



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

היבטי בטיחות ותנועה של האות הצהוב-אדום ברמזורים

פרופ' דוד מהלאל

מר סמי אדרי

במימון קרן מחקרים בענייני ביטוח ליד אגוד חברות הביטוח בישראל

יוני 2011, חיפה

דו"ח מחקר מס' S/23/2011

דו"ח זה משקף את דעות המחברים והמלצותיהם, ואיננו משקף בהכרח את דעותיהם של הטכניון ושל מוסד הטכניון למחקר ופיתוח.

מוסד הטכניון למחקר ופיתוח בע"מ אינו אחראי לדיוק הנתונים הכלולים בדו"ח ולמסקנותיו, ואין הדו"ח מהווה הנחיה או המלצה שלו.

תוכן הדו"ח אינו בהכרח משקף את דעותיהם של הגופים הרשמיים והרשויות המוסמכות האחראים לנושא, ואין הדו"ח מהווה תקן, הנחיה או נוהל מחייבים של אותם גופים ורשויות.

כל הזכויות שמורות למחברים ולמוסד הטכניון למחקר ופיתוח

תקציר

בישראל, כמו גם במספר מדינות נוספות בעולם, הרכב האורות במערכת הרמזורים כולל את האות האדום-צהוב אשר נועד להעביר מסר לנהגים כי האור האדום עתיד להתחלף, ועליהם להתכונן לתחילת נסיעה. זאת, במטרה להגדיל את זרימת הרוויה בגישה לצומת באמצעות צמצום הפסד זמן הזינוק. אות זה של הרמזור אינו קיים בהרבה מדינות העולם (למשל, ארה"ב). בחלק גדול מהמדינות בהן קיים האות האדום-צהוב הוא נמשך רק שניה אחת. משכו של האות בישראל הוא שתי שניות ומהווה חלק בלתי נפרד מהזמן הבין-ירוקים. הזמן הבין ירוקים נועד לאפשר את פינוי הצומת עם סיום הפאזה ברמזור. ניתן לומר כי מידת ההפחתה בתאונות חזית צד בצמתים מרומזרים תלויה בחישוב הזמן הבין ירוקים. תאונות מסוג זה מהוות שיעור משמעותי מכלל התאונות בצמתים מרומזרים. מתצפיות במחקר זה היה ניתן לראות כי פעמים רבות הנהג מקדים את כניסתו לצומת טרם סיום הזמן בין-ירוקים במהלך האות האדום-צהוב. יתכן כי הגורמים להתנהגות זו הם: היכרות הנהג עם אופן פעולת הרמזור, שיפורים טכנולוגיים בתאוצת כלי הרכב והפרשנות אותה הנהג נותן לאות האדום-צהוב ביחס לאור האדום.

מחקר זה בא לבחון את מידת הניצול של האות האדום-צהוב לנסיעה ולכניסה מוקדמת לצומת, והאם קיים הבדל בין מכוניות לבין כלי-רכב דו-גלגליים. בנוסף, המחקר בוחן את השפעת האות בהפחתת הפסד זמן הזינוק. בשלב הראשון, נערכה סקירת ספרות והשוואה בין שיטות שונות לחישוב זמן הבין ירוקים והרכבי האורות בצומת המרומזר. בשלב השני נערכו צילומי וידאו של תגובת נהגי כלי-מכוניות, אופנועים מוקטנועים לאות האדום-צהוב, במספר צמתים מרומזרים בערים חיפה ותל-אביב. בשלב השלישי נערך ניתוח אמפירי ואנליטי של התנהגות הנהגים ברגע הופעת האות האדום-צהוב ובמהלכו.

מניתוח תוצאות המחקר עולה כי שיעור ניכר מהנהגים מנצל את האור האדום-צהוב לנסיעה ומתחיל את תנועתו בזמן הופעת האדום-צהוב. בנוסף, שיעור קטן יותר אף חוצה את קו העצירה בזמן האדום-צהוב. רוכבי אופנועים חוצים את קו העצירה במהלך המופע האדום או מיד עם הופעת האדום-צהוב. נמצא כי הפסד זמן הזינוק של כלי הרכב בשיירה הוא כ-0.5 שניות ולמעשה ניתן לומר שלא קיים הפסד זמן הזינוק המקובל בספרות.

מסקנת המחקר היא כי משמעות ניצול האות האדום-צהוב לנסיעה על ידי הנהגים היא קיצור אפקטיבי של הזמן הבין ירוקים. נוכח העובדה שקיצור הזמן הבין ירוקים האפקטיבי מעלה את הסיכוי לתאונות מסוג חזית צד, במיוחד לגבי אופנועים, יש לשקול את קיצור משך האות הצהוב-אדום לשניה אחת או אף לבטלו כליל. המלצת המחקר אינה מתייחסת למשך הזמן הבין ירוקים ולכן, שינוי משך האות הצהוב-אדום צריך להעשות תוך שמירה על משך הזמן הבין ירוקים המחושב.

תוכן עניינים

3.....	תקציר
7.....	1. מבוא
9.....	2. סקר ספרות
9.....	2.1 כללי
14.....	2.2 קיום האור האדום-צהוב בעולם
14.....	2.2.1 אירופה
15.....	2.2.2 ארה"ב וקנדה
15.....	2.2.3 אוסטרליה וניו-זילנד
15.....	2.3 זמן בין-ירוקים
16.....	2.3.1 אופן חישוב הזמן בין-ירוקים בישראל ובמדינות אחרות
23.....	2.3.2 בטיחות ותאונות דרכים בצמתים מרומזרים
26.....	2.3.3 זמן בין-ירוקים והקשר לתאונות דרכים
27.....	2.4 התנהגות הנהגים בתחילת האדום-צהוב
27.....	2.4.1 התנהגות סתגלנית
28.....	2.4.2 זמן תגובה
29.....	2.4.3 הפסד זמן הזינוק בגישה לצומת
33.....	2.5 סיכום
34.....	3. מתודולוגיה

34.....	3.1 מבוא
35.....	3.2.1 כללי
35.....	3.2.2 סרטי הווידאו
37.....	3.2.3 מאפייני הצמתים הנחקרים
40.....	3.3 עיבוד הנתונים וניתוחם
44.....	4. ממצאי תצפיות השדה
44.....	4.1 כללי
45.....	4.2 מיקום כלי הרכב ביחס לקו העצירה
47.....	4.3 תזמון תחילת התנועה של כלי הרכב הראשונים בתור
53.....	4.4 חציית קו העצירה של כלי הרכב הראשונים בתור בתחילת הפאזה
59.....	4.5 הפסד זמן הזינוק
60.....	4.6 זרימת הרוויה
63.....	5.1 מסקנות
64.....	5.2 דיון
67.....	נספחים
67.....	נספח א'
69.....	רשימת מקורות

1. מבוא

הרמזור נועד להפריד בזמן תנועות נוגדות בצמתים עמוסים. הפרדת התנועות מבוצעת באמצעות אותות שונים הניתנים לתנועות מנוגדות. לצורך חילופי האורות מוגדרים מרווחי זמן בין המופעים, הנקראים זמן בין-ירוקים שנועדו לפנות את הצומת ולמנוע מפגש תנועות מנוגדות. הרמזור נתפס כאמצעי בטיחותי התלוי בציות הנהג להוראות חוקי התעבורה. כאשר נהגים המתקרבים לצומת אינם מצייתים לתקנות או מחליטים החלטות לא נכונות גדלה ההסתברות להתנגשות בין כלי-רכב מצטלבים ובין משתמשי דרך אחרים (הולכי רגל ורוכבי אופניים).

בישראל, התאונות השכיחות ביותר בצמתים מרומזרים הן תאונות מסוג חזית-צד - בשנת 2010 הגיע שיעור התאונות מסוג זה לכ- 72% מסך כל התאונות אשר כללו נפגעים בצמתים מרומזרים (הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, 2011). הגורמים להתרחשותן של תאונות מסוג זה הם רבים, אך הגורם המשמעותי והעיקרי מביניהן הוא כניסה לצומת במהלך האות האדום או כניסה מוקדמת לצומת טרם הופעת האור הירוק.

מרווח הזמן בין-ירוקים בתוכנית הרמזור נועד להבטיח את פינוי הצומת לאחר סיום פאזה, לקראת כניסה של כלי-רכב מפאזה עוקבת. למשך פרקי הזמן הבין-ירוקים ישנה השלכה על ההסתברות להתרחשות תאונות דרכים בצמתים מרומזרים. כאשר פרק זמן זה קצר מדי או מנוצל לתנועה לא מתוכננת עלולה לקרות תאונת דרכים.

בצמתים מרומזרים בישראל, האות האדום-צהוב הינו חלק בלתי נפרד מהזמן בין-ירוקים ומצביע על הופעת האות הירוק. המשמעות הפורמלית של האות הצהוב-אדום זהה לזאת של האור האדום. בשני המקרים אין לחצות את קו העצירה ולנוע לצומת. מטרת האות הצהוב-אדום היא להודיע לנהגים כי האור האדום עומד להתחלף, ועליהם להתכונן לתחילת נסיעה. האות הצהוב-אדום נוצר בזמנים בהם זמני הזינוק של כלי הרכב היו ארוכים והיה רצון למנוע את אובדן הזמן הכרוך בכך.

ההנחיות לחישוב זמן הבין ירוקים נועדו, בין השאר, לצמצם את הפסד זמן הזינוק של המכונות הראשונות בתור ובתוך כך, להגדיל את משך הזמן שבו מתקיימת זרימת הרוויה בגישה לצומת. יחד עם זאת, פעמים רבות הנהג מקדים את כניסתו לתחום הצומת טרם סיום הזמן בין-ירוקים במהלך האות האדום-צהוב, וכתוצאה מכך, מגדיל את ההסתברות להתרחשות תאונות בצומת. לתופעה זו מספר גורמים כגון: היכרותו של הנהג את אופן פעולת הרמזור, הפרשנות שהוא נותן לאות האדום-צהוב ביחס למופע האדום ושיפורים טכנולוגיים בתאוצת כלי הרכב.

עפ"י ההנחיות בישראל, האות האדום-צהוב הינו חלק בלתי נפרד מתכנית הרמזור. לעומת זאת, ברוב מדינות העולם וביניהם ארצות-הברית, רוב מדינות אירופה ואוסטרליה, הוא אינו קיים. במדינות בהן הוא קיים, משתנה פרק הזמן של האות ממדינה למדינה (בין שנייה אחת לשלוש שניות). בישראל משכו של האות קבוע ושווה לשתי שניות.

המוטיבציה למחקר

מפאת מספרן המועט של מדינות בהן קיים האות האדום-צהוב בתוכנית הרמזור, סוגיית השפעתו על אופן התנהגותו של הנהג בתחילת הפאזה לא נחקרה דיה. המחקר המקיף ביותר עד היום נעשה בשנת 2005 בבריטניה (Maxwell & York, 2005). בישראל, דנציגר (2004) ערך מחקר על שיטות שונות לחישוב הזמן הבין ירוקים ואת הקשר לתזמון תחילת התנועה של הנהג עם הופעת האור האדום-צהוב. עד כה לא נערך בישראל מחקר הבודק אמפירית את שיעור הנהגים הנכנסים לצומת בזמן האדום-צהוב.

מטרות המחקר

כאמור לעיל, האות האדום-צהוב לא נועד להתיר כניסה לצומת, אלא רק "להכין" את הנהג לקראת הופעת האור הירוק. כניסה לצומת במהלך האות האדום-צהוב מקצרת את מרווח הביטחון בין פאזות עוקבות ויוצרת סיכונים. מטרת המחקר היא לבחון האם האות האדום-צהוב מנוצל בפועל לנסיעה ולכניסה מוקדמת לצומת והאם קיים הבדל בין מכונות לבין כלי-רכב דו-גלגליים בסוגיה זו.

בנוסף, על מנת לבחון יתרון אפשרי של ניצול טוב יותר של האות הצהוב-אדום, נאמדה זרימת הרוויה והשוותה למקובל בעולם בספרות.

המחקר כולל ארבעה פרקים עיקריים: בפרק 2 תסקר הספרות הבין לאומית הכוללת ממצאי מחקרים קודמים בנושא הנדון. בפרק 3 תוצג המתודולוגיה לביצוע המחקר באמצעות צילומי ווידאו של תגובת נהגי מכוניות ורכב דו-גלגליים לאור האדום-צהוב. בפרק 4 יוצגו ממצאים מתצפיות שדה ובהמשך יוצג ניתוחם. בפרק 5 יערך דיון בממצאים ובמסקנות העולות מהן.

2. סקר ספרות

2.1 כללי

הייעוד של רמזור בצומת הינו הפרדה בזמן בין תנועות מנוגדות של כלי רכב בצומת. הרכב הפאזות בצומת מרומזר נועד, בין היתר, להפחית ככל שניתן את הסכנות הפוטנציאליות כתוצאה מקונפליקטים בין תנועות כלי רכב והולכי רגל, ולאפשר זרימה יעילה של התנועה בצומת (Papacostas & Prevedouros, 2001).

זמן הבין ירוקים מוגדר כפרק הזמן שבין סיום האור הירוק של תנועה אחת בצומת ותחילת הזמן הירוק לתנועה אחרת. זמן הבין ירוקים נועד לאפשר את פינוי הצומת עם סיום הפאזה ברמזור. ניתן לומר שמידת ההפחתה בתאונות חזית צד בצמתים מרומזרים תלויה בחישוב זמן הבין ירוקים. כאשר נקבע זמן בין ירוקים קצר מידי, נהגים אינם מספיקים לפנות את הצומת, מה שעלול לגרום לתאונות חזית-צד. מאידך, כאשר הזמן הבין ירוקים ארוך מידי, מופחתת קיבולת הצומת. על-כן, קביעה אופטימלית של פרק הזמן בין ירוקים אינה פשוטה ושנויה במחלוקת ולכן גם שונה בין מדינות ברחבי העולם.

בישראל, הזמן הבין ירוקים מורכב משלושה חלקים: האות הצהוב לתנועה המסיימת, שמשכו תמיד שלוש שניות והאות האדום-צהוב לתנועה המתחילה, שמשכו קבוע לשתי שניות. כאשר הזמן הבין-ירוקים נמשך למעלה מחמש שניות, יופיע אור אדום לתנועות המסיימות והמתחילות במשך פרק הזמן שמעל לחמש שניות הראשונות (אדום לכל) (הנחיות לתכנון רמזורים, 1981).

האור האדום-צהוב נועד להכין את הנהג לנסיעה טרם הופעת האור הירוק בפנס, כדי להפחית את זמן הזינוק ולהגדיל את זרימת הרוויה בצומת. Long (2005) מגדיר את זרימת הרוויה כזרימה לשחרור התור, בה מרווחי הזמן בין כלי-רכב עוקבים הם קבועים, מרגע שכלי הרכב הראשונים בתור יחצו את קו העצירה עם הופעת הירוק ועד לפיזור התור בנתיב.

עם זאת, חציית קו העצירה במהלך האות האדום-צהוב אסורה, בדומה לאות האדום ברמזור. ע"פ תקנות התעבורה, "נוהג רכב המתקרב לצומת שבו התנועה מוסדרת על ידי רמזור, יציית לאותות שברמזור ולא ייכנס לצומת אלא לאחר שהופיע בו אור ירוק" (תקנות התעבורה, סעיף 65/ה, 1961). ההנחה היא כי נהגים לא יחלו בנסיעה עד להופעת האור הירוק בפנס, וכי הנהג המפנה את שטח הניגוד ("אזור הקונפליקט") בצומת, השלים את הפינוי עד לסיום זמן הבין-ירוקים.

לאות האדום-צהוב עשויות להיות השלכות בטיחותיות שליליות מכמה סיבות:

- הנהגים יכולים לצפות את חילופי האורות טרם הופעת האדום-צהוב בפנס. נהגים יוממים "לומדים" להכיר את תכונות הרמזור ואת סדר המופעים בו. לפיכך, הם מסוגלים להעריך את זמן הופעתו של האדום-צהוב ולפיכך גם של האור הירוק, כל זאת על-ידי צפייה בפנס השייך לתנועה הנוגדת של כלי-רכב או הולכי רגל (Maxwell & York, 2005).
- מאז שנות ה-60 במהלכן נקבע האות ומשכו, הוטמעו שיפורים מכאניים בביצועי כלי הרכב ובייחוד כלי-רכב דו-גלגליים. נפח מנוע גדול ותיבת הילוכים אוטומטית מאפשרים הגברת התאוצה ממצב של עמידה לתחילת תנועה. כתוצאה, גדל הסיכוי של כניסה מוקדמת לצומת אצל רכב שהחל נסיעתו במהלך האות הצהוב-אדום.
- נהגים נוטים לפרש את האיסור על כניסה לצומת בזמן האות האדום-צהוב, כחמור פחות מהאיסור על כניסה לצומת באור אדום.

הגורמים שצוינו לעיל, מצביעים על אפשרות סבירה כי נהגים יחצו את קו העצירה ויכנסו לתוך אזור הקונפליקט בטרם פונה אזור זה על-ידי התנועה המסיימת. חציית קו העצירה טרם הופעת האור הירוק מגדיל את ההסתברות להתרחשות תאונת חזית-צד (בן-יעקב 1979). קונפליקט פוטנציאלי

נוסף עלול להיווצר בין הולכי רגל במעבר החצייה לבין כלי-רכב המתחילים בנסיעה לפני הופעת האור הירוק.

בראייה בינלאומית-השוואתית, ניתן לומר כי בעוד שבישראל האור האדום-צהוב מופיע בכל תוכנית רמזור, ברוב מדינות העולם ובכללן ארצות-הברית הוא אינו קיים כלל. בארצות-הברית, קביעת הזמן בין-ירוקים שונה ממדינה למדינה, אולם ביחס לשיטת החישוב בישראל, קיים הבדל מהותי בחישוב הזמן הבין-ירוקים. זמן תחילת התנועה של הרכב המתחיל אינו נלקח בחשבון, בניגוד לשיטת החישוב בישראל. ניתן לומר כי, באופן כללי פרק הזמן הבין ירוקים בישראל מלכתחילה קצר יותר.

נוכח מיעוט המדינות בהן קיים אור אדום-צהוב ברמזור, נמצא כי משנות ה-60 ועד לימינו נערכו רק חמישה מחקרים אשר בחנו את ההשפעה של הסרת האור האדום-צהוב מתוכנית הרמזור או הקטנת משכו:

- Older (1963) חקר 18 צמתים, מהם הוסר האור האדום-צהוב במשך 3 שניות, בבריטניה בין השנים 1959-1962 (מתוך: Maxwell & York, 2005). Older מצא תוספת של 1-1.7 שניות לזמן הזינוק של כלי הרכב הראשונים בתור, לאחר הסרה של האות האדום-צהוב (משכו היה 3 שניות). בצמתים בהם הנהג יכול היה לראות את פנס התנועה שמנגד, התוספת היתה קטנה יותר. חישוביו הראו כי הגדלת זמן הזינוק תוביל להפחתה של 6% בקיבולת הצמתים שנבחנו. Older מצא גם הפחתה של מ-1.5% מהנהגים אשר נכנסו לצומת במהלך האות האדום-צהוב, ל-0.1% נהגים אשר נכנסו בפרק הזמן המקביל לאחר הסרתו. Seneviratne (1974) חקר 2 צמתים ו-2 מעברי חצייה בהונג-קונג בשנת 1973 (מתוך: Maxwell & York, 2005). בניסוי, הושמט האות האדום-צהוב שמשכו היה 2 שניות. החוקר הראה הפחתה משמעותית של נהגים אשר זינקו לתוך הצומת במהלך האדום-צהוב, מ-22.1% ל-6% בפרק הזמן המקביל לאחר הסרתו. אולם, לאחר קבלת תוצאות הניסוי, הוחלט להשאיר את האדום-צהוב בטענה כי קיימת השפעה על זמני העיכוב של כלי הרכב.

בנוסף, Seneviratne הבחין בהפחתה משמעותית במספר הקונפליקטים של הולכי רגל וכלי רכב בצמתים עם מעברי חצייה.

- MaGill (1970) חקרה 7 צמתים בעיר מלבורן שבאוסטרליה בשנת 1965. היא חקרה את ההשפעה של משכי זמן אדום-צהוב (0 ו-2 שניות) על התנהגות הנהגים בתחילת התנועה. היא מצאה כי 'כאשר הרמזור בצומת נראה בבירור לעיני הנהג הממתין, לא היה צורך באות האדום-צהוב'. אולם, היא הסתייגה מכך באומרה כי 'כאשר הנהג הממתין אינו יכול לזהות את חילופי האורות בתנועה המסיימת, אזי לאדום-צהוב יש ערך בהפחתה קלה של העיכוב בזינוק'.

MaGill טענה כי האות האדום-צהוב יכול להפחית את העיכוב בזינוק באמצעות הכנת הנהגים להופעתו הקרבה של האור הירוק. היא הציעה כי אדום-צהוב במשך שתי שניות בקירוב יהיה אופטימלי, אולם לא ניתן היה לבדוק במחקרה משכי זמן נוספים.

- Macdonald (1978) ערך ניסוי במדינת ויקטוריה באוסטרליה, ובו בדק את ההשפעה של משכי אדום-צהוב שונים (0, 1, 1.5, 2 ו-3 שניות) על זמני התגובה בתחילת התנועה של נהגים. הניסוי נערך ברכב לצורכי ניסוי, המדמה המתנה לחילוף האורות בסמוך לקו העצירה. הנהגים נתבקשו להתחיל בנסיעה רק לאחר שיופיע האור הירוק בפנס. משך זמן ההמתנה באור האדום השתנה והיה בלתי צפוי, אך משך האדום-צהוב נאמר לנהגים מראש. נמדד הזמן מרגע הופעת האדום-צהוב ועד להסרת הרגל מדושת הבלם. מזמן זה הופחת זמן האדום-צהוב וכך התקבל זמן התגובה בתחילת התנועה.

תוצאות המחקר הראו כי אות אדום-צהוב במשך 3 שניות הוא ארוך למדי בהשוואה לפרקי הזמן האחרים. עבור פרק זמן של 3 שניות, זמן התגובה הממוצע היה 0.55 שניות ו-3.2 אחוז מהנהגים התחילו תנועתם טרם הופעת הירוק. לעומת זאת, בפרק זמן של שניה אחת, אחוז 0.6 אחוז מהנהגים החלו תנועתם לפני הירוק וזמן התגובה הממוצע היה הקצר ביותר – 0.3 שניות. ללא אות אדום-צהוב בפנס, זמני התגובה הממוצעים היו הארוכים ביותר – 0.7 שניות. לכן, טוען Macdonald, משך אדום-צהוב של שנייה אחת הוא אופטימלי למינימיזציה של העיכוב בזינוק, תחת תנאי תנועה נורמליים.

• Maxwell & York (2005) ערכו מחקר מקיף בבריטניה על תגובת הנהגים לאות האדום-צהוב בשנת 2004. המחקר כלל: ראיונות ושאלונים בקרב נהגים, ניתוח סרטי ווידאו של תגובת נהגים, רוכבים והולכי רגל לאדום-צהוב וניסוי בסימולטור נהיגה לבחינת תגובת הנהגים למשכי אדום-צהוב שונים (0, 1 ו-2 שניות).

הניסוי בסימולטור הראה תגובה אחידה להופעת הירוק כאשר הוסר האות האדום-צהוב. הנהגים טענו כי הרצף אדום - ירוק קל יותר להבנה. לטענת החוקרים, הפחתה במשך האדום-צהוב תביא לירידה במספר הפרות התנועה (הפרת תנועה הוגדרה כחציית קו העצירה טרם הופעת הירוק), ולא תפגע במידת היעילות של הפחתת הפסד זמן הזינוק. הם מצאו כי אדום-צהוב במשך שניה אחת, יסיר כמעט לגמרי את מספר ההפרות, אך אלו יעלו עם ה"למידה" של סדר הפאזות בתוכנית הרמזור.

מסקנת החוקרים היא כי ההנחיות לחישוב הזמן הבין ירוקים בבריטניה כיום, היא מספקת וחלק מהתועלות של קיבולת הצומת נובעות מכניסה מוקדמת לצומת של חלק מהנהגים. נהגים אלו בד"כ נזהרים מלסכן את עצמם ומשתמשי דרך אחרים. לטענתם, להסרת האדום-צהוב או להפחתה ממשכו, השלכות בטיחותיות על משתמשי הדרך הפגיעים יותר. חלק מהנהגים יחלו בנסיעתם בזמן הירוק שהיה לפני כן האות האדום-צהוב. כמו-כן, טוענים החוקרים, כי שינוי גורף כזה במערכת הרמזורים בבריטניה, כרוך בהוצאות כספיות גדולות מאוד.

הסרת האות האדום-צהוב, ללא שינוי משך הזמן הבין ירוקים, יכולה לשפר את הבטיחות בצומת ולגרום להפחתת הסיכוי להתרחשות תאונות חזית-צד. יש לציין כי הסרת האות, אין פירושה קיצור הזמן הבין-ירוקים אלא "כיבוי" של הפנס הצהוב. דהיינו, מעבר ישיר מאדום לירוק.

2.2 קיום האור האדום-צהוב בעולם

2.2.1 אירופה

ישראל נמנית עם אותן מדינות ספורות בהן קיימת שיטת רימזור עם צירוף אותות רביעי הוא האות האדום-צהוב. ע"פ ההנחיות לתכנון רמזורים משנת 1981, אורכו של האדום-צהוב חייב להיות קבוע ושווה ל-2 שניות ומהווה חלק מה"זמן בין-ירוקים". בגרמניה, אורכו של האדום-צהוב הוא שנייה אחת (1987, Retzko & Boltz) ובבריטניה אורכו שווה לזה שבישראל (1978, Jordain & York, Maxwell, 2005). בשנת 1974 החליטו שרי התחבורה בממשלות שונות באירופה, על כך שקיום האור ברמזור ואורכו הם אופציונאליים, ואין תקנות מחייבות לגביו.

למעשה, כפי שניתן לראות מטבלה מס' 1, ברוב מדינות אירופה, האור האדום-צהוב אינו קיים כלל (צרפת), או לחילופין בוטל או קוצר (פינלנד). החלטתם של הפינים והשבדים לקצר את אורך האות, נבעה מהרצון להפחית את מס' ההפרות של האיסור לתחילת נסיעה לפני הופעת האור הירוק, מתוך חשש להגדלת ההסתברות להתרחשות תאונות בצומת (Maxwell & York, 2005).

טבלה 2.1: מידת קיום האות האדום-צהוב במדינות שונות באירופה¹

מדינות בהן אין שימוש באדום-צהוב	מדינות בהן יש שימוש באדום-צהוב	
	מדינה	אורך האדום-צהוב (שניות)
בלגיה	פולין	1
צרפת	פינלנד	1-1.5 (2 עד לשנת 1990)
לוקסמבורג	שבדיה	1
הולנד	גרמניה	1
פורטוגל	אנגליה	2
איטליה	אוסטריה	2
ספרד	צ'כיה	2
אירלנד	קפריסין	2
	איסלנד	2
	מלטה	2
	רוסיה	3

¹ מקור: Maxwell & York, 2005.

2.2.2 ארה"ב וקנדה

בארצות הברית, כאמור, האות האדום-צהוב אינו קיים. על מנת להבטיח את פינוי הצומת על-ידי התנועה המסיימת, ה-FHWA² 2004, ממליץ על פאזת "אדום לכל" – בכל הגישות לצומת מופיע אור אדום על מנת לאפשר לנהגים שלא הספיקו, לפנות את הצומת. אורכו של האור הצהוב נע בין 3-6 שניות ואורכו של האור האדום נע בין 0.5-3.0 שניות. גם בקנדה האור האדום-צהוב אינו קיים.

2.2.3 אוסטרליה וניו-זילנד

באוסטרליה, עד לתחילת שנות ה-80, היו שתי מדינות (מערב אוסטרליה וויקטוריה) עם אור אדום-צהוב ברמזור, אולם על מנת ל"יישר קו" עם שאר מדינות היבשת, הוסר האות מפנס הרמזור. בראיון עם נציג רשות הדרכים של מדינת ויקטוריה נטען כי הנהגים הסתגלו בקלות רבה לעובדה כי הוסר האות בהרכב האורות ברמזור (Maxwell, 2005). גם בניו זילנד האור האדום-צהוב אינו קיים.

2.3 זמן בין-ירוקים

הזמן הבין-ירוקים נועד להבטיח את פינוי הצומת לאחר סיום פאזה ברמזור לקראת כלי-רכב מפאזה עוקבת. קביעה שגויה של משך זמן זה בצומת, עשויה לגרום לבעיות בטיחות בצומת, כגון תאונות חזית-צד בין כלי-רכב מתנועות נוגדות ואף תאונות חזית-אחור. לפיכך, מידת ההפחתה בתאונות חזית-צד בצמתים מרומזרים תלויה במידה רבה באופן חישוב הזמן בין-ירוקים (דנציגר, 2004).

ההנחה העיקרית בחישוב זמן בין-ירוקים היא כי נהג המתקרב לצומת בסיום האור הירוק ונוכח כי אינו יכול לעצור לפני קו העצירה (מרחק עצירתו קטן מהדרוש), יוכל להשלים את פינוי הצומת (תחום הצומת או "אזור הקונפליקט", על-פי הגדרת המתכנן) לפני כניסת הרכב הראשון בפאזה העוקבת, לתחום הצומת.

² Federal Highway Administration

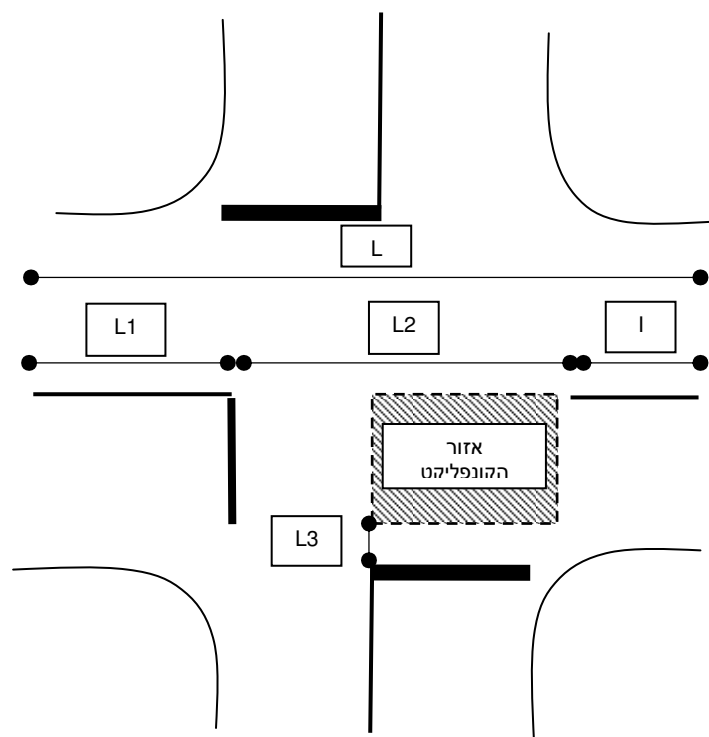
הדילמה העיקרית העומדת בפני מתכנן זמני הרמזור היא כי זמן בין-ירוקים ארוך אומנם יבטיח את פינוי הצומת על ידי הרכב המסיים, אולם יקטין את קיבולת הצומת. לעומת זאת, זמן בין-ירוקים קצר יגדיל את קיבולת הצומת, אך יגדיל במידה ניכרת את הסיכוי להתרחשות תאונות. לפיכך, זמן בין-ירוקים אופטימאלי אינו פשוט לחישוב וכולל בתוכו מרכיבי תנועה רבים כגון, גיאומטריית הצומת, מהירות כלי הרכב, מסלולם ונפחי התנועה בצומת.

2.3.1 אופן חישוב הזמן בין-ירוקים בישראל ובמדינות אחרות

ההנחיות בישראל לחישוב הזמן בין-ירוקים (הנחיות לתכנון רמזורים, משרד התחבורה, 1981):

ההנחיות קובעות כי בפני נהג המתקרב לצומת עם הופעת האור הצהוב עומדות שתי אפשרויות: לעצור לפני קו העצירה או להמשיך בנסיעה. לצורך חישוב הזמן הבין-ירוקים, מחושב זמן הפינוי של הרכב האחרון שנכנס עם סיום הירוק ובנוסף מחושב זמן הכניסה של הרכב הראשון בפאזה המתחילה. שטח הניגוד ("שטח הקונפליקט") הוא תחום בצומת בו חופפים מסלולי הנסיעה של הרכב המסיים והרכב הנכנס (איור 2.1).

איור 2.1: אזור הצומת



L = מה"כ מרחק הפינוי , L1 = מרחק העצירה , L2 = מרחק הפינוי עד סוף אזור הקונפליקט , L3 = מרחק מקו העצירה לתחילת אזור הקונפליקט ,
 אורך הרכב המפנה האחרון = l

נוסחת חישוב זמן הבין-ירוקים מובאת להלן:

[2.1]:

$$T = T_2 - T_3$$

כאשר:

$$T = \text{זמן הבין-ירוקים}$$

$$T_2 = \text{משך זמן הפינוי של הרכב האחרון בתנועה המסיימת (s)}$$

$$T_3 = \text{משך זמן הכניסה של הרכב הראשון בתנועה המתחילה מהמשך נסיעה (s)}$$

משך זמן הפינוי של כלי הרכב האחרון בתנועה המסיימת (T_2), מוגדר כסכום של זמן התגובה וזמן

הפינוי של מרחק הבלימה והמרחק מקו העצירה ועד לסוף שטח הניגוד.

[2.2]:

$$T_2 = T_1 + R$$

כאשר:

$$T_1 = \text{משך הפינוי של מרחק הבלימה והמרחק מקו העצירה ועד לסוף שטח הניגוד (S)}$$

$$R = \text{זמן התגובה (כשנייה אחת).}$$

[2.3]:

$$T_1 = \frac{-S + \sqrt{S^2 + 2aL}}{a}$$

כאשר:

$$\frac{m}{s} = S = \text{מהירות ההתקרבות לצומת (s)}$$

$$L = \text{מרחק הפינולי (m)}$$

$$a = \text{שיעור תאוצה (}\frac{m}{s^2}\text{)}$$

: [2.4]

$$L = L_1 + L_2 + l$$

כאשר:

$$L_2 = \text{מרחק הבלימה (m)}$$

$$L_1 = \text{המרחק מקו העצירה ועד סוף שטח הניגוד (m)}$$

$$l = \text{אורך כלי הרכב (12 m)}$$

: [2.5]

$$L_1 = \frac{S^2}{2g\mu}$$

כאשר:

$$g = \text{תאוצת הכובד (9.8}\frac{m}{s}\text{)}$$

$$\mu = \text{מקדם חיכוך (0.35)}$$

זמן הכניסה של הרכב הראשון בתור, בתנועה המתחילה, ניתן לחישוב על-פי הנוסחה הבאה:

: [2.6]

$$T_3 = \frac{L_3}{S}$$

ההנחיות בארה"ב לחישוב הזמן בין-ירוקים (ITE Handbook 99 – Traffic Engineering)
: Handbook (MUTCD-Manual of Uniform Traffic Control Devices

דנציגר (2004) בעבודתו, סקר את אופן חישוב הזמן בין-ירוקים במדינות שונות ברחבי העולם, לעומת אופן החישוב בישראל. הוא מצא כי בארה"ב אין הגדרה אחת לחישוב הזמן בין-ירוקים. קיימים שלושה מדריכים עיקריים כאשר חלקם נותנים המלצות כלליות (MUTCD) וחלקם נותנים המלצות מפורטות יותר (ITE Handbook).

ה-ITE מחלק את הזמן בין-ירוקים לאור הצהוב בסיום הירוק ולאור "אדום לכל" ע"פ הנוסחה הבאה:

$$T = T_y + T_r \quad [2.7]$$

כאשר:

$$T = \text{זמן בין-ירוקים כולל (S)}$$

$$T_y = \text{משך מעבר מרחק העצירה (S) – האור הצהוב}$$

$$T_r = \text{משך פינוי הצומת (משך ה"אדום לכל") (S)}$$

[2.8]

$$T_y = R + \frac{V}{2a} + \frac{V}{20G}$$

כאשר:

$$V = \text{מהירות בגישה לצומת } \left(\frac{m}{s}\right)$$

$R =$ זמן תגובה, בד"כ שניה אחת.

$a =$ שיעור תאוצה, בד"כ $3.1 \frac{m}{s^2}$

$G =$ שיפוע הגישה לצומת בצורה עשרונית (חיובי לעליות ושילילי לירידות)
:[2.9]

$$T_r = \frac{w + l}{V}$$

כאשר:

$w =$ רוחב הצומת (m)

$l =$ אורך כלי הרכב (m)

ה- ITE מגדיר את האור הצהוב כאזהרה לפני חילופי האורות בפנס. ההנחה היא כי הנהג האחרון לא יספיק לעצור לפני קו העצירה עם הופעת האדום, ולכן החישוב הוא פונקציה של תאוצת הרכב. זמן הצהוב נע בין 3-6 שניות. האלמנט השני בחישוב הזמן בין-ירוקים הוא האור "אדום לכל" המציין את זמן פינוי הצומת. האור האדום-צהוב לתנועה המתחילה אינו קיים בהנחיות אלו. בנוסף, המדריכים האמריקניים ממליצים לקחת בחשבון מרכיבים נוספים בחישוב הזמן בין-ירוקים הייחודיים לכל צומת בנפרד כגון: גיאומטריית הצומת, הולכי רגל, מהירות גישה, היסטורית תאונות ושיפוט הנדסי נוסף.

ההנחיות באנגליה לחישוב הזמן בין-ירוקים:

באנגליה לא קיימות נוסחאות קבועות לחישוב הזמן בין-ירוקים. לצמתיים סטנדרטיים, בעלי מאפיינים גיאומטריים אחידים, נהוג לקחת זמן מינימאלי של 3-5 שניות, כתלות בגיאומטריית הצומת. הרכב האורות ברמזור מורכב בדרך-כלל מאור צהוב קבוע במשך 3 שניות ואור אדום-צהוב במשך 2 שניות בדומה לישראל.

ההנחיות בגרמניה לחישוב הזמן בין-ירוקים (Official Signal Timing Standards in the)
:(Federal Republic of Germany)

בגרמניה מחלקים את פרק זמן הבין-ירוקים לשלושה חלקים: זמן ההגעה לקו העצירה, זמן פינוי הצומת וזמן הכניסה לצומת של הרכב המתחיל (boltz and retko 1987). הנוסחה הכוללת לחישוב הזמן בין-ירוקים היא:

[2.10]:

$$T = t_0 + t_c - t_e$$

כאשר:

$$T = \text{זמן הבין-ירוקים הכולל (S)}$$

$$t_0 = \text{משך ההגעה לקו העצירה (S)}$$

$$t_c = \text{משך פינוי (S)}$$

$$t_e = \text{משך הכניסה של הרכב המתחיל (S)}$$

ההנחיות הגרמניות דומות להנחיות בישראל בהפחתת זמן הכניסה לצומת בתחילת האור הירוק, מהזמן הכולל. אולם בניגוד לישראל, חישוב זמן הכניסה מתייחס לשני מצבים – תחילת תנועה ממצב עמידה והמשך נסיעה בגישה לצומת. לאחר חישוב הזמנים, נלקח הזמן המינימאלי ביותר מבין שניהם.

ההנחיות באוסטרליה לחישוב הזמן בין ירוקים (Austroads 1993, Traffic Signal):

זמן הבין ירוקים באוסטרליה מורכב מצירוף שני חלקים: 1. זמן התגובה וזמן ההגעה לקו העצירה. 2. זמן הפינוי – זמן מעבר אזור הקונפליקט ואורך הרכב ממנו מופחת זמן הכניסה של התנועה המתחילה. כפי שצוין לעיל, מתחילת שנות ה-80 לא קיים אות אדום-צהוב בהרכב האורות באוסטרליה.

[2.11]: זמן ההגעה לקו העצירה:

$$t_y = R + \frac{V_H}{2(a \pm 9.8g)}$$

כאשר:

$$t_y = \text{משך הצהוב (s)}$$

$$R = \text{משך תגובה (s)}$$

$$V_H = \text{מהירות מקסימאלית (m/s)}$$

$$a = \text{שיעור תאוצה (בד"כ } 3 \text{ m/s}^2 \text{)}$$

$$G = \text{שיפוע הגישה לצומת}$$

[2.12] משך פינוי הצומת (אדום לכל):

$$t_r = \frac{w + I}{V_l} - t_s$$

כאשר:

$$t_r = \text{משך אדום לכל (s)}$$

$$w = \text{רוחב הצומת (m)}$$

$$I = \text{אורך הרכב (m)}$$

$$t_s = \text{משך הכניסה של הרכב המתחיל (s)}$$

$$t_l = \text{מהירות מינימאלית של הרכב המסיים החוצה את הצומת (m/s)}$$

זמן הבין ירוקים באוסטרליה מחושב ע"פ הנוסחה הבאה:

[2.13]:

$$T = t_r + t_y$$

כאשר:

$$T = \text{זמן הבין ירוקים}$$

לסיכום, ממצאיו של דנציגר מראים כי ישנם הבדלים מהותיים באופן חישוב הזמנים בין ישראל

לארה"ב:

- זמן הצהוב בישראל הוא קבוע (3 שניות) ובארה"ב הוא משתנה (3 - 6 שניות).

- בישראל לא קיים מקום לשיקול דעת של מהנדס התנועה בבואו לקבוע את הזמן בין-ירוקים. בארה"ב, לעומת זאת, אומנם קיימות נוסחאות לחישוב אולם אלו בגדר יסודות עליהן נשען המהנדס כאשר הוא לוקח בחשבון פרמטרים נוספים הקיימים בכל צומת.
- ההנחיות בישראל מניחות תאוצה של הרכב המפנה, בניגוד להנחיות בארה"ב ובגרמניה, דבר המקצר את הזמן בין-ירוקים.
- ההנחיות בישראל מניחות כי כלי הרכב הנכנס, עובר את קו העצירה ממצב של המשך נסיעה ואילו בארה"ב ההנחיות אינן מתייחסות כלל לזמן הכניסה של כלי הרכב המתחיל. הפחתה של זמן הכניסה מקצרת את הזמן בין ירוקים ולכן המשמעות היא כי בישראל ההנחיות מורות על חישוב זמן בין ירוקים קצר יותר. הרכב האורות בישראל כולל אור אדום-צהוב שנמשך 2 שניות ואילו בארה"ב הוא לא קיים כלל.

2.3.2 בטיחות ותאונות דרכים בצמתים מרומזרים

תאונות דרכים בצמתים מרומזרים הינן גורם משמעותי לאבידות בנפש במדינות רבות. לרוב, התאונות נגרמות כתוצאה מגורם אחד או משילוב של כמה גורמים כגון: טעויות בשיקול הדעת ובפעולות של משתמשי הדרך, תכנון גיאומטרי לקוי, אמצעי בקרה שאינם מתוכננים כהלכה ועוד (Mitra, 2002). Sabey and Taylor (1980) הראו כי הגורם האנושי, לבדו או בשילוב עם גורמים אחרים, אחראי לכ-95% מכלל מהתאונות, כאשר תנאי הדרך והסביבה יחד עם הגורם האנושי אחראיים לכ-28% מהתאונות.

כאשר כלי הרכב בתנועה המתחילה נכנסים מיד לצומת, עם תחילת האור האדום-צהוב, הם למעשה נכנסים לשטח הצומת טרם הסתיים זמן הפינוי של הרכב המסיים האחרון – כלומר, לפני סיום זמן הבין-ירוקים. לפיכך, עלולים רכבים אלו לגרום לתאונה בינם לבין הרכבים המסיימים (בן-יעקב, 1979).

מחקרים מצביעים על בעיה בנושא שיעור ההפרות של איסור הכניסה לצומת בזמן האות האדום-צהוב בקרב הנהגים הממתינים סמוך לקו העצירה. דנציגר (2004) מצא כי שיעור גבוה מקרב הנהגים (מעל

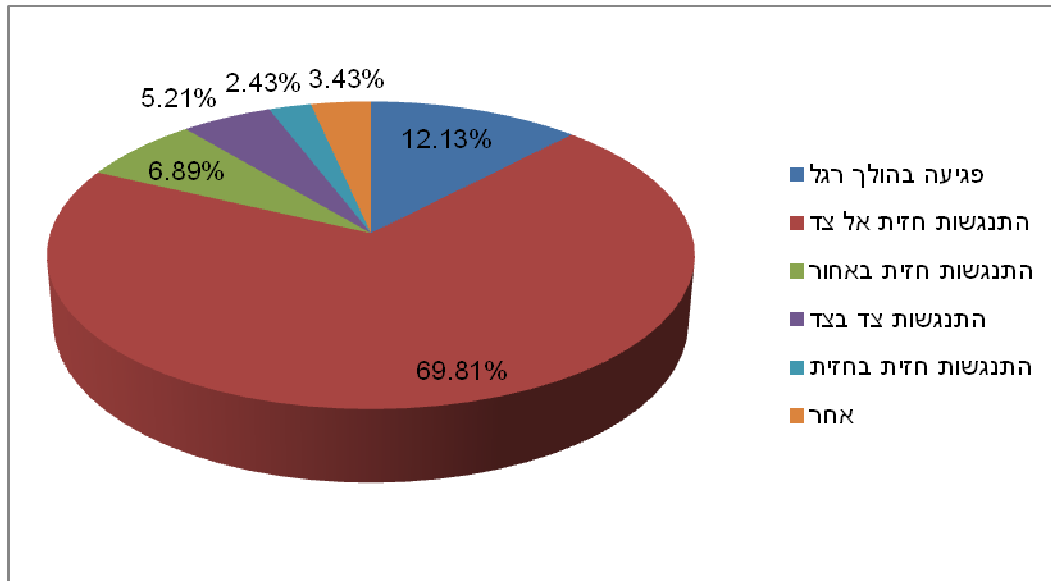
(50% הממתינים לאור הירוק לפני קו העצירה, מתחיל נסיעתו בזמן האדום-צהוב, וכי אחוז כלי הרכב הנכנסים לתוך הצומת בזמן האדום-צהוב, גבוה יותר בתנאי עומס מאשר בתנאי זרימה חופשית. Older (1963) הראה כי חלה הפחתה של 1.4% בשיעור הרכבים הנכנסים לצומת בזמן האדום-צהוב, ובזמן המקביל לו (אורכו היה 3 שניות) לאחר הסרתו מהפנס. Maxwell & York (2005) מצאו כי עבור אדום-צהוב במשך כ- 2 שניות, 36% מהרכבים חצו את קו העצירה לפני החילוף לירוק. Seneviratne (1974) הראה כי לאחר הסרה של זמן האדום-צהוב, חלה ירידה מ-22.1% ל-6.5% במספר הרכבים אשר "זינקו" לתוך הצומת. גם המחקר של Branston (1979) מצביע על כך שמספר הפרות התנועה של נהגים בזמן האדום-צהוב גדל ככל שמתארך גם זמן האדום-צהוב.

בישראל, תאונות מסוג חזית-צד בצמתים מרומזרים מהוות אחוז ניכר מסך כל התאונות (חזית-אחור, פגיעה בעצם דומם וכו'). על-פי הלמ"ס (הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, 2011), בשנת 2010, כ- 46% מסך כל התאונות עם נפגעים בארץ, היו תאונות חזית-צד – סה"כ ירידה של 5% משנת 2003. בצמתים מרומזרים-עירוניים סוג זה של תאונות היווה כ-72.3%, ובצמתים בין-עירוניים כ- 68.2% - סה"כ עלייה של 3% משנת 2003 בשני סוגי הצמתים. 6% מתאונות אלו היו בחומרת פגיעה קשה וקטלנית (טבלה 2.2). מאיור 2.1 ניתן להתרשם כי פרופורצית התאונות לאורך גבוהה מאוד, ביחס לסוגים אחרים.

טבלה 2.2: שיעור חומרת הפגיעה בתאונות חזית-צד בצמתים מרומזרים בשנת 2010³

חומרת תאונה	מרומזר עירוני	מרומזר בין-עירוני	סה"כ
קטלנית	0.6%	0.8%	0.6%
קשה	5.1%	6.1%	5.4%
קלה	94.3%	93.1%	94.0%

³ מקור: הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, 2011



רוכבי אופנועים ואופניים פגיעים במיוחד וחשיפתם למעורבות בתאונות דרכים גדולה, לעומת נוסעים בסוגי כלי-רכב ממונעים אחרים. על אף יתרונותיו התחבורתיים, רמת הסיכון של הרוכב, לא רק שהיא גבוהה יותר, אלא שחומרתה גבוהה מזו של הנוסע במכונית (מוקואס, 1998). בעיה זו, חמורה במיוחד בצמתים מאחר ומספר הקונפליקטים בשטח הצומת גדול מאשר בקטעי דרך. לפיכך, ההסתברות להיהרג או להיפגע בצורה חמורה גדלה בעשרות אחוזים לעומת נוסעים במכוניות (Harnen et al., 2003).

שיעורי ההרוגים בקרב נהגי רכב דו-גלגלי (הנמדדים במספר הרוגים ל 10,000 כלי-רכב) בתאונות דרכים בצמתים מרומזרים גבוהים בהרבה מאלו שנמדדו עבור מכוניות (Wang & Nihan, 2002). ה- USDOT 2000 Highway Traffic Administration National (מתוך: Harnen et al., 2003) דיווח על שיעור תמותה של רוכבי אופנועים פי 26 מזה של נוסעים במכוניות. בקנדה נמדד שיעור הרוגים של 5.1 בשנת 2000. באופן דומה, שיעורים גדולים נמדדו באוסטרליה (6.2 בשנת 2001). בבריטניה נמדד שיעור של 7.3 בשנת 2000. שיעורים גבוהים נמצאו גם בצרפת, גרמניה ושבדיה (Harnen et al., 2003). Mazharul Haque et al. (2008) מדווחים כי 33% מהמעורבים בתאונות דרכים בצמתים מרומזרים בסינגפור הם רוכבי אופנועים, למרות שסוג רכב זה מהווה רק

19% מכלי הרכב הממונעים במדינה. בישראל, ע"פ הלמ"ס, בשנים 2003-2010, מתוך 10,440 תאונות דרכים עם נפגעים בהן היו מעורבים רוכבי אופנועים ואופניים, כ-7730 (המהווים כ-74%) היו תאונות מסוג חזית-צד, ומתוכם כ-2690 (המהווים כ-25%) התרחשו בצמתים מרומזרים עירוניים ובין עירוניים.

לרוכבי אופנועים הממתינים בצומת לקבלת אור ירוק ברמזור, יש את היכולת והנגישות להמתין בקרבה יתרה לתחילת אזור הקונפליקט. זאת במטרה לצמצם ככל האפשר את זמן העיכוב בצומת עבורם. זאת ועוד, כמו שצוין לעיל, מבנה הצבת עמודי הרמזור בארץ (שני עמודים עבור כל מופע - אחד לפני קו העצירה ואחר המרוחק ממנו), מאפשר לנהג הממתין אחרי קו העצירה להבחין בחילופי המופעים ברמזור. כאשר תחילת הנסיעה של הרכב הדו-גלגלי מתרחשת טרם הופעת האור הירוק בפנס (כלומר, בזמן האדום-צהוב), ותאוצת האופנוע גדולה מזו של מכונית, ההסתברות לקונפליקט או תאונה בפועל עם רכב מהתנועה המסיימת גבוהה לאין שיעור. בנוסף, כאשר מדובר בצמתים עם עומסי תנועה כבדים, הלחץ על הנהג להתחיל את נסיעתו מהווה גורם משמעותי בהפרה וכניסה מוקדמת לצומת. . Maxwell & York (2005) מצאו כי 70% מרוכבי האופנועים ממתינים אחרי קו העצירה בתחילת הירוק. בנוסף, הוא מצא כי רוכבי אופנועים מתחילים את נסיעתם כ-1.4 שניות בממוצע לאחר הופעת האדום-צהוב, לעומת 1.75 שניות עבור מכוניות.

2.3.3 זמן בין-ירוקים והקשר לתאונות דרכים

מחקרים מצביעים על כך כי אורך הזמן בין-ירוקים ברמזור, עלול להשפיע על הסיכוי לקונפליקטים בתחום הצומת ולפיכך גם על הסיכוי להתנגשות כלי-רכב. Zador et al. (1985) הראו כי זמן בין-ירוקים שאינו תואם לזמנים המומלצים על-פי ה-ITE - בפרט, אור צהוב קצר, הגדיל את אחוז הנהגים שנכנסו לצומת ולא הספיקו לפנותם לפני תום הזמן בין-ירוקים. Retting and Greene (1997), דיווחו כי כניסות לצומת בזמן האדום וקונפליקטים בצומת, פחתו כאשר מערך הרמזורים בצמתים תוכננו לפי נוסחאות ה-ITE. גם Stein (1986) דיווח כי בצמתים בהם לא נעשה שימוש בנוסחאות לחישוב הזמן בין-ירוקים, אלא מתוך שיקול דעת הנדסי גרידא, נמדדו שיעורים גבוהים של תאונות דרכים.

Retting et al. (2002), הראו קשר ישיר בין תכנון נכון של זמן בין-ירוקים לשיעורי תאונות דרכים. במחקרם, הם העריכו את הפוטנציאל להתנגשות בין כלי-רכב, המושפע מאורך זמן בין-ירוקים הנקבע על-פי הנוסחאות המקובלות של ה-ITE. המחקר נערך במדינת ניו-יורק וכלל 122 צמתים מרומזרים. תוצאות המחקר הראו כי התאמת שיטת חישוב הזמן בין-ירוקים על-פי נוסחאות ה-ITE, אכן הפחיתו את הסיכון להתרחשות תאונות דרכים, בהן מעורבים הולכי רגל ורוכבי אופניים. יתר על כן, תכנון בשיטה זו, הפחית את הסיכון הכולל של תאונות בהם מעורבים מספר כלי-רכב ובמיוחד כאלו עם נפגעים.

2.4 התנהגות הנהגים בתחילת האדום-צהוב

2.4.1 התנהגות סתגלנית

ניתן להניח כי טבע האדם הוא להתאים את התנהגותו ולהסתגל לתנאים חדשים בסביבתו. כאשר בני אדם נוהגים, הם עומדים תמיד בפני תנאים המשתנים תדיר, ואליהם הם מוכרחים להסתגל. הסתגלותו של הנהג מתרחשת בתגובה לסביבת הדרך המשתנה באופן תמידי (Smiley, 2000). כך למשל, הרחבת נתיבי הנסיעה, השוליים ותחזוקת הכביש מובילים לעלייה במהירות הנסיעה. דוגמאות אלו ואחרות מצביעות על התנהגות סתגלנית של הנהג למצבים חדשים בהם הוא נתקל בזמן הנהיגה.

הרמזור נחשב בעיני הנהג לאמצעי בקרה צפוי (למעט חילוף האורות מירוק-לצהוב-לאדום בסיום הפאזה- "אזור הדילמה"), בו הוא מרגיש בטוח למדי מאחר וישנה חוקיות קבועה באופן פעולת הרמזור. התנהגות סתגלנית של הנהג מובילה לשינוי בהתנהגותו גם לגבי שינויים באופן פעולת הרמזור (כגון הסרת האור האדום-צהוב או הפחתה באורכו). לדוגמא, עד לשנת 1980, שתי מדינות באוסטרליה- מערב אוסטרליה וויקטוריה- השתמשו באור האדום-צהוב ברמזור. האור הוסר על מנת שתהיה אחידות עם כלל היבשת. חלק מהנהגים הסתגלו במהירות למצב החדש בו לא קיים אור אדום-צהוב ולחלקם לקח זמן ארוך יותר (Maxwell, 2005).

McGill (1970), שערכה את מחקרה במדינת ויקטוריה שבאוסטרליה, מצאה עלייה של 1.4 שניות בעיכוב זמן הזינוק זמן קצר לאחר הסרת האור האדום-צהוב והבחינה כי לאחר מספר שבועות זמן זה ירד שוב לאפס. לטענתה, ירידה זו נבעה מכך שהנהגים הסתגלו למצב החדש וציפו להופעת האור הירוק מהסתכלות על הפנס השייך לתנועה המסיימת.

דוגמא נוספת להתנהגות סתגלנית היא התאמה והסתגלות למבנה הצומת. McGill (1970) הצביעה על כך שהיכולת לראות את הפנס המוצב על עמוד באמצע הצומת או היכולת לזהות את סיום הפאזה של התנועה הנגדית (למשל, על-ידי זיהוי האות להולכי הרגל), היא גורם משמעותי המשפיע על העיכוב וההפסד בזמני הזינוק של כלי הרכב. יש לציין כי במדינות רבות ברחבי העולם תצורת הרמזורים בצומת אינה מחייבת הצבת שני עמודי רמזורים עבור כל מופע. במדינות כגון אנגליה ואוסטרליה, בחלק מהצמתים קיימים שני עמודי רמזור ואילו בחלקם קיים רק אחד.

בישראל, על-פי הנחיות לתכנון רמזורים משנת 1981, כל הקמת רמזור מחייבת, עבור כל מופע, הצבת רמזור "קרוב", בסמוך לקו העצירה שלפני הצומת, ורמזור "רחוק" מעבר לצומת, באופן שיראה תמיד לעיני הנהג הממתין ברכב הראשון לפני קו העצירה. זיהוי חילופי האורות ברמזור מאפשר לנהג לבצע פעולות מקדימות/מכינות לקראת תחילת התנועה וכניסה לצומת. תופעה נוספת שיש לציין בהקשר זה היא זיהוי חילופי האורות בפנס הרמזור של הולכי הרגל (מירוק לאדום), כאינדיקציה להופעתו הקרבה של האור האדום-צהוב לאחר מספר שניות הנקבע בתוכנית הרמזור בצומת.

2.4.2 זמן תגובה

נהגים, בדרך כלל, נתקלים במצבים הדורשים מהם להיות עירניים לסכנות פוטנציאליות בכביש, לאבחן אותם, להגיע להחלטה האם להגיב או לא ואם כן, לבצע את הפעולה הבטוחה ביותר להם ולסביבה. מצבים אלו מצריכים "זמן תגובה" או "זמן פעולה" (גם כאשר לא בוצעה אף פעולה בסוף תהליך עיבוד המידע אצל הנהג). זמן תגובה מוגדר כאינטרוול הזמן שתחילתו בהופעת אובייקט או מצב בטוח ראייתו / שמיעתו של הנהג ומסתיים כאשר הנהג הגיב לאותו מצב (היגוי, בלימה וכו'). אינטרוול הזמן הזה - מרגע הופעת הסכנה ועד לתגובת הנהג - מכיל מספר פעולות מצד הנהג. לא זו

בלבד שנהגים נתקלים באינספור מצבים לקבלת החלטות בזמן הנהיגה מנקודה אחת לשנייה, אלא שאלו משתנים באופן הזיהוי וההתמודדות איתם. על-כן, זמני התגובה משתנים מאירוע אחד למשנהו. בספרות המקצועית נהוג בדרך כלל לחלק את פעולות הנהג ל-4 שלבים עיקריים: איתור, זיהוי, החלטה ותגובה כאשר זמן התגובה משתנה מאחד למשנהו (Dewar & Olson, 2002).

עבודה זו, העוסקת בתגובת הנהג להופעת האור האדום-צהוב ברמזור, שייכת לאותה קבוצת מחקרים בהם שלושת השלבים הראשונים (איתור, זיהוי והחלטה) של זמן התגובה, כמעט ואינם רלוונטיים ומוגדרים כמינימום הזמן הנדרש לבצע כל שלב. זאת, מאחר והנהג יודע מראש וצופה את חילוף האורות בפנס הרמזור. על-כן, השלב העיקרי בו עוסק המחקר הוא השלב הרביעי- תחילת התגובה בפועל.

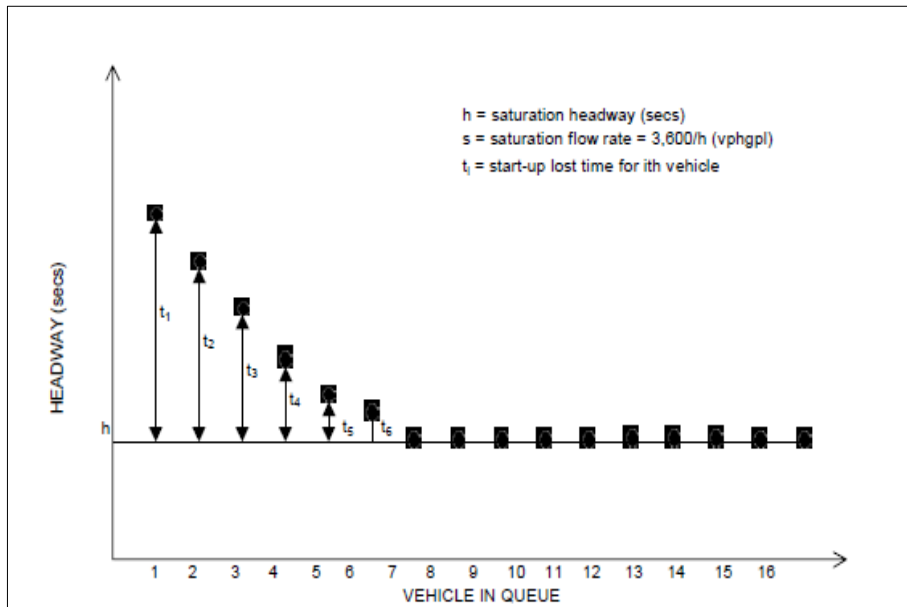
תצורת הכביש, מאפיינים גיאומטריים של הדרך ואמצעי בקרת תנועה המחזקים את תחושת הציפייה, עוזרים לנהג להגיב במהירות למצבי תנועה שונים. חוקרים שונים מעריכים באופן שונה את זמני התגובה של הנהגים, אולם הטווח המקובל נע בין 0.5-3.5 שניות, בעוד שזמן התגובה המוצע על ידי מדריכים, למשל ה-HCM, הוא בקירוב שנייה אחת (Triggs & Harris, 1982; Dewar & Olson, 2002) הציעו זמן תחילת תגובה קצר באופן יחסי הנע בין 0.16-0.25 שניות.

2.4.3 הפסד זמן הזינוק בגישה לצומת

הפסד זמן הזינוק הוא העיכוב המצטבר של כלי רכב בתחילת האור הירוק, עקב זינוק איטי לצומת. בפועל, עיכוב זה נמדד כהפרש בין הזמן הנדרש לחמשת כלי הרכב הראשונים לפנות את הצומת מתחילת האור הירוק, לעומת הזמן הנדרש לחמישייה השנייה של כלי רכב.

איור 2.2 מדגים את העיקרון של יצירת מרווחי הרוויה והפסד זמן זינוק עבור הרכבים הראשונים בתור. ניתן לראות כי המרווח הגדול ביותר הוא של כלי הרכב הראשון בתור. בגישה לצומת מרומזר זהו הרכב הראשון ליד קו העצירה.

איור 2.3: מרווחי רוויה והפסד זמן זינוק בתחילת התנועה⁴



המרווחים בין כלי הרכב הראשונים בנתיב, גדולים באופן יחסי מאחר והנהגים מגיבים באיטיות יחסית לחילופי האורות ואז מאיצים. המרווחים קטנים מרכב לרכב עד לנקודה בה הם מגיעים לתאוצה מקסימלית בכניסה לצומת, ומרגע זה והלאה כל המרווחים שווים בין כלי הרכב שחרור התור (Bestner and Vardnell, 2002). מתוך האיור ניתן לראות שסכימת ה- t_i עבור כלי הרכב הראשונים בתור, מניבה את הפסד זמן הזינוק הכולל. ניתן לחשב את הפסד זמן הזינוק מהנוסחה להלן:

[2.13]:

$$SOL = t_5 - (t_{10} - t_6)$$

כאשר:

SOL = הפסד זמן זינוק

t_i = זמן כניסת הרכב ה- i לצומת לאחר הופעת האור הירוק

⁴ מקור: Bestner and Vardnell (2002)

גורמים שונים משפיעים על הפסד זמן הזינוק כגון: סוג הרכב, שיפוע הדרך, גורמים פסיכולוגיים המשתנים מנהג לנהג והולכי רגל בצומת. אולם, הגורם המשפיע ביותר הוא זמן התגובה של הנהג. כך למשל, זמן התגובה בא לידי ביטוי בתגובה לחילוף האורות מאדום לאדום-צהוב ואז לירוק. זמן התגובה בראשית המופע הירוק הינו הזמן הדרוש לנהג לראות את חילופי האורות ולהגיב. זמן זה כנראה מתקצר באמצעות האות האדום-צהוב שמשכו בישראל הוא 2 שניות. מידע מוקדם יותר על ראשית המופע הירוק הצפוי, מתקבל מסיום המופעים הירוקים לכווני רכב והולכי רגל נוגדים. הנהגים בתנועה העוקבת מגיבים הן לשינוי האורות ברמזור והן לתזוזת המכוניות ולכן זמן התגובה שלהם קטן יותר בדרך כלל (בן-יעקב, 1979). לפיכך, קיצור זמן התגובה, משמעותו יכולה להיות קיצור הפסד זמן הזינוק.

הערכות של הפסדי זמן זינוק וקיבולת של צמתים מרומזרים קיימות כבר משנות ה-40 של המאה הקודמת. Clayton (1939) מצא הפסד זמן זינוק של 6 שניות עבור הרכבים הראשונים בתור ממחקר שערך מחוץ ללונדון. Greenshilds et al. (1947) מצאו בקונטיקט הפסד זמן זינוק של 3.7 שניות בממוצע - 40% פחות מזה שמצא Clayton (מתוך: Long, 2007). מחקרים נוספים שנערכו בארה"ב עבור ה-HCM 2000 מציגים תוצאות של הערכת זרימת רוויה והפסדי זמן זינוק בין השנים 1967-1992. המדריך מצהיר כי ערכים נצפים של הפסד זמן הזינוק נעים בין 1-2 שניות (HCM) (2000). במחקר שנערך בהוואי על ידי Li & Prevedorus (2006), ערכו החוקרים השוואה בין 3 שיטות שונות לחישוב זרימת רוויה בצמתים מרומזרים ובכללן השיטה המוצעת על-ידי ה-HCM 2000. עבור צמתים מרומזרים ללא אור אדום-צהוב, החוקרים מצאו ערך ממוצע של 2.89 שניות בהפסד זמן זינוק (גבוה מזה של ה-HCM) עם סטיית תקן של 1.36 שניות. מחקר נוסף שנערך על-ידי Noyce et al. (2000) ברחבי ארה"ב וכלל 8 אזורים גיאוגרפיים, בחן את מאפייני התנועה של פניות מוגנות או לא מוגנות שמאלה⁵ בצמתים מרומזרים. החוקרים מצאו הפסד זמן זינוק ממוצע של 1.6 שניות (נמצא בטווח הערכים שמציע ה-HCM). גם במחקר זה, הצמתים המרומזרים אינם כוללים את

⁵ פנייה לא מוגנת (Permissive Left Turn) - האפשרות לפנות שמאלה גם כאשר יש אור ירוק לתנועה הנוגדת, תוך מתן זכות קדימה וקבלת פערי חצייה.

האות האדום-צהוב. Bonnenson & Messer (1998) הראו הפסדי זמן זינוק בטווח של 0.58-2.8 שניות עבור זרימת רוויה של 1400-2000 ר"פ/שעת ירוק/נתיב, בהתאמה.

כאמור, נהגים העומדים סמוך לקו העצירה וממתינים לחילוף הפאזות ברמזור, צופים את חילוף האורות ועל-כן גם זמן התגובה שלהם מתקצר. ממצאיהם של Maxwell & York (2005) מראים כי בממוצע, נהגים הממתינים לפני קו העצירה מתחילים תנועתם כ-0.25 שניות לפני הופעת האור הירוק (כלומר, 1.75 שניות מרגע הופעת האדום-צהוב). בסה"כ נמצא כי 36% מהנהגים חוצים את קו העצירה לפני הופעת הירוק ו-66% מהנהגים מתחילים את תנועתם לפני הופעת הירוק. החוקרים ערכו גם ניסוי על ידי סימולאטור נהיגה, בו נבדקו זמני תגובה לאור אדום-צהוב באורכים שונים. כאשר הוסר האות האדום-צהוב מהרמזור (באורך 2 שניות), התקבלו זמני עיכוב בזינוק של 1.2-1.6 שניות. ערכים דומים לאלו שנמצאו בצילומי הווידאו. כלומר, לא הייתה כמעט השפעה להסרת האות אדום-צהוב על העיכוב בזינוק – ירידה ממוצעת של 0.4 שניות. כאשר הופחת האות האדום-צהוב לשנייה אחת, התקבלו זמני עיכוב בזינוק של 0.7-0.8 שניות. עוד נמצא כי זמן התגובה לשחרור בלם היד או הרגל וזמן ההאצה (בתגובה להסרת האדום – צהוב מהפנס), מהירים יותר במעבר ישיר מאדום לירוק מאשר עם אות אדום-צהוב בין שני המופעים.

את הקשר בין הפסד הזמן בזינוק לקיבולת הצומת בחן Older (1963) באנגליה עבור צמתים עם אות אדום-צהוב, ומצא שעלייה בזמן הזינוק תוביל לירידה של כ-6% בקיבולת הצומת. McGill (1970), בחנה את התנהגות הנהגים בתחילת הירוק לאחר אורכי אדום-צהוב שונים (0-2 שניות), ומצאה עלייה של 1.4 שניות בממוצע בהפסד זמן זינוק. גם Seneviratne (1974) ו-Maxwell (2005) הבחינו בעלייה של 1-1.7 שניות בממוצע בהפסד זמן הזינוק לאחר הסרה של האדום-צהוב (אורכו היה 3 שניות). בן-יעקב (1979) מצא כי הפסד זמן הזינוק הממוצע של כלי הרכב הראשונים בתור הוא 2.26 שניות לכל הנתיבים עם סטיית תקן של 0.62. בנוסף, הוא מצא כי ללא תוספת הזמן של המכונית הראשונה בתור, הפסד זמן הזינוק 1.16 שניות וסטיית תקן של 0.35. כלומר, המכונית הראשונה מוסיפה 1.1 שניות להפסד זמן הזינוק. ממצאיו של בן-יעקב מתחילת שנות ה-80, מתייחסים למצב בו התאוצת כלי הרכב היתה נמוכה באופן יחסית מזו של כלי הרכב כיום.

סיכום: ראוי לציין כי הערכים השונים של הפסדי זמן הזינוק, המתקבלים ממחקרים שונים ברחבי העולם, נובעים משיטות המדידה בהן נעשה שימוש. זאת, מאחר והמדידות נעשות על בסיס שונה כגון: קוי עצירה מסוגים שונים - שפת המדרכה כתחום הצומת או קו מצויר על פני המיסעה. לחילופין, מיקום פגוש אחורי או קדמי או על פי ציר הגלגלים. על-כן, כאשר באים לערוך השוואה בין מבחנים שונים יש לשים לב לשיטות המדידה בהן נעשה שימוש להערכה של פרמטרים שונים. מחקר העורך השוואה בשיטת "לפני-אחרי" נותן אינדיקציה טובה יותר להשפעה שיש לסוגים שונים של אמצעי בקרה על הפסד זמן הזינוק ומשתנים נוספים.

2.5 סיכום

מסקירת הספרות עולות מספר נקודות בעלות השלכות עבור מחקר זה:

- במספר קטן יחסית של מדינות בעולם קיים עדיין אור אדום-צהוב בתוכנית הרמזור. כפועל יוצא, לא נמצאו מחקרים רבים העוסקים באות האדום-צהוב.
- קיימים הבדלים באופני חישוב זמן הבין ירוקים בין ישראל למדינות אחרות בעולם. בישראל, כמו גם בגרמניה, מפחיתים מזמן הבין ירוקים הכולל את זמן הכניסה לצומת של הרכב הראשון בתנועה המתחילה, בעוד שבארה"ב אין התייחסות לזמן זה. ההפחתה של זמן הכניסה של הרכב הראשון מזמן הפינני בחישוב הזמן בין ירוקים בישראל מקצרת את הזמנים הבין ירוקים יחסית למקובל בארצות בהן אין מקצרים.
- שיעור תאונות מסוג חזית-צד בצמתים מרומזרים בישראל עמד על כ-72% בשנת 2010. תאונות מסוג זה עשויות להיגרם כתוצאה מכניסה לצומת באור אדום או מכניסה מוקדמת לצומת. כניסה לצומת בזמן האדום-צהוב, כמוה ככניסה במרווח זמן הבין-ירוקים ולמעשה ככניסה לצומת באור אדום. לעומת נהגים, שיעור הנפגעים וההרוגים בכלי רכב דו-גלגליים בצמתים מרומזרים גבוהים בהרבה. לרוכבי דו-גלגליים ישנה האפשרות לעמוד להמתין לתחילת הפאזה מעבר לקו העצירה, ולפיכך כניסתם לצומת בזמן האדום-צהוב מוקדמת מזו של רכבים פרטיים. תכנון נכון של זמן הבין-ירוקים עשוי להפחית את הסיכון הכולל של תאונות בהם מעורבים מספר כלי רכב, הוכי רגל ואופניים.

- מבנה מערך הרמזורים בישראל, עם שני עמודי רמזור לכל פאזה, מאפשר לנהג לבצע פעולות מקדימות/מכינות לקראת תחילת התנועה. בנוסף, יכולתו של הנהג לראות את פנס הרמזור של התנועה הנוגדת (כלי רכב או לחילופין הולכי רגל) מסייעת לו בהכנה לקראת חילופי האורות, דבר המקטין את הפסד זמן הזינוק.
- נהגים העומדים סמוך לקו העצירה וממתינים לחילוף הפאזות ברמזור, צופים את חילוף האורות והפסד זמן הזינוק שלהם כנראה מתקצר באמצעות האות האדום-צהוב שמשכו בישראל הוא 2 שניות.
- האות האדום-צהוב נותן לנהגים מרווח זמן על מנת להתכונן לחילופי האורות בפנס. בזמן זה הנהג אמור לשלב להילוך ראשון (בכלי-רכב עם מערכת גיר הילוכים ידנית) ולהוריד את בלם היד. פעולות אלו נועדו להפחית את הפסד זמן הזינוק עם הופעת האור הירוק, וניתן לצפות כי הסרתו של האור מפנס הרמזור, תגרום לעלייה בהפסד זמן הזינוק. ברם, לנהג יש יכולת לצפות את הופעת הירוק על פי התנועות הנוגדות.

3. מתודולוגיה

3.1 מבוא

מחקר זה כאמור, מעריך היבטים של בטיחות ותנועה הקשורים לאות האדום-צהוב ברמזור. המחקר בוחן את דפוסי ניצול האות האדום-צהוב לתנועה, לרבות הפרת ההנחות בנושא של כניסה לצומת בזמן הבין-ירוקים ומידת יעילותו של האות בהפחתת הפסד זמן הזינוק.

ביתר פירוט, המחקר עוסק בבחינת הסוגיות להלן:

- מידת ההתקדמות של כלי הרכב במהלך האדום-צהוב, וכפועל יוצא, את זמן מעבר קו העצירה והכניסה לתחום הצומת.
- השפעת התנהגותם של נהגים על הפסדי זמן הזינוק, בהשוואה לממצאי מחקרים אחרים.

שילבים עיקריים בביצוע המחקר:

1. סקירה מקיפה של הספרות המקצועית והמחקרית בנושא תוכניות הרמזור בכלל ובנושא האות האדום-צהוב ותגובותיו של הנהג לאות זה, בפרט.
2. איסוף נתונים מצמתיים מרומזרים, באמצעות סרטי ווידאו, הן לצורך בחינת תנועות כלי הרכב במהלך האות האדום-צהוב והן לצורך חישוב הפסד זמן הזינוק.
3. ארגון הנתונים, עיבודם וניתוחם באמצעות מדדים סטטיסטיים.
4. ניתוח אנליטי ואמפירי של הממצאים, דיון במשמעויות הנובעות מהתוצאות והסקת מסקנות.

3.2 איסוף הנתונים

3.2.1 כללי

במטרה לאמוד את מידת השימוש באות האדום-צהוב לנסיעה, בשלב ראשון, רוכזו סרטי ווידאו מהצמתיים הנבחנים (ראה להלן פירוט מקורות הסרטים) ובהמשך, נבחנו סרטי הוידאו על-פי הפרמטרים כדלהלן:

- מועד הופעת האות האדום-צהוב והירוק בפנס.
 - המועד בו כלי הרכב הראשונים בתור החלו בתנועה ופרק הזמן שחלף עד שחצו את קו העצירה ביחס למועד הופעת האור הירוק.
 - מיקומו של כלי הרכב ביחס לקו העצירה עם הופעת האור הירוק.
 - המרחק מקו העצירה לקו רדיוס הפנייה של כלי הרכב בתנועה הנוגדת. נתון זה ישמש להערכת תגובתו של הנהג המתחיל בנסיעה, למיקומו של כלי-רכב מהתנועה הנוגדת בתחום הצומת.
 - מועדי חצייתם של כלי הרכב החמישי והעשירי, את קו העצירה.
- סעיפים 1 ו-2 רלוונטיים גם עבור כלי-רכב דו-גלגליים אשר תועדו בצילומים.

3.2.2 סרטי הווידיאו

סרטי הווידיאו צולמו בשתי שיטות שונות:

1. סרטים שהופקו ממצלמות ווידאו של המרכז לבקרת רמזורים בעיריית חיפה. בצמתיים שנדגמו, מוצבות המצלמות על פנס הרמזור באמצע הצומת, ולכן זווית הצילום אינה מאפשרת לצפות גם בחילוף האורות בפנס וגם בכלי הרכב העומדים בתור. על כן, על פי בקשה מיוחדת, הותקן פנס לבן בגב הרמזור מול המצלמה, כך שבעת שיידלק האור האדום-צהוב בפנס, בו-זמנית יידלק גם הפנס הלבן למשך 2 שניות בדיוק. בסרט ניתן להבחין בכלי הרכב הממתינים מול קו העצירה ובאותה עת בפנס הלבן המצביע על הופעת האור האדום-צהוב (איור 3.1).

איור 3.1: זווית הצילום ממצלמת העירייה (צומת אח"י אילת בקריות)



2. בצומת נמיר-ארלוזורוב בעיר תל-אביב, הוצבה מצלמה ביתית על שפת המדרכה בניגוד לכיוון נסיעת כלי הרכב. על מנת לתעד את מועד הופעת האדום-צהוב, נעזרנו בפנס הולכי הרגל (תמונה 3.2). מתוכנית הרמזורים למדנו את הזמן החולף מתחילת האדום של פנס הולכי הרגל ועד לתחילת מועד הופעת האדום-צהוב בפנס לכלי הרכב בגישה.

איור 3.2: זווית הצילום של המצלמה על שפת המדרכה (צומת נמיר-ארלוזורוב בת"א)



בסרטים תועדו עשרת כלי הרכב הראשונים בתור החוצים את קו העצירה בכיוון ישר, כמו גם אופנועים בסמיכות לקו העצירה. כלי הרכב החלו בתנועה ממצב של עמידה. נקודת הייחוס לחציית קו העצירה היתה מיקום הגלגל הקדמי של המכונית על קו העצירה. מונה הזמן הופעל מרגע הופעת

האור האדום-צהוב. מרגע זה ואילך נמדדו הזמנים הנחוצים למחקר כמפורט לעיל. מהירות הצילום במצלמות כאמור היא 25 'פריימים' לשנייה. מהירות זו מאפשרת לאסוף מידע ברמת דיוק של עד כמאת השנייה.

במסגרת המחקר נדגמו סרטי וידאו מימי חול באמצע השבוע (א'-ה') בשעות שיא בוקר (7:00-9:00) ושעות שיא ערב (16:00-18:00). במסגרת המדגם רוכזו נתונים נוספים: סוג הרכב (פרטי או דו-גלגלי) וכיוון הנסיעה. אורכם הכולל של סרטי הווידאו היה כ- 30 שעות צילום. מאחר והמידע הדרוש למחקר הן השניות הראשונות בתחילת כל פאזה, נדרשו שעות צפייה ארוכות בסרטי הווידאו וחלוקת קובץ הסרט לאירועים שתחילתם הופעת האדום-צהוב.

לאחר איסוף הסרטים ממכשיר ההקלטה ומצלמת הווידאו, נעשה שימוש בתוכנת Windows Movie Maker של חברת Microsoft - תוכנה לעריכת וידאו המאפשרת לצפות בצילומי הווידאו על ידי חלוקה לפריימים בודדים ברמת דיוק של 0.04 שניות, כמצוין לעיל.

3.2.3 מאפייני הצמתים הנחקרים

מיקומם של צמתים מרומזרים מסווג על-פי שלוש קטגוריות: צמתים עירוניים, עירוניים למחצה (Semi-Urban) ובין עירוניים. במחקר זה נדגמו צמתים מטיפוס עירוני ועירוני למחצה מאחר ואלו מאופיינים בנפחי תנועה גבוהים. בצמתים אלו עוברים צירים ראשיים, ותנועת יוממים בהם בשעת השיא, קרובה לכושר ההעברה של הצומת ואף גבוהים ממנו.

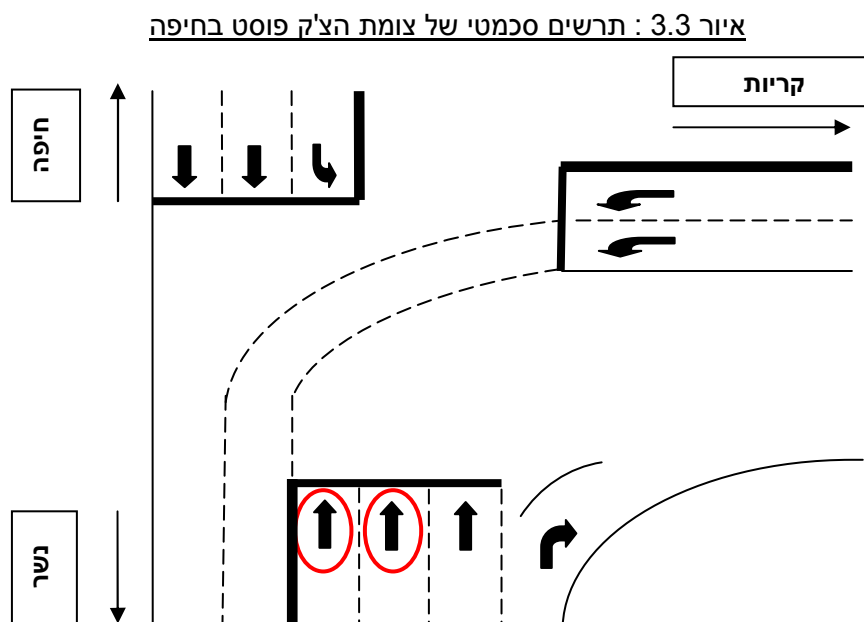
הצמתים שנדגמו הינם בעלי מאפיינים אחידים, במטרה לבודד את ההשפעות של גורמים חיצוניים ובלתי מבוקרים הן על אופן התנהגותו של הנהג והן על משטר הזרימה בגישה:

- הצמתים הנבחרים ממוקמים בשטח עם שיפוע מינימאלי ככל שניתן, על מנת לנטרל השפעת שיפוע הגישה לצומת על זמני הזינוק.
- נתיבי הנסיעה מהם נאספו נתונים הם בכיוון נסיעה ישר, בכדי לנטרל השפעתם של רדיוסי פנייה שונים על זמן הזינוק.

- לא נאספו נתונים מנתיבים או מחזורים בהם נצפה שיעור גבוה של כלי-רכב כבדים, מאחר ולאלו השפעה על הפסד זמן הזינוק וזרימת הרוויה.
 - הצילומים נערכו בתנאי מזג אוויר יבש בכדי לבודד את השפעתם של פני דרך רטובים.
- להלן מאפייני הצמתים ותרשים סכמטי של כל צומת – בכל תרשים מסומנים הנתיבים שנדגמו (מסומנים בעיגול אדום).

1. צומת הצ'ק פוסט בחיפה –

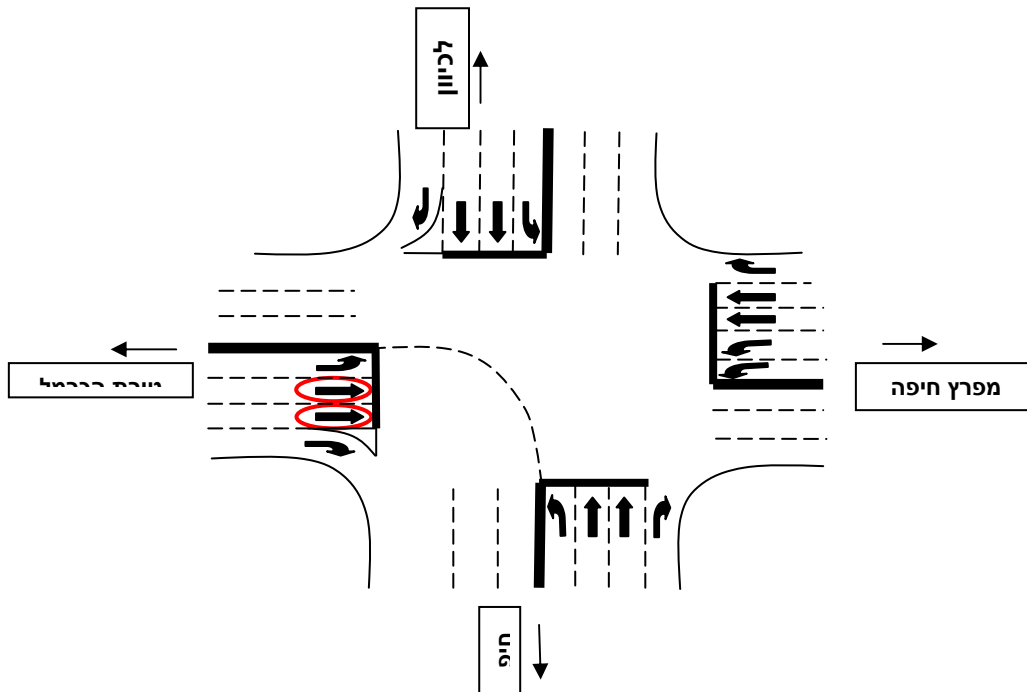
הצומת הינו צומת T, המהווה מפגש בין דרך בר- יהודה ושדרות ההסתדרות. הגישה המצולמת היא לבאים ממזרח על דרך בר-יהודה (מכיוון העיר נשר). בגישה קיימים שלושה נתיבים לנסיעה בכיוון ישר ופנייה חופשית ימינה. הנתונים נאספו משני הנתיבים השמאליים ביותר. יצוין כי מעל הצומת עובר גשר מחלף הקריות אולם זה אינו רלוונטי למחקר הנוכחי.



2. צומת מת"מ בחיפה –

הצומת הינו צומת צלב, המהווה מפגש בין כביש מספר 4 לבין דרך משה פלימן. הגישה המצולמת היא לבאים מדרום (טירת הכרמל) על כביש מספר 4. בגישה שני נתיבים לנסיעה בכיוון ישר, נתיב לפנייה שמאלה ופניה חופשית ימינה. נאספו נתונים משני הנתיבים בכיוון ישר.

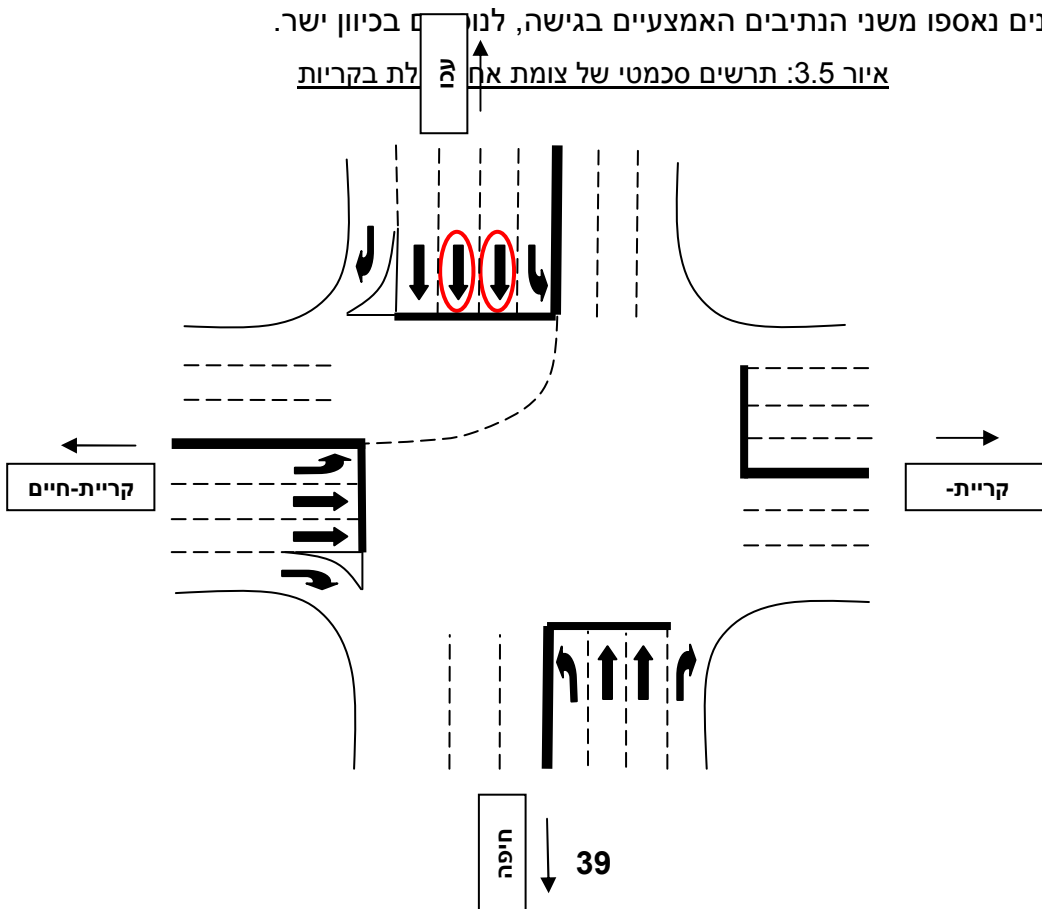
איור 3.4 : תרשים סכמטי של צומת מת"מ בחיפה



3. צומת אח"י אילת (קרוי גם צומת קריית-חיים) בקריות-

הצומת הינו צומת צלב, המהווה מפגש בין שדרות אח"י אילת בקריית חיים לבין שדרות ההסתדרות. הגישה המצולמת היא הגישה לבאים מכיוון צפון (עכו) על שדרות ההסתדרות. בגישה שלושה נתיבים לנסיעה בכיוון ישר, נתיב אחד לפנייה שמאלה ופנייה חופשית ימינה. הנתונים נאספו משני הנתיבים האמצעיים בגישה, לנו

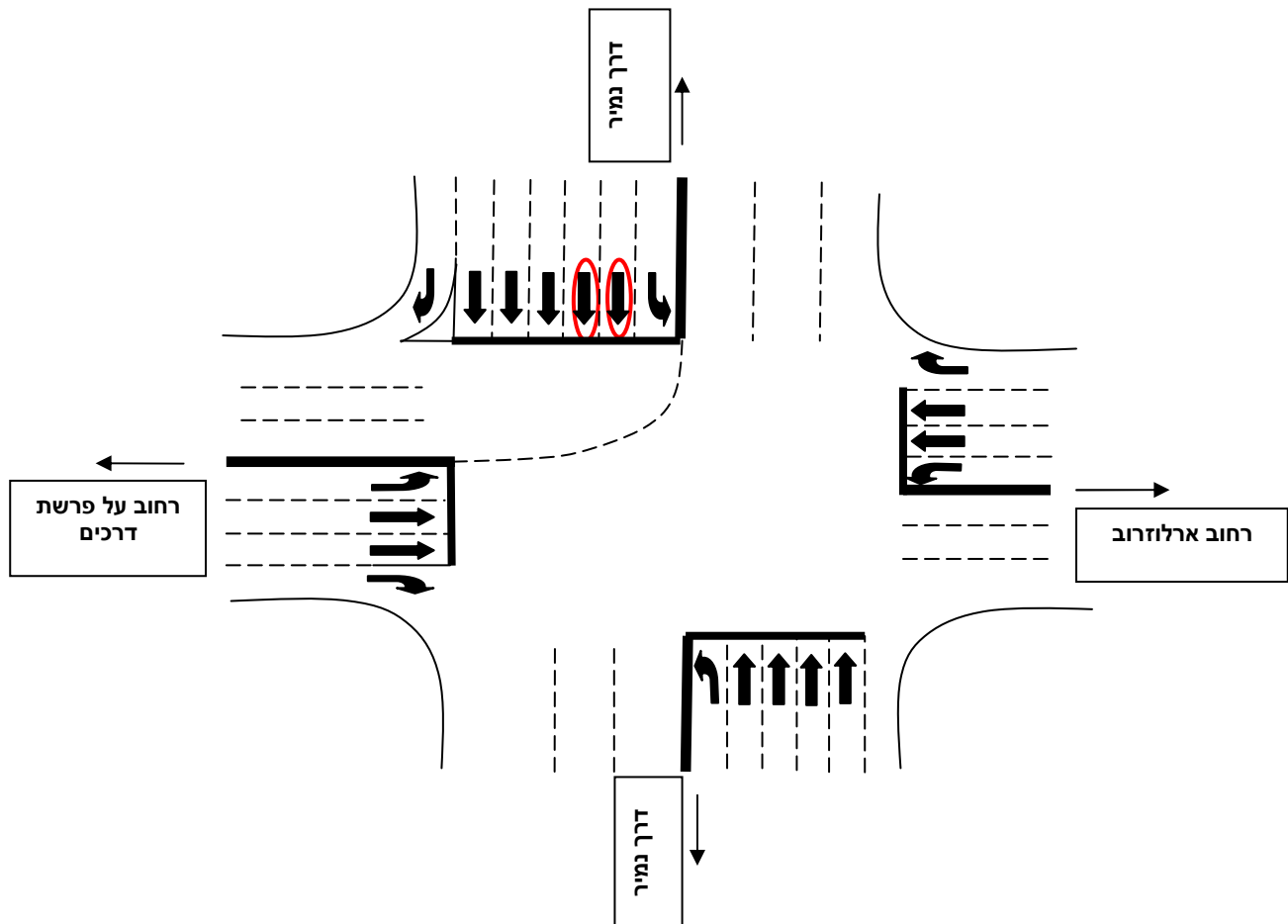
איור 3.5: תרשים סכמטי של צומת אח"י לת בקריות



4. צומת נמיר-ארלזרוב בתל אביב –

הצומת הינו צומת צלב, המהווה מפגש בין הרחובות נמיר וארלזרוב בסמוך לתחנת הרכבת. הגישה המצולמת היא הגישה לבאים מכיוון דרום על דרך נמיר. בגישה חמישה נתיבים לנסיעה בכיוון ישר, נתיב אחד לפנייה שמאלה ופנייה חופשית ימינה. הנתונים נאספו משני הנתיבים השמאליים ביותר בגישה, לנוסעים בכיוון ישר.

איור 3.6: תרשים סכמטי של צומת נמיר-ארלזרוב בתל-אביב



3.3 עיבוד הנתונים וניתוחם

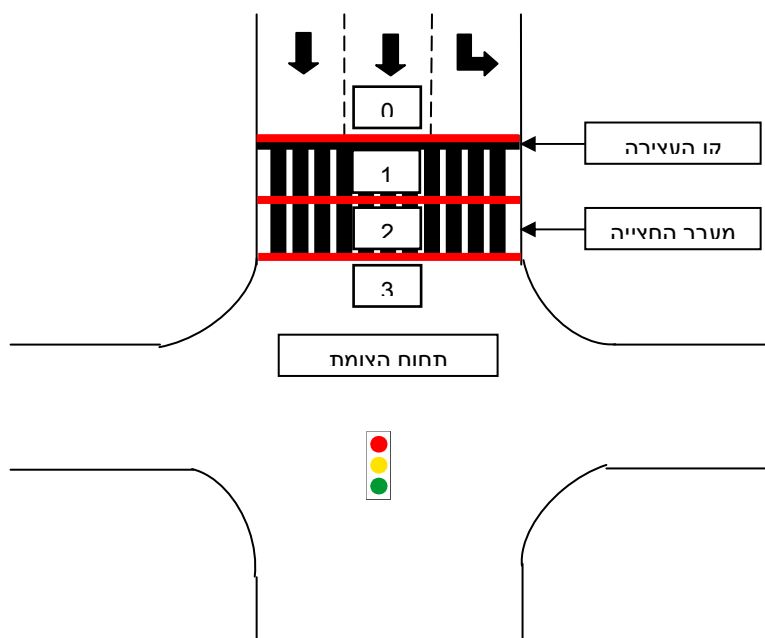
המידע שהתקבל מניתוח הסרטים הוזן לקובץ Excel. בקובץ מתועד המידע שנאסף מסרטי הווידאו עבור כל צומת, לאחר מיון וסינון. כל המידע שנאסף במחזור צילום אחד רוכז לכדי רשומה אחת המכילה את הנתונים הנדרשים שצוינו לעיל. בסה"כ, עבור כל צומת התקבלו כ-200 רשומות

(למעט צומת נמיר-ארלזרוב - 140 רשומות). הקובץ שימש בסיס ליצירת קבצי העבודה הדרושים למטרות השונות בשלבי העבודה השונים.

הנתונים הגולמיים בקובץ האמור שימושי לחישוב מדדים במטרה לנתח ולהעריך את התנהגות הנהגים עם הופעת האות האדום-צהוב:

- ממוצע פרק הזמן החולף מרגע הופעת האדום-צהוב בפנס ועד לתחילת הנסיעה של הרכב הראשון בתור. בתוך כך, חושבה סטיית התקן של פרק זמן זה. בנוסף, נערך חישוב של שיעור כלי הרכב המתחילים תנועתם ביחס להופעת האור הירוק, במרווחי זמן של 0.5 שניות.
 - ממוצע פרק הזמן החולף מרגע הופעת האדום-צהוב בפנס ועד למועד חציית קו העצירה ע"י כלי הרכב הראשון בתור. בתוך כך, חושבה סטיית התקן של פרק זמן זה. מנתונים אלו התקבל שיעור כלי הרכב החוצים את קו העצירה מתחילת הופעת האדום-צהוב ולאורכו (שתי שניות), במרווחי זמן של 0.5 שניות.
 - הגישה לצומת חולקה לארבעה תחומים, המגדירים את מיקומו של כלי הרכב המתחיל בתנועה במרחקים שונים ביחס לקו העצירה (איור 3.7):
 - תחום 0: לפני קו העצירה
 - תחום 1: בחציו הראשון של מעבר החצייה
 - תחום 2: בחציו השני של מעבר החצייה
 - תחום 3: למי שנמצאו מעבר למעבר החצייה
- נקודת הייחוס הינה גלגליו הקדמיים של כלי הרכב. כך למשל, העומדים לפני קו העצירה, בזמן הופעת הירוק, נמצאים בתחום 0. העומדים בחציו הראשון של מעבר החצייה (הקרוב לקו העצירה), בזמן הופעת הירוק, נמצאים בתחום 1. העומדים בחציו השני של מעבר החצייה, בזמן הופעת הירוק, נמצאים בתחום 2 והעומדים מעבר למעבר החצייה, בזמן הופעת הירוק, נמצאים בתחום 3.

איור 3.7: תחום הימצאות כלי הרכב בזמן הופעת הירוק



חישוב זרימת הרוויה:

השיטה המקובלת למציאת שיעור זרימת רוויה בצומת נתון, הינה על-ידי ביצוע תצפיות באותו הצומת. היתרון בשיטה זו, המובאת גם על-ידי (Berry (1974), הוא כי אין צורך לשקלל את זרימת הרוויה על-פי סוג כלי הרכב, פניות, רוחב הנתיב ויתר הגורמים המשפיעים על זרימת הרוויה. חסרונה של שיטה זו, שהיא מאפשרת קבלת נתונים עבור תכנון זמני מופעים לרמזור רק בצומת המסוים, כל זמן שהתנאים הגיאומטריים והתנועתיים אינם משתנים, על-כן, היא אינה מתאימה לחיזוי או ליישום בצמתים עם גיאומטריה שונה.

הנחת המוצא היא כי כל כלי הרכב הממתינים בתור, רוצים לעבור את הצומת באותו רגע בו מתאפשר הדבר. קצב המעבר מוגבל פיזית לקצב פינוי מירבי אשר מוגדר כזרימת הרוויה באותו נתיב או גישה. לפיכך, במהלך העבודה נמדדו זמני חציית קו העצירה של כלי הרכב שעברו את הצומת לאחר שעוכבו בתור שנוצר עם הופעת האור האדום בגישה לצומת. נהגים שהגיעו לצומת במשך המופע הירוק, ולא עצרו עצירה מלאה, לא נכללו בבסיס הנתונים.

במחקר זה, חישוב זרימת הרוויה התבצע על-ידי חלוקה של עשרת כלי הרכב הראשונים בתור

לשתי קבוצות נפרדות כדלהלן:

1. חמשת כלי הרכב הראשונים החוצים את קו העצירה מרגע הופעת הירוק.

2. חמשת כלי הרכב העוקבים החוצים גם הם את קו העצירה.

על מנת לנטרל את השפעת עיכוב זמן הזינוק, זרימת הרוויה מחושבת כהפרש בין זמן חציית הרכב העשירי את קו העצירה לבין זמן חצייתו של הרכב החמישי. הזמן המתקבל מחולק ל-5. על ידי חלוקת יחידת הזמן (שעה) בהפרש הזמנים הממוצע בין כלי הרכב (מרווחי הרוויה), מתקבלת זרימת הרוויה ביחידות של ר"פ/שעת ירוק/לנתיב. ניתן להבין זאת מתוך הנוסחה להלן:

[3.1]:

$$S = \frac{3600}{h}$$

כאשר:

S = שיעור זרימת הרוויה (ר"פ/שעת ירוק/נתיב).

h = מרווחי הרוויה (שניות).

[3.2]:

$$h = T_{10} - T_5 / 5$$

כאשר:

T_{10} = זמן חציית הרכב העשירי את קו העצירה מרגע הופעת הירוק

T_5 = זמן חציית הרכב החמישי את קו העצירה מרגע הופעת הירוק

חישוב הפסד זמן הזינוק:

הפסד זמן הזינוק של כלי הרכב הראשונים בתור, מחושב על פי ההפרש בין זמן חציית הרכב החמישי לבין זמן חציית הרכב העשירי את קו העצירה מזמן הופעת האור הירוק, על-פי נוסחה [2.13 דלעיל:

$$SOL = t_5 - (t_{10} - t_6)$$

4. ממצאי תצפיות השדה

4.1 כללי

בפרק זה יתוארו ממצאי תצפיות השדה של מאפייני התנהגות הנהגים הממתינים בתור לחילוף האורות בתחילת הפאזה. המידע שהתקבל מתצפיות אלו, כולל נתונים מ-4 צמתים מרומזרים בערים חיפה ותל-אביב. כלי הרכב שנצפו ונכללו בבסיס הנתונים הם כלי הרכב הפרטיים והדו-גלגליים, הראשונים בתור. בנוסף, תועדו תשעת כלי הרכב העוקבים בשיירה, אשר הספיקו לחצות את קו העצירה בזמן המופע הירוק. הממצאים בפרק 4.2 מתייחסים למכוניות ורכב דו-גלגליים. הממצאים בפרק 4.3 מתייחסים למכוניות בלבד. בעבודה זו, נדגמו בסה"כ כ-155 דו-גלגליים בצומת נמיר-ארלזרוב בתל אביב.

נתוני הבסיס אינם כוללים מצבים בהם נצפה קונפליקט בין התנועה המתחילה לתנועה המסיימת, להולכי רגל במעברי החצייה, או חסימה של הצומת. דהיינו, כשהתנועה המתחילה הייתה עלולה להתעכב עם תחילת הפאזה.

בכל צומת, נאספו צילומים מכ-100 מחזורי רמזור, למעט צומת נמיר-ארלזרוב, שם צולמו 70 מחזורים. בכל צומת צולמו שני נתיבים כך שבסה"כ התקבלו כ-740 רשומות (כל רשומה מציינת את כלי הרכב הראשון בתור בנתיב המצולם). כל רשומה מכילה את הנתונים להלן:

- מספר סידורי
- מועד הופעת האור האדום-צהוב בפנס
- מועד הופעת האור הירוק בפנס
- מועד תחילת התנועה של כלי הרכב הראשון
- מועד חציית קו העצירה של כלי הרכב הראשון
- מיקומו הפיסי של כלי הרכב ביחס לאור הירוק
- מועד חציית קו העצירה של כלי הרכב החמישי בתור
- מועד חציית קו העצירה של כלי הרכב העשירי בתור
- בצומת נמיר-ארלזרוב נדגם גם מועד הופעת האדום להולכי הרגל

4.2 מיקום כלי הרכב ביחס לקו העצירה

טבלה 4.1 מציגה את שיעור הנהגים הממתינים לפני או מעבר לקו העצירה ברגע הופעת האדום-צהוב. 87 נהגים (12% מכלל הרשומות) בכלי הרכב הפרטיים המתינו מעבר לקו העצירה. השיעור הגבוה ביותר נמצא בצמתים אח"י אילת ומת"מ (15%). לעומת מכוניות, 59% מהרוכבים המתינו מעבר לקו.

טבלה 4.1: מיקום כלי הרכב ברגע הופעת האדום-צהוב

סוה"כ כלי-רכב	שיעור כלי הרכב הממתינים מעבר לקו העצירה	שיעור כלי הרכב הממתינים לפני קו העצירה	צומת
200	15%	85%	אח"י אילת
200	15%	85%	מת"מ
140	10%	90%	נמיר-ארלזרוב
200	8%	92%	צ'ק - פוסט
740	12%	88%	Total
155	59%	41%	נמיר-ארלזרוב דו-גלגליים

לצורך חישוב מיקום כלי הרכב ביחס למועד הופעת האור הירוק, הוצאו מבסיס הנתונים הנהגים אשר כבר חצו את קו העצירה עם הופעת האדום-צהוב (12%). בניגוד לכך, כל הדו-גלגליים נכללו בבסיס הנתונים.

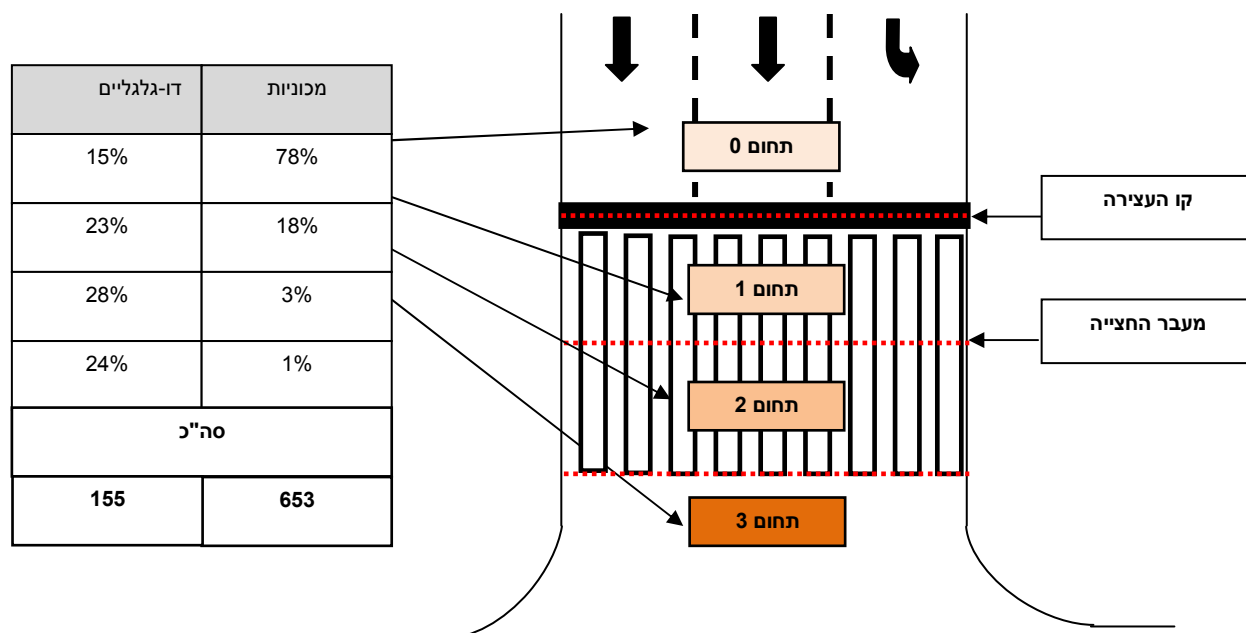
טבלה 4.2 ואיור 4.3 מציגים את שיעור הנהגים הנמצא במועד הופעת הירוק בתחומים השונים בגישה הנבחנת⁶. כ- 21% מכלי הרכב בכל הצמתים נמצאו בתחומים 1 ו- 2 (על מעבר החצייה) בזמן הופעת הירוק, וכ- 1% נמצא תחום 3 (מעבר למעבר החצייה). בצומת הצ'ק-פוסט נמצא שיעור גבוה מאוד של נהגים בתחומים 1 ו-2 (30%). בזמן הופעת הירוק, כ-85% מהדו-גלגליים בצומת נמיר-ארלזרוב נמצאים מעבר לקו העצירה.

⁶ ראה/י פירוט על אופן החלוקה לתחומים בפרק המתודולוגיה – 3.3

טבלה 4.2: מיקום כלי הרכב ברגע הופעת הירוק⁷

צומת	תחום הימצאות כלי הרכב בגישה לצומת				סה"כ כלי-רכב שהמתינו לפני קו העצירה	סה"כ כלי-רכב מעבר לקו העצירה	סה"כ כלי-רכב בגישה לצומת
	0	1	2	3			
אח"י אילת	81%	14%	4%	1%	171	29	200
מת"מ	84%	15%	1%	0%	171	29	200
נמיר-ארלזרוב	78%	16%	4%	2%	126	14	140
צ'ק - פוסט	69%	25%	5%	1%	185	15	200
Total	78%	18%	3%	1%	653	87	740
נמיר-ארלזרוב דו-גלגליים ⁸	15%	23%	28%	34%	130	25	155

איור 4.1: מיקום כלי הרכב ברגע הופעת הירוק - תרשים סכמטי של הגישה המצולמת



⁷ מכוניות פרטיות שהמתינו לפני קו העצירה בזמן האדום-צהוב
⁸ כל הדו-גלגליים בגישה המצולמת

בסה"כ, כ- 88% מכלל נהגי המכוניות הפרטיות המתינו לפני קו העצירה בזמן הופעת האדום-צהוב. מתוכם, כ-22% כבר נמצאים על מעבר החצייה או מעבר לו לאחר שתי שניות של האות האדום-צהוב. כלומר, חמישית מהנהגים הספיקו לחצות את קו העצירה אל תחום הצומת טרם סיום הזמן הבין-ירוקים. שיעור גבוה הרבה יותר של רוכבים (85%) נמצא מעבר לקו העצירה (רק 41% המתינו לפני הקו) ברגע הופעת האור הירוק. מתוכם, קרוב ל-30% נמצאו בזמן זה מעבר למעבר החצייה, בתוך אזור הקונפליקט. מהנתונים דלעיל נראה כי:

- חלק מנהגים במכוניות פרטיות עושים שימוש בזמן האדום-צהוב בכדי להפחית את זמן הכניסה שלהם אל תוך הצומת.
- עבור רוכבי אופנועים, נקודת ההמתנה בתחילת הפאזה נמצאת מעבר לקו העצירה.

4.3 תזמון תחילת התנועה של כלי הרכב הראשונים בתור

בפרק זה יתוארו תוצאות התצפיות בארבעת הצמתים הנדגמים. הנתונים ישמשו לעריכת ניתוח של תזמון תחילת תנועת כלי הרכב עם הופעת האדום-צהוב. מהנתונים עולה, כי 3% מכלל הנהגים בכלי הרכב הפרטיים התחילו תנועתם בזמן האדום. נהגים אלו אינם כלולים בבסיס הנתונים בתת-פרק זה, מאחר ומחקר זה עוסק בתגובת הנהגים להופעת האות האדום-צהוב. תחילת התנועה בזמן האדום תידון בנפרד בפרק 5 (מסקנות ודיון).

4.3.1 כלי-רכב פרטיים

טבלה 4.3 מציגה את תזמון תחילת התנועה ממועד הופעת האדום-צהוב. כלי-רכב אשר המתינו לפני קו העצירה, התחילו תנועתם כ-1.67 שני' לאחר הופעת האות האדום צהוב או במילים אחרות כ-0.33 שניות בממוצע לפני הופעת האור הירוק. כ-16% מבין כל הנהגים, התחילו תנועתם במהלך השנייה הראשונה של האדום-צהוב (17% בצומת נמיר-ארלוזורוב). 50% התחילו את תנועתם במהלך שנייה וחצי מהופעת האדום-צהוב (63% בצומת הצ'ק פוסט). סה"כ כ-70% מכלי הרכב החלו תנועתם במהלך האות הצהוב-אדום ורק 30% מהנהגים עדין עמדו במקומם עם הופעת האור הירוק בפנס.

טבלה 4.3: תזמון תחילת התנועה מרגע הופעת האדום-צהוב⁹

סה"כ כ"ר	תחילת תנועה לאחר הופעת הירוק	סה"כ כ"ר שהתחילו תנועה במהלך האדום-צהוב	עד 2 שניות ממועד הופעת האדום-צהוב (מצטבר)	עד 1.5 שניות ממועד הופעת האדום-צהוב (מצטבר)	עד 1 שנייה ממועד הופעת האדום-צהוב	תחילת תנועה (שניות מרגע הופעת האדום-צהוב)		צומת
						ממוצע	סטיית תקן	
196	44%	109	56%	28%	6%	1.90	0.77	אח"י אילת
200	38%	124	62%	46%	12%	1.81	0.89	מת"מ
126	21%	100	79%	62%	17%	1.59	0.71	נמיר-
187	19%	151	81%	63%	4%	1.45	1.02	צ'ק – פוסט
715	30%	500	70%	50%	16%	1.67	0.81	Total

הנהגים בצומת הצ'ק-פוסט, החלו בתנועה כ- 1.45 שניות בממוצע ממועד הופעת האדום-צהוב-פרק הזמן הקצר ביותר מבין כל הצמתים. פרק הזמן הארוך ביותר נמצא בצומת אח"י אילת (1.90 שניות בממוצע). כלומר, תזמון תחילת התנועה שונה בין צומת אחד למשנהו. תופעה זו יכולה להצביע על התנהגות שונה של נהגים בצמתים שונים. כדי לאמת השערה זו, נערכה בדיקת מובהקות סטטיסטית מסוג F (ANOVA) להשוואת ממוצעי ארבעת המדגמים. מטבלה 4.4 עולה כי ההבדל בין ארבעת הצמתים מובהק סטטיסטית.

טבלה 4.4: מבחן ANOVA חד-גורמי לבדיקת ההבדל בין ממוצעי זמן תחילת התנועה בין הצמתים

SOURCE OF VARIATION	SS	DF	MS	F	P-VALUE	F CRIT
Between Groups	23.54	3	7.84	10.57	8.29E-07	2.61
Within Groups	530.77	715	0.74			
Total	554.31	718				

⁹ לא כולל נהגים שהתחילו תנועתם בזמן האדום

עם מציאת הבדל מובהק בין הצמתים, נערכה בדיקת מובהקות סטטיסטית מסוג T לבחינת ההשערה כי ממוצע זמן תחילת התנועה של הנהגים בצומת הצ'ק פוסט **קטן** לעומת כל צומת אחר שנבחן. בסה"כ בוצעו כשלושה מבחני T.

השערות ה- H_0 ו- H_1 הן:

$$H_0 : \mu_{checkpost} - \mu_{other} = 0$$

$$H_1 : \mu_{checkpost} - \mu_{other} < 0$$

$\mu_{checkpost}$ = ממוצע זמן תחילת התנועה בצ'ק פוסט

μ_{other} = ממוצע זמן תחילת התנועה בצומת נבחן אחר

$$T = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - d_0}{S_p / \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$$

סטטיסטי מבחן T הוא:

לפי תוצאות בדיקת המובהקות מסוג T מתקבל:

P-VALUE	צומת
0.0000	אח"י אילת
0.0001	מת"מ
0.0801	נמיר ארלזרוב

לגבי ההשוואה בין צומת הצ'ק פוסט לצמתים אח"י

אילת ומת"מ, עבור רמת מובהקות של $\alpha = 0.05$, נדחית השערת ה- H_0 (ממוצע זמנים זהה). לגבי ההשוואה בין צומת הצ'ק פוסט לצומת נמיר-ארלזרוב, לא נדחית השערת ה- H_0 ברמת מובהקות של 5%.

4.3.2 כלי-רכב דו-גלגליים:

טבלה 4.5 מסכמת את הזמנים הממוצעים של מועד תחילת התנועה של רוכבי הדו-גלגליים. הסימן השלילי מצביע על כך שהרוכבים מתחילים תנועתם בזמן האור האדום. בהתייחס למועד הופעת

האדום- צהוב, הזמן הממוצע למועד תחילת תנועה של אלו הממתינים לפני הקו הוא 0.28 – שניות טרם הופעת האדום-צהוב. הזמן הממוצע למועד תחילת תנועה של אלו הממתינים מעבר לקו הוא 0.72 - שניות טרם הופעת האדום-צהוב. כלומר, הרוכבים העומדים מעבר לקו העצירה מתחילים תנועתם כ- 0.5 שניות לפני אלו העומדים לפני הקו. יצוין כי חלק מרוכבי האופנועים הממתינים מעבר לקו העצירה, נמצאו אף מעבר למעבר החציה, קרי, בתוך תחום הצומת.

טבלה 4.5 : תזמון תחילת התנועה של כלי רכב דו-גלגליים מרגע הופעת האדום-צהוב (בשניות)

ממתינים מעבר לקו העצירה		ממתינים לפני קו העצירה		סה"כ		
ממוצע	סטיית תקן	ממוצע	סטיית תקן	ממוצע	סטיית תקן	
-0.72	2.38	-0.28	1.53	-0.54	2.08	זמן תחילת תנועה (מרגע הופעת האדום-צהוב)
-2.72	2.38	-2.31	1.51	-2.55	2.07	זמן תחילת תנועה (מרגע הופעת הירוק)

מהשוואה בין רוכבים הממתינים לפני ומעבר לקו העצירה, נראה כי מועד תחילת התנועה של הרוכבים הממתינים מעבר לקו מוקדם יותר מזה של הממתינים לפני הקו. כדי לאמת השערה זו, נערכה בדיקת מובהקות סטטיסטית מסוג T להשוואת ממוצעי שני המדגמים.

השערות ה- H_0 ו- H_1 הן:

$$H_0 : \mu_{in_front} - \mu_{behind} = 0$$

$$H_1 : \mu_{in_front} - \mu_{behind} < 0$$

$$\mu_{in_front} = \text{ממוצע זמן תחילת התנועה של הרוכבים מעבר לקו העצירה}$$

$$\mu_{behind} = \text{ממוצע זמן תחילת התנועה של הרוכבים לפני קו העצירה}$$

$$T = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - d_0}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$$

סטטיסטי מבחן T הוא:

לפי תוצאות בדיקת המובהקות מסוג T מתקבל: $P - value = 0.0975$

עבור רמת מובהקות של $\alpha = 0.05$, לא נדחית השערת H_0 , הטוענת כי ממוצע זמן התחלת

הנסיעה של רוכבים הממתינים מעבר לקו העצירה, קטן מזה של הממתינים לפניו.

4.3.3 כלי-רכב פרטיים לעומת דו-גלגליים:

מהשוואה בין כלי רכב דו-גלגליים למכוניות הפרטיות, נראה כי מועד תחילת תנועתם של

האופנועים מוקדם יותר משל שאר כלי הרכב (-0.54 ו-1.67 שניות, בהתאמה) - הפרש של 2.21

שניות. כדי לאמת השערה זו, נערכה בדיקת מובהקות סטטיסטית מסוג T להשוואת ממוצעי שני

המדגמים.

$$H_0 : \mu_{car} - \mu_{motorcycle} = 0$$

השערות ה- H_0 ו- H_1 הן:

$$H_1 : \mu_{car} - \mu_{motorcycle} > 0$$

$$\mu_{car} = \text{ממוצע זמן תחילת התנועה לרכב פרטי}$$

$$\mu_{motorcycle} = \text{ממוצע זמן תחילת התנועה לרכב דו-גלגלי}$$

לפי תוצאות בדיקת המובהקות מסוג T מתקבל: $P - value = 4.3E - 10$

עבור רמת מובהקות של $\alpha = 0.05$, נדחית השערת H_0 הטוענת כי מועד התחלת הנסיעה

של רוכבי הדו-גלגליים, קטן מממוצע הזמן של נהגים כלי הרכב הפרטיים.

איור 4.2 מציג את התפלגות שיעור מועדי תחילת התנועה של הנהגים הראשונים בתור ביחס

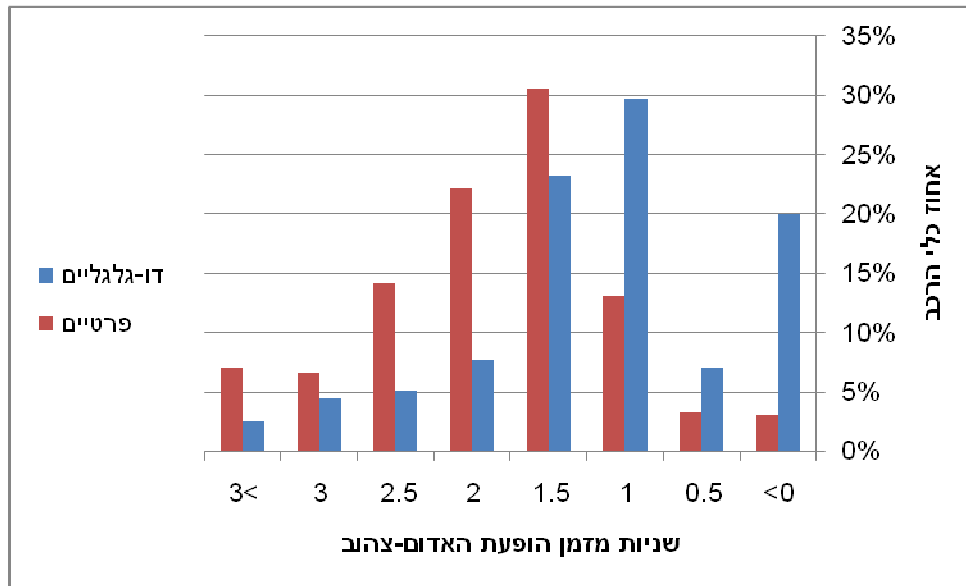
למועד הופעת האדום-צהוב. הגרף מציג השוואה בין מכוניות לדו-גלגליים. כ-30% מכלי הרכב

הפרטיים מתחילים תנועתם במהלך שנייה וחצי מרגע הופעת האדום-צהוב. שיעור דומה נמצא אצל

רוכבי דו-גלגליים שהתחילו תנועתם במהלך השנייה הראשונה. בנוסף, ניתן לראות כי התפלגות זמני

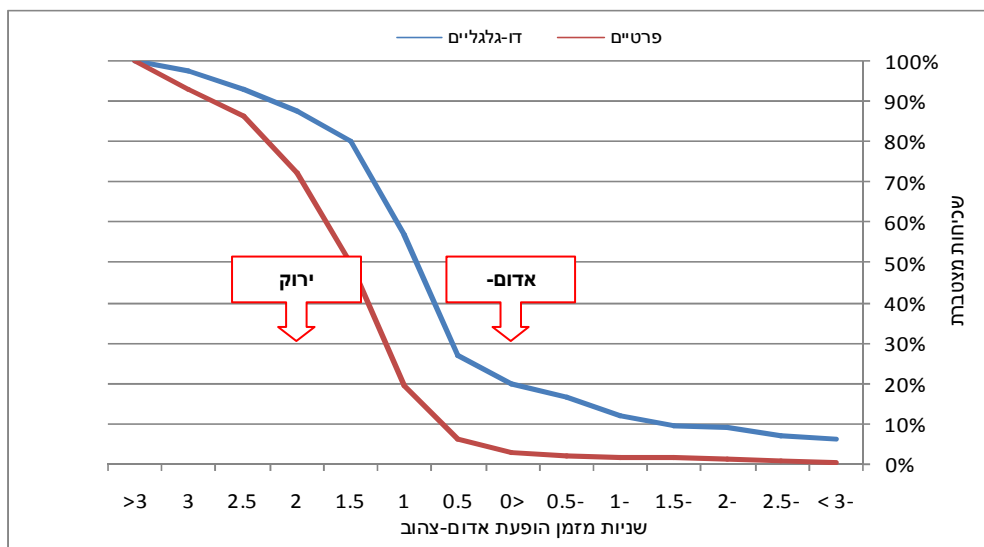
תחילת התנועה של הדו-גלגליים, נוטה לכיוון זמן הקטן מ-0, קרי, בזמן המופע האדום.

איור 4.2: התפלגות מועדי תחילת תנועה ביחס לרגע הופעת האדום-צהוב: מכוניות לעומת דו-גלגליים



איור 4.3 מציג את השכיחות המצטברת של מועדי תחילת התנועה של כלי הרכב הפרטיים בהשוואה לדו-גלגלים, על פני ציר הזמן. ניתן לראות כי עבור המכוניות הפרטיות, השיפוע מתון עד שנייה אחת מרגע הופעת האדום-צהוב ואילו עבור האופנועים השיפוע מתון עד חצי שנייה מרגע הופעת האדום-צהוב.

איור 4.3: שכיחות מצטברת של מועד תחילת התנועה ביחס להופעת האדום-צהוב - מכוניות לעומת דו-גלגליים



סיכום:

מהממצאים עולה כי שיעור גבוה מאוד של נהגים (70%) הממתינים להופעת האור הירוק, מתחיל תנועתו טרם סיום הזמן הבין-ירוקים. בממוצע, הנהגים מתחילים תנועתם כ-0.33 שניות טרם הופעת הירוק. Maxwell & York באנגליה, הראו כי 66% מהנהגים מתחילים תנועתם טרם הופעת הירוק. הנהגים התחילו תנועתם כ-0.25 שניות לפני הופעת הירוק, בממוצע. דנציגר הראה כי בצומת נמיר-ארלזרוב, 57% מתחילים תנועה טרם הופעת הירוק (79% במחקר הנוכחי). הנהגים התחילו תנועתם כ-0.53 שניות לאחר הופעת הירוק, בממוצע לעומת 0.41 שניות טרם הופעת הירוק, במחקר הנוכחי.

השיעור הגבוה של הנהגים המקדימים להתחיל בתנועה יתכן ונגרם כתוצאה מ:

- נהג, המבחין בהולכי רגל אשר סיימו לחצות את מעבר החצייה, מצפה לסיום הופעת האור האדום בפנס.
- בצמתים מרומזרים, בהם קיים מעבר חצייה להולכי רגל, המופע האדום לרכב הממתין קצר יותר ויתכן כי הנהג אינו מעלה את בלם היד או נשאר בהילוך נסיעה. דבר זה מפחית את זמן התגובה שלו.

לעומת נהגים ברכב פרטי, הרוכבים בצומת נמיר-ארלזרוב מתחילים תנועתם כחצי שנייה טרם הופעת האדום-צהוב, כלומר במהלך האור האדום. ההבדל נמצא מובהק סטטיסטית. ההמתנה של הרוכבים מעבר לקו, מאפשרת להם לראות טוב יותר את המתרחש בצומת – סיום הפאזה וקונפליקטים אפשריים – ולהגיב מהר יותר מנהגי רכב פרטי.

4.4 חציית קו העצירה של כלי הרכב הראשונים בתור בתחילת הפאזה

בתת-פרק זה, בסיס הנתונים לא כולל נהגים אשר המתינו על ו/או מעבר לקו העצירה . כמו-
 כן, תועד מקרה אחד בלבד בו הנהג חצה את קו העצירה בזמן האדום. מקרה זה לא נכלל בנתוני
 הבסיס.

4.4.1 כלי-רכב פרטיים:

טבלה 4.6 מציגה את ממוצע מועד חציית קו העצירה ביחס למועד הופעת האדום-צהוב והירוק. כמו-
 כן, מוצג שיעור הנהגים החוצים את קו העצירה במועדים השונים. ממוצע מועד חציית הקו עבור כל
 הצמתים יחד הוא 2.89 שניות - קרוב לשנייה אחת ממועד הופעת האור הירוק בפנס. כ-2% מכלל
 הנהגים חצו את הקו במהלך השנייה הראשונה מרגע הופעת האדום-צהוב. כ-4% חצו את הקו
 במהלך שנייה וחצי מרגע הופעתו. בסה"כ, כ-13% מהנהגים בכל הצמתים חוצים את הקו במהלך
 האדום-צהוב. בצומת הצ'ק-פוסט, כ-22% מהנהגים חוצים את קו העצירה לפני הופעת הירוק.

טבלה 4.6 : חציית קו העצירה של כלי הרכב הפרטיים ביחס למועד הופעת האדום-צהוב והירוק¹⁰

סוה"כ כלי-רכב שהמתינו לפני קו העצירה	חוצים לאחר הופעת הירוק	מספר כ"ר החוצים את הקו במהלך האדום- צהוב	חוצים עד 2 שניות מזמן האדום- צהוב (מצטבר)	חוצים עד 1.5 שניות מזמן האדום-צהוב (מצטבר)	חוצים עד 1 שניות מזמן האדום- צהוב	חציית קו העצירה (שניות מרגע הופעת האדום-צהוב)		צומת
						ממוצע	סטטיית תקן	
171	89%	19	11%	4%	2%	1.06	3.00	אח"י אילת
171	90%	17	10%	3%	3%	0.90	2.94	מת"מ
126	95%	7	5%	2%	0%	0.83	3.18	נמיר- ארלזרוב
185	78%	40	22%	6%	2%	0.79	2.55	צ'ק פוסט
653	87%	83	13%	4%	2%	0.94	2.89	Total

¹⁰ נהגים העומדים לפני קו העצירה

הנהגים בצומת הצ'ק-פוסט, חצו את קו העצירה כ- 0.55 שניות במוצע מרגע הופעת הירוק - הזמן הקצר ביותר מבין כל הצמתים. זמן החצייה הארוך ביותר, נמצא בצומת נמיר-ארלזרוב (1.18 שניות במוצע). כלומר, מועד חציית הקו שונה בין צומת אחד לשני. תופעה זו יכולה להצביע על התנהגות שונה של הנהגים בצמתים שונים. כדי לאמת השערה זו, נערכה בדיקת מובהקות סטטיסטית מסוג F (ANOVA) להשוואת ממוצעי ארבעת המדגמים. מטבלה 4.7 ניתן לראות שההבדל בין ארבעת הצמתים מובהק סטטיסטית.

טבלה 4.7: מבחן ANOVA חד-גורמי לבדיקת ההבדל בין ממוצעי זמן חציית קו העצירה בין הצמתים

SOURCE OF VARIATION	SS	DF	MS	F	P-VALUE	F CRIT
Between Groups	34.86	3	11.62	14.01	7.32218E-09	2.62
Within Groups	538.08	649	0.83			
Total	572.94	652				

לאחר מציאת הבדל מובהק בין הצמתים, נעשתה בדיקת מובהקות סטטיסטית מסוג T לבחינת ההשערה כי ממוצע מועד החצייה של הנהגים בצומת הצ'ק פוסט קטן לעומת כל צומת נבחן אחר. בסה"כ בוצעו שלושה מבחני T.

השערות ה- H_0 ו- H_1 הן:

$$H_0 : \mu_{checkpost} - \mu_{other} = 0$$

$$H_1 : \mu_{checkpost} - \mu_{other} < 0$$

$$\mu_{checkpost} = \text{ממוצע זמן חציית הקו בצ'ק פוסט}$$

$$\mu_{other} = \text{ממוצע זמן חציית הקו בצומת נבחן אחר}$$

לפי תוצאות בדיקת המובהקות מסוג T מתקבל:

P-VALUE	צומת
3.71651E-	אח"י אילת
1.42566E-	מת"מ
5.24587E-	נמיר ארלזרוב

עבור רמת מובהקות של $\alpha = 0.05$, נדחית השערת ה- H_0 הטוענת כי ממוצע מועד חציית

קו העצירה בצומת הצ'ק פוסט קטן מזה שבצמתים האחרים.

4.4.2 דו-גלגליים:

טבלה 4.8 מסכמת את ממוצעי מועדי חציית קו העצירה של כלי רכב דו-גלגליים. מובן מאליו כי הרוכבים שהתתינו מעבר לקו לא נכללו בבסיס הנתונים. הזמן הממוצע לחציית הקו הוא כ-0.2 שניות מרגע הופעת האדום-צהוב. כמו-כן, ניתן לראות כי כ-75% מהרוכבים חוצים את הקו טרם הופעת הירוק.

טבלה 4.8 : חציית קו העצירה של כלי רכב דו-גלגליים

סה"כ אופנועים	אחוז החוצים את הקו במהלך המופעים השונים			זמן חציית קו עצירה מרגע הופעת הירוק (שניות)		זמן חציית קו עצירה מרגע הופעת האדום-צהוב (שניות)	
	ירוק	אדום-צהוב	אדום	ממוצע	סטיית תקן	ממוצע	סטיית תקן
64	25%	59%	16%	1.62	-1.83	1.63	0.2

4.4.3 כלי-רכב פרטיים לעומת דו-גלגליים:

מהשוואה בין כלי רכב דו-גלגליים לבין המכוניות הפרטיות, נראה כי מועד חציית קו העצירה של אופנועים מוקדם יותר מזה של כלי הרכב הפרטיים (0.2 ו-2.89 שניות, בהתאמה) – הפרש של 2.69 שניות. כדי לאמת השערה זו, נערכה בדיקת מובהקות סטטיסטית מסוג T להשוואת ממוצעי שני המדגמים.

$$H_0 : \mu_{car} - \mu_{motorcycle} = 0$$

$$H_1 : \mu_{car} - \mu_{motorcycle} > 0$$

השערות ה- H_0 ו- H_1 הן:

$$\mu_{car} = \text{ממוצע זמן תחילת התנועה לרכב פרטי}$$

$\mu_{motorcycle} =$ ממוצע זמן תחילת התנועה לרכב דו-גלגלי

לפי תוצאות בדיקת המובהקות מסוג T מתקבל: $P\text{-value} = 6.8E-12$

עבור רמת מובהקות של $\alpha = 0.05$, נדחית השערת H_0 הטוענת כי מועד חציית קו העצירה

של דו-גלגליים מוקדם מזה של כלי הרכב הפרטיים.

איור 4.4 מציג את התפלגות שיעור מועדי חציית קו העצירה של הנהגים הראשונים בתור

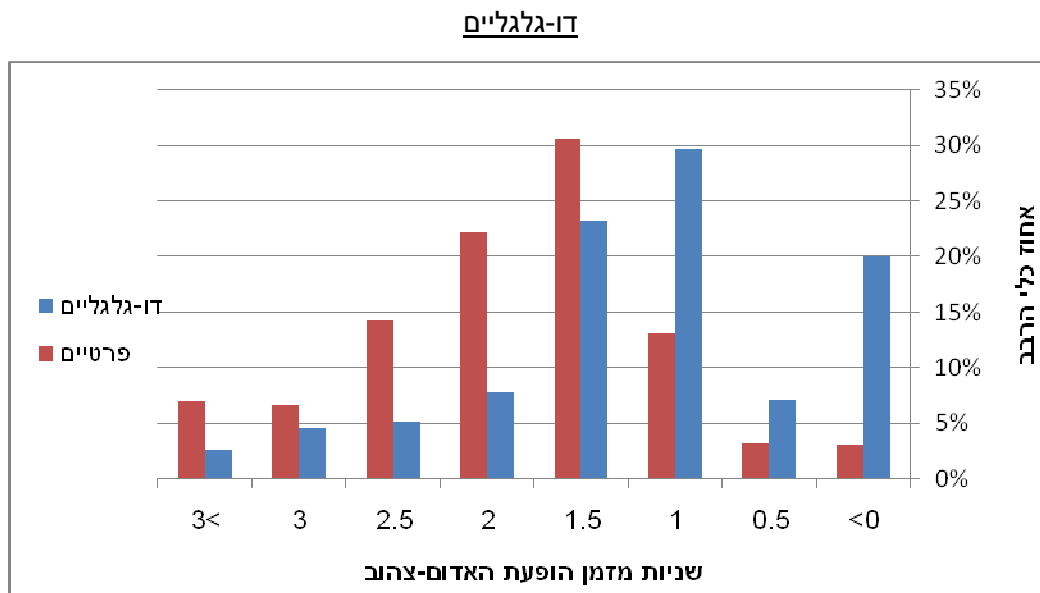
ביחס למועד הופעת האדום-צהוב. הגרף מציג השוואה בין מכוניות לדו-גלגליים. השיעור הגבוה ביותר

של רכבים פרטיים, חצה את קו העצירה במהלך השנייה הראשונה מרגע הופעת הירוק (כ- 67%

בסה"כ). לעומתם, קרוב ל-30% מרוכבי האופנועים, חוצים את קו העצירה בשנייה הראשונה של

האור האדום-צהוב. יותר מ-15% מהרוכבים אף חוצים בזמן המופע האדום.

איור 4.4: התפלגות מועדי חציית קו העצירה ביחס לרגע הופעת האדום-צהוב: מכוניות מכוניות לעומת



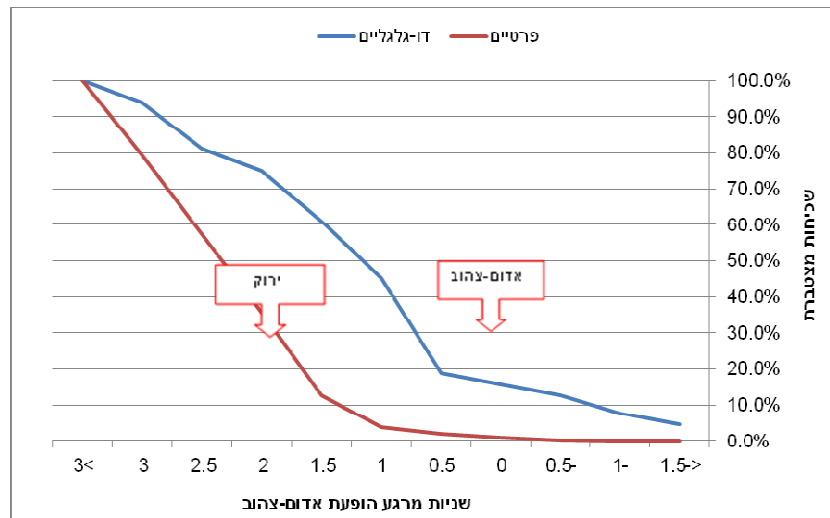
איור 4.5 מציג את השכיחות המצטברת של מועדי חציית קו העצירה של כלי הרכב הפרטיים

בהשוואה לדו-גלגלים, על פני ציר הזמן. ניתן לראות כי עבור המכוניות הפרטיות, השיפוע מתון עד

שנייה וחצי מרגע הופעת האדום-צהוב ואילו עבור האופנועים השיפוע מתון עד חצי שנייה מרגע

הופעת האדום-צהוב.

איור 4.5 : שכיחות מצטברת של מועדי חציית קו העצירה: מכוניות לעומת רכב דו-גלגלי



סיכום:

מהממצאים עולה כי שיעור לא מבוטל של נהגים בכל הצמתים (13%) חוצים את קו העצירה

במהלך הזמן הבין-ירוקים. לנהגים נדרשו כ- 0.89 שניות בממוצע לחצות הקו, מרגע הופעת הירוק.

השוואה בין הצמתים במחקר הנוכחי, מעלה כי בצומת הצ'ק-פוסט שיעור הנהגים החוצים את

הקו טרם הופעת הירוק הוא גבוה מאוד (22%), לעומת צומת נמיר-ארלזרוב (רק 5%). ההבדל בין

הצמתים נמצא מובהק סטטיסטית. ההסבר להבדלים בין שני הצמתים נעוץ בעובדה כי צומת נמיר-

ארלזרוב מאופיין בנפח תנועה גדול של הולכי רגל באזור תחנת הרכבת ומסוף האוטובוסים בקירבת

הצומת. סביר להניח כי הימצאות הולכי רגל רבים על סף מעבר החציה מגבירה את חשש הנהגים

לנוע לפני האור הירוק מחשש לפגיעה בהם.

לגבי כלי-רכב דו-גלגליים, נמצא כי כ- 16% חוצים את הקו במהלך האדום ובסה"כ כ-85%

מבין אלו שהמתינו לפני קו העצירה, חוצים אותו לפני הופעת הירוק. לרוכבים נדרשו 0.2 שניות לחצות

את קו העצירה מרגע הופעת האדום-צהוב. כלומר, נותרו להם כ-1.8 שניות בתוך פרק הזמן בין-

ירוקים על מנת לעבור את מעבר החצייה ולהיכנס לשטח הצומת. השוואה בין האופנועים למכוניות

פרטיות העלתה כי זמן חציית קו העצירה של האופנועים קצר באופן משמעותי מזה של מכוניות פרטיות.

4.5 הפסד זמן הזינוק

לא נכללו בבסיס הנתונים נהגים אשר חצו את קו העצירה במהלך האדום-צהוב או כאלו שהמתינו מעבר לקו העצירה בזמן המופע האדום (בסה"כ כ- 203 מתוך 738 שתועדו).

טבלה 4.9 מציגה את ממוצעי זמני חצייתם של קו העצירה על ידי הרכב החמישי והרכב העשירי בתור מרגע הופעת האור הירוק. כמו-כן, מוצג הפסד זמן הזינוק המחושב. מהטבלה עולה כי לחמשת כלי הרכב הראשונים בתור, לוקח בממוצע כ- 10.63 שניות לחצות את קו העצירה מרגע הופעת האור הירוק. לחמשת כלי הרכב העוקבים לוקח בממוצע כ- 10.12 שניות לחצות את הקו. מכאן שהפסד זמן הזינוק הממוצע לכל הצמתים הוא 0.51 שניות. סטיית התקן היא 2.7. הפסד זמן הזינוק הגבוה ביותר מבין ארבעת הצמתים נמצא בצומת אח"י אילת (0.79 שניות בממוצע). בצומת הצ'ק-פוסט נמצא הפסד זמן הזינוק הנמוך ביותר (0.28 שניות בממוצע).

טבלה 4.9: מועדי חציית קו העצירה והפסד זמן הזינוק בגישה לצומת (בשניות)¹¹

מספר כלי הרכב	הפסד זמן הזינוק		זמן מעבר רכב עשירי		זמן מעבר רכב חמישי		צומת
	ממוצע	סטיית תקן	ממוצע	סטיית תקן	ממוצע	סטיית תקן	
153	0.79	3.0	10.11	2.37	11.91	2.37	אח"י אילת
154	0.48	2.66	10.58	2.0	11.06	1.90	מת"מ
119	0.47	2.91	10.29	1.91	10.76	2.03	נמיר-ארלוזרוב
95	0.28	2.22	8.99	1.37	9.27	1.28	צ'ק-פוסט
521	0.51	2.7	10.12	2.14	10.63	2.06	Total

כפי שניתן להבחין, קיים שוני בין ארבעת הצמתים בהפסד זמן הזינוק. תופעה זו, מראה על התנהגות שונה של הנהגים בצמתים שונים. כדי לאמת השערה זו, נערכה בדיקת מובהקות

¹¹ לא כולל נהגים שחצו את קו העצירה בזמן האדום-צהוב ו/או המתינו מעבר לקו העצירה בזמן המופע האדום.

סטטיסטית מסוג F (ANOVA) להשוואת ממוצעי ארבעת המדגמים. מטבלה 4.10 ניתן לראות שההבדל בין ארבעת הצמתים איננו מובהק סטטיסטית.

טבלה 4.10: מבחן ANOVA חד-גורמי לבדיקת ההבדל בין ממוצעי הפסד זמן הזינוק בין הצמתים

SOURCE OF VARIATION	SS	DF	MS	F	P-VALUE	F CRIT
Between Groups	17.27	3	5.76	0.77	0.51	2.62
Within Groups	3873.92	517	7.49			
Total	3891.18	520				

4.6 זרימת הרוויה

בטבלה 4.11 להלן מוצגים שיעורי זרימות הרוויה כפי שחושבו עבור כל צומת בנפרד ועבור כל הצמתים ביחד. ממוצע זרימות הרוויה בכל הנתיבים הנדגמים הוא 1855 כ"ר/ לשעת ירוק / לנתיב. סטיית התקן של זרימה ממוצעת זו היא 361 (סטייה של 19% מהממוצע). מרווח הזמן הממוצע בין כלי הרכב בזרימת הרוויה (מרווחי הרוויה), הוא 2.02 שניות עם סטיית תקן של 0.44.

טבלה 4.11: שיעור זרימת הרוויה בגישה לצומת (כ"ר/ לשעת ירוק / לנתיב)¹²

זרימת הרוויה		מרווחי הרוויה		זמן מעבר רכב עשירי (בשניות)		צומת
ממוצע	סטיית תקן	ממוצע	סטיית תקן	ממוצע	סטיית תקן	
1872	359	2.02	0.46	10.11	2.37	אח"י אילת
1761	328	2.12	0.40	10.58	2.0	מת"מ
1805	306	2.06	0.38	10.29	1.91	נמיר-ארלוזרוב
2045	296	1.80	0.27	8.99	1.37	צ'ק-פוסט
1855	364	2.02	0.41	10.12	2.14	Total

גם בערכי זרימת הרוויה ניכר שוני בין ממוצעי הזרימה בארבעת הצמתים. תופעה זו, מראה כביכול על כושר העברה שונה בין צומת לצומת. כדי לאמת השערה זו, נערכה בדיקת מובהקות

¹² לא כולל נהגים שחצו את קו העצירה בזמן האדום-צהוב ו/או המתינו מעבר לקו העצירה בזמן המופע האדום.

סטטיסטית מסוג F (ANOVA) להשוואת ממוצעי ארבעת המדגמים. מטבלה 4.12 ניתן לראות שההבדל בין ארבעת הצמתים מובהק סטטיסטית.

טבלה 4.12: מבחן ANOVA חד-גורמי לבדיקת ההבדל בין ממוצעי שיעור זרימת הרוויה בין הצמתים

SOURCE OF VARIATION	SS	DF	MS	F	P-VALUE	F CRIT
Between Groups	5062979	3	1687660	13.70	1.31E-08	2.62
Within Groups	63583694	516	123224.2			
Total	68646673	519				

לאחר מציאת הבדל מובהק בין הצמתים, נעשתה בדיקת מובהקות סטטיסטית מסוג T לבחינת ההשערה כי ההבדל בין ממוצע זרימת הרוויה בצומת הצ'ק פוסט **קטן** לעומת כל צומת נבחן אחר. בסה"כ בוצעו שלושה מבחני T.

השערות ה- H_0 ו- H_1 הן:

$$H_0 : \mu_{checkpost} - \mu_{other} = 0$$

$$H_1 : \mu_{checkpost} - \mu_{other} < 0$$

$$\mu_{checkpost} = \text{ממוצע זרימת הרוויה בצומת הצ'ק פוסט}$$

$$\mu_{other} = \text{ממוצע זרימת הרוויה בצומת נבחן אחר}$$

לפי תוצאות בדיקת המובהקות מסוג T מתקבל:

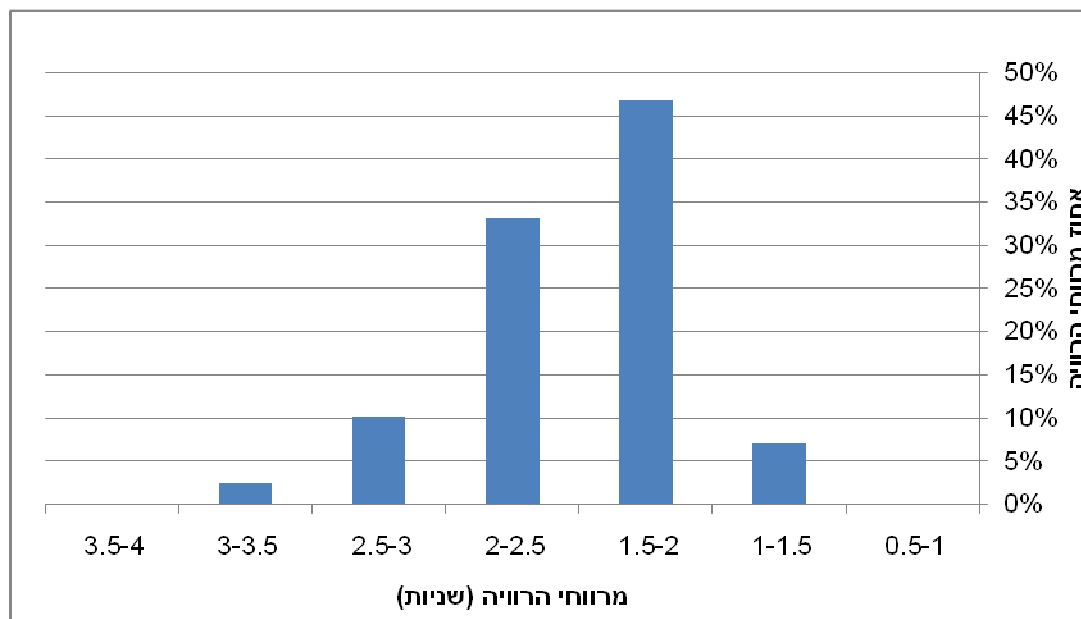
P-VALUE	צומת
0.00011	אח"י אילת
0.00000	מת"מ
0.00000	נמיר ארלזרוב

עבור רמת מובהקות של $\alpha = 0.05$ נדחית השערת ה- H_0 הטוענת כי ממוצע זרימת הרוויה בצומת הצ'ק פוסט קטן מזה שבצמתים האחרים.

איור 4.8 להלן מציג את התפלגות מרווחי הזמן בין חמשת כלי הרכב האחרונים בשיירה. ניתן

לראות כי קרוב ל-50% ממרווחי הרוויה נמצאים בטווח של 1.5 עד 2 שניות.

איור 4.8: התפלגות ממוצעי מרווחי הרוויה



סיכום:

הפסד זמן הזינוק הממוצע לכל הצמתים הוא **0.51** שניות. לצורך השוואה, מחקרו של בן-יעקב משנת 1979 הראה כי זמן הזינוק הממוצע לכלי-רכב עומד על 2.26 שניות. סביר להניח כי חלק מההבדלים נובע משיטות מדידה שונות, אך בעיקר משיפורים בתאוצת כלי הרכב. מחקרים מהשנים האחרונות, ובייחוד כאלו ממדינות בהן קיים האור אדום-צהוב, מראים כי הפסד זמן זינוק יכול לנוע בערכים של 0.58-2.8 כתלות באופן המדידה (Bonnenson & Messer, 1998; Li & Prevedorus, 2006).

ממוצע שיעור זרימות הרוויה בכל הצמתים, בהם התנועה זורמת ישר, הוא 1855 ר"פ/שעה/נתיב. בצומת הצ'ק-פוסט זרימת הרוויה גדולה יותר משאר הצמתים האחרים – הבדל זה נמצא מובהק סטטיסטית ברמת ביטחון של 95%. זרימת הרוויה הבסיסית המוצעת ע"י HCM 2000 היא 1900 ר"פ/שעה/נתיב, ואילו מרווח הרוויה המוצע ע"י המדריך הוא 1.895 שניות (מחקרים אחרים מציעים מרווח רוויה של 2 שניות וכתוצאה מכך זרימת רוויה של 1800 ר"פ/שעה/נתיב).

. מסקנות ודיון

5.1 מסקנות

האות האדום-צהוב מתריע בפני הנהג על הופעתו הקרבה של המופע הירוק, ונותן לו זמן להתכונן לתחילת נסיעה. לעתים, אות זה עשוי להגדיל את קיבולת הצומת המרומזר. מחקר זה בוחן את ההשערה כי הנהגים הממתינים בסמוך לקו העצירה להופעת האור הירוק בפנס, מנצלים את האור האדום-צהוב לנסיעה ולכניסה מוקדמת לצומת. מניתוח תוצאות המחקר עולות המסקנות הבאות:

- האות הצהוב אדום קיים במספר קטן יחסית מדינות בעולם.
- שיטת חישוב הזמן הבין ירוקים הנהוגה בישראל, שבה מפחיתים את זמן נסיעת כניסת הרכב הראשון, מקטינה את משך הזמן הבין ירוקים בהשוואה לשיטה האמריקאית בה אלמנט זה אינו קיים.
- בישראל, הפרופורציה של תאונות מסוג חזית-צד בצמתים מרומזרים, גבוהה מאוד ביחס לסוגי תאונות אחרים, בין כלי רכב.
- הממצאים מראים שלרוכבי אופנועים וקטנועים מאפיינים שונים מאלו של נהגי מכוניות מבחינת מיקומם ביחס לקו העצירה, זמן תחילת התנועה ביחס למופע האור בפנס ותזמון תחילת תנועתם. בניגוד לנהגי מכוניות, רוכבים ממתינים בדרך כלל מעבר לקו העצירה. בזמן הופעת הירוק הרוב המוחלט של הרוכבים נמצאים מעבר לקו העצירה (על מעבר החצייה או בתוך שטח הקונפליקט).
- נמצא כי עם הופעת האור הירוק, חלק מהנהגים (1%) נמצאים מעבר למעבר החצייה, דהיינו בתחום הצומת, למרות שיעורם קטן ביחס לנהגים אחרים. לממצא זה השלכות בטיחותיות מבחינת התרחשותן של תאונות מסוג חזית-צד בצמתים מרומזרים. נהגים אלו יכולים להוות גורם ישיר לתאונות אלו מאחר והם מפרים את ההנחות של קביעת הזמן הבין ירוקים.

- רוב נהגי המכוניות מתחילים תנועתם בזמן הופעת האדום-צהוב. רוכבי אופנועים מתחילים תנועתם כבר במהלך המופע האדום. תזמון תחילת התנועה של הרוכבים קטן בכ-2 שניות בממוצע מזה של הרכבים הפרטיים.
- אחוז ניכר מנהגי המכוניות חוצים את קו העצירה בזמן הופעת האדום-צהוב, כלומר בתוך זמן הבין-ירוקים. רוכבי אופנועים חוצים את קו העצירה במהלך המופע האדום או מיד עם הופעת האדום-צהוב. זאת, מאחר וזמן הזינוק שלהם קצר יותר מזה של הרכבים הפרטיים והם עומדים בסמוך מאוד לקו העצירה.
- הפסד זמן הזינוק של כלי הרכב בבתור לפני הרמזור קטן משנייה אחת.
- מסקנת המחקר היא כי משמעות ניצול האות האדום-צהוב לנסיעה על ידי הנהגים היא קיצור אפקטיבי של הזמן הבין ירוקים. נוכח העובדה שקיצור הזמן הבין ירוקים האפקטיבי מעלה את הסיכוי לתאונות מסוג חזית צד, במיוחד לגבי אופנועים, יש לשקול את קיצור משך האות הצהוב-אדום לשניה אחת או אף לבטלו כליל. המלצת המחקר אינה מתייחסת למשך הזמן הבין ירוקים ולכן, שינוי משך האות הצהוב-אדום צריך להעשות תוך שמירה על משך הזמן הבין ירוקים המחושב.

5.2 דיון

מטרת המחקר הנוכחי היתה לבדוק האם האור האדום-צהוב מנוצל לנסיעה ולכניסה מוקדמת לצומת. הממצאים מראים כי התנהגות הנהג הראשון בסמוך לקו העצירה, הממתין לחילופי האורות בפנס בתחילת הפאזה, אכן מאופיינת בזמן תגובה מהיר, כניסה מוקדמת לצומת וכפועל יוצא, הפרת מרווח הזמן הבין-ירוקים. התנהגות כזו, כאמור, מגדילה את ההסתברות להתרחשות תאונות מסוג חזית-צד בצומת המרומזר.

תכנון הזמן בין-ירוקים בישראל מתחשב בזמן הכניסה של הרכב הנכנס לצומת ממצב של המשך נסיעה. לעומת ההנחיות האמריקאיות, ומתקבל זמן בין-ירוקים קצר יותר ברמזור. בארץ ובעולם, עבירות הנהיגה רשומות כגורם עיקרי ב 80%-90% מתאונות הדרכים. הניסיון מראה כי

במקרים לא מעטים, טיפול הנדסי במערכת הרמזורים בצומת ו/או מאפייני הדרך עשוי להביא לירידה הן בשיעור עבירות התנועה והן במספר התנגשויות חזית-צד בצומת.

יתכן גם, כי נהגים משהים את תנועתם בזהותם קונפליקט פוטנציאלי, ומתחילים נסיעתם רק כשהבחינו כי בטוח לעשות כך. זאת, בשל העובדה כי לא תועדו מקרים בהם היה קונפליקט בין כלי-רכב או הולכי רגל. התוצאות מראות כי נהגים מתאימים את התנהגותם על בסיס היכולת להעריך את הסיכונים ואת הפוטנציאל לקונפליקטים. למצבים בהם קיימת נראות טובה של המתרחש בצומת לעיני הנהג, והפוטנציאל לקונפליקט הוא נמוך בעיניו, הנהג מתייחס בזהירות פחותה.

בהשוואה בין תגובתם של נהגי הרכב הפרטי לזו של רוכבי האופנועים, הממצאים מראים הבדלים מובהקים. סיבות אפשריות להבדלים אלו הן:

- תאוצת אופנועים גבוהה יותר מזו של רכבים פרטיים ומאפשרת זינוק מהיר יותר לתוך הצומת עם הופעת האדום-צהוב.

- גודלו של כלי הרכב משמעותי ביותר מבחינת מיקומו הפיסי ביחס לקו העצירה בהמתנה להופעת האור הירוק. רוכבי אופנועים יכולים לעמוד על מעבר החצייה או מעבר לו מבלי לסכן את הולכי הרגל. לעומתם, נהגים מכוניות מעדיפים להמתין לפני הקו, כך שיוכלו להימנע מלחסום את הולכי הרגל על מעבר החצייה. כמו-כן, ביכולתם להבחין בשני עמודי הרמזור (ליד קו העצירה וקצה המרוחק של הצומת).

- לרוכבי אופנועים הממתינים על קו גבול שטח הקונפליקט יש האפשרות להבחין בכל עמודי הרמזור בצומת ולצפות את סיום הפאזה של התנועה המסיימת.

הנהגים מסוגלים להבחין בפנס של התנועה המסיימת מנגד (כלי-רכב או הולכי רגל). נהג אשר מבחין כי הולכי הרגל סיימו את חציית מעבר החצייה, מצפה לסיימו של המופע האדום תוך זמן קצר. עובדה זו מאפשרת לנהג להתכונן לתחילת הנסיעה גם בלא הופעתו של האדום-צהוב. בנוסף, נהגים יוממים, אשר חוצים את צומת פעמים רבות, לומדים להכיר את אופן פעולתו ואת סדר המופעים והפאזות לתנועות השונות בצומת.

כניסה לצומת טרם הופעתו של האור הירוק בפנס כמוה ככניסה באור אדום ומהווה עבירה על תקנות התעבורה. יתכן וניצול האדום-צהוב לנסיעה נגרם בשל פרשנותו הסובייקטיבית של הנהג, בניגוד לצבע האדום בפנס הנתפס כאיסור ברור ומוחלט.

לסיכום, פוטנציאל התאוצה הגבוה של כלי הרכב ובמיוחד זה של אופנועים, המאפשר תגובה מהירה ולכן הפרה של איסור הכניסה לצומת במהלך האור האדום צהוב, משמעותם הגדלת ההסתברות להתרחשות קונפליקטים בצומת. לאור כל האמור לעיל, ולאור העובדה כי האור האדום-צהוב אינו קיים ברוב המדינות בעולם, המסקנה העיקרית מהעבודה הנוכחית היא כי כיום אין הכרח ואף הצדק לקיומו של האות האדום-צהוב בהרכב האורות ברמזור בישראל. אם אין מסירים את האות, יש לבחון לפחות את קיצורו בשנייה אחת.

נספח א'

טופס רישום ותיעוד הזמנים של כלי הרכב

זמן מעבר רכב 10 את קו העצירה	זמן מעבר רכב 5 את קו העצירה	זמן חציית קו העצירה	זמן תחילת תנועה	מועד הופעת האדום-צהוב	מס' מחזור
					1
					2
					3
					4
					5
					6
					7
					8
					9
					10
					11

נספח ב'

דוגמה לרשומות בקובץ הנתונים Excel של הרכבים הפרטיים בצומת אח"י אילת

שורת הנוסחה	G	F	E	D	C	B	A	
				צומת אח"י אילת				1
	זמן מעבר רכב עשירי	זמן מעבר רכב חמישי	מעבר קו עצירה	תחילת תזוזה	הופעת הירוק	הופעת האדום-צהוב	מחזור	2
	38.33	29.8	20.93	20.07	19.6	17.6	1	3
	39.63	33.2	24	23.2	23.6	21.6	2	4
	73.63	65.4	57.6	56.67	56.4	54.4	3	5
	44.97	37.33	25.53	25.53	26.53	24.53	4	6
	75.51	65.67	57.47	56.33	55.67	53.67	5	7
	46.75	38	30.47	29.73	29.73	27.73	6	8

דוגמה לרשומות בקובץ הנתונים Excel של כלי-רכב הדו-גלגליים בצומת נמיר-ארלזרוב

L	K	H	G	E	D	C	B	
	ממתינים אחרי הקו	ממתינים לפני הקו						1
	תזוזה	חצייה	תזוזה	זמן הופעת הירוק	זמן הופעת האדום-צהוב	זמן אדום להולכי רגל	מס' סידורי	2
		37.37	37.37	39.27	37.27	23.27	1	3
		21.73	21.25	23.87	20.87	6.87	2	4
		22.61	22.61	23.87	20.87	6.87	3	5
	47.91			49.75	47.75	33.75	4	6
	33.52	34.08	33.28	35.75	33.75	19.75	5	7
	18.73	19.77	19.37	20.71	18.71	4.71	6	8

1. Bestner, C.J. & PJ Vardnell, 2002. *The effect of a leading green phase on the start-up lost time of opposing vehicles*. South African Transport Conference, Pretoria.
2. Bonneson, J. 1998, *Lane Volume and Saturation Flow Rate for Multilane Intersection Approach*. Journal of Transportation Engineering, Volume 124 No. 3, American Society of Civil Engineers.
3. Bonneson, J. A. & Messer, J.C., 1988, *Phase Capacity Characteristics for Signalized Interchange and Intersection Approaches*, Transportation Research Record, No. 1646, pp.96-105. Transportation Research Board.
4. Branston, D., 1979, *Some factors affecting the capacity of signalized intersections*. Traffic Engineering and Control (1979-08/09) 360-6.
5. Dewar, R. E. & Olson P. L. (Editors), 2002, *Human Factors In Traffic Safety*, Lawyers & Judges Pub Co., Tucson, AZ.
6. FHWA , 1997, *Pedestrian Crash Types: A 1990s Informational Guide*, U.S. Department of Transportation,.
7. FHWA, 1998, *Highway Statistics* , U.S. Department of Transportation.
8. Haqou, M.M., Chin, H.C., & Huang, H., 2008, *Examining Exposure of Motorcycles at Signalized Intersections*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (2048) pp 60-65.
9. Harnen S.R., Umar, R.S. & Wong, S.V. & Wan Hashim W.I., 2004, *Development of prediction models for motorcycles crashes at signalized intersection on urban roads in Malaysia*, Journal of transportation and statistics, vol. 7, n. 2/3.
10. ITE , " Traffic Engineering Handbook", 5thed , 1999.

11. Jourdain S., 1986, *Intergreen Timing*, Traffic Engineering and Control, Vol 32, pp 179-182.
12. Khosla, K. & Williams J. C., 2006, *Saturation Flow Rate at Signalized Intersections during Longer Green Time*. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1978, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 61–67.
13. Lin, F. B., Tseng, P. Y. & Su, C. W., 2004, *Variations in queue discharge patterns and their implications in analysis of signalized intersections*. In: Procs. 83rd Annual Meeting Transportation Research Board, Wash. D.C.
14. Li, H. & Prevedouros, P. D., 2002, *Detailed Observations of Saturation Headways And Start-up Lost Times*. Presented at 81st Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
15. Long, G., 2005, *Start-Up Delays of Queued Vehicles*. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1934, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 125–131.
16. McGill, W. A., 1970, *optimizing the use of amber in traffic signals*. Proceedings of 5th ARRB Conference. 5(3), pp 95-110.
17. 2001 Michigan Traffic Crash Facts. Office of Highway Safety Planning, Michigan Department of State Police, East Lansing, 2001.
18. Maxwell, A. & York, I., 2005, *Review of the Red to Green Sequence at Traffic Signals*, Proceedings of ETC 2005, Strasbourg, France 18-20 September 2005 - Transport Policy and Operations – Traffic and Transport Safety - Safe Road Design. pp 22p.

19. Mitra, S., Chin, H. C. & Quddus, M. A., 2002, *Study of Intersection Accidents by Maneuver Type*. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1784, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 43–50.
20. Noyce, D. A., Daniel B. F. & Kent, C. K., 2000, *Traffic Characteristics of Protected/Permitted Left-Turn Signal Displays*. Transportation Research Record 1708, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 28-39.
21. Older, S. J., 1960, *The Effect of the omission of the red amber indication at traffic signals (Leicester)*. Research Note RN /3702/SJO. Crowthorne: RoadResearch Laboratory.
22. Older, S. J., 1963, *Omission of the red/amber period at traffic signals*. Traffic Engineering and Control (November 1963) 414-417.
23. Papacostas, C.S., & Prevedouros, P.D., 2001, *Transport Engineering and Planning*. “Third Edition”. Prentice Hall.
24. Retting R. A., Chapline J. F. & William A. F., 2002, *Changes in crash risk following re-timing of traffic signal change intervals*, Accident Analysis & Prevention Volume 34, Issue 2, Pages 215-220.
25. Ratzko H. G., & Boltze M., 1987, *Timing of Intergreen Periods at Signalized Intersections: The German Method*, ITE Journal, Vol 5, pp 23-26.
26. Retting, R. A., & M. A. Greene., 1997 *Influence of Signal Timing on Red-Light Running and Potential Vehicle Conflicts at Urban Intersections*. In Transportation Research Record 1595, TRB, National Research Council, Washington, D.C., , pp. 1–7.
27. Retting, R. A., Williams A. F., & Greene M. A., 1998, *Red-Light Running and Sensible Countermeasures: Summary of Research Findings*. In Transportation

- Research Record 1640*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 23–26.
28. Sabey, B., & Taylor H., 1980, *the Known Risks We Run: The Highway. Supplementary Report SR 567*, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, U.K.
29. Sarkar, S., & Andreas M., 2004, *Drivers' Perception of Pedestrians' Rights and Walking Environments*. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1978, TRB, National Research Council, Washington, D.C. , pp. 75-82.
30. Seneviratne, J. R. V., 1974, *Omission of the starting amber at traffic lightsignals – a before and after study*. Technical Report 157, Public WorksDepartment, Traffic and Transport Survey Division, Hong Kong.
31. Smiley, A., 2000, *Behavioral adaptation, safety, and intelligent transportation systems*. *Transportation Research Record* 1724, Paper No. 00-1504.
32. Songchitruksa, P. & Tarko, A. P., 2006, *Practical Method for Estimating Frequency of Right-Angle Collisions at Traffic Signals*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1953, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 89–97.
33. Stokes, R.W., 1988, *Comparison of saturation flow rates at signalized intersections*, *J. Transp. Eng.*; (United States); Journal Volume: 58:11.
34. *Traffic Safety Facts*. Report DOT HS 809 324. NHTSA, U.S. Department of Transportation, 2000. www.fars.nhtsa.dot.gov/pubs/3.pdf

35. Triggs, T., & Harris, W., 1982, *Reaction Time of Drivers to Road Stimuli*.
 Technical Report, Monash University, Human Factor Group, Department of
 Psychology.
36. U.S. Department of Transportation (USDOT), National Highway Traffic Safety
 Administration, National Center for Statistics and Analysis. 2002. *Traffic Safety
 Facts 2001: A Compilation of Motor Vehicle Crash Data from the
 Fatality Analysis Reporting System and the General Estimates System*, Report
 No. DOT HS 809 484. Washington, DC.
37. US Department of Transportation, 1999. Traffic safety facts 1998. Washington,
 DC.
38. Wang, Y., & Nihan, N.L., 2004, *Estimating the Risk of Collision between
 Bicycles and Motor Vehicles at Signalized Intersections*. *Accid. Anal. Prev.* 36
 (3), 313–321.
41. בן-יעקב י., (1979) *חקר המאפיינים הגיאומטריים והתנועתיים בצומת מרומזר, היחידה
 להנדסת תחבורה, הטכניון, ישראל.*
42. גיטלמן, הקרט ש., (2003), *קשר בין עבירות תנועה ומעורבות בתאונות (סקר ספרות),
 המכון לחקר התחבורה, הטכניון, ישראל.*
43. דנציגר י., (2004), *חקר שיטות שונות לחישוב הזמן בין-ירוקים בצמתים מרומזרים, היחידה
 להנדסת תחבורה וגיאואינפורמציה, הטכניון, ישראל.*
44. הנחיות לתכנון רמזורים, עורך: ישעיהו ר., משרד התחבורה – המפקח על התעבורה, 1981.
45. מהלאל ד., (2000), *תאונות חזית-צד בצמתים מרומזרים, המכון לחקר התחבורה, הטכניון,
 ישראל.*
46. מוקואס, ד., (1988) *מאפייני תאונות רכב דו-גלגלי בישראל בשנים 1995-1997, המכון לחקר
 התחבורה, הטכניון, ישראל.*
47. תאונות דרכים עם נפגעים 2007/8, הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, ירושלים, 2007.

48. תאונות דרכים עם נפגעים 2009, הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, ירושלים, 2010.

49. *תקנות התעבורה*, תשכ"א 1961, משרד התחבורה.