

השפעת משטר  
אגרות גודש  
כלל-ארצי על  
הרגלי הנסיעה  
בישראל

אשר מאיר  
הודיה למפרט

פורום  
**הת**  
לכדיניות  
ריבונות לאומית. חירות הפרט.

תמוז תשפ"ב - יולי 2022  
נייר מדיניות מס' 79

## ד"ר הודיה למפרט חוקרת בפורום קהלת לכלכלה

סיימה את לימודי הדוקטורט בבן גוריון והמשיכה ללימודי פוסט דוקטורט באוניברסיטת לובן בבלגיה ובטכניון. מרצה כיום באוניברסיטת אריאל. מחקרה עסק במדיניות קניין רוחני ופטנטים. עבדה בפורום קהלת עד יוני 2021 ועסקה במדיניות תחבורה ובריאות.



המחקר נערך בחדר המחקר של הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה בהתבסס על קובצי רשומות פרט מהם הושמטו פרטי זיהוי שהוכנו לצורך כך על ידי הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה.

## ד"ר אשר מאיר עמית בכיר בפורום קהלת

ameir@kohelet.org.il

עבד בעבר כמרצה בכיר בכלכלה במרכז אקדמי לב, וכחוקר בארגוני מחקר רבים ובהם Council of Economic Advisers, NBER, World Bank, ובמרכז טאוב, וכן במגזר הפרטי. בין תחומי המחקר הבולטים שלו: שוק הדיור ושוק האשראי הצרכני.



אנו מודים לדקסין לי, חירות אוזן ויונתן סורוצקין על עזרת מחקר מסורה. הרווחנו במיוחד משיחות עם ד"ר שוקי כהן, עם פרופ' הלל בר גרא ועם פרופ' עומר מואב. תודה מיוחדת לפרופ' משה גבעוני ז"ל שנתן בנדיבות רבה מזמנו המועט ומחמתו המרובה. אנו מודים לצוות חדר המחקר של הלמ"ס על העבודה המסורה לטובת המחקר שלנו תוך כדי הקפדה על השמירה של צנעת הפרט של האזרח.

---

# השפעת משטר אגרות גודש כלל-ארצי על הרגלי הנסיעה בישראל

---

אשר מאיר  
הודיה למפרט



תמוז תשפ"ב - יולי 2022  
נייר מדיניות מס' 79

---

השפעת משטר אגרות גודש כלל-ארצי על הרגלי הנסיעה בישראל  
ד"ר אשר מאיר וד"ר הודיה למפרט

נדפס בישראל, תמוז תשפ"ב - יולי 2022

מסת"ב 3-96-7674-965-978 ISBN



# תוכן העניינים

1	סיכום מנהלים
3	א. מבוא
11	ב. סקירת ספרות
19	ג. ניתוח תוצאות המודל
	ד. אגרת גודש כמס פיגוביאני שמפנים עלויות חיצוניות
35	– היבטים תיאורטיים
53	ה. תיאור מפורט של המודל
91	נספח א. תוצאות בצורת טבלה, עבור כלל המסלולים הגדושים
101	נספח ב. סקירת ספרות על גמישות הביקוש לנסיעה
107	נספח ג. נוסחאות שינוי רווחה
111	נספח ד. הערות טכניות על השיטה הנומרית
113	הערות
117	ביבליוגרפיה





# סיכום מנהלים

## השקת משטר אגרות גודש בישראל

בישראל, כמו במדינות אחרות, נסיעות עבודה (יוממות) במכונית כרוכות בלא מעט המתנה בפקקים. על פי הסקר החברתי של הלמ"ס, בשנת 2018 כ-2.1 מיליון עובדים במשרה מלאה הגיעו לעבודה באופן קבוע במכונית פרטית, בנסיעה ממוצעת של כ-27 דקות כל דרך. בחינת מהירות הנסיעה במסלולי היוממות הנפוצים ביותר (באמצעות היישומון של מפות גוגל) מלמדת שמסלול יוממות ממוצע היה אורך כ-20 דקות גם בתנאים ללא עומס כלל, כך שכשליש זמן הנסיעה מתווסף בגלל נהגים אחרים.

גביית אגרה עבור נסיעה בגודש תקטין את מספר כלי הרכב. אמנם הקטנה כזאת תקצר את זמני הנסיעה, אך בה בעת תקטין את מספר כלי הרכב הנהנים מן הכביש ומקיצור זמן זה. מחקר זה בוחן את המיסוי המאזן בצורה מיטבית בין שיקולים אלו, וממילא את התועלת המרבית לציבור שניתן להשיג על ידי משטר מיטבי כזה.

צמצום במספר כלי הרכב של יוממים צפוי לנגוס גם בצפיפות העובדים במרכזים המטרופוליניים ובכך ביתרונות האגלומרציה. הסימולציה עצמה אינה מתחשבת בעלות זאת, אבל חישוב גס נותן רושם שנגיסה זאת משמעותית רק עבור האזורים הפחות פקוקים בארץ, בוודאי לא עבור שלושה עשירוני גודש הגבוהים ביותר.<sup>1</sup>

מטרת המחקר הינה להתוות סדר גודל של הגידול ברווחה כתוצאה מאגרות גודש על פי קשת רחבה של הנחות סבירות.

מצאנו שעבור כ-30% ממסלולי היוממות הפקוקים ביותר, התועלת של אגרות גודש מצטיירת כדאית למדי. שכן ברמות גודש גבוהות כל מכונית מעכבת יותר את התנועה, ועיכוב זה מאט את נסיעתם של מספר רב יותר של נהגים ושל נוסעים באוטובוסים ובהסעות.

בסימולציה, ערך חסכון הזמן בניכוי אי הנוחות לנהגים המשנים את דפוסי היוממות באזורים עתירי-גודש אלו מגיע לסביבות 15-10 שקל לנהג מקורי ליום. התועלת המצרפית עבור כ-730 אלף נהגים כאלו מגיע לסכום של כ-10 מיליון שקל ביום.<sup>2</sup>

לעומת זאת, ממצאי המודל מצביעים על תועלת אפשרית צנועה למדי לאגרות גודש בשאר כבישי הארץ, אשר בהם רמות הגודש נמוכות יחסית. פוטנציאל התוספת לרווחה בכבישים אלו נאמדת בכ-4-1 שקל לנהג ליום; ובסך הכל כ-3 מיליון שקל ליום עבודה עבור כ-1.5 מיליון נהגים. במסלולים אלו, מיסי הנהיגה הקיימים, דוגמת בלו, קרובים כבר לרמת אגרת הגודש הרצויה.

הגידול בפועל ברווחה הנובע מהאגרות צפוי להיות נמוך משמעותית מהחזוי, כתוצאה מאגרות בגובה לא מטבי,<sup>3</sup> מעלויות תפעול ומירידה אפשרית באגלומרציה (ציפוף) העירונית. כאמור, דחיקת חלק ניכר של העובדים למיקומי עבודה או שעות עבודה צפופים ומרוכזים פחות עלולה לשחוק את פרוין העבודה של העובדים.

המודל מנבא שהאגרה היעילה בשעות שיא תהיה כ-50 שקל ליום באזורים הצפופים, ושהיא צפויה לחסוך למשלמי האגרה כ-20 דקות נסיעה ביום. כ-20% מן הנהגים יאלצו למצוא סידור חלופי.

המסקנה למדיניות: צפויה תועלת רבה מהשקת אגרות גודש במרכז הארץ, שם הגודש עצום וחלופות אופן הנסיעה ומיקום העבודה נרחבות יחסית.

כדי לאפשר לחוקרים אחרים לבקר את המודל ולהציב הנחות אחרות, אנו מפרסמים את קוד המקור של המודל.





## א. מבוא

**מצד אחד,  
הפקקים נותנים  
ביטוי לעלות  
חיצונית. כל  
נהג נוסף גורם  
עיכוב ניכר לכל  
יתר הנהגים, אך  
אינו נושא בעלות  
הכספית של  
עיכוב זה**

הגודש הכבד הנמצא בכניסה לערים הגדולות בארץ ובעולם הוא תופעה נפוצה, הנשענת למעשה על צירוף ייחודי של שני סוגים הפוכים של השפעות חיצוניות.

מצד אחד, הפקקים נותנים ביטוי לעלות חיצונית. כל נהג נוסף גורם עיכוב ניכר לכל יתר הנהגים, אך אינו נושא בעלות הכספית של עיכוב זה. לו נדרשו נהגים לשאת בעלות זו, חלקם היה בוחר לנסוע בזמן, באופן או במסלול אחרים. בכך הפקקים הם גדולים מן היעיל.

מצד שני, הפקקים נותנים ביטוי גם לתועלת חיצונית: פערים חדים בפיריון ובשכר שהם פועל יוצא של ריכוז העובדים במרכזי הערים. למשל, השכר הממוצע עבור בעלי השכלה אקדמית העובדים בתל אביב גבוה בכ־20% מזה של עמיתיהם העובדים ברמלה; ברמלה עלות השכירות היא כמחצית, והעיר נגישה יותר מתל אביב לפרברים רבים שבהם גרים העובדים בתל אביב. לו ניתן היה למעסיק בתל אביב לשכפל, ולו בקירוב, את פיריון העובדים שלו במשרד ברמלה, היה חוסך לעצמו עלויות שכירות, ולעובדים שלו – עלות נסיעה; ככל הנראה הדבר בלתי אפשרי. הסיבה ככל הנראה היא נוכחותם של עובדים רבים אחרים בסמיכות מקום למקום העבודה בתל אביב: נותני שירותים עסקיים איכותיים, מתחרים, לצד ספקים של אפיקי צריכה ייחודיים דוגמת מסעדות. כל יומם נוסף גורם שיפור בשכר ובאיכות הצריכה ליתר השוהים במרכז עירוני, אך אינו נהנה ממלוא התועלת שהוא מביא.

האתגר של מדיניות ציבורית הוא לשמר את היתרונות של ציפוף העובדים במרכזי הערים, תוך כדי צמצום החסרונות של הציפוף בכבישים המובילים אליהם. איזון מושכל בין היתרונות והחסרונות דורש מידע אמין על תרומת הציפוף לפיריון מחד, ועל התרומה

## האתגר של מדיניות ציבורית הוא לשמר את היתרונות של ציפוף העובדים במרכזי הערים, תוך כדי צמצום החסרונות של הציפוף בכבישים המובילים אליהם

שלו לעיכובים בכביש מאידך. מחקר זה בא לענות על דרישה זו. במחקר אנו אומדים את השיפור הצפוי בתועלת הציבור מהטלת עלויות העיכוב על הנהג בצורה של אגרת נסיעה תלוית-גודש, ואת ההשלכותיה על הנהגים עצמם ועל מפת המגורים והתעסוקה בישראל.

בעיית הפקקים כשלעצמה היא בראש ובראשונה בעיה של הקצאה. משאב שנמצא במחסור, שכיום מחולק בשיטה של כל הקודם זוכה. כמו בכל מוצר שמתומחר נמוך מדי, נוצר תור, הגורם לבזבז משאבים. עד היום טופלה בעיה זו רק בצד ההיצע. כבישים חדשים נבנו ותשתיות תחבורה ציבורית הוקמו. כתוצאה מכך, זמני הנסיעה אכן מתקצרים לנהגים הקיימים, ובנוסף עקב קיצור הנסיעה רבבות נהגים חדשים מוצאים את הנסיעה בתשתיות המתחדשות כדאית; רווחת הנהגים אכן משתפרת. אך בעיית ההקצאה לא נפתרה; עדיין הנהגים אינם נושאים בעלות העיכוב שהם גורמים, ועדיין יש צפיפות יתר.

בנייר מדיניות זה אנו דנים באפשרות לטיפול בבעיית הגודש בכבישים על ידי הפחתת הכמות המבוקשת של נסיעות, ולא רק על ידי הגדלת ההיצע. בניגוד לשווקים אחרים וחופשיים, שבהם השוק מתנכח באמצעות יצרנים שקובעים מחיר למוצר שהם מייצרים, שוק הכבישים הוא שוק שבו ההיצע מתוכנן באופן ריכוזי. הממשלה מחליטה כמה כבישים לסלול והיכן, ולכן יש צורך למצוא מנגנון שיקצה את נפח הכבישים בצורה אופטימאלית. צריך לשקול את יתרון המס לנסיעה מהירה יותר של נהגים שיסכימו לשלם אותו, כנגד ההפסד כלפי הנהגים הנוכחיים שייאלצו לאמץ חלופת נסיעה נוחה פחות מזו של היום – שינוי במסלול, באמצעי תחבורה או בזמן הנסיעה.

על פי התיאוריה הכלכלית, הדרך הנפוצה שבה חושבים על בעיית המתכנן המרכזי היא תכנון שיביא לרווחה מרבית (גישה תועלתנית). על פי גישה זו על המתכנן המרכזי לתמחר את הנסיעה בכביש באופן שימקסם את סך הרווחה של המשתמשים בו. כיום, המחיר שמשלמים הנהגים הוא עלות זמן הנסיעה ועלות תפעול כלי הרכב.<sup>4</sup> ביקוש הנהגים לנסיעה בכלי רכב, כמו כל ביקוש, תלוי שלילית בעלות הנסיעה. לכן, בכל פעם שנפתח כביש חדש, ועלות הנסיעה במונחי זמן יורדת, סך הנוסעים באותו המסלול עולה. מצד שני, לכל נוסע יש תועלת משלו מהנסיעה. נוסעים שיש להם תועלת גבוהה מנסיעתם, ייטו לנסוע בכביש גם כאשר עלות הנסיעה תהיה גבוהה. בשיווי משקל, כמות הנוסעים נקבעת כאשר עלות הזמן של הנוסע האחרון שמצטרף לכביש, שווה לתועלת של אותו נוסע מנסיעה זו.

**במקרה שלנו שבו  
המוצר הוא נסיעה  
בכביש, אין כניסה  
חופשית של ספקי  
כבישים שימהרו  
לספק כבישים  
כאשר יראו  
הזדמנות לגבות  
מחיר־דרך העולה  
על עלותה של  
בניית הכבישים**

כאשר מדובר בשוק תחרותי, בנקודת שיווי המשקל שבה נקבעים מחיר המוצר והכמות הנצרכת ממנו, מתקבל סך הרווחה המרבי. אולם, במקרה שלנו שבו המוצר הוא נסיעה בכביש, אין כניסה חופשית של ספקי כבישים שימהרו לספק כבישים כאשר יראו הזדמנות לגבות מחיר־דרך העולה על עלותה של בניית הכבישים. המדינה קובעת הן את כמות התשתית הן את המחיר. היום מחיר הנסיעה במרבית הדרכים אינו משתווה לעלות העיכוב שהנהג גורם לנהגים אחרים על ידי נסיעתו.

בתנאים אלו, נוסע שנוהג בכביש לוקח בחשבון את עלות הזמן של הנסיעה שלו ומחליט לפיה על כדאיות הנסיעה, אבל הוא אינו לוקח בחשבון את העובדה שבכך שהוא בוחר לנסוע בכביש, הוא מגדיל את עלות זמן הנסיעה של כל הנהגים האחרים. בשווקים שקיימות בהם החצנות שליליות, הקצאה תחרותית אינה מביאה להקצאה יעילה, מכיוון שהצרכנים או היצרנים אינם מפנימים את ההשפעה השלילית החיצונית שהם גורמים, ולכן צורכים או מייצרים כמות גדולה מדי מהמוצר. במקרה זה, על פי התיאוריה הכלכלית, התערבות ממשלתית בצורת מס בגובה ההחצנות השליליות צפויה להגדיל את הרווחה. במקרה שלנו, ההתערבות הממשלתית האופטימלית תהיה להטיל מס על נהגים, בגובה העלות שהם משיתים על הנהגים האחרים, כלומר מס פיגוביאני.<sup>5</sup> מטרת המס הפיגוביאני היא לשקף לנהג את ההשפעות החיצוניות שהוא מעמיס על הנהגים שסביבו. על פי הספרות הכלכלית, השתת מס פיגוביאני על נהגים תמקסם את סך הרווחה בשוק, מכיוון שכאשר המס משקף את העלות שנהג משית על נהגים אחרים, הוא נכנס למערך השיקולים של הצרכן ולבחירה שלו אם לנסוע בכביש או לא. כך נפתרת בעיית ההחצנות השליליות, והשוק חוזר להקצות את המקום בכביש בצורה יעילה.

להקצאה יעילה של נפח הכביש תפקיד חשוב נוסף, שלא מרבים לדבר עליו. היא למעשה התשתית הבסיסית לכל טכנולוגיה עתידית בתחום התחבורה. בין אם מדובר בתחבורה שיתופית חכמה כמו 'אובר' ו'ליפט' בין אם מדובר על מעבר למכונית אוטונומית פרטית או שיתופית ברמה כלשהי, ללא תשלום על החצנות שליליות על ידי מס גודש, טכנולוגיות חדשות אלו לא יוכלו לממש את הפוטנציאל שלהן. ייתכן למשל שרכב אוטונומי בסביבה של אגרות גודש ייעל מאוד את התחבורה; אנשים ישלמו סכום גבוה מאוד על כל נסיעה אבל יחסכו יותר כסף על ידי היכולת לוותר על רכישת רכב פרטי והטיפול בו. לעומת זאת, רכב אוטונומי בסביבה ללא אגרות גודש ידרדר את המצב, שכן רכב כזה יקטין מאוד את עלות הנסיעה לאוכלוסייה גדולה (נסיעה זולה יותר או נוחה יותר שכן אין צורך

## להקצאה יעילה של נפח הכביש תפקיד חשוב נוסף, שלא מרבים לדבר עליו. היא למעשה התשתית הבסיסית לכל טכנולוגיה עתידיה בתחום התחבורה

להתרכז בנהיגה) ובכך יחמיר עוד את מצב הפקקים. ייתכן שבנוכחות מסי גודש גבוהים מאוד נסיעה באוטובוס תהווה פתרון יעיל מאוד למרבית הנוסעים, שכן ללא פקקים האוטובוס מהיר מאוד והאגרה לנוסע בודד נמוכה למדי. ואולם, כעת לא מצליחים לממש שיווי משקל של אוטובוסים מהירים ותכופים וזולים לכל מקום כי בינתיים הנסיעה איטית בגלל הפקקים.

אם כן, מבחינה תיאורטית עומדת בפנינו בעיה פשוטה יחסית. עלינו להטיל מס דרך, או אגרות גודש, בגובה ההחצנות השליליות של כל נוסע. אלו יגרמו לכך שנהגים יפנימו את עלות הזמן שהם משיתים על נהגים אחרים, וכן לכך שחלק מעלויות הזמן יחלפו בעלויות כספיות. לפי היגיון זה, אגרות הגודש צפויות להיות נמוכות בכבישים שאינם עמוסים, מכיוון שבכבישים אלו תוספת של נוסע אחד אינה משנה את זמן הנסיעה של שאר הנוסעים. מנגד, בכבישים צפופים ועמוסים אנו צופים אגרות גודש גבוהות. כמו כן, על פי אותו היגיון, מלבד שונות גובה אגרות הגודש על פני רשת הכבישים, נוכל לצפות גם לשונות בגובה האגרות על פני זמן. כלומר, בזמנים עמוסים (שעות שיא) נצפה לאגרות גודש גבוהות יותר מאלו שתוטלנה בזמנים עמוסים פחות (שעות שפל).

האתגר האמיתי טמון אם כן בחישוב אמפירי של גובה אגרות אלו. כאן עומדות בפנינו כמה אבני נגף. ראשית, עלינו לקבל תמונת מצב עדכנית של הביקוש לנסיעות לאורך שעות היממה ברשת הכבישים בישראל. מתוך תמונת המצב עלינו להבין מהם הגורמים המשפיעים על בחירתו של הנוסע לנסוע, וכיצד בחירתו עשויה להשתנות כאשר תוטלנה עליו אגרות הגודש. לשם כך עלינו להתחשב באפשרויות הרבות העומדות לנהגים השוקלים לרדת מהכביש עקב התייקרות הנסיעה. יהיו נהגים שיבחרו שלא לשנות את התנהגותם. הם ישלמו את האגרות וייהנו מנסיעה מהירה יותר. נהגים אחרים יבחרו לוותר על הנסיעה עקב התייקרותה. חלקם יכולים לבחור להקדים או לאחר את נסיעתם וכך לנסוע בשעות עמוסות פחות שבהן אגרות הגודש נמוכות יותר. הם יכולים גם להחליט לעבור לתחבורה ציבורית או לתחבורה שיתופית. היות שמדובר בטווח הארוך, הם יכולים גם לבחור לשנות את מקום המגורים או מקום העבודה, כך שזמן הנסיעה יתקצר על מנת להפחית את תשלומי האגרות. לבסוף, בהינתן שינוי התנהגות הנהגים בכל רמה של אגרות גודש, נותר לחשב את אגרות הגודש שיביאו למקסימום רווחה, כאשר הרווחה מוגדרת כסכום עודף הצרכן ותשלומי האגרה. עודף הצרכן מחושב כתוספת לרווח מנסיעה שהיא התועלת מהנסיעה פחות העלות (בזמן ובכסף).

הקושי העיקרי בחישוב גובה אופטימאלי של אגרות והרווחה הנובעת מהן הוא ההפנמה כי הביקוש לנסיעה גמיש, הן בזמן (כלומר קיימת האפשרות לנסוע מוקדם יותר או מאוחר יותר) הן במקום (כלומר קיימת האפשרות לשנות מקום עבודה או מקום מגורים). לפי הידוע לנו, עד היום לא נעשה ניסיון לאמוד את השפעתן של אגרות גודש במציאות שבה הביקוש לנסיעות גמיש ובשיווי משקל של הטווח הארוך. משמעות חישוב שיווי משקל של הטווח הארוך היא שגורמים רבים, שבטווח הקצר נחשבים קבועים, עשויים להשתנות. למשל, ידוע כי הבעלות על רכב היא גורם המנבא בצורה טובה את הסיכוי של יוממים להשתמש בו כדי להגיע לעבודה. אולם בטווח הארוך בעלות על רכב הופכת למשתנה אנדוגני, כלומר כזה שתלוי בהחלטת הנהג, ואינה עוד משתנה בלתי תלוי. כמו כן, מרחק הנסיעה מהבית לעבודה, שבטווח הקצר נחשב משתנה בלתי תלוי, הופך בטווח הארוך למשתנה החלטה נוסף.

המודל המובא בנייר זה מתעתד להתמודד עם קשיים אלו. מלבד היכולת שלו לחשב, בהינתן הנחות המודל, את אגרות הגודש האופטימאליות בכל מסלול נסיעה ובכל שעה משעות היום, שיביאו למקסימום רווחה כוללת, המודל מאפשר גם לנתח את המאפיינים של הנהגים על פי בחירותיהם. למשל, אגרות גודש יכולות להטיב במיוחד עם בעלי שכר גבוה, שעבורם ערך התשלום הכספי קטן יחסית וערך חסכון הזמן גבוה יחסית. מאידך, הן יכולות להטיב גם עם בעלי הכנסה נמוכה שכבר כיום נוסעים בתחבורה ציבורית, הודות לשיפור המהירות של האוטובוסים. כמו כן מודל זה מאפשר לבחון כיצד התנהגות הצרכנים תלויה בטיב החלופות הקיימות לנהיגה ברכב פרטי, כלומר ברמת גמישות הביקוש שלהם לנסיעה. שהרי, מצד אחד ככל שיש חלופות טובות יותר והביקוש לנהיגה גמיש יותר, נדרשת אגרה נמוכה יותר כדי להפחית את מספר הנהגים על הכביש, והפגיעה ברווחת נהגים אלו נמוכה יותר. מצד שני, כאשר החלופות טובות, הנזק מן הפקקים הוא מלכתחילה נמוך יותר. אפיון המרוויחים והמפסידים העיקריים מאגרות גודש והצגת תחזית אמינה בנוגע לשינוי הצפוי בהתנהגות היוממים הם בעלי חשיבות ציבורית גדולה, וביכולתם להוסיף שיקולים כבדי משקל לדיון הציבורי בדבר אגרות גודש.

המודל נותן גם תמונה עשירה של שיווי משקל. הוא מאפשר לבחון עד כמה מהירות הנהגים השתפרה כתוצאה מאגרות הגודש האופטימאליות, במסלולים ובזמני הנסיעה השונים. כמו כן נוכל לדעת בקירוב כמה פחת מספר הנהגים בכביש בכל מסלול ובכל שעה עקב האגרות. נוסף על כך, ניתן לנתח את הקשר המתמטי

## אספנו זמני נסיעה משוערים עבור מאות מסלולים לאורך שעות היממה מהישומון של מפות גוגל, ומידע על יוממות – מסלול, משך זמן, ואופן נסיעה – עבור אלפי עובדים מתוך הסקר החברתי של הלמ"ס

בין מידת הגודש (מספר דקות הנסיעה העודפות) לגובה אגרת הגודש המוטלת באותו מסלול ובאותו זמן נסיעה. הואיל ויש לנו מגוון תצפיות של מסלולים שונים בשעות שונות, המודל מאפשר לאמוד את הקשר בין פרמטרים אלו. כמו כן, ניתן לבחון אם בחלק מהמסלולים אגרות הגודש האופטימליות הן שליליות. כלומר, בהינתן מסלול עם גודש נמוך, האם ייתכן שיהיה אופטימאלי דווקא להפחית את עלות הנסיעה כדי לעודד נהגים לנסוע ובכך להגדיל את הניצולת של הכביש?

מחקרים דומים נעשו על נתונים בחו"ל, אולם חלקם בחנו רק שיווי משקל של הטווח הקצר,<sup>6</sup> וחלקם חישובי שיווי אגרות גודש עם אופטימאליות מסדר שני.<sup>7</sup> בישראל בוצעה אמידה של ההשפעה של מדיניות תחבורה על התנהגות הנהגים במודל תל אביב,<sup>8</sup> אולם גם כאן נלקח בחשבון ביקוש קשיח בשיווי משקל של הטווח הקצר.

כדי להתמודד עם האתגר של מציאת שיווי משקל של הטווח הארוך, והתחשבות בגמישות הנהגים, שילבנו במודל מספר מאגרי נתונים. מתוך נתוני גוגל API אספנו נתונים על זמני נסיעה מפורטים לאורך שעות היממה במאות מסלולים בישראל. מתוך הסקר החברתי של הלשכה הסטטיסטית בישראל בשנים 2017-2018 אספנו מידע על הרגלי הנסיעה, הכוללים ישוב עבודה, ישוב מגורים וזמן הנסיעה של כשמונה אלף יוממים, שהם מדגם מייצג של כלל היוממים בישראל. כמו כן השתמשנו בנוסחה המקשרת באופן הנדסי בכל מסלול בין זמן הנסיעה לנפח הנוסעים בו. באמצעות אותה הנוסחה יכולנו גם לתרגם בחזרה את הירידה בנפח הנוסעים לחיסכון בזמן עבור שאר הנוסעים באותו המסלול.

על מנת לחזות את התנהגות הנהגים לאחר הטלת אגרות הגודש, השתמשנו בשיטת אמידה ייחודית. לכל נהג חושב באופן פרטני הסיכוי לבחור בכל אחת מהחלופות שעומדות לפניו, ונאמדה ההשפעה שיש לכל אחד מהמאפיינים של הנהג על הסתברות זו. למעשה חישבנו את המשתנה החבוי שהוא ערך הנסיעה עבור אותו הנהג, כלומר הנכונות שלו לשלם על הנסיעה, וכך הרכבנו מעין עקומת ביקוש לנסיעה במכונית. אגרות הגודש למעשה הגדילו את עלות הנסיעה הכספית, והקטינו את עלות הנסיעה בזמן. עבור אגרה נתונה, בכל מסלול ובכל שעה, חישבנו את הרווחה שהיא הרווח הכולל של נהגים. מכאן יכולנו לחשב את סט האגרות שממקסמות את הרווחה בכל מסלול ובכל חלק של היום, ולבחון, בהינתן האגרה, כיצד תשתנה ההסתברות של כל נהג לבחור בכל חלופה אפשרית.

**המודל מאפשר  
חישוב של  
אגרות גודש  
אופטימאליות  
(פיגוביאניות)  
בשיווי משקל בכל  
המסלולים בארץ,  
בשעות השיא  
ובשעות השפל,  
בטווח הארוך,  
על פי העדפות  
הנהגים כפי  
שהשתקפו בסקר  
החברתי בשנים  
2017-2018**

למודל זה מספר יתרונות מרכזיים. ראשית, המודל מאפשר חישוב של אגרות גודש אופטימאליות (פיגוביאניות) בשיווי משקל בכל המסלולים בארץ, בשעות השיא ובשעות השפל, בטווח הארוך, על פי העדפות הנהגים כפי שהשתקפו בסקר החברתי בשנים 2017-2018. ככל הידוע לנו, טרם התבצע חישוב אמפירי הלוקח בחשבון את כל הנתונים ומוציא כפלט את אגרות הגודש הפיגוביאניות בכל מסלול בשעות השיא ובשעות השפל. שנית, המודל לוקח בחשבון את העובדה שהביקוש לנסיעות גמיש, ושטווח הבחירה של נהגים בטווח הארוך רחב. מדובר במודל הראשון שמתמודד עם אתגר זה התמודדות מקיפה ומעמיקה. נוסף על כך, במודל כל ההנחות שקופות וניתנות לשינוי בצורה קלה יחסית. המודל חושב עם טווח גדול של פרמטרים, וניתן להרחיב את הטווח במידת הצורך בצורה קלה ופשוטה, תוך שימוש בקוד ובנתונים אגרגטיביים הפתוחים לציבור.

מנגד, למודל זה גם כמה מגבלות. המודל מחשב שיווי משקל בטווח הארוך, ולכן איננו מתאים לחיזוי של השפעת אגרות הגודש בטווח הקצר. נוסף על כך, המודל מחשב שיווי משקל חלקי בלבד. בשיווי משקל כללי, צפויים שינויים במחירי הרכב, מחירי הדירות, מחירי החנייה וכו'. חשוב מכל, בשיווי משקל כללי צפוי בעקבות אגרות גודש צמצום ניכר בצפיפות העובדים במרכזי התעסוקה הגדולים, וגידול בהתאם של מספר העובדים במקומות מרוחקים יותר. מהלך זה צפוי להביא לידי התכנסות מסוימת בפריזון ובשכר בין האזורים. כתוצאה מאגרות גודש, חלק מן הנהגים יבחרו לעבוד קרוב יותר לבית; אחרים יבחרו לגור קרוב יותר לאותו מרכז עירוני, ובכך ידחקו החוצה בתי עסק. בין כך ובין כך, מקומות העבודה יהיו יותר מפוזרים לעומת המצב לולא אגרות הגודש, ופריזון העבודה צפוי אם כן להתכנס. שכן, על פי מחקרים שנעשו בנושא, נמצא כי קיים גידול בפריזון לעובד כתוצאה מציפוף מקומות העבודה.<sup>9</sup> מגבלה נוספת שצריכה להילקח בחשבון היא שהמודל אינו בנוי לחישוב שיווי משקל ברשת תחבורה. כלומר, בעוד במציאות אגרת גודש גבוהה בכביש מסוים עשויה לגרום לנהג לעבור לנסוע בכביש חלופי ולהשפיע על הגודש שם, במודל שלנו כל מסלול חושב בנפרד, ולא קיימת השפעה של מסלול אחד על האחר. בדיון על המדיניות הרצויה כל השיקולים האלו נלקחו בחשבון, אבל אינם חלק ממודל הסימולציה עצמו.

---

הדיון על אגרות גודש משלב תובנות תיאורטיות עמוקות הנוגעות בבסיס המיקרו־כלכלה: ניתוח של היצע, ביקוש ומנגנון המחירים המושפע מהם. כמו כן, סוגיית ההחצנות השליליות היא אחת הסוגיות הכלכליות העקרוניות העומדות מאחורי הטיעונים בעד התערבות ממשלתית בשוק. זה דיון בעל השלכות מדעיות מעניינות, אך גם רלוונטיות לחיי היום־יום. נייר מדיניות זה מתעתד להוסיף נדבך מדעי חשוב למחקר על השלכות אגרות הגודש, תוך שימוש בנתונים מישראל, מתוך מטרה להוות כלי עזר לקובעי המדיניות בתחום.





## ב. סקירת ספרות

### אגרות גודש

ההיגיון הכלכלי בדבר גביית תשלום על שימוש בכביש נידון בהרחבה בספרות המקצועית לאורך השנים. התרומה המשמעותית הראשונה לדיון התיאורטי בדבר אגרות הגודש ניתנה על ידי פיגו<sup>10</sup> ונייט<sup>11</sup> שהצביעו על כך שהקצאת המקום בכביש חינם אינה נעשית בצורה אופטימאלית. על פי התיאוריה שהציגו, הבעיה העיקרית בהקצאת נפח הכביש היא ההשפעות החיצוניות (externalities) שנהג מייצר, כאשר הוא מאט את שאר המכוניות בכביש, והן אינן נלקחות בחשבון בהחלטה של הנהג אם לנסוע או לא.<sup>12</sup> הפתרון שהציגו היה גביית מחיר־דרך בגובה העלות שכל נהג מייצר לנהגים האחרים. הרעיון מאחורי פתרון זה פשוט. אם נחשוב על הקצאת נפח הכביש במונחים של היצע וביקוש, ככל שעלות הנסיעה (בזמן ובכסף) גבוהה יותר, הכמות המבוקשת לנסיעה כזאת תרד. כאשר נהג נדרש לשלם על העיכוב שהוא גורם לנהגים אחרים, הוא יבחר לנסוע רק אם התועלת שלו עולה על העלות הפרטית בתוספת העלות שהוא מסב לנהגים אחרים. יישארו על הכביש רק הנהגים שערך הנסיעה שלהם מצדיק את העלות החיצונית.

ראוי לציין כי ככלל, שיווי משקל אופטימאלי אינו מבטל את הגודש בכביש לחלוטין. אלא, בנקודה מסוימת התוספת לתועלת החברתית בעקבות ירידת הגודש בכבישים פחותה מהירידה בתועלת החברתית הנגרמת מהדרת נהגים מהכביש.

ויקרי<sup>13</sup> הוסיף לפתח את התיאוריה של אגרות גודש והטמיע מספר תובנות מעניינות.

כבר לפני כמאה שנה הצביע ארתור פיגו על ההשפעה החיצונית של נוסע נוסף על זמן הנסיעה של נוסעים אחרים, ועל היכולת של אגרה הולמת לתקן את התמריצים

ראשית, הוא הצביע על התופעה של עומס היתר (hypercongestion). תופעה זו מתרחשת כאשר מספר המכוניות המתעתדות לעבור במסלול נתון בזמן נתון גבוה עד כדי כך שגם מהירות הנסיעה יורדת וגם נפח התנועה בכביש יורד. למעשה, עד רמת גודש מסוימת, ניתן לומר שיש קשר עקבי בין קצב מעבר כלי רכב ובין משך זמן הנסיעה. ככל שנפח התנועה גדל, מספר כלי הרכב שאכן צולחים את הכביש גדל, אבל משך זמן הנסיעה מטפס אף הוא. אולם, מצויה גם נקודת שבר שממנה גידול במספר העולים על הכביש מדרדר לא רק את מהירות הנסיעה אלא גם את עצם קיבולת הכביש – יש גם מהירות נמוכה וגם קצב מעבר איטי. (הנושא נדון באריכות בעמודים 38-39).

על רקע זה טען ויקרי כי אגרות הגודש צריכות לקחת בחשבון לא רק את העומס בכביש בכל רגע נתון, אלא גם את המיקום של הרכב בתור בשעות העומס. רכב שנכנס לשעות העומס בתחילת התור, ייאלץ להתעכב בתור המכוניות זמן מועט יחסית, אבל יאריך את זמן הנסיעה להרבה כלי רכב מאחוריו. לעומת זאת, רכב שנכנס לתור לקראת סוף התור, ימתין ככל הנראה זמן רב, אך יגרום לעיכוב של מעט כלי רכב יחסית. על פי העיקרון של מס פיגוביאני, המדיניות הנכונה היא הטלת מס גבוה על נהג הרכב מהסוג הראשון מכיוון שהשפעות החיצוניות השליליות שהוא יוצר לנהגים האחרים משמעותיות, ואילו על הנהג מהסוג השני יוטל מס נמוך בלבד. על ידי אגרות הגודש, נוכל לשמור את גודש התנועה בתחום שבו יש קשר שלילי בין מהירות לנפח, וכך נוכל גם להגדיל את מספר המכוניות העוברות בכביש וגם את מהירותן.

ויקרי הדגיש מצד אחד את היתרון של קביעת אגרות גודש על פי הגודש בפועל, על פני תעריף עם לוח זמנים קבוע מראש. כך מערכת המיסוי תוכל להתאים עצמה לגודש בלתי צפוי שנובע מתאונה או ממזג האוויר. מצד שני, יש לאפשר לנהגים מידת מה של ודאות בעלויות הנסיעה. לכן על פי ויקרי יש להעדיף מנגנון דינאמי, שנותן הזדמנות לנהגים לבחור בנתיב נסיעה אחר במידה וגודש בלתי צפוי מתחיל להתהוות.<sup>14</sup>

בעוד אגרות גודש דינאמיות שמשתנות על פני זמן ופרוסות על כל רשת הכבישים נחשבות לאופטימאליות מסדר ראשון (ממקסמות את הרווחה ללא אילוצים), במקרים רבים נבחרת דווקא מדיניות שממקסמת את הרווחה תחת אילוצים, כלומר אופטימאלית מסדר שני בלבד. דוגמה אחת לכך היא נתיבים מהירים. נתיבים מהירים הם נתיבים שמתמחרים לפי מידת העומס בכביש, ומתקיימים במקביל

לכביש הרגיל. הנהג יכול לבחור אם לשלם ולנהוג בנתיב המהיר או להישאר בכביש הרגיל. נתיבים מהירים קיימים בערים רבות בעולם, ביניהן מינפוליס (I-394), סן דיאגו (I-15), וושינגטון (SR-167), מספר נתיבים מהירים ביוסטון ונתיב מהיר לתל אביב.

מחקרים שונים ניסו לכמת את הנכונות של נהגים לשלם עבור החיסכון בזמן. נוסף על כך, נמצא כי התועלת לנהג מנתיבים אלו אינה רק חיסכון בזמן, אלא גם יכולת לחזות את זמני ההגעה ליעד בצורה טובה יותר.<sup>15</sup> ברוב הנתיבים המהירים מתאפשרת הנסיעה ללא תשלום, כאשר הרכב מכיל מספר נוסעים. לפיכך, רבים מהנוסעים בוחרים לנסוע בנתיבים אלו במשותף עם נוסעים אחרים, או בתחבורה ציבורית. ביוסטון מצאו כי רוב הנסיעות שהתבצעו בנתיב המהיר היו נסיעות יוממות (67%), וכן, מתוך אלו שנסעו בנסיעה משותפת, חלק גדול נסעו עם בני משפחה בוגרים (31%) וחלק גם עם ילדים (21%).<sup>16</sup> כלומר, העלייה במקדם המילוי בכלי הרכב כתוצאה מהפטור על תשלום בנתיב המהיר עבור כלי רכב עם כמה נוסעים, איננה כרוכה בעקביות בירידה במספר כלי הרכב שנוסעים בסך הכול בכביש. בישראל קיים נתיב מהיר בכביש 1 בכניסה לתל אביב. מחיר הנסיעה בנתיב משתנה כתלות בעומסי התנועה בנתיבים הרגילים, כאשר רכב עם שלושה נוסעים או יותר פטור מהתשלום. בנתיב המהיר קיימת גם אפשרות להחנות את הרכב חינם בחניון מוסדר ולנסוע למרכז תל אביב בכביש המהיר בשאטלים מיוחדים היוצאים בתדירות גבוהה. ניתוח נתוני הנוסעים העלה כי רוב הנהגים בנתיב המהיר ששילמו על הנסיעה ולא בחרו בנסיעה שיתופית או בשאטלים, הם נוסעים אקראיים, שאינם משתמשים בנתיב באופן קבוע.<sup>17</sup> בסקר שנערך בקרב 530 נוסעים קבועים בנתיב המהיר התברר כי 84% מהם יוממים, ו-95% מהם ציינו כי האמינות בדבר הגעה בזמן ליעד חשובה להם או חשובה להם מאוד. כמחצית מהנשאלים השיבו כי נהגו להגיע לעבודתם ברכב לפני הקמת הנתיב המהיר.

סוג נוסף של אופטימאליות מסדר שני הוא אגרה קבועה על כניסה לעיר. אגרה כזאת קיימת בשטוקהולם, לונדון, גטנבורג, מילאנו וערים נוספות ברחבי העולם.<sup>18</sup> Buchanan (1952) הציע את האגרות האלו וטען כי הן יהוו מעין רישיון לשימוש בעיר. גובה אגרות הכניסה לעיר משתנה לעיתים על פני שעות היממה, כך שהן גבוהות יותר בשעות העומס כדי למתן את הביקוש לכניסה לעיר בשעות אלו. מהניסיון שנצבר בערים אלו מתקבל כי לרוב אגרות בכניסה לעיר, כאשר הן משולבות עם אפשרויות חניה מחוץ לעיר והגעה בתחבורה שיתופית לתוך העיר, משפרות את מהירות הנסיעה ומפחיתות את

הגודש בעיר. מספר מחקרים בחנו את השפעת אגרות הגודש על השימוש ברכב רב־נוסעים (HOV). כמעט כל המחקרים גילו שיש עלייה משמעותית בנוסעים באופן זה, אבל תוספת הנוסעים ברכב רב-נוסעים נופלת מצמצום הנוסעים ברכב עם נוסע אחד כך שאגרות גודש מקטינות כצפוי את סך הנוסעה.<sup>19</sup>

מערכת אגרות הגודש הקרובה ביותר למבנה של אופטימאליות מסדר ראשון מצויה בסינגפור. שם בכל קטע דרך מתבצעת גבייה אוטומטית של האגרה על ידי מערכת אלקטרונית. הגבייה משתנה לפי מיקום הדרך ושעות הנסיעה, אולם התעריף בכל דרך בכל זמן אינו דינאמי אלא נתון וידוע מראש, ולכן איננו יכול להשתנות בהתאם לשינוי בלתי צפוי בעומסי התנועה. בסינגפור אגרות הכניסה לעיר הפחיתו את מספר הכניסות לעיר ב־44% באופן מידי, כאשר מספר הכניסות ברכב פרטי צנח ב־73% ומהירות הנסיעה גדלה ב־22%. עם זאת, נשמעו טענות בדבר העובדה כי אגרות הגודש בסינגפור גבוהות מדי וגורמות לתת־ניצול של נפח הכביש, ולעלויות גבוהות לנהגים.<sup>20</sup>

כדי לחשב את גובה אגרות הגודש הפיגוביאניות ואת השינוי ברווחה הצפוי מהן, עלינו ראשית כול לנתח לעומק את האפשרויות העומדות לפני הנוסעים כאשר הן מוטלות. בניגוד למה שנהוג לטעון, הביקוש לנסיעות בשעות העומס רחוק מלהיות קשיח לחלוטין. כלומר, על אף העובדה שיום העבודה מתחיל ונגמר בדרך כלל בשעות קבועות, עדיין יש לנוסעים היוממים מרחב בחירה רחב. מרחב הבחירה משתנה בהתאם לטווח הזמן שעבר מרגע ההחלטה להטיל אגרות; ככל שטווח הזמן מתארך, לנוסע יש אפשרויות רבות יותר, כלומר הביקוש שלו לנסיעות גמיש יותר. בטווח הזמן הקצר, נוסעים שהיו רגילים לנסוע ברכב פרטי בשעות העומס יכולים לבחור להקדים או לאחר את שעת הנסיעה וכך לשלם אגרה מופחתת, לעבור לנסיעה בתחבורה ציבורית או שיתופית, להגיע לעבודה באופניים או ברגל, לוותר על הנסיעה ולעבוד מהבית או להמשיך לנסוע בשעת העומס ולשלם את האגרה הגבוהה. בטווח הארוך לאפשרויות אלו מתווספות אפשרויות נוספות, כמו לבחור לגור ליד מקום העבודה או לעבוד ליד מקום המגורים. כמו כן האפשרות לוותר על הנסיעה ברכב פרטי טומנת בחובה חיסכון גבוה יותר שכולל ויתור על רכישת הרכב, על אגרת הרישוי ועל התחזוקה השוטפת. מחקרים רבים ניסו לאמוד את השפעתן של אגרות הגודש על הרווחה על ידי סימולציות ומודלים אקונומטרים שמשמשים בנתוני נוסעים בזמן אמת כדי לחזות את השינוי בבחירותיהם כתוצאה משינוי בעלות הנסיעה. היתרון הטמון בסימולציות סטטיסטיות הוא היכולת לנתח את התנהגות הנוסעים בהתאם לנתוני הפרט וכן לזהות את השפעת אגרות הגודש על נהגים לפי פילוחים סוציאוקונומיים.

סימולציה כזאת נעשתה לאחרונה תוך שימוש בנתוני נוסעים בעיר ניו יורק.<sup>21</sup> בהתבסס על נתוני הסקר החברתי האמריקאי, נתונים סוציאקונומיים, סקרי כוח אדם ונתוני נסועה, נבנה מאגר נתונים סינתטי הכולל כ־8.2 מיליון נוסעים הגרים בתוך העיר, ו־1.5 מיליון נוסעים המגיעים אליה מבחוץ. המאגר כולל נתונים סוציאקונומיים על הנוסעים, וכן נתונים בדבר סוג הנסיעה שבחרו (רכב פרטי, אוטובוס, טרנזיט, אופניים, מונית, נסיעה שיתופית וכו'). בנוסף נאספו נתונים על רשת הנסיעה – מסלולים ושעות נסיעה, בתחבורה פרטית וציבורית. באמצעות מודל לוגיט מולטינומיאלי חושבה ההשפעה שיש לעלות ולזמן של הנסיעה על הבחירה באיזה אופן לנסוע, ובאמצעות מודל מבוסס תור חושבו זמני הנסיעה בכל מסלול ובכל שעה ביום. אגרות הגודש שהוטמעו במודל אינן אגרות פיגוביאניות שחושבו באמצעות מקסום רווחת הנוסעים, אלא נבחנו שתי רמות של אגרות אופציונאליות, המשתנות בזמני שיא ושפל ובשעות הלילה. כמו כן הסימולציה נעשתה בהנחה כי ערך הזמן של הנוסעים הוא \$29/h. תוצאות הסימולציה הראו כי כ־125,000 כלי רכב פרטיים ירדו מהכביש וכן כ־25,000 נוסעים נוספים בקארפול. לעומתם, 250,000 נוסעים עברו לתחבורה ציבורית. כ־40% מהנוסעים חוו ירידה בעודף הצרכן, בעוד לשאר הנוסעים עודף הצרכן עלה. בממוצע כל נוסע הגדיל את עודף הצרכן שלו בכ־\$10.66 ליום כתוצאה מהשתת אגרות הגודש. כלומר אגרות הגודש יצרו עודף צרכן חיובי בממוצע, עוד לפני שהכנסות המדינה מהאגרות נלקחו בחשבון. כמו כן, עיקר הירידה במספר כלי הרכב הפרטיים התרחשה בשעות השיא. על אף העובדה שהמודל נותן תמונה טובה של ההשפעות של אגרות הגודש, הוא מתמקד בטווח הקצר בלבד. האפשרויות העומדות לפני הנהג הן לשנות את אופן הנסיעה, זמן הנסיעה או לבטל את הנסיעה. לא עומדת לו האפשרות לעבור דירה או להחליף מקום עבודה. כפי שצינו, אפשרויות כאלו צפויות להגדיל את רווחת הצרכן אף יותר.

סימולציה נוספת, שאינה מתבססת על נתוני פרט ושבוחנת את הטווח הקצר בלבד, נעשתה על נתוני נסיעות ברומא.<sup>22</sup> מסקנות הסימולציה היו כי שיעור הנהגים ברכב פרטי שעתידיים לעבור ולנסוע בתחבורה ציבורית בעקבות אגרות הגודש הוא כ־25% מכלל הנהגים. לא מצאנו בספרות סימולציה דומה שלקחה בחשבון את גמישות הביקוש בטווח הארוך, ולא מצאנו סימולציה שבה גובה אגרות הגודש נקבע באופן אנדוגני במודל כתוצאה ממיקסום סך רווחת הנוסעים.

תפקיד חשוב נוסף שיש לסימולציות הוא לבחון את ההשפעה של אגרות גודש לפי התפלגות ההכנסות. לאגרות גודש ייתכן פן רגרסיבי, שכן הן ממירות תשלום בזמן לתשלום בכסף. עבור נהגים ממעמד גבוה, ערך הזמן גבוה יותר, ולכן חסכון הזמן מקזז במידה ניכרת את התשלום הכספי. לעומת זאת, נהגים ממעמד נמוך יודרו מהכביש בהסתברות גבוהה, ועודף הצרכן שלהם יכול להיפגע יותר. מאידך, הנוסעים בתחבורה ציבורית, שהם בדרך כלל מהמעמד הנמוך, מרוויחים בוודאות מאגרות הגודש. נטל האגרה על הנוסעים ברכב רב־נוסעים קטן למדי, ואילו נוסעים אלו נהנים ממלוא חסכון הזמן. נוסף על כך, לחלוקת ההכנסות ממס יש השפעה מרכזית על מידת השינוי באי השוויון כתוצאה מהאגרות. ככל שהחלוקה תהיה פרוגרסיבית יותר, כך ההשפעה נטו של אגרות הגודש צפויה להיות פרוגרסיבית יותר. על ידי שימוש בסימולציה על נתוני הנוסעים בשטוקהולם, ניתן להראות כי אגרות הגודש שם היו פרוגרסיביות.<sup>23</sup>

## אגרות גודש בישראל

עלות הציפיות בכבישים בישראל מוערכת בין 1.92% לב-7.36% אחוזי תוצר בשנה, על פי ניתוח של שידלובסקי ושראל,<sup>24</sup> וב-2% תוצר לכל הפחות, על פי הערכה של התוכנית האסטרטגית של משרד התחבורה מ־2012.<sup>25</sup> מכאן ניתן להניח כי פתרון, חלקי או מלא, לבעיית הגודש בכבישים צפוי להניב עלייה משמעותית ברווחה. ואכן בנייר מדיניות של מכון אהרון העריכו עומר מואב ושני שרייבר את הגידול ברווחה כתוצאה מאגרות גודש בישראל בכ-20 מיליארד שקלים בשנה.<sup>26</sup> החישוב שלהם התבסס על אומדן חיסכון של בין 1.3% ל-1.6% תוצר בשנה, ועל בסיס אומדן צמיחה ריאלית של כ-3% בשנה. בנייר זה נציע אומדן שונה לגידול ברווחה הצפוי מאגרות גודש פיגוביאניות. האומדן המוצג בעבודה זו לוקח בחשבון שאגרות פיגוביאניות אינן ממגרות את העומס בכבישים לחלוטין, אלא מקצות את הכביש בצורה שתמקסם את הרווחה. כמו כן, האומדן שלנו מתחשב בכך שאגרות גודש בטבען מדירות חלק מהנהגים בכביש ומאלצות אותם לבחור בחלופות אחרות, מה שפוגע בעודף הצרכן שלהם. על פי האומדן שלנו, התוספת לרווחה כתוצאה מאגרות גודש צנועה יותר, ומגיעה לכ-2 מיליארד שקלים בשנה. אולם, תוספת זו מחושבת לפי מצב הגודש בכבישים בשנים 2016-2018, ולכן ככל הנראה כיום היא מגיעה לכ-3 מיליארד שקלים. נוסף על כך, לאורך השנים תוספת הרווחה צפויה לגדול, עם הגידול באוכלוסייה, ולהצטבר תוך 40-30 שנים לכ-150-100 מיליארד שקלים. סכום זה מתקרב לסדר הגודל של אומדן התועלת מהקמת המטרו (בניכוי עלויות ההקמה).<sup>27</sup> בהינתן העלות המינימלית

---

הדרושה להפעלה של אגרות הגודש (ביחס לעלות הדרושה להגדלת הקיבולת של תשתיות התחבורה) אנו סבורים כי זוהי תוספת רווחה משמעותית שניתן לקבל באופן מידי כמעט.

על מנת לטפל בבעיית הצפיפות בכבישים הקימה הממשלה בשנת 2008 ועדה שנקראה "ועדה למיסוי ירוק", שמטרתה הייתה לבחון את שיטות מיסוי הרכב הקיימות ולהציע חלופות. אחת ההמלצות הייתה לגבות מנהגים אגרות גודש, כדי להפחית עומסים בכביש ולמסות את כלי הרכב בצורה הוגנת יותר, לפי גובה העלויות החיצוניות שכל נהג משית על סביבתו. בהחלטת ממשלה מאותה שנה הוטל על שר התחבורה להקים צוות בראשות נציגי משרד התחבורה והבטיחות בדרכים, ובהשתתפות נציגי משרד האוצר והמשרד להגנת הסביבה, במטרה להציע תוכנית פיילוט לקביעת אגרות גודש. על פי דוח מבקר המדינה,<sup>28</sup> אף שהוקם הצוות, פעולתו הופסקה ללא מתן הסברים נדרשים. ההחלטה על גניזת הכנת תוכנית הפיילוט לבחינת אגרות הגודש יחד עם החלטות אחרות שנועדו לצמצם את השימוש ברכב פרטי התקבלה על ידי שר התחבורה דאז, ישראל כץ, בניגוד להמלצת גורמי המקצוע במשרדו.

כדי לקבל מידע בדבר התמריצים הדרושים כדי להפחית את הנסיעה ברכב פרטי בכלל ובשעות העומס בפרט, החל בשנת 2013 ניסוי "נעים לירוק", בהשתתפות משרד האוצר, משרד התחבורה והבטיחות בדרכים ורשות המיסים. בניסוי השתתפו 1,200 מתנדבים בשני חלקים שונים ("נעים לירוק 1", ו"נעים לירוק 2"). ברכביהם הותקנו מכשירי ניטור שבחנו את הרגלי נסיעתם, וכל נסיעה תומחרה בהתאם לאזור הנסיעה ושעת הנסיעה. תוצאות הניסוי הראו כי כ־43% הפחיתו את עלויות נסיעתם, כאשר כמחצית מהם שינו את שעת היציאה, וכמחצית ויתרו על נסיעות. הניסוי "נעים לירוק 2" נועד לבחון התנהגות נהגים שמראש אינם צרכנים כבדים של רכב פרטי. תוצאות ניסוי "נעים לירוק 2" טרם התפרסמו, ובמקביל החל הניסוי "נעים לירוק 3". גם כאן, על פי דוח מבקר המדינה, פעל שר התחבורה דאז, ישראל כץ, כדי לעכב את עריכת הניסויים לתקופה מצטברת של כ־3 שנים.







# ג. ניתוח תוצאות המודל

## יסודות המודל

מודל הסימולציה המוצג פה פותח צוהר לתגובה הצפויה על מספר הנוסעים, על זמני נסיעה, על עלות הנסיעה, על רווחת הנהגים ועל רווחת הציבור בעקבות השקת אגרות גודש פיגוביאניות – מחירי דרך המטיל על הנהג את מלוא העלות של העיכוב שהוא גורם לנהגים אחרים. המודל מתואר בפרוטרוט בפרק התיאוריה, אך נציג פה את התכונות העיקריות שלו.

בבסיס המודל עומדים הנתונים של הסקר החברתי בשנים 2017 ו-2018. הנסקרים דיווחו על אופן ההגעה לעבודה ועיקרי ואורך זמן טיפוסים; נתונים כלכליים כמו שכר וחלקיות משרה; ונתונים דמוגרפיים כמו גיל ומין. נעשה שימוש בנתונים לא מותממים הכוללים יישוב מגורים ויישוב עבודה לכל המועסקים בסקר. רמת השכר ומספר העובדים בסקר זה עברו כיוול להתאים למספר היוצא מסקר משקי בית לשנת 2018, סקר מדויק יותר ביחס לפרמטרים אלו.

המודל מניח שלנהגים שלוש חלופות: לנהוג בשעות השיא (בבוקר, בערך 7:30 עד 8:30), לנהוג בשעות שפל (6:30 עד 7:00 ו-9:00 עד 9:30), או למצוא סידור חלופי (תחבורה חלופית דוגמת אוטובוס או קרפול; העתקת מקום העבודה או המגורים או עבודה מהבית).

אגרה מעלה את המחיר הכספי של הנסיעה, ובכך מדירה חלק מן הנהגים – במיוחד בעלי שכר נמוך ותשואה נמוכה מנסיעה – מן הכביש. בכך זמני הנסיעה מתקצרים בשיווי המשקל החדש. הרווחה של הנהגים מושפעת מן העלות הכספית של הנסיעה; מזמן הנסיעה (ערך קיצור הזמן הוא ביחס לשכר השעתי); ומשינוי בנוחות (מעבר משיא לשפל, או מנהיגה לסידור חלופי, כרוך באי נוחות המכומת במחיר כספי). רווחת הציבור מושפעת משינוי בהכנסות מן האגרה.

## בבסיס המודל

### עומדים הנתונים

### של הסקר החברתי

### בשנים 2017 ו-

### 2018. הנסקרים

### דיווחו על אופן

### ההגעה לעבודה

### העיקרי ואורך זמן

### טיפוסים; נתונים

### כלכליים כמו שכר

### וחלקי משרה;

### ונתונים דמוגרפיים

### כמו גיל ומין

## בעקבות אגרות גודש, הרווחה של הנהגים מושפעת משינוי בעלות הכספית, משך הזמן, והנחות של הנסיעה

חילקנו את כל הנהגים ל-10 קבוצות שוות-גודל לפי גודש ממוצע במסלול המקובל שלהם; קיבצנו יחד את כל האנשים באותה רמת גודש. לגודש בצהריים תכונות שונות מאלו שבבוקר; בפרט, הגודש בערב גולש יותר לשעות השפל. לכן יש סימולציה נפרדת לבוקר ולערב. לכן כל הרצה מכילה למעשה 20 סימולציות: 10 רמות גודש, בוקר וערב.

ההיקף המדויק של ההשפעה מחושב על פי הנחות על העדפות היוממים והנחות על השפעת מספר הנהגים על זמני הנסיעה, כמפורט בפרק המודל. אך קיימת אי ודאות רבה באשר לערך המדויק של מרבית הפרמטרים של המודל. כדי להבטיח שממצאי המודל אינם נשענים יתר על המידה על בחירות שרירותיות של פרמטרים של המודל, אימצנו מנעד של ערכים עבור הפרמטרים. עבור חלק מהפרמטרים מצאנו כי אין הבדל משמעותי, ולכן הוצאנו אותם מהצגת התוצאות, ועבור חלקם גילינו כי השפעתם משמעותית.

### הפרמטרים העיקריים של המודל והשפעתם

**קנה מידה של ערך הנסיעה – גמישות:** ניתן לנבא באופן כללי על פי תכונות היוממים לאילו סיכוי גבוה לבחור בסידור עבודה/מגורים הכרוך בנסיעה במכונית, ולאילו סיכוי נמוך. יש גם סיבות טובות להניח שלסיכוי גבוה לבחור בסידור כזה מתאם צמוד עם ערך שקלי גבוה בממוצע לבחירה זו (במילים אחרות, מן הצורך באגרה גבוהה יחסית לשכנע את הנהג לאמץ סידור חלופי)<sup>29</sup>. אבל לא מצאנו בסיס אמפירי משכנע שיסייע בעדנו לבחור מכפיל מסוים על פני אחר; מצאנו שמנעד רחב יחסית של מכפילים יכולים להתיישר עם הממצאים. לכן נבחרו מכפילים במנעד של כמעט פי שלושה – מ-10 עד 28 – שתואמים גמישות מצרפית בין 0.86 ל-2.3 בערך.

**יחס מהירות קיבולת למהירות שיא/אלפא:** אלפא נותן את היחס של זמן נסיעה בעומס שממצה את קיבולת הכביש לעומת זמן נסיעה בכביש פנוי. אם מסלול דורש 20 דקות באמצע הלילה ו-12 דקות יותר – 32 דקות סך הכול – כאשר יש שיא מעבר התנועה, אזי אלפא הוא 0.6 (12 דקות = 0.6 כפול 20 דקות). אלפא משפיע רק על זמני נסיעה מוחלטים, אך המודל שלנו מתבסס על זמני נסיעה יחסיים למשטר ההתחלתי ולכן אין השפעה על התוצאות משינוי בפרמטר זה.

**המודל מניח  
שלנהגים שלוש  
חלופות: לנהוג  
בשעות השיא  
(בבוקר, בערך  
7:30 עד 8:30),  
לנהוג בשעות  
שפל (6:30 עד  
7:00 ו-9:00 עד  
9:30), או למצוא  
סידור חלופי**

**מקדם הערמת עומס/בטא:** עד כמה תוספת מכוניות מגדילה את זמן הנסיעה כאשר עוברים את מיצוי הקיבולת. כאשר בטא שווה 3, תוספת של 1% כלי רכב מעבר למיצוי מוסיף 3% לתוספת זמן הנסיעה (בדוגמה לעיל, במקום 12 - 12.4 דקות); ואילו כאשר בטא שווה 5, אותה תוספת נפח תוסיף 5% לזמן העודף (12.6 דקות במקום 12). בטא גבוה אומר שבשעות עומס העיכוב גבוה במיוחד ויש יתרון עצום של הורדת העומס לכיוון מיצוי הקיבולת; אגרות הגודש אפקטיביות במיוחד.

**מהירות מרבית:** עד כמה זמן נסיעה מטבי נמוך מהזמן שקיבלנו בגוגל? לרוב הנסיעות ההנחה היא שאם גוגל נותן זמן נסיעה של 20 דקות, בפועל ניתן לנסוע ב-17 דקות. אבל אם נתון זה קרוב יותר ל-1, זה אומר שגם בזמן שפל אנו קרובים למיצוי הכביש והיכולת לשפר את זמני הנסיעה מוגבלת. השיפור ברווחה יהיה נמוך יחסית.

**משך זמן שעות היוממות:** הנתונים שלנו, והמודל שלנו, נועדו לאמוד רק את ההתנהגות של יוממים. לא ברור מאיזו שעה, ועד איזו שעה, עדיין עיקר הנסיעה היא של נוסעים לעבודה יום-יומית. בדרך כלל חישבנו שעות השיא כאורכות שעתיים וחצי (5 משבצות של חצי שעה: יציאה מס 7:00 עד 9:00 בבוקר ו-15:30 עד 17:30 בערב); ואילו שעות השפל עוד שעה וחצי סביב (שלש משבצות של חצי שעה: בבוקר יציאה ב-6:00, 6:30 ו-9:30; בערב יציאה מ-18:00 עד 19:00). בדקנו גם הנחה של עוד משבצת נוספת של יוממות (5:30 בבוקר ו-19:30 בערב, בסך הכול שעתיים). הנחה זו אומרת מצד אחד שקל יותר לעבור משעות שיא לשעות שפל בלי להגדיל את הפקקים, אך מצד שני זה גם אומר שמלכתחילה פחות אנשים סובלים את פקקי השיא. ההשפעה על הרווחה קטנה.

**מחיר הצל עבור נסיעה בשפל:** במודל שלנו, יש אי נוחות מסוימת בנסיעה בשעות שפל. לכן, אף שנסיעה אז מהירה יותר, רוב הנוסעים (בשני שלישים) מעדיפים לנסוע בשעות השיא. עם זאת, יש שונות בין אנשים באשר לאי-נוחות זו. אם בממוצע אי הנוחות שווה ערך ל-10 שקל, יש אנשים שגם עבור 30 שקל לא ישנו את זמן הנסיעה, ויש אנשים שדווקא מעדיפים לצאת מוקדם או מאוחר. הגדלת השונות משמעותה שיש יותר אנשים שנסיעה בשעות השפל מתאימה להם; קל יותר להעביר אנשים משעות העומס. מצד שני, יש גם יותר אנשים שקשה מאוד להעביר אותם. בסופו של דבר ההשפעה על הרווחה התבררה כזניחה.

---

ברוב הריצות מחיר הצל הוא אישי לכל נוסע באופן שחלוקת הנסיעות בין שיא לשפל במשטר ההתחלתי זהה. נוסף על כך, בדקנו מצב שבו מחיר הצל השקלי זהה לכל היוממים (כל אחד מוכן לעבור לשפל עבור  $X$  שקל). במקרה זה שעות השיא מוטות לבעלי שבר נמוך שעבורם סכום שקלי זה משמעותי. בדקנו גם מודל שבו מחיר הצל בזמן זהה לכולם (כל אחד מוכן לעבור לשפל כדי לחסוך  $Y$  דקות). במקרה זה המצב הפוך, השיא משופע לבעלי שבר גבוה. חסכון הזמן בשפל שווה להם פחות והאי-נוחות הכרוכה בו עולה להם יותר.

במודל הרצנו מנעד של ערכים על מנת לקבל את מגוון האפשרויות לערכים אלו ועל מנת לבדוק שהתוצאות העיקריות לא מושפעות מאוד משינוי קטן בפרמטרים.

ואלה הריצות העיקריות המוצגות בפרק זה:

ריצת בסיס ריצה 1: גמישות 1.2;  $\beta=5$ ; מהירות מקסימלית 85% מזמן הנסיעה של גוגל; אורך שעות השיא – שעה וחצי.

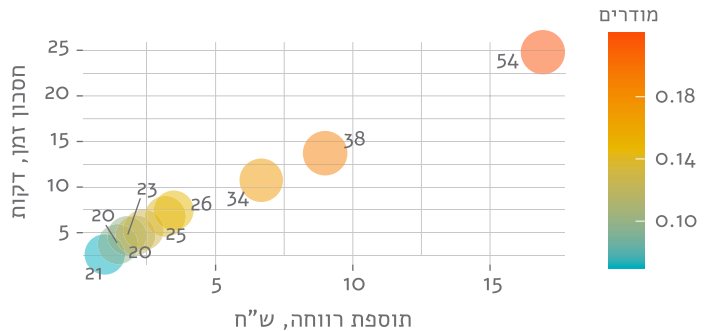
ריצות נוספות: ריצה 2: גמישות גבוהה (2.3). ריצה 3: גמישות נמוכה (0.8). ריצה 4: מהירות מקסימלית איטית יותר (95% מזמן הנסיעה של גוגל, כלומר פחות פוטנציאל לשיפור). ריצה 5: משך זמן יוממות בשפל שעתיים לעומת שעה וחצי. ריצה 6:  $\beta=3$  (תנועה נערמת מהר פחות בגודש). ריצה 7:  $\beta=6$  (תנועה נערמת מהר יותר בגודש). ריצה 8: לא מתחשבים באובדן הכנסה מבלו בחישוב הרווחה.

## אגרות גודש – תמונה כללית של שיווי משקל

התרשים הראשון נותן מבט-על של שיווי המשקל החדש שנוצר לאחר הטלת אגרות גודש פיגוביאניות. כל עיגול מסמן מסלול גודש. התוצאות התקבלו בממוצע על פני הריצות השונות, בחישוב יומי (נסיעה הלוך בבוקר + נסיעה חזור בערב). **שטח העיגולים** מראה שככל שהגודש המקורי גבוה יותר, השכר הממוצע של הנהגים בו עולה. **צבע העיגולים** מראה שבכבישים עמוסים יותר, אגרה מיטבית תפחית יותר את מספר הנהגים בכביש. **מיקום בציר ה-X** מראה שככל שיש יותר עומס, אגרות מסוגלות לתרום יותר לרווחה. התרומה העיקרית נצפית **במיקום בציר ה-Y**: חסכון הדקות לנהגים שנשארים על הכביש. לצד מרבית העיגולים נמצא גובה ממוצע של אגרה יומית, מעבר למס בלו הקיים היום. ככלל, האגרות משרות יותר את הרווחה הציבורית ואת מהירות הנסיעה ככל שהגודש המקורי עולה.

בזמן שיא,  
נהגים עם שכר  
נמוך יורדים  
מהכביש בעקבות  
האגרות. חלקם  
עוברים לנסוע  
בזמני שפל,  
שבהם האגרות  
נמוכות יותר,  
וחלקם יורדים  
מהכביש לגמרי

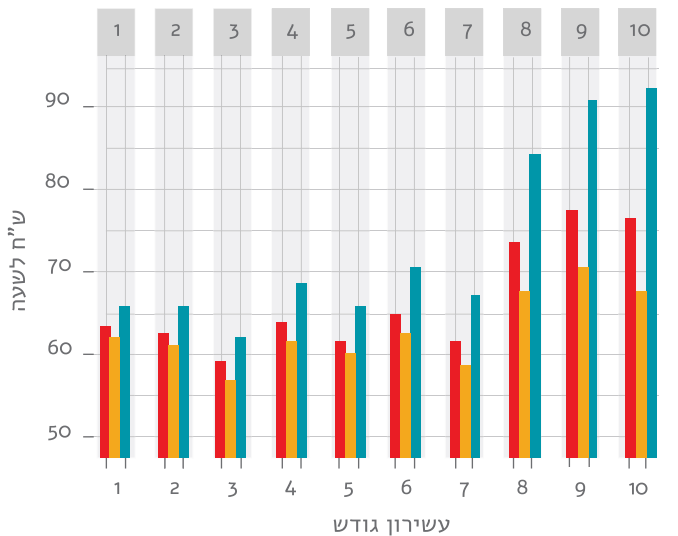
**תרשים 1: ממוצע סימולציות עיקריות, לנהג מקורי ליום**  
**תוספת רווחה (ציר אופקי), חסכון זמן (ציר אנכי), אגרה (סימון) שכר שעתי (שטח עיגול), אחוז מורדים מן הכביש (צבע)**



## אגרות גודש, רווחת הצרכן ואי שוויון

הנושא הראשון שאנחנו מעוניינים לבחון לעומק הוא השפעת אגרות הגודש על נהגים לפי התפלגות שכר ולפי הכנסות משק הבית. אחת הטענות שניתן לטעון כנגד יישום אגרות גודש היא שהמס צפוי להיות גרסיבי, כלומר לפגוע באוכלוסיות החלשות יותר מאשר באוכלוסיות החזקות. על פי טענה זו, אגרות הגודש ידירו מהכביש את בעלי ההכנסות הנמוכות, שכן אלו בעלי ערך נסיעה נמוך יותר וערך זמן נמוך יותר. אמנם הנסיעה בכביש תהיה מהירה וחופשית, אך תיוותר כפרוויילגיה לעשירים בלבד. תרשים 2 מראה כי אכן התפלגות ההכנסות בקרב נהגים משתנה כתוצאה מאגרות הגודש.

**תרשים 2: שכר הנהגים לפני ואחרי אגרה**



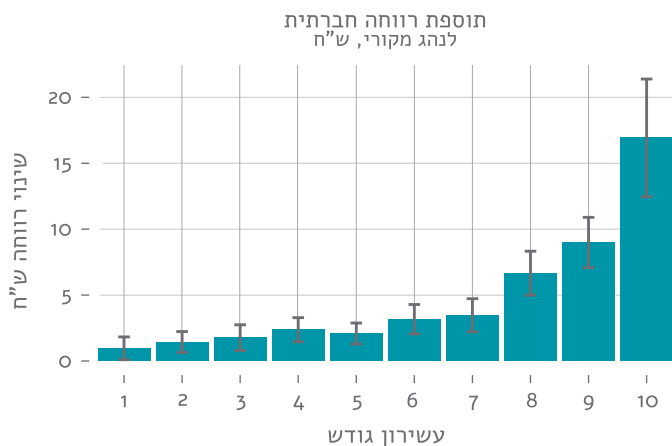
\* ימין אחרי אגרה, שמאל לפני אגרה.

שיא    שפל    משטר מקורי

## יש מנעד ניכר בעקבות שינוי בפרמטרים, אבל אין שינוי בתמונה הגדולה

כפי שניתן לראות בתרשים, המודל מניח ששכר הנוסעים בשיא ובשפל במשטר הקיים שווה. בהינתן הנחה זאת, ניתן לראות כי אגרות הגודש מעלות את השכר הממוצע בזמן שיא ומורידות אותו בזמן שפל. המשמעות היא כי בזמן שיא, נהגים עם שכר נמוך יורדים מהכביש בעקבות האגרות. חלקם עוברים לנסוע בזמני שפל, שבהם האגרות נמוכות יותר, וחלקם יורדים מהכביש לגמרי. בזמן שפל השכר הממוצע יורד בעקבות האגרות מכיוון שנהגים עם שכר נמוך שנהגו טרם האגרה בזמני שיא, עברו בעקבות האגרה לנהוג בזמני שפל. השכר הממוצע עולה, שכן היורדים מן הכביש הם אכן בעלי שכר נמוך.

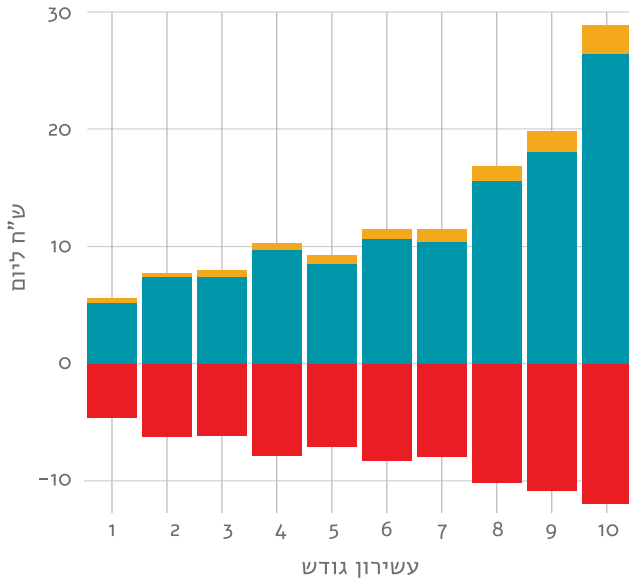
### תרשים 3: מנעד השינוי ברווחה החברתית לפי מסלול



\* קווי המנעד מסמנים סטיית תקן של כלל הסימולציות.

תרשים 3 מציג את ממוצע תוספת הרווחה החברתית לנוסע ליום, עבור עשירוני הגודש. בנוסף הוא מראה את סטיית התקן של הריצות השונות, בעקבות שינוי בפרמטרים. רואים ששינוי בפרמטרים אינו כרוך בשינוי של ממש בתמונה הגדולה. סטיית התקן עבור המסלולים הגדושים היא קרוב לשליש הערך. לכן נראה ששינוי בפרמטרים של המודל אינו מחולל שינוי דרמטי בממצא המרכזי: אגרות גודש חוסכות זמן יקר לנהגים בכבישים עמוסים, אבל ערך חסכון זמן זה הוא במיליארדי שקלים ולא בעשרות מיליארדים. בפרט, סדר הגודל של השינוי הוא כזה שיש עדיין צורך להשוות ערך חיסכון זה עם ערך השחיקה באגלומרציה במונחים של אזור גאוגרפי ושעות העבודה.

#### תרשים 4: מרכיבים של שינוי רווחה

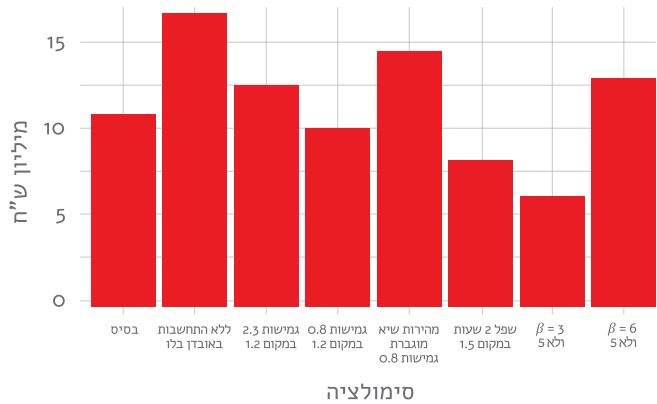


תרשים 4 מציג את המרכיבים השונים בשינוי הרווחה הכוללת, במסלולי הגודש השונים. הגידול ברווחה מורכב משלשה פרמטרים: מס הגודש שנגבה, שתורם לרווחה הכללית; הגידול ברווחת נוסעי האוטובוסים מחמת חסכון הזמן; והשינוי ברווחת נוסעי הרכב הפרטי, שהוא שלישי מכיוון שעלות האגרה עולה על ערך חסכון הזמן. חשוב לציין כי גביית האגרות וחלוקתן מחדש בצורה פרוגרסיבית מאפשרות למתן את ההשפעה של אגרות הגודש על השכבות החלשות.



**הפרמטר בעל  
 ההשפעה הגדולה  
 ביותר על כדאיות  
 של אגרות גודש  
 הוא מקדם הערמת  
 הגודש. כאשר  
 מקדם זה גבוה,  
 העלות החיצונית  
 של כל  
 נהג גבוהה מאוד  
 וההקלה בעקבות  
 האגרות גדולה  
 במיוחד אף היא.**

**תרשים 5: תוספת רווחה ליום**

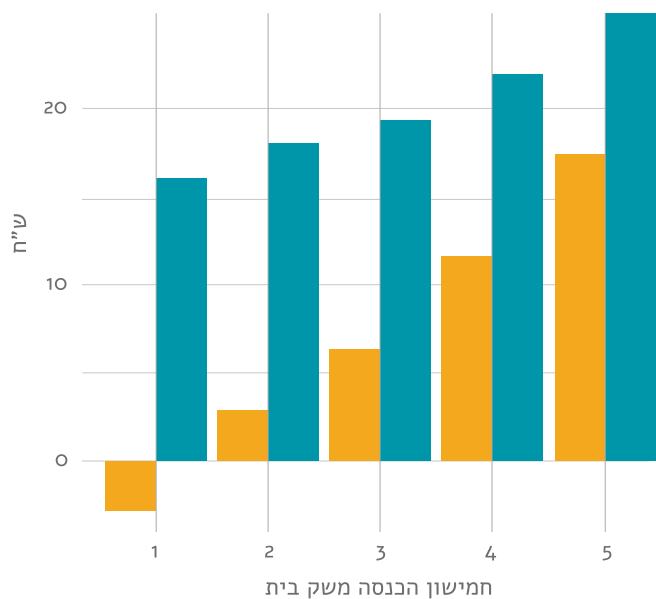


תרשים 5 מראה את סך תוספת הרווחה עבור ערכים שונים של הפרמטרים השונים. כאשר לא מתחשבים באובדן הכנסות מבלו הרווחה גדלה שכן הפסד זה כבר אינו מחושב. כאשר הגמישות גבוהה קל יותר לנוסעים להסתגל ולכן הרווחה גדולה יותר. כאשר מניחים מהירות שיא גבוהה יותר, אזי יש יותר מקום לשיפור והרווחה צומחת יותר. כמו כן כאשר יש יותר שעות שפיל יש מלכתחילה יותר חלופות לנהגים והאגרה תשפיע פחות. כאשר הגודש נערם פחות (בטא נמוך) הגודש פחות מפריע והתועלת של אגרות גודש צנועה יותר בהתאם.

בתרשים 6 ניתן לראות את ערך הנסיעה הממוצע (על פני כל המסלולים, על פני כל השעות, בכל הריצות שנבחרו) ביחס לחמישוני הכנסה. ערך הנסיעה חושב עבור כלל היוממים, וגם עבור כלל הנהגים. ערך הנסיעה עבור הנהגים הוא, במלים אחרות, גובה האגרה שהיה מרתיע את הנהג מנסיעה במכונית ודוחף אותו לחלופה אחרת.

ניתן לראות כי ערך הנסיעה הממוצע עולה כאשר ההכנסה עולה. הסיבה היא, שבעלי שכר גבוה משיגים תוספת שכר הרבה יותר גבוה כאשר מעתיקים את מקום העבודה למקום עתיר עובדים ועתיר שכר. לעומת זאת, הערך הממוצע עבור כלל בעלי ההכנסה הנמוכה ביותר שלילי, שכן מרביתם אכן אינם נוסעים במכונית. רק אותו מיעוט שהתפלגות נורמלית של ערך אישי מרימה אותו מממוצע שלילי ומעל רף האפס בוחר לנהוג.

**תרשים 6: נכונות לשלם עבור נסיעה במכונית**  
 לפי חמישון הכנסה ובחירת אופן נסיעה



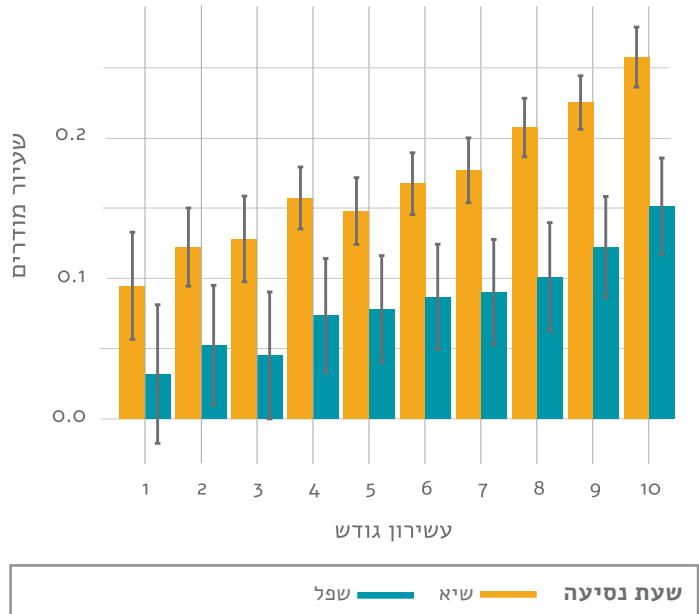
■ בוחרים נהיגה   
 ■ קבוצת יוממים   
 ■ כל יוממים

## אגרות גודש והתנהגות הנהגים

כעת ננתח את השינוי בהתנהגות הנהגים כתוצאה מאגרות הגודש.

בתרשים 7 מוצג הפירוק של מספר הנהגים שירדו מהכביש בזמני שיא ושפל כתגובה לאגרות פיגוביאניות. כצפוי, בזמני שיא מספר גדול יותר של נהגים ירד מהכביש. המספרים מוצגים באחוזים מסך הנהגים המקוריים.

### תרשים 7: שיעור מודרים מחמת אגרה לפי עשירון גודש



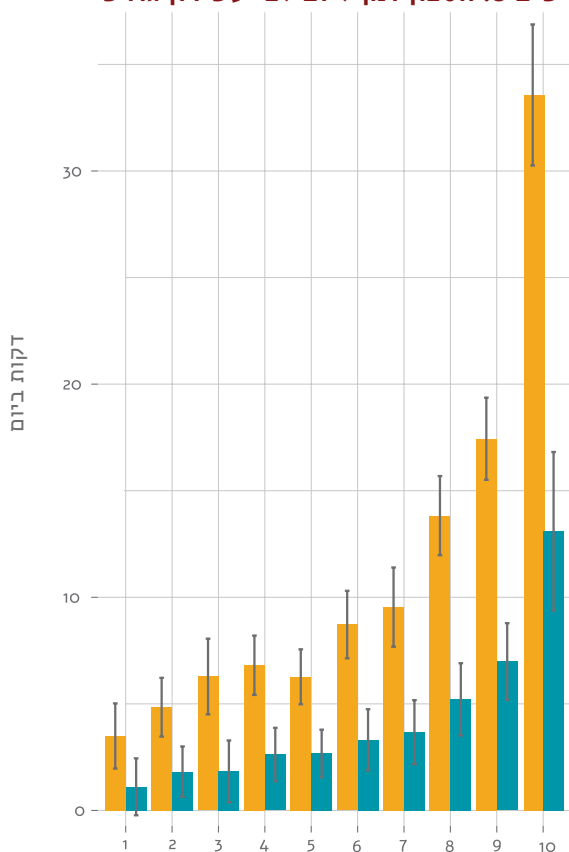
\* קווי המנעד מסמנים סטיית תקן של כלל הסימולציות.

## השינוי במהירות הנסיעה

המודל שלנו  
מנבא שאפילו  
תחת אגרות גודש  
מיטביות, פחות  
מ10% של כוח  
העבודה בישראל  
יראו שיפור של 15  
דקות או יותר ביום  
בזמני הנסיעה

המטרה העיקרית של אגרות גודש פיגוביאניות היא להגדיל את רווחת הנוסעים על ידי הפחתת עלות הזמן בנסיעה והמרתו בעלות כספית. בתרשים 8 ניתן לראות את משך הזמן הממוצע, בדקות, שנחסך עבור נהג ממוצע ליום בכל מסלול. עבור עשירון הגודש בשעות שיא, חיסכון זמן גדול למדי – יותר מחצי שעה ביום. מאידך, מדובר במספר קטן יחסית של אנשים. כל עשירון גודש הוא עשירית העובדים המגיעים לעבודה בעיקר במכונית; חלק נוסעים ממילא בזמן שפל. בנוסף, לא כל הנהגים ייהנו משיפור הזמן; בקבוצות גודש אלו יותר מ20% יאלצו לשנות את הרגלי הנסיעה. בסופו של דבר, המודל שלנו מנבא שאפילו תחת אגרות גודש מיטביות, פחות מ10% של כוח העבודה בישראל יראו שיפור של 15 דקות או יותר ביום בזמני הנסיעה בעקבות שיפור התנועה.

תרשים 8: חסכון זמן ליום לפי עשירון גודש

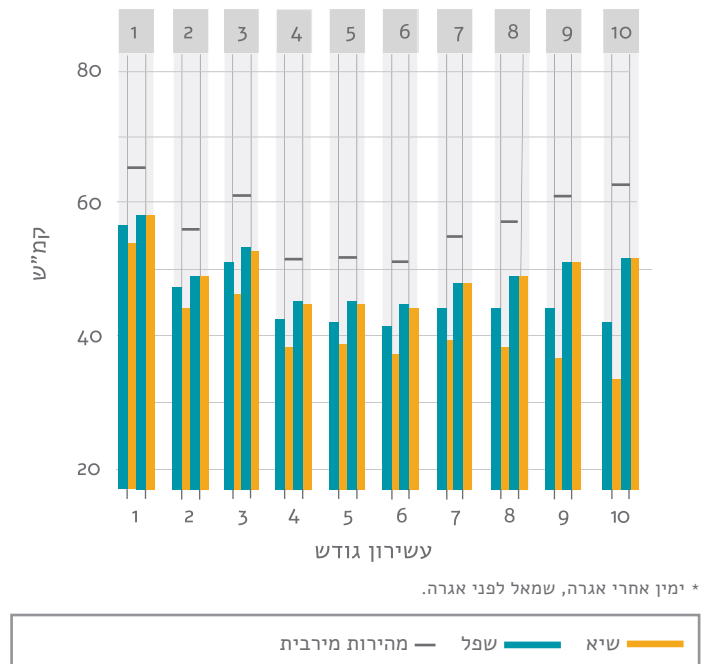


\* קווי המנעד מסמנים סטיית תקן של כלל הסימולציות.

חסכון הזמן שונה מאד בין עשירוני הגודש. בשבעה העשירונים הפקוקים פחות, חסכון הזמן בשיא לא מגיע אפילו ל-10 דקות ביום, כלומר, 5 דקות כל דרך. ואילו בעשירון הגבוה, חסכון הזמן הממוצע מעל חצי שעה כל יום.

בתרשים 9 ניתן לראות את מהירות הנסיעה הממוצעת בקמ"ש בכל מסלול לפני משטר אגרות הגודש ואחריו. מוצגת גם המהירות המקסימלית בכל מסלול כדי לאפשר השוואה נוחה. ניתן לראות כי אגרות גודש מקטינות את הבדלי המהירות בין שעות השיא לשעות השפל משום שהן גורמות לנהגים לשנות את שעת הנסיעה לשעה עמוסה פחות ולהימנע מתשלום אגרות גבוהות.

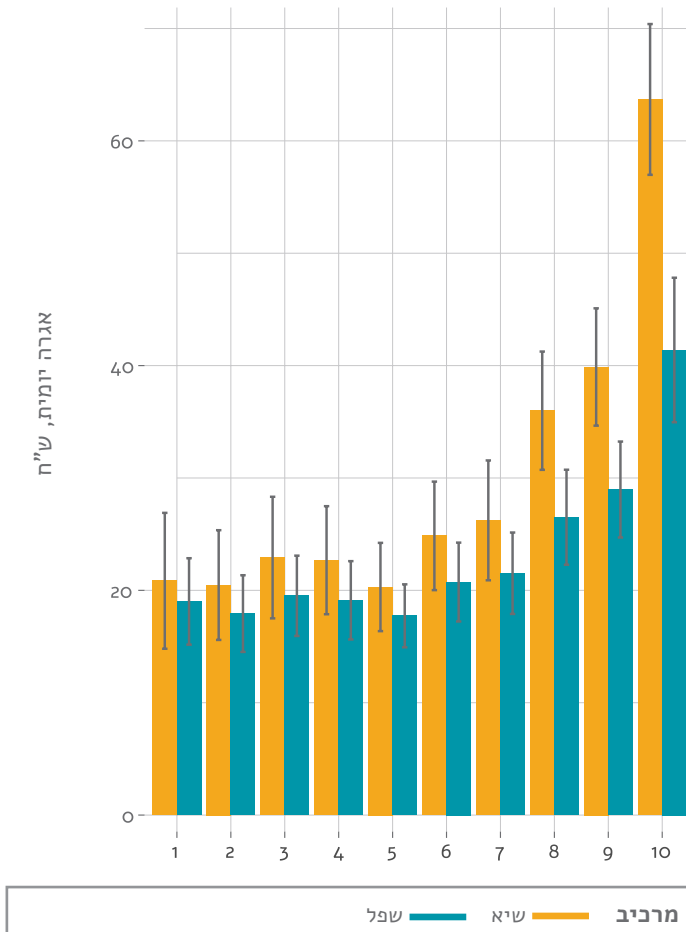
### תרשים 9: השפעת אגרות גודש על מהירות נסיעה



## גובה האגרות הפיגוביאניות

נבחן כעת את גובהן של האגרות הפיגוביאניות המתקבלות במודל. המודל מחשב את גובה האגרות לפי תשלום פר קילומטר, הממקסם את סך הרווחה. בתרשים 10 ניתן לראות את גובה האגרות לפי מסלול וזמני נסיעה. ניתן לראות כי ככל שהמסלול עמוס יותר, גובה האגרות גבוה יותר, וכן האגרות גבוהות יותר בזמני שיא. גובה המס הפיגוביאני הממוצע ליום לנוסע נע בין 20 עד 50 שקלים ליום לנוסע, לשני כיווני הנסיעה ביחד. נשים לב כי אגרות הגודש הן מס שמחליף את מס הבלו הקיים היום שעלותו כ-0.3 שקלים לק"מ. הערך המוצג פה הוא כמה אגרת הגודש עולה על מס הבלו המשולם היום. (לפי חישוב זה, בהחלט תיתכן אגרה שלילית, שמשמעותה שמש הבלו הקיים היום גבוה מן העלות החיצונית של הנסיעה.)<sup>30</sup>

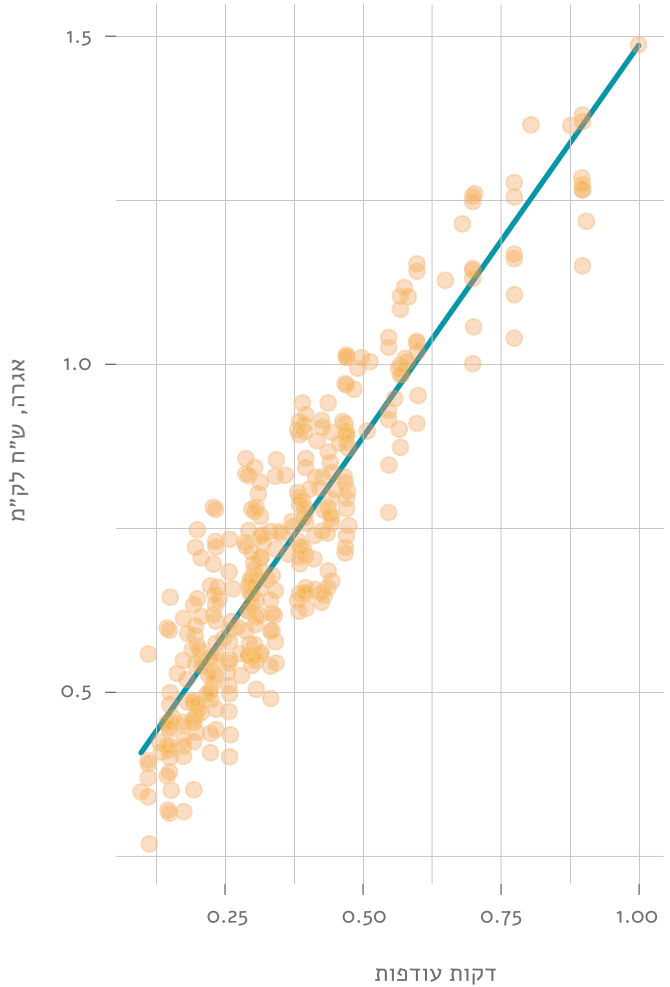
### תרשים 10: אגרה יומית לנהג לפי עשירון גודש וזמן נסיעה



\* קווי המנעד מסמנים סטיית תקן של כלל הסימולציות.

בתרשים 11 ניתן לראות את גובה האגרות במסלולים השונים, בהרצות השונות של המודל, כפונקציה של מספר הדקות העודפות בזמני שיא ושפל. דקות עודפות הן מספר דקות הנסיעה העודפות יחסית לזמן הנסיעה המהיר ביותר. ניתן לראות שבאופן די עקבי, כל דקת עיכוב נוספת מוסיפה כ-1.2 שקל לסכום האגרה.<sup>31</sup>

### תרשים 11: שיעור אגרה לעומת דקות עודפות









# ד. אגרת גודש כמס פיגוביאני שמפנים עלויות חיצוניות

## העלות החיצונית של נהיגה

הניתוח הכלכלי של אגרות תנועה מתחיל מעובדה הנדסאית בסיסית: ככל שיש יותר כלי רכב הנוסעים על כביש מסוים, התנועה עבור כל כלי רכב על הכביש נוטה להיות איטית יותר. כל רכב נוסף גורם עיכוב לכל רכב אחר על הכביש.

לעובדה הנדסאית זו נוסיף עובדה התנהגותית פשוטה: הכמות המבוקשת של נסיעה בקטע כביש כלשהו יורדת ככל שמחיר הנסיעה עולה. כלומר, עקומת הביקוש לנסיעה היא בעלת שיפוע שלילי, כמקובל בכל שוק. המחיר שנהגים משלמים מורכב מעלות כספית (הוצאות רכב, מיסי דלק ואגרות) ומעלות הזמן (עולה ככל שהתנועה איטית יותר).

לכן, אם העלות הכספית של הנסיעה היא אפס, כלומר אין מחיר כספי שולי לנוסע בכביש, מספר הנוסעים יהיה גדול מן המספר היעיל מפני שכל נהג לוקח בחשבון את עלות הפקק כלפיו, אבל לא לוקח בחשבון את עלות הפקק שהוא יוצר עבור נהגים אחרים. לא קיים שוק או מסלקה שמאפשרים לנהגים לשלם כדי להדיר נהגים אחרים מן הכביש, לכן שיווי המשקל בהיעדר מעורבות ציבורית מתאפיין בכמות יתר של תנועה.

אם אין מחיר  
כספי על השימוש  
בכביש, מספר  
הנוסעים יהיה  
גדול מן המספר  
היעיל מפני שכל  
נהג לוקח בחשבון  
את עלות הפקק  
כלפיו, אבל לא  
לוקח בחשבון את  
תרומתו לפקק של  
נהגים אחרים

חיוב כזה מכונה לפעמים "מס פיגוביאני", על שם הכלכלן האנגלי ארתור פיגו, אשר ספרו "כלכלת רווחה" משנת 1920 ייסד למעשה את הניתוח של כלכלת רווחה כפי שהיא נלמדת עד היום. כבר ציינו בפרק סקירות הספרות, שבין היתר, פיגו מביא דוגמה של אגרות גודש, לצד הפרשנות של נייט שמנתח את אותה הסוגיה דרך אספקלריה של מוצר יריבי.

חשוב לציין שמס פיגוביאני הוא אכן מס, ולא מנגנון פיצוי. הוא מס יעיל שמקטין עלויות חיצוניות במקום לייצר אותן, אבל הוא מס. ככלל, מס פיגוביאני פוגע ברווחת הצרכן וברווחת היצרן באותו מוצר או שירות שיצירתו או צריכתו כרוכות בעלות חיצונית. המס מוסיף לרווחת הנפגעים דרך צמצום הנזק, ולרווחת הציבור דרך הכנסות ממסים. סך כל הרווחה הציבורית בהכרח עולה, שכן ההגדרה של מס פיגוביאני היא מס שמשיג את הרווחה הכוללת הגבוהה ביותר. אבל ככלל הצרכן מפסיד, גם אם – כמו במקרה שלנו – הוא גם הנפגע מצריכת היתר. בפועל, מס גודש יצליח להפחית גודש רק אם עלות הנסיעה הכוללת – כסף + זמן – תהיה גבוהה יותר ממה שהייתה טרם הטלת המס. מחיר גבוה יותר לצרכן כרוך בהכרח בפגיעה ברווחה כאשר הגמישות איננה אפס.

מס פיגוביאני פוגע גם ברווחת היצרן; המס מהווה חיץ בין מחיר היצרן למחיר הצרכן, כך שהיצרן מקבל פדיון נמוך יותר עבור כמות מוצעת נמוכה יותר אף היא. שיקול זה נוגע למקרה שלנו, שכן היום לאוצר המדינה כובע של מוכר שירותי כביש, דרך מס הבלו, שדרכו האוצר גובה סכום של קרוב ל-30 אגורות על כל ק"מ נסיעה של רכב בנדין פרטי.

מאזן הרווח וההפסד של כלי הרכב על הכביש אינו אחיד כמובן. כאשר ערך הזמן נמוך ואילו ערך הנסיעה גבוה, האגרה נטו (תוספת כסף בניכוי חסכון ערך הזמן) גבוהה, ואובדן הרווחה גדול אף הוא. עבור נוסעים בעלי ערך זמן גבוה במיוחד, האגרה נטו תהיה שלילית – ערך חסכון הזמן עולה על המחיר הכספי המוגבר. (כעיקרון, תובנה זו מסייגת את האמירה שמס גודש מגדיל בהכרח את עלות הנסיעה, אם כי מבחינה פרקטית כבישי הארץ רחוקים מאוד מהתפלגות נוסעים הכרוכה בתוספת רווחת צרכן ממס גודש). בין המרוויחים הבולטים של משטר אגרות גודש נמצאים הנוסעים באוטובוס. אגרת הגודש לאוטובוס מחולקת במספר הנוסעים ומסתכמת בסכום נמוך; ואילו כל הנוסעים נהנים מחסכון הזמן.

---

יש להדגיש שמס פיגוביאני הוא מושג המוגדר בשיווי משקל חלקי. הוא אינו מתחשב בהשפעה על הרווחה בשיווי משקל כללי. בנידון שלנו, השפעות על שיווי משקל כללי יכולות להיות בעלות משקל. בין היתר, מס גודש צפוי להשפיע על מקומות העבודה והמגורים של אנשים. בקרב אנשים שגרים היום בפאתי המרכז העירוני ועובדים בתוכו, רבים יבחרו לגור ולעבוד במרכז, או לגור ולעבוד בפרברים. מידת האגלומרציה, הן בייצור הן בצריכה, צפויה לרדת. מנגד, צפיפות המגורים צפויה לרדת אף היא. שיווי משקל חלקי גם איננו מתחשב בשינויים בהיצע; סביר להניח שהיקף היצע הכבישים ואמצעי הסעת המונים למיניהם יהיה מושפע ממדיניות התמחור, אבל המודל שלנו אינו מתחשב בכך.

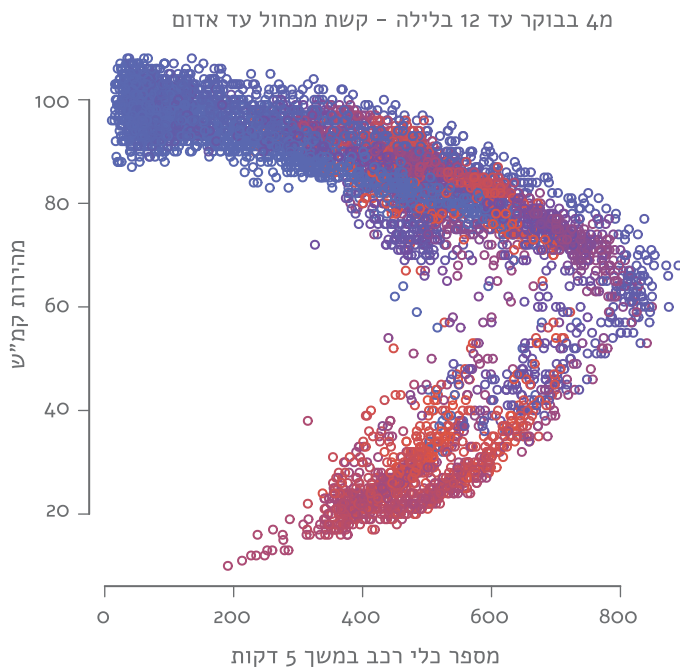
כמו כן לא נחשבו כלל השפעות חיצוניות נוספות דוגמת זיהום אוויר, תאונות דרכים, זמינות של תחבורה ציבורית<sup>32</sup> (לעומת משך זמן הנסיעה שלה), או השפעה בסדר שני על היצע הכבישים.

## נתונים הנדסאים: קיבולת, נפח ומהירות בכביש

עד כה דיברנו על היחס בין מהירות ונפח תנועה באופן כללי. אבל למעשה אפשר למדוד את התמורה הזאת ולתחום אותה. פה נדגים את הדברים באמצעות נתונים שקיבלנו מחברת התחבורה מתת.

חברת מתת אספה מידע מפורט על נפח התנועה ומהירות ממוצעת במספר קטעי כביש במרכז הארץ. המשתנים נמדדים כל 5 דקות סביב השעון לחודש ימים. את חלק מן הממצאים הנגישה החברה לציבור; מן הנתונים שהתפרסמו על קטע הכביש שבין מחלף ארלוזורוב ומחלף השלום יצרנו את התרשים למטה.<sup>33</sup>

### תרשים 12: מהירות ממוצעת וקצב מעבר כלי רכב בשעה קטע הכביש שבין מחלף ארלוזורוב ומחלף השלום מאי 2013



בתרשים שני צירים וקשת צבעים.<sup>34</sup> בציר האופקי מספר כלי רכב בכל חלון זמן (5 דקות). בציר האנכי מהירות ממוצעת. הצבעים הם שעה ביום: נקודות בשעות הקטנות של הלילה הן בצבע כחול, 9 בערב - באדום, וכל יתר השעות בקשת צבעים רציפה.

בחלק העליון של התרשים, במהירות מעל 60 קמ"ש בערך, יש תמורה די רציפה בין תוספת נפח ותוספת זמן: ככל שיש יותר נפח, המהירות יורדת. בהסתכלות אחרת, ככל שמסתפקים במהירות

נמוכה יותר, מצליחים להעביר יותר כלי רכב בכביש. כמעט כל הנקודות הנחולות והסגולות – עד שעות הערב – נמצאות במורד זה. בכביש ריק המהירות 100 קמ"ש בממוצע; ב־200 כלי רכב לחלון זה המהירות יורדת ל־95 קמ"ש בערך; בנפח של 400 כלי רכב ממוצע המהירות קרוב ל־85 קמ"ש, ב־600 – 75 קמ"ש, וב־800 כלי רכב – 60 קמ"ש.

אך לעקומה יש גם כן פלג תחתון, הנראה פרדוקסלי – הן הנפח הן המהירות יורדים. בחלק זה של התרשים מצטייר שמפסידים פעמיים; נוסעים לאט יותר וגם מעבירים פחות כלי רכב. במקום שנפח של 600 כלי רכב כרוך במהירות של כ־75 קמ"ש, נוסעים בממוצע של כ־40 קמ"ש. יש לשים לב גם שכמעט כל הנקודות בחלק זה של התרשים הן בצבע אדום, זאת אומרת, בשעות הערב.

תופעה זו, של נפח ומהירות היורדים בד בבד, מכונה לפעמים "גודש יתר". מצאנו בספרות המקצועית של כלכלני תחבורה ומהנדסי תחבורה שלוש גישות שונות, ולא סותרות, לנקודות אדומות אלו.

- מעבר כלי רכב מתחת לקיבולת הכביש יכול להיות תופעה של קטע כביש מסוים, אבל לרוב אינו מאפיין של רשת כבישים. כאשר ארבעה נתיבים מתנקזים לשני נתיבים, מעבר התנועה בארבעת הנתיבים מוגבל כמובן לקיבולת של שני נתיבים בלבד. לפי גישה זו, הנקודות בחלק התחתון של העקומה מראות נקודות זמן בהן מעבר כלי הרכב בקטע הכביש שבין מחלף ארלוזורוב ומחלף השלום מעוכב בגלל הצורך לעבור הלאה דרך כבישים ונתיבים צרים יותר. לו היינו עושים סקירה של כלל הרשת, היינו רואים שהרשת קרובה לממש את הקיבולת שלה, אם כי במהירות נמוכה מאוד בגלל ריבוי כלי הרכב המחכים כל אחד לתורו לנסוע בכביש. הדבר דומה לצומת עם רמזור. הקיבולת של כל אחד מן הכבישים שנפגשים בצומת גדולה הרבה יותר מן הקיבולת של הצומת עצמו.

- כאשר הצפיפות מגיעה לרמה מסוימת, הקיבולת של הכביש יורדת. בדומה לזרימה טורבולנטית (לא יציבה) במכניקת הזורמים, האינטרקציה של כלי הרכב יוצרת דינמיקה של שימוש לא יעיל בכביש.

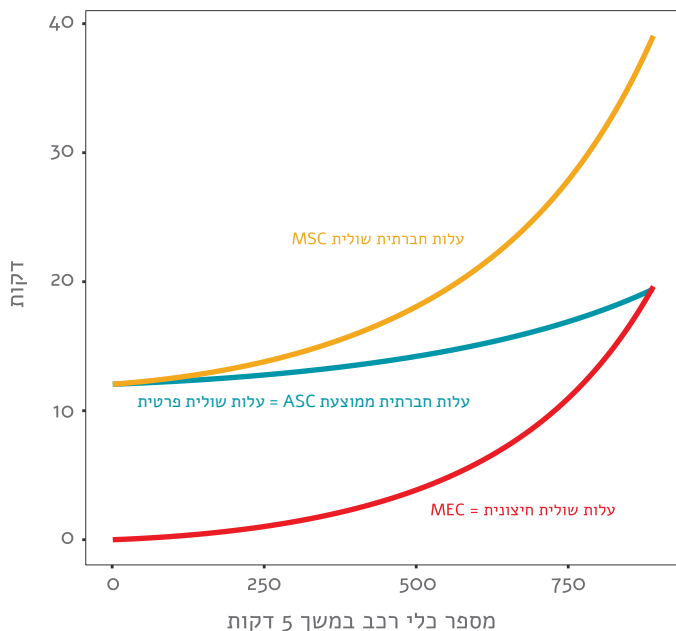
- יש בכביש זעזועי היצע אקראיים: תאונות דרכים, עבודות בכביש, פגעי מזג האוויר וכו'. עיכובים אלו כרוכים בפגיעה זמנית בקיבולת הכביש, אך אינם תלויים ישירות בגודש.

כאמור, הסברים אלו אינם סותרים ויש להניח שלכל אחד התרומה שלו לאותה הצרת הקיבולת שאנו עדים לה. אין אנחנו מומחים בהנדסת תחבורה, אך בעקבות התייעצות עם מספר מומחים הנחנו במודל שההסבר הראשון הוא העיקרי: באופן כללי בכלל רשת התחבורה נשמרת תמורה עקבית בין מהירות ומעבר כלי רכב.

## עלות זמן חיצונית, ממוצעת ושולית לעומת עלות פרטית

הנתונים מחברת מת"ת המוצגים בתרשים 12 מאפשרים לנו גם להמחיש את העלויות הפרטיות והחברתיות בעקבות הגודש, במונחי זמן. בתרשים 13 ניתן לראות את עלות הנסיעה השולית הכוללת, ואת הפירוק שלה לעלות שולית פנימית (שהיא גם העלות הממוצעת) ולעלות שולית חיצונית. נתייחס כאמור רק לחלק העליון של העקומה.

### תרשים 13: עלות ממוצעת ועלות חיצונית שולית עבור נרמול ל-20 ק"מ נסיעה



אם ניישם את נתוני התרשים על קטע כביש של 20 ק"מ (כמעט במדויק נסיעת היוממות הממוצעת בישראל), נראה שבנפח נמוך צולחים את המקטע ב־12 דקות (20 ק"מ ב־100 קמ"ש), ואילו במלוא הקיבולת צולחים אותו ב־20 דקות.

משך זמן זה הוא עלות הזמן הממוצעת, שכן כל כלי הרכב נוסעים באותה המהירות. משך זמן זה הוא גם כל העלות השולית הפרטית; כל נהג ששוקל נסיעה זו מבין שהגעה ליעד בתנאי גודש נתונים כרוכה בנסיעה באורך האופייני. בתרשים עקומה זו מופיעה בבחול.

העלות החברתית הכוללת היא פשוט העלות הממוצעת כפול מספר הנוסעים. כאשר יש נוסע אחד, העלות החברתית היא 12 דקות; כאשר יש 800 נהגים העלות החברתית היא 800 כפול 20 – 16 אלף דקות. העלות החברתית השולית עולה בכל שנעים ימינה משתי סיבות:

1. **תוספת הזמן לכלי רכב עולה.** במעבר מ־200 כלי רכב לפרק זמן ל־400, המהירות יורדת מ־95 קמ"ש ל־85 קמ"ש; משך זמן הנסיעה עולה מ־12.6 דקות ל־14.1 דקות – תוספת של 1.5 דקות. ואילו במעבר מ־600 כלי רכב ל־800, המהירות יורדת מ־75 ל־60 קמ"ש; זמן הנסיעה עולה מ־16 ל־20 דקות – תוספת של 4 דקות. במקרה הראשון התוספת השולית היא 1.5 דקות חלקי 200; ובמקרה השני – 4 דקות חלקי 200.

2. **תוספת הזמן מוטלת על הרבה יותר אנשים.** תוספת 1.5 דקות נופלת על 400 איש; סך כל התוספת – 600 דקות חלקי 200; עלות חברתית שולית של 3 דקות לכלי רכב. ואילו תוספת של 4 דקות נופלת על 800 נהגים; סך כל התוספת 3,200 דקות חלקי 200; עלות חברתית שולית של 16 דקות לכל כלי רכב.

העלות החברתית הממוצעת (average social cost ASC), שהיא גם העלות פרטית השולית, מסומנת בתרשים 13 בבחול. העלות החברתית השולית (marginal social cost MSC) מופיעה בתרשים 13 בצהוב. העקומה האדומה היא העלות החיצונית השולית (marginal external cost MEC).

התנאי של מס פיגוביאני, כלומר מס הממקסם רווחה, הוא מס השווה לעלות חיצונית שולית. בהמחשה זו, המס הפיגוביאני בגודש של 400 כלי רכב לשעה יהיה שווה הערך השקלי של 3 דקות נסיעה (עבור הנוסע השולי); ואילו בגודש של 800 נוסעים המס יהיה שווה ערך ל־16 דקות נסיעה. בהערכות שאימצנו במודל, מדובר בכ־2 שקל. לנסועה של 400, ו־10 שקלים לנסועה של 800.

## תרשימי ביקוש והיצע עם סימון רווחה

כעת נאפיין את שיווי המשקל בעזרת תרשימים. נדגיש שוב שבשלב זה, בוחנים רק את ההשפעה בקרב הנהגים; רק ההשפעה התלויה בגודש; רק בשיווי משקל חלקי; ובמחיר זמן אחיד. בהמשך נפרש את השפעת השוני בהערכת הזמן.

תרשים 15 להלן מאפיין את מרכיבי שיווי המשקל. בתחתית התרשים אנו מוצאים את מרכיבי העלות שאינם תלויים כמעט בגודש. יש עלות השימוש ברכב (זה כולל עלויות קבועות כמו פחת כי אנו מחפשים את שיווי המשקל בטווח הארוך); עלות הזמן הקבועה, דהיינו המהירה ביותר; ומס הבלו. מרכיבים אלו הם עלות פנימית, שכן הנוסע נושא בהם.

אך עלות הנסיעה של כל פרט תלויה במספר הנוסעים. ככל שיש יותר כלי רכב על הכביש, כך כל נהג נתקל בפקק גדול יותר. הואיל והפקק זהה לכל נוסע, ואנו מניחים כעת שעלות הזמן של כל הנוסעים זהה, **העלות הפרטית הממוצעת שווה בדיוק לעלות החברתית הממוצעת**. העלות הממוצעת הכוללת, הפרטית והחברתית כאחד, מיוצגת בעקומה בצבע טורקיז המתנשאת מעל העלויות הקבועות. לעקומה זו שיפוע חיובי שכן ככל שיש יותר נוסעים, העלות לכל נוסע גבוהה יותר.

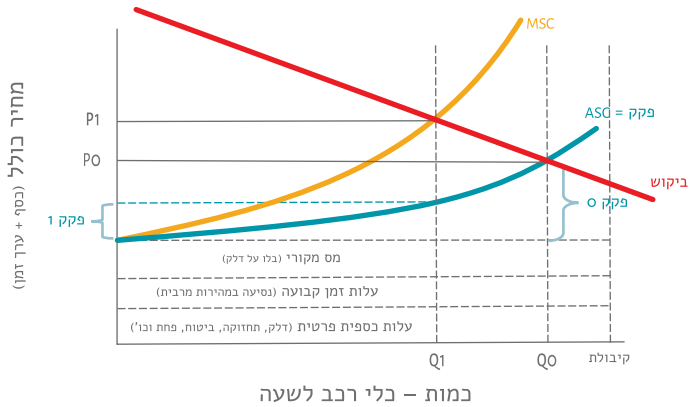
העקומה הצהובה מציגה את העלות החברתית השולית. כל נוסע נוסף מוסיף לסך כל העלות את העלות הפנימית שלו, שזו העקומה הכחולה, אך יש גם תוספת לעלותם של יתר הנוסעים. לכן עקומה זו מתרחקת והולכת מן העלות החברתית הממוצעת, שכן כל נוסע נוסף מוסיף עיכוב הולך וגדל למספר הולך וגדל של נוסעים אחרים.

באדום אנו מוצאים את עקומת הביקוש.

**שיווי משקל תחרותי**, בהיעדר אגרה תלוית-גודש, משמעותו שכל נהג משווה את העלות השולית הפרטית לתועלת השולית הפרטית. העלות הפרטית היא שווה לכולם ולכן היא העלות החברתית הממוצעת בכחול. המפגש בין העקומה הכחולה עם עקומת הביקוש היא נקודת האיזון. המחיר PO, הכמות Q0 והפקק – הפער בין זמן נסיעה מהיר וזמן הפקק – הוא הפקק המסומן 0.



## תרשים 14: אפיון שיווי המשקל

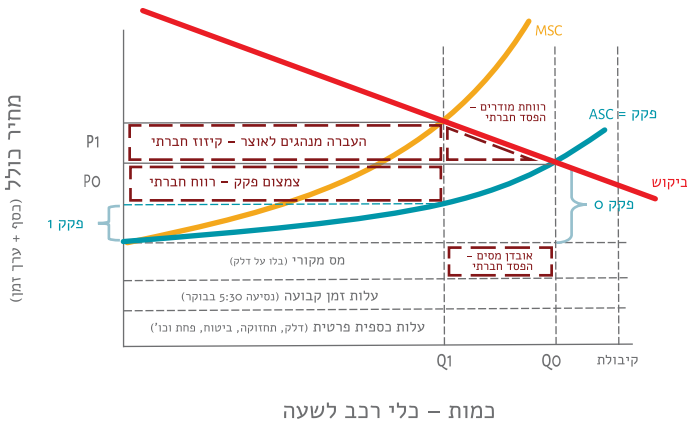


שיווי משקל פיגוביאני משווה את העלות החברתית לתועלת הפרטית. מדובר במפגש בין עקומת MSC הצהובה עם עקומת הביקוש. המחיר,  $P_1$ , גבוה יותר; ממילא הכמות המבוקשת,  $Q_1$ , נמוכה יותר.

הפקק בשיווי משקל זה הוא זה שתואם את הכמות החדשה  $Q_1$ . פקק זה מסומן בצירוף כפקק 1. ברור שרמת הגודש הפיגוביאנית איננה אפס, כפי שבדוגמה הקלאסית של ייצור מזהם, מס פיגוביאני אינו מכלה את כל הזיהום אלא רק משווה את התועלת מתוספת זיהום לעלות החיצונית שלו.

כעת נציג את ההשלכות לרווחה, בתרשים 15.

## תרשים 15: השלכות לרווחה



## רווחה מחיסכון בזמן הנסיעה

עיקר התכלית של המס היא לצמצם את זמן ההמתנה. כל הנהגים שנותרים על הכביש -  $Q_1$  במספר - נהנים ממלוא החיסכון בזמן הנסיעה, ההבדל בין פקק 0 לפקק 1. שטח זה מסומן "צמצום פקק - רווח חברתי".

### העברה מהצרכן לאוצר

המס הפיגוביאני צריך לגשר על הפער בין העלות הפרטית, בכחול, והעלות החברתית, בצהוב. הוא המרחק בין המחיר  $P_1$  ועקומת העלות הממוצעת בכחול. אלא, שהנהגים אינם נושאים בכל העלות; חלק מתקדז בחסכון הזמן. ההפסד ברווחת הצרכן לנהגים הוא רק הפער בין המחיר החדש  $P_1$  לזה הקודם  $P_0$ . אבל תשלום זה אינו הפסד חברתי אלא רק העברה מהצרכן לאוצר. לכן המלבן "העברה מנהגים לאוצר" הוא כאמור "קיזוז חברתי".

### משולש נטל עודף

יש גם אובדן ברווחת הצרכן שאינו מתקדז. כל הנהגים מ-1 עד  $Q_0$  מוצאים שהמחיר החדש הופך את הנסיעה ללא כדאית, והם מוותרים על רווחת הצרכן שלהם לחלוטין. מדובר בצרכנים בצד הימני של עקומת הביקוש, שרווחת הצרכן שלהם הייתה ממילא הנמוכה ביותר. אובדן רווחת הצרכן של היורדים מן הכביש מוצג במשולש "רווחת מודרים - הפסד חברתי".

## אובדן רווחת יצרן

בדרך כלל רווחת אבודה זו מצטיירת כמשולש. לעקומת ההיצע בדרך כלל שיפוע חיובי אופייני, כך שבמחיר שיווי משקל המחיר בקושי הספיק לתמרץ את אחרון המוכרים לייצר, ואובדן הרווחה שלו זניח. ככל שנעים שמאלה בעקומת ההיצע, המרחק בין עלות שולית ובין מחיר מקורי גדל, ואובדן הרווחה גדל אף הוא.

כאשר מדובר ביצרן עם עלות שולית של אפס, אובדן רווחת היצרן יהיה לא משולש אלא ריבוע. לדוגמה, מס על ספרי קינדל יעלה לחברת אמזון (לצד השותפים העסקיים שלה) את מלוא הפדיון האבוד.

מס הבלו על דלק מציב את מדינת ישראל פחות או יותר באותו מצב של מוכרי ספרי קינדל. מס הבלו על דלק מסתכם בקרוב ל-3 שקל לליטר דלק; עבור מכונית שנוסעת עשרה ק"מ לכל ליטר בנזין מדובר בתעריף של 30 אגורות לק"מ. בחישוב אחר, הפדיון של מס בלו הוא כ-21 מיליארד שקל בשנה, ונסועה של כלל כלי הרכב היא כ-63 מיליארד ק"מ. בתמונה הפוליטית הגדולה ברור שקיים מתאם בין כמות הנסועה והתשתית בכבישים, אבל בשיווי משקל פרטי העלות השולית של ק"מ נסועה נוסף כלפי המדינה קרובה לאפס. לכן יש בחישוב הרווחה גם אובדן רווחת היצרן – קרי הכנסה מבלו – בעקבות הטלת מס הגודש.

לכן בתרשים שלנו, כל אובדן מס הבלו בעקבות הנהגים מהווה אובדן רווחת יצרן. מדובר במלבן המסומן "אובדן מסים – הפסד חברתי".

## מס פיגוביאני נמוך ממס בלו

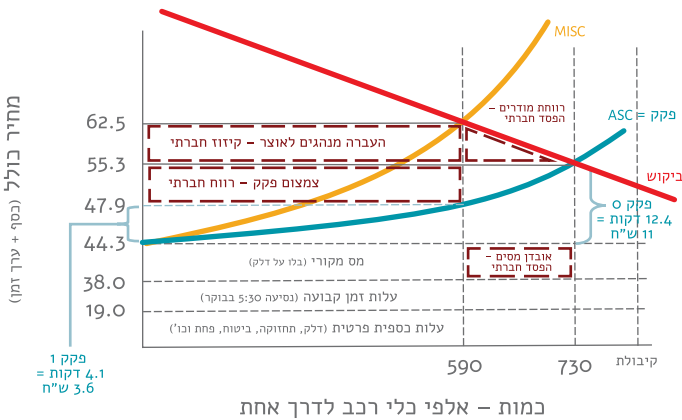
בכבישים שאינם פקוקים מאוד, המס הפיגוביאני יהיה נמוך ממס בלו. במקרה כזה,  $P_1$  יהיה נמוך מ- $P_0$ , ואילו  $Q_1$  יהיה גדול מ- $Q_0$ . הממשלה מרוויחה הכנסות נוספות מבלו על הנהגים החדשים, אך מפסידה על הנהגים הנתורים. יש משולש של תוספת רווחת צרכן לנהגים שנתווספו. אך עדיין בהגדרה יש תוספת רווחה ממעבר למס פיגוביאני.

## הצבת ערכים

לשם המחשה, נציב את הערכים המספריים שקיבלנו במודל, עבור הריצה הבסיסית שלנו, עבור 30% המסלולים הפקוקים ביותר, בממוצע כל שעות היוממות עבור דרך אחת.

תרשים 16 מייצג את הערכים לפי ממוצע השכר, ממוצע הזמן וחסכון הזמן, ממוצע המרחק וכו'. יש אמנם סוגים שונים של הטרוגניות שבגינם התרשים לא נותן סכום מדויק; בהמשך נעמוד על הממדים של ההפרש בסכום. בפרט, גם כאשר חסכון הזמן שווה לכל הנהגים, הערך הכספי שלו, המוצג בציר האנכי, שונה.<sup>35</sup> השכר, ובעקבותיו ערך הזמן, גבוה מן הממוצע עבור הנהגים שמסכימים לשלם את האגרה ונמוך מן הממוצע עבור הנהגים שמעדיפים למצוא סידור חלופי ולא לשלם. בנוסף, חסכון הזמן עצמו גדול יותר עבור הנהגים האמידים יותר, שמלכתחילה מוצאים נסיעה ארוכה יותר ופקוקה יותר כדאית.

תרשים 16: סימולציית בסיס למסלולים עמוסים



ממוצע ק"מ עבור נהגים אלו הוא 21.1 ק"מ, ואנו מעריכים שעלות בספית לק"מ ללא בלו היא 0.9 שקל לק"מ. בכך עלות בספית פרטית היא 19.0 שקל.

ממוצע זמן נסיעה במהירות מרבית הוא 21.4 דקות. ממוצע השכר הוא 76.0 שקל לשעה. אנו מחשבים את ערך הזמן כ-70% של השכר. לכן עלות זמן קבועה היא 19.0 שקל. (הערכה זאת של הערך הכספי של הזמן נדון בהמשך בעמוד 69.)

מס בלו מחושב כ 0.3 שקל לק"מ כפול 21.1 ק"מ. בכך **מס מקורי הינו 6.3 שקל**.

סך כל העלויות הקבועות הוא  $19.0 + 19.0 + 6.3 = 44.3$  שקל.

זמן הנסיעה הממוצע לפני אגרה הוא 33.8 דקות, שהן זמן עודף (על מהירות מרבית) של 12.4 דקות. הערך הכספי של מחיר זמן זה מחושב כ-70% של שכר של 76 שקל לשעה. לכן **פקק 0 הוא 11.0 שקל**.

עלות זאת מתווספת על העלויות הקבועות של המשטר טרום-האגרה. בכך **Po הוא 55.3 שקל**.

כאשר עוברים למשטר האגרות, זמן הנסיעה יורד ל-25.5 דקות, זמן עודף של 4.1 דקות. מכפילים דקות אלו ב-70% של 76 שקל לשעה. יוצא אם כן **פקק 1 הוא 3.6 שקל**.

לכן מתווספת האגרה עצמה, 14.6 שקל. סך העלות הוא עלות קבועה 44.3 שקל ועלות פקק 3.6 שקל ועלות אגרה 14.6 שקל. בכך **P1 הוא 62.5 שקל**.

זמן הנסיעה ירד מ-33.8 שקות ל-25.5 דקות, חסכון של 8.3 דקות. הערך הוא 7.4 שקל.

הגובה של המלבן של ערך חסכון הזמן הוא 7.4 שקל והבסיס 590 אלף נוסעים. **שטח המלבן הוא 4370 אלף שקל**.

העלות המקורית Po 55.3 שקל; העלות בעקבות האגרה – עם מחיר כסף מוגבר ומחיר זמן מוקטן – היא 62.5 שקל. גובה המשולש של אובדן רווחה הוא 7.2 שקל; חצי הגובה 3.6 שקל. כמות מבוקשת במחיר מוגבר זה ירדה ב-140 אלף נהגים. **שטח המשולש של רווחה אבודה הוא 500 אלף שקל**.

140 אלף נהגים ירדו מן הכביש בעקבות האגרה, עם מרחק נסיעה של 21.4 ק"מ עם שיעור בלו של 0.3 שקל. **אובדן רווחת יצרן מבלו מסתכם ב-900 אלף שקל**.

סך שיפור ברווחה חברתית לנהגים:  $4370 - 500 - 900 = 2970$  אלף שקל. זה יוצא 4.1 שקל לנוסע מקורי. (חישוב זה אינו לוקח בחשבון את תוספת הרווחה לנוסעים באוטובוסים ובהסעות, שאינו הנושא של תרשים זה.)

**ללא התחשבות  
בסוגים השונים  
של הטרוגניות של  
הנוסעים, מקבלים  
אומדן רווחה  
נמוך בקצת יותר  
מ-10% מן האומדן  
המתחשב בשוני  
הנהגים בשכר,  
באורך מסלול  
היוממות ובאופי  
המסלול. מדובר  
אמנם בסטייה  
לא מבוטלת, אבל  
בסטייה כזאת  
שתהפוך משטר  
אגרות המצטייר  
לא כדאי בחישוב  
על פי ממוצע  
לכדאי.**

בשיטת התרשים של הממוצעים, התרומה לרווחת הנוסעים במכונית הינה  $4370-500 = 3870$  אלף שקל, או 5.3 שקל לנהג. בפועל הערך של הסימולציה הוא קרוב יותר ל-6.0 שקל. הסיבה העיקרית היא שהמלבן בפועל גדול מן המלבן של הממוצעים, שכן הנהגים שבוחרים לשלם את האגרה אינם ממוצעים. השכר שלהם גבוה בהרבה – 81 שקל במקום 76 שקל. הם גם נוסעים מרחק גדול יותר ובגודש מקורי סמיך יותר.

סיבה נוספת לפער, אם כי משמעותית פחות, היא שמשולש אובדן רווחה גם גדול יותר. לנהגים היורדים מן הכביש שכר נמוך בהרבה מן הממוצע – 55 שקל במקום 76 שקל לשעה. השינוי בעלות הנסיעה הוא תוספת האגרה בניכוי ערך חסכון הזמן. עבור נהגים אלו, ערך חסכון הזמן נמוך ולכן השינוי במחיר גדול יותר, ולכן גם גובה המשולש גדול יותר.

ללא התחשבות בסוגים השונים של הטרוגניות של הנוסעים, מקבלים אומדן רווחה נמוך בקצת יותר מ-10% מן האומדן המתחשב בשוני הנהגים בשכר, באורך מסלול היוממות ובאופי המסלול. מדובר אמנם בסטייה לא מבוטלת, אבל לא בסטייה כזאת שתהפוך משטר אגרות המצטייר לא כדאי בחישוב על פי ממוצע לכדאי. השינוי הוא ניכר אבל אינו "משנה משחק". חישוב זה הוא עבור המסלולים הכי פקוקים; עבור יתר הכבישים, השפעת ההטרוגניות קטנה בהרבה.

## **החשיבות של הטרוגניות בערך הנסיעה ובהערכת הזמן**

פה נרחיב קצת על מקורות השונות בקרב הנהגים, עליה הצבענו בחלק הקודם.

ככלל, לבעלי שכר גבוה יותר תשואה גבוהה הרבה יותר של נסיעה לצורך פרנסה וממילא רווחת צרכן גבוהה יותר מיוממות בכלי רכב. מרובי שכר אלו נוטים הרבה יותר להגיע לעבודה במכונית; אלו שנוסעים נוטים לנסוע יותר זמן מבעלי שכר נמוך יותר; והרבה יותר מן הנסיעה שלהם היא בתנאי גודש. שכר שעתי לנוסעים באזורים של עשירון הגודש הגבוה ביותר גבוה ביותר מ-20% מזה של נוסעים באזורים של עשירון הגודש הנמוך.

## לוח 1 - שיעור נסיעה במכונית לפי שכר

רבעון שכר גבוה	רבעון שכר נמוך	
77%	49%	אחוז נוסעים במכונית
30.9 דקות	22.7 דקות	אורך נסיעה ממוצעת
10.5 דקות	7.4 דקות	נסיעה עודפת על מהירות מרבית

הטרוגניות זו תורמת ליעילות אגרות הגודש בשני אופנים:

- מכיוון שלבעלי שכר נמוך יש בממוצע "ערך נסיעה" נמוך יותר, אובדן הרווחה עבור הנוסע השולי נמוך בהרבה מאובדן הרווחה עבור הנוסע הממוצע.
- מכיוון שלבעלי שכר נמוך יש "ערך זמן" נמוך יותר, הערך השקלי של כל דקה נחסכת גבוה מן הערך השקלי של דקת הנסיעה הממוצעת במשטר המקורי.

מבחינה תיאורטית, בהחלט ניתן לצייר מצב שבו אגרות גודש מגדילות את רווחת הצרכן של הנהגים. אם הפקק נוצר בעיקר על ידי נהגים בעלי ערך נסיעה נמוך מאוד, ואילו כלפי הנהגים שהנסיעה חשובה להם ערך הזמן גבוה, יהיה מצב שבו אגרה נמוכה מפנה את הכביש, בעלות רווחה נמוכה, וערך חסכון הזמן אדיר. אולם בפועל, ההשפעה של הטרוגניות בשכר איננה קיצונית כל כך. מלכתחילה, האנשים שמשתלם להם לעמוד בפקקים בדרך לגוש דן הם אנשים אמידים; ממוצע השכר עבור הנוסעים בכבישים הסואנים ביותר (שני עשירוני הגודש הגבוהים) הוא שקל לשעה, לעומת ממוצע של 62 שקל ליתר המסלולים. מספר זה עולה ל-81 שקל בעקבות האגרה; המשמעות היא שתוספת העלות בפועל אינו 7.2 שקל כפי שמצטייר בתרשים הממוצע, אלא 7.0 שקל "בלבד". ברור שגם עבור הנהגים האמידים יותר, שמוצאים תשלום האגרה כדאי, האגרה מכבידה מאד על עלות הנסיעה.

## ההשפעה של גמישות הביקוש

כאשר עקומת הביקוש קשיחה מאוד, היא תפגוש את עקומת MSC בכמות נסועה קרובה יחסית לרמה המקורית. המס יהיה גבוה מאוד, ואילו ההשפעה על זמן הנסיעה תהיה קטנה. ההשפעה העיקרית תהיה העברת משאבים מנהגים לציבור.

אפשר לומר שבתנאים של גמישות נמוכה מאוד, אגרות הגודש דומות יותר למס רמזי מאשר למס פיגוביאני.<sup>36</sup> ההשפעה על העלות החיצונית נמוכה למדי, אך העלות השולית של כספי הציבור MCPF תהיה נמוכה.

לעומת זאת, כאשר עקומת הביקוש גמישה מאוד, היא פוגשת את עקומת MSC הרבה יותר שמאלה משיווי המשקל המקורי; חסכון הזמן גדול מאוד, אם כי מספר קטן יחסית של נהגים נהנים ממנו. במקרה זה למשולש של רווחה אבודה בסיס גדול מאוד, אך המשולש נמוך.

הארכנו בחלק השני של פרק הממצאים לציין שבפועל, ההשפעה של הגמישות בסימולציה אינה מכריעה. נכון הדבר שכאשר הביקוש לכביש מאד גמיש, אגרה נמוכה יחסית תצליח להקטין את הגודש. לכן המשולש של רווחה אבודה יהיה נמוך, שכן אלו שבוחרים לוותר על נסיעה אינם נפסדים הרבה. אבל אלו גם לא מרוויחים מן השיפור במהירות. עדיין המס מקטין את הבסיס של המלבן של חסכון זמן.

השיקול המכריע בבחירת האגרה היעילה הוא: ככל שמשפרים יותר את מהירות הנסיעה, פחות נהגים ייהנו משיפור זה. שיקול זה נעוץ בתכונות הגודש ולא בהעדפות הנוסעים. במלים אחרות, ככל שהמלבן "צמצום פקק - רווח חברתי" שבתרשים 16 נהיה גבוה יותר (חוסכים יותר זמן), מלבן זה נהיה יותר צר (פחות נהנים) כך שבשלב מסוים המס כבר לא מגדיל את הרווחה.

## רווחה בנוכחות אוטובוסים וכלי רכב רבי-נוסעים

ברור שגם אוטובוסים תורמים לגודש, גם הם יוצרים עלויות חיצוניות ומס גודש צריך לחול גם עליהם. אבל יחס עלות-תועלת עבור נוסעי אוטובוסים שונה מאוד מזה של נהגים. התרומה של אוטובוס לגודש היא בערך כפולה מהתרומה של מכונית; לכן אגרת הגודש הפיגוביאנית עבור אוטובוס תהיה בערך כפולה מזו של מכונית. אך אגרה זו מתחלקת בין נוסעים רבים, לעתים עשרות אנשים. אם לאוטובוס התרומה לגודש כפולה מזו של מכונית אך

השיקול המכריע  
בבחירת האגרה  
היעילה היא: ככל  
שמשפרים יותר את  
מהירות הנסיעה,  
פחות נהגים  
ייהנו משיפור זה.  
שיקול זה נעוץ  
בתכונות הגודש  
ולא בהעדפות  
הנוסעים



---

הוא מכיל פי עשרים מהנוסעים במכונית, כעיקרון האגרה הממוצעת תהיה עשירית מהאגרה של נהג ברכב פרטי, ואילו התרומה לרווחה דומה למדי.

אולם, חשבון זה אינו מדויק מכמה סיבות. תחילה, גילינו שחסכון הזמן של אוטובוס הוא פחות מזה של מכונית. ככל הנראה אוטובוסים אינם מצליחים לנצל לגמרי את הכביש הפנוי; ממילא הוא מבלה זמן רב בעצירות, בהאטה לקראת עצירות, ובהאצה מהן. נוסף על כך, לנוסעים באוטובוסים ערך זמן נמוך יחסית. לכן נוסע באוטובוס חוסך פחות זמן מנהג, והזמן הנחסך שווה פחות. אבל עדיין הרווחה לנוסעים באוטובוסים גדלה באופן משמעותי וחד־משמעי. פירוט נוסף בעיין מופיע בפרק המודל.

חלק מן היוממים מגיעים לעבודה בנסיעה שיתופית, או "קרפול". על פי התכונות של יוממים אלו ועל פי ההשפעה של אגרות הגודש עליהם, הם דומים מאוד לנוסעי אוטובוסים. הם יישאו רק בחלק מעלות האגרה, אך ייהנו ממרבית חסכון הזמן. גם להם עלות קבועה, בזמן ובנחות, שאינה מושפעת משיפור המהירות. גם בשכר הם נראים דומים לנוסעי אוטובוס; עבור יוממים שמדווחים על נסיעה במכונית אך ללא בעלות על מכונית השכר הממוצע הוא 51 שקל, קרוב מאוד לזה של נוסעים באוטובוסים, 49 שקל, ונמוך מאוד ביחס לשכר הנהגים, שהוא כ-70 שקל בממוצע.

בפועל, המודל שלנו אינו מזהה אנשים אלו והם נחשבים נהגים. הדבר בוודאי מעוות את חישוב הרווחה, אבל ככל הנראה העיוות קטן. נדון בנושא זה בהרחבה בפרק המודל.

אם השיפור בשירות האוטובוסים יהיה גדול, המשמעות היא שגמישות הביקוש לנסיעה במכונית תגדל: עלייה קטנה יחסית במחיר הכולל של נסיעה במכונית תהפוך את החלופה של האוטובוס לכדאית. לכן במידה ויש סיבה לחשוב שתהיה מהפכה באיכות שירות האוטובוסים בעקבות האגרה, נכון יהיה להעריך את השינוי ברווחה בערך גמישות גבוה יחסית.

דווקא באוטובוסים מצטיירת היתכנות של התסריט שהזכרנו בחלק הקודם, של רווחת צרכן העולה בעקבות אגרות גודש. כדי להקטין את מספר הנהגים, נדרשת עלייה במחיר בהינתן עקומת הביקוש. אבל אם אגרות גודש עצמן יוצרות חלופות כדאיות למכונית, אזי עקומת הביקוש משתנה בעקבות האגרה, נהיית גמישה יותר, ובכך התרומה לרווחה גדולה יותר והפגיעה ברווחת הצרכן קטנה יותר.

## תרומה לאיכות התכנון

לכבישים עלויות עצומות וגם תועלות עצומות. הקביעה שלכביש כלשהו תשואה חיובית היא קביעה מורכבת, שכן קשה היום לכמת את התועלת לציבור מכביש. בין היתר, משרד התחבורה עושה שימוש בנוהל מגובש, נוהל פר"ת, כדי להעריך פרויקטים של תחבורה, אבל הנוהל אינו יכול להיות טוב יותר מאשר מקורות המידע שעליהם הוא מתבסס.

אגרות גודש עשויות לעזור לכמת את הערך של קיבולת נוספת וגם להוון אותו. הערכה של התרומה של כביש חדש מתמצה בעיקר בהערכה של הנכונות לשלם, ובמקום שיש מידע מדויק על הנכונות לשלם על קיבולת קיימת, קל יותר לאמוד את הנכונות לשלם על קיבולת נוספת.<sup>37</sup>

לכן, בנוכחות משטר נרחב של אגרות גודש התשואה של תשתית כבישים תגדל משתי סיבות: כל כביש שייבנה ינוצל בצורה טובה יותר; ובנוסף, יהיה מידע אמין הרבה יותר לגבי כבישים עם תשואה חיובית.

## סיכום

נייר מדיניות זה מתמקד בעלויות החיצוניות של משך זמן ארוך יותר בנסיעה על כביש עמוס יותר. בהקשר זה, אגרת גודש היא מס פיגוריאני קלאסי. כאשר כל נהג מחויב לשלם סכום כספי השווה לעלות זמן המתנה שהוא גורם לנהגים אחרים, מתקבלים היקף תנועה ומהירות תנועה יעילים. הערך של החיסכון בזמן של הנהגים הנותרים יעלה על אובדן השימוש בכביש של הנהגים שאינם מוכנים לשלם את האגרה, היות שהנהגים העושים שימוש בכביש בעקבות האגרה הם בעלי ההערכה הגבוהה ביותר של הנסיעה ושל זמן הנסיעה.

לצד זה, רווחת הצרכן עבור הנהגים קרוב לוודאי תרד. כדי לצמצם את מספר הנהגים, יש צורך שמס הגודש יעלה יותר מ"מס הזמן" הקיים ללא אגרה. הנהגים הנותרים משלמים מחיר גבוה יותר, לצד נהגים אחרים המפסידים על ידי הדרתם מן הכביש לגמרי.

גם אגרה נמוכה תשפר את היעילות בכביש, ויכולה לתרום תרומה משמעותית. כאשר קיימת חלופה ראויה של אוטובוסים, שמשנעים פי עשרות ממספר הנוסעים ברכב פרטי אך יוצרים רק בערך פי שניים מהגודש, תמונה זו יכולה להשתנות. גמישות הביקוש תהיה גדולה, וממילא תוספת הרווחה הצפויה תגדל אף היא.



# ה. תיאור מפורט של המודל

"מס פיגוביאני" משמעותו מס/סובסידיה שמפנים את העלות או התועלת החיצונית הכרוכה בפעילות כלשהי. קביעת מס פיגוביאני על יצירת גודש בכביש נשענת אפוא על היכולת לכמת את העלות החיצונית הכרוכה בנהיגה. כאשר נהג עולה על הכביש, הנסיעה בו נעשית איטית יותר. במילים אחרות, עלות הזמן עולה. עיכוב זה מהווה עלות חיצונית כלפי יתר הנהגים. תוספת עלות תגרום לחלק מן הנהגים לוותר על נסיעה; כלפי אלו העלות החיצונית היא הפסד רווחת הצרכן משימוש בכביש. כלפי יתר הנהגים, העלות החיצונית היא עצם תוספת הזמן הנדרש לנסיעה.

## "בחירת מצב" לעומת "בחירת חיים"

לפני שניכנס לפרטי המודל, נסביר קצת את הגישה של המודל. כל מודל צריך לבחור אילו היבטים של הסביבה הוא רואה כקבוע, ואילו הוא רואה כתלויי-מדיניות. בהקשר של תחבורה, מודלים קלאסיים כמו זה של "ארבעה שלבים" לוקחים את מקומות המגורים של העובדים ואת מקומות התעסוקה כקבועים. אז המודל שואל, לאור פריסה גאוגרפית נתונה, אילו נסיעות יבחרו העובדים, ובאיזה אופן יבצעו אותן?

בפרסקפטיבה רחבה יותר, נמצאים מודלים שחותרים לבחון את הגורמים לפריסה הזאת עצמה. דוגמה בולטת היא "העיר החד-מרכזית", מודל שפותח בשנות ה-60 על ידי אלונסו, מות' ומילס. מודל זה מקבל את יתרונות האגלומרציה כקבוע, ולאור יתרונות אלו (יתרון השכר לעבודה במרכז עירוני) מנסה לנבא את התפתחות פריסת המגורים.

**יותר מאשר  
יוממים עושים  
'בחירת מצב'  
הם עושים  
'בחירת חיים':  
מקום מגורים,  
מקום עבודה  
(אם בכלל)  
ואופן הנסיעה**

יש גם מודלים התופסים פרספקטיבה רחבה עוד יותר, ומנסים לבחון מה יוצר את אותם יתרונות. ממת המגורים ובתי העסק נגזרת מפת השכר, ואילו ממפה זו נגזרת מפת המגורים ובתי העסק; מה קובע את שיווי המשקל?

לכל אחת מן הגישות תרומה חיונית להבנת השפעות המדיניות על המציאות. אין גם סתירה ביניהן. למשל, אפשר להריץ מודל "ארבעה שלבים" על בסיס פריסה נתונה, ואז לצעוד צעד נוסף ולבדוק את השלכות מסקנות המודל על פריסה זו עצמה. כמו כן, אפשר להריץ סימולציה ברוח של מודל "עיר חד-מרכזית" על בסיס תמונה נתונה של מפת שכר, ואז לבדוק את ההשלכות על המבנה הגאורפי של השכר.

המודל שלנו ממוקם למעשה בין שתי הגישות הראשונות. השאיפה היא לראות את ההשפעה של משטר אגרות גודש על החלטות היוממות של אנשים ברמה של בחירה של כלל דפוסי המגורים והעבודה, בהינתן פערי השכר הקיימים בין האזורים השונים. לכל פרט יש חופש לשנות את מקום המגורים ואת מקום העבודה כתגובה לשינוי המחירים מחמת אגרות גודש; אך לא נבחנת ההשפעה של כלל בחירות אלו על כלל מפת השכר והמגורים בישראל. נותרו במודל גם איפיונים קבועים נוספים: פריטים אינם נכנסים לשוק העבודה או פורשים ממנו, וגם אינם עוברים מאזור גודש אחד למשנהו. על כל אלו נאריך בהמשך.

הסיבה לבחירת רזולוציה זו היא, שבטווח הארוך בחירת אופן היוממות נעשית בו זמנית עם בחירה של מקום המגורים ומקום העבודה. יותר מאשר יוממים עושים "בחירת מצב" הם עושים "בחירת חיים": מקום מגורים, מקום עבודה (אם בכלל) ואופן הנסיעה. כאשר עלות הנסיעה במכונית עולה, למשל בעקבות מס גודש, וגורמת לנהג לשנות את הרגלי היוממות, דבקות במקום המגורים ומקום העבודה תוך כדי שינוי אופן ההגעה אינה מצטיירת לנו הבחירה המצויה בטווח הבינוני והארוך. סביר יותר להניח ששינוי באופן היוממות יהיה מלווה גם בשינוי של מסלול היוממות.

תפיסה זו נגזרת מן התובנה שמאפייני יוממי מכונית ויוממי תחבורה ציבורית שונים למדי. בטבלה למטה יש הערכה גסה של אורך נסיעת יוממות של נוסעים במכונית לעומת נוסעים באוטובוס. אין לנו נתונים מדויקים והמודל שלנו אינו מאפשר דיוק רב, לכן המספרים מעוגלים ל-5 נקודות האחוז הקרוב בלבד.

## לוח 2 – אורך נסיעה במכונית ובאוטובוס

נסיעה מעל 20 ק"מ	נסיעה מעל 12 ק"מ	נסיעת יוממות ממוצעת	
35%	60%	19 ק"מ	מכונית
10%	30%	10 ק"מ	אוטובוס

מקור: עיבוד של זמני ואופני נסיעה של הסקר החברתי ומהירות נסיעה על פי API של גוגל למכוניות ומאגר זמני נסיעה ארצי של אוטובוסים של הסדנה לידע ציבורי.

אחוז קטן יחסית של נוסעים באוטובוס חוצה את ה-12 ק"מ (על פי השיטה שלנו, כ-30%; על פי האתר של מוביט המספר המדויק הוא 32.4%) אך מרבית הנוסעים במכונית עוברים רף זה. אם עולים ל-20 ק"מ, על פי ההערכה שלנו רק אחוז קטן – 10% בקירוב – של נוסעים באוטובוס מגיעים לרף זה, אך יותר משליש הנוסעים במכונית עושים כן.

## מבט-על על המתודולוגיה

פה נציג מבט-על על האלמנטים החיוניים לביצוע חישוב כזה, עם תיאור קצר של האופן שבו אלמנטים באים לידי ביטוי במודל. בהמשך נפרט את פרטי המרכיבים, ואת הנימוקים לבחירתם.

**תמונת מצב עדכנית של הגודש בכבישי ישראל:** מיישומון "מטריצת מרחק" של גוגל קיבלנו משך זמן נסיעה צפוי עבור כ-10000 מסלולי יוממות נפוצים עבור 24 משבצות זמן במשך שעות היוממות בבוקר ובערב.

**אומדן השפעת שינויים במספר הנוסעים על מהירות הנסיעה:** חישובי הגודש היחסי העדכני במשבצות הזמן השונות, ואומדן השפעת שינוי במספר הנוסעים על משך הנסיעה, מתבססים על נוסחת קירוב בשימוש נרחב, נוסחת ה-BPR (סוכנות הכבישים הציבוריים) של ארה"ב. הואיל וההשפעה השולית של נהג נוסף תלויה ברמת הגודש הקיים, קובצו הנהגים לקבוצות של רמות גודש דומות, כאשר העלות החיצונית של נהג נוסף בכל מסלול דומה.

**אומדן השפעת שינויים במחיר הכספי ובמשך זמן הנסיעה על מספר הנהגים:** בסקר החברתי של 2017 ו-2018 יש נתונים על אופן הנסיעה, משך זמן הנסיעה, יישוב מגורים, יישוב עבודה, שבר ומאפיינים אחרים. רגרסיית פרוביט מעניקה הסתברות משוערת לבחירת נסיעה לעבודה במכונית; הסתברות זו מתפרשת כביטוי של הערך הכספי הממוצע של החלופה הזאת של הגעה לעבודה במכונית

כשגרה. כמו כן אנו מניחים שהתפלגות נוסעים בין שעות שיא ושעות שפל נותן ביטוי למוצק של "מחיר נוחות" שקלי לנסיעה בשעות שפל. נוסף על כך, המודל מניח שמחיר נוחות שקלי לזמן נסיעה הוא ביחס ישיר לזמן הנסיעה.

הנחות אלו, לצד מנעד נרחב של ערכים עבור הפרמטרים של היחסים, מאפשרות אומדן של הסיכוי שכל אחד מן הנסקרים בסקר החברתי היה בוחר בחלופת הנהיגה בהינתן מחיר־דרך כולל – בכסף ובזמן – שונה מזה של היום. הן מאפשרות גם כן חישוב ההשפעה של שינויים אלו על רווחת הנוסעים (שינוי בעלות הכספית ובעלות הזמן של נסיעה נתונה, לצד שינוי באופן או בזמן של הנסיעה). כך ניתן לחשב את המס שמעניק את מרב התוספת לרווחת הציבור, ולאפיין את שיווי המשקל הנגזר ממס זה.

## מטרות המודל

מטרת המודל היא לאמוד את גובה המס הפיגוביאני ואת תכונותיו, וכיצד הוא צפוי להשפיע על הרגלי הנוסעים ועל רווחתם. מס פיגוביאני נועד לגרום לנהג להפנים את העלות החיצונית שהוא יוצר בנסיעתו בכביש בעת גודש. במודל כמה מאפיינים.

**שינוי משטר בקנה מידה ארצי:** המודל אינו בוחן שינוי נקודתי בלבד שבו מוטלת אגרה על כביש בודד, אלא בוחן משטר חדש לחלוטין, שבו כל כבישי הארץ מתומחרים בעלות שולית. נהג אינו יכול לברוח ממסלול עם אגרת גודש למסלול אחר עם היעדר מס כזה.

**בטוח הארוך:** המודל נועד לבחון את שיווי המשקל של הטווח הארוך, שבבסיסו הוא דפוס היוממות בכלל האוכלוסייה בישראל בשנים 2017-2018. עובדים אלו בחרו יחד את מקום העבודה, מקום המגורים, ואמצעי התחבורה שמשמש אותם. הניתוח אם כן בוחן את שיווי המשקל החדש שעשוי להיווצר כאשר כל ההחלטות האלו תיעשנה מחדש במשטר של אגרות גודש.

**ליוממים:** מודל בוחן רק את ההשפעה של אגרות גודש על נוסעים בכביש לצורך עבודה מן הבית לעבודה וחזרה. אם התנהגותם של הנוסעים לפנאי, ללימודים וכדו' בשעות העומס שונה שינוי ניכר מזו של נהגים, המודל ייתן אומדן חסר של התועלת מאגרות גודש.

**עקב אגרות גודש,  
מספר הנוסעים  
בכביש במקומות  
ובשעות עמוסים  
יקטן. בעקבות  
זאת, האגלומרציה  
(סמיכות מקום  
של מקומות  
עבודה ושעות  
עבודה) צפויה  
לקטון אף היא**

**בשיווי משקל חלקי:** המודל בוחן שיווי משקל חלקי, כלומר שינויים בדפוס היוממות של נוסעים, כאשר שכר העבודה, עלות המגורים, ההחלטה בדבר רכישת השכלה וכיוצא בזה, נותרים קבועים. עקב אגרות גודש, מספר הנוסעים בכביש במקומות ובשעות עמוסים יקטן. בעקבות זאת, האגלומרציה (סמיכות מקום של מקומות עבודה ושעות עבודה) צפויה לקטון אף היא. אנשים רבים צפויים לבחור לגור קרוב יותר למקום העבודה, או לעבוד קרוב יותר לבית; הן מגורים הן עבודה במקומות דלי-אובלוסיה ודלי-גודש היום ימצאו אטרקטיביים לנוכח מחירי נסיעה גבוהים במרכז הארץ. יותר אנשים יעבדו בשעות לא שגרתיות. לתהליך כזה תיתכן בין היתר השפעה שלילית על פריון העבודה ("החצנות אגלומרציה") והשפעה חיובית על איכות החיים (מגורים בצפיפות פחותה). שוני בעלות הנסיעה ובתועלת שלה ישפיע מן הסתם גם על החלטות של רכישת הון אנושי היות שהתשואה מרכישת השכלה עשויה להשתנות. השפעות אלו לא נבחנו בעבודה זו.

**החצנות שליליות של גודש על עלות הזמן בלבד:** המודל לוקח בחשבון את העלויות החיצוניות הנגרמות מהאטת יוממים כתוצאה מגודש, אך אינו לוקח בחשבון השפעות חיצוניות אחרות, כגון זיהום אוויר, רעש ותאונות דרכים. להשפעה על תאונות דרכים ככל הנראה צורת U: בתחילה תוספת מכוניות מגדילה את הסיכון, אך כאשר ההשפעה על המהירות נהיית מובהקת מספר התאונות הקטלניות יורד.<sup>38</sup> מיסי גודש מסוגלים אם כן להגדיל את הסיכון בנסיעה בכביש, או לחלופין למתן אותו.

**בחירה בינארית של אופן הנסיעה:** ההשפעה על נסיעה במודל נבחנת בצורה בינארית, ביחס לשאלה אם לנהוג במכונית או לא. לא נבחנה ההשפעה על אורך הנסיעה (בעגה המקצועית, נבחן השול האקסטנסיבי, אך לא השול האינטנסיבי). ההשפעה של הטיה זו אינה מונוטונית בהכרח; נסקר שיגיב בפועל לאגרות גודש על ידי שינוי באורך הנסיעה או בתוואי שלה יכול להיות מזהה כלא-משנה התנהגות כלל או כזה שיוורד לגמרי מן הכביש.

## תיאור המודל בפירוט

### זמני נסיעה – תמונת מצב

המודל מייחס לכל נוסע זמן מהירות נסיעה בשיא ובשפל, ומהירות מרבית שהכביש מאפשר. כל הנתונים האלו הוסקו על בסיס נתונים של יישום הניווט של גוגל. התהליך היה כדלהלן:

באמצעות איסוף נתונים במשך חמש שנים של יישוב מגורים ויישוב עבודה בלתי מותממים של סקר כוח אדם, נוצרה מטריצת יוממות של מסלולי היוםמוות הנפוצים ביותר (בסקר כוח אדם לא מדווח אופן ההגעה לעבודה אלא רק יישוב העבודה). נתוני מהירות נסיעה מפורטים נדלו עבור 1,000 המסלולים הבין-עירוניים המאוכלסים ביותר. בפועל באחוז מסוים היה קושי טכני להוציא את הנתונים והמטריצה הסופית הייתה בת 948 זוגות יישוב-מוצא-יישוב-יעד (אזור תעשייה לצורך העניין נחשב יישוב). במסלולים אלו נוסעים בערך קצת יותר ממחצית היוםממים הבין-עירוניים בישראל (עובדים שעבורם יישוב המגורים ויישוב העבודה שונים זה מזה).

עבור כל אחד מ-948 המסלולים נעשתה קריאה ל-Distance Matrix API של גוגל. ליישום זה אפשרות לעשות קריאה בזמן אמת; במקרה זה גוגל משיב השערה של זמן נסיעה למי שנוסע מיידית. אפשר גם לעשות קריאה לזמן עתידי. ההנחה שלנו היא שבמקרה זה גוגל משיב זמן ממוצע של נסיעה עבור הזמן הנתון. ביקשנו זמני נסיעה עבור כל חצי שעה מ-5:30 עד 11:00 (12 משבצות בבוקר) ועבור כל חצי שעה מ-15:30 עד 21:00 (שוב 12 משבצות).

כאשר לא נותנים ל-API כתובת מסוימת, היישום בוחר לעצמו כתובת מסוימת ומזוהה ביישוב המוצא וביישוב היעד. הוא נותן זמן נסיעה משוער לשעה המבוקשת, משך נסיעה "טיפוסית", ומספר קילומטרים עבור המסלול שנבחר. חישוב הזמן ה"מהיר ביותר" מתחיל בקריאה לשעה 2:00 בבוקר. בהמשך, שמנו לב שבמסלולים רבים הזמנים המהירים ביותר של גוגל איטיים הן ביחס לניסיון אישי הן ביחס לזמנים שניתנים על ידי ווייז. הנוסחה שלנו מתבססת בעיקרון על המהירות המרבית האפשרית הנדסאית, ולכן הוכנס תיקון לחשב את מהירות השיא כ-85% של הזמן המהיר ביותר של גוגל.



כדי לפשט הן את החישוב הן את הפרשנות, המודל בנוי על שני זמני נסיעה בלבד, שיא ושפל. לכן היה צורך לכווץ את 24 מהירויות הנסיעה האלו לשלוש: שעות יוממות שיא; שעות יוממות שפל; שעות שאינן בעיקר שעות יוממות. ברור שכל משבצות ה"שיא" צריכות להיות יותר איטיות ממשבצות ה"שפל", שיהיו בתורן איטיות ביחס למשבצות "לא יוממות בעיקר". אבל בנקיבת מספר מדויק של המשבצות השייכות לכל סוגה יש כמובן ממד מסוים של שיפוט. על בסיס הניסיון האישי, מרבית הסימולציות בנויות על 5 משבצות שיא ו־3 משבצות שפל. נעשו גם ריצות עם 4 משבצות שפל כדי לוודא שהמסקנות אינן נשענות הישענות מכרעת על ההחלטה השיפוטית/שרירותית של המסלולים. עלה שבבוקר, יציאה בשיא פירושה 7:00, 7:30, 8:00, 8:30 ו־9:00. שפלי: 6:00, 6:30, 9:30. בחלק מן הריצות משבצת 5:30 נחשבה לשפל. בערב, שעות השיא נחשבו: 15:00, 15:30, 16:00, 16:30 ו־17:00. משבצות השפל הן: 17:30, 18:00, ו־18:30. בחלק מן הריצות 19:00 נחשבת גם משבצת יוממות של שפל, בעיקר כדי לוודא שהתוצאות אינן רגישות לקביעה, השרירותית במידת מה, מתי בדיוק הנסיעה "שיא" ומתי היא "שפל".

השלב הבא היה להציב מהירות נסיעה עבור הנסקרים בסקר החברתי. ההצבה נעשתה על ידי מצרופ ברזולוציה של נפת עבודה ונפת מגורים. הצבה זו נעשתה בשני שלבים. תחילה, כל יומם בסקר החברתי חולק לקבוצה ברזולוציה של נפה-נפה. זאת אומרת, הגודש האופייני עבור כל יומם נחשב הגודש הממוצע עבור אותם מסלולים מקוריים (מבין ה־948) עם אותה נפת מוצא ואותה נפת יעד. נסיעה פנים-עירונית משויכת למסלולים בין-עירוניים בתוך אותה הנפה. למסלולים בודדים לא נמצא מסלול תואם ונבחר ממוצע של נפה סמוכה באותו מחוז. בסופו של דבר, לכל יומם זקפנו מהירות נסיעה ממוצעת – כאחוז של מהירות שיא – המאפיינת את הממוצע של אותם מסלולים מקוריים בעלי נפות מוצא ונפות יעד שבעשירון המהירות המתאימה.

בסוף תהליך ההצבה הזה, משויך כל אחד משמונת אלפי היוממים שבסקר למהירות נסיעה בשיא ובשפל על פי המהירויות הממוצעות של מסלולים דומים להם גאוגרפית.

## קבוצות גודש

מס פיגוביאני צריך להשוות עלות פרטית לעלות חברתית. לשם כך חיוני לדעת מהי תרומת נהג אחד לכלל הגודש בכביש. אך עלות זו שונה במקומות שונים בארץ. בעשירון הגודש הנמוך ביותר, מהירות נסיעה בשיא היא בערך 75% מהמהירות המרבית. ואילו בעשירון הגודש הגבוה ביותר, מהירות הנסיעה בשיא היא בערך 50% מהמהירות המרבית. במקרה השני, העלות השולית החברתית גדולה הרבה יותר. להלן לוח שממחיש את ההבדל:

**לוח 3 - תכונות הגודש בעשירוני גודש 1 ו-10**

עשירון גודש	מהירות כאחוז ממהירות מרבית	צפיפות יחסית לצפיפות עם מעבר מרבי	תוספת זמן נסיעה כולל עבור נהג אחד	תוספת ערך זמן נסיעה כולל עבור נהג אחד
1 (הנמוך ביותר)	75%	89%	18 דקות	9 שקל
10 (הגבוה ביותר)	50%	110%	52 דקות	34 שקל
מהירות מרבית	7.4 דקות	10.5 דקות	7.4 דקות	10.5 דקות

הלוח נעשה על פי ערכי בסיס של הסימולציה; הם שונים עבור ערכים שונים של נוסחת ההמרה, מהירות מרבית וכו'. בפרט, כאשר מקדם הערמת הגודש בטא גדול יותר (5 במקום 3), גם העיכוב בתנאי גודש גדול הרבה יותר.

בכביש ריק, תוספת כלי רכב נוסף כמעט שאינה משנה את משך זמן הנסיעה. אבל כבר ברמת גודש של 90% – רמה המאפיינת את עשירון הגודש הנמוך בקרב היוממים במדגם – העיכוב משמעותי. תוספת של נהג אחד מוסיפה כ-18 דקות לכלל זמן הנסיעה של כלל הנהגים האחרים. (הדבר אינו תלוי במספר הנוסעים בכביש בהינתן רמת הצפיפות). בכבישים הצפופים ביותר התוספת היא כ-50 דקות.<sup>41</sup>

לשם כך, קיבצנו את היוממים לקבוצות בעלות רמות גודש דומות. נעשה הדבר עם 10 קבוצות גודש. לריבוי מספר הקבוצות יש יתרונות וחסרונות, ועל כך נאריך בהמשך. העשירוני חושבו על פי מספר משוקלל של נהגים בפועל בכל מסלול נפה-נפה.

#### לוח 4 - מחוזות יעד מובילים לכל מסלול-על

מחוזות יעד מחוזות יעד השכיחים ביותר בקרב הנוסעים בכל מסלול-על לכל מסלול-על:

מסלול	מחוז יעד ראשון	אחוז	מחוז יעד שני	אחוז
1	צפון	62%	דרום	24%
2	חיפה	41%	מרכז	27%
3	דרום	48%	צפון	31%
4	מרכז	91%	ירושלים	9%
5	חיפה	54%	צפון	39%
6	מרכז	79%	ירושלים	14%
7	ירושלים	63%	מרכז	28%
8	תל אביב	50%	מרכז	38%
9	תל אביב	82%	מרכז	18%
10	תל אביב	92%	מרכז	8%

ניתן לראות שהמסלולים הפקוקים ביותר - כמעט כולם נמצאים בדרך לתל אביב ולמחוז המרכז. במסלולים 9 ו-10 כולם באזורים אלו, ובמסלולים 7 ו-8 כ-90% גם בדרך למחוזות אלו. ואילו כמעט כל המסלולים עם מעט גודש הם במחוז הצפון והדרום.

אפשר להסתכל בכיוון ההפוך - מהי כמות הגודש המצויה עבור יעדים שונים? פה מוצגים מסלולי העל המובילים לפי מחוז עבודה.

#### לוח 5 - מסלולי-על השכיחים ביותר עבור כל מחוז יעד

מחוז עבודה	מסלול ראשון	אחוז	מסלול שני	אחוז
ירושלים	7	74%	6	10%
צפון	5	36%	3	25%
חיפה	5	51%	2	32%
מרכז	6	24%	4	21%
תל אביב	10	40%	9	36%
דרום	1	54%	3	39%
י"ש	1	48%	5	32%

רוב הנוסעים עם מעט גודש הם בצפון, אבל אין זה נכון שרוב נוסעי הצפון נהנים ממעט גודש! מרביתם נמצאים במסלולים 3 ומעלה.

בנוסחת BPR,

התרומה של כל

נוסע לסך זמן

הנסיעה היא

ביחס ישיר לגודל

הפקק עצמה

אנשים שעובדים בדרום וביו"ש חווים רמות נמוכות מאוד של גודש. בצפון ובחיפה הרמות הן מתונות. העובדים בירושלים ובמרכז חווים רמות גודש משמעותיות יותר, ואילו כמעט כל העובדים במחוז תל אביב חווים רמות גודש מהגבוהות ביותר.

## נוסחת BPR

כדי לכמת את העלות החיצונית של נסיעה, חייבים לדעת עד כמה נוסע נוסף מאט את התנועה. כדי לבצע סימולציה אינפורמטיבית נדרשת נוסחה גמישה, שניתן להציב בה מנעד ניכר של פרמטרים כדי להתחשב בשונות בין מסלולים, זמנים ואומדנים של דפוסי הגודש. בסופו של דבר מחפשים טווח סביר, לא נקודה מדויקת, אבל גם לזה נדרשת נוסחה אמינה.

נבחנו נוסחאות שונות ובסופו של דבר הוחלט על הנוסחה של BPR.<sup>39</sup> היתרונות של הנוסחה הם: היא פשוטה; היא נמצאת בשימוש נרחב הן בתיאוריה הן בפרקטיקה; היא מהווה קירוב סביר למדי לנוסחאות מדויקות יותר המבוססות ישירות על מידול של תהליכי יצירת גודש; היא תואמת את ההבנה שלנו באופי "גודש היתר" הנצפה בכבישי ישראל, כפי שתיארנו בפרק התיאוריה.

הנוסחה אומרת מה אחוז התוספת בזמן הנסיעה עבור אחוז נתון של תוספת נפח התנועה ביחס לקיבולת הכביש, כאשר קיבולת זו שוות ערך לקצב מעבר כלי רכב הגבוה ביותר או היעיל ביותר.

הנוסחה המדויקת היא:

$$T = T_0 + T_0 \alpha \left( \frac{V}{C} \right)^\beta$$

כאשר נפח התנועה  $V$  (volume) שווה 0, אזי אין שום גודש ואין עיכוב; משך זמן הנסיעה  $T$  (time) שווה לזמן נסיעה בתנאי זרימה חופשית  $T_0$ . ככל שהנפח עולה, זמן הנסיעה עולה; זמן הנסיעה עולה כפי הנפח לחזקת  $\beta$ .  $\beta$  הוא מקדם של צבירת עיכוב; ככל שהוא גבוה יותר, תוספת כלי רכב יוצרת עיכוב גדול יותר. כאשר הנפח שווה לקיבולת  $C$  (capacity) אזי משך זמן הנסיעה הוא  $\alpha + 1$  כפול זמן מינימאלי  $T_0$ .

הזכרנו בפתיחת המאמר שהתרומה של כל נהג לגודש גדל עם מספר הנהגים לשתי סיבות: תוספת הזמן עצמה גדולה יותר, ותוספת זאת מוכפלת במספר רב יותר של נהגים. נוסחת BPR נותנת ביטוי לתכונות אלו. נגזרת תוספת הזמן ביחס לנפח  $V$  היא מכפיל של  $V^{\beta-1}$ . מכיוון  $\beta$  גדול מאוד (מנעד הערכים הוא בין 3 ל-6), נגזרת

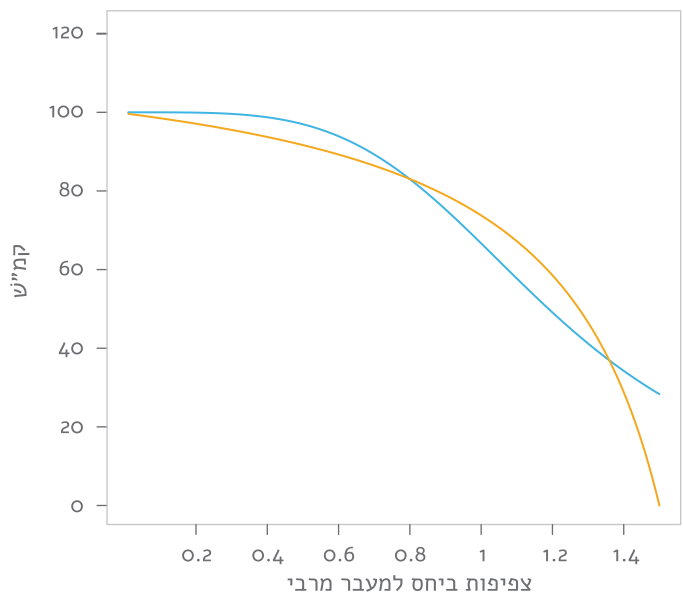
זאת גדלה עם  $V$ . ואילו תוספת זמן הנסיעה עבור כל הנהגים הוא תוספת הזמן כפול מספר הנהגים, זאת אומרת  $V$ , מספר אשר גדל עוד יותר מהר ביחס ל- $V$ . בפועל, התרומה לסך זמן הנסיעה היא ביחס ישיר לגודל הפקק עצמו, שכן לשניהם אותה תלות ב- $V$ .

לדוגמה, נסיעה מאשדוד לתל אביב ב-2:00 לפנות בוקר נמשכת 33 דקות, לפי גוגל. לאחר הפחתת 15% מזמן הנסיעה, כפי שהוסבר לעיל, מתקבלת מהירות השיא ההנדסאית – 28 דקות ( $T_0$ ). כאשר הנפח מגיע בדיוק לקיבולת  $C$ , התוספת תהיה  $\alpha$  כפול 28; כאשר  $\alpha$  שווה 0.6, מדובר ב-17 דקות, וזמן הנסיעה יהיה 45 דקות. בפועל זה אכן זמן הנסיעה בשעה 8:00 בבוקר.

הפרמטר  $\beta$  מתאר איך זמן הנסיעה עולה מ-28 ל-45 דקות, ויותר, כאשר הנפח נערם. ההשפעה של בטא חשובה במיוחד כאשר הנפח  $V$  עולה על הקיבולת  $C$  – תכונה שחווים מרבית היוממים במכונית באזור המרכז בשעות השיא.

נשווה נוסחה זו עם מודל תורי פשוט. משוואת ון־אירד ליחס נפח-מהירות היא משוואה עשירה יותר, עם תיקוף אמפירי מדויק יותר, וגם מבוססת תיאורטית באופן מדויק על תהליך תורי המאפיין היטב את התנועה של כלי רכב על הכביש.  $40^\circ$  בתרשים 17, עקומת BPR בכחול, ואילו עקומת ון־אירד בצהוב. בשני המקרים מדובר בנוסחאות, פונקציות, כאשר נבחרו הפרמטרים כדי ליצור קירוב ככל האפשר בין העקומות.

**תרשים 17: משוואת BPR (כחול) לעומת ואן ארדה (צהוב)**



רואים שעד קיבולת מלאה (ציפוף 1) העקומות קרובות למדי. ברמות ציפוף גדולות יותר ההבדל ניכר. עקומת ון־אירד יורדת למהירות אפס; שכן בשיווי משקל, כאשר קצב כניסת כלי הרכב יעלה על הקיבולת המרבית של הכביש, התור יהיה אין־סופי. ואילו עקומת BPR אינה מגיעה לעולם למהירות אפס. הערכים של ה־BPR ברמות צפיפות גבוהות תואמים היטב את ההנחה שכאשר יש הרבה כלי רכב, הם למעשה נאלצים לעמוד בתור כדי לנסוע בכביש במהירות סבירה.

כפי שהסברנו בפרק התיאוריה, לדעתנו זו הנחה סבירה יותר למידול גלי הגודש במשך היום. נראה שלרוב הגודש עולה על הקיבולת בעיקר בשעות השיא ולא מעבר. בפרק התיאוריה נמצאת הרחבה על דרכי התמודדות שונות עם תופעת נפח העולה על הקיבולת, ולמה נחשבה גישה זו המתאימה ביותר למודל זה.

לנוסחה יתרון נוסף וחשוב להיבט החישובי של המודל. הן נוסחת נפח-מהירות הן נוסחת מהירות-נפח הן נוסחאות פשוטות וקלות לחישוב.

יש לשים לב למגבלות אחדות לשימוש בנוסחת BPR:

- הנוסחה נועדה לשמש קירוב של יחס נפח-מהירות עבור קטע כביש נתון. ואילו במודל שלנו נעשה שימוש בנוסחה כמודל של מסלול שלם. אם השוני בין קטע כביש ומסלול הוא רק בגובה הפרמטרים, אזי הכיול שעשינו עשוי להיות משביע רצון. אך אם מדובר בשוני באופי התגובה, ייתכן שלא ניתן לקבל קירוב טוב על ידי נוסחה זו.
- ככל שיש לנו אומדן לקוי של הפרמטרים, אומדני הרווחה שלנו יהיו לקויים אף הם. אם בטא גדול מן ההשערות שלנו, השפעת אגרות הגודש תהיה גדולה ממה ששיערנו; וכן להפך.
- נוסחת BPR אינה מתחשבת בתופעות אקראיות דוגמת תאונות דרכים, עבודות בכביש ופגעי מזג האוויר. ככל שתופעות אלו מהוות חלק משמעותי יותר של העיכובים בכביש, אומדני הרווחה שלנו יהיו גדולים מן המוצדק, שכן עיכובים מסוג זה אינם מגיבים לשינויים בנפח התנועה באותה המידה של צפיפות בכביש לבד.
- כפי שצינו לעיל, הנוסחה גם אינה מתחשבת בתופעת "גודש היתר" במובן של גודש שלא רק מחלק את קיבולת הכביש בין

כלי רכב רבים, אלא גם מוריד בפועל את הקיבולת על ידי יצירת דפוסי תנועה דביקים. ככל שתופעה זו מובהקת יותר, האומדנים שלנו של השפעת אגרות גודש יהיו חסרים, שכן במודל שלנו אגרות הגודש משפיעות רק על ניצול הקיבולת ואילו בנוכחות "גודש יתר" הגבלת התנועה תשפיע על הקיבולת עצמה.

## מודל בחירה

במדגם שלנו יש כשמונת אלפים יוממים. כל אחד מדווח על אופן היוממות הטיפוסי ועל משך הזמן הטיפוסי, ובנוסף יש לנו שלל נתונים על היוםם: מין, גיל, השכלה, שכר, הכנסת משק בית ועוד.

אנו מעוניינים לאמוד עד כמה שינוי נתון במחיר הנסיעה ישפיע בשיווי משקל על הרגלי הנסיעה. אגרות גודש מגדילות ישירות את העלות הכספית של הנסיעה; אולם הן גם מקטינות את הכמות המבוקשת ובכך מקטינות את עלות הזמן.

כעיקרון, ניתן לאמוד השפעה על בחירה בינארית מסוג זה במודל לוגיט או פרוביט. מודל כזה מודד עד כמה שינוי במשתנה בלתי תלוי, דוגמת הכנסה או השכלה, משפיע על ההסתברות לבחירת נסיעה במכונית וממילא לסך כל הכמות המבוקשת. לו הייתה שונות ניכרת, ונמדדת, במחיר הנסיעה בין הנסקרים, היה ניתן לאמוד ישירות את השפעת מחיר זה על ההסתברות של בחירת מכונית, דרך מקדם רגרסיה. ממילא ניתן היה ללמוד כמה תוספת למחיר זה, באמצעות תוספת אגרה וחסכון זמן, עשויה להשפיע על הבחירה.<sup>41</sup>

אולם נתונים אלו אינם בנמצא. הנתונים הזמינים מאפשרים לנו לאמוד למשל את גמישות הביקוש ביחס להכנסה, אבל לא ביחס למחיר.

עם זאת, מסתבר שעדיין שיטת הפרוביט יכולה לזרות אור על השאלה שלנו. אחת הפרשנויות של רגרסיית פרוביט היא פרשנות "המשתנה החבוי". פרשנות זו גורסת שההכרעה הבינארית של המשתנה התלוי היא ביטוי של היות משתנה רציף, פונקציה ליניארית של המשתנים הבלתי תלויים בתוספת אבר שגיאה אקראית, גדול או קטן מאפס.

פרשנות זו תואמת היטב את התפיסה הכלכלית שלנו. באופן כללי, התועלת מנסיעה לעבודה היא האפשרות לקבל שכר גבוה יותר ו/או ליהנות ממגורים איכותיים יותר, שכן דיור בקרבת מרכזי תעסוקה לרוב יקר ביחס לדיור הנמצא במרחק. תועלות אלו נגזרות במידה רבה ממשתנים שנמנים בין המשתנים הבלתי תלויים ברגרסיה

שלנו: שבר, השכלה, תעסוקה של בן הזוג, מין. לנסיעה למרחק יש גם עלות, שלרוב גבוהה מזו של נסיעה טיפוסית, וקצרה יחסית, בתחבורה ציבורית. רווחת הצרכן היא התועלת (נכונות לשלם) בניכוי המחיר; בסופו של דבר מצטייר מתאם ניכר בין רווחת הצרכן מנסיעה במכונית דווקא, והמשתנים ברגרסיה. נבחרת נסיעה במכונית אם, ורק אם, הרווחה הנקייה מכך גדולה מאפס.<sup>42</sup>

נניח שאכן "רווחת הצרכן" היא פונקציה ליניארית של המשתנים הבלתי תלויים שלנו:

$$CS_i = X_i^T \beta + \varepsilon_i, \varepsilon_i \sim N(0, SD) \text{ for each } i$$

$X_i$  הוא הווקטור של המשתנים הבלתי תלויים. הנסקר בוחר כמובן לנסוע במכונית אם רווחת הצרכן שלו עולה על אפס. בתנאים אלו, אומדן של פרוביט ייתן אומדן יעיל של המקדמים  $\beta$ . הפרוביט במקרה זה ינרמל את ה- $SD$  של אברי השגיאה ל-1 וייתן לרווחת הצרכן קנה מידה מתאים. הערך המותאם של הרגרסיה במקרה זה, המתבטא בצורה של הסתברות, יהיה פונקציית ההתפלגות של הערך של המשתנה החבוי  $CS$ . בכך, ניתן לשחזר את הערכים החזויים של ה- $CS$  (ללא אבר השגיאה) על ידי פונקציית השברון (quantile function).

ברגע שיודעים את קנה המידה שמודד את רווחת הצרכן בשקלים, פשוט לבחון את ההשפעה של שינוי במחיר. שינוי במחיר הנסיעה יקטין את הערך של המשתנה החבוי ישירות, וכאשר מיישמים את פונקציית ההתפלגות מקבלים ישירות את ההסתברות החדשה.

במילים אחרות, המודל שלנו אינו מתייחס לאמידת המקדמים ברגרסיית הפרוביט, אלא במציאת אומדן לעודף הצרכן, שהוא המשתנה החבוי ברגרסייה. האומדן של הממוצע של משתנה זה, ללא האבר האקראי, הוא פונקציית השברון של ההסתברות החזויה לבחירת מכונית. בהינתן סט של ערכים עבור המשתנים המסבירים, כמו הכנסה, מין גיל וכו', נקבל את הניקוד (score) של כל נסקר. כאשר הניקוד, בתוספת אבר אקראי המתפלג נורמלית סטנדרטית, גבוה מ-0, המשמעות היא כי הנסקר יבחר לנהוג לעבודתו ברכבו הפרטי. לכן, אם היינו יודעים לזהות את יחס ההמרה בין הניקוד לשקלים, היינו יכולים לחשב עבור כל צרכן את התפלגות עודף הצרכן כתוצאה מהנסיעה, או במילים אחרות את פונקציית הביקוש לנסיעות. לאחר מכן, הדרך לאמידת השינוי בהתנהגות הנהגים כתוצאה מאגרות גודש קצרה. כל שעלינו לעשות הוא לשנות בהתאם את עלות הנסיעה בכסף ובזמן.



**מבחינה נומרית,  
המודל שלנו  
נשען על סדרה  
של הנחות שאינן  
מובנות מאליהן.  
בפועל, הרגרסיה  
משמשת בעיקר  
לדרג את הנסקרים;  
התוצאות נשענות  
בעיקר על בחירת  
קנה המידה  
ועל ערך הזמן  
של היוממים.**

מבחינה נומרית, המודל שלנו נשען על סדרה של הנחות שאינן מובנות מאליהן: רווחת הצרכן הממוצעת בטווח הארוך היא פונקציה ליניארית של המשתנים הבלתי תלויים; רווחת הצרכן בפועל מתפלגת נורמלית סביב ממוצע זה; השונות זהה לכל היוממים (הומוסקדסטיות). בפועל, הרגרסיה משמשת בעיקר לדרג את הנסקרים; התוצאות נשענות בעיקר על בחירת קנה המידה ועל ערך הזמן של היוממים. אם הרגרסיה מייחסת לנסקר א ניקוד 0.5 ואילו לנסקר ב ניקוד 1.0, אין כמעט משמעות בסימולציה לכך שרווחת הצרכן של ב כפולה בדיוק מזו של א. המשמעות העיקרית היא שערך הנסיעה של א נמוך בממוצע מזה של ב, ולכן בנוכחות אגרות גודש ההשפעה על ההתנהגות של א תהיה גדולה מזו של ב. המודל רגיש בעיקר לגודל קנה המידה ולמידת ההטרוגניות של הנהגים. עשינו ריצות שבהן בקנו מכפילים לא אחידים של הערך של המשתנה החבוי, וההשפעה על תוצאות הסימולציה נמצאה זניחה, כל זמן שהסדר נשמר.

## **הטרוגניות הנוסעים בתגובתם לאגרות גודש ובהפסד הרווחה**

דירוג הנהגים לפי מידת הנכונות לשלם עבור הנסיעה נותן צוהר חיוני לשוני בין נסקרים בתגובה לאגרות גודש. התגובה לאגרה נתונה גדולה הרבה יותר בקרב מעטי שכר, וזה כתוצאה משלוש סיבות:

1. ההשפעה של שינוי אחיד בגודל הערך החבוי על ההסתברות גדולה יותר ככל שערך הניקוד נמוך יותר. לדוגמה:

$$CDF(1)-CDF(0.9) = 0.025 \text{ ואילו } CDF(0.1)-CDF(0) = 0.04$$

כלומר, אותה עלות או "אגרה" במונחי המשתנה החבוי משנה את הסיכוי לבחור במכונית ב-4% עבור בעלי הסתברות נמוכה, אבל רק ב-2.5% עבור בעלי הסתברות גבוהה.

ולמעוטי שכר סיכוי נמוך הרבה יותר לבחור נסיעה במכונית וממילא ערך המשתנה החבוי שלהם נמוך יותר.

2. גמישות נמדדת באחוז השינוי במחיר. העלות של הנסיעה כוללת עלות הזמן. למעוטי שכר הערך המהוון של הזמן נמוך ביחס לבעלי שכר גבוה ולכן גם לו הייתה התגובה לערך שקלי נתון זהה לבעלי שכר גבוה ונמוך, עדיין הגמישות הייתה גבוהה יותר עבור בעל השכר הנמוך.

## חלק ניכר של תוספת הרווחה מאגרות גודש אינו נובע משינוי במספר הנהגים אלא גם משינוי בתמהיל הנהגים

3. אגרות הגודש מגדילות את עלות הכסף ומקטינות את עלות הזמן. לבעלי שכר נמוך, ערך הזמן הנמוך גורם לכך שהקיזוז של ערך הזמן קטן. עבור בעלי שכר גבוה הקיזוז גבוה ולפעמים גבוה מ־ס. במודל שלנו יש אחוז מסוים של בעלי שכר גבוה שמצטרפים למעגל הנהגים בעקבות אגרות גודש.

לסיכום: לבעלי שכר גבוה העלות השקלית המלאה (בחישוב עלות הזמן) של אגרת גודש נמוכה יותר; עלות נתונה מיתרגמת לאחוז נמוך יותר של העלות הראשונית; ואחוז נתון של העלות מיתרגם להשפעה קטנה יותר על הרגלי הנסיעה.

אם כן, חלק ניכר של תוספת הרווחה מאגרות גודש אינו נובע משינוי במספר הנהגים אלא גם משינוי בתמהיל הנהגים. המרוויחים זמן הם היוממים בעלי ערך הזמן הגבוה ביותר, ואילו המודרים מן הכביש לאמצעי תחבורה אחרים הם בעלי ערך הנסיעה הנמוך ביותר מלכתחילה והפגיעה הנמוכה ביותר.<sup>43</sup> המודל שלנו ממדל היטב תופעה זו, והמאפיין העיקרי שמאפשר לו לעשות כן הוא עצם הדירוג של הנהגים ולא דווקא היחס המספרי המדויק בין הערך הנזקף של נוסע א לעומת נוסע ב.

למשל, בפרמטרים הבסיסיים של הסימולציה, השכר הממוצע במצב ההתחלתי שווה בשעות השיא ובשעות השפל (על פי הנחה). אבל בנוכחות אגרות גודש, המצב שונה לחלוטין. במסלולים הפקוקים ביותר, אגרות גודש פותחות פער של כ־15 שקל בין שכר הנוסעים לשעה בשיא לנוסעים בשפל, ואלו ששורדים מן הכביש לגמרי מרוויחים אף פחות. במסלול הפקוק ביותר, מסלול 10 בשעות הבוקר, השכר הממוצע לנוסעים בשיא עולה מ־77 שקל לשעה טרם האגרה ל־90 שקל לשעה בעקבותיה, ואילו עבור נסיעה בשפל השכר יורד מ־77 שקל ל־69 שקל. פער השכר בין שיא לשפל בעקבות האגרה הוא 21 שקל. השכר הממוצע של היורדים מן הכביש נמוך אף יותר – כ־56 שקל.

## אופן חישוב עלות הנסיעה

המודל נועד לתת תמונה של ההתנהגות בטווח הארוך. משום כך, עלות הנסיעה הגלומה במודל כוללת גם עלויות "קבועות" כגון תחזוקה ואפילו פחת, שכן בטווח הארוך אדם לא יחזיק רכב לצורך נסיעה לעבודה אלא אם כן הערך של הנסיעה מצדיק את כל ההוצאות.

החישוב נעשה בצורה כזאת: עלות הדלק בשנים המדוברות הייתה בערך 6 שקל לליטר, אשר כ־3 שקל מהם הם עלות מס הבלו, ו־3 שקל עלות הדלק עצמו. חישובנו שמכונית ממוצעת בתנאי יוממות (לא נסיעה מהירה בכביש פתוח) צורכת בערך 10 ק"מ לליטר, ובכך עלות הדלק מסתכמת בכ־0.30 שקל לק"מ.

עלות רכישת הרכב חושבה על פי מחיר רכישה של 30 אלף שקל, אף שניתן למצוא רכבים יקרים הרבה יותר; רכבים במחיר זה מספיקים בדרך כלל לצורכי יוממות. 44 פחת על מכונית כזאת חושב כ־15% לשנה, דהיינו 4.5 אלף שקל לשנה. רישיון רכב בשנים אלו עלה כאלף שקל בשנה, ביטוח – כאלפיים שקל, ותחזוקה – כאלפיים שקל. הגענו לסך הכול ל־9.5 אלף שקל בשנה. זאת כאשר הרכב הממוצע נוסע כ־16 אלף ק"מ בשנה, כך שכל העלויות ה"קבועות" הללו מיתרגמות לעלות שולית של כ־60 אגורות לק"מ. סך הכול עלות 90 אגורות לק"מ.

במודל לא חישובנו את העלות של החניה, אף שמדובר בעלות ניכרת. היה קושי לחשב את העלות שכן עלות החניה שונה מאוד בערים שונות. קיים קושי בהתניית העלות על מקום העבודה שכן יישוב עבודה הוא אנדוגני למודל.

עלות הזמן חושבה כעיקרון כאחוז מתוך השכר השעתי. ראינו שהנחה מצויה היא שאנשים מעריכים את זמן הנסיעה בכ־70% מהשכר לשעה.<sup>45</sup> זו הערכה גסה מעט, מכיוון שהערכה של זמן נסיעה בדרך כלל אינה ליניארית עם הזמן, אלא עולה עם אורך הנסיעה (שכן אילוץ התקציב של 24 שעות ביום מאלץ יותר ככל שהנסיעה נוגסת יותר זמן). יש גם הבדל בין ההערכה של זמן נסיעה במכונית, באוטובוס וברכבת, ובין זמן נסיעה וזמן המתנה. מכל מקום מצאנו שתוצאות המודל אינן רגישות מאוד להנחות המדויקות.

נוסף על כך, הושמו גבולות על השכר השעתי המשמש בסיס לחישוב זה. גם אם השכר נמוך מאוד, השכר הגלום אינו יורד מ־20 שקל לשעה, וגם אם הוא גבוה מאוד הוא אינו עולה על 300 שקל לשעה, כך שהיוון הזמן נע בין 14 שקל לשעה ל־210 שקל לשעה. גם כאן, ההשפעה של גבולות אלו על התוצאות זניחה.

## מודל בחירה בין שעת שיא לשעת ושפל

הנחת המוצא שלנו היא כי ליוממים יש העדפה לנסיעה בשעות השיא הן בבוקר הן אחר הצהריים. יוממים שבחרים לנסוע בשעות שבהן עומס התנועה נמוך, מוותרים על נוחותם כדי לחסוך בזמן הנסיעה. כדי לבחון את התנהגות הנהגים שבחרים בכך, עלינו לאמוד את העלות שהם צפויים לשלם על צעד כזה.

כאשר מחיר הנסיעה בשעות השיא עולה בגלל אגרות גודש, לנהגים שלוש חלופות: הם יכולים לדבוק בהרגלי הנסיעה ולשלם את האגרה; הם יכולים להחליט שהנסיעה יקרה מדי ולוותר עליה (לטובת הגעה באמצעי תחבורה חלופי או לטובת העתקה של מיקום העבודה או של מיקום המגורים); הם יכולים גם לשנות את שעת הנסיעה. הניסיון מורה שחלופה זו מהווה מרכיב חיוני של תמונת הגודש. מצד אחד, חשוב לשים לב שחלק מן הנהגים משנים קצת את שעת הנסיעה ונטל המס כלפיהם אינו גדול בהכרח; מצד שני, חלק מן העלות החיצונית של מס גודש בשעות שיא היא דחיפת נהגים להעדיף שעות שפל ולהגדיל את הצפיפות בכבישים בשעות אלו, לעומת המשטר שבו אין מס גודש.

בכך, המודל שלנו מציב לכל נסקר שני ערכים קבועים ושני ערכים אקראיים:

**ערך נסיעה ממוצע V:** לכל נסקר נזקף ערך נסיעה ממוצע בשעות שיא במשטר המקורי. ערך זה, המכונה  $V$ , מזוהה בשיטה שלנו עם פונקציית השברון של הערך המותאם של רגרסיית הפרוביט, כפי שהוסבר לעיל.

**מרכיב אקראי בערך נסיעה  $e_1$ :** סביב ערך ממוצע זה יש התפלגות נורמלית של ערך נסיעה עם סטיית תקן מנורמלת ל-1.

**עלות צל ממוצעת לנסיעה בשעות שפל S:** בממוצע, הנוסעים מעדיפים לצאת ב־8:00 בבוקר בערך ולחזור ב־5:00 בערב בערך. נסיעה בשעות מוקדמות או מאוחרות יותר כרוכה, בממוצע, באי נוחות שניתן לתרגם לעלות כספית. עלות צל זו מכונה  $S$ .

**מרכיב אקראי בעלות הצל  $e_2$ :** סביב אי נוחות ממוצעת זו, יש התפלגות נורמלית של ערך הנסיעה בשעות שפל עם סטיית תקן  $SD_2$ .

על אופן ההצבה של עלות הצל  $S$  וסטיית התקן של ערך נסיעה בשפל  $SD_2$  נרחיב בהמשך.

נסמן נהיגה בשעות שיא באות P (peak), נהיגה בשפל באות O (off-peak) ואי־נהיגה באות N (none). נסמן את המשטר ההתחלתי במספר 1, והמשטר הפיגוביאני במספר 2. אות V מסמנת את ערך הנסיעה, כלומר רווחת הצרכן. בשלב זה, רווחת הצרכן נמדדת במונחים של סטיות התקן, וטרם מתרגמים אותה לשקל.

האות T מסמנת את האגרה (toll). אגרה זו היא שינוי המחיר נטו. מצד אחד היא מבטאת את העלייה במחיר הכספי של הנסיעה בגלל הטלת אגרות הגודש. מצד שני, היא נותנת ביטוי לערך הכספי של חסכון הזמן בגלל משטר האגרות, ולחיסכון הכספי בגלל ביטול מס הבלו על הדלק. במרבית המקרים האגרה T חיובית, אבל לפעמים היא שלילית. זה קורה כאשר לנהג ערך זמן גבוה מאוד, כך שהערך הכספי של הזמן הנחסך גובר על העלות הכספית המוגברת של האגרה; היא חיובית גם כאשר אין הרבה גודש מלכתחילה ומס הגודש הפיגוביאני נמוך ממס הבלו הקיים. נסמן  $T_p$  את המס הפיגוביאני בשעות השיא, ו- $T_0$  את המס הפיגוביאני בשעות השפל.

$$V(P1) = V + e_1, e_1 \sim N(0,1)$$

$$V(O1) = V + e_1 - S + e_2, e_2 \sim N(0, SD_2)$$

$$V(P2) = V + e_1 - T_p$$

$$V(O2) = V + e_1 - S + e_2 - T_0$$

$$V(N1) = V(N2) = 0$$

## חישוב ההשפעה על רווחת הצרכן

כל צירוף  $V, S, e_1$  ו- $e_2$  כרוך בבחירה אם ומתי לנסוע בכל משטר. כמו כן נגזרת מכך ההשפעה על רווחת הצרכן מהשינוי במשטר. בפועל, שלושת המצבים, P, O, N, גוזרים שישה סוגים של שינוי התנהגות כתוצאה מאגרות גודש (מנהיגה בזמן שיא לנהיגה בזמן שפל ולהפך, מנהיגה בזמן שיא לאי־נהיגה ולהפך, ומנהיגה בזמן שפל לאי־נהיגה ולהפך), ועוד שלושה סוגים של שימור התנהגות (מי שנהג בזמן שיא או בזמן שפל ממשיך לנהוג כך, ומי שבחר באי־נהיגה ממשיך לנהוג כך). יש צורך לחשב את ההשפעה על הרווחה עבור כל אחת מהאפשרויות הללו, למעט עבור אלו ששימרו התנהגות של אי־נהיגה, מכיוון שאגרות הגודש לא השפיעו על רווחתם כלל.

בדף נוסחאות בנספח הצגנו באופן מפורט את הנוסחאות לחישוב ההשפעה של אגרות גודש על הרווחה. פה נפתח באופן מפורט רק זוג בחירות מסוים. דוגמה זו תאפשר לקורא להבין את האינטואיציה מאחורי הניתוח בשאר המקרים.

### מעבר מנהיגה בשעות השיא במשטר ההתחלתי לנהיגה בשעות השפל במשטר אגרות גודש

לנסקר בעל ערכי בסיס  $V$  ו- $S$ , צירוף זה של בחירות יתקבל כאשר גילום המרכיבים האקראיים ממלא את התנאים הבאים:

$$V(P1) > V(N1) = 0, V(P1) > V(O1)$$

$$V(O2) > V(N2) = 0, V(O2) > V(P2)$$

במשטר 1, ערך הנהיגה בשיא עולה על אפס (ערך אי־נהיגה) וגם על ערך נהיגה בשפל. ואילו במשטר 2, ערך הנהיגה בשפל עולה על ערך אי־נהיגה, וגם על ערך נהיגה בשעות שיא.

המשמעות עבור המרכיבים האקראיים היא:

$$V(P1) > 0 \Rightarrow V + e_1 > 0 \Rightarrow e_1 > -V$$

$$V(P1) > V(O1) \Rightarrow V + e_1 > V + e_1 + e_2 - S \Rightarrow e_2 < S$$

$$V(O2) > 0 \Rightarrow V + e_1 + e_2 - S - T_0 > 0 \Rightarrow e_1 + e_2 > S + T_0 - V$$

$$V(O2) > V(P2) \Rightarrow V + e_1 + e_2 - S - T_0 > V + e_1 - TP \Rightarrow e_2 > S + T_0 - TP$$

השינוי ברווחה במעבר כזה הוא ההפרש בין הערכים:  $V(P1)$  ו- $V(O2)$  כלומר, שווה ל- $e_2 - S - T_0$ .

נותר רק למצוא את ההסתברות למעבר כזה על פי הנחת ההתפלגות הנורמלית. המשתנה  $e_2$  מתפלג נורמלית עם סטיית תקן  $SD_2$ ; הצפיפות היא  $PDF(e_2, sd=SD_2)$  וגבולות האינטגרציה הם:

$$S + T_0 - TP < e_2 < S$$

עבור  $e_2$  נתון נדרשים שני תנאים:

$$e_1 > -V, e_1 + e_2 > S + T_0 - V \Rightarrow e_1 > \max(-V, S + T_0 - V - e_2)$$

ההסתברות לכך היא:  $CDF(\max(-V, S+T_0-V-e_2))$ . ובכך תוחלת שינוי הרווחה כתוצאה משינוי זה שווה:

$$ECS(P_1, O_2) =$$

$$\int_{S+T_0-TP}^S (e_2-S-T_0)[1-CDF(\max(S+T_0-V-e_2,-V), sd=1)]PDF(e_2, SD_2)d(e_2)$$

לכל נסקר מחשבים את כל שמונה החלופות כפי שצוינו לעיל, וסוכמים את תוחלת השינוי ברווחת הצרכן עבור כל אחד. החישוב נעשה בצורה נומרית על ידי פונקציות ב-R עבור ה-CDF וה-PDF של התפלגות נורמלית ועבור אינטגרל נומרי.

## כיוול הבחירה בין נסיעה בשיא ובשפל

הניסיון מלמד שרוב מקומות העבודה מעדיפים שהעובדים יגיעו בסביבות 8 או 9 בבוקר ויישארו עד 5 או 6 בערב. מדובר למעשה בפן נוסף של אותן החצנות אגלומרציה שעומדות מאחורי היוממות בכלל. הפריון של האדם שיושב לבד בבית, בהסתכלות היסטורית, נמוך. פריון גבוה דורש שיתוף פעולה מתמשך עם אנשים רבים – בתוך מקום העבודה ובין מקומות עבודה. פריון מנהל בבית עסק נשען על קשר רציף עם עובדים, ופריון העובדים נשען על קשר רציף זה עם זה ועם המנהל. הפריון של כולם נשען על קשר עם ספקים ועם לקוחות. הצורך באגלומרציה עתית לרוב גדול אף יותר מהצורך באגלומרציה מקומית. אני יכול להרים טלפון לספק או ללקוח, אפילו אם אנחנו נמצאים בערים שונות, אבל לא ייתכן שאני מדבר ב-10:00 והספק או הלקוח מדברים ב-11:00.

אבל יתרון לאגלומרציה אין פירושו היעדר גמישות. עבודה ב-8 בבוקר פורה פחות מעבודה ב-9 בבוקר, אבל הפריון אינו אפס בממוצע. לכן כאשר מחיר ההגעה נמוך יותר סביב שעות השיא, לחלק מן העובדים יהיה כדאי להקדים או לאחר מעט את הנסיעה, להגיע בזמן נוח קצת פחות אבל להרוויח את חסכון הזמן. במודל מיישמים תובנה זו כעלות נוחות של נסיעה מחוץ לזמן הרגיל, לא עלות כספית אלא עלות צל. לעלות צל זו יש התפלגות מסוימת ומכך נגזר שחלק מן הציבור דווקא מעדיף להגיע בשעות שגרתיות פחות, גם לו מהירות הנסיעה הייתה זהה.

במודל שלנו, ערך הנסיעה הבסיסי ועלות הצל של נסיעה בזמני שפל נקבעים בנפרד. לפי שיטה זו, ראשית נקבעת עלות הנסיעה, ולאחר מכן עלות נוספת עבור כאלו שבוחרים לנסוע בזמני שפל, כאשר שתי עלויות אלו הן משתנה מקרי שמתפלג נורמלית עם

סטיות תקן בלתי תלויות. נקטנו שיטה זו מפני שהצבת ערך של נסיעה בשיא וערך של נסיעה בשפל בנפרד פירושה שאין קורלציה בין השניים – שיש אדם שמעריך מאוד נסיעה ב־8 בבוקר אך נסיעה ב־9 חסרת ערך לחלוטין כלפיו. לא נראה לנו שזו המציאות. לכן, המודל זוקף לכל אחד ערך בסיס לרווחת צרכן, עליו מתווסף אבר אקראי שנותן ביטוי לשונות בין אנשים, וכן ערך בסיס למחיר הצל של נהיגה בשעות השפל, שעליו מתווסף גם כן אבר אקראי.

מתודולוגיה זו מותירה שתי שאלות: מהו ערך הבסיס? ומהי השונות?

לא היה לנו בסיס אמפירי טוב לאומדן של השונות. על פי התבוננות היה נראה שהשונות באי נוחות של נסיעה בשעות שפל קטנה ביחס לשונות בעצם ערך הנסיעה. כדי לסבר את האוזן, די נפוץ לשמוע מישהו אומר: "יש פקק מטורף היום, אני אסע מוקדם יותר/מאוחר יותר", אך די נדיר לשמוע מישהו אומר: "יש פקק מטורף היום, אני פשוט אשב בבית". ערך הבסיס לשונות היה 0.4 כפול השונות של רווחת הצרכן; כדי לבחון כמה זה משנה, ניסינו גם ערך של 0.5. בערך הגבוה יותר, יש יותר אנשים שמוצאים שנהיגה בשעות השפל אטרקטיבית והרווחה גדולה יותר. אבל ההפרש ברווחה היה זניח. ההפרש המוחלט הממוצע לנוסע היה פחות משליש האגורה; רק במשבצת אחת מתוך 20 ההפרש גדול מאגורה לנוסע.

ערך הבסיס לרוב הריצות נקבע על ידי הצבת מחיר צל  $S$  שנותן לכל נוסע בנפרד הסתברות זהה לבחור בנהיגה בשעות השיא – הסתברות הזוהי להסתברות המצרפית. לא ידענו אם יש קורלציה חיובית בין הכנסה לבין נהיגה בשעות השיא, שכן מצד אחד לעשירים יש אולי יותר חשיבות להגיע לעבודה בשעות העבודה המקובלות, אך מצד שני ערך הזמן שלהם גבוה יותר במונחים כספיים.

בנוסף, הרצנו סימולציה שבה יש ערך שקלי אחיד למחיר הצל. על פי מודל זה, נסיעה בשעות השפל מרתיעה הרבה יותר עבור בעלי שכר נמוך, ויש נטייה לבעלי השכר הנמוך לנסוע בשעות השיא. יש גם סימולציה נוספת, שבה ההנחה היא שמחיר הצל הוא שיעור קבוע של ערך הזמן. על פי סברה זו, לכל אחד שווה, למשל, חצי שעה של זמן לנסוע בשעה נוחה. במקרה זה יוצא שהמחיר גבוה עבור העשירים יותר ולהם נטייה מוגברת, יחסית, לנסוע בשיא. בסופו של דבר ההשפעה של הנחות אלו על הממצאים הייתה זניחה.



## מודל בחירת מסלול גודש

כפי שהדגשנו בתחילת הפרק, התפיסה הבסיסית של המודל היא "בחירת חיים": בטווח הבינוני והארוך עובדים בוחרים יחד את מקום העבודה (אם בכלל), מקום המגורים ואופן ההגעה. ממילא, בוחרים גם את רמת הגודש. בהגדרה, נסיעה במרחק נתון יקר יותר בזמן באזור פקוק יותר; השכר גבוה יותר; וגם שכר הדירה גבוה יותר.

ככלל, ככל שהשכר גבוה יותר גם פערי השכר גבוהים יותר. עובדים מעוטי השכלה מרוויחים פחות, אך גם תוספת השכר מעבודה בתל אביב (אזור עתיר אגלומרציה) לעומת עבודה באזור תעשייה מרוחק קטנה יחסית. עבודה באזור בעל גודש רב משמעה נסיעה ארוכה כדי לממש תוספת שכר/חסכון עלות דיור של מרחק גאוגרפי נתון, או לחלופין הסתפקות בנסיעה קצרה ותוספת/חסכון קטנים יחסית באחוזים. כתוצאה מכך, נסיעה במכונית בגודש רב מתאימה בעיקר לעובדים מיומנים בעלי שכר גבוה. בפרק הממצאים רואים בעליל את השוני בשכר הממוצע בין המסלולים השונים.

כאשר נהג באזור נתון ניצב מול אגרות גודש, אחד משולי הבחירה שלו הוא להמשיך להגיע לעבודה במכונית אבל באזור עם פחות גודש ופחות מסי גודש. ממילא האנשים שמש הגודש מרתיע אותם במסלולים העמוסים, הם בעלי שכר נמוך למדי במוצא; אלו בדיוק אנשים שעשויים להגיב למסי גודש במסלול אלעד-תל-אביב בהעתקת מקום העבודה לראש העין, הסמוך יותר והפקוק פחות.

המודל אינו מאפשר מעבר מסלול, כפי שאינו מאפשר גם שינוי באורך הנסיעה (שול אינטנסיבי). כדי לאפשר מעבר כזה, היה נדרש לזקוף לכל יומם סולם פערי שכר אישי לפי אזור גודש; לזקוף מחיר צל למגורים בכל אזור; ובהמשך לפתור שיווי משקל כלל-ארצי עבור רמת הגודש ומס הגודש עבור כל אזור. מתבקש למעשה להריץ עוד שכבת איטרציה שמאפשרת מעבר למסלול אחר בעל תשואה חיובית לאור הנסיבות החדשות.

המודל אינו  
מאפשר מעבר  
מסלול גודש. כדי  
לאפשר מעבר כזה,  
היה נדרש לזקוף  
לכל יומם סולם  
פערי שכר אישי  
לפי אזור גודש;  
לזקוף מחיר צל  
למגורים בכל אזור;  
לפתור שיווי  
משקל כלל-  
ארצי עבור רמת  
הגודש ומס הגודש  
עבור כל אזור;  
ולהריץ עוד  
שכבת איטרציה  
שמאפשרת מעבר  
למסלול אחר.

בהיעדר יישום שיפור זה בשלב הנוכחי, נעיר שלוש הערות הקשורות להיערכות הנוכחית של המודל:

1. שינוי כזה היה מראה התכנסות ניכרת בתוספת עלות הנסיעה בין האזורים. כעת, הנושרים ממסלול 10 ניצבים מול סכום עודף של כ־29 שקל בכל דרך וחסכון זמן שמבחינתם שווה רק 8 שקל. תוספת העלות הנקייה היא 21 שקל. לעומת זאת, במסלול 4 התוספת הכספית היא כ־11 שקל ועלות הזמן (מבחינת נוסעים אלו) שווה כשקל אחד בלבד. התוספת הנקייה היא כ־10 שקל. נוצר יתרון של 11 שקל לטובת מסלול 4. הרבה אנשים שבמודל הנוכחי בוחרים להישאר במסלול 10 במקום לנשור לגמרי, יבחרו לעבור למסלול נמוך יותר. הגודש במסלול 10 יקטן, גם האגרה תקטן. ואילו במסלול 4 תהיה אגרה גדולה יותר שתשיג צמצום צנוע יותר בגודש בגלל העוברים. אם ההתכנסות תהיה חצי, אזי בפועל תוספת העלות הכוללת במסלול 10 תהיה קצת פחות מ־19 שקל, ואילו במסלול 4 האגרה תוספת העלות תהיה באמת יותר מ־13 שקל. בתפיסה של שיווי משקל חלקי, פערי השכר בין המסלולים נשארים אבל לנהגים רבים יהיה כדאי לוותר על השכר כדי לחסוך באגרה.

2. ההשפעה על הרווחה הכוללת תהיה חיובית אבל ככל הנראה קטנה. חיובית, שכן כל תוספת שול הסתגלות מגדילה רווחה. קטנה, מכיוון שהרווח של הנזקפים היום למסלולים הגבוהים (מרוויחים או מיכולת לעבור מסלול או מעלות נמוכה יותר) מתקזז עם הפסד של אלו שבמסלולים הנמוכים יותר (שיצטרכו לשלם יותר על נסיעה או לוותר).

3. במישור ההמלצות, גם פערים גדולים ברווחת הנוסעים לא היו משנים את התמונה הגדולה. ככלל, אנו מצביעים על כך שהקלה על העלות החיצונית של נסיעה בכביש עלולה להיות מלווה בפגיעה בתוספת החיצונית של אגלומרציה בערים, הן במקום והן בזמן. תוספת הרווחה, הצנועה ממילא, אשר תלווה מעבר יוממים בין מסלולים תהיה כרוכה בתוספת שחיקה באגלומרציה. עוד יותר עובדים מן המרכזים הגדולים יעברו לאזורים צפופים פחות.

ללא ספק הסימולציה הייתה מדויקת ואינפורמטיבית יותר לא הייתה אפשרות ליוממים לעבור בין מסלולי גודש. אנו משערים שההשפעה של פתיחת אופציה זאת על הממצאים הייתה צנועה, אבל מדובר באפיק ראוי לפיתוח המודל.

## אופן חישוב קנה המידה

אחד מהאתגרים הגדולים שעמדו לפתחנו היה חישוב קנה המידה, לפיו ניתן להמיר את רווחת הצרכן מהמשתנה החבוי ברגרסיית הפרוביט לשקלים חדשים.<sup>46</sup>

אין אנו מתיימרים לתת אומדן מדויק של קנה המידה, ולמעשה אנו עושים סימולציות עם מנעד רחב למדי, ביחס של כ־3 בין הנמוך לגבוה. עם זאת, גם גבולות גזרה אלו הם פרי של חיפוש מאומץ אחרי סימנים וסממנים של קנה המידה המיוחל. עשינו שימוש למעשה בשתי גישות שונות:

1. **התשואה ליוממות.** ככלל, מכונית מהירה הרבה יותר מאשר נסיעה באוטובוס, ולעתים קרובות גם ביחס לרכבת כאשר מתחשבים בהגעה לתחנות ומהן, אבל היא גם יקרה הרבה יותר. עובדים מוכנים לשלם מחיר עודף זה כאשר יש להם הרבה מה להרוויח מנסיעה ארוכה. במרכז עירוני הן השכר הן שכר הדירה גבוהים ביחס לפרברים; מי שיגור ויעבוד במרכז עירוני יוכל להשתכר היטב אך גם ישלם ביוקר עבור מגורים, או יסתפק בדירה קטנה; לעומת זאת, מי שיגור ויעבוד בפריפריה של המדינה או בפאתי העיר ייהנה משכר דירה נמוך יחסית אבל גם ירוויח שכר נמוך יחסית. לעומת זאת, יוממות במכונית מאפשרות ליהנות הן משכר דירה נמוך הן משכר עבודה גבוה. ניתן לכמת עלויות ותועלות אלו, ולבחון שבקנה מידה נמוך מדי יותר מדי נסקרים מוותרים על הזדמנות זמינה לשפר את רמת החיים, ואילו בקנה מידה גבוה מדי רואים שאנשים משלמים על יוממות סכום שמקזז חלק גדול מתוספת ההכנסה.

2. **גמישות מצרפית.** קיים יחס חד־ערכי בין קנה המידה והגמישות המצרפית. כאשר קנה המידה גבוה, המשמעות היא כי אגרה נתונה תהווה אחוז קטן של רווחת הצרכן, ותשפיע בצורה מעטה על הרגלי הנסיעה; הגמישות נמוכה. כלומר, קנה מידה גבוה מבטא גמישות נמוכה ביחס למחיר. בספרות נעשו אומדנים שונים של הגמישות המצרפית בטווח הארוך של הביקוש ליוממות רכב ביחס למחיר כספי; אלו נסקרו בנספחים ובפרק סקירת הספרות. מכיוון שאנחנו יודעים בערך את היחס בין המחיר הכספי ובין המחיר הכולל, ניתן להמיר אומדנים בצורה גסה מאוד למנעד של קני מידה למודל.

## חישוב מנעד המכפיל על פי התשואה ליוממות

התשואה ליוממות תלויה מאוד בשכר. מפת שכר של יישובים בארץ מראה שבממוצע, ניווד מוסיף לבעלי שכר נמוך אחוז קטן יותר משכרם, שגם ככה נמוך יותר. לכן, דרך אחת לקבל רושם של ערך הנסיעה במכונית דווקא היא לבחון את התרומה הצפויה לשכר עבור יוממים ברמות שכר שונות. תרומה זו צפויה לתאם את המחיר שעובדים מוכנים לשלם עבור נהיגה לעבודה.

הטבלה הבאה מאפשרת מבט על התאמה זו. בבסיס הטבלה רווחת הצרכן המשתמעת מן המודל שלנו, זאת אומרת, הניקוד כפול קנה המידה. כאשר רווחת צרכן יורדת לאפס, היוםם מעדיף את החלופה – בחישוב הנוכחי אוטובוס, שכן זו החלופה הזמינה ביותר עבור רוב העובדים. בצורה גסה, רווחת צרכן זה תהיה שווה לפער בין התשואה של נסיעה במכונית ובין זו של נסיעה באוטובוס:

$$CSCAR = (PAYCAR - COSTCAR) - (PAYBUS - COSTBUS)$$

כאשר CS פירושו רווחת צרכן, COST פירושו עלות הנסיעה, ו-PAY הוא השכר שניתן לממש עבור יומם שנעזר באמצעים המדוברים. בסידור קצת של האברים, ניתן לבדל את פער השכר:

$$CSCAR + COSTCAR - COSTBUS = (PAYCAR - PAYBUS)$$

חישוב זה של פרמיית השכר ממסלול מכונית מתבסס על החישוב השקלי של רווחת הצרכן, ובמודל שלנו – הניקוד כפול קנה המידה. בטבלה הבאה לקחנו תוספת זו כאחוז מן השכר, עבור מנעד של קני מידה. עלות הנסיעה באוטובוס (עבור נוסעים בפועל במכונית) או עלות הנסיעה במכונית (עבור נוסעים בפועל בדרך אחרת) נזקפות לפי הממוצע עבור יוממים בעלי מאפיינים דומים. יש עמודות נפרדות עבור נסקרים בחמישוני הכנסה לנפש שונים.

ברור שבפועל התשואה של הבוחרים במכונית גבוהה מן הממוצע לכל העובדים; בגלל זה הם בוחרים בנסיעה במכונית. ייתכן שתוספת השכר שלהם גבוהה מן הממוצע, או שעלות הנסיעה במכונית נמוכה מן הממוצע, או שעלות בחירת נסיעה באוטובוס גבוהה במיוחד. לכן הטבלה נועדה רק לתת רושם כללי של קנה מידה.

הנהג החציוני  
נמצא בחמישון  
ההכנסה השני  
מלמעלה. אבל  
הנהג השולי,  
זה המושפע מן  
האגרות, נמצא  
כמעט תמיד  
בחמישונים  
הנמוכים יותר

## לוח 6 - פער שכר משתמע משדרוג אמצעי נסיעה מאוטובוס למכונית, באחוז השכר

חמישון 5	חמישון 4	חמישון 3	חמישון 2	חמישון 1	חמישון הכנסה משק בית
7	10	11	13	18	קנה מידה 7
8	12	13	15	21	קנה מידה 10
12	16	19	21	28	קנה מידה 19
17	21	24	26	35	קנה מידה 28

מלוח זה ניתן להבין כי ככל שרמת ההכנסה עולה, התשואה ליוממות ברכב גדלה. חיזוק לתובנה זו ניתן לקבל מהלוח הבא, שבו מוצגת פרמיית השכר של עובדים בעיר, לעומת אלו העובדים ביישובים סמוכים, עבור שתי רמות הכנסה: בעלי תואר ראשון ומעלה (כ-35% מן העובדים בשנים 2011-2016), ובעלי רמת השכלה נמוכה יותר. נבחנו רק העובדים במשרה מלאה.

פרמיית השכר לעומת ממוצע מקומות העבודה במרחק של 15 עד 20 ק"מ קו אווירי מן העיר

## לוח 7 - פרמיית שכר ליוממות בערים מובילות

השכלה אקדמית	השכלה בסיסית	
17%	13%	תל אביב
24%	3%	ירושלים
44%	1%	חיפה
12%	23%	באר שבע

כ-45% של הנהגים נמצאים בחמישונים 3 עד 5, כך שהנהג החציוני נמצא בחמישון השני מלמעלה. אבל הנהג השולי, המושפע מן האגרות, נמצא כמעט תמיד בחמישונים הנמוכים יותר. לעומת שני החמישונים הגבוהים, שבהם מרבית הנהגים הם בעלי השכלה אקדמית, ביתר החמישונים רק מיעוט בעלי השכלה גבוהה - כ-35% עבור החמישון האמצעי.

אם מסתכלים בלוח הראשון על תוספת השכר הממוצעת עבור החמישון האמצעי, ומשווים אותו עם פרמיית השכר בפועל בלוח השני עבור האוכלוסייה האופיינית, קני המידה 10 ו-19 נראים

סבירים יותר מאשר קנה מידה 28. זה נראה מפתיע שהיומם המצוי בחמישון הכנסה אמצעי יראה בממוצע תוספת שחר של 25% ממעבר העודף לאזור עירוני. אבל זה לא בלתי אפשרי; יש אזורים כאלו, למשל אזור באר שבע. על פי קריטריון זה, מנעד קני המידה שנבחר נראה סביר למדי. לכן נראה לנו שהסיכויים טובים שמנעד זה, בין 10 ל-28, מכסה את מרבית המשקל של הצפי שלנו לקנה מידה מתאים.

## חישוב מנעד המכפיל על פי אומדנים של גמישות

מבחירת קנה המידה נגזרת גמישות הביקוש לכל הפרטים. שינוי נתון בהתנהגות הוא פועל יוצא של שינוי נתון בערך הנסיעה הממוצע, במונחים של סטיית התקן (המנורמלת ל-1). ככל שקנה המידה גבוה יותר, שינוי נתון בסטיות תקן מתורגם להוצאה שקלית גבוהה יותר. עם קנה מידה גבוה יותר, נדרש מס שקלי גבוה יותר כדי להשפיע על ההתנהגות, והמשמעות היא גמישות נמוכה יותר. ככל שקנה המידה גבוה יותר, הגמישות נמוכה יותר.

### לוח 8 - גמישות מצרפית לפי קנה מידה

קנה המידה	7	10	19	28
גמישות מצרפית של בחירת נסיעה במכונית (שול אקסטנסיבי)	-2.0	-1.4	-0.7	-0.5

קשה מאוד למדוד את גמישות הביקוש לשימוש במכונית לצורכי יוממות בטווח הארוך. בדרך כלל רואים שינויים רק בטווח הקצר, כאשר עיקר ההשפעה היא על העלות המשתנה. עם זאת, נעשו מספר ניסיונות, באמצעות סקרים או אקונומטריקה, לאמוד גמישות זו. כפי שמוסבר בפרק סקירת הספרות, המובא בנספחים, המנעד של גמישות מצרפית לשימוש במכונית ליוממות ביחס למחיר כספי הוא בערך בין -0.4 ל-0.7. עלות הזמן היא בערך 40% של העלות הכספית; המשמעות היא, ש-10% שינוי במחיר הכספי הוא שווה ערך לכ-7% שינוי במחיר הכולל; הגמישות במונחים אלו גבוהה בכ-30%. לפי זה, הגמישות ה"כוללת" נאמדת במנעד בערך בין -0.6 עד 1.0. יוצא שהמנעד שבחנו חובק את המנעד המשוער הנגזר מהשלכת אומדנים אלו להקשר שלנו.

## זקיפת מרחק נסיעה ללא-נהגים

במודל, לכל יומם הסתברות חיובית לבחור בנסיעה במכונית על פי עלות נסיעה כזאת. עבור הנוהגים בפועל, אנו שואלים שאלה בינארית פשוטה: האם ימשיך נהג זה לבחור לנסוע במסלול הקיים במכונית בסביבה של אגרות גודש? אולם שליש מהיוממים אינם נוסעים היום במכונית, ולפי הסתברות המודל הם מהווים כ-30% של הנוהגים בסימולציה. לנוסעים אלו צריך לזקוף מרחק נסיעה.

מרחק נסיעה עבור אלה שהיום אינם נוהגים נעשה על פי ממוצע מרחק נסיעה של יוממים באותו אזור ובאותו עשירון כלכלי. ההנחה היא שאילו יומם זה היה נוסע במכונית, הנסיעה שלו הייתה דומה לזו של עמיתו. הואיל והשונות במרחק הנסיעה אינה גדולה מאוד, ההשפעה של הנחה זו על תוצאות הסימולציה אינה גדולה.

## רווחה של נוסעים ברכב רב-נוסעים

משטר של אגרות גודש משפיע גם על רווחת יוממים שאינם נהגים. אלו שנוסעים באוטובוסים נהנים מזמני נסיעה קצרים יותר ואחידים יותר; הם גם נדרשים לשלם מחיר כספי גבוה יותר אבל לרוב מדובר בסכום קטן מאוד, שכן מקדם הגודש של אוטובוס הוא בערך פי שניים מזה של מכונית ואילו מספר הנוסעים גדול לרוב פי כמה עשרות, כך שהאגרה לנוסע קטנה.

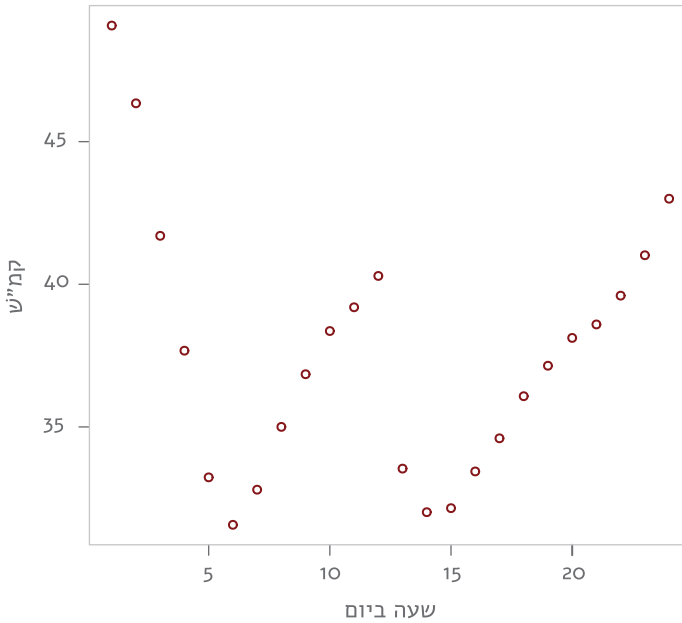
לכן לכל הפחות עלינו לחשב את הרווחה, מחמת חסכון זמן, של נוסעי האוטובוסים על פי השיקולים הנוכחיים. נוסף על כך, אם השיפור בחוויית הנסיעה באוטובוס או בטרמפ משמעותי, ייתכן שינוי בכל יחס התמורה של המציאות ושל המודל. תוצאות הרגרסיה מתבססות על יחס תועלת ועלות אוטובוס/מכונית כפי המציאות של 2018; ירידה של ממש בעלות האוטובוס כרוכה לא רק בתנועה על עקומת הביקוש, כפי שהמודל בוחן, אלא גם תנועה של עקומת הביקוש; העקומה תהיה גמישה הרבה יותר.

בתרשימים הבאים השווינו את זמני הנסיעה במכונית על פי המאגר שלנו עם זמני הנסיעה עבור אוטובוסים במאגר ייחודי של הסדנה לידע ציבורי. חישובים אלו אינם מאד מדוייקים, אבל מסתמן כי האוטובוסים אינם מנצלים היטב את הירידה בגודש.

המכוניות נוסעות בערך 25% מהר יותר בשעות השפל מאשר בשעת השיא; באזור המרכז/גוש דן השיפור הוא כ-30%. ואילו עבור אוטובוסים השיפור הוא כ-15%.

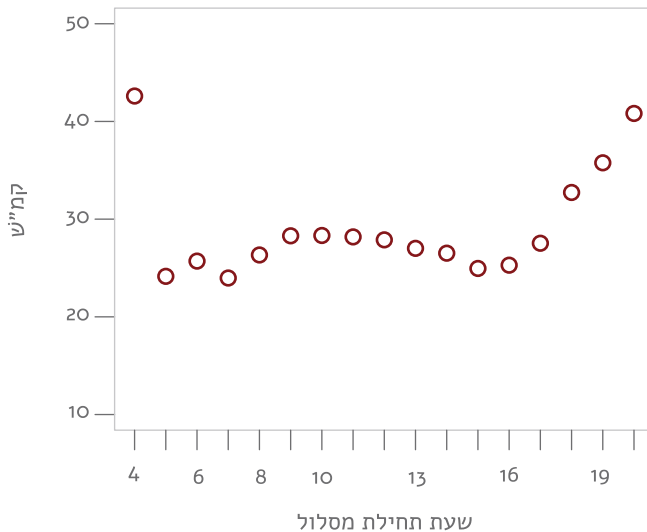
תוצאות הרגרסיה מתבססות על יחס תועלת ועלות אוטובוס/מכונית כפי המציאות של 2018; ירידה של ממש בעלות האוטובוס כרוכה לא רק בתנועה על עקומת הביקוש, כפי שהמודל בוחן, אלא גם תנועה של עקומת הביקוש; העקומה תהיה גמישה הרבה יותר

**תרשים 18: מהירות ממוצעת, נסיעות מכונית בין-עירוניים במדגם**



מקור: עיבוד פורום קהלת של נתוני הסדנה לידע אזרחי, על בסיס נתוני SIRI של משרד התחבורה

**תרשים 19: מהירות ממוצעת, כל קווי אוטובוס בין-עירוניים**



מקור: עיבוד פורום קהלת של נתוני הסדנה לידע אזרחי, על בסיס נתוני SIRI של משרד התחבורה



**שיעור חסכון זמן עבור נוסעי אוטובוסים חושב כחצי שיעור חסכון הזמן של נוסעי מכונית.**

**שיפור זה, המסתכם בפחות מ־5 דקות ביום בממוצע לנוסעי אוטובוסים, איננו נחשב גדול דיו להיחשב כשינוי של כלל עקומת הביקוש. לכן הפסד הרווחה עבור הנושרים מן הכביש לא עבר תיקון מחמת השיפור המסוים ברווחה של אלו שאינם נוהגים, ולא תיקנו את הגמישות/המכפיל כדי להתחשב בשיפור חוויית הנסיעה ברכב רב־נוסעים.**

**גם אלו שנוסעים  
בנסיעה משותפת  
(קרפול) חוסכים  
זמן מחמת פינוי  
הכביש, אך  
נושאים רק בחלק  
מעלות האגרה.  
בפועל, ההשפעה  
של טרמפיסטים  
על תוצאות המודל  
ככל הנראה קטנה.**

גם אלו שנוסעים בנסיעה משותפת (קרפול) חוסכים זמן מחמת פינוי הכביש, אך נושאים רק בחלק מעלות האגרה. (לא ניתן לדעת כמה בדיוק.) מבחינת רווחה, נוסעים אלו הם אי שם בין נהגים לנוסעי אוטובוס; הן חסכון הזמן שלהם הן תוספת העלות שלהם גדולים מאלו של נוסעי אוטובוסים וקטנים מאלו של נהגים.

בפועל, המודל שלנו אינו מזהה יוממים אלו, והם נחשבים לנהגים לכל דבר. קשה לדעת בדיוק כמה טרמפיסטים יש מסוג זה; מצאנו כ־130 אלף יוממים, כ־6 אחוז מנוסעי מכונית פרטית, שדיווחו על נסיעה לעבודה בעיקר במכונית אך ללא מכונית ברשותם. לא ברור מהו הההיקף, או אפילו הסימן, של השפעת קושי זיהוי זה על חישוב הרווחה. מצד אחד, יש טרמפיסטים שחישבנו כמודרים מן הכביש בגלל אגרות, והפסידו משולש רווחה; בפועל חלק נשארו על הכביש, כאשר חשבון הרווחה אינו חד־משמעי. (תלוי בנטל האגרה עליהם.) מנגד, מדובר באנשים בעלי שכר נמוך למדי; כפי שתארנו בפרק התיאוריה, שכר הטרמפיסטים זהה כמעט לשכר נוסעי האוטובוס. לכן יש טרמפיסטים שהחשבנו כנהגים שהסכימו לרדת מן הכביש בתגובה לאגרה צנועה, כאשר בפועל היה צורך להדיר נהג אמיד יותר מן הכביש והייתה נדרשת לכך אגרה גבוהה יותר. מכאן שההשפעה של טרמפיסטים על תוצאות המודל ככל הנראה קטנה.

## אופן אומדן הפרוביט

### בחירה בפרוביט לעומת לוגיט

מסיבות שונות, ההתפלגות הלוגיסטית נחשבת הנחה טובה יותר במרבית המקרים למשתנה חבוי, ולרוב עדיף להריץ רגרסיה של לוגיט ולא של פרוביט. עם זאת, הוחלט לעבוד עם פרוביט מכיוון שההנחה של התפלגות נורמלית משמשת לא רק לבסיס אמידת ערך הנסיעה, אלא גם בבסיס חישוב בחירת אופן הנסיעה (בשעות השיא או השפל). כפי שנראה, ההסתברות של אופן הנסיעה וזמן הנסיעה מחושבת על ידי אינטגרל כפול על ערך האבר האקראי בבחירת נהיגה, וכן בבחירת נסיעה בשיא לעומת שפל. חישוב אינטגרל בהתפלגות נורמלית אינטואיטיבי ופשוט יותר מאשר אינטגרל בהתפלגות לוגיסטית.

היות שהערך המותאם בפרוביט קרוב ביותר לזה של לוגיט, השפעתה של הנחה מופשטת זו על הממצאים זניחה. בחנו גם תרשימים Q-Q (שברון-שברון) המראים שהפריסה של הערכים דומה. בנוסף, הסברנו לעיל שהערך המדויק של הערך המותאם של הרגרסיה אינו חשוב מאוד לתוצאות המודל; ההשפעה העיקרית היא מסדר הנהגים ומבחירת קנה המידה.

## מידת האקסוגניות של המשתנים הבלתי תלויים

מכיוון שהאמידה נועדה לנבא מי האנשים שיבחרו "דפוס חיים" של נהיגה לעבודה, יש לבחור רק משתנים בלתי תלויים שנחשבים אקסוגניים לבחירה זו. לגבי חלק מהמשתנים הסיווג די ברור. ברור שהחלטה לרכוש מכונית תלויה באופן מובהק בהחלטה איך להגיע לעבודה, ושיש לראות משתנה זה כאנדוגני. לעומת זאת, ברור שהגיל הוא אקסוגני. עם זאת, יש כמה משתנים שהיה צורך להכריע לאן הם נוטים. להלן הסבר קצר לאחדות מן ההתלבטויות:

**השתתפות בכוח העבודה:** מדובר בשול חשוב מאוד. עלות היוממות היא גורם חשוב בהחלטה אם להצטרף בכלל לכוח העבודה. מבחינה זו, היה ראוי למצוא דרך לכלול ברגרסיה גם אנשים שאינם עובדים, כאשר החלטה לא לעבוד היא פועל יוצא של עלות הנסיעה. אך מכיוון שאנחנו רק מעלים את עלות הנסיעה ולא מפחיתים אותה, בסופו של דבר הירידה מן הכביש יכולה לכלול גם יציאה משוק העבודה. לכן בסימולציה הספציפית שאנו עורכים השמטת המשתנה של השתתפות בכוח העבודה נראית סבירה.

אזור מגורים: ככל הנראה הבחירה של אזור מגורים מושפע מן הגודש ולכן משתנה זה נחשב אנדוגני ואינו כלול ברגרסיה.

הכנסה מעבודה: ברור שהכנסה היא פועל יוצא של מקום העבודה והמגורים. במשטר אגרות גודש לחלק מן האנשים תהיה הכנסה נמוכה יותר שכן הם יבחרו לעבוד רחוק מן המרכז העירוני. אבל הוחלט שרוב השונות בהכנסה אינה תלויה בסידור יוממות, ולכן משתנה זה נחשב אקסוגני והוא כלול ברגרסיה.

בן זוג עובד: ברור שזה מושפע מעלות הנסיעה. עלות נסיעה גבוהה יכולה לגרום לכך שבן הזוג המטפל בבית ובילדים ימצא את התשואה לעבודה עם נסיעה נמוכה ולא כדאית (אפקט מחיר). מנגד, זה יכול לאלץ את המפרנס העיקרי להסתפק בעבודה מניבה פחות, ולגרום לכך שבן הזוג השני ימצא שעבודה הכרחית לשימור רמת החיים (אפקט הכנסה). אך לנו היה נראה שבימינו עיקר דפוס התעסוקה של בני זוג נקבע על פי שיקולים של אורח חיים ולא של כדאיות צרה.

הכנסת משק הבית: מאחר שמשתנה זה נשען הן על ההכנסה מעבודה הן על היות בן הזוג עובד, ברור שיש לו אותם ההיבטים של אנדוגניות של משתנים אלו, שנידונו כבר. כמו כן, הוא נכלל ברגרסיה מאותן סיבות שנכללו הם.

נוסוץ, שנעשה שימוש בהכנסה ולא בלוג הכנסה. כאשר מטרת הרגרסיה היא לבחון את המקדמים, השאלה אם התלות היא ליניארית או לוגריתמית היא קריטית. אבל אנו מתעניינים אך ורק בערך המותאם. מצאנו שבחירת הכנסה לעומת לוג הכנסה אינה משפיעה כמעט על ערך זה, ולכן בחרנו במשתנה הפשוט יותר.

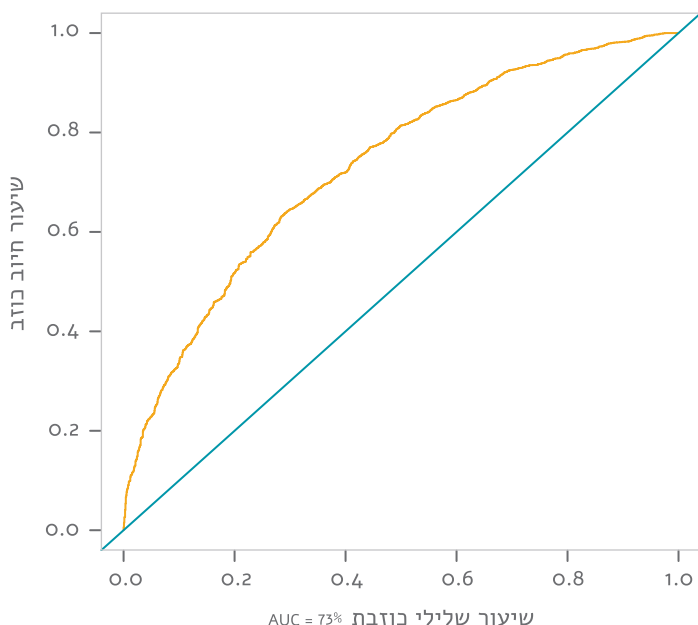
## תוצאות הרגרסיה

אחת הדרכים להמחיש את הטיב של הניבוי של מנבא הסתברותי עבור משתנה בינארי הוא תרשים עקומה אופיינית למסווג, או עקומת ROC. עקומה זו משווה בין בחירות שונות בין הרף לבחירה חיובית. אם נחליט שכל מי שהניבוי שלו מעל 10% נחשב "נהג", נסווג מעט מאוד נהגים כלא־נהגים, אך הרבה לא־נהגים ייסווגו כנהגים. אם הרף הוא 90%, אזי להפך: מעט מאוד לא־נהגים ייסווגו כנהגים, והמון נהגים ייחשבו לא־נהגים. עקומה אופיינית למסווג

פשוט מציגה עבור כל רף את אחוז הטעויות מכל סוג. ככל שהניבוי החלטי יותר (מייחס ערכים קרובים ל-100% או ל-0%) ומדויק יותר, ניתן יהיה להגיע למספר נמוך של שני סוגי השגיאה.

ניבוי אקראי מופיע בקו אלכסוני, ואילו ניבוי מושלם נצמד לצירים – צירי אפס טעויות מכל סוג. מכאן, שהשטח בין העקומה ובין הקו האלכסוני נותן מדד אינטואיטיבי של דיוק הניבוי.

### תרשים 20: עקומת ROC

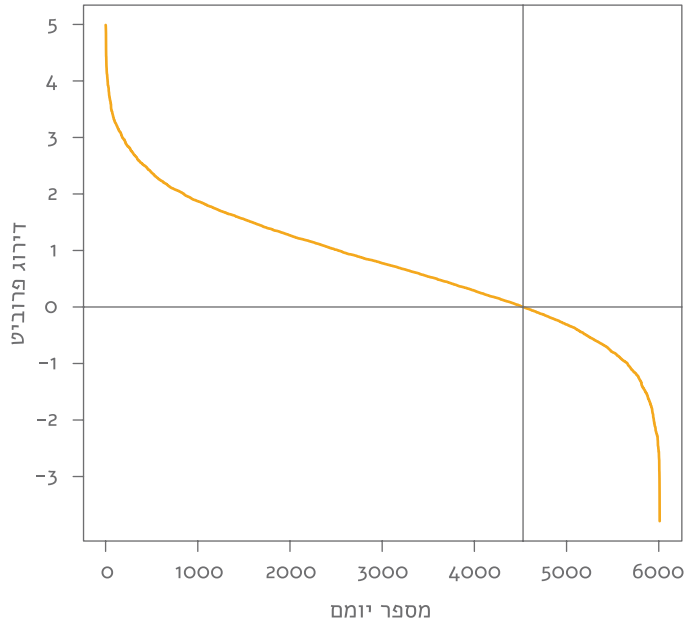


ניתן לראות מהתרשים כי רמת הניבוי של ההסתברות לנהוג ברבב הנובעת מהמודל, גבוהה בצורה מספקת.

### תמונת רווחת הצרכן

המשתנה החבוי המשתמע מרגרסיית פרוביט על בחירת נסיעה במכונית הוא רווחת הצרכן הנובעת מבחירה זו. צרכן בוחר לרכוש מוצר או שירות בתנאי שרווחת הצרכן שלו מרכישה זו עולה על אפס. ההסתברות שמקבלים מן הפרוביט היא פונקציית ההתפלגות של ערך המשתנה החבוי, וניתן לקבל משתנה זה באמצעות פונקציות השברון ותוספת אבר השגיאה, כפי שפורט לעיל.

## תרשים 21: דירוג פרוביט - ערך פונקצית השברון של הערך המותאם



## שיטת ההתכנסות למס פיגוביאני

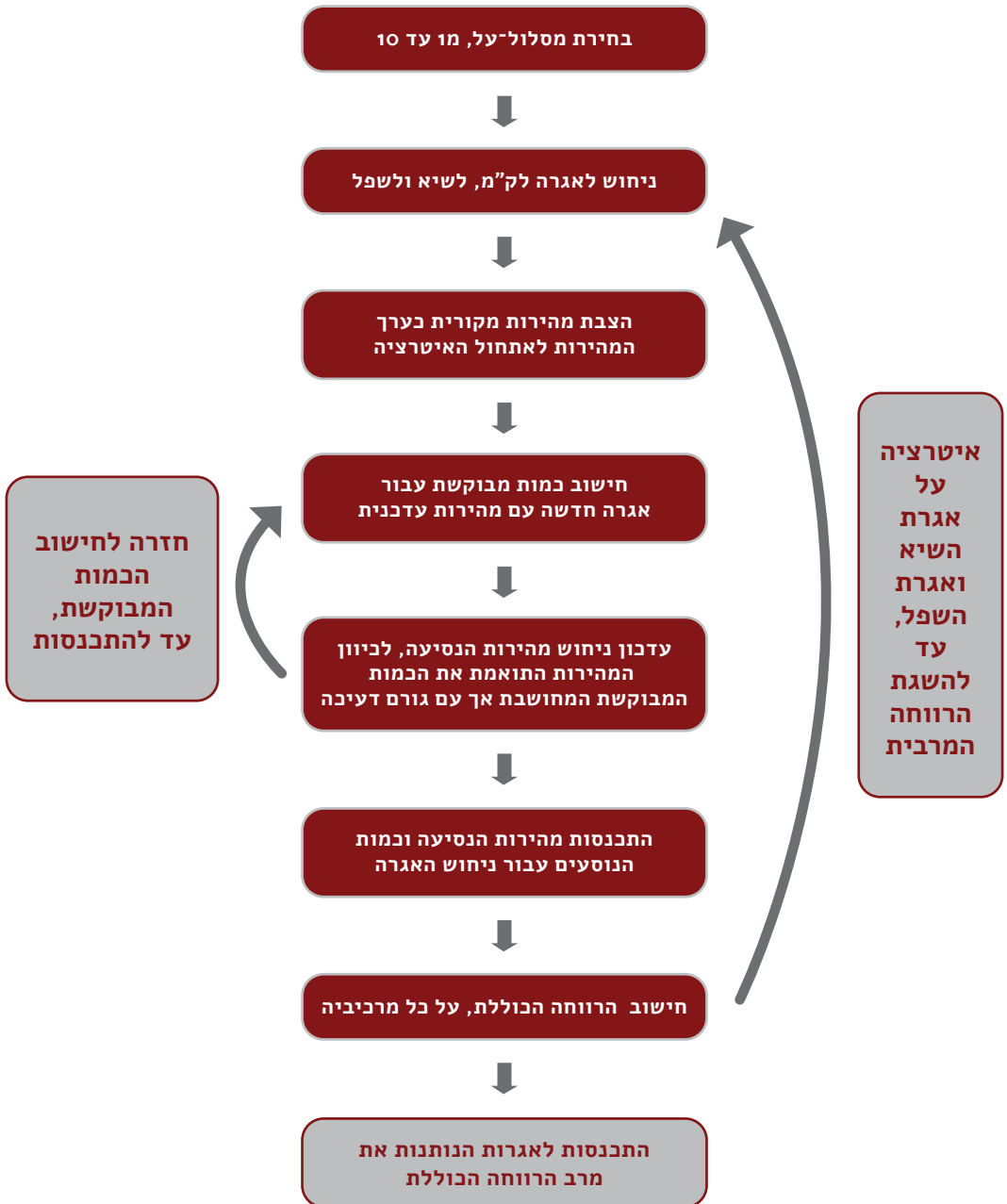
### אופן חישוב הרווחה

מס פיגוביאני הוא מס שממקסם את הרווחה החברתית. מרכיבי הרווחה במודל שלנו הם ארבעה עבור נהגים שניצבים מול מחירי נסיעה גבוהים יותר בעקבות המס:<sup>47</sup>

1. רכיב חיובי הנובע מחיסכון בעלות הזמן של הנסיעה, עבור נהגים שממשיכים לנסוע בכביש.
2. רכיב שלילי הנובע מביטול עודף הצרכן של נהגים שירדו מהכביש לחלוטין.
3. רכיב שלילי הנובע ממחיר הצל של נסיעה בשעות השפל כתוצאה מנהגים שעברו לנהוג בשעות נוחות פחות.
4. רכיב שלילי הנובע מהירידה בגביית מס הבלו מנהגים שירדו מהכביש.

חשוב לציין כי המס הפיגוביאני כשלעצמו אינו משפיע על הרווחה מכיוון שהוא נחשב כהעברה מנהג לקופת הציבור. לעומת זאת, הירידה בתשלום מס הבלו עבור נהגים שנרתעים נחשב לירידה ברווחה שכן מדובר בהפסד לאוצר שאין בו רווח מקדז של הצרכן.

## הצגה גרפית של שיטת החישוב הנומרי



## הנגשת הקוד

אנו מפרסמים את הקוד של המודל, ב-R, במלואו. כך ניתן לבקר את הממצאים וגם לערוך שינויים ושיפורים בהנחות. הקוד הנתון נועד לעבוד בקובץ הלא־מותמם בחדר המחקר, שם חשופים יישוב המגורים ויישוב העבודה של כל נסקר.

עם זאת, כדי ליצור את מרב הנגישות והביקורת, אנו מנגישים גם גרסה שעובדת עם גרסת ה-PUF (גרסה מותממת) של הסקרים. בגרסה זו יש רק "צורת יישוב עבודה" במקום יישוב עבודה; לכן הרזולציה נמוכה יותר. עקב כך, מסלולי העל פרוסים פחות; הפקוקים ביותר פקוקים פחות, והפנויים ביותר פנויים פחות. אבל הרמה הממוצעת של האגרות ושל השינויים ברווחה קרובה מאוד.

הקוד וקבצי הנתונים הנדרשים להריץ את המודל נמצאים בקישור:  
<https://drive.google.com/drive/folders/18WXJKgWKh1bFXefecf78sL63iVLYMecJ?usp=sharing>

תוצאות המודל הוצגו בהרחבה בפרק התוצאות לעיל.







# נספח א. תוצאות בצורת טבלה, עבור כלל המסלולים הגדושים

יש ערך רב להצגה טבלאית של הנתונים, בצורה מצרפית שתהיה מובנת ונקלטה. צירפנו את התוצאות לפי שתי רמות גודש: שלשת המסלולים הפקוקים ביותר, ושבעת המסלולים הפחות פקוקים. שכן ניכר מתרשים 1 למעלה שיש פער גדול למדי בתועלת לאגרות בין קבוצות אלו. עבור אלו האחרונים, תוספת הרווחה היומית אינה עולה על 4 שקל ליום לנהג; עבור אלו הראשונים, התועלת מתחיל ב8 שקל ביום ומגיע עד יותר מ15.

## עיקרי התוצאות עבור כל ערכי הפרמטרים עבור המסלולים הגדושים ביותר

30% מסלולים הפקוקים ביותר: 730 אלף נהגים, 230 אלף נוסעי אוטובוס/הסעות. מרחק ממוצע 21 ק"מ. שבר שעתי מקורי 76 שקל. הפסד בלו ממוצע 1.2 שקל.

### לוח 9 - עיקרי התוצאות עבור כל ערכי הפרמטרים עבור המסלולים הגדושים ביותר

תאור	דקות מקור	דקות אגרה	דקות מהירות שיא	אגרה שקל	מודרים %	תוספת רווחה לשקל	תוספת רווחה לנהגים לשקל	תוספת רווחה לנוסע* לשקל	ערך חסכון זמן לנהגים לשקל	עלות אי נוחות לנהגים לשקל	שבר אגרה שקל לשעה	שבר מודרים שקל לשעה
בסיס	33.8	25.4	21.4	14.6	19%	5.4	6.0	3.0	7.2	1.3	80.6	55.1
גמישות 2.3 במקום 1.2	33.8	24.9	21.4	12.0	21%	6.1	6.7	3.2	8.1	1.4	83.2	48.4
גמישות 8 במקום 1.2	33.8	25.8	21.4	16.9	17%	5.0	5.5	2.8	6.6	1.1	79.5	58.5
מהירות שיא מוגברת 10%	33.8	24.1	19.2	19.3	19%	6.3	6.7	3.5	8.1	1.4	80.1	57.4
שפל 2 שעות במקום 1.5	33.5	25.6	21.7	13.9	18%	5.3	5.8	2.7	7.0	1.2	80.3	55.0
בטא 3 במקום 5	33.8	27.4	21.3	13.1	19%	3.4	4.2	2.2	5.1	0.9	80.2	58.4
בטא 6 במקום 5	33.8	24.9	21.4	14.8	18%	6.2	6.6	3.2	7.9	1.4	80.7	53.9
מקסום ללא התחשבות בהפסד בלו	33.8	24.5	21.4	17.1	23%	7.0	6.0	3.3	7.2	1.3	81.6	56.6

\*"נוסע" = נוסע באוטובוס או בשאטל.

## עיקרי התוצאות עבור כל ערכי הפרמטרים עבור המסלולים הגדושים פחות

70% מסלולים הפקוקים פחות: 1530 אלף נהגים, 540 אלף נוסעי אוטובוס/הסעות. מרחק ממוצע 18 ק"מ. שבר שעתי מקורי 62 שקל.

### לוח 10 – עיקרי התוצאות עבור כל ערכי הפרמטרים עבור המסלולים הגדושים פחות

תאור	דקות מקור	דקות אגרה	דקות מהירות שיא	אגרה שקל	מודרים %	תוספת רווחה תוספת	תוספת רווחה לנהגים	תוספת רווחה לנוסע*	ערך חסכון זמן לנהגים שקל	עלות אי נוחות לנהגים שקל	שבר אגרה שקל לשעה	שבר מודרים שקל לשעה
בסיס	24.6	22.3	19.4	5.3	11%	0.9	1.4	0.9	1.7	0.3	63.7	49.0
גמישות 2.3 במקום 1.2	24.6	22.0	19.4	4.0	12%	1.1	1.6	1.0	2.0	0.4	64.7	44.6
גמישות 8. במקום 1.2	24.6	22.5	19.4	6.3	9%	0.8	1.2	0.8	1.5	0.3	63.4	50.7
מהירות שיא מוגברת 10%	24.6	21.0	17.4	8.8	13%	1.5	2.0	1.4	2.4	0.4	63.9	49.9
שפל 2 שעות במקום 1.5	24.5	22.3	19.6	4.9	10%	0.9	1.3	0.8	1.6	0.3	63.6	48.9
בטא 3 במקום 5	24.6	23.3	19.4	3.4	7%	0.4	0.7	0.4	0.9	0.2	63.0	50.2
בטא 6 במקום 5	24.6	21.9	19.5	5.7	11%	1.2	1.6	1.0	2.0	0.4	63.9	48.4
מקסום ללא התחשבות בהפסד בלו	24.6	21.3	19.4	8.3	17%	1.9	1.5	1.2	1.8	0.3	64.6	50.4

\*"נוסע" = נוסע באוטובוס או בשאטל.

## השוואות פרטניות לוח 11 – השפעת מידת הגודש

מסלולים	דקות מקור	דקות אגרה	דקות מהירות שיא	דקות חיסכון דקות	אגרה שקל	מודרים %	תוספת רווחה שקל
3	33.8	25.4	21.4	8.4	14.6	19%	5.4
7	24.6	22.3	19.4	2.4	5.3	11%	0.9

ההפרש בתוספת רווחה בין המסלולים מרשים. במסלולים הפחות פקקים, הזמן העודף המקורי – זמן בפועל פחות זמן מהירות שיא – הוא בקושי 5 דקות. ממילא הפוטנציאל לשיפור נמוך יחסית. מדובר במסלולים פחות פקוקים וגם במרחקים קצרים יותר מלכתחילה. תוספת רווחה ממוצעת לנהג מקורי באזורים הפקוקים פחות אינו מגיע אפילו לשקל אחד לכל דרך בריצת הבסיס.

## לערך הגמישות

## השפעה מוגבלת

## על שיווי המשקל

## הפיגוביאני. במנעד

גמישות שבין 0.8

ל2.3, כל מנעד

## האגרה הוא כשליש

## בלבד, כאשר מנעד

## תוספת הרווחה רק

כ20%.

בפועל הרווחה צפויה להיות עוד פחות. בין הסיבות:

- הסימולציה מניחה אגרה מותאמת בדיוק למידת הגודש – הנחה רחוקה מן המציאות האפשרית.
- אגרות הגודש באזורים הפקקים היום יגדילו את הצפיפות בכבישים הפחות פקוקים היום. כך שתוספת הרווחה בראשונים צפויה דווקא לעלות על ממצאי הסימולציה, ואלו שבאזורים פחות צפופים הרווחה תהיה קטנה יותר.
- הסימולציה אינה לוקחת בחשבון את ההשפעה על אגלומרציה. השיקול השני עשוי להקטין מאד את צמצום האגלומרציה באזורים הפנויים יותר, אבל עדיין אגרות גודש עלולות לשחוק את מידת הריכוזיות של עובדים.
- ערך הזמן המשוער במודל שלנו – 70% מן השכר – גבוה יותר מממוצע האומדנים בשימוש בעת האחרונה. נוהל פר"ת של משרד התחבורה למשל מעריך את העלות האפקטיבית לעובד רק 30% של השכר.

**לאור הבדלים אלו, יתר ההשוואות שנערוך פה יתרכזו באותם מסלולים בלבד.**

### לוח 12 – השפעת קנה מידה/גמישות

תאור	דקות מקור	דקות אגרה	אגרה שקל	מודרים %	תוספת רווחה שקל	תוספת רווחה לנוסע שקל	ערך חסכון זמן לנהגים שקל	עלות אי נוחות לנהגים שקל
גמישות 0.8	33.8	25.8	16.9	17%	5.0	2.8	6.6	1.1
גמישות 1.2	33.8	25.4	14.6	19%	5.4	3.0	7.2	1.3
גמישות 2.3	33.8	24.9	12.0	21%	6.1	3.2	8.1	1.4

לגמישות הביקוש יש השפעה די מוגבלת על שיווי המשקל הפיגוביאני. גמישות נמוכה פירושה שלנהגים יש חלופות איכותיות, כך שאי-הנוחות בעקבות האגרה קטנה יותר. אך בפועל, אי הנוחות אינה מאד גדולה ביחס לרווח מחסכון זמן. הגדלת הגמישות כמעט פי שלוש, מ0.8 ל2.3, מגדילה את חסכון הזמן בפחות מדקה – מ8.0 דקות ל8.9 דקות; שיווי המשקל על הכביש כמעט זהה. ההבדל

**התקרה על  
האגרה נגזרת  
בעיקר לא מן  
העובדה  
שהמודרים מן  
הכביש ניזוקים  
מן האגרה,  
אלא שאינם  
נהנים ממנה**

העיקרי הוא שנדרש אגרה הרבה יותר גדולה להגיע לשיווי המשקל; האגרה בגמישות נמוכה הקו שקל, ואילו בגמישות נמוכה רק 12 שקל.

ההסבר הוא, שאגרה גבוהה מדי פוגעת ברווחה בשתי דרכים. הדרך ראשונה מתייחסת לשטח של חסכון הזמן בציור ביקוש/היצע. ככל שהאגרה גבוהה יותר, עלות הנסיעה במונחי זמן יורדת. רווחת הצרכן במונחי זמן עבור כל נוסע בפועל עולה. מלבן רווחת הצרכן נהיה גבוה יותר. אך חסכון זמן זה הוא פועל יוצא של הורדת חלק מן הנהגים מן הכביש. בהכרח יש פחות צרכנים, ולכן מלבן רווחת הצרכן נהיה גם צר יותר.

הדרך השנייה היא אבדן הרווחה של אותם נהגים מודרים. כאשר הם נאלצים לשלם מחיר גבוה יותר עבור הנסיעה, מחמת תוספת האגרה (בניכוי חסכון הזמן), הם נאלצים גם למצוא הסדר נסיעה חילופי, רצוי פחות במונחים המשטר המקורי, בו הם בחרו נהיגה. הרווחה שלהם נפגעת. בציור ביקוש/היצא טיפוסי אבדן רווחה זה מוצא ביטוי במשולש של רווחה אבודה או נטל עודף, המכונה גם לפעמים "משולש הרברגר".

השפעת הגמישות על אובדן הרווחה (הדרך השנייה) ניכרת. כאשר יש לחלק הנוסעים חלופות נוחות לנהיגה במכונית פרטית, ההכרח לעבור לחלופה כזאת מחמת האגרה אינו כרוך בפגיעה גדולה ברווחה. במונחים של ביקוש והיצע, כאשר הגמישות גבוהה עקומת הביקוש יחסית שטוחה ומשולש רווחה אבודה נמוכה. אם כי השפעה זאת ממותנת בכך שבאשר הגמישות גבוהה, המדיניות האופטימאלית מורידה יותר נהגים והמשולש רחב יותר.

השפעת הגמישות על ערך חסכון הזמן קטנה, והשפעה זאת היא הדומיננטית. רואים בלוח שערך אי-הנוחות רק כ-20% של ערך חיסכון הזמן. לכן המנעד הרחב למדי של ערכי גמישות אינו מתורגם למנעד גדול כל כך של תוספת רווחה מחמת משטר אגרות גודש.

התקרה על האגרה נגזרת בעיקר לא מן העובדה שהמודרים מן הכביש ניזוקים מן האגרה, אלא שאינם נהנים ממנה. במונחים של מבוא למיקרו כלכלה, הקטנת מספר הנוסעים בכביש באמצעות אגרה מביאה למלבן רווחת צרכן – במונחי זמן – גבוה יותר, שכן המחיר במונחי זמן יורד. אבל מלבן זה הוא בהכרח צר יותר, שכן צמצום זמן הנסיעה הינו פועל יוצא ישיר של הקטנת נהגים מן הכביש.

המרכיב השני של התמונה הוא שטח הרווחה האבודה מחמת צמצום מספר הנוסעים, "משולש הרבגר". למשולש הרבגר, המכונה בטבלה "עלות אי נוחות", יש השפעה מוגבלת. ככל הגמישות גבוהה יותר, ניתן לקצץ בפקקים על ידי אגרה נמוכה יותר, ולכן המשולש נמוך יותר. מאידך, יותר אנשים יורדים מן הכביש, ולכן המשולש רחב יותר. ההבדל בגדול המשולש מסתכם רק ב-0.3 שקל לנוסע ליום, פחות מ-10% של השיפור ברווחה.

## שעות יוממות ביום

המודל מניח שכל הנוסעים בשעות היוממות, הם בעלי עקומת הביקוש שזהה לזאת של היוממים המופיעים בנתוני הסקר החברתי בסימולציה. ברור שהנחה זאת אינה מדויקת, שכן חלק של הנוסעים בשעות היוממות נוסעים למטרות אחרות, ואי הדיוק גדול יותר ככל שמתרחקים משעות היוממות העיקריות. (עדיין נכון שמי שנוסע בשעות העומס מתאפיין מן הסתם בגמישות נמוכה, אבל מחקרים מראים שעדיין לנוסעים לצרכי לימודים וצרכנות וכדומה יש גמישות גבוהה יותר). לכן יש חשיבות לאלו שעות בדיוק המודל מניח שהם שעות היוממות. המודל מניח ששעות נסיעות שיא בבוקר הינם מ7:30 עד 9:00, ובערב מ15:30 עד 17:30. אלו בעקביות משבצות הזמן עם הנסיעה האטית ביותר. סימולציית הבסיס מוסיפה לשעות אלו יציאות ב6:00, 6:30 ו9:30 בבוקר, ו18:00 עד 19:00 בערב, כשעות שפל – שהן עדיין בעיקר שעות יוממות. חשוב לבחון עד כמה ממצאי המודל נשענים על הנחה מעט שרירותית זאת.

## לוח 13 – השפעת אורך שעות השפל

אגרה שקל	דקות מהירות שיא	דקות אגרה	דקות מקור	תאור
14.6	21.4	25.4	33.8	בסיס
13.9	21.7	25.6	33.5	שפל 2 שעות במקום 1.5

רואים שהרחבת שעות היוממות אינה משפיעה מאד על הממצאים.

הסימולציה מכיילת את מספר הנוסעים ומשך זמן הנסיעה שלהם על פי הממוצעים בסקר החברתי. יותר שעות שפל פירושו אחוז גבוה יותר של יוממים שנוסעים בשעות אלו; כדי לשמור על זמן נסיעה ממוצע זהה, משך זמן בשיא גדל ומשך זמן בשפל יורד. תגובת משך זמן הנסיעה לירידה בתנועה (הנגזרת) גדולה יותר ככל

שזמני הנסיעה ארוכים יותר (זאת אומרת כביש צפוף יותר), ולכן בסימולציה עם יותר שעות שפל ירידת הזמן בשיא גדולה יותר, וזאת שבשפל קטנה יותר. הממוצע המשוקלל דומה למדי. כמו כן, אגרת השיא גבוהה יותר ואגרת שפל נמוכה יותר בסימולציה עם יותר שעות שפל; שוב הממוצע דומה למדי.

## מהירות שיא

פונקציית הגודש שקושרת בין נפח למהירות מתבססת בין היתר על הצבת מהירות השיא של הכביש – מהירות בתנאים של תנועה חופשית לחלוטין. ככל שמהירות בפועל קרובה יותר למהירות שיא, בעיית העומס קטנה יותר וקשה יותר להקטין אותה. בבסיס, מהירות שיא היא מהירה יותר מן המהירות הגבוהה ביותר שמקבלים מהיישומון של גוגל. בטבלה הבאה נציג תוצאות בהנמיהירות השיא חושבה כ-85% ממהירות של גוגל, במקום 95%, ממהירות זו, כפי שחושבה בריצות העיקריות של המודל.

### לוח 14 – השפעת ערך נזקף של מהירות שיא

תאור	דקות מקור	דקות אגרה	דקות מהירות שיא	אגרה שקל	מודרים %	תוספת רווחה שקל	תוספת רווחה לנהגים שקל	תוספת רווחה לנוסע* שקל	ערך חסכון זמן לנהגים שקל	עלות אי נוחות לנהגים שקל	שבר אגרה שקל לשעה	שבר מודרים שקל לשעה
גמישות 8. במקום 1.2	33.8	25.4	21.4	14.6	19%	5.4	5.5	3.0	7.2	1.3	80.6	55.1
מהירות שיא מוגברת 10%	33.8	24.1	19.2	19.3	19%	6.3	6.7	3.5	8.1	1.4	80.1	57.4

\*"נוסע" = נוסע באוטובוס או בשאטל.

הסימולציה של מהירות שיא מוגברת נעשתה עבור גמישות 0.8 ולא עבור ריצת הבסיס, לכן ההשוואה היא עבור ערך זה.

כצפוי, אגרת הגודש יותר יעילה כאשר מניחים מהירות שיא גבוהה יותר. חיסכון הזמן עולה מ-8.4 דקות ל-9.7 דקות, ותוספת הרווחה עולה מ-5.4 שקל ל-6.3 שקל. מאידך, לא מדובר בתוצאה שמשנה את התמונה הכוללת.

## התחשבות באובדן הבלו

חיוני בחישוב הרווחה החברתית לקחת בחשבון את הפסד ההכנסות מבלו. הערכים של חיסכון הזמן של הנהגים ושל הנוסעים, ועלות אי-הנוחות של אלו הנאלצים לשנות את הרגלי הנסיעה שלהם, נותנים ביטוי רק לשינוי ברווחת הצרכן. אבל יש גם שינוי ברווחת היצרן. מדינת ישראל מוכרת היום שירותי נסיעה במחיר קרוב מאד ל־30 אגורות לק"מ, שכן מרבית כלי הרכב משלמים בלו של בערך 3 שקל לליטר ונוסעים 10 ק"מ לליטר בקירוב. כאשר יש פחות נסיעות, אזי יש הפסד לא רק לצרכן אלא גם ל"יצרן" של הנסיעות, אוצר המדינה.

עם זאת, חישוב האובדן הזה מורכב. להלן השיקולים העיקריים:

1. תחלופה. המודל מניח שכאשר נהג יורד ממסלול מסוים הוא לא נוסע כלל. אבל ברור שחלק מן הנהגים שיורדים מן המסלולים העמוסים מחמת האגרה יבחרו במקום זה לנסוע במסלולים אחרים, עמוסים פחות. מובן שבחירה זאת תדחוק החוצה חלק מן הנהגים שבמודל הנוכחי בוחרים לנסוע למרות האגרה, אבל הדחיקה החוצה לא תהיה מאה אחוז. לכן המודל הנוכחי נותן ספירת יתר של השחיקה בשימוש בכביש.

2. חלק מן הבלו אינו עודף צרכן אלא כיסוי של עלויות שוליות, כמו אחזקה ובנייה של כבישים.

3. חלק מן הבלו הוא מס פיגוביאני על מפגעים כמו רעש וזיהום. כאשר אגרות גודש מתמרצות ירידה מן הכביש, יש גם פחות זיהום ורעש. אובדן ההכנסה מתקזז עם אובדן המפגע.

עצם הניכוי של מלוא אובדן הבלו אינו כמובן ליקוי במודל. אנו מדווחים את הערך של אובדן הבלו, ומי שחושב שאחוז זה או אחר של הבלו אינו הפסד אמיתי ברווחת יצרן יכול לנכות לעצמו מה שנראה לו סביר. הליקוי הוא ששיווי המשקל של שיא רווחת הצרכן מתבסס על חישוב זה.

כעת נבחן את השאלה עד כמה הנחה זאת משנה את שיווי המשקל.



## לוח 15 - השפעת הפסד הבלו

שכר מקור שקל לשעה	שכר מודרים שקל לשעה	שכר אגרה שקל לשעה	עלות אי נוחות לנהגים שקל	ערך חסכון זמן לנהגים שקל	תוספת רווחה לנוסע* שקל	תוספת רווחה לנהגים שקל	תוספת רווחה שקל	מודרים %	אגרה שקל	דקות אגרה	דקות מקור	תאור
75.9	55.1	80.6	1.3	7.2	3.0	6.0	5.4	19%	14.6	25.4	33.8	בסיס
75.9	56.6	81.6	1.3	7.2	3.3	6.0	7.0	23%	17.1	24.5	33.8	לא מתחשבים בהפסד בלו

\*"נוסע" = נוסע באוטובוס או בשאטל.

ניתן לראות כי אין משמעות לעובדה שתוספת הרווחה בלי ניכוי הבלו גדולה הרבה יותר. הסכום פשוט מוסיף חזרה את כל ערך הכנסות הבלו. מה שחשוב הוא השינוי בשיווי המשקל וברווחת הנוסעים.

השינוי נובע מזה שכאשר לא מתחשבים באובדן הבלו, שיווי המשקל הפיגוביאני יוריד יותר אנשים מן הכביש, שכן עלות ההרתעה הזאת נמוכה יותר. אכן רואים שבמשטר זה 23% מן הנהגים יורדים מן הכביש במקום 19%, וחסכון הזמן עולה מ-8.4 דקות ל-9.3 דקות. מאידך, רווחת הנהגים אינה שונה. מלבן חסכון הזמן צר יותר, אך גבוה יותר.

ניתן לסכם: ממצאי המודל היו מדויקים יותר לו היינו בוחרים לנכות רק חלק מן אובדן הכנסות הבלו בסימולציה. היה צריך לנכות לכל הפחות העלות השולית של תחזוקת הכביש מחמת נסיעות בפועל, מרכיב פיגוביאני של הבלו שאינו מתייחס לעלות הגודש, ודחייה מנסיעה במסלול אחר שמופיעה בתוספת נטו לנסיעה בכביש אחר. יש לשער שמדובר בכחצית החישוב שאכן נעשה. אבל ניתן גם לומר ששינוי זה לא היה משנה מאד את התמונה הכללית של ממצאי הסימולציה.

## קצב הערמת הגודש

עוד פרמטר קריטי לחישוב שיווי המשקל הוא הנגזרת של משך זמן הנסיעה עם תוספת נהגים. במשוואה שבחרנו לחשב יחס זה, הפרמטר שמגלם נגזרת זאת הוא בטא. מצאנו בספרות מגוון הצבות עבור ערך הבטא, כאשר ההמוצע הוא בסביבות ה-3. אבל מהתייעצות עם מומחי תחבורה בישראל עולה שערך זה נוטה להיות נמוך לתיאור מידת העיכוב בנסיעה הנגרם מתוספת נוסעים בכבישי ישראל בשעות היוממות. לכן לקחנו בטא שווה 5 כריצת בסיס, ובדקנו בטא 3 כערך נמוך ובטא 6 כערב גבוה.

לוח 16 - השפעת קצת הערמת הגודש

תאור	דקות מקור	דקות אגרה	אגרה שקל	מודרים %	תוספת רווחה לשקל	תוספת רווחה לנהגים לשקל	ערך חסכון זמן לנהגים	עלות נוחות לנהגים לשקל	שכר אגרה לשעה	שכר מודרים שקל לשעה
בטא 3	33.8	27.4	13.1	19%	3.4	4.2	5.1	0.9	80.2	58.4
בסיס - בטא 5	33.8	25.4	14.6	19%	5.4	6.0	7.2	1.3	80.6	55.1
בטא 6	33.8	24.9	14.8	18%	6.2	6.6	7.9	1.4	80.7	53.9

ככל שקצב הערמת הגודש גבוה יותר, התועלת של אגרות גודש גדולה יותר. כפי שהסברנו מספר פעמים, העלות החיצונית במונחי גודש עבור כל נהג נוסף היא רחוקה מליניארית. כל נהג נוסף גורם עיכוב גדול יותר, וככל שיש יותר כלי רכב על הכביש עיכוב נתון גורם הפסד ליותר נהגים.

כאשר בטא גבוה, ההשפעה הראשונה - נהג נוסף גורם יותר עיכוב ככל שיש יותר נהגים - משמעותית יותר. לכן, ירידה זהה במספר כלי הרכב בכביש מיתרגמת לתוספת זמן הרבה יותר גדולה. ראינו כי כאשר בטא שווה 6 מורידים פחות כלי רכב מן הכביש - 18 במקום 19 - אך תוספת הזמן דווקא גדלה: ל-8.9 דקות במקום 8.4.

מעניין יהיה לאמוד בצורה מדויקת יותר את ערך הבטא המתאים המצרפי, ואולי אפילו עבור כל כביש או סוג כביש בנפרד. אבל שוב, מדובר בהשפעה משמעותית אבל לא ב"משנה משחק". גם ערכים קיצוניים של בטא נותנים מנעד של תוספת רווחה הנע בין ירידה של 30% עד עלייה ב-10%.



# נספח ב. סקירת ספרות על גמישות הביקוש לנסיעה

## גמישות הביקוש לנסיעות יוממות ברכב פרטי

מטרתו של חלק זה היא לסקור את המידע בספרות בדבר גמישות הביקוש לנסיעה. אנו מעוניינים בעיקר בעדויות לגמישות הביקוש בטווח הארוך. ההבדל בין הטווח הקצר לטווח הארוך טמון בעובדה שבטווח הקצר עומדות לפני הצרכן פחות אלטרנטיבות. כאשר מחיר הנסיעה עולה, הוא יכול לבחור להקדים או לאחר את הנסיעה, לנסוע בתחבורה ציבורית או לעבור לעבוד מהבית. בטווח הארוך יש לו אפשרויות נוספות, כמו החלפת מקום עבודה או מקום מגורים, רכישת רכב או מכירתו וכיוצא בזה. כמו כן אנו מעוניינים בגמישות הביקוש לנסיעה של יוממים ברכב פרטי.

יש מספר רב של מאמרים אמפיריים שבחנו שאלה זו. כאן נביא שלושה מאמרים, שכל אחד מהם הוא מטה־אנליזה של עשרות מחקרים אחרים. ממאמרים אלו נוכל לקבל תמונה כללית של טווח הגמישויות הסביר, שממנו נוכל לגזור את טווח קני המידה שעלינו להשתמש בהם כדי להמיר שקלים לערכים החבויים של הנוסעים.

דה־ג'ונג וגאן<sup>48</sup> אספו נתונים מ־50 מחקרים שנעשו על גמישות הביקוש, מ־12 מדינות באירופה, ובחנו את גמישות הביקוש לנסיעה כאשר יש שינוי בזמן הנסיעה ובעלותה. חלק מהמאמרים השתמשו בנתוני אמת שנאספו לפני שינוי במחיר הנסיעה ואחריו, וחלק מסקרים שבהם נשאלו נהגים בדבר העדפותיהם. כמו כן, הם בחנו מודלי סימולציה מהולנד, איטליה ובלגיה המאפשרים סימולציות שבוחנות את גמישות הביקוש במדינות אלו תחת שינויים במחיר החניה, הדלק וזמן הנסיעה.

בטבלה הבאה ניתן לראות את ממוצע הגמישויות ב־50 מאמרים שנסקרו, וכן את הגמישויות בכל אחת מהמדינות הנוספות שנבחנו. הגמישויות נמדדו עבור מספר הנסיעות ומספר הקילומטרים, הן מתייחסות לטווחי הזמן שונים (טווח קצר וטווח ארוך) ולמטרות נסיעה שונות. הנתונים שרלוונטיים לעבודה זו הם הנתונים המתייחסים לגמישות בטווח הארוך, של יוממים.

### לוח 17 – גמישות מספר הנסיעות ביחס למחיר דלק

Table 1: Fuel Price Elasticities of the Number of Car Trip

Term/ purpose	Literature EU	The Netherlands' national model system (NMS)	Italian national model	Model for Brussels
<b>Short term:</b>				
Commuting	- 0.20	- 0.11	- 0.52	- 0.16
Home-based business	- 0.06	- 0.01	- 0.29	
Non-home-based business	- 0.06	- 0.01		
Education	- 0.22	- 0.10	- 0.55	
Other	- 0.20	- 0.31	- 0.16	
Total	- 0.16	- 0.19		
<b>Long term:</b>				
<b>Commuting</b>	<b>- 0.14</b>	<b>- 0.15</b>	<b>- 0.55</b>	<b>- 0.24</b>
Home-based business	- 0.07	- 0.01	- 0.29	
Non-home-based business	- 0.17	- 0.01		
Education	- 0.40	- 0.18	- 0.59	
Other	- 0.15	- 0.41	- 0.16	
Total	- 0.19	- 0.25		

Note: All elasticity comparisons in this paper are in terms of absolute values. For instance, an elasticity of  $-0.3$  will be said to be 'higher' than an elasticity of  $-0.2$ .

סקירה נוספת נעשתה על ידי גודווין, דארגיי והאנלי. 49 הם סקרו נתונים של 69 מחקרים שאמדו את השפעת מחיר הדלק על הביקוש לדלק, הביקוש לנסיעה, הבעלות על רכב וגורמים נוספים. אלו נבחנו הן בטווח הארוך הן בטווח הקצר. הטבלה הבאה מציגה תקציר של התוצאות שהתקבלו במחקרים אלו. הנתון שרלוונטי עבור עבודה זו הוא הגמישות לטווח הארוך של מספר הקילומטרים בנסיעה ברכב פרטי, כאשר יש שינוי במחיר הדלק. הטווח המוצג בטבלה הוא בין 0.1- ל-0.63-. . אף שבעבודה זו הביקוש לנסיעה מוגדר לפי כמות המכוניות הנוסעות בזמן שיא ובזמן שפל, ולא לפי מספר הקילומטרים, עדיין הנתון על גמישות המחיר על פי מספר הקילומטרים יכול לספק אינדיקציה טובה לגבי הגמישות שאנחנו מחפשים.

### לוח 18 - גמישות ביקוש לנסיעה ביחס למחיר הדלק

**Table 2: Overall results: elasticities of various measures of demand with respect to fuel price per litre produced by dynamic estimation using time series data**

Dependent variable	Short-term	Long-term
<b>Fuel consumption (total)</b>		
Mean elasticity	-0.25	-0.64
Standard deviation	0.15	0.44
Range	-0.01, -0.57	0, -1.81
Number of estimates	46	51
<b>Fuel consumption (per vehicle)</b>		
Mean elasticity	-0.08	-1.1
Standard deviation	n/a	n/a
Range	-0.08, -0.08	-1.1, -1.1
Number of estimates	1	1
<b>Vehicle-km (total)</b>		
Mean elasticity	-0.10	-0.29
Standard deviation	0.06	0.29
Range	-0.17, -0.05	-0.63, -0.10
Number of estimates	3	3
<b>Vehicle-km (per vehicle)</b>		
Mean elasticity	-0.10	-0.30
Standard deviation	0.06	0.23
Range	-0.14, -0.06	-0.55, -0.11
Number of estimates	2	3
<b>Vehicle stock</b>		
Mean elasticity	-0.08	-0.25
Standard deviation	0.06	0.17
Range	-0.21, -0.02	-0.63, -0.10
Number of estimates	8	8

n/a = Not available

אום, טיי הון, וויליאם ג'. ווטרס, וג'ונג סיי יונג סקרו מאמרים מוקדמים יותר הבוחנים את גמישות הביקוש לנסיעה. הם בחנו גמישויות לביקוש לנסיעה בתחבורה אווירית, ימית, רכב פרטי ואוטובוס. עבור רכב פרטי ואוטובוס הם גם הבחינו בין נסיעה בשעות השיא לנסיעה בשעות השפל. כמו כן הם הבחינו בין הגמישות לנסיעה באופן כללי, לבין הגמישות לשנות את אופן הנסיעה (מרכב לתחבורה ציבורית ולהפך). מצד שני לא הייתה אבחנה בין גמישות בטווח הקצר לגמישות בטווח הארוך. את הממצאים ניתן לראות בטבלה הבאה:

#### לוח 19 - סיכום אומדני גמישות

Table 4: Elasticities of Demand for Passenger Transport (All elasticity figures are negative)

Mode	Range Surveyed			No. of Studies <sup>c</sup>
	Market Demand Elasticities	Mode Choice Elasticities	Most Likely Range	
<b>Air<sup>a</sup>:</b>				
Vacation	0.40-4.60	0.38	1.10-2.70	8
Non-Vacation	0.08-4.18	0.18	0.40-1.20	6
Mixed <sup>b</sup>	0.44-4.51	0.26-5.26	0.70-2.10	14
<b>Rail: Intercity</b>				
Leisure	1.40	1.20	1.40-1.60	2
Business	0.70	0.57	0.60-0.70	2
Mixed <sup>b</sup>	0.11-1.54	0.86-1.14	0.30-1.18	8
<b>Rail Intracity</b>				
Peak	0.15	0.22-0.25	0.20-0.40	2
Off Peak	1.00		≤1.00	1
All Day <sup>b</sup>	0.12-1.80	0.08-0.75	0.10-0.70	4
<b>Automobile;</b>				
Peak	0.12-0.49	0.02-2.69	0.10-0.70	9
Off Peak	0.06-0.88	0.16-0.96	0.20-1.10	6
All Day <sup>b</sup>	0.00-0.52	0.01-1.26	0.10-1.10	7
<b>Bus:</b>				
Peak	0.00	0.03-0.58	0.10-0.70	6
Off Peak	1.08-1.54	0.01-0.69	0.10-1.10	3
All Day <sup>b</sup>	0.10-1.62	0.03-0.70	0.10-1.30	11

במאמרים הראשונים המחיר שנבדק הוא מחיר הדלק. במאמר האחרון בדקנו חלק מן המאמרים לראות מהו מחיר הייחוס עבור הגמישויות, והמאמרים שמצאנו ושפירוטו את הבסיס (Out of pocket costs) ביססו את החישוב על מחיר כספי שוטף. (או operating costs). הכוונה ככל הנראה לעלות דלק, אגרות וחניה.

לא ניתן להשליך ישירות מנתון על גמישות הביקוש ביחס למחיר מסוים ובמקום וזמן מסוימים למחיר אחר ובמקום וזמן אחרים. אבל נצביע על כמה כללים שיעזרו להפיק לקחים.

המודל שלנו הוא מודל גמישות ל"מחיר כולל" בטווח הארוך. המחיר מבחינתנו כולל גם עלויות קבועות (דוגמת פחת) וגם הערך הכספי של הזמן. אם הנתונים בספרות מתייחסים למכנה שונה (למשל מחיר כספי של דלק בלבד), יש צורך להמיר את הנתון למונחים שאנו עושים בהם שימוש.

בפרט, בארץ עלות הדלק (כ־60 אגורות לק"מ, כולל מס בלו) מהווה כשליש של העלות הכוללת (בערך 2 שקל לק"מ). מס זה גבוה ממסי הדלק ברוב מדינות אירופה באותה התקופה, כך שעלות כוללת פי שלושה ממחיר הדלק היא בסיס סביר להמרת הנתונים. שינוי בנסיעות של 15% של שינוי במחיר הדלק הוא שווה ערך לשינוי של 45% בשינוי במחיר הכולל. (שינוי של 0.15% בנסועה לעומת שינוי של 1% במחיר הדלק = 0.15% חלקי שינוי ב־0.33% בלבד של מחיר כולל). כאשר מדובר על "עלות שוטפת" המכפיל קטן יותר, אולי קרוב יותר לשניים במקום שלושה.

יש גם שיקולים נוספים. גמישות הביקוש תלויה בזמינות חלופות לנסיעה במכונית, שהן שונות מאוד מזמן לזמן וממקום למקום. נוסף על כך, ככל שההכנסה גבוהה יותר גמישות הביקוש למחיר צפויה להיות נמוכה יותר, שכן חלק ניכר מגמישות הביקוש נזקק לאפקט ההכנסה. ההכנסות בישראל היום גבוהות משמעותית מן ההכנסות ששררו במדינות הסקרים השונים שנסקרו במאמרי הסיכום שבדקנו. כך שהגמישות בארץ היום מבחינה זו צפויה להיות נמוכה יותר.

אם ניקח את מרכז הכובד של האומדנים השונים, עם התיקונים שנראים המתבקשים ביותר, נקבל מנעד של גמישות בערך בין 0.5 ל־1.5 – אי ודאות סטטיסטית שמשקפת אי ודאות אמיתית כלפי תגובה לא נודעת לשינוי במדיניות בעתיד לא נודע. מבחינתנו, הלקח המרכזי של סקירת הספרות הוא שניתן לקבל תמונה אמינה רק על ידי הרצת סימולציות במנעד רחב למדי של הנחות כלפי גמישות הביקוש לנסיעות יוממות.

במודל שלנו היקף הנסועה (מספר קילומטרים) יחסי כמעט למספר הנסיעות, אם כי יש קיצוץ גדול יותר בנסיעות ארוכות מאשר בנסיעות קצרות. לכן אפשר להחיל את אותו התיקון של הנתונים על גמישות ביחס של ק"מ נסועה. אז נקבל גמישויות בין 0.66 (הולנד) עד 3.6 (איטליה).







# נספח ג. נוסחאות שינוי רווחה

Mean value (consumer surplus) of peak commute in initial regime for commuter  $i$  defined as  $V_i$ . Mean value of shadow cost of off-peak commute in initial regime defined as  $S_i$ . Random term for value around  $V_i$  is  $e_{1i} \sim N(0,1)$ . Random term for value of off-peak trip is  $e_{2i} \sim N(0,SD2)$ . For most runs,  $SD2=0.4$ .

P refers to peak travel, O refers to off-peak travel, N refers to no travel. (Zero consumer surplus by definition.)

$TP_i$  is the effective relative toll for agent  $i$  for peak travel in the Pigovian regime;  $TO_i$  is the effective relative toll for offpeak travel. The toll adds the additional money cost but deducts the value of the time saved. The toll is occasionally negative, either because there is not much congestion and the Pigovian toll is less than the blo tax on gasoline, or because a driver has a very high value of time so that the time saving is worth more than the additional money cost.

$$TP_i = (TOLLPEAK_i - BLO) * KM_i - (TIMEPEAK_{1i} - TIMEPEAK_{2i}) * TIMEVAL_i$$

$$TO_i = (TOLLOFFPEAK_i - BLO) * KM_i - (TIMEOFFPEAK_{1i} - TIMEOFFPEAK_{2i}) * TIMEVAL_i$$

For simplicity, the subscripts are left out in the equations.

CDF is the cumulative distribution function of the normal distribution. PDF is the probability density function, which is the derivative of CDF. The mean is zero. The standard distribution is 1 for  $e_1$  (hence not indicated in the formulas) and  $SD2$  for  $e_2$ .

Value of travel in the various times and regimes for a given realization of  $e_1$  and  $e_2$  are:

$$V(P1) = V + e_1$$

$$V(O1) = V + e_1 - S + e_2$$

$$V(P2) = V + e_1 - TP$$

$$V(O2) = V + e_1 - S + e_2 - TO$$

Conditions for choose P1:  $V(P1) > 0$ ,  $V(P1) > V(O1)$ . This implies:  $V > -e_1$ ,  $S > e_2$ . Hence the probability is:

$$P(P1) = \text{CDF}(-V) * \text{CDF}(S, SD=SD2)$$

Conditions for choose O1:  $V(O1) > 0$ ,  $V(O1) > V(P1)$ . This implies  $e_1 + e_2 > (S - V)$ ,  $e_2 > S$ . For each  $e_2$ ,  $e_1 > (S - V - e_2)$  which has a probability of  $1 - \text{CDF}(S - V - e_2)$ . Integrate over all  $e_2$  greater than  $S$ ; the density for each  $e_2$  in the integral is  $\text{PDF}(e_2)$ . Hence the probability is given by:

$$P(O1) = \int_S^{\infty} [1 - \text{CDF}(S - V - e_2)] \text{PDF}(e_2)$$

## WELFARE CALCULATIONS

There are nine possible transitions for a commuter: peak-peak, peak-offpeak, peak-none; offpeak-peak, offpeak-offpeak, offpeak-none; none-peak, none-offpeak, none-none. Each has an associated probability and expected gain or loss in consumer surplus.

### PEAK-PEAK

Conditions:  $V(P1) > 0$ ,  $V(P1) > V(O1)$ ,  $V(P2) > 0$ ,  $V(P2) > V(O2)$ .

$V > -e_1$ ,  $S > e_2$ ,  $V - TP > -e_1$ ,  $V - TP + e_1 > V + e_1 - S - TO + e_2$  i.e.  $-TP > e_2 - S - TO$ .

Hence  $e_1 > -V$ ,  $e_1 > -(V - TP)$  i.e.  $e_1 > \max(-V, TP - V)$

Also  $e_2 < S$ ,  $e_2 < S + TO - TP$ , i.e.  $e_2 < \min(S, S + TO - TP)$

Consumer surplus change is just the net individual toll for peak travel:  $-TP$ .

$$\text{ECS}(P1, P2) = -TP * [1 - \text{CDF}(\max(-V, TP - V))] * \text{CDF}(\min(S, S + TO - TP, sd=SD2))$$

### PEAK-OFFPEAK

Conditions:  $V(P1) > 0$ ,  $V(P1) > V(O1)$ ,  $V(O2) > 0$ ,  $V(O2) > V(P2)$ .

$V > -e_1$ ,  $S > e_2$ ,  $V - TP > -e_1$ ;  $e_1 + e_2 > S - TO - V$ ,  $e_2 > S + TO - TP$

Change in consumer surplus is:  $(V + e_1 + e_2 - S - TO) - (V + e_1) = e_2 - S - TO$ .

Integrate over  $e_2$ :

$$\text{ECS}(P1, O2) = \int_{S+TO-TP}^S (e_2 - S - TO) * [1 - \text{CDF}(\max(S + TO - V - e_2, -V))] \text{PDF}(e_2, SD2)$$

## PEAK- NONE

Conditions:  $V(P1) > 0$ ,  $V(O1) > V(P1)$ ,  $V(P2) < 0$ ,  $V(O2) < 0$   
 $V > -e1$ ,  $S > e2$ ,  $V - TP < -e1$ ;  $e1 + e2 < S - TO - V$   
 $-V < e1 < TP - V$   
Also  $e2 < S$ ,  $e2 < S - TO - V - e1$  i.e.  $e2 < \min(S, S - TO - V - e1)$

Change in consumer surplus is  $-(V + e1)$ . Integrate over  $e1$ :

$$ECS(P1, N2) = \int_{-V}^{TP-V} (-e1 - V) * CDF(\min(S, S + TO - V - e1), SD2) PDF(e1)$$

## OFFPEAK-PEAK

Conditions:  $V(O1) > 0$ ,  $V(O1) > V(P1)$ ;  $V(P2) > 0$ ,  $V(P2) > V(O2)$   
 $e1 + e2 > (S - V)$ ,  $e2 > S$ ;  $e1 > TP - V$ ,  $e2 < S + TO - TP$   
 $e1 > \max(S - V - e2, TP - V)$   
 $S < e2 < S + TO - TP$  so these are the limits of integration over  $e2$ .

Change in consumer surplus:  $S - TP - e2$ . Save shadow cost  $(S - e2)$ , pay toll.

$$ECS(O1, P2) = \int_{-S}^{S+TO-TP} [1 - CDF(\max(TP - V, S - V - e2))] * PDF(e2)$$

## OFFPEAK-OFFPEAK

Conditions:  $V(O1) > 0$ ,  $V(O1) > V(P1)$ ;  $V(O2) > 0$ ,  $V(O2) > V(P2)$   
 $e1 + e2 > (S - V)$ ,  $e2 > S$ ;  $e1 + e2 > S + TO - V$ ,  $e2 > S + TO - TP$   
 $e1 > \max(S - V - e2, S + TO - V - e2)$ . For any given  $e2$ , this can be calculated directly with the CDF of the standard normal.  
The bounds on  $e2$  are:  $e2 > \max(S, S + TO - V)$  so these are the bounds of integration where the PDF is for  $e2$ , i.e.  $SD = SD2$ .

Change in welfare is  $-TO$ , the commuter just loses the toll.

$$ECS(O1, P2) = -TO \int_{\max(S, S+TO-V)}^{\infty} [1 - CDF(\max(S+TO-V - e2, S - V - e2))] * PDF(e2)$$

## OFFPEAK - NONE

Conditions:  $V(O1) > 0$ ,  $V(O1) > V(P1)$ ;  $V(P2) < 0$ ,  $V(O2) < 0$

Change in consumer surplus:  $-(V + e1 + e2 - S)$

$$ECS(O1, P2) = \int_S^{S-TP} \left[ \int_{S-e2-V}^{\min(TP-V, TO+S-e2-V)} -(V+e1+e2-S) * PDF(e1) \right] * PDF(e2, SD2)$$

---

## NONE - PEAK

Conditions:  $V(P1) < 0$ ,  $V(O1) < 0$ ,  $V(P2) > 0$ ,  $V(O2) > V(O1)$

This will only occur when  $TP < 0$ , a negative toll. This characterizes high-income individuals when the time savings due to a toll regime are worth more than the toll itself. There are always individuals like this in our distribution.

$$TP - V < e1 < -V; e2 < \min(S - V - e1, S + TO - TP)$$

Change in consumer surplus:  $V + e1 - TP$ , there is a welfare gain.

$$ECS(N1, P2) = \int_{TP - V}^{-V} (V + e1 - TP) * CDF(\min(S - V - e1, S + TO - TP), SD2) PDF(e1)$$

## NONE - OFFPEAK

Conditions:  $V(P1) < 0$ ,  $V(O1) < 0$ ,  $V(O2) > 0$ ,  $V(O2) > V(P2)$

Again, this will only occur when  $TO < 0$ , a negative toll. Hence the lower limit of integration is the upper limit plus  $TO$ .

Welfare gain is  $V + e1 + e2 - S - TO$

$$ECS(N1, O2) = \int_{\max(S + TO, S + TO - TP)}^{\infty} \left[ \int_{S - e2 - V + TO}^{\min(-V, S - e2 - V)} (V + e1 + e2 - S - TO) * PDF(e1) \right] * PDF(e2, SD2)$$

## NONE-NONE

The consumer surplus is zero in both regimes so there is no contribution to the consumer surplus calculation.



# נספח ד. הערות טכניות על השיטה הנומרית

המודל מתבסס על כשמונת אלפים יוממים מן הסקר החברתי. לכל נסקר יש זקיפה דטרמיניסטית של ממוצע ערך הנסיעה וממוצע ערך מחיר הצל לנסיעה בשפל לעומת שיא, והתפלגות נורמלית סביב ערך זה. כרגע שיטת הפתרון הנומרית היא פתירה נומרית של האינטגרל הכפול שנותן את תוחלת מספר הבוחרים בכל חלופה (נסיעה בשיא, נסיעה בשפל, הימנעות) ובכל משטר, ואת תוחלת השינוי ברווחה.

שיטת פתרון אפשרית היא פשוט לזקוף לכל אחד מן הנוסעים ערך אקראי לפי ההתפלגות ולפתור את המודל בצורה דטרמיניסטית. שיטה זו בעייתית שכן יש בכל מסלול רק כ-700 יוממים, זאת אומרת רק פחות מ-500 נהגים; בחירה של נהג אחד בלבד לעבור מנסיעה בשיא בסיבוב אחד של ההתכנסות לנסיעה בשפל בסיבוב הבא מהווה שינוי ניכר בשיווי המשקל. לעתים קרובות אין התכנסות כי במס מסוים יש נהג שולי ספציפי שבוחר נסיעה בשפל, כך שמהירות הנסיעה בשיא טובה, כך שנהג זה בוחר שוב לנסוע בשיא.

שיטת פתרון אחרת ששקלנו היא יצירת רשת (גריד) של יוממים, שמקיפה את ערכי האבר האקראי בטווח המעניין. למשל, אפשר להציב לכל נוסע ערך שגיאה בין 2- ל-2 עבור ערך הנסיעה במדרגות של 0.1, דהיינו 41 "כפילים". ולכל אחד ערכי אבר שגיאה עבור מחיר הצל מ-2- ל-2 במדרגות של 0.2, דהיינו 21 ערכים. כל נהג נהפך עכשיו לכ-800 כפילים, וסך כל הנהגים עולה על 6 מיליון. במקרה זה מספר הנהגים גדול פי כמה, אבל המודל הוא דטרמיניסטי ואין צורך במשאבי החישוב הנדרשים לחישוב נומרי של אלפי אינטגרלים כפולים. ייתכן ששיטה זו הייתה מביאה לידי שיטת חישוב נקייה ושקופה יותר, וגם מהירה יותר.

ייתכן גם שבגישה זו הרזולוציה הנדרשת מביאה לידי "קללת הממדים". למשל, אם נחליט שרזולוציה של 0.1 ו-0.2 גסה מדי, ולכל אחד עדיף רזולוציה של 0.05, פתאום במקום 41 כפול יש לנו 81 בריבוע. במקום 6 מיליון שיבוטים יש יותר מארבעים מיליון.

ככל הנראה הגישה היעילה ביותר תהיה גישה ביניים: קביעה מראש מהו מספר הכפילים, כך שהמספר נחשב לנשלט; ואז הצבת בדיוק מספר זה של ערכים אקראיים של שני אברי השגיאה. כך יש פריסה טובה של סוגי נהגים, וגם מספר גדול דיו שניתן להגיע להתכנסות ברזולוציה טובה. כמו כן, ישנם יתרונות של גישה קריאה ומהירה של פתרון דטרמיניסטי.

השיטה הזאת בוודאי תתבקש אם יהיה רצון לקחת בחשבון רובד נוסף של התכנסות למסלול גודש נבחר. אזי יהיה צורך בהתפלגות אישית של פרופיל שכר. קללת הממדים במקרה זה עצומה, אבל ניפוח המדגם הקיים למדגמים של מיליונים אחדים של נוסעים בשיטת מונטה קרלו עם פתרון דטרמיניסטי, מצטייר גישה נשלטת ומבטיחה.

במודל אימצנו תמיד את אותם פרמטרים של אפיון התנועה עבור כל המסלולים, למשל מקדם הערמת התנועה ("בטא" של נוסחת BPR). אבל אין כל קושי להציב פרמטרים שונים עבור מסלולים שונים, שכן פתרון כל מסלול הוא מקביל לחלוטין.

- 1 לסבר את האוון, Combes et al (2011) סיכמו את אומדני התרומה לגודל עיר לפריון כבין 2 ל 7 אחוז שיפור פריון להכפלת גודל העיר; זאת אומרת פריון גדל בערך כגודל העיר בחזקת בין 0.03 ל 0.1. ובאומדן שביצענו עבור ישראל מקדם היה 1.0.08 אם מתחילים במציאות של עיר אחת גדולה ושתי ערים בחצי גודלה, ומעבירים 10 אחוז מן העיר הגדולה לערים הקטנות, אזי הפריון הממוצע - בהיחשב בצמצום הפריון העיר הגדולה וגיודלה בקטנות - קטן בין 0.1% ל 0.3%. בשכר יומי ממוצע ליוממי מכונית בערי המרכז הגדולות בסקר החברתי, מדובר בעלות של בין 0.5 ש"ח ל 1.5 ש"ח לנוסע ליום, מנעד החופף במידה רבה את מנעד עלויות החיצוניות של הגודש עבור המסלולים הפחות פקוקים. נושא זה מתאים למחקר המשך שיבדוק ברזולוציה גבוהה את תרומת הציפוף לפריון העבודה בערים בישראל.
- 2 חישוב גם עבור ריצת הבסיס: מס של 29 שקל ביום מדיר מן הכביש 21% מהנהגים. חסכון הזמן לנהגים הנותרים הוא בערך 17 דקות ביום. (מדובר בכרבע זמן הנסיעה המקורי של 67 דקות, ושני שלישי זמן הנסיעה העודף על נסיעה מהירה של 43 דקות ביום.) השכר הממוצע של הנהגים המקוריים הוא כ־76 שקל לשעה, אבל בעלי שכר גבוה מוכנים יותר לשלם את האגרה ולכן עבור משלמי האגרה השכר הממוצע הוא כ־81 שקל. אנו מעריכים את זמן הנסיעה ב־70% של השכר; יוצא שחסכון הזמן של 17 דקות עבור 79% של הנהגים מסתכם בכ־13 שקל לנהג ליום. יש גם כרבע מיליון נוסעים באוטובוסים והסעות שיחסכו כ־10 דקות ביום. ערך חיסכון זה מגיע קרוב ל־2 מיליון שקל ליום. מנגד, 21% מהנהגים יאלצו למצוא סידור נסיעה חלופי, נוח פחות: שינוי באופן הנסיעה או במסלול שלה. אנו מעריכים את עלות הנוחות הממוצעת בכ־12 שקל ליום לנהגים אלו. הפסד זה של 12 שקל עבור 21% מהנהגים מפחית כמעט 2 שקל מ־15 השקלים. יש גם הפסד לאוצר המדינה של כ־2 שקל מן הבלו ששילמו נהגים אלו. בסך הכול תוספת הרווחה מסתכמת בקרוב ל־11 שקל לנהג מקורי ליום.
- 3 סימולציה שערכו רון צוק ופרופ' הלל בר גרא מאוניברסיטת בן גוריון באמצעות מודל תל אביב, בחנה את מידת מימוש שיפור הרווחה התיאורטי באמצעות אגרות גודש בסיסיות, ברזולוציה נמוכה, דוגמת אגרות תלויות־דקות או תלויות־נסועה לעומת אגרות תלויות־עלות־חצונית. תנאים שנבחנו הושג פחות משליש משיפור הרווחה התיאורטי באמצעות אגרות גודש בסיסיות אלה.
- 4 בעלויות אלו קיים כבר היום מרכיב משמעותי של מיסוי. על פי הלמ"ס (ולוח 19.12), כלי רכב פרטיים נסעו בשנת 2018 כ־48 מיליארד ק"מ. מס קנייה ואגרות רישום מסתכמים בכ־14 מיליארד שקל בשנה, ומס בלו על מכוניות - בערך 16 מיליארד. סך כל המס לק"מ מסתכם בכ־60 אגרות לק"מ. אלא שמשם זה אינו תלוי־גודש. <https://www.globes.co.il/news/article.aspx?did=1001291566>
- 5 Pigou, A. C. The Economics of Welfare, first edition. London: Macmillan & Co., Ltd., 1920
- 6 "Congestion pricing policies: Design and assessment for the city of Rome, Italy". Cipriani, Ernesto, et al Road". Transport Policy 80 (2019): 127-135; Gupta, Surabhi, Sukumar Kalmanje, and Kara M. Kockelman Transportation Planning and ".pricing simulations: Traffic, land use and welfare impacts for Austin, Texas Technology 29.01 (2006): 1-23
- 7 Efficient congestion tolls in the presence of unpriced congestion": Liu, Louie Nan, and John F. McDonald Journal of Urban Economics 44.3 (1998): 352-366; Verhoef, Erik ".a peak and off-peak simulation model Second-best congestion pricing in general networks. Heuristic algorithms for finding second-best". T Transportation Research Part B: Methodological 36.8 (2002): 707-729 ".optimal toll levels and toll points

- <https://www.ayalohw.co.il/%D7%9E%D7%95%D7%93%D7%9C-%D7%94%D7%AA%D7%97%D7%91%D7%95%D7%A8%D7%94-%D7%9C%D7%9E%D7%98%D7%A8%D7%95%D7%A4%D7%9C%D7%99%D7%9F-%D7%AA%D7%9C-%D7%90%D7%91%D7%99%D7%91> 8
- Rev Econ Stat 58 (1976): 339–350. "Are there returns to scale in city size". Segal, D 9
- Pigou, A.C. (1920). *Wealth and Welfare*. MacMillan, London 10
- Quarterly Journal of Economics 38.4 (1924): "Some fallacies in the interpretation of social cost". Knight, F 11  
582–606
- אפשר למסגר את הסוגיה במונחים של "מוצר פרטי" במקום "עלות חיצונית". אם תופסים שירותי כביש כעיקרון 12  
כמוצר לא-יריבי (כמו למשל זכויות יוצרים) ואז מזהים את הפן היריבי וכל מהג נוסף נוגס ברווחת יתר הנהגים, נכנה את  
הנביטה הזאת "עלות חיצונית". אם לעומת זאת תופסים כביש כעיקרון כמוצר יריבי (כמו למשל לחמניות) שיכול לשמש  
רק 400 איש בשעה ברמת שירות נתונה, אזי העובדה שכל אחד מן ה-400 אינו מותר מקום לנהג נוסף ליהנות מאותה  
רמת שירות, אינה נתפסת כעלות חיצונית אלא כתכונה בנאלית של כל מוצר יריבי ולכל היותר נראה עובדה זו כ"החצנה  
כספית" - pecuniary externality. הניתוח של פיגו מתבסס על תפיסה של מוצר לא-יריבי, ואילו זה של נייס מאמץ גישה  
של מוצר יריבי.
- The American Economic Review 53.2 (1963): "Pricing in urban and suburban transport". Vickrey, William S 13  
Law "s critique/Automobile accidents, tort law, externalities, and insurance: an economist". 452-465; ibid  
and Contemporary Problems 33.3 (1968): 464-487
- תמחור דינאמי כזה קיים היום בקטעי כביש רבים, בין היתר בנתיב המהיר בישראל וכנביש I66 בוירג'יניה בארה"ב. אבל 14  
אנו איננו מכירים דוגמה של אגרות גודש דינאמיות ברשת כבישים ("תמחור רשת"). ככל הנראה החסם הוא פוליטי ולא  
טכנולוגי, שכן כבר היום הבקרה על מהירות כלי הרכב של כל קטע כביש בכל הרשת מתקיימת בצורה מדויקת מאוד על  
ידי שירותי הנסיעה הפופולריים דוגמת ויז, מפות גוגל ומפות אפל.
- ".Willingness to pay for high-occupancy toll lanes: Empirical analysis from i-15 and i-394". Burris, Mark, et al 15  
.Transportation research record 2297.1 (2012): 47-55
- Journal of Public ".Hot lanes in Houston-six years of experience". Burris, Mark W., and Bill R. Stockton 16  
.Transportation 7.3 (2004): 1
- Congestion Pricing with Minimal Public". Cohen-Blankshtain, Galit, Hillel Bar-Gera, and Yoram Shifan 17  
International ".Opposition: The Use of High-occupancy Toll Lanes and Positive Incentives in Israel  
Transport Forum Discussion Papers. No. 2020/09. OECD Publishing, 2020
- Downtown congestion pricing in practice, Lewis Lehe, Transportation Research Part C 100, 2019 18
- Transportation ".Road congestion pricing in Singapore: 1975 to 2003". Phang, Sock-Yong, and Rex S. Toh 19  
The Stockholm congestion charges—5 years on. Effects," Journal (2004): 16-25; Börjesson, Maria, et al  
Transport Policy 20 (20 "acceptability and lessons learnt
- Transportation ".Road congestion pricing in Singapore: 1975 to 2003". Phang, Sock-Yong, and Rex S. Toh 20  
Journal (2004): 16-25
- A validated multi-agent simulation test bed to evaluate congestion pricing". He, Brian Yueshuai, et al 21  
Transport Policy 101 (2021): 145-161 ".policies on population segments by time-of-day in New York City
- ".Congestion pricing policies: Design and assessment for the city of Rome, Italy". Cipriani, Ernesto, et al 22  
Transport Policy 80 (2019): 127-135
- Equity effects of congestion pricing: quantitative". Eliasson, Jonas, and Lars-Cöran Mattsson 23  
Transportation Research Part A: Policy and Practice 40.7 ".methodology and a case study for Stockholm  
(2006): 602-620
- אלדד שידלובסקי ומיכאל שראל, "העלויות האמיתיות של השימוש בכלי רכב והמדיניות הרצויה", הרבעון הישראלי למיסים, 24  
127 (2007).
- פיתוח התחבורה הציבורית בישראל - תכנית אסטרטגית משרד התחבורה 2012. 25
- עומר מואב ושני שרייבר, "כיצד ניתן לצמצם את הצפיפות בכבישים על ידי אימוץ אגרות גודש", נייר מדיניות 06.2017 26  
12.2017, מכון אהרן למדיניות כלכלית.



- 27 מטרו גוש דן ההשפעות הכלכליות, החברתיות והאורבניות, דו"ח מתודולוגיה ותוצאות.
- 28 דו"ח מבקר המדינה 2019, משבר התחבורה הציבורית.
- 29 בפועל, הערך השקלי של בחירת נסיעה במכונית הוא פונקציית השברון של ההסתברות עבור התפלגות נורמלית. לפונקציית שברון זה קנה מידה שרירותי, בהתאם לשונות של ההתפלגות. ככל שקנה המידה גדול יותר, הערך השקלי של הנסיעה גדול יותר וצריך שינוי מחיר גדול יותר להניא את הנהג מן הנסיעה ולשכנע אותו לבחור בחלופה. במילים אחרות, ככל שקנה המידה גדול יותר, הנמישות נמוכה יותר.
- 30 מס הכלו שמשלמים הנוסעים במשטר המקורי מוערך ברוכב 11 שקל ליום עבור המסלולים הנדושים פחות, שבהם גם הנסועה הממוצעת נמוכה יותר; ו30 שקל עבור המסלולים הסואנים יותר. יוצא שתוספת התשלום עבור נהג ממוצע בכריפריה מסתכמת בשקלים בודדים ביום.
- 31 מילן, מיי וון וילאט (1993) בחנו כאמצעות מודל את ההשפעה של אגרות נודש שהבסיס לחיוב הוא "pence per minute delay". מעניין שהסימולציה שלנו מסיקה ששיטה חישוב זאת נותנת קירוב מצוין למס היעיל.
- 32 השפעה זו יכולה להיות משמעותית. היתרון לגודל בתחבורה ציבורית בעקבות צמצום זמן ההמתנה ככל שיש יותר נוסעים מכונה "אפקט מורינג".
- 33 גם הלמ"ס מפרסם ספירות תנועה סדירות. לנתוני הלמ"ס יתרון של מגוון רחב של כבישי הארץ. אך יש ספירות רק ברזולוציה של כל שעה, ואין נתונים על מהירות. בדצמבר 2018 הספירות של הלמ"ס נמצאו ב: [http://www.cbs.gov.il/webpub/pub/text\\_page\\_topic.html?publ=42&CYear=2017&CMonth=1](http://www.cbs.gov.il/webpub/pub/text_page_topic.html?publ=42&CYear=2017&CMonth=1)
- 34 התרשים מתבסס על תרשים שהתפרסם באתר "נתונים": <https://netunim.wordpress.com/2017/06/12/%D7%94%D7%93%D7%99%D7%A0%D7%9E%D7%99%D7%A7%D7%94-%D7%A9%D7%9C-%D7%92%D7%95%D7%93%D7%A9>
- 35 סוגים נוספים של הטרוגניות: התרשים עושה מצרף של נסיעות בוקר וצהריים; של נסיעות שיא ושפל, של מרחקים שונים ושל שלשה מסלולי נסיעה שונים.
- 36 בהקשר זה, מעניין לזכור שפראנק רמזי היה מתמטיקאי; העניין שלו בכלכלה, שהביא לשתי פריצות הדרך של מס רמזי ושל צמיחה מאוזנת, התעורר עקב פנישות שלו עם ארתור פיגו. יש לציין גם שפיגו (1947) היה אבי המושג "עלות חיכוך" של כספי ציבור" (MCPF).
- 37 בניית כבישים לפי המידע על כדאיות מהחיוב מתכתבת היטב עם ההערה של נייט (1921) שלמעשה שיווי משקל של שוק פרטי עשוי להשוות עלות חברתית ועלות פרטית כולל עלות הבנייה של הכביש. תוצאה זו פותחה במוהרינג (1962).
- 38 [https://moovitapp.com/insights/en/Moovit\\_Insights\\_Public\\_Transit\\_Index\\_Israel\\_Israel-1](https://moovitapp.com/insights/en/Moovit_Insights_Public_Transit_Index_Israel_Israel-1)
- 39 Retallack AE, Ostendorf B. Current Understanding of the Effects of Congestion on Traffic Accidents. Int J Environ Res Public Health. 2019;16(18):3400. Published 2019 Sep 13. doi:10.3390/ijerph16183400
- 40 נוסף שתי הבהרות: ראשית, תוספת זו אינה מתחשבת בתופעת "דחיקה החוצה" של נהגים אחרים; בפועל העלות החיצונית של החלטת הנסיעה בשיווי משקל קטנה יותר. שנית, הדבר איננו מעיד ישירות על הליקוי ביעילות, שכן גם במשטר פיגוביאני יש עיכוב לא מבוטל. היעילות נפגמת רק במידה שעלות זו מגדילה את העלות החברתית מעבר לתועלת הפרטית. במקרה שלנו, העיכוב ה"פיגוביאני" בעשירון הנמוך נשאר ללא שינוי כמעט, ואילו בעשירון הגבוה הוא 31 דקות פחות אמנם מ-52, אך עדיין לא מבוטל.
- 41 Bureau of Public Roads, U.S. Department of Commerce, Urban Planning Division, Washington D.C. Traffic Assignment Manual, 1964
- 42 Derivation of Van Aerde traffic stream model from". See for instance: Wu, Ning, and Hesham Rakha. Transportation research record 2124.1 (2009): 18-27. tandem-queueing theory
- 43 למעשה, נתון כזה היה מאפשר לנו לעשות גם רגרסיית טוביט ולבחון גם את ההשפעה על אורך הנסיעה - השול האינטנסיבי של בחירת המכונית.
- 44 מדיק יותר לומר שהרווחה העודפת ממכונית על פני חלופות אחרות, ובכלל זה אוטובוס, גדולה מאפס.
- 45 זה למשל ההערכה שמופיע ב-ECO Northwest, Ltd, et al, עמוד 9-II, עבור נסיעות בינעירוניות במכונית. ואילו עבור נסיעות תוך-עירוניות הערך שם הוא 50%. נהול פרי"ת של משרד התחבורה (2021 עמוד 116) מאמץ ערך של 30% בלבד. ייתכן אם כן ש-70% הוא הערכה גבוהה יחסית, ואומדן תוספת הרווחה גבוהה במידה דומה.

- 
- 46 זה מעבר לעובדה שבכל עליית מחיר, הכמות המבוקשת נחתכת מן הצד הימני של עקומת הביקוש. זאת אומרת, המפסידים הם בעלי רווחת הצרכן הנמוכה ביותר במשטר המקורי.
- 47 במלים אחרות, זה המחיר של מכונית שולית. עד עלות שנתית של מכונית במחיר זה, אגרות גודש ישפיעו על בחירת המכונית ולא על בחירת אופן היוממות. ואילו אם כתוצאה מאגרות הגודש לא ניתן כדאי להחזיק רכב אפילו ברמה זאת, העובד ישנה את הרגלי הנסיעה.
- 48 החישוב בחלק זה של הנייר מייצגים משקפים את דיווחי השכר של הנסקרים בסקר החברתי, ללא כיוול לשכר הממוצע המתקבל מסקר משקי בית כפי שנעשה ביתר הפרקים.
- 49 יש נהגים מסוימים המוצאים מחירים נמוכים יותר. לאלו יש אותן משבצות של שינוי רווחה אבל הפוך. למשל, זמן נסיעה ארוך יותר במקום שהיום מס בלו גבוה ממס גודש פיגוביאני; רכיב חיובי של נהג אמיד שנמשך לכביש בגלל חסכון זמן שעולה על תוספת העלות הכספית של האגרה, וכו'.
- 50 de Jong, G.; Gunn H.F. (2001) Recent Evidence on Car Cost and Time Elasticities of Travel Demand in Europe. *Journal of Transport Economics and Policy*, 35(2), pp.137-160
- 51 Elasticities of road traffic and fuel consumption with". Goodwin, Phil, Joyce Dargay, and Mark Hanly *Transport reviews* 24.3 (2004): 275-292 ".respect to price and income: a review



# ביבליוגרפיה

- Alonso, William (1964). *Location and Land Use*. Cambridge: Harvard University Press.
- Cipriani, Ernesto, et al. "Congestion pricing policies: Design and assessment for the city of Rome, Italy." *Transport Policy* 80 (2019): 127-135.
- De Jong, Gerard, and Hugh Gunn. "Recent evidence on car cost and time elasticities of travel demand in Europe." *Journal of Transport Economics and Policy* (JTEP) 35.2 (2001): 137-160.
- ECO Northwest, Ltd, et al. *Estimating the benefits and costs of public transit projects: A guidebook for practitioners*. Vol. 18. National Academy Press, 2002.
- Goodwin, Phil, Joyce Dargay, and Mark Hanly. "Elasticities of road traffic and fuel consumption with respect to price and income: a review." *Transport reviews* 24.3 (2004): 275-292.
- Gupta, Surabhi, Sukumar Kalmanje, and Kara M. Kockelman. "Road pricing simulations: Traffic, land use and welfare impacts for Austin, Texas." *Transportation Planning and Technology* 29.01 (2006): 1-23.
- Knight, Frank. "Some Fallacies in the Interpretation of Social Costs." *Quarterly Journal of Economics* 38.4 (1924): 582-606.
- Kreindler, Gabriel E. "The welfare effect of road congestion pricing: Experimental evidence and equilibrium implications." *Unpublished paper* (2018). <https://economics.mit.edu/files/13619>
- Liu, Louie Nan, and John F. McDonald. "Efficient congestion tolls in the presence of unpriced congestion: a peak and off-peak simulation model." *Journal of Urban Economics* 44.3 (1998): 352-366.
- Mills, Edwin S. (1972). *Studies in the Structure of the Urban Economy*. Baltimore: Johns Hopkins Press.
- Milne, D. S., and D. Van Vliet. "Implementing road user charging in SATURN." (1993).
- Mohring, H. (1972). "Optimization and Scale Economies in Urban Bus Transportation," *American Economic Review*, 591-604.
- Mohring, H. and Harwitz, M. (1962). *Highway Benefits: An Analytical Framework*, Ch 2, pp. 57-90.
- Muth, Richard F. (1969). *Cities and Housing*. Chicago: University of Chicago Press
- Oum, Tae Hoon, William G. Waters, and Jong Say Yong. *A survey of recent estimates of price elasticities of demand for transport*. Vol. 359. Washington, DC: World Bank, 1990.
- Phang, Sock-Yong, and Rex S. Toh. "Road congestion pricing in Singapore: 1975 to 2003." *Transportation Journal* (2004): 16-25.

Pigou, A.C. *The economics of welfare* (Kindle Locations 4246-4250). London, Macmillan and co., limited. Kindle Edition.

Pigou, A.C. (1948). *A Study in Public Finance*. 3rd ed. London: Macmillan.

Ramsey, F. P. "A Contribution to the Theory of Taxation". *The Economic Journal*. 37.145 (1927): 47–61

Segal, D. "Are there returns to scale in city size?." *Rev Econ Stat* 58 (1976): 339–350

Verhoef, Erik T. "Second-best congestion pricing in general networks. Heuristic algorithms for finding second-best optimal toll levels and toll points." *Transportation Research Part B: Methodological* 36.8 (2002): 707-729.

Vickrey, W.S. (1992). *Principles of Efficient Congestion Pricing*. <https://www.vtpi.org/vickrey.htm>

Vickrey, W.S. (1959). "Statement on the Pricing of Urban Street Use". *Hearings: U.S. Congress, Joint Committee on Metropolitan Washington, D.C. Problems*, 11 Nov. 1959, 466-477.

טרכטנברג, מנואל, שוקי כהן, אלון פרדו, ניר שרבי. להחזיר את "הפקק הגורדי": מתווה תחבורתי לטווח הקצר. מוסד שמואל נאמן, ספטמבר 2018

<http://blog.iliszka.org/2013/10/01/how-traffic-actually-works.html>

## חברות נוספות בסדרה



תשרי תשפ"א - אוקטובר 2020  
נייר מדיניות מס' 66



אלול תש"פ - ספטמבר 2020  
נייר מדיניות מס' 65



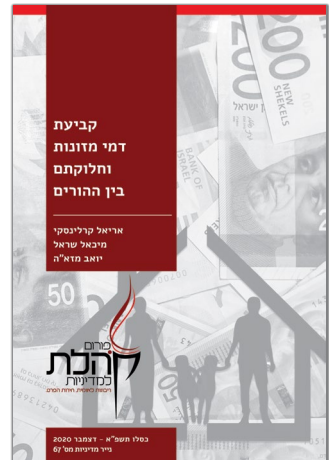
תשרי תשפ"א - ספטמבר 2020  
נייר מדיניות מס' 64



שבט תשפ"א - פברואר 2021  
נייר מדיניות מס' 69



כסלו תשפ"א - נובמבר 2020  
נייר מדיניות מס' 68



אלול תש"פ - ספטמבר 2020  
נייר מדיניות מס' 67



חשון תשפ"ב - נובמבר 2021  
נייר מדיניות מס' 72



תמוז תשפ"א - יולי 2021  
נייר מדיניות מס' 71



ניסן תשפ"א - מרץ 2021  
נייר מדיניות מס' 70



תשרי תשפ"ב - ספטמבר 2021  
נייר מדיניות מס' 76



אלול תשפ"א - אוגוסט 2021  
נייר מדיניות מס' 75



אב תשפ"א - יולי 2021  
נייר מדיניות מס' 73



## פורום קהלת

פורום קהלת הוא מכון מחקר השוכן בירושלים ופועל לעיגון מעמד הקבע של ישראל כמדינת הלאום של עם היהודי, לחיזוק הדמוקרטיה הישראלית, קידום חירות הפרט ועידוד יישום עקרונות השוק החופשי בישראל. הפורום איננו מפלגתי ונשען על מקורות עצמאיים פרטיים ללא מימון ישיר או עקיף ממדינת ישראל או מכל ישות מדינית אחרת. כל תוצרי הפורום מוגשים למקבלי ההחלטות ולציבור ללא תמורה.



### פורום קהלת (ע"ר)

רח' עם ועולמו 8

ירושלים, 9546306

טל' 02-6312720

[office@kohelet.org.il](mailto:office@kohelet.org.il)

[www.kohelet.org.il](http://www.kohelet.org.il)

ISBN 978-965-7674-96-3



9 789657 674963