



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

בחינת הקשר בין אירועי הנהיגה המתקבלים מטכנולוגיות מתקדמות לבין מאפייני תשתיות הדרכים

הוכן ע"י:

ד"ר ויקטוריה גיטלמן, ד"ר אטי דובא, אינג' רובי כרמל,
גבי פאני פיסחוב, אינג' סמדר מוריק, גבי לימור הנדל, גבי שרית חן,
פרופ' שלמה בכור

דו"ח מחקר מס' S/54/2013

**עבור: נתיבי ישראל - החברה הלאומית לתשתיות
תחבורה בע"מ**



אוגוסט 2013

תיעוד / תעודת זהות של הפרויקט

מס' הדו"ח :	
תאריך הגשת הדו"ח : אוגוסט 2013	שם הדו"ח : בחינת הקשר בין אירועי הנהיגה המתקבלים מטכנולוגיות מתקדמות לבין מאפייני תשתיות הדרכים
מספור הדו"ח של גוף מבצע העבודה: S/54/2013	שם המחברים : גיטלמן ו., דובא א., כרמל ר., פיסחוב פ., מוריק ס., הנדל ל., חן ש., בכור ש.
מספר החוזה : 4500052823	שם הגוף המבצע וכתובתו : מרכז רן נאור לחקר הבטיחות בדרכים
סוג הדו"ח והתקופה אליה הוא מתייחס: דו"ח מדעי, 2012-2013	
הערות נוספות:	
תקציר:	
1. מטרות :	
<p>מחקר זה הינו מחקר גישוש לבחינת מערכת הקשרים בין התרחשות האירועים בנהיגה לבין מאפייני תשתית ותאונות דרכים. המחקר מתבסס על הצלבת שני בסיסי נתונים: אירועי הנהיגה שהתקבלו על סמך נתוני "הקופסא הירוקה"- מערכת ניטור בזמן אמת שמותקנת במדגם כלי רכב, ומאפייני תשתיות בדרכים הלא עירוניות שניתנים להפקה על סמך מאגר הנתונים של מערכת המני"ב.</p> <p>בביצוע המחקר היו שלושה מרכיבים: א - סקר ספרות בינלאומית, בנושאי "הנהיגה הטבעית", שימושים בנתוני "הקופסא הירוקה" במחקרים הקודמים בארץ ומאפיינים גיאומטריים ואחרים של הדרכים הלא עירוניות שמשיעיים על התרחשות התאונות; ב - הכנת בסיס הנתונים למחקר, ע"י מיפוי נתונים על אירועי הנהיגה על רשת הכבישים, והפקת אירועי הנהיגה, מאפייני התשתית, מדדי החשיפה ומספרי התאונות עבור יחידות הניתוח; ג - ביצוע ניתוחים רבים, חד- ורב-פרמטריים, על בסיס הנתונים של המחקר.</p>	
2. ממצאים :	
<p>בסיס הנתונים של המחקר כלל 9 כבישים מייצגים: מס' 4, 65, 70, 1, 2, 40, 44, 444, 90, בהם נבנו כ-3500 יחידות ניתוח. אירועי הנהיגה ומאפייני תשתית הופקו לשנת 2010, כאשר מספרי התאונות רוכזו עבור השנים 2008-2010. המחקר התמקד בשלושה סוגי אירועים: סוג 1 - "בלימה", סוג 19 - "מהירות", וסך האירועים.</p> <p>ע"פ המודלים שפותחו במחקר לבדיקת הקשר בין כל אחד ממאפייני התשתית לבין התרחשות האירועים, בניכוי השפעת החשיפה (מספר מעברים בקטע של כלי הרכב עם "הקופסא הירוקה"), לרוב מאפייני התשתית נמצאה השפעה מובהקת על אירועי הנהיגה, כאשר חלק ניכר ממאפייני התשתית הדגימו השפעה הפוכה על אירועי "בלימה" לעומת אירועי "מהירות". בין היתר, קרבת צומת או מגבלות גיאומטריות, לרוב, גורמות להגברת אירועי ה"בלימה" ולמיתון באירועי ה"מהירות", בעוד שנסיעה בתנאי דרך טובים יותר ובקטעים ארוכים יותר, ללא הפרעות, מזוהה עם ירידה בבלימות ועם עליה באירועי מהירות וגם, עם עליה בסך האירועים.</p> <p>בבחינה המקדימה, נמצא קשר מובהק בין אירועים לתאונות, בניכוי השפעת החשיפה, כאשר צורת הקשר שונה בסוגי דרך שונים. הסתמן קשר חיובי בין אירועי ה"בלימה" ותאונות, וקשר שלילי בין אירועי ה"מהירות" ותאונות.</p> <p>ע"פ המודלים הרב-פרמטריים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית ואירועים בנהיגה, מאפייני התשתית המובילים מבחינת יכולת הניבוי של אירועים מסוג "בלימה" ו-"מהירות" הם: קרבת צומת, אורך קטע (מרחק בין צמתים עיקריים), סוג דרך, רוחב שול שמאלי, רוחב שול ימני, כאשר סוג דרך, קרבת צומת, אורך קטע משפיעים בצורה הפוכה על אירועי "מהירות" לעומת "בלימה". השפעת מאפייני התשתית על סך</p>	

האירועים דומה להשפעתם על אירועי ה"מהירות", כאשר בניבוי סך האירועים מעורבים מאפייני תשתית נוספים: רוחב נתיב, שיפוע לאורך.

המחקר בחן את הקשר המשולש בין "תאונות-מאפייני תשתית-אירועים בנהיגה", ע"י פיתוח מודלים בסיסיים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית והתרחשות התאונות ובהמשך, ע"י הוספת משתני האירועים למודלים הבסיסיים. ע"פ המודלים הבסיסיים, בדרך חד-מסלולית, מספר התאונות עולה עם עליה בחשיפה, בקרבת צמתים ובנוכחות שיפוע לאורך, כאשר כלל התאונות יורד בקטע עם רוחב נתיב צר או צר מאוד. כמו כן, בדרך דו-מסלולית או ממוחלפת, מספר התאונות עולה עם עליה בחשיפה, בדרך עם נפח תנועה גבוה יותר, בקרבת צמתים וכאשר רוחב שול שמאלי צר ובנוסף, זוהתה השפעה של שול ימני בינוני או צר, ושל קטע בינוני או ארוך בין הצמתים.

בכל סוגי הדרך, הוספת משתני האירועים לא שינתה מהותית את צורת הקשר בין מאפייני התשתית והתאונות שהייתה במודלים הבסיסיים. עם זאת, הוספת אירועים מסוג "בלימה" או "מהירות" שיפרה את ניבוי התאונות בדרך דו-מסלולית, עם הדגמת קשר מובהק (חיובי או שלילי, בהתאמה) עם מספרי התאונות. כמו כן, בדרך ממוחלפת, הוספת אירועי "מהירות" או סך האירועים שיפרה את ניבוי התאונות עם נפגעים, תוך כדי הדגמת קשר שלילי ומובהק עם מספרי התאונות.

3. מסקנות:

המודלים שפותחו במחקר תורמים להבנת מערכת הקשרים בין מאפייני התשתית, התנהגויות הנהגים והתרחשות התאונות. הקשרים הסטטיסטיים שנמצאו במודלים יכולים לשמש לזיהוי אתרים בעייתיים ברשת הדרכים.

מילות מפתח: אירועים בנהיגה, מאפייני תשתית, תאונות דרכים, מודל סטטיסטי

מס' עמודים : 183	סווג תפוצה (של עמוד זה):	סווג תפוצה (של הדו"ח):
------------------	----------------------------	--------------------------

זכויות יוצרים והסרת אחריות

א. כללי

האמור בסעיפים ב' ו'ג' שלהלן מתייחס אך ורק לכל משתמש ו/או צד ג' – למעט צוות המחקר ו/או מוסד הטכניון למחקר ופיתוח, אשר ביחס אליהם יחול האמור בהסכם שבינם ובין מעצ החברה הלאומית לדרכים בישראל בע"מ.

ב. זכויות יוצרים

1. זכויות היוצרים בדו"ח זה שייכות באופן בלעדי לחברה הלאומית לדרכים בישראל בע"מ (להלן: "החברה"). למען הסר כל ספק, זכויות יוצרים אלו חולשות, בין השאר, על ניסוח, עימוד, עריכה, תמליל, תמונות, איורים, שרטוטים, מפות, גרפיקה וכל מידע אחר הכלול בדו"ח זה.
2. אין לבצע שום שינוי או עיבוד בדו"ח זה, אין לשעתק את כולו או חלקו ואין לשלבו בשום מאגר מידע אחר לרבות שילובו מכל סיבה שהיא באתרי אינטרנט, בחומר מודפס, מאמרים, הוראות שימוש ומפרטים שאינם של החברה ושאיןם מיועדים לשימוש עבור מיזמים של החברה. כמו כן, אין להעתיק, להפיץ, לשדר או לפרסם את הדו"ח, כולו או חלקו, להשכירו או לסחור בו בכל דרך. כל זאת כאמור למעט, אם ניתן לכך אישור, מראש ובכתב, מאת החברה.

ג. הגבלת אחריות

בשום מקרה לא תחול על החברה אחריות בגין כל נזק ישיר או עקיף העלול להיגרם למשתמש ו/או לצד ג' כלשהו עקב השימוש בדו"ח זה וכולל, בין היתר אך מבלי לגרוע מן האמור, נזק מקרי, מיוחד או תוצאתי, או כל נזק אחר מכל סוג ומין; לרבות אך ללא הגבלה, כל נזק כספי או נזקי לגופו או לרכושו של המשתמש ו/או של צד ג', הנובעים או קשורים בכל דרך שהיא לשימוש בדו"ח זה.

ד. שונות

תוכנו של דו"ח זה משקף את דעות מחבריו בלבד בדבר העובדות הנתונים הממצאים המסקנות והלקחים המובאים בו.

תוכן הדו"ח איננו משקף בהכרח את ההשקפות או המדיניות הרשמית של החברה. אין לראות בדו"ח זה כשלעצמו תקן, מפרט או הנחייה מחייבת.

הדו"ח אינו מיועד לצרכי מכרז ואין לראות בו אישור למוצר או טכנולוגיה מכל סוג שהוא. אין לראות בדו"ח זה עידוד או פרסומת לרכישת מוצר או טכנולוגיה מכל סוג שהוא. אזכורם של שמות יצרנים/ספקים/קבלנים בדו"ח זה נעשה ממניע חיוניות לתוכן הדו"ח בלבד.

תוכן עניינים

1	..... תקציר מנהלים
9	..... 1. מבוא
9	..... 1.1. נושא המחקר ותוכן הדו"ח
12	..... 1.1. מחקרי "הנהיגה הטבעית" (Naturalistic driving)
12	..... 1.2.1. רקע - ההתפתחויות בעולם
13	..... 1.2.2. פוטנציאל מחקרי ה"נהיגה הטבעית" לצורכי שיפור הבטיחות
15	..... 1.2.3. נתוני "הנהיגה הטבעית": זיהוי אירועים חריגים בנהיגה, שיטות עיבוד
26	..... 1.2.4. היבטים נוספים
27	..... 1.2.5. סיכום
28	..... 1.3. "הקופסא הירוקה"
28	..... 1.3.1. רקע כללי - מערכות IVDR
29	..... 1.3.2. שימושים מחקריים בנתוני "הקופסא הירוקה"
37	..... 1.3.3. סיכום
38	..... 1.4. מאפייני תשתית של הדרכים הלא עירוניות שמשפיעים על התרחשות התאונות
38	..... 1.4.1. כללי
38	..... 1.4.2. מקדמי ירידה בתאונות שמזוהים עם מאפייני תשתית שונים
46	..... 1.4.3. מודלים לחיזוי תאונות
50	..... 1.4.4. סיכום - רשימה של מאפייני תשתית המשפיעים ביותר על התרחשות התאונות
51	..... 2. הכנת בסיס הנתונים למחקר
51	..... 2.1. מיפוי אירועי נהיגה על רשת הכבישים
51	..... 2.1.1. רקע - נתוני "הקופסא הירוקה"
52	..... 2.1.2. מתודולוגיה לניתוח נתוני "הקופסא הירוקה"
59	..... 2.1.3. תוצאות
66	..... 2.2. הכנת בסיס נתונים משולב עם מאפייני הדרכים
66	..... 2.2.1. כללי
68	..... 2.2.2. מאפייני התשתיות שהופקו עבור יחידות הניתוח במחקר
72	..... 2.2.3. יצירת בסיס נתונים משולב
73	..... 2.3. סטטיסטיקה תיאורית של בסיס הנתונים המשולב
78	..... 3. ניתוחים מקדימים של נתוני המחקר
78	..... 3.1. בחינת הקשר בין אירועי הנהיגה ומאפייני הדרכים
78	..... 3.1.1. הקשר בין חשיפה לאירועים בנהיגה
79	..... 3.1.2. בחינת הצורך במשתנה נפח תנועה קטגורי
81	..... 3.1.3. בחינת השפעה של מאפייני תשתית על אירועים
91	..... 3.1.4. סיכום הממצאים לגבי הקשר בין מאפייני התשתית ואירועים
94	..... 3.2. בחינת הקשר בין אירועים בנהיגה לבין תאונות דרכים
94	..... 3.2.1. הקשר בין חשיפה לתאונות
95	..... 3.2.2. הקשר בין אירועים לתאונות, מעבר לחשיפה

100	4. פיתוח מודלים רב-פרמטריים
100	4.1. פיתוח מודלים רב-פרמטריים לקשר בין מאפייני התשתית לאירועי הנהיגה
100	4.1.1. בחינת אינטראקציות בין מאפייני התשתית
102	4.1.2. התאמת המודלים
109	4.2. פיתוח מודלים רב-פרמטריים לבחינת הקשר בין אירועי הנהיגה ותאונות, בנוכחות מאפייני תשתית
110	4.2.1. מודלים רב-פרמטריים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית והתרחשות התאונות (מודלים בסיסיים)
114	4.2.2. מודלים רב-פרמטריים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית והתרחשות התאונות, בתוספת משתני אירועים
124	5. סיכום ומסקנות המחקר
124	5.1. כללי - נושא ומהלך המחקר
127	5.2. ממצאים מבדיקת הקשר בין כל אחד ממאפייני התשתית לבין התרחשות האירועים
130	5.3. ממצאים מבחינת הקשר בין אירועים בנהיגה ותאונות הדרכים
131	5.4. ממצאים מפיתוח מודלים לביטוי הקשר בין אירועים בנהיגה לבין מאפייני התשתית
132	5.5. ממצאים מפיתוח מודלים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית והתאונות, בתוספת משתני אירועים
134	5.6. מסקנות המחקר
138	מראי מקום
141	נספח א': סטטיסטיקה תיאורית של בסיס הנתונים המשולב שנבנה במחקר
145	נספח ב': מפות עם קטעי הכבישים שנכללו במחקר
152	נספח ג': תדירויות מעברי כלי רכב עם "הקופסא הירוקה" בכבישי המחקר

רשימת טבלאות ואיורים

- 21 טבלה 1.1. קטגוריות הסטייה מנתיב ותחליפי התאונה הנלווים (מקור: Hallmark et al, 2011).
- 39 טבלה 1.2. טיפולים הקשורים לגיאומטריה, להם קיימים מקדמי הפחתת תאונות על פי סוג הדרך. מקור: HSM (2010)
- 40 טבלה 1.3. טיפולים בצמתים להם קיימים מקדמי הפחתת תאונות, על פי סוג צומת. מקור: HSM (2010).
- 41 טבלה 1.4. מקדמי הפחתה בתאונות הקשורים למאפיינים גיאומטריים, על פי סוגי הסדר. מקור: RSDW (2009)
- 42 טבלה 1.5. מקדמי הפחתה בתאונות לאמצעי בטיחות הקשורים בגיאומטריה של דרכים בין עירוניות. מקור: Turner et al (2010)
- 43 טבלה 1.6. השפעת שינויים במאפיינים הגיאומטריים בדרכים הבין עירוניות על מספר התאונות. מקור: Elvik et al (2009).
- 45 טבלה 1.7. אחוז הפחתה בתאונות בעקבות שיפורי תשתית שונים הקשורים למאפיינים גיאומטריים. מקור: הקרט ואחרים (2002)
- 46 טבלה 1.8. אחוזי הפחתה בתאונות לשיפורים גיאומטריים שונים. מקור: גיטלמן ואחרים (2009)
- 48 טבלה 1.9. סוגי ההסדרים הבין עירוניים ורשימת מקדמי הפחתת התאונות הקשורים למאפיינים גיאומטריים. מקור: HSM (2010).
- 49 טבלה 1.10. סוגי ההסדרים ורשימת מקדמי הפחתת התאונות, לפי RSDW (2009).
- 50 טבלה 1.11. סיכום - מאפיינים גיאומטריים המשפיעים על תאונות בדרכים הבין-עירוניות
- 63 טבלה 2.1. דוגמא: כיול כביש 65
- 67 טבלה 2.2. זיהוי מאפייני תשתית עם סיכון בטיחותי גבוה יותר, ע"פ סקר הספרות
- 74 טבלה 2.3. מבנה בסיס הנתונים המשולב שנבנה במחקר
- 77 טבלה 2.4. תדירויות המעברים ביחידות הניתוח, בכבישי המחקר
- 80 טבלה 3.1. סטטיסטיקה תיאורית לבדיקת קשר אפשרי בין רמת נפח התנועה, שכוחות האירועים, מספר המעברים בקטע
- 82 טבלה 3.2. ממצאים מפיתוח מודלים מסבירים להתרחשות אירועים בנהיגה, עם מדד החשיפה ומשתנה "קרוב לצומת בהתקרבות"
- 83 טבלה 3.3. ממצאים מפיתוח מודלים מסבירים להתרחשות אירועים בנהיגה, עם מדד החשיפה ומשתנה "קרוב לצומת בהתרחקות"
- 84 טבלה 3.4. ממצאים מפיתוח מודלים מסבירים להתרחשות אירועים בנהיגה, עם מדד החשיפה ומשתנה "מרחק בין צמתים"
- 85 טבלה 3.5. ממצאים מפיתוח מודלים מסבירים להתרחשות אירועים בנהיגה, עם מדד החשיפה ומשתנה "רוחב שול ימין"
- 86 טבלה 3.6. ממצאים מפיתוח מודלים מסבירים להתרחשות אירועים בנהיגה, עם מדד החשיפה ומשתנה "סוג דרך"
- 87 טבלה 3.7. ממצאים מפיתוח מודלים מסבירים להתרחשות אירועים בנהיגה, עם מדד החשיפה ומשתנה "רוחב שול שמאל"
- 88 טבלה 3.8. ממצאים מפיתוח מודלים מסבירים להתרחשות אירועים בנהיגה, עם מדד החשיפה ומשתנה "רוחב נתיב"
- 89 טבלה 3.9. ממצאים מפיתוח מודלים מסבירים להתרחשות אירועים בנהיגה, עם מדד החשיפה ומשתנה "הגבהה צידית"
- 90 טבלה 3.10. ממצאים מפיתוח מודלים מסבירים להתרחשות אירועים בנהיגה, עם מדד החשיפה ומשתנה "שיפוע לאורך"

92	טבלה 3.11. סיכום לממצאי המודלים - הקשר בין כל אחד ממאפייני התשתית לבין התרחשות האירועים, בנוכחות חשיפה
97	טבלה 3.12. תוצאות המודלים לקשר בין אירועים לתאונות, בנוכחות חשיפה: מקדמי הקשר בין אירועים לתאונות ורמת המובהקות שלהם
99	טבלה 3.13. תוצאות המודלים לקשר בין אירועים לתאונות, בסוגי דרך שונים, בנוכחות חשיפה: מקדמי הקשר בין אירועים לתאונות ורמת המובהקות שלהם
109	טבלה 4.1. סיכום לממצאי המודלים הרב-פרמטריים לקשר בין מאפייני התשתית לבין התרחשות האירועים
111	טבלה 4.2. מודלים מסבירים לקשר בין מאפייני התשתית והתרחשות התאונות, בדרך חד-מסלולית
113	טבלה 4.3. מודלים מסבירים לקשר בין מאפייני התשתית והתרחשות התאונות, בדרך דו-מסלולית
114	טבלה 4.4. מודלים מסבירים לקשר בין מאפייני התשתית והתרחשות התאונות, בדרך ממוחלפת
116	טבלה 4.5. מודלים מסבירים לקשר בין מאפייני התשתית ותאונות עם נפגעים, בתוספת אירועים בנהיגה, בדרך חד-מסלולית
117	טבלה 4.6. מודלים מסבירים לקשר בין מאפייני התשתית וכלל התאונות, בתוספת אירועים בנהיגה, בדרך חד-מסלולית
118	טבלה 4.7. מודלים מסבירים לקשר בין מאפייני התשתית ותאונות עם נפגעים, בתוספת אירועים בנהיגה, בדרך דו-מסלולית
119	טבלה 4.8. מודלים מסבירים לקשר בין מאפייני התשתית וכלל התאונות, בתוספת אירועים בנהיגה, בדרך דו-מסלולית
121	טבלה 4.9. מודלים מסבירים לקשר בין מאפייני התשתית ותאונות עם נפגעים, בתוספת אירועים בנהיגה, בדרך ממוחלפת
122	טבלה 4.10. מודלים מסבירים לקשר בין מאפייני התשתית וכלל התאונות, בתוספת אירועים בנהיגה, בדרך ממוחלפת
128	טבלה 5.1. סיכום לממצאי המודלים - הקשר בין כל אחד ממאפייני התשתית לבין התרחשות האירועים, בנוכחות חשיפה
131	טבלה 5.2. תוצאות המודלים לקשר בין אירועים לתאונות, בסוגי דרך שונים, בנוכחות חשיפה: מקדמי הקשר בין אירועים לתאונות ורמת המובהקות שלהם
132	טבלה 5.3. סיכום לממצאי המודלים הרב-פרמטריים לקשר בין מאפייני התשתית לבין התרחשות האירועים בנהיגה
15	איור 1.1. סיווג הגורמים התורמים והקשורים עבור תאונה מסוג "קונפליקט עם רכב מוביל" (מקור: Dingus et al., 2006)
20	איור 1.2. שלוש תוצאות אפשריות של סטייה מהדרך עבור אותו רצף אירועים ראשוני (מקור: Hallmark et al, 2011)
29	איור 1.3. "הקופסא הירוקה" ברכב.
53	איור 2.1. שלבים עיקריים בתהליך ה-Map Matching
55	איור 2.2. דוגמא לגרף מועמדים
55	איור 2.3. פיצול גרף המועמדים
56	איור 2.4. דוגמא לקטע מרשת הלמ"ס
58	איור 2.5. הדגמת תהליך כיוול הכבישים.
60	איור 2.6. נתוני GPS של הקופסא הירוקה.
61	איור 2.7. הדגמת שיוך נתוני הקופסא הירוקה לרשת כבישים בתהליך ה-Map Matching.

62	איור 2.8. אירועי הנהיגה בכבישים 65,4 ו-70.
64	איור 2.9. הדגמת תהליך שיוך קטעי כביש ברשת מפורטת למידע מהלמ"ס.
64	איור 2.10. הדגמת תהליך שיוך אירועי נהיגה למידע מהלמ"ס.
65	איור 2.11. קביעת כיוון הנסיעה של קטע כביש (חלק מכביש 70) במסלול.
66	איור 2.12. דוגמא לבסיס הנתונים שנבנה בשלב מיפוי אירועי הנהיגה.
71	איור 2.13. קביעת ערכי המאפיינים של קרבה לצומת עבור קטע דרך חד-מסלולית.
75	איור 2.14. סוגי אירועים בנהיגה המופקים ע"י "הקופסא הירוקה".
78	איור 3.1. התפלגות ערכי מדד החשיפה בקטעי המחקר.
79	איור 3.2. צורת הקשר בין לוג מדד החשיפה לבין מספרי האירועים.
94	איור 3.3. התפלגות מספרי התאונות ביחידות הניתוח, לפי סוגי התאונות.
95	איור 3.4. תוצאות החלקה בין לוג מדד החשיפה לבין מספרי התאונות.
96	איור 3.5. רכיב חלק המבטא את הקשר בין אירועים לתאונות, במודלים שהותאמו ל-4 סוגי התאונות עם 3 סוגי האירועים.
103	איור 4.1. מספר אירועים מסוג "בלימה" הצפוי ביחידת הניתוח, בשנה, כתלות בסוג דרך.
104	איור 4.2. מספר אירועים מסוג "בלימה" הצפוי ביחידת הניתוח, בשנה, כתלות בסוג דרך ורוחב שול שמאלי.
105	איור 4.3. מספר אירועים מסוג "מהירות" הצפוי ביחידת הניתוח, בשנה, כתלות בסוג דרך.
108	איור 4.4. סך האירועים הצפוי ביחידת הניתוח, בשנה, כתלות בגודל השיפוע לאורך, בסוגי דרך שונים - עם שול שמאלי רחב, בדרך דו-מסלולית וממוחלפת.
108	איור 4.5. סך האירועים הצפוי ביחידת הניתוח, בשנה, כתלות בגודל השיפוע לאורך, בסוגי דרך שונים - עם שול שמאלי צר, בדרך דו-מסלולית וממוחלפת.

תקציר מנהלים

1. תיאור המחקר

א. נושא המחקר

בשנים האחרונות, חלה התקדמות ניכרת בתחומי מחקר אשר עוסק בתיעוד וניתוח של התנהגויות הנהגים בזמן הנהיגה היומיומית, ומוכר בשם "נהיגה טבעית" (Naturalistic driving). מניחים כי צפייה בהתנהגות משתמשי הדרך תספק תיאור של התנהגות הנהגים במצבים רגילים, במצבים קריטיים ואפילו בזמן תאונה, מה שיאפשר הבנה טובה יותר וטיפול נכון יותר בבעיות הבטיחות בדרכים.

בישראל, לאורך מספר שנים, בוצע איסוף נתוני "נהיגה טבעית" בעזרת "קופסא ירוקה" - מערכת ניטור בזמן אמת שמותקנת במדגם כלי רכב. פרויקט זה מובל ע"י עמותת "אור ירוק". בנתונים שנאספו בעזרת "הקופסא הירוקה" קיים ניטור רציף בזמן הנסיעה הכולל נתונים על מיקום כלי הרכב, מהירות הנסיעה, התאוצות והבלימות של הרכב. המערכת אוספת נתונים באמצעות חיישנים ממערכות הרכב השונות כגון: היגוי, בלימה, ספידומטר, גז וצריכת דלק, ובעזרת עיבוד נתוני החיישנים, מזהה ומתעד את תמרוני הנהיגה. במחקרים הקודמים בארץ הוגדרו תנאים לזיהוי אירועים בנהיגה, על סמך נתוני המערכת. לאורך זמן, הצטבר מאגר מידע גדול על מיקום אירועי הנהיגה המתרחשים על רשת הדרכים.

במקביל, בשנים האחרונות, בחברת נתיבי ישראל הוקמה מערכת ניהול בטיחות (מני"ב) ובוצע סקר דרכים מפורט בו תועדו מאפייני תשתית של הדרכים הלא עירוניות.

מכאן, נולד הרעיון של המחקר הנוכחי שהינו מחקר גישוש לבחינת מערכת הקשרים בין התרחשות האירועים בנהיגה לבין מאפייני התשתיות. המחקר מתבסס על הצלבת שני בסיסי נתונים קיימים: אירועי הנהיגה שהתקבלו על סמך נתוני "הקופסא הירוקה", ומאפייני התשתיות באתרי התרחשות האירועים שניתנים להפקה על סמך מאגר הנתונים של מערכת המני"ב.

הונח כי באמצעות בחינה משולבת זו יהיה ניתן לזהות קשרים בין התנהגויות הנהגים (הבאים לידי ביטוי באירועי הנהיגה) לבין מאפייני התשתית, כאשר ממצאי הניתוח עשויים לתרום להבנה מעמיקה יותר של האינטראקציות שבין מאפייני התשתיות והתנהגות הנהגים. כמו כן, הבנת קשרים אלה עשויה לתרום לזיהוי מוקדם של אתרים בעלי סיכון גבוה ברשת הדרכים, ע"פ ריכוזי האירועים בנהיגה ובטרם הצטברות התאונות.

ב. שיטת המחקר

בביצוע המחקר היו שלושה מרכיבים: סקר ספרות בינלאומית; הכנת בסיס הנתונים למחקר; ביצוע ניתוחים רבים, חד-ורב-פרמטריים, על בסיס הנתונים של המחקר.

(1) סקר הספרות הבינלאומית הציג רקע למחקרי "הנהיגה הטבעית", כולל סקירת ההתפתחויות בעולם ותיאור פוטנציאל נתוני הנהיגה הטבעית לצורכי שיפור הבטיחות. כמו כן, הוצגו דוגמאות לזיהוי אירועים חריגים בנהיגה, בחינת הקשר בין אירועי הנהיגה ואירועי התאונות, שיטות עיבוד של נתוני הנהיגה הטבעית, ועוד. מאידך, הוצג תיאור של מערכת "הקופסא הירוקה" ודוגמאות

לעיבודים ושימושים בנתוני "הקופסא הירוקה" במחקרים הקודמים בארץ, בהם נתוני המערכת שימשו בעיקר לאפיין דפוסי נהיגה שונים ולבחינת השפעת המערכת על נהיגת נהגים צעירים ואחרים.

כמו כן, הובא ריכוז ממצאים, מהמקורות השונים, לגבי המאפיינים הגיאומטריים ואחרים של הדרכים הלא עירוניות שמשפיעים יותר על התרחשות התאונות - ראה טבלה 1.1 בגוף הדו"ח. המאפיינים הגיאומטריים שנסקרו פוצלו לפי סוגי דרך בין-עירונית: דו-מסלולית ממוחלפת, דו-מסלולית עם צמתים, חד-מסלולית ובהמשך, לפי קטע דרך וצומת (מחלף, צומת מרומזר וצומת לא מרומזר).

(2) בהכנת בסיס הנתונים למחקר היו שני חלקים: (א) מיפוי נתונים על אירועי הנהיגה (על סמך נתוני "הקופסא הירוקה") על רשת הכבישים ו-(ב) הכנת בסיס הנתונים המשולב למחקר, לרבות אירועי הנהיגה, מאפייני התשתית, מדדי החשיפה ומספרי התאונות.

בשל היקף משמעותי ומורכבות של נתוני הנהיגה (מתוך "הקופסא הירוקה") וכן, השקעה ניכרת של משאבים אשר נדרשת להצבת נתונים אלה על גבי מפות הכבישים, כאשר מראש לא ידוע מהן תדירויות הנסיעה של כלי הרכב עם "הקופסא הירוקה" בכבישים השונים בארץ, להכנת בסיס הנתונים למחקר נבחרו 9 כבישים מייצגים: מס' 4, 65, 70, 1, 2, 40, 44, 444, 90. הכבישים המייצגים נבחרו, מחד, מבין הכבישים המובילים ברשת הלא עירונית, ומאידך, מתוך הנחה על סבירות גבוהה של שימוש בכבישים אלה ע"י כלי הרכב עם "הקופסא הירוקה", לצורכי הנסיעות השגררתיות ו/או נסיעות פנאי ותיירות. הכבישים שנבחרו הם הכבישים העיקריים באזור המרכז, בתוספת מספר כבישים טיפוסיים אשר משמשים לנסיעות לאזורי תיירות מובהקים בצפון ובדרום הארץ, והם מהווים שילוב של סוגי דרך שונים.

גבולות הכבישים שנבחרו למחקר היו כלהלן:

כביש מס'	ק"מ התחלה	ק"מ סוף
1	0	95.7
2	0	99.2
40	0	301.5
44	0	39.97
90	2.8	471
444	4	42.8
4	55.1	249.9
65	0	90.2
70	10	85.4

לצורכי המחקר, הכבישים חולקו ליחידות ניתוח - קטעים באורך כ-200 מ'. כל יחידת ניתוח מוגדרת לפי: מס' דרך, כיוון נסיעה, ק"מ התחלה וק"מ סיום. לכל יחידת ניתוח, קיים מידע על מספר הנסיעות בה, מספר הנהגים שעברו בקטע ומספר כלי הרכב שנסעו בו, בשנת 2010, וכמו כן, על מספר אירועים בנהיגה מהסוגים המוגדרים שנרשמו בקטע כביש זה, במהלך השנה. בבסיס הנתונים למחקר נותרו רק קטעי כביש כאלה בהם היו מעל 5 נסיעות של כלי הרכב (עם "הקופסא הירוקה"), בשנה, וכמו כן, בהם, במהלך השנה, עברו 3 או יותר כלי רכב שונים.

לכל יחידת ניתוח, נקבעו מאפייני תשתית על סמך נתוני המנ"ב. מאפיינים אלה הם: סוג דרך, נפח תנועה, מאפייני חתך הדרך - רוחב נתיב, רוחב שול ימני, רוחב שול שמאלי (בדרך דו-מסלולית או ממוחלפת); רדיוס אופקי, מצב הגבהה צידית (בהינתן רדיוס אופקי), שיפוע לאורך וכמו כן, מספר

מאפיינים המשקפים את השתנות מאפייני התשתית לאורך הקטע שהם: קרבת צומת/מחלף בהתקרבות ובהתרחקות, מרחק בין הצמתים הראשיים בקטע אליו שייכת יחידת הניתוח, שינוי במספר הנתיבים ביחס לקטע הקודם, שינוי ברוחב הנתיבים ביחס לקטע הקודם. כל מאפייני התשתית הם משתנים קטגוריים.

בסיס הנתונים שנבנה במחקר כלל כ-3500 יחידות ניתוח, כאשר לכל יחידה מוגדרים, מחד, מאפייני האירועים בנהיגה, לרבות רמת החשיפה לאירועים - היקף נסיעות, ומאידך, מאפייני תשתיות הדרכים. הן אירועי הנהיגה והן מאפייני התשתיות שייכים לשנת 2010. בנוסף, לכל יחידת ניתוח רוכזו מספרי תאונות דרכים, בשנים 2008-2010.

מבחינת שכיחות אירועי הנהיגה עלה כי מספר ניכר הצטבר עבור שני סוגי אירועים בלבד שהם: סוג 1 - "בלימה" וסוג 19 - "מהירות". מכאן, ניתוח מערכת הקשרים בין אירועי הנהיגה ומאפייני התשתית, ובין אירועי הנהיגה ותאונות התמקד בשלושה סוגי אירועים: סוג 1, סוג 19 וסך האירועים. משמעותיות האירועים הן: סוג 1 - "בלימה" (Braking) מתייחס לבלימות בנסיעה בקטע ישר, ללא סיבוב הגה, כאשר עבור בלימות במצבים אחרים (בעת פניות, עם סיבוב הגה) קיים רישום של אירועים אחרים; סוג 19 - "התראה על מהירות" (Speed alert) מתייחס לנסיעה מעל 120 קמ"ש - סף אחיד בכל סוגי הכבישים. אירועי הנהיגה מכלל הסוגים נצפו סה"כ ב-30.2% מיחידות הניתוח.

לגבי ייצוג הנהגים עם "הקופסא הירוקה" בכבישים שנבחרו למחקר יצוין כי המחקר התמקד בקבוצת ביקורת הכוללת 64 כלי רכב מתוך הצי של 200 כלי הרכב עם המכשיר, כאשר ב-9 הכבישים אשר נבחנו במחקר נכללו 62 כלי רכב (מתוך 64). כלומר, מקבץ הכבישים שנבחר למחקר הינו מייצג ומקיף עבור אוכלוסיית הנהגים שנבחרה למחקר (קבוצת הביקורת).

מפות עם קטעי הכבישים שנכנסו לניתוח במחקר הראו כי קטעי המחקר מספקים כישוי רחב של הכבישים הנבחרים. בנוסף, מבחינת התפלגויות של יחידות הניתוח, בכל כביש, לפי מספר המעברים - תדירויות נסיעה של כלי הרכב עם "הקופסא הירוקה", עלה כי ברוב הכבישים שנבחרו למחקר היה היקף ניכר של נסיעות כלי הרכב עם "הקופסא הירוקה".

(3) על בסיס הנתונים שנבנה למחקר נערך מגוון ניתוחים חד-ורב-פרמטריים לזיהוי מערכת הקשרים בין התרחשות האירועים בנהיגה, מאפייני התשתית ותאונות הדרכים. הניתוחים המקדימים בחנו את מערכת הקשרים בין התרחשות האירועים בנהיגה לבין מדדי החשיפה ומאפייני התשתיות, וכמו כן, את הקשר בין תאונות הדרכים לבין האירועים בנהיגה, בהינתן חשיפה. בהמשך, פותחו מודלים רב-משתנים: (א) לביטוי הקשר בין אירועים בנהיגה לבין מאפייני התשתית; (ב) לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית והתרחשות התאונות וכמו כן, מודלים בהם נבחן הקשר בין מאפייני התשתית לבין התרחשות התאונות, תוך כדי הוספת משתני האירועים.

הנחת היסוד בבחינת הקשר המשולש בין תאונות, מאפייני תשתית ואירועים הינה שאירועים בנהיגה הם משתנה מתווך בין מאפייני תשתית ותאונות. במידה ובמודל לקשר בין התשתיות והתאונות מתקבלת תרומת אירועים לחיזוי התאונות, זוהי הוכחה לחשיבות האירועים ולאפשרות שימוש במספרי האירועים לניבוי התאונות, בתנאי דרך שונים.

2. ממצאים עיקריים ומסקנות

א. ממצאים מבדיקת הקשר בין כל אחד ממאפייני התשתית לבין התרחשות האירועים

טבלה א' מסכמת את ממצאי המודלים שפותחו במחקר לבדיקת הקשר בין כל אחד ממאפייני התשתית לבין התרחשות האירועים, בניכוי חשיפה (מספר מעברים בקטע של כלי הרכב עם "הקופסא הירוקה"). מטבלה א' ניתן לראות שלרוב מאפייני התשתית נמצאה **השפעה מובהקת** על אירועי הנהיגה. חלק ניכר ממאפייני התשתית הדגימו **השפעה הפוכה** על אירועי ה"בלימה" לעומת אירועי "המהירות", כאשר שוני זה נראה הגיוני עקב טיב אירועים "הפוך". בין היתר נמצא כי קרבת צומת או מגבלות גיאומטריות, לרוב, גורמות להגברת אירועי ה"בלימה" ולמיתון באירועי ה"מהירות", בעוד שנסיעה בתנאי דרך טובים יותר ובקטעים ארוכים יותר, ללא הפרעות, מזוהה עם ירידה בבלימות ועם עליה באירועי מהירות.

בדומה לאירועי "מהירות", קרבת צומת או מגבלות גיאומטריות גורמות למיתון בסך האירועים, בעוד שנסיעה בתנאי דרך טובים יותר ובקטעים ארוכים יותר מזוהה עם עליה בסך האירועים. כלומר, הממצא המפתיע היה שבניגוד למצופה, עליה באירועי "המהירות" ובסך האירועים מצביעה על תנאי דרך טובים יותר (המאפשרים מהירויות נסיעה גבוהות יותר).

ב. ממצאים מקדימים מבחינת הקשר בין אירועים בנהיגה ותאונות

הבחינה המקדימה של הקשר בין אירועים ותאונות נערכה תוך כדי התחשבות ברמת החשיפה ובסוג דרך. טבלה ב' מסכמת את ממצאי המודלים שהותאמו בשלב זה, כאשר עבור כל סוג תאונות וכל סוג אירועים, בסוג דרך מסוים, מובא הרכיב הליניארי המבטא את הקשר בין אירועים לתאונות, מעבר לחשיפה. ניתן לראות כי בחלק ניכר מהמקרים נמצא קשר מובהק בין אירועים לתאונות, דהיינו קיימת השפעה של מספרי האירועים על מספרי התאונות, מעבר להשפעת החשיפה, כאשר צורת הקשר **שונה בסוגי דרך שונים**. בין היתר:

- עבור הדרכים החד-מסלוליות, הסתמן קשר חיובי בין אירועי ה"בלימה" וסך האירועים לבין התאונות;

- עבור הדרכים הדו-מסלוליות, זוהה קשר שלילי בין אירועי ה"מהירות" ותאונות, מכל הסוגים, ובנוסף, עבור התאונות עם נפגעים, זוהה קשר חיובי בין אירועי ה"בלימה" ותאונות;

- עבור הדרכים הממוחלפות, זוהה קשר בין מספרי התאונות, מהסוגים השונים, לבין אירועי "מהירות", אשר הצביע על ירידה בתאונות במספר אירועים קטן ועל עליה בתאונות כאשר מספר האירועים עולה.

הממצא עבור הדרכים הממוחלפות תואם את התפיסה הקיימת בנושא השפעת מהירויות, לפיה, מהירויות נסיעה גבוהות קשורות לעליה בסיכון לתאונות.

טבלה א'. סיכום לממצאי המודלים - הקשר בין כל אחד ממאפייני התשתית לבין התרחשות האירועים, בנוכחות חשיפה[#]

מאפיין תשתית נבחן	אירועים מסוג 1 ("בלימה")	אירועים מסוג 19 ("מהירות")	סך האירועים
א. קרוב לצומת בהתקרבות	קרבת צומת ונוכחות צומת בתוך קטע מזוהות עם ירידה באירועים	השפעה לא עקבית : קרבת צומת מזוהה עם ירידה באירועים, נוכחות צומת בתוך קטע - עם עליה באירועים	קרבת צומת ונוכחות צומת בתוך קטע מזוהות עם עליה באירועים
ב. קרוב לצומת בהתרחקות	קרבת צומת ונוכחות צומת בתוך קטע מזוהות עם ירידה באירועים	השפעה לא עקבית : קרבת צומת מזוהה עם ירידה באירועים, נוכחות צומת בתוך קטע - עם עליה באירועים	קרבת צומת ונוכחות צומת בתוך קטע מזוהות עם עליה באירועים
ג. מרחק בין צמתים	קטע בינוני-ארוך מזוהה עם ירידה באירועים, נוכחות צומת בתוך קטע - עם עליה באירועים	קטע בינוני-ארוך מזוהה עם עליה באירועים, נוכחות צומת בתוך קטע - עם ירידה באירועים	קטע בינוני-ארוך ונוכחות צומת בתוך קטע מזוהים עם עליה באירועים
ד. שינוי במספר נתיבים בין יחידות ניתוח עוקבות	--	--	--
ה. שינוי ברוחב הנתיבים בין יחידות ניתוח עוקבות	שינוי ברוחב הנתיבים ביחידות ניתוח עוקבות מקטין את מספר האירועים	שינוי ברוחב הנתיבים ביחידות ניתוח עוקבות מקטין את מספר האירועים	--
ו. רוחב שול ימין	שול בינוני או צר מזוהה עם עליה באירועים, לעומת שול רחב	שול בינוני או צר מזוהה עם ירידה באירועים, לעומת שול רחב * רחב *	שול בינוני או צר מזוהה עם עליה באירועים, לעומת שול רחב
ז. סוג דרך	דרך דו-מסלולית מזוהה עם עליה באירועים ודרך ממוחלפת - עם ירידה באירועים, לעומת דרך חד-מסלולית	דרך דו-מסלולית או ממוחלפת מזוהה עם עליה באירועים	דרך דו-מסלולית או ממוחלפת מזוהה עם עליה באירועים *
ח. רוחב שול שמאל	שול רחב או בינוני בדרך דו-מסלולית/ממוחלפת מזוהה עם ירידה באירועים, לעומת דרך חד-מסלולית	נוכחות שול שמאלי מזוהה עם עליה באירועים, בדרך דו-מסלולית או ממוחלפת, לעומת דרך חד-מסלולית *	נוכחות שול שמאלי מזוהה עם עליה באירועים, בדרך דו-מסלולית או ממוחלפת, לעומת דרך חד-מסלולית *
ט. רוחב נתיב	--	נתיב צר לעומת תקין מזוהה עם ירידה באירועים	נתיב צר לעומת תקין מזוהה עם ירידה באירועים *
י. רדיוס אופקי	רדיוס אופקי בינוני או גדול מזוהה עם עליה באירועים, לעומת הרדיוס הקטן *	רדיוס אופקי בינוני או גדול מזוהה עם עליה באירועים, לעומת הרדיוס הקטן	רדיוס אופקי בינוני או גדול מזוהה עם עליה באירועים, לעומת הרדיוס הקטן *
יא. הגבהה צידית	--	הגבהה לקויה ברדיוס בינוני מזוהה עם ירידה באירועים לעומת רדיוס גדול; ברדיוס בינוני, הגבהה לקויה מזוהה עם פחות אירועים לעומת הגבהה תקינה *	הגבהה לקויה ברדיוס קטן או בינוני מזוהה עם ירידה באירועים לעומת רדיוס גדול; ברדיוס בינוני, הגבהה לקויה מזוהה עם פחות אירועים לעומת הגבהה תקינה *
יב. שיפוע לאורך	רוב הערכים של שיפוע לאורך מזוהים עם ירידה באירועים, לעומת המצב ללא שיפוע *	רוב הערכים של שיפוע לאורך מזוהים עם ירידה באירועים, לעומת המצב ללא שיפוע	רוב הערכים של שיפוע לאורך מזוהים עם ירידה באירועים, לעומת המצב ללא שיפוע *

[#] בכל המקרים המפורטים בטבלה נמצאה השפעה מובהקת של מאפיין התשתית, בנוכחות חשיפה ($p < 0.05$). במקרים המסומנים ב"--" השפעת המאפיין, בנוכחות חשיפה, לא הייתה מובהקת.

* השפעה מנוגדת, לכאורה, להיגיון ההנדסי

טבלה ב'. תוצאות המודלים לקשר בין אירועים לתאונות, בסוגי דרך שונים, בנוכחות חשיפה: מקדמי הקשר בין אירועים לתאונות ורמת המובהקות שלהם

סוגי אירועים	סוג דרך	סוגי תאונות		
		תאונות עם נפגעים ללא הולכי רגל	תאונות עם נפגעים "כללי עם נפגעים"	כלל התאונות
סוג 1 ("בלימה")	חד-מסלולית	#0.758	#0.660	#0.791
	דו-מסלולית	#0.449	#0.425	0.033
	ממוחלפת	-0.037	-0.114	-0.059
סוג 19 ("מהירות")	חד-מסלולית	*-0.664	**0.819	-0.375
	דו-מסלולית	#-0.733	#-0.697	#-0.660
	ממוחלפת	e≤1 עבור #0.679 (1) e>1 עבור 0.502 (2)	e≤1 עבור #0.678 (1) e>1 עבור 0.434 (2)	e≤1 עבור #0.763 (1) **e>1 עבור 0.831 (2)
סך האירועים	חד-מסלולית	#0.905	#0.744	e≤1 עבור #1.495 (1) e>1 עבור -0.345 (2)
	דו-מסלולית	#0.158	*0.147	-0.054
	ממוחלפת	e≤2 עבור #0.399 (1) e>2 עבור -0.132 (2)	e≤2 עבור #0.403 (1) e>2 עבור -0.105 (2)	e≤1 עבור #0.569 (1) e>1 עבור 0.307 (2)

מובהק עם $p < 0.001$ * מובהק עם $p < 0.01$ ** מובהק עם $p < 0.05$ * מובהק עם $p < 0.1$
 e - מספר אירועים בנהיגה

ג. ממצאים מפיתוח מודלים לביטוי הקשר בין אירועים בנהיגה לבין מאפייני התשתית

ע"פ המודלים הרב-פרמטריים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית לבין אירועים בנהיגה (טבלה ג'), **מאפייני התשתית המובילים** מבחינת יכולת הניבוי של אירועים מסוג "בלימה" ו-"מהירות" הם: קרבת צומת, אורך קטע (מרחק בין צמתים עיקריים), סוג דרך, רוחב שול שמאלי, רוחב שול ימני. עם זאת, מאפייני התשתית: סוג דרך, קרבת צומת, אורך קטע - משפיעים בצורה הפוכה על אירועי "מהירות" לעומת "בלימה".

כמו כן, סוגי מאפייני התשתית המשפיעים ואופן השפעתם על סך האירועים דומים להשפעת מאפייני התשתית על אירועי ה"מהירות", כאשר בניבוי סך האירועים מעורבים גם מאפייני תשתית נוספים (רוחב נתיב, שיפוע לאורך).

טבלה ג'. סיכום לממצאי המודלים הרב-פרמטריים לקשר בין מאפייני התשתית לבין התרחשות האירועים בנהיגה

סוג אירועים	מאפייני תשתית שמוזוהים עם עליה באירועים	מאפייני תשתית שמוזוהים עם ירידה באירועים
אירועים מסוג 1 ("בלימה")	- יחידת ניתוח בקרבת צומת או בתחום הצומת לעומת קטע דרך מרוחק מהצומת - דרך דו-מסלולית לעומת חד-מסלולית, בנוכחות שול שמאלי בינוני לעומת רחב	- קטע בינוני או ארוך לעומת קצר - דרך ממוחלפת - דרך דו-מסלולית, בנוכחות שול שמאלי בינוני לעומת רחב
אירועים מסוג 19 ("מהירות")	- קטע בינוני או ארוך לעומת קצר - דרך דו-מסלולית או ממוחלפת לעומת חד-מסלולית	- יחידת ניתוח בקרבת צומת או בתחום הצומת לעומת קטע דרך מרוחק מהצומת - כאשר יש שול ימני צר
סך האירועים	- קטע בינוני או ארוך - כאשר רוחב שול ימני בינוני - דרך דו-מסלולית או ממוחלפת - הצפי גבוה יותר בקטעים עם שיפוע בירידה לעומת שיפוע בעליה - הצפי גבוה במיוחד כאשר יש שיפוע בינוני בירידה בדרך דו-מסלולית	- בקרבת צומת בהתרחקות או בהתרחקות - כאשר שול ימני צר - כאשר רוחב נתיב צר או צר מאוד

ד. ממצאים מפיתוח מודלים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית ותאונות, בתוספת משתני אירועים

כאמור, המחקר בחן את הקשר המשולש בין "תאונות-מאפייני תשתית-אירועים בנהיגה", כאשר בשלב הראשון פותחו מודלים בסיסיים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית והתרחשות התאונות ובשלב השני, למודלים הבסיסיים נוספו משתני האירועים.

ע"פ המודלים הבסיסיים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית ותאונות, מערכת קשרים זו **משתנה כתלות בסוג דרך**. בין היתר, בדרך חד-מסלולית, מספר התאונות עם נפגעים וכלל התאונות (ת"ד + "כללי עם נפגעים") עולה עם עליה בחשיפה (מספר המעברים בקטע), בקרבת צמתים ובנוכחות שיפוע לאורך. בנוסף, כלל התאונות יורד בקטע עם רוחב נתיב צר או צר מאוד.

בדרך דו-מסלולית, הן מספר התאונות עם נפגעים והן כלל התאונות עולה עם עליה בחשיפה, בדרך עם נפח תנועה גבוה יותר, בקרבת צמתים, כאשר רוחב שול ימני בינוני או צר, וכאשר רוחב שול שמאלי צר. כמו כן, מספר התאונות, משני הסוגים, יורד כאשר יחידת הניתוח שייכת לקטע בינוני או ארוך בין הצמתים וכאשר ישנו שול שמאלי בינוני.

בדרך ממוחלפת, הן מספר התאונות עם נפגעים והן כלל התאונות עולה עם עליה בחשיפה (מספר המעברים בקטע), כאשר בדרך נפח תנועה גבוה יותר, בקרבת מחלפים וכאשר רוחב שול שמאלי בינוני או צר. בנוסף, כלל התאונות עולה כאשר יחידת הניתוח שייכת לקטע ארוך יותר בין מחלפים ויורד כאשר רוחב שול ימני בינוני או צר.

בעקבות בחינת **תוספת משתני האירועים** למודלים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית והתאונות, נמצא כי בכל סוגי הדרך הוספת משתני האירועים **לא שינתה מהותית** את צורת הקשר בין מאפייני התשתית והתאונות. בין היתר, בדרך חד-מסלולית, אף אחד מסוגי האירועים לא נמצא מובהק במודלים לניבוי התאונות.

עם זאת, בדרך דו-מסלולית, הוספת אירועים מסוג "בלימה" **שיפרה את ניבוי התאונות** עם נפגעים, עם הדגמת קשר חיובי ומובהק עם מספרי התאונות, כאשר הוספת אירועים מסוג "מהירות" גם כן שיפרה ניבוי של תאונות עם נפגעים ושל כלל התאונות, תוך כדי הדגמת קשר שלילי ומובהק עם מספרי התאונות.

כמו כן, בדרך ממוחלפת, הוספת אירועי "מהירות" או סך האירועים **שיפרה את ניבוי התאונות** עם נפגעים, תוך כדי הדגמת קשר שלילי ומובהק עם מספרי התאונות.

כלומר, בדרך דו-מסלולית וממוחלפת הודגמה חשיבות של אירועים בנהיגה לניבוי התרחשות התאונות.

ה. מסקנות המחקר

1. במחקר **נמצאו קשרים סטטיסטיים** בין התרחשות האירועים בנהיגה לבין מאפייני התשתית. כמו כן, נמצאו קשרים סטטיסטיים בין מאפייני התשתית לבין התרחשות התאונות וכן, הודגמו קשרים סטטיסטיים מסוימים בין אירועים בנהיגה לבין התרחשות התאונות.

2. תחום מערכת הקשרים בין אירועים בנהיגה לבין מאפייני התשתית ובייחוד, הקשר המשולש בין תאונות, מאפייני התשתית ואירועים, לא נחקר בעבר. המחקר הנוכחי הראה כי מערכת

קשרים זאת **מורכבת**, כאשר אירועים בנהיגה אכן קשורים למאפייני התשתית ובתנאי דרך מסוימים, **יכולים לתרום** לניבוי התרחשות התאונות.

3. יחד עם זאת, רמת הקשר בין אירועים ותאונות שנמצאה במחקר זה **אינה חזקה דיה** כדי לאפשר זיהוי מוקדם של אתרים בעלי סיכון גבוה ברשת הדרכים, ע"פ ריכוזי האירועים בנהיגה שהיו מנבאים את ריכוזי התאונות. מאידך, **כן נמצאו** קשרים יציבים בין מאפייני התשתית לבין התרחשות האירועים, ובין מאפייני התשתית לבין התרחשות התאונות.

4. המחקר הראה כי **לסוגי אירועים שונים** קיים קשר שונה למאפייני התשתית וגם השפעה שונה על תאונות. עבור סוגי אירועים מסוימים (כגון: "בלימה") קיים **קשר ישיר** עם תאונות, כאשר עבור סוגי אירועים אחרים (כגון: "מהירות"), קיים **קשר הפוך**, דהיינו עליה באירועים מצביעה על קיום תנאי דרך טובים יותר ומכאן, ניתן לצפות לירידה בתאונות.

5. בתיעוד אירועי הנהיגה בעזרת הטכנולוגיות המתקדמות **כדאי להקפיד יותר** על הגדרת האירועים, במידה ואירועים אלה עתידים לשמש בניתוחים של מערכות הקשרים בין אירועי הנהיגה ומשתנים חיצוניים אחרים. נראה כי אירועים בנהיגה המופקים ע"י "הקופסא הירוקה" לא תמיד מסמנים אירוע חריג המוביל לתאונות.

6. המודלים שפותחו במחקר, למעשה, פותחים דף חדש בהבנת מערכת הקשרים בין מאפייני התשתית, התנהגויות הנהגים והתרחשות התאונות. הקשרים הסטטיסטיים שנמצאו במודלים **יכולים לשמש** לזיהוי אתרים בעייתיים ברשת הדרכים.

1. מבוא

1.1. נושא המחקר ותוכן הדו"ח

בשנים האחרונות, פותחו טכנולוגיות המנטרות והמתעדות את התנהגות הנהג וכלי הרכב בזמן הנסיעה. בעזרת ההתקנים ברכב ניתן לשחזר, בכל זמן נתון, את מיקומו המדויק של הרכב, את מהירות נסיעתו, כוון התקדמותו, תאוצות צידיות, ועוד. בעבר איסוף נתונים מסוג זה לאורך זמן היה יקר מאוד, ולכן כמעט ולא נעשה. היום, עקב זמינות הנתונים מסוג זה, במכוני מחקר באירופה ובארה"ב התעורר עניין לשילוב נתונים אלו בתחומי המחקר של בטיחות בדרכים. תחום המחקר אשר עוסק בתיעוד וניתוח של התנהגויות הנהגים בזמן הנהיגה מוכר בשם "נהיגה טבעית" (Naturalistic driving).

בישראל, לאורך מספר שנים, מבוצע איסוף נתוני "נהיגה טבעית" בעזרת "קופסא ירוקה" - מערכת ניטור בזמן אמת שמותקנת בכ-200 כלי רכב. פרויקט זה מובל ע"י עמותת "אור ירוק". בנתונים שנאספו בעזרת "הקופסא הירוקה" קיים ניטור רציף בזמן הנסיעה הכולל נתונים על מיקום כלי הרכב, מהירות הנסיעה, התאוצות והבלימות של הרכב. במחקרים הקודמים בארץ הוגדרו תנאים לזיהוי אירועי בטיחות בנהיגה, באמצעות ערכי הסף של הבלימות והתאוצות. לאורך זמן, מצטבר מאגר מידע גדול על מיקום אירועי הנהיגה המתרחשים על רשת הדרכים.

במקביל, בשנים האחרונות, בחברה הלאומית לתשתיות תחבורה הוקמה מערכת ניהול בטיחות (מנ"ב) ובוצע סקר דרכים מפורט בו תועדו מאפייני הדרכים, על פני רשת הדרכים הלא עירוניות. מאפייני התשתיות שנאספו כוללים פרטים על חתך לרוחב וגיאומטרית הדרך, אביזרי בטיחות, מצב צדי הדרך, ועוד.

מכאן, נוצרו תנאים לביצוע המחקר הנוכחי שהינו מחקר גישוש לבחינת הקשר בין התרחשות אירועי הנהיגה לבין מאפייני התשתיות. המחקר מתבסס על הצלבת שני בסיסי נתונים קיימים: אירועי הנהיגה הניתנים לזיהוי על סמך נתוני "הקופסא הירוקה", ומאפייני התשתיות באתרי התרחשות האירועים שניתנים להפקה על סמך מאגר הנתונים של מערכת המנ"ב. הונח כי באמצעות בחינה משולבת זו יהיה ניתן לזהות קשרים בין התנהגויות הנהגים (אירועי הנהיגה המובילים להתרחשות התאונות) לבין מאפייני התשתיות, כאשר ממצאי הניתוח עשויים לתרום להבנה מעמיקה יותר של האינטראקציות שבין מאפייני התשתיות והתנהגות הנהגים. כמו כן, הבנת קשרים אלה עשויה לתרום לזיהוי מוקדם של אתרים בעלי סיכון גבוה ברשת הדרכים, ע"פ ריכוזי האירועים בנהיגה ובטרם הצטברות התאונות.

ממצאי המחקר מוצגים בדו"ח זה באופן הבא:

פרקים 1.2-1.4 מביאים ממצאים מסקר הספרות הבינלאומית בנוגע לסוגיות המחקר. בסקר הספרות, נערך איתור וסיכום של ממצאי הספרות המחקרית בנושאים הקשורים לשימוש בנתוני "הנהיגה הטבעית" (Naturalistic driving), תיעוד התנהגות הנהגים בתנאי שטח שונים, זיהוי אירועים חריגים בנהיגה, הגדרת הצטברויות האירועים לזיהוי אתרי שטח הקשורים לריכוזי האירועים החריגים, הוכחות לקשר בין אירועי התנהגות להתרחשות התאונות וכד'. כמו כן, נערך חיפוש של מחקרים בהם נבחן קשר בין מאפייני התשתיות והאירועים החריגים בהתנהגות הנהגים.

מאידך, בוצע איתור וסיכום של ממצאי הספרות בנושאי הקשר בין המאפיינים הגיאומטריים של הדרכים הלא עירוניות לבין שכיחות ומאפייני תאונות דרכים, עם דגש על מאפייני התשתית אשר קשורים, בדרך כלל, לריכוזים גבוהים יותר של תאונות. חיפוש זה התמקד בפרסומים מהעשורים האחרונים, וכלל מודלים מסבירים ומקדמי שינוי בתאונות שמזוהים עם מאפייני תשתית שונים. בעקבות הסקר סוכמה רשימה של מאפייני התשתית המשפיעים יותר על התרחשות התאונות. הונח שבהתבסס על הצלבת הממצאים משני תחומי הסקר: האירועים החריגים שניתנים למדידה בהתנהגות הנהגים ומאפייני תשתית בעייתיים, יהיה ניתן לבחור, בהמשך המחקר, את סוגי האירועים בנהיגה וסוגי האתרים בדרכים הלא עירוניות לבחינת הקשרים ביניהם.

ממצאי הספרות מוצגים בדו"ח באופן הבא:

פרק 1.2 מביא רקע למחקרי "הנהיגה הטבעית", לרבות סקירת ההתפתחויות בעולם ותיאור פוטנציאל נתוני הנהיגה הטבעית לצורכי שיפור הבטיחות. כמו כן, מוצגות דוגמאות לזיהוי אירועים חריגים בנהיגה הטבעית, בחינת הקשר בין אירועי הנהיגה ואירועי התאונות, שיטות עיבוד של נתוני הנהיגה הטבעית ושיקולים נוספים;

פרק 1.3 מביא תיאור של מערכת "הקופסא הירוקה" שמשמשת לאיסוף נתוני הנהיגה הטבעית בישראל, וכמו כן, מציג דוגמאות לעיבודים ושימושים בנתוני "הקופסא הירוקה" במחקרים הקודמים בארץ;

פרק 1.4 מביא ריכוז ממצאים, מהמקורות השונים, לגבי המאפיינים הגיאומטריים ואחרים של הדרכים הלא עירוניות שמשפיעים יותר על התרחשות התאונות. בסוף הפרק מוצגת רשימה של מאפייני התשתית המשפיעים יותר על התרחשות התאונות.

פרק 2 מביא ממצאים מהכנת בסיס הנתונים למחקר. בשל היקף משמעותי ומורכבות של נתוני הנהיגה (מתוך "הקופסא הירוקה") וכן, השקעה ניכרת של משאבים אשר נדרשת להצבת נתונים אלה על גבי מפות הכבישים, כאשר מראש לא ידוע מהן תדירויות הנסיעה של כלי הרכב עם "הקופסא הירוקה" בכבישים השונים בארץ, להכנת בסיס הנתונים למחקר הוחלט לבחור במספר כבישים מייצגים. הכבישים המייצגים נבחרו, מחד, מבין הכבישים המובילים ברשת הלא עירונית, ומאידך, מתוך הנחה על סבירות גבוהה של שימוש בכבישים אלה ע"י אנשים שהיו מעורבים במחקרי "הקופסא הירוקה", לצורכי הנסיעות השגרתיות שלהם ו/או נסיעות פנאי ותיירות.

בתור הכבישים המייצגים ליצירת בסיס הנתונים למחקר נבחרו כבישים מס' 4, 65, 70, 1, 2, 40, 44, 444, 90 (9 כבישים). הכבישים שנבחרו למחקר כוללים את הכבישים העיקריים באזור המרכז, בתוספת מספר כבישים מייצגים אשר משמשים לנסיעות לאזורי תיירות מובהקים בצפון ובדרום הארץ. כמו כן, הכבישים שנבחרו מהווים שילוב של סוגי דרך שונים, דהיינו דרכים ממוחלפות, דו-מסלוליות וחד-מסלוליות.

כבישים מס' 4, 65, 70 שימשו כמקבץ כבישים ראשון שעליו נערך פיילוט של יצירת בסיס הנתונים למחקר המשלב בין אירועי הנהיגה ומאפייני התשתיות, לרבות פיתוח כללים להצבה, שילוב, סיווג וטיוב הנתונים, והדגמת ניתוחים סטטיסטיים ראשוניים. בהמשך המחקר, נערכה הרחבת בסיס הנתונים על מנת להכיל את כל הכבישים שנבחרו למחקר. כמו כן, בעקבות בחינת ממצאיהם של

ניתוחים סטטיסטיים ראשוניים בוצעו שינויים בכללי סיווג והכנת הנתונים על מאפייני התשתיות, מה שהוביל לעדכון מאפייני התשתיות בכל הכבישים במחקר.

בסיס הנתונים הסופי למחקר כלל כ-3500 יחידות ניתוח - קטעי כביש באורך כ-200 מ', כאשר לכל יחידה מוצגים, מחד, מאפייני האירועים בנהיגה (לרבות מאפייני החשיפה לאירועים - היקפי הנסיעות) ומאידך, מאפייני תשתיות הדרכים. הן אירועי הנהיגה והן מאפייני התשתיות שייכים לשנת 2010. בנוסף, לכל יחידת ניתוח רוכזו מספרי תאונות דרכים, לפי סוגים מוגדרים, שנרשמו בשנים 2008-2010.

פרק 2.1 מפרט את שיטת מיפוי הנתונים על אירועי הנהיגה (על סמך נתוני "הקופסא הירוקה") על רשת הכבישים, לרבות ניתוח הנתונים המקוריים, שילובם עם רשת הלמ"ס ויצירת בסיסי נתונים מסכמים לכל כביש נבחר. פרק 2.2 מתאר את בסיס הנתונים שנבנה במחקר, לרבות הגדרה סופית לכללים ששימשו להפקת מאפייני התשתיות; מבנה בסיס הנתונים המשולב שנבנה במחקר, עם אירועי הנהיגה, מאפייני התשתיות, מדדי החשיפה ומספרי התאונות, והצגת סטטיסטיקה תיאורית של בסיס הנתונים המשולב.

על בסיס הנתונים שנבנה למחקר נערך מגוון ניתוחים חד-ורב-פרמטריים לזיהוי מערכת הקשרים בין התרחשות האירועים בנהיגה לבין מאפייני התשתיות. בהמשך, על סמך אותם יחידות הניתוח, נבחן הקשר בין מאפייני התשתיות לבין התרחשות התאונות, תוך כדי התחשבות ברמת החשיפה, וכמו כן, תוך כדי התחשבות בהתרחשות האירועים בנהיגה.

המחקר שאף לבחון את הקשר המשולש בין "תאונות-מאפייני תשתיות-אירועים בנהיגה". הנחת היסוד בבחינה זאת הינה שאירועים בנהיגה הם משתנה מתווך בין תשתיות ותאונות. כאשר קיים קשר בין מאפייני תשתיות ותאונות, אזי הוספת משתני האירועים אמורה להחליף את מאפייני התשתיות, כולם או חלקם. במידה ובמודל לקשר בין התשתיות והתאונות אכן מקבלים את תרומת האירועים לחיזוי התאונות, זוהי הוכחה לחשיבות האירועים ולאפשרות השימוש במספרי האירועים לניבוי התרחשות התאונות, ברשת הדרכים.

פרק 3 מציג ממצאים מהניתוחים המקדימים אשר בחנו את מערכת הקשרים בין התרחשות האירועים בנהיגה לבין מדדי החשיפה ומאפייני התשתיות, וכמו כן, ממצאים מקדימים מבחינת הקשר בין תאונות הדרכים לבין האירועים בנהיגה, בהינתן חשיפה.

פרק 4 מציג מודלים רב-משתנים שפותחו במחקר שהם: המודלים לביטוי הקשר בין האירועים בנהיגה לבין מאפייני התשתיות, בהינתן חשיפה; המודלים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתיות והתרחשות התאונות; ולבסוף, המודלים בהם נבחן הקשר בין מאפייני התשתיות לבין התרחשות התאונות, תוך כדי הוספת משתני האירועים בנהיגה.

פרק 5 מביא סיכום לממצאי המחקר ואת מסקנותיו.

1.2. מחקרי "הנהיגה הטבעית" (Naturalistic driving)

1.2.1. רקע - ההתפתחויות בעולם

בשנים האחרונות, פותחו טכנולוגיות המנטרות והמתעדות את התנהגות הנהג וכלי הרכב בזמן הנסיעה. בעזרת ההתקנים ברכב ניתן לשחזר, לדוגמא, את מיקומו המדויק של הרכב, את מהירות נסיעתו, כוון התקדמותו, תאוצות לאורך ציר התקדמות הרכב, תאוצות צידייות, ועוד. בעבר איסוף נתונים מסוג זה לאורך זמן היה יקר מאוד, ולכן כמעט ולא נעשה. היום, עקב זמינות הנתונים מסוג זה, במכוני מחקר באירופה ובארה"ב התעורר עניין לשילוב נתונים אלו בתחומי המחקר של בטיחות בדרכים (Hallmark, 2006; Dingus et al, 2009; Campbell, 2009; Boyle et al, 2010; Van Schagen et al, 2011; et al, 2011).

כרקע לנושא זה ניתן לצטט את Campbell et al (2003), לפיהם, תורת הבטיחות בדרכים התפתחה באופן רקורסיבי. בתחילת הדרך, מחקרים בסיסיים הפיקו הבנה משופרת של הגורמים האחראים להתנגשויות ונפגעים. מידע זה הביא לפיתוח אמצעים ראשוניים למניעת תאונות. בהמשך, מחקרים העוסקים במניעת תאונות, כדוגמת חקירות מומחים, התמקדו בתאונות עם נפגעים. אבן דרך חשובה הונחה כאשר התחילו לבצע הבחנה בין תאונות עם נפגעים ותאונות ללא נפגעים, והפיקו מדדי סיכון להיפגעות או הסתברות לתאונה עם נפגעים (בעת התרחשות תאונה). שינוי זה אפשר שימוש בשיטות חישוב אנליטיות לניתוח סיכונים אשר תרמו בתחומי מניעת ההיפגעות. בין היתר, התקדמות זו היוותה צעד חיוני בפיתוח מערכות למיגון הנוסעים ברכב. כיום, מניעת (אירועי) תאונות נמצאת במסלול דומה. טכנולוגיות מערכות תחבורה תבונתיות ומכשירי עזר ברכב מציעים פוטנציאל עתידי להתקדמות בבטיחות בדרכים. טכנולוגיות אלה מאפשרות שיטות מחקר חדשות להפקת אומדני סיכון ולקבלת מידע מפורט על ביצועי הנהיגה והטעויות בנהיגה שלא יכלו להימדד בעבר. בעתיד תידרש הבנה מעמיקה יותר של הקשרים בין הגורמים השונים האחראים להתנגשויות והיפגעות לבין השפעת האמצעים למניעת תאונות. במיוחד, חשוב לפתח הבנה של הקשר בין ביצועי הנהג בפועל לתכן ומאפייני הדרך ולמצבי התנועה המשפיעים על הסיכון להתנגשויות ולהיפגעות. כללית, תחום זה עדיין לא ידוע, למרות שבאופן נרחב יש המאמינים בעובדה שהתנהגות הנהג אחראית לרוב התאונות.

בשנת 2005 הקונגרס האמריקני החליט לבצע את התוכנית האסטרטגית השנייה למחקר תעבורתי שמטרתה שינוע אנשים וסחורות ביעילות ובבטיחות ברשת הדרכים הלאומית. בין היתר, תוכנית זו מתמקדת בתפקיד הגורם האנושי בבטיחות בדרכים. במסגרת התוכנית מבוצעים מחקרים בתחום של "נהיגה טבעית" (naturalistic driving). במסגרת מחקר זה, מוקם מדגם של 2,000 כלי רכב מסוגים שונים, ב-6 מדינות שונות בארה"ב, עם כ-3000 נהגים מתנדבים בעלי מאפיינים שונים כגון: גיל, מגדר, מצב כלכלי-חברתי (Campbell, 2009). בכלי הרכב של המדגם יותקנו אמצעים המתעדים את סביבת הנהיגה, כולל: התמונות שרואה הנהג בזמן הנסיעה מלפנים ובצד, פני הנהג, ידיו; מידות התאוצה בכוון נסיעת הרכב ובכוון הצידי; מידע על מיקום הנסיעה ומאפיינים נוספים כגון: זווית סיבוב ההגה, מהירות הנסיעה, חגירת חגורות בטיחות. מידע נוסף שייאסף על הנסיעות יהיה לגבי סוג הדרך, גיאומטריה, שוליים, אביזרי בטיחות, סימון הדרכים בהן משתמשים משתתפי הניסוי ומידע על תאונות. המידע שייאסף וינותח יהווה בסיס לשיפורי

בטיחות. בתחום זה, קיימת רשימה של קרוב ל-500 שאלות מחקר המסודרות על-פי פוטנציאל השיפור הבטיחותי, בין היתר, עם מיקוד על תאונות בצמתים ותאונות בהן רכב סוטה משטח המיסעה ועוזב את תחום הדרך. מחקרים נוספים עוסקים בפיתוח שיטות יעילות לניתוח הנתונים הנאספים. איסוף נתונים מקיף זה התחיל בשנת 2010 (Dingus et al., 2006).

לפי Boyle et al (2010), בשנים האחרונות איסוף נתוני "נהיגה טבעית" נעשה אפשרי וכלכלי. ההתקדמות שהושגה בטכניקות איסוף הנתונים מאפשרת לחקור את מאפייני הנהיגה הטבעית המלווה במבטי וידאו קדמי ופנים-רכבי, יחד עם החיישנים העוקבים אחרי דוושות הגז והמעצורים, שינויים בסיבוב ההגה ושאר מאפייני הרכב והדרך. הנתונים החדשים שנאספים יכולים לשמש לחקר הנושאים הקשורים לבטיחות בתנועה והתנהגות הנהגים.

1.2.2. פוטנציאל מחקרי ה"נהיגה הטבעית" לצורכי שיפור הבטיחות

"נהיגה טבעית" היא שיטת מחקר שהתפתחה לאחרונה הצופה בהתנהגות משתמשי הדרך בהקשר של נהיגה יומיומית. התצפיות מתרחשות במהלך נסיעות יומיומיות שגרתיות, עדיף בכלי הרכב של הנהגים עצמם. על מנת לאסוף את הנתונים הנדרשים, המכונית מצוידת במכשירים שונים שרושמים ללא הפרעה את תמרוני הרכב (כגון מהירות, תאוצה/האטה, כיוון), התנהגות הנהג (כגון תנועות עיניים, ראש ויד) ותנאים חיצוניים כמו מאפייני הכביש, תנועה, מזג אוויר וכו' (SWOV, 2010; Van Schagen et al., 2011).

המטרה העיקרית של מחקרי הנהיגה הטבעית הינה לתעד אירועים בדרגות שונות: תאונות, כמעט תאונות, ואירועים. תאונות כוללות אירועים מדווחים ולא מדווחים, ואילו כמעט תאונות כוללות אירועים שבהם מעורבים תמרוני התחמקות משמעותיים. גורמים נמדדים הקשורים לאירועים האמורים לעיל כוללים: מצב סוציו-אקונומי של נהגים, סביבת הדרך, ומדידות של עמדות נהגים בדיווח עצמי (Shankar et al., 2008).

ה"נהיגה הטבעית" התפתחה כתוצאה מטכניקה מתקדמת המאפשרת איסוף, אחסון וניתוח של כמויות גדולות של נתונים בעזרת מכשור יותר ויותר קטן. הניסויים הראשונים ב"נהיגה הטבעית" התבצעו בארה"ב. גם באירופה, מספר גדל של מחקרים משתמש בשיטה חדשה זו. המחקרים בארצות הברית הראו כי "נהיגה טבעית" מספקת מידע מעניין מאוד על מערכת היחסים בין נהגים, כביש, רכב, תנאי מזג האוויר ומצב התנועה. הדבר אינו חל רק לגבי תנאי נהיגה רגילים, אלא גם לגבי מצבי כמעט-תאונה, מאחר וההתנהגות והגורמים שהובילו לאירוע או לתאונה מתועדים באופן ישיר (SWOV, 2010).

שילוב של צפייה בהתנהגות משתמשי הדרך בהקשר התנועה היומיומית יחד עם ידע אודות היכולות והמגבלות של מערכת עיבוד המידע האנושית מאפשרים זווית ראייה רחבה יותר על מערכת התנועה ככלל. שילוב זה מאפשר הבנה טובה יותר של בעיות בטיחות בדרכים ומספק תיאור טוב של התנהגות הנהג במצבים נורמאליים, במצבים קריטיים ואפילו בזמן תאונה. לפיכך, שיטת ה"נהיגה הטבעית" יכולה לספק תובנה מעמיקה יותר לגבי כיצד ומתי מצבים מסוכנים מתרחשים ומכאן, האפשרויות להפיכת מערכת התנועה לבטוחה יותר (SWOV, 2010).

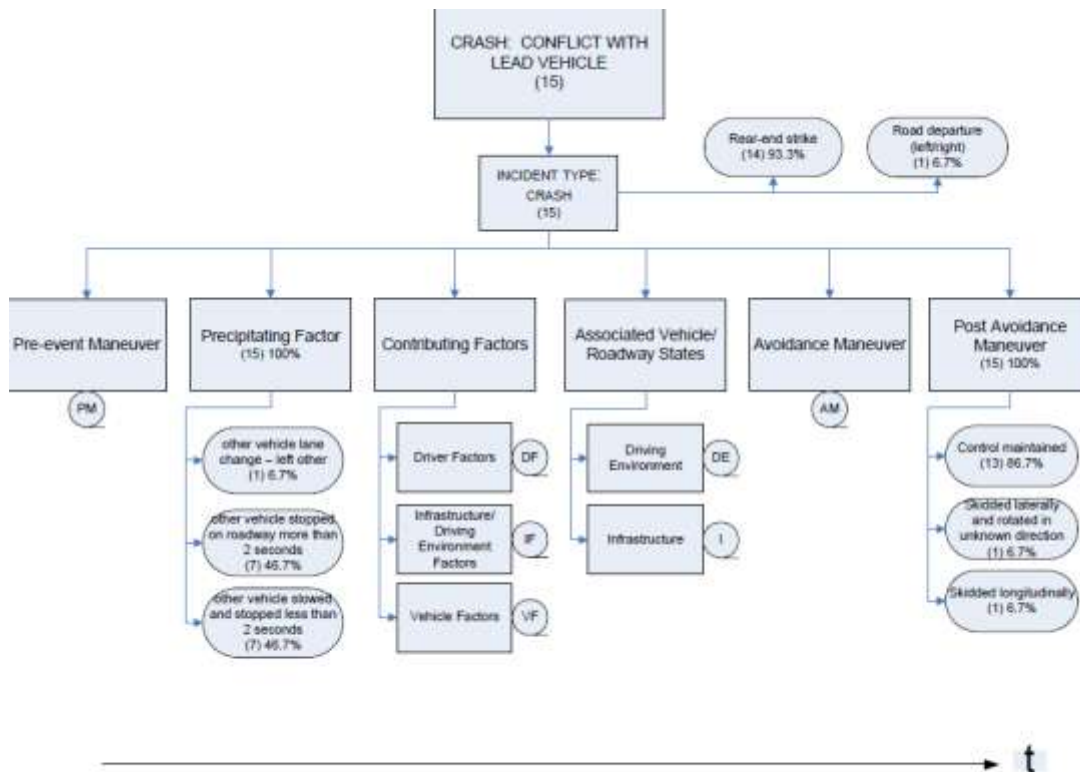
אחד המחקרים הראשונים שעשה שימוש בנתוני ה"נהיגה הטבעית" היה מחקר "100 כלי רכב" ("The 100-car Naturalistic Driving Study") במכון הטכנולוגי לתחבורה בוורגיניה, ארה"ב,

שבו, 100 כלי רכב צוידו במכשירי תצפית שכללו 5 מצלמות וידיאו, גלאי רדאר, רישום תאוצה ו-GPS, לתקופה של שנה. הנהגים לא קבלו שום הוראות מיוחדות, לא היה נסיין נוכח, ומכשור איסוף הנתונים לא בלט. בנוסף, רוב הנהגים נהגו בכלי הרכב שלהם (78 מתוך 100 כלי רכב). מטרת המחקר הייתה לייצר מידע מקיף אודות הגורמים שעשויים לשחק תפקיד בהתרחשות תאונות או כמעט תאונות (Dingus et al, 2006).

הנתונים שהתקבלו מכילים מקרים קיצוניים רבים של התנהגות וביצועי נהיגה, כולל ישנוניות חמורה, ליקויים, טעויות שיפוט, נטילת סיכונים, נכונות לעסוק במשימות משניות, נהיגה אגרסיבית, ועבירות תנועה. סה"כ התקבלו נתונים על מרחק של 2 מיליון ק"מ נהיגה, 43,000 שעות נתונים, 241 נהגים ראשיים ומשניים, 12-13 חודשי איסוף נתונים עבור כל רכב. מתוך הנתונים שנאספו נגזרו בסיסי הנתונים של תאונות, כמעט תאונות (מוגדר כאירוע קונפליקט הדורש תמרון התחמקות מהיר כדי למנוע תאונה) ואירועים (המייצגים קונפליקטים פחות חמורים), כולל 15 תאונות שדווחו למשטרה, 67 תאונות לא מדווחות, 761 כמעט תאונות, ו-8295 אירועים. בנוסף, התקבל מדגם של כ-20,000 non-events (מרווחים של 6 שניות ללא תאונה, כמעט תאונה, או אירוע). המידע סווג לפי תמרון טרום האירוע, גורם מזרז, סוג אירוע, גורמים תורמים, גורמים קשורים ותמרון ההתחמקות. דוגמא לסיווג הגורמים התורמים והקשורים עבור תאונה מסוג "קונפליקט עם רכב מוביל" מופיעה באיור 1.1.

יתרון אמיתי אחד לגישה הנטורליסטית הוא שהוידאו מאפשר צפייה ישירה של כל הפרמטרים לפני האירוע ובמהלך האירוע, כולל התנהגויות הנהג לפני האירוע כגון: הסחת דעת, נמנום וביצוע טעויות. בנוסף, גישה זו מאפשרת חישוב מדויק של פרמטרים כגון: מהירות הרכב, התקדמות רכב, זמן להתנגשות, וזמן תגובה של נהג. מאפייני הנהג שנמדדו במחקר כללו: גיל, מין, השכלה, תעסוקה וניסיון הנהיגה. מאפיינים הקשורים לביצועי נהיגה כללו: חדות ראייה, שמיעה, בריאות רפואית, שינה, זמן תגובה ושדה הראייה. מדידות התנהגות כללו: התנהגות נהיגה, לחץ בנהיגה, מתח בחיים, שימוש בחגורת בטיחות, בחירת מהירות, בחירת התקדמות, ליקויים, מעורבות במשימות משניות, אחוז עיניים סגורות, וסינוור. משתני סביבת הנהיגה כללו: מזג אוויר, תאורה, מצב פני המיסעה, נפח תנועה, סוג היישוב, מיקום ביחס לצומת, בקרת תנועה, ומתאר הדרך. התוצאה החשובה ביותר ממחקר זה היא שבקרוב ל-80% מכלל התאונות שנצפו במחקר וב-65% ממצבי הכמעט-תאונה, הסחת דעת או חוסר תשומת לב (3 שניות לפני התאונה) היו מעורבים.

באירופה, פרויקט PROLOGUE (Promoting real Life Observations for Gaining Understanding of road user behaviour in Europe) בדק את הכדאיות והתועלות של מחקר "נהיגה טבעית" אירופאי בקנה מידה גדול עבור ארגונים בעלי עניין ישיר או עקיף בבטיחות בדרכים ותחבורה (SWOV, 2010; Van Schagen et al., 2011).



איור 1.1. סיווג הגורמים התורמים והקשורים עבור תאונה מסוג "קונפליקט עם רכב מוביל" (מקור: Dingus et al, 2006)

Figure 1.1. Classification of factors related to accident type "conflict with lead vehicle" (Dingus et al, 2006).

במחקר אחר, Hallmark et al (2011) בחנו בהרחבה את אפשרויות השימוש בתוני ה"נהיגה הטבעית" לצורך שיפור הבנת תאונות סטייה מנתיב שהינו סוג תאונות נפוץ בדרכים בין-עירוניות חד-מסלוליות בארה"ב (וגם בישראל). בין היתר, החוקרים סיכמו מספר שיטות להערכת מדדים חלופיים למדדי התאונות, לצורך זיהוי אירועים חריגים. צוין כי נתוני הנהיגה הטבעית יתעדו תאונות, כמעט תאונות ואירועים חריגים כמו גם נהיגה רגילה. תדירות האירועים החריגים והכמעט-תאונות גדולה יותר מתדירות התאונות ולפיכך, ניתן להשתמש באירועים ובכמעט-תאונות כתחליפים לתאונות. השימוש בתחליפים יאפשר גם ללמוד מה קורה לפני ולאחר אירוע של סטייה מנתיב.

היתרון המשמעותי ביותר של מחקרי הנהיגה הטבעית הוא שהם מספקים תיעוד ממקור ראשון של האירועים שקדמו לתאונות ואירועים חריגים. לפי Hallmark et al (2011), בהתחשב בכמות הנתונים הגדולה שתיאסף בארה"ב, ניתן יהיה ללמוד יותר על התנהגויות הנהגים בהקשר למאפייני דרך ורכב שונים.

1.2.3. נתוני "הנהיגה הטבעית": זיהוי אירועים חריגים בנהיגה, שיטות עיבוד

נתוני ה"נהיגה הטבעית" מייצרים, בנוסף לכמות עצומה של נקודות נתונים (כגון: 2 מיליון ק"מ נהיגה במחקר "כלי רכב"), גם בסיס נתונים גדול במונחים של קיבולת אחסון מתוך הקלטות הוידאו. כתוצאה מהכמות הגדולה של נתוני וידאו, הקידוד והניתוח של הנתונים אורך זמן רב.

נדרשת גישה מוגדרת כדי לקבוע אלו קטעים מנתוני הוידאו כנראה יכילו מידע מעניין וכיצד לזהות אותם.

במחקר "100 כלי רכב", למשל, החוקרים רצו לחקור מה קורה ברכב או בדרך, מיד לפני תאונה או כמעט-תאונה. על מנת לזהות את קטעי הוידאו הרלוונטיים, נותחו ראשית 10% מכלל הנתונים. בדרך זו, היה ניתן לקבוע אילו ערכים של אילו משתנים מאפיינים כמעט-תאונה, כמו עצירה חדה או סטייה פתאומית. בהתבסס על קריטריונים אלה, ניתן היה לזהות את קטעי הוידאו הרלוונטיים ביתר 90% הנתונים (SWOV, 2010).

Gettman and Head (2003) הפיקו מדדים חלופיים לתאונות ממודלי סימולציה. במחקר נאספו נתונים מפורטים על כל אירועי הקונפליקט המתרחשים בין שני כלי רכב בצומת. שתי דרישות צריכות להתקיים כדי שאירוע בלתי רצוי יתרחש: (1) אחד מכלי הרכב חייב לנקוט פעולת התחמקות כדי להימנע מהתנגשות; (2) המדדים החלופיים חייבים להיות בעלי ערך משמעותי (כלומר, פחות מסף שציין המשתמש, כפי שמונחה על-ידי הספרות).

המדדים החלופיים הטובים ביותר עבור הסיכון לתאונות שהוצעו היו: זמן מינימאלי להתנגשות (Time to Collision - TTC) במהלך אירוע הקונפליקט; זמן מינימאלי לאחר הסגת הגבול (post encroachment time) במהלך אירוע הקונפליקט; מהירות מרבית של שני כלי הרכב (MaxS); הבדל מרבי במהירות של שני כלי הרכב במהלך אירוע הקונפליקט (DeltaS); קצב ההאטה (deceleration rate - DR) הראשוני של הרכב המגיב; מיקום של נקודת ההתחלה והסיום של אירוע הקונפליקט. הגודל של המדדים החלופיים TTC, PET, ו-DR נועד כדי לציין את חומרת אירוע הקונפליקט. הם מודדים את מידת הסבירות שתאונה תתרחש כתוצאה מהקונפליקט, כך ש: TTC ו-PET נמוכים מצביעים על סבירות גבוהה יותר לתאונה; DR גבוה מצביע על סבירות גבוהה יותר לתאונה. המדדים MaxS ו-DeltaS משמשים לציין החומרה האפשרית של תאונה (פוטנציאלית) שהינה תוצאה של אירוע קונפליקט שהוביל לתאונה במקום לכמעט-תאונה, כך ש: MaxS ו-DeltaS גבוהים יותר מצביעים על חומרה גבוהה יותר של התאונה שהתרחשה.

במחקרם, Hallmark et al (2011) השתמשו בנתוני הנהיגה הטבעית לבחירת מדדים חלופיים לתאונות של סטייה מנתיב. מבסיס הנתונים של המכון לחקר התחבורה באוניברסיטת מישיגן, עבור דרכים בין-עירוניות חד-מסלוליות בארה"ב, החוקרים הפיקו את אירועי הסטייה מנתיב כך שהתקבלו 22 אירועי סטייה מנתיב ימני ו-51 אירועי סטייה מנתיב שמאלי. כמו כן, הופקו נתוני הנהיגה הרגילה שלא כללו אירועי סטייה מנתיב.

הנתונים שהופקו שימשו כדי להעריך אלו משתנים וערכי סף עשויים להיות השימושיים ביותר בקביעת הטריגרים לזיהוי אירועי סטייה מנתיב במחקר שדה רחב היקף. כמו כן, זוהו נתונים עבור מספר משתני רכב קינמטיים שעשויים לאותת על סטייה מנתיב, כגון: מהירות רוחבית, קצב סבסוב, תאוצת צד, תאוצה קדימה, קצב גלגול, וקצב עלרוד. הערכים עבור המשתנים הקינמטיים הושאו עבור נהיגה רגילה לעומת סטייה מנתיב שמאלה וימינה, כדי לקבוע האם נתוני הנהיגה הרגילה היו שונים סטטיסטית מאירועי הסטייה מנתיב.

נתוני נהיגה טבעית מאפשרים להפיק באופן ישיר את הגורמים הקשורים לדרך, לסביבה, לרכב ולנהג כדי לזהות את הקשרים בין הגורמים המשפיעים על הסיכון להתרחשות תאונות סטייה

מנתיב (Hallmark et al, 2011). מידע זה ממקור ראשון יכול גם לשמש על מנת לקבוע את הגורמים המובילים לתוצאה חיובית. למשל, אם מספר דומה של סטיות מנתיב מתרחש בקטעי דרך עם וללא שוליים סלולים ולשוליים הסלולים יש שיעור גדול יותר של תוצאות חיוביות (כלי רכב יכולים לחזור בבטחה לדרך), ניתן להשתמש במספרי האירועים כדי להעריך את יעילותם של השוליים הסלולים.

הגדרות של מדדים חלופיים לתאונות או כמעט תאונות מנתוני נהיגה טבעית

מדדים חלופיים למדידת הסיכון לתאונות יכולים להתבטא בשתי צורות: מדדים חלופיים לבטיחות ומדדים חלופיים לתאונות. ההבדל בין השניים קשור לשאלה האם הקשר הבסיסי שלהם לבטיחות כבר נקבע. ברוב המקרים, הקשר שבין תאונות והמדד החלופי לבטיחות הינו משוער. לתחליפי בטיחות נבחרים מיוחס קשר כלשהו לבטיחות, למרות שקשר מוכח קיים רק לעיתים רחוקות. בנוסף, כאשר נעשה שימוש בתחליפי בטיחות במחקרים, אין ניסיון מוכח כדי להגדיר את הקשר בין תחליפי הבטיחות לתאונות (Hallmark et al, 2011).

דוגמאות לתחליפי בטיחות כוללות, למשל, קונפליקטים בתנועה, עבירות תנועה, התנהגות משתמש הדרך ומדדי מהירות (Forbes et al., 2003). שינוי במהירות משמש לעיתים קרובות להערכת יעילות הטיפוליים, כמו מיתון תנועה. המדד החלופי השני הוא תחליף לתאונות. מצופה כי לסוג זה של תחליף יש קשר סטטיסטי מדיד לתאונות. באופן אידיאלי, הקשר בין תאונות והמדד החלופי מוערך או ידוע. אם כן, התחליף לתאונות יכול לשמש כמדד ליעילות וניתן לחזות את הירידה בתאונות.

Shankar et al (2008) הגדירו תחליף לתאונות כמדד שנמצא בקורלציה עם תאונה, בדרך כלל על בסיס זמן, כך שככל שהזמן גדל, הסבירות לתאונה גם עולה. במובן זה, אירוע התאונה נתפס כנקודת סיום בזמן. בדומה לכך, התחליף יכול להיחשב כתוצאת משך הזמן שבה נקודות סיום בדידות בזמן נמדדות; מעניין במיוחד הוא הזמן של תחילת הסטייה מנתיב או מעקומה וזמן הסטייה מהדרך.

Shankar et al (2008) הגדירו בנוסף תחליף לתאונה כמדד שמגיב לאותן ההתערבויות כמו התאונות הקשורות. למשל, פסי הרעדה בקצה המיסעה צפויים להקטין את מספר אירועי סטייה מנתיב ימינה כמו גם אירועי תאונות מסוג ירידה מהדרך. על ידי כך שהתחליף מגיב להתערבות או לאמצעים, הוא משמש כמנגנון שמתווך את היעילות של האמצעי. התיווך הינו במובן שהתפקוד והזמינות של האמצעי מועברים לנהג (לדוגמה, באמצעות התראה), ובכך הוא מציע את הפוטנציאל למניעת התאונה הממשמשת ובאה או להפחתת חומרת התאונה.

ההבדל העיקרי בין מדדים חלופיים לבטיחות ומדדים חלופיים לתאונות הוא שתחליפי בטיחות משמשים חוקרים וארגונים כמשתנה תחליפי לנתוני תאונות. הם נמצאים בשימוש נרחב, אך אין קשר מוכח בין התאונות והמשתנה שבשימוש. ישנה הנחה כי אם תחליף הבטיחות משתנה (למשל, ירידה במהירויות), חומרת או תדירות התאונה תשתפר (Hallmark et al, 2011).

Archer (2001) השתמש בטכניקת הקונפליקט בתנועה אשר רושמת את התרחשות כמעט תאונות בתנועה בזמן אמת כדי לייצג את התדירות והתוצאות של התאונות. המדד החלופי שהציע

Archer (2001) מוגדר כ"זמן עד לתאונה". Mounce (1981) העריך את הקורלציה שבין אי ציות לשלט עצור לבין שיעור התאונות. Salman and Al-Maita (1995) העריכו קונפליקטים בתנועה ותאונות ב- 18 צמתי T בירדן ופתחו מודל רגרסיה ליניארית שקשר מספר תאונות שנתי למספר קונפליקטים ממוצע בשעה. Chin et al (1992) השתמשו בשיטת זמן עד להתנגשות כדי למדל קונפליקטים של התמזגות בדרכים מהירות.

חוקרים אחרים התייחסו אל מדדים חלופיים לתאונות כרצף, כאשר אירועי תנועה רגילים בקצה אחד ותאונות בקצה השני. ערכי סף משמשים כדי לחלק את האירועים. למשל, Chin and Quek (1997) תארו זאת כהתפלגות ההסתברויות של אירועים. Songchitruksa and Tarko (2006) השתמשו ברעיון של סידור אירועי התנועה מהבטוח ביותר למסוכן ביותר.

חוקרים שונים השתמשו בתחליפי תאונות שונים כדי להגדיר את הגבול שבין אירועים. מדד נפוץ שכבר נמצא בשימוש הוא *זמן להתנגשות* (Time to Collision - TTC), כאשר ב- $TTC=0$ רכב הנושא ורכב/אובייקט אחר מתנגשים וכתוצאה מכך מתרחשת תאונה. Songchitruksa and Tarko (2006) השתמשו במושג של דרגת הפרדה. כאשר יש הפרדה ניכרת בין כלי רכב על אותו הנתב שעוברים נקודת סכסוך, המעבר נחשב בטוח. כאשר הפרדה בין כלי רכב יורדת, הסיכון עולה עד ששני כלי הרכב מתנגשים. רצף זה של הפרדה בזמן נקרא זמן לאחר הסגת גבול (PET). מידת הפרדה ניתנת לחלוקה לרמות שונות של אירועי תאונה התואמות לרמות שונות של סיכון. במחקר של Songchitruksa and Tarko (2006), הסף שבין התאונה וגבולות ללא תאונה נקרא מדד הקרבה לתאונה. אחרים מתייחסים לסף זה כגבול למניעת תאונה.

Burgett and Gunderson (2001) מגדירים את הגבול למניעת תאונה כביטוי דטרמיניסטי נגזר אנליטית שמפריד בין ביצועי הנהג להימנעות מוצלחת מתאונה ולהימנעות לא מוצלחת מתאונה. לכל מערכת נתונה של תנאים, יש קבוצת משנה של תגובת בלימה של נהג ודרגת האטה שיגרמו להימנעות מתאונה וקבוצת משנה של ערכים שיובילו לתאונה.

Hayward (1972) הציע שימוש ב- TTC בעת מידול מצבים שבהם שני כלי הרכב ממשיכים באותה הדרך מבלי לשנות את המהירות שלהם. TTC הוא תחליף טוב לתאונות של התנגשות שני כלי רכב בגלל המרחק או הזמן המפריד בין שני כלי רכב שניתנים לזיהוי באופן ברור.

גבולות למניעת תאונות שמשו גם כתחליף לתאונות. Burgett and Miller (2001) השתמשו במהירות, מרחק הפרדה, האטה ובלימה כדי לפתח גבולות למניעת תאונות עבור תאונות חזית-אחור. Szabo and Wilson (2004) השתמשו במידת התאוצה ההכרחית כדי להימנע מתאונה כפונקציה של העיתוי או המיקום של אמצעי אזהרה כדי להגדיר את גבול מניעת התאונה. תחליפי תאונה אחרים שנמצאים בשימוש כוללים את שיעור מרחק העצירה שנתר (Allen et al., 1978) וקצב ההאטה (Songchitruksa and Tarko, 2004).

מספר אמצעים היו בשימוש כתחליפי תאונות עבור סטייה מנתיב כולל שמירת נתיב, זמן עד להתנגשות (TTC) וגבולות למניעת תאונות. עם זאת, קיים מידע מועט המתאר פיתוח קשרים סטטיסטיים בין תאונות סטייה מנתיב לבין תחליפי תאונות סטייה מנתיב. כתוצאה מכך, ההנחה

היא כי סוגים אלו של קשרים יהיו צריכים להיגזר מניתוח של נתוני נהיגה טבעית (Hallmark et al, 2011).

הסטה רוחבית או שמירה על נתיב הוא מדד אחד שנעשה בו שימוש ע"י מספר חוקרים להערכת סטיות מנתיב. שמירה על נתיב מאפשרת לזהות מתי כלי רכב עוזב את הדרך. הסטה מהנתיב מוגדרת גם כמרחק שבין קו האמצע של הרכב לבין קו האמצע של הנתיב. מיקום בנתיב ותנועה יחסית בתוך הנתיב נקבעים ע"י ניתוח נתוני המצלמה ממבט קדימה. נעשה גם שימוש במונח "חדירה לנתיב" אשר מרמז כי עזיבת נתיב היא בלתי נמנעת או צפויה (Hallmark et al, 2011).

מספר תחליפי תאונה משתמשים בזמן לאירוע קריטי כלשהו כמדד לסיכון לתאונה. זמן לסטייה מנתיב (TTLD) משקף את הזמן שנותר לפני שכלי הרכב חוצה את קו הנתיב במידה והרכב שומר על מסלולו הנוכחי. מספר חוקרים השתמשו בזמן לסטייה מהנתיב או בזמן להתנגשות כמדד חלופי לתאונה. למשל, Pomerleau et al (1999) השתמשו בזמן לסטייה מנתיב כדי לקבוע מתי מערכת התראה לסטייה מנתיב תיתן אזהרה לנהג. TTLD הוגדר כזמן עד שהחלק החיצוני של הצמיג חוצה את קו הנתיב.

מרחק פלישה (distance intruded) מודד את המרחק שכלי רכב חוצה לתוך נתיב או שול סמוך. מרחק פלישה משמש לקביעת התרחשות סטייה מנתיב. מערכת עקיבת נתיב קובעת את הטריגר שמגדיר אירוע של "פריצת נתיב" או "ביטול נתיב". פריצת נתיב מתרחשת כאשר רכב חוצה קו נתיב רציף. אירוע מופעל כאשר הרכב עובר מינימום של 3 ft (כ-0.9 מ') מחוץ לגבול הנתיב מבלי להשלים שינוי נתיב כאשר הוא נע במהירות של 45 ft (13.5 מ'') ומעלה (Dingus et al, 2006).

Szabo and Wilson (2004) השתמשו במונח גבולות מניעת תאונה. שני מדדים שימשו, אחד לעקומות ואחד לקטעים ישרים. עבור עקומות, יש נקודה קריטית שבה נהגים יכולים לקבל אזהרת סטייה מנתיב ולהגיב בהתאם על ידי האטה לפי הצורך. אם האזהרה ניתנת אחרי נקודה זו, הנהג לא יוכל להתמודד בבטיחות בעקומה. החוקרים השתמשו במונח דומה עבור קטעים ישרים בהתבסס על הגיאומטריה של הסטה רוחבית לתוך מעקה גירזי. תנועה מעבר לגבול מניעת התאונה מייצגת מצב שבו ישנה סבירות גדולה כי הרכב לא יצליח להתאושש.

Burgett and Gunderson (2001) דנו גם במושג גבול למניעת תאונה עבור תאונות סטייה מנתיב, שהוא פונקציה של זמן הבלימה של הנהג ורמת ההאטה הדרושה כדי למנוע תאונה. החוקרים דנו במונח ביחס לנהג הנוסע במהירות קבועה בקטע דרך ישר.

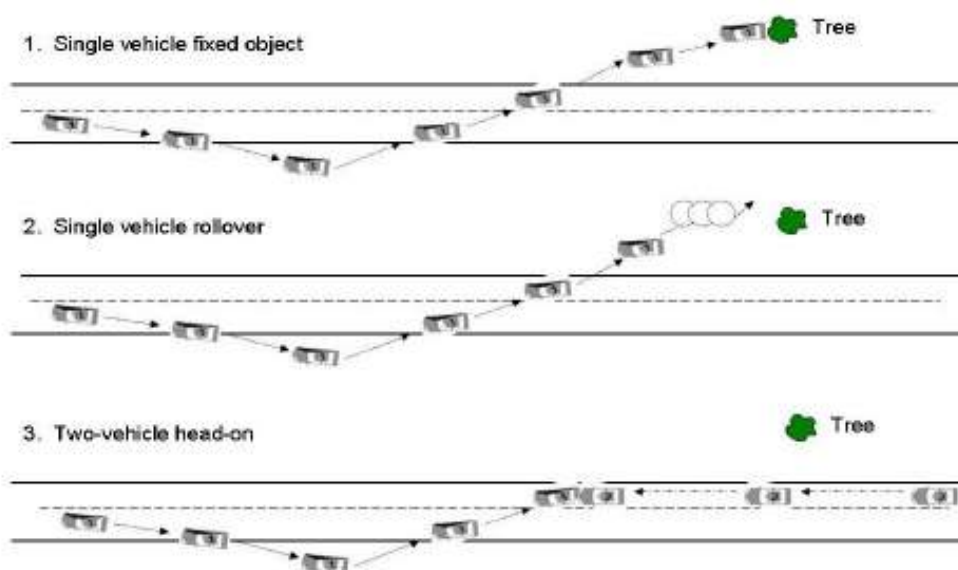
דוגמא: בחירת מדדים חלופיים לסטייה מנתיב

אחד היתרונות העיקריים של מחקרי נהיגה טבעית הוא כי הם יכולים לתפוס את כל הרמות של אירועים, כולל אלה הקשורים לסטייה מנתיב. אחת משאלות המחקר בפרויקט של Hallmark et al (2011) מתייחסת להערכת נתוני ה"נהיגה הטבעית" וקביעת תחליפי התאונות המתאימים ביותר לשימוש בניתוחי סטייה מנתיב. בוצעה הערכה גם של תחליפי תאונות פוטנציאליים כדי לקבוע אלו טריגרים קינמטיים של הרכב יכולים לשמש כדי לסמן סטיות פוטנציאליות מנתיב במחקר המלא. מאחר ותיווצר כמות גדולה של נתונים מהמחקר המלא, יהיה צורך בשיטה אוטומטית לסימון אירועים מעניינים.

תאונות סטייה מנתיב מספקות מצב מורכב יותר לפיתוח תחליפי תאונות בהשוואה לסוגי תאונות אחרים. רוב סוגי התאונות, כגון תאונה צדית או חזית-אחור, יכולים להיות מוגדרים על ידי מדד של זמן או מרחק (זמן או מרחק להתנגשות) משום שהסכנה, ההתנגשות עם רכב אחר, היא ברורה. בתאונת סטייה מנתיב, הסיכון העיקרי לא תמיד מזוהה בבירור, ובמקרים מסוימים סכנות מרובות עשויות להיות נוכחות. לדוגמה, כאשר רכב סוטה מקצה הדרך, סכנות מרובות עשויות להיות נוכחות ותוצאות מרובות (רצפים של אירועים) עשויות להיות אפשריות. סיכונים אפשריים כוללים נפילה מקצה המיסעה, מה שעלול להוביל לאובדן שליטה: מפגש בהפרשי חיכוך בין שטח המיסעה והשול, שיכול גם להוביל לאובדן שליטה; התהפכות הרכב; או פגיעה באובייקט קבוע (Hallmark et al, 2011).

האירועים המלווים כל סיכון יכולים גם לגרום למספר תוצאות שונות, שכל אחת מהן יכולה להוביל להיתקלות של הרכב בסיכונים שונים. רצף ראשוני של אירועים יכול להוביל למספר תוצאות שונות על בסיס סיכונים שונים, תגובות הנהג, ותנאי הכביש. איור 1.2 מציג שלוש תוצאות אפשריות לאותו אירוע ראשוני של ירידה מהכביש. לכל תוצאה יכול להיות סוג אחר של תחליף תאונה כדי לתאר אותה.

הרצף הראשון של האירועים לכל שלושת התרחישים כולל רכב היורד מהדרך ימינה, נתקל בשול לא סלול, מתקן וחוזר למיסעה, וחוצה את קו האמצע. בתרחיש הראשון, הרכב לאחר מכן יורד מהדרך לצד שמאל ופוגע בעץ. בתרחיש השני, הרכב יורד מהכביש לשמאל ומתהפך לפני שפוגע בעץ. בתרחיש השלישי, הרכב חוצה את קו האמצע ופוגע ברכב אחר חזיתית. הרצף הראשוני של האירועים היה זהה, אבל שלוש תוצאות שונות היו אפשריות עם שלושה סיכונים שונים. כל אחד מהאירועים הראשונים (למשל, סטייה מהדרך, התקלות בשול לא סלול) יכול להוביל לסדרה עוקבת אחרת של אירועים. לדוגמה, הרכב היה יכול לרדת מהדרך ימינה, להיתקל בשול לא סלול ולהתהפך (Hallmark et al, 2011).



איור 1.2. שלוש תוצאות אפשריות של סטייה מהדרך עבור אותו רצף אירועים ראשוני (מקור: Hallmark et al, 2011)

Figure 1.2. Three possible results of leaving the roadway for the same sequence of initial events (Hallmark et al, 2011).

כל שלב של סטייה מנתיב יכול להוביל למספר תוצאות, וכל תוצאה ייתכן שתצטרך להיות מתוארת על ידי תחליפי תאונה שונים. כתוצאה מכך, סטיות מנתיב במחקר של Hallmark et al (2011) חולקו לקטגוריות שבהן הסיכונים יהיו עקביים. חמש קטגוריות נבחרו, הכוללות נהיגה רגילה, הסטה רוחבית בתוך נתיב הנסיעה, סטייה מנתיב ימינה או שמאלה שבה הרכב נשאר במיסעה (הסגת גבול נתיב), סטייה מנתיב ימינה או שמאלה שבה הרכב יורד מהמיסעה (הסגת גבול שול), ותאונת סטייה מנתיב. תחליף או תחליפי תאונה זהו עבור כל קטגוריה, פרט לנהיגה רגילה כיוון שנהיגה רגילה על-פי ההגדרה נעדרת כל קונפליקט. תחליף התאונה הוא המדד המשמש להגדרת גבולות בין אירועים ולהערכת הסיכון לתאונה (למשל, זמן/מרחק להסגת גבול בקצה הנתיב). טבלה 1.1 מציגה את קטגוריות הסטייה מנתיב ותחליפי התאונה הנלווים.

טבלה 1.1. קטגוריות הסטייה מנתיב ותחליפי התאונה הנלווים (מקור: Hallmark et al, 2011).

Table 1.1. Categories of lane deviation and accompanying accident surrogates (Hallmark et al, 2011).

Category	Hazard	Surrogate	Metric
Normal driving	None	Lane deviation	ft
Lateral drift	Crossing lane line	Distance to lane departure (DTLD) or time to lane departure (TTLD)	s or ft
Lane encroachment	Sideswipe with adjacent or opposing vehicle	Time to collision (TTC) or distance to collision (DTC)	s or ft
	Head-on collision	TTC or DTC	s or ft
	Crossing lane line onto shoulder (left or right side)	Same as for shoulder encroachment Time to lane edge (TTLE) or distance to lane edge (DTLE)	s or ft
Shoulder encroachment	Shoulder (loss of control)	Change in steering angle or yaw rate	Degree/s
	Rollover	Rollover potential	Lateral acceleration (g)
	Fixed object collision	TTC or DTC	s or ft
	Crossing shoulder edge	Time to shoulder edge (TTSE) or distance to shoulder edge (DTSE)	s or ft
Lane departure crash	Vehicle, rollover, fixed object	NA	NA

להלן פירוט הקטגוריות המוצגות בטבלה 1.1.

נהיגה רגילה: קטגוריה זו מייצגת את טווח ההתנהגות שנותר כאשר תחליפי התאונה והתאונה עצמה הוסרו. לא נעשה שימוש בתחליפי תאונה לנהיגה רגילה. עם זאת, מידת הסטייה מנתיב היא המדד המשמש כדי להבחין בין נהיגה רגילה והסטה רוחבית. בקטגוריה זו אין גבול תחתון. הגבול בין נהיגה רגילה והסטה רוחבית צריך להיקבע במחקר המלא. שמירה על נתיב משתנה עבור נהגים אינדיבידואליים, כאשר הנהגים ישמרו על מיקום בנתיב באופן שונה בהתבסס על מגוון גורמים, כגון תנאי דרך שונים (למשל, שני נתיבים לעומת ארבעה נתיבים, נוכחות וסוג עקומה), תנאי מזג אוויר, שעה ביום, ומשך זמן נהיגה. כדי להגדיר סף זה, יהיה צורך לפתח מגוון של פעילות רכב נורמאלית תחת מצבים שונים ולאחר מכן לקבוע מה מהווה נהיגה רגילה עבור תרחיש נתון.

הסטה רוחבית בתוך נתיב הנסיעה: קטגוריה זו כוללת אירועים שבהם סטיית הרכב בתוך נתיב נסיעתו או כיוון נסיעתו לימין או לשמאל תוביל לסטייה מנתיב אלא אם הנהג ישנה את מסלול נסיעתו. תחליף תאונה יחיד יכול לשמש למדידת הסטה רוחבית כיוון שהסיכון היחיד הוא עזיבת

נתיב הנסיעה של כלי הרכב. התחליף שנבחר להערכת הסטה רוחבית הוא מרחק לסטייה מנתיב (distance to lane departure - DTLD). ניתן גם להשתמש בזמן לסטייה מנתיב (time to lane departure - TTLD) כמדד חלופי. הגבול התחתון הוא הנקודה שבה נהיגה רגילה מסתיימת, אשר צריך להיקבע במחקר המלא. הגבול העליון להסטה רוחבית וסטייה מנתיב הוא כאשר הצמיגים החיצוניים של הרכב מגיעים למרחק סובלנות מסוים מקו הנתיב או גבול הנתיב. מרחק סובלנות נחוץ משום שמערכות עקיבת נתיב יכולות לאתר רכב בתוך הנתיב שלו רק עד לרמה מסוימת של דיוק. כתוצאה מכך, מרחק הסובלנות משקף חוסר ודאות באיתור הרכב. מרחק לסטייה מנתיב דורש לדעת את מיקום הרכב יחסית לנתיב שלו. הדרך היחידה לקבל את מיקום הרכב בנתיב יהיה בעזרת מערכת עקיבת נתיב המספקת רמה דיוק מתאימה. מערכת עקיבת נתיב לא צפויה לעבוד בדרכי חצץ או במצבים בהם קווי הנתיב או סימוני נתיב אחרים אינם נוכחים (לדוגמה, דרך מכוסה בשלג).

הסגת גבול נתיב: קטגוריה זו כוללת אירועים שבהם רכב יוצא מנתיב הנסיעה המקורי שלו ופולש לתוך נתיב נסיעה סמוך. בנתיב סמוך זה יכולים להיות כלי רכב אחרים שנוסעים באותו הכיוון או בכיוונים מנוגדים. הסגת גבול מוגדרת כצמיג אחד או יותר הפולשים או חוצים את קצה קו הנתיב. הסיכון העיקרי להסגת גבול לנתיב סמוך הוא התנגשות צידית או חזית-אחור עם רכב אחר. הסיכון העיקרי להסגת גבול לנתיב נגדי הוא תאונה חזיתית או תאונה צידית עם כלי רכב בכיוון הנגדי. תחליף התאונה להתנגשות חזיתית, צידית, או חזית-אחור עם כלי רכב אחר הוא זמן להתנגשות (TTC). ניתן גם לחשב מרחק להתנגשות (DTC). רמת הסיכון ניתנת להגדרה באמצעות ערך סף כנקודה שבה תמרון ההגה להתחמקות נדרש כדי להימנע מהתנגשות.

אם הרכב אינו נתקל ברכב אחר לאחר הפלישה לנתיב נסיעה אחד או יותר, הסיכון הסמוך הבא הוא עזיבת הדרך. תחליף התאונה במקרה זה יהיה זמן לקצה נתיב (time to lane edge - TTL) או מרחק לקצה נתיב (distance to lane edge - DTLE). הגבול התחתון הוא הסף להסטה רוחבית כפי שתואר לעיל. הגבול העליון: הסף שבין הסגת גבול נתיב והסגת גבול שול הוא הנקודה שבה הצמיגים החיצוניים של הרכב מגיעים למרחק סובלנות מסוים מקו הנתיב או גבול נתיב המפריד בין נתיב סמוך ושול, בדומה למה שתואר בהסטה רוחבית. הסף שבין הסגת גבול נתיב ותאונת סטייה מנתיב הוא הנקודה שבה הרכב פוגע ברכב אחר. היכולת לקבוע זמן או מרחק להתנגשות או לקצה הנתיב תלויה במידת הדיוק של מערכת עקיבת נתיב והדיוק והמרחק שבו מערכת הרדאר ברכב יכולה לעקוב אחר אובייקטים בדרכו.

הסגת גבול שול: קטגוריה זו כוללת אירועים שבהם רכב יוצא משטח המיסעה לשול סלול או לא סלול. תופעה זו מכוננת סטייה מהדרך או ירידה מהדרך. יכולים להיות מספר סיכונים ברגע שהרכב עוזב את שטח המיסעה. המפגע הראשון שבו נתקלים כאשר עוזבים את דרך הנסיעה הוא השול עצמו. סכנות שול ספציפיות שעשויים להתקל בהן כוללות הבדלי חיכוך בין שטח המיסעה והשול הלא סלול וחריגות אחרות בשול (לדוגמה, מצע משוחרר, שוליים בוציים) שעלולים להוביל לאובדן שליטה או התהפכות של הרכב. הסיכונים שונים עבור שול סלול לעומת לא סלול. הסגת גבול לשול סלול מציגה רמת סיכון נמוכה יותר, בהעדר סיכונים, בהשוואה להסגת גבול לשול לא סלול, אפילו אם זמן להתנגשות או זמן לקצה השול (time to shoulder edge - TTSE) הוא זהה. הבדלי החיכוך בין השול הלא סלול והדרך הסלולה מהווה סיכון לאובדן שליטה בכל עת שהרכב

יורד באופן חלקי או מלא מהמיסעה הסלולה. ניתן לטפל בזאת על-ידי סיווג הסגת הגבול לרמות שונות של סיכון או התייחסות לזמן לקצה שול סלול כתחליף תאונה אחד וזמן לקצה שול לא סלול כתחליף אחר.

קשה לקבוע תחליף תאונה לאובדן שליטה בשול כיוון שהוא אינו מתאים לכל אחד מהמדדים האופייניים המשמשים כתחליפי תאונה. שינויים בהיקף מסוים של זווית ההיגוי או שיעור הסבסוב יכולים לשמש לזיהוי אובדן השליטה, אבל הם אינם תחליפי תאונה כשלעצמם. ייתכן שיהיה צורך להגדיר את רצף האירועים הצפוי ביותר הבא (התהפכות, חזרה לנתיב הנסיעה, חציית קו האמצע) ולאחר מכן להשתמש בתחליפי התאונה המתאימים עבור אירוע זה.

פוטנציאל ההתהפכות של הרכב הוא תחליף התאונה כאשר התהפכות הינה אפשרות. הסיכון של כלי רכב להיות מעורב בהתהפכות תלוי במספר גורמים, כולל מרכז הכובד של הרכב, עיצוב הרכב, חיכוך בין המיסעה והצמיגים, נתוני היגוי, גיאומטריית כביש, ומהירות רכב. כתוצאה מכך, קביעת הסבירות שרכב יתהפך יכולה להיות די מסובכת.

הסיכון הבא בו נפגשים כאשר עוזבים את נתיב הנסיעה הוא התנגשות בעצם קבוע. התנגשות זו יכולה להתרחש בשול או כאשר הרכב עוזב את השול. כאשר עצם קבוע (עץ, תיבת דואר, מעקה בטיחות ועוד) מציג את הסיכון המידי ביותר, תחליף התאונה המוצע הוא זמן להתנגשות (TTC) או מרחק להתנגשות (DTC).

סיכון נוסף כאשר עוזבים את הדרך הוא שברגע שרכב עוזב את השול, הוא עלול להיתקל בשיפוע שלילי, שעלול לגרום להתהפכות. כאשר הסיכון העיקרי הוא עזיבת השול, תחליף התאונה המוצע הוא זמן לקצה השול (Time to shoulder edge - TTSE). גם סיכון להתהפכות יכול לשמש כתחליף.

רמת הסיכון עבור רוב תחליפי התאונה המפורטים לעיל יכולה להיות מוגדרת על ידי פעולות שיש לנקוט כדי להימנע מתאונה. הנקודה בין אירוע בסיכון נמוך יותר לאירוע בסיכון גבוה יותר עשויה להיות מוגדרת כנקודה שבה נדרשת פעולת התחמקות משמעותית כדי להימנע מתאונה. ברגע שרכב עוזב את הדרך ויורד לשול, אפשרויות ההתאוששות הן בלימה עד לעצירה לפני עזיבת השול או לפני פגיעה בעצם, או סיבוב ההגה בחזרה אל נתיב הנסיעה המקורי.

הגבול התחתון הוא הסף להסגת גבול נתיב כפי שתואר לעיל. הגבול העליון: הסף שבין הסגת גבול שול ותאונת סטייה מנתיב הוא כאשר הרכב פוגע פיזית בעצם או פיזית מתהפך (תאונה), אשר מוגדר כ $TTC \text{ or } TTSE = 0$. היכולת לחשב זמן להתנגשות מוגבלת בשל רמת הדיוק של ה-GPS המשמש לקביעת המיקום המרחבי של הרכב. מערכת הרדאר ברכב תאפשר עקיבה ואחסון של מידע עבור חמשת העצמים הקרובים ביותר לרכב.

תאונת סטייה מנתיב: תאונה מוגדרת כאירוע שבו רכב פוגע ברכב אחר או בעצם ($TTC=0$) או ($TTSE=0$). רכב המתהפך פעם אחת או יותר גם נחשב לתאונה. תאונה גם יכולה להיות מוגדרת כמצב שבו הרכב עוזב את המיסעה ונאלץ לעצור באופן לא מתוכנן. למשל, החלקה מהדרך במהלך אירוע מזג אוויר חורפי ואז החלקה עד לעצירה במפרדה יכולה להיחשב כתאונה. קטגוריה זו כוללת את כל תאונות הסטייה מנתיב, בין אם הן מדווחות או לא מדווחות ע"י המשטרה, שנצפו במחקר נהיגה טבעית. גבול תחתון הוא הסף להסגת גבול נתיב או שול כפי שתוארו לעיל. אין גבול עליון. זיהוי סטייה מנתיב ידרוש הגדרת טריגרים לקנימטיקה של הרכב המספקים אינדיקציות

לכך שאירעה תאונה (למשל, האטה פתאומית). צפוי כי רוב התאונות יזוהו. עם זאת, זיהוי תאונות יהיה תלוי בספים שבשימוש, ולפיכך, חלק מהתאונות (לדוגמה, החלקה של הרכב מהדרך במהלך מזג אוויר חורפי) לא ייכללו.

בחירת ערכי סף לאירועים

במחקר "100 כלי רכב" (Dingus et al, 2006) נבחרו משתנים וטריגרים רלוונטיים לקביעת ערכי סף המבדילים בין אירועים קריטיים ברי תוקף ושאינם ברי תוקף. המחקר השתמש בניחות רגישות להערכת מיקום של טריגרים ברמות שונות. אם הטריגר מוגדר נמוך מדי (טעות מסוג I, או רגישות נמוכה יותר), אחוז גדול יותר של אירועים ממשיים נבחר, כמו גם מספר גדול יותר של "לא אירועים" (אזעקות שווא). התוצאה היא זמן צמצום נתונים ארוך יותר ופחות יעיל. לחלופין, אם הטריגר מוגדר גבוה מדי (טעות מסוג II), "לא אירועים" נוטים פחות להיבחר, אך מספר גדול יותר של אירועים בפועל עלולים להתפספס גם כן.

המחקר השתמש בתהליך איטרטיבי כדי לבחור טריגרים עבור אירועים ברי תוקף. הטריגרים נקבעו לרגישות נמוכה, ותהליך צמצום הנתונים שימש להערכת האירועים שנבחרו. החוקרים השתמשו בהתפלגות נורמאלית כדי לתאר כיצד ניתן למזער טעויות מסוג I ו-II בהתבסס על תיאוריית גילוי אותות. הטריגרים הסופיים עבור המשתנים הקשורים לאירועי סטייה מנתיב כללו: האצה לרוחב $0.7g \leq$; האצה לאורך $0.6g \leq$; האצה לאורך $0.5g \leq$ וזמן להתנגשות קדמית $TTC \geq 4s$; האטה לאורך $0.4g$ עד $0.5g$, וזמן להתנגשות קדמית $TTC \geq 4s$, ומרחק להתנגשות $> 100ft$; ושיעור סבסוב $\leq |4^\circ|$ שינוי בכיוון בתוך חלון זמן של 3 שניות.

כאמור, Hallmark et al (2011) השתמשו בנתוני הנהיגה הטבעית לבחירת מדדים חלופיים לתאונות של סטייה מנתיב, כאשר הופקו 22 אירועי סטייה מנתיב ימני ו-51 אירועי סטייה מנתיב שמאלי עבור דרכים בין-עירוניות חד-מסלוליות. אירוע הוגדר כמצב שבו הרכב יצא מנתיבו ב-0.1 מטר או יותר בשלב מסוים.

כל האירועים נחשבו כהסטות גבול מכיוון שהרכב יצא מנתיבו בכל המקרים, אך לא נאלץ לבצע תמרון התחמקות ולא איבד שליטה בשול. סביב כל אירוע, הופקו הנתונים הרציפים. הנתונים שלגביהם לא התרחש אירוע כונו נתוני "נהיגה רגילה". מספר משתנים נבדקו כדי לברר אם הם יכולים לשמש לקביעת ערכי סף בין נתוני נהיגה רגילה לבין אירועי סטייה מנתיב. הערך החיובי והשלילי המקסימאלי לכל אירוע הופקו עבור משתני רכב קינמטיים כגון: מהירות רוחבית, תאוצה רוחבית, קצב סבסוב, תאוצת קדימה, קצב גלגול, וקצב עלרוד.

הערכים השליליים והחיוביים המרביים עבור משתני רכב קינמטיים שונים של אירועי סטייה שמאלה וסטייה ימינה הושוו לכ-105,400 נתוני נהיגה רגילה (ללא אירועים). נתונים עבור כל משתנה קינמטי מנתוני הנהיגה הרגילה הושוו גרפית לנתונים של אירועי סטייה מנתיב. נעשה שימוש במבחן דירוג (Wilcoxon Rank Sum Test) כדי לקבוע האם נתוני הנהיגה הרגילה שונים סטטיסטית מנתוני האירועים. בכל המקרים, למעט קצב סבסוב נמוך מקסימאלי עבור סטיות מנתיב ימינה, המבחן הראה כי הנתונים היו שונים סטטיסטית. למרות שההתפלגויות עבור רוב המשתנים נקבעו כשוונות ברמת מובהקות של 95%, קיימת מידה ניכרת של חפיפה, המצביעה על

קושי בקביעת ערכי סף נמוכים מספיק כדי לכלול את כל האירועים אך עדיין גבוהים מספיק כך שכמות גדולה של "לא אירועים" לא ייכללו בהערכה.

שיטות עיבוד נתוני הנהיגה הטבעית

לפי Hallmark et al (2011), לניתוח נתוני ה"נהיגה הטבעית" קיימות מספר גישות אנליטיות וביניהן:

- גישת כריית נתונים המשתמשת במודלי עץ לסיווג ולרגרסיה;
- שיטת ה- (OR) odds ratio - יחס יחסים ורגרסיה לוגיסטית;
- רגרסיה לוגיסטית עבור נתונים בקורלציה שמסבירה דגימה חוזרת בקרב תצפיות (למשל, דגימה חוזרת לאותו נהג, נסיעה);
- ניתוח סדרות עתיות.

כל אחת מהגישות משתמשת בנתונים שנדגמו בדרך אחרת. מטרת הניתוח היא לזהות אלו גורמי דרך, נהג, רכב וסביבה הם המשתנים המסבירים הטובים ביותר בניבוי סבירות גבוהה של התנהגות לא רצויה (כגון: סטיות מנתיב) ותאונות (Hallmark et al, 2011).

לפי Hallmark et al (2011) הנתונים שכללו אירועי סטייה מנתיב נדגמו כנתונים רציפים בגישות הניתוח מסוג כריית נתונים וסדרות עתיות וסוכמו על-פי אירוע עבור השיטה המשתמשת ביחס-יחסים. במקרה זה, נתונים עבור בלוק של זמן סביב סטייה מנתיב לצד שמאל או ימין סוכמו כ"אירוע". נקודת ההתחלה עבור כל סטייה מנתיב נקבעה על-ידי זיהוי הנקודה בה הרכב החל לסטות ממסלולו לכיוון קצה הנתיב. נקודת הסיום של האירוע הייתה הנקודה בה הרכב חזר לנתיב ותיקן את דרכו. זמני התחלה וסיום נרשמו בנקודות הללו, ונתונים רציפים עבור כל אירוע הופקו. אירוע סטייה מנתיב כלל את זמן הסטייה מהדרך או הנתיב, זמן מחוץ לדרך או הנתיב, וזמן החזרה לנתיב הנסיעה המקורי. כאמור, נתונים שלא כללו סטייה מנתיב שימשו כדי לייצג נתוני נהיגה רגילה. גם נתוני הנהיגה הרגילה נדגמו כנתונים רציפים בגישות הניתוח מסוג כריית נתונים וסדרות עתיות וסוכמו כתקופה בדומה לאירוע עבור שיטת הניתוח יחס-יחסים.

בגישת כריית נתונים המשתמשת במודל עץ לסיווג ולרגרסיה ובשיטת יחס היחסים ורגרסיה לוגיסטית נבנו מודלים נפרדים לסטייה מנתיב ימינה ושמאלה. למרות שגודל המדגם הזמין היה מוגבל, שתי השיטות הביאו לתוצאות דומות. שתיהן הצביעו על כך שרדיוס העקום, גיל הנהג, וסוג השול היו רלוונטיים בהסברת סטיות מנתיב. רגרסיה לוגיסטית גם הראתה כי סטיות מנתיב, הן שמאלה והן ימינה, נטו יותר להתרחש בלילה ונטו להתרחש פחות ככל שרוחב הנתיב גדל. המודל לסטייה מנתיב שמאלה הצביע על כך כי גברים נהגים נטו יותר מנשים נהגות להיות מעורבים בסטיות מנתיב, בעוד שהמודל עבור סטייה מנתיב ימינה הראה כי סטיות מנתיב נוטות יותר להתרחש בקטעי דרך עם צפיפות גבוהה יותר של תאונות סטייה מנתיב ועבור נהגים שנהגים לזמן ממושך יותר 10 מייל לשעה או יותר מעל המהירות המותרת.

מציינים (Hallmark et al, 2011) כי נתונים על מקרים אמיתיים שהובילו לתאונות סטייה מנתיב או לאירוע שלא הסתיים בתאונה יהיו יקרי ערך בניתוח הבנה טובה יותר של אלו גורמים שליליים עשויים להוביל לתאונות ולכמעט תאונות, כמו גם הגורמים המובילים לאירועים ותוצאות חיוביים יותר. ההבנה מדוע תאונות לא מתרחשות מניבה מידע שימושי בדומה להערכה

של מדוע הם קרו. בשני המקרים, יכולים להיבחן הגורמים שהביאו את הרכב לעזוב את הדרך, הקשר בין גורמי הדרך, הסביבה, הרכב והאדם, והאירועים והתוצאות שלאחר מכן. Dingus et al (2006) דיווחו כי ניתוח של מצבי כמעט תאונה ממחקר הנהיגה הטבעית היה חשוב מכיוון שהוא הוכיח שהנהגים מבצעים בהצלחה תמרוני התחמקות.

1.2.4. היבטים נוספים

מספר מגבלות בגישת הנהיגה הטבעית חייבות להילקח בחשבון. חסרון ראשון ומשמעותי הוא, שבהגדרה, במחקר הנהיגה הטבעית אין שליטה ניסויית במשתנים השונים שעשויים להשפיע על ההתנהגות של משתמש הדרך. משמעות הדבר היא כי נתוני נהיגה טבעית מצביעים על מתאם בין משתנים מסוימים והתנהגות משתמש הדרך, אך לא על קשרים סיבתיים חד-משמעיים.

שנית, ההנחה היא כי בדרך כלל הנהגים במחקר הנהיגה הטבעית מתנהגים כפי שהם בדרך כלל, כיוון שאחרי כמה זמן הם שוכחים שהם משתתפים במחקר וכי הם נצפים כל הזמן. ישנן אינדיקציות חזקות מהניסיון האמריקאי שזה מה שקורה בפועל, אך עד כה, אין הוכחה מדעית קפדנית לכך.

הנושא השלישי הוא שהנהגים במדגם המחקר משתתפים על בסיס התנדבותי. לכן, לא ניתן לשלול את האפשרות שקיימת הטיית בחירה עצמית ושהמתנדבים שונים בהיבטים מסוימים מהלא משתתפים. לפיכך, ההתנהגות הנצפית לא תמיד יכולה לייצג את כל האוכלוסייה. עם זאת, ניתן לבסס ולקחת בחשבון את הכיוון והגודל המשוער של הטיה כזו על ידי שימוש בשאלוני רקע מתוכננים בקפידה.

חסרון מעשי אחרון הוא שמחקר הנהיגה הטבעית בקנה מידה מלא, כלומר כולל איסוף של נתוני וידאו שונים, הוא יקר יחסית ודורש זמן רב. כדי להפוך מחקר נהיגה טבעית לחסכוני, חשוב לזהות את שאלות המחקר שרלוונטיות לבעלי העניין השונים ולטפל בכמה שיותר משאלות מחקר אלה ככל האפשר במחקר נהיגה טבעית אחד (Van Schagen et al, 2011).

במחקרם, Hallmark et al (2011) מצאו כי למרות שההתפלגויות עבור מרבית המשתנים נקבעו להיות שונים ברמת מובהקות של 95%, הייתה מידה משמעותית של חפיפה. דבר זה מצביע על הקושי בקביעת ערכי סף נמוכים מספיק כדי לכלול את כל האירועים אך עדיין גבוהים מספיק כך שכמות גדולה של נתונים שאינם אירועים לא יוערכו. למרות שלא היו מספיק נתונים כדי לקבוע כיצד ערכי הסף צריכים להיות מוגדרים, התוצאות הראשוניות של Hallmark et al הראו כי עבור סטייה מנתיב שמאלה, קצב גלגול, קצב סבסוב, תאוצת צד ומהירות צידית הם מועמדים טובים לזיהוי אירועים. עבור סטיות מנתיב ימינה, התוצאות הראו כי קצב סבסוב, תאוצת צד ומהירות רוחבית הם מועמדים טובים לזיהוי אירועים.

עם זאת, הנתונים הזמינים לא תמיד מאפשרים לחוקרים לערוך ניתוח להערכת הקשר שבין המדדים החלופיים לבין תאונות. כך, במחקר של Hallmark et al (2011), בסיס הנתונים של המכון לתחבורה בוורגיניה כלל גם תאונות וגם אירועי סטייה מנתיב, אולם ברגע שהנתונים חולקו לפי סוג דרך, הנתונים לא הספיקו לביצוע הערכה.

1.2.5. סיכום

"נהיגה טבעית" היא שיטת מחקר שהתפתחה לאחרונה הצופה בהתנהגות משתמשי הדרך בהקשר של נהיגה יומיומית. התצפיות מתרחשות במהלך נסיעות יומיומיות שגרתיות. על מנת לאסוף את הנתונים הנדרשים, המכונית מצוידת במכשירים שונים שרושמים, ללא הפרעה, את תמרוני הרכב (כגון מהירות, תאוצה/האטה, כיוון), התנהגות הנהג (כגון תנועות עיניים, ראש ויד) ותנאים חיצוניים כמו מאפייני הכביש, תנועה, מזג אוויר וכו'.

המטרה העיקרית של מחקרי הנהיגה הטבעית הינה לתעד אירועים בדרגות שונות: אירועים בנהיגה, מצבי כמעט תאונה ותאונות. שילוב של צפייה בהתנהגות משתמשי הדרך בהקשר התנועה היומיומית יחד עם ידע אודות היכולות והמגבלות של מערכת עיבוד המידע האנושית מאפשרים זווית ראייה רחבה יותר על מערכת התנועה ככלל. שילוב זה מאפשר הבנה טובה יותר של בעיות בטיחות בדרכים ומספק תיאור טוב של התנהגות הנהג במצבים נורמאליים, במצבים קריטיים ואפילו בזמן תאונה. לפיכך, שיטת ה"נהיגה הטבעית" יכולה לספק תובנה מעמיקה יותר לגבי כיצד ומתי מצבים מסוכנים מתרחשים ומכאן, האפשרויות להפיכת מערכת התנועה לבטוחה יותר.

נתוני הנהיגה הטבעית יתעדו תאונות, כמעט תאונות, אירועים חריגים בנהיגה וגם נהיגה רגילה. תדירות האירועים החריגים והכמעט-תאונות גדולה יותר מתדירות התאונות ולפיכך, ניתן להשתמש באירועים ובכמעט-תאונות כתחליפים לתאונות. השימוש בתחליפים יאפשר גם ללמוד מה קורה לפני ולאחר האירועים.

עם זאת, התצפית הרציפה של הנהיגה הטבעית מייצרת בסיסי נתונים גדולים, כאשר בתוכם קיים צורך לזהות את האירועים הרלוונטיים לניתוח. זיהוי אירועים חריגים בנהיגה הינו מטלה מורכבת, המחייבת בדיקה פרטנית של מצבים שונים בנהיגה ובהמשך, "תרגום" של מאפייני המצבים שזוהו לערכים הנמדדים ברכב. ישנה שאיפה ליצירת שיטה אוטומטית לסימון אירועים מעניינים להמשך הניתוח.

במחקרים רבים פותחו דוגמאות למדדים תחליפיים לתאונות. עם זאת, בחלק ניכר מהמקרים לא קיים בסיס מוצק, בצורת קשרים סטטיסטיים מובהקים, בין תאונות מסוג מסוים לבין תחליפי תאונות אלה. מניחים כי סוגים של קשרים כאלה יכולים להיגזר מניתוח של נתוני הנהיגה הטבעית.

בניתוח נתוני הנהיגה הטבעית קיים קושי להבדיל בין מצב נהיגה רגילה לבין אירועים בנהיגה. ערכי הסף בזיהוי האירועים צריכים להיות נמוכים מספיק כדי לכלול את כל האירועים אך עדיין גבוהים מספיק כך שכמות גדולה של נתונים שאינם אירועים לא תיבחר לניתוח.

עד כה, לא נמצאו מחקרים עם בחינת הקשר בין אירועי נהיגה חריגים (לפי נתוני הנהיגה הטבעית) למאפייני תשתית.

1.3. "הקופסא הירוקה"

1.3.1. רקע כללי - מערכות IVDR

מערכת הרושמת נתוני נסיעה, מעבדת אותם, והמאפשרת גישה אליהם והפקת מידע רלוונטי לניהול בטיחות מכונה בספרות כ-"מערכת לרישום נתוני נסיעה" (IVDR - in vehicle data recorder).

המערכת הראשונה שפותחה לתייעוד נתונים ברכב נקראה "רשם נתוני אירוע" (Event Data - EDR Recorder), בדומה ל"קופסא השחורה" הקיימת במטוסים. המערכת תיעדה תאונות, כאשר המידע המופק ממנה שימש לניתוח הסיבות אשר גרמו לתאונה.

הניסיונות הראשוניים עם המערכת בוצעו על ידי NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) בארה"ב, בשנות ה-70. מערכת זו יצאה לשימוש מסחרי בשנות ה-80 בצפון אמריקה. כיום משמשת המערכת יצרני רכב, חברות ביטוח, סוכנויות לאכיפת החוק וחוקרים. מערכת זו יעילה לניתוח נתוני תאונות אך המידע המאוחסן בה קצר יחסית (מספר שניות) לפני, במהלך ואחרי התרחשות התאונה (Toledo, 2011). המערכת אינה מתעדת התנהגות שאיננה קשורה לאירועים חריגים.

כיום, מערכות IVDR מוכרות כמוצר מדף, אותו ניתן להרכיב ברוב הרכבים (על-ידי מתקין מורשה) והיא אינה דורשת תפעול מיוחד. המערכת מודדת ורושמת נתונים הקשורים לאופן נהיגת הנהג ולתנועת הרכב, כגון: מהירות ותאוצה אורכית (האצה ובלימה) ורוחבית (פניות). נתונים אלה מועברים אל מוקד, בזמן אמת או כעבור פרק זמן מסוים. לאחר הגעתם למוקד מעובדים הנתונים וכך המערכת מאפשרת להפיק מהנתונים מידע לגבי אופן הנהיגה. מידע זה ניתן להפצה למשתמש הקצה באמצעים שונים (לדוגמה: דרך האינטרנט).

למערכות כאלה קיימות מספר צורות, חלקן אוספות ושולחות את המידע למרכז הנתונים בלבד, וחלקן נותנות גם משוב לנהג בזמן אמת. על פי עקרון הפעולה, מערכת חיישנים אוספת נתונים ממערכות שונות ברכב (בילום, הגה, גז/תאוצה, מד אוץ), משקללת אותם על פי פרמטרים קבועים מראש ומבטאת אותם בגרף התנהגותי. במערכות מסוימות, מופיע גרף כתחום צבע (ירוק - נהיגה נכונה, צהוב - נהיגה גבולית ואדום - נהיגה מסוכנת). את הגרף ניתן להוציא ממרכז הנתונים ואף לקבל התרעה סלולארית לסמכות ממונה, כאשר מאובחנת נהיגה מסוכנת.

בשנים האחרונות פותחו מספר סוגים של מערכות IVDR. המערכות נבדלות זו מזו ביכולות שלהן אך את המידע אותו הן אוספות ניתן לסווג בדרך כלל למספר קטגוריות (בכור ואחרים, 2012):

1. תנועת הרכב, הכוללת תאוצה צידית ואורכית ומהירות הרכב;
2. בקרה על הנהג, הכוללת משתנים כגון משנק המנוע, בלימה וזווית הגלגל;
3. מאפיינים של המנוע, כמו סיבובים לדקה;
4. מצב מערכות הבטיחות ברכב, כמו כריות אוויר, חגורות בטיחות, מערכת למניעת נעילת גלגלים ובקרת כוח המשיכה;
5. מיקום הרכב באמצעות GPS;

6. זמן ;

7. תיעוד חזותי בתוך הרכב ומחוצה לו (Toledo and Lotan, 2006).

כיום קיימים בשוק בישראל מספר סוגים של מערכות כאלה. כמו כן, בישראל מקודם משנת 2008 תהליך חקיקה שיחייב התקנת מערכות מסוג זה באוטובוסים זעירים. במסגרת התהליך נכתב תקן ישראלי מקורי (ת"י 5905 חלקים 1-3) המסדיר את הגדרת המערכת על מנת לחייבה בחוק. תקן זה פורסם בסוף שנת 2010. נכון להיום, אין עדיין תקנה בנושא.

1.3.2. שימושים מחקריים בנתוני "הקופסא הירוקה"

בפרויקט שמובילה עמותת "אור ירוק" כבר לאורך מספר שנים, מבוצע איסוף נתוני "נהיגה טבעית" בעזרת "קופסאות ירוקות" המותקנות ב-200 כלי רכב. בנתונים שנאספו קיים ניטור רציף במהלך הנסיעה הכולל נתונים על מיקום כלי הרכב, מהירות הנסיעה, תאוצות ובלימות של הרכב ועוד.

מערכת זו משמשת לרישום ועיבוד נתוני נהיגה בזמן אמת, במטרה לסווג ולתת חיווי על דפוסי נהיגה ולהתריע כאשר מזוהה דפוס נהיגה בעייתי. המערכת אוספת נתונים באמצעות חיישנים ממערכות הרכב השונות כגון: היגוי, בלימה, ספידומטר, גז וצריכת דלק.

המערכת משקללת את נתוני החיישנים במטרה לסווג את דפוס הנהיגה של הנהג. המערכת מעבירה נתונים שהיא מעבדת למרכז בקרה חיצוני, אשר יכול לשמש גורמים שהם בעלי עניין ברמת הבטיחות של נהג הרכב (לדוגמה, הורים לנהג צעיר או מנהל צי רכב) ובכך ניתן לתת משוב לנהג. בנוסף, המערכת מסוגלת לתת לנהג גם משוב מיידי בתוך הרכב (איור 1.3).



איור 1.3. "הקופסא הירוקה" ברכב.

Figure 1.3. "Green box" in a vehicle.

חשיבותה של המערכת היא באיתור והתרעה על מצבי סיכון הנגרמים מאופי הנהיגה של נהג הרכב. כך למשל המערכת יכולה לזהות מצבים של האצה גבוהה, ביצוע עקומות במהירות גבוהה, בלימות חירום. זיהוי של מצב סיכון מוביל להתרעה חזותית/קולית לנהג ו/או לגורם חיצוני היכול ליצור קשר מיידי עם הנהג (בכור ואחרים, 2012).

המערכת מתעדת את התנהגות הנהג גם שלא במקרים חריגים כמו תאונות. בכך ניתן להשתמש במערכת גם לצרכי מחקר, חינוך והדרכה במטרה לשפר את הבטיחות.

מספר מחקרים שנעשו בארץ בשנים האחרונות בדקו כיצד המשוב שהתקבל מהמערכת השפיע על התנהגותם של הנהגים וכתוצאה מכך על הבטיחות (Musicant et al, 2007; Prato et al, 2010; Toledo, 2011; Toledo and Lotan, 2006). במחקרים אלה נעשה שימוש במערכת המזהה והמתעדת את תמרוני הנהיגה, ומהנתונים הללו מחשבת מדדי סיכון המצביעים על מידת הבטיחות של הנסיעה.

במחקר של Toledo et al (2008) מפורטת המסגרת הכללית של המערכת, המורכבת מארבע משימות שונות שהן: מדידה, זיהוי, אבחון ומשוב.

א. מדידה - המערכת אוספת את המידע הבא:

1. זיהוי הרכב והנהג - נהגים מזוהים באמצעות מפתח מגנטי.
2. זמני תחילת וסיום הנסיעה.
3. תאוצות אורכיות ורוחביות, כאשר התאוצות נמדדות בתדירות דגימה של 40 מדידות בשנייה.
4. מהירות הרכב.
5. מיקום הרכב (באמצעות GPS).
6. המערכת מסוגלת, בעת הצורך, לתעד גם פרמטרים הקשורים במנוע.

ב. זיהוי - המידע הגולמי שהמערכת מפיקה מעובד באמצעות אלגוריתמים של זיהוי תבנית כדי לצמצמו לתמרונים בעלי משמעות לאפיון התנהגותו של הנהג.

לאחר עיבוד המידע הגולמי, המערכת מזהה ומסווגת למעלה מ-20 סוגי תמרונים, כגון: שינויי נתיב עם וללא האצה, בלימה פתאומית, האצות חזקות ומהירות מופרזת ועוד. התמרונים האלה מסווגים לפי כיוונם (לימין או לשמאל) ולשלוש קטגוריות של חומרה המבוססות על פרמטרים שונים כמו תדירות התמרון ומידת פתאומיות השינוי במהירות ובתאוצה וכמו כן, המהירות בה התבצע התמרון.

ג. אבחון - התמרונים שזוהו וסווגו משמשים לחישוב סטטיסטי ולחישוב מספר מדדים ייחודיים לנהג ולרכב, לפי המרכיבים הבאים:

1. אינדקס סיכון אישי של הנהג - זהו אינדקס מספרי שמטרתו לקבוע את מידת הסיכון שהנהג יהיה מעורב בתאונות בפרק זמן נתון. האינדקס מחושב כפונקציה קווית של מספר וחומרת התמרונים השונים שהנהג ביצע. זמן הנהיגה משמש לנירמול כמות התמרונים, לפי הנוסחה הבאה:

$$R_{it} = \frac{\sum_j \sum_s \beta_{js} N_{ijst}}{DT_{it}}$$

כאשר

R_{it} - אינדקס סיכון לנהג i במהלך תקופה t;

DT_{it} - זמן הנסיעה הכולל של נהג i בתקופה t ;

N_{ijst} - מספר התמרונים מסוג j ודרגת חומרה s של נהג i במהלך תקופה t ;

β_{js} - משקלות התמרונים השונים.

אינדקס הסיכון מיוצג בטווח שבין 0 ל-10, כאשר 10 מייצג את התמרונים האגרסיביים ביותר.
2. סיווג סיכון - על בסיס אינדקס הסיכון, הנהגים מסווגים לשלוש קטגוריות התנהגות: מתונה, בינונית ומסוכנת.

3. אינדקס סיכון ברמת הנסיעה - מדדי סיכון וסיווגים המחושבים עבור כל נסיעה בנפרד.

4. אינדקס מהירות - ערך מספרי המשקף את התנהגות הנהג במהירויות המופרזות ותלוי במשך הזמן ובמידה בה עבר מעל למהירות המותרת. למרות שמהירות מופרזת נלקחת בחשבון בחישוב מדדי הסיכון הכלליים, מאחר ומהירות הנסיעה מהווה גורם חשוב בניבוי הסיכוי למעורבות בתאונה, נקבע בנוסף אינדקס נפרד למהירות.

5. אינדקס לקביעת צריכת דלק צפויה.

6. סטטיסטיקות הקשורות בחשיפה, כמו המרחק ומשך הזמן בו נסע הנהג, שעה ויום בשבוע וחלוקה מרחבית (נסיעה עירונית, בין עירונית ובסמוך לכביש).

ד. משוב - קיימות שתי צורות אפשריות של משוב: משוב בזמן אמת דרך התרעה המתקבלת ברכב ומשוב באתר אינטרנט שבו מופקים דו"חות המסכמים ומשווים מידע ברמת הנהג, הרכב או הצי הנבחן (Toledo et al, 2008).

במחקר בו הותקנה המערכת ברכבם של 33 נהגים (27 נהגו במשך כל תקופת המחקר), בשלב ראשון (שנמשך 1-2 חודשים), הנהגים לא קיבלו פידבק מהמערכת ובשלב השני (שנמשך 4-5 חודשים) ניתן פידבק אותו הם יכלו לראות באתר אינטרנט בו תועד המידע שהתקבל מהמערכת.

הנתונים שנאספו בשלב הראשון שימשו כדי לבדוק את הקשר בין מדדי הסיכון לבין נתוני תאונות היסטוריים. תוצאות המחקר הראו קשר מובהק בין המעורבות של נהגים בתאונות בעבר, לפני התקנת המערכת, לבין מדדי הסיכון אותן הציגה המערכת עבור אותם נהגים. ההתאמה בין שתי קבוצות הנתונים אפשרה את השימוש במדדי הסיכון בנהיגה כאינדיקטורים לסיכון למעורבות בתאונה.

בנוסף, עבור 27 הנהגים שהשתתפו במחקר עד סופו, נמצא קשר חיובי בין החשיפה למשוב מהמערכת לבין אינדקס הסיכון: ממוצע מדדי הסיכון בשלב הראשון של הניסוי היה 2.5 וירד ל-1.55 בחודש הראשון של השלב השני, וירידה זו נשמרה לאורך שני החודשים שלאחריו. למרות תוצאות חיוביות אלה, בחודש החמישי, מדד הסיכון חזר לרמתו ההתחלתית ואף למעלה מכך.

מהמחקר עולה כי השימוש במערכת זו, בשילוב עם הפעלת כוח אדם מתאים אשר מבצע בפועל את ניטור הנהיגה, מסוגל להפחית באופן משמעותי את שיעור התאונות, אך ללא ליווי כוח אדם מתאים, המערכת לא תהיה יעילה (Toledo and Lotan, 2006).

במחקר נוסף שבחן גם הוא את הקשר בין מדדי הסיכון בנהיגה לפי המערכת לבין המעורבות של הנהג בתאונות בפועל ואת השפעת הפידבק מהמערכת על הנהגים, נאספו נתונים של 103 נהגים (80 גברים ו-23 נשים, בממוצע גילאים של 41) שערכו 18,173 נסיעות ביותר מ-8,400 שעות נסיעה (Musicant et al, 2007).

המחקר נערך בשני שלבים. בשלב הראשון, נאספו מדדי הסיכון, אותם הציגה המערכת עבור נהג מסוים, שנאספו במשך 8 שבועות של נהיגה כאשר הנהג היה מודע להתקנת המערכת אך לא ידע למה היא משמשת. נתונים אלה הושושו למעורבות בתאונות בעבר (לפני התקנת המערכת) של אותו נהג. בשלב השני, תודרכו הנהגים המשתתפים בניסוי אודות פעולת המערכת, ובנוסף קיבלו משוב עבור בטיחות נהיגתם כפי שנהגו בתקופה הראשונה של הניסוי. בהמשך, קיבלו הנהגים גישה למידע השוטף אודות רמת הבטיחות בנהיגה שלהם, לכל משך 10 חודשי הניסוי הבאים, ובנוסף, נתונים אלה הוצגו לצד השוואה לרמת הבטיחות אותה הפגינו הנהגים האחרים שהשתתפו בניסוי.

תוצאות הניסוי הראו קשר חיובי בין מדדי הסיכון אותם קבעה המערכת בהתאם למעקב אחר נתוני הנסיעות, לבין המעורבות בתאונות, דבר המצביע על יכולתה של המערכת לנבא במידה מהימנה את מעורבות הנהגים בתאונות עתידיות באמצעות פרופילי הנהיגה שהיא בונה. בנוסף, חשיפה לפידבק מהמערכת הובילה לירידה של 40% בשיעורי התאונות של הנבדקים. בהשוואה של ממוצע מדדי הסיכון שהתקבלו מהמערכת לאורך 12 החודשים בהם התנהל הניסוי, התקבל הבדל מובהק בין מדדי הסיכון בשלב הראשון לעומת השני, אך הבדל זה התקדם במגמה יורדת ובחודש העשירי ההבדל לא נמצא מובהק (Musicant et al, 2007).

באופן דומה, Toledo et al (2008) בדקו את יעילות המערכת בשלושה פרמטרים: 1. בחינת הקשר בין מדדי הסיכון שנותנת המערכת לבין המעורבות בתאונות דרכים. 2. השפעת פידבק מהמערכת על מעורבות בתאונות דרכים. 3. בחינת טווח ההשפעה של הפידבק מהמערכת.

הניסוי נערך בשני שלבים, כאשר בשלב הראשון, שנמשך 8 שבועות, נבחנה יעילות המערכת בפרמטר הראשון, ובמהלכו יידעו את הנבדקים על התקנת המערכת אך הם לא קיבלו מידע לגבי אופי פעולתה ומטרותיה. השלב השני, שנמשך 7 חודשים, נועד לבחינת יעילות המערכת בפרמטר השני והשלישי, ובמהלכו הנבדקים תודרכו לגבי פעולת המערכת, קיבלו מידע ראשוני לגבי הנהיגה שלהם כפי שנאסף עד לשלב הנוכחי וכן, קיבלו קוד סודי שאפשר להם לקבל מידע שוטף המתקבל מהמערכת ונתונים השוואתיים ביחס לשאר הנהגים המשתתפים בניסוי (בשני השלבים הנבדקים לא קיבלו משוב נהיגה בזמן אמת כפי שמוצג, בדרך כלל, על מסך ברכב). בניסוי השתתפו 191 נהגים (189 גברים ו-2 נשים בגיל ממוצע של 41) שנהגו בצי של משאיות קטנות באחת החברות בארץ.

תוצאות המחקר בשלב הראשון הראו קשר חיובי מובהק בין מדדי הסיכון של המערכת לבין המעורבות בתאונות עבר של הנהגים לפני התקנת המערכת. תוצאות המחקר בשלב השני הראו ירידה של 38% במעורבות בתאונות דרכים בתקופת השלב השני של הניסוי לעומת מעורבות בתאונות בעבר. לעומת זאת, הירידה לא נמצאה מובהקת ביחס לתאונות שבהן הנהג היה אשם בתאונה. החוקרים סבורים כי ייתכן וההסבר לכך קשור למספר המועט של תאונות באשמת הנהג שהתרחשו במהלך הניסוי (ממוצע של 3.1). בהתייחס לפרמטר השלישי אותו בחן הניסוי, מציינים החוקרים כי לא ניתן להעריכו בעקבות מספר התאונות המועט שהתרחש בשלב זה. לעומת זאת,

בבדיקה של השינוי במדדי הסיכון לאורך תקופת הניסוי, נראתה ירידה של 33% במוצע בין השלב הראשון (ללא משוב מהמערכת) לעומת השלב השני (עם משוב מהמערכת), דהיינו, בהפחתה בסיכון הנהגים להיות מעורבים בתאונה. רמה זו נשמרה לאורך כל 7 חודשי הניסוי.

Toledo (2011) בדקה את היכולת של המערכת למדוד ולתעד אירועי נהיגה מסוכנים ולפתח, באמצעות המערכת, מנגנון שיסייע לזהות דפוסי התנהגות של נהגים ואירועים שיכולים להיות קשורים לסיכון למעורבות בתאונה.

במסגרת המחקר הוערכה השפעתו של המשוב שסופק לנהגים בהתבסס על האירועים שתועדו במערכת, על נהיגתם ועל הבטיחות.

המערכת תיעדה נתונים כמו בלימה, מהירות ותאוצה, אשר תורגמו לאירועים כמו בלימה והאצה מאסיביות, מהירות חורגת ועוד. אירועים אלה קיבלו משקל לפי דרגת חומרתם ועבור כל נהג שוקלל ציון בטיחות לפי נהיגתו. הניסוי נמשך כשנה, בו הותקנה המערכת בכ-100 כלי רכב בבסיס חיל אוויר והשתתפו למעלה מ-400 נהגים.

הניסוי כלל שלושה שלבים: בשלב הראשון, הנהגים לא קיבלו משוב מהמערכת; בשלב השני, הנהגים נחשפו למערכת וקיבלו הסבר על תפקודה. הנהגים שקיבלו את הציונים הנמוכים ביותר בבטיחות, קיבלו משוב מקצין הבטיחות. בשלב השלישי, כל הנהגים שהשתתפו בניסוי קיבלו משוב בצורת דו"ח אישי שפירט את אופן נהיגתם בכל אחד משלבי המחקר.

במחקר נמצאה ירידה ברמת האירועים מהשלב הראשון (ללא משוב) לשלב השני (משוב על ידי קצין הבטיחות), ומגמת הירידה נמשכה גם לשלב השלישי (משוב באמצעות דו"ח אישי).

עבור הנהגים שקיבלו את הציונים הנמוכים ביותר בבטיחות ולכן קיבלו את שני סוגי המשוב, מספר האירועים ירד ב-27%. עבור כלל הנהגים הירידה במספר האירועים מהשלב הראשון לשלישי הסתכמה ביותר מ-20%.

מחקרים שונים שהשתמשו במערכת התמקדו בנהיגת צעירים, המייצגת את אחת האוכלוסיות הבעייתיות בעולם הבטיחות בדרכים. לנהגים צעירים יש ייצוג יתר בתאונות דרכים ובמיוחד בשנת הנהיגה הראשונה שלהם (לוטן ואחרים, 2012).

מחקר שמטרתו לזהות גורמים עיקריים המשפיעים על התנהגות נהגים צעירים במהלך השנה הראשונה שלאחר קבלת רישיון הנהיגה, השתמש במערכת ובמדדי הסיכון (Prato et al, 2010).

תקופת המחקר, במהלכה נאספו נתונים הקשורים בהתנהגות הנסיעה של 62 נהגים צעירים והוריהם, כללה שני שלבים בהתאם לתכנית הישראלית לרישוי הדרגתי: שלושה חודשי נהיגה בליווי מבוגר (נהג בן 24 לפחות עם ותק של לפחות 5 שנות נהיגה) ותשעה חודשים נוספים בהם הנהגים הצעירים יכולים לנהוג לבד (הם רשאים לקחת איתם 2 נוסעים בלבד אלא אם נמצא ברכב נהג בן 24 לפחות עם 5 שנות ותק בנהיגה לפחות).

המערכת מדדה באופן רציף מהירויות ותאוצות ועיבדה את הנתונים כדי לזהות תמרוני נהיגה ולאמוד את חומרתם. במשך ארבעת חודשי המחקר הראשונים (שלושת חודשי הליווי וחודש אחד בתקופת ה"סלוי"), ניתן למשתתפים מידע מינימלי על מטרות ויכולות המערכת ולא ניתן להם כל משוב. לאחר מכן קיבלו המשתתפים מידע נוסף על המערכת וניתנה להם גישה לאתר אינטרנט

שבו הוצג המידע על נהיגתם (שלב המשוב). נמצא כי מדדי הסיכון שחושבו עבור נהיגתם של המשתתפים השתנו באופן משמעותי במשך זמן המחקר, כאשר ערכים נמוכים של מדדי הסיכון נצפו בעיקר במשך תקופת הליווי לעומת התקופה ללא ליווי שבה הערכים עלו משמעותית. לאחר מתן משוב למשפחות בפעם הראשונה (בחודש הרביעי או החמישי למחקר), ממוצע מדדי הסיכון ירד באופן משמעותי. בהמשך, בזמן שהממוצע עלה שוב עבור הצעירים (בנים), הירידה נשמרה עבור הצעירות (בנות) לאורך הזמן. באופן כללי, נהגים צעירים בנים מציגים ממוצע מדדי סיכון גבוה יותר ביחס לצעירות.

ממוצע מדדי הסיכון של ההורים לא השתנה במשך 12 חדשי המחקר, דבר המצביע על כך שסגנון נהיגת ההורים מבוסס יותר.

לוטן ואחרים (2012) בחנו את הפוטנציאל של המערכת לסייע לנהגים צעירים והוריהם לשפר ולשמור על רמת בטיחות נהיגה טובה במהלך שנת הנהיגה הראשונה. במחקר השתתפו כ-200 משפחות של נהגים צעירים, בנים בלבד, שנהגו במשך 12 חדשים (שנת הנהיגה הראשונה של הנהג הצעיר).

המשתתפים חולקו לארבע קבוצות לפי סוג המשוב שקיבלו:

1. קבוצת המשוב האישי - כל נהג קיבל משוב על דפוסי הנהיגה שלו בלבד. להורים לא היתה גישה לנתוני הנהיגה של הנהג הצעיר.

2. קבוצת המשוב המשפחתי ללא הדרכה - בקבוצה זו נתוני הנהיגה של כל אחד מהנהגים ברכב בו מותקנת המערכת חשופים לכל בני המשפחה המשתמשים באותו הרכב (בדרך כלל הנהג הצעיר והוריו).

3. קבוצת המשוב המשפחתי עם הדרכה - בקבוצה זו קיבלו המשתתפים משוב משפחתי, בדומה לקבוצה הקודמת, אך בנוסף קיבלו ההורים הדרכה אישית ייעודית.

4. קבוצת ביקורת - בקבוצה זו הנהג הצעיר והוריו אינם מקבלים משוב או הדרכה לאורך כל חודשי המחקר.

לצורך השוואה בין ארבע קבוצות המחקר הוגדר מדד המבטא את אופן הנהיגה במונחים של קצב אירועים. מדד זה מוגדר כמספר האירועים החריגים בכל דקת נהיגה. ההבדלים בין הקבוצות נסקרים ומנותחים בהרחבה בדו"ח המחקר.

מעבר למעקב אחר אופן הנהיגה ורמות הבטיחות של הנהגים, "הקופסא הירוקה" מספקת הזדמנות לנטר חשיפה. המידע שנאסף סיפק הזדמנות לבחון כמה נהגים צעירים נוהגים, מתי ואיפה, ללא קשר לביצועי הנהיגה שלהם. כדי לנתח חשיפה ולאחר מכן רמות בטיחות של הנסיעות, כל הנסיעות צריכות להיות מזוהות ומשויות לנהג שביצע אותן. בפועל, כשליש מהנסיעות שבוצעו היו בלתי מזוהות. כדי לא לאבד מידע זה, פותחו מודלים המחשבים את ההסתברות לכך שנסיעה מסוימת (שאינה מזוהה) בוצעה על ידי כל אחד מהנהגים האפשריים ברכב.

החוקרים סיכמו מספר מסקנות למחקר, ביניהן (לוטן ואחרים, 2012):

- קיום מערכת לרישום נתוני נהיגה ברכבם של נהגים צעירים (בנים) בשנה הראשונה לאחר קבלת רישיון הנהיגה משפרת את ביצועי הנהיגה שלהם מבחינה בטיחותית ללא קשר לסוג המשוב אותו הם מקבלים (בתנאי שהם מקבלים משוב).

- מבין כל צורות המשוב שנבדקו - ה"משוב המשפחתי" יעיל יותר מ"המשוב האישי".

- דפוסי החשיפה של נהגים צעירים משתנים בצורה משמעותית במעבר מתקופת הליווי והחלה של מגבלת לילה בתחילת הנהיגה העצמאית.

- נמצאו מתאמים גבוהים בין סגנון הנהיגה של נהגים צעירים והוריהם.

מבחינה מתודולוגית פותחה גישה חדשה לזיהוי נסיעות שלא זוהו באופן פעיל על ידי הנהגים שהשתתפו במחקר. השיטה מבוססת על זיהוי הסתברותי על סמך עצי סיווג. לזיהוי זה חשיבות בכך שניתן להתבסס על כל הנתונים שנאספים (ולא רק הנתונים המזוהים) ממערכות ניטור אשר אינן כוללות זיהוי ויזואלי רציף של הנהגים.

מחקר נוסף, שנערך בווינגטון, ארה"ב, בדק את השפעתה של מערכת רישום נתוני הנהיגה, על רמת הבטיחות בנהיגה של בני נוער (Farmer et al, 2010). המחקר נערך במשך 11 חודשים בקרב 84 נערים בני 16-17 (עם ותק נהיגה בין 0 ל-15 חודשים) ובהשתתפות הוריהם. במכונית בה נהג כל נער הותקנה מערכת לרישום נתוני נהיגה. המערכת רשמה אירועים של האטה והאצה פתאומית, חריגה ממהירויות מותרות ואי שימוש בחגורות בטיחות, והעבירה אותם בזמן אמת לאתר עם גישה חופשית עבור הורי הנער הנוהג. בנוסף, המערכת התריעה על אירועים אלה בהתרעה קולית לנהג היושב ברכב.

הנבדקים חולקו לארבע קבוצות לפי סוג ההתרעה/משוב על אירועי הבטיחות שהתרחשו במהלך הנהיגה:

קבוצה 1 - ניטור באמצעות התרעה ברכב ושליחת הודעה מיידיית לאתר אינטרנט.

קבוצה 2 - ניטור באמצעות התרעה ברכב ושליחת הודעה מותנית לאתר (במקרה של חריגת מהירות או אי שימוש בחגורת בטיחות, הנהג קיבל מרווח של 20 שניות לתקן את אירוע הבטיחות כדי שההתרעה לגביו לא תדווח לאתר)

קבוצה 3 - ניטור באמצעות התרעה לאתר בלבד.

קבוצה 4 (קבוצת הביקורת) – ניטור ללא התרעה ברכב וללא הודעה באתר.

בשבעים הראשונים לניסוי, המערכת לא התריעה על אירועי בטיחות, ולאחר מכן החלה להתריע לפי סוגי ההתרעות השונות. בין תוצאות המחקר היו:

- שיעורי ההאטה וההאצה הפתאומיים ירדו בשיעור גבוה יותר עבור קבוצות הניסוי לעומת קבוצת הביקורת (במיוחד עבור קבוצות 1 ו-2), אך הבדלים אלה לא נמצאו מובהקים.
- שיעורי אי השימוש בחגורת בטיחות ירדו ביותר מ-90% עבור קבוצה 1 ו-61% עבור קבוצה 3. השימוש בחגורות נשאר גבוה יחסית גם לאחר שההתרעות הופסקו, אך ההבדל לא היה מובהק.

- שיעורי החריגה מהמהירות המותרת הראו ירידה מסוימת רק עבור שתי הקבוצות עם התרעה בתוך הרכב, אך ירידה זו נמשכה רק למספר שבועות. בהמשך, החלה עליה בשיעור החריגות מהמהירות המותרת. עבור קבוצה 2 מגמת הירידה נשמרה לזמן הארוך ביותר, אך גם עבורה החלה עלייה לקראת סוף הניסוי.

החוקרים ציינו כי מעורבות ההורים בניסוי הייתה נמוכה מהצפוי, דבר שהשפיע על יעילות ההרתעה בקרב הנהגים הצעירים. לטענתם, התרעה בתוך הרכב אינה מספיקה כדי לחולל שינוי בנהיגה של צעירים ונדרש פיקוח מצד ההורים.

במסגרת הפרויקט האירופי Prologue (Van Schagen et al, 2011, Lotan et al, 2010), נערכו חמישה מחקרי שדה בהיקף מצומצם, ביניהם מחקר שהתבצע בישראל והשתמש במערכת לרישום נתוני נהיגה המעבדת נתונים באופן שהוסבר קודם על בסיס מחקרם של Toledo et al (2008). המחקר בישראל בדק התנהגות נהגים חדשים וותיקים וכלל ארבעה תתי-מחקרים:

1. למידת התנהגויות וסגנונות נהיגה תוך שימוש בשתי טכנולוגיות: מערכת לרישום נתוני נהיגה ומערכת ה-ME שבמקור משמשת כמערכת התרעה על סטייה מנתיב הנסיעה והתקרבות לרכב שלפנים, ולצורך מחקר זה הוסיפו לה את היכולת לתעד ולאחסן מידע.

מטרתו העיקרית של המחקר הראשון הייתה להעריך את הפוטנציאל של שתי הטכנולוגיות ולהשוות בין הנתונים שהן מספקות, במטרה לבחון האם הנתונים המתקבלים זהים או משלימים זה את זה בהבנה של התנהגות וסיכונים בנהיגה.

המסקנה העיקרית מהמחקר הייתה כי המשתתפים השונים שנמדדו על-ידי שתי המערכות משלימים זה את זה ויחדיו הם מספקים תמונה מקיפה יותר של התנהגות נהגים מאשר התמונה שהייתה מתקבלת מכל אחת מהמערכות בנפרד.

2. התנהגות של נהגים צעירים והוריהם במקומות שונים. מטרתו העיקרית של המחקר הייתה לפתח כלי דיגיטלי ל-מיפוי (map matching) שיאפשר לקשר את ההתנהגות הנרשמת במערכת של הנהג הצעיר והוריו למיקום מדויק ברשת הדרכים. הכלי יאפשר, למשל, לראות היכן ברשת הדרכים אירועים שונים הקשורים בבטיחות או הפרות של המהירות המותרת התרחשו, והאם קיים שוני בין קבוצות שונות בהקשר זה.

הכלי שפותח ויושם במחקר אפשר ניתוחים שימושיים. לדוגמה, נמצאו שינויים בחשיפה ורמות האירועים שנצפו בקרב נהגים צעירים לעומת הוריהם לפי סוג הדרך בה נהגו.

3. התנהגות נהגים צעירים לאחר מספר שנות ניסיון. במחקר זה נאספו נתונים על-ידי מערכת לניטור נתוני נהיגה כדי לבחון התנהגות של נהגים צעירים שנתיים עד ארבע שנים לאחר שקיבלו את רישיון הנהיגה. דפוסי התנהגותם הושוו לדפוסי ההתנהגות שלהם מיד לאחר קבלת הרישיון. המסקנה הייתה כי הנהגים לא נהגו בצורה בטוחה יותר ביחס לנהיגתם בשנה הראשונה וכי המשוב אינו משפיע על נהגים צעירים מנוסים. יש לקחת בחשבון כי במחקר זה הייתה נכונות נמוכה להשתתף בפעם השנייה (32 נהגים שהיוו 40% ממשתתפי המחקר הראשון) וכי ייתכן ויש הטיה בתוצאות.

4. דפוסי נהיגה של נהגים צעירים וסביבתם החברתית. מחקר זה בחן את ההשפעה של הסביבה החברתית של נהגים צעירים על חשיפתם ורמת הבטיחות, כפי שנתחו מנתונים שהפיקה המערכת. המשתתפים במחקר התגוררו באותה קהילה והכירו זה את זה. בנוסף לבחינת דפוסי הנהיגה של הקבוצה, יצרו במחקר רשת חברתית המבוססת על חברויות ונהיגה משותפת. לא נמצא דמיון בדפוסי הנהיגה של המשתתפים אך נמצא כי הנהג ה"טוב" ביותר היה האדם ה"פופולרי" ביותר בקבוצה והנהג ה"גרוע" ביותר היה הפחות מקובל בקבוצה, ממצא שיכול לתרום להבנה כי נורמות הנהיגה בקבוצה הן טובות. באופן כללי, המחקר הראה את הפוטנציאל בשימוש במיפוי הרשת החברתית בשילוב עם נתוני נהיגה טבעית כדי להבין התנהגות נהיגה.

מהמחקרים השונים ניתן לראות את תרומתה של "הקופסא הירוקה" להבנת דפוסי התנהגות של נהגים ולזיהוי דפוסי נהיגה בעיתיים.

רוב המחקרים בחנו את השפעת המשוב המתקבל על-ידי המערכת על התנהגות הנהגים (כולל נהיגת צעירים) ומצאו כי למשוב השפעה חיובית על התנהגות הנהג ובטיחות נסיעתו, בעיקר כאשר קיים פיקוח על המשוב (למשל, של הורים לנהג צעיר או מנהל של צי רכב).

מחקרים שבחנו את הקשר בין אירועי נהיגה המתקבלים מהמערכת לבין מאפייני תשתיות בדרכים לא נמצאו בספרות הקיימת בנושא "הקופסא הירוקה".

1.3.3. סיכום

בפרויקט שמובילה עמותת "אור ירוק", לאורך מספר שנים מבוצע איסוף נתוני "נהיגה טבעית" בעזרת ה"קופסאות הירוקות" המותקנות בכ-200 כלי רכב. בנתונים שנאספו קיים ניטור רציף במהלך הנסיעה הכולל נתונים על מיקום כלי הרכב, מהירות הנסיעה, תאוצות ובלימות של הרכב ועוד.

המערכת אוספת נתונים באמצעות חיישנים ממערכות הרכב השונות כגון: היגוי, בלימה, ספידומטר, גז וצריכת דלק. המערכת משקללת את נתוני החיישנים, מזהה ומתעדת את תמרוני הנהיגה, כאשר מהנתונים הללו ניתן לסווג את דפוס הנהיגה של הנהג ולחשב מדדי סיכון המצביעים על מידת הבטיחות של נסיעה. המערכת מעבירה את הנתונים שהיא מעבדת למרכז בקרה חיצוני ויכולה גם לתת לנהג משוב מיידי בתוך הרכב.

במספר מחקרים בארץ נערך שימוש בנתוני המערכת במטרה לאפיין דפוסי נהיגה שונים ולבחון את השפעת המערכת על נהיגת נהגים צעירים ואחרים.

כאמור, תוך כדי ניתוח תמרוני הרכב בעקבות פעילות הנהג, המערכת מזהה אירועי נהיגה שונים לרבות תמרוני הרכב המצביעים על דפוסי נהיגה מסוכנים. כמו כן, המערכת מזהה את מיקום הרכב במהלך הנסיעה. מכאן, יש תנאים להצלבת אירועי הנהיגה המופקים ע"י המערכת עם מיקום התרחשות האירועים - מאפייני תשתיות הכבישים.

במחקרים עם נתוני המערכת פותח מדד לאמידת רמת סיכון הנהג על סמך שכיחות התמרונים המסוכנים במהלך נסיעותיו. נראה כי לצורכי בחינת השפעה של מאפייני התשתית על אירועי הנהיגה, על סמך נתוני המערכת, נדרש לפתח מדד אשר יצביע על ריכוז תמרונים מסוכנים באתרים מסוימים, לאחר ניכוי רמת החשיפה (תדירות הנסיעות) ומאפייני הנהגים.

1.4. מאפייני תשתית של הדרכים הלא עירוניות שמשפיעים על התרחשות

התאונות

1.4.1. כללי

המחקר הנוכחי אמור למקד את בחינת ריכוזי האירועים החריגים בנהיגה באתרי דרכים עם מאפייני תשתית בעייתיים - כאלה אשר קשורים, בדרך כלל, לריכוזים גבוהים יותר של תאונות. לכן, נדרש סקר ספרות יעודי שיאפשר לסכם רשימה של מאפייני התשתית המשפיעים יותר על התרחשות התאונות.

התחום המחקרי של נושא הבטיחות בדרכים הקשור למאפייני הדרכים הוא רחב ביותר. חלק מתחום זה קשור לתכנון הגיאומטרי של הדרכים. גם הצטמצמות לשאלה אלו מאפיינים גיאומטריים של הדרכים הלא עירוניות משפיעים על התרחשות תאונות מכילה תתי נושאים רבים וביניהם, למשל, גיאומטריה של סוגי הדרכים הבין עירוניות לפי סיווגם: דרך חד-מסלולית, דרך דו-מסלולית עם צמתים, דרך דו-מסלולית ממוחלפת, או גיאומטריה של קטע דרך לעומת צומת או מחלף.

כדי למצוא את המאפיינים הגיאומטריים של הדרכים הלא עירוניות שמשפיעים על התרחשות התאונות נסקרו מקורות ספרות אשר הציגו קשר כמותי בין המאפיינים הגיאומטריים של הדרכים לבין התרחשות התאונות. קשר זה קיים משני סוגים: אחד - בצורת מקדמי ירידה במספר התאונות כתוצאה משיפור המאפיינים הגיאומטריים של דרך בין-עירונית, השני - בצורת מודלים לחיזוי מספר תאונות על-פי המאפיינים הגיאומטריים של הדרך. בסקירת מקורות הספרות השונים, נבחנו המאפיינים גיאומטריים בלבד, של הדרכים הבין-עירוניות, והשפעתם על התרחשות התאונות.

המקורות מהם נלקח מידע זה כללו:

ממצאי המחקרים בארץ - הקרט ואחרים (2002), גיטלמן ואחרים (2009);

ממצאי המחקרים מחו"ל - HSM (2010) Elvik et al, (2009) Bonneson and Pratt, Turner (2009) et al (2010).

1.4.2. מקדמי ירידה בתאונות שמזוהים עם מאפייני תשתית שונים

מקדם השינוי בתאונות, הקשור לשינוי בתשתית, מכונה במקורות האמריקניים בשני שמות. ב-HSM (2010) השינוי נקרא (CMF) Crash Modification Factor, ב-Bonneson and Pratt (2009) הוא נקרא (AMF) Accident Modification Factor. מקדמים אלו מבטאים את השפעת האמצעי או המאפיין התכנוני על שינוי בתאונות לעומת תנאי הבסיס, והם מופיעים כמספר עשרוני. לדוגמא, כאשר האמצעי משפר את הבטיחות - מפחית את מספר התאונות, ערך ה-CMF של התכונה קטן מ-1.0, ולהפך, כאשר ערך המאפיין תורם להגדלת מספר התאונות ערך ה-CMF גדול מ-1.00, בעוד שערך ה-1 שייך לתנאי הבסיס בתכנון. ערכי ה-AMF/CMF משמשים בנוסחאות לחיזוי מספר התאונות, בתנאי תכן שונים. לפי Bonneson and Pratt (2009) מקדם זה מציג את השינוי הצפוי בטווח הארוך בבטיחות האתר בעקבות שינוי במאפיין תכן מסוים.

במקורות הלא אמריקניים כגון: Elvik et al (2009), Turner et al (2010) יעילות אמצעי שיפור התשתית מבוטאת באחוזים. קיימת אבחנה בין השפעה חיובית ושלילית של האמצעי על הבטיחות. כאשר האמצעי משפר את הבטיחות - מפחית את מספר התאונות, יעילות האמצעי מתבטאת בירידת התאונות באחוזים עם סימן שלילי (-). ולהפך, כאשר האמצעי תורם להגדלת מספר התאונות, יעילות האמצעי מתבטאת בעלייה בתאונות באחוזים עם סימן חיובי (+).

א. HSM (2010)

במדריך אמריקני זה מתוארים מקדמי שינוי בתאונות (CMF) לתכנון, בקרת תנועה וטיפול בקטעי דרך, צמתים, ומחלפים. בטבלה 1.2 מופיעים הטיפוליים לקטעי דרך, לפי סוג דרך, להם קיימים מקדמי הפחתת תאונות. הטבלה מתייחסת להסדרים בדרכים בין-עירוניות בלבד.

טבלה 1.2. טיפולים הקשורים לגיאומטריה, להם קיימים מקדמי הפחתת תאונות על-פי סוג הדרך. מקור: HSM (2010).

Table 1.2. Treatments related to road geometry, for which accident modification factors are available, according to road types (HSM, 2010).

סוג דרך	שינויים גיאומטריים להם קיימים מקדמי הפחתת תאונות
דרך מהירה	הגדלת רוחב מפרדה, הגדלת מרווח צידי פנוי ממכשולים
דרך בין-עירונית דו-נתיבית	שיפור רוחב נתיב, הוספה/ הרחבה של שול, שיפור סוג שול, מיתון מדרונות מעבר לשול, הגדלת מרווח צידי פנוי ממכשולים, שיפור בטיחות בצד הדרך, שיפור בגודל ואורך רדיוס אופקי והוספת עקום מעבר, שיפור הגבהה צידית, שינוי בשיפוע לאורך, צמצום כניסות לחלקות גובלות
דרך בין-עירונית רב-נתיבית	שיפור רוחב נתיב, הוספה/ הרחבה של שול, בניית מפרדה, הגדלת רוחב מפרדה, מיתון מדרונות מעבר לשול, התקנת מתקנים סופגי אנרגיה לפני מכשולים, שיפור בטיחות בצד הדרך, התקנת מעקות בטיחות

מטבלה 1.2 ניתן ללמוד כי:

- בדרך מהירה, המאפיינים הגיאומטריים המשפיעים על התרחשות התאונות הם: מיסעה צרה; מכשולים קרובים בצד הדרך; היעדר מעקות בטיחות במפרדה; חוסר התקנים סופגי אנרגיה לפני מכשולים;

- בדרך בין-עירונית רב-נתיבית, המאפיינים הגיאומטריים המשפיעים על התרחשות התאונות הם: רוחב נתיב צר; רוחב שול צר; מדרון תלול מעבר לשול; חוסר התקנים סופגי אנרגיה לפני מכשולים; היעדר מעקה בטיחות במפרדה;

- בדרך בין-עירונית דו-נתיבית, המאפיינים הגיאומטריים הקשורים להתרחשות התאונות הם: רוחב נתיב צר; רוחב שול צר; מדרון תלול מעבר לשול; מכשולים קרובים בצד הדרך; רדיוס אופקי קטן; קטע ארוך בעקום אופקי; חסר עקום מעבר; הגבהה צידית בעקום קטנה מהנדרש; שיפוע תלול לאורך.

בטבלה 1.3 מפורטים הטיפוליים הגיאומטריים לצמתים, לפי סוג צומת, להם קיימים מקדמי הפחתת תאונות. הטבלה מתייחסת להסדרים בדרכים בין-עירוניות בלבד.

טבלה 1.3. טיפולים בצמתים להם קיימים מקדמי הפחתת תאונות, על פי סוג צומת. מקור: HSM (2010).

Table 1.3. Junction treatments for which accident modification factors are available, according to junction types (HSM, 2010).

סוג צומת	טיפולים להם קיימים מקדמי הפחתת תאונות
לא מרומזר גישה משנית	הפיכת צומת לא מרומזר למעגל תנועה, שיפור בזווית אלכסונית של צומת (קירוב הזווית האלכסונית לזווית ניצבת), הוספת נתיב פנייה שמאלה, הוספת נתיב פניה ימינה, הגדלת רוחב מפרדה, הפיכת פנייה שמאלה ישירה לפנייה ימינה ובהמשך פניית פרסה
לא מרומזר כל הגישות	הפיכת צומת לא מרומזר למעגל תנועה, הוספת נתיב פנייה שמאלה, הגדלת רוחב מפרדה
מרומזר 3 זרועות	הפיכת צומת מרומזר למעגל תנועה, הוספת נתיב פנייה שמאלה, הוספת נתיב פניה ימינה
מרומזר 4 זרועות	הפיכת צומת מרומזר למעגל תנועה, הוספת נתיב פנייה שמאלה, הוספת נתיב פניה ימינה

מטבלה 1.3 ניתן ללמוד כי :

- בצומת בין-עירוני לא מרומזר, מאפיינים גיאומטריים המשפיעים על התרחשות תאונות הם : זווית בין דרך משנית לדרך ראשית אינה ניצבת ; חסר נתיב פנייה שמאלה בדרך המשנית ; חסר נתיב פנייה שמאלה בדרך הראשית ; חסר נתיב פנייה ימינה בדרך המשנית ; מפרדה צרה מידי בדרך המשנית ; מפרדה צרה מידי בדרך הראשית ;

- בצומת בין-עירוני מרומזר, מאפיינים גיאומטריים הקשורים להתרחשות תאונות הם : חסר נתיב פנייה שמאלה בגישות ; חסר נתיב פנייה ימינה בגישות.

עבור מחלפים, מקדמי הפחתת תאונות קיימים עבור מספר רכיבי תכנון. ההתייחסות היא על-פי סוג המחלף : חצוצרה, רביע אחד, יהלום, עירוני חד נקודתי, תלתן חלקי, תלתן מלא, ישיר. רשימת המקדמים קיימת עבור : הפיכת צומת למחלף, שיפור בנתיבי שינוי מהירות, שיפור בקטעים עם 2 נתיבי התמזגות/ הפרדות - הפיכה לנתיב בודד להתמזגות/ הפרדות.

מנתונים אלו ניתן ללמוד כי במחלפים, מאפיינים גיאומטריים הקשורים להתרחשות תאונות הם : נתיבי שינוי מהירות קצרים ; קיום שני נתיבי שינוי מהירות מקבילים.

ב. RSDW¹ (2009)

במדריך אמריקני זה מוצגים ערכי הפחתת תאונות (AMF). ערכים אלו נמצאו במחקרים רחבי היקף שבדקו אתרים רבים ולאורך תקופות ארוכות.

במדריך יש התייחסות למספר סוגי דרכים : מהירה בין-עירונית, מהירה עירונית פרברית, בין עירונית דו-נתיבית, בין-עירונית עם 4 נתיבים, עורקים עירוניים ופרבריים, רמפות במחלפים, צמתים בין עירוניים מרומזרים, צמתים בין עירוניים לא מרומזרים, צמתים עירוניים מרומזרים וצמתים עירוניים לא מרומזרים.

¹ (2009) Bonneson and Pratt - Roadway Safety Design Workbook

לכל אחד מסוגי הסדרים אלו קיימים מקדמי שינוי בתאונות AMF עבור מאפיינים משפיעים. בטבלה 1.4 מובא פרוט המציין, לסוגי הסדר שונים, את המאפיינים המשפיעים על תאונות ואשר פותחו לגביהם מודלים למקדמי הפחתה בתאונות.

טבלה 1.4. מקדמי הפחתה בתאונות הקשורים למאפיינים גיאומטריים, על פי סוגי הסדר. מקור: RSDW (2009)

Table 1.4. Accident modification factors related to geometric characteristics, according to road types (RSDW, 2009).

סוג דרך/צומת	סוג אתר	מאפיינים להם קיימים מקדמי הפחתת תאונות
דרך מהירה	בין עירונית ופרברית	רדיוס אופקי, שיפוע, רוחב נתיב, שול ימני, שול שמאלי, רוחב מפרדה (ללא מעקה, מעקה חלקי מעקה מלא), מרווח פנוי בצד הדרך (ללא מעקה, מעקה חלקי, מעקה מלא), קטעי התמזגות בכניסות מרמפות, קטעי השתזרות
דרך בין עירונית	2 ו-4 נתיבים	רדיוס אופקי, מרווח פנוי בצד הדרך (ללא מעקה, מעקה חלקי, מעקה מלא), שיפוע מעבר לשול
דרך בין עירונית	2 נתיבים	עקום מעבר, רוחב נתיב ורוחב שול, סוג מפרדה, הגבהה צידית, נתיב עקיפה, צפיפות חיבורים לחלקות גובלות
דרך בין עירונית	4 נתיבים	רוחב נתיב, רוחב שול ימני, רוחב שול שמאלי, רוחב מפרדה (ללא מעקה, מעקה חלקי, מעקה מלא)
עורק עירוני ופרברי		רדיוס אופקי, רוחב נתיב, רוחב שול, רוחב מפרדה, חנייה מקבילה, מרחק צידי לעמודים
צומת בין עירוני	מרומזר	נתיב פנייה שמאלה, נתיב פנייה ימינה, מספר נתיבים, כניסות למגרשים גובלים
	לא מרומזר	נתיב פנייה שמאלה, נתיב פנייה ימינה, מספר נתיבים, רוחב שוליים, מפרדה, סטייה מזווית ניצבת בין זרועות הצומת, כניסות למגרשים גובלים

מטבלה 1.4 ניתן ללמוד כי :

- בדרך מהירה, מאפיינים גיאומטריים הקשורים להתרחשות תאונות: רדיוס אופקי קטן; שיפוע אורכי גדול; נתיבים צרים; שול ימני צר; שול שמאלי צר; מפרדה צרה; מפרדה ללא מעקה; אורך קצר של קטעי התמזגות; אורך קצר של קטעי השתזרות;

- בדרך בין-עירונית רב-נתיבית מאפיינים גיאומטריים הקשורים להתרחשות תאונות הם: רדיוס אופקי קטן; מכשולים קרובים בצד הדרך; שיפוע גדול מעבר לשול; רוחב נתיב צר; שול ימני צר; שול שמאלי צר; מפרדה צרה;

- בדרך בין-עירונית דו-נתיבית מאפיינים גיאומטריים הקשורים להתרחשות תאונות הם: רדיוס אופקי קטן; מכשולים קרובים בצד הדרך; שיפוע גדול מעבר לשול; העדר עקום מעבר; נתיב צר; שול צר; הגבהה צידית מתונה מידי; חסר נתיב עקיפה; חיבורים רבים לחלקות גובלות;

- בצומת בין עירוני מרומזר, מאפיינים גיאומטריים הקשורים להתרחשות תאונות הם: אין נתיב פנייה שמאלה; אין נתיב פנייה ימינה; מספר נתיבים קטן; סמוך לצומת כניסות למגרשים גובלים;

- בצומת בין-עירוני לא מרומזר, מאפיינים גיאומטריים הקשורים להתרחשות תאונות הם: אין נתיב פנייה שמאלה; אין נתיב פנייה ימינה; מספר נתיבים קטן; שוליים צרים; סטייה מזווית ניצבת בין זרועות הצומת; סמוך לצומת כניסות למגרשים גובלים.

ג. Austroads : Turner et al (2010)

במסמך אוסטרלי זה מרוכז ידע מכל העולם בנושאים הקשורים ליצירת תשתית בטיחותית. זו תוצאה של תוכנית מחקר שמטרתה להעריך את הסיכון בדרך, בתנועה ובתשתיות בצד הדרך. מטרת חלק זה של הפרויקט היא שיפור אומדן ההפחתה בתאונות הקשורים לסוגי דרכים שונים, ולאמצעי בטיחות שונים. הנושאים שנבחרו לבחינה נבחרו באמצעות התייעצות עם מומחים.

להלן רשימת הנושאים הקשורים למאפיינים הגיאומטריים של הדרכים הבין-עירוניות: תיעול והכוונה באמצעות איי תנועה ומפרדות; הפרדה מפלסית לצומת; בצומת הארכת נתיב פנייה ימינה (באוסטרליה נוסעים בצד שמאל); בצומת הסדרת נתיב פנייה שמאלה; בצומת הסדרת נתיב פניה ימינה; בצומת הקמת מעגלי תנועה חד- ורב-נתיביים; מפרדות; מעבר דרך מפרדה; נתיבי עקיפה; מעגלי תנועה; צמתים מדורגים; הגבהה צידית; הרחבה או סלילת שוליים.

בטבלה 1.5 מרוכזים אחוזי הפחתה בתאונות שנמצאו לכל אחד מנושאים אלו, תוך ציון אמינות האומדן (גבוהה, בנונית, נמוכה).

טבלה 1.5. מקדמי הפחתה בתאונות לאמצעי בטיחות הקשורים בגיאומטריה של דרכים בין עירוניות. מקור: Turner et al (2010)

Table 1.5. Accident reduction factors related to safety treatments of infrastructure of rural roads (Turner et al, 2010).

נושא	סוג האמצעי	% הפחתה	אמינות
תיעול והכוונה באמצעות איי תנועה ומפרדות	אי תנועה מפריד - בין עירוני	35%	נמוכה
	אי תנועה מפריד - צומתי קמץ	45%	נמוכה
	אי תנועה מפריד - צומתי צלב	40%	נמוכה
	מפרדה בנויה	15%	נמוכה
	מפרדה לא בנויה	25%	נמוכה
הפרדה מפלסית לצומת	הפרדה מפלסית במקום צומת: עירוני ובין עירוני	50%	נמוכה
בצומת הארכת נתיב פנייה שמאלה (באוסטרליה ימינה)	עירוני ובין עירוני	15%	נמוכה
	עירוני ובין עירוני	30%	נמוכה
בצומת הסדרת נתיב פנייה ימינה (באוסטרליה שמאלה)	עירוני ובין עירוני	35%	בנונית
	בצמתים מרומזרים	35%	נמוכה
בצומת הסדרת נתיב פנייה שמאלה (באוסטרליה ימינה)	בצמתים לא מרומזרים	35%	נמוכה
	בין עירוני	35%	נמוכה
	הסדרה בצבע	30%	נמוכה
	הסדרה בנויה	35%	נמוכה
בצומת מעגלי תנועה חד נתיביים לעומת רב נתיביים	מפרדה	40%	בנונית
	מפרדה מסומנת – עירוני ובין עירוני	15-20%	נמוכה
מעברים דרך מפרדה	מפרדה בנויה - בין עירוני	55%	בנונית
	הפיכת המעבר מדו כווני לחד כווני	31%	בנונית
נתיבי עקיפה	סגירת המעבר	53%	בנונית
	עירוני ובין עירוני	23%	בנונית
מעגלי תנועה	התוויה חדשה עם נתיבי עקיפה	54%	נמוכה
	התקנת מעגל תנועה – בין עירוני	70%	גבוהה
צמתים מדורגים	נפח במשני > 15% נפח בראשי	35%	נמוכה
	נפח במשני > 15-30% מנפח בראשי	25%	נמוכה
	נפח במשני < 30% נפח בראשי	35%	נמוכה
הגבהה צידית	לא ידוע	לא ידוע	לא קיים
הרחבה או סלילת שוליים		30%	גבוהה

מטבלה 1.5 ניתן ללמוד כי:

בדרך בין עירונית בקטעי דרך, מאפיינים גיאומטריים הקשורים להתרחשות תאונות הם: אין מפרדה מסומנת; אין מפרדה בנויה; קיימים פתחי מעבר במפרדות בהם ניתן לעבור בין הכיוונים או בכיוון אחד; אין נתיבי עקיפה (בדרכים חד-מסלוליות דו-נתיביות); שוליים צרים; שוליים לא סלולים;

בדרך בין עירונית בצמתים, מאפיינים גיאומטריים הקשורים להתרחשות תאונות הם: אין איי תנועה מתעלים בצומת; קיים צומת ולא מחלף; נתיב פנייה שמאלה קצר מדי; חסר נתיב פנייה ימינה; קיים מעגל תנועה רב נתיבי; הצומת אינו מעגל תנועה חד נתיבי; הצומת אינו צומת מדורג.

4. Elvik et al (2009)

בספר זה מרוכזים השינויים בתאונות באחוזים עבור אמצעי בטיחות שונים. קיימת אבחנה בין השפעה חיובית ושלילית של האמצעי על הבטיחות. כאשר האמצעי משפר את הבטיחות, כלומר, מפחית את התאונות, יעילות האמצעי מתבטאת בירידת התאונות באחוזים עם סימן שלילי (-). ולהפך, כאשר האמצעי גורם להגדלת מספר התאונות, יעילות האמצעי מתבטאת בעלייה בתאונות באחוזים עם סימן חיובי (+). הערכים לשינוי בתאונות עבור כל אמצעי נאספו ממחקרים רבים שנערכו במדינות שונות, כאשר הם מוּיָנו ועובדו בשיטת שקלול סטטיסטי (meta analysis). לכל אמצעי שנבחן התקבל אומדן של אחוז שינוי בתאונות וכן, רווח הסמך שלו ברמת ביטחון של 95%.

קיימים ממצאים עבור המאפיינים הגיאומטריים הבאים של דרכים בין עירוניות:

- בדרכים מהירות הוספת נתיבים; הסדרת נתיבי פנייה בצמתים; הפיכת צמתים מרומזרים ולא מרומזרים למעגלי תנועה; בצמתים שיפור זווית כך שתהיה קרובה יותר לניצבת; הפיכת צמתים למחלפים; שיפורים ברמפות מחלפים;

- שיפורים בחתך הדרך: הוספת נתיבים, הרחבת נתיבים, הסדרת נתיבי עקיפה, סלילת שוליים, הוספת מפרדה;

- טיפול בצידי הדרך: מתון מדרונות מעבר לשול; הגדלת רדיוס אופקי; הקטנת שיפוע לאורך; שדרוג כבישים.

בטבלה 1.6 מרוכזים חלק ממצאי הספר - מקדמי שינוי בתאונות עבור שינויים במאפיינים הגיאומטריים בדרכים הבין-עירוניות.

טבלה 1.6. השפעת שינויים במאפיינים הגיאומטריים בדרכים הבין עירוניות על מספר התאונות. מקור: Elvik et al (2009).

Table 1.6. Impact on accidents of changes in geometric characteristics of rural roads (Elvik et al , 2009).

אחוז שינוי במספר התאונות			
חומרת תאונה	סוג התאונה	אומדן מיטבי	95% רווח סמך
הוספת נתיב שלישי במסלול עם 2 נתיבים בדרך מהירה			
עם נפגעים	כל התאונות	+3	(-22 : +35)
נתיב פניה שמאלה בצומת קמץ: בנוי/ מסומן			
עם נפגעים	כל התאונות	-17	(-36 : +7)
נתיב פניה שמאלה בצומת צלב: בנוי/ מסומן			
עם נפגעים	כל התאונות	-24	(-43 : +1)
נתיב פניה ימינה בצומת קמץ או צלב: בנוי/ מסומן			
עם נפגעים	כל התאונות	-7	(-22 : +11)
תעול מלא בצומת קמץ: בנוי			

עם נפגעים	כל התאונות	-32	(-52 : -5)
תעול מלא בצומת צלב: בנוי			
עם נפגעים	כל התאונות	-57	(-70 : -41)
תעול דרך משנית בצומת צלב: בנוי			
עם נפגעים	כל התאונות	-20	(-31 : -7)
הפיכת צומת למעגל תנועה באזור בין עירוני			
כל החומרות	כל התאונות	-69	(-79 : -54)
שינוי זווית בין זרועות צומת קמץ כך שתהיה קרובה יותר לניצבת			
ללא פרוט	כל התאונות	+34	(+2 : +76)
שינוי זווית בין זרועות צומת צלב כך שתהיה קרובה יותר לניצבת			
ללא פרוט	כל התאונות	+6	(-2 : +15)
הפיכת צומת צלב לצומת מדורג			
עם נפגעים	כל התאונות	-20	(-25 : -10)
הפיכת צומת מרומזר למחלף עם הפרדה מפלסית			
עם נפגעים	כל התאונות	-28	(-40 : -15)
הארכה של 30 מ' של נתיבי האצה ונתיבי האטה במחלף			
ללא פרוט	תאונות בנתיבי האצה והאטה	-5	(-11 : +2)
במחלף הפיכת לולאה לרמפה קצרה			
ללא פרוט	כל התאונות	-30	(-45 : -10)
תוספת נתיבים – 4 במקום 2			
עם נפגעים	כל התאונות	-11	(-25 : +5)
הרחבת רוחב דרך מתת סטנדרטית לסטנדרטית			
עם נפגעים	בתחום בין עירוני	-5	(-7 : -3)
הרחבת רוחב דרך בתחום הסטנדרט			
עם נפגעים	בתחום בין עירוני	-8	(-10 : -6)
הרחבת רוחב נתיב בתחום הסטנדרט			
עם נפגעים	בתחום בין עירוני	+9	(+4 : +14)
הוספת נתיב עקיפה בכוון אחד			
עם נפגעים	כל התאונות	-13	(-27 : +4)
הוספת נתיב עקיפה בכוון בשני הכוונים			
עם נפגעים	כל התאונות	-40	(-55 : -25)
סלילת שוליים			
עם נפגעים	כל התאונות	-37	(-48 : -24)
הרחבת שוליים בדרכים בין עירוניות			
עם נפגעים	כל התאונות	-18	(-27 : -7)
הרחבת שוליים בדרכים מהירות			
עם נפגעים	כל התאונות	-27	(-43 : -24)
הוספת מפרדה לדרכים ללא מפרדה			
עם נפגעים	כל התאונות	-15	(-27 : -1)
מיתון מידרון סוללת הדרך מ 1:3 ל 1:4			
עם נפגעים	כל התאונות	-42	(-46 : -38)
מיתון מידרון סוללת הדרך מ 1:4 ל 1:6			
עם נפגעים	כל התאונות	-22	(-26 : -18)
הגדלת רדיוס מ > 200 ל 200-400			
ללא פרוט	כל התאונות	-50	(-55 : -45)
הגדלת רדיוס מ 200-400 ל 400-600			
ללא פרוט	כל התאונות	-33	(-36 : -29)
הגדלת רדיוס מ 400-600 ל 600-1000			
ללא פרוט	כל התאונות	-23	(-27 : -14)
הגדלת רדיוס מ 600-1000 ל 1000-2000			
ללא פרוט	כל התאונות	18	(-22 : -14)
הגדלת רדיוס מ 1000-2000 למעל 2000			
ללא פרוט	כל התאונות	-12	(-16 : -8)
הקטנת שיפוע לאורך ממעל 7% ל 5-7%			
ללא פרוט	כל התאונות	-20	(-38 : +1)
הקטנת שיפוע לאורך מ 7%-5 ל 5-3%			
ללא פרוט	כל התאונות	-10	(-20 : 0)
הקטנת שיפוע לאורך מ 5%-3 ל 3-2%			
ללא פרוט	כל התאונות	-10	(-15 : -5)
שידרוג דרכים			
עם נפגעים	בין עירוני	-20	(-25 : -15)

מטבלה 1.6 ניתן ללמוד כי :

- בדרך בין עירונית בקטעי דרך, מאפיינים גיאומטריים הקשורים להתרחשות תאונות הם : בדרך מהירה רק 2 נתיבים לכוון; בדרך בין עירונית רק 2 נתיבים לשני הכוונים; רוחב הדרך קטן מהרוחב הסטנדרטי; רוחב הדרך מתאים לסטנדרט מזערי; בדרך חד מסלולית אין נתיבי עקיפה; שולי הדרך אינם סלולים; שולי הדרך צרים; אין מפרדה בדרך; מדרונות סוללת הדרך תלולים; לדרך עקולים ברדיוסים קטנים; לדרך שיפועים תלולים לאורך; קיים צורך בשדרוג הדרך (עקב עלייה בנפח התנועה);

- בדרך בין עירונית בצמתים, מאפיינים גיאומטריים הקשורים להתרחשות תאונות הם : חסרים נתיבי פנייה ימנה ונתיבי פנייה שמאלה; חסרים איי הפרדה; בדרך קיימים צמתים לא מרומזרים שאינם מעגלי תנועה; בדרך קיימים צמתים לא מדורגים;

- בדרך בין עירונית במחלפים, מאפיינים גיאומטריים הקשורים להתרחשות תאונות הם : נתיבי האצה והאטה קצרים; רמפות לולאה.

ה. מחקרים מישראל

במחקר ישראלי של הקרט ואחרים (2002), נמצאו מקדמי ירידה בתאונות למספר שיפורי תשתית. במחקר זה אין בממצאים נתונים על מקדם הפחתה בתאונות לאלמנט תכנוני יחיד (כגון: הרחבת נתיב, שיפור צד הדרך וכו').

בטבלה 1.7 מתוארים ערכים של מקדמי ירידה בתאונות עבור אמצעים הקשורים למאפיינים גיאומטריים בתחום הבין עירוני בלבד.

טבלה 1.7. אחוזי הפחתה בתאונות בעקבות שיפורי תשתית שונים הקשורים למאפיינים גיאומטריים. מקור: הקרט ואחרים (2002)

Table 1.7. Percentage of accident reductions following various infrastructure improvements (Hakkert et al, 2002).

סוג אתר	סוג שיפור	ערך מומלץ לשימוש*
קטע דרך בינעירוני	שדרוג קטע לדו-מסלולי, כולל צמתים	-24%
	הרחבת קטע	+69%
	ריבוד עם זיפות שוליים	+41% במספר תאונות, -39% בשיעור תאונות חמורות
	הקמת מעבר עילי להולכי רגל	-59%
צומת בין עירוני	רמזור עם הסדרה	-30%
	הסדרה בצומת	-23%

*אם לא צוין אחרת, מתייחס לכלל התאונות עם נפגעים

מטבלה 1.7 ניתן ללמוד כי :

- בדרך בין עירונית בקטעי דרך, מאפיינים גיאומטריים הקשורים להתרחשות תאונות הם : בדרך רק 2 נתיבים לשני הכוונים; רוחב הדרך צר; לדרך שוליים לא סלולים;

- בדרך בין עירונית בצמתים, מאפיינים גיאומטריים הקשורים להתרחשות תאונות הם: בדרך קיימים צמתים לא מרומזרים; בדרך קיימים צמתים לא מוסדרים ללא נתיבי פנייה ואיי תנועה.

במחקר ישראלי של גיטלמן ואחרים (2009), נמצאו מקדמי הפחתה בתאונות למספר התערבויות בטיחות בדרכים בין עירוניות. גם בממצאים אלו אין נתונים על מקדמי הפחתה בתאונות לאלמנט תכנוני יחיד.

בטבלה 1.8 מרוכזים מקדמי הפחתה בתאונות אשר נמצאו במחקר זה עבור שינויים בגיאומטריה.

טבלה 1.8. אחוזי הפחתה בתאונות לשיפורים גיאומטריים שונים. מקור: גיטלמן ואחרים (2009)

Table 1.8. Percentage of accident reductions following various infrastructure improvements (Gitelman et al, 2009).

מס' /	סוג שיפור בתשתית בדרך לא עירונית	ערך מומלץ של מקדם ירידה בתאונות*
1	בצומת: הסדרה - שיפורים גיאומטריים	-20%
2	רמזור צומת, לרבות שיפורים גיאומטריים, לפי הצורך	-45%
3	בצומת: הקמת מעגל תנועה	-40%
4	בצומת: התקנת תאורה, לרבות שיפורים גיאומטריים, לפי הצורך	-21% בתאונות לילה
5	בקטע: יישור שוליים, לרבות ביטול מדרגות ומיתון מדרונות	-9% בתאונות רכב יחיד
6	בקטע דרך חד-מסלולית: הסדרה - שיפורים גיאומטריים (כולל צמתים)	אין ערך מומלץ
7	הרחבת קטע דרך חד-מסלולי לדו-מסלולי (לא כולל צמתים)	-40%

* מתייחס לכלל התאונות עם נפגעים, אם לא צוין אחרת

מטבלה 1.8 ניתן ללמוד כי:

בדרך בין עירונית בקטעי דרך, מאפיינים גיאומטריים הקשורים להתרחשות תאונות הם: השוליים אינם ישרים; מדרונות תלולים מעבר לשול; בדרך רק 2 נתיבים לשני הכוונים;

בדרך בין עירונית בצמתים, מאפיינים גיאומטריים הקשורים להתרחשות תאונות הם: בדרך קיימים צמתים לא מרומזרים שאינם מעגלי תנועה; בדרך קיימים צמתים לא מדורגים.

1.4.3. מודלים לחיזוי תאונות

לבחינת הקשר בין מאפייני הדרכים לבין התרחשות תאונות מקובל להתאים מודל סטטיסטי רב-משתני הקרוי "פונקצית ביצוע בטיחותי" או, באנגלית, safety performance function (SPF). מודל כזה אומד את מספר התאונות הצפוי בקטע לפי כמות התנועה, סוג דרך ומאפייני דרך נוספים.

למספר סוגים של קטעי דרכים, צמתים ומחלפים, פותחו מודלים שבאמצעותם ניתן לחשב את התאונות החזויות לפי סוג האתר. נפח התנועה הוא משתנה משפיע בכל המודלים. עבור קטעי דרך, אורך הקטע הוא משתנה משפיע נוסף. ברוב המודלים קיימים מאפיינים משפיעים נוספים. בסקירה נתמקד במאפיינים הגיאומטריים אשר משפיעים על חיזוי התאונות. המקורות מהם נלקח מידע זה הם: HSM (2010), RSDW (2009).

A. HSM (2010)

במדריך זה, למספר סוגים של דרך, פותח מודל שבאמצעותו ניתן לחשב את התאונות החזויות באתר. מודלים כאלו קיימים עבור:

- דרך בין-עירונית חד-מסלולית דו-נתיבית;

- צמתים בין-עירוניים בדרך חד-מסלולית דו-נתיבית - צומת 3 זרועות לא מרומזר, צומת 4 זרועות לא מרומזר, צומת 4 זרועות מרומזר;

- דרך בין-עירונית רב-נתיבית;

- צמתים בין-עירוניים בדרך רב-נתיבית - צומת 3 זרועות לא מרומזר, צומת 4 זרועות לא מרומזר, צומת 4 זרועות מרומזר; עורקי תנועה עירוניים.

בתהליך חיזוי מספר התאונות באתר מסוים קיימים שני שלבים. בשלב הראשון, לכל אתר, מניחים את תנאי הבסיס. לתנאי הבסיס פותחו נוסחאות לחיזוי מספר התאונות בתלות בנפח התנועה היומי הממוצע, ואורך הקטע (בקטעי דרך). בשלב השני לחיזוי, מתייחסים למספר מאפיינים משפיעים התלויים בסוג הדרך או הצומת, שערכיהם שונים מתנאי הבסיס, כאשר התחשבות זו באה לידי ביטוי ע"י שימוש במקדמי שינוי בתאונות (CMF). עבור כל מאפיין, ערך מקדם ההתאמה שווה 1.0 כאשר הוא שווה בערכו לערך המאפיין בתנאי הבסיס. כאשר ערך התכונה משפר את הבטיחות - מפחית את מספר התאונות, ערך ה-CMF של התכונה קטן מ-1.0, ולהפך, כאשר ערך המאפיין גורם להגדלת מספר התאונות, ערך ה-CMF גדול מ-1.0. לאחר מציאת כל המקדמים הנובעים מהתנאים השונים מתנאי הבסיס, מכפילים את הערך החזוי של מספר התאונות בתנאי הבסיס במקדמים שנתקבלו. תוצאת ההכפלה היא מספר התאונות החזוי לאתר, לפי מאפייניו.

עבור דרך בין-עירונית חד-מסלולית דו-נתיבית קיימים מודלים להערכת ערכי ה-CMF ל-12 מאפיינים שהם: רוחב נתיב; רוחב וסוג שול; מאפייני עקום אופקי - אורך, רדיוס, קיום /אי-קיום עקום מעבר; עקום אופקי - הגבהה צידית; שיפוע לאורך; צפיפות צמתים משניים; פס משונן בציר הדרך; נתיבי עקיפה; נתיב פניות מרכזי לפניות שמאלה; מצב צדי הדרך; תאורה; אכיפת מהירות אוטומטית.

עבור צמתים בין-עירוניים בדרך חד-מסלולית דו-נתיבית (שלושה סוגים), קיימים מודלים לערכי ה-CMF של 4 מאפיינים: מידת הסטייה מזווית ניצבת בין זרועות הצומת; קיום נתיבי פנייה שמאלה; קיום נתיבי פנייה ימינה; תאורה.

עבור דרכים בין-עירוניות רב-נתיביות יש אבחנה בין דרך מחולקת עם מפרדה לבין דרך ללא מפרדה (דרך בין-עירונית רב-נתיבית ללא מפרדה אינה אופיינית לארץ). קיימים מודלים לערכי ה-CMF ל-6 מאפיינים (חלק מהמאפיינים שונה לדרך עם מפרדה ולדרך ללא מפרדה): רוחב נתיב; רוחב וסוג שול ימני; רוחב מפרדה; מדרון מעבר לשול; תאורה; אכיפת מהירות אוטומטית.

עבור צמתים לא מרומזרים בין-עירוניים (עם 3 ו-4 זרועות) בדרך רב-נתיבית קיימים מודלים לערכי ה-CMF ל-4 מאפיינים: מידת הסטייה מזווית ניצבת בין זרועות הצומת; קיום נתיבי פנייה שמאלה; קיום נתיבי פנייה ימינה; תאורה.

בטבלה 1.9 מפורטים סוגי ההסדרים הבין עירוניים להם קיים מודל חיזוי, ורשימת מקדמי CMF הרלוונטיים.

טבלה 1.9. סוגי ההסדרים הבין עירוניים ורשימת מקדמי הפחתת התאונות הקשורים למאפיינים גיאומטריים. מקור: HSM (2010).

Table 1.9. Accident modification factors related to geometric characteristics of rural road sites (HSM, 2010).

סוג דרך	סוג אתר	מאפיינים להם קיימים מקדמי הפחתת תאונות
דרך בין עירונית חד מסלולית דו נתיבית	קטע	רוחב נתיב, רוחב וסוג שול, עקום אופקי - אורך, רדיוס, עקום מעבר, עקום אופקי- הגבהה צידית, שיפוע לאורך, צפיפות צמתים משניים, נתיבי עקיפה, צדי הדרך.
דרך בין עירונית חד מסלולית דו נתיבית	צומת לא מרומזר 3, 4 זרועות, צומת מרומזר 4 זרועות	מידת הסטייה מזווית ניצבת בין זרועות הצומת, קיום נתיבי פנייה שמאלה, קיום נתיבי פנייה ימינה.
דרך בין עירונית רב נתיבית מופרדת	קטע	רוחב נתיב, רוחב שול ימני, רוחב מפרדה.
דרך בין עירונית רב נתיבית מופרדת	צומת לא מרומזר 3, 4 זרועות	מידת הסטייה מזווית ניצבת בין זרועות הצומת, קיום נתיבי פנייה שמאלה, קיום נתיבי פנייה ימינה.

מטבלה 1.9 ניתן ללמוד כי :

- בדרך בין-עירונית חד-מסלולית בקטעי דרך, מאפיינים גיאומטריים הקשורים להתרחשות תאונות הם: נתיב צר; שול צר; שול לא סלול; עקום אופקי ארוך; עקום אופקי עם רדיוס קטן; בעקום אופקי חוסר בעקום מעבר; בעקום אופקי הגבהה צידית קטנה מהסטנדרט; שיפוע תלול לאורך; צמתים משניים צפופים לאורך הדרך; אין נתיבי עקיפה בדרך; צידי הדרך אינם בטיחותיים (מדרונות תלולים ומכשולים קרובים);

- בדרך בין-עירונית חד-מסלולית בצמתים, מאפיינים גיאומטריים הקשורים להתרחשות תאונות הם: זווית בין זרועות הצומת אינה ניצבת; חסרים בצומת נתיבי פנייה שמאלה; חסרים בצומת נתיבי פנייה ימינה;

- בדרך בין-עירונית רב-נתיבית דו-מסלולית בקטעי דרך, מאפיינים גיאומטריים הקשורים להתרחשות תאונות הם: נתיבים צרים; שול ימני צר; מפרדה צרה;

- בדרך בין-עירונית דו-מסלולית בצמתים, מאפיינים גיאומטריים הקשורים להתרחשות תאונות הם: זווית בין זרועות הצומת אינה ניצבת; חסרים בצומת נתיבי פנייה שמאלה; חסרים בצומת נתיבי פנייה ימינה.

ב. RSDW (2009)

במדריך זה, למספר סוגים של דרך, פותחו מודלים אשר באמצעותן ניתן לחשב מספר סוגי תאונות חזויות (לפי סוג התאונה). מודלים כאלו קיימים עבור סוגי דרכים: מהירה בין עירונית, מהירה עירונית פרברית, בין עירונית דו-נתיבית, בין עירונית עם 4 נתיבים, עורקים עירוניים ופרבריים, רמפות במחלפים, צמתים בין עירוניים מרומזרים, צמתים בין עירוניים לא מרומזרים, צמתים עירוניים מרומזרים וצמתים עירוניים לא מרומזרים.

בדומה למדריך ה-HSM (2010), הקלט הבסיסי של המודלים הוא נפח התנועה היומי ואורך קטע (לקטע דרך), כאשר בתהליך חיזוי התאונות ישנם שני שלבים.

בשלב הראשון, לכל אתר, מניחים את תנאי הבסיס, שעבורם קיימות נוסחאות לחיזוי מספר התאונות בתלות בנפח התנועה היומי הממוצע ואורך הקטע. בשלב השני, נערך תיקון התוצאה, תוך כדי התחשבות במאפייני האתר אשר שונים מתנאי הבסיס, ע"י שימוש במקדמי שינוי בתאונות (AMF במדריך זה). עבור כל מאפיין, ערך המקדם שווה 1.0 כאשר הוא שווה בערכו לערך המאפיין בתנאי הבסיס. כאשר ערך התכונה משפר את הבטיחות, מפחית את התאונות, ערך ה-AMF של התכונה קטן מ-1.0, ולהפך, כאשר ערך המאפיין גורם להגדלת מספר התאונות ערך ה-AMF גדול מ-1.0. לאחר מציאת כל המקדמים הנובעים מתנאים השונים מתנאי הבסיס, מכפילים את ערך חיזוי התאונות בתנאי הבסיס במקדמים שנתקבלו. תוצאת ההכפלה היא חיזוי התאונות לאתר.

בטבלה 1.10 מובא פירוט המצייין לסוגי דרכים בין-עירוניות שונות את המאפיינים הגיאומטריים המשפיעים על תאונות ואשר פותחו לגביהם מודלים למקדמי הפחתה בתאונות AMF.

טבלה 1.10. סוגי ההסדרים ורשימת מקדמי הפחתה התאונות, לפי RSDW (2009).

Table 1.10. Accident modification factors related to rural road sites (RSDW, 2009).

סוג דרך	סוג אתר	מאפיינים להם קיימים מקדמי הפחתה תאונות
דרך מהירה	בין עירונית ופרברית	רדיוס אופקי, שיפוע, רוחב נתיב, שול ימני, שול שמאלי, רוחב מפרדה (ללא מעקה, מעקה חלקי מעקה מלא), מרווח פנוי בצד הדרך (ללא מעקה, מעקה חלקי, מעקה מלא), קטעי התמזגות בכניסות מרמפות, קטעי השתזרות.
דרך בין עירונית	2 ו-4 נתיבים	רדיוס אופקי, מרווח פנוי בצד הדרך (ללא מעקה, מעקה חלקי מעקה מלא), שיפוע מעבר לשול.
דרך בין עירונית	2 נתיבים	עקום מעבר, רוחב נתיב ושול, סוג הפרדה, הגבהה צידית, נתיבי עקיפה.
דרך בין עירונית	4 נתיבים	רוחב נתיב, רוחב שול ימני, רוחב שול שמאלי, רוחב מפרדה (ללא מעקה, מעקה חלקי, מעקה מלא), שיעור משאיות.
צומת בין עירוני	מרומזר	נתיב פנייה שמאלה, נתיב פנייה ימינה, מספר נתיבים, כניסות למגרשים גובלים.
	לא מרומזר	נתיב פנייה שמאלה, נתיב פנייה ימינה, מספר נתיבים, רוחב שוליים, מפרדה, הסטייה מזווית ניצבת בין זרועות הצומת, כניסות למגרשים גובלים.

מטבלה 1.10 ניתן ללמוד:

- בדרך מהירה ופרברית מהירה, מאפיינים גיאומטריים הקשורים להתרחשות תאונות הם: רדיוס אופקי קטן; שיפוע תלול לאורך; נתיב צר; שול ימני צר; שול שמאלי צר; מפרדה צרה; מרווח צר פנוי ממכשולים לצד הדרך; אורך קצר של נתיבי התמזגות והפרדות ברמפות המחלפים.

- בדרך בין עירונית חד-מסלולית בקטעי דרך, מאפיינים גיאומטריים הקשורים להתרחשות תאונות הם: רדיוס אופקי קטן; מרווח צר פנוי ממכשולים לצד הדרך; שיפוע תלול של סוללת הדרך; חסרים עקומי מעבר; נתיב צר; שול צר; בעקום אופקי הגבהה צידית קטנה מהסטנדרט; אין נתיבי עקיפה בדרך.

- בדרך בין עירונית דו-מסלולית, מאפיינים גיאומטריים המשפיעים על התרחשות תאונות הם: רדיוס אופקי קטן; מרווח צר פנוי ממכשולים לצד הדרך; שיפוע תלול של סוללת הדרך; נתיב צר; שול ימני צר; שול שמאלי צר; מפרדה צרה; צפיפות בצמתים משניים (כניסות לחלקות גובלות).

- בדרך בין עירונית רב-נתיבית דו-מסלולית בקטעי דרך, מאפיינים גיאומטריים המשפיעים על התרחשות תאונות הם: נתיבים צרים; שול ימני צר; מפרדה צרה.

- בדרך בין עירונית בצמתים מרומזרים, מאפיינים גיאומטריים המשפיעים על התרחשות תאונות הם: אין נתיבי פניה שמאלה; אין נתיבי פנייה ימינה; מספר הנתיבים קטן; קיימות כניסות לחלקות גובלות סמוך לצומת.

- בדרך בין-עירונית בצמתים לא מרומזרים, מאפיינים גיאומטריים המשפיעים על התרחשות תאונות הם: אין נתיבי פניה שמאלה; אין נתיבי פנייה ימינה; מספר הנתיבים קטן; שוליים צרים; אין מפרדות; זווית בין זרועות הצומת אינה ניצבת; קיימות כניסות לחלקות גובלות סמוך לצומת.

1.4.4. סיכום - רשימה של מאפייני תשתית המשפיעים ביותר על התרחשות התאונות

מכל מקורות המידע שנסקרו קובצו מאפיינים גיאומטריים המשפיעים על התרחשות תאונות, לפי שלושה סוגי דרך בין-עירונית: דו-מסלולית ממחלפת, דו-מסלולית עם צמתים, חד-מסלולית. לכל סוג דרך פוצלו המאפיינים הגיאומטריים עבור קטע דרך ועבור מחלף, צומת מרומזר וצומת לא מרומזר.

בטבלה 1.11 מוצגים המאפיינים הגיאומטריים המשפיעים לפי סוגי הדרכים.

טבלה 1.11. סיכום - מאפיינים גיאומטריים המשפיעים על תאונות בדרכים הבין-עירוניות

Table 1.11. Summary: geometric characteristics influencing accidents on rural roads

סוג דרך	אזור בדרך	מאפיינים גיאומטריים המשפיעים על תאונות
דו-מסלולית עם מחלפים	קטע	רדיוס אופקי קטן. שיפוע תלול לאורך. נתיב צר. שול ימני צר. שול שמאלי צר. מפרדה צרה. מרווח צר פנוי ממכשולים לצד הדרך. קיימים רק 2 נתיבים לכל כוון. קיימים פתחים במפרדה.
	מחלף	אורך קצר של נתיבי התמזוגות/האצה והפרדות/האטה ברמפות. לולאות במחלפים. קיימים 2 נתיבי שינוי מהירות מקבילים.
דו-מסלולית עם צמתים	קטע	רדיוס אופקי קטן. מרווח צר פנוי ממכשולים לצד הדרך. שיפוע תלול של סוללת הדרך. נתיב צר. שול ימני צר. שול שמאלי צר. מפרדה צרה. צפיפות בצמתים משניים (כניסות לחלקות גובלות). קיימים צמתים לא מרומזרים. רוחב הדרך מתאים לסטנדרט מזערי. קיימים פתחים במפרדה.
	צומת מרומזר	אין נתיבי פניה שמאלה. נתיב פניה שמאלה קצר מידי. אין נתיבי פנייה ימינה. מספר הנתיבים קטן. קיימות כניסות לחלקות גובלות סמוך לצומת. זווית בין זרועות הצומת אינה ניצבת. הצומת אינה מדורגת.
	צומת לא מרומזר	אין נתיבי פניה שמאלה. נתיב פניה שמאלה קצר מידי. אין נתיבי פנייה ימינה. מספר הנתיבים קטן. שוליים צרים. אין מפרדות. זווית בין זרועות הצומת אינה ניצבת. קיימות כניסות לחלקות גובלות סמוך לצומת. הצומת אינה מדורגת. קיים מעגל תנועה רב נתיבי.
חד-מסלולית	קטע	רדיוס אופקי קטן. מרווח צר פנוי ממכשולים לצד הדרך. שיפוע תלול של סוללת הדרך. מכשולים קרובים בצידי הדרך. חסרים עקומי מעבר. נתיב צר. שול צר. שול לא סלול. עקום אופקי ארוך. שיפוע תלול לאורך. עקום אופקי הגבהה צידית קטנה מהסטנדרט. אין נתיבי עקיפה בדרך. צפיפות צמתים משניים. יש צורך בשדרוג הדרך לדו מסלולית עקב נפחי תנועה גבוהים.
	צומת מרומזר	אין נתיבי פניה שמאלה. נתיב פניה שמאלה קצר מידי. אין נתיבי פנייה ימינה. מספר הנתיבים קטן. קיימות כניסות לחלקות גובלות סמוך לצומת. זווית בין זרועות הצומת אינה ניצבת. הצומת אינה מדורגת. הצומת אינה מעגל תנועה.
	צומת לא מרומזר	אין נתיבי פניה שמאלה. נתיב פניה שמאלה קצר מידי. אין נתיבי פנייה ימינה. מספר הנתיבים קטן. שוליים צרים. אין מפרדות. מפרדה צרה מידי בדרך המשנית. זווית בין זרועות הצומת אינה ניצבת. קיימות כניסות לחלקות גובלות סמוך לצומת. הצומת אינה מעגל תנועה.

2. הכנת בסיס הנתונים למחקר

בהכנת בסיס הנתונים למחקר היו שני חלקים: (1) מיפוי נתונים על אירועי הנהיגה (על סמך נתוני "הקופסא הירוקה") על רשת הכבישים ו-(2) הכנת בסיס הנתונים המשולב למחקר, לרבות אירועי הנהיגה, מאפייני התשתית, מדדי החשיפה ומספרי התאונות. פרק 2.1 מפרט את שיטת מיפוי הנתונים על אירועי הנהיגה על רשת הכבישים, לרבות ניתוח הנתונים המקוריים, שילובם עם רשת ה"למ"ס ויצירת בסיסי נתונים מסכמים לכל כביש נבחר. פרק 2.2 מתאר את בסיס הנתונים שנבנה במחקר, לרבות הגדרה סופית לכללים ששימשו להפקת מאפייני התשתית, מבנה בסיס הנתונים המשולב שנבנה במחקר והצגת סטטיסטיקה תיאורית של בסיס הנתונים המשולב.

יש לציין שבשל היקף משמעותי ומורכבות של נתוני הנהיגה (מתוך "הקופסא הירוקה") וכן, השקעה ניכרת של משאבים אשר נדרשת להצבת נתונים אלה על גבי מפות הכבישים, כאשר מראש לא ידוע מהן תדירויות הנסיעה של כלי הרכב עם "הקופסא הירוקה" בכבישים השונים בארץ, להכנת בסיס הנתונים למחקר הוחלט לבחור **במספר כבישים מייצגים**. הכבישים המייצגים נבחרו, מחד, מבין הכבישים המובילים ברשת הלא עירונית, ומאידך, מתוך הנחה על סבירות גבוהה של שימוש בכבישים אלה ע"י האנשים שהיו מעורבים במחקרי "הקופסא הירוקה", לצורכי הנסיעות השגרתיות שלהם ו/או נסיעות פנאי ותיירות.

בתור הכבישים המייצגים ליצירת בסיס הנתונים למחקר נבחרו כבישים מס' 4, 65, 70, 1, 2, 40, 44, 444, 90 (**9 כבישים**). הכבישים שנבחרו למחקר כללו את הכבישים העיקריים באזור המרכז, בתוספת מספר כבישים טיפוסיים אשר משמשים לנסיעות לאזורי תיירות מובהקים בצפון ובדרום הארץ. כמו כן, הכבישים שנבחרו מהווים שילוב של סוגי דרך שונים, דהיינו דרכים ממוחלפות, דו-מסלוליות וחד-מסלוליות.

בסיס הנתונים הסופי שנבנה במחקר כולל **כ-3500 יחידות ניתוח** - קטעי כביש באורך כ-200 מ', כאשר לכל יחידה מוגדרים, מחד, מאפייני האירועים בנהיגה (לרבות מאפייני החשיפה לאירועים - היקפי הנסיעות) ומאידך, מאפייני תשתיות הדרכים. הן אירועי הנהיגה והן מאפייני התשתיות שייכים לשנת 2010. בנוסף, לכל יחידת ניתוח רוכזו מספרי תאונות דרכים, לפי סוגים מוגדרים, שנרשמו בשנים 2008-2010.

2.1. מיפוי אירועי נהיגה על רשת הכבישים

2.1.1. רקע - נתוני "הקופסא הירוקה"

"הנהיגה הטבעית" מאפשרת לספק מידע מפורט בנוגע לדפוסי הנהיגה והגורמים המתקשרים עם אירועים קריטיים, אירועים הקרובים להתנגשות והתנגשויות. בפרויקט שמובילה עמותת "אור ירוק" כבר לאורך מספר שנים, מבוצע איסוף נתוני "הנהיגה הטבעית" בעזרת "קופסאות ירוקות" המותקנות ב-200 כלי רכב. בנתונים שנאספו קיים ניטור רציף במהלך הנסיעה הכולל נתונים על מיקום כלי הרכב, מהירות הנסיעה, תאוצות ובלימות של הרכב, ועוד.

מערכת ניטור זו משמשת לרישום ועיבוד נתוני נהיגה בזמן אמת, במטרה לסווג ולתת חיווי על דפוסי נהיגה ולהתריע כאשר מזוהה דפוס נהיגה בעייתי. איסוף הנתונים מבוצע באמצעות חיישנים ממערכות הרכב השונות כגון: היגוי, בלימה, ספידומטר, גז וצריכת דלק. מטרתו של

עיבוד הנתונים היא לשקלל את נתוני החיישנים כדי לסווג את דפוס הנהיגה של הנהג. אירועי הבטיחות הנקלטים במכשיר ("הקופסא הירוקה") כוללים 20 קטגוריות אותן ניתן לשייך לתאוצה, בלימה, מהירות מופרזת, החלפת נתיב ופניות.

הנבדקים במחקר של "אור ירוק", בעלי הקופסאות הירוקות ברכביהם, חולקו לארבע קבוצות לפי סוג ההתרעה/המשוב על אירועי הבטיחות שהתרחשו במהלך הנהיגה, כלהלן:

קבוצה 1 - ניטור באמצעות התרעה ברכב ושליחת הודעה מיידית לאתר אינטרנט;

קבוצה 2 - ניטור באמצעות התרעה ברכב ושליחת הודעה מותנית לאתר;

קבוצה 3 - ניטור באמצעות התרעה לאתר בלבד;

קבוצה 4 (קבוצת הביקורת) - ניטור ללא התרעה ברכב וללא הודעה באתר.

מחקר זה התמקד בניתוח נתוני "הקופסא הירוקה" שהתקבלו **מקבוצת הביקורת**, בה הנהגים שהשתתפו במחקר לא קיבלו משוב על נהיגתם. בחינת קבוצה זו מספקת מידע מציאותי על אופן הנהיגה בכבישים, ללא התערבות ומשוב אשר עלולים להשפיע על התנהגות הנהגים.

מרבית המחקרים העוסקים בנתוני "הקופסא הירוקה" כוללים ניתוח של המידע שנאסף מהרכב כגון: מידע על הזמנים והמשכים של נסיעות, מרחקי הנסיעות, מיקום הרכב, מהירותו והתאוצות באופן רציף, שמירת מרחק, מעבר נתיב ופרמטרים של המנוע ומערכות הרכב (כגון: שימוש בחגורות בטיחות, פליטת מזהמים, מצב דוושות הגז והבלמים וכדומה). אולם, למרות שמערכות אלו כוללות, לרוב, רישום של נתוני מיקום באמצעות מכשיר GPS הן לא משייכות את המיקום לכביש, על-פי סוגיו השונים ומאפיינים מרחבים נוספים. לכן, פרק זה במחקר הנוכחי מתמקד בנתוני המיקום של הרכב, כדי לשייך אירועים בנהיגה למודל המרחבי של רשת הכבישים (מפה דיגיטלית), קרי לקטעי הכבישים בהם נצפו האירועים.

2.1.2. מתודולוגיה לניתוח נתוני "הקופסא הירוקה"

מכשיר "הקופסא הירוקה" מאפשר לקבל מידע על תאוצה, מהירות ומיקום כלי הרכב (אורך ורוחב גיאוגרפיים). האירועים הנקלטים במכשיר נחלקים לשני סוגים: האחד, אירועי מיקום במרווחי זמן קבועים (~ דקה), והשני, אירועי בטיחות בזמן התרחשותם. אירועי הבטיחות הנקלטים במכשיר כוללים, כאמור, 20 קטגוריות אותן ניתן לשייך לתאוצה, בלימה, מהירות מופרזת, החלפת נתיב ופניות.

המחקר הנוכחי שאף לבחון את הקשר בין התרחשות אירועים חריגים בנהיגה לבין מאפייני התשתיות. על מנת לאפשר בחינה זו, תצפיות מיקומי ה-GPS צריכות להתאים לרשת הכבישים על גבי מפה דיגיטלית נתונה. תהליך זה נקרא Map Matching, והוא מהווה תהליך מקדים ליישומים רבים, לרבות עיבוד סטטיסטי במרחב של אירועי נהיגה.

לרוב, גישות של התאמה למפה עוסקות בתצפיות בהן שיעורי דגימת מיקום גבוהים (יש תצפית כל 1-2 שניות). גישות אלו אינן מתאימות במקרים בהן שיעור הדגימה נמוך (כגון: תצפית כל 1-2 דקות בממוצע), כאשר אי הוודאות גדלה. במסגרת זו, טכניקת ההתאמה למפה מהווה אתגר בשל קצב הדגימה הנמוך של הנתונים, רמת הדיוק של מדידת המיקום ב-GPS והמפה הדיגיטלית.

מירב הגישות הקיימות להתאמה מתאפיינות באלגוריתמים מקומיים המעבירים את תצפיות ה-GPS לקטעי הכביש הנמצאים בשכנות להן. התוצאה של גישה לוקאלית זו, המתחשבת רק במיקום הנוכחי, מושפעת מאוד מטעויות מדידה של תצפיות ה-GPS. בעוד שלגישות המקומיות זמן חישוב קצר, מידת האפקטיביות שלהן רגישה לירידה בכמות התצפיות. לחלופין, האלגוריתם הגלובלי מתאים את כל תצפיות ה-GPS השייכות למסלול נסיעה מסוים לרשת הכבישים. באופן כללי, הגישה הגלובלית משיגה דיוק טוב יותר אך במחיר גבוה יותר בזמן החישוב. האלגוריתם המוצג במחקר זה מסתמך על רשת הכבישים והמידע המתקבל מהקופסא הירוקה (מיקום, מהירות, כיוון נסיעה וחותמת זמן) ופועל תחת אילוצי זמן ומהירות הנסיעה של מסלולי GPS, ובכך מאפשר לו להיות חסין לירידה בקצב הדגימה.

החלק הבא בתיאור השיטה יעסוק בתהליך התאמת הנתונים למפה באופן גלובלי על מנת להשיג מסלולים של GPS, תוך כדי התמודדות עם המבנה המרחבי הגיאומטרי והטופולוגי של רשת הכבישים והאילוצים על המסלולים הנובעים מאזימוט, מהירות הנסיעה ומאפיינים נוספים.

2.1.2.1. עקרונות האלגוריתם - Map Matching

בסעיף זה, האלגוריתם שפותח להתאמת נתוני האירועים בנהיגה למפה מתואר בפירוט. השלבים העיקריים של האלגוריתם מתוארים באיור 2.1.



איור 2.1. שלבים עיקריים בתהליך ה-Map Matching.

Figure 2.1. Main steps of the "Map Matching" process.

לאלגוריתם שני מאפיינים עיקריים:

(1) לכל נקודת דגימת GPS יכול להיות יותר מקטע כביש אחד המהווה מועמד מתאים, דבר התורם לחוסן ולנכונות האלגוריתם.

(2) מניחים כי נהגים נוטים לבחור בדרך הקצרה ביותר בין שתי נקודות רצופות של דגימת GPS. הנחה זו עשויה להיכשל כאשר שיעור הדגימה יורד באופן משמעותי. בשיעור דגימה של פחות מ-2 דקות, הנחה זו מקובלת והגיונית. הפתרון המתקבל משרשור המסלולים הקצרים ביותר בין שתי נקודות דגימה רצופות נאמן וקרוב יותר למסלול האמיתי, ולכן גם עשוי להיות שונה באופן מהותי מפתרון המסלול הקצר בין נקודת ההתחלה והסיום של מסלול ה-GPS.

בחירת המועמדים

התזוזה האופקית של נקודת ה-GPS ממיקומה האמיתי על קטעי הכביש נובע ממספר גורמים :

- מיקום נקודת ה-GPS עם דיוק ממוצע משוער של ± 10 מטרים ברמת מובהקות של 95%.

- השהיה בהקלטת הנתונים של מכשיר ההקלטה ("הקופסא הירוקה").

- הייצוג הפיסי ברשת הכבישים על גבי המפה הדיגיטלית, בה כבישים בעלי מספר נתיבים מיוצגים כקו אחד המהווה את מרכז הכביש.

- שגיאות המיקום בתהליך קליטת המפה (דיגיטציה) של הקווים המייצגים את מרכזי הכבישים.

בחינה של מקבצי נתונים שונים הובילה להערכה כי התזוזה במיקום הינה פחותה מ-50 מטרים ברמת מובהקות של 99%.

עבור כל תצפית GPS, מתבצע חיפוש אחר קטע כביש מקביל ברשת הכבישים באמצעות שלושה מרחקים ניצבים $[r1 \ r2 \ r3]$, המסודרים בסדר עולה מקטן לגדול. בכל מרחק, כיוון הנסיעה הנקלט מתצפיות ה-GPS נבחן ביחס לאזימוט הכביש ולערך δ . אם במרחק הנוכחי לא נמצאו קטעי כביש מתאימים, מתבצע חיפוש במרחק גדול יותר. לעיתים, במיוחד בתחילת נסיעה, דרוש זמן סנכרון בין לווויני ה-GPS למכשיר ההקלטה. כתוצאה מכך תצפיות אלו עלולות להיות מרוחקות עד מאוד מהמיקום האמיתי של כלי הרכב. לכן, במידה ולא נמצא כלל קטע כביש מתאים לתצפית ה-GPS האלגוריתם ממשיך לתצפית הבאה.

חישוב המסלול הקצר ביותר

רשת הכבישים מיוצגת בגרף מכוון בו המועמדים הם קטעי הכביש המהווים חלק מהגרף. עקיבה אחר מסלול הנסיעה מתרגמת לבעיית המסלול הקצר ביותר, בה המרחקים הם המשקלים על הקשתות:

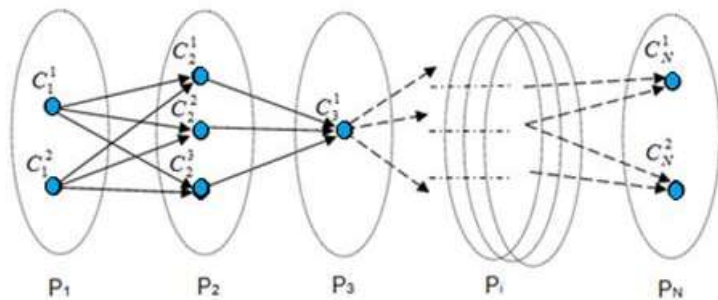
$$d(p^*) = \sum_{i \in p^*} d(i) = \min \left(\sum_{i \in p} d(i) \right)$$

כאשר p הוא המרחק בין שתי נקודות GPS, כאשר כל נקודת GPS משויכת לקטע אחר; p^* הוא המרחק הקצר ביותר בין שני מקטעים; $d(i)$ הוא משקל הקשת. סט מועמדי מקטעי הכביש בהם עלות הנסיעה היא הנמוכה ביותר הינה הנתוב הקצר ביותר ומהווה פתרון למסלול רצוי.

איור 2.2 מציג את הגרף הכללי של המועמדים, בו C_i^j הוא המועמד לקטע הכביש j עבור תצפית ה-GPS P_i . במקרים מסוימים לתצפית ה-GPS יכול להיות רק מועמד אחד (למשל, P_3 באיור 2.3).

בפועל, המסלול יכול להכיל מספר רב של תצפיות GPS. כתוצאה מכך, מספר האפשרויות לפתרון המסלול עלול להיות גדול משמעותית. במקרה שכזה, על גרף המועמדים להיות מחולק לכמה גרפים חלקיים. לדוגמה, מסלול המכיל עשר תצפיות GPS עם שלושה קטעי כביש מועמדים לכל תצפית מייצר גרף של 3^{10} מועמדים כלומר כשישים אלף קומבינציות אפשריות לפתרון המסלול,

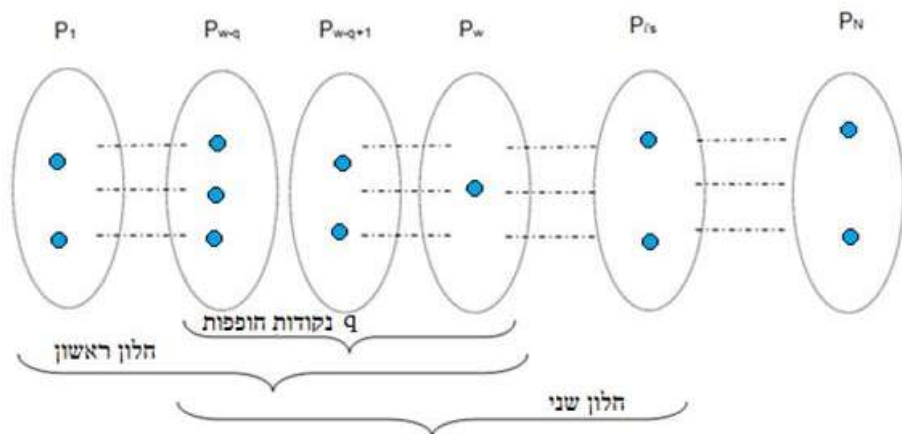
כאשר פיצול המסלול לשני מסלולים ייתן רק $2 \cdot 3^5$, כלומר כחמש מאות קומבינציות אפשריות לפתרון.



איור 2.2. דוגמה לגרף מועמדים

Figure 2.2. Example of a graph of candidates.

דוגמה לפיצול הגרף ניתן לראות איור 2.3. כפי שמודגם באיור 2.3, כל גרף מועמד חלקי בנוי מחלון הזזה המהווה חלק מהמסלול עם גודל חלון w . המסלול הקצר מחושב לכל חלון בתורו. על מנת לקבל מסלולים הקשורים זה לזה, יש חפיפה של מספר נקודות ה-GPS (q נקודות) בין חלונות רצופים. לאחר מציאת התיב הקצר ביותר לחלון הראשון, לנקודת ה-GPS של חלון זה יש רק מועמדים נכונים, מלבד אולי נקודת הסוף בחלון שעלולה להיות משויכת לקטע כביש בצורה שגויה. באופן זה, האלגוריתם ממשיך לחלונות הבאים P_{w-q} וכן הלאה.



איור 2.3. פיצול גרף המועמדים

Figure 2.3. Splitting of the graph of candidates.

חיבור חלקי המסלול לכדי מסלול רציף אחד מתבצע על-ידי מציאת קטע חופף בשני חלקי מסלול סמוכים. מציאת הקטע החופף אינה מסתמכת על קטע הכביש המשוך לתצפית ה-GPS הראשונה הנמצאת בקטע המשותף אלא על קטעי הכביש המשויכים לתצפית השנייה והשלישית. הסיבה לכך נובעת מהקשר הפנימי החזק הקיים בתוך המסלול לעומת הקשר הרופף הקיים בקצוות (תצפית GPS אחרונה או ראשונה בחלון), בה אין התחשבות כלפי שאר המסלול.

תיאור נתוני הפלט

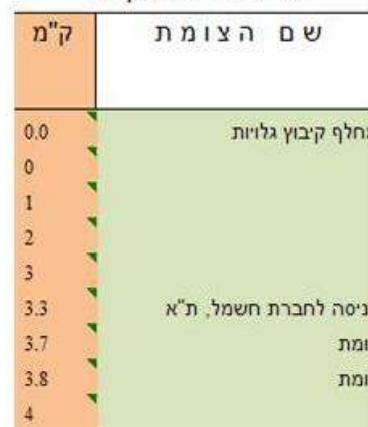
תוצאת אלגוריתם ה-Map Matching בא לידי ביטוי בשני סטי נתונים. הסט הראשון, שכבת חשיפה (Exposure layer), המספק מידע על כל קטע כביש הכלול במסלול, כגון זמן חצייה, סוג מקטע הכביש (עירוני או בין עירוני) אורך המקטע ומאפיינים נוספים. הסט השני, שכבת אירועים (Events layer), המספק מידע על מיקום של אירועי בטיחות וסוג האירוע בקטע כביש מסוים השייך למסלול ספציפי. שדות מפתח המצויים בכל אחד מסטי הנתונים וכן ברשת הכבישים מאפשרים לקשר בין בסיסי הנתונים השונים. השלב הבא הוא ביצירת בסיס משותף למקבצי הנתונים כך שניתן יהיה לחברם בהמשך עם מאפייני הדרכים של מערכת המנ"ב.

2.1.2.2. שילוב והתאמה של המסלולים והאירועים עם רשת הלמ"ס

שילוב קבצי הפלט המתקבלים מאלגוריתם ה-Map Matching עם מאפייני הדרכים מתבצע על ידי הבאתם לבסיס משותף. מאפייני הדרכים מתוארים על-ידי רשת הלמ"ס, המוגדרת באופן אלפא-נומרי ואינה כוללת קואורדינאטות של הכבישים הנכללים בה. הרשת מסווגת לסוג הכביש, עירוני ובין-עירוני. הרשת הבין-עירונית מוגדרת על-ידי מספר הכביש והקילומטר הרץ, כאשר נקודת ההתחלה וסיום הכביש מוגדרים באופן שרירותי על-ידי הלמ"ס (איור 2.4).

בנוסף, הרשת אינה מכוונת, כאשר כל מידע על גבי רשת זו (לדוגמא, תאונות או נפחי תנועה) נכלל בקטעי דרך ללא הגדרת כיוון הנסיעה. מכיוון שהרשת מתוארת גם באופן פיזי, על-ידי אבני דרך הכוללים את מספרי הקילומטרים המוצבים בשטח הכביש, רשת הלמ"ס אינה רגישה לשינויים המתרחשים בכביש. הרחבה, קיצור או הארכה של קטע כביש אינם גוררים הצבה מחדש של אבני הדרך או הגדרה מחדש של רשת הכבישים. לכן, כדי להתאים בין המסלולים המורכבים ממקטעי כביש ברשת הכבישים והאירועים לרשת הלמ"ס יש להתייחס לשני פנים: הראשון, המבטא שינוי באורך הכביש, קיצור או הארכה, שזהו תהליך של כיוול הכביש, והשני, המבטא מיקום מרחבי באופן אלפא-נומרי, שזהו תהליך בו לכל קטע כביש ברשת הכבישים ולכל אירוע יתווסף מידע מרשת הלמ"ס, המציין מספר כביש וקילומטר.

דרך 1 קטע 10 ממחלף קיבוץ גליות עד מחלף גנות
ת' אור המ קום



איור 2.4. דוגמא לקטע מרשת הלמ"ס

Figure 2.4. Example of a road section from the CBS network

כיוול הכבישים

השלב הראשון להתאמה בין רשת הכבישים (על סמך נתוני הנהיגה) ורשת הלמ"ס מתבטא בתהליך כיוול הכבישים. התהליך מתאר קיצור או הארכה של קטעי כביש בהתאם למדידות נתונות. מדידות אלו מתוארות על ידי צמתי הלמ"ס בהם ידוע מספר הכביש אליו הם שייכים, מספר הקילומטרים שעברו מתחילת הכביש וקואורדינטות הצומת המיוצג כנקודה.

דוגמא לתהליך הכיוול מוצגת באיור 2.5. בשל ייצוג הגיאומטרי של הצומת ואי-דיוק הקואורדינטות, לעתים, נקודות הצומת מרוחקות מהכביש. לכן, תהליך הכיוול מתחיל בהטלה של צמתי הלמ"ס על גבי קטע הכביש (P_1-P_4 באיור 2.5) ויצירת נקודות מפנה (Vertex) המהוות חיתוך של הכביש עם הנקודות המוטלות. ערכן המטרי מתקבל מערך הקילומטרים של צמתי הלמ"ס. הכביש המיוצג כקו מורכב מנקודות מפנה המחוברות ביניהן בסגמנטים ישרים. בהתאם לנקודות הלמ"ס המוטלות מחושב ערך חדש לנקודות המפנה המרכיבות את הכביש בעזרת אינטרפולציה או אקסטרפולציה.

חישוב ערך לנקודת המפנה V_1 המחושב באקסטרפולציה נתון על ידי:

$$v_1 = d_2^n - d_2^o \cdot \frac{d_1^n}{d_1^o}$$

כאשר:

d_1^o - המרחק בין היטל נקודות הלמ"ס P_1 ו- P_2 כפי שהיה נמדד על גבי הכביש על פי מידותיו המקוריות;

d_1^n - המרחק בין היטל נקודות הלמ"ס P_1 ו- P_2 המתקבל מערכי הקילומטרים בצומת הלמ"ס;

d_2^o - המרחק בין היטל נקודת הלמ"ס P_1 ונקודת המפנה הראשונה בכביש V_1 כפי שהיה נמדד על גבי הכביש על פי מידותיו המקוריות;

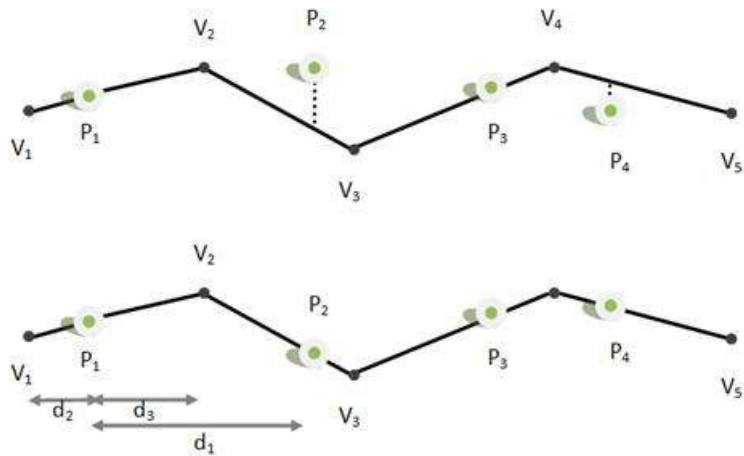
d_2^n - המרחק בין היטל נקודת הלמ"ס P_1 שערכה המטרי מתקבל מערך הקילומטרים בצומת ונקודת המפנה הראשונה בכביש V_1 שערכה מתקבל ממידותיו המקוריות של הכביש.

חישוב ערך לנקודת המפנה V_2 המחושב באינטרפולציה נתון על ידי:

$$v_2 = d_2^n - d_3^o \cdot \frac{d_1^n}{d_1^o}$$

כאשר d_3^o - המרחק בין נקודת המפנה השניה בכביש, V_2 , והיטל נקודת הלמ"ס P_1 כפי שהיה נמדד על פי מידותיו המקוריות של הכביש.

באופן דומה ניתן לחשב באינטרפולציה ערכים חדשים ומתואמים לשאר נקודות המפנה (V_1-V_5) המרכיבות את הכביש.



הסבר לאיור :

למעלה, הכביש ונקודות המפנה המרכיבות אותו (V_1-V_5). צמתי הלמ"ס מוגדרות על ידי נקודות P_1-P_4 . הצמתים שלעיתים מרוחקות מהכביש מוטלות על גביו.
 למטה, המרחקים (מסומנים ב-d) בין נקודות המפנה המרכיבות את הכביש ובין צמתי הלמ"ס המוטלות מאפשרות לכייל את הכביש בתהליכי אינטרפולציה.
 איור 2.5. הדגמת תהליך כיול הכבישים.

Figure 2.5. A demonstration of the process of road calibration

הוספת מידע מרשת הלמ"ס

השלב הבא בהתאמת המסלולים והאירועים עם רשת הלמ"ס הינו מבוסס מיקום. זהו תהליך בו לכל מסלול המורכב ממקטעי כביש המצויים על גבי רשת הכבישים ולכל אירוע, יתווסף מידע מרשת הלמ"ס המציין קילומטר וכיוון נסיעה. לצורך כך פוזרו נקודות מפנה על גבי הכביש המכויל ברזולוציה של מטר. כל נקודה כזו מכילה את מספר הקילומטר הרץ בהתאם לרשת הלמ"ס. לנקודות הקצה המגדירות את קטע הכביש במסלול משויכת נקודת קילומטר התחלה המגדירה את תחילת הקטע ונקודת קילומטר סיום המגדירה את סוף הקטע. נקודות הכביש המכויל משויכות לנקודות הקצה של קטע הכביש בהתאם למיקומן המרחבי היחסי המתבטא במרחק. נקודת כיול שמרחקה מנקודת קצה הוא מינימאלי משויכת אליה ולנקודת הקצה מתווסף מידע על הקילומטר הרץ.

הכבישים ברשת הלמ"ס מוגדרים באופן לא מכוון על-ידי נקודת התחלה, סיום ונקודות אמצע. הכבישים מכילים, לרוב, שני כיווני נסיעה אך מיוצגים לעיתים כקטע אחד. לכן, כדי להגדיר את כיוון הנסיעה במסלול על גבי קטע הכביש ברשת הכבישים נבחנו הקטעים באופן יחסי לקטעי הכביש השכנים להם, בהתבסס על התנאי הלוגי הבא :

$$\begin{aligned} & \text{if } km_{i+1} > km_i \text{ or } km_{i-1} < km_i \\ & \text{Then: } LD = 1 \\ & \text{Else: } LD = -1 \end{aligned}$$

כאשר :

km_i - מתאר קילומטר התחלה של קטע הכביש הנוכחי במסלול ;

km_{i-1} - מתאר קילומטר התחלה של קטע הכביש שקדם לקטע i במסלול;

km_{i+1} - מתאר קילומטר התחלה של קטע הכביש המאוחר לקטע i במסלול;

LD - מציין כיוון הלמ"ס, כאשר הערך "1" ניתן לקטעי כביש שכיוון התקדמותם במסלול הוא בהתאם להתקדמות הקילומטרים של הלמ"ס הגדלים בערכם, והערך "1-" ניתן לקטעי כביש שכיוון התקדמותם במסלול הינו נגד כיוון התקדמות הקילומטרים של הלמ"ס (ערכם קטן).

באופן דומה, משויך מידע על קילומטר לאירועי הנהיגה. האירועים מציינים נקודה במרחב ולכן, מותאמת להן נקודת מפנה אחת בכביש המכיל שמרחקה מהאירוע הוא מינימאלי. עם זאת, אירועי נהיגה אינם תדירים, לכן הם אינם מהווים רצף במרחב ודורשים התייחסות אחרת. לכל אירוע ידוע קטע הכביש בו הוא התרחש. לפיכך, ניתן לבצע חיפוש על שכבת המסלולים בהתאם למזהה המסלול וחתמת זמן, עד למציאת קטע הכביש הרלבנטי. כיוון הנסיעה של האירוע מתבסס על כיוון הנסיעה של קטע הכביש שנמצא.

2.1.3. תוצאות

הנתונים

כאמור, הנתונים שהתקבלו מ"הקופסא הירוקה" כללו תצפיות GPS של קבוצת הביקורת, בה הנהגים שהשתתפו במחקר לא קיבלו משוב על נהיגתם. הנתונים כללו כ-5 מיליון תצפיות GPS שנדגמו במהלך השנים 2009-2011. לתצפיות כיסוי גיאוגרפי רחב והן כוללות את רוב כבישי הארץ (איור 2.6). כדי להתאים את נתוני הקופסא הירוקה עם נתוני המנ"ב המעודכנים לשנת 2010, נבחרו תצפיות עבור שנה זו בלבד. הנתונים כוללים כ-3.4 מיליון תצפיות GPS בפריסה ארצית רחבה (ראה איור 2.6).

2.1.3.1. התאמה לרשת כבישים - Map Matching

זמני העיבוד לניתוח תצפיות ה-GPS והתאמתן לרשת הכבישים בתהליך ה-Map Matching הינו ארוך ותלוי, בין היתר, במורכבות האלגוריתם, עוצמת מעבד המחשב, גודל זיכרון RAM ומהירות כתיבה וקריאה של קבצים. הנתונים עובדו במחשב בעל מעבד i5 וזיכרון RAM של 4 גיגה. זמני העיבוד הממוצעים לכ-300,000 תצפיות הינו 52 שעות, דהיינו נדרשים כ-25 ימים לעיבוד של 3.4 מיליון תצפיות. לכן, כדי להפחית בזמני העיבוד בהכנת הנתונים, בשלב הנוכחי במחקר, נבחרו שלושה כבישים מייצגים לצורך הדגמה של הכנת הנתונים, בדיקת פוטנציאל הנתונים ופיתוח המתודולוגיה.

בחירת הכבישים נעשתה לאחר בדיקה שקיימים אירועי נהיגה ומספרם משמעותי, וכמו כן, שקיימים נתוני מנ"ב לכבישים אלו. הכבישים שנבחרו הם מס' 4, 65, 70, 1, 2, 40, 44, 44, 90 (9 כבישים). תצפיות ה-GPS הרלבנטיות לכבישים אלה כללו תצפיות המרוחקות עד חמישים מטרים מן הכביש, בשל רמת הדיוק של נתוני ה-GPS ושל רשת הכבישים.

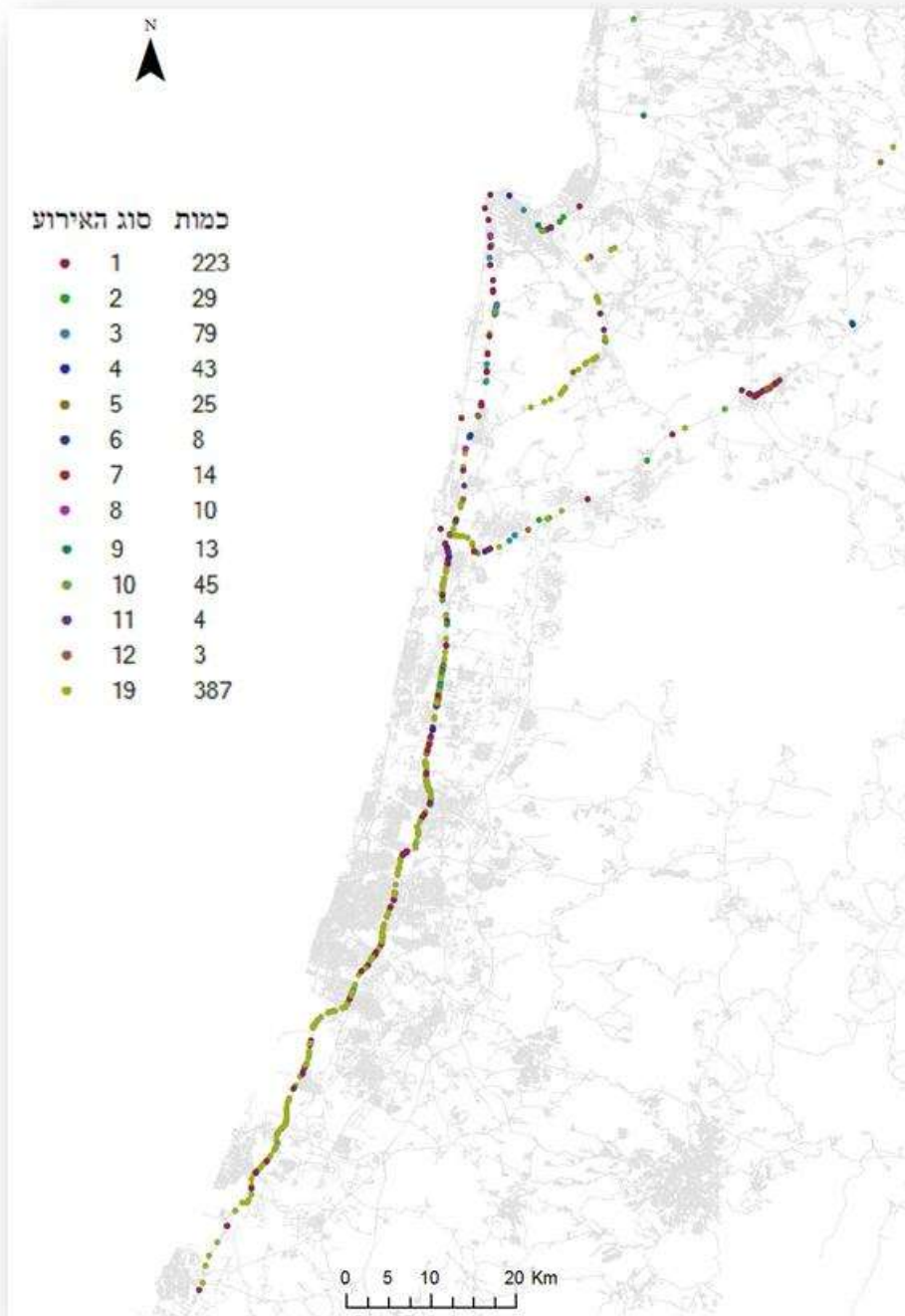


הסבר לאיור: מימין, הנתונים בשנים 2009-2011, הכוללים כ-5 מיליון תצפיות GPS. לנתונים פריסה ארצית רחבה. משמאל, הנתונים לשנת 2010, הכוללים כ-3.4 מיליון תצפיות GPS בכיסוי ארצי רחב. איור 2.6. נתוני GPS של הקופסא הירוקה.

Figure 2.6. GPS data of the "green box"

מכיוון שמסלול נסיעה כולל בתוכו לרוב יותר מכביש אחד, ובשל תהליך ה-Map Matching בו המסלול נפתר באופן גלובאלי, נכללו המסלולים של התצפיות הנבחרות בשלמותם. לדוגמא, כמות התצפיות הנבחרות, עבור הכבישים מס' 4, 65, 70, כללה כ-1.2 מיליון נקודות GPS וכ-13000 מסלולי נסיעה. לאחר פתרון ה-Map Matching, נמצאו כ-7000 מסלולים (מתוך כ-10000 מסלולים שנפתרו) בהם חלק מהמסלול או כולו נמצא בכבישים שנבחרו.

דוגמא לפתרון מסלול על-פי תצפיות ה-GPS בתהליך ה-Map Matching מוצגת באיור 2.7. איור 2.8 מציג, לדוגמא, את האירועים בכבישים מס' 4, 65 ו-70 ואת התפלגותם על פי סוג האירוע. מספרם של אירועי הנהיגה בכבישים אלה היה כ-900, כאשר 744 מתוכם הם אירועי נהיגה שהתרחשו בכביש מס' 4, 102 אירועים בכביש מס' 65 ו-37 אירועים בכביש מס' 70.



הערה: האירועים מוצגים על פי סוגם, כאשר לכל סוג אירוע מצוינת כמות האירועים מסוג זה.
 איור 2.8. אירועי הנהיגה בכבישים 4, 65 ו-70.

Figure 2.8. Driving events on roads No 4, 65, 70.

2.1.3.2. כיול הכבישים

כיול אורכי הכבישים התבצע בהתאם לצמתי הלמ"ס. טבלה 2.1 מביאה דוגמא לתוצאות הכיול, עבור כביש 65. הטבלה מציגה את צמתי הקטע, אורכו של הקטע ברשת הכבישים, קילומטר התחלה וסיום של צמתי הקטע על-פי רשת הלמ"ס ואת אורכו החדש של הכביש בהתאם לצמתי הלמ"ס.

התקצרות או התארכות הכביש נעשתה בצורה רציפה לינארית בכל קטע הכביש, בהתאם למתודולוגיה שהוצגה עבור תהליך הכיול. הערכים בטבלות מוצגים בקילומטרים לשם נוחות ההצגה אך מידות הכביש וכן תהליך הכיול נעשה במטרים כדי להשיג דיוק גבוה.

לדוגמא, אורך המקטע בכביש 65 בין צומת חנה וצומת גרנות ברשת הכבישים הינו 2.6 קילומטרים, כאשר לאחר כיול הקטע אורכו נקבע ל-3.0 קילומטרים, בהתאם לחיסור קילומטר ההתחלה בצומת מקילומטר הסיום בצומת. כמו כן, אורכו הכולל של כביש 65 (הקטע הנבחן במחקר) על פי רשת הכבישים הינו 91.2 קילומטרים, כאשר לאחר כיול כל מקטעי הכביש אורכו של הכביש נקבע ל-90.2 קילומטרים בהתאם לצמתי הלמ"ס (ראה טבלה 2.1).

טבלה 2.1. דוגמא: כיול כביש 65

Table 2.1. Example: calibration of Road 65

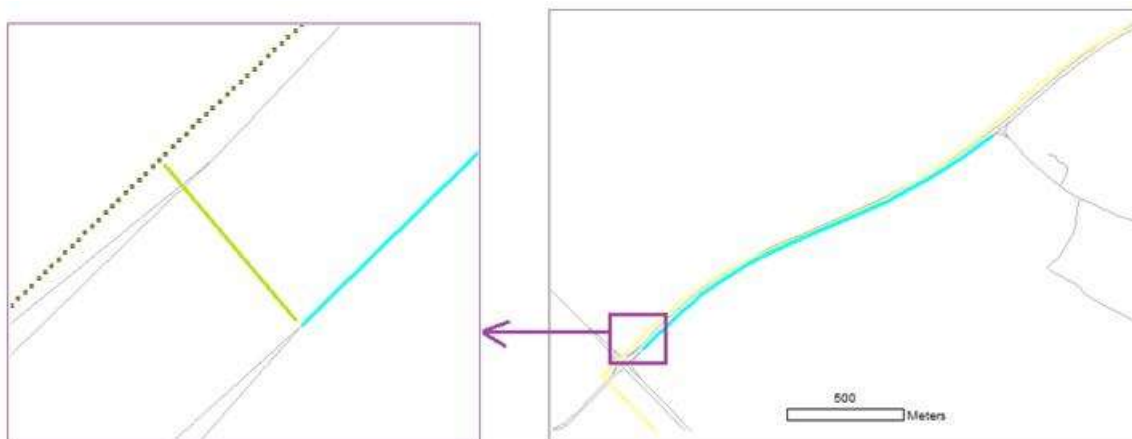
אורך חדש על פי צמתי הלמ"ס, ק"מ	קילומטר סיום בצומת למ"ס	קילומטר התחלה בצומת למ"ס	אורך הקטע ברשת הכבישים, ק"מ	צומת בקטע בכביש	צומת בקטע הכביש
1.6	1.6	0.0	1.6	מחלף קיסריה	צומת נחל חדרה
3.0	9.9	6.9	2.6	צומת גרנות	צומת חנה
0.9	10.8	9.9	1.0	צומת חנה	צומת מחנה 80
4.4	15.2	10.8	4.5	צומת מחנה 80	מחלף עירון
9.2	24.4	15.2	9.0	מחלף עירון	צומת מי-עמי
3.5	27.9	24.4	3.4	צומת מי-עמי	צומת אום אל-פאחם
6.3	34.2	27.9	6.3	צומת אום אל-פאחם	צומת מגידו
4.9	39.1	34.2	5.0	צומת מגידו	צומת הסרגל
0.7	46.6	45.9	0.7	צומת מכבי אש	היציאה המזרחית מעפולה
7.3	53.9	46.6	8.6	היציאה המזרחית מעפולה	צומת נאעורה
6.7	60.6	53.9	6.6	צומת נאעורה	כפר תבור
9.9	70.5	60.6	9.8	כפר תבור	צומת גולני
12.8	90.2	77.4	12.8	צומת עילבון	צומת קדרים
5.3	6.9	1.6	5.6	צומת נחל חדרה	צומת גרנות
6.9	77.4	70.5	6.9	צומת גולני	צומת עילבון
6.0	45.1	39.1	6.0	צומת הסרגל	עפולה
0.8	45.9	45.1	0.8	עפולה	צומת מכבי אש
90.2			91.2	אורך כולל, ק"מ	

2.1.3.3. הוספת מידע מרשת הלמ"ס

לאחר תהליך הכיול בו קטעי הכביש התקצרו או התארכו בצורה לינארית רציפה, בהתאם לצמתי הלמ"ס, ניתן לקשר בין המסלולים והאירועים וקילומטר למ"ס באופן מפורט, בהתבסס על מקטעי הכביש המרכיבים את רשת הכבישים המפורטת. לצורך כך פוזרו נקודות מפנה על גבי הכביש המכויל ברזולוציה של מטר. כל נקודה כזו מכילה את מספר הקילומטר הרץ בהתאם לרשת הלמ"ס. שיוך נקודות המפנה עם נקודות הקצה של קטע הכביש נעשה על-ידי מינימיזציה של המרחקים בין הנקודות.

הדגמה של התהליך מוצגת באיור 2.9. מימין, קטע הכביש ברשת המפורטת המהווה חלק ממסלול נסיעה בכביש 70 (מסומן בצבע טורקיז) ונקודות המפנה של הכביש המכויל (מסומן בצהוב). משמאל, נקודת המפנה הקרובה ביותר משויכת לתחילת קטע הכביש (המרחק המינימאלי מסומן בקו ירוק). ערכה המטרי של נקודת המפנה משויך לקילומטר ההתחלה של קטע הכביש ברשת המפורטת.

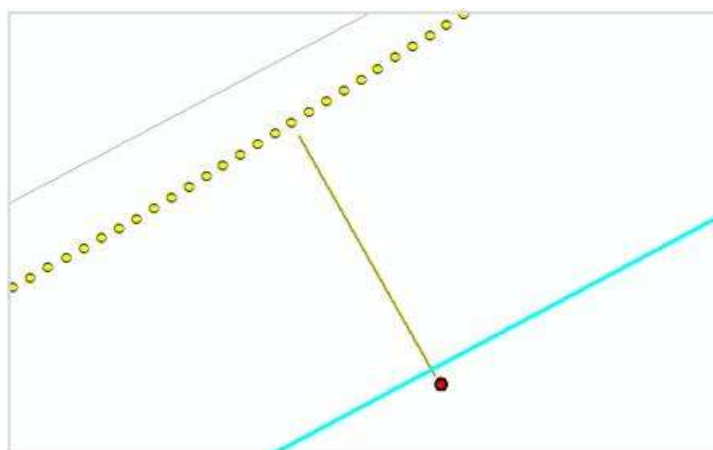
בדומה לכך, מתווסף מידע על ערכה המטרי של נקודת הסיום בקטע. הדגמה של תהליך שיוך האירועים לנקודות המפנה מוצג באיור 2.10. התהליך זה באופיו לשיוך מקטעי הכביש לנקודות המפנה ומבוסס על מרחק מינימאלי בין האירוע ונקודת המפנה. לאחר תהליך השיוך מתווסף מידע מטרי לאירוע (מסומן בנקודה אדומה).



הסבר לאיור: מימין, קטע בכביש 70, המהווה חלק ממסלול נסיעה (בטורקיז). נקודות המפנה על גבי הכביש המכיל הפזורות במרחקים של מטר (בצהוב). משמאל, נקודת המפנה הקרובה ביותר (בצהוב) משויכת לתחילת קטע הכביש (המרחק המינימאלי מסומן בקו ירוק).

איור 2.9. הדגמת תהליך שיוך קטעי כביש ברשת מפורטת למידע מהלמ"ס.

Figure 2.9. A demonstration of the process of fitting road sections from the detailed network to the CBS data.



הסבר: אירוע נהיגה (באדום) משויך לנקודת המפנה הקרובה אליו ביותר (בצהוב). המרחק המינימאלי מסומן בקו ירוק.

איור 2.10. הדגמת תהליך שיוך אירועי נהיגה למידע מהלמ"ס.

Figure 2.10. A demonstration of the process of fitting driving events to the CBS data.

כדי להגדיר את כיוון הנסיעה במסלול על גבי קטע הכביש ברשת הכבישים נבחנו הקטעים ביחס לקטעי הכביש השכנים. איור 2.11 מדגים את התהליך בכביש 70. קטע הכביש במסלול (בטורקיז) שמספרו הסידורי במסלול הוא 94 נבחן ביחס לקטע 93 וקטע 95, על-ידי השוואת קילומטר ההתחלה של כל אחד מהקטעים. מכיוון שקילומטר ההתחלה של קטע כביש 94 גדול מקילומטר

מספר הנסיעות בקטע מופיע בשדה מספר מעברים בקטע. מספר הנהגים בקטע ומספר כלי הרכב בקטע מצוינים בשדות בשמם. כעיקרון, לכל כלי רכב יכולים להיות יותר מנהג אחד, אך עקב אי-הזדהות של הנהגים בחלק מהנסיעות, להערכת תדירות השימוש בקטע עדיף להסתמך על מספר כלי הרכב בקטע מאשר על מספר הנהגים.

Road	Segment(User_id)	LAMAS_dirction	מספר מעברים בקטע	מספר נהגים בקטע	מספר כלי רכב בקטע	Lamas meter-1	Lamas meter-2	האם קיים בטבלת אירועים?
4	14541	1	301	24	24	138117.2	139174.2	yes
4	14685	1	413	23	24	134882.9	136514.2	yes
4	16504	-1	74	10	6	185406.5	185701.0	#N/A
4	16504	1	76	12	6	185406.5	185701.0	#N/A
4	16510	-1	66	10	6	183210.6	183746.6	#N/A
4	16510	1	69	12	6	183210.6	183746.6	#N/A
4	16511	-1	65	11	7	182853.0	183210.6	yes
4	16511	1	70	13	6	182853.0	183210.6	#N/A

Segment(User_id)	Lamas_dirction	EventType	Lamas_meter	מספר מעברים בקטע	מספר נהגים בקטע	מספר כלי רכב בקטע	Road	Lamas meter-1	Lamas meter-2
876420	1	19	85601.4	79	15	15	4	85515.6	85617.8
1027608	1	19	86460.2	74	11	13	4	85890.4	86780.1
1087281	1	19	87411.8	88	14	16	4	86780.1	91443.2
873616	1	1	122806.2	262	46	38	4	122215.3	122900.3
155985	1	1	139261.1	101	18	20	4	139174.2	139274.0
918402	1	19	68082.0	12	5	7	4	66800.0	68156.3
931108	1	1	78135.3	13	3	7	4	77422.2	78154.6
704815	1	19	80470.7	65	10	12	4	80468.9	80510.6
931079	1	19	81280.6	85	12	13	4	80931.4	83675.0

הסבר לאיור: למעלה, קטעי כביש המהווים חלק ממסלול נסיעה. למטה, אירועי נהיגה. הנתונים כוללים מידע על מיקום, כיוון הנסיעה, מספר נסיעות בקטע, מספר נהגים ומספר כלי רכב בקטע.

איור 2.12. דוגמא לבסיס הנתונים שנבנה בשלב מיפוי אירועי הנהיגה.

Figure 2.12. Example of a database created on the step of mapping driving events.

2.2. הכנת בסיס נתונים משולב עם מאפייני הדרכים

2.2.1. כללי

בעקבות הניתוח הגיאוגרפי של נתוני "הקופסא הירוקה", הצלבתם עם נתוני הלמ"ס והצבתם על גבי המפה הדיגיטלית, נוצר החלק הראשון של בסיס הנתונים למחקר בו לכל קטע כביש מוגדר - יחידת ניתוח, קיים מידע על מספר הנסיעות בו, מספר הנהגים שעברו בקטע ומספר כלי הרכב שנסעו בו, בשנת 2010, וכמו כן, על מספר אירועים בנהיגה מהסוגים המוגדרים (1-19) שנרשמו בקטע כביש זה במהלך השנה. כל יחידת ניתוח מוגדרת על מפת הכבישים ע"י מספר כביש ומספר ק"מ התחלה וסוף של קטע הכביש.

בתור הכבישים המייצגים ליצירת בסיס הנתונים למחקר נבחרו 9 כבישים: מס' 4, 65, 70, 1, 2, 40, 44, 444, 90, כאשר גבולות הכבישים היו כלהלן:

כביש מס'	ק"מ התחלה	ק"מ סוף
1	0	95.7
2	0	99.2
40	0	301.5
44	0	39.97
90	2.8	471
444	4	42.8
4	55.1	249.9
65	0	90.2
70	10	85.4

יש לציין כי גבולות הכבישים במחקר נקבעו ע"פ מסלולי נסיעות כלי הרכב עם ה"קופסא הירוקה" וזמינות מאפייני התשתיות במערכת המנ"ב. בתור נקודת ההתחלה של יחידות הניתוח בכביש מסוים נבחר ק"מ התחלה הקטן ביותר המופיע בכל הגיליונות עם מאפייני התשתית, כאשר נקודת התחלה זו תואמה עם הקטעים של אירועים בנהיגה שנמצאו בהצבה הגיאוגרפית.

לצורכי מחקר זה, הכבישים חולקו לקטעים באורך כ-200 מ'. הרזולוציה של 200 מ' נבחרה בהתחשב בקצב השתנות מאפייני הכבישים בשטח ותדירויות האירועים. בכל כביש קיימים שני כיווני נסיעה: כיוון נסיעה לפי ק"מ עולה וכיוון נסיעה לפי ק"מ יורד. לכן, לכל 200 מ' כביש הוגדרו שתי יחידות ניתוח, בכיוון נסיעה עולה ובכיוון נסיעה יורד. מכאן, **יחידת הניתוח** במחקר מוגדרת לפי: מס' דרך, כיוון נסיעה (ק"מ עולה או ק"מ יורד), ק"מ התחלה וק"מ סיום.

החלק השני בהכנת בסיס הנתונים למחקר הינו ייחוס לכל קטע כביש - יחידת ניתוח, של מאפייני התשתית אשר ניתן להפיק על סמך נתוני המנ"ב. בסיס הנתונים של מערכת המנ"ב נבנה על סמך סקר דרכים שנערך בשנת 2010, והוא כולל מאפיינים גיאומטריים ואחרים של תשתיות הדרכים, כאשר ערכי המאפיינים שמורים עבור סגמנטים באורך כ-100 מ'. מאפייני התשתית עבור יחידות הניתוח במחקר הופקו, לרוב, ע"י מיצוע של מאפייני הסגמנטים שנכללו בכל יחידה. (כאשר ערכי הקטגוריות במאפיין מסוים מוגדרים לפי סוג דרך וביחידת הניתוח קיים עירוב של מספר סוגי דרך, ערך המאפיין הופק לפי סוג דרך גבוה יותר).

מאפייני הכבישים להפקה עבור יחידות הניתוח נבחרו, מחד, על פי זמינות הנתונים במערכת המנ"ב ומאידך, בעקבות בחינת ריכוז של מאפייני התשתית עם סיכון בטיחותי גבוה יותר, על סמך סקר הספרות - טבלה 2.2. בטבלה מודגשים המאפיינים שניתן למצוא בנתוני המנ"ב.

טבלה 2.2. זיהוי מאפייני תשתית עם סיכון בטיחותי גבוה יותר, ע"פ סקר הספרות

Table 2.2. Recognition of infrastructure characteristics with higher accident risk, according to the literature survey

סוג דרך	אזור בדרך	מאפיינים גיאומטריים המשפיעים על תאונות
דו-מסלולית עם מחלפים	קטע	רדיוס אופקי קטן. שיפוע תלול לאורך. נתיב צר. שול ימני צר. שול שמאלי צר. מפרדה צרה. מרווח צר פנוי ממכשולים לצד הדרך. קיימים רק 2 נתיבים לכל כוון. קיימים פתחים במפרדה.
דו-מסלולית עם צמתים	מחלף	אורך קצר של נתיבי התמזגות/האצה והפרדות/האטה ברמפות. לולאות במחלפים. קיימים 2 נתיבי שינוי מהירות מקבילים.
דו-מסלולית עם צמתים	קטע	רדיוס אופקי קטן. מרווח צר פנוי ממכשולים לצד הדרך. שיפוע תלול של סוללת הדרך. נתיב צר. שול ימני צר. שול שמאלי צר. מפרדה צרה. צפיפות בצמתים משניים (כניסות לחלקות גובלות). קיימים צמתים לא מרומזרים. רוחב הדרך מתאים לסטנדרט מזערי. קיימים פתחים במפרדה.
צומת מרומזר	קטע	אין נתיבי פניה שמאלה. נתיב פניה שמאלה קצר מידי. אין נתיבי פנייה ימינה. מספר הנתיבים קטן. קיימים כניסות לחלקות גובלות סמוך לצמת. זווית בין זרועות הצומת אינה ניצבת. הצומת אינה מדורגת.
צומת לא מרומזר	קטע	אין נתיבי פניה שמאלה. נתיב פניה שמאלה קצר מידי. אין נתיבי פנייה ימינה. מספר הנתיבים קטן. שוליים צרים. אין מפרדות. זווית בין זרועות הצומת אינה ניצבת. קיימים כניסות לחלקות גובלות סמוך לצמת. הצומת אינה מדורגת. קיים מעגל תנועה רב נתיבי.
חד-מסלולית	קטע	רדיוס אופקי קטן. מרווח צר פנוי ממכשולים לצד הדרך. שיפוע תלול של סוללת הדרך. מכשולים קרובים בצדי הדרך. חסרים עקומי מעבר. נתיב צר. שול צר. שול לא סלול. עקום אופקי ארוך. שיפוע תלול לאורך. עקום אופקי הגבהה צידית קטנה מהסטנדרט. אין נתיבי עקיפה בדרך. צפיפות צמתים משניים. יש צורך בשדרוג הדרך לדו מסלולית עקב נפחי תנועה גבוהים.
צומת מרומזר	קטע	אין נתיבי פניה שמאלה. נתיב פניה שמאלה קצר מידי. אין נתיבי פנייה ימינה. מספר הנתיבים קטן. קיימים כניסות לחלקות גובלות סמוך לצומת. זווית בין זרועות הצומת אינה ניצבת. הצומת אינה מדורגת. הצומת אינה מעגל תנועה.
צומת לא מרומזר	קטע	אין נתיבי פניה שמאלה. נתיב פניה שמאלה קצר מידי. אין נתיבי פנייה ימינה. מספר הנתיבים קטן. שוליים צרים. אין מפרדות. מפרדה צרה מידי בדרך המשנית. זווית בין זרועות הצומת אינה ניצבת. קיימים כניסות לחלקות גובלות סמוך לצומת. הצומת אינה מעגל תנועה.

2.2.2. מאפייני התשתיות שהופקו עבור יחידות הניתוח במחקר

להלן הסבר לכללים אשר שימשו להפקת מאפייני התשתיות עבור יחידות הניתוח.

1. סוג דרך

קטעי הדרך - יחידות הניתוח סווגו על-פי שלושה סוגי דרך: חד-מסלולי, דו-מסלולי וממוחלף.

2. נפחי תנועה

לכל סוג דרך הוגדרו מספר רמות של נפחי תנועה, כלי רכב ביממה, כמוצג להלן:

ממוחלף	דו-מסלולי	חד-מסלולי	רמות של נפח תנועה
עד 40,000	עד 20,000	עד 6,000	נמוך-1
40,000-80,000	20,000-40,000	6,000-15,000	בינוני-2
מעל 80,000	מעל 40,000	מעל 15,000	גבוה-3

נתונים על נפחי תנועה של כלי הרכב ליממה, בקטעי דרך שונים, נמצאו בגיליון הצמתים של המני"ב וכן, בדו"חות של הלמ"ס. נתוני המני"ב לקטעי דרך סמוכים היו בעלי ערכים שונים מאוד, וחלקם לא סבירים בגודלם, לפעמים גדולים מאוד ולפעמים נמוכים מאוד. לכן, לצורכי הצבת נפחי התנועה בקטעי המחקר השתמשנו בנתונים של הלמ"ס על נפח תנועה יומי, בשני הכוונים ביחד, לפי פרסום הלמ"ס "תאונות דרכים עם נפגעים. חלק ב'".

3. חתך הדרך

לכל קטע כביש הוגדרו מספר מאפיינים של חתך הדרך שהם: רוחב נתיב, רוחב שול ימני (כולל), רוחב שול שמאלי (בדרך דו-מסלולית או ממוחלפת).

א. רוחב נתיב

קטגוריות של רוחב נתיב הוגדרו על-פי הנחיות לתכנון דרכים בין-עירוניות (כאשר עבור דרך אזורית דו-נתיבית, דו-מסלולית ודרך ראשית מומלץ רוחב נתיב 3.60 מ'):

קטגוריות של רוחב נתיב, מ'	כל סוגי הדרכים
רוחב תקין - 1	$3.6 \geq$ מס' נתיבים/רוחב מיסעה
רוחב צר - 2	$3.30 \geq$ מס' נתיבים/רוחב מיסעה > 3.60
רוחב צר מאוד - 3	$3.0 \geq$ מס' נתיבים/רוחב מיסעה > 3.30
רוחב צר מדי - 4*	$3.0 <$ מס' נתיבים/רוחב מיסעה

* בפועל, בבסיס הנתונים של המחקר לא נמצאו יחידות ניתוח בקטגורית 4

הערך עבור יחידת הניתוח מחושב כממוצע של הערכים בסגמנטים הנכללים ביחידת הניתוח.

ב. רוחב שול ימני (כולל)

הקטגוריות של שול ימני כולל נקבעו על-פי ערך מסכם של שול אספלט ושול גרנולרי:

קטגוריות של שול ימני כולל, מ'	כל סוגי הדרכים
רחב (תקין) - 1	$2.5 \geq$ רוחב שול ימני
בינוני - 2	$2.5 <$ רוחב שול ימני < 1.5
צר - 3	$1.5 \leq$ רוחב שול ימני

הערך עבור יחידת הניתוח מחושב כממוצע של הערכים בסגמנטים הנכללים ביחידת הניתוח.

ג. רוחב שול שמאלי (פנימי)

רוחב שול שמאלי מחושב רק בדרך דו-מסלולית או ממוחלפת, כאשר מאפיין זה לא רלוונטי לדרך חד-מסלולית. הקטגוריות של רוחב שול שמאלי נקבעו לפי הערך המסכם של שול אספלט ושול גרנולרי, כלהלן:

קטגוריות של שול שמאלי, מ' רחב (תקיין)-1	כל סוגי הדרכים ≥ 2.5 רוחב שול שמאלי
בינוני - 2	$1.50 < < 2.5$ רוחב שול שמאלי
צר - 3	≤ 1.5 רוחב שול שמאלי

הערך עבור יחידת הניתוח מחושב כממוצע של הערכים בסגמנטים הנכללים ביחידת הניתוח.

4. רדיוס אופקי

הקטגוריות של רדיוס אופקי נקבעו על-פי הנחיות לתכנון דרכים. הקטגוריות של רדיוס אופקי נקבעו לפי סוג דרך, כלהלן:

קטגוריות של רדיוס אופקי, מ' רדיוס קטן-1	חד-מסלולי*	דו-מסלולי*	ממוחלף*
עד 170 (כולל)	עד 340 (כולל)	עד 570 (כולל)	
רדיוס בינוני-2	170-800 (כולל)	340-1400 (כולל)	2300-570 (כולל)
רדיוס גדול-3	מעל 800	מעל 1400	מעל 2300

* לפי מהירויות תכן: 70 קמ"ש לדרך חד-מסלולית, 90 קמ"ש לדרך דו-מסלולית, 100 קמ"ש לדרך ממוחלפת

יש לשים לב שכאשר ערך הרדיוס האופקי גדול מהערכים של "רדיוס גדול-3", על פי סוג דרך, אין משמעות לנתון כי מדובר בקטע דרך ישר.

הערך עבור יחידת הניתוח מחושב כממוצע של הערכים בסגמנטים הנכללים ביחידת הניתוח.

5. הגבהה צידית

הקטגוריה של תקינות הגבהה צידית נקבעה בעקבות בדיקת היחס בין רדיוס אופקי לשיפוע צידי. נסמן: R - רדיוס אופקי, מ'; e - ערך שיפוע צידי או הגבהה צידית, שבר עשרוני (שני המאפיינים מוערכים כממוצע הערכים בסגמנטים הנכללים ביחידת הניתוח).

חישוב ההגבהה הצידי נעשה על-פי ההנחיות לתכנון דרכים, כאשר רדיוס מזערי מעוגל נלקח עבור דרך חד-מסלולית למהירות תכן 70 קמ"ש, דרך דו-מסלולית למהירות תכן 90 קמ"ש, דרך ממוחלפת למהירות תכן 100 קמ"ש. נתוני החישוב הם:

רדיוס אופקי (מטר)	חד-מסלולי	דו-מסלולי	ממוחלף
R_{min}	170	340	570
תחום חישוב	$800 > R$	$1400 > R$	$2300 > R$

מחשבים:

$$d_e = e_c - e = 0.07 * (R_{min}/R)^{0.849} - e$$

כאשר מעריך החזקה מתאים להגבהה צידית מרבית של 0.07.

אם עבור קטע דרך נבחן מתקבל ערך d_e הקטן מ-0.01, יש הגבהה צידית תקינה ונקבעת קטגוריה "0". לעומת זאת, כאשר מתקבל ערך d_e הגדול מ-0.01, יש הגבהה צידית לקויה (בגודל חסר)

ונקבעת קטגוריה "1". כאשר ערך הרדיוס האופקי גדול מהערכים של תחום החישוב, על-פי סוג דרך, אין משמעות למאפיין זה, והוא יסומן כ-"8-לא רלוונטי".

6. שיפוע לאורך

הערך "I" הוא ממוצע (באחוזים) של הערכים בסגמנטים ביחידת הניתוח. הקטגוריות של שיפוע לאורך נקבעו בהתאם להנחיות לתכנון דרכים², לפי סוג דרך, כמוצג להלן:

ממוחלף	דו-מסלולי	חד-מסלולי	קטגוריות של שיפוע לאורך (%)
5	6	8	I_{max}
$I \leq 3$	$I \leq 4$	$I \leq 5$	שיפוע קטן-0
$5 \geq I > 3$	$6 \geq I > 4$	$8 \geq I > 5$	שיפוע בינוני-1
$I > 5$	$I > 6$	$I > 8$	שיפוע גדול-2

בנוסף, עבור המקרים בהם קיים שיפוע (מעל 2%) תועד כיוון השיפוע לאורך: עליה או ירידה. בעקבות הצלבת המידע על גודל וכיוון השיפוע הוגדרו 7 קטגוריות של המאפיין - ראה טבלה 2.3 בהמשך הפרק.

7. קרבת צומת/ מחלף

לכל יחידת ניתוח בבסיס הנתונים של המחקר נקבע האם היא נמצאת בקרבת צומת/מחלף, בהתקרבות אל ובהתרחקות מהצומת/מחלף.

תחילה, לכל קטע דרך ארוך הוגדרו צמתים ראשיים. בתור הצמתים הראשיים נבחרו צמתים בהם קיימות פניות שמאלה ונפח התנועה המוערך בדרך המשנית גדול מ-1,000 כלי רכב ליממה. מיקום הצמתים, דהיינו מספר קילומטר על הדרך, נמצא הן בנתוני הלמ"ס והן בגיליון הצמתים של המנ"ב. לא תמיד נמצאה זהות מוחלטת בק"מ הצומת בשני בסיסי הנתונים. כאשר נמצאו הפרשים (של עשרות מטרים), קילומטר הצומת נקבע על-פי נתוני המנ"ב מכיוון שנתונים אלו התבססו על צילום בשטח.

לכל יחידת ניתוח נבדקה הקרבה לצומת/מחלף, ע"פ קרבתו לצומת/מחלף של הקצה הקרוב ביותר של הסגמנט הקרוב ביותר לצומת/מחלף. נעשתה אבחנה של המרחק בהתקרבות אל הצומת ובהתרחקות מהצומת והוגדרו שני מאפיינים, בהתאם. לכל מאפיין, יכולים להיות שלושה ערכים שהם: 0 - "לא קרוב", 1 - "קרוב" (בהתקרבות או בהתרחקות), 2 - "בתחום" (נקודת הצומת/מחלף נמצאת בתחום יחידת הניתוח).

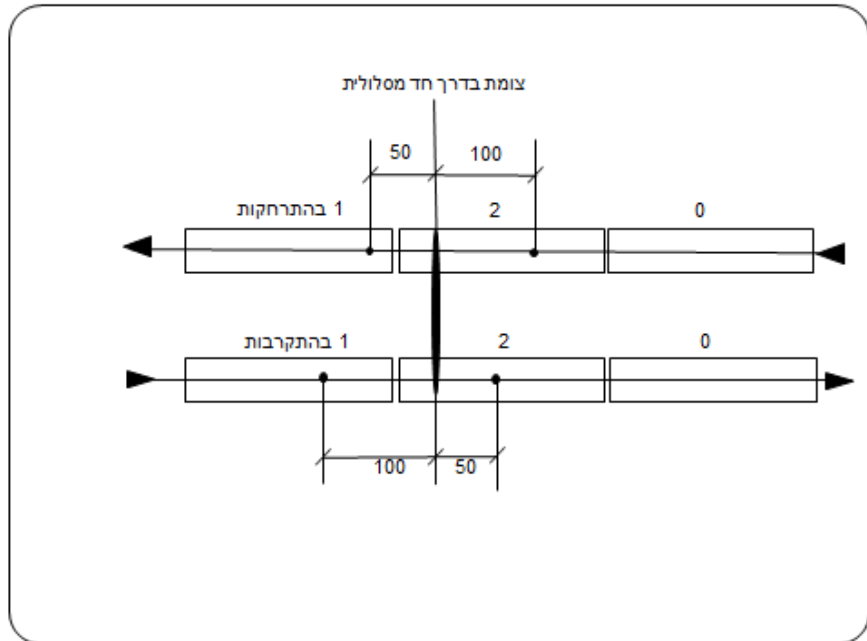
ספי המרחקים לקביעת הערכים "לא קרוב"/"קרוב", לפי סוג דרך, הוגדרו³ כמוצג בטבלה להלן. כאשר ערך המרחק בהתקרבות יקטן מערך הסף המוצג בטבלה, תיקבע קטגוריה "קרוב בהתקרבות" - ערך "1", אחרת - "0"; כאשר ערך המרחק בהתרחקות יקטן מערך הסף בטבלה, תיקבע קטגוריה "קרוב בהתרחקות" - ערך "1", אחרת - "0".

² עבור שיפוע מרבי בדרך חד-מסלולית אזורית למהירות תכן 70 קמ"ש, דרך דו-מסלולית ראשית למהירות תכן 90 קמ"ש, דרך ממוחלפת ראשית למהירות תכן 100 קמ"ש.

³ הספים הנ"ל הוערכו על-פי מרחקי תחילת נתיבי הפנייה ורמפות היציאה בהתקרבות לצמתים ומחלפים, וכמו כן, על-פי מרחקי סוף נתיבי ההתמוגגות בהתרחקות מצמתים ומחלפים, על מדגם של צמתים ומחלפים.

ממוחלף		דו-מסלולי		חד-מסלולי		מרחק אל-מ-צומת/מחלף (מטר)
בהתרחקות	בהתקרבות	בהתרחקות	בהתקרבות	בהתרחקות	בהתקרבות	
700>	900>	100>	200>	50>	100>	קטע קרוב לצומת/מחלף, כאשר המרחק

באיור 2.13 מודגמים ערכי משתני הקרבה לצומת של יחידות הניתוח בדרך חד-מסלולית.



איור 2.13. קביעת ערכי המאפיינים של קרבה לצומת עבור קטע דרך חד-מסלולית.

Figure 2.13. Definition of values for the characteristic of "junction vicinity" for a single-carriageway road section

8. מרחק בין צמתים

רמת ההשתנות של מאפייני התשתית לאורך קטע מושפעת ע"י אורך הקטע או המרחק בין הצמתים. כזכור, לכל קטע דרך הוגדרו צמתים ראשיים - ראה לעיל עבור מאפיין "7". לכן, כל יחידת ניתוח קיבלה קטגוריה של "מרחק בין צמתים" בהתאם לקטע דרך אליו היא שייכת. הקטגוריות של "מרחק בין צמתים" נקבעו על-פי שילוב של סוג דרך והמרחק בין הצמתים הראשיים (בק"מ), כמפורט להלן.

קטגוריה של "מרחק בין צמתים" (ק"מ)	חד-מסלולי	דו-מסלולי	ממוחלף
קטע קצר-1	עד 2	עד 4	עד 8
קטע בינוני-2	2-4	4-8	8-16
קטע ארוך-3	מעל 4	מעל 8	מעל 16

בנוסף, עבור יחידות הניתוח שכוללות צומת/מחלף, נקבעה קטגוריה "4-צומת בתוך יחידת ניתוח".

9. שינוי במספר נתיבים ביחס לקטעים סמוכים

מאפיין נוסף אשר משקף את השתנות מאפייני התשתית לאורך הקטע הינו שינוי במספר הנתבים ביחס לקטעים הסמוכים. לכן, לכל יחידת ניתוח חושב ערך ממוצע של מספר הנתבים בסגמנטים ביחידת הניתוח אשר, בהמשך, הושווה לערך של יחידת הניתוח הקודמת בכיוון הנסיעה.

כאשר הערכים המשווים זהים (אין שינוי) נקבעה קטגוריה "0". לעומת זאת, כאשר הערכים המשווים אינם זהים (יש שינוי) נקבעה קטגוריה "1". הערכים נחשבו ל-"זהים" כאשר הפרש בין מספר הנתבים הממוצע בין שתי יחידות הניתוח לא עלה על 0.5.

10. שינוי ברוחב נתיבים ביחס לקטעים סמוכים

בנוסף, השתנות במאפייני התשתית לאורך הקטע אופיינה ע"י שינוי ברוחב הנתבים ביחס לקטעים הסמוכים. לצורך כך, לכל יחידת ניתוח חושב ערך ממוצע של "רוחב הנתבים" (רוחב מיסעה מחולק במספר נתיבים) בסגמנטים ביחידת הניתוח. ערך של כל יחידת ניתוח הושווה לערך של יחידת הניתוח הקודמת בכיוון הנסיעה.

כאשר ההפרש בין הערכים המשווים היה שווה או קטן מ- 0.3 מ' (אין שינוי) נקבעה קטגוריה "0". לעומת זאת, כאשר ההפרש בין הערכים המשווים היה גדול מ- 0.3 מ' (יש שינוי) נקבעה קטגוריה "1".

לסיכום, לכל יחידת ניתוח, נקבעו מאפייני התשתית על סמך נתוני מערכת המנ"ב. מאפיינים אלה הם: סוג דרך, נפח תנועה, מאפייני חתך הדרך - רוחב נתיב, רוחב שול ימני, רוחב שול שמאלי (בדרך דו-מסלולית או ממוחלפת); רדיוס אופקי, מצב הגבהה צידית (בהינתן רדיוס אופקי), שיפוע לאורך וכמו כן, מספר מאפיינים המשקפים את השתנות מאפייני התשתית לאורך הקטע שהם: קרבת צומת/מחלף בהתקרבות ובהתרחקות, מרחק בין הצמתים הראשיים בקטע אליו שייכת יחידת הניתוח, שינוי במספר הנתבים ביחס לקטע הקודם, שינוי ברוחב הנתבים ביחס לקטע הקודם. כל מאפייני התשתית הם משתנים קטגוריים.

יצוין כי מקבץ המאפיינים הקשורים להשתנות מאפייני התשתית לאורך הקטע נוצר במיוחד כדי לשקף מורכבות אפשרית של משימות הנהיגה בקטע הנבחן עקב ריבוי תנועות כלי רכב אחרים המבצעים תמרוני הסתעפות או התמזגות לעומת התנועה העיקרית בקטע הדרך. ממחקרי הנהיגה ידוע כי קטעי כביש עם ריבוי שינויים בתשתית ו/או תנועה גורמים לגידול בעומס משימות הנהיגה ומכאן, לעליה בהסתברות להיווצרות טעויות אנוש אשר מובילות למצבי כמעט תאונה ולעתים, לתאונות.

2.2.3. יצירת בסיס נתונים משולב

מאפייני התשתית שחושבו חוברו לקובץ אחד לפי יחידות הניתוח. מאידך, לכל יחידת ניתוח חובר מידע על מספר הנסיעות בו, מספר הנהגים שעברו בקטע ומספר כלי הרכב שנסעו בו, בשנת 2010, וכמו כן, על מספר אירועים בנהיגה מהסוגים המוגדרים (1-19) שנרשמו בקטע כביש זה במהלך השנה. כאשר יחידת הניתוח לפי מאפייני התשתית היוותה שילוב של יחידות הניתוח לפי אירועים בנהיגה, הערכים של מספר הנהגים שעברו בקטע, מספר כלי הרכב ומספר הנסיעות בקטע נקבעו ע"י מיצוע, בתוספת סטית תקן לכל ערך.

לאחר מיזוג של מאפייני התשתית, המסלולים והאירועים התברר כי יש קטעים - יחידות ניתוח, ללא נסיעות. משמעות הדבר שאוכלוסיית הנהגים בכלי הרכב עם "הקופסא הירוקה" לא התנסתה כלל בנסיעות בקטעי כביש אלה (החשיפה שווה לאפס). לכן, יחידות ניתוח כאלה נמחקו מבסיס הנתונים.

בנוסף, הונח כי בחינת האינטראקציה בין מאפייני התשתית לבין אירועים בנהיגה צריכה להתבסס על קטעי כביש עם היקף מסוים של נסיעות הנהגים, דהיינו אין לבחון את הקשר על סמך נסיעות בודדות של נהגי המדגם. לכן, בקרב יחידות הניתוח שנותרו בוצעו סינונים נוספים כלהלן:

- בניתוח נכללו רק קטעי כביש כאלה בהם היו מעל 5 נסיעות של כלי הרכב (עם "הקופסא הירוקה"), בשנה;

- בניתוח נכללו קטעי הכביש בהם, במהלך השנה, עברו 3 או יותר כלי רכב שונים (עם "הקופסא הירוקה"); סינון זה נדרש כדי לבנות את הניתוח על התנהגות של מספר כלי רכב שונים שעברו בקטע הכביש במהלך השנה. (לדוגמא, בכביש 4, כלל הסינון הראשון הוריד 20% מיחידות הניתוח, כאשר כלל הסינון השני הוריד כ-5% נוספים).

כמו כן, מבסיס הנתונים המשולב הוסרו שורות בהן חסר מידע על חלק ניכר ממאפייני התשתית. לבסוף, ליחידות הניתוח נוסף מידע על התרחשות התאונות. עבור כל אחת מיחידות הניתוח הופקו:

1. סך התאונות עם נפגעים בשנים 2008-2010 (מקבצי "ת"ד" של הלמ"ס),
2. סך התאונות עם נפגעים ללא תאונות הולכי רגל, בשנים 2008-2010 (מקבצי ת"ד),
3. סך התאונות "כללי עם נפגעים", בשנים 2008-2010 (מקבצי "כללי עם נפגעים" של הלמ"ס),
4. סכום של 1 ו-3, דהיינו כלל התאונות בשנים 2008-2010.

בהתאם להגדרת יחידות הניתוח, נתוני התאונות כוללים מידע על תאונות שהתרחשו הן בגבולות הקו הירוק והן ביו"ש. מספרי התאונות הופקו לשני כיווני הנסיעה ביחד, בשל מודעות לאמינות נמוכה של מאפיין "כיוון הנסיעה" ברישום פרטי התאונות. זאת, להבדיל מספירת האירועים בנהיגה והפקת מאפייני התשתית אשר נרשמו לפי כיוון נסיעה. מכיוון שכל יחידת ניתוח מוגדרת לפי כיוון נסיעה מסוים, אותם מספרי התאונות הודבקו לכל זוג של יחידות הניתוח אשר זהות מבחינת המיקום בכביש אך נבדלות ע"פ כיוון הנסיעה.

טבלה 2.3 מציגה מבנה של בסיס הנתונים המשולב שנבנה במחקר, עם הגדרת יחידות הניתוח, מאפייני התשתיות, אירועי הנהיגה, מדדי החשיפה ומספרי התאונות. כהשלמה לבסיס הנתונים של המחקר, איור 2.14 מציג רשימה מקורית של אירועי הנהיגה המופקים ע"י "הקופסא הירוקה".

2.3 סטטיסטיקה תיאורית של בסיס הנתונים המשולב

נספח א' מציג סטטיסטיקה תיאורית של בסיס הנתונים המשולב שנבנה במחקר. בסיס הנתונים כלל 3,500 יחידות ניתוח (קטעי דרך באורך כ-200 מ', בכיוון נסיעה מסוים). ניתן לראות כי:

טבלה 2.3. מבנה בסיס הנתונים המשולב שנבנה במחקר

Table 2.3. A structure of the combined database built in the study

מאפיין יחידת ניתוח	שם המשתנה	ערכי המשתנים - קטגוריות/מספרים
כביש	road	מס' כביש (זיהוי יחידה)
עולה/יורד	kivun	כיוון נסיעה: 1 עולה, 2 יורד (זיהוי)
תחילת יחידת ניתוח	unit_st	ק"מ התחלה (זיהוי)
סוף יחידת ניתוח	unit_end	ק"מ סוף (זיהוי)
נפח תנועה, בקטגוריות	nefah_cat	1 נמוך, 2 בינוני, 3 גבוה, 9 אין מידע
שיפוע לאורך	shipua_orech	1 אין שיפוע (עד 2%), 2 שיפוע קטן בירידה, 3 שיפוע בינוני בירידה, 4 שיפוע גדול בירידה, 5 שיפוע קטן בעליה, 6 שיפוע בינוני בעליה, 7 שיפוע גדול בעליה, 9 מידע חסר
קרוב לצומת בהתקרבות	karov_lezomet_beitkarvut	0 לא קרוב, 1 קרוב, 2 היחידה בתחום הצומת, 9 מידע חסר
קרוב לצומת בהתרחקות	karov_lezomet_beitrahkut	0 לא קרוב, 1 קרוב, 2 היחידה בתחום הצומת, 9 מידע חסר
מרחק בין צמתים	merhak_benzmatim_cat	1 קטע קצר, 2 קטע בינוני, 3 קטע ארוך, 4 היחידה בתחום הצומת, 9 מידע חסר
האם יש שינוי במספר נתיבים בין יחידות ניתוח עוקבות	rama	0 אין שינוי (ערכים זהים), 1 יש שינוי
האם יש שינוי ברוחב הנתיבים בין יחידות ניתוח עוקבות	rama_rohav_nativ	0 אין שינוי (ערכים זהים), 1 יש שינוי
שול כולל חיצוני (רוחב שול ימין)	shul_kolel_hizoni	1 רחב (תקיין), 2 בינוני, 3 צר, 9 מידע חסר
סוג דרך	had_dumasluli	1 חד-מסלולי, 2 דו-מסלולי, 3 ממוחלף
שול כולל פנימי-שמאלי (קיים בסוג דרך 2,3 בלבד)	lhs	0 לא רלוונטי (דרך חד-מסלולית), 1 רחב (תקיין), 2 בינוני, 3 צר, 9 מידע חסר
רדיוס אופקי	radius_ofki_last	1 קטן, 2 בינוני, 3 גדול, 9 מידע חסר
רוחב נתיב	rohav_nativ	1 תקיין (רחב), 2 צר, 3 צר מאוד, 9 מידע חסר
הגבהה צידית (רלוונטית לרדיוס 1-קטן או 2-בינוני, בלבד)	Ira	0 - רדיוס גדול (הגבהה לא רלוונטית), 10 - רדיוס קטן, הגבהה תקינה; 11 - רדיוס קטן, הגבהה לקויה; 20 - רדיוס בינוני, הגבהה תקינה; 21 - רדיוס בינוני, הגבהה לקויה; 9 מידע חסר
מספר אירועים מסוג "בלימה"	num_ev_per_type.1	
מספר אירועים מסוג "האצה"	num_ev_per_type.2	
מספר אירועים מסוג "בלימה לפנייה"	num_ev_per_type.3	
מספר אירועים מסוג "האצה לפנייה"	num_ev_per_type.4	
מספר אירועים מסוג "האצה בעת פניה"	num_ev_per_type.5	
מספר אירועים מסוג "בלימת פתע בפניה"	num_ev_per_type.6	
מספר אירועים מסוג "פניה"	num_ev_per_type.7	
מספר אירועים מסוג "האצה בעת פניה"	num_ev_per_type.8	
מספר אירועים מסוג "בלימה בעת פניה"	num_ev_per_type.9	
מספר אירועים מסוג "האצה ביציאה מפניה"	num_ev_per_type.10	
מספר אירועים מסוג "בלימה ביציאה מפניה"	num_ev_per_type.11	
מספר אירועים מסוג "החלפת נתיב"	num_ev_per_type.12	
מספר אירועים מסוג "התראה על מהירות"	num_ev_per_type.19	
סך האירועים	ev_total	
מספר נהגים (שנסעו בכביש זה במשך שנה)	num_driv_tot	
מספר מעברים (נסיעות כלי רכב עם "הקופסא הירוקה")	num_tracks_tot	
מספר כלי רכב (שנסעו בכביש זה במשך שנה)	num_cars_tot	
סטיית תקן מסלולים	sd_tracks_tot	
סטיית תקן כלי רכב	sd_cars_tot	
סטיית תקן נהגים	sd_driv_tot	
סך התאונות עם נפגעים בשנים 2008-2010	INJ	
סך התאונות עם נפגעים ללא תאונות הולכי רגל	INJ_NP	
סך התאונות "כללי עם נפגעים" בשנים 2008-2010	GEN	
כלל התאונות בשנים 2008-2010: ת"ד+"כללי עם נפגעים"	tot	

¹ קטגוריה 4 של "מרחק בין צמתים" וקטגוריות 2 של "קרוב לצומת בהתקרבות", "קרוב לצומת בהתרחקות" מבטאות מצב זהה: "היחידה בתחום הצומת".

1	Braking
2	Accelerating
3	Braking into turn
4	Accelerate into turn
5	Accelerate while in turn
6	Sudden brake in turn
7	Turning
8	Accelerate while in turn
9	Braking while in turn
10	Accelerate while exiting turn
11	Braking while exiting turn
12	Lane change
13	Bypass
14	Lane Handling
15	Trip start
16	Trip end
17	Estimated trip start
18	Estimated trip end
19	Speed alert
20	Collision Suspect

איור 2.14. סוגי אירועים בנהיגה המופקים ע"י "הקופסא הירוקה".

Figure 2.14. Types of driving events produced by the "green box".

- 763 יחידות הניתוח (22%) היו בדרך חד-מסלולית, 1629 (46%) בדרך דו-מסלולית, 1107 (32%) בדרך ממוחלפת;
- סה"כ ב-54% מהיחידות נפח התנועה היה גבוה, ב-31% בינוני, ב-14% נמוך;
- רוחב הנתיב היה תקין ב-90% מיחידות הניתוח, צר ב-7%, צר מאוד ב-3% מהיחידות;
- כ-20% מהיחידות התאפיינו ברוחב שול ימני צר, 26% ברוחב שול בינוני, 41% בשול רחב, כאשר עבור 13% מהיחידות המידע היה חסר;
- כ-30% מיחידות הניתוח היו עם שול שמאלי צר, 21% עם שול שמאלי בינוני, 19% עם שול רחב, כאשר עבור 22% לא היה שול שמאלי (דרך חד-מסלולית) וב-8% מהמקרים המידע היה חסר;
- ל-84% מהיחידות לא הייתה בעיה של רדיוס אופקי (הרדיוס היה גדול), ב-15% נמצא רדיוס אופקי בינוני, בפחות מ-1% רדיוס קטן;
- הגבהה צדית לקויה נמצאה בכ-4% בלבד מיחידות הניתוח, ב-12% ההגבהה הייתה תקינה, כאשר עבור 84% מיחידות הניתוח מאפיין זה היה לא רלוונטי (הקטעים עם רדיוס אופקי גדול);
- בעיה של שיפוע לאורך נמצאה בכ-8% מיחידות הניתוח, כאשר ב-5% היה שיפוע בינוני וב-3% שיפוע גדול, בעוד שב-92% מיחידות הניתוח השיפוע היה קטן;
- קרבה לצומת הייתה רלוונטית ל-15% מהקטעים, בהתקרבות, ול-10% מהקטעים, בהתרחקות. בנוסף, 13% מהקטעים כללו בתוכם צומת/מחלף;

- מבין יחידות הניתוח, 54% השתייכו לקטעים קצרים בין הצמתים, 28% - לקטעים בינוניים, 6% - לקטעים ארוכים, כאשר, כאמור, 13% מהקטעים כללו בתוכם צומת/מחלף;

- שינוי במספר נתיבים לעומת הקטע הקודם נמצא ב-5% מיחידות הניתוח. לעומת זאת, שינויים ברוחב נתיבים לעומת הקטע הקודם נצפו ב-45% מיחידות הניתוח.

סה"כ, ע"פ כל מאפיין תשתית נבחן, חלק מסוים מיחידות הניתוח נמצא עם בעיות גיאומטריות, אם כי לא חלק גדול. נראה כי מורכבות גבוהה יותר בביצוע משימות הנהיגה בקטעי המחקר עשויה להיות קשורה לנפחי תנועה גבוהים יחסית ולתדירות גבוהה של צמתים לאורך כבישי המחקר. (סיכום זה אינו מפתיע כי הכבישים שנבחרו למחקר הם בין הכבישים המובילים ברשת הדרכים הלא עירונית, אשר מעבירים נפחי תנועה גבוהים ומתאפיינים ברמת תכן גבוהה יותר לעומת כבישים אחרים).

מבחינת שכיחות אירועי הנהיגה, לפי סוגים, עלה (ראה נספח א') כי מספר ניכר של אירועי הנהיגה הצטבר עבור שני סוגי אירועים בלבד שהם: סוג 1 - "בלימה" וסוג 19 - "התראה על מהירות", אשר נצפו, בהתאמה, ב-7.1% וב-20.6% מיחידות הניתוח. עבור יתר סוגי האירועים מספר המקרים היה נמוך משמעותית, דהיינו האירועים נצפו ב-1% או פחות מיחידות הניתוח. מכאן, ניתוח מערכת הקשרים בין אירועי הנהיגה ומאפייני התשתית וכן, בין אירועי הנהיגה והתאונות צריך להתמקד בשלושה סוגי אירועים שהם: **סוג 1, סוג 19 וסך האירועים** (סוגי אירועים אלה מודגשים בטבלה 2.3). אירועי הנהיגה מכל הסוגים נצפו סה"כ ב-30.2% מיחידות הניתוח.

לגבי משמעויות האירועים יצוין כי:

סוג 1 - "בלימה" (Braking באיור 2.14) מתייחס לבלימות בנסיעה בקטע ישר, ללא סיבוב הגה, כאשר עבור בלימות במצבים אחרים (בעת פניות, עם סיבוב הגה) קיים רישום של אירועים אחרים (ראה אירועים 3, 6, 9, 11 באיור 2.14);

סוג 19 - "התראה על מהירות" (Speed alert באיור 2.14) מתייחס לנסיעה מעל 120 קמ"ש - סף אחיד בכל סוגי הכבישים. יש לצפות ליותר אירועים מסוג זה בכבישים ברמה גבוהה יותר, בקטעים ישרים.

לגבי ייצוג הנהגים עם "הקופסא הירוקה" בכבישים שנבחרו למחקר יצוין כי המחקר התמקד בקבוצת ביקורת הכוללת 64 כלי רכב מתוך הצי של 200 כלי הרכב עם המכשיר, כאשר ב-9 הכבישים אשר נבחנו במחקר נכללו 62 כלי רכב (מתוך 64). כלומר, מקבץ הכבישים שנבחר למחקר הינו **מייצג ומקיף** עבור אוכלוסיית הנהגים במחקר (קבוצת הביקורת).

נספח ב' מציג מפות עם קטעי הכבישים שנכנסו לניתוח במחקר. הקטעים מוצגים ברשת TMC המותרת לפרסום. ניתן לראות כי קטעי המחקר מספקים **כיסוי רחב** של הכבישים הנבחנו.

בנוסף, **נספח ג'** מציג התפלגויות של יחידות הניתוח, בכל כביש, לפי מספר המעברים - תדירויות נסיעה של כלי הרכב עם "הקופסא הירוקה" בשנת 2010 (מאפיין num_tracks_tot בטבלה 2.3). טבלה 2.4 מסכמת את הממוצעים וסטיות התקן של מספרי המעברים ביחידות הניתוח, בכל כביש. ניתן לראות כי ברוב הכבישים שנבחרו למחקר היה **היקף ניכר** של נסיעות כלי הרכב עם

"הקופסא הירוקה" בשנת 2010 ; בכבישים מס' 70, 90 - היקף הנסיעות היה נמוך יותר, כצפוי, כי כבישים אלה מרוחקים מהפעילות היומיומית של כלי הרכב עם "הקופסא הירוקה".

טבלה 2.4. תדירויות המעברים ביחידות הניתוח, בכבישי המחקר

Table 2.4. Frequencies of travels through the units of analysis, on the study's roads

מספר יחידות ניתוח, בכביש	סטית תקן של מספר המעברים, ביחידות הניתוח	ממוצע מספר המעברים, ביחידות הניתוח	מס' כביש
337	76.0	188.5	1
439	87.8	128.0	2
778	131.0	137.1	4
975	53.2	36.4	40
152	50.7	57.3	44
401	53.5	23.1	65
82	5.1	12.4	70
153	1.5	6.7	90
183	94.9	92.1	444
3500	102.1	85.3	סה"כ

3. ניתוחים מקדימים של נתוני המחקר

3.1. בחינת הקשר בין אירועי הנהיגה ומאפייני הדרכים

בפרק זה מוצגים ממצאים מהניתוחים המקדימים שנערכו על בסיס הנתונים של המחקר אשר בחנו את מערכת הקשרים בין התרחשות האירועים בנהיגה לבין מדדי החשיפה ומאפייני התשתית⁴. מערכת קשרים זו נבחנה עבור שלושה סוגי אירועים: סוג 1 ("בלימה"), סוג 19 ("התראה על מהירות") וסך האירועים.

מבחינת מספרי האירועים בקטעי המחקר עלה כי:

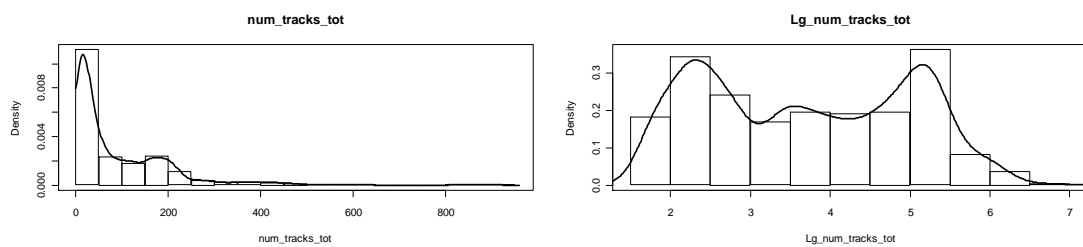
- שכיחות אירועים מסוג 1 משתנה בין 0 עד 11, עם ממוצע 0.10, סטית תקן 0.49;
- שכיחות אירועים מסוג 19 משתנה בין 0 עד 12, עם ממוצע 0.31, סטית תקן 0.75;
- שכיחות סך האירועים בקטעי המחקר משתנה בין 0 עד 30, עם ממוצע 0.51, סטית תקן 1.27.

בבדיקת הקורלציות בין האירועים (קורלציות Pearson) נמצא קשר מובהק ($p < 0.001$) בין סך האירועים לבין כל אחד מסוגי האירועים (סוג 1, סוג 19), כאשר בין שני סוגי האירועים קיים קשר אפסי.

3.1.1. הקשר בין חשיפה לאירועים בנהיגה

מדד המאפיין את רמת החשיפה לאירועים בנהיגה בקטע דרך הינו מספר מעברים בקטע (num_tracks_tot) המבטא את מספר הנסיעות של כלי הרכב עם ה"קופסא הירוקה". איור 3.1 מציג התפלגות של ערכי החשיפה בקטעי המחקר, עבור הערכים המקוריים ועבור התמרה לוגריתמית של הערכים.

הערכים המקוריים של מדד החשיפה נמצאים בטווח בין 5 עד 908 מעברים, עם ערך חציון 39 וממוצע של 85 נסיעות. ע"פ התפלגות של ההתמרה הלוגריתמית של ערכי המדד, מרבית הערכים נמצאים בטווח בין 6-2, דהיינו בין 7 עד 403 נסיעות.



איור 3.1. התפלגות ערכי מדד החשיפה בקטעי המחקר.

Figure 3.1. Distribution of values of the exposure measure on the study's road units.

איור 3.2 מציג תוצאות מבחינת צורת הקשר בין לוג מדד החשיפה לבין מספרי האירועים, לפי שלושה סוגים: סוג 1, סוג 19 וסך האירועים. ניתן להבחין שעבור כל סוג אירוע מסתמן קשר ליניארי ישיר בין לוג מדד החשיפה לבין מספרי האירועים, כאשר עליה בחשיפה מביאה לעליה באירועים.

⁴ בטרם ניתוחים אלה, מבסיס הנתונים של המחקר אשר כלל בהתחלה 3,500 יחידות ניתוח, הוסרו 4 רשימות עם מספר תאונות חריג, דהיינו בבסיס הנתונים נותרו 3,496 מקרים.

בהמשך, עבור כל אחד מסוגי האירועים הותאם מודל מסביר לקשר בין לוג החשיפה ל-לוג מספר האירועים, עם התפלגות בינומית שלילית עבור מספר האירועים. להלן המודלים שהותאמו.

(1) עבור סוג 1 של אירועים ("בלימה") התקבל המודל:

$y = \exp[-6.74 + 1.003 * \lg(\text{num_tracks_tot})]$, עם מקדמי מודל מובהקים ($p < 0.001$) ואחוז גבוה יחסית של שונות מוסברת בעזרת המודל (23.5%).

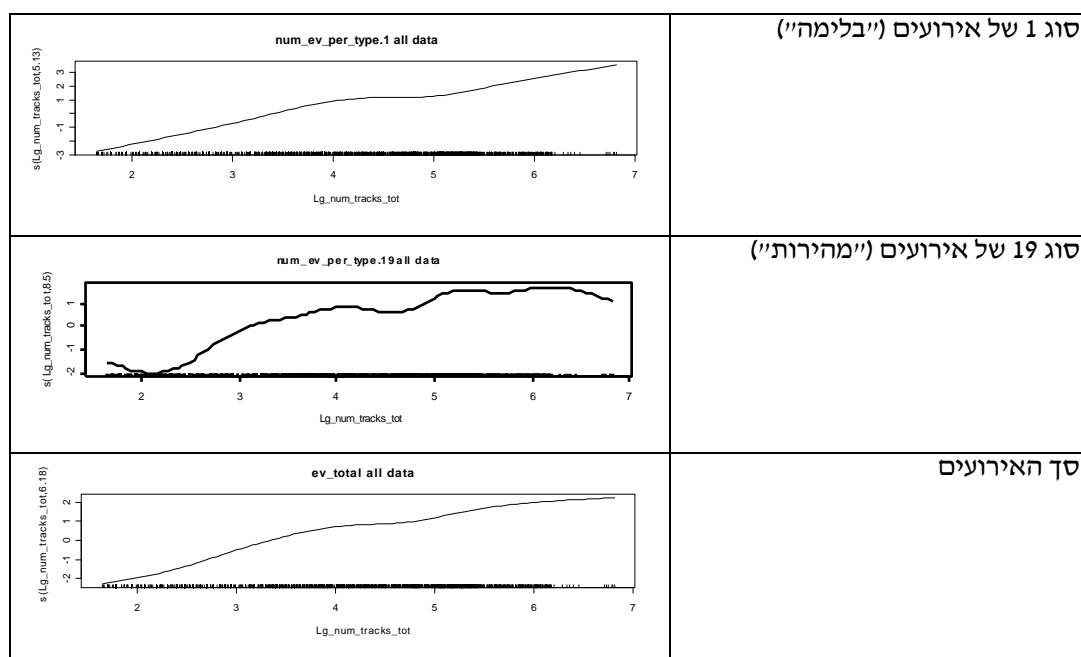
(2) עבור סוג 19 של אירועים ("מהירות") התקבל המודל:

$y = \exp[-4.48 + 0.770 * \lg(\text{num_tracks_tot})]$, עם מקדמי מודל מובהקים ($p < 0.001$) ואחוז גבוה יחסית של שונות מוסברת בעזרת המודל (23%).

(3) עבור סך האירועים התקבל המודל:

$y = \exp[-4.48 + 0.845 * \lg(\text{num_tracks_tot})]$, עם מקדמי מודל מובהקים ($p < 0.001$) ואחוז גבוה של שונות מוסברת בעזרת המודל (33.3%).

כלומר, ע"פ הביטוי המתמטי שנמצא לקשר בין מדד החשיפה לבין מספרי האירועים, קיים קשר ליניארי מובהק בין רמת החשיפה (מספר הנסיעות בקטע) לבין התרחשות האירועים, כאשר עם עליה ברמת החשיפה יש לצפות למספר גבוה יותר של אירועים. ניתן להבחין גם כי תוספת החשיפה, בתנאים דומים, תביא לתוספת גדולה יותר של אירועים מסוג 1 ("בלימה") לעומת סוג 19 או סך האירועים.



איור 3.2. צורת הקשר בין לוג מדד החשיפה לבין מספרי האירועים.

Figure 3.2. The form of relationship between the logarithm of exposure and the number of events.

3.1.2. בחינת הצורך במשתנה נפח תנועה קטגורי

מדד החשיפה העיקרי לאירועים בנהיגה הינו מספר המעברים בקטע (num_tracks_tot). בנוסף, קיים מדד חשיפה מסורתי של נפח התנועה בקטע, כאשר נפח התנועה מקובל לשמש, לדוגמא,

כמדד החשיפה בחיזוי תאונות הדרכים. לכן, נבחן הצורך בשימוש בנפח התנועה בקטע (משתנה nefah_cat) בתור מדד נוסף לחשיפה לאירועי הנהיגה.

הסטטיסטיקה התיאורית של אירועי הנהיגה (טבלה 3.1, א') הצביעה על קשר אפשרי בין רמת נפח התנועה לבין שכיחות האירועים, כאשר קטעי דרך עם נפחי תנועה גבוהים יותר היו מזוהים עם ממוצע גבוה יותר של האירועים, מכל אחד משלושת הסוגים. במודל בינומי שלילי שהותאם לקשר בין נפח תנועה קטגורי לאירועים, מכל סוג, נמצא קשר ישיר ומובהק, אם כי חלש, בין שני המשתנים, כאשר נפח תנועה קטגורי מסביר בין 1% עד 2.3% מהשונות.

גם בבדיקת הסטטיסטיקה התיאורית של מספר המעברים בקטע (num_tracks_tot) לעומת נפח תנועה קטגורי הסתמן קשר חיובי, כאשר קטעי דרך עם נפחי תנועה גבוהים יותר היו מזוהים עם מספר מעברים גבוה יותר (טבלה 3.1, ב'). כמו כן, בבדיקה הסטטיסטית נמצא הבדל מובהק ($p < 0.001$) בין ממוצעי מספר המעברים בקטע ברמות השונות של נפח תנועה קטגורי.

טבלה 3.1. סטטיסטיקה תיאורית לבדיקת קשר אפשרי בין רמת נפח התנועה, שכיחות האירועים, מספר המעברים בקטע

Table 3.1. Descriptive statistics for examination of possible relationship between the level of traffic volume, frequency of events, and the number of travels through the units

א - אירועים בנהיגה לרמות נפח תנועה קטגורי*

רמת נפח תנועה nefah_cat	מספר יחידות ניתוח	סוג אירועים	ממוצע	שונות
נמוך	499	סוג 1	0.026	0.033
		סוג 19	0.286	0.358
		סך האירועים	0.347	0.444
בינוני	1098	סוג 1	0.094	0.165
		סוג 19	0.234	0.533
		סך האירועים	0.427	1.404
גבוה	1899	סוג 1	0.129	0.334
		סוג 19	0.353	0.634
		סך האירועים	0.600	2.042

*סה"כ 3,496 יחידות ניתוח

ב - מספר המעברים בקטע לרמות נפח תנועה קטגורי

רמת נפח תנועה nefah_cat	מספר יחידות ניתוח	ממוצע	שונות
נמוך	499	26.07	737.5
בינוני	1098	66.54	6418.8
גבוה	1899	111.79	13458.8

מכיוון שנמצא קשר בין נפח תנועה קטגורי ומדד החשיפה העיקרי (מספר המעברים), הוחלט לבדוק האם קיים צורך בשני המשתנים במודל המסביר לאירועים. עבור כל אחד מסוגי האירועים הותאם מודל מסביר לקשר בין לוג החשיפה ורמת נפח התנועה ל-לוג מספר האירועים, עם התפלגות בינומית שלילית עבור מספר האירועים. להלן המודלים שהותאמו.

(1) מקדמי המודל עבור סוג 1 של אירועים היו כלהלן:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-6.84599	0.40613	-16.856	<2e-16
as.factor(nefah_cat) 2	0.45470	0.32637	1.393	0.164
as.factor(nefah_cat) 3	0.21972	0.32372	0.679	0.497
Lg_num_tracks_tot	0.96827	0.07394	13.095	<2e-16

מודל זה הצביע על קשר חיובי בין רמת נפח התנועה ומדד החשיפה העיקרי לבין מספר האירועים, אם כי השפעת רמת נפח התנועה לא הייתה מובהקת. מודל זה מתאפיין ב-19% של שונות מוסברת, כאשר שונות המוסברת ע"י מדד החשיפה העיקרי בלבד מהווה 18.7% והשונות המוסברת ע"י רמות נפח התנועה בלבד מהווה 2.3%.

(2) מקדמי המודל עבור סוג 19 של אירועים היו כלהלן:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-4.1420	0.1858	-22.288	<2e-16
as.factor(nefah_cat) 2	-1.1427	0.1346	-8.492	<2e-16
as.factor(nefah_cat) 3	-1.1044	0.1278	-8.642	<2e-16
Lg_num_tracks_tot	0.9170	0.0441	20.796	<2e-16

מודל זה הצביע על קשר חיובי בין מדד החשיפה העיקרי לבין מספר האירועים, וקשר שלילי בין רמות נפח התנועה לבין מספר האירועים, כאשר לשני משתני החשיפה נמצאה השפעה מובהקת על שכיחות האירועים. מודל זה מסביר 23.6% מהשונות, כאשר מדד החשיפה העיקרי בלבד מסביר 20.5% מהשונות ורמות נפח התנועה בלבד מסבירות 0.9% מהשונות.

(3) מקדמי המודל עבור סך האירועים היו כלהלן:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-4.14268	0.15903	-26.049	< 2e-16
as.factor(nefah_cat) 2	-0.75530	0.11590	-6.517	7.19e-11
as.factor(nefah_cat) 3	-0.83347	0.11207	-7.437	1.03e-13
Lg_num_tracks_tot	0.96204	0.03628	26.515	< 2e-16

גם מודל זה הצביע על קשר חיובי בין מדד החשיפה העיקרי לבין מספר האירועים, וקשר שלילי בין רמות נפח התנועה לבין מספר האירועים, כאשר לשני משתני החשיפה נמצאה השפעה מובהקת על שכיחות האירועים. מודל זה מסביר 30.6% מהשונות, כאשר מדד החשיפה העיקרי בלבד מסביר 29% מהשונות ורמות נפח התנועה בלבד מסבירות 0.9% מהשונות.

מכאן, שנפח תנועה קטגורי לא היווה תוספת מובהקת להסבר האירועים מסוג 1, מעבר למדד החשיפה העיקרי של מספר המעברים בקטע. לעומת זאת, עבור האירועים מסוג 19 וסך האירועים, משתנה זה היווה תוספת מובהקת למודל המסביר. עם זאת, בכל המקרים, השונות המוסברת ע"י משתנה נוסף זה הייתה מזערית. כמו כן, צורת ההשפעה של נפח תנועה קטגורי על מספרי האירועים מסוג 19 וסך האירועים לא היתה עקבית: בהיותו משתנה יחיד, נפח תנועה גבוה יותר התקשר עם עליה באירועים, כאשר בהיותו משתנה מסביר שני נפח תנועה גבוה יותר תרם לירידה באירועים. כלומר, ייתכן שהתלות הקיימת בין שני משתני החשיפה יוצרת אפקטים מוזרים שנובעים ממולטיקולינאריות. לכן, הוחלט לא להוסיף משתנה חשיפה שני - נפח תנועה קטגורי, למודלים מסבירים לאירועי הנהיגה.

3.1.3. בחינת השפעה של מאפייני תשתית על אירועים

מאפייני התשתית של קטעי המחקר הם משתנים קטגוריים (ראה לעיל טבלה 2.3). בשלב זה נערכה בדיקת הקשר בין התרחשות האירועים לבין כל אחד ממשתני התשתית בנוכחות חשיפה (מספר המעברים בקטע). הקשר נבדק באמצעות התאמת מודל מסביר לחיזוי מספר האירועים, בהינתן מדד החשיפה - לוג מספר המעברים בקטע, וערכי המשתנה הנבחן - מאפיין תשתית. המודלים הותאמו בעזרת פרוצדורת GLM של SAS, בהנחת התפלגות בינומית שלילית של

האירועים וקשר לוגריתמי בין המסבירים והמשתנה המוסבר. המודלים הותאמו עבור טווח הערכים העיקרי של החשיפה (לוג מדד החשיפה בין 2 עד 6). בדומה לבדיקות הקודמות, המודלים הותאמו לחוד עבור כל אחד משלושת סוגי האירועים בנהיגה: סוג 1, סוג 19 וסך האירועים. להלן ממצאי הבדיקות.

א. קרוב לצומת בהתקרבות (karov_lezomet_beitkarvut)

למשתנה זה שלוש קטגוריות: 0 - היחידה לא קרובה לצומת/מחלף בהתקרבות, 1 - היחידה קרובה לצומת/מחלף, 2 - היחידה כוללת בתוכה צומת/מחלף. טבלה 3.2 מסכמת ממצאים מפיתוח מודלים מסבירים עם משתנה זה. ניתן לראות כי:

- עבור כל סוגי האירועים נמצאה השפעה מובהקת של משתנה זה, בנוכחות חשיפה.

- עם זאת, עבור אירועים מסוג 1 ("בלימה") קרבת צומת ונוכחות צומת בתוך קטע מזוהות עם עליה באירועים, בעוד שעבור אירועים מסוג 19 ("מהירות") אותם המצבים של קרבת/נוכחות צומת מזוהים עם ירידה באירועים.

- עבור סך האירועים, השפעת משתנה זה לא היתה עקבית, כאשר קרבת צומת מזוהה עם ירידה ונוכחות צומת בתוך קטע - עם עליה באירועים.

טבלה 3.2. ממצאים מפיתוח מודלים מסבירים להתרחשות אירועים בנהיגה, עם מדד החשיפה ומשתנה "קרוב לצומת בהתקרבות"

Table 3.2. Findings from the development of explanatory models for driving events, with measure of exposure and "close to junction on approaching" variable

(1) מקדמי המודל עבור אירועים מסוג 1:				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-6.78784	0.38536	-17.614	< 2e-16
Lg_num_tracks_tot	0.95136	0.07939	11.983	< 2e-16
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut)1	0.46293	0.17880	2.589	0.00962
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut)2	1.06301	0.18676	5.692	1.26e-08
<p>שונות מוסברת: 23.6%; הבדל מובהק ($p < 0.01$) בהשפעת קטגוריות שונות של המשתנה. משמעות: השפעה מובהקת של משתנה זה בנוכחות חשיפה, כאשר קרבה לצומת או נוכחות צומת בתוך יחידה מעלות את מספר האירועים.</p>				
(2) מקדמי המודל עבור אירועים מסוג 19:				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-4.4083	0.1778	-24.800	< 2e-16
Lg_num_tracks_tot	0.8036	0.0379	21.207	< 2e-16
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut)1	-0.5642	0.1041	-5.418	6.02e-08
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut)2	-1.3878	0.1724	-8.051	8.19e-16
<p>שונות מוסברת: 24.5%; הבדל מובהק ($p < 0.001$) בהשפעת קטגוריות שונות של המשתנה. משמעות: השפעה מובהקת של משתנה זה בנוכחות חשיפה, כאשר קרבה לצומת או נוכחות צומת בתוך יחידה מפחיתות את מספר האירועים.</p>				
(3) מקדמי המודל עבור סך האירועים:				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-4.43463	0.15340	-28.909	< 2e-16
Lg_num_tracks_tot	0.87473	0.03244	26.964	< 2e-16
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut)1	-0.24207	0.08385	-2.887	0.00389
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut)2	0.07750	0.09228	0.840	0.40098
<p>שונות מוסברת: 29.3%; הבדל מובהק ($p < 0.01$) בהשפעת קטגוריות שונות של המשתנה. משמעות: השפעה לא עקבית של משתנה זה בנוכחות חשיפה - ירידה (מובהקת) במספר האירועים בקטגוריה "קרוב לצומת" ועליה (לא מובהקת) במספר האירועים כאשר צומת נמצא בתוך יחידה.</p>				

ב. קרוב לצומת בהתרחקות (karov_lezomet_beitrahkut)

למשתנה זה שלוש קטגוריות: 0 - היחידה לא קרובה לצומת/מחלף בהתרחקות, 1 - היחידה קרובה לצומת/מחלף, 2 - היחידה כוללת בתוכה צומת/מחלף. טבלה 3.3 מסכמת ממצאים מפיתוח מודלים מסבירים עם משתנה זה. ניתן לראות כי השפעת המשתנה "קרוב לצומת בהתרחקות" דומה להשפעת המשתנה הקודם ("קרוב לצומת בהתקרבות"). כלומר:

- עבור כל סוגי האירועים נמצאה השפעה מובהקת של משתנה זה, בנוכחות חשיפה.

- עם זאת, עבור אירועים מסוג 1 ("בלימה") קרבת צומת ונוכחות צומת בתוך קטע מזוהות עם עליה באירועים, בעוד שעבור אירועים מסוג 19 ("מהירות") אותם המצבים של קרבת צומת מזוהים עם ירידה באירועים.

- עבור סך האירועים, השפעת משתנה זה לא היתה עקבית, כאשר קרבת צומת מזוהה עם ירידה ונוכחות צומת בתוך קטע - עם עליה באירועים.

טבלה 3.3. ממצאים מפיתוח מודלים מסבירים להתרחשות אירועים בנהיגה, עם מדד החשיפה ומשתנה "קרוב לצומת בהתרחקות"

Table 3.3. Findings from the development of explanatory models for driving events, with measure of exposure and "close to junction on distancing" variable

(1) מקדמי המודל עבור אירועים מסוג 1 :				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-6.74978	0.38325	-17.612	< 2e-16
Lg_num_tracks_tot	0.96879	0.07964	12.165	< 2e-16
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut)1	0.03293	0.21482	0.153	0.878
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut)2	0.94559	0.18421	5.133	2.85e-07
<p>שוונות מוסברת: 23%; הבדל מובהק ($p < 0.001$) בהשפעת קטגוריות שונות של המשתנה. משמעות: השפעה מובהקת של משתנה זה בנוכחות חשיפה, כאשר קרבה לצומת או נוכחות צומת בתוך יחידה מעלות את מספר האירועים.</p>				
(2) מקדמי המודל עבור אירועים מסוג 19 :				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-4.44804	0.17974	-24.747	< 2e-16
Lg_num_tracks_tot	0.80319	0.03846	20.886	< 2e-16
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut)1	-0.44361	0.11686	-3.796	0.000147
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut)2	-1.34582	0.17259	-7.798	6.3e-15
<p>שוונות מוסברת: 23.9%; הבדל מובהק ($p < 0.001$) בהשפעת קטגוריות שונות של המשתנה. משמעות: השפעה מובהקת של משתנה זה בנוכחות חשיפה, כאשר קרבה לצומת או נוכחות צומת בתוך יחידה מפחיתות את מספר האירועים.</p>				
(3) מקדמי המודל עבור סך האירועים :				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-4.46319	0.15418	-28.948	< 2e-16
Lg_num_tracks_tot	0.87943	0.03272	26.876	< 2e-16
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut)1	-0.29732	0.09694	-3.067	0.00216
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut)2	0.08406	0.09174	0.916	0.35952
<p>שוונות מוסברת: 29.3%; הבדל מובהק ($p < 0.01$) בהשפעת קטגוריות שונות של המשתנה. משמעות: השפעה לא עקבית של משתנה זה בנוכחות חשיפה - ירידה (מובהקת) במספר האירועים בקטגוריה "קרוב לצומת" ועליה (לא מובהקת) במספר האירועים כאשר צומת נמצא בתוך יחידה.</p>				

ג. מרחק בין צמתים (merhak_benzmatim_cat)

למשתנה זה שלוש קטגוריות: 1 - קטע קצר, 2 - קטע בינוני, 3 - קטע ארוך, 4 - צומת/מחלף בתוך הקטע. טבלה 3.4 מסכמת ממצאים מפיתוח מודלים מסבירים עם משתנה זה. ניתן לראות כי:

- עבור כל סוגי האירועים נמצאה השפעה מובהקת של משתנה זה, בנוכחות חשיפה.

- עם זאת, עבור אירועים מסוג 1 ("בלימה") שיוך יחידת הניתוח לקטע בינוני-ארוך מזוהה עם ירידה באירועים, בעוד שנוכחות צומת בתוך קטע מזוהה עם עליה באירועים, כאשר עבור אירועים מסוג 19 ("מהירות") המצב הפוך: קטע בינוני-ארוך מזוהה עם עליה באירועים, בעוד שנוכחות צומת בתוך קטע מזוהה עם ירידה באירועים.

- עבור סך האירועים, המצבים של קטע בינוני-ארוך ונוכחות צומת בתוך קטע מזוהים עם עליה באירועים, לעומת קטע קצר.

טבלה 3.4. ממצאים מפיתוח מודלים מסבירים להתרחשות אירועים בנהיגה, עם מדד החשיפה ומשתנה "מרחק בין צמתים"

Table 3.4. Findings from the development of explanatory models for driving events, with measure of exposure and "distance between junctions" variable

(1) מקדמי המודל עבור אירועים מסוג 1 :				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-6.13945	0.40367	-15.209	< 2e-16
Lg_num_tracks_tot	0.88264	0.08167	10.808	< 2e-16
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat)2	-1.15567	0.25310	-4.566	4.97e-06
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat)3	-1.29100	1.05029	-1.229	0.219
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat)4	0.72868	0.18040	4.039	5.36e-05
שונויות מוסברות: 25.3%; הבדל מובהק בהשפעת קטגוריה 4 לעומת 2,3.				
משמעות: השפעה מובהקת של משתנה זה בנוכחות חשיפה, כאשר קטע בינוני-ארוך מזוהה עם ירידה באירועים, בעוד שנוכחות צומת בתוך יחידה מעלה את מספר האירועים.				
(2) מקדמי המודל עבור אירועים מסוג 19 :				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-5.17580	0.20453	-25.306	< 2e-16
Lg_num_tracks_tot	0.89132	0.04067	21.915	< 2e-16
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat)2	0.71943	0.08379	8.586	< 2e-16
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat)3	1.09827	0.22579	4.864	1.15e-06
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat)4	-1.04203	0.17266	-6.035	1.59e-09
שונויות מוסברות: 26.3%; הבדל מובהק בהשפעת קטגוריה 4 לעומת 2,3.				
משמעות: השפעה מובהקת של משתנה זה בנוכחות חשיפה, כאשר קטע בינוני-ארוך מזוהה עם עליה באירועים, בעוד שנוכחות צומת בתוך יחידה מפחיתה את מספר האירועים.				
(3) מקדמי המודל עבור סך האירועים :				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-4.75156	0.17210	-27.609	< 2e-16
Lg_num_tracks_tot	0.91267	0.03454	26.425	< 2e-16
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat)2	0.27268	0.07747	3.520	0.000432
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat)3	0.67229	0.21491	3.128	0.001759
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat)4	0.21669	0.09349	2.318	0.020453
שונויות מוסברות: 29.6%; הבדל מובהק בהשפעת קטגוריה 4 לעומת 2,3.				
משמעות: השפעה מובהקת של משתנה זה בנוכחות חשיפה, כאשר הן קטע בינוני-ארוך והן נוכחות צומת בתוך יחידה מזוהים עם עליה באירועים.				

ד. שינוי במספר נתיבים בין יחידות ניתוח עוקבות (rama)

למשתנה זה שני ערכים: 0 - אין שינוי, 1 - יש שינוי. מבחינת המודלים המסבירים עם משתנה זה עלה כי:

- למשתנה זה, בנוכחות חשיפה, לא נמצאה השפעה מובהקת על אירועים בנהיגה, מכל הסוגים שנבדקו.

- אופן השפעת משתנה זה היה שונה על אירועים שונים, דהיינו שינוי במספר נתיבים ביחידות ניתוח עוקבות נוטה להגביר את מספר האירועים מסוג 1, נוטה להקטין את מספר האירועים מסוג 19 ולמעשה, לא משפיע על סך האירועים.

ה. שינוי ברוחב הנתיבים בין יחידות ניתוח עוקבות (rama_rohav_nativ)

גם למשתנה זה שני ערכים: 0 - אין שינוי, 1 - יש שינוי. מבחינת המודלים המסבירים עם משתנה זה עלה כי:

- למשתנה זה, בנוכחות חשיפה, נמצאה השפעה מובהקת על אירועים מסוג 1 ו-19, ולא נמצאה השפעה על סך האירועים.

- אופן השפעת משתנה זה היה שונה על אירועים שונים, דהיינו שינוי ברוחב הנתיבים ביחידות ניתוח עוקבות מגביר את מספר האירועים מסוג 1 ("בלימה") ומקטין את מספר האירועים מסוג 19 ("מהירות").

ו. רוחב שול ימין (shul_kolel_hizoni)

למשתנה זה שלוש קטגוריות: 1 - שול רחב (תקיף), 2 - שול בינוני, 3 - שול צר. טבלה 3.5 מסכמת ממצאים מפיתוח מודלים מסבירים עם משתנה זה.

טבלה 3.5. ממצאים מפיתוח מודלים מסבירים להתרחשות אירועים בנהיגה, עם מדד החשיפה ומשתנה "רוחב שול ימין"

Table 3.5. Findings from the development of explanatory models for driving events, with measure of exposure and "width of right shoulder" variable

<p>(1) מקדמי המודל עבור אירועים מסוג 1:</p>					
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)	
(Intercept)	-6.64694	0.42243	-15.735	< 2e-16	
Lg_num_tracks_tot	0.93509	0.08494	11.008	< 2e-16	
as.factor(N_shul_kolel_hizoni)2	0.25261	0.19291	1.309	0.19037	
as.factor(N_shul_kolel_hizoni)3	0.49301	0.18303	2.694	0.00707	
<p>שוונות מוסברת: 20.2%; לא נמצא הבדל בין השפעת קטגוריות 2,3 של המשתנה. משמעות: השפעה מובהקת של משתנה זה בנוכחות חשיפה, כאשר שול בינוני או צר מעלה את מספר האירועים.</p>					
<p>(2) מקדמי המודל עבור אירועים מסוג 19:</p>					
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)	
(Intercept)	-4.32733	0.19493	-22.199	<2e-16	
Lg_num_tracks_tot	0.79738	0.04027	19.803	<2e-16	
as.factor(N_shul_kolel_hizoni)2	-0.17769	0.09033	-1.967	0.0492	
as.factor(N_shul_kolel_hizoni)3	-0.97134	0.11131	-8.727	<2e-16	
<p>שוונות מוסברת: 24.1%; נמצא הבדל מובהק ($p < 0.001$) בהשפעת קטגוריות שונות של המשתנה. משמעות: השפעה מובהקת של משתנה זה בנוכחות חשיפה, כאשר שול בינוני או צר מפחית את מספר האירועים.</p>					
<p>(3) מקדמי המודל עבור סך האירועים:</p>					
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)	
(Intercept)	-4.37170	0.16938	-25.810	< 2e-16	
Lg_num_tracks_tot	0.87273	0.03475	25.112	< 2e-16	
as.factor(N_shul_kolel_hizoni)2	-0.01617	0.07869	-0.205	0.837222	
as.factor(N_shul_kolel_hizoni)3	-0.28432	0.08244	-3.449	0.000563	
<p>שוונות מוסברת: 28.9%; הבדל מובהק ($p < 0.01$) בהשפעת קטגוריות שונות של המשתנה. משמעות: השפעה מובהקת של משתנה זה בנוכחות חשיפה, כאשר שול בינוני או צר מפחית את מספר האירועים.</p>					

מטבלה 3.5 ניתן לראות כי :

- עבור כל סוגי האירועים נמצאה השפעה מובהקת של משתנה זה, בנוכחות חשיפה.
- עבור אירועים מסוג 1 ("בלימה") שול בינוני או צר מזוהה עם עליה באירועים, לעומת שול רחב. לעומת זאת, עבור אירועים מסוג 19 ("מהירות") וסך האירועים, שול בינוני או צר מזוהה עם ירידה באירועים, לעומת שול רחב.

ז. סוג דרך (had_dumasluli)

למשתנה זה שלוש קטגוריות: 1 - חד-מסלולי, 2 - דו-מסלולי, 3 - ממוחלף. טבלה 3.6 מסכמת ממצאים מפיתוח מודלים מסבירים עם משתנה זה. ניתן לראות כי :

- עבור כל סוגי האירועים נמצאה השפעה מובהקת של משתנה זה, בנוכחות חשיפה.
- עבור אירועים מסוג 1 ("בלימה") דרך דו-מסלולית מזוהה עם עליה באירועים ודרך ממוחלפת - עם ירידה באירועים, לעומת דרך חד-מסלולית. לעומת זאת, עבור אירועים מסוג 19 ("מהירות") וסך האירועים, דרך דו-מסלולית או ממוחלפת מזוהה עם עליה באירועים.

טבלה 3.6. ממצאים מפיתוח מודלים מסבירים להתרחשות אירועים בנהיגה, עם מדד החשיפה ומשתנה "סוג דרך"

Table 3.6. Findings from the development of explanatory models for driving events, with measure of exposure and "road type" variable

(1) מקדמי המודל עבור אירועים מסוג 1 :				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-7.68174	0.42000	-18.290	< 2e-16
Lg_num_tracks_tot	1.26148	0.08163	15.454	< 2e-16
as.factor(N_had_dumasluli)2	0.43370	0.23741	1.827	0.0677
as.factor(N_had_dumasluli)3	-1.54750	0.26970	-5.738	9.59e-09
<p>שוונות מוסברת : 32.4% ; נמצא הבדל מובהק ($p < 0.001$) בין השפעת קטגוריות שונות של המשתנה. משמעות : השפעה מובהקת של משתנה זה בנוכחות חשיפה, כאשר דרך דו-מסלולית מזוהה עם עליה באירועים, דרך ממוחלפת - עם ירידה באירועים.</p>				
(2) מקדמי המודל עבור אירועים מסוג 19 :				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-5.03761	0.27130	-18.568	< 2e-16
Lg_num_tracks_tot	0.52653	0.04296	12.256	< 2e-16
as.factor(N_had_dumasluli)2	1.29111	0.23580	5.475	4.36e-08
as.factor(N_had_dumasluli)3	2.11149	0.23738	8.895	< 2e-16
<p>שוונות מוסברת : 27.1% ; נמצא הבדל מובהק ($p < 0.001$) בין השפעת קטגוריות שונות של המשתנה. משמעות : השפעה מובהקת של משתנה זה בנוכחות חשיפה, כאשר דרך דו-מסלולית או ממוחלפת מזוהה עם עליה באירועים.</p>				
(3) מקדמי המודל עבור סך האירועים :				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-5.06618	0.19219	-26.361	< 2e-16
Lg_num_tracks_tot	0.86346	0.03608	23.931	< 2e-16
as.factor(N_had_dumasluli)2	0.83977	0.13813	6.080	1.20e-09
as.factor(N_had_dumasluli)3	0.57433	0.14262	4.027	5.65e-05
<p>שוונות מוסברת : 30.5% ; הבדל מובהק ($p < 0.001$) בין השפעת קטגוריות שונות של המשתנה. משמעות : השפעה מובהקת של משתנה זה בנוכחות חשיפה, כאשר דרך דו-מסלולית או ממוחלפת מזוהה עם עליה באירועים.</p>				

ח. רוחב שול שמאל (lhs)

בדיקת רוחב שול שמאל רלוונטית לדרך דו-מסלולית או ממוחלפת, ואינה רלוונטית לדרך חד-מסלולית. לכן, למשתנה זה נקבעו ארבע קטגוריות: 0 - לא רלוונטי (דרך חד-מסלולית), 1 - שול רחב/תקיין (בדרך דו-מסלולית או ממוחלפת), 2 - שול בינוני (בדרך דו-מסלולית או ממוחלפת), 3 - שול צר (בדרך דו-מסלולית או ממוחלפת). טבלה 3.7 מסכמת ממצאים מפיתוח מודלים מסבירים עם משתנה זה. ניתן לראות כי:

- עבור כל סוגי האירועים נמצאה השפעה מובהקת של משתנה זה, בנוכחות חשיפה.

- עבור אירועים מסוג 1 ("בלימה") שול רחב או בינוני בדרך דו-מסלולית/ממוחלפת מזוהה עם ירידה באירועים, לעומת דרך חד-מסלולית; שול צר מזוהה עם עליה באירועים, אם כי, לא מובהק לעומת דרך חד-מסלולית.

- עבור אירועים מסוג 19 ("מהירות") וסך האירועים, נוכחות שול שמאלי מזוהה עם עליה באירועים, בדרך דו-מסלולית או ממוחלפת, לעומת דרך חד-מסלולית.

טבלה 3.7. ממצאים מפיתוח מודלים מסבירים להתרחשות אירועים בנהיגה, עם מדד החשיפה ומשתנה "רוחב שול שמאל"

Table 3.7. Findings from the development of explanatory models for driving events, with measure of exposure and "width of left shoulder" variable

(1) מקדמי המודל עבור אירועים מסוג 1:				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-6.55990	0.40390	-16.241	<2e-16
Lg_num_tracks_tot	0.99578	0.08368	11.900	<2e-16
as.factor(Ihs_N)1	-0.60871	0.29157	-2.088	0.0368
as.factor(Ihs_N)2	-0.75230	0.29358	-2.563	0.0104
as.factor(Ihs_N)3	0.28807	0.25760	1.118	0.2634
<p>שוונות מוסברת: 24.5%; נמצאו הבדלים מובהקים בהשפעת שול רחב או בינוני לעומת שול צר, בדרך דו-מסלולית או ממוחלפת ($p < 0.05$).</p> <p>משמעות: השפעה מובהקת של משתנה זה בנוכחות חשיפה, כאשר בדרך דו-מסלולית/ממוחלפת שול רחב או בינוני מזוהה עם ירידה באירועים, לעומת דרך חד-מסלולית; שול צר מזוהה עם עליה באירועים (לא מובהק לעומת דרך חד-מסלולית).</p>				
(2) מקדמי המודל עבור אירועים מסוג 19:				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-5.61817	0.27534	-20.405	< 2e-16
Lg_num_tracks_tot	0.68527	0.04228	16.209	< 2e-16
as.factor(Ihs_N)1	1.85601	0.23703	7.830	4.87e-15
as.factor(Ihs_N)2	2.16558	0.23319	9.287	< 2e-16
as.factor(Ihs_N)3	0.63251	0.24398	2.592	0.00953
<p>שוונות מוסברת: 34%; נמצא הבדל מובהק בין השפעת קטגוריות שונות של רוחב שול שמאלי ($p < 0.01$).</p> <p>משמעות: השפעה מובהקת של משתנה זה בנוכחות חשיפה, כאשר כל רוחב שול שמאלי בדרך דו-מסלולית או ממוחלפת מזוהה עם עליה באירועים לעומת דרך חד-מסלולית.</p>				
(3) מקדמי המודל עבור סך האירועים:				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-4.98344	0.19162	-26.007	< 2e-16
Lg_num_tracks_tot	0.84235	0.03614	23.307	< 2e-16
as.factor(Ihs_N)1	0.66659	0.14873	4.482	7.40e-06
as.factor(Ihs_N)2	0.97091	0.14404	6.741	1.58e-11
as.factor(Ihs_N)3	0.56992	0.14402	3.957	7.58e-05
<p>שוונות מוסברת: 31.7%; נמצא הבדל מובהק בין השפעת קטגוריות שונות של רוחב שול שמאלי ($p < 0.001$), ללא הבדל בין קטגוריות 1 ו-3.</p> <p>משמעות: השפעה מובהקת של משתנה זה בנוכחות חשיפה, כאשר כל רוחב שול שמאלי בדרך דו-מסלולית או ממוחלפת מזוהה עם עליה באירועים לעומת דרך חד-מסלולית.</p>				

ט. רוחב נתיב (rohav_nativ)

למשתנה זה שלוש קטגוריות: 1 - תקין, 2 - צר, 3 - צר מאוד. טבלה 3.8 מסכמת ממצאים מפיתוח מודלים מסבירים עם משתנה זה. ניתן לראות כי:

- עבור אירועים מסוג 1 ("בלימה") לא נמצאה השפעה של משתנה זה בנוכחות חשיפה.

- עבור אירועים מסוג 19 ("מהירות") וסך האירועים נמצאה השפעה מובהקת של משתנה זה, בנוכחות חשיפה, כאשר, בשני המקרים, נתיב צר לעומת תקין מזוהה עם ירידה באירועים.

טבלה 3.8. ממצאים מפיתוח מודלים מסבירים להתרחשות אירועים בנהיגה, עם מדד החשיפה ומשתנה "רוחב נתיב"

Table 3.8. Findings from the development of explanatory models for driving events, with measure of exposure and "lane width" variable

(1) מקדמי המודל עבור אירועים מסוג 1:				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-6.62199	0.40341	-16.415	<2e-16
Lg_num_tracks_tot	0.97920	0.08325	11.763	<2e-16
as.factor(N_rohav_nativ)2	-0.14525	0.54521	-0.266	0.790
as.factor(N_rohav_nativ)3	0.63921	0.66764	0.957	0.338
<p>שונות מוסברת: 20.6%; לא נמצא הבדל בין השפעת קטגוריות שונות של המשתנה. משמעות: השפעה לא מובהקת של משתנה זה בנוכחות חשיפה, כאשר נתיב צר נוטה לירידה באירועים, נתיב צר מאוד נוטה לעליה באירועים.</p>				
(2) מקדמי המודל עבור אירועים מסוג 19:				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-4.1875	0.1859	-22.521	< 2e-16
Lg_num_tracks_tot	0.7192	0.0393	18.298	< 2e-16
as.factor(N_rohav_nativ)2	-1.5517	0.4595	-3.377	0.000732
as.factor(N_rohav_nativ)3	-21.9407	11999.0941	-0.002	0.998541
<p>שונות מוסברת: 21.8%; לא נמצא הבדל בין השפעת קטגוריות שונות של המשתנה. משמעות: השפעה מובהקת של משתנה זה בנוכחות חשיפה, כאשר נתיב צר מזוהה עם ירידה באירועים.</p>				
(3) מקדמי המודל עבור סך האירועים:				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-4.20899	0.15919	-26.440	< 2e-16
Lg_num_tracks_tot	0.82370	0.03337	24.683	< 2e-16
as.factor(N_rohav_nativ)2	-0.95480	0.29856	-3.198	0.00138
as.factor(N_rohav_nativ)3	-1.31550	0.59331	-2.217	0.02661
<p>שונות מוסברת: 29.5%; לא נמצא הבדל בין השפעת קטגוריות שונות של המשתנה. משמעות: השפעה מובהקת של משתנה זה בנוכחות חשיפה, כאשר נתיב צר מזוהה עם ירידה באירועים.</p>				

י. רדיוס אופקי (radius_ofki_last)

למשתנה זה שלוש קטגוריות: 1 - רדיוס קטן, 2 - רדיוס בינוני, 3 - רדיוס גדול. המודלים המסבירים עם משתנה זה פותחו עם קטגורית ייחוס "1", דהיינו לעומת רדיוס אופקי קטן. מבחינת המודלים המסבירים עם משתנה זה עלה כי:

- למשתנה זה, בנוכחות חשיפה, נמצאה השפעה מובהקת על אירועים בנהיגה, מכל הסוגים שנבדקו. עם זאת, על-פי מבחן ANOVA, משתנה זה לא היה מובהק עבור אף אחד מסוגי האירועים, כאשר היעדר מובהקות היה חזק יותר עבור אירועים מסוג 1.

- עבור כל אחד מסוגי האירועים, רדיוס אופקי בינוני או גדול היה מזוהה עם עליה באירועים, לעומת הרדיוס הקטן.

יא. הגבהה ציידית (Ira)

בדיקת הגבהה ציידית רלוונטית לרדיוס קטן ובינוני, ואינה רלוונטית לרדיוס גדול. משתנה Ira מהווה שילוב של סוג רדיוס וסוג הגבהה ציידית. למשתנה זה חמש קטגוריות, כלהלן: 0 - רדיוס גדול (הגבהה לא רלוונטית), 10 - רדיוס קטן, הגבהה תקינה; 11 - רדיוס קטן, הגבהה לקויה; 20 - רדיוס בינוני, הגבהה תקינה; 21 - רדיוס בינוני, הגבהה לקויה. עם זאת, בבסיס הנתונים של המחקר לא נמצאו מקרים מסוג "10", עם רדיוס קטן והגבהה תקינה. טבלה 3.9 מסכמת ממצאים מפיתוח מודלים מסבירים עם משתנה זה.

טבלה 3.9. ממצאים מפיתוח מודלים מסבירים להתרחשות אירועים בנהיגה, עם מדד החשיפה ומשתנה "הגבהה ציידית"

Table 3.9. Findings from the development of explanatory models for driving events, with measure of exposure and "super-elevation" variable

(1) מקדמי המודל עבור אירועים מסוג 1 :				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-6.56995	0.37674	-17.439	<2e-16
Lg_num_tracks_tot	0.97500	0.07871	12.387	<2e-16
as.factor(Ira)11	-0.85300	1.05607	-0.808	0.419
as.factor(Ira)20	-0.02006	0.23100	-0.087	0.931
as.factor(Ira)21	-0.52332	0.38872	-1.346	0.178
שוונות מוסברת: 20.9%; לא נמצא הבדל בין השפעת קטגוריות שונות של המשתנה.				
משמעות: השפעה לא מובהקת של משתנה זה בנוכחות חשיפה.				
(2) מקדמי המודל עבור אירועים מסוג 19 :				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-4.482387	0.180349	-24.854	<2e-16
Lg_num_tracks_tot	0.781087	0.038353	20.366	<2e-16
as.factor(Ira)11	-0.873385	0.578073	-1.511	0.1308
as.factor(Ira)20	0.008815	0.120316	0.073	0.9416
as.factor(Ira)21	-0.436999	0.204019	-2.142	0.0322
שוונות מוסברת: 20.8%; לא נמצא הבדל בין השפעת קטגוריות שונות של המשתנה.				
משמעות: סה"כ, השפעה לא מובהקת של משתנה זה בנוכחות חשיפה, אם כי, הגבהה לקויה ברדיוס בינוני מזוהה עם ירידה באירועים לעומת רדיוס גדול.				
(3) מקדמי המודל עבור סך האירועים :				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-4.42170	0.15310	-28.880	<2e-16
Lg_num_tracks_tot	0.86895	0.03234	26.871	<2e-16
as.factor(Ira)11	-0.78689	0.44989	-1.749	0.0803
as.factor(Ira)20	0.01367	0.09862	0.139	0.8897
as.factor(Ira)21	-0.39505	0.16256	-2.430	0.0151
שוונות מוסברת: 29.2%; נמצא הבדל מובהק בין השפעת קטגוריות שונות של משתנה זה.				
משמעות: השפעה מובהקת של משתנה זה בנוכחות חשיפה, כאשר הגבהה לקויה ברדיוס קטן או בינוני מזוהה עם ירידה באירועים לעומת רדיוס גדול. כמו כן, ברדיוס בינוני, הגבהה לקויה מזוהה עם פחות אירועים לעומת הגבהה תקינה.				

מטבלה 3.9 ניתן לראות כי:

- עבור אירועים מסוג 1 ("בלימה") לא נמצאה השפעה מובהקת של משתנה זה, בנוכחות חשיפה.
- עבור אירועים מסוג 19 ("מהירות") וסך האירועים, נמצאה השפעה מובהקת של המשתנה. עבור אירועים מסוג 19, הגבהה לקויה ברדיוס בינוני מזוהה עם ירידה באירועים לעומת רדיוס גדול. עבור סך האירועים, הגבהה לקויה ברדיוס קטן או בינוני מזוהה עם ירידה באירועים לעומת

רדיוס גדול וכמו כן, ברדיוס בינוני, הגבהה לקויה מזוהה עם פחות אירועים לעומת הגבהה תקינה. (ממצאים אלה נראים מנוגדים להיגיון ההנדסי, אם כי, סביר כי הגבהה לקויה תורמת למיתון מהירויות בעת המעבר בעקום ומכאן, למיעוט האירועים).

יב. שיפוע לאורך (shipua_orech)

משתנה זה נוצר כשילוב של גודל וכיוון השיפוע לאורך. למשתנה זה שבע קטגוריות, כלהלן: 1 - אין שיפוע (עד 2%), 2 - שיפוע קטן בירידה, 3 - שיפוע בינוני בירידה, 4 - שיפוע גדול בירידה, 5 - שיפוע קטן בעליה, 6 - שיפוע בינוני בעליה, 7 - שיפוע גדול בעליה. טבלה 3.10 מסכמת ממצאים מפיתוח מודלים מסבירים עם משתנה זה.

טבלה 3.10. ממצאים מפיתוח מודלים מסבירים להתרחשות אירועים בנהיגה, עם מדד החשיפה ומשתנה "שיפוע לאורך"

Table 3.10. Findings from the development of explanatory models for driving events, with measure of exposure and "vertical grade" variable

(1) מקדמי המודל עבור אירועים מסוג 1:				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-6.705	0.3871	-17.321	3.281562e-67
Lg_num_tracks_tot	1.020	0.0802	12.717	4.749018e-37
as.factor(Shipua_orech_N)2	0.232	0.1981	1.173	2.408724e-01
as.factor(Shipua_orech_N)3	-2.292	1.0226	-2.241	2.500692e-02
as.factor(Shipua_orech_N)4	-2.000	0.8076	-2.476	1.326525e-02
as.factor(Shipua_orech_N)5	-0.711	0.2782	-2.555	1.061559e-02
as.factor(Shipua_orech_N)6	-1.715	1.0754	-1.595	1.107700e-01
as.factor(Shipua_orech_N)7	-1.889	1.1177	-1.690	9.101729e-02
<p>שוונות מוסברת: 23.7%; נמצא הבדל מובהק ($p < 0.05$) בין השפעת קטגוריות 3, 4, 5 לעומת קטגוריה 1 של המשתנה.</p> <p>משמעות: השפעה מובהקת של משתנה זה בנוכחות חשיפה, כאשר רוב הערכים של שיפוע לאורך (פרט ל-2 "שיפוע קטן בירידה") מזוהים עם ירידה באירועים.</p>				
(2) מקדמי המודל עבור אירועים מסוג 19:				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-4.517	0.1825	-24.754	2.787367e-135
Lg_num_tracks_tot	0.795	0.0384	20.718	2.363295e-95
as.factor(Shipua_orech_N)2	-0.118	0.1142	-1.035	3.006044e-01
as.factor(Shipua_orech_N)3	0.489	0.1916	2.552	1.071997e-02
as.factor(Shipua_orech_N)4	-1.655	0.4072	-4.065	4.803187e-05
as.factor(Shipua_orech_N)5	-0.058	0.1234	-0.471	6.373946e-01
as.factor(Shipua_orech_N)6	-1.208	0.4935	-2.449	1.432500e-02
as.factor(Shipua_orech_N)7	-2.819	1.0182	-2.769	5.619153e-03
<p>שוונות מוסברת: 22.8%; נמצא הבדל מובהק ($p < 0.05$) בין השפעת קטגוריות 3, 4, 6, 7 לעומת קטגוריה 1 של המשתנה.</p> <p>משמעות: השפעה מובהקת של משתנה זה בנוכחות חשיפה, כאשר רוב הערכים של שיפוע לאורך (פרט ל-3 "שיפוע בינוני בירידה") מזוהים עם ירידה באירועים.</p>				
(3) מקדמי המודל עבור סך האירועים:				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-4.4809	0.1554	-28.834	8.100714e-183
Lg_num_tracks_tot	0.8871	0.0325	27.285	6.407054e-164
as.factor(Shipua_orech_N)2	-0.0171	0.0920	-0.185	8.528688e-01
as.factor(Shipua_orech_N)3	0.0602	0.1817	0.332	7.401448e-01
as.factor(Shipua_orech_N)4	-1.7502	0.3342	-5.237	1.635585e-07
as.factor(Shipua_orech_N)5	0.0189	0.0998	0.189	8.501192e-01
as.factor(Shipua_orech_N)6	-0.7823	0.3351	-2.334	1.957555e-02
as.factor(Shipua_orech_N)7	-1.7554	0.4864	-3.608	3.079268e-04
<p>שוונות מוסברת: 30.9%; נמצא הבדל מובהק ($p < 0.05$) בין השפעת קטגוריות 4, 6, 7 לעומת קטגוריה 1 של המשתנה.</p> <p>משמעות: השפעה מובהקת של משתנה זה בנוכחות חשיפה, כאשר רוב הערכים של שיפוע לאורך (פרט לערך 3 "שיפוע בינוני בירידה" ולערך 5 "שיפוע קטן בעליה") מזוהים עם ירידה באירועים.</p>				

מטבלה 3.10 ניתן לראות כי :

- עבור כל סוגי האירועים נמצאה השפעה מובהקת של משתנה זה, בנוכחות חשיפה.
- עבור כל אחד מסוגי האירועים, רוב הערכים של שיפוע לאורך מזוהים עם ירידה באירועים, לעומת המצב ללא שיפוע.

3.1.4. סיכום הממצאים לגבי הקשר בין מאפייני התשתית ואירועים

טבלה 3.11 מסכמת את ממצאי המודלים שהוצגו לעיל - בדיקת הקשר בין כל אחד ממאפייני התשתית לבין התרחשות האירועים, בנוכחות חשיפה (מספר המעברים בקטע). ממצאי המודלים מוצגים עבור כל אחד משלושת סוגי האירועים : סוג 1, סוג 19 וסך האירועים.

מטבלה 3.11 ניתן לראות שלרוב מאפייני התשתית שנבדקו נמצאה השפעה מובהקת על אירועי הנהיגה. חלק ניכר ממאפייני התשתית הדגימו השפעה הפוכה על סוגי אירועים שונים, דהיינו על אירועי ה"בלימה" לעומת "התראה על מהירות" (מהירות נסיעה גבוהה), כאשר שוני זה נראה הגיוני עקב טיב אירועים "הפוך".

לרוב, אופן השפעה של מאפייני התשתית על אירועי הנהיגה מסוג "בלימה" ו-"התראה על מהירות" מסתדר עם ההיגיון ההנדסי, אם נזכר במשמעות אירועים אלה : סוג 1 - בלימה בקטע ישר (ללא סיבוב הגה), סוג 19 - מהירות גבוהה (מעל 120 קמ"ש). לגבי השפעה על אירועי ה"בלימה", ניתן להצביע על שני מאפייני תשתית עם השפעה מנוגדת, לכאורה, להיגיון ההנדסי שהם : (א) רדיוס אופקי בינוני או גדול אשר, ע"פ הממצאים, מזוהה עם עליה באירועים אלה לעומת הרדיוס הקטן ; (ב) נוכחות שיפוע לאורך, כאשר רוב הקטגוריות של שיפוע לאורך מזוהים עם ירידה באירועי ה"בלימה", לעומת המצב ללא שיפוע. לעומת זאת, אופן השפעה של כל מאפייני התשתית על אירועי המהירות (סוג 19) היה בהתאם למצופה ע"פ ההיגיון ההנדסי.

מבחינת השפעה של מאפייני התשתית על סך אירועי הנהיגה עולה כי השפעת המאפיינים הגיאומטריים שנמצאה לעיל, לרוב, מנוגדת לצפייה ההנדסית, לפיה, הרעה בתנאי הדרך (הצרת החתך לרוחב, רדיוס אופקי קטן יותר, נוכחות שיפוע לאורך) הייתה אמורה להביא לריבוי האירועים, בעוד ששיפור בתנאי הדרך (סוג דרך גבוה יותר, חתך רחב, קטע ישר ומישורי) היה אמור להביא לירידה באירועים. צפייה זו נובעת מההנחה שאירועי הנהיגה אמורים להצביע על הופעת מצבים מסוכנים (מצבי "כמעט תאונה" או טרום "כמעט תאונה")⁵.

לעומת זאת, הקשרים שנמצאו בין סך אירועי הנהיגה ומאפייני התשתית (ראה טבלה 3.11) מצביעים על דמיון ניכר בהשפעת המאפיינים הגיאומטריים על אירועי המהירות ועל סך האירועים, כאשר תנאי דרך טובים יותר (המאפשרים מהירויות נסיעה גבוהות יותר) מזוהים עם עליה בסך האירועים.

⁵ ראה, לדוגמא : Songchitruksa and Tarko (2004)

טבלה 3.11. סיכום לממצאי המודלים - הקשר בין כל אחד ממאפייני התשתית לבין התרחשות האירועים, בנוכחות חשיפה[#]

Table 3.11. Summary of models' findings: the relations between each infrastructure characteristic and driving events, accounting for exposure

מאפיין תשתית נבחן	אירועים מסוג 1 ("בלימה")	אירועים מסוג 19 ("מהירות")	סך האירועים
א. קרוב לצומת בהתקרבות	קרבת צומת ונוכחות צומת בתוך קטע מזוהות עם עליה באירועים	קרבת צומת ונוכחות צומת בתוך קטע מזוהות עם ירידה באירועים	השפעה לא עקבית : קרבת צומת מזוהה עם ירידה באירועים, נוכחות צומת בתוך קטע - עם עליה באירועים
ב. קרוב לצומת בהתרחקות	קרבת צומת ונוכחות צומת בתוך קטע מזוהות עם עליה באירועים	קרבת צומת ונוכחות צומת בתוך קטע מזוהות עם ירידה באירועים	השפעה לא עקבית : קרבת צומת מזוהה עם ירידה באירועים, נוכחות צומת בתוך קטע - עם עליה באירועים
ג. מרחק בין צמתים	קטע בינוני-ארוך מזוהה עם ירידה באירועים, נוכחות צומת בתוך קטע - עם עליה באירועים	קטע בינוני-ארוך מזוהה עם עליה באירועים, נוכחות צומת בתוך קטע - עם ירידה באירועים	קטע בינוני-ארוך ונוכחות צומת בתוך קטע מזוהים עם עליה באירועים
ד. שינוי במספר נתיבים בין יחידות ניתוח עוקבות	--	--	--
ה. שינוי ברוחב הנתיבים בין יחידות ניתוח עוקבות	שינוי ברוחב הנתיבים ביחידות ניתוח עוקבות מגביר את מספר האירועים	שינוי ברוחב הנתיבים ביחידות ניתוח עוקבות מקטין את מספר האירועים	--
ו. רוחב שול ימין	שול בינוני או צר מזוהה עם עליה באירועים, לעומת שול רחב	שול בינוני או צר מזוהה עם ירידה באירועים, לעומת שול רחב	שול בינוני או צר מזוהה עם ירידה באירועים, לעומת שול רחב * רחב *
ז. סוג דרך	דרך דו-מסלולית מזוהה עם עליה באירועים ודרך ממוחלפת - עם ירידה באירועים, לעומת דרך חד-מסלולית	דרך דו-מסלולית או ממוחלפת מזוהה עם עליה באירועים	דרך דו-מסלולית או ממוחלפת מזוהה עם עליה באירועים *
ח. רוחב שול שמאל	שול רחב או בינוני בדרך דו-מסלולית/ממוחלפת מזוהה עם ירידה באירועים, לעומת דרך חד-מסלולית	נוכחות שול שמאלי מזוהה עם עליה באירועים, בדרך דו-מסלולית או ממוחלפת, לעומת דרך חד-מסלולית *	נוכחות שול שמאלי מזוהה עם עליה באירועים, בדרך דו-מסלולית או ממוחלפת, לעומת דרך חד-מסלולית *
ט. רוחב נתיב	--	נתיב צר לעומת תקין מזוהה עם ירידה באירועים	נתיב צר לעומת תקין מזוהה עם ירידה באירועים *
י. רדיוס אופקי	רדיוס אופקי בינוני או גדול מזוהה עם עליה באירועים, לעומת הרדיוס הקטן *	רדיוס אופקי בינוני או גדול מזוהה עם עליה באירועים, לעומת הרדיוס הקטן	רדיוס אופקי בינוני או גדול מזוהה עם עליה באירועים, לעומת הרדיוס הקטן *
יא. הגבהה צידית	--	הגבהה לקויה ברדיוס בינוני מזוהה עם ירידה באירועים לעומת רדיוס גדול	הגבהה לקויה ברדיוס קטן או בינוני מזוהה עם ירידה באירועים לעומת רדיוס גדול; ברדיוס בינוני, הגבהה לקויה מזוהה עם פחות אירועים לעומת הגבהה תקינה *
יב. שיפוע לאורך	רוב הערכים של שיפוע לאורך מזוהים עם ירידה באירועים, לעומת המצב ללא שיפוע *	רוב הערכים של שיפוע לאורך מזוהים עם ירידה באירועים, לעומת המצב ללא שיפוע	רוב הערכים של שיפוע לאורך מזוהים עם ירידה באירועים, לעומת המצב ללא שיפוע *

[#] בכל המקרים המפורטים בטבלה נמצאה השפעה מובהקת של מאפיין התשתית, בנוכחות חשיפה ($p < 0.05$). במקרים המסומנים ב"--" השפעת המאפיין, בנוכחות חשיפה, לא הייתה מובהקת.

* השפעה מנוגדת, לכאורה, להיגיון ההנדסי

על סמך הממצאים בטבלה 3.11 ניתן לסכם כלהלן :

- שכיחות אירועי הנהיגה מסוג "בלימה" **עולה** כאשר הנהג נמצא בקרבת צומת, בהתקרבות אל או בהתרחקות ממנו, כאשר יש שינוי ברוחב המיסעה, כאשר שול ימין לא תקין (בינוני או צר), כאשר הנסיעה מתרחשת בדרך דו-מסלולית (לעומת חד-מסלולית) וכאשר קטע הדרך נמצא ברדיוס אופקי בינוני או גדול לעומת רדיוס קטן (אם כי, הממצא האחרון מעורר תהייה). לעומת זאת, שכיחות אירועי הנהיגה מסוג "בלימה" **יורדת** בדרך ממוחלפת (לעומת חד-מסלולית), כאשר הנסיעה מתרחשת בקטע בינוני-ארוך (לעומת קצר), כאשר בקטע יש שול שמאלי בינוני או רחב (לעומת דרך חד-מסלולית ללא שול שמאלי) או כאשר בקטע יש שיפוע לאורך (אם כי, הממצא האחרון נראה לא הגיוני). כלומר, קרבת צומת או מגבלות גיאומטריות, לרוב, גורמות להגברת אירועי הבלימה, בעוד שנסיעה בתנאי דרך טובים יותר ובקטעים ארוכים יותר, ללא הפרעות, מזוהה עם ירידה בבלימות.

- להבדיל מהמקרה הקודם, שכיחות אירועי הנהיגה מסוג "מהירות" **עולה** בדרך דו-מסלולית או ממוחלפת (לעומת חד-מסלולית), כאשר הנסיעה מתרחשת בקטע בינוני-ארוך (לעומת קצר), וכאשר קטע הדרך נמצא ברדיוס אופקי בינוני או גדול (לעומת רדיוס קטן). לעומת זאת, שכיחות אירועי הנהיגה מסוג "מהירות" **יורדת** כאשר הנהג נמצא בקרבת צומת, בהתקרבות אל או בהתרחקות ממנו, כאשר יש שינוי ברוחב המיסעה, כאשר שול ימין לא תקין (בינוני או צר), כאשר נתיב הנסיעה לא תקין (צר), כאשר ברדיוס בינוני יש הגבהה צידית לקויה או כאשר בקטע יש שיפוע לאורך. כלומר, קרבת צומת או מגבלות גיאומטריות גורמות למיתון באירועי מהירות, בעוד שנסיעה בתנאי דרך טובים יותר ובקטעים ארוכים יותר, ללא הפרעות, מזוהה עם עליה באירועי מהירות.

- על סך אירועי הנהיגה, השפעת קרבה או נוכחות צומת לא הייתה עקבית, כאשר קרבת צומת מזוהה עם ירידה באירועים, בעוד שנוכחות צומת בתוך קטע מזוהה עם עליה באירועים. בנוסף, שכיחות סך האירועים בנהיגה **עולה** כאשר הנסיעה מתרחשת בקטע ארוך יותר, כאשר נוסעים בדרך דו-מסלולית או ממוחלפת (לעומת חד-מסלולית) וכאשר קטע הדרך נמצא ברדיוס אופקי בינוני או גדול (לעומת רדיוס קטן). מאידך, שכיחות סך האירועים בנהיגה **יורדת** כאשר שול ימין לא תקין (בינוני או צר), כאשר נתיב הנסיעה לא תקין (צר), כאשר בעקום נמצאה הגבהה צידית לקויה או כאשר בקטע יש שיפוע לאורך.

כלומר, בדומה לאירועי המהירות, קרבת צומת או מגבלות גיאומטריות גורמות למיתון בסך האירועים, בעוד שנסיעה בתנאי דרך טובים יותר ובקטעים ארוכים יותר, ללא הפרעות, מזוהה עם עליה בסך האירועים. ההבדל בסך האירועים לעומת אירועי המהירות נמצא בהשפעת הצמתים, כאשר נוכחות צומת בתוך קטע מזוהה עם עליה בסך האירועים, בעוד שעבור אירועי המהירות כל צורה של נוכחות צומת מביאה לירידה באירועים.

מעבר לכך יש לציין כי הקשרים בין מאפייני התשתית והתרחשות האירועים בנהיגה שצוינו לעיל, מהווים סיכום פרלימינארי, אשר נובע מהניתוחים החד-פרמטריים של השפעת המשתנים (אם כי, בנוכחות משתני החשיפה). ביטוי נכון יותר להשפעת מאפייני התשתית על אירועי הנהיגה מתקבל בנייתוחים הרב-פרמטריים - ראה פרק 4.

3.2. בחינת הקשר בין אירועים בנהיגה לבין תאונות דרכים

3.2.1. הקשר בין חשיפה לתאונות

ניתוח נוסף במחקר מוקדש לבחינת הקשר בין אירועים בנהיגה ותאונות הדרכים. מכיוון שהן עבור האירועים והן עבור התאונות, רמת החשיפה (היקף נסיעות) מהווה מסביר מספר אחד, הקשר בין האירועים והתאונות נבדק בהינתן חשיפה. תחילה נבדקה צורת הקשר בין חשיפה לתאונות. בהמשך נבדק האם למספר אירועים יש השפעה על תאונות מעבר לחשיפה.

כפי שצוין בפרק 3.1, הערכים המקוריים של מדד החשיפה (מספר מעברים בקטע) נמצאים בטווח 5-908, כאשר מרבית הערכים שייכים לטווח 2-6 של לוג מספר מעברים (בהגדרה מדויקת יותר, בטווח 2-6.1), מה שתואם את טווח הערכים המקוריים 7-446. בחינת הקשר בין חשיפה לתאונות נערכה עבור טווח מלא וטווח מקוטע של הערכים.

כזכור, נתוני התאונות בקטעי המחקר נאספו עבור ארבעה סוגים שהם:

1. INJ - סך התאונות עם נפגעים, בשנים 2008-2010;

2. INJ_NP - סך התאונות עם נפגעים ללא תאונות הולכי רגל, בשנים 2008-2010;

3. GEN - סך התאונות "כללי עם נפגעים", בשנים 2008-2010;

4. tot - כלל התאונות בשנים 2008-2010 המהווה סכום של 1 ו-3.

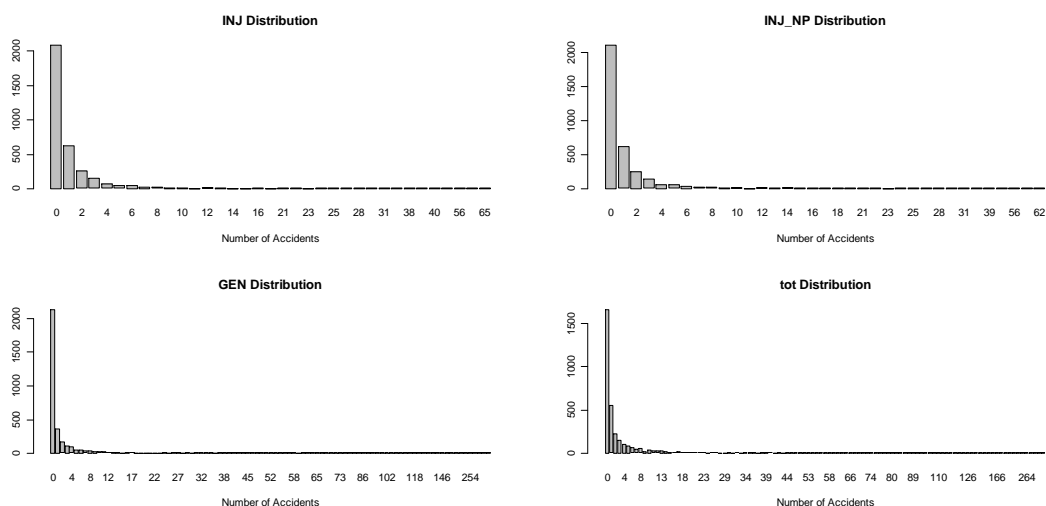
איור 3.3 מציג התפלגות של מספרי התאונות ביחידות הניתוח, לפי סוגי התאונות. הסטטיסטיקה התיאורית של התאונות ביחידות הניתוח הייתה כלהלן:

INJ - משתנה בין 0 עד 65, עם ממוצע 1.54, חציון 0.0;

INJ_NP - משתנה בין 0 עד 62, עם ממוצע 1.49, חציון 0.0;

GEN - משתנה בין 0 עד 1112, עם ממוצע 6.41, חציון 0.0;

tot - משתנה בין 0 עד 1130, עם ממוצע 7.95, חציון 1.0.



איור 3.3. התפלגות מספרי התאונות ביחידות הניתוח, לפי סוגי התאונות.

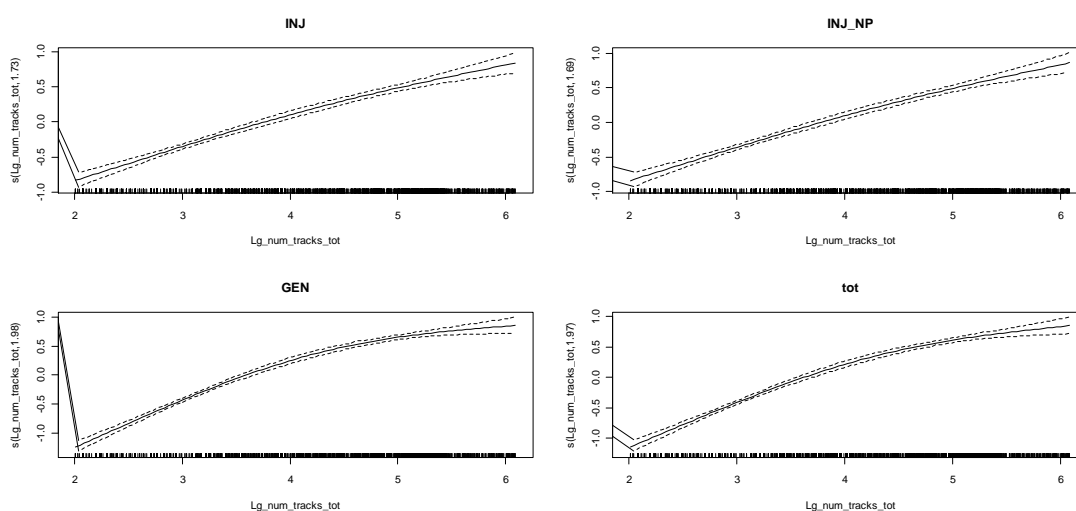
Figure 3.3. Distribution of accident frequencies per road units, according to accident types

איור 3.4 מציג תוצאות החלקה (בחינה א-פרמטרית של קשר בין שני המשתנים) בין לוג מדד החשיפה (מספר המעברים בקטע) לבין מספרי התאונות. הגרפים הותאמו לטווח המקוטע של

ערכי החשיפה, ללא קצוות. ניתן לראות שבכל המקרים מתאים מודל ליניארי המצביע על קשר ישיר בין מספר הנסיעות לבין מספר התאונות, עם אפשרות לשינוי צורת הקשר בערך 4.5 של לוג מדד החשיפה.

בהמשך, מובהקות של שינוי השיפוע בערך 4.5 של לוג מדד החשיפה, נבדקה בעזרת מודלים. נמצא כי עבור מספרי התאונות עם נפגעים (INJ_NP, INJ) לא היה שינוי מובהק בשיפוע קו הקשר בערך 4.5 של לוג מדד החשיפה.

לעומת זאת, עבור מספרי התאונות מסוג "כללי עם נפגעים" (GEN) וכלל התאונות (tot) נקודת השינוי הייתה מובהקת, כאשר אחרי ערך 4.5 של לוג מדד החשיפה (90 מעברים בקטע) קו השיפוע נעשה מתון יותר. בשני המקרים, לפני הערך 4.5, השיפוע היה חיובי מובהק, כאשר אחרי נקודה זו ערך השיפוע נעשה קטן יותר, עדיין חיובי אך לא מובהק.



איור 3.4. תוצאות החלקה בין לוג מדד החשיפה לבין מספרי התאונות.

Figure 3.4. Results of fitting a smoothing curve between the logarithm of exposure and accident numbers

3.2.2. הקשר בין אירועים לתאונות, מעבר לחשיפה

לבחינת הקשר בין אירועים ותאונות, בנוכחות חשיפה, תחילה נבנו מודלים עם קשר חלק של משתנה האירועים. המודלים הותאמו ל-4 סוגי התאונות עם 3 סוגי האירועים. בכל מודל שימשו הנתונים ללא קצוות בערכי החשיפה. עבור כל שילוב של סוג תאונות וסוג אירועים, הותאם מודל בינומי שלילי, עם קשר ליניארי למקוטעין של משתנה החשיפה, על-פי ממצאי הסעיף הקודם, וקשר חלק של משתנה האירועים.

איור 3.5 מציג תוצאות של התאמת המודלים, עם משתני האירועים שעברו התמרת לוג. עבור כל סוג תאונות, בנוכחות משתנה החשיפה, מובא הרכיב החלק המבטא את הקשר בין אירועים לתאונות. מבחינת הגרפים באיור 3.5 עולה כי:

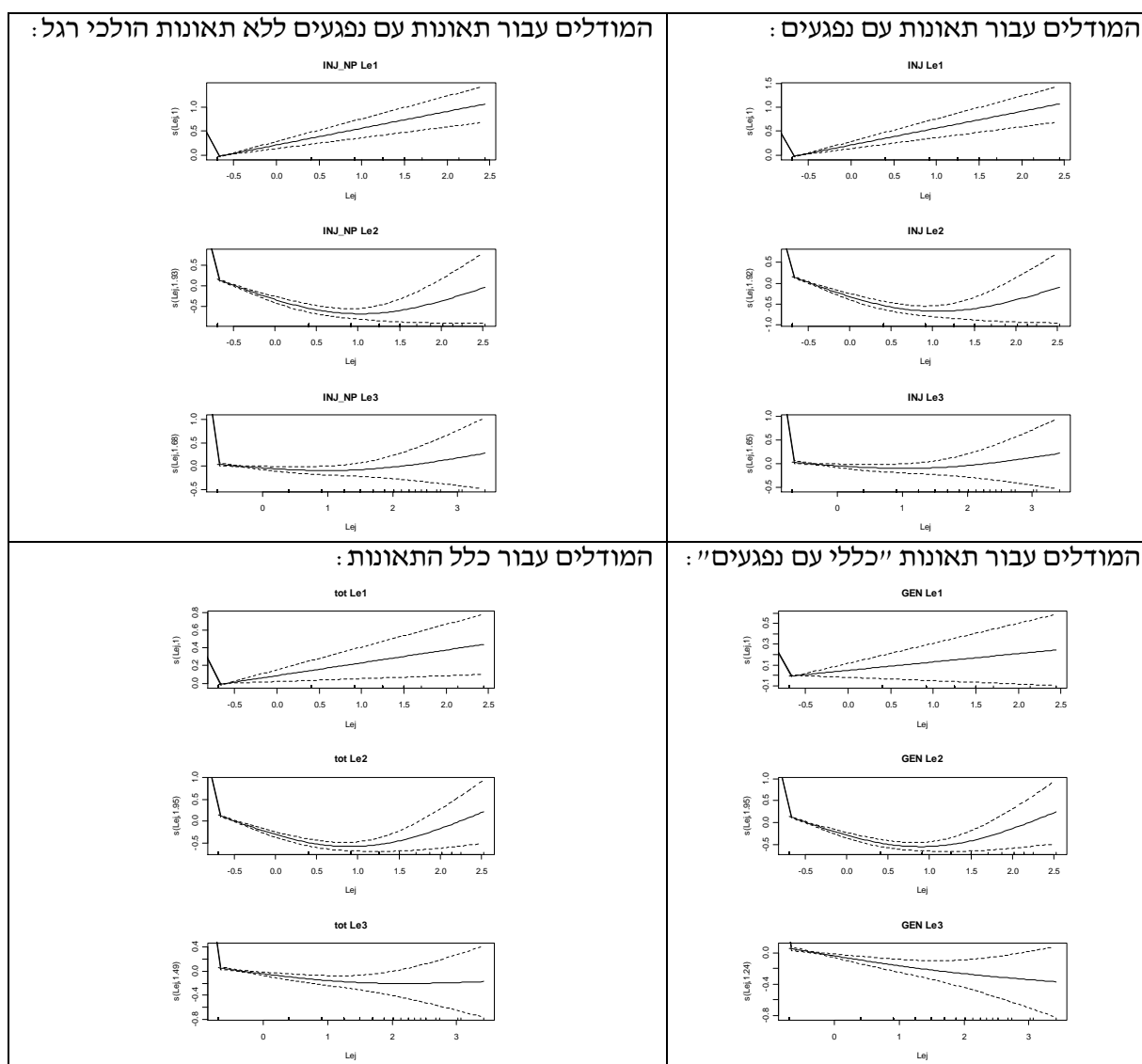
- במקרה של אירועים מסוג 1 ("בלימה") עבור כל סוגי התאונות מתאים קשר ליניארי עולה בין אירועים לתאונות;

- עבור אירועים מסוג 19 ("מהירות") מתאים קשר ליניארי בין אירועים לתאונות, עם אפשרות לשבירה בערך "1" של לוג מספר האירועים;

- עבור סך האירועים מתאים קשר ליניארי בין אירועים לתאונות, עם אפשרות לשבירה בערך "1.5" של לוג מספר האירועים.

עם זאת, הממצאים מהתאמת המודלים הראו שנקודות השבירה הנ"ל של משתני האירועים לא היו מובהקות עבור אף סוג תאונה. לכן, לביטוי הקשר בין משתני האירועים ומשתני התאונות, בנוכחות חשיפה, הותאמו מודלים עם קשר ליניארי של משתני האירועים לתאונות.

טבלה 3.12 מסכמת את ממצאי המודלים. עבור כל סוג תאונות וכל סוג אירועים מובא הרכיב הליניארי המבטא את הקשר בין אירועים לתאונות. קשרים אלה הם בנוכחות חשיפה, ולכן הם מבטאים את תרומת מספר האירועים לתאונות, מעבר לחשיפה. (כזכור, מספרי האירועים עברו התמרת לוג, דהיינו הקשר המוצג הינו בין לוג מספר האירועים ללוג מספר התאונות).



סוגי האירועים בגרפים : Le1 - אירועים מסוג 1 ; Le2 - אירועים מסוג 19 ; Le3 - סך האירועים.

איור 3.5. רכיב חלק המבטא את הקשר בין אירועים לתאונות, במודלים שהותאמו ל-4 סוגי התאונות עם 3 סוגי האירועים.

Figure 3.5. A smoothing component reflecting a relation between events and accidents, in the models fitted to 4 accidents types with 3 event types.

טבלה 3.12. תוצאות המודלים לקשר בין אירועים לתאונות, בנוכחות חשיפה: מקדמי הקשר בין אירועים לתאונות ורמת המובהקות שלהם

Table 3.12. Results of models for a relationship between driving events and accidents, accounting for exposure: estimates of relation coefficients between events and accidents, and their confidence level

tot כלל התאונות	סוגי תאונות			סוגי אירועים
	GEN תאונות "כללי עם נפגעים"	INJ_NP תאונות עם נפגעים ללא הולכי רגל	INJ תאונות עם נפגעים	
0.144	0.078	#0.353	#0.354	סוג 1 ("בלימה")
#-0.453	#-0.439	#-0.516	#-0.517	סוג 19 ("מהירות")
*-0.125	*-0.14	-0.07	-0.07	סך האירועים

מובהק עם $p < 0.001$ * מובהק עם $p < 0.1$ יתר המקדמים לא מובהקים.

מסיכום ממצאי המודלים (ראה טבלה 3.12) ניתן להסיק כי:

- בחלק ניכר מהמקרים נמצא קשר מובהק בין אירועים לתאונות, דהיינו קיימת השפעה של מספרי האירועים על מספרי התאונות, מעבר להשפעת החשיפה.

- בין מספרי האירועים מסוג 1 ("בלימה") לבין מספרי התאונות, מכל הסוגים, נמצא קשר חיובי, כאשר עליה במספר האירועים תורמת לעליה במספר התאונות. קשר זה נמצא מובהק עבור התאונות עם נפגעים, כאשר הקשר לא מובהק וחלש יותר עבור התאונות מסוג "כללי עם נפגעים".

- בין מספרי האירועים מסוג 19 ("מהירות") לבין מספרי התאונות, מכל הסוגים, נמצא קשר שלילי מובהק, כאשר עליה במספר האירועים תורמת לירידה בתאונות. לכאורה, קשר זה נראה מנוגד למצופה, כאשר בקטעי הכבישים עם תדירות גבוהה יותר של אירועי מהירות היינו מצפים לראות יותר תאונות ולא להפך. עם זאת, כפי שנמצא בפרק 3.1, עליה באירועי המהירות ככלל מצביעה על תנאי דרך טובים יותר ולכן, ייתכן שבתנאי דרך טובים יותר יתרחשו פחות תאונות. כמו כן, מכיוון שתוצאה זו התקבלה באופן עקבי בכל סוגי התאונות שנבחנו, היא אינה מקרית.

- בין סך האירועים לבין מספרי התאונות, מכל הסוגים, נמצא קשר שלילי, אם כי, יחסית חלש, כאשר עליה בסך האירועים תורמת לירידה בתאונות. קשר זה נמצא מובהק עבור תאונות "כללי עם נפגעים" וכתוצאה מכך, גם עבור כלל התאונות. גם קשר זה נראה, לכאורה, מנוגד למצופה, כאשר ייתכן שכיוון הקשר נובע מהשפעת אירועי המהירות. כזכור, בפרק 3.1 נמצא שקשר בין מאפייני התשתית וסך האירועים היה דומה לקשר בין מאפייני התשתית ואירועי המהירות. כלומר, סביר להניח שסך האירועים מבטא, בעיקר, את התנהגות אירועי המהירות, אם כי, בעוצמה חלשה יותר (ובתופסת רעש - סוגי אירועים אחרים).

בחינה נוספת של הקשר בין אירועים ותאונות, בנוכחות חשיפה, נערכה תוך כדי התחשבות בסוג דרך: חד-מסלולית, דו-מסלולית או ממוחלפת. קשר זה נבחן בניכוי מספר תצפיות חריגות (תצפיות עם מספר אירועים גבוה במיוחד, ביחידות הניתוח), עבור כל סוג דרך. לבחינת קשר זה הותאמו סה"כ 36 מודלים, לפי השילובים של 4 סוגי תאונות עם 3 סוגי אירועים ו-3 סוגי דרך. עבור כל שילוב, הותאם מודל בינומי שלילי, עם קשר ליניארי למקוטעין של משתנה החשיפה⁶ וקשר ליניארי, עם או ללא נקודת שבירה, של משתנה האירועים (משתני האירועים עברו התמרת לוג, כאשר למספר האירועים הגולמי נוסף 0.5 בטרם לקיחת הלוג).

⁶ עם נקודת שבירה בערך 4.5 של לוגריתם החשיפה או 90 מעברים בקטע

טבלה 3.13 מסכמת את ממצאי המודלים. עבור כל סוג תאונות וכל סוג אירועים, בסוג דרך מסוים, מובא הרכיב הליניארי המבטא את הקשר בין אירועים לתאונות (אם רלוונטי, לפני ואחרי נקודת השבירה במספר אירועים). קשרים אלה הם בנוכחות חשיפה, ולכן הם מבטאים את תרומת מספר האירועים לתאונות, מעבר לחשיפה. מספרי האירועים עברו התמרת לוג, לכן הקשר המוצג הינו בין לוג מספר האירועים ללוג מספר התאונות.

מסיכום ממצאי המודלים (ראה טבלה 3.13) ניתן להסיק כי:

- בחלק ניכר מהמקרים נמצא קשר מובהק בין אירועים לתאונות, דהיינו קיימת השפעה של מספרי האירועים על מספרי התאונות, מעבר להשפעת החשיפה, כאשר צורת הקשר *שונה בסוגי דרך שונים*.

- **בדרכים החד-מסלוליות**, נמצא קשר חיובי מובהק בין מספרי האירועים מסוג 1 ("בלימה") לבין מספרי התאונות, מכל הסוגים. כמו כן, בין מספרי האירועים מסוג 19 ("מהירות") לבין מספרי התאונות נמצא קשר שלילי מובהק עבור התאונות עם נפגעים, כאשר בין סך האירועים לבין מספרי התאונות נמצא קשר חיובי מובהק עבור רוב סוגי התאונות. בסוג דרך זה, עוצמת הקשר בין אירועים ותאונות הייתה ניכרת בכל המקרים (מקדמי הקשר גדולים). מכאן, בדרכים החד-מסלוליות, מספרי האירועים בנהיגה, מהסוגים השונים, עשויים להתאים לניבוי מספרי התאונות, כאשר יכולת ניבוי חזקה יותר מיוחסת לאירועי "בלימה" וסך האירועים (אשר בקשר חיובי עם תאונות).

- **בדרכים הדו-מסלוליות**, נמצא קשר חיובי מובהק בין מספרי האירועים מסוג 1 ("בלימה") לבין מספרי התאונות, עבור התאונות עם נפגעים. כמו כן, בין מספרי האירועים מסוג 19 ("מהירות") לבין מספרי התאונות נמצא קשר שלילי מובהק עבור כל סוגי התאונות, כאשר בשני המקרים עוצמת הקשר בין אירועים ותאונות הייתה ניכרת (מקדמי הקשר גדולים). לעומת זאת, עבור הקשר בין סך האירועים למספרי התאונות לא נתקבלו תוצאות עקביות: עבור התאונות עם נפגעים נמצא קשר חיובי מובהק, אם כי חלש יותר לעומת המקרים הקודמים עם סוגי אירועים מוגדרים (1 או 19), כאשר עבור התאונות "כללי עם נפגעים" התקבל קשר שלילי מובהק (וחלש יחסית למקרים הקודמים). מכאן, בדרכים הדו-מסלוליות, לניבוי מספרי התאונות מכל הסוגים מתאימים יותר אירועים מסוג "מהירות" (עם קשר שלילי לתאונות), כאשר עבור התאונות עם נפגעים ניתן להיעזר גם באירועים מסוג "בלימה" (עם קשר חיובי לתאונות). בסוג דרך זה, יכולת הניבוי של סך האירועים פחותה.

- **בדרכים הממוחלפות**, לא נמצא קשר מובהק בין מספרי האירועים מסוג 1 ("בלימה") לבין מספרי התאונות, כאשר עבור כל סוגי התאונות הסתמן קשר שלילי חלש. בין מספרי האירועים מסוג 19 ("מהירות") לבין מספרי התאונות נמצא קשר שלילי מובהק (וניכר) עבור כל סוגי התאונות, אולם רק עבור המצב כאשר מספר האירועים קטן: $e \leq 1$; כאשר מספר אירועי המהירות עולה ($e > 1$), מסתמן קשר חיובי בין אירועים ותאונות אשר נמצא מובהק כאשר הבחינה כוללת בתוכה גם תאונות "כללי עם נפגעים". בין סך האירועים למספרי התאונות נמצא קשר שלילי מובהק (וניכר) עבור כל סוגי התאונות, אולם רק במצב כאשר מספר האירועים קטן: $e \leq 2$ או $e \leq 1$; כאשר מספר האירועים גבוה יותר הקשר מפסיק להיות מובהק וגם מצביע על כיווני השפעה

שונים: קשר שלילי עבור התאונות עם נפגעים וקשר חיובי כאשר בוחנים גם את התאונות "כללי עם נפגעים".

לסיכום, בדרכים הממוחלפות, לניבוי מספרי התאונות מהסוגים השונים מתאימים בעיקר אירועים מסוג "מהירות", אשר מצביעים על ירידה בתאונות במספר אירועים קטן ועל עליה בתאונות כאשר מספר אירועי המהירות עולה יותר. יצוין כי הממצא האחרון דווקא תואם את ממצאי הספרות הקיימת בנושא השפעת מהירויות, בה נטען שמהירויות נסיעה גבוהות קשורות לעליה בסיכון לתאונות.

להבנה מעמיקה יותר של הקשר בין אירועים לתאונות, בתנאי דרך שונים, נערכו בהמשך ניתוחים רב-פרמטריים (ראה פרק 4).

טבלה 3.13. תוצאות המודלים לקשר בין אירועים לתאונות, בסוגי דרך שונים, בנוכחות חשיפה: מקדמי הקשר בין אירועים לתאונות ורמת המובהקות שלהם

Table 3.13. Results of models for a relationship between driving events and accidents, accounting for exposure, for different road types: estimates of relation coefficients between events and accidents, and their confidence level

סוגי תאונות				סוג דרך	סוגי אירועים
כלל התאונות	תאונות "כללי עם נפגעים"	תאונות עם נפגעים ללא הולכי רגל	תאונות עם נפגעים		
#0.791	#0.838	#0.660	#0.758	חד-מסלולית	סוג 1 ("בלימה")
0.033	e ≤ 1 -0.015 (1) e > 1 -0.337 (2)	#0.425	#0.449	דו-מסלולית	
-0.059	-0.050	-0.114	-0.037	ממוחלפת	סוג 19 ("מהירות")
-0.375	-0.242	** -0.819	* -0.664	חד-מסלולית	
# -0.660	# -0.652	# -0.697	# -0.733	דו-מסלולית	
e ≤ 1 -0.763 (1) **e > 1 0.831 (2)	e ≤ 1 -0.805 (1) **e > 1 0.969 (2)	e ≤ 1 -0.678 (1) e > 1 0.434 (2)	e ≤ 1 -0.679 (1) e > 1 0.502 (2)	ממוחלפת	
e ≤ 1 1.495 (1) e > 1 -0.345 (2)	# 1.535	# 0.744	# 0.905	חד-מסלולית	סך האירועים
-0.054	** -0.101	# 0.147	# 0.158	דו-מסלולית	
e ≤ 1 -0.569 (1) e > 1 0.307 (2)	e ≤ 1 -0.598 (1) e > 1 0.391 (2)	e ≤ 2 -0.403 (1) e > 2 -0.105 (2)	e ≤ 2 -0.399 (1) e > 2 -0.132 (2)	ממוחלפת	

* מובהק עם $p < 0.1$

** מובהק עם $p < 0.05$

מובהק עם $p < 0.01$

מובהק עם $p < 0.001$

e – מספר אירועים. יתר המקדמים לא מובהקים.

4. פיתוח מודלים רב-פרמטריים

4.1. פיתוח מודלים רב-פרמטריים לקשר בין מאפייני התשתית לאירועי הנהיגה

4.1.1. בחינת אינטראקציות בין מאפייני התשתית

בפרק 3.1 לעיל נדונו הקשרים בין מאפייני התשתית והתרחשות האירועים בנהיגה אשר נמצאו בניתוחים החד-פרמטריים של השפעת משתני התשתית. כידוע, בין משתני התשתית יכולות להיות קורלציות מבחינת השפעתם על אירועים בנהיגה. לכן, לקבלת ביטוי נכון יותר לקשר בין מאפייני התשתית לבין האירועים בנהיגה פותחו מודלים רב-פרמטריים המוצגים בפרק זה.

לפני התאמת המודלים נערכו בדיקות התנהגות הנתונים, דהיינו בחינת האינטראקציות בין המסבירים הפוטנציאליים ומשתני האירועים וזיהוי המשתנים המשפיעים יותר על האירועים, בנוכחות משתנים אחרים. בדיקות מוקדמות אלה נערכו בעזרת ניתוח גורמים (common factor analysis) ומודלים מסוג rpart ו-GBM. להלן ממצאים מהבדיקות המוקדמות⁷.

א. מיפוי הקשרים בין המשתנים נערך באמצעות ניתוח גורמים משותפים (common factor analysis). נמצא כי:

- קורלציות חזקות קיימות בין קבוצות המשתנים: (1) קרוב לצומת בהתקרבות, קרוב לצומת בהתרחקות, מרחק בין הצמתים; (2) מדד החשיפה (מספר מעברים), רוחב שול שמאל; (3) נפח תנועה קטגורי, רוחב נתיב; (4) שינוי במספר נתיבים ושינוי ברוחב מיסעה בין יחידות ניתוח עוקבות.

- לעומת זאת, המשתנים: רוחב שול ימין, רדיוס אופקי-הגבהה צידית - הם בעלי קשר נמוך לשאר המשתנים.

את המשתנים עם קורלציה נמוכה לשאר המשתנים מקובל להשאיר במודלים, כאשר בין המשתנים עם קורלציה גבוהה מקובל לבחור, להתאמת המודל, "נציג" אחד לקבוצה.

ב. בחינת קורלציות בין מאפייני התשתית נערכה בעזרת חישוב Pearson Correlation. נמצא כי:

- עבור המשתנים: רוחב שול ימין, רדיוס אופקי-הגבהה צידית - ישנם מקדמי קורלציה נמוכים עם שאר המשתנים גם כאשר מקדמים אלה נמצאו מובהקים. לדוגמא, לרוחב שול ימין מקדמי הקורלציה עם יתר המשתנים היו בטווח 0.05-0.24 (עבור המשתנים בקשר מובהק, $p < 0.01$), כאשר למשתנה רדיוס אופקי-הגבהה צידית מקדמי הקורלציה היו נמוכים עוד יותר, בטווח 0.04-0.07 (עבור המשתנים בקשר מובהק, $p < 0.05$).

- לעומת זאת, בתוך כל קבוצת משתנים שזוהתה בעזרת ניתוח גורמים, מקדמי הקורלציה היו גבוהים יותר כגון: 0.64-0.77 בקבוצה הראשונה; 0.56 בקבוצה השנייה; 0.37 בקבוצה השלישית; 0.28 בקבוצה הרביעית (המקדמים מובהקים, עם $p < 0.0001$).

⁷ חלק מהבדיקות המוקדמות: סעיפים א'-ב' - נערכו בשלב מוקדם יותר של המחקר, בעת הכנת דו"ח ביניים מס' 3, עם ממצאי המודלים הראשונים שהותאמו במחקר. לכן, בקרב המשתנים שנבדקו חסר שיפוע לאורך, רדיוס אופקי וסוג דרך וכמו כן, קיים שוני בהגדרת הקטגוריות של שול שמאלי. הבדיקות לפי סעיפים ג'-ד' נערכו מחדש בטרם התאמת המודלים הסופיים במחקר. בבדיקות החדשות נכללו כל משתני התשתית.

ג. **זיהוי השפעת המשתנים** נערך באמצעות שימוש בפונקציית $rpart$ מתוך ספריית $rpart$ של תוכנת R . כאשר הבדיקה נערכה ללא נרמול מוקדם למשתנה חשיפה, בין מאפייני התשתית המשפיעים על ניבוי האירועים (המורידים את שגיאת הניבוי באופן משמעותי) נמצאו:

- עבור אירועים מסוג 1, מדד החשיפה (מספר מעברים) ורוחב שול שמאל;
- עבור אירועים מסוג 19, רוחב שול שמאל, מדד החשיפה, קרבת צומת בהתקרבות;
- עבור סך האירועים, מדד החשיפה ורוחב שול שמאל.

כאשר הבדיקה נערכה לאחר נרמול מוקדם למשתנה החשיפה, בין מאפייני התשתית המשפיעים על ניבוי האירועים נמצאו:

- עבור אירועים מסוג 1, רוחב שול שמאל, מרחק בין הצמתים ושינוי ברוחב הנתיבים בין יחידות ניתוח עוקבות;
- עבור אירועים מסוג 19, רוחב שול שמאל וקרבת צומת בהתקרבות;
- עבור סך האירועים, רוחב שול שמאל ומרחק בין הצמתים.

בהרצה נוספת, עם כל משתני התשתית (בשלב האחרון של המחקר), בין מאפייני התשתית המשפיעים על ניבוי האירועים נמצאו:

- עבור אירועים מסוג 1, סוג דרך ורוחב שול שמאלי;
- עבור אירועים מסוג 19, רוחב שול שמאלי, מרחק בין צמתים וקרבת צומת בהתקרבות;
- עבור סך האירועים, שיפוע לאורך, סוג דרך, רוחב שול שמאלי וקרבת צומת בהתקרבות.

לסיכום, נראה כי המשתנים המשפיעים יותר על התרחשות האירועים קשורים לרמת החשיפה, סוג דרך והימצאות צמתים, כאשר מאפיינים גיאומטריים אחרים לא הופיעו בין המשתנים המובילים.

ד. **בחינה מסכמת של המשתנים המשפיעים** נערכה בשיטת GBM - Generalized Boosted Regression Modeling⁸ המאפשרת לדרג את המשתנים מבחינת חשיבותם בתור משתנים מסבירים לניבוי המשתנה המוסבר (האירועים). תרומת המשתנה להתרחשות האירועים מוערכת בנוכחות (ניכוי השפעה) של משתנים אחרים. נמצא כי:

- עבור אירועים מסוג 1, המשתנים המשפיעים ביותר, לפי סדר חשיבות יורד, הם:

סוג דרך, שיפוע לאורך, קרבת צומת בהתקרבות, שינוי ברוחב הנתיבים בין יחידות עוקבות, רוחב שול ימין, רוחב שול שמאל, קרבת צומת בהתרחקות, מרחק בין צמתים, הגבהה צידית, רדיוס אופקי.

- עבור אירועים מסוג 19, המשתנים המשפיעים ביותר, לפי סדר חשיבות יורד, הם:

רוחב שול שמאל, שיפוע לאורך, מרחק בין צמתים, קרבת צומת בהתקרבות, סוג דרך, רוחב שול ימין, קרבת צומת בהתרחקות, שינוי ברוחב הנתיבים בין יחידות עוקבות, שינוי במספר נתיבים בין יחידות ניתוח עוקבות, הגבהה צידית.

⁸ J.H. Friedman (2001). "Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine," Annals of Statistics 29(5):1189-1232.

- עבור סך האירועים, המשתנים המשפיעים ביותר, לפי סדר חשיבות יורד, הם :

שיפוע לאורך, רוחב שול ימין, סוג דרך, רוחב שול שמאל, קרבת צומת בהתקרבות, קרבת צומת בהתרחקות, מרחק בין צמתים, שינוי ברוחב נתיבים בין יחידות ניתוח עוקבות, שינוי במספר נתיבים בין יחידות ניתוח עוקבות, הגבהה צידית.

ניתן להבחין כי המשתנים החשובים לניבוי סוגי אירועים שונים משקפים את סוג הדרך, קרבת הצמתים, מאפיינים גיאומטריים שונים.

4.1.2. התאמת המודלים

לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית לבין האירועים בנהיגה פותחו מודלים רב-פרמטריים. לכל סוג אירועים, הורץ מודל פרמטרי של רגרסיה בינומית שלילית, עם לוג מספר האירועים כמשתנה תלוי, לוג מדד החשיפה (מספר מעברים בקטע) כמשתנה אופסט והמשתנים שנבחרו כמשתנים מסבירים. בחירת המשתנים המסבירים נעשתה לפי הערך המינימאלי של קריטריון (Akaike) (information criterion). לחישוב אמדי המודל שימשה פונקציית glm.nb, מתוך ספריית MASS של R⁹. בחירת המשתנים המסבירים במודל נעשתה על-ידי פונקציית stepAIC מתוך אותה ספריית MASS.

המשתנים המסבירים שנשמרו במודלים, לרוב, היו ברמת מובהקות גבוהה ($p < 0.05$), לפחות עבור חלק מערכיהם. כמו כן, השפעת המשתנים שנותרו בכל מודל הייתה מובהקת ע"פ בדיקת ANOVA.

יש לשים לב שכאשר במודל נשארו מספר משתנים מסבירים המציינים קרבת צומת (מתוך המשתנים : קרוב לצומת בהתקרבות, קרוב לצומת בהתרחקות, מרחק בין צמתים), יש התלכדות בין קטגוריות המשתנים שמסמנים מצב של נוכחות צומת בתוך יחידת הניתוח, דהיינו בין ערך "2" של karov_lezomet_beitkarvut ,karov_lezomet_beitrahkut ובין ערך "4" של merhak_benzmatim_cat.

להלן המודלים שהותאמו לנתונים.

א. המודל עבור אירועים מסוג 1 ("בלימה")

בעקבות הבדיקות המוקדמות המשתנים המועמדים להתאמת המודל היו: קרבת צומת בהתקרבות, מרחק בין צמתים, סוג דרך, רוחב שול שמאל, שיפוע לאורך, שינוי ברוחב הנתיבים בין יחידות עוקבות, האינטראקציה בין סוג דרך ורוחב שול שמאל.

מקדמי המודל שהותאם לאירועים מסוג 1 היו כלהלן :

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-6.5639	0.2444	-26.857	< 2e-16
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut)1	0.4123	0.1813	2.274	0.0230
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut)2	0.4267	0.1901	2.245	0.0248
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat)2	-0.5323	0.2689	-1.980	0.0477
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat)3	-1.1623	1.0694	-1.087	0.2771
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat)4	NA	NA	NA	NA
as.factor(had_dumasluli)2	0.5708	0.2547	2.241	0.0250
as.factor(had_dumasluli)3	-1.3495	0.3249	-4.153	3.28e-05
as.factor(Ihs_N)1	-0.0941	0.3527	-0.267	0.7897
as.factor(Ihs_N)2	0.1414	0.3356	0.421	0.6735
as.factor(Ihs_N)3	NA	NA	NA	NA

⁹ Venables & Ripley (2002)

as.factor(had_dumasluli)2:as.factor(Ihs_N)1	-0.2977	0.4237	-0.703	0.4823
as.factor(had_dumasluli)3:as.factor(Ihs_N)1	NA	NA	NA	NA
as.factor(had_dumasluli)2:as.factor(Ihs_N)2	-0.9516	0.4247	-2.241	0.0251
as.factor(had_dumasluli)3:as.factor(Ihs_N)2	NA	NA	NA	NA
as.factor(had_dumasluli)2:as.factor(Ihs_N)3	NA	NA	NA	NA
as.factor(had_dumasluli)3:as.factor(Ihs_N)3	NA	NA	NA	NA

השונות המוסברת בעזרת המודל 18.7%. המודל הותאם על סמך 2885 תצפיות (ללא תצפיות עם ערכים חסרים עבור שול ימין). (ערכי המשתנים עם השפעה מובהקת, עם $p < 0.05$ או רמת מובהקות גבוהה יותר, מודגשים באפור). משמעויות המודל:

- משתנים המשפיעים על אירועים מסוג 1 הם קרבת צומת בהתקרבות, מרחק בין צמתים, סוג דרך, רוחב שול שמאלי;

- מספר האירועים **עולה** כאשר יחידת הניתוח קרובה לצומת/מחלף או כאשר צומת/מחלף נמצא בתוך יחידת הניתוח, וכמו כן, כאשר יחידת הניתוח נמצאת בדרך דו-מסלולית לעומת חד-מסלולית;

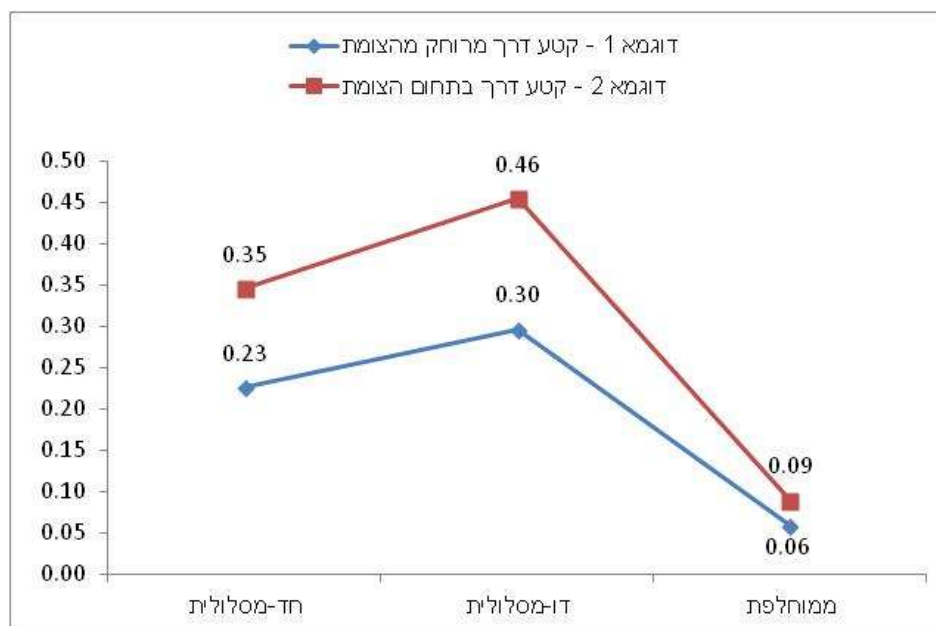
- מספר האירועים **יורד** כאשר יחידת הניתוח נמצאת בקטע בינוני או ארוך לעומת קצר, או כאשר היא נמצאת בדרך ממוחלפת.

להמחשת משמעויות המודל חושבו שתי דוגמאות:

דוגמא 1 - עבור קטע דרך (יחידת ניתוח באורך 200 מ') מרוחק מהצומת,

דוגמא 2 - עבור קטע דרך (יחידת ניתוח באורך 200 מ') בתחום הצומת,

כאשר יחידת הניתוח שייכת לקטע באורך בינוני, יש לה שול שמאלי רחב (בדרך דו-מסלולית או ממוחלפת) וכמו כן, ביחידת הניתוח היו 300 מעברים של כלי רכב עם ה"קופסא הירוקה", בשנה. המודל מספק אומדן למספר אירועים מסוג 1 ("בלימה") הצפוי ביחידת הניתוח, בשנה, כאשר הערכים מחושבים עבור סוגי דרך שונים. איור 4.1 מציג את ממצאי החישובים.

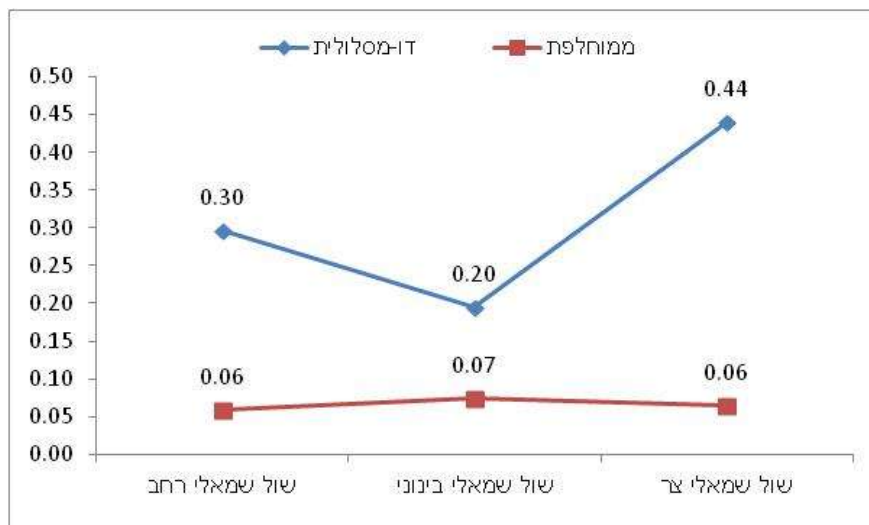


איור 4.1. מספר אירועים מסוג "בלימה" הצפוי ביחידת הניתוח, בשנה, כתלות בסוג דרך.

Figure 4.1. The number of "braking" events expected on the unit, per year, depending on road type

מאיור 4.1 ניתן לראות שבתנאי דרך דומים, מספר אירועים מסוג "בלימה" עולה בדרך דו-מסלולית (לעומת החד-מסלולית) ויורד בדרך ממוחלפת. כמו כן, מספר אירועי ה"בלימה" גבוה יותר בקטע דרך שנמצא בתחום הצומת לעומת קטע דרך המרוחק מהצומת.

השפעת סוג דרך ורוחב שול שמאלי על אירועים מסוג "בלימה" באה לידי ביטוי במספר מקדמי המודל, לרבות האינטראקציות בין שני המשתנים. לכן, להמחשת ההשפעה של רוחב שול שמאלי, בסוגי דרך שונים, נערכו חישובים נוספים. החישובים נערכו עבור יחידת הניתוח עם 300 מעברים בשנה, אשר נמצאת בקטע באורך בינוני ורחוקה מאזור הצומת. בעזרת המודל מתקבל אומדן למספר אירועים מסוג 1 ("בלימה") הצפוי ביחידת הניתוח, בשנה, כאשר הערכים מחושבים עבור שילובים שונים של סוג דרך ורוחב שול שמאלי. איור 4.2 מציג את ממצאי החישובים.



איור 4.2. מספר אירועים מסוג "בלימה" הצפוי ביחידת הניתוח, בשנה, כתלות בסוג דרך ורוחב שול שמאלי.

Figure 4.2. The number of "braking" events expected on the unit, per year, depending on the road type and the width of left shoulder

מאיור 4.2 ניתן לראות שבתנאי דרך דומים, מספר אירועים מסוג "בלימה" בדרך דו-מסלולית יורד בנוכחות שול שמאלי בינוני לעומת רחב ועולה בנוכחות שול שמאלי צר. לעומת זאת, בדרך ממוחלפת, מספר האירועים הצפוי אינו משתנה כתלות ברוחב שול שמאלי.

ב. המודל עבור אירועים מסוג 19 ("מהירות")

בעקבות הבדיקות המוקדמות המשתנים המועמדים להתאמת המודל היו: קרבת צומת בהתקרבות, קרבת צומת בהתרחקות, מרחק בין צמתים, רוחב שול ימין, סוג דרך, רוחב שול שמאל, שינוי ברוחב הנהיגים בין יחידות עוקבות, רוחב נתיב, האינטראקציה בין מרחק בין צמתים ורוחב שול שמאלי.

מקדמי המודל שהותאם לאירועים מסוג 19 היו כלהלן:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-9.694	1.005	-9.644	< 2e-16
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut)1	-0.487	0.108	-4.501	6.76e-06
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut)1	-0.895	0.182	-4.917	8.77e-07
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut)2	NA	NA	NA	NA
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat)2	0.422	0.088	4.811	1.50e-06
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat)3	1.699	0.249	6.832	8.36e-12

as.factor(N_merhak_benzmatim_cat) 4	NA	NA	NA	NA
as.factor(N_shul_kolel_hizoni) 2	0.004	0.089	0.044	0.964560
as.factor(N_shul_kolel_hizoni) 3	-0.330	0.120	-2.752	0.005928
as.factor(had_dumasluli) 2	3.363	1.009	3.333	0.000858
as.factor(had_dumasluli) 3	3.769	1.009	3.735	0.000188
as.factor(Ihs_N) 1	0.722	0.122	5.904	3.55e-09
as.factor(Ihs_N) 2	1.154	0.112	10.278	< 2e-16
as.factor(Ihs_N) 3	NA	NA	NA	NA

השונוות המוסברת בעזרת המודל 25.1%. (ערכי המשתנים עם השפעה מובהקת, עם $p < 0.05$ או רמת מובהקות גבוהה יותר, מודגשים באפור). המודל הותאם על סמך 2746 תצפיות (ללא תצפיות עם ערכים חסרים עבור שול ימין או שול שמאל). משמעויות המודל:

- משתנים המשפיעים על אירועים מסוג 19 הם קרבת צומת בהתקרבות ובהתרחקות, מרחק בין צמתים, רוחב שול ימין, סוג דרך, רוחב שול שמאל (בדרך דו-מסלולית וממוחלפת);

- מספר האירועים **עולה** כאשר יחידת הניתוח נמצאת בקטע בינוני או ארוך לעומת קצר, וכאשר יחידת הניתוח שייכת לדרך דו-מסלולית או ממוחלפת (לעומת חד-מסלולית), עם כל הערכים של רוחב שול שמאלי;

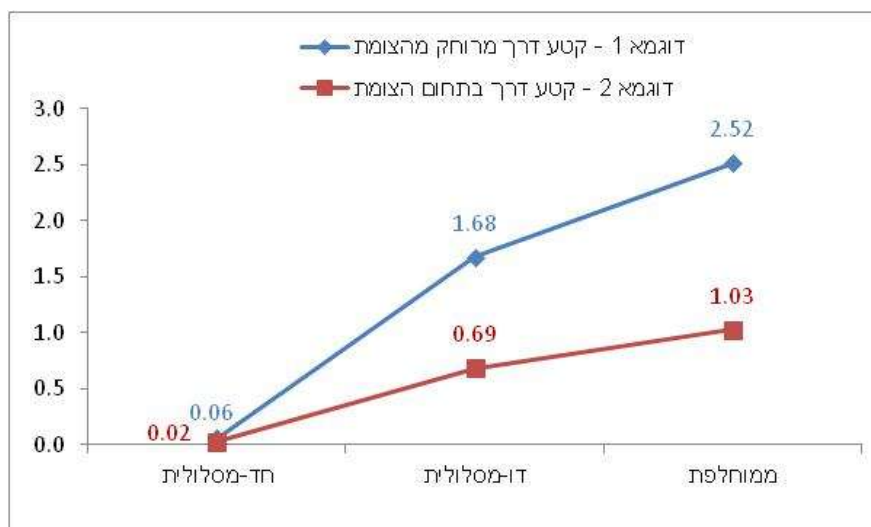
- מספר האירועים **יורד** כאשר היחידה קרובה לצומת בהתקרבות או בהתרחקות או כוללת בתוכה צומת/מחלף, או כאשר יש שול ימני צר (לעומת רחב).

להמחשת משמעויות המודל חושבו שתי דוגמאות:

דוגמא 1 - עבור קטע דרך (יחידת ניתוח באורך 200 מ') מרוחק מהצומת,

דוגמא 2 - עבור קטע דרך (יחידת ניתוח באורך 200 מ') בתחום הצומת,

כאשר יחידת הניתוח שייכת לקטע באורך בינוני, יש לה שול ימני רחב ושול שמאלי רחב (בדרך דו-מסלולית או ממוחלפת) וכמו כן, ביחידת הניתוח היו 300 מעברים של כלי רכב עם ה"קופסא הירוקה", בשנה. המודל מספק אומדן למספר אירועים מסוג 19 ("מהירות") הצפוי ביחידת הניתוח, בשנה, כאשר הערכים מחושבים עבור סוגי דרך שונים. איור 4.3 מציג את ממצאי החישובים.



איור 4.3. מספר אירועים מסוג "מהירות" הצפוי ביחידת הניתוח, בשנה, כתלות בסוג דרך.

Figure 4.3. The number of "speeding" events expected on the unit, per year, depending on road type

מאיור 4.3 ניתן לראות שבתנאי דרך דומים, מספר אירועים מסוג "מהירות" עולה בדרך דו-מסלולית, לעומת החד-מסלולית, ועולה עוד יותר בדרך ממוחלפת. כמו כן, מספר אירועי "מהירות" גבוה יותר בקטע דרך המרוחק מהצומת לעומת קטע דרך שנמצא בתחום הצומת.

ג. המודל עבור סך האירועים

בעקבות הבדיקות המוקדמות המשתנים המועמדים להתאמת המודל היו: קרבת צומת בהתקרבות, קרבת צומת בהתרחקות, מרחק בין צמתים, רוחב שול ימין, רוחב נתיב, סוג דרך, רוחב שול שמאל, שיפוע לאורך, והאינטראקציה בין שיפוע לאורך, סוג דרך ורוחב שול שמאלי.

מקדמי המודל שהותאם לסך האירועים היו כלהלן:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-6.087e+00	2.397e-01	-25.399	< 2e-16
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut)1	-2.347e-01	9.111e-02	-2.576	0.010
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut)2	6.473e-02	1.035e-01	0.625	0.532
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut)1	-2.469e-01	1.036e-01	-2.382	0.017
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut)2	NA	NA	NA	NA
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat)2	2.523e-01	8.749e-02	2.884	0.0039
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat)3	9.449e-01	2.496e-01	3.786	0.0002
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat)4	NA	NA	NA	NA
as.factor(N_shul_kolel_hizoni)2	4.100e-02	7.883e-02	0.520	0.603
as.factor(N_shul_kolel_hizoni)3	-2.032e-01	9.230e-02	-2.202	0.028
as.factor(N_rohav_nativ)2	-5.225e-01	3.096e-01	-1.688	0.091
as.factor(N_rohav_nativ)3	-1.092e+00	6.042e-01	-1.807	0.071
as.factor(had_dumasluli)2	1.374e+00	2.455e-01	5.597	2.17e-08
as.factor(had_dumasluli)3	5.988e-01	2.625e-01	2.282	0.022
as.factor(Ihs_N)1	3.857e-01	1.521e-01	2.536	0.011
as.factor(Ihs_N)2	7.703e-01	1.403e-01	5.490	4.03e-08
as.factor(Ihs_N)3	NA	NA	NA	NA
as.factor(Shipua_orech_N)2	4.563e-01	4.788e-01	0.953	0.341
as.factor(Shipua_orech_N)3	-2.662e+01	4.495e+05	0.0	1
as.factor(Shipua_orech_N)4	-1.490e+00	4.523e-01	-3.293	0.001
as.factor(Shipua_orech_N)5	-1.022e+00	1.037e+00	-0.986	0.324
as.factor(Shipua_orech_N)6	6.099e-01	1.064e+00	0.573	0.566
as.factor(Shipua_orech_N)7	-1.416e+00	6.121e-01	-2.313	0.021
as.fac(had_dumasluli)2:as.fac(Shipua_orech_N)2	-3.716e-01	5.050e-01	-0.736	0.462
as.fac(had_dumasluli)3:as.fac(Shipua_orech_N)2	-9.723e-01	5.313e-01	-1.830	0.067
as.fac(had_dumasluli)2:as.fac(Shipua_orech_N)3	2.846e+01	4.495e+05	0.0	1
as.fac(had_dumasluli)3:as.fac(Shipua_orech_N)3	2.665e+01	4.495e+05	0.0	1
as.fac(had_dumasluli)2:as.fac(Shipua_orech_N)4	-2.525e+01	4.806e+05	0.0	1
as.fac(had_dumasluli)3:as.fac(Shipua_orech_N)4	NA	NA	NA	NA
as.fac(had_dumasluli)2:as.fac(Shipua_orech_N)5	1.525e+00	1.052e+00	1.450	0.147
as.fac(had_dumasluli)3:as.fac(Shipua_orech_N)5	1.029e+00	1.061e+00	0.970	0.332
as.fac(had_dumasluli)2:as.fac(Shipua_orech_N)6	-2.836e+01	2.307e+06	0.0	1
as.fac(had_dumasluli)3:as.fac(Shipua_orech_N)6	-3.463e-01	1.139e+00	-0.304	0.761
as.fac(had_dumasluli)2:as.fac(Shipua_orech_N)7	-2.851e+01	2.307e+06	0.0	1
as.fac(had_dumasluli)3:as.fac(Shipua_orech_N)7	NA	NA	NA	NA
as.fac(Ihs_N)1:as.fac(Shipua_orech_N)2	6.158e-01	2.536e-01	2.429	0.015
as.fac(Ihs_N)2:as.fac(Shipua_orech_N)2	-2.112e-02	2.524e-01	-0.084	0.933
as.fac(Ihs_N)3:as.fac(Shipua_orech_N)2	NA	NA	NA	NA
as.fac(Ihs_N)1:as.fac(Shipua_orech_N)3	2.581e-01	5.250e-01	0.492	0.623
as.fac(Ihs_N)2:as.fac(Shipua_orech_N)3	-1.977e+00	7.873e-01	-2.511	0.012
as.fac(Ihs_N)3:as.fac(Shipua_orech_N)3	NA	NA	NA	NA
as.fac(Ihs_N)1:as.fac(Shipua_orech_N)4	9.940e-01	7.085e-01	1.403	0.161
as.fac(Ihs_N)2:as.fac(Shipua_orech_N)4	-2.662e+01	4.658e+05	0.0	1
as.fac(Ihs_N)3:as.fac(Shipua_orech_N)4	NA	NA	NA	NA
as.fac(Ihs_N)1:as.fac(Shipua_orech_N)5	-2.810e-01	2.815e-01	-0.998	0.318
as.fac(Ihs_N)2:as.fac(Shipua_orech_N)5	-2.358e-01	2.450e-01	-0.963	0.336
as.fac(Ihs_N)3:as.fac(Shipua_orech_N)5	NA	NA	NA	NA
as.fac(Ihs_N)1:as.fac(Shipua_orech_N)6	-1.417e+00	1.168e+00	-1.213	0.225
as.fac(Ihs_N)2:as.fac(Shipua_orech_N)6	-2.214e+00	1.133e+00	-1.954	0.051
as.fac(Ihs_N)3:as.fac(Shipua_orech_N)6	NA	NA	NA	NA
as.fac(Ihs_N)1:as.fac(Shipua_orech_N)7	3.586e-01	1.325e+00	0.271	0.787
as.fac(Ihs_N)2:as.fac(Shipua_orech_N)7	1.940e-01	1.382e+00	0.140	0.888
as.fac(Ihs_N)3:as.fac(Shipua_orech_N)7	NA	NA	NA	NA
as.fac(had_dumasluli)2:as.fac(Ihs_N)1	-9.558e-01	1.866e-01	-5.122	3.03e-07
as.fac(had_dumasluli)3:as.fac(Ihs_N)1	NA	NA	NA	NA
as.fac(had_dumasluli)2:as.fac(Ihs_N)2	-7.692e-01	1.718e-01	-4.477	7.58e-06
as.fac(had_dumasluli)3:as.fac(Ihs_N)2	NA	NA	NA	NA

as.fac(had_dumasluli)2:as.fac(Ihs_N)3
as.fac(had_dumasluli)3:as.fac(Ihs_N)3

NA NA NA NA
NA NA NA NA

השונוות המוסברת בעזרת המודל 14.1%. (ערכי המשתנים עם השפעה מובהקת, עם $p < 0.05$ או רמת מובהקות גבוהה יותר, מודגשים באפור). המודל הותאם על סמך 2746 תצפיות (ללא תצפיות עם ערכים חסרים עבור שול ימין או שול שמאל). משמעויות המודל:

- משתנים המשפיעים על סך האירועים הם קרבת צומת בהתקרבות ובהתרחקות, מרחק בין צמתים, רוחב שול ימין, רוחב נתיב, סוג דרך, רוחב שול שמאל (בדרך דו-מסלולית וממוחלפת), שיפוע לאורך;

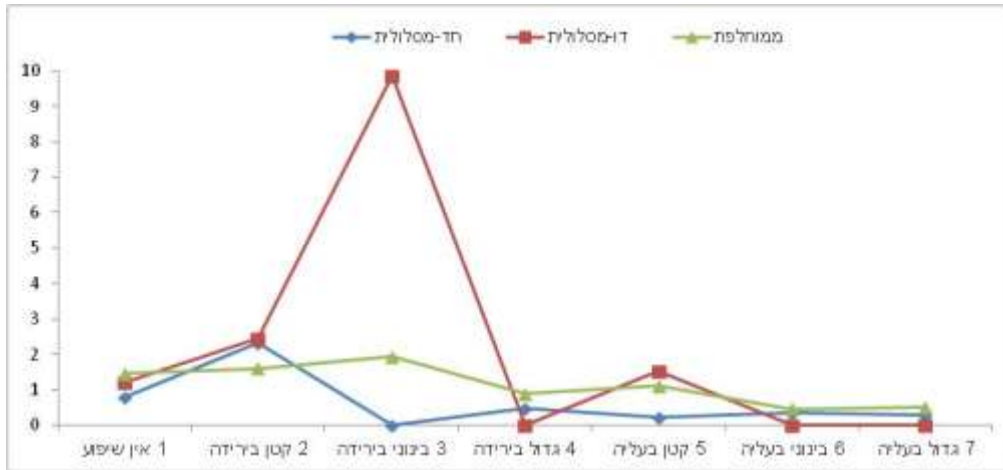
- מספר האירועים **עולה** כאשר היחידה נמצאת בקטע בינוני או ארוך, כאשר רוחב שול ימני בינוני, וכאשר יחידת הניתוח שייכת לדרך דו-מסלולית או ממוחלפת (עם כל הערכים של רוחב שול שמאלי);

- מספר האירועים **יורד** כאשר היחידה קרובה לצומת בהתקרבות או בהתרחקות, כאשר שול ימני צר, וכאשר רוחב נתיב צר או צר מאוד.

השפעת שיפוע לאורך מורכבת יותר, כאשר השפעת סוג דרך, רוחב שול שמאלי ושיפוע לאורך על סך האירועים באה לידי ביטוי במספר מקדמי המודל, לרבות האינטראקציות בין שלושת המשתנים. להמחשת ההשפעה של שיפוע לאורך, בסוגי דרך שונים, נערכו חישובים לדוגמא בעזרת המודל. החישובים נערכו עבור שני מצבים של רוחב שול שמאלי: רחב וצר. החישובים לדוגמא נערכו עבור יחידת הניתוח עם 300 מעברים בשנה, אשר נמצאת בקטע באורך בינוני ורחוקה מאזור הצומת; ליחידת הניתוח רוחב שול ימני בינוני (קטגוריה 2) ורוחב נתיב צר (קטגוריה 2). בתנאים אלה, בעזרת המודל מתקבל אומדן לסך האירועים הצפוי ביחידת הניתוח, בשנה, כאשר הערכים מחושבים עבור קטגוריות שונות של שיפוע לאורך, בסוגי דרך שונים. איור 4.4 מציג את ממצאי החישובים עבור שול שמאלי רחב, איור 4.5 - את ממצאי החישובים עבור שול שמאלי צר.

מאיור 4.4 ניתן לראות שהשפעת השיפוע לאורך שונה בסוגי דרך שונים. כללית, בכל סוג דרך, הצפי לאירועים בנהיגה גבוה יותר בקטעים עם שיפוע בירידה לעומת הקטעים עם שיפוע בעליה. ערך חריג וגבוה במיוחד של סך האירועים הצפוי מזהה עם שיפוע בינוני בירידה בדרך דו-מסלולית. בנוסף, ערכים גבוהים יחסית של סך האירועים מזהים עם שיפוע קטן בירידה בכל סוגי הדרכים, וכמו כן, עם שיפוע בינוני בירידה בדרך ממוחלפת ועם שיפוע קטן בעליה בדרך דו-מסלולית. מאידך, דווקא תנאי דרך מחמירים כגון: שיפוע גדול בירידה או בעליה, לא מזהים עם ריכוזי האירועים.

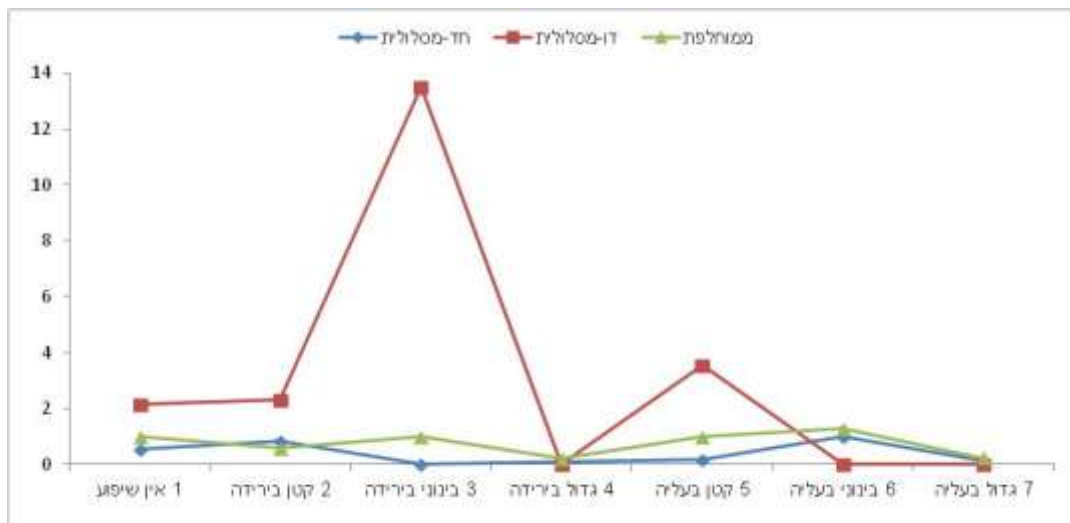
גם מאיור 4.5 ניתן לראות שהשפעת השיפוע לאורך שונה בסוגי דרך שונים, ללא מגמה ברורה. ערך חריג וגבוה במיוחד של סך האירועים הצפוי מזהה עם שיפוע בינוני בירידה בדרך דו-מסלולית. בנוסף, ערכים גבוהים יחסית של סך האירועים מזהים עם היעדר שיפוע לאורך, שיפוע קטן בירידה ושיפוע קטן בעליה, בדרך דו-מסלולית. בדרך חד-מסלולית וממוחלפת, ערכים גבוהים יותר של סך האירועים מזהים עם שיפוע בינוני בעליה, כאשר בדרך ממוחלפת גם שיפוע בינוני בירידה, שיפוע קטן בעליה והיעדר שיפוע לאורך מזהים עם מספר גבוה יותר של סך האירועים. בדומה למקרה הקודם, דווקא תנאי דרך מחמירים כגון: שיפוע גדול בירידה או בעליה, לא מזהים עם ריכוזי האירועים.



שיפוע לאורך	חד-מסלולית	דו-מסלולית	ממוחלפת
1 אין שיפוע	0.80	1.21	1.45
2 קטן בירידה	2.33	2.44	1.60
3 בינוני בירידה	0.00	9.87	1.94
4 גדול בירידה	0.49	0.00	0.88
5 קטן בעליה	0.22	1.51	1.10
6 בינוני בעליה	0.36	0.00	0.46
7 גדול בעליה	0.28	0.00	0.50

איור 4.4. סך האירועים הצפוי ביחידת הניתוח, בשנה, כתלות בגודל השיפוע לאורך, בסוגי דרך שונים - עם שול שמאלי רחב, בדרך דו-מסלולית וממוחלפת.

Figure 4.4. The total number of events expected per unit per year, depending on vertical grade category, for different road types - with wide left shoulder, on dual-carriageway roads with and without at-grade junctions.



שיפוע לאורך	חד-מסלולית	דו-מסלולית	ממוחלפת
1 אין שיפוע	0.54	2.14	0.99
2 קטן בירידה	0.86	2.33	0.59
3 בינוני בירידה	0.00	13.49	1.02
4 גדול בירידה	0.12	0.00	0.22
5 קטן בעליה	0.20	3.54	0.99
6 בינוני בעליה	1.00	0.00	1.28
7 גדול בעליה	0.13	0.00	0.24

איור 4.5. סך האירועים הצפוי ביחידת הניתוח, בשנה, כתלות בגודל השיפוע לאורך, בסוגי דרך שונים - עם שול שמאלי צר, בדרך דו-מסלולית וממוחלפת.

Figure 4.5. The total number of events expected per unit per year, depending on vertical grade category, for different road types - with narrow left shoulder, on dual-carriageway roads with and without at-grade junctions

ד. סיכום המודלים עבור סוגי אירועים שונים

טבלה 4.1 מסכמת את ממצאי המודלים הרב-פרמטריים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית והתרחשות האירועים בנהיגה. ניתן להבחין כי:

- בין מאפייני התשתית שנשארו בין המשתנים המסבירים להתרחשות האירועים בנהיגה מובילים המאפיינים של קרבת צומת, אורך הקטעים (מרחק בין צמתים עיקריים), סוג דרך, רוחב שול שמאלי, רוחב שול ימני, כאשר עבור סך האירועים הופיעו גם רוחב נתיב ושיפוע לאורך.

- מאפייני התשתית כגון: סוג דרך, קרבת צומת, אורך קטע - משפיעים בצורה הפוכה על אירועי "מהירות" לעומת "בלימה".

- סוגי מאפייני תשתית משפיעים ואופן השפעתם על סך האירועים דומים להשפעת מאפייני התשתית על אירועי ה"מהירות", כאשר בניבוי סך האירועים מעורבים גם מאפייני תשתית נוספים.

טבלה 4.1. סיכום לממצאי המודלים הרב-פרמטריים לקשר בין מאפייני התשתית לבין התרחשות האירועים

Table 4.1. Summary of multivariate models for a relationship between infrastructure characteristics and driving events

סוג אירועים	מאפייני תשתית שמזוהים עם עליה באירועים	מאפייני תשתית שמזוהים עם ירידה באירועים
אירועים מסוג 1 ("בלימה")	- יחידת ניתוח בקרבת צומת או בתחום הצומת לעומת קטע דרך מרוחק מהצומת - דרך דו-מסלולית לעומת חד-מסלולית, בנוכחות שול צר	- קטע בינוני או ארוך לעומת קצר - דרך ממוחלפת - דרך דו-מסלולית, בנוכחות שול שמאלי בינוני לעומת רחב
אירועים מסוג 19 ("מהירות")	- קטע בינוני או ארוך לעומת קצר - דרך דו-מסלולית או ממוחלפת לעומת חד-מסלולית	- יחידת ניתוח בקרבת צומת או בתחום הצומת לעומת קטע דרך מרוחק מהצומת - כאשר יש שול ימני צר
סך האירועים	- קטע בינוני או ארוך - כאשר רוחב שול ימני בינוני - דרך דו-מסלולית או ממוחלפת - הצפי גבוה יותר בקטעים עם שיפוע בירידה לעומת שיפוע בעליה - הצפי גבוה במיוחד כאשר יש שיפוע בינוני בירידה בדרך דו-מסלולית	- בקרבת צומת בהתקרבות או בהתרחקות - כאשר שול ימני צר - כאשר רוחב נתיב צר או צר מאוד

4.2. פיתוח מודלים רב-פרמטריים לבחינת הקשר בין אירועי נהיגה ותאונות,

בנוכחות מאפייני תשתית

כפי שהוצג לעיל (בפרקים 3.1, 4.1), על בסיס הנתונים שנבנה למחקר נערך מגוון ניתוחים חד-ורב-פרמטריים לזיהוי מערכת הקשרים בין התרחשות האירועים בנהיגה לבין מאפייני התשתיות. כמו כן, בפרק 3.2 הוצגו ממצאים מבחינת הקשר בין אירועים לתאונות, בנוכחות חשיפה, בסוגי דרך שונים. להבנה מעמיקה יותר של הקשר בין אירועים לתאונות, בתנאי דרך שונים, נערכו ניתוחים רב-פרמטריים המוצגים בפרק זה (פרק 4.2).

המחקר שאף לבחון את הקשר המשולש בין "תאונות-מאפייני תשתית-אירועים בנהיגה". הנחת היסוד בבחינה זאת הינה שאירועים בנהיגה הם משתנה מתווך בין תשתיות ותאונות. כאשר קיים קשר בין מאפייני תשתית ותאונות, אזי הוספת משתני האירועים אמורה להחליף את מאפייני התשתית, כולם או חלקם. במידה ובמודל לקשר בין תשתיות ותאונות אכן מקבלים את תרומת האירועים לחיזוי התאונות, זוהי הוכחה לחשיבות משתני האירועים ולאפשרות השימוש במספרי האירועים לניבוי התרחשות התאונות, ברשת הדרכים.

לבחינת מערכת הקשרים בין אירועים לתאונות, בתנאי דרך שונים, פותחו מודלים רב-פרמטריים. המודלים פותחו בשני שלבים :

בשלב הראשון, פותחו מודלים רב-פרמטריים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית והתרחשות התאונות - ממצאים מפיתוח מודלים אלה מוצגים בפרק 4.2.1;

בשלב השני, המודלים הרב-פרמטריים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית והתאונות פותחו עם הוספת משתני האירועים - ממצאים מפיתוח מודלים אלה מוצגים בפרק 4.2.2.

בעקבות השוואה בין המודלים שהתקבלו בשני השלבים הללו ניתן להסיק לגבי חשיבות האירועים לניבוי התרחשות התאונות, בתנאי דרך שונים.

4.2.1. מודלים רב-פרמטריים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית והתרחשות התאונות (מודלים בסיסיים)

כאמור, תחילה פותחו מודלים בסיסיים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית לבין התרחשות התאונות. השיטה לפיתוח המודלים הרב-פרמטריים תוארה לעיל בפרק 4.1.2¹⁰. עקב ערכים שונים של מאפייני התשתית בסוגי דרך שונים וכמו כן, בהתחשב בשוני שנצפה בקשר בין מאפייני התשתית והתרחשות האירועים בסוגי דרך שונים, בשלב זה של הניתוח הוחלט לפתח מודלים נפרדים לסוגי דרך שונים.

כמו כן, בניתוחים המקדימים (פרק 3.2), נבחנו ארבעה סוגי תאונות, כאשר הממצאים הצביעו על דמיון בהשפעת גורמים שונים על התאונות עם נפגעים, עם וללא תאונות הולכי רגל, מחד, ועל התאונות "כללי עם נפגעים" וכלל התאונות, מאידך. לכן, על מנת להימנע מתשובות מרובות, בשלב זה של הניתוח הוחלט לפתח מודלים מסבירים עבור שני סוגים של תאונות שהם :

(א) INJ - סך התאונות עם נפגעים,

(ב) tot - כלל התאונות (תאונות ת"ד ו-"כללי עם נפגעים" ביחד).

לפיתוח מודלים מסבירים לקשר בין מאפייני התשתית והתאונות שימשה כל רשימת המשתנים שהוכנו במחקר (ראה טבלה 2.3). עם זאת, לאחר פיצול בסיס הנתונים לפי סוגי דרך, בקרב התצפיות עבור כל סוג דרך נמצאו משתנים שהפכו ללא רלוונטיים בסוג דרך זה (כגון: רוחב שול שמאלי בדרך חד-מסלולית). בנוסף, שכוחות התצפיות בקטגוריות מסוימות של המשתנים ירדה. לכן, המודלים שהותאמו לנתונים לא יכלו לאמוד את השוני שבהשפעת קטגוריות כאלה. כמו כן, להבדיל מהמודלים הקודמים, משתנה החשיפה (לוג מספר מעברים בקטע הקרוי off) נכנס למודלים החדשים באופן ישיר, כמו יתר המשתנים המסבירים, ולא בצורת אופסט.

¹⁰ ראה גם : McCaffrey et al (2013)

מדגמי התצפיות להתאמת המודלים היו: 450 לדרך חד-מסלולית, 1286 לדרך דו-מסלולית, 1009 לדרך ממוחלפת.

המשתנים המסבירים שנשמרו במודלים לקשר בין מאפייני התשתית והתאונות, לרוב, היו ברמת מובהקות גבוהה ($p < 0.05$), לפחות עבור חלק מערכיהם. כמו כן, השפעת המשתנים שנותרו בכל מודל, לרוב, הייתה מובהקת ע"פ בדיקת ANOVA.

להלן המודלים שהותאמו לנתונים המפוצלים לפי סוג דרך.

א. מודלים עבור תאונות בדרך חד-מסלולית

טבלה 4.2 מציגה את מקדמי המודלים שהותאמו לתאונות בדרכים החד-מסלוליות: תאונות עם נפגעים וכלל התאונות. השונות המוסברת בעזרת המודלים הינה 29.8% ו-31.2%, בהתאמה. ע"פ בדיקת ANOVA, במודל עבור התאונות עם נפגעים משתנה החשיפה (off) לא היה מובהק, בעוד המשתנה של קרבת צומת בהתקרבות היה מובהק גבולית ($p < 0.1$). יתר המשתנים במודל זה וכל המשתנים במודל השני היו מובהקים.

טבלה 4.2. מודלים מסבירים לקשר בין מאפייני התשתית והתרחשות התאונות, בדרך חד-מסלולית

Table 4.2. Explanatory models for a relationship between infrastructure characteristics and accidents, on single-carriageway roads

(1) מקדמי המודל עבור התאונות עם נפגעים				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-3.2371	0.8858	-3.655	0.0003
off	0.1156	0.1115	1.037	0.2997
as.factor(nefah_cat)2	0.8024	0.8306	0.966	0.3340
as.factor(nefah_cat)3	1.8742	0.8138	2.303	0.0213
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut)1	-0.8125	0.5093	-1.595	0.1106
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut)2	0.9679	0.2239	4.323	1.54e-05
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut)1	1.0201	0.5077	2.009	0.0445
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut)2	NA	NA	NA	NA
as.factor(N_rama_rohav_nativ)1	0.5122	0.1981	2.585	0.0097
as.factor(Shipua_orech_N)2	0.6485	0.2397	2.706	0.0068
as.factor(Shipua_orech_N)3	0.2900	0.3904	0.743	0.4576
as.factor(Shipua_orech_N)5	0.7090	0.2695	2.631	0.0085
as.factor(Shipua_orech_N)6	0.7448	0.3975	1.874	0.0609
(2) מקדמי המודל עבור כלל התאונות				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-1.5557	0.372	-4.180	2.92e-05
off	0.2834	0.105	2.707	0.0068
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut)1	1.6916	0.554	3.052	0.0023
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut)2	1.1932	0.237	5.037	4.72e-07
as.factor(N_rama_rohav_nativ)1	0.7478	0.197	3.803	0.0001
as.factor(N_rohav_nativ)2	-0.7848	0.287	-2.731	0.0063
as.factor(N_rohav_nativ)3	-0.0617	0.356	-0.173	0.8624
as.factor(Shipua_orech_N)2	0.9084	0.216	4.209	2.56e-05
as.factor(Shipua_orech_N)3	0.3588	0.385	0.932	0.3514
as.factor(Shipua_orech_N)5	1.1180	0.248	4.510	6.49e-06
as.factor(Shipua_orech_N)6	0.8990	0.436	2.061	0.0393

מטבלה 4.2 ניתן לראות כי:

- קיים שוני בין משתני התשתית שמשפיעים על סוגי תאונות שונים. על תאונות עם נפגעים נמצאה השפעה של נפח התנועה בדרך (בנוסף למספר המעברים כמשתנה חשיפה עיקרי), קרבת צומת בהתקרבות ובהתרחקות, שינוי ברוחב נתיבים בין יחידות ניתוח עוקבות ושיפוע לאורך. על

כלל התאונות נמצאה השפעה של קרבת צומת בהתרחקות, שינוי ברוחב נתיבים בין יחידות ניתוח עוקבות, רוחב נתיב ושיפוע לאורך.

- מספר התאונות עם נפגעים **עולה** עם עליה בחשיפה (מספר המעברים בקטע), כאשר בדרך נפח תנועה גבוה יותר, בקרבת צמתים ובנוכחות שיפוע לאורך; לא נמצאו משתני תשתית המזוהים עם ירידה בתאונות (קרבת צומת בהתקרבות קיבלה מקדם שלילי אך לא מובהק, כאשר כל יתר המשתנים שמזוהים עם קרבת צומת קיבלו מקדמים חיוביים).

- כלל התאונות **עולה** עם עליה בחשיפה (מספר המעברים בקטע), בקרבת צמתים וכאשר קיים שיפוע לאורך. מאידך, המספר של כלל התאונות **יורד** בקטע עם רוחב נתיב צר או צר מאוד.

- משתני תשתית המשותפים לשני המודלים הראו השפעה **דומה** על שני סוגי התאונות, דהיינו הן מספר התאונות עם נפגעים והן כלל התאונות עולה עם עליה בחשיפה (מספר המעברים בקטע), בקרבת צמתים וכאשר קיים שיפוע לאורך.

ב. מודלים עבור תאונות בדרך דו-מסלולית

טבלה 4.3 מציגה את מקדמי המודלים שהותאמו לתאונות בדרכים הדו-מסלוליות: תאונות עם נפגעים וכלל התאונות. השונות המוסברת בעזרת המודלים הינה 13.5% ו-13.6%, בהתאמה. ע"פ בדיקת ANOVA, כל המשתנים בשני המודלים היו מובהקים.

מטבלה 4.3 ניתן לראות כי:

- הרכב המשתנים המשפיעים על שני סוגי התאונות **דומה** וכולל, בנוסף למספר המעברים בקטע כמשתנה חשיפה עיקרי, גם את נפח התנועה בדרך, קרבת צומת בהתקרבות, מרחק בין צמתים, רוחב שול ימין, רוחב שול שמאל. בנוסף למשתנים הנ"ל, על כלל התאונות משפיעה גם נוכחות של שיפוע לאורך.

- מספר התאונות עם נפגעים **עולה** עם עליה בחשיפה (מספר המעברים בקטע), כאשר בדרך נפח תנועה גבוה יותר, בקרבת צמתים, כאשר רוחב שול ימני בינוני או צר, וכאשר רוחב שול שמאלי צר. מאידך, מספר התאונות עם נפגעים **יורד** כאשר יחידת הניתוח שייכת לקטע בינוני או ארוך בין הצמתים, לעומת קטע קצר, וכאשר ישנו שול שמאלי בינוני.

- כלל התאונות **עולה** עם עליה בחשיפה (מספר המעברים בקטע), כאשר בדרך נפח תנועה גבוה יותר, בקרבת צמתים, כאשר רוחב שול ימני בינוני או צר, כאשר רוחב שול שמאלי צר ובנוכחות ערכים מסוימים של שיפוע לאורך (שיפוע קטן או גדול בירידה). מאידך, המספר של כלל התאונות **יורד** כאשר יחידת הניתוח שייכת לקטע בינוני או ארוך בין הצמתים, לעומת קטע קצר, כאשר ישנו שול שמאלי בינוני, וכמו כן, בנוכחות ערכים מסוימים של שיפוע לאורך (שיפוע בינוני בירידה, שיפוע קטן בעליה, כאשר עבור שיפוע בינוני או גדול בעליה היה מעט נתונים).

- משתני תשתית המשותפים לשני המודלים הראו השפעה **דומה** על שני סוגי התאונות, דהיינו הן מספר התאונות עם נפגעים והן כלל התאונות עולה עם עליה בחשיפה (מספר המעברים בקטע), בדרך עם נפח תנועה גבוה יותר, בקרבת צמתים, כאשר רוחב שול ימני בינוני או צר, וכאשר רוחב שול שמאלי צר. כמו כן, מספר התאונות, משני הסוגים, יורד כאשר יחידת הניתוח שייכת לקטע בינוני או ארוך בין הצמתים וכאשר ישנו שול שמאלי בינוני.

טבלה 4.3. מודלים מסבירים לקשר בין מאפייני התשתית והתרחשות התאונות, בדרך דו-מסלולית

Table 4.3. Explanatory models for a relationship between infrastructure characteristics and accidents, on dual-carriageway roads

(1) מקדמי המודל עבור התאונות עם נפגעים				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-1.4201	0.2947	-4.819	1.45e-06
off	0.1777	0.0561	3.166	0.0015
as.factor(nefah_cat)2	0.4938	0.1985	2.488	0.0129
as.factor(nefah_cat)3	0.6807	0.1918	3.548	0.0004
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut)1	0.3083	0.1543	1.998	0.0457
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut)2	0.7147	0.1441	4.960	7.06e-07
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat)2	-0.4345	0.1857	-2.340	0.0193
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat)3	-0.6233	0.4468	-1.395	0.1630
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat)4	NA	NA	NA	NA
as.factor(N_shul_kolel_hizoni)2	0.3605	0.1337	2.697	0.0070
as.factor(N_shul_kolel_hizoni)3	0.2615	0.1463	1.788	0.0738
as.factor(Ihs_N)2	-0.1794	0.1641	-1.093	0.2743
as.factor(Ihs_N)3	0.4695	0.1516	3.098	0.0019

(2) מקדמי המודל עבור כלל התאונות				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-4.649e-02	3.064e-01	-0.152	0.879
off	2.840e-01	5.942e-02	4.779	1.76e-06
as.factor(nefah_cat)2	2.067e-01	2.048e-01	1.010	0.313
as.factor(nefah_cat)3	8.834e-01	1.950e-01	4.530	5.89e-06
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut)1	3.295e-01	1.641e-01	2.008	0.045
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut)2	7.532e-01	1.568e-01	4.804	1.55e-06
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat)2	-6.082e-01	1.886e-01	-3.224	0.0013
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat)3	-6.920e-01	4.041e-01	-1.712	0.087
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat)4	NA	NA	NA	NA
as.factor(N_shul_kolel_hizoni)2	3.058e-01	1.392e-01	2.197	0.028
as.factor(N_shul_kolel_hizoni)3	2.939e-01	1.557e-01	1.887	0.059
as.factor(Ihs_N)2	-3.287e-01	1.660e-01	-1.980	0.048
as.factor(Ihs_N)3	4.583e-02	1.575e-01	0.291	0.771
as.factor(Shipua_orech_N)2	2.327e-01	1.571e-01	1.481	0.139
as.factor(Shipua_orech_N)3	-9.691e-01	5.847e-01	-1.658	0.097
as.factor(Shipua_orech_N)4	1.017e+00	5.357e-01	1.899	0.058
as.factor(Shipua_orech_N)5	-2.300e-01	2.062e-01	-1.115	0.265
as.factor(Shipua_orech_N)6	-2.343e+01	4.225e+04	-0.001	0.999
as.factor(Shipua_orech_N)7	-2.310e+01	4.225e+04	-0.001	0.999

ג. מודלים עבור תאונות בדרך ממוחלפת

טבלה 4.4 מציגה את מקדמי המודלים שהותאמו לתאונות בדרכים הממוחלפות: תאונות עם נפגעים וכלל התאונות. השונות המוסברת בעזרת המודלים הינה 21.8% ו-22.6%, בהתאמה. ע"פ בדיקת ANOVA, משתנה החשיפה (off) לא היה מובהק במודל לכלל התאונות, כאשר כל יתר המשתנים, בשני המודלים, היו מובהקים.

מטבלה 4.4 ניתן לראות כי:

- הרכב המשתנים המשפיעים על שני סוגי התאונות **דומה** למדי וכולל, בנוסף למספר המעברים בקטע כמשתנה חשיפה עיקרי, גם את נפח התנועה בדרך, קרבת מחלף בהתקרבות ובהתרחקות, ורוחב שול שמאל. עם זאת, עבור כלל התאונות נמצאה השפעה גם של שני משתנים נוספים: מרחק בין מחלפים ורוחב שול ימין.

- מספר התאונות עם נפגעים **עולה** עם עליה בחשיפה (מספר המעברים בקטע), כאשר בדרך נפח תנועה גבוה יותר, בקרבת מחלפים וכאשר רוחב שול שמאלי בינוני או צר (לעומת רחב). לא נמצאו משתנים שתורמים לירידה בתאונות אלה.

- כלל התאונות עולה עם עליה בחשיפה (מספר המעברים בקטע), כאשר בדרך נפח תנועה גבוה יותר, בקרבת מחלפים, כאשר יחידת הניתוח שייכת לקטע בינוני בין המחלפים (לעומת קטע קצר), וכאשר רוחב שול שמאלי בינוני או צר (לעומת רחב). מאידך, המספר של כלל התאונות יורד כאשר רוחב שול ימני בינוני או צר.

- משתני תשתית המשותפים לשני המודלים הראו השפעה דומה על שני סוגי התאונות, דהיינו הן מספר התאונות עם נפגעים והן כלל התאונות עולה עם עליה בחשיפה (מספר המעברים בקטע), כאשר בדרך נפח תנועה גבוה יותר, בקרבת מחלפים וכאשר רוחב שול שמאלי בינוני או צר.

טבלה 4.4. מודלים מסבירים לקשר בין מאפייני התשתית והתרחשות התאונות, בדרך ממוחלפת

Table 4.4. Explanatory models for a relationship between infrastructure characteristics and accidents, on dual-carriageway roads without at-grade junctions

מקדמי המודל עבור התאונות עם נפגעים (1)				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-2.7170	0.4861	-5.590	2.27e-08
off	0.3710	0.1255	2.955	0.0031
as.factor(nefah_cat) 2	0.1068	0.2755	0.388	0.6983
as.factor(nefah_cat) 3	0.8583	0.3009	2.853	0.0043
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 1	0.6639	0.1394	4.764	1.90e-06
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 2	1.7206	0.2209	7.788	6.83e-15
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut) 1	0.5324	0.1499	3.552	0.0004
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut) 2	NA	NA	NA	NA
as.factor(Ihs_N) 2	0.6448	0.1513	4.263	2.02e-05
as.factor(Ihs_N) 3	0.3467	0.1545	2.244	0.0248
מקדמי המודל עבור כלל התאונות (2)				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-1.3493	0.5603	-2.408	0.0160
off	0.1511	0.1386	1.090	0.2757
as.factor(nefah_cat) 2	1.0095	0.3135	3.220	0.0013
as.factor(nefah_cat) 3	2.0243	0.3505	5.775	7.68e-09
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 1	1.1803	0.1694	6.969	3.20e-12
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 2	2.3430	0.2822	8.304	< 2e-16
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut) 1	1.1483	0.1802	6.372	1.86e-10
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut) 2	NA	NA	NA	NA
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat) 2	0.4338	0.1773	2.447	0.0144
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat) 4	NA	NA	NA	NA
as.factor(N_shul_kolel_hizoni) 2	-0.2520	0.1652	-1.525	0.1271
as.factor(N_shul_kolel_hizoni) 3	-0.5251	0.1965	-2.672	0.0075
as.factor(Ihs_N) 2	0.5099	0.1793	2.844	0.0044
as.factor(Ihs_N) 3	0.3324	0.2096	1.586	0.1127

4.2.2. מודלים רב-פרמטריים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית והתרחשות התאונות,

בתוספת משתני אירועים

בשלב השני, המודלים הרב-פרמטריים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית ותאונות פותחו עם תוספת משתני האירועים. הונח שבעקבות השוואת המודלים שהתקבלו בתוספת משתני האירועים עם המודלים הבסיסיים שפותחו קודם (ראה פרק 4.2.1), יהיה ניתן להסיק לגבי חשיבות האירועים בנהיגה לניבוי התרחשות התאונות, בתנאי דרך שונים.

השיטה לפיתוח המודלים הרב-פרמטריים הייתה דומה לזאת של השלב הקודם, כאשר מודלים נפרדים פותחו לסוגי דרך שונים ועבור שני סוגי תאונות שהם: (א) INJ - סך התאונות עם נפגעים, ו-(ב) tot - כלל התאונות (תאונות ת"ד ו-"כללי עם נפגעים" ביחד). המשתנה המוסבר במודל הינו מספר תאונות, ביחידת הניתוח, כאשר בתור מסבירים פוטנציאליים שימשו מאפייני התשתית,

לוג מדד החשיפה (מספר מעברים בקטע) ולוג מספר אירועים (בתוספת 0.5 למספר האירועים הגולמי בטרם התמרת הלוג). משתני האירועים קרויים במודלים אלה: Lej.

לבחינת קשר זה הותאמו סה"כ 18 מודלים, לפי השילובים של 3 סוגי דרך עם 2 סוגי תאונות ו-3 סוגי אירועים. כלומר, בכל מודל שהותאם לסוג דרך וסוג תאונות מסוים נבחן משתנה אירועים, כל פעם מסוג אחד מבין שלושת הסוגים הבאים: סוג 1 "בלימה", סוג 19 "מהירות" או סך האירועים.

מכיוון שבקרב יחידות הניתוח ישנן תצפיות חריגות - עם מספר אירועים גבוה במיוחד, אשר עשויות להשפיע על תוצאות הניתוח, התאמת כל מודל, מבין ה-18 שצוינו לעיל, נערכה שלוש פעמים: (א) עם כל התצפיות, ללא השמטת התצפיות עם מספר אירועים חריג; (ב) בניכוי תצפיות חריגות עם הורדה אחידה של התצפיות בכל סוגי הדרכים; (ג) בניכוי תצפיות חריגות עם הורדה שונה של התצפיות החריגות, לפי סוג דרך. בקרב התצפיות בדרכים החד-מסלוליות, נמצאה סה"כ תצפית חריגה אחת ולכן, לא נערכו הרצות נוספות של המודלים ללא התצפית החריגה. מכאן, מדגמי התצפיות להתאמת המודלים היו: 450 לדרך חד-מסלולית, 1261-1286 לדרך דו-מסלולית, 994-1009 לדרך ממוחלפת.

יש לציין שממצאי המודלים שהותאמו לנתונים עם כל התצפיות ובניכוי תצפיות חריגות, היו דומים למדי. לכן, בהמשך, בהצגת תוצאות הניתוחים עבור כל אחד מ-18 המקרים (שילוב של סוג דרך, סוג תאונה וסוג אירוע) מובא מודל אחד.

א. מודלים עבור תאונות בדרך חד-מסלולית, בתוספת משתני אירועים

המודלים הבסיסיים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית ותאונות, בדרך חד-מסלולית, הוצגו לעיל בטבלה 4.2. טבלות 4.5-4.6 להלן מצייגות את מקדמי המודלים שהותאמו לקשר זה בתוספת משתני אירועים, עבור תאונות עם נפגעים וכלל התאונות, בהתאמה.

במודלים עבור התאונות עם נפגעים, השונות המוסברת במודלים בתוספת משתני האירועים הינה 29.8%-29.9%. ע"פ בדיקת ANOVA, בכל אחד מהמודלים - בתוספת אירועים מסוג 1, סוג 19 וסך האירועים, משתנה החשיפה (off) לא היה מובהק, משתנה של קרבת צומת בהתקרבות היה מובהק גבולית, כאשר יתר משתני התשתית היו מובהקים. מאידך, בכל שלושת המודלים, משתני האירועים לא היו מובהקים.

במודלים עבור כלל התאונות, השונות המוסברת במודלים בתוספת משתני האירועים הינה 31.2%-31.3%. ע"פ בדיקת ANOVA, בכל שלושת המודלים, כל משתני התשתית והחשיפה היו מובהקים, כאשר משתני האירועים לא היו מובהקים.

מטבלות 4.5-4.6 ניתן לראות כי בדרך חד-מסלולית:

- הוספת משתני האירועים למודלים עבור תאונות עם נפגעים וכלל התאונות, לא שינתה את צורת הקשר בין מאפייני התשתית והתאונות, כאשר בכל המודלים נשמר הן הרכב והן מהות הקשר בין מאפייני התשתית והתאונות שנמצא בשלב מוקדם יותר, בטרם הוספת האירועים.

- המשתנים של כל אחד מסוגי האירועים לא היו מובהקים במודלים שהותאמו. כלומר, תוספת מידע על אירועים בנהיגה שנרשמו בדרך חד-מסלולית לא שיפרה את ניבוי התאונות.

טבלה 4.5. מודלים מסבירים לקשר בין מאפייני התשתית ותאונות עם נפגעים, בתוספת אירועים בנהיגה, בדרך חד-מסלולית

Table 4.5. Explanatory models for a relationship between infrastructure characteristics and injury accidents, with the addition of driving events, on single-carriageway roads

(1) מקדמי המודל בתוספת אירועים מסוג 1 "בלימה"				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-3.1232	0.923	-3.382	0.0007
off	0.0993	0.116	0.852	0.3940
as.factor(nefah_cat) 2	0.8714	0.843	1.033	0.3015
as.factor(nefah_cat) 3	1.9451	0.828	2.349	0.0188
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 1	-0.7949	0.510	-1.559	0.1191
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 2	0.9496	0.226	4.207	2.59e-05
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut) 1	1.0179	0.508	2.004	0.0451
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut) 2	NA	NA	NA	NA
as.factor(N_rama_rohav_nativ) 1	0.5073	0.198	2.558	0.0105
as.factor(Shipua_orech_N) 2	0.6584	0.240	2.745	0.0060
as.factor(Shipua_orech_N) 3	0.2969	0.390	0.761	0.4468
as.factor(Shipua_orech_N) 5	0.7188	0.270	2.664	0.0077
as.factor(Shipua_orech_N) 6	0.7661	0.398	1.926	0.0541
Lej	0.2156	0.337	0.639	0.5225
(2) מקדמי המודל בתוספת אירועים מסוג 19 "מהירות"				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-1.952e+01	3.247e+05	0.000	0.999
off	1.171e-01	1.115e-01	1.050	0.294
as.factor(nefah_cat) 2	8.128e-01	8.307e-01	0.978	0.328
as.factor(nefah_cat) 3	1.875e+00	8.137e-01	2.304	0.021
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 1	-8.126e-01	5.092e-01	-1.596	0.110
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 2	9.671e-01	2.238e-01	4.321	1.55e-05
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut) 1	1.018e+00	5.074e-01	2.007	0.045
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut) 2	NA	NA	NA	NA
as.factor(N_rama_rohav_nativ) 1	5.115e-01	1.980e-01	2.583	0.0098
as.factor(Shipua_orech_N) 2	6.553e-01	2.400e-01	2.731	0.0063
as.factor(Shipua_orech_N) 3	2.942e-01	3.904e-01	0.753	0.4512
as.factor(Shipua_orech_N) 5	7.123e-01	2.695e-01	2.643	0.0082
as.factor(Shipua_orech_N) 6	7.486e-01	3.975e-01	1.884	0.0596
Lej	-2.348e+01	4.685e+05	0.000	0.999
(3) מקדמי המודל בתוספת סך האירועים				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-3.21069	0.91992	-3.490	0.0005
off	0.11095	0.11907	0.932	0.3514
as.factor(nefah_cat) 2	0.81078	0.83285	0.974	0.3303
as.factor(nefah_cat) 3	1.88521	0.81778	2.305	0.0211
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 1	-0.80902	0.50979	-1.587	0.1125
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 2	0.96265	0.22672	4.246	2.18e-05
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut) 1	1.01828	0.51214	1.988	0.0468
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut) 2	NA	NA	NA	NA
as.factor(N_rama_rohav_nativ) 1	0.51097	0.19824	2.578	0.0099
as.factor(Shipua_orech_N) 2	0.64908	0.23977	2.707	0.0068
as.factor(Shipua_orech_N) 3	0.28957	0.39067	0.741	0.4586
as.factor(Shipua_orech_N) 5	0.70874	0.26958	2.629	0.0086
as.factor(Shipua_orech_N) 6	0.74272	0.39792	1.867	0.0620
Lej	0.03606	0.27732	0.130	0.8966

טבלה 4.6. מודלים מסבירים לקשר בין מאפייני התשתית וכלל התאונות, בתוספת אירועים בנהיגה, בדרך חד-מסלולית

Table 4.6. Explanatory models for a relationship between infrastructure characteristics and total accidents, with the addition of driving events, on single-carriageway roads

(1) מקדמי המודל בתוספת אירועים מסוג 1 "בלימה"				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-1.382	0.493	-2.804	0.005
off	0.273	0.109	2.506	0.012
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut)1	1.685	0.555	3.033	0.002
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut)2	1.174	0.240	4.884	1.04e-06
as.factor(N_rama_rohav_nativ)1	0.740	0.197	3.763	0.0002
as.factor(N_rohav_nativ)2	-0.786	0.287	-2.735	0.0062
as.factor(N_rohav_nativ)3	-0.078	0.358	-0.219	0.8270
as.factor(Shipua_orech_N)2	0.920	0.216	4.262	2.02e-05
as.factor(Shipua_orech_N)3	0.369	0.385	0.960	0.3371
as.factor(Shipua_orech_N)5	1.128	0.248	4.550	5.36e-06
as.factor(Shipua_orech_N)6	0.918	0.436	2.104	0.035
Lej	0.221	0.356	0.621	0.534
(2) מקדמי המודל בתוספת אירועים מסוג 19 "מהירות"				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-1.831e+01	3.247e+05	0.000	0.999
off	2.845e-01	1.047e-01	2.718	0.007
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut)1	1.690e+00	5.539e-01	3.052	0.002
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut)2	1.190e+00	2.367e-01	5.029	4.92e-07
as.factor(N_rama_rohav_nativ)1	7.474e-01	1.965e-01	3.803	0.0001
as.factor(N_rohav_nativ)2	-7.701e-01	2.878e-01	-2.676	0.0074
as.factor(N_rohav_nativ)3	-6.269e-02	3.562e-01	-0.176	0.860
as.factor(Shipua_orech_N)2	9.154e-01	2.159e-01	4.240	2.23e-05
as.factor(Shipua_orech_N)3	3.618e-01	3.849e-01	0.940	0.347
as.factor(Shipua_orech_N)5	1.119e+00	2.478e-01	4.515	6.32e-06
as.factor(Shipua_orech_N)6	9.020e-01	4.359e-01	2.069	0.0385
Lej	-2.416e+01	4.685e+05	0.000	0.999
(3) מקדמי המודל בתוספת סך האירועים				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-1.577	0.469	-3.364	0.0008
off	0.286	0.110	2.602	0.0093
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut)1	1.694	0.558	3.037	0.0024
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut)2	1.197	0.241	4.967	6.79e-07
as.factor(N_rama_rohav_nativ)1	0.749	0.197	3.805	0.0001
as.factor(N_rohav_nativ)2	-0.784	0.288	-2.722	0.0065
as.factor(N_rohav_nativ)3	-0.060	0.356	-0.168	0.867
as.factor(Shipua_orech_N)2	0.907	0.216	4.202	2.65e-05
as.factor(Shipua_orech_N)3	0.358	0.385	0.930	0.352
as.factor(Shipua_orech_N)5	1.117	0.248	4.507	6.57e-06
as.factor(Shipua_orech_N)6	0.899	0.436	2.062	0.039
Lej	-0.023	0.287	-0.080	0.937

ב. מודלים עבור תאונות בדרך דו-מסלולית, בתוספת משתני אירועים

המודלים הבסיסיים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית ותאונות, בדרך דו-מסלולית, הוצגו לעיל בטבלה 4.3. (המודלים הבסיסיים שהותאמו לנתונים עם כל התצפיות ובניכוי תצפיות עם מספר אירועים חריג, היו דומים.) טבלות 4.7-4.8 להלן מציגות את מקדמי המודלים שהותאמו לקשר בין מאפייני התשתית ותאונות בתוספת משתני אירועים, עבור תאונות עם נפגעים וכלל התאונות, בהתאמה.

במודלים עבור התאונות עם נפגעים, השונות המוסברת בתוספת אירועים מסוג 1 הינה 14%, בתוספת אירועים מסוג 19 - 14.5%, בתוספת סך האירועים - 13.6%. ע"פ בדיקת ANOVA, במודל בתוספת אירועים מסוג 1, כל המשתנים מובהקים; במודל בתוספת אירועים מסוג 19, רוב

המשתנים מובהקים, כאשר משתנים "מרחק בין צמתים" ו-"קרוב לצומת בהתקרבות" מובהקים גבולית; במודל בתוספת סך האירועים, כל המשתנים מובהקים פרט למשתנה אירועים.

במודלים עבור כלל התאונות, השונות המוסברת בתוספת אירועים מסוג 1 הינה 13.7%, בתוספת אירועים מסוג 19 - 14.5%, בתוספת סך האירועים - 13.7%. ע"פ בדיקת ANOVA, במודל בתוספת אירועים מסוג 1, כל המשתנים מובהקים פרט למשתנה אירועים; במודל בתוספת אירועים מסוג 19, רוב המשתנים מובהקים, פרט למשתנה "רוחב שול שמאלי", כאשר משתנים "קרוב לצומת בהתקרבות", "רוחב שול ימין" מובהקים גבולית; במודל בתוספת סך האירועים, כל המשתנים מובהקים פרט למשתנה אירועים.

טבלה 4.7. מודלים מסבירים לקשר בין מאפייני התשתית ותאונות עם נפגעים, בתוספת אירועים **בנהיגה**, בדרך דו-מסלולית

Table 4.7. Explanatory models for a relationship between infrastructure characteristics and injury accidents, with the addition of driving events, on dual-carriageway roads

1) מקדמי המודל בתוספת אירועים מסוג 1 "בלימה" ¹				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-0.997	0.332	-3.006	0.0026
off	0.121	0.060	2.032	0.0422
as.factor(nefah_cat) 2	0.461	0.120	2.333	0.0196
as.factor(nefah_cat) 3	0.684	0.191	3.581	0.0003
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 1	0.315	0.154	2.048	0.0406
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 2	0.693	0.144	4.812	1.5e-06
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat) 2	-0.455	0.185	-2.461	0.0139
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat) 3	-0.634	0.447	-1.420	0.1555
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat) 4	NA	NA	NA	NA
as.factor(N_shul_kolel_hizoni) 2	0.290	0.134	2.168	0.0301
as.factor(N_shul_kolel_hizoni) 3	0.291	0.146	1.995	0.0461
as.factor(Ihs_N) 2	-0.181	0.163	-1.108	0.2680
as.factor(Ihs_N) 3	0.413	0.151	2.729	0.0063
Lej	0.294	0.124	2.371	0.0178
2) מקדמי המודל בתוספת אירועים מסוג 19 "מהירות" ¹				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-1.759	0.313	-5.617	1.94e-08
off	0.209	0.057	3.663	0.0002
as.factor(nefah_cat) 2	0.424	0.200	2.120	0.0340
as.factor(nefah_cat) 3	0.662	0.192	3.437	0.0006
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 1	0.290	0.154	1.890	0.0588
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 2	0.711	0.143	4.961	7.01e-07
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat) 2	-0.418	0.186	-2.250	0.0245
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat) 3	-0.419	0.451	-0.929	0.3526
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat) 4	NA	NA	NA	NA
as.factor(N_shul_kolel_hizoni) 2	0.373	0.133	2.803	0.0051
as.factor(N_shul_kolel_hizoni) 3	0.246	0.146	1.684	0.0923
as.factor(Ihs_N) 2	-0.142	0.166	-0.854	0.3931
as.factor(Ihs_N) 3	0.428	0.151	2.835	0.0046
Lej	-0.473	0.139	-3.413	0.0006
3) מקדמי המודל בתוספת סך האירועים ²				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-1.188	0.322	-3.691	0.0002
off	0.132	0.064	2.076	0.0379
as.factor(nefah_cat) 2	0.511	0.199	2.574	0.0101
as.factor(nefah_cat) 3	0.691	0.192	3.607	0.0003
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 1	0.300	0.155	1.933	0.0533
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 2	0.701	0.146	4.811	1.5e-06
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat) 2	-0.452	0.185	-2.446	0.0144
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat) 3	-0.710	0.447	-1.588	0.1122
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat) 4	NA	NA	NA	NA
as.factor(N_shul_kolel_hizoni) 2	0.331	0.135	2.458	0.0140
as.factor(N_shul_kolel_hizoni) 3	0.284	0.148	1.919	0.0550
as.factor(Ihs_N) 2	-0.166	0.164	-1.008	0.3136
as.factor(Ihs_N) 3	0.441	0.152	2.894	0.0038
Lej	0.156	0.098	1.591	0.1116

¹ מוצג מודל עם כל התצפיות, ללא השמטת תצפיות עם מספר אירועים חריג

² מודל בניכוי תצפיות חריגות, עם הורדה אחידה של התצפיות בכל סוגי הדרכים

טבלה 4.8. מודלים מסבירים לקשר בין מאפייני התשתית וכלל התאונות, בתוספת אירועים
 בנהיגה, בדרך דו-מסלולית

Table 4.8. Explanatory models for a relationship between infrastructure characteristics and total accidents, with the addition of driving events, on dual-carriageway roads

1) מקדמי המודל בתוספת אירועים מסוג 1 "בלימה"				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-1.050e-01	3.487e-01	-0.301	0.763
off	2.909e-01	6.314e-02	4.607	4.09e-06
as.factor(nefah_cat) 2	2.118e-01	2.048e-01	1.035	0.301
as.factor(nefah_cat) 3	8.839e-01	1.950e-01	4.532	5.83e-06
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 1	3.312e-01	1.641e-01	2.018	0.044
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 2	7.558e-01	1.572e-01	4.809	1.52e-06
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat) 2	-6.048e-01	1.888e-01	-3.204	0.0014
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat) 3	-6.877e-01	4.040e-01	-1.702	0.089
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat) 4	NA	NA	NA	NA
as.factor(N_shul_kolel_hizoni) 2	3.126e-01	1.395e-01	2.241	0.025
as.factor(N_shul_kolel_hizoni) 3	2.904e-01	1.558e-01	1.864	0.062
as.factor(Ihs_N) 2	-3.279e-01	1.660e-01	-1.975	0.048
as.factor(Ihs_N) 3	5.420e-02	1.578e-01	0.343	0.731
as.factor(Shipua_orech_N) 2	2.324e-01	1.571e-01	1.479	0.139
as.factor(Shipua_orech_N) 3	-9.697e-01	5.850e-01	-1.657	0.097
as.factor(Shipua_orech_N) 4	1.012e+00	5.358e-01	1.889	0.059
as.factor(Shipua_orech_N) 5	-2.283e-01	2.064e-01	-1.107	0.268
as.factor(Shipua_orech_N) 6	-2.343e+01	4.225e+04	-0.001	0.999
as.factor(Shipua_orech_N) 7	-2.311e+01	4.225e+04	-0.001	0.999
Lej	-4.354e-02	1.374e-01	-0.317	0.751
2) מקדמי המודל בתוספת אירועים מסוג 19 "מהירות"				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-4.483e-01	3.225e-01	-1.390	0.164
off	3.269e-01	6.041e-02	5.412	6.24e-08
as.factor(nefah_cat) 2	1.496e-01	2.057e-01	0.727	0.467
as.factor(nefah_cat) 3	8.649e-01	1.947e-01	4.442	8.93e-06
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 1	3.097e-01	1.632e-01	1.897	0.058
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 2	7.572e-01	1.560e-01	4.853	1.22e-06
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat) 2	-5.467e-01	1.880e-01	-2.908	0.004
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat) 3	-3.812e-01	4.043e-01	-0.943	0.346
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat) 4	NA	NA	NA	NA
as.factor(N_shul_kolel_hizoni) 2	3.091e-01	1.386e-01	2.230	0.026
as.factor(N_shul_kolel_hizoni) 3	2.615e-01	1.553e-01	1.684	0.092
as.factor(Ihs_N) 2	-2.855e-01	1.677e-01	-1.703	0.089
as.factor(Ihs_N) 3	8.556e-03	1.568e-01	0.055	0.956
as.factor(Shipua_orech_N) 2	2.071e-01	1.563e-01	1.325	0.185
as.factor(Shipua_orech_N) 3	-1.028e+00	5.931e-01	-1.733	0.083
as.factor(Shipua_orech_N) 4	9.205e-01	5.332e-01	1.726	0.084
as.factor(Shipua_orech_N) 5	-2.336e-01	2.054e-01	-1.138	0.255
as.factor(Shipua_orech_N) 6	-2.356e+01	4.225e+04	-0.001	0.999
as.factor(Shipua_orech_N) 7	-2.327e+01	4.225e+04	-0.001	0.999
Lej	-5.013e-01	1.335e-01	-3.755	0.0002
3) מקדמי המודל בתוספת סך האירועים				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-2.309e-01	3.375e-01	-0.684	0.494
off	3.209e-01	6.724e-02	4.773	1.82e-06
as.factor(nefah_cat) 2	2.061e-01	2.056e-01	1.002	0.316
as.factor(nefah_cat) 3	8.829e-01	1.953e-01	4.519	6.20e-06
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 1	3.374e-01	1.640e-01	2.057	0.040
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 2	7.690e-01	1.570e-01	4.897	9.73e-07
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat) 2	-5.927e-01	1.887e-01	-3.141	0.0017
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat) 3	-6.317e-01	4.053e-01	-1.559	0.119
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat) 4	NA	NA	NA	NA
as.factor(N_shul_kolel_hizoni) 2	3.133e-01	1.392e-01	2.250	0.024
as.factor(N_shul_kolel_hizoni) 3	2.756e-01	1.559e-01	1.768	0.077
as.factor(Ihs_N) 2	-3.260e-01	1.664e-01	-1.958	0.050
as.factor(Ihs_N) 3	6.541e-02	1.575e-01	0.415	0.678
as.factor(Shipua_orech_N) 2	2.422e-01	1.572e-01	1.541	0.123
as.factor(Shipua_orech_N) 3	-9.676e-01	5.868e-01	-1.649	0.099
as.factor(Shipua_orech_N) 4	1.015e+00	5.356e-01	1.895	0.058
as.factor(Shipua_orech_N) 5	-1.999e-01	2.061e-01	-0.970	0.332
as.factor(Shipua_orech_N) 6	-2.347e+01	4.225e+04	-0.001	0.999
as.factor(Shipua_orech_N) 7	-2.314e+01	4.225e+04	-0.001	0.999
Lej	-9.368e-02	9.159e-02	-1.023	0.306

¹ מוצג מודל עם כל התצפיות, ללא השמטת תצפיות עם מספר אירועים חריג

מטבלות 4.7-4.8 ניתן לראות כי בדרך דו-מסלולית :

- הן במודלים עבור תאונות עם נפגעים והן במודלים עבור כלל התאונות, הוספת משתני האירועים לא שינתה מהותית את צורת הקשר בין מאפייני התשתית והתאונות, כאשר בכל המודלים נשמר הן הרכב והן כיוון הקשר בין מאפייני התשתית והתאונות שנמצא בשלב מוקדם יותר, בטרם הוספת האירועים. עם זאת, הוספת משתני האירועים השפיע על ערכי המקדמים של משתני התשתית.

- במודלים עבור תאונות עם נפגעים : עבור אירועים מסוג "בלימה" נמצא קשר חיובי ומובהק עם מספרי התאונות, כאשר הוספת האירועים שיפרה במעט את גודל השונות המוסברת ע"י המודל. כמו כן, עבור אירועים מסוג "מהירות" נמצא קשר שלילי ומובהק עם מספרי התאונות, כאשר הוספת האירועים גם כן שיפרה במעט את גודל השונות המוסברת ע"י המודל. לעומת זאת, עבור סך האירועים, הסתמן קשר חיובי אך לא מובהק עם מספרי התאונות, ללא שיפור בגודל השונות המוסברת ע"י המודל בעקבות הוספת משתנה האירועים.

- במודלים עבור כלל התאונות: עבור אירועים מסוג 1 "בלימה" וסך האירועים הסתמן קשר שלילי אך לא מובהק עם מספרי התאונות, ללא שיפור בגודל השונות המוסברת ע"י המודל בעקבות הוספת משתנה האירועים. לעומת זאת, עבור אירועים מסוג 19 "מהירות" נמצא קשר שלילי ומובהק עם מספרי התאונות, כאשר הוספת האירועים שיפרה במעט את גודל השונות המוסברת ע"י המודל.

מכאן, בדרך דו-מסלולית, תוספת מידע על אירועים מסוג "בלימה" או "מהירות" משפרת את ניבוי התאונות עם נפגעים. כמו כן, תוספת מידע על אירועים מסוג "מהירות" משפרת ניבוי של כלל התאונות.

ג. מודלים עבור תאונות בדרך ממוחלפת, בתוספת משתני אירועים

המודלים הבסיסיים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית ותאונות, בדרך ממוחלפת, הוצגו לעיל בטבלה 4.4. (המודלים הבסיסיים שהותאמו לנתונים עם כל התצפיות ובינכוי תצפיות עם מספר אירועים חריג, היו דומים.) טבלות 4.9-4.10 להלן מציגות את מקדמי המודלים שהותאמו לקשר בין מאפייני התשתית ותאונות בתוספת משתני אירועים, עבור תאונות עם נפגעים וכלל התאונות, בהתאמה.

במודלים עבור התאונות עם נפגעים, השונות המוסברת בתוספת אירועים מסוג 1 הינה 22.1%, בתוספת אירועים מסוג 19 - 22.3%, בתוספת סך האירועים - 22.1%. ע"פ בדיקת ANOVA, במודל בתוספת אירועים מסוג 1, כל המשתנים מובהקים פרט למשתנה אירועים; במודל בתוספת אירועים מסוג 19, כל המשתנים מובהקים; במודל בתוספת סך האירועים, כל המשתנים מובהקים פרט למשתנה אירועים אשר מובהק גבולית.

במודלים עבור כלל התאונות, השונות המוסברת בתוספת אירועים מסוג 1 הינה 22.7%, בתוספת אירועים מסוג 19 - 22.6%, בתוספת סך האירועים - 22.7%. ע"פ בדיקת ANOVA, בכל המודלים - בתוספת אירועים מסוג 1, אירועים מסוג 19 או סך האירועים, כל המשתנים מובהקים פרט למשתנה חשיפה ומשתנה אירועים.

טבלה 4.9. מודלים מסבירים לקשר בין מאפייני התשתית ותאונות עם נפגעים, בתוספת אירועים בנהיגה, בדרך ממוחלפת

Table 4.9. Explanatory models for a relationship between infrastructure characteristics and injury accidents, with the addition of driving events, on dual-carriageway roads without at-grade junctions

(1) מקדמי המודל בתוספת אירועים מסוג 1 "בלימה" ³				
	Estimate	Std.Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-2.793	0.528	-5.284	1.26e-07
off	0.381	0.126	3.014	0.0026
as.factor(nefah_cat) 2	0.100	0.276	0.363	0.717
as.factor(nefah_cat) 3	0.848	0.301	2.820	0.0048
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 1	0.674	0.140	4.823	1.42e-06
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 2	1.734	0.222	7.818	5.37e-15
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut) 1	0.536	0.150	3.565	0.0004
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut) 2	NA	NA	NA	NA
as.factor(Ihs_N) 2	0.655	0.151	4.328	1.51e-05
as.factor(Ihs_N) 3	0.355	0.154	2.297	0.0216
Lej	-0.045	0.236	-0.192	0.847
(2) מקדמי המודל בתוספת אירועים מסוג 19 "מהירות" ¹				
	Estimate	Std.Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-2.847	0.490	-5.814	6.09e-09
off	0.418	0.128	3.276	0.001
as.factor(nefah_cat) 2	0.057	0.276	0.208	0.835
as.factor(nefah_cat) 3	0.789	0.302	2.610	0.009
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 1	0.570	0.142	4.000	6.33e-05
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 2	1.664	0.225	7.395	1.41e-13
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut) 1	0.486	0.151	3.213	0.0013
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut) 2	NA	NA	NA	NA
as.factor(Ihs_N) 2	0.628	0.151	4.154	3.26e-05
as.factor(Ihs_N) 3	0.272	0.160	1.703	0.089
Lej	-0.198	0.094	-2.096	0.036
(3) מקדמי המודל בתוספת סך האירועים ¹				
	Estimate	Std.Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-2.881	0.497	-5.795	6.81e-09
off	0.425	0.130	3.270	0.0011
as.factor(nefah_cat) 2	0.054	0.277	0.195	0.845
as.factor(nefah_cat) 3	0.797	0.303	2.629	0.0086
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 1	0.580	0.142	4.087	4.37e-05
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 2	1.676	0.223	7.499	6.41e-14
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut) 1	0.492	0.151	3.255	0.0011
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut) 2	NA	NA	NA	NA
as.factor(Ihs_N) 2	0.636	0.151	4.205	2.61e-05
as.factor(Ihs_N) 3	0.306	0.158	1.940	0.052
Lej	-0.164	0.092	-1.779	0.075

¹ מוצג מודל עם כל התצפיות, ללא השמטת תצפיות עם מספר אירועים חריג

³ מודל בניכוי תצפיות חריגות עם הורדה שונה של התצפיות החריגות, לפי סוג דרך

טבלה 4.10. מודלים מסבירים לקשר בין מאפייני התשתית וכלל התאונות, בתוספת אירועים בנהיגה, בדרך ממוחלפת

Table 4.10. Explanatory models for a relationship between infrastructure characteristics and total accidents, with the addition of driving events, on dual-carriageway roads without at-grade junctions

(1) מקדמי המודל בתוספת אירועים מסוג 1 "בלימה" ³				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-1.396	0.608	-2.297	0.022
off	0.160	0.140	1.146	0.252
as.factor(nefah_cat) 2	0.994	0.315	3.153	0.002
as.factor(nefah_cat) 3	2.008	0.351	5.714	1.10e-08
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 1	1.181	0.170	6.929	4.25e-12
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 2	2.355	0.284	8.282	< 2e-16
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut) 1	1.145	0.182	6.305	2.89e-10
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut) 2	NA	NA	NA	NA
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat) 2	0.429	0.178	2.412	0.016
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat) 4	NA	NA	NA	NA
as.factor(N_shul_kolel_hizoni) 2	-0.253	0.166	-1.523	0.128
as.factor(N_shul_kolel_hizoni) 3	-0.515	0.197	-2.608	0.009
as.factor(Ihs_N) 2	0.510	0.180	2.836	0.0046
as.factor(Ihs_N) 3	0.334	0.210	1.587	0.112
Lej	-0.028	0.281	-0.100	0.920
(2) מקדמי המודל בתוספת אירועים מסוג 19 "מהירות" ⁴				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-1.457	0.569	-2.559	0.0105
off	0.189	0.142	1.331	0.183
as.factor(nefah_cat) 2	0.974	0.314	3.097	0.002
as.factor(nefah_cat) 3	2.000	0.353	5.659	1.52e-08
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 1	1.111	0.174	6.380	1.77e-10
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 2	2.232	0.290	7.698	1.39e-14
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut) 1	1.123	0.182	6.163	7.15e-10
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut) 2	NA	NA	NA	NA
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat) 2	0.466	0.179	2.601	0.0093
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat) 4	NA	NA	NA	NA
as.factor(N_shul_kolel_hizoni) 2	-0.290	0.167	-1.740	0.082
as.factor(N_shul_kolel_hizoni) 3	-0.570	0.197	-2.894	0.004
as.factor(Ihs_N) 2	0.506	0.180	2.810	0.005
as.factor(Ihs_N) 3	0.272	0.216	1.260	0.208
Lej	-0.146	0.115	-1.271	0.204
(3) מקדמי המודל בתוספת סך האירועים ⁴				
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	-1.478	0.574	-2.575	0.010
off	0.186	0.143	1.297	0.194
as.factor(nefah_cat) 2	0.984	0.314	3.131	0.002
as.factor(nefah_cat) 3	2.009	0.352	5.700	1.20e-08
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 1	1.132	0.173	6.553	5.64e-11
as.factor(N_karov_lezomet_beitkarvut) 2	2.313	0.286	8.089	6.00e-16
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut) 1	1.143	0.182	6.264	3.75e-10
as.factor(N_karov_lezomet_beitrahkut) 2	NA	NA	NA	NA
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat) 2	0.461	0.178	2.592	0.0095
as.factor(N_merhak_benzmatim_cat) 4	NA	NA	NA	NA
as.factor(N_shul_kolel_hizoni) 2	-0.280	0.166	-1.682	0.092
as.factor(N_shul_kolel_hizoni) 3	-0.565	0.197	-2.871	0.004
as.factor(Ihs_N) 2	0.515	0.180	2.868	0.004
as.factor(Ihs_N) 3	0.321	0.213	1.509	0.131
Lej	-0.110	0.108	-1.011	0.312

² מודל בניכוי תצפיות חריגות, עם הורדה אחידה של התצפיות בכל סוגי הדרכים

³ מודל בניכוי תצפיות חריגות עם הורדה שונה של התצפיות החריגות, לפי סוג דרך

מטבלות 4.9-4.10 ניתן לראות כי בדרך ממוחלפת :

- הן במודלים עבור תאונות עם נפגעים והן במודלים עבור כלל התאונות, הוספת משתני האירועים לא שינתה מהותית את צורת הקשר בין מאפייני התשתית והתאונות, כאשר בכל המודלים נשמר הן הרכב והן כיוון הקשר בין מאפייני התשתית והתאונות שנמצא בשלב מוקדם יותר, בטרם הוספת האירועים. עם זאת, הוספת משתני האירועים השפיע על ערכי המקדמים של משתני התשתית.

- במודלים עבור תאונות עם נפגעים: עבור אירועים מסוג "בלימה" הסתמן קשר שלילי אך לא מובהק עם מספרי התאונות. לעומת זאת, עבור אירועים מסוג "מהירות" נמצא קשר שלילי ומובהק עם מספרי התאונות, כאשר הוספת האירועים שיפרה במעט את גודל השונות המוסברת ע"י המודל. כמו כן, עבור **סך האירועים** נמצא קשר שלילי ומובהק גבולית ($p < 0.1$) עם מספרי התאונות, כאשר הוספת האירועים שיפרה במעט את גודל השונות המוסברת ע"י המודל.

- במודלים עבור כלל התאונות: עבור כל סוגי האירועים - "בלימה", "מהירות" וסך האירועים, הסתמן קשר שלילי אך לא מובהק עם מספרי התאונות, ללא שיפור בגודל השונות המוסברת ע"י המודל בעקבות הוספת משתני האירועים.

מכאן, בדרך ממוחלפת, תוספת מידע על אירועים מסוג "מהירות" או סך האירועים משפרת את ניבוי התאונות עם נפגעים, כאשר עבור כלל התאונות תוספת מידע על אירועים אינה תורמת לניבוי התאונות.

ד. סיכום לממצאי המודלים

לסיכום, בעקבות התאמת המודלים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית והתאונות, בתוספת משתני האירועים, והשוואתם עם המודלים הבסיסיים (ללא משתני האירועים) התקבלו ממצאים כלהלן:

- בכל סוג דרך ובשני סוגי התאונות הוספת משתני האירועים לא שינתה מהותית את צורת הקשר בין מאפייני התשתית והתאונות, כאשר בכל המודלים נשמר הן הרכב והן כיוון הקשר בין מאפייני התשתית והתאונות שנמצא בטרם הוספת האירועים. עם זאת, הוספת משתני האירועים השפיע על ערכי המקדמים של משתני התשתית במודלים לניבוי התאונות.

- בדרך חד-מסלולית, אף אחד מסוגי האירועים לא נמצא מובהק במודלים לניבוי התאונות.

- בדרך דו-מסלולית, הוספת אירועים מסוג "בלימה" שיפרה את ניבוי התאונות עם נפגעים. כמו כן, הוספת אירועים מסוג "מהירות" שיפרה ניבוי של תאונות עם נפגעים ושל כלל התאונות. עבור אירועי "בלימה" נמצא קשר **חיובי ומובהק** עם מספרי התאונות; עבור אירועי "מהירות" נמצא קשר **שלילי ומובהק** עם מספרי התאונות.

- בדרך ממוחלפת, הוספת אירועי "מהירות" או סך האירועים שיפרה את ניבוי התאונות עם נפגעים, כאשר עבור כלל התאונות תוספת מידע על אירועים לא תרמה לניבוי התאונות. הן עבור אירועי "מהירות" והן עבור סך האירועים נמצא קשר **שלילי ומובהק** עם מספרי התאונות.

מכאן, חשיבות האירועים בנהיגה לניבוי התרחשות התאונות, נמצאה בדרך דו-מסלולית וממוחלפת ולא נמצאה בדרך חד-מסלולית.

5. סיכום ומסקנות המחקר

5.1. כללי - נושא ומהלך המחקר

א. נושא המחקר

בשנים האחרונות חלה התקדמות ניכרת בתחומי מחקר אשר עוסק בתיעוד וניתוח של התנהגויות הנהגים בזמן הנהיגה היומיומית, ומוכר בשם "נהיגה טבעית" (Naturalistic driving). איסוף הנתונים מבוצע בעזרת כלי רכב המצוידים במכשירים שונים אשר רושמים, ללא הפרעה, את תמרוני הרכב, התנהגות הנהג ולעתים, תנאים חיצוניים כמו מאפייני הכביש, תנועה, מזג אוויר וכו'.

המטרה העיקרית של מחקרי הנהיגה הטבעית הינה לתעד אירועים בדרגות שונות: אירועים בנהיגה, מצבי כמעט תאונה ותאונות. מניחים כי צפייה בהתנהגות משתמשי הדרך בהקשר התנועה היומיומית תספק תיאור של התנהגות הנהגים במצבים רגילים, במצבים קריטיים ואפילו בזמן תאונה, דבר שיאפשר הבנה טובה יותר וטיפול נכון יותר בבעיות הבטיחות בדרכים.

בישראל, לאורך מספר שנים, בוצע איסוף נתוני "נהיגה טבעית" בעזרת "קופסא ירוקה" - מערכת ניטור בזמן אמת שמותקנת במדגם כלי רכב. פרויקט זה מובל ע"י עמותת "אור ירוק". בנתונים שנאספו בעזרת "הקופסא הירוקה" קיים ניטור רציף בזמן הנסיעה הכולל נתונים על מיקום כלי הרכב, מהירות הנסיעה, התאוצות והבלימות של הרכב. המערכת אוספת נתונים באמצעות חיישנים ממערכות הרכב השונות כגון: היגוי, בלימה, ספידומטר, גז וצריכת דלק, ובעזרת עיבוד נתוני החיישנים, מזהה ומתעד את תמרוני הנהיגה. במחקרים הקודמים בארץ הוגדרו תנאים לזיהוי אירועים בנהיגה, על סמך נתוני המערכת. לאורך זמן, הצטבר מאגר מידע גדול על מיקום אירועי הנהיגה המתרחשים על רשת הדרכים.

במקביל, בשנים האחרונות, בחברה הלאומית לתשתיות תחבורה הוקמה מערכת ניהול בטיחות (מנ"ב) ובוצע סקר דרכים מפורט בו תועדו מאפייני תשתית של הדרכים הלא עירוניות.

מכאן, נולד הרעיון של המחקר הנוכחי שהינו מחקר גישוש לבחינת מערכת הקשרים בין התרחשות האירועים בנהיגה לבין מאפייני התשתיות. המחקר מתבסס על הצלבת שני בסיסי נתונים קיימים: אירועי הנהיגה שהתקבלו על סמך נתוני "הקופסא הירוקה", ומאפייני התשתיות באתרי התרחשות האירועים שניתנים להפקה על סמך מאגר הנתונים של מערכת המנ"ב.

הונח כי באמצעות בחינה משולבת זו יהיה ניתן לזהות קשרים בין התנהגויות הנהגים (הבאים לידי ביטוי באירועי הנהיגה) לבין מאפייני התשתית, כאשר ממצאי הניתוח עשויים לתרום להבנה מעמיקה יותר של האינטראקציות שבין מאפייני התשתיות והתנהגות הנהגים. כמו כן, הבנת קשרים אלה עשויה לתרום לזיהוי מוקדם של אתרים בעלי סיכון גבוה ברשת הדרכים, ע"פ ריכוזי האירועים בנהיגה ובטורם הצטברות התאונות.

ב. שיטת המחקר

בביצוע המחקר היו שלושה מרכיבים: סקר ספרות בינלאומית; הכנת בסיס הנתונים למחקר; ביצוע ניתוחים רבים, חד-ורב-פרמטריים, על בסיס הנתונים של המחקר.

(1) סקר הספרות הבינלאומית הציג רקע למחקרי "הנהיגה הטבעית", כולל סקירת ההתפתחויות בעולם ותיאור פוטנציאל נתוני הנהיגה הטבעית לצורכי שיפור הבטיחות. כמו כן, הוצגו דוגמאות לזיהוי אירועים חריגים בנהיגה, בחינת הקשר בין אירועי הנהיגה ואירועי התאונות, שיטות עיבוד של נתוני הנהיגה הטבעית ועוד. מאידך, הוצג תיאור של מערכת "הקופסא הירוקה" שמשמשת לאיסוף נתוני הנהיגה הטבעית בישראל, וכן, דוגמאות לעיבודים ושימושים בנתוני "הקופסא הירוקה" במחקרים הקודמים בארץ, בהם נתוני המערכת שימשו בעיקר לאפיין דפוסי נהיגה שונים ולבחינת השפעת המערכת על נהיגת נהגים צעירים ואחרים.

כמו כן, הובא ריכוז ממצאים, מהמקורות השונים, לגבי המאפיינים הגיאומטריים ואחרים של הדרכים הלא עירוניות שמשפיעים יותר על התרחשות התאונות. המאפיינים הגיאומטריים שנסקרו פוצלו לפי סוגי דרך בין-עירונית: דו-מסלולית ממוחלפת, דו-מסלולית עם צמתים, חד-מסלולית ובהמשך, לפי קטע דרך וצומת (מחלף, צומת מרומזר וצומת לא מרומזר). טבלה 1.1 בסוף פרק 1 מציגה רשימה מסכמת של מאפייני התשתית המשפיעים יותר על התרחשות התאונות, לפי סוגי אתרים.

(2) בהכנת בסיס הנתונים למחקר היו שני חלקים: (א) מיפוי נתונים על אירועי הנהיגה (על סמך נתוני "הקופסא הירוקה") על רשת הכבישים ו-(ב) הכנת בסיס הנתונים המשולב למחקר, לרבות אירועי הנהיגה, מאפייני התשתית, מדדי החשיפה ומספרי התאונות.

בשל היקף משמעותי ומורכבות של נתוני הנהיגה (מתוך "הקופסא הירוקה") וכן, השקעה ניכרת של משאבים אשר נדרשת להצבת נתונים אלה על גבי מפות הכבישים, כאשר מראש לא ידוע מהן תדירויות הנסיעה של כלי הרכב עם "הקופסא הירוקה" בכבישים השונים בארץ, להכנת בסיס הנתונים למחקר נבחרו מספר כבישים מייצגים: מס' 4, 65, 70, 1, 2, 40, 44, 444, 90 (9 כבישים). הכבישים המייצגים נבחרו, מחד, מבין הכבישים המובילים ברשת הלא עירונית, ומאידך, מתוך הנחה על סבירות גבוהה של שימוש בכבישים אלה ע"י האנשים שהיו מעורבים במחקר "הקופסא הירוקה", לצורכי הנסיעות השגרתיות שלהם ו/או נסיעות פנאי ותיירות. הכבישים שנבחרו כללו את הכבישים העיקריים באזור המרכז, בתוספת מספר כבישים טיפוסיים אשר משמשים לנסיעות לאזורי תיירות מובהקים בצפון ובדרום הארץ, והם מהווים שילוב של סוגי דרך שונים.

גבולות הכבישים שנבחרו למחקר היו כלהלן:

כביש מס'	ק"מ התחלה	ק"מ סוף
1	0	95.7
2	0	99.2
40	0	301.5
44	0	39.97
90	2.8	471
444	4	42.8
4	55.1	249.9
65	0	90.2
70	10	85.4

בעקבות הניתוח הגיאוגרפי של נתוני "הקופסא הירוקה", הצלבתם עם נתוני הלמ"ס והצבתם על גבי המפה הדיגיטלית, נוצר החלק הראשון של בסיס הנתונים בו, לכל יחידת ניתוח, קיים מידע על מספר הנסיעות בה, מספר הנהגים שעברו בקטע ומספר כלי הרכב שנסעו בו, בשנת 2010, וכמו כן, על מספר אירועים בנהיגה מהסוגים המוגדרים שנרשמו בקטע כביש זה, במהלך השנה. לצורכי

המחקר, הכבישים חולקו ליחידות ניתוח - קטעים באורך כ-200 מ'. כל יחידת ניתוח מוגדרת לפי: מס' דרך, כיוון נסיעה, ק"מ התחלה וק"מ סיום.

לכל יחידת ניתוח, נקבעו מאפייני התשתית על סמך נתוני מערכת המנ"ב. מאפיינים אלה הם: סוג דרך, נפח תנועה, מאפייני חתך הדרך - רוחב נתיב, רוחב שול ימני, רוחב שול שמאלי (בדרך דו-מסלולית או ממוחלפת); רדיוס אופקי, מצב הגבהה צידית (בהינתן רדיוס אופקי), שיפוע לאורך וכמו כן, מספר מאפיינים המשקפים את השתנות מאפייני התשתית לאורך הקטע שהם: קרבת צומת/מחלף בהתקרבות ובהתרחקות, מרחק בין הצמתים הראשיים בקטע אליו שייכת יחידת הניתוח, שינוי במספר הנתיבים ביחס לקטע הקודם, שינוי ברוחב הנתיבים ביחס לקטע הקודם. כל מאפייני התשתית הם משתנים קטגוריים.

לאחר מיזוג של מאפייני התשתית, המסלולים והאירועים נמצאו יחידות ניתוח ללא נסיעות. משמעות הדבר שאוכלוסיית כלי הרכב עם "הקופסא הירוקה" לא נסעה בקטעי כביש אלה (החשיפה שווה לאפס). לכן, יחידות ניתוח כאלה הורדו מבסיס הנתונים. בנוסף, הונח כי בחינת האינטראקציה בין מאפייני התשתית לבין אירועים בנהיגה צריכה להתבסס על קטעי כביש עם היקף מסוים של נסיעות הנהגים. לכן, בבסיס הנתונים למחקר נותרו רק קטעי כביש כאלה בהם היו מעל 5 נסיעות של כלי הרכב (עם "הקופסא הירוקה"), בשנה, וכמו כן, בהם, במהלך השנה, עברו 3 או יותר כלי רכב שונים.

בסיס הנתונים שנבנה במחקר כלל כ-3500 יחידות ניתוח, כאשר לכל יחידה מוגדרים, מחד, מאפייני האירועים בנהיגה, לרבות רמת החשיפה לאירועים - היקף נסיעות, ומאידך, מאפייני תשתיות הדרכים. הן אירועי הנהיגה והן מאפייני התשתיות שייכים לשנת 2010. בנוסף, לכל יחידת ניתוח רוכזו מספרי תאונות דרכים, בשנים 2008-2010. טבלה 2.3 בסוף פרק 2 מציגה מבנה של בסיס הנתונים המשולב שנבנה במחקר, עם הגדרת יחידות הניתוח, מאפייני התשתיות, אירועי הנהיגה, מדדי החשיפה ומספרי התאונות.

מבחינת שכיחות אירועי הנהיגה עלה כי מספר ניכר הצטבר עבור שני סוגי אירועים בלבד שהם: סוג 1 - "בלימה" וסוג 19 - "התראה על מהירות". מכאן, ניתוח מערכת הקשרים בין אירועי הנהיגה ומאפייני התשתית וכן, בין אירועי הנהיגה והתאונות התמקד בשלושה סוגי אירועים: **סוג 1, סוג 19 וסך האירועים**. אירועי הנהיגה מכל הסוגים נצפו סה"כ ב-30.2% מיחידות הניתוח. להלן משמעויות האירועים שנבחרו לניתוח:

סוג 1 - "בלימה" (Braking) מתייחס לבלימות בנסיעה בקטע ישר, ללא סיבוב הגה, כאשר עבור בלימות במצבים אחרים (בעת פניות, עם סיבוב הגה) קיים רישום של אירועים אחרים;

סוג 19 - "התראה על מהירות" (Speed alert) מתייחס לנסיעה מעל 120 קמ"ש - סף אחיד בכל סוגי הכבישים. יש לצפות ליותר אירועים מסוג זה בכבישים ברמה גבוהה יותר, בקטעים ישרים.

לגבי ייצוג הנהגים עם "הקופסא הירוקה" בכבישים שנבחרו למחקר יצוין כי המחקר התמקד בקבוצת ביקורת הכוללת 64 כלי רכב מתוך הצי של 200 כלי הרכב עם המכשיר, כאשר ב-9 הכבישים אשר נבחנו במחקר נכללו 62 כלי רכב (מתוך 64). כלומר, מקבץ הכבישים שנבחר למחקר הינו מייצג ומקיף עבור אוכלוסיית הנהגים שנבחרה למחקר (קבוצת הביקורת).

מפות עם קטעי הכבישים שנכנסו לניתוח במחקר הראו כי קטעי המחקר מספקים כיסוי רחב של הכבישים הנבחים. בנוסף, מבחינת התפלגויות של יחידות הניתוח, בכל כביש, לפי מספר המעברים - תדירויות נסיעה של כלי הרכב עם "הקופסא הירוקה", עלה כי ברוב הכבישים שנבחרו למחקר היה היקף ניכר של נסיעות כלי הרכב עם "הקופסא הירוקה".

(3) על בסיס הנתונים שנבנה למחקר נערך מגוון ניתוחים חד-ורב-פרמטריים לזיהוי מערכת הקשרים בין התרחשות האירועים בנהיגה לבין מאפייני התשתיות. בהמשך, על סמך אותם יחידות הניתוח, נבחן הקשר בין מאפייני התשתית לבין התרחשות התאונות, תוך כדי התחשבות ברמת החשיפה, וכמו כן, תוך כדי התחשבות בהתרחשות האירועים בנהיגה.

המחקר בחן את הקשר המשולש בין "תאונות-מאפייני תשתית-אירועים בנהיגה". הנחת היסוד בבחינה זאת הינה שאירועים בנהיגה הם משתנה מתווך בין מאפייני תשתיות ותאונות. כאשר נמצא קשר בין מאפייני תשתית ותאונות, הוספת משתני האירועים אמורה לתרום לשיפור מערכת קשרים זו. במידה ובמודל לקשר בין התשתיות והתאונות מתקבלת תרומת האירועים לחיזוי התאונות, זוהי הוכחה לחשיבות האירועים ולאפשרות השימוש במספרי האירועים לניבוי התאונות, בתנאי דרך שונים.

הניתוחים המקדימים שנערכו על בסיס הנתונים של המחקר בחנו את מערכת הקשרים בין התרחשות האירועים בנהיגה לבין מדדי החשיפה ומאפייני התשתיות, וכמו כן, את הקשר בין תאונות הדרכים לבין האירועים בנהיגה, בהינתן חשיפה. ממצאים עיקריים מניתוחים אלה מובאים בפרקים 5.2-5.3.

בהמשך, פותחו מודלים רב-משתנים: (א) לביטוי הקשר בין האירועים בנהיגה לבין מאפייני התשתית, בהינתן חשיפה; (ב) לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית והתרחשות התאונות וכמו כן, המודלים בהם נבחן הקשר בין מאפייני התשתית לבין התרחשות התאונות, תוך כדי הוספת משתני האירועים בנהיגה. ממצאים עיקריים מניתוחים אלה מובאים בפרקים 5.4-5.5.

5.2. ממצאים מבדיקת הקשר בין כל אחד ממאפייני התשתית לבין התרחשות האירועים

טבלה 5.1 מסכמת את ממצאי המודלים שפותחו במחקר לבדיקת הקשר בין כל אחד ממאפייני התשתית לבין התרחשות האירועים, בנוכחות חשיפה (מספר מעברים בקטע של כלי הרכב עם "הקופסא הירוקה"). ממצאי המודלים מוצגים עבור כל אחד משלושת סוגי האירועים: סוג 1, סוג 19 וסך האירועים.

מטבלה 5.1 ניתן לראות שלרוב מאפייני התשתית שנבדקו נמצאה השפעה מובהקת על אירועי הנהיגה. חלק ניכר ממאפייני התשתית הדגימו השפעה הפוכה על אירועי ה"בלימה" לעומת אירועי "המהירות", כאשר שוני זה נראה הגיוני עקב טיב אירועים "הפוך". בין היתר:

- שכיחות אירועי הנהיגה מסוג "בלימה" עולה כאשר הנהג נמצא בקרבת צומת, בהתקרבות אל או בהתרחקות ממנו, כאשר יש שינוי ברוחב המיסעה, כאשר שול ימין לא תקין (בינוני או צר), כאשר הנסיעה מתרחשת בדרך דו-מסלולית (לעומת חד-מסלולית) וכאשר קטע הדרך נמצא ברדיוס אופקי בינוני או גדול לעומת רדיוס קטן (אם כן, הממצא האחרון מעורר תהייה). לעומת זאת, שכיחות אירועי הנהיגה מסוג "בלימה" יורדת בדרך ממוחלפת (לעומת חד-מסלולית), כאשר

הנסיעה מתרחשת בקטע בינוני-ארוך (לעומת קצר), כאשר בקטע יש שול שמאלי בינוני או רחב (לעומת דרך חד-מסלולית ללא שול שמאלי) או כאשר בקטע יש שיפוע לאורך (אם כי, הממצא האחרון נראה לא הגיוני). כלומר, **קרבת צומת או מגבלות גיאומטריות**, לרוב, גורמות להגברת **אירועי ה"בלימה"**, בעוד שנסיעה בתנאי דרך טובים יותר ובקטעים ארוכים יותר, ללא הפרעות, מזוהה עם ירידה בבלימות.

טבלה 5.1. סיכום לממצאי המודלים - הקשר בין כל אחד ממאפייני התשתית לבין התרחשות האירועים, בנוכחות חשיפה[#]

Table 5.1. Summary of models' findings: the relations between each infrastructure characteristic and driving events, accounting for exposure

מאפיין תשתית נבחן	אירועים מסוג 1 ("בלימה")	אירועים מסוג 19 ("מהירות")	סך האירועים
א. קרוב לצומת בהתקרבות	קרבת צומת ונוכחות צומת בתוך קטע מזוהות עם עליה באירועים	קרבת צומת ונוכחות צומת בתוך קטע מזוהות עם ירידה באירועים	השפעה לא עקבית: קרבת צומת מזוהה עם ירידה באירועים, נוכחות צומת בתוך קטע - עם עליה באירועים
ב. קרוב לצומת בהתרחקות	קרבת צומת ונוכחות צומת בתוך קטע מזוהות עם עליה באירועים	קרבת צומת ונוכחות צומת בתוך קטע מזוהות עם ירידה באירועים	השפעה לא עקבית: קרבת צומת מזוהה עם ירידה באירועים, נוכחות צומת בתוך קטע - עם עליה באירועים
ג. מרחק בין צמתים	קטע בינוני-ארוך מזוהה עם ירידה באירועים, נוכחות צומת בתוך קטע - עם עליה באירועים	קטע בינוני-ארוך מזוהה עם עליה באירועים, נוכחות צומת בתוך קטע - עם ירידה באירועים	קטע בינוני-ארוך ונוכחות צומת בתוך קטע מזוהים עם עליה באירועים
ד. שינוי במספר נתיבים בין יחידות ניתוח עוקבות	--	--	--
ה. שינוי ברוחב הנתיבים בין יחידות ניתוח עוקבות	שינוי ברוחב הנתיבים ניתוח עוקבות מגביר את מספר האירועים	שינוי ברוחב הנתיבים ביחידות ניתוח עוקבות מקטין את מספר האירועים	--
ו. רוחב שול ימין	שול בינוני או צר מזוהה עם עליה באירועים, לעומת שול רחב	שול בינוני או צר מזוהה עם ירידה באירועים, לעומת שול רחב	שול בינוני או צר מזוהה עם ירידה באירועים, לעומת שול רחב * רחב
ז. סוג דרך	דרך דו-מסלולית מזוהה עם עליה באירועים ודרך ממוחלפת - עם ירידה באירועים, לעומת דרך חד-מסלולית	דרך דו-מסלולית או ממוחלפת מזוהה עם עליה באירועים	דרך דו-מסלולית או ממוחלפת מזוהה עם עליה באירועים *
ח. רוחב שול שמאל	שול רחב או בינוני בדרך דו-מסלולית/ממוחלפת מזוהה עם ירידה באירועים, לעומת דרך חד-מסלולית	נוכחות שול שמאלי מזוהה עם עליה באירועים, בדרך דו-מסלולית או ממוחלפת, לעומת דרך חד-מסלולית	נוכחות שול שמאלי מזוהה עם עליה באירועים, בדרך דו-מסלולית או ממוחלפת, לעומת דרך חד-מסלולית *
ט. רוחב נתיב	--	נתיב צר לעומת תקין מזוהה עם ירידה באירועים	נתיב צר לעומת תקין מזוהה עם ירידה באירועים *
י. רדיוס אופקי	רדיוס אופקי בינוני או גדול מזוהה עם עליה באירועים, לעומת הרדיוס הקטן *	רדיוס אופקי בינוני או גדול מזוהה עם עליה באירועים, לעומת הרדיוס הקטן	רדיוס אופקי בינוני או גדול מזוהה עם עליה באירועים, לעומת הרדיוס הקטן *
יא. הגבהה צידית	--	הגבהה לקויה ברדיוס בינוני מזוהה עם ירידה באירועים לעומת רדיוס גדול	הגבהה לקויה ברדיוס בינוני מזוהה עם ירידה באירועים לעומת רדיוס גדול; הגבהה לקויה מזוהה עם פחות אירועים לעומת הגבהה תקינה *
יב. שיפוע לאורך	רוב הערכים של שיפוע לאורך מזוהים עם ירידה באירועים, לעומת המצב ללא שיפוע *	רוב הערכים של שיפוע לאורך מזוהים עם ירידה באירועים, לעומת המצב ללא שיפוע	רוב הערכים של שיפוע לאורך מזוהים עם ירידה באירועים, לעומת המצב ללא שיפוע *

[#] בכל המקרים המפורטים בטבלה נמצאה השפעה מובהקת של מאפיין התשתית, בנוכחות חשיפה ($p < 0.05$). במקרים המסומנים ב"--" השפעת המאפיין, בנוכחות חשיפה, לא הייתה מובהקת.

* השפעה מנוגדת, לכאורה, להיגיון ההנדסי

- להבדיל מהמקרה הקודם, שכיחות אירועי הנהיגה מסוג "מהירות" עולה בדרך דו-מסלולית או ממוחלפת (לעומת חד-מסלולית), כאשר הנסיעה מתרחשת בקטע בינוני-ארוך (לעומת קצר), וכאשר קטע הדרך נמצא ברדיוס אופקי בינוני או גדול (לעומת רדיוס קטן). לעומת זאת, שכיחות אירועי הנהיגה מסוג "מהירות" יורדת כאשר הנהג נמצא בקרבת צומת, בהתקרבות אל או בהתרחקות ממנו, כאשר יש שינוי ברוחב המיסעה, כאשר שול ימין לא תקין (בינוני או צר), כאשר נתיב הנסיעה לא תקין (צר), כאשר ברדיוס בינוני יש הגבהה צידית לקויה או כאשר בקטע יש שיפוע לאורך. כלומר, **קרבת צומת או מגבלות גיאומטריות גורמות למיתון באירועי "מהירות"**, בעוד שנסיעה בתנאי דרך טובים יותר ובקטעים ארוכים יותר, ללא הפרעות, מזוהה עם עליה באירועי מהירות.

- על סך אירועי הנהיגה, השפעת קרבה או נוכחות צומת לא הייתה עקבית, כאשר קרבת צומת מזוהה עם ירידה באירועים, בעוד שנוכחות צומת בתוך קטע מזוהה עם עליה באירועים. בנוסף, שכיחות סך האירועים בנהיגה עולה כאשר הנסיעה מתרחשת בקטע ארוך יותר, כאשר נוסעים בדרך דו-מסלולית או ממוחלפת (לעומת חד-מסלולית) וכאשר קטע הדרך נמצא ברדיוס אופקי בינוני או גדול (לעומת רדיוס קטן). מאידך, שכיחות סך האירועים בנהיגה יורדת כאשר שול ימין לא תקין (בינוני או צר), כאשר נתיב הנסיעה לא תקין (צר), כאשר בעקום נמצאה הגבהה צידית לקויה או כאשר בקטע יש שיפוע לאורך. כלומר, בדומה לאירועי "מהירות", **קרבת צומת או מגבלות גיאומטריות גורמות למיתון בסך האירועים**, בעוד שנסיעה בתנאי דרך טובים יותר ובקטעים ארוכים יותר, ללא הפרעות, מזוהה עם עליה בסך האירועים.

ניתן להבחין שלרוב, אופן השפעה של מאפייני התשתית על אירועי הנהיגה מסוג "בלימה" ו-"התראה על מהירות" **מסתדר עם ההיגיון ההנדסי**, אם נזכר במשמעות אירועים אלה: סוג 1 - בלימה בקטע ישר (ללא סיבוב הגה), סוג 19 - מהירות גבוהה (מעל 120 קמ"ש). עם זאת, עבור אירועי ה"בלימה", נמצאו שני מאפייני תשתית עם השפעה מנוגדת, לכאורה, להיגיון ההנדסי שהם: (א) רדיוס אופקי בינוני או גדול אשר, ע"פ הממצאים, מזוהה עם עליה באירועים אלה לעומת הרדיוס הקטן; (ב) נוכחות שיפוע לאורך, כאשר רוב הקטגוריות של שיפוע לאורך מזוהים עם ירידה באירועי ה"בלימה", לעומת המצב ללא שיפוע. מאידך, עבור אירועי "המהירות", אופן השפעה של כל מאפייני התשתית היה בהתאם למצופה ע"פ ההיגיון ההנדסי.

לגבי סך האירועים בנהיגה, השפעת המאפיינים הגיאומטריים שנמצאה בטבלה 5.1, לכאורה, הייתה מנוגדת לצפייה ההנדסית, לפיה, הרעה בתנאי הדרך (הצרת החתך לרוחב, רדיוס אופקי קטן יותר, נוכחות שיפוע לאורך) הייתה אמורה להביא לריבוי האירועים, בעוד ששיפור בתנאי הדרך (סוג דרך גבוה יותר, חתך רחב, קטע ישר ומישורי) היה אמור להביא לירידה באירועים. צפייה זו נובעת מהנחה שאירועי הנהיגה אמורים להצביע על הופעת מצבים מסוכנים (מצבי "כמעט תאונה" או טרום "כמעט תאונה"). אולם, הקשרים שנמצאו בין סך אירועי הנהיגה ומאפייני התשתית הצביעו על דמיון ניכר בהשפעת המאפיינים הגיאומטריים על אירועי המהירות ועל סך האירועים, כאשר **תנאי דרך טובים יותר** (המאפשרים מהירויות נסיעה גבוהות יותר) **מזוהים עם עליה בסך האירועים**.

5.3. ממצאים מבחינת הקשר בין אירועים בנהיגה ותאונות הדרכים

הבחינה המקדימה של הקשר בין אירועים ותאונות, נערכה תוך כדי התחשבות ברמת החשיפה (מספר מעברים בקטע) וסוג דרך: חד-מסלולית, דו-מסלולית או ממוחלפת. טבלה 5.2 מסכמת את ממצאי המודלים שהותאמו בשלב זה, כאשר עבור כל סוג תאונות וכל סוג אירועים, בסוג דרך מסוים, מובא הרכיב הליניארי המבטא את הקשר בין אירועים לתאונות. קשרים אלה הם בנוכחות חשיפה, ולכן הם מבטאים את תרומת מספר האירועים לתאונות, מעבר לחשיפה. הקשר המוצג הינו בין לוג מספר האירועים ללוג מספר התאונות. ניתן לראות כי:

- בחלק ניכר מהמקרים נמצא קשר מובהק בין אירועים לתאונות, דהיינו קיימת השפעה של מספרי האירועים על מספרי התאונות, מעבר להשפעת החשיפה, כאשר צורת הקשר **שונה בסוגי דרך שונים**.

- **בדרכים החד-מסלוליות**, נמצא קשר חיובי מובהק בין אירועים מסוג "בלימה" לבין מספרי התאונות, מכל הסוגים. כמו כן, בין מספרי האירועים מסוג "מהירות" לבין מספרי התאונות נמצא קשר שלילי מובהק עבור התאונות עם נפגעים, כאשר בין סך האירועים לבין מספרי התאונות נמצא קשר חיובי מובהק עבור רוב סוגי התאונות. בסוג דרך זה, עוצמת הקשר בין אירועים ותאונות הייתה ניכרת בכל המקרים (מקדמי הקשר גדולים). מכאן, בדרכים החד-מסלוליות, מספרי האירועים בנהיגה, מהסוגים השונים, עשויים להתאים לניבוי מספרי התאונות, כאשר יכולת ניבוי חזקה יותר מיוחסת **לאירועי "בלימה" וסך האירועים** (אשר בקשר חיובי עם תאונות).

- **בדרכים הדו-מסלוליות**, נמצא קשר חיובי מובהק בין מספרי האירועים מסוג "בלימה" לבין מספרי התאונות, עבור התאונות עם נפגעים. כמו כן, בין מספרי האירועים מסוג "מהירות" לבין מספרי התאונות נמצא קשר שלילי מובהק עבור כל סוגי התאונות, כאשר בשני המקרים עוצמת הקשר בין אירועים ותאונות הייתה ניכרת. לעומת זאת, עבור הקשר בין סך האירועים למספרי התאונות לא נתקבלו תוצאות עקביות: עבור התאונות עם נפגעים נמצא קשר חיובי מובהק, אם כי חלש יותר לעומת המקרים הקודמים עם סוגי אירועים מוגדרים (1 או 19), כאשר עבור התאונות "כללי עם נפגעים" התקבל קשר שלילי מובהק (וחלש יחסית למקרים הקודמים). מכאן, בדרכים הדו-מסלוליות, לניבוי מספרי התאונות מכל הסוגים מתאימים יותר **אירועים מסוג "מהירות"** (עם קשר שלילי לתאונות), כאשר עבור התאונות עם נפגעים ניתן להיעזר גם באירועים **מסוג "בלימה"** (עם קשר חיובי לתאונות). בסוג דרך זה, יכולת הניבוי של סך האירועים פחותה.

- **בדרכים הממוחלפות**, לא נמצא קשר מובהק בין מספרי האירועים מסוג "בלימה" לבין מספרי התאונות, כאשר עבור כל סוגי התאונות הסתמן קשר שלילי חלש. בין מספרי האירועים מסוג "מהירות" לבין מספרי התאונות נמצא קשר שלילי מובהק (וניכר) עבור כל סוגי התאונות, אולם רק עבור המצב כאשר מספר האירועים קטן: $e \leq 1$; כאשר מספר אירועי המהירות עולה ($e > 1$), מסתמן קשר חיובי בין אירועים ותאונות אשר נמצא מובהק כאשר הבחינה כוללת בתוכה גם תאונות "כללי עם נפגעים". בין סך האירועים למספרי התאונות נמצא קשר שלילי מובהק (וניכר) עבור כל סוגי התאונות, אולם רק במצב כאשר מספר האירועים קטן: $e \leq 2$ או $e \leq 1$; כאשר מספר האירועים גבוה יותר הקשר מפסיק להיות מובהק וגם מצביע על כיווני השפעה שונים: קשר שלילי עבור התאונות עם נפגעים וקשר חיובי כאשר בוחנים גם את התאונות "כללי עם נפגעים".

לסיכום, בדרכים הממוחלפות, לניבוי מספרי התאונות מהסוגים השונים מתאימים בעיקר **אירועים מסוג "מהירות"**, אשר מצביעים על ירידה בתאונות במספר אירועים קטן ועל עליה בתאונות כאשר מספר אירועי המהירות עולה יותר. יצוין כי הממצא האחרון דווקא תואם את ממצאי הספרות הקיימת בנושא השפעת מהירויות, בה נטען שמהירויות נסיעה גבוהות קשורות לעליה בסיכון לתאונות.

טבלה 5.2. תוצאות המודלים לקשר בין אירועים לתאונות, בסוגי דרך שונים, בנוכחות חשיפה: מקדמי הקשר בין אירועים לתאונות ורמת המובהקות שלהם

Table 5.2. Results of models for a relationship between driving events and accidents, on different road types, accounting for exposure: estimates of relation coefficients between events and accidents, and their confidence level

סוגי תאונות				סוג דרך	סוגי אירועים
כלל התאונות	תאונות "כללי עם נפגעים"	תאונות עם נפגעים ללא הולכי רגל	תאונות עם נפגעים		
#0.791	#0.838	#0.660	#0.758	חד-מסלולית	סוג 1 ("בלימה")
0.033	e≤1 עבור -0.015 (1) e>1 עבור -0.337 (2)	#0.425	#0.449	דו-מסלולית	
-0.059	-0.050	-0.114	-0.037	ממוחלפת	סוג 19 ("מהירות")
-0.375	-0.242	**0.819	*0.664	חד-מסלולית	
#-0.660	#-0.652	#-0.697	#-0.733	דו-מסלולית	
e≤1 עבור -0.763 (1) **e>1 עבור 0.831 (2)	e≤1 עבור -0.805 (1) **e>1 עבור 0.969 (2)	e≤1 עבור -0.678 (1) e>1 עבור 0.434 (2)	e≤1 עבור -0.679 (1) e>1 עבור 0.502 (2)	ממוחלפת	סך האירועים
e≤1 עבור 1.495 (1) e>1 עבור -0.345 (2)	#1.535	#0.744	#0.905	חד-מסלולית	
-0.054	**0.101	#0.147	#0.158	דו-מסלולית	
e≤1 עבור -0.569 (1) e>1 עבור 0.307 (2)	e≤1 עבור -0.598 (1) e>1 עבור 0.391 (2)	e≤2 עבור -0.403 (1) e>2 עבור -0.105 (2)	e≤2 עבור -0.399 (1) e>2 עבור -0.132 (2)	ממוחלפת	

מובהק עם p<0.001 # מובהק עם p<0.01 ** מובהק עם p<0.05 * מובהק עם p<0.1
יתר המקדמים לא מובהקים. e - מספר אירועים בנהיגה

5.4. ממצאים מפתוח מודלים לביטוי הקשר בין אירועים בנהיגה לבין מאפייני

התשתית

לבחינה מעמיקה של הקשר בין מאפייני התשתית לבין האירועים בנהיגה פותחו מודלים רב-פרמטריים. טבלה 5.3 מסכמת את ממצאי המודלים, עבור סוגי אירועים שונים. ניתן להבחין כי:

- בין מאפייני התשתית שנשארו בין המשתנים המסבירים להתרחשות האירועים בנהיגה מובילים המאפיינים של קרבת צומת, אורך הקטעים (מרחק בין צמתים עיקריים), סוג דרך, רוחב שול שמאלי, רוחב שול ימני, כאשר עבור סך האירועים הופיעו גם רוחב נתיב ושיפוע לאורך.

- מאפייני התשתית כגון: סוג דרך, קרבת צומת, אורך קטע (מרחק בין צמתים עיקריים) - משפיעים בצורה הפוכה על אירועי "מהירות" לעומת "בלימה".

- סוגי מאפייני תשתית משפיעים ואופן השפעתם על סך האירועים דומים להשפעת מאפייני התשתית על אירועי "מהירות", כאשר בניבוי סך האירועים מעורבים גם מאפייני תשתית נוספים.

טבלה 5.3. סיכום לממצאי המודלים הרב-פרמטריים לקשר בין מאפייני התשתית לבין התרחשות האירועים בנהיגה

Table 5.3. Summary of multivariate models for a relationship between infrastructure characteristics and driving events

סוג אירועים	מאפייני תשתית שמזוהים עם עליה באירועים	מאפייני תשתית שמזוהים עם ירידה באירועים
אירועים מסוג 1 ("בלימה")	- יחידת ניתוח בקרבת צומת או בתחום הצומת לעומת קטע דרך מרוחק מהצומת - דרך דו-מסלולית לעומת חד-מסלולית, בנוכחות שול שמאלי בינוני לעומת רחב	- קטע בינוני או ארוך לעומת קצר - דרך דו-מסלולית, בנוכחות שול שמאלי בינוני לעומת רחב
אירועים מסוג 19 ("מהירות")	- קטע בינוני או ארוך לעומת קצר - דרך דו-מסלולית או ממוחלפת לעומת חד-מסלולית	- יחידת ניתוח בקרבת צומת או בתחום הצומת לעומת קטע דרך מרוחק מהצומת - כאשר יש שול ימני צר
סך האירועים	- קטע בינוני או ארוך - כאשר רוחב שול ימני בינוני - דרך דו-מסלולית או ממוחלפת - הצפי גבוה יותר בקטעים עם שיפוע בירידה לעומת שיפוע בעליה - הצפי גבוה במיוחד כאשר יש שיפוע בינוני בירידה בדרך דו-מסלולית	- בקרבת צומת בהתקרבות או בהתרחקות - כאשר שול ימני צר - כאשר רוחב נתיב צר או צר מאוד

5.5. ממצאים מפיתוח מודלים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית והתאונות,

בתוספת משתני אירועים

לבחינה מעמיקה של מערכת הקשרים בין אירועים לתאונות, בתנאי דרך שונים, פותחו מודלים רב-פרמטריים. המודלים פותחו בשני שלבים: בשלב הראשון, פותחו מודלים בסיסיים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית והתרחשות התאונות; בשלב השני, המודלים הרב-פרמטריים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית והתאונות פותחו עם הוספת משתני האירועים. בעקבות השוואה בין המודלים שהתקבלו בשני השלבים הללו ניתן להסיק לגבי חשיבות האירועים לניבוי התרחשות התאונות, בתנאי דרך שונים.

מודלים נפרדים פותחו לסוגי דרך שונים, ועבור שני סוגים של תאונות: (א) סך התאונות עם נפגעים, (ב) כלל התאונות (תאונות ת"ד ו-"כללי עם נפגעים" ביחד).

א. ממצאי המודלים הבסיסיים היו כלהלן.

(1) בדרך חד-מסלולית

- קיים שוני בין משתני התשתית שמשפיעים על סוגי תאונות שונים. על תאונות עם נפגעים נמצאה השפעה של נפח התנועה בדרך (בנוסף למספר המעברים כמשתנה חשיפה עיקרי), קרבת צומת בהתקרבות ובהתרחקות, שינוי ברוחב נתיבים בין יחידות ניתוח עוקבות ושיפוע לאורך. על כלל התאונות נמצאה השפעה של קרבת צומת בהתרחקות, שינוי ברוחב נתיבים בין יחידות ניתוח עוקבות, רוחב נתיב ושיפוע לאורך.

- מספר התאונות עם נפגעים עולה עם עליה בחשיפה (מספר המעברים בקטע), כאשר בדרך נפח תנועה גבוה יותר, בקרבת צמתים ובנוכחות שיפוע לאורך; לא נמצאו משתני תשתית המזוהים עם ירידה בתאונות.

- כלל התאונות **עולה** עם עליה בחשיפה (מספר המעברים בקטע), בקרבת צמתים וכאשר קיים שיפוע לאורך. מאידך, המספר של כלל התאונות **יורד** בקטע עם רוחב נתיב צר או צר מאוד.

- משתני תשתית המשותפים לשני המודלים הראו השפעה **זימה** על שני סוגי התאונות, דהיינו הן מספר התאונות עם נפגעים והן כלל התאונות עולה עם עליה בחשיפה (מספר המעברים בקטע), בקרבת צמתים וכאשר קיים שיפוע לאורך.

(2) בדרך דו-מסלולית

- הרכב המשתנים המשפיעים על שני סוגי התאונות **זימה** וכולל, בנוסף למספר המעברים בקטע כמשתנה חשיפה עיקרי, גם את נפח התנועה בדרך, קרבת צומת בהתקרבות, מרחק בין צמתים, רוחב שול ימין, רוחב שול שמאל. בנוסף למשתנים הנ"ל, על כלל התאונות משפיעה גם נוכחות של שיפוע לאורך.

- מספר התאונות עם נפגעים **עולה** עם עליה בחשיפה (מספר המעברים בקטע), כאשר בדרך נפח תנועה גבוה יותר, בקרבת צמתים, כאשר רוחב שול ימני בינוני או צר, וכאשר רוחב שול שמאלי צר. מאידך, מספר התאונות עם נפגעים **יורד** כאשר יחידת הניתוח שייכת לקטע בינוני או ארוך בין הצמתים, לעומת קטע קצר, וכאשר ישנו שול שמאלי בינוני.

- כלל התאונות **עולה** עם עליה בחשיפה (מספר המעברים בקטע), כאשר בדרך נפח תנועה גבוה יותר, בקרבת צמתים, כאשר רוחב שול ימני בינוני או צר, כאשר רוחב שול שמאלי צר ובנוכחות ערכים מסוימים של שיפוע לאורך (שיפוע קטן או גדול בירידה). מאידך, המספר של כלל התאונות **יורד** כאשר יחידת הניתוח שייכת לקטע בינוני או ארוך בין הצמתים, לעומת קטע קצר, כאשר ישנו שול שמאלי בינוני, וכמו כן, בנוכחות ערכים מסוימים של שיפוע לאורך (שיפוע בינוני בירידה, שיפוע קטן בעליה, כאשר עבור שיפוע בינוני או גדול בעליה היה מעט נתונים).

- משתני תשתית המשותפים לשני המודלים הראו השפעה **זימה** על שני סוגי התאונות, דהיינו הן מספר התאונות עם נפגעים והן כלל התאונות עולה עם עליה בחשיפה (מספר המעברים בקטע), בדרך עם נפח תנועה גבוה יותר, בקרבת צמתים, כאשר רוחב שול ימני בינוני או צר, וכאשר רוחב שול שמאלי צר. כמו כן, מספר התאונות, משני הסוגים, יורד כאשר יחידת הניתוח שייכת לקטע בינוני או ארוך בין הצמתים וכאשר ישנו שול שמאלי בינוני.

(3) בדרך ממוחלפת

- הרכב המשתנים המשפיעים על שני סוגי התאונות **זימה** למדי וכולל, בנוסף למספר המעברים בקטע כמשתנה חשיפה עיקרי, גם את נפח התנועה בדרך, קרבת מחלף בהתקרבות ובהתרחקות, ורוחב שול שמאל. עם זאת, עבור כלל התאונות נמצאה השפעה גם של שני משתנים נוספים: מרחק בין מחלפים ורוחב שול ימין.

- מספר התאונות עם נפגעים **עולה** עם עליה בחשיפה (מספר המעברים בקטע), כאשר בדרך נפח תנועה גבוה יותר, בקרבת מחלפים וכאשר רוחב שול שמאלי בינוני או צר (לעומת רחב). לא נמצאו משתנים שתורמים לירידה בתאונות אלה.

- כלל התאונות **עולה** עם עליה בחשיפה (מספר המעברים בקטע), כאשר בדרך נפח תנועה גבוה יותר, בקרבת מחלפים, כאשר יחידת הניתוח שייכת לקטע בינוני בין המחלפים (לעומת קטע

קצר), וכאשר רוחב שול שמאלי בינוני או צר (לעומת רחב). מאידך, המספר של כלל התאונות **יורד** כאשר רוחב שול ימני בינוני או צר.

- משתני תשתית המשותפים לשני המודלים הראו השפעה **דומה** על שני סוגי התאונות, דהיינו הן מספר התאונות עם נפגעים והן כלל התאונות עולה עם עליה בחשיפה (מספר המעברים בקטע), כאשר בדרך נפח תנועה גבוה יותר, בקרבת מחלפים וכאשר רוחב שול שמאלי בינוני או צר.

ב. בעקבות התאמת המודלים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית והתאונות, **בתוספת משתני האירועים**, והשוואתם עם המודלים הבסיסיים התקבלו ממצאים כלהלן:

- בכל סוג דרך ובשני סוגי התאונות הוספת משתני האירועים **לא שינתה מהותית** את צורת הקשר בין מאפייני התשתית והתאונות, כאשר בכל המודלים נשמר הן הרכב והן כיוון הקשר בין מאפייני התשתית והתאונות שנמצא בטרם הוספת האירועים. עם זאת, הוספת משתני האירועים השפיע על ערכי המקדמים של משתני התשתית במודלים לניבוי התאונות.

- בדרך חד-מסלולית, אף אחד מסוגי האירועים **לא נמצא מובהק** במודלים לניבוי התאונות.

- בדרך דו-מסלולית, הוספת אירועים מסוג "בלימה" שיפרה את ניבוי התאונות עם נפגעים. כמו כן, הוספת אירועים מסוג "מהירות" שיפרה ניבוי של תאונות עם נפגעים ושל כלל התאונות. עבור אירועי "בלימה" נמצא קשר **חיובי ומובהק** עם מספרי התאונות; עבור אירועי "מהירות" נמצא קשר **שלילי ומובהק** עם מספרי התאונות.

- בדרך ממוחלפת, הוספת אירועי "מהירות" או סך האירועים שיפרה את ניבוי התאונות עם נפגעים, כאשר עבור כלל התאונות תוספת מידע על אירועים לא תרמה לניבוי התאונות. הן עבור אירועי "מהירות" והן עבור סך האירועים נמצא קשר **שלילי ומובהק** עם מספרי התאונות.

מכאן, חשיבות האירועים בנהיגה לניבוי התרחשות התאונות, נמצאה בדרך דו-מסלולית וממוחלפת ולא נמצאה בדרך חד-מסלולית.

5.6. מסקנות המחקר

1. בהתאם למטרות שהוגדרו, המחקר **מצא קשרים סטטיסטיים** בין התרחשות האירועים בנהיגה לבין מאפייני התשתיות. כמו כן, נמצאו קשרים סטטיסטיים בין מאפייני התשתית לבין התרחשות התאונות וכן, הודגמו קשרים סטטיסטיים מסוימים בין אירועים בנהיגה לבין התרחשות התאונות.

2. תחום מערכת הקשרים בין אירועים בנהיגה לבין מאפייני התשתית ובייחוד, הקשר המשולש בין תאונות, מאפייני התשתית ואירועים בנהיגה, לא נחקר בעבר. המחקר הנוכחי הראה כי מערכת קשרים זאת **מורכבת**, כאשר אירועים בנהיגה אכן קשורים למאפייני התשתית ובתנאי דרך מסוימים, **יכולים לתרום** לניבוי התרחשות התאונות.

3. יחד עם זאת, רמת הקשר בין אירועים ותאונות שנמצאה במחקר זה **אינה חזקה דיה** כדי לאפשר זיהוי מוקדם של אתרים בעלי סיכון גבוה ברשת הדרכים, ע"פ ריכוזי האירועים בנהיגה שהיו מנבאים את ריכוזי התאונות. מאידך, **כן נמצאו** קשרים יציבים בין מאפייני התשתית לבין התרחשות האירועים, ובין מאפייני התשתית לבין התרחשות התאונות.

4. עבור רוב מאפייני התשתית שנבדקו לחוד נמצאה **השפעה מובהקת** על אירועי הנהיגה (מעבר להשפעת החשיפה). חלק ניכר ממאפייני התשתית הדגימו **השפעה הפוכה** על אירועי ה"בלימה" לעומת אירועי "מהירות", כאשר קרבת צומת או מגבלות גיאומטריות, לרוב, גורמות להגברת אירועי ה"בלימה" ולמיתון באירועי ה"מהירות", בעוד שנסיעה בתנאי דרך טובים יותר ובקטעים ארוכים יותר, ללא הפרעות, מזוהה עם ירידה בבלימות ועם עליה באירועי מהירות.

בדומה לאירועי "מהירות", קרבת צומת או מגבלות גיאומטריות גורמות למיתון בסך האירועים, בעוד שנסיעה בתנאי דרך טובים יותר ובקטעים ארוכים יותר מזוהה עם עליה בסך האירועים.

כלומר, הממצא המפתיע של המחקר הנוכחי היה שבניגוד למצופה, עליה באירועי "מהירות" ובסך האירועים מצביעה על תנאי דרך טובים יותר (המאפשרים מהירויות נסיעה גבוהות יותר).

5. בבחינה הכללית של הקשר בין אירועים ותאונות, תוך כדי התחשבות ברמת החשיפה ובסוג דרך, נמצאה השפעה של האירועים על התאונות, אם כי צורת הקשר **שונה בסוגי דרך שונים**. עבור הדרכים החד-מסלוליות, הסתמן קשר חיובי בין אירועי ה"בלימה" וסך האירועים לבין התאונות; עבור הדרכים הדו-מסלוליות, זוהה קשר שלילי בין אירועי ה"מהירות" והתאונות, מכל הסוגים, ובנוסף, עבור התאונות עם נפגעים, זוהה קשר חיובי בין אירועי ה"בלימה" ותאונות; עבור הדרכים הממוחלפות, זוהה קשר בין מספרי התאונות, מהסוגים השונים, לבין אירועי "מהירות", אשר הצביע על ירידה בתאונות במספר אירועים קטן ועל עליה בתאונות כאשר מספר האירועים עולה.

הממצא עבור הדרכים הממוחלפות תואם את התפיסה הקיימת בנושא השפעת מהירויות, לפיה מהירויות נסיעה גבוהות קשורות לעליה בסיכון לתאונות.

6. ע"פ המודלים הרב-פרמטריים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית לבין האירועים בנהיגה, **מאפייני התשתית המובילים** מבחינת יכולת הניבוי של אירועים מסוג "בלימה" ו-"מהירות" הם: קרבת צומת, אורך קטע (מרחק בין צמתים עיקריים), סוג דרך, רוחב שול שמאלי, רוחב שול ימני. עם זאת, מאפייני התשתית: סוג דרך, קרבת צומת, אורך קטע - משפיעים בצורה הפוכה על אירועי "מהירות" לעומת "בלימה".

כמו כן, סוגי מאפייני התשתית המשפיעים ואופן השפעתם על סך האירועים דומים להשפעת מאפייני התשתית על אירועי ה"מהירות", כאשר בניבוי סך האירועים מעורבים גם מאפייני תשתית נוספים (רוחב נתיב, שיפוע לאורך).

7. ע"פ המודלים הבסיסיים לביטוי הקשר **בין מאפייני התשתית והתאונות**, מערכת קשרים זו משתנה כתלות בסוג דרך. בין היתר, בדרך חד-מסלולית, מספר התאונות עם נפגעים וכלל התאונות (ת"ד + "כללי עם נפגעים") עולה עם עליה בחשיפה (מספר המעברים בקטע), בקרבת צמתים ובנוכחות שיפוע לאורך. בנוסף, כלל התאונות יורד בקטע עם רוחב נתיב צר או צר מאוד.

בדרך דו-מסלולית, הן מספר התאונות עם נפגעים והן כלל התאונות עולה עם עליה בחשיפה, בדרך עם נפח תנועה גבוה יותר, בקרבת צמתים, כאשר רוחב שול ימני בינוני או צר, וכאשר רוחב שול שמאלי צר. כמו כן, מספר התאונות, משני הסוגים, יורד כאשר יחידת הניתוח שייכת לקטע בינוני או ארוך בין הצמתים וכאשר ישנו שול שמאלי בינוני.

בדרך ממוחלפת, הן מספר התאונות עם נפגעים והן כלל התאונות עולה עם עליה בחשיפה (מספר המעברים בקטע), כאשר בדרך נפח תנועה גבוה יותר, בקרבת מחלפים וכאשר רוחב שול שמאלי בינוני או צר. בנוסף, כלל התאונות עולה כאשר יחידת הניתוח שייכת לקטע ארוך יותר בין מחלפים ויורד כאשר רוחב שול ימני בינוני או צר.

8. בעקבות בחינת תוספת משתני האירועים למודלים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית והתאונות, נמצא כי בכל סוגי הדרך הוספת משתני האירועים **לא שינתה מהותית** את צורת הקשר בין מאפייני התשתית והתאונות. בין היתר, בדרך חד-מסלולית, אף אחד מסוגי האירועים לא נמצא מובהק במודלים לניבוי התאונות.

עם זאת, בדרך דו-מסלולית, הוספת אירועים מסוג "בלימה" **שיפרה את ניבוי התאונות** עם נפגעים, עם הדגמת קשר חיובי ומובהק עם מספרי התאונות, כאשר הוספת אירועים מסוג "מהירות" גם כן שיפרה ניבוי של תאונות עם נפגעים ושל כלל התאונות, תוך כדי הדגמת קשר שלילי ומובהק עם מספרי התאונות.

כמו כן, בדרך ממוחלפת, הוספת אירועי "מהירות" או סך האירועים **שיפרה את ניבוי התאונות** עם נפגעים, תוך כדי הדגמת קשר שלילי ומובהק עם מספרי התאונות.

כלומר, בדרך דו-מסלולית וממוחלפת הודגמה חשיבות של אירועים בנהיגה לניבוי התרחשות התאונות.

9. לסיכום, המחקר הראה מרכיבים רבים של מערכת הקשרים בין מאפייני התשתית, התרחשות האירועים בנהיגה ותאונות הדרכים. המחקר הראה בבירור כי **לסוגי אירועים שונים** קיים קשר שונה למאפייני התשתית וגם השפעה שונה על תאונות. בחלק מהמקרים, צורת הקשר שנתגלתה בנייתוחים נראתה, במבט ראשון, כמפתיעה ומנוגדת למצופה אך נמצאה כהגיונית כאשר הגדרות האירועים בנהיגה נבחנו מחדש.

המחקר הצביע על כך שעבור סוגי אירועים מסוימים (כגון: בלימה) קיים **קשר ישיר** עם תאונות. עם זאת, אין לצפות תמיד לקשר ישיר, כאשר, עבור סוגי אירועים אחרים (כגון: מהירות), קיים **קשר הפוך**, דהיינו עליה באירועים מצביעה על קיום תנאי דרך טובים יותר ומכאן, ניתן לצפות לירידה בתאונות.

10. כללית, בתיעוד אירועי הנהיגה בעזרת הטכנולוגיות המתקדמות **כדאי להקפיד יותר** על הגדרת האירועים, במידה ואירועים אלה עתידים לשמש בנייתוחים של מערכות הקשרים בין אירועי הנהיגה והתרחשות התאונות, אירועים ומאפייני תשתית, או לערב משתנים חיצוניים אחרים. נראה כי אירועים בנהיגה המופקים ע"י "הקופסא הירוקה" לא תמיד מסמנים אירוע חריג המוביל לתאונות.

11. המודלים שפותחו במחקר, למעשה, פותחים דף חדש בהבנת מערכת הקשרים בין מאפייני התשתית, התנהגויות הנהגים והתרחשות התאונות. הקשרים הסטטיסטיים שנמצאו במודלים **יכולים לשמש** לזיהוי אתרים בעייתיים ברשת הדרכים.

12. הניתוחים שנערכו במחקר הסתמכו על בסיס נתונים גדול ומייצג אשר נבנה בעקבות שילוב ועיבוד מידע ממספר מקורות. השיטות ששימשו ליצירת בסיס הנתונים המשולב, לרבות מיפוי

נתונים על אירועי הנהיגה על רשת הכבישים והפקת מאפייני התשתית ליחידות הניתוח, עשויות לשמש גם במחקרים נוספים בתחום זה.

עם זאת, הנתונים ששימשו במחקר הנוכחי היו "כפופים" למגבלות של נתוני המקור. בין היתר, נתוני התאונות ליחידות הניתוח הופקו לשני כיווני הנסיעה ביחד (בשל מגבלות של קבצי התאונות מבחינת דיוק הרישום כל כיווני התנועה), כאשר ריכוזי האירועים ומאפייני התשתית הופקו לכל כיוון נסיעה. כמו כן, הדיוק בהצגת מאפייני התשתית תלוי בדיוק הרישום שנקבע בשלב פענוח נתונים עבור מערכת המנ"ב.

מכאן ייתכן כי מגבלות של נתוני המקור, בנוסף לרעש בהגדרת האירועים בנהיגה שצוין לעיל, לא אפשרו לגלות מערכת קשרים חזקה יותר בין אירועים, תשתיות ותאונות, במחקר הנוכחי. בנוסף, המחקר הנוכחי התבסס על תיעוד אירועי הנהיגה ב-62 כלי רכב שנסעו ברשת הכבישים במשך שנה. ייתכן כי מדגם גדול יותר של כלי הרכב עם "הקופסה הירוקה" ישנה את מובהקות הממצאים.

מראי מקום

בכור, ש., אברמסון, י., גיטלמן, ו., שפר, ש. (2012). סקירה כללית של מערכות בטא"ל והשלכותיהן הבטיחותיות. דו"ח מחקר S/35/2012, מרכז רן נאור לחקר הבטיחות בדרכים, הטכניון.

הקרט, ש., בונגיק, ח., גיטלמן, ו., בן יעקב, י., רפיח, ר., כהן, א., דובא, א. (2002). פיתוח שיטה, הנחיות וכלים ממוחשבים ל"מחקרי אפקטיביות" של שיפורים בטיחותיים בתשתית. משרד התחבורה.

גיטלמן, ו., הקרט, ש., פיסחוב, פ. (2009). הערכת יעילות בטיחותית של שיפורי תשתית שיושמו בדרכים הלא עירוניות. דוח מחקר 320/2009. המכון לחקר התחבורה.

לוטן, צ., טולדו, ת., גרינברג, ע., פרח, ח., מוזיקנט, א., עומר, ח., שמשוני, י., טאובמן-בן-ארי, א. (2012). בחינת התועלת של מכשירי רישום ברכב לבטיחותם של נהגים צעירים (מחקר השנה הראשונה). אור ירוק- העמותה לשינוי תרבות הנהיגה בישראל.

Allen, B. L., Shin, B. T., and Cooper, P. J. (1978). Analysis of Traffic Conflicts and Collisions. Transportation Research Record 667, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 67-76.

Archer, J. (2001). Traffic Conflict Technique: Historical to Current State-of the-Art. Institutionen för Infrastruktur KTH, Stockholm, Sweden.

Bonneson, J. A., and Pratt, M. P. (2009). Roadway Safety Design Workbook. Report no. FHWA/TX-09/0-4703-P2.

Boyle, L. B., Hallmark, S., Lee, J. D., McGehee, D. V., Neyens, D. M., and Ward, N. J. (2010). SHRP 2 Phase II Report: Integration of Analysis Methods and Development of Analysis Plan. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.

Burgett, A., and Gunderson, K. (2001). Crash Prevention Boundary for Road Departure Crashes: Derivation. Report HS 809 399. NHTSA Research Note, Washington, D.C.

Burgett, A., and Miller, R. J., Jr. (2001). A New Paradigm for Rear-End Crash Prevention Driving Performance. National Highway Traffic Safety Administration.

Campbell, K. (2009). SHRP 2 Safety: Making a Significant Improvement in Highway Safety. Presented at 4th Safety Research Symposium of the Transportation Research Board, Washington, D.C. http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp2/2009SRS_CampbellThur.PDF. Accessed March 28, 2011.

Campbell, K. L., Lepofsky, M., and Bittner, A. (2003). F-SHRP Web Document 2: Detailed Planning for Research on Making a Significant Improvement in Highway Safety. Study 2 - Safety.

Chin, H., Quek, S., and Chou, R. (1992). Quantitative Examination of Traffic Conflicts. Transportation Research Record 1376, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 87-91.

Chin, H., and Quek, S. (1997). Measurement of Traffic Conflicts. Safety Science, Vol. 26, No. 3, pp. 169-185.

Dingus, T. A., Klauer, S. G., Neale, V. L., Petersen, A., Lee, S. E., Sudweeks, J., Perez, M. A., Hankey, J., Ramsey, D., Gupta, S., Bucher, C., Doerzaph, Z. R., Jermeland, J., and Knippling, R. R. (2006). The 100-Car Naturalistic Driving Study: Phase II - Results of the 100-Car Field Experiment. NHTSA, U.S. Department of Transportation.

Elvik R., Hoya A., Vaa T., and Sorensen, M. (2009). The Handbook of Road Safety Measures. Second Edition.

Farmer, C.M., Kirely, B.B., McCartt, A.T. (2010). Effects of In-Vehicle Monitoring on the Driving Behavior of Teenagers, Journal of Safety Research, No. 41, pp. 39-45.

- Forbes, G., Eng, M., and Eng, P. (2003). *Synthesis of Safety for Traffic Operations*. Transport Canada, Ottawa, Ontario, Canada.
- Gettman, D., and Head, L. (2003). *Surrogate Safety Measures from Traffic Simulation Models*. Report FHWA-RD-03-050. FHWA, U.S. Department of Transportation.
- Hallmark S., Hsu Y.-Y., Boyle L., Carriquiry A., Tian Y., Mudgal A. (2011). *Evaluation of Data Needs, Crash Surrogates, and Analysis Methods to Address Lane Departure Research Questions Using Naturalistic Driving Study Data*. SHRP 2 Report S2-S01E-RW-1, National Academy of Sciences, USA.
- Hayward, J. (1972). *Near-Miss Determination Through Use of a Scale of Danger*. Highway Research Record 384, HRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 24–34.
- HSM (2010). *Highway Safety Manual*. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, D.C.
- Lotan, T., Albert, G., Ben-Bassat, T., Ganor, D., Grimberg, E., Musicant, O., Hakkert, S. and Toledo T. (2010). *Potential benefits of in-vehicle systems for understanding driver behaviour; a series of small-scale ND studies in Israel*. PROLOGUE Deliverable D3.2. Or Yarok, Hod Hasharon, Israel.
- McCaffrey, D.F., Griffin, B.A., Almirall D., Slaughter, M.E., Ramchand, R., Burgette, L.F. (2013, e-pub). *A Tutorial on Propensity Score Estimation for Multiple Treatments using Generalized Boosted Models*. *Statistics in Medicine*. DOI: 10.1002/sim.5753.
- Mounce, J. M. (1981). *Driver Compliance with Stop-Sign Control at Low-Volume Intersections*. Transportation Research Record 808, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 30–37.
- Musicant, O., Lotan, T. and Toledo, T., (2007), *Safety correlation and implications of an in-vehicle data recorder on driver behavior*, TRB 2007 Annual Meeting CD-ROM.
- Pomerleau, D., Jochem, T., Thorpe, C., Batavia, P., Pape, D., Hadden, J., McMillan, N., Brown, N., and Everson, J. (1999). *Run-off-Road Collision Avoidance Using IVHS Countermeasures*. Report DOT HS 809 170. NHTSA, U.S. Department of Transportation.
- Prato, C. G., Toledo, T., Lotan, T., Taubman-Ben-Ari, O., (2010). *Modeling the behavior of novice drivers during the first year after licensure*, *Accident Analysis and Prevention*, No. 42, pp. 480-486.
- Salman, N., and Al-Maita, K. (1995). *Safety Evaluation at Three-Leg, Unsignalized Intersections by Traffic Conflict Technique*. Transportation Research Record 1485, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 177–185.
- Shankar, V., Jovanis, P. P., Aguero-Valverde, J., and Gross, F. (2008). *Analysis of Naturalistic Driving Data: Prospective View on Methodological Paradigms*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2061, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 1–8.
- Songchitruksa, P., and Tarko, A. (2004). *Using Imaging Technology to Evaluate Highway Safety: Right-angle Collisions*. Joint Transportation Research Program, Purdue University, West Lafayette, Ind.
- Songchitruksa, P., and Tarko, A. (2006). *The Extreme Value Theory Approach to Safety Estimation*. *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 38, pp. 811–822.
- SWOV (2010). *Naturalistic driving: observing everyday driving behaviour*. SWOV Fact sheet, October 2010. SWOV, Leidschendam.
- Szabo, S., and Wilson, B. (2004). *Application of a Crash Prevention Boundary Metric to a Road Departure Warning System*. Proc., 2004 Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop, Gaithersburg, Md.

Toledo, G., (2011). Analysis and Modeling of Driving Behavior Using In-Vehicle Data Recorders, Research PhD. Thesis, Technion - Israel Institute of Technology, Haifa.

Toledo, T., Lotan, T., (2006). In-Vehicle Data Recorder for Evaluation of Driving Behavior and Safety, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1953, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2006, pp. 112–119.

Toledo, T., Musicant, O. and Lotan, T., (2008). In - Vehicle data recorders for monitoring and feedback on drivers' behavior, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 16, Issue 3, pp. 320-331.

Turner B., Imberger, K., Roper, p., Pyta, V., McLean, J. (2010). Engineering Risk Assessment part 6: Crash Reduction Factors. Austroads Project No. ST1428. Austroads Publication No. AP-T151/10.

Van Schagen, I., Welsh, R., Backer-Grøndahl, A., Hoedemaeker, M., Lotan, T., Morris, A., Sagberg, F., Winkelbauer, M. (2011). Towards a large-scale European Naturalistic Driving study: main findings of PROLOGUE. PROLOGUE Deliverable D4.2. SWOV Institute for Road Safety Research, Leidschendam, The Netherlands.

נספח א': סטטיסטיקה תיאורית של בסיס הנתונים המשולב שנבנה

במחקר

נפח תנועה יומי בקטע דרך

		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	נפח נמוך 1.00	499	14.3	14.3	14.3
	נפח בינוני 2.00	1098	31.4	31.4	45.6
	נפח גבוה 3.00	1903	54.4	54.4	100.0
	Total	3500	100.0	100.0	

שיפוע לאורך

		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	שיפוע לאורך קטן .00	3208	91.7	91.7	91.7
	שיפוע לאורך בינוני 1.00	181	5.2	5.2	96.8
	שיפוע לאורך גדול 2.00	109	3.1	3.1	99.9
	מידע חסר 9.00	2	.1	.1	100.0
	Total	3500	100.0	100.0	

קרוב לצומת בהתקרבות

		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	.00	2528	72.2	72.2	72.2
	1.00	531	15.2	15.2	87.4
	2.00	440	12.6	12.6	100.0
	מידע חסר 9.00	1	.0	.0	100.0
	Total	3500	100.0	100.0	

קרוב לצומת בהתרחקות

		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	.00	2712	77.5	77.5	77.5
	1.00	347	9.9	9.9	87.4
	2.00	440	12.6	12.6	100.0
	מידע חסר 9.00	1	.0	.0	100.0
	Total	3500	100.0	100.0	

מרחק בין צמתים

		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	קטע קצר 1.00	1882	53.8	53.8	53.8
	קטע בינוני 2.00	974	27.8	27.8	81.6
	קטע ארוך 3.00	203	5.8	5.8	87.4
	צומת בתוך יחידת ניתוח 4.00	440	12.6	12.6	100.0
	מידע חסר 9.00	1	.0	.0	100.0
	Total	3500	100.0	100.0	

שינוי במספר נתיבים בין קטעים עוקבים

		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	ערכים זהים .00	3307	94.5	94.5	94.5
	ערכים שונים 1.00	169	4.8	4.8	99.3
	מידע חסר 9.00	24	.7	.7	100.0
	Total	3500	100.0	100.0	

שינוי ברוחב נתיב בין קטעים עוקבים

		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	ערכים זהים .00	2250	64.3	64.3	64.3
	ערכים שונים 1.00	1226	35.0	35.0	99.3
	מידע חסר 9.00	24	.7	.7	100.0
	Total	3500	100.0	100.0	

שול כולל חיצוני

		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	רחב 1.00	1422	40.6	40.6	40.6
	בינוני 2.00	908	25.9	25.9	66.6
	צר 3.00	708	20.2	20.2	86.8
	מידע חסר 9.00	462	13.2	13.2	100.0
	Total	3500	100.0	100.0	

סוג דרך

		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	1.00 חד מסלולי	763	21.8	21.8	21.8
	2.00 דו מסלולי	1629	46.5	46.5	68.3
	3.00 ממוחלף	1107	31.6	31.6	100.0
	9.00 מידע חסר	1	.0	.0	100.0
	Total	3500	100.0	100.0	

שול כולל פנימי

		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	.00 לא רלוונטי לחד מסלולי	763	21.8	21.8	21.8
	1.00 רחב	661	18.9	18.9	40.7
	2.00 בינוני	728	20.8	20.8	61.5
	3.00 צר	1064	30.4	30.4	91.9
	9.00 מידע חסר	284	8.1	8.1	100.0
	Total	3500	100.0	100.0	

רדיוס אופקי

		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	1.00 רדיוס קטן	26	.7	.7	.7
	2.00 רדיוס בינוני	530	15.1	15.1	15.9
	3.00 רדיוס גדול	2942	84.1	84.1	99.9
	9.00 מידע חסר	2	.1	.1	100.0
	Total	3500	100.0	100.0	

רוחב נתיב

		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	1.00 תקין	3145	89.9	89.9	89.9
	2.00 צר	241	6.9	6.9	96.7
	3.00 צר מאוד	91	2.6	2.6	99.3
	9.00 מידע חסר	23	.7	.7	100.0
	Total	3500	100.0	100.0	

הגבהה צידית

		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	.00 הגבהה תקינה	402	11.5	11.5	11.5
	1.00 הגבהה לקויה	154	4.4	4.4	15.9
	8.00 not relevant	2943	84.1	84.1	100.0
	9.00 מידע חסר	1	.0	.0	100.0
	Total	3500	100.0	100.0	

num_ev_per_type.1

		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	0	3250	92.9	92.9	92.9
	1	189	5.4	5.4	98.3
	2	39	1.1	1.1	99.4
	3	13	.4	.4	99.7
	4	5	.1	.1	99.9
	5	1	.0	.0	99.9
	8	1	.0	.0	99.9
	11	2	.1	.1	100.0
	Total	3500	100.0	100.0	

num_ev_per_type.2

		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	0	3468	99.1	99.1	99.1
	1	30	.9	.9	99.9
	2	2	.1	.1	100.0
	Total	3500	100.0	100.0	

num_ev_per_type.3

		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	0	3454	98.7	98.7	98.7
	1	32	.9	.9	99.6
	2	7	.2	.2	99.8
	3	2	.1	.1	99.9

	4	1	.0	.0	99.9
	6	1	.0	.0	99.9
	7	1	.0	.0	99.9
	9	1	.0	.0	100.0
	12	1	.0	.0	100.0
	Total	3500	100.0	100.0	

num_ev_per_type.4

		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	0	3470	99.1	99.1	99.1
	1	19	.5	.5	99.7
	2	4	.1	.1	99.8
	3	5	.1	.1	99.9
	6	1	.0	.0	100.0
	15	1	.0	.0	100.0
	Total	3500	100.0	100.0	

num_ev_per_type.5

		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	0	3474	99.3	99.3	99.3
	1	22	.6	.6	99.9
	2	3	.1	.1	100.0
	5	1	.0	.0	100.0
	Total	3500	100.0	100.0	

num_ev_per_type.6

		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	0	3492	99.8	99.8	99.8
	1	8	.2	.2	100.0
	Total	3500	100.0	100.0	

num_ev_per_type.7

		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	0	3484	99.5	99.5	99.5
	1	14	.4	.4	99.9
	2	1	.0	.0	100.0
	3	1	.0	.0	100.0
	Total	3500	100.0	100.0	

num_ev_per_type.8

		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	0	3493	99.8	99.8	99.8
	1	4	.1	.1	99.9
	2	2	.1	.1	100.0
	4	1	.0	.0	100.0
	Total	3500	100.0	100.0	

num_ev_per_type.9

		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	0	3480	99.4	99.4	99.4
	1	18	.5	.5	99.9
	2	2	.1	.1	100.0
	Total	3500	100.0	100.0	

num_ev_per_type.10

		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	0	3460	98.9	98.9	98.9
	1	29	.8	.8	99.7
	2	8	.2	.2	99.9
	3	1	.0	.0	99.9
	4	1	.0	.0	100.0
	7	1	.0	.0	100.0
	Total	3500	100.0	100.0	

num_ev_per_type.11

		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	0	3490	99.7	99.7	99.7

1	10	.3	.3	100.0
Total	3500	100.0	100.0	

num_ev_per_type.12

	Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid 0	3496	99.9	99.9	99.9
1	4	.1	.1	100.0
Total	3500	100.0	100.0	

num_ev_per_type.19

	Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid 0	2778	79.4	79.4	79.4
1	497	14.2	14.2	93.6
2	158	4.5	4.5	98.1
3	40	1.1	1.1	99.2
4	19	.5	.5	99.8
5	1	.0	.0	99.8
6	1	.0	.0	99.8
7	2	.1	.1	99.9
8	2	.1	.1	99.9
9	1	.0	.0	100.0
12	1	.0	.0	100.0
Total	3500	100.0	100.0	

התפלגות של סך האירועים בנהיגה על יחידות הניתוח

ev_total שכיחות אחוז שכיחות מצטברת אחוז מצטבר

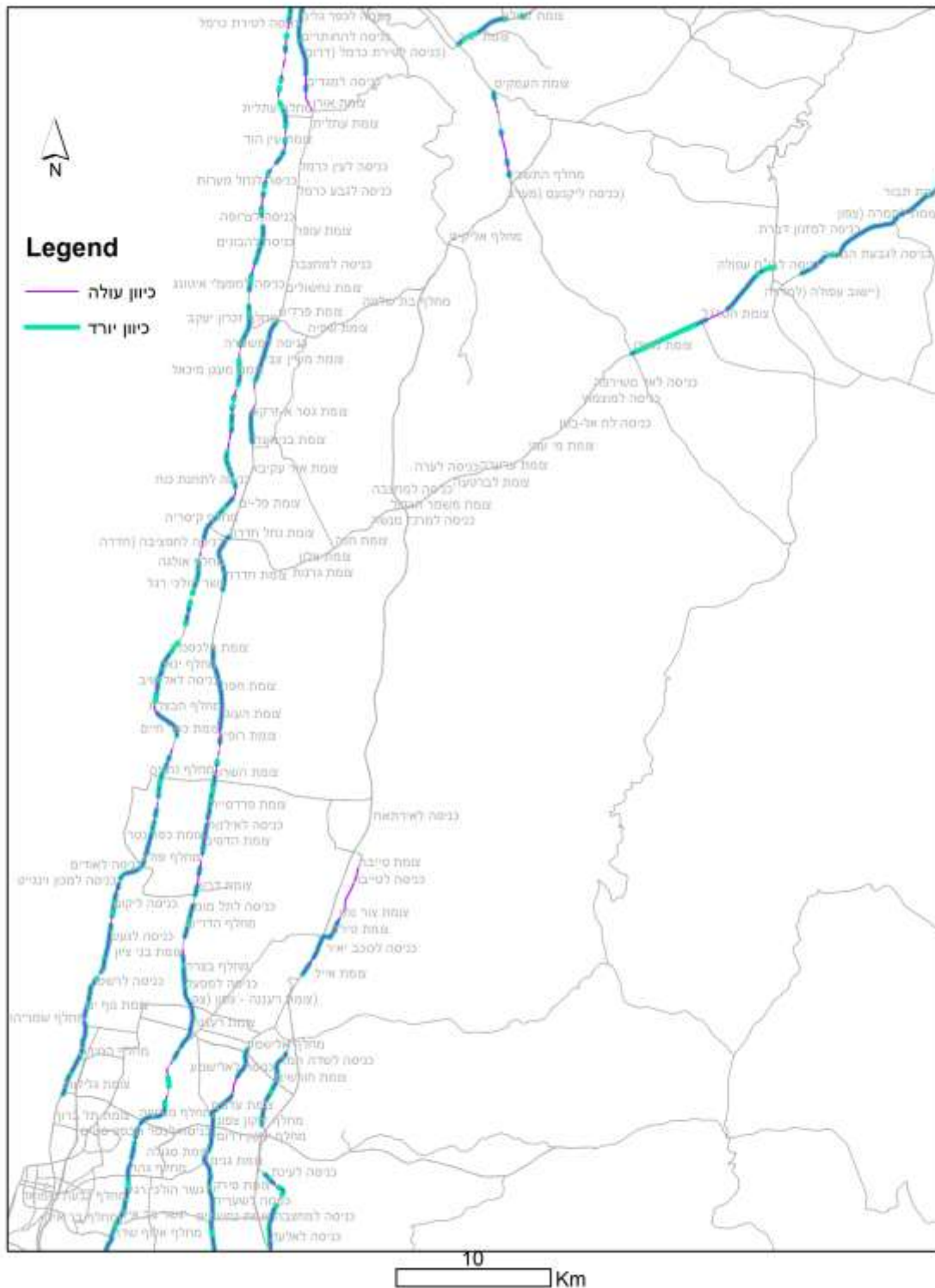
ev_total	שכיחות	אחוז	שכיחות מצטברת	אחוז מצטבר
0	2442	69.77	2442	69.77
1	702	20.06	3144	89.83
2	222	6.34	3366	96.17
3	66	1.89	3432	98.06
4	34	0.97	3466	99.03
5	13	0.37	3479	99.40
6	3	0.09	3482	99.49
7	5	0.14	3487	99.63
8	1	0.03	3488	99.66
9	2	0.06	3490	99.71
10	1	0.03	3491	99.74
11	1	0.03	3492	99.77
12	2	0.06	3494	99.83
14	1	0.03	3495	99.86
15	1	0.03	3496	99.89
17	1	0.03	3497	99.91
20	1	0.03	3498	99.94
21	1	0.03	3499	99.97
30	1	0.03	3500	100.00

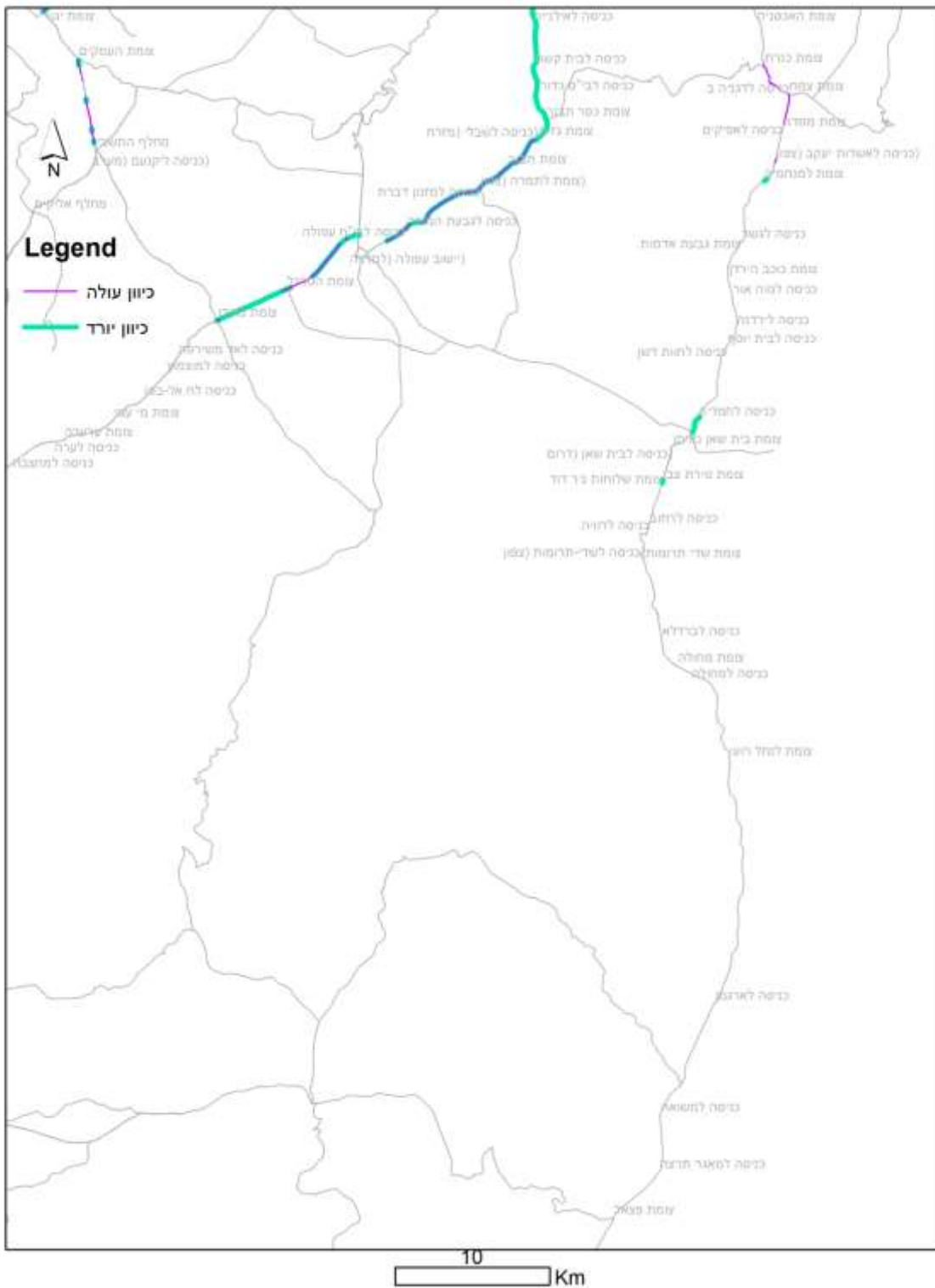
פילוג המאפיינים של מספר הנהגים שעברו בקטע, מספר המעברים בקטע, מספר כלי הרכב שעברו בקטע

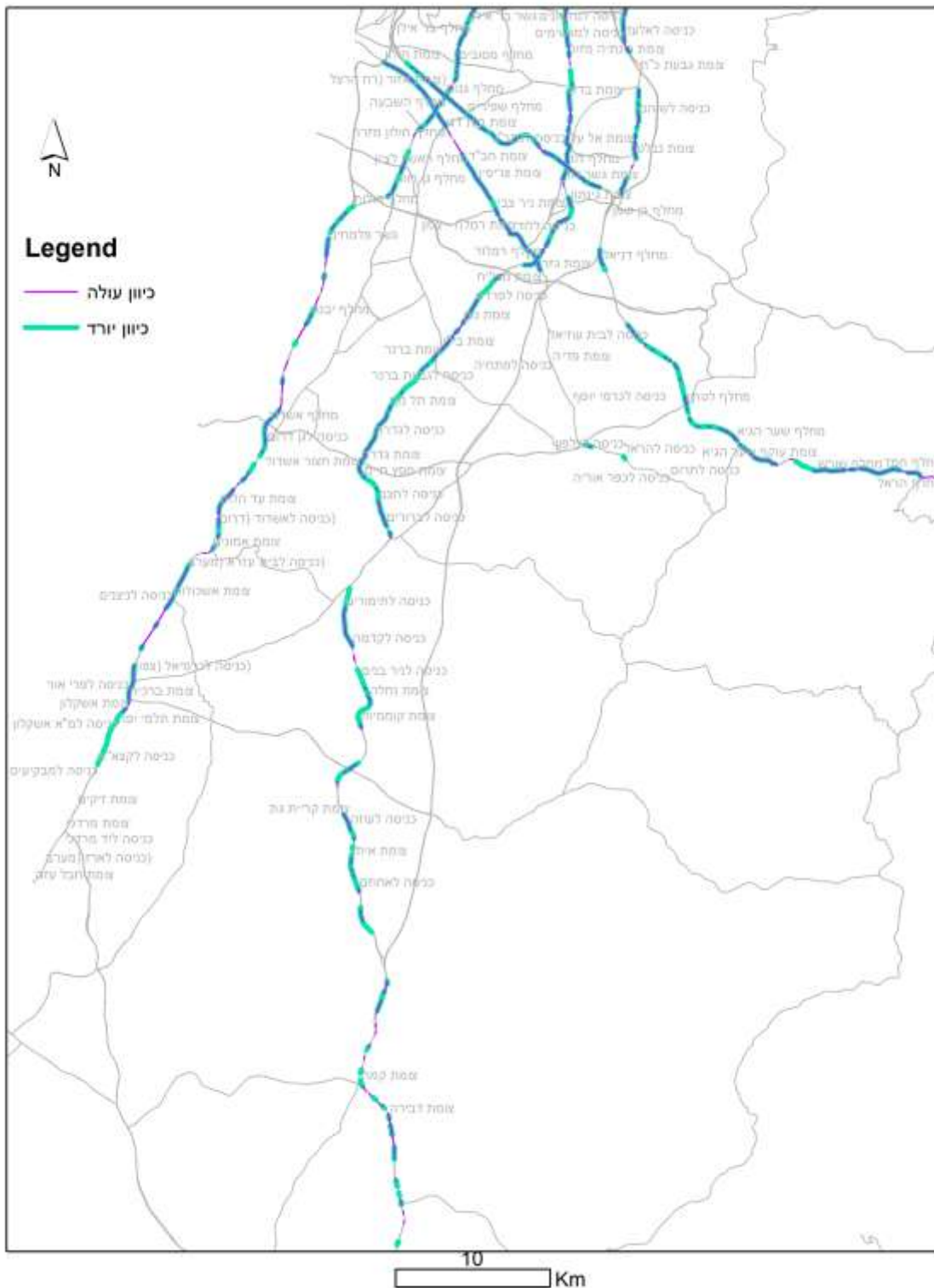
		num_driv_tot	num_tracks_tot	num_cars_tot
N	Valid	3500	3500	3500
	Missing	0	0	0
Mean		16.2	85.4	13.7
Median		11.0	39.0	10.0
Std. Deviation		14.5	102.1	10.8
Minimum		1	5.2	3
Maximum		125	908	79

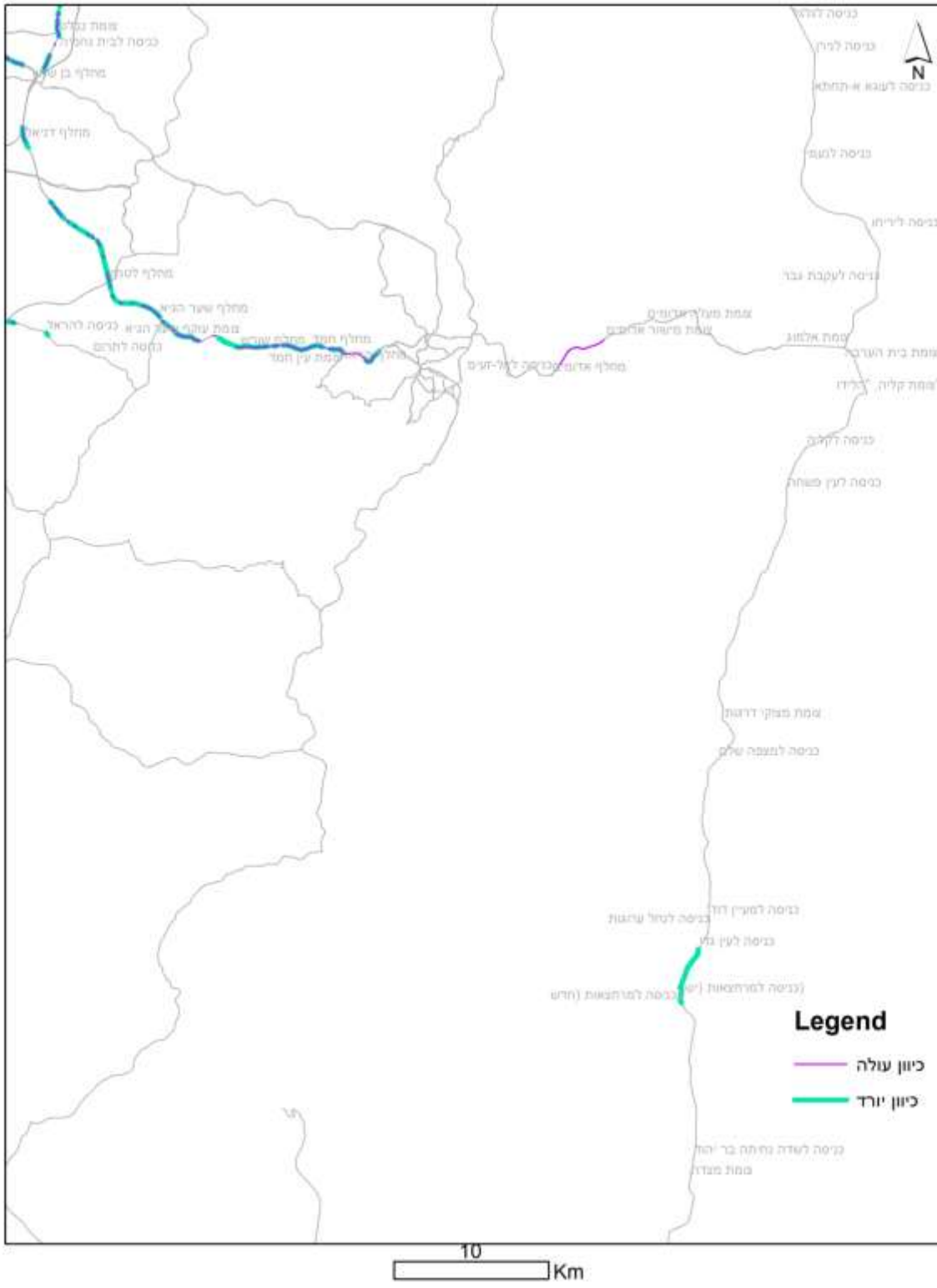
נספח ב': מפות עם קטעי הכבישים שנכללו במחקר

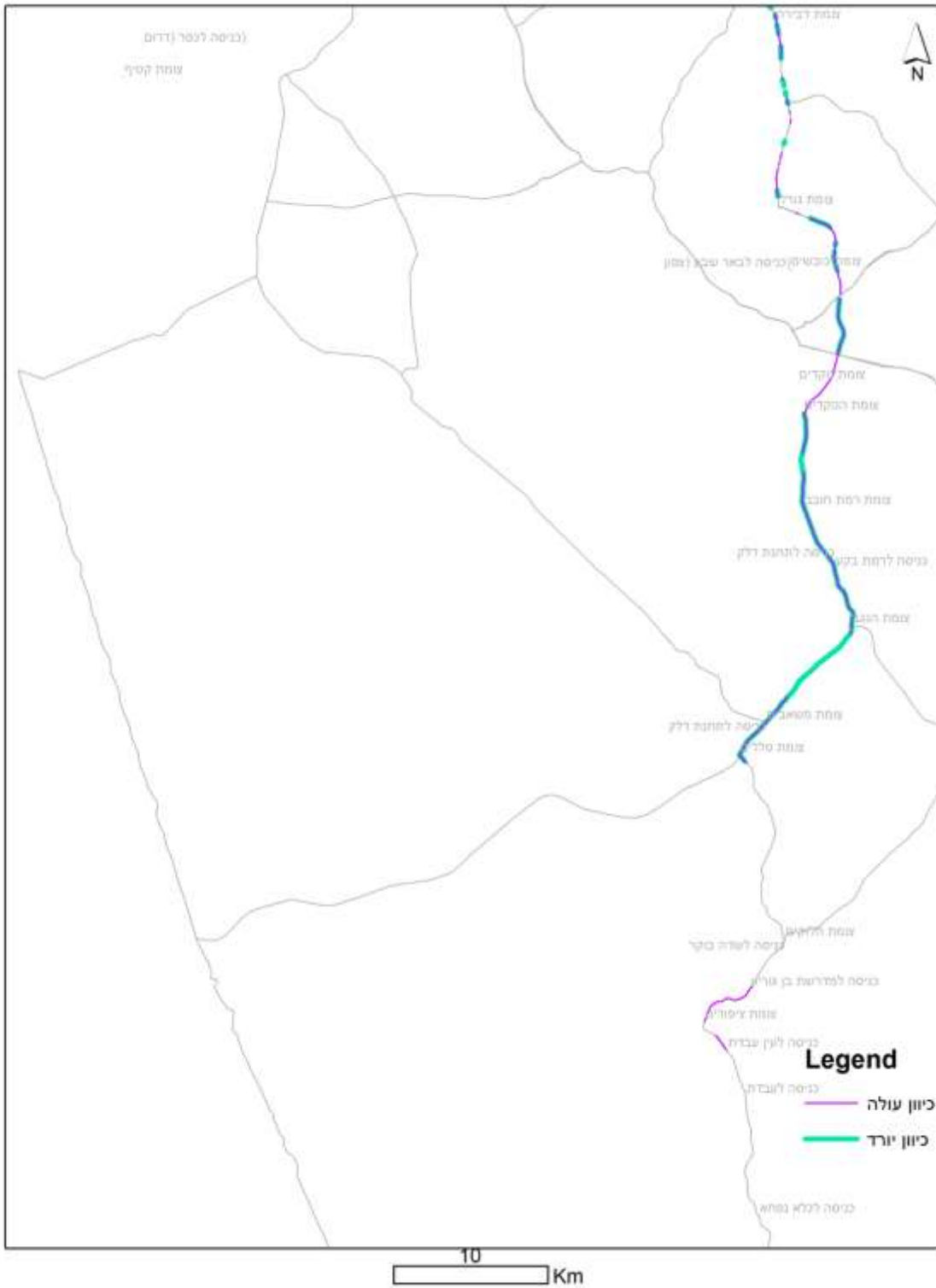


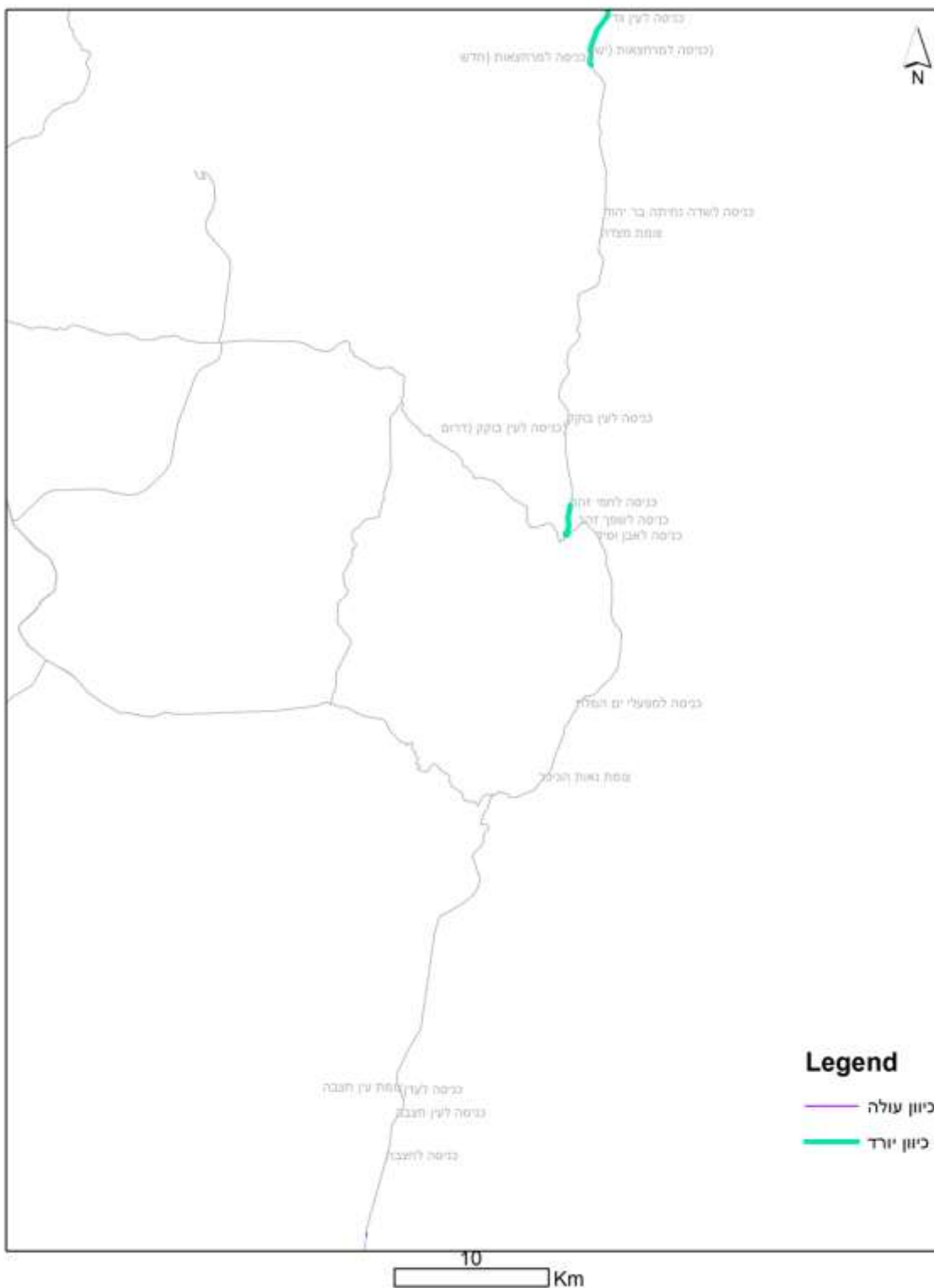




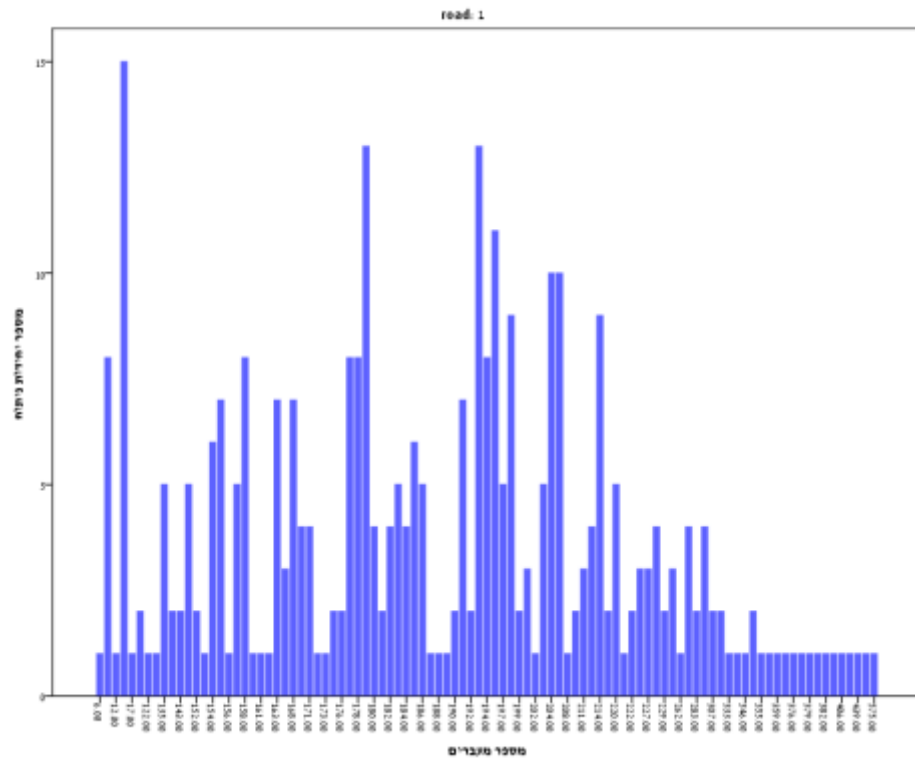




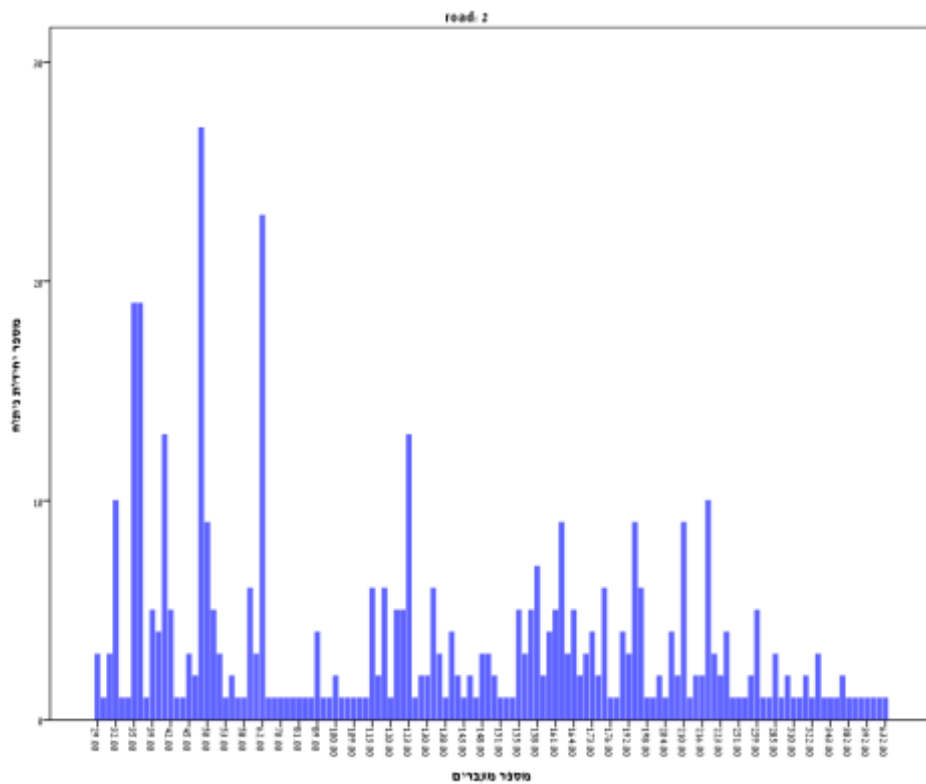




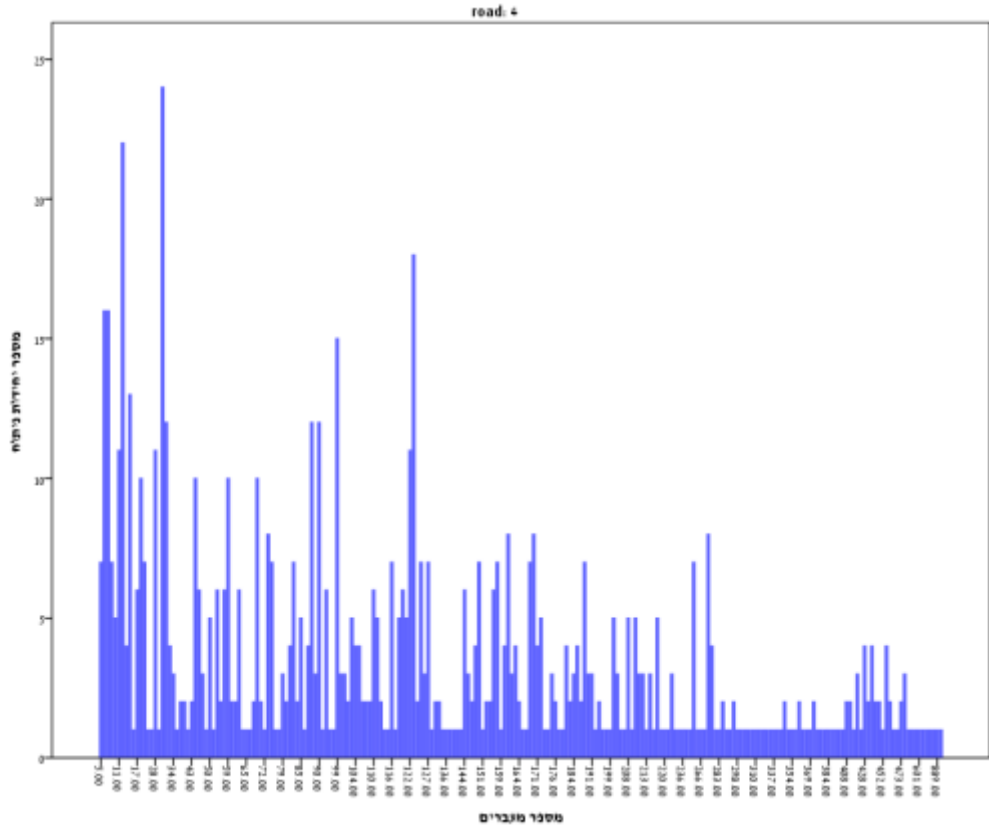
נספח ג': תדירויות מעברי כלי רכב עם "הקופסא הירוקה" בכבישי המחקר



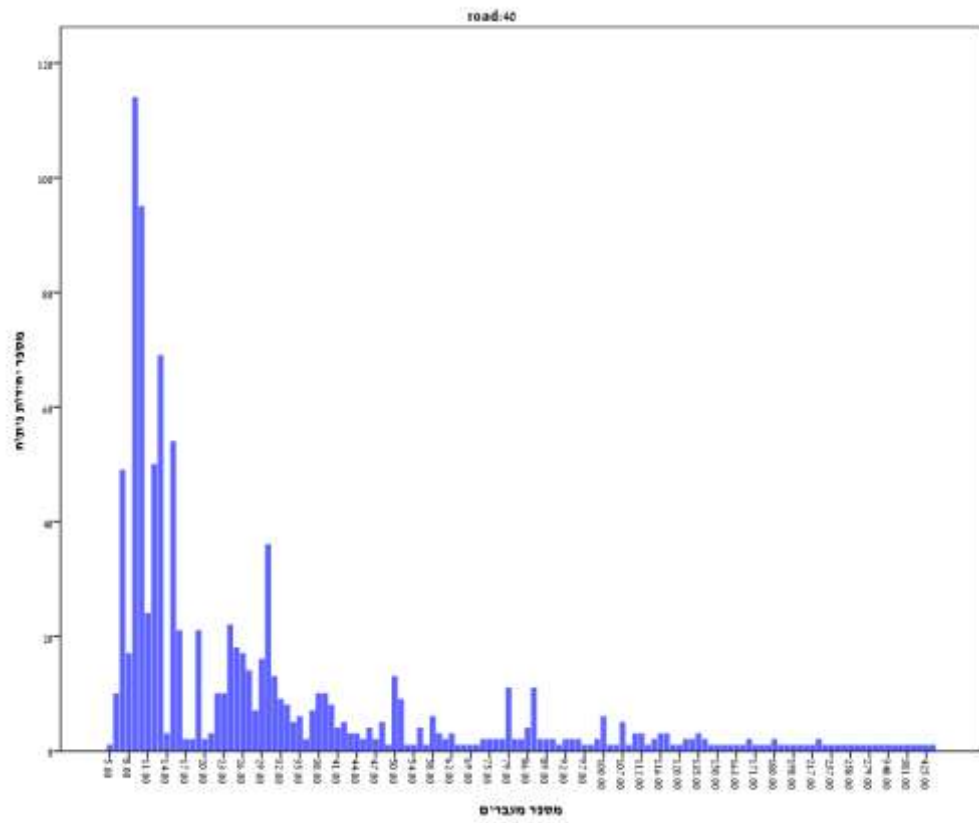
כביש 1 : $\text{mean}_{\text{tracks}}=188.5$, $\text{st.dev}_{\text{tracks}}=76.0$



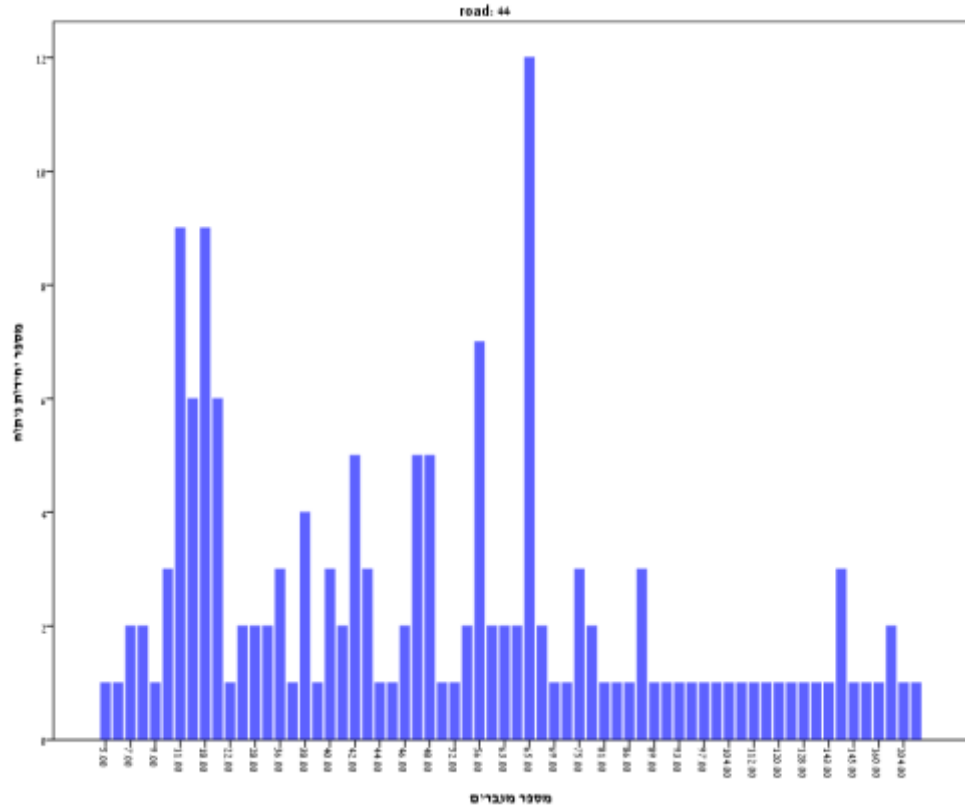
כביש 2 : $\text{mean}_{\text{tracks}}=128.0$, $\text{st.dev}_{\text{tracks}}=87.8$



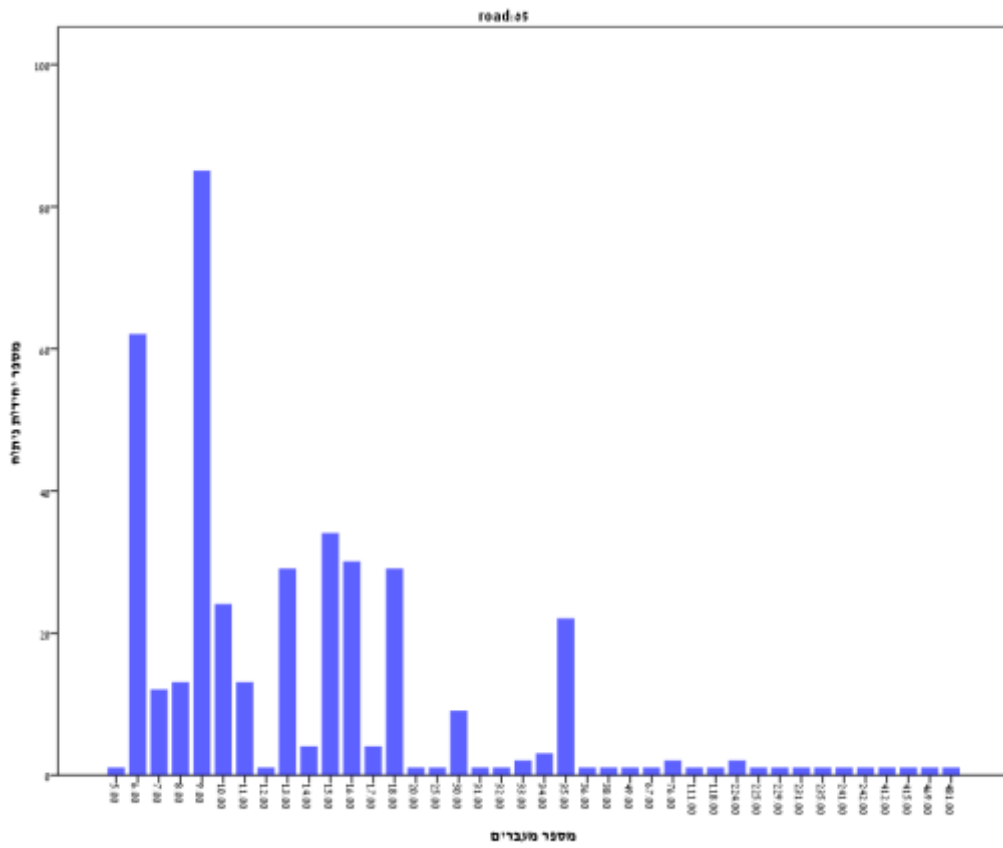
כביש 4 : $\text{mean}_{\text{tracks}}=137.1$, $\text{st.dev}_{\text{tracks}}=131$



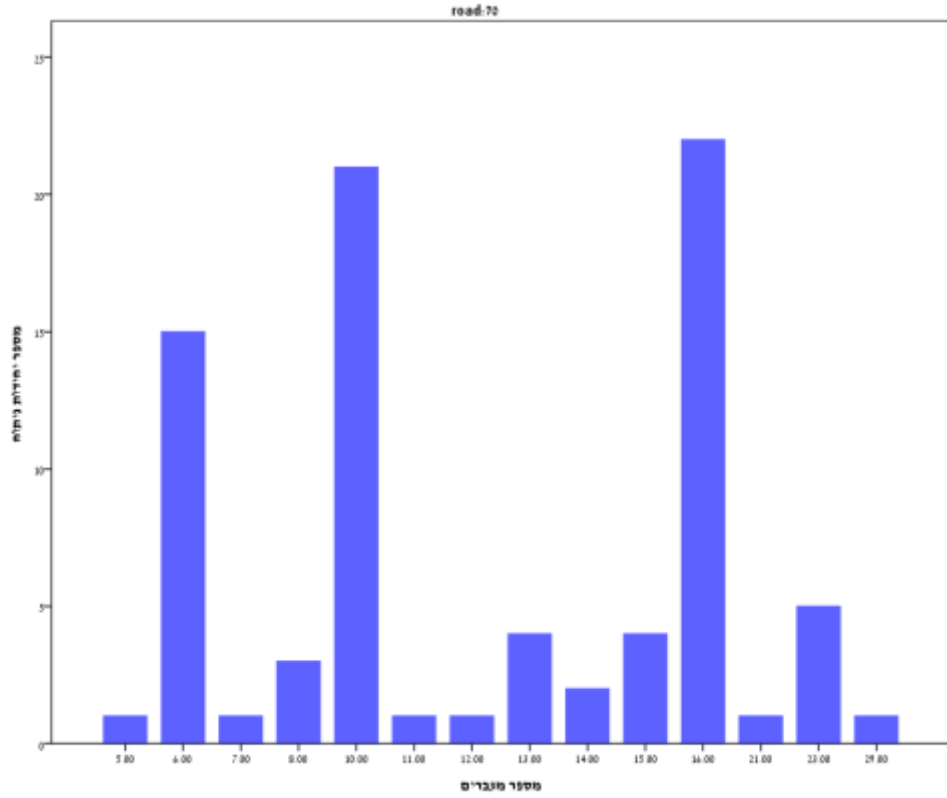
כביש 40 : $\text{mean}_{\text{tracks}}=36.4$, $\text{st.dev}_{\text{tracks}}=53.2$



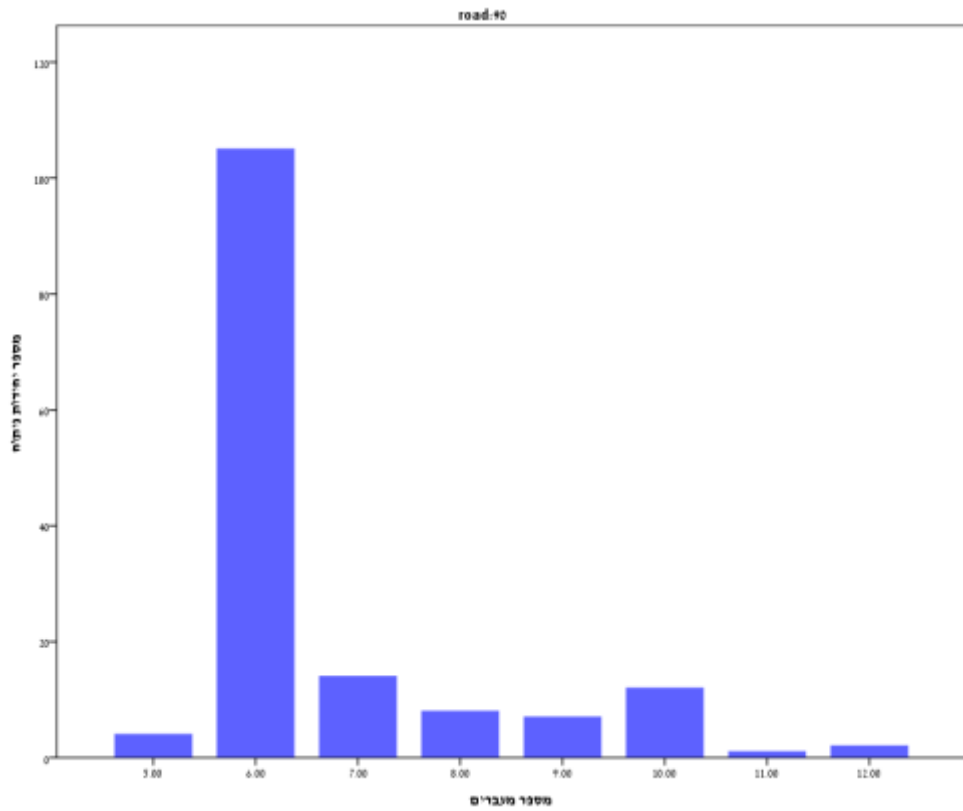
כביש 44 : $mean_{tracks}=57.3$, $st.dev_{tracks}=50.7$



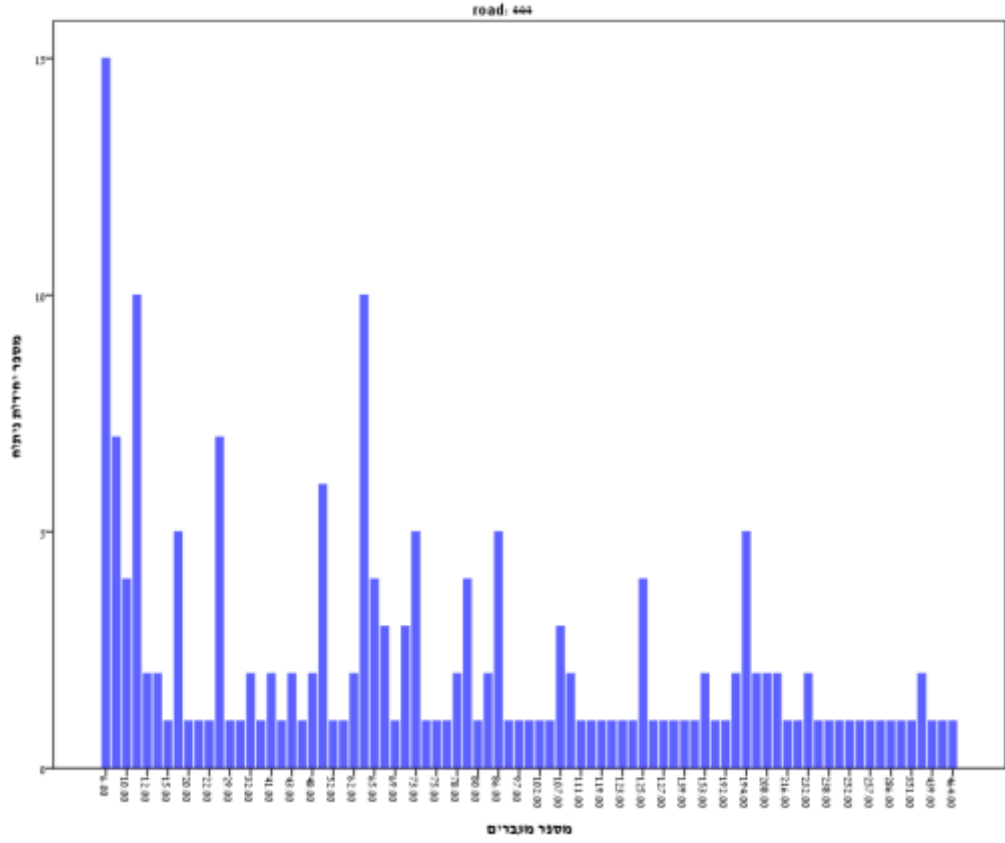
כביש 65 : $mean_{tracks}=23.1$, $st.dev_{tracks}=53.5$



כביש 70 : $\text{mean}_{\text{tracks}}=12.4$, $\text{st.dev}_{\text{tracks}}=5.1$



כביש 90 : $\text{mean}_{\text{tracks}}=6.7$, $\text{st.dev}_{\text{tracks}}=1.5$



כביש 444 : $mean_{tracks}=92.1$, $st.dev_{tracks}=94.9$

