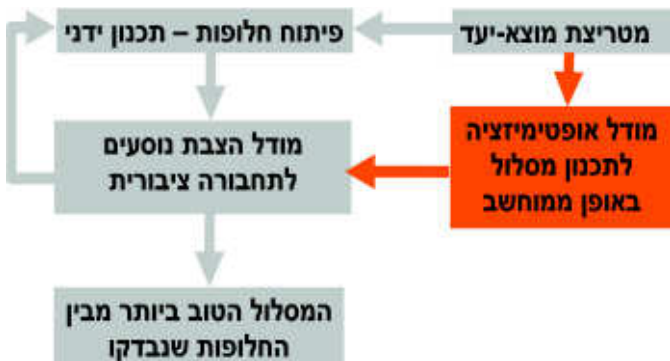


# מודל לתכנון מסלול מעגלי לקו תחבורה ציבורית\*

שי ג'רבי<sup>1</sup> פרופ' אבישי צדר<sup>2</sup>

של נסיעות על גבי חלופות מסלול שהוגדרו מראש, חלופות המסלול נקבעות ע"י המתכנן בהתאם למטריצת מוצא יעד (ולנתונים מרחביים נוספים אם קיימים) באופן ידני ועל בסיס של הערכת מומחה מושכלת. לאחר קביעת חלופות המסלול הן מוזנות כקלט למודל הצבה אשר בעזרתו ניתן לבחור את החלופה הטובה ביותר, מבחינת מענה לביקושים, ואף לבצע בה שיפורים ובדיקות חוזרות. מקובל להשתמש במודלים של הצבות נוסעים לתחבורה ציבורית בעיקר לתכנון באזורים עירוניים בינוניים עד גדולים, הבעיה היא שבכל גודל רשת מספר חלופות המסלול שניתן להציע ולבחון באופן ידני הוא מוגבל ומצמצם בהשוואה לסך כל החלופות האפשריות<sup>3</sup>. לפיכך לא ניתן להבטיח שהמסלולים המוזנים למודל הצבה הינם הטובים ביותר הקיימים ונותנים מענה אופטימלי לביקוש, או אף קרוב לכך. הנסיון לתת מענה לבעיה זו משמש מוטיבציה לקשת רחבה של עבודות ומחקרים אקדמיים בתחום חקר הביצועים ותורת הרשתות<sup>4</sup>. המכנה המשותף לכולם הוא הנסיון ליצור מסלול אופטימלי באופן ממוחשב, כאשר מטריצת הביקושים מהווה קלט למודל, והמסלול מהווה פלט שלו. יישום מוצלח של מודל אופטימיזציה ליצירת מסלולים עשוי להיות תמיכה משמעותית בתהליך התכנון השגרתי, ולהשלים אותו באופן המתואר בתרשים 2.



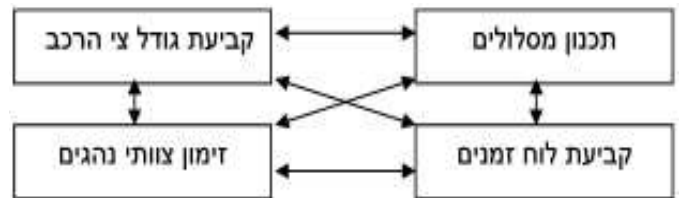
תרשים 2 - מודל משולב לתכנון מסלול תחבורה ציבורית

למרות מגוון רחב של מודלים לאופטימיזציה מסלולים המוצע בספרות, כמעט ולא נעשה שימוש במודלים כאלו בתכנון המבוצע בשטח. אחת הסיבות לכך היא העדר התייחסות מספקת לאופן התפלגות הביקוש במרחב ולשיקולים האורבניים של התכנון. יש לציין כי רוב המחקרים הקלאסיים בתחום זה התפרסמו בשנות ה-70 של המאה ה-20, לפני עידן מערכות המידע למיפוי (GIS). ההתפתחות הטכנולוגית האחרונות מאפשרות לחבר בין הדברים באופן המתואר בתרשים 2.

<sup>4</sup> תחום המחקר מכונה "בעיות מיסלול" - (Routing Problems). המשותף לבעיות אלה הוא השאיפה ליצור מסלול, בדרך כלל מעגלי, שיעבור בצמתים או בקטעי דרך שהוגדרו מראש, כאשר עלות המעבר הכוללת תהיה מינימלית. לבעיה זו גרסאות רבות שהידועות שבהן הן בעיית הסוכן הנוסע (חובת מעבר בצמתים מסוימים ברשת) ובעיית "מחלק הדואר הסיני" (חובת מעבר בקטעי דרך מסוימים ברשת).

## מבוא

העלייה המתמדת בגודש התנועה בכבישים ממקדת את תשומת הלב של המתכננים ומקבלי ההחלטות בצורך בשדרוג מערכות התחבורה הציבורית. הדבר בא לידי ביטוי במספר רב של מסמכי מדיניות ועבודות תכנון המקודמות בארץ ובעולם בשנים האחרונות. האתגר של פיתוח וקידום התחבורה הציבורית מחייב התמודדות משולבת עם מגוון רחב של בעיות תכנוניות, תפעוליות ומבניות. מבחינה הנדסית "טהורה" ניתן למנות ארבעה מרכיבים עיקריים אשר יוצרים יחדיו את בעיית התכנון הכולל של תחבורה ציבורית (תרשים 1). כל המרכיבים המופיעים בתרשים 1 משולבים באופן הדוק בתפעול היומיומי, באופן המחייב הזיון חוזר ותיאום ביניהם. למרות זאת, סקירת הספרות המקצועית במחקר ובפרקטיקה מעלה כי הנטייה ברוב המקרים היא להתמקד רק במרכיב אחד או שניים של הבעיה. עובדה זו אובחנה בעבר ע"י Ceder and Israeli (1993) כמגבלה משמעותית של הדיון בתחום, מאחר ולא ניתן לבצע תכנון תחבורה ציבורית שיבוא לידי ביטוי מוצלח בשטח מבלי לטפל בכל המרכיבים המתוארים בתרשים.



תרשים 1 - מרכיבי בעיית תכנון תחבורה ציבורית (מבוסס על Ceder and Israeli, 1993)

הסיבה העיקרית להפרדה נעוצה ככל הנראה במורכבות החישובית שבטיפול בכל המרכיבים בבת אחת. בשל מורכבות זו נתמקד גם במאמר הנוכחי, המתבסס מלכתחילה על מחקר אקדמי שהוא תיאורטי במהותו, במרכיב הראשון - תכנון המסלול. הדבר יעשה תוך התייחסות משולבת גם להקשרים המרחביים וגם להקשרים הלוגיסטיים של הנושא. סקירה נרחבת על המחקר העדכני בתחום תכנון תדירויות ולוחות זמנים מופיעה ב-Ceder (2007).

## גישות בתכנון מסלולים לתחבורה ציבורית

הפרקטיקה הנפוצה לתכנון מסלולים מתבססת על הצבה חזרתית

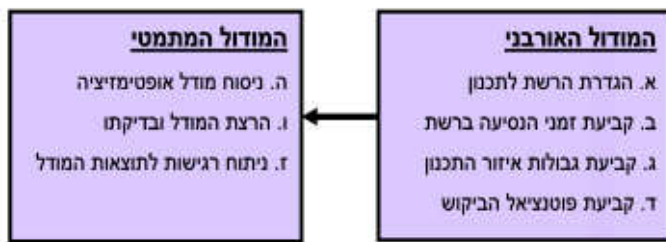
\* המאמר הינו גירסה מעובדת ומתורגמת לעברית של מאמר שפורסם לאחרונה ב- JERBY, CEDER - TRANSPORTATION RESEARCH RECORD (ראה במקורות) (2007)  
<sup>1</sup> מהנדס תעשייה וניהול ומתכנן ערים, חבר צוות המכון לחקר התחבורה - הטכניון  
<sup>2</sup> ראש היחידה להנדסת תחבורה וגיאואינפורמציה בפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתה בטכניון.  
<sup>3</sup> לצורך המחשה, הרשת המוצגת בתרשים 4 כוללת 1273 אפשרויות שונות ליצירת מסלול מעגלי.

- **מקסימום מענה לביקוש** - המודל יכול התייחסות לנושא זה בפונקצית המטרה.
- **מרחקי הליכה מינימליים** - המודל יכול התייחסות לנושא זה בפונקצית המטרה.

שילוב היעדים בא לידי ביטוי בהגדרת הבעיה המובאת להלן: **בהינתן רשת עירונית, יש לתכנן מסלול מעגלי שיביא לכיסוי מקסימלי של פוטנציאל הנוסעים, ממוקדי הביקוש השונים ברשת אל מרכז תחבורה כלשהוא, כאשר זמן הנסיעה במסלול כולו לא יעלה על ערך סף מוגדר**.<sup>7</sup>

פונקצית מטרה השואפת לכיסוי מקסימלי אמורה ליצור מסלול ארוך ומפותל, אלא שבמקרה הזה היא נחשמת באמצעות האילוף על זמן הנסיעה. האילוף מאפשר עמידה בלוחות זמנים ושמירה על רמת שירות; מצד שני, הוא אינו מאפשר לקו המעגלי לכסות את כל מוקדי הביקוש.

המתודולוגיה המוצעת לפתרון הבעיה מבוססת על גישת פתרון מודולרית. בדרך זו ניתן להמיר את הבעיה המורכבת לסדרה של תת-בעיות או סעיפים, ולקיים דיון נפרד ובלתי תלוי על כל אחד מהם (תרשים 3).



**תרשים 3 - מתודולוגיה לתכנון ממוחשב של קו תחבורה ציבורית (מבוסס על Jerby and Ceder, 2007)**

### שילוב התהליך

**א. הגדרת הרשת לתכנון**  
הקלט לשלב הראשון של התהליך הוא רשת הדרכים עליה מתבצע התכנון. בשלב זה יש לבצע צמצום של הרשת לכדי רשת קטנה ודלילה יותר הכוללת עורקי תחבורה ציבורית בלבד (רשת בסיסית לתחבורה ציבורית). עבודה עם רשת בסיסית מאפשרת למתכנן להקטין את

להלן תוצג מתודולוגית מחקר המשלבת בין ההיבטים האורבניים של התכנון לבין תחום תורת הרשתות וחקר ביצועים. מטרת המחקר היא להציע מודל לתכנון אופטימלי ממוחשב של מסלול מעגלי של קו תחבורה ציבורית.<sup>4</sup>

- תוצאות המחקר עשויות לסייע בכמה מישורים:
- תכנון מסלולי קווי הזנה לתחנת רכבת.
- תכנון מסלולים לקווים "שכונתיים" במסגרת רשת תחבורה ציבורית היררכית.<sup>5</sup>
- תכנון ותפעול קו תח"צ מופעל ביקוש בזמן אמיתי (DEMAND RESPONSE TRANSIT).

### ניסוח מטרות התכנון

השלב ההתחלתי ביצירת מודל אופטימיזציה הוא לנסח את פונקצית המטרה והאילוץ, אלו מהווים ביטוי כמותי של מטרות התכנון ושל המגבלות בשטח. בהקשר לתכנון מסלולים מקובל להשתמש בפונקציות מטרה המתייחסות לעלות כספית, כגון "מינימום עלויות למפעיל", "מינימום עלויות לנוסע", או שילוב של השתיים לפונקצית "מינימום עלות כללית" (Kuah and Perl 1988, Spasovic and Schonfeld 1993, Chein and Schonfeld 1997). הניסוח המדויק של פונקצית המטרה מחייב התייחסות לפערים שבין מטרות מפעיל השירות, למטרות משתמשי המערכת. הנוסע שואף להגיע ממוצא ספציפי ליעד ספציפי, במועד הנוח לו ובמהירות המקסימלית. לשם כך יש לבנות רשת מסלולים צפופה בעלת תדירות גבוהה, דבר זה עומד בסתירה למטרה העיקרית של המפעיל, שהיא צמצום עלויות התפעול ככל שרק שניתן. לפיכך תפקידה של רשות התחבורה הציבורית הוא למצוא את נקודת האיזון בין המטרות השונות והסותרות. טבלה 1 מסכמת חלק מהמטרות הנורמטיביות של התחבורה הציבורית מנקודות מבט שונות. הטבלה מתייחסת לתחבורה ציבורית כמערכת כוללת, וממירה את המטרות הכלליות ליעדים כמותיים. בשל מורכבות הבעיה התכנונית, תיתכן חפיפה בין חלק מהמטרות בטבלה. עיון בטבלה 1 מאפשר בחירה נורמטיבית של יעדים בהם מעוניינים להתמקד לצורך ניסוח מודל האופטימיזציה. לצורך המודל הנוכחי, נתמקד ביעדים הבאים:

- **תיאום עם אמצעים אחרים** - המודל יכול אילוף שיחייב את המסלול להיות מקושר לתחנת רכבת או למסוף תחבורה אחר שיוגדר.
- **מינימום זמן נסיעה כולל** - המודל יכול אילוף שיהווה חסם עליון לזמן הנסיעה.<sup>6</sup>

**טבלה 1- סיכום מטרות הנוסע והמפעיל והדרכים להשיגן**

נקודת מבט	מטרה	יעדים כמותיים	שייך לבעיה
נוסע	מינימום זמן נסיעה כולל	מינימום זמן המתנה	תכנון תדירויות
		מינימום זמן נסיעה	תכנון מסלולים
		מינימום זמן גישה לתחנה	תכנון תדירויות
מפעיל	עלויות תפעול מינימליות	מינימום שעות רכב	שילוב של כל ארבעת מרכיבי התכנון
		מינימום גודל צי	תכנון מסלולים
		מינימום נסיעות ריקות	תכנון מסלולים
רשות התחבורה הציבורית	מקסימום ניידות (מקסימום נסיעות בתח"צ בין מוצאים ויעדים)	מקסימום מענה לביקוש	תכנון מסלולים
		תיאום ושילוב עם אמצעים אחרים	תכנון תדירויות

<sup>6</sup> חסם עליון למשך זמן הנסיעה גם משפר את הסיכוי לתיאום עם אמצעים אחרים. <sup>7</sup> בעיה זו שונה בהגדרתה מבעית הסוכן הנוסע או מחלק הדואר הסיני, וככל הידוע אין לה פתרון קיים בספרות.

<sup>5</sup> רשת היררכית בנויה מקווים שכונתיים/מאספיים הפועלים באזורים מוגדרים, ואוספים נוסעים מ/אל מרכז תחבורה בו מתבצעת החלפה לקו עורקי מהיר.

סיבוכיות הבעיה, ומאפשרת למפעיל ולנוסעים להסתמך על רשת קבועה לאורך זמן.

### ב. קביעת זמני הנסיעה ברשת

בשלב השני יש לבצע אומדן של זמני הנסיעה בכל קטע ברשת. אומדן זמן הנסיעה מתבצע בהתאם לאורך הקטע ועל בסיס הנחות בדבר מהירות הנסיעה הממוצעת והתפלגותה. כידוע, מהירות הנסיעה הממוצעת משתנה בהתאם לרמת הגודש בקטע ובהתאם לשעות היום. אלא שכאשר קטע הכביש מוקצה באופן בלעדי לתחבורה ציבורית, ניתן להניח מהירות נסיעה שאינה מושפעת מגודש. במסגרת עבודה זו ייקלטו במודל זמני הנסיעה הממוצעים בלבד.

### ג. הגדרת גבולות איזור התכנון

הצורך בהגדרת גבולות איזור התכנון עבור מוקדי תחבורה מעוגן בתפיסה של רשת תחבורה ציבורית היררכית שהוזכרה לעיל. איזור התכנון מגדיר את קבוצות הרחובות ברשת הבסיסית מהן ניתן להזין את המוקד באופן סביר באמצעות מסלול מעגלי יחיד. תהליך הגדרת איזור כולל בדיקה של כל אחד מקטעי הרשת הבסיסית, כדי לבחון האם ניתן ליצור ממנו מסלול מעגלי אל מרכז התחבורה וחזרה, תוך עמידה באילוף הזמן. במידה ומשך המסלול הקצר ביותר (במונחי זמן נסיעה) מהקטע אל מרכז התחבורה וחזרה עולה על אילוף הזמן, הרי שהקטע נמצא מחוץ לגבולות איזור התכנון של המרכז. בשיטה זו ניתן לבצע צמצום נוסף של גודל הרשת ושל סיבוכיות החישוב שיתבצע בהמשך.

### ד. קביעת פוטנציאל הביקוש

בשלב הרביעי יש לאמוד את פוטנציאל הביקוש לנסיעות, מכל קטע ברשת הבסיסית, אל מרכז התחבורה. הגישה המודולרית שהוצגה בתרשים 3 מאפשרת לבחור את שיטת אומדן הביקושים מתוך מגוון רחב של מודלים הקיימות בספרות. להלן תוצג שיטה אפשרית לאומדן הביקוש המשלבת בין שתיים ממטרות התכנון שהוצגו בטבלה 1: השאיפה לאיסוף מספר מקסימלי של נוסעים, והשאיפה לצמצם למינימום את מרחק ההליכה הכולל שלהם. השיטה מתבססת על שלוש הנחות מרכזיות: הנחה א': בהינתן קו תחבורה ציבורית הפועל ברמת שירות גבוהה, ניתן להתייחס לכל האוכלוסייה באזורי ההשפעה שלו כמשתמשים פוטנציאליים, ללא קשר לרמת המינוע או רמה סוציו אקונומית. הנחה ב': הקו פועל בעצירה חופשית כ"מונית שירות". במצב זה כל אחד מהמשתמשים הפוטנציאליים יבחר בקטע הדרך הקרוב ביותר (בקו אירי) לנקודת המוצא שלו, כנקודת ההמתנה לרכב הציבורי. הנחה ג': הביקוש לנסיעות בקו מקטע מסוים ברשת, תלוי גם במרחקי ההליכה משימושי הקרקע שסביב קטע הדרך, אל נקודת ההמתנה. ככל ששימושי הקרקע רחוקים יותר מקטע הדרך, כך קטן פוטנציאל הנסיעות היוצאות מהקטע ברכב ציבורי שעובר בו, ולהפך.

### 1.1 חישוב מרחקי הליכה

ראשית יש להתייחס למרחק ההליכה המקסימלי של הנוסעים הפוטנציאליים אל ציר התחבורה הציבורית. זהו משתנה הנתון להחלטת מדיניות, והוא המגדיר את "איזור ההשפעה" של כל אחד מקטעי הרשת (מכונה בספרות catchment area). מקובל להניח אזורים של עד 400 מטר מכל צד של קטע ברשת (Farewell and Marx 1996), אם כי בתנאים מסוימים חלק מהנוסעים יהיו מוכנים ללכת מרחק

<sup>8</sup> מחקרים רבים מראים את הקשר בין רמת השירות והתדירות של קו תחבורה ציבורית, לבין המרחק המקסימלי שהנוסע יסכים ללכת עד אליו. בנוסף קיימת השפעה לפרמטרים סוציו אקונומיים, למוג האוויר, ולאופי הסביבה והעיצוב העירוני באזור. דיון נרחב בנושא זה אצל Cervero (2004).

גדול יותר<sup>8</sup>. בהתאם להגדרה זו ניתן לקבוע "איזור השפעה" סביב כל קטע ברשת. עבור כל אחד מאיזורי ההשפעה ניתן כעת לאמוד את מרחק ההליכה הממוצע משימושי הקרקע השונים אל נקודת ההמתנה לרכב. מרחק ההליכה הממוצע מתייחס לסך כל התושבים/מועסקים באיזור ההשפעה של הקטע, ולמרחק ההליכה הצפוי של כל אחד מהם. ערך זה מחושב לכל קטע בהתאם לנוסחה 1:

$$\overline{wd}_{(i,j)} = \sum_{b=1}^m \frac{pop_b * wd_b}{pop_{(i,j)}} \quad (1)$$

כאשר:

$i, j$  - צמתים ברשת המגדירים את קצות הקטע.

$b$  - מבנה כלשהו באזור ההשפעה של הקטע.

$pop_b$  - כמות האוכלוסייה (דיירים, מועסקים) במבנה  $b$ .

$wd_b$  - מרחק ההליכה ממבנה  $b$  לקטע הדרך הקרוב ביותר.

$pop_{(i,j)}$  - כמות האוכלוסייה (דיירים מועסקים וכו') באזור ההשפעה של הקטע.

$\overline{wd}_{(i,j)}$  - מרחק ההליכה הממוצע אל הקטע משימושי הקרקע שבאזור ההשפעה שלו.

$m$  - סך כל המבנים באזור ההשפעה של הקטע.

לצורך החישוב נדרשים נתונים לגבי ההתפלגות המדויקת של צפיפות האוכלוסייה באיזור ההשפעה של כל קטע, עד לרמה של מספר התושבים/מועסקים בכל מבנה. לשם כך נדרשת שכבת נתוני אוכלוסייה ברזולוציה גבוהה. בהעדר בסיס נתונים מפורט ניתן לבצע אומדן מקורב ע"י הכפלת צפיפות הבינוי בגודל משק בית.

### 2.2 אומדן פוטנציאל הביקוש כתלות במרחקי ההליכה

על פי הנחה א' לעיל, קיים מתאם בין צפיפות הבינוי באיזור מסוים, לפוטנציאל הביקוש לנסיעות בתחבורה ציבורית מהאיזור ואילו. על פי הנחה ג' לעיל, קיים יחס הפוך בין מרחק ההליכה משימושי הקרקע השונים באיזור, לפוטנציאל הביקוש לנסיעות בקו. על בסיס הנחות אלה ניתן לאמוד את פוטנציאל הביקוש לנסיעות בקו המוצע מהקטע באמצעות נוסחה 2.

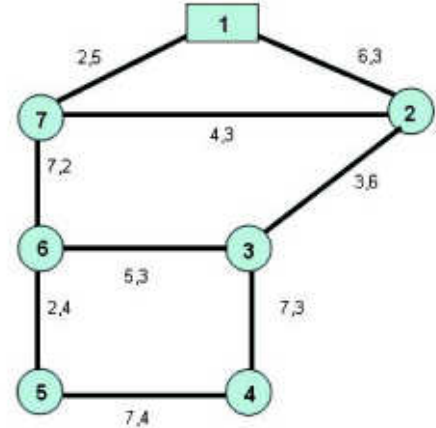
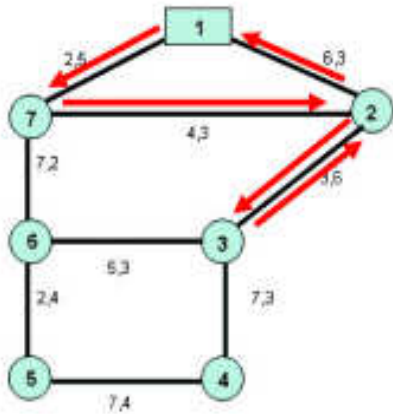
$$pd_{(i,j)} = \frac{pop_{(i,j)}}{\overline{wd}_{(i,j)}} \quad (2)$$

$pop_{(i,j)}$  - כמות האוכלוסייה (דיירים מועסקים וכו') באיזור ההשפעה של הקטע.

$\overline{wd}_{(i,j)}$  - מרחק ההליכה הממוצע לקטע.

$pd_{(i,j)}$  - פוטנציאל הביקוש לנסיעות מ/אל הקטע.

ניתן לראות שפוטנציאל הביקוש מקיים יחס ישר עם צפיפות האוכלוסייה, ויחס הפוך עם מרחק ההליכה הממוצע. ניסוח המדד באופן זה משלב שתי מטרות תכנוניות: "מענה מקסימלי לפוטנציאל הביקוש" ו"מינימום מרחקי הליכה". נוסחה 2 מהווה מדד להעדפת קטע  $(i, j)$  על פני קטעים אחרים, מבחינת הכדאיות שבשילובו במסלול המתוכנן. כעת ניתן לשלב מדד זה כקלט למודל מתמטי לתכנון מסלולים.



**ה. ניסוח מודל אופטימיזציה**

תרשים 4 מציג את התוצר המתקבל מהתהליך המתבצע במודל האורבני (שלבים א-ד) הרשת המתקבלת כוללת ערך פוטנציאל ביקוש וערך זמן נסיעה לכל אחד מהקטעים. רשת זו מהווה קלט למודל המתמטי לתכנון מסלול מעגלי אופטימלי.

**תרשים 4 - סכמת רשת המהווה קלט למודל האופטימיזציה. (לכל קטע שני ערכים. השמאלי מייצג זמן נסיעה ממוצע בדקות והימני פוטנציאל ביקוש)**

מודל האופטימיזציה לתכנון מסלולים ממוחשב מתבסס על המרכיבים הבאים:

**פונקציית מטרה: מקסימום מענה לפוטנציאל הביקוש אילוצים:**

- המסלול יהיה מעגלי
- המסלול יהיה רציף
- זמן הנסיעה במסלול לא יעלה על ערך מוגדר
- לא תהיה חזרה על אותו קטע באותו כיוון
- במקרה של חזרה על אותו קטע בכיוון הנגדי, איסוף הנוסעים יתבצע פעם אחת בלבד.

ניסוח פורמלי מלא של המודל מתואר בהרחבה ב-Jerby and Ceder (2007).

**ו. הרצת המודל ובדיקתו**

המודל המתמטי מומש והורץ בסביבת Lindo, עבור מספר רב של רשתות שהוגרלו אקראית, והביא לפתרונות אופטימליים עבור רשתות אלה (הפתרונות נבדקו באופן יסודי ע"י בקרים אנושיים ונמצאו אופטימליים). דוגמה לפיתוח אופטימלי מוצגת בתרשים 5. מסלול זה נותן מענה לפוטנציאל ביקוש בערך של 17, שהוא המקסימום שניתן לבצע בהינתן האילוצים.

המודל סיפק תוצאות אופטימליות גם עבור רשתות מסובכות יותר, אלא שזמן הריצה הארוך שלו חייב פיתוח של אלגוריתם לפתרון מקורב (היוריסטי) אשר יאפשר מתן מענה גם לרשתות בגודל ריאלי של 30-40 צמתים<sup>9</sup>. אחד העקרונות הבסיסיים בגישה ההיורסטית הוא הגדרת "יתנאי ההתחלה" של הפתרון באופן שיגדיל את הסיכוי להימצא בסמוך לאופטימום. אחת השיטות המקובלות בספרות ובפרקטיקה היא להגדיר את מוקדי הביקוש העיקריים ולקשר ביניהם במסלולים קצרים ביותר.

<sup>9</sup> באופן כללי, זמן הריצה של מודל מושפע ממספר המשתנים והאילוצים בו. במודל של הבעיה המתוארת כאן המשתנים מיוצגים במטריצות, שגודלן תלוי במספר צמתי הרשת. מכאן שכלל שהרשת גדולה יותר, כך גדל מספר המשתנים, לעתים באופן ליניארי, לעתים, כמו במקרה זה - באופן לא ליניארי.

**תרשים 5 - פלט המודל - מסלול מעגלי אופטימלי בהינתן אילוף זמן**

אלא שמסלולים קצרים ביותר לא תמיד מבטיחים מסלול אפקטיבי מבחינת כיסוי הביקוש. לפיכך ננסח את ההגדרה הבאה:  
**הגדרה: מסלול יעיל בין שני צמתים הוא המסלול הקצר ביותר ביניהם - אך לא בערכים של זמן נסיעה, אלא בערכים של "יחס העכבה",** כאשר יחס העכבה מוגדר מראש לכל קטע ברשת באופן הבא

$$\text{יחס העכבה לקטע דרך} = \frac{\text{זמן הנסיעה בקטע}}{\text{פוטנציאל הביקוש לנסיעות מ/אל הקטע}}$$

ככל שיחס העכבה לקטע גדול יותר, כך קטנה הכדאיות שבהכללתו במסלול נסיעה. על בסיס ההגדרות הנ"ל מומש אלגוריתם המתבסס על הגדרת קבוצת קטעים בעלי פוטנציאל ביקוש גבוה, וקישור ביניהם במסלולים היעילים ביותר, תוך שימוש באלגוריתם הידוע של "מסלול קצר ביותר" (Dijkstra 1959) בשינוי קל. ניסוח זה הבטיח זמן ריצה קצר ביותר.

התוצאות שהתקבלו מהאלגוריתם נבחנו על מספר רב של רשתות שהוגרלו אקראית, ואשר גודלן נע בין 15 ל-100 קטעי דרך. עבור רשתות אלה נמצא המסלול הטוב ביותר מבין מאות אלפי צירופי מסלול (ריאליים) שנבדקו במחשב.

**ז. ניתוח רגישות**

לאחר מציאת מסלול מיטבי ניתן לבצע ניתוח רגישות על פרמטרים שונים במודל, כגון:

- מרחקי ההליכה הרצויים<sup>10</sup>.
- זמני הנסיעה ברשת (התייחסות לשונות).
- אילוף זמן הנסיעה (מה יהיה המסלול שייבחר אם מאפשרים עוד 5 דקות לנסיעה?).
- פוטנציאל הביקוש ברשת.

הנקודה האחרונה מרמזת על הפוטנציאל הגלום בשיטת התכנון הממוחשבת לצורך תכנון מסלולים עבור קווי תחבורה מופעלי ביקוש (Demand Response Transit). מדובר בשירות תחבורה ציבורית המבוסס על התאמת מסלולי הנסיעה לביקושים המתקבלים בפועל במהלך הנסיעה או זמן קצר לפנייה. אמצעי זה, המיושם ברשתות התחבורה במקומות רבים בארה"ב, מחייב תכנון מסלולים מעגליים באופן שוטף לכל נסיעה בנפרד. התכנון מתבצע באופן דינמי ע"י סדרן עבודה. לפיכך יתכן כי אחד היישומים העתידיים של המודל המוצע הוא לשמש מערכת תומכת החלטה בתהליך זה.

<sup>10</sup> בהקשר זה מציינים Van Nes et al (2000) את הצורך לקחת בחשבון מרחקי הליכה שונים עבור איזורים שונים ואוכלוסיות שונות.



- Ceder A and Y. Israeli. 1993. Design and evaluation of transit routes in urban networks Proceedings of the 3rd International Conference on Competition and Ownership in Surface Passenger Transport, Ontario, Canada
- Cervero, R. 2001. Walk-and-Ride: Factors Influencing Pedestrian Access to Transit, Journal of Public Transportation, Vol. 3, No. 4, pp. 1-23.
- Chien, S., and P. Schonfeld. 1997. Optimization of Grid Transit System in Heterogeneous Urban Environment, Journal of Transportation Engineering, Vol. 123, No. 1, pp 28-35.
- Dijkstra, E. W. 1959, A Note on Two Problems in Connection with Graphs, Numerische Mathematik, 1, pp. 269-271.
- Farwell, Randall G. and Eric Marx. 1996. Planning, Implementation, and Evaluation of OmniRide Demand-Driven Transit Operations: Feeder and Flex-Route Services. Transportation Research Record 1557, TRB, National Research Council, Washington, DC, pp.1-11.
- Jerby, S., and Ceder A 2007. Optimal Routing Design for Shuttle Bus Service. Transportation Research Record No 1971, pp 14-22.
- Kuah, G. K., and J. Perl. 1988. Optimization of Feeder Bus Routes and Bus-Stop Spacing, Journal of Transportation Engineering, Vol. 114, No. 3, pp 341-354.
- Spasovic, L. N., and P. Schonfeld, 1993, A Method for Optimizing Transit Service Coverage., Transportation Research Record., 1402, pp 28-39.
- Van Nes, R., and P. H. L. Bovy. 2000. Importance of Objectives in Urban Transit-Network Design, Transportation Research Record 1735, pp 25-34.

**סיכום**

בעבודה זו הוצגה שיטה לתכנון אוטומטי של מסלול מעגלי של קו תחבורה ציבורית, לצורך הזנת תחנת רכבת (או מרכז תחבורה אחר). השיטה המוצעת מתבססת על מודל ליצירת מסלולים העומדים באילוף זמן נסיעה, ועם זאת מספקים באופן מיטבי את פוטנציאל הביקוש. פוטנציאל הביקוש נאמד תוך התייחסות משולבת לצפיפות הדיור ולמרחקי ההליכה.

שיטת המחקר התבססה על גישה מודולרית המפשטת את הבעיה המורכבת לסדרה של צעדי פתרון נפרדים ומאפשרת לבצע עדכונים והתאמות בכל אחד ממרכיבי התהליך. כך למשל בשלב הערכת פוטנציאל הביקוש ניתן ליישם גישות חלפיות מבלי לשנות את שאר המרכיבים. יש לציין כי ה"מודול האורבני" שתואר לעיל נבחן על גבי קובץ נתוני GIS שהתקבל מעיריית חיפה (בסיוע חברת "יפה נוף"). מתוך בחינת הקובץ עולה כי ניתן עקרונית לבצע אומדן מקורב של צפיפות האוכלוסיה סביב כל קטע ברשת הבסיסית באופן שתואר לעיל, באמצעות פונקציות בסיסיות בתוכנת ה-TransCAD. לאחר מכן ניתן לחשב את מרחק ההליכה הממוצע לכל קטע בהתאם לנוסחה 1, ואת אומדן פוטנציאל הביקוש בהתאם לנוסחה 2.

ככלל, המתודולוגיה המוצעת ניתן ליישום במספר רב של הליכי תכנון תחבורה ציבורית. בנוסף לסיוע בתכנון מסלולים בזמן אמיתי כמוזכר לעיל, ניתן לממש את המתודולוגיה לצורך תכנון קו איסוף ופיזור שכונתי, במסגרת רשת היררכית כלל עירונית. בנוסף ניתן להעזר בה לצורך קביעת המיקום של מסלולי העדפה ייעודיים לתחבורה ציבורית, במסגרת תכנית אב לתחבורה לכל אזור נתון.

**רשימת מקורות**

- Ceder, A. 2007. Public Transit Planning and Operation: Theory, Modeling and Practice, Elsevier, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 640 p.

**סוג?**

**אורך?**

**משקל?**

**מהירות?**

**כמות?**

**ביצוע מדידות וסקרי תנועה באיכות ובמחיר ללא תחרות בציר ובצומת, 24 שעות ביממה, בכל רחבי הארץ.**

א.י.פ.א.י. ישראל תנועה וחניה בע"מ, רח' הבזלת 8, ת.ד. 13187 צור יגאל 44862, טל' 09-7495777, פקס' 09-7496777

**מדריך לשירותים מקצועיים**

**סקרי תנועה ותחבורה**

רח' כנפי נשרים 15 – ת"ד 523 ירושלים 91004  
טל': 02-6511323 פקס': 02-6514687  
shiran@netvision.net.il  
www.transit.co.il

**עמוס אלטר**  
הנדסת דרכים ותנועה

ת.ד. 17208, ת"א 61170  
טל' 03-6023495 פקס' 03-6023499

**Eng. A. ALTER**  
Highways & Traffic Engineering  
P.O.B. 17208, TEL AVIV 61170  
Tel.: 972-3-6023495 Fax.: 972-3-6023499  
ISRAEL

**ישראל אדלר**  
הנדסה אזרחית בע"מ

**תכנון כבישים, חניות  
ופיתוח שטח**

רח' זוהר 4, רמת-גן 52442  
טל' 6738206 פקס' 6723172  
E-Mail: adler99@netvision.net.il