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

הכנת פרקים נבחרים למדריך הישראלי
להטמעת בטיחות בדרכים בתהליכי תכנון תשתיות

ד״ר ויקטוריה גיטלמן
אינג׳ רובי כרמל

במימון קרן רן נאור לקידום מחקר בטיחות בדרכים
מיסודה של עמותת אור ירוק

קרן רן נאור לקידום מחקר בטיחות בדרכים
RAN NAOR FOUNDATION
for the advancement of road safety research

יוני 2012

תקציר

רקע: בשנים האחרונות, במספר מדינות מתקדמות פורסמו מדריכים עם ריכוזי ידע בתחומי הנדסת תשתית בטיחותית אשר אמורים לשמש ככלי עזר למהנדסים בתהליכי תכנון של תשתיות הדרכים. לפי ההתפתחויות בעולם ובייחוד בארה״ב, נראה כי השלב הבא בקידום בטיחות התשתיות טמון בשילוב הידע שהצטבר בתחום הבטיחות בדרכים בתהליכי התכנון והתכן של הנדסת תחבורה. המטרה הינה ביצירה ומתן כלים כמותיים ואחרים למהנדסים כדי לשלב את בחינת סוגיות הבטיחות בתהליכים השגרתיים של עבודתם, מה שאמור להביא, בסופו של דבר, לשיפור קבלת ההחלטות בתהליכי התכנון אשר יביא תועלת בטיחותית.

בסדנא שהתקיימה בישראל בפברואר 2011 בנושא ״הטמעת הבטיחות בדרכים בתהליכי התכנון והתכן של הנדסת תחבורה ובינוי ערים״, הוצג המדריך האמריקני לבטיחות בדרכים (HSM, 2010) ונדונו סוגיות שונות הקשורות לשילוב נושאי הבטיחות בתהליכי התכנון. הסדנא הצביעה על הצורך והעניין שקיימים בציבור המקצועי בישראל בכלים השימושיים להטמעת נושאי הבטיחות בתהליכי העבודה.

מחקר זה מהווה המשך לפעילות שהחלה בסדנא הנ״ל, כאשר מטרתו להמחיש, בעזרת דוגמאות מעשיות, את אפשרויות השימוש בכלים הבטיחותיים לתמיכה בתהליכי תכנון תשתיות בתנאי הארץ. מחקר זה מהווה צעד ראשון לכיוון יצירת המדריך הישראלי בנושא בטיחות התשתיות והוא עוסק בבחינה פרטנית של הכלים הקיימים במקורות השונים בעולם ובישראל, ובהדגמת השימוש בכלים אלה להערכת השלכות בטיחותיות של החלטות תכנון שונות, בתנאי הארץ.

שיטת המחקר: מחקר זה ריכז כלים כמותיים המאפשרים לבחון את סוגיות הבטיחות בתהליכי תכנון ושיפור של תשתיות *בדרכים הלא עירוניות בישראל*. כלים אלה קיימים משני סוגים: (א) מודלים להערכת מספר תאונות צפוי באתר, לפי סוגי אתרים שונים; (ב) מקדמי שינוי בתאונות המתקשרים עם מאפייני תשתית שונים /שיפורי תשתית.

במחקר זה נערכו:

1) סקירה פרטנית של המדריך האמריקני HSM (2010) ומדריכי בטיחות אחרים בחו״ל מבחינת הימצאות הכלים המתאימים לתמוך בקבלת החלטות בתכנון מאפייני תשתיות בדרכים הלא עירוניות. כמו כן, נערכה סקירת תוצרי המחקרים בארץ, במטרה לרכז כלים הניתנים ליישום במסגרת תהליכי קבלת ההחלטות ע״י מהנדסי תנועה בנושאי התכנון של תשתיות דרכים לא עירוניות.

2) פיתוח דוגמאות ליישום הכלים הקיימים בחו״ל בתהליכי *תכנון כבישים חדשים* בתנאי הארץ. בעזרת הכלים הקיימים בחו״ל נערכו הדגמות החישובים של התועלת הבטיחותית משינויים במאפייני התשתית. להדגמת החישובים פותחו ארבע דוגמאות טיפוסיות בתנאי הארץ, עבור קטעי דרכים חד-מסלוליות וצומת לא מרומזר. הכלים שנוסו בהערכת הדוגמאות נלקחו משני מדריכים אמריקניים: HSM (2010), RSDW (2009).

3) הכנת דוגמאות ליישום הכלים הקיימים בישראל בתהליכי *שיפור תשתית קיימת* בתנאי הארץ. בעזרת הכלים שפותחו בישראל - מודלים להערכת מספר תאונות צפוי באתר, מקדמי ירידה

בתאונות - הודגמו חישובים של התועלת הבטיחותית משיפורי תשתית קיימת. החישובים נערכו עבור מספר דוגמאות טיפוסיות, ברמות מורכבות שונות, בקטעי דרכים חד-מסלוליות וצומת מרומזר.

ממצאים: בסקר הספרות נמצא כי מקדמי שינוי בתאונות הקשורים לשינויים במאפייני התשתית נמצאו במקורות רבים. ממחקרים שנעשו בארץ קיימים אומדנים למקדמי שינוי בתאונות בעקבות שיפורי תשתית נבחרים בדרכים הבין-עירוניות. עם זאת, רוב האומדנים בארץ מתייחסים להשפעה של שיפורי תשתית משולבים, כאשר מתוכם לא ניתן לקבל אומדנים להשפעה של שינוי במאפיין תשתית בודד.

בספרות הבינלאומית, אוסף ניכר של מודלים לחיזוי תאונות בדרכים הבין-עירוניות נמצא בשני מקורות מארה״ב: HSM (2010), RSDW (2009). חלק מהמודלים מתאימים לסוגי דרכים לא עירוניות הקיימים בישראל, כגון: קטע דרך חד-מסלולית דו-נתיבית; קטע דרך דו-מסלולית רב-נתיבית עם מפרדה; צמתים מרומזרים ולא מרומזרים. המודלים האמריקניים, בנוסף לנפחי התנועה ואורך קטע דרך, מאפשרים התחשבות גם במאפייני דרך או צומת נוספים. עם זאת, בין המקורות קיים הבדל בחלק מהמאפיינים שנלקחים בחשבון לצורך חיזוי התאונות.

במחקר שנערך בישראל, פותחו מודלים לחיזוי תאונות בדרכים הבין-עירוניות, למספר סוגי אתרים כגון: קטעי דרך דו-מסלולית וחד-מסלוליות, צמתים מרומזרים ולא מרומזרים, בעלי שלוש וארבע זרועות. מודלים אלה מאפשרים הערכה של *מספר תאונות אופייני* לקטע/צומת לפי שלוש רמות חומרה של תאונות: קטלניות, קשות, קלות. עם זאת, מודלים אלה מספקים הערכה למספר התאונות הצפוי באתר על סמך נפח התנועה וסוג אתר בלבד, כאשר בעזרת המודלים לא ניתן לבצע תיקון במספר התאונות הצפוי באתר, בהתאם למאפייני קטע או צומת נבחרים כגון: מספר נתיבים, מצב שוליים, מצב מפרדה וכד׳.

בשני המקורות האמריקניים: HSM (2010), RSDW (2009), היכולת לשמש לצורכי תכנון נסמכת על מקדמי שינוי בתאונות שקשורים למאפייני תשתית שונים אשר כלולים במודלים לחיזוי מספר התאונות באתר. בהינתן מספר חלופות עם מאפייני תכן שונים, בעזרת מודלים אלה ניתן לבנות תחזיות למספר התאונות הצפוי באתר בכל אחת מהחלופות ומכאן, לקבל החלטה מבוססת יותר לגבי החלופה המועדפת לתכנון.

עם זאת, יש לזכור שהמודלים שפותחו בחו״ל משקפים את הקשר בין מאפייני האתרים ומספרי התאונות באותן המדינות שעבורן הם פותחו, מה שלא בהכרח תואם את מערכת הקשרים הקיימת בתנאי הארץ. לכן, את התועלת משימוש במודלים הזרים כדאי לראות בעיקר בניתוח רגישות של התוצאה - מספר התאונות החזוי באתר - לשינויים במאפייני התשתית ולאו דווקא בערכים המוחלטים של מספר התאונות הצפוי באתר שמתקבלים באמצעות המודלים.

כאמור, המודלים שנמצאו במדריכים האמריקניים - HSM, RSDW, נבחנו במחקר זה על סמך דוגמאות טיפוסיות לקטעי דרכים וצמתים בתנאי הארץ, כולל: תכנון קטע ישר בדרך בין-עירונית חד-מסלולית, עם מהירויות תכן שונות; תכנון קטע בעקום אופקי בדרך בין-עירונית חד-מסלולית, עם מהירות תכן 70 קמ״ש; תכנון קטע בעקום אופקי בדרך בין-עירונית חד-מסלולית, עם מהירויות תכן של 60 ו-80 קמ״ש; תכנון צומת 3 זרועות ללא רמזור בדרך בין-עירונית חד-מסלולית, כאשר

בתור חלופות נבחנים מאפייני תשתית כגון: עם וללא נתיבי פניה שמאלה, נתיבי פנייה ימינה, מפרדות ותאורה.

מבחינת תוצאות ההערכות עלה כי מספר התאונות הצפוי באתר, לרוב, אינו זהה ע"פ ההערכות שבוצעו על סמך המדריכים השונים. הכלים המוצגים במדריכים אלה אכן מאפשרים לבחון את השפעת מאפייני התשתית כגון: רוחב נתיב, רוחב שול, מאפייני עקום ועוד - על מספר התאונות הצפוי באתר. עם זאת, גודל ההשפעה ולעתים, גם כיוון ההשפעה, משתנים בתלות במקור שסיפק את הכלים להערכה.

בעזרת הכלים שפותחו בעבר בישראל כגון: המודלים לחיזוי מספר תאונות באתרים מייצגים בדרכים הבין-עירוניות; מקדמי ירידה בתאונות הקשורים לשיפורי תשתית נבחרים, בתנאי הארץ - בדו"ח זה הודגמו הערכות של מספר תאונות אופייני לקטע דרך או צומת מסוים, בתנאי הארץ, וכמו כן, הוצגו חישובים של התועלות הבטיחותיות המתקשרות עם שיפורי תשתית שונים. כלים אלה עשויים לתרום לתהליכי קבלת ההחלטות בנוגע לשיפורים המתוכננים של תשתיות דרכים קיימות.

מסקנות המחקר:

- בעולם קיים ידע כמותי על השפעתם הבטיחותית של מרכיבי תכנון גיאומטרי של קטעי דרכים, צמתים ומחלפים.

- חלק מידע זה מוטמע בהנחיות הישראליות לתכנון גיאומטרי של דרכים, רחובות, צמתים ומחלפים.

- במצבים בהם מתאפשרת בחירה בין רכיבי התכנון, או כאשר המידות של רכיבי התכנון אינן חד-משמעיות וניתן לבחור אותן מתוך טווח של ערכים, רצוי לשלב את הידע הכמותי הקיים בנושאי הבטיחות בתהליך התכנון. מצבים אלו קורים כאשר תנאי התכנון אינם טיפוסיים, כאשר התכנון מורכב, או כאשר עלויות הביצוע גבוהות. במצבים אלו מומלץ להשתמש בידע הכמותי על בטיחות לצורך השוואה בין חלופות התכנון.

- בשל השוני המתקבל בהערכות לפי המקורות מחו"ל, נראה שקיים צורך בפיתוח כלים דומים בתנאי הארץ. בדומה למקובל בארה"ב, רצוי לפתח מודלים לחיזוי מספרי התאונות בסוגי דרך שונים בישראל שיאפשרו לבצע הערכה בשני שלבים: בשלב הראשון, עבור תנאי הבסיס, בתלות בסוג אתר, נפח התנועה ואורך קטע, ובשלב השני, עבור מספר מאפייני תשתית משפיעים שערכיהם שונים מתנאי הבסיס, כאשר התחשבות זו באה לידי ביטוי ע"י שימוש במקדמי שינוי בתאונות (כגון: crash modification factors במדריך הHSM). בדרך זו, בהערכות הבטיחות יהיה ניתן לקחת בחשבון את השינויים במאפייני התשתית כגון: מספר נתיבים, רוחב נתיב, רוחב שול, עקום אופקי, הגבהה צידית, שיפוע לאורך, מצב צידי הדרך, ועוד.

כמו כן, בין הנושאים המומלצים למחקרי המשך ניתן לציין: מציאת השפעות של מרכיבי תכנון גיאומטרי של דרכים, רחובות, צמתים ומחלפים בתנאי הארץ; יצירת מודלים לחיזוי תאונות עבור סוגי דרכים ואתרים שונים, בתנאי הארץ. בנוסף, יש מקום לבחינת פרטי תכנון שונים בהנחיות הישראליות על-פי הידע הכמותי המצטבר, בארץ ובחו"ל, לגבי ההשפעות הבטיחותיות שלהם.

תוכן עניינים

1. מבוא וסקירת מקורות **6**
1.1. מבוא 6
1.2 סקירת המקורות - כללי 7
1.3. מקדמי שינוי בתאונות הקשורים למאפייני תשתית 8
1.4 מודלים לחיזוי תאונות 17
1.5 מודלים לחיזוי תאונות בתנאי הארץ 21
1.6 סיכום לסקר הספרות 29
2. דוגמאות ליישום הכלים הקיימים בחו"ל בתהליכי תכנון כבישים חדשים, בתנאי הארץ **31**
2.1. דוגמא 1: תכנון קטע ישר בדרך חד-מסלולית 31
2.1.1. הערכה לפי HSM (2010) 32
2.1.2. הערכה לפי RSDW (2009) 34
2.1.3. דיון 35
2.2. דוגמא 2: תכנון קטע בעקום אופקי בדרך חד-מסלולית 36
2.2.1. הערכה לפי HSM (2010) 37
2.2.2. הערכה לפי RSDW (2009) 38
2.2.3. דיון 39
2.3. דוגמא 3: תכנון קטע עם עקום אופקי בדרך חד-מסלולית, עם מהירויות תכן שונות 39
2.3.1. הערכה לפי HSM (2010) 40
2.3.2. הערכה לפי RSDW (2009) 41
2.3.3. דיון 42
2.4. דוגמא 4: תכנון צומת שלוש זרועות לא מרומזר בדרך חד-מסלולית 43
2.4.1. הערכה לפי HSM (2010) 43
2.4.2. הערכה לפי RSDW (2009) 45
2.4.3. דיון 46
3. דוגמאות לשימוש בכלים הקיימים בישראל בתהליכי שיפור תשתיות **48**
3.1. הערכת מספר תאונות אופייני לקטע דרך/צומת 48
3.2. הערכת תועלת בטיחותית משיפור בתשתית 49
4. סיכום ודיון **54**
מראי מקום **57**
נספחים לפרק 2 .... **58**
2A.1. כלים לחיזוי מספר תאונות בקטע דרך חד-מסלולית, לפי HSM (2010) 58
2A.2. כלים לחיזוי מספר תאונות בקטע דרך חד-מסלולית, לפי RSDW (2009) 62
2A.3. כלים לחיזוי מספר תאונות בצומת שלוש זרועות לא מרומזר בדרך חד-מסלולית, לפי HSM (2010) 73
2A.4. כלים לחיזוי מספר תאונות בצומת שלוש זרועות לא מרומזר בדרך חד-מסלולית, לפי RSDW (2009) 75

1. מבוא וסקירת מקורות

1.1. מבוא

בשנים האחרונות, במספר מדינות מתקדמות פורסמו מדריכים עם ריכוזי ידע בתחומי הנדסת תשתית בטיחותית אשר אמורים לשמש ככלי עזר למהנדסים בתהליכי התכנון של תשתיות הדרכים. בין מקורות ידע אלה ניתן לציין: המדריך האמריקני לבטיחות בדרכים Highway Safety Manual (2010); המדריך לבטיחות בדרכים שהוכן ע"י PIARC - World Road Association (2003); המדריך לאמצעי בטיחות של Elvik et al (2009) המציג ריכוזי ידע בינלאומי על מקדמי ירידה בתאונות שמתקשרים עם אמצעים בטיחות שונים; סדרה של דו"חות טכניים שפורסמו ע"י Austroads באוסטרליה.

לפי ההתפתחויות בעולם ובייחוד בארה"ב, נראה כי השלב הבא בקידום בטיחות התשתיות טמון בשילוב הידע שהצטבר בתחום הבטיחות בדרכים בתהליכי התכנון והתכן של הנדסת תחבורה. המטרה הינה ביצירה ומתן כלים כמותיים ואחרים למהנדסים כדי לשלב את בחינת סוגיות הבטיחות בתהליכים השגרתיים של עבודתם, מה שאמור להביא, בסופו של דבר, לשיפור קבלת ההחלטות בתהליכי התכנון אשר יביא תועלת בטיחותית.

בישראל, בעשור האחרון, נערכו מספר מחקרים שמטרתם הייתה בפיתוח כלים שימושיים למהנדסים בנושאי הבטיחות. בין מחקרים כאלה ניתן לציין את הקרט, בונג'ק ואחרים (2002), גיטלמן, הקרט, פיסחוב (2009), בהם פותחה שיטה להערכת יעילות של שיפורים בטיחותיים בתשתית והוערכו מקדמי ירידה בתאונות הקשורים לשיפורי תשתית נבחרים, בתנאי הארץ. כמו כן, במסגרת הקמת המערכת לניהול בטיחות בחברה הלאומית לדרכים, פותחו מודלים לחיזוי מספרי התאונות, עבור מספר סוגי אתרים בתנאי הארץ (גיטלמן, דובא, הקרט, 2008).

עם זאת, הכלים הבטיחותיים שפותחו בישראל מוכרים בעיקר לצוותים שעובדים אתם באופן ישיר, כאשר לקהל הרחב יותר של מהנדסי תנועה הם אינם מוכרים.

בסדנא שהתקיימה בישראל בפברואר 2011 בנושא "הטמעת הבטיחות בדרכים בתהליכי התכנון והתכן של הנדסת תחבורה ובינוי ערים", הוצג המדריך האמריקני לבטיחות בדרכים (HSM, 2010) ונדונו סוגיות שונות וביניהן: ראית נושאי הבטיחות כחלק בלתי נפרד מתהליכי התכנון; יידוע הקהילה המקצועית על קיום כלים המאפשרים את הטמעת נושאי הבטיחות בתהליכי התכנון; זיהוי צרכים בכלים להטמעת הבטיחות בדרכים בתהליכי התכנון בישראל. הסדנא הצביעה על הצורך והעניין שקיימים בציבור המקצועי בישראל בכלים השימושיים להטמעת נושאי הבטיחות בתהליכי העבודה. נמצא כי בציבור המקצועי קיימת הסכמה על כך שהידע המצטבר בתחום הבטיחות בדרכים צריך לבוא לידי ביטוי בכלים שונים המשולבים בתהליכי התכנון והניתנים לשימוש שגרתי ע"י אנשי מקצוע, על מנת לשפר את איכות עבודתם ואת יעילות קבלת ההחלטות.

מחקר זה מהווה המשך לפעילות שהחלה בסדנא הנ"ל, כאשר מטרתו להמחיש, בעזרת דוגמאות מעשיות, את אפשרויות השימוש בכלים הבטיחותיים לתמיכה בתהליכי התכנון בתנאי הארץ.

הצפייה הינה כי "המדריך הישראלי" לבטיחות בדרכים, בצורתו הסופית, יהווה מדריך בהנדסת בטיחות שירכז את הכלים השימושיים בתנאי הארץ לשילוב היבטי הבטיחות בתהליכי תכנון

התשתיות. יצירת כלים כמותיים המיועדים למהנדסים העוסקים בתכנון, תוכל לקדם בעתיד את הבטיחות בדרכים באמצעות תשתית. שילוב הידע שנצבר בתהליכי התכנון של הנדסת תעבורה יביא לשיפור קבלת החלטות בתהליך התכנון, אשר יביא לתועלת בטיחותית.

מחקר זה מהווה צעד ראשון לכיוון יצירת המדריך הישראלי והוא עוסק בבחינה פרטנית של הכלים הקיימים במקורות השונים בעולם ובישראל, ובהדגמת השימוש בכלים אלה להערכת השלכות בטיחותיות של החלטות תכנון שונות, בתנאי הארץ. כפי שיוצג בהמשך, פיתוח דוגמאות במחקר זה הסתמך בעיקר על המדריכים האמריקניים, תוך כדי התאמת הכלים שפותחו בחו"ל לגישה התכנונית בישראל, ובנוסף, מודגמות אפשרויות השימוש בתוצרי המחקרים שנערכו בישראל.

<u>שיטת המחקר</u>

מחקר זה מתמקד בכלים הכמותיים המאפשרים לבחון את סוגיות הבטיחות **בתהליכי תכנון ושיפור של תשתיות בדרכים הלא עירוניות בישראל**. כלים כאלה קיימים משני סוגים:

(א) נוסחאות להערכת מספר תאונות צפוי באתר, לפי סוגי אתרים שונים (באנגלית: safety SPF - performance functions);

(ב) מקדמי שינוי בתאונות שמתקשרים עם מאפייני תשתית שונים, לפי סוגיהם (באנגלית: AMF - accident modification factors).

במחקר היו מרכיבים אלה:

1) סקירה פרטנית של המדריך האמריקני ומדריכי בטיחות אחרים בחו"ל מבחינת הימצאות הכלים המתאימים לתמוך בקבלת החלטות בתכנון מאפייני תשתיות בדרכים הלא עירוניות. כמו כן, נערכה סקירת תוצרי המחקרים בארץ, במטרה לרכז כלים הניתנים ליישום במסגרת תהליכי קבלת ההחלטות ע"י מהנדסי תנועה בנושאי התכנון של תשתיות דרכים לא עירוניות.

ממצאי הסקירה מובאים בפרק 1 של הדו"ח והם מוצגים בשני מקבצים: (א) מקדמי שינוי בתאונות המתקשרים עם מאפייני תשתית שונים/ שיפורי תשתית; (ב) מודלים להערכת מספר תאונות צפוי באתר.

2) הכנת דוגמאות ליישום הכלים הקיימים בחו"ל בתהליכי <u>תכנון כבישים חדשים</u> בתנאי הארץ, דהיינו הדגמת החישובים של התועלת הבטיחותית משינויים של מאפייני התשתית, בעזרת הכלים הקיימים בחו"ל. להדגמת החישובים פותחו ארבע דוגמאות טיפוסיות בתנאי הארץ, עבור קטעי דרכים חד-מסלוליות וצומת לא מרומזר. ממצאים אלה מוצגים בפרק 2 של הדו"ח.

3) הכנת דוגמאות ליישום הכלים הקיימים בישראל בתהליכי <u>שיפור תשתית קיימת</u> בתנאי הארץ, דהיינו הדגמת החישובים של התועלת הבטיחותית משיפורי תשתית קיימת, בעזרת הכלים שפותחו בישראל. להדגמת השימוש בכלים הוכנו מספר דוגמאות טיפוסיות, ברמות מורכבות שונות. ממצאים אלה מוצגים בפרק 3 של הדו"ח.

1.2 סקירת המקורות - כללי

בשלב הראשון במחקר, נערכה סקירה פרטנית של מדריכי הבטיחות הקיימים בחו"ל מבחינת הימצאות הכלים המתאימים לתמיכה בקבלת ההחלטות בתכנון מאפייני התשתיות בדרכים הלא

עירוניות. בסקר המקורות נכללו מדריכים הכוללים ידע כמותי על אמצעי התשתית הקשור לבטיחות, והם:

א. Highway Safety Manual (HSM) (2010) שפורסם בארה"ב, המהווה פרי עבודת צוותים מקצועיים רבים לאורך כעשור. במדריך מובאים מודלים לחיזוי תאונות בהתחשב בסוגי דרכים וצמתים שונים ובמאפיינים הרבים של הסדרי תנועה.

ב. המדריך לתכנון תשתית בטוחה - Roadway Safety Design Workbook (RSDW) - Bonneson and Pratt (2009) שהוכן במדינת טקסס, ארה"ב, ובו כלים לחיזוי תאונות בהתחשב בסוגי דרכים וצמתים שונים ובמאפיינים רבים של הסדרי תנועה.

ג. המדריך לבטיחות בדרכים (Road Safety Manual) של PIARC (2003) שהוכן ע"י World Road Association ובו ריכוז דוגמאות לשיטות וכלים כמותיים התומכים בקבלת החלטות בנושאי בטיחות.

ד. דו"ח אוסטרלי של Austroads: Turner et al (2010) עם ריכוז מקדמי ירידה בתאונות בנושאים הקשורים ליצירת תשתית בטיחותית.

ה. המדריך לאמצעי בטיחות בדרכים (The Handbook of Road Safety Measures) של Elvik et al (2009) המהווה ריכוז ידע בינלאומי בתחום הבטיחות בדרכים, עם דגש על מקדמי ירידה בתאונות המתקשרים עם אמצעים והתערבויות בטיחות שונים.

בנוסף, נבחנו תוצרי המחקרים בארץ, במטרה לרכז כלים הניתנים ליישום במסגרת תהליכי קבלת ההחלטות ע"י מהנדסי תנועה בנושאי תכנון התשתיות בדרכים הלא עירוניות. בסקירה נכללו דו"חות מחקר מהשנים האחרונות בהם הוערכו מקדמי הפחתה בתאונות הקשורים לשיפורי תשתית בתנאי הארץ, או נעשה חיזוי מספר תאונות על-פי מאפייני דרך או צומת.

בסקירת המקורות הושם דגש על: (א) מציאת מקדמי שינוי בתאונות המתקשרים עם שינוי במאפיינים השונים של תשתית בתחום הבין-עירוני, בקטעי דרכים, צמתים ומחלפים; (ב) מציאת מודלים לחיזוי התאונות באתרים השונים תחום הבין-עירוני.

1.3. מקדמי שינוי בתאונות הקשורים למאפייני תשתית

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

לעומת זאת, לאפיון יעילותם של אמצעי תשתית שונים, משמשים מקדמי ירידה בתאונות הקרויים Crash Reduction Factor (CRF) - ראה Harkey et al (2008); Bonneson and Pratt (2009). הCRF מבטא את שיעור התאונות שנחסך כתוצאה משיפור בטיחותי בתשתית.

לפי Lord and Bonneson (2006) את הקשר בין הAMF ו-הCRF ניתן להסביר באופן הבא. מקדם שינוי בתאונות AMF שמתקשר עם שינוי במאפיין הדרך מוגדר כלהלן:

$$AMF=N_{with}/N_{without}$$

כאשר

N_{with} - מספר התאונות הצפוי באתר עם הערך החדש של המאפיין;

$N_{without}$ - מספר התאונות הצפוי באתר עם הערך הישן של המאפיין.

אזי אחוז התאונות שעומד להיחסך - הCRF - בעקבות שינוי המאפיין מוערך כלהלן:

$$CRF = (1- AMF) * 100\%.$$

היתרון של שימוש במקדמי הCMF/AMF נמצא באפשרויות שילוב ההשפעה של מספר מאפייני תשתית. הערך המסכם של מספר תאונות צפוי באתר מסוים (C) מוערך באופן הבא (Bonneson and Pratt, 2009):

$$C = C_{basis} * AMF_1 * AMF_2 * ...$$

כאשר

C_{basis} - מספר התאונות הצפוי באתר בתנאי הבסיס;

AMF_1 - מקדם שינוי בתאונות הקשור לשינוי במאפיין הראשון;

AMF_2 - מקדם שינוי בתאונות הקשור לשינוי במאפיין השני, וכד'.

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

בחלק מהמקורות, בנוסף לאומדן ערך השינוי בתאונות הקשור לשיפור בתשתית, קיימת גם התייחסות לרמת המובהקות של השינוי. לדוגמא, Elvik et al (2009) מציגים רווח סמך ברמת ביטחון של 95% לאומדן הממוצע המשוקלל (best estimate) של מקדם הירידה בתאונות. לעומת זאת, בספרות האמריקנית מחשבים טעות תקן (standard error) לאומדני ה-AMF ובנוסף, מעריכים את איכות האומדן ע"י המדד של רמת ודאות החיזוי (level of predictive certainty) של הערך המוצע אשר יכולה להיות גבוהה, בינונית-גבוהה, בינונית-נכונה, או נמוכה. מדד זה משקף את איכות המתודולוגיה אשר שימשה לקבלת האומדן במחקרי ההערכה המקוריים (Harkey et al, 2008).

יודגש כאן שכל מקורות הספרות שנסקרו במחקר זה מציגים אומדנים מסכמים למקדמי שינוי/ מקדמי ירידה בתאונות, דהיינו כאלה המתבססים על מחקרי הערכה רבים ו/או בדיקת השינויים במספר רב של אתרי שטח, ולא על תוצאות מחקר בודד.

להלן ממצאים מבדיקת מקורות הספרות בנוגע למקדמי שינוי/ירידה בתאונות הקשורים למאפייני תשתית שונים.

א. HSM (2010)

במדריך אמריקאי זה מתוארים מקדמי הפחתה בתאונות הקשורים למאפייני תכן בקטעי דרכים ובקרת תנועה בצמתים וכמו כן, עבור שיפורי תשתית בקטעי דרך, צמתים ומחלפים. טבלה 1.1 מציגה סיכום לטיפולים במאפייני התשתית בקטעי דרך, להם קיימים מקדמי הפחתה בתאונות. הטבלה מתייחסת להסדרים בדרכים הבין-עירוניות בלבד, לפי סוג דרך. בהמשך, בטבלה 1.2 מפורטים השינויים במאפייני הצמתים, לפי סוג צומת, להם קיימים מקדמי הפחתה בתאונות. גם טבלה זו מתייחסת להסדרים בדרכים הבין-עירוניות בלבד.

טבלה 1.1. סוגי טיפולים בתשתית בקטע דרך להם קיימים מקדמי הפחתת תאונות במדריך HSM (2010), לפי סוג הדרך

סוג דרך	דרך מהירה	דרך בין-עירונית דו-נתיבית	דרך בין-עירונית רב-נתיבית
סוגי טיפולים בתשתית להם קיימים מקדמי הפחתת תאונות	- הגדלת רוחב מפרדה, - הגדלת רוחב אזור המפלט, - החלפת מעקות בטיחות במעקות פחות קשיחים, - התקנת מעקות בטיחות במפרדה, - התקנת סופגי אנרגיה לפני מכשולים, - התקנת תמרורי המלצה על מהירות לפני עקום אופקי, - התקנת שלטים מתחלפים להודעות אזהרה "תאונה לפניך", "פקק לפניך", - התקנת שלטים מתחלפים למהירות, - התקנת פס משונן בשול, - התקנת תאורה, - צמצום מרווח זמן לתיקון נזקי חורף.	- שיפור רוחב נתיב, - הוספה/ הרחבה של שול, - שיפור סוג שול, - מיתון מדרונות מעבר לשול, - הגדלת רוחב אזור המפלט, - התקנת סופגי אנרגיה לפני מכשולים, - שיפור בטיחות בצד הדרך, - שיפור בגודל ואורך רדיוס אופקי והוספת עקום מעבר, - שיפור הגבהה צידית, - שינוי בשיפוע לאורך, - התקנת תמרורי המלצה על מהירות לפני עקום אופקי, - התקנת שלטים מתחלפים למהירות, - התקנת סמנים אנכיים בקצה השול, - סימון שולים רחב, - סימון מרכז הדרך, - התקנת פס משונן במרכז הדרך, - התקנת תאורה, - צמצום מספר כניסות מהדרך לחלקות גובלות, - צמצום מרווח זמן לתיקון נזקי חורף	- שיפור רוחב נתיב, - הוספה/ הרחבה של שול, - בניית מפרדה, - הגדלת רוחב מפרדה, - מיתון מדרונות מעבר לשול, - התקנת סופגי אנרגיה לפני מכשולים, - שיפור בטיחות בצד הדרך, - החלפת מעקות בטיחות במעקות פחות קשיחים, - התקנת מעקות בטיחות במפרדה, - התקנת תמרורי המלצה על מהירות לפני עקום אופקי, - התקנת שלטים מתחלפים למהירות, - סימון שול ומרכז הדרך, - התקנת תאורה, - צמצום מרווח זמן לתיקון נזקי חורף

טבלה 1.2. סוגי טיפולים בתשתית בצומת להם קיימים מקדמי הפחתה בתאונות במדריך HSM (2010), לפי סוג צומת

סוג צומת	לא מרומזר גישה משנית	לא מרומזר כל הגישות	מרומזר עם 3 זרועות	מרומזר עם 4 זרועות
סוגי טיפולים להם קיימים מקדמי הפחתה בתאונות	- הפיכת צומת לא מרומזר למעגל תנועה, - הפיכת סוג בקרת תנועה מתמרור "עצור" בכוון המשני ל-"עצור" בכל הכוונים (הסדר לא קיים בארץ), - הפיכת צומת לא מרומזר לצומת מרומזר, - שיפור בזוית אלכסונית של צומת (קרוב הזוית האלכסונית לזווית ניצבת), - הוספת נתיב פנייה שמאלה, - הוספת נתיב פניה ימינה, - הגדלת רוחב מפרדה, -התקנת תאורה, - התקנת שילוט "עצור לפניך", - התקנת מהבהבים בצומת, - הפיכת פנייה שמאלה ישירה לפנייה ימינה ובהמשך פניית פרסה	- הפיכת צומת לא מרומזר למעגל תנועה, - הוספת נתיב פנייה שמאלה, - הגדלת רוחב מפרדה, - התקנת תאורה, - התקנת שילוט "עצור לפניך", - התקנת מהבהבים בצומת	- הפיכת צומת מרומזר למעגל תנועה, - הוספת נתיב פנייה שמאלה, - הוספת נתיב פניה ימינה, - התקנת תאורה, - רשות לפנייה ימינה באדום	- הפיכת צומת מרומזר למעגל תנועה, - הוספת נתיב פנייה שמאלה, - הוספת נתיב פניה ימינה, - התקנת תאורה, - רשות לפנייה ימינה באדום, - שיפור בזמן פינוי

עבור מספר רכיבי תכנון במחלפים, קיימים מקדמי הפחתה בתאונות, כאשר ההתייחסות היא על-פי סוג המחלף כגון: חצוצרה, רביע אחד, יהלום, עירוני חד נקודתי, תלתן חלקי, תלתן מלא, ישיר. לכל סוג מחלף קיימים מקדמי שינוי בתאונות עבור חלק מהטיפולים הבאים: הפיכת צומת למחלף, תכנון מחלף עם מעבר מעל הדרך המהירה, שיפור בנתיבי שינוי מהירות, שיפור בקטעים עם שני נתיבי התמזגות/ הפרדות ע"י הפיכה לנתיב בודד להתמזגות/ הפרדות.

סה"כ, במדריך HSM (2010) קיים מגוון רחב של מקדמי ירידה בתאונות, עבור שיפורי תשתית שונים.

בנוסף, במדריך זה מתוארת שיטה לחיזוי מספר תאונות באתר, כאשר תהליך החיזוי מתבסס בחלקו על שימוש במקדמי שינוי תאונות - CMF. הכלים לחיזוי קיימים עבור דרכים בין-עירוניות דו-נתיביות, בין-עירוניות רב-נתיביות, ודרכים עורקיות עירוניות ופרבריות.

ב. RSDW[1] (2009)

במדריך אמריקאי זה מתוארת שיטה לחיזוי תאונות לפי מאפייני האתר. תהליך החיזוי מתבסס בחלקו על ערכי שינוי בתאונות - AMF, כאשר ערכים אלו נמצאו במחקרים רחבי היקף שבדקו אתרים רבים ולאורך תקופות ארוכות.

במדריך מוצגים כלים להערכת מספר תאונות צפוי, לפי סוגי דרך וצמתים/ הסדרי תנועה אלה: דרך מהירה בין-עירונית, דרך מהירה עירונית פרברית, דרך בין-עירונית דו-נתיבית, דרך בין-עירונית עם

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

4 נתיבים, עורקים עירוניים ופרבריים, רמפות במחלפים, צמתים בין-עירוניים מרומזרים, צמתים בין-עירוניים לא מרומזרים, צמתים עירוניים מרומזרים וצמתים עירוניים לא מרומזרים.

לכל אחד מסוגי דרכים/הסדרים אלו קיימים מקדמי שינוי בתאונות - AMF - עבור מאפייני תשתית משפיעים. בטבלה 1.3 מובא פירוט של המאפיינים המשפיעים על תאונות, לפי סוגי דרך/הסדרים, שעבורם פותחו מודלים למקדמי שינוי בתאונות.

טבלה 1.3. מקדמי שינוי בתאונות עבור מאפייני תשתית שונים, לפי סוג דרך/ הסדר, במדריך RSDW (2009)

סוג דרך/ צומת	סוג אתר	מאפייני תשתית (ותנועה) להם קיימים מקדמי שינוי תאונות
דרך מהירה	בין עירונית ופרברית	רדיוס אופקי, שיפוע, רוחב נתיב, שול ימני, שול שמאלי, רוחב מפרדה (ללא מעקה, עם מעקה חלקי, עם מעקה מלא), פס משונן בשול, מרווח פנוי בצד הדרך (ללא מעקה, עם מעקה חלקי, עם מעקה מלא), קטעי התמזגות בכניסות מרמפות, קטעי השתזרות, שיעור משאיות בתנועה
דרך בין עירונית	2 ו- 4 נתיבים	רדיוס אופקי, מרווח פנוי בצד הדרך (ללא מעקה, עם מעקה חלקי, עם מעקה מלא), שיפוע מדרון מעבר לשול
דרך בין עירונית	2 נתיבים	עקומי מעבר, רוחב נתיב ושול, פס משונן בשול, פס משונן בציר הדרך, סוג מפרדה, הגבהה צידית, נתיבי עקיפה, צפיפות צמתי גישה לחלקות הגובלות לדרך
דרך בין עירונית	4 נתיבים	רוחב נתיב, רוחב שול ימני, רוחב שול שמאלי, רוחב מפרדה (ללא מעקה, עם מעקה חלקי, עם מעקה מלא), שיעור משאיות בתנועה
עורק עירוני ופרברי	--	רדיוס אופקי, רוחב נתיב, רוחב שול, רוחב מפרדה, חנייה מקבילה, מרחק צידי לעמודים, שיעור משאיות בתנועה
צומת בין עירוני	מרומזר	נתיב פנייה שמאלה, נתיב פנייה ימינה, מספר נתיבים, מספר כניסות למגרשים גובלים, שעור משאיות
	לא מרומזר	נתיב פנייה שמאלה, נתיב פנייה ימינה, מספר נתיבים, רוחב שוליים, מפרדה, סטייה מזווית ניצבת בין זרועות הצומת, מספר כניסות למגרשים גובלים, שיעור משאיות
צומת עירוני	מרומזר	נתיב פנייה שמאלה, נתיב פנייה ימינה, מספר נתיבים, תיעול פנייה ימינה, רוחב נתיב
	לא מרומזר	נתיב פנייה שמאלה, נתיב פנייה ימינה, מספר נתיבים, תיעול פנייה ימינה, רוחב נתיב, רוחב שול, מפרדה

לדוגמא, עבור דרך בין-עירונית חד-מסלולית דו-נתיבית קיימים מקדמי שינוי בתאונות עבור המאפיינים הבאים: רדיוס אופקי, מצב צדי הדרך (מרווח פנוי ממכשול - ללא מעקה, עם מעקה בטיחות לחלק מהאורך ועם מעקה בטיחות לכל האורך; שיפוע המדרון מעבר לשול), שיפוע לאורך, עקום מעבר אופקי, רוחב נתיב ורוחב שול, פס משונן בשול, פס משונן במרכז הדרך, נתיב מרכזי שלישי לפניות שמאלה (הסדר לא אופייני בארץ), הגבהה צידית, נתיבי זחילה ועקיפה, צפיפות כניסות למגרשים גובלים.

ג. PIARC (2003)

במדריך זה קיים ריכוז דוגמאות לשיטות וכלים כמותיים התומכים בקבלת החלטות בנושאי בטיחות. בין היתר, במדריך מובאים מקדמי הפחתה בתאונות, עבור הסדרי תשתית שונים. איור 1.1 מביא דוגמאות בנושא זה - מקדמי ירידה בתאונות בעקבות: (א) הרחבת אזור המפלט בצד הדרך,

(ב) מיתון מדרונות בצדי הדרך בעקומים, כאשר דוגמאות אלה נלקחו מהספרות האמריקנית. המדריך מציג דוגמאות גם ממדינות אחרות. עם זאת, סה״כ, אוסף מקדמי הירידה בתאונות המוצג במדריך זה אינו ממצה, כאשר HSM (2010), Elvik et al (2009) הם מקורות מידע מקיפים בהרבה לעומת הPIARC.

INCREASE OF THE LATERAL CLEARANCE ZONE (m)	ACCIDENT REDUCTION (%)
1.5	9
2.4	14
3.0	17
3.7	19
4.6	23
6.1	29

Source: Zegeer et al., 1992

א - % ירידה בתאונות בעקבות הרחבת אזור המפלט בצד הדרך

SIDE SLOPE BEFORE	SIDE SLOPE AFTER			
	4:1	5:1	6:1	7:1 or more
2:1	6	9	12	15
3:1	5	8	11	15
4:1	-	3	7	11
5:1	-	-	3	8
6:1	-	-	-	5

Source: Zegeer et al., 1990

ב - % ירידה בתאונות בעקבות מיתון מדרונות בצדי הדרך בעקומים

איור 1.1. דוגמאות למקדמי ירידה בתאונות, מתוך PIARC (2003).

ד. Austroads: Turner et al (2010)

במסמך אוסטרלי זה מרוכז ידע בנושאים הקשורים ליצירת תשתית בטיחותית. המסמך מהווה את אחד התוצרים של תוכנית מחקר מקיפה שמטרתה הייתה להעריך את הסיכונים בדרך, בתנועה ובתשתיות בצדי הדרך. מטרת חלק זה של הפרויקט הייתה שיפור אומדני הפחתה בתאונות הקשורים לסוגי דרך שונים, ולאמצעי בטיחות שונים. הנושאים לבחינה נבחרו באמצעות התייעצות עם פאנל מומחים.

רשימת הנושאים שקיבלו הערכה במסמך זה הם:

בקטע דרך - בקרת נגישות, תיעול והכוונה באמצעות איי-תנועה ומפרדות, סמני קצה, עמודוני הכוונה, סופגי אנרגיה, מעקות בטיחות, שיפור במרחקי ראות;

בצומת - הארכת נתיב פנייה ימינה (באוסטרליה נוסעים בצד שמאל), מניעת פנייה שמאלה, רימזור, מצלמת אכיפה של מעבר בצומת באדום, נתיב פניה ימינה, הקמת מעגל תנועה חד- ורב-נתיבי, נראות פנסי רמזור, הפרדה מפלסית לצומת, צמתים מדורגים, מניעת פניות פרסה;

בחתך לרוחב - סימון בקצה הדרך, מפרדות, מעבר דרך מפרדה, מניעת פניות בקטעי דרך, סימוני איסור עקיפה, נתיבי עקיפה, סימון מרכז הדרך, סימון שול הדרך, הגבהה צידית, הרחבה או הצרת שוליים;

אמצעים נוספים - איסורי חנייה, הפיכת חנייה אלכסונית למקבילה, סימון מילים וסמלים על פני המיסעה, סימון הגבלת מהירות על המיסעה, טיפולים בחציית הולכי רגל, טיפולים בחציית מסילות, טיפול בפני המיסעה, שילוט המלצה, הסדרת שילוט, מצלמות מהירות, שינוי מהירות מרבית מותרת, סגירת רחובות, תאורת רחובות, מיתון תנועה, צמחיה, מזג אויר, אתרי עבודה.

בטבלה 1.5 מוצגת דוגמא לאומדני יעילות בטיחותית שהתקבלו במחקר זה עבור שני נושאים: הקמת מפרדה והתקנת מעקות בטיחות. בנוסף לאומדנים המסכמים שנמצאו לאמצעים אלה, מוצג ציון אמינות האומדן (גבוהה, בינונית, נמוכה) שנקבע במחקר.

טבלה 1.5. דוגמאות לאחוזי הפחתה בתאונות הקשורים לאמצעי תשתית, לפי מדריך Austroads

נושא	סוג אמצעי	% הפחתה בתאונות	אמינות האומדן
הקמת מפרדה	מפרדה צבועה- כל האזורים	15-20%	נמוכה
	מפרדה בנויה- עירוני	45%	בינונית
	מפרדה בנויה- בין עירוני	55%	בינונית
מעקות בטיחות	התקנה- כל האזורים	40%	גבוהה

ה. Elvik et al (2009)

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

בספר קיימים ממצאים עבור אמצעי התשתית הבאים הקשורים בתכנון הדרך:

- הקמת שבילים להולכי רגל ולאופניים;

- בדרכים מהירות: הוספת נתיבים, שילוט מתחלף לאזהרה מפקק, לוחות למניעת סינוור;

- סלילת כבישים עוקפים; הוספת נתיבים בדרכים עירוניות ראשיות; שדרוג כבישים;

- בצמתים: תיעול נתיבי פנייה; הפיכת צמתים מרומזרים ולא מרומזרים למעגלי תנועה; שדרוג צמתים: שיפור זווית ושיפור שדה הראיה; הפיכת צמתים למחלפים; שיפורים ברמפות מחלפים;

- טיפול באתרי תורפה עם ריכוז תאונות;

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

- טיפול בצידי הדרך: הגדלת מרווח פנוי ממכשולים, מיתון מדרונות מעבר לשול; התקנת מעקות בטיחות; החלפת מעקות בטיחות קשיחים למעקות פחות קשיחים; התקנת סופגי אנרגיה לפני מכשולים;

- הגדלת רדיוס אופקי; הקטנת שיפוע לאורך; התקנת אמצעי אזהרה והבלטה בעקומים אופקיים;

- טיפולים לצמצום פגיעה בבעלי חיים: התקנת מראות, התקנת גדרות, שיפור ראות והפחתת אוכלוסיית בעלי החיים;

- התקנה ושיפור תאורה; שיפורים במנהרות.

טבלה 1.6 מביאה דוגמא לאומדני שינוי בתאונות בעקבות שינויים בחתך הדרך - הגדלת רוחב נתיב. הממצאים מתבססים על 14 מחקרים שנערכו בשבדיה, דנמרק, נורבגיה, ארה"ב ואוסטרליה.

טבלה 1.6. השפעת הגדלת רוחב נתיב על מספר תאונות בדרכים בין-עירוניות, לפי Elvik et al (2009)

אחוז שינוי במספר תאונות			
95% רווח סמך	אומדן מטבי	סוג תאונה	חומרת תאונה
הגדלת רוחב נתיב מרוחב קטן מהמותר על-פי הנחיות			
(+4 ; +14)	+9	כל התאונות	עם נפגעים
(-8 ; -1)	-5	כל התאונות	כל רמות החומרה
הגדלת רוחב נתיב בתחום המותר על-פי הנחיות			
(-14 ; -1)	-8	כל התאונות	עם נפגעים
(-24 ; -15)	-19	כל התאונות	כל רמות החומרה

ו. מחקרים מישראל

בישראל, בעשור האחרון, נערכו שני מחקרים בהם הוערכו מקדמי ירידה בתאונות הקשורים לשיפורי תשתית נבחרים, בתנאי הארץ. מחקרם של הקרט, בונג'ק ואחרים (2002) נערך ע"פ הזמנת משרד התחבורה; במחקר זה פותחה שיטה להערכת יעילות של שיפורים בטיחותיים בתשתית בתנאי הארץ וכן, הוערכו מקדמי ירידה בתאונות הקשורים לשיפורי תשתית שונים שבוצעו בישראל בשנות ה-1990. טבלה 1.7 מביאה אומדנים מסכמים שהתקבלו במחקר זה והומלצו לשימוש.

יצוין כי לפי הקרט, בונג'ק ואחרים (2002), ההמלצה לשימוש באומדנים שהתקבלו בתנאים המקומיים התבססה על בחינת שיקולים כגון: האם האומדנים שהתקבלו נמצאים בתוך מרווח הערכים שהתקבלו בהערכות דומות בחו"ל והאם הם מתאפיינים ברמת מובהקות גבוהה. בניסיון הבינלאומי, ככלל, ניתנת העדפה לערכים שהתקבלו באמצעות שיטת שקלול סטטיסטי (meta-analysis) של מחקרי הערכה רבים, כאשר בהקשר זה חשוב להקפיד על דמיון מרבי בין סוגי הטיפולים, סוגי האתרים וסוגי התאונות שעבורם מובאים הערכים. האומדנים המקומיים ניתנים לשימוש, ללא הסתייגות או עם הסתייגות קלה, כאשר (א) הם התקבלו ברמת מובהקות גבוהה (רמת ביטחון של 95%) ודומים לממצאים בחו"ל (אומדן כזה מומלץ לשימוש ללא הסתייגות), או (ב) הם התקבלו ברמת מובהקות גבוהה אך שונים מהממצאים בחו"ל או הם התקבלו ברמת מובהקות בינונית (כגון: ברמת הביטחון של 80%, לפחות) ודומים לאומדנים בחו"ל (אומדן כזה מומלץ לשימוש עם הסתייגות קלה).

במחקר המשך של גיטלמן, הקרט, פיסחוב (2009), נאספו נתונים על שיפורים בטיחותיים בתשתית שיושמו בדרכים הלא עירוניות בישראל בשנים 2005-2007, במטרה לבחון את יעילותם הבטיחותית

- לנתח שינויים בתאונות בתקופות "אחרי" לעומת "לפני" שיפורי התשתית, ולהפיק מקדמי ירידה בתאונות שמתקשרים עם שיפורי תשתית אלה, בתנאי הארץ. מחקר זה הביא עדכון לרשימת מקדמי הירידה בתאונות שהתקבלה במחקר הישראלי הקודם.

טבלה 1.7. מקדמי הפחתה בתאונות בעקבות שיפורי תשתית, בתנאי הארץ, לפי מחקר (2002)

סוג אתר	סוג שיפור	ערך מומלץ לשימוש*
קטע דרך בינעירוני	שדרוג קטע לדו-מסלולי, כולל צמתים	-24%
	הרחבת קטע	+69%
	ריבוד עם זיפות שוליים	+41% במספר תאונות, -39% בשיעור תאונות חמורות
	הקמת מעבר עילי להולכי רגל	-59% בתאונות הולכי רגל
צומת בינעירוני	תאורה עם הסדרה בצומת	-21%
	רמזור עם תאורה והסדרה	-30%
	רמזור עם הסדרה	-30%
	הסדרה בצומת	-23%
קטע דרך עירוני	הוספת אי מרכזי (מפרדה) בציר	-37%
	הרחבת קטע רחוב	+42%
	סלילת קטע רחוב	+88%
	שינוי גיאומטרי בקטע רחוב	-20%
	פסי האטה	-40%
	פסי האטה עם עיני חתול	-28%
	תמרור ג-7	-14%
	שיפורי תאורה בקטע	-18% בתאונות לילה
צומת עירוני	מעגל תנועה	-57%
	מעגל תנועה קטן	-62%
	רמזור צומת	-21%
	הוספת אוזניים בצומת לא מרומזר	-64%

*אם לא צוין אחרת, מתייחס לכלל התאונות עם נפגעים

בהתחשב בשיקולי מובהקות הערכים שהתקבלו בתנאי הארץ, עקביות הערכים והתאמתם לניסיון הבינלאומי, המחקר הביא ערכים מסכמים למקדמי ירידה בתאונות - אומדני יעילות בטיחותית של שיפורי תשתית בדרכים הלא עירוניות - שמומלצים לשימוש (טבלה 1.8). מרבית הערכים בטבלה 1.8 מתייחסים לכל סוגי התאונות. כמו כן, מבחינת רמת חומרת התאונות, האומדנים המסכמים מתייחסים לסה"כ התאונות עם נפגעים, כאשר על סמך ממצאי מחקר זה והניסיון הבינלאומי לא ניתן להמליץ על ערכים נפרדים של מקדמי ירידה בתאונות הקטלניות והקשות. בנוסף, בהתאם להסתייגויות שהוצגו במחקר (ראה עמודה שמאלית בטבלה 1.8) לחלק ניכר מהערכים מיוחס אופי זמני והם דורשים המשך מעקב ובחינה, בתנאי הארץ.

הערכים שהתקבלו בתנאי הארץ היוו השלמה לבסיס הידע של המערכת לניהול בטיחות (מנ"ב) של החברה הלאומית לדרכים, והם מומלצים לשימוש בעת בחירת טיפולים - שיפורי תשתית - בעבור מקומות תורפה בדרכים הלא עירוניות.

עם זאת, יש לשים לב שמרבית הניסיון הישראלי בנושא זה מתייחס לפרויקטי שדרוג/שיפור של כבישים קיימים, כאשר הטיפול הבטיחותי משלב, בדרך כלל, מספר אמצעים. מכאן, בממצאים אלה אין נתונים על מקדמי הפחתה בתאונות לאלמנט תכנוני יחיד כגון: הרחבת נתיב, מיתון שיפוע מדרון בצד הדרך וכד'.

טבלה 1.8. ערכים מסכמים למקדמי ירידה בתאונות עבור שיפורי תשתית בדרכים הלא עירוניות, בתנאי הארץ, לפי מחקר (2009)

סוג שיפור בתשתית בדרך לא עירונית	ערך מומלץ של מקדם ירידה בתאונות*	הסתייגויות לערך המומלץ
במחלף: טיפול משולב - התקנת אביזרי בטיחות, שיפורי סימון ותמרור	-5%	לא מובהק. דורש בדיקת המשך
במחלף: התקנת סופגי אנרגיה	-30%	לא מובהק. דורש בדיקת המשך
בצומת: הסדרה - שיפורים גיאומטריים	-20%	אומדן זמני. דורש בדיקת המשך
רמזור צומת, לרבות שיפורים גיאומטריים, לפי הצורך	-45%	--
רמזור צומת טי	-45%	--
רמזור צומת צלב	-30%	אומדן ישן. דורש בדיקת המשך
בצומת: הקמת מעגל תנועה	-40%	לא מובהק. דורש בדיקת המשך
בצומת: התקנת תאורה, לרבות שיפורים גיאומטריים, לפי הצורך	-21% בתאונות לילה	אומדן ישן. דורש בדיקת המשך
בצומת: שיפור נראות לפנסי רמזור באמצעות החלפת עדשות בלדים	אין ערך מומלץ	דורש בדיקת המשך
בקטע: התקנת מעקה במפרדה בדרך חד-מסלולית	-29%	לא מובהק. דורש בדיקת המשך
בקטע: יישור שוליים, לרבות ביטול מדרגות ומיתון מדרונות	-9% בתאונות רכב יחיד	לא מובהק. דורש בדיקת המשך
בקטע דו-מסלולי: טיפול משולב - התקנת אביזרי בטיחות - מעקות, התקני קצה, שיפורי סימון ותמרור	אין ערך מומלץ	דורש בדיקת המשך
בקטע חד-מסלולי: טיפול משולב - התקנת אביזרי בטיחות - מעקות, התקני קצה, שיפורי סימון ותמרור	-14%	לא מובהק. דורש בדיקת המשך
בקטע דו-מסלולי: טיפול משולב - ריבודים, אביזרי בטיחות, שיפורי סימון ותמרור	אין ערך מומלץ	דורש בדיקת המשך
בקטע חד-מסלולי: טיפול משולב - ריבודים, אביזרי בטיחות, שיפורי סימון ותמרור	-22%	--
בקטע דרך חד-מסלולית: הסדרה - שיפורים גיאומטריים (כולל צמתים)	אין ערך מומלץ	דורש בדיקת המשך
הרחבת קטע דרך חד-מסלולי לדו-מסלולי (לא כולל צמתים)	-40%	--

* מתייחס לכלל התאונות עם נפגעים, אם לא צוין אחרת

1.4 מודלים לחיזוי תאונות

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

Vij - מאפייני הדרך,

α,β,γ - מקדמי המודל.

סקירות המודלים המסבירים שפותחו בעולם ניתן לראות, לדוגמא, בדו"חות של פרויקט מחקר אירופאי RIPCORD- ISEREST[2] אשר עסק בשיפורי בטיחות בדרכים בין-עירוניות משניות באירופה, כגון : Reurings et al (2005) ; Mallschutzke et al (2006). בדו"חות מחקר זה נסקרו בעיקר מודלים לחיזוי מספר התאונות בתלות במאפייני הדרכים, המתאימים לקטעי דרכים חד-מסלוליות.

סקירת המודלים המסבירים שפותחו לסוגי אתרים שונים בארה"ב וקנדה מוצגת, לדוגמא, בדו"ח NCHRP 295 (2001). לפי מקור זה, צורות טיפוסיות של מודלים מסבירים לחיזוי מספר התאונות בקטע דרך מהירה, צומת מרומזר ומחלף, יהיו כמוצג להלן :

For highway sections, the SPFs are of the form:

$$SP = Section\ Length \times a\ (AADT)^b$$

For signalized intersections, the form of the SPFs is:

$$SP = a(Mainline\ AADT)^b$$

For interchanges, the form of the SPFs is:

$$SP = Number\ of\ ramps \times a\ (AADT)^b$$

כאשר המשתנים המסבירים במודלים אלה הם נפח תנועה יומי (AADT), אורך הקטע (section length), או מספר רמפות במחלף (number of ramps). מבחינת מאפייני המודלים המסבירים שהותאמו לקטעי דרכים וסוגי צמתים/מחלפים שונים בדרכים הלא עירוניות בארה"ב וקנדה עולה כי המסבירים השכיחים במודלים אלה הם :

בקטע דרך - נפח התנועה בדרך, סוג דרך וכמו כן, מצב המפרדה, מצב שוליים, רוחב נתיבים, מצב המיסעה ועוד. לדוגמא, המודלים שהותאמו לקטעי דרכים לא-עירוניות דו-נתיביות כוללים משתנים

[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

מסבירים אלה: נפח התנועה, רוחב נתיב, רוחב שול, הימצאות סכנות בצדי הדרך, עקמומיות, שיפועים, צפיפות כניסות מהחלקות הסמוכות ליחידת אורך הדרך, סוג מיסעה;

בצומת - סוג צומת, לפי מספר זרועות, מצב הבקרה, סוג דרך; נפחי התנועה בדרך הראשית והמשנית וכמו כן, היקף הפניות שמאלה, מצב המפרדה, עקמומיות, שיפוע אורכי ועוד.

יצוין כי שילוב פרמטרי דרך שונים כמשתנים מסבירים בתוך המודל תלוי בזמינות נתונים אלה בעת פיתוח המודל. באמצעות כל אחד מהמודלים ניתן לחשב את התאונות החזויות, לפי סוג אתר.

המודלים שמוצגים במקורות השונים פותחו לנסיבות השונות מבחינת מיקום הדרכים (מדינה או חלק ממנה), סוג דרך, נפחי תנועה, מאפיינים גיאומטריים, סוגי תאונות וכו'. לכן, בהתייחס למודלים המוצגים בספרות נדרש לנקוט עמדה לגבי ישימותם לחיזוי תאונות בתנאי מדינה אחרת, כאשר המצב האידיאלי הוא פיתוח מודלים מסבירים על סמך נתוני התאונות ומאפייני הדרכים המקומיים. לכן, בסקירת המודלים הקיימים בספרות מבחינת ישימותם הפוטנציאלית לביצוע הערכות בתנאי הארץ ניתנה עדיפות למדריכים מסכמים בנושא זה. בספרות האמריקנית נמצאו שני מקורות מסוג זה שהם: HSM (2010), RSDW (2009). סקירת המודלים המוצגים במדריכים אלה מובאת להלן. כמו כן, בהמשך מוצג סיכום למודלים המסבירים שפותחו לחיזוי תאונות, לפי סוגי אתרים שונים, בתנאי הארץ.

א. HSM (2010)

במדריך זה, למספר סוגים של דרך, מוצגים מודלים שבאמצעותם ניתן לאמוד את מספר התאונות החזויות, לפי חומרת תאונה וסוג תאונה. מודלים כאלה קיימים עבור:

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

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

- דרך בין-עירונית רב-נתיבית;

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

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

בטבלה 1.9 מפורטים סוגי ההסדרים הבין-עירוניים להם קיים מודל לחיזוי מספר התאונות בתנאי הבסיס ורשימת מקדמי הCMF הרלוונטיים.

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

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

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

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

טבלה 1.9. סוגי האתרים הבין-עירוניים ומאפייניהם המשמשים להערכת מספר תאונות חזוי באתר, לפי HSM (2010)

סוג דרך	סוג אתר	מאפיינים להם קיימים ערכי ה-CMF
דרך בין-עירונית חד-מסלולית דו-נתיבית	קטע דרך	רוחב נתיב, רוחב וסוג שול, עקום אופקי - אורך, רדיוס, עקום מעבר, עקום אופקי - הגבהה צידית, שיפוע לאורך, צפיפות צמתים משניים, פס משונן בציר הדרך, נתיבי עקיפה, נתיב פניות מרכזי לפניות שמאלה, צדי הדרך, תאורה, אכיפת מהירות אוטומטית
דרך בין-עירונית חד-מסלולית דו-נתיבית	צומת לא מרומזר עם 3 או 4 זרועות, צומת מרומזר 4 זרועות	מידת הסטייה מזווית ניצבת בין זרועות הצומת, קיום נתיבי פנייה שמאלה, קיום נתיבי פנייה ימינה, תאורה
דרך בין-עירונית רב-נתיבית מופרדת	קטע דרך	רוחב נתיב, רוחב שול ימני, רוחב מפרדה, תאורה, אכיפת מהירות אוטומטית
דרך בין-עירונית רב-נתיבית מופרדת	צומת לא מרומזר עם 3 או 4 זרועות	מידת הסטייה מזווית ניצבת בין זרועות הצומת, קיום נתיבי פנייה שמאלה, קיום נתיבי פנייה ימינה, תאורה

ב. RSDW (2009)

במדריך זה, למספר סוגים של דרך, פותחו מודלים שבאמצעותם ניתן לאמוד מספר תאונות חזוי עם נפגעים. מודלים אלו קיימים עבור סוגי דרכים: מהירה בין-עירונית, מהירה עירונית פרברית, בין-עירונית דו-נתיבית, בין-עירונית עם 4 נתיבים, עורקים עירוניים ופרבריים, רמפות במחלפים, וכמו

כן, עבור צמתים בין-עירוניים מרומזרים ולא-מרומזרים, וצמתים עירוניים מרומזרים ולא מרומזרים.

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

בשלב הראשון, לכל אתר, מניחים את תנאי הבסיס, שעבורם קיימות נוסחאות לחיזוי מספר התאונות בתלות בנפח התנועה היומי הממוצע ואורך הקטע. בשלב השני, נערך תיקון התוצאה, תוך כדי התחשבות במאפייני האתר אשר שונים מתנאי הבסיס, ע״י שימוש במקדמי שינוי בתאונות (AMF במדריך זה). סוגי הדרכים והאתרים שעבורם קיימות נוסחאות לחיזוי התאונות וכמו כן, מאפייני האתרים שיכולים להשפיע על ערכי החיזוי, בעזרת מקדמי ה-AMF, פורטו לעיל בטבלה 1.3, כאשר הוצגו מקדמי שינוי בתאונות הנמצאים במדריך זה.

1.5 מודלים לחיזוי תאונות בתנאי הארץ

במחקר של גיטלמן, דובא, הקרט (2008) שנעשה עבור החברה הלאומית לדרכים, פותחו מודלים לחיזוי תאונות בדרכים הבין-עירוניות בישראל. המודלים פותחו עבור שני סוגים של קטעי דרך: דו-מסלולית וחד-מסלוליות, וכמו כן, עבור מספר סוגים של צמתים: מרומזרים ולא מרומזרים, עם 3 ו-4 זרועות. המודלים מאפשרים הערכה של מספר תאונות חזוי בקטע/צומת לפי שלוש רמות חומרה של תאונות: קטלניות, קשות, קלות.

בכל המודלים הקלט הינו נפחי התנועה, ואורך קטע (עבור קטע דרך), כאשר מגוון המודלים מאפשר, למעשה, להתמודד עם השוני בין סוגי האתרים. עם זאת, במודלים אלה לא נלקחו בחשבון מקדמים הקשורים למאפייני דרך או צומת נוספים כגון: מספר נתיבים, מצב שוליים, מצב מפרדה וכו׳. כתוצאה, ניתן לבצע הערכה של מספר התאונות הצפוי, בממוצע, באתרים מסוג זה, בהתאם למאפייני החשיפה, ללא תיקוני המשך בהתאם למאפיינים הייחודיים של האתר.

להלן פירוט המודלים הקיימים עבור תנאי הארץ.

א. מודלים לחיזוי מספר התאונות בקטעי דרכים

<u>(1) הנתונים ששימשו לפיתוח המודלים</u>

פיתוח המודלים התבסס על נתוני תאונות הדרכים בשנים 2003-2005. מקורות הנתונים היו כלהלן:
1) רשימת הכבישים שבאחריות מע״צ - התקבלה ממע״צ.
2) רשימת קטעי הדרכים הדו-מסלוליות (לקביעת סוגי דרך ברשת) - התקבלה ממע״צ.
3) נתוני תאונות הדרכים - נגזרו מקבצי ״תאונות דרכים עם נפגעים״ (ת״ד) של הלמ״ס.
4) נפחי תנועה - נאספו מפרסומי הלמ״ס ״תאונות דרכים עם נפגעים, חלק ב׳: תאונות בדרכים לא עירוניות״, בשנים 2003-2005.

בשלב הכנת הנתונים לניתוח מאמצים ניכרים הושקעו בשילוב, בדיקות וטיוב של הנתונים המשולבים. בין היתר, כדי להציב נכון את נתוני התנועה, מחד, ולקבוע את סוג הדרך, מאידך, הכבישים שבאחריות מע״צ הוצלבו עם הקטעים המוגדרים של הלמ״ס. קטעי הדרכים בניתוח היו קטעים באורך 1 ק״מ או קצרים יותר (הקטעים הקצרים נמצאים בקצוות של הקטעים המוגדרים בין הצמתים או בקצוות של קטעי כביש שבאחריות מע״צ).

כתוצאה מתהליך ההכנה, הנתונים נאספו עבור 3680 קטעי דרך ב-215 דרכים. לכל קטע דרך (באורך 1 ק"מ או קצר יותר) נקבע סוג דרך (דו-מסלולי או חד-מסלולי) ונפח התנועה, בכל אחת מהשנים, 2003-2005. כמו כן, לכל קטע דרך נרשם מספר התאונות, לפי רמות חומרה (קלות, קשות, קטלניות) שנצפו בכל אחת מהשנים, 2003-2005. הניתוח התייחס סה"כ ל-10,339 קטעי דרך, מתוכם 2343 קטעים (23%) היו בדרכים הדו-מסלוליות ו-7996 (77%) בדרכים החד-מסלוליות.

(2) המודלים שפותחו

המודל הסטטיסטי שהותאם לכל סוג של אתרים היה כלהלן: מודל לוג ליניארי; ההתפלגות המותנית (בנפח תנועה) של מספר התאונות בקטע היא בינומית שלילית; מודל נפרד לפי חומרת התאונות (קלות, קשות, קטלניות); מתחשב בקורלציות בין התאונות בשנים שונות וכמו כן, בין סוגי התאונות (לפי חומרה) באותה השנה.

מודל מסביר לשכיחות התאונות בדרכים **החד-מסלוליות** היה כלהלן:

$$SP = L \cdot e^{-9.6048} \cdot V^{0.9487} \cdot e^{I} \qquad [1]$$

כאשר

SP - מספר תאונות שנתי שצפוי באתר (תוחלת מספר התאונות השנתי באתרים מסוג זה),

L - אורך הקטע, ק"מ,

V - נפח התנועה בקטע, כלי רכב,

I - מקדם במודל: $I = -2.2271$ לתאונות קטלניות, $I = -1.2616$ לתאונות קשות, $I = 0$ לתאונות קלות.

כמו כן, אמד לגודל השונות במודל זה: k=0.9876.

מודל מסביר לשכיחות התאונות בדרכים **הדו-מסלוליות** היה כלהלן:

$$SP = L \cdot e^{10.4071} \cdot V^{-2.8110} \cdot e^{I} \cdot V^{0.1703 \cdot \ln(V)} \qquad [2]$$

כאשר

SP - מספר תאונות שנתי שצפוי באתר (תוחלת מספר התאונות השנתי באתרים מסוג זה),

L - אורך הקטע, ק"מ,

V - נפח התנועה בקטע, כלי רכב,

I - מקדם במודל: $I = = -2.3926$ לתאונות קטלניות, $I = -1.4845$ לתאונות קשות, $I = 0$ לתאונות קלות. כמו כן, אמד לגודל השונות במודל זה: k=1.3984.

(3) פרוצדורה להערכת מספר תאונות אופייני לקטעי דרך לא עירונית

הערכת רמת הבטיחות של אתר מסוים שואפת להציג את מספר התאונות שאופייני לאתר זה. בשל המודעות לתופעת הרגרסיה לממוצע העשויה להתרחש במספרי התאונות שנצפו באתר בטווח הקצר, שכיחות התאונות שנצפתה באתר צריכה לעבור "תיקון" בהתבסס על מספר תאונות צפוי באתרים מסוג זה. חישובים כאלה מבוצעים באמצעות שיטות סטטיסטיות מקבוצת באייס אמפירי (PIARC, 2003; HSM, 2010). כלומר, מספר התאונות שאופייני לאתר מסוים מוערך כשילוב של שני מרכיבים: (א) תוחלת מספר התאונות שצפוי באתרים מסוג זה (כגון: בקטעי דרך עם חתך גיאומטרי ונפח תנועה דומה); (ב) מספר התאונות שנצפה באתר זה בעבר, כאשר שני הערכים משוקללים לערך אחד בהתאם למידת ההומוגניות של התנהגות התאונות שנצפו באתרים מהסוג הנבחן. במשוואה זו,

מומלץ[3] כי המרכיב הראשון - תוחלת מספר התאונות בקטעים/ צמתים מסוג מסוים, תיאמד באמצעות מודל סטטיסטי - פונקצית ביצוע בטיחותי.

בעזרת המודלים שפותחו בתנאי הארץ, את מספר התאונות האופייני לקטע דרך מסוים ניתן להעריך באופן הבא.

א) הנתונים הדרושים להערכה

לביצוע ההערכה, לכל קטע דרך נדרשים הנתונים הבאים:

אורך הקטע, ק״מ;

סוג דרך - דו-מסלולית או חד-מסלולית;

N – מספר שנים בהם נספרו תאונות הדרכים בקטע;

ACC_L – מספר תאונות קלות שנצפו בקטע, לאורך N שנים;

ACC_S – מספר תאונות קשות שנצפו בקטע, לאורך N שנים;

ACC_F - מספר תאונות קטלניות שנצפו בקטע, לאורך N שנים;

V - ממוצע יומי של נפח התנועה, כלי רכב, לאורך N שנים.

ב) הערכת מספר תאונות אופייני לקטע מסוים

מספר תאונות אופייני לקטע מסוים מוערך לשלוש רמות חומרה של התאונות, כמוצג להלן:

רמת חומרה של תאונות	מספר אופייני של תאונות, בשנה
תאונות קטלניות	$M_F = (W_F \cdot SP_F) + (1-W_F) \cdot ACC_F/N$
תאונות קשות	$M_S = (W_S \cdot SP_S) + (1-W_S) \cdot ACC_S/N$
תאונות קלות	$M_L = (W_L \cdot SP_L) + (1-W_L) \cdot ACC_L/N$

כאשר:

N - מספר שנים לספירת תאונות הדרכים בקטע;

ACC_F, ACC_S, ACC_L - מספר תאונות קטלניות/קשות/קלות, בהתאמה, שנצפו בקטע זה לאורך N שנים;

SP_F, SP_S, SP_L – מספר תאונות קטלניות/קשות/קלות, בהתאמה, שצפוי בשנה בקטעים מסוג זה, ראה סעיף ג׳ בהמשך;

W_F, W_S, W_L - מקדמי שקלול לתאונות קטלניות/קשות/קלות, בהתאמה, ראה סעיף ד׳ בהמשך;

M_F, M_S, M_L – מספר תאונות קטלניות/קשות/קלות, בהתאמה, שאופייני לקטע דרך זה.

ג) הערכת מספר תאונות צפוי בקטעים מסוג מסוים

הערכת מספר תאונות צפוי בקטעים מסוג מסוים מבוצעת באמצעות פונקציות תפקוד בטיחותי שהותאמו לשני סוגי דרכים - ראה נוסחאות 1,2 לעיל. כלומר,

---

[3] זאת, לעומת שיטה אחרת לחישוב תוחלת מספר התאונות שצפוי באתרים מסוג זה - בעזרת אמדים סטטיסטיים שניתן להעריך על סמך מספרי התאונות שנצפו בקבוצת התייחסות (reference group), אשר מורכבת מאתרים עם מאפיינים גיאומטריים ותנועתיים דומים לאתר הנבחן. לעניין זה ראה, לדוגמא, את PIARC (2003).

בעבור קטע דרך חד-מסלולית:

רמת חומרה של תאונות	מספר תאונות צפוי בשנה
תאונות קטלניות	$SP_F = L \cdot e^{-9.6048} \cdot V^{0.9487} \cdot e^{-2.2271} = SP_L \cdot e^{-2.2271}$
תאונות קשות	$SP_S = L \cdot e^{-9.6048} \cdot V^{0.9487} \cdot e^{-1.2616} = SP_L \cdot e^{-1.2616}$
תאונות קלות	$SP_L = L \cdot e^{-9.6048} \cdot V^{0.9487}$

בעבור קטע דרך דו-מסלולית:

רמת חומרה של תאונות	מספר תאונות צפוי בשנה
תאונות קטלניות	$SP_F = L \cdot e^{10.4071} \cdot V^{-2.8110} \cdot e^{-2.3926} \cdot V^{0.1703 \cdot \ln(V)} = SP_L \cdot e^{-2.3926}$
תאונות קשות	$SP_S = L \cdot e^{10.4071} \cdot V^{-2.8110} \cdot e^{-1.4845} \cdot V^{0.1703 \cdot \ln(V)} = SP_L \cdot e^{-1.4845}$
תאונות קלות	$SP_L = L \cdot e^{10.4071} \cdot V^{-2.8110} \cdot V^{0.1703 \cdot \ln(V)}$

כאשר:

L – אורך הקטע, ק"מ;

V – נפח תנועה יומי בקטע, כלי רכב (ממוצע לאורך N שנים);

e – exponent.

ד) מקדמי שקלול

מקדמי שקלול לתאונות קטלניות/קשות/קלות, בהתאמה, מוערכים באופן הבא:

רמת חומרה של תאונות	מקדם שקלול
תאונות קטלניות	W_F=k/ [k + (N* SP_F)]
תאונות קשות	W_S=k/ [k + (N* SP_S)]
תאונות קלות	W_L=k/ [k + (N* SP_L)]

כאשר: לקטעי דרכים חד-מסלוליות k=0.9876, לקטעי דרכים דו-מסלוליות k=1.3984.

ב. מודלים לחיזוי מספר התאונות בצמתים

<u>(1) הנתונים ששימשו לפיתוח המודלים</u>

פיתוח המודלים התבסס על נתוני תאונות הדרכים בשנים 2003-2005. מקורות הנתונים היו כלהלן:

1) רשימת צמתים של הלמ"ס, כולל מיקום הצומת, שם הצומת, התקבלה ממע"צ.

2) מאפייני הצמתים: מצב הבקרה (מרומזר/ לא מרומזר), סוג צומת (T, צלב, אחר) - התקבלו מחברת "ארם מהנדסים".

3) נתוני תאונות הדרכים - נגזרו מקבצי "תאונות דרכים עם נפגעים" (ת"ד) של הלמ"ס.

4) נפחי תנועה (סה"כ מספר כלי רכב שנכנסו לצומת ביממה) חושבו על סמך נפחי התנועה בקטעי דרך סמוכים אשר נאספו מפרסומי הלמ"ס: "תאונות דרכים עם נפגעים, חלק ב': תאונות בדרכים לא עירוניות", בשנים 2003-2005.

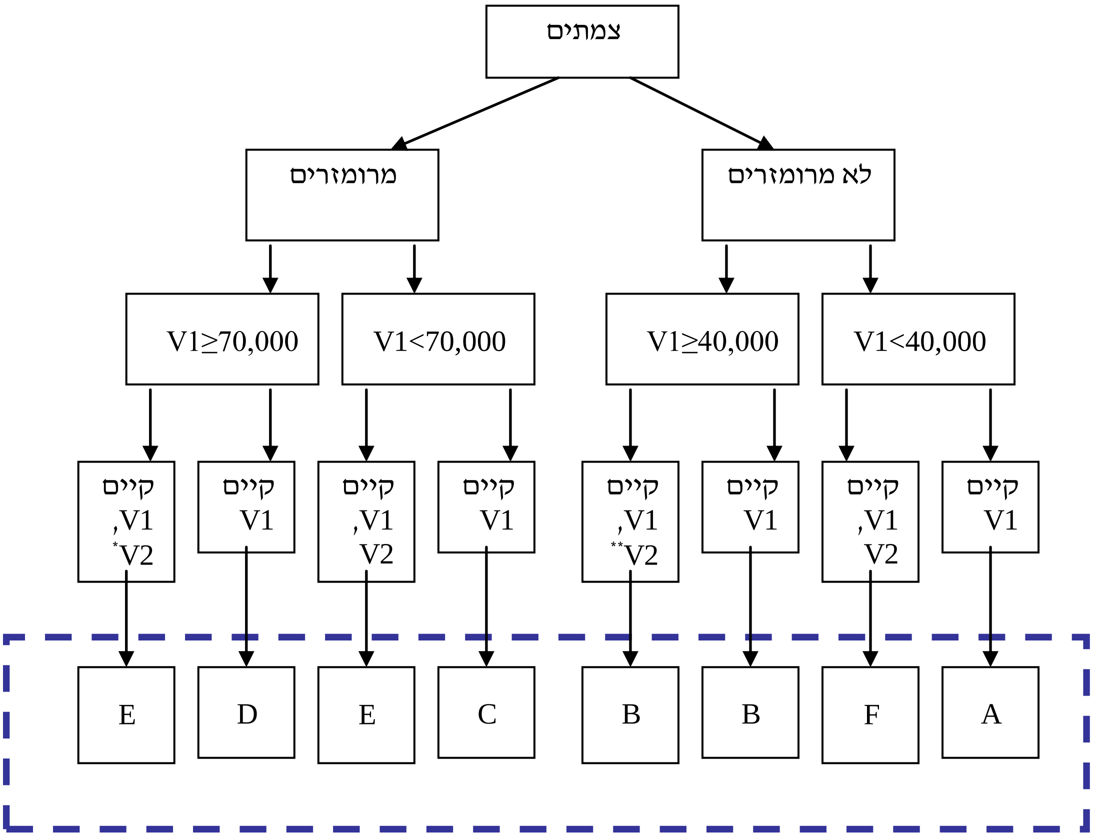
הצומת נכלל בבסיס הנתונים לפיתוח המודלים כאשר לגביו קיימים הנתונים הבאים: צורת הצומת, מצב הבקרה בצומת, נפחי התנועה בצומת (בשנה מסוימת). כמו כן, לכל צומת נרשמו מספרי התאונות, לפי רמות חומרה (קלות, קשות, קטלניות) שנצפו בכל אחת מהשנים, 2003-2005. למרות

המאמצים שהושקעו בהערכת נפחי התנועה בצמתים, לגבי חלק ניכר מהם נמצא מידע על נפח התנועה בדרך אחת בלבד. כמו כן, בשלב הכנת הנתונים לניתוח מאמצים ניכרים הושקעו בשילוב, בדיקות וטיוב של הנתונים המשולבים, בייחוד בנושאי הערכת נפחי התנועה בצמתים, חוסר התאמה בין צורת הצומת לבין מספר אומדני הנפח בקטעים הסמוכים, וכד'. כתוצאה מתהליך ההכנה, בסיס הנתונים לפיתוח המודלים כלל מידע על 5262 צמתים (סה"כ בשלוש שנים), מתוכם: 865 צמתים עם שני אומדנים של נפח התנועה (בראשי ובמשני) ו-4397 צמתים עם אומדן נפח אחד.

<u>(2) המודלים שנבנו</u>

מודלים נפרדים הותאמו לשתי קבוצות אתרים: צמתים מרומזרים ו-צמתים לא מרומזרים. מאפייני המודל הסטטיסטי שהותאם לכל קבוצה של אתרים היו כלהלן: מודל לוג ליניארי; ההתפלגות המותנית (בנפח התנועה) של מספר התאונות בצומת היא בינומית שלילית; מודל נפרד לפי חומרת התאונות (קלות, קשות, קטלניות); מתחשב בצורת הצומת: T או צלב; מתחשב בקורלציות בין התאונות בשנים שונות וכמו כן, בין סוגי התאונות (לפי חומרה) באותה השנה.

במסגרת פיתוח המודלים, הצמתים חולקו לקטגוריות לפי: (א) סוג בקרה בצומת (מרומזר/ לא מרומזר); (ב) צורת הצומת (T/ צלב); (ג) גודל נפח התנועה בדרך הראשית V1 (מתחת ומעל ל-40,000 כלי רכב ביממה בצומת לא מרומזר; מתחת ומעל ל-70,000 כלי רכב ביממה בצומת מרומזר). איור 1.2 מציג סיווג של המודלים שנבנו במחקר, לפי מאפייני הצמתים.



<u>הערות</u>:
* עקב מיעוט הנתונים לא הותאם מודל נפרד לקבוצה זו. נשתמש במודלים מקבוצה E.
** הנתונים הראו חוסר מובהקות של השפעת V2 במקרה זה. לכן, נשתמש במודל עם ערך V1 בלבד - קבוצה B.

איור 1.2. סיווג המודלים לחיזוי מספר התאונות בצומת שהותאמו לתנאי הארץ.

להלן פירוט המודלים לפי קבוצות הצמתים שבאיור 1.2.

קבוצה A: צומת לא מרומזר, עם נפח תנועה בראשי עד 40,000 כלי רכב ביממה, כאשר ידוע נפח תנועה אחד בלבד (V1).

עבור צומת T

רמת חומרה של תאונות	מספר תאונות צפוי בשנה
תאונות קטלניות	$SP_F = SP_L \cdot e^{-3.2231}$
תאונות קשות	$SP_S = SP_L \cdot e^{-2.0214}$
תאונות קלות	$SP_L = e^{-0.9427} \cdot (V1/11000)^{1.0706}$

עבור צומת צלב

רמת חומרה של תאונות	מספר תאונות צפוי בשנה
תאונות קטלניות	$SP_F = SP_L \cdot e^{-3.2231}$
תאונות קשות	$SP_S = SP_L \cdot e^{-2.0214}$
תאונות קלות	$SP_L = e^{-0.9362} \cdot (V1/11000)^{0.8171}$

כאשר: V1 - נפח תנועה בדרך הראשית, ממוצע יומי, כלי רכב (ממוצע לאורך N שנים); e – exponent. כמו כן, k=0.29, כאשר k הינו מקדם המבטא את גודל השונות במודל הסטטיסטי והמשמש להערכת מקדמי השקלול (ראה בהמשך פרוצדורה להערכת מספר תאונות אופייני לצומת).

קבוצה B: צומת לא מרומזר, עם נפח תנועה בראשי מעל 40,000 כלי רכב ביממה, כאשר ידוע נפח תנועה אחד בלבד (V1).

עבור צומת T

רמת חומרה של תאונות	מספר תאונות צפוי בשנה
תאונות קטלניות	$SP_F = SP_L \cdot e^{-2.9032}$
תאונות קשות	$SP_S = SP_L \cdot e^{-1.6748}$
תאונות קלות	$SP_L = e^{45.5399} \cdot (V1)^{-4.2465}$

עבור צומת צלב

רמת חומרה של תאונות	מספר תאונות צפוי בשנה
תאונות קטלניות	$SP_F = SP_L \cdot e^{-2.9032}$
תאונות קשות	$SP_S = SP_L \cdot e^{-1.6748}$
תאונות קלות	$SP_L = e^{-18.8999} \cdot (V1)^{1.7320}$

כאשר: V1 – נפח תנועה בכביש הראשי, ממוצע יומי, כלי רכב (ממוצע לאורך N שנים); e – exponent; כמו כן, k= 0.6186.

קבוצה C: צומת מרומזר, עם נפח תנועה בראשי עד 70,000 כלי רכב ביממה, כאשר ידוע נפח תנועה אחד בלבד (V1).

עבור צומת T

רמת חומרה של תאונות	מספר תאונות צפוי בשנה
תאונות קטלניות	$SP_F = e^{-16.0026} \cdot (V1)^{1.2411} \cdot e^{\{-0.8633 \cdot \max[0,\ln(V1)-\ln(35000)]\}}$
תאונות קשות	$SP_S = e^{-7.854} \cdot (V1)^{0.6075} \cdot e^{\{-0.8633 \cdot \max[0,\ln(V1)-\ln(35000)]\}}$
תאונות קלות	$SP_L = e^{-3.2674} \cdot (V1)^{0.3832} \cdot e^{\{-0.8633 \cdot \max[0,\ln(V1)-\ln(35000)]\}}$

עבור צומת צלב

מספר תאונות צפוי בשנה	רמת חומרה של תאונות
$SP_F = e^{-10.8004} \cdot (V1)^{0.8141} \cdot e^{\{-0.8633 \cdot \max[0,\ln(V1)-\ln(35000)]\}}$	תאונות קטלניות
$SP_S = e^{-10.5595} \cdot (V1)^{0.9121} \cdot e^{\{-0.8633 \cdot \max[0,\ln(V1)-\ln(35000)]\}}$	תאונות קשות
$SP_L = e^{-11.4406} \cdot (V1)^{1.2067} \cdot e^{\{-0.8633 \cdot \max[0,\ln(V1)-\ln(35000)]\}}$	תאונות קלות

כאשר: V1 – נפח תנועה בכביש הראשי, ממוצע יומי, כלי רכב (ממוצע לאורך N שנים); e – exponent; ln – לוגריתם. כמו כן, k= 0.9888.

קבוצה D: צומת מרומזר, עם נפח תנועה בראשי מעל 70,000 כלי רכב ביממה, כאשר ידוע נפח תנועה אחד בלבד (V1).

עבור צומת T

מספר תאונות צפוי בשנה	רמת חומרה של תאונות
$SP_F = e^{-3.2614} = 0.0383$	תאונות קטלניות
$SP_S = e^{-2.0853} = 0.1243$	תאונות קשות
$SP_L = e^{0.6076} = 1.836$	תאונות קלות

עבור צומת צלב

מספר תאונות צפוי בשנה	רמת חומרה של תאונות
$SP_F = e^{-2.0452} = 0.129$	תאונות קטלניות
$SP_S = e^{-0.8691} = 0.419$	תאונות קשות
$SP_L = e^{1.8238} = 6.195$	תאונות קלות

כאשר: e – exponent; k= 0.4712.

קבוצה E: צומת מרומזר, עם נפח תנועה בראשי עד 70,000 כלי רכב ביממה, כאשר ידוע נפח תנועה בראשי ובמשני. (בטרם הערכה, יש לקבוע V1> V2. כלומר, כ-V1 ישמש ערך גבוה יותר וכ-V2 ערך נמוך יותר).

עבור צומת T

מספר תאונות צפוי בשנה	רמת חומרה של תאונות
$SP_F = SP_L \cdot e^{-3.7288}$	תאונות קטלניות
$SP_S = SP_L \cdot e^{-2.2254}$	תאונות קשות
$SP_L = e^{-7.7007} \cdot (V1)^{0.5262} \cdot e^{\{-1.387 \cdot \max[0,\ln(V1)-\ln(35000)]\}} \cdot (V2)^{0.3832}$	תאונות קלות

עבור צומת צלב

מספר תאונות צפוי בשנה	רמת חומרה של תאונות
$SP_F = SP_L \cdot e^{-3.7288}$	תאונות קטלניות
$SP_S = SP_L \cdot e^{-2.2254}$	תאונות קשות
$SP_L = e^{-12.4958} \cdot (V1)^{0.5262} \cdot e^{\{-1.387 \cdot \max[0,\ln(V1)-\ln(35000)]\}} \cdot (V2)^{0.873}$	תאונות קלות

כאשר: V1 – נפח תנועה בכביש הראשי, ממוצע יומי, כלי רכב (ממוצע לאורך N שנים); V2 – נפח תנועה בכביש המשני, ממוצע יומי, כלי רכב (ממוצע לאורך N שנים); e – exponent; ln – לוגריתם; k= 2.059.

קבוצה F: צומת לא מרומזר, עם נפח תנועה בראשי עד 40,000 כלי רכב ביממה, כאשר ידוע נפח תנועה בראשי ובמשני. (גם במודל זה בטרם הערכה יש לקבוע V1> V2).

עבור צומת T

רמת חומרה של תאונות	מספר תאונות צפוי בשנה
תאונות קטלניות	$SP_F = SP_L \cdot e^{-3.4052}$
תאונות קשות	$SP_S = SP_L \cdot e^{-1.928}$
תאונות קלות	$SP_L = e^{-13.2056} \cdot (V1)^{0.8498} \cdot (V2)^{0.7115}$

עבור צומת צלב

רמת חומרה של תאונות	מספר תאונות צפוי בשנה
תאונות קטלניות	$SP_F = SP_L \cdot e^{-3.4052}$
תאונות קשות	$SP_S = SP_L \cdot e^{-1.928}$
תאונות קלות	$SP_L = e^{-14.5515} \cdot (V1)^{0.8498} \cdot (V2)^{0.7115}$

כאשר: V1 - נפח תנועה בכביש הראשי, ממוצע יומי, כלי רכב (ממוצע לאורך N שנים); V2 - נפח תנועה בכביש המשני, ממוצע יומי, כלי רכב (ממוצע לאורך N שנים); e - exponent; k= 0.7035.

(3) פרוצדורה להערכת מספר תאונות אופייני לצומת לא עירוני

כפי שהוסבר לעיל לקטעים, מספר התאונות שאופייני לאתר מסוים מוערך כשילוב של שני מרכיבים: (א) תוחלת מספר התאונות שצפוי באתרים מסוג זה (כגון: צמתים לא מרומזרים עם 3 זרועות ונפחי תנועה דומים); (ב) מספר התאונות שנצפה באתר זה בעבר, כאשר שני הערכים משוקללים לערך אחד תוך כדי שימוש במקדם המבטא את גודל השונות במודל הסטטיסטי - פונקצית ביצוע בטיחותי של אתרים מהסוג הנבחן.

בעזרת המודלים שפותחו בתנאי הארץ, את מספר התאונות האופייני לצומת מסוים ניתן להעריך באופן הבא.

א) הנתונים הדרושים להערכה

לביצוע ההערכה, לכל צומת נדרשים הנתונים הבאים:

צורת צומת: טי או צלב;

מצב הבקרה בצומת: מרומזר או לא מרומזר;

V1 – נפח תנועה בכביש הראשי, ממוצע יומי, כלי רכב,

V2 – נפח תנועה בכביש המשני, ממוצע יומי, כלי רכב,

N – מספר שנים לספירת תאונות הדרכים בצומת,

ACC_L – מספר תאונות קלות שנצפו בצומת, לאורך N שנים,

ACC_S – מספר תאונות קשות שנצפו בצומת, לאורך N שנים,

ACC_F - מספר תאונות קטלניות שנצפו בצומת, לאורך N שנים.

ב) הערכת מספר תאונות אופייני לצומת מסוים

בדומה לקטעים, מספר תאונות אופייני לצומת מסוים מוערך לשלוש רמות חומרה של תאונות:

רמת חומרה של תאונות	מספר אופייני של תאונות, בשנה
תאונות קטלניות	$M_F = (W_F \cdot SP_F) + (1-W_F) \cdot ACC_F/N$
תאונות קשות	$M_S = (W_S \cdot SP_S) + (1-W_S) \cdot ACC_S/N$
תאונות קלות	$M_L = (W_L \cdot SP_L) + (1-W_L) \cdot ACC_L/N$

כאשר:

N - מספר שנים לספירת תאונות הדרכים בצומת;

ACC_F, ACC_S, ACC_L - מספר תאונות קטלניות/קשות/קלות, בהתאמה, שנצפו בצומת זה לאורך N שנים;

SP_F, SP_S, SP_L - מספר תאונות קטלניות/קשות/קלות, בהתאמה, שצפוי בשנה בצמתים מסוג זה, ראה סעיף ג' בהמשך;

W_F, W_S, W_L - מקדמי שקלול לתאונות קטלניות/קשות/קלות, בהתאמה, ראה סעיף ד' בהמשך;

M_F, M_S, M_L – מספר תאונות קטלניות/קשות/קלות, בהתאמה, שאופייני לצומת זה.

ג) הערכת מספר תאונות צפוי בצמתים מסוג מסוים

הערכת מספר תאונות צפוי בצמתים מסוג מסוים SP_F, SP_S, SP_L מבוצעת באמצעות פונקציות תפקוד בטיחותי שתוארו לעיל, בסמוך לאיור 1.2.

ד) מקדמי שקלול

מקדמי שקלול לתאונות קטלניות/קשות/קלות, בהתאמה, מוערכים באופן הבא:

רמת חומרה של תאונות	מקדם שקלול
תאונות קטלניות	W_F=k/ [k + (N* SP_F)]
תאונות קשות	W_S=k/ [k + (N* SP_S)]
תאונות קלות	W_L=k/ [k + (N* SP_L)]

כאשר ערכי מקדם השקלול k, לפי המודלים, הוצגו לעיל, ביחד עם פונקציות תפקוד בטיחותי בסמוך לאיור 1.2.

1.6 סיכום לסקר הספרות

מקדמי שינוי בתאונות הקשורים לשינויים במאפייני התשתית נמצאו במקורות רבים. ממחקרים שנעשו בארץ קיימים אומדנים למקדמי שינוי בתאונות בעקבות שיפורי תשתית מסוימים בדרכים הבין-עירוניות. עם זאת, רוב האומדנים בארץ מתייחסים להשפעה של שיפורי תשתית משולבים, כאשר מתוכם לא ניתן לקבל אומדנים להשפעה של שינוי במאפיין תשתית בודד.

בספרות הבינלאומית, אוסף ניכר של מודלים לחיזוי תאונות בדרכים הבין-עירוניות נמצא בשני מקורות מארה"ב: HSM (2010), RSDW (2009). חלק מהמודלים מתאימים לסוגי דרכים לא עירוניות הקיימים בישראל, כגון: קטע דרך חד-מסלולית דו-נתיבית; קטע דרך דו-מסלולית רב-נתיבית עם מפרדה; צמתים מרומזרים ולא מרומזרים. המודלים האמריקניים, בנוסף לנפחי התנועה ואורך קטע דרך, מאפשרים התחשבות גם במאפייני דרך או צומת נוספים. עם זאת, בין המקורות קיים הבדל בחלק מהמאפיינים שנלקחים בחשבון לצורך חיזוי התאונות.

במחקר שנערך עבור מעצ, פותחו מודלים לחיזוי תאונות בדרכים הבין-עירוניות בישראל, למספר סוגי אתרים כגון: קטעי דרך דו-מסלולית וחד-מסלוליות, צמתים מרומזרים ולא מרומזרים, עם 3 ו-4 זרועות. מודלים אלה מאפשרים הערכה של מספר תאונות אופייני לקטע/צומת לפי שלוש רמות

חומרה של תאונות: קטלניות, קשות, קלות. עם זאת, מודלים אלה מספקים הערכה למספר תאונות הצפוי בצומת על סמך נפח התנועה וסוג אתר בלבד, כאשר בעזרת המודלים לא ניתן לבצע תיקון במספר התאונות הצפוי באתר, בהתאם למאפייני קטע או צומת נבחרים כגון: מספר נתיבים, מצב שוליים, מצב מפרדה וכו'.

נראה שקיים צורך בפיתוח מודלים לחיזוי מספרי התאונות בדרכים הבין-עירוניות בישראל אשר, בדומה למקובל בארה"ב, יאפשרו לבצע הערכה בשני שלבים: בשלב הראשון, עבור תנאי בסיס, בתלות בנפח התנועה באתר (ואורך הקטע בקטעי דרך), ובשלב השני, עבור מספר מאפיינים משפיעים התלויים בסוג הדרך או הצומת, שערכיהם שונים מתנאי הבסיס, כאשר התחשבות זו באה לידי ביטוי ע"י שימוש במקדמי שינוי בתאונות (כגון: CMF במדריך HSM, 2010). בדרך זו, יהיה ניתן לקחת בחשבון מקדמי שינוי במאפייני התשתית כגון: מספר נתיבים, רוחב נתיב, רוחב שול, עקום אופקי, הגבהה צידית, שיפוע לאורך, מצב צידי הדרך, ועוד.

בהמשך מחקר זה, המודלים שנמצאו בחו"ל לחיזוי מספר תאונות באתר, הכוללים מקדמי שינוי בתאונות שקשורים למאפייני תשתית שונים, ייבחנו על סמך דוגמאות טיפוסיות לקטעי דרכים וצמתים בתנאי הארץ. ההנחה היא כי הערכות מסוג זה יאפשרו השוואה בטיחותית, במונחים של מספר התאונות החזוי באתר, בין חלופות תכנון שונות.

2. דוגמאות ליישום הכלים הקיימים בחו"ל בתהליכי תכנון כבישים חדשים, בתנאי הארץ

בסקר הספרות נמצאו שני מקורות למודלים לחיזוי תאונות בקטעי דרכים, צמתים ומחלפים בתחום הבין-עירוני, אשר יכולים לשמש לבחינת חלופות תכנון שונות. שני המקורות הם ספרי הדרכה אמריקניים: HSM (2010), RSDW (2009). היכולת לשמש לצורכי תכנון נסמכת על מקדמי שינוי בתאונות שקשורים למאפייני תשתית שונים אשר כלולים במודלים לחיזוי מספר התאונות באתר. בהינתן מספר חלופות עם מאפייני תכן שונים, בעזרת המודלים מחו"ל ניתן לבנות תחזיות למספר התאונות הצפוי באתר עבור כל אחת מהחלופות ומכאן, לקבל החלטה מבוססת יותר לגבי החלופה המועדפת לתכנון.

עם זאת, יש לזכור שהמודלים שפותחו בחו"ל משקפים את הקשר בין מאפייני האתרים ומספרי התאונות באותן המדינות שעבורן הם פותחו, מה שלא בהכרח תואם את מערכת הקשרים הקיימת בתנאי הארץ. לכן, את התועלת משימוש במודלים הזרים כדאי לראות בעיקר בניתוח רגישות של התוצאה - מספר התאונות החזוי באתר - לשינויים במאפייני התשתית באתר ולאו דווקא בערכים המוחלטים של מספרי התאונות שמתקבלים באמצעות המודלים.

בפרק זה מובאות דוגמאות ליישום המודלים האמריקניים להערכת מספר תאונות צפוי באתרים טיפוסיים בתנאי הארץ, על-פי מספר חלופות תכנון. בתור דוגמאות טיפוסיות לתכנון בתנאי הארץ נבחרו מקרים אלה:

1) תכנון קטע ישר בדרך בין-עירונית חד-מסלולית, עם מהירויות תכן שונות.

2) תכנון קטע בעקום אופקי בדרך בין-עירונית חד-מסלולית, עם מהירות תכן 70 קמ"ש.

3) תכנון קטע בעקום אופקי בדרך בין-עירונית חד-מסלולית, עם מהירויות תכן של 60 ו-80 קמ"ש.

4) תכנון צומת בעל 3 זרועות ללא רמזור בדרך בין-עירונית חד-מסלולית, כאשר בתור חלופות נבחנים מאפייני תשתית כגון: עם וללא נתיבי פניה שמאלה, נתיבי פנייה ימינה, מפרדות ותאורה.

בדוגמאות של קטעי דרך, מידות רכיבי התכנון נלקחו מטיוטת ההנחיות החדשות לתכן גיאומטרי של דרכים בין-עירוניות - זילברשטיין ואחרים (2011).

בדוגמא לצומת, אופי הצומת בחלופות השונות נלקח מההנחיות הקיימות לתכן גיאומטרי של דרכים בין-עירוניות, צמתים ומחלפים (2000).

2.1. דוגמא 1: תכנון קטע ישר בדרך חד-מסלולית

בדוגמא זו, מתכננים קטע ישר בדרך בין-עירונית חד-מסלולית. <u>חלופות התכנון</u> השונות שנבחנות בדוגמא זו קשורות במהירויות תכן שונות, על-פי הנחיות התכנון הישראליות כגון: 60, 70 ו- 80 קמ"ש.

ע"פ ההנחיות בארץ, קביעת מהירות התכן של הדרך קשורה למספר גורמים כגון: אופי השיפוע הטבעי (מישורי, גבעי, הררי), היררכיה של הדרך (ראשית, אזורית, מקומית וגישה). עבור מהירות תכן 80 קמ"ש, של דרך ראשית, רוחב הנתיב צריך להיות 3.6 מ' ורוחב שול 3.0 מ'; עבור מהירות תכן 70 קמ"ש, של דרך גישה או מקומית, ניתן להצר את רוחב הנתיב ל-3.5 מ' ואת רוחב השול ל-2.5 מ'. עבור מהירות תכן 60 קמ"ש, של דרך גישה או מקומית, ניתן להצר את רוחב הנתיב ל- 3.3 מ' ואת רוחב השול ל-2.0 מ' (טבלה 2.1) מכאן, ניתן לבצע חיזוי של מספר התאונות עבור מאפייני התכנון המומלצים לרוחב נתיב ולרוחב שול, במהירויות תכן שונות.

טבלה 2.1. דרך בין-עירונית חד-מסלולית - רוחב נתיב ורוחב שול טיפוסי לתכנון

	מהירות תכן (קמ"ש)		
	60	70	80
רוחב נתיב (מ')	3.3	3.5	3.6
רוחב שול (מ')	2.0	2.5	3.0

<u>נתונים לדוגמא:</u> נפח תנועה יומי בקטע - 8,000 כלי רכב ליממה; אורך קטע - 5 ק"מ. מהירויות תכן לבחינה - 80, 70, 60 קמ"ש, עם רוחב נתיב - 3.6, 3.5, 3.3 מ', בהתאמה, ורוחב שול - 3.0, 2.5, 2.0 מ', בהתאמה. סוג שול - סלול.

בהערכות על סמך המודלים מחו"ל, תיבדק השפעה של הצרת הנתיב מ- 3.6 מ' ל- 3.5 מ' ול- 3.3 מ', וכמו כן, השפעה של הצרת השול מ- 3.0 מ' ל- 2.5 מ' ול- 2.0 מ'. בנוסף, תיבדק השפעה של הצרת הנתיב והצרת השול (שניהם ביחד) לצירופים השונים של רוחב.

2.1.1. הערכה לפי HSM (2010)

עבור קטע דרך בין-עירונית חד-מסלולית דו-נתיבית במדריך זה קיימים מודלים לערך של מקדמי שינוי בתאונות (CMF) לפי 12 מאפייני תשתית שהם: רוחב נתיב; רוחב וסוג שול; עקום אופקי - אורך, רדיוס, קיום/אי-קיום עקום מעבר; עקום אופקי - הגבהה צידית; שיפוע לאורך; צפיפות צמתים משניים; פס משונן בציר הדרך; נתיבי עקיפה; נתיב מרכזי לפניות שמאלה; מצב צדי הדרך; תאורה; אכיפת מהירות אוטומטית בקטע. תיאור שיטת חישוב ערכי ה-CMF ל-12 המאפיינים מוצג בנספח 2A.1.

לפי HSM (2010), תנאי הבסיס להערכת מספר תאונות חזוי בקטע דרך חד-מסלולי דו-נתיבי הם: רוחב נתיב- 12 רגל (3.66 מ'); <u>רוחב שול - 6 רגל</u> (1.8 מ', שונה מהמידות המומלצות בהנחיות הישראליות); סוג שול - סלול; דרוג מסוכנות צד הדרך - 3; צפיפות צמתי גישה לחלקות גובלות - 5 למייל; עקום אופקי - אין; עקום אנכי - אין; פס משונן במרכז הדרך - אין; נתיבי עקיפה - אין; נתיב מרכזי לפניות שמאלה בשני הכוונים - אין; תאורה - אין; אכיפה אוטומטית של מהירות - אין; שיפוע לאורך - 0%.

ניתן לראות שפרט לרוחב נתיב ולרוחב שול, כל תנאי הבסיס מתאימים לנתוני הדוגמא בתנאי הארץ.

הנוסחה לחיזוי מספר התאונות בתנאי הבסיס היא:

$$N_{spf\ rs} = AADT * L * 365 * 10^{-6} * e^{-(0.312)} \qquad [3]$$

כאשר

$N_{spf\ rs}$ - מספר תאונות חזוי לקטע דרך בתנאי הבסיס, בשנה;

AADT - נפח תנועה יומי ממוצע, כלי רכב ליממה;

L - אורך קטע הדרך, מייל.

מטבלה 2A.1 בנספח 2A.1 המכילה את ערכי בררת המחדל לפילוג התאונות לפי רמת חומרה בדרך בין-עירונית חד-מסלולית דו-נתיבית, עולה ששיעור התאונות עם נפגעים הוא 32.1 אחוז מבין כל התאונות. בתנאי הבסיס של הדרך, עבור קטע דרך באורך 5 ק"מ (3.1 מיל) ונפח תנועה יומי ממוצע של 8,000 כלי רכב, ניתן לחשב את מספר התאונות החזוי, ברמות חומרה שונות - טבלה 2.2. מהחישוב עולה שמספר תאונות חזוי עם נפגעים הוא 2.13 תאונות, לשנה.

טבלה 2.2. תוצאות חישוב של מספר תאונות חזוי, לפי רמות חומרה, לקטע דרך חד-מסלולי דו-נתיבי באורך 5 ק"מ, נפח יומי 8,000 כלי רכב ליממה, בתנאי הבסיס

HSM (2010): $N_{spf\ rs} = AADT * L * 365 * 10^{-6}\ e^{-(0.312)}$		
סוג תאונה	אחוז	SP
סך התאונות, כולל עם נפגעים ונזק בלבד	100	6.64
קטלנית	1.3	0.09
עם פגיעה חמורה	5.4	0.36
עם פגיעה קלה	10.9	0.72
עם פגיעה אפשרית	14.5	0.96
סך התאונות עם נפגעים	32.1	2.13
תאונות נזק בלבד	67.9	4.51

השפעת רוחב נתיב ורוחב שול מתבטאת בהכפלת מספר התאונות החזוי במקדמי הCMF.

<u>CMF_{1r} – מקדם רוחב נתיב:</u>

בנספח 2A.1 מופיעות טבלה ונוסחה לחישוב מקדם רוחב נתיב כתלות בנפח תנועה יומי. בטבלה 2A.3 בנספח זה, מצוינים ערכי מקדם רוחב נתיב שהתקבלו לנפח תנועה יומי של 8,000 כלי רכב, בתנאי הבסיס. מכאן, מקדמי התיקון לתאונות, לפי רוחב נתיב, יהיו כמוצג בטבלה 2.3.

טבלה 2.3. ערכי מקדם תיקון לתאונות, לפי רוחב נתיב, על פי HSM (2010)

רוחב נתיב (מטר)	רוחב נתיב (רגל)	CMF_{1r}
3.6	12	1.0
3.5	11.67	*1.03
3.3	11	1.05

*בקירוב

<u>CMF_{2r} – מקדם רוחב וסוג שול:</u>

בנספח 2A.1 מופיעות טבלה ונוסחה לחישוב מקדם רוחב שול כתלות בנפח תנועה יומי. בנספח זה בטבלה 2A.4 מופיעים ערכים למקדם רוחב שול. בטבלה 2A.5 בנספח זה מופיע מקדם לפי סוג שול (סלול, מצעים, משולב, מכוסה עשב). עבור שול סלול, המקובל בארץ, אין השפעה על מספר התאונות: ערך המקדם הוא 1.0 לכל תחום רוחב השול. טבלה 2.4 מציגה את ערכי המקדם של רוחב שול לנפח תנועה יומי של 8,000 כלי רכב.

טבלה 2.4. ערכי מקדם תיקון לתאונות, לפי רוחב שול, על פי HSM (2010)

רוחב שול (מטר)	רוחב שול (רגל)	CMF_{2r}
3.0	10	0.87
2.5	8.33	0.87
2.0	6.77	0.96 *

*בקירוב

עבור כל השילובים של רוחב נתיב ורוחב שול בדוגמא הישראלית בוצע חישוב של מקדמי תיקון בתאונות עם נפגעים לקטע דרך בין-עירונית חד-מסלולית, באורך 5 ק״מ, נפח תנועה 8,000 כלי רכב - טבלה 2.5.

טבלה 2.5. מספר חזוי של תאונות עם נפגעים, לפי רוחב נתיב ורוחב שול, בקטע דרך חד-מסלולי באורך 5 ק״מ ונפח תנועה 8,000 כלי רכב, על-פי HSM (2010)

תאונות עם נפגעים בתנאי הבסיס **2.13**

רוחב נתיב, מ'	רוחב שול, מ'	מקדם רוחב נתיב	מקדם רוחב שול	מספר תאונות חזוי, בשנה
3.6	3	1.00	0.87	1.85
3.6	2.5	1.00	0.87	1.85
3.6	2	1.00	0.96	2.04
3.5	3	1.03	0.87	1.91
3.5	2.5	1.03	0.87	1.91
3.5	2	1.03	0.96	2.11
3.3	3	1.05	0.87	1.95
3.3	2.5	1.05	0.87	1.95
3.3	2	1.05	0.96	2.15

2.1.2. הערכה לפי RSDW (2009)

עבור קטע דרך בין-עירונית חד-מסלולית דו-נתיבית קיימים מודלים לערכים של מקדמי שינוי בתאונות (AMF) עבור 14 מאפייני תשתית שהם: רדיוס אופקי, מרווח פנוי בצד הדרך (ללא מעקה, עם מעקה חלקי, עם מעקה מלא), שיפוע מעבר לשול, עקומי מעבר, רוחב נתיב ושול, פס משונן בשול, פסי משונן בציר הדרך, סוג מפרדה, הגבהה צידית, נתיבי עקיפה. תאור שיטות חישוב הAMF ל-14 המאפיינים מופיע בנספח 2A.2.

תנאי הבסיס לחיזוי התאונות בקטע דרך חד-מסלולי דו-נתיבי הם: רדיוס עקום אופקי - אין; שיפוע לאורך - אין; רוחב נתיב - 12 רגל (3.66 מ); רוחב שול - 8 רגל (2.4 מ', שונה מהמידות המומלצות בהנחיות הישראליות, ושונה מתנאי הבסיס לפי HSM, 2010); מעקות בטיחות - אין; מרווח צידי פנוי ממכשולים ללא מעקה – 30 רגל (9.1 מ'); שיפוע צידי של הסוללה 1:4; עקום מעבר – אין; פס משונן בשול - אין; פס משונן בציר הדרך - אין; מפרדה - אין; חוסר בהגבהה צידית בעקום אופקי ביחס להנחיות תכנון - אין; דירוג מסוכנות צד הדרך - 3; צפיפות צמתי גישה לחלקות גובלות - 5 למייל.

פרט לרוחב שול ורוחב נתיב, כל תנאי הבסיס מתאימים לנתוני הדוגמא.

הנוסח לחיזוי מספר התאונות בתנאי הבסיס היא:

$C_{b,2u} = 0.0537 * (0.001\ ADT)^{1.30} * L * f_{2U}$ [4]

כאשר

$C_{b,2u}$ - מספר תאונות עם נפגעים (כולל קטלניות) החזוי בתנאי הבסיס, בשנה;

ADT - נפח תנועה ממוצע, כלי רכב ליממה;

L - אורך קטע הדרך, מייל;

f_{ij} - מקדם כיול מקומי למספר נתיבים *i* לסוג מפרדה *j*.

בעזרת נוסחא [4] מספר התאונות עם נפגעים בתנאי בסיס, בקטע דרך באורך 5 ק"מ ונפח תנועה של 8,000 כלי רכב ליממה יהיה 2.49, כפי שמוצג בטבלה 2.6.

טבלה 2.6. תוצאות חישוב של מספר תאונות חזוי, בקטע דרך חד-מסלולי באורך 5 ק"מ, עם נפח תנועה 8,000 כלי רכב ליממה, בתנאי הבסיס, לפי RSDW (2009)

RSDW (2009): $C_{b,2u} = 0.0537 * (0.001\ ADT)^{1.30} * L * f_{2U}$		
תנאי הבסיס: נתיב 12 רגל, שול 8 רגל	1.00	SP
מספר חזוי של תאונות עם נפגעים		2.49

השפעת רוחב נתיב ורוחב שול מתבטאת בהכפלת מספר התאונות החזוי במקדמי הAMF.

$AMF_{lw,sw}$ – <u>רוחב נתיב ורוחב שול</u>: ערכי המקדם עבור שילובי רוחב נתיב ורוחב שול חושבו על-פי הנוסחא באיור 2A.8 המופיע בנספח 2A.2. תוצאות החישובים של המקדמים ומספר התאונות הצפוי בכל אחד מהשילובים מוצגים בטבלה 2.7.

טבלה 2.7. חיזוי תאונות עם נפגעים עבור שילובים שונים של רוחב נתיב ורוחב שול בקטע דרך חד-מסלולי, באורך 5 ק"מ ונפח תנועה של 8,000 כלי רכב ליממה, על-פי RSDW (2009).

תאונות עם נפגעים בתנאי בסיס **2.49**

רוחב נתיב (מ')	רוחב שול (מ')	רוחב נתיב (רגל)	רוחב שול (רגל)	מקדם רוחב נתיב ורוחב שול	תאונות
3.6	3	12	10	0.97	2.42
3.6	2.5	12	8.33	0.99	2.47
3.6	2	12	6.67	1.02	2.54
3.5	3	11.67	10.00	0.96	2.39
3.5	2.5	11.67	8.33	0.99	2.47
3.5	2	11.67	6.67	1.02	2.54
3.3	3	11	10.00	0.97	2.42
3.3	2.5	11	8.33	1.00	2.49
3.3	2	11	6.67	1.04	2.59

2.1.3. דיון

בטבלה 2.8 מופיע סיכום למספר התאונות החזוי בקטע דרך ישר חד-מסלולי, עם מאפייני הדוגמא, עבור השילובים השונים של רוחב נתיב ורוחב שול, על-פי שני המקורות האמריקניים.

טבלה 2.8. סיכום למספר התאונות עם נפגעים החזוי, בשנה, בקטע ישר של דרך חד-מסלולית, עם נתוני הדוגמא, עבור שילובים שונים של רוחב נתיב ורוחב שול, על-פי HSM (2010) ו-RSDW (2009)

		על פי HSM בתנאי הבסיס צפוי 2.13 תאונות עם נפגעים				על פי RSDW בתנאי הבסיס צפוי 2.49 תאונות נפגעים	
רוחב נתיב, מ'	רוחב שול, מ'	מקדם רוחב נתיב	מקדם רוחב שול	מקדם משולב	מספר תאונות חזוי	מקדם משולב לרוחב נתיב ורוחב שול	מספר תאונות חזוי
3.6	3.0	1.00	0.87	0.87	1.85	0.97	2.42
3.6	2.5	1.00	0.87	0.87	1.85	0.99	2.47
3.6	2.0	1.00	0.96	0.96	2.04	1.02	2.54
3.5	3.0	1.03	0.87	0.90	1.91	0.96	2.39
3.5	2.5	1.03	0.87	0.90	1.91	0.99	2.47
3.5	2.0	1.03	0.96	0.99	2.11	1.02	2.54
3.3	3.0	1.05	0.87	0.91	1.95	0.97	2.42
3.3	2.5	1.05	0.87	0.91	1.95	1.00	2.49
3.3	2.0	1.05	0.96	1.01	2.15	1.04	2.59

ניתן לראות כי:

- לפי HSM חתך הדרך הכולל את רוחב הנתיב הגדול ביותר, 3.6 מ', ורוחב השול הגדול ביותר, 3.0 מ', מביא למספר התאונות הקטן ביותר - 1.85 תאונות עם נפגעים, בשנה. עם זאת, גם ברוחב שול של 2.5 מ' החיזוי זהה, כלומר הרחבת השול מ- 2.5 מ' ל- 3.0 מ' לא מביאה להפחתה בתאונות.

מספר התאונות הגבוה ביותר מתקבל עבור חתך הדרך עם רוחב הנתיב ורוחב השול הצרים ביותר, 3.3 מ' ו-2.0 מ', בהתאמה, - 2.15 תאונות עם נפגעים, בשנה.

סה"כ לפי HSM, תחום חיזוי התאונות לשנה עבור כל תנאי חתך הדרך שנבדקו נע בין 1.85 ל- 2.15 תאונות לשנה, עם ממוצע 1.97 ±0.11 תאונות. מספר התאונות הגבוה ביותר עולה על מספר התאונות המינימאלי **ב-16%**.

- לפי RSDW, לא חתך הדרך הכולל את רוחב הנתיב הגדול ביותר מביא לחיזוי תאונות מזערי, אלא חתך הדרך הכולל נתיב ברוחב 3.5 מ' ושול ברוחב 3.00 מ', - 2.39 תאונות עם נפגעים, בשנה.

גם לפי RSDW, מספר התאונות הגבוה ביותר מתקבל עבור חתך הדרך עם רוחב נתיב ורוחב שול הצרים ביותר, 3.3 מ' ו- 2.0 מ', בהתאמה, - 2.59 תאונות עם נפגעים, בשנה.

סה"כ לפי RSDW, תחום חיזוי התאונות לשנה עבור כל תנאי חתך הדרך שנבדקו נע בין 2.39 ל- 2.59 תאונות בשנה, עם ממוצע 2.48 ± 0.07 תאונה, כאשר מספר התאונות הגבוה ביותר עולה על מספר התאונות המינימאלי **ב-8%**.

- סה"כ, מספר התאונות הצפוי בקטע דרך ישר מושפע במעט ע"י רוחב נתיב ורוחב שול.

2.2. דוגמא 2: תכנון קטע בעקום אופקי בדרך חד-מסלולית

בדוגמא זו מתוכנן קטע בעקום אופקי בדרך בין-עירונית חד-מסלולית. על-פי הנחיות תכנון ישראליות, הקטע מתוכנן למהירות תכן של 70 קמ"ש, כאשר רדיוס העקום האופקי 220 מ' (זהו הרדיוס המזערי למהירות תכן 80 קמ"ש), אורך העקום 345 מ' (מתאים לפנייה של 90 מעלות), כולל

90 מ' עקומי מעבר (אורך כל עקום מעבר 45 מ'); הגבהה צידית נדרשת 8 אחוז; רוחב נתיב בסיסי 3.5 מ', הרחבה נדרשת ב- 0.1 מ' בגלל הרדיוס; רוחב שול 2.5 מ'.

<u>הנתונים לדוגמא:</u> נפח תנועה יומי - 8,000 כלי רכב ליממה; אורך קטע - 0.345 ק"מ; מהירות תכן - 70 קמ"ש; רדיוס אופקי - 220 מ'; הגבהה צידית 8 אחוז (נגזרת ממדיניות הגבהה של 10 אחוז לרדיוס מזערי); קיימים עקומי מעבר בשני קצות הרדיוס; רוחב נתיב בסיסי - 3.5 מ'; קיימת הרחבה של 0.1 מ' לכל נתיב בגלל הרדיוס האופקי; סוג שול - סלול, רוחב שול - 2.5 מ'.

בדוגמא זו נבצע הערכות של מספר תאונות צפוי באתר, על סמך שני המודלים מחו"ל.

2.2.1. הערכה לפי HSM (2010)

תנאי הבסיס להערכת מספר תאונות חזוי בקטע דרך חד-מסלולי דו-נתיבי, לפי HSM (2010), זהים בדוגמא זאת לתנאי הבסיס בדוגמא 1 - ראה סעיף 2.1.1. פרט לאורך הקטע, רוחב נתיב, רוחב שול ורדיוס אופקי, יתר תנאי הבסיס מתאימים לנתוני הדוגמא.

בתנאי הבסיס של הדרך, עבור קטע דרך באורך 0.345 ק"מ (0.214 מייל) ונפח תנועה יומי ממוצע של 8,000 כלי רכב, מספר התאונות עם נפגעים החזוי בקטע יהיה 0.15, בשנה - טבלה 2.9.

טבלה 2.9. תוצאות חישוב של מספר תאונות חזוי, לפי רמות חומרה, לקטע דרך חד-מסלולי דו-נתיבי באורך 0.345 ק"מ, עם נפח תנועה 8,000 כלי רכב ליממה, בתנאי הבסיס

HSM (2010): $N_{spfrs} = AADT * L * 365 * 10^{-6}\ e^{-(0.312)}$		
סוג תאונה	אחוז	SP
סך התאונות, כולל עם נפגעים ונזק בלבד	100	0.46
קטלנית	1.3	0.01
עם פגיעה חמורה	5.4	0.02
עם פגיעה קלה	10.9	0.05
עם פגיעה אפשרית	14.5	0.07
סך התאונות עם נפגעים	32.1	**0.15**
תאונות נזק בלבד	67.9	0.31

השפעת רוחב נתיב, רוחב שול ורדיוס אופקי מתבטאת בהכפלת מספר התאונות החזוי במקדמי הCMF.

<u>CMF_{1r} – מקדם רוחב נתיב</u>:

חישוב זה בוצע עבור דוגמא 1. בנספח 2A.1 מטבלה 2A.3 מוצאים באינטרפולציה את ערך מקדם רוחב הנתיב - 1.03. ערך זה מוצג בטבלה 2.10.

טבלה 2.10. מקדם רוחב נתיב לדרך חד-מסלולית עם נפח תנועה של 8,000 כלי רכב ליממה, על פי HSM (2010)

רוחב נתיב (מטר)	רוחב נתיב (רגל)	CMF_{1r}
3.5	11.67	1.03

<u>CMF_{2r} – מקדם רוחב וסוג שול</u>:

גם חישוב זה בוצע עבור דוגמא 1. בנספח 2A.1 מטבלה 2A.4 מוצאים את ערך מקדם רוחב השול - 0.87. ערך זה מוצג בטבלה 2.1.

טבלה 2.11. מקדם רוחב שול לדרך חד-מסלולית עם נפח תנועה של 8,000 כלי רכב ליממה, על-פי HSM (2010)

רוחב שול (מטר)	רוחב שול (רגל)	CMF_{2r}
2.5	8.33	0.87

CMF_{3r} – עקום אופקי:

בנספח 2A.1 מוצגת נוסחת החישוב למקדם עקום אופקי. מהצבת הערכים: רדיוס 733 רגל, ו- S=1.0 (קיים עקום מעבר), מתקבל CMF_{3r}=1.29.

על סמך חיזוי התאונות בתנאי הבסיס (טבלה 2.9) והכפלת התוצאה בשלושה מקדמי השינוי שחושבו בהתאם למאפייני האתר, מתקבל:

$0.15 * 1.03* 0.87*1.29= 0.17$,

דהיינו יש לצפות ל-0.17 תאונות עם נפגעים, בשנה, בקטע העקום ברדיוס 220 מ', באורך 345 מ' בדרך חד-מסלולית עם נתיבים ברוחב 3.5 מ' ושול ברוחב 2.5 מ'.

2.2.2. הערכה לפי RSDW (2009)

תנאי הבסיס להערכת מספר תאונות חזוי בקטע דרך חד-מסלולי דו-נתיבי, לפי RSDW (2009), זהים בדוגמא זאת לתנאי הבסיס בדוגמא 1 - ראה סעיף 2.1.2. פרט לרוחב נתיב, רוחב שול ורדיוס אופקי, כל תנאי הבסיס מתאימים לנתוני הדוגמא.

בתנאי הבסיס של הדרך, עבור קטע דרך באורך 0.345 ק"מ (0.214 מייל) ונפח תנועה יומי ממוצע של 8,000 כלי רכב, מספר התאונות עם נפגעים החזוי בקטע יהיה **0.17**, בשנה.

השפעת רוחב נתיב ורוחב שול, ומאפייני העקום האופקי מתבטאת בהכפלת מספר התאונות החזוי במקדמי הAMF.

$AMF_{lw,sw}$ – רוחב נתיב ורוחב שול:

תיאור שיטת חישוב המקדם מופיע בנספח 2A.2 באיור 2A.8. עבור רוחב נתיב 3.5 מ' (השווה ל- 11.67 רגל), ורוחב שול 2.5 מ' (השווה ל- 8.33 רגל) מתקבל ערך מקדם משולב של רוחב נתיב ושול - 0.99.

AMF_{cr} – מקדם עקום אופקי:

תיאור נוסחת חישוב המקדם מופיע בנספח 2A.2 באיור 2A.1. עבור רדיוס 220 מ' (השווה ל- 733 רגל), ומהירות תכן של 70 קמ"ש (השווה ל- 43.5 מייל לשעה) מתקבל מקדם עקום אופקי 1.38.

על סמך חיזוי התאונות בתנאי הבסיס והכפלת התוצאה בשני מקדמי השינוי שחושבו בהתאם למאפייני האתר, מתקבל:

0.17 * 0.99*1.38= 0.23

דהיינו יש לצפות ל-0.23 תאונות עם נפגעים, בשנה, בקטע העקום ברדיוס 220 מ׳, באורך 345 מ׳ בדרך חד-מסלולית עם נתיבים ברוחב 3.5 מ׳ ושול ברוחב 2.5 מ׳.

2.2.3. דיון

בטבלה 2.12 מוצג סיכום למספר התאונות החזוי בעקום בדרך חד-מסלולית, עם מאפייני הדוגמא, על-פי שני המקורות אמריקניים.

מהשוואה בין שני המקורות עולה כי אומדני חיזוי התאונות בתנאי הבסיס היו קרובים: 0.15-0.17 תאונות עם נפגעים, בשנה. מדריך הHSM מייחס השפעה חזקה יותר לרוחב נתיב ורוחב שול, מאשר מדריך הRSDW. לעומת זאת, הRSDW מייחס השפעה חזקה יותר למאפייני העקום לעומת הHSM. ע״פ שני המקורות, הימצאות עקום במקום קטע ישר מעלה את מספר התאונות הצפוי ב-29%-38%.

בין אומדני מספר התאונות הצפוי בקטע עם העקום האופקי שהתקבלו על סמך שני המקורות, קיים הבדל של 35% במספר התאונות הצפוי בשנה: 0.17 תאונות בשנה לפי הHSM, לעומת 0.23 תאונות בשנה לפי הRSDW.

טבלה 2.12. מספר התאונות עם נפגעים החזוי, בשנה, בעקום בדרך חד-מסלולית, עם נתוני דוגמא 2, על-פי HSM (2010) ו-RSDW (2009)

		על פי HSM בתנאי הבסיס צפוי 0.15 תאונות עם נפגעים			על פי RSDW בתנאי הבסיס צפוי 0.17 תאונות עם נפגעים		
רוחב נתיב, מ׳	רוחב שול, מ׳	מקדם משולב לרוחב נתיב ושול	מקדם עקום	מספר תאונות חזוי	מקדם משולב לרוחב נתיב ורוחב שול	מקדם עקום	מספר תאונות חזוי
3.5	2.5	0.90	1.29	0.17	0.99	1.38	0.23

2.3. דוגמא 3: תכנון קטע עם עקום אופקי בדרך חד-מסלולית, עם מהירויות תכן שונות

בדוגמא זו, מתכננים קטע בעקום אופקי בדרך בין-עירונית חד-מסלולית. רדיוס העקום האופקי 220 מ׳ (זה הרדיוס המזערי למהירות תכן 80 קמ״ש). אורך העקום 345 מ׳ (מתאים לפנייה של 90 מעלות) כולל 90 מ׳ עקומי מעבר (אורך כל עקום מעבר 45 מ׳). על-פי הנחיות התכנון ניתן לתכנן דרך חד-מסלולית למהירויות תכן של 80 קמ״ש ו-60 קמ״ש.

חלופות התכנון שנבחנות בדוגמא זו קשורות בשני מהירויות תכן אלה: 60 ו- 80 קמ״ש. קביעת מהירות התכן ל-80 קמ״ש מביאה להגבהה צידית 10 אחוז, רוחב נתיב בסיסי 3.6 מ׳ (ללא צורך בהרחבה בגלל רדיוס) ורוחב שול 3.0 מ׳. לעומת זאת, קביעת מהירות התכן ל- 60 קמ״ש מביאה להגבהה צידית של 5 אחוז, רוחב נתיב בסיסי 3.3 מ׳, הרחבה ב- 0.25 מ׳ בגלל הרדיוס ורוחב שול של 2.0 מ׳.

<u>נתונים לדוגמא</u>: נפח תנועה יומי - 8,000 כלי רכב ליממה; אורך קטע - 0.345 ק"מ; מהירויות תכן - 60, 80 קמ"ש; רדיוס אופקי - 220 מ'; הגבהה צידית - 5 אחוז למהירות תכן 60 קמ"ש, 10 אחוז למהירות תכן 80 קמ"ש (שני הערכים נגזרים ממדיניות הגבהה של 10 אחוז לרדיוס מזערי); קיימים עקומי מעבר בשני קצות הרדיוס. כמו כן, רוחב נתיב בסיסי - 3.3 מ' למהירות תכן 60 קמ"ש (במקרה זה קיימת הרחבה של 0.3 מ' לכל נתיב בגלל רדיוס אופקי), 3.6 מ' למהירות תכן 80 קמ"ש (במקרה זה אין צורך בהרחבה בגלל רדיוס אופקי). סוג שול - סלול; רוחב שול 2.0 מ' למהירות תכן 60 קמ"ש, 3.0 מ' למהירות תכן 80 קמ"ש.

בהערכות על סמך המודלים מחו"ל, תיבדק השפעה של רוחב נתיב, רוחב שול ומאפייני העקום.

2.3.1. הערכה לפי HSM (2010)

תנאי הבסיס להערכת מספר תאונות חזוי בקטע דרך חד-מסלולי דו-נתיבי, לפי HSM (2010), זהים בדוגמא זאת לתנאי הבסיס בדוגמאות 1,2 - ראה סעיף 2.1.1. בתנאי הבסיס של הדרך, עבור קטע דרך באורך 0.345 ק"מ (0.214 מייל) ונפח תנועה יומי ממוצע של 8,000 כלי רכב, מספר התאונות עם נפגעים החזוי בקטע יהיה **0.15** - ראה טבלה 2.9 לעיל.

השפעת רוחב נתיב, רוחב שול ורדיוס אופקי מתבטאת בהכפלת מספר התאונות החזוי במקדמי הCMF.

<u>CMF_{1r} – מקדם רוחב נתיב</u>:

ערכי מקדמי רוחב נתיב עבור המידות הנבחנות זהים לערכים שחושבו בדוגמא 1, והם נלקחו מנספח 2A.1, טבלה 2A.3. ערכים אלו מוצגים בטבלה 2.13.

טבלה 2.13. מקדם רוחב נתיב לדרך חד-מסלולית, לפי HSM (2010)

מהירות תכן (קמ"ש)	רוחב נתיב (מטר)	רוחב נתיב (רגל)	CMF_{1r}
60	3.3	11	1.05
80	3.6	12	1.00

<u>CMF_{2r} – מקדם רוחב וסוג שול</u>:

ערכי מקדמי רוחב שול עבור המידות הנבחנות זהים לערכים בדוגמא 1, והם נלקחו מנספח 2A.1, טבלה 2A.4. ערכים אלו מוצגים בטבלה 2.14.

טבלה 2.14. ערכי מקדם רוחב שול לדרך חד-מסלולית, לפי HSM (2010)

מהירות תכן (קמ"ש)	רוחב שול (מטר)	רוחב שול (רגל)	CMF_{2r}
60	2.0	6	0.96 *
80	3.0	10	0.87

* בקירוב

<u>CMF_{3r} – עקום אופקי</u>:

ערכי מקדם העקום האופקי חושבו על-פי הנוסחה בנספח 2A.1, אשר זהה לנוסחא של דוגמא 2. מהצבת הערכים: רדיוס 733 רגל, ו- S=1.0 (קיים עקום מעבר), מתקבל CMF_{3r}=1.29.

ערך זה אינו תלוי במהירות התכן ולכן, הוא זהה עבור העקומים במהירויות התכן של 80 ו-60 קמ״ש.

על סמך חיזוי התאונות בתנאי הבסיס (ראה טבלה 2.9) והכפלת התוצאה בשלושת מקדמי השינוי שחושבו בהתאם למאפייני האתר, מתקבל:

עבור קטע דרך ברדיוס 220 מ׳, באורך 345 מ׳ והמתוכנן למהירות תכן 60 קמ״ש עם נתיבים ברוחב 3.3 מ׳ ושוליים ברוחב 2.0 מ׳ -

0.15 * 1.05* 0.96*1.29=0.20

עבור קטע דרך ברדיוס 220 מ׳, באורך 345 מ׳ והמתוכנן למהירות תכן 80 קמ״ש עם נתיבים ברוחב 3.6 מ׳ ושוליים ברוחב 3.0 מ׳ -

0.15 * 1.00* 0.87*1.29=0.17

כלומר, בתכנון למהירות תכן 60 ק״מ יש לצפות ל-0.20 תאונות עם נפגעים, בשנה, בעוד שבתכנון למהירות תכן 80 קמ״ש יש לצפות ל-0.20 תאונות עם נפגעים, בשנה.

יצוין כי התוצאה למהירות תכן 80 קמ״ש זהה לתוצאה שהתקבלה עבור מהירות תכן 70 קמ״ש (ראה דוגמא 2).

2.3.2. הערכה לפי RSDW (2009)

תנאי הבסיס להערכת מספר תאונות חזוי בקטע דרך חד-מסלולי דו-נתיבי, לפי RSDW (2009), זהים בדוגמא זו לתנאי הבסיס בדוגמאות 1, 2 לעיל - ראה פירוט בסעיף 2.1.2.

בתנאי הבסיס, עבור קטע דרך באורך 0.345 ק״מ (0.214 מייל) ונפח תנועה יומי ממוצע של 8,000 כלי רכב, מספר התאונות עם נפגעים החזוי בקטע יהיה **0.17**, בשנה.

השפעת רוחב נתיב ורוחב שול, ומאפייני העקום האופקי מתבטאת בהכפלת מספר התאונות החזוי במקדמי הAMF.

$AMF_{lw,sw}$ – רוחב נתיב ורוחב שול:

תיאור שיטת חישוב המקדם מופיע בנספח 2A.2 באיור 2A.8. בטבלה 2.15 מוצגים ערכי המקדם עבור שילובי רוחב נתיב ורוחב שול המתאימים למהירויות תכן 80 קמ״ש ו-60 קמ״ש.

טבלה 2.15. מקדמי רוחב נתיב ורוחב שול בדרך חד-מסלולית, לפי RSDW (2009)

מהירות תכן (קמ״ש)	רוחב נתיב (מ׳)	רוחב שול (מ׳)	רוחב נתיב (רגל)	רוחב שול (רגל)	מקדם רוחב נתיב ורוחב שול
60	3.3	2	11	6.67	1.04
80	3.6	3	12	10	0.97

AMF_{cr} – מקדם עקום אופקי:

תיאור שיטת חישוב המקדם מופיע בנספח 2A.2 באיור 2A.1, והוא זהה לצורת החישוב בדוגמא 2. מכיוון שמהירות התכן היא אחד הפרמטרים בנוסחא, תוצאות החישוב שונות עבור מהירויות תכן שונות, כלהלן:

עבור רדיוס 220 מ׳ ומהירות תכן 60 קמ״ש (37 מייל לשעה) מתקבל מקדם עקום אופקי 1.15;
עבור רדיוס 220 מ׳ ומהירות תכן 80 קמ״ש (50 מייל לשעה) מתקבל מקדם עקום אופקי 1.88.

על סמך חיזוי התאונות בתנאי הבסיס והכפלת התוצאה בשני מקדמי השינוי שחושבו בהתאם למאפייני האתר, מתקבל:

עבור קטע ברדיוס 220 מ׳, באורך 345 מ׳ והמתוכנן למהירות תכן 60 קמ״ש עם נתיבים ברוחב 3.3 מ׳ ושוליים ברוחב 2.0 מ׳ -

0.15 * 1.04*1.15=0.18

עבור קטע ברדיוס 220 מ׳, באורך 345 מ׳ והמתוכנן למהירות תכן 80 קמ״ש עם נתיבים ברוחב 3.6 מ׳ ושוליים ברוחב 3.0 מ׳ -

0.17 * 0.97*1.88= 0.31

כלומר, בתכנון למהירות תכן 60 ק״מ יש לצפות ל-0.18 תאונות עם נפגעים, בשנה, בעוד שבתכנון למהירות תכן 80 קמ״ש יש לצפות ל-0.31 תאונות עם נפגעים, בשנה.

2.3.3. דיון

בטבלה 2.16 מוצג סיכום למספר התאונות החזוי בעקום בדרך חד-מסלולית, עם מאפייני דוגמא 3, במהירויות תכן 60 ו-80 קמ״ש, על-פי שני המקורות אמריקניים. כמו כן, בטבלה מוצגות התוצאות שהתקבלו בדוגמא 2, למהירות תכן 70 קמ״ש.

כאמור, החישובים התייחסו לקטע בדרך בין-עירונית חד-מסלולית עם עקום אופקי ברדיוס 220 מ׳, אורך 345 מ׳, נפח תנועה 8,000 כלי רכב ביממה, כאשר מהירות תכן 80 קמ״ש מביאה להגבהה צידית של 10 אחוז, רוחב נתיב בסיסי 3.6 מ׳ (אין צורך בהרחבה בגלל הרדיוס) ורוחב שול 3.0 מ׳; ומהירות תכן 60 קמ״ש מביאה להגבהה צידית של 5 אחוז, רוחב נתיב בסיסי של 3.3 מ׳, הרחבה ב-0.25 מ׳ בגלל הרדיוס ורוחב שול של 2.0 מ׳.

טבלה 2.16. מספר התאונות עם נפגעים החזוי, בשנה, בעקום בדרך חד-מסלולית, עם נתוני דוגמאות 2 ו-3, על פי HSM (2010) ו-RSDW (2009)

			על-פי HSM בתנאי הבסיס צפוי 0.15 תאונות עם נפגעים			על פי RSDW בתנאי הבסיס צפוי 0.17 תאונות עם נפגעים		
מהירות תכן, קמ״ש	רוחב נתיב, מ׳	רוחב שול, מ׳	מקדם משולב לרוחב נתיב ושול	מקדם עקום	מספר תאונות חזוי	מקדם משולב לרוחב נתיב ושול	מקדם עקום	מספר תאונות חזוי
80	3.6	3.0	0.87	1.29	0.17	0.97	1.88	0.31
70	3.5	2.5	0.90	1.29	0.17	0.99	1.38	0.23
60	3.3	2.0	1.01	1.29	0.20	1.04	1.15	0.18

מהשוואה בין שני המקורות עולה כי תכנון עקום אופקי עם מהירויות תכן שונות מביא לשינוי במספר התאונות החזוי, אם כי במגמות הפוכות. לפי הHSM, הגדלת מהירות התכן בעקום המתבטאת בהגדלת רוחב נתיב ורוחב שול, משפרת את הבטיחות ומקטינה במעט את מספר התאונות הצפוי בקטע. לעומת זאת, לפי מדריך הRSDW, הגדלת מהירות התכן בעקום גורמת להרעה בבטיחות - עליה במספר התאונות הצפוי.

ייתכן כי הסיבה לתוצאות ההפוכות בהשפעת השינוי במהירות התכן נובעת מהשוני במאפיינים המשפיעים על מקדם התאונות המוערך עבור העקום האופקי. לדוגמא, לפי מדריך הHSM הערך מושפע מהרדיוס, אורך העקום וקיום עקומי מעבר, כאשר מהירות התכן אינה משפיעה על ערך המקדם. לעומת זאת, לפי המדריך מטקסס ערך המקדם מושפע מרדיוס העקום, אורכו, ומהירות התכן.

2.4. דוגמא 4: תכנון צומת בעל שלוש זרועות לא מרומזר בדרך חד-מסלולית

בדוגמא זו מתוכנן צומת שלוש זרועות (הסתעפות) ללא רמזור בדרך בין-עירונית חד-מסלולית. על-פי ההנחיות לתכנון בישראל, בהתאם להירככיית הדרך ניתן לתכנן צומת כזה עם וללא נתיבי פנייה ימינה ונתיבי פנייה שמאלה, עם וללא איי-הפרדה, עם וללא תאורה. לכן, בדוגמא זו נעשה חיזוי של מספר התאונות להסדר ללא נתיבי פנייה שמאלה וימינה, איי הפרדה ותאורה, כאשר בהמשך תיבדק השפעה של הוספת רכיבי תשתית אלה על מספר התאונות הצפוי בצומת.

<u>תנאי הבסיס של הצומת:</u> צומת שלוש זרועות - הסתעפות, ללא ניתוב (בקרה בלבד), בין שתי דרכים מקומיות חד-מסלוליות דו-נתיביות. בקרת הצומת מבוצעת באמצעות תמרור "זכות קדימה" בדרך המשנית, הצומת אינו מרומזר. בצומת אין נתיבי פנייה שמאלה ונתיבי פנייה ימינה; הצומת ללא איי-תנועה ואיי-הפרדה. הזווית בין זרועות הצומת ניצבת - 90 מעלות; בצומת שוליים ברוחב 1.2 מ'; הצומת ללא תאורה.

<u>רשימת השינויים בתשתית שהשעתם על מספר התאונות בצומת תיבדק היא:</u>

- הוספת נתיב פנייה שמאלה בדרך הראשית,
- הוספת נתיב פניה שמאלה בדרך המשנית,
- הוספת נתיב פנייה ימינה בדרך הראשית,
- הוספת נתיב פניה ימינה בדרך המשנית,
- בניית איי-הפרדה בגישות לצומת בדרך הראשית,
- התקנת תאורה בצומת.

<u>נתוני תנועה בצומת</u>: נפח תנועה יומי ממוצע בדרך הראשית - 4000 כלי רכב ליממה, חלוקת הנפח בין הכיוונים הראשיים היא 2000 כלי רכב ליממה בכל כיוון; נפח התנועה היומי הממוצע בדרך המשנית - 400 כלי רכב ביממה, חלוקת הנפח בין הפונים ימינה ושמאלה בדרך המשנית היא 200 כלי רכב בכל כיוון פנייה. אחוז הפונים שמאלה מהדרך הראשית - 10%; שיעור משאיות בתנועה - 15%.

2.4.1. הערכה לפי HSM (2010)

מספר התאונות החזוי בצומת בתנאי הבסיס תלוי בנפח תנועה יומי ממוצע בדרך הראשית ובדרך המשנית. הערכת מספר זה נעשתה בעזרת נוסחת החיזוי המוצגת בנספח 2A.3. עבור נפחי התנועה

של 4,000 כלי רכב בדרך הראשית ו-400 כלי רכב בדרך המשנית, ביממה, יש לצפות ל-0.69 תאונות, בשנה.

בהתחשב באחוזי ברירת המחדל לפילוג התאונות החזויות בצומת לפי רמות חומרה - ראה טבלה 2A.8 בנספח 2A.3 - מספר התאונות עם נפגעים החזוי בצומת בתנאי הבסיס יהיה **0.29**, לשנה. תוצאות אלה מופיעות בטבלה 2.17.

טבלה 2.17. חיזוי מספר התאונות לפי רמות חומרה, בתנאי הבסיס בצומת שלוש זרועות ללא רמזור עם נפח תנועה של 4,000 כלי רכב בדרך ראשית ו- 400 כלי רכב בדרך משנית, לפי HSM (2010)

HSM (2010): $N_{spf\ 3st}= exp[-9.86+0.79*Ln(AADT_{maj})+0.49*Ln(AADT_{min})]$		
סוג תאונה	אחוז	**SP**
סך התאונות, כולל עם נפגעים ונזק בלבד	100	0.69
קטלנית	1.7	0.01
עם פגיעה חמורה	4.0	0.03
עם פגיעה קלה	16.6	0.11
עם פגיעה אפשרית	19.2	0.13
סך התאונות עם נפגעים	41.5	**0.29**
תאונות נזק בלבד	58.5	0.40

השפעת מאפייני תשתית נוספים כגון: הוספת נתיב פניה שמאלה, הוספת נתיב פניה ימינה, הוספת תאורה - מתבטאת בהכפלת מספר התאונות החזוי במקדמי הCMF.

<u>CMF_{2j} - מקדם נתיבי פניה שמאלה</u>:

לפי טבלה 2A.10 בנספח 2A.3, מקדמי הפחתה בתאונות עקב הוספת נתיבי פנייה שמאלה, בצומת 3 זרועות לא מרומזר הם כלהלן:

בגישה 1 - 0.56; בשתי גישות - 0.31.

מכאן, הוספת נתיב פנייה שמאלה באחת הגישות תביא לחיזוי של: 0.16 =0.56 *0.29 תאונות עם נפגעים, בשנה. באופן דומה, הוספת נתיבי פנייה שמאלה בשתי הגישות בצומת תביא לחיזוי של: 0.09 =0.31 *0.29 תאונות עם נפגעים, בשנה.

<u>CMF_{3j} – מקדם נתיבי פנייה ימינה</u>:

לפי טבלה 2A.11 בנספח 2A.3, מקדמי הפחתה בתאונות עקב הוספת נתיבי פנייה ימינה, בצומת 3 זרועות לא מרומזר הם כלהלן:

בגישה 1 - 0.86; בשתי גישות - 0.74.

מכאן, הוספת נתיב פנייה ימינה בלבד (ללא הוספת נתיבי פנייה שמאלה), באחת הגישות תביא לחיזוי של: 0.25 =0.86 *0.29 תאונות עם נפגעים, בשנה.

כמו כן, הוספת נתיבי פנייה ימינה בשתי הגישות, ללא הוספת נתיבי פנייה שמאלה, תביא לחיזוי של: 0.21 =0.74 *0.29 תאונות עם נפגעים, בשנה.

הוספת נתיבי פנייה ימינה בשתי הגישות, יחד עם הוספת נתיבי פנייה שמאלה בשתי הגישות, תביא לחיזוי של: 0.07 =0.31*0.74 *0.29 תאונות עם נפגעים, בשנה.

<u>CMF_{4j} – מקדם תאורה</u>:

בנספח 2A.3 מופיעה נוסחה לחישוב מקדם שינוי בתאונות בצומת 3 זרועות לא מרומזר בעקבות התקנת תאורה. לצורך החישוב נדרש לדעת מהו שיעור התאונות בחשכה מכלל התאונות בצומת. בטבלה 2A.12, מופיע ערך ברירת המחדל לשיעור זה שהינו 0.26. בהתאם לנוסחת החישוב, מקדם שינוי בתאונות בעקבות הוספת התאורה בצומת יהיה: 1-0.38*0.260=0.90.

מכאן, מספר התאונות החזוי בצומת עם שני נתיבי פנייה שמאלה, שני נתיבי פנייה ימינה ותאורה יהיה כלהלן: 0.06 =0.9*0.74*0.31 *0.29. כלומר, יש לצפות ל-0.06 תאונות עם נפגעים, בשנה.

2.4.2. הערכה לפי RSDW (2009)

לפי RSDW (2009), חיזוי התאונות בתנאי הבסיס תלוי בנפח תנועה יומי ממוצע בדרך הראשית ובדרך המשנית, והוא נעשה על-פי נוסחת החיזוי המוצגת בנספח 2A.4 באיור 2A.13. עבור צומת עם נפחי תנועה של 4,000 כלי רכב בדרך הראשית ו-400 כלי רכב בדרך המשנית, מספר התאונות החזוי בשנה יהיה **0.20** תאונות עם נפגעים.

השפעת מאפייני תשתית נוספים כגון: הוספת נתיב פניה שמאלה, הוספת נתיב פניה ימינה, הוספת איי-הפרדה - מתבטאת בהכפלת מספר התאונות החזוי במקדמי הAMF.

<u>AMF_{lt} – מקדם נתיב פניה שמאלה</u>:

בנספח 2A.4 איור 2A.14 מופיע מקדם שינוי בתאונות בעקבות הוספת נתיב פנייה שמאלה. במדריך זה נלקחת חשבון השפעת נתיב פנייה שמאלה בדרך הראשית בלבד. עם זאת, קיימת השפעה של חלוקת נפחי התנועה הפונים שמאלה ונפחי התנועה בזרועות הצומת.

כאשר שיעור הפונים שמאלה הוא 10%, מתקבל ערך המקדם 0.70. מכאן, בעקבות הוספת נתיב פנייה שמאלה באחת הגישות בצומת יש לצפות ל- 0.14=0.70 *0.20 תאונות עם נפגעים, בשנה.

<u>AMFrt – מקדם נתיב פניה ימינה</u>:

בנספח 2A.4 איור 2A.15 מופיע מקדם שינוי בתאונות בעקבות הוספת נתיב פנייה ימינה. במדריך זה נלקחת חשבון השפעת נתיב פנייה ימינה בדרך הראשית בלבד. עם זאת, קיימת השפעה של חלוקת נפחי התנועה הפונים שמאלה ונפחי התנועה בזרועות הצומת.

עבור שיעור פונים של 10 אחוז בצומת, מתקבל ערך המקדם 0.89. מכאן, בעקבות הוספת נתיב פנייה ימינה בדרך הראשית, ללא נתיב פניה שמאלה, יש לצפות ל- 0.18 =0.89 *0.20 תאונות עם נפגעים, בשנה.

הוספת נתיב פנייה ימינה וגם נתיב פניה שמאלה בגישות בדרך הראשית תביא לאומדן של:
0.13 =0.89 *0.70*0.20 - תאונות עם נפגעים, בשנה.

AMF_{mp} – מקדם איי מפרדה:

בנספח 2A.4 איור 2A.16 מופיע מקדם שינוי בתאונות בעקבות הקמת מפרדה בנויה בדרך ראשית. קיימת הבחנה בין מפרדה בנויה עם נתיב פנייה שמאלה, לבין מפרדה בנויה ללא נתיב פנייה שמאלה. הוספת מפרדה בדרך הראשית כאשר אין הסדרה של נתיב פנייה שמאלה, גורמת להפחתה בתאונות. כאשר קיים נתיב פנייה שמאלה בדרך הראשית, הוספת מפרדה מפחיתה את מספר התאונות רק כאשר רוחב המפרדה עולה על 17 רגל (5.1 מ').

בארץ לא נהוג לבנות בצמתי דרכים חד-מסלוליות מפרדות ברוחב העולה על 2.0 מ' (2.0 מ' מספיק לאי מפלט להולכי רגל). לכן, ערך המקדם בדוגמא הנוכחית יהיה 1.0.

מקדם תאורה: לפי מדריך זה, לא קיים מקדם הפחתה בתאונות צומת בעקבות התקנת תאורה.

2.4.3. דיון

בטבלה 2.18 מוצג סיכום למספר התאונות החזוי בצומת 3 זרועות לא מרומזר, בתנאי הבסיס ועם שיפורי תשתית שונים, על פי שני המקורות.

טבלה 2.18. סיכום למספר התאונות עם נפגעים החזוי, בשנה, בצומת 3 זרועות לא מרומזר, בתנאי הבסיס ועם שיפורי תשתית שונים, על-פי HSM (2010) ו-RSDW (2009)

	על-פי HSM בתנאי הבסיס צפוי 0.29 תאונות עם נפגעים		על פי RSDW בתנאי בסיס צפוי 0.20 תאונות עם נפגעים	
סוג אמצעי תשתית	מקדם שינוי בתאונות	מספר תאונות חזוי	מקדם שינוי בתאונות	מספר תאונות חזוי
הוספת נתיב פנייה שמאלה בדרך הראשית	0.56	0.16	0.70	0.14
הוספת נתיב פניה שמאלה בדרך הראשית והמשנית	0.31	0.09	---	---
הוספת נתיב פנייה ימינה בדרך הראשית	0.86	0.25	0.89	0.18
הוספת נתיב פניה ימינה בדרך הראשית והמשנית	0.74	0.21	---	---
התקנת תאורה בצומת	0.90	0.26	---	
הוספת כל השיפורים	0.21	0.06	0.62	0.13

ניתן לראות כי:

- בתנאי הבסיס, בצומת הנדון יש לצפות ל-0.29 תאונות עם נפגעים, בשנה, לפי HSM ול-0.20 תאונות עם נפגעים, בשנה, לפי RSDW. כלומר, לפי הHSM, מספר התאונות החזוי גבוה ב-45%.

- לפי הHSM, השפעה חיובית על בטיחות קיימת עבור הסדרת נתיבי פנייה שמאלה וימינה בדרך הראשית והמשנית. לעומת זאת, לפי המדריך מטקסס, השפעה חיובית על בטיחות הצומת קיימת להסדרת נתיבי פנייה ימינה ושמאלה רק בדרך הראשית.

- ערכי מקדמי השינוי בתאונות בעקבות הסדרת נתיבי הפנייה בצומת גבוהים יותר ב-HSM לעומת המדריך מטקסס.

- השפעת התאורה בצומת נלקחת בחשבון במדריך הHSM בלבד.

- השפעת איי-התנועה בדרך הראשית בצומת לא נלקחת בחשבון בהערכת מספר התאונות החזוי לפי הHSM. לפי מדריך הRSDW, כאשר מוסדר בדרך הראשית נתיב פנייה שמאלה, אי ההפרדה ישפיע על מספר התאונות רק כאשר רוחבו יעלה על 5.60 מ'.

3. דוגמאות לשימוש בכלים הקיימים בישראל בתהליכי שיפור תשתיות

כפי שהוסבר בפרק 1, בישראל פותחו מספר כלים להערכת רמת בטיחות התשתיות שהם: (א) מודלים לחיזוי מספר תאונות באתרים מייצגים בדרכים הבין-עירוניות- ראה פרק 1.5; (ב) מקדמי ירידה בתאונות הקשורים לשיפורי תשתית נבחרים, בתנאי הארץ - ראה פרק 1.3.

בעזרת המודלים ניתן לבצע הערכה של מספר תאונות אופייני לקטע דרך או צומת מסוים, בתנאי הארץ. בעזרת המודלים ומקדמי הירידה בתאונות ניתן לבצע הערכות של תועלות בטיחותיות המתקשרות עם שיפורי תשתית שונים. אופן ביצוע הערכות כאלה מודגם בפרק זה.

3.1. הערכת מספר תאונות אופייני לקטע דרך/צומת

בפרק 1.5 מתוארים שלבים של פרוצדורה להערכת מספר תאונות אופייני לקטעי דרך או צומת לא עירוני. להלן דוגמאות ליישום פרוצדורה זו להערכת מספר תאונות אופייני לקטע דרך חד-מסלולית ולצומת מרומזר בעל שלוש זרועות.

א. הערכת מספר תאונות אופייני לקטע דרך חד-מסלולית

<u>הנתונים</u>: נבחן קטע דרך חד-מסלולית באורך 1.2 ק״מ, עם נפח תנועה 34,230 כלי רכב ביממה. לאורך שלוש שנים בקטע זה נרשמו: 14 תאונות קלות, 4 תאונות קשות, 0 תאונות קטלניות.

<u>הערכה</u>: תוחלת מספר התאונות השנתי שצפוי באתרים מסוג זה מוערכת בעזרת פונקציות תפקוד בטיחותי עבור תאונות קלות, קשות, קטלניות, כלהלן:

$SP_L = L \cdot e^{-9.6048} \cdot V^{0.9487} = 1.2 * e^{-9.6048} * 34320^{0.9487} = 1.62$

$SP_S = SP_L \cdot e^{-1.2616} = 1.62 * e^{-1.2616} = 0.46$

$SP_F = SP_L \cdot e^{-2.2271} = 1.62 * e^{-2.2271} = 0.17$

כלומר, בקטע טיפוסי של דרך חד-מסלולית באורך 1.2 ק״מ ועם נפח תנועה 34,230 כלי רכב ביממה, יש לצפות, מדי שנה, ל-1.62 תאונות קלות, 0.46 תאונות קשות, 0.17 תאונות קטלניות.

מספר תאונות אופייני לאתר מסוים מוערך כשילוב של שני מרכיבים: (א) תוחלת מספר התאונות שצפוי באתר טיפוסי מסוג זה; (ב) מספר התאונות שנצפה באתר זה בעבר, כאשר שני הערכים משולבים לערך אחד תוך כדי שימוש במקדמי שקלול.

מקדמי השקלול עבור תאונות קלות, קשות, קטלניות, בקטע הנבחן מוערכים באופן הבא:

$W_L=k/ [k + (N^* SP_L)] = 0.9876/[0.9876 + (3^*1.62)] = 0.17$

$W_S=k/ [k + (N^* SP_S)] = 0.9876/[0.9876 + (3^*0.46)] = 0.42$

$W_F=k/ [k + (N^* SP_F)] = 0.9876/[0.9876 + (3^*0.17)] = 0.65$

לבסוף, מספר תאונות אופייני לקטע הנבחן, לפי שלוש רמות חומרה של התאונות, מוערך כלהלן:

$M_L = (W_L \cdot SP_L) + (1-W_L) \cdot ACC_L/N = 0.17*1.62 + (1-0.17) * 14/3 = 4.15$

$M_S = (W_S \cdot SP_S) + (1-W_S) \cdot ACC_S/N = 0.42 * 0.46 + (1-0.42) * 4/3 = 0.97$

$M_F = (W_F \cdot SP_F) + (1-W_F) \cdot ACC_F/N = 0.65 * 0.17 + (1-0.65) * 0/3 = 0.11$

כלומר, מספר התאונות השנתי האופייני לקטע הנבחן הינו: 4.15 תאונות קלות, 0.97 תאונות קשות, 0.11 תאונות קטלניות, או סה״כ 5.23 תאונות עם נפגעים, בשנה.

ב. הערכת מספר תאונות אופייני לצומת מרומזר

הנתונים: נבחן צומת מרומזר בעל שלוש זרועות, עם נפח תנועה בדרך ראשית 37,000 כלי רכב ביממה. לאורך שלוש שנים בצומת זה נרשמו: 10 תאונות קלות, תאונה 1 קשה, תאונה 1 קטלנית.

הערכה: עבור צומת מרומזר, עם נפח תנועה בראשי עד 70,000 כלי רכב ביממה, כאשר ידוע נפח תנועה אחד בלבד (V1), יש להיעזר במודל C (ראה איור 1.2). עבור המקרה הנדון יש לקחת מודל לצומת בעל שלוש זרועות - צומת T.

תוחלת מספר התאונות השנתי שצפוי באתרים מסוג זה מוערכת בעזרת פונקציות תפקוד בטיחותי עבור תאונות קלות, קשות, קטלניות, כלהלן:

$SP_L = e^{-3.2674} \cdot (V1)^{0.3832} \cdot e^{\{-0.8633 \cdot \max[0,\ln(V1)-\ln(35000)]\}} = 2.04$

$SP_S = e^{-7.854} \cdot (V1)^{0.6075} \cdot e^{\{-0.8633 \cdot \max[0,\ln(V1)-\ln(35000)]\}} = 0.22$

$SP_F = e^{-16.0026} \cdot (V1)^{1.2411} \cdot e^{\{-0.8633 \cdot \max[0,\ln(V1)-\ln(35000)]\}} = 0.05$

כלומר, בצומת מרומזר טיפוסי בעל שלוש זרועות ונפח תנועה של 37,000 כלי רכב ביממה בדרך ראשית, יש לצפות, מדי שנה, ל-2.04 תאונות קלות, 0.22 תאונות קשות, 0.05 תאונות קטלניות.

מספר התאונות שאופייני לאתר הנבחן מוערך כשילוב של שני מרכיבים: (א) תוחלת מספר התאונות שצפוי באתרים מסוג זה; (ב) מספר התאונות שנצפה באתר זה בעבר, כאשר שני הערכים משולבים לערך אחד תוך כדי שימוש במקדמי שקלול.

מקדמי השקלול עבור תאונות קלות, קשות, קטלניות, בצומת הנבחן מוערכים באופן הבא:

$W_L=k/ [k + (N^* SP_L)] = 0.9888/[0.9888 + (3^*2.04)] = 0.14$

$W_S=k/ [k + (N^* SP_S)] = 0.9888/[0.9888 + (3^*0.22)] = 0.60$

$W_F=k/ [k + (N^* SP_F)] = 0.9888/[0.9888 + (3^*0.05)] = 0.87$

לבסוף, מספר התאונות האופייני לצומת הנבחן, לפי שלוש רמות חומרה של התאונות, מוערך כלהלן:

$M_L = (W_L \cdot SP_L) + (1-W_L) \cdot ACC_L/N = 0.14^*2.04 + (1-0.14) * 10/3 = 3.15$

$M_S = (W_S \cdot SP_S) + (1-W_S) \cdot ACC_S/N = 0.60 * 0.22 + (1-0.60) * 1/3 = 0.27$

$M_F = (W_F \cdot SP_F) + (1-W_F) \cdot ACC_F/N = 0.87 * 0.05 + (1-0.87) * 1/3 = 0.09$

כלומר, מספר התאונות השנתי האופייני לצומת זה הינו: 3.15 תאונות קלות, 0.27 תאונות קשות, 0.09 תאונות קטלניות, או סה"כ 3.51 תאונות עם נפגעים, בשנה.

3.2. הערכת תועלת בטיחותית משיפור בתשתית

התועלת הבטיחותית של שיפור בתשתית הינה עלות התאונות שייחסכו בעקבות הטיפול, לאורך חיי השיפור[4]. עלות זו מהווה מכפלה של מספר התאונות שייחסכו, מדי שנה, בעקבות הטיפול (ACC_SAVED), עלות תאונה ממוצעת (ACC_COST) ומקדם היוון (DF), כלהלן:

$$BENS=ACC_SAVED \cdot ACC_COST \cdot DF \qquad [5]$$

---

[4] ראה לדוגמא: הקרט, בונג'ק ואחרים (2002); Gitelman and Hakkert (2006)

כאשר מקדם ההיוון (DF-cumulative discount factor) תלוי באורך חיי הפרויקט ובשער הריבית להיוון. לדוגמא, המסגרת הטיפוסית להערכת שיפורים בטיחותיים בתשתית, לפי נהל פר״ת (2006), הינה: אורך חיי הפרויקט - 20 שנה, שער ריבית שנתית להיוון - 7% (DF=10.594).

מספר התאונות שייחסך בעקבות השיפור בתשתית מוערך כמכפלה של שני ערכים: מספר התאונות שנצפה באתר, בשנה, לפני הטיפול (ACC) ו-מקדם הפחתה בתאונות שמתקשר עם הטיפול הנבחן (P), כלהלן:

$$ACC_SAVED = ACC \cdot P \qquad [6]$$

מקדמי הפחתה בתאונות בעקבות טיפולי תשתית שונים ידועים מספרות מקצועית/ מחקרי הערכה קודמים (ראה פרק 1.3).

בתור אומדן למספר התאונות שנצפה באתר לפני הטיפול (ACC), מומלץ להשתמש במספר התאונות האופייני לאתר, דהיינו בערכי ה- M_F, M_S, M_L המתקבלים כשילוב של מספר תאונות טיפוסי שצפוי באתרים מסוג זה ומספר התאונות שנצפו בפועל באתר זה בעבר (ראה סעיף 3.1).

עם ערכי ה- M_F, M_S, M_L הנוסחאות לחישוב התועלת הבטיחותית בעקבות השיפור בתשתית ייראו כדלקמן:

במקום נוסחה [6] -

$$ACC_SAVED = M_F * P_F + M_S * P_S + M_L * P_L \qquad [7]$$

במקום נוסחה [5] -

$$BENS = [M_F * P_F * ACC_COST_F + M_S * P_S * ACC_COST_S + M_L * P_L * ACC_COST_L] * DF \qquad [8]$$

כאשר

P_F, P_S, P_L - מקדמי הפחתה בתאונות שמתקשרים עם השיפור הנבחן בתשתית, לתאונות קטלניות, קשות וקלות, בהתאמה;

ACC_COST_F, ACC_COST_S, ACC_COST_L - עלות תאונה ממוצעת באתרים מהסוג הנבחן, ש״ח, לתאונה קטלנית, קשה וקלה, בהתאמה.

להלן מספר דוגמאות להערכת התועלת הבטיחותית מיישום שיפורי תשתית.

א. דוגמא 1 - טיפול בודד

<u>נתוני המקרה:</u> הטיפול הנבחן הינו התקנת מעקה בטיחות בצדי דרך לא-עירונית חד-מסלולית. אורך הקטע לטיפול 1 ק״מ. נפח התנועה בקטע 16,000 כלי רכב ביממה. במשך 3 שנים בקטע זה נרשמו 12 תאונות קלות, 2 תאונות קשות, תאונה 1 קטלנית.

<u>ריכוז אומדנים להערכה:</u> מקטלוג הטיפולים של החברה הלאומית לדרכים[5] המרכז מידע על מקדמי ירידה בתאונות בעקבות שיפורי תשתית בדרכים הלא עירוניות התקבל כלהלן:

---

[5] ראה: גיטלמן, דובא, הקרט (2008)

סוג טיפול	תאונות מטרה	אחוז ירידה בתאונות המטרה	מקור
מעקה בטיחות בצד הדרך	תאונות עם נפגעים	-40	בינלאומי

כלומר, התקנת מעקה בטיחות בצד הדרך מתקשרת עם ירידה של 40% בתאונות עם נפגעים. מקדמי הפחתה בתאונות, להערכה הנוכחית, יהיו כלהלן:

P_L=P_S=P_F=0.40.

בעקבות הערכה בשיטה המוצגת לעיל בסעיף 3.1, מספר תאונות אופייני לקטע הנבחן יהיה כלהלן:

M_F	M_S	M_L
0.12	0.36	2.88

עלות תאונה ממוצעת מוערכת בהתאם לכללים של נוהל פר"ת (2006). במחקר גיטלמן, דובא, הקרט (2008) חושבו עלויות של תאונות ממוצעת עבור אתרים שונים של הדרכים הלא עירוניות[6]. אומדנים אלה ישמשו לדוגמאות בפרק זה.

עלות תאונה ממוצעת בקטע דרך, לפי רמות חומרה שונות של התאונות, תהיה כלהלן (₪):

ACC_COST_F	ACC_COST_S	ACC_COST_L
6,318,549	888,104	48,324

<u>הערכת התועלת הבטיחות של השיפור בתשתית:</u>

לפי נוסחה [7]

ACC_SAVED = M_F * P_F + M_S * P_S + M_L * P_L= 1.34

לפי נוספה [8]

BENS = [M_F * P_F * ACC_COST_F + M_S * P_S * ACC_COST_S + M_L * P_L * ACC_COST_L] * DF = [296,323 + 127,668 + 55,730] * 10.594 = 5,082,159

מכאן, בעקבות התקנת המעקות בצדי הדרך בקטע הנבחן, צפוי חיסכון של 1.3 תאונות עם נפגעים, בשנה, כאשר החיסכון הכלכלי בגין החיסכון בתאונות, לאורך 20 שנה, יהיה כ- 5.1 מיליון ₪.

ב. דוגמא 2 - טיפול משולב

<u>נתוני המקרה:</u> הטיפול הנבחן הינו סילוק מכשולים (כריתת עצים) + התקנת עמודים סלחניים במקום עמודי תאורה קיימים, בצדי דרך לא-עירונית חד-מסלולית. אורך הקטע לטיפול 1 ק"מ. נפח התנועה בקטע 16,000 כלי רכב ביממה. במשך 3 שנים בקטע זה נרשמו 12 תאונות קלות, 2 תאונות קשות, תאונה 1 קטלנית.

<u>ריכוז אומדנים להערכה</u>: מקטלוג הטיפולים של החברה הלאומית לדרכים התקבלו ערכים כלהלן:

טיפול	סוג טיפול	תאונות מטרה	אחוז ירידה בתאונות המטרה	מקור
1	סילוק מכשולים מצד הדרך	תאונות עם נפגעים	-20	בינלאומי
2	עמודים שבירים	תאונות עם נפגעים	-29	בינלאומי

[6] בשנת 2005

כלומר, מקדמי הפחתה בתאונות, לפי שני סוגי הטיפולים, יהיו כלהלן:

טיפול	P_F	P_S	P_L
1	0.20	0.20	0.20
2	0.29	0.29	0.29

בעקבות הערכה בשיטה המוצגת בסעיף 3.1, מספר תאונות אופייני לקטע הנבחן יהיה כלהלן:

M_F	M_S	M_L
0.12	0.36	2.88

עלות תאונה ממוצעת בקטע דרך, לפי רמות חומרה שונות של התאונות, תהיה כלהלן (ש"ח):

ACC_COST_F	ACC_COST_S	ACC_COST_L
6,318,549	888,104	48,324

<u>הערכת התועלת הבטיחות של השיפורים בתשתית:</u>

כאשר מבוצעים מספר שיפורים בתשתית באותו האתר, הערכת מקדם הפחתה בתאונות של כל השיפורים ביחד נעשית בהסתמך על אומדן ההסתברויות השונות שחוברו יחדיו, כלהלן:

$$P_{COMB} = 1 - \prod_{i}^{n} Ri \qquad [9]$$

כאשר

P_{COMB} - מקדם הפחתה המשולב למספר שיפורים,

n - מספר שיפורים המשולבים באתר, $i=1...n$,

$Ri = 1 - Pi$,

Pi - מקדם הפחתה בתאונות שמתקשר עם שיפור i.

לפי נוסחה [9], ערכים מסכמים של מקדמי הפחתה בתאונות באתר הנבחן יהיו:

$P_{COMB_F} = 1 – (1-0.2)*(1-0.29) = 1 – 0.8 * 0.71 = 1 – 0.568 = 0.432$

$P_{COMB_S} = 1 – (1-0.2)*(1-0.29) = 1 – 0.8 * 0.71 = 1 – 0.568 = 0.432$

$P_{COMB_L} = 1 – (1-0.2)*(1-0.29) = 1 – 0.8 * 0.71 = 1 – 0.568 = 0.432$

לפי נוסחה [7], מספר התאונות שנחסך, בשנה, בקטע הנבחן יהיה:

$ACC_SAVED = M_F * P_{COMB_F} + M_S * P_{COMB_S} + M_L * P_{COMB_L} = 1.45$

לפי נוסחה [8], הערך הנוכחי של התועלת הבטיחותית, לאורך 20 שנה, בקטע הנבחן יהיה:

$BENS = [M_F * P_{COMB_F} * ACC_COST_F + M_S * P_{COMB_S} * ACC_COST_S + M_L * P_{COMB_L} * ACC_COST_L] * DF = [320,029 + 137,881 + 60,188] * 10.594 = 5,488,732$

מכאן, בעקבות סילוק מכשולים והתקנת עמודים סלחניים בצדי הדרך בקטע הנבחן, צפוי חיסכון של כ-1.5 תאונות עם נפגעים, בשנה, כאשר החיסכון הכלכלי בגין החיסכון בתאונות, לאורך 20 שנה, יהיה כ- 5.5 מיליון ש"ח.

ג. דוגמא 3 - טיפול שמעלה שכיחות ומוריד את חומרת התאונות

<u>נתוני המקרה:</u> הטיפול הנבחן הינו ריבוד עם זיפות שוליים, בשני כיווני הנסיעה, בקטע דרך לא-עירונית חד-מסלולית. אורך הקטע לטיפול 2 ק"מ. נפח התנועה בקטע 12,000 כלי רכב ביממה. במשך 3 שנים בקטע זה נרשמו 6 תאונות קלות, 2 תאונות קשות, תאונה 1 קטלנית.

<u>ריכוז אומדנים להערכה:</u> מקטלוג הטיפולים של החברה הלאומית לדרכים התקבל[7] כי, בתנאי הארץ, טיפול זה מביא לירידה של 14% בתאונות הקטלניות והקשות, ולעליה של 41% בתאונות הקלות.

כלומר, מקדמי הפחתה בתאונות לטיפול זה יהיו כלהלן:

P_L	P_S	P_F
-0.41	0.14	0.14

בעקבות הערכה בשיטה המוצגת בסעיף 3.1, מספר תאונות אופייני לקטע הנבחן יהיה כלהלן:

M_L	M_S	M_F
1.75	0.46	0.16

עלות תאונה ממוצעת בקטע דרך, לפי רמות חומרה שונות של התאונות, תהיה כלהלן (₪):

ACC_COST_L	ACC_COST_S	ACC_COST_F
48,324	888,104	6,318,549

עקב תקופת השפעה מוגבלת של הטיפול (ריבוד מחדש) המסגרת להערכת התועלת הכלכלית במקרה הנוכחי תהיה קצרה יותר לעומת הדוגמאות הקודמות, כלהלן: 5 שנה, 7% ריבית, לכן DF = 4.10.

<u>הערכת התועלת הבטיחות של השיפור בתשתית:</u>

לפי נוסחה [7]

ACC_SAVED = M_F * P_F + M_S * P_S + M_L * P_L= -0.631

לפי נוספה [8]

BENS = [M_F * P_F * ACC_COST_F + M_S * P_S * ACC_COST_S + M_L * P_L * ACC_COST_L] * DF = [144,524 + 57,234 – 34,712] * 4.10 = 684,893

מכאן, בעקבות ביצוע ריבוד עם זיפות שוליים בקטע הנבחן, צפויה תוספת של 0.6 תאונות עם נפגעים, בשנה, אשר כוללת: חסכון של 0.02 תאונות קטלניות ושל 0.06 תאונות קשות, ותוספת של 0.72 תאונות קלות, מדי שנה.

החיסכון הכלכלי בגין החיסכון בתאונות החמורות ועל אף התוספת של התאונות הקלות, לאורך 5 שנים, יהיה כ- 685 אלף ₪.

[7] ראה גם טבלה 1.7 בפרק 1 של דו"ח זה

4. סיכום ודיון

כללי

מחקר זה ריכז כלים כמותיים המאפשרים לבחון את סוגיות הבטיחות בתהליכי תכנון ושיפור של תשתיות בדרכים הלא עירוניות בישראל. כלים כאלה קיימים משני סוגים: (א) מודלים להערכת מספר תאונות צפוי באתר, לפי סוגי אתרים שונים; (ב) מקדמי שינוי בתאונות המתקשרים עם מאפייני תשתית שונים /שיפורי תשתית.

במחקר זה נערכו:

1) סקירה פרטנית של ה-HSM (2010) ומדריכי בטיחות אחרים בחו"ל מבחינת הימצאות הכלים המתאימים לתמוך בקבלת החלטות בתכנון מאפייני תשתיות בדרכים הלא עירוניות. כמו כן, נערכה סקירת תוצרי המחקרים בארץ, במטרה לרכז כלים הניתנים ליישום במסגרת תהליכי קבלת ההחלטות ע"י מהנדסי תנועה בנושאי התכנון של תשתיות דרכים לא עירוניות.

2) פיתוח דוגמאות ליישום הכלים הקיימים בחו"ל בתהליכי *תכנון כבישים חדשים* בתנאי הארץ. בעזרת הכלים הקיימים בחו"ל נערכו הדגמות החישובים של התועלת הבטיחותית משינויים במאפייני התשתית. להדגמת החישובים פותחו ארבע דוגמאות טיפוסיות בתנאי הארץ, עבור קטעי דרכים חד-מסלוליות וצומת לא מרומזר. הכלים שנוסו בהערכת הדוגמאות נלקחו משני מדריכים אמריקניים: HSM (2010), RSDW (2009).

3) הכנת דוגמאות ליישום הכלים הקיימים בישראל בתהליכי *שיפור תשתית קיימת* בתנאי הארץ. בעזרת הכלים שפותחו בישראל - מודלים להערכת מספר תאונות צפוי באתר, מקדמי ירידה בתאונות - הודגמו חישובים של התועלת הבטיחותית משיפורי תשתית קיימת. החישובים נערכו עבור מספר דוגמאות טיפוסיות, ברמות מורכבות שונות, עבור קטעי דרכים חד-מסלוליות וצומת מרומזר.

ממצאים

בסקר הספרות נמצא כי מקדמי שינוי בתאונות הקשורים לשינויים במאפייני תשתית נמצאו במקורות רבים. ממחקרים שנעשו בארץ קיימים אומדנים למקדמי שינוי בתאונות בעקבות שיפורי תשתית מסוימים, בעיקר בדרכים הבין-עירוניות. עם זאת, רוב האומדנים בארץ מתייחסים להשפעה של שיפורי תשתית משולבים, כאשר מתוכם לא ניתן לקבל אומדנים להשפעה של שינוי במאפיין תשתית בודד.

בספרות הבינלאומית, אוסף ניכר של מודלים לחיזוי תאונות בדרכים הבין-עירוניות נמצא בשני מקורות מארה"ב: HSM (2010), RSDW (2009). חלק מהמודלים מתאימים לסוגי דרכים לא עירוניות הקיימים בישראל, כגון: קטע דרך חד-מסלולית דו-נתיבית; קטע דרך דו-מסלולית רב-נתיבית עם מפרדה; צמתים מרומזרים ולא מרומזרים. המודלים האמריקניים, בנוסף לנפחי התנועה ואורך קטע דרך, מאפשרים התחשבות גם במאפייני דרך או צומת נוספים. עם זאת, בין המקורות קיים הבדל בחלק מהמאפיינים שנלקחים בחשבון לצורך חיזוי התאונות.

במחקר שנערך בישראל, פותחו מודלים לחיזוי תאונות בדרכים הבין-עירוניות, למספר סוגי אתרים כגון: קטעי דרך דו-מסלולית וחד-מסלוליות, צמתים מרומזרים ולא מרומזרים, בעלי שלוש וארבע

זרועות. מודלים אלה מאפשרים הערכה של *מספר תאונות אופייני* לקטע/צומת, לפי שלוש רמות חומרה של תאונות: קטלניות, קשות, קלות. עם זאת, מודלים אלה מספקים הערכה למספר תאונות הצפוי בצומת על סמך נפח התנועה וסוג אתר בלבד, כאשר בעזרת המודלים לא ניתן לבצע תיקון במספר התאונות הצפוי באתר, בהתאם למאפייני קטע או צומת נוספים כגון: מספר נתיבים, מצב שוליים, מצב מפרדה וכד׳.

בסקר הספרות נמצאו שני מקורות למודלים לחיזוי תאונות בקטעי דרכים, צמתים ומחלפים בתחום הבין-עירוני, אשר יכולים לשמש לבחינת חלופות תכנון שונות. שני המקורות הם ספרי הדרכה אמריקניים: HSM (2010), RSDW (2009). היכולת לשמש לצורכי תכנון נסמכת על מקדמי שינוי בתאונות שקשורים למאפייני תשתית שונים אשר כלולים במודלים לחיזוי מספר התאונות באתר. בהינתן מספר חלופות עם מאפייני תכן שונים, בעזרת המודלים מחו״ל ניתן לבנות תחזיות למספר התאונות הצפוי באתר עם כל אחת מהחלופות ומכאן, לקבל החלטה מבוססת יותר לגבי החלופה המועדפת לתכנון.

עם זאת, יש לזכור שהמודלים שפותחו בחו״ל משקפים את הקשר בין מאפייני האתרים ומספרי התאונות באותן המדינות שעבורן הם פותחו, מה שלא בהכרח תואם את מערכת הקשרים הקיימת בתנאי הארץ. לכן, את התועלת משימוש במודלים הזרים כדאי לראות בעיקר בניתוח רגישות של התוצאה - מספר התאונות החזוי באתר - לשינויים במאפייני התשתית באתר ולאו דווקא בערכים המוחלטים של מספרי התאונות שמתקבלים באמצעות המודלים.

כאמור, המודלים שנמצאו במדריכים האמריקניים - HSM, RSDW, נבחנו במחקר זה על סמך דוגמאות טיפוסיות לקטעי דרכים וצמתים בתנאי הארץ. הדוגמאות שנבחנו כללו מקרים אלה: (1) תכנון קטע ישר בדרך בין-עירונית חד-מסלולית, עם מהירויות תכן שונות; (2) תכנון קטע בעקום אופקי בדרך בין-עירונית חד-מסלולית, עם מהירות תכן 70 קמ״ש; (3) תכנון קטע בעקום אופקי בדרך בין-עירונית חד-מסלולית, עם מהירויות תכן 60 ו-80 קמ״ש; (4) תכנון צומת 3 זרועות ללא רמזור בדרך בין-עירונית חד-מסלולית, כאשר בתור חלופות נבחנים מאפייני תשתית כגון: עם וללא נתיבי פניה שמאלה, נתיבי פנייה ימינה, מפרדות ותאורה.

מבחינת תוצאות ההערכות עלה כי מספר התאונות הצפוי באתר, לרוב, אינו זהה ע״פ ההערכות שבוצעו על סמך המדריכים השונים. הכלים המוצגים במדריכים אלה אכן מאפשרים לבחון את השפעת מאפייני התשתית כגון: רוחב נתיב, רוחב שול, מאפייני עקום ועוד - על מספר התאונות הצפוי באתר. עם זאת, גודל ההשפעה ולעתים, גם כיוון ההשפעה, משתנים בתלות במקור שסיפק את הכלים להערכה.

לדוגמא, בהערכת קטע ישר בדרך חד-מסלולית, טווח השינויים במספר התאונות הצפוי באתר, בתלות במאפייני התשתית, היה 16% לפי HSM (2010) ו-8% לפי RSDW (2009). בדוגמא אחרת, בקטע עם עקום אופקי בדרך חד-מסלולית, מדריך הHSM ייחס השפעה חזקה יותר לרוחב נתיב ורוחב שול, מאשר מדריך הRSDW, כאשר הRSDW ייחס השפעה חזקה יותר למאפייני העקום לעומת הHSM.

כמו כן, מהשוואה בין ממצאי הערכה ע״פ שני המקורות עלה כי תכנון עקום אופקי עם מהירויות תכן שונות מביא לשינוי במספר התאונות החזוי, אם כי במגמות הפוכות. לפי הHSM, הגדלת

מהירות התכן בעקום המתבטאת בהגדלת רוחב נתיב ורוחב שול, משפרת את הבטיחות ומקטינה במעט את מספר התאונות הצפוי בקטע. לעומת זאת, לפי מדריך הRSDW, הגדלת מהירות התכן בעקום גורמת להרעה בבטיחות - עליה במספר התאונות הצפוי.

בנוסף, שוני ניכר נמצא בין שני המדריכים בתוצאות הערכה של צומת לא מרומזר בעל שלוש זרועות. בין היתר, מספר התאונות החזוי באתר זה, בתנאי הבסיס, היה גבוה ב-45% לפי מדריך הHSM לעומת המקור השני. לפי הHSM, השפעה חיובית על בטיחות קיימת עבור הסדרת נתיבי פנייה שמאלה וימינה בדרך הראשית והמשנית. לעומת זאת, לפי המדריך מטקסס, השפעה חיובית על בטיחות הצומת קיימת להסדרת נתיבי פנייה ימינה ושמאלה רק בדרך הראשית. ערכי מקדמי השינוי בתאונות בעקבות הסדרת נתיבי הפנייה בצומת גבוהים יותר ב-HSM לעומת הRSDW.

בעזרת הכלים שפותחו בעבר בישראל כגון: המודלים לחיזוי מספר תאונות באתרים מייצגים בדרכים הבין-עירוניות; מקדמי ירידה בתאונות הקשורים לשיפורי תשתית נבחרים, בתנאי הארץ - בדו"ח זה הודגמו הערכות של מספר תאונות אופייני לקטע דרך או צומת מסוים, בתנאי הארץ, וכמו כן, חישובים של התועלות הבטיחותיות המתקשרות עם שיפורי תשתית שונים. כלים אלה עשויים לתרום לתהליכי קבלת ההחלטות בנוגע לשיפורים המתוכננים של תשתיות דרכים קיימות.

דיון

מסקנות המחקר:

- בעולם קיים ידע כמותי על השפעתם הבטיחותית של מרכיבי תכנון גיאומטרי של קטעי דרכים, צמתים ומחלפים.

- חלק מידע זה מוטמע בהנחיות הישראליות לתכנון גיאומטרי של דרכים, רחובות צמתים ומחלפים.

- במצבים בהם מתאפשרת בחירה בין רכיבי התכנון, או כאשר המידות של רכיבי התכנון אינן חד-משמעיות וניתן לבחור אותם מתוך טווח של ערכים, רצוי לשלב את הידע הכמותי הקיים בנושאי הבטיחות בתהליך התכנון. מצבים אלו קורים כאשר תנאי התכנון אינם טיפוסיים, כאשר התכנון מורכב, או כאשר עלויות הביצוע גבוהות. במצבים אלו מומלץ להשתמש בידע הכמותי על בטיחות לצורך השוואה בין חלופות התכנון.

- בשל השוני המתקבל בהערכות לפי המקורות מחו"ל, נראה שקיים צורך בפיתוח כלים דומים בתנאי הארץ. בדומה למקובל בארה"ב, רצוי לפתח מודלים לחיזוי מספרי התאונות בסוגי דרך שונים בישראל שיאפשרו לבצע הערכה בשני שלבים: בשלב הראשון, עבור תנאי הבסיס, בתלות בסוג אתר, נפח התנועה ואורך קטע, ובשלב השני, עבור מספר מאפייני תשתית משפיעים שערכיהם שונים מתנאי הבסיס, כאשר התחשבות זו באה לידי ביטוי ע"י שימוש במקדמי שינוי בתאונות (כגון: CMF במדריך HSM, 2010). בדרך זו, בהערכות הבטיחות יהיה ניתן לקחת בחשבון מקדמי שינוי במאפייני התשתית כגון: מספר נתיבים, רוחב נתיב, רוחב שול, עקום אופקי, הגבהה צידית, שיפוע לאורך, מצב צידי הדרך, ועוד.

בין הנושאים המומלצים למחקרי המשך ניתן לציין:

- מציאת השפעות של מרכיבי תכנון גיאומטרי של דרכים, צמתים ומחלפים, בתנאי הארץ;

- יצירת מודלים לחיזוי תאונות עבור סוגי דרכים, רחובות, צמתים ומחלפים שונים, בתנאי הארץ.

כמו כן, יש מקום לבחינת פרטי תכנון שונים בהנחיות הישראליות על-פי הידע הכמותי המצטבר, בארץ ובחו״ל, לגבי ההשפעות הבטיחותיות שלהם.

מראי מקום

1. הקרט ש., בונגיק ח., גיטלמן ו., בן יעקב י., רפיח ר., כהן א., דובא א. (2002). פיתוח שיטה, הנחיות וכלים ממוחשבים ל״מחקרי אפקטיביות״ של שיפורים בטיחותיים בתשתית. משרד התחבורה.
2. גיטלמן ו., הקרט ש., פיסחוב פ. (2009) . הערכת יעילות בטיחותית של שיפורי תשתית שיושמו בדרכים הלא עירוניות. דוח מחקר 320/2009. המכון לחקר התחבורה.
3. גיטלמן ו., דובא א., הקרט ש. (2008). פיתוח מערכת לניהול הבטיחות בדרכים. המכון לחקר התחבורה.
4. זילברשטין ר., פרישר ב., בסן ש. (2011). טיוטת הנחיות לתכן גיאומטרי של דרכים בין עירוניות, צמתים ומחלפים. תכן גיאומטרי של דרכים. משרד התחבורה ומע״צ.
5. הנחיות (2000). הנחיות לתכן גיאומטרי של דרכים בין עירוניות, צמתים ומחלפים II. תכן גיאומטרי של צמתים. משרד התחבורה ומע״צ.
6. נוהל פר״ת (2006). נוהל לבדיקת כדאיות כלכלית של פרויקטים תחבורתיים, משרד התחבורה ומשרד האוצר. חלק 2, פרק 6 ״בטיחות״.
7. Bonneson J. A. and Pratt M. P. (2009). Roadway Safety Design Workbook. Report No. FHWA/TX-09/0-4703-P2.
8. Elvik R., Hoya A., Vaa T. and Sorensen M. (2009). The Handbook of Road Safety Measures. Second Edition.
9. Gitelman V., Hakkert A.S. (2006) Economic evaluation of road safety measures: the framework, testing and future needs. Proceedings of the European Transport Conference (CD-ROM), held in Strasbourg, France, September.
10. HSM (2010). Highway Safety Manual. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, D. C.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. PIARC (2003). Road Safety Manual. (2003). World Road Association.
15. 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. RIPCORD-ISEREST. 30.06.2005
16. Turner B., Imberger K., Roper F., Pyta V. and McLean J. (2010). Engineering Risk Assessment part 6: Crash Reduction Factors. Austroads Project No. ST1428. Austroads Publication No. AP-T151/10.

נספחים לפרק 2

2A.1. כלים לחיזוי מספר תאונות בקטע דרך חד-מסלולית, לפי HSM (2010)

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

בטבלה 2A.1 מוצגות ערכי ברירת המחדל לפיצול תאונות לפי רמת חומרה בדרך בין-עירונית חד-מסלולית דו-נתיבית. מהטבלה עולה, לדוגמא, שתאונות עם נפגעים מהווים 32.1% מהתאונות החזויות בדרך זו. בטבלה 2A.2 מוצגים ערכי ברירת המחדל לפיצול התאונות לפי סוגי תאונות. בשיפוט ההנדסי לגבי אתר מסוים ניתן לשנות חלוקות אלה.

טבלה 2A.1. ערכי ברירת המחדל לפיצול תאונות לפי רמת חומרה בדרך בין-עירונית חד-מסלולית דו-נתיבית.

חומרת תאונה	אחוז תאונות
קטלנית	1.3
קשה	5.4
קלה	10.9
עם פגיעה אפשרית	14.5
תאונות עם נפגעים	32.1
תאונות נזק בלבד	67.9
סה"כ	100.0

טבלה2A.2: ערכי ברירת המחדל לפיצול תאונות לפי סוגי תאונות בדרך בין-עירונית חד-מסלולית דו-נתיבית.

	אחוז תאונות		
סוג תאונה	עם נפגעים	נזק בלבד	ס"ה (בשילוב רמות חומרה)
תאונות רכב יחיד			
התנגשות בבעלי חיים	3.8	18.4	12.1
התנגשות באופניים	0.4	0.1	0.2
התנגשות בהולכי רגל	0.7	0.1	0.3
התהפכות	3.7	1.5	2.5
עזיבת הדרך	54.5	50.5	52.1
תאונות רכב יחיד אחר	0.7	2.9	2.1
ס"ה תאונות רכב בודד	63.8	73.5	69.3
תאונות בין כלי רכב			
חזית צד	10.0	7.2	8.5
חזית חזית	3.4	0.3	1.6
חזית אחור	16.4	12.2	14.2
צד צד	3.8	3.8	3.7
אחר	2.6	3.0	2.7
ס"ה תאונות בין כלי רכב	36.2	26.5	30.7
ס"ה	100.0	100.0	100.0

להלן מוצגים מקדמי שינוי תאונות המשפיעים על מספר תאונות חיזוי בדרך בין-עירונית חד-מסלולית דו-נתיבית.

CMF_{1r} – מקדם רוחב נתיב:

בטבלה 2A.3 מוצגים מקדמי שינוי בתאונות ביחס לתנאי הבסיס עקב רוחב נתיב וכתלות בנפח תנועה יומי ממוצע בדרך. עבור נפח תנועה יומי ממוצע הגדול מ- 2000 כלי רכב ליממה ערך המקדם הוא קבוע.

טבלה2A.3. מקדמי שינוי בתאונות הקשורים לרוחב נתיב כתלות בנפח תנועה יומי

רוחב נתיב	AADT נפח יומי ממוצע (כלי רכב ליממה)		
	< 400	400-2000	> 2000
9 רגל או פחות	1.05	$1.05+2.81*10^{-4}(AADT-400)$	1.50
10 רגל	1.02	$1.02+1.75*10^{-4}(AADT-400)$	1.30
11 רגל	1.01	$1.01+2.5*10^{-4}(AADT-400)$	1.05
12 רגל או יותר	1.00	1.00	1.00

CMF_{2r} – מקדם רוחב וסוג שול:

בטבלה 2A.4 מוצגים מקדמי שינוי בתאונות ביחס לתנאי בסיס עקב רוחב שול וכתלות בנפח תנועה יומי ממוצע בדרך. עבור נפח תנועה יומי ממוצע הגדול מ-2000 כלי רכב ליממה ערך המקדם הוא קבוע.

טבלה 2A.4. מקדמי שינוי בתאונות ביחס לתנאי בסיס הקשורים לרוחב שול כתלות בנפח תנועה

רוחב שול	AADT נפח יומי ממוצע (כלי רכב ליממה)		
	< 400	400-2000	> 2000
0 רגל	1.10	$1.10+2.5*10^{-4}(AADT-400)$	1.50
2 רגל	1.07	$1.07+1.43*10^{-4}(AADT-400)$	1.30
4 רגל	1.02	$1.02+8.125*10^{-4}(AADT-400)$	1.15
6 רגל	1.00	1.00	1.00
8 רגל או יותר	0.98	$0.98+6.875*10^{-5}(AADT-400)$	0.87

בטבלה 2A.5 מוצגים מקדמי שינוי בתאונות ביחס לתנאי בסיס עקב סוג שול (סלול, מצעים, משולב סלילה ומצעים, מכוסה עשב), כתלות ברוחב שול. עבור שול סלול, בכל תחום רוחב השול, אין השפעה על תאונות.

טבלה 2A.5. מקדמי שינוי בתאונות ביחס לתנאי בסיס הקשורים לסוג שול כתלות ברוחב שול

סוג שול	רוחב שול (רגל)						
	0	1	2	3	4	6	8
סלול	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
מצעים	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01	1.02	1.02
משולב	1.00	1.01	1.02	1.02	1.03	1.04	1.06
מכוסה עשב	1.00	1.01	1.03	1.04	1.05	1.08	1.011

CMF_{3r} – עקום אופקי – מאפיינים: אורך, רדיוס, קיים/ לא קיים עקום מעבר

$$CMF_{3r} = \frac{(1.55*L_c) + \left(\frac{80.2}{R}\right) - (0.012*S)}{(1.55*L_c)}$$

כאשר

CMF_{3r} = מקדם עקום אופקי

L_c = אורך עקום אופקי

R = רדיוס עקום אופקי

S = 1.0 כאשר קיים עקום מעבר, 0 כאשר לא קיים עקום מעבר, 0.5 כאשר קיים עקום מעבר בצד אחד של העקום ובצידו השני אין עקום מעבר

<u>CMF_{4r} – עקום אופקי: הגבהה צידית</u>

CMF_{4r} = 1.00 עבור $SV < 0.01$

CMF_{4r} = 1.00 + 6* (SV -0.01) עבור $0.01 \leq SV < 0.02$

CMF_{4r} = 1.00 + 6* (SV -0.02) עבור $SV \geq 0.02$

כאשר

CMF_{4r} = מקדם הגבהה צידית בעקום אופקי

SV = ההפרש בין הגבהה צידית (רגל/ רגל) הנדרשת על פי הנחיות התכנון (בספר הירוק של AASHTO), לבין ההגבהה הצידית הקיימת בעקום

<u>CMF_{5r} – שיפוע אורכי</u>:

בטבלה 2A.6 מוצגים מקדמי שינוי בתאונות ביחס לתנאי בסיס עקב שיפוע לאורך. עבור אזור מישורי עם שיפוע לאורך עד 3% ערך המקדם הוא 1.0.

טבלה 2A.6. מקדמי שינוי בתאונות ביחס לתנאי בסיס עקב שיפוע לאורך

שיפוע		
מישורי (≤3%)3%	גיבעי (3%< שיפוע ≤ 6%)	הררי (6% <)
1.00	1.10	1.16

<u>CMF_{6r} – צפיפות צמתי גישה לחלקות גובלות</u>:

$$CMF_{6r} = \frac{0.322 + DD *[0.05 - 0.005* \ln(AADT)]}{0.322 + 5 *[0.05 - 0.005* \ln(AADT)]}$$

כאשר

CMF_{6r} = מקדם צפיפות צמתי גישה לחלקות גובלות

AADT = נפח תנועה יומי ממוצע

DD = צפיפות צמתי גישה משני צידי הדרך (צמתים למייל)

<u>CMF_{7r} – פס משונן בציר הדרך</u>: ערך המקדם קבוע - 0.94

<u>CMF_{8r} – נתיבי עקיפה</u>: מקדמים קבועים

כאשר יש נתיב עקיפה בצד אחד (נתיב שלישי), ערך המקדם 0.75.

כאשר בקטע דרך קיימים נתיבי עקיפה בשני צידי הדרך (4 נתיבים), ערך המקדם 0.65.

<u>CMF_{9r} – נתיב מרכזי לפניות שמאלה בשני הכוונים</u>: הסדר מסוג זה לא קיים בארץ, לכן אינו מוצג.

<u>CMF_{10r} – מצב צידי הדרך</u>:

מצב צידי הדרך מתואר ב-7 דרגות אפשריות, כאשר דרגה 1 היא המצב הטוב ביותר - צד דרך מישורי ופנוי ממכשולים, ומצב 7 היא המצב הגרוע ביותר, עם מכשולים קשיחים משני צידי הדרך בקצה השול. תנאי הבסיס מתקבלים בדרגה 3.

$$CMF_{10r} = \frac{e^{(-0.6869 + 0.0668 * RHR)}}{e^{(-0.4865)}}$$

כאשר

CMF_{10r} = מקדם מצב צידי הדרך

RHR = דירוג מצב צידי הדרך

בטבלה 2A.7 מופיעים ערכי מקדם מצב צידי הדרך שחושבו עבור מצבים בין 1 ל-7.

טבלה 2A.7. ערכי מקדם מצב צידי הדרך

RHR	CMF_{10r}
1	0.87
2	0.94
3	1.00
4	1.07
5	1.14
6	1.22
7	1.31

<u>CMF_{11r} – תאורה</u>:

$$CMF_{11r} = 1.0 – ((1.0 – 0.72 * P_{inr} – 0.83 * P_{pnr}) * P_{nr})$$

כאשר

CMF_{11r} = מקדם השפעת תאורה

P_{inr} = חלק של תאונות עם הרוגים ונפגעים בחשכה מתאונות אלו בכל שעות היממה

P_{pnr} = חלק של תאונות נזק בלבד בחשכה מתאונות אלו בכל שעות היממה

P_{nr} = חלק של כל התאונות בחשכה מתאונות אלו בכל שעות היממה

בטבלה 2A.7 מוצגים ערכי ברירת המחדל לשיעור תאונות לפי סוגיהם. משתמשים בנתונים אלו כאשר אין נתונים על שיעור תאונות בחשכה מתוך סך התאונות באתר.

טבלה 2A.7. ערכי ברירת המחדל לשיעור תאונות בחשיכה

	חלק של תאונות בחשכה על פי חומרה		חלק תאונות בחשכה
סוג דרך	עם נפגעים P_{inr}	נזק בלבד P_{pnr}	כלל התאונות P_{nr}
דו-נתיבית חד-מסלולית	0.382	0.618	0.370

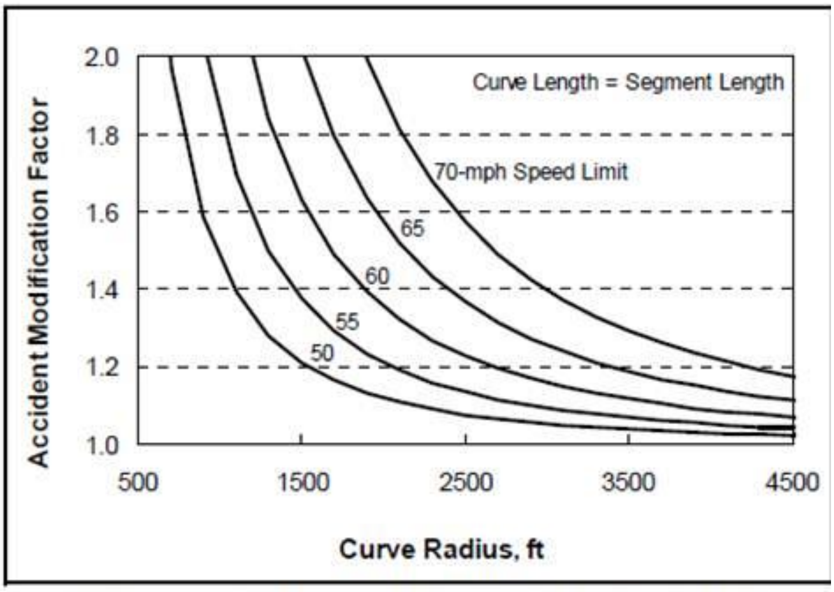
<u>CMF_{12r} – אכיפת מהירות אוטומטית</u>: ערך המקדם קבוע - 0.93.

2A.2. כלים לחיזוי מספר תאונות בקטע דרך חד-מסלולית, לפי RSDW (2009)

עבור דרך בין-עירונית חד-מסלולית דו-נתיבית קיימים מודלים לערכי הAMF עבור 14 מאפיינים, כולל: רדיוס אופקי, מרווח פנוי בצד הדרך (ללא מעקה, עם מעקה חלקי, עם מעקה מלא), שיפוע מעבר לשול.

להלן מקדמי שינוי בתאונות המשמשים לחיזוי תאונות בדרך בין-עירונית חד-מסלולית דו-נתיבית.

<u>AMF_{cr} –</u> איור 2A.1. גרף ונוסחה לחישוב מקדם עקום אופקי.

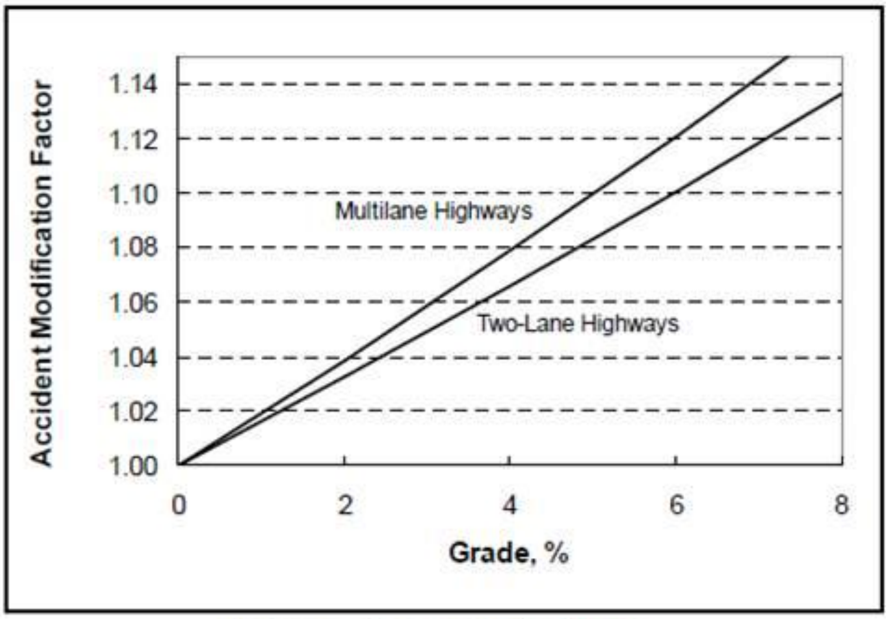


$$AMF_{cr} = 1.0 + 0.97\,(0.147\,V)^4\,\frac{(1.47\,V)^2}{32.2\,R^2}\left(\frac{L_c}{L}\right) \qquad (3\text{-}17)$$

where:

AMF_{cr} = horizontal curve radius accident modification factor;
V = speed limit, mph;
L_c = horizontal curve length (plus spirals), mi;
L = segment length, mi; and
R = curve radius, ft.

AMF_g – איור 2A.2. גרף ונוסחה לחישוב מקדם שיפוע לאורך.



For two-lane highways:

$$AMF_g = e^{0.016\,g} \qquad (3\text{-}18)$$

For multilane highways:

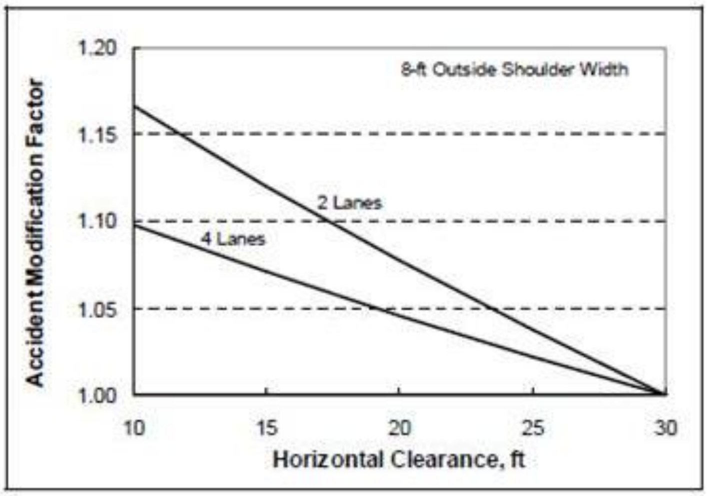
$$AMF_g = e^{0.019\,g} \qquad (3\text{-}19)$$

where:

AMF_g = grade accident modification factor; and

g = percent grade (absolute value), %.

AMF_{ocnb}– איור 2A.3. גרף ונוסחה לחישוב מקדם אזור פנוי ממכשולים מעבר לשול ללא מעקות.



$$AMF_{ocnb} = (e^{-0.014(W_{hc} - W_s - 22)} - 1.0)\,P_i + 1.0 \qquad (3\text{-}20)$$

where:
AMF_{ocnb} = outside clearance (no barrier) accident modification factor;
P_i = proportion of influential crashes of type i (see Table 3-5);
W_s = outside shoulder width, ft; and
W_{hc} = horizontal clearance (average for both sides of segment length), ft.

Base Condition: 30-ft horizontal clearance, 8-ft outside shoulder width

Table 3-5. Crash Distribution for Outside Clearance AMF.

Median Type	Through Lanes	Proportion of Crashes
Restrictive [1]	4	0.30
Undivided or nonrestrictive [2]	2	0.52
	4	0.32

Notes:
1 - Single-vehicle run-off-road crashes, right side only.
2 - Single-vehicle run-off-road crashes, either side.

איור 2A.4. גרף ונוסחה לחישוב מקדם אזור פנוי ממכשולים מעבר לשול עם מעקות $-AMF_{ocsb}$ לחלק מהאורך.

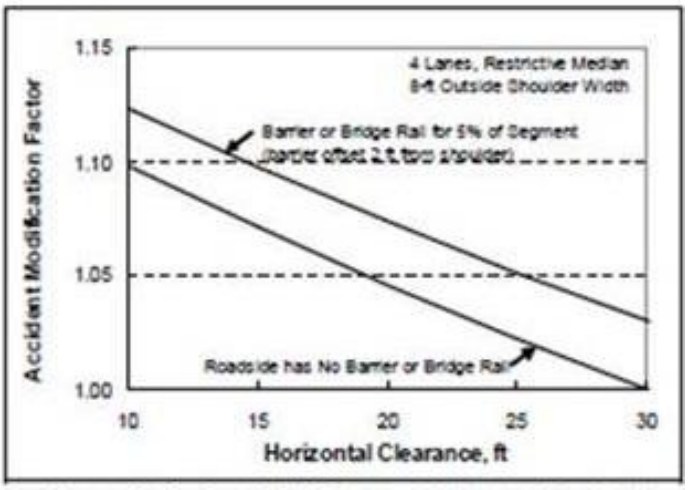


Figure 3-5. Outside Clearance (some barrier) AMF.

$$AMF_{ocsb} = (1.0 - P_{ob})\,AMF_{ocnb} + P_{ob}\,AMF_{oc|ob}\,F_{b|ob} \quad (3\text{-}21)$$

with,

$$AMF_{oc|ob} = (e^{-0.014\,(W_{ocb}-22)} - 1.0)\,P_i + 1.0 \quad (3\text{-}22)$$

$$F_{b|ob} = e^{0.757/W_{ocb}} \quad (3\text{-}23)$$

where:

AMF_{ocsb} = outside clearance (some barrier) accident modification factor;
AMF_{ocnb} = outside clearance (no barrier) accident modification factor;
$AMF_{oc|ob}$ = outside clearance accident modification factor when outside barrier is present;
$F_{b|ob}$ = barrier adjustment factor;
W_{ocb} = width from edge of shoulder to barrier face, ft;
P_{ob} = proportion of segment length with barrier on roadside; and
P_i = proportion of influential crashes of type *i* (see Table 3-5).

Base Condition: roadside barrier not present, 30-ft horizontal clearance, 8-ft outside shoulder width

$$W_{ocb} = \frac{\sum L_{ob,off}}{\sum \frac{L_{ob,off}}{W_{off} - W_s}} \quad (3\text{-}24)$$

$$P_{ob} = \frac{\sum L_{ob,off}}{2\,L} \quad (3\text{-}25)$$

where:

$L_{ob,off}$ = length of outside lane paralleled by a barrier located at a distance W_{off} from the traveled way, mi;
L = segment length, mi;
W_s = outside shoulder width, ft; and
W_{off} = width from edge of the traveled way to the face of a specific short length of barrier, ft.

AMF$_{ocfb}$ – איור 2A.5. גרף ונוסחה לחישוב מקדם אזור פנוי ממכשולים מעבר לשול עם מעקות לכל האורך.

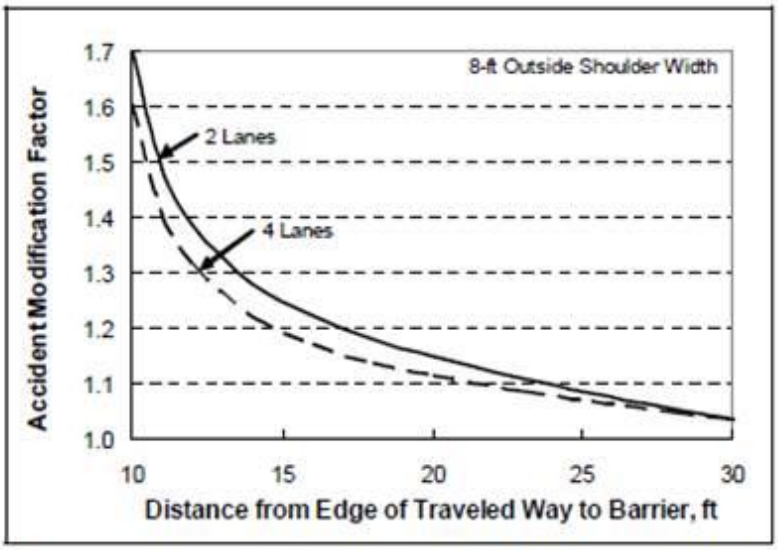


Figure 3-6. Outside Clearance (full barrier) AMF.

$$AMF_{ocfb} = AMF_{oc|ob} F_{b|ob} \qquad (3\text{-}26)$$

with,

$$AMF_{oc|ob} = (e^{-0.014\,(W_{ocb} - 22)} - 1.0)\, P_i + 1.0 \qquad (3\text{-}27)$$

$$F_{b|ob} = e^{0.757/W_{ocb}} \qquad (3\text{-}28)$$

where:

AMF_{ocfb} = outside clearance (full barrier) accident modification factor;

$AMF_{oc|ob}$ = outside clearance accident modification factor when outside barrier is present;

W_{ocb} = width from edge of shoulder to barrier face, ft;

$F_{b|ob}$ = rigid barrier adjustment factor; and

P_i = proportion of influential crashes of type *i* (see Table 3-5).

Base Condition: varies with P_i, 30-ft horizontal clearance or more, 8-ft outside shoulder width

$$W_{ocb} = \frac{2}{\dfrac{1}{W_{off,1} - W_s} + \dfrac{1}{W_{off,2} - W_s}} \qquad (3\text{-}29)$$

where:

$W_{off,i}$ = width from the edge of the traveled way to the face of the barrier in travel direction *i*, ft; and

W_s = outside shoulder width, ft.

AMF_{ss} – איור 2A.6. גרף ונוסחה לחישוב מקדם שיפוע הסוללה מעבר לשול.

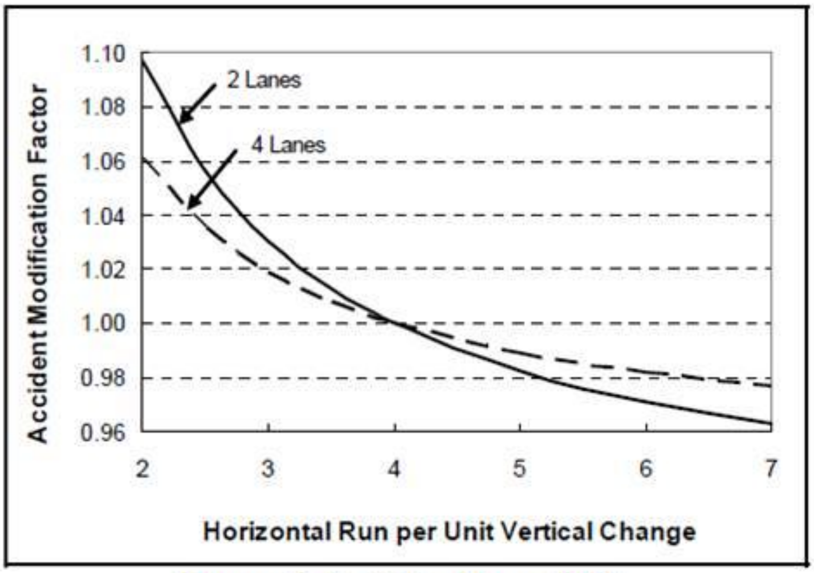


Figure 3-7. Side Slope AMF.

$$AMF_{ss} = (e^{0.69\,(1/S_s - 1/4)} - 1.0)\,P_i + 1.0 \qquad (3\text{-}30)$$

where:

AMF_{ss} = side slope accident modification factor;

P_i = proportion of influential crashes of type i (see Table 3-6); and

S_s = horizontal run for a 1-ft change in elevation (average for segment length), ft.

Base Condition: 1V:4H

AMF_{sp} – איור 2A.7. גרף ונוסחה לחישוב מקדם עקום מעבר.

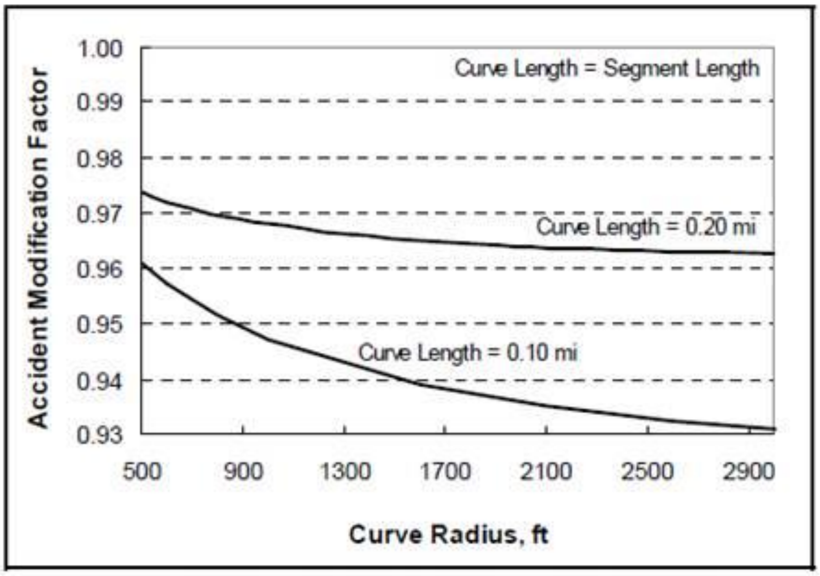


Figure 3-8. Spiral Transition Curve AMF.

$$AMF_{sp} = 1 - \frac{0.012}{1.55\,L_c + \frac{80.2}{R}}\left(\frac{L_c}{L}\right) \qquad (3\text{-}34)$$

where:
AMF_{sp} = spiral transition curve accident modification factor;
L_c = horizontal curve length (plus spirals), mi;
L = segment length, mi; and
R = curve radius, ft.

Base Condition: spiral transition curves not present

$AMF_{lw,sw}$ – איור 2A.8. גרף ונוסחה לחישוב מקדם רוחב נתיב ורוחב שול.

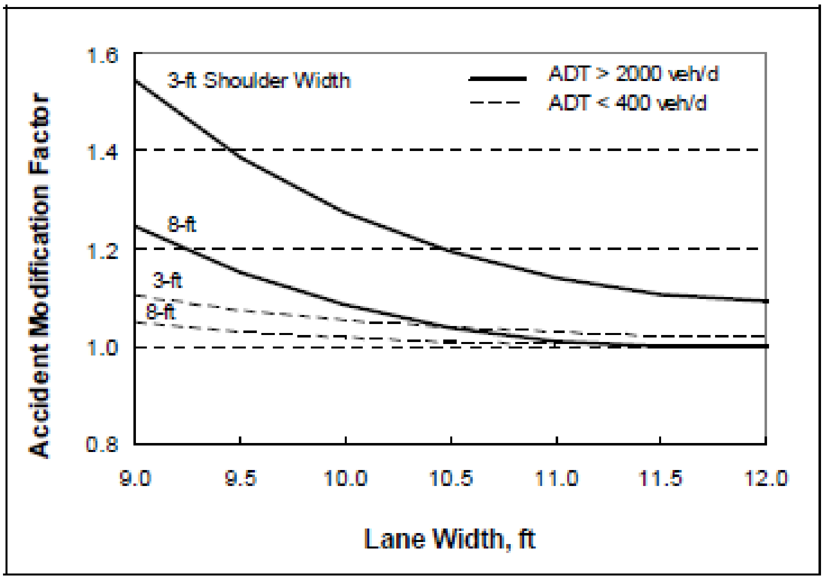


Figure 3-9. Lane and Shoulder Width AMF.

$$AMF_{lw,sw} = AMF_{hv}\, f_{ADT} + AMF_{lv}\,(1.0 - f_{ADT}) \qquad (3\text{-}35)$$

$$f_{ADT} = \frac{1.0}{1.0 + e^{-0.00393\,(ADT - 1200)}} \qquad (3\text{-}36)$$

$$AMF_{lv} = (AMF_{hv} - 1.0)\, 0.15 + 1.0 \qquad (3\text{-}37)$$

$$AMF_{hv} = \left(F_{lw}\, F_{sw}\, F_{lw,sw} - 1\right) 0.54 + 1.0 \qquad (3\text{-}38)$$

$$F_{lw} = e^{\,0.0533\,([W_l - 12.5]^2 - 0.250)} \qquad (3\text{-}39)$$

$$F_{sw} = e^{\,-0.163\,(W_s - 8)} \qquad (3\text{-}40)$$

$$F_{lw,sw} = e^{\,0.011\,(W_l\, W_s - 96)} \qquad (3\text{-}41)$$

where:
$AMF_{lw,sw}$ = lane and shoulder width accident modification factor;
AMF_{hv} = accident modification factor for high volume;
AMF_{lv} = accident modification factor for low volume;
f_{ADT} = traffic volume adjustment factor;
ADT = average daily traffic volume, veh/d;
W_l = lane width, ft; and
W_s = outside shoulder width, ft.

Base Condition: 12-ft lane width, 8-ft shoulder width

AMF_{srs} – איור 2A.9. גרף ונוסחה לחישוב מקדם פס משונן בצידי הדרך.

Table 3-8. Shoulder Rumble Strips AMF.

Median Type	Rumble Strips	AMF_{srs}
Nonrestrictive	Present	unknown
	Not present	1.00
Undivided	Present	0.91
	Not present	1.00

For two-lane highways:

$$AMF_{srs} = (0.82 - 1.0)\,P_{sv} + 1.0 \qquad (3\text{-}42)$$

where:

AMF_{srs} = shoulder rumble strips accident modification factor; and

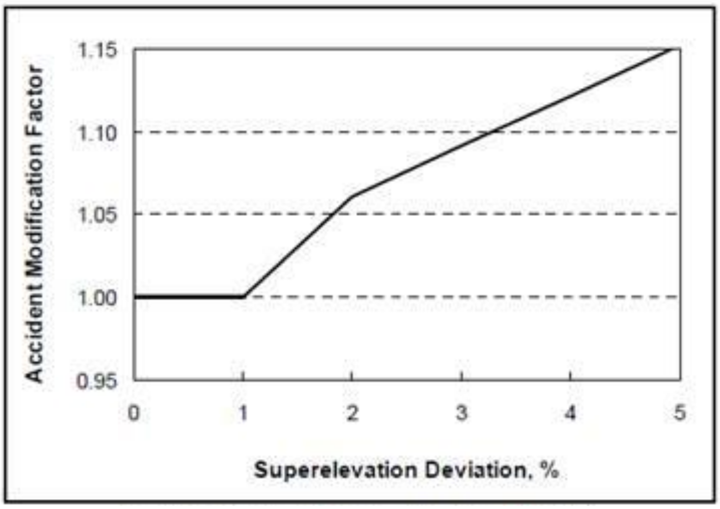
P_{sv} = proportion of single-vehicle run-off-road crashes (= 0.52).

Base Condition: shoulder rumble strips not present

AMF_{crs} – איור 2A.10. גרף ונוסחה לחישוב מקדם פס משונן במרכז הדרך.

Median Type	Rumble Strip	AMF_{crs}
Nonrestrictive	Present	unknown
	Not present	1.00
Undivided	Present	0.85
	Not present	1.00

AMF_e – איור 2A.11. גרף ונוסחה לחישוב מקדם ליקוי בהגבהה צידית בעיקולים.



AMF_{pass} – איור 2A.12. טבלה עם מקדמי נתיב עקיפה.

Climbing Lane or Passing Lane Type	AMF_{pass}
None provided	1.00
One direction (three-lane cross section)	0.75
Two directions (four-lane cross section)	0.65

AMF_{dd} – איור 2A.13. גרף ונוסחה לחישוב מקדם צפיפות צמתי חיבור לחלקות גובלות.

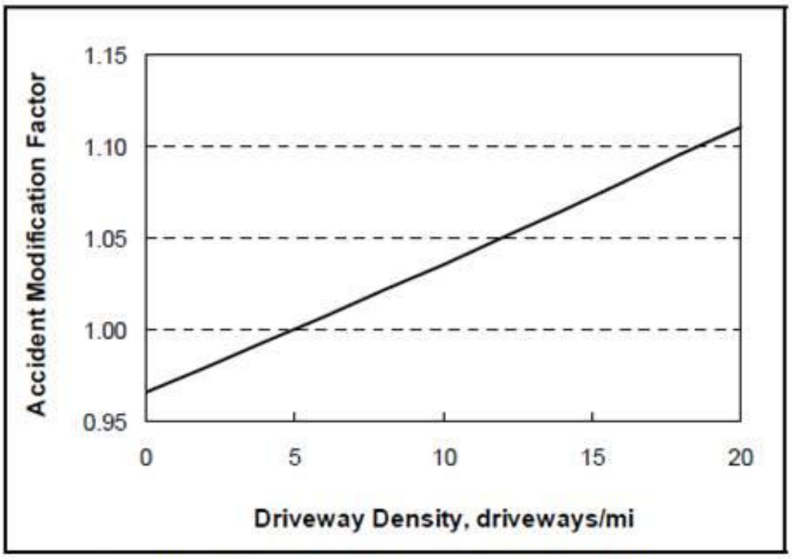


Figure 3-12. Driveway Density AMF.

$$AMF_{dd} = e^{0.007\,(D_d - 5)} \qquad (3\text{-}45)$$

where:

AMF_{dd} = driveway density accident modification factor; and

D_d = driveway density (two-way total); driveways/mi.

Base Condition: 5 driveways per mile

2A.3. כלים לחיזוי מספר תאונות בצומת שלוש זרועות לא מרומזר בדרך חד-מסלולית, לפי HSM (2010)

בנספח זה מוצגים פרטי המידע המתייחסים לצומת 3 זרועות לא מרומזר בדרך חד-מסלולית. (לא הובאו מהמקור פרטים הנוגעים לצומת 4 זרועות לא מרומזר ולצומת 3 זרועות מרומזר).

עבור צומת 3 זרועות לא מרומזר בדרך בין-עירונית חד-מסלולית קיימים מודלים לערכי הCMF ל-4 מאפיינים: זווית הסטייה מניצב בין זרועות הצומת, נתיבי פנייה שמאלה, נתיבי פנייה ימינה ותאורה בצומת.

להלן נוסחא לחיזוי מספר התאונות בצומת בתנאי הבסיס:

$$N_{spf3\ st} = \exp[-9.86+0.79*Ln(AADT_{maj})+0.49*Ln(AADT_{min})]$$

כאשר

$N_{spf3\ st}$ = אומדן לממוצע תאונות חזויות בצומת, בשנה;

$AADT_{maj}$ = נפח תנועה יומי ממוצע בדרך הראשית (כלי רכב ליממה);

$AADT_{min}$ = נפח תנועה יומי ממוצע בדרך המשנית (כלי רכב ליממה).

כמו כן, תחום נפח תנועה יומי ממוצע בדרך הראשית: 0- 19,500 כלי רכב ליממה;
תחום נפח תנועה יומי ממוצע בדרך המשנית: 0- 4,300 כלי רכב ליממה.

בטבלה 2A.8 מוצגים ערכי ברירת המחדל לפיצול התאונות לפי רמות חומרה. מהטבלה עולה שתאונות עם נפגעים מהווים 41.5% מהתאונות החזויות בצומת. בטבלה 2A.9 מוצגים ערכי ברירת המחדל לפיצול התאונות לפי סוגי תאונות.

טבלה 2A.8. ערכי ברירת המחדל לפיצול התאונות בצומת לפי רמות חומרה

חומרת תאונה	אחוז תאונות
קטלני	1.7
קשה	4.0
קלה	16.6
עם פגיעה אפשרית	19.2
סך התאונות עם נפגעים	41.5
תאונות נזק בלבד	58.5
סה"כ	100.0

טבלה 2A.9. ערכי בררת המחדל לפיצול התאונות לפי סוגי תאונות בצומת

סוג תאונה	אחוז תאונות		
	תאונות עם נפגעים	נזק בלבד	ס"ה (כל רמות החומרה)
תאונות רכב יחיד			
התנגשות בבעלי חיים	0.8	2.6	1.9
התנגשות באופניים	0.1	0.1	0.1
התנגשות בהולכי רגל	0.1	0.1	0.1
התהפכות	2.2	0.7	1.3
עזיבת הדרך	24.0	24.7	24.4
תאונות רכב יחיד אחר	1.1	2.0	1.6
ס"ה תאונות רכב בודד	28.3	30.2	29.4
חזית צד	27.5	21.0	23.7
חזית חזית	8.1	3.2	5.2
חזית אחור	26.0	29.2	27.8
צד צד	5.1	13.1	9.7
אחר	5.0	3.3	4.2
ס"ה תאונות בין כלי רכב	71.7	69.8	70.6
ס"ה	100.0	100.0	100.0

להלן מקדמי שינוי תאונות המשפיעים על חיזוי תאונות בצומת.

CMF_{1j} – מקדם זווית הסטייה מניצב בין זרועות הצומת:

$$CMF_{1j} = e^{(0.004*skew)}$$

כאשר

CMF_{1j} = מקדם זווית סטייה מניצב בין זרועות הצומת

skew = זווית הסטייה מניצב, במעלות

CMF_{2j} – מקדם נתיבי פניה שמאלה:

בטבלה 2A.10 מוצגים מקדמי שינוי בתאונות ביחס לתנאי בסיס עקב הוספת נתיבי פנייה שמאלה בצומת.

טבלה 2A.10. מקדמי שינוי בתאונות ביחס לתנאי בסיס עקב הוספת נתיבי פנייה שמאלה בצומת

סוג צומת	מספר גישות עם נתיב פנייה שמאלה	
	גישה 1	2 גישות
3 זרועות	0.56	0.31

CMF_{3j} – מקדם נתיבי פנייה ימינה:

בטבלה 2A.11 מוצגים מקדמי שינוי בתאונות ביחס לתנאי בסיס עקב הוספת נתיבי פנייה ימינה בצומת.

טבלה 2A.11. מקדמי שינוי בתאונות ביחס לתנאי בסיס עקב הוספת נתיבי פנייה ימינה בצומת

סוג צומת	מספר גישות עם נתיב פנייה ימינה	
	גישה 1	2 גישות
3 זרועות	0.86	0.74

CMF_{4j} – מקדם תאורה:

$$CMF_{4j} = 1-0.38*P_{ni}$$

כאשר:

P_{ni} = החלק היחסי של תאונות בחשכה מכלל התאונות הצומת.

בטבלה 2A.12 מוצגת ברירת המחדל של שיעור תאונות בחשכה מסך התאונות בצומת. משתמשים בערך זה כאשר לא קיימים נתונים לערך זה בצומת הנבחן.

טבלה 2A.12. ברירת המחדל של שיעור תאונות בחשכה מסך התאונות בצומת.

סוג צומת	החלק היחסי של תאונות בחשכה מכל תאונות הצומת
	P_{ni}
3 זרועות	0.260

2A.4. כלים לחיזוי מספר תאונות בצומת שלוש זרועות לא מרומזר בדרך חד-מסלולית, לפי RSDW (2009)

בנספח זה מובאים פרטי המידע המתייחסים לצומת 3 זרועות לא מרומזר, בלבד. (מהמקור לא הובאו פרטים בנוגע לצומת 4 זרועות לא מרומזר ולצמתים מרומזרים).

עבור צומת 3 זרועות לא מרומזר בדרך חד-מסלולית דו-נתיבית קיימים מודלים לערכי הAMF של מאפיינים אלה: מספר נתיבי פנייה שמאלה, מספר נתיבי פנייה ימינה, מפרדה בגישות לצומת.

באיור 2A.14 מוצגת נוסחה לחיזוי תאונות עם נפגעים בצמתים עם 3 זרועות, לא מרומזרים, כתלות בנפח התנועה היומי בדרך הראשית והמשנית. בהמשך, מוצגים מקדמי שינוי בתאונות המשפיעים על חיזוי תאונות בצומת מסוג זה.

איור 2A.14. נוסחה לחישוב תאונות חזויות בצומת.

For three-leg, unsignalized intersections:

$$C_{b,3u} = 0.0973\left(\frac{ADT_{major}}{1000}\right)^{0.863}\left(\frac{ADT_{minor}}{1000}\right)^{0.497} f_{3u} \quad (6\text{-}1)$$

where:

C_b = base injury (plus fatal) crash frequency, crashes/yr;
ADT_{major} = average daily traffic volume on the major road, veh/d;
ADT_{minor} = average daily traffic volume on the minor road, veh/d; and
f = local calibration factor.

AMF_{lt} – איור 2A.15. טבלת מקדם נתיב פנייה שמאלה.

Number of Intersection Legs	Approach Type	AMF Based on Number of Legs with a Left-Turn Lane [1]	
		One	Both
3	Major	0.70	not applicable [2]
4	Major	0.71	0.50

Notes:
1 - Values based on minor-road volume equal to one-tenth of the major-road volume.
2 - Only one major-road left-turn lane is likely at a three-leg intersection.

For three-leg intersections:

$$AMF_{LT} = AMF_1 \quad (6\text{-}31)$$

Evaluate Rule 1 for the major-road leg i (i = 1).

with,

$$P_{leg,i} = \frac{ADT_i}{ADT_1 + ADT_2 + ADT_3} \quad (6\text{-}32)$$

Base Condition:
major-road legs: left-turn lane (or bay) not present

AMFrt – איור 2A.16. טבלת מקדם נתיב פנייה ימינה.

Number of Intersection Legs	Approach Type	AMF Based on Number of Legs with a Right-Turn Lane [1]	
		One	Both
3	Major	0.89	not applicable [2]
4	Major	0.89	0.79

Notes:
1 - Values based on minor-road volume equal to one-tenth of the major-road volume.
2 - Only one major-road right-turn lane is likely at a three-leg intersection.

For three-leg intersections:

$$AMF_{RT} = AMF_1 \qquad (6\text{-}36)$$

Evaluate Rule 1 for the major-road leg i (i = 1).

with,

$$P_{leg,i} = \frac{ADT_i}{ADT_1 + ADT_2 + ADT_3} \qquad (6\text{-}37)$$

Base Condition:
major-road legs: right-turn lane (or bay) not present

AMF_{mp} – מקדם מפרדה:

איור 2A.17. טבלת מקדם מפרדה בדרך הראשית.

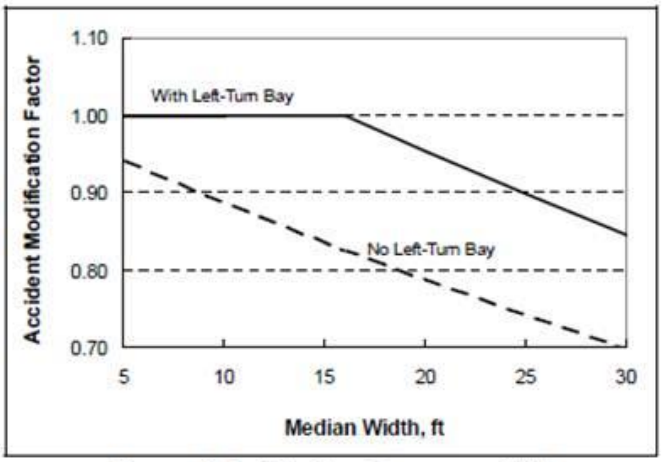


Figure 6-5. Median Presence AMF for an Unsignalized Intersection.

$$AMF_{mp} = AMF_1 \times AMF_2 \qquad (6\text{-}42)$$

Evaluate Rules 1 and 2.

Rule 1: If a left-turn lane is present and the median is 16 ft or more in width, then:

$$AMF_1 = e^{-0.012\,(W_m - 16)} \qquad (6\text{-}43)$$

otherwise, AMF_1 = 1.0.

Rule 2: If a left-turn lane is *not* present and a median is present, then:

$$AMF_2 = e^{-0.012\,W_m} \qquad (6\text{-}44)$$

otherwise, AMF_2 = 1.0.

---

where:
AMF_{mp} = median presence accident modification factor; and
W_m = median width (including bay, if present), ft.

Base Condition: no median on major road