



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 מספרים ומאפייני התאונות לבין המאפיינים הגיאומטריים של דרכים דו-נתיביות המשרתות נפחי תנועה נמוכים

הוכן ע"י:

ד"ר ויקטוריה גיטלמן

אינג' רובי כרמל

ד"ר אטי דובא

גב' פאני פיסחוב

פרופ' שלום הקרט

דו"ח מחקר מס' S/32/2012

עבור: מעצ - החברה הלאומית לדרכים בישראל
בע"מ



מרץ 2012

תיעוד / תעודת זהות של הפרויקט

מס' הדו"ח :	
תאריך הגשת הדו"ח : מרץ 2012	שם הדו"ח : בחינת הקשר בין מספרים ומאפייני התאונות לבין המאפיינים הגיאומטריים של דרכים דו-נתיביות המשרתות נפחי תנועה נמוכים
מספור הדו"ח של גוף מבצע העבודה : S/32/2012	שם המחברים : גיטלמן ו., כרמל ר., דובא א., פיסחוב פ., הקרט ש.
מספר החוזה : 4500033001	שם הגוף המבצע וכתובתו : מרכז רן נאור לחקר הבטיחות בדרכים
סוג הדו"ח והתקופה אליה הוא מתייחס: דו"ח מדעי, 2011-2012	
הערות נוספות:	
תקציר :	
1. מטרת :	
<p>מטרת המחקר הנוכחי הייתה לזהות קשרים סטטיסטיים בין המאפיינים הגיאומטריים ואחרים של דרכים חד-מסלוליות המשרתות נפחי תנועה נמוכים (דלות תנועה) לבין מספר וסוגי התאונות. בביצוע המחקר היו שלבים אלה: סקר ספרות בינלאומית בנושא המחקר; הכנת בסיס הנתונים למחקר; ניתוח הנתונים ופיתוח מודלים מסבירים. בהמשך, על סמך המודלים שפותחו במחקר נבנו כלים כמותיים לשימוש ההנדסי במסגרת תהליכי תכנון דרכים חדשות ו/או שיפור מאפייני הדרכים הקיימות וכמו כן, גובשו המלצות לשילוב ממצאי המחקר בתהליכי התכנון של דרכים דלות תנועה, בתנאי הארץ.</p>	
2. ממצאים :	
<p>בסקר הספרות נמצא כי בין המדינות השונות קיימים הבדלים בנפח התנועה היומי המרבי המגדיר דרך דלת תנועה. בין המדינות השונות, טווח הערכים של נפח התנועה בדרך דלת תנועה נע בין 100 ל-6,000 כלי רכב, ליממה. ברוב המדינות טווח הערכים הוא בין 400 ל-2,000 כלי רכב ליממה, כאשר בישראל קטעי דרכים עם נפחי תנועה כאלה נדירים למדי. בתאום עם מזמין המחקר דרכים דלות תנועה בתנאי הארץ ובהתאמה, קטעי הדרכים שנכללו במחקר, הוגדרו כלהלן: (א) קטעי דרכים חד-מסלוליים המתוחזקים על-ידי החברה הלאומית לדרכים; (ב) נפח התנועה היומי הממוצע בקטעי הדרך יהיה עד 3,000 כלי רכב (במעוגל); (ג) קטעי הדרך הכלולים במחקר יהיו הן בגבולות הקו הירוק והן בשטחי יהודה ושומרון.</p> <p>על קטעי הדרכים דלות התנועה שנבחרו למחקר נאסף מידע מפורט. המידע על המאפיינים הגיאומטריים ומאפייני תשתית נוספים התקבל מנתוני סקר דרכים שנערך בשנת 2010 ע"י החברה הלאומית לדרכים ואשר סיפק את מאפייני הדרכים למערכת ניהול בטיחות (מני"ב) של החברה. המידע על תאונות הדרכים ונפחי התנועה נאסף מקבצי הלמ"ס. לצורכי המחקר הסגמנטים של המני"ב קובצו לקטעי דרך קצרים באורך של כ-1 ק"מ. לאחר הסרת הסגמנטים שלא התאימו להגדרת קטעי הדרכים במחקר והפקת המאפיינים, בסיס הנתונים של המחקר כלל 1365 קטעי דרך קצרים, באורך כולל של 1235 ק"מ. המידע על מספרי תאונות הדרכים, בכל אחד מהקטעים, נאסף עבור חמש שנים, 2006-2010, לפי מספר סוגי תאונות.</p> <p>המודלים המסבירים פותחו לחמישה סוגי תאונות דרכים שהם: א. התנגשויות בין כלי רכב ("ת"ד"); ב. תאונות רכב יחיד ("ת"ד"). ג. תאונות חמורות (קשות וקטלניות ביחד). ד. סך התאונות עם נפגעים (כל התאונות "ת"ד"). ה. סך התאונות ("ת"ד" ו"כללי עם נפגעים" ביחד). כל מודל אומד את מספר התאונות הצפוי בקטע דרך בחמש שנים. מסיכום המשתנים המסבירים על פני חמשת המודלים עלה כי:</p> <ul style="list-style-type: none"> - בכל המודלים, כמצופה, עליה בנפח התנועה מעלה את מספר התאונות; - הגדלה התחלתית של רוחב שול, עד 2-2.5 מ', מעלה את מספר התאונות. לעומת זאת, המשך הרחבת השול, מעל 2-2.5 מ', מביא לירידה בתאונות; - הרחבה התחלתית של נתיב הנסיעה, עד 3-3.25 מ', מביאה לירידה ברוב סוגי התאונות. הגדלה נוספת של 	



רוחב הנתבי, מעבר ל- 3.25-3 מ', מביאה לעליה בתאונות רכב יחיד וסך התאונות;

- הגדלת רדיוס אופקי מזערי מזוהה עם ירידה בתאונות עם נפגעים, לרבות התנגשויות בין כלי רכב ותאונות רכב יחיד;

- שיפוע צד משפיע על התנגשויות בין כלי רכב, תאונות עם נפגעים וסך התאונות, כאשר מספר התאונות יורד עם עליה בשיפוע צד בתנאי רדיוס אופקי קטן, עד 300 מ';

- שיפור במצב צידי הדרך תורם לירידה בתאונות רכב יחיד, אם כי השפעה זו הייתה קטנה יחסית;

- שיפוע לאורך משפיע על סך התאונות בלבד, כאשר עליה בשיפוע לאורך מזוהה עם עליה בתאונות.

על סמך המודלים שפותחו במחקר, נבנו כלים כמותיים המאפשרים להמחיש את הקשרים בין המאפיינים הגיאומטריים של דרכים דלות התנועה לבין מספר התאונות הצפוי בקטע. כלים אלה הם: (1) הצגת קשרים כמותיים בין כל אחד מהמאפיינים הגיאומטריים של קטעי הדרכים לבין שכיחות התאונות; (2) הערכת מקדמי שינוי בתאונות שמתקשרים עם שינויים במאפיינים הגיאומטריים של קטע דרך.

3. מסקנות:

המודלים שפותחו במחקר לביטוי הקשר בין המאפיינים הגיאומטריים ושכיחות התאונות יכולים לשמש בסיס לבחירת המאפיינים הגיאומטריים של הקטעים, הן בתהליכי התכנון והן בתהליכי תחזוקת הכבישים או טיפול באתרי תורפה.

בנוסף, בעקבות בחינה משולבת של ממצאי המודלים שפותחו במחקר, ממצאי הספרות והמידות הגבוליות של המאפיינים הגיאומטריים מההנחיות לתכנון דרכים בין-עירוניות בארץ, התקבלו המלצות לתכנון מאפייני הדרכים דלות התנועה.

בעת שדרוג קטעי הדרכים, מומלץ לבצע בחינה מפורטת, בעזרת הכלים הכמותיים המוצגים בפרק 4 של הדו"ח, כדי להשוות בין המשמעויות הבטיחותיות של חלופות תכנון שונות.

מילות מפתח: דרך דלת תנועה, תאונות דרכים, מאפיינים גיאומטריים, מודל מסביר, מקדם שינוי בתאונות

סווג תפוצה (של הדו"ח):	סווג תפוצה (של עמוד זה):	מס' עמודים : 187
-------------------------	----------------------------	------------------

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 ושאינם 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

10	תקציר
16	1. מבוא וסקר ספרות בינלאומית
16	1.1. רקע ותיאור המחקר
17	1.2. נושא סקר הספרות
18	1.3. הגדרות דרכים דלות תנועה, בניסיון הבינלאומי
18	1.4. הנחיות לתכנון דרכים דלות תנועה
20	1.4.1. ריכוז ממצאים ממדינות ה-OECD והמלצות לתכן דרכים דלות תנועה
21	1.4.2. הנחיות AASHTO לתכן גיאומטרי של דרכים דלות תנועה
24	1.4.3. הנחיות מרכז בינוי צה"ל
25	1.4.4. כבישים ללא אבא
25	1.5. מודלים לחיזוי תאונות על-פי מאפייני הדרך
26	1.5.1. חתך רוחב - רוחב נתיב ורוחב שול
39	1.5.2. שילוב רוחב נתיב ורוחב שול
40	1.5.3. הגבהה צדית
42	1.5.4. תוואי אופקי- עקמומיות
45	1.5.5. עקביות של תוואי אופקי
45	1.5.6. תוואי אנכי - שיפוע
48	1.5.7. מודלים רב משתנים לחיזוי תאונות
63	1.6. מחקרים ישראליים על בטיחות בדרכים דלות תנועה
63	1.6.1. דרכים בעלות ארבע ספרות
64	1.6.2. עקביות תכן בדרכים חד-מסלוליות
65	1.6.3. שיעור תאונות בדרכים דלות תנועה בישראל
66	1.7. סיכום ומסקנות מסקר הספרות
68	2. הכנת בסיס הנתונים למחקר
68	2.1. איסוף מידע על נפחי תנועה
69	2.2. מאפייני הדרכים
69	2.2.1. מידע קיים על מאפייני הדרכים וממצאי בדיקתו לצורכי המחקר
73	2.2.2. הכנת בסיס נתונים עם מאפייני הדרכים, למחקר
77	2.3. נתוני תאונות הדרכים בקטעי הדרך הנחקרים
78	2.4. בסיס הנתונים עם כל מאפייני הדרכים
	3. ניתוח הנתונים ופיתוח מודלים לביטוי הקשר בין מאפייני הדרכים דלות תנועה לבין שכיחות התאונות
81	3.1. בחינת הנתונים
81	3.1.1. מבנה בסיס הנתונים
84	3.1.2. שלבי הניתוח - כללי
84	3.1.3. בחינת המשתנים המסבירים
90	3.1.4. סיכום: המשתנים המסבירים שנבחרו לפיתוח המודלים
91	3.2. פיתוח המודלים

91	3.2.1. שיטת הניתוח.....
92	3.2.2. המודלים שהותאמו במחקר לקשר בין מאפייני הקטעים והתרחשות התאונות.....
100	4. שימוש במודלים שפותחו במחקר לבחינת השפעת מאפייני תשתית על שכיחות התאונות.....
100	4.1. כללי.....
102	4.2. השפעת מאפייני הקטע על התנגשויות כלי רכב.....
102	4.2.1. צורת הקשר בין המאפיינים הגיאומטריים לבין שכיחות התאונות.....
106	4.2.2. מקדמי שינוי בתאונות הקשורים לשינויים במאפיינים הגיאומטריים.....
110	4.3. השפעת מאפייני הקטע על תאונות רכב יחיד.....
110	4.3.1. צורת הקשר בין המאפיינים הגיאומטריים לבין שכיחות התאונות.....
114	4.3.2. מקדמי שינוי בתאונות הקשורים לשינויים במאפיינים הגיאומטריים.....
119	4.4. השפעת מאפייני הקטע על התאונות החמורות.....
119	4.4.1. צורת הקשר בין המאפיינים הגיאומטריים לבין שכיחות התאונות.....
121	4.4.2. מקדמי שינוי בתאונות הקשורים לשינויים במאפיינים הגיאומטריים.....
124	4.5. השפעת מאפייני הקטע על סך התאונות עם נפגעים.....
124	4.5.1. צורת הקשר בין המאפיינים הגיאומטריים לבין שכיחות התאונות.....
128	4.5.2. מקדמי שינוי בתאונות הקשורים לשינויים במאפיינים הגיאומטריים.....
132	4.6. השפעת מאפייני הקטע על סך התאונות.....
133	4.6.1. צורת הקשר בין המאפיינים הגיאומטריים לבין שכיחות התאונות.....
137	4.6.2. מקדמי שינוי בתאונות הקשורים לשינויים במאפיינים הגיאומטריים.....
142	4.7. סיכום להשפעת מאפייני התשתית על התאונות, על סמך כל המודלים ביחד.....
143	4.8. דוגמאות לשימוש במודלים להערכת קטע דרך מסוים.....
147	5. סיכום ומסקנות.....
147	5.1. סיכום לממצאי המחקר.....
152	5.2. דיון והמלצות.....
152	5.2.1. רוחב שול.....
153	5.2.2. רוחב נתיב.....
153	5.2.3. רדיוס אופקי מזערי.....
153	5.2.4. שיפוע צד מרבי.....
154	5.2.5. מצב צידי הדרך.....
154	5.2.6. שיפוע לאורך.....
155	מראי מקום.....
160	נספח א': רשימת קטעי הדרכים למחקר.....
	נספח ב': ניתוח מגשש של המשתנים המסבירים - היסטוגרמות ותרשימי קופסה (BOX-PLOTS)
164	של הנתונים.....
	נספח ג': תוצאות הרצת התוכנות GMB ו-GAM לגבי חשיבות המשתנים המסבירים לסוגי
167	תאונות שונים.....

רשימת טבלאות וציורים

- טבלה 1.1. סיווג דרכים דלות תנועה על-פי נפח תנועה יומי, במדינות השונות*.
- טבלה 1.2. נתונים השוואתיים של אורך רשת הדרכים לעומת דרכים דלות תנועה, במדינות השונות (OECD, 1986)
- טבלה 1.3. מקדמי הפחתת תאונות בתלות ברוחב נתיב.
- טבלה 1.4. מקדמי שינוי בתאונות בתלות ברוחב שול.
- טבלה 1.5. המלצות תכנון לשילוב רוחב נתיב ורוחב שול, על-פי נפח התנועה, מהירות התכן ואחוז כלי רכב כבדים.
- טבלה 1.6. השפעת ליקוי בהגבהה הצדית על בטיחות בעקום אופקי.
- טבלה 1.7. היקף הנתונים שנאספו בפורטוגל לבחינת רמת הבטיחות של דרכים דו-נתיביות
- טבלה 1.8. מקדמי רגרסיה במודלים המסבירים שהותאמו לקטעי דרכים עם שול לא סלול, לפי Cardoso (2001a, 2001b)
- טבלה 1.9. מקדמי רגרסיה במודלים המסבירים שהותאמו לקטעי דרכים עם שול סלול, לפי Cardoso (2001a, 2001b)
- טבלה 1.10. מקדמי המודלים המסבירים לתאונות עם נפגעים בתלות באורך הקטע ונפח התנועה
- טבלה 1.11. מקדמי המודלים המסבירים לתאונות עם נפגעים בתלות באומדן הנסועה בקטע
- טבלה 1.12. מקדמי המודלים המסבירים לתאונות על-פי המודל הראשון של Mountain et al (1996)
- טבלה 1.13. מקדמי המודלים המסבירים לתאונות על פי המודל השני של Mountain et al (1996)
- טבלה 1.14. שיעורי התאונות למאפייני דרך שונים, לפי Prinsloo and Goudanas (2003)
- טבלה 1.15. השפעת סוגי סימון שונים על שיעורי התאונות בדרך דו-מסלולית, לפי Prinsloo and Goudanas (2003)
- טבלה 1.16. מקדמי המודל לחיזוי התאונות על פי סוג תאונה, בשנת 1995. מתוך: Qin et al (2004)
- טבלה 1.17. מקדמי המודלים לחיזוי סך התאונות בדרכים חד-מסלוליות ומהירות, לפי Turner et al (2000), (2003)
- טבלה 1.18. מקדמי המודל לסך התאונות בקטע דרך, לפי IHSDM
- טבלה 1.19. ערכי מקדמי העקביות שהוערכו לקטעי דרך נבחרים, ע"י חביב-מטר (2001)
- טבלה 2.1. מספר קטעי הדרך ואורכם הכולל על-פי נפח תנועה יומי מרבי שנקבע לבחירת הקטעים
- טבלה 2.2. קטעי דרך שעבורם לא נמצאו נתונים במנ"ב
- טבלה 2.3. דרוג תחומי רדיוס אופקי מזערי על פי מהירויות התכן
- טבלה 2.4. דרוג תחומי רדיוס אנכי קמור מזערי על-פי מהירויות התכן
- טבלה 2.5. דרוג תחומי רדיוס אנכי קעור מזערי על-פי מהירויות התכן
- טבלה 2.6. תחומי "רמות הבטיחות" של צדי הדרך על-פי מאפייני המעקות
- טבלה 2.7. תכן סלחני - הרוחב המומלץ של אזור המפלט מקצה המיסעה בקטעי מילוי או חפירה (המידות במטרים)*.
- טבלה 2.8. תחומי "רמות הבטיחות" של צדי הדרך על-פי רוחב אזור המפלט ונפח תנועה יומי
- טבלה 2.9. סך התאונות בקטעי המחקר, לפי סוגים מקובצים, בשנים 2006-2010
- טבלה 3.1. מבנה בסיס הנתונים שנמסר לניתוח

- טבלה 3.2. בחינת התפלגות מספרי התאונות, מהסוגים הנבחנים, בין קטעי המחקר
- טבלה 3.3. ממוצעים וטווחי הערכים של המשתנים המסבירים
- טבלה 3.4. השפעת מאפייני הקטע על תאונות התנגשות בין כלי הרכב - COL5
- טבלה 3.5. השפעת מאפייני הקטע על תאונות רכב יחיד - SNG5
- טבלה 3.6. השפעת מאפייני הקטע על התאונות החמורות - TDS5
- טבלה 3.7. השפעת מאפייני הקטע על תאונות עם נפגעים - TDT5
- טבלה 3.8. השפעת מאפייני הקטע על סך התאונות - ALL5
- טבלה 4.1. ערכי השינוי בתאונות התנגשות - AMF_n - הקשורים לשינויים בערכי המאפיינים הגיאומטריים של קטע דרך
- טבלה 4.2. ערכי השינוי בתאונות רכב יחיד - AMF_n - הקשורים לשינויים בערכי המאפיינים הגיאומטריים של קטע דרך
- טבלה 4.3. ערכי השינוי בתאונות החמורות - AMF_n - הקשורים לשינויים בערכי המאפיינים הגיאומטריים של קטע דרך
- טבלה 4.4. ערכי השינוי בסך התאונות עם נפגעים - AMF_n - הקשורים לשינויים בערכי המאפיינים הגיאומטריים של קטע דרך
- טבלה 4.5. ערכי השינוי בסך התאונות - AMF_n - הקשורים לשינויים בערכי המאפיינים הגיאומטריים של קטע דרך
- טבלה 4.6. סיכום להשפעת מאפייני התשתית על התרחשות התאונות, מהסוגים השונים, בקטעי דרכים דלות תנועה
- טבלה 4.7. דוגמא 1: הערכת השינויים הצפויים במספרי התאונות, מהסוגים השונים, בעקבות שיפורי תשתית
- טבלה 4.8. דוגמא 2: הערכת השינויים הצפויים במספרי התאונות, מהסוגים השונים, בעקבות שיפורי תשתית
- טבלה 5.1. סיכום להשפעת מאפייני התשתית על התרחשות התאונות, מהסוגים השונים, בקטעי דרכים דלות תנועה
- איור 1.1. הקשר בין רוחב נתיב ותאונות, בהינתן נפח יומי של 1,000 כלי רכב ולפי רוחב שונה של שוליים סלולים.
- איור 1.2. הקשר בין רוחב נתיב ותאונות, בהינתן נפח יומי של 4,000 כלי רכב ולפי רוחב שונה של שוליים סלולים.
- איור 1.3. הקשר בין מספר התאונות לרוחב נתיב, בתלות ברוחב שונה של שוליים לא סלולים.
- איור 1.4. הקשר בין מספר התאונות לרוחב נתיב, בתלות ברוחב שונה של שוליים סלולים.
- איור 1.5. מקדם שינוי בתאונות בתלות בשינוי רוחב נתיב, לפי Vogt and Bared (1988).
- איור 1.6. שינוי בתאונות בתלות ברוחב המיסעה, לפי המודלים בשתי מדינות: צפון קרוליינה וקליפורניה, לפי Council and Stewart (2000).
- איור 1.7. מקדמי שינוי בתאונות (מהסוגים הרלוונטיים) בתלות בנפח תנועה יומי ורוחב נתיב.
- איור 1.8. מקדמי שינוי בכלל התאונות, בתלות בנפח תנועה יומי ורוחב נתיב.
- איור 1.9. מקדמי שינוי בתאונות בתלות ברוחב שול, עבור נפח יומי של 1,000 כלי רכב ורוחב נתיב שונה.
- איור 1.10. מקדמי שינוי בתאונות בתלות ברוחב שול, עבור נפח תנועה יומי של 4,000 כלי רכב ורוחב נתיב שונה.
- איור 1.11. מקדמי שינוי בתאונות הרלוונטיות, בתלות ברוחב שול לא סלול ורוחב נתיב.

- איור 1.12. מקדמי שינוי בתאונות הרלוונטיות בתלות ברוחב שול סלול ורוחב נתיב.
- איור 1.13. מספר תאונות צפוי לק"מ דרך בתלות ברוחב שול, בארבע מדינות בארה"ב.
- איור 1.14. מקדמי שינוי בתאונות הרלוונטיות בתלות בנפח התנועה וברוחב שול.
- איור 1.15. מקדמי שינוי בסך התאונות, בתלות בנפח התנועה וברוחב שול סלול.
- איור 1.16. מקדמי שינוי בסך התאונות, בתלות בנפח התנועה וברוחב שול לא סלול (מצעים).
- איור 1.17. מקדם שינוי בתאונות בתלות בליקוי בהגבהה הצידיית.
- איור 1.18. מספר תאונות בשנה בתלות ברדיוס העקום, עבור אורך עקום קבוע - 1,000 מ' ונפח יומי ממוצע 3,000 כלי רכב.
- איור 1.19. מספר תאונות בעקום בשנה, בתלות ברדיוס ורוחב המיסעה, עבור אורך עקום קבוע 1,000 מ' ונפח יומי ממוצע 3,000 כלי רכב.
- איור 1.20. מקדם שינוי תאונות בעקום, בתלות באורך העקום וברדיוס העקום.
- איור 1.21. מקדם שינוי תאונות בתלות בהפרש בין הגבהה צדית קיימת לבין ההגבהה הנדרשת ולפי מספר ערכים של שיעור תאונות ממוצע לק"מ.
- איור 1.22. מקדם שינוי בתאונות בתלות בשינוי בשיפוע.
- איור 1.23. מקדם שינוי בתאונות בתלות בשיפוע אנכי, לפי ה-IHSDM.
- איור 1.24. מספר תאונות קטלניות וקשות הצפוי לק"מ דרך, במשך 3 שנים, בתלות בנפח התנועה בדרך (באלפים) - התאמת רגרסיה פואסוניית לנתונים.
- ציור 4.1. הקשר בין המאפיינים הגיאומטריים לבין מספר תאונות התנגשות הצפוי בקטע.
- ציור 4.2. צורת הקשר בין ערכי המאפיינים הגיאומטריים לבין מספר תאונות התנגשות הצפוי בקטע ב-5 שנים, בשיטת ה"כופל".
- ציור 4.3. הקשר בין המאפיינים הגיאומטריים לבין מספר תאונות רכב יחיד הצפוי בקטע.
- ציור 4.4. צורת הקשר בין ערכי המאפיינים הגיאומטריים לבין מספר תאונות רכב יחיד הצפוי בקטע ב-5 שנים, בשיטת ה"כופל".
- ציור 4.5. הקשר בין המאפיינים הגיאומטריים לבין מספר התאונות החמורות הצפוי בקטע.
- ציור 4.6. צורת הקשר בין ערכי המאפיינים הגיאומטריים לבין מספר התאונות החמורות הצפוי בקטע ב-5 שנים, בשיטת ה"כופל".
- ציור 4.7. הקשר בין המאפיינים הגיאומטריים לבין סך מספר התאונות עם נפגעים הצפוי בקטע.
- ציור 4.8. צורת הקשר בין ערכי המאפיינים הגיאומטריים לבין סך מספר התאונות עם נפגעים הצפוי בקטע ב-5 שנים, בשיטת ה"כופל".
- ציור 4.9. הקשר בין המאפיינים הגיאומטריים לבין סך מספר התאונות הצפוי בקטע.
- ציור 4.10. צורת הקשר בין ערכי המאפיינים הגיאומטריים לבין סך מספר התאונות הצפוי בקטע ב-5 שנים, בשיטת ה"כופל".

תקציר

1. כללי

מטרת המחקר הנוכחי הייתה לזהות קשרים סטטיסטיים בין המאפיינים הגיאומטריים ואחרים של דרכים חד-מסלוליות המשרתות נפחי תנועה נמוכים (דלות תנועה) לבין מספר וסוגי התאונות. בביצוע המחקר היו שלבים אלה: סקר ספרות בינלאומית בנושא המחקר; הכנת בסיס הנתונים למחקר; ניתוח הנתונים ופיתוח מודלים מסבירים. בהמשך, על סמך המודלים שפותחו במחקר נבנו כלים כמותיים לשימוש ההנדסי במסגרת תהליכי תכנון דרכים חדשות ו/או שיפור מאפייני הדרכים הקיימות וכמו כן, גובשו המלצות לשילוב ממצאי המחקר בתהליכי התכנון של דרכים דלות תנועה, בתנאי הארץ.

2. סקר ספרות

סקר הספרות שנערך במחקר התייחס לנושאים אלה: הגדרות של דרכים דלות תנועה, במדינות השונות; הנחיות תכנון של המאפיינים השונים בדרכים דלות התנועה, במדינות השונות; ממצאים מפיתוח מודלים מסבירים לקשר בין נפחי התנועה, מאפיינים גיאומטריים ואחרים של הדרכים ושכיחות התאונות, בדרכים החד-מסלוליות עם דגש על דרכים דלות תנועה; ריכוז ממצאי המחקרים מהארץ על בטיחות בדרכים חד-מסלוליות וחד-מסלוליות דלות תנועה. בסקר הספרות נמצא כי:

* הגדרה של דרכים דלות תנועה: בכל המדינות, דרך דלת תנועה היא דרך בין-עירונית חד-מסלולית דו-סטריית. בין המדינות השונות יש הבדלים בנפח התנועה היומי המרבי המגדיר דרך דלת תנועה, כאשר במספר מדינות, ישנן מספר היררכיות של דרכים דלות התנועה המוגדרות בטווחים השונים של נפחי תנועה ממוצעים. טווח הערכים של נפח התנועה נע בין 100 ל-6,000 כלי רכב, ליממה, כאשר ברוב המדינות טווח הערכים הוא בין 400 ל-2,000 כלי רכב ליממה;

* לגבי הנחיות תכנון לדרכים דלות תנועה: עקב נפח תנועה נמוך, התקציב לסלילה ולאחזקה של דרכים דלות התנועה נמוך, לכן ערכי התכן המזעריים לדרכים אלו נמוכים ביחס לערכי התכן המזעריים לדרכים החד-מסלוליות עם נפחי תנועה גדולים יותר. ערכי התכן המזעריים אותם נהוג לצמצם הם: מהירות התכן, רוחב נתיב ורוחב שול;

* לגבי המודלים הכמותיים להערכת מספרי התאונות: נמצאו דוגמאות רבות למודלים לחיזוי התאונות בדרכים בין-עירוניות חד-מסלוליות. לפיתוח מודלים אלה השתמשו במאפיינים הגיאומטריים של קטעי הדרכים, נפחי התנועה, והנתונים של תאונות הדרכים. באמצעות שיטות סטטיסטיות זוהו המאפיינים המשפיעים ונמצא ביטוי כמותי להשפעתם של משתנים מסוימים על מספר או שיעור התאונות (תאונות לנסועה) בקטע דרך. במודלים אחרים, נבחנה השפעה של ערכים תכנוניים של רכיב תכנוני אחד או של מספר רכיבי תכנון על שיעור התאונות הממוצע החזוי שהתקבל ממודל בסיסי. רכיבי התכנון שהשפעתם נמצאה במודלים הם: רוחב נתיב, רוחב שול, שילוב בין רוחב נתיב ורוחב שול, יחס בין שול סלול לשול לא סלול, סוג שול, חוסר בהגבהה צידית (ביחס להנחיות התכנון), עקמומיות, עקביות ושיפוע.

* לגבי המחקרים מהארץ: במחקר על דרכים חד-מסלוליות בין-עירוניות בעלות ארבע ספרות נמצא ששיעור התאונות בדרכים אלו גבוה ביחס לשיעור התאונות בשאר סוגי הדרכים ברשת הבין-עירונית. כמו כן, נמצא קשר בין מספר התאונות עם נפגעים בדרכים אלה לבין נפח התנועה והמדד שמבטא את המורכבות הגיאומטרית של הדרך. במחקר אחר נמצא קשר בין עלייה בעקביות התכן לירידה בשיעור התאונות.

במחקר נוסף של רמת הבטיחות של דרכים דלות תנועה בישראל הוגדרה דרך דלת תנועה עם נפח תנועה עד 3,000 כלי רכב ביממה. על סמך נתונים על תאונות בדרכים אלה הותאם מודל לחיזוי מספר התאונות החמורות על-פי נפחי התנועה. לכל קטע דרך חושב מדד בטיחות על-פי הסטייה בין מספר התאונות בפועל למספר התאונות החזוי. בעזרת מדד זה, נמצאו קטעי דרך בטוחים ומסוכנים, לעומת ממוצע התאונות בקטעים מסוג זה.

סה"כ, בעולם קיים ידע וניסיון סטטיסטי לפיתוח מודלים שונים להערכת מספרי התאונות בדרכים דלות תנועה, על סמך הנתונים של התאונות, נפחי התנועה והמאפיינים הגיאומטריים של דרכים אלה. עם זאת, הרכב המשתנים המסבירים שנשאר במודל הסטטיסטי לחיזוי מספר התאונות אינו קבוע ומשתנה בתלות בהגדרות הקטעים לניתוח, זמינות הנתונים, היקף הנתונים הנבחנים, מטרות הניתוח וכד'.

3. בסיס הנתונים של המחקר

בסקר הספרות נמצא כי בין המדינות השונות קיימים הבדלים בנפח התנועה היומי המרבי המגדיר דרך דלת תנועה. בין המדינות השונות, טווח הערכים של נפח התנועה בדרך דלת תנועה נע בין 100 ל-6,000 כלי רכב, ליממה. ברוב המדינות טווח הערכים הוא בין 400 ל-2,000 כלי רכב ליממה, כאשר בישראל קטעי דרכים עם נפחי תנועה כאלה נדירים למדי.

בתאום עם מזמין המחקר דרכים דלות תנועה בתנאי הארץ ובהתאמה, קטעי הדרכים שנכללו במחקר, הוגדרו כלהלן:

(א) קטעי דרכים חד-מסלוליים המתוחזקים על-ידי החברה הלאומית לדרכים;

(ב) נפח התנועה היומי הממוצע בקטעי הדרך יהיה עד 3,000 כלי רכב (במעוגל);

(ג) קטעי הדרך הכלולים במחקר יהיו הן בגבולות הקו הירוק והן בשטחי יהודה ושומרון.

בעקבות ניתוח קבצי הלמ"ס והצלבתם עם המידע ממערכת מני"ב של מע"צ ברשת הדרכים הלא עירונית נמצאו 164 קטעי דרך כאלה, באורך כולל של 1451 ק"מ.

על קטעי הדרכים דלות התנועה שנבחרו למחקר נאסף מידע מפורט. המידע על המאפיינים הגיאומטריים ומאפייני תשתית נוספים התקבל מנתוני סקר דרכים שנערך בשנת 2010 ע"י החברה הלאומית לדרכים ואשר סיפק את מאפייני הדרכים למערכת ניהול בטיחות (מני"ב) של החברה. המידע על תאונות הדרכים ונפחי התנועה נאסף מקבצי הלמ"ס.

הנתונים על מאפייני הדרכים נאספו במני"ב עבור סגמנטים באורך של כ-100 מ'. לצורכי המחקר קובצו הסגמנטים לקטעי דרך קצרים באורך של כ-1 ק"מ. לכל קטע קצר הופקו כל המאפיינים הזמינים, באמצעות מיצוע, על פני הסגמנטים שמרכיבים אותו, או כלל אחר, שמתוארים בפרק 2 של הדו"ח. לאחר הסרת הסגמנטים שלא התאימו להגדרת קטעי הדרכים במחקר והפקת

המאפיינים, בסיס הנתונים של המחקר כלל 1365 קטעי דרך קצרים, באורך כולל של 1235 ק"מ. המידע על מספרי תאונות הדרכים, בכל אחד מהקטעים, נאסף עבור חמש שנים, 2006-2010, לפי מספר סוגי תאונות.

4. פיתוח מודלים מסבירים לקשר בין מאפייני הקטעים ותאונות הדרכים

על הנתונים שנאספו, נערך מגוון ניתוחים חד-ורב-פרמטריים, על מנת לפתח מודלים מסבירים לקשר בין מאפייני הדרכים דלות התנועה לבין התרחשות התאונות. המודלים המסבירים פותחו לחמישה סוגי תאונות דרכים שהם:

א. התנגשויות בין כלי רכב ("תי"ד") - לפי המודל שהותאם במחקר, משתנים המשפיעים על תאונות התנגשות הם רוחב שול, רדיוס אופקי מזערי, שיפוע צד מרבי, נפח התנועה ואורך קטע.

ב. תאונות רכב יחיד ("תי"ד") - לפי המודל שהותאם במחקר, משתנים המשפיעים על תאונות אלה הם רוחב שול, רדיוס אופקי מזערי, מצב צדי הדרך, רוחב נתיב, נפח התנועה ואורך קטע.

ג. תאונות חמורות (קשות וקטלניות ביחד) - לפי המודל שהותאם במחקר, משתנים המשפיעים על תאונות חמורות הם רוחב שול, רוחב נתיב, נפח התנועה ואורך קטע.

ד. סך התאונות עם נפגעים (כל התאונות "תי"ד") - לפי המודל שהותאם במחקר, משתנים המשפיעים על תאונות עם נפגעים הם רוחב נתיב, רוחב שול, רדיוס אופקי מזערי, שיפוע צד מרבי, נפח התנועה ואורך קטע.

ה. סך התאונות ("תי"ד" ו"כללי עם נפגעים" ביחד) - לפי המודל שהותאם במחקר, משתנים המשפיעים על סך התאונות הם רוחב נתיב, רוחב שול, שיפוע אורך מרבי, שיפוע צד מרבי, נפח התנועה ואורך קטע.

כל מודל אומד את מספר התאונות הצפוי בקטע דרך בחמש שנים. (הערך השנתי הינו חמישית מהאומדן המתקבל בעזרת מודל).

טבלה א' מסכמת את הממצאים, על פני חמשת המודלים. ניתן לראות כי:

- השפעת מאפייני התשתית השונים הייתה עקבית, בכל המודלים, אם כי, מספר המאפיינים המסבירים משתנה בין המודלים;

- בכל המודלים, כמצופה, עליה בנפח התנועה מעלה את מספר התאונות;

- הגדלה התחלתית של רוחב שול, עד 2-2.5 מ', מעלה את מספר התאונות. לעומת זאת, המשך הרחבת השול, מעל 2-2.5 מ', מביא לירידה בתאונות;

- הרחבה התחלתית של נתיב הנסיעה, עד 3-3.25 מ', מביאה לירידה ברוב סוגי התאונות. הגדלה נוספת של רוחב הנתיב, מעבר ל-3-3.25 מ', מביאה לעליה בתאונות רכב יחיד וסך התאונות;

- הגדלת רדיוס אופקי מזערי מזוהה עם ירידה בתאונות עם נפגעים, לרבות התנגשויות בין כלי רכב ותאונות רכב יחיד;

- שיפוע צד משפיע על התנגשויות בין כלי רכב, תאונות עם נפגעים וסך התאונות, כאשר, בכל המקרים, מספר התאונות עולה עם עליה בשיפוע צד בתנאי רדיוס אופקי גדול, בעוד שמספר התאונות יורד עם עליה בשיפוע צד בתנאי רדיוס אופקי קטן, עד 300 מ';

- מצב צדי הדרך משפיע על סוג אחד של תאונות - תאונות רכב יחיד, כאשר שיפור במצב צדי הדרך תורם לירידה בתאונות אלה, אם כי השפעה זו הייתה קטנה יחסית;

- שיפוע אורך נמצא כמשפיע על סך התאונות בלבד (תאונות ת"ד ו-"כללי עם נפגעים", ביחד), כאשר עליה בשיפוע לאורך מזוהה עם עליה בתאונות.

טבלה א'. סיכום להשפעת מאפייני התשתית על התרחשות התאונות, מהסוגים השונים, בקטעי דרכים דלות תנועה

שינוי בתאונות עם עליה בערך המשתנה					משתנה מסביר
ALL5 סך התאונות	TDT5 תאונות עם נפגעים	TDS5 תאונות חמורות	SNG5 תאונות רכב יחיד	COL5 התנגשויות בין כלי רכב	
עליה	עליה	עליה	עליה	עליה	נפח תנועה יומי - AADT, אלף כלי רכב
עליה (כאשר רוחב שול עד 2 מ')	עליה (כאשר רוחב שול עד 2.5 מ')	עליה (כאשר רוחב שול עד 2.5 מ')	עליה (כאשר רוחב שול עד 2 מ')	עליה (כאשר רוחב שול עד 2.75 מ')	רוחב שול ממוצע, מ'
ירידה (כאשר רוחב שול מעל 2 מ')	ירידה (כאשר רוחב שול מעל 2.5 מ')	ירידה (כאשר רוחב שול מעל 2.5 מ')	ירידה (כאשר רוחב שול מעל 2 מ')	ירידה (כאשר רוחב שול מעל 2.75 מ')	רוחב שול ממוצע, מ'
ירידה (כאשר רוחב נתיב עד 3 מ')	ירידה	ירידה	ירידה (כאשר רוחב נתיב עד 3.25 מ')	--	רוחב נתיב ממוצע, מ'
עליה (כאשר רוחב נתיב מעל 3 מ')	--	--	עליה (כאשר רוחב נתיב מעל 3.25 מ')	--	רוחב נתיב ממוצע, מ'
--	ירידה	--	ירידה	ירידה	רדיוס אופקי מזערי, מ'
עליה (כאשר רדיוס אופקי מזערי 300 מ' או גדול יותר)	עליה (כאשר רדיוס אופקי מזערי 300 מ' או גדול יותר)	--	--	עליה (כאשר רדיוס אופקי מזערי 300 מ' או גדול יותר)	שיפוע צד מרבי, %
ירידה (כאשר רדיוס אופקי מזערי קטן מ-300 מ')	ירידה (כאשר רדיוס אופקי מזערי קטן מ-300 מ')	--	--	ירידה (כאשר רדיוס אופקי מזערי קטן מ-300 מ')	שיפוע צד מרבי, %
--	--	--	ירידה	--	ציון משוקלל של צדי הדרך
עליה	--	--	--	--	שיפוע אורך מרבי, %

5. כלים כמותיים לשימוש ההנדסי

על סמך המודלים שפותחו במחקר, נבנו כלים כמותיים המאפשרים להמחיש את הקשרים בין המאפיינים הגיאומטריים של דרכים דלות התנועה לבין מספר התאונות הצפוי בקטע. כלים אלה הם:

* הצגת קשרים כמותיים בין כל אחד מהמאפיינים הגיאומטריים של קטעי הדרכים לבין שכיחות התאונות;

* הערכת מקדמי שינוי בתאונות שמתקשרים עם שינויים במאפיינים הגיאומטריים של קטע דרך.

הכלים הכמותיים נבנו עבור כל אחד מחמשת סוגי התאונות שנותחו במחקר ועבור כל אחד מהמאפיינים הגיאומטריים של הקטעים שנמצאו כמשפיעים על התרחשות התאונות, לפי המודלים.

ההצגה הגרפית של הקשרים נערכה בשני אופנים:

(א) הקשר בין ערכי מאפיין מסוים לבין שכיחות התאונות מוצג בעזרת שני גרפים אשר נוצרו בעקבות חישוב שני מקרים לדוגמא, עם ערכים מסוימים של יתר מאפייני הקטעים;

(ב) צורת הקשר בין ערכי מאפיין מסוים לבין שכיחות התאונות מוצגת בשיטת ה"כופל", כאשר לכל שינוי בערך המאפיין מוצג השינוי היחסי בשכיחות התאונות לעומת ערך מסוים של אותו המאפיין שנבחר כבסיס החישוב ושעבורו ערך הכופל שווה 1.

להצגת הממצאים בשיטת ה"כופל" נבחרו ערכים טיפוסיים של מאפייני הקטעים - ערכי הבסיס, כלהלן: רוחב נתיב 2.8 מ'; רוחב שול 2 מ'; ציון משוקלל של מצב צדי הדרך 1.5; רדיוס אופקי מזערי 200 מ'; שיפוע צד מרבי 4%; שיפוע אורכי מרבי 5%. כלומר, הגרפים בשיטת ה"כופל" מראים את השינוי היחסי בשכיחות התאונות כאשר ערך המאפיין משתנה לעומת ערך הבסיס.

אוסף מלא של הכלים הכמותיים לשימוש ההנדסי מוצג בפרק 4 של הדו"ח. ידע כמותי זה לגבי השינוי הצפוי בתאונות, בעקבות שינוי במאפיין הגיאומטרי, עשוי לסייע בעת קבלת ההחלטות בשלבי תכנון של דרך חדשה או שיפור קטע דרך קיים/ טיפול באתר תורפה.

6. המלצות לשילוב ממצאי המחקר בתהליכי תכנון של דרכים דלות תנועה

המודלים שפותחו במחקר לביטוי הקשר בין המאפיינים הגיאומטריים ושכיחות התאונות יכולים לשמש בסיס לבחירת המאפיינים הגיאומטריים של הקטעים, הן בתהליכי התכנון והן בתהליכי תחזוקת הכבישים או טיפול באתרי תורפה.

בנוסף, בעקבות בחינה משולבת של ממצאי המודלים שפותחו במחקר, ממצאי סקר הספרות והמידות הגבוליות של המאפיינים הגיאומטריים מההנחיות לתכנון דרכים בין-עירוניות בארץ, התקבלו המלצות לתכנון מאפייני הדרכים דלות התנועה, כלהלן:

- להרחיב רוחב שול בדרכים דלות תנועה ל-3.0 מ'. על מנת לחסוך בעלויות, ניתן לאפשר הרחבה של שול סלול קיים ברוחב 2.0 מ', באמצעות שול ממצעים (לא סלול באספלט);

- להרחיב רוחב נתיב בדרכים דלות תנועה ל-3.2 מ';

- להמעט ככל האפשר בתכנון עיקולים ברדיוס הקטן מ-300 מ' בדרכים דלות תנועה. במקרים בהם הרדיוס האופקי קטן מ-300 מ' להתקין אמצעי אזהרה לנהג;

- לבחון את הפער בין המצב הקיים לבין ההנחיות בהקשר להגבהות הצידיים בעיקולים, בדרכים הקיימות. במידה וקיים פער כזה לפעול לצמצומו;

- לבחון את הפער בין המצב הקיים לבין ההנחיות, בהקשר לסלחנות צידי הדרך, בדרכים הקיימות. במידה וקיים פער כזה, לפעול לצמצומו ;

- בדרכים הקיימות, במקומות בהם ישנה חריגה מההנחיות לגבי השיפוע לאורך להציב תמרורי אזהרה.

בעת שדרוג קטעי הדרכים, מומלץ לבצע בחינה מפורטת, בעזרת הכלים הכמותיים המוצגים בפרק 4 של הדו"ח, כדי להשוות בין המשמעויות הבטיחותיות של חלופות תכנון שונות.

1. מבוא וסקר ספרות בינלאומית

1.1. רקע ותיאור המחקר

מבין למעלה מ- 7000 ק"מ של הדרכים הלא עירוניות בישראל, יותר מ-80% מהוות דרכים חד-מסלוליות, אשר מעבירות כ-40% מהנסועה השנתית. ע"פ הערכות¹, בשנים 2006-2008, הדרכים החד-מסלוליות ריכזו כמחצית מהתאונות הקלות וכ-60% מהתאונות הקשות והקטלניות, כאשר מדד קטלניות הנסיעה (הרוגים למיליארד נסועה) היה גבוה כפי שתיים וחצי בדרכים החד-מסלוליות לעומת הדו-מסלוליות.

מבין הדרכים החד-מסלוליות, אחת הקבוצות הבעייתיות היא דרכים דו-נתיביות המשרתות נפחי תנועה נמוכים (דלות תנועה). חלקן הגדול של דרכים אלה תוכננו ונסללו בעבר הרחוק ע"פ סטנדרטיים שלא תואמים את המקובל היום. חלק מדרכים אלה משמשות כדרכי גישה לישובים, לכן, גם ברמת הנחיות התכנון, הן נדרשו לעמוד ברמת שרות נמוכה, כשהמשמעות היא מידות מינימאליות לכל מאפייני הדרך הגיאומטריים. קטעי דרכים אלה, לא פעם, מתאפיינים בגיאומטריה בעייתית, תנאים לא סלחניים של צדי הדרך, שימוש במעקות בטיחות מיושנים, רמה נמוכה של הסדרים, היעדר אמצעי סימון מתקדמים וכד'. עקב תנאי תשתית בעייתיים חלק מקטעי דרכים אלה מתקשרים עם שכילות גבוהה מן הרגיל של תאונות הדרכים, ומתאפיינים בערכים גבוהים של מדדי הרוגים לנסועה.

בעשור האחרון החלו חוקרים בעולם לבחון את הכבישים דלי התנועה במסגרת פרויקטי שיפור הבטיחות. לדוגמא, מחקר מקיף לבחינת שיפורים בטיחותיים בכבישים דלי תנועה נערך בטקסס, בארה"ב, ע"י Fitzpatrick, Brewer (2004). המחקר התמקד בכבישים עם נפח תנועה עד 2000 כלי רכב ביממה ובחן את מאפייני התאונות, מאפייני תשתיות הדרכים ושיפורי בטיחות פוטנציאליים בעלי עלות נמוכה עבור כבישים אלה. נמצא כי לקטעים בעלי שיעור תאונות גבוה יש יותר עקומות אנכיות, יותר עקומים אופקיים, יותר נתיבים ושוליים צרים, מספר גבוה יותר של גישות ושל עצמים קשיחים בצדי הדרך. בין התאונות השכיחות בכבישים המשרתים נפחי תנועה נמוכים היו תאונות רכב יחיד ותאונות שמתרחשות בעקומים ובלילה, ללא תאורה.

מחקר שנערך ע"י Wade et al (2004) במינסוטה, ארה"ב, ניתח את שיעורי התאונות עבור כבישים דלי תנועה בעשרה מחוזות בדרום-מערב המדינה, כאשר הכבישים היו בעלי נפח תנועה יומי ממוצע של פחות מ-400 כלי רכב ביממה. במחקר נבדקו מאפייני התאונות, זוהו קטעי תורפה וגורמים עיקריים לתאונות. בין מסקנות המחקר היה כי מלבד טעויות הנהגים, הגורם היותר שכיח לתאונות דרכים בכבישים אלה הינו התנגשות בבעלי חיים.

Hall et al (2002) ערכו סקר של רשויות הדרך בארה"ב במטרה לבחון את ניסיונם של מהנדסים, מנהלים ואחראים על תפעול ואחזקה של רשת הכבישים המשרתים נפחי תנועה נמוכים. נמצא כי, ע"פ הניסיון הקיים, עם שיפורים בטיחותיים בעלי תרומה כלכלית גבוהה בכבישים דלי תנועה נמנים: תמרורים; שיפורים גיאומטריים כגון שיפור מרחקי ראות, הרחבת רוחב נתיב; טיפולי מיסעה; תוכניות פיקוח ואחזקה. כמו כן, בסיורי שטח של כבישים דלי תנועה (בעלי נפח תנועה

¹ גיטלמן ו. (2009). הערכה בטיחותית של דרכים חד-מסלוליות לא עירוניות. נייר עבודה.

ממוצע בין 150 עד 400 כלי רכב ביממה), עם ריכוז תאונות גבוה, נמצאו בעיות תשתית כגון: העדר/ אי התאמת תמרור וסימון; תמרורים לא מתוחזקים; עקומים המחייבים הגבלת המהירות המותרת; צמחייה הנמצאת ברצועת זכות הדרך והמושכת בעלי חיים; רוחב צר של נתיבי נסיעה; העדר שוליים; מדרון תלול/צוק ללא מעקות בטיחות; מעקות בטיחות לא מתוחזקים.

מבחינת המצב בשטח במחקרים השונים עולה, שבנוסף לקטעי הדרכים המשרתות נפחי תנועה נמוכים עם מאפייני תשתית בעייתיים ושיעורי תאונות גבוהים, קיימים גם קטעי הדרכים החד-מסלוליות שטופלו ושודרגו בשנים האחרונות ולכן, אינם מתאפיינים עוד במדדי בטיחות חריגים; קטעי דרכים כאלה עשויים לשמש דוגמא לקטעי דרכים ברמת בטיחות נאותה. קיום קטעי הדרכים החד-מסלוליות עם מאפיינים גיאומטריים שונים ורמות בטיחות שונות מאפשר לבחון קשרים סטטיסטיים בין מאפייני הדרכים לבין התרחשות התאונות.

מטרת המחקר הנוכחי הייתה לזהות קשרים סטטיסטיים בין המאפיינים הגיאומטריים ואחרים של דרכים חד-מסלוליות המשרתות נפחי תנועה נמוכים (דלות תנועה) לבין מספר וסוגי התאונות. המודלים שפותחו במחקר לביטוי הקשר בין המאפיינים הגיאומטריים ושכיחות התאונות יכולים לשמש בסיס לבחירת המאפיינים הגיאומטריים של הקטעים, הן בתהליכי התכנון והן בתהליכי תחזוקת הכבישים וטיפול באתרי תורפה.

בביצוע המחקר היו ארבעה שלבים שהם: (1) סקר ספרות בינלאומית בנושא המחקר; (2) הכנת בסיס הנתונים למחקר; (3) ניתוח הנתונים ופיתוח מודלים מסבירים; (4) גיבוש מסקנות והמלצות לגבי תהליכי התכנון ושיפור מאפייני הדרכים במסגרת תחזוקת הרשת. ממצאים מסקר הספרות שנערך במחקר מוצגים בפרק זה. ממצאים מהכנת בסיס הנתונים למחקר, הניתוחים שבוצעו ופיתוח המודלים מוצגים בפרקים 2-3 בהמשך הדו"ח. פרק 4 מציג כלים כמותיים לשימוש ההנדסי השוטף אשר נבנו על סמך המודלים שפותחו במחקר, כאשר פרק 5 מביא המלצות לשילוב ממצאי המחקר בתהליכי התכנון של דרכים דלות תנועה, בתנאי הארץ.

1.2. נושא סקר הספרות

כשלב הראשון למחקר בוצע סקר ספרות - איתור וסיכום של ממצאי הספרות המקצועית לגבי הקשר בין מאפיינים גיאומטריים ואחרים של דרכים לא עירוניות המשרתות נפחי תנועה נמוכים לבין שכיחות ומאפייני תאונות הדרכים, במדינות השונות (ארה"ב, מדינות אירופה, אוסטרליה) וגם בישראל. החיפוש התמקד בפרסומים מהעשורים האחרונים בשאיפה לכלול, בין היתר: מודלים מסבירים שהותאמו לדרכים דלות תנועה, מקדמי ירידה בתאונות שמזוהים עם שיפורי תשתית/ שינויים גיאומטריים בדרכים דלות תנועה וכד'. כמו כן, בסקר נכללו ממצאים של מחקרי הערכה של המאפיינים הגיאומטריים ורמת הבטיחות של הדרכים החד-מסלוליות בישראל, עם דגש על דרכים דלות תנועה. בנוסף, בסקר מובא סיכום של המאפיינים הגיאומטריים שמומלצים לתכן דרכים המשרתות נפחי תנועה נמוכים בהנחיות של המדינות המתקדמות.

הנושאים הנדונים בסקר הספרות הם:

* הגדרות של דרכים דלות תנועה, במדינות השונות - פרק 1.3;

* סקירת הנחיות תכנון של המאפיינים השונים בדרכים דלות התנועה, במדינות השונות - פרק 1.4. המאפיינים הנבחרים בהקשר זה הם: מהירות תכן, רוחב נתיב, רוחב שול לא סלול, רוחב שול סלול, רדיוס אופקי מזערי, רדיוס אנכי מזערי, מרחקי ראות, הגבהה צידית מרבית;

* ריכוז ממצאים מפיתוח מודלים מסבירים לקשר בין נפחי התנועה, מאפיינים גיאומטריים ואחרים של הדרכים ושכיחות התאונות, בדרכים החד-מסלוליות עם דגש על דרכים דלות תנועה - פרק 1.5;

* ריכוז ממצאי המחקרים מהארץ על בטיחות בדרכים חד-מסלוליות וחד-מסלוליות דלות תנועה - פרק 1.6.

פרק 1.7 מביא סיכום לממצאי סקר הספרות.

1.3 הגדרות דרכים דלות תנועה, בניסיון הבינלאומי

ההגדרות לדרכים דלות תנועה רבות. על פי המבוא לקובץ המאמרים של הכנס ה-8 לדרכים דלות תנועה בארצות הברית (TRB, 2003), דרכים מאוד דלות תנועה הן דרכים עם ממוצע של עד 400 כלי רכב ליום. יש מקורות שבהם כלולות בקטגוריה זו דרכים עם עד 2,000 כלי רכב ליום. על פי המקורות השונים בתחום של דרכים דלות התנועה, בתוך סיווג זה קיים תת סיווג נוסף על פי תחום נפחים יומיים ממוצעים, שמשפיע על אלמנטים תכנוניים כגון: מהירות תכן ורוחב נתיב. בטבלה 1.1 מוצגים נפחי תנועה יומיים ממוצעים, המתארים סיווגים של דרכים דלות התנועה, מתוך הנחיות התכנון של המדינות השונות.

על פי דו"ח של ארגון לשיתוף פעולה של המדינות המתועשות - OECD (1986), אשר סיכם את ניסיון המדינות המשתתפות בארגון, דרכים דלות התנועה הוגדרו כדרכים בהן הממוצע היומי של נפח התנועה הוא עד 1,500 כלי רכב ובמקרים מיוחדים - עד 2,000 כלי רכב.

בטבלה 1.2 מובאים נתוני אורך של כל רשת הדרכים ושל רשת הדרכים דלות התנועה, בכל מדינה, לרבות האומדנים לחלקן היחסי של דרכים דלות התנועה מתוך הרשת (מתוך: OECD, 1986). ניתן לראות כי דרכים דלות התנועה מהוות כ-50% מאורך הרשת הבינעירונית במדינות כמו הולנד, דנמרק, נורבגיה, כאשר ברוב המדינות דרכים אלה מהוות 70%-90% מאורך הרשת.

1.4 הנחיות לתכנון דרכים דלות תנועה

במסגרת עבודה שנערכה עבור מע"צ - "עדכון הנחיות לתכנון גיאומטרי של דרכים בין עירוניות, צמתים ומחלפים", נערך סקר ספרות בנושא הנחיות לתכנון דרכים דלות תנועה (אמי מתום, 2008). בסקר הני"ל נכללו מקורות ממדינות מפותחות ומישראל.

המקורות הבין-לאומיים העיקריים בנושא זה הם: עבודה המרכזת ממצאים ממספר רב של מדינות ה-OECD, לרבות המלצות לתכן של דרכים דלות תנועה (OECD, 1986), והנחיות לתכן דרכים דלות תנועה של AASHTO (2001). המקורות מישראל בהם מובאות הנחיות לתכנון דרכים בין-עירוניות דלות תנועה הם: הנחיות לתכנון דרכים במחנות צה"ל (צה"ל, 2001), והמאפיינים הגיאומטריים לתכן "כבישים ללא אבא" (מעצ, 2007). להלן הממצאים העיקריים בנושא תכנון דרכים דלות תנועה, על סמך המקורות הני"ל.

טבלה 1.1. סיווג דרכים דלות תנועה על-פי נפח תנועה יומי, במדינות השונות.*.

Table 1.1. Classification of low-volume roads according to daily vehicle traffic, in different countries

מס'	מדינה	סוג דרך ותחום נפח יומי ממוצע, כלי רכב
1	ישראל - הנחיות מרכז בינוי (בסיס צבאי)	דרך גישה פנימית - קטן מ- 200 דרך מאספת - מעל 200 דרך עורקית משנית - מתחת ל- 500 דרך עורקית - מעל 500
2	אוסטרליה	150-500 500-1000 מעל 1000
3	קנדה	קטן מ 100 100-200 מעל 200
4	דנמרק	קטן מ 2000 קטן מ 5000 קטן מ 6000
5	ספרד	קטן מ 250 250-500 500-1000 1000-2000 מעל 2000
6	נורבגיה	300-1500
7	שבדיה	150-200
8	טורקיה	קטן מ 2000
9	פינלנד	קטן מ 200 200-500 500-1500
10	המלצה למדינות מתפתחות McDonald and Robinson (1995)	קטן מ 20 20-100 100-400 400-1000 1000-5000

*ריכוז הממצאים: אמי מתום, 2008.

טבלה 1.2. נתונים השוואתיים של אורך רשת הדרכים לעומת דרכים דלות תנועה, במדינות השונות (OECD, 1986)

Table 1.2. Comparative data on total length of road network versus low-volume roads, in different countries

מס'	מדינה	אורך כל רשת הדרכים הבין עירונית (ק"מ)	אורך הדרכים הבין עירוניות דלות התנועה (ק"מ)	% דרכים דלות תנועה מתוך הרשת
1	אוסטרליה	791,750	752,162	95
2	בלגיה	108,266	94,350	87
3	קנדה	959,200	729,700	76
4	דנמרק	69,420	35,000	50
5	פינלנד	75,000	66,277	88
6	צרפת	1,500,000	1,260,000	84
7	הולנד	109,000	57,500	53
8	נורבגיה	⁽²⁾ 84,500	⁽²⁾ 42,000	50
9	ספרד	357,672	324,345	91
10	שבדיה	⁽¹⁾ 97,719	⁽¹⁾ 81,463	83
11	שוויץ	125,000	85,000	68
12	טורקיה	59,112	51,189	87
13	ארה"ב	6,143,672	4,202,467	68

(1) דרכים ציבוריות בלבד

(2) נתוני נורבגיה כוללים דרכים פרטיות כגון דרכי יער וכו'

1.4.1. ריכוז ממצאים ממדינות ה-OECD והמלצות לתכן דרכים דלות תנועה

דרכים דלות תנועה לא שונות מדרכים אחרות בדרישות התכנוניות שלהן. השוני הוא בכמות התנועה, ובהתאם לכך, במשאבים המוקצים. יש לתכנן דרכים דלות תנועה תוך שמירה על תנאי דרך בסיסיים ובעלויות נמוכות ככל האפשר.

מאפייני הדרכים הללו שונים בין מדינות מתפתחות למדינות המפותחות וכמו כן, בין מדינות ואזורים. מדינות רבות חקרו את הנושא וחלקן אף הוציאו הנחיות לתכנון, תפעול ותחזוקת הדרכים הללו. המכנה המשותף לדרכים אלה הוא נפח התנועה הנמוך שהן משרתות ובעקבות כך, התקציב הנמוך שמוקצה לבנייתן ולאחזקתן.

בתכנון דרך דלת תנועה אין להיצמד לערכי תכן המזעריים המותרים. יש לנקוט בגישה יותר הוליסטית בה נלקח בחשבון מכלול השיקולים הכלכליים, הבטיחותיים והאנושיים.

תפקידי הדרכים דלות התנועה הם:

1. גישה מקומית לשימושי קרקע סמוכים.
2. איסוף ופיזור תנועה מקומית לרשת דרכים במדרג גבוה יותר.
3. חיבור בין כפרים.
4. חיבור בין כפרים קטנים למרכזי קניות ותעסוקה.
5. גישה לקהילות מרוחקות (באוסטרליה, קנדה).

6. גישה לאזורים תיירותיים.

מהירות התכן

מהירות התכן תלויה בסיווג הדרך (במדינות שבהן קיים סיווג לדרכים דלות תנועה), בטופוגרפיה ובחתיך לרוחב הדרך. מהירות התכן בדרך חד-נתיבית נעה בין 30 קמ"ש (כגון: בבלגיה, קנדה, דנמרק ושוודיה) ל- 90 קמ"ש (המהירות המרבית בשוודיה). מהירות התכן בדרך דו-נתיבית נעה בין 30 קמ"ש ל-110 קמ"ש (בשוודיה ובארצות הברית, בטופוגרפיה מישורית). בכל שאר המדינות המקסימום הוא 100 קמ"ש או פחות.

חתיך לרוחב

כל המדינות שהשתתפו במחקר דיווחו כי מאפייני החתיך לרוחב הדרך - מספר הנתיבים, רוחב המיסעה, רוחב השוליים - תלויים בנפח התנועה היומי ולרוב, גם בסיווג הדרך. בחלק מהמדינות החתיך תלוי גם בטופוגרפיה, בהרכב התנועה ובמהירות התכן.

רוחב הנתיב בדרך דו-נתיבית

רוחב כל נתיב נע בין 2.5 מ' (בנורווגיה ודנמרק) ל-3.7 מ' (בקנדה - בדרכים עם מהירות תכן גבוהה). רוחב השול נע בין 0.25 מ' (בפינלנד) ל-3.0 מ' (הרוחב המרבי באוסטרליה).

רוחב המיסעה

רוחב המיסעה עם שני נתיבים ושוליים נע בין 6.0 מ' (בנורבגיה - בדרכים עם עד 200 כלי רכב ליום ובפינלנד בדרכים עם עד 1,500 כלי רכב ליום) עד 13.0 מ' (באוסטרליה - בדרכים עם יותר מ-1,500 כלי רכב ליום).

עיקרי המסקנות בסקר ה-OECD

1. דרכים דלות תנועה יורכבו מנתיב או שניים בהתאם לכמות והרכב התנועה.
2. עבור שני נתיבים - נתיב לכל כיוון, רוחב המיסעה יהיה בין 5.0 ל-6.0 מ'.
3. רוחב השול המזערי הוא 0.5 מ'. הרוחב הרצוי הוא 1.5 מ' ורצוי אף יותר, על מנת להקל על המצב כאשר רכב אחד חולף על פני רכב אחר הנוסע מולו.
4. תוואי וחתכי הרוחב ייקבעו בהתחשב במהירות התכן וברכב הגדול ביותר שישתמש בדרך.

1.4.2. הנחיות AASHTO לתכן גיאומטרי של דרכים דלות תנועה

הנחיות AASHTO (2001b) הן ההוצאה הראשונה של הנחיות לתכן דרכים מקומיות בעלות נפחי תנועה נמוכים. על פי הנחיות אלו, דרך דלת תנועה היא דרך מקומית עם נפח תנועה עד 400 כלי רכב ליום, בממוצע. תפקידה העיקרי של דרך מקומית כזאת הוא נגישות אל שימושי הקרקע הסמוכים, כאשר היא כמעט ולא משרתת את התנועה העוברת. כתוצאה מכך, מרבית הנהגים בדרך מכירים אותה היטב. ניתן להשתמש בהנחיות אלו גם לתכן דרכים מאספות בתנאי שנפח התנועה היומי הממוצע הוא 400 כלי רכב או פחות ורוב משתמשי הדרך מכירים אותה היטב.

המאפיין העיקרי של דרכים אלו הוא נפח התנועה הנמוך. בדרכים עם נפח כל כך נמוך נדיר שנהג יפגוש נהג אחר בדרך, ולכן תאונות עם יותר מרכב אחד הן נדירות למדי. נוסף על כך, כאמור, מרבית משתמשי הדרך בדרכים המקומיות מכירים היטב את הדרך. שני המאפיינים ביחד מאפשרים את ההקלות בקריטריוני התכן מבלי לפגוע בבטיחות הנוסעים בדרך.

פילוסופיית התכן

על פי המחקר של ניומן שצוטט בהנחיות AASHTO (2001b), קריטריוני התכן לדרכים דלות התנועה ייקבעו תוך איזון בין שני גורמים: ההבדלים בין עלויות ההקמה והתחזוקה, וההשפעות המשוערות על מספר התאונות וחומרתן. המטרה היא להשקיע את כספי הציבור בשיפור הבטיחות אך ורק כאשר יושג שיפור משמעותי. דוגמא לכך היא עקום אופקי עם מהירות תכן של 100 קמ"ש והגבהה מרבית של 6%. על פי הספר הירוק של AASHTO (2001a), רדיוס העקום האופקי המזערי הוא 435 מ'. ניומן הסיק כי בתנאים המיוחדים של דרך דלת תנועה, עבור רדיוס של 250 מ' תהיה פחות מתאונה אחת נוספת לק"מ בתקופה של 10 שנים. כל הערכים המופיעים בהנחיות מבוססים על חישובים כאלה.

סיווג הדרכים

הדרכים הבין-עירוניות דלות התנועה מתחלקות ל-6 קטגוריות תפקודיות, אשר משפיעות, יחד עם מהירות התכן, נפח יומי ממוצע ואחוז רכב כבד, על ערכי הקיצון של רכיבי התכן כגון: רוחב המיסעה, מקדם חיכוך מרבי ורדיוס אופקי מזערי. טווח מהירויות התכן רחב ביותר - הוא נע בין 20 קמ"ש ל-100 קמ"ש.

סוגי הדרכים ומאפייניהם העיקריים הם כלהלן:

1. **דרכי גישה ראשיות (Rural Major Access Roads)** - מתאפיינות בתכונות אלה:

- קישור לדרכים ראשיות יותר;
- כמות גבוהה יחסית של תנועה עוברת;
- משתמשי דרך שאינם מכירים את הדרך;
- מהירויות נסיעה גבוהות;
- לרוב, סלולות אך ייתכן שלא.

2. **דרכי גישה משניות (Rural Minor Access Roads)** - מתאפיינות בתכונות אלה:

- תפקידם היחיד: נגישות לקרקעות הסמוכות, לרוב מגורים ולא מסחר או דרכים ללא מוצא cul-de-sac (דרכים קצרות ללא המשכיות);
- רוב משתמשי הדרך מכירים אותה היטב;
- מהירויות נסיעה נמוכות;
- מיסעה צרה, נתיבים צרים, לעיתים חד-נתיבי;
- סלולות או לא סלולות;
- נגישות להסעות תלמידים, רכב חירום, רכב פינוי אשפה, וכו'.

3. **דרכים לצרכי תעשייה/מסחר (Rural Industrial/Commercial Roads)** - מתאפיינות בתכונות אלה:

- דרכים המחברות בין מפעל או אזור תעשייה למערכת הדרכים המקומית;
- אחוז גבוה של משאיות ורכבים כבדים אחרים;
- דרכים קצרות מאוד;
- ללא תנועה עוברת;
- סלולות או לא סלולות.

4. **דרכי גישה לצרכי חקלאות (Rural Agricultural Access Roads)** - מתאפיינות בתכונות אלה:

- דרכים המחברות בין שדות וחוות למערכת הדרכים המקומית;
- אחוז גבוה של רכבים חקלאיים אשר רחבים יותר ממשאית סטנדרטית;
- נהגים שמכירים היטב את הדרך;
- לרוב, לא סלולות.

5. **דרכים נופיות (Rural Recreational and Scenic Roads)** - מתאפיינות בתכונות אלה:

- דרכים המחברות בין אזורים תיירותיים ואזורי נופש למערכת הדרכים המקומית;
- משתמשי הדרך אינם מכירים אותה היטב;
- נגישות לסוגי רכב מיוחדים;
- ייתכנו נפחי תנועה עונתיים גבוהים;
- טווח מהירויות רחב;
- כולל דרכים ארוכות מאוד;
- סלולות או לא סלולות.

6. **דרכי שיקום (Rural Resource Recovery Roads)** - מתאפיינות בתכונות אלה:

- דרכים המשרתות מחצבות;
- כלי רכב מיוחדים ונהגים מקצועיים;
- לרוב, לא סלולות.

מרחק ראות לעצירה

מחקרים עדכניים הראו כי אפילו בדרכים עם תנועה כבדה התנגשויות בעקום אנכי קמור עם ראות מוגבלת הן נדירות למדי. ברוב המקרים החפץ בו התנגשו היה רכב אחר. לא היו ממצאים שהוכיחו שמרחק ראות גדול יותר היה מונע את התאונה. בכביש דל תנועה חדש, ניתן להסתפק במרחקי ראות קטנים מהמומלץ בספר הירוק של AASHTO כי ברוב המקרים האובייקט שהנהג צריך לראות מרחוק הוא רכב נוסף, כאשר ההסתברות לפגוש רכב נוסף בדרך דלת תנועה נמוכה מאוד.

על סמך המחקר של ניומן, ב- AASHTO (2001) פותחו שתי קבוצות של פרמטרים לחישוב מרחק ראות לעצירה בדרכים דלות תנועה - עבור אתר עם סיכון גבוה ועבור אתר עם סיכון נמוך. בנוסף לפרמטרים העיקריים כמו רוחב המיסעה, רדיוס אופקי, מקדם חיכוך ורדיוס אנכי, ההנחיות לדרכים דלות התנועה מתייחסות גם לטיפול בצמתים ולריהוט הדרך.

1.4.3. הנחיות מרכז בינוי צה"ל

ההנחיות לתכנון דרכים במחנות צה"ל אשר הוכנו ע"י "ל.ק.ג. מהנדסי תחבורה יועצים" - צה"ל (2001), היו הניסיון המובנה הראשון בישראל להתמודד עם קריטריוני תכן לדרכים דלילות-תנועה (בתוספת מרכיב של רכב מיוחד לתכן).

בהנחיות צה"ל (2001) הדרכים סווגו על-פי המאפיינים הבאים:

- א. מיקום הקטע ביחס לבסיס וביחס לסביבה;
- ב. יעוד הקטע מבחינה תפקודית;
- ג. עוצמת התנועה בקטע הדרך;
- ד. אופי פעילות הבסיס בשעת חירום.

להלן פירוט גורמי התכן והשפעתם על הסיווג:

א. מיקום הקטע: משמש לחלוקה הראשונה בין דרכי הגישה לבסיס, ובין הדרכים הנמצאות בתוך הבסיס. בתוך הבסיס ישנה חלוקה נוספת של הדרכים בהתאם לאזורים בהם הן עוברות. לצורך זה מוגדרים שני אזורים בתוך הבסיס:

(1) אזורים בנויים: אזורים תפקודיים בנויים בתוך גבולות הבסיס, הכוללים מבנים מסוגים שונים.

(2) אזורים פתוחים: כל האזורים בתוך גבולות הבסיס אשר נמצאים מחוץ לאזורים הבנויים, והמיועדים לאימונים, לתמרונים, לתנועה, לאחסון תחמושת או למטרות אחרות.

ב. יעוד הקטע: גורם זה מבחין בין הדרכים על-פי תפקידיהן השונים:

(1) בדרכי הגישה, ניתן להבחין בין דרכים המשרתות בסיס בודד, לדרכים המשרתות מספר בסיסים או דרכים המיועדות לשמש גם כציר תחבורה אזורי. לעובדה זו יש השלכה על עוצמת התנועה בדרך.

(2) בתוך הבסיס ישנם הבדלים תפקודיים נוספים, כאשר ישנן דרכים המחברות אזורים בתוך הבסיס, וישנן דרכים המשמשות לנגישות ישירה אל מתקן ספציפי או אל שימוש קרקע מסוים (מנהלתי או מבצע). כמו-כן, ישנן דרכים בבסיס ומחוצה לו, שתפקידן לנסיעות ביטחוניות ומבצעיות בלבד.

ג. עוצמת התנועה: גורם זה נקבע לפי הנפח בעת רגיעה. נפח זה מחולק לארבע רמות המשמשות לסיווג הדרכים.

ד. אופי הבסיס בחרום: גורם זה משמש לתיקון החתך הרוחבי של דרך הגישה לבסיס באופן שיתאים לדרישות מצב החירום. בנוסף, ייתכנו חיבורים והסדרים הנדסיים נוספים בבסיס שיהיו מנותקים בשגרה, אולם ייפתחו וישמשו בשעת חירום להקלת התנועה המבצעית.

באמצעות נתוני סוג הדרך: גישה לבסיס, עורקית, מאספת, גישה פנימית או דרך מבצעית, ובעזרת אפיון האזור: מישורי, גבעי או הררי - נקבעת מהירות התכן המזערית לדרך.

קביעת החתך לרוחב של הדרך מושפעת מסוג הדרך, סוג כלי הרכב לתכנון, נפח תנועה לתכן, מספר הולכי הרגל ותנאי תפעול מיוחדים. באפיון החתך לרוחב נקבע רוחב השוליים ורוחב הנתב ללא אבני שפה, ורוחב הנתב עם אבני שפה, לפחות בצד אחד של הדרך.

1.4.4. כבישים ללא אבא

בשנת 2007 הוכנה עבודה עבור מע"צ על ידי חברת "לנדיוז" שריכזה את הנושא של "כבישים ללא אבא" - מעצ (2007). העבודה כללה כ- 1,500 ק"מ של דרכים שרובן דלות תנועה והן מהוות כ- 20% מרשת הדרכים הבין עירונית. הגדרת המושג "כבישים ללא אבא" על פי הדו"ח של חברת לנדיוז היא: "כבישים קיימים, אשר כלולים ברשת הדרכים הכללית אך אינם מהווים חלק מרשת הדרכים הארצית וגם אינם באחזקתה של החברה הלאומית לדרכים". למעשה, אלו כבישי גישה שתחילתם ברשת הדרכים הארצית וסופם בישוב או מפעל או שימוש אחר. כיום, דרכים אלה לא מתוחזקות על-ידי אף גורם ולכן, נמצאות במצב מאוד ירוד. מטרת העבודה של מע"צ הייתה בקביעת סטנדרטים לתכנון דרכים אלו, הבאתן לסטנדרטים שנקבעו ומסירתן חזרה למועצות המקומיות להמשך תחזוקה. למעשה, המכנה המשותף של הדרכים האלה הינו פוליטי ולא הנדסי. רובן מתפקדות כדרכים מקומיות דלות תנועה, אך יש מהן שאינן דלות תנועה ויש מהן שמתפקדות כדרכים אזוריות ולא מקומיות.

הסטנדרטים שנקבעו התבססו על הסטנדרטים לתכנון של הדרכים המקומיות. במקרים מסוימים ניתנו "הקלות" תכנוניות ובמקרים אחרים "החמרות". בדו"ח אין נימוקים לקביעת הפרמטרים לתכנון שנקבעו לכבישים שנכללו בסקר בהשוואה לפרמטרים של דרכים מקומיות.

1.5. מודלים לחיזוי תאונות על-פי מאפייני הדרך

פרק זה מבוסס על דו"חות של פרויקט מחקר אירופאי RIPCORD- ISEREST² בנושא שיפורי הבטיחות בדרכים בין-עירוניות משניות לצורך תחבורה בת-קיימא, כגון: Reurings et al (2005); Mallschutzke et al (2006). דו"חות אלה המהווים סקירת הניסיון הבינלאומי מספקים מבט על הידע והניסיון המעשי בנוגע לבטיחות בדרכים הנבחנות. סוגי הדרכים המשניות כוללים את כל הדרכים הבין-עירוניות החד-מסלוליות שחלקן הן דרכים דלות תנועה. בין היתר, בדו"חות מחקר זה נסקרו מודלים לחיזוי מספר התאונות בתלות במאפייני הדרכים, המתאימים לקטעי דרכים חד-מסלוליות ולתחום נפחי התנועה הנמוכים בדרכים דלות התנועה.

² RIPCORD- ISEREST: Road Infrastructure Safety Protection - Core-Research and Development for Road Safety in Europe; Increasing safety and reliability of secondary roads for a sustainable Surface Transport

כללית, יש לציין שלבחינת הקשר בין מאפייני הדרכים לבין התרחשות התאונות מקובל להתאים מודל סטטיסטי רב-משתני הקרוי פונקציה ביצוע בטיחותי (SPF - safety performance function). מודל כזה אומד את מספר התאונות הצפוי בקטע לפי כמות התנועה, סוג הדרך ומאפייני דרך נוספים. צורת המודל הטיפוסי לתיאור הקשר בין מספר התאונות הצפוי בקטע דרך לבין נפח התנועה ומאפייני דרך נוספים הוא (Maycock and Summersgill, 1995):

$$E\{ACC\} = \alpha(LEN)(ADT)^\gamma \exp \sum [\beta_i v_{ij}]$$

כאשר:

$E\{ACC\}$ - תוחלת מספר התאונות בקטע דרך (מספר תאונות ליחידת זמן),

ADT - נפח תנועה יומי ממוצע, כלי רכב,

LEN - אורך הקטע,

V_{ij} - מאפייני הדרך,

α, β, γ - מקדמי המודל.

לדוגמא, המודלים המסבירים שהותאמו לקטעי דרכים לא-עירוניות דו-נתיביות בארה"ב וקנדה כוללים משתנים מסבירים אלה (NCHRP 295, 2001): נפח התנועה, רוחב נתיב, רוחב שול, הימצאות סכנות בצדי הדרך, עקמומיות ושיפועים, צפיפות הכניסות ליחידת אורך, סוג המיסעה.

להלן סקירת המודלים שנמצאו בספרות, לפי מאפיינים גיאומטריים שונים של הדרכים החד-מסלוליות, עם דגש על דרכים דלות התנועה.

1.5.1. חתך רוחב - רוחב נתיב ורוחב שול

מחקר של Zegeer et al (1981), ניתח את השפעתם על התרחשות התאונות של רוחב נתיב, רוחב שול ושיפוע המדרון מעבר לשול. במחקר פותחו מספר מודלים רב משתנים. בעזרת המודלים, ניתן להעריך את מספר התאונות לקילומטר דרך בשנה או את מספר התאונות מסוגים שונים כגון: תאונות רכב בודד, התנגשות חזיתית בין כלי רכב בכיווני נסיעה מנוגדים, תאונות חזית-צד עם כלי הרכב מכיווני נסיעה מנוגדים ותאונות בין כלי הרכב מאותו כיוון הנסיעה. מספר התאונות החזיות תלוי במשתנים הבאים: נפח תנועה יומי, רוחב נתיב, רוחב ממוצע של שול סלול, רוחב ממוצע של שול לא סלול (מעבר לשול הסלול), דירוג סכנות של המכשולים במפרדה או בצד הדרך, וסוג אזור (מישורי, גבעי או הררי).

להלן תיאור המודלים:

$$\text{Total Accidents}/(\text{km-year}) = 0,0009 \cdot \text{ADT}^{0,9711} \cdot 0,8897^W \cdot 0,9403^{PA} \cdot 0,9602^{UP} \cdot 1,2^H$$

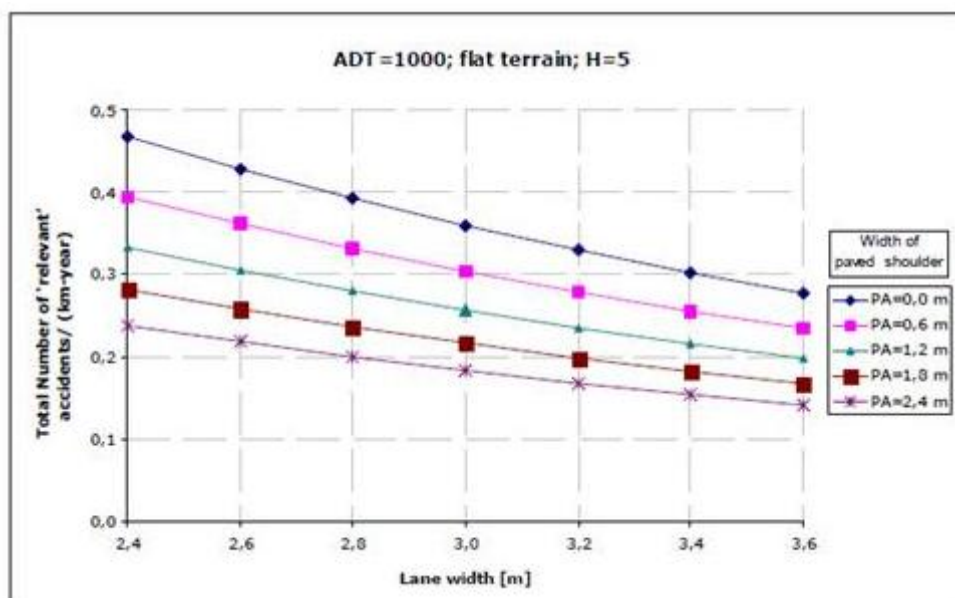
$$\text{Relevant Accidents}/(\text{km-year}) = 0,0012 \cdot \text{ADT}^{0,8824} \cdot 0,8786^W \cdot 0,9192^{PA} \cdot 0,9316^{UP} \cdot 1,2365^H \cdot 0,8822^{T1} \cdot 1,3221^{T2}$$

כאשר:

- ADT is the average daily traffic
- W is the lane width in feet
- PA is the average width of the paved shoulder in feet
- UP is the average width of the unpaved shoulder in feet
- H is the median or roadside hazard rating (1 to 7)
- T1 is 1 if the terrain is flat and 0 otherwise
- T2 is 1 if the terrain is mountainous and 0 otherwise, and

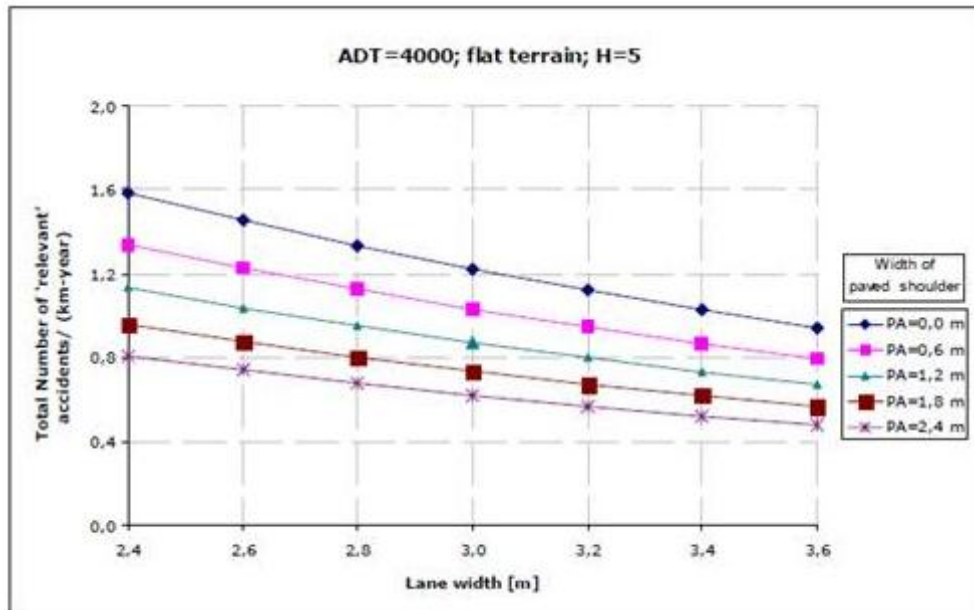
'relevant' are single-vehicle accidents, opposite direction head-on, opposite direction sideswipe and same direction sideswipe accidents.

באמצעות המודלים ניתן לבנות גרפים המתארים השפעה של משתנה מסוים על התרחשות התאונות, כאשר שאר המשתנים קבועים. להלן מספר דוגמאות להשפעת רוחב נתיב - איורים 1.1, 1.2.



איור 1.1. הקשר בין רוחב נתיב ותאונות, בהינתן נפח יומי של 1,000 כלי רכב ולפי רוחב שונה של שוליים סלולים.

Figure 1.1. A relationship between lane width and accidents, assuming daily traffic volume of 1,000 vehicles and according to various widths of paved shoulders.



איור 1.2. הקשר בין רוחב נתיב ותאונות, בהינתן נפח יומי של 4,000 כלי רכב ולפי רוחב שונה של שוליים סלולים.

Figure 1.2. A relationship between lane width and accidents, assuming daily traffic volume of 1,000 vehicles and according to various widths of paved shoulders.

במאמר של Hauer (2000a), נטען שלא ניתן לבטוח בכך שמודלים רבי משתנים מסוג זה מתארים את הקשר האמיתי בין הסיבה והתוצאה. מועלה החשש שהתוצאה המשויכת לרוחב נתיב נובעת מסיבות אחרות כגון: השוני בדיווח על התאונות או בצפיפות של עקומים בדרך (כי הנתונים המורחבים ככלל קשורים לדרך עם פחות עיקולים ופחות צמתים).

במחקר של Zegeer and Deacon (1987), נבנה מודל רב-משתני המתאר מספר תאונות מסוג עזיבת הדרך והתנגשות חזית-בחזית בתלות ברוחב הנתיב, רוחב שול סלול ולא סלול (יחד), ורוחב החלק הסלול של השול. במודל זה נפח תנועה יומי ממוצע אינו משתנה מסביר. להלן תיאור המודל:

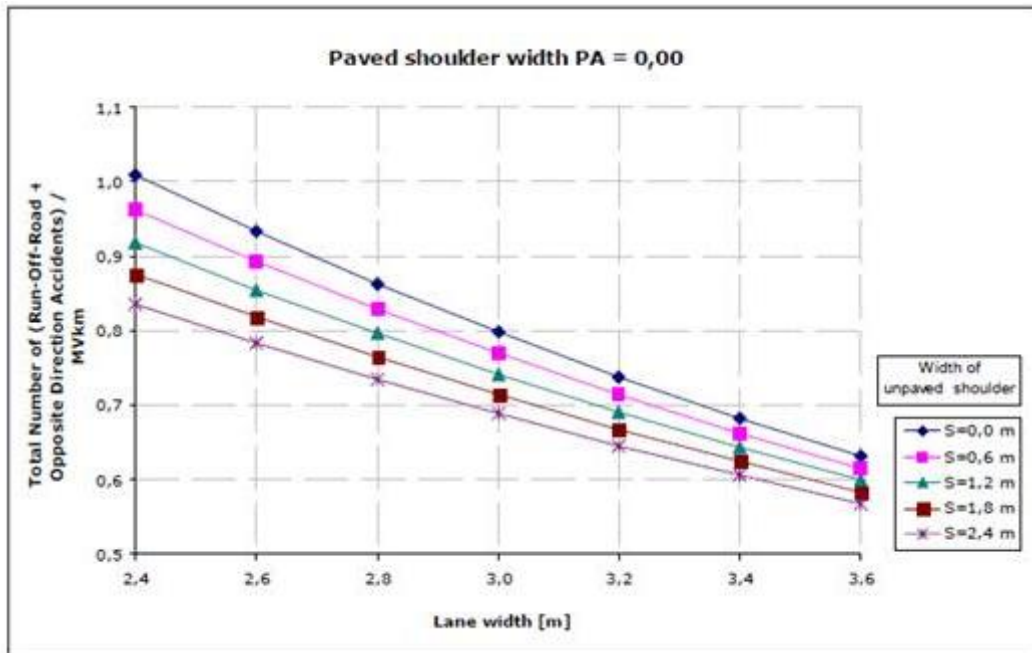
$$\text{Number of run off the road and opposite direction accidents)/MVkm} = 2,5793 \cdot 0,8907^W \cdot 0,9562^S \cdot 1,0026^{(W \cdot S)} \cdot 0,9403^{PA} \cdot 1,0040^{(W \cdot PA)}$$

כאשר:

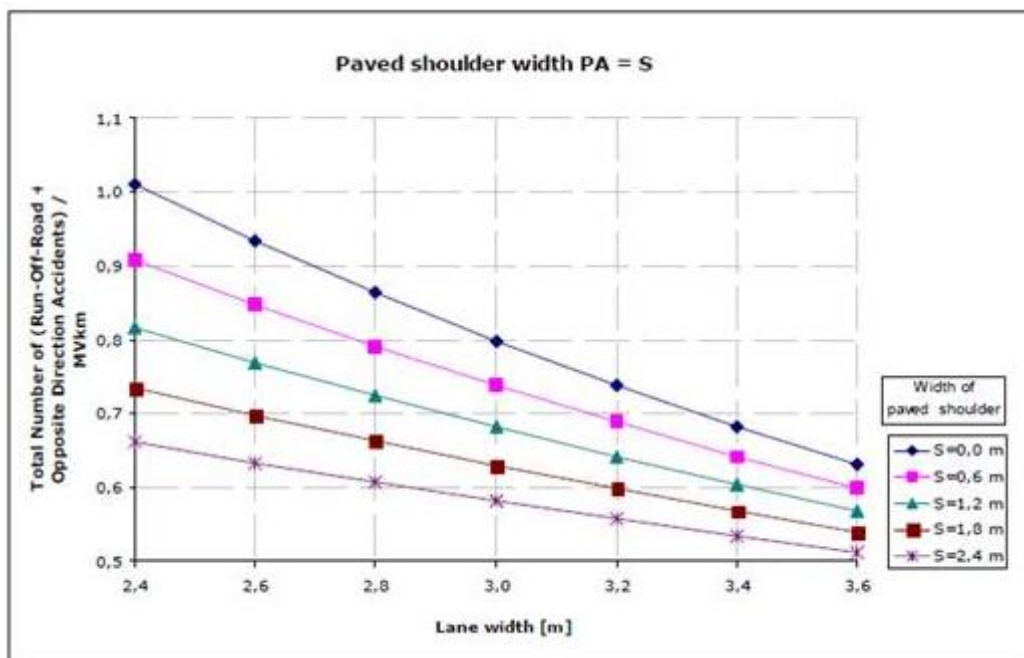
- W** is the lane width in feet
- S** is the unpaved and paved (together) shoulder width in feet
- PA** is the width of the paved part of the shoulder in feet

גם באמצעות מודל זה ניתן לבנות גרפים המתארים השפעה על התאונות של שינוי מספר משתנים מצומצם כאשר יתר המשתנים קבועים. להלן מספר דוגמאות להשפעת רוחב נתיב - איורים 1.3,

1.4.



איור 1.3. הקשר בין מספר התאונות לרוחב נתיב, בתלות ברוחב שונה של שוליים לא סלולים.
 Figure 1.3. A relationship between accident numbers and lane width, depending on various width of unpaved shoulder



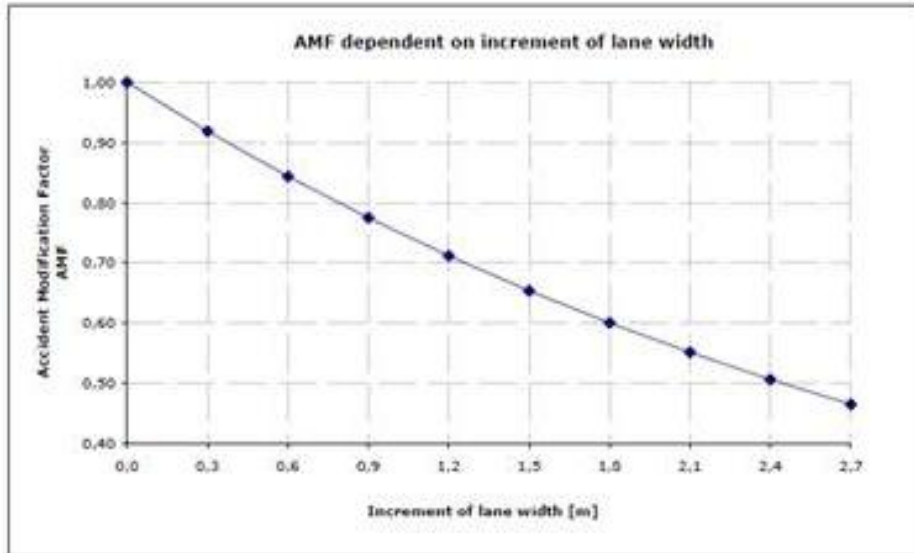
איור 1.4. הקשר בין מספר התאונות לרוחב נתיב, בתלות ברוחב שונה של שוליים סלולים.
 Figure 1.4. A relationship between accident numbers and lane width, depending on various width of paved shoulder

המודל מתחשב בתלות ברוחב שונה של שוליים סלולים. המודל מתחשב בנפח תנועה יומי, רוחב הדרך, דירוג סכנות בצד הדרך, צפיפות הצמתים, ממוצע של עקמומיות אופקית, ממוצע של עקמומיות אנכית. להתאמת המודל שימשו נתונים מהמדינות מיניסוטה

וושנינגטון. מקדם הרגרסיה לרוחב הנתביב היה (-0.085). פרוש הדבר שהגדלת רוחב נתביב ב- Δ ft

תביא למקדם שינוי תאונות (accident modification factor - AMF) של $e^{-0.085 \cdot \Delta}$.

צורת תלות זו מוצגת באיור 1.5. כלומר, עם הגדלת רוחב הנתביב צופים לירידה בתאונות.



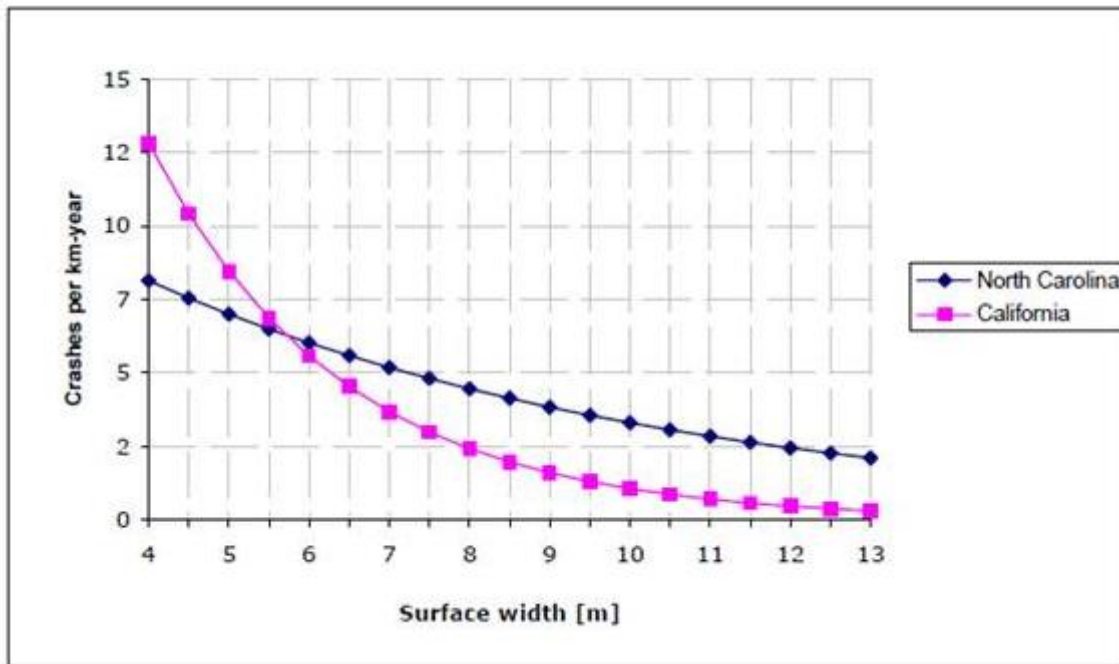
איור 1.5. מקדם שינוי בתאונות בתלות בשינוי רוחב נתביב, לפי Vogt and Bared (1988).

Figure 1.5. Accident modification factor depending on lane width changes.

Council and Stewart (2000) ניתחו נתונים ממספר מדינות בארה"ב לצורך חיזוי תאונות קטע לקילומטר בשנה, בתלות בנפח התנועה, רוחב המיסעה ורוחב שול. להלן המודלים שהותאמו להשפעת רוחב המיסעה על סמך הנתונים משתי מדינות - צפון קרוליינה וקליפורניה:

Number of accidents/km-year	= length · e ^{β₀} · ADT ^{β₁} · e ^{β₂·shoulder width} · e ^{β₃·surface width}
Number of accidents/km-year North Carolina	= length · e ^{-2,9915} · ADT ^{0,6725} · e ^{0,123·shoulder width} · e ^{0,1506·surface width}
Number of accidents/km-year California	= length · e ^{-3,0188} · ADT ^{0,9048} · e ^{0,3419·shoulder width} · e ^{0,4167·surface width}

על סמך המודלים שפותחו, איור 1.6 מתאר את השפעת רוחב המיסעה על התרחשות התאונות לקטע דרך באורך 2 ק"מ עם נפח תנועה ממוצע של 2,000 כלי רכב ביממה ושול ברוחב 1 מטר.



איור 1.6. שינוי בתאונות בתלות ברוחב המיסעה, לפי המודלים בשתי מדינות: צפון קרוליינה וקליפורניה, לפי Council and Stewart (2000).

Figure 1.6. Accidents changes depending on carriageway width, according to models from two states: North Carolina and California.

במודל תכנון בטיחותי של דרכים דו-נתיביות בארה"ב: Interactive Highway Safety Design (IHSDM) Model, מקדם שינוי בתאונות בתלות לרוחב נתיב הינו הראשון מבין 9 מקדמי השינוי בתאונות לרכיבי הדרך (IHSDM, 2004). טבלה 1.3 מציגה את מקדמי הפחתה בתאונות הקשורים לרכיב הדרך הנדון - רוחב נתיב (AMF_{RA}).

טבלה 1.3. מקדמי הפחתת תאונות בתלות ברוחב נתיב.

Table 1.3. Accident reduction factors depending on lane width

Lane width [m]	ADT ≤ 400	ADT = 401 to 1999	ADT ≥ 2000
2,70 (9ft)	1,05	$1,50 - 0,000281 \cdot (2000-ADT)$	1,50
3,10 (10ft)	1,02	$1,30 - 0,000175 \cdot (2000-ADT)$	1,30
3,40 (11ft)	1,01	$1,05 - 0,000025 \cdot (2000-ADT)$	1,05
3,70 (12ft)	1,00	1,00	1,00

כדי לחשב את הערך המסכם של מקדם השינוי בתאונות בתלות ברוחב נתיב - AMF_1 - משתמשים בנוסחה ובנתונים הבאים:

$$AMF_1 = (AMF_{ra} - 1,0) \cdot P_{ra} + 1,0$$

כאשר

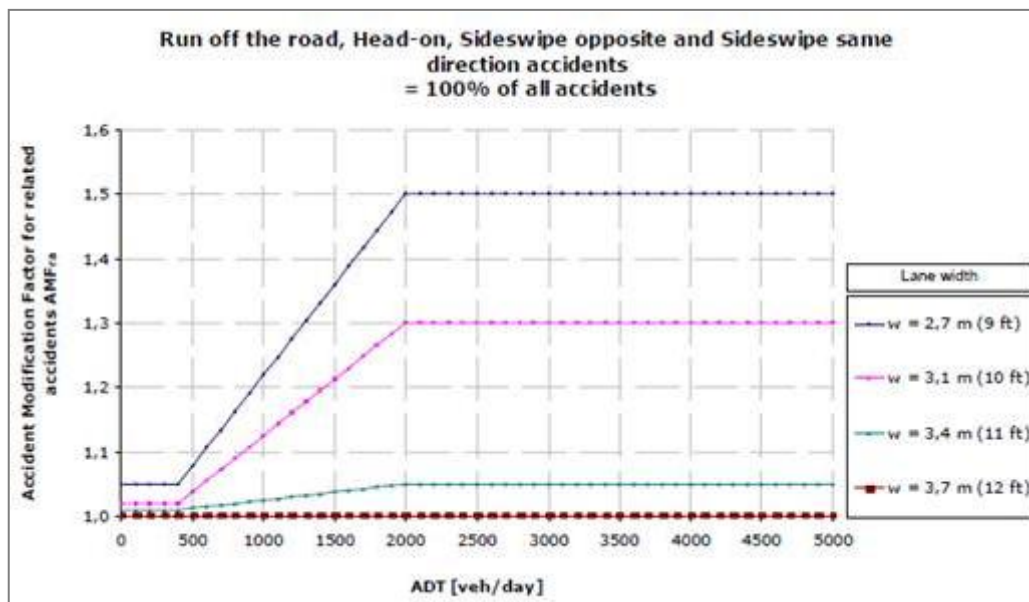
AMF_1 = Accident Modification Factor for total accidents

AMF_{ra} = Accident Modification Factor for related accidents (i.e Run off the road, Head-on, Sideswipe opposite and Sideswipe same direction accidents)

P_{ra} = proportion of total accidents constituted by related accidents (i.e 35% of all accidents based on a default distribution of accident types)

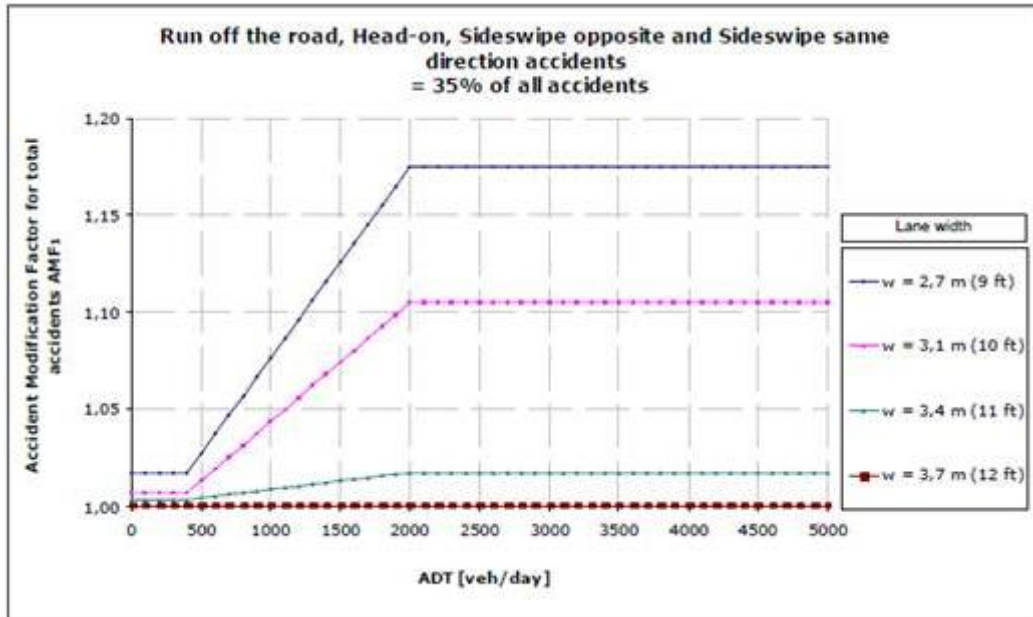
מניחים שרוחב נתיב משפיע על תאונות מסוגים כגון: רכב בודד, רכב יורד מהדרך, התנגשויות חזית בחזית, התנגשויות חזית בצד של כלי הרכב מכיוונים מנוגדים, והתנגשויות בין כלי הרכב באותו הכיוון.

על סמך החישובים הנ"ל של מקדמי השינוי בתאונות נבנו הגרפים הבאים: איור 1.7 - מקדמי השינוי בתאונות, מהסוגים המתאימים, בתלות בנפח התנועה ורוחב נתיב, ואיור 1.8 - מקדמי השינוי בסך התאונות, בתלות בנפח התנועה ורוחב נתיב.



איור 1.7. מקדמי שינוי בתאונות (מהסוגים הרלוונטיים) בתלות בנפח תנועה יומי ורוחב נתיב.

Figure 1.7. Accident modification factors (in relevant accident types) depending on daily traffic volume and lane width.



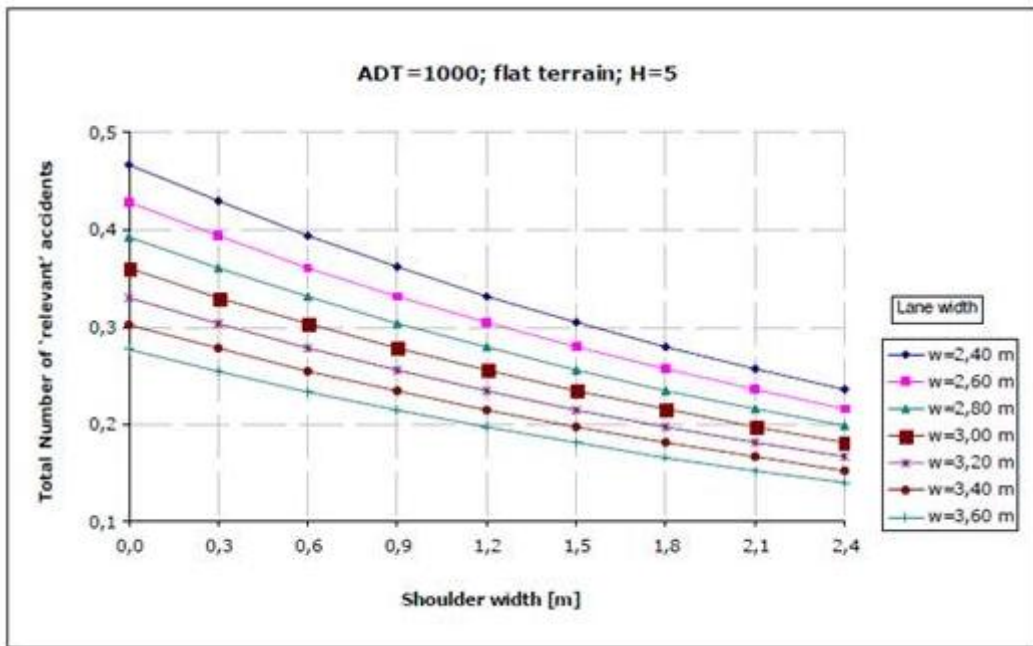
איור 1.8. מקדמי שינוי בכלל התאונות, בתלות בנפח תנועה יומי ורוחב נתיב.

Figure 1.8. Accident modification factors (in all accidents) depending on daily traffic volume and lane width.

מקדמי השינוי בתאונות בתחום נפחי התנועה מעל 2,000 כלי רכב ליממה מבוססים על תוצאות המחקר של Zegeer et al (1987). במקרה זה מוצע להשתמש בערך המקדם 1.05 עבור רוחב נתיב של 3.4 מ'. ערך זה נמוך מהערך שהתקבל במחקר אך הוא נקבע בהתבסס על דעת פאנל מומחים ומחקרים נוספים שנעשו בנושא - על תפקודם הבטיחותי של נתיבים ברוחב זה. מקדמי השינוי בתאונות עבור נפחי תנועה קטנים מ-400 כלי רכב ליממה מבוססים על מחקר של Griffin and Mak (1987). התחום של נפחי התנועה בין 400 ל-2,000 כלי רכב ליממה מבוסס על שיפוט של פנל המומחים.

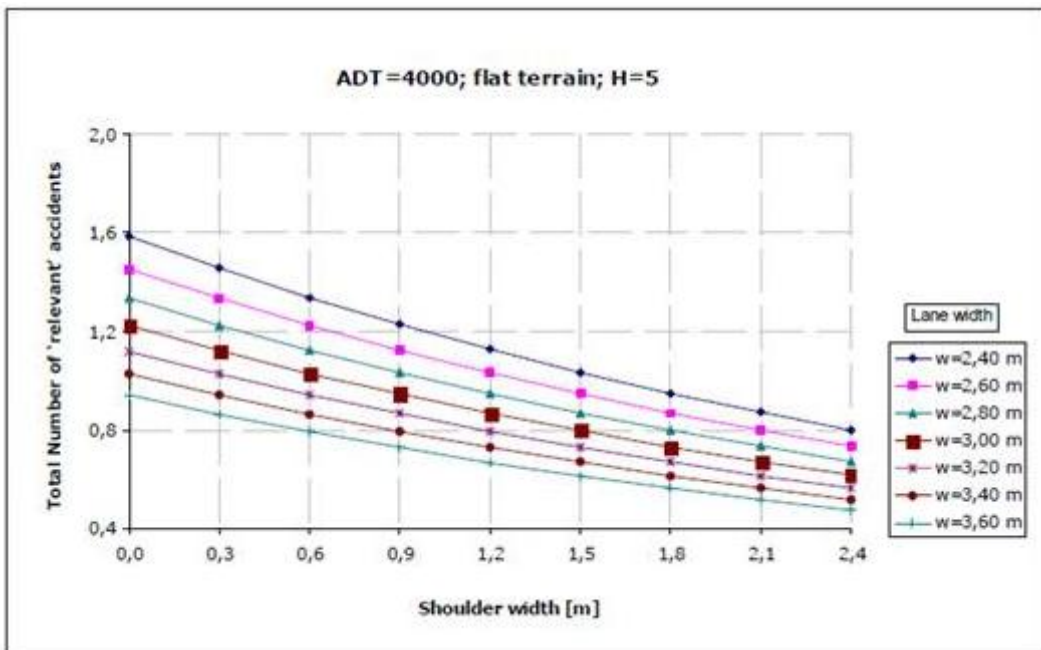
ממצאי המחקר של Zegeer et al (1987), שהוזכר לעיל לצורך מציאת הקשר בין תאונות לרוחב נתיב יכולים לשמש גם להערכת השפעה של רוחב שול על תאונות. איורים 1.9, 1.10 להלן מציגים את השפעת רוחב השול על מספר התאונות הרלוונטיות, עבור נפח תנועה יומי של 1,000 ו-4,000 כלי רכב, בהתאמה, ובתלות ברוחב נתיב הנסיעה. הערכות אלה בוצעו עבור אזור מישורי וערך "5" בדירוג הסכנות בצד הדרך.

גם במקרה זה במאמר של Hauer (2000b), נטען שלא ניתן להבטיח כי מודלים רבי משתנים מסוג זה מתארים את הסיבה והתוצאה. מועלה החשש שהתוצאה המשויכת לרוחב שול נובעת משוני בדיווח על התאונות, או בצפיפות של צמתים משניים בדרך (שוליים רחבים וסלולים קשורים לדרך עם פחות צמתים כאשר שוליים רחבים יותר שאינם סלולים מתקשרים לדרך עם יותר צמתים).



איור 1.9. מקדמי שינוי בתאונות בתלות ברוחב שול, עבור נפח יומי של 1,000 כלי רכב ורוחב נתיב שונה.

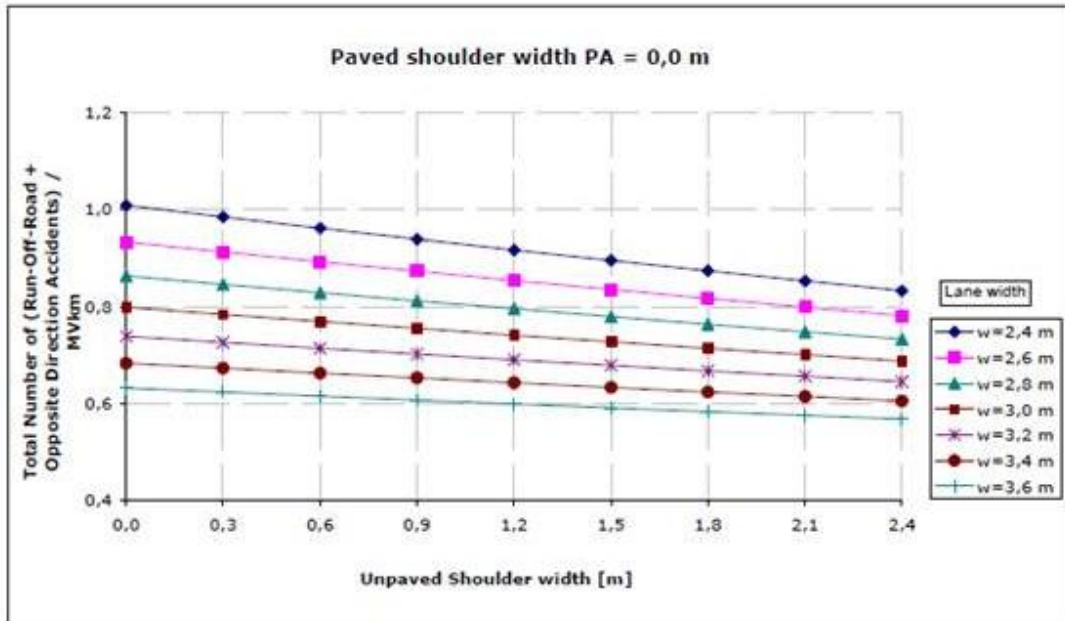
Figure 1.9. Accident modification factors depending on shoulder width, for daily traffic volume of 1,000 vehicles and different lane widths.



איור 1.10. מקדמי שינוי בתאונות בתלות ברוחב שול, עבור נפח תנועה יומי של 4,000 כלי רכב ורוחב נתיב שונה.

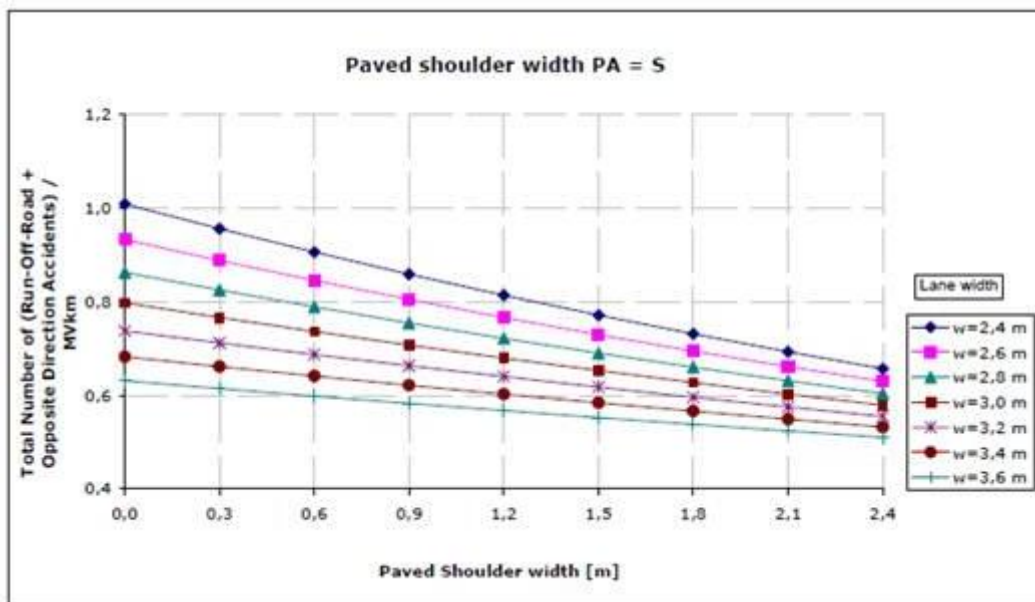
Figure 1.10. Accident modification factors depending on shoulder width, for daily traffic volume of 4,000 vehicles and different lane widths.

בעזרת המודל הרב משתני שהותאם במחקרם של Zegeer and Deacon (1987) והוצג לעיל, ניתן לבחון השפעה על מספר התאונות של שינוי רוחב שול. איורים 1.11, 1.12 מביאות דוגמאות בנושא זה: מקדמי שינוי בתאונות בתלות ברוחב שול ובתנאי רוחב נתיב שונה, עבור שול לא סלול, וסלול, בהתאמה.



איור 1.11. מקדמי שינוי בתאונות הרלוונטיות, בתלות ברוחב שול לא סלול ורוחב נתיב.

Figure 1.11. Accident modification factors depending on unpaved shoulder width and lane width.



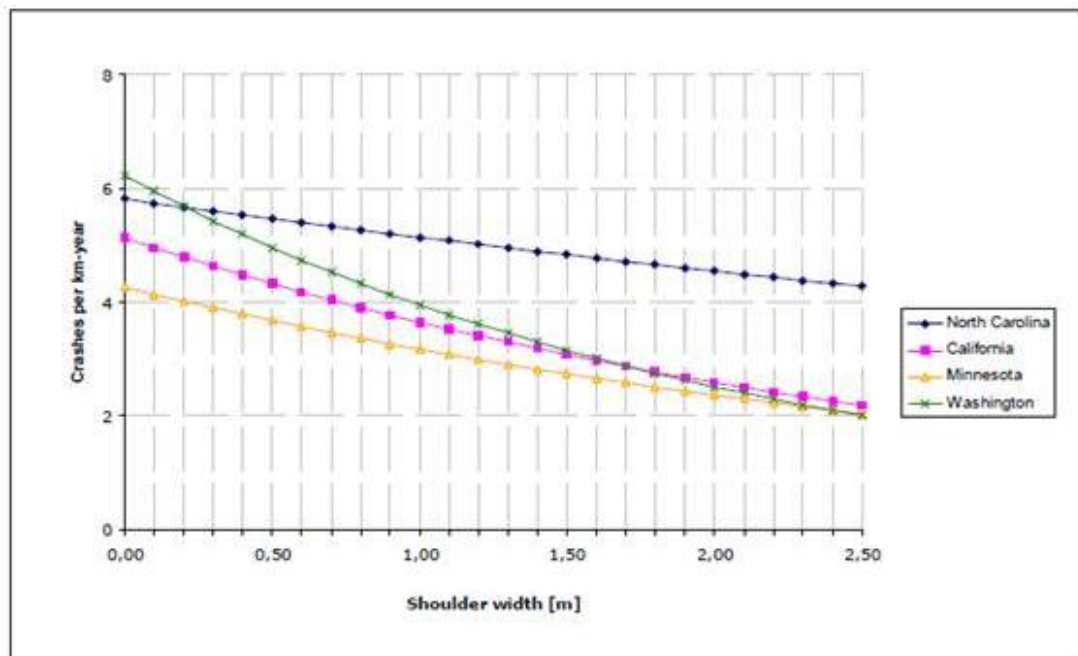
איור 1.12. מקדמי שינוי בתאונות הרלוונטיות בתלות ברוחב שול סלול ורוחב נתיב.

Figure 1.12. Accident modification factors depending on paved shoulder width and lane width.

במחקרם של Council and Stewart (2000) שצוין לעיל, נותחו נתונים ממספר מדינות בארה"ב לצורך חיזוי תאונות קטע לקילומטר בשנה, בתלות בנפח התנועה, רוחב המיסעה ורוחב שול. המודלים לביטוי השפעת רוחב שול על התרחשות התאונות נבנו עבור ארבע מדינות שהן: צפון קרוליינה, וושינגטון, מינסוטה וקליפורניה. להלן המודלים:

Number of accidents/km-year	$= \text{length} \cdot e^{\beta_0} \cdot \text{ADT}^{\beta_1} \cdot e^{\beta_2 \cdot \text{shoulder width}} \cdot e^{\beta_3 \cdot \text{surface width}}$
Number of accidents/km-year North Carolina	$= \text{length} \cdot e^{-2,9915} \cdot \text{ADT}^{0,6725} \cdot e^{-0,123 \cdot \text{shoulder width}} \cdot e^{-0,1506 \cdot \text{surface width}}$
Number of accidents/km-year Washington	$= \text{length} \cdot e^{-6,2152} \cdot \text{ADT}^{0,9669} \cdot e^{-0,4541 \cdot \text{shoulder width}}$
Number of accidents/km-year Minnesota	$= \text{length} \cdot e^{-8,1823} \cdot \text{ADT}^{1,1758} \cdot e^{-0,2924 \cdot \text{shoulder width}}$
Number of accidents/km-year California	$= \text{length} \cdot e^{-3,0188} \cdot \text{ADT}^{0,9048} \cdot e^{-0,3419 \cdot \text{shoulder width}} \cdot e^{-0,4167 \cdot \text{surface width}}$

איור 1.13 מתאר את השפעת רוחב השול על התרחשות התאונות, בארבע המדינות, עבור קטע דרך באורך 2 ק"מ עם נפח תנועה ממוצע של 2,000 כלי רכב ביממה ומיסעה ברוחב 7 מטר.



איור 1.13. מספר תאונות צפוי לק"מ דרך בתלות ברוחב שול, בארבע מדינות בארה"ב.
Figure 1.13. Expected accident number per 1 road km depending on shoulder width, in four US states.

מקדם שינוי בתאונות בתלות ברוחב שול הינו המקדם השני מתוך 9 מקדמי השינוי בתאונות לרכיבי הדרך המוצעים במודל תכנון בטיחותי של דרך דו-נתיבית בארה"ב (IHSDM). טבלה 1.4 מציגה את מקדמי השינוי בתאונות הקשורים לשינויים ברוחב שול - AMF_{WRA} .

טבלה 1.4. מקדמי שינוי בתאונות בתלות ברוחב שול.

Table 1.4. Accident modification factors depending on shoulder width

Shoulder Effective Width SEW in ft (m)	ADT ≤ 400	ADT = 401 to 1999	ADT ≥ 2000
0 (0,00)	1,10	1,50 - 0,000250 · (2000-ADT)	1,50
2 (0,60)	1,07	1,30 - 0,000144 · (2000-ADT)	1,30
4 (1,20)	1,02	1,15 - 0,0000813 · (2000-ADT)	1,15
6 (1,80)	1,00	1,00	1,00
≥ 8 (2,40)	0,98	0,87 - 0,0000688 · (2000-ADT)	0,87

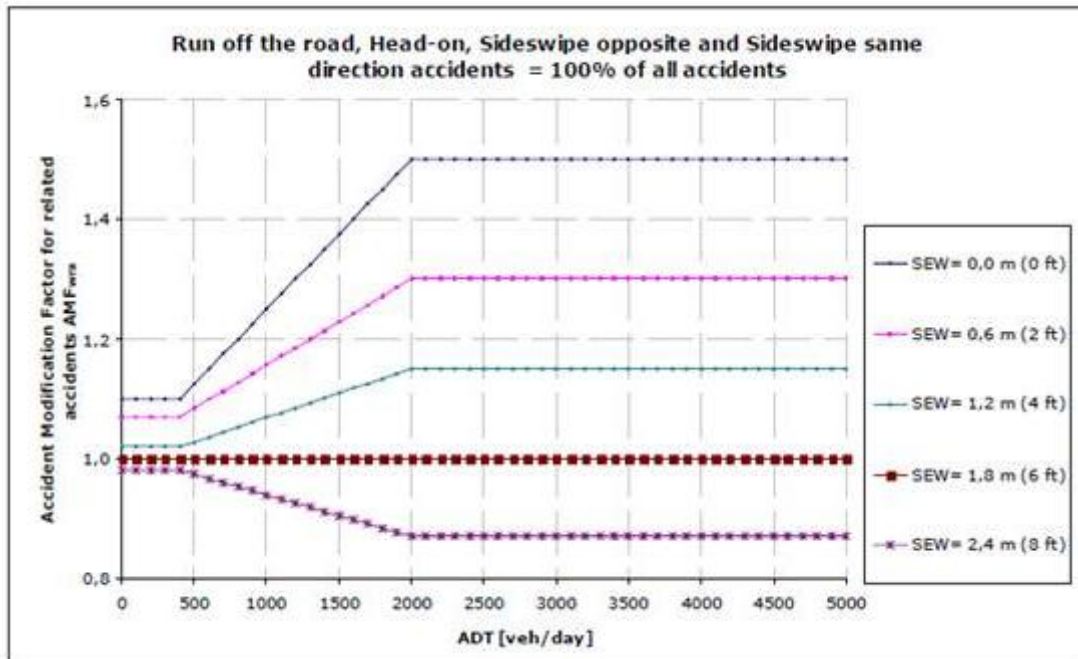
כדי לחשב מקדמי שינוי בתאונות לערכי הביניים של רוחב שול שאינם מופיעים בטבלה 1.4, יש לעשות אינטרפולציה של הערכים שבטבלה 1.4. כדי לחשב את הערך המסכם של מקדם השינוי בסך התאונות בתלות ברוחב שול וסוג שול - AMF_2 - משתמשים בנוסחא ובנתונים הבאים:

$$AMF_2 = (AMF_{wra} \cdot AMF_{tra} - 1,0) \cdot P_{ra} + 1,0$$

כאשר

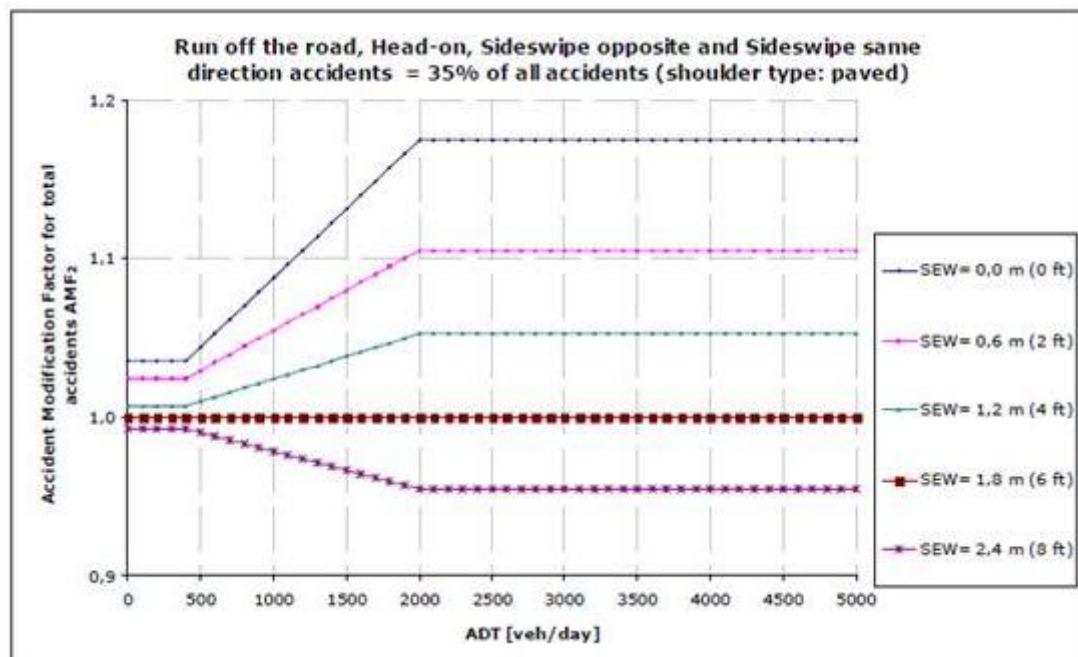
AMF_2	=	Accident Modification Factor for total accidents
AMF_{wra}	=	Accident Modification Factor for related accidents based on shoulder width [values from Table 3, <i>Values of AMF for Shoulder Width of Highway Segments (AMFwra)</i>]
AMF_{tra}	=	Accident Modification Factors for Shoulder Effective Width (SEW) and Shoulder Type on Two-Lane Highways [values from Table 4, <i>Accident Modification Factors for Shoulder Effective Width (SEW) and Shoulder Type on Two-Lane Highways (AMFtra)</i>]
P_{ra}	=	proportion of total accidents constituted by related accidents (i.e 35% of all accidents based on a default distribution of accident types); proportion should be the same as used for Lane Width

מניחים שרוחב שול משפיע על תאונות מסוגים אלה: רכב בודד, רכב יורד מהדרך, התנגשויות חזית בחזית, התנגשויות חזית בצד של כלי הרכב מכיוונים מנוגדים, והתנגשויות בין כלי הרכב באותו הכיוון. על סמך החישובים הנ"ל של מקדמי השינוי בתאונות נבנו הגרפים הבאים: איור 1.14 - מקדמי שינוי בתאונות, מהסוגים המתאימים, בתלות בנפח התנועה וברוחב שול; איור 1.15 - מקדמי שינוי בסך התאונות, בתלות בנפח התנועה וברוחב שול סלול; איור 1.16 - מקדמי שינוי בסך התאונות, בתלות בנפח התנועה וברוחב שול לא סלול.



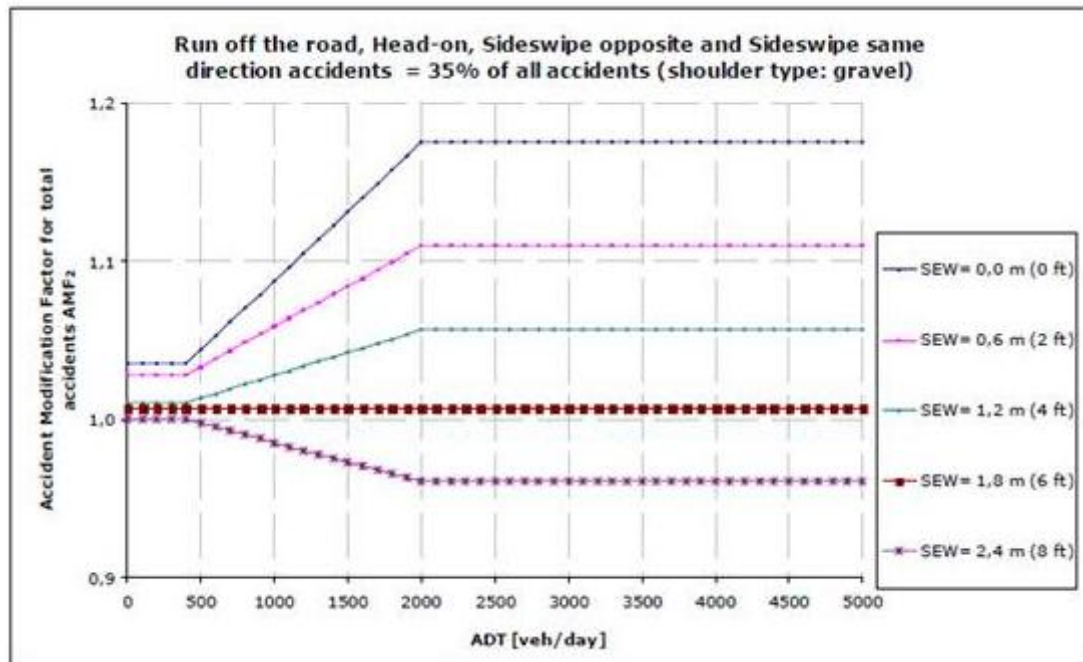
איור 1.14. מקדמי שינוי בתאונות הרלוונטיות בתלות בנפח התנועה וברוחב שול.

Figure 1.14. Accident modification factors depending on traffic volumes and shoulder width.



איור 1.15. מקדמי שינוי בסך התאונות, בתלות בנפח התנועה וברוחב שול סלול.

Figure 1.15. Accident modification factors depending on traffic volumes and paved shoulder width.



איור 1.16. מקדמי שינוי בסך התאונות, בתלות בנפח התנועה וברוחב שול לא סלול (מצעים).

Figure 1.16. Accident modification factors (in total accidents) depending on traffic volumes and unpaved shoulder width.

מקדמי השינוי בתאונות המוצעים להשפעת רוחב שול וסוג שול מבוססים על תוצאות המחקר של Zegeer et al (1987), אשר מציע יחס של 2:1 בין האפקטים של רוחב נתיב ורוחב שול. ממצא זה מתאים לתוצאות של מחקרים נוספים: Miaou (1996), Miaou (1995), Rinde (1977). מקדמי השינוי בתאונות עבור נפחי התנועה הקטנים מ-400 כלי רכב ביממה מבוססים על מחקרם של Zegeer et al (1981) עבור הדרכים דלות התנועה; במקרה זה מוצע היחס 1:1 בין האפקטים של רוחב נתיב ורוחב שול. התחום של נפחי התנועה בין 400 ל-2,000 כלי רכב ליממה מבוסס על שיפוט של פנל מומחים - Harwood et al (2000).

1.5.2. שילוב רוחב נתיב ורוחב שול

שכיחות התאונות וחומרת התאונות אינן מושפעות מאלמנטים בודדים בלבד, אלא גם מהשילוב ביניהם. רוחב הנתיב צריך להתאים לרוחב השול. לא סביר לצרף לנתיב צר שול רחב, כי זה יגרום לנהגים לנסוע על השול.

בהתבסס על הקשרים הסטטיסטיים שנמצאו במחקרים הקודמים בין רמת הבטיחות לבין פרטי תכנון בסיסיים, Mendoza et al (2002) יצרו את השילוב בין שני המאפיינים בהמלצות התכנון, כמוצג בטבלה 1.5.

טבלה 1.5. המלצות תכנון לשילוב רוחב נתיב ורוחב שול, על-פי נפח התנועה, מהירות התכן ואחוז כלי רכב כבדים.

Table 1.5. Design recommendations for a combination of lane width and shoulder width, according to traffic volume, design speed and percentage of heavy vehicles

ADT	Design speed	% of heavy vehicles			
		> 10%		< 10%	
		Lane width	Lane + shoulder width	Lane width	Lane + shoulder width
[veh./day]	[km/h]	[m]	[m]	[m]	[m]
≤ 750	< 50	3,00	3,50	2,70	3,30
	> 50	3,00	3,50	3,00	3,70
750 < ADT ≤ 2000	< 50	3,30	4,00	3,00	3,70
	> 50	3,70	4,60	3,30	4,30
> 2000	Any	3,70	5,50	3,30	5,20

1.5.3. הגבהה צדית

הגבהה צדית נדרשת בעיקולים ולצורך ניקוז גם בקטעים ישרים. בדרכים רבות באירופה ובארה"ב ההגבהה הצדית הקיימת בפועל נמוכה מההגבהה הצדית הרצויה על פי עקרונות התכנון. במקרים מסוימים המצב בפועל גרוע עוד יותר כי ההגבהה הצדית היא הפוכה לעומת הנדרש.

מקדם שינוי בתאונות לעקום האופקי במודל תכנון בטיחותי של דרך בארה"ב (IHSDM), מבוסס על מידת הליקוי בהגבהה הצדית. חוסר בהגבהה הצדית הוא ההפרש בין ההגבהה הצדית הקיימת בפועל (e_{act} %) לבין ההגבהה הצדית הנדרשת על פי התכנון (e_{design} %), כאשר ההגבהה הצדית על פי התכנון מבוססת על הספר הירוק של AASHTO (2001a). SD הוא הליקוי בהגבהה הצדית ביחידות של (%) אשר מוערך באופן הבא:

$$SD = 0,00 \text{ if } e_{act} \geq e_{design}$$

$$SD = e_{design} - e_{act} \text{ if } e_{act} < e_{design}$$

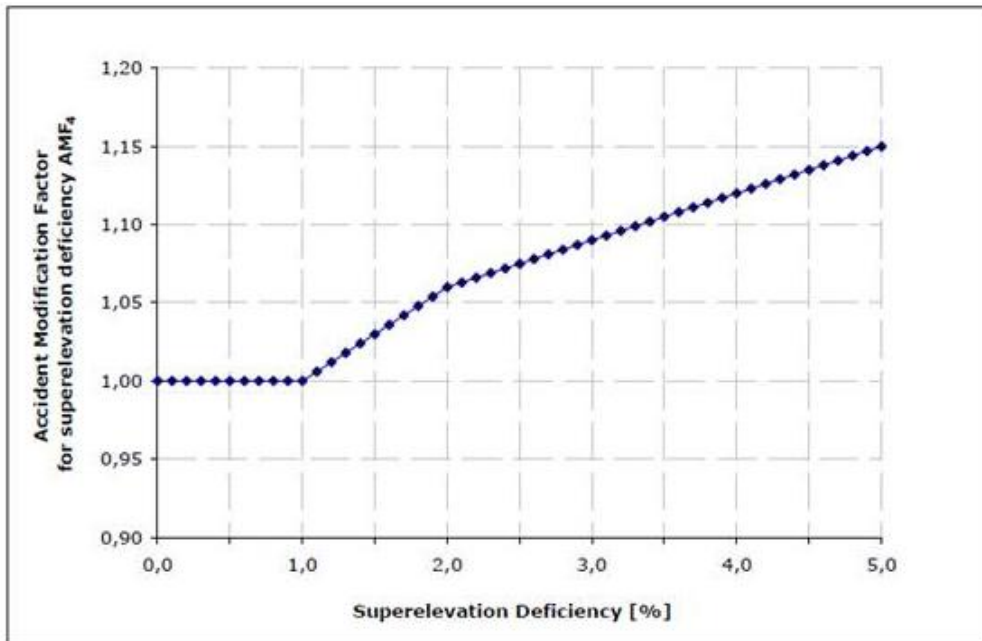
מקדם שינוי בתאונות להגבהה הצדית נקרא AMF_4 . ניתן להשתמש בערך שלילי של ההגבהה הצדית בפועל כאשר ההגבהה היא הפוכה. להלן תיאור מספרי לערכי מקדם השינוי בתאונות עקב הגבהה צדית לקויה:

$$AMF_4 = 1,00 \text{ for } SD < 0,01$$

$$AMF_4 = 1,00 + 6 \cdot (SD - 0,01) \text{ for } 0,01 < SD < 0,02$$

$$AMF_4 = 1,06 + 3 \cdot (SD - 0,03) \text{ for } 0,02 < SD$$

איור 1.17 מציג את ערכי מקדם השינוי בסך התאונות בתלות בליקוי בהגבהה הצדית.



איור 1.17. מקדם שינוי בתאונות בתלות בליקוי בהגבהה הצידית.

Figure 1.17. Accident modification factor depending on super-elevation deficiencies. טבלה 1.6 מתארת את השפעת הליקוי בהגבהה הצדית על הבטיחות בעקומים אופקיים, בקטעי דרכים, בתלות בנפח התנועה ומאפייני העקום.

טבלה 1.6. השפעת ליקוי בהגבהה הצדית על בטיחות בעקום אופקי.

Table 1.6. Effects of super-elevation deficiencies on safety at horizontal curves.

	Curve Length = 30 m Curve Radius = 60 m			Curve Length = 150 m Curve Radius = 300 m			Curve Length = 300 m Curve Radius = 600 m			Curve Length = 600 m Curve Radius = 600 m		
	Superelevation Deficiency			Superelevation Deficiency			Superelevation Deficiency			Superelevation Deficiency		
ADT [veh./ day]	0,00	0,02	0,04	0,00	0,02	0,04	0,00	0,02	0,04	0,00	0,02	0,04
	ACCIDENTS PER KILOMETRE PER YEAR											
400	0,82	0,87	0,91	0,09	0,09	0,10	0,06	0,07	0,07	0,06	0,06	0,07
1000	2,04	2,17	2,29	0,22	0,23	0,24	0,16	0,17	0,18	0,15	0,16	0,17
3000	6,13	6,50	6,87	0,65	0,68	0,73	0,48	0,50	0,53	0,45	0,47	0,50
5000	10,22	10,84	11,45	1,08	1,14	1,21	0,80	0,84	0,89	0,75	0,79	0,83
10000	20,45	21,68	22,90	2,16	2,29	2,42	1,58	1,68	1,78	1,49	1,58	1,67
	ACCIDENTS PER 10⁶ VEHICLE-KILOMETRES											
400	5,60	5,94	6,28	0,59	0,63	0,66	0,44	0,46	0,48	0,41	0,44	0,46
1000	5,60	5,94	6,28	0,59	0,63	0,66	0,44	0,46	0,48	0,41	0,44	0,46
3000	5,60	5,94	6,28	0,59	0,63	0,66	0,44	0,46	0,48	0,41	0,44	0,46
5000	5,60	5,94	6,28	0,59	0,63	0,66	0,44	0,46	0,48	0,41	0,44	0,46
10000	5,60	5,94	6,28	0,59	0,63	0,66	0,44	0,46	0,48	0,41	0,44	0,46

1.5.4. תוואי אופקי- עקמומיות

על-פי Glennon (1987), רדיוס העקום הינו המשתנה המשפיע ביותר על הבטיחות בעקום, ואחריו, בסדר חשיבות יורד, מופיעים רוחב שול, רוחב נתיב ואורך העיקול. על פי מחקר זה מספר מידות של רדיוס נמצאו כמהוות סיכון. מידות אלה נעות בין רדיוס קטן מ-500 מטר על פי מחקר של Glennon (1987) לבין רדיוס הקטן מ-1000 מטר, על-פי מחקר של Hedman (1990).

בין החוקרים בצפון אמריקה לבין החוקרים האירופאים קיים הבדל באופן תיאור העיקולים. באירופה, מתואר העיקול באמצעות רדיוס R. בצפון אמריקה, מתואר העיקול באמצעות רמת העיקול D. רמת העיקול פירושה מספר המעלות של הקשת שאורכה 100 רגל. הקשר בין הרדיוס R לבין רמת העיקול D ביחידות של מטר ושל רגל מופיע במשוואות הבאות:

$R = 180 \cdot a_b / (\pi \cdot D)$	[feet]	($a_b = 100$ feet)
$R = 5730 / D$	[feet]	($a_b = 100$ feet)
$R = 180 \cdot a_b / (\pi \cdot D)$	[metre]	($a_b = 30,5$ metre)
$R = 1748 / D$	[metre]	($a_b = 30,5$ metre)

Deacon (1986), פיתח מודל גרסיה לתיאור הקשר בין מספר התאונות בעקום לבין מספר משתנים מסבירים. המודל הינו:

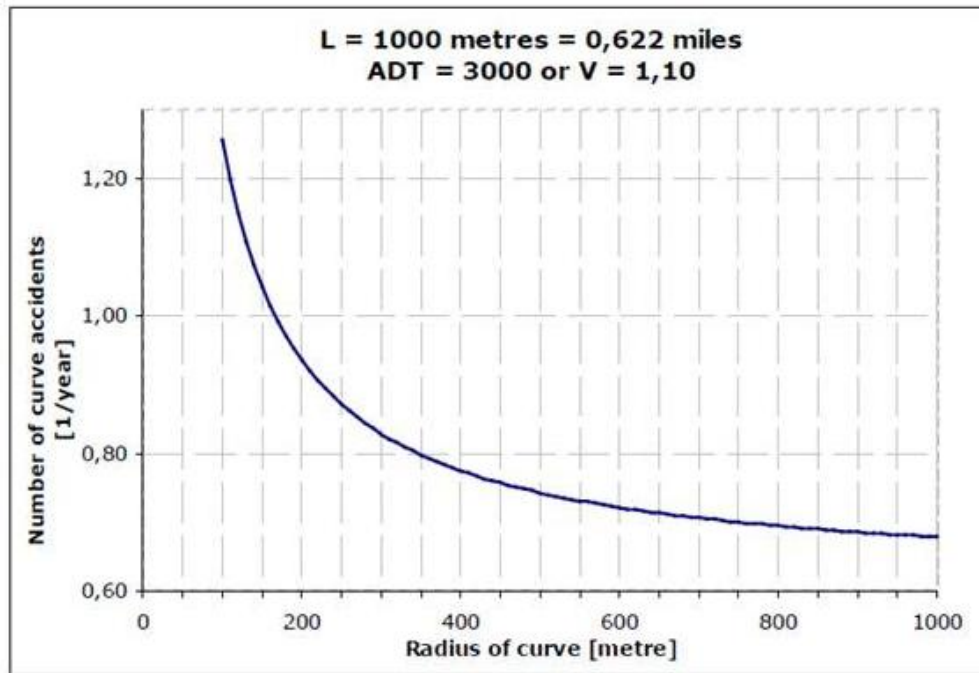
$$A = r \cdot L \cdot V + 0,0336 \cdot D \cdot V$$

כאשר

- A = Number of curve accidents per year
- r = Accident rate in accidents/10⁶ vehicle miles
- L = Length of curve in miles
- V = Traffic volume in 10⁶ vehicles per year
- D = Degree of curve (100 feet arc)

המודל מכיל שני חלקים. המכפלה ($r \cdot L \cdot V$) מייצגת את הרכב בעיקול. מספר התאונות פרופורציונאלי למיליון רכב-מייל. החלק השני מייצג את השפעת הכניסה והיציאה לרדיוס על מספר התאונות שהינו פרופורציוני למידת העיקול D או לרדיוס העיקול R.

איור 1.18 מתאר את הקשר בין רדיוס העקום ומספר התאונות, עבור אורך עקום קבוע - 1,000 מ', ונפח תנועה יומי של 3,000 כלי רכב. שיעור התאונות r במקרה זה הוא 0.902 תאונות למיליון מייל-רכב, על פי Perez (2002).



איור 1.18. מספר תאונות בשנה בתלות ברדיוס העקום, עבור אורך עקום קבוע - 1,000 מ' ונפח יומי ממוצע 3,000 כלי רכב.

Figure 1.18. Annual accident number depending on the curve radius, for curve length of 1,000 m and daily traffic of 3,000 vehicles.

Zegeer et al (1991), ערכו מחקר על קשר בין מאפייני העקומים וביטוחות ומצאו את המודל הבא:

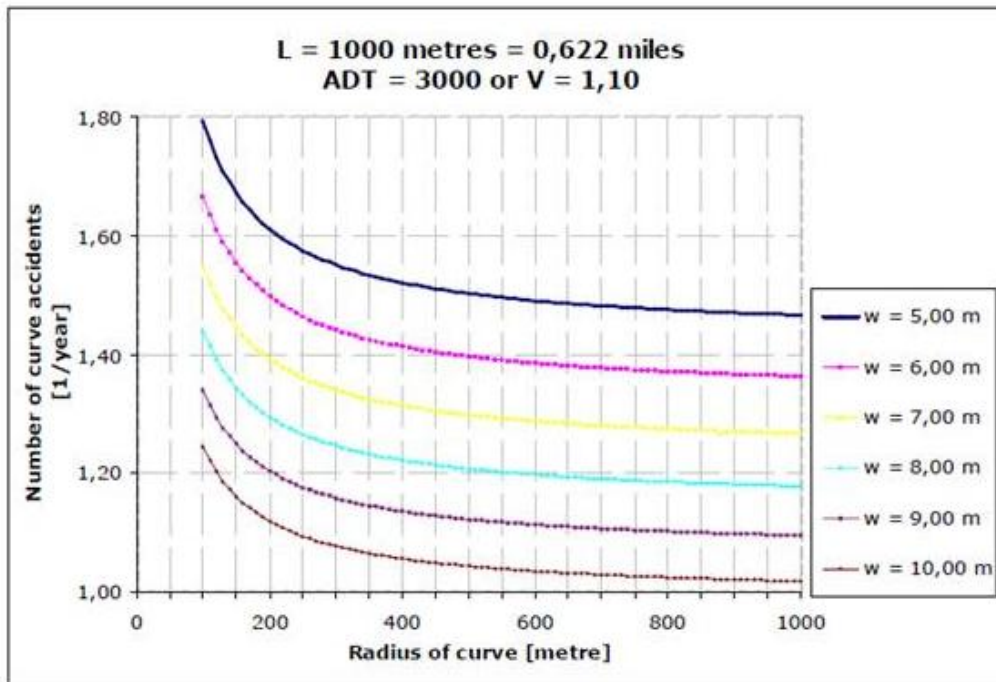
$$A = (1,552 \cdot L + 0,014 \cdot D - 0,012 \cdot S) \cdot V \cdot 0,978^{w-30}$$

$$= 1,552 \cdot L \cdot V \cdot 0,978^{w-30} + 0,014 \cdot D \cdot V \cdot 0,978^{w-30} - 0,012 \cdot S \cdot V \cdot 0,978^{w-30}$$

כאשר

- A = Number of curve accidents per year
- L = Length of curve in miles
- V = Traffic volume in 10^6 vehicles per year
- D = Degree of curve (100 feet arc)
- S = 1 if spiral exist and 0 otherwise
- w = Is the roadway width in feet (including lanes and shoulders)

איור 1.19 מראה את מספר התאונות החזוי בעקום באורך 1,000 מ' ונפח תנועה שנתי של 1.1 מיליון כלי רכב, המתאים לממוצע של 3,000 כלי רכב ביממה. S במקרה זה הוא 0. פירוש הדבר שאין עקומי מעבר ספירליים בין הישרים לרדיוס. שיעור התאונות במודל זה 1552 למיליון רכב-מייל. מודל זה לוקח בחשבון את רוחב המיסעה בניגוד למודלים אחרים, כגון של Glennon et al (1985) ושל Deacon (1986).



איור 1.19. מספר תאונות בעקום בשנה, בתלות ברדיוס ורוחב המיסעה, עבור אורך עקום קבוע 1,000 מ' ונפח יומי ממוצע 3,000 כלי רכב.

Figure 1.19. Annual number of curve accidents depending on the curve radius and carriageway width, for curve length of 1,000 m and daily traffic of 3,000 vehicles.

מקדם השינוי בתאונות לפי עקום אופקי (AMF_3) הינו המקדם השלישי במודל תכנון בטיחותי של דרך דו-נתיבית בארה"ב (IHSDM). מקדמי שינוי אלה משתמשים במודל של Zegeer et al (1991), עם התאמה מסוימת. הערך של AMF_3 שווה ל-1.0 במקרה שקטע הדרך הוא משיק או עקום מעבר ספיראלי ולא עקום אופקי. כאשר קטע הדרך נמצא על עקום אופקי, אזי AMF_3 מחושב כלהלן:

$$AMF_3 = (1,55 \cdot L_c + 80,2 / R - 0,012 \cdot S) / 1,55 \cdot L_c$$

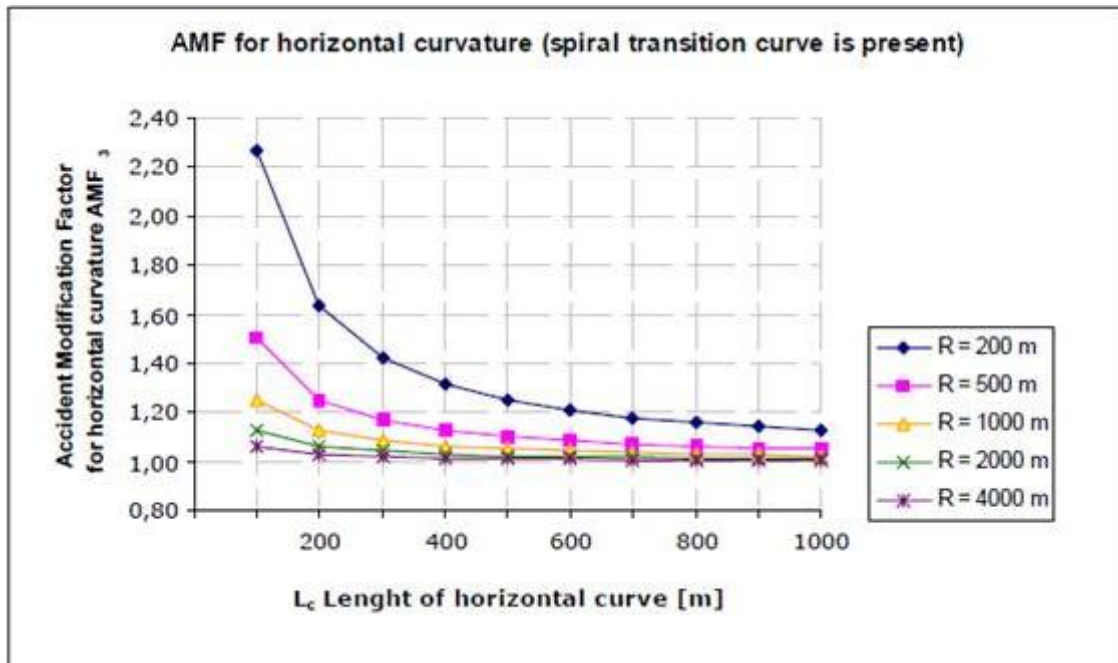
כאשר

R = Radius of horizontal curvature in feet

L_c = Length of horizontal curve in miles

S = 1 if spiral transition curve is present; 0,5 if spiral transition curve is present on one end of the circular curve and 0 otherwise

במקרה שרדיוס העקום קטן מ-100 רגל (30.5 מטר), נלקח ערך הרדיוס של 100 רגל (30.5 מטר). במקרה שאורך העקום קטן מ-100 רגל (30.5 מטר), נלקח ערך האורך 100 רגל (30.5 מטר). ערך של AMF_3 לא יכול להיות קטן מ-1.0, על-פי IHSDM. איור 1.20 מתאר את מקדם השינוי בתאונות בתלות באורך וברדיוס של העקום האופקי.



איור 1.20. מקדם שינוי תאונות בעקום, בתלות באורך העקום וברדיוס העקום.

Figure 1.20. Accident modification factor depending on the curve length and radius.

1.5.5. עקביות של תוואי אופקי

עקביות התוואי האופקי היא נקודה חשובה בבטיחות. מתכנני הדרך צריכים לתכנן את רכיבי הדרך בהתאמה לציפיות הנהג הנובעות מניסיונו בנהיגה בדרכים דומות ובקטעי הדרך הקודמים. שינוי גדול בעומס הנהיגה גורם לתאונות. לכן, יש למנוע שינויים גדולים בעומס הנהיגה על ידי מניעת שינויים גדולים בתוואי האופקי. משיקולי הבטיחות, התוואי האופקי צריך להיות עקבי במרחק הראות של הנהג. דרישה זו משמרת את מהירות התכן של הדרך.

על פי Wollidridge et al (2003), תכנון לא תלוי של קטעי הדרך מגדיל את הפוטנציאל לתאונות. לדוגמה, עיקול חד בודד המופיע בקטע דרך ישר וארוך יהיה מסוכן יותר בהשוואה לעיקול חד דומה המופיע בקטע דרך בסטנדרט נמוך. העיקול הראשון בסדרה של עיקולים בסמוך לקטע ישר יהיה מסוכן יותר בהשוואה לעיקולים הבאים. על פי Hoban (2001), כאשר מהירות האחוזון 85 עולה על מהירות התכן ביותר מ-10-15 קמ"ש, יש להשתמש באמצעי אזהרה כגון: שלטי אזהרה ואמצעי הבלטה שונים.

1.5.6. תוואי אנכי - שיפוע

שיפוע גדול מתקשר עם שכיחות גבוהה של התרחשות התאונות. Hedman (1990) מצטט את מחקרם של Brude et al (1980), אשר מצאו ששיפוע אנכי של 2.5% ו-4% מגדיל את שכיחות התאונות ב 10% ו-20%, בהתאמה, בהשוואה לדרך בשיפוע אופקי.

Li et al (1994) פיתחו מודל סטטיסטי רב-משתני לחיזוי תאונות קטלניות ותאונות עם נפגעים לדרכים דו-נתיביות, על סמך נתונים מקולומביה הבריטית, בקנדה. נמצאה פונקציה שינוי בתאונות AMF הלוקחת את השיפוע כמסביר:

$$AMF_{(\Delta\%grade)} \approx 1 + 0,136 \cdot \Delta\%grade / \sqrt{(Accid/km)}$$

לדוגמא, אם בדרך עם שיפוע של 2.5% יש 1.5 תאונות לקילומטר, והדרך שופרה לדרך עם שיפוע של 0%, השינוי בשיפוע והשפעתו על תאונות יהיו כלהלן :

$$\Delta\%grade = 0 - 2,5 = -2,5$$

$$AMF_{(\Delta\%grade)} \approx 1 + 0,136 \cdot (-2,5) / \sqrt{1,5}$$

$$AMF_{(\Delta\%grade)} \approx 0,7224$$

$$Accidents/ km_{after} = AMF_{(\Delta\%grade)} \cdot Accidents/ km_{before}$$

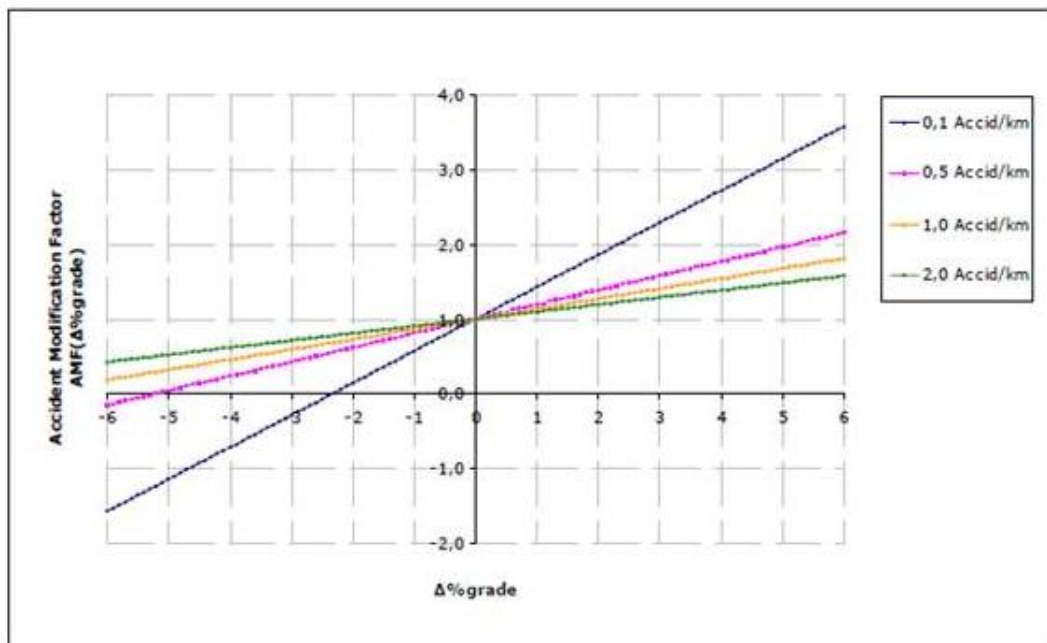
$$Accidents/ km_{after} = 0,7224 \cdot 1,5$$

$$Accidents/ km_{after} = 1,0836$$

$$Reduction: 0,416 Accidents/ km = 27,789\%$$

על פי פונקציה זאת, ניתן לחשוב שהפחתה של 1% בשיפוע מביאה להפחתה של 10% בתאונות. החיסרון במודל זה הינו מגבלותיו. לדרכים עם שיעור תאונות נמוך (למשל, 0.5 תאונות לקילומטר), והפחתה גדולה בשיפוע (למשל 6%), עקרון ההפחתה לא פועל, דהיינו ערך ה-AMF יכול להיות שלילי. כמו כן, לשיעור תאונות נמוך מאוד, הפחתה של 2.4% בשיפוע יכולה להיות שלילית.

על-פי Li et al. (1994), נמצא קשר בין מקדם שינוי בתאונות לבין הפרש בהגבהה הצדית הקיימת ביחס להגבהה הנכונה. הפרש זה מתואר באיור 1.21.



איור 1.21. מקדם שינוי תאונות בתלות בהפרש בין הגבהה צדית קיימת לבין ההגבהה הנדרשת ולפי מספר ערכים של שיעור תאונות ממוצע לק"מ.

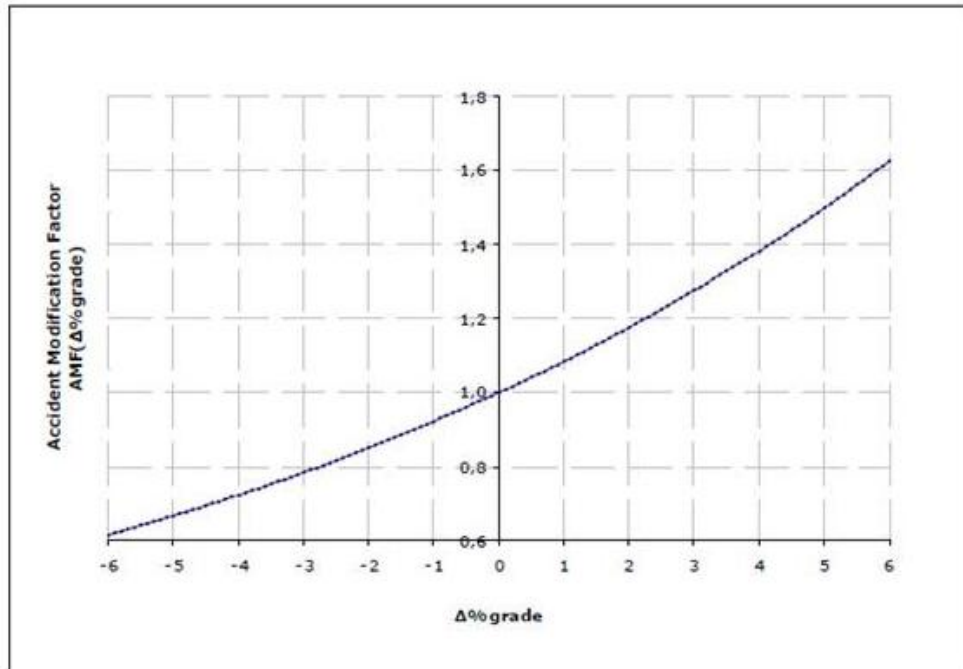
Figure 1.21. Accident modification factor depending on gap between the required and existing super-elevation and according to several values of accident rates per km.

Miaou (1995) מצא את הפונקציה למקדם שינוי בתאונות בתלות בשינוי בשיפוע. הפונקציה

$$AMF_{(\Delta\%grade)} = e^{0,081 \cdot \Delta\%grade}$$

הינה:

איור 1.22 מציג תיאור גרפי למקדם השינוי בתאונות בתלות בשינוי בשיפוע, לפי Miaou (1995).



איור 1.22. מקדם שינוי בתאונות בתלות בשינוי בשיפוע.

Figure 1.22. Accident modification factor depending on grade changes.

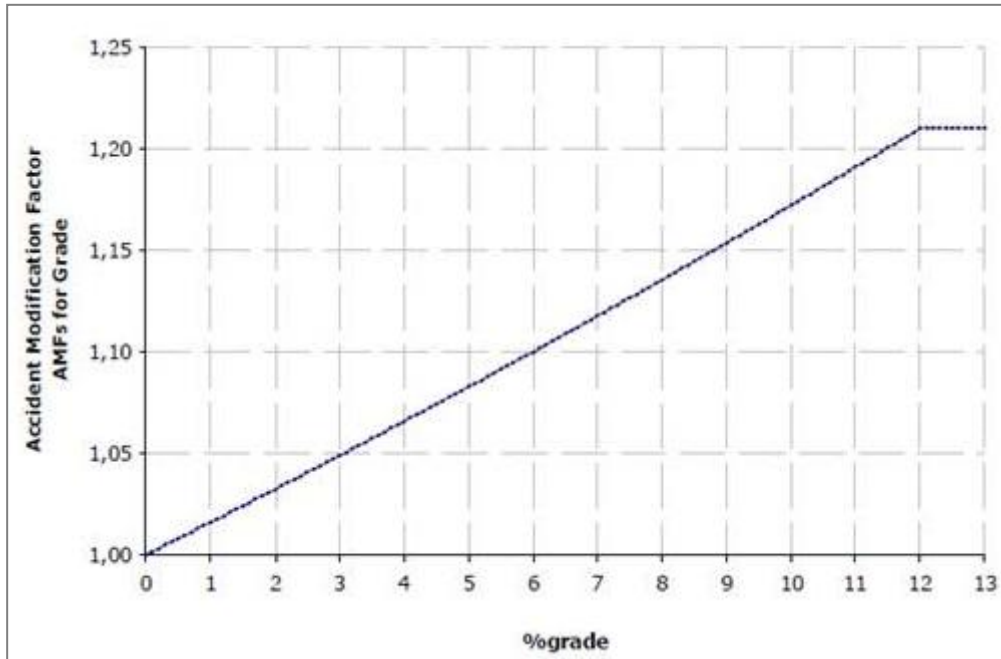
מקדמי הפחתה של ה-IHSDM בנושא שיפוע אנכי מבוססים על המודל של Miaou (1998): מוגדר AMF_5 , כאשר ערכו שווה ל-1.00 אם קטע הדרך הוא אופקי (תנאי בסיס). עקב חוסר בממצאים הסטטיסטיים פנל המומחים הגדיר לשימוש את הפונקציה הבאה:

$$AMF_5 = (1,016)^{PG}$$

where:

PG = Percent grade

איור 1.23 מביא ביטוי גרפי לקשר זה.



איור 1.23. מקדם שינוי בתאונות בתלות בשיפוע אנכי, לפי ה-IHSDM.

Figure 1.23. Accident modification factor depending on vertical grade, according to IHSDM.

1.5.7. מודלים רב משתנים לחיזוי תאונות

(2001a, 2001b) Cardoso (1)

במסגרת עבודה לשיפור בטיחות בקטעי דרך בדרכים בין-עירוניות חד-מסלוליות בפורטוגל, נבנו מודלים לחיזוי התאונות (Accident Predicting Models - APM) לעקומים ולקטעי דרך המשיקים לעקומים. מודלים שונים נבנו לעקומים עם שול סלול ולעקומים עם שול לא סלול. לצורכי פיתוח המודלים, נאספו נתונים מ-1,100 ק"מ של דרכים דו-נתיביות חד-מסלוליות, מתוכם 670 ק"מ עם שול לא סלול. לקטעי דרכים אלו נאספו נתונים גיאומטריים, נפחי התנועה, והתאונות. ריכוז הנתונים שנאספו מוצג בטבלה 1.7.

טבלה 1.7. היקף הנתונים שנאספו בפורטוגל לבחינת רמת הבטיחות של דרכים דו-נתיביות
Table 1.7. The scope of data collected in Portugal for safety level examination of single-carriageway roads

	Road with unpaved shoulder		Road with paved shoulder	
	Tangent	Curve	Tangent	Curve
Number of road elements	1,043	1,719	606	1,042
Length (km)	430	240	234	217
Traffic volume (10^6 vehicle x km)	3,121	1,588	3,553	2,877
Time period	1988 - 1993		1991 - 1995	
Number of injury accidents	3,121	2,378	1,007	906
Accident rate (per 10^6 vehicle x km)	1.04	1.5	0.28	0.31

לפיתוח מודל החיזוי השתמשו בתהליך קירוב לינארי, תוך שימוש בהתפלגות פואסונית והנוסחה הכללית הבאה:

$$AF = ax_1^{b_1} x_2^{b_2} \dots$$

ניתן להמיר נוסחה זאת לביטוי הבא :

$$\ln(AF) = \ln(a) + b_1 \ln(x_1) + b_2 \ln(x_2) + \dots$$

כאשר

- AF = expected accident frequency in the road element (tangent or curve) during the relevant time period;
- x_i = explicative variable, representing the influence of road characteristics or driver behaviour (speed);
- a, b_i = estimated coefficients.

במחקר, הותאמו ארבעה מודלים, עבור מצבים אלה: שול סלול בקטע עיקול, שול סלול בקטע משיק, שול לא סלול בקטע עיקול ושול לא סלול בקטע משיק. טבלאות 1.8, 1.9 מציגות את המודלים שהותאמו. בין המשתנים המסבירים במודלים אלה נמצאים: אורך הקטע, רוחב הנתב, עקמומיות ממוצעת, נפח תנועה יומי, מהירות ממוצעת והפחתה במהירות הממוצעת בשני הכוונים.

טבלה 1.8. מקדמי רגרסיה במודלים המסבירים שהותאמו לקטעי דרכים עם שול לא סלול, לפי (2001a, 2001b) Cardoso

Table 1.8. Regression coefficients in the models fitted to road sections with unpaved shoulders

			Curve	Tangent
a	$\ln(a)$	-	-10.29	-3.483
	Length	(m)	0.5731	1 (*)
	Carriageway width	(m)	-	-3.275
	Average bendiness	(1/km)	-	-0.2055
b_i	AADT	(vehicles per day)	0.8963	1.032
	Average speed	(km/h)	-	-0.6619
	Maximum reduction in the average speed (both directions)	(km/h)	0.07427	-
	Number of observations		1576	972
	Standardized deviation		2030	1374
	Pearson's χ^2		2143	1634
	Degrees of freedom		1572	892
	Overdispersion		1.29	1.54
	R^2_{FT}		0.24	0.49

טבלה 1.9. מקדמי רגרסיה במודלים המסבירים שהותאמו לקטעי דרכים עם שול סלול, לפי (2001a, 2001b) Cardoso

Table 1.9. Regression coefficients in the models fitted to road sections with paved shoulders

			Curve	Tangent
a	ln (a)	-	-13.32	-8.755
b _i	Length	(m)	0.6967	1*
	Carriageway width	(m)	-	0.1165
	AADT	(vehicles per day)	1*	1.181
	Average approach speed	(km/h)	0.0525	-1.87
	Maximum reduction in the average speed (both directions)	(km/h)	0.1285	-
Number of observations			834	606
Standardized deviation			969	797
Pearson's χ^2			964	773
Degrees of freedom			794	572
Overdispersion			1.22	1.39
R^2_{FT}			0.44	0.59

הערה לטבלאות 1.8, 1.9: * offset

מקדמי חיזוי התאונות בקטעי ההשקה ובקטעי העיקולים אוחדו למשוואה אחת כדי לקבל את הגידול בסיכון בעיקול, לכל סוג של שול (סלול ולא סלול). הנוסחאות לשוני בשכיחות התאונות החזויות היו כלהלן:

$$\text{For roads with non-paved shoulders: } VRAC = \frac{AF_{Curve}}{AF_{Tangent}} = e^{-6.907} \frac{(\Delta V_M)^{0.074} S^{0.206} L_F^{3.28} V_{MR}^{0.682}}{TMDA^{0.136} L_C^{0.427}}$$

$$\text{For roads with paved shoulders: } VRAC = \frac{AF_{Curve}}{AF_{Tangent}} = e^{-5.565} \frac{(\Delta V_M)^{0.129} V_{MR}^{1.932}}{TMDA^{0.181} L_C^{0.303} L_F^{0.129}}$$

כאשר

- VRAC = variation in the expected accident frequency due to the horizontal curvature;
- AF_{Curve} = expected accident frequency on curve;
- $AF_{Tangent}$ = expected accident frequency on tangent;
- ΔV_M = maximum average unimpeded speed at the beginning of the curve (both directions) (km/h);
- L_F = carriageway width (m);
- TMDA = average annual daily traffic (vehicles);
- V_{MR} = average unimpeded speed on the preceding (approach) tangent (km/h);
- S = average road bendiness in the 500 m preceding the initial section of the curve (1/km);
- L_C = curve length (m).

השתמשו בנוסחאות אלו לסיווג העיקולים על פי רמות הסיכון.

(1994) Kalakota and Seneviratne, (1992) Kalakota et al (2)

תאונות מתקופה של ארבע שנים שאירעו בקטעי דרכים בין-עירוניות חד-מסלוליות, באורך 85 ק"מ. במספר קטעי הדרך היה נתיב נוסף לזחילה או עקיפה. שיעור תאונות ממוצע היה 0.0141 תאונות למיליון קילומטר נסיעה, בשנה. ערך זה היה דומה לערך שהתקבל במחקר הפורטוגלי שתואר לעיל בקטעי הדרך המשיקים (0.0126 תאונות למיליון קילומטר נסיעה, בשנה). לעיקולים עם רדיוס קטן, בין 350 מ' ל-450 מ', נמצא שיעור תאונות גבוה באופן משמעותי ביחס לשאר קטעי הדרכים. הותאמו מודלים נפרדים לקבוצות של קטעים עם המאפיינים השונים, כלהלן:

א - מודלים למשיקים ועיקולים:

$$FTAc = 0.0000087 + 0.0916736 \frac{1}{X_1} + 0.0035X_2 - 0.0002X_6 - 0.000006X_8$$
$$(R^2=0,74);$$

ב - מודלים לעיקולי דרך בלבד:

$$FTAc = -0.0003 + 0.0038X_2 + 2.11995X_3 + 0.063026X_4 +$$
$$+ 0.000004X_5 - 0.0002X_6 - 0.00012X_7$$
$$(R^2=0,28);$$

ג - מודלים לקטעי דרך ישרים:

$$FTAc = 0.0001 + 0.0034X_2 + 0.002X_6$$
$$(R^2=0,84);$$

כאשר

$FTAc$ = yearly accidents per 1000 vehicles;
 X_1 = curve radius (ft);
 X_2 = segment length (miles);
 X_3 = X_2/X_1 ;
 X_4 = [longitudinal slope, (%)]/ X_1 ;
 X_5 = [shoulder width, (ft)]/ X_1 ;
 X_6 = X_2 x [shoulder width, (ft)];
 X_7 = X_3 x [longitudinal slope, (%)];
 X_8 = X_7 x [shoulder width, (ft)].

(1999) Khan et al (3)

פיתחו מודלים לחיזוי שכיחות התאונות, המיועדים לבחינת עלות הבטיחות לחלופות תחבורתיות שונות, עבור מדינת קולורדו בארה"ב. נתוני הדרכים במחקר כללו נתונים גיאומטריים ונפחי התנועה עבור 260 ק"מ של קטעי דרך ראשיים, ואת נתוני התאונות עם נפגעים ונזק בלבד, מתקופה של עשר שנים. לחלק מהמודלים אוחדו נתוני אורך קטע ונפח לנתון של נסועה: מייל-רכב (vehicle-mile traveled - VTM).

במחקר, פותחו מודלים שהמשתנים המסבירים שלהם היו אורך קטע ונפח תנועה יומי, או אומדן הנסועה. נבדקה השפעת המשתנים על סך התאונות, תאונות עם נפגעים, תאונות קטלניות ותאונות נזק בלבד. הותאמו שתי קבוצות מודלים: שמונה מודלים כפונקציה של אורך קטע ונפח התנועה, וארבעה מודלים כפונקציה של נסועה (VMT). הסיווג הפנימי של המודלים היה לפי מיקום הקטע (עירוני/ לא עירוני), אורך קטע (ארוך/ קצר), נפח תנועה יומי (גבוה/ נמוך) או לפי מיקום הקטע (עירוני/ לא עירוני) וגודל הנסועה (גבוה/נמוך). הגדרת אורך הקטע, נפח התנועה והנסועה כ"ארוך/קצר" או "גבוה/נמוך" הייתה בהתאם למאפייני המדגם שנותח דהיינו: "גבוה" או "ארוך" מסומן ב- ">" ומשמעותו "עולה על החציון", בעוד ש-"קצר" או "נמוך" מסומן ב- "<". ומשמעותו "נמוך מהחציון".

לפיתוח המודלים שימשו רגרסיה לינארית נורמלית (גאוסיאנית) ורגרסיה לינארית כללית עבור הלוגריתם של שכיחות התאונות ותוך כדי שימוש בהתפלגות פואסונית או בינומית שלילית עבור שכיחות התאונות. לבחירת המודל המתאים ביותר, לכל מקרה נבחן, שימש מבחן פירסון. המודלים של רגרסיה נורמלית הוגדרו על פי שתי הנוסחאות:

$$AF = a \cdot SL + b \cdot AADT; \quad AF = c \cdot VMT,$$

כאשר

AF = expected accident frequency;
 SL = segment length (miles = 1.6km);
 AADT = annual average daily traffic;
 VMT = travelled distance (vehicle x mile = 1.6 vehicle x km).

המודלים של רגרסיה לינארית כללית הוגדרו באמצעות הנוסחאות הבאות:

$$AF = SL^a \cdot AADT^b, \quad AF = VMT^c.$$

כמו כן, במחקר נמצא כי המודלים הלא אגרטיביים (שתוארו לעיל) היו טובים יותר מבחינת ההתאמה לנתונים מאשר מודלים אגרטיביים (עבור כל הקטעים ביחד). בטבלה 1.10 מוצגים שמונת המודלים (הלא אגרטיביים) שהותאמו לתאונות עם נפגעים, בתלות באורך הקטע ונפח תנועה יומי. בטבלה 1.11 מוצגים ארבעת המודלים (הלא אגרטיביים) שהותאמו לתאונות עם נפגעים, בתלות באומדן הנסועה (VMT).

טבלה 1.10. מקדמי המודלים המסבירים לתאונות עם נפגעים בתלות באורך הקטע ונפח התנועה
 Table 1.10. Coefficients of injury accident explanatory models, depending on section length and traffic volumes

	SL (mile)	AADT	df	χ^2	Model type	a	t	b	t
Urban	>	>	127	607	NB	0.9108	9.8422	1.48E-05	20.136
	>	<	229	1,194	P	0.3279	8.6884	0.2274	93.580
	<	>	239	2,271	P	0.2744	9.1711	0.2539	99.335
	<	<	137	962	LN	1.6210	7.1253	2.13E-05	7.9716
Rural	>	>	43	228	P	0.5432	5.6238	0.1943	15.657
	>	<	63	586	P	0.2859	6.1803	0.2417	23.6266
	<	>	66	150	P	0.2710	1.9261	0.1684	35.5349
	<	<	50	103	LN	0.2628	3.5639	4.73E-05	9.20623

טבלה 1.11. מקדמי המודלים המסבירים לתאונות עם נפגעים בתלות באומדן הנסועה בקטע
 Table 1.11. Coefficients of injury accident explanatory models, depending on
 kilometrage estimates

	VMT (vehicle x mile)	df	χ^2	Type of model	c	t
Urban	>	368	1,951	IG	5.88E-07	42.879
	<	370	3,990	LN	5.48E-05	42.9827
Rural	>	114	992	P	1.37E-05	125.206
	<	114	303	LN	4.52E-05	27.5165

הערות לטבלאות 1.10, 1.11 :

(1) ">" מסמן "עולה על החציון", "<" מסמן "נמוך מהחציון".

(2) LN - לוגריתם; P - התפלגות פואסונית; NB - התפלגות בינומית שלילית.

(1990, 1988) Kulmala and Roine (4)

בפינלנד, (1990, 1988) Kulmala and Roine השתמשו ברגרסיה לינארית מוכללת כדי להתאים מודל לקשר בין מאפייני הדרך למספרי התאונות בדרכים חד-מסלוליות בין-עירוניות. להתפלגות התאונות שימשה התפלגות פואסונית. במודל שהותאם כומתה השפעת המשתנים המסבירים הבאים: רוחב המיסעה הסלולה (נתיבים ושוליים סלולים), מהירות מרבית מותרת, עקמומיות ממוצעת, גביעיות ממוצעת, צפיפות צמתים משניים, אורך הקטע ונפח התנועה. החוקרים השתמשו בנתוני התאונות מתקופה בת שמונה שנים.

במחקר, הותאמו מודלים לא אגרטיביים (60 נוסחאות בקירוב), על פי השילובים השונים של המאפיינים כגון: מהירות מרבית מותרת, סיווג הדרך וסוג התאונה. בבחירת המשתנים המסבירים הטובים ביותר התעוררו קשיים האופייניים למחקרים מסוג זה, דהיינו עבור מספר משתנים מסבירים נמצאה קורלציה טובה עם המשתנה המוסבר, כאשר עבור מאפיינים אחרים כמשתנים מסבירים נמצא תחום ערכים צר.

המודל המתאים ביותר לסך התאונות היה כלהלן:

$$F_{Act} = e^{-2.482+S-0.2443RFL(2)+0.003411KA+0.001267TYL-0.1957FNR(2)+0.01246R-0.01547RKVL+0.006312RFL(1)MA+0.01858RFL(2)MA}$$

המודל המתאים ביותר לתאונות התנגשות בהולכי רגל, רוכבי אופניים ובעלי חיים היה כלהלן:

$$F_{Ac} = e^{-1.734+S-0.1989RLE(2)+0.001409KA-0.0009253TYL-0.1495FNR(2)-0.0268KPIT} \cdot e^{0.004529FLE(1)MA+0.02221RLE(2)MA-0.03401RLE(1)RKVL-0.04468RLE(2)RKVL}$$

כאשר בשני המודלים:

FacT = injury accident frequency (1979-1986);
FAc = injury accident (except for collision with pedestrians, cyclists and animals) frequency (1979-1986);
S = total traffic volume (1979-1986), in 10^6 vehicles;
RFL = carriageway width: 1 if greater than 7.60 and smaller than 8.50 m; 2 if greater than 8.50 m;
RLE = carriageway width: 1 if greater than 7.60 and smaller than 9.50 m; 2 if greater than 9.50 m;
MA = average hilliness (up-hill plus down-hill), in m/km;
KA = average bendiness (Grad/km);
FNR = legal speed limit: 0 if lower than 80 km/h; 1 if equal to 80 km/h; 2 if equal to 100 km/h;
TYL = number of private driveways per kilometre;
R = percentage of heavy vehicles;
RKVL = AADT (1,000 vehicles per);
KPIT = length of road stretch (km).

במודלים שנבנו נמצאה התאמה בין מספר משתנים. לדוגמא, רוחב המיסעה נמצא מתאים למהירות מרבית מותרת.

(1996) Mountain et al (5)

בבריטניה, Mountain et al (1996) פיתחו מודלים לחיזוי תאונות לדרכים עם צמתים משניים שעבורם חסרים נתונים על נפחי התנועה בגישות המשניות. הנתונים נאספו מ-3,800 קילומטרים של דרכים עירוניות ובין-עירוניות, חד-מסלוליות ודו-מסלוליות. הדרכים כללו יותר מ-5,000 צמתים משניים. הנתונים נאספו עבור: נפחי תנועה יומיים ממוצעים לקטעי הדרך, והתאונות מתקופה בת 15 שנים (כ-26,000). בין היתר, אורך קטעי הדרכים החד-מסלוליות העירוניות היה 945 ק"מ, לרבות 2,300 צמתים משניים; בקטעים אלה נרשמו 12,906 תאונות. אורך קטעי הדרכים החד-מסלוליות הבין-עירוניות היה 2,566 ק"מ, לרבות 2,677 צמתים משניים; בקטעים אלה נרשמו 10,535 תאונות.

במחקר, הותאמו מודלי רגרסיה לקשר בין מאפייני הדרכים ושכיחות התאונות, תוך כדי שימוש בהתפלגות פואסונית או בינומית שלילית עבור התאונות. פותחו שני סוגי מודלים. במודל הראשון, השפעת הצומת המשני על מספר התאונות בקטע נלקחה בחשבון באמצעות צירוף צפיפות הצמתים כמשתנה מסביר. במודל השני, השפעת הצמתים המשניים נלקחה בחשבון בנפרד.

הנוסחה וערכי המקדמים למודלים מהסוג הראשון היו כלהלן (טבלה 1.12):

$$AF = b_0 T^{b_1} L^{b_2} e^{b_3 N/L}$$

כאשר

T = total two-way annual traffic flow (million vehicles);
L = link length (km);
N = number of minor junctions in the link.

טבלה 1.12. מקדמי המודלים המסבירים לתאונות על-פי המודל הראשון של Mountain et al (1996)

Table 1.12. Coefficients of accident explanatory models according to the first model in Mountain et al (1996)

Model parameter	Urban A-road		Rural A-road	
	single carriageway	dual carriageway	single carriageway	dual carriageway
b_0	0.808	0.808	0.481	0.481
b_1	0.614	0.614	0.614	0.614
b_2	0.986	0.630	0.986	0.630
b_3	0.104	0.104	0.104	0.104

הנוסחה וערכי המקדמים למודלים מהסוג השני היו כלהלן (טבלה 1.13):

$$AF = AF_{link} + AF_{minor\ junction} = b_0 T^{b_1} L^{b_2} + b_3 T^{b_4}$$

- T = total two-way annual traffic flow (million vehicles);
- L = link length (km);
- N = number of minor junctions in the link

טבלה 1.13. מקדמי המודלים המסבירים לתאונות על פי המודל השני של Mountain et al (1996)
Table 1.13. Coefficients of accident explanatory models according to the second model in Mountain et al (1996)

Model parameter	Urban A-road		Rural A-road	
	single carriageway	dual carriageway	single carriageway	dual carriageway
b_0	0.784	0.628	0.453	0.363
b_1	0.644	0.644	0.644	0.644
b_2	0.957	0.658	0.957	0.658
b_3	0.131	0.131	0.088	0.088
b_4	0.648	0.648	0.648	0.648

בניתוח טיב התאמת המודלים, נמצא שהם שווי ערך.

(2003) Prinsloo and Goudanas (6)

Prinsloo and Goudanas (2003) פיתחו מודלים מסבירים לחיזוי מספר תאונות אופייני לפי סוג דרך, בניו סאות ולס, אוסטרליה. המודלים מחשבים את שיעור התאונות כאומדן לביצוע בטיחות ממוצע על פי סוג דרך. לסיווג הדרכים שימשו מספר מאפיינים כגון: רוחב נתיב, רוחב שול, עקום אופקי, עקום אנכי, צפיפות צמתים משניים, נתיבי פנייה, נתיבי עקיפה וסוג מיסעה. המודלים פותחו באמצעות שימוש בבסיס נתוני הדרכים הכולל יותר מ-10,000 ק"מ של דרכים בין עירוניות. מידע על המאפיינים הגיאומטריים של הדרכים נאסף עבור קטעי דרך באורך 10 מטר(!); נתונים על נפחי התנועה נתקבלו לכל קטע דרך בין צמתים ראשיים.

המחקר חולק לשניים. החלק הראשון כלל את פיתוח המודל על נתונים של 3,000 ק"מ של דרכים שבאחריות המדינה. בחלק השני, הותאם מודל ל-7,000 ק"מ של דרכים מקומיות. הממצאים שדווחו מתייחסים לחלק הראשון של המחקר. שימוש בנתוני התאונות היה לשתי תקופות זמן שהן: 5 שנים ו-10 שנים.

סיווג קטעי הדרכים (הגדרת הסטריאוטיפ) נעשה על פי מאפיינים אלה :

number of carriageways (one or two);
pavement width (dual carriageway: >15m; <=15m) ;
(single carriageway: >9.5m; <=9.5m and >6.25m;
<=6.25m and >4.5m; <=4.5m);
shoulder width (>1.5m; <=1.5m and >0.85m; <=0.85 and >0.0m; 0.0m);
number of lanes per carriageway (2, 3);
average lane width (>3.5m; <=1.5m and >3m; <=3m);
type of centre line marking (B/B, B/C, C, none).

לכל סוג דרך, נערך חישוב של השפעת תכונות נוספות לא אגרגטיביות לצורך חישוב שיעור התאונות, כולל: סוג מיסעה, עקום אופקי, אזורי הגבלת מהירות, קיום נתיב לעקיפה, סימון קצה הדרך, צדי דרך סלחניים, רוחב אזור נקי ממכשולים, מעקות בטיחות, הימצאות גשרים ומעברי מים וצפיפות צמתים משניים. שיעור תאונות ממוצע (תאונות למיליון ק"מ רכב) חושב לכל סוג דרך לתקופת התאונות בת עשר שנים. טבלה 1.14 מציגה את שיעורי התאונות לנתוני דרך שונים.

על סמך שיעורי התאונות לכל סוג דרך (שילוב המאפיינים) חושבה השפעת התכונות השונות על שיעור התאונות. ההשפעה חושבה באמצעות היחס בין שיעור התאונות הממוצע של כל קטעי הדרך בעלי התכונה הנבחנת, לבין שיעור התאונות בכל קטעי הדרך בקבוצה. לדוגמה, טבלה 1.15 מתארת את השפעתם של ארבעת סוגי הסימון של קו האמצע על שיעורי התאונות בדרך דו-מסלולית, עבור ארבעה מצבים של רוחב שול.

(2004) Qin et al (7)

Qin et al (2004), פיתחו מודלים מסבירים לסוגי תאונות שונים. הבסיס החשוב ביותר לצורך כך היה אימות ההשערה שהקשר בין מספר התאונות ונפח התנועה היומי הממוצע אינו לינארי, ושהוא תלוי בסוג התאונה הנבחן.

התאונות עם נפגעים הופרדו לארבעה סוגים שהם: תאונת רכב בודד, תאונה עם ריבוי כלי רכב מאותו כיוון הנסיעה, תאונה עם ריבוי כלי רכב מכיוונים מנוגדים ותאונה עם ריבוי כלי רכב בצומת. הנתונים נלקחו ממאגר הנתונים HSIS בארה"ב, שהינו מאגר של נתוני בטיחות רב-מדינתי המתוחזק על ידי רשות הדרך הפדראלית. נתוני נפחי התנועה נלקחו מרשויות הדרך של המדינות. לניתוח הוגדרה תקופה בת ארבע שנים. נתחו יותר מ-29,800 קטעי דרכים חד-מסלוליות דו-נתיביות באורך כולל של יותר מ-29,000 ק"מ. קטעי הדרך נבחרו באופן אקראי. לכל קטע נאספו נתונים אלה: מספר תאונות על פי הסוגים, אורך, נפח תנועה יומי ממוצע, מהירות מרבית מותרת, רוחב נתיב, רוחב שול, רוחב מיסעה.

לחיזוי התאונות, לפי סוגים, נעשה שימוש במודל פואסוני מסוג *Zero-inflated Poisson*. המודלים הוגדרו כך שיתאפשר קשר לינארי בין חשיפה למספר התאונות. היה צריך להגדיר את התנועה בדרכים שונות על פי סוג התאונה. הדבר הצריך נתוני תנועה מפורטים, כגון נפח שעותי בכל כיוון, נפחי תנועה בדרכים המשניות בצמתים. הממצאים המתוארים בהמשך מתבססים על נתוני תנועה זמניים רגילים, דהיינו נפח יומי ממוצע לשני הכוונים. המודל לחיזוי התאונות מתואר באמצעות הנוסחה:

טבלה 1.14. שיעורי התאונות למאפייני דרך שונים, לפי Prinsloo and Goudanas (2003)
 Table 1.14. Accident rates for different road characteristics, according to Prinsloo and Goudanas (2003)

Paved width categories (m)	Shoulder Width Class (m)	Number of lanes per carriageway	Average Lane Width (m)	Average crash rate (10-years)
Dual Carriageway				
Div <=15	>0 AND <=0.85	2	>3 AND <= 3.5	23.0
		3	>3.5	9.8
	>0.85 AND <=1.5	2	>3 AND <= 3.5	38.3
		3	>3 AND <= 3.5	22.2
	>1.5	2	>3.5	9.6
		3	>3 AND <= 3.5	7.4
	=0	2	>3 AND <= 3.5	10.1
		3	>3.5	6.1
	=0	2	>3 AND <= 3.5	31.1
		3	>3.5	27.3
Single Carriageway				
>4.5	0	2	<=3	53.5
		3	>3 AND <= 3.5	28.7
>6.25 AND <=9	>0 AND <=0.85	2	>3 AND <= 3.5	29.9
		3	>3.5	18.1
	>0.85 AND <=1.5	2	>3 AND <= 3.5	26.5
		3	>3.5	28.5
	0	2	<=3	63.2
		3	>3 AND <= 3.5	39.8
3	>3.5	25.3		
>9.5	>0 AND <=0.85	2	<=3	25.2
		3	>3 AND <= 3.5	53.3
	>0.85 AND <=1.5	2	>3.5	31.9
		3	>3 AND <= 3.5	66.9
	>1.5	2	>3 AND <= 3.5	24.5
		3	>3.5	19.5
	>0.85 AND <=1.5	3	>3 AND <= 3.5	22.0
		3	>3.5	21.3
	>1.5	2	>3 AND <= 3.5	58.2
		3	>3.5	61.3
0	2	>3.5	41.1	
	3	>3 AND <= 3.5	54.2	
3	>3.5	144.8		

טבלה 1.15. השפעת סוגי סימון שונים על שיעורי התאונות בדרך דו-מסלולית, לפי Prinsloo and Goudanas (2003)

Table 1.15. Effects of various types of road marking on accident rates on two-lane roads

Sealed width category (m)	Shoulder width class (m)	Centre line marking type crash rate difference (%)				Average crash rate difference (%)
		B/B	B/C	None	C	
Div <=15	>0 AND <=0.85	-8.61	71.77		0.78	4.06
		-34.26	-7.87		-1.53	27.07
		-5.06				-5.06
	>0.85 AND <=1.5	-6.97	21.34		-6.16	2.48
		113.30			-23.57	44.87
						-28.95
	>1.5	-26.42			28.34	0.96
					-13.03	-13.03
	0	5.56	31.76	92.31	-31.81	21.84
		91.64	-46.00	22.45	-53.91	-7.16

$$AF_k = \eta_k \rho_k = V_i^{\alpha_k} L_i^{\beta_k} e^{X_i \beta_k}$$

כאשר

- AF_k = expected accident frequency of type k ;
- η_k = computed exposure function for accident type k ;
- ρ_k = accident rate for accidents of type k ;
- V_i = AADT at site i ;
- L_i = length of road at site i ;
- X_i = set of characteristics of site i ;
- α, β = parameters to be estimated for accident type k .

המודל הותאם לנתונים שנתיים. תוצאות הרגרסיה הראו שהמקדמים לנפח תנועה יומי ואורך קטע הראו שונות קטנה עם השנים ושונות גדולה בין סוגי התאונות. טבלה 1.16 מציגה את הערכים המחושבים של הפרמטרים שהופקו מהמודל לצורך חיזוי תאונות, על פי התאונות שהתרחשו בשנה אחת מסוימת - 1995:

טבלה 1.16. מקדמי המודל לחיזוי התאונות על פי סוג תאונה, בשנת 1995. מתוך: Qin et al (2004)

Table 1.16. Coefficients of model for accident prediction according to accident type

Explanatory variable	Accident type				
	Single vehicle	Multi-vehicle same direction	Multi-vehicle opposite direction	Multi-vehicle intersecting direction	
Intercept	Coeff.	-0.672	2.133	8.882	0.883
	t-value	-2.405	3.226	6.188	0.857
ln(AADT)	Coeff.	0.254	1.270	1.126	0.720
	t-value	14.540	22.796	2.050	10.470
ln(Length)	Coeff.	0.725	0.429	0.748	0.245
	t-value	63.547	13.815	11.759	5.658
Shoulder width	Coeff.	0.026	-0.054	-0.123	-0.064
	t-value	3.295	-4.702	-5.393	-4.674
Lane width	Coeff.	0.136	-0.261	-0.908	-0.148
	t-value	6.925	-4.729	-7.469	-1.715
Speed limit	Coeff.	0.000	-0.013	-0.012	0.003
	t-value	-0.132	-2.805	-1.300	0.533

(2003) Turner et al , (2000) Turner (8)

Turner (2000), Turner et al (2003), פיתחו מודלים לחיזוי תאונות בדרכים בין-עירוניות עבור קטעי דרך וצמתים, בניו זילנד. המודלים פותחו לאתרים מיוחדים כגון: עקולים מבודדים, גשרים צרים, גשרים בעלי נתיב בודד ומפגשי רכבת-דרך. אתרי הדרכים חולקו לשלשה סוגים: צמתים (כולל 50 מ' בגישות), קטעי דרך, ואתרים מיוחדים כמפורט לעיל. לכל אתר נאספו נתונים על: גיאומטריה, מצב הבקרה צומת, מהירות מרבית מותרת וסוג שימושי הקרקע. לכל אתר, נעשה אומדן לנתוני התנועה. נלקחו נתוני התאונות מתקופה בת חמש שנים.

לפיתוח המודלים, נעשה שימוש בטכניקות כלליות למודלים לינאריים. לנתונים הותאמה התפלגות בינומית שלילית, להוציא עיקולים מבודדים, להם נבחר מבנה פואסוני. למודלים לצמתים וקטעי דרך הוגדר משתנה מסביר יחיד - נפח תנועה ממוצע יומי. במודלים לאתרים מיוחדים השתמשו במשתנים מסבירים אחרים כגון: מהירות התכן של עקום, מהירות התקרבות לעקום (עקום מבודד), מספר רכבות ביום (למפגשי רכבת), רוחב המיסעה (בגשרים).

פותח מודל חיזוי תאונות לצמתי קמץ, כלהלן :

$$AF = 5.2 \cdot 10^{-4} Q_{\min}^{0.57} Q_{\max}^{0.41}$$

כאשר

AF = expected accident frequency;
 Q_{\min} = AADT in the minor approach;
 Q_{\max} = AADT in the major approach.

מודלים מסוג לינאריים כלליים פותחו לסוגי תאונות עיקריים בקטעי דרך. לדוגמא, המודלים להתנגשויות חזיתיות ולהתנגשויות בעקיפה היו כלהלן :

$$AF = b_0 \left(\frac{Q_T}{2} \right)^{2b_1}$$

כאשר

AF = expected accident frequency;
 Q_T = AADT in the carriageway (vehicles).

במחקר, הותאמו 16 מודלים לדרכים בין-עירוניות חד-מסלוליות, לפי 8 סוגי תאונות/תמרונים ושני סוגי אזור. סוגי התאונות או התמרונים הם: התנגשות חזיתית, עקיפה, חזית-אחור, התנגשות בין רכב פונה ורכב מאותו כיוון, איבוד שליטה, תמרון במהירות נמוכה, אחר וסך כל התאונות עם נפגעים. סוגי האזורים הם: אזור מישורי ודרכים באזור עם שיפועים.

חמישה מודלים הותאמו לסוגי תאונות בדרכים מהירות שהם: חזית-אחור, איבוד שליטה, עקיפה, אחר וסך כל התאונות עם נפגעים. המודלים לדרכים המהירות היו כלהלן :

$$AF = b_0 Q_T^{b_1}$$

כאשר

AF = expected accident frequency on motorways;
 Q_T = AADT in one carriageway (vehicles);

טבלה 1.17 מציגה את מקדמי המודלים שהותאמו לדרכים החד-מסלוליות והמהירות.

טבלה 1.17. מקדמי המודלים לחיזוי סך התאונות בדרכים חד-מסלוליות ומהירות, לפי Turner (2000) et al (2003)

Table 1.17. Coefficients of models for accident prediction on single-carriageway roads and motorways

Type of road	b_0	b_1	k	Number of sites	Scaled deviance
Level terrain single carriageway	2.91×10^{-3}	0.84	1.5	100	32
Rolling terrain single carriageway	1.20×10^{-3}	0.84	1		9.2
Motorway (for each carriageway)	2.18×10^{-6}	1.43	19.8	76	62

Interactive Highway Safety Design Model (IHSDM) (9)

(IHSDM) Interactive Highway Safety Design Model הינה חבילת תוכנה לצורך הערכה של החלטות תכנוניות הקשורות לדרך בין-עירונית חד-מסלולית מההיבטים של בטיחות ותפעול (Krammes and Hayden, 2003). חבילת התוכנה פותחה בתמיכת רשות הדרך הפדרלית (FHWA) בארה"ב. IHSDM, הינה כלי עזר לצורך תכנון דרכים חדשות ותכנון מחדש של דרכים קיימות, המסייעת למתכנן בחיזוי הביצועים של חלופות התכנון. ניתן להשתמש ב-IHSDM בכל שלבי התכנון, מהתכנון המוקדם ועד התכנון המפורט. לתוכנה חמישה רכיבים עיקריים: סקירת מדיניות, חיזוי תאונות, הערכת עקביות התכנון, סקירת הצמתים וניתוח תנועה.

רכיב "סקירת המדיניות" משמש לבדיקת תכנון רכיבי הדרך, דהיינו האם הפרמטרים שנקבעו נמצאים בטווח הערכים שהוגדרו במדיניות התכנון של AASHTO. בדיקה זו נעשית לחתך לרוחב, כולל המאפיינים בצד הדרך, התוואי האופקי, התוואי האנכי ומרחקי ראות.

רכיב "חיזוי התאונות" מפיק אומדן למספר התאונות וחומרן על-פי המאפיינים הגיאומטריים ומאפייני התנועה. יש תהליך חיזוי נפרד לצמתים ותהליך נפרד לקטעי דרך. רכיבים המשפיעים על אלגוריתם חיזוי התאונות בקטעי הדרך כוללים: רוחב נתיב, רוחב שול, סוג שול, אורך ורדיוס של עקום אופקי, האם קיים מעבר עקומים ספיראלי, הגבהת צד, שיפוע, צפיפות צמתים משניים, האם קיימים נתיבי עקיפה ודירוג סכנות בצדי הדרך. האלגוריתמים לאומדן מספר ההתנגשויות משלבים מודלים סטטיסטיים המספקים תאונות חזויות למייל ומקדמי גורמים לשינוי. המודלים הבסיסיים פותחו לקטעי דרך ולארבעה סוגי צמתים.

המודלים הבסיסיים מכילים נוסחה לחישוב שכיחות תאונות בסיסית (AF - accident frequency) עם כל המשתנים המסבירים, עם ערכי בררת מחדל, ערכי נפח תנועה יומי ואורך הקטע. ערכי המקדמים הגורמים לשינוי (AMF - accident modification factor) משמשים לכוונון ערכי התאונות החזויות שהתקבלו מהמודל הבסיסי לערכים של קטע עם פרטי תכנון מסוימים שהשפעתם על רמת הסיכון או על חומרת התאונות ידועה. להלן הנוסחה להערכה:

$$AF_{link} = AF_{base\ model} (AMF_1, AMF_2, \dots, AMF_n).$$

כאשר

AF_{link}	= predicted number of total link accidents per year;
$AF_{base\ model}$	= predicted number of total link accidents per year for base conditions;
AMF_i	= accident modification factor i .

בחירת רכיבי הדרך והבקרה עבורם ופיתוח שיטות לכימות ה-AMF נעשתה על ידי פנל של מומחים. לקטעי דרך הוגדרו 12 רכיבים שהם: רוחב נתיב, סוג שול, רוחב שול, אורך של עקום אופקי, רדיוס, הגבהת צדית, מעבר עקומים, שיפוע, צפיפות צמתים משניים, האם קיימים נתיבים דו-סטריים לפניו שמאלה, האם קיימים נתיבי עקיפה ותכנון צדי הדרך.

בפיתוח IHSDM הותאמו מודלים בינומיים שלילים ומודלים בינומיים שלילים מורחבים לחישוב ה-AMF, מתוך בסיס הנתונים הארצי של HSIS לדרכים חד-מסלוליות דו-נתיביות, עם רוחב שלא עולה על 7.32 מ' ורוחב שול שאינו עולה על 3.66 מ'. לפיתוח שימשו נתוני התנועה והתאונות מהשנים 1985-1989, ממדינת מינסוטה, ומהשנים 1993-1995, ממדינת וושינגטון. סה"כ, נכללו הנתונים מ-3,308 קטעי דרך ו-8,083 תאונות.

נבדקו מספר גדול של משתנים מסבירים פוטנציאלים למודל קטעי הדרך כגון: נפח ממוצע יומי, אורך הקטע, רוחב נתיב, רוחב שול, מעלות בעקול לקשת באורך 100 מ', משקל עיקול אופקי (אורך קטע העיקול האופקי מחולק באורך כל הקטע), שיעור שיפוע פסגה (בעקום אנכי), משקל עקום אנכי בפסגה (אורך קטע העקום האנכי בפסגה מחולק באורך כל הקטע), שיפוע קבוע, דרוג סכנות בצד הדרך, צפיפות צמתים משניים, מהירות מרבית מותרת, אחוז רכב מסחרי בנפח הממוצע היומי. כמו כן, חושבו חמישה משתנים נוספים: חשיפה (במיליון ק"מ-רכב), רוחב מיסעה סלולה (נתיבים ושוליים סלולים), סכום מעלות עיקול כפול משקלם, סכום שיפוע פסגות עקום אנכי כפול משקלם, וסכום ערכים מוחלטים של שיפועים.

המודל הכללי היה כלהלן:

$$AF = e^a \prod x_i^{b_i}$$

כאשר

AF = expected number of accidents (total and injury accidents);
 x_i = explanatory variables;
 a, b_i = coefficients to calculate.

לפיתוח המודלים השתמשו בטכניקות של מידול פואסוני, בינומי שלילי ובינומי שלילים מורחב. מקדמי המודל שנבנה עבור סך התאונות בקטע דרך מובאים בטבלה 1.18.

טבלה 1.18. מקדמי המודל לסך התאונות בקטע דרך, לפי IHSDM
 Table 1.18. Coefficients of models for total accidents on road section, acc. to IHSDM

Variable	Coefficient	Estimated standard error	p-value
EXPO (million vehicle x km)	1 (as an offset)		
Intercept	0.165	0.1289	0.2006
Lane width - LW (m)	-0.278	0.1397	0.0465
Shoulder width - average of left and right widths - SW (m)	-0.194	0.0375	0.0001
Roadside hazard rating - RHR	+0.0668	0.0211	0.0015
Driveway density - DD (per km)	+0.0135	0.0042	0.0011
Degree of curve - DEG(i) (per 100m)	+0.0137	0.0024	0.0001
Crest curvature rate - V(i) (degree per 100m)	+0.142	0.0378	0.0002
Grade of section - GR(i) (percent)	+0.105	0.0287	0.0003
State (0 for Minnesota, 1 for Washington)	+0.139	0.0659	0.0351
n, p	1331, 9		
$D^m / (n-p-1)$	1.50		
K	0.3056		
R^2_k	0.829		
R^2	0.655		

בהמשך, רכיב "עקביות התכנון" של ה-IHSDM מאבחן בעיות בטיחות בעיקולים אופקיים. העקביות בתכנון מוגדרת כהסכמה בין ערכי התכנון וציפיות של נהג לא מקומי המבוססות על הניסיון שלו.

(1998a, 1998b) Baruya (10)

במסגרת פרויקט אירופי MASTER (MANaging Speed of Traffic on European Roads) פותחו מודלים לחיזוי תאונות בדרכים בין-עירוניות על-פי הנתונים מארבע מדינות: הולנד, פורטוגל, בריטניה ושבדיה (1998a, 1998b, Baruya). לנתונים הותאמו מודלים ליניאריים כלליים מקבוצת *Generalised linear multiplicative Poisson models*. נתוני המהירות, הגיאומטריה והתאונות נאספו מ-28 קטעי דרך בהולנד, 63 קטעי דרך בבריטניה, 39 - בפורטוגל ו-73 - בשבדיה. המהירויות נמדדו בשעות יום, ימי חול, לא בשעת שיא. נתוני גיאומטריית הדרך שנאספו הם: אורך הקטע, רוחב נתיב, ומהירות מרבית מותרת. בבריטניה בלבד, הוגדרו שני משתנים נוספים המתארים את עקמומיות הדרך (קשור לעקום האופקי), ואת השיפוע (קשור לחתך לאורך). נתוני התאונות נאספו לתקופות בין 3 ל-5 שנים.

בניתוח, נמצאו הבדלים גדולים בין שיעור התאונות ממוצע של ארבע המדינות. ביחידות של תאונות למיליון ק"מ-רכב הערך הנמוך ביותר היה בשבדיה (0.153), אחריו הולנד (0.215), בריטניה (0.333) ופורטוגל (0.533). בשל ההבדל הגדול ברמת הבטיחות, פותחו שתי קבוצות מודלים: המודל האירופי (Euro model) המבוסס על נתוני שבדיה, הולנד ובריטניה, והמודל האירופי המחוזק (Powered Euro model), המבוסס על נתוני פורטוגל.

המודל האירופי היה כלהלן:

$$AF = 5.663Q^{0.478} L^{0.847} V^{-2.492} P^{0.114} e^{0.038NJ - 0.056W + 0.023S}$$

כאשר

- AF = expected number of accidents (injury accidents);
- Q = AADT;
- L = link length (km);
- V = average speed (km/h);
- P = proportion of drivers exceeding the speed limit (%);
- NJ = number of junctions in the link;
- W = road width (m);
- S = speed limit (km/h).

המודל האירופי המחוזק היה כלהלן:

$$AF = \alpha \cdot EP^\beta = 1.00 \cdot EP^{1.35}$$

כאשר

- AF = expected number of injury accidents in Portuguese link;
- EP = predicted number of accidents using the euro model.

1.6. מחקרים ישראליים על בטיחות בדרכים דלות תנועה

1.6.1. דרכים בעלות ארבע ספרות

במחקר של הקרט ושוקיר-חדאד (2009), נמצא שסכום אורכי הדרכים הבין-עירוניות בעלות ארבע ספרות הוא 622 ק"מ. דרכים אלה מהוות 14% מהאורך הכולל של הדרכים הבין-עירוניות, על-פי נתוני הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה (למ"ס). לחלק מדרכים אלו קיימים נתונים על נפח תנועה יומי. קיימת התאמה חלקית בין דרכים בעלות ארבע ספרות לדרכים עם נפחי תנועה נמוכים.

בוצע חישוב נסועה בדרכים בהם הנפח היומי הממוצע ידוע. שיעור התאונות לנסועה בדרכים בעלות ארבע ספרות עם נפח תנועה ידוע היה 435 תאונות בשנה למיליארד קילומטר נסיעה, לעומת 277 תאונות בשנה למיליארד ק"מ נסיעה בכל רשת הדרכים.

בניתוח נתוני התאונות נמצא כי רוב התאונות בדרכים עם 4 ספרות מתרחשות בקטעי דרך ובאור יום. הסיבות העיקריות לתאונות הן: מהירות מופרזת, אי מתן זכות קדימה לרכב, סטייה מנתיב, פניה לא נכונה, אי ציות לתמרור עצור, אי שמירת רווח, אי ציות לתמרור מתן זכות קדימה, אי שמירה על הימין. סוגי התאונות הנפוצות הם: חזית בצד, חזית בחזית, התנגשות עם עצם דומם, התהפכות, חזית-אחור וירידה מהכביש.

ל-20 קטעי דרך מבין הדרכים בעלות ארבע הספרות נאספו פרמטרי תשתית כגון: רוחב נתיב, רוחב שול, טופוגרפית הדרך (שטח מישורי, גבעי או הררי), עקמומיות הדרך, מצב המיסעה, מצב התמרור וסימוני המיסעה, תאורת הדרך וצפיפות צמתים לקילומטר כביש. נערכה בדיקה מדגמית של מהירות לנקודה בכל קטע.

בניתוח מאפייני הקטעים נמצאו קשרים מובהקים (ברמת הביטחון של 95%) בין המשתנים הבאים: רוחב נתיב - טופוגרפית הדרך, רוחב שול - טופוגרפית הדרך, רוחב שול - טופוגרפיה-עקמומיות, טופוגרפיה - עקמומיות - צפיפות הצמתים, עקמומיות - תאורה, מצב המיסעה - מצב התמרור וסימוני המיסעה, מהירות ממוצעת - טופוגרפיה ועקמומיות הדרך, נפח תנועה - רוחב נתיב.

נבחנה התאמה בין מאפייני הקטעים לבין שכיחות התאונות. נמצא קשר סטטיסטי בין סך התאונות עם נפגעים לבין נפח התנועה ומדד גאומטרי מורכב. כמו כן, נמצא קשר בין התאונות החמורות לבין טופוגרפיה ומדד גאומטרי מורכב.

בנוסף, נמצא קשר ליניארי בין נפח התנועה למספר התאונות, כאשר בנפח גבוה יותר רווח הסמך לקשר זה מתרחב בצורה ניכרת. נמצא קשר לא ליניארי עולה בין המהירות הממוצעת לתאונות, כאשר הקשר מתמתן מעבר לתחום המהירות של 70-75 קמ"ש.

לגבי הקשר בין מאפייני תשתית מסוימים לבין שכיחות התאונות התקבלו ממצאים אלה:

- * בבחינת שיעור התאונות בתלות ברוחב נתיב הערך המרבי מתקבל ברוחב נתיב של 3.3 מ' ;
- * בבחינת שיעור התאונות בתלות ברוחב שול מתקבל הערך המינימאלי ברוחב שול של 1.5 מ' ;
- * בבחינת שיעור התאונות בתלות בצפיפות הצמתים מתקבל הערך המרבי למרחק 1.5 ק"מ בין הצמתים ;

* שיפור במיסעה מתקשר עם עלייה בתאונות ;

* שיפור בתמרור וסימון מיסעה מתקשר עם עלייה בתאונות;
* תוספת תאורה מתקשרת עם ירידה בתאונות.

1.6.2. עקביות תכן בדרכים חד-מסלוליות

עקביות תכן לאורך הדרך מהווה יתרון בטיחותי לנהג. אחת הגישות המקובלות לתכנון דרך השומרת על עקביות מבחינת מטלת הנהיגה היא תכנון המאפשר נהיגה עם שינויי מהירות נסיעה קטנים לאורך הדרך.

במחקר של חביב-מטר (2001) פותחו שני מדדים להערכת עקביות התכן של קטע דרך. מדד 1: RA שהוא שטח התחום בין פרופיל המהירות והמהירות הממוצעת, המנומל ליחידת אורך, לאורך כל הקטע. מדד 2: סטיית התקן של המהירויות בקטעי הדרך. מדדים אלו מתייחסים לעקביות של קטע הדרך כולו, בנוסף להתייחסותם לעקביות של אלמנטים גיאומטריים עוקבים המרכיבים את הקטע. כדי לחשב מדדים אלה נדרש לחשב את פרופיל המהירות של קטע הדרך.

במחקר, פותח מודל המשלב את שני המדדים שנסקרו. המודל מתאים לדרכים חד-מסלוליות ודו-מסלוליות. המודל המתאים לדרך החד-מסלולית כויל באמצעות נתוני פרופיל מהירות של 2 קטעי דרך: קטע 1 - כביש 669 מצומת בית אלפא עד צומת שלוחות; קטע 2 - כביש 77 מצומת רימון עד צומת גולני. לקטע 1 נמצא תכנון עם עקביות טובה, לקטע 2 - תכנון עם עקביות סבירה.

המודל המכויל לדרך החד-מסלולית הוא:

$$C_{TL} = 2.808 * e^{-0.278(RA * (\sigma/3.6))}$$

כאשר

C_{TL} - מדד עקביות בדרך בין-עירונית חד-מסלולית;

RA - השטח המנומל (מ"שניה);

σ - סטיית התקן.

בוצעה הרצה של המודל ל-9 קטעי דרך חד-מסלוליים. התוצאות מתוארות בטבלה 1.19.

טבלה 1.19. ערכי מקדמי העקביות שהוערכו לקטעי דרך נבחרים, ע"י חביב-מטר (2001)

Table 1.19. Values of design consistency coefficients estimated for selected road sections

איכות עקביות התכן	ערך C_{TL}	קטע דרך	מס'
טוב	2.5	כביש 669 צ' בית אלפא – צ' שלוחות	1
סביר	1.8006	כביש 77 צ' רימון – צ' גולני	2
טוב	2.19	כביש 79 צ' המוביל – צ' ציפור	3
טוב	2.456	כביש 90 צ' שמונה – צ' מטולה	4
טוב	2.4002	כביש 90 צ' עמיאד – צ' יפתח	5
טוב	2.0198	כביש 781 צ' אבלים – צ' עבלין	6
גרוע	0.0069	כביש 866 צ' עין אל אסד – כפר שמאי	7
גרוע	0.4733	כביש 672 צ' דמון – צ' אוניברסיטת חיפה	8
גרוע	0.4161	כביש 672 צ' אליקים – צ' דלית אל כרמל	9

נעשה ניתוח למציאת הקשר בין העקביות למהירות הממוצעת. נמצא קשר מובהק, כאשר העלייה בעקביות מעלה את המהירות הממוצעת. לקטעי דרך אלו נבחנו מספרי התאונות עם נפגעים.

נמצא קשר בין עלייה בעקביות לירידה בשיעור התאונות. הוסק שתכנון דרך עם עקביות טובה מביא לשיפור הבטיחות.

1.6.3. שיעור תאונות בדרכים דלות תנועה בישראל

במאמר של Polus and Cohen (2010) מתוארת עבודה בה חושבו ונותחו התאונות הקשות והקטלניות בדרכים בין-עירוניות חד-מסלוליות דלות תנועה בישראל.

בעבודה זאת הוגדר סף עליון לנפח יומי ממוצע של דרך דלת התנועה בעזרת קריטריון רמת השרות של הדרך. רמת השרות של דרך בין-עירונית חד-מסלולית נגזרת מפרמטר המתאר את אחוז זמן העקיבה - אחוז הזמן של רכב מהיר המעוקב על ידי רכב איטי הנוסע לפניו עד תחילת תהליך העקיפה. תחום אחוז הזמן המתאים לרמת השרות הגבוהה ביותר - A - נע בין 0% ל-15%, מה שמתאים לנפח תנועה של 300 כלי רכב לשעה, אשר בקירוב מאפיין נפח תנועה יומי של 3,000 כלי רכב, בשני כיווני הנסיעה.

בעבודה זו נבחנו 86 קטעי דרכים חד-מסלוליות ברשת הבין-עירונית בארץ, עם נפח תנועה יומי הקטן מ- 3,000 כלי רכב. הנתונים שנאספו כללו: מספר דרך, מס' קטע הדרך, אורך קטע הדרך, תאונות קשות וקטלניות מהשנים 2002-2004, נפח תנועה יומי בקטעים בשנים אלו, ומספר תאונות קטלניות וקשות לק"מ דרך.

להרבה קטעי דרך מספר התאונות היה 0. מודל התפלגות נורמאלית לא יכול להתאים לנתונים אלה כי אין בפילוג ערכים שליליים. מומלץ להשתמש בפילוג פואסון מכיוון שהוא לוקח בחשבון כל אירוע בעל ערך שלם לא שלילי. "אירוע" במקרה זה הוא התרחשות תאונה בקטע דרך. מכיוון שקטעי הדרך שונים זה מזה באורכן ובנפח התנועה היומי, המודל המומלץ מתייחס לנושאים אלה: המודל הוא מודל פואסון המכיל ערך חזוי של $\beta * L * V$ כאשר L הוא אורך הקטע בק"מ, V הוא נפח תנועה יומי באלפי כלי רכב, ו- β הוא קבוע שהאומדן לערכו ייקבע באמצעות הנתונים. ההסתברות להתרחשות תאונה בקטע באורך L ועם נפח יומי V ניתנת באמצעות פואסון:

$$\text{Prob}\{Y=y\} = \frac{(\beta * L * V)^y * e^{-\beta * L * V}}{Y!}$$

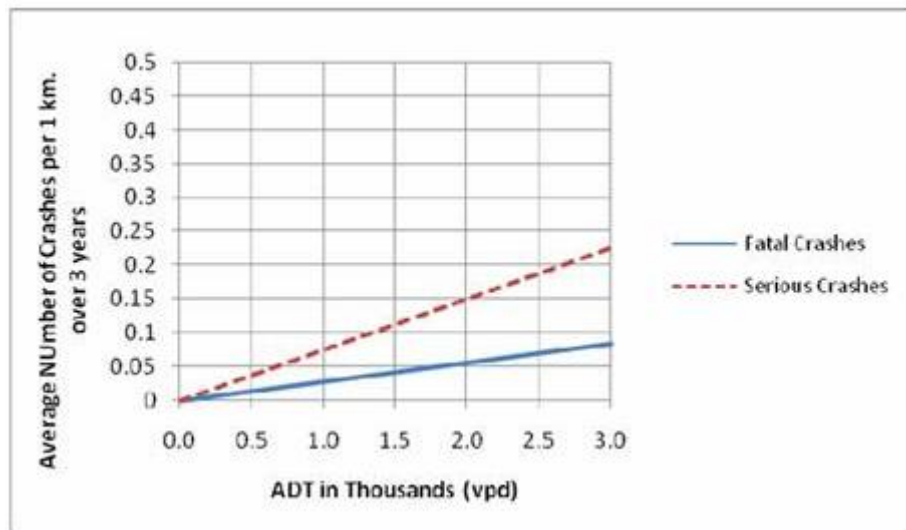
למספר קטעי דרך המצוינים באינדקס i, זה מביא לרגרסיה פואסונית עם אומדן פשוט לפרמטר β אשר מתקבל כלהלן:

$$\beta = \frac{\sum y_i}{\sum V_i * L_i}$$

כאשר Y_i הוא מספר התאונות בקטע i, L_i ו- V_i הם האורך והנפח היומי בקטע זה.

נערכה השוואה בין התפלגות פואסון (אשר נותנת את החיזוי לפילוג מספר התאונות בקטעי הדרך), לפילוג מספר התאונות בקטעי הדרך שנצפה בפועל. באמצעות מבחן "חי בריבוע" לטיב ההתאמה בין הפילוגים נמצא שאין לדחות את ההנחה לפילוג הפואסוני של הנתונים, ברמת מובהקות של 5%.

במחקר נבנו גרפים המתארים את ממוצע התאונות הקטלניות והתאונות הקשות, החזויות לק"מ דרך, בתלות בנפח התנועה היומי בדרך - איור 1.24.



איור 1.24. מספר תאונות קטלניות וקשות הצפוי לק"מ דרך, במשך 3 שנים, בתלות בנפח התנועה בדרך (באלפים) - התאמת רגרסיה פואסונית לנתונים.

Figure 1.24. The number of fatal and serious accidents expected per road km, in 3 years, depending on traffic volume (in thousands) - fitting Poisson regression to the data.

נתוני הנפח והתאונות לקטעי דרך רבים סוטים במידה משמעותית מהערכים החזויים שנמצאים בגרפים המייצגים את הערכים הממוצעים של כל קטעי הדרכים ביחד. מידת הסטייה יכולה לבטא את ההסתברות להתרחשות התאונות. הסתברות זו יכולה להיות מדד לבטיחות - Road Safety Score (RSS). כאשר ההסתברות היא מתחת ל-5%, וחריגת הדרך מהמספר החזוי לתאונות היא בצד הגבוה, ניתן לטעון במובהקות גבוהה שהדרך היא מסוכנת. כאשר ההסתברות היא מעל 95% וחריגת הדרך ממספר התאונות החזוי היא בצד הנמוך, ניתן לטעון כי הדרך בטוחה יותר מהממוצע.

נעשה חישוב ההסתברות לסטייה - מדד ה-RSS - לכל 86 קטעי הדרכים דלות התנועה שנבחנו במחקר, לשם זיהוי קטעי דרך בטוחים ומסוכנים. נמצאו 5 קטעי דרך מסוכנים ו-2 קטעי דרך בטוחים. לשאר הקטעים ערך ה-RSS היה בין 5% ל-95%, כלומר מספר תאונות קטלניות וקשות היה קרוב לערך החזוי. לטענת החוקרים, שיטת זיהוי זו מקבילה לשיטת בקרת איכות סטטיסטית הנהוגה בתעשיות רבות.

1.7. סיכום ומסקנות מסקר הספרות

הגדרה של דרכים דלות תנועה: בכל המדינות, הכוונה לדרך בין-עירונית חד-מסלולית דו-סטריית. בין המדינות השונות יש הבדלים בנפח התנועה היומי המרבי המגדיר דרך דלת תנועה. במספר מדינות, ישנן מספר היררכיות של דרכים דלות התנועה המוגדרות בטווחים שונים של נפחי תנועה ממוצעים. טווח הערכים של נפח התנועה נע בין 100 ל-6,000 כלי רכב, ליום. לרוב המדינות טווח הערכים הוא בין 400 ל-2,000 כלי רכב ליום.

הנחיות תכנון לדרכים דלות תנועה: עקב נפח תנועה נמוך, התקציב לסלילה ולאחזקה של דרכים דלות התנועה נמוך, לכן ערכי התכן המזעריים לדרכים אלו נמוכים ביחס לערכי התכן המזעריים לדרכים החד-מסלוליות עם נפחי תנועה גדולים יותר. ערכי התכן המזעריים אותם נהוג לצמצם הם: מהירות התכן, רוחב נתיב ורוחב שול.

מודלים לחיזוי התאונות: נמצאו דוגמאות רבות למודלים לחיזוי התאונות בדרכים בין-עירוניות חד-מסלוליות. במודלים אלה השתמשו בנתונים הגיאומטריים ובמאפיינים הנוספים של קטעי הדרך - נפחי התנועה, והנתונים של תאונות הדרכים. באמצעות שיטות סטטיסטיות זוהו המאפיינים המשפיעים ונמצא ביטוי כמותי להשפעתם של משתנים מסוימים על מספר או שיעור התאונות (תאונות לנסועה) בקטע דרך. במודלים אחרים, נבחנה השפעה של ערכים תכנוניים של רכיב תכנוני אחד או של מספר רכיבי תכנון על שיעור התאונות הממוצע החזוי שהתקבל ממודל בסיסי. רכיבי התכנון שהשפעתם נמצאה במודלים הם: רוחב נתיב, רוחב שול, שילוב בין רוחב נתיב ורוחב שול, יחס בין שול סלול לשול לא סלול, סוג שול, חוסר בהגבהה צידית (ביחס להנחיות התכנון), עקמומיות, עקביות ושיפוע.

מחקרים מהארץ: במחקר על דרכים חד-מסלוליות בין-עירוניות בעלות ארבע ספרות נמצא שיש מחסור בנתונים על נפחי התנועה לקטעי דרך רבים מסוג זה. נמצא ששיעור התאונות בדרכים אלו גבוה ביחס לשיעור התאונות בשאר סוגי הדרכים ברשת הבין-עירונית. נמצא קשר בין מספר התאונות עם נפגעים בדרכים אלה לבין נפח התנועה והמדד שמבטא את המורכבות הגיאומטרית של הדרך. כמו כן, נמצא קשר בין חומרת התאונות, טופוגרפיה תלולה, ומדד המורכבות הגיאומטרית של הדרך.

במחקר על הקשר בין עקביות (מידת שינוי מועטה של מהירות התכן בין הקטעים הסמוכים של דרך חד-מסלולית) לבטיחות, נמצא קשר בין עלייה בעקביות לירידה בשיעור התאונות.

במחקר רמת הבטיחות של דרכים דלות תנועה בישראל הוגדרה דרך דלת תנועה בארץ, עם נפח יומי ממוצע של עד 3,000 כלי רכב ביממה. על סמך נתונים על התאונות בדרכים אלה הותאם מודל לחיזוי מספר התאונות החמורות על פי נפחי התנועה. לכל קטע דרך חושב מדד בטיחות על פי הסטייה בין מספר התאונות בפועל למספר התאונות החזוי. על פי מדד זה, נמצאו קטעי דרך בטוחים ומסוכנים באופן מובהק, לעומת ממוצע התאונות בקטעים מסוג זה.

מסקנות: בעולם, קיים ידע וניסיון סטטיסטי לפיתוח וכיול מודלים שונים לחיזוי מספרי התאונות בדרכים דלות תנועה, על סמך הנתונים של התאונות, נפחי התנועה והמאפיינים הגיאומטריים של דרכים אלה. עם זאת, הרכב המשתנים המסבירים שנשאר במודל הסטטיסטי לחיזוי מספר התאונות אינו קבוע ומשתנה בתלות בהגדרות הקטעים לניתוח, זמינות הנתונים, היקף הנתונים הנבחים, מטרות הניתוח וכו'.

2. הכנת בסיס הנתונים למחקר

בסקר הספרות נמצא כי בין המדינות השונות קיימים הבדלים בנפח התנועה היומי המרבי המגדיר דרך דלת תנועה. בין המדינות השונות, טווח הערכים של נפח התנועה בדרך דלת תנועה נע בין 100 ל-6,000 כלי רכב, ליממה. לרוב המדינות טווח הערכים הוא בין 400 ל-2,000 כלי רכב ליממה, כאשר בישראל קטעי דרכים עם נפחי תנועה כאלה נדירים למדי.

בעקבות דיונים עם מזמין המחקר **קטעי הדרך אשר ייכללו במחקר הנוכחי** הוגדרו כלהלן:

(א) קטעי דרכים חד-מסלוליים המתחזקים על-ידי החברה הלאומית לדרכים.

(ב) נפח התנועה היומי הממוצע בקטעי הדרך יהיה עד 3,000 כלי רכב (במעוגל).

(ג) קטעי הדרך הכלולים במחקר יהיו הן בגבולות הקו הירוק והן בשטחי יהודה ושומרון.

ברשת הדרכים הלא עירונית נמצאו 164 קטעי דרך כאלה, באורך כולל של 1451 ק"מ.

שלב 2 למחקר הוקדש לאיסוף מידע מפורט על קטעי הדרכים דלות התנועה שנבחרו למחקר. המידע על המאפיינים הגיאומטריים ומאפייני תשתית נוספים התקבל מנתוני סקר דרכים שנערך בשנת 2010 ע"י החברה הלאומית לדרכים ואשר סיפק את מאפייני הדרכים למערכת ניהול בטיחות (מנ"ב) של החברה. המידע על תאונות הדרכים ונפחי התנועה נאסף מקבצי ה"למ"ס.

פרק זה מציג ממצאים מאיסוף והסדרת המידע על תאונות הדרכים, נפחי התנועה והמאפיינים הגיאומטריים ואחרים בקטעי דרכים דלות התנועה שנבחרו למחקר.

2.1. איסוף מידע על נפחי תנועה

מקורות מידע על נפחי תנועה

המידע על נפח תנועה יומי ממוצע, בכל קטע מוגדר של ה"למ"ס, נלקח מנתוני ספירות תנועה המפורסמים על-ידי ה"למ"ס. מקור המידע לנתונים אלה הוא קובץ המבוסס על ספירות תנועה מדגמיות שמתבצעות, מדי שנה, באמצעות מונים מכאניים בקטעי דרכים לא עירוניות.

נתוני הספירות המעודכנות נלקחו מקובץ ה"למ"ס בשם "תאונות ונפח תנועה בדרכים לא עירוניות לפי דרך וקטע בשנים 2007-2009" (קובץ זה שייך לפרסום שנתי "תאונות דרכים עם נפגעים. חלק ב" של ה"למ"ס). אומדני נפח תנועה יומי ממוצע מוצגים בעמודה "ממוצע נפח תנועה יומי".

חלק מקטעי הדרך שנבחרו למחקר לא קיים מידע זה. המידע החסר הושלם על-ידי צוות המחקר, על סמך הערכות המתחשבות במידע קיים בקטעי דרך סמוכים וכמו כן, במספר וגודל היישובים אותם משרתות קטעי הדרכים. כלומר, לקטעי דרכים אלה ניתן אומדן לנפח תנועה יומי ממוצע.

קביעת סף עליון לנפחי תנועה לקטעי הדרך במחקר

על סמך קובץ קטעי הדרכים של ה"למ"ס, לרבות נתוני נפחי התנועה שנלקחו מספירות התנועה או הושלמו בעזרת הערכות, נגזרה רשימת קטעי דרך עם נפח תנועה יומי עד 5,000 כלי רכב. רשימה זו שימשה בסיס לבחירת קטעי דרכים דלות תנועה למחקר.

נערכה בדיקה של מספר קטעים והאורך הכולל שלהם, בהתאם לחסם עליון שונה של נפח תנועה יומי, דהיינו: עד 5,000, עד 3,000 במעוגל, עד 3,000, עד 2000 במעוגל ועד 2000 כלי רכב ביממה. תוצאות בדיקה זו מוצגות בטבלה 2.1.

טבלה 2.1. מספר קטעי הדרך ואורכם הכולל על-פי נפח תנועה יומי מרבי שנקבע לבחירת הקטעים

Table 2.1. The number of road sections and their total length, according to the thresholds of maximum daily traffic volume

מס' הקבצה	גבול עליון לנפח יומי ממוצע, כל רכב ליממה	מספר קטעי דרך בהקבצה	אורך כולל של קטעי הדרך, ק"מ
1	2000	99	958.6
2	2000 במעוגל	114	1082.6
3	3000	146	1328
4	3000 במעוגל	164	1451
5	5000	198	1700

על סמך ממצאי הספרות ובעקבות התייעצות עם מזמיני המחקר הוחלט שגבול עליון לנפח תנועה יומי לבחירת קטעי הדרכים למחקר דרכים דלות תנועה בתנאי הארץ יהיה 3,000 כלי רכב ביממה (במעוגל). רשימת קטעי הדרך שנבחרו למחקר, לרבות אומדנים לנפחי תנועה, מוצגת בנספח א'.

2.2. מאפייני הדרכים

2.2.1. מידע קיים על מאפייני הדרכים וממצאי בדיקתו לצורכי המחקר

מקור המידע לנתונים על מאפייני תשתיות הדרכים הם קבצים שנבנו בעקבות סקר דרכים שהוזמן ע"י החברה הלאומית לדרכים ושבעקבותיו הוכנו קבצים עם מאפייני הדרכים עבור מערכת ניהול בטיחות (מני"ב) של החברה. כאמור, סקר הדרכים נערך ברשת הדרכים המתוחזקת על-ידי החברה. הנתונים המעודכנים נאספו בסקר שנערך בשנת 2010.

הנתונים על מאפייני הדרכים נאספו עבור סגמנטים באורך של כ-100 מ'. הנתונים למחקר נגזרו מבסיס הנתונים של מערכת המני"ב, עבור קטעי הדרכים דלות תנועה שנבחרו למחקר. המידע נאסף עבור קטעי דרך בלבד, לא כולל צמתים.

מהמני"ב התקבלו נתונים על קטעי הדרכים בעלי נפח תנועה יומי עד 5,000 כלי רכב; רשימה זו כללה 198 קטעי דרך באורך כולל של 1700 ק"מ.

לגבי קטעי הדרכים, מערכת המני"ב כוללת מאפיינים אלה: רוחב נתיבים, סוג סימון במרכז, סוג שוליים, רוחב שוליים סלולים, רוחב שוליים לא סלולים, נתונים על מעקות בטיחות בכל צד, נתונים על אזור המפלט בכל צד בקטעי דרך ללא מעקות בטיחות, רדיוס אופקי, רדיוס אנכי, שיפוע לאורך, שיפועים לרוחב (הגבהה צידית).

המידע ממערכת המני"ב התקבל בקובץ אקסל. בקובץ 6 גיליונות עבודה, כלהלן:

- גיליון 1 בשם "רשימת כבישים" מכיל קטע אחד מכל דרך שהופיע ברשימת קטעי הדרך המהווים פוטנציאל למחקר. בגיליון מפורטים קטעי דרך שונים ונתונים חסרים בטבלאות המופיעות בגיליונות הבאים. בגיליון 156 שורות שכל אחת מהן מתארת קטע דרך;
 - גיליון 2 בשם "1.0" המכיל נתוני סגמנטים הקשורים למסעה: מספר נתיבים לכל כוון, ס"ה נתיבים, קיים נתיב פנייה ימינה, קיים נתיב פנייה שמאלה, סוג נתיב, נתיבים, מפרדה, רוחב נתיבים, סוג ההפרדה, סוג הדרך, תמרור מהירות, אופן הסלילה, חספוס לכל כיוון, רוחב מסעה לכל כוון, סוג הפרדה בין כווני הנסיעה, רוחב מפרדה מכסימלי, רוחב מיסעה מינימלי, סוג מכשול, קיים מכשול קשיח. בגיליון זה 27,323 שורות המתארות סגמנטים באורך כולל של 2,749 ק"מ;
 - גיליון 3 בשם "1.1" המכיל נתוני סגמנטים הקשורים לשוליים, עבור כל צד בנפרד: רוחב שול אספלט, רוחב שול גרנולרי, רוחב שול אספלט פנימי, רוחב שול גרנולרי פנימי, רוחב שול, רוחב שול פנימי, סוג שול. בגיליון 54,612 שורות המתארות סגמנטים באורך כולל של 2,749 ק"מ, כאשר לכל סגמנט 2 שורות, כל שורה מתארת צד אחד;
 - גיליון 4 בשם "1.4" המכיל נתוני סגמנטים הקשורים למעקה, עבור כל צד בנפרד: סוג מעקה, תת סוג, דגם, גובה מעקה מינימלי, גובה מעקה מקסימלי, מרחק בין מעקה למסעה. בגיליון 28,311 שורות המתארות סגמנטים באורך כולל של 2,851 ק"מ, כאשר כל סגמנט מתאר צד אחד בלבד;
 - גיליון 5 בשם "1.5" המכיל נתוני סגמנטים הקשורים למפלט במקומות בהם אין מעקה, עבור כל צד בנפרד: רוחב אזור המפלט, מה מסמן את גבול אזור המפלט, האם קיים מכשול קשיח. בגיליון 31,484 שורות המתארות סגמנטים באורך כולל של 3,167 ק"מ, כאשר כל סגמנט מתאר צד אחד בלבד;
 - גיליון 6 בשם "רדיוס ושיפועים" המכיל נתוני סגמנטים הקשורים לרדיוס ושיפועים עבור כל צד בנפרד: רדיוס אופקי, שיפוע צד, רדיוס אנכי, שיפוע אורכי. בגיליון 62,262 שורות המתארות סגמנטים באורך כולל של 6,266 ק"מ, כאשר כל סגמנט מתאר צד אחד בלבד.
- אורך רוב הסגמנטים בכל הגיליונות היה 100 מ', בקירוב.
- כפי שצוין לעיל, לצורך המחקר, כדרכים דלות תנועה הוגדרו קטעי דרכים עם נפח תנועה יומי עד 3,000 כלי רכב ביממה (במעוגל). ברשת הדרכים, נמצאו 164 קטעי דרך כאלה, באורך כולל של 1451 ק"מ - ראה נספח א'.
- בעקבות בחינה פרטנית של מאפייני הכבישים שהתקבלו ממערכת המנ"ב, נערכו פעולות כלהלן:
- (1) על-פי גיליון "רשימת כבישים", עבור 8 קטעי דרך המופיעים בטבלה 2.2 לא קיימים נתונים ממנ"ב. קטעי דרך אלה, באורך כולל 19.6 ק"מ, הוצאו מהרשימה.
- לאחר הסרת קטעי דרך אלו, נותרו למחקר 156 קטעי דרך באורך כולל של 1431 ק"מ.

2) בגיליון "1.0", מתוארות תכונות של מיסעת הדרך בסגמנטים באורך של כ-100 מ': בגיליון זה כל סגמנט מכיל מידע על שני כיווני נסיעה, כאשר כיוון אחד נקרא "ק"מ עולה" ומתייחס לכיוון הנסיעה שבו מספור הקילומטרים עולה, ואילו כיוון שני נקרא "ק"מ יורד" ומתייחס לכיוון

טבלה 2.2. קטעי דרך שעבורם לא נמצאו נתונים במני"ב

Table 2.2. Road sections for which data were not found in SMS

מס' ס"ה	מס' דרך	מק"מ	עד ק"מ	אורך (ק"מ)
1	654	5	6.9	1.9
2	2414	0	1.6	1.6
3	5923	0	2.6	2.6
4	6533	0	2.2	2.2
5	6953	0	6.7	6.7
6	6954	0	1.9	1.9
7	7021	0	0.5	0.5
8	7111	0	2.2	2.2
ס"ה				19.6

הנסיעה הנגדי שבו מספור הקילומטרים יורד. חלק מהתכונות של הסגמנטים המופיעות בגיליון זה מעידות שהסגמנט אינו מתאים להגדרת הקטעים למחקר שהינם קטעי דרך חד-מסלולית. לכן, מרשימת קטעי המחקר הוסרו הסגמנטים שהתאפיינו בתכונות הבאות:

א. סגמנטים המתארים דרך בעלת יותר משני נתיבים (4 נתיבים או 3 נתיבים).

ב. סגמנטים המתארים דרך עם נתיבי פנייה.

ג. סגמנטים המתארים דרך בעלת מפרדה מאחד מהסוגים הבאים: בנויה ללא מעקה, מעקה בטיחות, מעקה + צבע.

ד. סגמנטים בהם אין הגדרה של מפרדה אך ישנו נתון שרוחב המפרדה המכסימלי או המינימלי עולה על 0.4 מ'.

3) בגיליון "1.1", מתוארות תכונות של שולי הדרך באחד מהצדדים. הצד מוגדר עבור כל סגמנט כחתך ימין או חתך שמאל, בסגמנטים באורך של כ-100 מ'. הגדרת חתך בכל סגמנט גורמת לכך שעבור כל סגמנט המופיע בגיליון "1.0" (המתאר תכונות בשני הכיוונים) צריכים להופיע שני סגמנטים המתארים אותו קטע דרך, האחד עם חתך L והשני עם חתך R. מכאן, כדי לתאר את שולי הדרך של קטע המוגדר בסגמנטים בגיליון "1.0" נחוץ מספר כפול של סגמנטים בגיליון "1.1".

בבדיקה נמצא ש-13 סגמנטים המתאימים למחקר שהוגדרה על פי גיליון "1.0" לא נכללו בגיליון "1.1".

ציפינו שכל הסגמנטים בגיליון "1.1" יכללו נתונים בהם יתוארו תכונות שולי הדרך, אך לאחר בדיקה נוספת נמצא שעבור 5433 סגמנטים הנתונים היחידים בטבלה כוללים נתונים על הסגמנט ללא נתונים על תכונות שולי הדרך. רק עבור 7182 סגמנטים מתוך 12628 באורך כולל של 721 ק"מ, יש בגיליון נתונים המתארים תכונות של שולי הדרך. מכיוון שרק בגיליון זה למספר גדול של סגמנטים חסרו נתוני תכונות הסגמנט, הערכנו שהדבר אינו נובע מחוסר בנתונים, אלא משיבוש

בבניית קובץ הנתונים. לשמחתנו, אחרי פנייה נוספת לאחראים על מערכת המנ"ב קיבלנו גיליון "1.1" מתוקן שהכיל נתונים על שולי הדרך לכל הסגמנטים שהוגדרו כבעלי תכונות המתאימות למחקר על-פי גיליון "1.0".

4) בגיליון "1.4", מתוארות תכונות של מעקות בטיחות בסגמנטים באורך של כ-100 מ'. בדומה לגיליון "1.1" מתוארות תכונות המעקות באחד מהצדים: שמאל L-, ימין R ומרכז C. בגיליון זה נמצאו 68 סגמנטים הכוללים מעקה במרכז הדרך. הגדרה זאת אינה מתאימה לקטעי המחקר אשר צריכים להתאים לחתך דרך חד-מסלולית דו-נתיבית, לכן סגמנטים אלו, המכילים מעקה בטיחות במרכז המסלול, הושמטו מקטעי המחקר.

5) בגיליון "1.5", מתוארות תכונות של אזור המפלט, כאשר לא קיים מעקה בטיחות בצד הדרך, בסגמנטים באורך של כ-100 מ'. בדומה לגיליון "1.1" מתוארות תכונות אזור המפלט, באחד מהצדים שמאל L-, ימין R ומרכז C. כצפוי, לא נמצאו סגמנטים במרכז C בקטעים שנבחנו.

הנחנו שעבור דרך חד-מסלולית, בכל גיליון מתוארים סגמנטים בעלי תכונות מתוך שני מצבים אפשריים: יש מעקה בצד הדרך (גיליון "1.4"), או אין מעקה בצד הדרך (גיליון "1.5"). נמצא כצפוי, שלא קיים סגמנט זהה גם בטבלה "1.4" וגם בטבלה "1.5".

ציפינו שבצרוף הסגמנטים בטבלאות אלו ביחד נמצא את כל רשימת הסגמנטים המתאימים למחקר שהוגדרה על-פי גיליון "1.0". בשלב הראשון ניסינו לזהות סגמנטים מגיליון "1.4" ומגיליון "1.5" בגיליון "1.0", על-פי השם המזהה של הסגמנט. ההתאמה הייתה נמוכה - נמצא שרק כשליש מהסגמנטים בגיליון "1.0" נמצאים בגיליונות "1.4" או "1.5".

בשלב השני ניסינו לזהות סגמנטים מגיליון "1.4" ומגיליון "1.5" בגיליון "1.0" על פי מספר הדרך, קילומטר התחלה וקילומטר סיום. לשמחתנו, נמצאו כל הסגמנטים שהכילו נתונים על מעקה בצד הדרך (מגיליון "1.4") או על אזור המפלט (מגיליון "1.5"); כלומר, לכל הסגמנטים שהוגדרו כבעלי תכונות המתאימות למחקר על-פי גיליון "1.0" נמצא מידע על מעקה או אזור המפלט בצד הדרך.

6) בגיליון "רדיוסים ושיפועים" מתוארות תכונות הסגמנטים ללא שם סגמנט, בשונה מהמופיע בשאר הגיליונות. כשלב ראשון, על-פי נתוני הסגמנט: מס' דרך, ק"מ התחלה וק"מ סוף - לכל סגמנט צורף שמו, כמופיע בגיליון 1.0.

ציפינו שנתוני כל סגמנט יופיעו בגיליון פעמיים, על-פי כיוון הנסיעה, פעם בכיוון "עולה" (לפי עלייה במספר הקילומטרים בכביש) ופעם בכיוון "יורד" (לפי ירידה במספר הקילומטרים בכביש). בבדיקה נמצא שעבור כל הסגמנטים שהוגדרו למחקר (על-פי גיליון "1.0") קיימים נתונים על רדיוס אופקי, שיפוע צד, רדיוס אנכי ושיפוע אורכי.

7) לאחר הסרת הסגמנטים המתארים דרך שאינה מתאימה להגדרות המחקר, על-פי התכונות מגיליונות "1.0", ו-"1.4", נותרו למחקר 12,282 סגמנטים מ-149 קטעי דרך, באורך כולל של 1,235 ק"מ.

2.2.2. הכנת בסיס נתונים עם מאפייני הדרכים, למחקר

כדי לאפיין תכונות של קטע דרך באורך קילומטר/מספר קילומטרים נדרש לקבץ את תכונות הסגמנטים שמרכיבים את הקטע, כאשר כל סגמנט מתאר קטע קצר באורך כ- 100 מ'. לצורכי המחקר הוחלט לבצע את קיבוץ הסגמנטים לקטעי דרך באורך של כ-1 ק"מ.

כדי להקל על ההתמצאות בחרנו לקבץ את הסגמנטים לקטעי דרך באורך ק"מ על-פי מספור הדרך. הסגמנטים שנכללו בקילומטר מסוים כללו את כל הסגמנטים שמתחילים ומסתיימים בתחום הקילומטר. לגבי הסגמנט שנמצא באחד מקצוות הקילומטר וחלקו גולש לק"מ הסמוך פעלנו לפי כלל זה: כאשר מחצית הסגמנט או יותר נמצא בתחום הקילומטר הנבחן, הסגמנט נכלל בתחום קילומטר זה. יש לציין שעקב הסרת סגמנטים בעלי תכונות שאינם מתאימים למחקר (ראה סעיף 2.2.1) קיימות אי-רציפויות בסגמנטים, כלומר לא תמיד הנקודה (קילומטר הדרך ברמת דיוק של מטרים) בה מסתיים סגמנט קודם זהה לנקודת ההתחלה של הסגמנט הסמוך הכלול במחקר.

רוב הנתונים הגיאומטריים של הסגמנטים מתארים את תכונות הדרך על-פי כיווני הנסיעה. מכיוון שדרכים בין-עירוניות דלות תנועה הן חד-מסלוליות דו-סטרייות, אין משמעות לכיווני הנסיעה במאפייני התכנון שלהם. ככלל, קיימת סימטריה במאפייני דרכים אלה. לכן, קיבוץ תכונות הקטעים נעשה לשני הכיוונים ביחד. יש לציין שגם בנתוני התאונות אין מידע אמין על כיוון הנסיעה של המעורבים, כך שגם אם קיבוץ התכונות היה נעשה לכל כיוון בנפרד, לא קיימת אפשרות להשתמש במידע זה כמסביר לתאונות בהן אין מידע על כיווני הנסיעה.

לתכונות בעלות מידה כגון: **רוחב נתיב, רוחב שול, רוחב שול אספלט, רוחב שול גרנולרי** - לכל קטע מקובץ באורך כקילומטר הוצגו הנתונים הבאים: מספר הסגמנטים המקובצים, ממוצע ערכי התכונה וסטיית התקן של ערכי התכונה.

לרדיוס אופקי המופיע עם סימן +/- נלקחו מספר ערכים: הערך המוחלט הנמוך ביותר בתחום הקילומטר - ממוצע וסטיית תקן של 3 סגמנטים בעלי הערך המוחלט הנמוך ביותר; וגם ממוצע וסטיית תקן של מחצית הסגמנטים הנמצאים במרכז הפילוג (ללא רבע מהסגמנטים בעלי הערכים הגבוהים ביותר וללא רבע מהסגמנטים בעלי הערכים הנמוכים ביותר). דרגנו את הערך שהתקבל עבור רדיוס אופקי מזערי על-פי טבלת רדיוס מינימאלי מותר לפי ספר הנחיות לתכנון גיאומטרי של דרכים בין-עירוניות, צמתים ומחלפים [תכן גיאומטרי של דרכים, מע"צ (1994), טבלה 5.2]. תחומי ערכי הדרוג מ-1 ל-5 על-פי רדיוס אופקי מזערי שקשור למהירות התכן מתואר בטבלה 2.3.

טבלה 2.3. דרוג תחומי רדיוס אופקי מזערי על פי מהירויות התכן

Table 2.3. Classification of minimum radius values according to design speeds

מהירות תכן, קמ"ש	ממוצע של 3 סגמנטים עם רדיוס אופקי מזערי, מ'	קטגוריות לרדיוס אופקי מזערי על-פי מהירויות תכן (1-5)
-60	120-	1
60 - 70 (כולל)	120 - 190 (כולל)	2
70 - 80 (כולל)	190 - 270 (כולל)	3
80 - 90 (כולל)	270 - 380 (כולל)	4
90 (כולל) +	380 (כולל) +	5

לשיפוע צד המופיע עם סימן "+/-" נלקחו מספר ערכים: הערך המוחלט הגבוה ביותר בתחום הקילומטר - ממוצע וסטיית תקן של 3 סגמנטים בעלי הערך המוחלט הגבוה ביותר, וגם ממוצע וסטיית תקן של מחצית הסגמנטים הנמצאים במרכז הפילוג (ללא רבע מהסגמנטים בעלי הערכים הגבוהים ביותר וללא רבע מהסגמנטים בעלי הערכים הנמוכים ביותר).

לרדיוס אנכי קמור המופיע עם סימן "+" נלקח מספר ערכים: הערך המוחלט הנמוך ביותר בתחום הקילומטר - ממוצע וסטיית תקן של 3 סגמנטים בעלי הערך המוחלט הנמוך ביותר, וגם ממוצע וסטיית תקן של מחצית הסגמנטים הנמצאים במרכז הפילוג (ללא רבע מהסגמנטים בעלי הערכים הגבוהים ביותר וללא רבע מהסגמנטים בעלי הערכים הנמוכים ביותר). דרגנו את הערך שהתקבל עבור רדיוס אנכי מזערי על-פי טבלת רדיוס אנכי קמור מינימאלי מותר לפי ספר הנחיות לתכן גיאומטרי של דרכים בין-עירוניות [תכן גיאומטרי של דרכים, מע"צ (1994), טבלה 6.2] בו מוצג גודל הרדיוס המזערי לתכן עקום אנכי קמור הדרוש לעצירה. תחומי ערכי הדרוג מ-1 ל-5 על-פי רדיוס אנכי קמור מזערי שקשור למהירות התכן מתואר בטבלה 2.4.

טבלה 2.4. דרוג תחומי רדיוס אנכי קמור מזערי על-פי מהירויות התכן

Table 2.4. Classification of vertical convex radius values according to design speeds

מהירות תכן, קמ"ש	ממוצע של 3 סגמנטים עם רדיוס אנכי חיובי קמור מזערי, מ'	קטגוריות לרדיוס אנכי חיובי קמור מזערי על-פי מהירויות תכן (1-5)
-60	1800-	1
60 - 70 (כולל)	1800 - 3000 (כולל)	2
70 - 80 (כולל)	3000 - 5000 (כולל)	3
80 - 90 (כולל)	5000 - 7250 (כולל)	4
90 (כולל) +	7250 (כולל) +	5

לרדיוס אנכי קעור המופיע עם סימן "-" נלקח מספר ערכים: הערך המוחלט הנמוך ביותר בתחום הקילומטר - ממוצע וסטיית תקן של 3 סגמנטים בעלי הערך המוחלט הנמוך ביותר, וגם ממוצע וסטיית תקן של מחצית הסגמנטים הנמצאים במרכז הפילוג (ללא רבע מהסגמנטים בעלי הערכים הגבוהים ביותר וללא רבע מהסגמנטים בעלי הערכים הנמוכים ביותר). דרגנו את הערך שהתקבל עבור הרדיוס המזערי על-פי טבלת רדיוס אנכי קעור מינימאלי מותר לפי ספר הנחיות לתכן גיאומטרי של דרכים בין-עירוניות, צמתים ומחלפים [תכן גיאומטרי של דרכים, מע"צ (1994), טבלה 6.3] עבור גודל הרדיוס המזערי לתכן עקום אנכי קעור הדרוש לעצירה. תחומי ערכי הדרוג מ-1 ל-5 על-פי רדיוס אנכי קעור מזערי שקשור למהירות התכן מתואר בטבלה 2.5.

טבלה 2.5. דרוג תחומי רדיוס אנכי קעור מזערי על-פי מהירויות התכן

Table 2.5. Classification of vertical concave radius values according to design speeds

מהירות תכן, קמ"ש	ממוצע של 3 סגמנטים עם רדיוס אנכי שלילי מזערי, מ'	קטגוריות לרדיוס אנכי קעור שלילי מזערי על-פי מהירויות תכן (1-5)
-60	1700-	1
60 - 70 (כולל)	1700 - 2400 (כולל)	2
70 - 80 (כולל)	2400 - 3200 (כולל)	3
80 - 90 (כולל)	3200 - 4000 (כולל)	4
90 (כולל) +	4000 (כולל) +	5

לשיפוע אורכי המופיע עם סימן "+/-" נלקחו מספר ערכים: הערך המוחלט *הגבוה ביותר* בתחום הקילומטר - ממוצע וסטיית תקן של 3 סגמנטים בעלי הערך המוחלט הגבוה ביותר, וגם ממוצע וסטיית תקן של מחצית הסגמנטים הנמצאים במרכז הפילוג (ללא רבע מהסגמנטים בעלי הערכים הגבוהים ביותר וללא רבע מהסגמנטים בעלי הערכים הנמוכים ביותר).

תוך כדי קיבוץ הנתונים להפקת הערכים הנ"ל נתגלו נתונים לא צפויים אשר דרשו התייחסות פרטנית, כלהלן:

1) **רוחב מיסעה**: בקיבוץ תכונות "רוחב מיסעה ק"מ עולה" ו-"רוחב מיסעה ק"מ יורד" מגיליון "1.0" נמצאו קטעי דרך שלמים על כל הקילומטרים, עם נתונים זהים לשני מאפיינים אלה, שהיו בטווח ערכים 5.5-8.5 מ'. בקטעי דרך שלמים אחרים היה שוני בין "רוחב מיסעה ק"מ עולה" ו-"רוחב מיסעה ק"מ יורד" ותחומי הערכים של 2.5-4.5 מ'. בבדיקה סטטיסטית נמצאה התאמה בין החברות שביצעו את הסקר לבין שני סוגי הממצאים. הערכנו היא שחברת "יונה" סיפקה את רוחב הנתוב עבור שתי ההגדרות: "רוחב מיסעה ק"מ עולה" ו-"רוחב מיסעה ק"מ יורד".

כמו כן, הנחנו ש"רוחב הפרדה" שניתן גם עבור סימוני צבע לא כלול ברוחב הנתוב. הערכנו שחברת "גאוקום" סיפקה את רוחב שני נתיבי הנסיעה שכלל גם את רוחב סימוני הצבע בהפרדה עבור ההגדרות "רוחב מיסעה ק"מ עולה" ו-"רוחב מיסעה ק"מ יורד".

2) כדי לקבל **רוחב נתוב** בעל משמעות זהה בנתוני שתי החברות, הגדרנו את התכונה "רוחב נתוב" לכל חברה בצורה שונה. על פי חברת "גאוקום", רוחב נתוב הוא חצי מרוחב מיסעה ק"מ יורד. יש לציין שבנתוני חברת "גאוקום" "רוחב מיסעה ק"מ עולה" זהה תמיד ל-"רוחב מיסעה ק"מ יורד". עבור נתוני חברת "יונה" רוחב נתוב הוא מחצית מסכום "רוחב מיסעה ק"מ עולה", "רוחב הפרדה" ו-"רוחב מיסעה ק"מ יורד".

בקיבוץ הנתונים למחקר לא קיימת הפרדה בין רוחב הנתוב בשני הכוונים.

3) בקיבוץ תכונות **רוחב השוליים** על-פי גיליון "1.1", לכל סגמנט המופיע בגיליון "1.0" צפינו למצוא 2 סגמנטים: האחד בחתך R והשני בחתך L. נמצאו פגמים ב 1082 זוגות סגמנטים: שניים מחתך R או שניים מחתך L. נמצא שכל הסגמנטים הפגומים התרכזו ב- 8 קטעי דרך.

כאשר ניסינו לתקן סגמנטים אלו באמצעות דמיון לסגמנטים סמוכים, נמצאו סגמנטים עם נתוני השוליים מכל הסוגים: שול, שול אספלט ושול גרנולרי - שרוחבם היה "0". להערכתנו, נתון זה שגוי. כאשר מודדים שוליים בסנטימטרים לא קימת דרך המתחזקת על-ידי החברה הלאומית לדרכים בה לאורך 100 מ' השול (לא סלול, או סלול, או שילוב בין סלול ולא סלול) הוא ברוחב "0" ס"מ. נמצאו 793 סגמנטים כאלו כאשר נתוניהם סופקו רק על-ידי חברת "גאוקום". בנתונים שסופקו על-ידי חברת "יונה" לא נמצאו סגמנטים כאלו. עובדה זאת מחזקת את השערתנו שנתונים אלו פגומים. החלטנו להתייחס לסגמנטים אלו כפגומים ולא לכלול אותם בחישוב התכונות המקובצות.

4) נתוני **מעקות הבטיחות** מגיליון "1.4" בק"מ בהם קיימים סגמנטים עם נתוני מעקות, קובצו ואוחדו באמצעות חישוב אשר הקנה לכל סגמנט ציון בין 1 ל-4 של "רמת הבטיחות" בצדי הדרך. רמת בטיחות 1 היא הנמוכה ביותר, ורמת בטיחות 4 היא הטובה ביותר. בטבלה 2.6 מוצגים גבולות להגדרת הקטגוריות.

טבלה 2.6. תחומי "רמות הבטיחות" של צדי הדרך על-פי מאפייני המעקות

Table 2.6. Definitions of "safety level" of roadsides according to barriers' characteristics

רמת בטיחות	מרחק מעקה ממיסעה (מ')
1 - נמוכה	1.0 - (לא כולל)
2 - בינונית	1.0 - 2.0
3 - טובה	+ 2.0 AND "מרחק פנוי בין המעקה עד למכשול הקרוב" עד 1.0
4 - טובה מאוד	+ 2.0 AND "מרחק פנוי בין המעקה עד למכשול הקרוב" +1.0

בנוסף צוינו שני סוגי אפיונים של מעקות מקובצים :

א) קטעים בהם מותקנים מעקות חדשים : תת סוג="פלדה EUR" כאשר אורכם מעל 30% מאורך הקטע המקובץ או מעל 0.5 ק"מ.

ב) קטעים בהם גובה המעקה בקטע תת-סטנדרטי : "גובה מעקה בטיחות : מינימום" > 0.7 מ' כאשר הם באורך מעל 20% מאורך הקטע המקובץ או מעל 0.2 ק"מ.

5) נתוני **אזור המפלט** מגיליון "1.5" בק"מ בהם קיימים סגמנטים עם אזור המפלט, קובצו ואוחדו באמצעות חישוב אשר הקנה לכל סגמנט ציון בין 1 ל-4 של "רמת הבטיחות" באזור המפלט בצדי הדרך, במקומות בהם אין מעקה בטיחות. רמת בטיחות 1 היא הנמוכה ביותר, ורמת בטיחות 4 היא הטובה ביותר. על-פי "הנחיות לבחירה והצבה של מעקות בטיחות קבועים בדרכים בין עירוניות" (2005) הרוחב המומלץ של אזור המפלט בתכנון סלחני תלוי בסוג הדרך ובנפחי התנועה היומיים הממוצעים. טבלה 2.7 נלקחה מתוך הנחיות אלו ונעזרנו בה לצורך דרוג הבטיחות על-פי רוחב אזור המפלט.

טבלה 2.7. תכן סלחני - הרוחב המומלץ של אזור המפלט מקצה המיסעה בקטעי מילוי או חפירה (המידות במטרים)*.

Table 2.7. Forgiving roadside design - recommended width of recovery zone from the edge of carriageway

סוג הדרך	נפח תנועה יומי	שיפוע המילוי				שיפוע החפירה			
		1:4	1:5	1:6	מתון	1:4	1:5	1:6	מתון
חד-מסלולית	עד 1500	7.5	6.5	5.5	5.0	3.5	4.0	5.0	5.0
	1500-5000	9.5	7.5	7.0	6.5	4.0	5.0	6.0	6.5
	מעל 5000	10.5	8.5	7.5	7.0	5.0	6.5	7.0	7.0
דו-מסלולית	בכל נפח	14.0	11.5	10.5	9.0	6.5	8.0	8.5	9.0

* מתוך "הנחיות לבחירה והצבה של מעקות בטיחות קבועים בדרכים בין עירוניות" (2005)

השתמשנו במידה המומלצת לרוחב אזור המפלט בשיפוע מתון בדרך חד-מסלולית עבור נפחי התנועה הרלבנטיים למחקר (עד 1,500 ומעל 1,500 כלי רכב ביממה), כרמה "3-טובה". תוספת של יותר מ-1.0 מ' לני"ל הגדרנו כרמה "4-טובה מאוד"; רמה "נמוכה" הוגדרה כמרחק עד 3.0 מ', ורמה "2-בינונית" כאשר הרוחב נמצא בין גבול עליון של רמה 1 וגבול תחתון של רמה 3. בטבלה 2.8 מוצגים גבולות להגדרת הקטגוריות של רמת הבטיחות של צדי הדרך על-פי רוחב אזור המפלט ועל-פי נפחי תנועה יומיים ממוצעים.

טבלה 2.8. תחומי "רמות הבטיחות" של צדי הדרך על-פי רוחב אזור המפלט ונפח תנועה יומי
Table 2.8. Definitions of "safety level" of roadsides according to recovery zone width and traffic volume

רוחב אזור מפלט (מ')		רמת בטיחות
מעל 1,500 כלי רכב ליממה	עד 1,500 כלי רכב ליממה	
עד 3.0 (לא כולל)	עד 3.0 (לא כולל)	1 - נמוכה
3.0 - 6.5 (לא כולל)	3.0 - 5.0 (לא כולל)	2 - בינונית
6.5 - 7.5 (לא כולל)	5.0 - 6.0 (לא כולל)	3 - טובה
+7.5	+ 6.0	4 - טובה מאוד

2.3. נתוני תאונות הדרכים בקטעי הדרך הנחקרים

המידע על תאונות הדרכים מתקבל מקבצי תאונות הדרכים של הלמ"ס עבור **חמש שנים אחרונות, 2006-2010**. למידע על תאונות משמשים שני סוגי קבצים: "תאונות דרכים" (ת"ד) ו-"כללי עם נפגעים". רוב המידע התקבל מקבצי "ת"ד" בשל איכות גבוהה יותר של נתוני התאונות בקובץ זה לעומת ה"כללי עם נפגעים" (הכולל מקרים שכלל לא נבדקים ע"י בוחני המשטרה). המידע נאסף על תאונות קטע בלבד, לא כולל צמתים.

בקבצי הלמ"ס מיקום כל תאונה מוגדר על-פי מספר דרך ומספר קילומטר. מספר הקילומטר מופיע בדיוק של ספרה אחת אחרי הנקודה העשרונית. מכאן הדיוק במיקום הוא דיוק של מאה מטר (תחום +/- 50 מ').

סוגי התאונות לאיסוף הנתונים ולבחינת הקשר עם מאפייני הדרכים הוגדרו כלהלן:

א. התנגשויות בין כלי הרכב מתוך התאונות עם נפגעים (ת"ד).

ב. תאונות רכב יחיד מתוך התאונות עם נפגעים (ת"ד).

ג. התנגשויות בבעלי חיים מתוך התאונות עם נפגעים (ת"ד).

ד. סה"כ התאונות עם נפגעים (ת"ד).

ה. תאונות חמורות - קשות וקטלניות ביחד (ת"ד).

ו. סה"כ התאונות: ת"ד ו-"כללי עם נפגעים".

מקבצי "ת"ד", עבור הקטגוריות א'-ג' לעיל, הקצבת סוגי התאונות הייתה כלהלן:

ה"התנגשויות" כוללות סוגים אלה -

2' התנגשות חזית אל צד'

3' התנגשות חזית באחור'

4' התנגשות צד בצד'

- 5' התנגשות חזית בחזית
- 17' התנגשות אחור אל חזית'
- 18' התנגשות אחור אל צד'
- "תאונות רכב יחיד" כוללות סוגים אלה -
- 6' התנגשות עם רכב שנעצר ללא חניה'
- 7' התנגשות עם רכב חונה'
- 8' התנגשות עם עצם דומם'
- 9' ירידה מהכביש או עלייה למדרכה'
- 10' התהפכות'
- 11' החלקה'
- "התנגשות בבעלי חיים" כוללת סוג -
- 19' התנגשות עם בעל חיים'.

מכאן, עבור כל קטע דרך שנכלל בבסיס הנתונים של המחקר הופקו 30 מספרים של תאונות: 6 סוגים כפול 5 שנים. טבלה 2.9 מציגה את מאפייני התאונות שנאספו עבור בסיס הנתונים של המחקר.

טבלה 2.9. סך התאונות בקטעי המחקר, לפי סוגים מקובצים, בשנים 2006-2010
 Table 2.9. The number of accidents on study's road sections, according to aggregated accident types, in 2006-2010

סוג תאונה מקובץ	2006	2007	2008	2009	2010	2006-2010	% תאונות לילה
התנגשויות	61	55	70	83	76	345	29.6%
רכב יחיד	51	47	39	52	36	225	39.6%
התנגשות בבעלי חיים	1	4	3	1	1	10	90.0%
תאונות חמורות (ת"ד)	31	29	43	37	39	179	43.6%
סך התאונות עם נפגעים (ת"ד)	114	108	117	139	120	598	34.6%
סך התאונות: "ת"ד" + "כללי עם נפגעים"	342	338	372	411	437	1,900	36.0%

2.4. בסיס הנתונים עם כל מאפייני הדרכים

בסיום שלב הכנת הנתונים למחקר, בסיס הנתונים על קטעי הדרכים דלות התנועה כלל 1365 סגמנטים (כל אחד באורך כ-1 ק"מ), באורך כולל של 1235 ק"מ. כל הנתונים שנאספו עבור קטעי הדרכים דלות התנועה רוכזו בטבלה מסכמת אחת. נתונים אלה כללו, לכל קטע (סגמנט):

- I.D.
- מס' דרך
- ק"מ דרך (מספר שלם)
- נפח תנועה יומי, אלפי כלי רכב (ממוצע בשנים 2007-2009)
- האם מקור נתון הנפח מנתוני הלמ"ס או אומדן
- ק"מ התחלה של קטע

- ק"מ סיום של קטע
- אורך הקטע, ק"מ
- סכום אורכי הסגמנטים הכלולים בקטע, ק"מ
- האם הקטע המקובץ כולל אי-רציפות
- מספר סגמנטים לחישוב רוחב נתיב מקובץ
- ס"ה נתונים לחישוב רוחב נתיב מקובץ
- רוחב נתיב ממוצע, מ'
- סטיית תקן ברוחב נתיב ממוצע, מ'
- מהירות מותרת בתחילת קטע המקובץ (ע"פ תמרור), קמ"ש
- "מס' מהירות מותרת בקטע " - כאשר אין שינוי מהירות בקטע המס' = 1. במקרה שיש בתחום הקטע המקובץ שינויי מהירות על פי תמרור, נתונים על שינויי מהירות מותרת בקטע על פי הסדר בכוון נסיעה "עולה"
- מס' סגמנטים בקטע המקובץ ללא נתוני שול
- רוחב שול ממוצע, מ'
- סטיית תקן לרוחב שול ממוצע, מ'
- רוחב שול אספלט ממוצע, מ'
- סטיית תקן לרוחב שול אספלט ממוצע, מ'
- רוחב שול גרנולרי ממוצע, מ'
- סטיית תקן לרוחב שול גרנולרי ממוצע, מ'
- מספר סגמנטים עם מעקות בטיחות בקטע
- ציון ממוצע לסגמנטים עם מעקות
- סטיית תקן לציון סגמנטים עם מעקות
- האם מעקות יורו מהווים לפחות 30% מאורך המעקות או לפחות 0.5 ק"מ
- מספר הסגמנטים בהם מותקנים מעקות יורו כאשר הם מהווים לפחות 30% מאורך המעקות או לפחות 0.5 ק"מ
- האם מעקות נמוכים מ-70 ס"מ מהווים לפחות 20% מאורך המעקות או לפחות 0.2 ק"מ
- מספר הסגמנטים בהם מותקנים מעקות יורו, כאשר הם מהווים לפחות 30% מאורך המעקות או לפחות 0.5 ק"מ
- מספר הסגמנטים בקטע ללא מעקות
- ציון בטיחותי ממוצע של סגמנטים ללא מעקות
- סטית תקן של ציון בטיחותי לסגמנטים ללא מעקות
- מספר סגמנטים לחישוב רדיוסים ושיפועים
- רדיוס של סגמנט עם רדיוס אופקי מזערי
- ממוצע של רדיוס אופקי של 3 סגמנטים בעלי הרדיוסים האופקיים המזעריים
- סטית תקן של 3 סגמנטים בעלי הרדיוסים האופקיים המזעריים

- קטגוריה (1-5) של ממוצע של 3 רדיוסים אופקיים מזעריים על פי מהירות תכן
- רדיוס אופקי ממוצע ללא קצוות
- סטיית תקן לרדיוס אופקי ממוצע ללא קצוות
- רדיוס של סגמנט עם רדיוס אנכי חיובי מזערי
- ממוצע של רדיוס אנכי חיובי של 3 סגמנטים בעלי הרדיוסים האופקיים המזעריים
- סטיית תקן של 3 סגמנטים בעלי הרדיוסים אנכיים חיוביים המזעריים
- קטגוריה (1-5) של ממוצע של 3 רדיוסים אנכיים חיוביים מזעריים על פי מהירות תכן
- רדיוס אנכי חיובי ממוצע ללא קצוות
- סטיית תקן לרדיוס אנכי חיובי ממוצע ללא קצוות
- רדיוס של סגמנט עם רדיוס אנכי שלילי מזערי
- ממוצע של רדיוס אנכי שלילי של 3 סגמנטים בעלי הרדיוסים האופקיים המזעריים
- סטיית תקן של 3 סגמנטים בעלי הרדיוסים אנכיים שליליים המזעריים
- קטגוריה (1-5) של ממוצע של 3 רדיוסים אנכיים שליליים מזעריים על פי מהירות תכן
- רדיוס אנכי שלילי ממוצע ללא קצוות
- סטיית תקן לרדיוס שלילי חיובי ממוצע ללא קצוות
- שיפוע צד מרבי (%)
- ממוצע שיפוע צד של 3 סגמנטים עם שיפוע צד מרבי
- סטיית תקן שיפוע צד של 3 סגמנטים עם שיפוע צד מרבי
- ממוצע שיפוע צד ללא קצוות
- סטיית תקן של שיפוע צד ללא קצוות
- שיפוע לאורך מרבי (%)
- ממוצע שיפוע לאורך של 3 סגמנטים עם שיפוע צד מרבי
- סטיית תקן שיפוע לאורך של 3 סגמנטים עם שיפוע צד מרבי
- ממוצע שיפוע לאורך ללא קצוות
- סטיית תקן של שיפוע לאורך ללא קצוות

כמו כן, בטבלה המסכמת הוצגו מספרי תאונות הדרכים, בכל אחת מהשנים 2006-2010, לפי סוגים אלה:

- התנגשויות בין כלי הרכב מתוך התאונות עם נפגעים (ת"ד)
- תאונות רכב יחיד מתוך התאונות עם נפגעים (ת"ד)
- התנגשויות בבעלי חיים מתוך התאונות עם נפגעים (ת"ד)
- סה"כ התאונות עם נפגעים (ת"ד)
- תאונות חמורות - קשות וקטלניות ביחד (ת"ד)
- סה"כ התאונות: ת"ד ו-"כללי עם נפגעים".

3. ניתוח הנתונים ופיתוח מודלים לביטוי הקשר בין מאפייני הדרכים דלות תנועה לבין שכיחות התאונות

בשלב השלישי של המחקר נערך מגוון ניתוחים חד-ורב-פרמטריים של הנתונים שנאספו, על מנת לפתח מודלים מסבירים לקשר בין מאפייני הדרכים דלות התנועה לבין שכיחות התאונות. המודלים המסבירים פותחו לחמישה סוגי תאונות דרכים שהם:

- התנגשויות בין כלי הרכב מתוך התאונות עם נפגעים (ת"ד),
- תאונות רכב יחיד מתוך התאונות עם נפגעים (ת"ד),
- סך התאונות עם נפגעים (ת"ד),
- תאונות חמורות - קשות וקטלניות ביחד (ת"ד),
- סך כל התאונות: ת"ד ו-יכללי עם נפגעים".

עבור סוג תאונות - התנגשויות בבעלי חיים מתוך התאונות עם נפגעים - לא נערך ניתוח כי סה"כ בשנים 2006-2010 בכל קטעי המחקר נרשמו 10 תאונות מסוג זה, בלבד.

בפרק זה מוצגים ממצאים מניתוח הנתונים והתאמת המודלים המסבירים להתרחשות התאונות בדרכים דלות התנועה.

3.1. בחינת הנתונים

3.1.1. מבנה בסיס הנתונים

בסיס הנתונים שנמסר לניתוח כלל מידע על קטעי הדרכים דלות התנועה - 1365 קטעי דרך קצרים, באורך כולל של 1235 ק"מ. כל שורה תיארה קטע אחד. מבנה בסיס הנתונים מוצג בטבלה 3.1, והוא כולל:

- ID לכל קטע, בתוספת 4 שדות זיהוי (מס' דרך, ק"מ דרך, ק"מ התחלה של קטע, ק"מ סיום של קטע);
- אורך הקטע, ק"מ;
- נפח תנועה יומי, אלף כלי רכב;
- מאפיינים גיאומטריים ואחרים של הקטע.

בין המאפיינים המועמדים למסבירים במודלים נקבעה עדיפות (ראה בטבלה 3.1): 1 - לבחון בעדיפות ראשונה, 2 - בעדיפות שנייה, 3 - בעדיפות שלישית. (בשל היקף הנתונים, מגבלותיהם ומורכבות הקשרים ביניהם שנתגלו תוך כדי הניתוח, הניתוח התבסס בעיקר על המאפיינים שעבורם נקבעה עדיפות ראשונה).

כמו כן, לכל קטע הוצגו המאפיינים התלויים - מספרי תאונות הדרכים, לפי ששת הסוגים שנבחרו למחקר, עבור כל אחת מהשנים: מ-2006 עד 2010 (ראה טבלה 3.1).

מבחינת הנתונים עלה כי:

- ישנם 7 קטעים עם מספר תאונות גבוה אך לא יציב לאורך השנים. בעקבות בחינת מיקום של קטעים אלה נמצא שרובם כוללים בתוכם צמתים אשר כפי הנראה גרמו לתנודות הגדולות

טבלה 3.1. מבנה בסיס הנתונים שנמסר לניתוח

Table 3.1. The structure of database delivered to the analysis

הערות: עדיפות למודל	שדות ID	1	1	1	3	1	2	1	3	2	3	2	3	2	1	3	2	2	1	3								
I.D.	כביש	ק"מ	התחלה	ק"מ סיום	נפח תנועה יומי 2007-9 (אלפים)	אורך, ק"מ	רוחב נתיב ממוצע	רוחב נתיב	סטטיית תקן לרוחב	מהירות מותרת בתחילת הקטע	מס' מהירות מותרות בקטע: 1 - אין שינוי, 2 או אחר - מספר שינויים	רוחב שול ממוצע	סטטיית תקן לרוחב שול	רוחב שול אספלט ממוצע	סטטיית תקן לרוחב שול אספלט ממוצע	רוחב שול גרנולרי ממוצע	סטטיית תקן לרוחב שול גרנולרי ממוצע	יחס: מספר סגמנטים עם מעקות בטיחות מתוך הסה"כ	סטטיית תקן עם מעקות-ממוצע	סטטיית תקן עם מעקות-ממוצע	מעקות "יורו" כאשר הם מעל 30%	מעקות נמוכים כאשר הם מעל 20%	מעקות-ממוצע	מעקות-ממוצע	מעקות-ממוצע	מעקות-ממוצע	מעקות-ממוצע	
ID	RoadN	kmN	km_s	km_e	AADT	length	lane_w	lane_w_sd	sp_limit	spl_ch	sh_to_w	sh_to_w_sd	sh_as_w	sh_as_w_sd	sh_gr_w	sh_gr_w_sd	bar_avl	bar_est	bar_est_sd	new_bar	low_bar	no_bar_e	no_bar_e	st	st	st	st	st
1	1	3	1	2	3	1	3	1	2	3	1	3	1	3	1	3	1	2	3	1	3	2	3	2	3	2	3	
ציון משוקלל של צדי הדרך: עם מעקה וללא מעקה	ממוצע של 3 סגמנטים עם רדיוס אופקי מזערי, מ'	סטטיית תקן של 3 סגמנטים עם רדיוס אופקי מזערי, מ'	קטגוריות לרדיוס אופקי מזערי מהירויות תכן (1-5)	רדיוס אופקי ממוצע על פי מהירויות תכן (1-5)	סטטיית תקן ללא מעקות ממוצע	ממוצע של 3 סגמנטים עם רדיוס אנכי חיובי מזערי, מ'	סטטיית תקן של 3 סגמנטים עם רדיוס אנכי חיובי מזערי, מ'	קטגוריות לרדיוס אנכי חיובי קמור מהירויות תכן (1-5)	רדיוס אנכי חיובי ממוצע ללא מעקות, מ'	סטטיית תקן ללא מעקות ממוצע	ממוצע של 3 סגמנטים עם רדיוס אנכי חיובי מזערי, מ'	סטטיית תקן של 3 סגמנטים עם רדיוס אנכי חיובי מזערי, מ'	קטגוריות לרדיוס אנכי חיובי קמור מהירויות תכן (1-5)	רדיוס אנכי חיובי ממוצע ללא מעקות, מ'	סטטיית תקן ללא מעקות ממוצע	ממוצע של 3 סגמנטים עם רדיוס אנכי חיובי מזערי, מ'	סטטיית תקן של 3 סגמנטים עם רדיוס אנכי חיובי מזערי, מ'	קטגוריות לרדיוס אנכי חיובי קמור מהירויות תכן (1-5)	רדיוס אנכי חיובי ממוצע ללא מעקות, מ'	סטטיית תקן ללא מעקות ממוצע	שיפוע צד ממוצע 3 סגמנטים הכי גדולים, %	סטטיית תקן לשיפוע צד של 3 סגמנטים הכי גדולים, %	שיפוע צדי ממוצע ללא מעקות, %	סטטיית תקן ללא מעקות לשיפוע צדי, %	שיפוע צדי ממוצע ללא מעקות, %	סטטיית תקן ללא מעקות לשיפוע צדי, %	שיפוע צדי ממוצע ללא מעקות, %	סטטיית תקן ללא מעקות לשיפוע צדי, %
rh_min_s	rh_min	d	rh_cat	rh_mean	n_sd	rvp_min	rvp_min_sd	rvp_cat	rvp_mean	n_sd	rvn_min	rvn_min_sd	rvn_cat	rvn_mean	n_sd	ss_max	ss_max_d	ss_meas	ss_meas_n	ss_meas_n_sd								

טבלה 3.1. (המשך)

תלויים - מספר תאונות, לפי 6 קטגוריות, 5 שנים																
1	3	2	3													
שיפוע לטעיית תקן	שיפוע לטעיית תקן	שיפוע לטעיית תקן	שיפוע לטעיית תקן	התנגשויות בין כלי רכב 2006	רכב יחיד 2006	התנגשויות בבעלי חיים 2006	תאונות ת"ד חמורות 2006	סך תאונות ת"ד 2006	סך תאונות ת"ד וכללי עם נפגעים 2006	התנגשויות בין כלי רכב 2007	רכב יחיד 2007	התנגשויות בבעלי חיים 2007	תאונות ת"ד חמורות 2007			
ממוצע 3 סגמנטים הכי גדולים, %	ממוצע 3 סגמנטים הכי גדולים, %	ממוצע ללא קצוות, %	ממוצע ללא קצוות, %										סך תאונות ת"ד וכללי עם נפגעים 2007			
gr_max_	gr_max_	gr_mean_	gr_mean_	COL_2006	SNG_2006	ANM_2006	TDS_2006	TDT_2006	ALL_2006	COL_2007	SNG_2007	ANM_2007	TDS_2007	TDT_2007	ALL_2007	COL_2008
sd	sd	sd	sd													

				סך תאונות ת"ד וכללי עם נפגעים 2008	התנגשויות בין כלי רכב 2009	רכב יחיד 2009	התנגשויות בבעלי חיים 2009	תאונות ת"ד חמורות 2009	סך תאונות ת"ד 2009	סך תאונות ת"ד וכללי עם נפגעים 2009	התנגשויות בין כלי רכב 2010	רכב יחיד 2010	התנגשויות בבעלי חיים 2010	תאונות ת"ד חמורות 2010	סך תאונות ת"ד 2010	סך תאונות ת"ד וכללי עם נפגעים 2010
SNG_2008	ANM_2008	TDS_2008	TDT_2008	ALL_2008	COL_2009	SNG_2009	ANM_2009	TDS_2009	TDT_2009	ALL_2009	COL_2010	SNG_2010	ANM_2010	TDS_2010	TDT_2010	ALL_2010

במספרי התאונות בקטע, בייחוד עבור משתני ALL - סך התאונות, כולל ת"ד וכללי עם נפגעים ; קטעים חריגים אלה הוצאו מהניתוח, כך שלניתוח נותרו **1358 קטעי דרך**.

- המשתנים המסבירים למספר תאונות אינם נתונים בפרוט שנתי, אלא כערך אופייני לכל חמש השנים, מתוך הנחה שמאפייני הקטע לא השתנו משמעותית, אם בכלל, בשנים אלה. לכן ניתוח הקשר בין המשתנים המסבירים לבין התאונות נעשה עבור סכום התאונות ב-5 השנים. לצורך כך לכל קטע נוצרו משתני התאונות הכוללים סכום של כל התאונות על פני חמש השנים, 2006-2010, שהם :

COL5 - התנגשויות בין כלי הרכב מתוך התאונות עם נפגעים (ת"ד), ב-5 השנים ;

SNG5 - תאונות רכב יחיד מתוך התאונות עם נפגעים (ת"ד), ב-5 השנים ;

TDT5 - סך התאונות עם נפגעים (ת"ד), ב-5 השנים ;

TDS5 - תאונות חמורות - קשות וקטלניות ביחד (ת"ד), ב-5 השנים ;

ALL5 - סך כל התאונות : ת"ד ו-"כללי עם נפגעים" ביחד, ב-5 השנים.

- כמו כן, כאמור, התאונות מסוג התנגשויות בבעלי חיים לא נכללו בניתוח כי תאונות מסוג זה נרשמו סה"כ ב-8 קטעים בלבד, מתוך 1358.

טבלה 3.2 מציגה פילוגים של קטעי המחקר לפי מספרי התאונות, מהסוגים הנבחנים, שנרשמו בהם (בחמש השנים). ניתן לראות, כי סה"כ בחמש השנים, מתוך 1358 הקטעים במחקר, תאונות התנגשות בין כלי הרכב נרשמו ב-217 קטעים (16% מקטעי המחקר); תאונות רכב יחיד - ב-181 קטעים (13%); תאונות חמורות - ב-141 קטעים (10%); תאונות עם נפגעים - ב-341 קטעים (25%); כלל התאונות מסוג ת"ד וכללי עם נפגעים - ב-680 קטעים (50%).

3.1.2. שלבי הניתוח - כללי

במחקר זה, בחינת הנתונים והתאמת המודלים לקשר בין המשתנים המסבירים למשתני התאונות נעשתה במספר שלבים :

(1) מודלים מסוג עצים, rpart ו-GBM ;

(2) מודלים חיבוריים אבל לא בהכרח לינאריים ;

(3) מודלים עם מסבירים לינאריים,

השלבים 1-2 שימשו לבחינת התנהגות הנתונים, האינטראקציות בין המסבירים הפוטנציאליים ומשתני התאונות ובחירת המשתנים המסבירים להתאמת המודלים ; ממצאים מניתוחים אלה מובאים בפרק 3.1. ממצאים מהשלב האחרון של התאמת המודלים הרב-פרמטריים מוצגים בפרק 3.2.

3.1.3. בחינת המשתנים המסבירים

בין מאפייני הקטעים המועמדים למשתנים המסבירים קיימת קבוצה של **16 משתנים** בעדיפות ראשונה - ראה טבלה 3.1. בקרב משתנים אלה ניתן לזהות 5 קבוצות, כאשר קבוצה 1 כוללת משתנים ללא קשר ביניהם, בעוד שיתר הקבוצות כוללות משתנים הקשורים ביניהם. כלומר :

טבלה 3.2. בחינת התפלגות מספרי התאונות, מהסוגים הנבחרים, בין קטעי המחקר

Table 3.2. Distribution of accident numbers, of the types selected, between the study's sections

1 - תאונות התנגשות בין כלי הרכב

COL5	Frequency	Percent	Cumulative Frequency	Cumulative Percent
0	1141	84.02	1141	84.02
1	157	11.56	1298	95.58
2	39	2.87	1337	98.45
3	12	0.88	1349	99.34
4	4	0.29	1353	99.63
5	3	0.22	1356	99.85
7	2	0.15	1358	100.00

2 - תאונות רכב יחיד

SNG5	Frequency	Percent	Frequency	Percent
0	1177	86.67	1177	86.67
1	153	11.27	1330	97.94
2	22	1.62	1352	99.56
3	4	0.29	1356	99.85
4	1	0.07	1357	99.93
6	1	0.07	1358	100.00

3 - תאונות חמורות

TDS5	Frequency	Percent	Cumulative Frequency	Cumulative Percent
0	1217	89.62	1217	89.62
1	117	8.62	1334	98.23
2	17	1.25	1351	99.48
3	6	0.44	1357	99.93
4	1	0.07	1358	100.00

4 - תאונות עם נפגעים

TDT5	Frequency	Percent	Cumulative Frequency	Cumulative Percent
0	1017	74.89	1017	74.89
1	223	16.42	1240	91.31
2	71	5.23	1311	96.54
3	22	1.62	1333	98.16
4	13	0.96	1346	99.12
5	3	0.22	1349	99.34
6	4	0.29	1353	99.63
7	3	0.22	1356	99.85
8	2	0.15	1358	100.00

5 - סך התאונות (ת"ד וכללי עם נפגעים)

ALL5	Frequency	Percent	Cumulative Frequency	Cumulative Percent
0	678	49.93	678	49.93
1	303	22.31	981	72.24
2	178	13.11	1159	85.35
3	71	5.23	1230	90.57
4	45	3.31	1275	93.89
5	29	2.14	1304	96.02
6	14	1.03	1318	97.05
7	12	0.88	1330	97.94
8	4	0.29	1334	98.23
9	7	0.52	1341	98.75
10-27	17	1.25	1358	100.0

קבוצה 1: "AADT", "length", "lane_w", "sp_limit", "sh_to_w", "ss_max", "gr_max" - הכוללת, בהתאמה, נפח תנועה, אורך קטע, רוחב נתיב ממוצע, מהירות מותרת, רוחב שול ממוצע, אומדן לשיפוע צד מרבי, אומדן לשיפוע אורכי מרבי - בקבוצה זו נכללו המשתנים ללא קשר ביניהם;

קבוצה 2: "bar_est", "no_bar_est", "rside_est" - הכוללת, בהתאמה, ציון מצב מעקות, ציון מצב צדי הדרך ללא מעקות, ציון משוקלל למצב צדי הדרך - בקבוצה זו מראש הוגדר קשר בין המשתנים, כאשר המשתנה rside_est מהווה שקלול מסכם של bar_est ו-no_bar_est עבור קטע מסוים;

קבוצה 3: "rh_min", "rh_cat" - הכוללת אומדן לרדיוס אופקי מזערי והקטגוריה שלו;

קבוצה 4: "rvp_min", "rvp_cat" - הכוללת אומדן לרדיוס אנכי חיובי מזערי והקטגוריה שלו;

קבוצה 5: "rvn_min", "rvn_cat" - הכוללת אומדן לרדיוס אנכי שלילי מזערי והקטגוריה שלו - בקבוצות 3-5 הקשר בין המשתנים הוגדר מראש בעזרת התאמה להגדרות מהירות התכן (ראה פרק 2).

טבלה 3.3 מציגה את הממוצעים וטווחי הערכים של המשתנים. נספת ב' מציג היסטוגרמות ותרשימי קופסה (Box-Plots) עבור הנתונים.

טבלה 3.3. ממוצעים וטווחי הערכים של המשתנים המסבירים

Table 3.3. Averages and ranges of values of explanatory variables

משתנה	N	ממוצע	סטית תקן	ערך מינימאלי	ערך מרבי
AADT	1358	1.86	0.84	0.20	3.50
length	1358	0.94	0.16	0.15	1.42
lane_w	1358	3.19	0.35	1.69	4.17
sp_limit	1358	79.44	15.03	30.0	90.0
sh_to_w ³	1358	1.61	0.74	0	4.83
bar_est	1080	2.24	0.67	1.00	4.0
no_bar_est	1321	1.23	0.30	1.00	2.57
rside_est	1358	1.56	0.49	0.90	3.83
rh_min	1338	1543	594.15	4.84	10001
rh_cat	1338	3.88	1.47	1.00	5.00
rvp_min	1336	809.7	209.44	4.78	10001
rvp_cat	1336	1.22	0.63	1.00	5.00
rvn_min	1336	-806.3	1224.86	-10001	-5.26
rvn_cat	1336	1.30	0.86	1.00	5.00
ss_max	1338	4.18	1.60	0.64	10.02
gr_max	1338	5.25	3.04	0.24	15.37

בהמשך, נערכה בחינת הקשרים בין המשתנים המסבירים על מנת לבחור את המשתנים המובילים להתאמת המודלים. בחינת המשתנים נערכה באופן הבא:

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

המשתנים: AADT, length, sp_limit וגם lane_w - הם בעלי קשר נמוך לשאר המשתנים;

³ כלומר, בין קטעי המחקר, ממוצע רוחב שול היה 1.61 מ', עם סטית תקן 0.74 מ'. לעומת זאת, ממוצע רוחב שול שלול היה 1.13 מ', עם סטית תקן 0.70 מ'. מכאן, שול שלול היווה כ-70% מרוחב קטעי המחקר.

- לעומת זאת, קורלציות חזקות נמצאו בין המשתנים: `rside_est`, `bar_est`, `no_bar_est` וכמו כן, בין המשתנים: `rh_cat`, `rh_min`, `ss_max`, `gr_max`; בין המשתנים: `rvp_cat`, `rvp_min` ובין המשתנים: `rvn_cat`, `rvn_min`.

יצוין שאת 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 המסבירים לתאונות:

כדי לקבל מושג ראשוני של הקשר בין כל אחד מהמסבירים למשתנה התלוי של מספר תאונות דרכים, ללא ניכוי השפעת משתנים אחרים, חושבו קורלציות פשוטות (Pearson Correlation) בין כל אחד מהמשתנים המסבירים עם התמרת המשתנים התלויים שהיא שורש מספר התאונות מחולק באורך קטע ונפח התנועה בו. (כלומר, קשר ראשוני זה בין המסבירים הפוטנציאליים לבין התאונות נבחן בניכוי השפעת אורך הקטע ונפח התנועה בקטע).

להלן סיכום לקשרים שנמצאו מובהקים (ברמת מובהקות 0.05):

- עבור תאונות התנגשות בין כלי הרכב (COL5) נמצאו קורלציות חזקות עם המשתנים: `sp_limit`, `rh_cat`, `rh_min`

- עבור תאונות רכב יחיד (SNG5) נמצאו קורלציות חזקות עם המשתנים: `rvn_cat`, `no_bar_est`, `rvn_min`

- עבור התאונות החמורות (TDS5) נמצאו קורלציות חזקות עם המשתנים: `rvp_cat`, `rvp_min`

- עבור התאונות עם נפגעים (TDT5) נמצאו קורלציות חזקות עם המשתנים: `rvn_cat`, `sp_limit`, `rvn_min`

- עבור כלל התאונות (ALL5) נמצאו קורלציות חזקות עם המשתנים: `no_bar_est`, `rvp_cat`, `rvn_cat`, `rvn_min`, `rvp_min`

ג. נערך זיהוי השפעת המשתנים באמצעות שימוש בפונקציית `rpart` מתוך סיפריית `rpart` של תוכנת R. נמצא שרק משתנה אחד מוריד את שגיאת הניבוי באופן משמעותי - המשתנה `sp_limit`. עם זאת, בהמשך הוחלט להוריד משתנה זה מפיתוח המודלים המסבירים עקב חשיבותו הנמוכה למטרות המחקר (המטרה היא זיהוי קשרים בין המאפיינים הגיאומטריים של קטעי הדרכים דלות התנועה לבין התרחשות התאונות, כאשר המשתנה של "מהירות מותרת" בקטע גם כשהוא מובהק רק מרמז על שינויים במאפייני הדרך שכפי הנראה היו בשטח ולכן, הכתיבו את השינויים במהירות המותרת).

לאחר הסרת המשתנה `sp_limit`, בהרצות נוספות של תוכנת `rpart`, עם נרמול לנפח התנועה בקטע, עבור סך התאונות (ALL5) נמצאה השפעה של משתנים אלה: `lane_w`, `rvn_min`, כאשר עבור הסוגים האחרים של התאונות לא נמצאו משתנים משפיעים.

ד. בחינת הקשר בין נפח התנועה ומספרי התאונות:

כפי שידוע מהספרות, הקשרים החזקים ביותר של תאונות עם משתנים מסבירים צפויים להיות עם משתנה נפח התנועה. זאת מכיוון שנפח התנועה משפיע על כל סוגי התאונות, ואילו מאפיינים גיאומטריים משפיעים רק על חלק מהן, כך שבהסתכלות על כלל התאונות קשה יותר להבחין בתרומתם של משתנים אלה. לכן, בהתחלה, נבחן הקשר בין נפח התנועה ותאונות.

מהספרות ידוע שבדרך כלל צורת הקשר היא שלוג נפח התנועה קשור לינארית ללוג תוחלת מספר התאונות. תחילה נבדקה צורת הקשר בין לוג נפח התנועה ולוג תוחלת מספר התאונות (עם אופסט של אורך קטע, כדי למדל את תוחלת התאונות החמש-שנתית לק"מ). הותאם מודל בינומי שלילי חלק (smooth) לנתוני כל אחד מסוגי התאונות, כאשר בציר X מופיע $\log(100 * AADT)$ המכונה lg_x .

אובחן שהקשר הינו לינארי למקוטעין, עם שבירה ב- lg_x השווה ל-3.9 שהינו AADT השווה ל-0.495 בקירוב. בבדיקה עלה שסה"כ בבסיס הנתונים של המחקר יש 17 תצפיות המקבלות ערך הנמוך מערך זה. בשל מספר התצפיות הקטן (17) שעליו מבוסס השיפוע מתחת ל-3.9, הוחלט להתאים מודל רק לתצפיות מעל לערך זה.

לאחר ויתור על ערכי הAADT הקטנים מ-0.5, לכל סוג תאונות הותאמה רגרסיה בינומית שלילית לינארית לקשר בין נפח התנועה והתאונות, ואופסט השווה ללוג אורך הקטע. עבור כל רגרסיה נבחן השיפוע ומובהקותו ונמצא שהשיפוע של כל הסדרות חיובי, אם כי הוא מובהק ($p < 0.05$) עבור כל סוגי התאונות פרט ל-TDS5 (עבור התאונות החמורות נמצאה מובהקות שולית עם $p = 0.28$).

ה. בחינת הקשר בין משתנים נוספים ומספרי התאונות:

בשלב ראשוני, נבדקה הוספה של כל משתנה לחוד, למודל הכולל את נפח התנועה. כך יכולנו לקבל מושג על השפעת נתוני קצה ורמז להשפעה של המשתנה. (אם כי, יש לזכור שהתאמה זאת מוטית בשל אי-הכללת משתנים אחרים העשויים להשפיע על תאונות הדרכים. הבחירה הסופית בין המשתנים וההתמרות המתאימות נעשו במודל המסכם עם כל המשתנים שנבחרו - ראה פרק 3.2).

קשר זה נבדק עבור משתנים אלה: רוחב שול, רוחב נתיב, מצב צדי הדרך ללא מעקה, ציון משוקלל לצדי הדרך, רדיוס אופקי מזערי, רדיוס אנכי חיוב מזערי, רדיוס אנכי שלילי מזערי, שיפוע צד מרבי, שיפוע אורך מרבי. בעקבות בחינת צורות הקשר בין המשתנים הגיאומטריים ומספרי התאונות, בניכוי השפעת נפח התנועה ואורך הקטע, נקבע הצורך להוציא מהניתוח את הערכים החריגות של כל אחד מהמשתנים. זאת, בשל התנהגות חריגה של הקשר שנצפה בקצות הערכים וגם עקב מיעוט התצפיות (הקטעים) שהיו עם הערכים החריגים.

כתוצאה, להתאמת המודלים נשארו ערכי המשתנים בגבולות שלהלן:

רוחב נתיב בטווח 2-4 מ': $lane_w <= 4 \& lane_w > 2$;

רוחב שול עד 4 מ': $sh_to_w <= 4$;

ציון משוקלל של מצב צדי הדרך מעל 1 ומתחת ל-3: $\log(rs_side_est) >= 1.1$;

רדיוס אופקי מזערי מעל 20 מ': $\log(\text{rh_min}) \geq 3$;

רדיוס אנכי שלילי מזערי מעל 18 מ': $\log(-\text{rvn_min}) \geq 2.9$;

שיפוע צד מרבי בין 1.4 עד 8 אחוז: $(\text{ss_max} \leq 8) \ \& \ (\text{ss_max} \geq 1.4)$;

שיפוע אורך מרבי בין 0.6 עד 13 אחוז: $(\text{gr_max} \leq 13) \ \& \ (\text{gr_max} \geq 0.6)$.

כמו כן, כפי שצוין לעיל, נפח התנועה הנבחן יהיה מעל 0.5 אלף כלי רכב ביממה: $\lg_x > 3.9$ כאשר $x = 100 * \text{AADT}$.

ו. בחינה מסכמת של המשתנים המשפיעים:

לבסוף, לצורך בחינה מסכמת של המשתנים השתמשנו בשיטה לקבלת חשיבות המשתנים (Variable importance) לפי GBM - Generalized Boosted Regression Modeling.⁵ עבור כל משתנה תוצאה - סוג תאונות, התקבלו שמונת המשתנים בעלי החשיבות הגבוהה ביותר.

ה-GBM הורץ עבור אוסף הנתונים ללא תצפיות חריגות, עבור המשתנים המותמרים (לוגריתם או שורש ריבועי, בתלות במאפיין). עבור כל משתנה בוצעו שני סוגי התאמות: התאמה על-ידי תוכנת GBM והתאמה ע"י תוכנת GAM (אשר כללה בחירת משתנים). נספח ג' מציג את סיכום הממצאים, משתי ההרצות, ה-GBM וה-GAM, עבור חמשת סוגי התאונות, כאשר עבור כל סוג תאונה (המשתנה התלוי) מובאים הפלטים הבאים:

- חשיבות המשתנים ע"פ GBM;

- שרטוט הקשר בין כל משתנה מסביר לתלוי בנוכחות כל שאר המסבירים, על-פי ההתאמה שהתקבלה על-ידי GBM;

- שרטוט הקשר בין כל משתנה מסביר לתלוי בנוכחות כל שאר המסבירים, על-פי ההתאמה שהתקבלה על-ידי GAM.

בנוסף, ברשימת חשיבות המשתנים לפי ה-GBM מוצגים סימנים אלה: "+" שמשמעו שאותו המשתנה נבחר כחשוב הן על-ידי ה-GBM והן ע"י ה-GAM; "-" שמשמעו שהמשתנה נבחר על-ידי ה-GBM ולא נבחר ע"י ה-GAM.

בהתחשב בתוצאות אלה, נבחרו משתנים להמשך הניתוח - התאמת מודלים מסבירים, לכל אחד מסוגי התאונות. בחירה זו בוצעה בהתחשב בשיקולים אלה:

- הבחירה נעשתה מבין המשתנים שנבחרו כחשובים ע"י ה-GBM ו/או ה-GAM;

- נשמרו המשתנים lane_w ו-sh_to_w המופיעים במחקרים רבים בספרות כמסבירי תאונות חשובים. (כמו כן, יש לזכור שבמודלים המצומצמים יותר לא נכללים כל משתני המודל המקורי,

⁴ דהיינו מתחת ל-"מינוס 18" מ' כי מדובר ברדיוס שלילי

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

ולכן, ייתכן שמשתנים שלא היו חשובים כאשר נכללו כל המשתנים של המודל יהפכו לחשובים לאחר השמטת משתנים מהמודל. מכאן, מותר להוסיף משתנים רצויים בשלב לאחר ההשמטה של משתנים לא חשובים);

- בנוסף, משתנים מסוימים פוצלו למספר ערכים משיקולים הנדסיים.

3.1.4. סיכום: המשתנים המסבירים שנבחרו לפיתוח המודלים

בעקבות כל הבחינות שתוארו בסעיף הקודם, המשתנים ששימשו כמועמדים הסופיים להתאמת המודלים המסבירים היו כמוצג להלן. רשימת המועמדים הסופיים נקבעה לכל אחד מהמשתנים התלויים - סוגי התאונות בניתוח.

א. COL5 - התנגשויות בין כלי רכב

כמשתנים המועמדים למסבירים נבחרו: rh_min , $lane_w$, sh_to_w , ss_max , דהיינו רדיוס אופקי מזערי, רוחב נתיב, רוחב שול, שיפוע צד מרבי, כאשר

עבור ss_max נוצרו שני משתנים: 1 - בהינתן $rh_min > 300$ מ', 2 - בהינתן rh_min אחר.

ב. SNG5 - תאונות רכב יחיד

כמשתנים המועמדים למסבירים נבחרו: gr_max , ss_max , rh_min , $rside_est$, sh_to_w , $lane_w$, דהיינו רוחב נתיב, רוחב שול, מצב משוקלל של צדי הדרך, רדיוס אופקי מזערי, שיפוע צד מרבי, שיפוע אורכי מרבי, כאשר

עבור ss_max נוצרו שני משתנים: 1 - בהינתן $rh_min > 300$ מ', 2 - בהינתן rh_min אחר.

ג. TDS5 - תאונות חמורות

כמשתנים המועמדים למסבירים נבחרו: gr_max , ss_max , $rside_est$, rh_min , sh_to_w , $lane_w$, דהיינו רוחב נתיב, רוחב שול, רדיוס אופקי מזערי, מצב משוקלל של צדי הדרך, שיפוע צד מרבי, שיפוע אורכי מרבי, כאשר

עבור ss_max נוצרו שני משתנים: 1 - בהינתן $rh_min > 300$ מ', 2 - בהינתן rh_min אחר;

עבור $rside_est$ נוצרו שני משתנים: 1 - בהינתן $bar_est = 2$, כאשר $bar_est = 0$ (חסר).

ד. TDT5 - סך התאונות עם נפגעים

כמשתנים המועמדים למסבירים נבחרו: gr_max , ss_max , rh_min , sh_to_w , $lane_w$, דהיינו רוחב נתיב, רוחב שול, רדיוס אופקי מזערי, שיפוע צד מרבי, שיפוע אורכי מרבי, כאשר

עבור ss_max נוצרו שני משתנים: 1 - בהינתן $rh_min > 300$ מ', 2 - בהינתן rh_min אחר.

ה. ALL5 - סך התאונות

כמשתנים המועמדים למסבירים נבחרו: gr_max , ss_max , rh_min , sh_to_w , $lane_w$, דהיינו רוחב נתיב, רוחב שול, רדיוס אופקי מזערי, שיפוע צד מרבי, שיפוע אורכי מרבי, כאשר

עבור ss_max נוצרו שני משתנים: 1 - בהינתן $rh_min > 300$ מ', 2 - בהינתן rh_min אחר.

3.2. פיתוח המודלים

3.2.1. שיטת הניתוח

כללי

לבחינת הקשר בין מאפייני הדרכים לבין התרחשות התאונות מקובל להתאים מודל סטטיסטי רב-משתני הקרוי פונקציית ביצוע בטיחותי (SPF – safety performance function). מודל כזה אומד את מספר התאונות הצפוי בקטע לפי כמות התנועה, סוג הדרך ומאפייני דרך נוספים. צורת המודל הטיפוסי לתיאור הקשר בין מספר התאונות הצפוי בקטע דרך לבין נפח התנועה ומאפייני דרך נוספים היא (Maycock and Summersgill, 1995):

$$E\{ACC\} = \alpha(LEN)(ADT)^\gamma \exp \sum [\beta_i v_{ij}]$$

כאשר:

$E\{ACC\}$ – תוחלת מספר התאונות בקטע דרך (מספר תאונות ליחידת זמן),

ADT – נפח תנועה יומי ממוצע, כלי רכב,

LEN – אורך הקטע,

V_{ij} – מאפייני הדרך,

α, β, γ – מקדמי המודל.

לדוגמא, מודלים מסבירים שהותאמו לקטעי דרכים לא עירוניות דו-נתיביות בארה"ב וקנדה כוללים משתנים מסבירים אלה (NCHRP 295, 2001): נפח התנועה, רוחב נתיב, רוחב שול, הימצאות סכנות בצדי הדרך, עקמומיות ושיפועים, צפיפות הכניסות ליחידת אורך, סוג המיסעה.

לפיתוח המודלים המסבירים משמשות משפחות מודלים מסוג Generalized Linear Mixed Models. מודלים מסוג זה מטופלים בפרוצדורות GENMOD ו-GLIMMIX של SAS, כאשר בשלב מקדים לפיתוח המודלים נעשות בדיקות מרובות של הנתונים, על מנת לנטרל תופעות אקראיות ולזהות קשרים יציבים בין המשתנים המסבירים (מאפייני הדרכים) לבין מספרי התאונות. כמו כן, לבחירת משתנים מסבירים מתוך משתנים מסבירים אפשריים משמשות שיטות המבוססות על עצי החלטה, כגון GBM, כפי שתואר בפרק 3.1. שימוש בשיטות אלה מאפשר ללמוד על אינטראקציות אפשריות בין משתנים מסבירים, כאשר קריטריון הבחירה בין משתנים הינו על-פי יכולת הניבוי שלהם.

בחירת משתנים מסבירים במחקר הנוכחי

לבחירת המשתנים המסבירים, במחקר זה שימשה גישה המוצגת, לדוגמא, במחקר של Fitzpatrick, Lord, and Park (2008). במחקרם, בחנו החוקרים מספר משתנים כמסבירים במודלים של תאונות. הם בחנו את המשתנים, שילובים שלהם (לא כל המשתנים יכולים להופיע בו זמנית בשל הקשרים החזקים ביניהם), והסירו את המשתנים הלא מובהקים. הבחירה בין מודלים הייתה הן לפי טיב התאמה והן לפי ההגיוניות שלו. כלומר, הרכב המשתנים במודל וכיוון השפעתם הגיוניים. נציין כאן שייתכן לקבל השפעות לא בכיוון ההגיוני של משתנים, בשל העובדה

שמשנתנים אלה קשורים למשתנים אחרים והכיוונים ההפוכים הינם תוצאה של מולטיקולינאריות עם משתנים אחרים, או שהם כוללים השפעות של משתנים אחרים שלא נכנסו למודל או שכלל לא נמדדו.

בעבודה זאת אנו השתמשנו במשתנים שנבחרו על-ידי בחינות סטטיסטיות (כגון GMB) כבעלי חשיבות, כמועמדים למודלים בנוכחות נפח התנועה, אך גם שמרנו בין המועמדים משתנים נוספים שלהם צפויה השפעה על תאונות, ע"פ שיקולים הנדסיים.

במקרה של חוסר לינאריות של תרומת המשתנה המסביר, אנו חיפשנו טרנספורמציה שתאפשר התאמת מודל לינארי או לינארי למקוטעין. כמו כן, כפי שצוין לעיל, המודלים הותאמו לנתונים לאחר הוצאת ערכים קיצוניים של המשתנים המסבירים.

התאמת המודלים

לכל סוג תאונות, תחילה הותאם מודל לא פרמטרי (מודל חלק) ולאחר מכן, הותאם מודל פרמטרי. בהתאמת המודל הפרמטרי, תחילה הורץ מודל פרמטרי של רגרסיה בינומית שלילית, עם מספר התאונות בחמש שנים כמשתנה תלוי, לוג אורך קטע כמשתנה אופסט וכל המשתנים הנבחרים כמשתנים מסבירים. לשם חישוב אמדי המודל השתמשנו בפונקציה glm.nb, גרסה 7.3-14, מתוך ספריית MASS של R (Venables & Ripley, 2002).

לאחר מכן, נעשתה בחירת המשתנים על-ידי הפונקציה stepAIC מתוך אותה ספריית MASS. חישובי השיפועים המצריכים חיבור של מקדמי המודל נעשו באמצעות פונקציה estimable מתוך ספריית gsmodels של R (Warnes, 2011).

המשתנים המסבירים שנשמרו במודלים, לרוב, היו ברמת מובהקות גבוהה ($p < 0.05$), כאשר עבור משתנים מסוימים - המאפיינים הגיאומטריים עם חשיבות גבוהה ע"פ השיקול ההנדסי, שימשו רמות מובהקות ליברליות יותר, של 10% ואף 20%. זאת, בהתחשב בכלל שמקובל בספרות לגבי שמירת הקשר שבין המאפיינים התחבורתיים לתאונות.

3.2.2. המודלים שהותאמו במחקר לקשר בין מאפייני הקטעים והתרחשות התאונות

המודלים שמוצגים להלן מראים, לכל סוג תאונות, את המודל החלק שהותאם למשתנים המסבירים (והמדגים את צורת הקשר בין המסביר והתלוי) ואת המודל הפרמטרי הסופי, לאחר בחירת המשתנים לפי הערך המינימאלי של קריטריון AIC (Akaike information criterion). כאמור, המודלים הותאמו **למספר התאונות בחמש שנים** כמשתנה תלוי (כאשר לוג אורך קטע משמש כמשתנה אופסט).

(1) המודל עבור התנגשויות בין כלי רכב בקטע דרך - COL5

המודל החלק שהותאם לנתונים הראה כי על סוג תאונות זה לא נמצאה השפעה של רוחב נתיב. לעומת זאת, כן נמצאה השפעה של רוחב שול, כאשר צורת הקשר בין משתנה זה והתאונות משתנה ליד הערך 2.75 מ' של רוחב שול. כמו כן, ניתן להבחין בקשר שלילי בין (לוגריתם) רדיוס אופקי מזערי לבין התאונות וכן, בקשר שלילי בין (שורש ריבוע מ-) שיפוע צד מרבי לבין התאונות בהינתן רדיוס אופקי קטן (עד 300 מ').

מודל פרמטרי סופי שהותאם לנתוני התנגשויות בין כלי רכב - COL5 - הינו :

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	-3.6216	1.4377	-2.519	0.01177 *
lg_x	0.4588	0.1591	2.884	0.00392 **
sh_to_w	0.3429	0.1428	2.401	0.01636 *
pmax(sh_to_w - 2.75, 0)	-1.0263	0.7014	-1.463	0.14344
log(rh_min)	-0.1746	0.1049	-1.664	0.09605 .
sqrt(ss_max)	0.1734	0.3548	0.489	0.62504
I_LT_300	1.9804	1.1513	1.720	0.08540 .
sqrt(ss_max):I_LT_300	-0.8257	0.5142	-1.606	0.10836

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for Negative Binomial(0.3802) family taken to be 1)

משמעויות המודל עבור התנגשויות בין כלי רכב בקטע דרך:

- משתנים המשפיעים על תאונות התנגשות בקטע דרך דלת תנועה הם נפח התנועה, רוחב שול, רדיוס אופקי מזערי, שיפוע צד מרבי;

- מספר התאונות בקטע עולה עם עליה בנפח התנועה;

- לגבי השפעת רוחב שול, מספר התאונות עולה עם הגדלת רוחב שול עד 2.75 מ', כאשר עם הרחבת רוחב שול מעל 2.75 מ' מספר התאונות יורד;

- מספר התאונות יורד עם עליה ברדיוס אופקי מזערי;

- מספר התאונות עולה עם עליה בשיפוע צד מרבי כאשר רדיוס אופקי מזערי גדול מ-300 מ' ($I_{LT_{300}=0}$). לעומת זאת, כאשר רדיוס אופקי מזערי קטן מ-300 מ' ($I_{LT_{300}=1}$), מספר התאונות יורד עם עליה בשיפוע צד מרבי, מה שמסקף את ההשפעה החיובית של הגבהה צדית בעקומים.

טבלה 3.4 מסכמת את שיפועי המודל⁶ אשר מבטאים את הקשר בין שינוי במאפייני הקטע לבין שינוי במספר התאונות.

⁶ ממצאים של simple-slope analysis

טבלה 3.4. השפעת מאפייני הקטע על תאונות התנגשות בין כלי הרכב - COL5*

Table 3.4. Effects of road section characteristics on multiple-vehicles collisions

מקדם השפעה - slope, (רמת מובהקות p-value)	צורת המשתנה, תנאי נוסף אם רלוונטי	משתנה מסביר
0.46 (p<0.005)	lg_x כאשר x=100*AADT	נפח תנועה יומי - AADT, אלף כלי רכב
0.34 (p<0.02)	,sh_to_w כאשר sh_to_w<=2.75	רוחב שול ממוצע, מ'
-0.68 (p=0.28)	,sh_to_w כאשר sh_to_w>2.75	רוחב שול ממוצע, מ'
-0.175 (p=0.096)	log(rh_min)	רדיוס אופקי מזערי, מ'
0.17 (p=0.62)	sqrt(ss_max) כאשר רדיוס אופקי מזערי 300 מ' או גדול (I_LT_300=0) יותר	שיפוע צד מרבי, %
-0.65 (p=0.076)	sqrt(ss_max) כאשר רדיוס אופקי מזערי קטן מ-300 מ'	שיפוע צד מרבי, %

* לוגריתם מספר תאונות בחמש שנים

(2) המודל עבור תאונות רכב יחיד בקטע דרך - SNG5

המודל החלק שהותאם לנתונים הראה כי על סוג תאונות זה נמצאה השפעה של רוחב נתיב, כאשר צורת הקשר בין משתנה זה והתאונות משתנה ליד הערך 3.25 מ' של רוחב נתיב. כמו כן, נמצאה השפעה של רוחב שול, כאשר צורת הקשר בין משתנה זה והתאונות משתנה ליד הערך 2 מ' של רוחב שול. בנוסף, ניתן להבחין בקשר שלילי בין (לוגריתם) רדיוס אופקי מזערי לבין התאונות וכן, בקשר שלילי קל בין (לוגריתם) הציון המשוקלל של מצב צדי הדרך לבין התאונות.

מודל פרמטרי סופי שהותאם לנתוני תאונות רכב יחיד - SNG5 - הינו:

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)							
(Intercept)	-2.23042	1.40450	-1.588	0.11228							
lg_x	0.28897	0.16626	1.738	0.08221 .							
sh_to_w	0.66736	0.21405	3.118	0.00182 **							
pmax(sh_to_w - 2, 0)	-1.33726	0.43456	-3.077	0.00209 **							
log(rh_min)	-0.13173	0.06584	-2.001	0.04542 *							
log(inside_est)	-0.06791	0.32950	-0.206	0.83671							
lane_w	-0.35427	0.36959	-0.959	0.33779							
pmax(lane_w - 3.25, 0)	0.64748	0.90444	0.716	0.47406							

Signif. codes:	0	'***'	0.001	'**'	0.01	'*'	0.05	'.'	0.1	' '	1

(Dispersion parameter for Negative Binomial(0.6553) family taken to be 1)

משמעויות המודל עבור תאונות רכב יחיד בקטע דרך:

- משתנים המשפיעים על תאונות רכב יחיד בקטע דרך דלת תנועה הם נפח התנועה, רוחב שול, רדיוס אופקי מזערי, מצב צדי הדרך, רוחב נתיב;
- מספר התאונות בקטע עולה עם עליה בנפח התנועה;

- לגבי השפעת רוחב שול, מספר התאונות עולה עם הגדלת רוחב שול עד 2 מ', כאשר עם הרחבת רוחב שול מעל 2 מ' מספר התאונות יורד ;

- מספר התאונות יורד עם עליה ברדיוס אופקי מזערי ;

- מספר התאונות יורד עם עליה בציון המשוקלל של מצב צדי הדרך, אם כי ההשפעה היא קטנה ;

- לגבי השפעת רוחב נתיב, מספר התאונות יורד עם הגדלת רוחב נתיב עד 3.25 מ', כאשר עם הרחבת רוחב נתיב מעל 3.25 מ' מספר התאונות עולה.

השפעת המשתנים של מצב צדי הדרך ורוחב נתיב אינה מובהקת אך הם נשמרו במודל עקב חשיבותם ההנדסית. באופן כללי, מובהקות המשתנים המסבירים במודל SNG5 נמוכה יותר לעומת יתר המודלים בשל המספר הנמוך יחסית של נתוני התאונות ששימשו לניתוח.

טבלה 3.5 מסכמת את שיפועי המודל אשר מבטאים את הקשר בין שינוי במאפייני הקטע לבין שינוי במספר התאונות.

טבלה 3.5. השפעת מאפייני הקטע על תאונות רכב יחיד - SNG5*

Table 3.5. Effects of road section characteristics on single-vehicle accidents

מקדם השפעה - slope, (p-value רמת מובהקות)	צורת המשתנה, תנאי נוסף אם רלוונטי	משתנה מסביר
0.29 (p=0.082)	lg_x כאשר $x=100*AADT$	נפח תנועה יומי - AADT, אלף כלי רכב
0.67 (p<0.002)	sh_to_w כאשר $sh_to_w \leq 2$	רוחב שול ממוצע, מ'
-0.67 (p<0.05)	sh_to_w כאשר $sh_to_w > 2$	רוחב שול ממוצע, מ'
-0.35 (p=0.34)	lane_w כאשר $lane_w \leq 3.25$	רוחב נתיב ממוצע, מ'
0.29 (p=0.66)	lane_w כאשר $lane_w > 3.25$	רוחב נתיב ממוצע, מ'
-0.13 (p<0.05)	log(rh_min)	רדיוס אופקי מזערי, מ'
-0.068 (p=0.84)	log(inside_est)	ציון משוקלל של צדי הדרך

* לוגריתם מספר תאונות בחמש שנים

(3) המודל עבור תאונות חמורות בקטע דרך - TDS5

המודל החלק שהותאם לנתונים הראה כי מספר התאונות יורד עם הגדלת רוחב נתיב. כמו כן, קיימת השפעה של רוחב שול, כאשר צורת הקשר בין משתנה זה והתאונות משתנה ליד הערך 2.5 מ' של רוחב שול. לגבי יתר המשתנים: רדיוס אופקי מזערי, שיפוע צד מרבי, מצב צדי הדרך - הקווים קרובים לאופקיים ומצביעים על אי-תלות בין מאפיינים אלה לבין התאונות.

מודל פרמטרי סופי שהותאם לנתוני התאונות החמורות - TDS5 - הינו :

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	-2.2205	1.2328	-1.801	0.07166 .
lg_x	0.1041	0.1856	0.561	0.57499
sh_to_w	0.5195	0.1802	2.883	0.00394 **
pmax(sh_to_w - 2.5, 0)	-1.3346	0.6636	-2.011	0.04430 *
lane_w	-0.3461	0.2694	-1.285	0.19890

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for Negative Binomial(0.4215) family taken to be 1)

משמעויות המודל עבור תאונות חמורות בקטע דרך:

- משתנים המשפיעים על תאונות חמורות בקטע דרך דלת תנועה הם נפח התנועה, רוחב שול, רוחב נתיב;

- מספר התאונות בקטע עולה עם עליה בנפח התנועה;

- לגבי השפעת רוחב שול, מספר התאונות עולה עם הגדלת רוחב שול עד 2.5 מ', כאשר עם הרחבת רוחב שול מעל 2.5 מ' מספר התאונות יורד;

- מספר התאונות יורד עם עליה ברוחב נתיב.

גם במודל זה, בדומה למודל עבור SNG5, מובהקות המשתנים המסבירים במודל נמוכה יותר לעומת יתר המודלים בשל המספר הנמוך יחסית של נתוני התאונות ששימשו לניתוח.

טבלה 3.6 מסכמת את שיפועי המודל אשר מבטאים את הקשר בין שינוי במאפייני הקטע לבין שינוי במספר התאונות.

טבלה 3.6. השפעת מאפייני הקטע על התאונות החמורות - *TDS5

Table 3.6. Effects of road section characteristics on severe accidents

מקדם השפעה - slope, (p-value רמת מובהקות)	צורת המשתנה, תנאי נוסף אם רלוונטי	משתנה מסביר
0.104 (p=0.57)	lg_x כאשר x=100*AADT	נפח תנועה יומי - AADT, אלף כלי רכב
0.52 (p<0.005)	,sh_to_w כאשר sh_to_w<=2.5	רוחב שול ממוצע, מ'
-0.815 (p=0.15)	,sh_to_w כאשר sh_to_w>2.5	רוחב שול ממוצע, מ'
-0.346 (p=0.20)	lane_w	רוחב נתיב ממוצע, מ'

* לוגריתם מספר תאונות בחמש שנים

(4) המודל עבור תאונות עם נפגעים בקטע דרך - TDT5

המודל החלק שהותאם לנתונים הראה כי על סוג תאונות זה לא נמצאה השפעה של רוחב נתיב ושל שיפוע לאורך. לעומת זאת, כן נמצאה השפעה של רוחב שול, כאשר צורת הקשר בין משתנה זה והתאונות משתנה ליד הערך 2.5 מ' של רוחב שול. כמו כן, ניתן להבחין בקשר שלילי בין (לוגריתם) רדיוס אופקי מזערי לבין התאונות וכן, בקשר שלילי בין (שורש ריבוע מ-) שיפוע צד מרבי לבין התאונות בהינתן רדיוס אופקי קטן (עד 300 מ').

מודל פרמטרי סופי שהותאם לנתוני התאונות עם נפגעים - TDT5 - הינו:

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	-2.67023	1.20524	-2.216	0.0267 *
lg_x	0.32069	0.12517	2.562	0.0104 *

lane_w	-0.09385	0.18511	-0.507	0.6122	
sh_to_w	0.41261	0.12642	3.264	0.0011	**
pmax(sh_to_w - 2.5, 0)	-1.10848	0.43830	-2.529	0.0114	*
log(rh_min)	-0.12029	0.08245	-1.459	0.1446	
sqrt(ss_max)	0.31394	0.28094	1.117	0.2638	
I_LT_300	2.04287	0.93554	2.184	0.0290	*
sqrt(ss_max):I_LT_300	-0.91520	0.41758	-2.192	0.0284	*

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

(Dispersion parameter for Negative Binomial(0.4824) family taken to be 1)

משמעויות המודל שהותאם עבור תאונות עם נפגעים בקטע דרך:

- משתנים המשפיעים על תאונות עם נפגעים בקטע דרך דלת תנועה הם נפח התנועה, רוחב נתיב, רוחב שול, רדיוס אופקי מזערי, שיפוע צד מרבי;

- מספר התאונות בקטע עולה עם עליה בנפח התנועה;

- מספר התאונות יורד עם עליה ברוחב נתיב, אם כי ההשפעה קטנה יחסית;

- לגבי השפעת רוחב שול, מספר התאונות עולה עם הגדלת רוחב שול עד 2.5 מ', כאשר עם הרחבת רוחב שול מעל 2.5 מ' מספר התאונות יורד;

- מספר התאונות יורד עם עליה ברדיוס אופקי מזערי;

- מספר התאונות עולה עם עליה בשיפוע צד מרבי כאשר רדיוס אופקי מזערי גדול מ-300 מ' ($I_{LT_{300}=0}$). לעומת זאת, כאשר רדיוס אופקי מזערי קטן מ-300 מ' ($I_{LT_{300}=1}$), מספר התאונות יורד עם עליה בשיפוע צד מרבי, מה שמשקף את ההשפעה החיובית של הגבהה צדית בעקומים.

סה"כ, המשתנים המשפיעים במודל זה - עבור סך התאונות עם נפגעים - דומים למשתנים המשפיעים במודל COL5, פרט למשתנה רוחב נתיב שלא היה במודל עבור ההתנגשויות בלבד (COL5).

טבלה 3.7 מסכמת את שיפועי המודל אשר מבטאים את הקשר בין שינוי במאפייני הקטע לבין שינוי במספר התאונות.

טבלה 3.7. השפעת מאפייני הקטע על תאונות עם נפגעים - TDT5*

Table 3.7. Effects of road section characteristics on injury accidents

מקדם השפעה - slope, (רמת מובהקות p-value)	צורת המשתנה, תנאי נוסף אם רלוונטי	משתנה מסביר
0.32 (p<0.02)	lg_x כאשר x=100*AADT	נפח תנועה יומי - AADT, אלף כלי רכב
-0.094 (p=0.61)	lane_w	רוחב נתיב ממוצע, מ'י
0.41 (p<0.002)	sh_to_w כאשר sh_to_w<=2.5	רוחב שול ממוצע, מ'י
-0.70 (p=0.064)	sh_to_w כאשר sh_to_w>2.5	רוחב שול ממוצע, מ'י
-0.12 (p=0.14)	log(rh_min)	רדיוס אופקי מזערי, מ'י
0.31 (p=0.26)	sqrt(ss_max) כאשר רדיוס אופקי מזערי 300 מ'י או גדול (I_LT_300=0) יותר	שיפוע צד מרבי, %
-0.60 (p=0.052)	sqrt(ss_max) כאשר רדיוס אופקי מזערי קטן מ-300 מ'י (I_LT_300=1)	שיפוע צד מרבי, %

* לוגריתם מספר תאונות בחמש שנים

ALL5 - המודל עבור סך התאונות בקטע דרך

המודל החלק שהותאם לנתונים הראה כי על סוג תאונות זה נמצאה השפעה של רוחב נתיב, כאשר צורת הקשר בין משתנה זה והתאונות משתנה ליד הערך 3 מ'י של רוחב נתיב. כמו כן, נמצאה השפעה של רוחב שול, כאשר צורת הקשר בין משתנה זה והתאונות משתנה ליד הערך 2 מ'י של רוחב שול. לעומת זאת, על סך התאונות לא נמצאה השפעה של רדיוס אופקי מזערי. בנוסף, ניתן להבחין בקשר חיובי בין (שורש ריבוע מ-) שיפוע מרבי לאורך לבין התאונות וכן, בקשר שלילי בין (שורש ריבוע מ-) שיפוע צד מרבי לבין התאונות בהינתן רדיוס אופקי קטן (עד 300 מ').

מודל פרמטרי סופי שהותאם לנתוני סך התאונות - ALL5 - הינו:

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	-0.39608	0.94556	-0.419	0.675299
lg_x	0.35138	0.08885	3.955	7.66e-05 ***
lane_w	-0.91520	0.28535	-3.207	0.001340 **
pmax(lane_w - 3, 0)	1.06313	0.42510	2.501	0.012388 *
sh_to_w	0.39956	0.11306	3.534	0.000409 ***
pmax(sh_to_w - 2, 0)	-1.00725	0.22767	-4.424	9.68e-06 ***
sqrt(gr_max)	0.17516	0.08200	2.136	0.032673 *
sqrt(ss_max)	0.32357	0.17862	1.811	0.070074 .
I_LT_300	1.35241	0.62228	2.173	0.029758 *
sqrt(ss_max):I_LT_300	-0.63424	0.28856	-2.198	0.027952 *

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for Negative Binomial(0.6662) family taken to be 1)

משמעויות המודל שהותאם עבור סך התאונות בקטע דרך:

- משתנים המשפיעים על סך התאונות בקטע דרך דלת תנועה הם נפח התנועה, רוחב נתיב, רוחב שול, שיפור אורך מרבי, שיפוע צד מרבי;

- מספר התאונות בקטע עולה עם עליה בנפח התנועה;

- לגבי השפעת רוחב נתיב, מספר התאונות יורד עם הגדלת רוחב נתיב עד 3 מ', כאשר עם הרחבת רוחב נתיב מעל 3 מ' מספר התאונות עולה;

- לגבי השפעת רוחב שול, מספר התאונות עולה עם הגדלת רוחב שול עד 2 מ', כאשר עם הרחבת רוחב שול מעל 2 מ' מספר התאונות יורד;

- מספר התאונות עולה עם עליה בשיפוע אורך מרבי;

- מספר התאונות עולה עם עליה בשיפוע צד מרבי כאשר רדיוס אופקי מזערי גדול מ-300 מ' ($I_{LT_300=0}$). לעומת זאת, כאשר רדיוס אופקי מזערי קטן מ-300 מ' ($I_{LT_300=1}$), מספר התאונות יורד עם עליה בשיפוע צד מרבי, מה שמשקף את ההשפעה החיובית של הגבהה צדית בעקומים.

רוב המשתנים המשפיעים במודל זה - עבור סך התאונות - דומה למשתנים המשפיעים שנמצאו במודלים עבור התנגשויות כלי רכב (COL5) ועבור תאונות עם נפגעים (TDT5), אם כי, יש הבדלים בהשפעות מאפיינים בודדים כגון: רוחב נתיב, רדיוס אופקי, שיפוע אורכי.

טבלה 3.8 מסכמת את שיפועי המודל אשר מבטאים את הקשר בין שינוי במאפייני הקטע לבין שינוי במספר התאונות.

טבלה 3.8. השפעת מאפייני הקטע על סך התאונות - ALL5*

Table 3.8. Effects of road section characteristics on total accidents

מקדם השפעה - slope, (רמת מובהקות p-value)	צורת המשתנה, תנאי נוסף אם רלוונטי	משתנה מסביר
0.35 (p<0.001)	lg_x כאשר $x=100*AADT$	נפח תנועה יומי - AADT, אלף כלי רכב
-0.915 (p<0.002)	lane_w כאשר $lane_w \leq 3$	רוחב נתיב ממוצע, מ'
0.148 (p=0.49)	lane_w כאשר $lane_w > 3$	רוחב נתיב ממוצע, מ'
0.40 (p<0.001)	sh_to_w כאשר $sh_to_w \leq 2$	רוחב שול ממוצע, מ'
-0.61 (p<0.001)	sh_to_w כאשר $sh_to_w > 2$	רוחב שול ממוצע, מ'
0.175 (p<0.05)	sqrt(gr_max)	שיפוע אורך מרבי, %
0.32 (p=0.07)	sqrt(ss_max) כאשר רדיוס אופקי מזערי 300 מ' או גדול יותר ($I_{LT_300=0}$)	שיפוע צד מרבי, %
-0.31 (p=0.17)	sqrt(ss_max) כאשר רדיוס אופקי מזערי קטן מ-300 מ' ($I_{LT_300=1}$)	שיפוע צד מרבי, %

* לוגריתם מספר תאונות בחמש שנים

4. שימוש במודלים שפותחו במחקר לבחינת השפעת מאפייני תשתית על שכיחות התאונות

פרק זה מציג את המשמעויות ההנדסיות שניתן להפיק מהמודלים שפותחו במחקר - בחינת הקשרים בין המאפיינים הגיאומטריים של דרכים דלות התנועה לבין מספר התאונות הצפוי בקטע. בחינה זו אפשרית בעזרת כלים אלה:

* הצגת קשרים כמותיים בין כל אחד מהמאפיינים הגיאומטריים של קטעי הדרכים לבין שכיחות התאונות;

* הערכת מקדמי שינוי בתאונות שמתקשרים עם שינויים במאפיינים הגיאומטריים של קטע דרך.

ידע כמותי זה לגבי השינוי הצפוי בתאונות, בעקבות שינוי במאפיין הגיאומטרי, עשוי לסייע בעת קבלת ההחלטות בשלבי תכנון של דרך חדשה או שיפור קטע דרך קיים/ טיפול באתר תורפה.

פרק 4.1 מציג בקצרה את הרקע התיאורטי ליצירת הכלים הכמותיים לשימוש ההנדסי (על סמך המודלים שפותחו). בהמשך, פרקים 4.2-4.6 מציגים את הכלים הכמותיים שנבנו עבור כל אחד מחמשת סוגי התאונות שנותחו במחקר. פרק 4.7 מציג סיכום להשפעת מאפייני התשתית על תאונות הדרכים, אשר נלמד על סמך כל סוגי התאונות ביחד. פרק 4.8 מביא דוגמאות לשימוש במודלים בהערכה פרטנית של קטע דרך מסוים: השינוי הצפוי בתאונות בעקבות שינויים במאפייני תשתית שונים.

4.1. כללי

במחקר זה פותחו מודלים מסבירים לקשר בין המאפיינים הגיאומטריים של דרכים דלות תנועה לבין מספר תאונות צפוי בקטע דרך. המודלים פותחו עבור חמישה סוגי תאונות שהם:

א. התנגשויות בין כלי רכב (6 סוגים ביחד, "ת"ד" בלבד) -

משתנים המשפיעים על תאונות התנגשות הם רוחב שול, רדיוס אופקי מזערי, שיפוע צד מרבי, נפח התנועה ואורך קטע.

ב. תאונות רכב יחיד (6 סוגים ביחד, "ת"ד" בלבד) -

משתנים המשפיעים על תאונות רכב יחיד הם רוחב שול, רדיוס אופקי מזערי, מצב צדי הדרך, רוחב נתיב, נפח התנועה ואורך קטע.

ג. תאונות חמורות (קשות וקטלניות ביחד) -

משתנים המשפיעים על תאונות חמורות הם רוחב שול, רוחב נתיב, נפח התנועה ואורך קטע.

ד. סך התאונות עם נפגעים (כל התאונות "ת"ד") -

משתנים המשפיעים על תאונות עם נפגעים הם רוחב נתיב, רוחב שול, רדיוס אופקי מזערי, שיפוע צד מרבי, נפח התנועה ואורך קטע.

ה. סך התאונות ("ת"ד" ו"כללי עם נפגעים" ביחד) -

משתנים המשפיעים על סך התאונות הם רוחב נתיב, רוחב שול, שיפוע אורך מרבי, שיפוע צד מרבי, נפח התנועה ואורך קטע.

כל מודל אומד את מספר התאונות הצפוי בקטע דרך בחמש שנים. (הערך השנתי הינו חמישית מהאומדן המתקבל בעזרת מודל).

המודלים שפותחו במחקר מאפשרים לבחון את הקשרים בין המאפיינים הגיאומטריים של דרכים דלות תנועה לבין מספר תאונות הצפוי בקטע, בעזרת כלים אלה :

1) הצגת קשרים כמותיים בין כל אחד מהמאפיינים הגיאומטריים שנשארו במודל המסביר לבין שכיחות התאונות.

2) הערכת מקדמי שינוי בתאונות - accident modification factor (AMF) - שמתקשרים עם שינויים במאפייני הדרך.

לפי Lord and Bonneson (2006) את ה-AMF ניתן להגדיר כלהלן :

$$[1] \quad AMF = N_{new} / N_{old}$$

כאשר

N_{new} - מספר התאונות הצפוי עם הערך החדש של המשתנה המסביר ;

N_{old} - מספר התאונות הצפוי עם הערך הישן של המשתנה המסביר.

אחוז התאונות שעומד להיחסך (בספרות האמריקנית CRF - crash reduction factor) בעקבות שינוי המשתנה המסביר מוערך כלהלן :

$$[2] \quad CRF = (1 - AMF) * 100\%$$

מכיוון שהשפעת משתנה מסביר מסוים מוערכת בתנאים ללא שינוי במשתנים המשפיעים האחרים, להערכת ערכי ה-AMF ניתן להיעזר במקדם השפעה (slope) אשר חושבו בעזרת המודלים, לכל אחד מהמשתנים המסבירים (ראה טבלאות 3.4-3.8 בפרק 3). בעזרת מקדמי ההשפעה ההערכה מבוצעת כלהלן :

$$[3] \quad AMF = \exp [slope * (value_{new} - value_{old})]$$

כאשר

slope - מקדם השפעה של המאפיין הנבחן ;

$value_{new}$ - הערך החדש של המאפיין הנבחן ;

$value_{old}$ - הערך הישן של המאפיין הנבחן.

במקרה כאשר בהשפעת המאפיין ישנה "נקודת שבירה" (לדוגמא, במודל עבור סך התאונות עם נפגעים, הגדלת רוחב שול עד 2.5 מ' מתקשרת עם עליה בתאונות, בעוד שהגדלת רוחב שול מעבר לערך זה מתקשרת עם ירידה בתאונות) וחישוב ה-AMF מבוצע לטווח שינוי רחב של המאפיין אשר חוצה את נקודת השבירה, אזי להערכת ה-AMF קיימות שתי דרכים : (א) להזין את מלוא נוסחת המודל לנוסחה [1] לעיל, או (ב) בנוסחה [3] לעיל לבצע הכפלה של שני ערכים : AMF האחד עבור

שינוי המאפיין מהערך הקטן הישן עד לנקודת השבירה, ו-AMF השני עבור שינוי המאפיין מנקודת השבירה עד לערך החדש הגדול.

כמו כן, בעת הזנת הנתונים לחישוב יש לשים לב לצורת המשתנה במודל: לוגריתם, שורש ריבוע או ערך ישיר.

כל החישובים הני"ל של ערכי AMF בוצעו עבור כל אחד מהמשתנים המסבירים של חמשת המודלים שפותחו במחקר. כמו כן, נערכו חישובים להדגמה הגרפית של הקשרים הכמותיים בין כל אחד מהמאפיינים הגיאומטריים של המודלים המסבירים לבין שכיחות התאונות. ההצגה הגרפית של הקשרים נערכה בשני אופנים:

(א) הקשר בין ערכי מאפיין מסוים לבין שכיחות התאונות מוצג בעזרת שני גרפים אשר נוצרו בעקבות חישוב שני מקרים לדוגמא, עם ערכים מסוימים של יתר מאפייני הקטעים;

(ב) צורת הקשר בין ערכי מאפיין מסוים לבין שכיחות התאונות מוצגת בשיטת ה"כופל", כאשר לכל שינוי בערך המאפיין מוצג השינוי היחסי בשכיחות התאונות לעומת ערך מסוים של אותו המאפיין שנבחר כבסיס החישוב ושעברו ערך הכופל שווה 1.

להצגת הממצאים בשיטת ה"כופל" נבחרו ערכים טיפוסיים של מאפייני הקטעים - ערכי הבסיס, כלהלן: רוחב נתיב 2.8 מ'; רוחב שול 2 מ'; ציון משוקלל של מצב צדי הדרך 1.5; רדיוס אופקי מזערי 200 מ'; שיפוע צד מרבי 4%; שיפוע אורכי מרבי 5%. כאמור, הגרפים בשיטת ה"כופל" מראים את השינוי היחסי בשכיחות התאונות כאשר ערך המאפיין משתנה לעומת ערך הבסיס.

להלן הממצאים שהתקבלו באמצעות חמשת המודלים שפותחו במחקר.

4.2. השפעת מאפייני הקטע על התנגשויות כלי רכב

המשתנים המשפיעים על תאונות התנגשות בקטע דרך דלת התנועה הם רוחב שול, רדיוס אופקי מזערי, שיפוע צד מרבי, נפח התנועה ואורך קטע. בהקשר תאונות מסוג זה יש מקום להציג השפעה של שלושה מאפיינים גיאומטריים שהם:

- רוחב שול,

- רדיוס אופקי מזערי,

- שיפוע צד מרבי.

יצוין כי, לפי המודל, צורת הקשר עם התאונות אינה רציפה עבור שני מאפייני תשתית: (א) רוחב שול, כאשר מספר התאונות עולה עם הגדלת רוחב שול עד 2.75 מ' ובהמשך יורד עם הרחבת רוחב שול מעל 2.75 מ'; (ב) שיפוע צד, כאשר מספר התאונות עולה עם עליה בשיפוע צד בתנאי רדיוס אופקי גדול מ-300 מ' ויורד עם עליה בשיפוע צד בתנאי רדיוס אופקי הקטן מ-300 מ'.

4.2.1. צורת הקשר בין המאפיינים הגיאומטריים לבין שכיחות התאונות

ציור 4.1 מביא הצגה גרפית של הקשר בין ערכי המאפיינים - רוחב שול, רדיוס אופקי, שיפוע צד, לבין שכיחות התאונות. צורת הקשר לכל מאפיין מוצגת בעזרת שני גרפים אשר נוצרו בעקבות חישוב שני מקרים לדוגמא, עם ערכים מסוימים של יתר מאפייני הקטעים; מקרים אלה מפורטים

בסמוך לציורים. נזכיר כי שכיחות התאונות בציור 4.1 הינה מספר תאונות התנגשות הצפוי בקטע דרך ב-5 שנים.

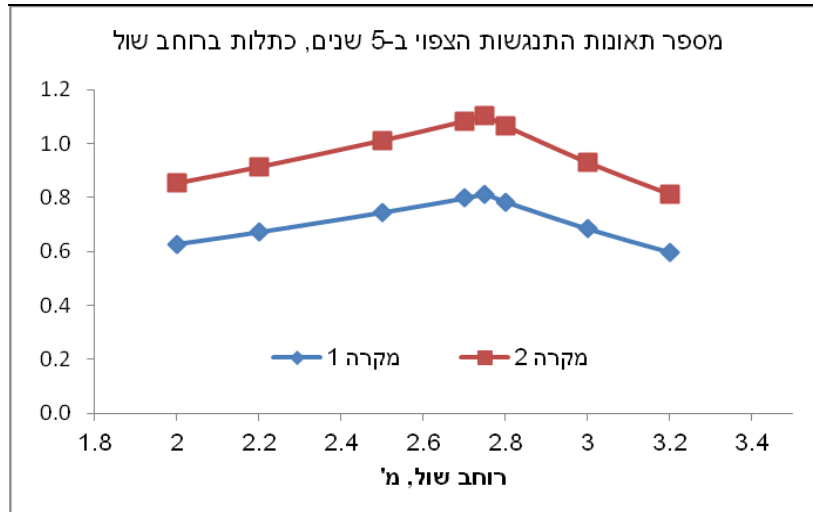
יש לשים לב שהשפעת שיפוע הצד מוצגת בציור 4.1, ג' עבור המצב עם רדיוס אופקי קטן, פחות מ-300 מ'. במצב זה, מספר התאונות יורד עם עליה בשיפוע הצד, מה שמשקף את ההשפעה החיובית של הגבהה צדית בעקומים. בהצגת הקשר עבור רדיוס אופקי הגדול מ-300 מ', תתקבל השפעה שלילית - עליה במספר התאונות עם עליה בשיפוע הצד.

ציור 4.2 מציג את צורת הקשר בין ערכי המאפיינים הגיאומטריים לבין שכיחות התאונות בשיטת ה"כופל", כאשר לשינוי בערך המאפיין מוצג השינוי היחסי בשכיחות התאונות לעומת ערך מסוים של אותו המאפיין שנבחר כבסיס החישוב ושעבורו ערך הכופל שווה 1. בציור 4.2 מוצג השינוי היחסי בתאונות התנגשות - כופל מספר התאונות, כאשר: (א) רוחב שול משתנה לעומת ערך הבסיס 2 מ'; (ב) רדיוס אופקי משתנה לעומת ערך הבסיס 200 מ'; (ג) שיפוע צד משתנה לעומת ערך הבסיס 4%.

יש לשים לב שגם בציור 4.2 השפעת שיפוע הצד מוצגת עבור המצב עם רדיוס אופקי קטן, פחות מ-300 מ', דהיינו עבור התנאים בהם עליה בשיפוע הצד מתקשרת עם ירידה במספר התאונות מה שמשקף את ההשפעה החיובית של הגבהה צדית בעקומים.

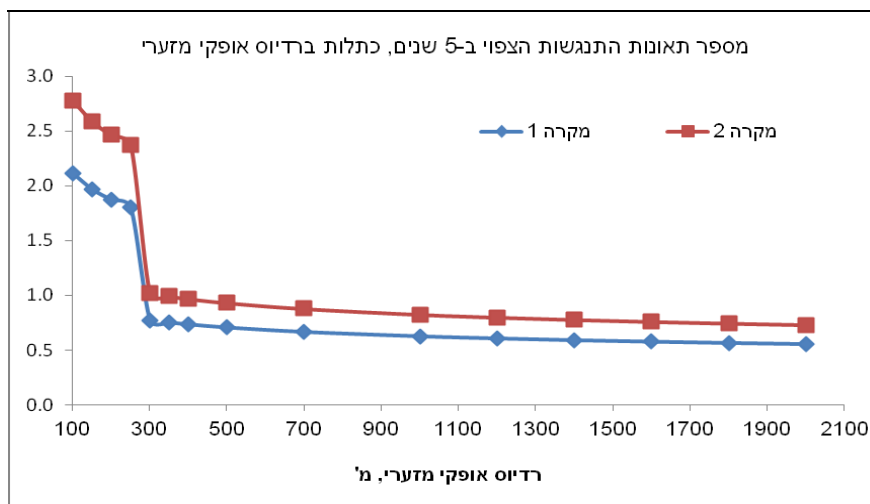
כמו כן, יש לשים לב ל"קפיצה" בצורת הקשר בין הרדיוס האופקי לבין שכיחות התאונות אשר נובעת מהשפעת שיפוע הצד: כאמור, ברדיוסים קטנים, עד 300 מ', קיים קשר חיובי בין הגדלת שיפוע הצד לבין שכיחות התאונות, בעוד שברדיוסים הגדולים, הגדלה בשיפוע הצד מביאה לתוצאה הפוכה מבחינת התאונות. הנקודה של 300 מ' ברדיוס האופקי הינה נקודת השבירה של המודל אשר מראה צורות קשר שונות בשני טווחי השינוי של הרדיוס. כמו כן, חישוב השפעת הרדיוס האופקי על שכיחות התאונות מושפע מגודל שיפוע הצד בהנחות החישוב - מה שמודגם ע"י שני הגרפים המוצגים בציור 4.2, ב'.

סה"כ, מציורים 4.1-4.2 ניתן לראות שמספר תאונות התנגשות בקטע דרך דלת תנועה עולה עם הגדלת רוחב שול עד 2.75 מ' ויורד לאחר מכן; יורד עם עליה ברדיוס האופקי; יורד עם הגדלת שיפוע צד, בהינתן רדיוס אופקי קטן.



מקרה 1 : אורך קטע 1 ק"מ; נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה; רדיוס אופקי 1000 מ'; שיפוע צד 2%.
 מקרה 2 : אורך קטע 1 ק"מ; נפח תנועה 3,000 כלי רכב ביממה; רדיוס אופקי 500 מ'; שיפוע צד 2%.

א - הקשר בין ערכי רוחב שול לבין מספר תאונות התנגשות הצפוי בקטע ב-5 שנים

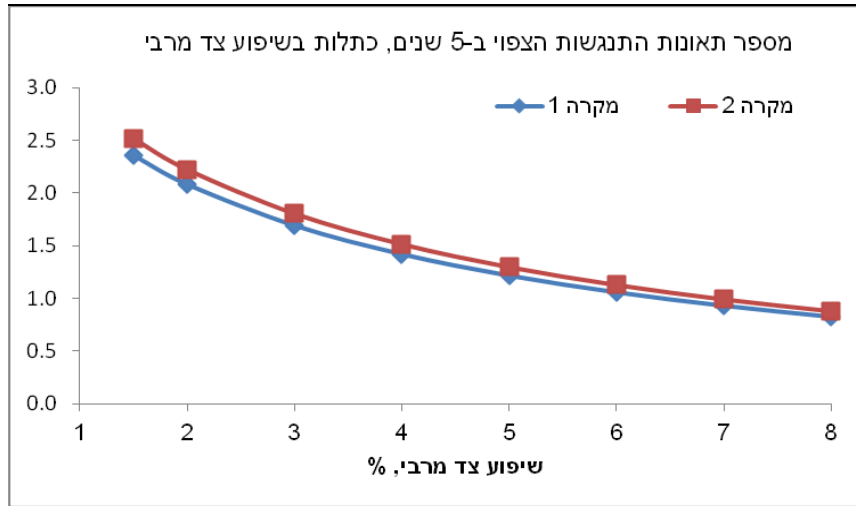


מקרה 1 : אורך קטע 1 ק"מ; נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה; רוחב שול 2.5 מ'; שיפוע צד 2%.
 מקרה 2 : אורך קטע 1 ק"מ; נפח תנועה 2,500 כלי רכב ביממה; רוחב שול 2.7 מ'; שיפוע צד 2%.

ב - הקשר בין ערכי הרדיוס האופקי לבין מספר תאונות התנגשות הצפוי בקטע ב-5 שנים

ציור 4.1. הקשר בין המאפיינים הגיאומטריים לבין מספר תאונות התנגשות הצפוי בקטע.

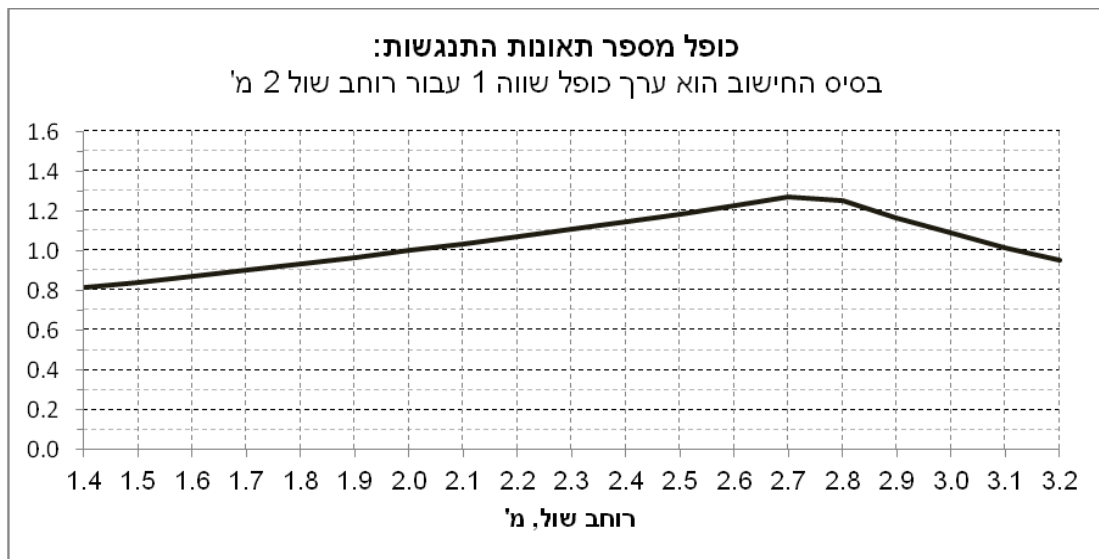
Figure 4.1. A relationship between the geometric characteristics and expected number of multiple-vehicle collisions, on a low-volume road section.



מקרה 1: אורך קטע 1 ק"מ; נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה; רוחב שול 2.5 מ'; רדיוס אופקי 290 מ'.
 מקרה 2: אורך קטע 1 ק"מ; נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה; רוחב שול 2.5 מ'; רדיוס אופקי 200 מ'.

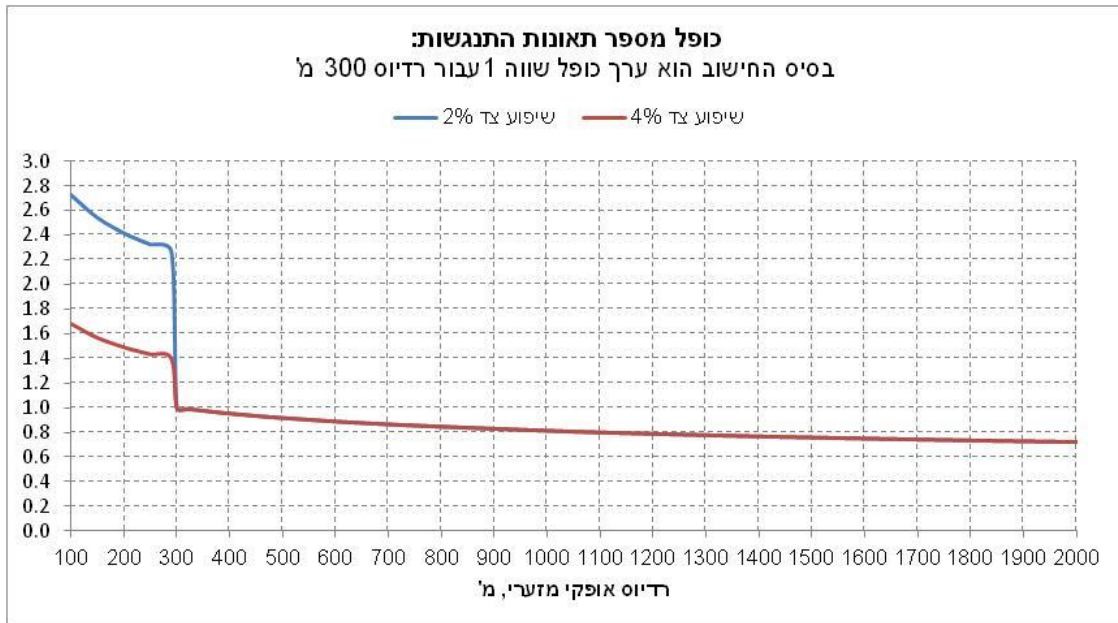
ג - הקשר בין ערכי שיפוע צד לבין מספר תאונות התנגשות הצפוי בקטע ב-5 שנים
 ציור 4.1. הקשר בין המאפיינים הגיאומטריים לבין מספר תאונות התנגשות הצפוי בקטע - המשך.

Figure 4.1 - cont.

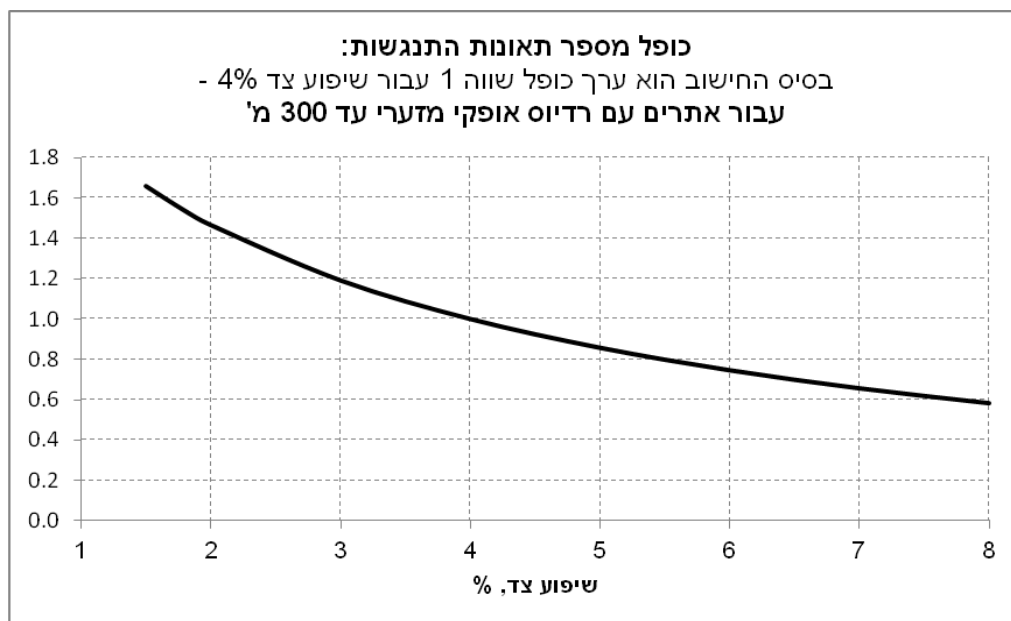


א - כופל מספר תאונות התנגשות הצפוי בקטע לעומת ערך רוחב שול
 ציור 4.2. צורת הקשר בין ערכי המאפיינים הגיאומטריים לבין מספר תאונות התנגשות הצפוי בקטע ב-5 שנים, בשיטת ה"כופל".

Figure 4.2. The form of relationship between the geometric characteristics and the number of multiple-vehicle collisions, expected in 5 years on a low-volume road section, using a "multiplier" method



ב - כופל מספר תאונות התנגשות הצפוי בקטע לעומת ערכי הרדיוס האופקי



ג - כופל מספר תאונות התנגשות הצפוי בקטע לעומת ערכי שיפוע צד

ציור 4.2. צורת הקשר בין ערכי המאפיינים הגיאומטריים לבין מספר תאונות התנגשות הצפוי בקטע ב-5 שנים, בשיטת ה"כופל" - המשך.

Figure 4.2 - cont.

4.2.2. מקדמי שינוי בתאונות הקשורים לשינויים במאפיינים הגיאומטריים

טבלאות 4.1, אי-ג', והציורים הנלווים לטבלאות אלה, מציגים את מקדמי השינוי בתאונות ההתנגשות - AMF - הקשורים לשינויים בערכי המאפיינים הגיאומטריים: רוחב שול, רדיוס אופקי ושיפוע צד, בהתאמה. כל טבלה מראה את AMF כאשר המאפיין משתנה מהערך הישן שהוא קטן יותר (המוצג בשורות) לערך החדש שהוא גדול יותר (המוצג בעמודות). כל ציור הנלווה

לטבלה מציג את ערכיה בצורה גרפית, דהיינו את ערכי AMF הקשורים לערכים החדשים של מאפיין התשתית, כאשר כל עקומה מציגה את ערכי AMF כתלות בערך ישן מסוים של המאפיין.

ניתן לראות שהגדלת רדיוס עקום אופקי והגדלת שיפוע צד (בתנאי רדיוס אופקי קטן) מביאות לשיפור בטיחותי - ירידה בתאונות, במצב החדש לעומת הישן, כאשר שיפור בטיחותי חזק יותר (AMF קטן יותר) מתקבל עבור שינויים משמעותיים יותר במאפייני התשתית, דהיינו בעקבות טיפול במצב ישן גרוע יותר (רדיוס אופקי קטן יותר, כגון 100-200 מ', שיפוע צד קטן יותר).

לעומת זאת, הרחבת רוחב שול לא תמיד מביאה לשיפור בטיחותי (AMF הקטן מ-1), כאשר ירידה בתאונות, לעומת המצב הישן, נצפית בעיקר בהרחבת רוחב שול עד כ-3 מ' או ערך גדול יותר.

טבלה 4.1. ערכי השינוי בתאונות התנגשות - AMF - הקשורים לשינויים בערכי המאפיינים הגיאומטריים של קטע דרך

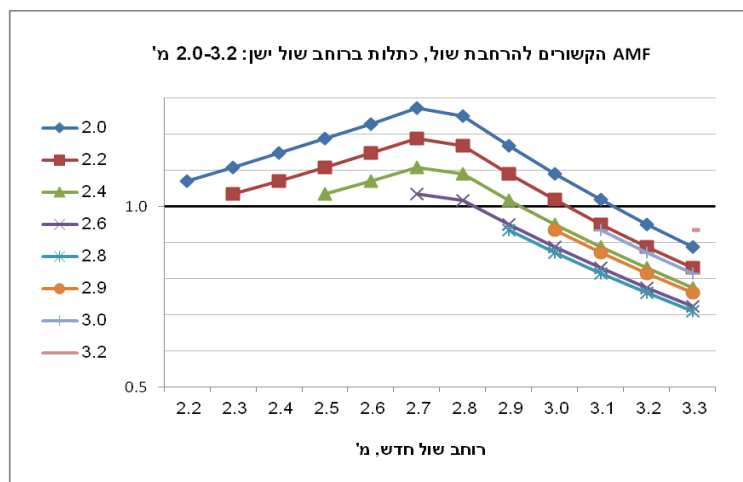
Table 4.1. Accident modification factors of multiple-vehicle collisions associated with changes in the values of geometric characteristics of a low-volume road section

(א) AMF הקשורים בהרחבת רוחב שול

רוחב שול, מ'	value _{new} הערך החדש												
	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3	
הערך הישן value _{old}	2.0	1.07	1.11	1.15	1.19	1.23	1.27	1.25	1.17	1.09	1.02	0.95	0.89
	2.2		1.03	1.07	1.11	1.15	1.19	1.17	1.09	1.02	0.95	0.89	0.83
	2.4				1.03	1.07	1.11	1.09	1.02	0.95	0.89	0.83	0.77
	2.6						1.03	1.02	0.95	0.89	0.83	0.77	0.72
	2.8								0.93	0.87	0.81	0.76	0.71
	2.9									0.93	0.87	0.81	0.76
	3.0										0.93	0.87	0.81
	3.2												0.93

ציור נלווה לטבלה 4.1, א': ערכי AMF הקשורים לערכים החדשים של רוחב שול, כתלות בערך הישן של המאפיין

הישן של המאפיין



טבלה 4.1. ערכי השינוי בתאונות התנגשות - AMF_n - הקשורים לשינויים בערכי המאפיינים הגיאומטריים של קטע דרך – המשך

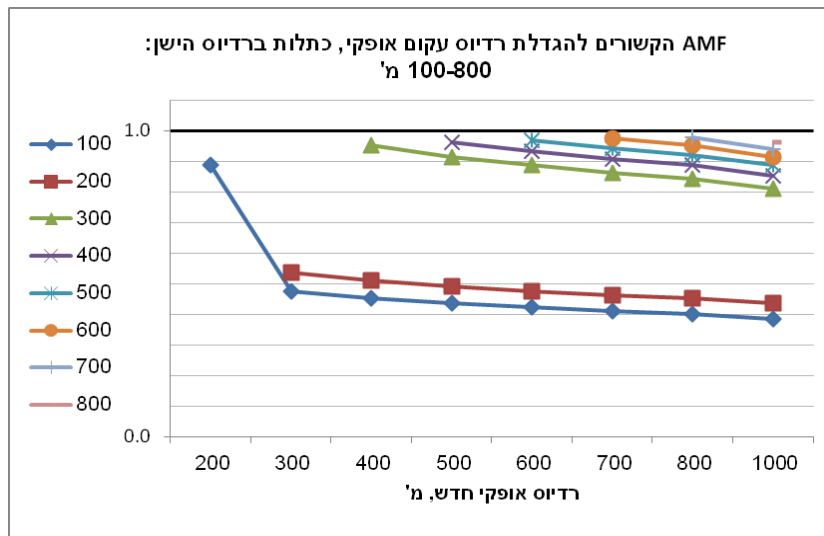
Table 4.1 - cont.

(ב) AMF הקשורים בהגדלת רדיוס עקום אופקי

רדיוס אופקי מזערי, מ'		value _{new} הערך החדש							
		200	300	400	500	600	700	800	1000
הערך הישן value _{old}	100*	0.89	0.48	0.45	0.44	0.42	0.41	0.40	0.39
	200*		0.54	0.51	0.49	0.48	0.46	0.45	0.44
	300			0.95	0.91	0.89	0.86	0.84	0.81
	400				0.96	0.93	0.91	0.89	0.85
	500					0.97	0.94	0.92	0.89
	600						0.97	0.95	0.91
	700							0.98	0.94
	800								0.96

* החישובים עבור שיפוע צד 3%

ציור נלווה לטבלה 4.1, ב': ערכי AMF_n הקשורים לערכים החדשים של רדיוס עקום אופקי, כתלות בערך הישן של המאפיין



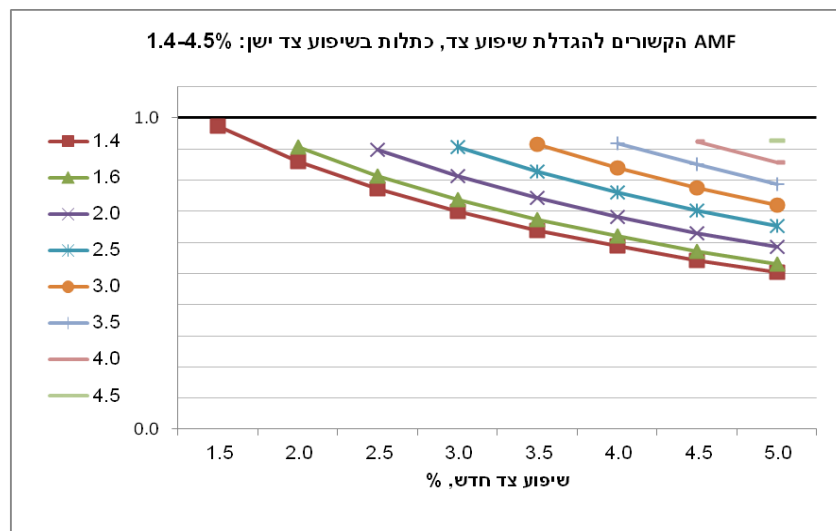
טבלה 4.1. ערכי השינוי בתאונות התנגשות - AMF_n - הקשורים לשינויים בערכי המאפיינים הגיאומטריים של קטע דרך - המשך

Table 4.1 - cont.

(ג) AMF הקשורים בהגדלת שיפוע צד: בתנאי רדיוס אופקי קטן, עד 300 מ'

שיפוע צד, %		value _{new} הערך החדש							
		1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
הערך הישן value _{old}	1.4	0.97	0.86	0.77	0.70	0.64	0.59	0.54	0.50
	1.6		0.91	0.81	0.74	0.67	0.62	0.57	0.53
	2.0			0.90	0.81	0.74	0.68	0.63	0.59
	2.5				0.91	0.83	0.76	0.70	0.65
	3.0					0.91	0.84	0.78	0.72
	3.5						0.92	0.85	0.79
	4.0							0.92	0.86
	4.5								0.93

ציור נלווה לטבלה 4.1, ג': ערכי AMF_n הקשורים לערכים החדשים של שיפוע צד, כתלות בערך הישן של המאפיין



4.3. השפעת מאפייני הקטע על תאונות רכב יחיד

המשתנים המשפיעים על תאונות רכב יחיד בקטע דרך דלת תנועה הם רוחב שול, רדיוס אופקי מזערי, מצב צדי הדרך, רוחב נתיב, נפח התנועה ואורך קטע. בהקשר תאונות מסוג זה יש מקום להציג השפעה של ארבעה מאפיינים גיאומטריים שהם:

- רוחב שול,
- רדיוס אופקי מזערי,
- מצב צדי הדרך,
- רוחב נתיב.

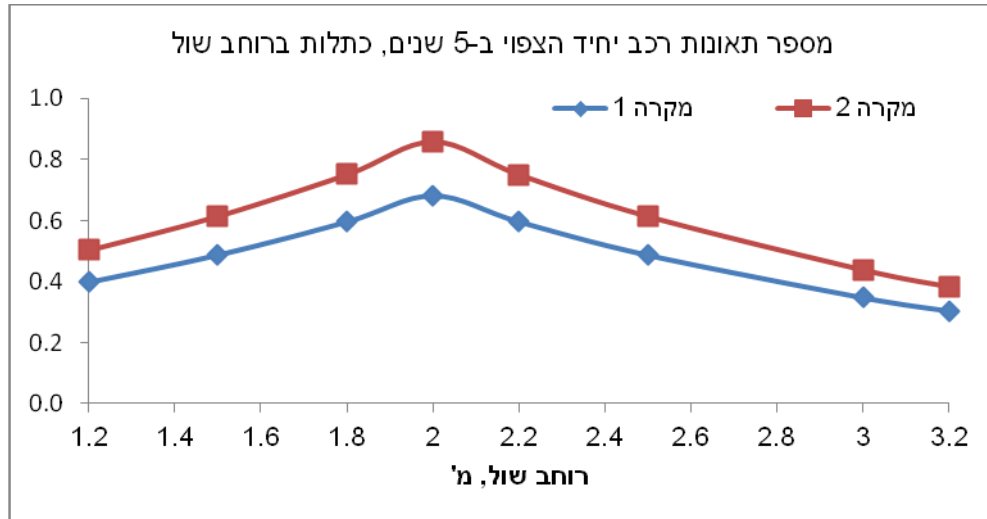
יצוין כי, לפי המודל, צורת הקשר עם התאונות אינה רציפה עבור שני מאפייני תשתית: (א) רוחב שול, כאשר מספר התאונות עולה עם הגדלת רוחב שול עד 2 מ', ובהמשך יורד עם הרחבת רוחב שול מעל 2 מ'; (ב) רוחב נתיב, כאשר מספר התאונות יורד עם הגדלת רוחב נתיב עד 3.25 מ', ובהמשך עולה עם הרחבת רוחב נתיב מעל 3.25 מ'.

4.3.1. צורת הקשר בין המאפיינים הגיאומטריים לבין שכיחות התאונות

ציור 4.3 מביא הצגה גרפית של הקשר בין ערכי המאפיינים - רוחב שול, רדיוס אופקי, מצב צדי הדרך, רוחב נתיב, לבין שכיחות התאונות. צורת הקשר לכל מאפיין מוצגת בעזרת שני גרפים אשר נוצרו בעקבות חישוב שני מקרים לדוגמא, עם ערכים מסוימים של יתר מאפייני הקטעים; מקרים אלה מפורטים בסמוך לציורים.

ציור 4.4 מציג את צורת הקשר בין ערכי המאפיינים הגיאומטריים לבין שכיחות התאונות בשיטת ה"כופל", כאשר לשינוי בערך המאפיין מוצג השינוי היחסי בשכיחות התאונות לעומת ערך מסוים של אותו המאפיין שנבחר כבסיס החישוב ושעברו ערך הכופל שווה 1. בציור 4.4 מוצג השינוי היחסי בתאונות התנגשות - כופל מספר התאונות, כאשר: (א) רוחב שול משתנה לעומת ערך הבסיס 2 מ'; (ב) רדיוס אופקי משתנה לעומת ערך הבסיס 200 מ'; (ג) מצב צדי הדרך משתנה לעומת ערך הבסיס 1.5; (ד) רוחב נתיב משתנה לעומת ערך הבסיס 2.8 מ'.

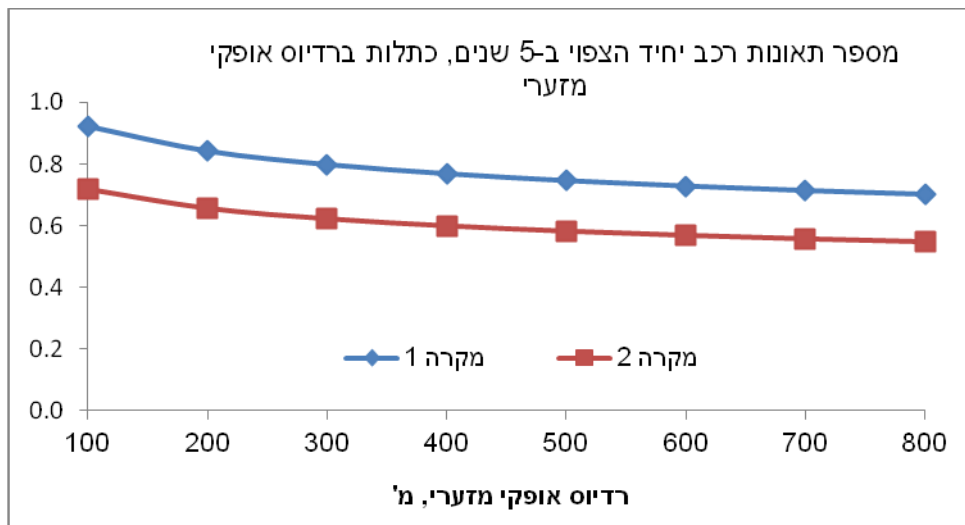
סה"כ, ציורים 4.3-4.4 ממחישים כי מספר תאונות רכב יחיד בקטע דרך דלת תנועה עולה עם הגדלת רוחב שול עד 2 מ' ויורד לאחר מכן; יורד עם עליה ברדיוס האופקי; יורד עם שיפור מצב צדי הדרך; יורד עם הגדלת רוחב נתיב עד 3.25 מ' ועולה לאחר מכן.



מקרה 1: אורך קטע 1 ק"מ; נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה; רדיוס אופקי 1000 מ'; רוחב נתיב 3 מ'; ציון משוקלל של צדי הדרך 2.

מקרה 2: אורך קטע 1 ק"מ; נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה; רדיוס אופקי 200 מ'; רוחב נתיב 3 מ'; ציון משוקלל של צדי הדרך 1.5.

א - הקשר בין ערכי רוחב שול לבין מספר תאונות רכב יחיד הצפוי בקטע ב-5 שנים



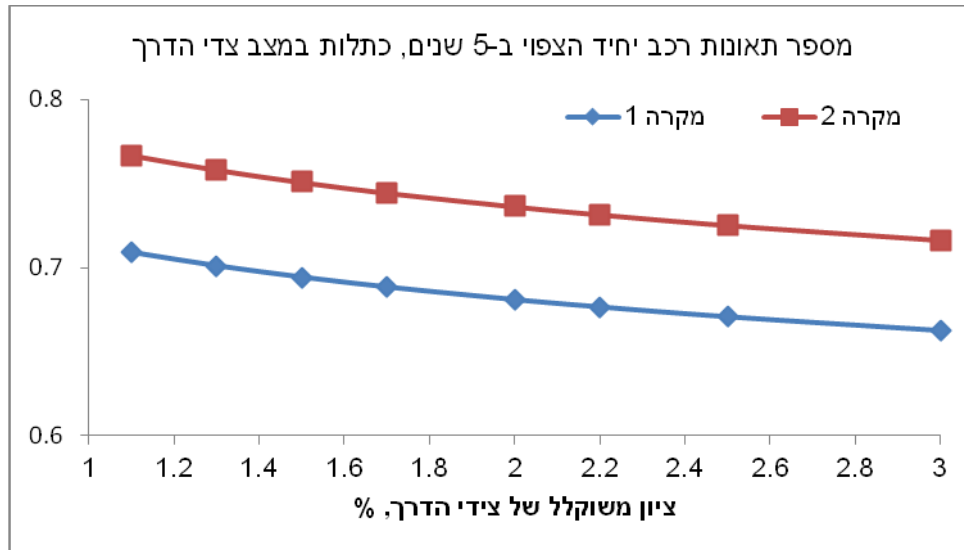
מקרה 1: אורך קטע 1 ק"מ; נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה; רוחב שול 2 מ'; רוחב נתיב 3 מ'; ציון משוקלל של צדי הדרך 2.

מקרה 2: אורך קטע 1 ק"מ; נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה; רוחב שול 1.6 מ'; רוחב נתיב 3 מ'; ציון משוקלל של צדי הדרך 1.5.

ב - הקשר בין ערכי הרדיוס האופקי לבין מספר תאונות רכב יחיד הצפוי בקטע ב-5 שנים

ציור 4.3. הקשר בין המאפיינים הגיאומטריים לבין מספר תאונות רכב יחיד הצפוי בקטע.

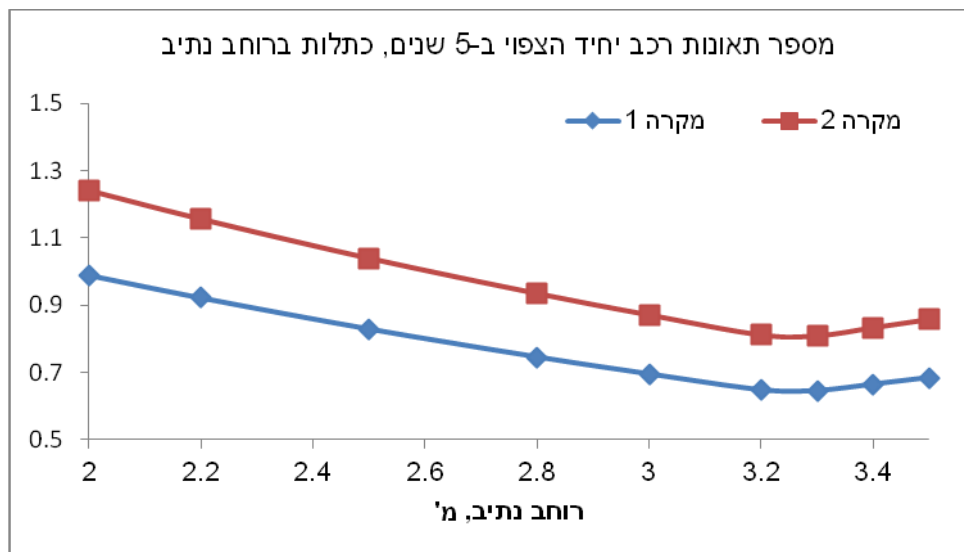
Figure 4.3. A relationship between the geometric characteristics and expected number of single-vehicle accidents, on a low-volume road section.



מקרה 1 : אורך קטע 1 ק"מ ; נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה ; רוחב שול 2 מ' ; רוחב נתיב 3 מ' ; רדיוס אופקי 1000 מ'.

מקרה 2 : אורך קטע 1 ק"מ ; נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה ; רוחב שול 1.8 מ' ; רוחב נתיב 3 מ' ; רדיוס אופקי 200 מ'.

ג - הקשר בין ציון מצב צדי הדרך לבין מספר תאונות רכב יחיד הצפוי בקטע ב-5 שנים



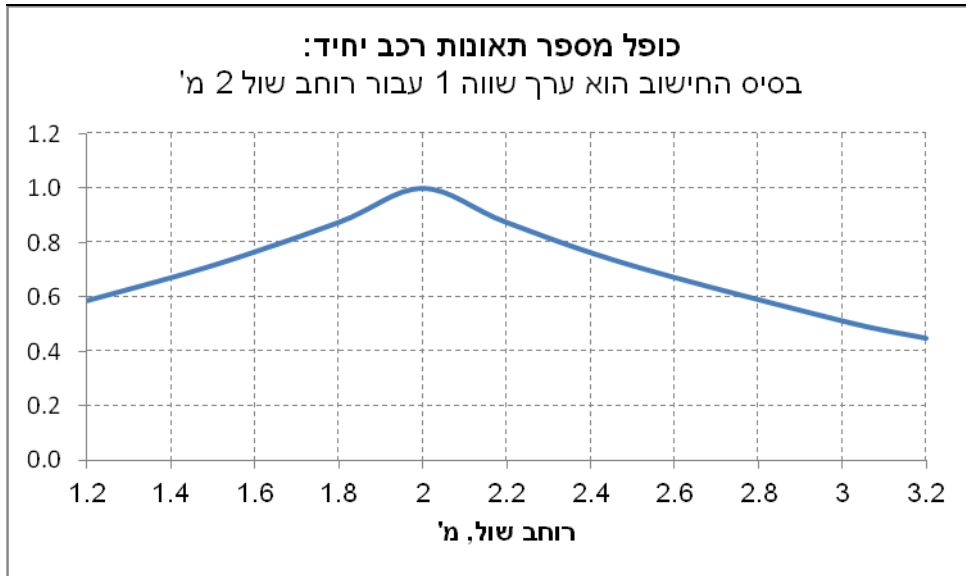
מקרה 1 : אורך קטע 1 ק"מ ; נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה ; רוחב שול 2 מ' ; רדיוס אופקי 1000 מ' ; מצב צדי הדרך 1.5.

מקרה 2 : אורך קטע 1 ק"מ ; נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה ; רוחב שול 2 מ' ; רדיוס אופקי 200 מ' ; מצב צדי הדרך 1.2.

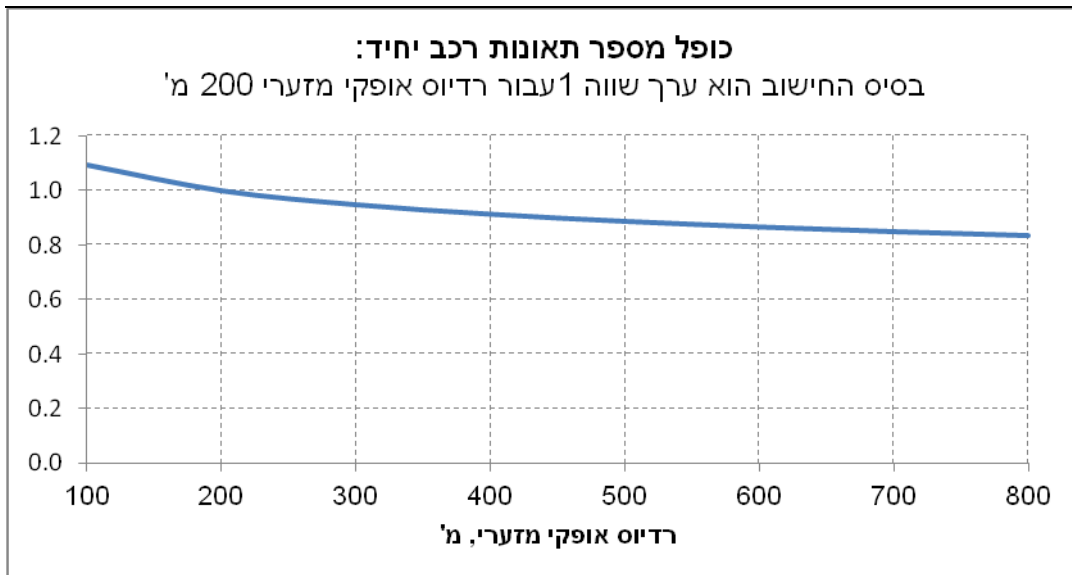
ד - הקשר בין רוחב נתיב לבין מספר תאונות רכב יחיד הצפוי בקטע ב-5 שנים

צור 4.3. הקשר בין המאפיינים הגיאומטריים לבין מספר תאונות רכב יחיד הצפוי בקטע - המשך.

Figure 4.3 - cont.



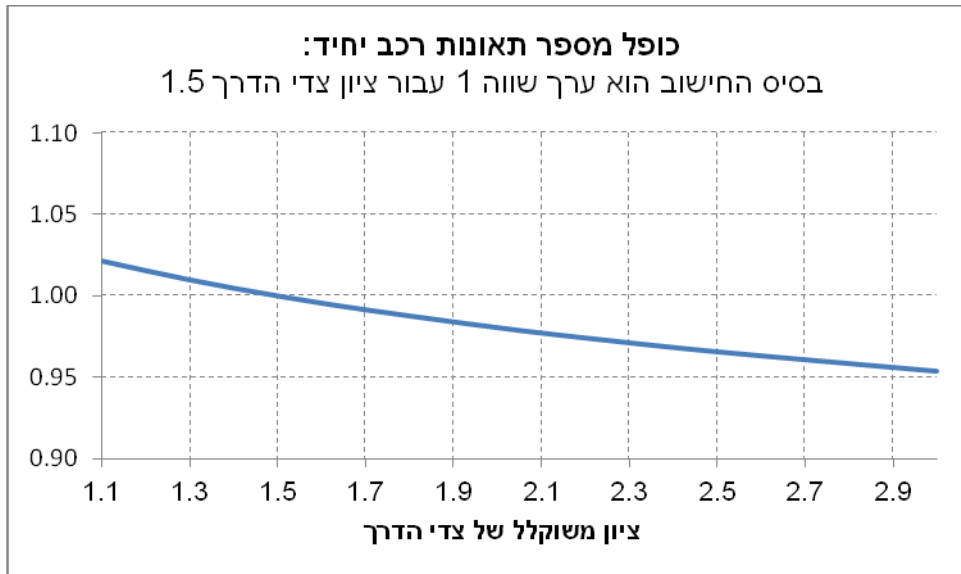
א - כופל מספר תאונות רכב יחיד הצפוי בקטע לעומת ערך רוחב שול



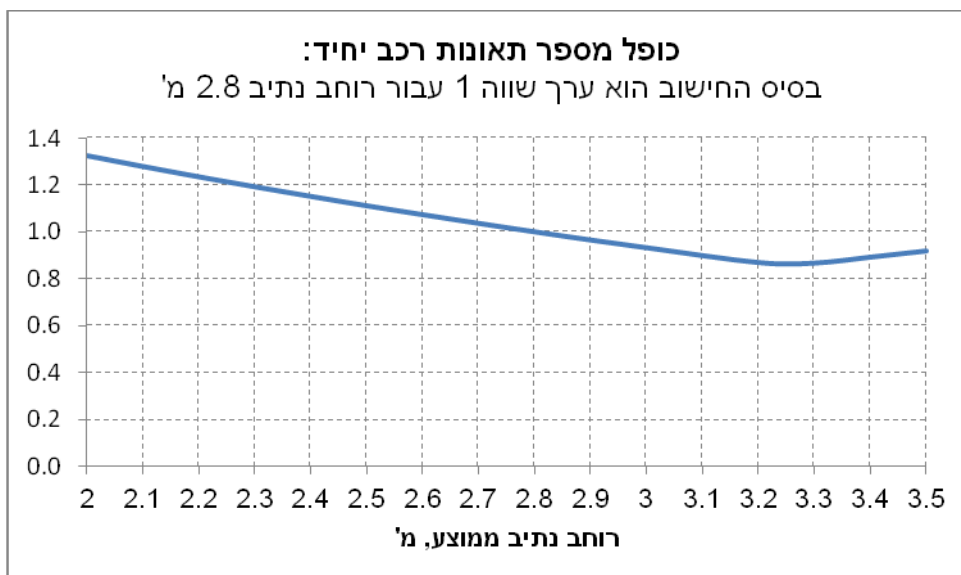
ב - כופל מספר תאונות רכב יחיד הצפוי בקטע לעומת ערכי הרדיוס האופקי

ציור 4.4. צורת הקשר בין ערכי המאפיינים הגיאומטריים לבין מספר תאונות רכב יחיד הצפוי בקטע ב-5 שנים, בשיטת ה"כופל".

Figure 4.4. The form of relationship between the geometric characteristics and the number of single-vehicle accidents, expected in 5 years on a low-volume road section, using a "multiplier" method



ג - כופל מספר תאונות רכב יחיד הצפוי בקטע לעומת ציון מצב צדי הדרך



ד - כופל מספר תאונות רכב יחיד הצפוי בקטע לעומת ערכי רוחב נתיב

ציור 4.4. צורת הקשר בין ערכי המאפיינים הגיאומטריים לבין מספר תאונות רכב יחיד הצפוי בקטע ב-5 שנים, בשיטת ה"כופל" - המשך.

Figure 4.4 - cont.

4.3.2. מקדמי שינוי בתאונות הקשורים לשינויים במאפיינים הגיאומטריים

טבלאות 4.2, אי-ד', והציורים הנלווים לטבלאות אלה, מציגים את מקדמי השינוי בתאונות ההתנגשות - AMF - הקשורים לשינויים בערכי המאפיינים הגיאומטריים: רוחב שול, רדיוס אופקי, מצב צדי הדרך ורוחב נתיב, בהתאמה. כל טבלה מראה את AMF כאשר המאפיין משתנה מהערך הישן שהוא קטן יותר (המוצג בשורות) לערך החדש שהוא גדול יותר (המוצג בעמודות). כל ציור הנלווה לטבלה מציג את ערכיה בצורה גרפית, דהיינו את ערכי AMF הקשורים לערכים

החדשים של מאפיין התשתית, כאשר כל עקומה מציגה את ערכי AMF כתלות בערך ישן מסוים של המאפיין.

ניתן לראות שהגדלת רדיוס עקום אופקי ושיפור ציון צדי הדרך מביאים לשיפור בטיחותי - ירידה בתאונות, במצב החדש לעומת הישן, כאשר שיפור בטיחותי חזק יותר (AMF קטן יותר) מתקבל עבור שינויים משמעותיים יותר במאפייני התשתית, דהיינו בעקבות טיפול במצב ישן גרוע יותר (רדיוס אופקי קטן יותר, ציון צדי הדרך נמוך יותר).

לעומת זאת, הרחבת רוחב שול לא תמיד מביאה לשיפור בטיחותי (AMF הקטן מ-1), כאשר ירידה בתאונות, לעומת המצב הישן, נצפית בעיקר בהרחבת רוחב שול עד כ-2.5 מ' או ערך גדול יותר. כמו כן, הרחבת רוחב נתיב עד כ-3.2 מ' משפרת את מצב התאונות (מתקבל AMF הקטן מ-1), כאשר מעל 3.2 מ' התרומה החיובית של הרחבת הנתיב מתחילה להצטמצם; בתנאים מסוימים (רוחב נתיב ישן 3.2 מ' או גדול יותר) הרחבת הנתיב אפילו מביאה להרעה בתאונות.

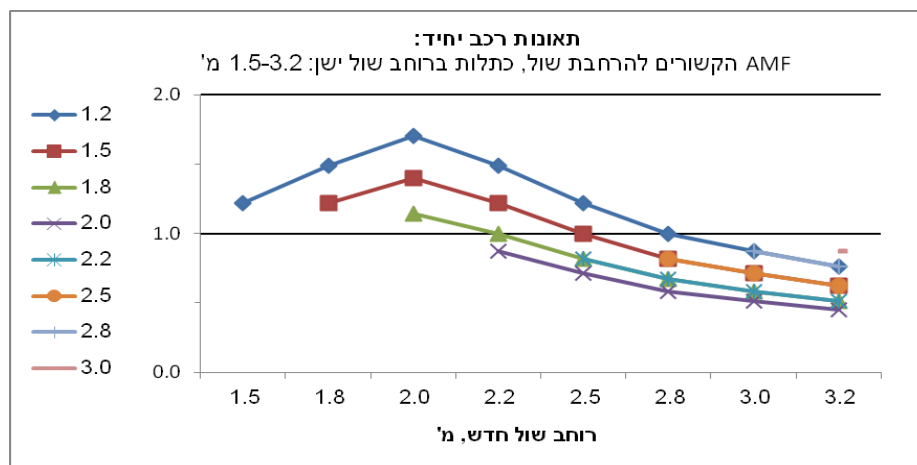
טבלה 4.2. ערכי השינוי בתאונות רכב יחיד - AMF - הקשורים לשינויים בערכי המאפיינים הגיאומטריים של קטע דרך

Table 4.2. Accident modification factors of single-vehicle accidents associated with changes in the values of geometric characteristics of a low-volume road section

(א) AMF הקשורים בהרחבת רוחב שול

רוחב שול, מ'		value _{new} הערך החדש							
		1.5	1.8	2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3.2
הערך הישן value _{old}	1.2	1.22	1.49	1.71	1.49	1.22	1.00	0.87	0.76
	1.5		1.22	1.40	1.22	1.00	0.82	0.71	0.62
	1.8			1.14	1.00	0.82	0.67	0.58	0.51
	2.0				0.87	0.72	0.59	0.51	0.45
	2.2					0.82	0.67	0.59	0.51
	2.5						0.82	0.72	0.63
	2.8							0.87	0.76
	3.0								0.87

ציור נלווה לטבלה 4.2, א': ערכי AMF הקשורים לערכים החדשים של רוחב שול, כתלות בערך הישן של המאפיין



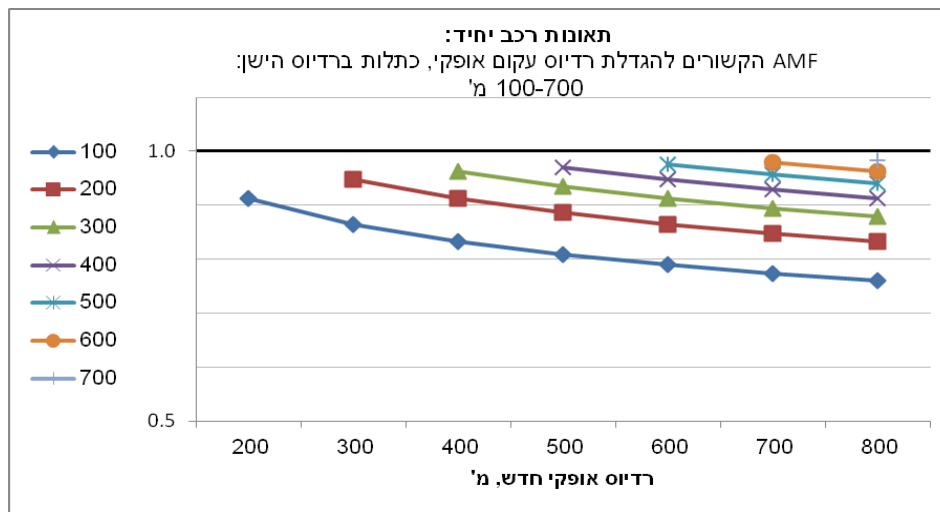
טבלה 4.2. ערכי השינוי בתאונות רכב יחיד - AMF^ה - הקשורים לשינויים בערכי המאפיינים הגיאומטריים של קטע דרך – המשך

Table 4.2 - cont.

(ב) AMF הקשורים בהגדלת רדיוס עקום אופקי

		value _{new} הערך החדש						
		200	300	400	500	600	700	800
הערך הישן value _{old}	100	0.91	0.87	0.83	0.81	0.79	0.77	0.76
	200		0.95	0.91	0.89	0.87	0.85	0.83
	300			0.96	0.93	0.91	0.89	0.88
	400				0.97	0.95	0.93	0.91
	500					0.98	0.96	0.94
	600						0.98	0.96
	700							0.98
	800							

ציור נלווה לטבלה 4.2, ב': ערכי AMF^ה הקשורים לערכים החדשים של רדיוס עקום אופקי, כתלות בערך הישן של המאפיין



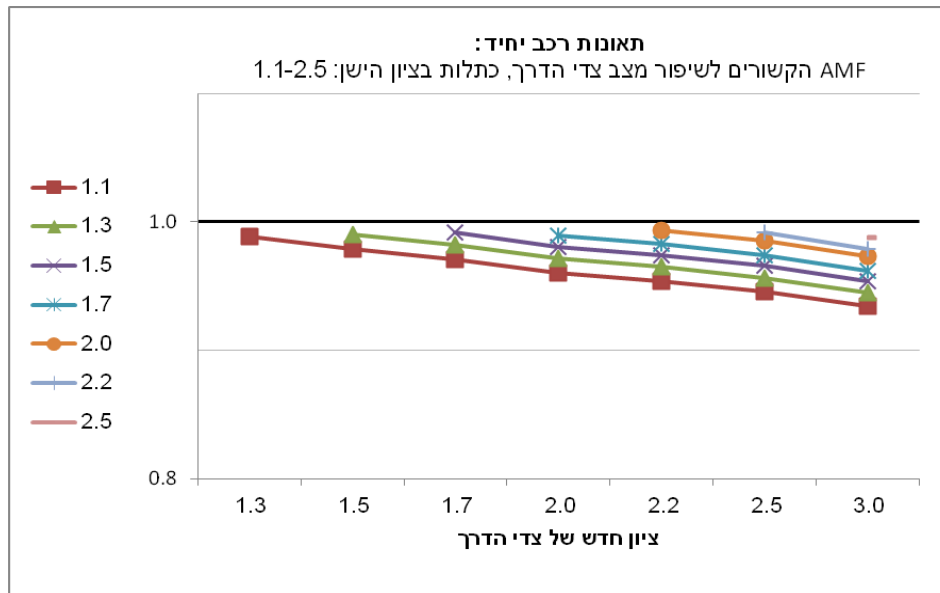
טבלה 4.2. ערכי השינוי בתאונות רכב יחיד - AMF_n - הקשורים לשינויים בערכי המאפיינים הגיאומטריים של קטע דרך – המשך

Table 4.2 - cont.

(ג) AMF_n הקשורים בשיפור מצב צדי הדרך

ציון משוקלל של צדי הדרך		value _{new} הערך החדש						
		1.3	1.5	1.7	2.0	2.2	2.5	3.0
הערך הישן value _{old}	1.1	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.95	0.93
	1.3		0.99	0.98	0.97	0.96	0.96	0.94
	1.5			0.99	0.98	0.97	0.97	0.95
	1.7				0.99	0.98	0.97	0.96
	2.0					0.99	0.98	0.97
	2.2						0.99	0.98
	2.5							0.99

ציור נלווה לטבלה 4.2, ג': ערכי AMF_n הקשורים לערכים החדשים של מצב צדי הדרך, כתלות בערך הישן של המאפיין



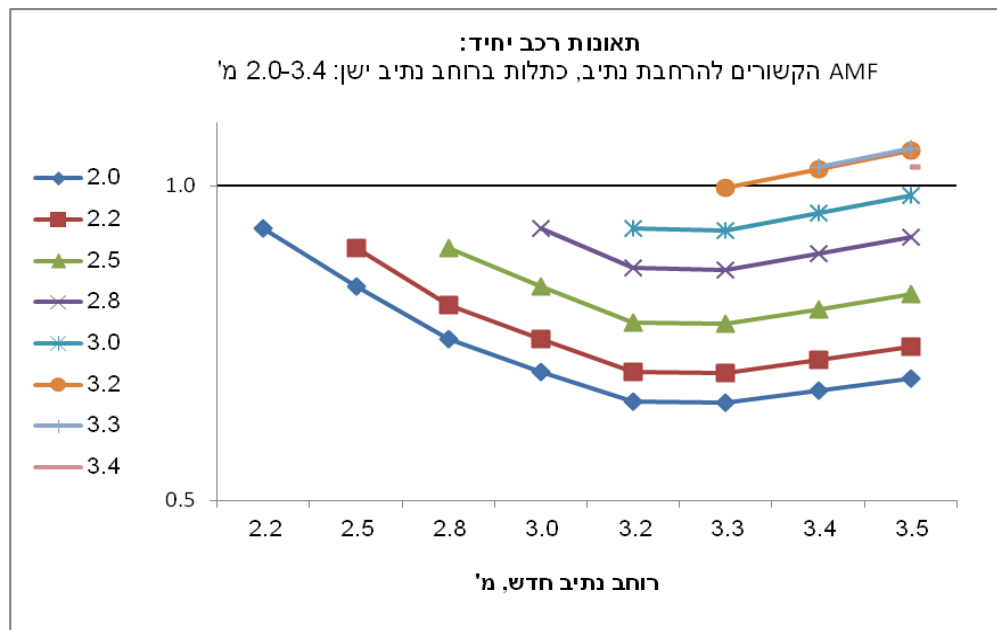
טבלה 4.2. ערכי השינוי בתאונות רכב יחיד - AMFⁿ - הקשורים לשינויים בערכי המאפיינים הגיאומטריים של קטע דרך – המשך

Table 4.2 - cont.

(ד) AMF הקשורים בהרחבת רוחב נתיב

רוחב נתיב ממוצע, מ'		value _{new} הערך החדש							
		2.2	2.5	2.8	3.0	3.2	3.3	3.4	3.5
הערך הישן value _{old}	2.0	0.93	0.84	0.76	0.70	0.66	0.66	0.67	0.69
	2.2		0.90	0.81	0.76	0.70	0.70	0.72	0.74
	2.5			0.90	0.84	0.78	0.78	0.80	0.83
	2.8				0.93	0.87	0.87	0.89	0.92
	3.0					0.93	0.93	0.96	0.99
	3.2						1.00	1.03	1.06
	3.3							1.03	1.06
	3.4								1.03

ציור נלווה לטבלה 4.2, ד': ערכי ה-AMF הקשורים לערכים החדשים של רוחב נתיב, כתלות בערך הישן של המאפיין



4.4. השפעת מאפייני הקטע על התאונות החמורות

המשתנים המשפיעים על התאונות החמורות בקטע דרך דלת תנועה הם רוחב שול, רוחב נתיב, נפח התנועה ואורך קטע. בהקשר התאונות החמורות יש מקום להציג השפעה של שני מאפיינים גיאומטריים שהם:

- רוחב שול,

- רוחב נתיב.

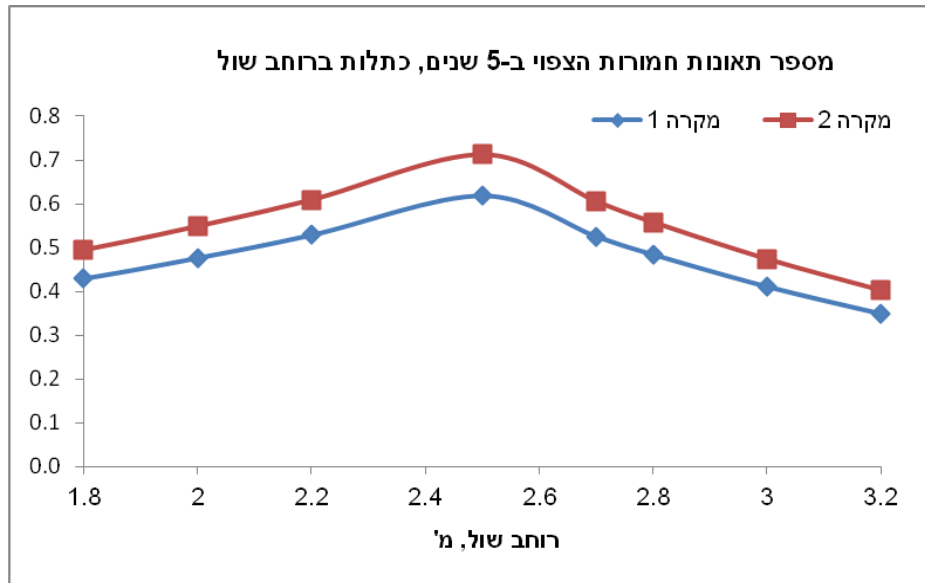
יצוין כי, לפי מודל זה, צורת הקשר עם התאונות אינה רציפה עבור מאפיין תשתית אחד - רוחב שול, כאשר מספר התאונות עולה עם הגדלת רוחב שול עד 2.5 מ', ובהמשך יורד עם הרחבת רוחב שול מעל 2.5 מ'.

4.4.1. צורת הקשר בין המאפיינים הגיאומטריים לבין שכיחות התאונות

ציור 4.5 מביא הצגה גרפית של הקשר בין ערכי המאפיינים - רוחב שול, רוחב נתיב, לבין שכיחות התאונות החמורות. צורת הקשר לכל מאפיין מוצגת בעזרת שני גרפים אשר נוצרו בעקבות חישוב שני מקרים לדוגמא, עם ערכים מסוימים של יתר מאפייני הקטעים; מקרים אלה מפורטים בסמוך לציורים.

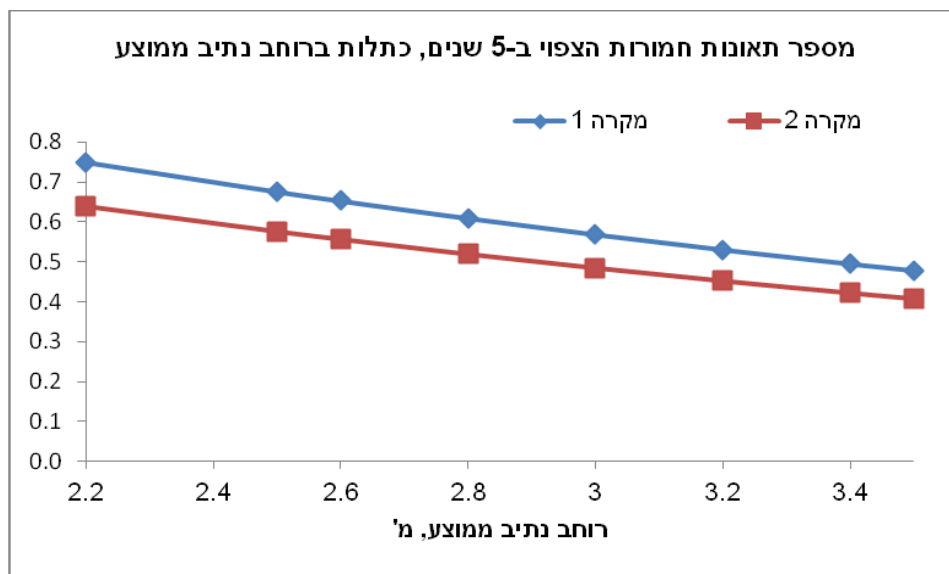
ציור 4.6 מציג את צורת הקשר בין ערכי המאפיינים הגיאומטריים לבין שכיחות התאונות החמורות בשיטת ה"כופל", כאשר לשינוי בערך המאפיין מוצג השינוי היחסי בשכיחות התאונות לעומת ערך מסוים של אותו המאפיין שנבחר כבסיס החישוב ושעבורו ערך הכופל שווה 1. בציור 4.6 מוצג השינוי היחסי בתאונות החמורות - כופל מספר התאונות, כאשר: (א) רוחב שול משתנה לעומת ערך הבסיס 2 מ'; (ב) רוחב נתיב משתנה לעומת ערך הבסיס 2.8 מ'.

סה"כ, ציורים 4.5-4.6 ממחישים כי מספר התאונות החמורות בקטע דרך דלת תנועה עולה עם הגדלת רוחב שול עד 2.5 מ' ויורד לאחר מכן; יורד עם הגדלת רוחב נתיב.



מקרה 1 : אורך קטע 1 ק"מ ; נפח תנועה 1,000 כלי רכב ביממה ; רוחב נתיב 3 מ'.
 מקרה 2 : אורך קטע 1 ק"מ ; נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה ; רוחב נתיב 2.8 מ'.

א - הקשר בין ערכי רוחב שול לבין מספר התאונות החמורות הצפוי בקטע ב-5 שנים

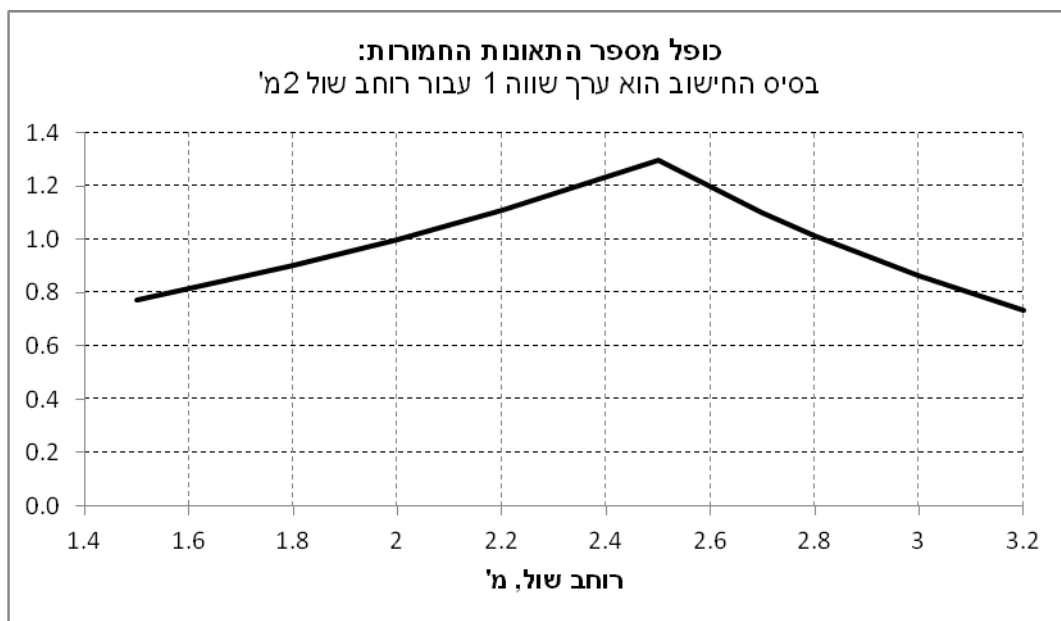


מקרה 1 : אורך קטע 1 ק"מ ; נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה ; רוחב שול 2.2 מ'.
 מקרה 2 : אורך קטע 1 ק"מ ; נפח תנועה 1,000 כלי רכב ביממה ; רוחב שול 2.8 מ'.

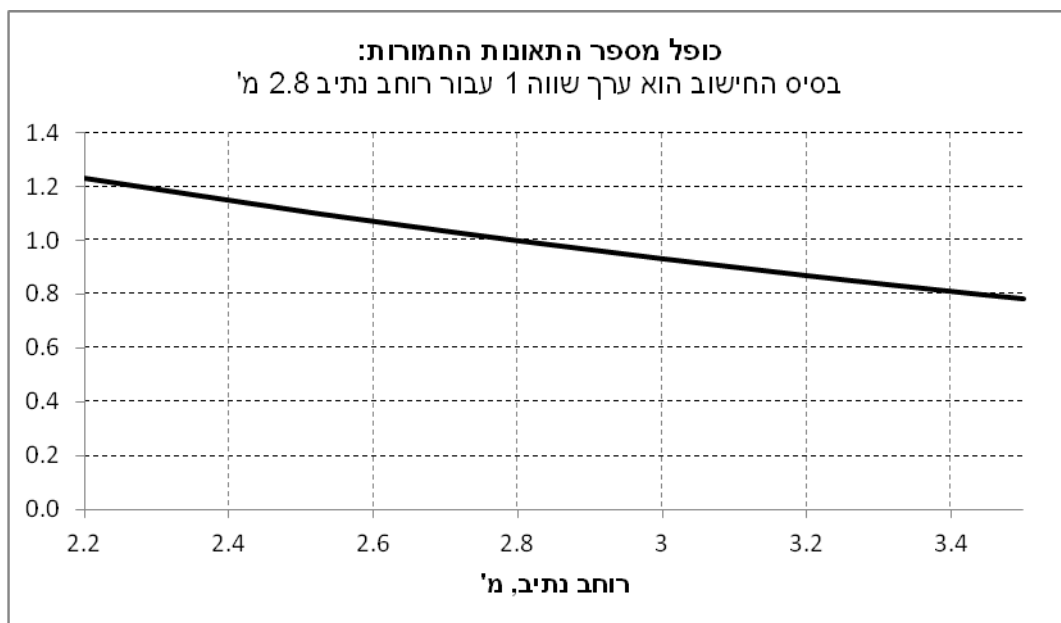
ב - הקשר בין ערכי רוחב נתיב לבין מספר התאונות החמורות הצפוי בקטע ב-5 שנים

ציור 4.5. הקשר בין המאפיינים הגיאומטריים לבין מספר התאונות החמורות הצפוי בקטע.

Figure 4.5. A relationship between the geometric characteristics and expected number of severe accidents, on a low-volume road section.



א - כופל מספר התאונות החמורות הצפוי בקטע לעומת ערך רוחב שול



ב - כופל מספר התאונות החמורות הצפוי בקטע לעומת ערך רוחב נתיב

ציור 4.6. צורת הקשר בין ערכי המאפיינים הגיאומטריים לבין מספר התאונות החמורות הצפוי בקטע ב-5 שנים, בשיטת ה"כופל".

Figure 4.6. The form of relationship between the geometric characteristics and the number of severe accidents, expected in 5 years on a low-volume road section, using a "multiplier" method.

4.4.2. מקדמי שינוי בתאונות הקשורים לשינויים במאפיינים הגיאומטריים

טבלאות 4.3, א-ב', והציורים הנלווים לטבלאות אלה, מציגים את מקדמי השינוי בתאונות ההתנגשות - AMF - הקשורים לשינויים בערכי המאפיינים הגיאומטריים: רוחב שול ורוחב

נתיב, בהתאמה. כל טבלה מראה את ה-AMF כאשר המאפיין משתנה מהערך הישן שהוא קטן יותר (המוצג בשורות) לערך החדש שהוא גדול יותר (המוצג בעמודות). כל ציור הנלווה לטבלה מציג את ערכיה בצורה גרפית, דהיינו את ערכי ה-AMF הקשורים לערכים החדשים של מאפיין התשתית, כאשר כל עקומה מציגה את ערכי ה-AMF כתלות בערך ישן מסוים של המאפיין.

ניתן לראות שהגדלת רוחב נתיב מתקשרת עם שיפור בטיחותי - ירידה בתאונות, במצב החדש לעומת הישן, כאשר שיפור בטיחותי חזק יותר (AMF קטן יותר) מתקבל עבור שינויים משמעותיים יותר במאפיין התשתית, דהיינו בעקבות טיפול ברוחב נתיב ישן קטן יותר.

לעומת זאת, הרחבת רוחב שול לא תמיד מביאה לשיפור בטיחותי (AMF הקטן מ-1), כאשר ירידה בתאונות, לעומת המצב הישן, נצפית בעיקר בהרחבת רוחב שול עד כ-2.6 מ' או ערך גדול יותר.

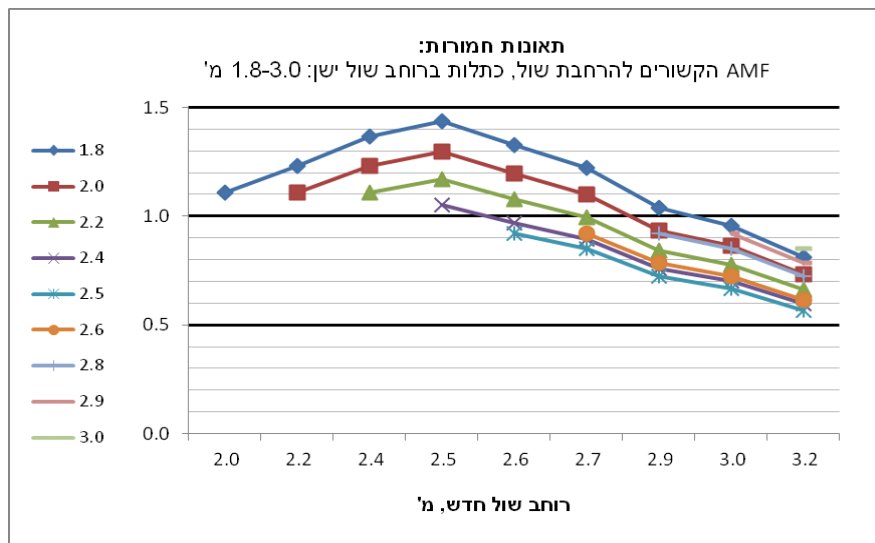
טבלה 4.3. ערכי השינוי בתאונות החמורות - AMF - הקשורים לשינויים בערכי המאפיינים הגיאומטריים של קטע דרך

Table 4.3. Accident modification factors of severe accidents associated with changes in the values of geometric characteristics of a low-volume road section.

(א) AMF הקשורים בהרחבת רוחב שול

רוחב שול, מ'		value _{new} הערך החדש								
		2.0	2.2	2.4	2.5	2.6	2.7	2.9	3.0	3.2
הערך הישן value _{old}	1.8	1.11	1.23	1.37	1.44	1.33	1.22	1.04	0.96	0.81
	2.0		1.11	1.23	1.30	1.20	1.10	0.94	0.86	0.73
	2.2			1.11	1.17	1.08	0.99	0.84	0.78	0.66
	2.4				1.05	0.97	0.89	0.76	0.70	0.60
	2.5					0.92	0.85	0.72	0.67	0.57
	2.6						0.92	0.78	0.72	0.61
	2.8							0.92	0.85	0.72
	2.9								0.92	0.78
	3.0									0.85

ציור נלווה לטבלה 4.3, א': ערכי ה-AMF הקשורים לערכים החדשים של רוחב שול, כתלות בערך הישן של המאפיין



טבלה 4.3. ערכי השינוי בתאונות החמורות - AMF - הקשורים לשינויים בערכי המאפיינים הגיאומטריים של קטע דרך - המשך

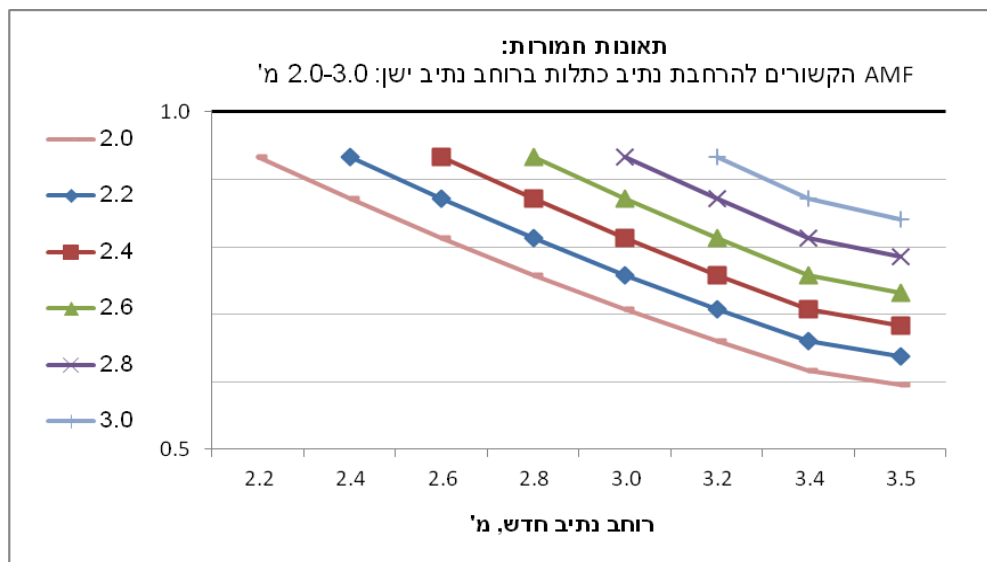
Table 4.3 - cont.

(ב) AMF הקשורים בהרחבת רוחב נתיב

רוחב נתיב, מ'		value _{new} הערך החדש							
		2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.5
הערך הישן value _{old}	2.0	0.93	0.87	0.81	0.76	0.71	0.66	0.62	0.60
	2.2		0.93	0.87	0.81	0.76	0.71	0.66	0.64
	2.4			0.93	0.87	0.81	0.76	0.71	0.68
	2.6				0.93	0.87	0.81	0.76	0.73
	2.8					0.93	0.87	0.81	0.78
	3.0						0.93	0.87	0.84

ציור נלווה לטבלה 4.3, ב': ערכי AMF הקשורים לערכים החדשים של רוחב נתיב, כתלות בערך

הישן של המאפיין



4.5. השפעת מאפייני הקטע על סך התאונות עם נפגעים

המשתנים המשפיעים על תאונות עם נפגעים בקטע דרך דלת תנועה הם רוחב נתיב, רוחב שול, רדיוס אופקי מזערי, שיפוע צד מרבי, נפח התנועה ואורך קטע. בהקשר תאונות מסוג זה יש מקום להציג השפעה של ארבעה מאפיינים גיאומטריים שהם:

- רוחב נתיב,
- רוחב שול,
- רדיוס אופקי מזערי,
- שיפוע צד מרבי.

יצוין כי, לפי המודל, צורת הקשר עם התאונות אינה רציפה עבור שני מאפייני תשתית: (א) רוחב שול, כאשר מספר התאונות עולה עם הגדלת רוחב שול עד 2.5 מ' ובהמשך יורד עם הרחבת רוחב שול מעל 2.5 מ'; (ב) שיפוע צד, כאשר מספר התאונות עולה עם עליה בשיפוע צד בתנאי רדיוס אופקי גדול מ-300 מ' ויורד עם עליה בשיפוע צד בתנאי רדיוס אופקי קטן מ-300 מ'.

4.5.1. צורת הקשר בין המאפיינים הגיאומטריים לבין שכיחות התאונות

ציור 4.7 מביא הצגה גרפית של הקשר בין ערכי המאפיינים - רוחב נתיב, רוחב שול, רדיוס אופקי, שיפוע צד, לבין שכיחות התאונות. צורת הקשר לכל מאפיין מוצגת בעזרת שני גרפים אשר נוצרו בעקבות חישוב שני מקרים לדוגמא, עם ערכים מסוימים של יתר מאפייני הקטעים; מקרים אלה מפורטים בסמוך לציורים.

יש לשים לב שהשפעת שיפוע צד מוצגת בציור 4.7, ד', עבור שני מצבים שונים: (א) המצב עם רדיוס אופקי קטן מ-300 מ', בו מספר התאונות יורד עם עליה בשיפוע הצד, מה שמשקף את ההשפעה החיובית של הגבהה צדית בעקומים; (ב) המצב עם רדיוס אופקי הגדול מ-300 מ', בו מתקבלת עליה במספר התאונות עם עליה בשיפוע הצד.

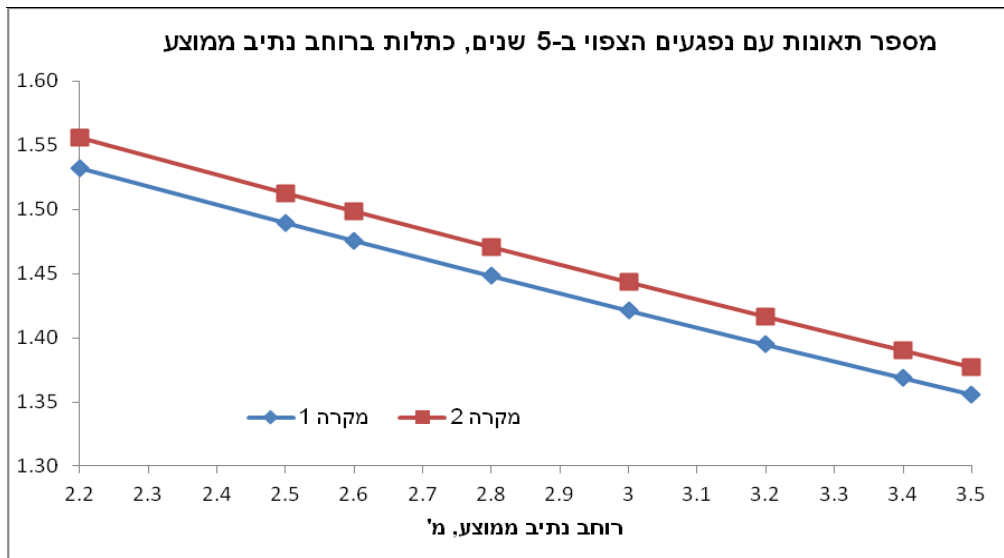
ציור 4.8 מציג את צורת הקשר בין ערכי המאפיינים הגיאומטריים לבין שכיחות התאונות בשיטת ה"כופל", כאשר לשינוי בערך המאפיין מוצג השינוי היחסי בשכיחות התאונות לעומת ערך מסוים של אותו המאפיין שנבחר כבסיס החישוב ושעבורו ערך הכופל שווה 1. בציור 4.8 מוצג השינוי היחסי בסך התאונות עם נפגעים - כופל מספר התאונות, כאשר: (א) רוחב נתיב משתנה לעומת ערך הבסיס 2.8 מ'; (ב) רוחב שול משתנה לעומת ערך הבסיס 2 מ'; (ג) רדיוס אופקי משתנה לעומת ערך הבסיס 200 מ'; (ד) שיפוע צד משתנה לעומת ערך הבסיס 4%.

יש לשים לב שגם בציור 4.8, ד', השפעת שיפוע הצד מוצגת עבור המצב עם רדיוס אופקי קטן, עד 300 מ', דהיינו עבור התנאים בהם עליה בשיפוע הצד מתקשרת עם ירידה במספר התאונות מה שמשקף את ההשפעה החיובית של הגבהה צדית בעקומים.

כמו כן, יש לשים לב ל"קפיצה" בצורת הקשר בין הרדיוס האופקי לבין שכיחות התאונות (ראה ציור 4.8, ג') אשר נובעת מהשפעת שיפוע הצד: כאמור, ברדיוסים קטנים, עד 300 מ', קיים קשר חיובי בין הגדלת שיפוע הצד לבין שכיחות התאונות, בעוד שברדיוסים הגדולים, הגדלה בשיפוע הצד מביאה לתוצאה הפוכה מבחינת התאונות. הנקודה של 300 מ' ברדיוס האופקי הינה נקודת השבירה של המודל אשר מראה צורות קשר שונות בשני טווחי השינוי של הרדיוס. כמו כן, חישוב

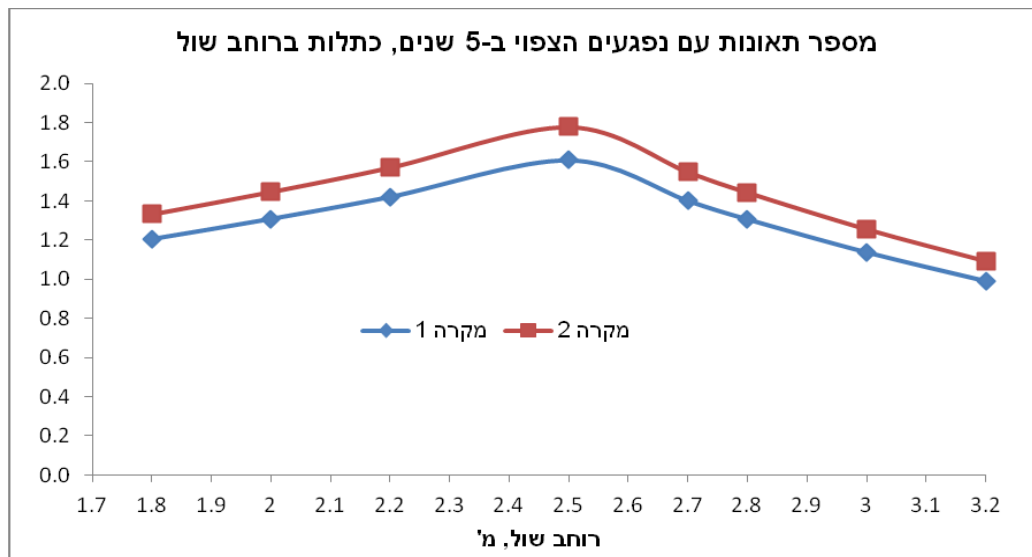
השפעת הרדיוס האופקי על שכיחות התאונות מושפע מגודל שיפוע הצד בהנחות החישוב; בציור 4.2, ג', הקשר חושב עבור שיפוע צד 2%.

סה"כ, מציורים 4.7-4.8 ניתן לראות שסך מספר התאונות עם נפגעים בקטע דרך דלת תנועה עולה עם הגדלת רוחב שול עד 2.5 מ' ויורד לאחר מכן; יורד עם עליה ברוחב נתיב; יורד עם עליה ברדיוס האופקי; יורד עם הגדלת שיפוע צד, בהינתן רדיוס אופקי קטן.



מקרה 1: אורך קטע 1 ק"מ; נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה; רוחב שול 2.2 מ'; רדיוס אופקי 500 מ'; שיפוע צד 2%.
מקרה 2: אורך קטע 1 ק"מ; נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה; רוחב שול 2.8 מ'; רדיוס אופקי 1000 מ'; שיפוע צד 4%.

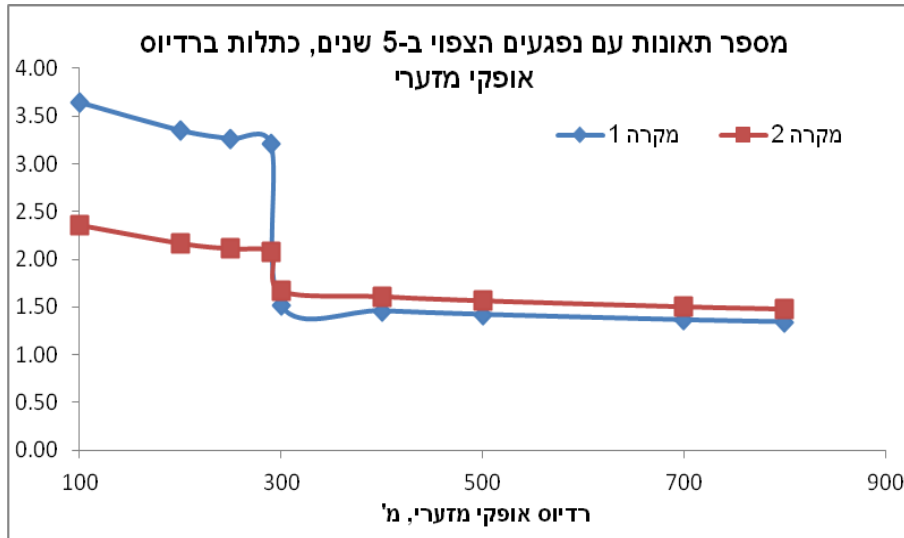
א - הקשר בין ערכי רוחב נתיב לבין סך מספר התאונות עם נפגעים הצפוי בקטע ב-5 שנים



מקרה 1: אורך קטע 1 ק"מ; נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה; רוחב שול 3 מ'; רדיוס אופקי 500 מ'; שיפוע צד 2%.
מקרה 2: אורך קטע 1 ק"מ; נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה; רוחב שול 3 מ'; רדיוס אופקי 1000 מ'; שיפוע צד 4%.

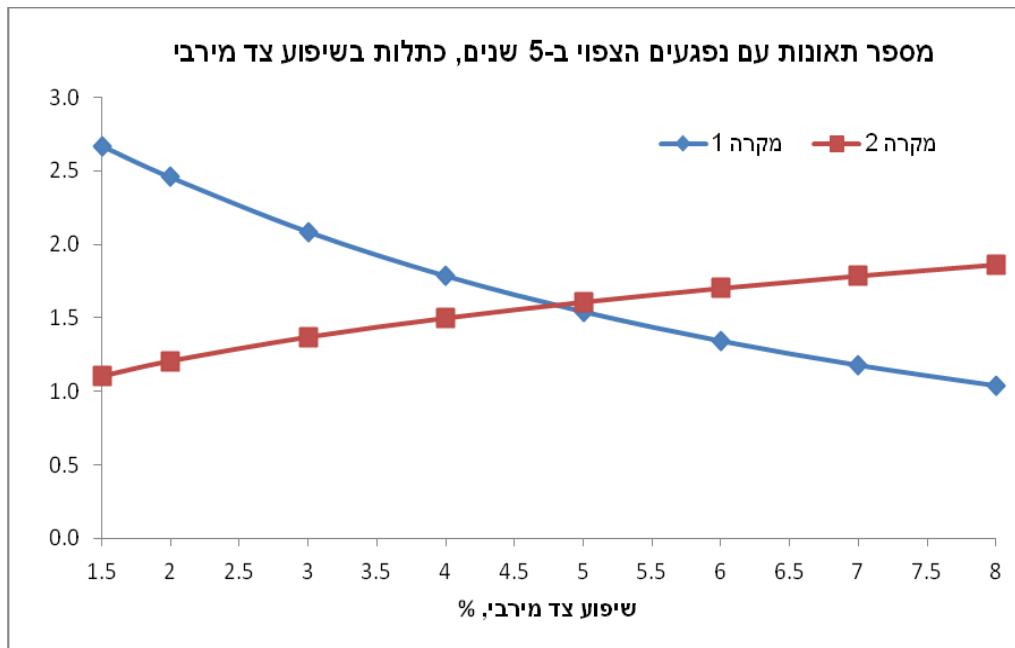
ב - הקשר בין ערכי רוחב שול לבין סך מספר התאונות עם נפגעים הצפוי בקטע ב-5 שנים

ציור 4.7. הקשר בין המאפיינים הגיאומטריים לבין סך מספר התאונות עם נפגעים הצפוי בקטע.
Figure 4.7. A relationship between the geometric characteristics and expected number of injury accidents, on a low-volume road section.



מקרה 1 : אורך קטע 1 ק"מ; נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה; רוחב נתיב 3 מ'; רוחב שול 2.2 מ'; שיפוע צד 2%.
 מקרה 2 : אורך קטע 1 ק"מ; נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה; רוחב נתיב 3 מ'; רוחב שול 2.8 מ'; שיפוע צד 4%.

ג - הקשר בין ערכי הרדיוס האופקי לבין סך מספר התאונות עם נפגעים הצפוי בקטע ב-5 שנים



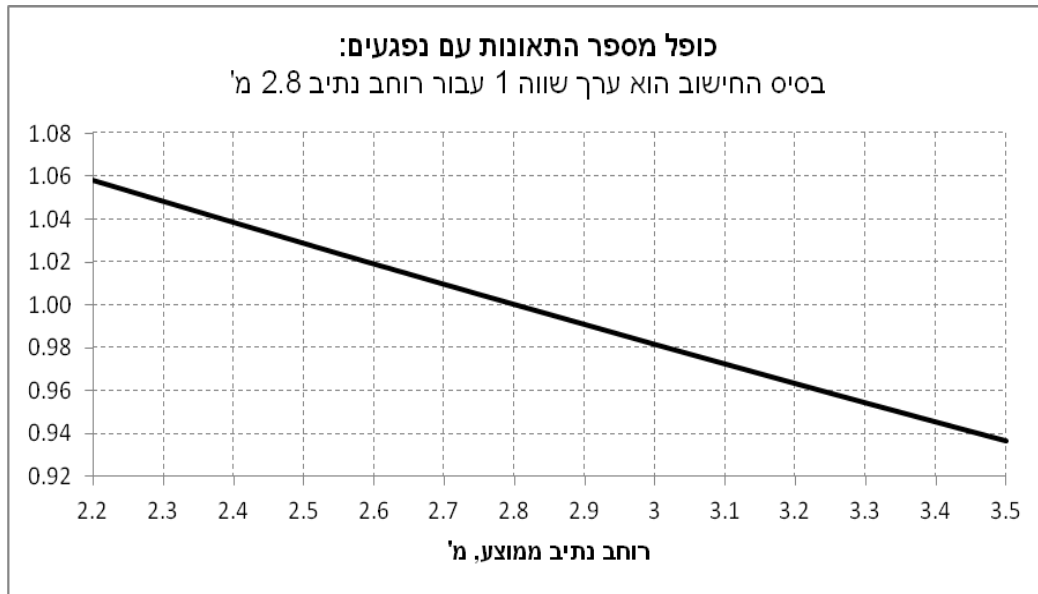
מקרה 1 : אורך קטע 1 ק"מ; נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה; רוחב נתיב 3 מ'; רוחב שול 2.8 מ'; רדיוס אופקי 200 מ' (רדיוס קטן).

מקרה 2 : אורך קטע 1 ק"מ; נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה; רוחב נתיב 3 מ'; רוחב שול 2.2 מ'; רדיוס אופקי 300 מ' (רדיוס גדול).

ד - הקשר בין ערכי שיפוע צד לבין סך מספר התאונות עם נפגעים הצפוי בקטע ב-5 שנים

ציור 4.7. הקשר בין המאפיינים הגיאומטריים לבין סך מספר התאונות עם נפגעים הצפוי בקטע המשך.

Figure 4.7- cont.



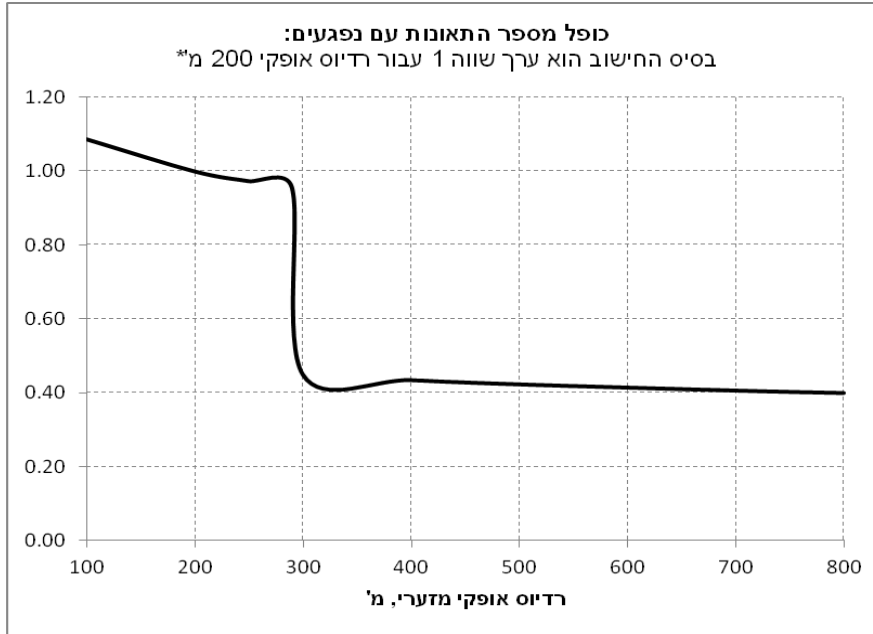
א - כופל מספר התאונות עם נפגעים הצפוי בקטע לעומת ערך רוחב נתיב



ב - כופל מספר התאונות עם נפגעים הצפוי בקטע לעומת ערך רוחב שול

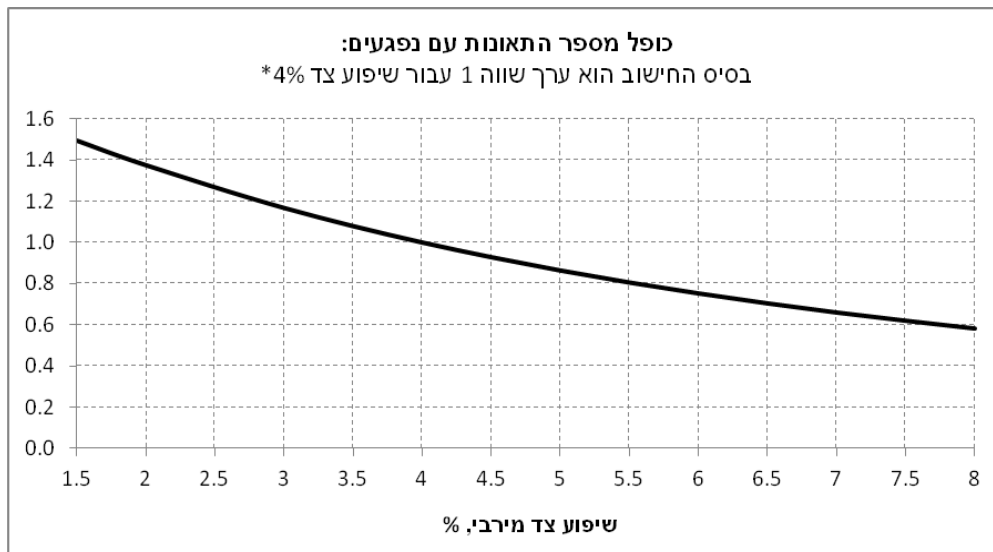
ציור 4.8. צורת הקשר בין ערכי המאפיינים הגיאומטריים לבין סך מספר התאונות עם נפגעים הצפוי בקטע ב-5 שנים, בשיטת ה"כופל".

Figure 4.8. The form of relationship between the geometric characteristics and the number of injury accidents, expected in 5 years on a low-volume road section, using a "multiplier" method.



* חישוב עם שיפוע צד 2%

ג - כופל מספר התאונות עם נפגעים הצפוי בקטע לעומת ערכי הרדיוס האופקי



* חישוב עבור רדיוס קטן, עד 300 מ'

ד - כופל מספר התאונות עם נפגעים הצפוי בקטע לעומת ערכי שיפוע צד

ציור 4.8. צורת הקשר בין ערכי המאפיינים הגיאומטריים לבין סך מספר התאונות עם נפגעים הצפוי בקטע ב-5 שנים, בשיטת ה"כופל" - המשך.

Figure 4.8 - cont.

4.5.2. מקדמי שינוי בתאונות הקשורים לשינויים במאפיינים הגיאומטריים

טבלאות 4.4, א'-ד', והציורים הנלווים לטבלאות אלה, מציגים את מקדמי השינוי בתאונות עם נפגעים - AMF - הקשורים לשינויים בערכי המאפיינים הגיאומטריים: רוחב נתיב, רוחב שול, רדיוס אופקי ושיפוע צד, בהתאמה. כל טבלה מראה את AMF כאשר המאפיין משתנה מהערך הישן שהוא קטן יותר (המוצג בשורות) לערך החדש שהוא גדול יותר (המוצג בעמודות). כל ציור

הנלווה לטבלה מציג את ערכיה בצורה גרפית, דהיינו את ערכי ה-AMF הקשורים לערכים החדשים של מאפיין התשתית, כאשר כל עקומה מציגה את ערכי ה-AMF כתלות בערך ישן מסוים של המאפיין.

ניתן לראות שהגדלת רוחב נתיב, הגדלת רדיוס עקום אופקי והגדלת שיפוע צד (בתנאי רדיוס אופקי קטן) מביאות לשיפור בטיחותי - ירידה בתאונות, במצב החדש לעומת הישן, כאשר שיפור בטיחותי חזק יותר (AMF קטן יותר) מתקבל עבור שינויים משמעותיים יותר במאפייני התשתית, דהיינו בעקבות טיפול במצב ישן גרוע יותר (רוחב נתיב קטן יותר; רדיוס אופקי קטן יותר, כגון 100-200 מ'; שיפוע צד קטן יותר).

לעומת זאת, הרחבת רוחב שול לא תמיד מביאה לשיפור בטיחותי (AMF הקטן מ-1), כאשר ירידה בתאונות, לעומת המצב הישן, נצפית בעיקר בהרחבת רוחב שול עד כ-2.6 מ' או ערך גדול יותר.

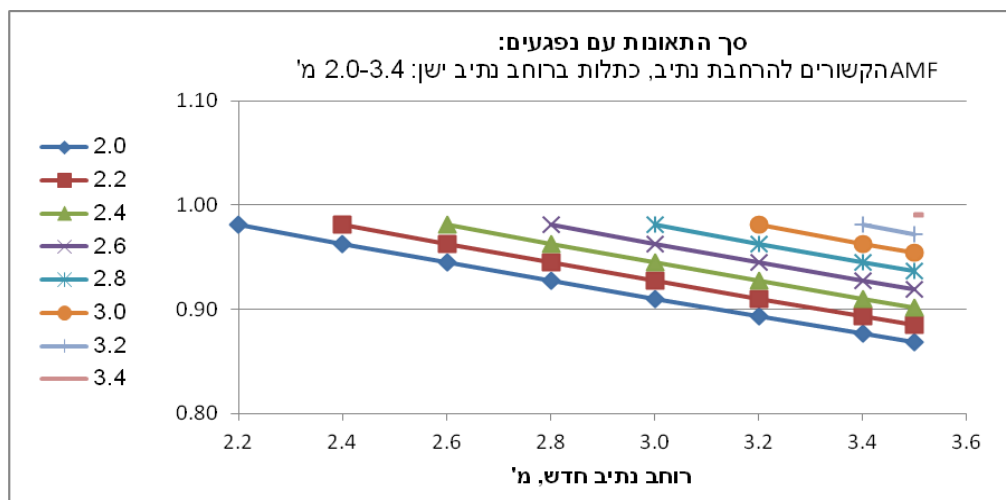
טבלה 4.4. ערכי השינוי בסך התאונות עם נפגעים - ה-AMF - הקשורים לשינויים בערכי המאפיינים הגיאומטריים של קטע דרך

Table 4.4. Accident modification factors of injury accidents associated with changes in the values of geometric characteristics of a low-volume road section

(א) AMF הקשורים בהרחבת רוחב נתיב

רוחב נתיב, מ'		value _{new} הערך החדש							
		2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.5
הערך הישן value _{old}	2.0	0.98	0.96	0.95	0.93	0.91	0.89	0.88	0.87
	2.2		0.98	0.96	0.95	0.93	0.91	0.89	0.89
	2.4			0.98	0.96	0.95	0.93	0.91	0.90
	2.6				0.98	0.96	0.95	0.93	0.92
	2.8					0.98	0.96	0.95	0.94
	3.0						0.98	0.96	0.95
	3.2							0.98	0.97
	3.4								0.99

ציון נלווה לטבלה 4.4, א': ערכי ה-AMF הקשורים לערכים החדשים של רוחב נתיב, כתלות בערך הישן של המאפיין



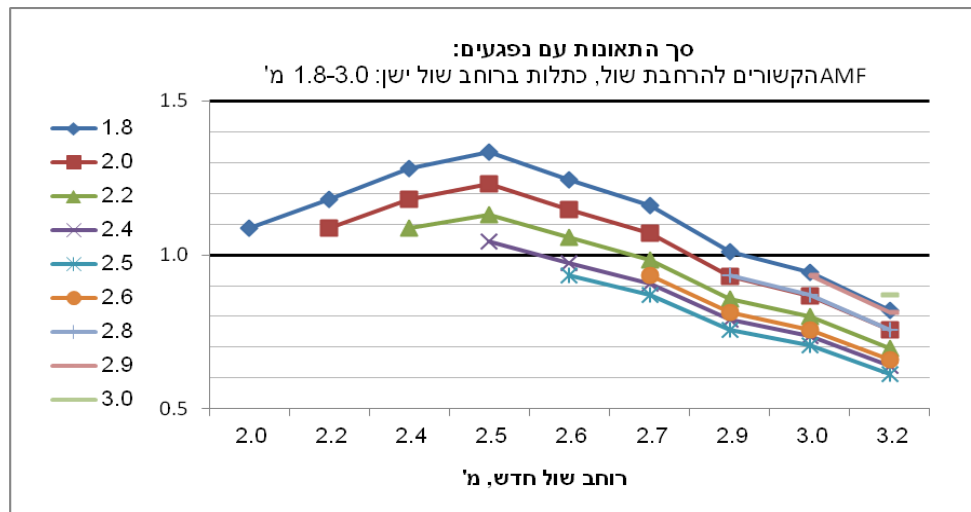
טבלה 4.4. ערכי השינוי בסך התאונות עם נפגעים - AMF - הקשורים לשינויים בערכי המאפיינים הגיאומטריים של קטע דרך - המשך

Table 4.4 - cont.

(ב) AMF הקשורים בהרחבת רוחב שול

רוחב שול, מ'		value _{new} הערך החדש								
		2.0	2.2	2.4	2.5	2.6	2.7	2.9	3.0	3.2
הערך הישן value _{old}	1.8	1.09	1.18	1.28	1.33	1.25	1.16	1.01	0.94	0.82
	2.0		1.09	1.18	1.23	1.15	1.07	0.93	0.87	0.76
	2.2			1.09	1.13	1.06	0.98	0.86	0.80	0.70
	2.4				1.04	0.97	0.91	0.79	0.74	0.64
	2.5					0.93	0.87	0.76	0.71	0.61
	2.6						0.93	0.81	0.76	0.66
	2.8							0.93	0.87	0.76
	2.9								0.93	0.81
	3.0									0.87

ציור נלווה לטבלה 4.4, ב': ערכי AMF הקשורים לערכים החדשים של רוחב שול, כתלות בערך הישן של המאפיין



טבלה 4.4. ערכי השינוי בסך התאונות עם נפגעים - AMF - הקשורים לשינויים בערכי המאפיינים הגיאומטריים של קטע דרך – המשך

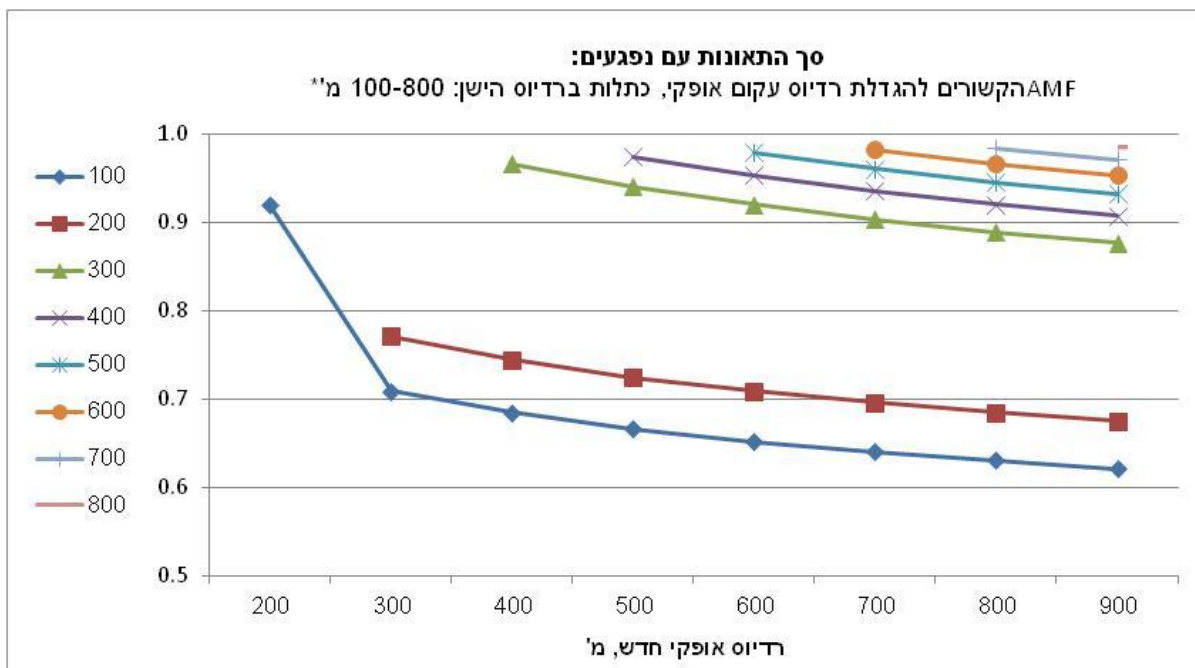
Table 4.4 - cont.

(ג) AMF הקשורים בהגדלת רדיוס עקום אופקי

רדיוס אופקי מזערי, מ'		value _{new} הערך החדש							
		200	300	400	500	600	700	800	900
הערך הישן value _{old}	100*	0.92	0.71	0.68	0.67	0.65	0.64	0.63	0.62
	200*		0.77	0.74	0.72	0.71	0.70	0.68	0.67
	300			0.97	0.94	0.92	0.90	0.89	0.88
	400				0.97	0.95	0.93	0.92	0.91
	500					0.98	0.96	0.95	0.93
	600						0.98	0.97	0.95
	700							0.98	0.97
	800								0.99

* החישובים עבור שיפוע צד 4%

ציור נלווה לטבלה 4.4, ג': ערכי AMF הקשורים לערכים החדשים של רדיוס עקום אופקי, כתלות בערך הישן של המאפיין



טבלה 4.4. ערכי השינוי בסך התאונות עם נפגעים - AMF - הקשורים לשינויים בערכי המאפיינים הגיאומטריים של קטע דרך - המשך

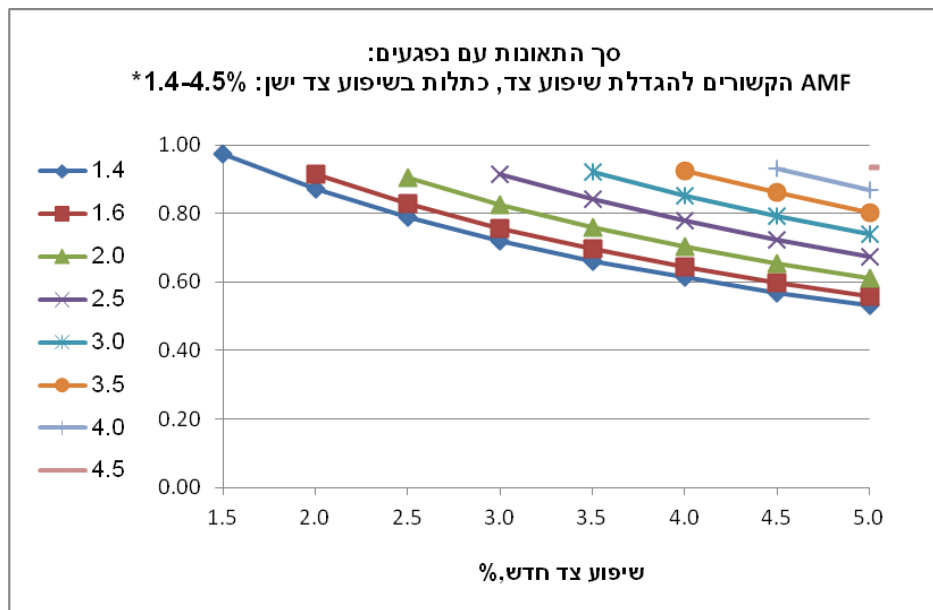
Table 4.4 - cont.

(ד) AMF הקשורים בהגדלת שיפוע צד: בתנאי רדיוס אופקי קטן, עד 300 מ'

שיפוע צד, %		value _{new} הערך החדש							
		1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
הערך הישן value _{old}	1.4	0.98	0.87	0.79	0.72	0.66	0.61	0.57	0.53
	1.6		0.91	0.83	0.76	0.70	0.64	0.60	0.56
	2.0			0.90	0.83	0.76	0.70	0.65	0.61
	2.5				0.91	0.84	0.78	0.72	0.68
	3.0					0.92	0.85	0.79	0.74
	3.5						0.93	0.86	0.80
	4.0							0.93	0.87
	4.5								0.93

ציור נלווה לטבלה 4.4, ד': ערכי AMF הקשורים לערכים החדשים של שיפוע צד, כתלות בערך הישן של המאפיין

הישן של המאפיין



* בתנאי רדיוס אופקי קטן, עד 300 מ'

4.6. השפעת מאפייני הקטע על סך התאונות

המשתנים המשפיעים על סך התאונות ("ת"ד" + "כללי עם נפגעים") בקטע דרך דלת תנועה הם רוחב נתיב, רוחב שול, שיפוע אורך מרבי, שיפוע צד מרבי, נפח התנועה ואורך קטע. בהקשר סך התאונות יש מקום להציג השפעה של ארבעה מאפיינים גיאומטריים שהם:

- רוחב נתיב,
- רוחב שול,
- שיפוע אורך מרבי,

- שיפוע צד מרבי.

יצוין כי, לפי המודל, צורת הקשר עם התאונות אינה רציפה עבור שלושה מאפייני תשתית: (א) רוחב נתיב, כאשר מספר התאונות יורד עם הגדלת רוחב נתיב עד 3 מ' ובהמשך עולה עם הרחבת רוחב נתיב מעל 3 מ'; (ב) רוחב שול, כאשר מספר התאונות עולה עם הגדלת רוחב שול עד 2 מ' ובהמשך יורד עם הרחבת רוחב שול מעל 2 מ'; (ג) שיפוע צד, כאשר מספר התאונות עולה עם עליה בשיפוע צד בתנאי רדיוס אופקי גדול מ-300 מ' ויורד עם עליה בשיפוע צד בתנאי רדיוס אופקי קטן מ-300 מ'.

4.6.1. צורת הקשר בין המאפיינים הגיאומטריים לבין שכיחות התאונות

ציור 4.9 מביא הצגה גרפית של הקשר בין ערכי המאפיינים - רוחב נתיב, רוחב שול, שיפוע אורך מרבי, שיפוע צד, לבין שכיחות התאונות. צורת הקשר לכל מאפיין מוצגת בעזרת שני גרפים אשר נוצרו בעקבות חישוב שני מקרים לדוגמא, עם ערכים מסוימים של יתר מאפייני הקטעים; מקרים אלה מפורטים בסמוך לציורים.

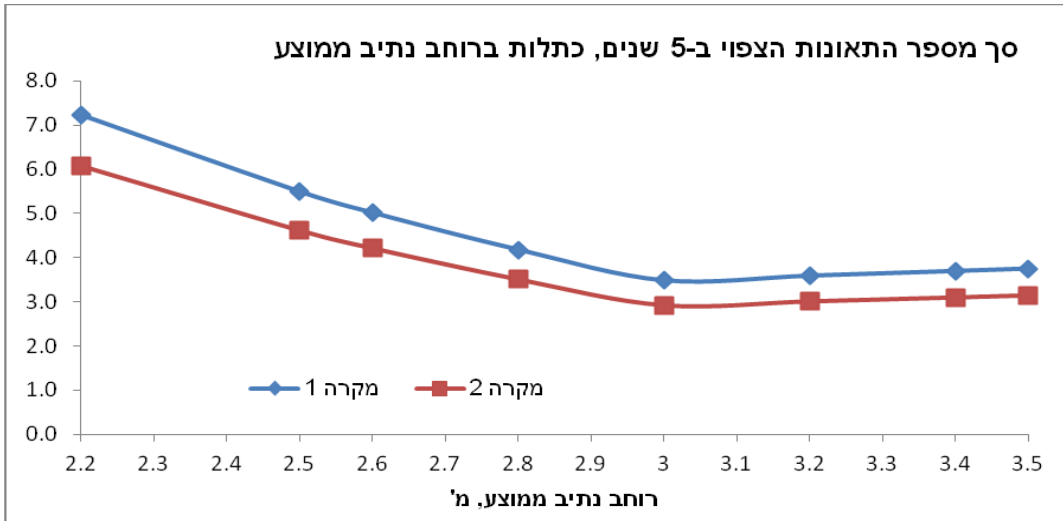
יש לשים לב שהשפעת רוב המאפיינים, פרט לשיפוע צד, מוצגת עבור מצב עם רדיוס אופקי גדול מ-300 מ' (במצב עם רדיוס אופקי קטן מ-300 מ', לפי המודל, החישוב מושפע מערך מסוים של שיפוע צד ולכן, לא מוצג).

השפעת שיפוע צד מוצגת בציור 4.9, ד', עבור המצב עם רדיוס אופקי קטן מ-300 מ', בו מספר התאונות יורד עם עליה בשיפוע הצד, מה שמשקף את ההשפעה החיובית של הגבהה צדית בעקומים (במצב עם רדיוס אופקי גדול מ-300 מ' מתקבלת עליה במספר התאונות עם עליה בשיפוע הצד; מצב זה לא מוצג בציור 4.9).

ציור 4.10 מציג את צורת הקשר בין ערכי המאפיינים הגיאומטריים לבין שכיחות התאונות בשיטת ה"כופל", כאשר לשינוי בערך המאפיין מוצג השינוי היחסי בשכיחות התאונות לעומת ערך מסוים של אותו המאפיין שנבחר כבסיס החישוב ושעבורו ערך הכופל שווה 1. בציור 4.10 מוצג השינוי היחסי בסך התאונות - כופל מספר התאונות, כאשר: (א) רוחב נתיב משתנה לעומת ערך הבסיס 2.8 מ'; (ב) רוחב שול משתנה לעומת ערך הבסיס 2 מ'; (ג) שיפוע אורך משתנה לעומת ערך הבסיס 5%; (ד) שיפוע צד משתנה לעומת ערך הבסיס 4%.

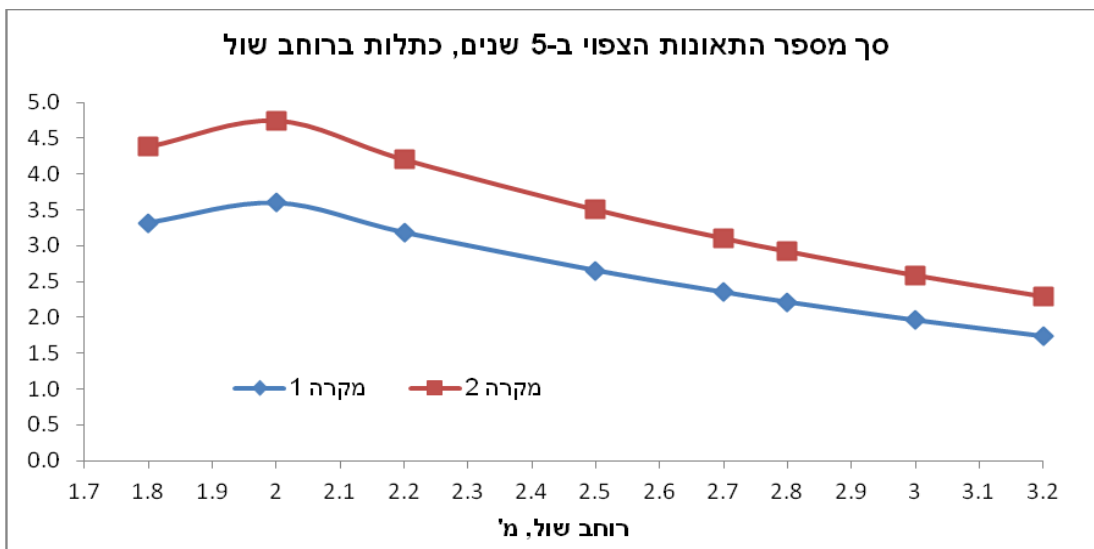
יש לשים לב שגם בציור 4.10 השפעת רוב המאפיינים, פרט לשיפוע צד, מוצגת עבור מצב עם רדיוס אופקי גדול מ-300 מ', בעוד שעבור שיפוע צד (ראה ציור 4.10, ד'), השפעתו מוצגת במצב עם רדיוס אופקי קטן, עד 300 מ', דהיינו עבור התנאים בהם עליה בשיפוע צד מתקשרת עם ירידה במספר התאונות, מה שמשקף את ההשפעה החיובית של הגבהה צדית בעקומים.

סה"כ, ציורים 4.9-4.10 ממחישים כי סך מספר התאונות בקטע דרך דלת תנועה יורד עם עליה ברוחב נתיב עד 3 מ' ועולה לאחר מכן; עולה עם הגדלת רוחב שול עד 2 מ' ויורד לאחר מכן; עולה עם עליה בשיפוע אורך; יורד עם הגדלת שיפוע צד, בהינתן רדיוס אופקי קטן.



מקרה 1 : אורך קטע 1 ק"מ; נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה; רוחב שול 2.2 מ'; שיפוע אורך 5%; שיפוע צד 2%.
מקרה 2 : אורך קטע 1 ק"מ; נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה; רוחב שול 2.8 מ'; שיפוע אורך 5%; שיפוע צד 4%.

א - הקשר בין ערכי רוחב נתיב לבין סך התאונות הצפוי בקטע ב-5 שנים*



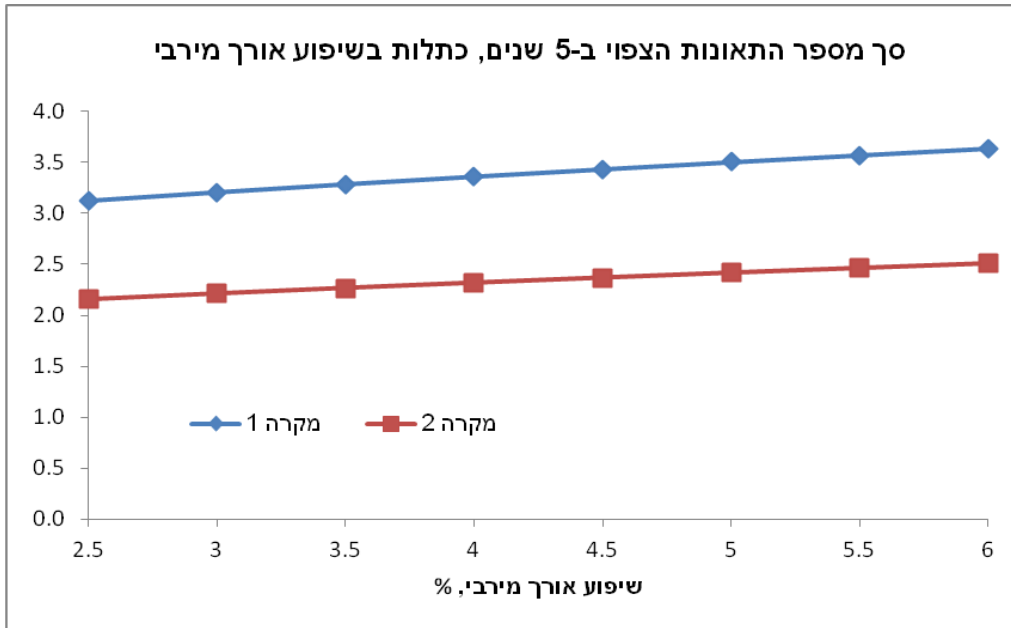
מקרה 1 : אורך קטע 1 ק"מ; נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה; רוחב שול 3 מ'; שיפוע אורך 3%; שיפוע צד 2%.
מקרה 2 : אורך קטע 1 ק"מ; נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה; רוחב שול 3 מ'; שיפוע אורך 5%; שיפוע צד 4%.

ב - הקשר בין ערכי רוחב שול לבין סך מספר התאונות הצפוי בקטע ב-5 שנים*

* בתנאי רדיוס אופקי גדול מ-300 מ'

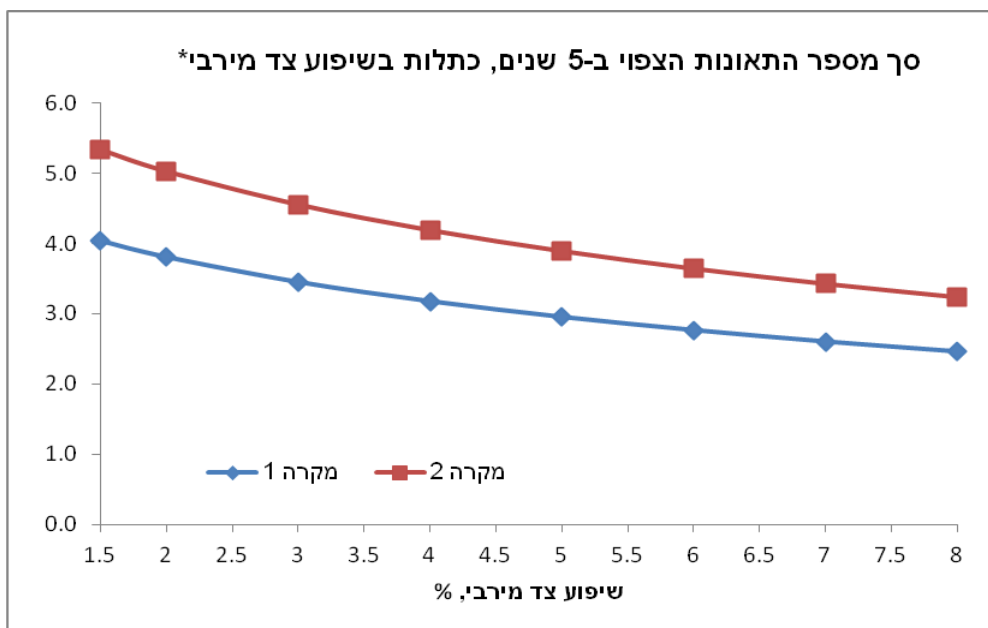
ציור 4.9. הקשר בין המאפיינים הגיאומטריים לבין סך מספר התאונות הצפוי בקטע.

Figure 4.9. A relationship between the geometric characteristics and expected number of total accidents, on a low-volume road section.



מקרה 1: אורך קטע 1 ק"מ; נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה; רוחב נתיב 3 מ'; רוחב שול 2.5 מ'; שיפוע צד 4%.
מקרה 2: אורך קטע 1 ק"מ; נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה; רוחב נתיב 3 מ'; רוחב שול 2.8 מ'; שיפוע צד 2%.

ג - הקשר בין ערכי שיפוע לאורך לבין סך מספר התאונות הצפוי בקטע ב-5 שנים
(בתנאי רדיוס אופקי גדול מ-300 מ')

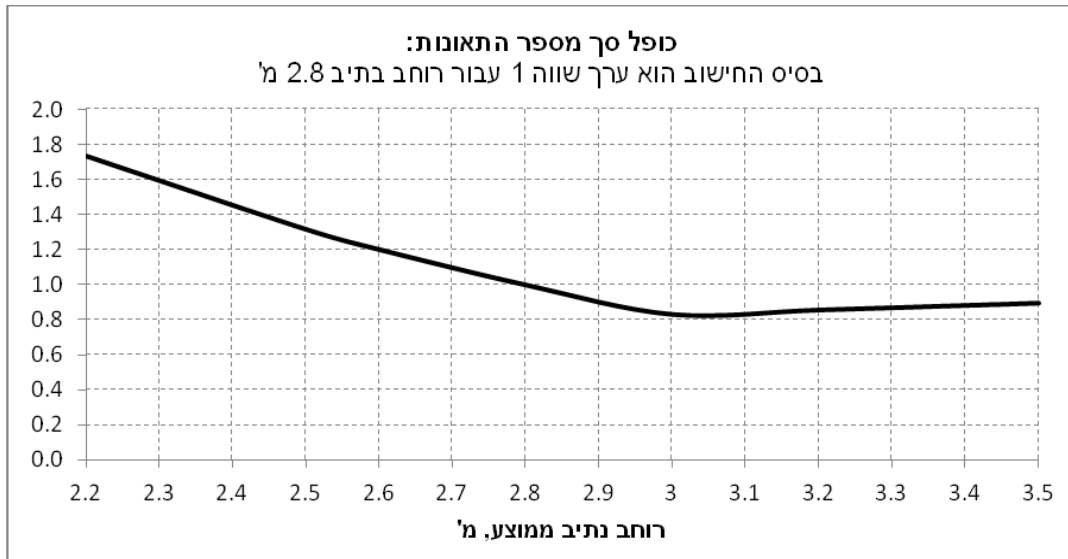


* בתנאי רדיוס אופקי קטן מ-300 מ'

מקרה 1: אורך קטע 1 ק"מ; נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה; רוחב נתיב 3 מ'; רוחב שול 2.8 מ'; שיפוע אורך 5%.
מקרה 2: אורך קטע 1 ק"מ; נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה; רוחב נתיב 3 מ'; רוחב שול 2.2 מ'; שיפוע אורך 3%.

ד - הקשר בין ערכי שיפוע צד לבין סך מספר התאונות הצפוי בקטע ב-5 שנים
ציור 4.9. הקשר בין המאפיינים הגיאומטריים לבין סך מספר התאונות הצפוי בקטע - המשך.

Figure 4.9 - cont.



א - כופל סך מספר התאונות הצפוי בקטע לעומת ערך רוחב נתיב

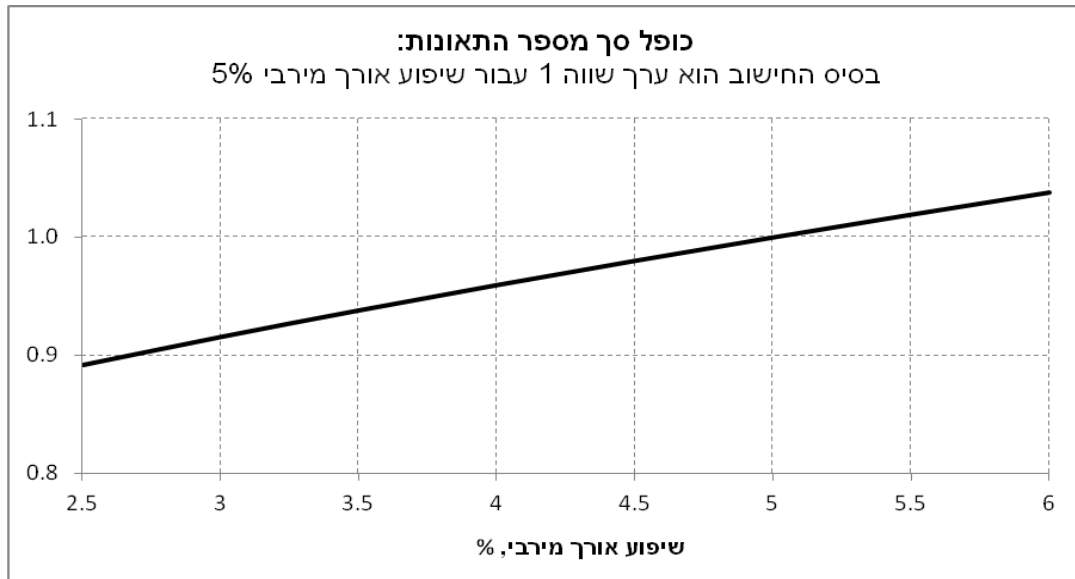


ב - כופל סך מספר התאונות הצפוי בקטע לעומת ערך רוחב שול

הערה: בתנאי רדיוס אופקי גדול מ-300 מ'

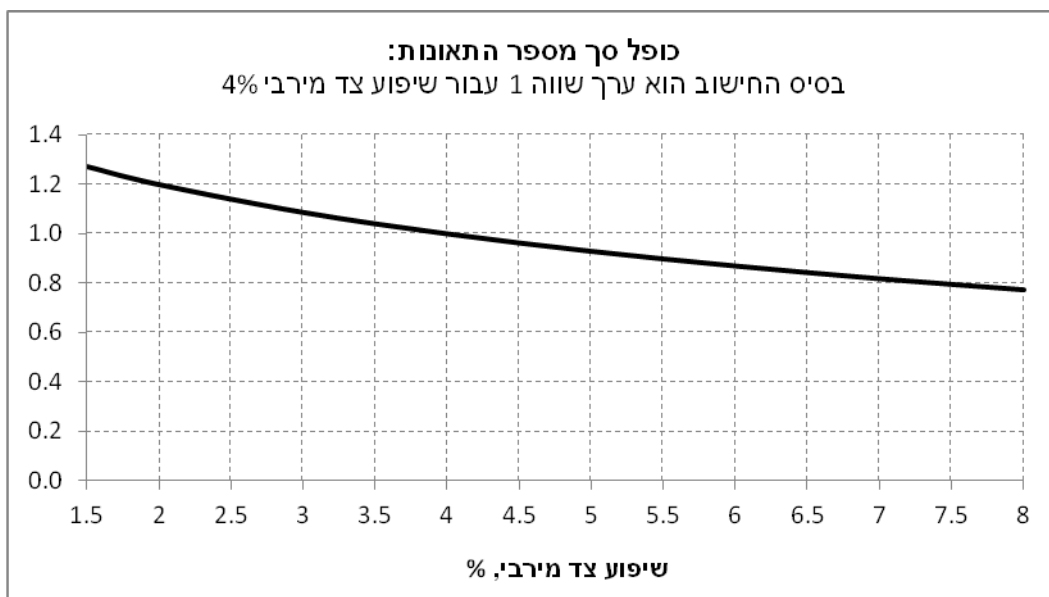
ציור 4.10. צורת הקשר בין ערכי המאפיינים הגיאומטריים לבין סך מספר התאונות הצפוי בקטע ב-5 שנים, בשיטת ה"כופל".

Figure 4.10. The form of relationship between the geometric characteristics and the number of total accidents, expected in 5 years on a low-volume road section, using a "multiplier" method.



* החישוב בתנאי רדיוס אופקי גדול מ-300 מ'

ג - כופל סך מספר התאונות הצפוי בקטע לעומת ערכי שיפוע אורך



* החישוב עבור רדיוס קטן, עד 300 מ'

ד - כופל סך מספר התאונות הצפוי בקטע לעומת ערכי שיפוע צד

ציור 4.10. צורת הקשר בין ערכי המאפיינים הגיאומטריים לבין סך מספר התאונות הצפוי בקטע ב-5 שנים, בשיטת ה"כופל" - המשך.

Figure 4.10 - cont.

4.6.2. מקדמי שינוי בתאונות הקשורים לשינויים במאפיינים הגיאומטריים

טבלאות 4.5, א'-ד', והציורים הנלווים לטבלאות אלה, מציגים את מקדמי השינוי בסך התאונות - AMF - הקשורים לשינויים בערכי המאפיינים הגיאומטריים: רוחב נתיב, רוחב שול, שיפוע לאורך ושיפוע צד, בהתאמה. כל טבלה מראה את AMF כאשר המאפיין משתנה מהערך הישן שהוא קטן יותר (המוצג בשורות) לערך החדש שהוא גדול יותר (המוצג בעמודות). כל ציור הנלווה

לטבלה מציג את ערכיה בצורה גרפית, דהיינו את ערכי AMF הקשורים לערכים החדשים של מאפיין התשתית, כאשר כל עקומה מציגה את ערכי AMF כתלות בערך ישן מסוים של המאפיין.

ניתן לראות שהגדלת שיפוע צד (בתנאי רדיוס אופקי קטן) מביאה לשיפור בטיחותי - ירידה בתאונות, במצב החדש לעומת הישן, כאשר שיפור בטיחותי חזק יותר (AMF קטן יותר) מתקבל בעקבות טיפול במצב הישן עם שיפוע צד קטן יותר.

לעומת זאת, הרחבת רוחב שול לא תמיד מביאה לשיפור בטיחותי (AMF הקטן מ-1), כאשר ירידה בתאונות, לעומת המצב הישן, נצפית בהרחבת רוחב שול מעל 2 מ'; ירידה גדולה יותר בתאונות מושגת בעקבות הרחבה גדולה יותר של רוחב שול. כמו כן, הרחבת רוחב נתיב עם המצב הישן -2.0 מ' משפרת את מצב התאונות (מתקבל AMF הקטן מ-1), אם כי שיפור מרבי בתאונות מושג בהרחבה עד 3 מ'; הרחבת הנתיב עם המצב הישן של 3.0 מ' או גדול יותר מביאה להרעה בתאונות. בנוסף, הגדלת שיפוע אורך מביאה לעליה בתאונות, כאשר השינוי ההפוך - הקטנת שיפוע אורך - יביא לירידה בתאונות (עם ערכי AMF ההפוכים לעומת הערכים המוצגים בטבלה 4.10, ג', דהיינו לקבלת האומדן יש לקחת 1 חלקי הערך המוצג בטבלה).

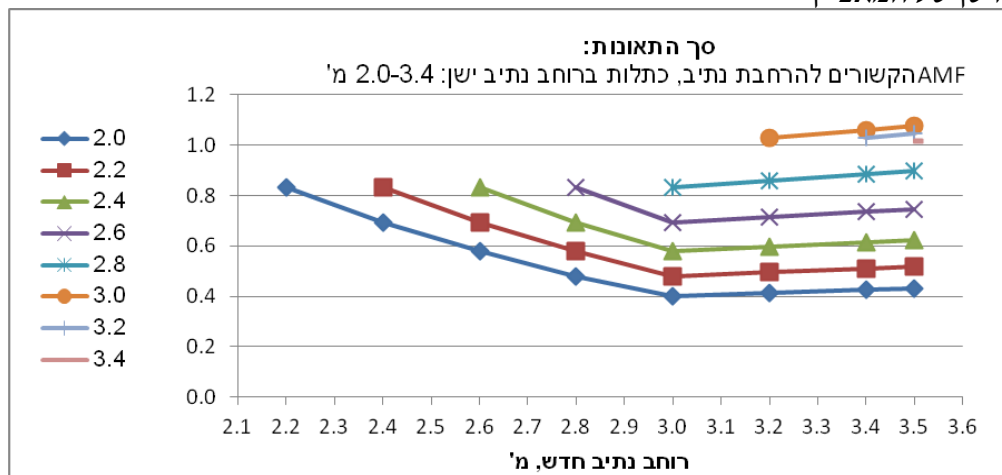
טבלה 4.5. ערכי השינוי בסך התאונות - AMF - הקשורים לשינויים בערכי המאפיינים הגיאומטריים של קטע דרך

Table 4.5. Accident modification factors of total accidents associated with changes in the values of geometric characteristics of a low-volume road section.

(א) AMF הקשורים בהרחבת רוחב נתיב

רוחב נתיב, מ'		value ^{new} הערך החדש							
		2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.5
הערך הישן value ^{old}	2.0	0.83	0.69	0.58	0.48	0.40	0.41	0.42	0.43
	2.2		0.83	0.69	0.58	0.48	0.50	0.51	0.52
	2.4			0.83	0.69	0.58	0.59	0.61	0.62
	2.6				0.83	0.69	0.71	0.74	0.75
	2.8					0.83	0.86	0.88	0.90
	3.0						1.03	1.06	1.08
	3.2							1.03	1.05
	3.4								1.01

ציור נלווה לטבלה 4.5, א': ערכי AMF הקשורים לערכים החדשים של רוחב נתיב, כתלות בערך הישן של המאפיין



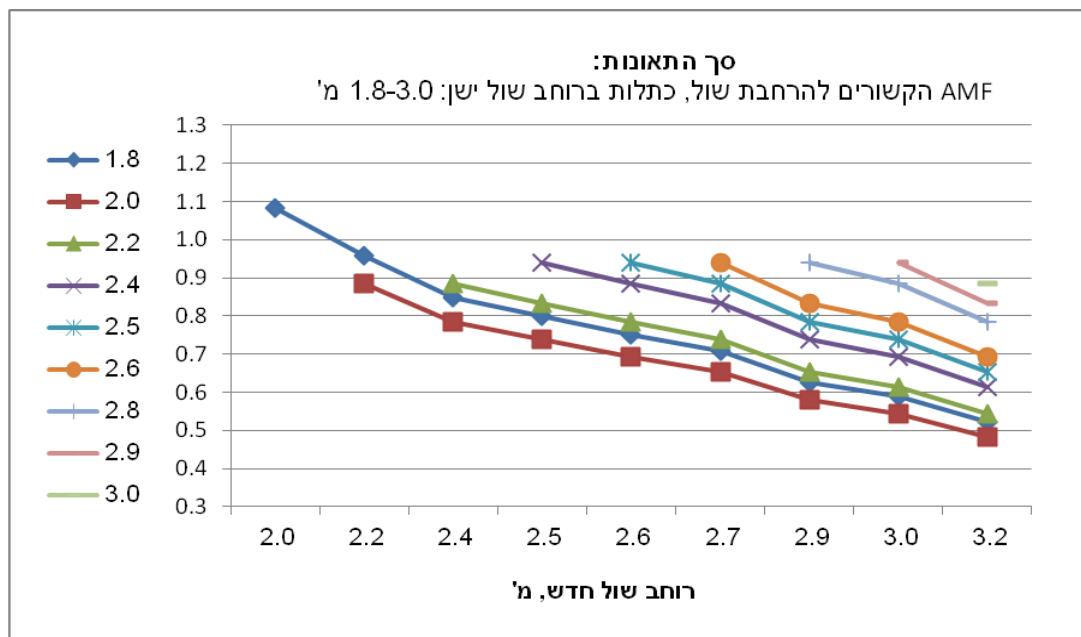
טבלה 4.5. ערכי השינוי בסך התאונות - AMF_n - הקשורים לשינויים בערכי המאפיינים הגיאומטריים של קטע דרך - המשך

Table 4.5 - cont.

AMF (ב) הקשורים בהרחבת רוחב שול

רוחב שול, מ'		value _{new} הערך החדש								
		2.0	2.2	2.4	2.5	2.6	2.7	2.9	3.0	3.2
הערך הישן value _{old}	1.8	1.08	0.96	0.85	0.80	0.75	0.71	0.63	0.59	0.52
	2.0		0.89	0.78	0.74	0.69	0.65	0.58	0.54	0.48
	2.2			0.89	0.83	0.78	0.74	0.65	0.61	0.54
	2.4				0.94	0.89	0.83	0.74	0.69	0.61
	2.5					0.94	0.89	0.78	0.74	0.65
	2.6						0.94	0.83	0.78	0.69
	2.8							0.94	0.89	0.78
	2.9								0.94	0.83
	3.0									0.89

ציור נלווה לטבלה 4.5, ב': ערכי AMF_n הקשורים לערכים החדשים של רוחב שול, כתלות בערך הישן של המאפיין



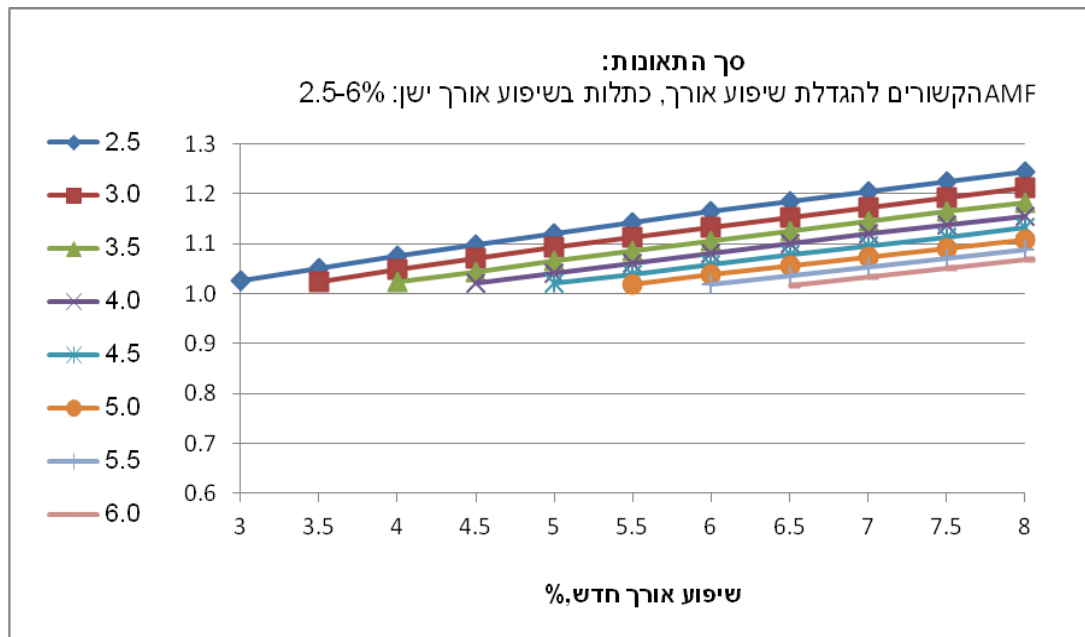
טבלה 4.5. ערכי השינוי בסך התאונות - AMF - הקשורים לשינויים בערכי המאפיינים הגיאומטריים של קטע דרך – המשך

Table 4.5 - cont.

(ג) AMF הקשורים בהגדלת שיפוע לאורך

שיפוע אורך מירבי, %		value _{new} הערך החדש										
		3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8
הערך הישן value _{old}	2.5	1.03	1.05	1.08	1.10	1.12	1.14	1.16	1.18	1.20	1.22	1.24
	3.0		1.02	1.05	1.07	1.09	1.11	1.13	1.15	1.17	1.19	1.21
	3.5			1.02	1.04	1.07	1.09	1.11	1.13	1.15	1.16	1.18
	4.0				1.02	1.04	1.06	1.08	1.10	1.12	1.14	1.16
	4.5					1.02	1.04	1.06	1.08	1.10	1.11	1.13
	5.0						1.02	1.04	1.06	1.07	1.09	1.11
	5.5							1.02	1.04	1.05	1.07	1.09
	6.0								1.02	1.03	1.05	1.07

ציור נלווה לטבלה 4.5, ג': ערכי AMF הקשורים לערכים החדשים של שיפוע אורך מרבי, כתלות בערך הישן של המאפיין



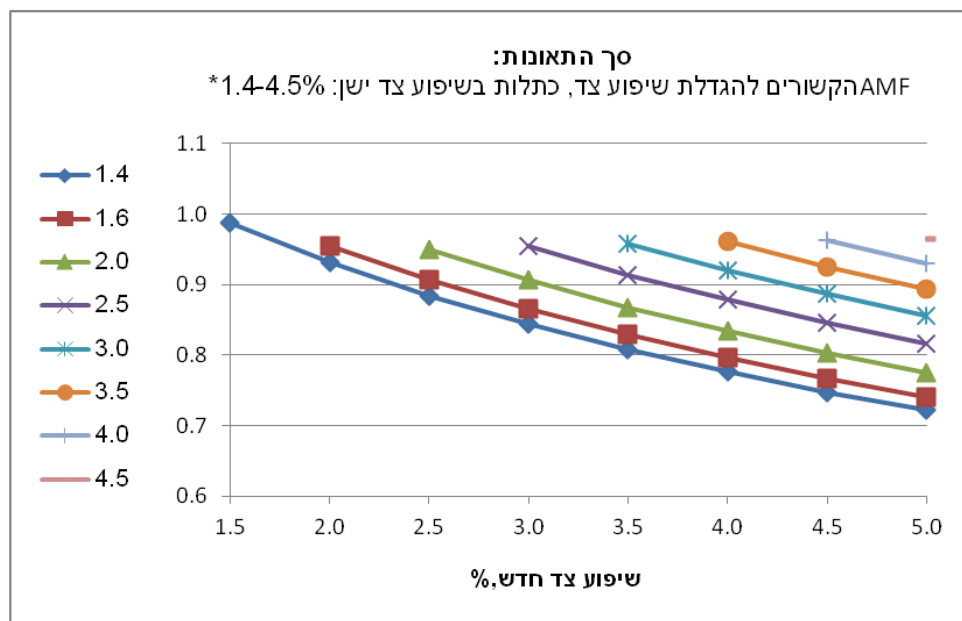
טבלה 4.5. ערכי השינוי בסך התאונות - AMF - הקשורים לשינויים בערכי המאפיינים הגיאומטריים של קטע דרך - המשך

Table 4.5 - cont.

(ד) AMF הקשורים בהגדלת שיפוע צד: בתנאי רדיוס אופקי קטן, עד 300 מ'

שיפוע צד, %		value _{new} הערך החדש							
		1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
הערך הישן value _{old}	1.4	0.99	0.93	0.88	0.84	0.81	0.78	0.75	0.72
	1.6		0.95	0.91	0.87	0.83	0.80	0.77	0.74
	2.0			0.95	0.91	0.87	0.83	0.80	0.78
	2.5				0.95	0.91	0.88	0.85	0.82
	3.0					0.96	0.92	0.89	0.86
	3.5						0.96	0.93	0.89
	4.0							0.96	0.93
	4.5								0.97

ציור נלווה לטבלה 4.5, ד': ערכי AMF הקשורים לערכים החדשים של שיפוע צד, כתלות בערך הישן של המאפיין



* בתנאי רדיוס אופקי קטן, עד 300 מ'

4.7. סיכום להשפעת מאפייני התשתית על התאונות, על סמך כל המודלים ביחד

המודלים המסבירים שהותאמו לתאונות בקטעי הדרכים דלות התנועה הצביעו על קשרים למאפייני התשתיות, כלהלן :

- על תאונות התנגשות בין כלי הרכב משפיעים רוחב שול, רדיוס אופקי מזערי, שיפוע צד מרבי, נפח התנועה ואורך קטע;

- על תאונות רכב יחיד - רוחב שול, רדיוס אופקי מזערי, מצב צדי הדרך, רוחב נתיב, נפח התנועה ואורך קטע;

- על תאונות חמורות - רוחב שול, רוחב נתיב, נפח התנועה ואורך קטע;

- על תאונות עם נפגעים - רוחב נתיב, רוחב שול, רדיוס אופקי מזערי, שיפוע צד מרבי, נפח התנועה ואורך קטע;

- על סך התאונות - רוחב נתיב, רוחב שול, שיפור אורך מרבי, שיפוע צד מרבי, נפח התנועה ואורך קטע.

טבלה 4.6 מסכמת את הממצאים, על פני חמשת המודלים. ניתן לראות כי :

- השפעת מאפייני התשתית השונים הייתה עקבית, בכל המודלים, אם כי, מספר המאפיינים המסבירים משתנה בין המודלים ;

- בכל המודלים, כמצופה, עליה בנפח התנועה מעלה את מספר התאונות ;

- הגדלה התחלתית של רוחב שול, עד 2-2.5 מ', מעלה את מספר התאונות. לעומת זאת, המשך הרחבת השול, מעל 2-2.5 מ', מביא לירידה בתאונות ;

- הרחבה התחלתית של נתיב הנסיעה, עד 3-3.25 מ', מביאה לירידה ברוב סוגי התאונות. הגדלה נוספת של רוחב הנתיב, מעבר ל- 3-3.25 מ', מביאה לעליה בתאונות רכב יחיד וסך התאונות ;

- הגדלת רדיוס אופקי מזערי מזוהה עם ירידה בתאונות עם נפגעים, לרבות התנגשויות בין כלי רכב ותאונות רכב יחיד ;

- שיפוע צד משפיע על התנגשויות בין כלי רכב, תאונות עם נפגעים וסך התאונות, כאשר, בכל המקרים, מספר התאונות עולה עם עליה בשיפוע צד בתנאי רדיוס אופקי גדול, בעוד שמספר התאונות יורד עם עליה בשיפוע צד בתנאי רדיוס אופקי קטן, עד 300 מ' ;

- מצב צדי הדרך משפיע על סוג אחד של תאונות - תאונות רכב יחיד, כאשר שיפור במצב צידי הדרך תורם לירידה בתאונות אלה, אם כי השפעה זו הייתה קטנה יחסית ;

- שיפוע אורך נמצא כמשפיע על סך התאונות בלבד (תאונות ת"ד ו-"כללי עם נפגעים", ביחד), כאשר עליה בשיפוע לאורך מזוהה עם עליה בתאונות.

טבלה 4.6. סיכום להשפעת מאפייני התשתית על התרחשות התאונות, מהסוגים השונים, בקטעי דרכים דלות תנועה

Table 4.6. A summary of impacts of infrastructure characteristics on occurrences of various accident types, on low-volume road sections

שינוי בתאונות עם עליה בערך המשתנה					משתנה מסביר
ALL5 סך התאונות	TDT5 תאונות עם נפגעים	TDS5 תאונות חמורות	SNG5 תאונות רכב יחיד	COL5 התנגשויות בין כלי רכב	
עליה	עליה	עליה	עליה	עליה	נפח תנועה יומי - AADT, אלף כלי רכב
עליה (כאשר רוחב שול עד 2 מ') (שול עד 2 מ')	עליה (כאשר רוחב שול עד 2.5 מ')	עליה (כאשר רוחב שול עד 2.5 מ')	עליה (כאשר רוחב שול עד 2 מ')	עליה (כאשר רוחב שול עד 2.75 מ')	רוחב שול ממוצע, מ'
ירידה (כאשר רוחב שול מעל 2 מ')	ירידה (כאשר רוחב שול מעל 2.5 מ')	ירידה (כאשר רוחב שול מעל 2.5 מ')	ירידה (כאשר רוחב שול מעל 2 מ')	ירידה (כאשר רוחב שול מעל 2.75 מ')	רוחב שול ממוצע, מ'
ירידה (כאשר רוחב שול נתיב עד 3 מ')	ירידה	ירידה	ירידה (כאשר רוחב שול נתיב עד 3.25 מ')	--	רוחב נתיב ממוצע, מ'
עליה (כאשר רוחב שול נתיב מעל 3 מ')	--	--	עליה (כאשר רוחב שול נתיב מעל 3.25 מ')	--	רוחב נתיב ממוצע, מ'
--	ירידה	--	ירידה	ירידה	רדיוס אופקי מזערי, מ'
עליה (כאשר רדיוס אופקי מזערי 300 מ' או גדול יותר)	עליה (כאשר רדיוס אופקי מזערי 300 מ' או גדול יותר)	--	--	עליה (כאשר רדיוס אופקי מזערי 300 מ' או גדול יותר)	שיפוע צד מרבי, %
ירידה (כאשר רדיוס אופקי מזערי קטן מ-300 מ')	ירידה (כאשר רדיוס אופקי מזערי קטן מ-300 מ')	--	--	ירידה (כאשר רדיוס אופקי מזערי קטן מ-300 מ')	שיפוע צד מרבי, %
--	--	--	ירידה	--	ציון משוקלל של צדי הדרך
עליה	--	--	--	--	שיפוע אורך מרבי, %

4.8. דוגמאות לשימוש במודלים להערכת קטע דרך מסוים

על סמך המודלים שפותחו במחקר חושבו מקדמי שינוי בתאונות - AMF - שמתקשרים עם שינויים במאפייני הדרך. מקדמים אלה מוצגים בטבלאות 4.1-4.5 לעיל. בעזרת מקדמי ה-AMF ניתן לבחון את השינויים הצפויים, בסוגי התאונות השונים, בעקבות שינויים במאפייני תשתית נבחרים בקטעי דרך מסוימים.

טבלאות 4.7-4.8 מציגות דוגמאות להערכת השינויים הצפויים במספרי התאונות, מהסוגים השונים, בעקבות שיפורי התשתית, בקטעי דרך מסוימים.

דוגמא 1: בטבלה 4.7 מוצג קטע דרך באורך 1 ק"מ, עם נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה, רוחב נתיב 2.6 מ', רוחב שול 1.8 מ', רדיוס אופקי 300 מ', ציון צדי הדרך 1.5. בקטע דרך זה נרשמו, בחמש שנים: 2 תאונות התנגשות בין כלי הרכב, תאונה 1 של רכב יחיד, תאונה 1 חמורה, 3 תאונות עם נפגעים, סך התאונות ("ת"ד" + "כללי עם נפגעים") - 5.

שיפורי התשתית הנבחרים הם: הגדלת רוחב נתיב מ-2.6 ל-3.0 מ', הגדלת רוחב שול מ-1.8 ל-2.6 מ', הגדלת רדיוס אופקי מ-300 ל-500 מ', שיפור מצב צדי הדרך מציון 1.5 לציון 2.2. בטבלה מוצגים ערכי ה-AMF הקשורים בשיפורי התשתית הנבחרים ומספרי התאונות האמורים להיחסך בעקבות שיפורי התשתית, בהתאם. (סוגי שיפורים מסוימים לא משפיעים על חלק מסוגי התאונות; במקרים אלה בעמודות ה-AMF רשום "אין השפעה").

טבלה 4.7. דוגמא 1: הערכת השינויים הצפויים במספרי התאונות, מהסוגים השונים, בעקבות שיפורי תשתית

Table 4.7. Example 1: evaluation of expected changes in the numbers of various accident types, following road infrastructure improvements

מאפייני הקטע לטיפול	טיפול 1: הרחבת נתיב	טיפול 2: הרחבת שול	טיפול 3: הגדלת רדיוס אופקי	טיפול 4: שיפור מצב צדי הדרך
1	3.0	2.6	500	2.2
2				
2.6				
1.8				
300				
1.5				
2				
3				
3				
AMF	AMF	AMF	AMF	AMF
התנגשויות בין כלי רכב	אין השפעה	1.32	0.91	אין השפעה
תאונות רכב יחיד	0.87	0.76	0.93	0.97
תאונות חמורות	0.87	1.33	אין השפעה	אין השפעה
תאונות עם נפגעים	0.96	1.25	0.94	אין השפעה
סך התאונות	0.69	0.75	אין השפעה	אין השפעה
מספר תאונות שנצפו ב-5 שנים:	מספר התאונות שייחסך	מספר התאונות שייחסך	מספר התאונות שייחסך	מספר התאונות שייחסך
2	--	-0.63	0.17	--
1	0.13	0.24	0.07	0.03
1	0.13	-0.33	--	--
3	0.11	-0.74	0.18	--
5	1.53	1.24	--	--

מטבלה 4.7 ניתן לראות כי:

- הרחבת נתיב מזוהה עם פוטנציאל חיובי של חיסכון ברוב סוגי התאונות, כאשר החיסכון המרבי צפוי בסך התאונות;

- הרחבת שול (בטווח הנבחן בדוגמא זו) מבטיחה חיסכון בתאונות רכב יחיד ובסך התאונות, כאשר על תאונות התנגשות, תאונות חמורות ותאונות עם נפגעים צפויה השפעה שלילית;

- הגדלת רדיוס אופקי מבטיחה חיסכון קל בתאונות התנגשות, תאונות רכב יחיד ותאונות עם נפגעים;

- שיפור צדי הדרך מבטיח חיסכון מינורי מאוד בתאונות רכב יחיד.

סה"כ, נראה כי בין שיפורי התשתית המושווים בדוגמא זו, חיסכון עקבי ומשמעותי יותר בתאונות מזוהה: בעדיפות הראשונה - עם הרחבת רוחב נתיב; בעדיפות השנייה - עם הגדלת רדיוס עקום אופקי; בעדיפות השלישית - עם הרחבת שול; בעדיפות הרביעית - עם שיפור צדי הדרך.

דוגמא 2: בטבלה 4.8 מוצג קטע דרך באורך 1 ק"מ, עם נפח תנועה 2,000 כלי רכב ביממה, רוחב נתיב 2.6 מ', רוחב שול 2.0 מ', רדיוס אופקי 200 מ', ציון צדי הדרך 1.5. בקטע דרך זה נרשמו, בחמש שנים: 2 תאונות התנגשות בין כלי הרכב, 2 תאונות רכב יחיד, תאונה 1 חמורה, 4 תאונות עם נפגעים, סך התאונות ("ת"ד" + "כללי עם נפגעים") - 5.

שיפורי התשתית הנבחנים הם: הגדלת רוחב נתיב מ-2.6 ל-2.8 מ', הגדלת רוחב שול מ-2.0 ל-3.0 מ', הגדלת רדיוס אופקי מ-200 ל-400 מ', הגדלת שיפוע צד מ-2% ל-4% (בתנאי רדיוס אופקי קטן, מדובר בשיפור הגבהה צדית). בטבלה מוצגים ערכי AMF הקשורים בשיפורי התשתית הנבחנים ומספרי התאונות האמורים להיחסך בעקבות שיפורי התשתית, בהתאם. (סוגי שיפורים מסוימים לא משפיעים על חלק מסוגי התאונות; במקרים אלה בעמודות ה-AMF רשום "אין השפעה").

טבלה 4.8. דוגמא 2: הערכת השינויים הצפויים במספרי התאונות, מהסוגים השונים, בעקבות שיפורי תשתית

Table 4.8. Example 2: evaluation of expected changes in the numbers of various accident types, following road infrastructure improvements

מאפייני הקטע לטיפול	טיפול 1: הרחבת נתיב	טיפול 2: הרחבת שול	טיפול 3: הגדלת רדיוס אופקי	טיפול 4: הגדלת שיפוע צד (רדיוס קטן)		
					AMF	שייחסך
1	2.8	3.0	400	4	אורך, ק"מ	
2					נפח תנועה יומי, אלף כלי רכב	
2.6					רוחב נתיב, מ'	
2.0					רוחב שול, מ'	
200					רדיוס אופקי מזערי, מ'	
1.5					ציון צדי הדרך	
2					שיפוע צד, %	
3					שיפוע לאורך, %	
					סוג תאונות:	
					התנגשויות בין כלי רכב	אין השפעה
					תאונות רכב יחיד	0.93
					תאונות חמורות	0.93
					תאונות עם נפגעים	0.98
					סך התאונות	0.83
					מספר תאונות שנצפו ב-5 שנים:	מספר התאונות שייחסך
					התנגשויות בין כלי רכב	--
					תאונות רכב יחיד	0.14
					תאונות חמורות	0.07
					תאונות עם נפגעים	0.07
					סך התאונות	0.84
					מספר תאונות שייחסך	0.63
					אין השפעה	--
					אין השפעה	--
					אין השפעה	1.19
					מספר התאונות שייחסך	0.83

מטבלה 4.8 ניתן לראות כי:

- הרחבת נתיב מזוהה עם פוטנציאל חיובי של חיסכון קל ברוב סוגי התאונות, כאשר החיסכון המרבי צפוי בסך התאונות;
 - הרחבת שול (בטווח הנבחן בדוגמא זו) מזוהה עם חיסכון ניכר ברוב סוגי התאונות פרט לתאונות התנגשות בהן צפויה הרעה קלה;
 - הגדלת רדיוס אופקי מבטיחה חיסכון ניכר בתאונות התנגשות ותאונות עם נפגעים, כאשר בתאונות רכב יחיד צפוי חיסכון קל;
 - הגדלת שיפוע צד מבטיחה חיסכון בתאונות התנגשות, תאונות עם נפגעים וסך התאונות.
- סה"כ, נראה כי בין שיפורי התשתית המושווים בדוגמא זו, חיסכון עקבי ומשמעותי יותר בתאונות מזוהה: בעדיפות הראשונה - עם הגדלת שיפוע צד; בעדיפות השנייה - עם הגדלת רדיוס אופקי; בעדיפות השלישית - עם הרחבת שול; בעדיפות הרביעית - עם הרחבת נתיב.

5. סיכום ומסקנות

5.1. סיכום לממצאי המחקר

כללי

מטרת המחקר הנוכחי הייתה לזהות קשרים סטטיסטיים בין המאפיינים הגיאומטריים ואחרים של דרכים חד-מסלוליות המשרתות נפחי תנועה נמוכים (דלות תנועה) לבין מספר וסוגי התאונות. בביצוע המחקר היו שלבים אלה: סקר ספרות בינלאומית בנושא המחקר; הכנת בסיס הנתונים למחקר; ניתוח הנתונים ופיתוח מודלים מסבירים. בהמשך, על סמך המודלים שפותחו במחקר נבנו כלים כמותיים לשימוש ההנדסי במסגרת תהליכי תכנון דרכים חדשות ו/או שיפור מאפייני הדרכים הקיימות וכמו כן, גובשו המלצות לשילוב ממצאי המחקר בתהליכי התכנון של דרכים דלות תנועה, בתנאי הארץ.

סקר ספרות

סקר הספרות שנערך במחקר התייחס לנושאים אלה: הגדרות של דרכים דלות תנועה, במדינות השונות; הנחיות תכנון של המאפיינים השונים בדרכים דלות התנועה, במדינות השונות; ממצאים מפיתוח מודלים מסבירים לקשר בין נפחי התנועה, מאפיינים גיאומטריים ואחרים של הדרכים ושכיחות התאונות, בדרכים החד-מסלוליות עם דגש על דרכים דלות תנועה; ריכוז ממצאי המחקרים מהארץ על בטיחות בדרכים חד-מסלוליות וחד-מסלוליות דלות תנועה. בסקר הספרות נמצא כי:

* הגדרה של דרכים דלות תנועה: בכל המדינות, דרך דלת תנועה היא דרך בין-עירונית חד-מסלולית דו-סטריית. בין המדינות השונות יש הבדלים בנפח התנועה היומי המרבי המגדיר דרך דלת תנועה, כאשר במספר מדינות, ישנן מספר היררכיות של דרכים דלות התנועה המוגדרות בטווחים השונים של נפחי תנועה ממוצעים. טווח הערכים של נפח התנועה נע בין 100 ל-6,000 כלי רכב, ליממה, כאשר לרוב המדינות טווח הערכים הוא בין 400 ל-2,000 כלי רכב ליממה;

* לגבי הנחיות תכנון לדרכים דלות תנועה: עקב נפח תנועה נמוך, התקציב לסלילה ולאחזקה של דרכים דלות התנועה נמוך, לכן ערכי התכן המזעריים לדרכים אלו נמוכים ביחס לערכי התכן המזעריים לדרכים החד-מסלוליות עם נפחי תנועה גדולים יותר. ערכי התכן המזעריים אותם נהוג לצמצם הם: מהירות התכן, רוחב נתיב ורוחב שול;

* לגבי המודלים הכמותיים להערכת מספרי התאונות: נמצאו דוגמאות רבות למודלים לחיזוי התאונות בדרכים בין-עירוניות חד-מסלוליות. לפיתוח מודלים אלה השתמשו במאפיינים הגיאומטריים של קטעי הדרכים, נפחי התנועה, והנתונים של תאונות הדרכים. באמצעות שיטות סטטיסטיות זוהו המאפיינים המשפיעים ונמצא ביטוי כמותי להשפעתם של משתנים מסוימים על מספר או שיעור התאונות (תאונות לנסועה) בקטע דרך. במודלים אחרים, נבחנה השפעה של ערכים תכנוניים של רכיב תכנוני אחד או של מספר רכיבי תכנון על שיעור התאונות הממוצע החזוי שהתקבל ממודל בסיסי. רכיבי התכנון שהשפעתם נמצאה במודלים הם: רוחב נתיב, רוחב שול, שילוב בין רוחב נתיב ורוחב שול, יחס בין שול סלול לשול לא סלול, סוג שול, חוסר בהגבהה צידית (ביחס להנחיות התכנון), עקמומיות, עקביות ושיפוע.

* לגבי המחקרים מהארץ: במחקר על דרכים חד-מסלוליות בין-עירוניות בעלות ארבע ספרות נמצא שיש מחסור בנתונים על נפחי התנועה לקטעי דרך רבים מסוג זה. נמצא ששיעור התאונות בדרכים אלו גבוה ביחס לשיעור התאונות בשאר סוגי הדרכים ברשת הבין-עירונית. נמצא קשר בין מספר התאונות עם נפגעים בדרכים אלה לבין נפח התנועה והמדד שמבטא את המורכבות הגיאומטרית של הדרך. כמו כן, נמצא קשר בין חומרת התאונות, טופוגרפיה תלולה, ומדד המורכבות הגיאומטרית של הדרך.

במחקר אחר על קשר בין עקביות התכן (מידת שינוי מועטה של מהירות התכן בין הקטעים הסמוכים של דרך חד-מסלולית) לבטיחות, נמצא קשר בין עלייה בעקביות לירידה בשיעור התאונות.

במחקר נוסף של רמת הבטיחות של דרכים דלות תנועה בישראל הוגדרה דרך דלת תנועה בארץ, עם נפח יומי ממוצע עד 3,000 כלי רכב ביממה. על סמך נתונים על התאונות בדרכים אלה הותאם מודל לחיזוי מספר התאונות החמורות על-פי נפחי התנועה. לכל קטע דרך חושב מדד בטיחות על פי הסטייה בין מספר התאונות בפועל למספר התאונות החזוי. בעזרת מדד זה, נמצאו קטעי דרך בטוחים ומסוכנים באופן מובהק, לעומת ממוצע התאונות בקטעים מסוג זה.

סה"כ, על סמך סקר הספרות הוסק כי, בעולם, קיים ידע וניסיון סטטיסטי לפיתוח וכיול מודלים שונים להערכת מספרי התאונות בדרכים דלות תנועה, על סמך הנתונים של התאונות, נפחי התנועה והמאפיינים הגיאומטריים של דרכים אלה. עם זאת, הרכב המשתנים המסבירים שנשאר במודל הסטטיסטי לחיזוי מספר התאונות אינו קבוע ומשתנה בתלות בהגדרות הקטעים לניתוח, זמינות הנתונים, היקף הנתונים הנבחנים, מטרות הניתוח וכד'.

בסיס הנתונים של המחקר

בסקר הספרות נמצא כי בין המדינות השונות קיימים הבדלים בנפח התנועה היומי המרבי המגדיר דרך דלת תנועה. בין המדינות השונות, טווח הערכים של נפח התנועה בדרך דלת תנועה נע בין 100 ל-6,000 כלי רכב, ליממה. לרוב המדינות טווח הערכים הוא בין 400 ל-2,000 כלי רכב ליממה, כאשר בישראל קטעי דרכים עם נפחי תנועה כאלה נדירים למדי.

בתאום עם מזמין המחקר דרכים דלות תנועה בתנאי הארץ ובהתאמה, קטעי הדרכים שנכללו במחקר, הוגדרו כלהלן:

(ד) קטעי דרכים חד-מסלוליים המתחזקים על-ידי החברה הלאומית לדרכים;

(ה) נפח התנועה היומי הממוצע בקטעי הדרך יהיה עד 3,000 כלי רכב (במעוגל);

(ו) קטעי הדרך הכלולים במחקר יהיו הן בגבולות הקו הירוק והן בשטחי יהודה ושומרון.

בעקבות ניתוח קבצי הלמ"ס והצלבתם עם המידע ממערכת מני"ב של מע"צ ברשת הדרכים הלא עירונית נמצאו 164 קטעי דרך כאלה, באורך כולל של 1451 ק"מ.

על קטעי הדרכים דלות התנועה שנבחרו למחקר נאסף מידע מפורט. המידע על המאפיינים הגיאומטריים ומאפייני תשתית נוספים התקבל מנתוני סקר דרכים שנערך בשנת 2010 ע"י החברה הלאומית לדרכים ואשר סיפק את מאפייני הדרכים למערכת ניהול בטיחות (מני"ב) של החברה. המידע על תאונות הדרכים ונפחי התנועה נאסף מקבצי הלמ"ס.

הנתונים על מאפייני הדרכים נאספו במני"ב עבור סגמנטים באורך של כ-100 מ'. לצורכי המחקר קובצו הסגמנטים לקטעי דרך קצרים באורך של כ-1 ק"מ. לכל קטע קצר הופקו כל המאפיינים הזמינים, באמצעות מיצוע, על פני הסגמנטים שמרכיבים אותו, או כלל אחר, שמתוארים בפרק 2. כמו כן, על הנתונים נעשו בדיקות לוגיות רבות. לאחר הסרת הסגמנטים שלא התאימו להגדרת קטעי הדרכים במחקר והפקת המאפיינים, בסיס הנתונים של המחקר כלל 1365 קטעי דרך קצרים, באורך כולל של 1235 ק"מ.

המידע על מספרי תאונות הדרכים, בכל אחד מהקטעים, נאסף עבור חמש שנים, 2006-2010, לפי שישה סוגי תאונות שהם:

- התנגשויות בין כלי הרכב מתוך התאונות עם נפגעים (ת"ד),
- תאונות רכב יחיד מתוך התאונות עם נפגעים (ת"ד),
- תאונות חמורות - קשות וקטלניות ביחד (ת"ד),
- סך התאונות עם נפגעים (ת"ד),
- סך כל התאונות: ת"ד + "כללי עם נפגעים",
- התנגשויות בבעלי חיים (ת"ד).

בהמשך, עבור סוג תאונות "התנגשויות בבעלי חיים" לא נערך ניתוח כי סה"כ בשנים 2006-2010 בכל קטעי המחקר נרשמו 10 תאונות מסוג זה, בלבד.

פיתוח מודלים מסבירים לקשר בין מאפייני הקטעים ותאונות הדרכים

על הנתונים שנאספו, נערך מגוון ניתוחים חד-ורב-פרמטריים, על מנת לפתח מודלים מסבירים לקשר בין מאפייני הדרכים דלות התנועה לבין התרחשות התאונות. המודלים המסבירים פותחו לחמישה סוגי תאונות דרכים שהם:

- א. התנגשויות בין כלי רכב ("ת"די") - לפי המודל שהותאם במחקר, משתנים המשפיעים על תאונות התנגשות הם רוחב שול, רדיוס אופקי מזערי, שיפוע צד מרבי, נפח התנועה ואורך קטע.
- ב. תאונות רכב יחיד ("ת"די") - לפי המודל שהותאם במחקר, משתנים המשפיעים על תאונות אלה הם רוחב שול, רדיוס אופקי מזערי, מצב צדי הדרך, רוחב נתיב, נפח התנועה ואורך קטע.
- ג. תאונות חמורות (קשות וקטלניות ביחד) - לפי המודל שהותאם במחקר, משתנים המשפיעים על תאונות חמורות הם רוחב שול, רוחב נתיב, נפח התנועה ואורך קטע.
- ד. סך התאונות עם נפגעים (כל התאונות "ת"די") - לפי המודל שהותאם במחקר, משתנים המשפיעים על תאונות עם נפגעים הם רוחב נתיב, רוחב שול, רדיוס אופקי מזערי, שיפוע צד מרבי, נפח התנועה ואורך קטע.
- ה. סך התאונות ("ת"די" ו"כללי עם נפגעים" ביחד) - לפי המודל שהותאם במחקר, משתנים המשפיעים על סך התאונות הם רוחב נתיב, רוחב שול, שיפוע אורך מרבי, שיפוע צד מרבי, נפח התנועה ואורך קטע.

כל מודל אומד את מספר התאונות הצפוי בקטע דרך *במשש שנים*. (הערך השנתי הינו חמישית מהאומדן המתקבל בעזרת מודל).

טבלה 5.1 מסכמת את הממצאים, על פני חמשת המודלים. ניתן לראות כי:

- השפעת מאפייני התשתית השונים הייתה עקבית, בכל המודלים, אם כי, מספר המאפיינים המסבירים משתנה בין המודלים;

- בכל המודלים, כמצופה, עליה בנפח התנועה מעלה את מספר התאונות;

- הגדלה התחלתית של רוחב שול, עד 2-2.5 מ', מעלה את מספר התאונות. לעומת זאת, המשך הרחבת השול, מעל 2-2.5 מ', מביא לירידה בתאונות;

- הרחבה התחלתית של נתיב הנסיעה, עד 3-3.25 מ', מביאה לירידה ברוב סוגי התאונות. הגדלה נוספת של רוחב הנתיב, מעבר ל- 3-3.25 מ', מביאה לעליה בתאונות רכב יחיד וסך התאונות;

- הגדלת רדיוס אופקי מזערי מזוהה עם ירידה בתאונות עם נפגעים, לרבות התנגשויות בין כלי רכב ותאונות רכב יחיד;

- שיפוע צד משפיע על התנגשויות בין כלי רכב, תאונות עם נפגעים וסך התאונות, כאשר, בכל המקרים, מספר התאונות עולה עם עליה בשיפוע צד בתנאי רדיוס אופקי גדול, בעוד שמספר התאונות יורד עם עליה בשיפוע צד בתנאי רדיוס אופקי קטן, עד 300 מ';

- מצב צדי הדרך משפיע על סוג אחד של תאונות - תאונות רכב יחיד, כאשר שיפור במצב צידי הדרך תורם לירידה בתאונות אלה, אם כי השפעה זו הייתה קטנה יחסית;

- שיפוע אורך נמצא כמשפיע על סך התאונות בלבד (תאונות ת"ד ו-"כללי עם נפגעים", ביחד), כאשר עליה בשיפוע לאורך מזוהה עם עליה בתאונות.

כלים כמותיים לשימוש ההנדסי

על סמך המודלים שפותחו במחקר, נבנו כלים כמותיים המאפשרים להמחיש את הקשרים בין המאפיינים הגיאומטריים של דרכים דלות התנועה לבין מספר התאונות הצפוי בקטע. כלים אלה הם:

* הצגת קשרים כמותיים בין כל אחד מהמאפיינים הגיאומטריים של קטעי הדרכים לבין שכיחות התאונות;

* הערכת מקדמי שינוי בתאונות שמתקשרים עם שינויים במאפיינים הגיאומטריים של קטע דרך.

הכלים הכמותיים נבנו עבור כל אחד מחמשת סוגי התאונות שנותחו במחקר ועבור כל אחד מהמאפיינים הגיאומטריים של הקטעים שנמצאו כמשפיעים על התרחשות התאונות, לפי המודלים.

ההצגה הגרפיים של הקשרים נערכה בשני אופנים:

(א) הקשר בין ערכי מאפיין מסוים לבין שכיחות התאונות מוצג בעזרת שני גרפים אשר נוצרו בעקבות חישוב שני מקרים לדוגמא, עם ערכים מסוימים של יתר מאפייני הקטעים;

(ב) צורת הקשר בין ערכי מאפיין מסוים לבין שכיחות התאונות מוצגת בשיטת ה"כופל", כאשר לכל שינוי בערך המאפיין מוצג השינוי היחסי בשכיחות התאונות לעומת ערך מסוים של אותו המאפיין שנבחר כבסיס החישוב ושעבורו ערך הכופל שווה 1.

טבלה 5.1. סיכום להשפעת מאפייני התשתית על התרחשות התאונות, מהסוגים השונים, בקטעי דרכים דלות תנועה

Table 5.1. A summary of impacts of infrastructure characteristics on occurrences of various accident types, on low-volume road sections

שינוי בתאונות עם עליה בערך המשתנה					משתנה מסביר
ALL5 סך התאונות	TDT5 תאונות עם נפגעים	TDS5 תאונות חמורות	SNG5 תאונות רכב יחיד	COL5 התנגשויות בין כלי רכב	
עליה	עליה	עליה	עליה	עליה	נפח תנועה יומי - AADT, אלף כלי רכב
עליה (כאשר רוחב שול עד 2 מ') (שול עד 2 מ')	עליה (כאשר רוחב שול עד 2.5 מ')	עליה (כאשר רוחב שול עד 2.5 מ')	עליה (כאשר רוחב שול עד 2 מ')	עליה (כאשר רוחב שול עד 2.75 מ')	רוחב שול ממוצע, מ'
ירידה (כאשר רוחב שול מעל 2 מ')	ירידה (כאשר רוחב שול מעל 2.5 מ')	ירידה (כאשר רוחב שול מעל 2.5 מ')	ירידה (כאשר רוחב שול מעל 2 מ')	ירידה (כאשר רוחב שול מעל 2.75 מ')	רוחב שול ממוצע, מ'
ירידה (כאשר רוחב שול נתיב עד 3 מ')	ירידה	ירידה	ירידה (כאשר רוחב שול נתיב עד 3.25 מ')	--	רוחב נתיב ממוצע, מ'
עליה (כאשר רוחב שול נתיב מעל 3 מ')	--	--	עליה (כאשר רוחב שול נתיב מעל 3.25 מ')	--	רוחב נתיב ממוצע, מ'
--	ירידה	--	ירידה	ירידה	רדיוס אופקי מזערי, מ'
עליה (כאשר רדיוס אופקי מזערי 300 מ' או גדול יותר)	עליה (כאשר רדיוס אופקי מזערי 300 מ' או גדול יותר)	--	--	עליה (כאשר רדיוס אופקי מזערי 300 מ' או גדול יותר)	שיפוע צד מרבי, %
ירידה (כאשר רדיוס אופקי מזערי קטן מ-300 מ')	ירידה (כאשר רדיוס אופקי מזערי קטן מ-300 מ')	--	--	ירידה (כאשר רדיוס אופקי מזערי קטן מ-300 מ')	שיפוע צד מרבי, %
--	--	--	ירידה	--	ציון משוקלל של צדי הדרך
עליה	--	--	--	--	שיפוע אורך מרבי, %

להצגת הממצאים בשיטת ה"כופל" נבחרו ערכים טיפוסיים של מאפייני הקטעים - ערכי הבסיס, כלהלן: רוחב נתיב 2.8 מ'; רוחב שול 2 מ'; ציון משוקלל של מצב צדי הדרך 1.5; רדיוס אופקי מזערי 200 מ'; שיפוע צד מרבי 4%; שיפוע אורכי מרבי 5%. כלומר, הגרפים בשיטת ה"כופל" מראים את השינוי היחסי בשכיחות התאונות כאשר ערך המאפיין משתנה לעומת ערך הבסיס.

אוסף מלא של הכלים הכמותיים לשימוש ההנדסי מוצג בפרק 4 של הדו"ח. ידע כמותי זה לגבי השינוי הצפוי בתאונות, בעקבות שינוי במאפיין הגיאומטרי, עשוי לסייע בעת קבלת ההחלטות בשלבי תכנון של דרך חדשה או שיפור קטע דרך קיים/ טיפול באתר תורפה.

5.2. דיון והמלצות

המודלים שפותחו במחקר לביטוי הקשר בין המאפיינים הגיאומטריים ושכיחות התאונות יכולים לשמש בסיס לבחירת המאפיינים הגיאומטריים של הקטעים, הן בתהליכי התכנון והן בתהליכי תחזוקת הכבישים או טיפול באתרי תורפה.

בעקבות בחינה משולבת של ממצאי המודלים שפותחו במחקר, ממצאי סקר הספרות והמידות הגבוליות של המאפיינים הגיאומטריים מההנחיות לתכנון דרכים בין-עירוניות בארץ, פרק זה מציג המלצות לשילוב ממצאי המחקר בתהליכי תכנון של דרכים דלות תנועה.

כאשר מסכמים את כל המאפיינים המשפיעים על כל חמשת סוגי התאונות שנבחנו במחקר, מתקבלים שישה מאפיינים משפיעים שהם:

- (1) רוחב שול המופיע במודלים לכל סוגי התאונות;
- (2) רוחב נתיב המופיע ב-4 מודלים מתוך 5;
- (3) רדיוס אופקי מזערי המופיע ב-3 מודלים מתוך 5;
- (4) שיפוע צד מרבי המופיע ב-3 מודלים מתוך 5;
- (5) מצב צידי הדרך המופיע במודל לסוג תאונות אחד (תאונות רכב יחיד);
- (6) שיפוע לאורך המופיע במודל לסוג תאונות אחד (סך התאונות).

להלן סיכום הממצאים עבור כל אחד מהמאפיינים, ע"פ ההיבט ההנדסי.

5.2.1 רוחב שול

על-פי תוצאות המחקר: מה שמאפיין את השפעת השול במודלים לכל סוגי התאונות הוא נקודת השבירה עם ערך מרבי בשכיחות תאונות. בין רוחב שול של 1.1 מ' עד רוחב 2.0-2.8 מ' (תלוי בסוג התאונות) קיימת מגמת עלייה בתאונות עם עלייה ברוחב שול. כאשר השול רחב יותר מ- 2.0-2.8 מ' (תלוי בסוג התאונות) קיימת מגמת ירידה בתאונות.

על-פי הספרות: לפי ארבעה מחקרים בארה"ב, מחקר מאנגליה ומחקר מאוסטרליה, הגדלת רוחב השול מפחיתה את שיעור התאונות. המגמה הזאת קיימת בכל תחום רוחב השול, מ-0 מ' ועד לרוחב 1.5, 2.4, 2.5 מ' ומעלה (הגבול העליון שונה בכל מחקר). ברוב המחקרים, השינוי הנבחן הוא בסך התאונות, כאשר במחקר אחד נבחנה השפעה על תאונות מהסוגים הנבחרים כגון: תאונות רכב בודד, התנגשות חזיתית בין כלי הרכב מכיווני נסיעה מנוגדים, תאונות חזית-צד עם כלי הרכב מכיווני נסיעה מנוגדים, תאונות בין כלי הרכב מאותו כיוון הנסיעה. בספרות, עבור מאפיין זה, לא נמצאה נקודת שבירה של מגמה עם ערך מרבי, כפי שנמצא במחקר הנוכחי.

על-פי טיוטת הנחיות תכנון של דרכים בין-עירוניות (2011): דרך דלת תנועה היא תת-סוג של דרך מקומית ודרך-גישה, עם נפח תנועה ממוצע ליממה עד 1,500 כלי רכב. רוחב שול מומלץ לדרך מקומית וגישה הוא 2.0 מ'. אין הפחתה במאפיין זה עבור דרך דלת תנועה.

המלצה: משיקולי הבטיחות, יש מקום להרחיב רוחב שול בדרכים דלות תנועה ל- 3.0 מ'. על מנת לחסוך בעלויות, ניתן לאפשר הרחבה של שול סלול קיים ברוחב 2.0 מ', באמצעות שול ממצעים (לא סלול באספלט).

בחינה מפורטת עבור קטע דרך מסוים, לרבות השוואה בין חלופות, ניתן לבצע בעזרת הכלים הכמותיים שהוצגו בפרק 4.

5.2.2 רוחב נתיב

על-פי תוצאות המחקר: לרוחב נתיב נמצאה השפעה שונה על סוגי תאונות שונות. עבור תאונות מסוג רכב יחיד נמצאה נקודת שבירה עם ערך מזערי לשכיחות התאונות עבור רוחב נתיב של 3.2- 3.3 מ'. עבור תאונות חמורות, סך התאונות עם נפגעים וסך התאונות בכלל, אין נקודת שבירה. לסוגי תאונות אלו, הגדלת רוחב נתיב בתחום בין 2.2 מ' ל- 3.5 מ' מקטינה את מספר התאונות.

על-פי הספרות: מחקרים מארה"ב, אנגליה ואוסטרליה, מראים שהגדלת רוחב נתיב בתחומים מ- 2.4 מ' ועד 3.6 מ', מביאה להפחתה בתאונות. בספרות לא נמצאו נקודות שבירה בהשפעת רוחב נתיב על תאונות.

על-פי טיוטת הנחיות תכנון של דרכים בין-עירוניות (2011): רוחב נתיב מומלץ לדרך מקומית וגישה הוא 3.5 מ', רוחב נתיב לדרך דלת תנועה הוא 3.0 מ'.

המלצה: להרחיב רוחב נתיב בדרכים דלות תנועה ל- 3.2 מ'.

5.2.3 רדיוס אופקי מזערי

על-פי תוצאות המחקר: השפעת רדיוס אופקי מזערי דומה עבור תאונות התנגשות בין כלי הרכב וסך התאונות עם נפגעים. כלומר, הגדלת הרדיוס האופקי המזערי מורידה את שכיחות התאונות, כאשר בתחום של רדיוס אופקי מזערי של 300 מ' קיימת קפיצה כלפי מטה. עבור תאונות רכב יחיד, קיימת ירידה בתאונות עם הגדלת הרדיוס האופקי המזערי, ללא קפיצה כלפי מטה ליד הערך 300 מ'.

על-פי הספרות: במחקר מארה"ב צוין שרדיוס אופקי מזערי הוא המאפיין בעל ההשפעה הגדולה ביותר על תאונות בדרכים החד-מסלוליות. ככל שהרדיוס גדול יותר שיעור התאונות קטן, כאשר ההשפעה של הגדלת הרדיוס האופקי בתחום מ-100 עד 300 מ' רבה ביותר. השפעת הגדלת הרדיוס האופקי מעבר ל-300 מ' מביאה להפחתה מתונה יותר בתאונות. ניתן לראות שלגבי מאפיין זה קיימת התאמה טובה בין ממצאי המחקר הנוכחי וממצאי הספרות.

על-פי טיוטת הנחיות תכנון של דרכים בין-עירוניות (2011): כאמור, דרך דלת תנועה היא תת-סוג של דרך מקומית וגישה. מהירות התכן לדרך מקומית וגישה היא: 60, 70, 80 קמ"ש. רדיוסים אופקיים מזעריים למהירויות תכן אלו הם: 110, 170, 220 מ', בהתאמה.

המלצה: להמעיט ככל האפשר בתכנון עיקולים ברדיוס הקטן מ-300 מ' בדרכים דלות תנועה. במקרים בהם הרדיוס האופקי קטן מ-300 מ' להתקין אמצעי אזהרה לנהג כגון: תמרורי אזהרה, סמני קצה, תמרורי הגבלת מהירות.

5.2.4 שיפוע צד מרבי

על-פי תוצאות המחקר: עבור התנגשויות בין כלי הרכב, סך התאונות עם נפגעים וסך התאונות נמצא שעלייה בשיפוע צד מרבי (בתנאי רדיוס אופקי קטן) מקטינה את שכיחות התאונות.

על-פי הספרות: בדרכים רבות באירופה ובארה"ב ההגבהה הצדית הקיימת בפועל נמוכה מההגבהה הצדית הרצויה על-פי עקרונות התכנון. במקרים מסוימים המצב בפועל גרוע עוד יותר כי ההגבהה הצדית היא הפוכה לעומת הנדרש. במחקרים נמצא ששיפור בהגבהה הצדית כך שתתאים להנחיות התכנון מפחית תאונות. בהקשר זה, קיימת התאמה טובה בין ממצאי המחקר וממצאי הספרות.

על-פי טיוטת הנחיות תכנון של דרכים בין-עירוניות (2011): דרך דלת תנועה היא תת-סווג של דרך מקומית וגישה, כאשר מהירות התכן לדרך מקומית וגישה היא: 60, 70, 80 קמ"ש. הגבהה צדית מרבית עבור רדיוס מזערי למהירויות תכן אלו היא 10%.

המלצה: בדרכים הקיימות לבחון את הפער בין המצב הקיים לבין ההנחיות בהקשר להגבהות הצידיות בעיקולים. במידה וקיים פער כזה לפעול לצמצומו.

5.2.5 מצב צידי הדרך

על-פי תוצאות המחקר: עבור תאונות רכב יחיד נמצא שעלייה בציון רמת הבטיחות של צידי הדרך (ערך משולב למצב מעקות הבטיחות ורוחב אזור המפלט במקרים ללא מעקה) מביאה לירידה בתאונות.

על-פי הספרות: על-פי מחקר מארה"ב, שיפור בבטיחות צדי הדרך מפחית את שיעור התאונות. גם בנושא זה קיימת התאמה טובה בין ממצאי המחקר הנוכחי וממצאי הספרות.

על-פי טיוטת הנחיות תכנון של דרכים בין-עירוניות (2011): עבור כל סוגי הדרכים נקבע שיש לתכנן את צידי הדרך כך שיהיו סלחניים. קיימת הגדרה לתנאי צדי דרך סלחניים, שלא נדרשת עבורם התקנת מעקות בטיחות. כמו כן, ישנה הפנייה להנחיות להצבת מעקות בטיחות, במידה ולא מתקיימים תנאים לקיום אזור המפלט לרכב.

המלצה: בדרכים הקיימות לבחון את הפער בין המצב הקיים לבין ההנחיות, בהקשר לסלחנות צידי הדרך. במידה וקיים פער כזה, לפעול לצמצומו.

5.2.6 שיפוע לאורך

על-פי תוצאות המחקר: עבור סך התאונות נמצא שעלייה בשיפוע לאורך מגדילה את שכחות התאונות.

על-פי הספרות: נמצאו שלשה מחקרים מארה"ב, לפיהם שיפוע גדול לאורך מתקשר עם עלייה בתאונות. מכאן, קיימת התאמה טובה בין ממצאי המחקר הנוכחי וממצאי הספרות.

על-פי טיוטת הנחיות תכנון של דרכים בין עירוניות (2011): דרך דלת תנועה היא תת-סווג של דרך מקומית וגישה. מהירות התכן לדרך מקומית באזור מישורי היא 80 קמ"ש, שיפוע מרבי לאורך הוא 8%, כאשר עבור דרך דלת תנועה ניתן להגדילו ל-10%.

כמו כן, מהירות התכן לדרך מקומית באזור גבעי היא 70 קמ"ש, שיפוע מרבי לאורך הוא 9%, כאשר עבור דרך דלת תנועה ניתן להגדילו ל-11%. מהירות התכן לדרך מקומית באזור הררי היא 60 קמ"ש, שיפוע מרבי לאורך הוא 10%, כאשר עבור דרך דלת תנועה ניתן להגדילו ל-12%.

המלצה: בדרכים הקיימות, במקומות בהם ישנה חריגה מההנחיות להציב תמרורי אזהרה. בעת שדרוג קטעי הדרכים, מומלץ לבצע בחינה מפורטת, בעזרת הכלים הכמותיים המוצגים בפרק 4, כדי להשוות בין המשמעויות הבטיחותיות של חלופות תכנון שונות.

מחקרי המשך: במחקרי המשך, מומלץ לבצע בחינה פרטנית יותר של מאפייני כביש נבחרים כגון: מאפייני שוליים, תכן עקומים וכד'.

מראי מקום

1. אמי מתום (2008). סקר ספרות בנושא דרכים דלות תנועה. עדכון הנחיות לתכנון גיאומטרי של דרכים בין-עירוניות, צמתים ומחלפים. כרך I - תכן גיאומטרי של דרכים. מהדורה מעודכנת - אוקטובר 2008. הוכן ע"י זילברשטיין ר., פרישר ב. ואחרים, עבור משרד התחבורה ומעצ - החברה הלאומית לדרכים.
2. גיטלמן ו. (2009). הערכה בטיחותית של דרכים חד-מסלוליות לא עירוניות. נייר עבודה.
3. הנחיות לבחירה והצבה של מעקות בטיחות קבועים בדרכים בין עירוניות (2005). מהדורה שנייה. משרד התחבורה, מנהל היבשה, אגף לתכנון תחבורתי.
4. הנחיות לתכנון גיאומטרי של דרכים בין עירוניות, צמתים ומחלפים (1994). כרך 1 - תכן גיאומטרי של דרכים. מע"צ.
5. הנחיות לתכן גיאומטרי של דרכים (2011). משרד התחבורה והבטיחות בדרכים ומע"צ - החברה הלאומית לדרכים (טיוטה).
6. הקרט ש., שוקיר-חדאד ל. (2009) השפעת התשתית של דרכים מקומיות בין עירוניות על תאונות הדרכים. דו"ח מחקר מס' 318-2009, המכון לחקר התחבורה, הטכניון.
7. חביב-מטר ק. (2001). פיתוח מודלים לתכנון עקבי של כבישים. חיבור על מחקר לשם מילוי חלקי של הדרישות לקבלת התואר מגיסטר בהנדסה אזרחית. הטכניון.
8. מעצ (2007). מאפיינים גיאומטריים לתכן של כבישים ללא אבא. מעצ - החברה הלאומית לדרכים. הוכן ע"י לנדיוז תכנון תנועה וכבישים, נובמבר 2007.
9. צה"ל (2001). הנחיות לתכנון דרכים במחנות צה"ל, מרכז בינוי, צה"ל.
10. AASHTO (2001a). A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. (The Green Book) 4th Ed. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington D. C.
11. AASHTO (2001b). Guidelines for Geometric Design of Very Low Volume Local Road (ADT<400) (AASHTO), Washington D. C.
12. Baruya, A. (1998a). Speed-accident relationships on European roads. In: 9th International Conference Road Safety in Europe, Bergish Gladbach, Germany.
13. Baruya, A. (1998b). Speed-accident relationships on different kinds of European roads. Deliverable D7 - Master 4th Framework project, European Commission.
14. Cardoso, J. L. (2001a). Design consistency and signing of curves on interurban single carriageway roads. Report 197/01-NTSR, LNEC, Lisboa (In Portuguese).

15. Cardoso, J. L. (2001b). Detection and low-cost engineering improvement of inconsistent horizontal curves in rural roads. 12th International conference "Road safety on three continents", FERSI/VTI/TRB, Moscow, September.
16. Council, F. and Stewart, J. R. (2000). Safety Effects of the Conversion of Two-lane Rural to Four-lane Rural Roadways Based on Cross-sectional Models. Transportation Research Board Annual Meeting.
17. Deacon, J. (1986). Relationship between Accident and Horizontal Curvature. Appendix D in Designing Safer Roads. Special Report 214. Transportation Research Board, Washington D. C.
18. Fitzpatrick, K., Brewer, M. (2004). Summary of Treatments for Crashes on Rural Two-Lane Highways in Texas, Report FHWA/TX-05/0-4048-S, Texas Transportation Institute.
19. Glennon, J., Newman, T. and Leish, J. (1985). Safety and Operational Considerations for Design of Rural Curves. Report No. FHWA/RD-86/035, Federal Highway Administration, Washington D. C.
20. Glennon, J. C. (1987). Effect of Key Highway Feature on Highway Safety, Transportation Research Board, Washington D. C.
21. Griffin, L. I. and Mak, K. K. (1987). The Benefits to Be Achieved from Widening Rural Two-lane Farm-to-Market Roads in Texas. Report No. IAC(86-87)-1039. Texas Transportation Institute, College Station TX.
22. Hall, J.W., Rutman, E.W., Brogan, J.D. (2002). Highway Safety Challenges on Low – Volume Rural Roads, Final Report ,FHWA, New Mexico.
23. Harwood, D. W., Council, F. M., Hauer, E., Hughes, W. E., and Vogt, A. (2000). Prediction of the Expected Safety Performance of Rural Two-lane Highways. FHWA-RD-99-207.
24. Hauer, E. (2000a). Lane Width and Safety. Professor (Emeritus). Department of Civil Engineering. University of Toronto.
25. Hauer, E. (2000b). Shoulder Width Shoulder paving and Safety. Professor (Emeritus). Department of Civil Engineering. University of Toronto.
26. Hedman, K. O. (1990). Road Design and Safety. VTI rapport 351A pp 225-238. Swedish Road and Traffic Research Institute, Linkoping, Sweden.
27. Hoban, C. J. (1988). Selecting Appropriate Geometric Design Standards for Rural Road Improvements. Compendium of Technical Papers. 58 Annual Meeting, Institute of Transportation Engineers, Washington D. C.
28. Interactive Highway Safety Design Model (IHSDM) (2004). Crash Prediction Module Engineer's Manual.
29. Kalakota, K. R., Islam, M. N. and Seneviratne, P. N. (1992). Influence of geometric design variables on accident rates on two-lane rural highways. In: International Conference Road Safety in Europe. FERSI, Berlin, 1992, VTI Report 380A pt 2, 207-226.
30. Kalakota, K. and Seneviratne, P. N. (1994). Accident prediction models for two-lane rural highways. Mountain Plains Consortium, North Dakota State University, 1994/5.

31. Khan, S., Shanmugam, R. and Hoeschen, B. (1999). Injury, fatal and property damage accidents models for highway corridors. *Transportation Research Records*, 1665, 84-92.
32. Krammes, R. A. and Hayden, C. (2003). Making two-lane roads safer. *Public Roads*, 64(4), 16-21.
33. Kulmala, R. and Roine, M. (1988). Accident prediction models for two-lane roads in Finland. *Traffic safety theory research methods*, April 26-28, 1988, Amsterdam, Session IV: Statistical analysis and models.
34. Li, J., Abdelwahad, W., and Brown, G. (1994). Joint Effect of Access and Geometry on Two-Lane Rural Highway Safety in British Columbia. *Canadian Journal of Civil Engineering*, XXI (vi),1012-1024.
35. Mallschutzke, K., Galvez, I., Gatti, G., Van de Leur, M., Dell, O.L. (2006). Secondary road safety: Actual knowledge and experiences. *RIPCORD-ISEREST*. 5.09.2006.
36. Maycock, G. and Summersgill, I. (1995). *Methods for Investigating the Relationship Between Accidents, Road User Behaviour and Road Design Standards*. Annex III to SWOV-report Safety effects of road design standards, R-94-7.
37. McDonald and Robinson (1995), *Geometric Design of Low-Cost Roads in Developing Countries*. (Proceedings of 6th International Conference on Low-Volume Roads), University of Southampton, University of Birmingham, U.K.
38. Mendoza, A. D., Quintero, F.P., Mayoral, E. G. (2002). *Algunas Consideraciones de Seguridad Para el Proyecto Geometrico de Carreteras*. Publicacion Tecnica no. 217 Sanfandila' Qro.
39. Miaou, S. P. (1995). *Development of Adjustment Factors for Single-Vehicle Run-Off-Road Accident Rates by Horizontal Curvature and Grade*. Oak Ridge National Laboratory, Draft, August.
40. Miaou, S. P. (1996). *Measuring the Goodness-of Fit of Accident Prediction Models*. Report No. FHWA-RD-96-040, Federal Highway Administration, USA.
41. Miaou, S. P. (1998). *Vertical Grade Analysis Summary*. Unpublished.
42. Mountain, L. and Fawaz, B. (1996). Estimating accidents at Junctions using routinely available input data. *Traffic Engineering & Control*, 37(11), 624-628.
43. NCHRP synthesis 295 (2001). *Statistical methods in highway safety analysis. A Synthesis of Highway Practice*. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, D.C.
44. OECD (1986). *Economic design of low-traffic roads*. Organization for Economic Co-operation and Development, Road Transport Research, Paris.
45. Perez, I. P. (2002). *Experiencia Norteamericana en Modelos que Relacionan el Numero de Accidentes las Variables del Proyecto Geometrico de las Carreteras Convencionales*. In RUTAS magazine.

46. Polus, A. and Cohen, M. (2010). Models of Accidents on Low-Volume Rural Roads. Paper Submitted for publication in TRR Journal and Presentation in the 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board.
47. Prinsloo, B. and Goudanas, C. (2003). Development of crash prediction model for rural roads in NSW. 21st ARRB Transport Research Conference, Queensland, Australia.
48. Qin, X., Ivan, J. N. and Ravishanker, N. (2004). Selecting exposure measures in crash rate prediction for two-lane highway segment. *Accident Analysis and Prevention*, 36, 183-191.
49. Reurings, M., Janssen, T., Eenink, R., Elvik, R., Cardoso, J., Stefan, C. (2005). Accident prediction models and road safety impact assessment: a state-of-the-art. RIPCORDER-ISEREST. 30.06.2005.
50. Rinde, E. A. (1977). Accident Rates vs. Shoulder Width. Report No. CA-DOT-TR-3147-1-77-01. California Department of Transportation.
51. Roine, M. and Kulmala, R. (1990). Accident models for major roads in Finland, Links on single carriageways outside densely population areas. Research Report 730, VTT. Translation from Finnish by I. K. Ulvila. LNEC, Lisboa, 1992.
52. TRB (2003). Proceedings of 8th International Conference on Low-Volume Roads, Nevada, USA, Transportation Research Board (TRB), TRR 1819, Vol. 1 & 2.
53. Turner, S. (2000). Accident prediction models. Transfund New Zealand Research Report, 192.
54. Turner, S. et al. (2003). New Zealand Accident prediction models and their applications. Transport our highway to a sustainable future: proceeding of the 21st ARRB and 11th REAAA Conference, Cairns, Queensland, Australia, 18-23 May.
55. Vogt, A. and Bared, J. (1998). Accident Models for Two-lane Segments and Intersections. *Transportation Research Record* 1635, 18-29.
56. Wade, M., Hammond, C., Kim, C.H. (2004). Accident analysis of significant crash rates for low to very low volume roadways in 10 Minnesota counties, Final Report 2004-22, University of Minnesota.
57. Woldridge, M. D., Fitzpatrick, K., Harwood, D. W., Potts, I. B., Elefteriadou, L., and Torbic, D. J. (2003). Geometric Design Consistency on High-Speed Rural Two-Lane Roadways. Transportation Research Board, Washington D. C.
58. Zegeer, C. V., Deen, R. C. and Mayes, J. G. (1981). Effect of Lane Width and Shoulders Width on Accident Reduction on Rural Two-lane Roads. *Transportation Research Record* 806, 33-43.
59. Zegeer, C.V. and Deacon, J. A. (1987). Effect of Lane Width, Shoulder Width, and Shoulder Type on Highway Safety. In: Relationship between Key Highway Features. State of the Art. Report 6. Transportation Research Board, Washington D. C.

60. Zegeer, C. V., Stewart, R., Reinfurt, D., Council, F., Neuman, T., Hamilton, E., Miller, T. and Hunter, W. (1991). Cost-effective Geometric Improvements for Safety Upgrading of Horizontal Curves. Report FHWA-RD-90-021, FHWA, Washington D. C.
61. Zegeer, C. V., Reinfurt, D., Hummer, J., Herf, L. and Hunter, W. (2008). Safety Effects of Cross-section Design for Two-lane Roads. FHWA-RD-87/008, Federal Highway Administration.

נספח א': רשימת קטעי הדרכים למחקר

רשימת קטעי הדרכים שנבחרו למחקר - עם נפח תנועה יומי עד 3,000 כלי רכב (במעגול).
 מרבית ערכי הנפח נלקחו מקבצי הלמ"ס. נתוני נפח בצבע אדום מציינים אומדן שניתן ע"י צוות המחקר (בשל היעדר נתון זה בקבצי הלמ"ס).

מס'	דרך	מ-ק"מ	עד ק"מ	תיאור מ-	תיאור עד	נפח יומי (אלפים)	אורך (ק"מ)	שטח
1	3	275	277.4	מכניסה למודיעין דרום	עד צומת בית חורון	2.1	2.4	יו"ש
2	4	51.1	55	מצומת חבל עזה	עד צומת מרדכי	2.1	3.9	ק"י
3	4	197.3	199.5	מצומת בצת	עד צומת	2.8	2.2	ק"י
4	12	0	11.5	מיישוב אילת	עד כניסה לנטפים (מעבר גבול)	1.5	11.5	ק"י
5	12	11.5	68	מכניסה לנטפים (מעבר גבול)	עד צומת שיזפון (עובדה)	0.8	56.5	ק"י
6	13	0	11.8	מצומת ציחור	עד צומת מנחה	0.4	11.8	ק"י
7	25	211	219	מצומת נתיבות	עד צומת סעד	3.5	8.2	ק"י
8	25	219	223	מצומת סעד	עד מחסום נחל עוז	2.0	4.1	ק"י
9	35	32.5	41.4	מצומת נחושה	עד צומת	3.0	8.9	ק"י
10	35	41.4	58.8	מצומת	עד צומת העוקפים	2.5	17.4	יו"ש
11	40	0	11.9	מצומת קטורה	עד צומת שיזפון (עובדה)	0.8	11.9	ק"י
12	40	11.9	38.2	מצומת שיזפון (עובדה)	עד צומת ציחור	1.3	26.3	ק"י
13	40	38.2	98.2	מצומת ציחור	עד כניסה למצפה רמון	1.6	60	ק"י
14	40	98.2	119.8	מכניסה למצפה רמון	עד כניסה לעבדת	2.9	21.6	ק"י
15	40	119.8	134	מכניסה לעבדת	עד צומת חלוקים	3.0	14.2	ק"י
16	80	176.4	197.3	מצומת ערערה בנגב	עד צומת תל ערד	2.0	20.9	ק"י
17	87	11.1	23.5	מצומת יהודייה	עד צומת קצרין	2.8	12.4	ק"י
18	87	23.5	26.1	מצומת קצרין	עד צומת המפלים	2.8	2.6	ק"י
19	87	26.1	35.2	מצומת המפלים	עד צומת בשן	1.0	9.1	ק"י
20	91	14.6	22.7	מצומת נשוט	עד צומת השריון	3.1	8.1	ק"י
21	91	22.7	29.7	מצומת השריון	עד צומת זיוון	3.0	7	ק"י
22	92	16.8	23.2	מצומת מעלה גמלא	עד צומת יהודייה	3.4	6.4	ק"י
23	98	1.6	8.1	מצומת מעגן	עד צומת חמת גדר	1.8	6.5	ק"י
24	98	8.1	24	מצומת אפיק	עד צומת מגשימים	1.4	15.9	ק"י
25	98	24	36.2	מצומת מגשימים	עד צומת אורחה	1.8	12.2	ק"י
26	98	36.2	46.8	מצומת אורחה	עד צומת זיוון	1.8	10.6	ק"י
27	98	46.8	69.1	מצומת זיוון	עד צומת בראון	1.8	22.3	ק"י
28	98	69.1	76.8	מצומת בראון	עד צומת יער אודם	1.8	7.7	ק"י
29	98	76.8	86.5	מצומת יער אודם	עד צומת מסעדה	1.8	9.7	ק"י
30	98	86.5	87.2	מצומת מסעדה	עד צומת מג'דל שמש (דרום)	1.8	0.7	ק"י
31	98	87.2	89.8	מצומת מג'דל שמש (דרום)	עד צומת מג'דל שמש	1.8	2.6	ק"י
32	98	89.8	92.5	מצומת מג'דל שמש	עד צומת רכבל חרמון	1.8	2.7	ק"י
33	204	134	151.2	מצומת חלוקים	עד צומת ירוחם	1.2	17.2	ק"י
34	204	151.2	164.4	מצומת ירוחם	עד צומת דימונה	1.2	13.2	ק"י
35	206	17	28.9	מצומת ירקעם	עד צומת רותם	0.5	11.9	ק"י
36	211	108	147.5	מצומת מבצע חורב	עד צומת טללים	1.5	39.5	ק"י
37	222	150.2	184.1	מצומת משאבים	עד צומת צאלים	3.0	33.9	ק"י
38	222	184.1	196	מצומת צאלים	עד צומת גבולות	2.1	11.9	ק"י
39	224	0	12	מצומת הנגב	עד צומת גבעת ירוחם	2.1	12	ק"י
40	225	0	14.8	מצומת ירוחם	עד צומת ירקעם	0.5	14.8	ק"י
41	234	0	23.2	מצומת צאלים	עד צומת רעים	0.9	23.2	ק"י
42	240	0	3.1	מצומת חולית	עד צומת קטיף	1.3	3.1	ק"י
43	242	8.7	11.5	מצומת כיסופים	עד צומת גמה	0.9	2.8	ק"י

מס'	דרך	מ-ק"מ	עד ק"מ	תיאור מ-	תיאור עד	נפח יומי (אלפים)	אורך (ק"מ)	שטח
44	310	0	11	מצומת אשל הנשיא	עד צומת להבים	2.3	11	ק"י
45	316	0	3.5	מצומת ליתיר	עד צומת סוסיה	2.5	3.5	ק"י
46	317	0.0	21.1	מצומת שמעה	עד צומת כרמל (ליד ערד)	2.5	21.1	יו"ש
47	325	0	10.3	מצומת דבירה	עד כניסה ללהב	3.5	10.3	ק"י
48	334	13.5	16.8	מצומת איבים	עד צומת שדה צבי	3.5	3.3	ק"י
49	352	0	9.1	מצומת חלץ	עד צומת ניר חן	3.5	9.1	ק"י
50	353	0	24	מכניסה ללי און	עד צומת לי און	2.7	24	ק"י
51	353	24	24.5	מצומת קוממיות	עד כניסה ללי און	2.7	0.5	ק"י
52	356	0.0	16	מצומת גבעת המטוס	עד צומת לאספר	1.5	16	יו"ש
53	358	0	12	מצומת שמורת להב דרום	עד כניסה לבית מרסם	1.8	12	ק"י
54	375	17.1	23	מכניסה למבוא ביתר	עד צומת אל-ח'דר	3.0	5.9	יו"ש
55	395	0	11.6	מצומת אשתאול	עד כניסה לגבעת יערים	1.8	11.6	ק"י
56	449	16.8	28	מצומת עפרה	עד כניסה לייט"ב	3.0	11.2	יו"ש
57	450	0.0	19.5	מצומת ביתוניא (דרום)	עד צומת חלמיש	3.0	19.5	יו"ש
58	457	0.0	3.8	מצומת למעלה מכמש	עד צומת מעלה מכמש	3.0	3.8	יו"ש
59	463	0.0	13.7	מצומת נילי	עד כניסה לח' כפר מר	2.0	13.7	יו"ש
60	465	6.5	33.0	מכניסה לרנתיס	עד צומת	2.0	26.5	יו"ש
61	505	21.3	75.7	מצומת שערי תקווה	עד צומת פצאל	2.0	54.4	יו"ש
62	508	0.0	22	מצומת מעלה אפרים	עד צומת חמרה	2.0	22	יו"ש
63	557	0.0	13.3	מצומת אבני חפץ	עד צומת ענב	2.0	13.3	יו"ש
64	578	0.0	23.0	מצומת בקעות	עד צומת מחולה	1.5	23	יו"ש
65	585	25.4	31.3	מצומת באקה אל-גרבייה	עד צומת דותן	1.5	5.862	יו"ש
66	654	5	6.9	מצומת שמורת אלוני יצחק	עד צומת אביאל	2.6	1.9	ק"י
67	717	3.2	6.9	מצומת נעורה	עד כניסה למולדת	1.0	3.7	ק"י
68	721	1.7	11	מצומת אורן	עד צומת דמון	3.0	9.3	ק"י
69	789	0	14.3	מצומת כורסי	עד צומת אפיק	2.4	14.3	ק"י
70	808	13.1	19.9	מצומת מגשימים	עד צומת דליות	1.9	6.8	ק"י
71	808	19.9	30.3	מצומת דליות	עד צומת המפלים	1.7	10.4	ק"י
72	869	0	16.1	מצומת מעלה גמלא	עד צומת דליות	1.1	16.1	ק"י
73	886	39.3	60.1	מצומת עין זיתים	עד צומת רמות נפתלי	3.0	20.8	ק"י
74	886	60.1	61.7	מצומת רמות נפתלי	עד צומת מצודת ישע	3.0	1.6	ק"י
75	886	61.7	78.3	מצומת מצודת ישע	עד כניסה למשגב עם	3.0	16.6	ק"י
76	888	0	13	מצומת בית צידה	עד צומת בית המכס	1.4	13	ק"י
77	899	6.7	35	מצומת אדמית	עד צומת חירם	1.1	28.3	ק"י
78	899	35	42.5	מצומת חירם (דובב)	עד צומת אביבים (דרום)	2.9	7.5	ק"י
79	899	42.5	60.2	מצומת אביבים (דרום)	עד צומת מצודת ישע	1.1	17.7	ק"י
80	899	60.2	64.6	מצומת מצודת ישע	עד צומת כ"ח	3.0	4.4	ק"י
81	918	15	16.2	מצומת גונן	עד צומת להבות הבשן	2.4	1.2	ק"י
82	918	16.2	19.6	מצומת להבות הבשן	עד צומת שמורת נחל רחום	2.7	3.4	ק"י
83	918	19.6	26	מצומת שמורת נחל רחום	עד צומת חורשת טל	3.2	6.4	ק"י
84	959	0	17.5	מצומת גונן	עד צומת בראון	1.3	17.5	ק"י
85	978	40	48.8	מצומת השריון	עד צומת האמיר	1.0	8.8	ק"י
86	978	48.8	61.3	מצומת האמיר	עד צומת יער אודם	1.0	12.5	ק"י
87	2200	0	4.4	מכניסה ליבול	עד צומת	0.5	4.4	ק"י
88	2211	0	3.5	מצומת אבשלום	עד כניסה לדקל	2.0	3.5	ק"י
89	2410	0	8.7	מצומת מעון	עד צומת כיסופים	1.4	8.7	ק"י
90	2414	0	1.6	מצומת אופקים	עד כניסה למסלול (מזרח)	1.6	1.6	ק"י
91	2422	0	4	מצומת שוקדה	עד כניסה לשוקדה	2.3	4	ק"י
92	2499	0	8	מצומת נאות הכיכר	עד כניסה לנאות הכיכר	0.5	8	ק"י

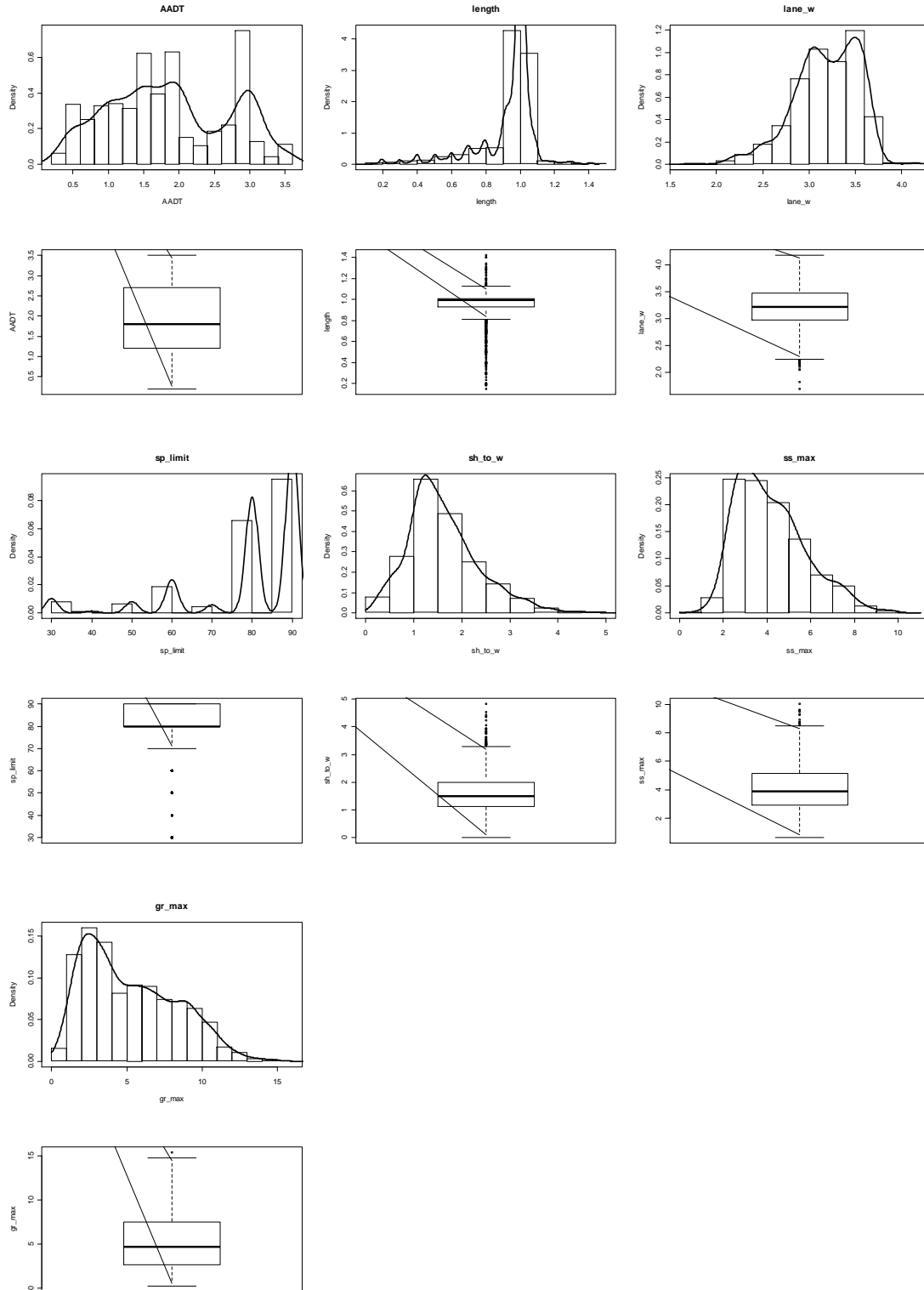
מס'	דרך	מ-ק"מ	עד ק"מ	תיאור מ-	תיאור עד	נפח יומי (אלפים)	אורך (ק"מ)	שטח
93	2544	0	2.5	מצומת לתאשור	עד כניסה לברוש	1.1	2.5	ק"י
94	2932	0	4	מצומת ניר משה	עד כניסה לניר משה	1.5	4	ק"י
95	3157	0.0	5.5	מצומת שיירות עציון(אפרתה)	עד צומת לח'ירבת תוקוע	1.0	5.5	יו"ש
96	3178	0.0	1.5	מצומת שני (ליבנה)	עד כניסה לראפאת (חברון)	0.5	1.5	יו"ש
97	3199	1.5	20	מצומת כידוד	עד כניסה למצדה - מערד	0.5	18.5	ק"י
98	3411	0	4.2	מצומת זיקים	עד כניסה לזיקים	2.8	4.2	ק"י
99	3413	0	1	מצומת ניר חן	עד כניסה לניר חן	2.5	1	ק"י
100	3415	0	10.9	מצומת לכיש	עד כניסה לאמציה	2.2	10.9	ק"י
101	3533	0	2	מצומת קוממיות	עד כניסה לרווחה	1.6	2	ק"י
102	3544	0	0.9	מצומת לי און	עד כניסה לגבעת ישעיהו	1.7	0.9	ק"י
103	3553	0	1.1	מצומת נחלה	עד כניסה לסגולה	2.5	1.1	ק"י
104	3698	0.0	5	מצומת לח'ירבית תוקוע	עד צומת מצוקי דרגות	0.2	5	יו"ש
105	3712	0	0.5	מצומת לאמונים	עד 0.5 ק"מ	0.5	0.5	ק"י
106	3835	0	4.5	מצומת צרעה	עד כנ' לאכסניה (גבעת שמש)	0.5	4.5	ק"י
107	3866	0	10	מצומת נס הרים	עד צומת מחסיה	3.1	10	ק"י
108	3933	0	0.7	מצומת חפץ חיים	עד כניסה לחפץ חיים	1.9	0.7	ק"י
109	3955	0	1.4	ממחלף שורש	עד כניסה לשורש	3.2	1.4	ק"י
110	3985	0	2.2	מצומת מעוז ציון	עד צומת מוצא עילית	0.8	2.2	ק"י
111	4243	0	0.5	מצומת פדיה	עד כניסה לפתחיה (דרום)	3.4	0.5	ק"י
112	4314	0	1.9	מצומת מודיעים	עד כניסה לגמזו	3.1	1.9	ק"י
113	5066	0.0	10.5	מצומת יקר	עד צומת עמנואל	1.5	10.5	יו"ש
114	5533	0	2.5	מצומת צור נתן	עד צומת	2.0	2.5	ק"י
115	5704	0	0.9	מצומת בארותיים	עד כניסה לבארותיים	3.0	0.9	ק"י
116	5710	2.6	3.7	ממחלף חבצלת	עד כניסה לבית הבראה	1.0	1.1	ק"י
117	5812	0	0.5	מצומת אליכין	עד כניסה לאליכין	1.5	0.5	ק"י
118	5923	0	2.6	מצומת מצר	עד כניסה למצר	1.0	2.6	ק"י
119	6533	0	2.2	מצומת אביאל	עד ק"מ 2.2	2.0	2.2	ק"י
120	6666	0	7.4	מצומת למעלה גלבוע	עד צומת מצפה גלבוע	1.0	7.4	ק"י
121	6667	8.7	12.8	מצומת תל שובה	עד צומת בית שאן-נווה איתן	2.1	4.1	ק"י
122	6678	0	5.2	מצומת טירת צבי	עד כניסה לשדה אליהו	3.0	5.2	ק"י
123	6688	0	0.5	מצומת מעוז חיים	עד ק"מ 0.5	1.0	0.5	ק"י
124	6714	0	1.4	מצומת ניר יפה	עד כניסה למלאה	1.0	1.4	ק"י
125	6724	0	3.1	מצומת דבורה	עד כניסה לרם און	1.0	3.1	ק"י
126	6953	0	6.7	מצומת עין השופט	עד צומת משמר העמק	3.4	6.7	ק"י
127	6954	0	1.9	מצומת רמת השופט	עד כניסה לעין השופט	2.0	1.9	ק"י
128	7021	0	0.5	מצומת עופר	עד ק"מ 0.5	3.2	0.5	ק"י
129	7079	0	2.2	מצומת בית שאן נווה איתן	עד צומת תל אשתורי	2.0	2.2	ק"י
130	7111	0	2.2	מצומת עין הוד	עד כניסה לניר עציון	3.1	2.2	ק"י
131	7212	0	6.1	מצומת מערת נשרים	עד צומת נשר	2.7	6.1	ק"י
132	7276	0	7.1	מצומת גזית	עד כניסה לגזית	2.0	7.1	ק"י
133	7589	0	1.3	מצומת מסדה	עד כניסה למסדה	1.9	1.3	ק"י
134	7599	0	0.6	מצומת חמת גדר	עד ק"מ 0.6	0.5	0.6	ק"י
135	7677	0	6.3	מצומת פורייה עילית	עד צומת האכסניה	0.8	6.3	ק"י
136	7707	0	0.8	מצומת לביא	עד כניסה להודיות	0.5	0.8	ק"י
137	7899	0	4	מצומת גשור	עד כניסה לגשור	1.0	4	ק"י
138	7926	0	1.3	מצומת ציפורי	עד כניסה לציפורי	1.0	1.3	ק"י
139	7933	0	1.5	מצומת קורנית	עד ק"מ 1.5	1.0	1.5	ק"י
140	7955	0	1.5	מצומת יודפת	עד ק"מ 1.5	1.0	1.5	ק"י
141	8077	0	3.8	מצומת חוקוק	עד כניסה לרמות לבנים	1.0	3.8	ק"י

מס'	דרך	מ-ק"מ	עד ק"מ	תיאור מ-	תיאור עד	נפח יומי (אלפים)	אורך (ק"מ)	שטח
142	08177	1	1	מצומת מנזר הר נחום	עד כניסה למנזר הר נחום	0.4	1	ק"י
143	08277	8.1	8.1	מצומת כורזים	עד צומת אלמגור	3.2	8.1	ק"י
144	08533	1.1	1.1	מצומת ג'ולס	עד ק"מ 1.1	3.0	1.1	ק"י
145	08544	5.5	5.5	מצומת כישור	עד כניסה לפלך	0.5	5.5	ק"י
146	08655	3	3	מצומת סמוע	עד כניסה לכפר סמוע	3.0	3	ק"י
147	08677	4.2	4.2	מצומת כפר הנשיא	עד כניסה לטובא	3.0	4.2	ק"י
148	08833	10.8	10.8	מצומת אשרת	עד צומת מעונה	2.0	10.8	ק"י
149	52.28900	61	61	מצומת צפת	עד יישוב ראש פינה, רח הגליל	3.0	8.8	ק"י
150	18.28933	27.2	27.2	מצומת אבן מנחם	עד צומת הר בירנית	0.5	9	ק"י
151	08944	8.2	8.2	מצומת אלקוש	עד ק"מ 8.2	2.8	8.2	ק"י
152	08966	2.6	2.6	מצומת אביבים (דרום)	עד צומת ריחאנייה	0.9	2.6	ק"י
153	08990	1.4	1.4	מצומת חניתה	עד ק"מ 1.4	0.5	1.4	ק"י
154	08992	3.3	3.3	מצומת שומרה	עד ק"מ 3.3	0.5	3.3	ק"י
155	08994	3.7	3.7	מצומת שתולה	עד כניסה לשתולה (גבול)	0.5	3.7	ק"י
156	09088	2	2	מצומת קצרין צפון	עד צומת קצרין	3.4	2	ק"י
157	09098	6.5	6.5	מצומת קצרין צפון	עד צומת עין אלעלק	1.5	6.5	ק"י
158	09119	3.9	3.9	מצומת יסוד המעלה	עד כניסה לחולתה	2.6	3.9	ק"י
159	09799	4.2	4.2	מצומת גוב-געש	עד צומת אל-רום	0.5	4.2	ק"י
160	09881	6.6	6.6	מצומת אביטל	עד צומת פורן	0.5	6.6	ק"י
161	09888	4	4	מצומת בית הלל	עד צומת הגושרים	3.3	4	ק"י
162	09892	2	2	מצומת שמיר	עד כניסה לשמיר	0.5	2	ק"י
163	09898	2	2	מצומת מגדל שמש (דרום)	עד צומת נווה אטי"ב	0.5	2	ק"י
164	76.39977	81.5	81.5	מצומת משגב עם	עד צומת תל חי	2.5	5.2	ק"י
					סך הכל		1451.5	ק"מ

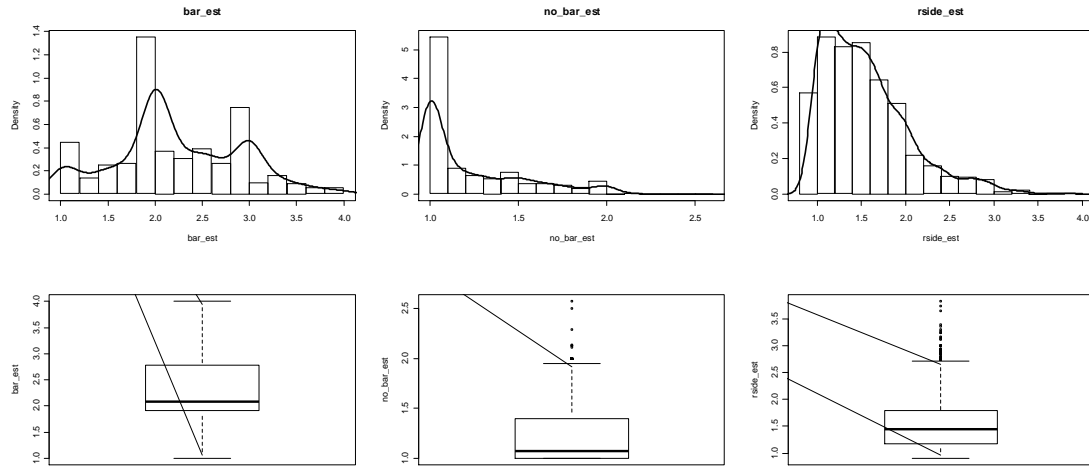
נספח ב': ניתוח מגשש של המשתנים המסבירים - היסטוגרמות

ותרשימי קופסה (Box-Plots) של הנתונים

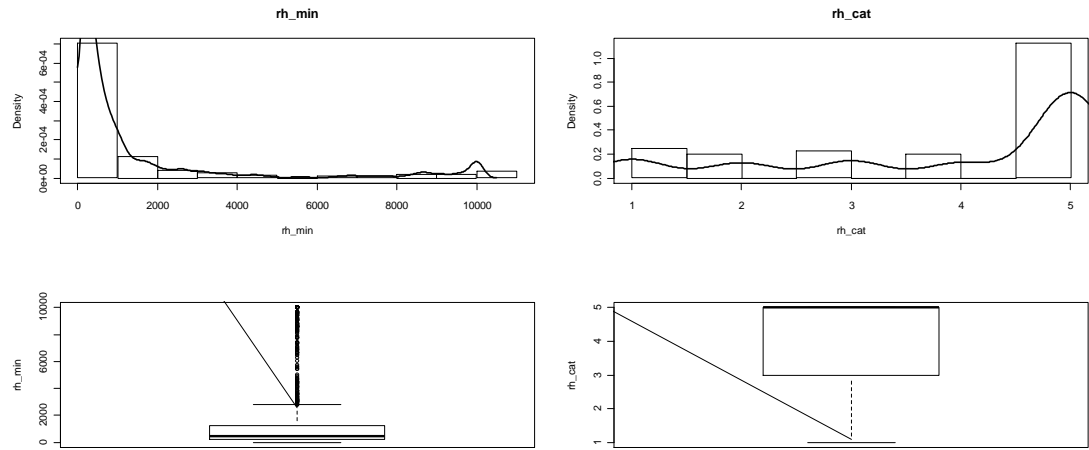
קבוצה 1: "AADT", "length", "lane_w", "sp_limit", "sh_to_w", "ss_max", "gr_max"



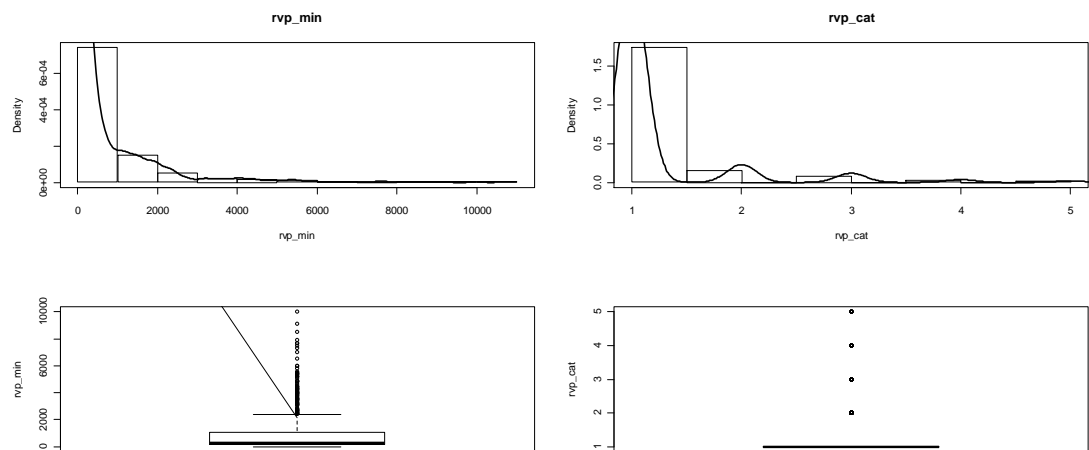
קבוצה 2: "bar_est", "no_bar_est", "rside_est"



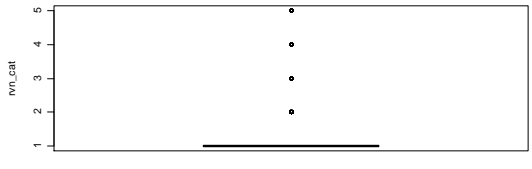
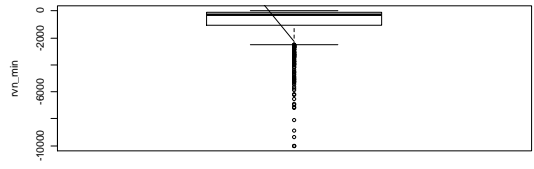
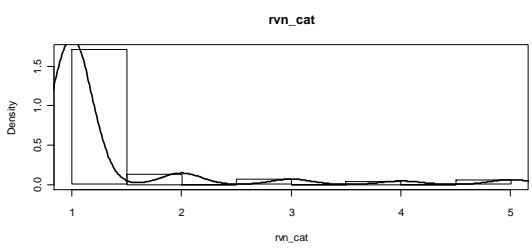
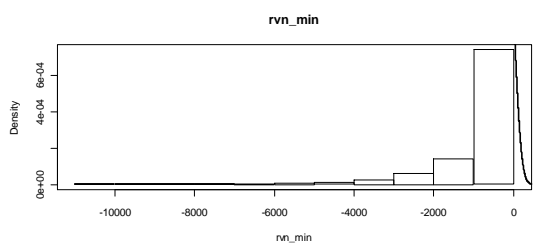
קבוצה 3: "rh_min", "rh_cat"



קבוצה 4: "rvp_min", "rvp_cat"



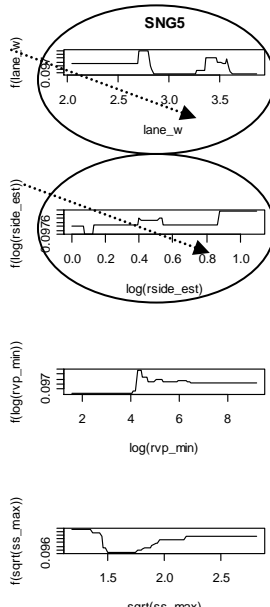
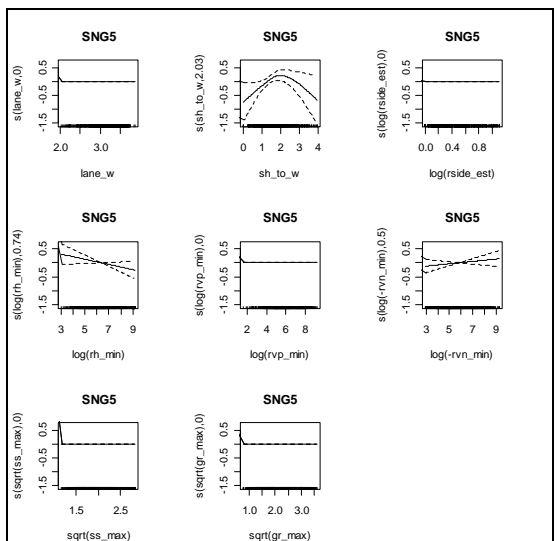
"rvn_min", "rvn_cat": 5 קבוצה



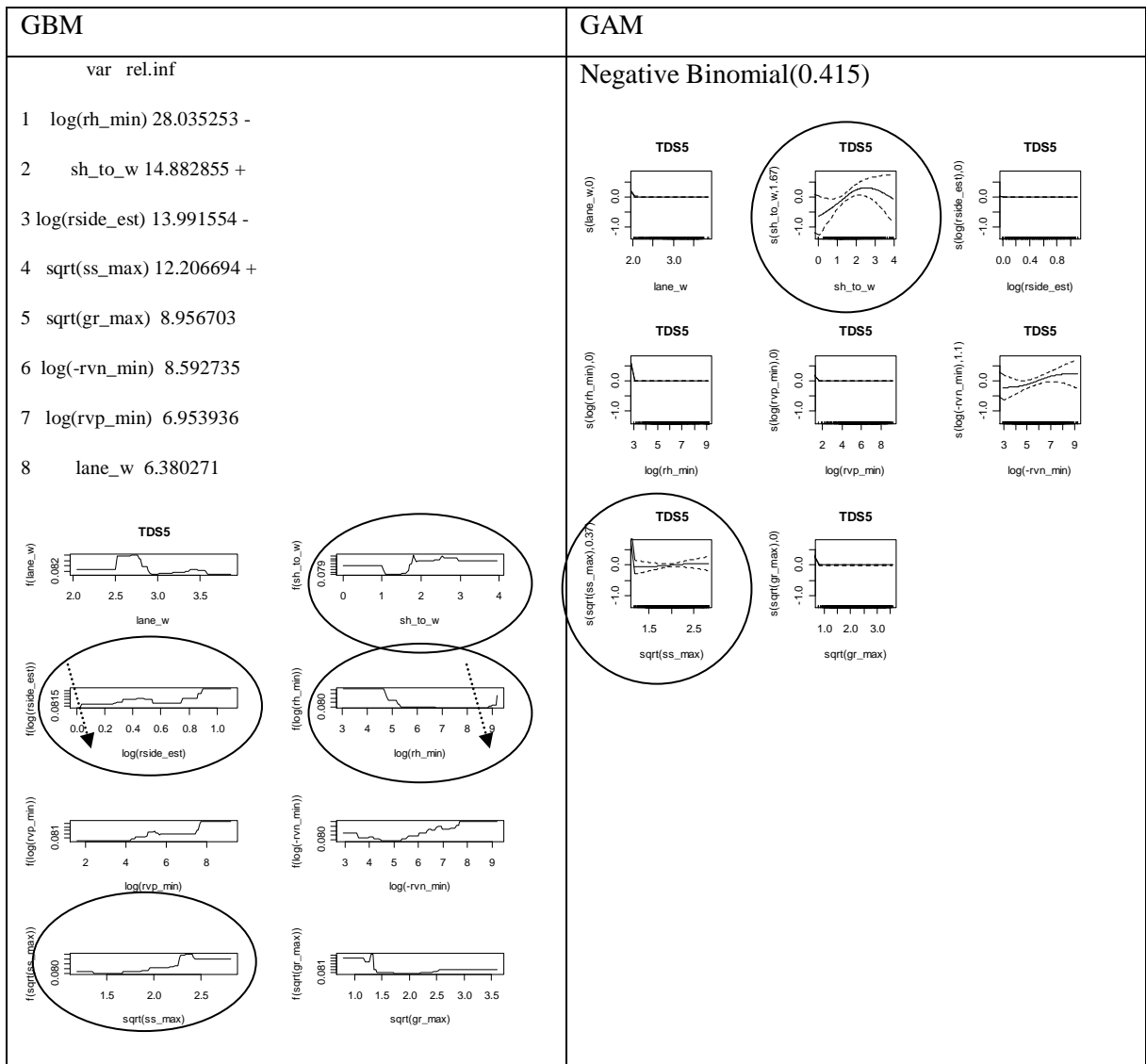
נספח ג': תוצאות הרצת התוכנות GMB ו-GAM לגבי חשיבות המשתנים המסבירים לסוגי תאונות שונים

COL5 - תאונות התנגשות בין כלי הרכב

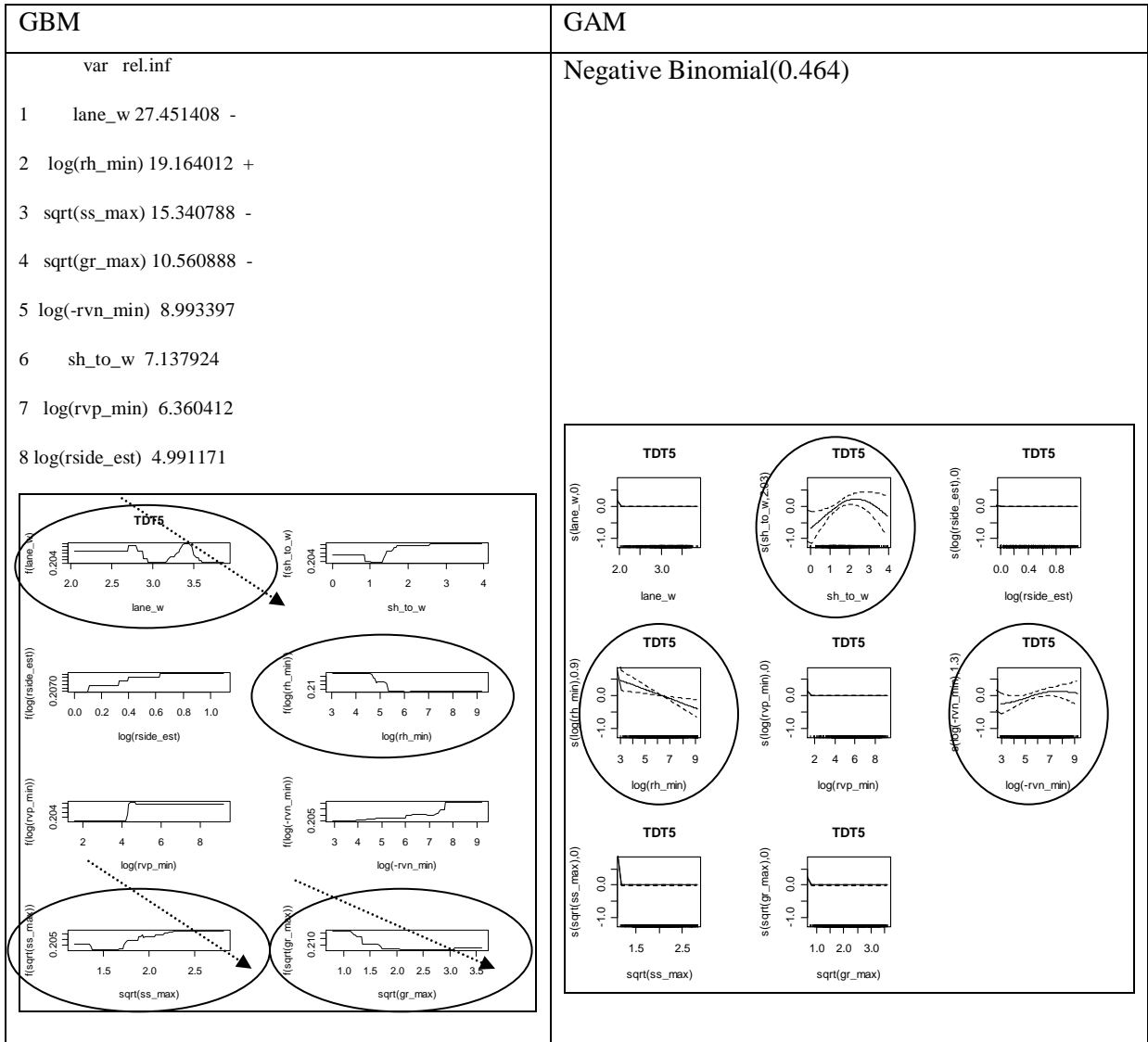
GBM	GAM
<p>var rel.inf</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 log(rh_min) 27.113767 + 2 lane_w 23.289471 - 3 log(-rvn_min) 12.561009 + 4 sh_to_w 11.319855 + 5 sqrt(ss_max) 9.268274 6 log(rvp_min) 6.353376 7 log(rside_est) 5.495860 8 sqrt(gr_max) 4.598388 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;"> </div>	<p>Negative Binomial(0.373)</p> <div style="display: grid; grid-template-columns: repeat(3, 1fr); gap: 10px;"> <!-- Row 1 --> <div style="text-align: center;"> </div> <div style="text-align: center;"> </div> <div style="text-align: center;"> </div> <!-- Row 2 --> <div style="text-align: center;"> </div> <div style="text-align: center;"> </div> <div style="text-align: center;"> </div> <!-- Row 3 --> <div style="text-align: center;"> </div> <div style="text-align: center;"> </div> </div>

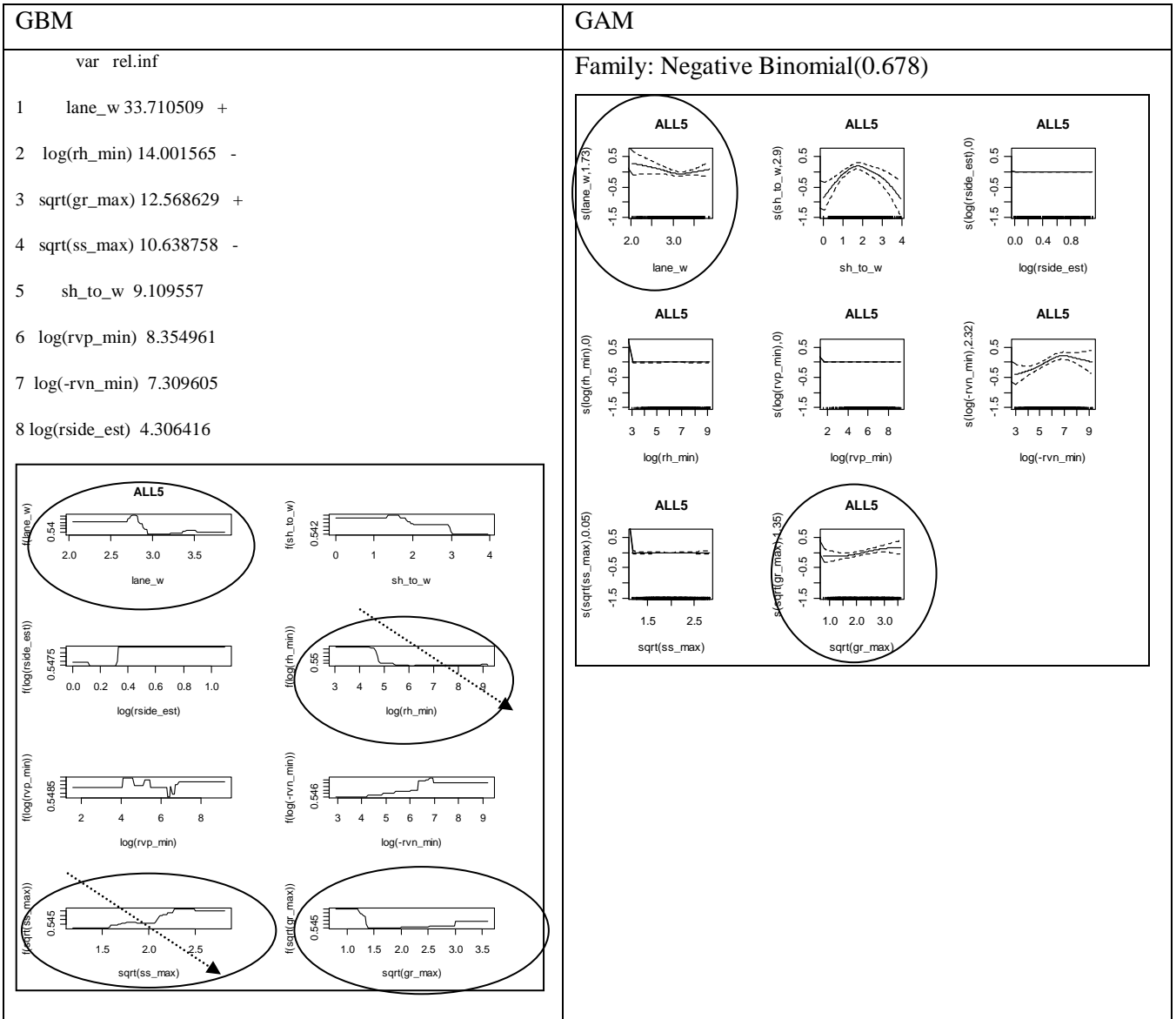
GBM	GAM
<p>var rel.inf</p> <p>1 lane_w 59.66188 -</p> <p>2 log(rside_est) 40.33812 -</p> <p>3 sh_to_w 0.00000</p> <p>4 log(rh_min) 0.00000</p> <p>5 log(rvp_min) 0.00000</p> <p>6 log(-rvn_min) 0.00000</p> <p>7 sqrt(ss_max) 0.00000</p> <p>8 sqrt(gr_max) 0.00000</p> 	<p>Family: Negative Binomial(0.625)</p> 

TDS5 – תאונות חמורות



TDT5 – תאונות עם נפגעים





English summary

1. General

This study aimed at identification of relationship between the geometric and other characteristics of single-carriageway low-volume roads and accident numbers and types, under Israeli conditions. The study included the following steps: a survey of international literature on the study's topic; study's database preparation; data analysis and development of explanatory models. Furthermore, using the models quantitative tools for engineers were developed to be applied in the processes of new roads' design and/or improving existing roads. In addition, recommendations were provided for implementation of the study's findings in the processes of design of low-volume roads in Israel.

2. Literature survey

The literature survey conducted in the study referred to these issues: definitions of low-volume roads in different countries; design guidelines on various characteristics of low-volume roads, in different countries; findings from the development of explanatory models on the relationship between traffic volumes, geometric and other road characteristics and accident frequencies on single-carriageway roads, with the emphasis on low-volume roads; a summary of Israeli research findings on safety of single-carriageway roads and single-carriageway low-volume roads. The literature survey demonstrated that:

* *Concerning the definition of low-volume roads:* in all countries, a low-volume road is a rural single-carriageway two-way road. Among the countries, differences exist in the upper values of daily traffic volume for the definition of low-volume roads. In some countries, several hierarchies of low-volume roads are defined by different ranges of average daily traffic volumes. The spectrum of values of traffic volumes on such roads ranges from 100 to 6,000 vehicles per day, where in the majority of countries, this range lies between 400 and 2,000 vehicles per day;

* *As to design guidelines for low-volume roads:* due to minor traffic volumes, the budget for building and maintenance of low-volume roads is typically low and, thus, bottom design values for such roads are low compared to similar values for single-carriageway roads with larger traffic volumes. The design values that are customary to reduce are: the design speed, lane width and shoulder width;

* *Concerning quantitative models for evaluating accident numbers:* numerous examples of models for predicting accidents on rural single-carriageway roads were found. For the development of these models the geometric characteristics of road sections, traffic volumes, and traffic accident data were used. Using statistical methods, the influencing characteristics

were identified and a quantitative expression was found for the effect of certain variables on accident numbers or rates (accidents per vehicle-kilometers traveled), on a road section. Other models examined the influence of design values of one or more design components on the expected average accidents rate obtained from a basic model. Design components which were found as influential in such models are: lane width, shoulder width, a combination of lane width and shoulder width, a ratio between paved shoulder and unpaved shoulder, shoulder type, lack of super-elevation (with relation to the design guidelines), curvature, design consistency and grade.

* *As to Israeli research findings:* a study of rural single-carriageway roads with four digit numbers found that accident rates on such roads are high compared to those on other rural road types. The study also found a relationship between the number of injury accidents on such roads and traffic volumes and the index expressing the geometric complexity of the road. Another study found a relation between the increase in the design consistency of the road and the accident rate reduction.

A recent study on the safety level of low-volume roads in Israel defined a low-volume road as a road with traffic volume of up to 3,000 vehicles per day. Based on accident data on such roads, a model was adjusted for predicting the number of severe accidents according to traffic volumes. For each road section, a safety measure was calculated according to the deviation of actual accident number from the predicted accident number. Using this measure, safe and dangerous road sections were found, compared to the average accident number on such sections.

In total, in the world, there is knowledge and statistical experience of developing various models for assessing accident numbers on low-volume roads, based on accident data, traffic volumes and geometric characteristics of such roads. However, the composition of the explanatory variables remaining in the statistical model for predicting the number of accidents is not fixed but varies depending on the definition of sections analyzed, data availability, the scope of the data examined, analysis objectives, etc.

3. The study's database

The literature survey revealed that among various countries, differences exist as to the upper value of daily traffic volume defining low-volume roads. Among the various countries, the spectrum of values of traffic volumes on such roads ranges from 100 to 6,000 vehicles per day. In the majority of countries, this range lies between 400 and 2,000 vehicles per day, where road sections with such low traffic volumes are rare in Israel.

Based on a discussion with the National Roads Company (NRC), low-volume roads in Israeli conditions and the study's road sections, respectively, were defined as follows: (a) single-

carriageway roads under the NRC responsibility; (b) with daily traffic volume below 3,000 vehicles (as a rounded figure); (c) situated both within and outside the "green line" boundaries.

Following the analysis of the Central Bureau of Statistics' files and matching the data with information from the NRC Safety Management System, on the Israeli rural road network 164 road sections of this type were found, with a total length of 1451 km.

For the study's road sections, detailed data were collected. The information on geometric and other road infrastructure characteristics came from the "2010 Road survey", which was carried out by the NRC and supplied the data to the NRC Safety Management System (SMS). Accident data and traffic volumes were extracted from the Central Bureau of Statistics' files.

Within the SMS, the data on road characteristics were collected for segments of about 100 meters in length. For the study's purpose, the SMS segments were combined into short road sections of about 1 km in length. For each short section all the available characteristics were produced, through averaging, across the segments that comprise it, or using another rule as described in Chapter 2 of the report. Having dropped the segments which did not satisfy the study's definitions and having produced the infrastructure characteristics, the study's database included **1365 short road sections**, with a total length of **1235 km**. The data on accident numbers, on each road section, was collected for five years, 2006-2010, according to several accident types.

4. Developing explanatory models for the relationship between section characteristics and road accidents

Various univariate and multivariate analyses were conducted on the data collected in order to develop explanatory models for the relationship between low-volume road characteristics and accident occurrences. The explanatory models were fitted to five accident types which are:

- a. Multiple-vehicle collisions (based on the "road accident" (RA) files) - according to the model fitted in the study, variables that affect collision occurrences are shoulder width, minimum horizontal radius, maximum horizontal grade, traffic volume and section length.
- b. Single-vehicle accidents (from the RA-files) - according to the model developed, variables that affect such accidents are shoulder width, minimum horizontal radius, roadside conditions, lane width, traffic volume and section length.
- c. Severe accidents (fatal and serious together) - according to this model, variables affecting severe accidents are shoulder width, lane width, traffic volume and section length.

d. Total injury accidents (from the RA-files) - according to the model, variables affecting injury accidents are lane width, shoulder width, minimum horizontal radius, maximum horizontal grade, traffic volume and section length.

e. All accidents (based on the RA- and "general injury" files together) - according to the model developed, variables affecting all accidents are lane width, shoulder width, maximum vertical grade, maximum horizontal grade, traffic volume and section length.

Every model estimates the expected accident number, on a road section, in five years (the annual value is a fifth of the estimate obtained using the model).

Table A summarizes the findings across the five models. It can be seen that:

- The effect of various infrastructure characteristics is consistent across the models, though, the number of explanatory characteristics varies between the models;
- In all the models, as expected, an increase in traffic volume brings to an increase in accident numbers;
- An initial extension of shoulder width, up to 2-2.5 m, is associated with increase in accidents. However, further shoulder widening, above 2-2.5 m, brings to accident reduction;
- An initial extension of lane width, up to 3-3.25 m, brings to a reduction in most accident types. Further extension of lane width, above 3-3.25 m, is associated with increase in single-vehicle and all accidents;
- The increase of minimum horizontal radius is associated with injury accident reduction, including multiple-vehicle collisions and single-vehicle accidents;
- The value of maximum horizontal grade affects multiple-vehicle collisions, injury accidents and all accidents, where, in all cases, accident numbers increase with an increase in this characteristic's value, under the conditions of large horizontal radius, but decrease under the conditions of small horizontal radius, below 300 m (i.e. a positive effect of super-elevation under the conditions of sharp horizontal curves was observed);
- The improvement in roadside conditions contributes to a reduction in single-vehicle accidents, yet, the extent of the effect is relatively low;
- The vertical grade affects all accidents only (from the RA- and "general injury" files together), where higher positive grade is associated with accident increase.

Table A. A summary of the effects of infrastructure characteristics on various accident occurrences, on low-volume road sections

Explanatory Variable	Accident change following an increase in variable value				
	Multiple-vehicle collisions	Single-vehicle accidents	Severe accidents	Total injury accidents	All accidents
Daily traffic volume -AADT, thousand vehicles	Increase	Increase	Increase	Increase	Increase
Average shoulder width, m	Increase (shoulder width up to 2.75 m)	Increase (shoulder width up to 2 m)	Increase (shoulder width up to 2.5 m)	Increase (shoulder width up to 2.5 m)	Increase (shoulder width up to 2 m)
Average shoulder width, m	Decrease (shoulder width above 2.75 m)	Decrease (shoulder width above 2 m)	Decrease (shoulder width above 2.5 m)	Decrease (shoulder width above 2.5 m)	Decrease (shoulder width above 2 m)
Average lane width, m	--	Decrease (lane width up to 3.25 m)	Decrease	Decrease	Decrease (lane width up to 3 m)
Average lane width, m	--	Increase (lane width above 3.25 m)	--	--	Increase (lane width above 3 m)
Minimum horizontal radius, m	Decrease	Decrease	--	Decrease	--
Maximum horizontal grade, %	Increase (where minimum horizontal radius is 300 m or larger)	--	--	Increase (where minimum horizontal radius is 300 m or larger)	Increase (where minimum horizontal radius is 300 m or larger)
Maximum horizontal grade, %	Decrease (where minimum horizontal radius is less than 300 m)	--	--	Decrease (where minimum horizontal radius is less than 300 m)	Decrease (where minimum horizontal radius is less than 300 m)
Roadside conditions, a weighted score	--	Decrease	--	--	--
Maximum vertical grade, %	--	--	--	--	Increase

5. Quantitative tools for engineers

Based on the models developed, quantitative tools were built enabling to demonstrate the relationship between the geometric characteristics of low-volume roads and expected accident numbers. Those tools are:

- * A graphical presentation of the quantitative relations between each one of the road infrastructure characteristics and accident rates;

- * Evaluation of accident modification factors associated with changes in the geometric characteristics of road sections.

Quantitative tools were built for each one of the five accident types examined in the study and for each geometric characteristic of road sections that was found to influence accident occurrences, according to the models.

The graphical presentation of the relations was conducted in two ways:

(1) The relation between the values of a specific road characteristic and accident frequencies is presented using two graphs that were created by calculating two example cases, assuming certain values of other road characteristics;

(2) The shape of the relation between the values of a specific road characteristic and accident frequencies is presented using the "multiplier" method, where for each change in the characteristic considered a relative change in accident frequencies is shown compared to a certain value of the characteristic which was chosen as a basis for the calculation and for which the "multiplier" value equals "1".

In order to present the findings using the "multiplier" method, typical values of road section characteristics were selected - the baseline values, as follows: lane width of 2.8 m; shoulder width of 2 m; the weighted score of roadside conditions of 1.5; minimum horizontal radius of 200 m; maximum horizontal grade of 4%; maximum vertical grade of 5%. Thus, the graphs created using the "multiplier" method showed a relative change in accident frequencies following the characteristic changes compared to the baseline values.

The full set of the quantitative tools for engineering applications is presented in Chapter 4 of the report. This quantitative knowledge about the expected changes in road accidents, following the change in road characteristics, may help for making decisions in the design stages of a new road or in improving an existing road section/black spot treatment.

6. Recommendations for integrating the study findings in the design processes of low-volume roads

The models developed by the study for measuring the relationship between the geometric characteristics and accident frequencies on low-volume roads can serve as a basis for selecting road section parameters, both during the design and road maintenance processes or black-spot treatment.

In addition, following a combined consideration of the models' results, literature findings and boundary values of geometric characteristics from the rural road design guidelines, recommendations on preferable characteristics of low-volume roads were provided, as follows:

- Extending the shoulder width on low-volume roads to 3.0 m. To save costs, the extension of existing paved shoulder of 2.0 m wide is possible, using a gravel shoulder (not asphalt-paved);
- Extending the lane width on low-volume roads to 3.2 m;
- Reducing as much as possible the use of horizontal curves with radius below 300 m. In cases where the horizontal radius is less than 300 m, install warning signs for drivers;
- Examine the gaps between the existing road conditions and the guidelines' recommendations related to the super-elevation values on curves. Once a gap is recognized, act to reduce it;
- Similarly, examine the gaps between the existing road conditions and the guidelines related to forgiving roadsides. Should there be such a gap, act to reduce it;
- On existing roads, where there is a deviation from the guidelines regarding vertical grade, install warning signs.

In general, while reconstructing a road section, it is recommended to carry out a detailed examination, using the tools presented in Chapter 4 of the report, in order to compare the safety outcomes expected from various design alternatives.

List of tables and figures

Table 1.1. Classification of low-volume roads according to daily vehicle traffic, in different countries

Table 1.2. Comparative data on total length of road network versus low-volume roads, in different countries

Table 1.3. Accident reduction factors depending on lane width

Table 1.4. Accident modification factors depending on shoulder width

Table 1.5. Design recommendations for a combination of lane width and shoulder width, according to traffic volume, design speed and percentage of heavy vehicles

Table 1.6. Effects of super-elevation deficiencies on safety at horizontal curves.

Table 1.7. The scope of data collected in Portugal for safety level examination of single-carriageway roads

Table 1.8. Regression coefficients in the models fitted to road sections with unpaved shoulders

Table 1.9. Regression coefficients in the models fitted to road sections with paved shoulders

Table 1.10. Coefficients of injury accident explanatory models, depending on section length and traffic volumes

Table 1.11. Coefficients of injury accident explanatory models, depending on kilometrage estimates

Table 1.12. Coefficients of accident explanatory models according to the first model in Mountain et al (1996)

Table 1.13. Coefficients of accident explanatory models according to the second model in Mountain et al (1996)

Table 1.14. Accident rates for different road characteristics, according to Prinsloo and Goudanas (2003)

Table 1.15. Effects of various types of road marking on accident rates on two-lane roads

Table 1.16. Coefficients of model for accident prediction according to accident type

Table 1.17. Coefficients of models for accident prediction on single-carriageway roads and motorways

Table 1.18. Coefficients of models for total accidents on road section, acc. to IHSDM

Table 1.19. Values of design consistency coefficients estimated for selected road sections

Table 2.1. The number of road sections and their total length, according to the thresholds of maximum daily traffic volume

Table 2.2. Road sections for which data were not found in SMS

Table 2.3. Classification of minimum radius values according to design speeds

Table 2.4. Classification of vertical convex radius values according to design speeds

Table 2.5. Classification of vertical concave radius values according to design speeds

Table 2.6. Values of "safety level" of roadsides according to barriers' characteristics

Table 2.7. Forgiving roadside design - recommended values of recovery zone from the edge of carriageway

Table 2.8. Definitions of "safety level" of roadsides according to recovery zone width and traffic volume

Table 2.9. The number of accidents on study's road sections, according to aggregated accident types, in 2006-2010

Table 3.1. The structure of database delivered to the analysis

Table 3.2. Distribution of accident numbers, from the types selected, between the study's sections

Table 3.3. Averages and ranges of values of explanatory variables

Table 3.4. Effects of road section characteristics on multiple-vehicles collisions

Table 3.5. Effects of road section characteristics on single-vehicle accidents

Table 3.6. Effects of road section characteristics on severe accidents

Table 3.7. Effects of road section characteristics on injury accidents

Table 3.8. Effects of road section characteristics on total accidents

Table 4.1. Accident modification factors of multiple-vehicle collisions associated with changes in the values of geometric characteristics of a low-volume road section

Table 4.2. Accident modification factors of single-vehicle accidents associated with changes in the values of geometric characteristics of a low-volume road section

Table 4.3. Accident modification factors of severe accidents associated with changes in the values of geometric characteristics of a low-volume road section

Table 4.4. Accident modification factors of injury accidents associated with changes in the values of geometric characteristics of a low-volume road section

Table 4.5. Accident modification factors of total accidents associated with changes in the values of geometric characteristics of a low-volume road section

Table 4.6. A summary of impacts of infrastructure characteristics on occurrences of various accident types, on low-volume road sections

Table 4.7. Example 1: evaluation of expected changes in the numbers of various accident types, following road infrastructure improvements

Table 4.8. Example 2: evaluation of expected changes in the numbers of various accident types, following road infrastructure improvements

Table 5.1. A summary of impacts of infrastructure characteristics on occurrences of various accident types, on low-volume road sections

Figure 1.1. A relationship between lane width and accidents, assuming daily traffic volume of 1,000 vehicles and according to various widths of paved shoulders.

Figure 1.2. A relationship between lane width and accidents, assuming daily traffic volume of 1,000 vehicles and according to various widths of paved shoulders.

Figure 1.3. A relationship between accident numbers and lane width, depending on various width of unpaved shoulder.

Figure 1.4. A relationship between accident numbers and lane width, depending on various width of paved shoulder.

Figure 1.5. Accident modification factor depending on lane width changes.

Figure 1.6. Accidents changes depending on carriageway width, according to models from two states: North Carolina and California.

Figure 1.7. Accident modification factors depending on daily traffic volume and lane width.

Figure 1.8. Accident modification factors (in all accidents) depending on daily traffic volume and lane width

Figure 1.9. Accident modification factors depending on shoulder width, for daily traffic volume of 1,000 vehicles and different lane widths.

Figure 1.10. Accident modification factors depending on shoulder width, for daily traffic volume of 4,000 vehicles and different lane widths.

Figure 1.11. Accident modification factors depending on unpaved shoulder width and lane width.

Figure 1.12. Accident modification factors depending on paved shoulder width and lane width.

Figure 1.13. Expected accident number per 1 road km depending on shoulder width, in four US states

Figure 1.14. Accident modification factors depending on traffic volumes and shoulder width

Figure 1.15. Accident modification factors depending on traffic volumes and paved shoulder width.

Figure 1.16. Accident modification factors (in total accidents) depending on traffic volumes and unpaved shoulder width

Figure 1.17. Accident modification factor depending on super-elevation deficiencies

Figure 1.18. Annual accident number depending on the curve radius, for curve length of 1,000 m and daily traffic of 3,000 vehicles

Figure 1.19. Annual number of curve accidents depending on the curve radius and carriageway width, for curve length of 1,000 m and daily traffic of 3,000 vehicles

Figure 1.20. Accident modification factor depending on the curve length and radius

Figure 1.21. Accident modification factor depending on gap between the required and existing super-elevation and according to several values of accident rates per km

Figure 1.22. Accident modification factor depending on grade changes

Figure 1.23. Accident modification factor depending on vertical grade, according to IHSDM

Figure 1.24. The number of fatal and serious accidents expected per road km, in 3 years, depending on traffic volume (in thousands) - fitting Poisson regression to the data

Figure 4.1. A relationship between the geometric characteristics and expected number of multiple-vehicle collisions, on a low-volume road section.

Figure 4.2. The form of relationship between the geometric characteristics and the number of multiple-vehicle collisions, expected in 5 years on a low-volume road section, using a "multiplier" method

Figure 4.3. A relationship between the geometric characteristics and expected number of single-vehicle accidents, on a low-volume road section

Figure 4.4. The form of relationship between the geometric characteristics and the number of single-vehicle accidents, expected in 5 years on a low-volume road section, using a "multiplier" method

Figure 4.5. A relationship between the geometric characteristics and expected number of severe accidents, on a low-volume road section

Figure 4.6. The form of relationship between the geometric characteristics and the number of severe accidents, expected in 5 years on a low-volume road section, using a "multiplier" method

Figure 4.7. A relationship between the geometric characteristics and expected number of injury accidents, on a low-volume road section

Figure 4.8. The form of relationship between the geometric characteristics and the number of injury accidents, expected in 5 years on a low-volume road section, using a "multiplier" method

Figure 4.9. A relationship between the geometric characteristics and expected number of total accidents, on a low-volume road section

Figure 4.10. The form of relationship between the geometric characteristics and the number of total accidents, expected in 5 years on a low-volume road section, using a "multiplier" method.

Table of Content

Summary	10
1. Introduction and survey of international literature	16
1.1. Background and study's description	16
1.2. The theme of literature survey	17
1.3. Definitions of low-volume roads, in the international experience	18
1.4. Guidelines for design of low-volume roads	18
1.5. Models for accident prediction based on road characteristics	25
1.6. Israeli studies of safety of low-volume roads	63
1.7. Summary and conclusions from the literature survey	66
2. Preparation of the study's database	68
2.1. Data collection on traffic volumes	68
2.2. Road characteristics	69
2.3. Accident data on the studied road sections	77
2.4. The database with all the road characteristics	78
3. Data analysis and development of models for measuring the relationship between the characteristics of low-volume roads and accident frequencies	81
3.1. Data examinations	81
3.2. Models' development	91
4. Using the models developed for the examination of effects of road characteristics on accident frequencies	100
4.1. General	
4.2. Effects of road characteristics on multiple-vehicle collisions	102
4.3. Effects of road characteristics on single-vehicle accidents	110
4.4. Effects of road characteristics on severe accidents	119
4.5. Effects of road characteristics on injury accidents	124
4.6. Effects of road characteristics on total accidents	132
4.7. Summary of impacts of road infrastructure characteristics on accidents, based on all the models together	142
4.8. Examples of use of the models' results for evaluation of a road section	143
5. Summary and conclusions	147
5.1. Summary of study's findings	147
5.2. Discussion and recommendations	152

References	155
Appendix A. A list of studied road sections	160
Appendix B. Exploratory analysis of explanatory variables – histograms and Box-plots of the data	164
Appendix C. Results of running GMB and GAM software packages for the examination of importance of various explanatory variables for different accident types	167

Record / "Identity Card" of the project

Report No. (of INRC):	
Date: March 2012	Report Name: An examination of the relationship between the number and characteristics of accidents and the geometry of low-volume two-lane roads
Report No. (of the contractor): S/32/2012	Authors: Gitelman V., Carmel R., Doveh E., Pesahov F., Hakkert S.
INRC Contract No.: 4500033001	Contractor (Name & Address): Ran Naor Road Safety Research Center, Technion
Report Type & Project Period: Scientific report, 2011-2012	
Additional Notes:	
<p>Abstract:</p> <p>1. Objectives: This study aimed at identification of relationship between the geometric and other characteristics of single-carriageway low-volume roads and accident numbers and types, under Israeli conditions. The study included the following steps: a survey of international literature on the study's topic; study's database preparation; data analysis and development of explanatory models. Furthermore, using the models developed quantitative tools for engineers were built to be applied in the processes of new roads' design and/or improving existing roads. In addition, recommendations were provided for implementation of the study's findings in the design processes of low-volume roads in Israel.</p> <p>2. Findings: A literature survey revealed that, among the countries, differences exist as to the definition of upper value of daily traffic for low-volume roads. Among the countries, the spectrum of values of traffic volumes on such roads ranges from 100 to 6,000 vehicles per day. In the majority of countries, this range lies between 400 and 2,000 vehicles per day, where road sections with such low traffic volumes are rare in Israel. Based on a discussion with the National Roads Company (NRC), low-volume roads in Israeli conditions and study's road sections, respectively, were defined as follows: (a) single-carriageway roads under the NRC responsibility; (b) with daily traffic volume below 3,000 vehicles (as a rounded figure); (c) situated both within and outside the "green line" boundaries.</p> <p>For the study's road sections, detailed data were collected. The information on geometric and other road infrastructure characteristics came from the "2010 Road survey", which was carried out by the NRC and supplied the data to the NRC Safety Management System (SMS). Accident data and traffic volumes were extracted from the Central Bureau of Statistics' files. For the study's purpose, the SMS segments were combined into short road sections of about 1 km in length. Having dropped the segments which did not satisfy the study's definitions and having produced the infrastructure characteristics, the study's database included 1365 road sections, with a total length of 1235 km. The data on accident numbers, on each road section, was collected for five years, 2006-2010, according to several accident types.</p> <p>Statistical explanatory models were fitted to five accident types which are: a. Multiple-vehicle collisions (based on "road accident" (RA) files); b. Single-vehicle accidents (RA-files); c. Severe accidents (fatal and serious together); d. Total injury accidents (RA-files); e. All accidents (based on</p>	

RA- and "general injury" files together). Every model estimates the expected accident number, on a road section, in five years. Summarizing the explanatory variables kept in the five models, it was found that:

- In all the models, as expected, an increase in traffic volume brings to an increase in accident numbers;
- An initial extension of shoulder width, up to 2-2.5 m, is associated with increase in accidents. However, further shoulder widening, above 2-2.5 m, brings to accident reduction;
- An initial extension of lane width, up to 3-3.25 m, brings to a reduction in most accident types. Further extension of lane width, above 3-3.25 m, is associated with increase in single-vehicle and all accidents;
- The increase of minimum horizontal radius is associated with injury accident reduction, including multiple-vehicle collisions and single-vehicle accidents;
- Side-slope value affects multiple-vehicle collisions, injury accidents and all accidents, where accident number reduces with an increase in side-slope, under the conditions of small horizontal radius - below 300m;
- The improvement in roadside conditions contributes to a reduction in single-vehicle accidents, yet, the extent of the effect is relatively low;
- Vertical slope affects all accidents only, where higher slope is associated with accident increase.

Based on the models developed, quantitative tools were built enabling to demonstrate the relationship between the geometric characteristics of low-volume roads and expected accident numbers. Those tools are: (1) a graphical presentation of relations between each one of road infrastructure characteristics and accident rates; (2) evaluation of accident modification factors associated with changes in the geometric characteristics of road section.

3. Recommendations: The models developed by the study for measuring the relationship between the geometric characteristics and accident frequencies can serve as a basis for selecting road section parameters, both during the design and road maintenance processes or black-spot treatment.

In addition, following a combined consideration of the models' results, literature findings and boundary values of geometric characteristics from the rural roads' design guidelines, recommendations on preferable characteristics of low-volume roads were provided.

In general, reconstructing a road section, it is recommended to carry out a detailed examination, using the tools presented in Chapter 4 of the report, in order to compare the safety outcomes expected from various design alternatives.

Key Words: Low-volume road, road accidents, geometric characteristics, explanatory model, accident modification factor

No. of Pages: 187

Classification of Current Page Distribution:

Classification of Report Distribution:

An examination of the relationship between the number and characteristics of accidents and the geometry of low-volume two-lane roads

March 2012

Prepared by:

Dr. Victoria Gitelman

Eng. Robi Carmel

Dr. Etti Doveh

Mss Fanny Pesahov

Prof. Shalom Hakkert

**Prepared for MA'ATZ - Israel National Roads
Company - INRC LTD.**