



מערכת בקרת כניסות

ד"ר אליה בן-שבת
עדי רותם-ברמן *

מבוא

עומסי התנועה בדרכים הפרבריות המהירות באזורי המטרופולינים הגדולים הפכו לתופעה נפוצה הגורמת לעיכובים רבים לתנועת כ"ר. לעיכובים אלה קיימות השלכות חמורות הן מההיבט הכלכלי המתייחס לשעות רכב רבות שמבוזבזות מידי יום בקטעי הדרך השונים, הן מההיבט הסביבתי המתייחס לבעיות זיהום האוויר והן מההיבט הבטיחותי. תהליך ההתמזגות וההשתלבות של נפחי תנועה בדרך המהירה בתנאי עומס הינה בעייתית ומגדילה את הסיכויים לתאונות באזור ההתמזגות. לבקרה של נפחי התנועה המשתזרים בדרך המהירה פוטנציאל לשפר את רמת הבטיחות באזור ההתמזגות.

צווארי הבקבוק בקטעי הדרך נובעים כתוצאה מביקושים גבוהים או מתופעות דינמיות של זרימת תנועה כמו התמזגויות ו/או השתזרות הגורמות להקטנת קיבולת הדרך. בנייתו של מאפייני תנועה בדרכים מהירות נראה כי הקיבולת בקטעי הדרך לעיתים קרובות אינה מנוצלת במלואה. אחת הדרכים להתמודדות עם בעיות העומס בדרכים מהירות ולהביא לניצול יעיל של התשתית הינה פיתוח ותפעול של מערכות לניהול ובקרת תנועה. אחד ממגוון האמצעים לניהול ובקרת תנועה בדרכים מהירות הינה מערכת לבקרת כניסות.

מערכת לבקרת כניסות

אחד האמצעים היעילים לניהול ובקרת התנועה בדרכים מהירות הינו תפעול של מערכת לבקרת הכניסות (Ramp Metering). מערכת לבקרת כניסות כוללת הצבה של רמזור בכניסה לדרך המהירה שמטרתו לווסת ולתזמן את כניסת כ"ר לדרך המהירה באמצעות משכים משתנים של אור ירוק ואדום. היעד המרכזי של מערכת לבקרת כניסות הינו לווסת את נפחי התנועה בכניסה לדרך באופן כזה שנפח התנועה בנתיבים המהירים לא יעלה על הנפחים בתנאי קיבולת. מערכות לבקרת כניסות נפוצות במדינות אירופה ואמריקה. מערכות כאלה אינן מיושמות כיום בישראל.

חב' נתיבי איילון הוזמנה להשתתף בניסוי בין לאומי בתחום בקרת כניסה לכביש מהיר המנוהל על ידי האיחוד האירופי, מאמר זה מתאר את עיקרי הניסוי.

פרויקט EURAMP

פרויקט EURAMP כולל יישום ובחינה של אסטרטגיות שונות לבקרת

כניסות לדרכים מהירות במספר מדינות אירופה. הפרויקט מתבצע במסגרת תוכנית המסגרת השישית למחקר ופיתוח של האיחוד האירופי. מדינת ישראל הינה אחת המדינות המשתתפות בפרויקט. במסגרת הפרויקט מתעתדת מדינת ישראל להקים וליישם אסטרטגיה לבקרת כניסות בשתי רמפות לאורך דרך נתיבי איילון. יישום המערכת בשתי הרמפות יתבצע ע"י חברת נתיבי איילון ומוגדר כניסוי שמלווה ע"י משרד התחבורה.

המדינות השותפות בפרויקט הינן: אנגליה, צרפת, הולנד, גרמניה, יוון וישראל. במסגרת הפרויקט ייבחנו אסטרטגיות לבקרת כניסות במספר אתרים במדינות השונות שהוגדרו למטרה זו, ונתיבי איילון ישמש כאחד האתרים לבחינה. כחלק מהפרויקט יפותחו אסטרטגיות חדשות לבקרת הכניסות ויוכן ספר הנחיות להקמה ותפעול של מערכות לבקרת הכניסות.

מאמר זה כולל תיאור של תהליך האפיון וההקמה של מערכת לבקרת הכניסות בנתיבי איילון אשר מתבצע לראשונה בישראל.

תיאור הניסוי באיילון

הניסוי בנתיבי איילון כולל איפיון, הקמה והפעלה של מערכת לבקרת כניסות בשתי רמפות בקטע איילון מרכז. לצורך בחירת הרמפות שבהם תוקם המערכת, בוצע ניתוח של בעיות התנועה והקיבולת בכל קטעי הדרך. הרמפות שנבחרו ליישום במסגרת הניסוי ושבהן תוקם המערכת לבקרת הכניסות הן רמפת קק"ל לכיוון צפון ורמפת קיבוץ גלויות לכיוון דרום.

רמפת קק"ל לכיוון צפון: במצב הקיים נוצרים מידי יום עומסי תנועה באזור ההתמזגות של נפחי התנועה מהרמפה ובמורד הזרם באזור ההשתזרות של נפחי התנועה לכיוון דרך מס' 5 והרצליה. עומסי תנועה אלה גולשים בכיוון מעלה הזרם לכיוון רמפת רוקח ורמפת ההלכה.

רמפת קיבוץ גלויות לכיוון דרום: באזור רמפת קיבוץ גלויות נוצרים עומסי תנועה בשעות השיא של אחה"צ שנובעים, בדומה לרמפת קק"ל, מתנועות ההתמזגות בנתיבים המהירים. עומסי תנועה אלה גולשים לעיתים קרובות במעלה הזרם לכיוון לגוורדייה.

לויסות של נפחי התנועה בכניסה לנתיבים המהירים של הדרך בשתי רמפות אלה קיים פוטנציאל להקל ואולי אף לפתור את בעיית הצפיפות בסביבת הרמפה.

אסטרטגיות לבקרת כניסות

אסטרטגיות לבקרת כניסות קובעות את נפח התנועה שיורשה להיכנס ברמפה כך שנפח התנועה בנתיבים המהירים באזור הרמפה לא יעלה על הנפח בתנאי קיבולת. מיושמות בעולם מספר סוגי אסטרטגיות כפי שיתואר להלן.

* ד"ר אליה בן-שבת - הנדסת תחבורה תנועה ובקרה בע"מ
עדי רותם-ברמן - מהנדסת תחבורה במשרדה של ד"ר אליה בן-שבת
המשרד מתמחה במחקר, תכנון, ליווי והקמה של מערכות ניהול ובקרת תנועה מתקדמות ITS -



אסטרטגיית קבלת פערים (Gap acceptance)

בקרת כניסות המבוססת על קבלת פערים, פותחה במטרה לסייע לנהג להשתלב בצורה בטוחה בזרם התנועה העוברת בדרך הראשית, על ידי גרימת מינימום הפרעות לתנועה לאורך הדרך המהירה. העיקרון המרכזי שעליו מושתתת אסטרטגיית בקרה זו הוא ניצול של פערים הנפערים בזרימת התנועה לאורך הדרך המהירה כך שניתן יהיה לשלב לתוכם נפח תנועה מהכניסה. זיהוי פערים בזרימת התנועה לאורך הדרך המהירה מתאפשר על ידי זיהוי מהירותם של כלי רכב הנוסעים בנתיב הימני לאורך הדרך המהירה.

במצבים בהם זרימת התנועה לאורך הדרך מתנהלת בתנאי צפיפות גדולה, זמני האור האדום ארוכים. כתוצאה מכך, משתרכים תורים ארוכים בכבישים וסה"כ נפחי התנועה שנכנסים לדרך קטנים. עקב כך, הצדקים ליישום מערכת בקרה מהסוג הזה יתקבלו במקרים שבהם יש לשפר את רמת הבטיחות במקומות שבהם התכנון הגיאומטרי של הכביש לא מאפשר מרחק ראות רצוי לצורכי התמוגות.

אסטרטגיית המבוססת על תיאורית ה-Fuzzy Logic

יישום תיאורית ה-Fuzzy Logic לבקרת כניסות כוללת הגדרת סדרת תנאים ומצבי תנועה שונים ותכנון של פעולות בקרה בהתאמה עבורם. תהליך הבקרה במקרה זה כולל הגדרת כללים לוגיים מסוג "אם" מצב תנועה מסוים "אז" פעולת בקרה מתאימה. אחד החסרונות העיקריים של השיטה הינו ריבוי של פרמטרים המשפיעים הן על זרימת התנועה ומתארים את מצבי התנועה השונים והן על פעולות הבקרה. ריבוי הפרמטרים מכתוב צירופים שונים ורבים של מצבים שאותם יש להגדיר מראש ועבורם יש לתכנן את פעולות הבקרה המתאימות מראש. תהליך התכנון שנגזר על כן מתוך שיטה זו הינו ארוך ומורכב ולא תמיד נותן מענה לכל מגוון מצבי התנועה המתרחשים בדרך.

אסטרטגיית ביקוש-קיבולת

ליישומה של אסטרטגיית ביקוש-קיבולת, נדרשים נתונים של נפחי תנועה ואחוזי תפוסה כפי שנמדדים במעלה הזרם (לפני הכניסה), במורד הזרם (סוף אזור ההתמוגות) וברמפה. העיקרון של השיטה הוא חישוב, ב"זמן אמת", של נפחי התנועה $r(k)$ אשר יורשו להיכנס לדרך המהירה, על מנת שנפחי התנועה במורד הזרם, לא יהיו גדולים מהקיבולת. נפח התנועה $r(k)$ שיורשה להיכנס לדרך המהירה בפרק הזמן k יחושב באמצעות הנוסחה:

$$r(k) = b * (Cap - Qin(k)) + (1 - b) * R \min \quad (1)$$

Cap - קיבולת הדרך המהירה במורד הזרם.
Qin - נפח התנועה כפי שנמדד במעלה הזרם.
R min - נפח מינימלי שיורשה להיכנס לדרך המהירה בתנאי עומס.
b - משתנה בינארי {1, 0} אשר נקבע כפונקציה של התפוסה במורד הזרם.

אסטרטגיית "משוב" (ALINEA)

אסטרטגיית הבקרה שנסקרו לעיל מבוססות על פילוסופיית ה-feed forward (היזון קדימה), ומהוות בקרה ב'חוג פתוח'. אסטרטגיית הבקרה הנוכחית מבוססת על תיאורית המשוב. מערכת משוב מוגדרת כמערכת שבה המדידה משפיעה על עדכון של

משתנה הבקרה והתיקון החוזר משפיע על המדידה. מערכת כזאת נקראת גם מערכת בקרת היזון חוזר feedback system, או מערכת בקרה ב'חוג סגור' closed loop system. אסטרטגיית הבקרה ALINEA מבוססת על בקרת המשוב.

העיקרון שעליו מבוססת אסטרטגיית הבקרה ALINEA הוא ויסות של נפחי תנועה בכניסה על מנת שזרימת התנועה לאורך הדרך תתנהל בתנאי תפוסה רצויים. בדרך כלל אחוז התפוסה הרצוי Ocr שווה ל-90% מערך התפוסה בתנאי קיבולת. היתרון ביישום של אסטרטגיית בקרה זו מתבטא בכך שנדרש ניטור של אחוזי התפוסה רק במורד זרם התנועה.

תהליך הבקרה במקרה זה מתחיל על ידי השוואה בין ערך תפוסה רצוי במורד הזרם לבין ערך התפוסה המצוי שהוא אות המשוב שהתקבל על ידי מדידת אחוז התפוסה באמצעות הגלאי. הסטייה שמהווה את ההפרש בין שני ערכים אלה קובעת את ערכה של פונקציית הבקרה או את חוק הבקרה. בהתאם לנפח שהתקבל על ידי פונקציית הבקרה נקבע משך האור הירוק בתוכנית הרמזור.

$$r(k) = r(k-1) + R * (Ocr - Oout(k)) \quad (2)$$

Ocr - ערך תפוסה קריטי שנקבע מראש.
Oout - ערך התפוסה כפי שנמדד במורד הזרם, בזמן k .
בניסויי שטח שבוצעו בהולנד ובצרפת נראה כי לאסטרטגיית הבקרה ALINEA ביצועים טובים יותר, בהשוואה לאסטרטגיית האחרות ובהשוואה לאסטרטגיית הביקוש-קיבולת.
במסגרת הניסוי בנתיבי איילון הוחלט ליישם אסטרטגיית בקרה זו. שיקול נוסף ליישום של אסטרטגייה זו הינו המשך פיתוחה ובחינתה במסגרת פרויקט EURAMP.

אפיון של מערכת הבקרה

3.1 כללי

תהליך האיפיון של מערכת לבקרת כניסות דורש התייחסות למספר נושאים:

- א. אסטרטגיית לבקרת הנתיבים המהירים שתקבע את ערך נפח התנועה שיורשה להיכנס לרמפה בתנאי תנועה שונים ומשיקולים של זרימת התנועה בנתיבים המהירים.
- ב. אסטרטגיית ושיטה לבקרת התור ברמפה. ברוב המקרים בקרת הנתיבים המהירים גורמת להיווצרות תורים ברמפה. תורים אלה יש לנהל כחלק מתהליך הבקרה ובכפוף למדיניות שנקבעת ומתייחסת למאפייני גלישת התור ברמפה ומקום האחסון של כ"ר כפי שנדרש כחלק מתפעול של המערכת.
- ג. אופן תפעול הרמזור בשטח. אסטרטגיית הבקרה קובעת את נפח התנועה שיורשה להיכנס ברמפה. אופן התפעול של הרמזור מתייחס לתהליך התכנון והתפעול של הרמזור אשר יאפשר קציבת זמני האור הירוק ברמזור כפי שנקבע ע"י האסטרטגייה, וכפי שנדרש לצורך הוויסות של כ"ר.

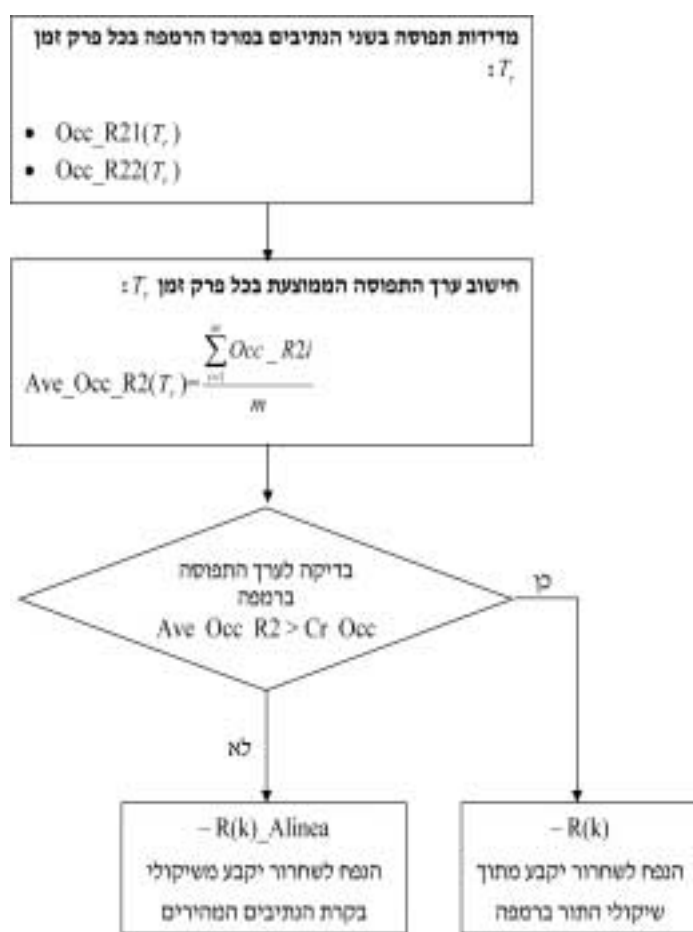
3.2 בקרת הנתיבים המהירים

אסטרטגיית ALINEA קובעת את קצב הוויסות של נפחי התנועה שנכנסים מהרמפה לדרך המהירה מתוך שיקולים של מצב התנועה והתפוסה בנתיבים המהירים בלבד. תהליך בקרת הנתיבים המהירים מתבצע באופן עצמאי בשלושה שלבים.
א. מדידת נתונים בשטח - גלאי ההשראה שיוקנו בנתיבים המהירים

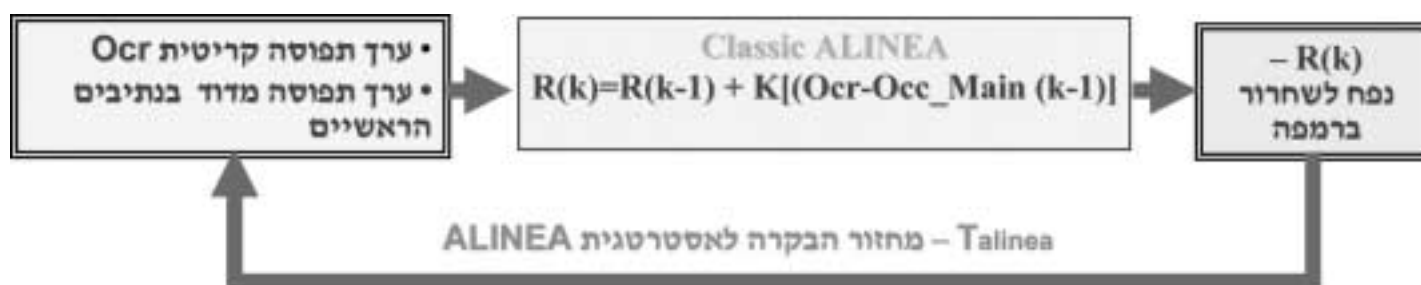


לצורך בקרת התור ברמפה נוסח ואופיין במערכת אילוף לאורך התור המרבי שיורשה ברמפה. העיקרון המרכזי להגדרת אילוף זה הינו בדיקה שוטפת של אורך התור ברמפה והפסקה של וויסות הנפחים לפרקי זמן קצרים כאשר התור מתפתח. במקרה שנוצרת גלישת תור מעבר לערך שמוגדר מראש כסף לאחסון ברמפה, בקרת הרמפה "תשתלט" על בקרת הנתיבים המהירים. כלומר, הנפח לשחרור ברמפה ייקבע משיקולי הרמפה בלבד. התהליך לבקרת התור ברמפה מקבל כקלט נתוני תפוסה מאזור מרכז הרמפה. כאשר התפוסה הנמדדת גדולה מערך סף שנקבע (כ-50%), מופעלת תכנית רמזור שמאפשרת לשחרר נפח מהרמפה כך שתימנע גלישת התור מעבר למקום האחסון שהוגדר כמדיניות. **תרשים מס' 2** מתאר את תהליך בקרת התור ברמפה.

תרשים מס' 2: תהליך בקרת התור ברמפה



תרשים מס' 1: תהליך הבקרה של אסטרטגיית ALINEA



במורד אזור ההשתזרות ימדדו את נתוני התנועה הבאים:

- תפוסה [%].
 - נפח [כ"ר].
- המדדות שיתקבלו ע"י הגלאי הינם ערך ממוצע לפרק זמן (T_{alinea}) שיקבע כזמן המחזור לעדכון הנפח שיורשה להיכנס ע"י אסטרטגיית ALINEA. פרק זמן זה נע בין 30 ל-60 שניות.
- ב. עיבוד נתונים - הנתונים שיתקבלו ע"י הגלאים בכל מחזור של אסטרטגיית ALINEA יעובדו לצורך קבלת ערך התפוסה הממוצעת בכל הנתיבים וקבלת ערך הנפח העובר בכל הנתיבים.

- **מדדות נפח ותפוסה בנתיבים המהירים כל פרק זמן (T_{alinea}):**

- נתוני תפוסה - $Occ_Mi(T_{alinea})$

- נתוני נפח - $Flow_Mi(T_{alinea})$

$i =$ מס' נתיב

- **עיבוד נתונים מהגלאים בכל מחזור ALINEA (T_{alinea}):**

- תפוסה ממוצעת - $Occ_Main(k) = \frac{\sum_{i=1}^n [Occ_Mi(T_{alinea})]}{n}$

- סה"כ נפח - $Flow_Main(k) [veh/hr] = \sum_{i=1}^n Flow_Mi(T_{alinea}) * (3600/T_{alinea})$

ג. **פעולת האלגוריתם** - אסטרטגיית ALINEA מבוססת על אלגוריתם אשר מקבל כקלט את נתוני התפוסה והנפח שנמדדו בנתיבים המהירים. בנוסף מקבל האלגוריתם כקלט את ערך התפוסה הקריטית באזור ההשתזרות. פלט האלגוריתם הינו הנפח $R(k)$ לשחרור מהרמפה. תהליך הבקרה מתבצע בכל זמן מחזור ALINEA. **תרשים מס' 1** מתאר את תהליך הבקרה של ALINEA.

בקרת התור ברמפה

במסגרת הניסוי בנתיבי איילון הוגדרה מדיניות שעל פיה לא תורשה גלישת תורים מהרמפה בשל המרחק הקצר לצמתים הסמוכים. בקרת הנתיבים המהירים גורמת ברוב המקרים ובמיוחד ברמפות הניסוי שבהן הביקושים גבוהים לתורים ברמפה. לפיכך, נדרש ליישם תהליך שעל פיו ניתן יהיה לבקר את התור ברמפה במקביל ותוך כדי בקרת הנתיבים המהירים.

אופן תפעול הרמזור

מדיניות תפעול רמזור לבקרת כניסות

קיימות שלוש מתכונות תפעול לרמזור בקרת כניסות. מתכונות התפעול מתייחסות לאופן קציבת זמני הירוק והאדום ברמזור על מנת לאפשר לנפח המחושב ע"י האסטרטגיה להיכנס לדרך המהירה.

- **רכב אחד לירוק (One car per green)** - ע"פ מדיניות זו הרמזור יפעל באופן כזה שבכל מופע ירוק תתאפשר כניסה של כ"ר אחד בלבד לדרך המהירה. מדיניות זו מלווה בתמרוך מתאים. לתפעול הרמזור ע"פ מדיניות זו קיימת מגבלה לסה"כ הנפח השעתי שיורשה להיכנס מהרמפה. הנפח המרבי שיורשה להיכנס ע"פ מדיניות זו נע סביב 800 כ"ר/שעה.
- **שני רכבים לירוק** - בדומה למדיניות הראשונה, אלא שבמקרה זה מורשים להיכנס לדרך המהירה בכל מופע ירוק 2 כ"ר בלבד. הנפח המרבי שיורשה להיכנס ע"פ מדיניות זו הינו כ-1100 כ"ר/שעה.
- **קבוצות רכבים** - קציבת זמני הירוק במקרה זה מאפשרת כניסה של קבוצות כ"ר משתנות בכל מופע ירוק כפי שגדרש ע"י האסטרטגיה.

במסגרת הניסוי באיילון הוחלט לבחור במדיניות המאפשרת תפעול רמזור המאפשר כניסה של קבוצות כ"ר. השיקול המרכזי לבחירת מדיניות זו הינו הביקושים הגבוהים ברמפות. בשתי הרמפות שנבחרו ליישום הביקושים נעים בין 1200-1400 כ"ר/שעה. מאחר וע"פ המדיניות שהוגדרה לא תורשה גלישת תורים ברמפה, המדיניות של רכב אחד או שניים לכל מופע ירוק אינה רלוונטית לאתרים אלה.

אופן התפעול של המערכת לבקרת הכניסות יתבצע באופן הבא: אסטרטגית הבקרה קובעת בכל מחזור ALINEA את הנפח $R(k)$ שיורשה להיכנס ברמפה. נפח זה מתורגם לתכנית רמזור מתאימה לצורך קציבת זמני הירוק והאדום ברמזור. למטרה זו, תוכננו תכניות רמזור שונות המאפשרות כניסה של קבוצות כ"ר המתאימות לערכי $R(k)$ שונים.

טבלה מס' 1 מתארת את תכניות הרמזור שתוכננו לערכים שונים של $R(k)$ כפי שיחושבו ע"י האסטרטגיה.

פרויקט EURAMP מלווה כאמור ע"י משרד התחבורה. כחלק מהניסוי התקבלו מספר החלטות על אופן תכנון התוכניות ותפעול הרמזור, כמפורט להלן:

- לא יפעל אדום-צהוב
 - משך מופע אדום מינימלי - 4 שניות
 - משך מופע צהוב - 3 שניות
 - התפעול לא יכלול "הבהוב ירוק"
 - משך ירוק מינימלי - 4 שניות
- החלטות אלה שימשו בסיס לתכנון התוכניות המפורטות בטבלה.

מאחר ומחזור הפעולה של אסטרטגית ALINEA אינו תואם בהכרח את מחזורי הפעולה של הרמזור הוגדרה מתכונת תפעול כזו אשר קובעת התחלה של מחזור רמזור חדש רק עם סיום מחזור רמזור קודם. כלומר, כאשר מתקבל ערך $R(k)$ חדש שחושב ע"י האסטרטגיה (בכל פרק זמן T_{aline}), תכנית הרמזור שנקבעת עבור הערך $R(k)$ תכנס לפעולה רק בתום המחזור של התכנית שנמצאת בפעולה.

תרשים מס' 3 (בעמוד הבא), מתאר את אופן התפעול של הרמזור.

ארכיטקטורת המערכת

ארכיטקטורת המערכת מתארת את מרכיבי המערכת, אופן פריסתם ותפקידם במערכת הבקרה. ארכיטקטורת המערכת נגזרת הן מתוך דרישות החישוב של אסטרטגית הבקרה שנבחרה והן מתוך דרישות התפעול של הרמזור.

מערכת בקרת הכניסות תכלול את האלמנטים הבאים:

- גלאי השראה בכל אחד מהנתיבים המהירים במורד הזרם לרמפה (באזור ההשתזרות מהרמפה בנתיבים המהירים).
 - גלאי השראה ברמפה.
 - רמזור שיותקן ביציאה מהרמפה.
 - ארון בקרה שיותקן ברמפה ושתפקידו לאסוף נתונים הנמדדים ע"י הגלאים, לעבד את המידע, להריץ את אלגוריתם הבקרה ולבקר את פעולת הרמזור.
 - עמדת בקרה (מחשב) שתותקן במרכז הבקרה של נתיבי איילון. עמדה זו תשמש לביצוע שינויים בהגדרות הפרמטרים המהווים חלק מהאלגוריתמים ומתהליכי הבקרה בארון הבקרה ולאחסון וניתוח נתונים שימשו לצורך הערכת תפקוד המערכת.
- תרשים מס' 4** (בעמוד הבא) מתאר את ארכיטקטורת המערכת. המערכת תוגדר כך שהשתמש יוכל לבחור את האסטרטגיה שתופעל ולבצע שינויים בפרמטרים של המערכת.

הערכה תנועתית

בשלב מקדים ליישום של המערכת בשטח בוצעה הערכה תנועתית של פעולת המערכת באמצעות מודל סימולציה. מודל הסימולציה מאפשר לדמות הן את זרימת התנועה בדרך ואת הן את פעולת אסטרטגית הבקרה. על מנת לדמות את פעולת האסטרטגיה במערכת, נדרש לכתוב מודול חישובי למודל הסימולציה אשר יבצע את פעולת האסטרטגיה ותהליך הבקרה המלא בהתאם לתנאי התנועה כפי שתואר בפרקים הקודמים.

הערכה התנועתית שמתבצעת באמצעות מודל מיקרו-סימולציה מאפשרת לבחון את רמת התפקוד והתועלות של יישום מערכת לבקרת כניסות על זרימת התנועה ואת מידת הרגישות של המאפיינים התכנוניים והתפעוליים של המערכת על רמת התפקוד של זרימת התנועה.

נפח (כ"ר/שעה)	300	400	500	600	700	800	900	950	1000	1050	1100	1200	1300	1400
זמן ירוק	4	4	4	4	6	6	8	8	10	10	12	14	20	26
זמן צהוב	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
זמן אדום	17	11	7	5	6	4	5	4	5	4	4	4	4	4
זמן אדום צהוב	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
זמן מחזור (שניות)	24	18	14	12	15	13	16	15	18	17	19	21	27	33

טבלה מס' 1: תכניות הרמזור השונות שתוכננו לערכים שונים של $R(k)$ כפי שיחושבו ע"י האסטרטגיה.

- ערך התפוסה הקריטית בנתיבים המהירים
 - מיקום הגלאי למדידת ערך התפוסה הקריטית בנתיבים המהירים
 - **פרמטרים המהווים חלק מבקרת תור ברמפה:**
 - ערך סף לתפוסה ברמפה
 - נפח מרבי לשחרור מהרמפה כאשר מזוהה תור ברמפה
 - מיקום הגלאי למדידת התפוסה ברמפה
 - פרק הזמן למדידת ערך התפוסה
- תהליך הבדיקה לצורך הקביעה של הפרמטרים לתפעול המערכת, התייחסה גם לצירופים שונים של פרמטרים אלה. בשלב ראשון בוצעו בדיקות לניתוח ההשפעות של מאפייני מערכת בקרת הנתיבים המהירים על תפקוד האלגוריתם. המטרה של בדיקות אלה הייתה לקבוע את ערכי הפרמטרים שיאפשרו את התפעול המיטבי של האלגוריתם. כאשר הושג ההרכב האופטימלי של הפרמטרים המאפיינים את בקרת הנתיבים המהירים, נוסף מודול אילוץ התור ברמפה שמטרתו למנוע את גלישת התור ברמפה לצמתים הסמוכים. בשלב זה נבדקו הפרמטרים המשפיעים על תפעול מודול התור ברמפה וכוילו באופן כזה שתמנע גלישת התור בצמתים הסמוכים תוך כדי הפרעה מינימלית לתנועה בנתיבים המהירים.

הערכה התנועתית של תפעול מערכת בקרת כניסות תיאור תרחישי הבדיקה

- התקנת מערכת לבקרת כניסות ברמפות הניסוי באיילון דורשת הארכת נתיב ההאצה ביחס למצב הקיים. שינוי זה לכשעצמו מהווה שיפור בהסדר התנועה ביחס למצב הקיים. על מנת להעריך את מידת ההשפעה שנובעת מיישום של מערכת בקרת הכניסות בלבד על זרימת התנועה הוגדרו שלושה תרחישי בדיקה שונים.
- א. מצב קיים.
 - ב. תרחיש הכולל הארכת נתיב ההאצה ל-260 מ'.
ג. תרחיש הכולל את יישום מערכת בקרת כניסות.

מדדי הביצוע

מדדי הביצוע ששימשו לצורך הערכה התנועתית מתייחסים הן לזרימת התנועה בנתיבים המהירים והן לזרימת התנועה ברמפת הכניסה. תוצאות הבדיקה המתוארות בפרק זה מתייחסות לרמפת ק"ל בכיוון צפון.

המדדים המתייחסים לזרימת התנועה בנתיבים מהירים הינם:

- נפח עובר [כ"ר/שעה]
 - מהירות ממוצעת [קמ"ש]
 - זמן נסיעה ממוצע [דקות:שניות]
 - זמן עיכוב ממוצע [דקות:שניות]
- מדדים אלה חושבו לקטע איילון צפון המושפע מסביבת הרמפה. אורך הקטע שעבורו חושבו המדדים הינו כ-2.1 ק"מ.

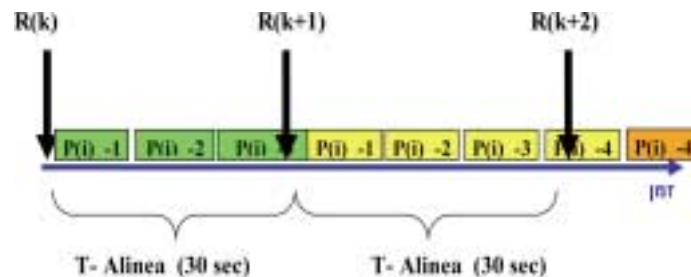
המדדים המתייחסים לתנועת כ"ר ברמפה הינם:

- נפח נכנס ברמפה [כ"ר/שעה]
- זמן עיכוב ממוצע [דקות: שניות]

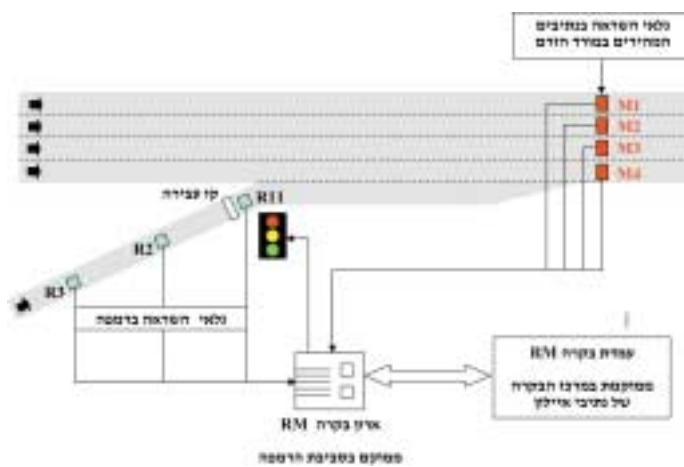
כמו כן, חושב מדד עיכוב כולל לנפחי התנועה בדרך המהירה וברמפה.

תוצאות הערכה תנועתית לרמפת ק"ל

בוצעו הרצות של מודל הסימולציה עבור כל אחד מהתרחישים



תרשים מס' 3: אופן התפעול של הרמזור



תרשים מס' 4: ארכיטקטורת המערכת.

מטרת הבדיקה

- לבדיקה באמצעות הסימולציה הוגדרו מס' מטרות עיקריות:
- א. קביעת מתכונת התפעול המיטבית למערכת בקרת הכניסות. מתכונת התפעול מושפעת ממיקום הגלאים וערכי הפרמטרים השונים שנקבעים כחלק מהגדרת האסטרטגיה. הבדיקה באמצעות הסימולציה איפשרה לסייע הן בקביעת מיקום הגלאים והן בקביעת ערך הפרמטרים (set up) שיאפשרו תפעול מיטבי של המערכת.
 - ב. הערכה תנועתית של יישום מערכת לבקרת כניסות ברמפות הניסוי בנתיבי איילון. המטרה במקרה זה הינה להעריך את התועלת התנועתית ביישום של מערכת מהסוג הזה ומידת השפעתה על תנועת כ"ר בנתיבים המהירים וברמפות.

הרכב הפרמטרים לתפעול של מערכת הבקרה

הפרמטרים ומאפייני הבקרה המשפיעים על תפעול המערכת מתייחסים הן לאסטרטגיה לבקרת הנתיבים המהירים ובקרת התור ברמפה והן לאופן התפעול של הרמזור.

הפרמטרים ומאפייני הבקרה שאותם נדרש לקבוע כשלב מקדים לתפעול בשטח ושלהם השפעה על תפקוד המערכת הינם:

פרמטרים המהווים חלק מבקרת הנתיבים המהירים:

- מחזור הפעולה של אסטרטגית ALINEA לבקרת הנתיבים המהירים. המחזור נע בין 30 שניות ל-60 שניות
- תכניות רמזור -
- אורכי מחזור התכניות
- אורך מחזור משתנה או קבוע

שהוגדרו לצורך ביצוע הערכה תנועתית וחשוב של מדדי הביצוע שהוגדרו. מדדי הביצוע חושבו לכל שעה במשך כארבע שעות בתקופת השיא.

נתיבים מהירים

מהירות ממוצעת - מהירויות הנסיעה הממוצעות שחושבו בכל שעה ולכל תרחיש שהוגדר מתוארות בטבלה מס' 2 ובתרישים מס' 5.

זמן עיכוב ממוצע - טבלה מס' 4 ותרישים מס' 7 (בעמוד הבא), מתארים את זמן העיכוב הממוצע שחושב לכל אחד מהתרחישים במשך כ-4 שעות במהלך תקופת השיא.

זרימת התנועה ברמפה

מדדי הביצוע ששימשו להערכת מצב התנועה ברמפה הם הנפח שנכנס לדרך המהירה וזמן העיכוב הממוצע ש"ר ברמפה נאלצים להמתין לפני כניסתם לדרך המהירה.

נפח נכנס - טבלה מס' 5

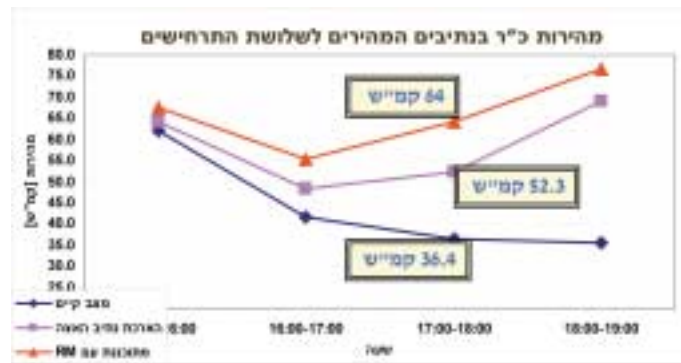
ותרישים מס' 8 (בעמוד הבא), להלן מתארים את נפחי התנועה שנכנסים לדרך המהירה בכל שעה בכל אחד מהתרחישים.

תרחיש	מהירות [קמ"ש]			
	18:00-19:00	17:00-18:00	16:00-17:00	15:00-16:00
רשת מצב קיים	35.6	36.4	41.6	62.2
הארכת נתיב האצה	69.1	52.3	48.3	64.0
יישום מערכת בקרת כניסות RM	76.6	64.0	55.2	67.5

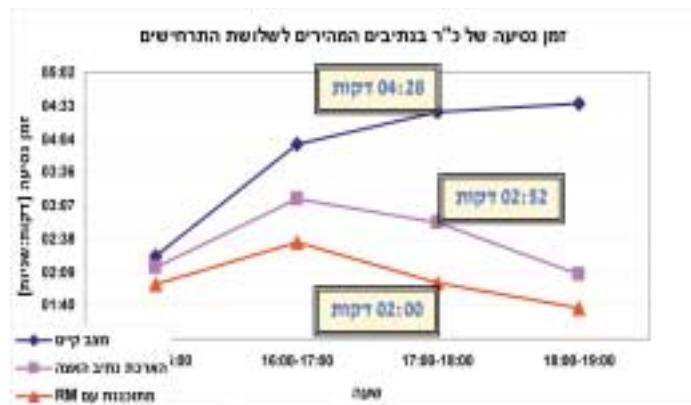
טבלה מס' 2: מהירות ממוצעת בנתיבים המהירים בכל תרחיש ובכל שעה בתקופת השיא

מתוך הטבלה נראה כי הנפח השעתי הנכנס מהרמפה לנתיבים

המהירים דומה בכל התרחישים: בשעת שיא הביקוש 16:00-17:00, נראה כי במצב שבו מערכת הבקרה פועלת הנפח הנכנס לדרך המהירה הינו כ-1250 כ"ר/שעה ביחס ל-1290 במצב ללא בקרה. חשוב לציין כי המטרה של מערכת לבקרת הכניסות אינה להגביל ולמנוע כניסה של כ"ר מהרמפה לדרך המהירה, אלא לווסת ולתזמן את כניסתם כך שתמנע צפיפות גדולה בנתיבים המהירים.



תרישים מס' 5: מהירות ממוצעת בנתיבים המהירים בכל תרחיש ובכל שעה בתקופת השיא



תרישים מס' 6: זמן הנסיעה הממוצע בכל תרחיש ולכל שעה בתקופת השיא

מתוך התוצאות נראה יתרון להארכת נתיב האצה של הרמפה ביחס למצב הקיים. כמו כן, בשעת השיא (17:00-18:00) נראה שיפור של כ-22% במהירות הנסיעה כאשר מופעלת מערכת לבקרת כניסות ברמפה ביחס למצב הכולל את הארכת נתיב האצה.

זמן נסיעה ממוצע - טבלה מס' 3 ותרישים מס' 6 מתארים את זמני הנסיעה שחושבו לכל אחד מהתרחישים במשך כ-4 שעות תקופת השיא. מתוך התוצאות נראה שיפור של כ-55% בזמן הנסיעה במצב שבו מופעלת מערכת בקרת כניסות ביחס למצב הקיים בשעת השיא (17:00-18:00). כמו כן, נראה שיפור של כ-30% בזמן הנסיעה במצב שבו מוארך נתיב האצה לרמפה ביחס למצב הקיים.

תרחיש	זמן נסיעה [דקות:שניות]			
	18:00-19:00	17:00-18:00	16:00-17:00	15:00-16:00
רשת מצב קיים	04:36	04:28	04:01	02:23
הארכת נתיב האצה	02:08	02:52	03:13	02:14
יישום מערכת בקרת כניסות RM	01:38	02:00	02:36	01:59

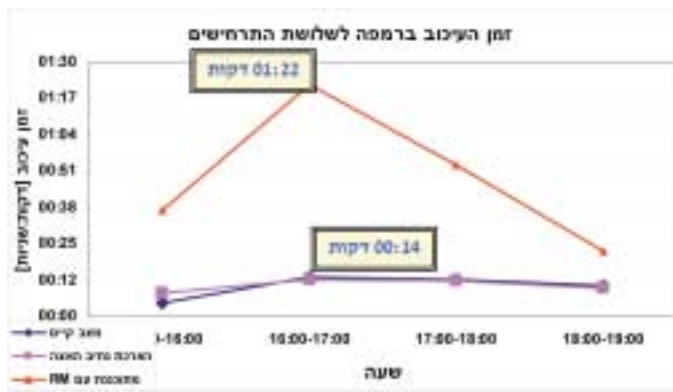
טבלה מס' 3: זמן הנסיעה הממוצע בכל תרחיש ולכל שעה בתקופת השיא



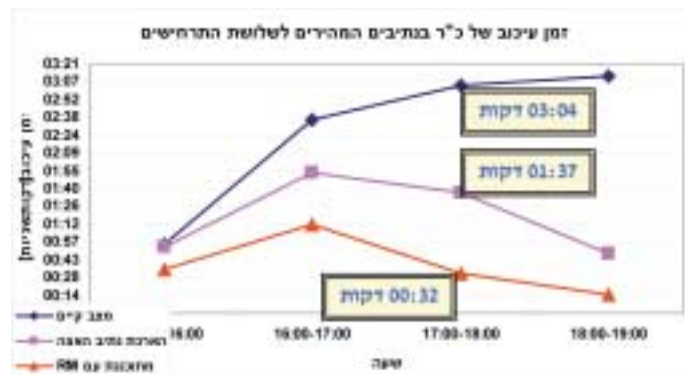
זמן עיכוב - טבלה מס' 6 ותרשים מס' 9 מתארים את זמן העיכוב הממוצע לכל כ"ר ברמפה בכל שעה במהלך תקופת השיא ובשלושת התרחישים שנבדקו.

זמן עיכוב [דקות:שניות]				תרחיש
18:00-19:00	17:00-18:00	16:00-17:00	15:00-16:00	
03:12	03:04	02:37	00:56	רשת מצב קיים
00:48	01:37	01:54	00:53	הארכת נתיב האצה
00:14	00:32	01:12	00:35	יישום מערכת בקרת כניסות RM

טבלה מס' 4: זמן עיכוב ממוצע בכל תרחיש ולכל שעה בתקופת השיא



תרשים מס' 9: זמן עיכוב ממוצע ברמפה בכל תרחיש ולכל שעה בתקופת השיא



תרשים מס' 7: זמן עיכוב ממוצע בנתיבים המהירים בכל תרחיש ולכל שעה בתקופת השיא

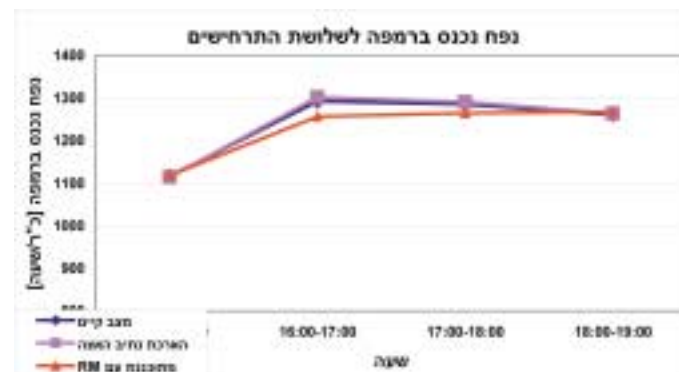
מתוך התוצאות נראה כי זמן העיכוב הממוצע לכ"ר ברמפה כתוצאה מהפעלת מערכת לבקרת כניסות נע בין 20 שניות ל-80 שניות בשעת השיא.

נפח [כ"ר/שעה]				תרחיש
18:00-19:00	17:00-18:00	16:00-17:00	15:00-16:00	
1261	03:04	1293	1117	רשת מצב קיים
1264	01:37	1303	1115	הארכת נתיב האצה
1268	00:32	1257	1119	יישום מערכת בקרת כניסות RM

טבלה מס' 5: נפחי התנועה שנכנסים לדרך המהירה בכל שעה בכל אחד מהתרחישים.

מדד עיכוב כולל
מתוך התוצאות לעיל נראה כי העיכוב הממוצע לתנועה בנתיבים המהירים קטן בעוד שהעיכוב הממוצע לתנועה ברמפה גדל. למטרה זו חושב מדד של עיכוב כולל בנתיבים המהירים וברמפה. מדד העיכוב הכולל מתייחס לשה"כ העיכוב שנגרם לכל כ"ר ברמפה ובנתיבים המהירים לפני ואחרי יישום של המערכת. מדד העיכוב הכולל הינו מכפלה של שה"כ הנפח העובר בשעת השיא בעיכוב הממוצע שחושב, הן עבור הנתיבים המהירים והן עבור הרמפה. העיכוב הכולל שחושב לרמפה ולנתיבים המהירים מפורט ב**טבלאות 7 ו-8 בהתאמה**, (בעמוד 33).

מתוך התוצאות נראה כי נגרמים עיכובים של 29 שעות X רכב לתנועה ברמפה במצב שבו מופעלת אסטרטגיה לבקרת כניסות אולם בנתיבים המהירים נגרם חיכוך של 168 שעות X רכב ביישום המערכת.



תרשים מס' 8: נפחי התנועה שנכנסים לדרך המהירה בכל שעה בכל אחד מהתרחישים.

זמן עיכוב [דקות:שניות]				תרחיש
18:00-19:00	17:00-18:00	16:00-17:00	15:00-16:00	
00:11	00:13	00:14	00:05	רשת מצב קיים
00:10	00:12	00:13	00:08	הארכת נתיב האצה
00:23	00:54	01:22	00:38	יישום מערכת בקרת כניסות RM

טבלה מס' 6: זמן עיכוב ממוצע בכל תרחיש ולכל שעה בתקופת השיא

המשך בעמוד 33 ←



השני מוגדרים מראש מסלולי גישה מהם צפויה תנועה הדורשת עדיפות. הרכב המתקרב ונכנס לטווח הקליטה של היחידה המותקנת במנגנון הרמזור שולח מידע על מהירותו, כיוונו, מיקומו ביחס לצומת ומספר מזהה של הרכב. המערכת מעדכנת את סדר הפאזות ברמזור ושולחת מידע לרמזור הבא הנמצא במסלול רכב החירום למתן עדיפות. מערכת נוספת שמציעה החברה מתבצעת ההתקשרות בין שתי היחידות באמצעות קליטת אותות GPRS (General Packet Radio Service) מהליון ליחידה הנמצאת ברכב ולזו המותקנת ברמזור ומחשבת בהתקרות הרכב לצומת את מהירותו, כיוונו ומסלולו. בניסוי שנערך בניו יורק מערכת זו קצרה את זמן נסיעת רכב החירום ב-37%.

פרטים נוספים ניתן למצוא באתר החברה בכתובת:

<http://www.3m.com/us/safety/tcm/solutions/>

גלישה מהנה באוטוסטרדת המידע.

מחמאות, טענות והצעות נא לשלוח לקובי בכתובת:

kav_eng@netvision.net.il

אחת החברות העוסקות בנושא זה הינה חברת Applied Generics. חברה זו מציעה מערכת לאיסוף מידע מתוך רשת הטלפונים הניידים על נפחי תנועה בזמן אמת תוך שמירה על אנונימיות של המנויים. מידע נוסף על מערכת זו ומצגת ניתן למצוא באתר:

<http://www.appliedgenerics.com/rodin24.php>

חברה אחרת העוסקת בתחום הינה חברת Golden River Traffic הממוקמת באנגליה. חברה זו פיתחה מוצר המשתמש באותות GPRS (General Packet Radio Service). מידע נוסף ניתן למצוא באתר החברה: [GPRS communications in UK traffic monitoring.htm](http://www.goldenrivertraffic.com/GPRS_communications_in_UK_traffic_monitoring.htm)

סידר לעצמו גל ירוק

לא מזמן הופיעה בכותרות העיתונים ידיעה על תושב העיר לונגמונט בקולורדו, שרכש מכשיר הנותן למפעיל אותו עדיפות ברמזור. המכשיר נקרא OPTICOM של חברת 3M. המכשיר מיועד לשימוש ברכבי חירום וכלי תחבורה ציבורית ובנוי משתי יחידות, אחת המותקנת ברכב והשנייה במנגנון הרמזור.

המערכת משתמשת בגלי אינפרא אדום הנשלחים מהיחידה הנמצאת ברכב ליחידה המותקנת במנגנון הרמזור. ביחידה המותקנת במנגנון מהצד

מערכת בקרת כניסות (המשך מעמוד 27)

תרחיש	נפח נכנס ברמפה [כ"ר/שעה]	זמן עיכוב [שניות]	שניות X רכב	שעות X רכב
מצב קיים	1293	14	18102	5
הארכת נתיב האצה	1303	13	16935	5
יישום מערכת בקרת כניסות RM	1257	82	103047	29

טבלה מס' 7: העיכוב הכולל שחושב ברמפה בשעת שיא לכל התרחישים

תרחיש	נפח עובר [כ"ר/שעה]	זמן עיכוב [שניות]	שניות X רכב	שעות X רכב
מצב קיים	7251	157	1138407	316
הארכת נתיב האצה	7370	114	840142	233
יישום מערכת בקרת כניסות RM	7378	72	531240	148

טבלה מס' 8: העיכוב הכולל שחושב בנתיבים המהירים בשעת שיא לכל התרחישים

שעות X רכב במצב שבו מיושמת המערכת ביחס למצב הקיים.

ועדה בין משרדית - במסגרת הפרויקט הוקמה ועדה בין משרדית בראשותו של מר ישעיהו רוטן, מנהל אנף בכיר, תכנון תחבורתי במשרד התחבורה שמטרתה ללוות את הפרויקט ולרכז הנחיות לתכנון ותפעול רמזורים לבקרת כניסות.

צוות העבודה:

- אנף בקרת תנועה בנתיבי איילון - לב קרסילישקוב, ודרן קוליץ
- אליה בן-שבת, הנדסת תחבורה, תנועה ובקרה
- יואב זקס
- שמואל צירקל

חומר נוסף ניתן למצוא באתרי האינטרנט:

www.euramp.org

www.ayalonhw.co.il

סיכום

מאמר זה מתאר את תהליך האפיון והבדיקה של מערכת בקרת כניסות לקראת יישום וניסוי הפעלה ברמפת קק"ל וקיבוץ גלויות בקטע המרכזי של דרך נתיבי איילון. הניסוי מתבצע כחלק מפרויקט אירופאי EURAMP.

הערכה תנועתית של יישום המערכת ברמפת קק"ל מראה יתרון ליישום והפעלת המערכת. יתרון זה בא לידי ביטוי בשיפור של כ-22% במהירות הנסיעה במצב שבו מיושמת מערכת לבקרת כניסות ביחס למצב שבו מוארך נתיב האצה (כפי שנדרש לצורך יישום המערכת) ובשיפור של בין כ-30% ועד כ-75% במהירות הנסיעה ביחס למצב הקיים. העיכוב הממוצע לכ"ר ברמפה הנובע מיישום המערכת נע בין 20 ל-80 שניות במהלך תקופת השיא.

התועלת ביישום של מערכת לבקרת כניסות במונחים של שעות רכב מתבטא בחיסכון של כ-85 שעות X רכב בין מצב שבו מיושמת מערכת בקרת כניסות לבין מצב של הארכת נתיב האצה ובחסכון של 168