



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

זיהוי מאפייני תשתית המשפיעים על מהירויות הנסיעה בדרכים החד-מסלוליות בישראל, כבסיס ליישום גישה של "דרכים המסבירות את עצמן"

ד"ר ויקטוריה גיטלמן

גב' פאני פיסחוב

אינג' רובי כרמל

גב' סמדר מוריק

פרופ' שלמה בכור

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

ספטמבר 2013, חיפה

דו"ח מחקר מס' S/55/2013

תקציר

1. רקע למחקר

השפעת המהירות כגורם מכריע הן בהתרחשות התאונות והן ברמת חומרתן הוכחה במחקרים רבים. לכן, לניהול מהירויות הנסיעה במערכת הדרכים מייחסים חשיבות רבה מבחינת שיפור רמת הבטיחות והניידות ברשת. אחד ממרכיבי הניהול הינו שימוש באמצעים הנדסיים להסדרת תשתיות הדרכים ולבניית דרכים חדשות, כאשר לכל סוג דרך תפקיד מוגדר וברור אשר בא לידי ביטוי בתכן הדרך. מאפייני התכן של הדרך אמורים להעביר לנהגים מסר ברור לגבי מהירות המתאימה לנסיעה בדרך זו. יישום גישה זה בתכן דרכים מבטא את התפיסה של "דרכים המסבירות את עצמן".

ע"פ ה"הנחיות לקביעת מהירויות ברשת הדרכים" בישראל (הנחיות, 2010), יש לשאוף ליצירת מערכת דרכים אשר תתאפיין באיזון בין כוונת הרשויות והמתכננים שבנו את הדרכים לבין התנהגות ציבור הנהגים שנוסע בדרכים אלה. האיזון מתקיים כאשר מושגת התאמה בין מהירות היעוד של סוג דרך מסוים (שנקבעה ע"י הרשויות והמתכננים) לבין מהירויות הנסיעה בפועל של הנהגים. חשוב שקטעי הדרכים עם מאפיינים הנדסיים דומים יאפשרו משטר מהירות זהה, וכמו כן, שהמסרים לגבי אפשרויות הנסיעה בקטעי דרכים אלה יהיו ברורים בעיני הנהגים.

ההנחיות (2010) הגדירו את ההיררכיה החדשה של סוגי הדרכים בארץ ואת הגישה החדשה לקביעת מהירויות הנסיעה ברשת הדרכים. עם זאת, קיים צורך בפיתוח כלים הנדסיים שיסייעו ביישום הגישה החדשה - התאמת מאפייני הדרכים למהירויות הייעוד. כלומר, נדרש לבסס את מאפייני הדרכים בארץ שיהפכו אותן לדרכים המסבירות את עצמן בעיני הנהגים ובכך, יתרמו לצמצום הפערים בין מהירויות הייעוד לבין מהירויות הנסיעה בפועל.

מחקרים אמפיריים מראים כי מאפייני התכן משפיעים על מהירויות הנסיעה הנבחרות על-ידי הנהגים. עם זאת, נדרש ידע ומידע מפורט לגבי מאפייני הכביש שיאפשרו להשיג את אותן מהירויות הנסיעה המתאימות לכביש ("מהירות היעוד"). בהקשר זה, נדרש גם ידע לגבי תפיסת הנהגים של דרכים מסוג מסוים, בתנאים המקומיים, המתבטאת במהירות נסיעתם. לכן, מטרת מחקר זה הייתה לחקור את הקשר בין מהירויות הנסיעה ומאפייני הכביש, בתנאי הארץ, על מנת לזהות את מאפייני התשתית המשפיעים על בחירת מהירויות נסיעה מסוימות על-ידי הנהגים. המחקר התמקד בדרכים החד-מסלוליות, כי סוג דרך זה מתאפיין ברמות בטיחות נמוכות יותר לעומת הדרכים הדו-מסלוליות, וכמו כן, מהווה את החלק הארי מרשת הדרכים הלא עירוניות בישראל.

במחקר היו מרכיבים אלה: (א) סיכום ממצאי הספרות לגבי הכלים הקיימים ליצירת דרכים המסבירות את עצמן; (ב) הכנת בסיס הנתונים למחקר; (ג) בחינת מידת ההתאמה בין מהירויות הנסיעה בפועל למהירויות היעוד, בקטעי המחקר; (ד) ביצוע ניתוחים סטטיסטיים לזיהוי מאפייני התשתית שמשפיעים על בחירת מהירויות הנסיעה ע"י הנהגים, בתנאי הארץ, לרבות בחינת נושא העקביות בתכן, תוך כדי שימוש במדדי מהירויות התכן ש"שוחזרו" על סמך מאפייני תשתית קיימים; (ה) בדיקה הנדסית של מאפייני הקטעים עם מהירויות גבוהות ונמוכות.

2. ממצאים עיקריים של המחקר

א. ממצאי הספרות

לפי הניסיון הבינלאומי, בין הכלים הניתנים ליצירת דרכים המסבירות את עצמן ניתן למנות: הגדרת היררכיה נכונה של מערכת הדרכים; הקפדה על עקביות בתכן הדרך; מציאת ביטוי לקשר בין מאפייני הדרכים לבין מהירויות הנסיעה.

תפיסת הדרכים המסבירות את עצמן דורשת הגדרה פונקציונאלית של סוגי הדרכים, כאשר לכל סוג מוגדרת מהירות היעוד אשר מושגת באמצעות מאפייני תכן הולמים. למעשה, מבוצע תכנון מחדש של מערכת הדרכים, על מנת ליצור מצב שבו תפקידי הדרכים ומאפייני התכן יהיו עקביים וברורים יותר לנהגים. ההנחה הנה שמערכת תנועה אחידה וצפויה יותר תחזק את יכולת הנהגים לבחור במהירויות נסיעה מתאימות. כתוצאה מכך, יצטמצמו הקונפליקטים שקשורים לגורם המהירות ולגורמים אחרים, מצב אשר יביא, בסופו של דבר, לירידה במספר התאונות.

בנסיעתו לאורך הדרך מסתמך הנהג על ניסיונו מהנהיגה בדקות הקודמות. כאשר ציפיותיו אינן מתממשות, נוצר קונפליקט בין ציפיותיו לבין הנתונים בשטח, מצב אשר עשוי לגרום לטעויות בהחלטות הנהג ולהביא לתאונות. מאידך, כאשר הכביש מתוכנן בעקביות ובאחידות, הדבר מביא לכך שציפיות הנהג מתממשות ונהיגתו תהיה בעלת פחות שגיאות ומכאן, יותר בטוחה. מהירות התפעול הינה הפרמטר העיקרי בהערכת עקביות של תכן הדרך. בספרות, קיימים מודלים רבים לחיזוי מהירות התפעול בהתבסס על המאפיינים הגיאומטריים, אם כי, רובם נבנו עבור תנאי הנסיעה בעקום. עקביות התכן מוערכת על-פי ההפרשים במהירות התפעול בין שני אלמנטים עוקבים או בין מהירות התפעול ומהירות התכן של אותו האלמנט הגיאומטרי; ככל שהפרשים אלה קטנים יותר, כך העקביות גדלה.

הן לבחינת איכות התכן והן לבחינת השפעתם של מאפייני דרך שונים על בטיחות, משמשות מהירויות הנסיעה בזרימה חופשית (מהירויות התפעול). מהירויות הנסיעה מתאימות גם לשמש כמדד אובייקטיבי למדידת "תפיסת הנהגים" של תנאי דרך שונים. על סמך ממצאי המחקרים שנערכו בעולם ניתן להצביע על השפעתם על מהירויות בפועל של מאפייני דרך שונים, וביניהם: מצב סביבת הדרך; החתך הגיאומטרי; מדדי עקום ואופקי ושיפוע אנכי; קרבת צמתים, מהירות מותרת. טבלה 1.14 בפרק 1 מסכמת את מאפייני הדרך המשפיעים על מהירויות הנסיעה של נהגים, ע"פ המקורות שנסקרו. עם זאת, מערכת קשרים זו טרם הגיעה למצב המאפשר לשמש בסיס מוצק לתכנון, ולכן, קיים צורך במחקרים אמפיריים נוספים שיתרמו להבנתה.

ב. בסיס הנתונים של המחקר

מחקר זה התבסס על שילוב שני בסיסי נתונים: (א) מערכת מידע גיאוגרפית המציגה את מדדי מהירויות הנסיעה ברשת הדרכים שנבנה במחקר בכור, מוריק, גיטלמן (2012); (ב) בסיס נתונים על מאפייני הדרכים של חברת נתיבי ישראל.

מדדי מהירויות הנסיעה חושבו עבור קטעי דרך מוגדרים, על סמך תצפיות המהירות של כלי הרכב שנסעו לאורך כבישי הארץ במשך 6 חודשים, פברואר-יולי 2011. מידע על מאפייני התשתיות התקבל ממערכת ניהול בטיחות (מנ"ב) של חברת נתיבי ישראל; מידע זה נוצר בעקבות סקר דרכים שנערך בשנת 2010. מכיוון שמדדי מהירויות הנסיעה קיימים עבור הקטעים המוגדרים, גם מאפייני הדרך הופקו עבור יחידות ניתוח אלה. עבור כל מאפיין תשתית, לכל יחידת ניתוח חושב הערך המייצג

שלו וכן, מדדים לאפיון פיזור הערכים. בנוסף, על סמך מאפייני תשתית נבחרים חושבו מדדי עקביות התכן, באמצעות "תרגום" ערכי המאפיינים לערכי מהירות התכן. מדדי התשתיות הופקו עבור המאפיינים של רוחב נתיב, רוחב שול, רדיוס אופקי, רדיוס אנכי, שיפוע אורכי, מצב צדי הדרך וצפיפות הצמתים, סה"כ: 54 מאפייני תשתית, לכל קטע מחקר (בתוספת נפח תנועה יומי).

מדד המהירות העיקרי שנבחן במחקר הינו "חריגת המהירות" או ההפרש בין מדד האחוזון ה-85 של מהירויות הנסיעה לבין המהירות המותרת (אשר מבטא גם את ההפרש בין מהירות התפעול ומהירות היעוד בקטע). מדדי המהירות קיימים עבור שש תקופות זמן שונות. בעקבות בחינת הדמיון והשוני בין אורכי הקטעים ופילוגי המהירות, בתקופות זמן שונות, וכן, מתוך שאיפה לבסיס נתונים מרבי, בחינת מערכת הקשרים בין מאפייני הדרך ומהירויות הנסיעה התמקדה בקטעים עם מדדי המהירות בשעות יום-ימי חול. בסיס הנתונים של המחקר כלל 178 קטעי דרכים חד-מסלוליות. סה"כ בכל קטעי המחקר, ממוצע מדד המהירות העיקרי היה $10 \text{ קמ"ש} \pm 12 \text{ קמ"ש}$ (סטית תקן).

ג. קשרים סטטיסטיים בין מאפייני התשתית ומדד המהירות

(1) זיהוי קבוצות הומוגניות של קטעי המחקר על-פי מדד המהירות בוצע בעזרת שיטת CART, תוך כדי שימוש בערכים המוחלטים של מאפייני התשתית. על סמך עץ הסיווג שנבנה (מודל עם 65% של שונות מוסברת), נמצא כי מאפייני התשתית שמשפיעים על חלוקת הקטעים לפי הפרשי המהירות הם: צפיפות הצמתים בקטע, רוחב שול, רדיוס אנכי קמור, רדיוס אנכי קעור, שיפוע לאורך, רוחב נתיב, רדיוס אופקי, מצב צידי הדרך ללא מעקה. כלומר, רוב מאפייני התשתית השפיעו על חלוקת הקטעים לקבוצות ההומוגניות.

לפי מודל זה, רמות מהירות נמוכות במיוחד (האחוזון ה-85 בין 5-30 קמ"ש מתחת למהירות המותרת) נצפו בקטעים עם צפיפות צמתים גבוהה במיוחד (מעל 0.13) ורוחב שול קטן (אומדן ממוצע קטן מ-1.3 מ') וכמו כן, בקטעים עם צפיפות צמתים נמוכה (פחות מ-0.006) אך רוחב שול קטן (אומדן מינימלי עד 0.6 מ') ושיפוע אורך גדול (אומדן מרבי מעל 9.5%).

מאידך, רמות מהירות גבוהות (חריגות של 15-20 קמ"ש מעל המהירות המותרת) נצפו בקטעים עם צפיפות צמתים בינונית וללא בעיות גיאומטריות; בקטעים עם צפיפות צמתים נמוכה ושול צר (אומדן מינימלי עד 0.3 מ'); בקטעים עם צפיפות צמתים נמוכה וללא עקמומיות אופקית, חלקם עם מצב טוב של צידי הדרך ללא מעקה ושול רחב (אומדן מרבי מעל 2.5 מ'). כמו כן, רמות מהירות גבוהות במיוחד (חריגות מעל 20 קמ"ש) נצפו בקטעים עם צפיפות צמתים נמוכה, כאשר הנתיב רחב (אומדן מרבי מעל 3.0 מ') או בקטעים ללא בעיות גיאומטריות ושול רחב (אומדן מרבי מעל 2.5 מ').

(2) לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית לבין מדד המהירות פותחו מודלי רגרסיה רב-משתנית. סה"כ פותחו שלושה מודלים, על סמך הרכבים שונים של מאפייני התשתית שהם: 1- כל מאפייני התשתית (הערכים המוחלטים); 2- מאפייני תשתית נבחרים (הערכים המוחלטים) שהוגדרו בעקבות בחינת קורלציות בין מאפייני התשתית ובחירה "נציג" לכל קבוצת משתנים שנמצאו בקורלציה גבוהה; 3- כל מאפייני התשתית המבוטאים באחוזי פילוג לפי קטגוריות מוגדרות. (המודלים עם 61%-67% של שונות מוסברת). בעקבות בחינת המודלים נמצא כי:

- מדד המהירות עולה עם עליה ברוחב שול ועם עליה בממד מצב צידי הדרך ללא מעקות הבטיחות, כאשר השפעת מאפייני תשתית אלה על מהירות היתה עקבית בכל המודלים שהותאמו במחקר.

- מאידך, מדד המהירות יורד עם עליה בנפח התנועה (ממצא עקבי בכל המודלים) וגם עם עליה בממד צפיפות הצמתים לאורך קטע (ממצא של שני המודלים מתוך שלושה).

- עבור הרדיוס האופקי נמצאה השפעה בשני מודלים אשר מצביעה על אפקט ממתן על מדד המהירות של נוכחות הרדיוס האופקי, בכלל, או של קיום רדיוסים קטנים במיוחד.

- לגבי השיפוע לאורך, בשני המודלים הראשונים עבור מאפיין זה נשמרו שני ערכים אשר למעשה נטרלו אחד את השני מבחינת השפעתם על מדד המהירות. רק במודל השלישי זוהתה השפעה של קטגורית שיפוע אורך גדול במיוחד (8-10%) אשר מזוהה עם אפקט ממתן על המהירות.

- עבור השפעת רוחב נתיב על מהירות לא נתקבלו תוצאות שימושיות כאשר במודל 1 נשמרו שני ערכי המאפיין שנטרלו את השפעתו המעשית על מדד המהירות, בעוד שבמודל 3 התקבל שכל ערכי המאפיין מזוהים עם עליה במהירות.

- לגבי הרדיוסים האנכיים, במודל 1 לא נמצאה השפעה מעשית על מדד המהירות (מקדמי המודל היו קטנים מאוד), כאשר מאפיינים אלה לא נכללו בין המסבירים במודל 2. במודל 3 נמצא אפקט ממתן על מדד המהירות של ערכים מסוימים של הרדיוסים האנכיים (כגון: רדיוס אנכי קמור בטווח 2500-4000 מ' ורדיוס אנכי קעור בטווח עד 1500 מ'). עם זאת, סה"כ השפעת הרדיוסים האנכיים על המהירות מצטיירת כזניחה.

בנוסף, בבחינה המשולבת של השפעת מאפייני התשתית נמצא כי, בנפחי תנועה נמוכים יותר (כגון: עד 10,0 אלף כלי רכב ביממה), על מדד המהירות קיימת השפעה מעשית של רוחב שול, מצב צידי הדרך ללא מעקה, נוכחות הצמתים בקטע. כמו כן, השפעת מאפיינים אלה על חריגת המהירות מהותית יותר בנפחי תנועה נמוכים (כגון: 3,0 אלף כלי רכב ביממה). עם זאת, השפעת מאפיינים אלה נעלמת כאשר מדובר בקטעים עם נוכחות ניכרת של העקום האופקי כגון: ב-50% או יותר מאורך הקטע.

(3) מהירויות התכן לקטעי המחקר שוחזרו על סמך ארבעת מאפייני התשתית: רוחב נתיב, רוחב שול, עקום אופקי ושיפוע אורכי, כאשר חושבו הן אומדני מהירות התכן לקטע כולו (ממוצע, סטית תקן, ערך מינימלי, ערך מרבי של ערכי מהירויות התכן) והן מדדי השתנות של מהירות התכן לאורך קטע. הקבוצה האחרונה של המדדים כוללת את אחוזי המקרים לפי שלוש קטגוריות מוגדרות של הפרשי מהירות התכן (עד 10 קמ"ש, 10-20 קמ"ש, מעל 20 קמ"ש, בהתאם להגדרה של עקביות תכן טובה, בינונית ונמוכה, בספרות המקצועית), אשר הוערכו בעקבות בחינת הפרשים של מהירויות התכן במקטעים קצרים עוקבים בתוך כל קטע. כתוצאה, עבור כל קטע מחקר, התקבלו סה"כ 28 מדדים של מהירויות התכן.

בחינה מוקדמת של ממוצעי מהירויות התכן בקטעי המחקר הראתה שוני ניכר בערכים שהתקבלו על סמך מאפייני תשתית שונים. בין היתר, הערכים שהתקבלו לפי רוחב נתיב ורוחב שול היו נמוכים יותר לעומת אותם האומדנים לפי רדיוס אופקי ושיפוע לאורך. כמו כן, מבחינת הפרשי מהירויות התכן

בקטעי המחקר, ניכר פיזור רחב יותר של הערכים שהתקבלו על סמך רוחב נתיב ורוחב שול לעומת מאפייני הרדיוס והשיפוע.

סיווג קטעי המחקר בשיטת CART על-פי ערכי מדד המהירות בפועל - האחוזון ה-85 של מהירויות הנסיעה, ועל סמך מדדי מהירויות התכן, הראה כי חלק ניכר ממדדי מהירויות התכן השפיעו על חלוקת הקטעים לקבוצות ההומוגניות (מודל זה עם 68% שונות מוסברת). בין היתר נמצא כי רמות נמוכות של מהירויות הנסיעה בפועל (האחוזון ה-85 עד 70 קמ"ש) נצפו בקטעים עם ממוצע נמוך של מהירות התכן ופיזור גדול של אומדני מהירות התכן לאורך קטע, לפי המאפיינים של רוחב נתיב ורדיוס אופקי, דהיינו, בקטעים עם עקמומיות ניכרת והשתנות גדולה בחתך הרוחבי לאורך קטע.

מאידך, מהירויות נסיעה גבוהות (האחוזון ה-85 של 100 קמ"ש או יותר) נצפו בקטעים עם ממוצע גבוה של מהירויות התכן לפי הרדיוס האופקי, ואחוזים נמוכים של מקרים עם הפרשים ניכרים במהירויות התכן או אחוזים גבוהים של מקרים עם הפרשים קטנים במהירויות התכן, במקטעים העוקבים, לפי רוחב נתיב או רוחב שול. כלומר, קטעים ישרים יותר, עם מיעוט עקומים אופקיים, אשר מתאפיינים גם במראה קבוע יותר של החתך לרוחב, מזמינים מהירויות נסיעה גבוהות, אשר עולות ב-20-30 קמ"ש מעל המהירות המותרת.

בהמשך, סיווג רב-משתני של קטעי המחקר בשיטת *cluster analysis* הצביע על חמש קבוצות הומוגניות (קלסטרים) של הקטעים לפי הרמות השונות של מהירויות התכן ורמת השתנות של מאפייני הקטעים, כאשר קבוצות 1-2 מתאפיינות ברמות תכן נמוכות יותר ו/או בהשתנות ניכרת של רוב מאפייני התשתית לאורך קטע, בעוד שקבוצות 3-5 מזוהות עם רמות תכן גבוהות יותר ו/או השתנות נמוכה יותר של מאפייני התשתית לאורך קטע.

לבסוף, נערכה בחינת ההשפעה של מהירויות התכן על מהירויות הנסיעה בפועל, ע"י התאמה חוזרת של המודל הרב-פרמטרי לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית לבין מדד המהירות העיקרי, כאשר לרשימת מאפייני התשתית נוסף גם מדד של מהירות תכן - מספר הקלסטר. לפי המודל שהתקבל (עם שונות מוסברת 69%), קבוצות קטעים 3-5 מזוהות עם עליה במהירויות הנסיעה בפועל, לעומת קבוצה 1, כאשר קבוצה 2 מזוהה עם ירידה במהירות. כלומר, אופן ההשפעה שזוהה במודל המסביר תואם את המשמעויות של קבוצות הקטעים שהתקבלו קודם.

מכאן, קבוצות הקטעים המתאפיינות ברמות תכן גבוהות יותר ו/או השתנות נמוכה יותר של מאפייני התשתית לאורך קטע, מזוהות עם עליה במהירויות הנסיעה בפועל, כאשר קבוצות הקטעים המתאפיינות ברמות תכן נמוכות יותר ו/או בהשתנות ניכרת של רוב מאפייני התשתית לאורך קטע, מזוהות עם ירידה במהירות.

סה"כ, המחקר הצביע על התאמה ניכרת בין תכן טוב ומהירויות נסיעה גבוהות, ולהפך, כאשר בין הממתנים העיקריים של מהירויות הנסיעה בפועל נמצאו האילוצים הגיאומטריים כגון: נוכחות של רדיוסים אופקיים קטנים או שיפועים אורכיים גבוהים. בנוסף, על מהירויות הנסיעה בפועל ישנה השפעה עקבית של נפח התנועה בדרך, צפיפות הצמתים, רוחב שול ומצב צידי הדרך ללא מעקות.

ד. בדיקה הנדסית של קטעי הדרכים עם מהירויות גבוהות ונמוכות

סיור הנדסי וירטואלי נערך בקטעי המחקר אשר מתאפיינים בחריגות נמוכות וגבוהות במיוחד של מהירויות הנסיעה בפועל. מהתבוננות במאפייני עשרת קטעי הדרך בעלי המהירות הנמוכה עלה כי להפחתה במהירויות הנסיעה תרמו מאפיינים אלה: שכיחות גבוהה של צמתים משניים לאורך קטע, שוליים צרים, פיתולים רבים ברדיוסים קטנים, שיפוע אורכי גבוה, קיום מעקות בטיחות מעבר לשול צר, ורוחב צר של אזור המפלט לרכב.

מאידך, מבחינת מאפייני עשרת הקטעים בעלי המהירות הגבוהה נמצא כי למהירויות נסיעה גבוהות תורמים המאפיינים הבאים: נפחי תנועה נמוכים, מיעוט צמתים משניים, שוליים רחבים, מעט פיתולים, מעט שיפועים לאורך, מעט מעקות בטיחות בצידי הדרך (כי אין בהם צורך), מעקות המותקנים מעבר לשול רחב, ורוחב ניכר של אזור המפלט.

ממצאים אלו עולים בקנה אחד עם ממצאי הספרות ועם ההיגיון הנדסי. עם זאת, במדגם הקטעים שנבחנו לא נמצאה השפעה של רוחב נתיב, כאשר על-פי הספרות, רוחב נתיב צר מתקשר עם מהירות נמוכה, ורוחב נתיב רחב עם מהירות גבוהה.

ה. בחינת הקשר בין מהירות ובטיחות, בקטעי המחקר

המחקר הצביע על מאפייני התשתית אשר תורמים להורדת מהירויות הנסיעה בפועל בקטעי הדרכים החד-מסלוליות, בישראל, כאשר ערכים אלה קשורים להצנעת מאפייני החתך לרוחב, הוספת עקמומיות לתוואי הכביש או ריבוי צמתים. עם זאת, שינויים כאלה במאפייני התשתית מזוהים עם ירידה ברמת התכן של הכביש, כאשר קיים חשש שהם עשויים להביא לעליה בתאונות הדרכים. בשל המודעת לסתירה האפשרית בהשפעת מאפייני התשתית על מהירויות הנסיעה בפועל לעומת רמת הבטיחות של קטעי הדרכים, נערכה בחינת הקשר בין רמת המהירות ורמת הבטיחות בקטעי המחקר. בתור מדד הבטיחות שימש שיעור תאונות הדרכים ליחידת נסועה אשר מוערך כסך התאונות בשנים 2010-2011 חלקי אורך קטע ונפח התנועה בקטע.

נמצא כי קבוצת הקטעים עם המהירויות הנמוכות (דהיינו, עם חריגה שלילית של האחוזון ה-85 של המהירויות בפועל לעומת המהירות המותרת) מזוהה עם שיעור גבוה יותר של סך התאונות עם נפגעים אך עם שיעור נמוך יותר של התאונות החמורות, לעומת קבוצת הקטעים עם המהירויות הגבוהות (הקטעים עם חריגה חיובית ניכרת, מעל 20 קמ"ש, של האחוזון ה-85 לעומת המהירות המותרת). כמו כן, בקבוצת הקטעים עם המהירויות הנמוכות נמצא קשר ישיר בין עליה במהירות הנסיעה לבין שיעור התאונות, אשר היה גם חזק יותר בקרב התאונות החמורות. כלומר, מניתוח נתוני התאונות בקטעי המחקר התקבלה עדות מסוימת לכך שמהירויות גבוהות יותר מזוהות עם עליה בתאונות החמורות ולכן, יש מקום לפעול לשינוי מאפייני התשתית ליצירת שינוי במהירות.

3. המלצות המחקר

המחקר הצביע על מאפייני התשתית אשר קשורים להורדת מהירויות הנסיעה בקטעי הדרכים החד-מסלוליות בארץ. מאפייני תשתית כאלה עשויים להועיל להשגת התאמה טובה בין מהירויות הנסיעה והמהירות המותרת, בסוג דרך זה, ובכך לתרום ליצירת דרכים חד-מסלוליות המסבירות את עצמן. מאפייני תשתית אלה הם:

* רוחב שול ורוחב אזור המפלט בצד הדרך, כאשר ערכים נמוכים יותר של מאפיינים אלה מזוהים עם ירידה במהירות;

* צפיפות צמתים לאורך קטע, כאשר עליה במדד זה מזוהה עם ירידה במהירות;

* רדיוס אופקי ושיפוע לאורך, כאשר נוכחות גבוהה יותר של מאפיינים אלה לאורך קטע מזוהה עם אפקט ממתן על המהירות.

כמו כן, השפעה חזקה יותר על מהירויות הנסיעה של הצרת שוליים, הקטנת אזור המפלט או צפיפות צמתים גבוהה יותר, תורגש יותר בקטעי דרך עם נפחי תנועה לא גבוהים.

בעקבות ניתוח מאפייני התשתית בפועל, יש לצפות כי בדרכים החד-מסלוליות בישראל, מהירויות נסיעה נמוכות יותר - בהתאם למהירות המותרת, יהיו בקטעים המזוהים עם המאפיינים הבאים:

- צפיפות צמתים ניכרת, כאשר הגישות המשניות מהוות כ-20% מאורך קטע;
- רוחב שול צר, כ-1.3 מ', בממוצע;
- עקמומיות אופקית ניכרת, כאשר העקומים האופקיים (עם רדיוס עד 400 מ') מהווים כשליש מאורך קטע;
- נוכחות ניכרת של שיפועים אורכיים, כאשר שיפוע אורכי (מעל 3%) מהווה כ-40% מאורך קטע;
- נוכחות ניכרת של מעקות הבטיחות בצדי הדרך, כאשר המעקות מותקנים בכ-60% מאורך קטע;
- מיקום המעקות בקרבת המיסעה, כאשר המעקות אמורים להימצא בתחום עד 2 מ' מקצה הנתיב;
- במקרה ללא המעקות המותקנים בצד הדרך, קיום אזור מפלט צר יחסית, ברוחב עד 3 מ'.

את האומדנים הללו של מאפייני התשתית מומלץ לקחת בחשבון כאשר שוקלים ליצור הצרה ויזואלית ו/או הפרעה לרצף הנסיעה בקטע כביש, על מנת להוריד את מהירויות הנסיעה בפועל.

המחקר מצא עדויות לכך שקטעי הדרכים החד-מסלוליות עם מהירויות גבוהות יותר מזוהות עם עליה בתאונות החמורות לעומת הקטעים עם המהירויות הנמוכות, כאשר בקבוצת הקטעים עם המהירויות הנמוכות נמצא קשר ישיר בין עליה במהירויות הנסיעה לבין שיעורי התאונות, אשר היה גם חזק יותר בקרב התאונות החמורות. מכאן, יש מקום לביצוע שינויים במאפייני התשתית כדי ליצור שינוי במהירות אשר יתרום גם לשיפור בטיחותם של קטעי הכבישים.

מאפייני הדרכים המבטיחים ביותר מבחינת פיתוח כלים המקדמים את הגישה של "דרכים המסבירות את עצמן", בדרכים החד-מסלוליות בארץ, הם רוחב שול, רוחב אזור המפלט בצדי הדרך, נוכחות מעקות הבטיחות בקרבת המיסעה, צפיפות הגישות המשניות לאורך קטע. הצרת שוליים, הצנעת אזור המפלט, קירוב מעקות לקצה המיסעה, גידול בגישות המשניות לאורך קטע יביאו להורדת מהירויות הנסיעה בקטע ולשיפור בטיחותו.

בנוסף, לשיפור רמת הבטיחות של קטע דרך חד-מסלולית יש ליישם אמצעים למניעת תאונות חזית-חזית, כגון: פס הרעדה לאורך קו הפרדה האמצעי או התקנת מעקות הבטיחות במרכז הכביש.

אמצעים אלה לא נבחנו במחקר הנוכחי אך, לפי הספרות המקצועית והניסיון המצטבר בתחום, הם הוכיחו את יעילותם לצמצום התאונות בדרכים החד-מסלוליות.

סוגי מאפייני התשתית שנמצאו במחקר זה כמשפיעים על מהירויות הנסיעה בדרכים החד-מסלוליות וערכיהם המזוהים עם מהירויות הנסיעה בהתאם למהירות המותרת, צריכים להילקח בחשבון ביצירת כלים הנדסיים ליישום המדיניות החדשה של קביעת המהירויות ברשת הדרכים בארץ, לפי ההנחיות (2010). כמו כן, יש מקום להתייחס לממצאי מחקר זה כאשר באים לבחון את דרישות ההנחיות הקיימות לתכן הדרכים החד-מסלוליות בארץ, בהקשר ליצירת התאמה טובה יותר בין מהירויות הנסיעה ומהירויות היעוד, הן בכבישים החדשים והן בכבישים הקיימים המיועדים לשדרוג.

תוכן עניינים

12.....	1. מבוא וסקר ספרות
12.....	1.1. רקע למחקר
12.....	1.1.1. מהירות כגורם סיכון
12.....	1.1.2. תפיסת "דרכים המסבירות את עצמן"
15.....	1.1.3. הנחיות חדשות לקביעת מהירויות בישראל
17.....	1.1.4. הצורך להתמקד בדרכים החד-מסלוליות
19.....	1.2. נושא המחקר
20.....	1.3. סקר ספרות: כלים קיימים ליצירת דרכים המסבירות את עצמן
20.....	1.3.1. הגדרת סוגי דרכים במערכת
22.....	1.3.2. עקביות בתכן הדרך
24.....	1.3.3. הקשר בין מאפייני הדרכים לבין מהירויות הנסיעה
34.....	1.3.4. סיכום
37.....	2. הכנת בסיס הנתונים למחקר
37.....	2.1. מקורות המידע
37.....	2.2. מאפייני הדרך המועמדים למסבירים של מהירויות הנסיעה
39.....	2.3. הגדרת יחידות ניתוח
39.....	2.4. הגדרת מדדי תשתית לבחינה במחקר
43.....	2.5. בסיס הנתונים שהוכן למחקר
47.....	3. בחינת התאמה בין מהירויות התפעול ומהירויות היעוד
52.....	4. הניתוחים הסטטיסטיים לזיהוי מאפייני תשתית המשפיעים על מהירויות הנסיעה
52.....	4.1. כללי
53.....	4.2. זיהוי קבוצות הומוגניות של קטעי המחקר על-פי מדד המהירות
58.....	4.3. פיתוח מודלים רב-פרמטריים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית לבין מדד המהירות
62.....	4.3.1. הדגמת הקשר בין מאפייני התשתית לבין מדד המהירות, על סמך מודל 2
67.....	4.4. זיהוי קבוצות הומוגניות של קטעי המחקר לפי מהירויות תכן משוחזרות
68.....	4.4.1. בחינת התנהגות של אומדני מהירויות התכן בקטעי המחקר
71.....	4.4.2. בחינת השפעה של מדדי מהירויות התכן על מהירויות הנסיעה בפועל
74.....	4.4.3. זיהוי קבוצות קטעי המחקר עם התנהגות דומה של מדדי מהירויות התכן
78.....	4.5. בחינת השפעה של מהירויות התכן על מהירויות הנסיעה בפועל
80.....	5. ממצאים מבדיקה הנדסית של קטעי המחקר עם מהירויות גבוהות ונמוכות
80.....	5.1. כללי
81.....	5.2. מאפייני קטעי דרך בעלי המהירות הנמוכה
85.....	5.3. מאפייני קטעי דרך בעלי המהירות הגבוהה
90.....	5.4. סיכום
91.....	6. סיכום ומסקנות
91.....	6.1. כללי
92.....	6.2. ממצאים עיקריים של המחקר
92.....	6.2.1. ממצאי הספרות

92.....	6.2.2. בסיס הנתונים של המחקר
93.....	6.2.3. קשרים סטטיסטיים בין מאפייני התשתית ומדד המהירות
96.....	6.2.4. בדיקה הנדסית של קטעי הדרכים עם מהירויות גבוהות ונמוכות
96.....	6.3. דיון ומסקנות
99.....	6.4. בחינת הקשר בין המהירות והבטיחות, בקטעי המחקר
104.....	6.5. המלצות המחקר
106.....	מראי מקום
109.....	נספח א': רשימת מאפייני התשתית שנבחנו במחקר
110.....	נספח ב': מאפייני קבוצות הקטעים שזוהו בניתוח מהירויות התכן
112.....	נספח ג'. מדדים סטטיסטיים של מאפייני התשתית בקבוצות קטעים עם מהירויות גבוהות ונמוכות

1. מבוא וסקר ספרות

1.1. רקע למחקר

1.1.1. מהירות כגורם סיכון

השפעת המהירות כגורם מכריע הן בהתרחשות התאונות והן ברמת חומרתן נבחנה במחקרים רבים (Shinar, 1998; Lynam and Hummel, 2002; OECD, 2006; Aarts and Van Schagen, 2006).

ממחקרים אלו עולה כי הבנות היסוד לתיאור הקשר בין מהירויות הנסיעה והבטיחות הן:

- מהירויות נסיעה גבוהות מתקשרות ישירות עם חומרת הפגיעה ועם ההסתברות להיות מעורב בתאונה.
- מהירות מופרזת מהווה גורם שניוני לתאונות רבות שהגורם הישיר שלהן שונה.
- פיזור גדול במהירויות אף הוא גורם לתאונות.

לגבי השפעת גורם המהירות על התרחשות התאונות, OECD (2006) מציג נימוקים כלהלן: המהירויות הגבוהות מקצרות את הזמן שנוטר לנהג לתגובה (הנדרש לעיבוד מידע, החלטה וביצוע פעולה) עקב סיבות אלה: כי מרחק נסיעת הרכב בפרק זמן התגובה עולה עם מהירות גבוהה יותר; כי מרחק הבלימה עולה פרופורציונאלית לריבוע גודל המהירות; כי אפשרות למניעת ההתנגשות יורדת ככל שמהירות עולה.

מהירות נחשבת כיום לאחד מגורמי הסיכון העיקריים בתנועה (Wegman & Aarts, 2006; NCHRP Report 500, 2009). ע"פ הערכות ECMT/OECD¹, מהירות מופרזת (excessive speed) או מהירות שאינה הולמת את תנאי הדרך והתנועה (inappropriate speed) הינה בעיית הבטיחות החריפה ביותר במדינות רבות, אשר גורמת, בממוצע, לשליש מהתאונות הקטלניות ופועלת כגורם מחמיר ברוב התאונות. עם זאת, קיים קושי בהגדרת תרומתה של מהירות (גבוהה מן המותר או אינה הולמת) בהתרחשות של תאונה מסוימת וכתוצאה מכך, יש תת-דיווח על גורם מהירות ברישומי התאונות ע"י המשטרה (OECD, 2006).

1.1.2. תפיסת "דרכים המסבירות את עצמן"

כדי להפחית את מהירויות הנסיעה הגבוהות נדרשת מדיניות של ניהול מהירויות הנסיעה. ניהול מהירויות הנסיעה כולל מגוון פעילויות ואמצעים שמכוונים להשגת רמת מהירות רצויה, בכל מערכת הדרכים. אחד ממרכיבי הניהול הוא שימוש באמצעים הנדסיים להסדרת תשתיות הדרכים ולבניית דרכים חדשות, כאשר לכל סוג דרך תפקיד מוגדר וברור אשר בא לידי ביטוי בתכן הדרך. אופן סלילה ומאפייני התכן של הדרכים אמורים להעביר לנהגים מסר ברור לגבי מהירויות הנסיעה המתאימות.

בעשור האחרון, מספר עולה של מדינות מחפש גישות חדשות להגדרת סוגי דרכים כבסיס ליצירת מערכת דרכים ה"מסבירות את עצמן" (self-explaining roads). תחילת תהליך זה רואים במחקרים משנות ה-60 של המאה הקודמת אשר ייחסו תפקיד משמעותי לראיה צידית של הנהג (peripheral vision) בהערכת מהירויות הנסיעה (כגון: Salvatore, 1967). בשנות ה-60 וה-70, קבוצת חוקרים

¹ OECD – Organization for Economic Co-operation and Development
ECMT – European Conference of Ministers of Transport

משוודיה פיתחה הנחיות לתכנון עירוני המכוון לבטיחות - SCARF guidelines, אשר המליצו על יישום הסדרי תנועה הקלים להבנה ע"י הנהגים. מאוחר יותר, התפתחו תפיסות כגון: "Road readability" (1987, Mazet, Dubois and Fleury), "Self-explaining roads" (Theeuwes and Godthelp, 1995), אשר הדגישו חשיבות של מאפייני התכן שסייעו לנהג בבחירת מהירות נסיעה הולמת. בכל הגישות שהוצעו, הודגש הצורך ביצירת מערכת דרכים על סמך עקרונות תכן אחידים ועקביים, אשר יביאו לצמצום השונויות בתכן הדרכים הקיימות.

התקדמות נוספת של תפיסת ה"דרכים המסבירות את עצמן" קשורה להתפתחות האסטרטגיה של בטיחות בת-קיימא אשר נולדה בהולנד בתחילת שנות ה-90 ושהייתה מכוונת למניעה מקדימה של מצבי הסיכון בדרך (OECD, 2006). הנחת היסוד של תפיסת הבטיחות בת-הקיימא הינה כי הגורם האנושי מעורב ברוב התאונות ולכן, במערכת התחבורה יש ליצור תנאים כאלה אשר מותאמים ליכולות ולמגבלות של המשתמשים בדרך ובנוסף, מצמצמים את הסיכוי לטעויות. מכאן, על תשתית הדרכים להיות מותאמת למגבלות הגורם האנושי (דרישה זו מושגת באמצעות תכנון הולם); על כלי הרכב להיות מצוידים באופן אשר יקל על משימות הנהיגה וכן יספק הגנה טובה בעת התרחשות התאונות. כמו כן, יש לספק למשתמשי הדרך את כל המידע והידע הדרושים למשימות השימוש בדרך וכמו כן, לפעול למניעת התנהגותם המסוכנת, לפי הצורך.

חמשת העקרונות המבטאים את מהותה של תפיסת הבטיחות בת-הקיימא מוצגים בטבלה 1.1. בין היתר, עקרון ההתאמה לציפיות (predictability) שואף למניעת אי-וודאויות אצל משתמשי הדרך מבחינת ההתנהגות הצפויה בדרך מסוימת. מניחים שתכן דרך שמותאם לציפיות מונע תמרונים מסוכנים בתנועה הודות לוודאות הקיימת אצל הנהג לגבי ההתנהגות הצפויה ממנו והתנהגות צפויה של נהגים אחרים. תנאי זה מושג באמצעות אפיון עקבי ואחיד של דרכים ששייכות לאותו הסוג המוגדר.

עקרון ההתאמה לציפיות מבוסס על יצירת תכן דרך מזוהה (recognizable road design). כלומר, מאפייני הדרך צריכים להעביר לנהג מסר לגבי סוג דרך בו הוא נוסע, איזה סוג התנהגות (כולל מהירות הנסיעה) צפוי ממנו ומנהגים אחרים ואילו סוגי משתמשי הדרך צפויים בדרך זו.

טבלה 1.1. עקרונות הבטיחות בת-הקיימא. מקור: Wegman & Aarts (2006)

Sustainable Safety Principle	Description
Functionality of roads	Mono-functionality of roads as either through roads, distributor roads, or access roads in a hierarchically structured road network
Homogeneity of mass and/or speed and direction	Equality of speed, direction, and mass at moderate and high speeds
Forgivingness of the environment and of road users	Injury limitation through a forgiving road environment and anticipation of road user behaviour
Predictability of road course and road user behaviour by a recognizable road design	Road environment and road user behaviour that support road user expectations through consistency and continuity of road design
State awareness by the road user	Ability to assess one's capacity to handle the driving task

תפיסת בטיחות בת-קיימא מושתתת על עקרון רציונליזציה של מערכת הדרכים והתאמתן ליכולות של משתמשי הדרך. במסגרת מדיניות זו מבוצעת הגדרה פונקציונאלית של סוגי הדרכים, כאשר לכל סוג מוגדר הרכב של משתמשי הדרך ומהירות יעד אשר מושגת באמצעות מאפייני תכן הולמים. למעשה,

מבוצע תכנון מחדש של מערכת הדרכים, על מנת ליצור מצב שבו תפקידי הדרכים ומאפייני התכן יהיו עקביים וברורים יותר לנהגים. ההנחה הנה שמערכת תנועה אחידה וצפויה יותר תחזק את יכולת הנהגים לבחור במהירויות נסיעה מתאימות. כתוצאה מכך, יצטמצמו הקונפליקטים שקשורים לגורם המהירות ולגורמים אחרים, מצב אשר יביא בסופו של דבר לירידה בתאונות.

בהתאם לניסיון הבינלאומי, סיווג הדרכים מתבסס על שלושה תפקידים עיקריים שהם: העברת התנועה (flow), פיזור התנועה (distribution) וגישה (access), כאשר בכל סוג של דרך קיים שילוב שונה בחשיבות תפקידים אלו. לדוגמא, התפקיד העיקרי של דרך מהירה הינו העברת התנועה, ואילו התפקיד העיקרי של דרך מקומית הינו הבטחת גישה. סיווג טיפוסי של דרכים, בהתאם לתפקידיהן ומיקום (שטח עירוני/בין-עירוני) מוצג בטבלה 1.2. המטרה העיקרית של סיווג זה הינה שהדרכים "יסבירו את עצמן" בהתאם לתפקידיהן. לכן, לכל אחד מסוגי הדרכים שבטבלה 1.2 נדרשת הגדרה של החתך הטיפוסי לקטעים, צורות הצמתים, אופני הבקרה והמהירויות המותרות. בנוסף, המערך האנכי והאופקי של הדרך צריך להתאים לתפקידה ולמהירויות נסיעה רצויות (OECD, 2006).

טבלה 1.2. סוגי דרכים ותפקידיהן. מקור: OECD (2006).

סביבה	סוג דרך (באנגלית)*	סוג דרך (בעברית)	פונקציות עיקריות
שטח לא עירוני	Motorway (interurban)	דרך מהירה (לא עירונית)	זרימה
	Main highways (principal inter urban roads)	(דרכים בין-עירוניות עיקריות)	זרימה
	Rural main roads	דרך ראשית בין-עירונית	זרימה/פיזור
	Rural minor roads	דרכים מאספות ומקומיות בין-עירוניות	גישה
שטח עירוני	Motorways (urban)	דרך מהירה (עירונית)	זרימה
	Urban arterial and main roads Urban residential roads	עורק תנועה ודרך ראשית עירונית רחוב מאסף מקומי עירוני	זרימה/פיזור גישה

*מוצג עקב פערים קיימים לעומת סוגי הדרכים בישראל

על-פי הסבר פסיכולוגי של Weller et al (2008), התנהגות הנהג אינה מושפעת באופן ישיר ממצב הדרך אלא מ"תפיסה" (מושג סובייקטיבי) של מצב הדרך על-ידי הנהג. האופן שבו נתפס מצב הדרך תלוי לא רק בגיאומטריית הדרך אלא גם בגורמים נוספים וביניהם רמזים או תכונות הסביבה ה"מזמינות" את אופן השימוש בה. מאפייני הדרך מעבירים לנהג מסר שקטע הדרך ניתן לנסיעה בטווח מסוים של מהירויות ותשומת לב. טווח זה נקרא מהירות ותשומת לב "מועדפות". בנוסף לגישת התכונות ה"מזמינות" קיימות תיאוריות לימוד, המבוססות על תגובות למצבים, אשר מסבירות כיצד המאפיינים הסביבתיים מעוררים טווח של התנהגויות מסוימות. במקרה זה מאפייני הדרך או הסביבה, משמשים כ-"גירוי הבחנה". "גירוי הבחנה" זה נותן לנהג רמז איזה תוצאה תתקבל מהתנהגותו, כאשר ידע מוקדם וצפייה לתוצאות התנהגות מסוימות, יביאו להתנהגות בפועל. תמרור דרך מהווה דוגמא ל-"גירוי הבחנה". עם זאת, רמז בודד עשוי להיות לא יעיל, כי עקב סינונים שונים, הוא עשוי לא להיתפס ע"י הנהג. לכן, עדיף שמצב הדרך והסביבה יכללו ריבוי של "גירוי הבחנה". מכאן, ניתן לשפר באופן משמעותי את התנהגות הנהגים והבטיחות בדרכים ע"י רמזים ו"גירוי הבחנה" שייכללו בתכן ואבזור הדרך. יישום גישה זו אינו מוגבל לאתרים מסוימים, אלא יכול לסייע בעיצוב התנהגותי שמתאים לסוגי דרך שונים, דבר המהווה מטרה בתפיסת "דרכים המסבירות את עצמן".

1.1.3. הנחיות חדשות לקביעת מהירויות בישראל

גם על-פי התובנות שהתגבשו לאחרונה בישראל ושבאו לידי ביטוי ב"הנחיות לקביעת מהירויות ברשת הדרכים" (הנחיות, 2010), ניהול מהירויות הנסיעה ברשת הדרכים צריך להתבסס על עיקרון מערכתי אחד. מערכת התחבורה בנויה באופן היררכי ובה קיים מדרג של דרכים שונות: בקצהו האחד - הדרכים המהירות והעורקיות, המיועדות להוביל נוסעים ומטענים למרחקים גדולים יחסית, ובקצה השני - הדרכים המקומיות, אשר עיקר תפקידן לאפשר נגישות למקומות יישוב. מערכת התחבורה צריכה לאפשר ניידות מרבית תוך כדי שמירה על בטיחות משתמשיה ואיכות הסביבה. לכן, קיימת חשיבות רבה להגדרה ברורה של תפקידי הדרכים אשר תבוא לידי ביטוי במאפייני הדרך ובמהירויות שמתאימות לנסיעה בדרכים אלה.

במערכת התחבורה פועלים במשולב מערכת התשתית והמשתמשים בדרך. המערכת תתפקד כראוי כאשר מרכיביה מתואמים ומשדרים למשתמש מסרים ברורים וחד-משמעיים. מכאן, חשוב שקטעי הדרכים עם מאפיינים הנדסיים דומים יאפשרו משטר מהירות זהה, וכמו כן, שהמסרים לגבי אפשרויות הנסיעה בקטעי דרכים אלה יהיו ברורים בעיני הנהגים.

המטרת המרכזית של ההנחיות (2010) הינה ביצירת מערכת דרכים אשר תתאפיין באיזון בין כוונת הרשויות והמתכננים שבנו את הדרכים לבין התנהגות ציבור הנהגים שנוסע בדרכים אלה. האיזון מתקיים כאשר מושגת התאמה בין מהירות היעוד של סוג דרך מסוים (שנקבעה ע"י הרשויות והמתכננים) לבין מהירויות הנסיעה בפועל של הנהגים.

במונחים של מהירות, המטרה של תהליך התכנון הינה להגיע לאיזון בין שלושה סוגי מהירות שהם: מהירות תכן, מהירות מותרת ומהירות תפעול, כאשר ערכים של סוגי מהירות אלה מתבססים על קביעת מהירות ייעוד לסוג דרך מסוים. לפי הנחיות (2010):

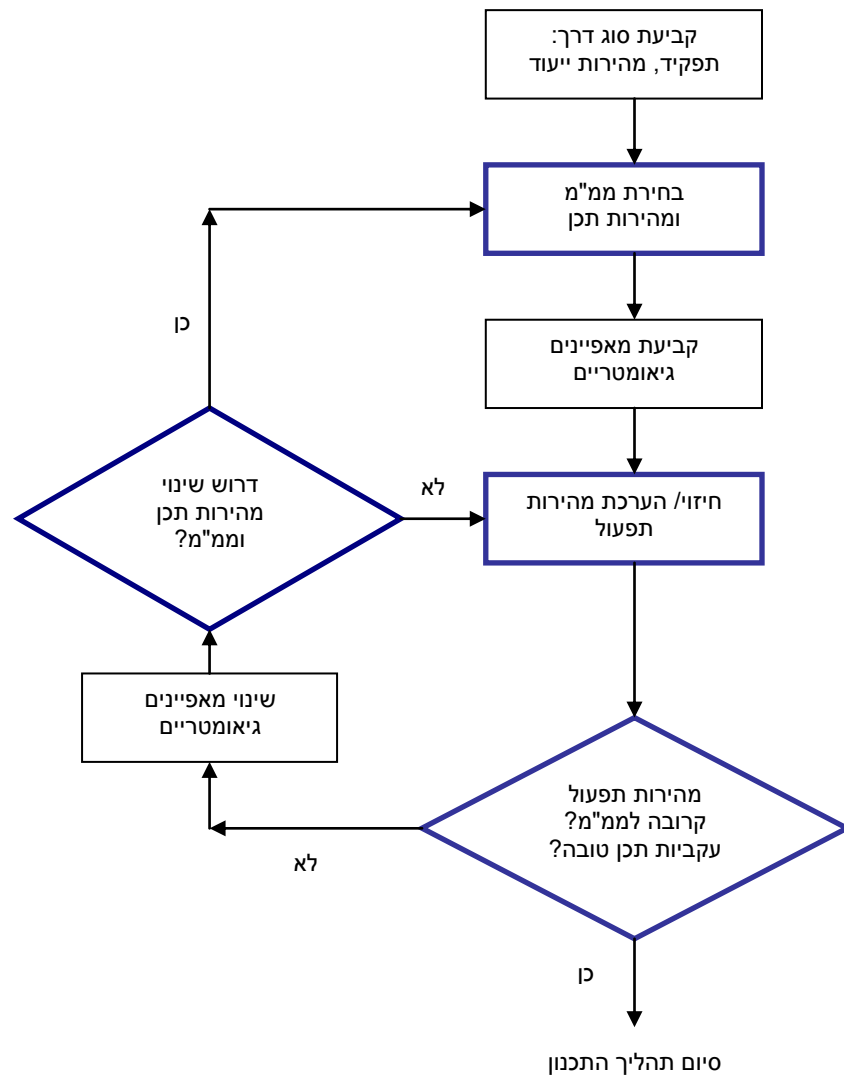
* מהירות הייעוד (target speed), בראיה המערכתית, הינה מהירות נסיעה רצויה בסוג דרך מוגדר. בעיני המשתמש בדרך זוהי מהירות שמתאימה לנסיעה בדרך מסוימת, אשר תכן הדרך וסביבתה אמורים לשדר. השאיפה הינה שרוב כלי הרכב בסוג דרך זה ייסעו במהירות שקרובה למהירות הייעוד.

* המהירות המרבית המותרת (ממ"מ) הינה המהירות המרבית שבה מותר לנהגים לנסוע בדרך זו, בתנאי תנועה ומזג אוויר רגילים.

* מהירות התכן (design speed) הינה המהירות הנקבעת לצורך התכן הגיאומטרי של הדרך: קביעת המאפיינים הגיאומטריים המשפיעים על תפעול כלי-רכב במרב הבטיחות.

* מהירות התפעול (operating speed) הינה המהירות בה נצפים הנהגים הנוסעים בתנאי זרימה חופשית. בקטעים ישירים ומישוריים, מהירות התפעול הינה מהירות נסיעה חופשית שמשמשת לבחינת רמת ציות הנהגים למהירות המותרת (ממ"מ). בקטעים אחרים (עקומים, שיפועים), מהירות התפעול משמשת כמדד כמותי להערכת עקביות תכן הדרך.

איור 1.1 מתאר קשרי גומלין בין סוגי המהירות במסגרת תהליך התכנון. בדרך לא עירונית, תהליך התכנון מתבצע באופן הבא:



איור 1.1. קשרי גומלין בין סוגי מהירות בתהליך התכנון של דרך לא עירונית. מקור: הנחיות (2010).

* בהינתן מדרג דרכים מוגדר במדינה, סוג דרך לתכנון קובע את מהירות הייעוד. מהירות הייעוד תקבע את מהירות התכן ואת הממ"מ.

* הממ"מ תהיה קרובה ככל הניתן למהירות הייעוד, ובמצב האידיאלי שווה למהירות הייעוד. עקב מרווח בטיחות מסוים שנדרש בכל תהליך תכנון, מהירות התכן תהיה גבוהה יותר ממהירות הייעוד.

* הממ"מ ומהירות התכן ישמשו לתכנון המאפיינים הגיאומטריים של הדרך. על סמך המאפיינים הגיאומטריים שנקבעו יבוצע חיזוי/הערכת מהירות הנסיעה בפועל (מהירות התפעול). כאשר נמצאה התאמה גבוהה בין הממ"מ והמהירות בפועל וכמו כן, תכן הדרך עונה לסדרה של קריטריונים של עקביות תכן טובה (ראה בהמשך פרק 1.3), תהליך התכנון מסתיים.

* במידה והתאמה זו לא הושגה ו/או התכנון לא עונה לקריטריונים של עקביות תכן טובה, יבוצע שינוי במאפיינים הגיאומטריים של הדרך. בעקבות שינוי המאפיינים הגיאומטריים תבוצע הערכת חוזרת של מהירויות התפעול ובהינתן תוצאות התכנון על-פי התאמתן בין הממ"מ ומהירות התפעול

והקריטריונים של עקביות תכן טובה. תהליך זה יכול לחזור על עצמו פעמים מספר עד לקבלת תוצאות משביעות רצון.

* במידה והוכח שלא ניתן לעמוד בדרישות ההתאמה בין הממ"מ ומהירות התפעול ו/או בקריטריונים של איכות התכן, במסגרת ערכי הממ"מ ומהירות התכן שנקבעו לתכנון, יבוצע שינוי הערכים בשני סוגי המהירות, עם כל ההשלכות על מאפייני הדרך שנגזרות מכך.

טווחי המהירויות המותרות וטווחי מהירויות התכן שמומלצים ליישום בסוגים השונים של דרך לא עירונית מפורטים בטבלאות 1.3-1.4.

טבלה 1.3. מהירויות ייעוד וממ"מ מומלצות, קמ"ש, לפי סוגי דרכים לא עירוניות

סוג הדרך	מהירות הייעוד המרבית	תחום הפחתה עקב רגישות
דרך מהירה	110	110 - 90
דרך פרברית/ מעויירת מהירה + דרך דו-מסלולית ממוחלפת	100	100 - 80
דרך דו-מסלולית אחרת	90	90 - 70
דרך חד-מסלולית	70	70 - 50

טבלה 1.4. תחומים מומלצים של מהירויות התכן, קמ"ש, לפי סוגי דרכים לא עירוניות

סוג הדרך	מהירות התכן המרבית	תחום הפחתה עקב רגישות
דרך מהירה	120	120 - 100
דרך פרברית/ מעויירת מהירה + דרך דו-מסלולית ממוחלפת	110	110 - 90
דרך דו-מסלולית אחרת	100	100 - 80
דרך חד-מסלולית	80	80 - 60

סה"כ, ההנחיות (2010) הגדירו את ההיררכיה החדשה של סוגי הדרכים בארץ ואת הגישה החדשה לקביעת מהירויות הנסיעה ברשת הדרכים, תוך כדי איזון בין שיקולי הניידות והבטיחות. כמו כן, ההנחיות מסבירות את אופן פעילות המתכנן ליישום הגישה החדשה. עם זאת, קיים צורך בפיתוח כלים הנדסיים שיסייעו ביישום הגישה החדשה - התאמת מאפייני הדרכים למהירויות הייעוד. במילים אחרות, נדרש לבסס את מאפייני הדרכים בארץ שיהפכו אותן לדרכים המסבירות את עצמן בעיני הנהגים ובכך, יתרמו לצמצום הפערים בין מהירויות הייעוד לבין מהירויות התפעול.

1.1.4 הצורך להתמקד בדרכים החד-מסלוליות

הדרכים החד-מסלוליות, הן בישראל והן במדינות האחרות, מתאפיינות ברמות בטיחות נמוכות לעומת הדרכים הדו-מסלוליות. מצב זה מתקשר, קודם כל, עם הסיכון הקיים בדרכים החד-מסלוליות להתרחשות התנגשויות חזית-חזית וכמו כן, עם רמות תכן נמוכות יותר של דרכים אלה לעומת הדרכים הדו-מסלוליות.

ע"פ הערכות בישראל, מבין קרוב ל-5,000 ק"מ של הדרכים הלא עירוניות, כ-80% מהוות דרכים חד-מסלוליות, אשר מעבירות מעל 30% מהנסועה השנתית (גיטלמן, 2009). בשנים 2006-2008, כ-60% מהתאונות הקשות והקטלניות וכמחצית מהתאונות הקלות בקטעי הדרכים הלא עירוניות נרשמו בדרכים החד-מסלוליות. אחוז התאונות החמורות בדרכים החד-מסלוליות היה גבוה בכ-50%

לעומת הדרכים הדו-מסלוליות, כאשר מדד קטלניות הנסיעה (מספר הרוגים למיליארד נסועה) היה גבוה כפי 2.5 בדרכים החד-מסלוליות לעומת הדו-מסלוליות (גיטלמן, 2009).

דרכים לא עירוניות חד-מסלוליות מתקשרות עם סיכון מרבי לפגיעה קשה וקטלנית ברוב המדינות המתועשות. ע"פ הערכות, כ-60% מהרוגים בתאונות הדרכים נרשמים בדרכים הלא עירוניות אשר אינן מהירות לעומת 10% הרוגים בדרכים המהירות וכ-30% הרוגים בדרכים העירוניות (Weller et al, 2008). אותו המקור בהסתמך על נתוני EC (2001), מציין כי חלק מהסיבות למצב זה נובע ממאפייני דרכים אלו, וביניהם:

- * היסטוריה של סלילת הדרך, כאשר במקרים רבים דרכים אלו נסללו בעבר והסטנדרטים שלהם לא מתאימים לדרישות הבטיחות בהווה;
- * השימושים השונים שעל דרכים אלו לספק, גם נייודות וגם נגישות;
- * מהירות מרבית מותרת יחסית גבוהה ומהירויות נסיעה יחסית גבוהות;
- * שונות רבה במהירויות הנסיעה בין המשתמשים השונים;
- * צידי דרך לא סלחניים.

על-פי נתונים מגרמניה (Weller et al, 2008), מהירות לא מתאימה לתנאי הדרך היא הסיבה העיקרית לתאונות בדרכים החד-מסלוליות. מצב זה הביא מדינות מסוימות (אנגליה, הולנד, נורבגיה) לביצוע תסקירי בטיחות ובדיקות בטיחות של הדרכים הלא עירוניות במטרה להתאים מהירויות מותרות לתנאי הדרך. בין בעיות בטיחות עיקריות שמזוהות בדרכים אלה מציינים (OECD, 2006):

* תאונות רכב יחיד - עזיבת הדרך והתנגשות בעצמים קשיחים בצידי הדרכים, כאשר האמצעים למניעת תאונות אלה הם יצירת תנאי דרך סלחניים (הרחקת מכשולים, יצירת אזור מפלט לרכב או לחילופין, התקנת מעקות בטיחות/סופגי אנרגיה למיגון המכשולים ושמירת הרכב בתוך שטח המיסעה);

* תאונות התנגשות חזיתית, כאשר מניעתן מחייבת תכנון לטווח הארוך: שינוי חתך הדרך במטרה ליצור הפרדה פיסית בין כיווני הנסיעה באמצעות מעקות בטיחות, או שימוש בפתרונות "רכים יותר" כמו אזורי חיץ, פסי הפרדה משוננים ועוד;

* תשומת לב מיוחדת נדרשת באתרים עם שיפוע אנכי משמעותי. בשיפוע חזק בירידה מקובל להציב שלט עם המלצה לנהגי רכב להישאר בהילוך נמוך ולהתקין אמצעי מפלט לרכב כבד (arrester beds). בשיפוע תלול בעליה בדרך חד-מסלולית, מקובל להסדיר נתיבים לעקיפה של רכב כבד ואיטי (OECD, 2006).

בנוסף, הצורך בפיתוח אמצעים הנדרשים ליצירת דרכים המסבירות את עצמן וניהול מהירות אינו שווה בסוגי דרך שונים. לדוגמא, הדרכים המהירות נחשבות לסביבת הדרך הבטוחה ביותר עבור התנועה המהירה. פרט למספר אמצעים לניהול תנועה צפופה כגון: הגבלת כניסות ברמפות (ramp metering) ומהירות מותרת משתנה, בדרכים אלה לא נדרשים אמצעים נוספים לניהול מהירויות. הצורך באמצעים לניהול מהירות מתעורר באזורי עבודות בדרך, בהם להורדת המהירות משמשים הסדרים כגון: הצרת נתיבי נסיעה, סימון ושילוט מיוחד, מעקות בטיחות ואביזרי בטיחות נוספים

(OECD, 2006). לפי ERSO (2006), לגבי הדרכים המהירות הדרישות ליצירת "דרך המסבירה את עצמה" ברורות יחסית, כאשר בסוג דרך זה הסדרים אחידים החלו להיות מיושמים במדינות אירופה בשנים האחרונות. לעומת זאת, לגבי יתר סוגי הדרכים, קיימות בעיות בטיחות רבות, כפי שצוין לעיל, ולכן, קיים צורך בפיתוח הסדרי תשתית אשר יתרמו לניהול מהירויות ולשיפור רמת הבטיחות בדרכים אלה. בשל הן היקף והן חומרת בעיות הבטיחות בדרכים החד-מסלוליות, זיהוי מאפייני הדרך אשר יביאו למהירויות נסיעה מתאימות יותר חשוב במיוחד עבור סוג דרך זה.

1.2. נושא המחקר

מחקרים אמפיריים מראים כי מאפייני התכן משפיעים על מהירויות הנסיעה הנבחרות על-ידי הנהגים. עם זאת, חסר ידע ומידע מפורט לגבי מאפייני הכביש הנדרשים כדי להשיג את אותן מהירויות הנסיעה המתאימות לכביש ("מהירות היעוד") ו/או המוגדרות על-פי חוק. כמו כן, חסר ידע לגבי תפיסת הנהגים של דרכים מסוג מסוים, בתנאים המקומיים, המתבטאת במהירות נסיעתם בכביש.

מטרת מחקר זה הינה לחקור את הקשר בין מהירויות הנסיעה ומאפייני הכביש, בדרכים החד-מסלוליות בישראל, על מנת לזהות את מאפייני התשתית המשפיעים על בחירת מהירויות נסיעה מסוימות על-ידי הנהגים. במחקר, נבחנת מידת ההתאמה בין מהירויות הנסיעה למהירויות היעוד, בקטעי דרך שונים, ובעזרת שיטות סטטיסטיות שונות נערך זיהוי של מאפייני התשתית שמשפיעים על בחירת מהירויות הנסיעה ע"י הנהגים, דבר המאפשר להצביע גם על קבוצות הומוגניות של קטעי דרך בהם רמות מהירות מסוימות מתקשרות עם מאפיינים גיאומטריים וויזואליים מסוימים. בנוסף, במחקר נבחן נושא העקביות בתכן מאפייני הדרכים, באמצעות "שחזור" של מהירויות התכן ע"פ מאפייני הקטעים, סיווגי הקטעים ע"פ השתנות מהירויות התכן ובחינת השפעה של מהירות התכן על מהירויות הנסיעה בפועל.

הנחת המחקר הינה כי יישום מאפייני הדרכים אשר קשורים להפחתת מהירויות הנסיעה ו/או לחיזוק ההתאמה בין מהירויות הנסיעה ומהירויות היעוד יתרום להגברת הבטיחות בדרכים. בהתבסס על ממצאי המחקר, ניתן יהיה להמליץ למתכננים בארץ על מאפייני הדרכים הנחוצים להשגת מהירויות ייעוד רצויות בדרכים החד-מסלוליות. באופן זה, המחקר יתרום לפיתוח כלים המקדמים את הגישה של "דרכים המסבירות את עצמן".

ממצאי המחקר מוצגים בדו"ח זה באופן הבא:

פרק 1.3 מביא ממצאים מסקר הספרות לגבי הכלים הקיימים ליצירת דרכים המסבירות את עצמן;

פרק 2 מסביר את תהליך הכנת בסיס הנתונים למחקר ואת מאפייניו;

פרק 3 מציג ממצאים מבחינת רמת ההתאמה בין מהירויות הנסיעה ומהירויות היעוד בקטעי המחקר;

פרק 4 מביא ממצאים מהניתוחים הסטטיסטיים שנערכו במחקר;

פרק 5 מציג ממצאים מבדיקה הנדסית של קטעי המחקר עם מהירויות גבוהות ונמוכות;

פרק 6 מסכם את הממצאים העיקריים של המחקר ומציג את מסקנותיו, לרבות הצבעה על מאפייני התשתית שמתאימים להשגת מהירויות ייעוד רצויות בדרכים החד-מסלוליות.

1.3. סקר ספרות: כלים קיימים ליצירת דרכים המסבירות את עצמן

סקר הספרות נערך במטרה לסכם את הידע הקיים, בניסיון הבינלאומי, בנוגע למאפייני הדרכים החד-מסלוליות (או בינעירוניות בכלל) אשר נמצאו כתורמים ליצירת דרכים המסבירות את עצמן. בין הכלים הניתנים היום ליצירת דרכים המסבירות את עצמן ניתן למנות: הגדרת היררכיה נכונה של מערכת הדרכים; הקפדה על עקביות בתכן הדרך; מציאת ביטוי לקשר בין מאפייני הדרכים לבין התנהגות הנהגים (מהירויות הנסיעה).

1.3.1. הגדרת סוגי דרכים במערכת

במערכת התחבורה חשיבות רבה מיוחסת להגדרה ברורה של תפקידי הדרכים אשר תבוא לידי ביטוי במאפייני הדרך ובמהירויות שמתאימות לנסיעה בדרכים אלה. לאורך השנים, מספר עולה של מדינות מחפש גישות חדשות להגדרת סוגי דרכים כבסיס ליצירת מערכת דרכים ש"מסבירות את עצמן". ככלל, הסיווג מתבסס על הפרדה מרבית בין שלוש פונקציות עיקריות שהן: העברת התנועה, פיזור התנועה וגישה. בטבלאות 1.5-1.7 מובאות דוגמאות לסיווג דרכים לא עירוניות על-פי תפקודן, במדינות כמו קנדה, ניו זילנד וארה"ב. סיווג דומה של הדרכים הלא עירוניות קיים גם בישראל - טבלה 1.8.

טבלה 1.5. מאפייני דרכים לא עירוניות בקנדה, ע"פ סיווגן. מקור: TAC (1999).

	Rural Locals	Rural Collectors	Rural Arterials	Rural Freeways
service function	traffic movement secondary consideration	traffic movement and land access of equal importance	traffic movement primary consideration	optimum mobility
land service	land access primary consideration	traffic movement and land access of equal importance	land access secondary consideration	no access
traffic volume vehicles per day (typically)	<1000 AADT	<5000 AADT	<12 000 AADT	>8000 AADT
flow characteristics	interrupted flow	interrupted flow	uninterrupted flow except at	freeflow (grade separated) major intersections
design speed (km/h)	50 - 110	60 - 110	80 - 130	100 - 130
average running speed (km/h) (free flow conditions)	50 - 90	50 - 90	60 - 100	70 - 110
vehicle type	predominantly passenger cars, light to medium trucks and occasional heavy trucks	all types, up to 30% trucks in the 3 t to 5 t range	all types, up to 20% trucks	all types, up to 20% heavy trucks
normal connections	locals collectors	locals collectors arterials	collectors arterials freeways	arterials freeways

טבלה 1.6. מאפייני דרכים לא עירוניות בניו זילנד, על-פי סיווגן. מקור: Tranzit (2003).

	Local Road	Collector Road	Arterial Road	Expressway	Motorway
Traffic Function	traffic movement is the secondary consideration	traffic movement and land access are of equal importance	traffic movement is the primary consideration	traffic movement is the primary consideration	optimized traffic movement is the primary consideration
Land Access Function	land access is the primary consideration	land access and traffic movement are of equal importance	some access control	rigid access control	no access
Traffic Volume (AADT)	<1000	<5000	<12000	>8000	>8000
Flow Characteristics	Interrupted flow	Interrupted flow	uninterrupted flow except at intersections (signalized)	uninterrupted flow except at signalized intersections	free flow (grade separated intersections)
Design Speed (km/h)	50 – 110	60 – 110	80 – 130	100 – 130	100 – 130
Average running speed in free flow conditions (km/h)	50 – 90	50 – 90	60 – 100	60 – 100	70 -110
Vehicle type	cars, light/medium trucks, occasional heavy trucks	all types, up to 30% trucks in the 3 t to 5 t range	all types, up to 20% heavy trucks	all types, up to 20% heavy trucks	all types, up to 20% heavy trucks
Normally connected to:	locals, collectors	locals, collectors, arterials	collectors, arterials, expressways, motorways	arterials, motorways	arterials, expressways, motorways

טבלה 1.7. מאפיינים טיפוסיים לסוגי דרכים לא עירוניות בארה"ב. מקור: Fitzpatrick et al (2003).

Item	Class/subclass:				
	Freeway	Arterials/Highways		Collectors	Local
		Principal	Minor		
Anticipated Speed or Speed limit	55 to 70 mph	45 to 70 mph	45 to 70 mph	35 to 55 mph	35 to 55 mph
Purpose	High mobility, access limited to ramps	High mobility, limited access	High mobility, limited access	Connection between local streets and arterials	Provides access to land adjacent to collector network and serves travel over relatively short distances
Cross Section	Multilane divided	Multilane divided and two-lane undivided /divided	Two- or three-lane	Two- or three-lane	Two-lane
Driveway Access Density	None (ramps)	Low	Low to Moderate	Moderate to High	High
Roadside development	None	Low to Medium	Medium	Medium to High	High
Median	Yes (restrictive)	Yes (restrictive)	Usually	Occasionally	No
Anticipated traffic	High	High	High to Moderate	Moderate	Low

טבלה 1.8. סיווג דרכים לא עירוניות ומאפייניהן בישראל. מקור: הנחיות (2012).

מאפייני הדרך	סוג הדרך			
	מהירה	"מעויירת" ¹ (פרברית) מהירה	ראשית	אזורית
יחס ניידות-נגישות	ניידות אופטימלית ללא נגישות	ניידות אופטימלית ללא נגישות	ניידות עדיפה על נגישות	ניידות שווה לנגישות
בקרת הגישות	מלאה	מלאה	מלאה או חלקית	חלקית או מצומצמת ⁴
מאפייני זרם התנועה	זרימה חופשית	זרימה חופשית	זרימה בלתי מופרעת להוציא אזורים מתוממרים	זרימה מופרעת
מהירות התכן (קמ"ש)	100-120	90-110	דו-מסלולית: 80-110 חד-מסלולית: 60-80	דו-מסלולית: 80-100 חד-מסלולית: 60-80
רמת השירות לתכן ³	C באזור לא רגיש, D בשאר	D	D	D, E באזורי רגישות גבוהה
מספר מסלולים	2 לפחות	2 לפחות	בד"כ 2, לעתים 1	בד"כ 1, לעתים 2

ניתן להבחין שבאופן עקבי, ירידה בהיררכית הדרך מתקשרת עם ירידה בנפחי התנועה, במהירויות התכן ובמהירויות נסיעה צפויות, במקביל עם הצרת חתך הדרך, גידול ברמת ההפרעה לזרימת התנועה והגברה בשימושי הקרקע בציד הדרך. עם זאת, מאפייני הדרכים והן, רמות מהירויות התכן ומהירויות הנסיעה הצפויות אינם נבדלים באופן חד בין סוגי הדרכים השונים, פרט לשני הקצוות: דרכים מהירות לעומת המקומיות. מכאן, ניכר הקושי ביצירת מאפייני דרך ייחודיים עבור סוגי דרך שונים ובייחוד, כאלה שאינם בקצוות של ההיררכיה, דבר שהיה הופך אותן לדרכים המסבירות את עצמן.

1.3.2. עקביות בתכן הדרך

מאפייני התכן של הדרכים הלא עירוניות נקבעים על-פי סטנדרטים גיאומטריים ותנועתיים מקובלים. הנהג בנסיעתו לאורך הדרך מסתמך על ניסיונו מהנהיגה בדקות הקודמות ולכן, מצפה למאפייני דרך מסוימים. כאשר ציפיותיו אינן מתממשות, נוצר קונפליקט בין צורת הנהיגה הקיימת (בהתאם לציפיותיו של הנהג) לבין הנתונים בשטח, מצב אשר עשוי לגרום לטעויות בהחלטות הנהג ומכאן, להביא לתאונות. ולהפך, כאשר הכביש מתוכנן בעקביות ובאחידות, הוא עונה לציפיות הנהג; כתוצאה, נהיגתו תהיה חלקה ורגועה יותר, בעלת שגיאות מועטות ומכאן, יותר בטוחה (חביב-מטר, 2001).

עקביות בתכן הדרך מוגדרת כמידת האחידות של המרכיבים הגיאומטריים של קטע דרך. עקביות טובה תאפשר נהיגה בטוחה ונוחה, ובמהירות אחידה במידה רבה. קיימות מספר סיבות לחוסר עקביות בתכן דרכים וביניהן:

* הבדלים בין הקטעים: תכנון עקומים אופקיים ואנכיים מתבסס על מהירות התכן. לעומת זאת, הקטעים הישרים אינם תלויים במהירות התכן, וכתוצאה מכך, בתוואי הדרך נוצרים קטעים עם מהירויות תפעול שונות;

* התפתחות בדרישות התכנון: יתכן שקטעים שונים נבנו בתקופות שונות, כאשר בין התקופות היו שינויים בדרישות התכן ולכן, המשך בניית הדרך התבצע לפי דרישות שונות;

* סיבות כלכליות: אפשרי שלחלק מהדרך היה תקציב מספיק לבניה ברמת תכן מסוימת וחלק אחר נבנה בסטנדרטים גיאומטריים שונים, עקב צמצום בתקציב או בתקופה אחרת.
* טופוגרפיה: שינוי במאפייני התכן בגלל הטופוגרפיה השונה מאזור לאזור.

תוואי לא אחיד מחייב את הנהגים לשנות לעתים קרובות את מהירות נסיעתם בהתאם לאלמנטים הגיאומטריים של הדרך וללא כל קשר לעומס התנועה בדרך. מכאן, אחידות בתוואי תגרום להקטנת השונות במאפייני המהירויות, מצב אשר יתרום להעלאת רמת הבטיחות בדרך. הנחה זו מסתמכת על ממצאי המחקרים אשר הצביעו על קשר הפוך בין השונות במהירויות הנסיעה לבין הבטיחות, כאשר המחקר הראשון היה של Solomon (1964).

שיטת המהירות האחידה מורכבת מהערכת מהירויות הנסיעה בכביש על סמך מדידות או חיזוי מהירויות לאורך התוואי, ובניית פרופיל המהירות. פרופיל המהירות מוגדר כתרשים רצוף המתאר את מהירות הנסיעה הממשית בכיוון מסוים, וניתן להכינו לכלי רכב פרטיים וגם כבדים. בעזרת פרופיל המהירויות ניתן לראות את השפעת גיאומטרית הדרך על מהירויות כלי רכב שונים, ולזהות את הקטעים אשר גורמים להפרשי מהירויות גבוהים (פולוס ואחרים, 1997).

גישת השימוש במהירות להערכת עקביות התכן מורכבת משני מרכיבים: הראשון מתייחס להפרש בין מהירות התכן והאחוזון ה-85 של מהירות התפעול באותו קטע והשני - להפרש באחוזון ה-85 של מהירות התפעול של שני קטעים סמוכים. להשגת תוואי אחיד, שני המרכיבים שואפים לתת הפרש מהירויות מינימאלי (Lamm et al, 1999). ככלל, כאשר שני ההפרשים קטנים מ-10 קמ"ש, התכנון נחשב ל-"טוב", דהיינו בו קיימת עקביות בתוואי האופקי ואין צורך בשיפור התכנון הגיאומטרי; כאשר ההפרשים נמצאים בטווח של 10-20 קמ"ש, התכנון נחשב ל-"סביר" שבו קיים חוסר בעקביות בתכנון הגיאומטרי במידה מסוימת ובדרך כלל, לא נחוץ תיקון לתוואי הקיים; כאשר שני ההפרשים עולים על 20 קמ"ש, התכנון נחשב ל-"גרוע". תכנון "גרוע" גורם לחוסר עקביות בתכנון הגיאומטרי האופקי יחד עם הבדלים משמעותיים בפרופיל המהירות, לכן קטע כביש המתוכנן באופן גרוע (ברמת עקביות נמוכה) זקוק לתכנון מחדש ולשיפור התוואי בקטעים המסוכנים.

עקביות נמוכה מביאה לזרימת תנועה לא אחידה, וכתוצאה מכך להגדלת הסיכוי למעורבות בתאונות; מאידך, עליה בעקביות מביאה להקטנת שיעור התאונות. ההסבר לכך הינו שעקביות טובה פירושה תנאים גיאומטריים טובים יותר, מינימיזציה של השונות במהירות וכפועל יוצא הפחתה בשיעור התאונות.

לגבי הוכחות אמפיריות לקשר בין עקביות התכן ושיעורי התאונות, ניתן לציין את מחקרם של Anderson et al (1999) אשר בחנו נתוני תאונות ב-5287 עקומים אופקיים בשש מדינות בארה"ב. במחקר זה נמצא ששיעור תאונות מרבי נצפה בעקומים עם תכנון "גרוע" ושיעור תאונות מינימאלי -

בעקומים עם תכנון "טוב", כאשר סיווג התכנון היה לפי קריטריון ההפרש בין מהירות התפעול ומהירות התכן.






מהירות התפעול הינה הפרמטר העיקרי בהערכת עקביות תכן הדרך. לפי הנחיות אמריקניות, מהירות התפעול היא המהירות הכוללת הגבוהה ביותר שאפשר לשמור עליה בדרך כאשר הגורמים הקובעים את המהירות הם המאפיינים הגיאומטריים של הכביש. המדד המקובל ביותר להערכת מהירות התפעול הוא האחוזון ה-85 של מהירות בתנאי זרימה חופשית. שיטות רבות פותחו בעולם לחיזוי מהירות התפעול ע"פ מאפייני הדרך, כאשר חלקן הגדול טיפל בחיזוי המהירות בעקום (Lamm et al, 1995; Misaghi & Hassan, 2005).

1.3.3. הקשר בין מאפייני הדרכים לבין מהירויות הנסיעה

כדי לבנות בסיס ליצירת דרכים המסבירות את עצמן, חשוב לרכז ממצאי מחקרים אשר מצאו ביטוי לקשר בין מאפייני הדרכים לבין התנהגויות הנהגים ובעיקר, המהירויות הנבחרות ע"י הנהגים לנסיעה בדרכים אלה.

בהולנד, מספר מחקרים שנערכו ב-SWOV חיפשו הגדרה למאפייני הדרך אשר הופכים את תכן הדרך למזוהה בעיני הנהגים. על סמך מחקרים אלה, בשנת 2003 המועצה הלאומית לניידות בהולנד בחרה בשני מאפיינים שישמשו לזיהוי סוגי הדרך (essential recognizability characteristics) והם: סוג הפרדה בין כיווני הנסיעה וסימון קצה המיסעה. סוגי הדרכים המוגדרים בהולנד במסגרת תפיסת הבטיחות בת-קיימא, לרבות המהירויות המותרות ושני המאפיינים הנ"ל מוצגים בטבלה 1.9. ניתן להבחין שבהולנד קיימת חלוקה של דרכים בין-עירוניות ל-3 סוגים השונים זה מזה במהירות המרבית המותרת, והם: דרכים ראשיות שעיקר תפקידן הוא ניידות, עם ממ"מ 100 קמ"ש (120 קמ"ש בדרכים מהירות); דרכים מאספות שתפקידן הוא ניידות ונגישות, עם ממ"מ 80 קמ"ש, ודרכי גישה שתפקידן הוא נגישות, עם ממ"מ 60 קמ"ש.

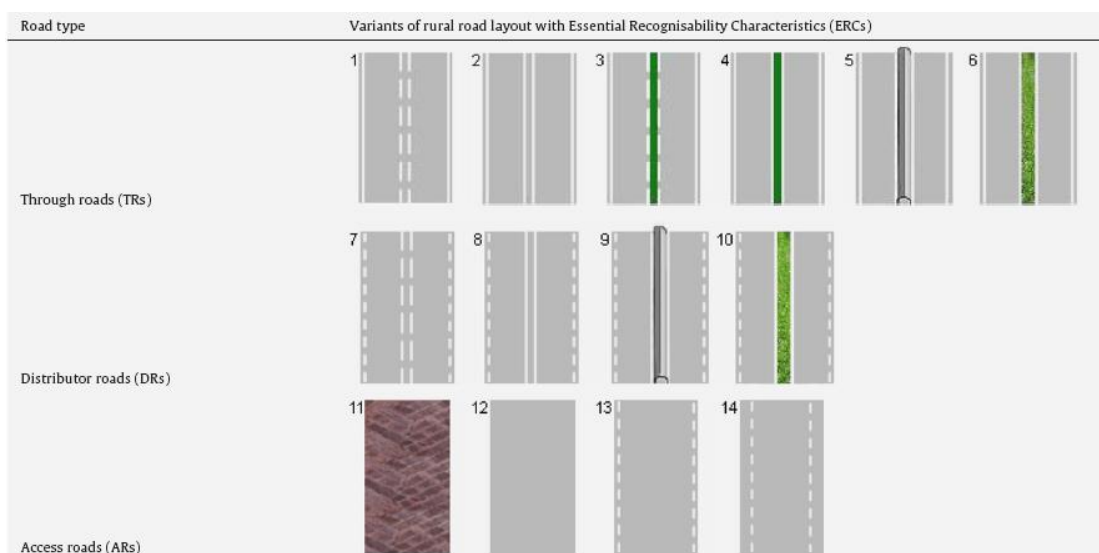
טבלה 1.9. מאפיינים מהותיים לזיהוי סוגי הדרכים בהולנד. מקור: SWOV (2007a).

Essential recognizability characteristics	Through road		Distributor road			Access road	
	SW120	SW100	GOW80	GOW70	GOW50	ETW60	ETW30
Zone sign	Motorway sign 	Trunk road sign 	Sign n.a. (general speed limit)	Speed limit sign 	Sign n.a. (general speed limit)	Zone sign 	Regulation or zone sign 
Edge marking	Continuous marking	Continuous marking	Broken marking	Broken marking or kerb	Broken marking or kerb	None or broken marking	None or broken line, or kerb
Driving direction separation	Vehicle barrier or wide median	Double axis line with green 'filling', barrier, or median	Double axis line or median	Double axis line or median	Double axis line or median	None	None

יישום מאפייני הזיהוי לסוגי דרכים שונות התחיל בהולנד בשנת 2004. מחקרי מעקב שנערכו ב-

SWOV גילו בעיות בזיהוי סוגי דרך שונים ע"י הנהגים על סמך הסימון המוגדר. לעומת זאת, במחקר אחר שנערך באמצעות סימולטור נהיגה בשנת 2007, נמצא שרמת הדיוק בזיהוי סוג דרך והמהירות המותרת בדרך עלתה כאשר הנהגים ראו יותר מאפייני תכן שמצביעים על נוכחות משתמשי דרך אחרים כגון: נתיבי אופניים והפרדה פיסיית בין כיווני התנועה (שמסמן נוכחות אפשרית של רכב חקלאי). כמו כן, נמצאה השפעה חזקה של תכן דרך על התנהגות רצויה של הנהג, במונחים של מהירות הנסיעה ומיקומו של רכב בדרך (SWOV, 2007a). בין מסקנות המחקר היה שלהגברת הבנת המסרים ע"י הנהגים נדרש קמפיין הסברה לאומי. בנוסף, קיים צורך בהגדרת מאפיינים מהותיים נוספים של סוגי דרך שונים על מנת להגיע למימוש תפיסת הבטיחות בת-הקיימא.

Stelling-Konczak et al (2011), בחנו אלו הסדרים של דרכים בין-עירוניות בהולנד ניתנים לזיהוי על-ידי משתמשי הדרך, בעיקר במעברים בין סוגי דרך שונים. במחקר הראו למשתתפים סדרות של צילומים של מעבר בין דרכים מסוגים שונים בצמתים. המשתתפים נדרשו לשייך את הדרכים משני צידי הצומת לסוג המתאים, כאשר לכל סוג דרך הוצגו מספר חלופות. סוגי הדרכים והחלופות היו שונים זה מזה בסימוני השול וכמו כן, בסוג וסימון ההפרדה בין כיווני הנסיעה הנגדיים. באיור 1.2 מתוארות חלופות הסימון האפשריות ל-3 סוגי הדרכים הבין-עירוניות שאינן דרכים מהירות, בהולנד.



איור 1.2. דוגמאות לחלופות הסימון של סוגי דרך שונים, בהולנד. מקור: Stelling-Konczak et al (2011).

במחקר נמצא שלמעבר בין דרך ראשית לדרך מחלקת, שינוי בסימון השול בלבד (קו רציף בדרך ראשית, קו קטעים בדרך מחלקת) אינו מזהה ע"י הנהגים. שינוי בסימון ההפרדה יחד עם שינוי בסימון השול עדיף על מעבר בו קיים שינוי בסימון השול בלבד. כמו כן, נמצא כי הפרדה מסומנת וצבועה בירוק משפרת את רמת הזיהוי אך רק ביחד עם אמצעים נוספים. המעבר בין דרך מחלקת לדרך מקומית מזהה בצורה טובה, כאשר הדרך המחלקת מסומנת במלואה; מפרדה בנויה בדרך המחלקת משפרת את זיהוי המעבר מדרך גישה כי היא נתפסת בעיני הנהגים כמתאימה למהירויות גבוהות יותר.

במסגרת פרויקט אירופי iSEREST – RiPCORD² נערך מחקר של תפיסת סוגי הדרך בעיני הנהגים (Weller et al, 2008). במחקר השתתפו 46 נהגים מגרמניה אשר התבקשו לאפיין את התייחסותם למקבץ תמונות של חתכי דרכים שצולמו ברשת הדרכים הלא עירוניות בגרמניה. כל נהג אפיין את "תפיסותיו" כלפי 21 תמונות שנלקחו באופן אקראי ממאגר של 25 תמונות. אפיון תפיסת הנהג נעשה באמצעות רשימה של מונחים המבטאים את תחושותיו כלפי מראה הדרך כגון: "מונוטוני", "משעמם", "מוריד ריכוז" וכו', או "מרגיע", "מהנה" וכד' או אפילו "מעצבן", "מאיים" וכד'. רשימת המונחים נקבעה בצורה של שאלון הקרוי RECL (Road Environment Construct List) אשר פותח במחקרים קודמים, כאשר ייחוס המונחים לכל תמונה נעשה באמצעות דירוג (score). בנוסף, כל נהג סיפק הערכה של מהירות הנסיעה שמתאימה בעיניו לנסיעה בכל חתך מוצג.

עיבוד ראשוני של תוצאות המשאל בעזרת ניתוח גורמים (factor analysis) אפשר הקבצה של תפיסות הנהגים (פירוט התחושות שמתקשרות עם תמונות חתכי הדרך) לשלושה פקטורים, כמוצג בטבלה 1.10, כאשר לפקטור 1 ניתן שם "מונוטוניות", לפקטור 2 - "נוחות", לפקטור 3 - "דרישה" (הכוונה היא לעומס יתר על משימת הנהיגה אשר "דורש" ריכוז גבוה).

תוך כדי שימוש בפקטורים שנבנו, נערך סיווג של חתכי הדרך הנבחים ל-3 קטגוריות (clusters) כמוצג בטבלה 1.11 (אשר היו שונות באופן מובהק). לאחר מכן, כדי לבחון התאמה בין התחושות הסובייקטיביות של הנהגים והתנהגותם בפועל, רמת המהירות שדווחה ע"י הנהגים ביחס לכל תמונה (של חתך הדרך) שימשה לסיווג חוזר של התמונות בהתאם ל-3 הקטגוריות שנקבעו. נמצא שבאמצעות מדד המהירות, 19 מתוך 21 התמונות סווגו לקבוצה הנכונה. כמו כן, באמצעות בנית גרסיה הוכח שהפקטורים (של תחושות הנהגים) משמשים כמסבירים טובים למדד מהירות הנסיעה שנבחרת ע"י הנהג. נמצא שכל שערך הפקטורים של "מונוטוניות" ו-"נוחות" הדרך גבוה יותר, רמת המהירות עולה.

טבלה 1.10. התאמת המשתנים של שאלון RECL ל-3 פקטורים, במחקר של Weller et al (2008).

Variable	Factor I	Factor II	Factor III
Monotonous	0.854	0.032	-0.163
Lowers concentration	0.832	0.294	0.051
Boring	0.802	-0.050	-0.138
Lowers alertness	0.782	0.302	0.006
Changeable	-0.780	0.114	0.240
Increases wakefulness	-0.710	-0.413	0.083
Increases attention	-0.701	-0.480	0.072
Relaxing	0.188	0.805	-0.206
Enjoyable	0.062	0.803	-0.388
Gives a good view	0.272	0.651	-0.433
Peaceful	0.041	0.630	-0.302
Spacious	0.278	0.591	-0.395
Irritating	-0.089	-0.179	0.837
Threatening	-0.070	-0.411	0.717
Demanding	-0.160	-0.407	0.698
Dangerous	-0.103	-0.507	0.626
Explained variance (%)	28.26	23.01	17.75

² 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.

טבלה 1.11. שלוש קטגוריות של דרכים לא עירוניות ואפיון באמצעות הפקטורים של תחושת הנהגים, במחקר של Weller et al (2008).

	Factor I: monotony	Factor II: comfort	Factor III: demand
Cluster I	Low	Low	High
Cluster II	Low	High	Low
Cluster III	High	High	Low

לבסוף, מבצע המחקר ערכו אפיון מפורט של מאפייני החתכים שקובצו לקטגוריות השונות. תוצאות אבחון זה מובאות בטבלה 1.12, לפיהן, Cluster 1 מתאפיין בתנאי דרך ירודים (מיסעה גרועה, דרך צרה, סימון מחוק); Cluster 2 - בתנאי דרך בינוניים; Cluster 3 - בתנאי דרך טובים (מיסעה טובה, דרך רחבה, סימון טוב). מכאן, ניתן להבחין בהתאמה ניכרת בין סיווג חתכי הדרך בהתאם לתחושות הנהגים (כמוצג בטבלה 1.11) לבין מאפייני הדרכים בפועל (כמוצג בטבלה 1.12). מחקר זה תרם להבנה מעמיקה יותר של תפיסות הנהגים של מאפייני דרך שונים ושל צפיות הנהגים מתנאי הדרך, כאשר ממצאיו נלקחו בחשבון בבניית קטגוריזציה נכונה יותר של הדרכים הלא עירוניות באירופה.

טבלה 1.12. מאפיינים אובייקטיביים של חתכי הדרכים אשר סווגו לשלוש הקטגוריות בהתאם לתחושות הנהגים, במחקר של Weller et al (2008).

	Cluster I	Cluster II	Cluster III
Surface	Poor	Between I and III	Good
Road width	Very narrow	Between I and III	Wide
Road markings (centre line)	No	**	Yes
Sight distance	**	**	Very high
Horizontal alignment	**	High CCR*	Low CCR*

*CCR – curvature change rate **any value

במכון לתחבורה בטקסס התנהלה סדרה של מחקרים שמטרתם הייתה לבחון את מערכת הקשרים בין מהירות התכן, המהירויות בפועל והמהירויות המותרות, ולהציע חלופות הולמות וקריטריונים לקביעת המאפיינים הגיאומטריים של הדרך. המחקרים של Fitzpatrick et al (2003), Fitzpatrick et al (2005) חיפשו ביטוי למערכת הקשרים בין המהירויות בפועל ומאפיינים גיאומטריים ואחרים, בקטע דרך ישר סמוך לעקום (משיק). במחקר נאספו נתונים על 79 קטעי דרך מישוריים יחסית (שיפוע -4% עד +4%, מרחק 0.1 מייל מעקום סמוך), בארבעה סוגי דרך: עורק עירוני/פרברי (35 אתרים), דרך מאספת (2 אתרים), דרך מקומית (13 אתרים) ועורק תנועה לא עירוני (9 אתרים). בכל אתר, נערכו מדידות מהירות בתנאי זרימה חופשית, שעות יום, ונאספו מאפיינים גיאומטריים וסביבתיים, וביניהם:

* סוג דרך וסוג אזור;

* מאפייני החתך לרוחב: מספר נתיבים, רוחב המיסעה, מצב שוליים, סוג ורוחב המפרדה, הימצאות נתיבי חניה ונתיבי אופניים;

* אפיון צדי הדרך: מצב צידי הדרך, צפיפות נקודות גישה, רמת פעילות של הולכי הרגל;

* אמצעי בקרה: צפיפות רמזורים למייל, מהירות מותרת בקטע לפי התמרור (posted speed);

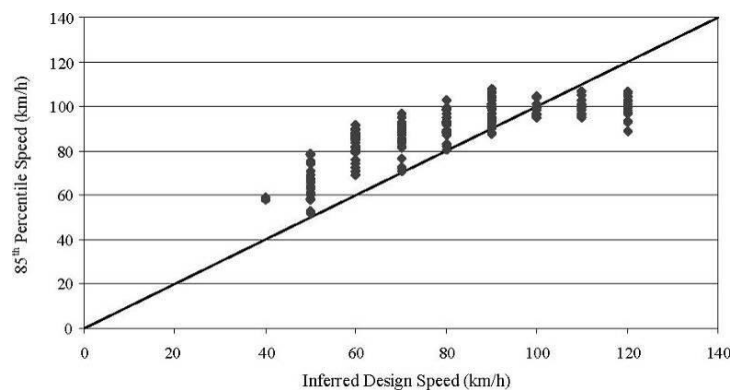
* חתך אורכי: מרחקים עד לנקודות השינוי (עקום, גשר, צומת T), סוג שטח.

בניתוח הסטטיסטי של הנתונים עבור כל סוגי הדרכים ביחד נמצא שהמסבירים הטובים ביותר לחיזוי מהירויות הנסיעה בפועל (האחוזון ה-85) הם: המהירות המותרת בקטע וצפיפות נקודות הגישה לאורך הדרך (ברמות מובהקות של 5% ו-20% בהתאמה).

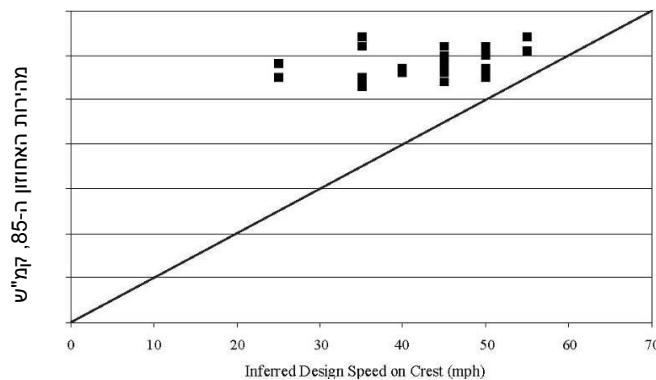
ע"פ ממצאים של מחקר זה ביחד עם הממצאים של מחקרים קודמים שנערכו בארה"ב אשר סוכמו במחקר, בדרכים הלא עירוניות, על המהירות בפועל נמצאה השפעה של משתנים כגון: קרבת עקומות, אורך קטע, שיפוע אורכי, סוג אזור, וכן, השפעה אפשרית של צפיפות הגישות.

לפי ניתוח מסכם של ממצאי המחקרים שנערך ע"י Fitzpatrick et al (2003), בדרך חד-מסלולית, לתכן דרך נמצא אפקט משמעותי על המהירות בפועל, בעיקר ברדיוסים קטנים (עד 250 מטר) ושיפוע אנכי ניכר, כאשר ערכים אחרים של פרמטרים אלה התקשרו עם מהירויות נסיעה דומות (אם כי, עם שונות גדולה של הערכים). הצבת המהירויות בפועל מול ערכי מהירות התכן, באתרים השונים, הדגימה מצב שקרוב לאי-תלות בין שני המאפיינים - ראו דוגמאות באיור 1.3. מכאן הוסק ששימוש במהירות תכן גבוהה מ-80 קמ"ש בדרך חד-מסלולית לא עירונית ומעל 70 קמ"ש בעורק תנועה פרברי, לא ישפיע על מהירויות הנסיעה בפועל.

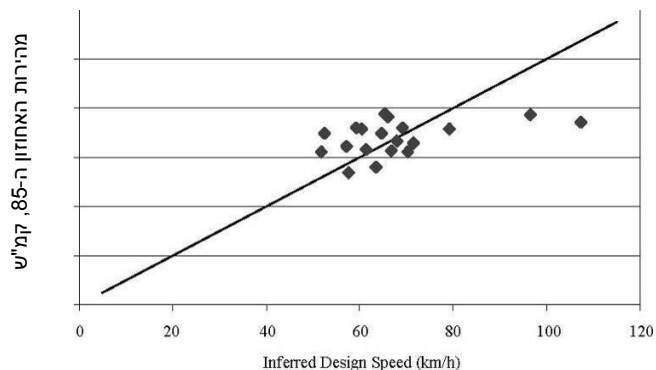
א. מהירות בפועל לעומת מהירות התכן, ב-138 עקומים אופקיים, בדרכים לא עירוניות חד-מסלוליות



ב. מהירות בפועל לעומת מהירות התכן, בעקומים אנכיים עם מגבלות ראות, בדרכים לא עירוניות חד-מסלוליות



ג. מהירות בפועל לעומת מהירות התכן, בעקומים אופקיים, בדרכים פרבריות



איור 1.3. הדגמת הקשר בין מהירות התכן ומהירויות הנסיעה בפועל, במספר סוגי אתרים, על סמך נתונים אמפיריים בארה"ב. מקור: Fitzpatrick et al (2003).

בניתוח נפרד לפי סוגי הדרך Fitzpatrick et al (2005) קיבלו תוצאות כלהלן:

* בדרכים העורקיות נמצא קשר ליניארי חזק בין האחוזון ה-85 של מהירויות הנסיעה לבין המהירות המותרת (המורה ע"י תמרור), בעוד שבדרכים המאספות והמקומיות קשר סטטיסטי זה היה חלש. בניתוח פרטני נוסף עבור הדרכים העורקיות זוהו משתנים מסבירים נוספים שהם: הימצאות מפרדה וצורתה.

* בדרכים המקומיות (עם ממ"מ של 48 קמ"ש) נצפה פיזור רחב של מהירויות הנסיעה בפועל, עם משתנה מסביר אחד – הימצאות נתיבי חניה לאורך הרחוב.

בנוסף, נערך ניתוח אשכולות במטרה לזהות משתנים (מאפייני הדרך) שתורמים ליצירת קבוצות אתרים עם מהירויות נסיעה דומות. בין משתנים אלה נמצאו: רמת פעילות הולכי הרגל, הימצאות נתיבי חניה, הימצאות קו הפרדה, סוג מפרדה, סביבת הדרך (מגורים, מסחר, חקלאות), סוג דרך וצפיפות הרמזורים. סה"כ, ממצאי המחקר תאמו את ההיגיון ההנדסי. עם זאת, הקשרים הסטטיסטיים שנמצאו היו חלשים למדי, פרט לקשר בין המהירות המותרת והמהירות בפועל.

כפי שצוין לעיל בפרק 1.3.2, מודלים רבים פותחו בעולם לחיזוי מהירות התפעול בדרכים הלא עירוניות על סמך מאפייני הדרך, כאשר חלקם הגדול עסק בחיזוי המהירות בעקום (Lamm et al, 1999; Misaghi & Hassan, 2005) וחלקם הקטן יותר - בחיזוי המהירות בקטע ישר או בעקומי מעבר (כגון: Figuroa and Tarko, 2007; Bird & Hashim, 2006). בין המשתנים המשפיעים על מהירות התפעול נמצאו: מדדי עקמומיות, אורך העקום או המשיק, מדדי השיפוע לאורך, הגבהה צדית, מאפייני עקומים קודמים בדרך, מצב המיסעה, רוחב נתיב ורוחב שול, סוג רכב, קרבת צמתים ועוד. צורות הקשר שנמצאו משתנות כתלות במדינה, סוג דרך, תנאי הדרך והסביבה, מאפייני הדרך שהיו זמינים למדידה במחקר. כמו כן, לרוב, מודלים אלה פותחו לצורכי הערכת עקביות תכן הדרך ולא בקונטקסט של יצירת דרכים המסבירות את עצמן.

חביב-מטר (2001) פיתחה מודל לתכנון עקבי של דרכים דו-נתיביות בישראל בהתבסס על מאפייני התוואי האופקי. Polus et al (2005) שיפרו את מודל העקביות הבסיסי, בהתחשב בדרכים הרריות. מודל העקביות המשופר לדרכים ההרריות מעריך את אחידות התכנון באמצעות בחינת ההפרש במהירות בין שני אלמנטים גיאומטריים סמוכים, ובאמצעות הערכה "אורכית" של מידת הסטיות של המהירות מהמהירות הממוצעת וכמו כן, מתייחס להפרשי המהירויות בין כלי רכב פרטיים ומשאיות.

במחקר אוסטרלי של Edquist et al (2009), נערכה סקירה של מחקרים אשר בחנו השפעת סביבת הדרך על בחירת המהירות על-ידי הנהגים, לרבות בדיקת ההשפעה הן על תפיסת המהירות ע"י הנהגים עצמם והן על המהירות שנראית כמתאימה לתנאי הדרך בעיני הנהגים. ע"פ ממצאי הספרות, מהירויות נמוכות יותר מזוהות עם תנאים גיאומטריים כגון: סוגי מיסעות קשים יותר (הגורמים לרמות רעש ורעידות חזקות יותר); דרך צרה יותר; עקומים אופקיים ואנכיים; שיפוע אורכי עולה; ליקויים בסימון מיסעה. גם סביבת הדרך יכולה להשפיע על בחירת מהירויות הנסיעה, כאשר לדוגמא, עצמים רבים בצידי הדרך מחזקים את אפקט התנועה בראיה הפריפריאלית של הנהג, דבר הגורם לו להאט. באופן דומה, הנהגים נוטים להפחית את המהירות כאשר עצמים קשיחים נמצאים בקרבת המיסעה, עם אפשרויות מצומצמות למניעת נגיעה בעצמים אלה, או כאשר הדרך מתאפיינת בריבוי נקודות כניסה ובנוכחות משתמשי דרך אחרים. לגבי סימון מיסעה ותימרור שתפקידם העיקרי

להעביר לנהג מידע לגבי מהירויות נסיעה מתאימות, נמצא כי השפעתם על מהירויות הנסיעה בפועל מוגבלת למדי, פרט לנסיבות מסוימות כגון: שילוט התראה דינאמי על סכנות זמניות. בין הגורמים האחרים המשפיעים על בחירת מהירויות הנסיעה ע"י הנהגים נמצאו: תנאי מאור; ראות מוגבלת עקב תנאי מזג האוויר; מיסעה רטובה; פקק תנועה או נוכחות כלי רכב חונים בצד הדרך. בנוסף, הקשר בין סביבת הדרך והמהירות מושפע ע"י מצבי הנהג והרכב, לדוגמא, האם הנהג נמצא תחת לחץ, עייפות או היסח דעת; גיל וותק הנהיגה של הנהג; יכולות הרכב; הימצאות ברכב אמצעים חכמים לתמיכה בנהיגה, ועוד.

בהקשר של שיפורי תשתית המבטאים את תפיסת הדרכים המסבירות את עצמן, Elliot et al (2003) מתארים סדרה של מחקרים באנגליה אשר בחנו השפעת הסדרים שונים על הורדת מהירויות הנסיעה בכניסה לכפרים מדרכים הלא עירוניות. נמצא כי סימון מיסעה ותימור פשוט הביאו לירידה של 1-2 מייל לשעה במהירויות הנסיעה; שימוש במיסעה צבועה עם אפקט ויזואלי של היצרות התקשר עם ירידה של 5-7 מייל לשעה, בעוד שהוספת היצרות פיסיית או טיפול הנדסי אחר כמו התקנת פסי האטה או הסטה צידית הביאו לירידה של 10 מייל לשעה, במהירויות הממוצעות.

במחקר שנערך בישראל - זילברשטיין, גיטלמן וריגלר (2009) נבחנה תפיסת הנהגים של קטעי דרך טיפוסיים בדרכים הלא עירוניות בישראל באמצעות מדידת מהירויות נסיעה בחתכים טיפוסיים של הדרכים הלא עירוניות, סקרי דעות בתחנות דלק וקבוצות מיקוד. ממצאי מדידות המהירות בחתכי דרך טיפוסיים הראו כי המשתנה המשפיע ביותר על אומדני המהירות בקטעי הדרכים הלא עירוניות הוא סוג דרך: המהירות יורדת בדרך חד-מסלולית ועולה בדרך דו-מסלולית, וכמו כן, המהירות נמוכה יותר בדרך אזורית לעומת ראשית. משתנים גיאומטריים נוספים אשר תורמים ל"מיתון" מהירויות הנסיעה הם טופוגרפיה (קטע הררי לעומת מישורי) ועקום אופקי שמאלה.

סקר דעות הנהגים בתחנות דלק בוצע במטרה לבחון את תפיסות הנהגים של מהירויות מותרות ומהירויות המתאימות לנסיעה בדרכים הבינעירוניות בישראל. על-פי רוב תשובות הנהגים לגבי המהירות שמתאימה לנסיעה מסתמנת תפיסה הגיונית לפיה, החתך הטיפוסי ללא אילוצים, בכל סוג דרך, מזוהה עם מהירות גבוהה יותר, בעוד שאילוצי החתך - עקומים ושיפועים, מזוהים עם מהירויות נסיעה נמוכות יותר. כמו כן, באופן עקבי, הערך הנמוך ביותר של המהירות המתאימה לנסיעה ניתן ע"י הנהגים לחתכים עם טופוגרפיה הררית. עם זאת, לפי מדדי המהירות שחושבו על סמך תשובות הנהגים ניתן להסיק שבקרב הנהגים קיימת שאיפה למהירויות נסיעה גבוהות מהמותר כיום בקטעי דרך עם חתכים טיפוסיים. על-פי ממצאי ניתוח של נתוני הסקר, הנהגים יודעים להבחין בין סוגי דרך שונים בבחירת המהירות שמתאימה לנסיעה, כאשר רמות מהירויות הנסיעה שמזוהות בעיני הנהגים עם סוגי דרך שונים, היו כלהלן: דרך ראשית דו-מסלולית מזוהה עם הרמה הגבוהה ביותר של מהירויות הנסיעה; דרך ראשית חד-מסלולית - עם ערך נמוך יותר, במקום השני; דרך דו-מסלולית אזורית - במקום השלישי; דרך חד-מסלולית אזורית - במקום הרביעי, עם הערך הנמוך ביותר של מהירויות הנסיעה.

Ivan, Garrick, and Hanson (2009) בדקו האם מאפיינים פיזיים של הדרך וסביבת הדרך קשורים למהירויות נסיעה בפועל. מהירויות נסיעה בפועל נמדדו ב-300 אתרים באזורים עירוניים, פרבריים

ולא עירוניים במדינת קונקטיקט, ארה"ב, במיקומים ללא עקומים אופקיים או אמצעי בקרת תנועה. נמצא כי הגורמים הקשורים עם מהירויות נסיעה ממוצעות גבוהות הם שוליים רחבים, מרחקים גדולים בין קצה הדרך לקו הבניין וסביבת אזור מגורים. לעומת זאת, הגורמים הקשורים עם מהירויות נסיעה ממוצעות נמוכות הם חנייה ברחוב, מדרכות ומיקום באזור מרכז העיר או באזור מסחרי. הממצאים מרמזים כי נהגים מאטים היכן שהדרך מרגישה "כלואה" או שיש פעילות ניכרת ברחוב, והם מאיצים היכן שהדרך מרגישה "פתוחה" או שהפעילות ברחוב מועטה. הממצאים מדגימים כי באמצעות בחירה מכוונת של מאפייני הדרך וסביבתה, ניתן להשפיע על מהירויות הנסיעה ברחוב. נראה כי הנהגים נעזרים ברמזים ממרכיבי הדרך וסביבת הדרך כדי להחליט כמה מהר לנהוג, ורמזים אלה אינם תלויים במהירות המרבית המותרת.

מחקר שנערך באירופה - SPACE (2012), התמקד ביישומים של הקונספט "דרכים שמסבירות את עצמן". במחקר חיפשו פרטי תכנון דרך שיובנו באופן אינטואיטיבי על-ידי הנהגים לצורך ריסון מהירות. הדבר נועד לצורך כתיבת מדריך למתכנני דרכים. לאחר התייעצות עם מומחים ובדיקות נהגים בסימולאטור נהיגה, הוחלט להתמקד בטיפולים בעיקולי דרך ובמעברים מאזור עם ממ"מ גבוה לאזור עם ממ"מ נמוך, מכיוון שבמקומות מסוג זה מייחסים חשיבות גדולה למהירות בשל הסיכויים לאובדן שליטה והתרחשות תאונות.

על סמך סקר הספרות שנערך במחקר, נמצאה רשימת הטיפולים להסדרי התנועה העיקולים שהם בעלי פוטנציאל להשפעה על מהירות, וביניהם: תמרורי חיצים בעיקול (chevron) או סמני קצה; פסים אלכסוניים בצדי התיב (בשול ובמרכז); הצבת תמרור דינמי (מופעל על-ידי רכב שמהירותו עולה על הסף המומלץ); טיפול בפני המיסעה כגון: הוספת סימון "האט" על המיסעה או פסי הרעדה לרחוב התיב; שיפור מרחקי ראות; שיפור התווית הדרך.

מדיונים בסדנת המומחים שנערכה במחקר עלה שקשה לאמוד את השפעתו של יישום אמצעי בודד, על הפחתת המהירות. המומחים הסכימו שיש לשמור עקביות ביישום האמצעים, כאשר שימוש באמצעים מסוימים צריך להיות כפונקציה של חדות העיקולים. בעקבות המלצת המומחים הוחלט לבחון שתי נקודות אלו: השפעת יישום של מספר אמצעים במקביל ועקביות ביישום.

באמצעות סימולאטור נהיגה עם בסיס נייד המדמה תאוצות צדיות, נבחנה מידת הפחתה במהירות בעקבות טיפול המתאים למידת חדות העיקול. משתתפי הניסוי נהגו בסימולאטור ע"פ מספר תסריטים המהווים שילוב של 3 סוגי חדות העיקולים ו-3 רמות טיפול. המשתתפים נחלקו לקבוצה עם עקביות ביישום האמצעים (כאשר רמת הטיפול התאימה לחדות העיקול), ולקבוצה ללא העקביות. מידת יעילות של הטיפולים נמדדה ע"פ הפחתה במהירות הנסיעה. האמצעים שנבחנו בעזרת הסימולאטור כללו: טיפול ברמה נמוכה - תמרור אזהרה "עיקול לפניך"; טיפול ברמה בינונית - תמרור אזהרה "עיקול לפניך" ותמרורים צדיים עם חיצים; טיפול ברמה גבוהה - תמרור אזהרה "עיקול לפניך", תמרורים צדיים עם חיצים, סימוני פסים אלכסוניים במפרדה ובצד בדרך, ופסי הרעדה לרחוב התיב. מניתוח הממצאים נמצא ששילוב של מספר אמצעים יעיל יותר משימוש באמצעי בודד. כמו כן, נמצא ששימוש באמצעים באופן עקבי יעיל יותר מאשר השימוש הלא עקבי.

בספר Theeuwes et al (2012) העוסק בתכנון מערכות דרכים בטוחות מנקודת מבט של גורמי

אנוש קיים פרק המוקדש לדרכים המסבירות עצמן. בפרק זה, נדונה חשיבות של סיווג מדורג של הדרכים באמצעות שימוש באמצעים אופייניים לסביבת כל סוג דרך, לצורך בחירה על-ידי הנהג בהתנהגות המתאימה לסוג הדרך. כמו כן, בפרק מתוארים המחקרים בהם נבחנה השפעת התערבות בעיצוב סביבת הדרך על מהירות הנסיעה בדרך, בשטח העירוני. בסיכום הפרק נאמר שרעיון הדרכים שמסבירות את עצמן באמצעות סיווגם הסובייקטיבי על-ידי הנהגים, הושרש ותוקף במחקרים המדעיים. רעיון זה אומץ על-ידי רשויות דרך במדינות רבות בעולם, כגישה לתכנון מחדש של סביבת הדרך. כדי לקבל אפקט משמעותי בשינוי התנהגות הנהג (מהירות נסיעתו) בהתאם לסוג הדרך, אין זה מספיק לשנות הבט שולי בסביבת הדרך, אלא נחוץ תכנון חדש, שונה באופן ניכר, של סביבת הדרך.

בארה"ב פורסמו הנחיות לשילוב גורמי אנוש בתכנון מערכות דרכים - דו"ח NCHRP Report 600 (2012). על-פי דו"ח זה דרכים המסבירות את עצמן הן סביבת הדרך בה המשתמש יודע כיצד להתנהג על-פי תכן הדרך ולא על-פי גורם חיצוני כגון: תמרורים ומזורים. כאשר הדרך אינה מסבירה את עצמה, תפעול הדרך יכול להיות לא יעיל, איטי, לא בטיחותי, עם שונות רבה במהירויות המשתמשים. צוין כי בתהליך הנהיגה הנהג קולט מידע על מאפייני הדרך תוך כדי סריקה וחיפוש באופן רציף. בטבלה 1.13 מתוארים מאפיינים המשפיעים על מידות צעדי הסריקה של הנהגים, לפי Campbell et al (2008). ניתן לראות כי מאפייני הדרך המשפיעים על הסריקה הם: סיווג הדרך; רוחב נתיב; רוחב שול; מרחק ראות; סוג ריבוד ומצבו; מצב צידי הדרך; שיפוע הדרך ועקמומיות הדרך.

טבלה 1.13. מאפיינים המשפיעים על מידות הסריקה של הדרך על-ידי הנהג. מקור: Campbell et al (2008)

Factor	Variable	
User	Age Vision Experience	Cognitive ability Road familiarity
Operations	Speed Vehicle type Traffic volume	One-way flow Two-way flow Control type
Highway	Functional class Lane width Shoulder width Sight distance Pavement type and condition	Condition Roadside Grades Curvature
Environment	Weather Land use Pedestrians Urban	Rural Time of day Light condition Scenic/interest attractions

על-פי NCHRP Report 600 (2012), שימוש עקבי בשילוב של המאפיינים הגיאומטריים מוביל למרכיבי דרך העונים לציפיות הנהג, ולכן, הוא יכול לגרום לו לנהוג במהירות אחידה, עם מיעוט שינויי מהירות לא צפויים. לדוגמא, צריך למנוע שינויים גדולים ופתאומיים בהתוויה האופקית, במרחק ראות וברדיוס העיקול, מכיוון שהם מגדילים את עומס העבודה של הנהג, גורמים לתפיסה מוטעית, שגיאות והיווצרות לתאונה.

בסקר של ארגון הדרכים העולמי PIARC (2012) נבחן באיזו מידה הנושאים של גורמי אנוש נכללו בהנחיות התכנון לדרכים מאספות בין-עירוניות, במספר מדינות נבחרות. בסקר, נכללו הנחיות התכנון של המדינות: פורטוגל, קנדה, אוסטרליה, יפן, סין, הונגריה, שבדיה, צרפת והולנד. סה"כ, נבחנו כ-100 קריטריונים של גורמי אנוש, אשר חולקו לשלוש קבוצות כלהלן:

(1) *דרישות לצפיות הנהג בנקודות הקריטיות*: למשתמש הדרך יש לתת מספיק זמן כדי להתאים את הנהיגה ממצב נתון למצב אחר. דרכים ידידותיות למשתמש מספקות לנהג מספיק זמן כדי להתאים את עצמו למצב החדש. זמן התגובה המקובל של 2-3 שני' לא תמיד מספיק. לזיהוי הנקודות הקריטיות, כגון עקול חד או מעבר חצייה, רצוי לספק זמן אבחנה ארוך יותר, של 8-10 שני'. לפני הנקודה הקריטית רצוי לספק לנהג, בנוסף לזמן האבחנה, גם אמצעי אזהרה מקדימים.

(2) *ניהול שדה הראייה כדי להבטיח מהירות נכונה ושמירה על נסיעה בנתיב*: כידוע, הנהגים מתאימים את מהירות נסיעתם למצב דרך נתון, כאשר כמות המידע שעל הנהג לעבד משפיעה על איכות הנהיגה. כמו כן, כמות המידע משפיעה גם על המהירות בה בוחר הנהג לנסוע. לכן, המושג השימושי בתכנון הינו הצפיפות האופטית של שדה הראייה, שזוהי פונקציה של מספר האובייקטים הניצבים המנוגדים לרקע.

ידוע כי מעט אובייקטים המנוגדים לרקע מובילים למונוטוניות, אשר מפחיתה את רמת הביצועים ומהירות התגובות של הנהג. כדי למנוע מונוטוניות, הנהג באופן תת-מודע משנה את פעילות הנהיגה שלו כדי להגדיל את כמות המידע הנקלט. כלומר, הנהג סוטה, בולם או במרבית המקרים, מגביר את המהירות. מכאן, התפיסה המרחבית, ובמיוחד מספר הניגודים בבהירות או בצבע, המשפיעים על מהירות הנסיעה, צריכים להיות מוגדרים כדי לתמוך בבחירת המהירות הנכונה ע"י הנהג. לכן, ניהול מהירות יעיל משתמש בשינוי בבהירות ובניגודיות הצבעים, כדי למנוע הגברת מהירות באופן תת-הכרתי. כדי ליישם עקרון זה, סביבת הדרך צריכה לכלול את האמצעים כגון: עצמים שמושכים את תשומת לב הנהג, אך לא מסיחים אותה; תוואי מתפתל במקצב אחיד (בעקמומיות שאינה חריפה מידי). מוצע למנוע תכנון בו קיים קטע ישר ארוך לפני נקודה קריטית, כגון עיקול חד.

(3) *דרישה לשילוב גורמי אנוש בתכנון כאשר נדרש מהנהג שינוי בהתנהגות עקב שינוי בדרך*: כידוע, הנהגים עוקבים אחרי הדרך עם ציפיות לוגיות שעוצבו על-ידי ניסיונם. דבר זה משפיע על התפיסה והתגובה של הנהגים, כאשר במקרים רבים זהו תהליך לא מודע. מצב זה דומה לטיפוס במדרגות, כאשר התנועה של המטפס מותאמת לתדירות המדרגות הנתפסת. אם מדרגה אחת שונה בגובהה, התנועה תורע בצורה משמעותית, שתוצאתה יכולה להיות מעידה או נפילה. כיוול התנהגות הנהג בדרך נעשית באופן דומה, בצורה לא מודעת. מאפייני הנתיב, השול וצידי הדרך יוצרים את תפיסת הדרך ע"י הנהג אשר מגיב בהתאם. רכיב לא צפוי מפריע לפעולה האוטומטית של הנהג שעלולה לגרום לסטייה. אחרי מספר שניות קריטיות הנהג יכול להתגבר על ההפרעה. מסיבות אלו המתכננים מנסים לשמור על עקביות במאפייני הדרך אשר אמורים להשתנות בקצב הגיוני. שינויים הכרחיים צריכים להיות מוצגים מוקדם וברור ככל האפשר. יש להימנע מתכנון שינויים שיבלבלו את הנהג.

בין המלצות הסקר היו:

- לאמן את מתכנני הדרכים בנושאי שילוב של דרישות הנהג בתכנון הדרך, כולל התפיסה המרחבית, ניהול שדה הראייה, תכנון התנהגות הנהג כאשר נדרש שינוי;

- לאמן את מתכנני הדרכים ביישום עקרונות תכנון דרכים המסבירות את עצמן, לרבות קביעת מערכת דרכים היררכית;

- לפתח קשרים חסרים בין תחום הראייה המרחבית, אדריכלות נוף ותכנון תנאי דרך סלחניים;

- להנחיות התכנון להוסיף התייחסות לנושאים כגון: עקרונות הראייה המרחבית; ניהול שדה הראייה להבטחת מהירות מתאימה ושמירה על נסיעה בנתיב; תכנון התנהגות הנהג כאשר נדרש שינוי; הבחנה בנקודות הקריטיות; שימוש בעצמים תופסי מבט.

1.3.4 סיכום

במערכת התחבורה פועלים במשולב מערכת התשתית והמשתמשים בדרך. המערכת תתפקד כראוי כאשר מרכיביה מתואמים ומשדרים למשתמש מסרים ברורים וחד-משמעיים. חשוב שקטעי הדרכים עם מאפיינים הנדסיים דומים יאפשרו משטר מהירות זהה וכמו כן, שהמסרים לגבי אפשרויות הנסיעה בקטעי דרכים אלה יהיו ברורים בעיני הנהגים. תפיסת הדרכים המסבירות את עצמן צריכה לקבוע עקרונות וכללי תכנון לחתך ולמאפייני הדרך, תהליך אשר יתרום לצמצום הפערים בין כוונות המתכנן לבין התנהגות הנהגים ובסופו של דבר, יביא להגברת הבטיחות.

על סמך הניסיון הבינלאומי, בין הכלים הניתנים ליצירת דרכים המסבירות את עצמן ניתן למנות: הגדרת היררכיה נכונה של מערכת הדרכים; הקפדה על עקביות בתכן הדרך; מציאת ביטוי לקשר בין מאפייני הדרכים לבין מהירויות הנסיעה.

תפיסת הדרכים המסבירות את עצמן דורשת הגדרה פונקציונאלית של סוגי הדרכים, כאשר לכל סוג מוגדרת מהירות היעוד אשר מושגת באמצעות מאפייני תכן הולמים. למעשה, מבוצע תכנון מחדש של מערכת הדרכים, על מנת ליצור מצב שבו תפקידי הדרכים ומאפייני התכן יהיו עקביים וברורים יותר לנהגים. ההנחה הנה שמערכת תנועה אחידה וצפויה יותר תחזק את יכולת הנהגים לבחור במהירויות נסיעה מתאימות. כתוצאה מכך, יצטמצמו הקונפליקטים שקשורים לגורם המהירות ולגורמים אחרים, מצב אשר יביא בסופו של דבר לירידה במספר התאונות.

ההנחיות לקביעת מהירויות (2010) הגדירו את ההיררכיה החדשה של סוגי הדרכים בארץ ואת הגישה החדשה לקביעת מהירויות הנסיעה ברשת הדרכים, תוך כדי איזון בין שיקולי הניידות והבטיחות. כמו כן, ההנחיות מסבירות את אופן פעילות המתכנן ליישום הגישה החדשה. עם זאת, קיים צורך בפיתוח כלים הנדסיים שיסייעו ביישום הגישה החדשה - התאמת מאפייני הדרכים למהירויות היעוד. כלומר, נדרש לבסס את מאפייני הדרכים בארץ שיהפכו אותן לדרכים המסבירות את עצמן בעיני הנהגים ובכך, יתרמו לצמצום הפערים בין מהירויות היעוד לבין מהירויות התפעול. בשל הן היקף והן חומרת בעיות הבטיחות בדרכים החד-מסלוליות, זיהוי מאפייני הדרך אשר יביאו למהירויות נסיעה מתאימות יותר חשוב במיוחד עבור סוג דרך זה.

בנסיעתו לאורך הדרך מסתמך הנהג על ניסיונו מהנהיגה בדקות הקודמות. כאשר ציפיותיו אינן מתממשות, נוצר קונפליקט בין ציפיותיו לבין הנתונים בשטח, מצב אשר עשוי לגרום לטעויות

בהחלטות הנהג ולחייב לתאונות. מאידך, כאשר הכביש מתוכנן בעקביות ובאחידות, הדבר מביא לכך שצפיפות הנהג יתממשו ונהיגתו תהיה בעלת פחות שגיאות ומכאן יותר בטוחה.

מהירות התפעול הינה הפרמטר העיקרי בהערכת עקביות תכן הדרך. בספרות קיימים מודלים רבים לחיזוי מהירות התפעול בהתבסס על המאפיינים הגיאומטריים, אם כי רובם נבנו עבור תנאי הנסיעה בעקום. עקביות התכן מוערכת על-פי ההפרשים במהירות התפעול בין שני אלמנטים עוקבים או בין מהירות התפעול ומהירות התכן של אותו האלמנט הגיאומטרי; ככל שהפרשים אלה קטנים יותר כך העקביות גדלה.

הן לבחינת איכות התכן והן לבחינת השפעתם של מאפייני דרך שונים על בטיחות, משמשות מהירויות הנסיעה בזרימה חופשית (מהירויות התפעול). מהירויות הנסיעה מתאימות גם לשמש כמדד אובייקטיבי למדידת "תפיסת הנהגים" של תנאי דרך שונים.

טבלה 1.14 מסכמת את מאפייני הדרך המשפיעים על מהירויות הנסיעה של הנהגים, ע"פ המקורות שנסקרו.

טבלה 1.14. מאפייני דרך המשפיעים על מהירויות הנסיעה, על-פי מקורות הספרות

מס'	מאפיינים משפיעים	מקור	ממצא: השפעה על מהירויות בפועל
1	היררכיה נכונה של מערכת הדרכים אשר נתמכת ע"י מאפייני הדרך וסביבתה	NCHRP Report 600, 2012 Theeuwes et al, 2012 זילברשטיין וחבריו, 2009 Campbell et al, 2008 OECD, 2006 Wegman and Aarts, 2006 Theeuwes et al, 1995 Mazet and Fleury, 1987 PIARC, 2012	הפחתת מהירות בדרכים מהיררכיה נמוכה
2	עקומים אופקיים	זילברשטיין וחבריו, 2009 Edquist et al, 2009 Weller et al, 2008 Campbell et al, 2008 Misaghi and Hassan, 2005 Fitzpatrick et al, 2005, 2003	הפחתת מהירות על-פי מידת הרדיוס
3	סוג הפרדה בין הנתיבים בדרך דו-נתיבית	Stelling-Konczak et al, 2011 SWOV, 2007a Fitzpatrick et al, 2005 Elliot et al, 2003	פס צבע מזוהה עם מהירות גבוהה, שטח הפרדה צבוע - עם מהירות נמוכה, מפרדה בנויה - עם מהירות יותר נמוכה
4	צפיפות גישות לדרך	Edquist et al, 2009 Fitzpatrick et al, 2005, 2003	צפיפות גבוהה של גישות מפחיתה מהירות
5	מצב המיסעה	Edquist et al, 2009 Weller et al, 2008 Campbell et al, 2008	מיסעה במצב גרוע מפחיתה מהירות
6	רוחב נתיב	Weller et al, 2008 Campbell et al, 2008 Elliot et al, 2003	נתיב צר מפחית מהירות
7	רוחב שול	Ivan et al, 2009 Weller et al, 2008 Campbell et al, 2008	שול צר מפחית מהירות
8	צדי הדרך	Edquist et al, 2009 Campbell et al, 2008 PIARC, 2012	עצמים קשיחים קרובים לדרך מפחיתים מהירות
9	שיפועים לאורך	Campbell et al, 2008 Fitzpatrick et al, 2005, 2003	שיפועים גבוהים לאורך מפחיתים מהירות
10	מהירות מותרת	Fitzpatrick et al, 2005, 2003	ממ"מ נמוכה מפחיתה מהירות
11	סוג אזור	Fitzpatrick et al, 2005, 2003	אזור עם בינוי קרוב לדרך מפחית מהירות

על סמך ממצאי המחקרים שנערכו בעולם ניתן להצביע על השפעתם על מהירויות בפועל של מאפייני דרך שונים, וביניהם: מצב סביבת הדרך; החתך הגיאומטרי; מדדי עקום אופקי ושיפוע אנכי; קרבת צמתים, ממ"מ. עם זאת, מערכת קשרים זו טרם הגיעה למצב שמאפשר לשמש בסיס מוצק לתכנון, ולכן, קיים צורך במחקרים אמפיריים נוספים שיתרמו להבנתה.

2. הכנת בסיס הנתונים למחקר

2.1. מקורות המידע

מחקר זה שאף לבחון את מערכת הקשרים בין מהירויות הנסיעה ומאפייני הדרך, בדרכים החד-מסלוליות בישראל, על מנת לזהות את מאפייני התכן המשפיעים על בחירת מהירויות נסיעה מסוימות על-ידי הנהגים. בחינה זו מתבססת על שילוב של שני בסיסי נתונים:

(א) מערכת מידע גיאוגרפית המציגה את מדדי מהירויות הנסיעה ברשת הדרכים;

(ב) בסיס נתונים על מאפייני הדרכים של חברת נתיבי ישראל.

בסיס הנתונים הראשון נבנה במחקר בכור, מוריק, גיטלמן (2012) על סמך נתונים מבוססי GPS לגבי מיקום כלי רכב ברשת הכבישים המאפשרים לחשב את מהירויות הנסיעה בקטעי רשת מוגדרים (קטעי TMC). המחקר ניתח מעל 30,000,000 תצפיות מהירות של כלי רכב שנסעו לאורך כבישי הארץ במשך 6 חודשים, פברואר-יולי 2011, וחישב מדדי מהירות: מהירות ממוצעת, סטית תקן, מהירות האחוזון ה-85, אחוז כלי רכב מעל המהירות המותרת - עבור הקטעים המוגדרים. אומדני המהירות חושבו בשעות זרימה חופשית, אם כי, כאמור, באגרזיה על פני הזמן - 6 חודשי תצפיות. אומדני המהירות חושבו לחוד עבור שעות יום ושעות לילה, בימי חול ובימי שישי, שבת. קבצי הפלט המיוצרים על-ידי מנגנון העיבוד במחקר כללו שדות מפתח של קטעי ה-TMC ומדדי מהירות מחושבים. מקור המידע לנתונים על מאפייני תשתיות הדרכים הינו סקר דרכים שהוזמן ע"י חברת נתיבי ישראל ושבעקבותיו הוכנו קבצים עם מאפייני הדרכים עבור מערכת ניהול בטיחות (מנ"ב) של החברה. סקר הדרכים נערך ברשת הדרכים המתוחזקת על-ידי החברה, הנתונים נאספו בשנת 2010.

הנתונים למחקר זה נגזרו מבסיס הנתונים של מערכת המנ"ב, עבור קטעי הדרכים החד-מסלוליות. המידע נאסף עבור קטעי דרך בלבד, לא כולל צמתים. במערכת המנ"ב, הנתונים על מאפייני הדרכים קיימים עבור סגמנטים באורך של כ-100 מ'. עבור כל סגמנט ישנם מאפיינים אלה: מספר דרך, קילומטר התחלה, קילומטר סוף, רוחב מיסעה, שול אספלט חיצוני (כיוון עולה וכיוון יורד), שול גרנולרי חיצוני (כיוון עולה וכיוון יורד), רוחב שול (כיוון עולה וכיוון יורד), קוד המציין אזור גיאוגרפי, אורך, שיפוע אורכי, שיפוע צידי, רדיוס אופקי, רדיוס אנכי. כאשר קיימים מעקות בטיחות בצד הדרך, מצוין: מיקום המעקה בחתך (שמאל או ימין), חומר (פלדה או בטון), סוג, מודל, גובה מינימאלי, גובה מקסימאלי, מרחק ממיסעה, מרחק ממכשול. כאשר לא קיימים מעקות בצידי הדרך, מצוין רוחב אזור המפלט, סוג מכשול.

2.2. מאפייני הדרך המועמדים למסבירים של מהירויות הנסיעה

בעקבות בחינת ממצאי הספרות הונח כי על בחירת מהירות הנסיעה ע"י הנהג עשויים להשפיע מאפייני דרך כגון: רוחב נתיב, רוחב שול, עקום אופקי, עקום אנכי, שיפוע לאורך, מצב צידי הדרך. על-פי הנחיות לתכן דרכים, מאפייני הדרך נגזרים מבחירת סוג הדרך ומהירות התכן. לפי הנחיות לתכן דרכים בישראל (הנחיות, 2012), בדרכים החד-מסלוליות מהירויות הייעוד נקבעו כלהלן:

* בדרך חד-מסלולית מישורית – 70 קמ"ש;

* בדרך חד-מסלולית גבעית – 60 קמ"ש;

* בדרך חד-מסלולית הררית – 50 קמ"ש.

לכן, ערכי מהירויות התכן בדרך החד-מסלולית הם:

* בדרך מישורית – 80 קמ"ש;

* בדרך גבעית – 70 קמ"ש;

* בדרך הררית – 60 קמ"ש.

הדרישות לרוחב נתיב בדרך החד-מסלולית נקבעו כלהלן:

* בדרך ראשית עם מהירות תכן 80-60 קמ"ש - 3.6 מ';

* בדרך אזורית עם מהירות תכן 80 קמ"ש - 3.6 מ';

* בדרך אזורית עם מהירות תכן 70 קמ"ש - 3.5 מ';

* בדרך אזורית עם מהירות תכן 60 קמ"ש - 3.3 מ';

* בדרך מקומית וגישה עם מהירות תכן 80 קמ"ש - 3.5 מ';

* בדרך מקומית וגישה דלת תנועה עם מהירות תכן 80-60 קמ"ש - 3.0 מ'.

הדרישות לרוחב שול בדרך החד-מסלולית נקבעו כלהלן:

* בדרך ראשית עם מהירות תכן 80-60 קמ"ש - 3.0 מ';

* בדרך אזורית עם מהירות תכן 80 קמ"ש - 3.0 מ';

* בדרך אזורית עם מהירות תכן 70 קמ"ש - 2.5 מ';

* בדרך אזורית עם מהירות תכן 60 קמ"ש - 2.0 מ';

* בדרך מקומית וגישה עם מהירות תכן 80-60 קמ"ש - 2.0 מ'.

הדרישות לרדיוס מזערי של עקום אופקי בדרך החד-מסלולית נקבעו כלהלן:

* רדיוס אופקי מזערי למהירות תכן 60, 70 ו-80 קמ"ש יהיה 110, 170 ו-220 מ', בהתאמה.

הדרישות לשיפוע אורכי מרבי בדרך החד-מסלולית נקבעו כלהלן:

* בדרך ראשית ואזורית במהירות תכן 60 קמ"ש (הררי) - 9%;

* בדרך ראשית ואזורית במהירות תכן 70 קמ"ש (גבעי) - 8%;

* בדרך ראשית ואזורית במהירות תכן 80 קמ"ש (משורי) - 7%;

* בדרך מקומית וגישה במהירות תכן 60 קמ"ש (הררי) - 10%;

* בדרך מקומית וגישה במהירות תכן 70 קמ"ש (גבעי) - 9%;

* בדרך מקומית וגישה במהירות תכן 80 קמ"ש (משורי) - 8%.

הדרישות לרדיוס מזערי של עקום אנכי קמור בדרך החד-מסלולית נקבעו כלהלן:

רדיוס מזערי לעקום אנכי קמור במהירות תכן 60, 70 ו-80 קמ"ש יהיה 1400, 2500 ו-4,000 מ', בהתאמה.

הדרישות לרדיוס מזערי של עקום אנכי קעור בדרך החד-מסלולית נקבעו כלהלן:

רדיוס מזערי לעקום אנכי קעור במהירות תכן 60, 70 ו-80 קמ"ש יהיה 1500, 2200 ו-2,800 מ', בהתאמה.

לגבי מצב צידי הדרך, קיימות דרישות בהנחיות להצבת מעקות בטיחות (2005) אשר מתייחסות, בין היתר, להצדקים להצבת מעקות, מיקום הצבת המעקות ולדרישות לרוחב אזור המפלט בהיעדר מעקות. דרישות אלה מפורטות למדי ולכן, אינן מובאות כאן; עיקר הדרישות להסדרת צידי דרך סלחניים, עבור הדרכים החד-מסלוליות, נלקחו בחשבון בהגדרת מצבי צידי הדרך – ראה סעיף 2.4.

2.3. הגדרת יחידות ניתוח

מדדי מהירויות הנסיעה קיימים עבור קטעים מוגדרים של רשת הדרכים (קטעי TMC). כלומר, יחידות הניתוח הם קטעי דרך בין צמתים מוגדרים. מכאן, גם מאפייני הדרך צריכים להיגזר עבור יחידות ניתוח אלה. כל יחידת ניתוח מזוהה לפי: מס' דרך; קילומטר בצומת קצה של התחלת הקטע; קילומטר בצומת קצה של סוף הקטע.

במערכת המנ"ב, רוב הנתונים הגיאומטריים של הסגמנטים מתארים את תכונות הדרך על-פי כיווני הנסיעה. מכיוון שהמחקר עוסק בדרכים חד-מסלוליות דו-סטרויות, אין משמעות לכיווני הנסיעה במאפייני התכנון שלהם, כאשר, לרוב, קיימת סימטריות במאפייני דרכים אלה. לכן, קיבוץ תכונות הקטעים נעשה לשני הכיוונים ביחד. לכל יחידת ניתוח נאספו נתוני כל הסגמנטים הכלולים ביחידת הניתוח בשני כיווני הנסיעה (עולה ויורד). מהניתוח הוסרו: סגמנטים בקטעים מופרדים, ליד צמתים וליד מחלפים.

2.4. הגדרת מדדי תשתית לבחינה במחקר

על סמך הנתונים הזמינים במערכת המנ"ב, מדדי התשתיות המוצעים לבחינה במחקר זה מתייחסים למרכיבי תשתית אלה: (א) רוחב נתיב, (ב) רוחב שול, (ג) רדיוס אופקי, (ד) רדיוס אנכי, (ה) שיפוע אורכי, (ו) מצב צדי הדרך. עבור כל מאפיין, לכל יחידת ניתוח מחושב הערך המייצג שלו וכן, מדדים לאפיון פיזור הערכים. יש לשים לב כי יחידות הניתוח ארוכות יחסית, כאשר מידע על מאפייני תשתית קיים עבור סגמנטים באורך של כל 100 מ'. מכאן, מדדי התשתית מהווים תוצאה של מיצוע או הכללה של מדידות רבות, כאשר יש מקום לבחון גם את רמת השתנות המאפיין בעזרת מדדים מיוחדים. בנוסף, על סמך מאפייני תשתית נבחרים מחושבים מדדי עקביות התכן, באמצעות "תרגום" ערכי המאפיינים לערכי מהירות התכן.

המדדים מוערכים לכל קטע דרך - יחידת ניתוח, שעבורו ישנם מדדי המהירות.

בנוסף למאפייני החתך לרוחב, המאפיינים הגיאומטריים ואפיון צדי הדרך, לכל יחידת ניתוח מופק גם מדד צפיפות הצמתים. הימצאות צמתים משפיע על רצף הנסיעה ומכאן, על מהירויות הנסיעה של כלי הרכב, לכן, היא צריכה להילקח בחשבון באפיון הקטעים. כמו כן, השפעת נוכחות הצמתים על מהירויות הנסיעה נמצאה גם בספרות (ראה סעיף 1.3).

להלן פירוט המדדים שהופקו להערכת כל מאפיין תשתית, עבור כל קטע - יחידת ניתוח המקובצת מהסגמנטים³.

³ המונחים שהיו בשימוש בהפקת מדדי התשתית: יחידת ניתוח – קטע ארוך, בין שני צמתים שעבורו יש מדדי מהירות; סגמנט – יחידת מידע על מאפייני תשתית, באורך כ-100 מ'; מקבץ – הכללה של מספר סגמנטים עוקבים.

א. רוחב נתיב

1. **מדדים מייצגים:** על סמך ערכים מוחלטים של רוחב נתיב, מחושבים אומדן ממוצע (מקוטע - על סמך 50% המרכזיים של התפלגות הערכים), אומדן \min (על סמך 25% הנמוכים של התפלגות הערכים), ואומדן \max (על סמך 25% הגבוהים של התפלגות הערכים).

2. **מדדי השתנות:** יש לסווג את הערכים המוחלטים של רוחב נתיב לקטגוריות: עד 3.3, 3.3-3.5, 3.5-3.6, מעל 3.6 - ולהציג % של כל קטגוריה, עבור קטע.

3. **בדיקת עקביות התכן:** יש לקבץ סגמנטים עוקבים למקבצים באורך כולל עד 330 מ' (בשני הכיוונים, עולה ויורד) ולכל מקבץ לחשב **רוחב נתיב ממוצע**. את הערכים שהתקבלו יש לתרגם לאומדן של מהירות תכן לפי הכללים שלהלן:

תחום	מהירות תכן, קמ"ש
רוחב נתיב ממוצע < 3.60 מ'	*80
3.59 < רוחב נתיב ממוצע < 3.50 מ'	70
3.49 < רוחב נתיב ממוצע < 3.30 מ'	60
רוחב נתיב ממוצע < 3.29	50

* למעשה, 80 או גבוהה יותר - 90, 100 קמ"ש

יש לחשב הפרשים של מהירות תכן לכל שני מקבצים סמוכים ועל סמך ההפרשים לבנות התפלגות. על סמך התפלגות ההפרשים במהירות התכן, יש לסווג את הערכים לקטגוריות: עד 10 קמ"ש, 10-20 קמ"ש, מעל 20 קמ"ש - ולהציג % של כל קטגוריה, עבור קטע.

ב. רוחב שול

1. **מדדים מייצגים:** על סמך ערכים מוחלטים של רוחב שול, מחושבים אומדן ממוצע (מקוטע - על סמך 50% המרכזיים של התפלגות הערכים), אומדן \min (על סמך 25% הנמוכים של התפלגות הערכים), ואומדן \max (על סמך 25% הגבוהים של התפלגות הערכים).

2. **מדדי השתנות:** יש לסווג את הערכים של רוחב שול לקטגוריות: עד 2.0, 2.0-2.5, 2.5-3.0, מעל 3.0 - ולהציג % של כל קטגוריה, עבור קטע.

3. **בדיקת עקביות התכן:** יש לקבץ סגמנטים עוקבים למקבצים באורך כולל עד 330 מ' (בשני הכיוונים, עולה ויורד) ולכל מקבץ לחשב **רוחב שול ממוצע**. את הערכים שהתקבלו יש לתרגם לאומדן של מהירות תכן לפי הכללים שלהלן:

תחום	מהירות תכן, קמ"ש
רוחב שול ממוצע < 3.0 מ'	*80
2.99 < רוחב שול ממוצע < 2.5	70
2.49 < רוחב שול ממוצע < 2.0	60
רוחב שול ממוצע < 1.99	50

* 80 או גבוהה יותר - 90, 100 קמ"ש

יש לחשב הפרשים של מהירות תכן לכל שני מקבצים סמוכים, ועל סמך ההפרשים לבנות התפלגות. על סמך התפלגות ההפרשים במהירות התכן, יש לסווג את הערכים לקטגוריות: עד 10 קמ"ש, 10-20 קמ"ש, מעל 20 קמ"ש - ולהציג % של כל קטגוריה, עבור קטע.

ג. רדיוס אופקי

1. החלק הרלוונטי של הקטע: יש לחשב % מאורך קטע בו קיים רדיוס אופקי (סגמנטים בהם הרדיוס קטן מערך 400 מ'; יתר הסגמנטים יחשבו לישרים).

2. מדדים מייצגים: עבור הסגמנטים בהם קיים הרדיוס (דהיינו, קטן מ-400 מ'), מחושבים לרדיוס האופקי: אומדן ממוצע (על סמך 50% המרכזיים של התפלגות הערכים), אומדן min (על סמך 25% הנמוכים של התפלגות הערכים), אומדן max (על סמך 25% הגבוהים של התפלגות הערכים).

3. מדדי השתנות: עבור הסגמנטים בהם קיים הרדיוס, יש לסווג את הערכים לקטגוריות: עד 100 מ', 100-200 מ', 200-300 מ', מעל 300 מ' – ולהציג % של כל קטגוריה, עבור קטע.

4. בדיקת עקביות התכן: עבור הסגמנטים בהם קיים הרדיוס, יש לקבץ סגמנטים עוקבים למקבצים באורך כולל עד 330 מ' (דהיינו, 2-3 סגמנטים, בשני כיווני הנסיעה) ולכל מקבץ לחשב רדיוס אופקי ממוצע. את הערכים שהתקבלו יש לתרגם לאומדן של מהירות תכן לפי הכללים שלהלן:

תחום	מהירות תכן, קמ"ש
רדיוס ≤ 340 מ'	90
$220 \leq$ רדיוס ≤ 339	80
$170 \leq$ רדיוס ≤ 219	70
$110 \leq$ רדיוס ≤ 169	60
רדיוס ≤ 109	50

יש לחשב הפרשים של מהירות התכן לכל שני מקבצים סמוכים, ועל סמך הפרשים לבנות התפלגות. על סמך התפלגות הפרשים במהירות התכן, יש לסווג את הערכים לקטגוריות: עד 10 קמ"ש, 10-20 קמ"ש, מעל 20 קמ"ש – ולהציג % של כל קטגוריה, עבור קטע.

ד. רדיוס אנכי

- עבור עקמומיות אנכית קמורה

1. החלק הרלוונטי של הקטע: יש לחשב % מאורך קטע בו קיים רדיוס אנכי קמור (סגמנטים בהם הרדיוס קטן מ-6500 מ'; יתר הסגמנטים יחשבו למישוריים).

2. מדדים מייצגים: עבור הסגמנטים בהם קיים רדיוס אנכי קמור, יש לחשב למאפיין זה: אומדן ממוצע (על סמך 50% המרכזיים של התפלגות הערכים), אומדן min (על סמך 25% הנמוכים של התפלגות הערכים), אומדן max (על סמך 25% הגבוהים של התפלגות הערכים).

3. מדדי השתנות: עבור הסגמנטים בהם קיים רדיוס אנכי קמור, יש לסווג את הערכים לקטגוריות: עד 1400 מ', 1400-2500 מ', 2500-4000 מ', מעל 4000 מ' - ולהציג % של כל קטגוריה, עבור קטע.

- עבור עקמומיות אנכית קעורה

1. החלק הרלוונטי של הקטע: יש לחשב % מאורך קטע בו קיים רדיוס אנכי קעור (סגמנטים בהם הרדיוס קטן מערך מסוים כגון: 4000 מ'; יתר הסגמנטים יחשבו למישוריים).

2. **מדדים מייצגים:** עבור הסגמנטים בהם קיים רדיוס אנכי קעור, יש לחשב למאפיין זה: אומדן ממוצע (על סמך 50% המרכזיים של התפלגות הערכים), אומדן \min (על סמך 25% הנמוכים של התפלגות הערכים), אומדן \max (על סמך 25% הגבוהים של התפלגות הערכים).

3. **מדדי השתנות:** עבור הסגמנטים בהם קיים רדיוס אנכי קעור, יש לסווג את הערכים לקטגוריות: עד 1500 מ', 1500-2200 מ', 2200-2800 מ', מעל 2800 מ' - ולהציג % של כל קטגוריה, עבור קטע.

ה. שיפוע לאורך

1. **החלק הרלוונטי של הקטע:** יש לחשב % מאורך קטע בו קיים שיפוע לאורך (סגמנטים בהם השיפוע גדול מערך 3%; יתר הסגמנטים יחשבו למצב "ללא שיפוע").

2. **מדדים מייצגים:** עבור הסגמנטים בהם קיים השיפוע, מחושבים לערכי השיפוע: אומדן ממוצע (על סמך 50% המרכזיים של התפלגות הערכים), אומדן \min (על סמך 25% הנמוכים של התפלגות הערכים), אומדן \max (על סמך 25% הגבוהים של התפלגות הערכים).

3. **מדדי השתנות:** עבור הסגמנטים בהם קיים השיפוע, יש לסווג את הערכים לקטגוריות: עד 6%, 6%-8%, 8%-10%, מעל 10% - ולהציג % של כל קטגוריה, עבור קטע.

4. **בדיקת עקביות:** עבור הסגמנטים בהם קיים השיפוע, יש לקבץ סגמנטים עוקבים למקבצים באורך כולל עד 330 מ' (דהיינו, 2-3 סגמנטים, בשני כיווני הנסיעה) ולכל מקבץ לחשב שיפוע אורכי ממוצע. את הערכים שהתקבלו יש לתרגם לאומדן של מהירות תכן לפי הכללים שלהלן:

תחום	מהירות תכן, קמ"ש
שיפוע $\geq 6\%$	90
$6\% < \text{שיפוע} \leq 7\%$	80
$7\% < \text{שיפוע} \leq 8\%$	70
$8\% < \text{שיפוע} \leq 9\%$	60
$9\% < \text{שיפוע}$	50

יש לחשב הפרשים של מהירות תכן לכל שני מקבצים סמוכים, ועל סמך ההפרשים לבנות התפלגות. על סמך התפלגות הפרשים במהירות התכן, יש לסווג את הערכים לקטגוריות: עד 10 קמ"ש, 10-20 קמ"ש, מעל 20 קמ"ש - ולהציג % של כל קטגוריה, עבור קטע.

ו. מצב צדי הדרך

1. **מדד נוכחות מעקות:** יש לחשב % מאורך קטע בו קיימים מעקות בצדי הדרך (מדד נוכחות המעקות `bar_avl` המראה את חלקם היחסי של סגמנטים עם מעקות הבטיחות מתוך סך הסגמנטים בקטע המקובץ).

2. **רמת בטיחות צידי הדרך לפי מצב המעקות:** עבור הסגמנטים עם המעקות, יש לקבוע קטגוריות של מצב מעקות בטיחות `bar_est`: 1-4, אשר מבטא את קרבת המעקות למיסעה. על סמך ההתפלגות של ערכי הקטגוריות יש לחשב אומדן ממוצע (מקוטע) - על סמך 50% המרכזיים של התפלגות הערכים), אומדן \min (על סמך 25% הנמוכים של התפלגות הערכים), אומדן \max (על סמך 25% הגבוהים של התפלגות הערכים).

3. רמת בטיחות צידי הדרך לפי מצב אזור המפלט: עבור הסגמנטים ללא המעקות, יש לקבוע קטגוריות של מצב אזור המפלט no_bar_est: 1-4, אשר מבטא את רוחב אזור המפרט. על סמך ההתפלגות של ערכי הקטגוריות יש לחשב אומדן ממוצע (מקוטע - על סמך 50% המרכזיים של התפלגות הערכים), אומדן חומו (על סמך 25% הנמוכים של התפלגות הערכים), אומדן max (על סמך 25% הגבוהים של התפלגות הערכים).
להלן הגדרות לקטגוריות של מצב צדי הדרך.

תחומי "רמות הבטיחות" של צדי הדרך על-פי מיקום המעקות (bar_est)

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

תחומי "רמות הבטיחות" של צדי הדרך על-פי רוחב אזור המפלט (no_bar_est)

רוחב אזור המפלט, מ'	רמת בטיחות
עד 3.0	1 - נמוכה
3.0 - 5.5 (לא כולל)	2 - בינונית
5.5 - 7.5 (לא כולל)	3 - טובה
7.5 או יותר	4 - טובה מאוד

ז. צפיפות הצמתים בקטע

בטרם הפקת מדדי התשתיות שהוצגו לעיל, מכל קטע הוסרו סגמנטים הכוללים צמתים. יש להניח כי הימצאות הצמתים בקטע משפיעה על מדדי המהירות. לכן, הוחלט לסכם את אורך הסגמנטים שהוסרו ולהציג לכל קטע מדד צפיפות הצמתים - היחס בין אורך הסגמנטים שהוסרו לאורך הכולל של הקטע (%).

לזיהוי הסגמנטים הנמצאים בקרבת צמתים שימשו סימנים כגון: רוחב נתיב מעל 4.2 מ'; יותר מנתיב נסיעה אחד לכיוון; רוחב שול פנימי השונה מאפס.

2.5. בסיס הנתונים שהוכן למחקר

לכל קטע כביש חד-מסלולי שקיים במערכת המידע על מדדי מהירויות הנסיעה, הופקו מאפייני תשתית בהתאם להגדרות של סעיף 2.4. בסיס הנתונים עם מדדי המהירות ומאפייני התשתית כלל 179 קטעים.

טבלה 2.1 מציגה סטטיסטיקה תיאורית של מאפייני התשתית בקטעי המחקר. מבחינת ממוצע המדדים שהופקו, על פני כל קטעי המחקר, ניתן ללמוד כי:

- בממוצע, כ-9% מאורך הקטעים היוו צמתים;

- מבין קטעי המחקר, 35% נמצאו עם רוחב נתיב עד 3.3 מ', 34% עם רוחב נתיב בין 3.3-3.5 מ' והיתר - ברוחב גדול יותר, כאשר רוחב נתיב ממוצע בין קטעי המחקר היה 3.3 מ';

- מבין קטעי המחקר, 54% היו עם רוחב שול עד 2 מ', 21% עם רוחב שול בין 2.0-2.5 מ', 13% עם רוחב שול בין 2.5-3.0 מ', 11% עם רוחב שול מעל 3 מ', כאשר רוחב שול ממוצע הינו 1.9 מ';

- מבין קטעי המחקר, בממוצע כ-18% מאורך הקטעים נמצא עם רדיוס אופקי עד 400 מ' (דהיינו קיים רדיוס אופקי; יתר חלקי הקטעים - ישרים). מבין חלקי הקטעים הלא ישרים, כ-4% נמצאו עם רדיוס אופקי עד 100 מ', 25% עם רדיוס בין 100-200 מ', 31% עם רדיוס בין 200-300 מ', 34% עם רדיוס מעל 300 מ'⁴.

- מבין קטעי המחקר, בממוצע 84% מאורך הקטעים נמצאו עם רדיוס אנכי קמור (היתר - ללא רדיוס אנכי קמור). בין חלקי הקטעים עם הרדיוס האנכי הקמור, 44% נמצאו עם רדיוס עד 1400 מ', 22% עם רדיוס בין 1400-2500 מ', 18% עם רדיוס בין 2500-4000 מ', 16% עם רדיוס קמור גדול יותר.

- מבין קטעי המחקר, בממוצע 71% מאורך הקטעים נמצאו עם רדיוס אנכי קעור (היתר - ללא רדיוס אנכי קעור)⁵. בין חלקי הקטעים עם הרדיוס האנכי הקעור, 55% נמצאו עם רדיוס עד 1500 מ', 17% עם רדיוס בין 1500-2200 מ', 11% עם רדיוס בין 2200-2800 מ', 16% עם רדיוס קעור גדול יותר.

- מבין קטעי המחקר, בממוצע 27% מאורך הקטעים נמצאו עם שיפוע אורכי מעל 3% (יתר חלקי הקטעים ללא שיפוע אורכי). מבין חלקי הקטעים עם השיפוע, 66% היו עם שיפוע אורכי עד 6%; 12% - עם שיפוע אורכי בין 6%-8%; 4% - עם שיפוע בין 8%-10%; פחות מ-1% - עם שיפוע מעל 10%⁶.

- כמחצית מאורך הקטעים (48%) היו עם מעקות בטיחות בצידי הדרך. עבור חלקי הקטעים עם נוכחות מעקות הבטיחות, האומדן הממוצע של מצב המעקות היה 2.4 (בין "בינוני" ל-"טוב", לפי מיקום מעקות הבטיחות בצידי הדרך); עבור חלקי הקטעים ללא מעקות הבטיחות, האומדן הממוצע של מצב צידי הדרך היה 1.3 (בין רמת בטיחות "נמוכה" ל-"בינונית", לפי רוחב אזור המפרט).

כמו כן, בעקבות "תרגום" ערכי המאפיינים למהירויות התכן ובחינה הפרשים בין מהירויות התכן במקבצי סגמנטים עוקבים, ההפרשים במהירות התכן סווגו לשלוש קטגוריות: עד 10 קמ"ש, בין 10-20 קמ"ש, מעל 20 קמ"ש (בדומה להגדרה של רמות עקביות התכן). פילוגי ההפרשים לפי קטגוריות אלה התקבלו על סמך 4 מאפייני התשתית שהם: רוחב נתיב, רוחב שול, רדיוס אופקי, שיפוע אורכי; שורות עם קטגוריות אלה של מהירות התכן מודגשות בטבלה 2.1 ב"אפור כהה".

ניתן לראות כי ע"פ כל ארבעת מאפייני התשתית שנותחו, רוב קטעי הדרכים נפלו לקטגוריה של רמת עקביות טובה, עם הפרש קטן במהירות התכן, עד 10 קמ"ש: כ-71% לפי ערכי רוחב נתיב ורוחב שול, 95%-88% לפי ערכי הרדיוס והשיפוע. מאידך, אחוז קטן מהקטעים נפל לקטגוריה של רמת עקביות גרועה, עם הפרש גדול, מעל 20 קמ"ש, במהירות התכן: 8%-7% לפי ערכי רוחב נתיב ורוחב שול, 5%-1% לפי ערכי הרדיוס והשיפוע.

⁴ כאשר כ-6% נוספים מקטעי המחקר היו ישרים לכל האורך

⁵ הסיבה לכך שסכום של אורך הקטעים עם רדיוס אנכי קמור (84%) ורדיוס אנכי קעור (71%) גדול מ-100% היא שמקבצים של סגמנטים להם חושבו מאפייני התשתית יכולים להכיל גם רדיוס אנכי קמור וגם רדיוס אנכי קעור.

⁶ כאשר כ-17% נוספים מקטעי המחקר היו מישוריים (ללא שיפוע אורכי) לכל האורך

טבלה 2.1. סטטיסטיקה תיאורית של מאפייני התשתית שהופקו לקטעי המחקר (179 קטעים)

מאפיין תשתית נבחן	מדד תשתית שהופק	ממוצע	חציון	סטית תקן	ערך מינימלי	ערך מרבי
נכוחות צמתים	מדד צפיפות צמתים*	0.09	0.05	0.13	0.00	0.77
רוחב נתיב	אומדן מינימלי, מ'	2.9	3.1	0.4	1.4	3.9
	אומדן ממוצע, מ'	3.3	3.4	0.3	2.3	3.9
	אומדן מרבי, מ'	3.8	3.9	0.3	2.8	4.2
	אחוז מקרים ברוחב עד 3.3 מטר	35.4	20.0	34.1	0.0	100.0
	אחוז ברוחב בין 3.3 ל 3.5	33.7	31.0	23.3	0.0	96.7
	אחוז ברוחב בין 3.5 עד 3.6	13.5	11.0	13.7	0.0	72.3
	אחוז ברוחב 3.6 ויותר	15.2	10.0	17.1	0.0	100.0
	אחוז מקרים עם הפרשים של מהירות תכן עד 10 קמ"ש - לפי רוחב נתיב	71.0	69.2	18.5	27.3	100.0
רוחב שול	אחוז מקרים עם הפרשים של מהירות תכן בין 10 ל 20 קמ"ש - לפי רוחב נתיב	22.4	23.5	14.8	0.0	60.0
	אחוז מקרים עם הפרשים של מהירות תכן 20 קמ"ש ויותר - לפי רוחב נתיב	6.6	2.7	8.8	0.0	36.4
	אומדן מינימלי, מ'	0.6	0.4	0.6	0.0	2.6
	אומדן ממוצע, מ'	1.9	1.9	0.7	0.4	4.0
	אומדן מרבי, מ'	3.4	3.1	1.2	1.2	7.2
	אחוז מקרים עם רוחב שול עד 2 מ'	54.2	53.5	34.8	0.0	100.0
	אחוז מקרים עם רוחב שול בין 2 ל 2.5	21.0	17.3	19.1	0.0	90.0
	אחוז מקרים עם רוחב שול מ 2.5 ל 3	13.4	6.8	16.8	0.0	100.0
רדיוס אופקי	אחוז מקרים עם רוחב שול מעל 3 מ'	11.4	1.4	19.7	0.0	83.3
	אחוז מקרים עם הפרשים של מהירות תכן עד 10 קמ"ש - לפי רוחב שול	70.7	72.7	22.6	0.0	100.0
	אחוז מקרים עם הפרשים של מהירות תכן בין 10 ל 20 קמ"ש - לפי רוחב שול	21.7	20.9	17.1	0.0	77.8
	אחוז מקרים עם הפרשים של מהירות תכן 20 קמ"ש ויותר - לפי רוחב שול	7.7	1.7	12.9	0.0	100.0
	אחוז מאורך קטע עם רדיוס גדול מ 400 מ'	82.1	86.1	15.4	0.0	100.0
	אחוז מאורך קטע עם רדיוס קטן מ 400 מ'	17.7	13.5	15.4	0.0	100.0
	אומדן מינימלי - רדיוס אופקי, מ'	124.3	120.9	84.0	0.0	355.7
	אומדן ממוצע - רדיוס אופקי, מ'	226.2	239.5	82.1	0.0	385.9
עקום אנכי קמור	אומדן מרבי - רדיוס אופקי, מ'	335.8	376.7	103.1	0.0	399.9
	אחוז מקרים עם רדיוס אופקי עד 100 מ'	3.9	0.0	8.1	0.0	50.0
	אחוז מקרים עם רדיוס אופקי בין 100-200	25.0	23.5	20.0	0.0	100.0
	אחוז מקרים עם רדיוס אופקי בין 200-300	30.7	30.4	22.0	0.0	100.0
	אחוז מקרים עם רדיוס אופקי מעל 300 מ'	33.7	29.4	25.5	0.0	100.0
	אחוז מקרים עם הפרשים של מהירות תכן בין 0-10 קמ"ש - לפי רדיוס אופקי	87.8	89.7	9.6	50.0	100.0
	אחוז מקרים עם הפרשים של מהירות תכן בין 10-20 קמ"ש - לפי רדיוס אופקי	7.4	6.1	7.5	0.0	40.0
	אחוז מקרים עם הפרשים של מהירות תכן מעל 20 קמ"ש - לפי רדיוס אופקי	4.8	2.8	6.8	0.0	50.0
עקום אנכי קעור	אחוז מאורך קטע עם רדיוס אנכי קמור עד 6500 מ'	83.9	86.9	11.1	50.0	100.0
	אומדן מינימלי - רדיוס אנכי קמור, מ'	105	31	232	0	1965
	אומדן ממוצע - רדיוס אנכי קמור, מ'	1763	1669	576	69	4046
	אומדן מרבי - רדיוס אנכי קמור, מ'	5955	6191	703	1965	6497
	אחוז מקרים עם רדיוס אנכי קמור עד 1400 מ'	43.8	44.4	14.1	0.0	98.9
	אחוז מקרים עם רדיוס אנכי קמור בין 1400 עד 2500	22.0	21.9	9.3	0.0	100.0
	אחוז מקרים עם רדיוס אנכי קמור בין 2500 עד 4000	18.0	17.4	7.6	0.0	54.5
	אחוז מקרים עם רדיוס אנכי קמור מעל 4000 מ'	16.2	13.7	10.1	0.0	53.3
שיפוע	אחוז מאורך קטע עם רדיוס אנכי קעור עד 4000 מטר	71.0	73.3	15.4	28.6	100.0
	אומדן מינימלי - רדיוס אנכי קעור, מ'	113	31	282	0	2460
	אומדן ממוצע - רדיוס אנכי קעור, מ'	1755	1662	452	69	2895
	אומדן מרבי - רדיוס אנכי קעור, מ'	3723	3840	366	1965	3999
	אחוז מקרים עם רדיוס אנכי קעור עד 1500 מ'	54.8	56.0	13.4	0.0	99.4
	אחוז מקרים עם רדיוס אנכי קעור 1500-2200 מ'	17.3	16.7	9.5	0.0	100.0
	אחוז מקרים עם רדיוס אנכי קעור 2200-2800	11.5	11.1	5.9	0.0	33.3
	אחוז מקרים עם רדיוס אנכי קעור מעל 2800 מ'	16.5	16.1	8.4	0.0	50.0
אחוז מאורך קטע עם שיפוע לאורך גדול מ 3%	26.6	19.5	25.2	0.0	100.0	

מאפיין תשתית נבחן	מדד תשתית שהופק	ממוצע	חציון	סטית תקן	ערך מינימלי	ערך מרבי
לאורך	אומדן מינימלי - שיפוע לאורך %	2.7	3.1	1.3	0.0	7.7
	אומדן ממוצע - שיפוע לאורך %	3.7	4.1	2.0	0.0	7.7
	אומדן מרבי - שיפוע לאורך %	5.7	5.9	3.4	0.0	14.9
	אחוז מקרים עם שיפוע לאורך עד 6%	65.9	77.8	37.1	0.0	100.0
	אחוז מקרים עם שיפוע לאורך בין 6%-8%	11.7	0.0	16.8	0.0	100.0
	אחוז מקרים עם שיפוע לאורך בין 8% ל 10%	3.8	0.0	7.9	0.0	41.2
	אחוז מקרים עם שיפוע לאורך מעל 10%	0.6	0.0	2.8	0.0	22.6
	אחוז מקרים עם הפרשים של מהירות תכן בין 0-10 קמ"ש - לפי שיפוע לאורך	95.2	100.0	9.8	0.0	100.0
	אחוז מקרים עם הפרשים של מהירות תכן בין 10-20 קמ"ש - לפי שיפוע לאורך	3.5	0.0	6.4	0.0	50.0
	אחוז מקרים עם הפרשים של מהירות תכן מעל 20 קמ"ש - לפי שיפוע לאורך	1.2	0.0	7.7	0.0	100.0
מצב צידי הדרך	אחוז מאורך הקטע בו קיימים מעקות בצד הדרך	0.48	0.45	0.25	0.00	1.00
	מצב מעקות - אומדן מינימלי	1.5	1.5	0.6	0.0	3.2
	מצב מעקות - אומדן ממוצע	2.4	2.5	0.7	0.0	3.9
	מצב מעקות - אומדן מרבי	3.3	3.5	0.8	0.0	4.0
	מצב צדי הדרך ללא מעקות - אומדן מינימלי	1.0	1.0	0.4	0.0	4.0
	מצב צדי הדרך ללא מעקות - אומדן ממוצע	1.3	1.0	0.6	0.0	4.0
	מצב צדי הדרך ללא מעקות - אומדן מרבי	2.6	2.0	1.1	0.0	4.0

* חלקי הקטעים שהוסרו עקב קיום צמתים

3. בחינת התאמה בין מהירויות התפעול ומהירויות היעוד

ע"פ הנחיות (2010), סוג דרך קובע את תפקידה, מהירות היעוד ומהירות התכן. מהירות התכן קובעת את מאפייני הדרך. המהירות המותרת לנסיעה בקטע דרך נקבעת לפי סוג דרך ומאפייני הכביש, כאשר במצב האידיאלי המהירות המותרת שווה למהירות היעוד. מאידך, מהירות התפעול בקטע משקפת את המהירות הנבחרת לנסיעה ע"י רוב הנהגים והיא מוערכת ע"י מדד האחוזון ה-85 של מהירויות הנסיעה בתנאי זרימה חופשית. מכאן, לבחינת רמת ההתאמה בין מאפייני הדרך (כוונות הרשויות והמתכנן) לבין התנהגות הנהגים יכולים לשמש שני מדדים:

(1) ההפרש בין מדד האחוזון ה-85 של מהירויות הנסיעה לבין המהירות המותרת (המבטא את ההפרש בין מהירות התפעול ומהירות היעוד);

(2) ההפרש בין מדד האחוזון ה-85 של מהירויות הנסיעה לבין מהירות התכן (המבטא את ההפרש בין מהירות התפעול ומהירות התכן) או את רמת עקביות התכן).

עבור המדד השני חסר מידע של מהירויות התכן בקטעים (במחקר זה יבוצעו הערכות של מהירויות התכן בקטעי המחקר ותיבדק השפעה של מהירויות התכן על מהירויות הנסיעה בפועל – ראה פרק 4). להלן ממצאים מבחינת המדד הראשון – הפרשים בין מהירויות התפעול ומהירויות היעוד, בקטעי המחקר (קטעי הדרכים החד-מסלוליות). המהירות המותרת ברוב קטעי המחקר הינה 80 קמ"ש (פרט למספר קטעים בכבישים 31, 90 בהם ממ"מ 90 קמ"ש).

כזכור, במערכת המידע על מדדי מהירויות הנסיעה ברשת הדרכים קיימים 6 חתכים המציגים את מדדי המהירות בפרקי זמן שונים שהם: שעות יום-יום חול, שעות לילה-יום חול, שעות יום-שישי, שעות לילה-שישי, שעות יום-שבת, שעות לילה-שבת. לבחינת מאגר הנתונים, בחתכי זמן שונים, נערכו שני ניתוחים:

(א) בחינת התפלגות הקטעים לפי אורכם;

(ב) בחינת התפלגות הקטעים לפי הפרשי המהירות (מדד האחוזון ה-85 של מהירויות הנסיעה פחות המהירות המותרת),

כאשר התפלגויות האורכים נבנו בהקבצות של 5 ק"מ והתפלגויות הפרשי המהירות נבנו בהקבצות של 5 קמ"ש.

טבלאות 3.1-3.2 מסכמות את התפלגויות קטעי המחקר, לפי אורכם ולפי הפרשי המהירות, בחתכי זמן שונים. איור 3.1 מביא הצגה ויזואלית של ההתפלגויות. טבלה 3.3 מציגה סיכום מתומצת להתפלגויות הפרשי המהירות. ניתן לראות כי:

- בכל חתך זמן קיים מספר שונה של קטעים ברשת שעבורם הופקו מדדי המהירות, כאשר מספר קטעים מרבי (188) קיים עבור שעות יום-יום חול, ומספר קטעים מינימאלי – עבור שעות לילה-שישי (71), שעות לילה-שבת (98).

- בכל חתכי הזמן עם מספר קטעים גבוה יותר, קיים דמיון ניכר בין פילוגי הקטעים לפי אורכם, כאשר 26%-28% מהקטעים הם באורך עד 5 ק"מ, אחוז מצטבר של 64%-65% - באורך עד 10 ק"מ, אחוז מצטבר של 84%-85% - באורך עד 15 ק"מ, 91% מהקטעים באורך עד 20 ק"מ.

- בכל חתכי הזמן, אחוז מרבי של הקטעים היה באורך 5-10 ק"מ, עם אחוזים ניכרים נוספים של קטעים באורך עד 5 ק"מ ובאורך 10-15 ק"מ, כאשר שכיחות קטעים ארוכים יותר נמוכה יותר.

- בכל חתכי הזמן, מעל מחצית הקטעים (50%-65%) מתאפיינים בהפרשי מהירות בטווח עד 20 קמ"ש, כאשר אחוזים גבוהים יותר של הקטעים נצפו עם הפרשי מהירויות של 10-15 קמ"ש או 15-20 קמ"ש (ערכים גבוהים יותר - בשעות לילה, סוף שבוע).

- כמו כן, אחוז גבוה יחסית של הקטעים (12%-31%), בכל חתכי הזמן, נצפה עם הפרשי מהירות בטווח של 20-30 קמ"ש, אם כי עם אחוז משמעותי יותר בשעות לילה.

- בנוסף, בכל חתכי הזמן, ישנם קטעים שמתאפיינים בהפרש שלילי בין מהירויות הנסיעה והמהירות המותרת (7%-19%), כאשר אחוז גבוה יותר של קטעים כאלה נצפה בשעות יום.

- לבסוף, ישנו אחוז מסוים של קטעים (4%-11%) עם הפרשי מהירות גדולים יותר, מעל 30 קמ"ש.

מהשוואה בין התפלגויות הפרשי המהירות בחתכי זמן שונים עולה כי רמות המהירות דומות בשעות יום-שישי לשעות יום-ימי חול, כאשר רמות מהירות גבוהות יותר לעומת שעות יום-ימי חול נצפו בשעות לילה-ימי חול, שעות לילה-יום שישי, שעות יום-יום שבת ומהירויות גבוהות במיוחד נצפו בשעות לילה - שבת.

בהתחשב בדמיון בין אורכי הקטעים ופילוגי המהירות וכן, היקף בסיס הנתונים, בחינת מערכת הקשרים בין מאפייני הדרך ומהירויות הנסיעה תתמקד בקטעים עם מדדי המהירות **בשעות יום-ימי חול**.

מדד המהירות שנבחן במחקר זה הינו ההפרש בין מדד האחוזון ה-85 של מהירויות הנסיעה לבין המהירות המותרת ($\Delta 1$), בשעות יום-ימי חול. טבלה 3.4 מציגה סטטיסטיקה תיאורית של פרמטר זה. ניתן ראות כי על פני כל התצפיות ממוצע מדד ההפרש היה $10 \text{ קמ"ש} \pm 12 \text{ קמ"ש}$ (סטית תקון).

טבלה 3.1. התפלגות קטעי המחקר לפי אורכם, בחתכי זמן שונים

% מצטבר של הקטעים						אורך קטע, ק"מ
שעות לילה- שבת	שעות יום- שבת	שעות לילה- שישי	שעות יום- שישי	שעות לילה-ימי חול	שעות יום-ימי חול	
25.0	26.9	23.9	27.0	26.3	28.2	0-5
63.5	63.7	67.6	64.0	65.4	64.4	5-10
80.2	84.1	88.7	84.3	84.0	84.6	10-15
88.5	90.7	95.8	91.0	91.0	91.0	15-20
92.7	94.5	98.6	94.9	94.2	94.7	20-25
94.8	95.6	98.6	96.1	95.5	95.7	25-30
96.9	97.8	98.6	97.8	97.4	97.9	30-35
97.9	98.4	100.0	98.3	98.1	98.4	35-40
100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	40+
96	182	71	178	156	188	מספר קטעים

טבלה 3.2. התפלגות קטעי המחקר לפי הפרשי המהירות, בחתכי זמן שונים

% קטעים						טווח הפרשי המהירות, קמ"ש
שעות לילה- שבת	שעות יום- שבת	שעות לילה- שישי	שעות יום- שישי	שעות לילה-ימי חול	שעות יום-ימי חול	
	1.1	1.4	.6	.6	.5	-30 -25
1.0	1.6		.6	.0	.5	-25 -20
1.0	1.6	1.4	2.2	.6	2.7	-20 -15
1.0	1.1	1.4	2.2	2.6	3.2	-15 -10
1.0	3.3		2.8	3.8	3.2	-10 -5
3.1	7.7	7.0	9.0	2.6	8.5	-5 0
7.3	11.5	11.3	7.3	9.0	10.1	0-5
8.3	13.7	8.5	16.3	12.2	17.0	5-10
15.6	22.0	16.9	20.8	19.9	23.4	10-15
18.8	10.4	26.8	18.5	18.6	14.9	15-20
22.9	16.5	18.3	9.6	12.8	7.4	20-25
8.3	3.8	7.0	5.1	9.6	4.8	25-30
4.2	2.2	0	2.2	4.5	1.6	30-35
3.1	1.1	0	1.1	1.9	1.1	35-40
4.2	2.2	0	1.7	1.3	1.1	40+
100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	סה"כ
96	182	71	178	156	188	מספר קטעים

טבלה 3.3. סיכום מתומצת להתפלגויות הפרשי המהירות בקטעי המחקר, בחתכי זמן שונים

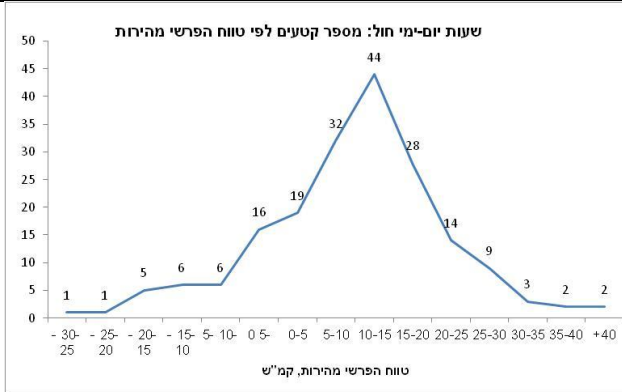
% קטעים						הפרשי מהירויות
שעות לילה- שבת	שעות יום- שבת	שעות לילה- שישי	שעות יום- שישי	שעות לילה-ימי חול	שעות יום-ימי חול	
7.3	16.5	11.3	17.4	10.3	18.6	שלילי
50.0	57.7	63.4	62.9	59.6	65.4	עד 20 קמ"ש
31.3	20.3	25.4	14.6	22.4	12.2	20-30 קמ"ש
11.5	5.5	0.0	5.1	7.7	3.7	מעל 30 קמ"ש
100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	סה"כ
96	182	71	178	156	188	מספר קטעים

טבלה 3.4. סטטיסטיקה תיאורית של מדד המהירות העיקרי - ההפרש בין מדד האחוזון ה-85 של מהירויות הנסיעה לבין המהירות המותרת (delta1), בשעות יום-ימי חול*

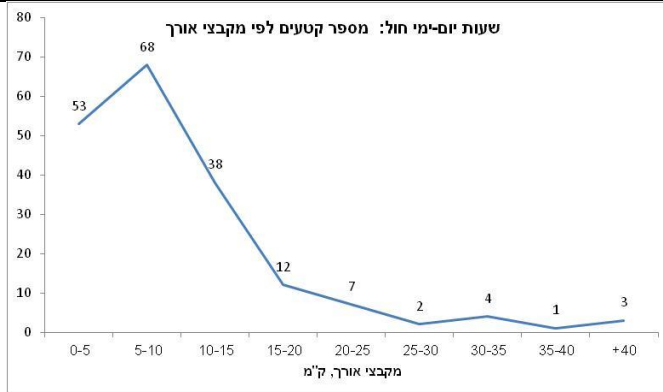
ערך מרבי	ערך מינימלי	סטית תקן	חציון	ממוצע	מדד מהירות
43.0	-26.0	12.2	11.0	9.9	הפרש בין מדד האחוזון ה-85 של מהירויות הנסיעה לבין המהירות המותרת, בשעות יום-ימי חול

*מבוסס על 178 תצפיות, כאשר עבור קטע כביש 65, ק"מ 44.9-53.9 היתה מדידה חסרה

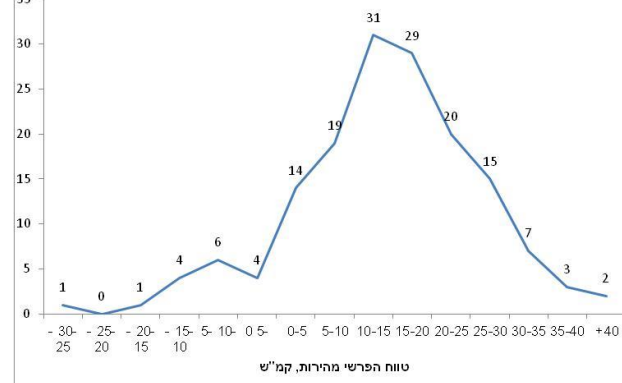
התפלגות הקטעים לפי הפרשי מהירות



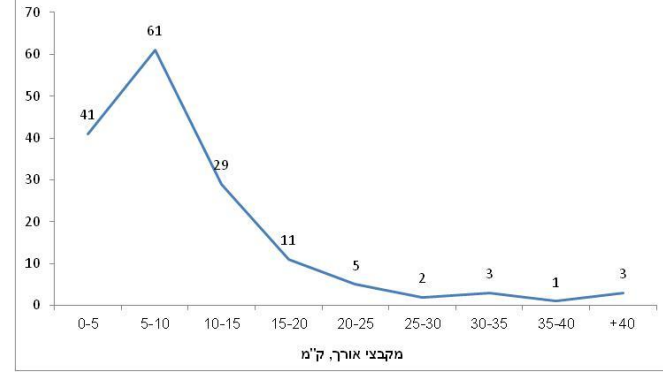
התפלגות הקטעים לפי אורכם



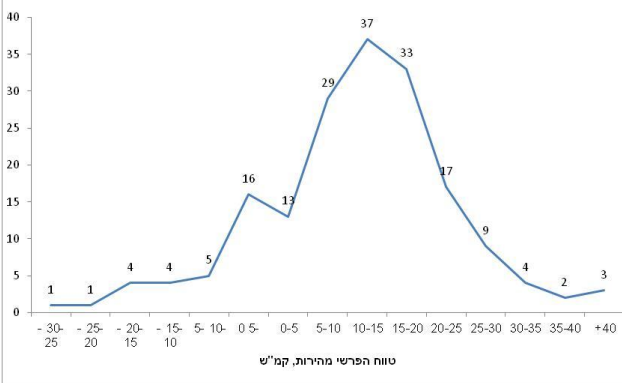
שעות לילה-ימי חול: התפלגות הקטעים לפי הפרשי מהירות



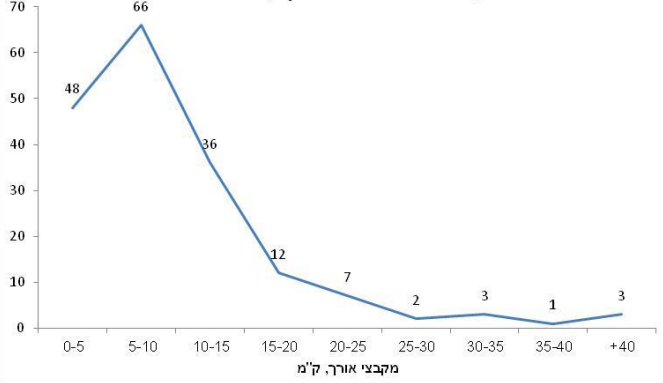
שעות לילה-ימי חול: התפלגות הקטעים לפי מקבצי אורך



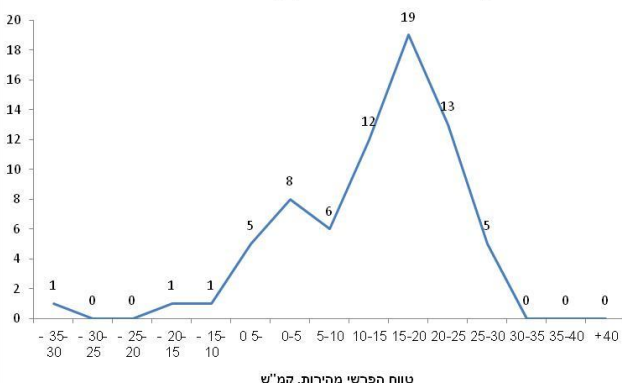
שעות יום-שישי: התפלגות הקטעים לפי הפרשי מהירות



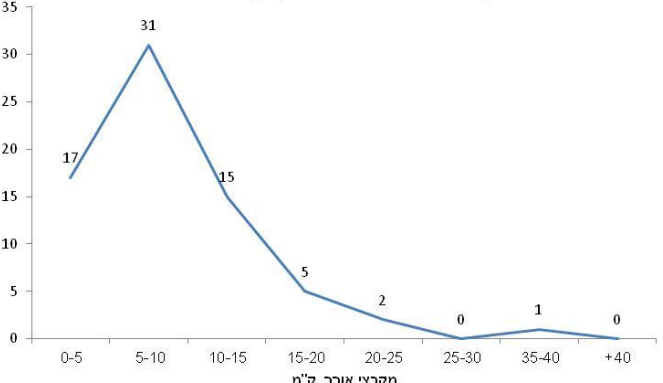
שעות יום-שישי: התפלגות הקטעים לפי אורכם



שעות לילה-שישי: התפלגות הקטעים לפי הפרשי מהירות



שעות לילה-שישי: התפלגות הקטעים לפי אורכם

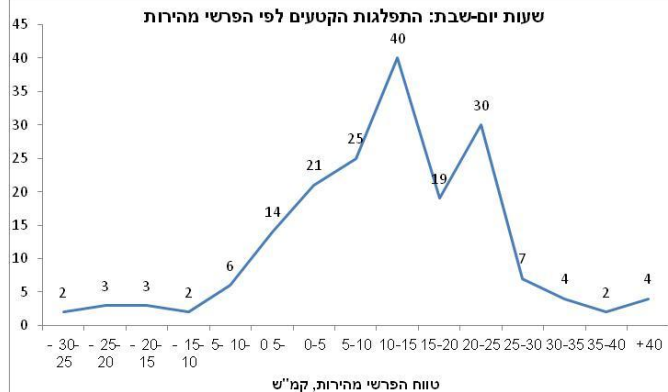


איור 3.1. הצגה ויזואלית של התפלגויות קטעי המחקר לפי אורכם ולפי הפרשי המהירות, בחתכי זמן שונים.

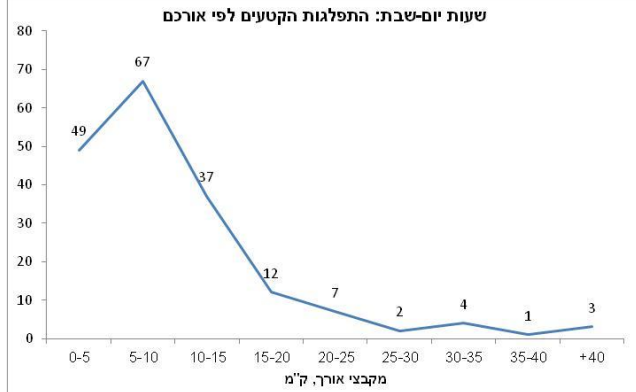
התפלגות הקטעים לפי הפרשי מהירות

התפלגות הקטעים לפי אורכם

שעות יום-שבת: התפלגות הקטעים לפי הפרשי מהירות



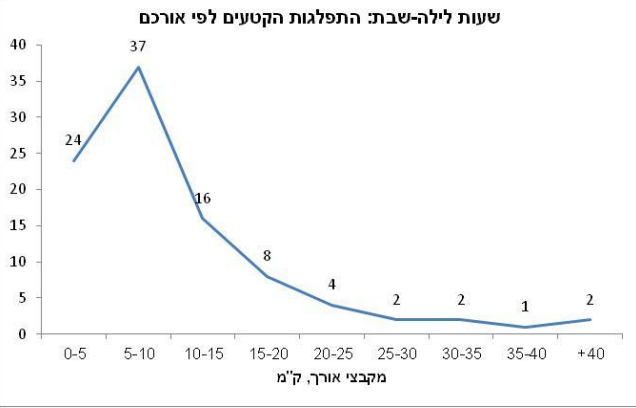
שעות יום-שבת: התפלגות הקטעים לפי אורכם



שעות לילה-שבת: התפלגות הקטעים לפי הפרשי מהירות



שעות לילה-שבת: התפלגות הקטעים לפי אורכם



איור 3.1. הצגה ויזואלית של התפלגויות קטעי המחקר לפי אורכם ולפי הפרשי המהירות, בחתכי זמן שונים - המשך.

4. הניתוחים הסטטיסטיים לזיהוי מאפייני תשתית המשפיעים על מהירויות

הנסיעה

4.1. כללי

הניתוחים הסטטיסטיים במחקר זה נערכו במטרה לזהות את מאפייני התשתית שמשפיעים על בחירת מהירויות הנסיעה ע"י הנהגים וכמו כן, כדי להצביע על קבוצות הומוגניות של קטעי הדרך בהם רמות מהירות מסוימות מתקשרות עם מאפייני דרך מסוימים. בנוסף, במחקר נבחן נושא העקביות בתוך מאפייני הדרך, באמצעות "שחזור" של מהירויות התכן על סמך מאפייני הקטעים, סיווגי הקטעים ע"פ מדדי מהירויות התכן ובחינת הקשר בין מאפייני מהירות התכן לבין מהירויות הנסיעה בפועל. לבחינת הקשר בין מאפייני הדרך לבין מהירויות הנסיעה שימש **מדד המהירות העיקרי** - ההפרש בין האחוזון ה-85 של מהירויות הנסיעה לבין המהירות המותרת, בשעות יום-ימי חול.

כפי שצוין בפרק 2, בקרב מאפייני התשתית שהופקו במחקר היו שלושה סוגים: (1) המדדים המייצגים שהם ערכים מוחלטים של מאפייני התשתית בקטע (אומדן ממוצע, אומדן מינימלי, אומדן מרבי); (2) מדדי השתנות של מאפייני התשתית בקטע המבוטאים באחוזי המקרים שנצפו לפי קטגוריות מוגדרות של ערכי המאפיין; (3) אומדני מהירות תכן שנגזרו על סמך מאפייני התשתית. הצגה שונה של מאפייני התשתית מאפשרת ביצוע של מספר ניתוחים, תוך כדי השוואה בין התוצאות, מה שמהווה למעשה בדיקת רגישות של הממצאים. נספח א' מציג את רשימת מאפייני התשתית שנבחנו במחקר, לפי שתי הקבוצות הראשונות: 1 - הערכים המוחלטים של מאפייני התשתית; 2 - קטגוריות פילוג למאפיינים הנבחרים. (לגבי אומדני מהירות התכן ראה הסבר בפרק 4.4).

הניתוחים הסטטיסטיים שנערכו במחקר כללו מרכיבים אלה:

(1) סיווג קטעי המחקר על-פי ערכי מדד המהירות, תוך כדי שימוש במאפייני התשתית – בעזרת מודל CART. זוהי שיטת סיווג רב-פרמטרית המאפשרת לזהות קבוצות הומוגניות של הקטעים על-פי מדד המהירות. ממצאים מניתוח זה מוצגים בפרק 4.2.

(2) פיתוח מודלים רב-פרמטריים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית לבין מדד המהירות. המודלים הינם מודלי רגרסיה לינארית שפותחו בשיטת רגרסיה בצעדים. ע"פ תוצאות המודלים ניתן להצביע על מאפייני התשתית שמשפיעים על מהירויות הנסיעה בקטעי המחקר. בשלב זה פותחו שלושה מודלים: (א) תוך כדי שימוש ברשימה של כל מאפייני התשתית – הערכים המוחלטים; (ב) תוך כדי שימוש ברשימה מצומצמת של מאפייני התשתית (הערכים המוחלטים) אשר נקבעה בעקבות בחינת קורלציות בין מאפייני התשתית ובחירה "נציג" לכל קבוצת משתנים שנמצאו בקורלציה גבוהה; (ג) תוך כדי שימוש ברשימה של כל מאפייני התשתית המבוטאים באחוזי פילוג לפי קטגוריות מוגדרות. ממצאי הניתוח מוצגים בפרק 4.3.

(3) בחינת מאפיינים של מהירויות התכן ששוחזרו לקטעי המחקר, כאשר ניתוח זה מאפשר לזהות קבוצות קטעים ברמות שונות של עקביות התכן. מהירויות התכן שוחזרו על סמך ארבעת מאפייני התשתית: רוחב נתיב, רוחב שול, עקום אופקי ושיפוע אורכי. הערכים שהתקבלו על סמך המאפיינים

השונים אינם בהכרח זהים. לכן, נערך ניתוח מקדים לבחינת התנהגות של ערכים אלה בקטעי המחקר כדי לזהות דמיון ושוני בקביעת מהירויות התכן ע"פ מאפייני תשתית שונים. בהמשך, נבחן הקשר בין מדדי מהירויות התכן לבין מהירויות הנסיעה בפועל, בעזרת שיטת CART, וכמו כן, נערך סיווג רב-משטני של קטעי המחקר כדי לזהות קבוצות הומוגניות של הקטעים מבחינת התנהגות של מדדי מהירויות התכן (בעזרת cluster analysis). כתוצאה, כל קטע שויך לקלסטר מסוים ע"פ מהירויות התכן שלו. ממצאים מניתוחים אלה מוצגים בפרק 4.4.

(4) לבסוף, נערכה בחינת השפעה של מהירויות התכן על מהירויות הנסיעה בפועל. בשלב זה, בוצעה התאמה חוזרת של המודל הרב-פרמטרי לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית לבין מדד המהירות (שנבנה בשלב 2), כאשר לרשימת מאפייני התשתית נוסף גם מדד של מהירות תכן - מספר קלסטר שנקבע בשלב 3. בחינה זאת נערכה על האופציה הראשונה בפיתוח מודל הרגרסיה - מודל שהשתמש ברשימה המלאה של מאפייני התשתית (הערכים המוחלטים). ממצאים מניתוח זה מובאים בפרק 4.5.

4.2. זיהוי קבוצות הומוגניות של קטעי המחקר על-פי מדד המהירות

זיהוי קבוצות הומוגניות של קטעי המחקר על-פי מדד המהירות בוצע תוך כדי שימוש בערכים המוחלטים של מאפייני התשתית. הזיהוי נערך בשיטת CART (classification and regression trees), בתוכנה R 2.14. להלן רשימה של מאפייני התשתית שנבדקו בהרצה זאת:

שם המשתנה בעץ CART	שם המשתנה המקורי - ראה נספח א'	משמעות המשתנה
Rnmin	rohav_nativ_avr_min	רוחב נתיב - אומדן מינימלי
Rnavr	rohav_nativ_avr_mean	רוחב נתיב - אומדן ממוצע
Rnmax	rohav_nativ_avr_max	רוחב נתיב - אומדן מרבי
ZFIFUT_ZM	madad_zfifut_zmatim	מדד צפיפות צמתים
Rsmin	rohav_shul_avr_min	רוחב שול - אומדן מינימלי
Rsavr	rohav_shul_avr_mean	רוחב שול - אומדן ממוצע
RSMAX	rohav_shul_avr_max	רוחב שול - אומדן מרבי
Romin	minimum_ofki_min	רדיוס אופקי - אומדן מינימלי
Roavr	minimum_ofki_mean	רדיוס אופקי - אומדן ממוצע
Romax	minimum_ofki_max	רדיוס אופקי - אומדן מרבי
Ramin	minimum_anahi_min	רדיוס אנכי קמור - אומדן מינימלי
Raavr	minimum_anahi_mean	רדיוס אנכי קמור - אומדן ממוצע
Ramax	minimum_anahi_max	רדיוס אנכי קמור - אומדן מרבי
Akmin	minimum_ak_anahi_min	רדיוס אנכי קעור - אומדן מינימלי
Akavr	minimum_ak_anahi_mean	רדיוס אנכי קעור - אומדן ממוצע
Akmax	minimum_ak_anahi_max	רדיוס אנכי קעור - אומדן מרבי
Somin	shipor_avr_min	שיפוע לאורך - אומדן מינימלי
Soavr	shipor_avr_mean	שיפוע לאורך - אומדן ממוצע
Somax	shipor_avr_max	שיפוע לאורך - אומדן מרבי
bar_avl	bar_avl	אחוז מאורך קטע עם נוכחות מעקות
be_mean	bar_est_mean	מצב מעקות - אומדן ממוצע
nbe_mean	no_bar_est_mean	מצב צידי דרך ללא מעקות - אומדן ממוצע

קטגוריות של מדד המהירות - ההפרש בין מהירות האחוזון 85 ובין המהירות המותרת ($\Delta 1$), ששימשו ליצירת עץ הסיווג היו כלהלן:

מס' קטגוריה	טווח הפרשי המהירות, קמ"ש
1	(-5)-(-30)
2	0-(-5)
3	0-5
4	(5)-(10)
5	(10)-(15)
6	(15)-(20)
7	20+

השיטה ליצירת עץ הסיווג מתוארת, לדוגמא, ב-Breiman et al (1984), Hastie et al (2009), Therneau and Atkinson (2013). בשיטה זאת, בכל שלב, מוצאים משתנה הנותן חלוקה הכי טובה לקטגוריות שהוגדרו, דבר היוצר "צומת" בתוך העץ. כדי לבנות את החלוקה נכונה, משתמשים בפונקצית "זיהום" של צומת (impurity) שמראה את רמת העירוב בין הקטגוריות השונות בתוך הצומת. (צומת "טהור" יכול תצפיות מקטגוריה אחת בלבד). מטרת התהליך היא לבנות חלוקה שנותנת ירידה מקסימלית ברמת הזיהום. מאידך, רצוי לא להצמיח עץ גדול מדי אשר יקשה על ההבנה. לכן, הדרך המקובלת ליצירת העץ היא לבנות עץ "מקסימלי" (המסביר כל תצפית בקובץ) ולאחר מכן, לגזום עץ אופטימלי בהתאם לקריטריון כמותי מסוים כגון: טעות מינימלית (Xerror).

טבלה 4.1 מציגה את פרמטרי ההערכה עבור רמות שונות של העץ המקסימלי שנבנה על קטעי המחקר. הערך המינימלי של הטעות (Xerror) הינו 0.86; לפי שורה זאת בטבלה (על רקע אפור), יש לבנות עץ אופטימלי עם רמת הסיבוכיות (CP) 0.0147. עץ זה אמור לקיים גם תנאי: $Xerror \leq \min(Xerror) + Xstd$, כאשר במקרה הנוכחי יהיה קטן מ (0.86+0.047), כלומר מ-0.907.

טבלה 4.1. פרמטרי עץ הסיווג המקסימלי שנבנה על קטעי המחקר כבסיס לבחירת העץ האופטימלי

מס' סידורי	מדד הסיבוכיות (CP)	מספר חלוקות בתוך העץ (Nsplit)	טעות יחסית בניבוי (error rel)	Xerror (cross-validation error)	סטיית תקן של טעות הניבוי (Xstd)
1	0.1250	0	1.000	1.000	0.042
2	0.0515	1	0.875	0.949	0.044
3	0.0368	4	0.721	0.904	0.046
4	0.0221	5	0.684	0.882	0.046
5	0.0147	13	0.493	0.860	0.047
6	0.0123	23	0.346	0.956	0.044
7	0.0118	26	0.309	0.956	0.044
8	0.0074	31	0.250	0.949	0.044
9	0.0037	64	0.007	0.971	0.043
10	0	66	0.000	0.963	0.044

כתוצאה מהגדרה הנ"ל של דרישות לעץ הסיווג, התקבל עץ סיווג אופטימלי כמוצג באיור 4.1. העץ כולל 24 צמתים טרמינליים המתוארים בטבלה 4.2. השונות המוסברת ע"י המודל הנה 65%, טעות

ניבוי 26% (דהיינו, 132 תצפיות מתוך 178⁷ מסווגים נכון ע"י העץ). פירוט בדיקה של אחוז הניבוי השגוי של המודל מוצג בטבלה 4.3.

טבלה 4.2. סיכום צמתים טרמינלים בעץ הסיווג

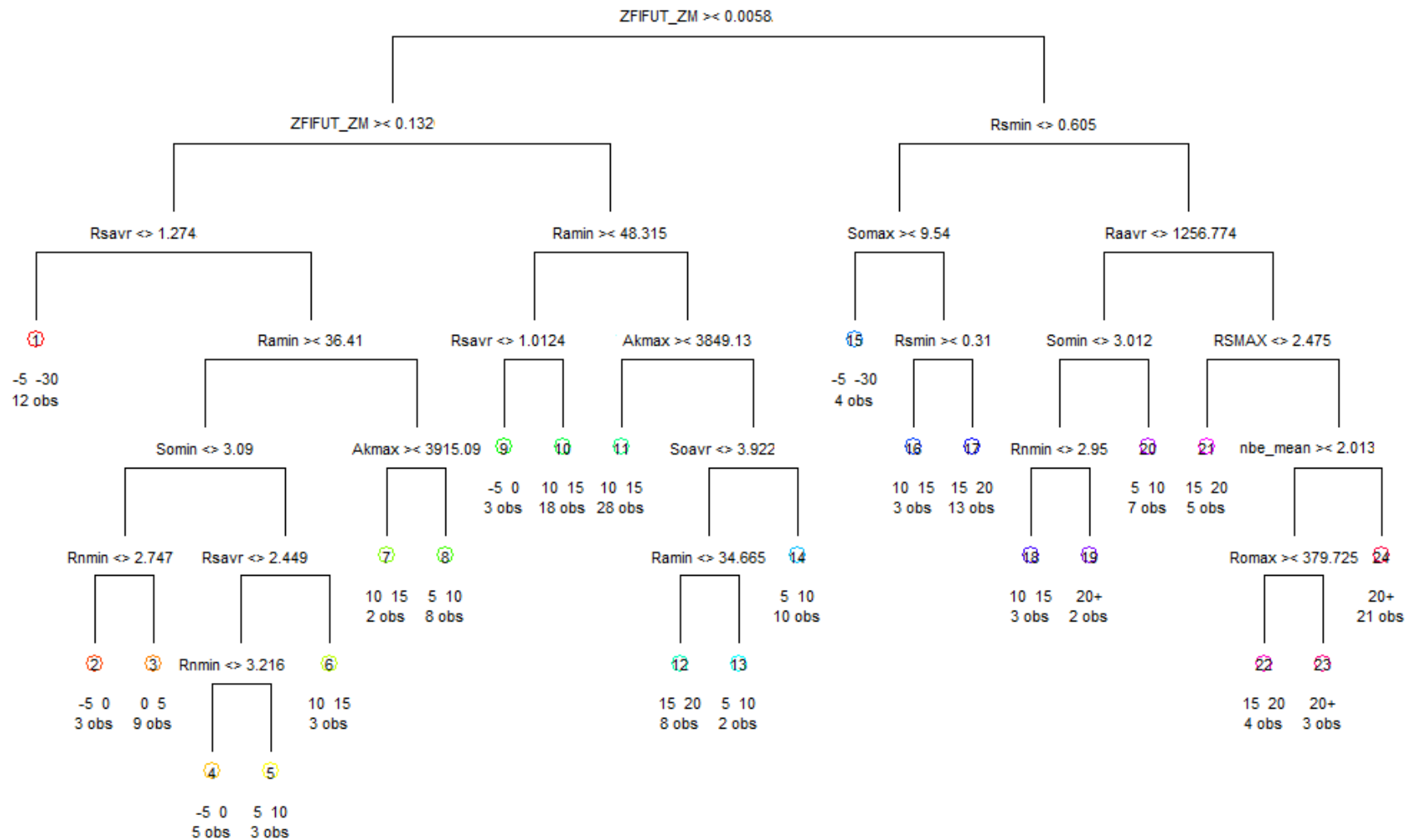
מספר צומת בעץ – איור 4.1	קטגוריה של הפרשי מהירות	מספר תצפיות בצומת	מספר תצפיות בהפסד (סווגו לא נכון)	הסתברות לסיווג נכון
1	-5 -30	12	3	0.75
2	0 -5	3	1	0.67
3	5 0	9	1	0.89
4	0 -5	5	2	0.6
5	10 5	3	1	0.67
6	15 10	3	1	0.67
7	15 10	2	0	1
8	10 5	8	1	0.88
9	0 -5	3	1	0.67
10	15 10	18	4	0.78
11	15 10	28	14	0.5
12	20 15	8	1	0.88
13	10 5	2	0	1
14	10 5	10	4	0.6
15	-5 -30	4	1	0.75
16	15 10	3	0	1
17	20 15	13	7	0.46
18	15 10	3	0	1
19	20+	2	0	1
20	10 5	7	2	0.71
21	20 15	5	2	0.6
22	20 15	4	0	1
23	20+	3	0	1
24	20+	21	1	0.95
סה"כ		179	47	0.74

טבלה 4.3. בדיקת אחוז ניבוי שגוי של המודל (לפי קטגוריות של הפרשי המהירות)

ערכים אמיתיים							ערך מנובה
20+	15 20	10 15	5 10	0 5	-5 0	-30 -5	
0	0	0	0	1	3	12	-30 -5
0	0	0	0	0	7	3	-5 0
0	0	0	0	8	1	0	0 5
0	1	1	22	3	3	0	5 10
2	5	38	4	4	2	2	10 15
1	20	4	1	3	0	1	15 20
25	0	0	1	0	0	0	20+
28	26	43	28	19	16	18	סה"כ ערכים אמיתיים
89%	77%	88%	79%	42%	44%	67%	אחוז ניבוי נכון

בקריאת עץ הסיווג (ראה איור 4.1) יש לשים לב כי סימן "><" הינו ">=" (יותר או שווה), כאשר הסימון "><" הינו "<" (פחות). כמו כן, בכל צומת, מצד שמאל התנאי המוצג בצומת מתקיים ("כן") ובצד ימין התנאי לא מתקיים ("לא").

⁷ לקטע אחד נתוני המהירות היו חסרים, לכן בפועל היו 178 תצפיות



איור 4.1. העץ האופטימלי שהתקבל בשיטת CART: קבוצות קטעים ע"פ הפרשי המהירות שמזוהות על סמך מאפייני תשתית.

מבדיקת עץ הסיווג אשר יוצר את קבוצות הקטעים עם הפרשי מהירות מוגדרים על סמך מאפייני התשתית (ראה איור 4.1) עולים ממצאים כלהלן:

- מאפייני התשתית שמשיפיעים על חלוקת הקטעים לפי הפרשי המהירות הם: צפיפות הצמתים בקטע, רוחב שול (אומדן ממוצע, אומדן מינימלי, אומדן מרבי), רדיוס אנכי קמור (אומדן מינימלי, אומדן ממוצע), רדיוס אנכי קעור (אומדן מרבי), שיפוע לאורך (אומדן ממוצע, אומדן מינימלי, אומדן מרבי), רוחב נתיב (אומדן מינימלי), רדיוס אופקי (אומדן מרבי), מצב צידי הדרך ללא מעקה. למעשה, רוב מאפייני התשתית השפיעו על חלוקת הקטעים לקבוצות ההומוגניות.

- לגבי מאפייני התשתית המזוהים עם קבוצות קטעים מסוימות ניתן להסיק כלהלן:

(א) רמות מהירות נמוכות במיוחד (הפרשים "30-5", דהיינו האחוזון ה-85 נמצא בין 30 עד 5 קמ"ש מתחת למהירות המותרת) נצפו בקטעים עם צפיפות צמתים גבוהה במיוחד (מעל 0.132) ורוחב שול קטן (אומדן ממוצע פחות מ-1.27 מ') וכמו כן, בקטעים עם צפיפות צמתים נמוכה (פחות מ-0.006) אך רוחב שול קטן (אומדן מינימלי עד 0.6 מ') ושיפוע אורך גדול (אומדן מרבי מעל 9.5%).

(ב) רמות מהירות נמוכות (הפרשים "5-0") נצפו כאשר הקטעים היו עם צפיפות צמתים גבוהה, רוחב שול לא קטן אך נתיב צר (עד 2.75 מ'); או כאשר צפיפות הצמתים גבוהה, רוחב שול בינוני (אומדן ממוצע בין 1.27 עד 2.45 מ') ורוחב נתיב עד 3.2 מ' (אומדן מינימלי), וכמו כן, כאשר הקטעים היו עם צפיפות צמתים בינונית, ורוחב שול קטן יחסית (אומדן ממוצע עד 1.0 מ').

(ג) רמות מהירות קרובות למהירות המותרת (הפרשים "5 0", דהיינו האחוזון ה-85 נמצא בטווח עד 5 קמ"ש מעל המהירות המותרת) נצפו כאשר הקטעים היו עם צפיפות צמתים גבוהה, רוחב שול לא קטן ורוחב נתיב מעל 2.75 מ' (אומדן מינימלי).

(ד) רמות מהירות גבוהות יותר (הפרשים "10 5") נצפו כאשר הקטעים היו עם צפיפות צמתים גבוהה, רוחב שול בינוני (אומדן ממוצע בין 1.27 עד 2.45 מ') ורוחב נתיב מעל 3.2 מ' (אומדן מינימלי); כאשר צפיפות צמתים גבוהה, שול לא צר ויש עקמומיות אנכית בקטע; בקטעים עם צפיפות צמתים בינונית ונוכחות עקמומיות אנכית בקטע; וכמו כן, בקטעים עם צפיפות צמתים נמוכה, שול לא צר ורדיוס אנכי קמור עד 1256 מ' (כאומדן ממוצע).

(ה) רמות מהירות גבוהות עוד יותר (הפרשים "15 10") מזוהות עם קטעים עם צפיפות צמתים גבוהה ורוחב שול גדול (מעל 2.45 מ' כאומדן ממוצע); עם קטעים עם צפיפות צמתים בינונית או גבוהה וללא בעיות גיאומטריות; עם קטעים עם צפיפות צמתים נמוכה, רוחב שול צר (אומדן מינימלי בטווח 0.3-0.6 מ'); וכמו כן, עם קטעים עם צפיפות צמתים נמוכה, שול לא צר ורוחב נתיב עד 2.95 מ' (כאומדן מינימלי).

(ו) רמות מהירות גבוהות (הפרשים "20 15") נצפו בקטעים עם צפיפות צמתים בינונית וללא בעיות גיאומטריות; בקטעים עם צפיפות צמתים נמוכה ושול צר (אומדן מינימלי עד 0.3 מ'); בקטעים עם צפיפות צמתים נמוכה וללא עקמומיות אופקית, חלקם עם מצב טוב של צידי הדרך ללא מעקה ושול רחב (אומדן מרבי מעל 2.47 מ').

(z) רמות מהירות גבוהות במיוחד (הפרשים "+20") נצפו בקטעים עם צפיפות צמתים נמוכה, כאשר הנתיב רחב (אומדן מרבי מעל 2.95 מ') או בקטעים ללא בעיות גיאומטריות ושול רחב (אומדן מרבי מעל 2.47 מ').

4.3. פיתוח מודלים רב-פרמטריים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית לבין מדד

המהירות

לפיתוח מודלים רב-פרמטריים לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית לבין מדד המהירות שימשה פרוצדורה GLM בתוכנת R 2.14 (package Mass) (Myers et al, 2010). המודלים שהותאמו הם מודלי רגרסיה לינארית רב-משתנית שפותחו בשיטת רגרסיה בצעדים. התאמת המודל נעצרת כאשר מושג ערך מינימלי של קריטריון AIC (אשר נותן קנס על ריבוי משתנים מסבירים במודל) וערך מרבי של השונות המוסברת ע"י המודל. הפרמטר המוסבר הינו ההפרש בין מהירות האחוזון ה-85 ובין המהירות המותרת (הערך המקורי של Δ_1 , ללא הקבצה לקטגוריות). לפיתוח המודלים שימשו 178 תצפיות (הוסר קטע אחד ללא אומדן מהירות).

בשלב זה פותחו שלושה מודלים:

(א) **מודל 1** פותח תוך כדי שימוש ברשימה של כל מאפייני התשתית המבוטאים בערכים המוחלטים. פיתוח מודל זה התחיל עם רשימה של 22 מאפיינים מסבירים, לרבות נפח תנועה יומי ומאפייני התשתית המוחלטים כמוצג בנספח א'. עבור מצב צידי הדרך נוצרו שני משתנים משולבים כלהלן:

$$\text{bamean} = \text{bar_avl} * \text{bar_est_mean}$$

$$\text{nobamean} = (1 - \text{bar_avl}) * \text{no_bar_est_mean}$$

התאמת מודל זה הסתיימה עם 12 משתנים מסבירים, שונות מוסברת 65.9%.

(2) **מודל 2** פותח תוך כדי שימוש ברשימה מצומצמת של מאפייני התשתית המבוטאים בערכים המוחלטים. רשימה מצומצמת זו נקבעה בעקבות בחינת קורלציות בין מאפייני התשתית - Pearson Correlation Coefficients. מכל מקבץ של משתני תשתית שנמצאו בקורלציה מובהקת ($p < 0.001$) וגבוהה (מקדמי קורלציה מעל 0.4 בערכה המוחלט) נבחר "נציג", דבר שאפשר לצמצם את הרשימה ההתחלתית של מאפייני התשתית להתאמת המודל. כתוצאה, פיתוח מודל זה התחיל עם 12 מסבירים פוטנציאליים שהם: נפח תנועה יומי, מדד צפיפות הצמתים, רוחב נתיב (אומדן ממוצע), רוחב שול (אומדן ממוצע), רדיוס אופקי (אומדן ממוצע), רדיוס אנכי קמור (אומדן ממוצע), שיפור לאורך (אומדן מינימלי), שיפור לאורך (אומדן מרבי), מדד נוכחות מעקות בקטע, מצב צידי הדרך ללא מעקה, אחוז מאורך קטע עם שיפור אורכי, אחוז מאורך קטע ללא רדיוס אופקי.

התאמת מודל זה הסתיימה עם 7 משתנים מסבירים, שונות מוסברת 67.1%⁸.

⁸ על מנת לשפר את משמעויות המודל, בטרם התאמת המודל הסופי, עבור הקטעים ללא עקומים ושיפועים נקבעו ערכים כלהלן: עבור קטע ללא רדיוס אופקי (אינדיקטור $\text{minimum_ofki_plt} = 0$), רדיוס אופקי ממוצע, מינימלי ומרבי נקבע ל-500 מ'; עבור קטע ללא שיפוע לאורך ($\text{shipor_avr_pgt} = 0$) שיפוע אורכי ממוצע, מינימלי ומרבי נקבע ל-0%. לגבי רדיוס אנכי קמור ורדיוס אנכי קעור לא נמצאו קטעים ללא הרדיוסים בכלל (כאשר האינדיקטורים minimum_anahi_pin או $\text{minimum_ak_anahi_pin}$ שווים ל-0) ולכן, לא נדרש טיפול בערכי המאפיינים.

(3) **מודל 3** פותח תוך כדי שימוש ברשימה של כל מאפייני התשתית המבוטאים באחוזי פילוג לפי קטגוריות מוגדרות - ראה נספח א'. עם זאת, כדי ליצור אי-תלות בין המסבירים הנבדקים, לפיתוח המודל עבור כל מאפיין תשתית נלקחו שלוש קטגוריות מתוך ארבע הקיימות.

רשימה התחלתית לפיתוח המודל כללה 22 משתנים, לרבות נפח תנועה יומי, מאפייני התשתית באחוזים ומאפייני צידי הדרך (שאינם מבוטאים באחוזים). התאמת מודל זה הסתיימה עם 14 משתנים מסבירים, שונות מוסברת 60.7%.

טבלה 4.4 מציגה את שלושת המודלים שהותאמו לנתוני המחקר. ניתן לראות שלרוב מאפייני התשתית שנותרו במודלים נמצאה השפעה מובהקת על מדד המהירות. רק במודל 3 עבור קטגוריות נבחרות של רוחב שול, רדיוס אופקי ושיפוע לאורך לא נמצאה השפעה מובהקת על המהירות אך מאפיינים אלה נשמרו במודל לשיפור איכות המודל כולו.

יצוין גם כי מבחן יחס הנראות (likelihood ratio) אשר בודק האם המודל הסופי שונה מהמודל ההתחלתי, היה מובהק ($p < 0.0001$) עבור כל אחד מהמודלים. כמו כן, בדיקת ANOVA הראתה מובהקות של מרבית המשתנים שנותרו בכל אחד מהמודלים.

ע"פ תוצאות המודלים ניתן להצביע על מאפייני התשתית שמשפיעים על מהירויות הנסיעה בקטעי המחקר, כלהלן:

- **במודל 1** נמצא כי על מדד המהירות משפיעים נפח תנועה, רוחב נתיב, רוחב שול, רדיוס אופקי, רדיוס אנכי קמור, רדיוס אנכי קעור, שיפוע לאורך, מצב צידי הדרך ללא מעקות הבטיחות (קיום אזור המפלט לרכב בצד הדרך). לפי מודל זה, מדד המהירות *עולה* עם עליה ברוחב שול (כאומדן ממוצע) ועם עליה במדד המשקף קיום אזור המפלט בצד הדרך. ההשפעה של רוחב נתיב למעשה *מנטרלת* במודל כאשר עליה באומדן המינימלי של רוחב הנתיב מזוהה עם עליה במהירות, בעוד שעליה באומדן הממוצע של רוחב הנתיב מזוהה עם ירידה במהירות. באופן דומה, שני הערכים של שיפוע לאורך: האומדן המינימלי והאומדן הממוצע, *מנטרלים* זה את זה מבחינת השפעתם על מדד המהירות. כמו כן, שני הערכים של רדיוס אופקי: האומדן הממוצע והאומדן המרבי, מוצגים במודל עם שני מקדמים הפוכים, דבר *המנטרל* את השפעתם על מדד המהירות. בנוסף, עליה בנפח תנועה יומי מזוהה עם *ירידה* במהירות, כאשר עבור המאפיינים של רדיוס אנכי קמור ורדיוס אנכי קעור מקדמי המודל קטנים מאוד, דהיינו ללא השפעה מעשית על מדד מהירויות הנסיעה.

- **במודל 2** נמצא כי על מדד המהירות משפיעים מאפיינים כגון: נפח תנועה, מדד צפיפות הצמתים, רוחב שול (אומדן ממוצע), שיפוע לאורך (אומדן מינימלי ואומדן מרבי), מצב צידי הדרך ללא מעקות הבטיחות, אחוז מאורך קטע ללא רדיוס אופקי. לפי מודל זה, מדד המהירות *עולה* עם עליה ברוחב שול (אומדן ממוצע), עם עליה במדד מצב צידי הדרך ללא מעקות הבטיחות (המשקף גידול באזור המפלט לרכב), ועם עליה במדד המצביע על היעדר רדיוס אופקי בקטע. מאידך, מדד המהירות *יורד* עם עליה במדד צפיפות הצמתים ועם עליה בנפח התנועה בדרך. לגבי השפעת שיפוע לאורך התקבלו שתי תוצאות אשר, למעשה, *מנטרלות* את השפעת המאפיין: עליה באומדן המינימלי של שיפוע לאורך מזוהה עם עליה במהירות, בעוד שעליה באומדן המרבי של שיפוע לאורך מזוהה עם ירידה במהירות.

טבלה 4.4. מודלים מסבירים לקשר בין מאפייני התשתית לבין מדד המהירות שהותאמו במחקר

(א) מודל 1 – על סמך כל מאפייני התשתית המבוטאים בערכים מוחלטים

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	-1.59	12.92	-0.12	0.902012	
nefah	-0.70	0.09	-8.06	1.49E-13	***
rohav_nativ_avr_min	12.68	2.53	5.01	1.40E-06	***
rohav_nativ_avr_mean	-15.94	3.77	-4.22	3.97E-05	***
rohav_shul_avr_mean	6.38	0.92	6.97	7.30E-11	***
minimum_ofki_mean	0.04	0.01	3.25	0.00142	**
minimum_ofki_max	-0.04	0.01	-2.59	0.010453	*
minimum_anahi_min	-0.01	0.00	-2.10	0.036936	*
minimum_anahi_max	0.00	0.00	2.22	0.027804	*
minimum_ak_anahi_max	0.00	0.00	1.85	0.066179	.
shipor_avr_min	2.90	1.14	2.56	0.011426	*
shipor_avr_mean	-2.40	0.66	-3.64	0.000365	***
noBAMEAN	2.34	1.03	2.26	0.024959	*

(ב) מודל 2 – על סמך רשימה מצומצמת של מאפייני התשתית המבוטאים בערכים מוחלטים

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	-25.23	4.39	-5.75	4.15E-08	***
nefah	-0.60	0.08	-7.41	5.76E-12	***
madad_zfifut_zmatim	-16.23	5.08	-3.20	1.67E-03	**
rohav_shul_avr_mean	4.37	0.88	4.96	1.70E-06	***
shipor_avr_min	1.67	0.56	2.96	3.51E-03	**
shipor_avr_max	-0.63	0.25	-2.50	1.35E-02	*
no_bar_est_mean	1.93	0.96	2.01	4.57E-02	*
minimum_ofki_pgt	0.37	0.04	8.50	9.28E-15	***

(ג) מודל 3 – על סמך כל מאפייני התשתית המבוטאים באחוזי פילוג לפי קטגוריות מוגדרות

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	26.44	6.63	3.99	0.0001	***
nefah	-0.61	0.10	-6.18	4.97E-09	***
madad_zfifut_zmatim	-14.11	6.39	-2.21	0.028704	*
rohav_nativ0_3_3	0.14	0.04	3.12	0.002147	**
rohav_nativ3_3_3_5	0.18	0.04	4.18	4.83E-05	***
rohav_nativ3_5_3_6	0.15	0.07	2.00	0.047004	*
rohav_shul_avr0_2	-0.11	0.03	-3.88	0.000151	***
rohav_shul_avr2_5_3	-0.08	0.05	-1.55	0.123769	
ofki_ad_100	-0.38	0.09	-4.13	5.75E-05	***
ofki100_200	-0.05	0.03	-1.48	0.140451	
anahi2500_4000	-0.22	0.10	-2.12	0.035633	*
ak_anahi_ad_1500	-0.22	0.07	-3.18	0.001745	**
shipor_avr6_8	-0.07	0.05	-1.59	0.113375	
shipor_avr8_10	-0.17	0.09	-1.94	0.05384	.
no_bar_est_mean	3.46	1.12	3.09	0.002353	**

הערה לטבלה 4.4: רמות מובהקות של משתני המודלים: "****" $p < 0.001$, "****" $p < 0.01$, "****" $p < 0.05$, "****" $p < 0.1$.

- **במודל 3** נמצא כי על מדד המהירות משפיעים נפח תנועה, מדד צפיפות הצמתים, רוחב נתיב, ערכים מסוימים של רוחב שול, רדיוס אופקי, רדיוס אנכי קמור וקעור, שיפוע לאורך, וכמו כן, מצב צידי הדרך ללא מעקות הבטיחות. לפי מודל זה, מדד המהירות עולה עם כל הערכים של רוחב נתיב ועולה משמעותית עם עליה בממד מצב צידי הדרך ללא מעקות הבטיחות (המשקף גידול באזור המפלט לרכב). לעומת זאת, מדד המהירות יורד משמעותית עם עליה בממד צפיפות הצמתים וכן, יורד עם

עליה בנפח התנועה בדרך. כמו כן, מדד המהירות **יורד** בנוכחות של שול צר (עד 2 מ'), רדיוס אופקי קטן (עד 100 מ'), שיפוע אורכי גדול (בין 8-10%). בנוסף, אפקט **ממתן** על מדד המהירות נמצא כאשר בקטע קיים אחוז גבוה של רדיוס אנכי קמור בטווח 2500-4000 מ' ושל רדיוס אנכי קעור בטווח עד 1500 מ'.

בעקבות בחינה של כל המודלים ביחד ניתן להסיק כי:

- מדד המהירות **עולה** עם עליה ברוחב שול ועם עליה במדד מצב צידי הדרך ללא מעקות הבטיחות. השפעת מאפייני תשתית אלה על מהירות היתה עקבית בכל המודלים שהותאמו במחקר. השפעה דומה של מצב צידי הדרך ללא מעקה (המשקף את גודל אזור המפלט לרכב) נמצאה בכל שלושת המודלים. השפעת שינוי רוחב שול על המהירות נמצאה בשני המודלים המבוססים על הערכים המוחלטים של המאפיינים, כאשר גם במודל 3 נוכחות שול צר במיוחד (עד 2 מ') היתה מזוהה עם ירידה במהירות.

- מאידך, מדד המהירות **יורד** עם עליה בנפח התנועה (ממצא עקבי בכל המודלים) וגם עם עליה במדד צפיפות הצמתים לאורך קטע (ממצא של שני המודלים מתוך שלושה).

- עבור הרדיוס האופקי נמצאה השפעה בשני מודלים (מודל 2, מודל 3) אשר מצביעה על אפקט **ממתן** על מדד המהירות של נוכחות הרדיוס האופקי בכלל או של קיום רדיוסים קטנים במיוחד. (במודל 1 נשאו שני ערכי המאפיין עם מקדמים הפוכים שנטרלו את השפעתם על מדד המהירות.)

- לגבי השיפוע לאורך, בשני המודלים הראשונים עבור מאפיין זה נשמרו שני ערכים אשר למעשה נטרלו אחד את השני מבחינת השפעתם על מדד המהירות. רק במודל השלישי זוהתה השפעה של קטגורית שיפוע אורך גדול במיוחד (8-10%) אשר מזוהה עם אפקט **ממתן** על המהירות.

- עבור השפעת רוחב נתיב על מהירות לא נתקבלו תוצאות שימושיות כאשר במודל 1 נשמרו שני ערכי המאפיין שנטרלו את השפעתו המעשית על מדד המהירות, בעוד שבמודל 3 התקבל שכל ערכי המאפיין מזוהים עם עליה במהירות.

- לגבי הרדיוסים האנכיים, במודל 1 לא נמצאה השפעה מעשית על מדד המהירות (מקדמי המודל היו קטנים מאוד), כאשר מאפיינים אלה לא נכללו בין המסבירים במודל 2. במודל 3 נמצא אפקט **ממתן** על מדד המהירות של ערכים מסוימים של הרדיוסים האנכיים (כגון: רדיוס אנכי קמור בטווח 2500-4000 מ' ושל רדיוס אנכי קעור בטווח עד 1500 מ'). עם זאת, סה"כ נראה כי השפעת הרדיוסים האנכיים על המהירות זניחה למדי.

מכאן, על מדד המהירות נמצאה השפעת של מאפייני תשתית אלה:

- **רוחב שול ומצב צידי הדרך ללא מעקות** (רוחב אזור המפלט לרכב), כאשר ערכים גדולים יותר של מאפיינים אלה מזוהים עם עליה במהירות, וממצא זה היה עקבי על פני כל המודלים.

- **נפח התנועה ומדד צפיפות הצמתים** לאורך הקטע, כאשר עליה במדדים אלה מזוהה עם ירידה במהירות, וממצא זה היה עקבי על פני כל המודלים.

- רדיוס אופקי ושיפוע לאורך, כאשר במודלים השונים היו סימנים לכך שנוכחותם של מאפיינים אלה לאורך קטע או קיום ערכים קיצוניים יותר של שני המאפיינים (רדיוס קטן ושיפוע גדול) מזוהים עם אפקט ממתן על המהירות.

4.3.1. הדגמת הקשר בין מאפייני התשתית לבין מדד המהירות, על סמך מודל 2

כדי להמחיש את השפעתם של מאפייני תשתית שונים על מהירויות הנסיעה, על סמך מודל 2 נבנו גרפים עם הצגת משמעותיות המודל. מודל 2 נבחר להצגה היוזואלית מכיוון שבין שלושת המודלים שנבנו במחקר, מודל זה מתאפיין באחוז מרבי של השונות המוסברת לקשר הנבחן וגם במשמעותיות מעשיות ברורות יותר, לעומת יתר המודלים, לגבי השפעת מאפייני התשתית על המהירות.

יש לשים לב שמודל זה מתאים לטווחים הבאים של מאפייני התשתית:

* נפח תנועה יומי בין 0.3 עד 37.2 אלף כלי רכב, עם ממוצע 9.8 אלף כלי רכב ביממה (על פני בסיס הנתונים של המחקר);

* מדד צפיפות הצמתים בין 0 עד 1 (ממוצע 0.09, דהיינו 9% מאורך קטע היו צמתים);

* רוחב שול (אומדן ממוצע) בין 0.4 עד 3.96 מ' (ממוצע של בסיס הנתונים - 1.91 מ');

* שיפוע לאורך (אומדן מינימלי) בין 3% עד 8% (כאשר בקטע קיים שיפוע אורך מעל 3%, עבור יתר הקטעים נקבע 0);

* שיפוע לאורך (אומדן מרבי) בין 3% עד 15% (כאשר בקטע קיים שיפוע אורך מעל 3%, עבור יתר הקטעים נקבע 0);

* מצב צידי הדרך ללא מעקה (אומדן ממוצע) בין 1 עד 4 (בהתאם לקטגוריות שהוגדרו למאפיין זה – ראה סעיף 2.4 לעיל);

* אחוז מאורך קטע עם רדיוס מעל 400 מ' (אינדיקטור minimum_ofki_pgt) בין 0 עד 100%, עם ממוצע 82% (על פני בסיס הנתונים של המחקר).

טווחי הערכים הנ"ל שימשו בחישובי המודל המוצגים להלן. להצגה היוזואלית של מערכת הקשרים בין מאפייני התשתית ומדד המהירות (שהינו, כזכור, ההפרש בין מהירות האחוזון ה-85 בקטע לבין המהירות המותרת), נבנו הדוגמאות הבאות:

1. השפעת רוחב שול על מדד המהירות, ברמות שונות של נפח התנועה בדרך: 3,0, 10,0 ו-18,0 אלף כלי רכב ביממה (כערכים מייצגים לקטעי הדרכים החד-מסלוליות בארץ).

2. השפעת רוחב שול על מדד המהירות, ברמות שונות של נוכחות עקום אופקי בקטע - אחוז מאורך קטע עם רדיוס מעל 400 מ' (דהיינו ללא רדיוס אופקי): 20%, 50% ו-80% (אלה ערכים המייצגים את טווח הערכים שנבדק במחקר).

3. השפעת מצב צידי הדרך ללא מעקה על מדד המהירות, ברמות שונות של נפח התנועה בדרך: 3,0, 10,0 ו-18,0 אלף כלי רכב ביממה.

4. השפעת מצב צידי הדרך ללא מעקה על מדד המהירות, ברמות שונות של נוכחות עקום אופקי בקטע - אחוז מאורך קטע ללא רדיוס אופקי: 20%, 50% ו-80%.

5. השפעת מדד צפיפות הצמחים על מדד המהירות, ברמות שונות של נפח התנועה בדרך: 3,0, 10,0 ו-18,0 אלף כלי רכב ביממה.

6. השפעת מדד צפיפות הצמחים על מדד המהירות, ברמות שונות של נוכחות עקום אופקי בקטע - אחוז מאורך קטע ללא רדיוס אופקי: 20%, 50% ו-80%.

בכל דוגמא נבדק הקשר בין מאפיין תשתית מסוים ומדד המהירות, במספר רמות של מאפיין תשתית נוסף. עבור יתר מאפייני התשתית שלא השתנו בדוגמא מסוימת אך נדרשו לפי המודל, שימשו ערכי ברירת המחדל כלהלן:

מדד צפיפות הצמחים – 0.1; שיפוע לאורך (אומדן מינימלי) - 3%; שיפוע לאורך (אומדן מרבי) - 8%; מצב צדי הדרך ללא מעקה – 2; אחוז מאורך קטע ללא רדיוס אופקי – 80%; נפח תנועה יומי – 10,0 אלף כלי רכב; רוחב שול (אומדן ממוצע) – 2 מ'.

איור 4.2 מציג את הדוגמאות לקשר בין מאפייני התשתית ומדד המהירות שחושבו בעזרת מודל 2. ניתן לראות כי:

- הגדלת רוחב שול מביאה לעליה במדד המהירות. עם זאת, ערכים גבוהים של מדד המהירות (חריגה מהמהירות המותרת) מתקבלים בנפחי תנועה נמוכים יותר, עד 10,0 אלף כלי רכב ביממה, אשר בנוכחות שול תקני (3-2.5 מ') מזוהים עם חריגה של 10-15 קמ"ש מעל המהירות המותרת. מאידך, בנפחי תנועה גבוהים (18,0 אלף כלי רכב ביממה), חריגת המהירות תהיה נמוכה יותר גם כאשר קיים שול תקני.

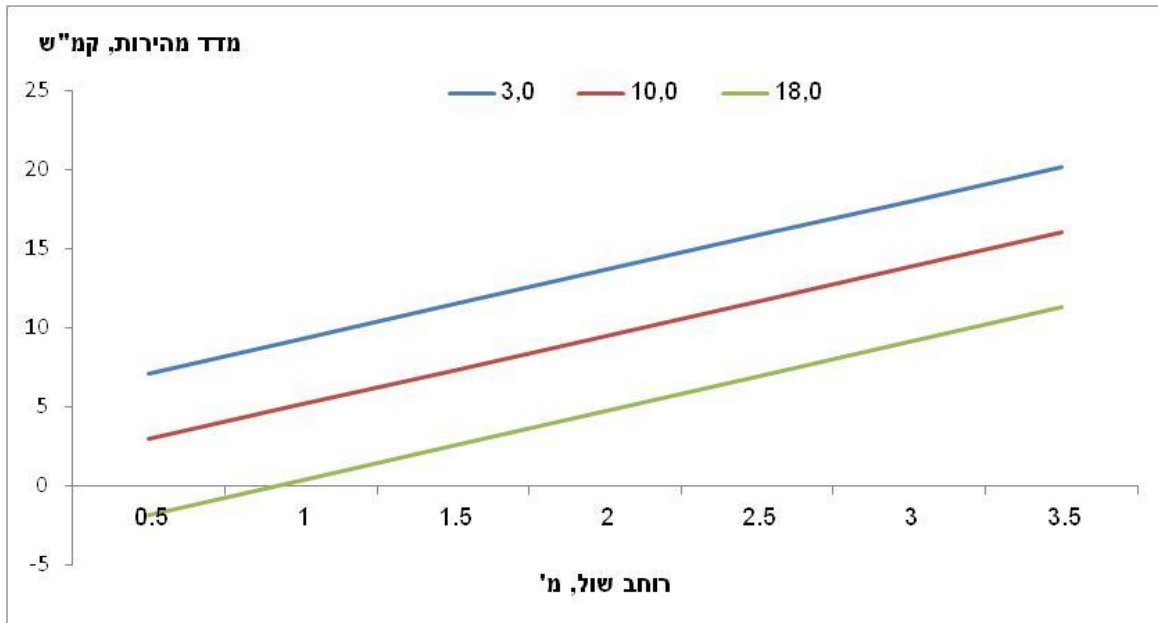
כמו כן, כאשר ב-50% או יותר מאורך הקטע נמצא עקום אופקי, מדד המהירות נשאר נמוך גם כאשר רוחב שול עולה ל-3 מ' או יותר. כלומר, נוכחות עקום אופקי ממתנת את השפעתו של רוחב שול.

- קיום אזור מפלט רחב יותר בצד הדרך (מדד גבוה יותר של מצב צידי הדרך ללא מעקה) מעלה את מדד המהירות. עם שיפור מצב צידי הדרך, חריגת המהירות עולה בנפחי תנועה נמוכים יותר (כגון: 3,0 אלף כלי רכב), כאשר בנפחי תנועה גבוהים יותר גם במצב הטוב של צידי הדרך (ערך 3) חריגת המהירות אינה גבוהה.

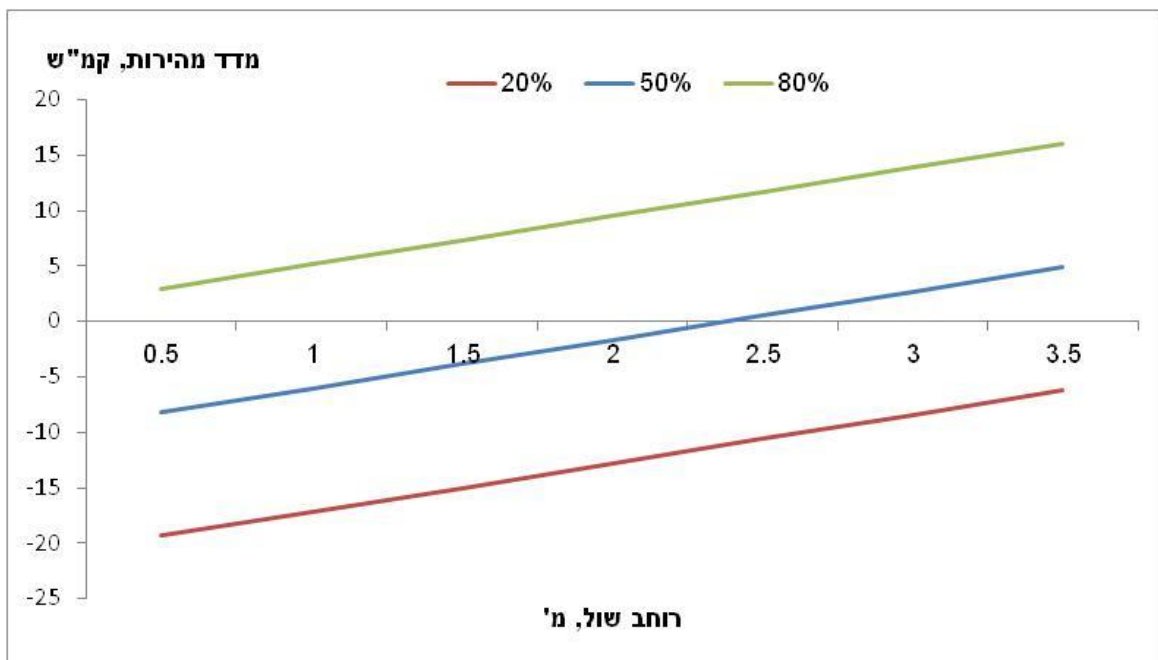
כמו כן, כאשר ב-50% או יותר מאורך הקטע נמצא עקום אופקי, מדד המהירות נשאר נמוך, דהיינו השפעת נוכחות העקום האופקי חזקה יותר מאשר השפעתו של מצב צידי הדרך.

- נוכחות הצמחים בקטע ממתנת את מדד המהירות, כאשר השפעת מדד זה מהותית יותר בנפחי תנועה נמוכים יותר. בדומה למקרים הקודמים, השפעת מדד זה אינה מורגשת כאשר מדובר בקטע עם נוכחות ניכרת של העקום האופקי – 50% או יותר מאורך הקטע.

לסיכום, בנפחי תנועה נמוכים יותר (כגון: עד 10,0 אלף כלי רכב ביממה), על מדד המהירות קיימת השפעה מעשית של רוחב שול, מצב צידי הדרך ללא מעקה, נוכחות הצמחים בקטע. השפעת מאפיינים אלה על חריגת המהירות מהותית יותר בנפחי תנועה נמוכים (כגון: 3,0 אלף כלי רכב ביממה). עם זאת, השפעת מאפיינים אלה נעלמת כאשר מדובר בקטעים עם נוכחות ניכרת של העקום האופקי כגון: ב-50% או יותר מאורך הקטע.

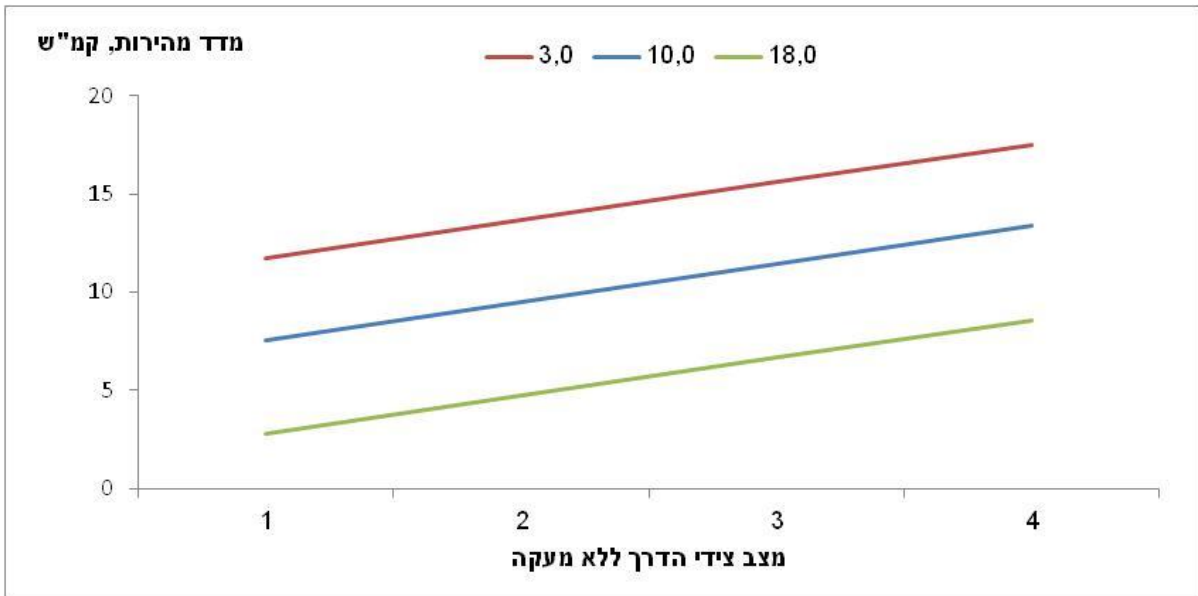


1 - השפעת רוחב שול על מדד המהירות, ברמות שונות של נפח התנועה בדרך (אלף כלי רכב)

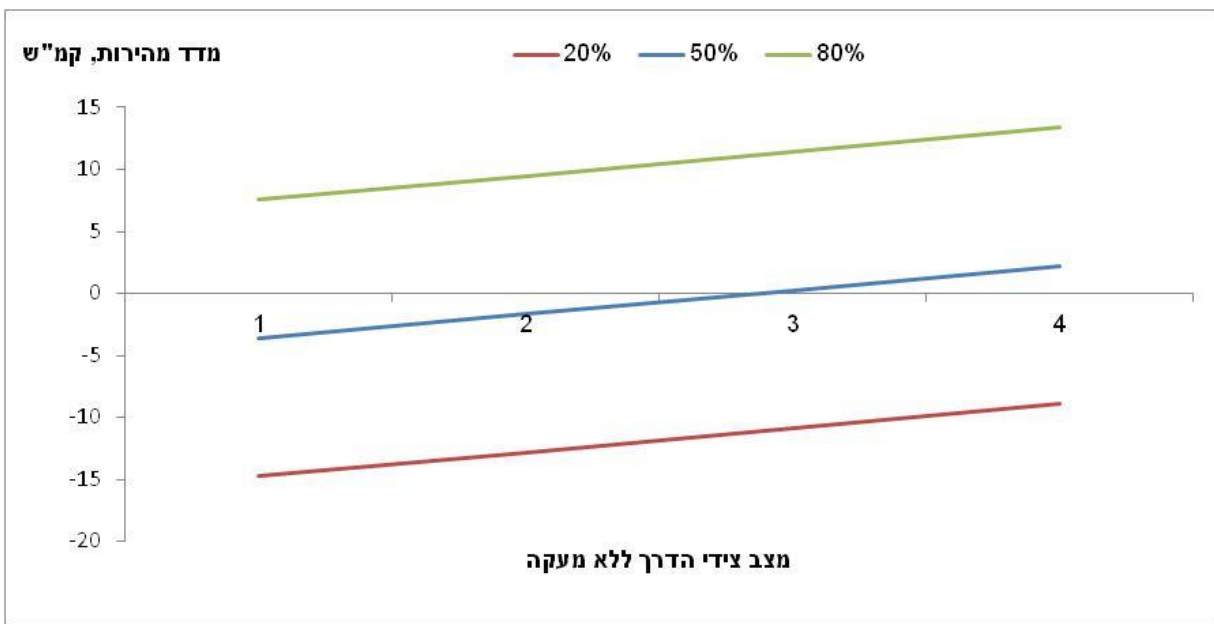


2 - השפעת רוחב שול על מדד המהירות, ברמות שונות של נוכחות עקום אופקי בקטע - אחוז מאורך קטע ללא רדיוס אופקי

הערה: מדד המהירות הינו הפרש בין מהירות האחוזון 85 בקטע לבין המהירות המותרת
איור 4.2. דוגמאות להצגה ויזואלית של מערכת הקשרים בין מאפייני התשתית לבין מדד המהירות.

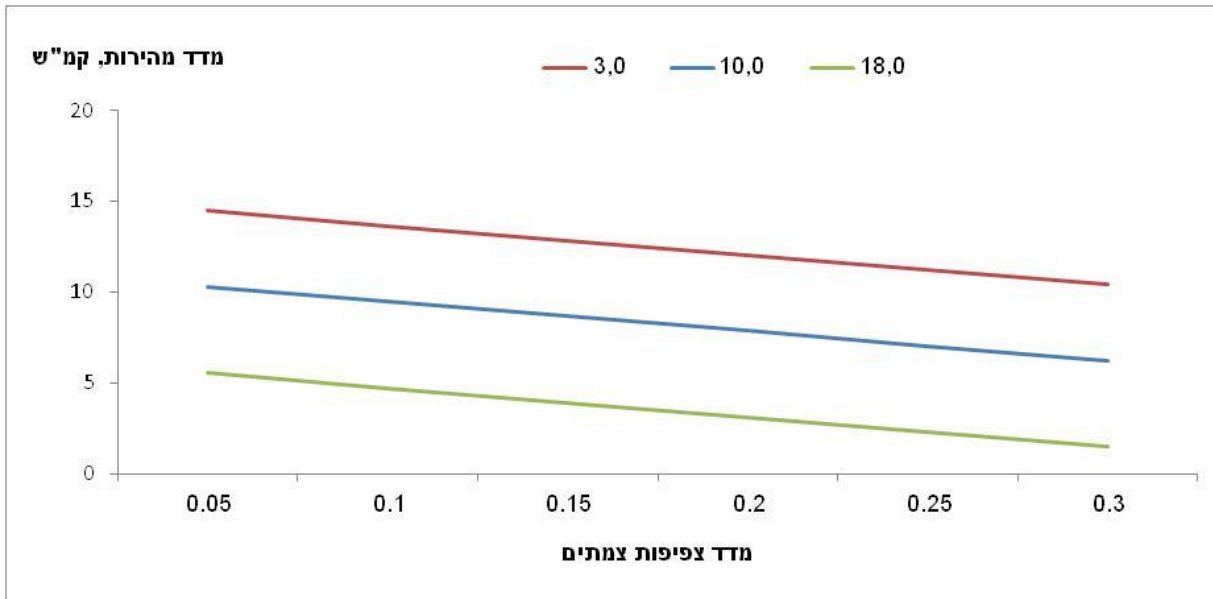


3 - השפעת מצב צידי הדרך ללא מעקה על מדד המהירות, ברמות שונות של נפח התנועה בדרך (אלף כלי רכב)

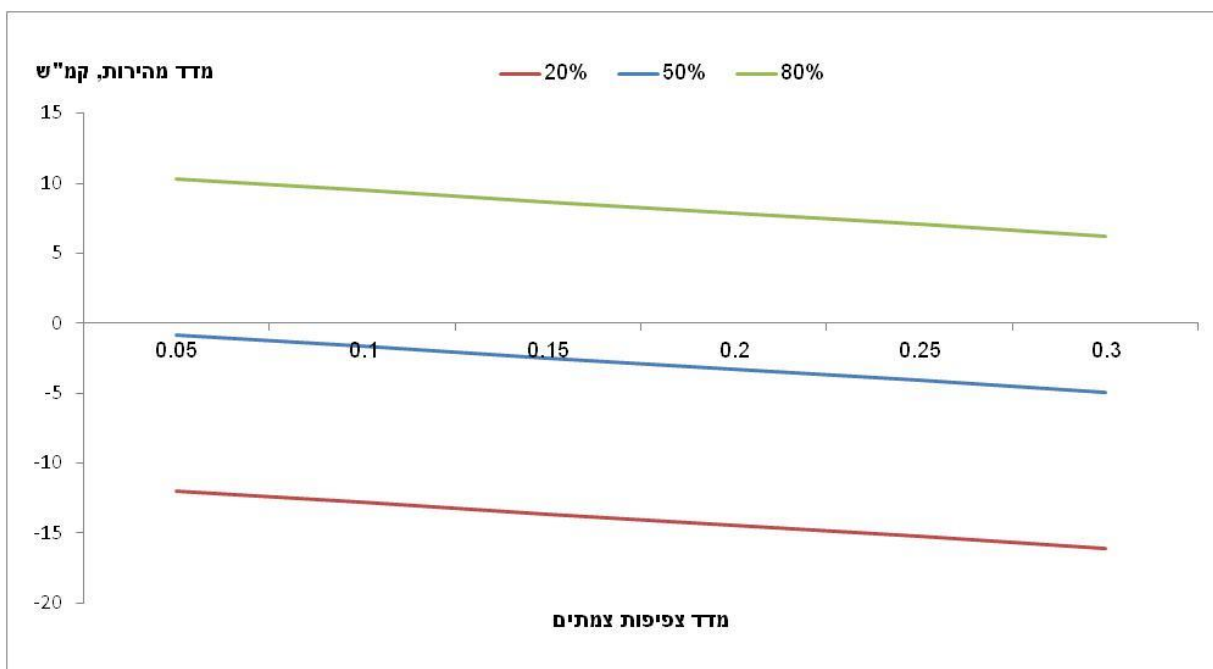


4 - השפעת מצב צידי הדרך ללא מעקה על מדד המהירות, ברמות שונות של נוכחות עקום אופקי בקטע - אחוז מאורך קטע ללא רדיוס אופקי

הערה: מדד המהירות הינו הפרש בין מהירות האחוזון ה-85 בקטע לבין המהירות המותרת
 איור 4.2. דוגמאות להצגה ויזואלית של מערכת הקשרים בין מאפייני התשתית לבין מדד המהירות - המשך.



5 - השפעת מדד צפיפות הצמתים על מדד המהירות, ברמות שונות של נפח התנועה בדרך (אלף כלי רכב)



6 - השפעת מדד צפיפות הצמתים על מדד המהירות, ברמות שונות של נוכחות עקום אופקי בקטע - אחוז מאורך קטע ללא רדיוס אופקי

הערה: מדד המהירות הינו הפרש בין מהירות האחוזון 85 בקטע לבין המהירות המותרת

איור 4.2. דוגמאות להצגה ויזואלית של מערכת הקשרים בין מאפייני התשתית לבין מדד המהירות - המשך.

4.4. זיהוי קבוצות הומוגניות של קטעי המחקר לפי מהירויות תכן משוחזרות

ע"פ ממצאי הספרות (ראה פרק 1.3), לעקביות תכן דרך קיימת השפעה על בחירת מהירויות הנסיעה בפועל ע"י הנהגים ועל רמת בטיחות הדרך, כאשר עקביות טובה יותר תורמת לשיפור הבטיחות. למדידת עקביות התכן משתמשים בערכי מהירויות התכן כאשר ע"פ הנחיות לתכנון דרכים בארץ ובעולם, בחירת מהירות התכן קובעת את מאפייני הדרך. עקב חשיבות נושא עקביות התכן הן מבחינת איכות התכנון והן מבחינת רמת בטיחות הדרך, במחקר הנוכחי נעשה ניסיון להתייחס לרמת עקביות התכנון של קטעי הדרכים הנבחרים, כאשר מהירויות התכן של הקטעים משוחזרות על סמך מאפייני הדרך בפועל.

כפי שהוסבר בפרק 2.4, במחקר הנוכחי, מאפייני הקטעים בפועל כגון: רוחב נתיב, רוחב שול, רדיוס עקום אופקי, גודל השיפור לאורך - "תורגמו" לערכי מהירויות התכן. ערכי מהירויות התכן שוחזרו למקטעים קצרים באורך עד 330 מ', ובהמשך, חושבו אומדני מהירות התכן לקטע כולו שהם: ממוצע, סטית תקן, ערך מינימלי וערך מרבי של ערכי מהירויות התכן שנצפו בו, ובנוסף, חושבו מדדים לאפיון רמת ההשתנות של מהירויות התכן לאורך קטע. לצורך כך חושבו הפרשים של מהירות התכן לכל שני מקטעים קצרים עוקבים בתוך הקטע, אשר בהמשך סווגו לפי שלוש קטגוריות: עד 10 קמ"ש, 10-20 קמ"ש, מעל 20 קמ"ש (בהתאם להגדרה של עקביות תכן טובה, בינונית ונמוכה, בספרות המקצועית). כתוצאה, לכל קטע דרך התקבלו שלושה מדדים של השתנות מהירות התכן - אחוזי המקרים לפי שלוש הקטגוריות הנ"ל, דהיינו עם שינוי קל, בינוני או ניכר במהירות התכן בין המקטעים העוקבים, מה שמשקף נוכחות של מאפייני דרך דומים, דומים חלקית או שונים, בנסיעה לאורך הקטע.

לפיכך, אומדני מהירויות התכן ומדדי השתנות מהירות התכן התקבלו על סמך ארבעה מאפייני תשתית, כאשר עם כל מאפיין תשתית חושבו 4 אומדני מהירות התכן לקטע כולו (ממוצע, סטית תקן, ערך מינימלי, ערך מרבי של ערכי מהירויות התכן שנצפו בו) ועוד 3 מדדי השתנות של מהירות התכן לאורך הקטע (אחוזי המקרים לפי 3 הקטגוריות המוגדרות של הפרשי מהירות התכן). מכאן, עבור כל קטע דרך, במחקר הנוכחי, התקבלו סה"כ 28 מדדים של מהירות התכן. רשימת מדדים אלה מוצגת בטבלה 4.5.

עם זאת, על סמך מאפייני תשתית שונים לקטע דרך מסוים לא בהכרח מתקבלים ערכים זהים של מדדי מהירות התכן. לכן, בשלב הנוכחי של הניתוח, היה צורך לבחון את התנהגות מדדי מהירות התכן בקטעי המחקר, לזהות קבוצות הומוגניות של קטעי המחקר מבחינת הגדלים ורמת ההשתנות של מהירויות התכן ובהמשך, לבחון השפעה של מהירויות התכן על מהירויות הנסיעה בפועל. לפיכך, בשלב זה של הניתוח - בחינת מאפיינים של מהירויות התכן ששוחזרו לקטעי המחקר, היו שלושה מרכיבים, כלהלן:

(א) ניתוח מקדים לבחינת התנהגות של אומדני מהירויות התכן בקטעי המחקר, כדי לזהות דמיון ושוני בקביעת מהירויות התכן ע"פ מאפייני תשתית שונים.

(ב) בחינת השפעה של המדדים השונים של מהירויות התכן על מהירויות הנסיעה בפועל. בחינה זאת נערכה בעזרת מודל CART, ע"י סיווג קטעי המחקר על-פי ערכי מדד המהירות בפועל – האחוזון ה-85 של מהירויות הנסיעה ותוך כדי שימוש בכל מדדי מהירויות התכן.

(ג) סיווג רב-משתני של קטעי המחקר למען זיהוי קבוצות קטעים עם התנהגות דומה של מדדי מהירות התכן, תוך כדי שימוש ברשימה המלאה של מדדי מהירות התכן שנקבעו על סמך מאפייני תשתית שונים. סיווג זה נערך בעזרת שיטת ניתוח אשכולות (cluster analysis). כתוצאה מהניתוח, כל קטע שויך לקלסטר מסוים ע"פ מהירויות התכן שלו.

טבלה 4.5. מדדי מהירות התכן שהופקו לקטעי המחקר

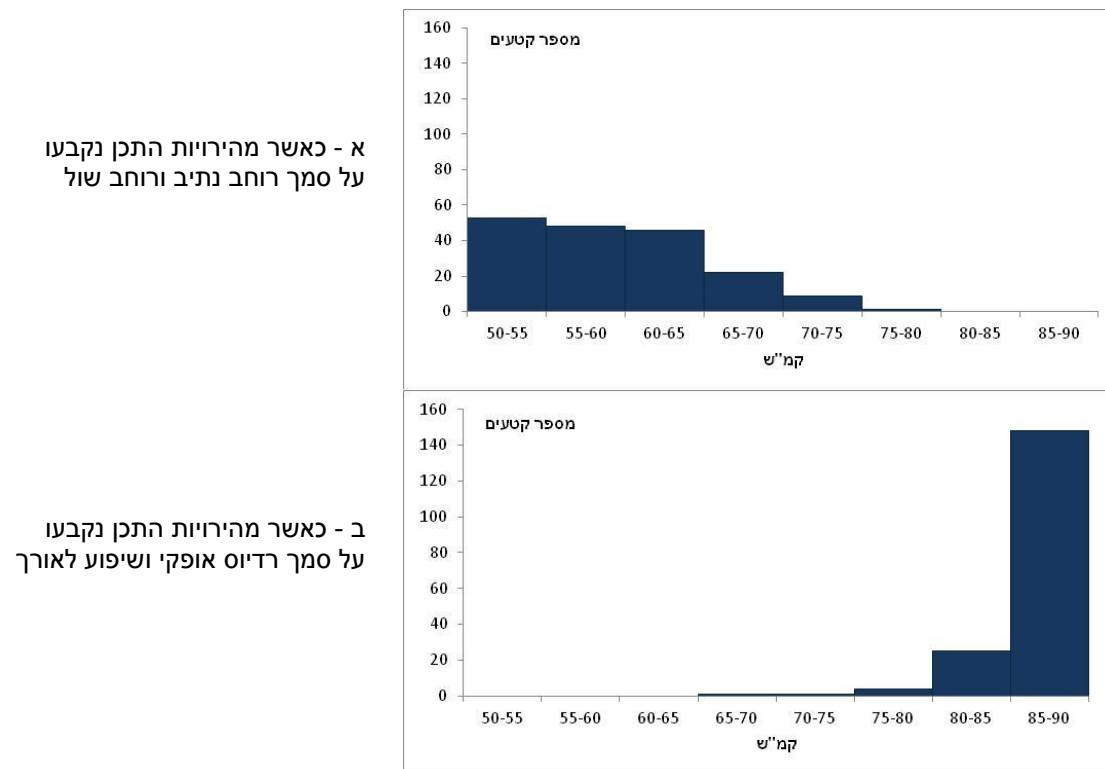
משמעות המדד	מדד מהירות תכן
ממוצע מהירות תכן בקטע, על סמך רוחב נתיב	MT_NATIV_AVR
ממוצע מהירות תכן בקטע, על סמך רוחב שול	MT_SHUL_AVR
ממוצע מהירות תכן בקטע, על סמך רדיוס אופקי	MT_RADOF_AVR
ממוצע מהירות תכן בקטע, על סמך שיפוע לאורך	MT_SHIP_AVR
סטית תקן של מהירות תכן בקטע, על סמך רוחב נתיב	MT_NATIV_STD
סטית תקן של מהירות תכן בקטע, על סמך רוחב שול	MT_SHUL_STD
סטית תקן של מהירות תכן בקטע, על סמך רדיוס אופקי	MT_RADOF_STD
סטית תקן של מהירות תכן בקטע, על סמך שיפוע לאורך	MT_SHIP_STD
ערך מינימלי של מהירות תכן בקטע, על סמך רוחב נתיב	MT_NATIV_MIN
ערך מינימלי של מהירות תכן בקטע, על סמך רוחב שול	MT_SHUL_MIN
ערך מינימלי של מהירות תכן בקטע, על סמך רדיוס אופקי	MT_RADOF_MIN
ערך מינימלי של מהירות תכן בקטע, על סמך שיפוע לאורך	MT_SHIP_MIN
ערך מרבי של מהירות תכן בקטע, על סמך רוחב נתיב	MT_NATIV_MAX
ערך מרבי של מהירות תכן בקטע, על סמך רוחב שול	MT_SHUL_MAX
ערך מרבי של מהירות תכן בקטע, על סמך רדיוס אופקי	MT_RADOF_MAX
ערך מרבי של מהירות תכן בקטע, על סמך שיפוע לאורך	MT_SHIP_MAX
אחוז מקטעים עוקבים עם הפרשים עד 10 קמ"ש במהירות תכן, על סמך רוחב נתיב	efresh_M_t_NO_10
אחוז מקטעים עוקבים עם הפרשים בין 10-20 קמ"ש במהירות תכן, על סמך רוחב נתיב	efresh_m_t_N10_20
אחוז מקטעים עוקבים עם הפרשים מעל 20 קמ"ש במהירות תכן, על סמך רוחב נתיב	efresh_m_t_N20_more
אחוז מקטעים עוקבים עם הפרשים עד 10 קמ"ש במהירות תכן, על סמך רוחב שול	efresh_M_t_s0_10
אחוז מקטעים עוקבים עם הפרשים בין 10-20 קמ"ש במהירות תכן, על סמך רוחב שול	efresh_m_t_s10_20
אחוז מקטעים עוקבים עם הפרשים מעל 20 קמ"ש במהירות תכן, על סמך רוחב שול	efresh_m_t_s20_more
אחוז מקטעים עוקבים עם הפרשים עד 10 קמ"ש במהירות תכן, על סמך רדיוס אופקי	efresh_M_t_r0_10
אחוז מקטעים עוקבים עם הפרשים בין 10-20 קמ"ש במהירות תכן, על סמך רדיוס אופקי	efresh_m_t_r10_20
אחוז מקטעים עוקבים עם הפרשים מעל 20 קמ"ש במהירות תכן, על סמך רדיוס אופקי	efresh_m_t_r20_more
אחוז מקטעים עוקבים עם הפרשים עד 10 קמ"ש במהירות תכן, על סמך שיפוע לאורך	efresh_M_t_ship0_10
אחוז מקטעים עוקבים עם הפרשים בין 10-20 קמ"ש במהירות תכן, על סמך שיפוע לאורך	efresh_m_t_ship10_20
אחוז מקטעים עוקבים עם הפרשים מעל 20 קמ"ש במהירות תכן, על סמך שיפוע לאורך	efresh_m_t_ship20_more

להלן ממצאי הניתוחים הסטטיסטיים של מהירויות התכן.

4.4.1. בחינת התנהגות של אומדני מהירויות התכן בקטעי המחקר

בחינה זו התייחסה לממוצע מהירויות התכן בקטעים שנקבעו על סמך ארבעת מאפייני התשתית. בדיקה מדגמית של קטעי המחקר הראתה כי קיים שוני בין אומדני מהירויות התכן שנקבעו לפי רוחב נתיב ורוחב שול לעומת אותם האומדנים שנקבעו לפי רדיוס אופקי ושיפוע אורכי, כאשר ערכי מהירויות התכן לפי מאפייני הרדיוס והשיפוע לרוב היו גבוהים יותר. הבדיקות הסטטיסטיות (כגון:

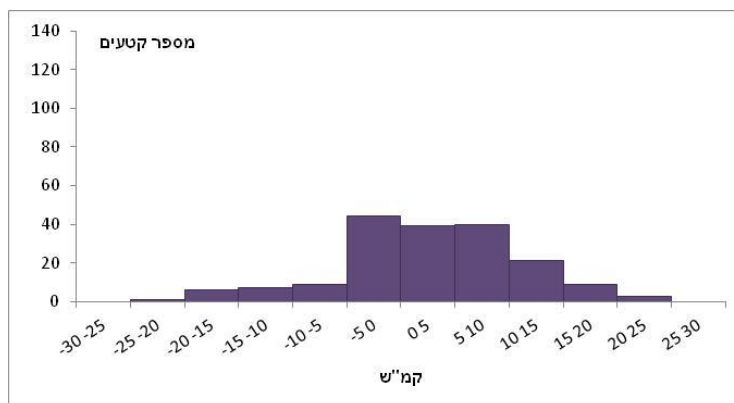
קורלציות Pearson) הצביעו על שוני בין ממוצעי מהירויות התכן לפי שני זוגות המאפיינים. להמחשת סוגיה זאת, איורים 4.3-4.4 מציגים התפלגויות של ממוצעי מהירויות התכן ושל הפרשי מהירויות התכן בקטעי המחקר, בהתאמה, אשר חושבו על סמך שני זוגות המאפיינים: רוחב נתיב ורוחב שול לעומת רדיוס אופקי ושיפוע אורכי. (בהקשר הנוכחי, הפרש מהירויות התכן הינו הבדל בין שני ערכי המהירות שהתקבלו בתוך כל זוג של מאפייני התשתית).



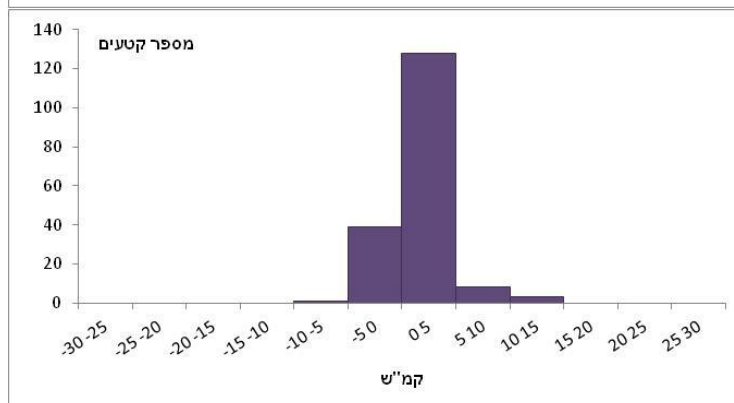
איור 4.3. התפלגויות ממוצעי מהירויות התכן (קמ"ש) בקטעי המחקר, על סמך מאפייני תשתית שונים.

איורים 4.3-4.4 מדגימים הבדלים ניכרים בהתנהגויות ממוצעי מהירויות התכן בקטעי המחקר, כאשר אומדני המהירות הוערכו על סמך מאפייני תשתית שונים. ניתן להבחין כי על סמך רוחב נתיב ורוחב שול מתקבלים ערכים נמוכים יותר של מהירויות התכן לעומת האומדנים שהתקבלו על סמך הרדיוס והשיפוע. כמו כן, כאשר בוחנים את הפרשי מהירויות התכן בקטעי המחקר, ניכר פיזור רחב יותר של הערכים שהתקבלו על סמך רוחב נתיב ורוחב שול לעומת מאפייני הרדיוס והשיפוע. טבלה 4.6 מציגה סיכום למדדים הסטטיסטיים של התפלגויות מהירויות התכן שנקבעו על סמך מאפייני תשתית שונים.

א - כאשר מהירויות התכן נקבעו על סמך רוחב נתיב ורוחב שול



ב - כאשר מהירויות התכן נקבעו על סמך רדיוס אופקי ושיפוע לאורך



איור 4.4. התפלגויות הפרשים בין מהירויות התכן (קמ"ש) בקטעי המחקר, על סמך מאפייני תשתית שונים.

טבלה 4.6. מדדים סטטיסטיים של התפלגויות מהירויות התכן שנקבעו על סמך מאפייני תשתית שונים

א – ממוצעי מהירויות התכן בקטעי המחקר (קמ"ש)

מדדים סטטיסטיים	על סמך רוחב נתיב ורוחב שול	על סמך רדיוס אופקי ושיפוע אורכי
Mean	59.3	87.5
Std. Deviation	6.4	3.3
Minimum	50.0	67.5
Maximum	76.7	90.0

ב – הפרשים בין ממוצעי מהירויות התכן בקטעי המחקר (קמ"ש)*

מדדים סטטיסטיים	על סמך רוחב נתיב ורוחב שול	על סמך רדיוס אופקי ושיפוע אורכי
Mean	2.9	1.6
Std. Deviation	8.2	2.5
Minimum	-21.2	-6.7
Maximum	24.0	15.0

* הפרש בין ממוצעי מהירויות התכן שהתקבלו בתוך כל זוג של מאפייני התשתית, דהיינו רוחב נתיב ורוחב שול, או רדיוס אופקי ושיפוע אורכי

בשל השוני שנמצא בין אומדני מהירויות התכן ששוחזרו על סמך מאפייני תשתית שונים, לא ניתן להציע ערך אחד מוסכם של מהירות התכן עבור קטע דרך מסוים שהיה מתקבל על פני כל הערכים של מהירויות התכן. לכן, קיים צורך בזיהוי קבוצות של קטעי המחקר עם התנהגות דומה של מהירויות התכן, תוך כדי שימוש בכל המדדים של מהירויות התכן.

4.4.2. בחינת השפעה של מדדי מהירויות התכן על מהירויות הנסיעה בפועל

בחינה זאת נערכה ע"י סיווג קטעי המחקר על-פי ערכי מדד המהירות בפועל - האחוזון ה-85 של מהירויות הנסיעה, תוך כדי שימוש בכל מדדי מהירויות התכן. לסיווג קטעי המחקר שימשה שיטת ה-CART שתוארה לעיל בפרק 4.2. ביצירת עץ הסיווג השתתפו מדדי הממוצעים, סטיות התכן ואחוזי המקרים לפי קטגוריות מוגדרות - סה"כ 20 מדדים מתוך רשימת מדדי מהירויות התכן שהוצגה בטבלה 4.5, כאשר ערכי המינימום והמקסימום של מהירויות התכן הורדו מהניתוח.

קטגוריות של מדד המהירות בפועל - האחוזון ה-85 של מהירויות הנסיעה, ששימשו ליצירת עץ הסיווג היו כלהלן:

מס' קטגוריה	טווח המהירות, קמ"ש
1	עד 70
2	70-80
3	80-90
4	90-100
5	100-110
6	מעל 110

עץ הסיווג האופטימלי שהתקבל בניתוח זה מוצג באיור 4.5. העץ כולל 21 צמתים טרמינליים. השונות המוסברת ע"י המודל הנה 68%. בקריאת עץ הסיווג יש לשים לב כי, בכל צומת, התנאי המוצג בצומת מתקיים ("כן") מצד שמאל ולא מתקיים ("לא") מצד ימין.

עץ הסיווג באיור 4.5 יוצר את קבוצות הקטעים עם רמות מהירות שונות על סמך מדדי מהירויות התכן. מבדיקת עץ הסיווג עולות ממצאים כלהלן:

- מדדי מהירויות התכן שהשפיעו על חלוקת הקטעים לפי רמות המהירויות בפועל הם:

- * סטית תקן של מהירות התכן בקטע שנקבעה על סמך רוחב נתיב;
- * ממוצע מהירות התכן שנקבעה על סמך רדיוס אופקי;
- * אחוז המקרים בקטע עם הפרש ניכר בין מהירויות תכן (מעל 20 קמ"ש) במקטעים העוקבים, כאשר מהירויות התכן נקבעו לפי רוחב שול;
- * סטית תקן של מהירות התכן בקטע שנקבעה על סמך רדיוס אופקי;
- * אחוז המקרים בקטע עם הפרש בינוני בין מהירויות תכן (בין 10-20 קמ"ש) במקטעים העוקבים, כאשר מהירויות התכן נקבעו לפי שיפוע לאורך או רוחב נתיב;
- * סטית תקן של מהירות התכן בקטע שנקבעה על סמך רוחב שול;
- * אחוז המקרים בקטע עם הפרש קטן בין מהירויות תכן (עד 10 קמ"ש) במקטעים העוקבים, כאשר מהירויות התכן נקבעו לפי רוחב שול;
- * אחוז המקרים בקטע עם הפרש גבוה בין מהירויות תכן (מעל 20 קמ"ש) במקטעים העוקבים, כאשר מהירויות התכן נקבעו לפי רוחב נתיב.

לפיכך, חלק ניכר ממדדי מהירויות התכן (9 מתוך 20) השפיעו על חלוקת הקטעים לקבוצות ההומוגניות, מבחינת רמת מהירויות הנסיעה בפועל בקטעים אלה.

- לגבי מדדי מהירויות התכן שמזוהים עם קבוצות קטעים מסוימות ניתן לציין כלהלן:

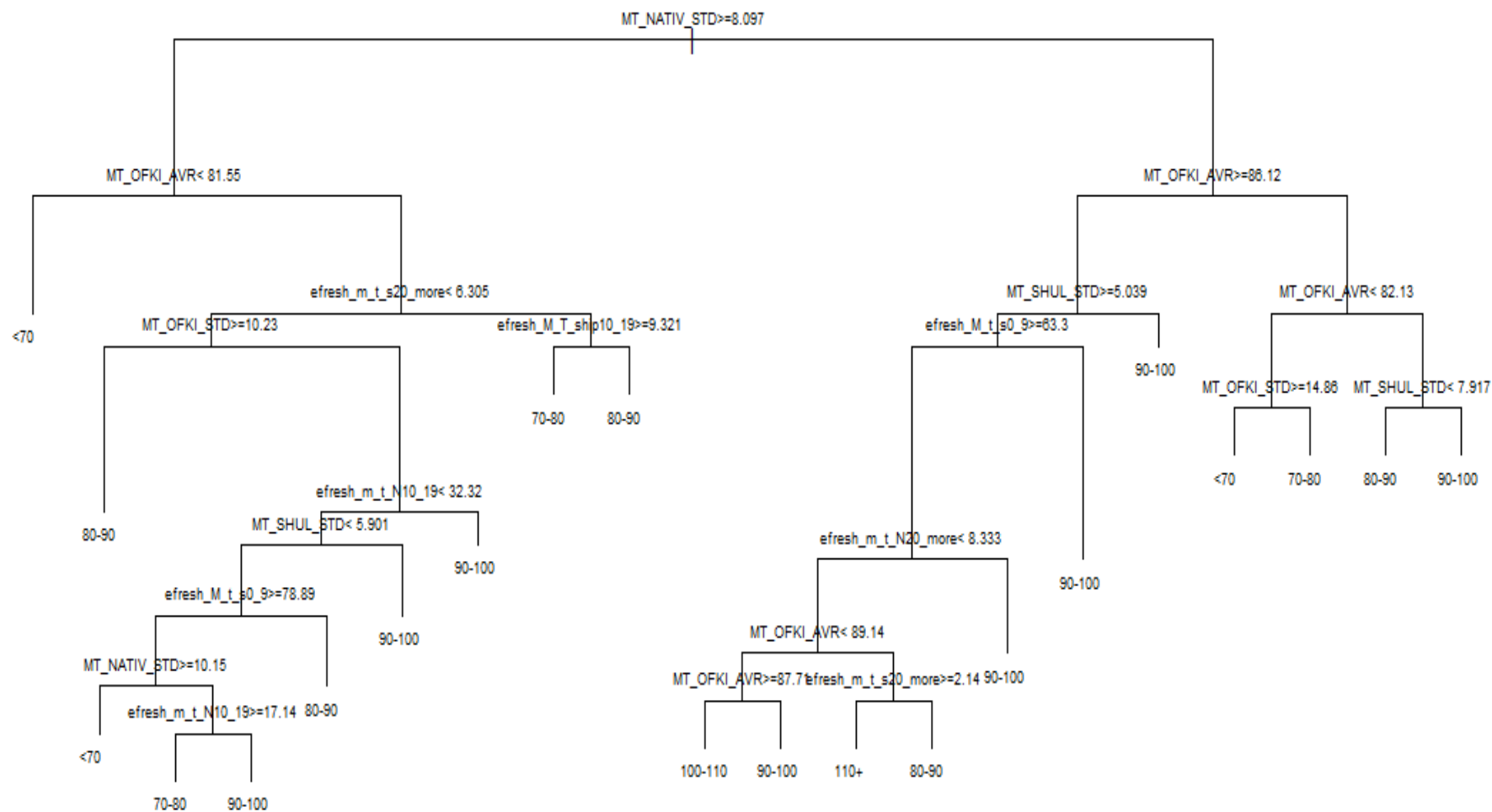
(א) רמות מהירות נמוכות במיוחד (האחוזון ה-85 של מהירויות הנסיעה בפועל עד 70 קמ"ש) נצפו בקטעים עם ערכים גבוהים יותר של פיזור אומדני מהירות התכן, לפי רוחב הנתיב בקטע (סטית תקן של מהירויות התכן, לפי רוחב נתיב - מעל 8.1 קמ"ש) ועם ממוצע מהירות תכן נמוך יותר, לפי הרדיוס האופקי (עד 81.5 קמ"ש); בקטעים עם פיזור גדול של אומדני מהירות התכן, לפי רוחב נתיב (סטית תקן של מהירויות התכן, לפי רוחב נתיב - מעל 10.1 קמ"ש) ופיזור נמוך של אומדני מהירות התכן, לפי רוחב שול; וכמו כן, בקטעים עם ממוצע נמוך של מהירות התכן, לפי הרדיוס האופקי (בין 82.1-86.1 קמ"ש) ופיזור ניכר של אומדני מהירות התכן, לפי הרדיוס האופקי (סטית תקן של מהירויות התכן, לפי הרדיוס האופקי - מעל 14.9 קמ"ש).

(ב) כמו כן, רמות מהירות נמוכות יחסית (האחוזון ה-85 של מהירויות הנסיעה בפועל בין 70-80 קמ"ש) נצפו בקטעים עם פיזור גדול יחסית של אומדני מהירות התכן בקטע, לפי רוחב נתיב (סטית תקן של מהירויות התכן, לפי רוחב נתיב - בין 8.1-10.1 קמ"ש) ופיזור נמוך יחסית של אומדני מהירות התכן, לפי רוחב שול; בקטעים עם פיזור גדול יחסית של אומדני מהירות התכן בקטע, לפי רוחב נתיב (סטית תקן של מהירויות התכן, לפי רוחב נתיב - מעל 8.1 קמ"ש), ממוצע מהירות התכן, לפי הרדיוס האופקי, מעל 81.6 קמ"ש והשתנות ניכרת ברוחב שול (מעל 6.3% מקרים עם הפרשים ניכרים בין מהירויות התכן ומעל 9.3% של הפרשים בינוניים בין מהירויות התכן, במקטעים העוקבים, כאשר מהירות התכן נקבעה לפי רוחב שול); וכמו כן, בקטעים עם ממוצע מהירות תכן נמוך לפי הרדיוס האופקי (בין 82.1-86.1 קמ"ש) ופיזור מתון של אומדני מהירות התכן בקטע, לפי הרדיוס האופקי (סטית תקן של מהירויות התכן, לפי הרדיוס האופקי - עד 14.9 קמ"ש).

(ג) מאידך, רמות מהירות גבוהות (האחוזון ה-85 של מהירויות הנסיעה 100-110 קמ"ש) נצפו בקטעים עם אומדן גבוה יחסית של ממוצע מהירות התכן בקטע, לפי הרדיוס האופקי (בטווח בין 87.7-89.1 קמ"ש), אחוז גבוה של מקרים עם הפרשים קטנים בין מהירויות התכן במקטעים העוקבים, לפי רוחב שול (מעל 63.3%), ואחוז קטן של מקרים עם הפרשים גדולים בין מהירויות התכן במקטעים העוקבים, לפי רוחב נתיב (עד 8.3%).

(ד) כמו כן, רמות מהירות גבוהות במיוחד (האחוזון ה-85 של מהירויות הנסיעה מעל 110 קמ"ש) נצפו בקטעים עם אומדן גבוה של ממוצע מהירות התכן בקטע, לפי הרדיוס האופקי (מעל 86.1 קמ"ש) וללא מגבלה עליונה, אחוז גבוה של מקרים עם הפרשים קטנים בין מהירויות התכן במקטעים העוקבים, לפי רוחב שול (מעל 63.3%), אחוז קטן של מקרים עם הפרשים גדולים בין מהירויות התכן במקטעים העוקבים, לפי רוחב נתיב (עד 8.3%) ותנאי נוסף (אם כי, לא הגיוני) של נוכחות אחוז קטן של מקרים עם הפרשים גדולים בין מהירויות התכן במקטעים העוקבים, לפי רוחב שול (מעל 2.1%).

לסיכום, רמות נמוכות של מהירויות הנסיעה בפועל (האחוזון ה-85 עד 70 קמ"ש) נצפו בקטעים עם ממוצע נמוך של מהירות התכן ופיזור גדול של אומדני מהירות התכן לאורך קטע, לפי המאפיינים של רוחב נתיב ורדיוס אופקי; דהיינו, בקטעים עם עקמומיות ניכרת והשתנות גדולה בחתך הרוחבי לאורך קטע. הקלה מסוימת בתנאים אלה, כגון: ממוצע נמוך של מהירות התכן לפי הרדיוס האופקי בשילוב



איור 4.5. עץ הסיווג האופטימלי שהתקבל בשיטת CART: קבוצות קטעים ע"פ מהירות האחזון ה-85 שזוהו על סמך מדדי מהירויות התכן.

צמצום מסוים בהשתנות מהירויות התכן לאורך קטע, או קיום השתנות במהירויות התכן לאורך קטע לפי מאפיין רוחב הנתיב אך ללא מגבלה של ממוצע מהירות התכן לפי הרדיוס האופקי (אם כי, לעיתים, בליווי השתנות ניכרת באומדני מהירויות התכן לפי רוחב שול), מזהה על עליה קלה ברמות מהירויות הנסיעה בפועל - לאחזון ה-85 של 70-80 קמ"ש.

מאידך, מהירויות נסיעה גבוהות (האחזון ה-85 של 100 קמ"ש או יותר) נצפו בקטעים עם ממוצע גבוה של מהירויות התכן לפי הרדיוס האופקי, ואחזים נמוכים של מקרים עם הפרשים ניכרים במהירויות התכן או אחזים גבוהים של מקרים עם הפרשים קטנים במהירויות התכן, במקטעים העוקבים, לפי רוחב נתיב או רוחב שול. כלומר, קטעים ישרים יותר, עם מיעוט עקומים אופקיים, אשר מתאפיינים גם במראה קבוע יותר של החתך לרוחב, מזמינים מהירויות נסיעה גבוהות, אשר עולות ב-20-30 קמ"ש מעל המהירות המותרת.

4.4.3. זיהוי קבוצות קטעי המחקר עם התנהגות דומה של מדדי מהירויות התכן

בשלב זה, נערך סיווג רב-משתני של קטעי המחקר למען זיהוי קבוצות קטעים עם התנהגות דומה של מדדי מהירות התכן. סיווג זה נערך תוך כדי שימוש ברשימה המלאה של מדדי מהירויות התכן שנקבעו על סמך מאפייני תשתית שונים (ראה טבלה 4.5), בעזרת שיטת ניתוח אשכולות (cluster analysis - CA). מטרת ה-CA הינה לסווג את התצפיות לקבוצות באופן כזה שבתוך הקבוצות התצפיות יהיו דומות, כאשר קיים שוני בין הקבוצות; כל זאת, תוך כדי שימוש בסט המאפיינים המוגדר.

לביצוע ניתוחי האשכולות פותחו שיטות שונות (כגון: Hastie, 2001; Everitt et al, 2001; Anderberg, 1973; et al, 2009) אשר מיושמות בתחומי ידע שונים וביניהם: ביולוגיה, גאוגרפיה, אקולוגיה, רפואה, עסקים ועוד. לביצוע ה-CA קיים צורך להחליט לגבי שלושה מרכיבים של השיטה⁹: (1) מדד המרחק בין התצפיות; (2) שיטת הסיווג; (3) שיטה לקביעת מספר קבוצות דרוש. לביצוע ה-CA זיהוי קבוצות הומוגניות של קטעי הדרכים במחקר הנוכחי, נבחרו כלים אלה: חישוב המרחקים האינלידיים (Euclidean distance) בין היחידות המשוות (קטעי המחקר), על סמך מדדי מהירויות התכן; שיטת Ward ליצירת עץ הסיווג (dendrogram) של היחידות המשוות (כגון: Johnson & Wichern, 2002), כאשר לבחירת מספר קבוצות דרוש שימשה שיטת *k-means*.

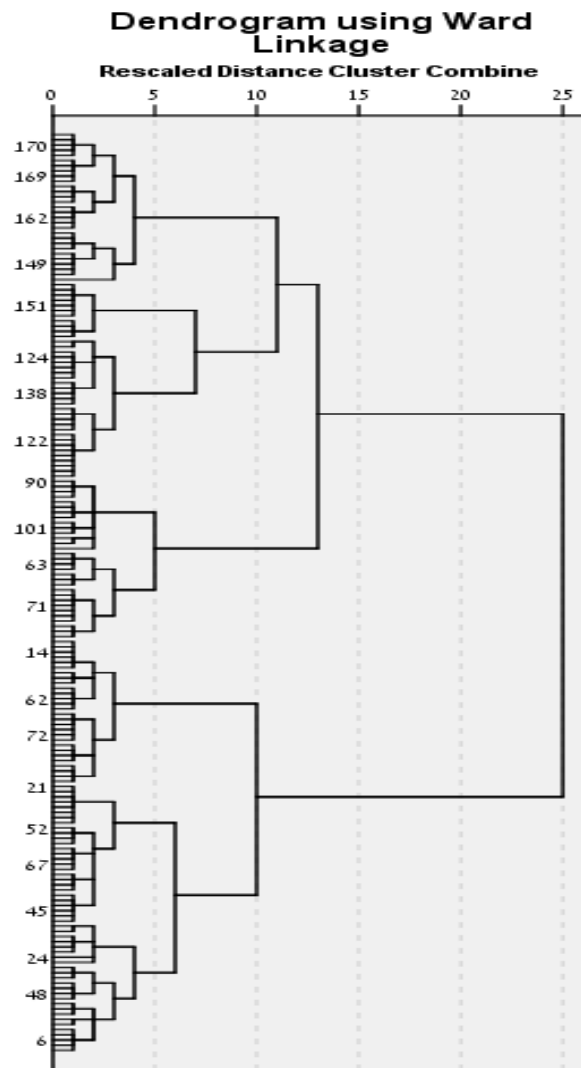
בשיטת ה-*k-means*, מחלקים את התצפיות למספר שונה של קבוצות, כאשר עבור כל חלוקה ל-*k* קבוצות מבוצע חישוב מרחקים בין "מרכזי הקבוצות". כאשר מספר קבוצות גדול, מתקבלים מרחקים קטנים. ככל שמספר הקבוצות יורד, אומדן המרחקים גדל. בעזרת *scree diagram* שמציגה את המרחקים המוערכים מול מספר קבוצות עולה מחפשים "נקודת שבירה" בקשר אשר מזהה עם שינוי ניכר באומדן המרחק בעקבות שינוי במספר הקבוצות (כלל זה מכונה "elbow rule"). מספר הקבוצות שמזהה עם שינוי ניכר במרחק מומלץ לשימוש בתור מספר קבוצות הדרוש בסיווג הנבחן.

עץ הסיווג שנוצר בניתוח הנוכחי של קטעי המחקר מוצג באיור 4.6. איור 4.7 מביא את ה-*scree diagram* שסייעה בבחירת מספר קבוצות דרוש. ע"פ נקודת השבירה בגרף המרחקים הוחלט לבחור

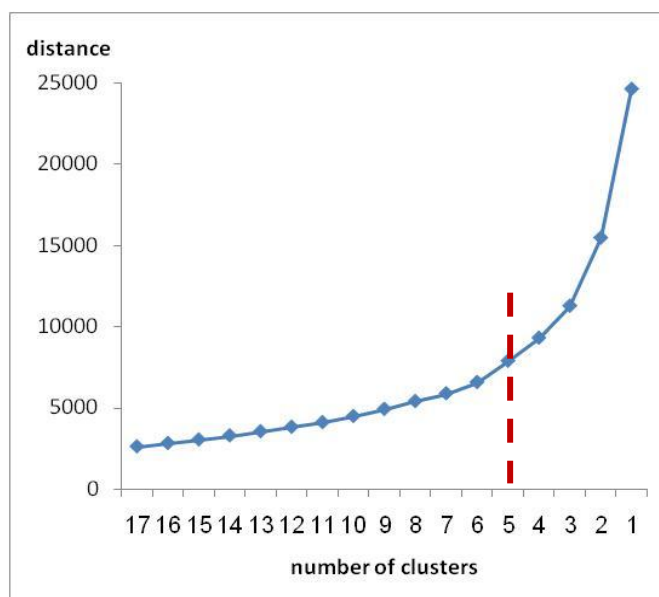
⁹ ראה: SPSS Tutorial on Cluster Analysis

ב-5 קלסטרים לחלוקת קטעי המחקר ע"פ מדדי מהירויות התכן שלהם. כתוצאה מתהליך זה, כל קטע משויך לקבוצה מסוימת (קלסטר) ע"פ מדדי מהירויות התכן שלו. מספר הקטעים בכל קבוצה הוא: (1) 27, (2) 25, (3) 50, (4) 31, (5) 45.

להבנת משמעויות הקלסטרים יש להסתכל במאפיינים של מהירויות התכן, בכל קבוצה. פירוט מלא של מאפייני הקטעים בכל קבוצה, במונחים של האומדנים הסטטיסטיים של כל מאפיין (ממוצע, סטית תקן, חציון, מינימום, מקסימום) מוצג בנספח ב'. איור 4.8 מביא הצגה ויזואלית של המאפיינים העיקריים של הקבוצות - ממוצעי מהירויות התכן ואחוזי המקרים עם הפרשים קטנים במהירויות התכן בין המקטעים העוקבים, לפי כל אחד מארבעת מאפייני התשתית ששימשו לשחזור של מהירויות התכן. (הצגה כזאת מכונה "פרופילים" של הקבוצות).



איור 4.6. עץ הסיווג שנוצר בעקבות סיווג קטעי המחקר לפי מדדי מהירויות התכן.



איור 4.7. *scree diagram* לבחירת מספר קבוצות דרוש של קטעי המחקר.

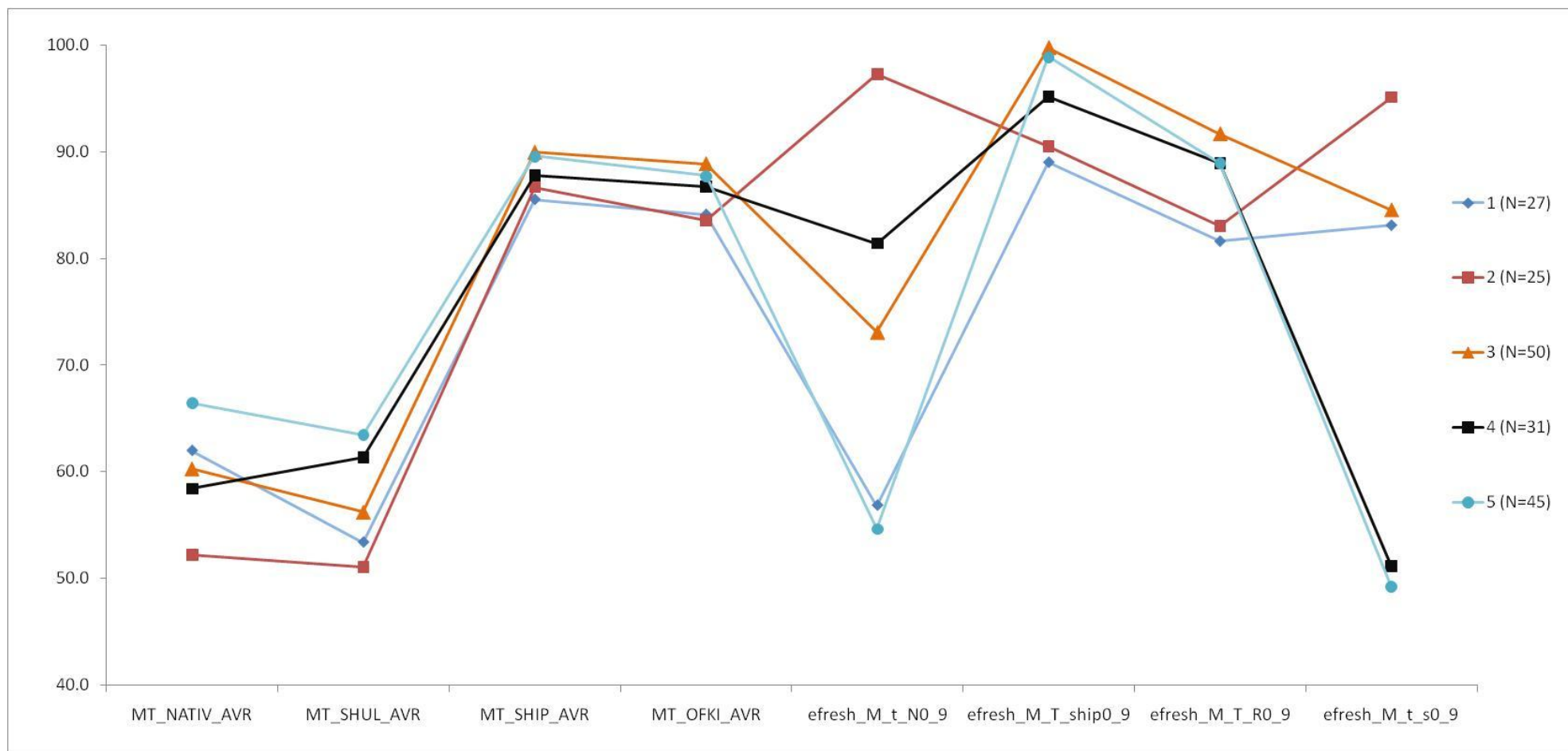
מאיור 4.8 ניתן לראות כי:

- **קבוצה 1** של הקטעים מתאפיינת ברמה בינונית של ממוצעי מהירויות התכן לפי רוחב נתיב ורוחב שול וברמה נמוכה של מהירויות התכן לפי רדיוס אופקי ושיפוע לאורך. כמו כן, היא מתאפיינת בערכים הנמוכים ביותר של אחוזי המקרים עם הפרשים קטנים במהירויות התכן בין המקטעים העוקבים לפי הרדיוס והשיפוע, באחוז נמוך של מקרים כאלה לפי רוחב נתיב ובאחוז בינוני של המקרים לפי רוחב שול. מכאן, זוהי קבוצה עם רמת תכן נמוכה יחסית והשתנות ניכרת של רוב מאפייני התשתית לאורך קטע (לעומת ליתר קטעי המחקר).

- **קבוצה 2** מתאפיינת בערכים הנמוכים ביותר של ממוצעי מהירויות התכן לפי כל מאפייני התשתית, בערכים הגבוהים ביותר של אחוזי המקרים עם הפרשים קטנים במהירויות התכן בין המקטעים העוקבים, לפי רוחב נתיב ורוחב שול, ובאחוזים נמוכים יחסית של מקרים כאלה לפי רדיוס אופקי ושיפוע אורכי. כלומר, זוהי קבוצה עם רמות תכן נמוכות וחתך רוחב עקבי.

- **קבוצה 3** מזוהה עם ערכים בינוניים של ממוצעי מהירויות התכן לפי רוחב נתיב ורוחב שול ועם ערכים גבוהים של מהירויות התכן לפי רדיוס אופקי ושיפוע לאורך. כמו כן, קבוצה זאת מתאפיינת בערכים הגבוהים ביותר של אחוזי המקרים עם הפרשים קטנים במהירויות התכן בין המקטעים העוקבים, לפי הרדיוס והשיפוע, ובאחוזים בינוניים של אותם המקרים לפי רוחב נתיב ורוחב שול. כלומר, אלה קטעים עם עקמומיות נמוכה ושינויים מסוימים של החתך לרוחב לאורך קטע.

- **קבוצה 4** מתאפיינת בערכים בינוניים של ממוצעי מהירויות התכן לפי כל מאפייני התשתית, בערכים בינוניים של אחוזי המקרים עם הפרשים קטנים במהירויות התכן בין המקטעים העוקבים לפי רוחב נתיב, רדיוס אופקי ושיפוע אורכי, וגם באחוזים הנמוכים של מקרים כאלה לפי רוחב שול. כלומר, קבוצה זאת עם רמת תכן בינונית אך השתנות ניכרת ברוחב שול.



איור 4.8. פרופילים של קבוצות קטעי המחקר שזוהו על סמך מדדי מהירויות התכן (ממוצעים של כל מדד לפי קבוצה).

- **קבוצה 5** מתאפיינת בערכים הגבוהים ביותר של ממוצעי מהירויות התכן לפי רוחב נתיב ורוחב שול, ובערכים הגבוהים של ממוצעי מהירויות התכן לפי הרדיוס והשיפוע. כמו כן, קבוצה זאת מתאפיינת בערכים הנמוכים ביותר של אחוזי המקרים עם הפרשים קטנים במהירויות התכן בין המקטעים העוקבים, לפי רוחב נתיב ורוחב שול, ובאחוזים גבוהים של מקרים כאלה לפי הרדיוס והשיפוע. כלומר, קבוצה זאת עם רמות תכן גבוהות וחתך רוחב משתנה.

כדי להקל על הבנת התמונה הכוללת, טבלה 4.7 מציגה סיכום לתכונות של קבוצות הקטעים לפי הרמות השונות של מהירויות התכן ורמת השתנות של מאפייני הקטעים. כמו כן, הוצע מפתח לתרגום הקטגוריות לניקוד בטיחותי מסוים, דבר המאפשר ליצור דירוג של קבוצות הקטעים לפי רמת בטיחותם הנתפסת. ניתן לראות שעל-פי מאפייני מהירויות התכן שיוחסו לקטעי המחקר, קבוצות קטעים 1 ו-2 מתאפיינות ברמות תכן נמוכות יותר, בעוד שקבוצות קטעים 3-5 מזוהות עם רמות תכן טובות יותר.

טבלה 4.7. סיכום תכונות של קבוצות הקטעים, לפי מאפייני מהירויות התכן, וניקוד בטיחותי מסכם

קבוצת קטעים	רמת מהירות תכן לפי רוחב נתיב ורוחב שול*	רמת מהירות תכן לפי רדיוס אופקי ושיפוע לאורך*	השתנות מהירויות התכן בקטע לפי רוחב נתיב ורוחב שול**	השתנות מהירויות התכן בקטע לפי רדיוס אופקי ושיפוע לאורך**	ניקוד בטיחותי מסכם (total safety score)
קבוצה 1	בינונית	נמוכה	גבוהה-בינונית	גבוהה	9
קבוצה 2	נמוכה	נמוכה	נמוכה	גבוהה	8
קבוצה 3	בינונית	גבוהה	בינונית	נמוכה	16
קבוצה 4	בינונית	בינונית	בינונית-גבוהה	בינונית	11
קבוצה 5	גבוהה	גבוהה	גבוהה	נמוכה	16

* ניקוד בטיחותי: "גבוהה" =5, "בינונית" =3, "נמוכה" =1

** ניקוד בטיחותי: "גבוהה" =1, "בינונית" =3, "נמוכה" =5

4.5. בחינת השפעה של מהירויות התכן על מהירויות הנסיעה בפועל

בשלב מוקדם יותר של המחקר (ראה פרק 4.3) פותחו מודלי רגרסיה לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית לבין מדד המהירות - ההפרש בין מהירות האחוזון ה-85 ובין המהירות המותרת. לבחינת השפעה של מהירויות התכן על מהירויות הנסיעה בפועל, בוצעה התאמה חוזרת של המודל הרב-פרמטרי, כאשר לרשימת מאפייני התשתית נוסף גם מדד של מהירויות התכן - מספר קלסטר שנקבע לכל קטע בפרק 4.4.

בחינה זאת נערכה על מודל 1 שהשתמש ברשימה המלאה של מאפייני התשתית (הערכים המוחלטים). פיתוח המודל החדש התחיל עם רשימה של 23 מסבירים פוטנציאליים, לרבות נפח תנועה יומי, מאפייני התשתית המוחלטים ומספר קלסטר לפי מהירויות התכן. התאמת מודל זה הסתיימה עם 13 משתנים מסבירים, שונות מוסברת 69.2%.

טבלה 4.8 מציגה את מקדמי המודל שהותאם לנתונים. ניתן לראות כי המודל החדש דומה למודל הקודם (מודל 1), כאשר על מדד המהירות משפיעים אותם המאפיינים שזוהו קודם: נפח תנועה, רוחב נתיב, רוחב שול, רדיוס אופקי, רדיוס אנכי קמור, רדיוס אנכי קעור, שיפוע לאורך, מצב צידי הדרך ללא מעקות הבטיחות, בתוספת מספר קלסטר לפי מהירויות התכן. מקדמי המודל החדש עבור

מאפייני התשתית שונים במקצת לעומת המודל הקודם, אך ללא שוני מהותי מבחינת הכיוון ועוצמת ההשפעה על מהירויות הנסיעה בפועל. כמו כן, במודל החדש בהשוואה עם המודל הקודם, המאפיינים של רדיוס אנכי קמור וקעור איבדו את מובהקותם מבחינת השפעה על מדד המהירות.

בדומה למודל הקודם, מדד המהירות עולה עם עליה ברוחב שול ועם עליה במדד המשקף את מצב צידי הדרך, ויורד עם עליה בנפח התנועה. כמו כן, ההשפעה של רוחב נתיב, רדיוס אופקי, שיפוע לאורך, למעשה, מנוטרלת במודל עקב קיום שני מקדמים הפוכים לאותו מאפיין תשתית, כאשר עבור המאפיינים של רדיוס אנכי קמור ורדיוס אנכי קעור מקדמי המודל קטנים מאוד, ללא השפעה מעשית על מדד מהירויות הנסיעה.

לגבי השפעת מהירויות התכן (מספר קלסטר) נמצא (ראה טבלה 4.8) כי קבוצות קטעים 3-5 מזהות עם עליה במהירויות הנסיעה בפועל, לעומת קבוצה 1, כאשר קבוצה 2 מזהה עם ירידה במהירות. ממצאים אלה **תואמים את המשמעויות** של קבוצות הקטעים שהתקבלו בפרק 4.4, כאשר קבוצות 3-5 מתאפיינות ברמות תכן גבוהות יותר ו/או בהשתנות נמוכה יותר של מאפייני התשתית לאורך קטע, בעוד שקבוצות 1-2 מתאפיינות ברמות תכן נמוכות יותר ו/או בהשתנות ניכרת של רוב מאפייני התשתית לאורך קטע.

ניתן להבחין גם כי תוספת המדד המשקף את מהירויות התכן שיפרה את רמת התאמת המודל: השונות המוסברת עלתה מ-66% ל-69%.

לסיכום, נראה כי בחינת מהירויות התכן משפרת את הבנת המשמעויות של מאפייני הקטעים, כאשר תוספת מדד מהירויות התכן עשויה לתרום לניבוי של מהירויות הנסיעה בפועל.

טבלה 4.8. מודל מסביר חדש לקשר בין מאפייני התשתית ומדד המהירות, בתוספת קלסטר של מהירויות התכן

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	8.18	14.69	0.56	0.57833	
nefah	-0.65	0.09	-7.23	1.86E-11	***
rohav_nativ_avr_min	12.58	2.51	5.01	0.00000144	***
rohav_nativ_avr_mean	-19.42	4.17	-4.66	0.00000664	***
rohav_shul_avr_mean	5.57	1.08	5.17	6.88E-07	***
minimum_ofki_mean	0.03	0.01	2.56	0.01128	*
minimum_ofki_max	-0.03	0.01	-2.50	0.01348	*
minimum_anahi_min	-0.01	0.00	-1.56	0.12098	
minimum_anahi_max	0.00	0.00	2.44	1.56E-02	*
minimum_ak_anahi_max	0.00	0.00	1.63	0.10531	
shipor_avr_min	2.18	1.16	1.89	0.06078	.
shipor_avr_mean	-1.46	0.72	-2.02	0.04507	*
noBAMEAN	2.95	1.06	2.77	0.00624	**
as.factor(QCL_1)	מובהקות המדד בכללותו			0.0017382	**
as.factor(QCL_1)2	-3.01	2.50	-1.20	0.23082	
as.factor(QCL_1)3	5.70	2.16	2.64	0.00908	**
as.factor(QCL_1)4	4.28	2.18	1.97	0.05074	.
as.factor(QCL_1)5	3.08	2.33	1.33	1.87E-01	

הערה לטבלה 4.8: רמות מובהקות של משתני המודלים: "****" $p < 0.001$, "****" $p < 0.01$, "****" $p < 0.05$, "****" $p < 0.1$.

5. ממצאים מבדיקה הנדסית של קטעי המחקר עם מהירויות גבוהות

ונמוכות

5.1. כללי

בנוסף לניתוחים הסטטיסטיים, נערך סיור הנדסי בקטעי המחקר אשר מתאפיינים בחריגות נמוכות וגבוהות במיוחד של מהירויות הנסיעה בפועל. מטרת הסיור הנדסי הייתה לאמת את הממצאים הסטטיסטיים לגבי הקשר בין מאפייני התשתית למהירויות הנסיעה. הסיור הנדסי נערך בעזרת אתר האינטרנט של Google maps, בעשרים קטעי דרך נבחרים.

לבחינה הנדסית, מתוך בסיס הנתונים של המחקר נבחרו עשרת קטעי הדרך שבהם ההפרש בין האחוזון 85 של מהירויות הנסיעה לבין במהירות המותרת בימי חול, הוא הנמוך ביותר (טבלה 5.1), וכמו כן, עשרת קטעי הדרך שבהם הפרש זה הוא הגבוה ביותר (טבלה 5.2). הקבוצה הראשונה מכונה קטעים "בעלי המהירות הנמוכה", הקבוצה השנייה - קטעים "בעלי המהירות הגבוהה". הצפייה הינה שבכל אחת מקבוצות הקטעים ימצאו מאפייני תשתית דומים המשפיעים על המהירות.

בעשרת קטעי הדרך "בעלי המהירות הנמוכה" חריגות המהירות נעו בין 26- קמ"ש לבין 14- קמ"ש, עם ממוצע של 17.7- קמ"ש. בעשרת קטעי הדרך "בעלי המהירות הגבוהה" חריגות המהירות היו בטווח בין 28 קמ"ש ל-43 קמ"ש, עם ממוצע של 34.4 קמ"ש. להשוואה, ממוצע החריגות של כל 178 קטעי המחקר הוא 9.9 קמ"ש.

טבלה 5.1. עשרת קטעי דרך "בעלי המהירות הנמוכה"

מס' מספר כביש	ק"מ תחילת קטע	ק"מ סוף קטע	אורך הקטע (ק"מ)	תאור קטע הדרך	מהירות האחוזון 85, קמ"ש	חריגה מהמהירות המותרת*, קמ"ש
1	754	52.7	3.4	מפותל, בגליל, בתוך יישובים נצרת וריינה	54	-26
2	98	87.2	4.9	מפותל, בגולן, בתוך מסעדה, מגדל שמש, חרמון	58	-22
3	805	9.7	4.9	מפותל, בגליל, בתוך יישובים סחנין, ערבה	62	-18
4	90	404.2	2.2	בין צמח לכנרת, ליד יישובים, חתך עירוני	62	-18
5	721	2	9.2	מפותל, הררי, בכרמל, בין דמון לאורן	63	-17
6	672	23	11.8	מפותל, הררי, בכרמל, בין מחלף אליקים לדלית אל כרמל, חלקו בישובים, חתך עירוני	63	-17
7	754	56.4	4.4	מפותל, בגליל, בתוך יישובים משהד, כפר כנא	63	-17
8	767	16	3.2	מפותל, בגליל, אלומות כנרת	65	-15
9	781	1	2.2	במפרץ חיפה, מצומת הצריף לצומת ביאליק-רבין בקרית אתא, אזור עירוני	66	-14
10	395	0	17.9	מפותל, בהרי ירושלים, בין אשתעול לצומת כרם	66	-14

* מהירות מותרת 80 קמ"ש

טבלה 5.2. עשרת קטעי דרך "בעלי המהירות הגבוהה"

מס' כביש	ק"מ תחילת קטע	ק"מ סוף קטע	אורך הקטע (ק"מ)	תאור קטע הדרך	מהירות האחזון ה-85, קמ"ש	חריגה מהמהירות המותרת*, קמ"ש
1	12	53.96	14.0	בדרום, בין סיירים לבקעת עובדה	123	43
2	12	39	14.8	בדרום, בין בקעת עובדה לשיזפון	121	41
3	211	113.8	15.1	בדרום, בין צומת הר קרן לשבטה	118	38
4	40	11.9	15.1	בדרום, בין שזפון לשיטים	117	37
5	13	0	11.3	בדרום, בין ציחור למנוחה	114	34
6	40	38.2	54.8	בדרום, בין ציחור למצפה רמון	112	32
7	211	129	18.4	בדרום, בין שיבטה לטללים	112	32
8	258	0	22.3	בדרום, בין צפית לחתרורים	110	30
9	222	150.2	33.8	בדרום, בין משאבים לצאלים	109	29
10	234	12.5	10.5	בדרום, בין אורים לגמה (רעים)	108	28

* מהירות מותרת 80 קמ"ש

5.2. מאפייני קטעי דרך בעלי המהירות הנמוכה

מטבלה 5.1 ניתן לראות כי קטעי הדרך בעלי המהירות הנמוכה נמצאים בצפון ובמרכז הארץ. חלקם דרכים מפותלות באזור הררי, חלקם עוברים בתוך יישובים. טבלה 5.3 מציגה ריכוז של מאפייני הקטעים שנמצאו בין המשתנים המסבירים למהירויות הנסיעה.

טבלה 5.3. מאפייני תשתית נבחרים של קטעים "בעלי המהירות הנמוכה"

מס' כביש	ק"מ התחלה	ק"מ סוף	נפח תנועה, אלף כלי רכב	מדד צפיפות הצמתים	רוחב שול ממוצע, מ'	% מאורך קטע עם רדיוס קטן	% מאורך קטע עם שיפוע גדול	% מאורך קטע עם מעקות	מדד מצב צידי הדרך ללא מעקה	חריגת מהירות, קמ"ש
754	52.7	56.4	19.9	0.27	0.68	47.6	80.0	0.60	1.8	-26
98	87.2	101.1	1.8	0.14	0.54	39.5	61.4	0.43	1.0	-22
90	404.2	406.5	14.9	0.22	0.80	35.3	11.8	0.21	2.0	-18
805	9.7	16.7	8.9	0.15	0.60	21.1	17.1	0.59	2.0	-18
672	23	40.1	5.9	0.07	1.10	43.6	56.4	0.26	2.0	-17
721	2	11.3	2.7	0.00	0.67	58.9	73.3	0.29	1.0	-17
754	56.4	60.9	16.9	0.34	0.43	20.7	44.8	0.28	2.0	-17
767	16	19.3	8.4	0.06	0.97	73.3	93.3	0.62	1.9	-15
395	0	18	5.4	0.00	1.24	62.7	72.9	0.59	1.9	-14
781	1	5	32.5	0.07	2.34	23.1	0.0	0.73	2.9	-14
ממוצע בין 10 הקטעים										
ממוצע בין 178 קטעים (כל קטעי המחקר)										
			9.7	0.09	1.91	17.7	26.6	0.48	2.4	9.9

להלן התייחסות למאפייני הקטעים עם המהירות הנמוכה:

* **נפח תנועה:** הקטעים עם המהירות הנמוכה מתאפיינים בנפח תנועה יומי בין 1.8-32.5 אלף כלי רכב, עם ממוצע של 13.3 אלף כלי רכב ליממה, אשר עולה על הממוצע של כלל קטעי המחקר (9.7 אלף כלי רכב). נפחי התנועה בקטעים אלה שונים ובטווח רחב מאוד ולכן, נפח התנועה אינו יכול להסביר את המהירות הנמוכה.

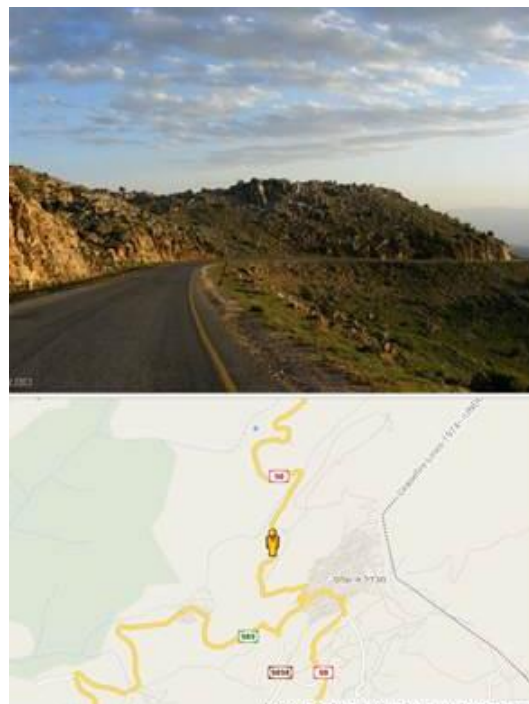
* **מדד צפיפות צמתים:** מדד צפיפות הצמתים בקטעים אלה נע בין 0% עד 34% מאורך קטע, עם ממוצע של 15%, כאשר מדד זה גבוה יותר מאשר הממוצע בכלל הקטעים (9%). נראה כי מדד צפיפות הצמתים מתאים להסבר מהירויות הנסיעה בקטע, כאשר צפיפות צמתים גבוהה יותר

מתקשרת למהירות איטית יותר. איור 5.1 מביא דוגמא לקטע כביש עם צמתים וכניסות רבות לחלקות הסמוכות: קטע כביש 805, בו המהירות נמוכה.



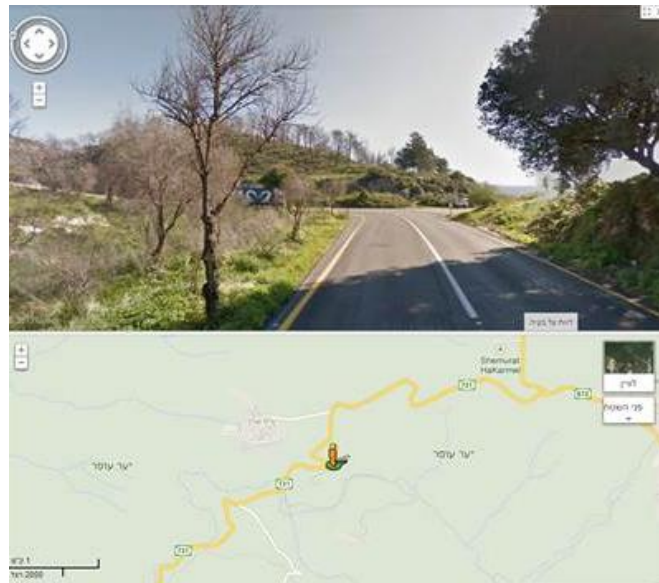
איור 5.1. דוגמא לקטע כביש עם צפיפות צמתים גבוהה ומהירות איטית: כביש 805.

* רוחב שול: רוחב שול ממוצע של קטעי הדרך "בעלי המהירות הנמוכה" נע בין 0.43 מ' ל-2.34 מ', עם ממוצע של 1.04 מ', אשר נמוך משמעותית לעומת הממוצע של כלל הקטעים (1.91 מ'). מכאן, רוחב שול ממוצע מתאים להסבר המהירות, כאשר רוחב שול נמוך יותר מתקשר למהירות איטית יותר. באיור 5.2 מוצגת דוגמא לשוליים צרים בכביש 98, בו המהירות נמוכה.



איור 5.2. דוגמא לקטע כביש עם שול צר ומהירות איטית: כביש 98.

* **עקמומיות אופקית:** רדיוס אופקי הקטן מ-400 מ' בכביש חד-מסלולי מצריך הגבהה לרוחב. לכן, אחוז נוכחות של הרדיוס האופקי הקטן מ-400 מ', לאורך קטע, הוא מדד טוב לאפיון עקמומיות הקטע. בקטעי הדרך "בעלי המהירות הנמוכה" מדד זה נע בין 20.7% ל-73.3%, עם ממוצע של 40.5% אשר גבוה משמעותית לעומת הממוצע של כלל המדגם (17.7%). מכאן, מדד עקמומיות הקטע מסביר בצורה טובה את המהירות, כאשר אחוז גבוה יותר של נוכחות העקומים בקטע מתקשר למהירות איטית יותר. באיור 5.3 מוצגת דוגמא לקטע כביש 721, אשר מתאפיין ב-58.9% של נוכחות העקומים.



איור 5.3. דוגמא לקטע כביש עם עקמומיות גבוהה ומהירות איטית: כביש 721.

* **שיפוע לאורך:** שיפוע לאורך הגדול מ-3% גורם להאטה של רכב כבד. לכן, אחוז נוכחות הסגמנטים עם השיפוע לאורך הגדול מ-3% הוא מדד טוב לרמת השיפועים בקטע. בקטעי הדרך "בעלי המהירות הנמוכה" מדד זה נע בין 0.0% ל-93.3%, עם ממוצע של 48.6%, אשר גבוה משמעותית לעומת הממוצע של כלל המדגם (26.6%). מכאן, מדד נוכחות השיפועים לאורך מתאים להסבר המהירות, כאשר אחוז גבוה יותר של המדד מתקשר למהירות איטית יותר. באיור 5.4 מוצגת דוגמא לקטע כביש משופע בו המהירות נמוכה – קטע כביש 754 כאשר שיפועים מעל 3% קיימים ב-80% מאורכו.

* **נוכחות מעקות בטיחות בצד הדרך:** בקטעי הדרך "בעלי המהירות הנמוכה" אחוז מאורך קטע בו קיימים מעקות הבטיחות נע בין 21% עד 73%, עם ממוצע של 49% אשר אינו שונה מכלל המדגם. לכן, נוכחות המעקות בצד הדרך לא בהכרח מתקשרת עם מהירות נמוכה.

* **מצב מעקות הבטיחות:** מדד מצב מעקות הבטיחות מאפיין בעיקר את מרחק המעקה מהמיסעה. בקרב הקטעים "בעלי המהירות הנמוכה" מדד זה נע בין 1.0 עד 2.9, עם ממוצע של 1.9 אשר נמוך יותר לעומת ממוצע כלל המדגם (שהינו 2.4). מכאן, סביר כי מאפיין זה מתאים להסבר המהירות, כאשר מדד נמוך יותר (מרחק קטן יותר בין המעקות והמיסעה) מתקשר למהירות איטית יותר. באיור 5.5 מוצגת דוגמא למרחק נמוך של המעקות מהמיסעה, בכביש 395, בו המהירות נמוכה.



איור 5.4. דוגמא לקטע כביש עם נוכחות גבוהה של שיפועים לאורך ומהירות איטית: כביש 754.



איור 5.5. דוגמא לקטע כביש עם מעקה קרוב למיסעה ומהירות איטית: כביש 395.

* מצב צידי הדרך ללא מעקה: מצב צידי הדרך ללא מעקה מאפיין את רוחב אזור המפלט לרכב. בקרב כל הקטעים "בעלי המהירות הנמוכה" מדד זה שווה ל-1 (הנמוך ביותר), כאשר הוא גם נמוך יותר לעומת כלל המדגם (עם ממוצע של 1.3). מכאן, סביר כי מאפיין זה מתאים להסבר המהירות, כאשר מדד נמוך יותר (רוחב צר יותר של אזור המפלט) מתקשר למהירות איטית יותר. באיור 5.6 מוצגת דוגמא לרוחב צר של אזור המפלט, בכביש 90, עם מהירות נמוכה.



איור 5.6. דוגמא לקטע כביש עם רוחב צר של אזור המפלט ומהירות איטית: כביש 90.

5.3. מאפייני קטעי דרך בעלי המהירות הגבוהה

מטבלה 5.2 לעיל ניתן לראות כי קטעי הדרך בעלי המהירות הגבוהה נמצאים בדרום הארץ. כל הקטעים ללא עיקולים חדים או עם מעט עיקולים חדים, רובם באזורים מישוריים. טבלה 5.4 מציגה ריכוז של מאפייני הקטעים שנמצאו בין המשתנים המסבירים למהירויות הנסיעה.

טבלה 5.4. מאפייני תשתית נבחרים של קטעים "בעלי המהירות הגבוהה"

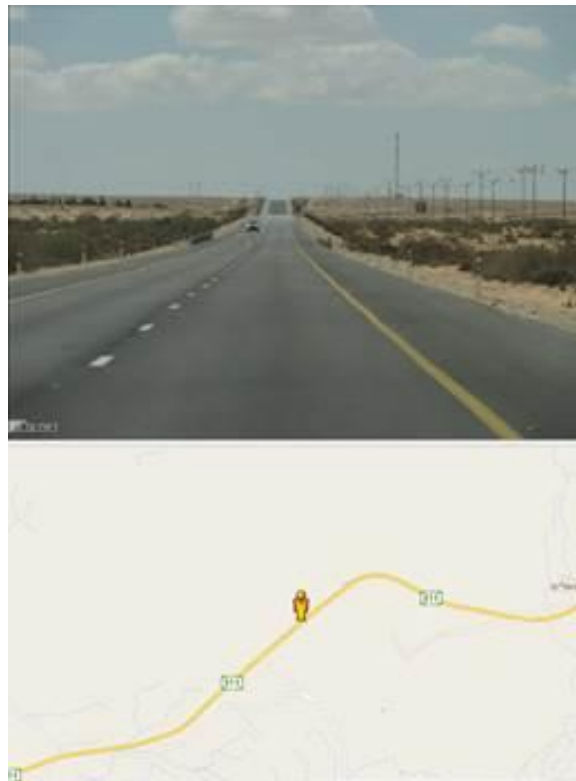
מס' כביש	ק"מ התחלה	ק"מ סוף	נפח תנועה, אלף כלי רכב	מדד צפיפות הצמתים	רוחב שול ממוצע, מ'	% מאורך קטע עם רדיוס קטן	% מאורך קטע עם שיפוע גדול	% מעקנות מעקנות	מדד מצב צידי הדרך ללא מעקה	חרגת מהירות, קמ"ש
234	12.5	23.2	0.9	0.0	1.17	11.3	0.9	3.0	2.5	28
222	150.2	184.1	3	0.0	2.80	10.2	1.5	3.0	1.7	29
258	0	22.4	4.7	0.004	2.90	23.2	36.2	2.8	1.8	30
40	38.2	98.2	1.8	0.024	3.25	21.6	30.6	3.0	1.9	32
211	129	147.5	1.5	0.0	2.09	6.0	0.0	3.0	1.0	32
13	0	11.8	0.3	0.0	3.97	4.4	0.0	3.0	2.6	34
40	11.9	27	1.3	0.0	3.22	2.0	1.3	2.2	2.7	37
211	113.8	129	1.5	0.0	2.17	7.3	7.3	2.9	1.0	38
12	39	54.0	0.8	0.0	1.91	6.3	4.1	2.1	1.1	41
12	54.0	68	0.8	0.0	1.90	3.7	4.3	2.5	1.6	43
		מוצע בין 10 הקטעים		0.0	2.54	9.6	8.6	2.8	1.8	34.4
		מוצע בין 178 קטעים (כל קטעי המחקר)		0.09	1.91	17.7	26.6	2.4	1.3	9.9

להלן התייחסות למאפייני הקטעים עם המהירות הגבוהה:

* **נפח תנועה:** הקטעים עם המהירות הגבוהה מתאפיינים בנפח תנועה יומי בין 0.8-4.7 אלף כלי רכב, עם ממוצע של 1.7 אלף כלי רכב ליממה, אשר נמוך משמעותית לעומת הממוצע של כלל קטעי המחקר (9.7 אלף כלי רכב). מכאן עולה שקטעים "בעלי המהירות הגבוהה" מתאפיינים בנפחי תנועה נמוכים. באיור 5.7 מוצגת דוגמא לתנועה דלילה בכביש 211.

* **מדד צפיפות צמתים:** מדד צפיפות הצמתים בקטעים אלה נע בין 0% עד 2.4% מאורך קטע, עם ממוצע של 0.3%, כאשר ממוצע של כלל הקטעים גבוה משמעותית (9%). מכאן, מדד צפיפות

הצמתים מתאים להסבר מהירויות הנסיעה בקטע, כאשר צפיפות צמתים נמוכה מתקשרת למהירות הגבוהה. איור 5.8 מביא דוגמא לקטע כביש 40 עם מהירות גבוהה וללא צמתי משנה וכניסות לשטח הגובל בכביש.



איור 5.7. דוגמא לקטע כביש עם תנועה דלילה ומהירות גבוהה: כביש 211.



איור 5.8. דוגמא לקטע כביש עם צפיפות צמתים נמוכה ומהירות גבוהה: כביש 40.

* **רוחב שול:** רוחב שול ממוצע של קטעי הדרך "בעלי המהירות הגבוהה" נע בין 1.2 מ' ל-4.0 מ', עם ממוצע של 2.5 מ', אשר גבוה משמעותית לעומת הממוצע של כלל הקטעים (1.91 מ'). מכאן, רוחב שול ממוצע מתאים להסבר המהירות, כאשר רוחב שול גדול יותר מתקשר למהירות גבוהה יותר. באיור 5.9 מוצגת דוגמא לשוליים רחבים בכביש 12, בו המהירות גבוהה.



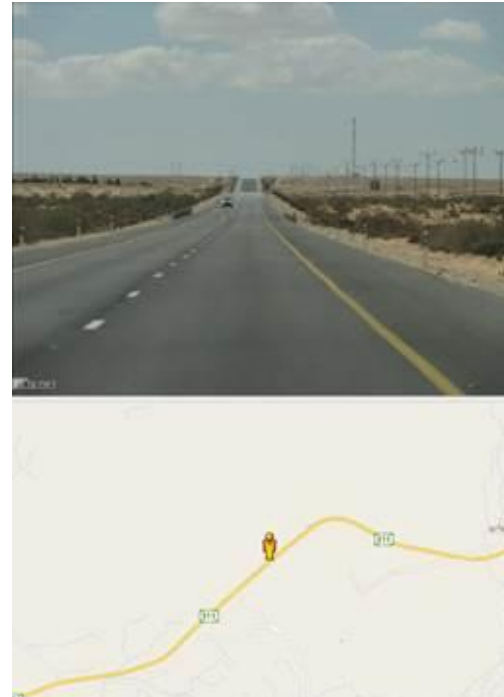
איור 5.9. דוגמא לקטע כביש עם שול רחב ומהירות גבוהה: כביש 12.

* **עקמומיות אופקית:** אחוז נוכחות של רדיוס אופקי הקטן מ-400 מ', לאורך קטע, מאפיין את רמת עקמומיות הקטע. בקטעי הדרך "בעלי המהירות הגבוהה" מדד זה נע בין 2.0% ל-23.2%, עם ממוצע של 9.6% אשר נמוך משמעותית לעומת הממוצע של כלל המדגם (17.7%). מכאן, מדד עקמומיות הקטע מסביר בצורה טובה את המהירות, כאשר אחוז נמוך של נוכחות העקומים בקטע מתקשר למהירות גבוהה יותר. באיור 5.10 מוצגת דוגמא לקטע ישר ארוך בכביש 211 (עם 6% בלבד מאורך הקטע עם הרדיוסים האופקיים), בו המהירות גבוהה.

* **שיפוע לאורך:** אחוז מאורך קטע בו קיימים שיפועים לאורך הגדולים מ-3% מאפיין את רמת השיפועים בקטע. בקטעי הדרך "בעלי המהירות הגבוהה" מדד זה נע בין 0% ל-36.2%, עם ממוצע של 8.6%, אשר נמוך משמעותית לעומת הממוצע של כלל המדגם (26.6%). מכאן, מדד נוכחות השיפועים לאורך מתאים להסבר המהירות, כאשר אחוז נמוך יותר של המדד מתקשר למהירות גבוהה יותר. באיור 5.11 מוצגת דוגמא לקטע ללא שיפוע בו המהירות גבוהה - קטע כביש 222, כאשר שיפועים לאורך (מעל 3%) קיימים ב-1.5% מאורכו.

* **נוכחות מעקות בטיחות בצדי הדרך:** בקטעי הדרך "בעלי המהירות הגבוהה" אחוז מאורך קטע בו קיימים מעקות הבטיחות נע בין 3% עד 51%, עם ממוצע של 24% אשר נמוך משמעותית לעומת הממוצע של כלל המדגם (48%). מכאן, היעדר מעקות הבטיחות בצדי הדרך מתקשר עם מהירות גבוהה יותר. איור 5.12 מביא דוגמא לדרך 40 בדרום, ללא מעקות הבטיחות ועם מהירות גבוהה (רק ב-11% מאורך הקטע ישנם מעקות הבטיחות בצדי הדרך).

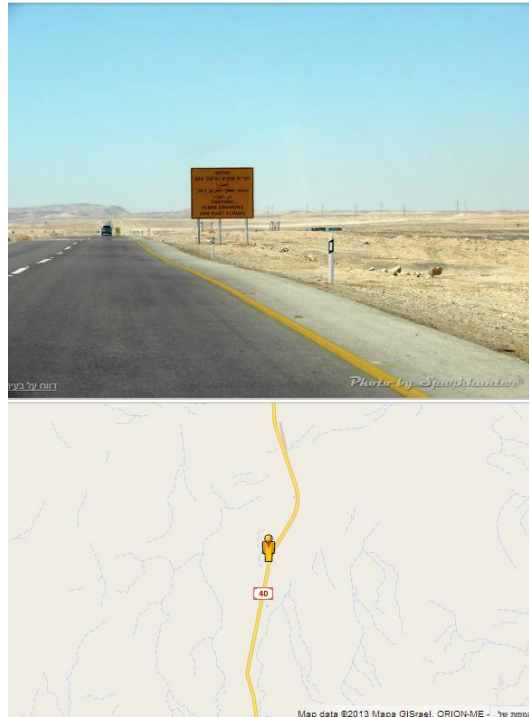
* מצב מעקות הבטיחות: מדד מצב מעקות הבטיחות מאפיין את מרחק המעקה מהמיסעה. בקרב הקטעים "בעלי המהירות הגבוהה" מדד זה נע בין 2.1 עד 3.0, עם ממוצע של 2.8 אשר גבוה יותר לעומת הממוצע של כלל המדגם (שהינו 2.4). מכאן, מאפיין זה מתאים להסבר המהירות, כאשר מרחק גדול יותר של המעקות מהמיסעה מתקשר למהירות גבוהה יותר. באיור 5.13 מוצגת דוגמא למרחק גדול של המעקות מהמיסעה, בכביש 12, בו המהירות גבוהה.



איור 5.10. דוגמא לקטע כביש עם עקמומיות נמוכה ומהירות גבוהה: כביש 211.



איור 5.11. דוגמא לקטע כביש עם נוכחות נמוכה של שיפועים לאורך ומהירות גבוהה: כביש 222.

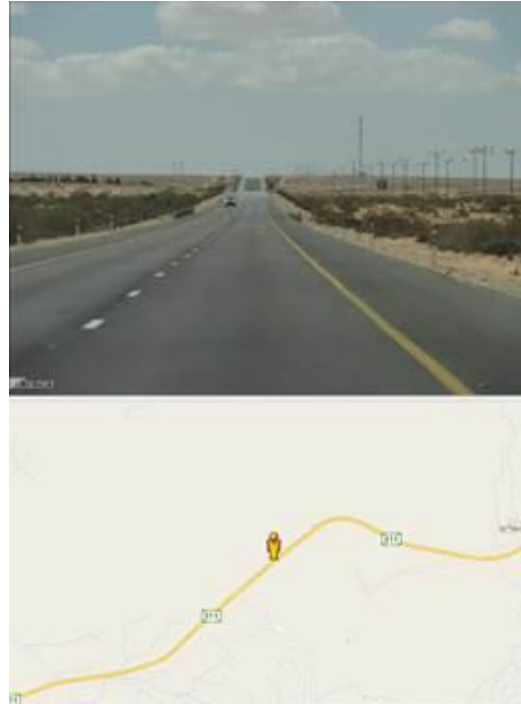


איור 5.12. דוגמא לקטע כביש עם נוכחות נמוכה של מעקות הבטיחות ומהירות גבוהה: כביש 40.



איור 5.13. דוגמא לקטע כביש עם מעקה רחוק מהמיסעה ומהירות גבוהה: כביש 12.

* מצב צידי הדרך ללא מעקה: מצב צידי הדרך ללא מעקה מאפיין את רוחב אזור המפלט לרכב. בקרב הקטעים "בעלי המהירות הגבוהה" מדד זה נמצא בטווח 1.0-2.7, עם ממוצע של 1.8 אשר גבוה יותר לעומת כלל המדגם (עם הממוצע של 1.3). מכאן, מאפיין זה מתאים להסבר המהירות, כאשר מדד גבוה יותר (רוחב גדול יותר של אזור המפלט) מתקשר למהירות גבוהה יותר. באיור 5.14 מוצגת דוגמא לרוחב גדול של אזור המפלט, בכביש 211, עם מהירות גבוהה.



איור 5.14. דוגמא לקטע כביש עם רוחב גדול של אזור המפלט ומהירות גבוהה: כביש 211.

5.4. סיכום

מהתבוננות במאפייני קבוצת קטעי הדרך "בעלי המהירות הנמוכה" עולה כי להפחתה במהירות הנסיעה תורמים המאפיינים הבאים: שכיחות גבוהה של צמתים משניים, שוליים צרים, פיתולים רבים ברדיוסים קטנים, שיפוע אורכי גבוה, קיום מעקות בטיחות מעבר לשול צר, ורוחב צר של אזור המפלט לרכב.

מאידך, מבחינת מאפייני הקטעים "בעלי המהירות הגבוהה" נמצא כי למהירויות נסיעה גבוהות תורמים המאפיינים הבאים: נפחי תנועה נמוכים, מיעוט צמתים משניים, שוליים רחבים, מעט פיתולים, מעט שיפועים לאורך, מעט מעקות בטיחות בצידו הדרך (כי אין בהם צורך), מעקות המותקנים מעבר לשול רחב, ורוחב ניכר של אזור המפלט (מכשולים רחוקים מקצה השול).

ממצאים אלו עולים בקנה אחד עם ממצאי סקר הספרות ועם ההיגיון ההנדסי. הממצא היחידי שאינו תואם את סקר הספרות הינו שרוחב נתיב אינו משפיע על מהירות הנסיעה. על-פי הספרות, רוחב נתיב צר מתקשר עם מהירות נמוכה, ורוחב נתיב רחב עם מהירות גבוהה, כאשר במדגם הקטעים שנבחנו לא נמצא קשר מסוג זה.

6. סיכום ומסקנות

6.1. כללי

השפעת המהירות כגורם מכריע הן בהתרחשות התאונות והן ברמת חומרתן הוכחה במחקרים רבים. לכן, לניהול מהירויות הנסיעה במערכת הדרכים מייחסים חשיבות רבה מבחינת שיפור רמת הבטיחות והניידות ברשת. אחד ממרכיבי הניהול הינו שימוש באמצעים הנדסיים להסדרת תשתיות הדרכים ולבניית דרכים חדשות, כאשר לכל סוג דרך תפקיד מוגדר וברור אשר בא לידי ביטוי בתכנון הדרך. מאפייני התכנון של הדרך אמורים להעביר לנהגים מסר ברור לגבי מהירות המתאימה לנסיעה בדרך זו. יישום גישה זה בתכנון דרכים מבטא את התפיסה של "דרכים המסבירות את עצמן".

ע"פ ה"הנחיות לקביעת מהירויות ברשת הדרכים" בישראל (הנחיות, 2010), יש לשאוף ליצירת מערכת דרכים אשר תתאפיין באיזון בין כוונת הרשויות והמתכננים שבנו את הדרכים לבין התנהגות ציבור הנהגים שנוסע בדרכים אלה. האיזון מתקיים כאשר מושגת התאמה בין מהירות היעוד של סוג דרך מסוים (שנקבעה ע"י הרשויות והמתכננים) לבין מהירויות הנסיעה בפועל של הנהגים. חשוב שקטעי הדרכים עם מאפיינים הנדסיים דומים יאפשרו משטר מהירות זהה, וכמו כן, שהמסרים לגבי אפשרויות הנסיעה בקטעי דרכים אלה יהיו ברורים בעיני הנהגים.

ההנחיות (2010) הגדירו את ההיררכיה החדשה של סוגי הדרכים בארץ ואת הגישה החדשה לקביעת מהירויות הנסיעה ברשת הדרכים. עם זאת, קיים צורך בפיתוח כלים הנדסיים שיסייעו ביישום הגישה החדשה - התאמת מאפייני הדרכים למהירויות הייעוד. כלומר, נדרש לבסס את מאפייני הדרכים בארץ שיהפכו אותן לדרכים המסבירות את עצמן בעיני הנהגים ובכך, יתרמו לצמצום הפערים בין מהירויות הייעוד לבין מהירויות הנסיעה בפועל.

מחקרים אמפיריים מראים כי מאפייני התכנון משפיעים על מהירויות הנסיעה הנבחרות על-ידי הנהגים. עם זאת, נדרש ידע ומידע מפורט לגבי מאפייני הכביש שיאפשרו להשיג את אותן מהירויות הנסיעה המתאימות לכביש ("מהירות היעוד"). בהקשר זה, נדרש גם ידע לגבי תפיסת הנהגים של דרכים מסוג מסוים, בתנאים המקומיים, המתבטאת במהירות נסיעתם. לכן, מטרת מחקר זה הייתה לחקור את הקשר בין מהירויות הנסיעה ומאפייני הכביש, בתנאי הארץ, על מנת לזהות את מאפייני התשתית המשפיעים על בחירת מהירויות נסיעה מסוימות על-ידי הנהגים. המחקר מתמקד בדרכים החד-מסלוליות, כי סוג דרך זה מתאפיין ברמות בטיחות נמוכות יותר לעומת הדרכים הדו-מסלוליות, וכמו כן, מהווה את החלק הארי מרשת הדרכים הלא עירוניות בישראל.

במחקר היו מרכיבים אלה: (א) סיכום ממצאי הספרות לגבי הכלים הקיימים ליצירת דרכים המסבירות את עצמן; (ב) הכנת בסיס הנתונים למחקר; (ג) בחינת מידת ההתאמה בין מהירויות הנסיעה בפועל למהירויות היעוד, בקטעי דרך שונים; (ד) ביצוע ניתוחים סטטיסטיים לזיהוי מאפייני התשתית שמשפיעים על בחירת מהירויות הנסיעה ע"י הנהגים, בתנאי הארץ, לרבות בחינת נושא העקביות בתכנון, באמצעות "שחזור" של מהירויות התכנון ע"פ מאפייני תשתית נבחרים, סיווג הקטעים ע"פ מדדי מהירויות התכנון ובחינת השפעה של מהירות התכנון על מהירויות הנסיעה בפועל; (ה) בדיקה הנדסית של מאפייני הקטעים עם מהירויות גבוהות ונמוכות.

6.2. ממצאים עיקריים של המחקר

6.2.1. ממצאי הספרות

לפי הניסיון הבינלאומי, בין הכלים הניתנים ליצירת דרכים המסבירות את עצמן ניתן למנות: הגדרת היררכיה נכונה של מערכת הדרכים; הקפדה על עקביות בתכן הדרך; מציאת ביטוי לקשר בין מאפייני הדרכים לבין מהירויות הנסיעה.

תפיסת הדרכים המסבירות את עצמן דורשת הגדרה פונקציונאלית של סוגי הדרכים, כאשר לכל סוג מוגדרת מהירות היעוד אשר מושגת באמצעות מאפייני תכן הולמים. למעשה, מבוצע תכנון מחדש של מערכת הדרכים, על מנת ליצור מצב שבו תפקידי הדרכים ומאפייני התכן יהיו עקביים וברורים יותר לנהגים. ההנחה הנה שמערכת תנועה אחידה וצפויה יותר תחזק את יכולת הנהגים לבחור במהירויות נסיעה מתאימות. כתוצאה מכך, יצטמצמו הקונפליקטים שקשורים לגורם המהירות ולגורמים אחרים, מצב אשר יביא, בסופו של דבר, לירידה במספר התאונות.

בנסיעתו לאורך הדרך מסתמך הנהג על ניסיונו מהנהיגה בדקות הקודמות. כאשר ציפיותיו אינן מתממשות, נוצר קונפליקט בין ציפיותיו לבין הנתונים בשטח, מצב אשר עשוי לגרום לטעויות בהחלטות הנהג ולהביא לתאונות. מאידך, כאשר הכביש מתוכנן בעקביות ובאחידות, הדבר מביא לכך שציפיות הנהג מתממשות ונהיגתו תהיה בעלת פחות שגיאות ומכאן, יותר בטוחה.

מהירות התפעול הינה הפרמטר העיקרי בהערכת עקביות של תכן הדרך. בספרות, קיימים מודלים רבים לחיזוי מהירות התפעול בהתבסס על המאפיינים הגיאומטריים, אם כי, רובם נבנו עבור תנאי הנסיעה בעקום. עקביות התכן מוערכת על-פי ההפרשים במהירות התפעול בין שני אלמנטים עוקבים או בין מהירות התפעול ומהירות התכן של אותו האלמנט הגיאומטרי; ככל שהפרשים אלה קטנים יותר, כך העקביות גדלה.

הן לבחינת איכות התכן והן לבחינת השפעתם של מאפייני דרך שונים על בטיחות, משמשות מהירויות הנסיעה בזרימה חופשית (מהירויות התפעול). מהירויות הנסיעה מתאימות גם לשמש כמדד אובייקטיבי למדידת "תפיסת הנהגים" של תנאי דרך שונים.

על סמך ממצאי המחקרים שנערכו בעולם ניתן להצביע על השפעתם על מהירויות בפועל של מאפייני דרך שונים, וביניהם: מצב סביבת הדרך; החתך הגיאומטרי; מדדי עקום אופקי ושיפוע אנכי; קרבת צמתים, מהירות מותרת. טבלה 1.14 בפרק 1 מסכמת את מאפייני הדרך המשפיעים על מהירויות הנסיעה של נהגים, ע"פ המקורות שנסקרו. עם זאת, מערכת קשרים זו טרם הגיעה למצב המאפשר לשמש בסיס מוצק לתכנון, ולכן, קיים צורך במחקרים אמפיריים נוספים שיתרמו להבנתה.

6.2.2. בסיס הנתונים של המחקר

מחקר זה התבסס על שילוב שני בסיסי נתונים: (א) מערכת מידע גיאוגרפית המציגה את מדדי מהירויות הנסיעה ברשת הדרכים שנבנה במחקר בכור, מוריק, גיטלמן (2012); (ב) בסיס נתונים על מאפייני הדרכים של חברת נתיבי ישראל.

מדדי מהירויות הנסיעה חושבו עבור קטעי דרך מוגדרים (קטעי TMC), על סמך תצפיות המהירות של כלי הרכב שנסעו לאורך כבישי הארץ במשך 6 חודשים, פברואר-יולי 2011. המידע על מאפייני

התשתיות התקבל ממערכת ניהול בטיחות (מנ"ב) של חברת נתיבי ישראל, והוא נבנה בעקבות סקר דרכים שנערך בשנת 2010. המידע על מאפייני התשתית קיים עבור סגמנטים באורך של 100 מ'.

מכיוון שמדדי מהירויות הנסיעה קיימים עבור הקטעים המוגדרים, גם מאפייני הדרך הופקו עבור יחידות ניתוח אלה. עבור כל מאפיין תשתית, לכל יחידת ניתוח חושב הערך המייצג שלו וכן, מדדים לאפיון פיזור הערכים. בנוסף, על סמך מאפייני תשתית נבחרים חושבו מדדי עקביות התכן, באמצעות "תרגום" ערכי המאפיינים לערכי מהירות התכן. מדדי התשתיות הופקו עבור המאפיינים של רוחב נתיב, רוחב שול, רדיוס אופקי, רדיוס אנכי, שיפוע אורכי, מצב צדי הדרך וצפיפות הצמתים, סה"כ: 54 מאפייני תשתית, לכל קטע מחקר (בתוספת נפח תנועה יומי).

מדד המהירות העיקרי שנבחן במחקר הינו "חריגת המהירות" או ההפרש בין מדד האחוזון ה-85 של מהירויות הנסיעה לבין המהירות המותרת (אשר מבטא גם את ההפרש בין מהירות התפעול ומהירות היעוד בקטע). מדדי המהירות קיימים עבור שש תקופות זמן שונות. בעקבות בחינת הדמיון והשוני בין אורכי הקטעים ופילוגי המהירות, בתקופות זמן שונות, וכן, מתוך שאיפה לבסיס נתונים מרבי, בחינת מערכת הקשרים בין מאפייני הדרך ומהירויות הנסיעה התמקדה בקטעים עם מדדי המהירות בשעות יום-ימי חול. בסיס הנתונים של המחקר כלל 178 קטעי דרכים חד-מסלוליות. סה"כ בכל קטעי המחקר, ממוצע מדד המהירות העיקרי היה $10 \text{ קמ"ש} \pm 12 \text{ קמ"ש}$ (סטית תקן).

6.2.3. קשרים סטטיסטיים בין מאפייני התשתית ומדד המהירות

א. זיהוי קבוצות הומוגניות של קטעי המחקר על-פי מדד המהירות בוצע בעזרת שיטת CART, תוך כדי שימוש בערכים המוחלטים של מאפייני התשתית. על סמך עץ הסיווג שנבנה (מודל עם 65% של שונות מוסברת), נמצא כי מאפייני התשתית שמשפיעים על חלוקת הקטעים לפי הפרשי המהירות הם: צפיפות הצמתים בקטע, רוחב שול (אומדן ממוצע, אומדן מינימלי, אומדן מרבי), רדיוס אנכי קמור (אומדן מינימלי, אומדן ממוצע), רדיוס אנכי קעור (אומדן מרבי), שיפוע לאורך (אומדן ממוצע, אומדן מינימלי, אומדן מרבי), רוחב נתיב (אומדן מינימלי), רדיוס אופקי (אומדן מרבי), מצב צידי הדרך ללא מעקה. כלומר, רוב מאפייני התשתית השפיעו על חלוקת הקטעים לקבוצות ההומוגניות.

לפי מודל זה, רמות מהירות נמוכות במיוחד (האחוזון ה-85 בין 5-30 קמ"ש מתחת למהירות המותרת) נצפו בקטעים עם צפיפות צמתים גבוהה במיוחד (מעל 0.13) ורוחב שול קטן (אומדן ממוצע פחות מ-1.3 מ') וכמו כן, בקטעים עם צפיפות צמתים נמוכה (פחות מ-0.006) אך רוחב שול קטן (אומדן מינימלי עד 0.6 מ') ושיפוע אורך גדול (אומדן מרבי מעל 9.5%).

מאידך, רמות מהירות גבוהות (חריגות של 15-20 קמ"ש מעל המהירות המותרת) נצפו בקטעים עם צפיפות צמתים בינונית וללא בעיות גיאומטריות; בקטעים עם צפיפות צמתים נמוכה ושול צר (אומדן מינימלי עד 0.3 מ'); בקטעים עם צפיפות צמתים נמוכה וללא עקמומיות אופקית, חלקם עם מצב טוב של צידי הדרך ללא מעקה ושול רחב (אומדן מרבי מעל 2.5 מ'). כמו כן, רמות מהירות גבוהות במיוחד (חריגות מעל 20 קמ"ש) נצפו בקטעים עם צפיפות צמתים נמוכה, כאשר הנתיב רחב (אומדן מרבי מעל 3.0 מ') או בקטעים ללא בעיות גיאומטריות ושול רחב (אומדן מרבי מעל 2.5 מ').

ב. לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית לבין מדד המהירות פותחו מודלי רגרסיה רב-משתנית. סה"כ פותחו שלושה מודלים, על סמך הרכבים שונים של מאפייני התשתית שהם: (1) כל מאפייני התשתית (הערכים המוחלטים); (2) מאפייני תשתית נבחרים (הערכים המוחלטים) שהוגדרו בעקבות בחינת קורלציות בין מאפייני התשתית ובחירה "נציג" לכל קבוצת משתנים שנמצאו בקורלציה גבוהה; (3) כל מאפייני התשתית המבוטאים באחוזי פילוג לפי קטגוריות מוגדרות. (המודלים עם 61%-67% של שונות מוסברת).

בעקבות בחינת המודלים נמצא כי:

- מדד המהירות **עולה** עם עליה ברוחב שול ועם עליה במדד מצב צידי הדרך ללא מעקות הבטיחות, כאשר השפעת מאפייני תשתית אלה על מהירות היתה עקבית בכל המודלים שהותאמו במחקר.

- מאידך, מדד המהירות **יורד** עם עליה בנפח התנועה (ממצא עקבי בכל המודלים) וגם עם עליה במדד צפיפות הצמתים לאורך קטע (ממצא של שני המודלים מתוך שלושה).

- עבור הרדיוס האופקי נמצאה השפעה בשני מודלים אשר מצביעה על אפקט **ממתן** על מדד המהירות של נוכחות הרדיוס האופקי, בכלל, או של קיום רדיוסים קטנים במיוחד.

- לגבי השיפוע לאורך, בשני המודלים הראשונים עבור מאפיין זה נשמרו שני ערכים אשר למעשה נטרלו אחד את השני מבחינת השפעתם על מדד המהירות. רק במודל השלישי זוהתה השפעה של קטגורית שיפוע אורך גדול במיוחד (8-10%) אשר מזוהה עם אפקט **ממתן** על המהירות.

- עבור השפעת רוחב נתיב על מהירות לא נתקבלו תוצאות שימושיות כאשר במודל 1 נשמרו שני ערכי המאפיין שנטרלו את השפעתו המעשית על מדד המהירות, בעוד שבמודל 3 התקבל שכל ערכי המאפיין מזוהים עם עליה במהירות.

- לגבי הרדיוסים האנכיים, במודל 1 לא נמצאה השפעה מעשית על מדד המהירות (מקדמי המודל היו קטנים מאוד), כאשר מאפיינים אלה לא נכללו בין המסבירים במודל 2. במודל 3 נמצא אפקט ממתן על מדד המהירות של ערכים מסוימים של הרדיוסים האנכיים (כגון: רדיוס אנכי קמור בטווח 2500-4000 מ' ושל רדיוס אנכי קעור בטווח עד 1500 מ'). עם זאת, סה"כ נראה כי השפעת הרדיוסים האנכיים על המהירות זניחה למדי.

בנוסף, בבחינה המשולבת של השפעת מאפייני התשתית נמצא כי, בנפחי תנועה נמוכים יותר (כגון: עד 10,0 אלף כלי רכב ביממה), על מדד המהירות קיימת השפעה מעשית של רוחב שול, מצב צידי הדרך ללא מעקה, נוכחות הצמתים בקטע. כמו כן, השפעת מאפיינים אלה על חריגת המהירות מהותית יותר בנפחי תנועה נמוכים (כגון: 3,0 אלף כלי רכב ביממה). עם זאת, השפעת מאפיינים אלה נעלמת כאשר מדובר בקטעים עם נוכחות ניכרת של העקום האופקי כגון: ב-50% או יותר מאורך הקטע.

ג. מהירויות התכן לקטעי המחקר שוחזרו על סמך ארבעת מאפייני התשתית: רוחב נתיב, רוחב שול, עקום אופקי ושיפוע אורכי, כאשר חושבו הן אומדני מהירות התכן לקטע כולו (ממוצע, סטית תקן, ערך מינימלי, ערך מרבי של ערכי מהירויות התכן שנצפו בו) והן מדדי השתנות של מהירות התכן לאורך קטע - אחוזי המקרים לפי שלוש הקטגוריות המוגדרות של הפרשי מהירות התכן (עד 10 קמ"ש, 10-

20 קמ"ש, מעל 20 קמ"ש, בהתאם להגדרה של עקביות תכן טובה, בינונית ונמוכה, בספרות המקצועית), אשר הוערכו בעקבות בחינת הפרשים של מהירויות התכן במקטעים קצרים עוקבים בתוך כל קטע. כתוצאה, עבור כל קטע, התקבלו סה"כ 28 מדדים של מהירויות התכן.

בחינה מוקדמת של ממוצעי מהירויות התכן בקטעי המחקר הראתה שוני ניכר בערכים שהתקבלו על סמך מאפייני תשתית שונים. בין היתר, הערכים שהתקבלו לפי רוחב נתיב ורוחב שול היו נמוכים יותר לעומת אותם האומדנים לפי רדיוס אופקי ושיפוע לאורך. כמו כן, מבחינת הפרשי מהירויות התכן בקטעי המחקר, ניכר פיזור רחב יותר של הערכים שהתקבלו על סמך רוחב נתיב ורוחב שול לעומת מאפייני הרדיוס והשיפוע.

סיווג קטעי המחקר בשיטת CART על-פי ערכי מדד המהירות בפועל - האחוזון ה-85 של מהירויות הנסיעה, הראה כי חלק ניכר ממדדי מהירויות התכן השפיעו על חלוקת הקטעים לקבוצות ההומוגניות (מודל זה עם 68% שונות מוסברת).

בין היתר נמצא כי רמות נמוכות של מהירויות הנסיעה בפועל (האחוזון ה-85 עד 70 קמ"ש) נצפו בקטעים עם ממוצע נמוך של מהירות התכן ופיזור גדול של אומדני מהירות התכן לאורך קטע, לפי המאפיינים של רוחב נתיב ורדיוס אופקי, דהיינו, בקטעים עם עקמומיות ניכרת והשתנות גדולה בחתך הרוחבי לאורך קטע. הקלה מסוימת בתנאים אלה, כגון: ממוצע נמוך של מהירות התכן לפי הרדיוס האופקי בשילוב צמצום מסוים בהשתנות מהירויות התכן לאורך קטע, או קיום השתנות במהירויות התכן לאורך קטע לפי מאפיין רוחב הנתיב אך ללא מגבלה של ממוצע מהירות התכן לפי הרדיוס האופקי, מזוהה על עליה קלה ברמות מהירויות הנסיעה בפועל - לאחוזון ה-85 של 70-80 קמ"ש.

מאידך, מהירויות נסיעה גבוהות (האחוזון ה-85 של 100 קמ"ש או יותר) נצפו בקטעים עם ממוצע גבוה של מהירויות התכן לפי הרדיוס האופקי, ואחוזים נמוכים של מקרים עם הפרשים ניכרים במהירויות התכן במקטעים העוקבים/ אחוזים גבוהים של מקרים עם הפרשים קטנים במהירויות התכן במקטעים העוקבים, לפי רוחב נתיב או רוחב שול. כלומר, קטעים ישרים יותר, עם מיעוט עקומים אופקיים, אשר מתאפיינים גם במראה קבוע יותר של החתך לרוחב, מזמינים מהירויות נסיעה גבוהות, אשר עולות ב-20-30 קמ"ש מעל המהירות המותרת.

בהמשך, סיווג רב-משתני של קטעי המחקר בשיטת *cluster analysis* הצביע על 5 קבוצות הומוגניות (קלסטרים) של הקטעים לפי הרמות השונות של מהירויות התכן ורמת השתנות של מאפייני הקטעים, כלהלן:

קבוצה 1 עם רמת תכן נמוכה יחסית והשתנות ניכרת של רוב מאפייני התשתית לאורך קטע;

קבוצה 2 עם רמות תכן נמוכות וחתך רוחב עקבי;

קבוצה 3 עם עקמומיות נמוכה ושינויים מסוימים של החתך לרוחב, לאורך קטע;

קבוצה 4 עם רמת תכן בינונית אך השתנות ניכרת ברוחב שול;

קבוצה 5 עם רמות תכן גבוהות וחתך רוחב משתנה.

לפיכך, קבוצות קטעים 1-2 מתאפיינות ברמות תכן נמוכות יותר ו/או בהשתנות ניכרת של רוב מאפייני התשתית לאורך קטע, בעוד שקבוצות קטעים 3-5 מזוהות עם רמות תכן גבוהות יותר ו/או השתנות נמוכה יותר של מאפייני התשתית לאורך קטע.

לבסוף, נערכה בחינת השפעה של מהירויות התכן על מהירויות הנסיעה בפועל, ע"י התאמה חוזרת של המודל הרב-פרמטרי לביטוי הקשר בין מאפייני התשתית לבין מדד המהירות העיקרי, כאשר לרשימת מאפייני התשתית נוסף גם מדד של מהירות תכן - מספר הקלסטר. לפי המודל שהתקבל (עם שונות מוסברת 69%), קבוצות קטעים 3-5 מזוהות עם עליה במהירויות הנסיעה בפועל, לעומת קבוצה 1, כאשר קבוצה 2 מזוהה עם ירידה במהירות. כלומר, אופן ההשפעה שזוהה במודל המסביר תואם את המשמעויות של קבוצות הקטעים שהתקבלו לעיל. מכאן, בחינת מהירויות התכן שיפרה את הבנת המשמעויות של מאפייני הקטעים, כאשר תוספת מדד מהירויות התכן תרמה לניבוי של מהירויות הנסיעה בפועל.

6.2.4. בדיקה הנדסית של קטעי הדרכים עם מהירויות גבוהות ונמוכות

סיוור הנדסי וירטואלי נערך בקטעי המחקר אשר מתאפיינים בחריגות נמוכות וגבוהות במיוחד של מהירויות הנסיעה בפועל. מהתבוננות במאפייני עשרת קטעי הדרך בעלי המהירות הנמוכה עלה כי להפחתה במהירויות הנסיעה תרמו מאפיינים אלה: שכיחות גבוהה של צמתים משניים לאורך קטע, שוליים צרים, פיתולים רבים ברדיוסים קטנים, שיפוע אורכי גבוה, קיום מעקות בטיחות מעבר לשול צר, ורוחב צר של אזור המפלט לרכב.

מאידך, מבחינת מאפייני עשרת הקטעים בעלי המהירות הגבוהה נמצא כי למהירויות נסיעה גבוהות תורמים המאפיינים הבאים: נפחי תנועה נמוכים, מיעוט צמתים משניים, שוליים רחבים, מעט פיתולים, מעט שיפועים לאורך, מעט מעקות בטיחות בצידו הדרך (כי אין בהם צורך), מעקות המותקנים מעבר לשול רחב, ורוחב ניכר של אזור המפלט.

ממצאים אלו עולים בקנה אחד עם ממצאי סקר הספרות ועם ההיגיון ההנדסי. הממצא היחידי שאינו תואם את סקר הספרות הינו שרוחב נתיב אינו משפיע על מהירות הנסיעה. על-פי הספרות, רוחב נתיב צר מתקשר עם מהירות נמוכה, ורוחב נתיב רחב עם מהירות גבוהה, כאשר במדגם הקטעים שנבחנו לא נמצא קשר מסוג זה.

6.3. דיון ומסקנות

הנחת המחקר הייתה כי זיהוי מאפייני הדרכים אשר קשורים לרמות שונות של מהירויות הנסיעה יתרום להבנה טובה יותר של מערכות קשרים זאת, אשר בהיותה מיושמת, תביא לחיזוק ההתאמה בין מהירויות הנסיעה ומהירויות היעוד של קטעי הכבישים, מה שיתרום, בסופו של דבר, להגברת הבטיחות בדרכים.

בהתבסס על ממצאי המחקר, על מדד המהירויות בפועל בדרכים החד-מסלוליות בארץ נמצאה השפעת של מאפייני תשתית אלה:

* רוחב שול ומצב צידי הדרך ללא מעקות (רוחב אזור המפלט לרכב), כאשר ערכים גדולים יותר של מאפיינים אלה מזוהים עם עליה במהירות.

* נפח התנועה ומדד צפיפות הצמתים לאורך קטע, כאשר עליה במדדים אלה מזוהה עם ירידה במהירות.

* רדיוס אופקי ושיפוע לאורך, כאשר במודלים השונים היו סימנים לכך שנוכחותם של מאפיינים אלה לאורך קטע או קיום ערכים קיצוניים יותר של שני המאפיינים (רדיוס קטן ושיפוע גדול) מזוהים עם אפקט ממתן על המהירות.

כמו כן, נמצא שקבוצות הקטעים המתאפיינות ברמות תכן גבוהות יותר ו/או השתנות נמוכה יותר של מאפייני התשתית לאורך קטע, מזוהות עם עליה במהירויות הנסיעה בפועל, כאשר קבוצות הקטעים המתאפיינות ברמות תכן נמוכות יותר ו/או בהשתנות ניכרת של רוב מאפייני התשתית לאורך קטע, מזוהות עם ירידה במהירות.

בנוסף, הבחינה המשולבת של השפעת מאפייני התשתית הצביע על כך שהשפעה מעשית על מדד המהירות של רוחב שול, מצב צידי הדרך ללא מעקה, נוכחות הצמתים בקטע, קיימת בעיקר בנפחי תנועה לא גבוהים (כגון: עד 10,0 אלף כלי רכב ביממה) והיא חזקה יותר בנפחי תנועה נמוכים. עם זאת, השפעת מאפיינים אלה פוחתת כאשר מדובר בקטעים עם נוכחות ניכרת של עקמומיות אופקית.

מכאן, המחקר הצביע על התאמה ניכרת בין תכן טוב ומהירויות נסיעה גבוהות, ולהפך, כאשר בין ממתנים עיקריים של מהירויות הנסיעה בפועל נמצאו האילוצים הגיאומטריים כגון: נוכחות של רדיוסים אופקיים קטנים או שיפועים אורכיים גבוהים. בנוסף, על מהירויות הנסיעה בפועל ישנה השפעה עקבית של נפח התנועה בדרך, צפיפות הצמתים, רוחב שול ומצב צידי הדרך ללא מעקות. עם זאת, בהקשר זה מתעוררת שאלה לגבי המאפיינים שעשויים לתת כלים למתכנן מבחינת ההשפעה על המהירויות בפועל.

בראיה הרחבה יש לציין כי תכנון דרך בין-עירונית מונחה ע"י ההנחיות הקיימות ותנאי השטח, כאשר בבחירת המאפיינים, ככלל, קיים שיקול כלכלי. חלק מהמאפיינים שנמצאו כמשפיעים על מהירויות הנסיעה במחקר זה, נגזרים מהתנאים והאילוצים הקיימים, כך שלמתכנן נשאר טווח מוגבל לקביעת ערכי תכנון של מאפיינים אלו. לדוגמא, נפחי התנועה בדרך לא נקבעים באמצעות התכנון הפיסי. כמו כן, כאשר הדרך עוברת באזור הררי, נגזרים מכך אילוצים של שיפועים לאורך, עיקולים ברדיוס קטן והצורך בהצבת מעקות הבטיחות בצד הדרך.

עם זאת, מידות של חלק מהמאפיינים ניתנים לקביעה על-ידי המתכנן, בתחום אפיצות (tolerance) מסוים. בין מאפיינים כאלה יכולים להיות, לדוגמא, רוחב שול, רדיוס אופקי, שיפוע לאורך, מרחק מעקה בטיחות מקצה השול, רוחב אזור המפלט (במקומות בהם לא מוצב מעקה), שכיחות צמתים משניים לאורך הדרך. אם כי, כיום, על בחירת מאפיינים אלה לרוב משפיע שיקול כלכלי.

יש לזכור גם שלמידות מסוימות של חלק מהמאפיינים תיתכן השפעה הפוכה על מהירות ובטיחות. לדוגמא, במחקר זה נמצא ששול צר מפחית את מהירות הנסיעה (דבר האמור לשפר את הבטיחות), אך מנגד ידוע מהספרות כי שול צר מתקשר עם שיעורי תאונות גבוהים יותר. מכאן, קיים צורך למצוא את המידה של מאפיין התכנון אשר תביא למרב התועלת הבטיחותית, ע"י השגת הפרש מרבי בין

התועלת הבטיחותית מהפחתת מהירויות הנסיעה לבין הנזק הבטיחותי שעשוי להיגרם מהצנעת מאפיין התכנון. כלומר, בשינוי מאפייני התכנון נדרשת מידת זהירות.

עקב מורכבות הקשר בין מאפייני הדרך והבטיחות, ייתכן ויש מקום להשתמש בשינוי מאפייני הדרך התורמים להפחתה במהירות בעיקר במקומות בהם מהירות הנסיעה גורמת לסיכון ניכר כגון: בקטעי דרכים בין-עירוניות החוצים אזורים בנויים. בקטע דרך כזה (וייתכן גם, באזור המעבר אליו), להשגת אפקט הורדת מהירויות הנסיעה ניתן להצר שוליים, להרבות בצמתים המשניים ולקרר מכשולים (כגון: עצים), לשול. עם זאת, אזור כזה צריך להיות מואר, כאזור בנוי, בלילה.

כדי לסייע בזיהוי ערכים של מאפייני הדרכים אשר תורמים להשגת מהירויות יעוד רצויות, על סמך בסיס הנתונים של המחקר הופק סיכום למאפיינים של קטעי הדרכים שמזוהים עם מהירויות גבוהות ונמוכות. אומדני המהירויות (ערכי חריגה לעומת המהירות המותרת) הוערכו בעזרת מודל 2 שפותח במחקר, כאשר בהמשך, נבחרו כל הקטעים עם חריגה שלילית במהירות מנגד כל הקטעים עם חריגה חיובית ניכרת (מעל 20 קמ"ש). סה"כ, נמצאו 32 קטעים עם מהירויות נמוכות ו-23 קטעים עם מהירויות גבוהות. עבור כל קבוצת קטעים חושבו מדדים סטטיסטיים של מאפייני התשתית. ממצאים מפורטים מהערכה זו מוצגים בנספח ג'. טבלה 6.1 מציגה סיכום לממוצעים של מאפייני התשתית, בשתי קבוצות הקטעים, אשר מצביעים על הבדל ניכר במאפיינים.

טבלה 6.1. ערכי הממוצעים (\pm סטית תקן) של מאפייני תשתית נבחרים, בקבוצות הקטעים עם מהירויות נסיעה נמוכות וגבוהות*

מאפייני תשתית	קטעים עם מהירויות נמוכות	קטעים עם מהירויות גבוהות
מדד צפיפות הצמתים	0.20 (0.17 \pm)	0.01 (0.02 \pm)
רוחב שול, מ' (אומדן ממוצע)	1.3 (0.6 \pm)	2.6 (0.7 \pm)
אחוז מקרים עם רוחב שול עד 2 מ'	75.2 (27.0 \pm)	26.0 (29.3 \pm)
אחוז מאורך קטע עם רדיוס קטן (עד 400 מ')	34.0 (22.3 \pm)	7.1 (4.1 \pm)
אחוז מקרים עם רדיוס אופקי עד 100 מ'	9.1 (12.9 \pm)	1.2 (4.1 \pm)
אחוז מאורך קטע עם שיפוע גדול (מעל 3%)	43.3 (31.9 \pm)	11.1 (15.0 \pm)
אחוז מאורך קטע בו קיימים מעקות בצדי הדרך	0.61 (0.22 \pm)	0.29 (0.15 \pm)
מצב מעקות בטיחות (קרבה למיסעה)	2.04 (0.60 \pm)	2.89 (0.36 \pm)
מצב צידי הדרך ללא מעקה (רוחב איזור המפלט)	1.00 (0.44 \pm)	1.90 (0.64 \pm)

* עבור כל מאפיין תשתית קיים הבדל מובהק בין שתי קבוצות הקטעים ($p < 0.05$; לפי מבחן T)

מטבלה 6.1 ניתן להסיק כי מהירויות נסיעה נמוכות יותר – בהתאם למהירות המותרת, מושגות בקטעים עם צפיפות צמתים ניכרת, של 20% במוצע; רוחב שול צר – 1.3 מ' במוצע; עקמומיות אופקית ניכרת – כשליש מאורך קטע עם עקומים אופקיים (עד 400 מ'); עם נוכחת ניכרת של שיפועים אורכיים – כ 40% מאורך קטע עם שיפוע אורכי מעל 3%; כאשר בכ-60% מאורך קטע קיימים מעקות בצדי הדרך; מיקום המעקות – עד 2 מ' מקצה הנתבי; וכאשר אין מעקות בצד הדרך, קיים אזור המפלט ברוחב עד 3 מ'.

מאפייני תשתית אלה יביאו להורדת מהירויות הנסיעה בקטע דרך חד-מסלולית. עם זאת, ניכר כי חלק מהערכים הנ"ל (כגון: רוחב שול, רוחב אזור המפלט) אינם תואמים את דרישות ההנחיות לתכנון. כמו כן, כפי שצוין לעיל, אימוץ חתכי דרך מאולצים/לא תקינים עשוי לגרום לעליה בשיעורי התאונות. לכן, לא ניתן לצאת עם המלצה גורפת לגבי השינויים במאפיינים הגיאומטריים של קטעי הדרכים למען הורדת מהירויות הנסיעה בפועל. נראה כי הדרך הנכונה לקביעת מאפייני הדרכים

הנחוצים להשגת מהירויות ייעוד רצויות הינה ע"י בחינת יחסי הגומלין בין מיתון המהירות והשלכות על בטיחות אשר עשויות לנבוע מהצנעת הדרישות למאפייני הדרכים, לגבי החתך לרוחב ולאורך. בעקבות ריכוז ממצאים אמפיריים ותיאורטיים לגבי יחסי הגומלין הנ"ל ניתן יהיה להמליץ על שינויים בהנחיות תכנון קיימות.

על-פי ממצאי המחקר נראה כי מאפייני הדרכים המבטיחים ביותר מבחינת פיתוח כלים המקדמים את הגישה של "דרכים המסבירות את עצמן", בדרכים החד-מסלוליות בארץ, הם רוחב שול, רוחב אזור המפלט בצידו הדרך, נוכחות מעקות הבטיחות בקרבת המיסעה, צפיפות הגישות המשניות לאורך קטע. הצרת השוליים, הצנעת אזור המפלט, קירוב מעקות לקצה המיסעה, גידול בגישות המשניות יביאו להורדת מהירויות הנסיעה לאורך קטע. עם זאת, אימוץ פתרונות אלה, מן הסתם, יחייב יישום אמצעים נוספים, כדי להתריע על החתך המוצר בקטע/ קיום גישות משניות רבות, ובכך למנוע עליה אפשרית בתאונות הדרכים.

6.4. בחינת הקשר בין המהירות והבטיחות, בקטעי המחקר

א. הסוגיה הנבחנת

המחקר הצביע על מאפייני התשתית אשר תורמים להורדת מהירויות הנסיעה בפועל בקטעי הדרכים החד-מסלוליות, בישראל. ערכים אלה קשורים להצנעת מאפייני החתך לרוחב (הקטנת רוחב שול, הצרת אזור המפלט בצד הדרך), הוספת עקמומיות לתוואי הכביש (עקום אופקי, שיפוע לאורך) או ריבוי צמתים. שינויים כאלה במאפייני הכביש מביאים להצרה ויזואלית של מראה הכביש ו/או לשבירת רצף הנסיעה ומכאן, להקטנת מהירויות הנסיעה.

מאידך, שינויים כאלה במאפייני התשתית מזהים עם ירידה ברמת התכן של הכביש, כאשר חלקם מהווים גם סטייה מדרישות ההנחיות הקיימות. כמו כן, על-פי הממצאים הקיימים בספרות המקצועית שינויים כאלה בתכן הכביש עשויים להביא לעליה בתאונות הדרכים.

בשל המודעת לסתירה האפשרית בהשפעת מאפייני התשתית על מהירויות הנסיעה בפועל לעומת רמת הבטיחות של קטעי הדרכים, נערכה בחינת הקשר בין רמת המהירות ורמת הבטיחות של קטעי המחקר. בחינה זאת נערכה בשני מישורים: (1) בקרב הקטעים הנבחרים עם חריגה שלילית וחוביית במהירויות הנסיעה בפועל; (2) בקרב כלל קטעי המחקר.

כזכור, בעקבות יישום המודל שפותח במחקר, בקרב קטעי המחקר נמצאו 32 קטעים עם מהירויות נמוכות (דהיינו, עם חריגה שלילית של האחוזון ה-85 של המהירויות בפועל לעומת המהירות המותרת) ו-23 קטעים עם מהירויות גבוהות (עם חריגה חיובית ניכרת, מעל 20 קמ"ש, של האחוזון ה-85 לעומת המהירות המותרת). המדדים הסטטיסטיים של מאפייני התשתית הצביעו על שוני ניכר בין שתי קבוצות הקטעים (ראה טבלה 6.1 לעיל). לכן, הוחלט לבדוק האם קיים שוני ברמת הבטיחות בין שתי קבוצות הקטעים הנ"ל וכמו כן, לבחון את צורת הקשר בין רמת המהירות ורמת הבטיחות, בכל קבוצה.

בנוסף, בהסתמך על דוגמאות ממאמר של Elvik (2011) אשר הדגים קשר ישיר בין רמת המהירות (מהירות הנסיעה הממוצעת) ורמת הבטיחות (שיעור התאונות עם נפגעים ליחידת נסועה) עבור סוגי

דרך שונים שנקבעו לפי המהירות המותרת, הוחלט לבחון צורת קשר דומה בקטעי המחקר. מכיוון שכל קטעי המחקר הם קטעי דרכים חד-מסלוליות, עם מהירות מותרת 80 קמ"ש (ברוב הקטעים), ולכן, בראיה הכללית (לפי ההגדרה של Elvik, 2011), הם מהווים מדגם הומוגני של קטעי דרכים, עבור קטעי המחקר נערכה בדיקת הקשר בין המהירויות בפועל לבין שיעורי התאונות. בדיקה זאת נערכה עבור: (א) כל קטעי המחקר ביחד; (ב) קבוצת קטעי המחקר עם חריגה שלילית במהירויות הנסיעה.

ב. שיטת הבדיקה

בתור מדד הבטיחות לקטע דרך נבחר שיעור תאונות דרכים ליחידת נסועה אשר מוערך כסך התאונות שנצפו בקטע בתקופה מסוימת חלקי אורך קטע ונפח התנועה בקטע. מספרי תאונות הדרכים בקטעי המחקר הופקו על סמך קבצי "ת"ד" של הלמ"ס, סה"כ עבור השנים 2010-2011, כאשר בספירה נכללו תאונות קטע בלבד (לא כולל צמתים). הבדיקה נערכה עבור סך התאונות עם נפגעים והתאונות החמורות (קשות + קטלניות). כמו כן, בהתחשב בכך שמדדי המהירות שנבחנו במחקר זה התייחסו לשעות יום-ימי חול, גם בבדיקת התאונות ניתנה התייחסות נפרדת לתקופה המקבילה של התרחשות התאונות (ימי חול, שעות יום). מכאן, בחינת רמת הבטיחות של קטעי המחקר נערכה בהתייחס לחתכי התאונות הבאים:

1. סך התאונות עם נפגעים.
2. סך התאונות החמורות.
3. תאונות עם נפגעים בימי חול-שעות יום.
4. תאונות חמורות בימי חול-שעות יום.

להשוואה בין שיעורי התאונות בשתי קבוצות הקטעים - עם המהירויות הנמוכות והמהירויות הגבוהות, שימש מבחן T (independent samples T-test של SPSS) ומבחן Mann-Whitney המאפשרים לבדוק האם בין ממוצעי הערכים של שני מדגמים בלתי תלויים קיים שוני מובהק.

בנוסף, מתוך הנחה שכל אחת משתי קבוצות הקטעים מהווה מדגם אחיד של קטעים מבחינת מאפייני התשתית: רמה נמוכה בקטעים עם המהירויות הנמוכות, רמה גבוהה בקטעים עם המהירויות הגבוהות, עבור כל קבוצה נבדק הקשר בין רמת המהירות ורמת הבטיחות של הקטעים. במידה וקשר כזה נמצא, הוא עשוי להצביע על קיום השפעת המהירות על הבטיחות, בהינתן מאפייני תשתית מסוימים. בדיקה זאת נערכה בעזרת התאמת קו המגמה לקשר בין מדדי המהירות (חריגת המהירות) ומדדי הבטיחות (שיעורי התאונות) של כל קבוצת קטעים, ובדיקת מובהקות השיפוע של קו המגמה; בדיקה זאת נערכה ע"י התאמת מודל רגרסיה ליניארית, באמצעות SPSS.

כמו כן, לבדיקת הקשר הכללי בין המהירויות בפועל לבין שיעורי התאונות (לפי הדוגמאות של Elvik, 2011), בקטעי המחקר, הותאם מודל רגרסיה לא ליניארית, לפי נוסחה $y = ax^b$ וללא intercept; מודל זה הותאם באמצעות SPSS. בהקשר זה כמדד המהירויות בפועל שימש האחוזון ה-85 של מהירויות הנסיעה.

ג. הממצאים

טבלה 6.2 מציגה תוצאות מהשוואה בין שיעורי התאונות בקטעים עם המהירויות הנמוכות והגבוהות, לפי סוגי תאונות שונים. ניתן לראות כי בקטעים עם המהירויות הנמוכות נמצא שיעור גבוה יותר של סך התאונות עם נפגעים, לעומת הקטעים עם המהירויות הגבוהות, כאשר ההבדל מובהק ($p < 0.05$) בקרב סך התאונות והתאונות בימי חול-שעות יום. לעומת זאת, שיעור התאונות החמורות גבוה יותר בקטעים עם המהירויות הגבוהות לעומת הנמוכות, כאשר ההבדל אינו מובהק בקרב סך התאונות אך קרוב למובהק ($p < 0.06$) בקרב התאונות בימי חול-שעות יום.

איור 6.1 מציג את מדדי חריגת המהירות ושיעורי התאונות של שתי קבוצות הקטעים, עם המהירויות הנמוכות והגבוהות, בתוספת קו המגמה לקשר בין מדד חריגת המהירות ושיעור התאונות, בכל קבוצה. הערכים מוצגים עבור סך התאונות עם נפגעים וסך התאונות החמורות. טבלה 6.3 מציגה משוואות של קווי המגמה שהותאמו לכל מקרה, לרבות רמת המובהקות של השיפוע.

ניתן לראות כי עבור קבוצת הקטעים עם המהירויות הנמוכות הסתמן קשר ישיר בין מדד חריגת המהירות לבין שיעור התאונות, הן בקרב סך התאונות והן בקרב התאונות החמורות. כלומר, עליה במהירות מביאה לעליה בתאונות. עם זאת, מקדם השיפוע אינו מובהק.

לעומת זאת, עבור קבוצת הקטעים עם המהירויות הגבוהות הסתמן קשר הפוך בין מדד המהירות לבין שיעור התאונות, כאשר בקטעים עם מהירויות גבוהות יותר נצפו שיעורי תאונות נמוכים יותר. גם כאן מקדם השיפוע אינו מובהק, הן בקרב סך התאונות והן בקרב התאונות החמורות.

בנוסף, יש לציין כי בכל המקרים המוצגים בטבלה 6.2 - קווי המגמה שהותאמו לקשר בין מדד המהירות ושיעור התאונות בקבוצות הקטעים הנבחרים, רמת השונות המוסברת (R^2) על-ידי המודלים הייתה נמוכה.

טבלה 6.4 מציגה את המודלים הלא ליניאריים שהותאמו לקשר בין המהירויות בפועל (האחוזון ה-85 של מהירויות הנסיעה) לבין שיעורי התאונות, עבור כל קטעי המחקר ביחד. טבלה 6.5 מציגה את המודלים הלא ליניאריים שהותאמו לקשר זה בקטעי המחקר עם המהירויות הנמוכות (בהם האחוזון ה-85 של המהירויות בפועל נמוך יותר מאשר המהירות המותרת).

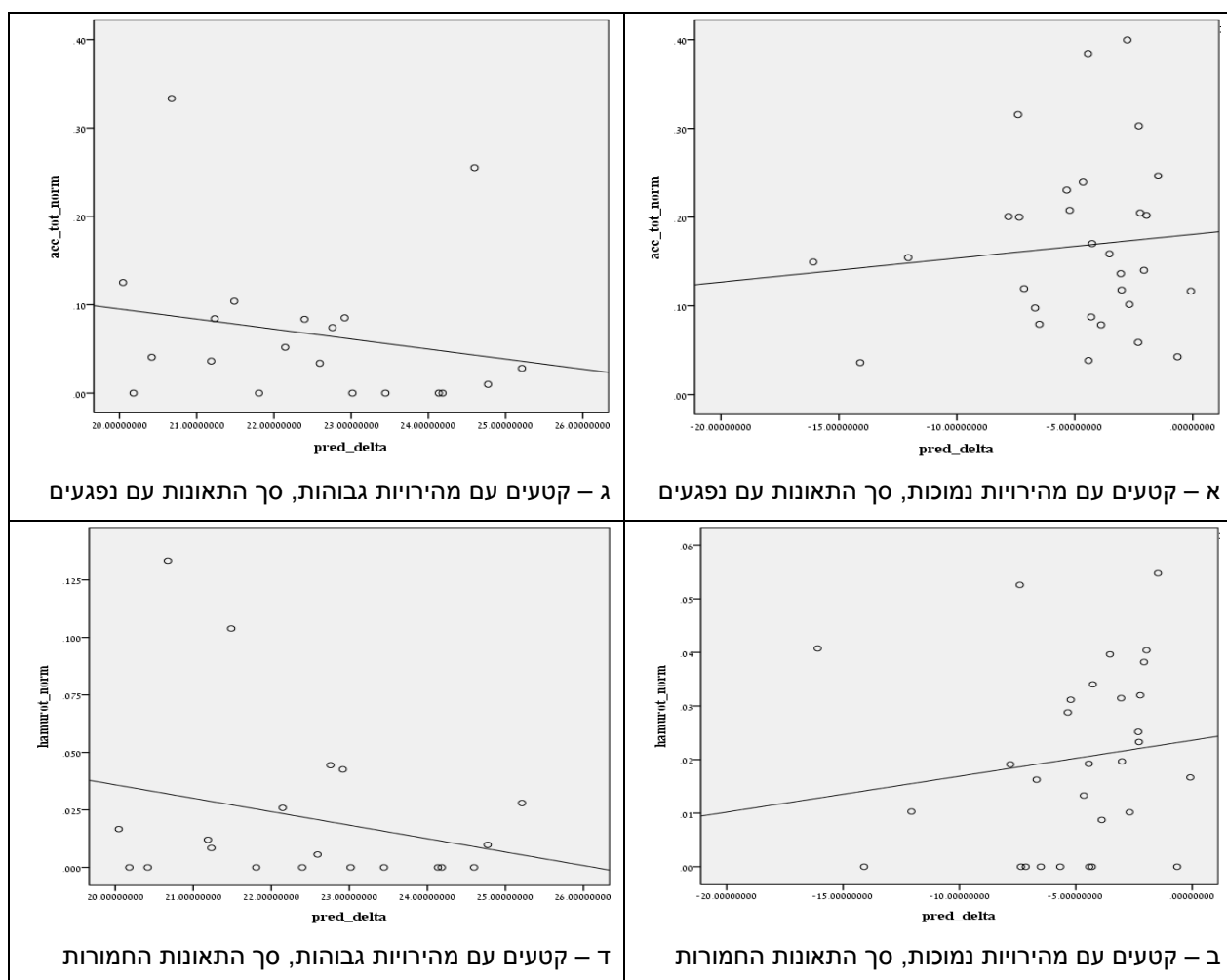
ניתן לראות שבמודלים שהותאמו לכל קטעי המחקר ביחד, הסתמן קשר הפוך בין רמת המהירות ורמת הבטיחות כאשר נבחנו סך התאונות עם נפגעים (סה"כ ובימי חול-שעות יום), והסתמן קשר ישיר בין המהירות והבטיחות כאשר נבחנו התאונות החמורות (סה"כ ובימי חול-שעות יום). הקשר ההפוך שנצפה בסך התאונות עם נפגעים מנוגד לממצאי הספרות. יצוין כי במודלים אלה, עבור כל קטעי המחקר ביחד, התקבלה שונות מוסברת אפסית ולכן, תרומתם להבנת הקשר בין מהירות ובטיחות אינה גבוהה.

לעומת זאת, במודלים שהותאמו לקטעי המחקר עם המהירויות הנמוכות, רמת השונות המוסברת הייתה גבוהה יותר (בין 2% עד 12%), בייחוד עבור התאונות החמורות. במודלים אלה, באופן עקבי, התקבל קשר ישיר בין מהירויות הנסיעה בפועל לבין שיעורי התאונות, כאשר קשר זה חזק יותר עבור התאונות החמורות.

טבלה 6.2. השוואה בין שיעורי התאונות* בקטעים עם מהירויות נמוכות וגבוהות, לפי סוגי תאונות שונים

מבחן דרגות			מבחן שוויון הממוצעים			מבחן שוויון השוניות		שיעורי תאונות לפי קבוצות קטעים				תנאי הערכה	
Asymp. Sig. (2-tailed)	Z	Mann-Whitney U	Sig. (2-tailed)	df	t	Sig.	F	טעות תקן של הממוצע	סטית תקן	ממוצע	N	סוג קטעים	סוג תאונות
.000	-3.501	163	.005	53	2.926	.886	.021	0.019	0.110	0.175	32	עם מהירויות נמוכות	סך התאונות עם נפגעים
								0.023	0.112	0.086	23	עם מהירויות גבוהות	
.185	-1.324	292	.465	53	-.736	.013	6.637	0.003	0.019	0.022	32	עם מהירויות נמוכות	סך התאונות החמורות
								0.013	0.061	0.030	23	עם מהירויות גבוהות	
.001	-3.471	165	.012	53	2.609	.781	.078	0.013	0.076	0.114	32	עם מהירויות נמוכות	תאונות עם נפגעים, בימי חול-שעות יום
								0.017	0.082	0.058	23	עם מהירויות גבוהות	
.056	-1.908	263	.790	53	-.267	.136	2.287	0.002	0.012	0.012	32	עם מהירויות נמוכות	תאונות חמורות, בימי חול-שעות יום
								0.008	0.040	0.014	23	עם מהירויות גבוהות	

* מספר תאונות בשנים 2010-2011, חלקי אורך קטע (ק"מ) ונפח תנועה יומי (אלף כלי רכב)



הערה: בציר X מוצג הפרש (חזוי) בין האחוזון ה-85 של מהירויות הנסיעה בפועל לבין המהירות המותרת; בציר Y מוצג שיעור תאונות - מספר תאונות בשנים 2010-2011, חלקי אורך קטע, ק"מ, ונפח תנועה יומי, אלף כלי רכב

איור 6.1. מדדי חריגת המהירות ושיעורי התאונות, לפי קבוצת קטעים וסוג תאונות, בתוספת קו המגמה לקשר בין מדד המהירות ושיעור התאונות.

טבלה 6.3. משוואות קווי המגמה שהותאמה לקשר בין מדד המהירות ושיעור התאונות, לפי קבוצת קטעים וסוג תאונות

סוג מודל	מקדם	טעות תקן	t	Sig.	R ²
א – קטעים עם מהירויות נמוכות, סך התאונות עם נפגעים	קבוע	.030	6.052	.000	.011
	מדד חריגת מהירות	.005	.559	.581	
ב – קטעים עם מהירויות נמוכות, סך התאונות החמורות	קבוע	.005	4.465	.000	.022
	מדד חריגת מהירות	.001	.795	.434	
ג – קטעים עם מהירויות גבוהות, סך התאונות עם נפגעים	קבוע	.288	1.118	.278	.042
	מדד חריגת מהירות	.013	-.886	.387	
ד – קטעים עם מהירויות גבוהות, סך התאונות החמורות	קבוע	.118	1.301	.210	.045
	מדד חריגת מהירות	.005	-1.120	.277	

טבלה 6.4. המודלים הלא ליניאריים שהותאמה לקשר בין האחוזון ה-85 של מהירויות הנסיעה ושיעורי התאונות, עבור כל קטעי המחקר ביחד, לפי סוג תאונות

סוג תאונות	המודל*	R ²
א - סך התאונות עם נפגעים	$y=3.568*x^{-0.719}$.009
ב - סך התאונות החמורות	$y=0.005*x^{0.392}$.001
ג - תאונות עם נפגעים בימי חול-שעות יום	$y=2.413*x^{-0.735}$.007
ד - תאונות חמורות בימי חול-שעות יום	$y=0.005*x^{0.221}$.000

* x – האחוזון ה-85 של מהירויות הנסיעה בפועל; y – שיעור תאונות.

טבלה 6.5. המודלים הלא ליניאריים שהותאמה לקשר בין האחוזון ה-85 של מהירויות הנסיעה ושיעורי התאונות, עבור הקטעים עם המהירויות הנמוכות, לפי סוג תאונות

סוג תאונות	המודל*	R ²
א - סך התאונות עם נפגעים	$y=0.001*x^{1.199}$.024
ב - סך התאונות החמורות	$y=9.6E-10*x^{3.921}$.057
ג - תאונות עם נפגעים בימי חול-שעות יום	$y=0.001*x^{1.015}$.017
ד - תאונות חמורות בימי חול-שעות יום	$y=4.0E-12*x^{5.05}$.121

* x – האחוזון ה-85 של מהירויות הנסיעה בפועל; y – שיעור תאונות.

ד. סיכום

קבוצת הקטעים עם המהירויות הנמוכות מזהה עם שיעור גבוה יותר של סך התאונות עם נפגעים אך עם שיעור נמוך יותר של התאונות החמורות, לעומת קבוצת הקטעים עם המהירויות הגבוהות. כמו כן, בקבוצת הקטעים עם המהירויות הנמוכות נמצא קשר ישיר בין עליה במהירות הנסיעה לבין שיעורי התאונות, אשר היה גם חזק יותר בקרב התאונות החמורות.

מכאן, מניתוח נתוני התאונות בקטעי המחקר התקבלה עדות מסוימת לכך שמהירויות גבוהות יותר מזהות עם עליה בתאונות החמורות ולכן, יש מקום לפעול לשינוי מאפייני התשתית ליצירת שינוי במהירות. נראה כי יש מקום להצנעת מאפייני התשתית בקבוצת הקטעים עם המהירויות הגבוהות כדי להוריד את שיעור התאונות החמורות. מאידך, יש מקום לשיפור של מאפייני התשתית בקבוצת הקטעים עם המהירויות הנמוכות (ורמת תכן נמוכה), כדי לצמצם שיעור של סך התאונות עם נפגעים.

6.5. המלצות המחקר

המחקר הצביע על מאפייני התשתית אשר קשורים להורדת מהירויות הנסיעה בקטעי הדרכים החד-מסלוליות בארץ. מאפייני תשתית כאלה עשויים להועיל להשגת התאמה טובה בין מהירויות הנסיעה והמהירות המותרת, בסוג דרך זה, ובכך לתרום ליצירת דרכים חד-מסלוליות המסבירות את עצמן. מאפייני תשתית אלה הם:

* רוחב שול ורוחב אזור המפלט בצד הדרך, כאשר ערכים נמוכים יותר של מאפיינים אלה מזהים עם ירידה במהירות;

* צפיפות צמתים לאורך קטע, כאשר עליה במדד זה מזהה עם ירידה במהירות;

* רדיוס אופקי ושיפוע לאורך, כאשר נוכחות גבוהה יותר של מאפיינים אלה לאורך קטע מזהה עם אפקט ממתן על המהירות.

כמו כן, השפעה חזקה יותר על מהירויות הנסיעה של הצרת שוליים, הקטנת אזור המפלט או צפיפות צמתים גבוהה יותר, תורגש יותר בקטעי דרך עם נפחי תנועה לא גבוהים.

בעקבות ניתוח מאפייני התשתית בפועל, יש לצפות כי בדרכים החד-מסלוליות בישראל, מהירויות נסיעה נמוכות יותר - בהתאם למהירות המותרת, יהיו בקטעים המזוהים עם המאפיינים הבאים:

- צפיפות צמתים ניכרת, כאשר הגישות המשניות מהוות כ-20% מאורך קטע;
- רוחב שול צר, כ-1.3 מ', בממוצע;
- עקמומיות אופקית ניכרת, כאשר העקומים האופקיים (עם רדיוס עד 400 מ') מהווים כשליש מאורך קטע;
- נוכחות ניכרת של שיפועים אורכיים, כאשר שיפוע אורכי (מעל 3%) מהווה כ-40% מאורך קטע;
- נוכחות ניכרת של מעקות הבטיחות בצדי הדרך, כאשר המעקות מותקנים בכ-60% מאורך קטע;
- מיקום המעקות בקרבת המיסעה, כאשר המעקות אמורים להימצא בתחום עד 2 מ' מקצה הנתב;
- במקרה ללא המעקות המותקנים בצד הדרך, קיום אזור מפלט צר יחסית, ברוחב עד 3 מ'.

את האומדנים הללו של מאפייני התשתית מומלץ לקחת בחשבון כאשר שוקלים ליצור הצרה ויזואלית ו/או הפרעה לרצף הנסיעה בקטע כביש, על מנת להוריד את מהירויות הנסיעה בפועל.

המחקר מצא עדויות לכך שקטעי הדרכים החד-מסלוליות עם מהירויות גבוהות יותר מזוהות עם עליה בתאונות החמורות לעומת הקטעים עם המהירויות הנמוכות, כאשר בקבוצת הקטעים עם המהירויות הנמוכות נמצא קשר ישיר בין עליה במהירויות הנסיעה לבין שיעורי התאונות, אשר היה גם חזק יותר בקרב התאונות החמורות. מכאן, יש מקום לביצוע שינויים במאפייני התשתית כדי ליצור שינוי במהירות אשר יתרום גם לשיפור בטיחותם של קטעי הכבישים.

מאפייני הדרכים המבטיחים ביותר מבחינת פיתוח כלים המקדמים את הגישה של "דרכים המסבירות את עצמן", בדרכים החד-מסלוליות בארץ, הם רוחב שול, רוחב אזור המפלט בצדי הדרך, נוכחות מעקות הבטיחות בקרבת המיסעה, צפיפות הגישות המשניות לאורך קטע. הצרת שוליים, הצנעת אזור המפלט, קירוב מעקות לקצה המיסעה, גידול בגישות המשניות לאורך קטע יביאו להורדת מהירויות הנסיעה בקטע ולשיפור בטיחותו.

בנוסף, לשיפור רמת הבטיחות של קטע דרך חד-מסלולית יש ליישם אמצעים למניעת תאונות חזית-חזית, כגון: פס הרעדה לאורך קו הפרדה האמצעי או התקנת מעקות הבטיחות במרכז הכביש. אמצעים אלה לא נבחנו במחקר הנוכחי אך, לפי הספרות המקצועית והניסיון המצטבר בתחום, הם הוכיחו את יעילותם לצמצום התאונות בדרכים החד-מסלוליות.

סוגי מאפייני התשתית שנמצאו במחקר זה כמשפיעים על מהירויות הנסיעה בדרכים החד-מסלוליות וערכיהם המזוהים עם מהירויות הנסיעה בהתאם למהירות המותרת, צריכים להילקח בחשבון ביצירת כלים הנדסיים ליישום המדיניות החדשה של קביעת המהירויות ברשת הדרכים בארץ, לפי ההנחיות (2010). כמו כן, יש מקום להתייחס לממצאי מחקר זה כאשר באים לבחון את דרישות ההנחיות

הקיימות לתכן הדרכים החד-מסלוליות בארץ, בהקשר ליצירת התאמה טובה יותר בין מהירויות הנסיעה ומהירויות היעוד, הן בכבישים החדשים והן בכבישים הקיימים המיועדים לשדרוג.

מראי מקום

1. בכור ש., מוריק ס., גיטלמן ו. (2012). הקמת בסיס מידע מרחבי לניתוח מהירויות ברמה ארצית. מרכז רן נאור לחקר הבטיחות בדרכים, הטכניון.
2. גיטלמן ו. (2009). הערכה בטיחותית של דרכים חד-מסלוליות לא עירוניות. מוגש לאור ירוק.
3. הנחיות לקביעת מהירויות ברשת הדרכים (2010). משרד התחבורה והבטיחות בדרכים - מנהל היבשה/ האגף לתכנון תחברתי.
4. הנחיות לתכן גיאומטרי של דרכים בין עירוניות צמתים ומחלפים (2012). חלק 1 תכן גיאומטרי של דרכים. משרד התחבורה, מע"צ, אמי מתום.
5. זילברשטיין ר., גיטלמן ו., ריגלר ד. (2009). בחינת תפיסת הנהגים של קטעי דרך טיפוסיים בדרכים הבינעירוניות בישראל. הוכן ע"י: חברת אמי מתום - מהנדסים ויועצים בע"מ עבור: מעצ - החברה הלאומית לדרכים בע"מ.
6. חביב-מטר ק. (2001). פיתוח מודלים לתכנון עקבי של כבישים, טכניון-מכון טכנולוגי לישראל.
7. פולוס א., קראוס י., ליבנה מ., שמואלי ס. (1997). פיתוח קריטריונים לתכנון אחיד ולהערכה אלטרנטיבית, דו"ח מחקר 97-254, המכון לחקר התחבורה, הטכניון.
8. Aarts L. and Van Schagen I.N.L.G. (2006). Driving speed and the risk of road crashes: a review, *Accident Analysis and Prevention*, 38(2), 215-224.
9. Anderberg, M.R. (1973). *Cluster Analysis for Applications*. Academic Press, New York.
10. Anderson I.B., Bauer K.M., Harwood D.W. and Fitzpatrick K. (1999). Relationship to safety of geometric design consistency measures for rural two-lane highways. TRR 1658, 43-51, Transportation Research Board, Washington D.C.
11. Breiman L., Friedman J., Olshen R. and Stone C. (1984). *Classification and regression trees*. Wadsworth and Brooks/Cole.
12. Campbell J. L., Richard C. M. and Graham J. (2008). *Human Factors Guidelines for Road Systems*. NCHRP REPORT 600. National Cooperative Highway Research Program.
13. Edquist J., Rudin-Brown C. M. and Lenne M. (2009). Road design factors and their interaction with speed and speed limits. Monash University, Accident Research Centre. Victoria, Australia.
14. Elliot M.A., Mccoll V.A. & Kennedy J.V. (2003). Road design measures to reduce drivers' speed via "psychological" processes: A literature review. Report No. TRL564, Transport Research Laboratory.
15. Elvik R. (2011). Assessing causality in multivariate accident models. *Accident Analysis and Prevention* 43(2011), 253-264.
16. EC (2001). *White Paper: European Transport Policy for 2001: Time to Decide*. Office for Official Publications of the European Commission, Luxembourg.
17. Everitt, B.S., Landau, S., & Leese, M. (2001). *Cluster Analysis*. Arnold Publishers, London, 4th edition.
18. Fitzpatrick K., Carlson P., Brewer M.A. et al (2003). Design speed, operating speed, and posted speed practices. NCHRP report 504, Transportation Research Board.
19. Fitzpatrick K., Miaou S.-P., Brewer M. et al (2005). Exploration of the relationship between operating speed and roadway features on tangent sections. *Journal of Transportation Engineering*, 131(4), 261-269.
20. Hastie T., Tibshirani R. and Friedman J. (2009). *The elements of statistical learning*. Springer.

21. Ivan J.N., Garrick N.W. and Hanson G. (2009). Designing roads that guide drivers to choose safer speeds. Joint Highway Research Advisory Council (JHRAC) of the University of Connecticut and the Connecticut Department of Transportation. Report No. JHR 09-321.
22. Johnson, R.A. & Wichern, D.W. (2002). Applied multivariate statistical analysis. New Jersey: Pearson Education.
23. Lamm R., Choueiri E., Psarianos B., Soilemezoglou G. (1995). A Practical Safety Approach to Highway Geometric Design: International Case Studies: Germany, Greece, Lebanon, and the United States. International Symposium on Highway Geometric Design Practices, Massachusetts.
24. Lamm R., Psarianos B., Mailaender T. (1999). Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook, Mc-Graw Hill.
25. Lynam D. and Hummel T. (2002). The effect of speed on road deaths and injuries: literature review. TRL Limited Unpublished Project Report PR SE/627/02, Vägverket TR80 2002:15779.
26. Myers R.H., Montgomery D.C., Vining G.G., Robinson T.J. (2010). Generalized Linear Models with Applications in Engineering and the Sciences, Second Edition, Wiley.
27. Mazet C., Dubois D. and Fleury D. (1987). Categorisation et interpretation de scenes visuelles: le cas de l'environnement urbain et routier, in Psychologie Francaise, numero special sur l'environnement, 85-96.
28. Misaghi P. & Hassan M. (2005). Modeling Operating Speed and Speed Differential on Two-Lane Rural Roads, Journal of transportation engineering, 131(6), pp. 408-417.
29. NCHRP Report 500 (2009). Guidance for Implementation of the AASHTO Strategic Highway Safety plan. Volume 23: A Guide for Reducing Speeding-related Crashes. National Cooperative Highway Research Program.
30. NCHRP Report 600 (2012). Human Factors Guidelines for Road Systems, 2nd edition. National Cooperative Highway Research Program.
31. OECD (2006). Speed management. Organization for Economic Co-operation and Development, European Conference of Ministers of Transport.
32. PIARC (2012). Human Factors in Road Design: Review of Design Standards in Nine Countries. Technical Committee C1 Safer Road Infrastructure. Report 2012R36EN. <http://www.piarc.org>.
33. Polus A., Pollatschek M. and Mattar-Habib C. (2005). An Enhanced Integrated Design-Consistency Model for both Mountainous Highways and Its Relationship to Safety, Road and Transportation Research 14(4), pp. 13-26.
34. Salvatore S. (1967). Vehicle speed estimation from visual stimuli, Public Roads, 34 (6), 128-131.
35. Shinar D. (1998). Speed and Crashes: a controversial topic and an elusive relationship. In Special Report 254: Managing Speed, TRB, Washington DC.
36. Solomon D. (1964). Accidents on main rural highways related to speed, driver and vehicle. Washington: US Government Printing Office.
37. SPACE (2009). Speed Adaption Control by Self-Explaining Roads (SPACE). Final Report.
38. SPSS (2007). SPSS Statistics Base. 17.0 User's Guide. <http://www.spss.com>.
39. SWOV (2007a). Recognizable road design. SWOV fact sheet, May 2007.
40. SWOV (2007b). Background of the five sustainable safety principles. SWOV fact sheet, October 2007.
41. Stelling-Konczak A., Aarts L., Duivendoorn K. and Goldenbeld C. (2011). Supporting drivers in forming expectation about transition between rural road categories. Accident Analysis and Prevention 43, 101-111.

42. TAC (1999). Geometric Design Guide for Canadian Roads. Transportation Association of Canada, Ottawa.
43. Theeuwes J. and Godthelp H. (1995). Self-explaining roads: how people categorize roads outside the built-up area, Road Safety in Europe and Strategic Highway Research Program Conference, Lille, France.
44. Theeuwes J., Van Der Horst R. and Kuiken M. (2012). Designing Safe Road System. A Human Factors Perspective. ASHGATE.
45. Therneau T.M., Atkinson E.J. (2013). An Introduction to Recursive Partitioning Using the RPART Routines.
46. Tranzit (2003). State Highway Geometric Design Manual, Tranzit New Zealand, Wellington.
47. Wegman F.C.M. and Aarts L.T. (Eds) (2006). Advancing sustainable safety: national road safety outlook for 2005-2006. SWOV, The Netherlands.
48. Weller G., Schlag B., Friedel T., Rammin C. (2008). Behaviourally relevant road categorisation: A step towards self-explaining rural roads. Accident Analysis and Prevention 40, 1581-1588.

נספח א': רשימת מאפייני התשתית שנבחנו במחקר

Name	מדד תשתית שהופק	מאפיין תשתית נבחן
madad_zfifut_zmatim	מדד צפיפות צמתים	כללי
rohav_nativ_avr_min	1 אומדן מינימלי, מ'	רוחב נתיב
rohav_nativ_avr_mean	1 אומדן ממוצע, מ'	רוחב נתיב
rohav_nativ_avr_max	1 אומדן מרבי, מ'	רוחב נתיב
rohav_nativ0_3_3	2 אחוז מקרים ברוחב עד 3.3 מטר	רוחב נתיב
rohav_nativ3_3_3_5	2 אחוז ברוחב בין 3.3 ל 3.5	רוחב נתיב
rohav_nativ3_5_3_6	2 אחוז ברוחב בין 3.5 עד 3.6	רוחב נתיב
rohav_nativ3_6_more	2 אחוז ברוחב 3.6 ויותר	רוחב נתיב
rohav_shul_avr_min	1 אומדן מינימלי, מ'	רוחב שול
rohav_shul_avr_mean	1 אומדן ממוצע, מ'	רוחב שול
rohav_shul_avr_max	1 אומדן מרבי, מ'	רוחב שול
rohav_shul_avr0_2	2 אחוז מקרים עם רוחב שול עד 2 מ'	רוחב שול
rohav_shul_avr2_2_5	2 אחוז מקרים עם רוחב שול בין 2 ל 2.5	רוחב שול
rohav_shul_avr2_5_3	2 אחוז מקרים עם רוחב שול מ 2.5 ל 3	רוחב שול
rohav_shul_avr3_more	2 אחוז מקרים עם רוחב שול מעל 3 מ'	רוחב שול
minimum_ofki_plt	אינדיקטור קיום: אחוז מאורך קטע עם רדיוס קטן מ 400 מ'	רדיוס אופקי
minimum_ofki_min	1 אומדן מינימלי - רדיוס אופקי, מ'	רדיוס אופקי
minimum_ofki_mean	1 אומדן ממוצע - רדיוס אופקי, מ'	רדיוס אופקי
minimum_ofki_max	1 אומדן מרבי - רדיוס אופקי, מ'	רדיוס אופקי
ofki_ad_100	2 אחוז מקרים עם רדיוס אופקי עד 100 מ'	רדיוס אופקי
ofki100_200	2 אחוז מקרים עם רדיוס אופקי בין 100-200	רדיוס אופקי
ofki200_300	2 אחוז מקרים עם רדיוס אופקי בין 200-300	רדיוס אופקי
ofki300_more	2 אחוז מקרים עם רדיוס אופקי מעל 300 מ'	רדיוס אופקי
minimum_anahi_pin	אינדיקטור קיום: אחוז מאורך קטע עם רדיוס אנכי קמור עד 6500 מ'	עקום אנכי קמור
minimum_anahi_min	1 אומדן מינימלי - רדיוס אנכי קמור, מ'	עקום אנכי קמור
minimum_anahi_mean	1 אומדן ממוצע - רדיוס אנכי קמור, מ'	עקום אנכי קמור
minimum_anahi_max	1 אומדן מרבי - רדיוס אנכי קמור, מ'	עקום אנכי קמור
anahi_ad_1400	2 אחוז מקרים עם רדיוס אנכי קמור עד 1400 מ'	עקום אנכי קמור
anahi1400_2500	2 אחוז מקרים עם רדיוס אנכי קמור בין 1400 עד 2500	עקום אנכי קמור
anahi2500_4000	2 אחוז מקרים עם רדיוס אנכי קמור בין 2500 עד 4000	עקום אנכי קמור
anahi4000_more	2 אחוז מקרים עם רדיוס אנכי קמור מעל 4000 מ'	עקום אנכי קמור
minimum_ak_anahi_pin	אינדיקטור קיום: אחוז מאורך קטע עם רדיוס אנכי קעור עד 4000 מטר	עקום אנכי קעור
minimum_ak_anahi_min	1 אומדן מינימלי - רדיוס אנכי קעור, מ'	עקום אנכי קעור
minimum_ak_anahi_mean	1 אומדן ממוצע - רדיוס אנכי קעור, מ'	עקום אנכי קעור
minimum_ak_anahi_max	1 אומדן מרבי - רדיוס אנכי קעור, מ'	עקום אנכי קעור
ak_anahi_ad_1500	2 אחוז מקרים עם רדיוס אנכי קעור עד 1500 מ'	עקום אנכי קעור
ak_anahi1500_2200	2 אחוז מקרים עם רדיוס אנכי קעור 1500-2200 מ'	עקום אנכי קעור
ak_anahi2200_2800	2 אחוז מקרים עם רדיוס אנכי קעור 2200-2800	עקום אנכי קעור
ak_anahi2800_more	2 אחוז מקרים עם רדיוס אנכי קעור מעל 2800 מ'	עקום אנכי קעור
shipor_avr_pgt	אינדיקטור קיום: אחוז מאורך קטע עם שיפוע לאורך גדול מ 3%	שיפוע לאורך
shipor_avr_min	1 אומדן מינימלי - שיפוע לאורך %	שיפוע לאורך
shipor_avr_mean	1 אומדן ממוצע - שיפוע לאורך %	שיפוע לאורך
shipor_avr_max	1 אומדן מרבי - שיפוע לאורך %	שיפוע לאורך
shipor_avr_ad_6	2 אחוז מקרים עם שיפוע לאורך עד 6%	שיפוע לאורך
shipor_avr6_8	2 אחוז מקרים עם שיפוע לאורך בין 6%-8%	שיפוע לאורך
shipor_avr8_10	2 אחוז מקרים עם שיפוע לאורך בין 8% ל 10%	שיפוע לאורך
shipor_avr10more	2 אחוז מקרים עם שיפוע לאורך מעל 10%	שיפוע לאורך
bar_avl	אינדיקטור קיום: אחוז מאורך הקטע בו קיימים מעקות בצד הדרך	מצב צידי הדרך
bar_est_min	1 מצב מעקות - אומדן מינימלי	מצב צידי הדרך
bar_est_mean	1 מצב מעקות - אומדן ממוצע	מצב צידי הדרך
bar_est_max	1 מצב מעקות - אומדן מרבי	מצב צידי הדרך
no_bar_est_min	1 מצב צדי הדרך ללא מעקות - אומדן מינימלי	מצב צידי הדרך
no_bar_est_mean	1 מצב צדי הדרך ללא מעקות - אומדן ממוצע	מצב צידי הדרך
no_bar_est_max	1 מצב צדי הדרך ללא מעקות - אומדן מרבי	מצב צידי הדרך

נספח ב': מאפייני קבוצות הקטעים שזוהו בניתוח מהירויות התכן

גודל הקבוצות: (1) 27, (2) 25, (3) 50, (4) 31, (5) 45.

Cluster		MT_N ATIV_ AVR	MT_NA TIV_ STD	MT_NAT IV_ MIN	MT_NAT IV_ MAX	MT_SH UL_ AVR	MT_SH UL_ STD	MT_SH UL_ MIN	MT_SHU L_ MAX	MT_SHI P_ AVR	MT_SHI P_ STD	MT_SHI P_ MIN	MT_SHI P_ MAX	MT_OF KI_ AVR	MT_OF KI_ STD	MT_OF KI_ MIN	MT_OF KI_ MAX
1	Mean	62.0	9.2	50.7	80.0	53.4	4.3	50.0	65.2	85.5	8.3	59.6	90.0	84.1	10.6	53.7	90.0
	St.Dev.	5.3	1.7	2.7	.0	5.5	3.2	.0	11.2	4.2	3.8	11.6	.0	4.5	3.5	6.3	.0
	Median	60.6	9.1	50.0	80.0	52.1	4.3	50.0	60.0	87.0	7.4	50.0	90.0	85.7	10.9	50.0	90.0
	Min	54.1	6.5	50.0	80.0	50.0	.0	50.0	50.0	72.7	3.0	50.0	90.0	69.0	3.8	50.0	90.0
	Max	74.0	13.3	60.0	80.0	77.1	9.9	50.0	80.0	89.3	16.2	80.0	90.0	89.1	17.3	70.0	90.0
2	Mean	52.3	2.4	50.3	57.8	51.1	1.6	49.9	55.9	86.6	6.2	68.4	89.6	83.6	10.2	56.0	89.2
	St.Dev.	4.5	3.4	1.0	11.2	2.1	2.2	.5	8.0	4.0	4.7	14.3	2.0	6.5	4.1	9.1	4.0
	Median	50.0	.0	50.0	50.0	50.0	.0	50.0	50.0	88.3	5.8	70.0	90.0	86.0	9.8	50.0	90.0
	Min	50.0	.0	50.0	50.0	50.0	.0	47.6	50.0	75.0	.0	50.0	80.0	60.0	3.3	50.0	70.0
	Max	69.1	10.6	54.4	80.0	58.5	8.0	50.0	80.0	90.0	16.3	90.0	90.0	89.1	16.7	80.0	90.0
3	Mean	60.3	6.6	53.4	73.2	56.2	4.2	50.8	64.2	89.9	.2	89.2	90.0	88.9	3.6	74.4	90.0
	St.Dev.	6.1	2.9	4.8	7.7	7.5	3.1	3.4	10.5	.4	.8	3.4	.0	.9	2.3	10.9	.0
	Median	61.0	5.7	50.0	75.0	53.3	4.4	50.0	60.0	90.0	.0	90.0	90.0	89.0	3.9	80.0	90.0
	Min	50.6	3.1	50.0	60.0	50.0	.0	50.0	50.0	87.5	.0	70.0	90.0	86.3	.0	60.0	90.0
	Max	76.3	15.0	60.0	80.0	78.7	13.7	70.0	80.0	90.0	4.5	90.0	90.0	90.0	7.6	90.0	90.0
4	Mean	58.4	4.9	52.9	70.0	61.4	8.0	50.3	74.5	87.8	4.9	72.6	90.0	86.7	7.6	60.6	90.0
	St.Dev.	7.0	3.5	5.9	10.6	6.9	1.9	1.8	7.2	2.7	4.8	15.5	.0	2.5	3.6	9.6	.0
	Median	58.6	4.7	50.0	70.0	60.0	8.3	50.0	80.0	88.7	4.4	70.0	90.0	87.3	6.8	60.0	90.0
	Min	50.0	.0	50.0	50.0	52.3	4.3	50.0	60.0	80.9	.0	50.0	90.0	81.3	.0	50.0	90.0
	Max	77.8	12.0	70.0	80.0	75.5	11.3	60.0	80.0	90.0	14.4	90.0	90.0	90.0	15.1	90.0	90.0
5	Mean	66.4	8.2	54.9	78.7	63.5	8.3	52.0	76.2	89.6	1.2	85.1	90.0	87.7	5.7	69.1	90.0
	St.Dev.	4.7	2.0	5.5	4.0	7.1	2.4	4.6	6.5	1.3	2.8	11.0	.0	2.5	3.6	11.4	.0
	Median	67.8	8.1	50.0	80.0	63.8	8.1	50.0	80.0	90.0	.0	90.0	90.0	88.2	5.8	70.0	90.0
	Min	53.0	4.4	50.0	60.0	52.9	4.8	50.0	60.0	82.7	.0	50.0	90.0	78.2	.0	50.0	90.0
	Max	77.8	13.0	70.0	80.0	76.8	12.6	70.0	80.0	90.0	11.9	90.0	90.0	90.0	14.7	90.0	90.0

Cluster		efresh_M_t_N0_9	efresh_m_t_N10_19	efresh_m_t_N20_more	efresh_M_T_ship0_9	efresh_M_T_ship10_19	efresh_M_T_s_hip20_more	efresh_M_T_R0_9	efresh_M_T_R10_19	efresh_M_T_R20_more	efresh_M_t_s0_9	efresh_m_t_s10_19	efresh_m_t_s20_more
1	Mean	56.9	30.7	12.5	89.0	9.7	1.3	81.6	11.9	6.5	83.1	13.4	3.5
	St.Dev.	13.7	10.6	8.4	7.3	8.2	2.5	10.8	9.1	5.6	12.5	10.9	5.5
	Median	58.2	27.8	11.4	91.2	8.0	.0	83.3	10.0	4.8	81.8	13.3	1.7
	Min	27.3	9.8	.0	71.4	.0	.0	50.0	.0	1.3	60.0	.0	.0
	Max	78.0	50.0	36.4	97.5	28.6	10.0	94.9	40.0	22.2	100.0	36.0	26.7
	N	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
2	Mean	97.2	2.4	.4	90.4	7.9	1.7	83.0	9.5	7.4	95.0	4.9	.1
	St.Dev.	5.4	5.2	1.3	10.0	10.2	3.0	10.4	7.6	10.3	7.9	7.8	.3
	Median	100.0	.0	.0	92.3	5.0	.0	86.7	9.3	4.2	100.0	.0	.0
	Min	83.3	.0	.0	50.0	.0	.0	50.0	.0	.0	77.8	.0	.0
	Max	100.0	16.7	6.3	100.0	50.0	10.0	95.7	30.8	50.0	100.0	22.2	1.7
	N	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
3	Mean	73.1	22.2	4.8	99.7	.2	.0	91.7	6.1	2.2	84.5	13.1	2.3
	St.Dev.	11.9	11.6	7.9	1.3	1.3	.2	7.2	7.4	3.3	11.7	10.1	4.2
	Median	75.0	20.7	.0	100.0	.0	.0	93.0	4.9	.0	80.5	13.1	.0
	Min	47.6	.0	.0	91.7	.0	.0	66.7	.0	.0	66.7	.0	.0
	Max	97.1	45.5	33.3	100.0	8.3	1.7	100.0	33.3	11.1	100.0	33.3	16.7
	N	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
4	Mean	81.4	15.0	3.6	95.1	3.6	1.2	88.9	7.0	4.0	51.2	37.6	11.2
	St.Dev.	13.4	10.5	6.9	4.9	3.9	2.8	7.6	5.3	3.8	11.2	12.9	9.4
	Median	78.0	17.1	.0	95.9	2.6	.0	90.4	7.5	2.6	50.0	37.5	10.7
	Min	55.6	.0	.0	82.4	.0	.0	62.5	.0	.0	27.0	13.9	.0
	Max	100.0	28.6	33.3	100.0	11.8	12.5	100.0	25.0	15.4	70.4	66.7	38.9
	N	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
5	Mean	54.6	34.6	10.8	98.9	1.0	.1	88.9	5.4	5.7	49.2	35.0	15.8
	St.Dev.	9.6	10.6	9.9	2.5	2.4	.6	9.5	6.6	8.4	14.4	13.7	15.3
	Median	55.0	33.3	10.5	100.0	.0	.0	90.9	3.7	3.0	48.5	35.7	12.5
	Min	32.4	13.3	.0	87.9	.0	.0	50.0	.0	.0	16.7	.0	.0
	Max	74.2	60.0	34.6	100.0	12.1	3.7	100.0	28.6	50.0	75.0	77.8	54.2
	N	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45

נספח ג'. מדדים סטטיסטיים של מאפייני התשתית בקבוצות קטעים עם

מהירויות גבוהות ונמוכות

א – מאפייני תשתית בקטעים עם מהירויות נמוכות (חריגת מהירות שלילית), סה"כ: 32 קטעים.

Road characteristic	Mean	Median	Std. Deviation	Minimum	Maximum	CV*
madad_zfifut_zmatim	0.20	0.16	0.17	0.0	0.77	0.82
rohav_nativ_avr_mean	3.3	3.4	0.3	2.6	3.6	0.08
rohav_nativ0_3_3	30.8	18.1	28.9	0.0	96.7	0.94
rohav_nativ3_3_3_5	31.8	31.7	18.5	2.3	91.7	0.58
rohav_nativ3_5_3_6	12.8	12.9	10.0	0.0	29.2	0.78
rohav_nativ3_6_more	21.7	21.7	13.8	0.0	51.7	0.63
rohav_shul_avr_mean	1.3	1.2	0.6	0.4	2.4	0.43
rohav_shul_avr0_2	75.2	85.4	27.0	0.0	100.0	0.36
rohav_shul_avr2_2_5	15.2	8.3	17.9	0.0	66.7	1.17
rohav_shul_avr2_5_3	5.8	1.5	9.3	0.0	33.3	1.60
rohav_shul_avr3_more	3.8	0.0	6.6	0.0	23.5	1.74
minimum_ofki_plt	34.0	32.9	22.3	0.0	100.0	0.65
minimum_ofki_mean	244	229	83	98	500	0.34
ofki_ad_100	9.1	0.0	12.9	0.0	50.0	1.41
ofki100_200	22.9	23.1	17.1	0.0	53.3	0.75
ofki200_300	26.3	25.7	21.7	0.0	100.0	0.83
ofki300_more	38.5	25.4	31.9	0.0	100.0	0.83
minimum_anahi_pin	82.2	83.7	11.0	57.1	100.0	0.13
minimum_anahi_mean	2014	1943	767	871	4046	0.38
anahi_ad_1400	39.4	38.6	16.5	0.0	71.2	0.42
anahi1400_2500	20.9	19.6	9.5	0.0	50.0	0.45
anahi2500_4000	19.2	17.7	10.5	7.1	54.5	0.55
anahi4000_more	20.5	19.7	14.2	0.0	53.3	0.69
minimum_ak_anahi_pin	66.0	66.3	17.4	28.6	100.0	0.26
minimum_ak_anahi_mean	1915	1872	505	1196	2836	0.26
ak_anahi_ad_1500	51.4	50.0	17.4	0.0	83.3	0.34
ak_anahi1500_2200	16.9	16.7	8.4	0.0	35.0	0.49
ak_anahi2200_2800	11.5	11.3	7.8	0.0	33.3	0.68
ak_anahi2800_more	20.2	18.9	12.0	0.0	50.0	0.60
shipor_avr_pgt	43.3	45.0	31.9	0.0	100.0	0.74
shipor_avr_mean	4.2	4.6	2.3	0.0	7.5	0.55
shipor_avr_ad_6	52.4	57.6	35.8	0.0	100.0	0.68
shipor_avr6_8	20.8	18.3	21.3	0.0	83.3	1.02
shipor_avr8_10	6.7	0.0	10.7	0.0	41.2	1.59
shipor_avr10more	1.1	0.0	3.7	0.0	20.2	3.21
bar_avl	0.61	0.61	0.22	0.21	1.0	0.36
bar_est_mean	2.04	2.00	0.60	1.00	3.2	0.29
no_bar_est_mean	1.00	1.00	0.44	0.00	3.0	0.44

* CV – coefficient of variation, CV =standard error of estimate/expected estimate

ב – מאפייני תשתית בקטעים עם מהירויות גבוהות (חריגה של 20 קמ"ש או יותר), סה"כ: 23

קטעים.

Road characteristic	Mean	Median	Std. Deviation	Minimum	Maximum	CV
madad_zfifut_zmatim	0.01	0.00	0.02	0.00	0.10	3.02
rohav_nativ_avr_mean	3.3	3.4	0.2	2.7	3.6	0.06
rohav_nativ0_3_3	30.5	8.4	35.1	0.0	100.0	1.15
rohav_nativ3_3_3_5	42.2	34.5	30.4	0.0	96.7	0.72
rohav_nativ3_5_3_6	16.3	11.0	18.3	0.0	72.3	1.12
rohav_nativ3_6_more	10.2	3.3	18.2	0.0	76.9	1.79
rohav_shul_avr_mean	2.6	2.6	0.7	1.2	4.0	0.26
rohav_shul_avr0_2	26.0	10.2	29.3	0.0	100.0	1.12
rohav_shul_avr2_2_5	26.7	20.2	23.8	0.0	90.0	0.89
rohav_shul_avr2_5_3	16.5	14.7	13.3	0.0	39.7	0.80
rohav_shul_avr3_more	30.7	24.1	29.7	0.0	83.3	0.97
minimum_ofki_plt	7.1	7.0	4.1	0.0	16.0	0.58
minimum_ofki_mean	274	253	81	180	500	0.30
ofki_ad_100	1.2	0.0	4.1	0.0	16.7	3.38
ofki100_200	23.3	25.0	17.0	0.0	55.6	0.73
ofki200_300	29.7	25.0	27.3	0.0	100.0	0.92
ofki300_more	37.1	30.0	26.9	0.0	100.0	0.73
minimum_anahi_pin	90.6	91.8	5.6	74.7	100.0	0.06
minimum_anahi_mean	1434	1424	416	69	2288	0.29
anahi_ad_1400	51.5	49.0	14.2	30.4	98.9	0.28
anahi1400_2500	22.3	24.1	7.6	1.1	40.9	0.34
anahi2500_4000	14.2	13.8	5.8	0.0	24.1	0.41
anahi4000_more	12.0	11.5	6.4	0.0	30.4	0.53
minimum_ak_anahi_pin	79.9	80.2	8.7	61.5	100.0	0.11
minimum_ak_anahi_mean	1472	1447	408	69	2126	0.28
ak_anahi_ad_1500	61.1	60.0	12.3	43.8	99.4	0.20
ak_anahi1500_2200	16.2	16.0	6.7	0.0	26.5	0.41
ak_anahi2200_2800	11.1	11.1	4.8	0.0	23.8	0.43
ak_anahi2800_more	11.6	11.4	5.4	0.0	22.1	0.46
shipor_avr_pgt	11.1	4.3	15.0	0.0	53.4	1.35
shipor_avr_mean	3.4	3.6	1.5	0.0	5.7	0.45
shipor_avr_ad_6	82.8	100.0	34.8	0.0	100.0	0.42
shipor_avr6_8	4.2	0.0	11.8	0.0	48.4	2.83
shipor_avr8_10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	--
shipor_avr10more	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	--
bar_avl	0.29	0.29	0.15	0.03	0.65	0.52
bar_est_mean	2.89	3.00	0.36	2.13	3.85	0.12
no_bar_est_mean	1.90	1.75	0.64	1.00	3.94	0.34