



**מרכז רן נאור לחקר הבטיחות בדרכים**  
The Ran Naor Road Safety Research center



**המכון לחקר התחבורה**  
הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל  
Technion - Israel Institute of Technology  
Transportation Research Institute

## פיתוח ויישום מודל סימולציה לדרכים דו נתיביות

ד"ר תומר טולדו

ד"ר חנין פרח

**במימון הרשות הלאומית לבטיחות בדרכים**

הרשות הלאומית  
לבטיחות בדרכים



דצמבר 2009, חיפה

דו"ח מחקר מס' S/6/2009



דוח מסכם

המחקר מומן ע"י הרשות הלאומית לבטיחות בדרכים, יחידת המדען הראשי  
ומרכז רן נאור לחקר הבטיחות בדרכים

מספר המחקר: 3/2008 תאריך תחילת המחקר: 1.08.08 תאריך הגשת הדו"ח: 31.12.09

שם החוקר הראשי: ד"ר תומר טולדו

שם חוקר נוסף: ד"ר חנין פרח

שמות חוקרים נוספים: אינג' רובי כרמל, גב' פאני פיסחוב, גב' לימור הנדל

מוסד המחקר: מרכז רן נאור לחקר הבטיחות בדרכים

נושא הדו"ח (עברית): פיתוח ויישום מודל סימולציה לדרכים דו נתיבות

**תקציר הדו"ח:** כבישים בין-עירוניים דו-נתיביים מהווים חלק נכבד מהכבישים בישראל. כבישים אלו, למשל כמו "כביש הערבה", נבדלים משאר סוגי הכבישים בארץ, מכיוון שתמרונים העקיפה בכבישים דו-נתיביים כרוכים בנסיעה בנתיב הנגדי. תמרון העקיפה הינו אחד התמרונים החשובים ביותר בכבישים דו-נתיביים מכיוון שהינו תהליך מורכב שיש לו השלכות ישירות על זרימת התנועה והבטיחות. למרות חשיבות תמרונים אלו, בספרות קיימים מעט מאוד מודלים לקבלת פערים בעקיפה. מטרת המחקר הנוכחי הינה לחקור את התנהגות הנהגים בעקיפה בכבישים בין עירוניים דו-נתיביים ולפתח ולכיל מודלים המתחשבים ברצון של הנהגים בעקיפה ובהחלטות שלהם לגבי קבלת או דחיית הפערים לעקיפה.

איסוף נתונים על תמרונים בעקיפה בכבישים דו-נתיביים הינו תהליך מסובך, ולכן הגישה במחקר זה הינה בחקירת התנהגות הנהגים בעקיפה באמצעות השימוש בסימולטור נהיגה אינטראקטיבי בתנאי מעבדה. הניסוי כלל 16 תסריטים שונים המאפשרים זיהוי וכיול השפעת המשתנים השונים הקשורים לרכבים המעורבים בתהליך העקיפה, מאפייני הכבישים, ומאפייני הנהגים על התנהגות הנהגים בעקיפה.

במחקר זה פותחו מודלים לעקיפה המורכבים משני שלבים. השלב הראשון של המודל בודק את רצון הנהג לעקוף והשלב השני בודק את החלטתו באם לקבל או לדחות את הפער הזמין לעקיפה. ולכן ההסתברות שנהג מסוים ישלים עקיפה מסוימת שווה למכפלת ההסתברות שהנהג רוצה לעקוף כפול ההסתברות שהוא יקבל את הפער הזמין לעקיפה. תוצאות כיוול המודלים מראות שמבנה המודל לעקיפה המורכב משני שלבים מסביר יותר טוב את התנהגות הנהגים בעקיפה מאשר מודל בעל שלב אחד המתחשב רק בהחלטות הנהגים בקבלת ודחיית פערים לעקיפה. בשני השלבים של המודל ישנה התחשבות בהשפעת מאפייני התשתית, התנועה ומאפייני הנהגים על התנהגות הנהגים בעקיפה. בנוסף ישנה התחשבות בהטרוגניות באוכלוסיית הנהגים. התוצאות מראות שכל קבוצות המשתנים האלו משפיעות באופן מובהק על הרצון של הנהגים לעקוף ועל ההסתברות שלהם לקבל פער זמין לעקיפה.



המודלים שפותחו במחקר זה מהווים תרומה ייחודית לספרות המקצועית, גם ברמה המתודולוגית וגם ברמה האמפירית. התוצאות המוצגות במחקר זה מעמיקות את הידע לגבי המשתנים שמשפיעים על החלטות הנהגים בעקיפה וההתנהגות בעקיפה. מודלים אלו ניתנים ליישום בעתיד בתוכנות זרימת התנועה כגון, תוכנות סימולציה מיקרוסקופיות לתנועה בכבישים דו-נתיביים. מודל זה יעזור למהנדסים ולמתכננים בעת קביעת הנחיות וקריטריונים לעקיפה, בתכנון כבישים חדשים, בשדרוג כבישים קיימים ובהערכת בטיחות כבישים דו-נתיביים.

**Research Title:** Development and implementation of a simulation model for two-lane highways

**Abstract:** Two-lane highways make up a substantial proportion of the road network in Israel. These roads, such as the "Arava road" are different from other types of roads because passing maneuvers on two-lane roads involve driving on the opposite lane direction. Passing is among the most significant driving behaviors on two-lane highways. It substantially impacts the highway performance. Despite the importance of the problem, few studies attempted to model passing behavior. In this research, a model that attempts to capture both drivers' desire to pass and their gap acceptance decisions to complete a desired passing maneuver is developed and estimated.

Data related to passing maneuvers on two-lane roads are difficult to collect; therefore, the approach of this study in investigating passing behavior is a use of an interactive driving simulator in a laboratory environment. 16 different scenarios were used in the experiment in order to capture the impact of factors related to the various vehicles involved, the road geometry and the driver characteristics in the model.

Passing behavior models are developed that include choices in two levels: the desire to pass and the decision whether or not to accept an available passing gap. The probability to complete a passing maneuver is modeled as the product of the probabilities of a positive decision on both these choices. The estimation results show that modeling the drivers' desire to pass the vehicle in front has a statistically significant contribution in explaining their passing behavior. The two sub-model incorporate variables that capture the impact of the attributes of the specific passing gap that the driver evaluates and the relevant vehicles, the geometric characteristics of the road section and the driver characteristics and account for unobserved heterogeneity in the driver population.

The models developed have a unique contribution to the state-of-the art, both at the methodological and the empirical level. The results presented enhance the knowledge about the factors that affect the decision to pass. A natural extension of this research could be in the implementation of the models in traffic micro-simulation models.



חתימת החוקר הראשי: ד"ר תומר טולדו

שם מנהל רשות המחקר: \_\_\_\_\_

חתימה: \_\_\_\_\_

## תקציר בעברית

### 1. מבוא

כבישים בין-עירוניים דו-נתיביים מהווים חלק נכבד מהכבישים בישראל. תמרון העקיפה בכבישים דו נתיביים הינו תהליך מורכב שיש לו השלכות ישירות על זרימת התנועה והבטיחות. לצורך חקירת תמרוני העקיפה יש צורך לאסוף נתונים על מאפייני התשתית של קטע הדרך שבו מתבצעות העקיפות, נתונים על מאפייני התנועה ונתונים אישיים של הנהגים ומאפייני הנסיעה שלהם. השגת נתונים אלו מתצפיות שדה הינו תהליך קשה, יקר ומסובך, ולכן הגישה המאומצת במחקר זה הינה לחקור את התנהגות הנהגים בעקיפה באמצעות השימוש בסימולאטור נהיגה בתנאי מעבדה. המחקר הנוכחי חוקר את התנהגות הנהגים בעקיפה ומפתח מודלים לקבלת פערים בעקיפה בכבישים בין עירוניים דו נתיביים. המודלים שפותחו מתחשבים ברצון של הנהגים לעקוף בנוסף להחלטות שלהם בקבלת או דחיית הפערים הזמינים לעקיפה. המודלים שפותחו כוללים את השפעת מאפייני התשתית, התנועה ומאפייני הנהגים על ההתנהגות בעקיפה.

### 2. סקר ספרות

המטרה מסקירת הספרות הייתה לבדוק איזה מחקרים נעשו בנושא העקיפות בכבישים דו-נתיביים, איזה מודלים קיימים בקבלת החלטות בעקיפה, מה הם המשתנים שמשפיעים על החלטות הנהגים בעקיפה, ולסקור את תוכנות הסימולציה שפותחו בעולם לכבישים דו-נתיביים.

תוצאות סקירת הספרות מראות שהמחקרים שנעשו על עקיפות התמקדו יותר בחקירת מרחקי הראות בעקיפה, השפעת מהירות הרכב המעכב ומהירות הרכב העוקף על מספר העקיפות, תאונות בעקיפה, השפעת חוסר הסבלנות על פער העקיפה הקריטי, סיווג תמרוני העקיפה, תדירות העקיפות, ותפיסת הנהגים לפער הנדרש לעקיפה. נמצא שישנם מספר משתנים שמשפיעים על החלטות הנהגים בעקיפה ושצריכים להילקח בחשבון בעת פיתוח מודל מתמטי לעקיפה. משתנים אלו כגון: מהירות הרכב המעכב, מהירות הרכב המתקרב בנתיב הנגדי, מהירות הרכב העוקף, מרחק העקיבה בין הרכב העוקף והרכב הנעקף בזמן תחילת העקיפה, גודל הפער לעקיפה, מאפייני הדרך, וסוג הרכב הנעקף.

בנוסף, נמצאו מספר רב של מודלים לקבלת פערים בצמתים, אך מעט מאוד מודלים פותחו לקבלת פערים בעקיפה בכבישים דו-נתיביים. בכל המודלים לקבלת פערים בעקיפה בכבישים דו-נתיביים שפותחו אין התחשבות ברצון של הנהגים לעקוף.

נסקרו מספר תוכנות סימולציה לכבישים דו-נתיביים כגון: Two-Lane ,Traffic on Rural Roads (TRARR), Passing (TWOPAS), VTISim, ו-RuTSim. תוכנות אלו פותחו על ידי חוקרים אוסטרלים, אמריקאים ושוודים. מודל העקיפה בתוכנת ה-TRARR הינו מודל דטרמיניסטי. הרכב תמיד יבצע עקיפה אם הפער הזמין הינו גדול מהפער המוערך שנדרש לעקיפה עם לקיחת מקדם בטחון. בתוכנת ה-TWOPAS המודל של העקיפה מתבסס על נתוני שדה משנות השבעים. שתי התוכנות, VTISim ו-RuTSim מניחות שמודל העקיפה הינו סטוכסטי. הסתברויות העקיפה במודל זה מחושבות לפי פונקציות Gompertz. המודל כויל לנתוני שדה בשוודיה. במודלים אלו נלקחו בחשבון מספר דל מאוד של משתנים שמשפיעים על ההתנהגות בעקיפה.

### 3. מתודולוגית המחקר ואיסוף הנתונים

לצורך המחקר תוכנן סקר מקיף במטרה לאסוף נתונים אישיים, נתוני תשתית ותנועה. נתונים אישיים נאספו באמצעות שאלון המכיל שאלות על המצב הסוציו-דמוגרפי (גיל, מגדר, וכו'), מצב סוציו-אקונומי (הכנסה, גודל משק בית, וכו') וסגנונות הנהיגה של הנהגים. בנוסף נערך ניסוי בסימולאטור נהיגה בתנאי מעבדה. 100 נהגים השתתפו בניסוי (69 גברים, 31 נשים), טווח הגילאים של הנהגים המשתתפים היה בין 21 ל-61 כאשר הגיל הממוצע הוא 32.7 עם סטיית תקן של 9.8 שנים. המשתתפים השלימו את השאלון ולאחר מכן השתתפו בניסוי בסימולאטור נהיגה שכלל תהליך של קבלת החלטות. הניסוי בסימולאטור כלל 16 תסריטים שונים של קטעי דרך בין-עירוניים דו-נתיביים עם מאפייני תשתית ותנועה שונים. 16 התסריטים שנוצרו הינם קומבינציות שונות של ארבעה פקטורים, כאשר כל פקטור הינו בעל 2 רמות כמוצג בטבלה א':

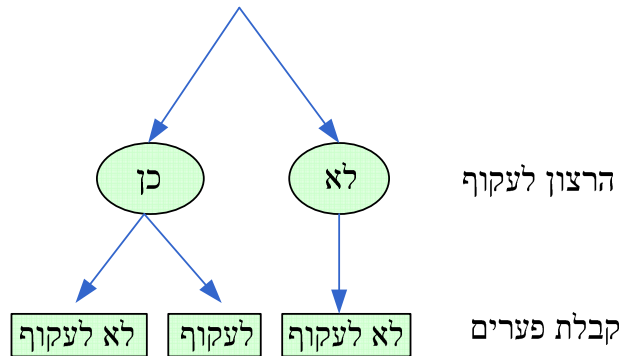
**טבלה א': הפקטורים הנכללים בתכנון הניסוי**

פקטור	גבוה	נמוך
<b>מאפייני תשתית</b>	רוחב נתיב: 3.75 מטר, רוחב שוליים: 2.25 מטר.	
	רדיוס העקום האופקי: 1500-2500 מטר	רדיוס העקום האופקי: 300-400 מטר
<b>פערי העקיפה בנתיב הנגדי</b>	הוגרלו באופן רנדומאלי מתוך התפלגות אקספוננציאלית שלילית קטומה	
	ממוצע: 10.3 שניות מינימום 5 שניות; מקסימום 25 שניות	ממוצע: 18.0 שניות מינימום 9 שניות; מקסימום 31 שניות
<b>מהירות הרכב המוביל</b>	הוגרלה באופן רנדומאלי מתוך התפלגות אחידה	
	- 67% בין 80-120 קמ"ש. - 33% בין 40-80 קמ"ש.	- 33% בין 80-120 קמ"ש. - 67% בין 40-80 קמ"ש.
<b>מהירות הרכב הנוסע בנתיב הנגדי</b>	הוגרלה באופן רנדומאלי מתוך התפלגות אחידה	
	- 67% בין 80-120 קמ"ש. - 33% בין 40-80 קמ"ש.	- 33% בין 80-120 קמ"ש. - 67% בין 40-80 קמ"ש.

קבוצות התסריטים והתסריטים שנבחרו לכל נהג נקבעו על פי שיטה שנקראת Partial Confounding. שיטה זו מאפשרת לנתח את השפעת ארבעת הפקטורים והאינטראקציות ביניהם על המשתנים השונים. בזמן הנהיגה של המשתתפים תוכנת הסימולאטור רושמת כל 0.1 שנייה את המהירות, התאוצה והמיקום הרוחבי והאורכי של רכב הנהג המשתתף בניסוי ושל כל שאר הרכבים בתסריט. מנתונים אלו חושבו הפרשי המהירויות בין הרכב העוקף והנעקף, מהירויות נסיעה רצויות, גודלי הפערים המתקבלים והנדחים, המרחק שהנהג שומר מהרכב לפניו לפני היציאה לעקיפה ופרמטרים נוספים באמצעות תכנות בתוכנת ה-Matlab.

#### 4. מבנה המודל

ההנחה המרכזית במודלים לעקיפה בכבישים דו-נתיביים שפותחו במחקר זה הינה שתהליך העקיפה מורכב משני שלבים: הרצון של הנהג לעקוף והחלטה שלו לקבל או לדחות את פער העקיפה. תהליך זה מתואר בתרשים הזרימה הבא:



תרשים א': תרשים זרימה של מבנה מודל העקיפה

בשלב הראשון הנהגים מחליטים האם ברצונם לעקוף את הרכב שמעכב אותם או לא ובשלב השני הם מעריכים את הפער הזמין לעקיפה ומחליטים באם לקבל או לדחות אותו. ולכן ההסתברות לעקיפה הינה המכפלה של ההסתברות לתשובה חיובית בשני השלבים: הנהג רוצה לעקוף והוא מקבל את הפער הזמין לעקיפה:

כאשר  $n$  הינו אינדקס הנהג.

כל אחת מההסתברויות האלה הינה הסתברות בינארית.

#### 5. תוצאות המודל וממצאים

בסיס הנתונים כלל 14654 תצפיות של קבלת או דחיית פערים לעקיפה, כאשר 696 (5%) מתצפיות אלו הם פערים שהתקבלו. בהסתמך על בסיס נתונים זה נבדקו וכוילו שלושה מודלים שונים לעקיפה. במודל הראשון הפער הזמין לעקיפה הוגדר שהינו הפער המדוד בזמן בין שני כלי רכב העוקבים בנתיב הנגדי. במודל השני הפער הזמין לעקיפה הוגדר שהינו הפער המדוד בזמן בין הרכב שמתקרב מהנתיב הנגדי לבין הרכב הנעקף. ובמודל השלישי הפער הזמין לעקיפה הוגדר שהינו הפער המדוד בזמן בין הרכב שמתקרב מהנתיב הנגדי לבין הרכב העוקף. טבלה ב' מסכמת את תוצאות כיוול שלושת המודלים:

טבלה ב': תוצאות כיוול המודלים השונים לעקיפה

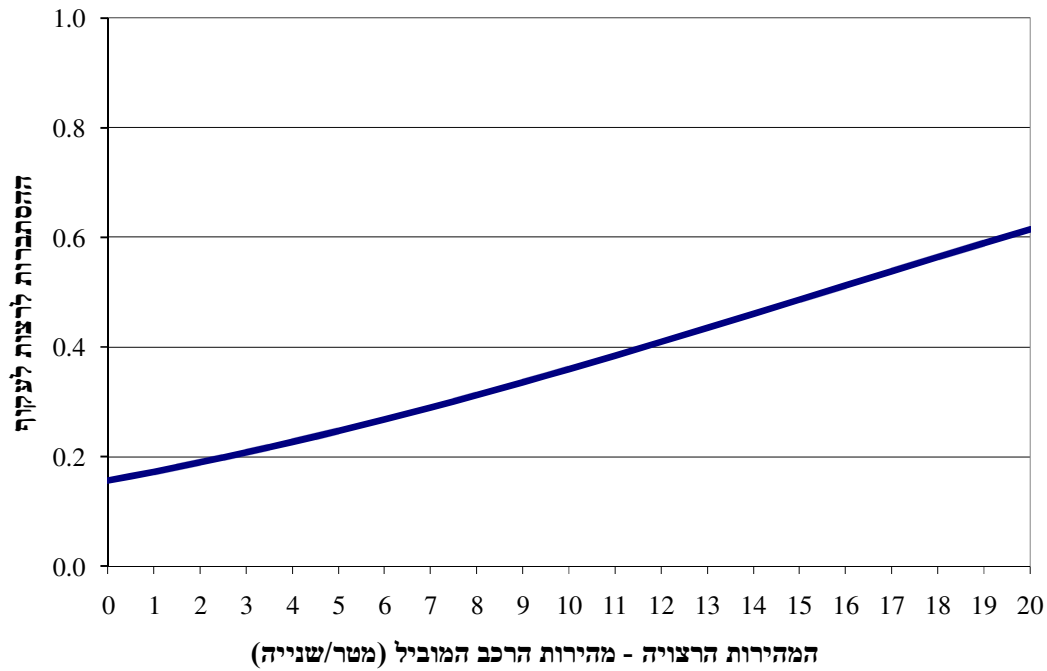
המודל השלישי		המודל השני		המודל הראשון		
מובהקות (P-value)	ערך המשתנה	מובהקות (P-value)	ערך המשתנה	מובהקות (P-value)	ערך המשתנה	
-1298.45		-1323.08		-1300.54		ערך הנראות המקסימאלית
<b>פונקציית הרצון לעקיפה</b>						
0.000	-0.534	0.002	-0.379	0.000	-0.534	קבוע
0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	סטיית התקן
0.000	0.018	0.000	0.019	0.000	0.018	(מהירות רצויה – מהירות הרכב המוביל) ק"מ/שעה
0.000	-0.016	0.000	-0.015	0.000	-0.016	פער העקיבה (מטר)
0.007	0.015	0.002	0.021	0.011	0.014	מרחק נסיעה מצטבר (ק"מ)
0.000	0.472	0.000	0.387	0.000	0.497	הטרונגניות באוכלוסייה ברצון לעקיפה
<b>פונקציית קבלת הפערים בעקיפה</b>						
0.000	2.990	0.000	3.053	0.000	3.726	קבוע
0.000	-1.289	0.000	-0.870	0.000	-1.261	סטיית התקן
0.000	-0.206	0.000	-0.274	0.000	-0.196	הטרונגניות באוכלוסייה בקבלת פערים
0.000	-0.011	0.000	-0.009	0.000	-0.005	מהירות הרכב העוקף (ק"מ/שעה)
0.000	0.009	0.001	0.008	0.000	0.01	מהירות הרכב הנעקף (ק"מ/שעה)
0.001	-0.002	0.029	-0.0017	0.000	-0.01	מהירות הרכב בנתיב הנגדי (ק"מ/שעה)
0.000	0.104	0.000	0.115	0.000	0.108	עקמומיות הדרך (1/ק"מ)
0.034	0.072	0.071	0.070	0.010	0.094	סוג הרכב הנעקף (1=משאית, 0=רכב פרטי)
0.011	-0.156	0.017	-0.333	0.018	-0.142	גיל הנהגים בין 21 ל- 25 שנים

ניתן לראות מטבלה ב' שהמודל השלישי (שמניח שהפער הזמין הינו הפער בזמן בין הרכב העוקף והרכב המתקרב מהנתיב הנגדי) הינו המודל עם ערך הנראות המקסימאלי הגבוה ביותר וכל המשתנים שלו מובהקים סטטיסטית ברמת בטחון של 95%. ולכן מבחינה סטטיסטית הינו המודל הטוב ביותר מבין שלושת המודלים שנבחנו. בנוסף, כויל מודל רביעי הכולל בתוכו רק את השלב של קבלת או דחיית הפער (בלי החלק של הרצון לעקיפה) במטרה לבדוק את תרומת וחשיבות רצון הנהגים בעקיפה בהסבר החלטותם בעקיפה. התוצאות הראו שלהוספת השלב של הרצון של הנהגים בעקיפה תרומה מובהקת סטטיסטית.

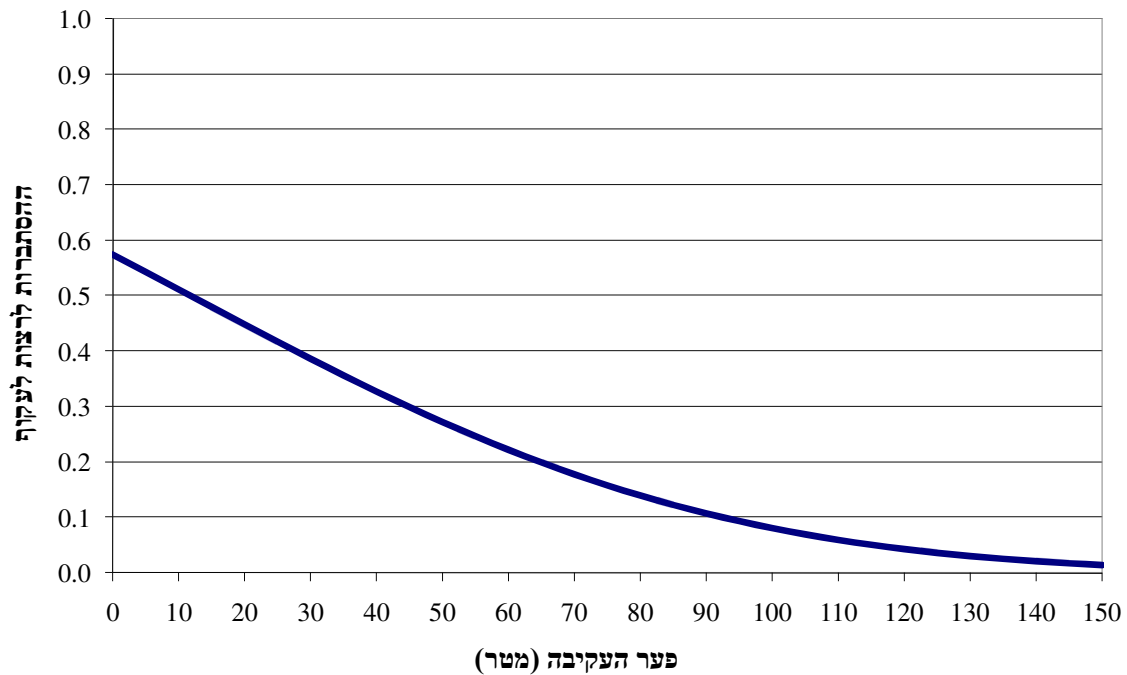
בהתבסס על תוצאות המודל השלישי המופיע בטבלה ב', תרשימים ב' ו- ג' ממחישים את השפעת ההפרש בין המהירות הרצויה של הרכב העוקף למהירות הרכב המוביל והשפעת פער העקיבה בין הרכב העוקף לרכב הנעקף



על ההסתברות של הרצון בעקיפה. בכל אחד מתרשימים אלו הערך של המשתנה שהשפעתו נבדקת השתנה בזמן שכל שאר המשתנים האחרים הנכנסים במודל נשארו קבועים. ההסתברויות המתוארות בתרשימים הם תחת ההנחה שההפרש בין המהירות הרצויה של הרכב העוקף לבין מהירות הרכב המוביל שווה ל- 40 קמ"ש ופער העקיבה שהנהג שמר מהרכב המוביל בזמן קבלת הפער הינו 30 מטר.



תרשים ב': השפעת הפרש המהירויות על ההסתברות לרצות לעקוף

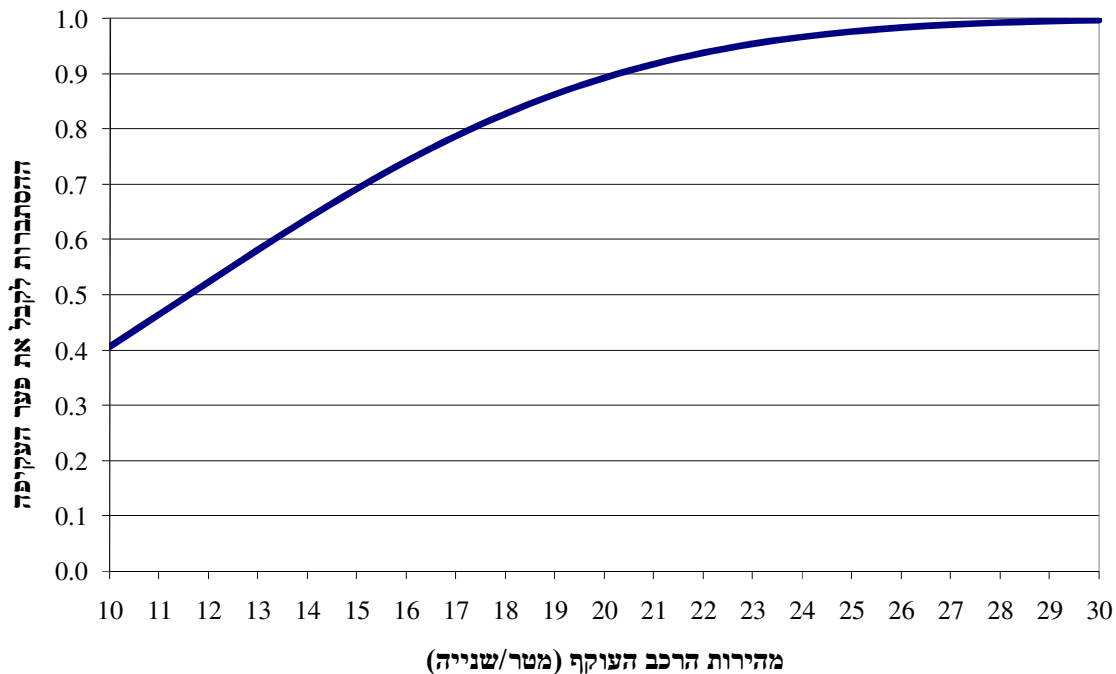


תרשים ג': השפעת פער העקיבה על ההסתברות לרצות לעקוף

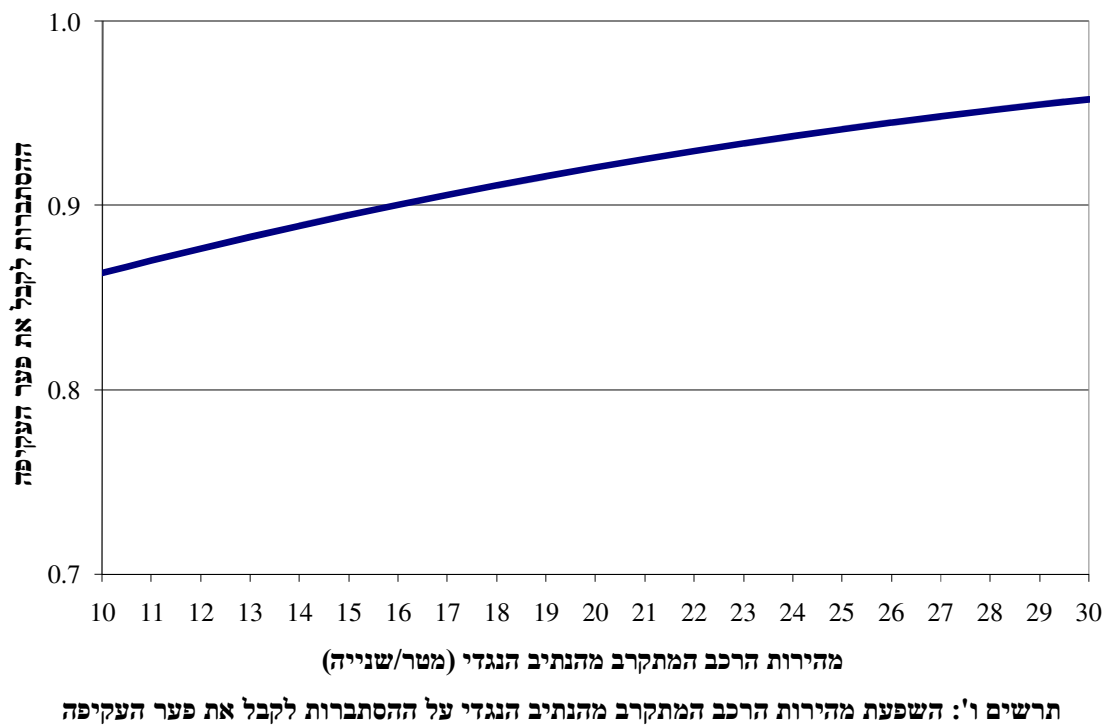
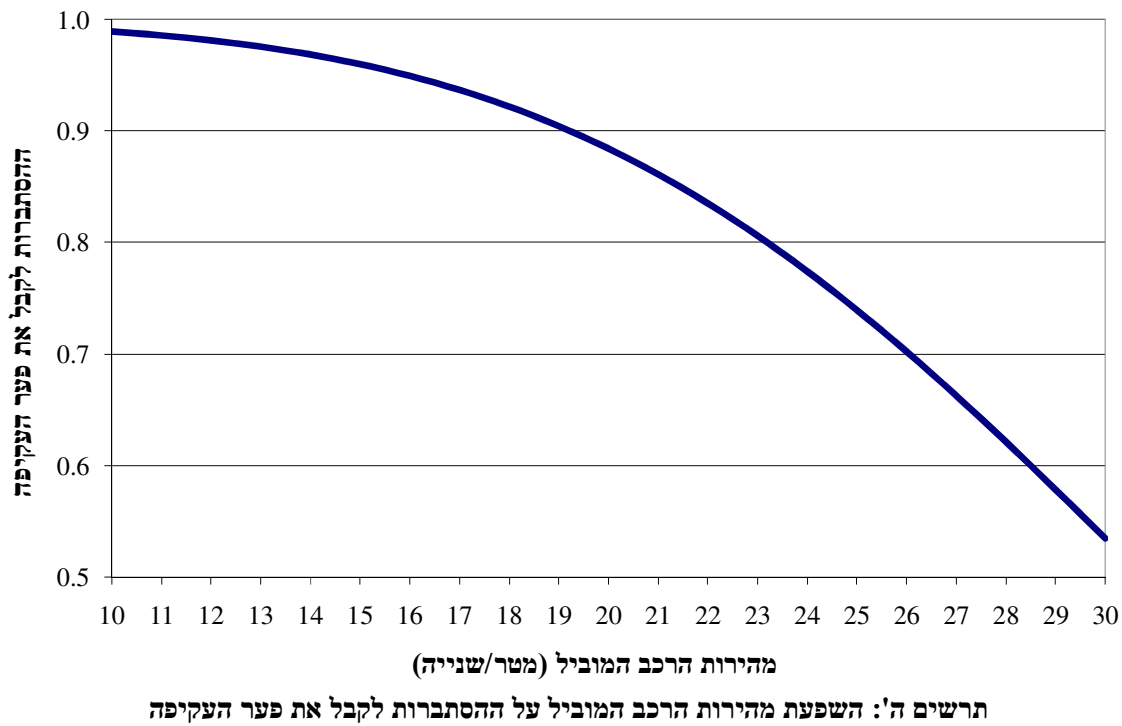
התוצאות בתרשים ב' מראים שהרצון של הנהגים לעקוף עולה ככל שהפרש בין מהירות הנסיעה הרצויה שלהם לבין מהירות הנסיעה של הנהג המוביל גדל. מתרשים ג' ניתן לראות שככל שפער העקיבה שהנהג העוקף שומר מהרכב הנעקף גדול יותר, ההסתברות של הרצון שלו לעקוף יורדת.

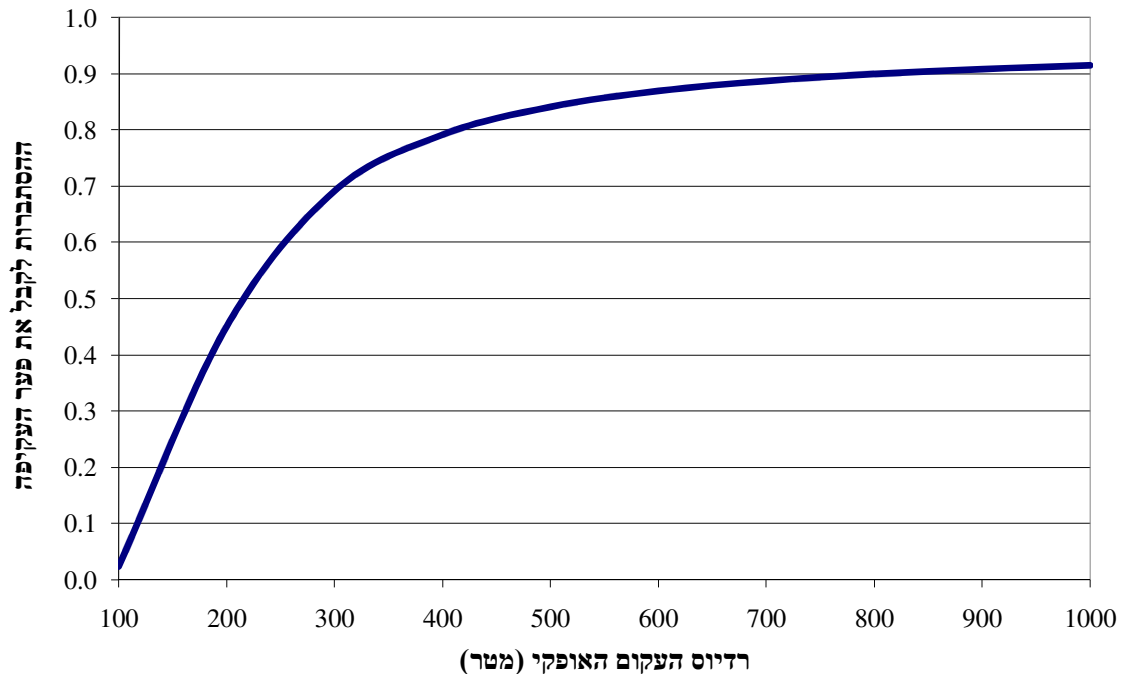
איסוף נתונים לגבי התנהגות הנהגים בעקיפה באמצעות השימוש בסימולאטור נהיגה עלול להוביל לתוצאות שונות מהתוצאות הנובעות מהתנהגות אותם הנהגים בשטח. לדוגמה, הנהגים המשתתפים בניסוי עלולים להתעייף, להשתעמם, או לגלות חוסר התעניינות בניסוי וכתוצאה מכך להגביר את מהירות נסיעתם על מנת לסיים את הניסוי מהר יותר. המשתנה של המרחק המצטבר, שהינו המרחק המדוד מתחילת הנסיעה בסימולאטור ועד נקודת המדידה, עשוי לתקן סטייה זו. במחקר נמצא שלמשתנה זה השפעה חיובית קטנה אך מובהקת על נטיית הנהגים לרצות לעקוף. מטרת משתנה זה הינה תיקון יחסי לסטייה הנובעת מאיסוף הנתונים בסימולאטור, ולכן בעת ההשתמשות במודל זה לצורכי חיזוי צריך להשמיט משתנה זה.

תרשימים ד' עד ז' מתארים את השפעת המשתנים השונים על ההסתברות לקבל את הפער לעקיפה. בכל אחד מהתרשימים האלו הערך של המשתנה שהשפעתו נבדקת השתנה בזמן שכל שאר המשתנים האחרים שנכללים במודל נשארו קבועים. התרשימים מתארים את ההסתברות של נהג בגיל בין 21-25 לקבל פער בגודל מסוים לעקיפה. אם לא נאמר אחרת, הפער הזמין שווה ל-15 שניות, מהירות הרכב המוביל הינה 60 קמ"ש, המהירות של הרכב המתקרב מהנתיב הנגדי הינה 90 קמ"ש, המהירות של הרכב העוקף הינה 80 קמ"ש. עקמומיות הדרך ( $1/R$ ) שווה ל-0.5, כלומר הרדיוס של העקום האופקי שווה ל-2000 מטר. הרכב הנעקף הינו רכב פרטי.



**תרשים ד': השפעת מהירות הרכב העוקף על ההסתברות לקבל את פער העקיפה**



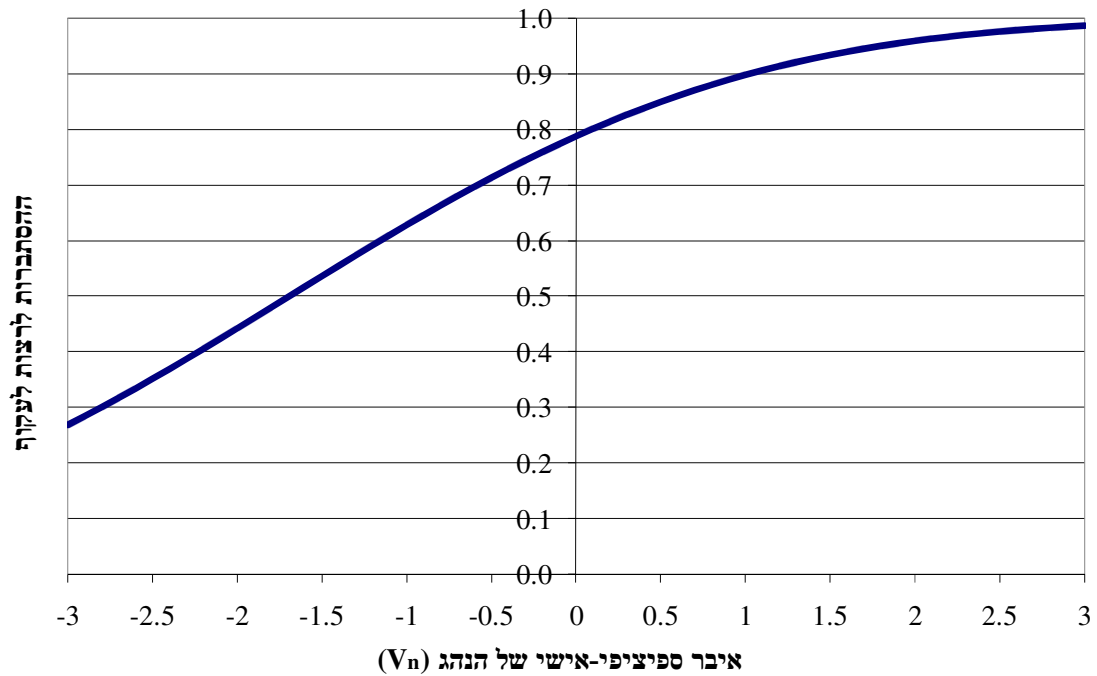


**תרשים ז': השפעת רדיוס העקום האופקי על ההסתברות לקבל את פער העקיפה**

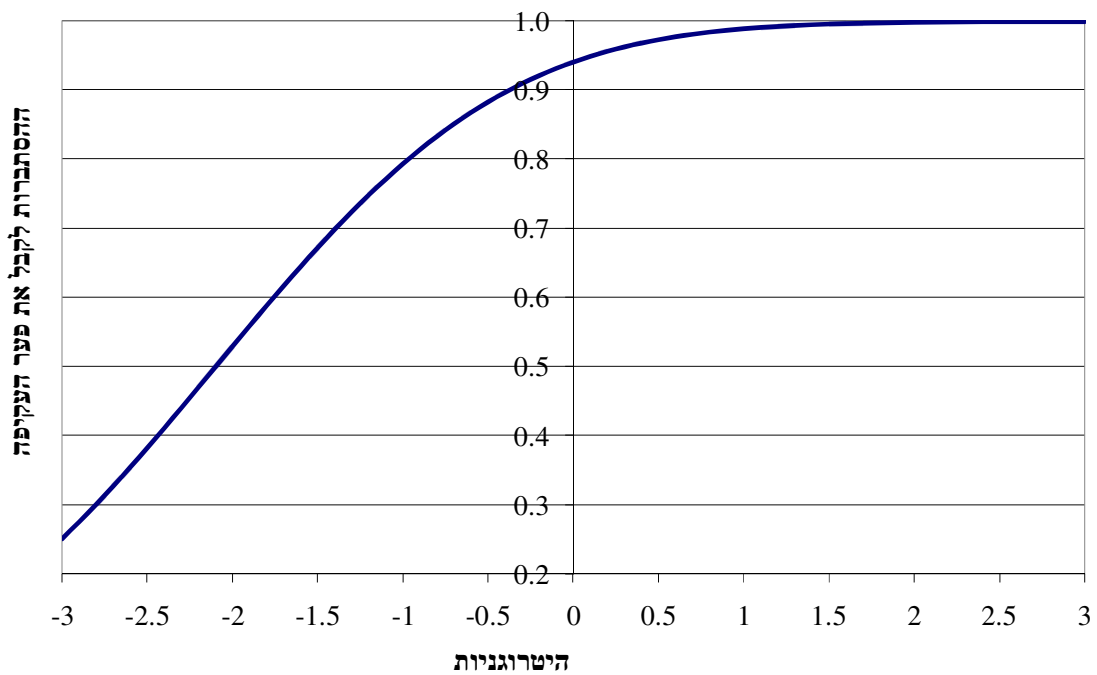
התוצאות מראות שככל שמהירות הנסיעה של הנהגים הינה גבוהה יותר הנטייה שלהם לקבל את הפער לעקיפה גדלה וכאשר מהירות הרכב המוביל עולה הנטייה שלהם לעקוף יורדת. תוצאה זו הינה אינטואיטיבית מכיוון שככל שמהירות הרכב המוביל הינה גבוהה יותר נדרש יותר זמן לנהג העוקף לסיים את תהליך העקיפה. ככל שמהירות הרכב המתקרב מהכיוון הנגדי הינה גבוהה יותר, זאת אומרת הפער במרחק בין הרכבים בנתיב הנגדי הינו גדול יותר, ההסתברות שהנהג יקבל את הפער גדולה יותר. גם כן נמצא שעקמומיות הכביש משפיעה על החלטות הנהגים בעקיפה. בכבישים עם עקומים אופקיים מתונים יותר, הפער הקריטי של הנהגים קטן יותר ולכן ההסתברות לקבלת פער לעקיפה עולה.

תוצאות המודל מראות גם שהפער הקריטי של הנהגים בעקיפה גדול יותר במקרים שבהם הרכב הנעקף הינו משאית ולא רכב פרטי. נמצא שהנטייה של הצעירים לעקוף הינה גבוהה יותר מהמבוגרים. לא נמצא הבדל מובהק בין הגברים לנשים בהתנהגות בעקיפה.

תרשימים ח ו-ט מציגים את השפעת הטרוגניות בין הנהגים על ההסתברות לרצות לעקוף וההסתברות לקבל פער לעקיפה. הטרוגניות זו תופסת את ההבדלים הבלתי מדודים בין הנהגים, כגון רמת האגרסיביות של הנהגים השונים או רמת מיומנותם בנהיגה וכד'. ההנחה היא שאיבר זה מתפלג נורמאלית. איבר זה הינו קבוע עבור כל נהג ולכן תופס את הקורלציה שבין התצפיות השונות של אותו נהג. המודל מבוסס על ההנחה, שעל ידי ההתחשבות באיבר שגיאה זה התצפיות השונות של אותו נהג הן בלתי תלויות.



תרשים ח': השפעת ההטרונגניות של הנהגים על ההסתברות לרצות לעקוף



תרשים ט': השפעת ההטרונגניות של הנהגים על ההסתברות לקבל את פער העקיפה

ניתן לראות משני התרשימים ח ו-ט שההסתברות לרצות לעקוף וההסתברות לקבל את פער העקיפה מושפעים מההבדלים שיש בין הנהגים וההטרונגניות בין הנהגים.

## 6. סיכום והמשך מחקר

במחקר זה פותחו שלושה מודלים לעקיפה. ההנחה הבסיסית בכל המודלים שפותחו הינה שתהליך העקיפה מורכב משני שלבים: הרצון לעקיפה וקבלת הפער לעקיפה. ולכן ההסתברות שנהג מסוים יעקוף שווה להסתברות של הרצון שלו לעקוף כפול ההסתברות שהוא יקבל את הפער הזמין לעקיפה. נבדקו שלוש אפשרויות לאופן הגדרת הפער הזמין: (1) הפער הזמין לעקיפה הינו הפער המדוד בזמן בין שני כלי רכב עוקבים בנתיב הנגדי; (2) הפער הזמין לעקיפה הינו הפער המדוד בזמן בין הרכב שמתקרב בנתיב הנגדי לרכב הנעקף; ו- (3) הפער הזמין לעקיפה הינו הפער המדוד בזמן בין הרכב העוקף לרכב המתקרב מהנתיב הנגדי. תוצאות הכיול הראו שהמודל השלישי הינו הטוב ביותר מבחינה סטטיסטית וכל המשתנים שבו מובהקים סטטיסטית. במילים אחרות, הנהגים בתהליך קבלת ההחלטות בעקיפה מתחשבים בפער (בזמן) הזמין בינם לבין הרכב המתקרב מהנתיב הנגדי.

בנוסף, מחקר זה השווה בין מודל בעל שלב אחד (קבלת/דחיית פער) לעומת מודל בעל שני שלבים (רצון לעקיפה וקבלת/דחיית פער) על מנת לבדוק את תרומת ההתחשבות בשני שלבים לעומת שלב אחד בהסבר התנהגות הנהגים בעקיפה. התוצאות הראו שהמודל בעל שני השלבים (רצון לעקיפה וקבלת/דחיית פער) מסביר יותר טוב את התנהגות הנהגים בעקיפה.

בשלושת המודלים שפותחו נלקחה בחשבון השפעת מאפייני התשתית, התנועה ומאפייני הנהגים על החלטות הנהגים בעקיפה. התוצאות מראות שכל קבוצות המשתנים האלו משפיעות באופן מובהק על הרצון של הנהגים לעקוף ועל ההסתברות שלהם לקבל את הפער הזמין לעקיפה. הוספת משתני ההטרונגיות בין הנהגים בשני שלבי המודל שיפר את יכולת המודל בהסבר התנהגות הנהגים בעקיפה.

המודלים שפותחו במחקר זה מהווים תרומה ייחודית לספרות המקצועית, גם ברמה המתודולוגית וגם ברמה האמפירית. התוצאות המוצגות במחקר זה מעמיקות את הידע לגבי המשתנים שמשפיעים על החלטות הנהגים בעקיפה ולגבי ההתנהגות שלהם בעקיפה. למודלים אלו פוטנציאל ליישום בעתיד בתוכנות של זרימת התנועה כגון, בתוכנות סימולציה מיקרוסקופיות לתנועה בכבישים דו-נתיביים וזה יכול לשמש את המהנדסים והמתכננים בעת קביעת הנחיות וקריטריונים לעקיפה, בתכנון כבישים חדשים, בשדרוג כבישים קיימים, ובהערכת רמת הבטיחות בכבישים אלו.

ראוי לציין שלמרות שהתוצאות המדווחות כאן הן מבטיחות, למחקר זה ישנם מספר מגבלות המצריכות המשך מחקר במספר כיוונים במטרה לחזק את התוצאות ולהגדיל את השימושיות של המודלים שפותחו. כיווני מחקר אלו כוללות: (1) בדיקת מאפייני תשתית נוספים למשל רוחב הנתיב והשוליים, עקמומיות התוואי האנכי, מאפייני צידי הדרך ומרחקי הראות; (2) ההרחבה של מסגרת המודל שתכלול עקיפות של יותר מרכב אחד ועקיפות מבוטלות; (3) ולידציה לתוצאות המחקר על ידי מחקר שדה עדכני; (4) יישום מודל קבלת הפערים בעקיפה במודלים לזרימת תנועה כגון במודלים של סימולאציות תנועה מיקרוסקופית; ו- (5) פיתוח אינדיקטורים לבטיחות של תמרוני העקיפה בכבישים דו-נתיביים ובדיקת ההשפעה של מאפייני התשתית, התנועה והתנהגות הנהגים על רמת הבטיחות והסיכוי בהתרחשות תאונות.