



# מודל לקביעת מפלס הרעש האופטימאלי במערכת דרכים עירונית

מאת  
אורלי איצקוביץ  
שלמה בכור

חיפה, אוגוסט 2009

דו"ח מחקר מס' 323/2009



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



שם הפרסום: מודל לקביעת מפלס הרעש האופטימאלי במערכת דרכים עירונית	הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל המכון לחקר התחבורה
פרויקט מס'/סימון מחקר מס':	פרסום מס'/דו"ח מחקר מס': 323/2009
מתברים: אורלי איצקוביץ, שלמה בכור	סוג פרסום: עבודת מגיסטר
המדור המבצע: המכון לחקר התחבורה	שם המזמין:

**ת ק צ י ר :**

רעש הוא בעיה סביבתית המשפיעה על חיי רבים. באזורים אורבניים, רעש הנובע ממערכות תחבורה הוא הדומיננטי ביותר. בין השפעותיו השליליות ניתן למנות תחושת מטרד, הפרעה לשינה וירידת ערך של בתים באזורים רועשים.

בתהליך תכנון אורבאני ואזורי, חישוב מטרד הרעש נעשה לרוב לאחר קביעת שימושי קרקע ומתן זכויות דרך. כתוצאה מכך, מרבית הפתרונות האקוסטיים מתייחסים להפחתת רעש סביבתית. מחקר זה שואף לתת להיבט הרעש משקל רב יותר בעת תכנון שכונות מגורים חדשות, מתוך ההבנה כי סביבת מגורים שקטה הינה חלק משמעותי מאיכות החיים אותה רוצה השכונה לספק.

מטרת המחקר היא פיתוח של מודל לקביעת מפלס הרעש האופטימלי במערכת דרכים עירונית על ידי שינוי הביקושים לנסיעות ברשת. פיתוח המודל נעשה תוך שימוש במפלסי הרעש (מתורגמים לכמות כלי רכב) כהגבלה על הביקושים לנסיעות במודל הצבת הנסיעות ברכב פרטי. מטרה זו מושגת על ידי שילוב בין מודל להצבת נסיעות ברכב פרטי למודל לחישוב רעש מכבישים.

במחקר זה, הניסוח המתמטי של הבעיה המשולבת דומה לניסוח המקובל בתכנון תחבורה לבעיית הצבת נסיעות עם ביקוש גמיש. ההבדלים הם שפונקציית הביקוש במקרה הנוכחי תלויה במפלס הרעש, פריסת הביקוש לא קבועה וקיימת דרגת חופש לגבי קביעת הביקוש בין כל מוצא ויעד, במטרה להגיע למצב אופטימלי מבחינת רעש. מחקר זה מתמקד בפיתוח אלגוריתם יישומי לפתרון הבעיה המשולבת לרשתות אמיתיות.

האלגוריתם שפותח במחקר זה מורכב משלושה שלבים עיקריים:

שלב ראשון - הרצת מודל הצבת נסיעות עם ביקוש התחלתי וקבלת נפחי תנועה וזמני נסיעה בקטעי הרשת.

שלב שני - חישוב מפלס הרעש ההתחלתי ובדיקת עמידה בקריטריונים שנקבעו מראש. במידה וקיימת חריגה, מחשבים את כמות התנועה האקווילנטית (מבחינת רעש) שיכולה לעבור בקטע.

שלב שלישי - חישוב הביקוש לנסיעות, המתקופק על פי מגבלות הרעש, בעזרת מודל הצבת נסיעות ברכב פרטי. חוזרים על השלבים השני והשלישי עד להתכנסות התהליך. בתהליך קיים מנגנון המוודא שסך כל הביקוש (בכל מוצא-יעד יחד) נשמר קבוע. מנגנון זה מחושב על ידי הכנסת חסמים תחתונים במספר קטעים אשר בהם לא מתקיימת מגבלת רעש. ללא חסמים אלה, פיתרון הבעיה עלול להקטין את הביקוש הכולל לביקוש אפסי.

בסיום התהליך מתקבלת מטריצה נסיעות מוצא-יעד שונה מהמטריצה ההתחלתית. על פי הביקושים במטריצה הסופית ניתן לתכנן את כמות ופיזור יחידות הדיור בצורה מיטבית מהפך האקוסטי.

עיקר התהליך מבוסס על שיטה איטרטיבית למציאת נפחי התנועה האקווילנטים. לצורך כך, פותח אלגוריתם עזר, שמטרתו, מציאת כמות כלי הרכב המרבית שיכולה לעבור בכל אחד מהכבישים תוך שמירה על קריטריון הרעש שנקבע בכל אחת מנקודות הבדיקה. פיתוח זה מהווה תרומה ייחודית של המחקר, שכן כיום לא קיים כלי מתמטי המאפשר לחשב את הבעיה ה"הפוכה" במקרה של רעש מכבישים.

שיטת העבודה הודגמה על רשת המבוססת על נתונים אמיתיים. הרשת כוללת 68 קטעים ומטריצת ביקושים



נקודות לחישוב הרעש. נערכו שלוש איטרציות עד להתייחסות התהליך. התפלגות הנסיעות במטריצה הסופית הייתה שונה משמעותית מזו שבמטריצת הנסיעות ההתחלתית תוך שמירה על סך הנסיעות הכללי. במטריצה ההתחלתית היו שלושה מוקדים עיקריים לביקוש הנסיעות, שהיוו יחדיו רק כ-31% מכלל הביקושים, ויתר הביקושים התפזרו על פני המוצאים האחרים במערכת בצורה כמעט אחידה. במטריצה הסופית, לעומת זאת, התקבלו ארבעה מוקדי ביקוש מובהקים שהיוו כ-61% מכלל הביקושים. לסיכום, מההיבט המתמטי פותחה שיטה לקביעת הביקוש האופטימלי לנסיעות, ברשת דרכים, תוך שימוש באילוצים לביקושים. מההיבט הסביבתי נבדקה האפשרות לתכנון מיקום ייעודי קרקע בשכונת מגורים על פי מפלסי הרעש הצפויים מהכבישים בשכונה. באופן תיאורטי נראה כי הדבר אפשרי, אך יש לתת את הדעת כי נושא האקוסטיקה אינו הנושא הסביבתי היחיד בעת תכנון שכונת מגורים ונדרש לבדוק האם רשת שתוכננה כך שתענה על דרישות אקוסטיות מקדימות נותנת פתרון ראוי גם לשאר הבעיות הסביבתיות בשכונה.

<u>הפצה</u> : בלתי מוגבלת		<u>מילות מפתח</u> :
<u>תאריך</u> : אוגוסט 2011	<u>מס' עמודים</u> : 80	<u>הערות</u> :

# תוכן עניינים

1	.....	תקציר	
3	.....	רשימת סמלים וקיצורים	
5	.....	מבוא	1.1
6	.....	מטרת העבודה	1.1
7	.....	מבנה העבודה	1.2
8	.....	סקירת ספרות	2.1
8	.....	הנדסת אקוסטיקה	2.1
8	.....	אפיון רעש	2.1.1
12	.....	תאור אקוסטי של רעש מכבישים	2.1.2
13	.....	מודל חישוב רעש מכבישים	2.1.3
15	.....	ניתוח רגישות של מודל חיזוי הרעש	2.1.4
19	.....	תוכנות לחישוב רעש	2.1.5
20	.....	מאפייני רעש תחבורה והקשר להנדסת תנועה	2.1.6
22	.....	תכנון תחבורה	2.2
22	.....	מודל הצבת נסיעות ברכב פרטי	2.2.1
23	.....	בעיית שיווי משקל למשתמש	2.2.2
27	.....	שילוב של מודלים לחישוב רעש ומודלים תנועתיים	2.3
28	.....	סיכום	2.4
30	.....	מתודולוגיה	3.1
30	.....	שיטת העבודה	3.1
31	.....	הנחות המחקר	3.2
31	.....	הנדסת תחבורה	3.2.1
31	.....	הנדסת אקוסטיקה	3.2.2
33	.....	תהליך העבודה	3.3
33	.....	כללי	3.3.1
35	.....	אלגוריתם עזר למציאת נפח התנועה הנדרש	3.3.2
39	.....	סיכום של שלבי אלגוריתם העזר	3.3.3
41	.....	דוגמא	3.3.4
48	.....	תוצאות	4.1
56	.....	סיכום והסקת מסקנות	5.1
56	.....	דיון	5.1
57	.....	תחומי מחקר עתידיים	5.2
59	.....	רשימת מראי מקום	6.1
61	.....	נספח א' - רשת טירת הכרמל, נתונים ותוצאות	

## רשימת איורים

- איור 1 : אחוז האוכלוסיה החשופה לרעש ממקורות שונים, (האתר של המשרד להגנת הסביבה, 2009)..... 5
- איור 2 : עקומות שקלול A, B ו-C..... 10
- איור 3 : ספקטרום רעש בפס אוקטבה ובפס שליש אוקטבה בסקלת dB ו-dB(A)..... 11
- איור 4 : מפלס רעש שווה ערך שעתי ב-dB(A) כתלות במהירות הנסיעה של כלי הרכב העוברים בכביש בשעה אחת..... 17
- איור 5 : מפלס רעש שווה ערך שעתי ב-dB(A) כתלות בכמות כלי הרכב העוברים בכביש בשעה אחת..... 18
- איור 6 : מפלס רעש שווה ערך ב-dB(A) כתלות ברמת השרות בכביש למהירות תכן של 97 קמ"ש..... 21
- איור 7 : מתודולוגית העבודה..... 33
- איור 8 : רשת הדוגמא..... 41
- איור 9 : נפחי תנועה ומהירויות נסיעה ברשת הראשונה וברשת המיטבית..... 46
- איור 10 : רשת כבשים ראשית של טירת הכרמל..... 48
- איור 11 : תיאור רשת הכבישים בתוכנת Transcad..... 49
- איור 12 : קטעי הרשת בהם נדרש לערוך שינוי..... 51
- איור 13 : ביקוש נסיעות מכל המוצאים בתחילת התהליך ובסופו..... 54

## רשימת טבלאות

- טבלה 1 : נתוני הקטעים שבדוגמא.....41
- טבלה 2: נתוני ביקוש התחלתי.....42
- טבלה 3: נתוני נפח ומהירות נסיעה בכבישים עבור איטרציה  $k=0$ .....42
- טבלה 4: מפלסי רעש שווה ערך ב-dB(A) מכל אחד מהכבישים והמפלס הרעש הכללי בנקודת חישוב הרעש A.....43
- טבלה 5: בדיקת קריטיות של הכבישים ברשת למפלס הרעש הכללי.....43
- טבלה 6: חישוב כמות כלי הרכב המותרת בכבישים הקריטיים.....44
- טבלה 7: ביקושי נסיעה לאחר החישוב.....44
- טבלה 8: נתוני נפח ומהירות נסיעה בכבישים עבור איטרציה  $k=1$ .....45
- טבלה 9: מפלסי רעש שווה ערך ב-dB(A) מכל אחד מהכבישים והמפלס הרעש הכללי בנקודת חישוב הרעש A, עבור  $k=1$ .....45
- טבלה 10: ביקוש ראשוני לעומת ביקוש מיטבי, מהפן האקוסטי, ואחוז השינוי בניהם.....46
- טבלה 11: מטריצת הביקושים ההתחלתית.....50
- טבלה 12: השינויים הנדרשים בנפחי התנועה, לאחר האיטרציה הראשונה, על מנת לעמוד בקריטריון הרעש.....50
- טבלה 13: השינויים הנדרשים בנפחי התנועה, לאחר האיטרציה השנייה, על מנת לעמוד בקריטריון הרעש.....52
- טבלה 14: מטריצת הביקושים הסופית.....53
- טבלה 15: אחוז השינוי בכמות הנסיעות במטריצה סופית לעומת התחלתית.....53
- 
- טבלה א 1 : נתוני הכבישים מערכת.....61
- טבלה א 2: תוצאות הצבת הנסיעות ברשת.....62
- טבלה א 3: תוצאות אלגוריתם עזר - ריצה ראשונה.....64
- טבלה א 4: תוצאות אלגוריתם עזר - ריצה שנייה.....69
- טבלה א 5: תוצאות אלגוריתם עזר - ריצה שלישית.....74

## תקציר

רעש הוא בעיה סביבתית המשפיעה על חיי רבים . באזורים אורבניים, רעש הנובע ממערכות תחבורה הוא הדומיננטי ביותר . בין השפעותיו השליליות ניתן למנות תחושת מטרד, הפרעה לשינה וירידת ערך של בתים באזורים רועשים.

בתהליך תכנון אורבאני ואזורי, חישוב מטרד הרעש נעשה לרוב לאחר קביעת שימושי קרקע ומתן זכויות דרך . כתוצאה מכך, מרבית הפתרונות האקוסטיים מתייחסים להפחתת רעש סביבתית. מחקר זה שואף לתת להיבט הרעש משקל רב יותר בעת תכנון שכונות מגורים חדשות, מתוך ההבנה כי סביבת מגורים שקטה הינה חלק משמעותי מאיכות החיים אותה רוצה השכונה לספק.

מטרת המחקר היא פיתוח של מודל לקביעת מפלס הרעש האופטימלי במערכת דרכים עירונית על ידי שינוי הביקושים לנסיעות ברשת. פיתוח המודל נעשה תוך שימוש במפלסי הרעש (מתורגמים לכמות כלי רכב) כהגבלה על הביקושים לנסיעות במודל הצבת הנסיעות ברכב פרטי. מטרה זו מושגת על ידי שילוב בין מודל להצבת נסיעות ברכב פרטי למודל לחישוב רעש מכבישים.

במחקר זה, הניסוח המתמטי של הבעיה המשולבת דומה לניסוח המקובל בתכנון תחבורה לבעיית הצבת נסיעות עם ביקוש גמיש . ההבדלים הם שפונקציית הביקוש במקרה הנוכחי תלויה במפלס הרעש, פריסת הביקוש לא קבועה וקיימת דרגת חופש לגבי קביעת הביקוש בין כל מוצא ויעד, במטרה להגיע למצב אופטימלי מבחינת רעש. מחקר זה מתמקד בפיתוח אלגוריתם יישומי לפתרון הבעיה המשולבת לרשתות אמיתיות.

האלגוריתם שפותח במחקר זה מורכב משלושה שלבים עיקריים:

שלב ראשון - הרצת מודל הצבת נסיעות עם ביקוש התחלתי וקבלת נפחי תנועה וזמני נסיעה בקטעי הרשת.

שלב שני - חישוב מפלס הרעש ההתחלתי ובדיקת עמידה בקריטריונים שנקבעו מראש. במידה וקיימת חריגה, מחשבים את כמות התנועה האקו וילנטית (מבחינת רעש) שיכולה לעבור בקטע.

שלב שלישי - חישוב הביקוש לנסיעות, המתוקן על פי מגבלות הרעש, בעזרת מודל הצבת נסיעות ברכב פרטי.

חוזרים על השלבים השני והשלישי עד להתכנסות התהליך . בתהליך קיים מנגנון המוודא שסך כל הביקוש (בכל מוצא-יעד יחד) נשמר קבוע. מנגנון זה מחושב על ידי



הכנסת חסמים תחתונים במספר קטעים אשר בהם לא מתקיימת מגבלת רעש . ללא חסמים אלה, פיתרון הבעיה עלול להקטין את הביקוש הכולל לביקוש אפסי.

בסיום התהליך מתקבלת מטריצה נסיעות מוצא-יעד שונה מהמטריצה ההתחלתית . על פי הביקושים במטריצה הסופית ניתן לתכנן את כמות ופיזור יחידות הדיור בצורה מיטבית מהפן האקוסטי.

עיקר התהליך מבוסס על שיטה איטרטיבית למציאת נפחי התנועה האקוויולנטים . לצורך כך, פותח אלגוריתם עזר, שמטרתו, מציאת כמות כלי הרכב המרבית שיכולה לעבור בכל אחד מהכבישים תוך שמירה על קריטריון הרעש שנקבע בכל אחת מנקודות הבדיקה. פיתוח זה מהווה תרומה ייחודית של המחקר , שכן כיום לא קיים כלי מתמטי המאפשר לחשב את הבעיה ה"הפוכה" במקרה של רעש מכבישים.

שיטת העבודה הודגמה על רשת המבוססת על נתונים אמיתיים . הרשת כוללת 68 קטעים ומטריצת ביקושים המורכבת מ- 13 זוגות של מוצאים-יעדים. הביקוש הכללי ברשת ההתחלתית היה של 1,652 נסיעות ונבחרו ארבע נקודות לחישוב הרעש . נערכו שלוש איטרציות עד להתכנסות התהליך . התפלגות הנסיעות במטריצה הסופית הייתה שונה משמעותית מזו שבמטריצת הנסיעות ההתחלתית תוך שמירה על סך הנסיעות הכללי . במטריצה ההתחלתית היו שלושה מוקדים עיקרים לביקוש הנסיעות, שהיוו יחדיו רק כ- 31% מכלל הביקושים, ויתר הביקושים התפזרו על פני המוצאים האחרים במערכת בצורה כמעט אחידה . במטריצה הסופית, לעומת זאת, התקבלו ארבעה מוקדי ביקוש מובהקים שהיוו כ-61% מכלל הביקושים.

לסיכום, מההיבט המתמטי פותחה שיטה לקביעת הביקוש האופטימלי לנסיעות , ברשת דרכים, תוך שימוש באילוצים לביקושים. מההיבט הסביבתי נבדקה האפשרות לתכנון מיקום ייעודי קרקע בשכונת מגורים על פי מפלסי הרעש הצפויים מהכבישים בשכונה. באופן תיאורטי נראה כי הדבר אפשרי , אך יש לתת את הדעת כי נושא האקוסטיקה אינו הנושא הסביבתי היחיד בעת תכנון שכונת מגורים ונדרש לבדוק האם רשת שתוכננה כך שתענה על דרישות אקוסטיות מקדימות נותנת פתרון ראוי גם לשאר הבעיות הסביבתיות בשכונה.

## רשימת סמלים וקיצורים

### אקוסטיקה

- $L_w$  - מפלס הספק הקול;
- $W$  - הספק הקול ב-watts;
- $W_0$  - הספק הייחוס, בד"כ  $10^{-12}$  watts;
- $L_p$  - מפלס לחץ הקול;
- $p$  - אמפליטודת לחץ הגל;
- pref - לחץ הייחוס, בד"כ  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa;
- $Leq$  - מפלס הרעש שווה הערך;
- $Leq(1h)$  - מפלס הרעש שווה-הערך השעתי לשעת שיא,
- $E_{Li}$  - מפלס רעש הפליטה של כלי רכב מסוג  $i$ ;
- $A_{traff(i)}$  - התיקון הנדרש עבור זרימת התנועה של כלי רכב מסוג  $i$ ;
- $A_d$  - התיקון הנדרש למרחק בין הדרך לנקודת חישוב הרעש ולאורך הכביש;
- $A_s$  - התיקון הנדרש להסתרות ולבליעת הקול בקרקע בין הדרך לנקודת חישוב הרעש.
- $V_i$  - נפח התנועה [כלי רכב / זמן];
- $S_i$  - מהירות התנועה [קמ"ש].
- $d$  - המרחק האנכי בין מיקום חישוב הרעש לכביש [מטרים];
- $\alpha$  - זווית הראייה בין נקודת חישוב הרעש לכביש במעלות.
- $P_{tot}$  - מפלס הרעש הכללי לגיאומטריה אנכית נתונה בין נקודת חישוב הרעש לכביש;
- $P_{free-field}$  - מפלס רעש ייחוס בשדה חופשי.
- $A$  - קבוע הקשור לסוג כלי הרכב;
- $B$  - קבוע הקשור לרעש מהגלגלים;
- $C$  - קבוע הקשור לרעש מהמנוע;
- $D1-J2$  - קבועים התלויים בסוג כלי הרכב וסוג המיסעה.
- $E_A$  - האנרגיה האקוסטית;
- $x$  - אורך הקטע הנבדק;
- $S_{entr}$  - מהירות הנסיעה בכניסה לקטע הנבדק.
- $f$  - תדירות הקול;
- $A_{atm}$  - פקטור התיקון לבליעת הקול באוויר;
- $T$  - טמפרטורה בקלווין;
- $T_0$  - טמפרטורת ייחוס (293.15 Kelvin);
- $f_{rO}$  - פקטור חמצן כתלות בתדירות;
- $f_{rN}$  - פקטור לחנקן כתלות בתדירות.

## תחבורה

- $X_a$  - עומס התנועה בקטע a [כ"ר.זמן];
- $f_k^{rs}$  - הזרימה במסלול k בין מוצע r ויעד s [כ"ר.זמן];
- $\delta_{ak}^{rs}$  - שווה ל-1 אם קטע a נמצא במסלול k בין מוצע r ויעד s, ושווה ל-0 אחרת.
- $C_{rs}^k$  - עלות הנסיעה במסלול k בין מוצע r ויעד s.
- $t_a$  - זמן הנסיעה בקטע a.
- $q_{rs}$  - סך כל הביקוש בין מוצא r ויעד s;
- $K_{rs}$  - סט המסלולים עם זרימה חיובית בין מוצא r ויעד s.
- $D_{rs}^{-1}$  - פונקצית הביקוש ההפוכה המקשרת בין כל מוצע-יעד rs;
- $q_{rs}$  - משתנה הביקוש.
- $c^*$  - זמן הנסיעה המינימלי (בעומס) בין מוצא-יעד rs.

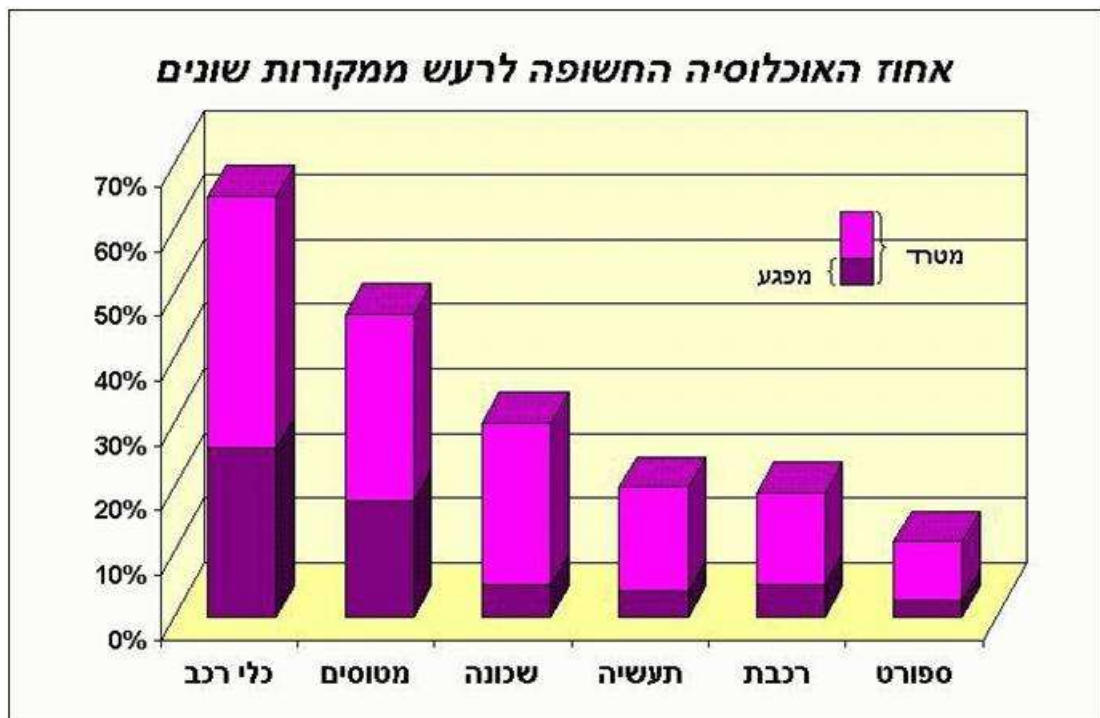
## אלגוריתם העזר שפותח במחקר

- i - אינדקס לנקודות החישוב;
- j - אינדקס לכבישים ברשת;
- k - אינדקס למספר האיטרציה.
- $C_i$  - קריטריון הרעש בנקודה i ב-dB(A);
- $L_{A,i,j}^k$  - מפלס רעש שווה ערך מכביש j בנקודה i באיטרציה k ב-dB(A);
- $L_{Amax,i}^k$  - מפלס רעש מרבי בנקודה i באיטרציה k ב-dB(A);
- $Tc_i$  - הפרש במפלסי הרעש המצביע על קריטיות של הכביש, ב-dB(A);
- $E_{j,i}^k$  - האנרגיה האקוסטית של הכביש j בנקודה i באיטרציה k;
- $E_{max,i}^k$  - האנרגיה האקוסטית המרבית בנקודה i באיטרציה k;
- $DR_{j,i}^k$  - התרומה היחסית של האנרגיה האקוסטית של הכביש j - לאנרגיה האקוסטית הכללית בנקודה i באיטרציה k;
- $L_{A,j,i}^k$  - מפלס רעש שווה ערך רצוי מכביש j בנקודה i באיטרציה k;
- $\Delta L_{A,j,i}^k$  - ההפרש בין מפלס הרעש הרצוי בכביש j למפלס הקיים בו;
- $Q_j^k$  - כמות כלי הרכב בכביש j באיטרציה k;
- $Q_j^k$  - כמות כלי הרכב הרצויה בכביש j באיטרציה k.

## 1. מבוא

רעש הוא בעיה סביבתית המשפיעה על חיי היום יום של אנשים רבים והוא אף הוגדר ע"י האיחוד האירופאי כזיהום סביבתי "noise pollution" (European Commission) (2002).

מבין מקורות הרעש הסביבתיים השולטים בחיינו הרעש ממערכות תחבורה הוא המקור הדומיננטי ביותר בעיקר באזורי אורבאניים. קיימים שלושה מקורות עיקריים לרעש תחבורה: מטוסים, כבישים ורכבות. מבין שלושת המקורות הללו הרעש מדרכים (כבישים) הוא הרעש הנפוץ ביותר אשר משפיע – במידה זו או אחרת – על כל תושבי המדינות המפותחות. רעש מתחבורה, בדומה לזיהום אוויר, מדגיש את הקונפליקט בין הצרכים של היחיד לבין הדרישות של הכלל. בעוד הצורך של היחיד הוא לניידות נוחה וזמינה, השאיפה של הכלל היא איכות חיים המתבטאת בשקט סביבתי (ERF (2004).



איור 1: אחוז האוכלוסיה החשופה לרעש ממקורות שונים (האתר של המשרד להגנת הסביבה, 2009)

Figure 1: population percentage exposed to noise from different sources

השפעותיו השליליות העיקריות של רעש מדרכים על האדם הן: גרימת תחושת מטרד, הפרעות לשינה וירידת ערך של בתים במקומות רועשים. לדוגמא, מוערך כי באירופה בלבד, הנזק הכלכלי שיגרם כתוצאה מזיהום רעש יכול להגיע לכ- 38

מיליארד יורו. בגרמניה ההערכה היא כי כל עליה של דציבל אחד במפלס הרעש הסביבתי מורידה את ערך הבית בכ-0.5% (ERF (2004)).

בתהליך תכנון אורבאני ואזורי, חישוב מטרד הרעש נעשה בדרך כלל לאחר קביעת שימושי קרקע ומתן זכויות דרך. כתוצאה מכך, מרבית הפתרונות האקוסטיים מתייחסים להפחתת רעש שנוצר ממערכת התחבורה.

לאור האמור לעיל, מחקר זה שואף לתת להיבט הרעש משקל רב יותר בעת תכנון שכונות מגורים חדשות, מתוך ההבנה כי סביבת מגורים שקטה הינה חלק משמעותי מאיכות החיים אותה רוצה השכונה לספק.

התחומים הרלוונטיים למחקר זה הינם: הנדסת אקוסטיקה, שתיתן את הכלים לערוך את חישובי הרעש. תכנון תחבורה, שיספק את מודל הצבת הנסיעות באמצעותו מתקבלות תחזיות התנועה לרשת הדרכים הנבדקת. חקירת הקשר בין הביקוש לנסיעות ברשת תחבורה לבין מפלס הרעש מדרכים על ידי שימוש בכלים מתמטיים, ומחקר ביצועים כגון ניסוח בעיית אופטימיזציה ופיתוח תהליך אשר ייתן את מטריצת הנסיעות מוצא-יעד המיטבית מבחינת הרעש.

## 1.1 מטרת העבודה

כאמור, רעש מדרכים הוא הרעש הסביבתי הנפוץ ביותר באזורים אורבאניים אשר משפיע על רוב תושבי המדינות המפותחות. סביבת מגורים שקטה הינה מטרה של רבים, שכן היא תורמת לאיכות חיים, נוסף למשמעות הכלכלית הטמונה בחובה.

מטרת העבודה היא, אם כן, פיתוח של מודל לקביעת מפלס הרעש האופטימלי במערכת דרכים עירונית על ידי שינוי הביקושים ברשת. פיתוח המודל נעשה תוך שימוש במפלסי הרעש (מתורגמים לכמות כלי רכב) כהגבלה על הביקושים לנסיעות במודל הצבת הנסיעות ברכב פרטי.

בהיבט האקוסטי, תהליך התכנון המקובל של שכונת מגורים חדשה, הוא חד-כיווני: תחילה מתכננים את מיקום וכמות יחידות הדיור בשכונה, את מיקום ייעודי הקרקע השונים ואת מערך הכבישים בשכונה, ורק לאחר מכן, כאשר כל מרכיבי השכונה מתוכננים וקבועים, מחשבים את מפלס הרעש הצפוי במבני המגורים ו במבנים הרגישים לרעש בשכונה. הבעיה העולה מדרך עבודה זו היא שלאחר שנקבעו כל המרכיבים בשכונה קשה מאוד לשנותם. כלומר, אם בחישוב האקוסטי נתגלתה בעיה במפלסי הרעש, במרבית המקרים, האפשרות היחידה לטיפול בבעיה היא באמצעות

אמצעי מיגון סביבתיים כגון קירות אקוסטיים, סוללות או מיגון דירתי למבנים החשופים לרעש.

כאן המקום לציין, כי קיים פער בין מפלס הרעש המותר מכבי שים, על פי התקנות השונות, לבין מפלס רעש הרצוי לאדם הפרטי. התקנות המתייחסות לרעש מכבישים, בהיותן תקנות כלליות, הוכנו על מנת לתת מענה לרעש כתוצאה מכבישים ראשיים, והן אינן נותנות מענה, במקרים רבים, לרצון ולציפייה של האנשים ממפלס רעש כתוצאה מכבישים פנימיים בסמוך לביתם.

מטרתי בעבודה זו היא להציע מודל שישנה את הגישה לתכנון שכונות מגורים חדשות: תחילה ייקבעו מפלסי הרעש הרצויים באזורים השונים בשכונה, אשר יכולים להיות לעיתים נמוכים ממפלסי קריטריון הרעש המותר, ומתוך מפלסים אלה יגזרו מיקום וכמות יחידות הדיור ובהתאם לכך גם מטריצת הנסיעות בשכונה. דהיינו, מחקר זה מציע להשתמש בקריטריון ני רעש פרטניים לאזורים השונים בשכונה, על מנת לקבוע את מיקום יעודי הקרקע בשכונה.

מוטיבציית המחקר היא למצוא איזון בין מפלס הרעש המתקבל ממערכת התחבורה (בעיקר תנועת כלי רכב פרטיים) לבין מפלס רעש נתון מראש לסביבה הקרובה למערכת הדרכים. המחקר שואף לפתח מודל אשר בהינתן מפלס רעש נתקבל מטריצת הצבות התנועה שעונה על מפלס רעש זה.

## **2.1 מבנה העבודה**

העבודה נפתחת בפרק המבוא הכולל את הצגת הנושא ומטרת העבודה.

לאחר מכן אציג סקירה ספרותית המורכבת משלושה חלקים. החלק הראשון והשני כוללים מושגים בסיסיים בהנדסת אקוסטיקה ותכנון תחבורה, בהתאמה, וזאת על מנת לספק רקע כללי בנושאים אלה שהינם הבסיס לעבודה זו. החלק השלישי כולל סקירה של מאמרים הדנים בשילוב בין הנדסת אקוסטיקה לבין תכנון תחבורה.

הפרק השלישי של העבודה מציג את שיטת המחקר ובו תאור של פיתוח העבודה וההנחות התכנוניות שבהן השתמשתי. בפרק זה אביא גם דוגמא פשוטה, שמטרתה להדגים את שיטת העבודה שפותחה.

בפרק הרביעי ארחיב את הדגמת שיטת העבודה על רשת בקנה מידה אמיתי ואדון בתוצאות שהתקבלו.

הפרק האחרון הוא הסיכום הכולל גם הצעות למחקר המשך.

## 2. סקירת ספרות

עבודה זו עוסקת בנושא רעש מכבישים . לשם שלמות המידע אסקור תחילה , בסעיפים 2.1 ו- 2.2, מושגים כללים בנושא הנדסת אקוסטיקה ותכנון תחבורה . בסעיף 2.3 תובא סקירת מאמרים העוסקים בשילוב בין מודלים לתכנון תחבורה לבין מפגעי רעש מכבישים.

### 1.2 הנדסת אקוסטיקה

להלן מושגים נבחרים באקוסטיקה אשר דרושים לצורך המחקר , בדגש על מודל לחישוב רעש מכבישים.

#### 1.1.2 אפיון רעש

קול הוא תופעה פיזיקלית הנוצרת על ידי גלי לחץ בתווך (גז, נוזל או מוצק) הניתנת לזיהוי ע"י אוזן האדם . באוויר, גלי הקול נגרמים על ידי שינויים קטנים בלחץ, והם יכולים להיות מתוארים על ידי גל סינוס או סופרפוזיציה של גלים בעלי תדירויות שונות, פאזות שונות ואמפליטודת שונות. מעבר של קול במרחב גורם לשינוי בלחץ ולתנועת חלקיקים ובעצם לזרימת אנרגיה באותו המרחב (Harris C.M (1979)).

רעש הוא קול בלתי רצוי וככזה הוא סוביקטיבי לשומע . בעבודה זו אעשה שימוש במונחים קול ורעש כאילו הם זהים.

מאפייני הרעש משתנים בהתאם למשך האירוע הרועש , עוצמתו, תכולתו הספקטרלית והאם הרעש נושא מסר . אוזן האדם ומוחו רגישים יותר לרעש הנושא מסר כגון דיבורים ומוסיקה מאשר רעש שאינו נושא מסר כגון רעש מתחבורה מגלי הים או מרוח (Beranek L.L and Ver I.L (1992)).

מערכת השמיעה של האדם קולטת קולות בטווח רחב של תדירויות – בין 20 הרץ ל- 20 קילוהרץ כלומר בטווח רחב של עד  $10^3$ . שינויי הלחץ הנקלטים על ידי אוזן האדם גם הם נעים בטווח רחב - מסף השמיעה ועד סף הכאב – שינויים של לחץ עד  $10^7$ . על מנת שניתן יהיה לשמור על סקאלת תיאור אחידה ועל מנת להימנע מסרבול בכתיבה נעשה שימוש בסקלה לוגריתמית על מנת לתאר רעש . הסקאלה הלוגריתמית המקובלת לשימוש בהנדסת אקוסטיקה היא הדציבל (dB) (Beranek, (L.L(1971)).

**מפלס הספק הקול** - (Sound Power Level -  $L_w$ ) הוא קצב פליטת האנרגיה האקוסטית של מקור רעש והוא מבוטא ביחידות ואט (W). מפלס הספק הקול בדציבלים, מוגדר על ידי הביטוי:

$$[1] \quad L_w = 10 \log \frac{W}{W_0}$$

כאשר:

$W$  – הספק הקול ב-watts;  
 $W_0$  – הספק הייחוס, בד"כ  $10^{-12}$  watts.

**מפלס לחץ הקול** (Sound Pressure Level -  $L_p$ ), הוא הגודל הניתן למדידה ישירה על ידי מיקרופון והוא מוגדר על ידי הביטוי:

$$[2] \quad L_p = 10 \log \left[ \frac{p^2}{p_{ref}^2} \right]$$

כאשר:

$L_p$  – מפלס לחץ הקול ב-dB;  
 $p$  – אמפליטודת לחץ הגל;  
 $p_{ref}$  – לחץ הייחוס, בד"כ  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa.

כאמור, קול הוא תנודה של לחץ אוויר ותדירות היא מספר התנודות בשנייה. באקוסטיקה התדירות היא ביחידות הרץ (Hz).

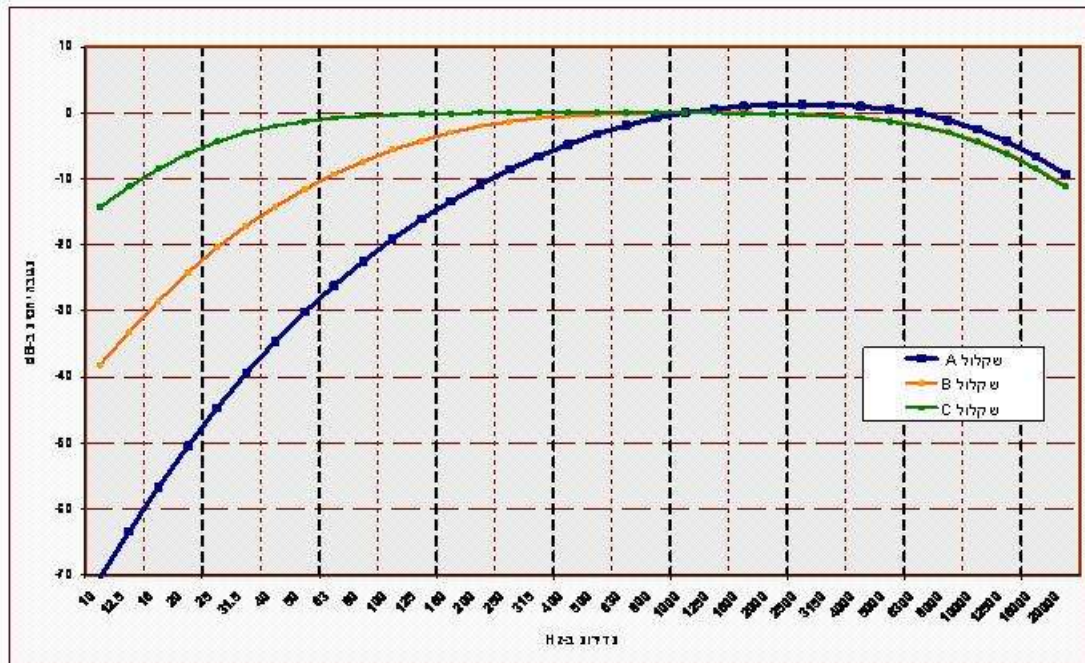
מערכת השמיעה של האדם אינה רגישה לכל ספקטרום התדירויות במידה שווה. הרגישות המירבית היא בתחום תדירויות הדיבור – בין 500 לכ-4000 הרץ והרגישות נמוכה יותר בתחום התדירויות הנמוכות (עד 500 הרץ) והגבוהות (מעל 4000 הרץ).

ההרכב הספקטרלי של הקול, או הרעש, מאפשר לזהות את מקור הקול. תיאור רעש בעזרת תיאור הספקטרום המלא שלו גם הוא מסורבל ולכן פותחו סולמות שיקלול, שהם למעשה פונקציות תלויות תדירות שמטרתן לאפשר תיאור כמותי של רעש בעזרת מספר יחיד. בכדי להתחשב ב רגישות של אוזן האדם לתדירויות השונות פותחו, סולמות השיקלול A, B ו-C המתיימרות לייצג את האופן בו אנשים מעריכים את עצמת הרעש שהם שומעים ואת תגובתם לרעש זה. סולם שיקלול A הוא



הסולם הנפוץ והמקובל ביותר לצרכים אלו וסימון יחידות המדידה בסולם זה הוא dB(A) – קרי – דציבל A (Beranek, L.L(1971)).

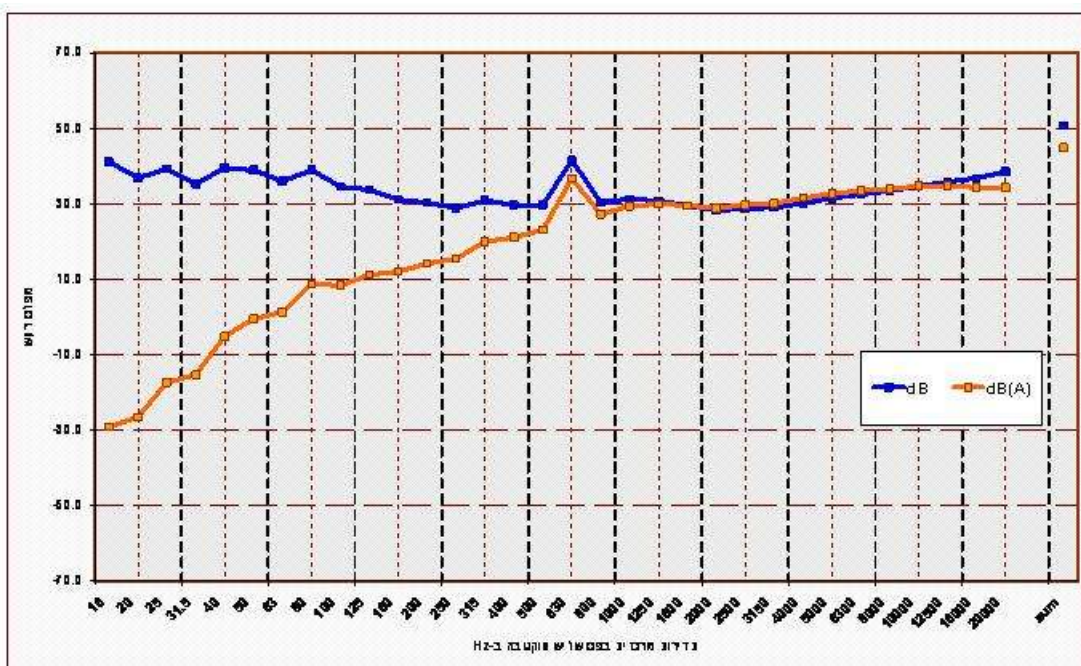
רעש סביבתי, דוגמת רעש מכלי רכב, רכבות מטוסים וכו' גם הוא נמדד בעזרת שקלול A שהוא, כאמור, השקלול המתאר בצורה הטובה ביותר את הדרך בה אנשים מגיבים לרעש זה.



איור 2 : עקומות שקלול A, B ו-C. (Beranek, L.L (1971))  
 Figure 2: A, B and C-weighting curve. (Beranek, L.L (1971))

סקאלת דציבל A, dB(A), שהינו ערך חד מספרי לעצמת הקול (על פי רגישות מערכת השמיעה של האדם) מתחילה ב-0 שזהו סף השמיעה התחתון שאוזן האדם מסוגלת לקלוט. במפלס בסביבות 140 דציבל ומעליו נגרם כאב ועלול להיגרם נזק למערכת השמיעה של האדם.

ניתן להציג את ספקטרום הרעש, בין השאר, על ידי חלוקתו לפסים ברוחב אוקטבה או שליש אוקטבה. אוקטבה היא מרווח בין שני צלילים שיחס התדירויות ביניהם הוא 2. מפלס לחץ הרעש המוצג בצורה כזו יקרא מפלס רעש בפס אוקטבה. פריסה עדינה יותר של מרחב התדירות נעשית על ידי חלוקתו לפסי שליש אוקטבה. באיור מס' 2, להלן, מוצג ספקטרום רעש פעם בפס אוקטבה ובפעם נוספת בפס שליש אוקטבה. כמו כן מוצג באיור מפלס הרעש ב- dB וב-dB(A) על מנת שניתן יהיה לעמוד על ההבדלים ביניהם.



איור 3: ספקטרום רעש בפס אוקטבה ובפס שליש אוקטבה בסקלת dB ו- dB(A)

Figure 3: Noise spectrum in octave band and in one-third-octave band in dB and dB(A)

רעש שאינו קבוע בזמן, כגון רעש תחבורה, נמדד בעזרת מיצועו (הלוגריתמי) בזמן ונקרא מפלס רעש שווה ערך (Equivalent Sound Pressure Level), ונמדד ביחידות dB(A). סימנו המקובל של מפלס הרעש שווה הערך הוא:  $L_{eq}$ . (Harris, C.M (1979)) והוא מוגדר כך:

$$[3] L_{eq} = 10 \times \log \left( \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \frac{P_{rms}^2}{P_{ref}^2} dt \right)$$

כאשר:

T – משך זמן מדידת הרעש.

משמעותו הפיזיקלית של רעש שווה ערך היא: אותו מפלס רעש קבוע במשך זמן המדידה, T, שהאנרגיה האקוסטית שלו שווה לאנרגיה הכלולה במפלס הרעש המשתנה של זרימת התנועה בפועל.

### 2.1.2 תאור אקוסטי של רעש מכבישים

הודות למגוון כלי הרכב העושים שימוש בכביש והאופי האקראי של זרימת התנועה מקובל לתאר רעש מכבישים על ידי הסטטיסטיקה של פילוג הרעש ועל ידי שימוש באינטגרציה של האנרגיה האקוסטית המוקרנת מהכביש ליחידת זמן.

קיימות שיטות רבות לתיאור רעש מכבישים (ISO 9613-2. (1999), Nordic Prediction ) Methods for Rail and Road Traffic Noise (2002), Technical Guides Calculation of (Road Traffic Noise (1988)). רובן מתבססות על אינטגרציה של האנרגיה המוקרנת מהכביש, וההבדלים ביניהן נובעים בעיקר ממשך הזמן עבורו נעשית הסכימה : שעה אחת, כל שעות היום, כל שעות הלילה או היממה כולה. דוגמא למדדים אלה הם:

$L_{eqday} / L_{eqnight}$  - מפלס רעש שווה ערך לשעות היום או מפלס רעש שווה ערך לשעות הלילה, בהתאמה.

$L_{dn}$  - מפלס רעש שווה ערך ליממה כולה עם קנס של 10 dB(A) לכל אירוע רעש בשעות הלילה.

$L_{den}$  - מפלס רעש שווה ערך ליממה כולה עם קנס של 5 dB(A) לשעות הערב ו-10 dB(A) לשעות הלילה.

הנוהג בארץ, הנשען בעיקרו על הגישה האמריקאית (FHWA Traffic Noise Model, (1998)), מתייחס למפלס הרעש המוקרן מהדרך במשך שעה אחת, שהיא שעת שיא

הרעש, במהלך 24 שעות היממה, כלומר שעת שיא הרעש היממתי. המדד המתאר את הרעש מהכביש הוא  $L_{eq}(1h)$  - מפלס הרעש שווה- הערך השעתי לשעת שיא והוא מהווה את הממוצע האנרגטי של הרעש מהכביש לשעה זו.

### 3.1.2 מודל חישוב רעש מכבישים

כאמור, מודל חישוב הרעש הנהוג בארץ הוא המודל האמריקאי, (The ) FHWA TNM (Federal Highway Administration Traffic Noise Model), זהו מודל אקוסטי המבוסס על מדידות רעש, וכמו מודלים נוספים, מחשב את הרעש הצפוי מדרך על ידי סדרה של התאמות למפלס ייחוס. מפלס הייחוס הוא מפלס רעש הפליטה של כלי הרכב (Vehicle Noise Emission) הנגרם ממעבר של כלי רכב בודד במרחק ייחוס של 15 מטר מהדרך. ההתאמות הנעשות לאחר מכן מתייחסות לנפח ומהירות התנועה, מרחק נקודת חישוב הרעש מהדרך וההסתרות הקיימות או מתוכננות בין הדרך לנקודת חישוב הרעש.

מודל זה מחלק את כלי הרכב בכביש לחמש קבוצות: מכוניות פרטיות, משאיות קלות, משאיות כבדות, אוטובוסים ואופנועים. המשוואה הבסיסית לחישוב רעש מדרך על ידי מודל זה היא:

$$[4] \quad L_{Aeq}(1h) = EL_i + A_{traff(i)} + A_d + A_s$$

כאשר:

- $EL_i$  – מפלס רעש הפליטה של כלי רכב מסוג i;
- $A_{traff(i)}$  – התיקון הנדרש עבור זרימת התנועה של כלי רכב מסוג i;
- $A_d$  – התיקון הנדרש למרחק בין הדרך לנקודת חישוב הרעש ולאורך הכביש;
- $A_s$  – התיקון הנדרש להסתרות ולבליעת הקול בקרקע בין הדרך לנקודת חישוב הרעש.

התיקון לזרימת התנועה הוא פונקציה של נפח התנועה ומהירותה ומחושב לכל אחד מסוגי כלי הרכב בנפרד:

$$[5] \quad A_{traff(i)} = 10 \log \left( \frac{V_i}{S_i} \right) - 13.2 \quad dB$$

כאשר:

- $V_i$  – נפח התנועה במספר כלי רכב לשעה;
- $S_i$  – מהירות התנועה בקמ"ש.

התיקון הנדרש למרחק של נקודת חישוב הרעש מהכביש ולאורך הכביש נתון על ידי המשוואה הבאה והוא אינו תלוי בסוג כלי הרכב אלא קבוע לכל נקודת חישוב:

$$[6] \quad A_d = 10 \log \left[ \left( \frac{15}{d} \right) \left( \frac{\alpha}{180} \right) \right] \text{ dB}$$

כאשר:

$d$  – המרחק האנכי בין מיקום חישוב הרעש לכביש במטרים;  
 $\alpha$  – זווית הראייה בין נקודת חישוב הרעש לכביש במעלות.

התיקון הנדרש להסתרות ולבליעת קול בקרקע מחושב על פי המשוואה הבאה:

$$[7] \quad A_s = 20 \log \left| \frac{P_{tot}}{P_{free-field}} \right|$$

כאשר:

$P_{tot}$  – מפלס הרעש הכללי לגיאומטריה אנכית נתונה בין נקודת חישוב הרעש לכביש;  
 $P_{free-field}$  – מפלס רעש ייחוס בשדה חופשי.

מכאן שהמשתנים העיקריים הדרושים לחיזוי הרעש על פי המודל הם:

- גיאומטריית הכבישים.
- מהירות התנועה עבור כל אחד מסוגי הרכב.
- נפחי תנועה – כלי הרכב מסווגים לחמש קבוצות לפי ההגדרות להלן:
  - ❖ מכוניות - כלי רכב בעלי שני צירים וארבעה גלגלים המיועדים להובלת עד 9 אנשים או הובלת מטען ומשקלם הכולל נמוך מ-4,500 ק"ג.
  - ❖ משאיות בינוניות - כלי רכב המיועדים להובלת מטען, בעלי שני צירים וששה גלגלים ומשקלם הכולל הינו 4,500 עד 12,000 ק"ג.
  - ❖ משאיות כבדות - כלי רכב המיועדים להובלת מטען, בעלי שלושה צירים או יותר ומשקלם גבוה מ-12,000 ק"ג.
  - ❖ אופנועים - כלי רכב דו גלגליים.
  - ❖ אוטובוסים - כלי רכב המיועדים להובלת אנשים, בעלי שני צירים וששה גלגלים ומשקלם הכולל הינו 4,500 עד 12,000 ק"ג.
- מיקום מקבלי הרעש וגובהם.

- תכונות בליעת הקול של השטחים בסמוך לכביש.
- נתונים גיאומטריים של מבנים, קירות או סוללות החוסמים את דרך התפשטות הרעש.

#### 4.1.2 ניתוח רגישות של מודל חיזוי הרעש

##### מפלס רעש הפליטה

מודל ה-TNM הינו מודל אקוסטי ומפלס רעש הפליטה של כלי הרכב השונים, בו נעשה שימוש, מבוסס על נתוני מדידות רעש רחבות היקף שנעשו בארה"ב (Fleming, 1995). בין השנים 1994 ו-1995 נערכו כ-6,000 מדידות רעש של כלי רכב ב-9 מדינות בארה"ב ועל פי תוצאות מדידות אלו נבנה בסיס הנתונים של המודל. קיים תהליך קבוע של בדיקת המודל על ידי ה-FHWA ובעקבות בדיקות אלו מתפרסמות גרסאות מעודכנות של התכנה.

בזמן שכלי רכב בודד חולף על פני מיקרופון, הממוקם 15 מטר מהדרך ובגובה של 1.5 מטר מעל הקרקע, מפלס הרעש שהוא יוצר עולה, מגיע למקסימום ולאחר מכן יורד כאשר הרכב מתרחק מנקודת המדידה. מפלס הרעש המקסימלי המתקבל בעת מעבר כלי הרכב הוא מפלס רעש הפליטה של אותו כלי הרכב.

על מנת לחשב את מפלס הרעש מתנועת כל כלי הרכב בדרך כלשהי נדרש לחשב את האנרגיה הממוצעת של פליטת הרעש מכל אחד מסוגי כלי הרכב. אנרגיה זו תלויה בארבעה משתנים:

1.  $f$  – ערך נומינלי של תדירות מרכזית בפס שליש אוקטבה [Hz];
2.  $i$  – אינדקס לסוג כלי הרכב;
3.  $p$  – אינדקס לסוג המיסעה;
4.  $s$  – מהירות נסיעת כלי הרכב.

קביעת מפלס פליטת הרעש של כל אחד מסוגי כלי הרכב נעשה באמצעות המשוואות הבאות:

$$[8] \quad E_A(s_i) = (0.6214s_i)^{A/10} \cdot 10^{B/10} + 10^{C/10}$$

$$L_{emis,i}(s_i, f) = 10 \log(E_A) + (D_1 + 0.6214 D_2 s_i) +$$

$$(E_1 + 0.6214 E_2 s_i) [\log f] + (F_1 + 0.6214 F_2 s_i) [\log f]^2 +$$

$$[9] \quad (G_1 + 0.6214 G_2 s_i) [\log f]^3 + (H_1 + 0.6214 H_2 s_i) [\log f]^4 +$$

$$(I_1 + 0.6214 I_2 s_i) [\log f]^5 + (J_1 + 0.6214 J_2 s_i) [\log f]^6$$

$$[10] \quad E_{emis,i}(s_i, f) = 10^{(L_{emis,i}/10)}$$

כאשר:

- A – קבוע הקשור לסוג כלי הרכב;
- B – קבוע הקשור לרעש מהגלגלים;
- C – קבוע הקשור לרעש מהמנוע;
- D1-J2 – קבועים התלויים בסוג כלי הרכב וסוג המיסעה.

המשוואה הראשונה, מבין השלוש, נותנת את האנרגיה האקוסטית,  $E_A$ , ממפלס הרעש המרבי בשקלול A לסוג כלי הרכב עפ"י סוג הרכב, רעש מהגלגלים ורעש מהמנוע. המשוואה השנייה ממירה את האנרגיה הזו לספקטרום בפס שליש אוקטאבה, גם הוא בשקלול A והמשוואה השלישית ממירה את פס שליש האוקטאבה חזרה לצורתו האנרגטית.

### מהירות

הרעש המוקרן מכלי רכב תלוי במהירותו. ככלל, ככל שמהירות הנסיעה גבוהה יותר גדל מפלס הרעש המוקרן מהכביש.

מודל ה-TNM מחשב את מהירות הנסיעה כתלות במהירות הנסיעה בקטע (שהוזנה למודל), שיפוע הכביש ואמצעים לשליטה בתנועה, באם קיימים כאלה (דוגמת רמזורים, שלטי עצור וכו').

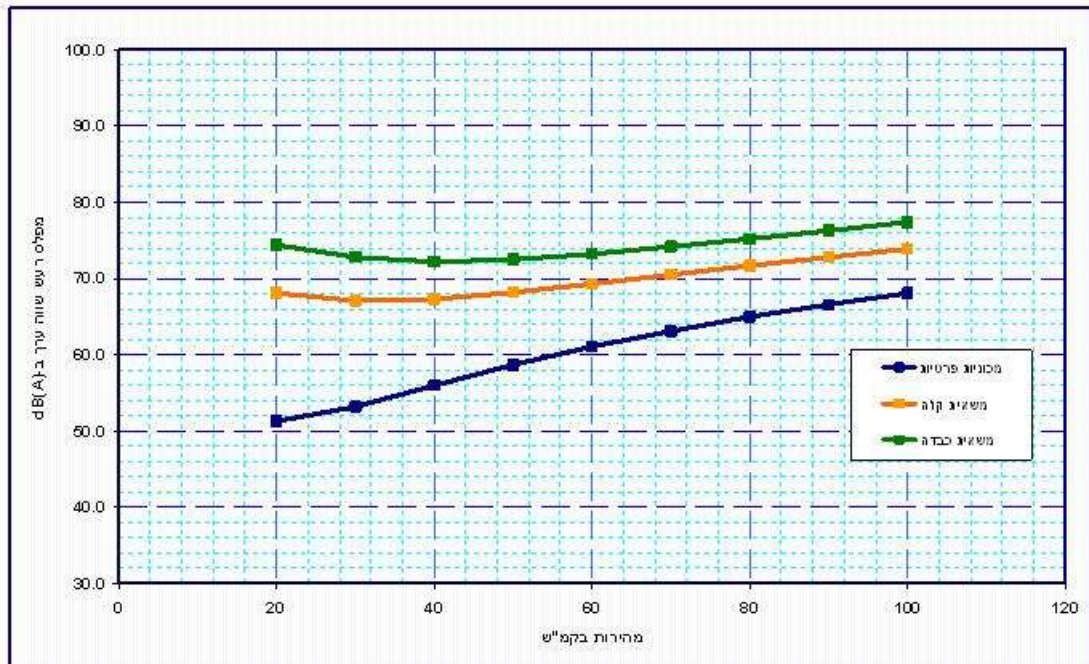
משוואת הרגרסיה לחישוב מהירות הנסיעה בנקודה מסוימת בכביש היא:

$$[11] \quad s_x = 1.609 A \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\{0.3048x + B[\ln(A) - \ln(A - 0.6214 s_{entr})\}^{1/C}]^C}{B} \right)^C \right] \right\}$$

כאשר:

- $s_x$  – מהירות הנסיעה במרחק x;
- A ו-B – מקדמים התלויים במקדם הרגרסיה ושיפוע הכביש;
- C – קבוע (עבור רכב פרטי = 0.482);
- x – אורך הקטע הנבדק;
- $s_{entr}$  – מהירות הנסיעה בכניסה לקטע הנבדק.

את תלות מפלס רעש הפליטה במהירות הנסיעה בכל אחד מסוגי כלי הרכב ניתן לראות באיור מס' 4 להלן,



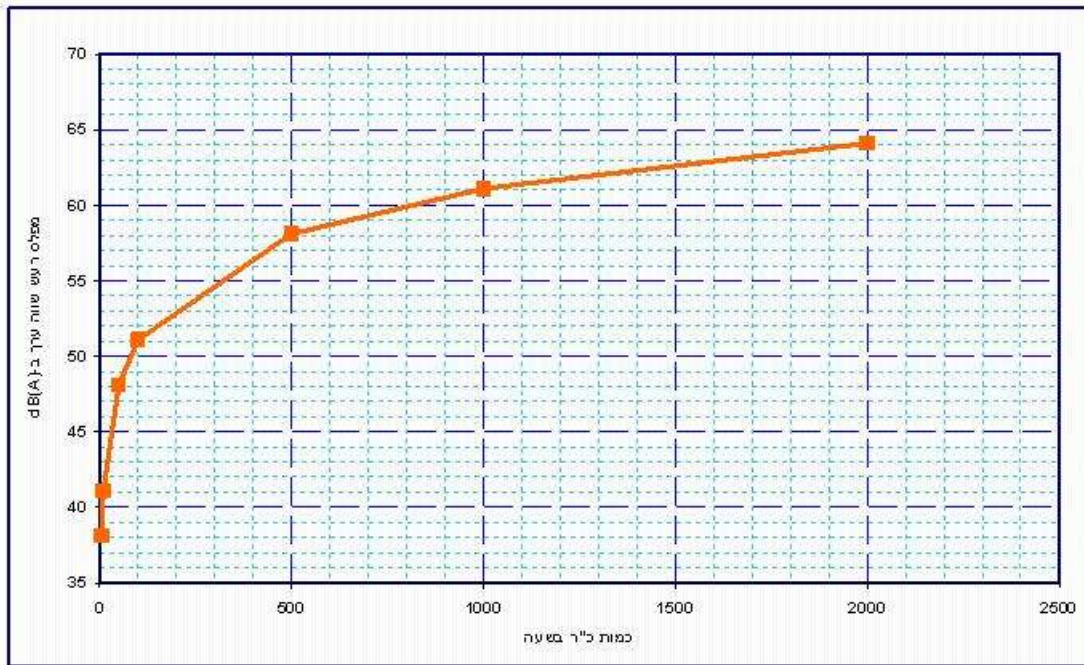
**איור 4: מפלס רעש שווה ערך שעותי ב-dB(A) כתלות במהירות הנסיעה של כלי הרכב העוברים בכביש בשעה אחת.** (FHWA Traffic Noise Model. Technical Manual (1998))

**Figure 4: Noise Level in dB(A) Vs. the average hourly speed of the traffic.** (FHWA Traffic Noise Model. Technical Manual (1998))

#### נפח התנועה

עליה בנפח זרם התנועה (ללא שינוי בהרכבו) בשיעור של 25% תגרום להעלאת מפלס הרעש בשיעור של 1dB(A). הכפלת נפח התנועה תגרום להעלאת מפלס הרעש בשיעור של 3dB(A). העלייה של מפלס הרעש כתלות בכמות כלי הרכב היא עליה אקספוננציאלית כפי שניתן לראות באיור מס' 5.





**איור 5: מפלס רעש שווה ערך שעתית ב-dB(A) כתלות בכמות כלי הרכב העוברים בכביש בשעה אחת.** (FHWA Traffic Noise Model. Technical Manual (1998))

**Figure 5: Noise Level in dB(A) Vs. the hourly traffic volume.** (FHWA Traffic Noise Model. Technical Manual (1998))

### הרכב התנועה

הרכב התנועה הוא גורם בעל חשיבות גדולה בחישוב מפלס הרעש שמקורו בכביש. במהירות נסיעה של 60 קמ"ש מפלס הרעש של משאית כבדה, כפי שהיא מוגדרת במודל ה-FHWA, גבוה ב-3.8 dB(A) מזו של משאית בינונית וב-12 dB(A) מזו של מכונית פרטית. ניתן להציג את היחס בצורה הבאה:

משאית כבדה אחת שוות ערך (מבחינה אקוסטית) ל-3 משאיות בינוניות או ל-14 מכוניות פרטיות. משאית בינונית אחת שוות ערך ל-6 מכוניות פרטיות.

### המרחק בין מקבל הרעש והכביש

כביש, שעליו זורמת תנועה בצורה רצופה, מהווה מקור אקוסטי קווי, לעומת מכונית בודדת המהווה מקור אקוסטי נקודתי.

עבור מקור קווי שיעור ירידת הרעש כתוצאה מהגידול במרחק הוא 3dB(A) להכפלת המרחק. כך למשל אם במרחק 20 מטר מכביש מסוים נמדד מפלס רעש של 70dB(A), הרי שבמרחק 40 מטר ירד מפלס הרעש ל-67dB(A) ובמרחק של 80 מטר לכ-64dB(A) כתוצאה מהמרחק מהכביש.

### בליעת הקול בקרקע

גורם נוסף המשפיע על ירידת הרעש עם המרחק הוא בליעת הקול בקרקע . חלק מהאנרגיה האקוסטית המוקרנת ממקור הרעש יכולה להיספג בקרקע באם הקרקע היא קרקע רכה . המודל מתחשב בסוג הקרקע שבין מקור הרעש לנקודת חישוב הרעש. ניתן להזין למודל מספר סוגי קרקעות (קרקע קשה, קרקע רכה, משטח מים וכו').

### בליעת הקול באוויר

בליעת הקול באוויר מחושבת על פי תקן ISO 9613-1 (1993) ISO 9613-1. ניתן להזין למודל טמפרטורה ואחוזי לחות , (הלחץ האטמוספרי לא ניתן להזנה והוא קבוע , 101.325 kPa). המשוואה בה נעשה שימוש לחישוב פקטור התיקון לבליעת הקול באוויר,  $A_{atm}$ , היא:

$$[12] \quad A_{atm} = 8.686 f^2 \left[ \left( 1.84 \cdot 10^{-11} \sqrt{\frac{T}{T_0}} \right) + \left( \frac{T}{T_0} \right)^{5/2} \left( \frac{0.01275 e^{-2239.1/T}}{\left( f_{rO} + \frac{f^2}{f_{rO}} \right)} + \frac{0.1068 e^{-3352/T}}{\left( f_{rN} + \frac{f^2}{f_{rN}} \right)} \right) \right]$$

כאשר:

- f – תדירות הקול;
- T – טמפרטורה בקלווין;
- $T_0$  – טמפרטורת ייחוס (293.15 Kelvin);
- $f_{rO}$  – פקטור חמצן כתלות בתדירות;
- $f_{rN}$  – פקטור לחנקן כתלות בתדירות.

### 5.1.2 תוכנות לחישוב רעש

קיימות תוכנות מסחריות רבות לחישוב רעש. חלקן תוכנות המתמחות בחישוב רעש ממקור אחד בלבד , לדוגמא תוכנת INM (Integrated Noise Model) לחישוב רעש מטוסים או תוכנת TNM לחישוב רעש מכבישים . בשנים האחרונות נפוצות יותר ויותר תוכנות רעש המשלבות בתוכן מספר מודלים ומסוגלות לחשב רעש ממספר מקורות לדוגמא: SoundPLAN, CadnaA ו-Predictor. תוכנות אלה מכילות מספר רב של מודלים לחישוב רעש ממקורות שונים ומהוות פלטפורמה לחישוב רעש משולב. בעבודה זו נעשה שימוש בתוכנת SoundPLAN לחישוב רעש כבישים.

### 6.1.2 מאפייני רעש תחבורה והקשר להנדסת תנועה

רעש מעורקי תחבורה הוא סך כל הרעש הנתרם על ידי כלי הרכב היחידים העושים שימוש בכביש, וכדי להעריך את השפעותיו של רעש זה על האוכלוסייה הקרובה לכביש יש להעריך את מפלסי הרעש בנקודת מקבל הרעש מכלל כלי הרכב העושים שימוש בדרכים הסמוכות.

הרעש הנגרם מנתיב תנועה, בהינתן התפלגות כלי רכב באותו הנתיב ובמשתני כביש קבועים, הינו פונקציה של נפח התנועה באותו הנתיב ומהירות התנועה.

$$[13] L_{eq}(1h) = f(V, X)$$

כאשר:

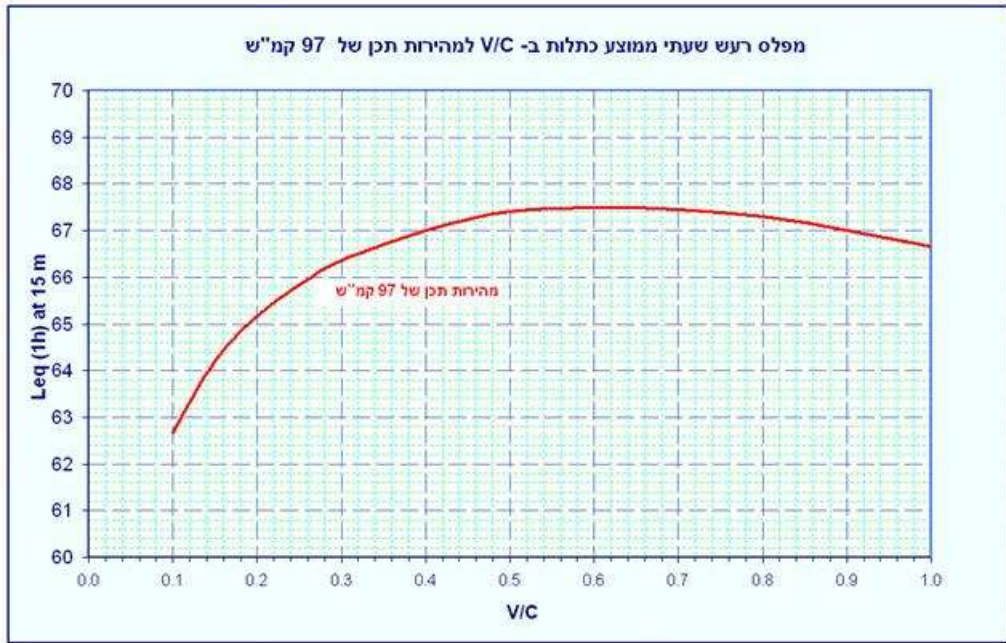
V – מהירות שעתית ממוצעת של התנועה;  
X – כמות כלי הרכב השעתית.

כפי שניתן לראות באיורים מס' 4 ו-5 מפלס הרעש עולה הן כתוצאה מהעלייה בכמות כלי הרכב והן מהעלייה במהירות הנסיעה. אך בפועל, אין עלייה אינסופית של כמות התנועה ושל מהירותה. ידוע שככל שעולה כמות התנועה בכביש יורדת מהירות הנסיעה באותו הכביש וככל שנפח התנועה מתקרב לקיבולת הכביש קיימת האטה בתנועה עד לעומס תנועה וקבלת צוואר בקבוק ("פקק"), שבו המהירות נמוכה מאוד.

קיבולת הכביש היא מדד קבוע לכביש המתאר את המספר מרבי של כלי רכב שיכולים לעבור בנקודה מסוימת במשך פרק זמן נתון תחת תנאי דרך, תנועה ואמצעי בקרה נתונים. המדד המקובל להגדרת הקיבולת הוא כלי רכב לשעה.

רמת השירות בכביש היא מדד איכותי המתאר תנאי זרימה בכביש. על פי ה-Highway Capacity Manual (2000), קיימות שש רמות שירות אפשריות והן מסומנות באינדקסים A עד F. רמת שירות A מייצגת את תנאי הזרימה הטובים ביותר ורמת שירות F מייצגת את תנאי הזרימה הגרועים ביותר.

הקשר בין רמת השירות של הכביש לבין מפלס הרעש המוקרן ממנו ידוע בהנדסת האקוסטיקה וניתן לראותו באיור מס' 6 להלן.



**איור 6: מפלס רעש שווה ערך ב- dB(A) כתלות ברמת השרות בכביש למהירות תכן של 97 קמ"ש**

**Figure 6 Noise Level in dB(A) Vs. V/C ratio for design speed of 97 kph**

ניתן לראות כי מפלס הרעש תלוי ביחס V/C. עד לערך של 0.5 עולה מפלס הרעש עם העלייה בנפח התנועה. בטווח זה תוספת הרעש הנגרמת על ידי הגידול במספר כלי הרכב היא גדולה יותר מהירידה הנגרמת עקב ההפחתה במהירות. מיחס 0.5 ועד 0.7 מפלס הרעש קבוע וביחס של מעל 0.7 מפלס הרעש יורד מכיוון שכמות המכוניות בכביש גדלה אולם מהירותן ירדה ונוצר צוואר בקבוק.

## 2.2 תכנון תחבורה

להלן תאור מודלים נבחרים בתכנון תחבורה אשר דרושים לצורך המחקר, כאשר הדגש הוא על מודל הצבת נסיעות ברכב פרטי, המהווה את הבסיס לחיזוי נפחי תנועה.

### 1.2.2 מודל הצבת נסיעות ברכב פרטי

תחזיות תנועה מערכתיות מתקבלות בעזרת מודל הצבת נסיעות. המודל מחלק את הביקוש לנסיעות על פני מערכת הדרכים. הביקוש מיוצג על ידי מטריצת נסיעות מוצא יעד, ומפוזר על הקטעים המייצגים את הרחובות או הכבישים המרכיבים את רשת התחבורה.

הקלט למודל ההצבה מורכב משלושה חלקים עיקריים:

1. **רשת הדרכים** – המייצגת את היצע הנסיעות ברשת וכוללת את אורך הקטעים, קיבולות הדרכים וזמן נסיעה חופשית.
  2. **מטריצת הנסיעות** – המייצגת את ביקוש הנסיעות ברשת.
  3. **פונקציית העכבה** – המבטאת את הקשר בין זמן הנסיעה בדרך לבין נפח התנועה בו.
- הפלט העיקרי של מודל ההצבה הוא **נפחי התנועה** בכל אחד מהקטעים ברשת. זמני נסיעה בעומס מתקבלים על ידי הפעלת פונקציית עכבה.

בין שימושיו של מודל הצבת הנסיעות ניתן למנות חיזוי עתידי של נתונים על פיזור כמות הנסיעות, נתונים המהווים כלי למגוון של היבטי תכנון, כגון תכנון תעבורה ומבנה המיסעה, כדאיות כלכלית של פרויקטים תחבורתיים וכו'.

בספרות קיימים מודלים רבים של הצבת נסיעות, כאשר השוני העיקרי ביניהם הוא ההנחה ההתנהגותית לגבי בחירת המסלולים של הנהגים. קיימים שני עקרונות עיקריים לבחירת המסלולים ע"י הנהגים (Wardrop (1952)).

1. עיקרון שיווי משקל למשתמש (UE – User Equilibrium) - על פיו כל נהג בוחר את המסלול הנסיעה הקצר ביותר עבורו. על פי עיקרון זה אף אחד מהנהגים ברשת אינו יכול לשפר את זמן נסיעתו ע"י מעבר למסלול אחר מכיוון שהמסלול בו הוא נוסע הוא בהכרח המסלול הקצר ביותר.
2. עיקרון אופטימום מערכת (SO – System Optimum) - על פיו בחירת המסלול, של כל הנהגים ברשת, נעשית מתוך מטרה שזמן הנסיעה הכללי במערכת

יהיה מזערי. כלומר, בהכרח, חלק מהנהגים נוסעים לאו דווקא במסלול הקצר ביותר עבורם.

למרות שעיקרון אופטימום מערכתני מנצל את הרשת בצורה הטובה ביותר, ברור כי עקרון שיווי משקל למשתמש הוא העיקרון המתאר בצורה טובה יותר את המציאות, בה כל נהג בוחר את מסלול הנסיעה על פי שיקוליו שלו וללא התחשבות בכלל הנהגים ברשת.

כדי לפתור בעיית שיווי משקל ברשת נתונה, יש להשתמש במספר כלים מתמטיים ובעזרתן של שיטות הלקוחות מחקר ביצועים ניתן לנסח את בעיית שיווי המשקל כבעיית אופטימיזציה. אם נעשה כך ניתן יהיה לפתור את בעיית שיווי המשקל למשתמש ע"י אלגוריתמים ידועים.

## 2.2.2 בעיית שיווי משקל למשתמש

ההגדרות וההנחות הדרושות לפתרון בעיית שיווי משקל למשתמש:

1. יש להגדיר את הקשר בין נפחי התנועה בקטעי הרשת וזרימת התנועה במסלולים. רוב המסלולים, ברשת שאינה טריוויאלית, מורכבים ממספר קטעים שונים ולא מקטע בודד. על כן הקשר יוגדר כך: נפח התנועה בקטע שווה לסכום הזרימות בכל המסלולים שעוברים דרכו והנוסחה המבטאת את הקשר הנ"ל היא:

$$[15] X_a = \sum_{rs} \sum_k f_k^{rs} \delta_{ak}^{rs}$$

כאשר:

$X_a$  – עומס התנועה בקטע a;  
 $f_k^{rs}$  – הזרימה במסלול k בין מוצע r ויעד s;  
 $\delta_{ak}^{rs}$  – שווה ל-1 אם קטע a נמצא במסלול k בין מוצע r ויעד s, ושווה ל-0 אחרת.

2. יש להגדיר את הקשר בין זמני הנסיעה בכל קטע ברשת וזמני הנסיעה במסלולים. הקשר יוגדר כך: זמן הנסיעה במסלול הוא סכום זמני הנסיעה בקטעים שמרכיבים את המסלול. והנוסחה המבטאת את הקשר הנ"ל היא:

$$[16] C_k^{rs} = \sum_a t_a \delta_{ak}^{rs}$$

כאשר:

$C_k^{rs}$  - זמן הנסיעה במסלול  $k$  בין מוצא  $r$  ויעד  $s$ .

$t_a$  - זמן הנסיעה בקטע  $a$ .

3. יש להגדיר את הקשר בין נפח התנועה וזמני הנסיעה ברשת. נושא זה נחקר רבות בספרות ומקובל להניח שפונקציית העכבה היא פונקציה לא- ליניארית, ומונוטונית-עולה עם נפח התנועה. וכן מתקיימת הנחת הסימטריות: זמן הנסיעה בקטע מסוים תלוי אך ורק בנפח באותו קטע. הביטויים המתמטיים לתנאים אלה הם:

$$[17] \quad t_a = t_a(X_a)$$

$$[18] \quad \frac{dt_a}{dX_a} > 0$$

ניסוח מודל האופטימיזציה נעשה על ידי Beckman et al. (1956):

$$[19] \quad \text{Min} \sum_a \int_0^{X_a} t_a(X_a) dX_a$$

s.t.

$$[20] \quad \sum_k f_k^{rs} = q_{rs} \forall r, s, k \in K_{rs}$$

$$[21] \quad f_k^{rs} \geq 0$$

כאשר:

$q_{rs}$  - סך כל הביקוש בין מוצא  $r$  ויעד  $s$ ;

$K_{rs}$  - סט המסלולים עם זרימה חיובית בין מוצא  $r$  ויעד  $s$ .

ניסוח זה מניח כי הביקוש לנסיעות בין כל מוצא- יעד קבוע. קיימות הרחבות של ניסוח זה אשר מניחות שהביקוש לנסיעות בין מוצא- יעד הינו גמיש. במקרה זה, הביטוי המתמטי המבטא את שיווי משקל ניתן על ידי:

$$[22] \quad \text{Min} \sum_a \int_0^{X_a} t_a(X_a) dX - \sum_{rs} \int_0^{q_{rs}} D_{rs}^{-1}(X_a) dX$$

s.t

$$[23] \quad \sum_k f_k^{rs} = q_{rs} \quad \forall r, s$$

$$[24] \quad f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k, r, s$$

$$[25] \quad q_{rs} \geq 0 \quad \forall r, s$$

כאשר:

$D_{rs}^{-1}$  היא פונקציית הביקוש ההפוכה המקשרת בין כל מוצא-יעד  $rs$ ;  $q_{rs}$  - משתנה הביקוש.

הביטוי לעיל מקיים את תנאי שיווי משקל למשתמש הבאים , הוכחה ניתן למצוא בספר של Sheffi (1985):

$$[26] \quad f_k^{rs} (C_k^{rs} - c_{rs}^*) = 0$$

$$[27] \quad C_k^{rs} - c_{rs}^* \geq 0$$

כאשר:

$c^*$  - זמן הנסיעה המינימלי (בעומס) בין מוצא-יעד  $rs$ .

כלומר, עלויות הנסיעה בכל מסלול הנושא זרימה חיובית , שוות בעת שיווי משקל למשתמש.

מגבלות מודל הצבה דטרמיניסטי ידועות וחוקרים רבים ניסו להרחיב את המודל לפתרון בעיות מורכבות. הספרים של Sheffi (1985), Patriksson (1994), Bell and Iida (1997) סוקרים את בעיית ההצבה בהרחבה.

לאחר ניסוח בעיית הצבת הנסיעות כבעיית מינימיזציה נדרש למצוא דרך לפתור אותה. ישנם אלגוריתמים מגוונים לפתרון בעיה זו , כאשר האלגוריתם הנפוץ ביותר לפתרון הבעיה הוא אלגוריתם Frank-Wolfe (FW).

אלגוריתם FW הינו אלגוריתם כללי לפתרון בעיות אופטימיזציה לא-ליניאריות תחת אילוץ ליניאריים. האלגוריתם פותח במקור כפתרון לבעיה ריבועית , אולם, עם הזמן, נעשה מקובל גם לפתרון של בעיות הצבה . הרעיון העומד בלב האלגוריתם



הוא ביצוע קירוב ליניארי של פונקצית המטרה על מנת למצוא את כיוון הירידה של הפונקציה. כאשר המטרה היא לצמצם את האזור בו ייתכן המינימום של הפונקציה לתחום הולך וקטן עד הגעה לנקודות המינימום. מכיוון שההנחה היא שהפונקציה קמורה אזי נקודת המינימום היא יחידה.

האלגוריתם הוא אלגוריתם רקורסיבי כך שבצעד ה- $n$ , עוברים מהפתרון הנוכחי,  $X^n$ , לפתרון טוב יותר,  $X^{n+1}$ . חישוב הפתרון החדש מבוסס על הצבת הכל או כלום (All Or Nothing assignment). בהצבה זו מוצבים כל הנסיעות בין כל זוג מוצא-יעד על המסלול הקצר ביותר, עבור אותו הזוג. החיסרון העיקרי בהצבה זו היא שאין התחשבות בעומס התנועה ולאחר הצבת הנסיעות על גבי הרשת זמני הנסיעה בהכרח יהיו שונים.

קיימים שיפורים לאלגוריתם FW במטרה לחשב את גודל הצעד האופטימלי בצורה יעילה. כיום, קיימות תכנות מסחריות של תכנון תחבורה כגון Emme/2 ו-TransCad אשר כוללות פתרון הצבת נסיעות ברכב פרטי.

### 3.2 שילוב של מודלים לחישוב רעש ומודלים תנועתיים

נושא הרעש באזורים אורבאניים הינו נושא המתפתח רבות בשנים האחרונות. כפי שניתן לראות רעש מכבישים ומודלים לתכנון תחבורה הינם נושאים שלובים יחדיו, היות וישנם פרמטרים רבים המשותפים להם. מתוך הבנה זו חוקרים שונים ניסו לקשור בין שני התחומים להלן מספר דוגמאות.

האיחוד האירופאי, תחת קבוצת IMAGINE (Improvement Methods for the Assessment of the Generic Impact of Noise in the Environment) ערך סקירה מקיפה על ההתאמה בין מודלי תחבורה למודלים לחישוב רעש (TLM *et al.* 2005). חלקו הראשון של דו"ח זה הוקדש לבחינת המודלים המובילים לחישוב רעש מדרכים, חלקו השני סקר את המודלים המובילים לתכנון תחבורה וחלקו השלישי דן בהתאמה בניהם. עם זאת ממצאי הדו"ח עוסקים בעיקר בשאלה כיצד ניתן להשתמש בנתונים ממודלי התחבורה בחישובי הרעש השונים וזאת במסגרת הידע הקיים ולא מעלים אפשרויות חדשות לשילוב בין התחומים.

Houtmen and Immers (1986) ניסו להגביל את הרעש מתחבורה ע"י אילוצים של קיבולת הכבישים. המחברים הראו פיתרון מתמטי להגבלת קיבולת הכבישים ברשת על ידי הוספת אילוץ. האילוץ הוא על הזרימה המקסימלית בכביש,  $X$ , כפונקציה של מרחק ממקבל רעש, הרכב התנועה ומהירותה וקריטריון הרעש בו צריך לעמוד. אילוץ זה מאגד בתוכו את הקשר בין זמן הנסיעה כדלקמן:

$$[28] \quad C^* = X \quad \text{for } X < C \\ = C \quad \text{for } X > C$$

כאשר:

$C$  הוא קיבולת הכביש

$C^*$  הוא קיבולת כפונקציה של זמן הנסיעה.

$X$  הוא זרימה מקסימלית מחושבת.

גישת המחברים הייתה למעשה שינוי בצד ההיצע של הבעיה, על ידי הגבלת הקיבולת. מאמר זה הוא קרוב לרעיון של המחקר הנידון, כפי שיוסבר בפרק המתודולוגיה.

Rillet and Benedek (1994) ניסו להכניס אילוצים סביבתיים למודל התחבורה . האילוצים הנבחנים קשורים כולם לאיכות אוויר , ובמאמר מוסגר נאמר כי ניתן להחליפם באילוצי רעש . בדומה למחברים הקודמים , המחברים משתמשים במודל הצבת נסיעות ברכב פרטי המוכר , ללא שינוי בניסוח המתמטי . השינוי במחקר זה הוא שוב באילוצי קיבולת.

קיימים מאמרים נוספים העומדים על הקשר בין מודלים לתכנון תחבורה לבין מודלים לחישוב רעש, אולם רובם המוחלט עושה שימוש בתונים ממודל התחבורה כקלט לחישוב רעש, ולא נמצאו מאמרים הדנים בקשר ההפוך. לדוגמא, Bhaskar et al., 2004.

## 4.2 סיכום

קיימות שיטות רבות לתיאור רעש מכבישים ורובן נשענות על אינטגרציה של האנרגיה המוקרנת מהכביש , ההבדלים בין השיטות נובעים בעיקר ממשך הזמן עבורו נעשית הסכימה. הנוהג בארץ, הנשען בעיקרו על הגישה האמריקאית, מתייחס למפלס הרעש המוקרן מהדרך במשך שעה אחת , שהיא שעת שיא הרעש במהלך 24 שעות היממה (שעת שיא הרעש היממתי) . המדד המתאר את הרעש מהכביש הוא  $Leq(1h)$  - מפלס הרעש שווה- הערך השעתי לשעת שיא והוא מהווה את הממוצע האנרגטי של הרעש מהכביש . המשתנים העיקריים הדרושים לחיזוי הרעש על פי המודל הם : גיאומטריית הכבישים , נפחי תנועה , מהירות התנועה , מיקום מקבלי הרעש וגובהם, תכונות בליעת הקול של השטחים שליד הכביש ונתונים גיאומטריים של מבנים, קירות או סוללות החוסמים את דרך התפשטות הרעש.

תחזיות תנועה מערכתיות מתקבלות בעזרת מודל הצבת נסיעות . המודל מחלק את הביקוש לנסיעות על פני מערכת הדרכים . הביקוש מיוצג על ידי מטריצת נסיעות מוצא יעד, ומפוזר על הקטעים המייצגים את הרחובות או הכבישים המרכיבים את רשת התחבורה . בספרות קיימים מודלים רבים של הצבת נסיעות , כאשר השוני ביניהם הוא ההנחה ההתנהגותית לגבי בחירת המסלולים . אם מניחים שלנהגים יהיה מידע מושלם לגבי זמני נסיעה, מודל ההצבה מנוסח על ידי בעיית שיווי משקל דטרמיניסטי למשתמש. הניסוח המקורי של בעיית האופטימיזציה מניח כי הביקוש לנסיעות בין כל מוצא- יעד קבוע . קיימות הרחבות של ניסוח זה אשר מניחות שהביקוש לנסיעות בין מוצא-יעד הינו גמיש.

הפרמטרים המשמשים לחישוב רעש מכבישים דומים לפרמטרים הדרושים למודלים לתכנון תחבורתי, ואף יותר מכך, הפלט ממודלים לתכנון תחבורתי משמשים כקלט למודלים לחישוב רעש מכבישים. על כן, נמצאו מספר מאמרים הבוחנים את הקשר שבין המודלים. במרבית המאמרים קיימת סקירה של המודלים הקיימים ונבחנה טיב ההתאמה ביניהם. בנוסף נמצאו בספרות מספר ניסיונות להגביל את כמות התנועה כתלות באילוצים סביבתיים (מגבלות זיהום אוויר) אולם גישת המחברים הייתה הגבלה על קיבולת הכביש. לא נמצאו בספרות תכנון ביקוש מיטבי על פי מגבלות רעש, שזוהי מטרת המחקר הנידון, כפי שיוסבר בפרק הבא.

### 3. מתודולוגיה

#### 1.3 שיטת העבודה

מטרת העבודה היא לפתח מודל לקביעת מפלס הרעש האופטימלי במערכת דרכים עירונית. מטרה זו מושגת על ידי שילוב בין מודל להצבת נסיעות ברכב פרטי למודל לחישוב רעש מכבישים.

הניסוח המתמטי של הבעיה המשולבת דומה לניסוח המקובל בתכנון תחבורה לבעיית הצבת נסיעות עם ביקוש גמיש. ההבדל בין הניסוח המקובל למחקר הנוכחי הוא, שפונקציית הביקוש במקרה הנוכחי תלויה במפלס הרעש. כיוון שפונקציה זו אינה ליניארית, קשה לבטא בצורה אנליטית את הניסוח ואת תנאי קיום ויחידות הפתרון. מחקר זה מתמקד בפיתוח אלגוריתם לפתרון הבעיה המשולבת.

נקודת ההתחלה של המודל המשולב היא קביעת סך כל הביקוש בכל המוצאים והיעדים יחדיו. קביעה זו נעשית בדרך כלל על ידי חיש וב אוכלוסיה ותעסוקה כללית, כמקובל בבדיקות פרויקטים שונים של תכנון שכונתי.

בהינתן מערכת כבישים (מתוכננת או קיימת), נפחי התנועה מתקבלים על ידי הצבת הביקוש לנסיעות בין כל מוצא ליעד. במידה ופילוג הנסיעות ידוע (וקבוע), פתרון הבעיה ידוע ולא ניתן יהיה לשנות את הביקוש. במחקר זה אניח, כי פריסת הביקוש לא קבועה וקיימת דרגת חופש לגבי קביעת הביקוש בין כל מוצא ויעד, במטרה להגיע למצב אופטימלי מבחינת רעש.

יש לציין כי בספרות לא נמצאו מאמרים אשר דנו באפשרות זו. לרוב, המאמרים דנו בשינוי באילוצי הבעיה מצד ההיצע (קיבולות), כאשר הביקוש לנסיעות בין כל מוצא ויעד קבוע. לכן, מחקר זה מהווה תרומה בתכנון שימושי קרקע של שכונות חדשות או הרחבות שכונות קיימות.

האלגוריתם שפותח במחקר זה מורכב משלושה שלבים עיקריים. בשלב הראשון מריצים את מודל הצבת נסיעות עם ביקוש התחלתי ומקבלים נפחי תנועה וזמני נסיעה בקטעי הרשת. בשלב השני מחשבים את מפלס הרעש ההתחלתי ובודקים את העמידה בקריטריונים שנקבעו מראש. במידה וקיימת חריגה, מחשבים את כמות התנועה האקווילנטית (מבחינת רעש) שיכולה לעבור בקטע. בשלב השלישי מחשבים את הביקוש לנסיעות, המתוקן על פי מגבלות הרעש, בעזרת מודל הצבת נסיעות ברכב פרטי. חוזרים על השלבים השני והשלישי עד להתכנסות התהליך.

בתהליך קיים מנגנון המוודא שסך כל הביקוש (בכל מוצא- יעד יחד) נשמר קבוע. מנגנון זה מחושב על ידי הכנסת חסמים תחתונים במספר קטעים אשר בהם לא מתקיימת מגבלת רעש. ללא חסמים אלה, פיתרון הבעיה עלול להקטין את הביקוש הכולל, דבר אשר יהוו תוצאה לא רצויה מבחינה תכנונית.

בסיום התהליך מתקבלת מטריצה נסיעות מוצא-יעד שונה מהמטריצה ההתחלתית. על פי הביקושים במטריצה הסופית ניתן לתכנן את השכונה, כלומר, כמות ופיזור יחידות הדיור בצורה מיטבית מהפן האקוסטי.

## 2.3 הנחות המחקר

### 1.2.3 הנדסת תחבורה

הצבת הנסיעות נעשתה על פי מודל סטטי – דטרמיניסטי של אילוצי קיבולת.

מודל סטטי - מכיוון שנעשתה ההנחה כי זמני הנסיעות אינם משתנים עם הזמן, הקיבולת וזמני הנסיעה בקטעים השונים וכן הביקושים לנסיעות במטריצה כולה, לא משתנים עם הזמן ולכן פ יזור הנסיעות ברשת, שהוא תוצאת המודל, הוא קבוע לאורך הניתוח כולו. כמובן שבמציאות נפחי התנועה אינם קבועים אולם במשך הזמן של שעות השיא, שהוא הזמן הקריטי עבור חישובי הרעש, מתקיים מצב הקרוב לשיווי משקל סטטי.

מודל דטרמיניסטי י - מכיוון שנעשה שימוש בהצבת נסיעות עבור מצב של שיווי משקל למשתמש. כל אחד מהמשתמשים ברשת יודע מהן עלויות הנסיעה בכל אחד מהמסלולים האפשריים ברשת ומחליט לנסוע במסלול הקצר ביותר עבורו. במצב זה אף אחד מהמשתמשים ברשת אינו יכול לשפר את מצבו על ידי החלפת מסלול הנסיעה וזמני הנסיעות בכל המסלולים, שבהם נעשה שימוש, שווים או קצרים יותר מזמני הנסיעה בכל אחד מהמסלולים שבהם לא נעשה שימוש. כמובן, שהבחירה של מסלול נסיעה על ידי המשתמש הבודד משפיעה על הרשת כולה מכיוון ש העומס במסלול בו בחר עולה ומהירות הנסיעה בו יורדת.

### 2.2.3 הנדסת אקוסטיקה

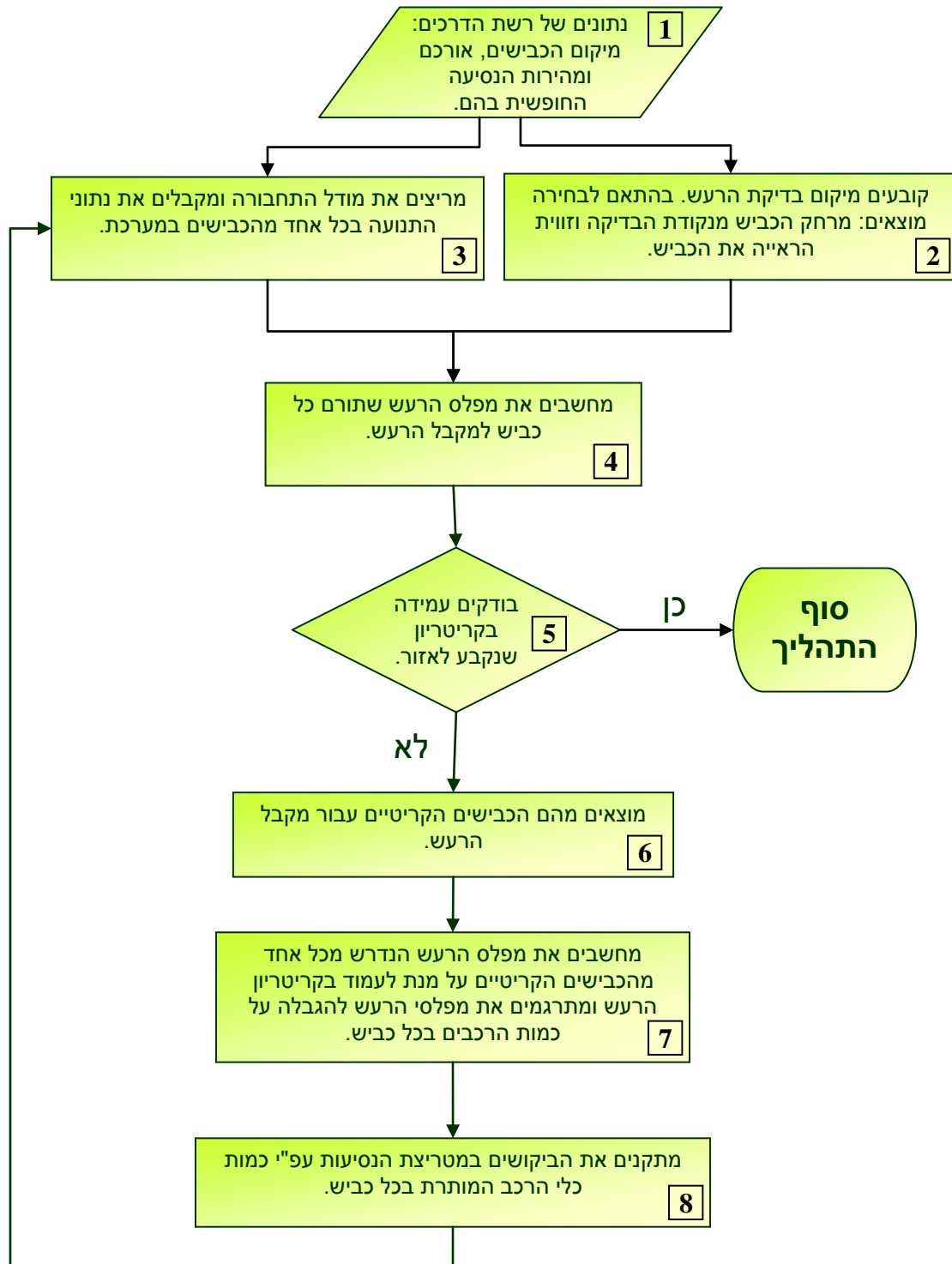
חישובי הרעש נערכו עבור מכ וניות פרטיות, במקבלים מייצגים בגובה של 1.5 מטר מעל פני הקרקע ולשעת שיא התנועה עפ"י תחזיות התנועה.

מכוניות פרטיות - על אף שהרכב התנועה הוא גורם בעל חשיבות בחישוב מפלס הרעש שמקורו בכביש, נערכו החישובים בעבודה זו עבור רעש ממכוניות פרטיות

בלבד, וזאת מכיוון שה מחקר התמקד בכבישים פנ ימיים בשכונות מגורים ולא בכבישים ראשיים.

מקבלי הרעש – נלקחו מקבלי רעש מייצגים בגבולות הבנייה המתוכננת ומגובה של 1.5 מטר מעל הקרקע, גובה מייצג לשטח הפתוח.

תחזיות תנועה – מכיוון שהמחקר התמקד בכבישים פנ ימיים בשכונות מגורים חישובי הרעש נ ערכו לשעות שיא ולא על פי נתוני תנועה ל רמות שירות B ו-C, כמקובל בחישוב רעש מכבישים ראשיים. הנחת העבודה, עבור כבישים בין עירוניים וכבישים ראשיים, היא שהכביש יגיע לרמות שירות אלה באופן סדיר, אולם הקביעה אינה נכונה כאשר בוחנים כבישים פנימיים בהם רמת שרות C פחות נפוצה ועל כן נעשה שימוש בתחזיות תנועה לשעת שיא.



איור 7: מתודולוגיית העבודה

Figure 7: model methodology



## להלן מובא פרוט של תהליך העבודה:

1. הנתונים הדרושים לתחילת העבודה הם תכנון של השכונה בדגש על מערכת הכבישים, מבני המגורים ומבנים רגישים לרעש. את תכנון השכונה מתרגמים לרשת דרכים הכוללת את מיקום הכבישים ואורכם, מהירות הנסיעה החופשית בהם וביקושים התחלתיים למטריצת הנסיעות. על ידי כך מתקבלת רשת הדרכים אותה רוצים לבדוק.
2. בהתאם לתכנון השכונה, מגדירים מפלסי רעש רצויים לאזורים השונים. לאחר הגדרת האזורים בוחרים נקודה מייצגת בכל אחד מהאזורים וזו הנקודה שעבורה יחושבו מפלסי הרעש. מוצעים עבורה את הנתונים הבאים: מרחק הכביש ממקבל הרעש, זווית הראייה של מקבל את הכביש וסוג הקרקע בין הכביש לנקודת החישוב.
3. במקביל לבחירת אזורי הרעש מריצים את מטריצת הביקושים ההתחלתית במודל הצבת הנסיעות ברכב פרטי. מתוך הרצה זו מקבלים את נפחי התנועה ומהירויות הנסיעה בכבישים ברשת.
4. לאחר הרצת מודל הנסיעה ברכב פרטי מחשבים את מפלס הרעש שתורם כל כביש בכל אחת מנקודות הבדיקה ואת מפלסי הרעש הכלליים בנקודות אלה. הקלט למודל הרעש הם, כמובן, נפחי התנועה ומהירות הנסיעה שהתקבלו בצעד הקודם.
5. בודקים האם מפלס הרעש הכללי בנקודות הבדיקה שנבחרו עומד בקריטריון שנקבע לכל אחת מהן. אם כן – סוף התהליך - נמצאה האופטימיזציה של רעש הכבישים. אם לא – מוצאים מהם הכבישים הקריטיים עבור כל נקודת הבדיקה. הכבישים הקריטיים הם אלה אשר להם התרומה האנרגטית הגבוהה ביותר בנקודת הבדיקה, כלומר, מפלסי הרעש מהם הם הגבוהים ביותר.
6. מוצאים מהם הכבישים הקריטיים בכל נקודה. אלה הם הכבישים שתרומתם האנרגטית למפלס הרעש בנקודה הנבדקת היא הגבוהה ביותר.
7. מחשבים מהו מפלס הרעש הנדרש, בכל אחד מהכבישים הקריטיים, על מנת לעמוד בקריטריון הרעש בכל אחת מנקודות הבדיקה ומתרגמים את מפלס הרעש הנדרש לכמות כלי רכב בכל כביש.
8. מתקנים את הביקושים במטריצת הנסיעות עפ"י כמות כלי הרכב הנדרשת בכל כביש. תיקון הביקושים כולל בתוכו גם הצבת חסמים תחתונים באותם

כבישים שאינם הכבישים הקריטיים על מנת לשמור על ביקוש קבוע ברשת כולה.

עיקר החישוב, סעיפים 5-7 לעיל, מבוסס על שיטה איטרטיבית למציאת נפחי התנועה האקווילנטים. לצורך זה, פותח אלגוריתם עזר.

### 2.3.3 אלגוריתם עזר למציאת נפח התנועה הנדרש

#### כללי

כאמור, המטרה של אלגוריתם זה היא למצוא את כמות כלי הרכב המרבית שיכולה לעבור בכל אחד מהכבישים תוך שמירה על קריטריון הרעש שנקבע בכל אחת מנקודות הבדיקה.

#### אתחול

לאתחול האלגוריתם נדרש לקבוע, בכל אחת מנקודות הבדיקה, את קריטריון הרעש  $C_i$ .

#### הצעד הראשון

עבור איטרציה  $k$  -

מתוך מודל הצבת הנסיעות המורחב מתקבלים נפחי התנועה  $Q_j^k$ , ומהירויות הנסיעה בכל הכבישים ברשת בהם קיימת זרימת תנועה. עבור נקודת חישוב הרעש  $i$  -

מתוך מודל הרעש, שאליו הוזנו נתוני הכבישים (שהתקבלו ממודל הצבת הנסיעות) מתקבלים שני נתונים: מפלס הרעש שתורם כל כביש בנקודות החישוב ומפלס הרעש הכללי בנקודה.

הבדיקה הראשונה שנערכת היא: האם מפלס הרעש בנקודה  $i$  עומד בקריטריון הרעש שלו:

$$[29] \quad L_{A,i}^k \leq C_i$$

אם התשובה לאי השוויון היא חיובית, כלומר מפלס הרעש בנקודה  $i$  נמוך או שווה לקריטריון הרעש, אזי אין בעיה אקוסטית בנקודה ועל כן לא נדרש תיקון לכמות כלי הרכב וניתן להתקדם ולבדוק את הנקודה הבאה,  $i+1$ , אם נקודה  $i$  היא נקודת הבדיקה האחרונה - הסתיים התהליך וכל הנקודות עומדות בקריטריון הרעש שנקבע עבורן. כלומר, לא נדרשים יותר שינויים בכמות התנועה - סוף התהליך.

אם התשובה לאי השוויון היא שלילית, כלומר מפלס הרעש בנקודה  $i$  גבוה מקריטריון הרעש, אזי קיימת בעיה אקוסטית בנקודה. נדרש לתקן את הביקושים במערכת, וזאת באמצעות מציאת כמות כלי הרכב האקוולנטית בכבישים - יש לעבור לצעד הבא.

### הצעד השני

עבור נקודת הבדיקה  $i$  -

מתוך רשימת הכבישים שהתקבלה ממודל הרעש מוצאים את מפלס הרעש המרבי שתורם כביש בודד,  $L_{Amax,i}^k$ , למפלס הכללי.

עבור כביש  $j$  -

בודקים האם הוא כביש "קריטי" לנקודת הבדיקה. כל אחד מהכבישים ברשת תורם אנרגיה אקוסטית למפלס הרעש הכללי בנקודת הבדיקה, אולם בגלל האופי הלוגריטמי של חישוב הרעש התרומה של חלק מהכבישים ברשת זניחה לנקודה הנבדקת. מכיוון שהמטרה היא להפחית את מפלס הרעש בנקודת הבדיקה נדרש להתמקד באותם כבישים שתורמים תרומה משמעותית למפלס הכללי. אציין כי חייב להיות לפחות כביש אחד שהוא כביש קריטי בכל נקודת חישוב. התנאי לקריטיות של הכביש:

$$[30] \quad L_{Amax,i}^k - L_{A,j,i}^k \geq TC_i$$

כאשר:

$TC_i$  - הפרש במפלסי הרעש המצביע על קריטיות של הכביש, ב-dB(A).

אם התשובה לאי השוויון שלילית, הכביש אינו קריטי.

אם התשובה לאי השוויון חיובית, הכביש קריטי.

ממשכים לבדוק את כביש  $j+1$ , אם  $j$  היה הכביש האחרון הסתיימה בדיקת הכבישים בנקודה  $i$  ויש לעבור לצעד הבא.

### הצעד השלישי

בשלב הקודם מצאנו מהם הכבישים הקריטיים, באיטרציה  $k$ , לנקודה  $i$ . כעת יש למצוא את כמות כלי הרכב האקוולנטית הנדרשת בכל אחד מהכבישים הללו,  $Q_j^k$ , בכדי שניתן יהיה לעמוד בקריטריון הרעש בנקודה. תחילה נמצא מהו מפלס הרעש

הדרוש מכל אחד מהכבישים ,  $L_{A,j,i}^k$  , כך שאינטגרציה של מפלסי הרעש תיתן את מפלס הקריטריון.

הרעש בנקודת חישוב מתקבל מסכימת מפלסי הרעש של מספר כבישים . במחקר זה הנחתי כי התרומה היחסית של כל אחד מהכבישים במערכת למפלס הרעש הכללי בנקודה נשמרת בתוך כל איטרציה . לכן, תחילה מוצאים מהי התרומה האנרגטית היחסית של כל כביש למפלס הרעש הכללי , ולאחר מכן מחשבים את המפלס החדש שכביש זה יתרום על בסיס התרומה היחסית המקורית.

בגלל האופי הלוגריתמי של הרעש תחילה יש לחשב את האנרגיה האקוסטית של הכבישים הקריטיים,  $E_{j,i}^k$  , בכדי שנוכל לבצע בהמשך פעולות אריתמטיות.

$$[31] \quad E_{j,i}^k = 10^{(L_{A,j,i}^k \times 0.1)}$$

לאחר מכן תחושב  $DR_{j,i}^k$  , שהיא התרומה האנרגטית היחסית של כביש j למפלס הרעש הכללי בנקודה,  $L_{A,i}^k$  . כאמור, המטרה היא לשמור על התרומה היחסית של כל אחד מהכבישים למפלס הרעש הכללי.

כעת ניתן לחשב את מפלס הרעש הרצוי מכביש j ,  $L_{A,j,i}^k$  , החישוב נערוך על פי המשוואה:

$$[32] \quad L_{A,j,i}^k = 10 \log(E_{j,i}^k \times DR_{j,i}^k)$$

כאשר מתקיים:

$$[33] \quad \sum_j L_{A,j,i}^k = L_{A,i}^k$$

ההפרש בין מפלס הרעש הרצוי בכביש j למפלס הקיים בו מסומן כ-  $\Delta L_{A,j,i}^k$  . ומחושב על פי:

$$[34] \quad \Delta L_{A,j,i}^k = L_{A,j,i}^k - L_{A,i}^k$$

כעת ניתן לחשב את כמות כלי הרכב האקוילונטית שנדרשת בכביש j על מנת לעמוד בקריטריון הרעש שנקבע לנקודה i:

$$[35] \quad Q_{j,i}^k = 10^{\left( \frac{\Delta L_{A,j,i}^k + 10 \log(Q_j^k)}{10} \right)}$$

לאחר מציאת  $Q_{j,i}^k$  עוברים לכביש  $j+1$ .

אם כביש  $j$  היה הכביש האחרון - עוברים לנקודה  $i+1$  וחוזרים לצעד הראשון.

אם נקודה  $i$  הייתה הנקודה האחרונה עוברים לצעד הרביעי.

### הצעד הרביעי

מטרת צעד זה היא מציאת כמות כלי הרכב המרבית שיכולה לעבור בכל כביש במערכת על מנת לעמוד בקריטריון הרעש בכל נקודות חישוב הרעש. מאחר שמציאת כמות כלי הרכב בכל כביש נערכת לכל נקודה בנפרד, נדרש כעת לסכם את התוצאות.

קיימת אפשרות שאותו הכביש ישפיע על מספר נקודות חישוב ושהשפעה שלו בכל נקודה תהיה שונה. כלומר, כמות כלי הרכב האקוולנטית בו בכל נקודה תהיה אחרת. הצעד הרביעי הוא, אם כן, לבחון את התוצאות כולן ולהחליט על כמות כלי הרכב בכל אחד מהכבישים בראייה מערכתית.

כמות כלי רכב המותרת בכל כביש תהיה המינימום בין כל הדרישות בכל הנקודות.

$$[36] \quad Q_j^k = \text{Min}(Q_{j,i}^k)$$

את וקטור הכבישים, בהם יש כעת הגבלה על כלי הרכב, ואת כמות כלי הרכב המותרת בכל אחד מהם מחזירים למודל הצבת הנסיעות. מריצים את מודל הנסיעות ברכב פרטי כאשר ההגבלה על כמות כלי הרכב בכל כביש באה לידי ביטוי כהגבלה על הביקושים במוצאים ויעדים, בדומה לתיקון מטריצה לפי ספירות תנועה ובהוספת חסמים תחתונים בכבישים שאינם כבישים קריטים למערכת. לאחר הרצת מודל הצבת נסיעות המורחב (המתקן את הביקוש לנסיעות בין מוצא ליעד), מקבלים חזרה את נפחי התנועה,  $Q_{j,i}^{k+1}$ , ומהירויות הנסיעה בכל הכבישים.

חוזרים לצעד הראשון עבור  $k+1$ .

### 3.3.3 סיכום של שלבי אלגוריתם העוזר

#### אתחול:

- קביעת קריטריון הרעש,  $C_i$ , לכל אחת מנקודות חישוב הרעש.

#### צעד 1:

- עבור איטרציה  $k$  -
- קבלת רשימת הכבישים ברשת נפח ומהירות התנועה בכל אחד מהם.
- עבור נקודת הבדיקה  $i$  -
- קבלת מפלס הרעש שווה הערך,  $L_{A,i,j}^k$ , לכל אחד מהכבישים ברשת.
- קבלת מפלס הרעש שווה הערך הכללי,  $L_{A,i}^k$ .
- בדיקה: האם מפלס הרעש הכללי עומד בקריטריון הרעש.  
← אם לא - המשך לצעד הבא;
- ← אם כן - סיום התהליך עבור הנקודה  $i$ , קבע  $i+1$  וחזור לתחילת הצעד.
- ← אם  $i$  היא הנקודה האחרונה - סיום התהליך.

#### צעד 2:

- עבור נקודת הבדיקה  $i$  -
- מציאת מפלס הרעש המרבי מכביש בודד,  $L_{Amax,i}^k$ .
- עבור כביש  $j$ :
- בדיקה: האם הוא כביש "קריטי" לנקודת הבדיקה  
← אם כן - המשך לצעד הבא;
- ← אם לא - סיום התהליך לכביש זה, חזור על הבדיקה עבור  $j+1$ ; (אם  $j$  כביש אחרון עבור לצעד הבא);

#### צעד 3:

- חישוב האנרגיה האקוסטית של הכבישים הקריטיים,  $E_{j,i}^k$ .
- חישוב אחוז התרומה האנרגטית של כביש  $j$ , למפלס הרעש הכללי בנקודה,  $DR_{j,i}^k$ .
- חישוב מפלס הרעש הרצוי מכביש  $j$ ,  $L_{A,j,i}^k$ , על מנת שניתן יהיה לעמוד בקריטריון הרעש בנקודה  $k$ .

- חישוב ההפרש בין מפלס הרעש הרצוי בכביש  $j$  למפלס הקיים בו.
- חישוב הכמות החדשה של כלי הרכב שנדרשת בכביש על מנת לעמוד בקריטריון הרעש שנקבע.

← עבור לכביש  $j+1$  וחזור על צעד 3.

← אם כביש  $j$  היה הכביש האחרון - עבור לנקודה  $i+1$  וחזור לצעד 1.

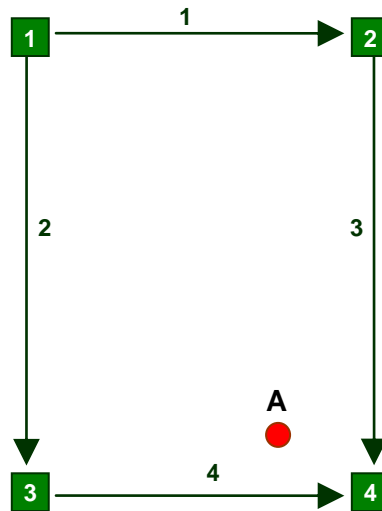
← אם נקודה  $i$  הייתה הנקודה האחרונה המשך לצעד 4.

#### צעד 4:

- מציאת כמות כלי הרכב המותרת בכל כביש מתוך כל הנקודות שנבדקו.
  - החזרה למודל התנועה של ההגבלות על כמות כלי הרכב כהגבלה על הביקושים.
  - קבלת מטריצת נסיעות חדשה.
- ← קביעת  $k+1$  וחזרה לצעד 1.

### 4.3.3 דוגמא

על מנת להדגים את שיטת העבודה בכ לל ואת אלגוריתם העזר בפרט, נתונה רשת פשוטה בת ארבע קודקודים וארבע קשתות ובה מוקמה נקודת חישוב רעש אחת. קודקודים 1 ו-2 הם מוצאים וקודקודים 3 ו-4 הם יעדים, נקודה A היא נקודת חישוב הרעש. איור מס' 8 מציג את הרשת ובטבלה מס' 1 מוצגים נתוני הקטעים.



איור 8: רשת הדוגמא

Figure 8: The network in the example

טבלה 1: נתוני הקטעים שבדוגמא

Table 1: Arc parameters in the example

קיבולת	זמן מעבר בנפח אפס [דקות]	קטע	אל-	מ-
750	0.24	1	2	1
750	0.48	2	3	1
750	0.48	3	4	2
1000	0.17	4	4	3

פונקציית העכבה בה נעשה שימוש היא:

$$[37] \quad t = t_0 + \left[ 1 + 0.6 \left( \frac{x_a}{c_a} \right)^4 \right]$$



סך הביקושים ברשת הוא 1,000 נסיעות בשעה. הביקושים מתחלקים בין שלוש זוגות של מוצא-יעד. בטבלה מס' 2 מוצג הביקוש ההתחלתי לנסיעות.

טבלה 2: נתוני ביקוש התחלתי

Table 2: Initial trip demands

מוצא	יעד	ביקוש ראשוני בל"ר לשעה
1	4	500
1	3	300
2	4	200
סה"כ ברשת		1000

כעת אדגים, שלב אחר שלב, את מציאת הביקושים המיטביים ברשת על פי שיטת העבודה שתוארה בסעיף הקודם.

אתחול -

- נקבע כי קריטריון הרעש לנקודה A הוא 55 dB(A).
- ההפרש המצביע על קריטיות הכביש הוא 10 dB(A).

צעד 1 -

עבור איטרציה  $k=0$

- קבלת רשימת הכבישים ברשת נפח ומהירות התנועה בכל אחד מהם.

טבלה 3: נתוני נפח ומהירות נסיעה בכבישים עבור איטרציה  $k=0$

Table 3: Traffic data at  $k=0$

קטע	נפח התנועה בל"ר לשעה	מהירות נסיעה בקמ"ש
1	236	60
2	564	40
3	436	48
4	264	60

עבור נקודת הבדיקה  $i$  -

- קבלת מפלס הרעש שווה הערך,  $L_{A,i,j}^k$ , לכל אחד מהכבישים ברשת.

• קבלת מפלס הרעש שווה הערך הכללי,  $L_{A,i}^k$ .

טבלה 4: מפלסי רעש שווה ערך ב- dB(A) מכל אחד מהכבישים והמפלס הרעש הכללי בנקודת חישוב הרעש A

Table 4: Noise level in dB(A) from each road and the total noise level at point A

מפלס רעש שווה ערך ב-dB(A)	קטע
35.2	1
41.3	2
54.9	3
55.2	4
58.2	סה"כ A בנקודה

• בדיקה: האם מפלס הרעש הכללי עומד בקריטריון הרעש.

← אם לא - המשך לצעד הבא;

קריטריון הרעש הוא : 55 dB(A), מפלס הרעש בנקודה הוא : 58.2 dB(A), כלומר מפלס הרעש אינו עומד בקריטריון ועל כן נמשיך לצעד הבא;

צעד 2 -

עבור נקודת הבדיקה i -

• מציאת מפלס הרעש המרבי מכביש בודד,  $L_{Amax,i}^k$  - כביש 4 : 55.2 dB(A);

עבור כביש j:

• בדיקה: האם הוא כביש "קריטי" לנקודת הבדיקה

טבלה 5: בדיקת קריטיות של הכבישים ברשת למפלס הרעש הכללי

Table 5: Check for the sound level in the critical section of the road

מפלס רעש קריטי dB(A)-ב	קטע
NO	1
NO	2
54.9	3
55.2	4

**צעד 3:**

- חישוב האנרגיה האקוסטית של הכבישים הקריטיים,  $E_{j,i}^k$ .
- חישוב אחוז התרומה האנרגטית של כביש  $j$ , למפלס הרעש הכללי בנקודה,  $DR_{j,i}^k$ .
- חישוב מפלס הרעש הרצוי מכביש  $j$ ,  $L_{A,j,i}^k$ , על מנת שניתן יהיה לעמוד בקריטריון הרעש בנקודה  $k$ .
- חישוב ההפרש בין מפלס הרעש הרצוי בכביש  $j$  למפלס הקיים בו.
- חישוב הכמות החדשה של כלי הרכב שנדרשת בכביש על מנת לעמוד בקריטריון הרעש שנקבע.

**טבלה 6: חישוב כמות כלי הרכב המותרת בכבישים הקריטיים**

**Table 6: Calculation of the allowed vehicle volume in the critical section of the road**

קטע	$L_{A,i,j}^k$	$E_{j,i}^k$	$DR_{j,i}^k$	$L_{A,j,i}^k$	$\Delta L_{A,j,i}^k$	$Q_j^k$	$Q_j^k$
3	54.9	308271	47%	51.7	-3.2	436	210
4	55.2	331151	50%	52.0	-3.2	264	127

**צעד 4:**

- מציאת כמות כלי הרכב המותרת בכל כביש מתוך כל הנקודות שנבדקו.
  - החזרה למודל התנועה של ההגבלות על כמות כלי הרכב כהגבלה על הביקושים.
  - קבלת מטריצת נסיעות חדשה.
- ← קביעת  $k+1$  וחזרה לצעד 1.

**טבלה 7: ביקושי נסיעה לאחר החישוב**

**Table 7: Second trip demands**

מוצא	יעד	ביקוש שני
1	4	241
1	3	663
2	4	96

טבלה 8: נתוני נפח ומהירות נסיעה בכבישים עבור איטרציה k=1

Table 8: Traffic data at k=1

קטע	נפח התנועה בכ"ר לשעה	מהירות נסיעה בקמ"ש
1	241	60
2	663	34
3	337	48
4	0	60

עבור k=1 - צעד ראשון:

עבור נקודת הבדיקה i -

• קבלת מפלס הרעש שווה הערך,  $L_{A,i,j}^k$ , לכל אחד מהכבישים ברשת.

• קבלת מפלס הרעש שווה הערך הכללי,  $L_{A,i}^k$ .

טבלה 9: מפלסי רעש שווה ערך ב- dB(A) מכל אחד מהכבישים והמפלס הרעש הכללי בנקודת חישוב הרעש A, עבור k=1

Table 9: Noise level in dB(A) from each road and the total noise level at point A, for k=1

קטע	מפלס רעש שווה ערך ב-dB(A)
1	35.2
2	40.7
3	53.8
4	-
סה"כ בנקודה A	54.0

• בדיקה: האם מפלס הרעש הכללי עומד בקריטריון הרעש.

← אם לא - המשך לצעד הבא;

← אם כן - סיום התהליך עבור הנקודה i, קבע i+1 וחזור לתחילת הצעד.

← אם i נקודה אחרונה - סיום התהליך.

קריטריון הרעש הוא: 55 dB(A) מפלס הרעש בנקודה הוא: 54.0 dB(A).

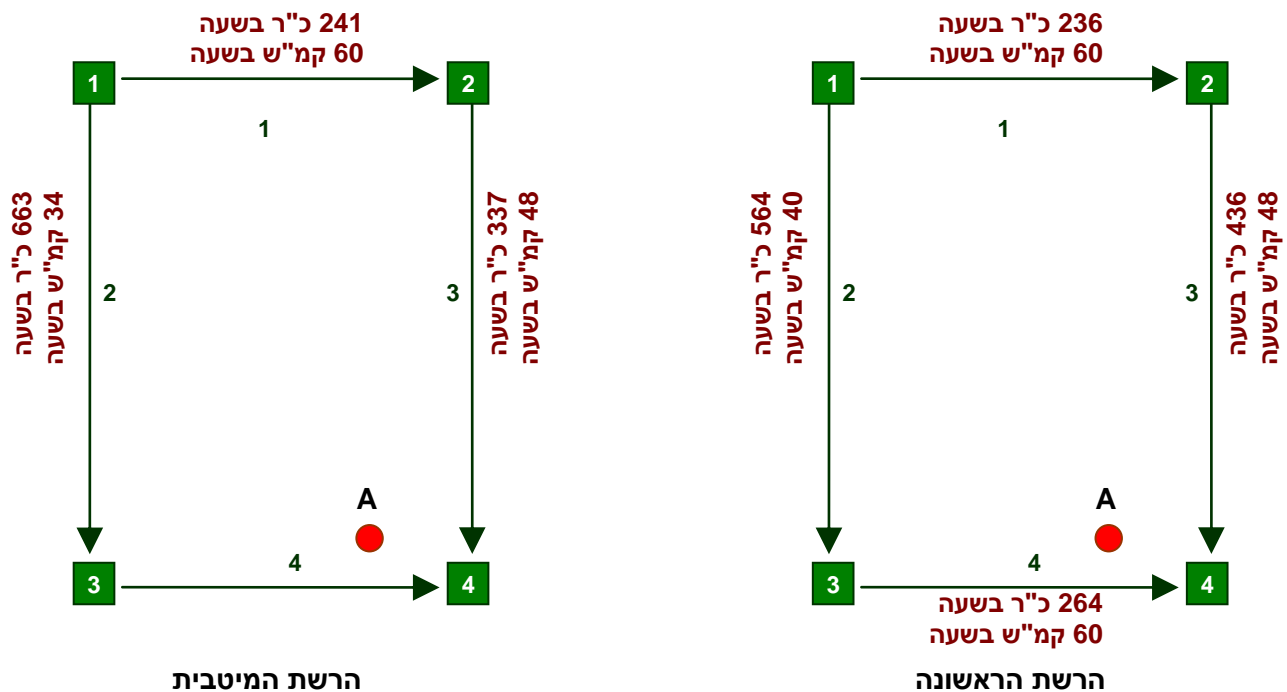
מפלס הרעש עומד בקריטריון ועל כן נדרש לעבור לנקודת הבדיקה הבאה, מכיוון שהסתיימו נקודות הבדיקה זהו סיומו של התהליך.

מכאן, שהביקושים המיטביים, מהפן האקוסטי, לרשת הדרכים שהוצגה בדוגמה הם אלה של ההרצה האחרונה. בטבלה מס' 10 מוצגים הביקושים ההתחלתיים לעומת הביקושים המיטביים ברשת ובאיור מס' 9 מוצגים נפחי התנועה ומהירויות הנסיעה בהרצה הראשונה לעומת ההרצה המיטבית.

**טבלה 10: ביקוש ראשוני לעומת ביקוש מיטב, מהפן האקוסטי, ואחוז השינוי בניהם**

**Table 10: Initial and optimal, from the acoustic aspect, trip demands and the chance percent**

מוצא	יעד	ביקוש ראשוני בכ"ר לשעה	ביקוש מיטבי בכ"ר לשעה	אחוז השינוי הנדרש
1	4	500	241	-51%
1	3	300	663	+121%
2	4	200	96	-52%
סה"כ ביקוש ברשת		1000	1000	-



**איור 9: נפחי תנועה ומהירויות נסיעה ברשת הראשונה וברשת המיטבית**

**Figure 9: Traffic volumes and speed in the optimal and initial network**

מתוך השוואה של התוצאות שהתקבלו עולה כי בפתרון המיטבי לא יהיו כלל נסיעות בכביש מס' 4. השינוי במטריצה הביקושים יהיה ירדה של כ-50% בביקוש בין מוצא-יעד 1-4 ובין מוצא-יעד 1-2 ואילו עליה בביקוש בכ-20% בין מוצא-יעד 1-3 לעומת הביקוש הראשוני.

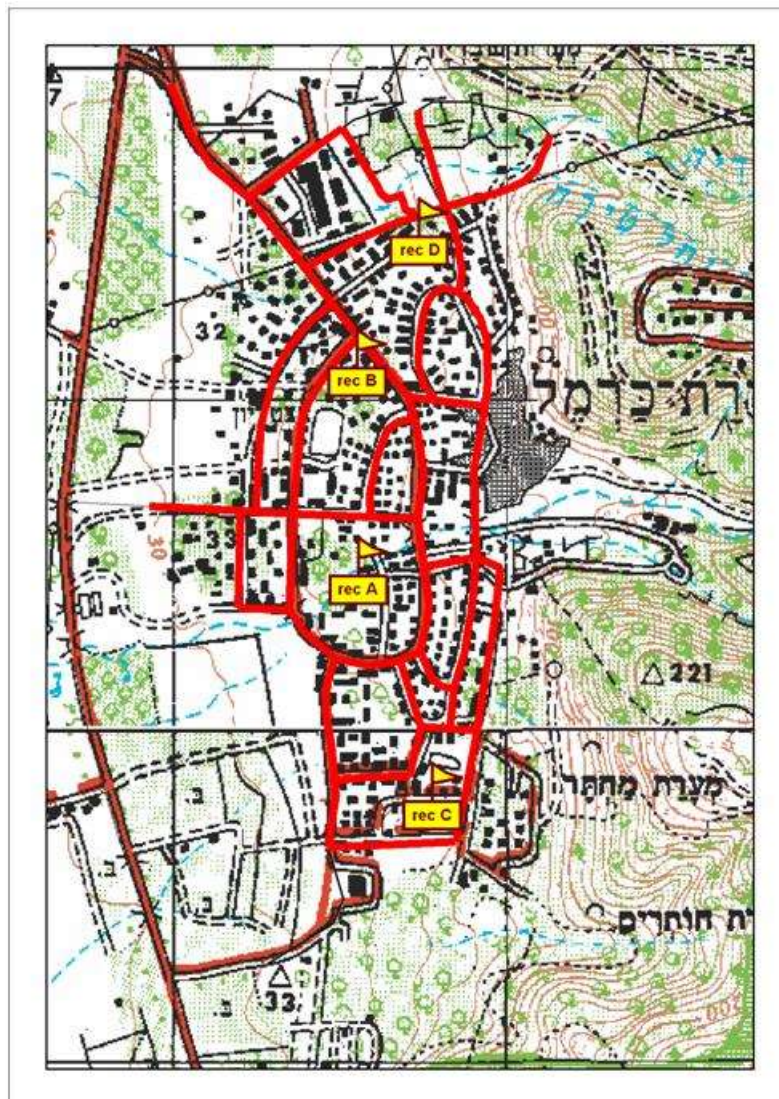
על פי התכנון הראשוני מירב הביקוש ברשת היה בין מוצא 1 ליעד 4, כ-500 כלי רכב בשעה. ביקוש זה התחלק בין שני מסלולי נסיעה: (1) 1-2-4 ו-(2) 1-3-4. ביקושים נוספים במערכת היו בין מוצא 1 ליעד 3 (300 כ"ר בשעה) ובין מוצא 2 ליעד 4 (200 כ"ר בשעה).

מניתוח חישובי הרעש התברר כי הכבישים הקריטיים עברו החריגה מקריטריון הרעש בנקודה A הם כביש מס' 3 וכביש מס' 4, שהם הכבישים הקרובים ביותר לנקודה. נבחנה ההשתתפות של כבישים אלה במסלולי הנסיעות השונים ברשת. כביש מס' 3 הוא חלק משני מסלולי נסיעה: הראשון, מסלול 1-2-4 ממוצא 1 ליעד 4 והשני, מסלול 2-4 ממוצא 2 ליעד 4. כביש מס' 4 הוא חלק ממסלול נסי עה אחד בלבד: 1-3-4 ממוצא 1 ליעד 4. על ידי הגבלת הביקוש בין מוצא 1 ליעד 4 וממוצא 2 ליעד 4, ובו זמנית הגדלת הביקוש בין מוצא 1 ליעד 3, ניתן היה להכיל את כל ביקוש הנסיעות בין 1 ל-4, שעמד כעת על כ-240 נסיעות בלבד, במסלול 1-2-4 ולא נדרש להשתמש במסלול 1-3-4. על ידי הסטת כל הביקושים למסלול 1-2-4 ואי שימוש במסלול 1-3-4 התקבלה מטריצת נסיעות שבה אין כלל נסיעות בכביש מס' 3. מירב הנסיעות ברשת הן בין מוצא 1 ליעד 3 על כביש מס' 2, שהשפעתו על נקודת חישוב הרעש קטנה יותר וכך התקבל שמפלס הרעש בנקודה A, בסיום התהליך, עומד בקריטריון הרעש שנקבע לו.

#### 4. תוצאות

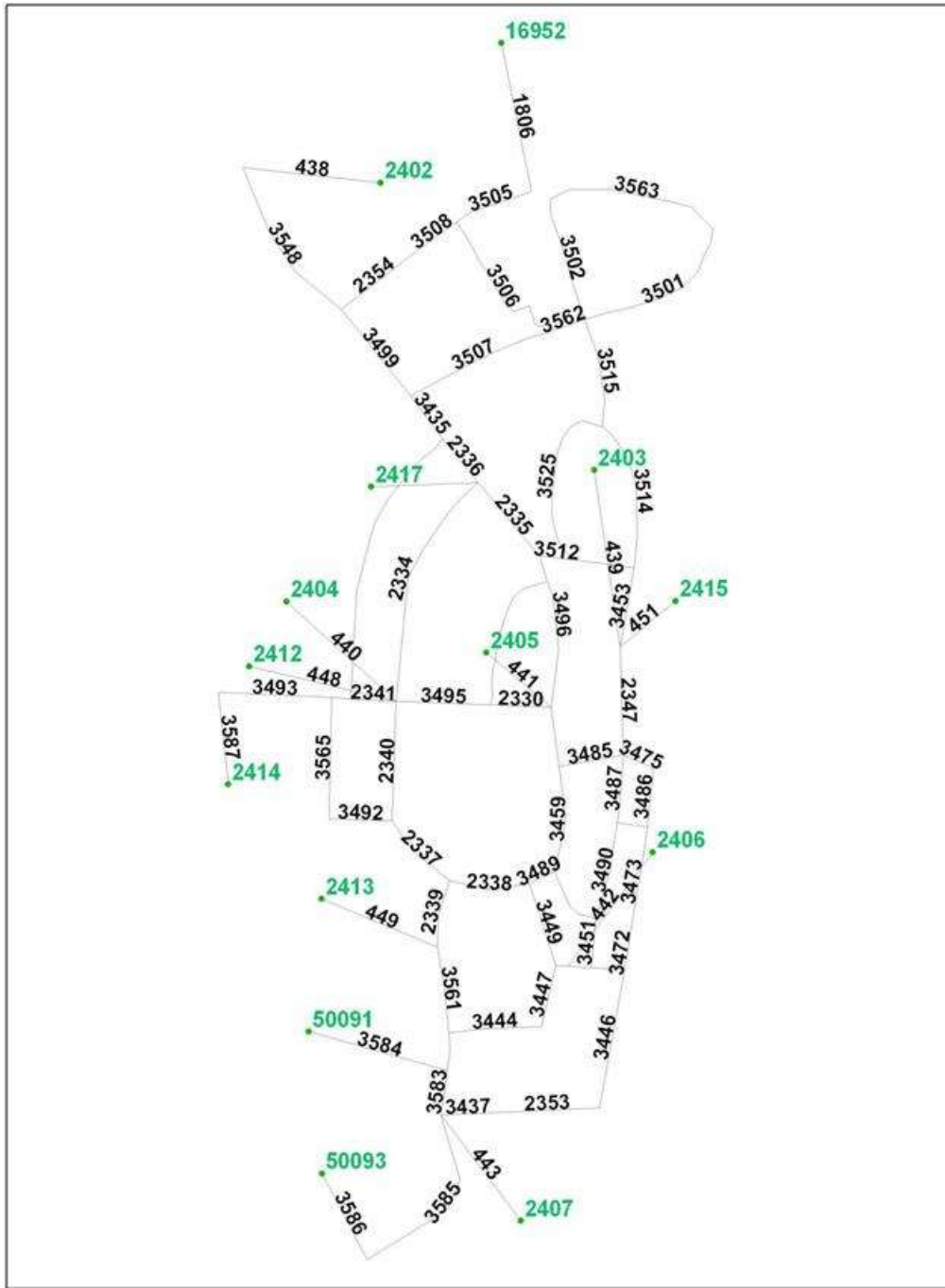
הרשת שנבדקה מבוססת על נתונים אמיתיים של טירת הכרמל . לצורך המחקר , המרחב חולק ל-13 אזורי תנועה, ורשת הדרכים כוללת 68 קטעים. אומנם הנתונים בהם נעשה שימוש הם של רשת קיימת, אולם ההתייחסות הייתה כאל רשת בהקמה, שעדין ניתנת לשינוי . המטרה של הדוגמא הינה לבחון את יכולת ההתמודדות של האלגוריתם ושיטת העבודה המוצעת על גבי רשת אמיתית.

איור מס' 10 מציג את תרשים הרשת ומיקום נקודת חישוב הרעש בה המסומנות כ- rec A-D. איור מס' 11 מציג את תיאור רשת הדרכים בתוכנת ה-TransCad, הערכים מייצגים זיהוי של הקטע (ID). נתוני הרשת מופעים בטבלה מס' 1 בנספח.



איור 10: רשת כבשים ראשית של טירת הכרמל

Figure 10: Main Road Network of Tirat hacarmel



**איור: 11 תיאור רשת הכבישים בתוכנת Transcad**

**Figure 11: Tirat hacarmel Network in Transcad**

הביקוש הכללי ברשת ההתחלתית היה של 1,652 נסיעות. להלן תיאור מטריצת הנסיעות ההתחלתית:



טבלה: 11 מטריצת הביקושים ההתחלתית

Table 11: Initial trip demands

סה"כ	50093	50091	16952	2417	2415	2414	2413	2412	2407	2406	2405	2404	2403	2402	יעדים מוצאים
140	20	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10		2402
92	20	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		50	2403
92	20	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		2	50	2404
92	20	2	2	2	2	2	2	2	2	2		2	2	50	2405
122	20	2	2	2	2	2	2	2	2		2	2	2	80	2406
122	20	2	2	2	2	2	2	2		2	2	2	2	80	2407
122	20	2	2	2	2	2	2		2	2	2	2	2	80	2412
122	20	2	2	2	2	2		2	2	2	2	2	2	80	2413
210	20	10	10	10	10		10	10	10	10	10	10	10	80	2414
92	20	2	2	2		2	2	2	2	2	2	2	2	50	2415
92	20	2	2		2	2	2	2	2	2	2	2	2	50	2417
92	20	2		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	50	16952
92	20		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	50	50091
170		10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	50	50093
1652	260	50	50	50	50	42	50	50	50	50	50	50	50	800	סה"כ

לצורך המחקר, הונח קריטריון רעש מחמיר של 35 dB(A) בנקודות A ו-B וקריטריון של 45 dB(A) בנקודות C ו-D. לאחר ההרצה הראשונה התגלו חריגות מקריטריון הרעש בנקודות A ו-B של 2.6 dB(A) ו-12.8 dB(A) בהתאמה. לאחר הרצת האלגוריתם התקבלו נפחי התנועה, שעל פיהם נדרש התיקון בביקושים והם מוצגים בטבלה מס' 12.

טבלה: 12 השינויים הנדרשים בנפחי התנועה, לאחר האיטרציה הראשונה, על מנת לעמוד בקריטריון הרעש

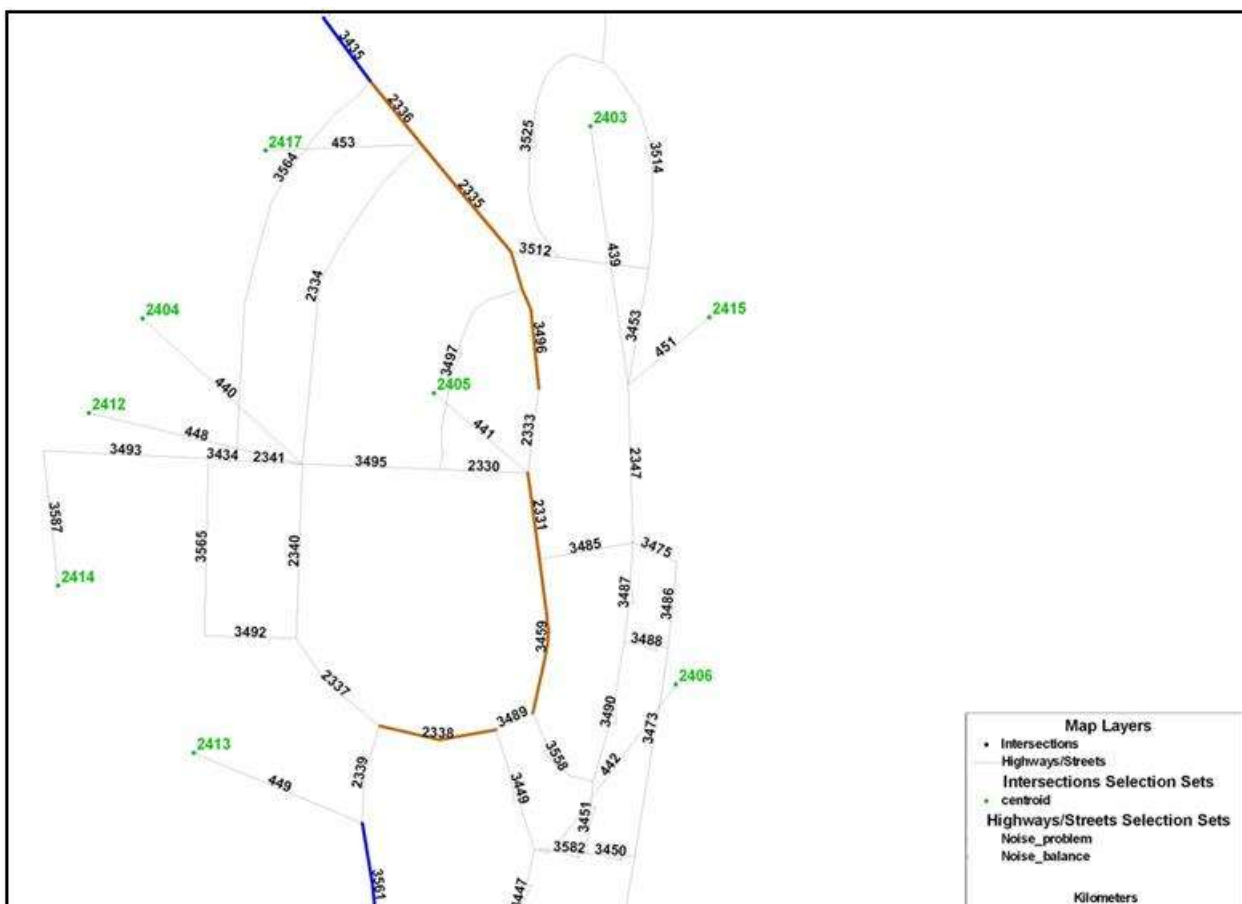
Table 12: The changes needed in traffic volume to meet the noise criterion in the first iteration

קטע	נפח קיים בכ"ר לשעה	נפח נדרש בכ"ר לשעה	אחוז ההפחתה
2331	604	335	45%
2335	686	130	81%
2336	738	140	81%
2338	478	265	45%
3459	548	304	45%
3496	558	106	81%
3552	558	106	81%

כאמור, הביקוש הכללי ברשת ההתחלתית עמד על 1,652 נסיעות. כפי שניתן לראות בטבלה מס' 12, נדרשו הפחתות משמעותיות בנפח התנועה בשבעה כבישים ברשת

על מנת לעמוד בקריטריון הרעש : בארבעה מהכבישים , 2335 , 2336 , 3596 ו-3552, נדרשה הפחתה של כ- 80% בנפח התנועה , ובשלושת הכבישים הנותרים נדרשה הפחתה של 45%. נפחי התנועה הנדרשים הוזנו למודל התחבורה כהגבלות לביקושים ברשת . כפי שהוסבר בפרק המתודולוגיה , נדרש לאזן גם את הביקוש לנסיעות עם חסמים תחתונים בכבישים שאינם קריטיים לנקודת חישוב הרעש . איזון זה נחוץ על מנת לשמור על סך כל הביקוש הכולל קרוב ככל האפשר לסה "כ המקורי.

המפה להלן מציגה את קטעי הרשת עם חסמים תחתונים ועליונים לאחר ההרצה הראשונה:



איור: 12: קטעי הרשת בהם נדרש לערוך שינוי

Figure 12: Road Sections that require flow adjustment

באיטרציה השנייה עמד ביקוש הנסיעות הכללי על 1,812 נסיעות וגם לאחריה לא עמדו מפלסי הרעש בנקודות A ו-B בקריטריון הרעש , אולם החרגות מהקריטריון

היו קטנות משמעותית מהחריגות באיטרציה הראשונה ועמדו על  $1 \text{ dB(A)}$  ו-  $2.2 \text{ dB(A)}$  בהתאמה. נעשתה הרצה נוספת של האלגוריתם והתקבלו תיקונים חדשים לנפחי התנועה המוצגים בטבלה מס' 13.

**טבלה 13: השינויים הנדרשים בנפחי התנועה לאחר האיטרציה השנייה, על מנת לעמוד בקריטריון הרעש**

**Table 13: The changes needed in traffic volume to meet the noise criterion in the second iteration**

קטע	נפח קיים בל"ר לשעה	נפח נדרש בל"ר לשעה	אחוז ההפחתה
2331	333	267	20%
2335	132	80	40%
2336	158	95	40%
2338	254	203	20%
3459	294	235	20%
3564	675	406	40%

לאחר ההרצה השנייה של האלגוריתם נמצא כי כעת יש רק שישה כבישים, לעומת שבעה באיטרציה הקודמת, בהם נדרש תיקון של נפח התנועה על מנת לעמוד בקריטריון הרעש. ההפחתות בנפחים באיטרציה זו היו מתוננות יותר ועמדו על 40% בשלושה כבישים ו- 20% בשלושת הכבישים האחרים. פעם נוספת הוזנו נפחי התנועה הנדרשים כהגבלות לביקושים במודל התחבורה.

באיטרציה השלישית עמד ביקוש הנסיעות הכללי על 1,584 נסיעות. מפלסי הרעש שהתקבלו בנקודות A ו-B היו  $35.3 \text{ dB(A)}$  ו-  $35.7 \text{ dB(A)}$ . שניהם פחות מ-  $1 \text{ dB(A)}$  ממפלס הקריטריון ועל כן הוחלט לעצור את התהליך בנקודה זו.

להלן תיאור מטריצת הנסיעות הסופית:

טבלה:14 מטריצת הביקושים הסופית

Table 14: Final trip demands

סה"כ	50093	50091	16952	2417	2415	2414	2413	2412	2407	2406	2405	2404	2403	2402	יעדים מוצאים
32	3	2	10	3	1	3	1	3	2	1	1	3	1		2402
54	20	1	2		2	6	1	6	2	2	6	6		3	2403
171	33	3	4	2	2	2	2	2	3	2	2		2	110	2404
29	13	1	0		2	2	1	2	1	2		2	2	1	2405
92	27	3	0	0	10	7	2	7	3		7	7	10	7	2406
76	20	2	0	0	2	6	6	6		2	7	6	2	14	2407
237	33	3	4	2	2	2	2		3	2	2	2	2	177	2412
89	33	3	0	0	10	2		2	3	3	8	2	10	11	2413
335	33	17	22		10		10	10	17	10	10	10	10	177	2414
54	20	1	2			6	1	6	2	2	6	6	2	3	2415
43	3	0	1		0	2	0	2	0	0	0	2	0	32	2417
62	3	0		1	2	1	0	1	0	2	0	1	2	50	16952
83	20		0	0	8	6	6	6	2	2	7	6	8	9	50091
226		10	2	1	10	32	32	32	10	10	37	32	10	9	50093
1584	263	47	49	9	62	76	65	84	49	40	93	84	62	601	סה"כ

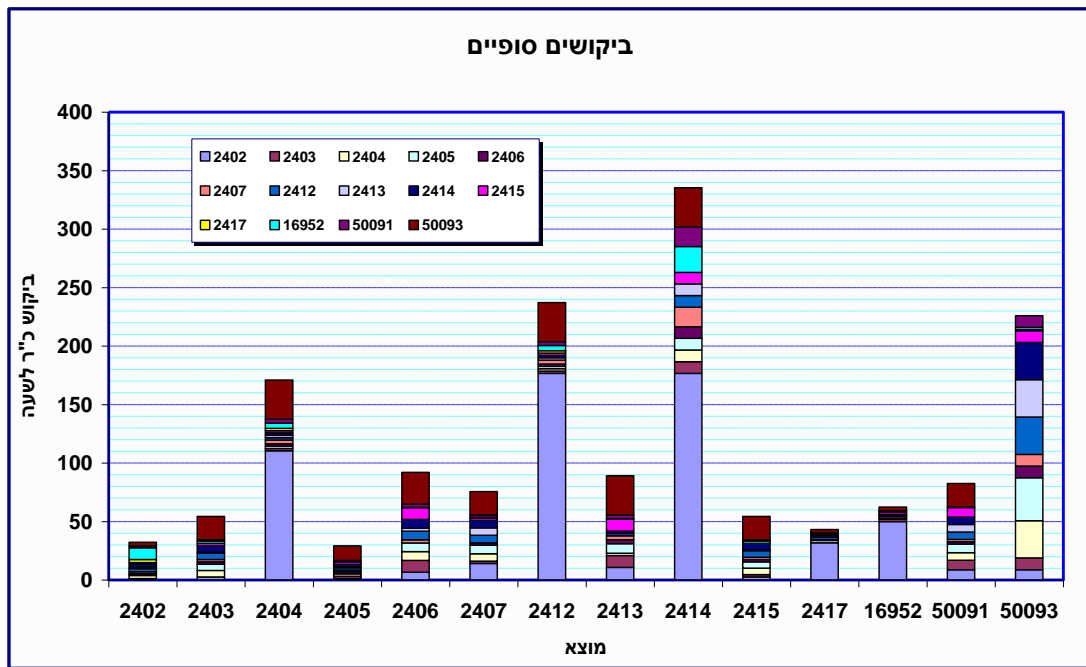
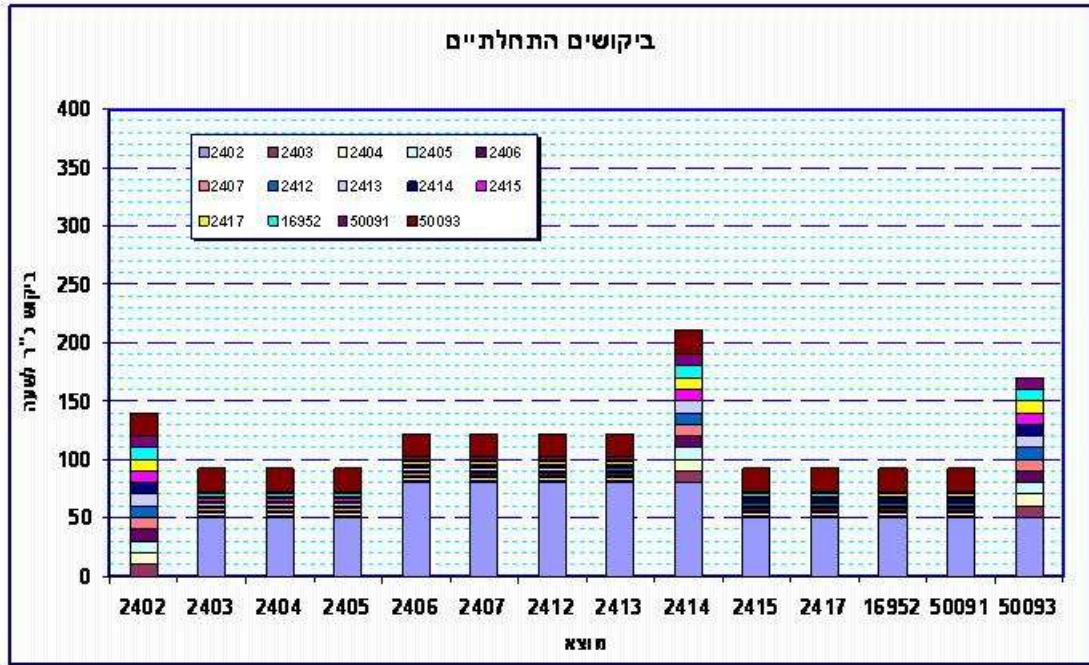
בטבלה 15, להלן, מוצג אחוז השינוי בכמות הנסיעות במטריצה הסופית לעומת המטריצה ההתחלתית.

טבלה:15 אחוז השינוי בכמות הנסיעות במטריצה סופית לעומת התחלתית

Table 15: Percentage of change in the Final to the initial trip demands

סה"כ	50093	50091	16952	2417	2415	2414	2413	2412	2407	2406	2405	2404	2403	2402	יעדים מוצאים
	-77%	-84%	-84%		-74%	-88%	-74%	-87%	-74%	-84%	-90%	-74%	-88%		2402
	-41%		-46%		-100%		175%	-65%	175%		175%	175%		-95%	2403
	86%	67%	67%	121%		-1%			67%	-1%			-1%	121%	2404
	-68%	-37%	-37%	-98%	-100%	-1%		-51%	-37%	-1%			-1%	-98%	2405
	-25%	36%	36%	-92%	-98%	410%	272%	23%	272%	36%		272%	272%	410%	2406
	-38%			-83%	-90%		219%	219%	219%			267%	219%		2407
	94%	67%	67%	121%		-1%			67%	-1%			-1%	121%	2412
	-27%	67%	67%	-87%	-94%	408%			67%	67%	313%		408%	-87%	2413
	60%	67%	67%	121%	-100%	-1%			67%	-1%			-1%	121%	2414
	-41%		-46%		-100%		175%	-65%	175%		175%	175%		-95%	2415
	-53%	-86%	-86%	-37%		-97%		-90%	-86%	-93%	-97%		-97%	-36%	2417
	-32%	-84%	-84%		-74%		-74%	-88%	-74%	-84%		-94%	-74%		16952
	-10%			-83%	-90%	307%	219%	219%	219%			267%	219%	307%	50091
	33%			-82%	-89%		219%	219%	219%			267%	219%		50093
	-4%	1%	-6%	-2%	-82%	23%	82%	30%	69%	-2%	-19%	86%	69%	23%	סה"כ

- \* תאים המסומנים באדום - ירידה בביקוש הסופי לעומת ההתחלה.
- \* תאים המסומנים בצהוב - עליה בביקוש הסופי לעומת ההתחלה.
- \* תאים שאינם מסומנים - ללא שינוי בביקוש.



איור 13: ביקוש נסיעות מכל המוצאים בתחילת התהליך ובסופו  
 Figure 13: Initial and final trip demand

מעיון בטבלה מס' 15 ואיור מס' 13 ניתן לראות כי התפלגות הנסיעות במטריצה הסופית שונה משמעותית מזו שבמטריצת הנסיעות ההתחלתית תוך שמירה על סך הנסיעות הכללי. במטריצה ההתחלתית היו אומנם שלושה מוקדים עיקרים לביקוש הנסיעות: 2402, 2414 ו-50093, אולם הם היוו יחדיו רק כ- 31% מכלל הביקושים, ויתר הביקושים התפזרו על פני המוצאים האחרים במערכת בצורה כמעט אחידה.

במטריצה הסופית, לעומת זאת, התקבלו ארבעה מוקדי ביקוש מובהקים : 2404, 2414, 2414 ו-50093 המהווים כעת כ-61% מכלל הביקושים.

המשמעות המעשית של התוצאות שהתקבלו היא שעל מנת להגיע לרשת דרכים אופטימלית, מהפן האקוסטי, נדרש לשנות את ייעודי הקרקע בשכונה. כאמור, הדוגמא כללה רשת קיימת וכמובן שלא ניתן לשנות בה את יעודי הקרקע על פי הממצאים. אולם אם היה מדובר בשכונה בהקמה ניתן היה להשתמש במי דע שקיבלנו על מנת לתכנן את ייעודי הקרקע בצורה מיטבית מהפן האקוסטי. התוצאות המלאות של אלגוריתם העזר לחישוב הרעש של הרשת מוצגות בנספח א'.

## 5. סיכום והסקת מסקנות

### 1.5 דיון

מטרת העבודה הייתה לפתח מודל לקביעת מפלס הרעש האופטימלי במערכת דרכים עירונית על ידי שינוי הביקושים ברשת תוך שימוש במפלסי הרעש (מתורגמים לכמות כלי רכב) כהגבלה על הביקושים לנסיעות במודל הצבת הנסיעות ברכב פרטי.

המוטיבציה למחקר הייתה כפולה, מצד אחד בעיה מתמטית ומצד שני בעיה סביבתית. מהפן המתמטי ההתמקדות הייתה בשינוי בעיית האופטימיזציה המוכרת לפתרון הצבת נסיעות, כך שפונקציית הביקוש תהיה תלויה במפלס הרעש. מהפן הסביבתי ההתמקדות הייתה בהעלאת פתרון אפשרי להפחתת מפלסי הרעש כתוצאה מכבישים בשכונות מגורים חדשות.

בהיבט המתמטי עמדה בפניי בעיה משולבת של אופטימיזציית תכנון תחבורה וחישוב רעש כבישים. הניסוח המתמטי של הבעיה המשולבת דמה לניסוח המקובל לבעיית הצבת נסיעות עם ביקוש גמיש, אולם פונקציית הביקוש הייתה תלויה במפלס הרעש. המחקר התמקד בפיתוח אלגוריתם לפתרון הבעיה כשה נחה המרכזית היא כי הביקוש בין כל זוג מוצא-יעד לא קבוע וקיימת דרגת חופש לקביעתו, במטרה להגיע למצב אופטימלי מבחינת רעש. מאידך, הוכנס לתהליך מנגנון של חסמים תחתונים, על מנת לוודא שסך כל הביקוש (בכל המוצאים-יעדים יחד) נשמר קבוע בכדי להימנע מלהגיע לביקושים אפסיים במערכת. בסיום התהליך מתקבלת מטריצה נסיעות מוצא-יעד של פיה ניתן לתכנן את השכונה בצורה מיטבית.

בהיבט הסביבתי הקושי היה להציע מודל שישנה את הגישה לתכנון אקוסטי של שכונות מגורים חדשות. בניגוד למקובל בתהליך התכנון כיום, שבו רק לאחר שכל מרכיבי השכונה מתוכננים וקבועים מחשבים את מפלס הרעש הצפוי, המודל המוצא ייקבע תחילה את מפלסי הרעש הרצויים באזורים השונים בשכונה, ומתוכם ייגזרו מיקום וכמות יחידות הדיוור בשכונה. הבעיה המתעוררת מהדרך המקובלת היא, שלאחר שנקבעו כל המרכיבים בשכונה קשה מאוד לשנותם ואם בחישוב האקוסטי נתגלתה חריגה ממפלסי הרעש הרצויים, הטיפול בה הוא באמצעות אמצעי מיגון סביבתיים כגון קירות אקוסטיים, סוללות או מיגון דירתי למבנים

החשופים לרעש. בדרך החדשה שהצעתי נעשה שימוש בקריטריוני רעש פרטניים לאזורים השונים בשכונה, על מנת לקבוע את מיקום יעודי הקרקע בשכונה.

המודל והאלגוריתם שפותח במחקר זה הודגמו על בסיסי נתונים אמיתיים של רשת דרכים. נערכו שלוש איטרציות עד להתכנסות התהליך והתקבל כי התפלגות הנסיעות במטריצה הסופית שונה משמעותית מזו שבמטריצת הנסיעות ההתחלתית תוך שמירה על סך הנסיעות הכללי.

מההיבט המתמטי פותחה שיטה לקביעת הביקוש האופטימלי לנסיעות, ברשת דרכים, תוך שימוש באילוצים לביקושים. המודל שפותח במחקר איפשר לפתור את בעיית תכנון הצבת נסיעות ברכב פרטי כאשר הביקוש בין כל מוצא-יעד גמיש ומכנסים אילוץ על ביקוש זה. אומנם לא הוכחתי קיום ויחידות של הפתרון אולם בדוגמא שנבדקה התקבלה התכנסות של רשת הדרכים.

מההיבט הסביבתי נבדקה האפשרות לתכנון מיקום ייעודי קרקע בשכונת מגורים על פי מפלסי הרעש הצפויים מהכבישים בשכונה. באופן תיאורטי נראה כי הדבר אפשרי, אך נושא האקוסטיקה אינו הנושא הסביבתי היחיד בעת תכנון שכונת מגורים. אומנם יש חשיבות גדולה לנושא הרעש ורצון רב למזער את הנזקים הנגרמים בגינו אך יש לזכור כי יש פרמטרים נוספים המשפיעים על תכנון השכונה. גם אם נצליח לתכנן שכונה כך שתענה על כל הדרישות האקוסטיות המקדימות אין זה מבטיח פתרון לשאר הבעיות הסביבתיות בשכונה.

## **2.5 תחומי מחקר עתידיים**

המשך המחקר יכול להתמקד במספר תחומים:

- מיכון התהליך - במחקר זה שולבו שתי תכנות נפרדות TransCad עבור מודל הצבת הנסיעות ו-SoundPLAN עבור חישובי הרעש. המשך אפשרי למחקר יהיה פיתוח תוכנה אחת שתשלב את שני המודלים. תוכנה כזו תספק כלי נוח לעבודה, כך שבהרצה אחת יתקבלו הנתונים הן עבור הצבות הנסיעה והן עבור מפלסי הרעש המתקבלים.
- חקירה תיאורטית של תכונות הפתרון - במחקר זה לא נבדקו התנאים לקיום הפתרון ויחידות שלו. ניתן לערוך מחקר המשך אשר יבדוק מהם התנאים שיבטיחו קיים פתרון ויחידות שלו.
- חקירת אלגוריתמים לפתרון הבעיה המשולבת תחבורה- רעש - ניתן לשפר ולפתח אלגוריתם נוספים שיבדקו את הקשר שבין מודל הצבת נסיעות



למודל לחישוב רעש ולנסות להוסיף או להחליף את האילוצים שנבדקו  
במחקר זה.

- הרחבת המודל – במחקר זה נעשה שימוש בהצבת נסיעות לרכב פרטי בלבד.  
מכיוון שהרכב התנועה משפיעה גם על מודל הצבת הנסיעות וגם על מודל  
הרעש ניתן, במחקר המשך, לבחון שימוש בהרכב תנועה שונה לדוגמא  
הוספת משאיות או/ו אוטובוסים להרכב התנועה.

## 6. רשימת מראי מקום

- Beckmann M., McGuire, C.B and Winsten C.B, "Studies in the Economics of Transportation", *Yale University Press*, 1956
- Bell, M.G.H. and Iida, Y., "Transportation Network Analysis", *Wiley*, 1997
- Beranek, L.L. "Noise and Vibration Control" *McGraw-Hill*, 1971.
- Beranek, L.L., Ver I.L., "Noise and Vibration Control Engineering – Principals and Applications" *Wiley*, 1992.
- Bhasker, A., Chung E., Kuwahara M. and Oshino, Y., "Integration of Road Traffic Noise Model (ASJ) and Traffic Simulation (AVENUE) for Built-Up Area", *Advancing Transport*, 16, pp. 783-794, 2004.
- Department of Transport, Welsh Office. "Technical Guides Calculation of Road Traffic Noise", *HMSO*, London, 1988.
- European Commission. "Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise." <http://ec.europa.eu/environment/noise/directive.htm>
- Fleming, G. G., A. Rapoza, and C. Lee. "Development of National Reference Energy Mean Emission Levels for the FHWA Traffic Noise Model." Report FHWA-PD-96-008 and DOT-VNTSC-96-2. *John A. Volpe National Transportation Systems Center, Acoustics Facility*, Cambridge, Mass., Nov. 1995.
- Harris, C.M. "Handbook of Noise Control" 2<sup>nd</sup> Edition, *McGraw-Hill* 1979.
- Houtmen W.J and Immers H.B, "A Traffic Assignment Model to Reduce Noise Annoyance in Urban Networks", *Transportation Research Record*, 1143, pp.17-21, 1986.
- IMAGINE, "Review of the Suitability of Traffic Models for Noise Modelling", *Transport & Mobility LEUVEN*, 2005.
- ISO 9613-2. "Acoustics – Attenuation of Sound During Propagation Outdoors- Part 2: General Method of Calculation", *Acoustics Society of America*, 1999.
- Jonasson, H., Nielsen, H.L. "Road traffic noise: Nordic prediction method", *Nordic Council of Ministers*, Copenhagen, 2, 1996.

Papi, J. and Halleman, B, "Road Traffic Noise the Road Sector's Perspective", *the European Union Road Federation*, 2004.

Patriksson M., "The Traffic Assignment Problem: Models and Methods", *VSP, Utrecht*, 1994.

Rilett R.L and Benedek M.C, "Traffic Assignment Under Environmental and Equity Objectives", *Transportation Research Record*, 1443, 1994.

Sheffi, Y., "Urban Transportation Networks", *Prentice Hall*, 1985.

US Department of Transportation. "FHWA Traffic Noise Model, Technical Manual", *US Department of transportation*, 1998 version 2.5, 2004.

Wardrop, J.P, "Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research", *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*, Part II, pp. 325-378, 1952

## נספח א' - רשת טירת הכרמל, נתונים ותוצאות

טבלה א 1 : נתוני הכבישים מערכת

Table A1: Arc parameters

מספר חופשית בקמ"ש	קיבולת בכ"ר לשעה	אורך בק"מ	שם הכביש
60	546	0.07	3488
60	1411	0.07	3489
60	546	0.24	3490
60	1364	0.15	3492
60	5644	0.28	3493
60	5644	0.23	3495
60	5644	0.17	3496
60	546	0.36	3497
70	4174	0.27	3499
60	1034	0.41	3501
60	3527	0.30	3502
50	1066	0.20	3505
69	807	0.38	3506
60	4909	0.36	3507
48	1066	0.12	3508
60	2728	0.08	3512
60	546	0.37	3514
60	2728	0.27	3515
60	546	0.43	3525
88	6000	0.47	3529
60	5644	0.43	3548
60	4938	0.16	3551
60	5644	0.07	3552
49	3309	0.23	3553
60	1364	0.16	3558
60	1909	0.21	3561
60	5169	0.10	3562
60	2822	0.43	3563
60	4938	0.40	3564
60	1909	0.29	3565
60	3386	0.26	3566
60	546	0.06	3582
60	2728	0.11	3583
60	3273	0.47	3585

מספר חופשית בקמ"ש	קיבולת בכ"ר לשעה	אורך בק"מ	שם הכביש
90	6000	0.90	2328
60	2822	0.15	2330
60	2822	0.15	2331
60	5644	0.14	2333
60	1975	0.59	2334
60	5644	0.23	2335
60	5644	0.14	2336
60	1411	0.20	2337
60	1411	0.20	2338
60	1909	0.17	2339
60	1411	0.29	2340
60	5644	0.11	2341
69	5079	0.46	2342
89	6000	0.40	2343
60	3273	0.26	2347
90	6000	0.60	2352
60	2728	0.25	2353
69	807	0.23	2354
60	5644	0.05	3434
60	5644	0.13	3435
60	3386	0.30	3436
60	2728	0.13	3437
60	1909	0.09	3443
60	546	0.23	3444
60	1091	0.34	3446
60	546	0.15	3447
60	546	0.03	3448
60	546	0.21	3449
60	546	0.08	3450
60	1364	0.12	3451
60	1091	0.20	3453
60	2728	0.15	3457
60	2822	0.26	3459
60	1091	0.08	3472
60	1091	0.27	3473
60	1091	0.08	3475
60	2822	0.16	3485
60	1091	0.14	3486
60	546	0.17	3487

Table A2: Assignment result

ריצה 3			ריצה 2			ריצה 1		
מהירות קמ"ש	נפח כ"ר לשעה	כביש	מהירות קמ"ש	נפח כ"ר לשעה	כביש	מהירות קמ"ש	נפח כ"ר לשעה	כביש
19	117	2330	19	131	2330	19	80	2330
56	267	2331	56	333	2331	55	604	2331
18	72	2333	18	116	2333	18	558	2333
32	19	2334	32	28	2334	32	46	2334
55	80	2335	55	132	2335	55	686	2335
55	120	2336	55	158	2336	55	738	2336
22	301	2337	22	280	2337	22	150	2337
56	213	2338	56	254	2338	55	478	2338
20	514	2339	19	533	2339	18	628	2339
28	224	2340	28	208	2340	28	100	2340
15	432	2341	15	545	2341	15	236	2341
26	210	2347	26	226	2347	26	142	2347
48	85	2353	48	85	2353	48	84	2353
26	101	2354	26	118	2354	26	132	2354
47	335	3434	47	412	3434	47	202	3434
17	615	3435	17	833	3435	17	952	3435
23	495	3436	23	675	3436	23	234	3436
17	85	3437	17	85	3437	17	84	3437
47	536	3443	47	540	3443	47	536	3443
19	0	3444	19	0	3444	19	0	3444
51	85	3446	51	85	3446	51	84	3446
18	0	3447	18	0	3447	18	0	3447
5	92	3448	5	107	3448	5	122	3448
23	92	3449	23	107	3449	23	122	3449
49	40	3450	49	42	3450	49	50	3450
12	0	3451	12	0	3451	12	0	3451
23	18	3453	23	27	3453	23	138	3453
19	12	3457	19	21	3457	19	132	3457
56	235	3459	56	294	3459	56	548	3459
51	91	3472	51	92	3472	51	102	3472
56	91	3473	56	92	3473	56	102	3473
12	67	3475	12	68	3475	12	78	3475
15	153	3485	15	170	3485	15	96	3485
18	67	3486	18	68	3486	18	78	3486
56	24	3487	56	24	3487	56	24	3487
7	24	3488	7	24	3488	7	24	3488
50	235	3489	50	294	3489	47	548	3489
56	0	3490	56	0	3490	56	0	3490
18	77	3492	18	72	3492	18	50	3492
22	412	3493	22	484	3493	22	252	3493
25	117	3495	25	131	3495	25	80	3495
55	72	3496	55	116	3496	55	558	3496
25	0	3497	25	0	3497	25	0	3497
28	615	3499	28	833	3499	28	952	3499
33	0	3501	33	0	3501	33	0	3501

ריצה 3		
מהירות קמ"ש	נפח כ"ר לשעה	כביש
28	0	3502
21	111	3505
28	10	3506
33	0	3507
44	101	3508
8	8	3512
32	6	3514
27	10	3515
34	4	3525
34	633	3548
51	72	3552
19	0	3558
42	536	3561
14	10	3562
53	0	3563
33	495	3564
22	77	3565
25	40	3582
52	478	3583
58	489	3585

ריצה 2		
מהירות קמ"ש	נפח כ"ר לשעה	כביש
28	0	3502
21	128	3505
28	10	3506
33	0	3507
44	118	3508
8	17	3512
32	6	3514
27	10	3515
34	4	3525
34	836	3548
51	116	3552
19	0	3558
42	540	3561
14	10	3562
53	0	3563
32	675	3564
22	72	3565
25	42	3582
52	479	3583
5	132	3584
58	485	3585
30	485	3586
31	484	3587

ריצה 1		
מהירות קמ"ש	נפח כ"ר לשעה	כביש
28	0	3502
21	142	3505
28	10	3506
33	0	3507
44	132	3508
8	128	3512
32	6	3514
27	10	3515
34	4	3525
34	940	3548
51	558	3552
19	0	3558
42	536	3561
14	10	3562
53	0	3563
33	234	3564
22	50	3565
25	50	3582
53	466	3583
5	142	3584
58	430	3585
30	430	3586
31	252	3587

טבלה א3 : תוצאות אלגוריתם עזר - ריצה ראשונה

Table A3: Algorithm result - 1<sup>st</sup> run

			קריטריון הרעש	מפלט רצוי מכביש		מפלט מקסמלי מכביש	עמידה בקריטריון	מפלט רעש מחושב	שם המקבל
			35			32.3	OVER	37.6	A
Qnew	10logQ	Qex	הפרש במפלט	מפלט רעש רצוי	אחוז ההשפעה	בדיקת השפעה	E	מפלט רעש	כביש
304	24.8	548	-2.6	29.7	30%	32.3	1698	32.3	3459
265	24.2	478	-2.6	27.5	18%	30.1	1023	30.1	2338
335	25.3	604	-2.6	26.8	15%	29.4	871	29.4	2331
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	234	23.7	3489
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	234	23.7	2339
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	214	23.3	3496
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	174	22.4	2335
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	155	21.9	3561
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	110	20.4	2337
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	102	20.1	2333
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	98	19.9	2340
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	71	18.5	2336
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	63	18.0	3583
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	49	16.9	3443
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	48	16.8	3495
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	47	16.7	3552
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	44	16.4	3436
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	37	15.7	3548
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	36	15.6	2341
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	35	15.5	3485
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	34	15.3	3564
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	33	15.2	3449
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	33	15.2	3493
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	31	14.9	3499
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	30	14.8	2330
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	27	14.3	3446
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	22	13.5	2334
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	22	13.4	3434
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	19	12.9	3435
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	17	12.3	3487
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	14	11.6	3492
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	14	11.6	3473
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	14	11.6	3565
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	13	11.0	2353
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	9	9.3	3512
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	6	8.1	3457
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	6	7.7	3450
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	3	4.5	3582
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	3	4.3	3437
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	2	3.9	3508
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	2	3.8	2354
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	1	-2.3	3514
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	1	-2.5	3525

			קריטריון רעש	מפלס רצוי מכביש		מפלס מקסמלי מכביש	עמידה בקריטריון	מפלס רעש מחושב	שם המקבל
			35			32.3	OVER	37.6	A
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	0	-4.6	3506
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	0	-4.8	3515
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	0	-9.6	3562

				מפלס רצוי מכביש		מפלס מקסמלי מכביש	עמידה בקריטריון	מפלס רעש מחושב	שם המקבל
			35			40.4	OVER	42.2	B
Qnew	10logQ	Qex	הפרש במפלס	מפלס רעש רצוי	אחוז ההשפעה	בדיקת השפעה	E	מפלס רעש	כביש
130	21.2	686	-7.2	33.2	66%	40.4	10965	40.4	2335
140	21.5	738	-7.2	26.2	13%	33.4	2188	33.4	2336
106	20.3	558	-7.2	21.6	5%	28.8	759	28.8	3496
106	20.3	558	-7.2	20.4	3%	27.6	575	27.6	3552
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	347	25.4	3564
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	339	25.3	2334
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	224	23.5	3435
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	186	22.7	3499
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	162	22.1	2331
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	141	21.5	3459
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	126	21.0	3548
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	112	20.5	3512
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	74	18.7	2333
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	71	18.5	3436
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	60	17.8	2338
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	42	16.2	3457
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	25	14.0	3561
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	25	14.0	3493
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	19	12.8	2341
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	18	12.6	3489
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	17	12.2	2339
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	15	11.9	3495
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	14	11.6	2340
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	14	11.5	3434
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	11	10.4	3583
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	10	10.1	3443
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	10	10.0	2354
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	10	9.8	3508
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	9	9.6	2330
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	7	8.4	3446
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	7	8.2	2337
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	6	8.1	3525
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	6	8.0	3485
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	5	7.0	3565
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	4	6.0	3487



			מפלט רצוי מכביש			מפלט מקסמלי מכביש	עמידה בקריטריון	מפלט רעש מחושב	שם המקבל
						40.4	OVER	42.2	B
		35							
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	4	5.6	3449
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	4	5.5	2353
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	3	5.0	3473
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	3	4.2	3514
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	2	2.7	3492
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	2	2.3	3515
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	2	2.0	3506
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	1	0.8	3450
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	1	-1.4	3437
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	1	-2.8	3562
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	1	-3.0	3582

			מפלט רצוי מכביש קריטריון הרעש			מפלט מקסמלי מכביש	עמידה בקריטריון	מפלט רעש מחושב	שם המקבל
						31.0	OK	36.1	C
		45							
Qnew	10logQ	Qex	הפרש במפלט	מפלט רעש רצוי	אחוז ההשפעה	בדיקת השפעה	E	מפלט רעש	כביש
0	19.2	84	0.0	0.0	31%	31.0	1259	31.0	3446
0	19.2	84	0.0	0.0	29%	30.7	1175	30.7	2353
0	27.3	536	0.0	0.0	6%	24.1	257	24.1	3561
0	26.7	466	0.0	0.0	6%	24.1	257	24.1	3583
0	27.3	536	0.0	0.0	5%	23.3	214	23.3	3443
0	27.4	548	0.0	0.0	5%	23.0	200	23.0	3459
0	26.8	478	0.0	0.0	5%	22.7	186	22.7	2338
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	65	18.1	2331
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	59	17.7	2339
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	59	17.7	3489
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	44	16.4	3496
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	41	16.1	3473
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	37	15.7	2335
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	29	14.6	3449
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	27	14.3	3437
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	23	13.6	3450
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	18	12.5	2336
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	14	11.5	3548
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	12	10.7	2333
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	11	10.3	3552
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	10	10.0	3499
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	10	9.9	2337
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	10	9.8	3582
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	7	8.7	3564
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	6	8.0	3493
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	6	7.9	3436
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	6	7.7	2340

			מפלט רצוי מכביש קריטריון הרעש			מפלט מקסמלי מכביש	עמידה בקריטריון	מפלט רעש מחושב	שם המקבל
			45			31.0	OK	36.1	C
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	5	7.4	3435
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	5	7.2	3487
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	4	6.0	3485
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	4	5.5	2341
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	3	4.8	2334
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	3	4.4	3434
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	3	4.3	3495
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	2	3.1	3565
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	2	2.7	2330
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	2	2.5	3512
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	2	2.1	3492
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	2	2.0	3457
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	1	-0.4	3508
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	1	-0.7	2354
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	0	-7.4	3514
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	0	-8.1	3525
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	0	-9.1	3506
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	0	-9.4	3515
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	0	-14.1	3562

			מפלט רצוי מכביש קריטריון הרעש			מפלט מקסמלי מכביש	עמידה בקריטריון	מפלט רעש מחושב	שם המקבל
			45			27.8	OK	34.1	D
Qnew	10logQ	Qex	הפרש במפלט	מפלט רעש רצוי	אחוז ההשפעה	בדיקת השפעה	E	מפלט רעש	כביש
0	28.4	686	0.0	0.0	23%	27.8	603	27.8	2335
0	28.7	738	0.0	0.0	21%	27.4	550	27.4	2336
0	29.8	952	0.0	0.0	9%	23.8	240	23.8	3499
0	29.8	952	0.0	0.0	7%	22.5	178	22.5	3435
0	29.7	940	0.0	0.0	6%	22.2	166	22.2	3548
0	27.5	558	0.0	0.0	6%	22.2	166	22.2	3496
0	27.8	604	0.0	0.0	4%	20.3	107	20.3	2331
0	23.7	234	0.0	0.0	4%	19.8	95	19.8	3564
0	27.4	548	0.0	0.0	3%	18.8	76	18.8	3459
0	27.5	558	0.0	0.0	3%	18.6	72	18.6	3552
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	32	15.0	3508
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	31	14.9	3515
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	28	14.4	3506
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	26	14.2	2333
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	26	14.2	2338
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	21	13.3	2334
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	19	12.9	2354
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	16	12.1	3512
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	15	11.8	3436

			מפלים רצוי הרעש		מפלים מקסמלי מכביש	עמידה בקריטריון	מפלים רעש מחושב	שם המקבל	
			45		27.8	OK	34.1	D	
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	14	11.6	3562
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	12	10.9	3561
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	12	10.9	3457
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	10	10.0	3525
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	9	9.3	3493
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	8	9.2	3489
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	7	8.5	2339
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	6	7.7	3583
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	5	7.3	3443
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	5	7.1	3514
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	5	6.8	2341
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	4	6.3	2340
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	4	5.9	3446
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	4	5.7	3434
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	4	5.5	3495
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	3	4.1	2337
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	3	4.0	3485
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	2	3.7	2330
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	2	3.0	2353
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	2	2.5	3487
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	2	2.3	3449
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	2	2.3	3473
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	2	2.0	3565
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	1	-1.6	3492
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	1	-1.9	3450
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	0	-4.0	3437
0	0.0	0	0.0	0.0	0%	NO	0	-6.0	3582

Table A4: Algorithm result - 2<sup>ed</sup> run

			קריטריון הרעש	מפלט רצוי מכביש		מפלט מקסמלי מכביש	עמידה בקריטריון	מפלט רעש מחושב	שם המקבל
			35			29.6	OVER	36.0	A
Qnew	10logQ	Qex	הפרש במפלט	מפלט רעש רצוי	אחוז ההשפעה	בדיקת השפעה	E	מפלט רעש	כביש
235	23.7	294	-1.0	28.6	0.23	29.6	912	29.6	3459
203	23.1	254	-1.0	26.5	0.14	27.5	562	27.5	2338
267	24.3	333	-1.0	25.9	0.12	26.9	490	26.9	2331
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	204	23.1	2340
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	204	23.1	2337
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	195	22.9	2339
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	158	22.0	3561
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	141	21.5	3489
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	126	21.0	3436
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	93	19.7	3564
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	85	19.3	2341
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	79	19.0	3495
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	63	18.0	3493
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	63	18.0	3485
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	62	17.9	3583
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	50	17.0	3443
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	49	16.9	2330
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	44	16.4	3434
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	44	16.4	3496
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	33	15.2	2335
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	33	15.2	3548
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	30	14.7	3449
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	28	14.4	3446
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	27	14.3	3499
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	21	13.3	2333
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	21	13.2	3492
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	21	13.2	3565
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	17	12.3	3487
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	17	12.3	3435
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	15	11.9	2336
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	13	11.3	2334
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	13	11.1	3473
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	13	11.0	2353
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	10	9.9	3552
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	5	6.9	3450
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	3	4.3	3437
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	2	3.7	3582
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	2	3.4	3508
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	2	3.3	2354
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	1	0.5	3512
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	1	0.1	3457
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	1	-2.3	3514

			קריטריון הרעש	מפלט רצוי מכביש		מפלט מקסמלי מכביש	עמידה בקריטריון	מפלט רעש מחושב	שם המקבל
			35			29.6	OVER	36.0	A
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	1	-2.5	3525
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	0	-4.6	3506
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	0	-4.8	3515
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	0	-9.6	3562

			קריטריון הרעש	מפלט רצוי מכביש		מפלט מקסמלי מכביש	עמידה בקריטריון	מפלט רעש מחושב	שם המקבל
			35			33.2	OVER	37.2	B
Qnew	10logQ	Qex	הפרש במפלט	מפלט רעש רצוי	אחוז ההשפעה	בדיקת השפעה	E	מפלט רעש	כביש
80	19.0	132	-2.2	31.0	0.40	33.2	2089	33.2	2335
406	26.1	675	-2.2	27.6	0.18	29.8	955	29.8	3564
95	19.8	158	-2.2	24.5	0.09	26.7	468	26.7	2336
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	204	23.1	2334
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	204	23.1	3436
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	195	22.9	3435
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	162	22.1	3499
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	158	22.0	3496
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	120	20.8	3552
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	112	20.5	3548
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	93	19.7	2331
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	76	18.8	3459
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	48	16.8	3493
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	45	16.5	2341
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	33	15.2	2338
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	30	14.8	2340
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	29	14.6	3434
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	26	14.1	3561
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	26	14.1	3495
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	15	11.9	2333
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	15	11.7	3512
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	15	11.7	2330
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	14	11.4	2339
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	12	10.9	2337
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	11	10.5	3485
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	11	10.4	3583
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	11	10.4	3489
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	10	10.2	3443
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	9	9.5	2354
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	9	9.3	3508
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	7	8.6	3565
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	7	8.4	3446
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	7	8.2	3457

			קריטריון הרעש	מפלס רצוי מכביש		מפלס מקסמלי מכביש	עמידה בקריטריון	מפלס רעש מחושב	שם המקבל
			<b>35</b>			<b>33.2</b>	<b>OVER</b>	<b>37.2</b>	<b>B</b>
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	6	8.1	3525
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	4	6.0	3487
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	4	5.5	2353
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	3	5.1	3449
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	3	4.5	3473
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	3	4.3	3492
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	3	4.2	3514
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	2	2.3	3515
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	2	2.0	3506
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	1	0.1	3450
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	1	-1.4	3437
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	1	-2.8	3562
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	0	-3.8	3582

			קריטריון הרעש	מפלס רצוי מכביש		מפלס מקסמלי מכביש	עמידה בקריטריון	מפלס רעש מחושב	שם המקבל
			<b>45</b>			<b>31.1</b>	<b>OK</b>	<b>35.9</b>	<b>C</b>
Qnew	10logQ	Qex	הפרש במפלס	מפלס רעש רצוי	ההשפעה אחוז	בדיקת השפעה	E	מפלס רעש	כביש
0	19.3	85	0.0	0.0	0.33	31.1	1288	31.1	3446
0	19.3	85	0.0	0.0	0.31	30.8	1202	30.8	2353
0	27.3	540	0.0	0.0	0.07	24.2	263	24.2	3561
0	26.8	479	0.0	0.0	0.07	24.1	257	24.1	3583
0	27.3	540	0.0	0.0	0.06	23.4	219	23.4	3443
0	24.7	294	0.0	0.0	0.03	20.3	107	20.3	3459
0	24.0	254	0.0	0.0	0.03	20.1	102	20.1	2338
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	49	16.9	2339
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	37	15.7	2331
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	36	15.6	3473
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	35	15.5	3489
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	28	14.4	3437
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	25	14.0	3449
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	20	13.1	3564
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	19	12.8	3450
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	18	12.6	2337
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	18	12.5	3436
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	13	11.0	3548
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	12	10.9	2340
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	12	10.8	3493
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	9	9.6	3496
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	9	9.4	3499
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	8	9.2	2341
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	8	9.0	3582
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	7	8.5	2335
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	7	8.4	3485

			קריטריון הרעש	מפלס רצוי מכביש		מפלס מקסמלי מכביש	עמידה בקריטריון	מפלס רעש מחושב	שם המקבל
			45			31.1	OK	35.9	C
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	6	7.5	3434
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	5	7.2	3487
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	5	6.8	3435
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	4	6.4	3495
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	4	5.9	2336
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	3	4.8	2330
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	3	4.6	3565
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	2	3.9	2333
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	2	3.7	3492
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	2	3.5	3552
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	2	2.6	2334
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	1	-0.9	3508
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	1	-1.2	2354
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	0	-6.0	3457
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	0	-6.3	3512
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	0	-7.4	3514
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	0	-8.1	3525
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	0	-9.1	3506
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	0	-9.4	3515
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	0	-14.1	3562

			קריטריון הרעש	מפלס רצוי מכביש		מפלס מקסמלי מכביש	עמידה בקריטריון	מפלס רעש מחושב	שם המקבל
			45			24.2	OK	31.7	D
Qnew	10logQ	Qex	הפרש במפלס	מפלס רעש רצוי	אחוז ההשפעה	בדיקת השפעה	E	מפלס רעש	כביש
0	28.3	675	0.0	0.0	0.18	24.2	263	24.2	3564
0	29.2	833	0.0	0.0	0.14	23.2	209	23.2	3499
0	29.2	833	0.0	0.0	0.10	21.9	155	21.9	3435
0	29.2	836	0.0	0.0	0.10	21.7	148	21.7	3548
0	22.0	158	0.0	0.0	0.08	20.7	117	20.7	2336
0	21.2	132	0.0	0.0	0.08	20.7	117	20.7	2335
0	25.2	333	0.0	0.0	0.04	17.9	62	17.9	2331
0	28.3	675	0.0	0.0	0.03	16.4	44	16.4	3436
0	24.7	294	0.0	0.0	0.03	16.1	41	16.1	3459
0	20.6	116	0.0	0.0	0.02	15.4	35	15.4	3496
0	10.0	10	0.0	0.0	0.02	14.9	31	14.9	3515
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	28	14.5	3508
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	28	14.4	3506
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	17	12.4	2354
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	16	12.1	3493
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	15	11.7	3552
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	14	11.6	3562
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	14	11.6	2338
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	13	11.2	2334

			קריטריון הרעש	מפלס רצוי מכביש		מפלס מקסמלי מכביש	עמידה בקריטריון	מפלס רעש מחושב	שם המקבל
			45			24.2	OK	31.7	D
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	12	10.9	3561
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	11	10.4	2341
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	10	10.0	3525
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	9	9.4	2340
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	8	8.8	3434
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	6	7.7	2339
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	6	7.7	3583
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	6	7.7	3495
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	5	7.4	2333
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	5	7.3	3443
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	5	7.1	3514
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	5	7.0	3489
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	5	6.8	2337
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	4	6.5	3485
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	4	5.9	3446
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	4	5.9	2330
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	2	3.6	3565
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	2	3.3	3512
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	2	3.0	2353
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	2	2.9	3457
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	2	2.5	3487
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	2	1.9	3473
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	2	1.8	3449
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	1	0.0	3492
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	1	-2.6	3450
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	0	-3.9	3437
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	0	-6.7	3582



טבלה א5 : תוצאות אלגוריתם עזר - ריצה שלישית

Table A5: Algorithm result - 3<sup>rd</sup> run

			קריטריון הרעש	מפלס רצוי מכביש		מפלס מקסמלי מכביש	עמידה בקריטריון	מפלס רעש מחושב	שם המקבל
			35			28.6	OVER	35.3	A
Qnew	10logQ	Qex	הפרש במפלס	מפלס רעש רצוי	אחוז ההשפעה	בדיקת השפעה	E	מפלס רעש	כביש
220	23.4	235	-0.3	28.3	0.21	28.6	724	28.6	3459
199	23.0	213	-0.3	26.4	0.14	26.7	468	26.7	2338
249	24.0	267	-0.3	25.7	0.12	26.0	398	26.0	2331
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	219	23.4	2340
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	219	23.4	2337
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	186	22.7	2339
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	155	21.9	3561
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	112	20.5	3489
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	91	19.6	3436
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	71	18.5	3564
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	71	18.5	3495
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	68	18.3	2341
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	62	17.9	3583
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	56	17.5	3485
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	54	17.3	3493
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	49	16.9	3443
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	44	16.4	2330
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	36	15.6	3434
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	28	14.4	3446
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	28	14.4	3496
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	25	14.0	3548
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	25	14.0	3449
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	22	13.5	3492
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	22	13.5	3565
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	20	13.1	2335
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	20	13.0	3499
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	17	12.3	3487
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	13	11.3	2333
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	13	11.1	3473
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	13	11.0	2353
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	13	11.0	3435
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	12	10.7	2336
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	9	9.6	2334
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	6	7.8	3552
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	5	6.7	3450
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	3	4.3	3437
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	2	3.5	3582
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	2	2.7	3508
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	2	2.6	2354
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	1	-2.3	3514
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	1	-2.3	3457
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	1	-2.5	3525

			קריטריון הרעש	מפלס רצוי מכביש		מפלס מקסמלי מכביש	עמידה בקריטריון	מפלס רעש מחושב	שם המקבל
			35			28.6	OVER	35.3	A
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	1	-2.8	3512
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	0	-4.6	3506
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	0	-4.8	3515
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	0	-9.6	3562

			קריטריון הרעש	מפלס רצוי מכביש		מפלס מקסמלי מכביש	עמידה בקריטריון	מפלס רעש מחושב	שם המקבל
			35			31.1	OVER	35.7	B
Qnew	10logQ	Qex	הפרש במפלס	מפלס רעש רצוי	אחוז ההשפעה	בדיקת השפעה	E	מפלס רעש	כביש
68	18.4	80	-0.7	30.4	0.35	31.1	1288	31.1	2335
423	26.3	495	-0.7	28.0	0.20	28.7	741	28.7	3564
103	20.1	120	-0.7	24.8	0.10	25.5	355	25.5	2336
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	148	21.7	3436
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	145	21.6	3435
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	141	21.5	2334
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	120	20.8	3499
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	98	19.9	3496
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	85	19.3	3548
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	74	18.7	2331
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	74	18.7	3552
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	60	17.8	3459
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	41	16.1	3493
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	35	15.4	2341
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	32	15.1	2340
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	28	14.5	2338
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	25	14.0	3561
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	23	13.7	3434
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	23	13.6	3495
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	13	11.2	2330
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	13	11.2	2337
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	13	11.2	2339
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	11	10.4	3583
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	10	10.1	3443
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	10	10.0	3485
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	10	9.8	2333
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	9	9.4	3489
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	8	8.8	3565
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	8	8.8	2354
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	7	8.6	3508
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	7	8.4	3512
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	7	8.4	3446
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	6	8.1	3525
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	4	6.0	3487
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	4	5.8	3457

			קריטריון הרעש	מפלס רצוי מכביש		מפלס מקסמלי מכביש	עמידה בקריטריון	מפלס רעש מחושב	שם המקבל
			35			31.1	OVER	35.7	B
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	4	5.5	2353
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	3	4.6	3492
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	3	4.5	3473
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	3	4.4	3449
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	3	4.2	3514
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	2	2.3	3515
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	2	2.0	3506
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	1	-0.1	3450
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	1	-1.4	3437
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	1	-2.8	3562
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	0	-4.0	3582

			קריטריון הרעש	מפלס רצוי מכביש		מפלס מקסמלי מכביש	עמידה בקריטריון	מפלס רעש מחושב	שם המקבל
			45			31.1	OK	35.7	C
Qnew	10logQ	Qex	הפרש במפלס	מפלס רעש רצוי	ההשפעה אחוז	בדיקת השפעה	E	מפלס רעש	כביש
0	19.3	85	0.0	0.0	0.34	31.1	1288	31.1	3446
0	19.3	85	0.0	0.0	0.32	30.8	1202	30.8	2353
0	27.3	536	0.0	0.0	0.07	24.1	257	24.1	3561
0	26.8	478	0.0	0.0	0.07	24.1	257	24.1	3583
0	27.3	536	0.0	0.0	0.06	23.3	214	23.3	3443
0	23.7	235	0.0	0.0	0.02	19.3	85	19.3	3459
0	23.3	213	0.0	0.0	0.02	19.3	85	19.3	2338
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	47	16.7	2339
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	36	15.6	3473
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	30	14.7	2331
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	28	14.5	3489
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	28	14.4	3437
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	21	13.3	3449
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	20	13.0	2337
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	18	12.6	3450
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	16	12.0	3564
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	13	11.2	2340
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	13	11.1	3436
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	10	10.1	3493
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	10	9.8	3548
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	8	8.8	3582
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	7	8.2	2341
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	6	8.1	3499
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	6	8.0	3485
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	6	7.5	3496
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	5	7.2	3487
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	5	6.6	3434

			קריטריון הרעש	מפלס רצוי מכביש		מפלס מקסמלי מכביש	עמידה בקריטריון	מפלס רעש מחושב	שם המקבל
			45			31.1	OK	35.7	C
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	4	6.3	2335
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	4	6.0	3495
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	4	5.5	3435
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	3	4.9	3565
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	3	4.7	2336
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	3	4.3	2330
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	3	4.0	3492
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	2	1.8	2333
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	1	1.4	3552
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	1	1.0	2334
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	1	-1.5	3508
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	1	-1.9	2354
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	0	-7.4	3514
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	0	-8.1	3525
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	0	-8.5	3457
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	0	-9.1	3506
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	0	-9.4	3515
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	0	-9.6	3512
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	0	-14.1	3562

			קריטריון הרעש	מפלס רצוי מכביש		מפלס מקסמלי מכביש	עמידה בקריטריון	מפלס רעש מחושב	שם המקבל
			45			23.1	OK	30.6	D
Qnew	10logQ	Qex	הפרש במפלס	מפלס רעש רצוי	ההשפעה אחוז	בדיקת השפעה	E	מפלס רעש	כביש
0	26.9	495	0.0	0.0	0.18	23.1	204	23.1	3564
0	27.9	615	0.0	0.0	0.13	21.9	155	21.9	3499
0	27.9	615	0.0	0.0	0.10	20.6	115	20.6	3435
0	28.0	633	0.0	0.0	0.10	20.5	112	20.5	3548
0	20.8	120	0.0	0.0	0.08	19.5	89	19.5	2336
0	19.0	80	0.0	0.0	0.06	18.5	71	18.5	2335
0	24.3	267	0.0	0.0	0.04	16.9	49	16.9	2331
0	23.7	235	0.0	0.0	0.03	15.1	32	15.1	3459
0	26.9	495	0.0	0.0	0.03	15.1	32	15.1	3436
0	10.0	10	0.0	0.0	0.03	14.9	31	14.9	3515
0	10.0	10	0.0	0.0	0.02	14.4	28	14.4	3506
0	20.1	101	0.0	0.0	0.02	13.8	24	13.8	3508
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	21	13.3	3496
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	15	11.7	2354
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	14	11.6	3562
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	14	11.4	3493
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	12	10.9	3561
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	12	10.8	2338
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	10	10.0	3525
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	10	9.8	2340

			קריטריון הרעש	מפלס רצוי מכביש		מפלס מקסמלי מכביש	עמידה בקריטריון	מפלס רעש מחושב	שם המקבל
			45			23.1	OK	30.6	D
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	9	9.7	3552
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	9	9.5	2334
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	9	9.4	2341
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	6	7.9	3434
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	6	7.7	3583
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	6	7.5	2339
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	5	7.3	3443
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	5	7.2	3495
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	5	7.1	3514
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	5	7.1	2337
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	4	6.1	3485
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	4	6.0	3489
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	4	5.9	3446
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	3	5.4	2330
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	3	5.3	2333
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	2	3.9	3565
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	2	3.0	2353
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	2	2.5	3487
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	2	1.8	3473
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	1	1.1	3449
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	1	0.4	3457
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	1	0.3	3492
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	1	0.0	3512
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	1	-2.8	3450
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	0	-3.9	3437
0	0.0	0	0.0	0.0	0.00	NO	0	-6.9	3582