאילוצים של זמן ועלות, כל סוכן מבצע התאמה של דפוס הנסיעות (מסלול, אמצעי ולעיתים יעד) ואף משנה את תזמון הפעילויות במידה ואין לו אפשרות לממש את התכנית. אנו מאמינים שדור הבא של מודל הסימולציה ניתן יהיה לבצע הערכות יותר רגישות לשינויים תחבורתיים מאשר ניתן כיום לעשות באמצעות סל הכלים העומד לרשות מתכנן התחבורה.

תודות

העבודה שתוארה במאמר זה מתבססת על מחקר שמומן על ידי המדען הראשי משרד התחבורה. הכותבים מודים מקרב לב לצוות חברת סיטי-גראף בע"מ שסייעה בפיתוח היישום הממוחשב לחישובי הנגישות. אנו מודים גם להערות המועילות של שופט בלתי תלוי אשר עזר לנו רבות לשפר את המאמר.

מקורות

Alam, B. M., Thompson, G. L. and Brown, J. R. Estimating Transit Accessibility with an Alternative Method. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2010, 2144(1), 62-71.

Balmer, M., Axhausen, K., & Nagel, K. (2006). Agent-based demand-modeling framework for large-scale microsimulations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1985), 125-134.

Ben-Akiva, M. and Lerman, S.R., 1979, Disaggregate travel and mobility choice models and measures of accessibility. In *Behavioural Travel Modelling*, D.A. Hensher and P.R. Stopher (Eds.), pp. 654-679 (London: Croom Helm).

Ben-Elia, E., Avineri, E. (2015). Response to Travel Information: A Behavioural Review. *Transport Reviews*, 35(3).

Benenson I., K. Martens, Y. Rofé and A. Kwartler, 2010, Measuring the Gap Between Car and Transit Accessibility Estimating Access Using a High-Resolution Transit Network Geographic Information System, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, N2144, 28–35

Benenson I., K. Martens, Y. Rofé and A. Kwartler, 2011, Public transport versus private car: GIS-based estimation of accessibility applied to the Tel Aviv metropolitan area, *Annals of Regional Science*, 47:499–515

Benenson, I., D. Geyzersky, et al (2014). "Transport Accessibility from a Human Point of View Key presentation at the Geoinformatics for Intelligent Transportation Conference, Ostrava, 27-Jan-2014

Bertolini, L., le Clercq, F., Kapoen, L., 2005. Sustainable accessibility: a conceptual framework to integrate transport and land use planning. Two test-applications in the Netherlands and a reflection on the way forward. *Transport Policy* 12 (3), 207–220.

Bhandari, K., Kato, H. and Hayashi, Y. Economic and equity evaluation of Delhi Metro. *International Journal of Urban Sciences*, 2009, 13(2), 187-203.

- Black, J., Conroy, M. Accessibility measures and the social evaluation of urban structure. *Environment and Planning A*, 9(9), 1977, 1013-1031.
- Blumenberg, E. A. and P. Ong (2001). "Cars, buses, and jobs: welfare participants and employment access in Los Angeles." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*(1756): 22-31.
- Bristow, G., Farrington, J., Shaw, J., & Richardson, T. (2009). Developing an evaluation framework for crosscutting policy goals: the Accessibility Policy Assessment Tool. *Environment and planning A*, 41(1), 48.
- Bruinsma, F. R., P. Nijkamp, et al. (1990). *Infrastructure and Metropolitan Development in an International Perspective: Survey and Methodological Exploration*. Research Memoranda. Amsterdam, Faculteit der Economische Wetenschappen en Econometrie/Vrije Universiteit Amsterdam.
- Buerli, M., 2012, "The current state of graph databases." www.cs.utexas.edu/~cannata/dbms/Class%20Notes/09%20Graph_Databases_Survey.pdf
- Burkey, M. L. Decomposing geographic accessibility into component parts: methods and an application to hospitals. *The Annals of Regional Science*, 2012, 48(3), 783-800.
- Cleveland, William S.; Devlin, Susan J. (1988). "Locally-Weighted Regression: An Approach to Regression Analysis by Local Fitting". *Journal of the American Statistical Association* 83 (403): 596-610
- Crauser, A., K. Mehlorn, U. Meyer, and P. Sanders, 1998, A Parallelization of Dijkstra's Shortest Path. Algorithm. *Mathematical Foundations of Computer Science 1998*. Lecture Notes in Computer Science Volume 1450, 722-731.
- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, 1(1), 269-271.
- Dong, X.J., BBen Akiva, M.E., Bowman, J.L. and Walker, J.L., 2006, Moving from trip-based to activity-based measures of accessibility. *Transportation Research Part A-Policy and Practice*, 40, pp. 163-180.
- Farrington, J. and C. Farrington (2005). "Rural accessibility, social inclusion and social justice: Towards conceptualisation." *Journal of Transport Geography* 13(1): 1-12.
- Feitelson, E. (2002). "Introducing environmental equity dimensions into the sustainable transport discourse: issues and pitfalls." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 7(2): 99-118.

- Feng, T., Zhang, J. (2012). Multicriteria evaluation on accessibility based transportation equity in road network design problem. *Journal of Advanced Transportation*
- Ferguson, N. S., Lamb, K. E., Wang, Y., Ogilvie, D., & Ellaway, A. (2013). Access to recreational physical activities by car and bus: an assessment of socio-spatial inequalities in mainland Scotland. *PLoS one*, 8(2), e55638.
- Foth, N., Manaugh, K. and El-Geneidy, A. M. Towards equitable transit: examining transit accessibility and social need in Toronto, Canada, 1996–2006. *Journal of Transport Geography*, 2013, 29, 1-10.
- Garb, Y. and J. Levine (2002). "Congestion pricing's conditional promise: promotion of accessibility or mobility?" *Transport Policy* 9(3): 179-188.
- Geurs, K. T. and J. R. Ritsema van Eck (2001). Accessibility measures: review and applications. Evaluation of accessibility impacts of land-use transport scenario's, and related social and economic impacts. Bilthoven, RIVM - National Institute of Public Health and the Environment (NL).
- Geurs, K. T. and B. van Wee (2004). "Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions." *Journal of Transport Geography* 12(2): 127-140.
- Gini, C (1912), Variabilità e mutabilità, contributo allo studio delle distribuzioni e relazioni statistiche Studi Economico-Giuridici dell'Univ. di Cagliari, 3 pp. 1–158
- Grengs, J., Levine, J., Shen, Q., & Shen, Q. (2010). Intermetropolitan comparison of transportation accessibility: Sorting out mobility and proximity in San Francisco and Washington, DC. *Journal of Planning Education and Research*, 29(4), 427-443.
- Haas, P., Makarewicz, C., Benedict, A., & Bernstein, S. (2008). Estimating transportation costs by characteristics of neighborhood and household. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2077), 62-70.
- Handy, S. L. and D. A. Niemeier (1997). "Measuring accessibility: An exploration of issues and alternatives." *Environment and Planning A* 29(7): 1175-1194.
- Hess, D. B. (2005). "Access to employment for adults in poverty in the Buffalo–Niagara region." *Urban Studies* 42(7): 1177-1200.
- Ivan, I., Horak, J., Fojtik, D., & Inspektor, T. (2013). Evaluation of Public Transport Accessibility at Municipality Level in the Czech

Republic. In GeoConference on Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing, Conference Proceedings (Vol. 1, p. 1088).

Karner, A., & Niemeier, D. (2013). Civil rights guidance and equity analysis methods for regional transportation plans: a critical review of literature and practice. *Journal of Transport Geography*, 33, 126-134.

Kawabata, M. (2009). "Spatiotemporal dimensions of modal accessibility disparity in Boston and San Francisco." *Environment and Planning A* 41(1): 183-198.

Kenyon, S., G. Lyons, et al. (2002). "Transport and social exclusion: investigating the possibility of promoting inclusion through virtual mobility." *Journal of Transport Geography* 10(3): 207-219.

Kwan, M.P., 1999b, Gender and individual access to urban opportunities: a study using spacetime measures. *The Professional Geographer*, 51, pp. 210-227.

Kwok, R. C. W. and A. G. O. Yeh (2004). "The use of modal accessibility gap as an indicator for sustainable transport development." *Environment and Planning A* 36(5): 921-936.

Lao, Y.; Liu, L. Performance evaluation of bus lines with data envelopment analysis and geographic information systems. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2009, 33(4), 247-255.

Liu, S. and Zhu, X. Accessibility Analyst: an integrated GIS tool for accessibility analysis in urban transportation planning. *Environment and Planning B: Planning and Design*. 2004, vol. 31, issue 1, 105-124. DOI: 10.1068/b305.

Lorenz M. O., (1905) methods of Measuring the Concentration of Wealth Publications of the American Statistical Association Volume 9, Issue 70,

Lucas, K. (2012). "Transport and social exclusion: Where are we now?" *Transport Policy* 20: 105-113.

Mao, L., & Nekorchuk, D. (2013). Measuring spatial accessibility to healthcare for populations with multiple transportation modes. *Health & place*, 24, 115-122

Martens, K. (2012). "Justice in transport as justice in access: applying Walzer's 'Spheres of Justice' to the transport sector" *Transportation* (Online 21 February 2012).

Martin, D., Jordan, H. and Roderick, P. Taking the bus: incorporating public transport timetable data into health care accessibility modelling. *Environment and planning. A*, 2008, 40(10), 2510.

Mavoia, S., Witten, K., McCreanor, T., & O'Sullivan, D. (2012). GIS based destination accessibility via public transit and walking in Auckland, New Zealand. *Journal of Transport Geography*, 20(1), 15-22.

Miller, H.J., 1999a, Measuring space-time accessibility benefits within transportation networks: basic theory and computational procedures. *Geographical Analysis*, 31, pp. 187-212.

Minocha, I., Sriraj, P. S., Metaxatos, P., & Thakuriah, P. V. (2008). Analysis of transport quality of service and employment accessibility for the Greater Chicago, Illinois, Region. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2042(1), 20-29.

NEUTENS, T., et al. Equity of urban service delivery: a comparison of different accessibility measures. *Environment and planning. A*, 2010, 42(7), 1613.

O'Sullivan, D., Morrison, A. and Shearer, J. Using desktop GIS for the investigation of accessibility by public transport: an isochrone approach. *International Journal of Geographical Information Science*, 2000, 14(1), 85-104.

Rashidi, T. H., & Mohammadian, A. K. (2011). A dynamic hazard-based system of equations of vehicle ownership with endogenous long-term decision factors incorporating group decision making. *Journal of Transport Geography*, 19(6), 1072-1080.

Salonen, M. and Toivonen, T. Modelling travel time in urban networks: comparable measures for private car and public transport. *Journal of Transport Geography*, 2013, 31, 143-153.

Tribby, C. P., Zanderbergen, P. A. High-resolution spatio-temporal modeling of public transit accessibility. *Applied Geography*, 2012, 34, 345-355.

Witten, K., Exteter, D., Field, A. The quality of urban environments: Mapping variation in access to community resources. *Urban Studies*, 2003, 40(1), 161-177.

Witten, K., Pearce, J. and Day, P. Neighbourhood Destination Accessibility Index: a GIS tool for measuring infrastructure support for neighbourhood physical activity. *Environment and Planning-Part A*, 2011, 43(1), 205