

כמו אוטובוס, רק ריק ולא זז: המחקר שחושף את חוסר היעילות של התחבורה החכמה

סימולטור שיצרו חוקרים באוניברסיטאות בן-גוריון ותל אביב על נתוני התנועה בגוש דן מערער את הסיכוי לתת שירות נוח בכלי רכב אוטונומיים ושיתופיים — ומצביע על הצורך לחזור לתכנן רחובות שנוח להגיע בהם ברגל לתחנות ■ "צריך לחזור לניידות באמצעים הקלאסיים"

06:09 19.02.2020 מאת: **מירב מורן**

דמיינו שירות תחבורה אידיאלי שבו במקום לנהוג בעצמכם בכביש העמוס בדרך לעבודה וממנה — תוכלו להזמין באפליקציה רכב ובו מקום לארבעה נוסעים, פרט לנהג, וזה יגיע תוך כמה דקות ויסיע אתכם מביתכם אל פתח המשרד. במהלך הנסיעה הרכב יאסוף נוסעים נוספים שהאפליקציה החכמה מצאה כי מסלולם דומה, וכך השירות המפנק של מונית אישית יהיה במחיר סביר שתחלקו עם שותפיכם לדרך. מעבר לכך, גם פקקים לא יהיו, כי רכב אחד יסיע רבים — ולכן השירות ישחרר את העומס בכבישים.

את החלום הזה על תחבורה שיתופית, יעילה וזולה כמו תחבורה ציבורית — אך כזו שמתאימה את עצמה לצרכיו והרגליו הפרטיים של כל נוסע — ניסו להגשים בעבר שירותי "אובר פול" בארה"ב, בקנדה ובאירופה. זאת, עד שהוכח כי גרמו להגברת הגודש במטרופולינים בעשרות אחוזים, תוך שיטוט אינסופי של מכוניות במסלול חיפושן אחר נוסעים — ובנסיעה בין נוסע לנסע. באחרונה מנסה גם שירות "באבל דן" לחקות זאת, ולהגשים את החזון בישראל באמצעות האפליקציה של חברת ויה. בנוסף, יש מי שתולים את תקוותם ברכב האוטונומי ומאמינים שכאשר הוא יגיע, החלום הזה יתגשם.

ואולם האשליה הזאת מתנפצת נוכח מחקר שביצעה קבוצת חוקרים בכירים מהאוניברסיטאות תל אביב ובן-גוריון, שיצרו סימולטור המדמה את השירות האידיאלי: צי רכב עתידיני, אוטונומי ושיתופי הפועל בגוש דן ומשרת את כל הנוסעים בתחומו. תוצאות הניסוי שערכו הראו היתכנות מוגבלת ביותר — ועוד בתנאי מעבדה סטריליים, שאינם מביאים בחשבון מפגעי דרך הנובעים ממזג אוויר ותאונות, תקלות בכלי הרכב ואילוצים אחרים.

מטרת החוקרים היתה לאפיין את צי הרכב המתאים לשירות התחבורה האידיאלי, שייתן לנוסע נוחות של מונית אישית בשילוב יעילות התפקוד של אוטובוס. הסימולטור שבנו החוקרים ביקש לקיים את השירות בתנאים האלה: הנוסעים בשירות השיתופי יגיעו ליעד תוך לכל היותר פי 1.5 מהזמן שאורכת נסיעה פרטית וישירה מנקודת המוצא, משך ההמתנה להסעה יהיה עד 20 דקות, והמרחק המקסימלי שיעבור הנוסע מנקודת המוצא שלו אל תחנת האיסוף יהיה עד 500 מטר ולא יותר.

הסימולציה התבססה על בסיס מאגר של נתוני אמת של נסיעות יום במטרופולין מרכז, שמרכז המכון הגיאוגרפי באוניברסיטת תל אביב. לביצוע המחקר נלקח מדגם של 300 אלף נוסעים בגבולות אשדוד-מודיעין-נתניה (כ-10% מכמות הנוסעים האמיתית), בתפזורת גיאוגרפית ושעות יממה עם נתוני עומסים אופייניים.

כדי לבחון את ההיתכנות של מודל תחבורה ציבורית כזה, גמיש ובהזמנה אישית, בנו החוקרים אלגוריתם, שבאמצעותו בחנו את טיב הנסיעות וכמותן, כשהם מגדילים את הצי עוד ועוד. ראשית הצי כלל 50 אלף כלי רכב שיתופיים, ולבסוף נבחן צי של 100 אלף כלי רכב כאלה, שהיו אמורים לבצע את הנסיעות עבור 300 הנוסעים במדגם.

את הניסוי ערך הדוקטורנט גולן בן דור, בהנחיה משותפת של ד"ר ערן בן-אליא מאוניברסיטת בן גוריון ופרופ' יצחק בננסון מאוניברסיטת תל אביב. מימון המעבדות היה, בין היתר, מתקציב משרד התחבורה. הסימולטור לשיטת ההסעות הגמישה פותח על ידי חוקרים בישראל, וניתוח הנתונים התבסס על עקרונות של סימולציות דומות שנערכו בעשור החולף במוסדות מחקר באירופה, למשל על הנסיעות במרכז העיר ליסבון. להלן הממצאים העיקריים של הניסוי.

1. לא יותר משניים יחד

אחת המסקנות הבולטות של מודל שירות הנסיעות שבחנו החוקרים היא שיעילותו נמוכה במיוחד, שכן לא ניתן להסיע יותר משני אנשים בו-זמנית במוצע — גם בשיא הביקוש. במשך רוב השעות היום שירות הנסיעות שירת רק אדם אחד; בשעות השיא (6:00–9:00 ו-15:00–18:00) עלה ממוצע הנוסעים ל-2.02 נוסעים בצי של 50 אלף כלי רכב ול-2.12 נוסעים בצי של 100 אלף.

גם בשעות הביקוש הכבד, על פי הממצאים, לכל היותר 16% מכלי הרכב בשירות הנסיעות הסיעו שלושה אנשים במוצע בו-זמנית, ולא יותר מ-10% הסיעו ארבעה אנשים. כלומר, גם בשעות שבהן אוטובוסים ורכבות מלאים עד אפס מקום — מחצית מכלי הרכב הקטנים והשיתופיים שנבדקו נמצאו בתפוסה נמוכה של נוסע אחד, משוטטים ריקים בדרכם לנוסעים, או ממתינים לקריאה בחניה.

היעילות של שירות הנסיעות שנמדדה במשך יום שלם (6:00–1:00) נמצאה גרועה יותר: צי של 50 אלף כלי רכב הסיע ארבעה אנשים רק ב-6% משעות הפעילות שלו, ושלושה נוסעים ב-11% משעות הפעילות. 100 אלף כלי הרכב הסיעו 7% מהזמן שלושה נוסעים, ופחות מ-3% משעות הפעילות הם הסיעו ארבעה נוסעים.

כשהחוקרים הגדירו לסימולטור תנאי שלפיו על כלי הרכב להגיע בשעות השיא למוצע של ארבעה נוסעים, הנוסעים נאלצו לבלות ברכב השיתופי פי שלושה ממשך הזמן שהיתה נמשכת נסיעה ישירה בכלי רכב פרטי. בנוסף, החוקרים הגיעו למסקנה שכדי להגיע לתפוסה ממוצעת של ארבעה נוסעים, נדרש צי כלי רכב עם עשרה מקומות.

2. כשהנסיעה מתארכת — אין טעם בהסעה עם יותר מ-4 מקומות

מטבעו, שירות שיתופי גמיש במסלולו יאריך את זמן הנסיעה בהשוואה לנסיעה ברכב פרטי צמוד, משום שהמסלול כולל איסוף של מספר אנשים המתגוררים במקומות שונים ונוסעים ליעדים אחרים. החוקרים הניחו כי התארכות נסיעה שיתופית בפי 1.5 בהשוואה לנסיעה ישירה (למשל חצי שעה במקום 20 דקות או שעה במקום 40 דקות) היא הזמן

המקסימלי שאנשים יסכימו לקבל. אלא שתחת מגבלה זו הצליחו להסיע רק קצת יותר משני נוסעים בממוצע בכל נסיעה.

זאת ועוד, כשהציבו לסימולטור דרישה שכלי רכב יסיע לפחות חמישה אנשים בממוצע לאורך כל שעות השירות, זמני הנסיעות התארכו ליותר מפי שלושה. מכך מסיקים החוקרים כי אין טעם להפעיל צי רכב עם מקום ליותר מארבעה נוסעים בו־זמנית.

3. נסיעות ריקות, חניה יקרה וגודש נוסף

הסימולציה הראתה שככל שהצי גדל — כך הניצולת ירדה וכלי הרכב עמדו בחניה זמן רב יותר. כשהחוקרים הקטינו את הצי — היו יותר נסיעות ריקות. כך, בצי של 50 אלף כלי רכב שיתופיים, נמצא כי הם חונים כשליש מזמן השירות, וקרוב ל-10% מהזמן הם נוסעים ריקים. בצי עם 100 אלף כלי רכב המצב מחריף: הם חונים 70% מהזמן, ואמנם נוסעים ריקים רק 2% מהזמן — אך הצי כפול בגודלו ולכן הנוסעה עולה.

נסיעות ריקות מייצגות נסועה מיותרת, ואילו זמני חניה מייצגים שטח שנגזרות ממנו עלויות. ככל ששטח החניה קרוב לאזורי הביקוש, כך הוא יקר יותר. אם כלי הרכב ימתינו הרחק ממרכזי הביקוש, העלות של החניה אמנם תרד — אך היקף הנוסעה, הכולל עלויות תפעול כגון דלק, בלאי ושכר נהגים יעלה, כי כלי הרכב יסעו הלוך וחזור והמרחק והמרחק שיעברו בכל הזמנת נסיעה יהיה ארוך יותר.

בתסריט עתידי של כלי רכב חשמליים ואוטונומיים, לחניה מרוחקת אמנם תהיה השפעה קטנה על התייקרות התפעול, אך התוספת המטרידה לנסועה תיוותר בעינה. המסקנה היא שבשני המקרים — של צי רכב גדול וקטן — יהיו הרבה מאוד נסיעות ריקות, שרק יוסיפו הרבה מאוד גודש לדרכים.

4. כשהמתנה לרכב ההסעות מתקצרת — זמן המסע מתארך

בחניה נוספת שביצעו החוקרים היתה של ההבדלים בין שירות מדלת לדלת לבין שירות מתחנות שנמצאות עד 500 מטר מנקודות המוצא והיעד של הנוסעים. ההבדל בעילות השירות בין שני המודלים הוא שולי: 50 אלף מכוניות שיתופיות הסיעו 2.06 אנשים בממוצע בשעות הביקוש, לעומת 2.02 נוסעים במודל דלת לדלת. גם כשהגדילו את הצי ל-100 אלף מכוניות שיתופיות המצב לא השתפר משמעותית, וההסעות בין תחנות כללו 2.18 אנשים בממוצע בשעות הביקוש, לעומת 2.12 מדלת לדלת.

באופן לא מפתיע, בניסוי שבו אספו את ציבור הנוסעים מהתחנות התקצר זמן ההמתנה לאיסוף. בצי של 50 אלף מכוניות שיתופיות ההמתנה התקצרה בצי, מ-22 דקות בממוצע בשירות מדלת לדלת ל-11 דקות בממוצע באיסוף מהתחנות. בצי של 100 אלף ההמתנה התקצרה ל-8 דקות בתחנות בהשוואה ל-12 דקות מדלת לדלת.

ואולם כשמחברים לזמן ההמתנה את זמן ההליכה לתחנה, מתברר שמודל התחנות אינו מקצר את המסע באופן משמעותי: בצי של 50 אלף, הנוסע שילך לתחנה יקצר את משך הנסיעה שלו בחמש דקות בממוצע, ואילו בצי של 100 אלף המסע כולו אף יתארך בשתי דקות בממוצע. המשמעות היא שבשירות שממילא אוסף שניים-שלושה אנשים בממוצע, עדיפה הסעה מדלת לדלת, כי זמן המסע אינו מתקצר בזכות הליכה לתחנות. הנוסעים לפיכך אינם מקבלים שירות יעיל יותר באיסוף מהתחנות, אבל יש מרוויחים מהמודל — המסיעים, משום שהנסועה הכללית יורדת, ועמה הוצאות התפעול.

5. זמני המתנה ארוכים בפריפריה המטרופולינית

המחקר גילה כי בשעות העומס, כל נסיעה חמישית משולי המטרופולין אילצה נוסעים להמתין שההסעה תאסוף אותם זמן לא סביר. כשהסימולטור ניסה לבצע את כל הנסיעות במרחב הניסוי — אשדוד-מודיעין-נתניה — באמצעות 50 אלף כלי רכב, זמני המתנה להסעה הגיעו לעד 42 דקות ולממוצע של 22 דקות; בצי של 100 אלף המתנה המקסימלית ירדה ל-21 דקות, והממוצע היה 12 דקות.

כשהחוקרים הגדירו שסף הביצוע לנסיעה יהיה המתנה מקסימלית של 20 דקות, ואם ההמתנה מתארכת יותר הנסיעה "מתבטלת" — בשעות העומס בבקרים הסימולטור לא יכול היה לספק בזמן סביר 20% מהנסיעות מהפריפריה המטרופולינית אל לב המטרופולין. במשך כל היום, בצי של 50 אלף כלי רכב, 6% מהנסיעות כלל לא יצאו לדרך, כלומר 6% מכלל המשתמשים נתקעו בבית או בעבודה. הצי של 100 אלף התקרב לביצוע מלא, עם רק קצת פחות מ-2% מהנוסעים שנסיעתם בוטלה בגלל זמן המתנה ארוך מדי. הסימולציה הראתה גם שכלל שהטווח הגיאוגרפי מתרחב ומרחקי הנסיעה מתארכים, כך גדל שיעור הנוסעים שלא יוכלו לקבל שירות בזמן סביר.

6. אופטימיות זעירה: צמצום אפשרי בנסועה

הסימולציה שבנו החוקרים הראתה כי השירות השיתופי עשוי להפחית כ-3% מהנסועה בתוך המטרופולין — 130 אלף ק"מ, מתוך 4.3 מיליון ק"מ יומיים. במודל התחנות, הנסועה עשויה לרדת אף ב-440 אלף ק"מ שמייצגים בסך הכל 10% מכלל הנסועה היומית במטרופולין לאורך כל היום. אך זאת, בהנחה שנוסעים יסכימו להמתין 20 דקות ויותר להסעה, שכן הצמצום בנסועה הוא בנסיעות הארוכות שאותן אי אפשר לספק בזמן סביר. אלה הנסיעות שבהן אנשים צריכים לחכות יותר מדי זמן שהמכוניות יגיעו אליהם ובמיקום שלהם המכוניות השיתופיות הכי בזבזניות בגלל הפיזור והמרחק. כמו כן הצמצום בנסועה נמדד בהנחה שכלי הרכב יחנו בכל מקום שבו הורידו את הנוסע האחרון, והם אינם צריכים לנסוע ולחזור מחניה שנמצאת במקום אחר. המצב הזה אינו מציאותי, ולכן חלק לא מבוטל מההפחתה בנסועה הוא תיאורטי בלבד.

7. בחזרה למסילות

בן-אליא מדגיש לפיכך שיש להתבונן בזהירות על התחזית להפחתת הנסועה והגודש: "רוב הנסיעות שקשה לספק בגלל זמני המתנה ממושכים, הן גם הנסיעות הארוכות מהשוליים למרכז. בהנחה שדווקא אלה הם הנוסעים שיוותרו על השירות וייסעו ברכב הפרטי, ההפחתה בגודש פחות משמעותית, וספק אם תקרה כלל".

הסימולציה, מדגיש בן-אליא, בוצעה על נתוני ביקוש באוכלוסייה קיימת ונכונה למועד ביצוע המחקר (2019). היא לא הביאה בחשבון את תוספת האוכלוסייה בעתיד, שתקרה על תשתיות דרכים שלא צפויים להתרחב. "תוספת האוכלוסייה באזור המרכז מתוכננת בעיקר בשכונות הפרברים בטבעת הרחוקה. העובדה שכבר בנתונים הקיימים קשה לתת מענה בשירות גמיש ליותר מחמישית מנסיעות מאזורים אלה ממחישה את הבעייתיות בהסתמכות על שירות כזה בעתיד", הוא אומר.

רכב בהזמנה במסלול גמיש בכל זמן ומכל מקום, הוא מעטפת חדשנית לתנאי ניידות במכונית צמודה, אך מתכנן הערים והאדריכל ד"ר יודן רופא מאוניברסיטת בן-גוריון מסביר כי בעיות תחבורה מתעצמות ככל שהפיתוח מוטה לניידות בסגנון כזה. "רכב אישי

ופרטי מאפשר לפזר את המגורים ומקומות התעסוקה ולהרחיק אותם זה מזה. הדבר דוחף לכך שהדרכים מעוצבות בסגנון שמשרת רק את הרכב הפרטי, והתוצאה היא התפשטות הגודש על פני כל המרחב המטרופוליני ועל פני כל שעות היום", אומר רופא. "זה חזון לוס אנג'לס — חיים שלמים עוברים בנסיעה בתוך רכב בדרכים שפקוקות בכלי רכב".

פרופ' נורית אלפסי, ראש המגמה לתכנון ערים במחלקה לגיאוגרפיה ופיתוח סביבתי באוניברסיטת בן-גוריון, אומרת כי האופציה לפזר מרכזי עסקים, הנבדקת כפתרון לגודש בדרכים, לא הגיונית. "מוקדי תעסוקה בשולי הערים הם יעד לנסיעות מכל המטרופולין, והם יהיו פקוקים אם לא יתרכזו סביב תשתית לתחבורת המונים".

בנוסף, טוענת אלפסי, פיצול מוקדי עסקים יחליש את המשק. "הפעילות הכלכלית העיקרית היא עסקות הנעשות במפגש מגוון בין אנשים, ולכן הם מבקשים את הקרבה והצפיפות. אף מדינה אינה מסכימה לשלם את מחיר הפירוק של ריכוזיות אזור העסקים. בערים שבהן מרכז העסקים מתפצל, הדבר גרם להתנהלות לא מיטבית", אומרת אלפסי.

8. לתכנן להולכי רגל

רופא סבור שיוקר הקרקע והקושי הגובר להגיע ללב המטרופולין דוחקים החוצה ובהדרגה פעילויות שאינן זקוקות למרכז העסקי, ומאמין שיכול להתפתח מטרופולין מוצלח מרובה מוקדים, ובלבד שתנאי הניידות ביניהם נוחים. "האתגר הוא לתכנן את פיזור הפונקציות הכלכליות והציבוריות שיוצאות לפריפריה המטרופולינית, ואת המגורים שנבנים במקביל באופן שישפר ולא יכביד על תנאי הניידות. את זאת משיגים בין היתר באמצעות אמצעי הסעה המוניים המאפשרים לנוע בין המוקדים ביעילות", הוא אומר.

רופא מסביר שכתולדה משמירת קרקע לדרכים ושטחים לנסיעה ולאחסון רכב פרטי, סביבות התעסוקה והמגורים שנבנו וממשיכות להיבנות מותאמות לניידות במכונית: מרחקים גדולים בין יעדים, דרכים רחבות ותשתיות לחניונים. "נוצרו רחובות עוינים להולכי רגל ולנוסעים באופניים ובכלי רכב קטנים אחרים", אומר רופא. כל נסיעה בתחבורה ציבורית יעילה מתחילה בהליכה אל התחנה — אך ברוב השכונות החדשות שנבנו בעשורים האחרונים, הרחובות מתוכננים למכוניות, וזה אחד הגורמים שאנשים בישראל מדירים את עצמם משירות התחבורה הציבורית. ההליכה לתחנה לפעמים אינה אפשרית וכמעט תמיד לא נעימה".

לדברי בן אליא, "העובדה שאפילו בתנאי מעבדה אידיאליים שיטת התחבורה הציבורית הגמישה אינה כלכלית ולא יעילה, מאלצת אותנו לחזור ולתכנן ניידות באמצעים רבי קיבולת קלאסיים — רבות ואוטובוסים — הפועלים במסלולים ובתחנות קבועים שאליהם הנוסעים מגיעים ברגל ובאופניים".