

מתקן עזר לנהג לחציית צומת מרומזר

דו"ח סיכום מחקר

פרופ' דורון בלשה

פרופ' דוד מהלאל

פרופ' פר-אולוף גוטמן

ד"ר יותם אברמסון

לימור הנדל

פאני פיסחוב

במימון הרשות הלאומית לבטיחות בדרכים

הרשות הלאומית
לבטיחות בדרכים



פברואר 2010, חיפה

דו"ח מחקר מס' S/7/2010

דוח מסכם

המחקר מומן ע"י הרשות הלאומית לבטיחות בדרכים, יחידת המדען הראשי

מספר המחקר: 2012699 תאריך תחילת המחקר: 1.05.09 תאריך הגשת הדו"ח: 28.02.10

שם החוקר הראשי: פרופ' דורון בלשה

שם חוקר נוסף: פרופ' דוד מהלאל, פרופ' פר-אולוף גוטמן

שמות חוקרים נוספים: ד"ר יותם אברמסון, גב' לימור הנדל

מוסד המחקר: מרכז הן נאור לחקר הבטיחות בדרכים

נושא המחקר (עברית): מתקן עזר לנהג לחציית צומת מרומזר

נושא הדו"ח (עברית): דו"ח סיכום למחקר הנ"ל

תקציר הדו"ח: תאונות קטלניות בצמתים בישראל מהוות כרבע מתוך התאונות הקטלניות. קיים איפוא עניין רב בהקטנת שיעור התאונות מסוג זה.

נהג המתקרב לצומת מרומזר בעת הדלק האות הצהוב נדרש לקבל במהירות החלטה האם לחצות את הצומת או לעצור. כידוע, בעת קבלת האות הצהוב, נהג שאינו יכול לעצור בבטחה לפני קו העצירה אמור להמשיך ולחצות את הצומת. בהתאם לכך גם מתוכננים הזמנים הבין ירוקים ברמזור בצומת. ברם, ההחלטה האם הנהג יכול לעצור בבטחה אינה יכולה תמיד להתקבל בצורה נכונה, שכן מדובר באומדן מורכב. אומדן זה ברמה החישובית מבוסס על מהירות הנסיעה, על המרחק מקו העצירה, על מרחק הפינני בצומת (גודל הצומת) ועל מקדם החיכוך. על אחת כמה וכמה החלטה זו היא מורכבת בהנתן הסביבה הכוללת גם כלי רכב אחרים אשר גם נהגיהם לעתים נתונים באותו המצב. בפועל הנהג אינו מסוגל לעשות חישובים כלשהם, ומסתמך על הנסיון שלו בנהיגה, על חושיו ועל הערכותיו הסובייקטיביות.

מחקר זה נועד לפתח הגדרה של מתקן עזר לנהג, אשר יקבל כקלט את נתוני הרכב והרמזור, ואופציונלית גם את מיקום כלי הרכב האחרים באיזור, וימליץ לנהג כיצד לנהוג – דהיינו, האם בעת הדלק האות הצהוב עליו לעצור או לעבור. מטרת המחקר היא לבחון מתקן כזה – להגדיר כיצד יעבוד, לבחון את פעולתו והשפעתו על נהגים באמצעות סימולטור, ולהעריך את תרומתו הבטיחותית.

מעבדת המחקר כללה סביבת סימולטור – הגה, דוושות ומספר מחשבים לאיסוף נתונים ולשליטה על חלקי הסימולטור השונים. נהגים שונים נבחנו כולם באותו תסריט נהיגה. התסריט כלל מספר מקטעים, המכילים 40 צמתים מרומזרים בעלי ארבע זרועות. לעתים, בזמן הגישה לצומת, ניתן אות אדום בכיוון ממנו ניגש לצומת רכב הניסוי, לעתים אות ירוק, ולעתים התחלף מירוק לצהוב, ואח"כ לאדום. נהג שנכנס לצומת באור אדום קיבל אות הדומה לזה של מכונית משטרה (סירנה).

מטרת המתקן עצמו היא להמליץ אם לעבור או לעצור. המלצת המתקן לעצירה נתנת אם הרכב נמצא מהצומת במרחק הגדול ממרחק העצירה שלו. אם הרכב לעצור נמצא במרחק הקצר ממרחק העצירה

אזי יומלץ לעצור. אחרת, יומלץ לעבור. המלצת המתקן ניתנת בשתי דרכים בו זמנית: יוזואלית וקולית.

מערך המחקר כלל נהיגה של תסריט אחד בסימולטור לכל נבדק. חלק מהנבדקים – קבוצת הביקורת – נהגה ברכב שבו לא הותקן המתקן נשוא מחקר זה. החלק השני – קבוצת הניסוי – נהגה ברכב כאשר המתקן הופיע בלוח המחוונים של המכונית, ופעל בהתאם למפורט למעלה.

מניתוח סטטיסטי של התוצאות עולה, כי המתקן מקרב את פונקציית ההסתברות לעצירה לפונקציית מדרגה. פעולה זאת מקטינה את אזור הקושי בקבלת החלטות של פונקציית ההסתברות לעצירה בגישה לצומת מרומזר ותורמת למניעת תאונות חזית-אחור ע"י גרימה להחלטות נהגים אחידות יותר. באופן תיאורטי, אילו כל הנהגים היו מתנהגים לפי המלצות מתקן כזה, תאונות חזית צד לא היו כלל קורות, מאחר ולא היו קורות חריגות מהזמן הבין ירוקים.

Research Title: Driver Assistance for Signalized Intersections

Abstract: In the years 2002-2006 there have been in Israel 3495 severe accidents (severely wounded and fatal). These accidents form 30% of all 11697 severe accidents in Israel in these years. Among them, 1610 were side-impact accidents, 146 read-head accidents, and 1166 pedestrian related.

In an intersection, a driver is required to practice high alertness and fulfill more complex tasks than in other parts of the road. Therefore, some mechanisms exist to help the driver completing his tasks successfully. The data above shows that these mechanisms, which are supposed theoretically to ensure zero accidents, do not function optimally.

These 3495 intersection accidents divide into 1493 in signalized accidents and 1932 in non-signalized (the rest is unknown). From a research done by the company MATAT to the Israeli MOT it turns out that the cost of traffic accidents to the Israeli economy is 12.6 billion NIS, so we can roughly say that for the signalized intersections the cost is 1608 million NIS; the average annual damage of a single signalized intersection is therefore approximately 1.6 million shekel (based on 1000 signalized intersections in Israel).

A driver approaching an intersection is demanded to decide quickly whether or not to cross the intersection. As known, when the yellow signal is received a driver that estimates that he or she cannot safely stop before the stop line should continue and pass the intersection. However, the decision whether stop is not always a trivial one, because there are several estimation and calculation it's possible or not possible to stop is a task which is sometimes complex. This task is even more complex in the presence of a real environment with other vehicles that are sometimes found in the exact same dilemma.

In light of the above, this research will develop and evaluate the effectiveness of a device installed in vehicles, and advice the driver about this dilemma. The device will receive the signal lights data (by wireless transmission from a unit in the traffic lights controller), and optionally also the other vehicles' location and speed (using various sensors), and will recommend the driver as for how to proceed – that is, whether to stop or to continue. The objective of the research is to design this device – without prototype implementation – define exactly how it will work, and to examine its operation and its influence on drivers using a simulator.

The research begins with a thorough literature study of the human problem in signalized intersections and existing solutions, both high- and low-tech ones. Then, some observations will be done on real traffic videos existing in the library of the Technion's Transportation Research Institute. From these observations the design will initially be designed.

The initial design of the device will be reviewed by the researchers and updated according to initial tests and discussions.

After these steps, the main experiment will take place: 50 drivers will be tested in a simulator without the device, on a scenario containing 15 minutes of driving in and out of town. Then, 50 drivers will experience the same scenario but this time with the device activated.

For each driver data will be collected weather or not he stopped in an intersection, as well as the speed in the entrance to the intersection and the time to the stop line upon the appearance of the yellow signal ("potential time to intersection"). The data will be displayed in the known form of a "crossing probability function" (CPF) showing the crossing decision as a function of the potential time to intersection (for several groups of speeds). The goal of the experiment is to show that this function is shaped more like a "stair" when the device is activated; that is, that applying this device makes drivers more unified in their behavior. The results of the experiment will be summarized and it will be shown how the device is changing the CPF and thus donating to traffic safety.

חתימת החוקר הראשי: פרופ' דורון בלשה

חתימות החוקרים השותפים¹:

- | | |
|--------|-----------------------------------|
| חתימה: | 1. שם החוקר: פרופ' דוד מהלאל |
| חתימה: | 2. שם החוקר: פרופ' פר-אולוף גוטמן |
| חתימה: | 3. שם החוקר: ד"ר יותם אברמסון |
| חתימה: | 4. שם החוקר: גב' לימור הנדל |

שם מנהל רשות המחקר: _____

חתימה: _____

¹ חתימות של השותפים למחקר, כולל היועצים או המדריכים, ומנהל רשות המחקר נחוצות לאישור הדו"ח וסיום המימון

תוכן העניינים

1.....	תקציר	
5.....	תוכן העניינים	
6.....	ראשי תיבות	
6.....	תרשימים	
6.....	טבלאות	
7.....	מבוא	1.
8.....	סקר ספרות	2.
8.....	היקף בעיית התאונות	2.1
8.....	סוג תאונה ומיקום תאונה	2.1.1
11.....	בעיית החלטה בסיום המופע הירוק	2.2
12.....	אזור של קושי בקבלת החלטות	2.2.1
13.....	איזור ה"קושי בקבלת החלטות"	2.2.2
14.....	פונקציית הסתברות לעצירה	2.2.3
16.....	גורמים התורמים להתנהגות של מעבר באור אדום	2.3
17.....	אמצעים לסיוע לנהג בהחלטות חצייה בצומת	2.4
17.....	אמצעים לא-טכנולוגיים להקטנת מורכבות קבלת ההחלטות בצומת	2.4.1
19.....	אמצעים טכנולוגיים להארכה אדפטיבית של הזמן-בין-ירוקים	2.4.2
21.....	אמצעי סיוע להחלטות חציה	2.4.3
22.....	גורמי אנוש באמצעים לסיוע לנהג בהחלטות חציה	2.4.4
24.....	מטרת המחקר	3.
25.....	שיטת המחקר	4.
25.....	תיאור מעבדת המחקר	4.1
26.....	תסריטי הנהיגה	4.2
27.....	תכנון המתקן	4.3
28.....	אפיזודות בדיקה	4.4
28.....	תהליך הבדיקה	4.5
30.....	מהלך הניסוי	5.
30.....	אוכלוסיית הנהגים	5.1
30.....	אפיזודות הניסוי	5.2
33.....	תוצאות	6.
33.....	החלטות מעבר	6.1
33.....	בניית מודל רגרסיה	6.1.1
37.....	מודל הרגרסיה בטווח של בעיית החלטה (זפ"צ בין 1 ל- 4 שניות)	6.1.2
38.....	בחינת השפעת "זפ"צ" בהתאם לאופי פעולת מתקן העזר	6.1.3
42.....	הרגשת הנהג	6.2
42.....	שיעור הציות	6.3
43.....	סיכום ומסקנות	7.
44.....	דיון	8.
47.....	נספח מס' 1: אפיזודות הניסוי בשלוש הקבוצות	

ראשי תיבות

ראשי תיבות	משמעות
זפ"צ	זמן פוטנציאלי לצומת
קמ"ש	קילומטר לשעה
למ"ס	לשכה מרכזית לסטטיסטיקה
מת"ת	מרכז מחקרי תחבורה
מכ"מ	מגלה כיוון מרחק

תרשימים

- תרשים 1 : אזורים שנוצרים בגישה לצומת. איזור האופציה הוא איזור שבו יכול נהג לעצור בבטחה לפני קו העצירה, אך באותה מידה יכול גם להמשיך ולהכנס לצומת כאשר האור עדיין אינו אדום.
- איזור דילמה כאשר אינו יכול לעשות לא את זה ולא את זה. 12.....
- תרשים 2 : הסתברות לעצירה כפונקציה של הזפ"צ. (מקור: (1985, Mahalel, Zaidel, Klein)..... 14
- תרשים 3 : : פונקציית הסתברות לעצירה בצומת אידיאלי. ההסתברות עולה בבת אחת מאפס לאחד, בנקודה כלשהי (בדוגמא זו, 37 מטר) 15
- תרשים 4: התפלגות המקרים של הארכת זמן בין ירוקים (Mahalel and Abramson, 2007)..... 21
- תרשים 5 : פונקציות שונות של הסתברות לעצירה וקירבתן לפונקציית מדרגה. ניתן לראות כי רוחב התחום שבין האחוזון ה-10 לאחוזון ה-90 הוא מדד לקירבה לפונקציית מדרגה. ככל שהתחום צר יותר, כך הפונקציה קרובה יותר למדרגה. בפונקציית מדרגה מושלמת רוחב התחום הוא אפס. 24.....
- תרשים 6 : מבנה הסימולטור 25
- תרשים 7: פונקציית הסתברות לעצירה לפי מהירות 30 קמ"ש זפ"צ 35
- תרשים 8: פונקציית הסתברות לעצירה לפי מהירות 40 קמ"ש זפ"צ 35
- תרשים 9: פונקציית הסתברות לעצירה לפי מהירות 50 קמ"ש זפ"צ 35
- תרשים 10: פונקציית הסתברות לעצירה לפי מהירות 60 קמ"ש זפ"צ 36
- תרשים 11 : איזור הקושי בקבלת החלטות ללא/עם מתקן עזר לפי מהירות התקרבות לצומת . 37.....
- תרשים 12: פונקציית הסתברות לעצירה לפי מהירות 30 קמ"ש זפ"צ בטווח בעיית החלטה 39
- תרשים 13: פונקציית הסתברות לעצירה לפי מהירות 40 קמ"ש זפ"צ בטווח בעיית החלטה 40
- תרשים 14 : פונקציית הסתברות לעצירה לפי מהירות 50 קמ"ש זפ"צ בטווח בעיית החלטה 40
- תרשים 15: פונקציית הסתברות לעצירה לפי מהירות 60 קמ"ש זפ"צ בטווח בעיית החלטה 41
- תרשים 16 : מרווח השונות בטווח בעיית החלטה ללא/עם מתקן עזר לפי מהירות התקרבות לצומת . 41.....
- 42.....

טבלאות

- טבלה 1 : גבולות האזור של קושי בקבלת החלטות (Parsonson et al., 1974) 14
- טבלה 2 : ריכוז אוכלוסיית הניסוי 32
- טבלה 3 : תוצאות רגרסיה לוגיסטית לניבוי עצירה ע"י מהירות התקרבות לצומת במתן אור צהוב וזפ"צ – עם וללא הפעלת מתקן עזר לנהג 34
- טבלה 4 : מרווח השונות ללא/עם מתקן עזר ואחוז צמצום המרווח בעקבות הפעלת מתקן עזר 36
- טבלה 5: תוצאות רגרסיה לוגיסטית לניבוי עצירה ע"י מהירות התקרבות לצומת במתן אור צהוב וזפ"צ – עם וללא הפעלת מתקן עזר לנהג (בהגבלת זפ"צ בין 2 ל 4 שניות)..... 37
- טבלה 6: תוצאות רגרסיה לוגיסטית לניבוי עצירה ע"י מהירות התקרבות לצומת במתן אור צהוב וזפ"צ לפי אופן הפעלת מתקן עזר 38
- טבלה 7 : מרווח השונות ללא/עם מתקן עזר ואחוז צמצום המרווח בעקבות הפעלת מתקן עזר 41
- טבלה 8: שיעור הציות להמלצות המתקן בחתכים של הוראת המתקן ומהירויות נסיעה..... 43

1. מבוא

בשנים 2002-2006, ארעו 480 תאונות קטלניות בצמתים בישראל (למ"ס, 2010). תאונות אלה מהוות 25% מתוך 1867 התאונות הקטלניות בשנים אלה. מתוך 480 תאונות אלה, 190 היו תאונות חזית-צד, והשאר ברובן הגדול תאונות עם הולכי-רגל.

צומת הוא מקום מפגש של תנועות מכיוונים שונים בו נדרש הנהג לגלות עירנות גבוהה ולמלא משימות מורכבות יותר מבקטעי-דרך אחרים. לכן, קיימים מנגנונים בצומת שעוזרים לנהג במילוי תפקידו. תאונות חזית-צד בצומת, הנוצרת כתוצאה ממפגש של תנועות נחתכות, היא כשלון של מנגנונים אלה להסדיר את התנועה. הנתונים הנ"ל מצביעים על כך שהתשתית הקיימת בצמתים, אשר אמורה באופן תאורטי לדאוג לאפס תאונות, אינה משיגה את מלוא מטרתה.

190 התאונות הקטלניות חזית-צד בצומת מתחלקות בערך שווה בשווה בין צמתים מרומזרים ללא מרומזרים (90 מרומז', 96 לא-מרומז', 4 לא ידוע). ממחקר של חברת מת"ת עבור משרד התחבורה (מתת, 2006) עולה כי סך עלות תאונות הדרכים למשק היא 12.6 מיליארד ₪. היות ותאונות צד בצמתים מרומזרים מהוות כ-5% מהתאונות (90 מתוך 1867), ניתן להעריך בחישוב גס שעלותן של תאונות חזית-צד בצמתים מרומזרים היא כ-600 מליון ₪, וזאת בכאלף צמתים מרומזרים. כלומר, הנזק הנגרם לשנה מתאונות בצומת מרומזר מסויים הינו כ-600 אלף ₪ בממוצע.

נהג המתקרב לצומת והאות הצהוב נדלק נדרש לקבל במהירות החלטה האם לחצות את הצומת או לא. כידוע, בעת קבלת האות הצהוב, נהג שחש כי אינו יכול לעצור בבטחה לפני קו העצירה אמור להמשיך ולחצות את הצומת. זאת על פי החוק, ובהתאם לכך גם מתוכננים זמני הרמזור בצומת. ברם, ההחלטה האם הנהג יכול לעצור בבטחה אינה יכולה תמיד להתקבל בצורה נכונה, שכן מדובר באומדן מורכב ביותר. אומדן זה ברמה החישובית מבוסס על מהירות הנסיעה, על המרחק מקו העצירה, על מרחק הפינוי בצומת (גודל הצומת) ועל מקדם החיכוך. על אחת כמה וכמה החלטה זו היא מורכבת בהנתן הסביבה הכוללת גם כלי רכב אחרים אשר גם נהגיהם לעתים נתונים באותו המצב. בפועל הנהג אינו מסוגל לעשות חישובים כלשהם, ומסתמך על הנסיון שלו בנהיגה, על חושיו ועל הערכותיו הסובייקטיביות.

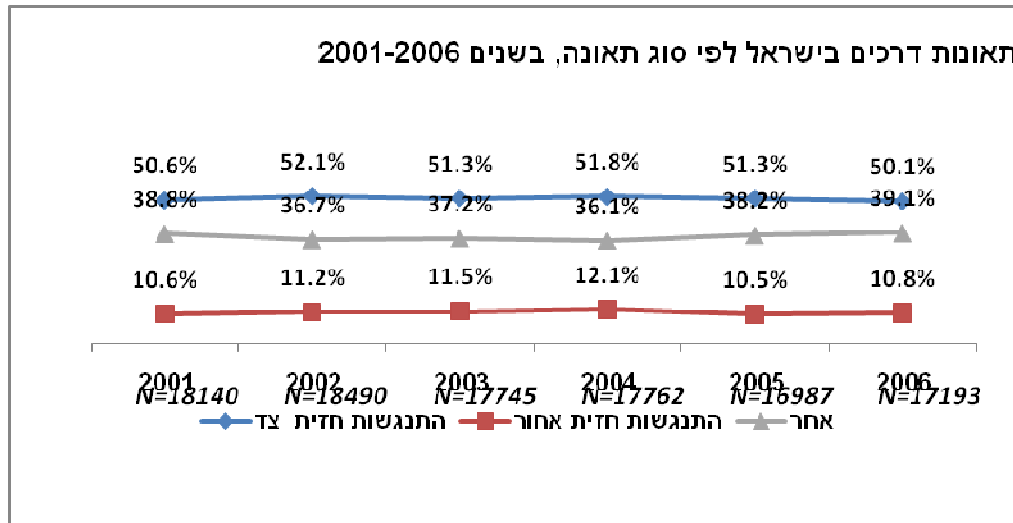
המחקר הנוכחי נועד לפתח הגדרה של מתקן עזר לנהג, אשר יקבל כקלט את נתוני הרכב והרמזור, ואופציונלית גם את מיקום כלי הרכב האחרים באיזור, וימליץ לנהג כיצד לנהוג – דהיינו, האם בעת הדלק האות הצהוב עליו לעצור או לעבור. מטרת המחקר היא להציע מתקן כזה – ללא פיתוח טכני – להגדיר כיצד יעבוד, לבחון את פעולתו והשפעתו על נהגים באמצעות סימולטור, ולהעריך את תרומתו הבטיחותית.

2. סקר ספרות

בסקר הספרות להלן נגדיר את בעיית התאונות בצומת מרומזר וננסה להבין את בעיית ההחלטה העומדת בפני הנהג. לאחר מכן נסקור את הקיים בספרות בנושא גורמי אנוש – בהקשר של החלטות חצייה – ולבסוף נסקור את הפתרונות הקיימים, הן פתרונות תשתית בסיסיים והן פתרונות טכנולוגיים.

2.1 היקף בעיית התאונות

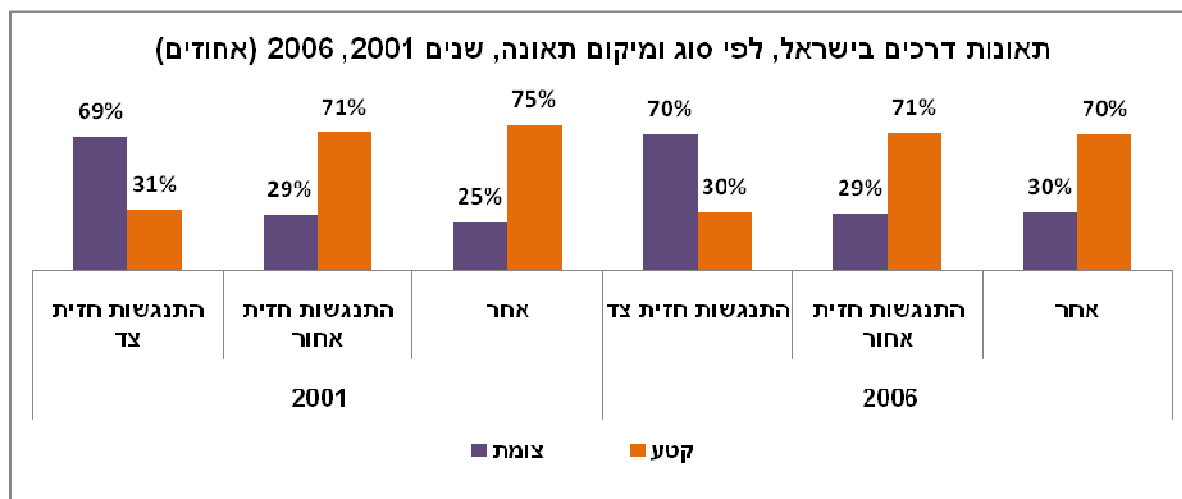
תאונות חזית צד וחזית אחור לאורך כל השנים (2001-2006) מהוות מעל 60% מכלל תאונות הדרכים עם נפגעים בישראל. תאונות חזית צד מהוות כמחצית מכלל התאונות עם נפגעים בישראל ועוד כ-10% מהוות תאונות חזית אחור. נתונים אלה מוצגים ב תמונה 1.



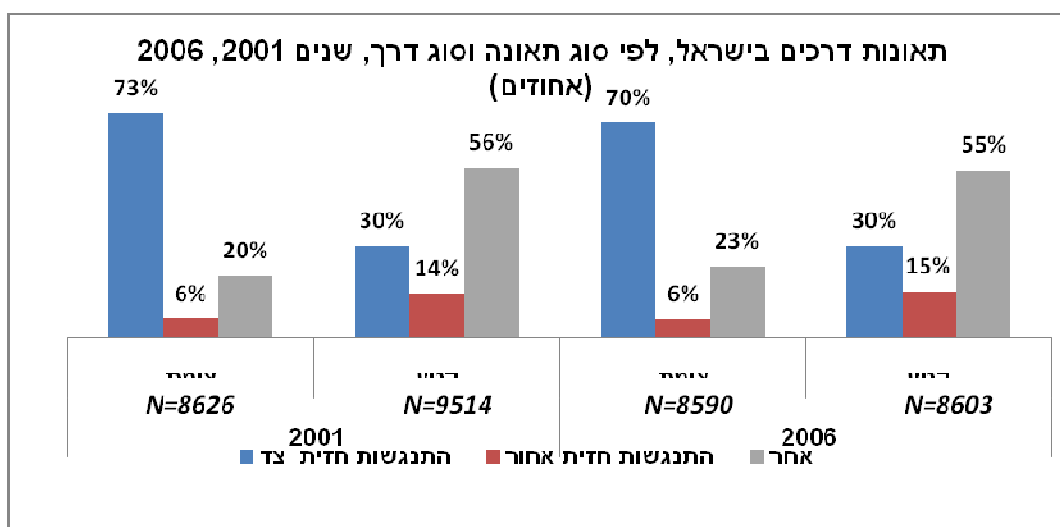
תמונה 1: תאונות דרכים בישראל. מקור: תאונות דרכים עם נפגעים 2001-2006, חלק א', הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה.

2.1.1 סוג תאונה ומיקום תאונה

בתמונה 2 אנו רואים את חלוקת התאונות לפי סוג תאונה, ובתמונה 3 לפי סוג תאונה וסוג דרך. אנו רואים שכ-2/3 מתאונות חזית צד מתרחשות בצמתים, לעומתן כ-2/3 תאונות חזית אחור מתרחשות בקטע דרך.

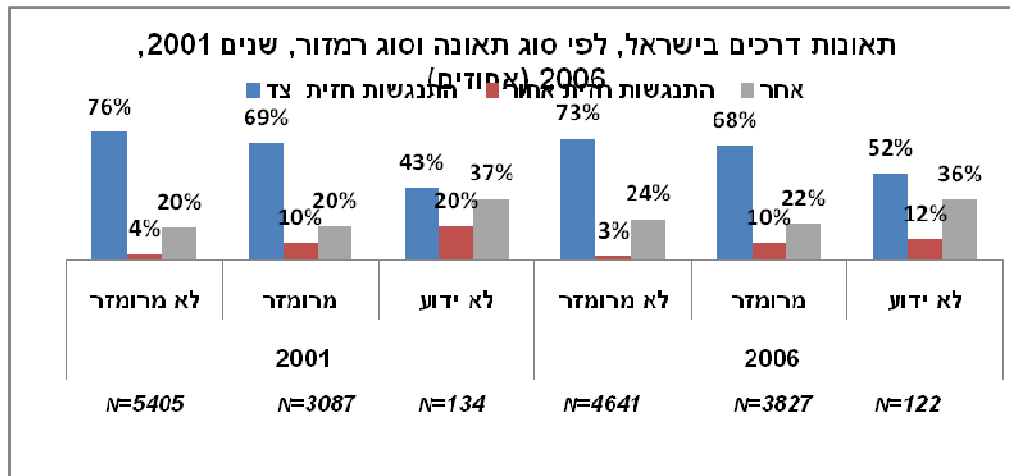


תמונה 2: תאונות דרכים בישראל (חזית צד, חזית אחר לעומת אחרות), בשנים 2001-2006 (מקור: תאונות דרכים עם נפגעים 2001-2006, חלק א', הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה)



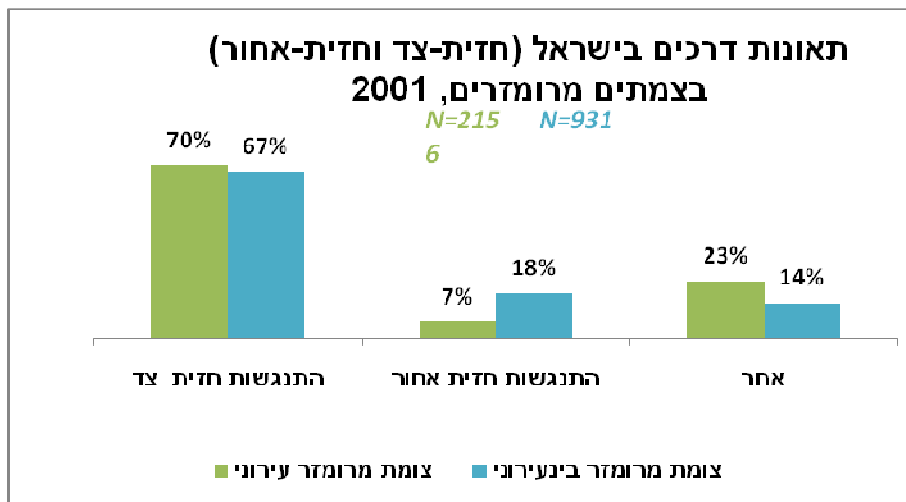
תמונה 3: תאונות לפי סוג תאונה ודרך. מקור: תאונות דרכים עם נפגעים 2001-2006, חלק א', הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה.

בשנת 2006, כ- 70% מבין כלל התאונות עם נפגעים המתרחשות בצמתים היו תאונות חזית צד, 6% תאונות חזית אחר ו- 23% תאונות מסוגים אחרים. לעומת זאת, בקטע דרך תאונות חזית צד וחזית אחר מתרחשות פחות – רק כ- 30% מבין כלל התאונות המתרחשות בקטע דרך היו תאונות חזית צד, 15% תאונות חזית אחר ו- 55% שאר התאונות עם נפגעים.



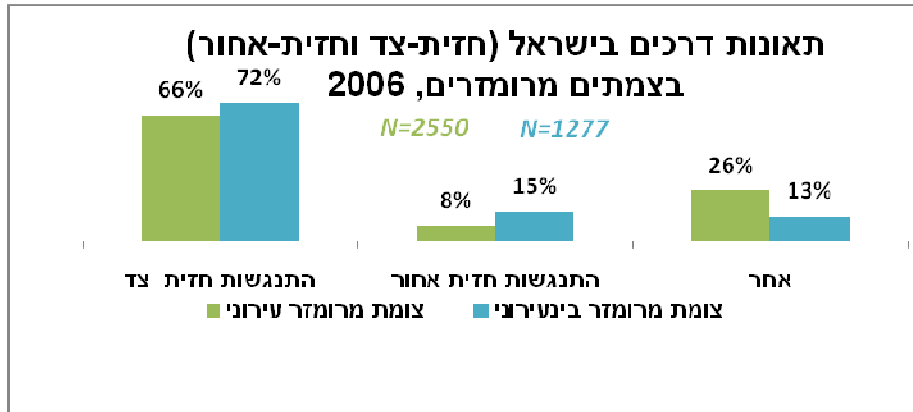
תמונה 4: תאונות לפי סוג תאונה וסוג רמזור. מקור: תאונות דרכים עם נפגעים 2001-2006, חלק א', הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה.

כאשר בוחנים התרחשות תאונות חזית צד וחזית אחור לפי צמתים מרומזרים ולא מרומזרים (ראו תמונה 4), נראה כי הן בצמתים מרומזרים והן בצמתים לא מרומזרים תאונות חזית צד מהוות כ-3/4 מכלל התאונות עם נפגעים, כאשר בצמתים מרומזרים (ראו תמונה 5) יורד אחוז התאונות חזית צד, אך לא במידה משמעותית (68% לעומת 73% בשנת 2006). שימו לב שבצמתים מרומזרים עולה שיעור התאונות חזית-אחור.



תמונה 5: תאונות בצמתים מרומזרים 2001. מקור: תאונות דרכים עם נפגעים 2001, חלק א', הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה.

הן בצמתים עירוניים מרומזרים והן בצמתים בין עירוניים מרומזרים אחוז תאונות הדרכים מסוג חזית צד גבוה – כ-70% מכלל התאונות עם נפגעים (ראו תמונה 5 ו-6).



תמונה 6: תאונות בצמתים מרומזרים 2006. מקור: תאונות דרכים עם נפגעים 2006, חלק א', הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה.

בשנת 2006 אחוז גבוה יותר של תאונות חזית צד התרחש בצומת בינעירוני מרומזר מאשר בצומת עירוני מרומזר (72% לעומת 66% בהתאמה) – ראו תמונה 6.

2.2 בעיית החלטה בסיום המופע הירוק

נהג המתקרב לצומת מרומזר בגמר האור הירוק צריך לקבל החלטה באם לעבור את הצומת או לעצור לפניו. אם ההחלטה היא לעבור, עליו להספיק להיכנס לצומת לפני הופעת האור האדום. אם ההחלטה היא לעצור, עליו להספיק לעצור את רכבו לפני קו העצירה. מיקום הרכב ומהירות הנסיעה בעת סיום המופע הירוק משפיעים על סוג ההחלטה שהנהג מקבל. כאשר הנהג נמצא בקרבה גדולה לצומת או במרחק גדול ממנה ההחלטה קלה יחסית. בעיות החלטה מתעוררות כאשר המרחק של הרכב מקו העצירה ומהירותו הם כאלו ששתי אפשרויות ההחלטה נראות סבירות ולנהג קשה להעריך איזה מהן תהיה ההחלטה הנכונה.

החלטת עצירה במצב שאינו מתאים לעצירה (מרחק הרכב מהצומת קטן מהמרחק הדרוש לו לעצירה נוחה) עלולה לחייב תאוטה גדולה, עד כדי עצירת חירום או עצירה מעבר לקו העצירה, קרי על מעבר החציה או בתוך הצומת. המחיר של החלטה כזו הוא חוסר הנוחיות שבתאוטה גבוהה, סיכון באובדן שליטה על הרכב והסיכון לתאונה מסוג חזית-אחור עם רכב עוקב שנהגו לא ציפה שהרכב שלפניו יעצור. במקרה שבוצעה עצירה על מעבר החציה או בתוך הצומת, הרי נגרמת הפרעה ואף סיכון להולכי הרגל ו/או לנוסעים בכיוונים האחרים.

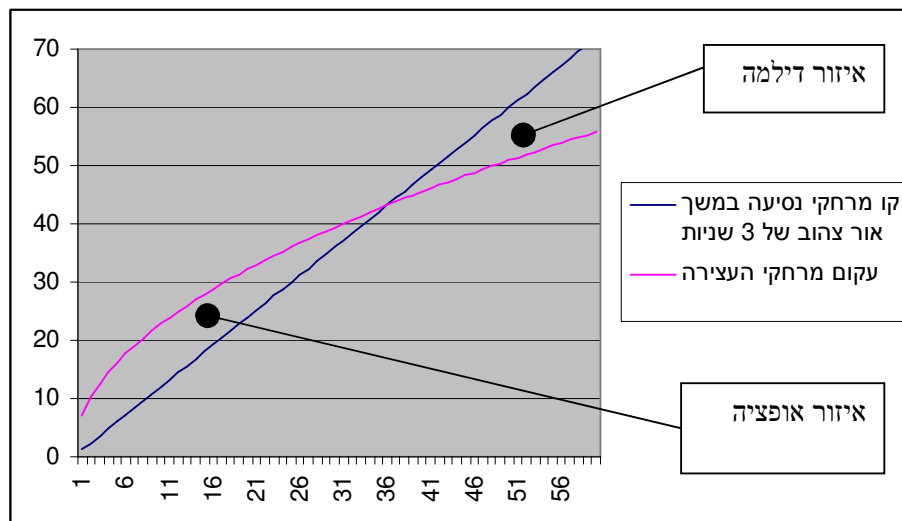
המחיר של החלטת מעבר במצב שאינו מתאים למעבר (מרחק גדול מדי מקו העצירה) הוא הסיכון לתאונה מסוג חזית-צד עם רכב שנכנס לצומת מכיוון צולב.

היסוס בהחלטה במצבים שתוארו לעיל גורר איבוד זמן ויתרת זמן קצרה יותר לביצוע ההחלטה, דבר העלול להגדיל את הסיכוי להחלטות לא מוצלחות.

2.2.1 אזור של קושי בקבלת החלטות

מבחינה הנדסית, בעת סיום המופע הירוק עשויים הנהגים להימצא באזורים שונים בקרבת הצומת. האזורים מוגדרים כפונקציה של מהירות ההתקרבות ומרחק מקו העצירה של הרכב בעת סיום המופע הירוק. תרשים 1 מתאר את האזורים שנוצרים בקרבת הצומת (Mahalel, Zaidel, Klein, 1985).

שני אזורים עשויים להיווצר כפי שניתן לראות בציור: אזור הדילמה ואזור האופציה. אזור הדילמה נוצר בין קו מרחקי העצירה לבין קו המרחק שאותו עובר הנהג באור צהוב (בציור מס' 1 האור הצהוב שמגדיר אזור דילמה נמשך 3 שניות). בלימה של נהג באזור הדילמה תהיה בלימת חירום והנהג מסתכן בעצירה אחרי קו העצירה. אם הנהג מחליט לעבור הוא יחצה את קו העצירה באור אדום.



תרשים 1: אזורים שנוצרים בגישה לצומת. איזור האופציה הוא איזור שבו יכול נהג לעצור בבטחה לפני קו העצירה, אך באותה מידה יכול גם להמשיך ולהכנס לצומת כאשר האור עדיין אינו אדום. איזור דילמה כאשר אינו יכול לעשות לא את זה ולא את זה.

לדוגמא, נהג מתקרב לצומת במהירות של 60 קמ"ש ונמצא במרחק של 60 מ' מקו העצירה בסוף המופע הירוק (נקודה D). אם הנהג מחליט לעצור, עצירתו תהיה עצירת חירום מכיוון שהמרחק הדרוש לו לעצירה בטוחה הוא 63 מ'. מצד שני, אם הנהג מחליט לעבור, הוא ייכנס לצומת באור אדום, כיוון שהמרחק שהוא יכול לעבור ב-3 שניות (50 מ') קטן מהמרחק בו הוא נמצא מקו העצירה (60 מ'). למרות שבמידה והנהג יחליט לעבור הוא ייכנס לצומת באור אדום, החלטת המעבר של הנהג בנקודה D אינה יוצרת סיכון לתאונת חזית-צד בצומת, בהנחה שמהירות התכן היא 60 קמ"ש. עובדה זאת נוצרת עקב תכנון הזמן הבין-ירוק שנועד לאפשר מעבר בטוח לנהג שאינו יכול לעצור את רכבו, כלומר נהג הנמצא במרחק הקטן ממרחק העצירה מהצומת עם הופעת האור הצהוב. ככל שמתארך האור הצהוב, קטן אזור הדילמה. בהתאם לציור מס' 1 באור צהוב של 6 שניות נעלם אזור הדילמה לחלוטין בכל מהירות סבירה.

יש לציין כי נהג באיזור הדילמה נופל למעשה "בין הכסאות" של תכנון הצומת ואכיפת המשטרה, מכיוון שתכנון הצומת מאפשר לו לעבור בבטחה מבלי שיהיה חשש לתאונת חזית-צד, בעוד שהחוק אוסר עליו לעבור. בפועל, במקומות בהם המהירות המותרת גבוהה מ-50 קמ"ש, מופעל ירוק מהבהב אשר "מוציא", מבחינה מסויימת, את הנהג מאיזור הדילמה.

האזור השני שנוצר הוא אזור האופציה. אזור האופציה נוצר בין קו מרחקי העצירה (מצד ימין) לבין קו המרחק אותו עובר הנהג במשך האור הצהוב. ככל שמתארך האור הצהוב, גדל אזור האופציה. באזור האופציה יכול הנהג לעצור או להמשיך ולהיכנס לצומת לפני הופעת האור האדום. החלטת מעבר עלולה לגרום לתאונת חזית-צד, במידה והרכב איטי והצומת גדול, והחלטת עצירה עלולה לגרום לתאונת חזית-אחור כאשר יותר מכלי רכב אחד נמצאים באזור זה.

לשם הדגמת הסיכון לתאונות חזית-צד נתבונן על נהג שבגמר האור הירוק נמצא בנקודה E ונניח מהירות תכן של 60 קמ"ש ואור צהוב של 6 שניות. נהג זה יכול להיכנס לצומת לפני הופעת האור האדום מכיוון שהוא נמצא במרחק קטן מהמרחק שהרכב עובר ב-6 שניות, אך הוא מועד לתאונת חזית-צד. עובדה זו נובעת מכך שהזמן הבין-ירוק מאפשר מעבר בטוח רק לנהגים הנמצאים במרחק מהצומת הקטן או שווה למרחק העצירה. בנקודה E הנהג נמצא במרחק גדול ממרחק העצירה, כלומר הוא יכול לעצור בצורה בטוחה. הסיכון לתאונות חזית-אחור באזור האופציה נוצר כאשר שני כלי רכב עוקבים נמצאים באזור האופציה והנהג הראשון מחליט לעצור ואילו הנהג השני מחליט לעבור. העובדה שלנהגים ניתנת האופציה לבחירה בין עצירה למעבר מגדילה את ההסתברות להחלטות מנוגדות באזור האופציה.

2.2.2 איזור ה"קושי בקבלת החלטות"

מבחינה אמפירית ניתן להגדיר אזור בקרבת הצומת בו הנהגים, אשר מתקרבים לצומת במהירויות שונות, מתקשים לקבל החלטה. Mahalel and Zaidel (1985) כינו אזור זה כאזור של "קושי בקבלת החלטות". באזור של קושי בקבלת החלטות קיימת הסתברות גבוהה להחלטות מנוגדות, עצירה ומעבר. בספרות המקצועית (Parsonson, Roseveare, and Thomas, 1974; Zeeger,) נהגים להגדיר אזור זה כאזור שהגבול הרחוק שלו מהצומת נמצא בנקודה בה 90% מהנהגים מחליטים לעצור והגבול הקרוב לצומת נמצא בנקודה בה 10% מהנהגים מחליטים לעצור. בתוך האזור ניתן למצוא פרופורציות גבוהות הן של החלטות עצירה והן של החלטות מעבר. הגדרה זו היא במידה רבה שרירותית ונוטה לכיוון שמרני ומקסימליסטי. יש לזכור שפוטנציאל הסיכון הגבוה ביותר נמצא בנקודה בה 50% מהנהגים מחליטים לעצור ו-50% הנותרים מחליטים לעבור. ככל שמתרחקים מנקודה זאת לכיוון של הגדלה או הקטנה של אחוז החלטות העצירה, קטן פוטנציאל הסיכון. במחקרם, Lum and Halim (2006) הגדירו את אזור הדילמה כסיטואציה הניצבת בפני נהג שבה בשל קומבינציות מסוימות של מהירות ומרחק מקו העצירה, הנהג לא יוכל לפנות את הצומת בזמן ואף לא יוכל לעצור בבטחה.

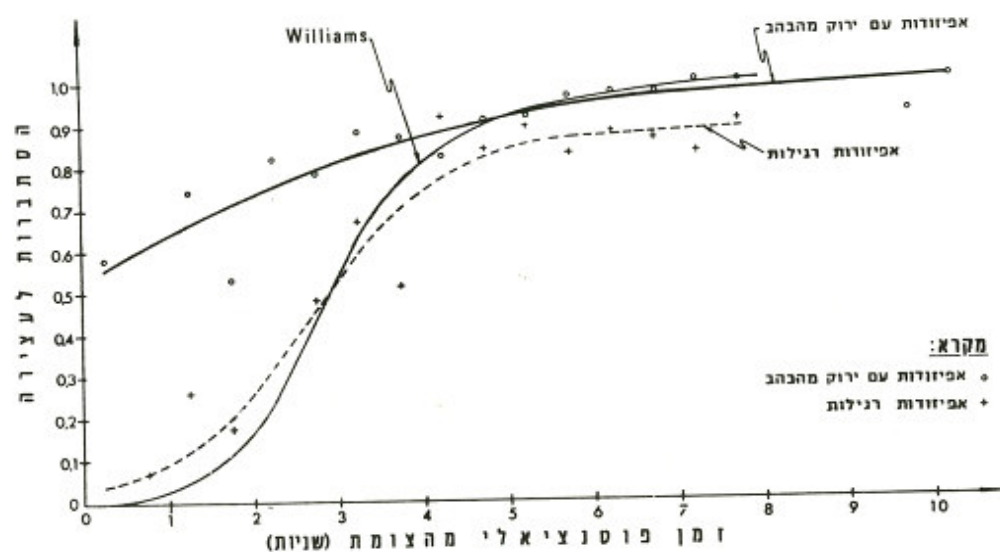
טבלה 1 מתארת את גבולות האזור של קושי בקבלת החלטות עבור מהירויות התקרבות שונות כפי שמתואר בעבודתם של Parsonson et al. (1974).

מרחק מהצומת (מ')		מהירות התקרבות (קמ"ש)
מיקום הנקודה של 90% החלטות עצירה	מיקום הנקודה של 10% החלטות עצירה	
52	27	48
75	33	64
90	50	72
105	66	80
135	78	97

טבלה 1: גבולות האזור של קושי בקבלת החלטות (Parsonson et al., 1974)

2.2.3 פונקציית הסתברות לעצירה

דרך נוחה להציג את החלטת הנהג היא באמצעות הבעת ההסתברות לעצירה כפונקציה של הזמן הפוטנציאלי מהצומת (זפ"צ). זמן זה מוגדר כזמן הדרוש לנהג להגיע לקו העצירה מרגע הופעת האור הצהוב, בהנחה של מהירות התקרבות קבועה. הזפ"צ תלוי במרחק מהצומת ובמהירות ההתקרבות. תרשים 2 מתאר פונקציה זו כפי שנמצאה ע"י Williams (1977) ו-Mahalel, Zaidel, Klein (1984) עם וללא אפיזודות של ירוק מהבהב. ההסתברות לעצירה חושבה כאחוז החלטות העצירה שהתקבל מתוך המספר הכולל של החלטות באותו זפ"צ.

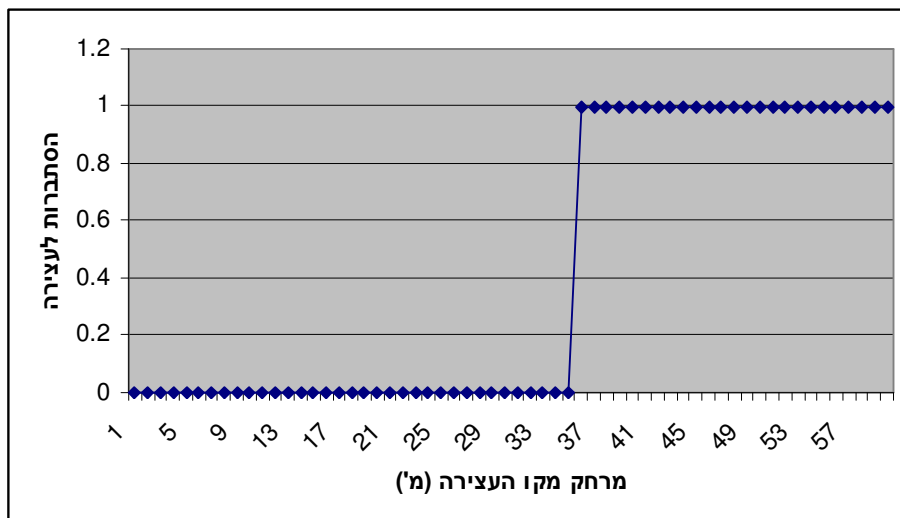


תרשים 2: הסתברות לעצירה כפונקציה של הזפ"צ. (מקור: Mahalel, Zaidel, Klein, 1985)

תיאורטית, בכדי למנוע תאונות חזית-אחור, ובכדי להיות מסוגלים לקבוע את הזמן-בין-ירוקים בצומת באופן יעיל, צורתה האידיאלית של פונקציה זו היא של פונקציית מדרגה (ראה תרשים 2). כלומר: כל הנהגים מחליטים באופן זהה, וכולם מחליטים לעצור אם ורק אם הם פחות מ- n שניות מהצומת (עבור n כלשהו). כמובן, שבמציאות הדבר אינו כך, כפי שרואים בגרף בתרשים 3.

בצומת שבו מתקיימת פונקציית מדרגה כנ"ל, כל הנהגים הם "אידיאליים" או "הגיוניים", והם עוצרים תמיד באור צהוב במידה ואפשר, וגם מרחקי העצירה של כולם שווים. בצומת אידיאלי מעין זה לא יהיו אף פעם תאונות חזית-אחור כיוון שהסיבה העיקרית לתאונות מסוג זה אינה קיימת. באופן דומה, תאונות חזית-צד יצטמצמו באמצעות בחירת אינטרוול שינוי המאפשר לנהגים שנמצאים במרחק קצר מהמרחק הקריטי לפנות את הצומת. אולם, אידיאל שכזה אינו בר השגה כיוון שכלי רכב מגיעים לצומת במהירויות שונות. יתרה מכך, החלטות הנהג אינן דטרמיניסטיות ונפרדות אלא רציפות והסתברותיות (Mahalel and Zaidel, 1986).

צורת פונקציית ההסתברות לעצירה קובעת את טווח האזור של "קושי בקבלת החלטות"; ככל שהפונקציה דומה יותר לפונקציית מדרגה, כך קטן יותר הטווח; ככל שהעקומה שטוחה יותר (שונת גדולה), כך גדל יותר טווח האזור. ככל שהאזור של "קושי בקבלת החלטות" גדול יותר וכלל שנפח התנועה גדול יותר, כך גדלה ההסתברות שכלי רכב ימצאו באזור זה בתחילת הצהוב. כלי רכב אלה יהיו נתונים לפיכך בסיכון גבוה יותר לתאונות מסוג חזית-אחור (Mahalel and Zaidel, 1986; Mahalel and Prashker, 1987; Prashker and Mahalel, 1989b). על פי (Mahalel and Prashker, 1987) ו-Prashker and Mahalel (1987a, 1989b), יצירת אזור אופציה גדול באמצעות אינטרוול אזהרה ארוך של 6 שניות מגדילה את הפיזור של פונקציית ההסתברות לעצירה ואת טווח האזור של "קושי בקבלת החלטות". כתוצאה מכך עולה גם ההסתברות לתאונות מסוג חזית-אחור.



תרשים 3 : פונקציית ההסתברות לעצירה בצומת אידיאלי. ההסתברות עולה בבת אחת מאפס לאחד, בנקודה כלשהי (בדוגמא זו, 37 מטר)

2.3 גורמים התורמים להתנהגות של מעבר באור אדום

נהגים עשויים לעבור את הצומת באור אדום כיוון שהם נכשלים בשיפוט של הזמן המספיק כדי לפנות את הצומת בבטחה או שהם נכשלים בזיהוי הנוכחות והסטאטוס של הרמזור. כדי לפתח מערכת עזר לנהג שתסייע במניעת מעבר באור אדום, יש להבין קודם כל את הגורמים התורמים ואת הנסיבות בהן מתרחשת עבירה זו.

מחקרים דווחו על מספר גורמים התורמים למעבר באור אדום כמו גיל ומין הנהג, תזמון הרמזור בצומת, מהירות התקרבות כלי הרכב, השעה ביום ועוד (Yang and Najm, 2007).

תזמון הרמזור, במיוחד משך זמן אינטרוול שינוי הרמזור לצהוב, משפיע על גודל אזור הדילמה הניצב בפני נהגים בזמן חילוף הרמזור מירוק לאדום והוכח כמשפיע על רמת הסיכון לנהגים הנכנסים לצומת באור אדום (Retting and Greene, 1997). תדירות המעבר באור אדום גדלה כאשר משך זמן אינטרוול האור הצהוב הוא פחות מ 3.5 שניות (Brewer, Bonneson, and Zimmerman, 2002).

במחקרם, Retting, Ulmer, and Williams (1999) מצאו כי כ 260000 תאונות הנגרמות כתוצאה ממעבר באור אדום מתרחשות מדי שנה בארה"ב, מתוכן כ 750 הן תאונות קטלניות. בהשוואה לתאונות קטלניות אחרות, תאונות הנגרמות ממעבר באור אדום היו בסבירות גבוהה יותר להתרחש בכבישים עירוניים (86% לעומת 42%) ובסבירות גבוהה יותר להתרחש בשעות היום (57% לעומת 48%). כקבוצה, אנשים שחוצים צומת באור אדום הם בסבירות גבוהה יותר לעומת נהגים אחרים: צעירים (מתחת לגיל 30), זכרים, בעלי עבירות תנועה קודמות והרשעות על נהיגה בשכרות, בעלי רישיון נהיגה לא בתוקף, וצרכו אלכוהול לפני התאונה. השוואה בין מאפייני נהגים העוברים באור אדום בשעות היום לעומת שעות הלילה הראתה כי נהגים העוברים באור אדום בשעות הלילה הם בסבירות גבוהה יותר צעירים, זכרים, בעלי עבירות תנועה קודמות והרשעות על נהיגה בשכרות, בעלי רישיון נהיגה לא בתוקף ו 53% מהם היו בעלי ריכוז גבוה של אלכוהול בדם בהשוואה לנהגים העוברים באור אדום בשעות היום.

במחקרם, Retting and Williams (1996) אספו נתונים באמצעות מצלמה אוטומטית, תצפיתנים מאומנים ונתונים מדוחות של משרד התחבורה בארה"ב על מנת לספק פרופיל של נהגים העוברים באור אדום בצומת עירוני. המחקר נערך בוויירג'יניה בצומת של עורק תנועה בעל 8 נתיבים ורחוב מאסף בעל 4 נתיבים. הנתונים נאספו עבור כלי רכב שנסעו בעורק הראשי שהמהירות המותרת בו היא 45 mph, סה"כ נצפו 462 נהגים שעברו באור אדום ו 911 נהגים שלא עברו באור אדום. בוויירג'יניה נהגים מחויבים לעצור בצהוב קבוע אם לא מספיק בטוח להמשיך. בממוצע נצפו שתי עבירות של מעבר באור אדום עבור כל שעת תצפית. ממצאי המחקר עולה כי נהגים העוברים באור אדום כקבוצה היו צעירים יותר, בעלי סבירות נמוכה לחגור חגורות בטיחות, בעלי הרשעות על עבירות תנועה ורישומי נהיגה גרועים, ונהגו בכלי רכב קטנים וישנים יותר בהשוואה לנהגים שלא עברו באור אדום. באופן מפתיע לא נמצאו הבדלים בין המינים בין נהגים שעוברים באור אדום לאלה שלא.

Yang and Najm (2007) חקרו את ההתנהגות של מעבר באור אדום באמצעות 47000 צילומים שצולמו במצלמת אכיפה ב 11 צמתים מרומזרים בקליפורניה במשך 4 שנים. מטרתם הייתה לבדוק האם יש סוגי נהגים מסוימים שהם בעלי נטייה גבוהה לעבור באור אדום והאם מאפיינים מסוימים של צמתים וסביבות תורמים לסבירות גבוהה יותר למעבר באור אדום. במהלך המחקר זוהו גורמים בעלי קורלציה חזקה להתנהגות של מעבר באור אדום והם: נהגים צעירים נטו יותר לעבור את הצומת באור אדום ובסבירות גבוהה יותר בצעו עבירה זו במהירות העולה על המהירות המותרת; בשעות שבין שמונה בערב לחמש בבוקר היו מעט עבירות, אולם נהגים שעברו באור אדום במסגרת זמן זו נטו יותר להאיץ ולחצות את הצומת במהירות גבוהה; במסגרת הזמן שבין שמונה בערב לחמש בבוקר נהגים שעברו באור אדום נכנסו בהסתברות גבוהה יותר לצומת שתי שניות או יותר לאחר תחילת המופע האדום; נהגים שעברו באור אדום היו בסבירות נמוכה יותר לחצות צמתים בעלי נפח תנועה גדול במהירויות הגבוהות מהמהירות המותרת. בנוסף, הנתונים מראים כי חלק מהנהגים שעברו באור אדום עשו זאת שלא במתכוון, באופן ספציפי, שלוש המהירויות הגבוהות בהן עברו באור אדום היו פחות מ 20 mph ויותר מ 94% מהנהגים שעברו באור אדום חצו את הצומת בטווח זמן של עד 2 שניות לאחר תחילת המופע האדום. לפי החוקרים, ממצאים אלה יאפשרו לזהות תסריטים בהם מערכת התרעה למעבר באור אדום תוכל לסייע לנהגים להימנע מסיטואציות נהיגה מסוכנות בהתקרבות לצמתים מרומזרים.

בסקר טלפוני ארצי שנערך בארה"ב בקרב 880 נהגים, Porter and Berry (2001) מצאו כי קבוצת הגיל נבאה מעבר באור אדום, באופן ספציפי נהגים צעירים נטו יותר לעבור באור אדום. נהגים דווחו גם כי הם נוטים יותר לעבור באור אדום כאשר הם לבד ברכב. בניגוד לציפייה, תסכול לא היווה גורם חשוב לניבוי מעבר באור אדום בניגוד לתרומתו המשמעותית להתנהגויות נהיגה אחרות כמו מהירות מופרזת, היצמדות לרכב שמלפנים, זיגזוג וסימון תנועות בכעס.

במחקר שנערך בששה צמתים מרומזרים בשלוש ערים בווירג'יניה, Porter and England (2000) מצאו הבדלים בין הערים כגורם ניבוי משמעותי למעבר באור אדום. שיעור גבוה של מעבר באור אדום נצפה בערים עם צמתים גדולים ונפח תנועה גדול. גם השעה ביום (למרות שהוגבלה לאינטרוול של 15:00-18:00 בו התבצעו התצפיות) נבאה מעבר באור אדום. עבירות של מעבר באור אדום היו שכיחות יותר בשעה מוקדמת יותר באינטרוול זמן זה. לאחר שהבדלי העיר והשעה נשלטו, שני גורמי נהג נמצאו כמנבאים חשובים: שימוש בחגורת בטיחות ואתניות. נהגים לא חגורים ונהגים שאינם לבנים עברו באור אדום בשכיחות גבוהה יותר.

2.4 אמצעים לסיוע לנהג בהחלטות חצייה בצומת

2.4.1 אמצעים לא-טכנולוגיים להקטנת מורכבות קבלת החלטות בצומת

מספר אמצעים הוצעו בעבר כדי להקל על הנהג בקבלת החלטות לעבור או לעצור וכדי להקטין את הסיכון לתאונות חזית-אחור או חזית-צד.

לגבי החלטת מעבר, האמצעי ההנדסי העיקרי שנועד להבטיח פינוי הצומת והפחתת הסיכוי לתאונת חזית-צד הוא הזמן הבין-ירוק, המוגדר כזמן שנמשך מגמר האור הירוק במופע אחד עד לתחילת האור הירוק של המופע העוקב. הזמן הבין-ירוק נועד לאפשר לנהג אשר בגמר האור הירוק אינו יכול לעצור, לחצות את הצומת ולפנות את אזור הניגוד לפני הופעת כלי הרכב בפאזה העוקבת. בחישוב הזמן הבין-ירוק לוקחים בחשבון את זמן התגובה של הנהג, את מהירות ההתקרבות של הרכב לצומת, את קצב ההאטה, אורך הצומת, ואת המרחק מקו העצירה ועד לתחילת שטח הניגוד ומהירות הכניסה של התנועה הצולבת (Mahalel, Zaidel, Klein, 1985).

התרעה על סיום המופע הירוק נועדה להקל על תהליך קבלת ההחלטות של הנהג. התרעה מעין זאת מהווה האור הצהוב המופיע ברמזור. התקנת מתקן ספירה לאחור של האור הירוק ברמזור נועדה להוות התרעה נוספת על זאת הקיימת לגבי הזמן שנותר עד להתחלפות לאור צהוב. במחקר לפני-אחרי בצומת עם מתקן ספירה לאחור של האור הירוק, Lum and Halim (2006) מצאו כי חודש וחצי לאחר התקנת המתקן הייתה ירידה משמעותית של כ-65% במספר העבירות של מעבר באור אדום, אולם השפעה זו חלפה עם הזמן כאשר מספר העבירות עלה חזרה כמעט עד לרמה שלפני התקנת המתקן.

אמצעי נוסף להתרעה על גמר המופע הירוק הוא הירוק המהבהב ב-3 השניות האחרונות של המופע הירוק. מבחינה תכנונית הירוק המהבהב הוא חלק מהפאזה הירוקה ולכן אינו מהווה חלק מהזמן הבין ירוק בארץ. השימוש בהבהוב ירוק מקובל בכל הצמתים הבין-עירוניים ובחלק מהצמתים העירוניים. מחקרי הערכה על השפעת ההבהוב הירוק על הבטיחות בצומת מצאו גידול מובהק בתאונות מסוג חזית-אחור בצמתים מרומזרים בהם הותקן ירוק מהבהב (Hakkert and Mahalel, 1978); (Knoflacher, 1973; Mahalel, Zaidel, Klein, 1985). זאת, למרות התחושה הסובייקטיבית שהירוק המהבהב מסייע לנהג המתקרב לצומת לקבל החלטה נכונה. (Mahalel, Zaidel, Klein, 1985) טוענים כי לנוכח הגידול באזור הקושי בקבלת החלטות, הגדלת פוטנציאל התאונות מסוג חזית-אחור מומלץ לשקול מחדש את ההצדק לשימוש באור ירוק מהבהב בצמתים מרומזרים. Xuedong et al (2005) מציעים סימון מיוחד לכביש, אשר נועד לשפר את החלטות הנהגים בגישה לצומת מרומזר, כפי שנראה בתמונה 7. הכותבים מראים תוצאות המוכיחות כי סימון כזה עשוי לסייע להחלטות נהגים.



תמונה 7: סימולציה של הסימון המוצע ע"י Xuedong et al

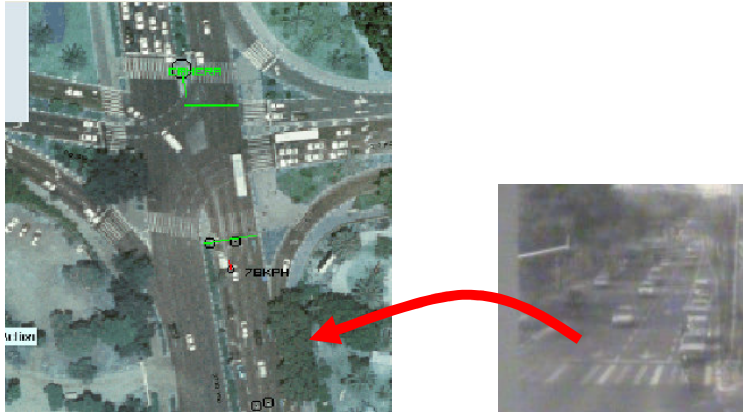
2.4.2 אמצעים טכנולוגיים להארכה אדפטיבית של הזמן-בין-ירוקים

עם התפתחות הטכנולוגיה בשנים האחרונות, נוצרו אפשרויות נוספות לסייע לנהגים לקבל החלטות נכונות בצומת. להלן נציג מספר דוגמאות להתקנים טכנולוגיים שמטרתם לסייע לנהג בהחלטותיו בגישה לצומת מרומזר.

חברת נסטור האמריקאית (Nestor, 2006) פיתחה מערכת, אשר מאריכה את הזמן-בין-ירוקים בצומת באופן אדפטיבי כאשר יש צורך בטיחותי בכך. המערכת מזהה, ע"י גלאים מתקדמים (מכ"מ או מצלמות), מצבים בהם ללא הארכת הזמן בין ירוקים, יוצר מצב מסוכן. מצבים כאלה נוצרים בד"כ כאשר נהג אחד או יותר מקבל החלטה לא נכונה בצומת. במקרה כזה המערכת מזהה כי אותו נהג לא יספיק להשלים את חציית הצומת בזמן, ומאריכה בהתאם את הזמן בין ירוקים ע"מ למנוע מרכב בדרך החוצה להתנגש בו. יצויין כי המערכת היא בעיקרה מערכת אכיפה והאופציה של הארכת הזמן בין ירוקים היא תוסף אשר לא ברור כמה מן הלקוחות אכן מפעילים אותו.

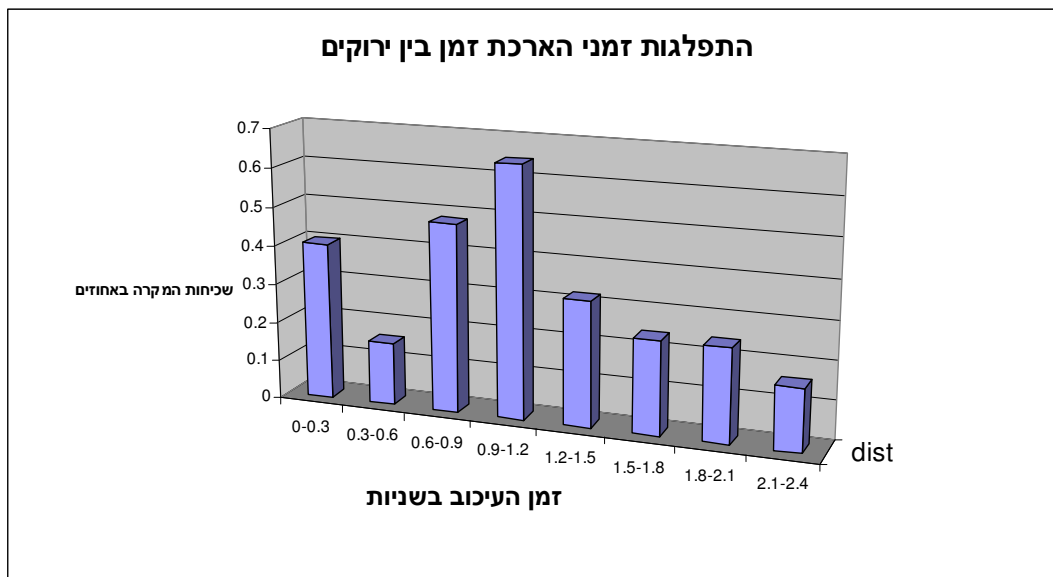
במקביל מתבצע בקליפורניה פרויקט דומה (PREVENT, 2007), אשר נועד להתאים את מחזור הרמזור לסכנות שונות. במסגרת זו קיימת גם האפשרות לדחות את האור הירוק.

Mahalel and Abramson (2007) ביצעו ניסוי שמטרתו היתה למדוד את מספר הפעמים בהם דרושה הארכה כזו של הזמן-בין-ירוקים. הניסוי בוצע בעזרת מצלמה בצומת הרחובות נמיר-לבנון בתל-אביב. אל המצלמה חובר מחשב המנתח את תנועת המכוניות וממפה את תנועת כל המכוניות בתנועה מדרום לצפון (ראו תמונה 8). בנוסף לידיעתו על מיקומן ומהירותן של המכוניות, יש למתקן גם ידע על מצב הרמזור המופנה לתנועה זו.



תמונה 8: ניסוי Mahalel-Abramson - המבט מהמצלמה (מימין) מועבר למידע המוצג ממבט-על (שמאל).

המערכת הופעלה במשך כ-35 שעות. במהלך הזמן הזה ביצע הרמזור 1241 מחזורים. החלטות לא נכונות התקבלו ע"י נהגים ב-33 מהמקרים, המהווים כ-2.6 אחוזים. בתרשים 4 אנו רואים את התפלגות מידת ההארכה הדרושה בזמן בין ירוקים על מנת למנוע תאונה, כאחוזים מכלל מחזורי הרמזור. מן התרשים אנו למדים שהמקרה הנפוץ ביותר הוא באיזור השניה, ושבמקרים קיצוניים יש להאריך את הזמן בין ירוקים עד מעל שתי שניות בכדי למנוע המצאות כלי-רכב מתנועות נגדיות באיזור הקונפליקט. מקרים אלה מתרחשים כאשר רכב נכנס לצומת במהירות נמוכה יחסית של כ-30 קמ"ש בדיוק כאשר מתחלף אור צהוב לאדום. במקרה כזה לוקח לכלי רכב זה כארבע וחצי שניות לפנות את איזור הקונפליקט, ולכן הוא יוצר צורך בהארכת הזמן בין ירוקים במעל שתי שניות. יש לציין שכלי רכב איטיים אלה נכנסו לצומת למרות שבזמן שקיבלו את האור הצהוב הם יכלו לעצור. במלים אחרות מדובר בנהגים שפונקציית המטרה שלהם מתמקדת באי-כניסה באור אדום, אולם אינם מקפידים על עצירה עם הופעת האור הצהוב, כאשר הם נמצאים במרחק הגדול ממרחק העצירה שלהם.



תרשים 4: התפלגות המקרים של הארכת זמן בין ירוקים (Mahalel and Abramson, 2007)

2.4.3 אמצעי סיוע להחלטות חציה

פרויקט מעניין בתחום בוצע בשנים 2005-2007 תחת פרוייקט העל IP-PREVENT. הפרוייקט, בשם intersafe¹, כלל מכוניות מצוידות בציוד תקשורת, חיישן ליזר המגלה את הצומת ומיקום הרכב, ותקשורת בין בקר הרמזור לרכב. במכונית, צג מיוחד התריע בפני הנהג אם הוא עומד לחצות באדום, ולחליפין העביר לו מידע לגבי המהירות האידיאלית שעליו לנסוע בכדי לעבור בירוק.

מטרות הפרוייקט היו:

- פיתוח ובדיקה של מערכת התראה לנהג בצומת, במכונית הדגמה, המבוססת על מיקום מדוייק של הרכב, חיזוי התנהגותם של אלמנטים אחרים ותקשורת עם הרמזור.
- פיתוח של מערכת בטיחות מתקדמת לצמתים, באמצעות סביבת סימולטור, ובדיקת אפשרויות ליישומים עתידיים ודרישות מחיישנים עתידיים.



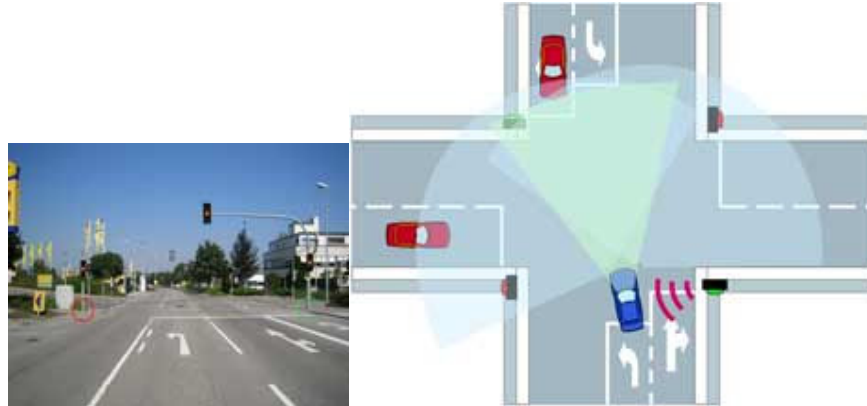
ציור מס' 9: חיישנים ברכב

בפרוייקט השתמשו בשתי גישות מקבילות:

- מלמטה למעלה (bottom-up) – התקנת סנסורים מתקדמים ברכב ובתשתית, כולל תקשורת בין הרכב לתשתית.
- מלמעלה למטה (top-down) – פיתוח של מערכת בטיחות מתקדמת לצמתים, באמצעות סביבה דינמית של סימולטור, בכדי להבין ולנתח יישומים מתקדמים עתידיים, ולהבין את הדרישות מחיישנים עתידיים. כמו כן ניתן לבדוק את המערכות הקיימות בתסריטים עתירי-סיכון.



ציור מס' 10: סביבת הסימולאטור של פרוייקט intersafe



ציור מס' 11: מימין, צומת עם התקנת מערכת intersafe. משמאל, תרשים של מכונית הפונה שמאלה ומקבלת התראה על פניה אסורה שמאלה (למרות שהאור ירוק כמקובל באירופה)

2.4.4 גורמי אנוש באמצעים לסייע לנהג בהחלטות חציה

אזהרות דינמיות הן "מערכות איתות מבוססות סנסורים" (Bliss and Gilson, 1998). מערכות אלה מציגות, בכל רגע נתון, אחד משניים או יותר מסרים (אי הפעלה של האזהרה גם נחשבת למסר), בהתבסס על קלט מסנסורים, אנשים או התקנים חישוביים. לפחות אחד מהמסרים (אך לא כולם) מזהיר את המשתמש אודות סכנה פוטנציאלית שעשויה לדרוש התערבות או ניטור. במחקרו Meyer (2004) עושה הבחנה בין שני סוגי תגובות למערכת אזהרה: ציות ותלות ובוחן את הגורמים המשפיעים על תגובת האדם לאזהרות. לפי Meyer (2004), מערכת אזהרה צריכה להשפיע על ההתנהגות גם כאשר היא מצביעה על סכנה וגם כאשר היא מצביעה על מצב בטוח. מערכת אזהרה שמפספסת מעט מאד מטרות אבל יוצרת התראות שווא בתדירות גבוהה תגרום לכך שהמשתמשים יהססו לפעול כאשר ניתנת אזהרה (כיוון שסביר להניח שזו התראת שווא), אבל הם יהיו בטוחים שהמצב תקין כאשר אין אזהרה. אלה הן שתי תגובות שונות למערכת האזהרה: האחת היא הנטייה לבצע פעולה כאשר אינדיקטור האזהרה מורה לאדם לבצע את הפעולה והאחרת היא הנטייה להימנע מביצוע פעולה כאשר אינדיקטור האזהרה לא מציין שהיא הכרחית. ניתן להשתמש במונח 'ציות' (compliance) כדי לציין את התגובה לפיה האדם פועל בהתאם לאות אזהרה ונוקט בפעולה מתחמקת. לעומת זאת, תגובה שונה קיימת כאשר מערכת האזהרה מציינת שהמערכת תקינה ובהתאם לכך המשתמש אינו נוקט באמצעי זהירות - המונח 'אמון' (reliance) נבחר לתגובה זו.

ממצאים אמפיריים תומכים בטענה שציות ואמון הן שתי תגובות נפרדות. למשל, מחקר על גילוי אותות עם אזהרה בינארית הראה כי ציות לא השתנה לאורך זמן בעוד שאמון פחת ככל שהמפעילים צברו ניסיון (Meyer, 2001). בנוסף, נמצא כי תקפות האזהרה השפיעה יותר על ציות בהשוואה לאמון. לבסוף, ציות, אך לא אמון, הושפע מצורת התצוגה של האזהרה: אזהרות אשר שולבו במידע נוסף הובילו ליתר ציות מאשר אזהרות שהוצגו בנפרד ממידע נוסף.

תגובות לאזהרות הן חלק מסט הפעולות של המפעיל האנושי. כתוצאה מכך, תגובות לאזהרות מושפעות מגורמים רבים, אשר ניתן לסווגם לשלוש קטגוריות: גורמים נורמטיביים (ניתן לחלקם לגורמים מצביים וגורמים דיאגנוסטיים), גורמי משימה (ניתן לחלקם לגורמים סביבתיים וגורמי ממשק) וגורמים הקשורים למפעיל האנושי (ניתן לסווגם למאפיינים כלליים ומאפיינים הספציפיים למערכת) (Meyer, 2004).

3. מטרת המחקר

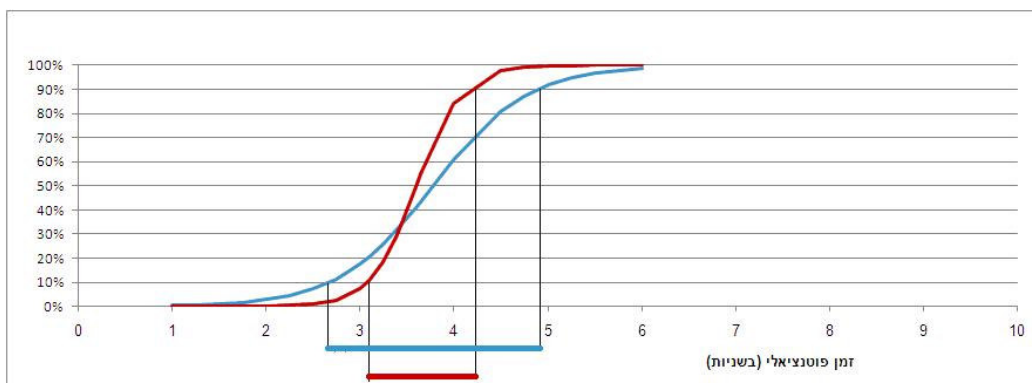
במחקר זה מפותחת הגדרה של מתקן עזר לנהג אשר יספק לנהג המלצות כיצד להתנהג בגישה לצומת מרומזר בעת קבלת האור הצהוב. ההמלצה תינתן לנהג באמצעים ויזואליים וקוליים באמצעות התקן אשר יותקן בלוח השעונים של הרכב ויהיה מופנה אל הנהג.

ההתקן, אשר ימומש במחקר זה בסימולטור בלבד, יקבל כקלט את נתוני הרכב והרמזור, וימליץ לנהג כיצד לנהוג – דהיינו, האם לעצור או לעבור.

מטרת המחקר היא לבחון מתקן תוך-רכבי שיסייע לנהג לקבל החלטה נכונה ובטוחה כיצד לנהוג עם הידלק האות הצהוב – לעצור או לעבור.

המחקר יתמקד בהשפעות המתקן על קבלת ההחלטות של נהגים, ויבחן את תרומתו לבטיחות הנסיעה.

השערת המחקר היא, כי המתקן ישנה את מבנה פונקציית ההסתברות לעצירה של נהגים בגישה לצומת מרומזר עם הדלק האור הצהוב, כך שהפונקציה תדמה יותר לפונקציית מדרגה (שונות קטנה יותר). מדד הקירבה לפונקציית מדרגה נמדד ע"י רוחב התחום שבין האחוזונים ה-10 ל-90, כמוסבר בתרשים 5. פונקציית ההסתברות לעצירה הדומה לפונקציית מדרגה משמעותה התנהגות אחידה של נהגים, ובכך היא עשויה להקטין את הסיכון לתאונות חזית-אחור, הנגרמת בשל התנהגות לא-אחידה של נהגים.



תרשים 5: פונקציות שונות של ההסתברות לעצירה וקירבתן לפונקציית מדרגה. ניתן לראות כי רוחב התחום שבין האחוזון ה-10 לאחוזון ה-90 הוא מדד לקירבה לפונקציית מדרגה. ככל שהתחום צר יותר, כך הפונקציה קרובה יותר למדרגה. בפונקציית מדרגה מושלמת רוחב התחום הוא אפס.

4. שיטת המחקר

4.1 תיאור מעבדת המחקר

מעבדת המחקר כללה את סביבת מכונת הסימולטור ומספר מחשבים לאיסוף נתונים ולשליטה על חלקי הסימולטור השונים. הסימולטור STISIM מתוצרת System Technology, Inc הותקן בסביבה הכוללת מושב של מכונת והגה אלקטרוני. סימולטור זה מאפשר, תכנות מלא של תסריטי הנהיגה, איסוף נתונים נרחב ושליחת אותות למערכות חיצוניות על מנת לסנכרן בין כל מערכות הסימולטור.

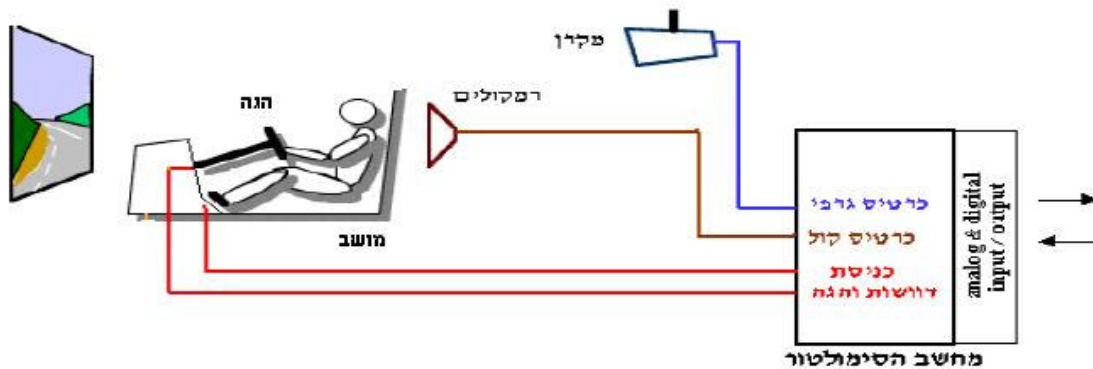
הסימולטור היה בעל ממשק אינטראקטיבי שכלל: דוושת האצה, דוושת בלימה מערכת היגוי, צג פנימי ומערכת קול. תסריטי הסימולטור הוקרנו על מסך תוך שימוש בהדמיה חזותית וקולית בכדי לתת תחושה אמיתית של נהיגה.

מערכת ההיגוי - מערכת ההיגוי חוברה למחשב נפרד כדי ליצור בהגה תחושה של התנגדות בהתאם למהירות הנסיעה ולמבנה התסריט.

תסריט ההדמיה הוקרן על-גבי מסך בגודל של 180X140 ס"מ ובמרחק של 2 מטר מעיני הנבדק. במצב זה הנהג קיבל תמונה אמיתית ומאוזנת.

בנוסף לתסריט הנהיגה, הוקרנה בחלקו העליון של המסך הדמיה של המראה האחורית ובתחתית המסך הוקרן מד המהירות.

מבנה כללי של מערכת הסימולטור מופיע בתרשים 6.



תרשים 6 : מבנה הסימולטור

לסימולטור נהיגה יש יתרונות רבים מאחר והוא יכול לשחזר מצבי נהיגה ממשיים לסביבה וירטואלית בטוחה ומבוקרת ולאפשר עריכת ניסויים שונים ביניהם מצבי חירום שאינם אפשריים בבחינת רכב מעשית. סימולטורים מהווים אמצעי בטוח, המסוגל לבחון את מגבלות הנהג והרכב במהירויות גבוהות ותוך כדי מצבים מסובכים כגון: תנועה עמוסה, בלימת פתע, סיבוב מסוכן, וכן, השפעת גורמים שונים כגון אלכוהול, סמים, משקאות ממריצים, עייפות וכד' על ריכוז הנהג בנסיעה

ויכולתו להתמודד עם מקרים קיצוניים כגון אלו, כל זאת, מבלי לסכן את האדם המתנסה והמשתמש בסימולטור. בעולם המערבי לסימולטורים תפקיד חשוב: החל בכאלו המתרגלים טייסים ונוטים בהטסה ובהטלת חימוש, דרך סימולטורים המדמים, עבור רופאים ואחיות, חולה הנזקק לניתוח דחוף או לכל טיפול אחר וכלה בסימולטורים המהווים חלק בלתי נפרד ממערך המלחמה בתאונות הדרכים וחקר הגורמים המשפיעים עליו.

לסימולטור, כמובן, גם חסרונות. החסרון העיקרי בסימולטור הוא שהמצב בו נמצא הנהג אינו זהה למצב בו הוא נמצא במציאות. מעבר לעבודה שהמראה והצלילים המושמעים אינם כפי שהם במציאות (דבר שניתן להתגבר עליו חלקית ע"י שכלול הסימולטור), עצם הידיעה שאינו יושב בתוך כלי-רכב נע ואינו יכול להמצא בסכנה, גורם לנהג להתנהג אחרת מאשר במציאות. על העדר "תחושת המציאות" מנסים להתגבר ע"י מתן פרסים ועונשים שונים המיועדים לחקות את ה"פרסים" וה"עונשים" הניתנים במציאות על התנהגות טובה או רעה. הנחת הבסיס בסימולטור היא, שאם המראה והצלילים מתקרבים לאלו שבמציאות, וניתנים פרסים ועונשים במידה מספקת כדי ליצור תנאי לחץ הדומים למציאות, אזי התוצאות תהיינה דומות לאלו שבמציאות.

Blaauw (1983) הציע שתי רמות שעל פיהן תיבחן תקפות הסימולטור. הראשונה: פיזית הנוגעת באספקטים הפיזיים בסביבתו של הנהג ובממשקים בין הרכב לנהג כמו למשל בנייתו של הסימולטור על גבי משטח נע המדמה את תנועתיות הנסיעה, דימוי זה קרוי, תקפות פיזית - physical validity. השנייה: התנהגותית העוסקת בהתאמה (correspondence) בין הסימולטור לעולם האמיתי קרוי: דימוי הכביש הנראה ע"י הנהג, המהירות, שינויי הרקע בתגובה לפעולה המתבצעת ע"י הנהג וכו'. וקרויה תקפות התנהגותית - Behavioral validity. ככל שהסימולטור קרוב יותר לדרך פעולתו ותגובתו הפיזית של הרכב (fidelity), כך גם הסימולטור נראה טוב יותר ואמין יותר. זו גם הסיבה שהרבה מהסימולטורים נבנים על בסיס נע ומתרכזים ב- physical validity. עם זאת, תקפות פיזית, אפילו מוחלטת, בין הסימולטור לרכב לא משפרת או משפיעה כלל על התקפות ההתנהגותית. ובכל זאת רבים מהמחקרים נעשו ונעשים על תחום זה מפני שזהו תחום שקל יותר לבחון ולבקר אותו.

4.2 תסריטי הנהיגה

בכל ניסוי נעשה שימוש באותו תסריט נהיגה. התסריט כולל מספר מקטעים:

- מקטע התרגלות: קטע של 500 מטר בו הנהג נוהג בכביש ישר, דו כיווני עם שני נתיבים לכל כיוון וקו הפרדה רצוף (ללא מפרדה), כאשר מעט תנועה נוכחת בכביש בשני הכיוונים. מקטע זה נועד להכניס את הנהג לתחושת הנהיגה בסימולטור ולאפשר לו להתרגל להגה, לדוושות וכו'.
- מקטע תרגול צמתיים: קטע של 500 מטר נוספים
- מקטע עירוני: מקטע בן 5.5 ק"מ הכולל נסיעה בתוך עיר. הכביש נשאר חד מסלולי עם שני נתיבים לכל כיוון, ואילו בצדדים מופיעות מכוניות חונות, עצים, הולכי רגל ההולכים עם כיוון ונגד כיוון הנסיעה בשני צדי הרחוב. כמו כן מופיעים כמובן בתים ומבנים, חלקם בנייני

משרדים גבוהים מאד (גורדי שחקים) וחלקם בניינים בעלי 3-4 קומות אך רחבים מאד. במקטע זה 24 צמתים (ראו תאור הצמתים להלן).

- מקטע בין-עירוני: מקטע בן 4 ק"מ הכולל נסיעה בשטח פתוח. הכביש נשאר חד מסלולי עם שני נתיבים לכל כיוון, הבניינים הגבוהים נעלמים, ובמקומם מופיעים בדלילות בתים כפריים, חלקם עסקיים (רחבים מאד בעלי קומה אחת, מסעדות, תחנות דלק וכו'), וחלקם בתים פרטיים. הולכי רגל ההולכים עם כיוון ונגד כיוון הנסיעה אינם נוכחים פה, ועצים מפוזרים לצדי הדרך. במקטע זה 12 צמתים (ראו תאור הצמתים להלן).

כל אחד מ-40 הצמתים הוא צומת של ארבע זרועות מרומזר. לעתים, ניתן את אדום בכיוון ממנו ניגש לצומת רכב הניסוי, לעתים את ירוק, ולעתים מתחלף מירוק לצהוב, ואח"כ לאדום, בזמן הגישה לצומת.

נהג שנכנס לצומת באור אדום מקבל את הדומה לזה של מכונית משטרה (סירנה).

4.3 תכנון המתקן

מטרת המתקן היא להמליץ אם לעבור או לעצור. לשם כך יכול המתקן להשתמש בשתי שיטות:

א. לבסס את המלצתו על כך שהרכב לא יכנס לצומת באור אדום. אם הרכב עומד להכנס לצומת באור אדום (ע"ס מהירותו הנוכחית, מרחקו מקו העצירה, ובהנחה שימשיך במהירותו הנוכחית), אזי יומלץ לעצור. אחרת יומלץ לעבור.

ב. לבסס את המלצתו על כך שהרכב יעצור לפני קו העצירה אם הוא מסוגל לכך. אם הרכב מסוגל לעצור לפני קו העצירה (בהנחה שהנהג יגיב להמלצת המתקן תוך זמן תגובה מסוים כמפורט להלן), אזי יומלץ לעצור. אחרת, יומלץ לעבור.

עובדה ידועה היא, כי שתי ההגדרות הנ"ל אינן זהות. בהחלט ייתכן מצב בו הנהג מסוגל לעצור לפני קו העצירה, אך גם אם ימשיך ויעבור את הצומת, לא יכנס באור אדום לצומת. מאידך, בתנאים מסויימים קיים גם מצב הפוך בו הנהג אינו מסוגל לעצור בבטחה לפני קו העצירה אך אם ימשיך יכנס לצומת באור אדום. ראו סעיף 2.2.1 הדן בנושא זה.

במחקר זה, כפי שמפורט להלן, נעשה שימוש בשתי ההגדרות.

לגבי שיטת החישוב ב' לעיל: כאמור בשיטה זו עקרון המתקן הוא, שהוא ממליץ לעבור את הצומת אם אין אפשרות לעצור בבטחה, ולעצור אם יש אפשרות לעצור בבטחה. ההגדרה של "בבטחה" נתונה לדיון, והיא תלויה במידה רבה בכלי הרכב בו נוהגים. בספרות מקובל להסתמך על תאטות של 7.3-8.5 קמ"ש לשניה². בסימולטור קל יותר לבלום, וחסרה תחושת "בלימת חירום", לפיכך התבצע קדם-ניסוי עם 5 נהגים בכדי לקבוע מהי התאטה הנורמלית. הנהגים התבקשו לנסוע במהירות של 50 קמ"ש ולבלום "בבטחה" (במלים אלו) עם התקבל הוראה לכך. ממוצע התאטות של חמשת הנהגים ב-5 בלימות כ"א הוא 12.8 קמ"ש לשניה. תאטה זו נבחרה כתאטה על-פיה יעבוד המתקן.

בשיטה ב' לעיל המתקן פועל איפוא כך: ברגע המעבר מהאות הירוק לצהוב, המתקן מחשב את מרחק העצירה בהנתן התאטה הנ"ל, המהירות הנוכחית וזמן תגובה של 0.7 שניות. מרחק עצירה

זה מושווה למרחק מקו העצירה באותו הרגע. אם מרחק העצירה קטן מהמרחק לקו העצירה (כלומר, כלי הרכב יכול לעצור לפני הקו) אזי המתקן ממליץ לעצור. אחרת, ממליץ לעבור.

בכל מקרה, המלצת המתקן ניתנת בשתי דרכים בו זמנית:

- ויזואלי: נורית אדומה (לעצירה) או ירוקה (למעבר) נדלקת בלוח השעונים של הנהג למשך 3 שניות. ה"נורית" מופיעה באיזור לוח השעונים כמלבן שרוחבו עשירית מרוחב המסך, וגובהו עשירית מגובה המסך.
- קולי: מושמע צליל מתריע (לעצירה) או מרגיע (למעבר) בה בעת עם הופעת ה"נורית" המתוארת למעלה. אורכו של הצליל כחצי שניה.

4.4 אפיזודות בדיקה

מערך המחקר כלל נהיגה של תסריט אחד בסימולטור לכל נבדק. חלק מהנבדקים – קבוצת הביקורת – נהגת ברכב שבו לא הותקן המתקן נשוא מחקר זה. החלק השני – קבוצת הניסוי – נהגת ברכב אשר המתקן מופיע בלוח המחוונים של המכונית, ופועל בהתאם למפורט למעלה.

בחצי מהצמתים (12 מתוך 24 בעירוני, 6 מתוך 12 בבינעירוני), הנהג מקבל אות ירוק או אדום כבר בזמן גישתו לצומת. צומת כזה אינו מהווה מקור מידע בניסוי והוא חלק מהרקע. בחצי הנותר, מופיע אור צהוב ברמזור עם התקרבות רכב הנבדק לצומת. צומת כזה מהווה חלק מהניסוי והוא מוגדר כאפיזודה. לכל אפיזודה המאפיינים הבאים:

- מהירות התקרבות: טווח המהירויות נע מ-30 קמ"ש עד 60 קמ"ש בקפיצות של 10 קמ"ש.
- מרחק מקו העצירה בגמר האור הירוק (במטרים).

המרחק מקו העצירה באפיזודות השונות פוזר באופן שרירותי על תחום רחב של ערכים (1 עד 6 שניות). כפי שמפורט להלן, עם התקדמות הניסוי התמקד המחקר בתחום ערכים בהם אכן יש שוני בין החלטות שונות של נהגים.

4.5 תהליך הבדיקה

המטרה של הנהג להגיע מנקודת ההתחלה לנקודת הסיום של המסלול בזמן הקצר ביותר תוך שמירה על חוקי התנועה (לא לעבור באור אדום ברמזור). בפילוט מקדים שנערך על שלשה נבדקים נמצא כי הזמן הממוצע שלוקח לנהג מתחילת המסלול ועד סופו הוא 18 דקות. על כל מעבר באור אדום, נשמע צליל סירנה של משטרה ונרשמת לנהג עבירה. כל הנהגים, הן מקבוצת הביקורת והן מקבוצת הניסוי, מקבלים תגמול של 20 ש"ח (בצורת תווי קניה) עבור ההשתתפות בניסוי. נהג, שעובר את המסלול בפחות מ-18 דקות וללא עבירות (צלילי משטרה) מקבל 10 ש"ח נוספים. הדבר מוסבר לנבדקים בתחילת הניסוי. התגמול הנוסף נועד לדמות ערך לזמן הנסיעה של הנהגים.

כדי לדמות את המציאות עד כמה שניתן יצרנו קונפליקט בקרב הנבדקים: עליהם לעבור את המסלול ללא עבירות אך בפחות מהזמן הממוצע שנקבע. התגמול הנוסף נועד ל"קנוס" את אלה שמיהרו וקיבלו החלטות לא נכונות וחצו באדום. לעומת זאת, ע"מ לדמות את עלות הזמן לנהגים, הוגדר סף של 18 דקות כסף הצלחה. כלומר ניתן קנס על מעבר אור אדום ופרס על סיום המסלול בזמן הקצר

מ- 18 דקות וללא עבירות כדי ליצור מוטיבציה בקרב הנהגים לקבלת החלטות נכונות. אם הניסוי היה ללא מגבלת זמן הנבדקים אולי לא היו מבצעים עבירות אך היה לוקח להם הרבה זמן כי ייתכן והיו עוצרים גם כשלא היה צריך לעצור. מצד שני, אם רק נקציב להם זמן הם עשויים לעבור באדום במרבית המקרים וזה לא דומה לאופן בו הם נוהגים במציאות.

עבור כל אפיזודה שעובר הנהג, נרשמת תגובתו (עבר/עצר) עבור סוג זה של אפיזודה (צירוף של שני המאפיינים הנ"ל מהירות+זפ"צ). התוצאה של כלל הניסוי תהיה קובץ שבו כל החלטה של נהג מהווה רשומה. המשתנים של כל רשומה הם:

- מזהה נהג
- מזהה צומת
- מהירות בזמן מתן האות הצהוב ברמזור
- מרחק מהצומת בזמן מתן האות הצהוב ברמזור
- עבר או עצר ברמזור
- מתקן פועל או לא
- המלצת המתקן לעבור/לעצור

5. מהלך הניסוי

5.1 אוכלוסיית הנהגים

מתוך רצון למנוע למידה של הנבדקים במידה והיו אותם נבדקים נוהגים בסימולאטור פעם אחת בלי המתקן ואחר כך עם המתקן, הוחלט לערוך את הניסוי עם שתי קבוצות נפרדות אך דומות במאפייניהן ככל האפשר. קבוצת הביקורת תנהג בסימולאטור ללא המתקן וקבוצת הניסוי תנהג בסימולאטור עם המתקן.

בניסוי השתתפו 44 נהגים שנהגו כאשר המתקן אינו פועל בסימולטור, ו-32 נהגים אשר השתתפו כאשר המתקן פועל. בנוסף השתתפו מספר נהגים לצרכי כיוול המערכת אשר אינם נספרים במניין הניסוי.

אוכלוסיית הנהגים הורכבה ברובה מסטודנטים בטכניון אשר הסכימו להשתתף בניסוי. גילם הממוצע של הנבדקים היה 28. רובם של הנבדקים היו גברים (83%) ורובם המכריע רווקים (89%).

5.2 אפיזודות הניסוי

במהלך הרצת הניסוי בסימולאטור נערכו מספר שינויים בתנאי הניסוי המתוארים להלן (ראה נספח מס' 1). קבוצת הנבדקים התחלקו כדלקמן:

קבוצת הביקורת – ללא המתקן: 44 נבדקים כמפורט להלן:

15 נבדקים עם זמנים ומהירויות קבועות, כלומר מהירות הרכב מתקבעת באופן אוטומטי עם התקרבות הנהג לצומת, ודוושות התאוצה והבלימה אינן מגיבות עד שהאות ברמזור מתחלף לצהוב. כאשר האות מתחלף לצהוב הופכות הדוושות לפעילות ומתאפשר לנהג להגיב – לעצור או לעבור. לנבדקים אלה הוצגו 36 אפיזודות כמפורט בנספח 1.

29 נבדקים נוספים, עם מספר האפיזודות מופחת (18 אפיזודות), ללא מגבלת המהירות.

קבוצת הניסוי – עם המתקן: 32 נבדקים כמפורט להלן:

15 נבדקים עם מספר האפיזודות מופחת (18 אפיזודות), ללא מגבלת המהירות, והמתקן עובד בשיטה א' המפורטת בסעיף 4.3 לעיל (הימנעות מכניסה לצומת באדום).

17 נהגים עם מהירות קבועה, ו-18 אפיזודות שונות בהן ממוקד הזפ"צ סביב איזור הדילמה (קרי באיזור 2.5-4.5 שניות ולא זמנים כמו 1 ו-6 שניות בהם החלטת הנהג טריוויאלית). המתקן עובד בשיטה ב' המפורטת בסעיף 4.3 לעיל (המלצה לעצור אם אפשר).

הסבר לשינויים שהתקבלו במהלך הרצת הניסוי:

זמן מקו העצירה בעת חילוף לצהוב:

בכל הנבדקים בלי המתקן, וב-15 הנבדקים הראשונים עם המתקן, הזפ"צ בעת החילוף לאור צהוב היה בעל ערכים דומים עם שינויים טכניים. לאחר שראינו כי נבדק תמיד עובר כאשר הזמן מקו העצירה הוא 1-2 שניות, כלומר, הסתברות לעצירה היא 0, ואילו כאשר הזמן מקו העצירה הוא מעל 5, ההסתברות לעצירה היא 100 (תמיד עוצר), אזי הוחלט כי אין טעם לבדוק איך המתקן ישפיע

באותם זמנים שבהם ההחלטה טריוויאלית. לפיכך, ב-17 הנבדקים האחרונים בוטלו זמנים אלה והוספו נקודות זמן בתחום של 2-4 שניות כדי להתמקד בהחלטות באזור שאינו טריוויאלי. כתוצאה מכך קיים הבדל בין הנבדקים בערכי הזמן מקו העצירה בעת חילוף לצהוב. יש לציין כי הארגון מחדש הוא תוצאה של אילוף של זמן הניסוי – לא ניתן היה להוסיף אפיזודות מבלי לעייף את הנבדקים יתר על המידה ולכן נעשה ניסיון להפיק מידע רב ככל האפשר ממספר האפיזודות האפשריות.

פעולת המתקן:

ב-15 הנבדקים הראשונים עם המתקן, המתקן פעל על פי שיטה א' המתוארת בסעיף 4.3 לעיל, קרי הימנעות מכניסה לצומת באור אדום. לאחר מכן הוחלט כי הגדרה זו, שהיא "משטרית" בעיקרה (קרי: מתייחסת לציות לחוק ולא בהכרח לבטיחות או להנדסת תנועה) איננה מתאימה לניסוי, והוחלט לעבור לשיטה ב' המתוארת בסעיף 4.3 לעיל, קרי המלצה לעצירה אם הדבר אפשרי. כך נבדקו 17 נבדקים נוספים.

טבלה 2 מציגה ריכוז של חלוקת אוכלוסיית הניסוי לפי שיטות הניסוי השונות.

מספר נבדקים		מבנה אפיזודות הבדיקה			קבוצה
מס' נבדקים בקבוצה	מס' נבדקים לפי צורת הניסוי	מס' אפיזודות	מאפייני מהירות	עם/בלי מתקן	
44	15	40	עם קיבוע מהירות	בלי	ביקורת
	29	18	בלי קיבוע מהירות		
32	15	18	בלי קיבוע מהירות	עם מתקן הפועל בשיטה א' המתוארת בסעיף 4.3 לעיל	ניסוי
	17	18	עם קיבוע מהירות	עם מתקן הפועל בשיטה ב' המתוארת בסעיף 4.3 לעיל	

76				סה"כ
----	--	--	--	------

טבלה 2: ריכוז אוכלוסיית הניסוי

6. תוצאות

6.1 החלטות מעבר

6.1.1 בניית מודל רגרסיה

בדקנו את פונקצית הסתברות לעצירה בשתי קבוצות דגימה:

- קבוצת הביקורת (ללא מתקן עזר ברכב) כללה את 15 נבדקים הראשונים, אשר קבלו 36 אפיזודות, ועם הגבלת מהירות, וכן 29 נבדקים נוספים, אשר קיבלו 18 אפיזודות ונהגו ללא הגבלות מהירות.

- קבוצת הניסוי (עם מתקן עזר) כללה 32 נבדקים. 15 מן הנבדקים נהגו עם מתקן עזר בשיטה א' לעיל (מניעת מעבר באדום), וללא הגבלת מהירות, ו-17 נהגים עם מתקן עזר ע"פ שיטה ב' (לעצור אם אפשרי), ועם הגבלת מהירות.

בניסיון לאמוד את פונקצית ההסתברות לעצירה נשתמש במודל רגרסיה לוגיסטית. זהו מודל של רגרסיה מרובה אשר בו המשתנה התלוי הוא דיכוטומי עם שני ערכים: החלטת עצירה והחלטת מעבר (0,1). המשתנים המסבירים במודל רציפים והם: מהירות התקרבות לצומת במתן אור צהוב (בקמ"ש)³ וזפ"צ (בשניות). הרגרסיה הלוגיסטית אומדת את הסיכוי לעצירה, אשר מתקבל בטווח ערכים בין 0 ל 1, כאשר ערך קרוב לאפס מבטא סיכוי נמוך לעצירה, ואילו ערך קרוב לאחד מבטא סיכוי גבוה לעצירה. הנוסחה הבסיסית של המודל היא:

$$P(y) = 1 / (1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon)})$$

- P - הסתברות לעצירה
- y – משתנה דיכוטומי (עצר/לא עצר)
- e - בסיס בלוגריתם טבעי
- β_0 - ערך הקבוע
- β_1 - מקדם הרגרסיה של משתנה המסביר "מהירות"
- β_2 מקדם הרגרסיה של משתנה המסביר "זפ"צ"
- ε - משתנה אקראי נורמלי $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$

אנחנו אומדים את המודל בשני מצבים שונים: נהיגה עם מתקן עזר וללא מתקן עזר, על מנת לבדוק מה השפעתו של המתקן על החלטת הנהג לעצור. עקב המספר המועט של המשתנים המסבירים, כל המסבירים הוכנסו למודל יחד והרגרסיה בוצעה בצעד אחד.

הסבר למודל

מסביר משתנה מסביר	מקדם לא רגרסיה מתוקנן B	טעות תקן של מקדם רגרסיה S.E.	Wald (df=1)	Exp(B)	אחוז השונות המוסברת	חי בריבוע	אחוז סיווג מדויק על ידי מסבירים
ללא מתקן עזר לנהג	מהירות	0.01	8.96	1.04	0.693	604.4 ₍₂₎ , p<0.001	84.4%
	זמן	*1.98	221.63	7.25			
	קבוע	*-8.69	144.90				
עם מתקן עזר לנהג	מהירות	0.02	4.28	1.03	0.716	312.9 ₍₂₎ , p<0.001	90.4%
	זמן	*4.20	63.38	66.91			
	קבוע	*-16.03	71.77				

*ערך מובהק ברמת מובהקות 0.05

טבלה 3: תוצאות רגרסיה לוגיסטית לניבוי עצירה ע"י מהירות התקרבות לצומת במתן אור צהוב

זפ"צ – עם וללא הפעלת מתקן עזר לנהג

בטבלה 3 מתוארים שני מודלים של רגרסיה עם/ללא מתקן עזר לנהג המנסה לנבא את ההסתברות לעצירה בעת התקרבות לצומת כפונקציה של מהירות ההתקרבות וזפ"צ. המודל ללא מתקן עזר לנהג נמצא מובהק ($R^2=0.693$, $X^2_{(2)}=604.4$ p<0.001, N=44). משוואת מודל הרגרסיה הנה:

$$P(y) = 1 / (1 + e^{(8.69 - 0.04x_1 - 1.98x_2)})$$

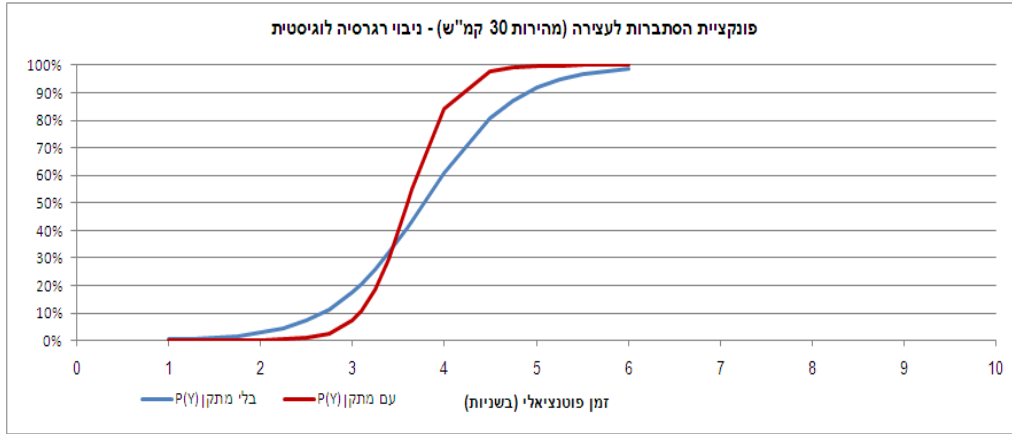
מהירות התקרבות וזפ"צ מסבירים 69% מהשונות במשתנה התלוי. עלייה ביחידת מהירות אחת מעלה פי 1.04 יחידות את הסיכוי שנהג יעצור בהתקרבות לצומת ועלייה ביחידת זמן אחת מעלה פי 7.25 יחידות את הסיכוי שהנהג יעצור בעת התקרבות לצומת.

כאשר בוחנים את מודל הרגרסיה לניבוי עצירה עם מתקן עזר, נראה כי גם מודל זה מובהק ($R^2=0.72$, $X^2_{(2)}=312.9$ p<0.001, N=32) וחלה עליה קלה בשונות המוסברת (72% לעומת 69%). משוואת המודל הנה:

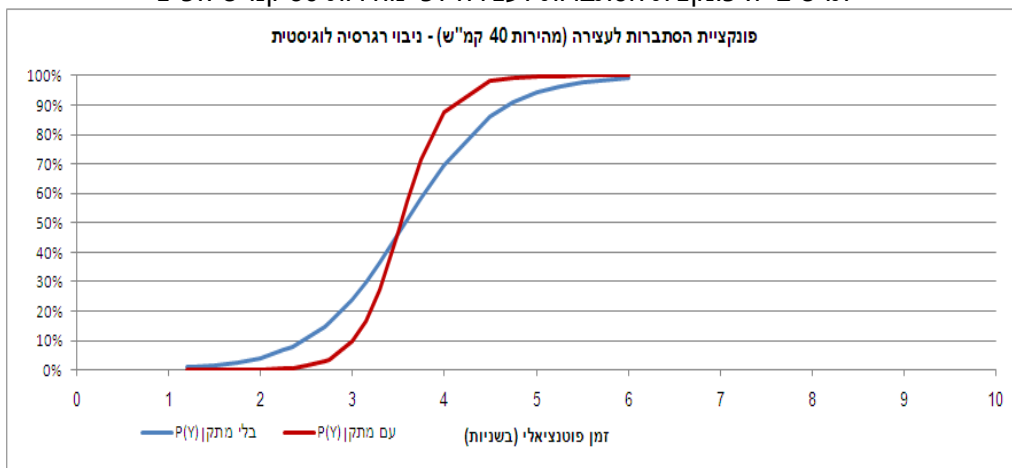
$$P(y) = 1 / (1 + e^{(16.03 - 0.03x_1 - 4.2x_2)})$$

עלייה ביחידת מהירות אחת מעלה פי 1.03 יחידות את הסיכוי שנהג יעצור בהתקרבות לצומת ועלייה ביחידת זמן אחת מעלה פי 66.9 יחידות את הסיכוי שהנהג יעצור בעת התקרבות לצומת.

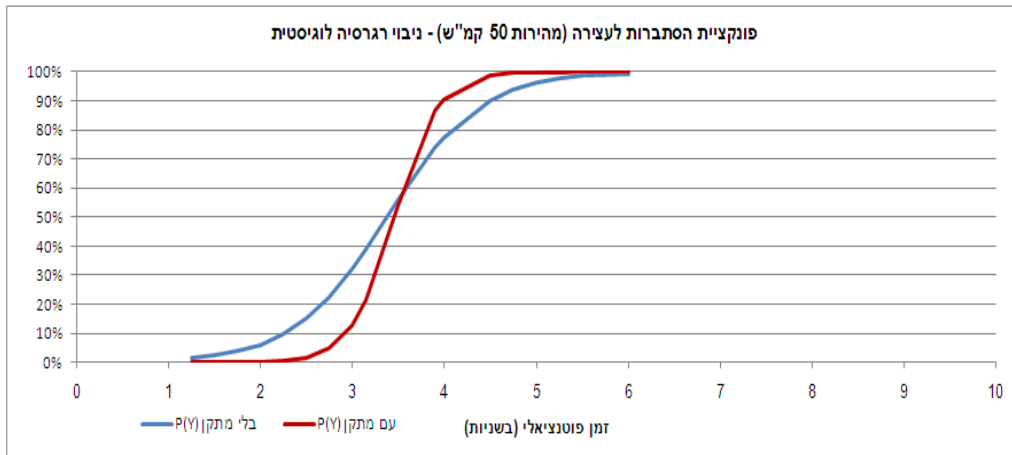
בתרשים 7, תרשים 8, תרשים 9 ותרשים 10 מוצגת פונקציית ההסתברות לעצירה המנובאת על ידי מהירות וזפ"צ, עם מתקן עזר וללא מתקן (לפי 4 קבוצות מהירות: 30, 40, 50, 60 קמ"ש בהתאמה).



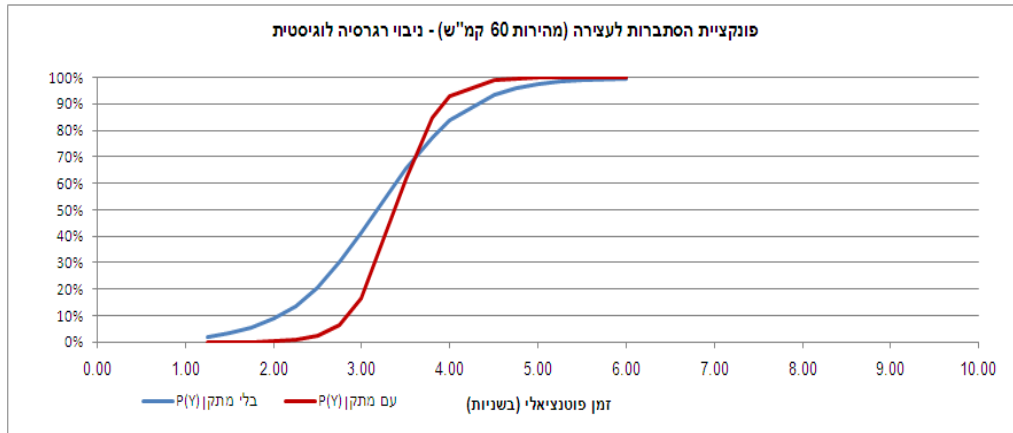
תרשים 7: פונקציית הסתברות לעצירה לפי מהירות 30 קמ"ש וזפ"צ



תרשים 8: פונקציית הסתברות לעצירה לפי מהירות 40 קמ"ש וזפ"צ



תרשים 9: פונקציית הסתברות לעצירה לפי מהירות 50 קמ"ש וזפ"צ



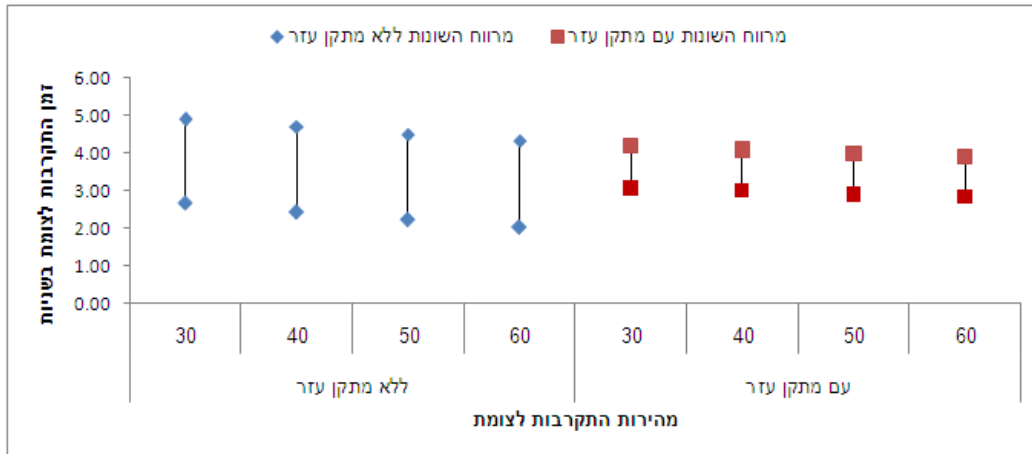
תרשים 10: פונקציית הסתברות לעצירה לפי מהירות 60 קמ"ש זפ"צ

בכל ארבעת הגרפים ניכר היטב, כי פונקציית הסתברות לעצירה מדורגת יותר עם המתקן מאשר בלי המתקן. יש לציין כי רק בפונקציית הסתברות לעצירה, כאשר המהירות מבודדת לערך בודד (או תחום צר, כפי שנעשה כאן), ניתן להגיע לפונקציית מדרגה מושלמת, שכן זמן העצירה ה"אידיאלי" או ה"נכון" אינו קבוע לכלל המהירויות.

המדד להצלחת המתקן הוא למעשה הקטנת האורך של איזור הקושי בקבלת החלטות בעת הפעלת מתקן עזר. איזור הקושי בקבלת החלטות מוגדר כמרחק בין האחוזון ה-10 לאחוזון ה-90 בכ"א מארבעת הגרפים בתרשימים לעיל. טבלה 4 מפרטת את שיעור הצמצום של המרווח במהירויות השונות. נתון זה מובא באופן גרפי בתרשים 11.

שיעור צמצום המרווח	אורך אזור קושי קבלת החלטות עם מתקן עזר (במטרים)	מרווח שונות עם מתקן עזר		אורך אזור קושי קבלת החלטות ללא מתקן עזר (במטרים)	מרווח שונות ללא מתקן עזר		מהירות התקרבות לצומת
		אחוזון 10	אחוזון 90		אחוזון 10	אחוזון 90	
49%	33.9	3.08	4.21	66.6	2.68	4.90	30
51%	44.0	3.00	4.10	90.0	2.45	4.70	40
52%	54.0	2.90	3.98	112.5	2.25	4.50	50
53%	64.2	2.85	3.92	136.8	2.05	4.33	60

טבלה 4: מרווח השונות ללא/עם מתקן עזר ואחוז צמצום המרווח בעקבות הפעלת מתקן עזר



תרשים 11: איזור הקושי בקבלת החלטות ללא/עם מתקן עזר לפי מהירות התקרבות לצומת.
 6.1.2 מודל הרגרסיה בטווח של בעיית החלטה (זפ"צ בין 1 ל- 4 שניות)

מאחר וזפ"צ בין 1 ל- 4 שניות מהווה זמן קריטי בהחלטת הנהג לעצור/לעבור, בנינו מודל רגרסיה לוגיסטית נוסף, כאשר המשתנים המסבירים הם: מהירות התקרבות לצומת במתן אור צהוב (בקמ"ש) וזפ"צ (בשניות) המוגבל לטווח בין 1 ל- 4 שניות. כמו כן, המודל נבדק בשני מצבים – ללא מתקן עזר לנהג ועם מתקן עזר לנהג. בטבלה 5 מתוארים ממצאים של המודל.

אחוז סיווג מדויק על ידי מסבירים	חי בריבוע	אחוז השונות המוסברת	Exp(B)	Wald (df=1)	טעות תקן של מקדם רגרסיה S.E.	מקדם רגרסיה לא מתוקן B	משתנה מסביר	
82.1%	227.9 ₍₂₎ , p<0.001	0.490	1.04	7.33	0.01	*0.03	מהירות	ללא מתקן עזר לנהג
			9.66	115.83	0.21	*2.27	זמן	
				102.87	0.93	*-9.52	קבוע	
88.9%	201.68 ₍₂₎ , p<0.001	0.643	1.05	5.98	0.02	*0.05	מהירות	עם מתקן עזר לנהג
			240.32	65.51	0.68	*5.48	זמן	
				69.92	2.49	*-20.83	קבוע	

*ערך מובהק ברמת מובהקות 0.05

טבלה 5: תוצאות רגרסיה לוגיסטית לניבוי עצירה ע"י מהירות התקרבות לצומת במתן אור צהוב וזפ"צ – עם וללא הפעלת מתקן עזר לנהג (בהגבלת זפ"צ בין 2 ל- 4 שניות).
 המודל ללא מתקן עזר לנהג נמצא מובהק (R²=0.490, X²₍₂₎=227.9 p<0.001, N=44). מהירות התקרבות וזפ"צ מסבירים 49% מהשונות במשתנה התלוי. משוואת מודל הרגרסיה הנה:

$$P(y) = 1 / (1 + e^{(9.52 - 0.03x_1 - 2.27x_2)})$$

עלייה ביחידת מהירות אחת מעלה פי 1.04 יחידות את הסיכוי שנהג יעצור בהתקרבות לצומת ועלייה ביחידת זמן אחת מעלה פי 9.66 יחידות את הסיכוי שנהג יעצור בעת התקרבות לצומת. מודל הרגרסיה לניבוי עצירה עם מתקן עזר נמצא מובהק ($R^2=0.64$, $X^2_{(2)}=201.7$ $p<0.001$, $N=32$) וחלה עלייה משמעותית בשונות המוסברת (64% לעומת 49%). משוואת מודל הרגרסיה הנה:

$$P(y) = 1/(1 + e^{(20.83 - 0.05x_1 - 5.48x_2)})$$

עלייה ביחידת מהירות אחת מעלה פי 1.05 יחידות את הסיכוי שנהג יעצור בהתקרבות לצומת ועלייה ביחידת זמן אחת מעלה פי 240 יחידות את הסיכוי שנהג יעצור בעת התקרבות לצומת.

מהתבוננות בנתונים עולה, כי ההתמקדות בתחום זמן של 1-4 שניות חושפת שינוי משמעותי הרבה יותר באחוז השונות המוסברת של ההחלטה לעצור כפונקציה של המהירות והזפ"צ (עליה של 14% לעומת 2% בתחום הכללי). במילים אחרות, בתחום של 1-4 שניות, בעת השימוש במתקן ניתן לראות תלות רבה יותר בין המהירות והזפ"צ להחלטות החציה, קרי יותר אחידות בין הנהגים שלהם מהירות זפ"צ זהים.

6.1.3 בחינת השפעת "זפ"צ" בהתאם לאופי פעולת מתקן העזר

מאחר ואופן הפעולה של מתקן העזר לנהג היה השתנה מעט במהלך המחקר (תחילה המתקן פעל על פי הכלל שאומר: יותר משלוש שניות עד קו העצירה, ההמלצה שהמתקן נתן היא לעצור, אחרת - לעבור. מאוחר יותר שונתה הפעלתו של המתקן באופן הבא: המתקן בדק בהתאם למהירות הנהג את מרחק העצירה, במידה ומרחק העצירה היה גדול מהמרחק שנשאר עד קו העצירה, אזי המתקן המליץ לנהג לעבור, אחרת - לעצור) בדקנו את מודל הרגרסיה לפי אופן הפעלת המתקן. הממצאים מתוארים בטבלה 6.

אופן הפעלת המתקן	משתנה מסביר	מקדם רגרסיה לא מתוקן B	טעות תקן של מקדם רגרסיה S.E.	Wald (df=1)	Exp (B)	אחוז השונות המוסברת	חי בריבוע	אחוז סיווג מדויק על ידי מסבירים
התראה של 3 שניות	מהירות	*0.04	0.01	9.07	1.04	0.818	284.53 ₍₂₎ p<0.001	90.3%
	זמן	*2.26	0.28	61.49	9.56			
	קבוע	*-11.29	1.75	41.40				
התראה לפי מהירות ומרחק מהצומת	מהירות	*0.08	0.02	17.12	1.08	0.692	224.01 ₍₂₎ p<0.001	88.6%
	זמן	*4.74	0.66	51.32	114.3			
	קבוע	*-19.29	2.59	55.62				

*ערך מובהק ברמת מובהקות 0.05

טבלה 6: תוצאות רגרסיה לוגיסטית לניבוי עצירה ע"י מהירות התקרבות לצומת במתן אור צהוב זפ"צ לפי אופן הפעלת מתקן עזר

המודל כאשר המתקן מתריע 3 שניות לפני הצומת נמצא מובהק ($R^2=0.818$, $X^2_{(2)}=284.53$) $p<0.001$ מהירות התקרבות זפ"צ מסבירים 82% מהשונות במשתנה התלוי. משוואת מודל הרגרסיה הנה:

$$P(y) = 1/(1 + e^{(11.29-0.04x1-2.26x2)})$$

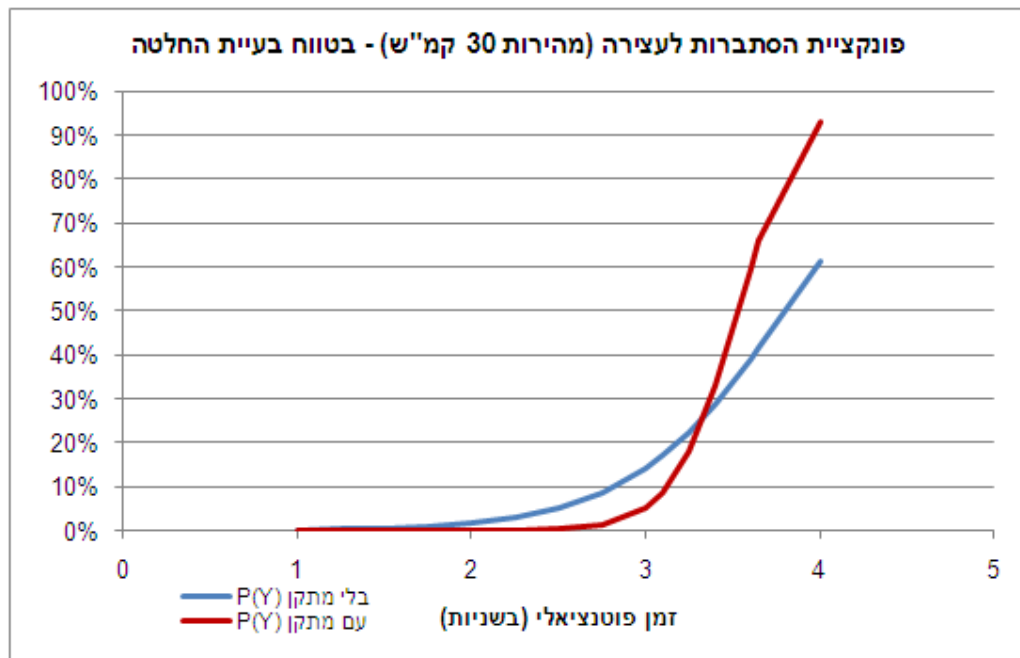
עלייה ביחידת מהירות אחת מעלה פי 1.04 יחידות את הסיכוי שנהג יעצור בהתקרבות לצומת ועלייה ביחידת זמן אחת מעלה פי 9.56 יחידות את הסיכוי שנהג יעצור בעת התקרבות לצומת.

המודל כאשר המתקן מתריע לפי מרחק וזמן מהצומת נמצא אף הוא מובהק ($R^2=0.692$, $X^2_{(2)}=224.01$) $p<0.001$ מהירות התקרבות זפ"צ מסבירים 69% מהשונות במשתנה התלוי. משוואת מודל הרגרסיה הנה:

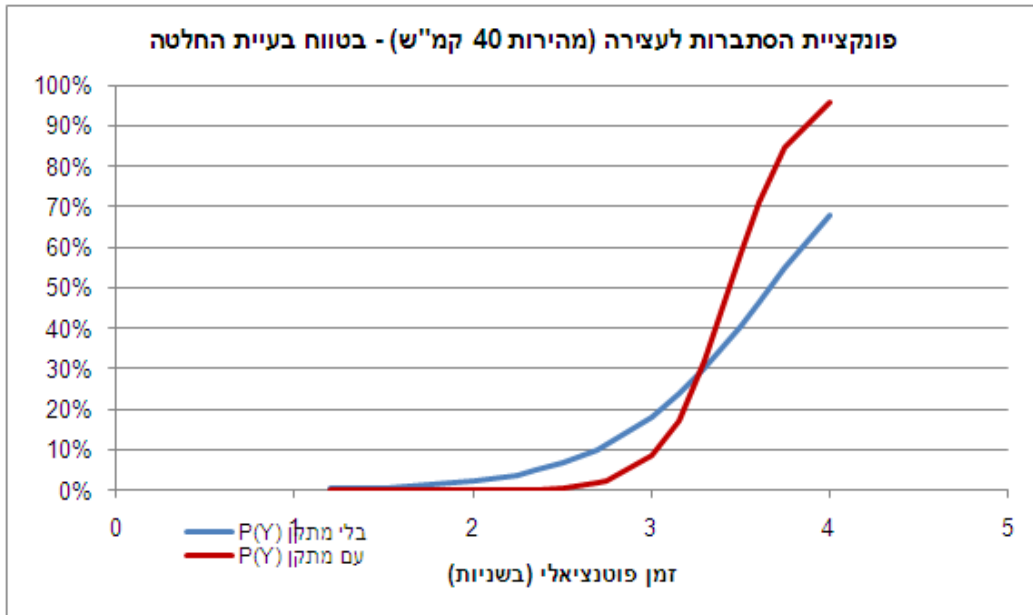
$$P(y) = 1/(1 + e^{(19.29-0.08x1-4.74x2)})$$

עלייה ביחידת מהירות אחת מעלה פי 1.08 יחידות את הסיכוי שנהג יעצור בהתקרבות לצומת ועלייה ביחידת זמן אחת מעלה פי 114.3 יחידות את הסיכוי שנהג יעצור בעת התקרבות לצומת.

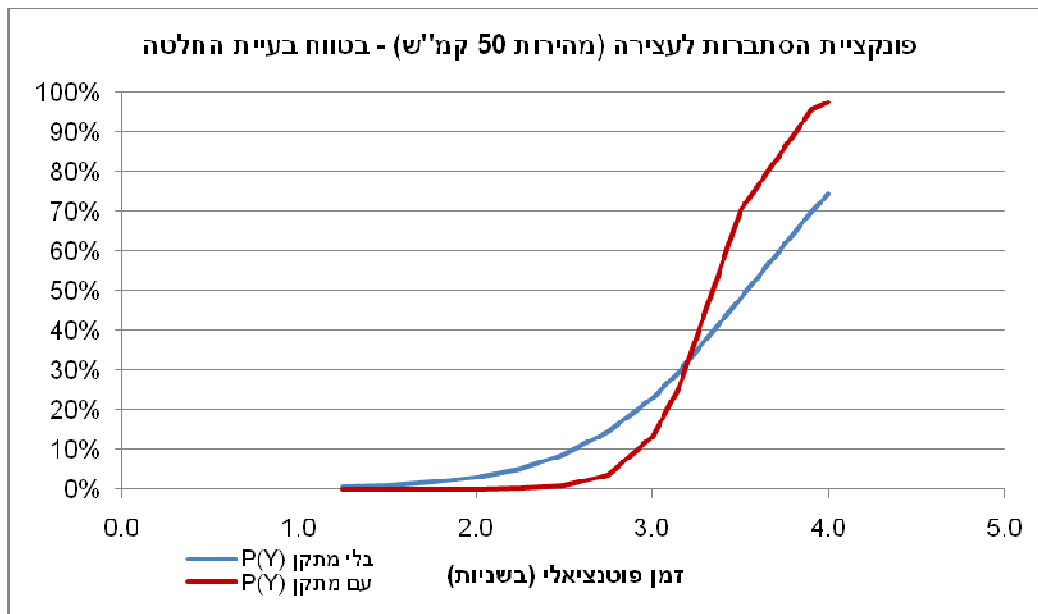
בתרשים 12, תרשים 13, ותרשים 14 מוצגת פונקציית ההסתברות לעצירה המנובאת על ידי מהירות זפ"צ בטווח בעיית החלטה (בין 4 שניות לפני הצומת), עם מתקן עזר וללא מתקן (לפי 4 קבוצות מהירות: 30,40,50,60 קמ"ש בהתאמה).



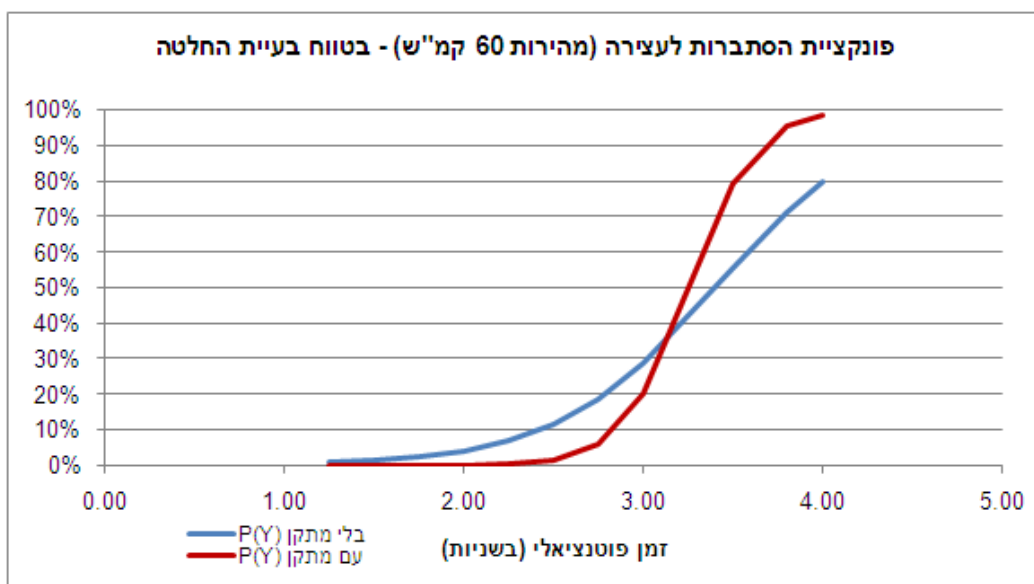
תרשים 12: פונקציית הסתברות לעצירה לפי מהירות 30 קמ"ש זפ"צ בטווח בעיית החלטה



תרשים 13: פונקציית הסתברות לעצירה לפי מהירות 40 קמ"ש זפ"צ בטווח בעיית החלטה



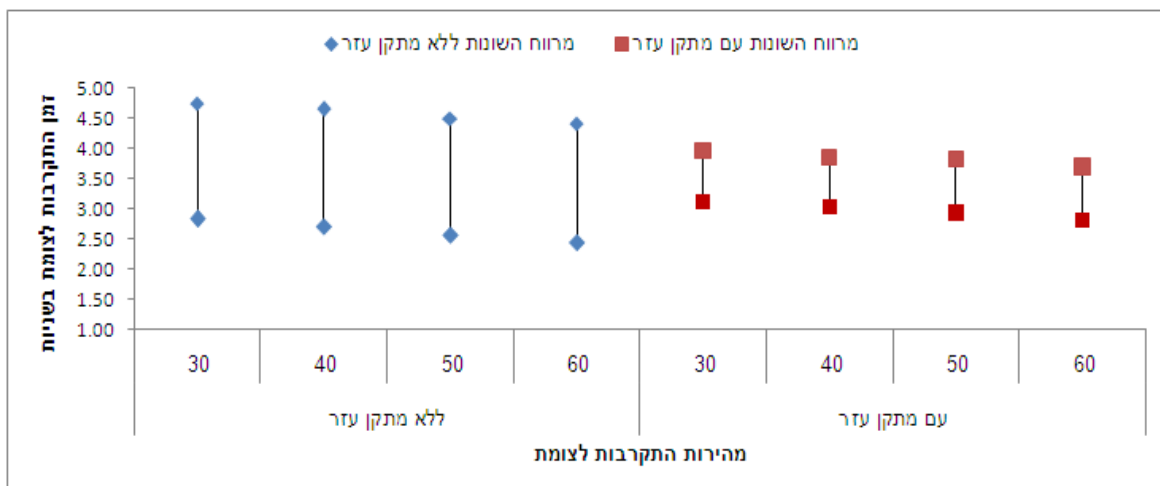
תרשים 14: פונקציית הסתברות לעצירה לפי מהירות 50 קמ"ש זפ"צ בטווח בעיית החלטה



תרשים 15: פונקציית הסתברות לעצירה לפי מהירות 60 קמ"ש וזפ"צ בטווח בעיית החלטה בטווח בעיית החלטה המדד להצלחת המתקן הוא למעשה עלייה בשיעור הצמצום של מרווח השונות בעת הפעלת מתקן עזר.. טבלה מפרטת את שיעור הצמצום של המרווח במהירויות השונות. נתון זה מובא באופן גרפי בתרשים .

שיעור צמצום המרווח בכל זמני הניסוי	שיעור הצמצום המרווח בעיית החלטה	אורך אזור קושי קבלת החלטות עם מתקן עזר (במטרים)	מרווח שונות עם מתקן עזר		אורך אזור קושי קבלת החלטות ללא מתקן עזר (במטרים)	מרווח שונות ללא מתקן עזר		מהירות התקרבות לצומת
			אחוזון 10	אחוזון 90		אחוזון 10	אחוזון 90	
49%	56%	25.2	3.12	3.96	57.6	2.83	4.75	30
51%	57%	33.2	3.03	3.86	78.0	2.70	4.65	40
52%	54%	44.5	2.93	3.82	97.0	2.56	4.5	50
53%	55%	53.4	2.82	3.71	117.6	2.44	4.4	60

טבלה 7: מרווח השונות ללא/עם מתקן עזר ואחוז צמצום המרווח בעקבות הפעלת מתקן עזר



תרשים 16 : מרווח השונות בטווח בעיית החלטה ללא/עם מתקן עזר לפי מהירות התקרבות לצומת .

6.2 הרגשת הנהג

מידרוג פונקצית העצירה הוא ללא ספק שיפור בבטיחות. יחד עם זאת, בניסוי הסתבר כי למידרוג זה - שהוא בעצם אילוף של נהגים מסויימים לפעול כנגד האינסטינקט שלהם - יש מחיר בהרגשה הסובייקטיבית של הנהגים כפי שדווחה על ידיהם לאחר הניסוי.

ל-7/32 מהנבדקים (כ-22%) המתקן "עזר" כלשונם.

ל-5/32 מהנבדקים (כ-16%) "הטריד" וגרם להם לעומס נוסף מכיוון שנאלצו "לוודא שהוא עובד".

ל-22/32 מהנבדקים (כ-69%) אין שינוי בהרגשה.

44% מהנבדקים דיווח כי היו מתקינים את המתקן ברכבם ומשתמשים בו. 70.5% אמרו כי היו עושים זאת אילו התבצעו במתקן שינויים כלשהם. בתיאור החופשי של "מה צריך לשנות" במתקן, העלו 41% מן הנהגים את הנקודה שאינו מתייחס למצב התנועה, הרכב, הכביש, מזג אוויר, עוצמת בלימה (היכרות עם הרכב), ו-29% שהוא לא משרה אמינות ולכן הם נאלצים להשקיע אנרגיה נוספת בכדי לוודא שהוא צודק, במקום שיעזור להם.

17% מהנהגים דיווחו כי המתקן סתר לפעמים את החלטותיהם. 14.7% אמרו כי הרעש "מלחיץ" וכי יש למתנו.

6.3 שיעור הציות

נתון מעניין לבדיקה הוא מידת הציות להמלצות המתקן בקרב הנהגים. בטבלה 8 מוצגים אחוזי הציות להוראות המתקן בקרב קבוצות הביקורת והניסוי, בחתכים של המלצת המתקן (לעבור או לעצור) ושל מהירות הנסיעה.

המלצת המתקן	מהירות	אחוז מציינים בקב' ניסוי	אחוז מציינים בקב' ביקורת	ערך מבחן $ Z $ * לפרופורציות	N קב' ניסוי	N קב' ביקורת
לעצור	30	74%	55%	1.44**	39	20
	40	88%	65%	3.90	66	122
	50	87%	64%	5.26	112	255
	60	91%	65%	5.16	53	230
	סה"כ	86%	64%	7.71	270	627
לעבור	30	93%	96%	0.90**	83	122

69	36	**0.73	84%	89%	40
97	40	4.17	58%	88%	50
66	42	7.06	52%	98%	60
354	201	5.67	75%	92%	סה"כ

* ערך $|Z|$ לדחיית ההשערה הקיימת ברמת מובהקות 0.05 (דו-צדדי) הנו לפחות 1.96

** לא קיים הבדל מובהק ברמת מובהקות 0.05

טבלה 8: שיעור הציות להמלצות המתקן בחתכים של הוראת המתקן ומהירויות נסיעה

מובן, כי בקבוצת הביקורת, בה הנהגים נהגו ללא מתקן פועל, אין משמעות ל"ציות". יחד עם זאת ניתן לחשב אחוזי "ציות תיאורטי" במובן זה שהנהג פעל או לא פעל ע"פ ההמלצה שהיה המתקן נותן אילו היה מותקן. לאחוזי "ציות תיאורטי" אלה משמעות לגבי ההשוואה עם קבוצת הניסוי.

כאשר רוצים לבדוק האם קיים הבדל מובהק בין 2 פרופורציות מקובל לבצע מבחן Z לפרופורציות. מבחן זה מאפשר לבחון (בהנחת התפלגות נורמאלית) את ההשערה הגורסת כי קיים הבדל מובהק בין שתי הקבוצות לעומת השערה בסיסית הטוענת כי אין הבדל בין שתי הקבוצות (ההבדל נבחן ברמת מובהקות 0.05). ממבחן זה אנו רואים כי קיים הבדל מובהק לגבי הציות להוראה לעצור, בכלל המדגם כמו גם כמעט בכל המהירויות (חוץ מ-30 קמ"ש). לגבי ההוראה לעבור קיים הבדל מובהק במהירויות גבוהות של 50 ו-60 קמ"ש כמו גם בכלל המדגם. באופן כללי ניתן לומר כי המתקן מעלה את אחוזי הציות להתנהגות אחידה בקבלת החלטות חציה – קרי, שינה את התנהגות הנהגים לכיוון של קבלה של המלצות המתקן - ושהשפעתו ניכרת יותר במהירויות גבוהות יחסית.

7. סיכום ומסקנות

במחקר זה פיתחנו ובחנו את יעילותו של מתקן עזר לנהג לחציית צומת מרומזר. פיתחנו את הגדרת המתקן ע"פ מחקרים קודמים ותצפיות, מימשנו את המתקן ע"ג סימולטור נהיגה ובדקנו את התנהגותם של נהגים שונים בסימולטור עם ובלי המתקן.

מהמחקר עולה כי למתקן המוצע יש פוטנציאל טוב להפוך את החלטות הנהגים לאחידות יותר ולקרב את פונקציית ההסתברות לעצירה לפונקציית מדרגה. מחקרי המשך מוצעים כוללים שיפורים במתקן כך שיתייחס לגורמים נוספים, וכן חיפוש אחר דרכים להקטנת ההטרדה הנוצרת ע"י התראת המתקן.

8. דיון

המחקר מראה כי למתקן המוצע יש פוטנציאל טוב להפוך את החלטות הנהגים לאחידות יותר לגרום לפונקציית ההסתברות לעצירה להיות קרובה יותר לפונקציית מדרגה. פעולה זו יכולה לתרום למניעת תאונות חזית-אחור ע"י גרימה להחלטות נהגים אחידות יותר. באופן תיאורטי, אילו כל הנהגים היו משתמשים במתקן כזה, תאונות חזית צד לא היו כלל קורות, כי המלצות המכשירים היו תואמות בין מכונית למכונית.

מובן, כי יש לתת את הדעת לנתונים העולים מן המחקר לגבי גרימת אי-נוחות לנהג. מוצע, כי מחקר המשך יבדוק כיצד למזער את אי-הנוחות שהתגלתה במחקר, שכן אי נוחות זו כשלעצמה עלולה לפגוע בבטיחות, בניסיונות מסוימות. יחד עם זאת אי הנוחות שנוצרה אצל הנהגים אין בה כדי להפחית מחשיבות המתקן, שהרי מטרתו של המתקן אינו להגביר את נוחות הנהיגה אלא את הבטיחות, והוא עושה זאת באמצעים מערכתיים ולא עבור הנהג הבודד. פעולתו של המתקן תהיה יעילה אם תופעל לגבי נהגים רבים, תאחד את אופי החלטותיהם ובכך תפחית את ההסתברות לתאונות חזית אחור. ההפרעה לנוחות הנהיגה אין בה בכדי להפחית מחשיבות זו.

המתקן אינו מושלם, כמובן. שיפורים נוספים במודל המתקן כוללים:

- התחשבות בגורמים נוספים מעבר לחישוב פשטני של מהירות ומרחק. בכדי לספק התראה אמינה יש להתחשב, בין היתר, בגורמים כמו:

- מצב הכביש – רטוב, יבש, סוג החומר ממנו בנויה המיסעה (מקדם ההחלקה).

- צפיפות התנועה, ובמיוחד כלי רכב סמוכים מלפנים ומאחור. בהקשר זה עולה השאלה אם בהנתן החלטה "נכונה" של צורך בעצירה אל מול הצומת, אך במקביל מאותר כלי רכב שקרוב אלינו מאחור וקיים חשש שיתנגש בנו, האם יש בקירבה זו בכדי להשפיע על החלטת החציה?

- מצב הבלמים, יכולתם לבלום את הרכב במרחק עצירה נתון

- עוררות הנהג: מהו זמן התגובה של הנהג מרגע שראה את האור הצהוב ועד שהגיב להחלטה (כלשהי). ערך זה משתנה מנהג לנהג וגם אצל כל נהג, בהתאם לתנאים רבים ומגוונים.

- מצב הצמיגים ובהתאם מקדם החיכוך שלהם.

- עידון עוצמת ההתראה כך שעוצמתה תהיה פרופורציונלית למידת הסכנה (קרי, להסתברות שהנהג עלול לקבל החלטה לא נכונה).

כל האמור לעיל הינם שיפורים במתקן, אם וכאשר ימומש, ולא כולם בהכרח מהווים צורך מחקרי. צורך מחקרי עולה עקב השאלה כיצד להפחית את אי הנוחות של הנהגים מן המתקן וכיצד לגרום להם לסמוך עליו יותר ולשמוע יותר בקלות להמלצותיו.

למ"ס, 2010: אתר הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה

מתת - מרכז תכנון תחבורה בע"מ, עלות תאונות דרכים בישראל, דו"ח למשרד התחבורה, 2004.

Nestor inc. website, www.nestor.com

PATH website,

<http://www.path.berkeley.edu/PATH/Research/current/safety/5210.html>

PREVENT-IP website, <http://www.prevent->

[ip.org/en/prevent_subprojects/intersection_safety/intersafe/](http://www.prevent-ip.org/en/prevent_subprojects/intersection_safety/intersafe/)

Normal deceleration values, Transportation and Traffic Engineering Handbook. 2nd edition, Institute of Transportation Engineers, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1982, page 168

Mahalel D, Zaidel D, Klein T. "Driver's decision process on termination of the green light." *Accid Anal Prev.* 1985 Oct;17(5):373-80.

Mahalel D, Zaidel D. "Safety evaluation of a flashing-green light in a traffic signal". *Traffic engineering & control*, 1985, vol. 26, no2, pp. 79-81.

Hakkert, A.-S., and Mahalel, D., "Estimating the Number of Accidents at Intersections from a Knowledge of the Traffic Flows on the Approaches," *Accident Analysis and Prevention*, 10: 69-79, 1978.

Parsonson, P.S., R.W. Roseveare, and J.R. Thomas Jr. "Small Area Detection at Intersection Approaches". *Traffic Engineering*. Vol. 44, No. N5, Arlington, VA, February 1974, pp. 8-17.

Zegeer, C. V., and R. C. Deen. "Identification of Hazardous Locations on City Streets". *Traffic Quarterly*, Oct. 1977 Lum and Halim (2006)

Mahalel, D. and J.N. Prashker. "A Behavioral Approach to Risk Estimation of Rear-End Collisions at Signalized Intersections." *Transportation Research Record* 1114. Transportation Research Board, Washington D.C., 1987, pp. 96-102.

Mahalel, D., and D. M. Zaidel. "Safety Evaluation of a Flashing-Green Light in a Traffic Signal". *Traffic Engineering and Control*, Vol. 26, 1985, pp. 77-81

Prashker, J. N., and D. Mahalel. "The Relationship Between an Option Space and Driver's Indecision at Signalized Intersection Approaches". In *Transportation Research, Part B. Methodological* 23B, 1989, pp. 401-413

- Retting, R. A., & Greene, M. A. (1995). "The influence of traffic signal timing on red-light running and potential vehicle conflicts at urban intersections". Arlington, VA: Insurance Institute for Highway Safety (Retting, Ulmer, and Williams 1999)
- Retting, R.A. and Williams, A.F., 1996. "Characteristics of red light violators: results of a field investigation". *Journal of Safety Research* 27, pp. 9–15
- Bonneson, J. A., K. H. Zimmerman, and M. Brewer. "Engineering Countermeasures to Reduce Red-Light-Running". Report 4027-2. Texas Transportation Institute, College Station, 2002.
- Porter, B., & England, K. (2000). "Predicting red-light running behavior: A traffic safety study in three urban settings". *Journal of Safety Research*, 31 (1), 1-8.
- K.M. Lum and H. Halim, "A before-and-after study on green signal countdown device installation", *Transport. Res. F* 9 (2006), pp. 29–41
- Knoflachner, H. (1973). "Der Einfluss des Grünblinkens auf die Leistungsfähigkeit und Sicherheit Lichtsignalgeregelter Strassenkreuzungen". Bundesministerium für Bauten und Technik, Heft 8
- Bliss, J. P., & Gilson, R. D. (1998). "Emergency signal failure: Implications and recommendations". *Ergonomics*, 41, 57-72
- Yotam Abramson and David Mahalel, "Vision-based Static Precrash Warning", in *Road Safety on Four Continents*, November 2007, Bangkok, Thailand

נספח מס' 1: אפיזודות הניסוי בשלוש הקבוצות

להלן מובאות אפיזודות הניסוי עבור האוכלוסיות השונות (ראה טבלה 2)

17 נבדקים אחרונים עם מתקן		29 נבדקים בלי מתקן ועוד 15 נבדקים נוספים עם מתקן		15 נבדקים ראשונים בלי מתקן	
זפ"צ	מהירות	זפ"צ	מהירות	זפ"צ	מהירות
2.00	30	1.25	30	1	30
3.00	30	2.5	30	1.5	30
3.10	30	2.75	30	1.75	30
3.25	30	4.5	30	2	30
3.40	30	4.75	30	2.25	30
3.60	30	5	30	2.5	30
3.65	30	5.25	30	3	30
		5.5	30	4	30
		6	30		
		6.5	30		
		10	30		
2.70	40	1.25	40	1.2	40
3.30	40	1.50	40	2	40
3.60	40	1.75	40	2.35	40
3.75	40	2.00	40	2.7	40
5.25	40	2.25	40	3.15	40
		2.50	40	3.5	40

		2.75	40	4	40
		3.00	40	5	40
		3.50	40		
		4.00	40		
		4.50	40		
		4.75	40		
		5.00	40		
		5.25	40		
		5.50	40		
		6.00	40		
		6.50	40		
		10.00	40		
3.15	50	1.25	50	2	50
3.90	50	1.50	50	2.5	50
5.00	50	1.75	50	3	50
6.00	50	2.00	50	3.5	50
		2.25	50	4	50
		2.50	50	4.5	50
		2.75	50	5	50
		3.00	50	6	50
		3.50	50		
		4.00	50		
		4.50	50		

		4.75	50		
		5.00	50		
		5.25	50		
		5.50	50		
		6.00	50		
		6.50	50		
		10.00	50		
1.25	60	1.25	60	2	60
3.80	60	1.50	60	3	60
		1.75	60	3.5	60
		2.00	60	4	60
		2.25	60	4.5	60
		2.50	60	5	60
		2.75	60	6	60
		3.00	60	7	60
		3.50	60		
		4.00	60		
		4.50	60		
		4.75	60		
		5.00	60		
		5.25	60		
		5.50	60		
		6.00	60		

		6.50	60		
		10.00	60		

[/http://www.prevent-ip.org/en/prevent_subprojects/intersection_safety/intersafe](http://www.prevent-ip.org/en/prevent_subprojects/intersection_safety/intersafe)¹
 Transportation and Traffic Engineering Handbook. 2nd edition, Institute of Transportation Engineers,²
 עמוד 168, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1982
³ מהירויות נעות בין 30 ל 60 קמ"ש, זמן התקרבות לצומת מוגבל עד 6 שניות.