אוניברסיטת תל-אביב
הפקולטה להנדסה ע"ש איבי ואלדר פליישמן
בית הספר לתארים מתקדמים ע"ש זנדמן-סליינר

שינוע דינאמי במערכות לשיתוף אופניים

חיבור זה הוגש כעבודת גמר לקראת התואר "מוסמך אוניברסיטה"
בהנדסת תעשייה וניהול

על - ידי

דנה פסח

תשרי תשע"ד

אוניברסיטת תל-אביב
הפקולטה להנדסה ע"ש איבי ואלדר פליישמן
בית הספר לתארים מתקדמים ע"ש זנדמן-סליינר

שינוע דינאמי במערכות לשיתוף אופניים

חיבור זה הוגש כעבודת גמר לקראת התואר ״מוסמך אוניברסיטה״
בהנדסת תעשייה וניהול

על - ידי

דנה פסח

העבודה נעשתה במחלקה להנדסת תעשייה

בהנחיית פרופ׳ מיכל צור וד״ר טל רביב

תשרי תשע״ד

פתח דבר

עבודה זו עוסקת בנושא שהולך וצובר תאוצה והתעניינות יותר ויותר ברחבי העולם. כיום ערים מרכזיות רבות בעולם מפעילות מערכות לשיתוף אופניים (Bike-Sharing) ולאחרונה (באפריל 2011) הצטרפה אליהן גם העיר תל-אביב. עבודה זו היא מפירותיו של מחקר יישומי ושיתוף פעולה בין חוקרים מהאקדמיה לבין חברת FSM, המפעילה את פרויקט שיתוף האופניים בתל-אביב.

הצלחתם של שיתופי פעולה מסוג זה היא אתגר מורכב, והסיבות לכך מגוונות. ישנם פערי שפה ופערי ידע בין שני הגורמים - הנושאים הנחקרים באקדמיה, בדרך כלל עוד אינם נמצאים כלל בשיח העסקי והציבורי. הבעיות שבהן עוסק כל אחד מהצדדים הן בעיות בעלות אופי שונה - באקדמיה דנים בבעיות בעלות אופי תיאורטי, לעומת אופיים המעשי של בעיות תפעוליות. לוחות הזמנים שעל פיהם פועלים הצדדים הם שונים זה מזה ומשימות מחקר הנדרשות ע"י גופים עסקיים וציבוריים דורשות מסגרת זמן מצומצמת יותר. יחד עם זאת מדובר בנושא חשוב במיוחד, שכן למעורבות האקדמיה בחברה ובתעשייה עשויה להיות השפעה מכרעת על קידומה ועל הצלחתה של החברה.

האתגר המחקרי בעבודה זו היה מורכב, אך מרתק ביותר היה האתגר היישומי. על מנת להתמודד עם האתגר היישומי היה צורך במאמצים מקצועיים ואישיים על מנת לשכנע את מפעילי המערכת שהמחקר ללא ספק יתרום גם להשגת המטרה העסקית של הארגון, ובכך להשיג את הסכמתם לשיתוף המידע והידע שבידיהם, ובשלב מאוחר יותר לשכנע אותם ליישם את מסקנות המחקר. היה זה תהליך ארוך שנמשך כשנתיים וחצי, והחל עוד לפני הקמת הפרויקט בעיר תל-אביב. במהלך התקופה הזו נדרשנו לגשר על הפער שבין הידע האקדמי באוניברסיטה לבין הידע התפעולי בארגון ולהתגבר על האתגרים הנוספים הקיימים בפרויקט מסוג זה. ניתן לומר כי כל אחד מהצדדים יצא לבסוף נשכר משיתוף הפעולה.

על אף הקשיים, פעלנו בהרבה התלהבות ורצון להשפיע על הפרויקט שאנחנו מאמינים כי הוא מאד משמעותי ותורם רבות לחברה. שאפתי לעסוק במחקר שלא יישאר בגנזכי האקדמיה בלבד ולמרות שהאתגר לא היה קל, אני מאמינה שהצלחתי בעזרתם של הרשומים מטה להגשים את השאיפה הזו, אני גאה על כך מאד ומודה על ההזדמנות שניתנה לי.

* פרסום המחקר בעיתונות הפופולארית:

http://www.haaretz.co.il/news/education/1.1171258

http://www.haaretz.com/print-edition/features/the-cycling-equation-1.356832

תודות

ברצוני להודות מעומק הלב למנחים שלי פרופ׳ מיכל צור וד״ר טל רביב, על שעות ההנחיה הרבות, על הסבלנות ועל הרעיונות שדחפו אותי קדימה. תודה לכם על ההזדמנות לעסוק במחקר בתחום שהוא כל כך מעניין, מעשי ובעל משמעות לחברה. תודה על כך שאפשרתם לי לבטא את עצמי, את רעיונותיי וכישוריי. תודה על התמיכה ועל שחלקתם איתי מקרוב את הקשיים ואת ההצלחות בעבודה על המחקר. למדתי מכם הרבה מאד מבחינה מקצועית, אבל למדתי אפילו עוד יותר בהיבט האישי. למדתי לחשוב, לחקור דברים לעומק, להיות ביקורתית, לתור אחר האמת המדעית. למדתי לא להתייאש גם כשקשה.

תודה לעובדי חברת FSM, המפעילה את מערכת ״תל-אופן״ בתל-אביב, שקיבלו אותי כחלק מהצוות, וסייעו לי בשעות רבות של דיונים, וויכוחים וסיעורי מוחות. התובנות שקיבלתי בעזרתכם היו חלק משמעותי ובלתי נפרד מהמחקר. תודה על שקיבלתם את הרעיונות עם ראש פתוח ובזרועות פתוחות, ושהפכתם את עבודת המחקר למעשית ולמעניינת. האתגר עמו התמודדנו יחד לשילוב ולמיזוג הרעיונות האקדמיים והידע התפעולי בארגון, היה אתגר ייחודי ויוצא דופן עבורי, זו הייתה התמודדות מדהימה, מספקת ותורמת מאד ברמה האישית. תודה מיוחדת לשלמה כהן, סמנכ״ל התפעול על הידע ועל המידע שחלקת עמי, על הפתיחות ועל התמיכה הרבה.

תודה לכל חברי המחלקה להנדסת תעשייה באוניברסיטת ת״א, על שסיפקתם לי את כל התנאים להצליח במחקר, על שתמכתם בי ועודדתם אותי להצליח ולעשות מחקר בעל משמעות. תודה לחברי הסגל ולעמיתי הסטודנטים למחקר. תודה אישית לאנשים הבאים: אדיסון אברהם, איריס פורמה, דינה קליכמן, ורד דבורי, ורד שפיגל, פרופ׳ יבגני חמלניצקי, פרופ׳ יגאל גרצ׳אק, פרופ׳ יוסי בוקצ׳ין, יניב רג׳יניאנו, משה ישראל, עופר קולקה, פרופ׳ עירד בן-גל, פרופ׳ עמי ארבל, רותם בוטון.

תודה לפרופ׳ הלל בר-גרא מאוניברסיטת בן-גוריון, על הרעיונות הטובים והמרעננים, על העידוד ועל החיוך. תודה לכל הסטודנטים לתואר הראשון, שהתעניינו בפרויקט ותרמו רעיונות יקרים מפז – מוטי לויאן, מורן בלחדב, דלית ליברידר, דרור שמואל ושי יאנובסקי מאוניברסיטת תל אביב. תודה לאפרת זמר ולשיר זכריה מאוניברסיטת בן גוריון בנגב, ותודה ליוני וידלנסקי מהאוניברסיטה העברית בירושלים. תודה לימי גליק.

לסיום, תודה מיוחדת למשפחה שלי שעמדתם מאחוריי תמיד, האמנתם בי ודחפתם אותי קדימה.

* המחקר נתמך בסיוע חלקי ממענק הקרן הלאומית למדע (ISF) מספר 1109/11.

"הנגשת העושר המחקרי הקיים באקדמיה לשימוש בתעשייה מסייעת לשני הצדדים להפוך ידע אקדמי למסחרי. היא מסייעת לחברות לעסוק במו"פ איכותי לטווח ארוך ולפתח מוצרים עתידיים, אשר יקנו לחברות יתרון בשוק התחרותי ויתרמו למיצובה של ישראל כמדינה בחזית הטכנולוגית העולמית. קשה לדמיין פלטפורמה אחרת שבה עשוי להתקיים מפגש כה ייחודי בין התעשייה לאקדמיה, מפגש שממצה את יכולות כל הצדדים להשיג פיתוחים בעלי פוטנציאל כלכלי" (אבי חסון, המדען הראשי, 2012).

תקציר

ערים מרכזיות רבות בעולם מפעילות מערכות שיתוף אופניים (Bike-Sharing) ולאחרונה (באפריל 2011) הצטרפה אליהן גם העיר תל-אביב. מערכות שיתוף אופניים כוללות תחנות אוטומטיות להשכרת אופניים המפוזרות ברחבי העיר. המערכות מאפשרות ללקוחותיהן לשכור זוג אופניים בתחנה אחת, להשתמש בהם לנסיעה קצרה בעיר, ולהחזירם בתחנה אחרת. הצלחתן של מערכות אלו תלויה במידה רבה ביכולתן לספק את ביקוש המשתמשים לאופניים זמינים בתחנות המוצא ולעמדות עגינה פנויות בתחנות היעד. בדרך כלל קצב ועיתוי השכרת האופניים בכל תחנה שונה מקצב ועיתוי ההחזרה, ולכן האיזון בכמות האופניים בתחנות מופר. על מנת לתת מענה לבעיית האיזון, יש צורך לשנע אופניים בין התחנות. שינוע האופניים (Repositioning) מתבצע באמצעות צי של כלי רכב המיועד למטרה זו. בפועל כיום, איזון המערכות מתבסס על האינטואיציה של המשלחים במרכז הבקרה או של הנהגים בשטח.

ניתן לבצע את משימת השינוע במהלך הלילה (שינוע סטאטי), בהנחה שהמערכת כמעט בטלה בשעות אלו, ו/או במהלך היום (שינוע דינאמי). היתרון של שינוע האופניים בשעות הלילה, הוא בכך שבשעות אלה התנועה בעיר זורמת וכלי הרכב המשנעים יכולים לנוע במהירות ומבלי לתרום לגודש התנועה בעיר. שינוע בשעות היום מאפשר תגובה יעילה יותר לשיאי ביקוש זמניים. כאשר מספר האופניים והקיבולות של התחנות מוגבלים, שינוע במהלך הלילה בלבד אינו מאפשר היענות לחלק ניכר מהביקוש.

מטרת מחקר זה היא הצגת שיטה לתכנון שינוע דינאמי באופן שימקסם את שביעות הרצון של משתמשי המערכת וימזער את חוסר הנוחות הנגרם להם כתוצאה ממחסור באופניים ועמדות פנויות בתחנות. שיטת הפתרון המוצגת, מבוססת על מודל מתמטי עם אופק מתגלגל ועל התאמות היוריסטיות שונות למציאות הסטוכסטית של המערכת. לצורך ההשוואה העבודה מציגה כללי שילוח היוריסטיים נוספים. חלקם מבוססים על אומדן הביקוש העתידי וחלקם קצרי ראות ומבוססים על המצב הנוכחי של המערכת בלבד. האחרונים מדמים את השיקולים האינטואיטיביים של המפעילים כיום.

השיטות השונות מושוות באמצעות מודל סימולציה הכולל נתוני ביקוש שנאספו ממערכת שיתוף האופניים בתל-אביב. הניסוי הנומרי באמצעות הסימולציה מדגים את עדיפות הפתרון המתקבל מהמודל המתמטי על פני השיטות האחרות ואת עליונותם של כללי השילוח המבוססים על אומדני ביקוש עתידי על פני הכללים קצרי הראות. מרבית השיטות שהוצגו מאפשרות שיפור ניכר במדדי איכות השירות של המערכת בהשוואה לאופן שבו פועלים מפעילי המערכת.

* **דנה פסח** עבדה כיועצת בתחום התכנון והתפעול בחברת FSM, המפעילה את "תל-אופן" (Tel-O-Fun), מערכת שיתוף האופניים בעיר תל-אביב.

תוכן עניינים

1. מבוא 1
2. סקר ספרות 4
2.1. בעיות ניתוב כלליות 4
2.2. מערכות לשיתוף מכוניות (Car-Sharing Systems) 6
2.3. שינוע במערכות שיתוף אופניים 8
2.4. בעיות שונות במערכות לשיתוף אופניים 11
3. בעיית השינוע הדינאמית (Dynamic Repositioning Problem) 13
3.1. תיאור הפרמטרים של הבעיה ומאפייניהם 15
3.2. פונקציית המטרה 16
3.3. משתני ההחלטה 18
3.4. מודל התנהגות המשתמש 18
4. שיטת פתרון המבוססת על מודל תכנות מתמטי 21
4.1. הנחות המודל 21
4.2. הקלט לבעיה 23
4.3. משתני ההחלטה 24
4.4. ניסוח המודל 24
4.5. האתגרים בפתרון הבעיה 30
4.6. התאמת המודל למציאות הסטוכסטית 30
4.7. הפחתת המאמץ החישובי 33
4.8. שימוש בתכונות ייחודיות של הבעיה על מנת לשפר את זמן הריצה 36
4.9. דיון ומסקנות 40
5. בחינת המודל המתמטי 42
5.1. הקלט לבעיה 42
5.2. ניסוי 1 – בחינת האפקטיביות של שיטת ניפוי התחנות 43
5.3. ניסוי 2 – בחינת האפקטיביות של מחיקת הקשתות 49
5.4. ניסוי 3 – בחינת האופק המתגלגל 51
5.5. ניסויים נוספים 57
6. שיטות פתרון המבוססות על כללי שילוח (Dispatching Rules) 58
6.1. מאפיינים של שיטות המבוססות על כללי שילוח 58
6.2. יישום מאפייני השיטות 60
6.3. סיכום והשוואה 71
7. הערכה באמצעות מודל סימולציה 73
7.1. התנהגות המשתמשים 73
7.2. סיכום ההבדלים בין מודל הסימולציה לבין מודל התכנות המתמטי 79
7.3. ניסויים 79
8. תוצאות הרצת הסימולציה 86
8.1. תיאור התוצאות 86
8.2. ניתוח באמצעות מבחנים סטטיסטיים 87

8.3. קורלציה בין מדדים ... 91
8.4. סיכום ... 93
9. סיכום ומסקנות ... 94
9.1. תרומה ... 94
9.2. המלצות למחקר עתידי ... 95
9.3. יישום בפועל ... 95
10. נספחים ... 96
10.1. נספח א׳ - דוגמה מספרית למחיקת הקשתות על פי אלגוריתם 2 ... 96
10.2. נספח ב׳ – יישום מודל הסימולציה ... 99
11. רשימת מקורות ... 103

רשימת סימנים

אינדקסים:

i, j	תחנה/צומת
v	כלי רכב
t	תקופה (בזמן בדיד)

w_{ij}	משך ההליכה מתחנה i אל תחנה j
r_{ij}	משך הרכיבה מתחנה i אל תחנה j
O_{ij}	משך הנסיעה מתחנה i אל תחנה j באמצעי תחבורה אחר (או ה״קנס״ הנוסף למשתמש בעת אי שימוש במערכת)

פרמטרים מהמודל המתמטי:

הפרמטרים שמגדירים את הקונפיגורציה של המערכת

N	קבוצת התחנות במערכת $i = 1, \ldots, \|N\|$
V	קבוצת רכבי השינוע במערכת $v = 1, \ldots, \|V\|$
c_i	קיבולת התחנה i – מספר עמדות העגינה בתחנה i. $i \in N$.
k_v	קיבולת כלי הרכב v – מספר האופניים שניתן לטעון על כלי הרכב $v \in V$
t_{ij}	זמן נסיעה ברכב מתחנה i אל תחנה j – בזמן רציף (בשניות).
L	משך זמן הטעינה לכל זוג אופניים (בשניות).
U	משך זמן הפריקה לכל זוג אופניים (בשניות).

הפרמטרים שמגדירים את מצב המערכת העדכני (בתחילת אופק התכנון):

s_i^0	מספר זוגות האופניים בתחנה i, לפני תחילת השינוע $i \in N$
y_v^0	כמות אופניים על רכב v
l_v	התחנה שאליה נוסע רכב v.
Δ_v	מספר התקופות שייקח לרכב v להגיע לתחנה l_v, שאליה הוא נמצא בדרכו (ייתכן גם $\Delta_v = 0$ במצב שבו הרכב נמצא בתחנה בתחילת אופק התכנון).

פרמטרים שקשורים לביקוש ולפרקי הזמן במודל:

τ רמת הדיסקרטיזציה של המודל - משך תקופת הזמן הבדיד (בשניות).

T'' משך אופק התכנון - מספר התקופות לביצוע פעילות השינוע.

t'_{ij} זמן נסיעה ברכב מתחנה i אל תחנה j – בתקופות (מעוגל למעלה).

$t'_{ij} = \left\lceil t_{ij}/_{\tau} \right\rceil$. למשל, אם משך הנסיעה בין זוג התחנות הוא 9 דקות (540 שניות),

ואורכה של תקופה הוא 5 דקות (300 שניות), אז $t'_{ij} = \left\lceil 540/_{300} \right\rceil = 2$.

d_{it} ביקוש נטו לאופניים בתחנה i בתקופה t מחושב ע״י ההפרש בין תוחלת הביקוש להשכרות בתחנה לבין תוחלת הביקוש להחזרות בתחנה. אם ערך המשתנה הוא חיובי אזי מדובר בעודף של השכרות על פני החזרות בתקופה t, ואחרת מדובר בעודף של החזרות על פני השכרות בתקופה t.

$\bar{L}$ חסם למספר האופניים המקסימאלי שניתן לטעון על כלי הרכב במהלך תקופה בודדת, מחושב באופן הבא: $\bar{L} = \tau/\mathrm{L}$ (המנה אינה מעוגלת בהתאם לאמור בסעיף 4.3).

$\bar{U}$ חסם למספר האופניים המקסימאלי שניתן לפרוק מכלי הרכב במהלך תקופה בודדת, מחושב באופן הבא: $\bar{U} = \tau/\mathrm{U}$ (המנה אינה מעוגלת בהתאם לאמור בסעיף 4.3).

U_{it} גבול עליון רצוי עבור מלאי הביטחון – כמות אופניים מקסימאלית רצויה בתחנה בתקופה t. חריגה ממנה מובילה לקנס בפונקציית המטרה.

L_{it} גבול תחתון רצוי עבור מלאי הביטחון – כמות אופניים מינימאלית רצויה בתחנה בתקופה t. חריגה ממנה מובילה לקנס בפונקציית המטרה.

פרמטרים שמשפיעים על פונקציית המטרה:

α משקל עבור עלויות הנסיעה.

h היחס בין עלות ההמתנה של משתמשים שמבקשים להחזיר אופניים לבין עלות ההמתנה של משתמשים שמבקשים לשכור אופניים.

$\beta(t)$ פונקציית היוון שמגדירה את המשקלות של מספר הממתינים בכל תקופה. ככל שהתקופה t קרובה יותר, כך המשקל גבוה יותר. למשל: $\beta(t) = 0.99^t$

γ משתנה שמגדיר את המשקל עבור ה״קנס״ על החריגה ממלאי הביטחון. ניתן לומר שהמשקל של מלאי הביטחון ביחס למשקל של זמן המתנה הוא נמוך, משום שיחידת חריגה ממלאי ביטחון אינה מובילה בהכרח להמתנת לקוחות, שהיא המדד האמיתי של רמת השירות במערכת.

משתני ההחלטה מהמודל המתמטי:

x_{ijtv} משתני ניתוב. ערך בינארי השווה ל-1 אם רכב v יוצא מתחנה i אל תחנה j בתקופה t. אחרת ערכו של המשתנה שווה ל-0.

y^{L}_{itv} מספר זוגות האופניים שנטענים מתחנה i אל כלי רכב v בתקופה t.

y^{U}_{itv} מספר זוגות האופניים שנפרקים מכלי רכב v אל תחנה i בתקופה t.

y_{ijtv} משתני זרימה. מספר זוגות האופניים שרכב v נושא עליו בנסיעתו מתחנה i אל תחנה j המתחילה בתקופה t. אם אין נסיעה של רכב v מתחנה i אל תחנה j בתקופה t אזי ערך המשתנה יהיה אפס.

s_{it} רמת המלאי בתחנה i בסוף תקופה t.

W^{B}_{it} מספר הממתינים להשכרת אופניים בתחנה i בתקופה t.

W^{R}_{it} מספר הממתינים להחזרת אופניים בתחנה i בתקופה t.

Z_{it} החריגה ממלאי הביטחון בתחנה i בתקופה t.

רשימת איורים

איור 1: השינוע הסטאטי במהלך הלילה אינו מספיק...14
איור 2: משתני ההחלטה שיש לקבוע הם נתיבי כלי הרכב וכמויות הטעינה והפריקה...18
איור 3: בחינת האלטרנטיבות העומדות בפני המשתמש...19
איור 4: סיכום פרוצדורת הפתרון...33
איור 5: אופק קצר להחלטות הניתוב...35
איור 6: אופק קצר להחלטות הניתוב, התרה חלקית...36
איור 7: מחיקת קשתות על פי שיקולים גיאוגרפיים...37
איור 8: חלוקת העיר לשני אזורים...43
איור 9: בחינת ניפוי התחנות...45
איור 10: אופן הפתרון של המודל המלא...51
איור 11: הזנת תנאי התחלה במודל המתגלגל...52
איור 12: הרצת המודל המתגלגל ב-5 הרצות עוקבות...52
איור 13: בחינת המודל עם האופק המתגלגל...53
איור 14: חלוקת העיר לארבעה אזורים...57
איור 15: דוגמה לתחנה בעלת עודף גבוה של החזרות...59
איור 16: דוגמה לגישה הנאיבית של מפעילי המערכת...63
איור 17: דוגמה לשיטה המשקללת את הכמות ואת המרחק...64
איור 18: שיטה המשקללת את הכמות ואת המרחק - דוגמה נוספת...64
איור 19: דוגמה לשיטה המבוססת על מסלול קבוע מראש (שלב א')...66
איור 20: לשיטה המבוססת למסלול קבוע מראש (שלב ב')...67
איור 21: דוגמה לשיטה המבוססת למסלול קבוע מראש (שלב ג')...67
איור 22: דוגמה לפונקציית המכירות האבודות בתחנה מסוימת...69
איור 23: תרשים זרימה עבור התנהגות המשתמשים...74
איור 24: בחירת המשתמש בעת הגעה לתחנה ריקה...75
איור 25: הזמן האידיאלי...76
איור 26: בחירת המשתמש על פי מזעור הזמן העודף...77
איור 27: ניסיון החזרת אופניים בתחנה מלאה...78
איור 28: התנהגות המשתמש כאשר הוא נתקל פעם נוספת בתחנה מלאה...78
איור 29: חלוקת העיר לאזורים תפעוליים...80
איור 30: השוואת הזמן העודף הממוצע ליום בין השיטות השונות...86
איור 31: השוואת אחוז המשתמשים שלא קיבלו שירות באופן מיידי...87
איור 32: השוואת הזמן העודף בכל מופע בנפרד...90
איור 33: דוגמה למחיקת הקשתות...96
איור 34: השינויים לאחר מחיקת הקשתות בסדר שאינו עולה...98

<u>רשימת טבלאות</u>

טבלה 1 : סיכום האתגרים בבעיית השינוע הדינאמית ופתרונם....39

טבלה 2 : תוצאות ניסוי בחינת האפקטיביות של שיטת ניפוי התחנות 47

טבלה 3 : תוצאות ניסוי בחינת האפקטיביות של שיטת מחיקת הקשתות 50

טבלה 4 : תוצאות ניסוי בחינת האופק המתגלגל....55

טבלה 5 : ניתוח שונות (ANOVA)....87

טבלה 6 : מבחן Duncan להשוואת ממוצעי השיטות....89

טבלה 7 : בחינת קורלציה בין המדדים השונים 91

טבלה 8 : ערכי מטריצת המרחקים ומטריצת הקשתות לפני מחיקת הקשתות 96

טבלה 9 : ערכי מטריצת המרחקים ומטריצת הקשתות כתוצאה ממחיקת הקשתות....97

1. מבוא

מערכת לשיתוף אופניים הינה מערכת עירונית הכוללת תחנות אוטומטיות להשכרת אופניים המפוזרות ברחבי העיר. המערכת מאפשרת ללקוחותיה לשכור זוג אופניים בתחנה אחת, להשתמש בהם לנסיעה קצרה בעיר, ולהחזירם בתחנה אחרת. בכל תחנה ישנו מסוף שמשמש להשכרת האופניים באמצעות כרטיס אשראי או באמצעות כרטיס מנוי תקופתי בתשלום. בנוסף, בתחנות ישנם מנעולים חכמים שמזהים את זוגות האופניים המחוברים אליהם. הזמינות של האופניים מתעדכנת במערכת המידע של המפעיל ומתפרסמת באתר האינטרנט שלו ובמסופי ההשכרה בזמן אמת. המערכת פועלת בכל שעות היממה ובכל ימות השבוע.

המערכת משפרת את מערך התחבורה הציבורית בעיר על ידי עידוד משתמשיה, גם אלו הגרים מחוץ לעיר, להגיע אל מרכזי הערים באמצעות תחבורה ציבורית ולא באמצעות רכבם הפרטי ולנוע שם באמצעות אופניים. באופן זה, המערכת מעודדת את השימוש הן באופניים והן בתחבורה ציבורית ובכך מובילה להפחתת עומסי התנועה ובעיות החניה במרכז העיר, להפחתת זיהום האוויר והרעש בעיר, להפחתת השימוש בדלקים מאובנים ולהפחתת הפליטה של גזי חממה (GHG). יתרון סביבתי נוסף הוא בכך, ששיתוף האופניים בקרב המשתמשים מאפשר חסכון במשאבים בייצור של זוגות אופניים. בנוסף, המערכת מעודדת אורח חיים בריא בקרב התושבים, מפחיתה את סכנת הגניבה של אופניים פרטיות, מהווה אטרקציה עבור תיירים, ומאפשרת להם אמצעי ניוד נוח.

המערכת הראשונה לשיתוף אופניים הוקמה באמסטרדם בשנת 1968, ומאז חלה התפתחות מרשימה בטכנולוגיה של המערכות הללו. במאמר של Demaio (2004), מוצגים שלושה דורות של מערכות לשיתוף אופניים:

במערכת הדור הראשון שיושמה באמסטרדם פוזרו אופניים ברחבי העיר ומשתמשים יכלו לרכב עליהם ליעדם ללא אילוצי מיקום בתחנות. אולם, האופניים במערכת זו נגנבו והמערכת נכשלה.

הדור השני נחשף ב-1995 בקופנהגן. במערכת זו הוקמו תחנות אופניים וניתן היה לשכור זוגות אופניים ע"י הפקדת מטבע בנקודת השכרת האופניים והשבתו בנקודת החזרת האופניים. לרוע המזל, גם במערכת זו היו גניבות רבות שנבעו, בין השאר, מהאנונימיות של המשתמשים ומחוסר האפשרות לבצע מעקב אחריהם.

מערכות שיתוף האופניים שפועלות כיום הן מערכות דור שלישי אוטומטיות וחכמות המשתמשות בטכנולוגיות מידע בכדי להבטיח שהאופניים במערכת לא ייגנבו. בעזרת נעילת האופניים באמצעים אלקטרו-מכאניים ובאמצעות מעקב אחר שוכרי האופניים ע"י תשלום המבוצע בכרטיס אשראי או בטלפון סלולארי, מצליחות המערכות בדור השלישי להפחית במידה ניכרת את שיעור הגניבות וההשחתה של זוגות אופניים. בנוסף, הטכנולוגיות החדשות הללו מאפשרות לאסוף את נתוני הביקוש במערכת, וניתן לעשות בהם שימוש על מנת לתמוך בהחלטות תפעוליות במערכת.

ערים מרכזיות רבות בעולם מפעילות מערכות שיתוף אופניים ולאחרונה (באפריל 2011) הצטרפה אליהן גם העיר תל-אביב. בשנים האחרונות ישנן עוד ועוד ערים שהולכות ומיישמות מערכות

כאלה. על פי Demaio And Meddin (2012), קיימות כיום ברחבי העולם כ-400 מערכות לשיתוף אופניים מהדור השני והשלישי.

הצלחתה של מערכת לשיתוף אופניים תלויה במידה רבה ביכולתה לספק את ביקוש המשתמשים לאופניים זמינים בתחנות המוצא ולעמדות עגינה פנויות בתחנות היעד. בדרך כלל קצב ועיתוי השכרת האופניים בכל תחנה שונה מקצב ועיתוי ההחזרה, ולכן האיזון בכמות האופניים בתחנות מופר. אופיין החד-כיווני של הרכיבות במערכת מוביל לכך שישנן תחנות שמתמלאות בעוד אחרות מתרוקנות. למשל, בתחנות הסמוכות לאזור משרדים יהיו החזרות רבות של אופניים בשעות הבוקר והשכרות רבות של אופניים אחה"צ.

על מנת לתת מענה לבעיית האיזון, יש צורך לשנע אופניים בין התחנות. שינוע האופניים (Repositioning) מתבצע באמצעות צי של כלי רכב המיועד למטרה זו. בפועל כיום, השינוע במערכות הללו מתבסס על האינטואיציה של המשלחים במרכז הבקרה או של הנהגים בשטח.

ניתן לבצע את משימת השינוע במהלך הלילה (שינוע סטאטי) ו/או במהלך היום (שינוע דינאמי). היתרון של שינוע האופניים בשעות הלילה, בהן פעילות המערכת מועטה, הוא בכך שבשעות אלה התנועה בעיר זורמת וכלי הרכב המשנעים יכולים לנוע במהירות ומבלי להפריע לתחבורה בעיר. שינוע בשעות היום מאפשר תגובה יעילה יותר לשיאי ביקוש זמניים.
בשנים האחרונות הלך וגדל העניין במחקר בנושא מערכות לשיתוף אופניים. מרבית המחקרים שפורסמו בנושא עסקו בניתוח נתונים אמפיריים ממערכות קיימות על מנת לקבל תובנות על אופי הביקוש ולגבש שיטות לביצוע תחזית. מחקרים נוספים טיפלו בנושאים אסטרטגיים כגון פריסת רשת התחנות וקביעת קיבולת התחנות. המחקר המוצג בעבודה זו עוסק בנושאים תפעוליים הנוגעים לשינוע האופניים במערכת.

מטרת המחקר המוצג בעבודה זו היא הצגת שיטה המבוססת על מודל מתמטי המספקת המלצה לשינוע **הדינאמי** של האופניים באופן יעיל, שממזער את חוסר שביעות הרצון של המשתמשים. השיטה ניגשת לבעיה מנקודת מבט מעשית והיא נבחנה תוך שיתוף פעולה עם מפעילי מערכת שיתוף האופניים בעיר תל-אביב. השיטה עושה שימוש בתחזיות ביקוש להשכרת אופניים, בקיבולות כלי הרכב, בזמני הנסיעה שלהם, ובנתונים נוספים המאפיינים מערכות שיתוף אופניים. יישום הפתרון המושג מהמודל המתמטי בסביבה של זמן-אמת במערכת לשיתוף אופניים דורש מספר התאמות שמתבצעות באופן היוריסטי. על מנת לבחון את ביצועי השיטה המוצעת, פותחו בעבודה זו מספר שיטות היוריסטיות נוספות המבוססות על כללי שילוח. חלקן מייצגות בקירוב את השיטות שמיושמות כיום ע"י מפעילי המערכת, וחלקן מתוחכמות יותר ומורכבות יותר מבחינה חישובית.
באמצעות ניסוי סימולציה אנחנו מראים שהמדיניות המתקבלת באמצעות המודל המתמטי משיגה תוצאות טובות יותר מאשר השיטות האחרות. רוב השיטות המבוססות על כללי השילוח משיגות תוצאות טובות יותר מהשיטות הנהוגות בפועל כיום. מודל הסימולציה כולל את מידול ההחלטות של המשתמשים במערכת, בפרט כאשר הם אינם יכולים לשכור או להחזיר אופניים.

התנהגות המשתמשים במערכת מיוצגת באמצעות מודל התנהגות אקסיומטי. כל משתמש מיוצג ע"י זמן היציאה, תחנת המוצא הרצויה ותחנת היעד הרצויה. אם אופניים אינם זמינים בתחנת המוצא ו/או עמדת עגינה אינה זמינה בתחנת היעד – המשתמש יכול לבחור להשתמש בתחנה קרובה אחרת או להימנע משימוש במערכת לחלוטין (לא אפשרי במקרה של מחסור בתחנת עגינה). במקרה האחרון, המשתמש עשוי לבחור ללכת ברגל או להשתמש באמצעי תחבורה אחר ממקום מוצאו אל היעד שאליו הוא מבקש להגיע. העלות שנגרמת למשתמש כתוצאה מכל אחת מהאפשרויות מתבטאת בתוספת הזמן שהוא מבלה במערכת ותוספת זו מהווה מדד לחוסר שביעות הרצון של המשתמש. לפיכך, המטרה היא לפזר ולשנע את האופניים באופן שבו ימוזער סה"כ חוסר שביעות הרצון של כל המשתמשים במערכת, כלומר: סך הזמן הנוסף שהם מבלים במערכת כתוצאה מחוסר זמינות של אופניים או של תחנות עגינה.

העבודה מכילה את הפרקים הבאים: בפרק 2 אנו סוקרים את הספרות הרלוונטית לבעיית השינוע הדינאמית ולבעיות קרובות. בפרק 3 מוצגת הגדרת בעיית השינוע הדינאמית. בפרק 4 מוצגת שיטת פתרון היוריסטית לבעיה הדינאמית, המבוססת על מודל תכנות מתמטי. בפרק 5 מוצגים ניסויים הבוחנים את ביצועי המודל המתמטי בסביבה דטרמיניסטית. פרק 6 מציג שיטות לפתרון הבעיה באמצעות היוריסטיקות המבוססות על כללי שילוח (dispatching rules). פרק 7 מציג את המודל המשמש לבחינת ביצועי השיטות בסביבת הסימולציה ופרק 8 מציג את תוצאות ניסויי הסימולציה. לבסוף, פרק 9 מציג מסקנות והמלצות למחקר עתידי.

2. סקר ספרות

בפרק זה תוצג סקירת הספרות הרלוונטית לנושא השינוע הדינאמי במערכות לשיתוף אופניים. בסעיף 2.1 נציג את מיקום הבעיה בהקשר הרחב של בעיות ניתוב כלי רכב (Vehicle Routing Problems), בסעיף 2.2 נציג ספרות העוסקת במערכות לשיתוף מכוניות (Car-Sharing Systems), ובסעיף 2.3 נדון בספרות הנוגעת לבעיות השינוע במערכות לשיתוף אופניים. לבסוף, בסעיף 2.4 נציג ספרות שדנה בבעיות אחרות הקשורות במערכות לשיתוף אופניים.

2.1. בעיות ניתוב כלליות

בעיית השינוע במערכות לשיתוף אופניים הינה בעלת דמיון לבעיות איסוף ומסירה (Pickup and Delivery Problem), שהינה סוג של בעיית ניתוב כלי רכב (VRP). בדומה לבעיית איסוף ומסירה, גם כאן אנחנו מבצעים איסוף והפצה של פריטים – אופניים.

במאמרם, Berbegila et al. (2007) מסווגים את בעיות ה-PDP על פי הסכמה הבאה: [Structure|Visits|Vehicles]. השדה הראשון, **מבנה**, מייצג את מספר המקורות והיעדים עבור כל פריט, השדה השני, **ביקורים**, מייצג את דרגות החופש שמתאפשרות בביקורים, ואילו השדה השלישי, **כלי רכב**, מייצג את מספר כלי הרכב בבעיה. על פי סיווג זה הבעיה שלנו מסווגת באופן הבא: [M-M|P/D|m]. בבעיה שלנו המבנה הוא מבנה של רבים לרבים (many-to-many), משום שכל צומת בה מתפקד כמקור וכיעד לזוגות אופניים. בניגוד לכך, בעיית יחיד ליחיד (one-to-one) היא בעיה שבה לכל פריט יש מקור יחיד ויעד יחיד ומוגדר. בעיה מסוג יחיד לרבים ליחיד (one-to-many-to-one) מוגדרת כבעיה שבה הפריטים זמינים במחסן ומיועדים להפצה אל הלקוחות, ופריטים שנמצאים אצל הלקוחות מיועדים להבאה אל המחסן. הביקורים בבעיה שבה אנחנו מטפלים הם מסוג P/D, כלומר בכל תחנה מתאפשר איסוף או מסירה בלבד. למעשה כל הפריטים הם זהים מסוג אחד בלבד, ולכן אין תועלת לאיסוף ומסירה בו זמנית. הבעיה שבה מטפלת עבודה זו מתייחסת לאפשרות של רכב אחד או של מספר כלי רכב. ההבדל העיקרי בין הבעיה שלנו לבעיית PDP הינו, שב- PDP שבספרות הכמויות שיש לאסוף או למסור בצמתים הן נתונות מראש, ואילו בבעיה שלנו כמויות אלה הן משתני החלטה. בנוסף, במערכת לשיתוף אופניים הביקוש אינו ממתין בהכרח, אלא המשתמשים יכולים לבחור להמתין, לנטוש או לנדוד לתחנה אחרת. יתר על כן, פונקציית המטרה בבעיות PDP היא לרוב מזעור עלויות ואינה מתייחסת לרמת השירות, שהיא המטרה העיקרית בבעיה שלנו.

Berbegila et al. (2007) גם מסווגים את הבעיות בממד נוסף המתייחס לזמינות המידע. בבעיות **סטאטיות** מניחים שכל המידע הוא דטרמיניסטי וידוע מראש. בבעיות **דינאמיות**, המידע מתגלה באופן הדרגתי בחלוף הזמן. בבעיות **סטוכסטיות** חלק מהמידע (למשל הביקוש) מיוצג ע״י משתנים אקראיים שהתפלגותם ידועה בדרך כלל.

בעיה **דינאמית וסטוכסטית** הינה בעיה שבה מקבל ההחלטות נדרש לבצע החלטות עוד בטרם כל המידע הנדרש נמצא זמין לו, כאשר קיים מידע סטוכסטי שניתן לנצל על התפלגותם האקראית של הנתונים שעוד לא התגלו. בבעיות אלה מקבלי ההחלטות נדרשים לשנות את ההחלטה כאשר מידע חדש מתקבל (Pillac et al., 2011 ,Powell et al.,1995).
הבעיה שבה אנחנו מטפלים היא בעיית ניתוב דינאמית וסטוכסטית, שבה חוסר הוודאות מתייחס בעיקר לביקוש – רמת הביקוש, התזמון שלו והמיקום שלו.

אם כן, הבעיה הדומה ביותר לבעיה שמוצגת בעבודה זו היא בעיה של איסוף ומסירה דינאמי במבנה של רבים-לרבים (Dynamic and stochastic many-to-many PDP). אין מחקרים זמינים המטפלים בבעיה זו.

Berbegila et al. (2010) מציגים סקירה נרחבת על בעיות PDP דינאמיות. בין השאר המאמר סוקר גם שיטות פתרון מקובלות לבעיות מסוג זה. אסטרטגיה ראשונה אפשרית היא פתרון הגרסה הסטאטית של הבעיה בכל פעם שמידע חדש מתגלה, אך החיסרון הוא בכך שזה עלול לקחת זמן ממושך, שאינו מתאים לסביבה של זמן-אמת. אסטרטגיה אחרת שבה משתמשים באופן תדיר בספרות, היא פתרון הבעיה הסטאטית פעם אחת בלבד בתחילת אופק התכנון וכשמתגלה המידע מעדכנים את הפתרון באמצעות שיטות היוריסטיות. במאמר זה מתבצעת סקירה של ספרות הנוגעת לבעיות דינאמית וסטוכסטיות, אך רק בעיות שהן במבנה של one-to-one. מתודולוגיות נוספות הקיימות לפתרון בעיות מסוג זה הן: תכנות דינאמי, תכנות מתמטי בשלמים, תכנות סטוכסטי ואופק מתגלגל.

בעיית PDP דינאמית וסטוכסטית מתוארת ב-Yang et al. (2004) המתייחס לבעיה דינאמית מסוג TPDP (dynamic full truckload pickup and delivery problem), עם חלונות זמן (Time Windows). המאמר מציג ניסוח MIP לבעיה סטאטית ולאחר מכן עושה שימוש באסטרטגיה של אופק מתגלגל עבור הבעיה הדינאמית בזמן-אמת. בבעיה זו דרישות יכולות להידחות ע"י המפעיל, וניתן לשרת דרישה מסוימת באיחור עם תוספת "קנס".
ההבדל העיקרי בין הבעיה הזו לבין הבעיה שלנו היא שבמאמר מדובר בבעיה שבה בכל צעד מתבצעת משימה אחת בלבד של איסוף ומסירה, ולא ניתן להתחיל משימה חדשה עד שהקודמת לא הסתיימה. לעומת זאת, בבעיה שלנו אפשר לבצע מספר משימות איסוף לפני ביצוע משימה של מסירה או להיפך.

הבעיה בה אנחנו מטפלים הינה דומה גם לבעיות ניתוב מלאי (Inventory Routing Problems). בעיות ניתוב מלאי הן הרחבה נוספת לבעיות ניתוב כלי רכב, ובהן יש לבצע החלטות ניתוב וכן לנהל את החלטות המלאי, כך שלא תתקיים חריגה מקיבולת כלי הרכב. בבעיית השינוע במערכת לשיתוף אופניים – האופניים הם המלאי, אך בניגוד לבעיות IRP אחרות, במערכת לשיתוף אופניים מתבצעות החזרות המגדילות את המלאי בתחנות. כמו כן, כאמור לעיל, פונקציית

המטרה מתייחסת לרמת השירות במערכת ואילו פונקציית המטרה בבעיות IRP היא מזעור העלות, הכוללת עלויות נסיעה, עלויות מלאי ועלויות נוספות (Bertazzi et al., 2008).

2.2. <u>מערכות לשיתוף מכוניות (Car-Sharing Systems)</u>

קיים דמיון בין מערכות לשיתוף אופניים לבין מערכות לשיתוף מכוניות (car-sharing systems). מערכות לשיתוף מכוניות מסווגות לשני סוגים עיקריים: מערכות שבהן הנסיעות מתבצעות הלוך ושוב, ומערכות שבהן הנסיעות עשויות להתבצע בכיוון אחד והמשתמש יכול להחזיר את הרכב בכל תחנה. מערכת לשיתוף אופניים דומה במאפייניה למערכת לשיתוף מכוניות שבה הנסיעות מתבצעות בכיוון אחד (one-way car-sharing system). קיימים נושאים משותפים לשתי הבעיות והעיקרי שבהם הוא חוסר האיזון בפיזור המלאי בין התחנות, שנוצר כתוצאה מנסיעות חד-כיווניות. בשני סוגי המערכות פתרון אפשרי לבעיית חוסר האיזון הוא העברת כלי הרכב (אופניים, מכוניות) בין התחנות על מנת להבטיח פיזור שיאפשר לספק את הביקוש. אף על פי כן, קיימים הבדלים משמעותיים בין הבעיות הללו, משום שעל פי רוב מכונית מועברת ממקום למקום באמצעות נהג, ואילו אופניים מועברות במנות על ידי רכבי שינוע ייעודיים. הספרות העוסקת במערכות לשיתוף מכוניות, מתייחסת בעיקרה למערכות שבהן מתבצעות בדרך כלל הזמנות מראש וכך, בשונה ממערכות לשיתוף אופניים, ניתן לדעת מתי לקוח צפוי להגיע, לאיזו תחנת איסוף ולאיזו תחנת יעד הוא יגיע.

Kek et al. (2006) הציעו שיטה בעלת שלושה שלבים לתמיכה בהחלטה במערכת לשיתוף מכוניות בכיוון אחד. המטרה היא לסייע למפעילים לקבוע את כוח האדם ואת אופן העברת המכוניות, תוך שימור רמת שירות מסוימת הנמדדת ע"י משכי הזמן שבהם התחנות ריקות או מלאות. הם ביצעו ניסויי סימולציה על בסיס נתונים ממערכת שיתוף מכוניות אמיתית בסינגפור והראו כי השיטה שהציעו משפרת את ביצועי המערכת.

Mukai and Watanabe (2005) דנו במערכת לשיתוף מכוניות שבה המשתמשים אינם בהכרח מזמינים רכב מראש, אלא יכולים לשכור רכב בכל זמן ובכל תחנה, ולבצע מסלולים של כיוון אחד. עוד הם מניחים כי המשתמשים מחליטים האם להשתמש במערכת שיתוף המכוניות על פי הנמוך מבין משך הזמן שייקח להם להגיע אל יעדם בהליכה, לבין משך הזמן שייקח להם להגיע אל יעדם באמצעות שימוש במערכת. איזון המערכת מתבצע באופן דינאמי באמצעות "בקרי מיקום" שמעבירים כלי רכב אחד בכל פעם, בהתאם להנחיות ממרכז בקרה. הם מציעים אלגוריתם, שדורש הומוגניות בפיזור ובשינוע המכוניות בכל אזור שירות. תוצאות של ניסוי סימולציה מראות שהאלגוריתם הוא אפקטיבי בבעיות מסוג זה.

Uesugi et al. (2007) הציעו שיטה לאיזון מלאי המכוניות באמצעות ביקוש המשתמשים, במערכת לשיתוף מכוניות בכיוון יחיד. המשתמשים מזמינים מכונית מראש תוך ציון תחנת המוצא ותחנת היעד שלהם. הם מניחים כי מספר המכוניות שיכולות לחנות בו זמנית בתחנה אינו מוגבל. בנוסף, הם מניחים כי משתמשים בעלי דרישה זהה של תחנת מוצא ותחנת יעד יכולים

לנסוע ביחד או לחוד והם מציעים לאזן את המערכת באמצעות הקצאת מכוניות למשתמשים בהתאם לדרישה לפיזור המכוניות בתחנות. הדרישה כי המשתמשים ייסעו ביחד מצריכה להוסיף למחקר זה תמריץ שיוביל את המשתמשים לנהוג כך.

Barth et al. (2004) מציגים מערכת לשיתוף מכוניות שבה המשתמשים יכולים להזמין רכב מראש או לשכור רכב ישירות בתחנות למסלול בכיוון יחיד. בעת ההשכרה, המשתמש מציין את המסלול הצפוי שלו, אך יכול בסופו של דבר לבחור להגיע לתחנה אחרת. המשתמש יכול לבחור לעצור בעצירות ביניים בדרך. הם מציעים שתי שיטות לאופן שבו ניתן לסייע לאיזון המערכת באמצעות פעולות המשתמשים. שיטה אחת מבוססת על נסיעה ברכב משותף עבור משתמשים עם דרישה זהה לנסיעה ישירה מתחנת מוצא לתחנת יעד, כאשר נדרשים פחות כלי רכב בתחנת היעד ו/או נדרשים יותר כלי רכב בתחנת המוצא. שיטה נוספת מבוססת על נסיעה במכוניות נפרדות עבור משתמשים בעלי דרישה זהה, כאשר נדרשים פחות כלי רכב בתחנת המוצא ו/או נדרשים יותר כלי רכב בתחנת היעד. הם מציעים מודל שמתמרץ את הלקוחות באמצעות הפחתת מחיר הנסיעה, כאשר המערכת אינה מאוזנת ודורשת בחירת פעולה מסוימת מצדם. הם מציגים תנאים שבהם גם המשתמשים שמזמינים מכוניות מראש יכולים לקחת חלק בתוכנית התמריצים שלהם, בתנאי שהם מעוניינים גם בזמני הגעה דומים לתחנת המוצא. הם בחנו את השיטה באמצעות סימולציה של אירועים בדידים על פני תרחישים שונים שנמשכים 24 שעות כל אחד וביססו את התרחישים על נתוני מערכת אמיתית בקמפוס של האוניברסיטה "UC-Riverside". בניסויי הסימולציה שביצעו הם הניחו שהמשתמשים תמיד משתפים פעולה. תוצאות המודל הראו שניתן להפחית 42% ממספר פעולות האיזון הנדרשות מהמפעיל, באמצעות מתן תמריצים למשתמשים לפעול באופן שדורש המודל.

Papanikolaou (2011) עוסק בתיאור ההתנהגות במערכת של שיתוף מכוניות בכיוון יחיד עם תחנות בעלות קיבולת מוגבלת. במערכת עם קיבולת מוגבלת יכולים להיווצר מצבים של חוסר במכוניות או חוסר במקומות חניה. הוא מתאר את התנהגות המערכת כתהליך של דיפוזיה במרחב, שבו כלי רכב עוברים מאזור אחד שבו יש צפיפות גבוהה של משתמשים וצפיפות נמוכה של מכוניות לאזור אחר שבו יש צפיפות נמוכה של משתמשים וצפיפות גבוהה של מכוניות. הדיפוזיה מפסיקה כאשר אין יותר משתמשים במקום שבו חונים כלי רכב או כאשר אין יותר כלי רכב במקום שבו משתמשים ממתינים. הוא מתאר את התנהגות המשתמשים באופן הבא: אם משתמש אינו מוצא מכונית זמינה בתחנת המוצא אז הוא ממתין זמן מה ולאחר מכן נוטש את המערכת, וככל הנראה בוחר באמצעי תחבורה אחר. אם המשתמש אינו מוצא מקום חניה זמין בתחנת היעד הוא נוסע אל התחנה הפנויה הקרובה ביותר.

Nair and Miller-Hooks (2011) עשו שימוש בתכנות מתמטי סטוכסטי מעורב (Stochastic MIP) על מנת לבצע תכנון של שינוע סטאטי, בתחילת תקופת התכנון, במערכות לשיתוף כלי רכב. המטרה שלהם היא מזעור העלות להעברת כלי רכב (אופניים או מכוניות) בתוספת קנס על חוסרים, כך שיסופק אילוץ של רמת שירות המוגדרת כאחוז מוגדר מהביקוש.

הם מניחים שהעלות להעברת כלי רכב בין שתי תחנות היא קבועה, ואין להם במודל כלל אילוצים של ניתוב ושל שינוע. הם בחנו את השיטה שלהם על בסיס נתוני מערכת שיתוף מכוניות בסינגפור באמצעות ניסוי סימולציה. בשונה מהם, במודל שלנו אנו מתייחסים לרמת השירות בפונקציית המטרה, ובנוסף אנחנו מתייחסים לניתוב המדויק של כלי הרכב המבצעים את השינוע וכן לכמויות שיש לפרוק ולטעון בכל תחנה.

2.3. שינוע במערכות שיתוף אופניים

Vogel and Mattfeld (2010) הציגו מודל שמטרתו היא להעריך את השפעת השינוע הדינאמי על רמת השירות במערכות לשיתוף אופניים. הם מציגים מודל כללי של הדינאמיקה במערכת שמתאר את ההתנהגות ברמת המאקרו. על בסיס המודל הם מציגים פונקציה שמחשבת את ההסתברות להשכרה מוצלחת כפונקציה של מספר המשתמשים, ואת התועלת של ביצוע השינוע ביחס לשיפור ההסתברות הזו. הם מתארים מצב שבו המערכת מגיעה לשיווי משקל במספר המשתמשים. בתחילה מספר המשתמשים עולה באופן מעריכי, כאשר יש מספיק אופניים זמינים ולאחר מכן מספר המשתמשים פוחת בשל חוסר שביעות רצון שנובע מקושי לספק את השירות למשתמשים רבים. המסקנות מהמודל עשויות לסייע בתכנון אסטרטגי של מידת השינוע שמומלץ לבצע במערכת בהתאם לרמת השירות הרצויה. המודל שלהם יעיל לתכנון אסטרטגי, אך הוא אינו מפורט דיו בכדי לתמוך במשימות שינוע האופניים. בשונה מהמאמר שלהם, המיקוד שלנו הוא במשימות השינוע המבוצעות ברמה הטקטית באופן יומיומי. נציין כי הם אינם מתייחסים לרמה פרטנית של התנהגות משתמשים נפרדים ובתחנות שונות במערכת, והם אינם מתייחסים למאפיינים הגיאוגרפיים של מבנה המערכת.

Raviv and Kolka (2013) מציעים פונקציה שמאפשרת לחשב את מספר ההשכרות וההחזרות האבודות (שלא ניתן לממש עקב חוסר באופניים זמינים או בתחנות עגינה זמינות) הצפוי במהלך תקופה מסוימת, כפונקציה של רמת המלאי ההתחלתית בתחנה בודדת. יש לציין, כי ההנחה היא כי במהלך התקופה שאותה הם בוחנים, לא מתבצע שינוע. השיטה שלהם דורשת קלט של שני תהליכי ביקוש סטוכסטיים שאינם בהכרח הומוגניים בזמן. אחד להשכרה והשני להחזרה של אופניים בתחנה, במהלך תקופת תכנון מסוימת שמתייחסת ליום המחרת.

במספר מאמרים נדונה בעיית השינוע **הסטאטית** במערכות לשיתוף אופניים. בבעיה הסטאטית שינוע האופניים מתבצע בתקופה מוגדרת כאשר המערכת כמעט ואינה פעילה, וניתן להזניח את הביקוש במהלך תקופה זו. לפיכך, השינוע הסטאטי מתבצע לרוב במהלך הלילה, במטרה להכין את מצב המערכת לביקוש שצפוי להתרחש ביום המחרת.

Chemla et al. (2012) דנים בבעיית השינוע הסטאטית במערכת לשיתוף אופניים. הם מניחים רכב יחיד ומניחים שהוא יכול לבקר מספר פעמים בכל תחנה. הם מתייחסים אל הבעיה כאל בעיית איסוף ומסירה מסוג רבים לרבים (Many-to-Many Pickup and Delivery Problem). כלומר, הם מניחים שהמלאי הנדרש בכל תחנה הוא נתון מראש, ופונקציית המטרה היא מזעור עלויות הנסיעה שיביאו את המערכת למצב הנדרש. הם לא מציינים את האופן שבו נקבעות

הכמויות. המודל שהם מציגים מחייב לספק את כל האילוצים והוא אינו מאפשר חריגה מהמלאי הנדרש בכל תחנה, המודל גם אינו מציע "קנס" על חריגה כזו, והם מניחים כי הזמן לביצוע עבודת השינוע אינו מוגבל. הם מתארים אלגוריתם בשיטת branch and cut לפתרון התרה של המודל ומראים כיצד לבנות פתרון פיזיבילי בשיטת Tabu-Search על בסיס הפתרון שהושג מהתרת המודל. מפתרון ההתרה מתקבל חסם תחתון ובמקרים רבים ניתן להוכיח באמצעותו שהתקבל פתרון אופטימאלי או קרוב לאופטימום.

בדומה ל-Chemla et al. (2012), גם Benchimol et al. (2011) מטפל בשינוע סטאטי במערכת לשיתוף אופניים, תוך התייחסות לבעיה כאל בעיית איסוף ומסירה עם רכב יחיד. גם אצלם בהינתן רכב בעל קיבולת מוגדרת, יש למצוא את הנתיב שמאזן את כל הצמתים לרמת מלאי נתונה מראש. במאמר הם מציגים חישובי סיבוכיות, חסמים תחתונים ואלגוריתם קירוב, ומציגים מספר מקרי קיצון אותם ניתן לפתור בזמן פולינומיאלי.

Raviv et al. (2013) מתייחסים לבעיית השינוע הסטאטית כבעיית ניתוב מלאי (IRP) שבה יש לקבוע את הנתיב של רכבי השינוע ואת כמויות הטעינה והפריקה בכל תחנה בנתיבים הללו. בניגוד לבעיית איסוף ומסירה (PDP), כמו זו שהוצגה ב-Chemla et al. (2012), רמות המלאי בכל תחנה אינן נתונות, אלא מהוות משתני החלטה. בנוסף, הם מגדירים מגבלת זמן לביצוע משימת השינוע, שכן זו מגבלה נדרשת במערכת תפעולית אמיתית, בעיקר משום ששינוע סטאטי מתבצע בשעות הלילה וחייב להסתיים לפני תחילת יום העבודה הבא. הם עושים שימוש בפונקציית מטרה שמבקשת למזער את חוסר שביעת הרצון של המשתמשים שנקבע על פי המודל שנוסח ב- Raviv and Kolka (2013) וכן את עלויות התפעול, ומציגים מספר ניסוחים מתמטיים מסוג MILP (mixed integer linear programming) לפתרון הבעיה. אחד המודלים המוצגים הוא ה- Time Indexed Model המאפשר תיאור הדינאמיקה במערכת והתייחסות אליה באסטרטגיית הפתרון. המודל המתמטי המוצג בעבודה זו מרחיב ניסוח זה לבעיית השינוע הדינאמית. בנוסף Raviv et al. (2013) מציגים שיטה להפחתת ממד הבעיה והמאמץ החישובי על ידי ניצול המבנה הגיאוגרפי הייחודי לערים. בעבודה זו אנחנו משתמשים בשיטה זו ומשפרים אותה.

לעומת בעיית השינוע הסטאטית במערכת לשיתוף אופניים, בבעיה הדינאמית הביקוש משנה את רמות המלאי בתחנות כתוצאה מפעילות המשתמשים שמתרחשת עוד במהלך ביצוע משימות השינוע (הרחבה בפרק 3).

Contardo et al. (2012) מציגים מודל לתכנות מתמטי לפתרון בעיית שינוע דינאמית תחת ההנחות שהביקוש ידוע מראש, שזמני הפריקה והטעינה הם אפס, ושלקוחות שאינם יכולים לשכור או להחזיר אופניים - נוטשים מיד את המערכת, גם ללא החזרת האופניים שברשותם. פונקציית המטרה היא מזעור מספר הנוטשים. הם עושים שימוש בניסוח של זרימה ברשת מרחב

וזמן. שיטת הפתרון המוצגת מבוססת על השגת חסמים תחתונים ופתרונות פיזיביליים ועל Column generation.

קיימים מספר הבדלים בין מאמר זה לבין המחקר המוצג בעבודה זו:

מאפיין	Contardo et al. (2012)	עבודה זו
פונקציית המטרה	מזעור השכרות/החזרות אבודות – מזעור מספר הנטישות	מזעור חוסר שביעות הרצון של המשתמשים במערכת (מתבטא במשך הזמן שהם מבזבזים בעת השימוש בשירות)
התנהגות המשתמשים	הביקוש ידוע מראש, לקוחות שאינם יכולים לשכור או להחזיר אופניים - נוטשים מיד את המערכת, גם ללא החזרת האופניים שברשותם	הביקוש הינו תהליך ביקוש סטוכסטי, המשתמשים יכולים לבחור להמתין, לנטוש או לנדוד לתחנה אחרת
נקודות התחלה אפשריות של כלי הרכב	בכל תחנה	במחסן, בכל תחנה, בדרך אל תחנה
זמני טעינה ופריקה	בעלי ערך אפס	בעלי ערך חיובי
מחסני ביניים	אין	המודל מאפשר מספר מחסנים שעשויים לתרום ליעילות התפעולית של המערכת
שימוש בתכונות הבעיה	אין	מחיקת קשתות, ניפוי תחנות
התאמת שיטות הפתרון למצב סטוכסטי	אין	קיים
התאמת שיטות הפתרון לשימוש תפעולי בזמן-אמת	אין	קיים
בחינת המודל באמצעות סימולציה	אין	קיים
סט נתונים לבחינת המודל	חילול מופעים כללי	שימוש בנתונים ממערכת אמיתית

2.4. בעיות שונות במערכות לשיתוף אופניים

ישנם מחקרים שעוסקים בשאלות נוספות המתייחסות למערכות לשיתוף אופניים. למשל, מחקרים שמתייחסים לבעיות אסטרטגיות ולבעיות בהקמת המערכת. Shu et al. (2010) עוסקים בהחלטות אסטרטגיות ומציגים מודל תכנות ליניארי דטרמיניסטי למקסום מספר ההשכרות שהמערכת יכולה לספק באמצעות הקצאה ראשונית של מלאי בתחנות. על מנת לתאר את רשת זרימת האופניים בין התחנות, הם מבצעים חלוקה של היום לפרקי זמן בני רבע שעה. הם מניחים קצב הגעות פואסוני של משתמשים ומניחים שהמשתמשים נוטשים מיד כאשר אין אופניים זמינים בעמדה. לגבי משך הנסיעות הם מניחים כי כל רכיבה מסתיימת במסגרת פרק זמן בודד. המחקר מראה שהתערבות באיזון המערכת ע״י שינוע סטאטי בכל יום משפרת את ביצועי המערכת. לעומת זאת מראה המחקר כי כאשר הנצילות במערכת נמוכה מאד או גבוהה מאד האפשרות להשפיע על השימוש באמצעות איזון היא נמוכה מאד. הם מראים כי ניתן להשתמש במודל על מנת להעריך את מספר האופניים הרצוי במערכת ואת קיבולת התחנות הרצויה. הם מגדירים את ניצולת המערכת כיחס בין מספר ההשכרות שהמערכת מאפשרת לבין מספר האופניים הכולל שמפוזר בתחנות. על סמך הניסויים שערכו הם מראים כי על פי מקרה המבחן שבדקו, ניצולת נמוכה במערכת תדרוש הוספת מספר רב של זוגות אופניים כדי לתמוך בגידול נמוך יחסית במספר ההשכרות שהמערכת יכולה לספק. יש לציין, כי במקרה המבחן שבדקו נעשה שימוש בנתוני נצילות יומיים, שאינם משתנים לאורך שעות היממה. לפיכך, הממצאים מתאימים קרוב לוודאי רק בעבור נצילות בשעות העומס. הם מחשבים את גודל התחנות הנדרש על פי מספר האופניים הגבוה ביותר הצפוי בכל תחנה על פני כל פרקי זמן. בנוסף, הם עושים שימוש במודל שניסחו על מנת לנתח את מערכת שיתוף האופניים בסינגפור באופן המבוסס על תחזיות ביקוש שנגזרו מנתוני שימוש במערכת הרכבות הציבורית.

Lin and Yang (2010) חקרו את הפריסה של רשת התחנות במערכת לשיתוף אופניים. הם מנסחים מודל מתמטי שמבקש להגדיר היכן למקם את התחנות במערכת, על מנת למזער פונקציית מטרה שכוללת את רמת השירות של המשתמשים ואת העלויות עבור מפעילי המערכת. העלויות עבור המפעיל כוללות עלות Setup ליצירת נתיבים ולהקמת תחנות. רמת השירות מתוארת כנגזרת של שלושה פרמטרים: פריסת התחנות, ההסתברות לזמינות האופניים להשכרה, עלויות הרכיבה. איכות פריסת התחנות נמדדת על פי האחוז מהביקוש הכולל לרכיבה מנקודת מוצא לנקודת יעד, שנמצא במסגרת זמן הגעה מוגדר. על המודל שנבנה מבוצעים ניתוחי רגישות, זאת כדי להשיג תובנות מעמיקות על הפרמטרים המשפיעים על התנהגות המערכת, וכיצד ניתן לשפרם.

בנוסף, ישנם מחקרים שמציגים ניתוחים אמפיריים. למשל, Froehlich et al. (2009) משתמשים בנתונים שנאספו ממערכת שיתוף האופניים בברצלונה, על מנת לחקור תבניות של התנהגות המשתמשים ולבצע תחזית למספר האופניים בתחנות. הם מבצעים ניתוח על בסיס נתונים גיאוגרפיים ושעתיים שנאספו במהלך 13 שבועות. הם מיישמים טכניקות של סגמנטציה על מנת לזהות התנהגויות דומות בין תחנות ומראים כיצד התנהגות המשתמשים מושפעת ממיקום התחנה, מהשכונה ומהשעה ביום. המודל שלהם מצליח לחזות את השימוש בתחנה בשגיאה

ממוצעת של שני זוגות אופניים, ולחזות שעתיים קדימה את מצב התחנה (מלא, ריק או תקין) בדיוק של 80%. הניסויים שלהם מראים ש-10 עד 15 ימי חול מספיקים כדי לבנות את תחזית התחנות באמצעות המודל שלהם.

גם Kaltenbrunner et al. (2008), עורכים ניתוח סטטיסטי של נתוני מערכת שיתוף האופניים בברצלונה. הם מראים כי בתחנות שממוקמות בקרבת אוניברסיטאות ואזורי משרדים יש עלייה במספר האופניים בשעות הבוקר כאשר משתמשים מגיעים לעבודה וללימודים וירידה במספר האופניים בשעות הערב כאשר המשתמשים עוזבים את מקומות העבודה. לעומת זאת, באזורי המגורים המגמה היא הפוכה. בנוסף, הם מראים כי יש הבדל משמעותי בין התבניות שמתקבלות בימי החול לבין התבניות שמתקבלות בסופי השבוע.

ב-Kaltenbrunner et al. (2010) מוצגת שיטה לחיזוי קצר מועד שמבוססת על הניתוח שביצעו ב-2008. בשיטת החיזוי הם עושים שימוש במצבן הנוכחי והחזוי של התחנות השכנות, מתוך ההבנה שקיים קשר בין תחנות סמוכות. הם אכן מראים ששימוש במידע הנוגע לתחנות הסמוכות מסייע לשיפור התחזית. בנוסף, הם מראים כי ככל שאופק החיזוי רחוק יותר, כך שגיאת התחזית הינה גבוהה יותר.

Lathia et al. (2012) עוסקים בניתוח ההשפעה של פתיחת מערכת שיתוף האופניים בלונדון לשימוש ע"י משתמשים מזדמנים. לקוחות מזדמנים הם לקוחות שאינם בעלי מנוי קבוע במערכת והם שוכרים אופניים באמצעות כרטיס אשראי. הנתונים על בסיסם בוצע המחקר פוצלו לנתונים שלפני כניסתם של משתמשים מזדמנים ולנתונים שלאחר כניסת המזדמנים. הניתוח חשף את השינוי שחל בדפוסי השימוש במערכת בעקבות פתיחתה למשתמשים זמניים. הם הראו כי המשתמשים הזמניים הובילו לגידול בשימוש בעיקר בסופי השבוע, וכי נשמר אופי השימוש במרכז העיר אל מול קצוות העיר. עם זאת, היו גם תחנות שבהן היה שינוי מוחלט של אופי ומגמת השימוש בהן.

כל ארבעת המאמרים הללו עושים שימוש אך ורק בנתונים הגלויים שמספקת המערכת באתר האינטרנט, המכילים את מספר האופניים הזמינים בתחנות, והם מתעלמים לחלוטין מפעולות השינוע שמתבצעות במערכת. ניתן לערוך ניתוח מעמיק יותר בעזרת מידע מפורט יותר שכולל את תנועות האופניים במערכת.

Borgnat et al. (2010), עורכים ניתוח סטטיסטי על בסיס נתוני המערכת בליון שבצרפת. בניגוד למאמרים שלעיל, הם עושים שימוש בנתונים כלליים על המערכת ועל העיר - הם לוקחים בחשבון פופולאריות והתרחבות השירות בעיר, מזג האוויר ועונות השנה. בנוסף, הם לוקחים כקלט גם את מספר ההשכרות במערכת.

3. בעיית השינוע הדינאמית (Dynamic Repositioning Problem)

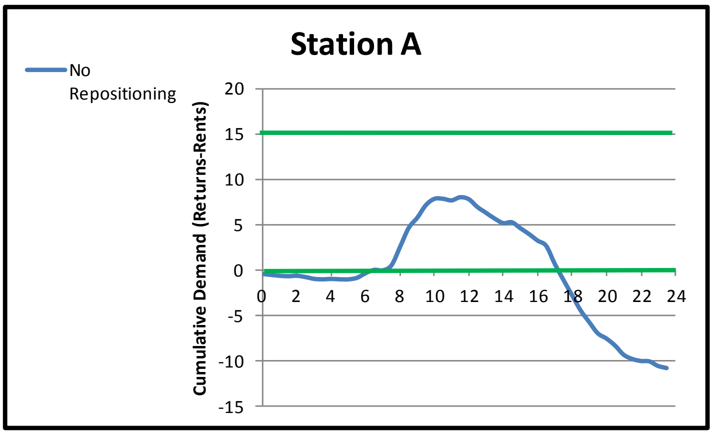
כאמור, הצלחתה של מערכת לשיתוף אופניים תלויה במידה רבה ביכולתה לספק את ביקוש המשתמשים לאופניים זמינים בתחנות המוצא ולעמדות עגינה פנויות בתחנות היעד. בדרך כלל האיזון בכמות האופניים בתחנות מופר, משום שקצב ועיתוי השכרת האופניים בכל תחנה שונה מקצב ועיתוי ההחזרה. שינוע דינאמי של אופניים באמצעות צי ייעודי של כלי רכב, נועד לתת מענה לבעיית האיזון בתחנות. על מנת לבצע את השינוע הדינאמי, יש לבצע החלטות לגבי נתיבי הנסיעה של רכבי השינוע ולגבי הכמות שיש לפרוק או לטעון בכל אחת מהתחנות שנתיבי הנסיעה עוברים בהן. יש לציין, כי הבעיה שבה אנחנו מטפלים היא בעיה תפעולית, שבה מספר כלי הרכב כבר נקבע.

שינוע דינאמי, בניגוד לשינוע סטאטי, מתבצע במהלך היום ולא ניתן להניח עוד שהמערכת בטלה במהלך ביצוע פעילויות השינוע. בבעיה זו הביקוש מתרחש בזמן-אמת תוך כדי עבודת המשנעים. הצורך בשינוע דינאמי, במהלך היום, קיים גם אם מתבצע שינוע סטאטי, במהלך הלילה. שינוע בשעות היום מאפשר מתן תגובה לשיאי ביקוש זמניים ולהתמודדות עם האקראיות הקיימת במערכת בזמן אמת, וכאשר מספר האופניים והקיבולות של התחנות מוגבלים, שינוע במהלך הלילה בלבד אינו מאפשר היענות לחלק ניכר מהביקוש.

הגרף המופיע באיור 1(א) מציג את הפעילות באחת התחנות במערכת שיתוף האופניים בתל-אביב. העקומה הרציפה מייצגת את הביקוש המצטבר נטו של המשתמשים בתחנה במהלך יממה. הקווים הירוקים (קווים אופקיים מודגשים) מייצגים את קיבולת התחנה. ציר ה-X מייצג את השעה במהלך היממה וציר ה-Y מייצג את הביקוש המצטבר נטו – ההחזרות בניכוי ההשכרות. יש להבהיר כי הגרף אינו מציג את פעולות האיזון בתחנה, אך פעולות אלה אכן התבצעו. ללא פעולות האיזון בתחנה, לא ניתן היה להבחין בביקוש מצטבר שגדול מהמלאי ההתחלתי. המשמעות של חריגה מגבולות הקיבולת של התחנה היא היווצרות של חוסר (של זוגות אופניים) – אם התרחשה חריגה מהגבול התחתון של הקיבולת, ועודף (גם כן של זוגות אופניים) – אם התרחשה חריגה מהגבול העליון של הקיבולת.

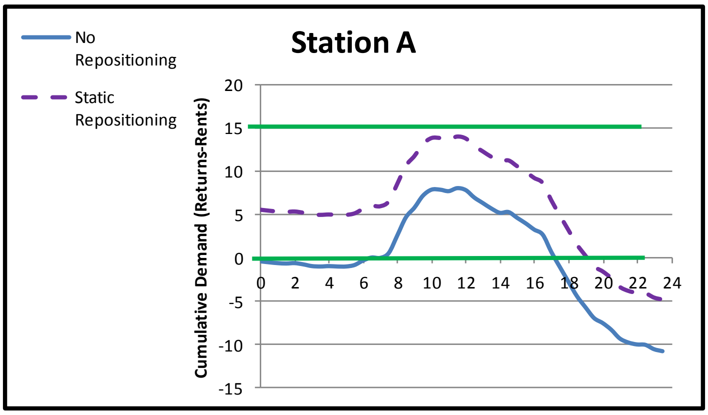
באיור ניתן לראות כי אילו רמת המלאי בתחנה בתחילת היום היא 0 זוגות אופניים, אזי לאחר השעה 17:00 התחנה מתרוקנת ונוצר חוסר של זוגות אופניים בתחנה ומשתמשים שיגיעו אליה לא יוכלו לשכור זוגות אופניים. לכן, אם נבצע שינוע סטאטי ונתחיל את היום עם רמת מלאי גבוהה יותר בתחנה, נוכל למנוע חלק מהחוסר. יש לשים לב, שלא רצוי להגדיל את רמת המלאי ההתחלתית מעבר לגבול מסוים, משום שמספר רב של זוגות אופניים בתחנה עלול להוביל לכך שהתחנה תתמלא לקראת הצהריים ומשתמשים לא יוכלו למצוא עמדת עגינה זמינה להחזרת אופניים בתחנה. ניתן לראות באיור 1(ב), שגם אם נגדיל את רמת המלאי ההתחלתית בתחנה זו למקסימום האפשרי מבלי ליצור עודף בתחנה, עדיין ייווצר חוסר ומשתמשים לא יוכלו לשכור זוגות אופניים בתחנה, אם כי הבעיה תיווצר מעט מאוחר יותר, בסביבות השעה 19:00 (עקומה מקווקוות). את החוסר ניתן לפתור באמצעות שינוע דינאמי על ידי הוספת זוגות אופניים לתחנה במהלך היום, כפי שניתן לראות באיור 1(ג) (עקומה מנוקדת).

(א)



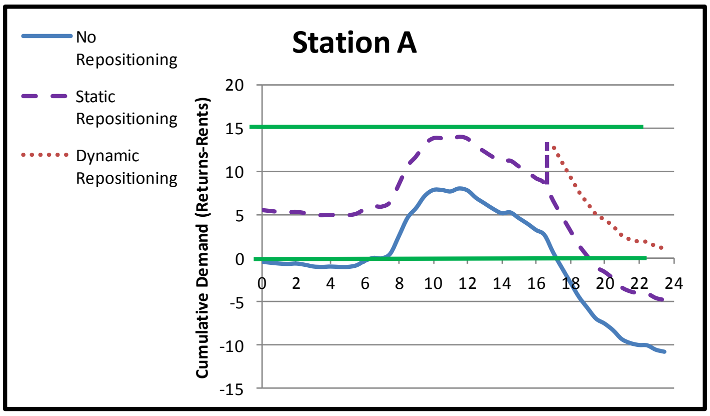
איור 1(א): התנועה הטבעית המצטברת של המשתמשים בתחנה במהלך יממה ממוצעת

(ב)



איור 1(ב): הוספת רמת מלאי בתחילת היום באמצעות שינוע סטאטי. עדיין לא ניתן למנוע את החוסר.

(ג)



איור 1(ג): מניעת החוסר ע"י הוספת מלאי במהלך היום באמצעות שינוע דינאמי.

איור 1: השינוע הסטאטי במהלך הלילה אינו מספיק

הדוגמה שהצגנו מניחה מצב דטרמיניסטי, אך בפועל הביקוש במערכת הוא סטוכסטי ולכן החשיבות של שינוע דינאמי במהלך היום אף גוברת מאחר והוא מאפשר מתן מענה למצבים שאינם צפויים.

בבעיה הדינאמית, קיים קושי לבצע תכנון מראש של החלטות הניתוב והמלאי, שכן לא ניתן לדעת מראש מה יהיה מצב המערכת, משום שהוא משתנה באופן תדיר ולא וודאי. המשמעות היא שיש לתכנן **מדיניות** (בניגוד ל**פתרון**), ולבצע את ההחלטות בפועל בהתאם למצב המערכת העדכני. לחילופין, ניתן לתכנן פתרון מראש, ולהתאים אותו על פי המצב העדכני בשטח.
עבור ביצוע יעיל של שינוע דינאמי, ועל מנת להתאים את הפעילות למצב העדכני בשטח - נדרשת סביבה טכנולוגית המאפשרת העברת מידע בזמן אמת על מיקום המשנעים, על מצב המלאי בתחנות ועל רמת המלאי בכלי הרכב. תוספת של מידע חדש למסלולים שכבר תוכננו היא מורכבת ומובילה לצורך בתכנון מחדש – חלקי או מלא. ככל שהמודל עוקב אחר השינויים באופן תדיר יותר, כך יש ביטוי טוב יותר לדינמיות של הבעיה, אך עם זאת הבעיה הופכת למורכבת יותר.

3.1. <u>תיאור הפרמטרים של הבעיה ומאפייניהם</u>

<u>תהליכי ביקוש המשתמשים לנסיעות</u> –
הביקוש לנסיעות הינו תהליך סטוכסטי שאינו הומוגני בזמן. נסיעה מוגדרת כזוג של תחנת מוצא ותחנת יעד. באמצעות נתוני עבר שנאספו ממערכת השכרת האופניים, אנחנו אומדים את הביקוש לנסיעות, ואת הביקוש להשכרות ולהחזרות בנפרד עבור כל תחנה במהלך היום.

קיימת חשיבות רבה לאמידת תהליכי הביקוש לנסיעות, משום שבדרך זו ניתן לפעול בגישה פרו-אקטיבית ולהקדים תרופה למצבים שבהם תחנות צפויות להתרוקן או להתמלא. ניתוח נתוני מערכת שיתוף האופניים בתל-אביב מלמד כי הביקוש מתנהג באופן דומה בכל יום (ימי החול מתנהגים דומה זה לזה, וסופי השבוע מתנהגים דומה זה לזה). המערכת אמנם מכילה אקראיות, אך ניתן להבחין כי אקראיות זו אינה גבוהה והתבניות חוזרות על עצמן מדי יום.

יתרון באפיון הביקוש להשכרות ולהחזרות באופן נפרד לכל תחנה הוא היכולת להבין את התנהגות הביקוש בכל אחת מן התחנות ולבצע טיפול בכל תחנה בנפרד. מאפייני הביקוש להשכרות ולהחזרות בתחנה תלויים בגורמים שונים כגון: מיקום התחנה, אתרים הממוקמים בסביבת התחנה, סביבתה הגיאוגרפית של התחנה, משתמשים שנוסעים באופן קבוע במסלולים מסוימים וכדומה. למשל, בתחנות הסמוכות לאזורי משרדים ישנן החזרות רבות של אופניים בשעות הבוקר והתחנות מתמלאות לחלוטין בשעות אלה, ואילו בשעות אחה"צ ישנן השכרות רבות של אופניים והתחנות מתרוקנות לחלוטין בשעות אלה. מפעיל המערכת יכול לצפות את ההתנהגות העתידית של הביקוש בתחנות ולפעול בהתאם (למשל, במקרה זה הוא יחליט שבאזור המשרדים בשעות הבוקר יש להשאיר את התחנות כמעט ריקות לחלוטין).

<u>מיקום התחנות ומטריצות מרחקים (או מטריצות זמנים) ביניהן</u> – זמני הרכיבה באופניים וזמני ההליכה ברגל בין התחנות מאפיינים ומשפיעים על התנהגות המשתמשים ועל החלטותיהם, כפי שיתואר בהמשך. זמני הנסיעה של רכבי השינוע בין התחנות נדרשים על מנת לתכנן את פעולות השינוע. למשל, קבוצת התחנות שניתן יהיה לבקר במהלך משמרת מושפע ממשך הזמן הנדרש לנסיעה בין התחנות.

קיבולת התחנות – קיבולת התחנה הינה מספר עמדות העגינה שבה. לפיכך, בכל תחנה קיים יחס חליפין (tradeoff) בין מספר המשתמשים שיוכלו לשכור אופניים בתחנה לבין מספר המשתמשים שיוכלו להחזיר אופניים בתחנה. כלומר, ככל שנציב מספר גדול יותר של אופניים בתחנה, כך יוכלו יותר משתמשים לשכור זוגות אופניים, אך פחות משתמשים יוכלו להחזיר אופניים.
אילו אילוץ הקיבולת לא היה כובל ניתן היה למלא זוגות אופניים רבים במהלך שעות הלילה ולהתיר די עמדות עגינה זמינות, על מנת שניתן יהיה לספק את הביקוש ללא שינוע דינאמי במהלך היום. אולם בפועל קיבולת התחנה היא משאב יקר ולכן שימוש בשינוע דינאמי הוא בלתי נמנע.

מספר כלי הרכב וקיבולתם – במערכת יכולים להיות מספר כלי רכב המבצעים את השינוע. ניתן לחלק את המשימות ביניהם על פי חלוקה לאזורים, לנתיבים שונים או על פי חלוקה כלשהי אחרת. למשל, במערכת שיתוף האופניים בתל-אביב פועלים כארבעה עד שישה כלי רכב בכל שעות היממה. קיבולת כלי הרכב, תשפיע על המשימות שיכולות להתבצע בתחנות – מהי כמות האופניים שהרכב יכול לטעון או לפרוק בתחנה.

מצב המערכת העדכני – מצב המערכת העדכני הוא נתון חשוב, משום שהמצב משתנה כל העת. במידה ותוכנן פתרון מראש יש להתאים את ביצוע התוכנית למצב העדכני בשטח. יש להתחשב במצב זה גם כאשר מבצעים תכנון של תוכנית חדשה. מצב המערכת בא לידי ביטוי במספר משתנים והם: רמת המלאי בתחנות, רמת המלאי על כלי הרכב ומיקום כלי הרכב (מיקום כלי הרכב יכול להיות באחת התחנות או בדרך בין זוג תחנות).
מצב המערכת העדכני, בשילוב תחזית הביקוש לעתיד, משפיעים על קבלת ההחלטות במערכת.

3.2. פונקציית המטרה

מנקודת המבט של מפעילי המערכת, ניתן לומר כי פונקציית המטרה הנראית לנגד עיניהם היא מקסום רמת השירות או לחילופין - מזעור חוסר שביעות הרצון של המשתמשים. חוסר שביעות הרצון של המשתמשים נובע ממצבים שבהם הם אינם יכולים לשכור אופניים (משום שתחנת המוצא שלהם ריקה), או ממצבים שבהם הם אינם יכולים להחזיר אופניים (משום שתחנת היעד שלהם מלאה).
את חוסר שביעות הרצון ניתן לתאר באמצעות מדדים שונים כגון:
מספר/אחוז נטישות – נטישה היא מצב שבו משתמש שלא קיבל שירות באופן מיידי בוחר לעזוב את התחנה ולא לעשות שימוש במערכת (בהחזרה או בהשכרה). בפועל, לא סביר שהמשתמשים תמיד נוטשים ולכן החיסרון במדד זה הוא שהוא אינו מבטא את המציאות באופן מדויק. בפרט, לא ניתן להניח שהמשתמשים שמעוניינים להחזיר אופניים נוטשים את המערכת כאשר הם אינם יכולים לקבל שירות. אם נניח שהם נוטשים המשמעות היא שזוגות אופניים עוזבים ונעלמים מן המערכת.
זמני המתנה – זמן המתנה נמדד כאשר משתמש אינו יכול לקבל שירות באופן מיידי ומחליט להמתין בתחנה עד לקבלת השירות. בפועל, לא סביר שהמשתמשים תמיד ממתינים, וייתכן

שחלקם בוחרים לנטוש או לנדוד לתחנה אחרת שבה הם יוכלו לקבל את השירות. יחד עם זאת, יתרון משמעותי במדד זה הוא מידת הפשטות בחישובו.

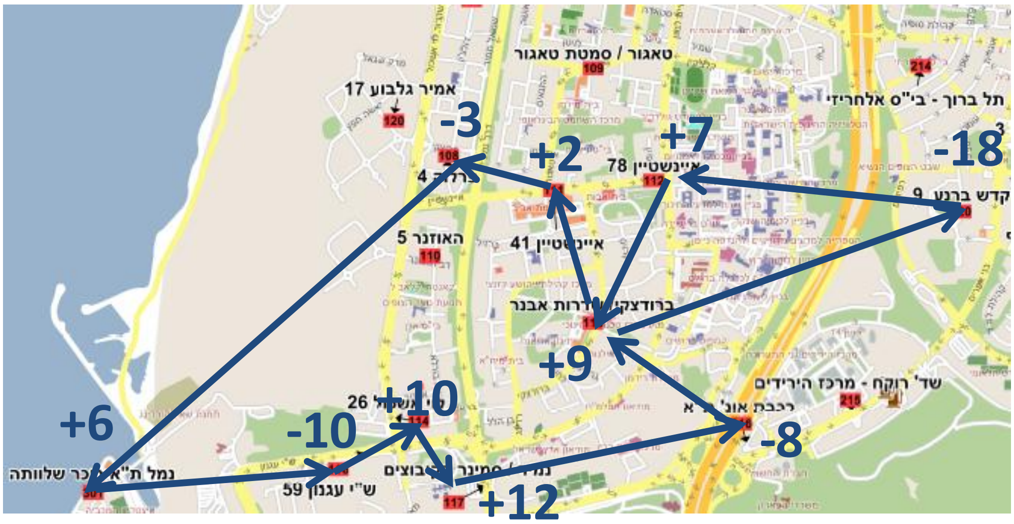
משכי השהייה במערכת – משך השהייה הוא פרק הזמן הנדרש בפועל עבור המשתמש להגעה מתחנת מוצאו אל תחנת היעד שלו. המשתמש מעוניין למזער את משך השהייה שלו במערכת או לחילופין למזער את תוספת הזמן כתוצאה מנדידה בין תחנות או מהארכת המסלול עקב אי קבלת השירות באופן מיידי בתחנת המוצא או בתחנת היעד. משך השהייה של המשתמש נקבע על פי מודל ההתנהגות שלו שיתואר בהרחבה בסעיף 3.4.

המדד שייבחר לתיאור חוסר שביעות הרצון במערכת, תלוי בהנחות לגבי מודל התנהגות המשתמש ובהתאם לכך לגבי פונקציית המטרה שהמשתמש רואה לנגד עיניו. בסעיף 3.4 נציג באופן מפורט את מודל התנהגות המשתמש שאנחנו מניחים ונציג את המדד שיתאר את פונקציית המטרה שמבטאת את חוסר שביעות הרצון של המשתמשים במערכת בפועל ע"פ הנחת מודל המשתמש הנ"ל.

יש לומר, כי לעתים פונקציית המטרה של מפעילי המערכת כוללת גם עלויות נסיעה. לעתים קרובות בבעיות ניתוב כלי רכב תיתכן סתירה בין פונקציות המטרה של רמת השירות ועלויות הנסיעה, משום שתגובה מהירה לביקוש מיידי שאינו ידוע מראש, משמעותה שרכבי השינוע צריכים לנסוע מרחק גדול יותר (Larsen et al., 2008). במקרה בו אנו מטפלים מדובר בבעיה דינאמית שבה בשעות היום כלי הרכב ועובדי השינוע הם משאבים שעלותם שקועה והם פועלים באופן רציף, ולכן החיסכון כתוצאה מהשהייתם הוא זניח. במקרה זה, על בסיס פונקציית מטרה של שיפור השירות, השינוע יבצע את המשימות ביעילות, בשאיפה להגיע ולספק כמה שיותר מהביקוש. פתרון אופטימאלי לבעיית השינוע יגרור ניצול יעיל של משאבי השינוע המוגבלים מאחר וכדי לשפר את רמת השירות יש להשתמש בכלי הרכב למשימות שינוע שיחס העלות/תועלת שלהם נמוך ככל האפשר.

3.3. <u>משתני ההחלטה</u>

על מנת למזער את חוסר שביעות הרצון של המשתמשים במערכת, יש להציב בתחנות השונות רמת מלאי מתאימה שתספק מענה מתאים לביקוש במהלך היום. לצורך כך, ההחלטות שיש לבצע בבעיית השינוע הדינאמית הן בחירת נתיבי הנסיעה עבור כלי הרכב וכן כמות האופניים שיש לפרוק ו/או לטעון בתחנות שממוקמות לאורך נתיבי הנסיעה (איור 2).



איור 2: משתני ההחלטה שיש לקבוע הם נתיבי כלי הרכב וכמויות הטעינה והפריקה.
סימן שלילי – מסמל פריקת זוגות אופניים מכלי הרכב אל התחנה

עד כאן תיארנו באופן כללי את הבעיה, אך חשוב להבין כי בעיית השינוע הדינאמית אינה שלמה כל עוד לא הוצגה המורכבות, הטמונה בהבנה מעמיקה של הדינאמיקה בהתנהגות המשתמשים ובהבנת פונקציית המטרה שרואים המשתמשים לנגד עיניהם.

3.4. <u>מודל התנהגות המשתמש</u>

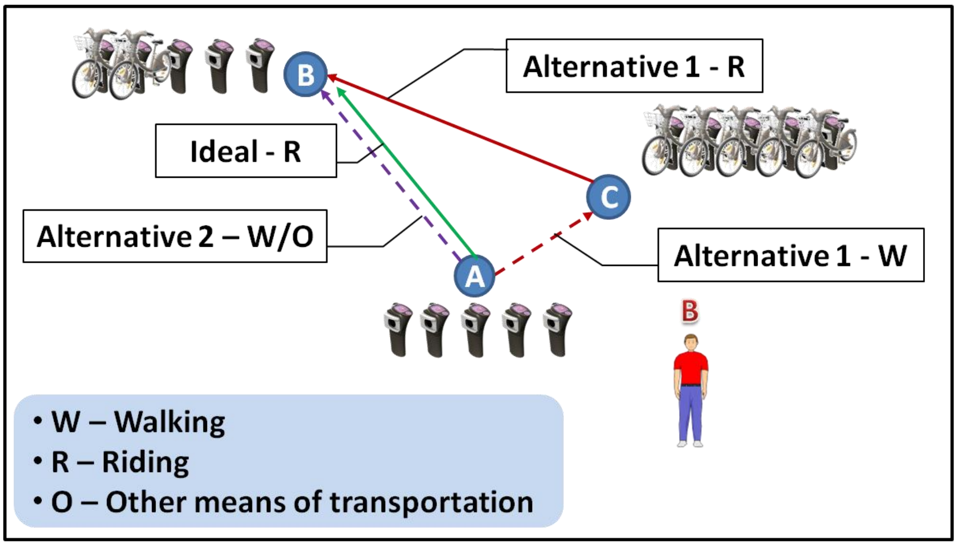
כאמור, פונקציית המטרה שאנו מתאימים לבעיית השינוע הדינאמית היא מקסום רמת השירות שהמערכת מספקת למשתמשים. אך מהו המדד לרמת השירות שרואה המשתמש לנגד עיניו?

המערכת מאפשרת זמינות גבוהה של מידע למשתמשיה במסופים ובאתר האינטרנט ובכל זמן יכול המשתמש לקבל מידע בנוגע למצב המלאי בתחנות. המשתמשים במערכת שיתוף האופניים עושים שימוש במידע שמאפשרת להם המערכת על מנת לבחור את פעולותיהם.

אילו היה ניתן תמיד לספק למשתמש זוג אופניים פנויים בתחנת מוצאו ועמדת עגינה זמינה בתחנת היעד, אזי המשתמש היה בוחר לרכב ישירות מתחנת המוצא אל תחנת היעד. אך אם לא כך יהיה הדבר, אזי באפשרותו של המשתמש לבחור אחת מתוך מספר אלטרנטיבות אחרות, העומדות בפניו להגעה מנקודת מוצאו אל היעד שאליו הוא שואף להגיע. למשל, במצב שבו תחנת המוצא ריקה יכול המשתמש לבחור לשקלל בהחלטתו את מצב התחנות הקרובות למקום הימצאו, וללכת אל תחנה קרובה שבה יש זוגות אופניים במלאי. כאלטרנטיבה נוספת, המשתמש עשוי לבחור להשתמש באמצעי תחבורה אחר או ללכת ברגל וייאלץ עקב כך לשלם סכום כסף

נוסף ו/או להאריך את משך הזמן בהגעה אל היעד. ניתן לומר, שבכל המקרים שתוארו לעיל נוסף "קנס" לפונקציית המטרה של המשתמש.

לדוגמה, נתאר מצב שבו קיים משתמש שמבקש להגיע מתחנה A אל תחנה B. כאשר הוא מגיע אל תחנה A לשכור זוג אופניים הוא נוכח כי התחנה ריקה (איור 3). במצב זה המשתמש יכול לבחור לשקלל בהחלטתו את מצב התחנות הקרובות למקום הימצאו, וללכת אל תחנה קרובה (תחנה C באיור) שבה יש זוגות אופניים במלאי (אלטרנטיבה מספר 1 באיור). אפשרות נוספת שעומדת לרשותו, היא לנטוש את המערכת ולהגיע אל היעד הרצוי שלו B ברגל או ע"י אמצעי תחבורה אחר (אלטרנטיבה מספר 2 באיור).



איור 3: בחינת האלטרנטיבות העומדות בפני המשתמש

המשתמש מעוניין להגיע מתחנה A אל תחנה B, אך תחנת המוצא ריקה. אלטרנטיבה 1 – הליכה אל תחנה קרובה שבה ישנו מלאי אופניים זמין ולאחר מכן רכיבה אל תחנת היעד B. אלטרנטיבה 2 – נטישת המערכת והליכה אל תחנת היעד.

במקרה שבו יבחר המשתמש בכל זאת להשתמש במערכת שיתוף האופניים, גם אז יעמדו בפניו מספר אלטרנטיבות. ואנו משערים כי הוא ייבחר בדרך שתמזער את הזמן העודף שהוא יבזבז במערכת כתוצאה מנדידה בין תחנות ומהארכת המסלול עקב אי קבלת השירות מיד בתחנת המוצא או היעד. כאמור, במקרה של בחירה באלטרנטיבה אחרת כגון נסיעה באוטובוס, ברכבת או במונית, הקנס יתבטא בעלות כספית. גם את העלות הכספית הזו ניתן לתמחר במונחים של זמן.

אם כן, נגדיר כאן את פונקציית המטרה העומדת לנגד עיניו של המשתמש, אותה הוא מעוניין למזער: <u>הזמן העודף</u> - הזמן שהמשתמש מבזבז במערכת עקב אי קבלת השירות באופן מיידי – ההפרש בין הזמן שתארך הדרך בפועל (בהתאם לאלטרנטיבה שייבחר), לבין הזמן האידיאלי

שהייתה אורכת הדרך אילו היו זוג אופניים זמינים בתחנת המקור ועמדת עגינה זמינה בתחנת היעד.

באופן פורמאלי – בהשכרת אופניים המשתמש מעוניין לפעול בהתאם לנוסחה הבאה:

$$min\{min_{i\in stations}\{w_{Ai}+r_{iB}\}, O_{AB}\}$$

כאשר w_{Ai} הוא זמן ההליכה מתחנה A אל תחנה i כלשהי ו- r_{iB} הוא משך הרכיבה באופניים מתחנה i אל תחנה B. O_{AB} הוא משך הנסיעה בין תחנה A לתחנה B באמצעי תחבורה אחר (או ה"קנס" הנוסף למשתמש בבחירת אמצעי תחבורה אחר).

לאחר השכרת האופניים והשימוש בהם, המשתמש נדרש להחזרת האופניים. בהחזרה המשתמש יהיה מעוניין לפעול בהתאם לנוסחה הבאה:

$$min_{j\in stations}\{r_{Bj}+w_{jB}\}$$

כלומר, במקרה שבו תחנת היעד הרצויה של המשתמש מלאה, ואין בה עמדות עגינה זמינות - המשתמש מעוניין לבחור להחזיר את האופניים בתחנה j שתמזער את זמן ההגעה שלו אל היעד B (במקרה זה המשתמש נדרש לרכב אל התחנה j, בה יחזיר את האופניים, וממנה ילך ברגל אל היעד הרצוי B).

יש לשים לב, כי בשונה מהמקרה של השכרת אופניים - בהחזרה אין למשתמש אלטרנטיבה נוספת, אלא הוא מחויב להחזיר את האופניים אל אחת מתחנות המערכת.

התנהגות המשתמשים ופונקציית המטרה העומדת לנגד עיניהם יידונו בהרחבה בהמשך בפרק 7.1.

בסעיף 3.2 הצגנו מדדי חוסר שביעות רצון נוספים – נטישות וזמני המתנה. לעומת מדד הזמן העודף, החיסרון במדדים אלה הוא שהם אינם מיטיבים לבטא בקירוב את המציאות. איננו יכולים להניח שהמשתמשים תמיד נוטשים (בפרט בהחזרת זוג אופניים), והם גם אינם תמיד ממתינים (בפרט כאשר הם אינם מקבלים שירות בהשכרת זוג אופניים). מדד הזמן העודף תואם טוב יותר את המציאות, אם כי החיסרון שלו הוא הקושי בחישובו, שכן הוא דורש תיאור מדויק של המסלולים הרצויים של המשתמשים.

4. שיטת פתרון המבוססת על מודל תכנות מתמטי

כפי שראינו בפרק 3, בעיית השינוע הדינאמית הינה בעיה מורכבת שבה אנו נדרשים לשקלל מספר שיקולים בו זמנית: שיקולים גיאוגרפיים, שיקולים של מלאי ושיקולי תזמון וסנכרון.
לצורך התמודדות עם מורכבות הבעיה, אנחנו מציגים בפרק זה מודל תכנות מתמטי דטרמיניסטי ולאחר מכן נתאר כיצד אנחנו מבצעים התאמות שונות למציאות הסטוכסטית של הבעיה, שבה אנחנו מטפלים.
המוטיבציה בשימוש במודל תכנות מתמטי היא ביכולתו לבצע תכנון בגישה שאינה קצרת ראייה, אלא מתכננת קדימה ופועלת באופן פרואקטיבי בהתאם לציפיות ולתחזיות, תוך שקלול מספר גורמים בו זמנית. בנוסף, הביקוש מכיל תבניות דומות לאורך זמן ולכן המודל המתמטי יכול לשמש לצורך תכנון מדיניות כללית.
שימוש במודל תכנות מתמטי בשילוב עם גישה של אופק מתגלגל מסייע להתמודד עם העובדה שמצב המערכת משתנה כל העת, ובאופן שלא ניתן לחזות בוודאות. באמצעות גישה זו, אנחנו מבצעים עדכון של מצב המערכת הנוכחי בכל גלגול של האופק, ומאפשרים למודל לבצע תכנון מתאים למתרחש בשטח, תוך התחשבות באירועים שעתידים להתרחש במערכת.

4.1. הנחות המודל

4.1.1. מודל דטרמיניסטי

על מנת לפשט את הבעיה המורכבת הזו, אנחנו מציעים לגשת לבעיה בשלב הראשון באמצעות מודל דטרמיניסטי. לצורך כך, נניח שנתוני הביקוש החזוי ידועים ושווים לתוחלת הביקוש.

4.1.2. חלוקה לתקופות זמן בדידות

על מנת לעקוב אחר האירועים המתרחשים במערכת ועל מנת לבטא את הדינאמיות שבה, אנחנו מחלקים את משך הזמן שאותו אנחנו פותרים לפרקי זמן בדידים קצרים ומתייחסים לפרקי הזמן הבדידים כאל תקופות נפרדות. בהתאם לכך, אנחנו מייצגים את הביקוש ואת מצב המערכת בכל תקופת זמן בדידה, ואנו מניחים שתהליך הביקוש נשאר קבוע בכל תקופה.
יתרון בשימוש בתקופות זמן בדידות הוא שיפור הדיוק במודל והיכולת לסנכרן בין מועד התרחשותם של אירועים במערכת. למשל, על מנת שהמודל יתכנן שכלי רכב יגיע בזמן למלא זוגות אופניים בתחנה מתרוקנת - עליו להגיע אל התחנה עוד לפני שהיא צפויה להתרוקן לחלוטין.
בנוסף, החלוקה לפרקי זמן קצרים נחוצה כבסיס להתאמות הדינמיות שיוגדרו בהמשך (סעיפים 4.6-4.8).

4.1.3. התנהגות המשתמשים

קיים קושי בייצוג מודל המשתמש המורכב (סעיף 3.4) במסגרת מודל התכנות המתמטי, שכן פתרון בעיית האופטימיזציה של מפעילי המערכת הרואים לנגד עיניהם את מזעור הזמן העודף של כל המשתמשים, דורש ראשית פתרון של בעיות האופטימיזציה הפרטיות של כל משתמש. נוסף על כך, מצבי החוסר והעודף באופניים בתחנות מוביל לשינויים בתהליכי הביקוש, וקיים קושי לייצג במודל המתמטי את השינוי הנגרם כתוצאה ממצבים אלה. למשל, ייתכן שמשתמש רצה להגיע אל

תחנת יעד מסוימת, אך בשל היותה מלאה, הוא החזיר לבסוף את זוג האופניים בתחנה אחרת והלך ברגל אל היעד הרצוי האמיתי שלו.

לפיכך נשתמש במודל פשוט יותר המקורב למודל שתואר בסעיף 3.4 ובהמשך בסעיף 7.3 נראה באמצעות מודל סימולציה כיצד התוצאות המתקבלות ממודל זה תואמות את התוצאות המתקבלות ממודל המשתמש שתואר.

במודל המתמטי נניח כעת כי בעת עמידה בפני תחנה ריקה או מלאה, המשתמשים אינם עוברים לתחנה אחרת שבה הם יכולים לקבל את השירות, אלא ממתינים בתחנה בה הם נמצאים. הזמן שהמשתמשים ייאלצו להמתין יהווה כעת את ה"קנס" והוא משמש תחליף במודל לזמן העודף האמיתי שרואים המשתמשים לנגד עיניהם (מדד הזמן העודף הוגדר בסעיף 3.4). בהתאם לכך, במסגרת המודל המתמטי אנו מתארים כעת את תהליכי הביקוש כתהליכים נפרדים של השכרות והחזרות עבור כל תחנה בכל פרק זמן במהלך היום.

נדגיש כי איננו סוברים שמודל משתמש פשטני זה מייצג את התנהגות המשתמשים במערכת. יתרונו הוא בכך שמאפשר לנו לבנות מודל מתמטי שהאופטימיזציה שלו מובילה לפתרון הממזער בקירוב את זמן השהיה של המשתמשים במערכת גם תחת מודל משתמש ריאליסטי יותר כפי שהוצג לעיל.

קיימים יתרונות לתיאור הביקוש במערכת כביקוש להשכרות ולהחזרות בנפרד לכל תחנה, לעומת תיאורו כביקוש לנסיעות מתחנת מוצא אל תחנת יעד. יתרון בתיאור הביקוש באופן נפרד לכל תחנה הוא שקיימים נתונים רבים יותר עבור הביקוש בתחנה (מאשר הביקוש לזוג תחנות מסוים) וכך ניתן לאמוד בדיוק רב יותר את הביקוש. למשל, קיבוץ כל הביקוש להשכרה מתחנה i, ללא תלות ביעד, מאפשר מספר תצפיות גבוה יותר מאשר הביקוש להשכרה בתחנה i ולהחזרה בתחנה j, ולכן אמידה טובה יותר המושפעת הרבה פחות מגורמי רעש.

4.1.4. פונקציית מטרה חליפית

כאמור, פונקציית המטרה שאנחנו מאמינים שהמשתמש רואה לנגד עיניו היא מזעור הזמן העודף שהוא מבזבז בביצוע דרכו מנקודת המוצא שלו אל נקודת היעד שאליה הוא שואף להגיע. עם זאת, בשל השינוי בייצוג של התנהגות המשתמשים במודל (כפי שתואר בסעיף 4.1.3), הזמן העודף של המשתמשים מתבטא בזמן ההמתנה שלהם במערכת.
על פי הגדרת התנהגות המשתמשים במודל, כעת המשתמשים אינם עוברים לתחנה אחרת כאשר הם אינם יכולים לקבל את השירות, אלא ממתינים בתחנה בה הם נמצאים עד שיוכלו לקבל את השירות, ולכן פונקציית המטרה מייצגת כעת את זמני ההמתנה של המשתמשים.
בסעיף 7.3 נראה באמצעות מודל סימולציה כי פונקציית מטרה זו נמצאת בקורלציה גבוהה עם פונקציית המטרה של הזמן העודף המבוזבז של המשתמשים על פי מודל ההתנהגות שתואר.

4.1.5. מאפיינים נוספים של המודל

מחסני ביניים - במודל המתמטי אנחנו מניחים שישנם מחסני ביניים וכל תחנה שקיבולתה גבוהה יכולה לשמש כמחסן ביניים – כלומר, כמחסן הממוקם בנקודה מרכזית ומשמש לצבירה של זוגות אופניים והעברתם בין כלי רכב (גם כאשר כלי הרכב אינם נפגשים בנקודה בו-זמנית).

הרשאת תתי מעגלים וביקורים חוזרים בתחנות - המודל המתמטי מאפשר לרכבי השינוע לעבור מספר פעמים בכל תחנה במהלך אופק התכנון. ביקורים חוזרים בתחנות נדרשים למשל כדי לספק תחנה בה הפער בין הביקוש להחזרות לבין הביקוש להשכרות גדול מקיבולת התחנה או מקיבולת הרכב.

הרשאת ביקורים חוזרים והעברות אופקיות (Transshipments) - משום שהמודל המתמטי מאפשר ביקורים חוזרים בתחנות, ניתן לעשות שימוש בתחנות כנקודות ביניים להעברת אופניים בין רכבי שינוע שונים. בנוסף, באמצעות תיאור הדינאמיקה ע"י פרקי זמן קצרים ניתן לקיים סנכרון במערכת ולוודא שאופניים לא ייאספו מתחנה, לפני שהגיעו אליה (או ייפרקו בתחנה לפני שהתפנה בה מקום).

4.2. הקלט לבעיה

פרמטרים שמגדירים את הקונפיגורציה של המערכת – אלה הם בדרך כלל פרמטרים קבועים המשתנים לעתים רחוקות כגון: קיבולת התחנות, מספר כלי הרכב וקיבולתם, משך הטעינה והפריקה של אופניים בתחנה, מטריצת זמני הנסיעה בין התחנות.

פרמטרים שמגדירים את מצב המערכת העדכני – מצב המערכת משתנה כל העת והוא מוגדר ע"י רמת המלאי בתחנות, רמת המלאי ברכבי השינוע ומיקומם. על אף שהמודל הוא סטטי והוא אינו מתעדכן על פי מצב המערכת בזמן אמת, הוא מאפשר לאתחל את המערכת עם נתוני קלט שמייצגים את מצב המערכת בנקודת זמן מסוימת. בפרט, ניתן לייצג נתוני התחלה שעל פיהם כלי הרכב אינם נמצאים בהכרח במחסן, אלא יכולים להימצא בכל אחת מהתחנות או בדרך אל תחנה. במקרה האחרון, מיקום כלי הרכב יתואר באמצעות התחנה שאליה הוא צפוי להגיע ומשך הזמן שנותר לו כדי להגיע אל התחנה.

המשמעות של הגדרה זו היא שניתן להתחיל את ריצת המודל בכל שעה ביום ובכל מצב של המערכת, כפי שנדרש במודל דינאמי.

נתוני הביקוש – אנחנו לוקחים כקלט למודל את הביקוש הצפוי בעתיד ואנחנו מניחים שהוא תלוי זמן ולא הומוגני במהלך היום. אופק התכנון מחולק לתקופות קצרות (של דקה או מספר דקות) ואנו מניחים שהביקוש נשאר קבוע בכל תקופה כזו.

המודל המתמטי עושה שימוש בביקוש נטו בכל תחנה בכל תקופה, המחושב ע"י ההפרש בין תוחלת הביקוש להחזרות בתחנה לבין תוחלת הביקוש לאופניים בתחנה.

פרמטרים שמשפיעים על פונקציית המטרה – פונקציית המטרה ממזערת את ערכם המשוקלל של סך עלות זמני ההמתנה של המשתמשים במערכת עם עלויות הנסיעה של כלי הרכב.

מעניין לציין, כי במערכת כזו פעמים רבות עלות ההמתנה להחזרת זוג אופניים גבוהה יותר מאשר עלות ההמתנה להשכרת זוג אופניים, משום שלמחזירים אין חלופה של נטישת המערכת ולכן הנזק הנגרם להם הוא רב יותר. במקרה כזה עלות ההמתנה להחזרת זוג אופניים עשויה לקבל משקל גבוהה יותר בפונקציית המטרה.

4.3. <u>משתני ההחלטה</u>

ההחלטות שיש לבצע בבעיית השינוע הדינאמית הן: **החלטות ניתוב** - בחירת נתיבי הנסיעה עבור כלי הרכב; **החלטות המלאי** - כמות האופניים שיש לפרוק או לטעון בתחנות שממוקמות על נתיבי הנסיעה.

במודל המתמטי אין אילוצי שלמות על משתני המלאי, מאחר והמודל המתמטי משמש בעיקר לצורך קביעת הניתוב. החלטות המלאי המדויקות מתעדכנות בזמן ביצוע הפריקה והטעינה בפועל, בהתאם למצב התחנה, כפי שיוסבר בסעיף 4.6.5.

4.4. <u>ניסוח המודל</u>

במאמר של Raviv et al. (2013), מוצגים מספר ניסוחים מתמטיים המתאימים לטיפול בבעיית השינוע הסטאטית. הניסוח המתמטי המוצג כאן מבוסס על אחד הניסוחים במאמר זה המכונה "Time Indexed Formulation", תוך התאמתו לבעיית השינוע הדינאמית.

בסעיף זה נציג ראשית את הסימנים עבור הפרמטרים ועבור משתני ההחלטה של המודל, אחר כך נציג את ניסוח המודל השלם ולאחר מכן נציג הסברים עבור הניסוח.

4.4.1. <u>אינדקסים</u>

i, j	תחנה/צומת
v	כלי רכב
t	תקופה (בזמן בדיד)

4.4.2. <u>הפרמטרים של המודל</u>

הפרמטרים שמגדירים את הקונפיגורציה של המערכת:

N	קבוצת התחנות במערכת $i = 1, \dots, \|N\|$
V	קבוצת רכבי השינוע במערכת $v = 1, \dots, \|V\|$
c_i	קיבולת התחנה i – מספר עמדות העגינה בתחנה i. $i \in N$.
k_v	קיבולת כלי הרכב v – מספר האופניים שניתן לטעון על כלי הרכב $v \in V$
t_{ij}	זמן נסיעה ברכב מתחנה i אל תחנה j – בזמן רציף (בשניות).
L	משך זמן הטעינה לכל זוג אופניים (בשניות).
U	משך זמן הפריקה לכל זוג אופניים (בשניות).

הפרמטרים שמגדירים את מצב המערכת העדכני (בתחילת אופק התכנון):

s_i^0 מספר זוגות האופניים בתחנה i, לפני תחילת השינוע $i \in N$

y_v^0 כמות אופניים על רכב v.

l_v התחנה שאליה נוסע רכב v.

Δ_v מספר התקופות שייקח לרכב v להגיע לתחנה l_v, שאליה הוא נמצא בדרכו (ייתכן גם $\Delta_v = 0$ במצב שבו הרכב נמצא בתחנה בתחילת אופק התכנון).

פרמטרים שקשורים לביקוש ולפרקי הזמן במודל:

τ רמת הדיסקרטיזציה של המודל - משך תקופת הזמן הבדיד (בשניות).

T'' משך אופק התכנון - מספר התקופות לביצוע פעילות השינוע.

t'_{ij} זמן נסיעה ברכב מתחנה i אל תחנה j – בתקופות (מעוגל למעלה).

$t'_{ij} = \left\lceil t_{ij}/\tau \right\rceil$. למשל, אם משך הנסיעה בין זוג התחנות הוא 9 דקות (540 שניות),

ואורכו של פרק זמן הוא 5 דקות (300 שניות), אז $t'_{ij} = \left\lceil 540/300 \right\rceil = 2$.

d_{it} ביקוש נטו לאופניים בתחנה i בתקופה t מחושב ע"י ההפרש בין תוחלת הביקוש להשכרות בתחנה לבין תוחלת הביקוש להחזרות בתחנה. אם ערך המשתנה הוא חיובי אזי מדובר בעודף של השכרות על פני החזרות בתקופה t, ואחרת מדובר בעודף של החזרות על פני השכרות בתקופה t.

חסם למספר האופניים המקסימאלי שניתן לטעון על כלי הרכב במהלך תקופה בודדת, מחושב באופן הבא: $\bar{L} = \tau/\mathrm{L}$ (המנה אינה מעוגלת בהתאם לאמור בסעיף 4.3).

חסם למספר האופניים המקסימאלי שניתן לפרוק מכלי הרכב במהלך תקופה בודדת, מחושב באופן הבא: $\bar{U} = \tau/\mathrm{U}$ (המנה אינה מעוגלת בהתאם לאמור בסעיף 4.3).

פרמטרים שמשפיעים על פונקציית המטרה:

α משקל עבור עלויות הנסיעה של הרכב המשנע.

h היחס בין עלות ההמתנה של משתמשים שמבקשים להחזיר אופניים לבין עלות ההמתנה של משתמשים שמבקשים לשכור אופניים.

.4.4.3 משתני ההחלטה של המודל

x_{ijtv} משתני ניתוב. ערך בינארי השווה ל-1 אם רכב v יוצא מתחנה i אל תחנה j בתקופה t. אחרת ערכו של המשתנה שווה ל-0.

y_{itv}^L מספר זוגות האופניים שנטענים מתחנה i אל כלי רכב v בתקופה t.

y_{itv}^{U} מספר זוגות האופניים שנפרקים מכלי רכב v אל תחנה i בתקופה t.

y_{ijtv} משתני זרימה. מספר זוגות האופניים שרכב v נושא עליו בנסיעתו מתחנה i אל תחנה j המתחילה בתקופה t. אם אין נסיעה של רכב v מתחנה i אל תחנה j בתקופה t אזי ערך המשתנה יהיה אפס.

s_{it} רמת המלאי בתחנה i בסוף תקופה t.

W_{it}^{B} מספר הממתינים להשכרת אופניים בתחנה i בתקופה t.

W_{it}^{R} מספר הממתינים להחזרת אופניים בתחנה i בתקופה t.

4.4.4. הניסוח

$$Min\left\{\sum_{i\in N}\sum_{t=1}^{T''}\left(W_{it}^{B}+h\cdot W_{it}^{R}\right)+\alpha\cdot\sum_{i,j,t,v}t_{ij}\cdot x_{ijtv}\right\}$$

(1) $s_{it}-W_{it}^{B}+W_{it}^{R}=s_{i,t-1}-W_{i,t-1}^{B}+W_{i,t-1}^{R}+\sum_{v\in V}\left(y_{itv}^{U}-y_{itv}^{L}\right)-d_{it}$

$\forall\, i\in N, t=1,\dots,T''$

(2) $s_{it}\le c_i$ $\quad\forall\, i\in N, t=1,\dots,T''$

(3) $\sum_{j\in N}x_{ijtv}=1$ $\quad\forall\, v\in V, i=l_v, t=\Delta_v$

(4) $\sum_{i\neq l_v, j\in N}x_{ijtv}=0$ $\quad\forall\, v\in V, t=\Delta_v$

(5) $\sum_{j\in N}x_{j,i,t-t'_{ji},v}=\sum_{r\in N}x_{irtv}$ $\quad\forall\, i\in N, t=\Delta_v+1,\dots,T'', v\in V$

(6) $\sum_{j\in N}y_{j,i,t-t'_{ji},v}=\sum_{r\in N}y_{irtv}+y_{itv}^{U}-y_{itv}^{L}$ $\quad\forall\, i\in N, t=\Delta_v+1,\dots,T'', v\in V$

(7) $y_{ijtv}\ \le\ k_v x_{ijtv}$ $\quad\forall\, i\in N, t=0,\dots,T'',\forall\, v\in V$

(8) $y_{itv}^{L}\le \min(2\bar{L},c_i,k_v)\sum_{j\in N}x_{ijvt}$ $\quad\forall\, i\in N, t=0,\dots,T'',\ \forall\, v\in V$

(9) $y_{itv}^{U}\le \min(2\bar{U},c_i,k_v)\sum_{j\in N}x_{ijvt}$ $\quad\forall\, i\in N, t=0,\dots,T'',\ \forall\, v\in V$

(10) $\sum_{i,j\in N}\sum_{t\le w}t_{ij}x_{ijt-t'_{ij},v}+\sum_{i\in N}\sum_{t\le w}(Ly_{itv}^{L}+Uy_{itv}^{U})\le(w-\Delta_v)\cdot\tau$

$\forall\, w=\Delta_v+1,\dots,T'',\ \forall v\in V$

(11) $\sum_{i,j\in N}\sum_{t\le w}t_{ij}x_{ijt-t'_{ij},v}+\sum_{i\in N}\sum_{t\le w}(Ly_{itv}^{L}+Uy_{itv}^{U})\ge(w-\Delta_v-2)\cdot\tau$

$\forall\, w=\Delta_v+3,\dots,T'',\ \forall v\in V$

(12) $\sum_{j\in N}y_{i,j,t,v}=y_v^{0}+y_{itv}^{L}-y_{itv}^{U}$ $\quad\forall\, v\in V, i=l_v, t=\Delta_v$

(13) $\sum_{i,j\in N}\sum_{t\le\Delta_v}x_{ijtv}=0$ $\quad\forall v\in V$

(14) $y_{itv}^{L}\ge 0,\ y_{itv}^{U}\ge 0$ $\quad\forall\, i\in N, t=0,\dots,T'',\forall\, v\in V$

(15) $x_{ijtv}\in\{0,1\}$ $\quad\forall i,j\in N, t=0,\dots,T'', v\in V$

(16) $y_{ijtv}\ge 0$ $\quad\forall i,j\in N, t=0,\dots,T'', v\in V$

(17) $s_{it}\ge 0$ $\quad\forall i\in N, t=0,\dots,T''$

4.4.5. פונקציית המטרה

פונקציית המטרה משקללת את סך עלות זמני ההמתנה של המשתמשים במערכת עם עלויות הנסיעה של כלי הרכב.

האיבר הראשון בפונקציית המטרה משקלל את סך זמני ההמתנה של הלקוחות בתחנות. W_{it}^{B} ו- W_{it}^{R}, מייצגים את מספר הממתינים להשכרה ולהחזרה בתחנה i בתקופה t, סכומם לאורך פרקי הזמן מייצג את סך זמני ההמתנה של המשתמשים במערכת. h הוא היחס בין עלות ההמתנה של המחזירים לבין עלות ההמתנה של השוכרים.

האיבר השני בפונקציית המטרה מתאר את עלויות הנסיעה ומוסיף "קנס" לפונקציית המטרה עבור כל נסיעה בהתאם למשכה. להבנתנו המשקל, α, של רכיב זה צריך להיות קטן מאחר ומרבית העלויות הקשורות בהפעלת רכבי השינוע הן עלויות שקועות ברמה התפעולית. המטרה העיקרית היא ניצולם של המשנעים באופן מיטבי מבחינת רמת השירות למשתמשי המערכת (בשונה ממטרה של חסכון בנסיעת המשנעים).

4.4.6. <u>אילוצים</u>

(1) אילוץ שימור מלאי בכל תחנה – האילוץ מעדכן את רמת המלאי בתקופה הנוכחית על בסיס המלאי שהיה בתחנה בתקופה הקודמת, השינויים שהתבצעו בתקופה הנוכחית ע"י הרכב, הממתינים והביקוש.

(2) אילוץ קיבולת - כמויות האופניים בתחנות לא יהיו גבוהות מקיבולת התחנה.

(3) רכב v ייצא מתחנה l_v בתקופה Δ_v.

(4) האילוץ מוודא שרכב v לא ייצא בזמן Δ_v מאף תחנה אחרת, פרט ל-l_v.

(5) כאשר הרכב נכנס לתחנה בתקופה מסוימת (אחרי שנסע אליה במשך מספר תקופות בהתאם למרחק מתחנת המקור), הוא גם יעזוב את התחנה בתקופה הזו. הוא יכול גם להגיע אל אותה התחנה עצמה בתקופה הבאה כדי לייצג עיכוב בתחנה לצורך פריקה או טעינה או לחילופין לצורך עיכוב בלבד ללא פריקה או טעינה. האילוץ מתזמן את תנועות הרכב בהתאם לזמן הבדיד.

(6) שימור כמויות אופניים על המשאית. הכמות שהייתה על הרכב בנסיעתו אל התחנה הנוכחית ועוד הכמות נטו שנטענה על הרכב, שווה לכמות שתהיה על הרכב בנסיעתו הבאה.

(7) הגבלת הכמות שהרכב נושא בכל תקופה לקיבולת הרכב ולנתיבים שנבחרו.

(8) מוודא שאם הרכב לא מגיע לתחנה בתקופה הזו, אופניים לא ייטענו אל הרכב. לעומת זאת, אם הרכב מגיע לתחנה בתקופה, אזי נבחר לאפשר לו לטעון יותר זוגות אופניים ממה שניתן במשך תקופה אחת, שכן ייתכן שהנסיעה בתקופה הקודמת לקחה פחות מתקופה שלמה בזמן בדיד, ונותר זמן שעוד ניתן לנצל. יחד עם זאת, באילוצים (10) ו-(11) אנחנו מוודאים שסך כל העבודה שבוצעה עד התקופה הזו אינו חורג ממה שניתן לבצע במשך הזמן הזה ($2\bar{L}$ הוא חסם תחתון טוב לאילוץ, ובדרך כלל הוא נמוך יותר מקיבולת הרכב). למידע נוסף ניתן לפנות ל-Raviv et al. (2013).

(9) מוודא שאם הרכב לא מגיע לתחנה בתקופה הזו, אופניים לא ייפרקו מהרכב. לעומת זאת, אם הרכב מגיע לתחנה בתקופה, אזי נבחר לאפשר לו לפרוק יותר זוגות אופניים ממה שניתן במשך תקופה אחת, שכן ייתכן שהנסיעה בתקופה הקודמת לקחה פחות מתקופה שלמה בזמן בדיד, ונותר זמן שעוד ניתן לנצל. יחד עם זאת, באילוצים (10) ו-(11) אנחנו מוודאים שסך כל העבודה שבוצעה עד התקופה הזו אינו חורג ממה שניתן לבצע במשך הזמן הזה ($2\bar{U}$ הוא חסם תחתון טוב לאילוץ, ובדרך כלל הוא נמוך יותר מקיבולת הרכב). למידע נוסף ניתן לפנות ל-Raviv et al. (2013).

(10) ביצוע בקרה על הזמן שנוצל לנסיעה ולפריקה ולטעינה ומבצע תיאום בין הזמן הרציף לבין הזמן הבדיד של ביצוע הפעולות הללו - חסם עליון (ראה הרחבה בסעיף 4.4.6.1).

(11) ביצוע בקרה על הזמן שנוצל לנסיעה ולפריקה ולטעינה ומבצע תיאום בין הזמן הרציף לבין הזמן הבדיד של ביצוע הפעולות הללו - חסם תחתון (ראה הרחבה בסעיף 4.4.6.1).

(12) כמות האופניים על הרכב שיוצא מהתחנה ההתחלתית שלו l_v בזמן Δ_v, שווה לכמות האופניים ההתחלתית על הרכב ועוד הכמות שנטענה עליו.

(13) הנתיבים שמייצגים תקופות שלפני הזמן Δ_v, לא ייבחרו משום שהרכב עוד יימצא בדרכו אל l_v.

4.4.6.1. הרחבה בנושא אילוצי הבקרה על הזמן:

בשל הדיסקרטיזציה, יש מגבלות מסוימות במודל. על מנת להבטיח פיזיביליות, זמני הנסיעה מעוגלים כלפי מעלה, והדבר מוביל לפערים בלוח הזמנים. על מנת להתגבר על הבעיה הזו מוגדרים מספר אילוצים שמטפלים בכך.

אילוצים (10) ו-(11) הם אילוצים שהוספו על מנת לסייע בביצוע בקרה על הזמן שנוצל לנסיעה ולביצוע משימות הפריקה והטעינה. האילוצים הללו מבצעים תיאום בין הזמן הרציף לבין הזמן הבדיד של ביצוע הפעולות הללו.

צד שמאל באילוצים מייצג את סך הזמן הרציף שנוצל עד לתקופת הזמן הבדידה שמיוצגת ע"י w – האיבר הראשון מייצג את סך זמני הנסיעה והאיבר השני מייצג את סך זמני הטעינה והפריקה.
אילוץ (10) מגדיר חסם עליון לזמן הרציף - צד ימין מייצג את תקופות הזמן הבדידות שחלפו עד לתקופה w ביחידות של זמן רציף.
זמן הנסיעה הרציף עשוי להיות קצר יותר מאשר זמן הנסיעה במספר בדיד של תקופות ולכן האיבר השני בצד שמאל עשוי לסייע לביצוע התיאום בין הזמנים ע"י פריקה או טעינה של מספר זוגות אופניים גדול יותר ממה שאפשרי בסה"כ בתחנה. לכן, יש צורך בהוספת אילוצים נוספים שיגבילו את כמות האופניים שהרכב יפרוק או יטען בתחנה (ראה אילוצים (8) ו-(9)).

באילוץ (11), מוגדר את החסם תחתון לזמן הרציף במטרה לשמר את לוח הזמנים שתוכנן כך שיהיה קרוב ליישום שלו.

החשיבות של האילוצים הללו נובעת מתוך הצורך לשמר את כמויות האופניים בתחנות בהתאם למתוכנן. בין החסם העליון לבין החסם התחתון ישנו חלון של 2 תקופות זמן בדידות. ייתכן חוסר סנכרון במהלך הזמן הזה, אבל אנחנו מאמינים שהוא זניח.

4.5. האתגרים בפתרון הבעיה

הניסוח שלעיל הוא ניסוח דטרמיניסטי, אך ישנם מספר אתגרים ביישום הפתרון בסביבה שבה אנחנו מטפלים.

4.5.1. סטוכסטיות – המציאות של הבעיה בה אנחנו מטפלים הינה מציאות סטוכסטית, שבה הנתונים אינם ידועים מראש וניתן להעריך אותם בלבד. כשהרכב מגיע לתחנה, מצב המלאי כבר אינו בהכרח זהה למצב שנחזה בעת ביצוע התכנון.

4.5.2. אפקט סוף האופק – במציאות היומיומית של המערכת, פעילותה מתרחשת באופן מתמשך (24 שעות ביממה, 7 ימים בשבוע). המשמעות היא שתכנון שמתבצע לאופק קצר, אינו משקלל את המתרחש לאחר תום התקופה.

4.5.3. נדרש פתרון בזמן-אמת – את הבעיה יש לפתור בזמן אמת ולהשיג פתרון מהיר על מנת לתת מענה יעיל, על אף השינויים התכופים במצב המערכת. אם זמן הפתרון הוא ארוך, ייתכן שעוד במהלך התכנון ישתנה מצב המערכת, עליו נסמך התכנון, והתכנון עלול שלא להיות רלוונטי עוד.

המשמעות בהתמודדות עם האתגרים הללו, היא שיש להתאים את הפתרון המתקבל מניסוח המודל המתמטי, כך שייתן מענה לאתגרים שצוינו.

.

4.6. התאמת המודל למציאות הסטוכסטית

כדי להתאים את המודל לסביבה סטוכסטית - אנחנו מבצעים מספר התאמות למודל. בתחילה נתאר כיצד אנחנו מבצעים שינויים במודל עצמו על מנת להתאים אותו לסביבה הסטוכסטית ולאחר מכן נציג התאמות שאנחנו מבצעים לאחר ריצת המודל.

4.6.1. שימוש בפונקציית היוון (Discount)

מאחר וחוסר הוודאות לגבי הביקוש הולכת וגדלה ככל שאופק התכנון רחוק יותר, אנחנו מציעים להוסיף פונקציית היוון - $\beta(t)$ לפונקציית המטרה על מנת לתכנן ביתר דיוק עבור הזמן הקרוב ולקחת בחשבון את העתיד, אך לתת לו משקל נמוך יותר מאשר משקל העתיד הקרוב. פונקציית היוון למשל - $\beta(t) = 0.99^t$.

פרמטרים נוספים:

$\beta(t)$	פונקציית היוון שמגדירה את המשקלות של פונקצית המטרה בכל תקופה. ככל שהתקופה t קרובה יותר, כך המשקל גבוה יותר. למשל: $\beta(t) = 0.99^t$

השינוי בפונקציית המטרה:

כעת נוספה פונקציית Discount $\beta(t)$ על פונקציית המטרה.

$$Min\left\{\sum_{t=1}^{T''}\beta(t)\cdot\left(\sum_{i\in N}\left(W_{it}^{B}+h\cdot W_{it}^{R}\right)+\alpha\cdot\sum_{i,j,v}t_{ij}\cdot x_{ijtv}\right)\right\}$$

4.6.2. מלאי ביטחון

על מנת להתמודד עם האקראיות בחרנו להוסיף אלמנט של מלאי ביטחון. מטרתו של מלאי הביטחון שנוסף היא לקנוס מצבים שבהם מצב המלאי המתוכנן בתחנה הינו גבוה מדי ומצבים שבהם מצב המלאי המתוכנן בתחנה הינו נמוך מדי. זאת משום שבסביבה סטוכסטית, מצבים כאלה עלולים בהסתברות גבוהה להוביל לחוסרים.

פרמטרים נוספים:

γ	משתנה שמגדיר את המשקל עבור מלאי הביטחון. ניתן לומר שהמשקל של מלאי הביטחון ביחס למשקל של זמן המתנה הוא נמוך, משום שיחידת חריגה ממלאי ביטחון אינה מובילה בהכרח להמתנת לקוחות, שהיא המדד האמיתי של רמת השירות במערכת.
U_{it}	גבול עליון רצוי עבור מלאי הביטחון – כמות אופניים מקסימאלית רצויה בתחנה בתקופה t. חריגה ממנה מובילה לקנס בפונקציית המטרה.
L_{it}	גבול תחתון רצוי עבור מלאי הביטחון – כמות אופניים מינימאלית רצויה בתחנה בתקופה t. חריגה ממנה מובילה לקנס בפונקציית המטרה.

הגבולות הללו תלויים בתקופה t, משום שבתקופות שבהן צפוי מספר רב של השכרות ביחס להחזרות – המתכנן עשוי להעדיף שהגבול L_{it} יהיה גבוה, ואילו בתקופות שבהן צפוי מספר רב של החזרות – המתכנן עשוי להעדיף שהגבול U_{it} יהיה נמוך. האופטימיזציה של מלאי הביטחון היא מחוץ לתחום העיסוק של עבודה זו. בעבודה זו נעשה שימוש בכלל אצבע לקביעת מלאי הביטחון, כפי שיתואר בהמשך.

משתני החלטה נוספים:

Z_{it}	החריגה ממלאי הביטחון בתחנה i בתקופה t.

השינוי בפונקציית המטרה:

נוסף כאן מלאי הביטחון, עם משקל γ.

$$Min\left\{\sum_{t=1}^{T''}\beta(t)\cdot\left(\sum_{i\in N}\left(W_{it}^{B}+h\cdot W_{it}^{R}\right)+\alpha\cdot\sum_{i,j,v}t_{ij}\cdot x_{ijtv}+\gamma\cdot Z_{it}\right)\right\}$$

אילוצים נוספים:

אילוצים (18)- (20) נוספו על מנת להתייחס למלאי הביטחון. כל חריגה ממלאי הביטחון נקנסת בפונקציית המטרה.

$$(18)\quad Z_{it}\geq 0 \qquad \forall i\in N, t=0,\dots,T''$$

$$(19)\quad Z_{it}\geq s_{it}-U_{it} \qquad \forall i\in N, t=0,\dots,T''$$

$$(20)\quad Z_{it}\geq L_{it}-s_{it} \qquad \forall i\in N, t=0,\dots,T''$$

4.6.3. בחירת משך התקופה שעבורה יתבצע התכנון

פתרון שיחושב עבור אופק תכנון ארוך יימשך זמן רב, שבמהלכו מצב המערכת עשוי להשתנות והתכנון שבוצע עלול שלא להיות מתאים עוד.
לעומת זאת, פתרון שיחושב עבור אופק תכנון קצר, אינו מתחשב באירועים שעתידים להתרחש במערכת לאחר סיום האופק ולכן עלול להשפיע לרעה על פרקי זמן מעט יותר רחוקים.
לפיכך, אנחנו מציעים לפתור את הבעיה לאופק תכנון בינוני של מספר שעות קדימה, אך יישום הפתרון יהיה עבור פרק זמן קצר יותר, כפי שמוסבר בהמשך.

4.6.4. אופק מתגלגל (Rolling Horizon)

המערכת פועלת באופן רציף 24 שעות ביממה, 7 ימים בשבוע. אנחנו משתמשים במתודולוגיה של אופק מתגלגל על מנת להימנע מאפקט סוף האופק, כלומר: להימנע מכך שבסיום פרק הזמן המערכת תימצא במצב שאינו מתאים עבור פרק הזמן הבא, ולפיכך ייווצרו המתנות נוספות של משתמשים.

השיטה שאנחנו מציעים מתבצעת באופן הבא: פתרון הבעיה מחושב עבור אופק תכנון של מספר שעות קדימה (T' תקופות. פרק זמן זה יכונה "אופק התכנון", Planning Horizon), אך היישום בפועל הוא של הפתרון שהושג עבור משך של מספר תקופות זמן בלבד, למשל עבור חצי השעה הראשונה (פרק זמן זה יכונה "אופק הביצוע", Implementation Horizon). לאחר הביצוע בפועל של פתרון חצי השעה, נאסף מידע עדכני על מצב המערכת הנוכחי, וכעת האופק מתגלגל והפתרון מחושב שוב עבור פרק זמן של T'' תקופות נוספות קדימה. השימוש בגישה זו מאפשר לסיים את אופק הביצוע הנוכחי, כאשר מצב המערכת מתאים גם לביקוש העתידי הצפוי.

השימוש בגישה זו מסייע בנוסף, להתמודד עם העובדה שמצב המערכת משתנה כל העת, ובאופן שלא ניתן לחזות בוודאות. משום שמצב המערכת משתנה כל העת, אין זה מעשי לבצע וליישם במדויק תכנון עבור אופק תכנון ארוך, גם לא עבור מספר שעות.
באמצעות גישה זו, אנחנו מבצעים עדכון של מצב המערכת הנוכחי בכל גלגול של האופק, ומאפשרים למודל לבצע תכנון מתאים יותר למתרחש בשטח.

4.6.5. כללים ליישום הפתרון

בשל המציאות הסטוכסטית של המערכת, ייתכן שבעת הגעת הרכב אל התחנה מצב המלאי בכלי הרכב ו/או בתחנה לא יאפשרו את ביצוע המשימה שתוכננה. לפיכך, את החלטות הניתוב והמלאי שמספק המודל המתמטי יהיה צורך לשנות ולהתאים למצב העדכני של המערכת בזמן אמת.
החלטות הניתוב – יתבצעו כפי שהנחה המודל, אלא אם בזמן אמת התגלה כי אין אפשרות לבצע את המשימה הנדרשת בתחנה כלל. כלומר, אם המשנע נדרש לפרוק מספר זוגות אופניים בתחנה, אך אין אופניים על כלי הרכב, או שהמשנע נדרש להעמיס זוגות אופניים אך רכב השינוע מלא, המשנע ייבחר שלא להגיע אל התחנה.

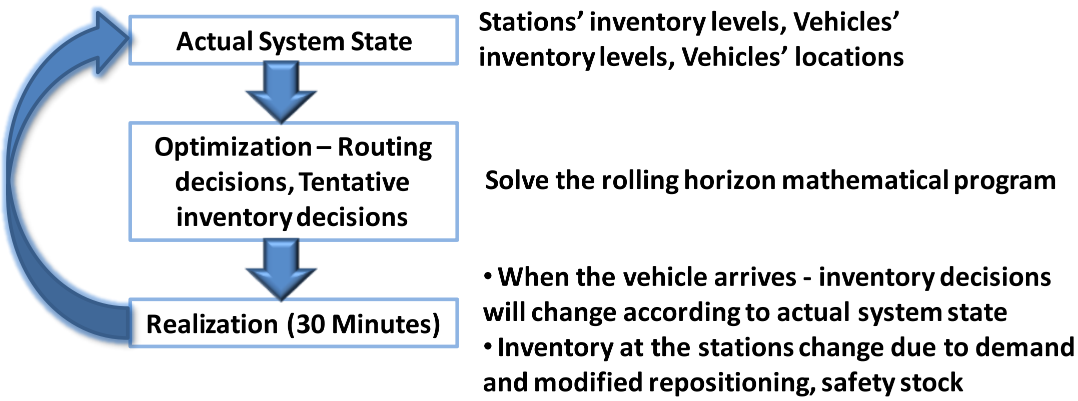
החלטות המלאי – המודל המתמטי מספק המלצה באשר לכמות שיש לטעון או לפרוק בתחנה שעל הנתיב. את החלטת המלאי יש להתאים למצב התחנה העדכני בעת הגעת כלי הרכב אל התחנה.

בזמן אמת החלטת המלאי שתתבצע היא זו הניתנת לביצוע באופן הקרוב ביותר להחלטת המלאי המתוכננת, תוך שמירה על מלאי ביטחון נדרש. למשל, במקרה שבו המשנע נדרש לאסוף בתחנה 8 זוגות, אך ברכבו ישנו מקום פנוי רק עבור 6 זוגות – המשנע ייבחר לאסוף 6 זוגות בתחנה. דוגמה נוספת - כאשר המשנע נדרש לאסוף בתחנה 8 זוגות, אך בתחנה ישנם 7 זוגות בלבד, הוא לא ייבחר לאסוף את כל 7 הזוגות מהתחנה, אלא 6 או 5 זוגות בהתאם למלאי ביטחון שעליו לשמור בתחנה (או למרווח ביטחון שעליו לשמור ממגבלת הקיבולת בתחנה).

בנוסף, יש להזכיר כי משתני הפריקה והטעינה במודל הם אינם שלמים ויש לעגל אותם לצורך יישום הפתרון בפועל.

4.6.6. סיכום ביניים של שיטת הפתרון

באיור 4, מוצג הסיכום של הפרוצדורה שפועלת בזמן אמת ומותאמת לסביבה הסטוכסטית. בכל פעם אנחנו מזינים למודל האופטימיזציה את מצב המערכת העדכני ופותרים בעיית ניתוב ומלאי. במידה וניתן, היינו מיישמים את החלטות המודל לאופק הביצוע שנקבע, מעדכנים את מצב המערכת ופותרים שוב את הבעיה. אולם ביישום בפועל, יכול להיות שמצב המערכת יהיה שונה ממה שתוכנן בפתרון מודל האופטימיזציה, כפי שהוסבר לעיל. במקרה זה יהיה צורך להתאים את ההחלטה למצב העדכני, כך שיתחשב ברמות המלאי בתחנות ועל כלי הרכב, וכן שיתחשב במלאי הביטחון.



איור 4: סיכום פרוצדורת הפתרון

4.7. הפחתת המאמץ החישובי

עד עתה ביצענו התאמות שונות לסביבה הסטוכסטית, אבל מבחינה חישובית הבעיה עדיין מאד מורכבת וצריך לבצע שיפורים נוספים על מנת להתאים אותה לעבודה בזמן אמת.

משתני הניתוב $\left(x_{ijtv}\right)$ הם משתנים בינאריים שדרישת השלמות עבורם הופכת את הבעיה למורכבת יותר. מספר משתני הניתוב בבעיה הוא גבוה והוא שווה לריבוע מספר התחנות במערכת מוכפל במספר התקופות ובמספר כלי הרכב.

על מנת להפחית את המאמץ החישובי של המודל אנחנו מציעים מספר גישות להפחתת מספר משתני הניתוב.

4.7.1. <u>אופק קצר להחלטות הניתוב - הפחתת משתני הניתוב באופק עתידי</u>

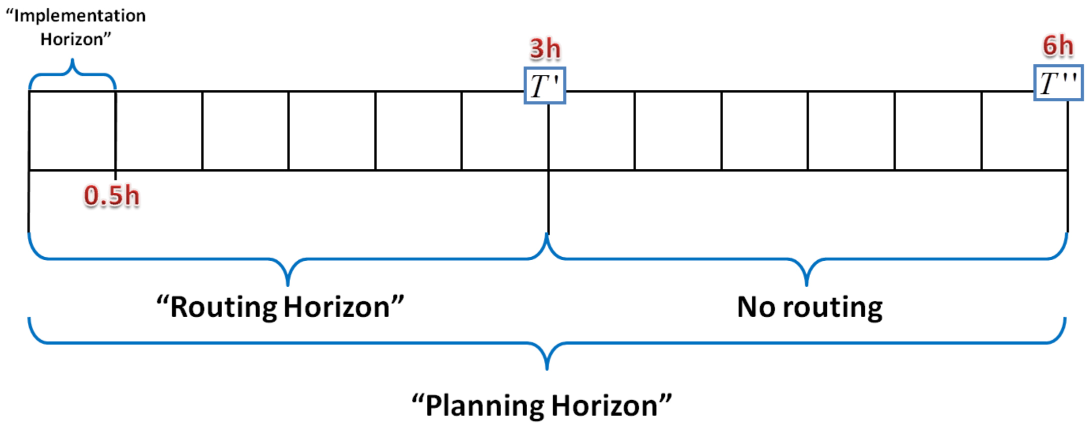
על מנת להפחית את משתני הניתוב באופן שיאפשר להשיג פתרון מהיר יותר, נניח כי בפרק זמן הרחוק מהזמן הנוכחי, לא מתבצע שינוע במערכת. ניתן להגדיר זאת כך, משום שהשינוע בתקופות רחוקות עשוי שלא להתבצע כפי שתוכנן, שכן האקראיות הולכת וגדלה ככל שהתקופה רחוקה יותר, וגם "תנאי ההתחלה" של מצב המערכת עבור התקופה הרחוקה, עשויים שלא להיות כפי שנצפה. עם זאת, לא נרצה שלא להכליל כלל תקופות מרוחקות, זאת על מנת להתחשב בכל זאת בביקוש שעתיד להתרחש בתקופות אלה.

בנוסף, הגדרה זו מאפשרת בשעות שפל במהלך היום להכין את המערכת לשעה של עומס שעתידה להתרחש ובה לא ניתן לבצע שינוע יעיל במערכת. אם המשנעים כבר סיימו לבצע את משימותיהם עבור השעות הראשונות, ולא צפויים חוסר או עודף בשעות הקרובות – נרצה שהם לא יתבטלו כעת, אלא יפעלו על מנת לספק מענה לביקוש בשעת העומס הבאה. לפיכך, ההנחה כי אין שינוע בפרק זמן עתידי, מסייעת לקחת את הביקוש העתידי כ"שובר שוויון" בין בטלה לבין הכנת התחנות לשעת העומס העתידית.

לעומת זאת, בשל פונקציית ה-Discount החשיבות של העתיד היא פחותה, ולכן אם יש משימות דחופות כעת המודל ייתן עדיפות לתקופות הקרובות.

אנו מחלקים את אופק התכנון לשני פרקי זמן – הראשון, המוקדם יותר (תקופות 'T..1 באיור 5), שיכונה "אופק הניתוב" (Routing Horizon) מכיל משתני ניתוב. עבור פרק הזמן השני, המאוחר יותר (תקופות "T..[T'+1] באיור 5), נניח כי במהלכו לא מתבצע שינוע כלל, ובדרך זו נפחית את מספר משתני הניתוב באופן שיאפשר להשיג פתרון מהיר יותר, אך עדיין תוך התחשבות בביקוש שעתיד להתרחש.

לדוגמה - שעת העומס בבוקר מסתיימת בערך בשעה 9:30, ועד השעה 12:30 השינוע מסיים לכסות את החוסר והעודף שנוצר כתוצאה משיאי הביקוש בשעות הבוקר. החל משעה זו, זוהי שעת שפל שבה לא צפוי להיות חוסר או עודף בתחנות משום שהשימוש במערכת הוא בהיקף מאד נמוך, אך עם זאת, יש צורך להכין את המערכת לשעת העומס הבאה, שצפויה להתחיל בערך בשעה 16:00 אחה"צ, ובה יהיה קשה יותר לספק את הביקוש. בהתאם לכך, ניקח כאופק התכנון העתידי משך של 6 שעות, כך שרק 3 השעות הראשונות בהן נתכנן את השינוע יוגדרו כאופק הניתוב (איור 5).



איור 5: אופק קצר להחלטות הניתוב

השינוי באילוצים:

יש להתאים את אילוץ (1) המתאר את שימור המלאי באופן הבא:

$$(21)\quad s_{it} - W_{it}^{B} + W_{it}^{R} = s_{i,t-1} - W_{i,t-1}^{B} + W_{i,t-1}^{R} + \sum_{v\in V}\left(y_{itv}^{U} - y_{itv}^{L}\right) - d_{it}$$
$$\forall\, i \in N, t = 1, \dots, T'$$

יש להוסיף את האילוץ הבא על מנת לתאר את שימור המלאי במהלך פרק הזמן העתידי, שאינו כולל את פעולות השינוע:

$$(22)\quad s_{it} - W_{it}^{B} + W_{it}^{R} = s_{i,t-1} - W_{i,t-1}^{B} + W_{i,t-1}^{R} - d_{it}$$
$$\forall\, i \in N, t = T' + 1, \dots, T''$$

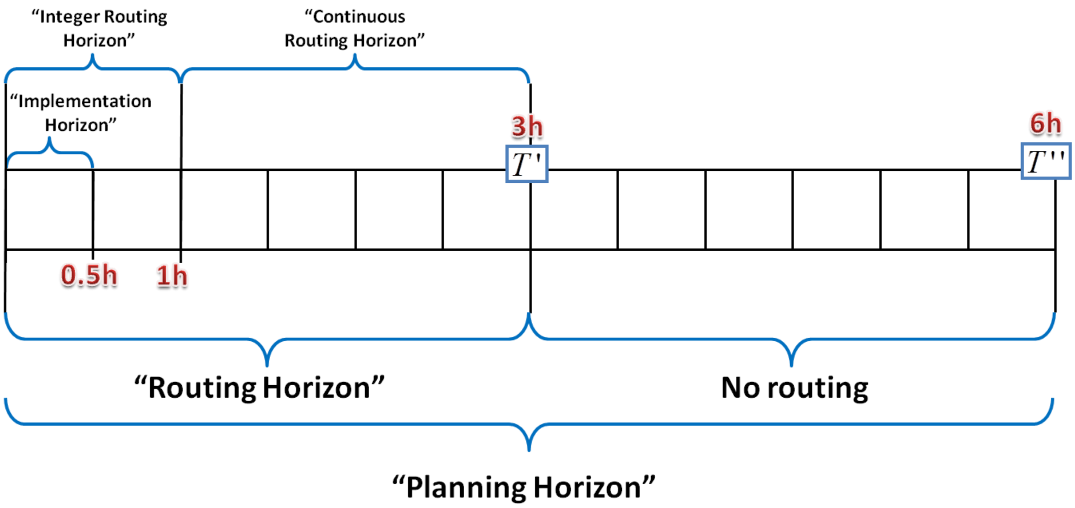
4.7.2. התרה חלקית

בהתאם למה שהוגדר בסעיפים הקודמים, אנחנו פותרים את הבעיה עבור האופק שמכיל שני פרקי זמן (עם שינוע וללא שינוע), מיישמים את חצי השעה הראשונה ומגלגלים את האופק.

כעת, כדי להפחית עוד את המאמץ החישובי, אנחנו לוקחים אופק הניתוב (סדר גודל של כ-3 שעות), ומחלקים אותו כך שרק בשעה הראשונה אנחנו מאלצים את משתני הניתוב להיות שלמים (איור 6). בעקבות כך נגדיר שני פרקי זמן חדשים "אופק הניתוב השלם" (Integer Routing Horizon) ו"אופק הניתוב הרציף" (Continuous Routing Horizon) .

אופק הביצוע (Implementation Horizon), אותו אנחנו מיישמים, הוא החשוב ביותר וככל שנתכנן את השינוע לתקופה רחוקה יותר, כך אי הוודאות לגבי מצב המערכת ילך ויגבר וייתכן שלא יהיה ניתן לבצע את פעולות השינוע כפי שהן תוכננו מראש.

ההתרה החלקית מאפשרת לנו לקחת בחשבון את מה שעתיד להתרחש בהמשך אופק הניתוב, מבלי להעמיס מאד על החישוביות של הבעיה. כמו כן, היא מאפשרת לקחת בחשבון במידה מסוימת את מגבלות הקיבולת של רכבי השינוע. אמנם, לערכי משתני הניתוב הרציפים שיתקבלו, אין משמעות אמיתית, שכן לא ניתן לפצל רכב למספר נתיבים, אבל הם מספקים מידע עתידי מסוים שמאפשר לקבל בפרק הזמן הקרוב החלטות נכונות יותר שמתחשבות גם בעומס העתידי על כלי הרכב המשנעים.



איור 6: אופק קצר להחלטות הניתוב, התרה חלקית

4.8. <u>שימוש בתכונות ייחודיות של הבעיה על מנת לשפר את זמן הריצה</u>

בפרק זה אנחנו מציגים שימוש בתכונות ייחודיות של הבעיה, על מנת לשפר עוד את ביצועי המודל ולאפשר קבלת פתרון בזמן קצר יותר. על מנת לשפר את החישוביות של המודל אנחנו מציעים שתי גישות נוספות להפחתת משתני הניתוב.

4.8.1. <u>ניפוי תחנות</u>

באמצעות התבוננות במערכת ובנתוניה, ניתן להבחין כי בכל זמן נתון ישנן לא מעט תחנות שאינן דורשות טיפול מיידי ועל פי הביקוש הצפוי בהן - הן לא יחרגו ממלאי ביטחון מסוים בטווח של כמה שעות קדימה. המשמעות היא שניתן לנפות את התחנות הללו מההחלטה של הרכב ולהפחית משתני ניתוב. ניפוי של תחנה משמעותה מחיקה של משתני הניתוב המייצגים את הקשתות שנכנסות ואת הקשתות שיוצאות מאותה התחנה. בדרך זו ניתן להפחית באופן משמעותי את המאמץ לפתרון הבעיה.

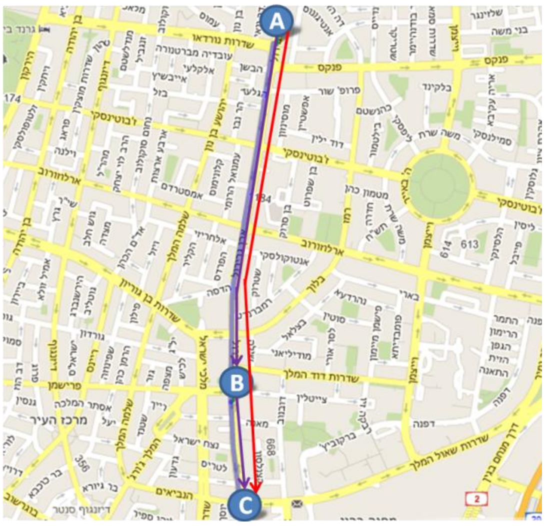
יש לציין שצעד זה הינו צעד היוריסטי, ולכן על אף שסביר שצעד זה אינו פוגע משמעותית בפתרון, אין באפשרותנו להוכיח זאת.

4.8.2. <u>מחיקת קשתות על פי שיקולים גיאוגרפיים</u>

במבנה של סביבה עירונית, רכבי השינוע הינם מוגבלים לנסיעה על רשת הכבישים בעיר ולכן נסיעה בין שתי תחנות מסוימות, צפויה לעבור דרך תחנות נוספות. תובנה זו מאפשרת למחוק קשתות בבעיה ולהפחית את המאמץ לפתרונה (Raviv et al., 2013).

למשל, ניתן לראות דוגמה באיור 7 תחנות A, B ו-C באיור מייצגות את מיקומן של תחנות אמיתיות במערכת. כאשר מחפשים את נתיב הנסיעה המהיר ביותר בין תחנה A לבין תחנה C, מקבלים נתיב שעובר דרך תחנה B. המודל שלנו מאפשר ביקורים חוזרים בתחנות ולכן, במקרה זה, כדי להגיע מתחנה A אל תחנה C, המשנע יוכל לבחור להגיע דרך שתי קשתות – AB ו-BC. המשמעות היא שניתן למחוק את הקשת AC. מחיקת קשתות משמעותה מחיקת משתני ניתוב.

במקרה זה ניתן למחוק את קשת AC, משום שהדרך החליפית אינה מאריכה את זמן המסלול.
יש לציין שזוהי אינה היוריסטיקה, אלא שיטה מדויקת.



איור 7: מחיקת קשתות על פי שיקולים גיאוגרפיים.

ניתן למחוק את קשת AC, ולהגיע מ-A ל-C, דרך הקשתות AB ו-BC

אלגוריתם 1 מציג את השיטה למחיקת הקשתות.

אלגוריתם 1: מחיקת קשתות פשוטה

עבור כל קשת (i,j) (כאשר $i \neq j$):
אם קיימת תחנה k שעבורה
מתקיים $t_{ik} + t_{kj} = t_{ij}$
אזי מחק את קשת (i,j).

בבעיות מורכבות מאד עם מספר תחנות גבוה, ניתן להשתמש ברעיון דומה גם על מנת לנפות מספר גבוה יותר של קשתות. למשל, אם נתיר מחיקת קשת שעבורה הדרך החלופית אינה מאריכה את המסלול ביותר מ-10%, ניתן יהיה למחוק מספר קשתות גבוה יותר. לעומת השיטה הקודמת צפויה מחיקה נרחבת יותר של קשתות, אך יש לשים לב שבאופן כזה זמני הנסיעה שהמודל רואה יכולים להיות ארוכים מעט מאלו שבמציאות. במצב כזה יתכנו החלטות ניתוב שאינן אופטימאליות (אלגוריתם 2).

בערים בהן ישנם נתיבים ארוכים חד סטריים רבים, צפויה מחיקת קשתות נרחבת עוד יותר, משום שיותר תחנות צפויות להימצא בדרך אל תחנות אחרות.

העתק את t_{ij} ל t'_{ij} לכל זוג קדקודים $i \neq j$
עבור על כל הקשתות (i,j) בסדר לא יורד של t_{ij} (כאשר $i \neq j$):
מצא k $(k \neq i,j)$ שממזער את $t'_{ik} + t'_{kj}$, מבין הקדקודים k $t_{ik}, t_{kj} < t_{ij}$
אם מתקיים התנאי $(t'_{ik} + t'_{kj}) \leq t_{ij} \cdot (1+\theta)$
מחק את קשת (i,j)
עדכן את מטריצת המרחקים באופן הבא: $t'_{ij} = t'_{ik} + t'_{kj}$

בערכים t'_{ij} נשמר במהלך ריצת האלגוריתם אורך המסלול הקצר ביותר בין כל זוג קדקודים i,j לאחר מחיקת הקשתות. מקרה פרטי של אלגוריתם 2, שבו $\theta = 0$ מייצג את אלגוריתם 1, שהוצג לראשונה במאמר של Raviv et al. (2013).

ניתן לשים לב כי בסה״כ אורכו הכולל של מסלול כלשהו לא גדל ביחס של יותר מ-θ מאורכו המקורי. במקרים של נסיעה בסביבה עירונית, הזמן עשוי בין כה וכה להיות שונה מהצפוי בשל המציאות הסטוכסטית של סביבה מסוג זה. עוד יצוין שאם לפי פתרון התוכנית המתמטית המשנע עובר דרך צומת מסוים מבלי לפרוק או לטעון בו זוגות אופניים (מצב שיכול להיווצר עקב מחיקת הקשתות הנ״ל), בפועל הוא ידלג על התחנה וייסע במסלול הקצר ביותר מהתחנה הקודמת לתחנה הבאה בה מתבצעת פעולה. דוגמה מפורטת ניתן לראות בנספח א׳.

טענה:

בהינתן G – גרף הקשתות המקורי, G' – הגרף המעודכן לאחר יישום אלגוריתם 2

ובהינתן L, L' המסלול הקצר ביותר בין שני קודקודים ב-G, G' בהתאמה

$\Downarrow$

המסלול הקצר ביותר מקיים $L' \leq L \cdot (1+\theta)$

הוכחה:

1. נניח ש- (i,j) הינה קשת שנמחקה בגרף.
2. מחיקת (i,j) אינה מובילה להארכת המסלול הקצר בין i לבין j ביותר מ-$t_{ij} \cdot \theta$. זאת בעקבות התנאי שקודקוד k קיים ומקיים את התנאי $(t'_{ik} + t'_{kj}) \leq t_{ij} \cdot (1+\theta)$.
3. נדרש להוכיח בנוסף כי קשת (i,j) שנמחקה לא אפשרה מוקדם יותר מחיקה של קשת אחרת בגרף מהצורה (i,n) או (n,j). אחרת, הגדלת t'_{ij} עלולה להוביל להארכת אחת הקשתות שנמחקו ביחס של יותר θ.
4. נניח בשלילה ש-(i,j) היא חלק ממסלול מ i ל n שאפשר את מחיקת הקשת (i,n) באיטרציה מוקדמת יותר. בהתאם לכך:
   4.1. מתקיים $t_{ij} < t_{in}$ בעקבות התנאי למחיקה באלגוריתם $t_{ij} < t_{in}, t_{nj}$

4.2. מתקיים $t_{in} < t_{ij}$ בעקבות הדרישה למעבר על הקשתות בסדר שאינו יורד

5. קיימת סתירה בין 4.1 לבין 4.2 ולכן הוכח כי (i,j) לא השתתפה מוקדם יותר במחיקה של קשת אחרת מהצורה (i,n). טיעון דומה תקף לקשתות מהצורה (n,j).

6. אין בגרף מסלולים קצרים שהוארכו ביחס של יותר מ-θ . ■

4.8.3 <u>שילוב של מחיקת הקשתות וניפוי התחנות</u>

כשמשלבים את שתי המתודות הללו ביחד חשוב לשים לב, כי יש לבצע קודם כל את ניפוי התחנות ורק לאחר מכן את מחיקת הקשתות. זאת משום שניפוי של תחנה משמעותה מחיקת כל הקשתות שיוצאות ממנה וכן מחיקת כל הקשתות שנכנסות אליה.

באיור 7 למשל, במחיקת הקשתות תתבצע מחיקה של קשת AC, על סמך מעבר בשתי קשתות דרך תחנה B. בניפוי התחנות, אם תימחק תחנה B, יימחקו גם הקשתות הקשורות אליה AB ו-BC ולא תיוותר אף קשת שתייצג את הנסיעה מתחנה A לתחנה C.

<u>תיאור השיטה המשולבת</u>

1. ביצוע ניפוי של תחנות.
2. עבור התחנות שנופו יש לקבוע כערך אינסופי את הקשתות שיוצאות ונכנסות מהתחנות שנופו.
3. מחיקת קשתות – בשלב זה הקשתות של התחנות שנופו אינן נמחקות, אך התחנות הללו גם לא נבחרות כתחנות ביניים (הן עומדות להיות מנופות).
4. מחיקת הקשתות היוצאות והנכנסות מהתחנות שנופו (כזכור – מחיקת קשת משמעותה מחיקת משתנה ניתוב באמצעות איפוס הקשת במטריצת הקשתות).

בטבלה 1 ניתן לראות סיכום של האתגרים בבעיית השינוע הדינאמית ואת הפתרונות המוצעים על מנת להתמודד עם האתגרים הללו.

טבלה 1: סיכום האתגרים בבעיית השינוע הדינאמית ופתרונם

בעיה	פתרונות
אקראיות	פונקציית Discount, מלאי ביטחון, שינוי החלטות המלאי בהגעת הרכב לתחנה, יישום פרק זמן קצר בלבד ("אופק הביצוע") וגלגול האופק.
אפקט סוף האופק	התחשבות בפרק זמן עתידי, אופק מתגלגל
פתרון מהיר בזמן-אמת	התרה חלקית, אופק קצר להחלטות הניתוב. מחיקת קשתות, ניפוי תחנות.

4.9. דיון ומסקנות

4.9.1. המוטיבציה בשימוש במודל תכנות מתמטי

תבניות חוזרות - המערכת אמנם מכילה אקראיות, אך ניתן להבחין כי הביקוש מכיל תבניות דומות לאורך זמן ולכן המודל המתמטי יכול לשמש לצורך תכנון מדיניות כללית.

התחשבות בתחזיות עתידיות - מודל תכנות מתמטי יכול לבצע תכנון בגישה שאינה קצרת ראייה, אלא מתכננת קדימה ופועלת באופן פרואקטיבי בהתאם לציפיות ולתחזיות, תוך שקלול מספר גורמים בו זמנית (שיקולים גיאוגרפיים, שיקולי תזמון, שיקולי מלאי). דוגמאות:

- כלל קצר רואי עשוי לטפל רק בתחנות הקרובות למקום הימצאו של כלי הרכב ולא יגיע לטפל בתחנות הרחוקות, למשל מחוץ למרכז העיר.
- ישנם מצבים שבהם אין צורך למלא מחדש תחנה שמתרוקנת, משום שבמבט לעתיד צפויים להגיע אליה מספר רב של משתמשים המחזירים זוגות אופניים ולכן מילויה עשוי להוביל למצב שבו המחזירים לא יוכלו למצוא עמדות עגינה זמינות.

4.9.2. מחסני ביניים

במודל המתמטי שמוצג כאן אין מחסן מרכזי אחד מוגדר, אלא אנחנו מניחים שישנם מחסני ביניים וכל תחנה שקיבולתה גבוהה יכולה לשמש כמחסן ביניים. אנחנו ממליצים למפעילי המערכת לעשות שימוש במחסני ביניים, על מנת לשפר את תפעול המערכת, לאפשר תגובה מהירה יותר לחוסר ולעודף אופניים בתחנות, ולהפחית את הצורך בחזרת רכבי השינוע למחסן המרכזי המרוחק מאזורים שונים בעיר. לדוגמה, ללא מחסני ביניים - אם המחסן ממוקם בדרום העיר ובתחנות בצפון העיר יש מחסור באופניים הגדול מקיבולת הרכב, אזי יש צורך לשלוח יותר ממשנע אחד לאזור, לשלוח את המשנע הלוך ושוב מספר פעמים, או לחילופין להסתפק ברמת שירות נמוכה יותר. המחסן יאפשר שמירה של זוגות אופניים בקרבת אזור זה, וניתן יהיה לשפר את רמת השירות באופן משמעותי. בנוסף, שימוש במחסני ביניים מאפשר לתפעל את העיר בחלוקה לאזורים שונים. חלוקת העיר לאזורים שונים מסייעת לנהל את התפעול בצורה נוחה יותר, אך הקושי שנוצר בחלוקת העיר הוא חוסר האיזון במספר זוגות האופניים בתוך האזורים. לדוגמה, בשעות הבוקר משתמשים רבים רוכבים אל תחנות המרכז ופרברי העיר מתרוקנים מזוגות אופניים. באמצעות מחסני ביניים הממוקמים בין האזורים, ניתן להעביר זוגות אופניים בין האזורים גם ללא צורך בחפיפה ביניהם, וכך לפתור את חוסר האיזון שבין האזורים. בפועל, המשמעות של מחסני ביניים היא שקיים צורך בהוספת זוגות אופניים נוספים למערכת, אך העלות החד פעמית של רכישת זוגות אופניים תתקזז עם השיפור ברמת השירות ועם הגידול באוכלוסיית הלקוחות, שמצטברים לאורך זמן.

4.9.3. משך תקופת הזמן הבדיד (Time granularity)

הגדרנו את τ כמשך תקופת הזמן הבדיד. ככל שתקופה זו קצרה יותר, כך ניתן לבטא באופן מדויק יותר את הדינאמיות של המערכת ולעקוב אחר האירועים המתרחשים במערכת. עם זאת, מספר התקופות גדל ולכן החישוביות של המודל הופכת למורכבת יותר וקשה יותר לפתרון. נושא החישוביות הוא משמעותי כאשר מדובר בבעיה שיש לפתור בזמן אמת. לעומת זאת, במקרה של תקופות זמן ארוכות, לא ניתן יהיה לסנכרן ביעילות בין אירועים שונים המתרחשים במערכת.

אם משכם של תקופות הזמן הבדידות הוא ארוך ביחס לזמן הנסיעה בין התחנות, יישאר זמן מבוזבז שבו המשנע ייאלץ להמתין עד לסיום פרק הזמן ולקבלת המשימה הבאה (משום שניתן לבצע משימה אחת בלבד בכל תקופה)

5. <u>בחינת המודל המתמטי</u>

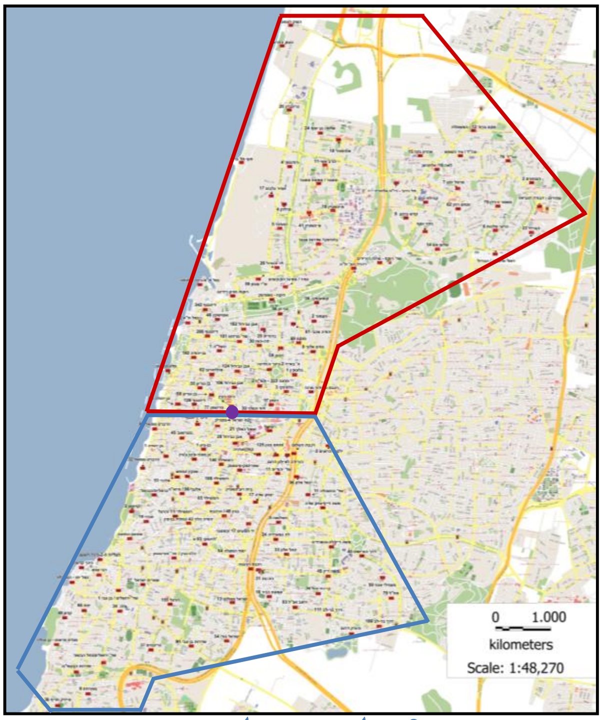
בפרק זה נציג את הניסויים שהתבצעו כדי לבחון את המודל המתמטי הדטרמיניסטי. ראשית, נבחן את תפקוד המודל ואת השפעת ניפוי התחנות ומחיקת הקשתות ולאחר מכן נבצע התאמות שונות (אופק מתגלגל, התרה חלקית) ונבחן האם ההתאמות אינן גורעות באופן משמעותי מהפתרון. בפרקים 7 ו-8 נתיר את ההנחה של מודל דטרמיניסטי ונציג תוצאות עבור מודל סימולציה המדגים את השימוש במודל המתמטי במציאות סטוכסטית.

5.1. <u>הקלט לבעיה</u>

5.1.1. <u>הפרמטרים שמגדירים את מאפייני המערכת:</u> מיקום התחנות, קיבולתן, וקיבולת כלי הרכב – נקבעו על פי נתוני מערכת השכרת האופניים בעיר תל-אביב (מערכת תל-אופן), כפי שהיו נכונים לחודש אוקטובר 2011. בתקופה זו מערכת השכרת האופניים הכילה 129 תחנות. קיבולת התחנות נעה בין 17 לבין 28 עמדות עגינה, קיבולת כלי הרכב מוגבלת ל-20 זוגות אופניים. זמני הנסיעה בין התחנות נשלפו באמצעות שימוש ב-Google Maps, בהתאם למיקומי התחנות במערכת השכרת האופניים בתל-אביב.

5.1.2. <u>נתוני הביקוש:</u> נתוני הביקוש נאספו ממערכת תל-אופן בימי חול במהלך חודש אוקטובר 2011. מספר המשתמשים הממוצע ליום בתקופה זו עמד על כ-4,200. קצבי הביקוש נאמדו על סמך נתונים אלה בהנחה שקצב הביקוש קבוע במהלך כל חצי שעה שלמה.

5.1.3. <u>חלוקת העיר לאזורים:</u> העיר חולקה לשני אזורים שבכל אחד מהם פועל כלי רכב יחיד. חלוקת העיר לאזורים מאפשרת את קיצור משך פתרון המודל בזמן אמת. יש לציין כי החלוקה לאזורים עלולה ליצור מצב של חוסר איזון בביקוש בכל אזור, ואי יכולת לאזן ע"י העברה בין אזורים, ולפיכך הוצב מחסן ביניים בין האזורים. מחסן ביניים בין האזורים מאפשר העברה של זוגות אופניים בין האזורים, גם ללא חפיפה ביניהם. באיור 8 ניתן לראות את החלוקה לאזורים ואת מיקום המחסן ביניהם. האזור צפוני כולל 68 תחנות והאזור הדרומי 61 תחנות ומחסן שגובל באזור הצפוני. בנוסף, נבנו תרחישים המתייחסים לכל העיר כאל אזור תפעולי אחד המשורת ע"י כלי רכב יחיד.



איור 8: חלוקת העיר לשני אזורים

5.1.4. <u>יצירת נתוני הבעיה:</u> לצורך הניסוי, יצרנו סדרות של נתוני ביקוש שונים על בסיס המידע שנאסף במערכת בשעות שונות. הנתונים במהלך היממה חולקו לשמונה סדרות של שלוש שעות כל אחת, ולכל סדרה הוספנו את נתוני הביקוש במהלך שלוש שעות עתידיות בהן לא מתבצע שינוע (בהתאם למתואר בסעיף 4.7.1). לדוגמה: נתוני 6:00-9:00 בבוקר בתוספת התחשבות בביקוש שבין השעות 9:00-12:00, נתוני 9:00-12:00 בתוספת התחשבות בביקוש שבין השעות 12:00-15:00, וכו'. בצורה זו יצרנו שמונה סדרות נתונים לכל אחד מהאזורים.

5.1.5. <u>מצב המערכת ההתחלתי:</u> מיקומם ההתחלתי של רכבי השינוע הוא במחסן הביניים, ורמת המלאי ההתחלתית בתחנות בכל סדרת נתונים נקבעה להיות רמת המלאי שנאספה מנתוני המלאי בפועל ביום עבודה טיפוסי בתקופת המבחן.

5.2. <u>ניסוי 1 – בחינת האפקטיביות של שיטת ניפוי התחנות</u>

בניסוי זה בחנו את תפקודו של המודל המלא ללא ביצוע התאמות שונות וללא האופק המתגלגל, והשווינו בין תפקוד המודל במצבים שבהם בוצע ניפוי התחנות לבין מצבים שבהם לא בוצע ניפוי התחנות.

5.2.1. <u>משך הריצה</u>

הבעיות המתוארות לעיל הורצו בניסוי זה עם מגבלת זמן של 1500 שניות (25 דקות), חלק מהבעיות נפתרו בזמן קצר יותר. כאשר בעיית האופטימיזציה לא נפתרה בפרק זמן זה, אנו מדווחים על הפתרון הטוב ביותר שהתקבל. יש לציין שמשך פתרון של 25 דקות זהו זמן ארוך שאינו מתאים לפתרון בזמן אמת, אך כאן נבחן מודל דטרמיניסטי בלבד. בהמשך נראה כיצד

באמצעות ההתאמות ושימוש באופק המתגלגל ניתן לפתור את הבעיות בזמן קצר יותר (יש לציין שהפתרון המתקבל באמצעות האופק המתגלגל הינו פתרון היוריסטי).

5.2.2. פרמטרים נוספים

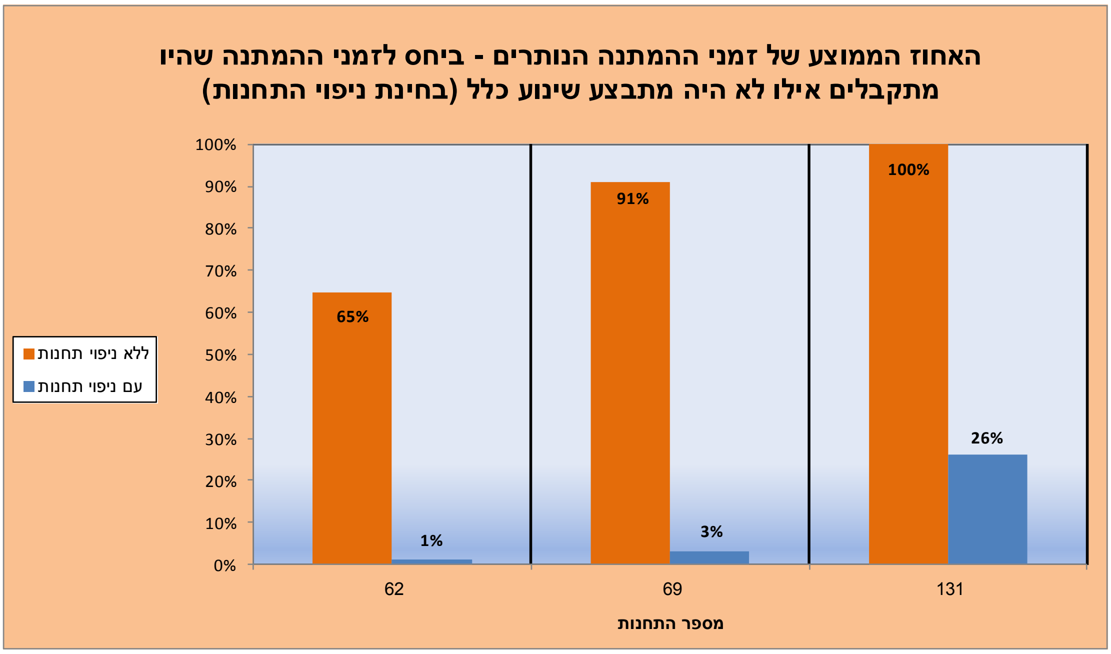
- נקבע שמשך הזמן של תקופה אחת הוא 5 דק' (300 שניות), וכן:
  - $T' = 36$ תקופות $= 3$ שעות
  - $T'' = 72$ תקופות $= 6$ שעות
- $\alpha = 0$ – עלויות הנסיעה נבחרו להיות אפס משום שהן עלויות שקועות בבעיה שבה אנחנו מטפלים (ר' הסבר בסעיף 4.4.5).
- $h = 2$ - בשל עלות החוסר הגבוהה בעמדת עגינה לעומת עלות החוסר באופניים (כמתואר בסעיף 4.4.5, משום שעבור מחזירים העומדים בפני חוסר בעמדת עגינה אין חלופה של נטישת המערכת ולכן הם מעמיסים עליה יותר מאשר השוכרים).
- $\gamma = 0$ - מלאי הביטחון נבחר להיות אפס משום שכעת אנחנו מטפלים בבעיה דטרמיניסטית.
- פונקציית היוון שמגדירה את המשקלות של מספר הממתינים בכל תקופה. עבור האופק שבו לא מתוכנן שינוע (תקופות [T'+1]..T" באיור 6) - ככל שהתקופה t קרובה יותר, כך המשקל גבוה יותר (ר' סעיף 4.6.1):
  - $\beta(t) = 0.99^t\ ;\ \forall t > T'$
  - $\beta(t) = 1\ ;\ \forall t \le T'$

5.2.3. ניפוי התחנות ומחיקת הקשתות

בחנו את ההשפעה של ניפוי תחנות ומחיקת קשתות לפני ריצת מודל האופטימיזציה, באופן שתואר בסעיף 4.8. ניפוי התחנות מתבצע על סמך הביקוש החזוי ב-6 השעות הקרובות, ומנופות התחנות שכמות האופניים בהן אינה צפויה לחרוג מגבולות מסוימים במהלך תקופת הזמן הזו. הגבולות שנבחרו עבור ניפוי התחנות: ב-3 השעות הראשונות נלקח גבול נוקשה יותר של 3 זוגות אופניים בתחנה (או מלאי של קיבולת התחנה פחות 3 זוגות), וב-3 השעות המאוחרות יותר נלקח גבול של 2 זוגות אופניים בתחנה (או מלאי של קיבולת התחנה פחות 2 זוגות).
מחיקת הקשתות בניסוי זה התבצעה ברובה על בסיס 0%, כלומר מחיקת קשתות שאורך נסיעה עליהן זהה לאורך נסיעה על פני שתי קשתות אחרות (ר' סעיף 4.8.2). זאת למעט בעיות שהכילו 131 תחנות, בהן לא ניתן היה לפתור את הבעיה על בסיס 0% מחיקת קשתות, ולכן עבור בעיות אלה נבחרה מחיקת קשתות על בסיס 20% (דיון במחיקת הקשתות מופיע בסעיף 4.8.2).

איור 9 מציג את תוצאות הניסוי לגבי ההשפעה של ניפוי התחנות עבור 24 תרחישים בעלי סט נתוני ביקוש ומלאי התחלתי שונה מתרחיש לתרחיש. התרחישים מייצגים 8 תסריטי ביקוש שונים עבור כל אחד משני האזורים שתוארו ועבור האזור המכיל את כל התחנות בעיר. בתרשים מוצג האחוז הממוצע של זמני ההמתנה הנותרים ביחס לזמני ההמתנה שהיו מתקבלים אילו לא

היה מתבצע שינוע כלל. עבור כל אזור, הגרף עורך השוואה בין האחוז הממוצע הנותר מזמני ההמתנה בהרצות שונות – ללא ניפוי תחנות, עם ניפוי תחנות.



איור 9: בחינת ניפוי התחנות.
האחוז הממוצע של זמני ההמתנה הנותרים ביחס לזמני ההמתנה כאשר לא מתבצע שינוע כלל

על פי האיור ניתן לראות כי כאשר מנפים תחנות ניתן להשיג פתרונות טובים באופן משמעותי מאשר ללא ניפוי תחנות. עבור 131 תחנות, כלל לא ניתן היה לפתור את הבעיה ללא ניפוי התחנות.

בטבלה 2 מוצגות תוצאות ניסוי בחינת האפקטיביות של שיטת ניפוי התחנות באופן מפורט יותר. בעמודות הראשונה והשנייה משמאל מוצגים מספר התרחיש ומספר התחנות בבעיה, בהתאמה. בעמודה השלישית מוצג אחוז מחיקת הקשתות. בעמודות 4-7 (8-11) מוצגים הנתונים עבור פתרון ללא (עם) ניפוי התחנות – ערך הפתרון, מספר ואחוז הקשתות שנותרו, משך זמן הריצה בשניות, בהתאמה. בעמודה 12 מוצג ערך הפתרון המתקבל כאשר לא מתבצע שינוע כלל. בעמודות 13-14 מוצגים החסם התחתון וערך הפתרון שהתקבלו מריצה של עד 12 שעות ללא ניפוי התחנות (חלק מהבעיות נפתרו לאופטימום בזמן קצר יותר). המטרה היא לקבל חסם תחתון תקף לבעיה, משום שעבור הפתרון שהתקבל באמצעות ניפוי התחנות – לא ניתן לבחון את הפער מהחסם התחתון על סמך החסם התחתון שהתקבל באותה הריצה, שכן ניפוי התחנות עשוי לבטל פתרונות אפשריים שבהם התחנות שנופו יכולות היו לשמש כתחנות ביניים לצורך העברות בין תחנות אחרות (Transshipments). בעמודת ערך הפתרון מסומנת כוכבית כאשר ערך הפתרון הוא הטוב ביותר שהתקבל עבור המופע. לבסוף, בעמודה האחרונה מוצג מספר המשתמשים שלקחו חלק בתרחיש.

יש לציין כי ערכי הפתרון עבור זמני ההמתנה שהתקבלו כפלט מהמודל הם אינם מדד מדויק לזמן ההמתנה של המשתמשים, משום שמדובר בבעיה שבפועל היא איננה דטרמיניסטית, אך גם משום פונקציית ההיוון (Discount) על העתיד ומשום המשקל השונה שניתן לחוסר בעמודות עגינה

לעומת חוסר בזוגות אופניים. בנוסף, יש לזכור כי הרזולוציה של המודל היא איננה זמן רציף, אלא בתקופת זמן בדידות. עם זאת, נבחן בהמשך כיצד מתפקד המודל בסביבה הסטוכסטית ונראה כיצד הוא משפר את פונקציית המטרה האמיתית במערכת. לצורך הדיון, היחידות של ערכי הפתרון המוצגים בטבלה הן בדקות (לאחר הכפלה ב-5, משום שכל תקופת המתנה מייצגת 5 דקות המתנה).

הערות ומסקנות מהניסוי:

- ניתן לראות **שניפוי התחנות** מסייע לקבלת תוצאות טובות יותר ולשיפור משמעותי של זמן השגת הפתרון.
- כאמור, עבור הפתרון שהתקבל באמצעות ניפוי התחנות – לא ניתן לבחון את הפער מהחסם התחתון על סמך החסם התחתון שהתקבל באותה הריצה ולכן מוצג בטבלה 2 בעמודות 13-14 ערך הפתרון והחסם התחתון שהתקבל מריצה של 12 שעות ללא ניפוי התחנות. עבור 87% מהמקרים - המודל עם ניפוי התחנות סיפק ב-25 דקות תוצאה טובה יותר (או שווה) מאשר הפתרון הטוב ביותר שהתקבל מריצה של 12 שעות ללא ניפוי התחנות. בעמודת ערך הפתרון שהתקבל באמצעות ניפוי התחנות ב-25 דקות (עמודה 8), מסומנות כוכביות במקרים שבהם הפתרון שהתקבל טוב יותר או שווה לפתרון שהתקבל בזמן ריצה של 12 שעות. בבעיות שלא נפתרו לאופטימום, התקבלו חסמים תחתונים חלשים.
- **החלוקה לאזורים** מאפשרת להשיג פתרונות שלא ניתן לקבל ללא חלוקת האזורים, בשל הקושי החישובי של בעיה בעלת מספר רב של תחנות.

על בסיס המסקנות הללו נבחר כיצד להפעיל את המודל במערכת בזמן אמת (ראה פרק 7 הדן בהפעלת הסימולציה כהדמיית המציאות).

טבלה 2: תוצאות ניסוי בחינת האפקטיביות של שיטת ניפוי התחנות

Inst.	מספר התחנות	% מחיקת קשתות	ללא ניפוי תחנות				עם ניפוי תחנות				ללא שינוע	ללא ניפוי תחנות, 12 שעות ריצה		מספר המשתמשים
			ערך הפתרון (דקות המתנה)	קשתות שנותרו לאחר 0% מחיקת קשתות	אחוז קשתות שנותרו	זמן ריצה (שניות)	ערך הפתרון (דקות המתנה)	קשתות שנותרו לאחר ניפוי תחנות ו-0% מחיקת קשתות	אחוז קשתות שנותרו	זמן ריצה (שניות)		חסם תחתון	ערך הפתרון (דקות המתנה)	
1	62	0%	1523.70	1479	38%	1500	0.00*	213	0.06	347	1541.65	0.00	1461.11	163
2	62	0%	4.25	1479	38%	1500	0.00*	170	0.04	158	163.67	0.00	2.54	211
3	62	0%	227.75	1479	38%	1500	0.00*	81	0.02	48	552.91	0.00	0.00	437
4	62	0%	1963.41	1479	38%	1500	125.06	230	0.06	1500	3400.57	9.64	100.47	524
5	62	0%	297.28	1479	38%	1500	0.19*	257	0.07	737	954.68	0.19	0.19	636
6	62	0%	5099.88	1479	38%	1500	0.00*	184	0.05	478	6658.47	0.00	1579.91	745
7	62	0%	2396.94	1479	38%	1500	106.13*	264	0.07	1500	4670.50	0.00	935.78	664
8	62	0%	1068.48	1479	38%	1500	0.35*	164	0.04	373	1492.12	0.12	2.25	420

Inst.	מספר התחנות	% מחיקת קשתות	ללא ניפוי תחנות				עם ניפוי תחנות				ללא שינוע	ללא ניפוי תחנות, 12 שעות ריצה		מספר המשתמשים
			ערך הפתרון (דקות המתנה)	קשתות שנותרו לאחר 0% מחיקת קשתות	אחוז קשתות שנותרו	זמן ריצה (שניות)	ערך הפתרון (דקות המתנה)	קשתות שנותרו לאחר ניפוי תחנות ו-0% מחיקת קשתות	אחוז קשתות שנותרו	זמן ריצה (שניות)		חסם תחתון	ערך הפתרון (דקות המתנה)	
1	69	0%	2389.68	1705	36%	1500	0.00*	52	0.01	14	2389.68	0.00	183.46	153
2	69	0%	4.53	1705	36%	1500	0.00*	20	0.00	12	4.53	0.00	0.00	295
3	69	0%	503.31	1705	36%	1500	0.00*	91	0.02	43	503.31	0.00	401.95	552
4	69	0%	2774.37	1705	36%	1500	44.15*	294	0.06	1500	3353.63	3.05	427.13	572
5	69	0%	111.38	1705	36%	1500	1.04	106	0.02	49	111.38	0.35	0.35	698
6	69	0%	336.36	1705	36%	1500	0.00*	174	0.04	44	385.16	0.00	91.80	911
7	69	0%	2381.03	1705	36%	1500	62.37*	256	0.05	1500	2669.67	3.49	1368.82	821
8	69	0%	700.49	1705	36%	1500	216.36	141	0.03	102	700.49	0.00	0.00	446

מספר המשתמשים	ללא ניפוי תחנות, 12 שעות ריצה		ללא שינוע	עם ניפוי תחנות				ללא ניפוי תחנות				% מחיקת קשתות	מספר התחנות	Inst.
	ערך הפתרון (דקות המתנה)	חסם תחתון		זמן ריצה (שניות)	אחוז קשתות שנותרו	קשתות שנותרו לאחר ניפוי תחנות ו-20% מחיקת קשתות	ערך הפתרון (דקות המתנה)	זמן ריצה (שניות)	אחוז קשתות שנותרו	קשתות שנותרו לאחר 20% מחיקת קשתות	ערך הפתרון (דקות המתנה)			
315	906.12	0.00	3931.33	868	0.01	183	0.00*	1500	9%	1511	-	20%	131	1
506	4.83	0.00	168.20	455	0.01	140	0.00*	1500	9%	1511	-	20%	131	2
988	1056.22	0.00	1056.22	830	0.01	166	0.00*	1500	9%	1511	-	20%	131	3
1095	-	0	6754.20	1500	0.02	391	4156.60*	1500	9%	1511	-	20%	131	4
1333	397.48	1.24	1066.06	1500	0.02	267	61.57*	1500	9%	1511	-	20%	131	5
1655	2244.92	0.00	7043.63	1500	0.02	278	472.58*	1500	9%	1511	-	20%	131	6
1485	6178.61	1.92	7340.17	1500	0.02	373	2776.14*	1500	9%	1511	-	20%	131	7
867	1142.48	0.50	2192.61	1500	0.02	279	296.89*	1500	9%	1511	-	20%	131	8

5.3. <u>ניסוי 2 – בחינת האפקטיביות של מחיקת הקשתות</u>

בניסוי זה נבחנה האפקטיביות של מחיקת הקשתות ובוצעה השוואה בין אחוזי מחיקת קשתות שונים של 0%, 10% ו-20%. פרט למחיקת הקשתות הפרמטרים של הניסוי זהים לניסוי 1 וכוללים ניפוי תחנות.

מחיקת קשתות באחוז גבוה מ-0% היא היוריסטיקה המקטינה את קבוצת הפתרונות האפשריים ועלולה להביא להוצאת הפתרונות האופטימאליים מקבוצה זו. מצד שני, היא מאפשרת הקטנה של ממד הבעיה ועל ידי כך מציאה של פתרון טוב יותר במאמץ חישובי נתון.

טבלה 3 מציגה את תוצאות ניסוי בחינת האפקטיביות של מחיקת הקשתות. בעמודה הראשונה משמאל מוצג מספר התרחיש. בעמודות 2-6 מוצגות התוצאות עבור פתרון עם 0% מחיקת קשתות – מספר הקשתות שנותרו, החסם התחתון, ערך הפתרון, הפער של ערך הפתרון מהחסם התחתון המתקבל מריצה של 12 שעות, משך זמן הריצה בשניות. בעמודות 7-11 (12-17) מוצגות התוצאות עבור פתרון עם 10% (20%) מחיקת קשתות.

יש להעיר כי בבעיות בהן מתבצע ניפוי תחנות או בבעיות בהן מחיקת הקשתות היא באחוז גבוה מ-0% החסמים התחתונים שהתקבלו מהמודל המתמטי הם אינם חסמים תחתונים תקפים למודל ללא מחיקת הקשתות, שכן ניפוי התחנות ומחיקת הקשתות עשויים לבטל פתרונות אפשריים (בדומה לניסוי 1 עם ניפוי התחנות).

הערות ומסקנות מהניסוי:

- על פי הממוצע, מחיקת קשתות של 10% היא הטובה ביותר, אך לא ניתן להכריע באופן חד משמעי שזהו אחוז המחיקה הטוב ביותר, שכן רק בחלק מהמקרים הוא היה טוב מהאחרים.
- ההמלצה היא לבחון עבור כל מערכת את אחוז המחיקה היעיל. ייתכן שבמערכות שונות בעלות מבנה ובעלות עומס שונה יתקבל אחוז מחיקת קשתות שונה כאחוז הטוב ביותר, ויש לבחון כל מקרה לגופו. בפרט יש לבחור באחוז מחיקה שיאפשר קבלת פתרון אפשרי.
- ניתן לראות מהתוצאות שבמקרים מסוימים ניתן להשתמש גם במודל מלא (ללא אופק מתגלגל) לפתרון הבעיה, משום שישנם תרחישים שבהם, בעזרת מחיקת הקשתות וניפוי התחנות מתקבל פתרון מהיר גם למודל המלא.

טבלה 3: תוצאות ניסוי בחינת האפקטיביות של שיטת מחיקת הקשתות

69 תחנות														
Inst.	ניפוי תחנות, 0% מחיקת קשתות				ניפוי תחנות, 10% מחיקת קשתות					ניפוי תחנות, 20% מחיקת קשתות				
	קשתות שנותרו	ערך הפתרון	זמן הריצה (שניות)	פער מפתרון 12 שעות	קשתות שנותרו	חסם תחתון	ערך הפתרון	פער מפתרון 12 שעות	זמן הריצה (שניות)	קשתות שנותרו	חסם תחתון	ערך הפתרון	פער מפתרון 12 שעות	זמן הריצה (שניות)
1	52	0.00	14	0.00	48	0.00	0.00	0.00	18	37	0.00	0.00	0.00	13
2	20	0.00	12	0.00	19	0.00	0.00	0.00	12	17	0.00	0.00	0.00	12
3	91	0.00	43	0.00	84	0.00	0.00	0.00	14	64	0.00	0.00	0.00	14
4	294	44.15	1500	0.93	264	3.41	8.61*	0.65	1500	186	6.10	36.97	0.92	1500
5	106	1.04	49	0.67	93	1.04	1.04	0.67	53	64	1.04	1.04	0.67	64
6	174	0.00	44	0.00	145	0.00	0.00	0.00	118	97	0.00	0.00	0.00	23
7	256	62.37	1500	0.94	218	3.49	3.49*	0.00	903	135	3.49	3.49*	0.00	452
8	141	216.36	102	1.00	117	216.36	216.36	1.00	16	86	216.36	216.36	1.00	51
Avg		40.49					28.69					32.23		

62 תחנות														
Inst.	ניפוי תחנות, 0% מחיקת קשתות				ניפוי תחנות, 10% מחיקת קשתות					ניפוי תחנות, 20% מחיקת קשתות				
	קשתות שנותרו	ערך הפתרון	זמן הריצה (שניות)	פער מפתרון 12 שעות	קשתות שנותרו	חסם תחתון	Best	פער מפתרון 12 שעות	זמן הריצה (שניות)	קשתות שנותרו	חסם תחתון	ערך הפתרון	פער מפתרון 12 שעות	זמן הריצה (שניות)
1	213	0.00	347	0.00	160	0.00	0.00	0.00	15	109	0.00	0.00	0.00	136
2	170	0.00	158	0.00	138	0.00	0.00	0.00	70	91	0.00	0.00	0.00	13
3	81	0.00	48	0.00	76	0.00	0.00	0.00	29	55	0.00	0.00	0.00	18
4	230	125.06	1500	0.92	185	12.41	26.62*	0.64	1500	129	14.47	55.23	0.83	1500
5	257	0.19	737	0.00	210	0.19	0.19	0.00	1352	144	0.19	0.19	0.00	535
6	184	0.00	478	0.00	153	0.00	0.00	0.00	964	114	0.00	0.00	0.00	369
7	264	106.13	1500	1.00	225	0.00	103.74*	1.00	1500	155	0.00	156.96	1.00	1500
8	164	0.35	373	0.67	140	0.35	0.35	0.67	239	106	0.35	0.35	0.67	156
Avg		28.97					16.36					26.59		

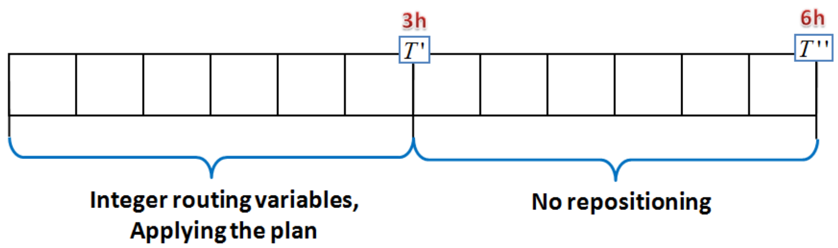
5.4. <u>ניסוי 3 – בחינת האופק המתגלגל</u>

בניסוי זה השווינו את תפקודו של מודל מלא ללא ביצוע התאמות שונות למודל עם אופק מתגלגל.

5.4.1. <u>מודל מלא</u>

כל הפרמטרים בניסוי הם בדומה לניסוי 1. משך הריצה - 25 דקות.

הפתרון שמתקבל עבור 3 השעות הראשונות - נועד ליישום (איור 10).



איור 10: אופן הפתרון של המודל המלא

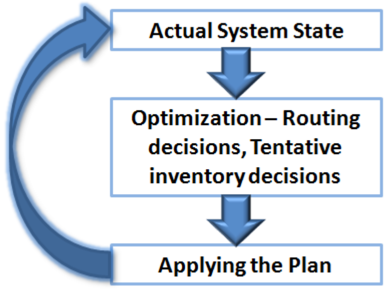
5.4.2. <u>מודל מתגלגל</u>

מטרת הניסוי הינה לבחון את המודל המתגלגל. כל הפרמטרים בניסוי עבור מודל זה הם זהים למודל המלא לצורך השוואת תנאי הניסוי.

אופק התכנון הינו 6 שעות. את המודל המלא מריצים ריצה אחת מלאה במשך 25 דקות ובה הפתרון שמתקבל עבור 3 השעות הראשונות נועד ליישום. לעומת זאת, המודל המתגלגל נפתר ב-5 הרצות עוקבות שנמשכות 5 דקות כל אחת, כאשר מתבצעת התרה חלקית בדומה למתואר בסעיף 4.7.2.

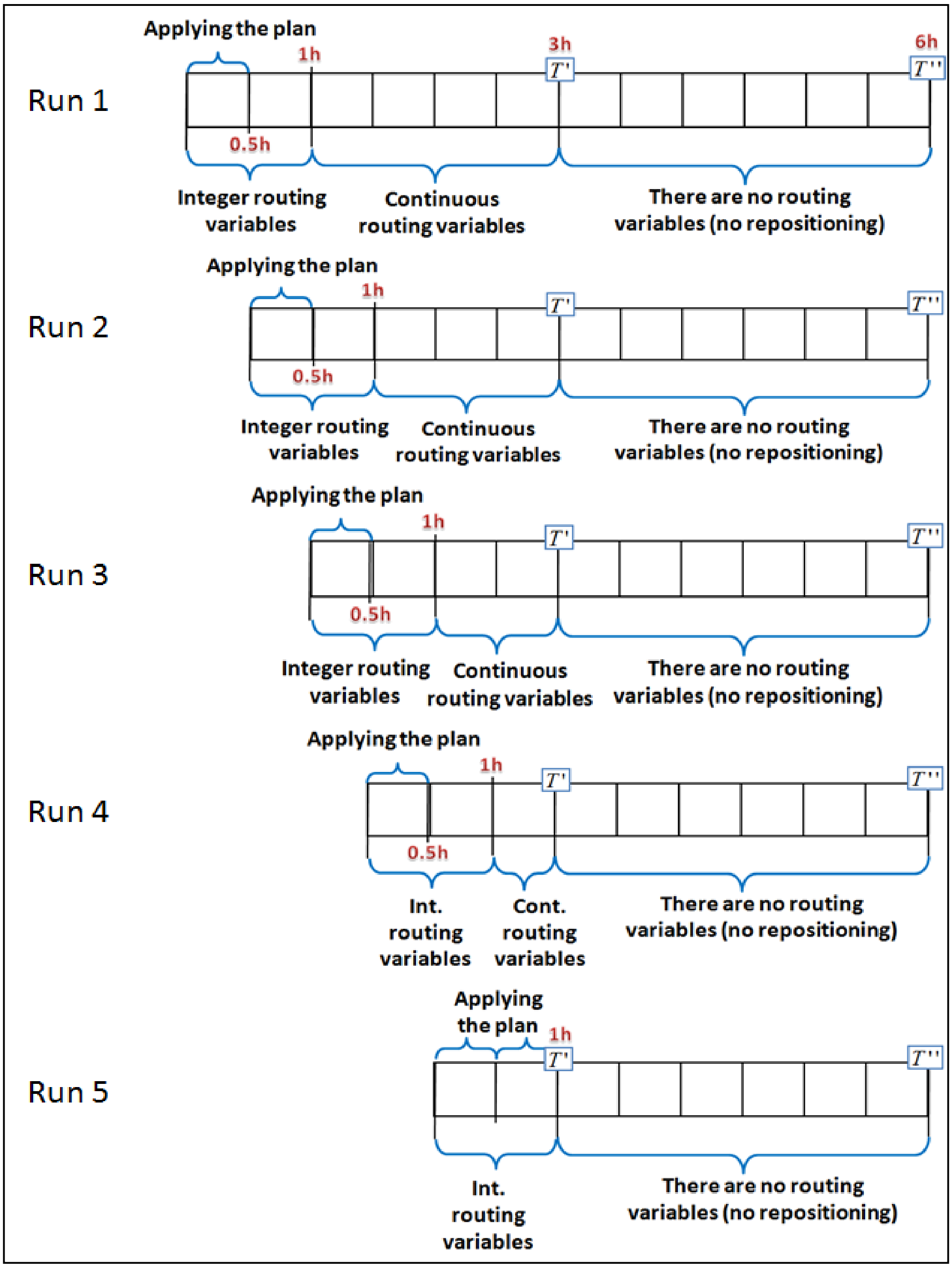
הפתרון שמתקבל עבור חצי השעה הראשונה (אופק הביצוע) הוא זה שנועד ליישום וההנחה לצורך הניסוי היא שהתוכנית שתוכננה עבור חצי השעה הראשונה אכן יצאה לפועל כפי שתוכננה והביקוש היה תואם לתוחלת הביקוש במהלך התקופה. בהתאם לכך, המלאי בתחנות (והממתינים בהן) בתום חצי השעה הוא כפי שתוכנן והוא מוזן, יחד עם מיקום הרכב ורמת המלאי שבו, כתנאי התחלה אל הריצה הבאה (איור 11). המחשה לאופן הרצת המודל המתגלגל בניסוי זה ניתן לראות באיור 12.

יש להדגיש כי פתרון המודל המלא במשך 25 דקות הוא איננו מעשי, שכן זהו זמן ארוך ובמהלך החישוב מתקיימים שינויים במצב המערכת שעלולים להוביל לכך שהתוכנית לא תהיה רלוונטית עוד. לעומת זאת, פיצול החישוב ל-5 דקות פתרון בכל פעם מאפשר ליישם את התוכנית בפרק הזמן הקרוב ובהפעלת המודל בזמן אמת במערכת אמיתית ניתן גם לעדכן בכל ריצה את תנאי ההתחלה של המערכת בהתאם למה שהתרחש בפועל (בשונה מהמודל המלא שמתייחס ל-3 השעות הקרובות כאילו הן יתרחשו כולן בהכרח על פי התחזית). בנוסף, ניתן לתזמן את ריצת המודל לזמן שבו המשנע מתעכב בתחנה על מנת לפרוק או לטעון זוגות אופניים.



איור 11: הזנת תנאי התחלה במודל המתגלגל.

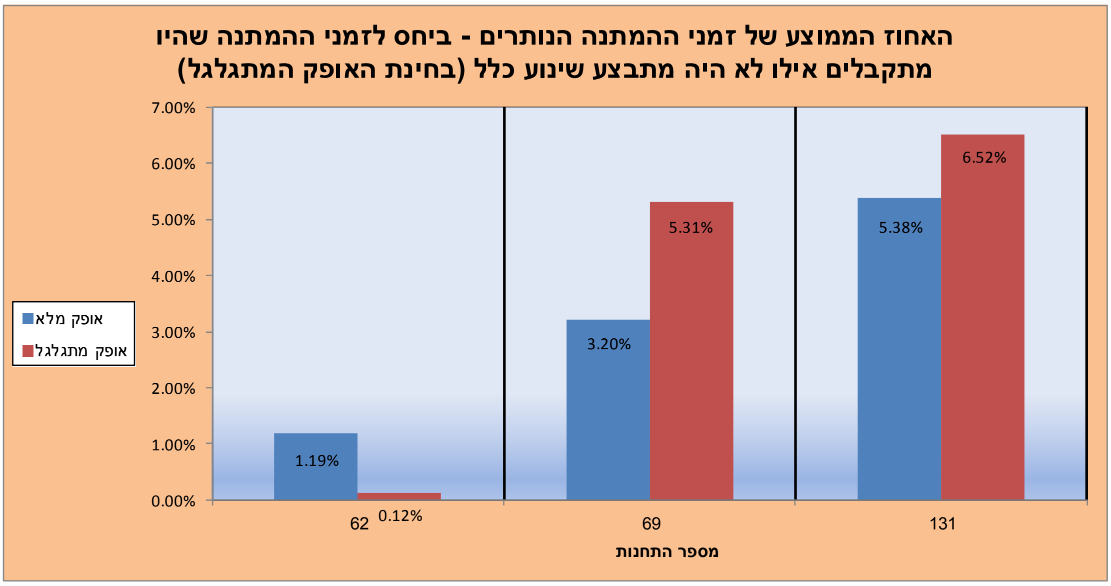
מצב המערכת מוזן בתום כל ריצה כתנאי התחלה לריצה הבאה



איור 12: הרצת המודל המתגלגל ב-5 הרצות עוקבות.

את המודל המלא מריצים ריצה אחת מלאה ובה הפתרון עבור 3 השעות הראשונות נועד ליישום. לעומת זאת, המודל המתגלגל נפתר ב-5 הרצות עוקבות

איור 13 מציג את תוצאות הניסוי עבור התרחישים שנבחנו. בתרשים מוצג האחוז הממוצע של זמני ההמתנה הנותרים ביחס לזמני ההמתנה שהיו מתקבלים אילו לא היה מתבצע שינוע כלל, עבור המודל המלא ועבור המודל עם האופק המתגלגל.



איור 13: בחינת המודל עם האופק המתגלגל
האחוז הממוצע של זמני ההמתנה הנותרים ביחס לזמני ההמתנה כאשר לא מתבצע שינוע כלל

בטבלה 4 מוצגות תוצאות ניסוי בחינת שיטת האופק המתגלגל. בעמודות הראשונה והשנייה משמאל מוצגים מספר התרחיש ומספר התחנות בבעיה. בעמודה השלישית מוצג אחוז מחיקת הקשתות. בעמודות 4-7 (8-11) מוצגים הנתונים עבור פתרון מודל עם אופק מתגלגל (מודל מלא) – ערך הפתרון, מספר/אחוז הקשתות שנותרו, משך זמן הריצה בשניות. בעמודה 12 מוצג ערך הפתרון המתקבל כאשר לא מתבצע שינוע כלל.

בדומה לניסוי 1, עבור הפתרון שהתקבל באמצעות ניפוי התחנות – לא ניתן לבחון את הפער מהחסם התחתון על סמך החסם התחתון שהתקבל באותה הריצה ולכן מוצגים בטבלה בעמודות 13-14 ערך הפתרון והחסם התחתון שהתקבל מריצה של 12 שעות ללא ניפוי התחנות. בעמודה האחרונה מוצגים מספר המשתמשים שלקחו חלק בתרחיש.

הערות ומסקנות מהניסוי:

- מתוך 24 התרחישים השונים – האופק המתגלגל לא הצליח להגיע לפתרון ב-2 מקרים בלבד, בבעיות בהן היו 131 תחנות. הגרף שהוצג באיור 13 מתייחס רק למקרים שבהם האופק המתגלגל הצליח לפתור.

- חשוב לציין שכאשר אין פתרון בשיטת האופק המתגלגל, תקציב זמן נוסף לפתרון הבעיה הוא אינו מעשי. פתרון המודל המלא משמש אותנו כאן לצורך השוואה, אך לא ניתן ליישמו בפועל.
- ב-59% מהמקרים הפתרון שהתקבל באמצעות האופק המתגלגל היה טוב יותר מהפתרון שהתקבל ע"י המודל המלא. ב-78% אחוז משאר המקרים ההפרש בפונקציות המטרה לא עלה על סך כולל של 7 דקות (פחות מ-2 שניות למשתמש). ב-22% הנותרים ההפרש עמד על כ-20 שניות למשתמש. כאמור, המודל המלא אינו ישים בפועל, אך ההשוואה כאן מלמדת שאין הרעה משמעותית בשימוש בפתרונות שמתקבלים מהמודל המתגלגל.
- ב-79% מהמקרים האופק המתגלגל הגיע לפתרון אופטימאלי לאחר זמן קצר יותר מהזמן המוקצב. יש להעיר כי גם במקרה שבו האופק המתגלגל מגיע לאופטימום, אין מדובר באופטימום של המודל הדטרמיניסטי.

טבלה 4: תוצאות ניסוי בחינת האופק המתגלגל

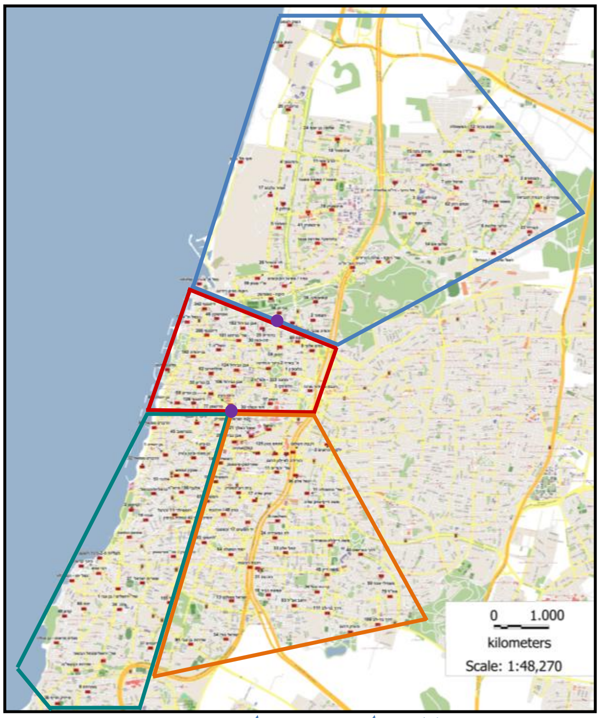
מספר המשתמשים	מודל מלא, ללא ניפוי תחנות, 12 שעות ריצה		ללא שינוע	מודל מלא, עם ניפוי תחנות				מודל מתגלגל, עם ניפוי תחנות				% מחיקת קשתות	מספר התחנות	Inst.
	ערך הפתרון (דקות המתנה)	חסם תחתון		זמן ריצה (שניות)	אחוז קשתות שנותרו	קשתות שנותרו לאחר ניפוי תחנות ו-0% מחיקת קשתות	ערך הפתרון (דקות המתנה)	זמן ריצה (שניות)	אחוז קשתות שנותרו	קשתות שנותרו לאחר 0% מחיקת קשתות	ערך הפתרון (דקות המתנה)			
163	1461.11	0.00	1541.65	347	0.06	213	0.00	452	6%	213	0.00	0%	62	1
211	2.54	0.00	163.67	158	0.04	170	0.00	56	4%	170	0.00	0%	62	2
437	0.00	0.00	552.91	48	0.02	81	0.00	39	2%	81	0.00	0%	62	3
524	100.47	9.64	3400.57	1500	0.06	230	125.06	799	6%	230	14.72*	0%	62	4
636	0.19	0.19	954.68	737	0.07	257	0.19*	400	7%	257	4.80	0%	62	5
745	1579.91	0.00	6658.47	478	0.05	184	0.00*	156	5%	184	5.00	0%	62	6
664	935.78	0.00	4670.50	1500	0.07	264	106.13	1503	7%	264	5.00*	0%	62	7
420	2.25	0.12	1492.12	373	0.04	164	0.35*	274	4%	164	3.33	0%	62	8

מספר המשתמשים	מודל מלא, ללא ניפוי תחנות, 12 שעות ריצה		ללא שינוע	מודל מלא, עם ניפוי תחנות				מודל מתגלגל, עם ניפוי תחנות				% מחיקת קשתות	מספר התחנות	Inst.
	ערך הפתרון (דקות המתנה)	חסם תחתון		זמן ריצה (שניות)	אחוז קשתות שנותרו	קשתות שנותרו לאחר ניפוי תחנות ו-0% מחיקת קשתות	ערך הפתרון (דקות המתנה)	זמן ריצה (שניות)	אחוז קשתות שנותרו	קשתות שנותרו לאחר 0% מחיקת קשתות	ערך הפתרון (דקות המתנה)			
153	183.46	0.00	2389.68	14	0.01	52	0.00*	46	1%	52	6.87	0%	69	1
295	0.00	0.00	4.53	12	0.00	20	0.00*	38	0%	20	0.00*	0%	69	2
552	401.95	0.00	503.31	43	0.02	91	0.00*	51	2%	91	0.00*	0%	69	3
572	427.13	3.05	3353.63	1500	0.06	294	44.15*	1503	6%	294	283.50	0%	69	4
698	0.35	0.35	111.38	49	0.02	106	1.04	57	2%	106	1.04	0%	69	5
911	91.80	0.00	385.16	44	0.04	174	0.00*	81	4%	174	0.00*	0%	69	6
821	1368.82	3.49	2669.67	1500	0.05	256	62.37	1503	5%	256	28.63*	0%	69	7
446	0.00	0.00	700.49	102	0.03	141	216.36	67	3%	141	217.27	0%	69	8

מספר המשתמשים	מודל מלא, ללא ניפוי תחנות, 12 שעות ריצה		ללא שינוע	מודל מלא, עם ניפוי תחנות				מודל מתגלגל, עם ניפוי תחנות				% מחיקת קשתות	מספר התחנות	Inst.
	ערך הפתרון (דקות המתנה)	חסם תחתון		זמן ריצה (שניות)	אחוז קשתות שנותרו	קשתות שנותרו לאחר ניפוי תחנות ו-20% מחיקת קשתות	ערך הפתרון (דקות המתנה)	זמן ריצה (שניות)	אחוז קשתות שנותרו	קשתות שנותרו לאחר 20% מחיקת קשתות	ערך הפתרון (דקות המתנה)			
315	906.12	0.00	3931.33	868	0.01	183	0.00*	812	1%	183	0.73	20%	131	1
506	4.83	0.00	168.20	455	0.01	140	0.00*	184	1%	140	0.00*	20%	131	2
988	1056.22	0.00	1056.22	830	0.01	166	0.00*	262	1%	166	0.95	20%	131	3
1095	-	0.00	6754.20	1500	0.02	391	4156.60*	-	2%	391	-	20%	131	4
1333	397.48	1.24	1066.06	1500	0.02	267	61.57	1271	2%	267	12.76*	20%	131	5
1655	2244.92	0.00	7043.63	1500	0.02	278	472.58	859	2%	278	388.48*	20%	131	6
1485	6178.61	1.92	7340.17	1500	0.02	373	2776.14	-	2%	373	-	20%	131	7
867	1142.48	0.50	2192.61	1500	0.02	279	296.89*	770	2%	279	605.68	20%	131	8

5.5. ניסויים נוספים

בסעיף זה נדון בניסויים נוספים שבוצעו על נתוני מערכת תל-אופן בה קיימת חלוקת העיר לארבעה אזורים המשורתים כל אחד על ידי רכב יחיד. חלוקת העיר לאזורים מאפשרת תפעול קל יותר של המערכת וניהול נוח יותר של פעילות המשנעים ממרכז הבקרה. יש להזכיר כי החלוקה לאזורים עלולה ליצור מצב של חוסר איזון בביקוש בכל אזור, ואי יכולת לאזן ע״י העברה בין אזורים, ולפיכך הוצבו מחסני ביניים בין האזורים. באיור 14 ניתן לראות את החלוקה לאזורים ואת מיקום המחסנים ביניהם. האזור הצפוני כולל 39 תחנות, האזור הדרום-מזרחי כולל 30 תחנות, האזור הדרום-מערבי כולל 31 תחנות ואזור המרכז כולל 29 תחנות. בנוסף, ישנם שני מחסני ביניים שהוצבו בין האזורים הקיצוניים לבין אזור המרכז. הבעיות הורצו בניסוי זה עם מגבלת זמן של 1500 שניות (25 דקות), אולם חלק מהבעיות נפתרו בזמן קצר יותר.



איור 14: חלוקת העיר לארבעה אזורים

הערות ומסקנות מהניסוי:

- מתוך 32 התרחישים השונים – כל התרחישים נפתרו ע״י המודל המתגלגל, ב-93% התקבל פתרון אופטימאלי בזמן קצר יותר מהזמן המוקצב (לעומת 79% בניסוי הקודם). יש להזכיר כי גם במקרה שבו האופק המתגלגל מגיע לאופטימום, אין מדובר בהכרח באופטימום של המודל הדטרמיניסטי.
- ב-75% מהמקרים, הפתרון שהתקבל מהמודל המתגלגל היה זהה לפתרון האופטימאלי של המודל הדטרמיניסטי המלא.
- בבעיות קטנות השימוש בשיטת ניפוי התחנות מיתרת את הצורך במחיקת קשתות באחוז גבוה מ-0%.

6. שיטות פתרון המבוססות על כללי שילוח (Dispatching Rules)

כלל שילוח (Dispatching Rule) הוא כלל שמתעדף את המשימות הממתינות לביצוע עבור משנע. בכל פעם שהמשנע מסיים משימה ומתפנה, כלל השילוח בוחן את המשימות הממתינות ובוחר את המשימה בעלת העדיפות הגבוהה ביותר לביצוע ע״י המשנע.
המוטיבציה העיקרית לשימוש בשיטות פתרון המבוססות על כללי שילוח היא הפשטות היחסית ביישום השיטות הללו.

שיטה המבוססת על מודל תכנות מתמטי מצריכה חישוב מורכב, רכישת רישיון למערכת מתאימה והטמעה במערכת המידע של המפעיל. בנוסף, מפעילי המערכת שאינם בקיאים ברזי התכנות המתמטי, עשויים להתקשות בהבנת המודל ולפיכך משימת ההטמעה עשויה להיות מורכבת יותר.

כיום מפעילי המערכות לשיתוף אופניים עושים שימוש בכללי שילוח קצרי רואי הפשוטים ליישום ולמעשה פועלים בגישה של ״כיבוי שרפות״.
בפרק זה נציג כללים מתוחכמים יותר המנצלים את יתרון הפשטות של כללי השילוח, אך עושים שימוש גם ביכולת לחזות ולאמוד את הביקוש הצפוי ולספק לו מענה באופן פרו-אקטיבי.
לצורך השוואה ובחינת שיטות הפתרון המוצעות נציג בנוסף כללים המדמים את גישת התפעול הנוכחית.

השיטות המוצגות כאן, המבוססות על כללי שילוח כוללות שני ממדי החלטה – החלטה לגבי התחנה הבאה במסלול עבור רכב השינוע, והחלטה עבור הכמות שיש לפרוק או לטעון בתחנה שאליה צפוי להגיע הרכב.

ראשית, נציג את המאפיינים של השיטות המבוססות על כללי שילוח ולאחר מכן נמחיש כיצד ליישם אותם בשיטות הפתרון. בפרקים 7-8 הדנים בסימולציה, נשווה בין השיטות השונות ונבחן מהם המאפיינים המייחדים את השיטות המספקות את הפתרונות הטובים ביותר.

6.1. מאפיינים של שיטות המבוססות על כללי שילוח

6.1.1. חלוקה לאזורים

במערכות להשכרת אופניים כמו מערכת השכרת האופניים בתל-אביב, קיימת מדיניות תפעולית של חלוקה לאזורים, כאשר בכל אזור פועל כלי רכב משנע יחיד. חלוקה זו נובעת לעתים ממבנה ניהולי של המערכת וזוהי גישה נוחה מבחינה תפעולית. החסרון שעלול להיווצר כתוצאה מגישה זו היא שלא יתאפשר שינוע של אופניים בין האזורים, ולכן דרגות החופש האפשריות לשינוע הן מעטות יותר. ניתן להתגבר על חסרון זה באמצעות קביעת מחסני ביניים משותפים בין האזורים (סעיף 4.9.2).

6.1.2. קביעת המסלול

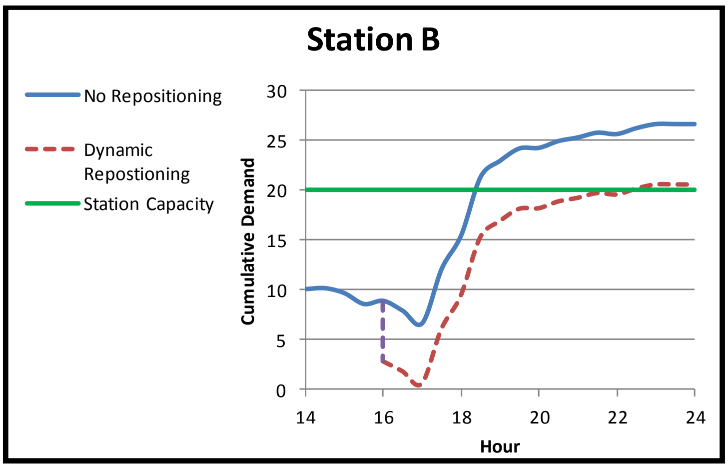
מסלול מעגלי קבוע מראש - למשל פתרון בעיית TSP שנקבע על צמתי המערכת, או מסלול שנקבע ע״י מומחה ולוקח בחשבון שיקולים שונים כמו התנהגות הביקוש בתחנה, מיקום גיאוגרפי של התחנות, דרכי גישה לתחנות ועוד. התפעול של גישה זו הוא נוח ופשוט ועובדי השינוע יילמדו אותה בקלות ויהיו מנוסים בה. עם זאת, יש לציין כי הגישה הזו אינה מתחשבת במצב המערכת העדכני. יש להדגיש, כי גם במקרה של מסלול קבוע מראש, תיתכן דרישה לשינויים קלים כפי שיודגם בהמשך בסעיף 6.2.4.

מסלול שנקבע בזמן-אמת – על פי גישה זו, המצב העדכני של המערכת יכתיב את המסלול. גישה זו היא יותר מסובכת לחישוב ולתפעול, אך היא מתאימה להשתנות המהירה והבלתי צפויה לעתים, של המערכת.

6.1.3. קביעת רמת יעד רצויה למלאי בתחנות

רמת יעד קבועה – בדרך כלל רמת היעד הקבועה תהיה שווה לחצי מקיבולת התחנה. הסיבה לכך היא שכמות זו היא נקודת האמצע ביחס החליפין בין מספר המשכירים לבין מספר המחזירים שיוכלו לקבל שירות בתחנה. גישה זו היא פשוטה ליישום עבור מפעילי המערכת, אך היא איננה מתחשבת באומדן הביקוש העתידי הצפוי בתחנות. למשל, ייתכן כי בתחנה מסוימת ישנו עודף גבוה של החזרות בטווח שעות מסוים כמודגם באיור 15. בתחנה זו, כמות השווה לחצי מקיבולת התחנה איננה רצויה שכן משתמשים רבים לא יוכלו לבצע החזר. במקרה זה יש להציב בתחנה רמת מלאי נמוכה יותר על מנת לספק את הביקוש הגבוה להחזרות. בדוגמה המוצגת באיור, המשנע מגיע בשעה 16:00 והוא אינו מציב מחצית מהקיבולת בתחנה, אלא מפחית ממנה זוגות אופניים. יש לשים לב, כי ריקון התחנה לחלוטין אינו כדאי אף הוא, שכן ישנו ביקוש גם להשכרות לאחר השעה 16:00.

רמת יעד דינמית – על פי גישה זו, רמת היעד בתחנה תיקבע על פי אומדן הביקוש העתידי הצפוי בתחנה. גישה זו היא יותר מסובכת ליישום, אך היא מאפשרת לתת מענה פרו-אקטיבי להתרחשות במערכת, ולתת מענה מבעוד מועד להתרוקנות או להתמלאות של תחנות.



איור 15: דוגמה לתחנה בעלת עודף גבוה של החזרות.
הביקוש הצפוי בתחנה הוא גבוה יותר מקיבולתה (הקו העבה המאוזן). כאשר המשנע מגיע בשעה 16:00 הוא אינו מציב מחצית מהקיבולת בתחנה, אלא מפחית ממנה זוגות אופניים.

6.1.4. כמות העבודה האפשרית בתחנה

לעתים נבחר להגיע בעדיפות גבוהה אל תחנה שניתן לבצע בה את השינוי האפשרי הגבוה ביותר. כמות העבודה האפשרית היא כמות הפריקה/הטעינה המתוכננת בתחנה, והיא נובעת מחישוב המשקלל את ההפרש שבין רמת היעד הרצויה של המלאי לבין רמת היעד הנוכחית של המלאי, לבין מספר הזוגות שניתן לפרוק/לטעון בתחנה. מספר הזוגות שניתן לפרוק בתחנה מושפע ממספר זוגות האופניים הזמין בכלי הרכב ובמספר עמדות העגינה הזמינות, ואילו מספר הזוגות שניתן לטעון בתחנה מושפע מהקיבולת הפנויה על כלי הרכב וממספר זוגות האופניים הזמינים בתחנה.

6.1.5. קביעת כמות הטעינה והפריקה בפועל

החלטת הטעינה או הפריקה תתבצע בעת הגעת כלי הרכב המשנע אל התחנה. ההחלטה לגבי מאפיין זה חייבת להתבצע באופן דינמי משום שכמות הטעינה והפריקה בפועל מושפעת ממצב המלאי העדכני של התחנה בה נמצא הרכב, וממצב המלאי העדכני של כלי הרכב. ייתכנו מצבים שבהם כמות האופניים בעת הגעת הרכב אל התחנה שונה מהמצב החזוי, ולכן יש להתאים את החלטות המלאי למצב בפועל.

למשל, אם ברכב השינוע ישנם 5 זוגות אופניים והוא מגיע לתחנה שבה רמת היעד הרצויה הינה 13 זוגות אופניים. אם בהגיעו לתחנה מתברר שיש בה 5 זוגות אופניים, לא ניתן להגיע לרמת היעד הרצויה. ניתן לקרב ככל שניתן את רמת המלאי בתחנה לרמה הרצויה ולהעלות בה את רמת מלאי ל- 10 זוגות.

6.2. יישום מאפייני השיטות

בסעיף זה נציג מספר דוגמאות ליישום מאפייני השיטות ונדון ביתרונות ובחסרונות של הגישות השונות.

הגישה שבה מפעילי המערכות נוקטים לעתים קרובות, היא גישה שאינה לוקחת כשיקול את אומדני הביקוש הצפויים בתחנות. המפעילים נוהגים לתת מענה, כאשר הם מבחינים בתחנה שהתרוקנה או התמלאה לחלוטין.

במסגרת השיטות שנבחנו, בחנו שילוב של אפשרויות שונות לקביעת המסלול ולקביעת רמת היעד של המלאי.

בפרקים 8-7 המתארים את הסימולציה שבצענו, נבחן את השיטות הללו ונאבחן מהם מאפייניהן של הגישות שסיפקו פתרונות טובים.

6.2.1. סימנים

בפרק זה ייעשה שימוש בסימנים שתוארו בסעיף 4.4.3. c_i מייצג את קיבולת התחנה i (מספר עמדות העגינה בה), k_v הוא קיבולת כלי הרכב המשנע v , t_{ij} הוא זמן הנסיעה מתחנה i לתחנה j.

סימנים נוספים:

s_i - רמת המלאי בתחנה i בתקופה הנוכחית. בשונה מ-s_{it} שהוגדר בסעיף 4.4.3, בשיטות המבוססות על כללי שילוח אנחנו מתייחסים רק לתקופה הנוכחית, ולא לרמות המלאי הצפויות בתחנה בתקופות הבאות. לכן האינדקס t אינו מופיע.

y_v – מספר האופניים על כלי הרכב המשנע v בתקופה הנוכחית. בשונה מ-y_{ijtv} שהוגדר בסעיף 4.4.3, בשיטות המבוססות על כללי שילוח אנחנו מתייחסים רק לתקופה הנוכחית ולכן האינדקסים i, j, t אינם מופיעים.

f_i - כמות העבודה האפשרית (feasible) בתחנה i (כפי שתוארה בסעיף 6.1.4).

I_i - רמת היעד של המלאי בתחנה i (סעיף 6.1.3).

6.2.2. כלל 1 - הגישה ה"נאיבית"

השיטה - מסלול משתנה, רמת יעד קבועה של מלאי השווה למחצית הקיבולת.
ישנן דרכים שונות להחליט על התחנה הבאה במסלול המשתנה.
על פי הגישה המוצגת בכלל זה, התחנה הבאה במסלול המשתנה נקבעת על פי התחנה שהטיפול בה יאפשר את כמות העבודה המקסימאלית בתחנה. כלומר, התחנה הבאה שנבחר לטפל בה היא התחנה שהכי רחוקה מרמת היעד של המלאי הרצויה בה, תוך התחשבות ברמת המלאי העדכנית ברכב (כמוזכר בסעיף 6.1.4), נדגים זאת באמצעות איור 16.

באיור נראה כי הרכב נמצא בתחנה E והוא ריק מאופניים. על המשלח (עובד הבקרה או מערכת ממוחשבת) לבדוק מהי התחנה הבאה שיש לטפל בה. הוא בוחן את התחנות אחת-אחת ומבחין כי בתחנה A, ישנן 6 עמדות עגינה ו-5 זוגות אופניים, לכן יש לאסוף 2 זוגות אופניים על מנת להגיע לרמת יעד של 3 זוגות אופניים בתחנה (מחצית הקיבולת). בתחנות C ו-D יש לאסוף זוג אופניים יחיד. לעומת זאת, בתחנה B יש לפרוק זוגות אופניים, אך הרכב ריק, ולכן לא ניתן לבצע עבודה בתחנה זו.

לבסוף, התחנה הבאה לטיפול תיבחר כתחנה A, משום שבה ניתן לבצע את כמות העבודה המקסימאלית.

באופן פורמאלי ניתן להגדיר את השיטה באופן הבא:

- עבור כל תחנה i
  - חשב את כמות העבודה $f_i = \left|\max\left(\min\left(s_i - \frac{c_i}{2}, k_v - y_v\right), -y_v\right)\right|$

    בחר את התחנה שלה ערך f_i הגבוה ביותר
- סע אל התחנה שנבחרה ובהגעתך אליה בצע חישוב עדכני לבחירת המשימה:

  $f_i = \max\left(\min\left(s_i - \frac{c_i}{2}, k_v - y_v\right), -y_v\right)$

  (ערך שלילי – פריקה, ערך חיובי – טעינה)

ובאופן מפורט מעט יותר:

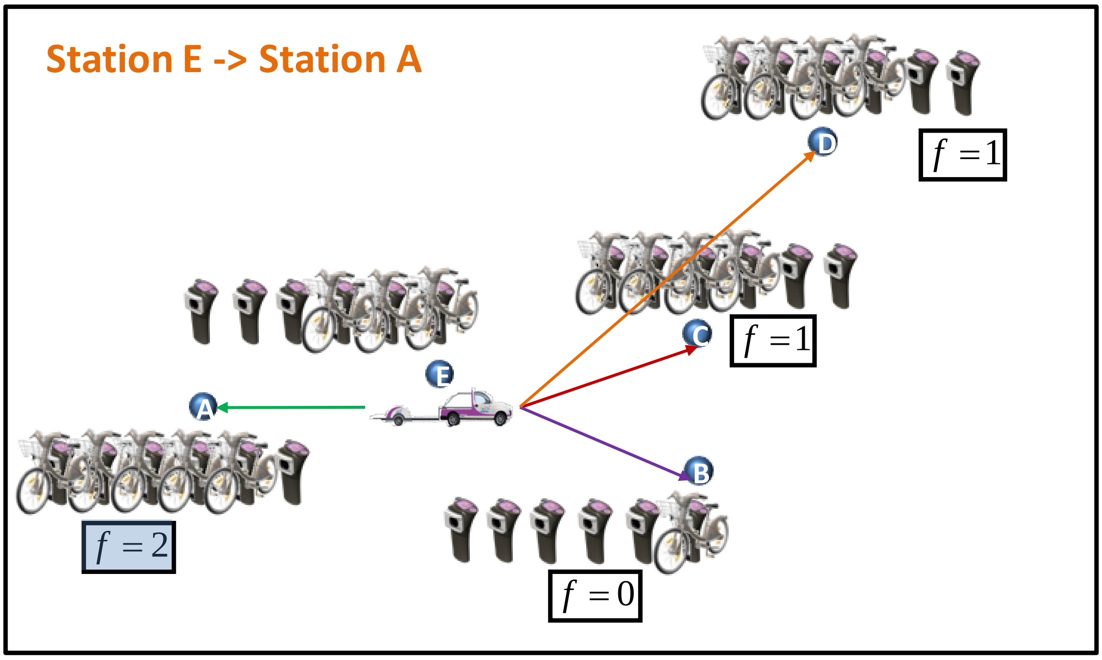
- עבור כל תחנה i
  - חשב את ההפרש בין כמות האופניים בתחנה s_i לבין רמת היעד הרצויה $\frac{c_i}{2}$
  - אם ההפרש $s_i - \frac{c_i}{2}$ הוא שלילי
    - קבע כי יש **לפרוק** זוגות אופניים מהרכב אל התחנה וקבע את ערך f_i כמינימום בין כמות האופניים על רכב השינוע y_v לבין ערכו המוחלט של ההפרש שחושב:

      $f_i = \min\left(\frac{c_i}{2} - s_i, y_v\right)$.
  - אחרת
    - קבע כי יש **לטעון** זוגות אופניים מהתחנה אל הרכב וקבע את ערך f_i כמינימום בין המקומות הפנויים שישנם על הרכב לבין $(k_v - y_v)$ לבין ההפרש שחושב:

      $f_i = \min(s_i - \frac{c_i}{2}, k_v - y_v)$.
- בחר את התחנה שלה ערך f_i הגבוה ביותר
- סע אל התחנה שנבחרה ובהגעתך אליה בצע חישוב עדכני לבחירת המשימה:

  $f_i = \max\left(\min\left(s_i - \frac{c_i}{2}, k_v - y_v\right), -y_v\right)$

  (ערך שלילי – פריקה, ערך חיובי – טעינה)



איור 16: דוגמה לגישה הנאיבית של מפעילי המערכת

השיטה הזו היא שיטה מאד נאיבית והיא אינה לוקחת בחשבון גורמים שונים. למשל היא אינה משקללת בהחלטתה את המרחק ממיקומו הנוכחי של הרכב אל התחנות ואינה מנצלת הזדמנויות לשרת כמה תחנות קרובות זו לזו בנסיעה אחת. על אף הנאיביות של השיטה, היא מתארת בקירוב טוב את השיטה של מפעילי תל-אופן כיום.

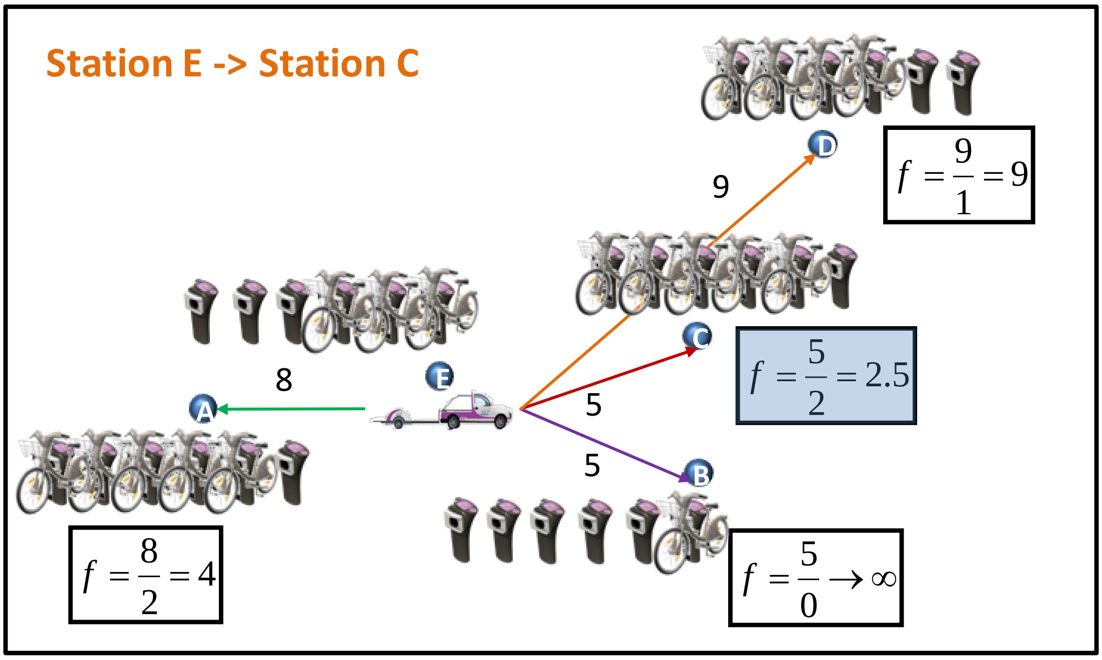
6.2.3. <u>כלל 2 - שקלול כמות העבודה והמרחק</u>

השיטה - מסלול משתנה, רמת יעד קבועה של מלאי השווה למחצית הקיבולת, שקלול המרחק.
כאמור, החיסרון בגישה הקודמת שהוצגה הוא שהיא אינה לוקחת בחשבון את המרחקים אל התחנות. יש צורך לשקלל בהחלטה גם את המרחק אל התחנה, משום שהשאיפה היא שהשינוע יבצע את מרב העבודה במרחק ובזמן נסיעה קצר. ללא הוספת המרחק לשיקולים, ייתכן שהרכב ינוע הלוך וחזור בין שני קצוות העיר בחוסר יעילות.

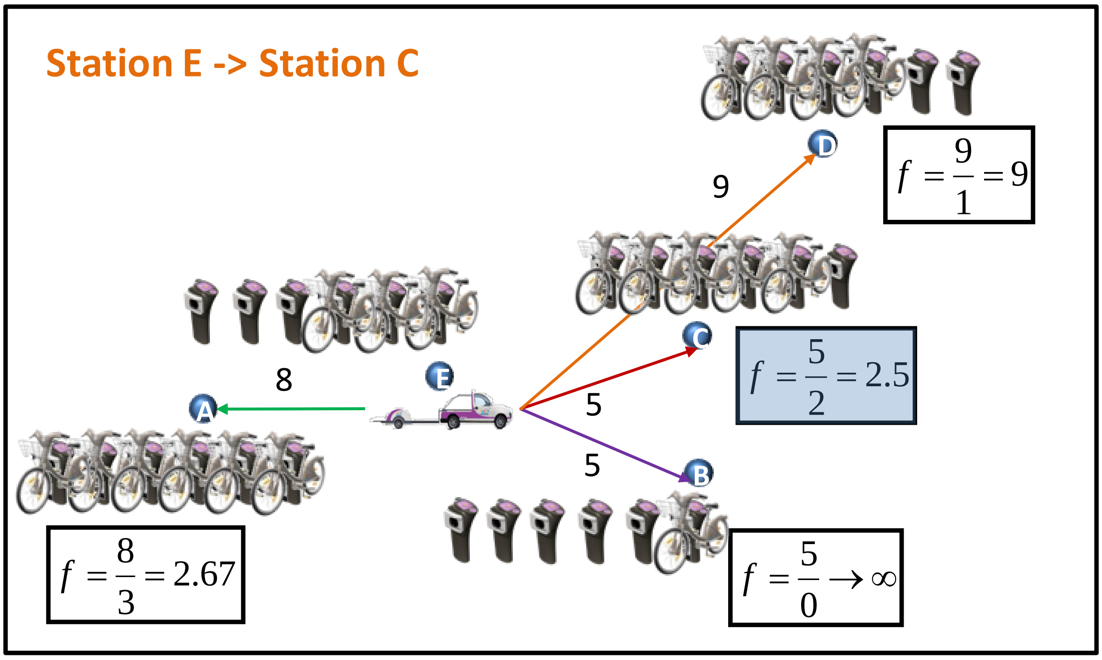
אם כן, בשונה מהדוגמה הקודמת, על פי הגישה המוצגת בדוגמה זו התחנה הבאה במסלול המשתנה נקבעת על פי **מזעור** הקריטריון $\frac{\text{זמן או מרחק נסיעה}}{\text{כמות עבודה}} = \frac{t_{ji}}{f_i}$. כלומר, התחנה הבאה שנבחר לטפל בה היא תחנה שקרובה יחסית ושכמות העבודה האפשרית בה בטיפול בה היא גבוהה. כמות העבודה מחושבת כמו שתואר בדוגמה הקודמת.

ניתן כמובן לבחור בקריטריון שמשקלל באופן שונה את המרחק ואת כמות העבודה, למשל קריטריון שנותן משקל גבוה יותר לכל יחידת כמות $\frac{t_{ji}}{(f_i)^2}$.

השיטה הזו היא פשוטה ונאיבית, ועדיין חסרה מרכיבים נוספים שעשויים לעזור לשפר אותה, בהם נדון בהמשך. נדגים שיטה זו באמצעות איור 17.



איור 17: דוגמה לשיטה המשקללת את הכמות ואת המרחק



איור 18: שיטה המשקללת את הכמות ואת המרחק - דוגמה נוספת

הרכב שוב נמצא בתחנה E והוא ריק מאופניים, ועל המשלח שוב מוטלת המשימה לבדוק מהי התחנה הבאה שיש לטפל בה. בדומה לדוגמה הקודמת הוא שוב בוחן את התחנות אחת-אחת ומבחין כי בתחנה A ובתחנה C יש לאסוף 2 זוגות אופניים בכל אחת על מנת להגיע לרמת היעד של 3 זוגות אופניים בתחנה. כעת הוא משקלל גם את המרחק אל התחנה ומחליט שהתחנה הבאה שתטופל היא תחנה C, משום שתחנה זו הינה קרובה יותר למקום הימצאו של כלי הרכב.

באיור 18 ניתן לראות דוגמה נוספת עם שינוי קל – בדוגמה זו יש לאסוף 3 זוגות אופניים בתחנה A ו-2 זוגות אופניים בתחנה C. על אף שבתחנה A כמות העבודה היא גדולה יותר, התחנה הבאה שתטופל היא תחנה C, בשל שקלול המרחק.

בין החסרונות של שיטה זו, היא העובדה שהיא אינה משקללת בהחלטותיה את אומדן הביקוש העתידי, אלא עושה שימוש ברמת יעד קבועה של מלאי.
בנוסף, השיטה אמנם עושה שימוש במצב הרכב העדכני על מנת לבצע את ההחלטות, אך היא אינה מתכננת מראש את מצב הרכב הרצוי.

- עבור כל תחנה i
  - חשב עבור התחנה את הערך של f_i:

$$f_i = \left|\max\left(\min\left(s_i - \frac{c_i}{2}, k_v - y_v\right)\ , -y_v\right)\right|$$

  - חשב עבור התחנה את זמן הנסיעה אליה t_{ji}
- בחר את התחנה שלה ערך $\frac{t_{ji}}{f_i}$ הנמוך ביותר (או קריטריון אחר)
- סע אל התחנה שנבחרה ובהגעתך אליה בצע חישוב עדכני לבחירת המשימה:

$$f_i = \max\left(\min\left(s_i - \frac{c_i}{2}, k_v - y_v\right)\ , -y_v\right)$$

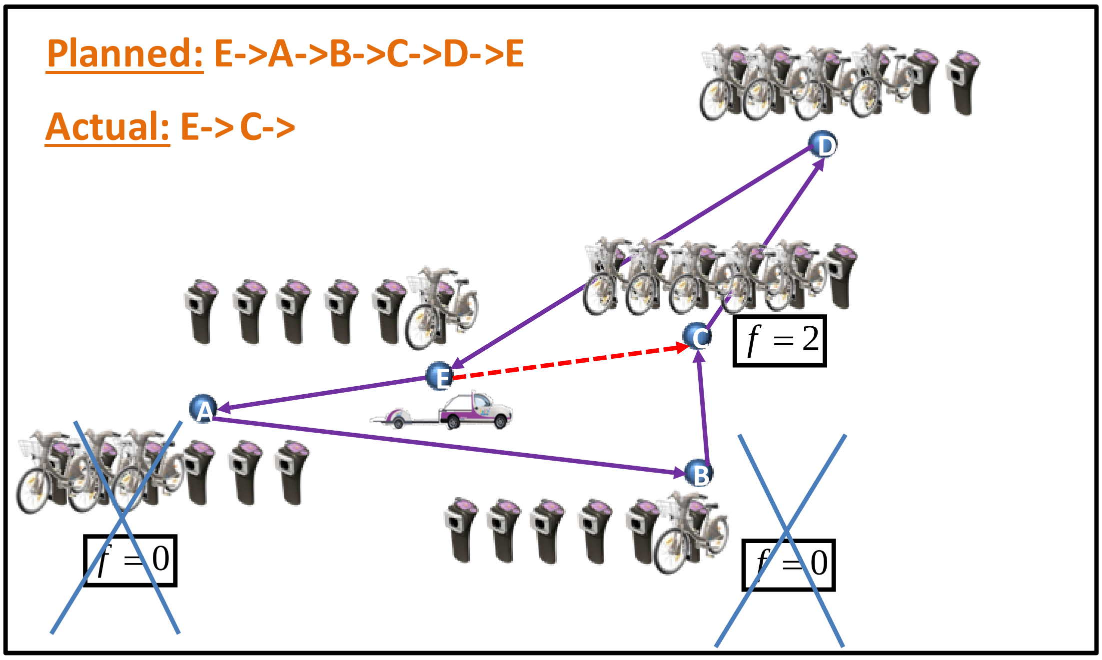
(ערך שלילי – פריקה, ערך חיובי – טעינה)

6.2.4. <u>כלל 3 - מסלול קבוע מראש</u>

כעת נציג שיטה שעושה שימוש במסלול קבוע מראש. מסלול קבוע מראש יכול להיות המסלול המעגלי הקצר או המהיר ביותר בין תחנות האזור שעליו אחראי המשנע. לחילופין ניתן להשתמש במסלול קבוע שנקבע ע"י מומחה הלוקח בחשבון שיקולים נוספים של התנהגות הביקוש בתחנה, דרכי גישה לתחנות ועוד. כאמור, היתרון הגדול בשיטה זו הוא שהיא קלה לתפעול ועובדי השינוע והבקרה יסגלו מיומנות וילמדו במהרה את המסלולים הקבועים.

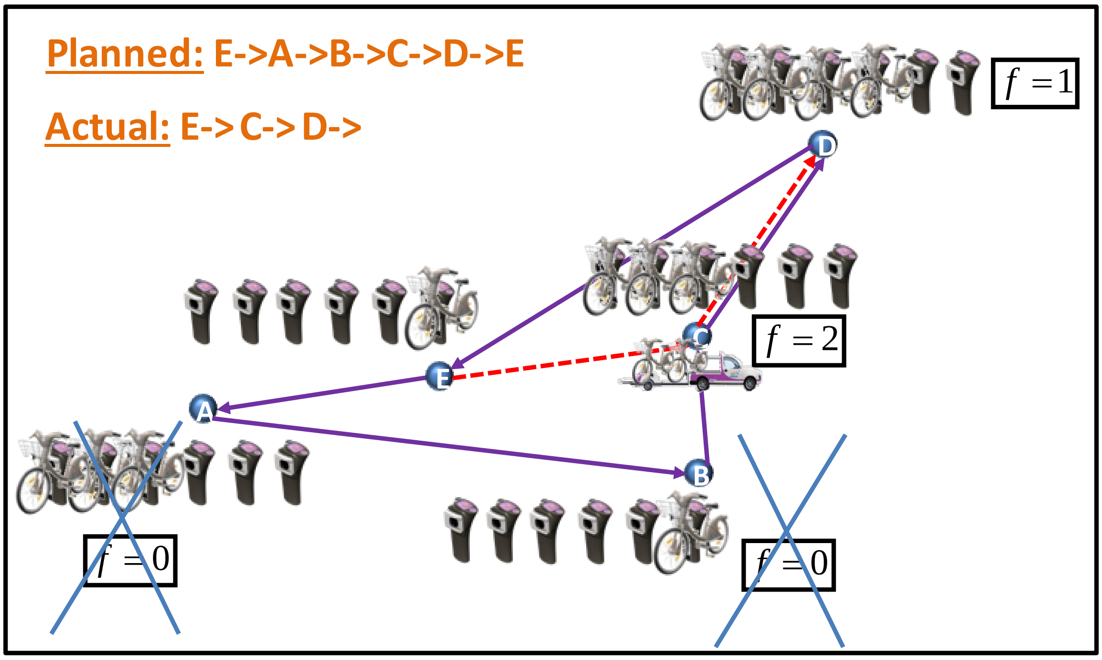
החיסרון בשיטה זו לעומת השיטות שהוצגו קודם לכן הוא, שהגישה אינה מתחשבת במצב המערכת העדכני. החלטת הטעינה או הפריקה בפועל מושפעת מרמת המלאי העדכנית בתחנות וברכבי השינוע, ולכן ייתכן מצב שבו יהיו לאורך המסלול תחנות שאין בהן משימה אפשרית לביצוע. לפיכך, ניתן לדלג בצורה מושכלת על התחנות הללו ולקצר את המסלול.
ניתן לייעל עוד יותר את השיטה ולדלג גם על תחנות שבהן כמות העבודה אינה גדולה מכמות מסוימת של זוגות אופניים. כלל כזה נבחן במסגרת הניסוי הנומרי שערכנו (פרקים 7-8).

נדגים שיטה זו באמצעות האיורים הבאים (איור 19, איור 20, איור 21).



איור 19: דוגמה לשיטה המבוססת על מסלול קבוע מראש (שלב א׳)

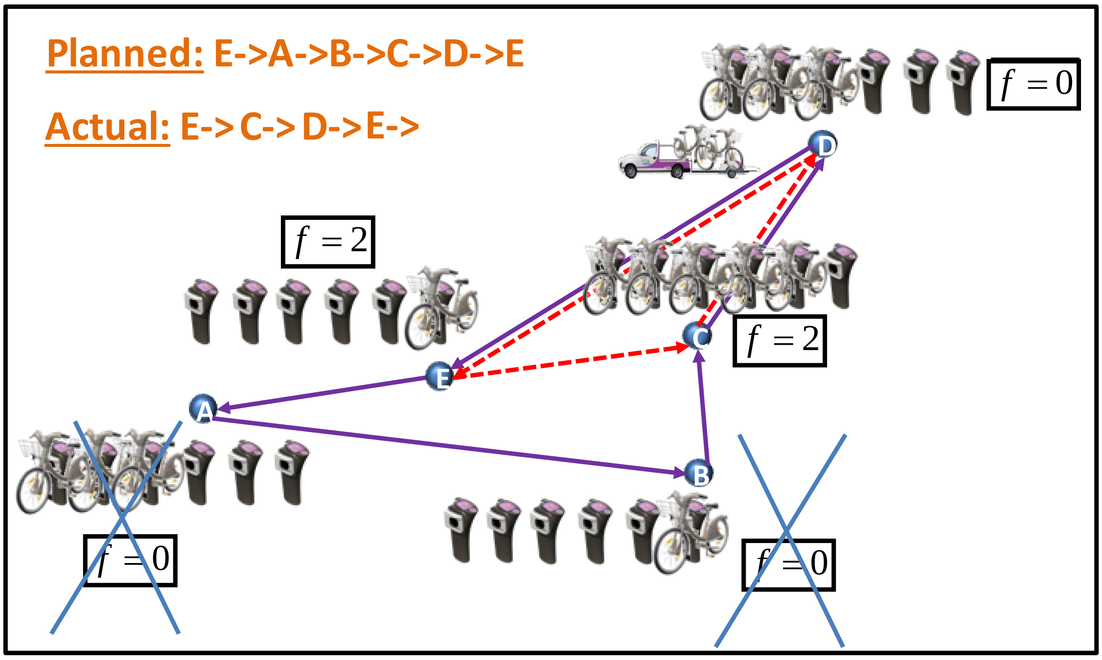
המשנע נמצא בתחנה E והוא ריק מאופניים איור 19. בידי המשלח יש מסלול מעגלי קבוע מתוכנן מראש על פיו התחנה הבאה היא A (החצים המלאים שאינם מקווקווים), אך בעוד המשנע נמצא בתחנה E וטרם יצא אל תחנה A, יכול להבחין המשלח כי תחנה A מכילה את מספר האופניים הרצוי בתחנה, ולכן אין צורך לשלוח את כלי השינוע אליה. אם כן, ניתן לדלג על תחנה A ולפנות לבחון את הטיפול בתחנה הבאה במסלול – היא תחנה B. תחנה זו דורשת פריקת אופניים מהרכב אל התחנה, אך רכב השינוע ריק בשלב זה, ולכן יבחר המשלח לדלג על תחנה זו ולא לטפל בה זו בשלב זה. אם כן, התחנה הבאה במסלול שהמשנע יגיע אליה היא תחנה C, משום שהוא יכול לטעון ממנה 2 זוגות אופניים הנדרשים כדי להציב את התחנה ברמת המלאי הרצויה שלה (החץ המקווקו).



איור 20: לשיטה המבוססת למסלול קבוע מראש (שלב ב')

התחנה הבאה אליה יגיע הרכב היא תחנה D, משום שבה יש באפשרותו לטעון זוג אופניים (איור 20). חשוב לציין שכמות הטעינה או הפריקה בפועל תקבע על סמך בחינת מצב המלאי העדכני בתחנה בעת הגעת הרכב אל התחנה, כפי שניתן לראות באיור 21.

באיור 21 ניתן לראות, כי בעת שהרכב עשה דרכו אל תחנה D, משתמש הגיע אל התחנה ושכר זוג אופניים. לכן, כעת אין צורך להוסיף זוג אופניים בתחנה.



איור 21: דוגמה לשיטה המבוססת למסלול קבוע מראש (שלב ג')

ובאופן פורמאלי:

- עבור *תחנה* i *הבאה* במסלול
  - חשב את הכמות שיש לפרוק או לטעון בתחנה בדומה לחישוב v_i שהוצג לעיל:

$$f_i = \left|\max\left(\min\left(s_i - \frac{c_i}{2}, k_v - y_v\right)\ , -y_v\right)\right|$$

  - אם $f_i \neq 0$ אזי סע אל התחנה
    - בהגעה אל התחנה קבע את כמות הטעינה או הפריקה על פי הערך העדכני בעת הגעת הרכב:

$$f_i = \max\left(\min\left(s_i - \frac{c_i}{2}, k_v - y_v\right)\ , -y_v\right)$$

(ערך שלילי – פריקה, ערך חיובי – טעינה)

  - אחרת $i = i + 1$ וחזור.

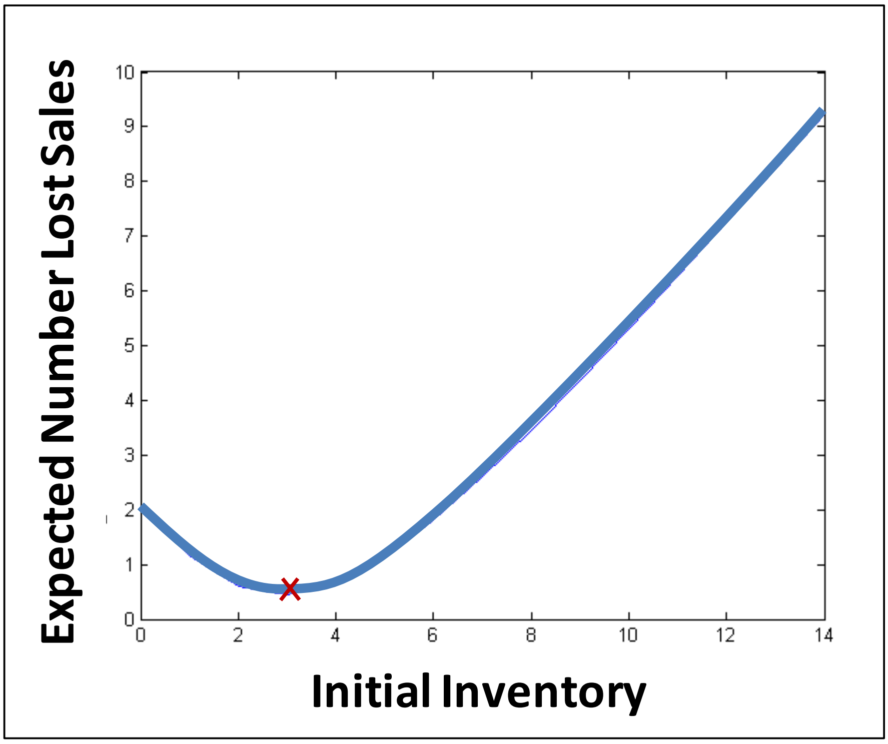
6.2.5. <u>כלל 4 – רמת יעד משתנה של המלאי בתחנה</u>

שיטה המציעה רמת יעד משתנה של מלאי בתחנה, נועדה על מנת להתאים את המלאי בתחנה לביקוש העתידי הצפוי. למשל, בתחנה המוצגת באיור 15 לעיל, נחזה כי ישנו עודף גבוה של החזרות במהלך השעות שלאחר הגעת המשנע , ולפיכך יעד המלאי שלנו בתחנה יהיה מספר מועט של זוגות אופניים, על מנת להשאיר מספר גבוה של עמדות עגינה זמינות בתחנה. ניתן להציע שיטות שונות לחישוב רמת היעד הרצויה בתחנה. בעבודה זו אנחנו עושים שימוש במתודולוגיה שפותחה במאמר של Raviv and Kolka (2013).

Raviv and Kolka (2013) מציעים פונקציה שמאפשרת לחשב את תוחלת מספר המכירות האבודות הצפוי במהלך תקופה מסוימת, כפונקציה של רמת המלאי ההתחלתית בתחנה בודדת. בעבודה זו רמת היעד בתחנה בכל נקודת זמן נקבעת כרמה הממזערת את תוחלת מספר המכירות האבודות במהלך חלון זמן שמשכו מייצג את תדירות הביקור הצפויה בתחנה.

באיור 22 ניתן לראות דוגמה לפונקציית תוחלת המכירות האבודות בתחנה מסוימת (מחושבת בנקודת זמן מסוימת וכוללת תקופה עתידית נתונה). הציר האופקי מייצג את רמת המלאי ההתחלתית בתחנה, ואילו הציר האנכי מייצג את תוחלת מספר המכירות האבודות הצפויות בתחנה – מספר הלקוחות שלא יקבלו שירות בתחנה. באמצעות פונקציה זו ניתן להציע רמת מלאי יעילה עבור יישום של שינוע סטאטי במהלך הלילה.

הפונקציה הזו מניחה שהלקוחות נוטשים במקרה שבו אין זוגות אופניים זמינים או אין בתחנה עמדות עגינה זמינות. הנחה זו אמנם מפשטת את התנהגותם האמיתית של הלקוחות, אך אנחנו נראה בהמשך, באמצעות ניסויים במודל הסימולציה, כי ניתן להשיג תוצאות טובות מהשימוש בפונקציה זו.



איור 22: דוגמה לפונקציית המכירות האבודות בתחנה מסוימת

בעבודה זו אנחנו מאמצים את המתודולוגיה הזו לשימוש בבעיה הדינאמית ע״י בחירת רמת המלאי הרצויה בעת הגעת הרכב אל התחנה. הקלטים החשובים בשימוש במתודולוגיה זו, הם קצבי הביקוש העתידיים להשכרות ולהחזרות בתחנה, וכן התקופה העתידית שבה אנחנו מעוניינים לחשב עבורה את מספר הלקוחות האבודים שינטשו את המערכת. התקופה הזו יכולה להיות תקופה שמייצגת את משך הזמן המשוער להגעת הרכב אל אותה התחנה בפעם הבאה, או תקופה שמייצגת את משך הזמן המשוער למעבר בכל התחנות שיש לבצע בהן משימה באזור. משך התקופה הוא פרמטר, והוא צפוי להיות שונה ממערכת למערכת ומעיר לעיר.

ניתן להשתמש בשיטה זו לחישוב רמת המלאי הרצויה בשילוב עם שימוש במסלול קבוע מראש או עם שימוש במסלול משתנה שנקבע בהתאם למצב המלאי העדכני בתחנות ולהפרש בינו לבין מצב המלאי הרצוי על פי השיטה.

שימוש במסלול קבוע מראש:

- עבור תחנה i הבאה במסלול
  - בחר את התקופה העתידית לחישוב מספר המכירות האבודות
  - הזן את האומדנים עבור קצבי הביקוש העתידיים להשכרות ולהחזרות במהלך התקופה שנבחרה
  - חשב את רמת המלאי הרצויה בתחנה I_i הממזערת את מספר המכירות האבודות במהלך התקופה

- חשב את הכמות שיש לפרוק או לטעון בתחנה:

$$f_i = |\max(\min(s_i - I_i, k_v - y_v)\ \ , -y_v)|$$

- אם $f_i \neq 0$ אזי סע אל התחנה
  - בהגעה אל התחנה חשב מחדש את $\mathrm{I_i}$ וקבע את כמות הטעינה או הפריקה על פי הערך העדכני בעת הגעת הרכב:

$$f_i = \max(\min(s_i - I_i, k_v - y_v)\ \ , -y_v)$$

(ערך שלילי – פריקה, ערך חיובי – טעינה)

- אחרת $i = i + 1$ וחזור.

שימוש במסלול משתנה:

- עבור כל תחנה i
  - בחר את התקופה העתידית לחישוב מספר המכירות האבודות
  - הזן את האומדנים עבור קצבי הביקוש העתידיים להשכרות ולהחזרות במהלך התקופה שנבחרה
  - חשב את רמת המלאי הרצויה בתחנה I_i הממזערת את מספר המכירות האבודות במהלך התקופה
  - חשב עבור התחנה את הערך של f_i:

$$f_i = |\max(\min(s_i - I_i, k_v - y_v)\ \ , -y_v)|$$

  - חשב עבור התחנה את זמן הנסיעה אליה t_{ji}
- בחר את התחנה שלה ערך $\frac{t_{ji}}{f_i}$ הנמוך ביותר (או קריטריון אחר)
- סע אל התחנה שנבחרה ובהגעתך אליה חשב מחדש את $\mathrm{I_i}$ ובצע חישוב עדכני לבחירת המשימה: $f_i = \max(\min(s_i - I_i, k_v - y_v)\ \ , -y_v)$

(ערך שלילי – פריקה, ערך חיובי – טעינה)

מסלול קבוע מראש עם ניפוי של תחנות:

השיטה שעושה שימוש במסלול קבוע מראש אינה משקללת באופן יעיל את מצב המערכת העדכני. נציג כאן כיצד ניתן לשפר עוד את השיטה, על מנת להתחשב באופן יעיל יותר הן במצב המערכת העדכני והן באומדן הביקוש העתידי.

בשיטה שהוצגה לעיל, התבצע דילוג על תחנות שאין בהן משימה לבצע בנקודת הזמן הנוכחית, אך כאן אנחנו מציעים לדלג על תחנות שכמות העבודה האפשרית מהנסיעה אליהן היא נמוכה. תכונה שמאפיינת את המערכת היא שבנקודות זמן שונות, ישנן הרבה תחנות שאינן דורשות טיפול מיידי. מרבית התחנות אמנם אינן מכילות רמת מלאי השווה בדיוק לרמת היעד, אך הן מכילות רמת מלאי קרובה לרמת היעד – כזו שתאפשר להן לתת שירות בשעות הקרובות. השיפור כאן מציע לדלג גם על תחנות שלא דורשות טיפול מיידי והן אינן צפויות לחרוג ממלאי ביטחון שנקבע, במהלך של מספר שעות קדימה.

השיפור הזה עושה שימוש בתכונה ייחודית של המערכת והוא מאפשר להתמקד בתחנות החשובות הדורשות טיפול מהיר ומיידי יותר.

- עבור תחנה i הבאה במסלול
  - בחר את התקופה העתידית לחישוב מספר המכירות האבודות
  - הזן את האומדנים עבור קצבי הביקוש העתידיים להשכרות ולהחזרות במהלך התקופה שנבחרה
  - חשב את רמת המלאי הרצויה בתחנה I_i הממזערת את מספר המכירות האבודות במהלך התקופה
  - בחר מלאי ביטחון עבור התחנה (בעבודה זו מלאי הביטחון מוגדר באופן שרירותי. שאלה מעניינת למחקר עתידי היא כיצד לקבוע את מלאי הביטחון)
  - חשב על פי אומדני הביקוש העתידיים את מצב התחנה הצפוי בכל פרק זמן
  - בדוק האם מצב התחנה הצפוי בפרקי הזמן בתקופה הקרובה אינו חורג ממלאי הביטחון שנקבע (בתקופה יכולה להיבחר כפרמטר, למשל טווח של כ-6 שעות קדימה).
  - אם אין חריגה צפויה ממלאי הביטחון
    - דלג על התחנה
  - אחרת
    - חשב את הכמות שיש לפרוק או לטעון בתחנה:
      $$f_i = |\max(\min(s_i - I_i, k_v - y_v) \quad, -y_v)|$$
    - אם $f_i \neq 0$ אזי סע אל התחנה
    - בהגעה אל התחנה חשב מחדש את I_i וקבע את כמות הטעינה או הפריקה על פי הערך העדכני בעת הגעת הרכב:
      $$f_i = \max(\min(s_i - I_i, k_v - y_v) \quad, -y_v)$$
      (ערך שלילי – פריקה, ערך חיובי – טעינה)

6.3. סיכום והשוואה

הכללים שמיישמים מסלול קבוע מראש הם פשוטים ליישום והמפעילים היו רוצים לעבוד כך, על מנת שהנהגים ועובדי חדר הבקרה ילמדו את המסלולים ויסגלו מיומנות גבוהה בעבודתם.
עם זאת, כללים אלה אינם משקללים ביעילות את מצב המערכת העדכני ואת אומדן הביקוש הצפוי בתחנות. זאת משום שייתכן שהתחנות שדורשות טיפול קרוב ומיידי אינן התחנות הבאות במסלול.
בנוסף, שימוש במסלול קבוע, מפחית את היכולת לבצע שימוש יעיל במצב הרכב העדכני, וכן אינו מאפשר לתכנן את מצב הרכב הרצוי מראש.

לעומת זאת, הכללים שמיישמים מסלול משתנה משכילים להתאים את עצמם למצב המערכת העדכני וינתבו את כלי הרכב אל התחנות הדורשות טיפול מיידי יותר.
כללים אלה, משכילים לבצע שימוש במצב העדכני של הרכב, משום שהחלטת הניתוב הבאה מושפעת ממספר זוגות האופניים על כלי השינוע.
עם זאת יש לשים לב, כי על אף ששיטות אלה פועלות על פי רמת המלאי העדכנית ברכב, הן אינן מאפשרות לבצע תכנון מושכל של רמת המלאי הרצויה בכלי הרכב.

רמת יעד קבועה של מלאי היא קלה לחישוב, אבל כפי שראינו בדוגמה לגבי תחנה B באיור 15, היא איננה מתאימה את עצמה לאומדן הביקוש העתידי.
לעומת זאת, רמת יעד משתנה של מלאי, מאפשרת לשקלל בהחלטות השינוע והמלאי את האומדן של הביקוש העתידי הצפוי ובכך להפחית את מספר הלקוחות שלא יקבלו שירות.
ע"י הניסויים שנערכו באמצעות מודל הסימולציה נראה בהמשך כי פונקציית מטרה של מזעור הלקוחות הנוטשים שאינם מקבלים שירות נמצאת בקורלציה גבוהה עם פונקציות המטרה של מזעור הזמן העודף של המשתמשים כפי שהוא מוצג בסעיף 3.4.
בניגוד להיוריסטיקות שהוצגו בפרק זה, המבוססות על כללי שילוח, השיטה המבוססת על מודל התכנות המתמטי מאפשרת לקחת הרבה שיקולים בו זמנית – שיקולי תזמון, שיקולי מלאי ושיקולים גיאוגרפיים. בנוסף, השיטה הזו מאפשרת לתכנן קדימה את מצב המערכת הרצוי. למשל, שיטה זו מאפשרת לתכנן את רמת המלאי הרצויה בכלי הרכב המשנעים. לעומתה, השיטה שעושה שימוש במסלול משתנה אינה מתכננת מה יהיה מצב הרכב הרצוי, אלא פועלת בהתאם למצב הרכב הנוכחי.

7. הערכה באמצעות מודל סימולציה

במטרה לבחון את שיטת הפתרון שלנו בתנאים מציאותיים עם נתוני ביקוש סטוכסטיים, בנינו מודל סימולציה המדמה את המערכת האמיתית ואת התנהגות המשתמשים בה. מודל הסימולציה מגלגל את האופק ופותר את בעיית האופטימיזציה מדי חצי שעה. ניתוב רכבי השינוע ופעולות הפריקה וההעמסה בתחנות מונחות על ידי פתרון המודל המתמטי כמתואר בפרק 4. התנהגות המשתמשים בסימולציה תואמת את מודל המשתמש המתואר בסעיף 3.4. פירוט בנושא יישום מודל הסימולציה ניתן למצוא בנספח ב׳ – יישום מודל הסימולציה.

7.1. התנהגות המשתמשים

התנהגות המשתמשים שיושמה במודל הסימולציה היא ההתנהגות המתוארת בסעיף 3.4. כאשר המשתמשים עומדים בפני חוסר באופניים או בעמדות עגינה – הם אינם ממתינים, אלא נודדים במערכת בהתאם לשאיפה למזער את הזמן העודף שהם מבזבזים בהגעה אל היעד שאליו הם מעוניינים להגיע. אנחנו מאמינים כי התנהגות זו קרובה יותר להתנהגות המשתמשים במציאות. כאמור, המשתמש עשוי לבחור שלא להשתמש במערכת שיתוף האופניים, אלא להשתמש באמצעי תחבורה אחר או ללכת ברגל אל היעד שאליו הוא מעוניין להגיע. בשני המקרים הללו נוסף ״קנס״ (ביח׳ של זמן) לפונקציית המטרה של המשתמש. במודל הסימולציה, הקנס על בחירה שלא להשתמש במערכת מיושם ומחושב על פי משך הזמן להליכה ברגל אל תחנת היעד.

במודל הסימולציה האלטרנטיבה שנבחנה עבור המשתמשים היא אלטרנטיבה של הליכה בלבד, ולא נוספו למודל ההתנהגות אלטרנטיבות אחרות של שימוש באמצעי תחבורה אחרים כגון נסיעה באוטובוס משום שאין ברשותנו נתונים על משכי הנסיעה באוטובוס ועל זמני ההמתנה בתחנות האוטובוס. ניתן להניח כי המסקנות לא היו משתנות באופן משמעותי, משום שמרבית הנסיעות באופניים הן נסיעות קצרות יחסית של 2-3 ק״מ, ולכן אין הזדמנות משמעותית לחסוך זמן ע״י נסיעה באוטובוס כאשר לוקחים בחשבון את זמן ההמתנה.

תיאור פורמאלי של התנהגות המשתמשים כפי שהיא מיוצגת במודל הסימולציה (ר' איור 23):

<u>הגעת לקוח לשכור אופניים בתחנת המוצא :</u>

א. אם יש זוג אופניים זמין בתחנה אזי

א.1. שכור זוג אופניים ורכב אל תחנת היעד

א.2. בהגעה אל היעד אם יש עמדת עגינה זמינה בתחנת היעד האמיתית

א.2.א. סיום מוצלח ביעד האמיתי

א.3. אחרת

א.3.א. סע להחזיר בתחנה הקרובה ביותר ליעד האמיתי שאינה מלאה

א.3.ב. בהגעה אל התחנה אם אין עמדת עגינה בתחנה זו

א.3.ב.1.חשב את המסלול הכולל המהיר ביותר הכולל רכיבה אל תחנה ובה עמדת עגינה פנויה, והליכה ממנה אל תחנת היעד האמיתית.

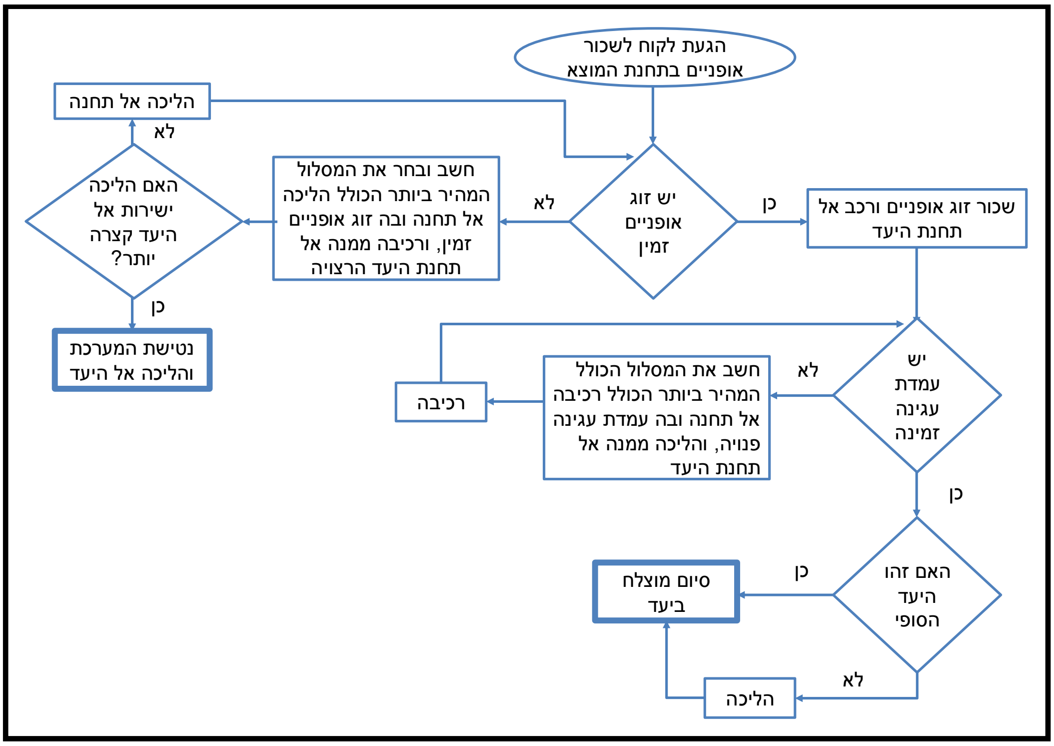
ב. אחרת

ב.1. חשב ובחר את המסלול המהיר ביותר הכולל הליכה אל תחנה ובה זוג אופניים זמין, ורכיבה ממנה אל תחנת היעד הרצויה

ב.2. חשב את משך הזמן הכרוך בנטישת המערכת והליכה אל תחנת היעד הרצויה.

ב.3. בחר את הדרך המהירה ביותר להגעה אל היעד (הליכה או בחירה במסלול הכולל הליכה ורכיבה)

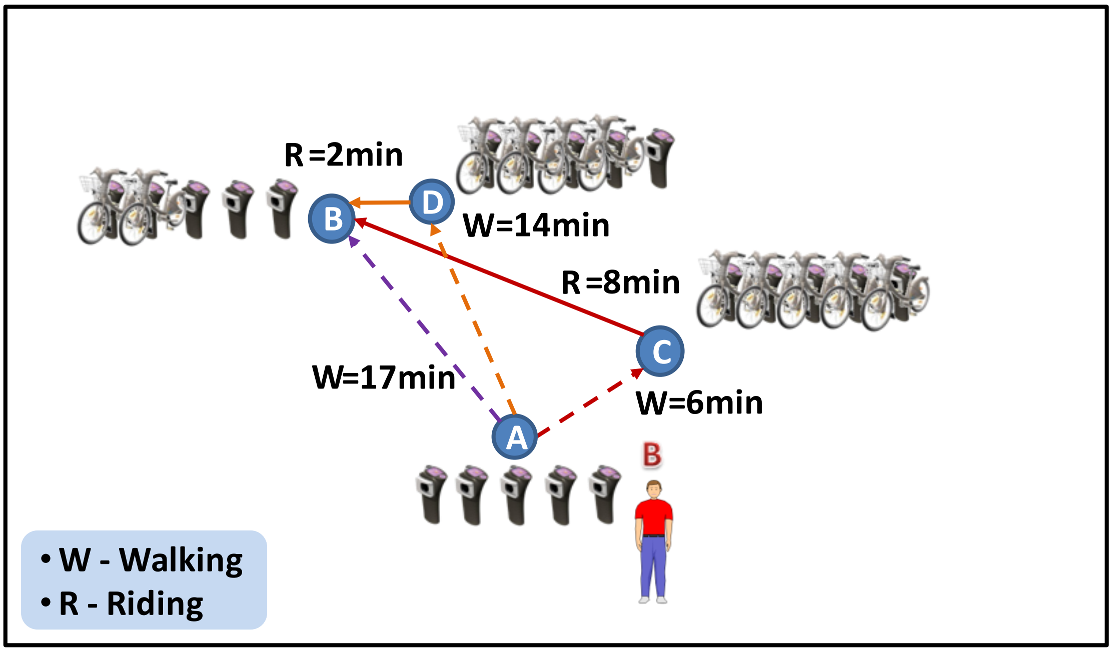
ב.4. במידה ונבחרה האלטרנטיבה של מסלול הכולל הליכה ורכיבה - בהגעה אל היעד חזור לסעיף א.2.



איור 23: תרשים זרימה עבור התנהגות המשתמשים

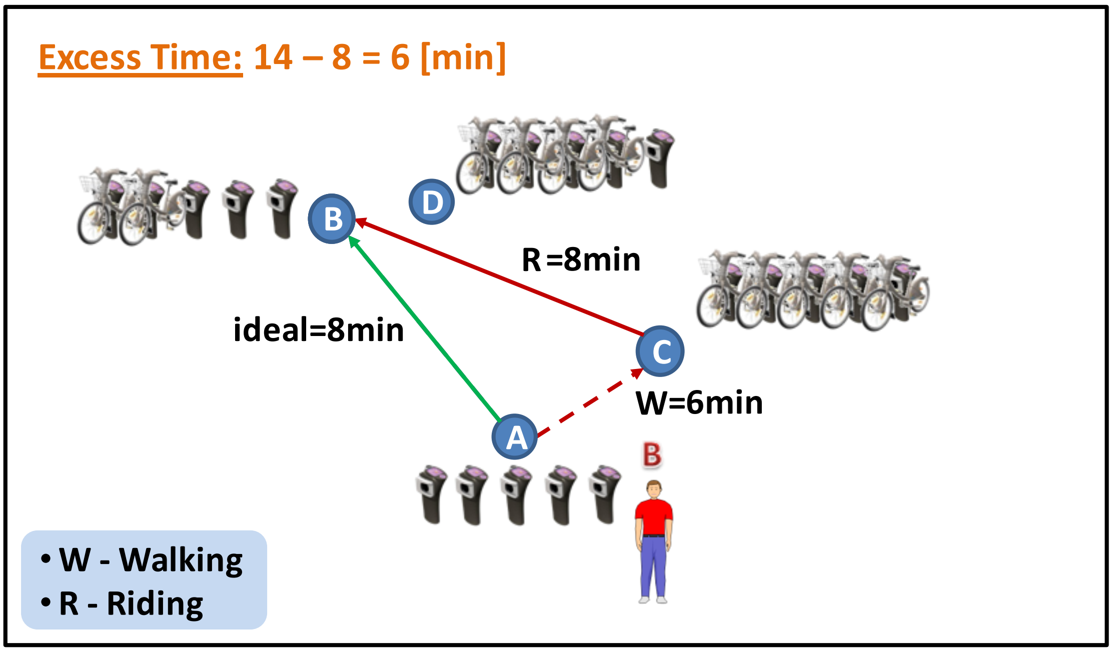
הדגמת התנהגות המשתמשים כפי שהיא מיוצגת במודל הסימולציה:

נדגים את התנהגות המשתמשים באמצעות הדוגמה המוצגת באיור 24. המשתמש שבאיור מעוניין לשכור אופניים בתחנה A הקרובה לביתו ולרכב אל תחנה B, היא תחנת היעד שלו (מעל ראשו מסומן היעד הרצוי). למגינת לבו, כאשר הוא מגיע אל תחנה A, הוא מבחין כי התחנה ריקה ואין בה זוגות אופניים זמינים להשכרה. בדוגמה זו הוא יכול כעת לבחור בין מספר אפשרויות: האחת, לצעוד ברגל אל תחנה C שבה ישנם זוגות אופניים זמינים להשכרה ומשם לרכב אל תחנת היעד B. השנייה, לצעוד ברגל אל תחנה D ומשם לרכב אל תחנת היעד B. אפשרות שלישית העומדת בפני המשתמש היא לבחור שלא להשתמש כלל במערכת ולצעוד ברגל מתחנת המקור A ישירות אל תחנת היעד B. אנחנו מאמינים כי המשתמשים במערכת יבחרו את אופן ההגעה אל היעד הרצוי, מתוך רצון למזער את הזמן שהם מבזבזים בדרכם, ולפיכך המשתמש יבחר את האפשרות הראשונה (הליכה ל-C ומשם רכיבה ל-B). כאן המקום לציין שהמערכת מספקת למשתמש מידע על מצב המלאי בתחנות במסופי התחנות, באתר האינטרנט, ובאפליקציות סלולאריות. לפיכך המשתמש יכול לבצע החלטה מושכלת על אופן השימוש שלו במערכת.



איור 24: בחירת המשתמש בעת הגעה לתחנה ריקה.

המשתמש מעוניין להגיע מתחנה A אל תחנה B, אך תחנה A ריקה ועליו לבחור דרך חלופית להגעה אל היעד הרצוי שלו.



איור 25: הזמן האידיאלי

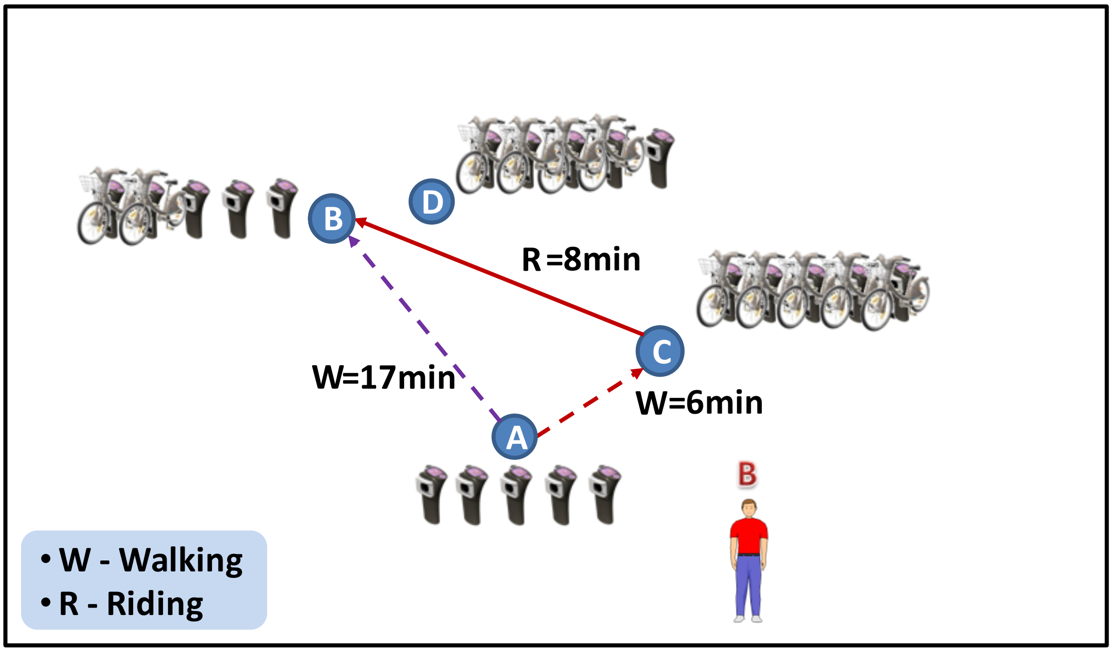
זמן ההגעה מתחנת המוצא אל תחנת היעד אם היה ניתן לספק ללקוח זוג אופניים זמין בתחנת המקור ועמדת עגינה זמינה בתחנת היעד

באיור 25 ניתן לראות כי אילו היה ניתן לספק ללקוח זוג אופניים זמין בתחנת המקור ועמדת עגינה זמינה בתחנת היעד, אזי זמן הרכיבה אל היעד יהיה הזמן האידיאלי מבחינת המשתמש.

על סמך התנהגות זו של המשתמשים נגדיר את פונקציית המטרה העומדת לנגד עיניו של הלקוח כזמן העודף (Excess Time), שהוא נאלץ לבזבז בדרך אל היעד הרצוי. בדוגמה זו, הזמן העודף הוא ההפרש בין הזמן שארכה הדרך בפועל (14 דקות), לבין הזמן האידיאלי שהייתה אורכת הדרך אילו היו זוג אופניים זמינים בתחנת המקור ועמדת עגינה זמינה בתחנת היעד (8 דקות). כלומר, הזמן העודף של המשתמש בדוגמה זו הוא: $14 - 8 = 6$ [min].

ניתן לשים לב, כי פונקציית המטרה של הזמן העודף שקולה לפונקציית המטרה של סך הזמן במערכת, משום שההפרש ביניהן - סך הזמנים האידיאליים במערכת - הוא קבוע.

נבחן כעת אפשרות חלופית נוספת העומדת בפני המשתמש. באיור 26 נבחנת האפשרות של המשתמש לבחור ללכת ברגל מתחנת המוצא A אל תחנת היעד B ולא להשתמש בשירות שיתוף האופניים. המשתמש בוחן את האלטרנטיבה ומחליט האם כדאי לו להשתמש בשירות או ללכת ברגל. במקרה זה המשתמש בכל זאת יבחר להשתמש בשירות, משום שזמן ההליכה מנקודת המקור אל נקודת היעד הינו ארוך יותר מזמן ההגעה באמצעות השימוש במערכת (14 דקות, לעומת 17 דקות). במקרה זה, ה"קנס" שמתווסף לפונקציית המטרה של המשתמש מתבטא בזמן עודף בהליכה. כאמור, במקרה של בחירה באלטרנטיבה אחרת כגון נסיעה באוטובוס, ברכבת או במונית, הקנס יתבטא גם בעלות כספית, אותה ניתן גם כן לתמחר במונחים של זמן.

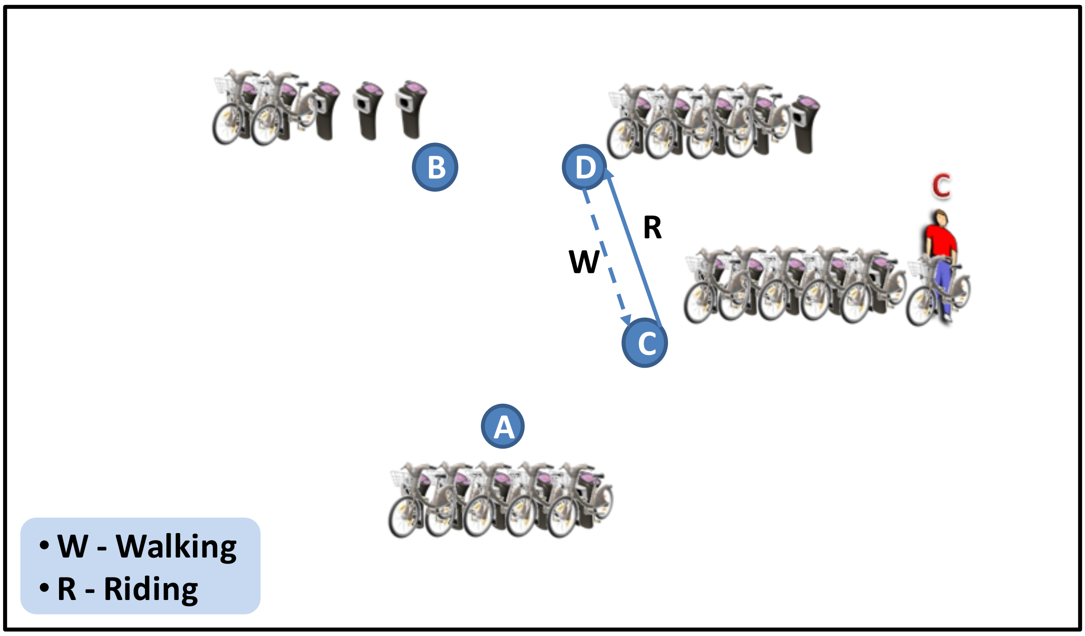


איור 26: בחירת המשתמש על פי מזעור הזמן העודף.

המשתמש יכול לבחור בין הליכה ברגל אל תחנת היעד (תחנה B) לבין הליכה ברגל אל התחנה הקרובה שבה יש זוגות אופניים (תחנה C) וממנה ברכיבה אל תחנת היעד (תחנה B). המשתמש יבחר בדרך המהירה ביותר שבה יבזבז פחות זמן עודף

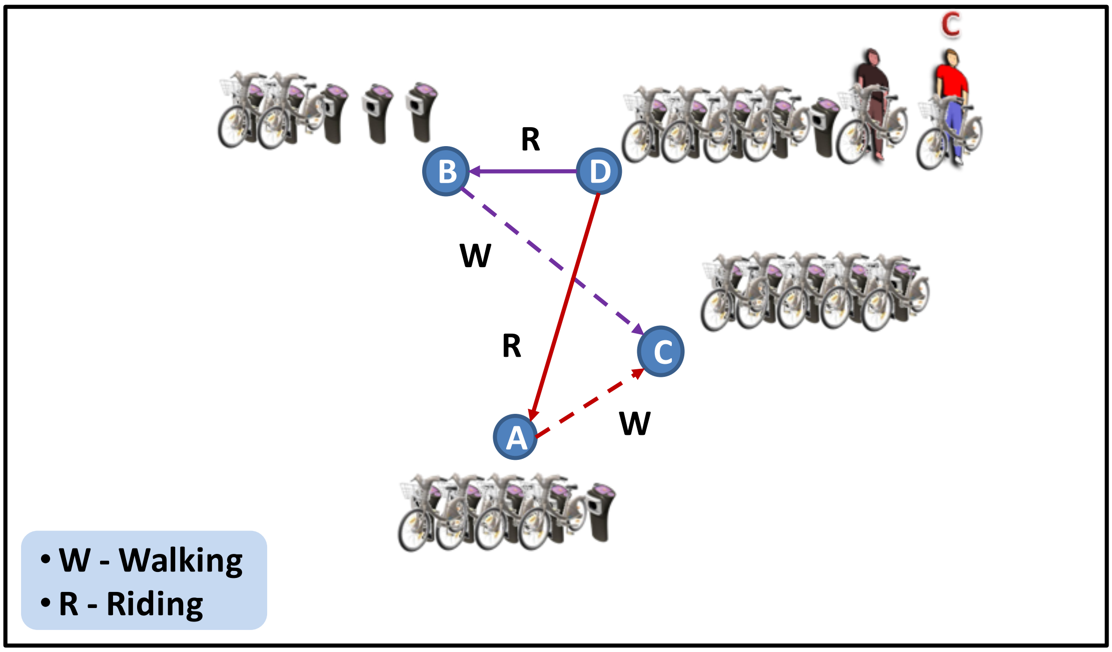
נבחן את התנהגות המשתמש גם בעת החזרת אופניים לתחנה. חשוב לזכור, שבשונה מהמקרה של השכרת אופניים, בהחזרת אופניים הלקוח אינו יכול לבחור לנטוש את המערכת, אלא הוא מוכרח להחזיר את האופניים למערכת באחת מתחנותיה (אחרת הוא משלם קנס כספי גבוה).

באיור 27, ניתן לראות משתמש המעוניין להגיע אל תחנה C ולהחזיר בה זוג אופניים, אך הוא מבחין כי התחנה מלאה ואין בה עמדות עגינה זמינות. במקרה זה המשתמש יאתר במערכת המידע את התחנה הקרובה ביותר אליו, שאינה מלאה (תחנה D באיור) וירכב אליה להחזרת האופניים. יש לשים לב, כי במקרה שמתואר באיור, המשתמש יבחר שלא לרכב אל תחנה A, משום שמערכת המידע מאפשרת לו לראות כי תחנה זו הינה מלאה.



איור 27: ניסיון החזרת אופניים בתחנה מלאה.
המשתמש ייבחר לרכב לתחנה הקרובה שאינה מלאה (תחנה D) וללכת ברגל אל תחנת היעד הרצויה שלו (תחנה C)

ייתכן מצב שבו במהלך רכיבתו אל התחנה הקרובה D, יגיעו משתמשים נוספים להחזיר זוגות אופניים בתחנה D וכעת גם היא תתמלא. באיור 28 ניתן לראות כיצד עשוי המשתמש לפעול במקרה כזה. שתי אפשרויות עומדות בפני המשתמש – רכיבה אל תחנה B וממנה הליכה אל תחנת היעד C, או רכיבה אל תחנה A וממנה הליכה אל תחנת היעד C. כמו קודם, המשתמש ייבחר בדרך שתמזער את הזמן העודף שהוא מבזבז במערכת.



איור 28: התנהגות המשתמש כאשר הוא נתקל פעם נוספת בתחנה מלאה.
היעד המקורי הרצוי של המשתמש הוא תחנה C. המשתמש תכנן להחזיר את האופניים בתחנה D וללכת ממנה ברגל לתחנה C, אך גם תחנה D התמלאה. במקרה זה, המשתמש נדרש לבחור כיצד לפעול

7.2. <u>סיכום ההבדלים בין מודל הסימולציה לבין מודל התכנות המתמטי</u>

	מודל תכנות מתמטי	**סימולציה**
ביקוש	דטרמיניסטי	סטוכסטי
זמן	פרקי זמן בדידים	זמן רציף
החלטת המשתמש	המתנה	ההחלטה מתבצעת על פי שאיפת המשתמש למזער את הזמן העודף שהוא מבזבז בהגעה אל היעד
פונקציית מטרה (מינימום)	זמן המתנה	סך הזמן/הזמן העודף – המדד האמיתי של המשתמשים
נתוני הביקוש	נתון הביקוש להשכרות ולהחזרות בכל תחנה. הביקוש להחזרות ידוע מראש.	ביקוש המשתמשים לתחנת מקור ויעד – מאפשר למדוד את עודף הזמן. הביקוש להחזרות תלוי בהשכרות בפועל.
זמני הליכה וזמני רכיבה	אינם נכללים במודל	נכללים במודל ומאפשרים לשקלל את משך שהיית המשתמשים במערכת ואת הזמן העודף שלהם.

כפי שניתן לראות בטבלה המסכמת, במודל התכנות המתמטי פונקציית המטרה היא זמן ההמתנה הכולל של המשתמשים, ובסימולציה המשתמשים אינם ממתינים בהכרח ויש להם פונקציית מטרה שונה. באמצעות ניסויים במודל הסימולציה נבחן האם מזעור מדד משך ההמתנה הכולל יוביל לזמן עודף כולל נמוך. נפעיל את היוריסטיקה שפיתחנו המבוססת על מודל התכנות המתמטי ונישם את המלצותיה במודל הסימולציה. בנוסף, נפעיל היוריסטיקות נוספות המייצגות משפחת שיטות המשמשות כיום את מפעילי המערכות ונשווה את תוצאותיהן לתוצאות היוריסטיקה של התכנות המתמטי.

7.3. <u>ניסויים</u>

7.3.1. <u>הקלט למערכת</u>

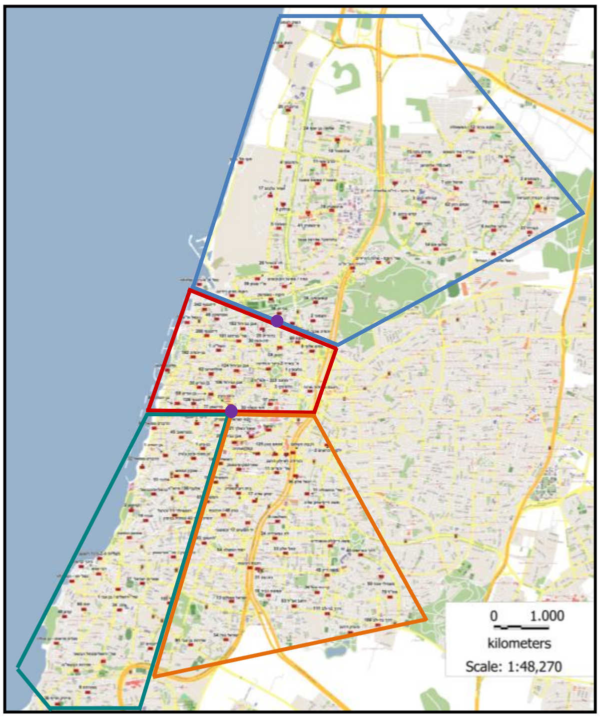
הנתונים נאספו מתוך מערכת שיתוף האופניים בעיר תל-אביב. בעת ביצוע הניסוי היו במערכת שיתוף האופניים בתל-אביב כ-130 תחנות פעילות.

מאפייני המערכת בניסוי:

- <u>קיבולת התחנות</u> – נעה בין 17 לבין 28 עמדות עגינה בהתאם לנתוני המערכת.
- <u>קיבולת כלי הרכב</u> – 20 זוגות אופניים, **בהתאם לנתוני המערכת.**
- <u>מספר כלי הרכב</u> – 4 כלי רכב, כל אחד מהם אחראי על אזור מסוים בעיר (איור 29). החלוקה לאזורים התבססה על ניתוח נתוני הביקוש ואומצה ע״י מפעילי המערכת. העקרונות שהנחו את חלוקת העיר לאזורים היו מספר התחנות בכל אזור וכן ניסיון לשמור על מידה

מסוימת של איזון בביקוש בכל אזור עד כמה שניתן. יש לציין שלא ניתן להגיע לאיזון מלא בכל אזור, שכן תחנות סמוכות זו לזו מתאפיינות בתבניות ביקוש דומות (כך למשל, כל התחנות באזור משרדים מסוים יתמלאו בשעות הבוקר ויתרוקנו בשעות אחה״צ והערב).

- <u>מטריצות זמני הנסיעה וזמני ההליכה בין התחנות</u> – זמני הנסיעה וההליכה בין התחנות חושבו באמצעות Google Maps.
- <u>מטריצת זמני הרכיבה בין התחנות</u> – נסמן את משכי הרכיבה באופניים בין תחנה i לבין תחנה j ב-r_{ij} ואת זמני ההליכה באמצעות w_{ij} (ר׳ סעיף 3.4). ההנחה היא שזמן הרכיבה בין זוג תחנות הוא מחצית מזמן ההליכה בין אותן תחנות $r_{ij} = \frac{w_{ij}}{2}$.
- <u>מחסני ביניים</u> – שני מחסני ביניים הממוקמים בין האזורים. יש לציין כי מחסני ביניים אינם קיימים במערכת בפועל, אך ייעצנו למפעילי המערכת לעשות שימוש במחסנים כאלה ובימים אלה הם בוחנים את האפשרות של יישום ההמלצה (ראה סעיף 4.9.2).



איור 29: חלוקת העיר לאזורים תפעוליים

הפרמטרים שמגדירים את מצב המערכת ההתחלתי:

- <u>מיקומם ההתחלתי של רכבי השינוע</u> – במחסנים.
- <u>רמת המלאי ההתחלתית בתחנות</u> – נאספה מתוך המלאי ההתחלתי שהיה במערכת שיתוף האופניים בפועל.
- <u>רמת המלאי ההתחלתית על כלי הרכב</u> – ריק, אך ניתן לקחת אופניים מהמחסן לפני היציאה ממנו.

נתוני הביקוש:

- עבור אירועי הלקוחות הוגרלו 20 מופעים שונים. קלטי הביקוש הוגרלו מהתפלגות פואסון עם תוחלות המבוססות על נתונים שנאספו במערכת שיתוף האופניים בתל-אביב בימי חול במהלך חודש. אמידת תוחלת הביקוש מתוך נתוני מערכת שיתוף האופניים התבצעה באופן הבא: היממה חולקה לפרקי זמן של חצאי שעות ובכל תחנה חושבה התוחלת עבור הביקוש להשכרות במהלך כל חצי שעה. כלומר, הביקוש הוא אינו הומוגני במהלך היום. יש לציין שתצפיות שבהן התחנה הייתה ריקה הוצאו מחישוב התוחלת, משום שבזמנים אלה לא ניתן להעריך מה היה הביקוש בתחנה. הערה: באמצעות חלוקת הקלט לפרקי זמן קצרים ניתן להתמודד עם העדר הומוגניות של הקלט במהלך היום. אילו היינו בוחרים תקופה קצרה יותר ייתכן שפרק הזמן היה קצר מכדי שיהיו בו די נתונים לחישוב התוחלת.
- אמידת מטריצת OD_{ij} (ר' נספח ב' – יישום מודל הסימולציה), המגדירה את ההסתברות שמשתמש שתחנת המוצא שלו היא i יבחר לרכב אל תחנת היעד j, התבצעה באמצעות איסוף נתונים על מסלולי הנסיעה של רוכבי האופניים וחושבו התפלגויות הנסיעה בין תחנת מקור לבין תחנות יעד שונות.

7.3.2. <u>פונקציות השינוע – החלטות ביצוע בעת הגעת הרכב ובזמן עזיבת הרכב</u>

במודל הסימולציה בחנו מספר שיטות היוריסטיות שיושמו בפונקציות השינוע. נבחנה השיטה היוריסטית המבוססת על המודל המתמטי וכן נבחנו שיטות שונות המבוססות על כללי שילוח. התבצעו 20 הרצות שונות שכל אחת מהן מכילה את אותם נתוני קלט עבור כל אחת מהשיטות. כלומר, על מנת ליצור השוואה הוגנת נוצרו 20 מופעים שהתקבלו כקלט בכל אחת מהשיטות.

היוריסטיקה המבוססת על תכנות מתמטי:

- במודל הסימולציה נבחנה השיטה היוריסטית המבוססת על מודל התכנות המתמטי ומכילה את ההתאמות השונות למציאות הסטוכסטית ולריצה בזמן-אמת, כפי שהן תוארו בסעיפים 4.6-4.8.
- מודל האופטימיזציה מופעל, כמתואר, בגישה של אופק מתגלגל ומחושב מחדש על פי המלאי העדכני בכל חצי שעה של סימולציה. אופק התכנון הינו 3 שעות שינוע עם התרה חלקית ו-3 שעות נוספות של תקופה עתידית. מודל האופטימיזציה רץ באופן נפרד עבור כל אחד מכלי הרכב עבור התחנות שעליהן הוא אחראי באזור בו הוא פועל.
- <u>ניפוי תחנות ומחיקת קשתות</u> - לפני ריצת מודל האופטימיזציה מתבצע שלב של ניפוי תחנות ומחיקת קשתות באופן שתואר בסעיף 4.8. ניפוי התחנות מתבצע על סמך הביקוש החזוי ב-6 השעות הקרובות, ומנופות התחנות שאינן צפויות לחרוג ממלאי הביטחון במהלך תקופת הזמן הזו. מלאי הביטחון שנבחר עבור ניפוי התחנות: ב-3 השעות הראשונות נלקח מלאי ביטחון נוקשה יותר של 3 זוגות אופניים בתחנה (ולמרווח של 3 זוגות פחות מקיבולת התחנה), וב-3 השעות המאוחרות יותר נלקח מלאי ביטחון של 2 זוגות אופניים בתחנה (ולמרווח של 2 זוגות פחות מקיבולת התחנה).
- <u>זמן הריצה</u> - ריצת מודל האופטימיזציה הוגבלה למשך של עד 5 דקות בכל ריצה, אבל בפועל משך הריצה הסתיים בזמן קצר בהרבה בהגעה לאופטימום.

- <u>פונקציית השינוע של קביעת משימת המלאי בעת הגעת הרכב לתחנה</u> – משימת המלאי נלקחת מתוצאות מודל האופטימיזציה ומכילה את מספר האופניים שיש לטעון או לפרוק בתחנה. את משימת המלאי בפועל יש להתאים תוך התחשבות בכמות העדכנית שניתן לטעון או לפרוק בתחנה בהתאם למצב המלאי בכלי הרכב ולמצב המלאי בתחנה. בנוסף, משימת המלאי לוקחת בחשבון מלאי ביטחון שיש להשאיר בתחנה. במקרה זה נבחר מלאי ביטחון של שני זוגות אופניים ושתי עמדות עגינה בכל תחנה.
- <u>פונקציית השינוע של קבלת משימת הניתוב בעת עזיבת הרכב את התחנה</u> – משימת הניתוב נשלפת מתוך הפלט של מודל האופטימיזציה, יחד איתה נבחנת משימת המלאי הצפויה. אם אין אפשרות לבצע את המשימה בתחנה הבאה במסלול בשל כמות האופניים בכלי הרכב או בתחנה, או שאין צורך לבצע משימה בתחנה, רכב השינוע ידלג על התחנה וייסע ישירות אל התחנה הבאה במסלול שיש בה משימה לבצע (יש לציין, כי מודל האופטימיזציה עשוי לתכנן מעבר בתחנות שאין בהן משימה לבצע כתחנות ביניים, משום שהתבצעה מחיקה של קשתות, אך במודל הסימולציה אין צורך לעבור בתחנות אלה). הווקטור שמכיל את המסלול יכיל את השינוע בשעה הקרובה (ולא רק חצי שעה), משום שייתכן שפרק הזמן יתקצר בעקבות דילוגים. במודל המתמטי, ההתרה החלקית מתבצעת על פרק הזמן שלאחר השעה הראשונה, ולכן בשעה הראשונה מתקבלים משתני ניתוב בעלי משמעות. פונקציית השינוע יוזמת ריצת אופטימיזציה נוספת אם עברה חצי שעה מריצת האופטימיזציה הקודמת, או אם הרכב סיים את המסלול שהוקצה לו לפני תום חצי השעה.
- <u>פרמטרים להרצת מודל האופטימיזציה</u>:
  - היחס בין עלות ההמתנה של משתמשים שמבקשים להחזיר אופניים לבין עלות ההמתנה של משתמשים שמבקשים לשכור אופניים הוא $h = 2$ בשל העלות של חוסר בעמדת עגינה לעומת העלות של חוסר באופניים (כמתואר בסעיף 4.4.5, משום שעבור מחזירים העומדים בפני חוסר בעמדת עגינה אין חלופה של נטישת המערכת ולכן הם מעמיסים עליה יותר מאשר השוכרים).
  - משקל עבור עלויות הנסיעה נקבע ל- $\alpha = 0$. משום שהן עלויות שקועות בבעיה שבה אנחנו מטפלים (ר' הסבר בסעיף 4.4.5).
  - משקל הקנס עבור חריגה ממלאי הביטחון $\gamma = 0.05$ (ניתן לומר שהמשקל של מלאי הביטחון ביחס למשקל של זמן המתנה הוא נמוך, משום שיחידת חריגה ממלאי ביטחון אינה מובילה בהכרח להמתנת לקוחות, שהיא המדד האמיתי של רמת השירות במערכת).
  - ממתינים – במעבר בין ריצות עוקבות לא מתבצעת הזנה של ערך הממתינים למודל האופטימיזציה משום שבפועל מודל המשתמש שלנו מניח שמשתמשים לעולם לא יבחרו להישאר בתחנה וממילא אין למפעיל מידע לגבי מספר הממתינים בתחנה.

שיטות עם רמת יעד מלאי קבועה:

בשיטות אלה רמת היעד של המלאי היא קבועה ושווה למחצית מקיבולת התחנה.

- מסלול משתנה נאיבי (קריטריון כמות בלבד) - התחנה הבאה במסלול המשתנה נקבעת על פי התחנה שהטיפול בה יאפשר את כמות העבודה המקסימאלית בתחנה. כלומר, התחנה הבאה שנבחר לטפל בה היא התחנה שהכי רחוקה מרמת היעד של המלאי הרצויה בה (ר' סעיף 6.2.2).
- מסלול קבוע על פי TSP (ר' סעיף 6.2.4).
- מסלול קבוע על פי מומחה (ר' סעיף 6.2.4).
- מסלול משתנה (קריטריון $\frac{\text{זמן או מרחק נסיעה}}{\text{כמות עבודה}} = \frac{t_{ji}}{f_i}$) - התחנה הבאה במסלול המשתנה נקבעת על פי **מזעור** הקריטריון (ר' סעיף 6.2.3).
- מסלול משתנה (קריטריון $\frac{\text{זמן או מרחק נסיעה}}{(\text{כמות עבודה})^2} = \frac{t_{ji}}{(f_i)^2}$) - התחנה הבאה במסלול המשתנה נקבעת על פי **מזעור** הקריטריון (ר' סעיף 6.2.3).

שיטות עם רמת יעד מלאי משתנה:

בשיטות שבהן יש רמת יעד מלאי משתנה יש לקבוע את פרק הזמן העתידי שבו יש למזער את סך המכירות האבודות (ר' סעיף 6.2.5). עבור הפרמטר של פרק זמן זה בחנו מספר רב של ערכים ולבסוף נבחר משך הזמן המייצג את אורכו של מסלול TSP. השיטות הנבחנות בשילוב רמת יעד משתנה הן:

- מסלול קבוע על פי TSP
- מסלול קבוע על פי מומחה
- מסלול משתנה (קריטריון $\frac{\text{זמן או מרחק נסיעה}}{\text{כמות עבודה}} = \frac{t_{ji}}{f_i}$)
- מסלול משתנה (קריטריון $\frac{\text{זמן או מרחק נסיעה}}{(\text{כמות עבודה})^2} = \frac{t_{ji}}{(f_i)^2}$)

שיטות עם ניפוי תחנות:

בשיטות שפועלות על פי מסלול קבוע, ניתן לדלג על תחנות שבהן אין משימה לבצע או שלא ניתן לבצע בהן משימה בהתאם למלאי העדכני בכלי הרכב או בתחנה. בחרנו לבחון שיטות עם מסלול קבוע שבהן, בנוסף לדילוג על תחנות שבהן אין משימה לביצוע רק ברגע הנוכחי, ניתן לבצע דילוג גם על תחנות שבטווח של מספר שעות קדימה לא יחרגו ממלאי ביטחון (בדומה לרעיון שהוצג בהיוריסטיקה שעושה שימוש במודל התכנות המתמטי).

- מסלול קבוע על פי TSP, רמת יעד משתנה
- מסלול קבוע על פי TSP, רמת יעד קבועה במחצית הקיבולת

ללא שינוע – אין רכבי שינוע כלל

נרצה להשוות את התוצאות של השיטות השונות למצב שבו לא מתבצע כלל שינוע במטרה לבחון את מידת התרומה בפועל להקטנת הזמן העודף בכל אחת משיטות השינוע שהוצגו.

7.3.3. נתוני סימולציה נוספים

- **מספר התקופות הכולל T** – 48 תקופות של חצאי שעות (יממה). העיר תל-אביב פעילה בכל שעות היממה. באזורים מסוימים בעיר המערכת פעילה למדי גם בשעות הקטנות של הלילה. (לכן, באזורים מסוימים בעיר יש ככל הנראה לבצע שינוע **דינאמי** בכל שעות היממה, בשונה משינוע סטאטי). כל הזמנים במודל כגון זמני הנסיעה וזמני ההליכה מתואמים ליחידות הזמן של T.
- **תקופת קירור (Cool Down)** – 2 תקופות נוספות של חצי שעה.

7.3.4. מדדים מחושבים

- **הזמן העודף הכולל:** עבור הלקוחות שהגיעו ליעדם ויצאו מהמערכת – חישוב ההפרש בין סך הזמן ששהו במערכת לבין הזמן האידיאלי שהיו שוהים במערכת לו תמיד היה ניתן לספק להם אופניים זמינים בהגעתם אל תחנת המקור ועמדת עגינה זמינה בהגעתם אל תחנת היעד. תקופת הקירור נדרשת כדי לוודא שכל המשתמשים יצאו מהמערכת מאחר ולא ניתן לבצע את החישוב עבור משתמשים הנמצאים במערכת.
- **נטישות - מספר המשתמשים שאינם מקבלים שירות באופן מיידי:** מספר הלקוחות שאינם מקבלים שירות בהשכרה בתחנת המוצא שלהם, ומספר הלקוחות שאינם מקבלים שירות בהחזרה בתחנת היעד הרצויה שלהם. יש לציין שאי קבלת שירות עבור לקוח נספרת פעם אחת בלבד בהשכרה ופעם אחת בלבד בהחזרה. למשל, אם לקוח לא קיבל שירות בהשכרה בתחנת המוצא המקורית שלו ובחר ללכת ברגל לתחנה אחרת – במידה ובתחנה האחרת הוא שוב לא יימצא זוג אופניים זמין, הנטישה לא תספר בשנית.
- **משכי הזמן שבהם התחנות ריקות או מלאות:** מדד זה הוא מדד שיש באפשרותו של המפעיל למדוד ואכן רבים מהמפעילים עושים שימוש במדד זה. יש לציין שמדד זה מניח משקל שווה לחוסרים לכל התחנות, ובכך אנו רואים את חסרונו, שכן תחנות שבהן הביקוש להשכרות הינו גבוה - הימצאותן ריקות יוביל לחוסר שביעות רצון גבוה יותר, מאשר בתחנות שהביקוש בהן הוא נמוך.
- **אמד למספר הנטישות - אמד למספר הלקוחות שאינם מקבלים שירות באופן מיידי:** אמד למספר הלקוחות שלא יקבלו שירות בהשכרה או בהחזרה. מדד זה מחושב באמצעות שקלול של פרקי הזמן שבהם התחנות ריקות או מלאות עם קצב ההשכרה או ההחזרה החזוי בתחנה. למשל, אם בחצי השעה 14:30-15:00 בתחנה מסוימת התחנה הייתה ריקה למשך 15 דקות וקצב ההשכרה החזוי בה הוא 10 השכרות לחצי שעה, האמד למספר המשתמשים שלא יוכלו לשכור אופניים בתחנה בפרק זמן זה הוא: $\frac{15}{30} \cdot 10 = 5$. מדד זה ניתן לחישוב ע"י המפעילים של המערכת, והוא נותן מענה להטיה שנוצרת באמצעות חישוב המדד הקודם (מדד משכי הזמן שבהם התחנות ריקות או מלאות). נראה בהמשך בתוצאות הסימולציה כי מדד זה

נמצא בקורלציה גבוהה עם שני המדדים הראשונים שאינם ניתנים לחישוב בפועל ע"י מפעילי המערכת.

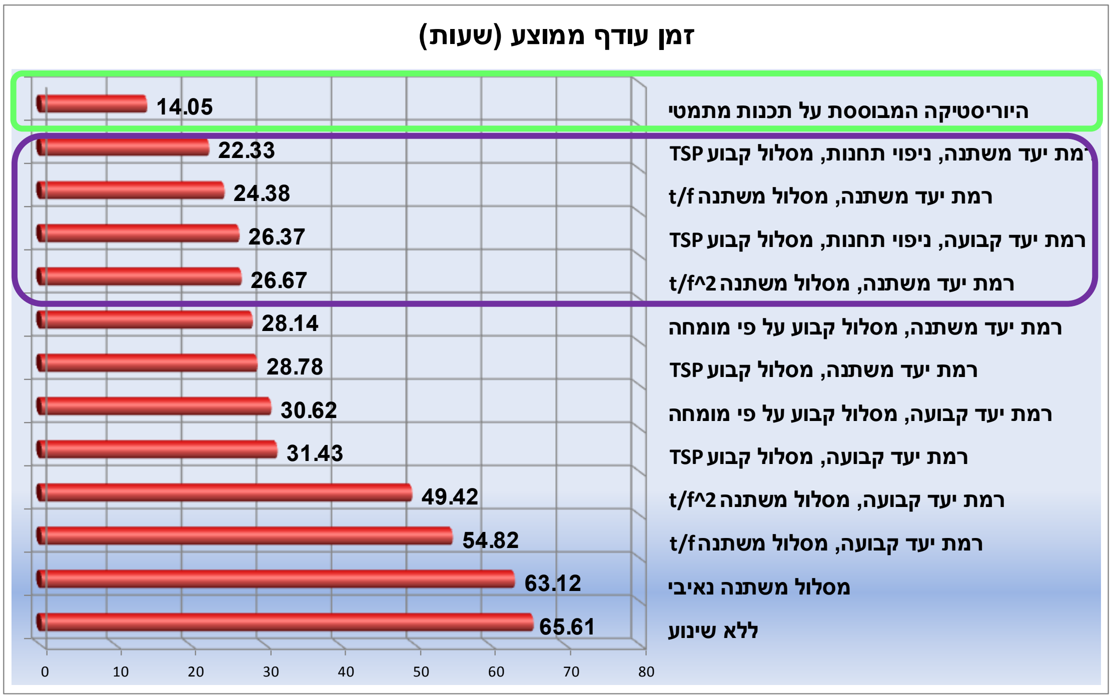
הערה בנושא חישוב המדדים: כאמור, יש לוודא שהחישוב מתבצע כך שבסוף היום הלקוחות כולם יצאו מהמערכת באמצעות הוספת תקופת קירור, על מנת שלא תיווצר הטיה בחישוב המדדים. אחרת ייתכן שלקוחות שטרם הגיעו ליעדם בזבזו זמן עודף גבוה במערכת, אך הוא לא יתווסף לחישוב המדד משום שהם טרם סיימו את השירות.

8. תוצאות הרצת הסימולציה

8.1. תיאור התוצאות

כאמור, במסגרת הניסויים שבוצעו, נבחנו שיטות שונות באמצעות 20 ריאליזציות ביקוש שונות שהוגרלו על סמך נתוני מערכת שיתוף האופניים בתל אביב. משכה של כל ריאליזציה הוא 24 שעות.

באיור 30 ניתן לראות תרשים המתאר עבור כל שיטה את הזמן העודף הממוצע על פני הריאליזציות השונות.



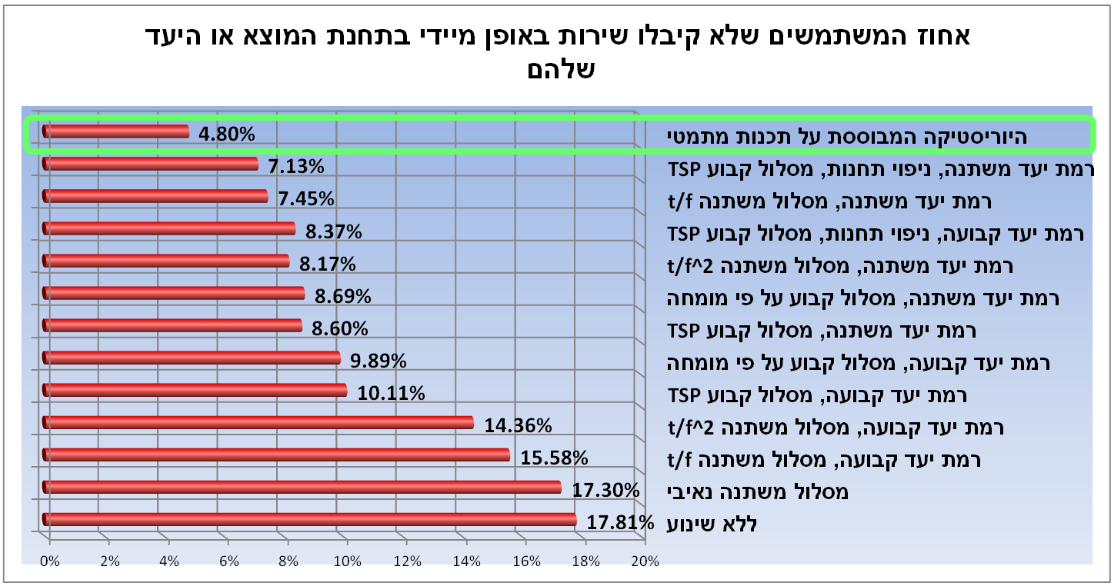
איור 30: השוואת הזמן העודף הממוצע ליום בין השיטות השונות

בתוצאות ניתן לראות שהשיטה המבוססת על מודל התכנות המתמטי היא השיטה הטובה ביותר והשימוש בה מוביל לשיפור משמעותי על פני שיטות אחרות, גם שיטות מתוחכמות.

השיטות הטובות הבאות לאחר שיטת התכנות המתמטי, הן גישות שבאפשרותן לשקלל את אומדן הביקוש העתידי: רמת יעד משתנה וניפוי תחנות הם שני אלמנטים שמאפשרים לקחת בחשבון את הביקוש החזוי בעתיד ולפעול בהתאם.

כיום מפעילי המערכות פועלים בגישות שאינן מתחשבות בביקוש העתידי, אלא במצב המערכת העדכני. ניתן לראות שגישות אלה הן טובות פחות מהגישות האחרות שהוצגו כאן.

באיור 31 ניתן לראות תרשים המשווה, על פני השיטות השונות, את אחוזי המשתמשים שלא קיבלו שירות באופן מיידי.



איור 31: השוואת אחוז המשתמשים שלא קיבלו שירות באופן מיידי בתחנת המוצא או היעד שלהם

ניתן לראות כי השיטה המבוססת על מודל התכנות המתמטי היא הטובה ביותר גם מבחינת מדד זה. בשיטה זו למשתמשים היה כ-4 דקות זמן עודף בממוצע לעומת 5-6 דקות בממוצע בשיטות האחרות (מספר המשתמשים הוא כ-4,200 ליום).

8.2. ניתוח באמצעות מבחנים סטטיסטיים

ניגש לבחון האם ההבדלים בין השיטות במדד הזמן העודף הם מובהקים. לצורך כך בוצעו מבחנים סטטיסטיים שיתוארו להלן.

8.2.1. ניתוח שונות (ANOVA)

על סמך המבחנים המקדימים ניתן לבצע ניתוח שונות משום שההנחות הנדרשות מתקיימות. ניתוח שונות (טבלה 5).

טבלה 5: ניתוח שונות (ANOVA)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig. (P-Value)
Between Groups	65861.377	12	5488.448	104.731	.000
Within Groups	12944.064	247	52.405		
Total	78805.441	259			

בניתוח השונות שהתבצע ניתן לראות כי יש הבדל מובהק בין השיטות - רמת המובהקות קרובה ל-0 (P-Value).

8.2.2. מבחן להשוואת השיטות – מבחן Duncan

קיים הבדל בין השיטות ולכן ניתן לבצע כעת מבחן להשוואת כל השיטות זו לזו – מבחן Duncan. מבחן Duncan משמש לשם השוואת מספר שיטות בו זמנית - המבחן בוחן את ההשערה שכל השיטות הן שוות. אם המבחן לא מאפשר לדחות את ההשערה ששתי שיטות הן שוות, אזי הן מאוחדות לרמה אחת. בטבלה 6 ניתן לראות כי 13 השיטות אוחדו ל-7 רמות.

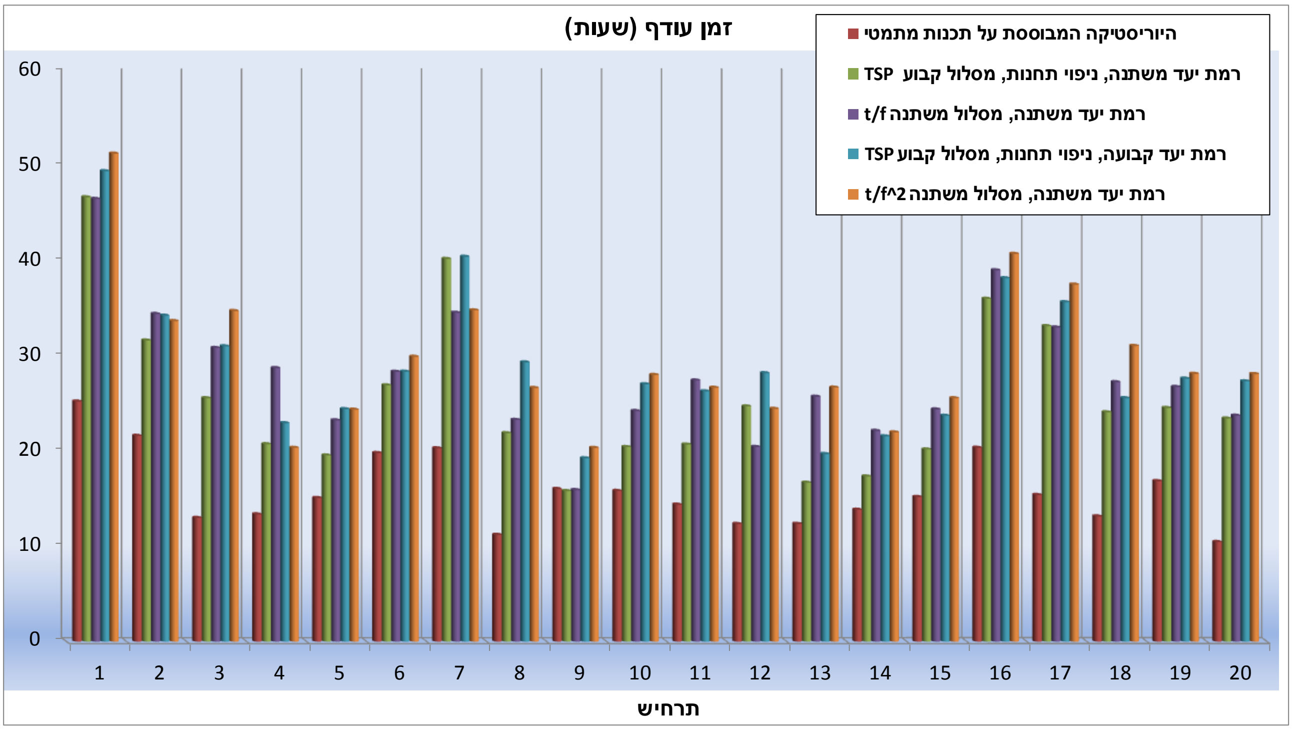
תהליך הבחינה מתבצע ראשית ע״י מיון השיטות על פי סדר יורד של ממוצע ערך פונקצית המטרה ולאחר מכן מתבצעת השוואה באמצעות חישוב הפרשים בסדר הבא: בין הגבוהה ביותר לנמוכה ביותר, בין הגבוהה ביותר לבין השנייה הנמוכה ביותר, וכך הלאה עד להשוואת הגבוהה ביותר והשנייה הגבוהה ביותר. כל הפרש הוא מובהק אך ורק אם הוא גבוה יותר מההפרש המינימאלי למובהקות R_p המחושב באמצעות טבלאות מבחן Duncan. אם נמצא עבור שתי רמות שאינן סמוכות שההפרש ביניהן אינו מובהק – ניתן להשליך את המסקנה גם על הרמות שביניהן. לפרטים נוספים על השיטה ניתן לפנות ל-Duncan (1955) (בעיקר בעמודים 1-7).

על פי תוצאות המבחן בטבלה 6 ניתן לראות כי השיטה המבוססת על המודל המתמטי נמצאת לבד בראש הטבלה באופן מובהק. בנוסף, השיטות הבאות אחריה הן שוב השיטות שלוקחות בחשבון את הביקוש העתידי, אך אין הבדל מובהק ביניהן.

טבלה 6: מבחן Duncan להשוואת ממוצעי השיטות

שיטה	N	קיבוץ שיטות לפי $\alpha = 0.05$						
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
היוריסטיקה המבוססת על תכנות מתמטי	20	14.05						
רמת יעד משתנה, ניפוי תחנות, מסלול קבוע TSP	20		22.33					
רמת יעד משתנה, מסלול משתנה $\frac{t}{f}$	20		24.38	24.38				
רמת יעד קבועה, ניפוי תחנות, מסלול קבוע TSP	20		26.37	26.37	26.37			
רמת יעד משתנה, מסלול משתנה $\frac{t}{(f)^2}$	20		26.67	26.67	26.67			
רמת יעד משתנה, מסלול קבוע על פי מומחה	20			28.14	28.14			
רמת יעד משתנה, מסלול קבוע TSP	20			28.78	28.78			
רמת יעד קבועה, מסלול קבוע על פי מומחה	20				30.62			
רמת יעד קבועה, מסלול קבוע TSP	20				31.43			
רמת יעד קבועה, מסלול משתנה $\frac{t}{(f)^2}$	20					49.42		
רמת יעד קבועה, מסלול משתנה $\frac{t}{f}$	20						54.82	
מסלול משתנה נאיבי, רמת יעד קבועה	20							63.12
ללא שינוע	20							65.61

8.2.3. מובהקות על פי השוואת המופעים



איור 32: השוואת הזמן העודף בכל מופע בנפרד

באיור 32 ניתן לראות תרשים המציג השוואה בין 5 השיטות הטובות ביותר, עבור כל אחד מ-20 המופעים. כאמור, כל מופע הוא יום שהוגרל באופן זהה עבור כל השיטות באמצעות גרעין אקראי משותף. ניתן לראות בתרשים כי בכל המופעים השיטה המבוססת על התכנות המתמטי סיפקה מדד טוב יותר עבור הזמן העודף של המשתמשים.

יש לציין שאין כאן תועלת בהצגת גבולות הרב״ס של התוצאות שהתקבלו, שכן עיקר השונות נובעת מהשונות בין המופעים השונים. לדוגמה, אם נביט במופע החמישי, נבחין כי כל 5 השיטות מקבלות ערך פונקצית מטרה טוב יותר מאשר בשיטות במופע הראשון. לפיכך, גבולות הרב״ס עשויים שלא למסור מידע שימושי במקרה זה. ניתן לראות שמבחינת הדירוג של השיטה המבוססת על מודל התכנות המתמטי – לא קיימת שונות והשיטה פועלת באופן מיטבי בכל המופעים הנפרדים.

8.3. קורלציה בין מדדים

יש לציין שהמפעיל בשטח אינו יכול לשקלל את המדד האמיתי של הזמן העודף של המשתמשים מאחר ואין בידיו מידע על הפעולות של המשתמשים שלא קיבלו שירות בתחנות המוצא או היעד המועדפות עליהם. לפיכך נבחן את הקורלציה של מדד זה עם מדדים אחרים, קלים יותר לחישוב, על מנת לספק למפעילים שיטת מדידה יעילה.

לצורך בחינת הקורלציה בין המדדים נבחן את הקורלציה עבור כל שיטה באופן נפרד, על מנת שהשיטה לא תהיה גורם מסביר בין התצפיות.

טבלה 7: בחינת קורלציה בין המדדים השונים

		הזמן העודף הכולל	נטישות	אמד למספר הנטישות	משכי הזמן שבהם התחנות ריקות או מלאות
רמת יעד קבועה, ניפוי תחנות, מסלול קבוע TSP	**הזמן העודף הכולל**		0.97	0.94	0.76
	נטישות	0.97		0.96	0.77
	אמד למספר הנטישות	0.94	0.96		0.83
	משכי הזמן שבהם התחנות ריקות או מלאות	0.76	0.77	0.83	
רמת יעד קבועה, מסלול קבוע TSP	**הזמן העודף הכולל**		0.90	0.90	0.62
	נטישות	0.90		0.94	0.63
	אמד למספר הנטישות	0.90	0.94		0.66
	משכי הזמן שבהם התחנות ריקות או מלאות	0.62	0.63	0.66	
רמת יעד קבועה, מסלול קבוע על פי מומחה	**הזמן העודף הכולל**		0.94	0.93	0.57
	נטישות	0.94		0.93	0.60
	אמד למספר הנטישות	0.93	0.93		0.63
	משכי הזמן שבהם התחנות ריקות או מלאות	0.57	0.60	0.63	
רמת יעד משתנה, ניפוי תחנות, מסלול קבוע TSP	**הזמן העודף הכולל**		0.98	0.96	0.72
	נטישות	0.98		0.97	0.68
	אמד למספר הנטישות	0.96	0.97		0.64
	משכי הזמן שבהם התחנות ריקות או מלאות	0.72	0.68	0.64	
רמת יעד משתנה, מסלול קבוע TSP	**הזמן העודף הכולל**		0.96	0.96	0.47
	נטישות	0.96		0.97	0.40
	אמד למספר הנטישות	0.96	0.97		0.40
	משכי הזמן שבהם התחנות ריקות או מלאות	0.47	0.40	0.40	
רמת יעד משתנה, מסלול קבוע על פי מומחה	**הזמן העודף הכולל**		0.97	0.95	0.68
	נטישות	0.97		0.96	0.62
	אמד למספר הנטישות	0.95	0.96		0.61
	משכי הזמן שבהם התחנות ריקות או מלאות	0.68	0.62	0.61	
מסלול משתנה נאיבי	**הזמן העודף הכולל**		0.92	0.82	0.47
	נטישות	0.92		0.93	0.54
	אמד למספר הנטישות	0.82	0.93		0.67
	משכי הזמן שבהם התחנות ריקות או מלאות	0.47	0.54	0.67	

רמת יעד קבועה, מסלול משתנה $\frac{t}{f}$	**הזמן העודף הכולל**		0.94	0.93	0.50
	נטישות	0.94		0.96	0.52
	אמד למספר הנטישות	0.93	0.96		0.60
	משכי הזמן שבהם התחנות ריקות או מלאות	0.50	0.52	0.60	
רמת יעד קבועה, מסלול משתנה $\frac{t}{(f)^2}$	**הזמן העודף הכולל**		0.97	0.94	0.58
	נטישות	0.97		0.96	0.62
	אמד למספר הנטישות	0.94	0.96		0.71
	משכי הזמן שבהם התחנות ריקות או מלאות	0.58	0.62	0.71	
רמת יעד משתנה, מסלול משתנה $\frac{t}{(f)^2}$	**הזמן העודף הכולל**		0.95	0.93	0.52
	נטישות	0.95		0.96	0.39
	אמד למספר הנטישות	0.93	0.96		0.41
	משכי הזמן שבהם התחנות ריקות או מלאות	0.52	0.39	0.41	
רמת יעד משתנה, מסלול משתנה $\frac{t}{f}$	**הזמן העודף הכולל**		0.95	0.95	0.55
	נטישות	0.95		0.95	0.52
	אמד למספר הנטישות	0.95	0.95		0.55
	משכי הזמן שבהם התחנות ריקות או מלאות	0.55	0.52	0.55	
ללא שינוע	**הזמן העודף הכולל**		0.91	0.85	0.61
	נטישות	0.91		0.95	0.68
	אמד למספר הנטישות	0.85	0.95		0.72
	משכי הזמן שבהם התחנות ריקות או מלאות	0.61	0.68	0.72	
היוריסטיקה המבוססת על תכנות מתמטי	**הזמן העודף הכולל**		0.97	0.91	0.81
	נטישות	0.97		0.93	0.81
	אמד למספר הנטישות	0.91	0.93		0.90
	משכי הזמן שבהם התחנות ריקות או מלאות	0.81	0.81	0.90	

בטבלה 7 ניתן לראות כי יש קורלציה בין הזמן העודף הכולל לבין מדד הנטישות והאמד למספר הנטישות (כפי שהוא מוצג בסעיף 7.3.4. האמד למספר הנטישות הינו מדד שניתן לחישוב במערכת האמיתית ואנחנו ממליצים למפעילי המערכת להשתמש בו. ניתן לראות כי אכן ישנה קורלציה גבוהה בין מדד הנטישות לבין האמד לנטישות ולכן האמד יכול לשמש לצורך אמידת מספר המשתמשים שאינם מקבלים שירות באופן מיידי. המדד של משכי הזמן שבהם התחנות ריקות או מלאות אינו יכול לתפקד כמדד מתאים, משום שבינו לבין המדד האמיתי של הזמן העודף יש קורלציה חלשה בחלק מהמקרים. לכן ההמלצה למפעילי המערכת היא שלא להשתמש במדד זה, משום שהוא יכול להוביל לתפעול שגוי של המערכת. יש בכך חידוש חשוב, שכן זהו מדד מקובל בקרב מפעילי מערכות לשיתוף אופניים, אך כאן הראינו כי מדד זה עלול להוביל לתובנות שגויות.

ניתן להבחין גם בקורלציה גבוהה בד״כ בין מדד הזמן העודף לבין מדדי הנטישות ואומדני הנטישות. כלומר גם אם המפעיל מתרכז במזעור מספר הנטישות הוא עשוי למזער בעקיפין גם את הזמן העודף שהוא לדעתנו המדד הנכון (אך הבלתי מדיד בפועל) לרמת השירות של המערכת.

8.4. סיכום

ההיוריסטיקה המתמטית שהוצגה מאפשרת קבלת פתרונות טובים גם במונחי פונקציית המטרה האמיתית שהמשתמשים רואים לנגד עיניהם – מדד הזמן העודף. זאת על אף שפונקציית המטרה של המודל המתמטי העומד בבסיס השיטה היא מזעור זמני המתנה. הניסוי שלנו מדגים שהשיטה עדיפה באופן מובהק בהשוואה לכללי שילוח שונים שנבדקו.

יש לציין שהמפעיל בשטח אינו יכול לשקלל את המדד של מודל התכנות המתמטי (זמני המתנת הלקוחות) וגם לא את המדד האמיתי של הזמן העודף של המשתמשים.

חשוב להבין כי במערכת האמיתית גם אין אפשרות לחשב את מספר המשתמשים בפועל שלא קיבלו שירות באופן מיידי. ניתן לאמוד אותו בלבד. לפיכך, אנחנו מספקים למפעילי המערכת מדד יעיל שניתן לחישוב ונמצא בקורלציה גבוהה עם המדדים האחרים (ראה חישוב המדד בסעיף 7.1).

9. סיכום ומסקנות

9.1. תרומה

עבודה זו דנה בבעיית השינוע הדינאמית במערכות לשיתוף אופניים. המתודולוגיה שהוצגה מכילה שני מרכיבים עיקריים. האחד, הגדרת מודל התנהגות המשתמשים במערכת באמצעות מודל התנהגות אקסיומטי המניח שהמשתמשים ממזערים את הזמן העודף שהם מבזבזים במערכת. השני, פיתוח שיטה המבוססת על מודל מתמטי ועל תהליך של אופק מתגלגל על מנת לפתור את בעיית השינוע הדינאמית.

השיטה המבוססת על המודל המתמטי פועלת באמצעות פתרון מודל דטרמיניסטי בכל פרק זמן קצר (למשל, חצי שעה), וביצוע של מספר התאמות היוריסטיות ליישום הפתרון בסביבה של זמן-אמת, בהתאם למצב המערכת העדכני ביותר.

רמת השירות במודל המתמטי מיוצגת באמצעות פונקציית מטרה חליפית קלה יותר לחישוב, המשקללת את זמני ההמתנה של המשתמשים, אך הראינו כי היא מסייעת לשפר מדדים נוספים כגון פונקציית המטרה של סך הזמן העודף של המשתמשים במערכת.

לצורך ההשוואה פותחו כללי שילוח היוריסטיים נוספים. חלקם מבוססים על אומדן הביקוש העתידי וחלקם קצרי ראות ומבוססים על המצב הנוכחי של המערכת בלבד. האחרונים מדמים את השיקולים האינטואיטיביים של המפעילים כיום.

השיטות השונות הושוו באמצעות מודל סימולציה ובאמצעות נתוני ביקוש שנאספו ממערכת שיתוף האופניים בתל-אביב. במודל שולבו ההחלטות שמתבצעות באמצעות כל שיטה ויוצגה הדינאמיקה של המערכת שנוצרה כתוצאה מההחלטות הללו. לבסוף המודל מספק חישוב מדדי רמת השירות שהושגו באמצעות כל שיטה.
הניסוי הנומרי באמצעות סימולציה הדגים את עדיפות הפתרון המתקבל מהמודל המתמטי על פני השיטות האחרות, גם המתוחכמות שבהן, ואת עליונותם של כללי השילוח המבוססים על אומדני ביקוש עתידי על פני הכללים קצרי הראות. מרבית השיטות שהוצגו מאפשרות שיפור ניכר במדדי איכות השירות של המערכת בהשוואה לאופן שבו פועלים מפעילי המערכת.

המחקר מראה שניתן להשיג שיפור ברמת השירות במערכות לשיתוף אופניים באמצעות השיטה שפותחה, ולסייע בכך להגברת השימוש במערכת. לא מדובר רק בחסכון בזמן, אלא גם בשיפור רמת האמינות של המערכת שבעקבותיו לקוחות נוספים ישתמשו במערכת ויובילו להפחתת עומסי התנועה ובעיות החניה במרכז העיר, להפחתת זיהום האוויר והרעש בעיר, להפחתת השימוש בדלק ולהפחתת הפליטה של גזי חממה (GHG).

ניפוי התחנות ומחיקת הקשתות מסייעות להשגת פתרון במהירות הנדרשת במערכת זמן-אמת. מומלץ לבחון את השימוש בשיטות אלה על בעיות ניתוב מלאי אחרות.

9.2. המלצות למחקר עתידי

השינוע הדינאמי במהלך היום מושפע מהמלאי ההתחלתי בתחנות בתחילת היום ולכן תהיה תועלת בבחינת השילוב בין שינוע סטאטי לבין שינוע דינאמי.

בעיר תל-אביב וייתכן שגם בערים מרכזיות נוספות בעולם, מערכת שיתוף האופניים דווקא פעילה במיוחד בשעות הלילה ולכן יש לבצע שינוע דינאמי בכל שעות היממה. כדאי לבחון כיצד מתפקדות השיטות שהוצגו בהפעלה על פני תקופה ארוכה יותר של מספר ימים או מספר שבועות.

על מנת לבחון את השיטה לאורך זמן יש לקבוע תקופת חימום ולבחון כיצד השיטה מתפקדת לאחר תקופה זו.

באמצעות מודל הסימולציה שפותח ניתן לבחון מדיניות ושאלות "What If" שונות כגון מיקום ומספר מחסני הביניים, מספר כלי הרכב ועוד.

9.3. יישום בפועל

ייתכן כי מפעילי המערכת יעדיפו לפעול עם מסלול דומה עד כמה שניתן בכל יום על מנת שהנהגים והמשלחים ילמדו את העבודה ויפתחו מיומנות, ולצורך כך הם יכולים להשתמש באחת מהשיטות הנוספות המוצעות בעבודה זו, הפשוטות יחסית ליישום.

מאידך, האקראיות במערכת דורשת מסלולים משתנים ועל פי תוצאות המחקר ניתן להשיג שיפור ברמת השירות במערכות לשיתוף אופניים באמצעות השיטה המבוססת על המודל המתמטי. לכן ישנה הצדקה לפיתוח מערכת מידע וטכנולוגיה שתוכל ליישם את השיטה.

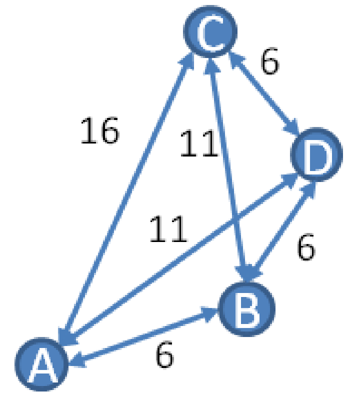
חלק ממסקנות המחקר יושמו כבר בהצלחה במערכת שיתוף האופניים בתל-אביב ובהן שימוש במידע ובתחזיות לגבי אומדן הביקוש העתידי וכן שימוש במצבורים של זוגות אופניים בין האזורים.

10. נספחים

10.1. נספח א' - דוגמה מספרית למחיקת הקשתות על פי אלגוריתם 2

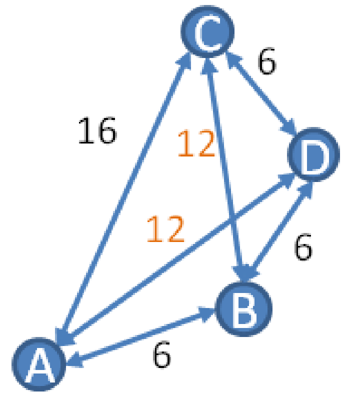
נתבונן בדוגמה המופיעה באיור 33(א). מטריצת המרחקים עבור הדוגמה מופיעה בטבלה 8(א) ומטריצת הקשתות שלה מופיעה בטבלה 8(ב).

(א)



איור 33(א): ערכי המרחקים לפני מחיקת הקשתות

(ב)



איור 33(ב): ערכי המרחקים לאחר מחיקת הקשתות

איור 33: דוגמה למחיקת הקשתות

טבלה 8: ערכי מטריצת המרחקים ומטריצת הקשתות לפני מחיקת הקשתות

(א)

D	C	B	A	
11	16	6	0	A
6	11	0	6	B
6	0	11	16	C
0	6	6	11	D

טבלה 8(א): מטריצת המרחקים לפני מחיקת הקשתות

(ב)

D	C	B	A	
1	1	1	1	A
1	1	1	1	B
1	1	1	1	C
1	1	1	1	D

טבלה 8(ב): מטריצת הקשתות לפני מחיקת הקשתות

המשך הדוגמה:

- נניח $\theta = 0.1$
- נמיין את הקשתות לפי סדר עולה של זמן הנסיעה ונקבל את הסדר הבא מימין לשמאל:
  AB=6, BD=6, CD=6, AD=11, BC=11, AC=16
- לאחר מכן נבחן את הקשתות אחת-אחת ונבדוק האם מתקיים התנאי $(1-\theta)\cdot\left(t_{ik}+t_{kj}\right)\leq t_{ij}$.
- <u>עבור AB, BD, CD התנאי אינו מתקיים ולכן אין שינוי:</u>
  - **AB:** 0.9· (AD+DB)=0.9·(11+6)=15.3>6

- ○ **BD:** $0.9\cdot (BA+AD)=0.9\cdot(6+11)=15.3>6$
- ○ **CD:** $0.9\cdot (CB+BD)=0.9\cdot(11+6)=15.3>6$

- <u>עבור AD, BC התנאי מתקיים ולכן הקשת נמחקת ומתבצע עדכון במטריצת המרחקים</u>
  - ○ **AD:** $0.9\cdot (AB+BD)=0.9\cdot(6+6)=10.8\leq 11$
  - ○ **BC:** $0.9\cdot (BD+DC)=0.9\cdot(6+6)=10.8\leq 11$
  - ○ העדכון הוא כדלקמן:

    $AD=AB+BD=12$

    $BC=BD+DC=12$

- את העדכון ניתן לראות באופן גרפי באיור 33(ב), ובאופן טבלאי בטבלה 9(א) ובטבלה 9(ב).

טבלה 9: ערכי מטריצת המרחקים ומטריצת הקשתות כתוצאה ממחיקת הקשתות

(א)

	A	B	C	D
A	0	6	16	<u>**12**</u>
B	6	0	<u>**12**</u>	6
C	16	<u>**12**</u>	0	6
D	<u>**12**</u>	6	6	0

טבלה 9(א): מטריצת המרחקים לפני מחיקת הקשתות

(ב)

	A	B	C	D
A	1	1	1	<u>**0**</u>
B	1	1	<u>**0**</u>	1
C	1	<u>**0**</u>	1	1
D	<u>**0**</u>	1	1	1

טבלה 9(ב): מטריצת הקשתות לפני מחיקת הקשתות

- <u>לאחר מכן הקשת עבור הקשת AC התנאי אינו מתקיים ולכן אין שינוי:</u>
  - ○ **AC:** $0.9\cdot (AD+DC)=0.9\cdot(12+6)=16.2>16$

יש לציין שמטריצת זמני הנסיעה או המרחקים איננה בהכרח סימטרית, ופה זה הוצג כך רק לצורך הדוגמה.

<u>סדר לא עולה – דוגמה נגדית</u>

נדגים מדוע יש צורך בסדר עולה באמצעות דוגמה נגדית.

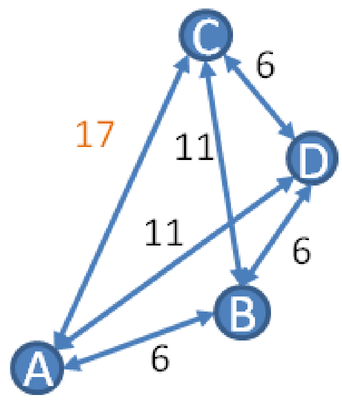
- נבחן את הקשתות על פי סדר כלשהו שאינו עולה מימין לשמאל:

  $AC=16$, $AD=11$, $BC=11$ וכן הלאה.
- **AC:** $0.9\cdot (AD+DC)=0.9\cdot (AB+BC)=0.9\cdot(11+6)=15.3\leq 16$

  התנאי מתקיים ולכן הקשת נמחקת ויש עדכון של המרחק: $AC=AD+DC=AB+BC=17$

  את העדכון ניתן לראות באיור 34(א).

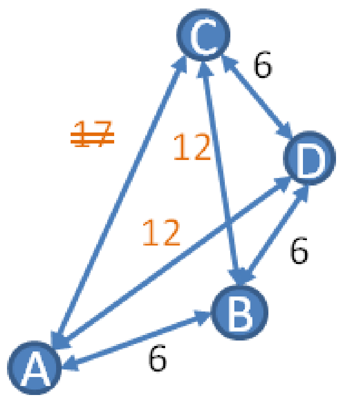
(א)



איור 34(א): מחיקת קשת AC

ועדכון המרחק מ-A ל-C.

(ב)



איור 34(ב): שינוי בקשתות AD, BC.

המרחק מ-A ל-C, הוא כבר לא 17.

איור 34: השינויים לאחר מחיקת הקשתות בסדר שאינו עולה

- **AD:** $0.9\cdot(AB+BD)=0.9\cdot(6+6)=10.8\le 11$

  BC: $0.9\cdot(BD+DC)=0.9\cdot(6+6)=10.8\le 11$

  התנאי מתקיים ולכן יש מחיקת קשתות ועדכון מרחקים:

  $AD=AB+BD=12$

  $BC=BD+DC=12$

- המרחק של הגעה מתחנה A אל תחנה C, כעת הוא כבר לא 17 (איור 34(ב)), אלא:

  $AC=AD+DC=AB+BC=12+6=18$

כאן כבר יש חריגה של יותר מ-10% מאורכה המקורי של הקשת, ולכן זה אינו מצב תקין:

$\left(\frac{18}{16}-1\right)=12.5\%$. בדוגמה הקודמת על פי סדר עולה התקבל: $\left(\frac{17}{16}-1\right)=6.25\%$.

לפיכך, יש לטפל בקשתות על פי סדר עולה של זמני הנסיעה.

10.2. **נספח ב' – יישום מודל הסימולציה**

10.2.1. סימולציה של אירועים בדידים

סימולציה המבוססת על אירועים בדידים בזמן, יושמה כקוד בשפת Matlab (הקוד זמין לפי בקשה). כל אירוע מיוצג במערכת על ידי וקטור שורה במטריצת האירועים. האיבר הראשון בכל אירוע הוא הזמן שבו מתרחש האירוע ושאר האיברים מייצגים את זהות הישות ואת סוג האירוע. רשימת האירועים היא מטריצה שמכילה את וקטורי האירועים. במהלך הריצה נוצרים אירועים שונים עבור המשתמשים ועבור כלי הרכב.

10.2.2. הישויות במערכת

במודל הסימולציה קיימות ישויות משני סוגים – משתמשים ורכבי שינוע. נתאר את מאפייני הישויות:

משתמש:

- תכונות שנקבעות בעת יצירת הישות: תחנת מוצא, זמן הגעה למערכת ולתחנת המוצא, יעד רצוי.
- תכונות שנקבעות במהלך הריצה: יעד ביניים (כאשר המשתמש בוחר מסלול המשלב הליכה ורכיבה יחד), זמן הגעה ליעד ביניים, זמן הגעה ליעד הרצוי הסופי, זמן שהיה במערכת, זמן עודף מבוזבז במערכת.

רכב:

- תכונות שנקבעות בעת יצירת הישות: מספרי התחנות (או האזור) שהרכב אחראי עליהן, זמני טעינה ופריקה.
- תכונות שנקבעות במהלך הריצה: מסלול - זמן הגעה לתחנה, זמן עזיבת תחנה, משימות מלאי - מספר האופניים לפריקה או לטעינה בתחנות.

10.2.3. משאבים במערכת

במודל הסימולציה המשאבים הם זוגות האופניים בתחנות ועמדות העגינה בתחנות. המשאבים מפוזרים בתחנות השונות והכמות שלהם בכל תחנה נקבעת על ידי קיבולת התחנה (מספר עמדות העגינה בתחנה) ועל ידי רמת המלאי העדכנית בתחנה (מספר זוגות האופניים בתחנה). כמות המשאבים הללו משתנה במהלך ריצת הסימולציה.

10.2.4. האירועים במערכת

שעון הסימולציה מתקדם על פי התרחשותם של האירועים במערכת. ישנם אירועים שנוצרים ונוספים למטריצת האירועים בתחילת ריצת הסימולציה וישנם אירועים שמתווספים במהלך הריצה. האירועים המניעים את הסימולציה ומשפיעים על מצב המערכת הם האירועים הבאים:

אירועי המשתמשים – הגעה לתחנת השכרה, הגעה לתחנת החזרה, עזיבת המערכת.

אירועי השינוע – הגעת הרכב לתחנה (והחלטה טעינה/פריקה) ועזיבת הרכב את התחנה.

טיפול באירוע הגעת משתמש לתחנת השכרה:

ההגעה הראשונה לכל תחנה נוצרת בתחילת הריצה. אם התחנה אינה ריקה – שכור אופניים והפחת זוג אופניים מתחנת ההשכרה, צור אירוע הגעה לתחנת החזרה, צור אירוע הגעה לתחנה עבור משתמש נוסף. אם התחנה ריקה – צור אירוע הגעה בתחנה קרובה שאינה ריקה או צור אירוע עזיבת המערכת והליכה ברגל אל היעד (פירוט בסעיף 7.1).

טיפול באירוע הגעת משתמש לתחנת החזרה:

אם התחנה אינה מלאה - החזר אופניים והוסף זוג אופניים לתחנת ההחזרה, צור אירוע עזיבת המערכת (עכשיו או בעוד מספר יחידות זמן השווה לזמן ההליכה אל היעד הרצוי האמיתי, אם מדובר בתחנת ביניים). אם התחנה מלאה - צור אירוע הגעה בתחנה קרובה שאינה מלאה (פירוט בסעיף 7.1).

טיפול באירוע עזיבת משתמש את המערכת:

עזוב את המערכת, הפחת אחד ממספר המשתמשים שנמצאים במערכת, הוסף אחד למספר המשתמשים שעזבו את המערכת, הוסף מידע לחישוב המדדים.

טיפול באירוע הגעת הרכב לתחנה:

ההגעה הראשונה עבור כל רכב נוצרת בתחילת הריצה. בעת ההגעה - בצע משימת מלאי, צור אירוע עזיבה.

טיפול באירוע עזיבת הרכב את התחנה:

בעת העזיבה – בדוק/חשב מהי התחנה הבאה במסלול, צור אירוע הגעה לתחנה הבאה.

10.2.5. <u>הגדרת מצב המערכת</u>

מצב המערכת בכל זמן מוגדר ע״י מצב המלאי בתחנות, מצב המלאי ברכבי השינוע ומיקומם. מיקום כלי רכב שאינו נמצא בתחנה מתואר על ידי התחנה הבאה אליה הוא אמור להגיע וזמן ההגעה לשם.

10.2.6. <u>הקלט למערכת</u>

הפרמטרים שמגדירים את מאפייני המערכת: קיבולת התחנות, מספר כלי הרכב וקיבולתם, משך הטעינה והפריקה של אופניים בתחנה, מטריצות זמני הנסיעה, זמני ההליכה וזמני הרכיבה בין התחנות.

הפרמטרים שמגדירים את המצב ההתחלתי של המערכת: רמת המלאי בתחנות, רמת המלאי בכלי הרכב ומיקומם של רכבי השינוע.

נתוני הביקוש:

- אנחנו מניחים שהביקוש להשכרות הינו תהליך ביקוש פואסוני שאינו הומוגני בזמן. היממה מחולקת לפרקי זמן קצרים (למשל: 30 דק׳) ואנו מניחים שתהליך הביקוש נשאר קבוע בכל פרק זמן כזה. נסמן את תוחלת הביקוש להשכרות בתחנה i בפרק זמן t באמצעות λ_{it}. ניתן לאמוד נתונים אלו על סמך היסטורית הביקוש במערכת במספר רב של ימים בעלי מאפיינים דומים.
- מטריצה OD_{ij} המגדירה את ההסתברות שמשתמש שתחנת המוצא שלו היא i יבחר לרכב אל תחנת היעד j. מטריצת ה-OD_{ij} מאפשרת לאפיין את האינטראקציה הקיימת בין התחנות

במערכת לשיתוף אופניים. האינטראקציה מתבטאת למשל בכך, שלקוח שאינו יכול לממש את ההשכרה הרצויה בתחנת המוצא - לא יגיע ליעדו לביצוע ההחזרה הצפויה ולעומת זאת, ייתכן שיגיע לתחנה סמוכה כדי לשכור אופניים. ככלל המטריצה OD עשויה להיות תלויה גם בזמן t אך בשל מיעוט בנתונים היסטוריים החלטנו להתעלם מתלות זו בסימולציה ואמדנו את OD_{ij} על סמך פרופורציות המעבר בין כל זוג תחנות לאורך כל התקופה.

10.2.7. <u>יצירת תרחישים שונים על סמך נתוני הביקוש</u>

על מנת ליצור תסריטי ביקוש (scenarios) שונים בעלי מאפיינים דומים לביקוש שנצפה בפועל במערכת, נעשה שימוש בתוחלת הביקוש λ_{it} על פי השיטה הבאה:

- עבור כל תחנה i
  - עבור כל פרק זמן t – הגרלת מספר המשתמשים שיגיעו בפרק הזמן על פי התפלגות פואסון עם תוחלת λ_{it}.
    - עבור כל אחד מהמשתמשים שהוגרלו להגיע בפרק הזמן המסוים:
      - הגרלת זמן הגעת המשתמש (באופן אחיד על פני פרק הזמן t)
      - הגרלת היעד שאליו שואף להגיע המשתמש

10.2.8. <u>פונקציות השינוע</u> – החלטות השינוע מתבצעות בעת התרחשותם של שני אירועים – אירוע הגעת הרכב לתחנה בו נקבעת משימת המלאי, ואירוע עזיבת הרכב את התחנה בו נקבעת משימת הניתוב. אירועי השינוע יושמו בנפרד מתוכנית הסימולציה באמצעות קריאה לפונקציות על מנת שניתן יהיה לבחון מתודולוגיות שינוע שונות מבלי לתחזק כמה תכניות סימולציה. בעת התרחשות אירוע של הגעת כלי רכב לתחנה - מתבצעת קריאה לפונקציה שתפקידה הוא לקבוע את המשימה שתבוצע בתחנה, כלומר מהי הכמות שיש לטעון או לפרוק בתחנה. בעת התרחשות אירוע של עזיבת הרכב את התחנה - מתבצעת קריאה לפונקציה שתפקידה הוא לקבוע מהי התחנה הבאה במסלול הרכב. התחנה הבאה יכולה להיקבע על סמך מסלול מתוכנן מראש, או על סמך החלטה בזמן-אמת שמתחשבת במצב המערכת העדכני. יש לשים לב, כי פונקציות אלה צריכות לפעול במסגרת האפשרויות הפיזיביליות של המערכת. למשל לא ניתן לפרוק זוגות אופניים החורגים מהמלאי על הרכב או מיתרת הקיבולת של התחנה. פונקציות אלה מקבלות כקלט את מספר הרכב ואת נתוני מצב המערכת העדכני (במלאי בתחנות וברכבי השינוע, מיקום רכבי השינוע), ובנוסף הן מבצעות שימוש בנתוני המבנה של המערכת (קיבולות, זמני נסיעה), על מנת לבצע החלטות ניתוב והחלטות מלאי עבור כלי הרכב המשנעים. פונקציות אלה עשויות לטעון נתונים נוספים כגון – מסלול שנקבע מראש עבור כלי הרכב, מספרי התחנות שעליהן אחראי הרכב באזור שבו הוא פועל, מלאי ביטחון נדרש בתחנות, תחנות שמתפקדות כמחסני ביניים (באפרים).

10.2.9. <u>נתוני סימולציה נוספים</u>

- **מספר התקופות הכולל T** – אופק התכנון.
- **תקופת קירור (Cool down)** - בתקופה זו אין הגעות של משתמשים חדשים למערכת והסימולציה מופעלת רק על מנת לאפשר לכל המשתמשים לעזוב את המערכת. ע"י כך ניתן להימנע מהטיות בחישוב המדדים המבוססים על מידע הנאסף רק בעת שהמשתמש עוזב את המערכת.
- **שעון הסימולציה**

11. רשימת מקורות

Barth M., Todd M., Xue L., (2004). User-Based Vehicle Relocation Techniques for Multiple-Station Shared-Use Vehicle Systems. *The 80th Annual Meeting of the Transportation Research Board.*

Benchimol, M., Benchimol, P., Chappert, B., Taille, A.D.L, Laroche, F., Meunier, F. and Robinet, L. (2011). Balancing the stations of a self service “bike hire” system. *RAIRO Operations Research* 45, 37-61.

Berbeglia, G., Cordeau, J.-F., Gribkovskaia, I. and Laporte, G. (2007). Static pickup and delivery problems: a classification scheme and survey. *TOP*, 15, 1-31.

Berbeglia, G., Cordeau, J.-F. and Laporte, G. (2010). Dynamic pickup and delivery problems. *European Journal of Operational Research*. 202, 8-15.

Bertazzi, L., Savelsbergh, M. and Speranza, M.G. (2008). Inventory Routing. In: "The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges" Edited by Golden, B., Raghavan, S. and Wasil, E. Springer.

Borgnat, P., Robardet, C., Rouquier, J.-B., Fleury, E., Abry, P., Flandrin, P., (2010). Shared bicycles in a city: a signal processing and data analysis perspective. *Advances in Complex Systems* 14(3), 415-438.

Chemla, D., Meunier, F., & Wolfler Calvo, R. (2013). Bike sharing systems: Solving the static rebalancing problem. *Discrete Optimization*, 10(2), 120–146

Contardo, C., Morency, C. and Rousseau, L.-M. (2012). Balancing a dynamic public bike-sharing system. Working paper.

Demaio, P. (2004). Will Smart Bikes Succeed as Public Transportation in the United States?. *Journal of Public Transportation*, 7, 1-16.

Demaio P. and Meddin R. (2012). The Bike-Sharing World Map. *The Bike-Sharing Blog* *http://bike-sharing.blogspot.co.il/* [accessed: September 17, 2012]

Duncan B. D. (1955). Multiple Range and Multiple F Tests. *Biometrics,* 11 (1), 1-42 *http://www.jstor.org/stable/3001478*

Froehlich, J., Neumann, J., Oliver, N., (2009). Sensing and predicting the pulse of the city through shared bicycling. *Proceedings of the 21st International Joint Conference on Artificial intelligence*. 1420–1426.

Kaltenbrunner, A., Jens, G., Joan, C., Rodrigo, M., and Rafael B. (2008). Bicycle cycles and mobility patterns - Exploring and characterizing data from a community bicycle program. http://arxiv.org/abs/0810.4187v1

Kaltenbrunner, A., Meza, R., Grivolla, J., Codina, J., Banchs, R., (2010). Urban cycles and mobility patterns: exploring and predicting trends in a bicycle-based public transport system. *IEEE Pervasive and Mobile Computing* 6, 455–466.

Kek A, Cheu R, Meng Q, Fung C. A (2006). Decision Support Tool for Vehicle Relocation Operations in Carsharing Systems, *The 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board.*

Larsen, A., Madsen, O. B.G. and M. Solomon, M. (2008) Recent Developments in Dynamic Vehicle Routing Systems. In: "The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges" Edited by Golden, B., Raghavan, S. and Wasil, E. Springer.

Lathia, N., Ahmed, S. and Capra, L. (2012). Measuring the impact of opening the London shared bicycle scheme to casual users. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 22, 88–102.

Lin, J-R. and Yang, T.-H. (2011). Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints. *Transportation Research Part E*, 47(2), 284–294.

Nair R. and Miller-Hooks E. (2011). Fleet Management for Vehicle Sharing Operations, *Transportation Science*, 45(4), 524-540.

Papanikolaou D. (2011). A New System Dynamics Framework for Modeling Behavior of Vehicle Sharing Systems. *Proceedings of the 2011 Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design*, 126-133.

Pillac, V., Gendreau, M., Guéret, C., and Medaglia, A. L. (2012). A review of dynamic vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, 225(1), 1–11.

Powell, W. B., Jaillet, P., and Odoni, A. (1995). Stochastic and dynamic networks and routing. *Handbooks in operations research and management science*, 8, 141-295.

Raviv, T., Tzur, M., and Forma, I. A. (2013). Static repositioning in a bike-sharing system: models and solution approaches. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 1-43, 2(3), 187-229

Raviv, T., and Kolka, O. (2013). Optimal inventory management of a bike-sharing station. *IIE Transactions*, 45(10), 1077-1093

Shu, J., Chou, M., Liu, Q., Teo, C-P. and Wang, I-L. (2010). Bicycle-sharing system: deployment, utilization and the value of re-distribution. Working paper.

Uesugi, K., Mukai, N. and Watanabe, T. (2007). Optimization of vehicle assignment for car sharing system. In: Lecture notes in artificial intelligence, *Intelligent knowledge: knowledge-based intelligent information and engineering systems*. 1105-1111.

Vogel, P. and Mattfeld, D.C (2010). Modeling of Repositioning Activities in Bike-Sharing Systems, Proceeding of the 12th World Conference on Transport Research, July 11-15, 2010, Lisbon, Portugal.

Yang, J., Jaillet, P. and Mahmassani H. (2004). Real-Time Multivehicle Truckload Pickup and Delivery Problems. *Transportation Science* 38 (2) 135-148.

Abstract

Nowadays, many cities around the world operate bike-sharing systems. Bike-sharing systems allow people to rent a bicycle at one of many automatic rental stations scattered in the city, use them for a short journey and return them at any station in the city. The success of these systems depends largely on their ability to satisfy the user demand for available bicycles at the origin and for available lockers at the destination stations. Usually, at each station, the rate of rentals is different from the rate of returns, at various times during the day. Therefore, inventory of bicycles at the stations is not balanced. Balancing the inventory levels requires transferring bicycles between the stations using a fleet of vehicles designed for this purpose. We refer to this operation as *repositioning*. In the current practice, the repositioning is based at the best on the intuition and the experience of the dispatchers in a central control facility or, in some cases, on these of the drivers of the repositioning vehicles.

We observe two types of repositioning operations. *Static repositioning* is carried out during the night, while the system is nearly idle. Its purpose is to prepare the system for the next day's demand, based on the demand forecast. *Dynamic repositioning* is carried out during the day. It allows responding to peaks of demand during the day. In most systems, static repositioning alone is insufficient to provide adequate level of service due to the capacity limitation of the stations, the limited number of bicycles in the system and the stochastic nature of the demand.

The goal of this study is to develop a dynamic repositioning policy that minimizes the discomfort of users in the system, which is caused by the lack of available bicycles and available lockers at the stations. The method presented, is a heuristic based on a mathematical programming model (Math Heuristic), which is solved with a rolling horizon procedure. The implementation of the solution obtained from the mathematical model in a real-time environment of a bike-sharing system requires several adaptations that are carried out heuristically.

In order to benchmark the proposed method, we designed several other heuristic methods based on simpler dispatching rules. Some of them roughly represent the methods currently used by the dispatchers and some are more sophisticated and computationally demanding.

The various methods are compared using demand data collected from the bike-sharing system in Tel Aviv (Tel-O-Fun). A simulation experiment is used to demonstrate the superiority of the policy obtained by the mathematical model over the other heuristic methods. Most of these methods in turn, showed to outperform the current practice.

* **Dana Pessach** worked as a planning and operation consultant at FSM Ltd., that operates "Tel-O-Fun", the bike-sharing system in Tel-Aviv.
* The research is partially supported by the Israel Science Foundation (ISF) grant no. 1109/11

TEL AVIV UNIVERSITY
The Iby and Aladar Fleischman Faculty of Engineering
The Zandman-Slaner School of Graduate Studies

Dynamic Repositioning in Bike-Sharing Systems

A thesis submitted toward the degree of
Master of Science in Industrial Engineering

By

Dana Pessach

This research was carried out in the Department of Industrial Engineering
under the supervision of Prof. Michal Tzur And Dr. Tal Raviv

October 2013

TEL AVIV UNIVERSITY
The Iby and Aladar Fleischman Faculty of Engineering
The Zandman-Slaner School of Graduate Studies

Dynamic Repositioning in Bike-Sharing Systems

A thesis submitted toward the degree of
Master of Science in Industrial Engineering

By

Dana Pessach

October 2013