

## התערבות ותחרות בשוק התחרורה המוטורית

### II. עלות הצפיפות

מאת

ראובן גרוינוו

#### תמציה

המעבר מתחבורה ציבורית לרכב פרטי, והפיגור בהשקעות בכבישים אchariy גידול צי הרכב הביא לעלייה משמעותית בцеיפות בכבישים ב-35 השנים האחרונות. בתנאי צפיפות עלות הנסעה לפרט קטן מהעלות למשק, שכן הפרט מועלם בשיקוליו מעלה הזמן הנסוף לנוסעים האחרים במערכת תחבורה ציבורית התונעה בעקבות ניסתו לנתיב.

נסין לאמוד את עלויות הצפיפות כרוכך בסדרה ארוכה של הנחות על פונקציית המהירות, עלויות הזמן, רכיבי חלונות הרגיסטרים לזמן הנסעה, גמישיות ביקוש לנטיעות ועוד. חישובים המבוססים על סימולציה של רשת הנסיעות בתל-אביב מראים שב-1991 היה כרוכך כל ק"מ-רכב בתוספת זמן לשימושים האחרים של 1-9 דקות. במונחים כספיים הייתה הعلاות לפרט רק עשירית עד מחצית מהעלות למשק. מסי השימוש (וחשוב בהם — מס הדלק) היו בשיעורים קטנים במידה מסוימת מנזקי הצפיפות בתחבורה העירונית.

לפי העריכנו אם ניתן היה להטיל אגרות צפיפות דיפרנציאלית שתגשינה על הפער בין העלות לפרט ולמשך תקופה תנועת הרכב הפרטי באזרחי הצפיפות העירונית הכבדה מצלטמות במחצית, והתחרורה הציבורית הייתה גדלה ברבע-שליש. אגרות אלו היו מביאות לירידה קטנה בלבד במספר הנוסעים הכלול והוא חוסכות למשך כ-150 מיליון שעות נסעה שערך במחצית 1995 הוא למעלה מ-2 מיליארד ש"ח. אך האגרות במקרה זה היו צרכות להיות בשיעורים כה מפליגים קשה להאמין שכן ישימות. מיסי הדלק לא מצלחים לחותם עם בעיית הצפיפות, ויש לאמצן מגוון רחב של אמצעי מדיניות נוספות כדי לmour את הנק.

המכון למחקר כלכלי בישראל ע"ש מורייס פאלק

ירושלים, מאי 1997 ♦ מאמר לוין מס' 97.03

## התערבות ותחרות בשוק התחרורה המוטורית — עלות הצפיפות\*

### א. הקדמה

הפגיעה בחשקוות בתשתיות עמד בשנים האחרונות במרכז הדין הציבורי. ב-25 השנים האחרונות גדל צי הרכב פי 6, בעוד שטח הכבישים גדל רק פי 1.8. היחס ק"מ-רכב לשטח כביש שלוש, וגדלה בדומה משמעותית הצפיפות בדרכים.<sup>1</sup> החלץ הציבורי להגדלת החשקוות בכבישים נושא להשכיה שתי עובדות יסוד: (א) כמחצית מהתנועה המוטורית היא בכבישים עירוניים שאפשרויות הרתבements מוגבלות, ו-(ב) גם בעיר אופטימלי מבחינה חברונית אמורה להתקיים צפיפות, כך שההרחבה הכבישים (הדרישה שלעצמה) אין לתת מענה מלבד בעיית הצפיפות.

בתנאי צפיפות המחייבו את החלטות הנסיעה של הפרט שונה ממחירו למשק. הפרט מתעלם בשיקוליו מהשפעת פולוטוי על עליות הנסיעה (במוני זמן וכטף) של משתמשים אחרים במערכת. כתוצאה אין לצפות שמנגנון התחרות החופשית יביא, בהדרת התערבות, להקצת מקורות אופטימלית בתחרורה המוטורית. העיות בהקצתה מתבטאת בחלוקת הנזעים בין: סוג הרכב השונים (רכב פרטי, מוניות, אוטובוסים), במספר הנסיעות הכלל, ובхаיקף התשתיות הנדרש לביצוע נסיעות אלה.

אחד הדרכים שモוצעות בספרות הכלכליות להתמודד עם בעיית הגודש היא הטלת אגרה. אגרה זו אין מטרתה לגייס משאבים מהציבור, אלא לאפשר על העלפר ביז המחבר לפרט והמחיר למשק. הטלת אגרה מסוג זה תעמיד את המשתמשים במערכת בפני מערכת המהירים הכלכליים, ותביא לפתרון הקצאי טוב יותר.

העקרון שהשימוש בכביש אינו חופשי וחיב בתשלום הוא עקרון שהציבור ונציגו מתקשים לעכל (כשם שהעקרון שהשימוש בכביש בבעמג'רש חנייה פטור מתשולם, היה עקרון קשה לעיכול). ישמו, ואפילו באופן חלקי, מחייב אומדן של הנזק הכרוך בצפיפות. המאמר מנסה לתות תשובה מקורבת לשאלת.

באופן טבעי, הצפיפות שונה מנתיב ומשעה לנסיעה, ותלויה באופי הנתיב ובמספר המשתמשים. לא ניתן למפות את כל הנטיות שבחן מתיקיות צפיפות. במאמר נבחן בין תנועה עירונית ובינעירונית וננסה למדוד את נזקי הצפיפות כתוצאה שנייה מספר כלי הרכב הנתיב. כפי שהצבעתי במאמר קודם (גורנוו, 1997א), האגדלת השימוש ברכב פרטי הייתה הגורם העיקרי להגדלת הצפיפות. בעשרות וחמש השנים האחרונות חל שינוי חד ברכב התנועה. הרכב הפרט שוחbil בשנת 1970 כשליש מהנוסעים, משרות ביום נתה כפול, במקביל קטן נתח השוק של

\* ברצוני לחזור ולהזכיר לעוזרי המחבר שטיינו ביוי במחקר זה — יהה רובינשטיין, ניצן מלמד ואביעד טור-סיני. כמו כן נזונה תזותי ליחסו לכך מהמחקר זה — יהה רובינשטיין, ניצן מלמד ומחקר תחרורה, בהם נערת שלבטים שונים של המחבר. המחבר נהנה מסיום כספי של מכון ירושלים לחקר ישראל ומשרד תחבורה.

<sup>1</sup> הנתונים לא כוללים אופניים. ב-35 השנים 1961-1995 נגדל צי הרכב פי 24, שטוח הכבישים פי 3 ומדובר ק"מ-רכב לשטח כביש — פי 6.

התחרות הציבורית בחצי.<sup>2</sup> קילומטראי הרכיב גדול בעשרות וחמש השנים האחרונות פי חמישה, אך קילומטראי הנוטעים גדול רק פי שלושה. לשון אחרת, אלמלא המuber מרכיב ציבוררי לרכיב פרטי, הייתה הצפיפות גדלת רק ב-60 אחוז מהigidol בפועל.

שימוש ברכב פרטי כורך בתשלומים מיסים בשיעור הגובה מחמס המוטל על כל מוצר לצרכות בר-קיימא אחר. נשאלות על כן השאלה, האם אין המס משמש תחליף לאגרה. האם המחר לפרט (חכול את המיסים) גבוהה או נמוך מהמחיר למשק? על שאלה זו אני מנסה לענות בשתי רמות: בrama מצפה, עברו כלל כלי הרכב, ובrama הפרטנית, עברו כל סוג רכב בנפרד.

מדיניות אגירות אופטימלית מחייבת מיסוי דיפרנציאלי. במערכות זו האגרה על כל סוג רכב תלויה בתרומות לציפוי. האגרה המוטלת על כל נוסע היא ביחס הפוך למספר הנוטעים ברכב. בrama הפרטנית נבדקת שאלה כיצד ישפיו המיסוי הדיפרנציאלי על הרכיב התנועה ועל הצפיפות, והאם מסי השימוש (ובראש וראשונה, מס הדלק) המוטלים על הרכיב הפרטני, גבוהים מדי מנקודות ראות הקצאתית.

כמו במחקרנו הקודם (גראנוו, 1997), גם מחקר זה סובל מתשתיות נתונים רועעה. אלא שבמקרה זה אין זה ייחודי למסק היישורי וגובה מחומר הסכמה בספרות לגבי כמה מהפרמטרים החוויניים למחקר (פונקציית מהירות, ערך זמן וכדומה). בכלל מגבלות נתונים מקומיים (שפורטו בגראנוו 1997), תקופת ההתייחסות של המחקר היא שנת 1991. קרוב לוודאי שרוב התוצאות עליהן מצביע המחקר החומרו בהמשך השנים שלאז.<sup>3</sup>

**ב. תיאוריה**  
 מערכת התחרות הציבורית היא מערכת מבודדת. המערכת מייצרת שירותים רשותי הסעה תוך שילוב מגוון רחב של גורמי יצור: שירותי כביש, שירותי רכב וזמן נוסעים. אלא שבניגוד למערכת יצור רגילה, בה כל גורמי הייצור הם בשליטת גורם מכון אחד (הנהלת הפירמה), לא קיים במערכת התחרות הציבורית גורם מרכזי מכון. כל אחד מהמשתתפים בתחום הייצור שואף להביא את רווחתו (או רווחתו) למCASTIMOS, וכך שדר מערך המחררים והעלויות שעומד בפנוי סוטה מערך המחררים והעלויות החברתי, לא תחילה התוצאה אופטימלית מבחינה חברתית. אחת התולדות של פיצול החלטות היא בעית הצפיפות במרקזים עירוניים.

הנוסף, בשיקוליו בבחירה אמצעי ונתיב הנסיעה, ובמחלתוינו ביחס למספר הנסיעות, לוקחים בחשבון את העלות הישירה (תעריף הנסיעה או עלויות התפעול של כל רכב), ואת עלויות הזמן הקשורות במסעה, אך מתעלם מתחשלה שיש לכניותו לנטייה על מסק הנסיעה של נוסעים אחרים. כתוצאה, כאשר משך הנסיעה מושפע ממספר המשתמשים, נוצר פער בין העלויות השולית

<sup>2</sup> חמדודה נעשתה במונחי ויטע-קיימ בתנוחה שמקדמי התפותה לא השתנו על פיו זמן. ברכב הפרטி נכל גם הרכיב המסחרי, שהוא תחליף קרוב לרכיב הפרטני. בתחרות הציבורית נכללו המוניות והאוטובוסים (כולל האוטובוסים בעלות פרטנית).

<sup>3</sup> עלית ממד המחררים לצרכן בתקופה 1991-1996 הייתה בשיעור של 70 אחוז.

הפרטית והעלות השולית החברתית. פער זה תלוי במספר המשמשים ובהשפעה שיש לתוספת נוסע על עלות הנסעה.

באופן פורמלי, כאשר העלות לפרט היא  $(X)^a = 7$ , העלות החברתית הכוללת תהיה  $X^a = 7$ . כאשר העלות לפרט גדלה עם מספר המשמשים במערכת,  $X$ , העלות השולית החברתית עולה על העלות השולית הפרטית:  $7 > (X^a)^b = 7^b$ . הפער בין העלות השולית החברתית הפרטית והחברתית היא ההשפעה החיצונית:  $X^b - X^a = b(X^a) - a(X^b)$ .

כדי לחשב את תיקון ההשפעה החיצונית דרושה אינפורמציה על מספר המשמשים  $X$ , ועל  $X^a$  — ההשפעה שיש לכל רכב נוסף על עלויות הנסעה של שאר המשמשים. למטרה זו דרושה אינפורמציה על השפעת כל רכב על מהירות הנסעה בתאגיד (פונקציית מהירות) ועל השפעת המהירות על עלויות הנסעה. כל אחד מרכיבי חישוב זה כרוך במידה רבה של אידויוק. מספר המשמשים משתנה ממקום למקום ומשעה לשעה. לא נעשו בשנים האחרונות כל נסיעון לאמוד את פונקציית המהירות של כל רכב במרכזים עירוניים בישראל, ועל חוקר להשתמש בפרמטרים המתקבלים מן החוץ. באופן דומה, הערכת ההשפעה שיש ל מהירות הנסעה על עלויות הנסעה בפועל תלויה בהנחות רבות.

בעליות הנסעה שלושה רכיבים: עלויות שוטפות, עלויות קבועות (עלויות הקשורות במספר כלי הרכב המופעלים), ועלויות זמן נסעתם. כל שלושת הרכיבים רגילים ל מהירות הנסעה. לא קיים קשר מוגנתי בין העלויות השוטפות ומהירות הנסעה. נסעה אטית (הכרוכה בעצרות רבות) מגדילה את עלויות התפעול של כל רכב השניים (במיוחד עלויות הדלק והאחזקה). מכאן, נסעה במהירות גבוהה מביאה אף היא להגדלת עלויות אלו. לשם פשוטות, התעלמתי במחקר זה, בדומה למחקרים הקודמים (גורונאו-ויס, 1982), מוחש שבני העליות השוטפות ומהירות.

מהירות הנסעה משפיעה על העלות הקבועות במידה ושינוי במהירות מביא לשינוי במספר כלי הרכב המופעל במערכת. הביקוש לנסיעות מסווגין על ידי תנודות גדולות על פני זמן (תנודות שיטתיות ומקריות). כתוצאה לכך המכביינו מופעל חלק גדול מהזמן. השפעת המהירות על מספר כלי הרכב תלויות במידה התחלופהaktiva (הקיימות בביקושים בין עונות שיא ופל). האתות המהירות בעונת השיא מביאה להקטנת מספר הסביבים שמסוגל כל רכב לבצע במשך התקופה. היא עשויה להשיבא להגדלת צי הרכב כאשר לא קיימת תחלופה בין ביקושים בשעות שיא ושעות שפל, אך היא לא תשפיע על גודל הצי כאשר ניתן לדוחות את הנסיעות לשעות השפל (וاثبات המהירות תצמצם את מספר השעות בהן כלי הרכב תונח).

השפעת המהירות על מספר הסביבים שכלי רכב מסוגל לעשות בשעות השיא תלויות בחלוקת זמנו של הרכב בין נסעה לבן טעינה ופיריקה, וגדלה ככל שהזמן המוקדש לטעינה ופיריקה (של נסעים ומטען) קטן יותר.

קיימים רק אומדן גסים על חלוקת זmeno של הרכב בין זמן נסעה וזמן אחר (אומדנים המבוססים בעיקר על קילומטראיו) הרכיב והנחות על מהירות המשחרית שלו) ולא קיים כל מידע

על חלוקת הזמן בין נסיעה וחניה בanford בשעותinea וsharp. לצורך על כן להמיר אינפורמציה זו בבחנות.

ג. **הנחות**  
הנחנו שיקולי הרכישה של רכב פרטי אינם מושפעים ממחירות הנסעה של הרכב לעומת אמצעים חלופיים (מוניות ואוטובוסים), ומהkilומטראי של הרכב. לגבי כל הנקב האחרים' אומצה ההנחה שرك זמן הנהגים רגש למהירות. הנחה זו מתעלמת, על כן, מושפעת מהירות על סבב כל הנקב ומיניה שהמהירות אינה מושפעה על מספר kali הנקב (הנחהנו, עם זאת, שמספר kali הרכבה משתנה עם הקילומטראי). להנחה זו הצדקה רבה יותר כמשמעותה בחובלות רבות מאשר במקרה של הובלות נוסעים, והיא עשויה להביא לחטיה לפני מטה בעלות הציפיות של

ערך זמני של הנוסעים (ובעיקר של יממים, Commuters) היה נושא למידה ארוכה של מחקרים בעולם. הנסיון שנערך בישראל בנושא מוצמצם ביוטר,<sup>5</sup> ועל כן נאלץ להתבסס על הניסיון העולמי. לפי נסיוון זה הערך שנוסעים מייחדים לזמן הוא  $\frac{1}{4}$  -  $\frac{1}{5}$  משכרים לשעת עבודה. ההганסה לשעה ב-1991 הייתה 15.2 ש'יח (למ"ס, שנותן 1992, לוח 12.35). בהנחה ששכר של נסיעים ברכב פרטני גבוה ב-25 אחוז מהמוצע, של נסיעות במוניות גבוהה בשליש, ושל נסיעות אוטובוס שווה למוצע, ושער הזמן הוא שלוש מהשכר, יהיה ערך זמני של נסיעי רכב פרטי 6.33 ש'יח לשעה, של נסיעי מוגנות – 6.76 ש'יח, ושל נסיעי אוטובוסים – 5.07 ש'יח.<sup>6</sup> גם האינפורמציה על מקדמי התפוצה של כל הרכב אינה מעודכנת. הנתנוו שמספר הנוסעים המוצע ברכב פרטי הוא 1.35 בנסיעות עירוניות ו-2 בנסיעות בינלאומיות, שמספר הנוסעים ברכב פרטי בתוניית הוא 3.5-5, בהסתמכת.<sup>7</sup>

בדוח 1 חולקו עלויות הנסעה לפי עלויות המשתנות באופן פרופורציוני לקילומטראי (⁷) ועלויות המשתנות עם זמם הנסעה (⁸),  $(S_0 / S_1) + 1 = 7$ , כאשר  $S_0$  היא מהירות הנסעה. במרכיב הראשון נכללו עלויות התפעול והרכב (להוציא עלויות נהיגה), פרט לרכיב הפרטי שלגביו חנתנו שرك עלויות התפעול תלויות בקילומטראי. המרכיב השני הוא סכום של עלויות הנהיגה וזמן

<sup>4</sup> לפי סקר המשאיות 1990<sup>1</sup>, מסחר השעות בחו"ל משאיות ממוצעת נמצאת בתנועה (עמוסה או ריקה) הוא כ-2,000 שעות בלבד. ביום עבורה ממוצע (יום שבתלה) נוסעת המשאית רק כ-150 ק"מ. לגבי חומריות יש לזכור שמספר המוניות נקבע באופן בלעדי על ידי מדיניות הרישוי של משרד התחבורה, במוויה מהוות לכלכלהם כלכלית.

**5 נסיכון אחד** מעשה על ידי שלמה אלישר בשנות ה-60. אלישר ניסה לאמוד את ערך זמנים של הנוסעים במטוסים מישיקולים כלכליים.

חישובן (גרכוניאן, 1996) לשנת 1994. השיר המופיע במחירים קבועים עליה באותה תקופה (ב-5.8%).  
הוינה פי 1.7 (חישור המוצע למשך שיר במחירים קבועים עליה באותה תקופה ב-5.8%).

ב-1994 אלה היו בסיסAMPFI עדכני. האומדן לרכיב פרטיו מבוסס על הערכות המכון לחקר

הסקרי-יוניינית (1998).

7. למספרים אלה אין בסיס אמפרי ערך. אגדה מהחבורת האומדנים לאוטובוסים ומוניותם אלו שמשו במחקר גורנאו-ויס (1983).

הנוסעים. מרכיב שלויות הנהיגה תלוי בשכר הנהגים בכל הרכב השונים ובמספר שעות הנהיגה. ערך זמן הנוסעים תלוי בערך הזמן לשעה ובמקדם התפוצה. הטור האחרון בלוח מתאר את מרכיבי העלות לרכב ממוצע, כאשר הממוצע מחושב לפי משקל הרכב בק"מ-רכב הכלול.<sup>8</sup>

לוח 2 מפרק את שלויות הרכב המשנות למרכיביהם: שלויות תפעול, זמן נהגים וזמן נסעים. לאחר שלויות הזמן תלויות ב מהירות, חשבו שלויות לשולש רמות מהירות: 15 קמ"ש (מהירות טיפוסית למרכזי הערים הצפופות), 25 קמ"ש (מהירות טיפוסית לבנייה עירונית), ו- 70 קמ"ש ( מהירות עירונית טיפוסית לבנייה בעיירונית). החלו מכך על חשיבות זמן הנסיעות עלות הנסעה (במיוחד ברכב פרטី ובאוטובוסים), בהם הוא מוחז 60-70 אחוז מכלל העלות) וחשיבות עלות זמן הנהגים (בעיקר במוניות וברכב להובלת משאות). חשיבות ערך הזמן מבון פחותה ככל שגדלה המהירות. מרכיב זמן הנסיעות מוחז 70 אחוז מעלות רכב פרטី לבנייה איטית בתנועה עירונית (15 קמ"ש) אך רק 45 אחוז לבנייה בעיירונית מהירה.<sup>9</sup> שלויות הזמן (נהג ונוסעים) מוחזות 70 אחוז מכלל שלויות נהיגה איטית ורק שיליש מהעלויות לבנייה מהירה.

צידן השני של המطبع הוא משקלם הקטן של שלויות התפעול ורכיב חמס לבנייה העירונית. החמס מהווים כשיתר מכלל שלויות רכב פרטី לבנייה עירונית (במהירות 25 קמ"ש) אך רק 7 אחוז מעלות המוניות ו-4 אחוז מעלות האוטובוסים. מרכיב חמס מהווים כמעט רבע שלויות רכב ממוצע לבנייה בעיירונית.

עלית השכר הריאלי על פני התקופה (1970-1991) והורדת המסוי הביאו לירידת חשיבות החמס ועלייה חשיבות ערך הזמן במרכבי העלות של התחבורה המוטורית בעשורים האחרונים השנהוגות.<sup>10</sup> מגמה זו, כפי שנראה, היא רבת חשיבות לדין בשאלת באיזו מידת מהווים מסי השימוש תחליף לאגרות צפיפות.

<sup>8</sup> נתוני הרכב הממוצע מושפעים במידה רבה מנתוני הרכב המשחררי שמשקלתו בק"מ-רכב עולה במידה ניכרת על משקלו בק"מ-נוסעים. לגבי רכב זה, המשמש לעתיס קרונות בתחליף לרכב פרטី, ניתן להנחות על עלות הזמן מוטות כלפי מעלה (עלות זמן הנהג המשמש ברכב לצרכי הפרטיים נמוכה מתחולות כאשר הוא משתמש ברכב לצרכי עבודה). דרך חישובם של נתוני התפעול ושלויות הנהיגה מתוארת בגרונו (1997, נספח).

<sup>9</sup> החבד היה גדול יותר אם היוינו מיניכים אותו מקדים מילוי בניו סוגיה הנסיעות.

<sup>10</sup> השוואת מרכיב הזמן בעלות רכב פרטី לבנייה עירונית (25 קמ"ש) עם נתוני גראנו-ויס (1982) מצביעה על עלייה מ-50 ל-60 אחוז (אם היוינו מיניכים, כפי שהניבו גראנו-ויס, שמקדם התפוצה הוא 1.7 היה משקל הזמן עליה ל-2/3).

לוח 1. מרכיבי העלות לפי סוג רכב ואיזור הנסיעה, 1991

היחידה							
		רכב פרטי	מניות	אוטובוס	bosim	רכב	שיעוריות
59.3	59.3	74.3	59.3	59.3	59.3	47.4	59.3
2700	2700	2500	2700	2700	2700	2400	2700
21.96	21.96	19.75	29.72	21.96	21.96	19.75	29.72
0	0	5.07	5.07	6.76	6.33	5.07	5.07
עלות זמן נסע							
<b>הוצאות עירונית</b>							
		nosuim	לכלי רכב			מקדם תפסה	
0.532	2.231	0.904	3.007	0.564	0.228	עלות משתנה לק"מ-רכב	
0.316	1.548	0.456	2.490	0.393	0.127	לפעוליל	ש"ח לק"מ
12.165	0	5.07	202.8	20.28	8.55	למשק	ש"ח לק"מ
6.699	21.96	19.75	29.72	21.96	0	עלות משתנה עם הזמן	עלות משתנה עם הזמן
18.865	21.96	24.82	232.52	42.24	8.55	ערוך זמן נסעים	ערוך זמן נסעים
100.0	3.5	23.9	2.3	2.4	67.9	ערוך זמן נסעים	ערוך זמן נסעים
100.0	0	11.1	42.8	3.4	42.7	סה"כ ערוך זמן	סה"כ ערוך זמן
משקל בק"מ רכב							
משקל בק"מ נסע							
<b>הוצאות ביןעירונית</b>							
		nosuim	לכלי רכב			מקדם תפסה	
0.635	2.231	0.904	3.007	0.564	0.228	עלות משתנה לק"מ-רכב	
0.402	1.548	0.456	2.49	0.393	0.127	לפעוליל	ש"ח לק"מ
16.363	0	10.14	126.75	37.18	12.66	למשק	ש"ח לק"מ
7.547	21.96	19.75	29.72	21.96	0	עלות משתנה עם הזמן	עלות משתנה עם הזמן
23.910	21.96	29.89	156.47	59.14	12.66	ערוך זמן נסעים	ערוך זמן נסעים
100.0	8.0	19.3	3.7	4.0	65.0	ערוך זמן נסעים	ערוך זמן נסעים
100.0	0.0	13.6	32.7	7.8	45.9	סה"כ ערוך זמן	סה"כ ערוך זמן
משקל בק"מ רכב							
משקל בק"מ נסע							

מקור: עלויות הרכב ושכר הנהגים — גראנוו (1996); ערוך זמן נסעים ומקדמי מילוי — ראה גוף חנכה.

הנִזְבֵּחַ בְּאַלְמָנוֹת לְפָנֵי סְמוֹגַן הַלְּכָבֶד (מִהְרָיוֹת הַגְּדוּלָה), 1661

**מקורות:** היישוב העולות לרכיב-קיימן מבוסס על לוח T.

ד. **עלויות הצפיפות**  
 עלויות הצפיפות תלויות באופן קרייטי בהנחותינו לגבי פונקציית המהירות. בספרות התתborותית לא קיימת הסכמה ביחס לפונקציות המהירות הירוניות והביניירוניות. הקשר בין מהירות ונפח התנועה תלוי באופן הפסציפי של רשות הכבישים (גורמים טופוגרפיים, צמחיים וכדומה), ניתול התנועה (Traffic management) : רמזורים, נתיבים יהודים, כבישים חד-סטריטיים, בישורי הנගים, הרוב התנועה ועוד. קשה להאמין שקיימת פונקציית מתמטית פשוטה המסогלת לשקל מכלול גורמים אלה. לא ייפלא, איפוא, שבמספרות הוציא מגון של פונקציות. חלון קשור את המהירות בוגדש התנועה בכיביש (מספר כל הרכב לק"מ) וחלון בעומס התנועה (מספר כל הרכב העובר בכיביש בשעה). חלון של הפונקציות מתמקד ב מהירות וחילון משך הנסעה  $t_s$  מהפונקציות השונות נזירים אומדנים שונים להשפעה יש לרכב שלו על משך הנסעה בתיב  $(X/t_s)$ , להקף תנועה נתון, או לחילופין, אומדנים שונים לגמישות הזמן ביחס לנפח התנועה  $(x_s)$  כאשר

משך הזמן הנסעה נתון.<sup>12</sup>

כל יחסית לענות על השאלה האם המסל ברטמו הנוכחות ( $x_s$ ) גבוח או נמוך מעליות הצפיפות  $X/t_s = (X/t)/t_s$ . משתנה מפתח בקביעה זו הוא היחס  $\hat{w} / \hat{t}$  — מרכיב המסל יחסית לאומדן ערך הזמן. כל עוד מתקאים  $(\hat{w} / \hat{t}) > (X/t_s / X)$ , המסל קטן מעליות הצפיפות. לפי לוח 1, המסל לק"מ-רכב בנסעה עירונית (הפער בין הULAR למספר ולםשך) היה ב-1991 בממוצע 0.22 שית (והמס בנסעה בין-עירונית כמעט זהה). ערך הזמן לנוי הנחותינו הוא 18.9 שית לכלי רכב (מזה כ-3/2 הוא עלויות זמן הנסעים, ושליש עלות זמן הנגמים). היחס  $\hat{w} / \hat{t}$  עבר רכב ממוצע הוא, איפוא, 0.011 בתחבורה העירונית ( $0.010-0.010$  בתחבורה הביניירונית). יכול של פונקציות מהירות בתחבורה העירונית מראה שבמהירות הקטנה מ-35-45 קמ"ש גבולות עלויות הצפיפות מהמס קבועים. בתחבורה הביניירונית עלות עלויות הצפיפות על המסל קבועים כאשר מהירות

קטנה מ-50-70 ק"מ.<sup>13</sup>

הגורם העיקרי לצפיפות בכבישים הם כל הרכב הפרטיטים. כל רכב אלו מהווים (לפי לוח 1) 2/3 מהתנועה (במנוחת ק"מ-רכב) אך מובילים רק 45 אחוז מהנסעים (במנוחת ק"מ-נסעים). המסל על החוצה השוטפת של רכב פרט היה ב-1991 0.10 שית לק"מ. היחס  $\hat{w} / \hat{t}$  עבר רכב פרטית בתנועה עירונית היה 0.0054 ובתנועה הביניירונית 0.0042. כאשר מהירות התנועה

<sup>12</sup> הנושא הקשור את היקף התנועה ( $X$ ) בוגדש ( $D$ ) היא  $DS = X$ , כאשר  $S$  היא מהירות. משך

הנסיעה  $t$  מוקיים, כמפורט,  $t = 1/S$ .

<sup>13</sup> השפעה החיצונית שווה ל-  $X/t_s = (X/t)/t_s$ , כאשר  $x_s$  היא הנMISSות של  $t$  ביחס ל-X. כאשר רק מרכיב זמן הנסעה וגייס לנפח התנועה,  $x_s = t_s = x_s$  כאשר  $\hat{w}$  הוא מחיר הזמן ו-  $x_s$  היא גמישות הזמן ביחס ל-X. מתקאים  $(x_s - 1)/t_s = x_s - x_s$  כאשר  $x_s$  היא גמישות  $t$  ביחס לגודש גמישות הזמן ביחס ל-X. דיוון מפורט יותר בפונקציות המהירות כלל בנספח 2.

<sup>13</sup> החישוב מפורט בנספח 2.

העירונית יורדת מתחת ל-45 קמ"ש יהיה נזק הצפיפות הנגרם על-ידי הרכב הפרטி גדול (בשוליים) מהמש שהוא משלם. בתגובה ביעירונית נזקי הצפיפות שנורמים כל הרכב הפרטיים גדולים מהמס כאשר המהירות יורדת מתחת ל-70 קמ"ש.<sup>14</sup>

מעאים דומים מתקבלים כאשר משתמשים בסימולציה. השתמשו לצורך הסימולציה בראש הכבישים של מטרופולין תל-אביב, ונבדקו ההשלכות של תוספת 5 אחוז במל הרכב הפרטיים (על המצב הקיים ב-1993) על משך הנסעה ברכב פרטיז ואוטובוסים ברוחבי העיר.<sup>15</sup>

توزאות הנסיעה והסימולציה מופיעות להלן. הלוות מתאר שתי הცבות: הצבה אחת מוגרת שעת בוקר ממרכז (בין השעות 6:00 ל-09:00) והשנייה את שעת השיא בבוקר (00:00-08:00).

התוצאות מווינו לפי שני אפיונים: המרחק ממרכז העיר וסוג הדרך בת מוגשת הרכב. לפי נתונים אלה מחריות הנסיעה המוגשת ברכב פרטיז בשעת בוקר מרוכז היא 34 קמ"ש ומהירות יורדת ל-30 קמ"ש בשעת השיא. מהירות יורדת ככל שמדוברים למרוכז העיר — היא 62 קמ"ש בטבעת החיצונית יורדת ל-14 קמ"ש בגלען (בשעת השיא מהירות בגלען יורדת עד 12 קמ"ש). המהירות תלויה גם בסוג הדרך: מהירות המוגשת של רכב פרטיז בדרך מהירה באזור תל-אביב היא 83 קמ"ש ובדרך עropicית (משנית או ראשית) המהירות המוגשת היא רק כ-20 קמ"ש.

>Showoot מהירות הנסיעה בכל טבעת ובכל סוג דרך במצב הקיים בהשוואה למצב בו יתווסף 5 אחוז נוספים לתנועת הרכב הפרטיז מאפשרת את היישוב עלות נזקי הצפיפות המופיע בשני הטורים האחורניים (החשב נעשה לנושע שלו ולרכב שלו), כאשר לפי הנחה מקדם התפוצה של כל הרכב זהה — 1.3 (נוטעים לרכב פרטיז). לפי תוצאות הסימולציה עלות עלויות הצפיפות בשעת בוקר ממוגשת באזור תל-אביב על המס שמשלם הרכב הפרטיז בכל סוג הדרך (פרטיז, אוטובוס, דרכים מתיירות). הפער בין עלויות הצפיפות והמס גדול בשעת השיא. בגלען, לשם דוגמה, עלות עלויות הצפיפות על המס פי 30 — נזקי הצפיפות עלולים על 3 שי"ת לכל רכב לק"מ. לא פחות חשוב הוא הממצא שבמטרופולין תל-אביב אפילו בדרך מהירה (דרך בה מהירות המוגשת היא כ-80 קמ"ש) המס המוטל על העלות השוטפת של רכב פרטיז אינו "מוגם" — דהיינו, הוא אינו עולה על נזקי הצפיפות לחן גורם הרכב.<sup>16</sup>

<sup>14</sup> בחישוב נזקי הצפיפות הנגרמים על ידי כלי הרכב הכבדים (אוטובוסים ומשאיות) צריך להתחשב במקדמי החפרעה של כל רכב אלה. לדוגמא, לפי לוח 1 המס המוטל על קי"מ-אוטובוס הוא 0.52 שי"ת. אך לאחר ומקדם החפרעה של אוטובוס שהוא ל-2 (אוטובוס שקול לשני כל רכב פרטיזים) יהיה ערך ש' 0.52/2 (מתווך במקדם החפרעה) = 0.014.

<sup>15</sup> הבדיקה נעשתה על-ידי המכון הישראלי לטכנון ומחקר תחבורה. תוצאות הסימולציה משקפות, כמובן, את היחסות הבסיסיות של המודול המשמש בהצבות אלו. לפי התוצאות בטור הנסע בדרך המהירה ביותר מהמנוא לעיר, אין תלופה בין כל רכב פרטיזים ואוטובוסים, והמודול מתעלם מஹבלת נוסעים במוניות וברכב מסחרי. פונקציית משך הנסעה המשמשת את המכון בהצבות התנועה היא פונקציה לוגריתמית. הנתונים שעליים מבוססת הסימולציה מופיעים במכון (1994).

<sup>16</sup> אומדן המכון הישראלי לטכנון ומחקר תחבורה ביחס למחריות המוגשת במטרופולין (למעלה 30 קמ"ש בשעת בוקר ממוגשת), גבולה במידה מסוימת מאומדנים אחרים. לפי מות"ת (מרכז תכנון תחבורה) המחריות המוגשות בשעת שיא היא רק 22.4 קמ"ש (ובן השעות 00:00 עד 09:00 המחריות קטנה מ-29 קמ"ש). אומדן מות"ת מבוסט על סקר הרגלי נסעה (חישוב "מספר לשערי"), בעוד אומדן המכון מבוסט על הצבות נתוני תנועה ממוחשבות.

עלות גנרטורים		שעות לנולעיקם		עלות גנרטורים פראטי	
מהירות (קמ"ש)		נולעים לkilometer		נולעים לkilometer	
זמן גנרטור	זמן גנרטור	זמן גנרטור	זמן גנרטור	זמן גנרטור	זמן גנרטור
2.72	0.144	0.075	0.070	13.3	14.2
0.85	0.045	0.048	0.037	21.0	27.4
0.62	0.033	0.035	0.026	28.9	38.7
0.23	0.012	0.021	0.016	47.3	61.6
		0.042	0.030	22.5	33.6
3.17	0.168	0.082	0.081	10.3	12.4
1.17	0.062	0.051	0.041	17.0	24.6
0.83	0.044	0.037	0.029	23.4	34.9
0.30	0.016	0.022	0.017	36.7	57.9
	0.046	0.033		18.3	30.2
				430	780
				1,210	600
				1,918.1	21.1

**מקורה:** הצלבות והמכבים המשוראים למכבון גומחהך תונמבהה.

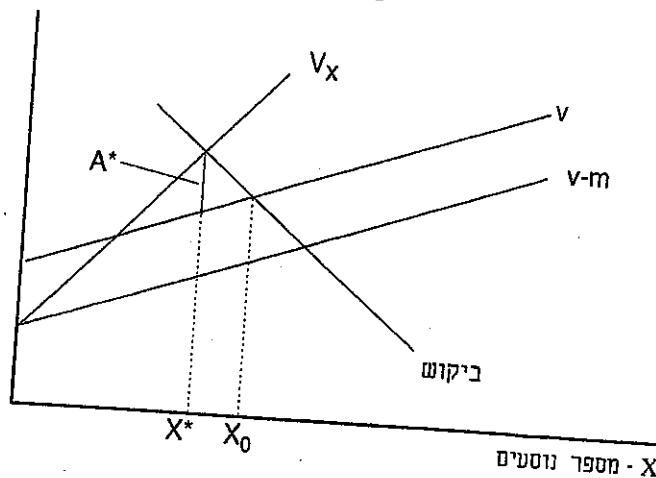
לטוט (המשם). ובקי עצמות לבי טוג דוד (לק"מ-רכב)

הקביעה שבתנוועה ביעירונית המס המוטל על הULARיות השוטפות של רכב פרטי עולה על נזקי הצפיפות כל עוד מהירות התנוועה אינה נופלת מ-70 קמ"ש, לעומת זאת לא להיות נכונה באזור גדור שמו מטרופולין תל-אביב.

גראנו-ויס, שהשו את נזקי הצפיפות עם המס שהיה קיים ב-1974, הגיעו למסקנות דומות. במחקרם נמצא שהמס הממושך קטן מעליות הצפיפות כאשר המהירות העירונית יורדת מתחילה ל-40 קמ"ש, כאשר המהירות הבינעירונית בכבישים הרחבים יורדת מתחילה ל-60 קמ"ש (גראנו-ויס, 1982, עמ' 22-23). משקנה זה תלויה באופן קרייטי באומדן חישס  $\bar{w}/m$ . (התוצאה תלויה גם בהנחות לגבי פונקציית המהירות. גראנו-ויס אימצו ההנחה שמחמיות היא פונקציה ליניארית של נפח התנוועה. במחקר זה נבדק מגוון רחב של צורות פונקציונליות). השוואת פרמטר זה עם האומדן ל-1991 מראה שבמוצע לא חלה ירידת ביחס זה במהלך 17 שנים (ואולי הוא אף גדול). עלית המיסים על התחרורה המוטורית הדביקה את עליית השכר ועלית ערך הזמן. יוצא דופן מבחינה זו הוא הרכב הפרטி, כאשר הגידול במסי הרכב הפרטי מפגר אחורי עליית ערך הזמן.

ה. **אגרות צפיפות אופטימליות**  
 חישוב עלות הצפיפות במצב הקיים אין בו למד על אגרות הצפיפות האופטימליות כאשר הביקוש לנסיעות אינו קשייל חלוטין. האגרה האופטימלית היא אגרה שתשווה את המחיר לשימוש עם העלות השולית החברתית. אם הנושא רואה בפניו את העלות החברתית המומצעת (ז) אגרה זו תהיה שווה ל- $A^* = V - X^*$ , כאשר העליות מושבות בנקודת האופטימום \* (ראה ציור 1). לחישוב אגרות אלו נדרש מידע על גמישויות הביקוש (כולל הגמישויות הצולבות), ועל פונקציית המהירות (הקובעת את גמישות היצע ואת העלות השולית החברתית).

ציור 1



חשיבות האופטימום החברתי דורש מידע על גמישיות הביקוש ביחס למחיר הכלול, כאשר מחיר זה מורכב מסכום הueliyot הכספיות וUELIOOT הזמן. מרבית המחקרים האמפיריים עוסקים בגמישות הביקוש ביחס לUELIOOT הכספיות (תעריף הנסיעה). קיימת הסכמה שגמישות זו נמוכה (בשבירות 0.3) ושגמישות הביקוש לנסיעות ברכב פרטי ביחס לתעריף הנסעה באוטובוס נמוכה אף יותר (אומדן נפוץ הוא 0.05). הגמישות ביחס לUELIOOT הכספיות תלויות בגמישות ביחס למחיר הכלול ובמרכזו שמהווה הueliyot הכספיות ביחס הכלול, לפיلوح 2 מהוות הueliyot הכספיות 40-40 אחוז מהמחיר הכלול של הפעלת רכב פרטי בתנועה עירונית וכ-55 אחוז מהמחיר להפעלתו בכבאי-שים בינויוונים. הueliyot הכספיות של אוטובוס (כולל שכר נהגים) מהוות 35-25 אחוז מהueliyot הכספיות בתנועה עירונית וכ-2/3 מהueliyot בכבאים בינויוונים. הסימולציה מבוססת על ההנחה שהגמישות המחיר העצמי לנסיעות ברכב פרטי, מוניות ואוטובוס היא בין 1.0-1.0.5, שגמישות הביקוש הצולבת בין רכב פרטי ומוניות היא 0.25 ובין רכב פרטי ואוטובוס היא 60 קמ''ש, שהמהירות העירונית המירבית של רכב קל (רכב פרטי, מוניות ורכב מסחרי) היא 60 קמ''ש, שהמהירות בה נפח התנועה מכפילי היא 10 קמ''ש, והמהירות עבורי הרכב הכבד (אוטובוסים ומשאיות) הם 50-5 קמ''ש, בהתאם. פונקציית המהירות הבינויוונית מבוססת על ההנחה שהמהירות המירבית היא 100 קמ''ש וחמירותה בה תופוקת המערכת מכפילית היא 50 קמ''ש.

הueliyot הנסעה באמצעות התחבורה השונות נזירים מהueliyot המופיעות בלוח 1 וממקדמי התפוסה (ראהلوح 4). החישוב מניח שNealii המוניות והאוטובוסים משלים מהירות השווה לעלות המזעצת; לשון אחרית, הוא מותאר מצב שבו שורותים אלו לא מסובדים. החישוב נערך עבור סדרה של ערכיהם המותייחים למספר כל הרכב (המתוקנים) המשותם בכביש בשעה. קיבולת הכביש העירוני היא לפי הנחה 1,000, kali רכב לשעה, וקיבולת הכביש הבינויווני היא 2,000 kali לשעה. התפלגות מספר הנוסעים לפי kali הרכב במצב חקיים (ש בלוח 4 מבוססת על רכב לשעה. התפלגות הנוסעים הקיימת בכבאים עירוניים ובינויוונים, כפי שהוא מופיע בלוח 1. <sup>18</sup>

התפלגות הנוסעים הקיימת בכבאים עירוניים ובינויוונים, כפי שהוא מופיע בלוח 1. <sup>18</sup> לחץ 5 מותאר את תוצאות הסימולציה עבור תנוצה עירונית, כאשר פונקציית המהירות ופונקציית הביקוש הן ליניאריות. כאשר שעור ניצול הקיבולת נמוך (20 אחוז – 200 kali רכב), והמהירות קרובה למהירות המירבית (רכב פרטי עבורי מהירות של 50 קמ''ש), המש הקאים מהוות תחליף קרוב לאגירה האופטימלית, והפטרון האופטימלי קרוב מאד למצב הקיימים. אך עלייה בשיעור ניצול הקיבולת ל-50 אחוז (500 kali רכב) וירידת המהירות ל-35 קמ''ש, דיבים ליצירת פער משמעותי בין-

<sup>17</sup> ב似מולציה "משתתפים" גם רכב מסחרי ומשאיות. לפי ההנחה, גמישות המחיר העצמי לרכב מסחרי היא 0.25, ולמשאיות 0.1. אין תחולפה בין רכב זה ורכב הנוסעים.

<sup>18</sup> אולם החישוב מתוואר בזורה מפורט יותר בסוף 3.

<sup>4</sup> מרכבי העליות למשען אמצעי החברה - תחבורה ציבורית ורכב פרטי

א. מתקיים  $\hat{P}_i = P_i / \bar{P}$ . ב. מתקדם ההפערת הרמתנו  $\hat{X}_i/X_i = \text{מתקדם}$  בהעדר אגרות שיטמיות (ההמתקוונט) בעקבות (ז) במקודם ההפערת הרמתנו  $= \text{מתקדם}$  בהעדר מתקודם ההורקן ומתקודם ההורקן  $= \text{מתקדם}$  כולם. ג. מתקדם ההורקן  $= \text{מתקדם}$  כולם. ד. מתקודם ההורקן  $= \text{מתקודם}$  כולם. א. מתקודם ההורקן  $= \text{מתקודם}$  כולם. ב. מתקודם ההורקן  $= \text{מתקודם}$  כולם. ג. מתקודם ההורקן  $= \text{מתקודם}$  כולם. ד. מתקודם ההורקן  $= \text{מתקודם}$  כולם.

**מקור:** הרוב התהועה – ליה ועלוות לק"מ רוכב (לזה 1) מהליך עזקה (לט').

לירח 5. אגרות צפיפות והלקצאה אוטומילית של רכב פרטי ואוטובוסים — תנועה עירונית

תנאי נסיעה (ב)	אגרה (מט' ש"ח ליום)	מזהם (שלישו)				מזהם וטבען (שלישו)				מזהם ואטבסטים (שלישו)				מזהם ואטבסטים (שלישו)			
		רכב פרטי	אטטומוטר	רכב מטען	אטטומוטר	רכב פרטי	אטטומוטר	רכב פרטי	אטטומוטר	רכב פרטי	אטטומוטר	רכב פרטי	אטטומוטר	רכב פרטי	אטטומוטר	רכב פרטי	אטטומוטר
כליה																	
מצב התחלה	0.013	0.075	0.22	0.30	41	50	171	170	406	200							
אופטימום	0.004	0.059	0.21	0.28	41	50	173	172	411	202							
יחס	0.31	0.79	0.96	0.95	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
בינוי																	
מצב ההאנלוי	0.013	0.075	0.29	0.35	28	35	428	426	1015	500							
אופטימום	0.017	0.244	0.27	0.50	30	38	459	333	957	434							
יחס	1.31	3.25	0.94	1.44	1.11	1.10	1.07	0.78	0.94	0.87							
כזרה (א)																	
מצב התחלה	0.013	0.075	0.49	0.48	14	20	684	682	1623	800							
אופטימום	0.041	0.602	0.34	0.90	24	31	845	362	1478	575							
יחס	3.15	8.03	0.70	1.85	1.73	1.56	1.24	0.53	0.91	0.72							
כזרה (ב)																	
מצב התחלה	0.013	0.075	0.69	0.59	10	15	770	767	1826	900							
אופטימום	0.055	0.807	0.38	1.12	22	29	1,011	363	1,683	618							
יחס	4.23	10.76	0.55	1.90	2.34	1.94	1.31	0.47	0.92	0.69							

זכי הצעיפות של הרכב הפרטி גדולים במידה ניכרת מהמס המוטל על עליות התפעול. הטלת אגרת צפיפות אופטימלית תעצמת ברבע את מסטר כל הרכב הפרטימי הנעים בכביש, ותביא להאצת התנועה ב-10 אחוז. האצת המהירות של האוטובוסים יותר מאשר מפצת את נוסעים התחבורה הציבורית על העלאת האגרה, ובאי לירידה במחיר הכלול של השימוש באוטובוסים, ולהגדלת מסטר נוסעים. מסטר הנוסעים הכלול, לפי הסימולציה, יירד במידה זוומה בלבד (כ-5%). האגרה הנדרשת כדי להביא לתוצאות זו גדרה פי 3 ויתר מהמסים המוטלים על התפעול השוטף של הרכב הפרטי, ובאי ליקור השימוש בו במעט 50 אחוז.

הפרע בין האגרה האופטימלית והמס הקיים גדול כאשר שיעור ניצול הקיבולת עולה ל-80-90 אחוז ומהירות יורדת ל-15-20 קמ"ש. במקרה זה נדרשת אגרה שהיא פי 8-10 משיעור המס הקיים, אגרה שתביא כמעט להכפלת עלות השימוש ברכב הפרטי. אגרה בגובה זה תביא להקטנת השימוש ברכב הפרטי בחצי ועליה בmahירות הנסעה של 60-100 אחוז. האצת המהירות של האוטובוסים ובאי לידול במסטר הנוסעים בתחבורה הציבורית ברבע עד שלישי. הגידול במסטר הנוסעים הכלול קטן מ-10 אחוז. מסקנות אלו, בזרען הכללי, אין רגשות לשינויים בהנותם לגבי צורת פונקציית המהירות או הפרמטרים של הביקוש.<sup>19</sup>

לוט 6 מတיר את השלכות אגרת צפיפות אופטימלית על הקצאת התנועה בכבישים הביני-עירוניים. ראיינו שבמקרה זה המס הנוכחי עולה על האגרה האופטימלית כל עוד המהירות לא נופלת מתחת ל-70 קמ"ש. ואננס כל עוד שיעור ניצול הקיבולת קטן מכך (דהינו, 1,000 בלי רכב בשעה) לא תביא הטלת אגרה אופטימלית לשינויים משמעותיים בתנועה. גם כאשר שיעור ניצול הקיבולת עולה ל-80 אחוז (1,600 כלי רכב לשעה), האגרה האופטימלית לא מביאה לשינויים קיצוניים. אגרה הגבוהה פי 2 מהמס הנוכחי מצמצמת את מסטר כל הרכב הפרטיטים בכ-10 אחוז, השיפור בmahירות הוא מזער, ועל כן חל רק גידול קטן במסטר הנוסעים בתחבורה הציבורית, וחל ירידת קלה במסטר הנוסעים הכלול.<sup>20</sup>

באופן טבעי עולה השאלה מהו החalcon במונחי זמן אם היה ניתן למש את הפתרון האופטימלי בתחבורה העירונית. בהדר נזונים על חלוקת התנועה בין תנאי הצפיפות השונים, ניתן לתות לשאלת זו רק תשובה מקורבת. תשובהנו תהיה מבוססת על הנחה שמספר הנוסעים הכלול אינו משתנה, אך שהרכב התנועה (ליתר דיוק, מרכיב האוטובוסים בתנועה) והמהירות האופטימלית הם אלה המומוארים בלוח 5.<sup>21</sup>

<sup>19</sup> מבחן הרגישות שנערך למסקנות אלו מתייחסים בסוף.<sup>3</sup>

<sup>20</sup> מסקנות אלו מבוססות על התהוו שפונקציית המהירות היא לינארית. אם היו מיניחים פונקציית משך נסיעה מעריכית (כאשר גמישות זמן הנסעה ביחס לשיעור ניצול הקיבולת היא 3) הייתה נדרשת אראה הרבה יותר גדרה (פי 6 מהמס הקיים) והרידת במסטר כל הרכב הפרטיטים הינה הרבה יותר חזקה (כבר בוגר מוגעת הרכב הפרטיט). זהה בסוף.<sup>3</sup>

<sup>21</sup> לפי לוח 5 בתנאי צפיפות כבדה תביא האגרה האופטימלית לירידה של 40-40 אחוז במסטר כל הרכב ורק של 9 אחוז במסטר הוטעים. אם הינו מניה בחישובי שמספר הנוסעים הוא קבוע ורק חל שינוי בהרכב התנועה, היה השיפור בmahירות קטן יותר. כמו כן יש לזכור שההנחה בין רכב פרטיט לאוטובוס יש רק משקל קטן בשינויים המומוארים בלוח 5.

לוח 6. אגרות צפיפות והקצאה אופטימלית של רכב פרטי ואטומובילית — תנועה בעירונית

תנאי נסיפות	סיכוי לשלעה)	מספר כל רכב		מספר גנרטורים (לפענה)		אגורה (שיהילקיון)		אוטובוסים		רכב פרטי		אטומובילים		סיכוי לשלעה)		אוטובוסים		רכב פרטי		אטומובילים		סיכוי לשלעה)	אוטובוסים	רכב פרטי	אטומובילים	
		סיכוי	סיכוי	סיכוי	סיכוי	סיכוי	סיכוי	סיכוי	סיכוי	סיכוי	סיכוי	סיכוי	סיכוי	סיכוי	סיכוי	סיכוי	סיכוי	סיכוי	סיכוי	סיכוי	סיכוי	סיכוי	סיכוי			
כלו	*																									
מצב התחלה																										
אופטומות																										
יחל																										
בינוית																										
מצב התחלת																										
אופטומות																										
יחל	*																									
בירה																										
מצב התחלת																										
אופטומות																										
יחל	*																									

7. אומדן תסוכן שעווה נסעה בעקבות הטלה אגדת צעירות אוטומלית

התוצאות החישוב מתוארות בלוח 7. הלוח חושב בשתי הנקודות. לפי ההנחה תריאונה רך ובע מהתנועה העירונית היא בתנאי צפיפות קלה, רביע בתנאי צפיפות בינונית, וחציית התנועה היא בתנאי צפיפות כבדה. לפי ההנחה השנייה, המשקלות הן: 1/4 : 1/4 : 1/4, בהתאם. שני המקרים הנחנו שה坦ועה הבינעירונית היא בתנאי צפיפות בינונית (במהירות ממוצעת של 75 קמ"ש), ושבע מהצפיפות הכבודה היא כאשר הרכב הפרטני נע במהירות של 15 קמ"ש, ו- 3/4 כאשר הוא נע במהירות של 20 קמ"ש. חלוקת הנוסעים בין הרכב הפרטני, המסחרי והמוני ("הרכב הקל") לבין האוטובוסים במצב החתמתי היא, לפי המצב התקיים, ובאופןים – לפי המתוואר בלוח 5.

האצת התנועה בעקבות חטלה אגרות צפיפות אופטימליות מביאה, לפי חישובינו, לחסכו של כ-40 אחוז מהזמן "המתבזבז" בסיעות עירוניות בתנאי צפיפות כבדה. כאשר מחייבת הקילומטראי עירוני הוא בתנאי צפיפות כבדה (חტלק העליון של לוח 7) יביאו האגרות לחסכו של כ-290 מיליון שעות לשנה (למעלה מהמשית הזמן המוקדש לנסיעות). כאשר משקל הנסיעות בתנאי צפיפות כבדה הוא רך ובע מיחסות עירוניות, קטן האומדן ל-150 מיליון שעות (שהן שמיינית הזמן המוקדש לנסיעות).

לפי סקר דפוסי השימוש בזמן בישראל 1991/92 (למ"ס, 1995) הקודש כל פרט בגיןאי + 14 מדויים ביום 68 דקות להליכה ונסעה (מזה 20 דקות נסעה לעובודה). אם נניח שההילכת מוחווה מחציית זמן זה בקבוצת הגיל עד 19, ושליש מהזמן בגיןאי + 20+, יהיה אומדן זמן הנסעה הכלול באוכלוסייה 1,110 מיליון שעות בשנה. אומדן זה עקבי עם האומדן החתמתי בלוח 7. לפי אומדן זה, הייתה עלות הצפיפות בשנת 1991 (לפי 5.7 ש"ח לשעת נסעה) 855 מיליון ש"ח (במחירים 1991). בתקופה 1991-1995 גדל הקילומטראי ב-53 אחוז, והScar הממוצע למשרת שכיר ב-61 אחוז. עלות הגודש העירוני בשנת 1995 (במחירים אותן השנה) הייתה, איפוא, 2.1 מיליארד ש"ח. חישוב זה מתעלם מההחמרה בתנאי הצפיפות במשך התקופה.<sup>22</sup>

#### ו. סיכום

כל ניסיון לאמוד את עלויות הצפיפות נתקל במשמעותו חמור נתונים. לכל אורך של החישוב נאלצנו לחמיר מידע בדוק בנסיבות. עם זאת ממציאות בדיקות הרגניות המופיעות בנספחם שיטות האומדן שאומצאה במאמר זה היא שמרנית. שמרנות זו מותבטאת בבחירה פונקציית המהירות, באומדן רץ הזמן, בנתונות לגבי נזקי צפיפות אחרים (עלויות הרכב), ולבסוף בהנחה על התוצאות בה נתקל נחג בתנועה העירונית בתנאי צפיפות כבדה. גם באומדן שמרני זה התוצאות רוחקוות מלהיות "צנעות". לפי הערכתנו לעלה משמיינית הזמן המוקדש לנסעה הוא "մבוזבז" — הקצהה יותר יעלה של הנסיעות בין אמצעי הנסעה השונים הייתה יכולה לחסוך (בנתוני 1991) כ-150 מיליון שעות נסעה לשנה, תוךפגיעה מזערית בהיקף הנסיעות. כולל זמן זה בערך

<sup>22</sup> בתקופה 1991-1995 גדל ממד ק"מ-רכב לשטח כביש בתנועה העירונית ביותר ממחצית (גורנוויל, 1997, לוח 6). בחישוב עלות הגודש לשנת 1995 השתמשתי באומדן הגידול בkilometrage' הכלול. לפי אומדן (גורנוויל, 1997, לוח 4) עליה הקילומטראי עירוני ביותר מ-70 אחוז. השימוש בכופל הגבואה היה מגדייל את אומדן עלות הצפיפות ב-1995 ל-2.3 מיליארד ש"ח.

شمיניתים לו הנוסעים מציביע על נקי צפיפות העולמים בתיקוף על 2 מיליארדי ש"ח לשנה (במחירים 1995). בכך זה לא כוללו עלויות זמן הנהגים ועלויות הרכב. הניות מציביע על אופי הנקודות של הבנייה. מרבית נקי הצפיפות מוקרים בציברי צפיפות קשה כאשר מהירות התנועה של הרכב הפרטן יורדת מתחת ל-20-25 קמ"ש. מערך מסי השימוש (בראש ובראשונה, מס הדלק) חסרי אונים להתקoddס עם הבנייה. לפי חישובינו מסי השימוש על הרכב הפרטן דיים לגשר על הפער בין המחיר לפרטן והמחיר למשק בתנועה הבינעירונית (להוציא מקומות נדירים של תנאי צפיפות בבדה), אך הם נמכרים מכדי שיוכלו להתקoddס עם תנאי הצפיפות עירונית הכבדה.

הסימולציה של רשות הנסיעות בתל-אביב מראה ששבועת בוקר ממוצעת היה הדק שגרם לכך רכב נוסף למרכז במונחים האות כיל הרכב האחוריים 8.6-0.7 דקוטן לק"מ. במונחים כספיים הסתכום נזק זה (במחירים 1991) ב-2.7-0.2 ש"ח. זאת כאשר ה"מחיר" שراء הצרכן בפנוי היה 0.2 ש"ח לק"מ, ומרכיב המשך 0.1 ש"ח. הפער בין המחיר לפרטן והמחיר למשק הוא, איפוא, ביחס של 2:1 עד 1:15. כאשר הצרכן מגבש את החלוטותיו על סמך מחיר שהוא רק חלק מזעיר מהמחיר למשק — "בזוזו מקרים" הוא תוצאה מותקשת.

הकצאה אופטימלית אין פרושה ביטול הצפיפות ונסיעה במונחים המירביתי. הקצאה אופטימלית פירושה שינוי הרכב התנועה והעצמה. לפי הערכה שמנית, רכב פרטן ממוצע נושא שמיינית מהקלומטראי השנתי שלו בתנאי צפיפות בבדה, אך לנסיעה זו מוקדים 30% מכלל הזמן המשמש לנסיעות. האצת התנועה במקטע זה תפורה, איפוא, חלק גדול מביעות הצפיפות. לפי חישובינו נדרש צמצום בנסיעות הרכב הפרטן במקטע זה במחצית, והגדלה בנסיעות האוטובוסים ברבע עד שליש.

נסيون להתבסס על מגנון המהירים שיביא לשינוי זה היה מחיב הcaptation המכול (רבות עלות הזמן) של הנסעה ברכב הפרטן. גישור הפער בין ההצלחות לפרטן וההצלחות מחיב במקורה זה העלתה שיעורי שימוש הקיימים פי 8-10. קשה להאמין שהמוחוקק יאזור אומץ להטיל על הרכב הפרטן מס בשיעורים כה מפליגים.<sup>23</sup> יתר על כן, הטלת מס כהכבד לكيוץ לא נדרש במקטעים אחרים של השוק, בראש ובראשונה בתנועה הבינעירונית, שבה רמות הצפיפות נמוכת, והמס, ברמותו הנוכחית, מגשר על הפער בין ההצלחות לפרטן ולמשק.

למס הדלק אין הגמישות הנדרשת מהאגירה. האגירה תיבת לחשתנות משעה לשעה ומנתיב לנתייב עם השתנות הצפיפות. מס הדלק לק"מ-רכב תלוי בתצרוכת הדלק לק"מ והשתנותה עם תנאי הצפיפות. לאחר וצרוכת הדלק היא בעלת רגשות נמוכת לצפיפות, שיעור ההשתנות של המס לק"מ הוא מוגבל.<sup>24</sup> התמודדות עם מפגע הצפיפות בנסיעות העירונית מחייבת, איפוא,

<sup>23</sup> האגירה שהוצע להטילה על השימוש ב"כביש חוצה ישראל" הייתה 5 סנט לק"מ — דהיינו כ-15 אגורות לק"מ.

<sup>24</sup> אם נניח לשם פשוטות שהוצאות הנסעה מרכיבות מהוצאות דלק ומחזאות זמן בלבד יהיה הוצאות הדלק  $\alpha X^{\alpha}$ , כאשר  $\alpha$  מחיר הדלק,  $A$ , מקדם המשקף את תצרוכת הדלק לק"מ,  $X$  מספר כלי הרכב ו- $\alpha$

שימוש בסדרה שלמה של אמצעי עזר מינהליים בנוסף למס: הגבלת שימוש לרכב פרטי בנתיבים מסויימים וייחודם לתחבורה ציבורית, אגרות חניה או איסורי חניה, מסי רכב ועוד. אמצעי נפוץ, שבא לפצוח על הkowski בחתול אגרה בגובה חדש על הרכב הפרט, הוא סבוסד התחבורת הציבורית (ובעיקר שירות האוטובוסים). מאז תחילת שנות ה-70 הפעילה ממשלת ישראל מכשור זה, בעלות חולכת וגדלה, כדי "להחזיר" את הנוסעים מהרכב הפרט לרכב הציבורי. נתוני התפעול של שירות האוטובוסים בתחבורה הציבורית (גראנוו, 1997) מראים שהצלחת הממשלת בנסיון זה הייתה קטנה ביותר. כאמור הבא בסדרה (גראנוו, 1997ב) נבדוק מהם הגורמים שהביאו לכשלון מדיניות העידוד של התחבורה הציבורית.

---

מקדם המשקף את רגשות תצורת הדלק לתנאי הצפיפות, והוא הוצאות הזמן  $wBX^\beta$  כאשר  $w$  הוא ערך הזמן, אזי הוצאות לנוסף הן

$$v = pAX^\alpha + wBX^\beta$$

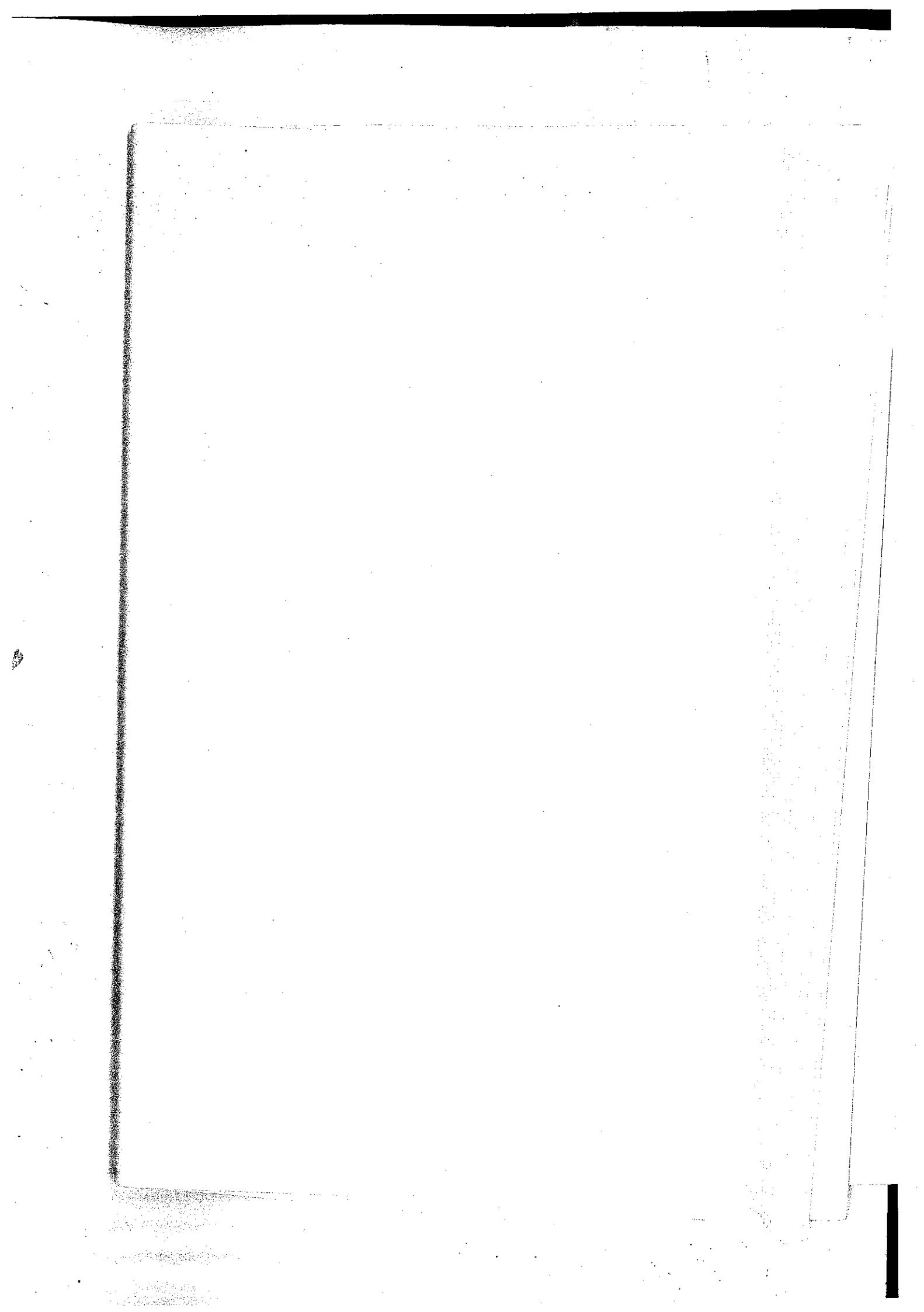
ההוצאות הקשורות להן

$$V_x = (\alpha + 1)pAX^\alpha + (\beta + 1)wBX^\beta$$

ואהגרה האופטימלית

$$V_x - v = \alpha pAX^\alpha + \beta wBX^\beta = pAX^\alpha [\alpha + \beta(w/pA)X^{\beta-\alpha}]$$

הביטוי בסוגרים הוא שיעור חמס שיש להטיל על הדלק. שיעור זה גדול עם הצפיפות כאשר  $\beta < \alpha$ . כאשר  $\alpha = \beta$  מן הدين היה להטיל מס שיעלה עם משך הנסעה.



### גשפה 1. אומדן ערך הזמן בתחבורה

החесכון בזמן הנוסעים הוא מרכיב חשוב בתשואה של כל תוכנית לשיפור תשתיות התחבורה המוטורית.<sup>1</sup> הערך הכספי של שעת נסעה עשוי, איפוא, להשפיע בצורה משמעותית על שקווי הרכבות של תחבורה ציבורית. באופן דומה, הוא ישפיע על העריכה ביחס למיסוי האופטימלי על התחבורה המוטורית, ולהילופין — על גובה אגרות שימוש (אגרות כביש), במידה ויהלט על גביה ישירה של אגרות עבור השימוש בתכבים מסוימים (למשל, כביש חוצה-ישראל או מנהרת הכרמל).

אומדן ערך זמן בתחבורה מובסים במידה רבה על התנהגות יממים (commuters): בחירותם בין אמצעי תחבורה ובין מסלולי נסעה. ערך הזמן נגורר מהשוואת השפעת משתנה המחיר ומשתנה הזמן על הבחירה.<sup>2</sup>

מרבית אומדני ערך הזמן הם בתחום שבין 25 ל-85 אחוז מחесוך, ונוחוג לצרכי בדיקות עלות-תועלת להשתמש באומדנים שהם 1.3-1.4 Machscher לשעה. בהדר אומדנים ישירים של ערך הזמן, המובסים על הנסיעון הישראלי, לא עוסוק נטף זה ביחס ערך הזמן/שכר, אלא ברגשות של אומדן ערך הזמן לאומדנים שונים של השכר.

אומדן השכר הריבנטי תלוי במקבל החלטות (חישיר או העקיף) ביחס לנסעה, יהיה תלוי, על כן, במטרת הנסעה. בנסיבות לצרכי עבודה מקבל החלטות (ולו בעקיפין) הוא המעביר. ההזאה האלטרנטיבית מבחןתו היא עלות העבודה השעשית (השכר ברוטו ביחס לתוצאות ההזאה). לעומת זאת שקולו העובד ביחס לנסיעותיו לעבודה או נסיעותיו הפרטיות מושפעות מהשכר שהוא רואה בפניו, שהוא השכר בניכוי מסים. עלות העבודה לשעה כפולת מהשכר נטו.<sup>3</sup>

קיימים מתאימים חיוניים בין נסיעות ושכר. הכנסות הממוצעת של משקי בית כאשר השקולו הוא

<sup>1</sup> בחישוב כדיות כביש חוצה-ישראל שנערך על ידי חברת מתי'יט (1994) תרם חסכון הזמן למשך מ-4% מהשכר הנוכחי של החשקה בכביש. חישוב שהרי מועלם מערך זמן הנוסעים הנחסך והוא מקטין את שעור התשואה הפנימי של החשקה בחצי.

<sup>2</sup> הניתוח בסיס החישוב היא שחיבור (Z) תלויות בהפרש המחרירים (או העליות) בין האלטרנטיבות השונות (амצעי הוללה, נתיבים) ( $\Delta Z = f(Z)$ ), כאשר המחריר מועלות כספיות (P) ועלויות זמן ( $\Delta t$ ), כאשר  $\Delta t$  הוא הערך שמייחס הנושא לזמן. לפיכך,

$$Z = f(\Delta Z) = f[\Delta(P + \Delta t)] = f(\Delta P + \Delta t)$$

ועל-כן:

<sup>3</sup> לפי הערכות המכון הישראלי לתכנון ומחקר תחבורה (1988), חמשים מהווים כרביע מהשכר ברוטו, בעוד ההוצאות הנלוות הן 52 אחוז מהשכר ברוטו. השכר נטו מהווות, איפוא, 75 אחוז מהשכר ברוטו בעוד עלות העבודה לשעה היא פי 1.5 מהשכר ברוטו. לפי נתוני מינהל הכנסות המדינה (1994, לוח כ"ב 9) היה נטול המס ב-1991 על משק בית בעל הכנסה שנתית של 30,000 דולר (68,000 ש"ח) – 17 אחוז (נטול מס על משק בית בעל הכנסה של 60,000 וולר היה 30 אחוז). ב-1991 הייתה ההכנסה השנתית של משק בית שבראשו שכיר 57,000 ש"ח (למ"ס, 1993, לוח 11.2).

לפי מספר הנסיעות גבוהה ב-30 אחוז מההכנסה של משק בית עירוני ממוצע.<sup>4</sup> מכאן, יש ל勘ח בחשבון שחלק מהנסיעות מבוצעת על ידי נסיעים שאינם מושקים, וכברע מהנסיעות על ידי מושקים אינם קשור בעבודתם.<sup>5</sup> אם נניח שהערך שמייחס המעבד לזמן העבודה בנסיעות לcrcyi עבודה שווה לעלות העבודה לשעה, שהערך שמייחס העובד לזמן העבודה הוא שialis מהשכר לאחר מס, וערך הזמן בכל שאר הנסיעות הוא רבע מהשכר לאחר מס, יהיה ערך הזמן הממוצע שווה 35-40 אחוז מהשכר הממוצע במשק.

בчисובינו אימצנו הנחה הפטנית יותר: שהשכר הקבוע לנסיעי אוטובוס שווה לשכר הממוצע (ברוטו) ושכר נסיעי הרכב הפרטני גבוה ב-25 אחוז מהשכר הממוצע. הנסיעים מוחלקים בזורה שווה בין הרכב הפרטני והאוטובוסס, ומיחסים לזמן ערך השווה לשיליש מהשכר. לפי הנחות אלו, ערך הזמן שווה ל-37.5 אחוז מהשכר הממוצע במשק.<sup>6</sup>

היחס בין הערך שמייחס הנסיע עולם והשכר תלוי במידה רבה ביכולתו להמיר שעות נסיעה בשעות עבודה. בעיה דומה קיימת בהערכת השפעת חסכון בזמן נסיעה על עלות שכרי הנהגים ברכב מסחרי (רכב מסחרי, מוניות, אוטובוסים ומשאיות). נהגים אלה מחלקים את זמנם בין נסיעה לבין המתנה לטעינה ופריקה או המתנה להובלה. השפעות שנייםים במהירות הנסעה על עלויות הנהיגת תלויה במשטר הנסעה והמתנה. במידה והמתנה להובלה מהוות מרכיב חשוב בזמן הנהגים, והאצת מהירות הנסעה אינה גוררת הגדלה במספר הפסבים שעשויה כליה רק כרוכך בזמן מסויים המוקדש לטעינה, פריקה והמתנה, זמן זה בלתי תלוי במשך הנסעה, אזי העלות

<sup>4</sup> החישוב מבוסס על נתוני סקר הרגלי נסעה 1984 (למיס, 1987). הנתונים מתיחסים לשכירים בשלושת הערים הגדולות. הפער מסווג כמספר צולו מצורת השקלול, השוואת ההכנסה הממוצעת של משקי הבית בסקר עם נתוני סקר ההכנסות באותה שנה מראה שאין הבדל משמעותי בתוצאות שני הסקרים. תוצאה דומה התקבלה על ידי המכון (1988) כאשר החישוב התייחס רק לנסיעות בענייני עבודה.

<sup>5</sup> לפי סקר הרגלי נסעה 1984 התפלגות הנסיעות בשלוש הערים הגדולות היא:

%	אלפי נסיעות יומיות
13	508
87	3,368
22	854
65	2,514
34	1,327
7	267
24	920
100	3,875

<sup>6</sup> אם נניח שבנסיעות אחרות השכר הקבוע הוא השכר הממוצע, יתקבל האומדן הנמוך, ואם נניח שהשכר הוא השכר המשוקל במספר נסיעות, יתקבל האומדן הגבוה.

<sup>7</sup> בחישוב שנעשה לאחרונה (мот"ת, 1994) אומצה ההנחה שערך הזמן הוא 38 אחוז מהשכר (мотת הניחו שערך הזמן בנסיעות לעבודה שווה למוחצית השכר). בתיישוב זה, השתמשו המהגרים בתמורה לשעת עבודה (התמורה לעבודה בהכנסה הלאומית מחלוקת במספר שעות העבודה השנתיות) כמודד לשכר. מודד

לק"מ קטנה עם גידול המהירות.<sup>8</sup> המצב הראשון מופיע את המשאות, שחלק גדול מזמן מוקדש להמתנה. המקרה השני מופיע אוטובוסים בתנועה עירונית שזמן ההמתנה בתחנות אינו תלוי במהירות נסיעתם.<sup>9</sup>

שיעורים דומים קיימים בהערכות השפעת המהירות על עלויות הרכב (עלויות חון, ביטוח, אגרה).

זה גובה ב-90 אחוז מהשכר לשעה כפי שהוא נמדד בסקרים הhackstones.

<sup>8</sup> כאשר כל שבב כרוך ב- $k''m$  נסעה, ובהמתנה של  $\gamma$  שעות (לטינית, פריקה וחותנה בין שני שבבים), אז מספר הסבבים שיבצע כל רכב בשעה הוא  $[k''m + \gamma] / k = F$  והק"מ לשעה הוא  $1 - [(s/k) + (\gamma/k)] = Fk$ . עלות שכר נהגים לק"מ היא על כן  $(s/k) + (\gamma/k)$ , וא, כאשר  $s$  הוא שכר הנהגים.

<sup>9</sup> מצב שלישי הוא מצב שבו זמן ההמתנה פרופורציוני בזמן הנסעה. יהי  $\gamma$  חלק הזמן שהרכב בתנועה, ו- $k$  אורך השבב בק"מ. מספר הסבבים שהרכב מבצע בשעה הוא  $k/s = F$ , והkilometrage' הוא  $Fk = s\gamma$ . כאשר  $s$  הוא שכר הנהגתו עולה מהאגה לק"מ במקרה זה  $s/w = Fk/w$ , כאשר  $\gamma/w = \gamma'$ .

## נספח 2. אומדן פונקציית המהירות

מהירות התנועה ( $S$ ) היא פונקציה יורדת של הגודש בכביש – מספר כלי הרכב לק"מ כביש. פונקציה זו תלויות בטיב הכביש (רוחבו, שיפועו, כמות עיקולים, רוחב שלילים, שילוט ורימוזור), מיענות הנוגדים והרכב התנועה. נחתת התנועה – מספר כלי הרכב העובר בכביש בשעה – הוא כפולה של הגודש ומהירות התנועה:  $DS = X$ . גידול בגודש התנועה מלווה בירידה ב מהירות הזרימה, ועל כן לא ניתן, בהכרח, להגדלה בנפח התנועה. נסמל ב- $\epsilon$  את הגמישות, אווי מתקיים

$$\epsilon_{SD} = 1 + \epsilon_{SD}$$

כאשר  $0 < \epsilon_{SD}$ . רק כאשר רגישות המהירות לשינויים בגודש היא קטנה,  $1 < |\epsilon_{SD}|$ , ניתן גידול במספר כלי הרכב בהתאם לגידול במספר כלי הרכב העובר בתנועה. כאשר  $1 > |\epsilon_{SD}|$  ניתן גידול בגודש להקטנת מספר כלי הרכב העובר בתנועה בכל יחידת זמן.

באופן דומה, לא קיים קשר חד-כיווני בין המהירות לנפח התנועה. גמישות  $S$  ביחס ל- $X$  שווה

$$\frac{\epsilon_{SD}}{1 + \epsilon_{SD}} = \frac{\epsilon_{SX}}{1 + \epsilon_{SX}}$$

$0 < \epsilon_{SX}$ . אך כאשר  $1 > |\epsilon_{SX}|$ , הירידה ב מהירות בעקבות הגידול בגודש איננו מלווה בגידול בנפח התנועה, אלא בירידתו:  $0 > \epsilon_{SX}$ . תחיה  $S^*$  המהירות בה מתקיים  $1 - \epsilon_{SD} = \epsilon_{SD}$ , אווי בכל מהירות הנמוכה מ- $S^*$  מתקיים תנאי גודש-יתר (hypercongestion), כאשר הגדלת הגודש מביאה לירידה גם ב מהירות וגם בנפח התנועה (כאשר  $S^* > 0, S^* > S$ ).

פונקציות המהירות השונות שהוצעו בספרות נבדלות זו מזו באיפיון ההשפעה שיש לגודש או לנפח התנועה על המהירות כאשר זו גודלה מ- $S^*$ , ובקיים (או אי-קיים) תחום המתאר גודש-יתר. חלקן של פונקציות אלו מותאר את הקשר בין המהירות והגודש, חלקן את הקשר בין המהירות לנפח התנועה, וחלקן מתמקדד משך הנסיעה ( $t = 1/S$ ).

בספרו Kenneth Small Urban Transportation Economics סוקר את פונקציות המהירות

שנאמדו בספרות (לוח נ-1):

לוח נ-1. פונקציות מהירות

- |   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1) $S = \alpha - \delta D = S_m - \delta D$                                       | $S^* = S_m / 2$               |
| 2) $S = \alpha - \gamma \ln D = -S^* \ln(D/D_m)$                                  |                               |
| 3) $S = \alpha \pm [\gamma - \delta X]^\beta = S^* \pm [\gamma - \delta X]^\beta$ | $S_m = \alpha + \gamma^\beta$ |
| 4) $t = \alpha \pm [\gamma - \delta X]^\beta = t^* + [\gamma - \delta X]^\beta$   | $t_m = \alpha - \gamma^\beta$ |
| 5) $t = \alpha + \delta X^\beta = t_m + \delta X^\beta$                           |                               |

$t$	זמן נסעה	$S$	מהירות
$t_m$	זמן נסעה מודע	$S_m$	מהירות מידנית
$t^*$	זמן נסעה "קריטי" ( $t^* = -\epsilon_{SD} D_m = 1/\epsilon_{SD}$ )	$S^*$	מהירות "קריטי"
$X$	מספר כלי רכב	$D_m$	גודש מירבי ( $D_m = 0$ )
$\delta, \gamma, \beta, \alpha$	פרמטרים		

הפונקציות השכיחות ביותר והנארות את הקשר בין המהירות והגודש. הן הפונקציה הלינארית והחצ-לוגריתמית. Payne (1984) אמד פונקציה לינארית ( $\delta > 0$ )

$$S = \alpha - \delta D \quad (1)$$

בפונקציה זו  $\alpha$  היא המהירות המירבית,  $\alpha = S_m / 2$ , ומתקיים  $S^* = S_m / S$ . גמישות המהירות ביחס לגודש היא  $\epsilon_{SD} = 1 - (S_m / S)$  (כאשר  $S_m \leq S$ ), והגמישות ביחס לנפח התנועה היא

$$\epsilon_{SX} = \frac{1 - (S_m / S)}{2 - (S_m / S)}$$

במחקריו ההיסטורי הניח פונקציה חצ-לוגריתמית Walters (1961)

$$S = \alpha - \gamma \ln D \quad (2)$$

במקרה זה,  $\gamma = S^*/(S - S^*) - 1$ ,  $\epsilon_{SD} = S^*/(S - S^*)$  והגמישות חן  $\epsilon_{SX} = S^*/(S - S^*) - 1$ .  
שורה ארוכה של חוקרים קושרים את המהירות לנפח התנועה X [למשל, Boardman-Lave (1977), Keeler-Small (1977)]

$$S = \alpha \pm [\gamma - \delta X]^\beta \quad (3)$$

בפונקציה זו המהירות המירבית היא  $\gamma^\beta$  ו-  $\alpha = S_m = \alpha + \gamma^\beta$  ומתקיים  $\alpha = S^* = \alpha^{1/\beta}$  הגמישות ביחס לנפח התנועה היא

$$\epsilon_{SX} = -\beta \frac{S - S^*}{S} \left[ \left( \frac{S_m - S^*}{S - S^*} \right)^{1/\beta} - 1 \right]$$

אחרים משתמשים באותה צורה פונקציונלית כאשר המשטנה המוסבר הוא משך הנסיעה t [למשל, Coleman (1961)]

$$t = \alpha \pm [\gamma - \delta X]^\beta \quad (4)$$

<sup>10</sup> בניתו של  $D_0 = e^{\alpha/\beta}$  : Walters (1961)  $S = -\beta \ln(D/D_0)$  ומתקיים

<sup>11</sup> ניסוח אלטרנטיבי של פונקציה זו הוא:  $S = \alpha \pm \delta'[\gamma' - (X/X_0)]^\beta$  או  $S = \alpha \pm [\gamma - \delta'(X/X_0)]^\beta$  כאשר  $X_0$  היא "קיובלת הכביש" ומתקיים  $\delta' = \delta X_0$ ,  $\delta' = (\delta')^\beta$ ,  $\delta' = \gamma/\delta' - 1$ ,  $\delta' = (\delta')^\beta$ ,  $\delta' = \gamma/\delta' - 1$ ,  $\delta' = \gamma/\delta - 1$ ,  $\delta' = 1/\beta$ ,  $\delta' = b - a(S - \alpha)^{1/\beta}$ ,  $a = \gamma/\delta - 1$ ,  $b = 1/\beta$ .

כאשר המהירות המירבית היא  $S^* = 1/\alpha + \gamma^{1/2}$ , גמישות המהירות ביחס לנוף

$$\varepsilon_{SX} = -\beta \frac{S-S^*}{S} \left[ \left( \frac{S}{S_m} \frac{S_m-S}{S-S^*} \right)^{1/\beta} - 1 \right]$$

לבסוף, במחקרים מסוימים [למשל, Dewees (1978)] אומצה פונקציה שאינה נוכחתי ביטויו לערך תנאי גודש-יתר, ושלפיה הקשר בין  $S$  ו- $X$  הוא קשר שלילי (קשר בין  $S$  ו- $X$  חיובי) עבור כל ערכי  $X$

$$t = \alpha + \delta X^\beta \quad (5)$$

כאשר  $\alpha = 1/\mu$ ,  $S_m = \beta(S - S_m)/S_m$  וمتיקיים  $\delta = \beta(S - S_m)/S_m$ . גמישות המהירות ביחס לנוף התנוועה תלויות במספר פונקציות אלו בטוחה שבין  $S^*$  והמהירות המירבית  $S_m$ , ובמיוחד היחס של המהירות בתוך טווח זה. אם נסמן את הטוחה (היחס)  $Z = (S_m - S^*)/(S_m - S) = (\mu - \mu^*)/\mu$ , אז  $\mu^* = \mu - \mu S_m + (1 - \mu)S = S$ . נוכל כתוב את הגמישויות השונות בפונקציות של  $Z$  ו- $\mu$ . למשל, בפונקציה החצי-לוגריתמית (2)  $Z/\mu - 1 = \varepsilon_{SX}$  ובפונקציה המעריכית (5)  $\delta Z/(1+\mu) = \varepsilon_{SX}$ . עבור הפונקציות (3) ו-(4) הנוסחה מרכיבת יותר:

$$\varepsilon_{SX} = -\beta \frac{\mu z}{1+\mu z} \left[ (1/\mu)^{1/\beta} - 1 \right] \quad \text{כאשר הפונקציה היא (3):}$$

$$\varepsilon_{SX} = -\beta \mu z \left[ \left( \frac{1+\mu z}{\mu} \right)^{1/\beta} - 1 \right] \quad \text{ואשר היא (4):}$$

אומדני המהירות חקריתית  $S^*$  שונים מחקר למחקר. הפיזור הגדול בממצאים מוסבר בחלקן על ידי חבדלים בבחירה הפונקציה, אך בעיקר על ידי תנאי זרימה שונים בכיבושים ששימשו לאמידת פונקציית המהירות. בעוד שבתחבורה העירונית, במרכז הערים, נמצאו ערכי  $S^*$  בין 20 ו-30 קמ"ש [Walters (1987) Ardekani-Herman (1968) Coleman (1961)], נאמדו עבור

<sup>12</sup> גם במקרה זה [בדומה ל-(3)] בחלק מהניסיונות המשנה המסביר הוא לפחות שיעור ניצול הקיבולת  $X_0/X = x$  השימושיים בורות הפונקציה מתוארים בהערה 11.

<sup>13</sup> גם פונקציה זו מנוטה לעיתים בצורה  $\delta'(X/X_0) = \alpha + t = \alpha + \delta X_0$  Small. מוצע קירוב לינארי לפונקציה זו

$$t = \begin{cases} \alpha & \text{כאשר } X < X_0 \\ \alpha + \delta''[(X/X_0) - 1] & \text{כאשר } X > X_0 \end{cases}$$

ובן גם, שאם היינו מנוטים לגבי פונקציה (3) שמתיקיים  $\delta'' = 0$ , פונקציה לא הייתה אפשרית ביטוי לתנאי גודש-יתר — מתקיים  $0 < \varepsilon_{SX} < 0$  [Smeed (1968)].

כבישים מהירים (expressways) בשטחים עירוניים ערכים הרבה יותר גבוהים  $S^* > S_m > 55$

[Boardman-Lave, (1977) Keeler-Small (1977)].

המהירות המרבית בתנועה עירונית נקבעת במידה רבה על ידי הגבולות המהירות החוקיות (50-65 קמ"ש). אך עבור תנואה ביןעירונית אומדן  $S_m$  גבוהים במידה משמעותית מהמהירות המותרת. לבסוף, אומדן הפרמטר  $\beta$  תלוי בצורת הפונקציה: בפונקציית מהצורה (3)-(4) נמצא

בדיב' חרך  $1/2 = \beta$  ובפונקציה המעריכית (5) אומדו (או הניחו) חוקרם ערכים בתחום 2.5-4.0.

בישראל נעשו מספר נסיניות לאמוד פונקציית מהירות. רמן הראל (1974) ניסח לامוד פונקציה זו אך נכשל. במקומו הוא מניה פונקציית מהירות לינארית (דוחינו פונקציה (3) כאשר  $1 = \beta$ ). יכולת של פונקציה זו התבסס על שתי נקודות. ארץ, פינס וקוברינסקי (1977) אומדו פונקציית מהירות עירונית נפרדות לכל רכבי פרטיים ולאוטובוסים (מדידותיהם מבוססות על נתוני תנועה ומהירות ברוחב גן-יהודה בתל אביב). גם חוקרם אלו העדיפו את הפונקציה הלינארית.

המכון לחקר התכנורה משתמש במודל הצבות התנועה שלו בפונקציה לוגיסטית.<sup>14</sup> פונקציה זו לא נסימלה בישראל אלא הותאמת לצרכי מודל החצבה. חכ' מות'ת משתמש בחרכותיה בפונקציה מהצורה (3) כאשר  $0.5 = \beta$ . בכביש מהיר (נתיבי איילון) אומדן מות'ת הם  $S_m = 105$

$10 < S^* < 15$ .

לנוכח אי-ההסכמה ביחס לצורות פונקציית מהירות והפרמטרים בפונקציה זו (בעיקר הפרמטר  $\beta$ ) נשאלת השאלה באיזו מידת רגילים אומדי ה להשפיע החיצונית

$$v_x - v = \hat{w}_x \left( \frac{\partial t}{\partial x} \right)$$

לבחירה הפונקציה. כדי לענות על שאלת זו הנחתנו שקיימת הסכמה ביחס לגבולות טווח המהירות  $S^*$  ו-  $S_m$  ושփונקציות נבדלות במשתנה המוסבר (מהירות או משך נסיעה) ובפרמטר  $\beta$ . בziejור נ-1(א-ז) והנחנו תנאי תנואה עירונית  $10 = S^* < S_m = 60$ , ובziejור נ-2(א-ז) תנאי תנואה ביןעירונית  $50 = S^* < S_m = 100$ . בחלק א' מהתארת מהירות כפונקציה של המשתנה "ניצול קיבולת" ( $x/X_0 = x$  כאשר  $0 = x$  מתקיים  $S_m = S$  וכאשר  $1 = x$  מתקיים  $S^* = S$ ). חלק ב' מຕאר את משך הנסיעה  $S = t$ . בחלק ג' מופיע האומדן של A כפונקציה של ניצול הקיבולת, ובחלק ד' מופיע האומדן של A כפונקציה של מהירות.

<sup>14</sup> פונקציה זו מתחשבת בזרה ממורשת במספר הצמותים הקיימים בכל קטע כביש. המהירות בקטע לפי

$$\frac{S}{S_m} = \left( \frac{1+e^\beta}{e^\beta} \right) \left( \frac{e^{\beta(1-x)}}{1+e^{\beta(1-x)}} \right) \text{ כאשר } X/X_0 = x \text{ ו- } \beta = 3.$$

בציורים מותאים שלושה סוגי פונקציות המוגדרות בצורה מפורטת בלוח (נ-2):

- פונקציה מהצורה (3) [פונקציה A ו-B] כאשר פונקציה A מקיימת  $1 = \beta$  ופונקציה B  $\frac{1}{\beta} = \beta$
- פונקציה מהצורה (4) [פונקציה C ו-D], כאשר פונקציה C מקיימת  $1 = \beta$  ופונקציה D  $\frac{1}{\beta} = \beta$
- פונקציה מהצורה (5) [פונקציה E] כאשר  $3 = \beta$ <sup>15</sup>

#### לוח נ-2. פונקציות מהירות

I. תנעה עירונית ( $S_m = 60$ , $S^* = 10$ ) ציר (1-2)		II. תנעה בימירונית ( $S_m = 100$ , $S^* = 50$ ) ציר (2-3)	
A)	$S = 60 - 50x$	A)	$S = 60 - 50x$
B)	$S = 50 + 50(1-x)^{1/2}$	B)	$S = 10 + 50(1-x)^{1/2}$
C)	$t = 0.01 + 0.01x$	C)	$t = 1/60 + 5/60x$
D)	$t = 0.02 - 0.01(1-x)^{1/2}$	D)	$t = 0.1 - 5/60(1-x)^{1/2}$
E)	$t = 0.01 + 0.01x^3$	E)	$t = 1/60 + 5/60x^3$

S — מהירות (קמ"ש)

z — זמן נסעה (שעות לקמ"ש)

x — שיעור ניצול קיבולת

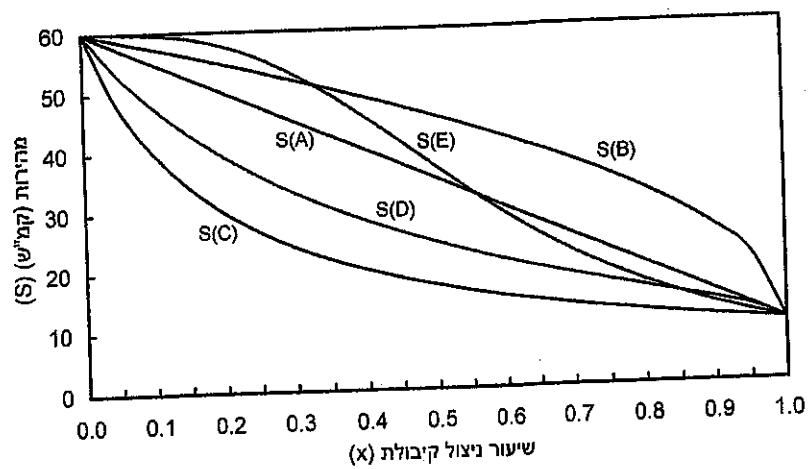
בשני הציורים (נ-1 ו- נ-2) בולטות פונקציית מהירות B (הפונקציה של Boardman-Lave ו- Keeler-Small המשמשת את מות"ת) כפונקציה הפתוחה וגישה לשינויים בנוף התנועה.<sup>16</sup> כתוצאה זמן הנסעה z מוגיב רק במעט לשינויים בנוף התנועה ורק כאשר הקיבולת מוגצלת כמעט全面 (0.8 > x) מתחילה זמן הנסעה עלות בצורה חדה. פונקציית זמן הנסעה הלינארית (C) מהויה בדומה חסם עליון לאומדן משך הזמן עבור כל ערך של x. אין קשר שיטתי בין אומדן משך הנסעה לפי פונקציות A (פונקציית מהירות הלינארית) ופונקציה D. הפונקציה המעריכית (E) "חותכת" את פונקציות האחרות.

ציורים נ-1ג ו- נ-2ג מראים שאין הבדלים אומדן ההשפעה החיצונית (במנוח זמן) בין חמיש הפונקציות כל עוד שיעור ניצול הקיבולת קטן מ-0.6. ההבדלים מתגלים כאשר  $x < 0.6$  ובולטים כאשר שיעור ניצול הקיבולת עולה על 0.8. שוב מוגלה פונקציה B כיווצאת דופן: לפיה פונקציה זו ההשפעה החיצונית קטנה יחסית כל עוד  $x > 0.8$ , אך היא עולה באופן תולול כאשר שיעור ניצול הקיבולת מתקרב לאחד. אומדנים דומים להשפעה החיצונית מותקבים כאשר פונקציית מהירות היא פונקציה D (פונקציה בה השימוש Coleman).

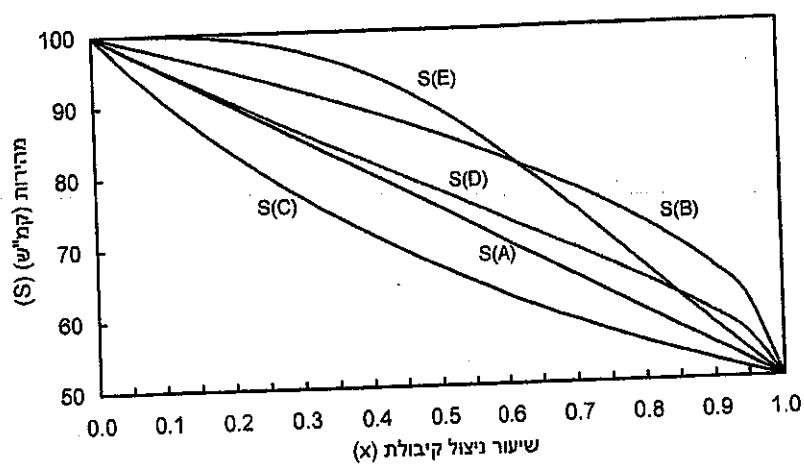
<sup>15</sup> פונקציית משך הנסעה הלינארית (פונקציה ג) היא כמובן גם מקרה פרטי של צורה (5) כאשר  $1 = \beta$ .

<sup>16</sup> פונקציה זו היא היחידה מבין החמש שחיה קבועה לכל אורכה ללא קשר לערכי  $S_m$  ו-  $S^*$ .

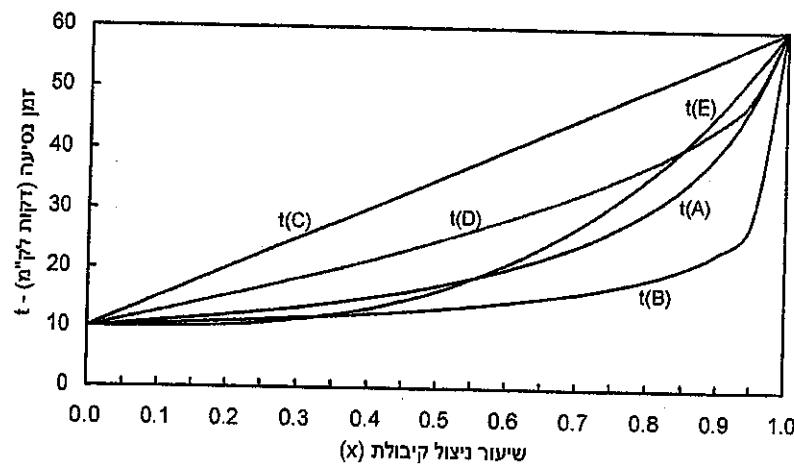
ציור ג-1א. פונקציית מהירות עירונית



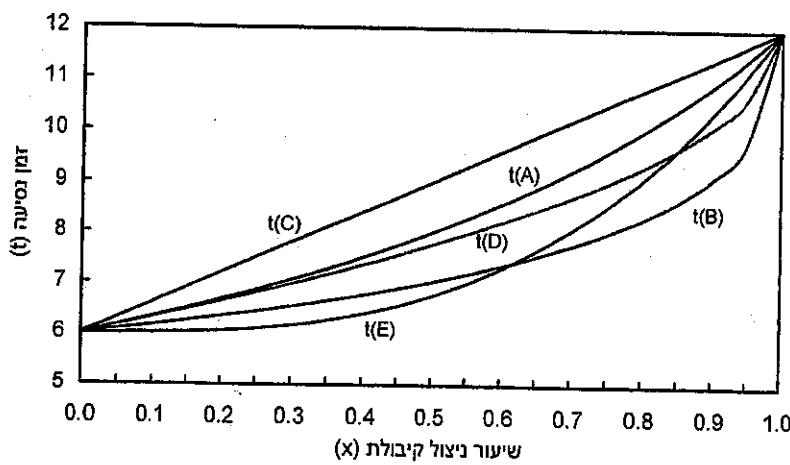
ציור ג-2א. פונקציית מהירות בינעירונית



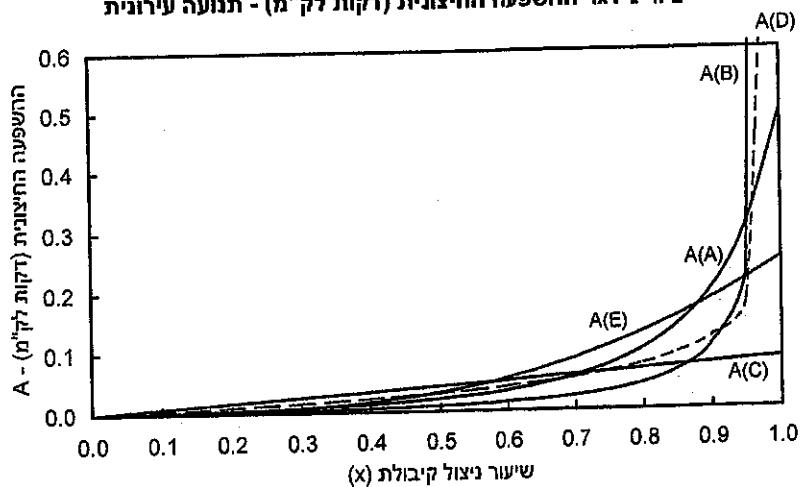
ציור כ-1ב. פונקציית זמן נסעה עירונית



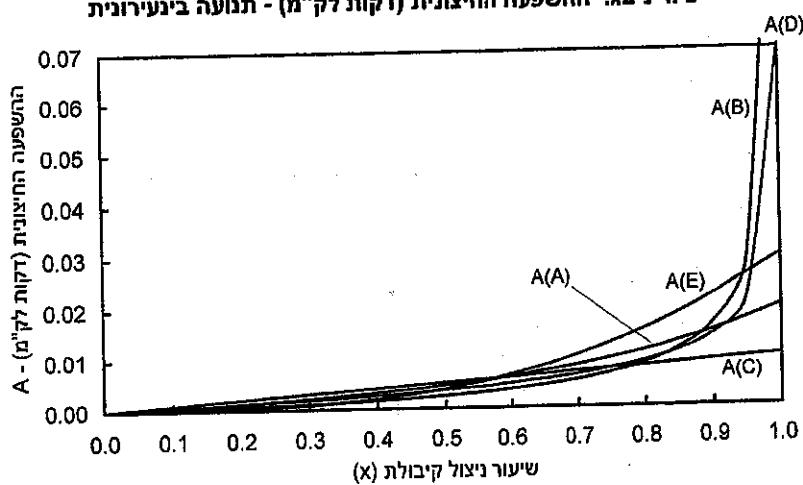
ציור כ-2ב. פונקציית זמן נסעה ביןעירונית



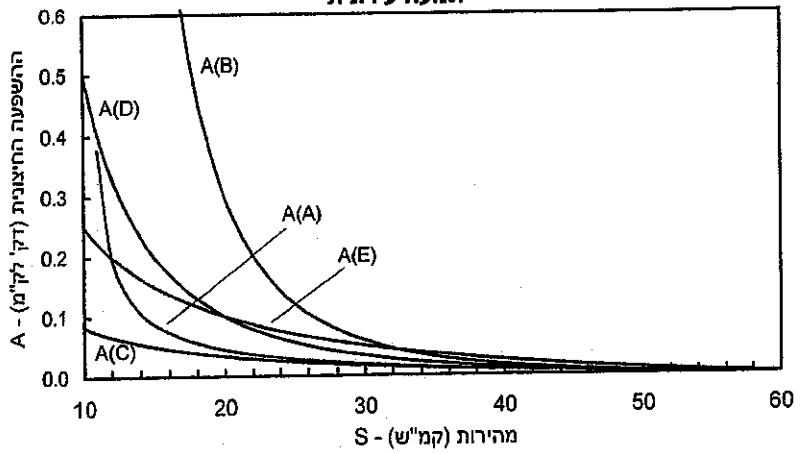
ציור ב-1ג. ההשפעה החיצונית (דקות לק"מ) - תנועה עירונית



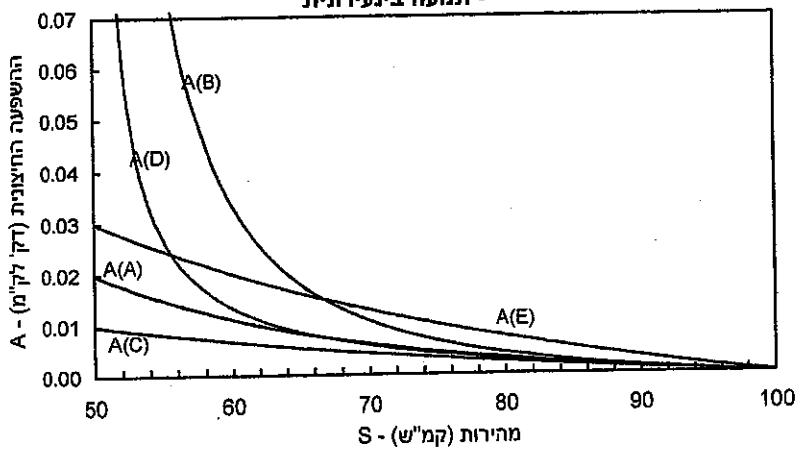
ציור ב-2ג. ההשפעה החיצונית (דקות לק"מ) - תנועה ביןעירונית



ציור ג-1ד. ההשפעה החיצונית כפונקציה של המהירות -  
תנועה עירונית



ציור ג-2ד. ההשפעה החיצונית כפונקציה של המהירות -  
תנועה בigenousיות



פונקציית זמן הנסעה הילינארית (פונקציה C) מהוות אמנים חסם עליון להערכת משך זמן הנסעה, אך מביאה לאומדנים נוכחים של ההשפעה החיצונית. שתי הפונקציות A-E (פונקציית המהירות הליניארית ופונקציית משך הנסעה המערכית) על אף החבדלים ביניהם (במיוחד עבור הפרמטרים הבינעירוניים), נותנות אומדנים קרובים להשפעה החיצונית. אומדנים אלה הם ערכי ביניים בין האומדנים הגבוהים המתקבלים כאשר משתמשים בפונקציות B ו-D והאומדנים הנמוכים של פונקציה C.

כדי לבדוק האם מסי התurbulence גבוהים או נמוכים מנקוי הצפיפות לחם גורמים כלի הרכב

$$\text{זההינו האם } X \left( \frac{\partial V}{\partial x} \right) \leq \frac{m}{\hat{m}} \text{ ניתן להשוו את אומדני ההשפעה החיצונית במונחי זמן עם היחס}$$

$\hat{m}/m$  — המס יחסית לערך הזמן. לפי לוח 1 עבור כל רכב "ממוצע" ערך זה הוא 0.011 בתחרורה עירונית ו-0.010 בתחרורה ביןעירונית. המס החל על התוצאות השוטפות של רכב פרט נמוך יחסית למס על רכב "ממוצע" (הכולל עבור סוג הרכב האחרים גם את מסי הרכיש). עבור רכב פרט  $\hat{m}/m$  הוא 0.0054 בתנועה עירונית ו-0.0042 בתנועה ביןעירונית. בלוח נ-3 מתוירים

$$\text{ערך } X/X = x \text{ ו- } S \text{ שעבורם מתקיים השוויון } x = \left[ \frac{\partial t}{\partial x} \right] \hat{m}/m$$

כאשר נצול הקיבולת גדול מערכיים אלו, והמהירות נמוכה יותר, יהיה נקי הצפיפות גבוהים מהמס. מחלוקת עולה שלמרות שקיים פיזור גדול בערבי  $x$  ה"קריטיטי" בין פונקציות המהירות השונות, קיימת הסכמה (כמעט מפתיעה) ביחס למהירות ה"קריטית". בתנועה עירונית, כאשר המהירות יורדת מתחת ל-45-35 קמ"ש, המס המוצע על רכב נמוך מנקוי הצפיפות לפחות גורם הרכב. בתנועה הבינעירונית ערכי המהירות תקritisites הם בטוויה 50-70 קמ"ש. המס המוטל על רכב פרטיו קטן מנקוי הצפיפות כאשר מהירות התנועה העירונית יורדת מתחת למהירות של 50-45 קמ"ש, והתנועה הבינעירונית מתנהלת ב מהירות הנמוכה מ-70-80 קמ"ש.<sup>17</sup>

<sup>17</sup> בכל המקרים נותנת פונקציית זמן הנסעה המערכית ( $3 = \beta$ ) אומדן הגובה במידה מסוימת משאר האומדנים.

ליהו-ג. רישוב ערכי שיעור ועלול קובלטן (א) ותירורת (ב) שעבורם המט אטומפי — תנועה עירונית ובעירוני.

$(S^* = 50, S_m = 100)$ מתחברות בעירונית				$(S^* = 10, S_m = 60)$ מתחברות עירונית			
רכב פולטי, רכב ממוצע		רכב פולטי, רכב ממוצע		רכב פולטי, רכב ממוצע		רכב פולטי, רכב ממוצע	
$m / \hat{w} = 0.0042$	$m / \hat{w} = 0.10$	$m / \hat{w} = 0.0054$	$m / \hat{w} = 0.011$	$m / \hat{w} = 0.0054$	$m / \hat{w} = 0.011$	$m / \hat{w} = 0.0054$	$m / \hat{w} = 0.011$
S	x	S	x	S	x	S	x
75.8	0.48	61.8	0.76	47.7	0.25	41.3	0.37
79.9	0.64	70.7	0.83	48.8	0.40	43.4	0.55
70.4	0.42	50.0	1.00	45.3	0.06	36.1	0.13
74.8	0.56	63.0	0.83	45.7	0.12	37.1	0.23
87.7	0.52	75.0	0.69	54.2	0.28	49.2	0.35

$$m = \hat{w}x(\partial t / \partial x)$$

המס מספק נאש N

$$\begin{aligned} t &= \alpha - \gamma[1-x]\beta \\ \beta &= 1/C \\ \beta &= 1/2(D) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t &= \alpha + \gamma(x)\beta \\ \beta &= 3(E) \end{aligned}$$

### נספח 3. חישוב אגרות והשפעות האופטימליות

כאשר קיים אמצעי הובלה אחד בלבד תהיה אגרת השפעות האופטימלית,  $A^* = V_x - v = X^* v$ , כאשר העליות מושבות בנקודות האופטימום. כאשר פועלים במערכת מספר אמצעי הובלה תהיה האגרה האופטימלית המוטלת על אמצעי :

$$A_i^* = V_{X_i} - v_i = \sum_{j=1}^n X_j^* \left( \frac{\partial v_j}{\partial X_i} \right),$$

כאשר  $i$  הוא מספר אמצעי הנסעה ו-  $X_i^*$  הוא מספר המשמשים באמצעי  $i$  באופטימום החברתי. החשיפה החיצונית שיש לנouse באמצעי  $i$  תלויות במקדמי התפוצה  $r_i$  (מספר הנוסעים) בכל רכב מסווג  $i$  ובהשפעה שיש לרכב מסווג  $i$  על האטota התנועה. רכב כבד (אוטובוסים, משאיות) הוא בעל השפעה רבה יותר על האטota התנועה מאשר רכב קל (רכב פרטי, מסחרי או מוניות), ונחוג לשקף הבדל זה על ידי גורם הפרעה  $r_i$ . יהיה  $X_i$  מספר הנוסעים, אז מספר כל הרכיב המתוקנים (יר"מ)  $Y$  הוא

$$Y = \sum_{i=1}^n (r_i / r) X_i = \sum \hat{r}_i X_i$$

כאשר  $r$  הוא מועד התפרעה המתוקן (במספר הנוסעים). האגרה האופטימלית על אמצעי  $i$  היא

$$A_i^* = \hat{r}_i \sum_{j=1}^n X_j^* \left( \frac{\partial v_j}{\partial Y} \right) = \hat{r}_i A^*$$

כאשר  $A^*$  הוא הנזק שגורם כל רכב מתוקן בנקודות האופטימום (האגירה שיש להטיל על כל רכב מתוקן). נסעים באמצעי תחבורה שונים חייבים באגרות שונות בהתאם למקדמי התפרעה המתוקנים שלהם.

חישוב  $A^*$  מותנה בחישוב פיצול התנועה האופטימלי (חישוב  $X_i^*$ ), התלו依 בביטחון לאמצעי  $i$  והעלות השולית החברתית  $V_{X_i}$ .

כדי לחשב את  $X_i^*$  נדרשות  $n$  משוואות ביחס

$$X_i = X_i(\Pi_1, \dots, \Pi_n)$$

כאשר  $\Pi_i$  הוא המחיר למשתמש באמצעי  $i$ , ו-  $m$  משוואות המתארות את הערות השולית  $V_{X_i} = v_i + \hat{r}_i A^*$ .

בහינתן מספר כל רכב במצב ההתחלתי  $Y^0$  ופיצול התנועה בין סוג הרכב השונים  $X_i^0$ , חושבה הערות החברתית המומוצעת בנסעה באמצעי  $i$

$$v_i = v_{0i} + (v_{ii}/S)$$

כאשר  $S$  מהירות  $v$  היא פונקציה של  $\gamma$  (בהתאם לפונקציית המהירות).  
המחיר למשתמש הוא

$$\Pi_i = v_i + m_i$$

כאשר  $m$  הוא נטל המס המוטל על הנוסע.

בcheinתן גמישיות הביקוש וGamishiyot hamachir chzolbot [גנוח], כאשר  $X_i = X^0$ , ניתן לחשב את הפרמטרים של משוואות הביקוש.<sup>18</sup> הפתרון האופטימלי מקיים  $x_i = \Pi_i - V_i$  וכורך בפתרון  $n$  משוואות לא-lienariot.

הפתרון עבור משוואות ביקוש לינאריות ופונקציות מהירות לינאריות  $Y_{i0} - \beta_{i0} = S_i$  מתואר בלוחות 5 ו-6. לוח 5 מבוסס על פונקציית מהירות עירונית:  
רכב קל:  $S_i = 60 - 50(Y/1000)$   
ולרכב כבד (אוטובוסים ומשאיות):  $S_i = 50 - 45(Y/1000)$   
לוח 6 מבוסס על פונקציית מהירות בינוירונית (משותפת לכל אמצעי החברה):  
 $S_i = 100 - 50(Y/2000)$

קיולות כביש עירוני היא, לפי הנהלה – 1000, ושל כביש בינוירוני – 2000 כלי רכב לשעה.

מטריצת הגמישיות היא:

רכב פרטאי	0	0	0.10	0.25	-0.50
מוניות	0	0	0	-0.50	0.25
אוטובוסים	0	0	-0.50	0	0.10
רכב מסחרי	0	-0.10	0	0	0
משאיות	-0.05	0	0	0	0

<sup>18</sup> החישוב נעשה בשתי אלגורitmivot:

א. פונקציות ביקוש לינאריות:

$$X_i = \alpha_{i0} + \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} \Pi_j \quad i=1, \dots, n$$

כאשר:

$$\alpha_{ij} = \eta_{ij} X_i^0 / \Pi_j^0 = \eta_{ij} \Psi_i Y^0 / \Pi_i^0$$

$$\alpha_{i0} = X_i^0 - \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} \Pi_j^0 = \left(1 - \sum_{j=1}^n \eta_{ij}\right) \Psi_i Y^0.$$

ב. גמישות קבועה לכל אורך העקומה:

$$X_i = A_{0i} \Pi_1^{\eta_{i1}} \Pi_2^{\eta_{i2}} \dots \Pi_n^{\eta_{in}}$$

כאשר

$$A_{0i} = \Psi_i Y^0 / \Pi_1^{\eta_{i1}} \Pi_2^{\eta_{i2}} \dots \Pi_n^{\eta_{in}}$$

כדי לבדוק את רגישות המסקנות להנחהינו חשבו האגרות האופטימליות ופיקול התנועה האופטימלי בהנחהות שונות על מטריצת הגמישיות ועל צורת פונקציית הביקוש. לוחות נ-4 ו-נ-5 מတaris את תוכנות הסימולציה של התנועה העירונית כאשר:

א. כל הפרמטרים במטריצת הגמישיות מוכפלים ב-2.

ב. כל הפרמטרים במטריצת הגמישיות מוחולקים ב-2.<sup>19</sup>

כפי שניתן לפנות, השינויים (הירידה במספר כלי הרכב הפרטיים, הגדול במספר הנוסעים בתחבורה הציבורית, הירידה במספר הכולל של כלי הרכב והגדול במחירות) גדולים יותר ככל שהנוסעים רגשים יותר לשינוי מחיר. ככל שגדלה רגשיות זו תידרש, על כן, אגרה נמוכה יותר כדי להביא לתוצאות הרצויות, אך המסקנות המתווארות בגוף הפרק אין משתנות.

בלוחות נ-6, נ-7, נ-8, נ-9 מתוארות תוכנות הסימולציה כאשר פונקציית המהירות היא מעורכית וכאשר פונקציית זמן הנסעה היא מעורכית. הפונקציות מניחות אותה מהירות מירבית (60 קמ"ש בתחבורה עירונית ו-100 קמ"ש בתחבורה ביןעירונית) ואوها מהירות קרייטית S<sup>\*</sup> (50 קמ"ש ו-50 קמ"ש בהתאם). בלוחות נ-6-נ-7 מתוארות התוצאות עבור התנועה העירונית, כאשר פונקציית המהירות העירונית זה:<sup>20</sup>

$$A. \text{ פונקציית המהירות } S = 10 + 50[1 - (\bar{Y}/1,000)]^{1/2}$$

$$B. \text{ פונקציית הזמן } t = (1/60) + (5/60)[(\bar{Y}/1,000)]^3$$

בלוח נ-8-נ-9 מתוארות התוצאות עבור התנועה הבינעירונית, כאשר פונקציית המהירות זה:

$$A. \text{ פונקציית המהירות } S = 50 + 50[1 - (\bar{Y} / 2000)]^{1/2}$$

$$B. \text{ פונקציית הזמן } t = 0.01 + 0.01(\bar{Y} / 2000)^3$$

תוצאות הסימולציה משקפות את תוכנות פונקציות המהירות (כפי שניתנו בסוף 2). פונקציית המהירות המערכית (לוח נ-6) פחות וגישה לשינויים בשער ניצול הקובלות מאשר הפונקצייה הילינרית והפער בין תocab הקיים והאופטימום בתנועה העירונית קטן יותר (casar שיעור ניצול הקובלות עולה ל- 80-90 אחוז, נדרשת רק ירידת של 30-25 אחוז בתנועת הרכב הפרטוי). באופטימום, נדרשת על כן אגרה נמוכה יותר (אך גם במקורה זה האגרה האופטימלית בתנאי עומס היא פי 5-7 מהמס הקיים). פונקציית הזמן המערכית (לוח נ-7) אמנים וגישה יותר מהfonקציה הילינרית לשינויים בעומס התנועה, אך תוכנות הסימולציה ביחס לתנועה העירונית דומות מאד לאלו המופיעות בגוף הפרק (אך יידרשו אגרות גבוהות יותר וירידה דלה יותר בכמות הרכב הפרטוי גם ברמות עומס תנוצה בגין - casar שער ניצול הקובלות הוא חצי).

<sup>19</sup> חושבה גם ההתקאה כאשר גמישות המחיר הצולבת בין רכב פרטי ואוטובוס היא 0.25, אך השינוי היה מזערי.

<sup>20</sup> גם אם אומצה ההנחה שבתחבורה העירונית המהירות המירבית של רכב כבד היא 50 קמ"ש ומהירותם הקרייטית היא 5 קמ"ש. בלוחות נ-6-נ-9 אומצה גם הנחה נוספת והיא שגמישיות הביקוש קבועה לכל אורך העקומה (ראה העירה 1 בסוף זה).

הסימולציות לגבי התנועה הבינעירונית דומות לאלו המתקבלות כאשר פונקציית המהירות  
לינארית. שוב ממחישה פונקציית זמן הנסעה המערבית (לוח נ-9) את רגשותה לעומס התנועה  
וכאשר שיעור ניצול הקבולת עולה ל-80 אחוז (כלי רכב) מספר כל הרכב הפרטיאו אופטימל  
קטן מהקיים ב-25 אחוז והאגירה האופטימלית גדולה כמעט פי 3 מזו המופיע בלוח 6 עבורי  
פונקציית מהירות לינארית (פי 6 מהמס הנוכחי).

הרכב המשחררי מהו בחלוקת תחליף לרכב פרטיא ובחלוקת תחליף לשאיות. הנחנו שכמחצית  
כל הרכב המשחררים נוהגים כרכב פרטיא ומחצית כמשאיות. מצטט מספר אמצעי ההובלה  
מחמישה לארבעה לא שינוי את מסקנותינו במידת ממשותית.

לוח נ-4. אגרות צפיפות והקפקאה אופטימלית בתנועה העירונית בתנאי ביצוע גמישא

מזהיר (קמ"ש)	מזהיר ש"ל (קמ"ש)	מספר וטענות (קמ"ש)		מלוטר כליא רכב (ריהם לשעה)	תנא צפיפות כליה מצב התנועה אטומים ירח
		רכב אטם בטל	רכב אטם בטל		
אגד-מס עין קלטן	מזהיר ליליק (מ)	רכב אטם בטל	רכב אטם בטל	200 204 406 415 170 171 172 176 50 41 50 41 1.02 1.03 1.01 1.00	תנא צפיפות כליה מצב התנועה אטומים ירח
אולד-	רכב אטם בטל	רכב אטם בטל	רכב אטם בטל	200 204 406 415 170 171 172 176 50 41 50 41 1.02 1.03 1.01 1.00	תנא צפיפות כליה מצב התנועה אטומים ירח
בסיים	רכב אטם בטל	רכב אטם בטל	רכב אטם בטל	200 204 406 415 170 171 172 176 50 41 50 41 1.02 1.03 1.01 1.00	תנא צפיפות כליה מצב התנועה אטומים ירח
0.013	0.075	0.22	0.30	41 50 171 170 406 415 200 204	תנא צפיפות כליה מצב התנועה אטומים ירח
0.004	0.060	0.21	0.28	41 50 171 170 406 415 200 204	תנא צפיפות כליה מצב התנועה אטומים ירח
0.31	0.80	0.96	0.95	1.00 1.03 1.01 1.02	תנא צפיפות כליה מצב התנועה אטומים ירח
0.013	0.075	0.29	0.35	28 35 428 426 1015 940 500 390	תנא צפיפות כליה מצב התנועה אטומים ירח
0.015	0.218	0.26	0.47	32 40 502 267 1015 940 500 390	תנא צפיפות כליה מצב התנועה אטומים ירח
1.15	2.91	0.89	1.34	1.18 1.16 1.17 0.93	תנא צפיפות כליה מצב התנועה אטומים ירח
0.013	0.075	0.49	0.48	14 20 684 682 163 800	תנא צפיפות כליה מצב התנועה אטומים ירח
0.032	0.468	0.30	0.74	28 36 1023 210 1521 480	תנא צפיפות כליה מצב התנועה אטומים ירח
2.46	6.24	0.61	1.52	2.03 1.80 1.50 0.94	תנא צפיפות כליה מצב התנועה אטומים ירח
0.013	0.075	0.69	0.59	10 15 770 767 1826 900	תנא צפיפות כליה מצב התנועה אטומים ירח
0.041	0.610	0.32	0.89	27 34 1259 190 1779 515	תנא צפיפות כליה מצב התנועה אטומים ירח
3.15	8.13	0.47	1.51	2.82 2.28 1.64 0.97	תנא צפיפות כליה מצב התנועה אטומים ירח

א. גישות הביקוש כפלוגות מתאימים בלילה.<sup>5</sup>

לעומת נס. אגרות צפיפות וודקה אונטסימלית בתגובה הדרוגית בתנאי בילויים קשיים.

מזהה גנוטים (לעומם)										מספר כל	רכב (ר' מ לשלן)	תאי צפיפות		
סוחך					אנוואט									
סוחך		רקב		רקב	אנוואט		אנוואט		רקב	רקב				
סוחך	רקב	רקב	רקב	רקב	סוחך	רקב	סוחך	רקב	רקב	סוחך	רקב	תאי צפיפות		
אגוז- מט- שמי	אגוז- מט- שמי	רכב	רכב	רכב	אנוואט	אנוואט	אנוואט	אנוואט	רקב	סוחך	רקב	תאי צפיפות		
לכימן	אנוואט	אנוואט	אנוואט	אנוואט	בונסם	בונסם	בונסם	בונסם	פראט	פראט	פראט	תאי צפיפות		
בוסטן	פראט	פראט	פראט	פראט	פראט	פראט	פראט	פראט	פראט	פראט	פראט	תאי צפיפות		
0.013	0.075	0.22	0.30	41	50	171	170	406	200	500	500	מבדה הונגרי		
0.004	0.058	0.21	0.28	41	50	172	171	408	201	462	462	אופטימום		
0.31	0.78	0.96	0.94	1.00	1.00	1.01	1.00	1.01	1.00	0.92	0.92	ירוח		
0.013	0.075	0.29	0.35	28	35	428	426	1015	500	646	646	מבדה הונגרי		
0.018	0.266	0.28	0.53	29	37	441	374	978	462	700	700	אומיג'ו		
1.38	3.55	0.97	1.52	1.06	1.06	1.03	0.88	0.96	0.92	0.81	0.81	ירוח		
0.013	0.075	0.49	0.48	14	20	684	682	1623	800	900	900	מבדה הונגרי		
0.052	0.773	0.39	1.09	21	28	761	469	1494	646	697	697	אומיג'ו		
4.00	10.31	0.80	2.26	1.50	1.39	1.11	0.69	0.92	0.78	0.78	0.78	ירוח		
0.013	0.075	0.69	0.59	10	15	770	767	1826	900	900	900	מבדה המלט		
0.073	1.082	0.45	1.43	19	25	891	485	1675	646	697	697	אומיג'ו		
5.62	14.43	0.65	2.42	1.96	1.68	1.16	0.63	0.92	0.78	0.78	0.78	ירוח		

א. גמישיות הבדיקה הם ממציאות אלו בלה 5.

לוח נ-6. אגרות במטופת והוקצאה אופטימלית בցמונת הערים — מגזיניות מעריביות מעריביות —  $S = 10 + 50[1 - (Y/1000)]^{1/2}$

אברה — מט' שיער לקל'ן		מחריע ליקויים		מחריג (קמ"ש)		מספר גוש סעמים (לשען)		מספכ' כליה רכבת גראם עליה)		תנאי גנטנות	
אברה	מט'	רכבת	גראם	רכבת	גראם	רכבת	גראם	רכבת	גראם	רכבת	גראם
0.013	0.075	0.20	0.29	45	55	171	170	406	209	209	1.05
0.002	0.028	0.19	0.24	45	54	172	181	419	209	209	1.05
0.15	0.37	0.95	0.84	1.00	1.00	1.01	1.06	1.03	1.03	1.03	1.05
0.013	0.075	0.23	0.31	37	45	428	426	1015	500	500	1.05
0.008	0.119	0.23	0.35	37	46	440	397	1002	481	481	1.05
0.62	1.59	0.97	1.14	1.02	1.02	1.03	0.93	0.99	0.96	0.96	1.05
0.013	0.075	0.31	0.37	25	32	684	682	1623	800	800	1.05
0.024	0.361	0.28	0.62	30	38	755	575	1545	689	689	1.05
1.85	4.81	0.91	1.71	1.20	1.17	1.10	0.77	0.95	0.86	0.86	1.05
0.013	0.075	0.38	0.41	19	26	770	767	1826	900	900	1.05
0.036	0.529	0.31	0.80	28	35	911	546	1756	744	744	1.05
2.77	7.05	0.81	1.94	1.44	1.37	1.18	0.71	0.96	0.83	0.83	1.05

. $S = 5 + 45[1 - (Y/1000)]^{1/2}$  היא הנקודות הדרישות עבור אוטובוסים

לולו נ-ג. ארגון צבאיות והקצינים האוטומיליטים במטה הערוגיות — פונקציית גזן מסעדה מוניציפלית.

מספר כליא	רבי גראם לשעון)	מספר גנוטאים (לעשרה)					
		סוחיב	רכב פדרט	רכב איטו-	רכב איטו-	רכב איטו-	רכב איטו-
גנוטים	פדרט	פדרט בטוטם	פדרט בטוטם	פדרט בטוטם	פדרט בטוטם	פדרט בטוטם	פדרט בטוטם
קללה	מגבת הדרתני	200	192	192	192	192	192
אופניים	3.92	0.90	1.01	1.03	0.93	0.99	0.96
ריש	3.92	10.13	2.91	1.41	1.27	1.18	0.63
בגוניות	0.051	0.760	0.29	0.99	33	47	503
(א)	0.013	0.075	0.32	0.34	24	37	428
ליס	0.013	0.075	0.73	0.54	9	17	1015
אנטומום	0.013	0.075	0.50	2.37	20	32	500
ירח	0.140	2.078	0.50	2.37	20	32	383
כבודה מהלך	10.77	27.71	0.69	4.36	2.20	1.92	1.40
טבורה (ב)	0.013	0.075	0.66	7	13	770	767
טבורה (ג)	0.186	2.746	0.61	3.07	16	28	1826
טבורה (ד)	14.31	36.61	0.64	4.67	2.45	2.15	900
טבורה (ה)							615
טבורה (ו)							0.68

נ' שער אינטגרום של מנגנון ריאיון  $\frac{1}{X} = \frac{1}{1000} + \left[ \frac{9}{500} \right] \ln \left( \frac{Y}{500} \right)$

לנה-8. אגרות צפיפות והתקצאה באמצעות מנגנון מילימית בהנעה הביעורנית – מנגנון מילימית בהנעה הביעורנית –  $S = 50 + 50[1 - (Y/2000)]^{1/2}$

טבלה נלי	ריבוי גראם	ספירת גראם	מספר גראם (במ"ש)	מזהה (ט"ז)	אברה – מס' טיה לקרון
תגא צפיפות	גיראים לעומן	סוריים	אנטול	אנטול	אנטול – בושם
קלח	מצב הרהיליג אונטומים	יוט	בריאוּת	מצב הרהיליג אונטומים	יוט
0.021	0.046	0.19	0.18	95	95
0.001	0.007	0.17	0.14	94	94
0.05	0.15	0.90	0.79	1.00	1.00
				1.03	1.03
				1.08	1.08
				1.05	1.05
				1.06	1.06
0.021	0.046	0.19	0.19	85	85
0.004	0.026	0.18	0.17	85	85
0.19	0.57	0.92	0.90	1.00	1.00
				1.03	1.03
				1.02	1.02
				1.03	1.03
0.021	0.046	0.21	0.20	72	72
0.013	0.079	0.20	0.23	74	74
0.62	1.72	0.95	1.16	1.02	1.02
				1.04	1.04
				0.99	0.99
				0.97	0.97

לוח נ-9. אגרות צפיפות והתקצאת אופטימילינג בתגנעה הבינלאומית – מתקצאיות זום מסעא שעיברת  $= 0.01 + 0.01 [1 - 1/(2/2000)]^3$

מספר גוועים (לשעת)		מזהיר (קמ"ש)		מזהיר (קמ"ש)		מספר כרי		רכב (רכ'ם לישון)		רכב (רכ'ם לישון)		רכב (רכ'ם לישון)	
מזהיר (קמ"ש)		מזהיר (קמ"ש)		מזהיר (קמ"ש)		רכב (רכ'ם לישון)		רכב (רכ'ם לישון)		רכב (רכ'ם לישון)		רכב (רכ'ם לישון)	
מזהיר (קמ"ש)		מזהיר (קמ"ש)		מזהיר (קמ"ש)		רכב (רכ'ם לישון)		רכב (רכ'ם לישון)		רכב (רכ'ם לישון)		רכב (רכ'ם לישון)	
אגרה – מט (שיי) לקיינן	אגרה – מט (שיי) לקיינן	אלאן – אטמן – ברטי ברטי	רלב – ברטי ברטי	רלב – ברטי ברטי	רלב – ברטי ברטי	קלר מצב הרווחני օպטימום 叽	בליגיאת מצב התהלהני օ�טימום 叽	כברה מצב התהלהני օ�טימום 叽	בליגיאת מצב התהלהני օ�טימום 叽				
0.021	0.046	0.18	0.18	99	99	320	449	1006	40	421	421	421	421
0.002	0.010	0.16	0.14	99	99	331	480	1057	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
0.10	0.22	0.90	0.80	1.00	1.00	1.03	1.07	1.07	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
0.021	0.046	0.19	0.19	89	89	800	1123	2516	1000	944	944	944	944
0.016	0.100	0.19	0.24	90	90	834	991	2440	944	944	944	944	944
0.76	2.17	0.97	1.29	1.01	1.01	1.04	0.88	0.97	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94
0.021	0.046	0.22	0.21	66	66	1280	1797	4026	1600	1367	1367	1367	1367
0.044	0.278	0.23	0.43	76	76	1339	1317	3636	0.90	0.85	0.85	0.85	0.85
2.10	6.04	1.05	2.05	1.15	1.15	1.05	0.73	0.90	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85

### ביבליוגרפיה

- אורד ב', ד' פינס ושי קוברינסקי (1977). "מיסוי הרכב במרכז עירוני," *רבעון לכלכלה*, כרך 24, מס' 94 (ספטמבר) : 221-213.
- גרונאו ראובן, וצבי וייס (1982), "אגרות צפיפות ומיסוי הרכב בישראל," *סקר בנק ישראל*, 55 (אוקטובר) : 40-3.
- (1997). "התערבות והחרות בשוק התחבורה המוטורית. I. ענף התחבורה המוטורית — סיפור של כשל שוק," ירושלים: המכון למחקר כלכלי בישראל ע"ש מorris פאלק, מאמר לדין מס' 97.03.
- (1997). "התערבות והחרות בשוק התחבורה המוטורית. III. סיסוד התחבורה הציבורית וההערות בשוק המוניות," ירושלים: המכון למחקר כלכלי בישראל ע"ש מorris פאלק, מאמר לדין מס' 97.03iii (בחכנה).
- המכון הישראלי לתכנון ומחקר תחבורה (1988). אומדן ערך הזמן בנסיבות בעניין עבודה (ספטמבר).
- (1994). "בסיס נתונים ממוחשב לצרכי תכנון תחבורה, עדכון רשותות ומטריצות לשנת 1993," דוח' בינויים מס' 1, דוח' מס' 181 (וונ).
- לשכה מרכזית לסטטיסטיקה (למ"ס). (1993, 1992), *נתונות סטטיסטי לישראל*. ירושלים.
- (1988). *סקר הרגלי נסעה 1984*. ירושלים: פרסום מיוחד מס' 811.
- (1993). *סקר משאיות 1990*. ירושלים: פרסום מיוחד מס' 924.
- (1995). *דף השימוש בזמן בישראל: סקר תיקצוב זמן 1991/92*. ירושלים: פרסום מיוחד מס' 996 (וונ).
- מיניל הכנסות המדינה, דוח' שנתי 1994.
- מת"ת (1994). ניתוח תנעה והערכה כלכלית. חבי כביש חוצה ישראל (ספטמבר) (פורסם גם בתנעה ותחבורה, 41, יולי 1995).

- Boardman, Anthony E., and Lester B. Lave (1977). "Highway Congestion and Congestion Tolls," *Journal of Urban Economics*, 4: 340-359.
- Coleman, Robert R. (1961). "A Study of Urban Travel Time in Pennsylvania Cities," *Highway Research Board Bulletin*, 303: 62-75.
- Deweese, Donald N. (1978). "Simulations of Traffic Congestion in Toronto," *Transportation Research*, 12: 153-165.
- Harel, R. (1974). "Road User Charges Policy, the Case of Israel." Unpublished Ph.D. dissertation, Harvard University.

- Keeler, Theodore E., and Kenneth A. Small (1977). "Optimal Peak-Load Pricing, Investment, and Service Levels on Urban Expressways," *Journal of Political Economy*, 85: 1-25.
- Payne, Harold J. (1984). "Discontinuity in Equilibrium Freeway Traffic Flow," *Transportation Research Record*, 971: 140-146.
- Smeed, R. J. (1968). "Traffic Studies and Urban Congestion," *Journal of Transportation Economics and Policy*, 2: 33-70.
- Small, Kenneth A. (1992). *Urban Transportation Economics*. Harwood Academic Publishers, Chur.
- Watlers, Allen A. (1961), "The Theory and Measurement of Private and Social Cost of Highway Congestion," *Econometrica*, 29: 676-699.