

קורס פרויקטים בחקר הסביבה, תשס"ט בנושא זיהום אוויר בישראל

קובץ הצעות מחקר שהוכנו ע"י התלמידים



המגישים	נושא ההצעה	
נטע אחיטוב, סינתיה גודרד, יפתח ספקטור	אופן היווצרות מדיניות סביבתית בישראל. מקרה מבחן: אסבסט כמקור זיהום אוויר חלקיקי.	1
הדס גבאי, חנה שומך, שלומית דקל	השפעת צעדי תכנון ירוק מצד הרשות המקומית על רמת זיהום האוויר.	2
אפרת הילדסהיים, רגינה פנקס, תום שפע, רינת בוטבול	השפעת מיזם הרכב החשמלי על זיהום האוויר בישראל.	3
קרן יעבץ, מאיה אלוני-שפיר, צור משעל, יעקב (קובי) ניר	יכולת ספיחת מזהמים על ידי צמחייה במרחב העירוני ומשמעותה הכלכלית.	4
ירון הירש, איתי פרידיונג, מיכל שורץ	זיהום אוויר מפעילות בנמל התעופה בן-גוריון.	5
עדי שפירא, לורית ליבוביץ, לירון פרידמן, אשד מזוריץ	חקר סיכון מפריצה כוללת של מיכל אמוניה במפרץ חיפה.	6
מישל שפיר, רותם נאור, יואב גוטרמן, ירון בלסלב	השפעת זיהום האוויר על כמות המשקעים באזור חיפה.	7
איה לביא, אבי לובצ'יק, אסף הוכמן	מה הם הגורמים המשפיעים ביותר על ריכוז האירוסולים הטבעיים במזרח הים התיכון ובישראל?	8

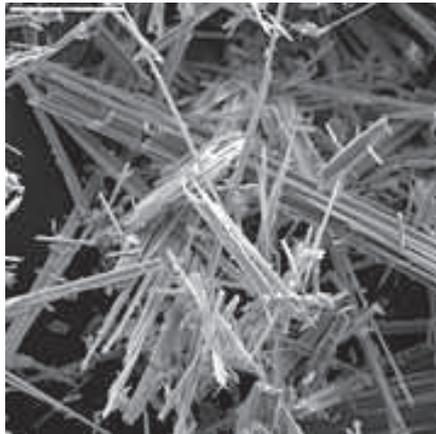
אוניברסיטת תל אביב
ביה"ס ללימודי הסביבה על שם פורטר

הצעת מחקר המוגשת במסגרת קורס פרויקטים באיכות הסביבה תשס"ט

אופן היווצרות מדיניות סביבתית בישראל
מקרה מבחן: אסבסט כמקור זיהום אוויר חלקיקי

מרצה: פרופ' עמרם אשל

מנחה מסייע: נועם סגל



עורכי הפרויקט:

נטע אחיטוב, ת.ז. 013686985

סינתיה גודרד, ת.ז. 304659485

יפתח ספקטור, ת.ז. 005867288

תוכן עניינים

3	..... תודות	א.
4	..... מבוא	ב.
6	..... סקירת הרקע המדעי	ג.
6	..... 1.סקירה כללית על זיהום אוויר	
7	..... 2.סקירה על הזיהום החלקיקי	
7	..... 3.אסבסט	
9	..... 4.בעיות בריאותיות הנובעות משאיפת אסבסט	
15	..... 5.סקירה היסטורית של נוכחות אסבסט בישראל, בדגש על מפעל "איתנית" ...	
20	..... 6.מדיניות ממשלת ישראל בנוגע לאסבסט	
24	..... 7.הצגת מודל רשתות מדיניות, כפי שהוא עולה ממחקרה של ד"ר יעל פרג	
28	..... שאלת המחקר	ד.
29	..... חשיבותה של שאלת המחקר	ה.
31	..... מסקנות בעקבות העבודה	ו.
33	..... רשימת מקורות	ז.
36	..... נספחים	ח.

א. תודות:

בכתיבת הצעת מחקר זו נסתייענו במספר מומחים ואנשי מקצוע בתחום. ברצוננו להודות לכולם על שתרמו מזמנם ומן הידע שצברו וסייעו לנו עצה ואוזן קשבת.

1. מר נועם סגל
2. גב' אורית רייך
3. ד"ר יעל פרג

ב. מבוא :

במחקר זה נציג את תהליך קבלת החלטות של הממשלה בנוגע לטיפול במפגע אסבסט. נבחן את העיר נהרייה כמקרה מבחן המייצג את בעיית האסבסט בארץ (ר' סקירת רקע). ההחלטה להציג את נושא זיהום האסבסט כחוסה תחת הכותרת הכללית של זיהום אוויר נבעה מהתעניינותנו בהרצאתה של גבי ניצה חייקין, ב-9 במרץ 2009, בנושא זיהום אוויר ממקורות תעשייתיים, הרצאה שניתנה במהלך הקורס "פרויקטים בחקר הסביבה: זיהום אוויר" בבית ספר "פורטר" למדעי הסביבה, אוניברסיטת תל אביב.

בעידן הטכנולוגיות החדשות והמאמץ העולמי להפחתת זיהום האוויר - ופסע לפני ועידת קופנהגן שתתקיים בדצמבר 2009 ותדון בהפחתה בינלאומית של פליטות גזי החממה - נושא זיהום האוויר בארץ כתוצאה מחלקיקי אסבסט מרחפים הוא מקרה מעניין של מזהם סביבתי שהמודעות אליו הודחקה במשך זמן רב. בארץ קיימים מבני אסבסט רבים, בהיקף של מיליוני מטרים מרובעים¹, שנכון להיום אין היערכות ממשלתית ממשית להסרתם וסילוק מפגעייהם. החלטנו לחקור את הסיבות להשהיה זו. בהתאם לכך זוהי שאלת המחקר שלנו: מה הם הגורמים לעיכוב הממושך בארץ, עיכוב של 70 שנה (על נתון זה נרחיב בסקירה המדעית), בתחילת הטיפול הממוסד למניעת נזקי האסבסט ותיקונם?

בעבודה נסקור את ההתייחסות המוסדית בישראל לנושא מפגע האסבסט לאורך תקופת המחקר, בין השנים 1950-2007. מחקרנו פותח בסקירת האסבסט מנקודת מבט פיסיקלית, כחומר הגורם לזיהום אוויר. בהמשך מוצגות הסכנות הבריאותיות הנובעות מחומר זה. סכנות אלו אינן מוטלות בספק - מחקרים מדעיים ורפואיים רבים שנעשו בתחום מוכיחים שהאסבסט הוא גורם זיהום אוויר בעל השלכות קשות על גוף האדם. כמקרה מבחן התמקדנו בדוגמה המוחשית ביותר בישראל - העיר נהרייה. לאחר מכן מוצגת החקיקה בנושא, ובסיום סקירה קצרה של הפעילות המעשית שנעשתה בכל זאת לתיקון נזקי האסבסט בישראל. עם סיום העבודה מצאנו לנכון להמליץ על המשך המחקר בשאלה מורכבת זו, מתוך תקווה שהעיון והפרסום יוכלו לתרום לשיפורים במנגנון קבלת החלטות בכל הקשור לסביבה ולבריאות הציבור.

ממחקרנו עולה תמונה מתמשכת של חוסר בהירות ותיקפות בחקיקה הישראלית בכל הקשור לאסבסט. כתוצאה מערפול זה, לא התקיימה לאורך כל תקופת המחקר אכיפה ברורה באשר לשימוש בחומרים הכוללים אסבסט ליעדים שונים ובמיוחד לבנייה, ובאשר לאופני הטיפול בחומר זה. רק בדצמבר 2008, קרוב ל-60 שנה לאחר תחילת השימוש המסיבי באסבסט בישראל, הונחה על שולחן הכנסת הצעת חוק המבקשת להסדיר באופן כולל ואחיד את אופן העיסוק באסבסט בישראל ודרכי הטיפול במפגעיו, כדי לצמצם את חשיפת הציבור הרחב לנזקי החומר הזה.

¹ עמותת אדם, טבע ודין : <http://www.adamteva.org.il/?CategoryID=444&ArticleID=474>

לצורך ניתוח הסיבות לאותו עיכוב שהעלינו בממצאינו, בחרנו להשתמש כבסיס תיאורטי במודל "רשתות תהליך", אותו הציגה ד"ר יעל פרג בעבודת הדוקטורט שלה משנת 2005². המודל הזה דן באופן עיצוב המדיניות הסביבתית בישראל ומציע דרכים לשפרו (ר' סקירה מדעית). הטיעון החשוב ביותר במודל, אשר אכן תאם לממצאים שמצאנו אנו, הוא היעדר ייצוג לציבור הרחב בתהליך קבלת ההחלטות, או ייצוג מצומצם למדי. נוכחנו לדעת כי בכל הקשור למפגע האסבסט אכן ניכרת היעדרות משמעותית של השפעת הציבור על תהליך עיצוב מדיניות הסביבה.

עבודתנו לא נועדה לחרוץ מסקנה "מי אשם" בדחיית ההתייחסות המוסדית למפגע האסבסט - באם הגורמים המוסדיים או האינטרסים הכלכליים (או שיתוף ביניהם) הם שדחקו את הציבור החוצה מן השיח הסביבתי, או שמא הציבור הוא זה שהתעצל להתאמץ והתעורר בסופו של דבר לעניין רק מכורח המציאות. כל שאנו מבקשים להצביע עליו הוא עצם ההיעדרות הממושכת, והקשר בינה ובין העיכוב בטיפול מוסדי בבעיה. עובדה היא שרק ב-20 השנים האחרונות – בפיגור של 40 שנה מתחילת המפגע - החלה באזור נהרייה התעוררות ציבורית ממשית בעניין האסבסט. התעוררות זו התפשטה לקהלים נוספים ולארגונים חוץ מוסדיים. לכך אפשר לייחס את סגירת מקור הזיהום העיקרי, ואת תחילת התהליך לניקוי ותיקון הנזקים.

לדעתנו יש מקום לבחון את השאלה שלהלן בהקשר רחב יותר, במסגרת לימודי הסביבה: האם, כפי שמצאנו בנושא האסבסט, נוכחות הציבור בישראל בתהליכי קבלת ההחלטות הסביבתיות היא שולית ומעוכבת? ואם כן, מדוע?

² הופנינו למודל זה באדיבותו של נועם סגל.

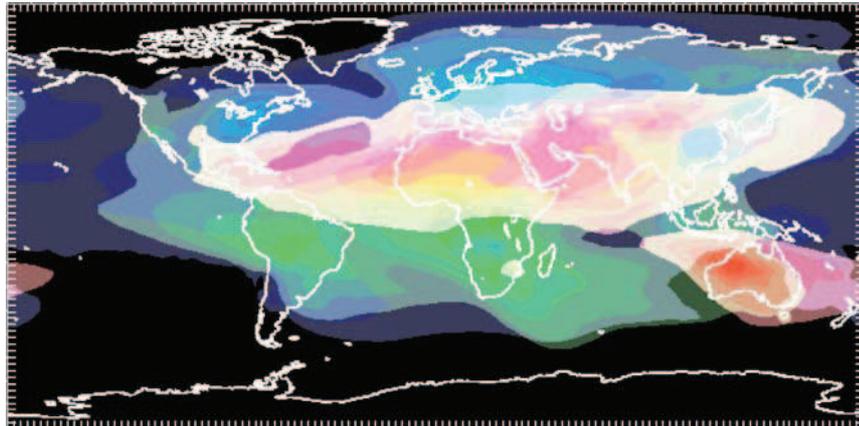
ג. סקירת הרקע המדעי

ג.1. סקירה כללית על זיהום אוויר

זיהום אוויר מתבטא בשלוש צורות עיקריות: שינוי הרכבו הגזי, ומציאות ארוסולים (רסיסי מוצק או נוזל זעירים) או חלקיקים (מוצקים וטיפות נוזל גסים ביחס). EPA - Environmental Protection Agency³ מגדירה זיהום אוויר⁴ כדלקמן: "כל חלקיק באוויר שיכול לגרום נזק לאדם או לסביבה."

לזיהום האוויר מספר משמעותות, ובהן פגיעה בבריאות האדם, פגיעה ישירה בסביבה ופגיעות עקיפות כגון חימום כדור הארץ, הסטת משקעים ושינוי משטרם.

הצהרת האוויר הנקי משנת 1970 בארה"ב⁵ מגדירה 188 מזהמי אוויר שעל EPA לטפל בהם, כל אחד על פי מאפייניו⁶. ששת המזהמים העיקריים הם: אוזון (O3), פחמן חד-חמצני (CO), דו-תחמוצת גופרית (Sulfur Dioxide), דו-תחמוצת חנקן (Nitrogen Dioxide), עופרת וחלקיקי זיהום (Particulates of Matter, PM), שהם נושא עבודה זאת. ב - PM נכללים אבק מינרלי, פיח, מלח ים, אבקת צמחים ושאר חומרים כימיים וביולוגיים. זיהום האסבסט נכלל גם הוא ב - PM.



איור 1: הפיזור הגיאוגרפי של חלקיקי PM עיקריים⁷.
 ירוק: פיח משריפות. אדום: אבק. כחול: סולפטים ממקורות תעשייתיים.

³ הרשות לשמירת הסביבה בארה"ב בתרגום מילולי, או המשרד להגנת הסביבה של ארה"ב בתרגום המשמעות.

⁴ כל ההגדרות נלקחו מאתר EPA <http://www.epa.gov/ebtpages/airairpollutants.html> ותורגמו על ידנו.

⁵ חוק אוויר נקי בארה"ב הועבר ב - 1970, בעקבותיו גם הוקמה סוכנות EPA.

"...establish the EPA in response to the growing public demand for cleaner water, air and land... EPA was assigned the daunting task of repairing the damage already done to the natural environment and to establish new criteria to guide Americans in making a cleaner environment a reality."

<http://www.epa.gov/epahome/aboutepa.htm>

⁶ פירוט רשימת המזהמים בנספח 1.

⁷ מתוך: Hansen and Lacis, 1990: Sun and dust versus greenhouse gases: An assessment of their relative roles in global climate change, Nature, 346, 713.

2.ג סקירה על הזיהום החלקיקי

- EPA הנהיגה חלוקת החלקיקים המזהמים (PM) לשתי קטגוריות סיכון המקובלות כיום בעולם:
1. חלקיקים גדולים מ – 10 מיקרון (מיליונית המטר). אלה אינם נשארים באטמוספירה לתקופות ממושכות ולא נסחפים לטווחים גדולים. לכן, נכון להיום, אינם נחשבים מסוכנים לסביבה.
 2. חלקיקים שגודלם נע בין 10 ל – 2.5 מיקרון (מכונים "חלקיקים גסים ננשמים" - "Inhalable Coarse Particles"), וחלקיקים הקטנים מ – 2.5 מיקרון (מכונים "חלקיקים עדינים" - "Fine Particles"). חלקיקים אלה שוהים באוויר למשך שנים רבות, נפוצים על שטחים נרחבים ומסוכנים לבריאות האדם.

מרבית החלקיקים העדינים מתגבשים באטמוספירה מריאקציות בין כימיקלים ובעיקר מריאקציה בין תחמוצות גופרית (Sulfur Dioxides) ובין תחמוצות חנקניות (Nitrogen Oxides). משערים שהאדם אחראי לייצור 10 אחוז מן החלקיקים הקטנים מ-5 מיקרון.⁸

שהיית חלקיקים באטמוספירה ופיזורם הגיאוגרפי:

באטמוספירה העולמית נישאים בכל עת כ - 100.000 טון PM ושאר ארוסולים שמעלים הרוח, גלי הים, הרי הגעש והמקורות האנתרופוגניים לאוויר.⁹ זמן שהיית חלקיק באטמוספירה וטווח תפוצתו נובעים מגודלו (המבטא יחס בין נפחו לשטח פניו)¹⁰. חלקיק קטן נופל לאט בהשוואה לחלקיק גדול, וסיכויו רבים להתרומם לגבהים גדולים, לשהות באוויר זמן ארוך ולהגיע למרחקים גדולים. ככלל, זמן שהייה באוויר של חלקיקים ברדיוס 2-5 מיקרון הוא נמוך משנה, ואילו חלקיקים שהרדיוס שלהם הוא 0.5-1 מיקרון עלולים לשהות באוויר עד 12 שנים.

3.ג אסבסט

אסבסט (Asbestos) הוא שם מסחרי גנרי לסוג של סלע טבעי הנמצא במקומות רבים בעולם.¹¹ האסבסט (Hydrated Silicate Minerals) מורכב בעיקר מצורן, חמצן ומימן, ומופיע בכמה צורות לפי תוספות מגנזיום, סידן, אשלגן וברזל. המינרלים הללו מתגבשים בטבע כסיבים דקים ועמידים בטמפרטורות גבוהות, שאינם מסיסים בחומרים כימיים טבעיים¹² ואינם

⁸ פרופ' קולין פרייס, סמינר "שינויי אקלים", אוניברסיטת ת"א, החוג לגיאופיסיקה, ינואר 2009.

⁹ ליתר פירוט ר' נספח 4.

¹⁰ לפירוט פיזיקלי ר' נספח 4.

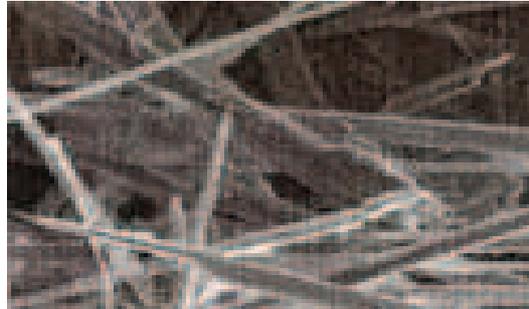
¹¹ יצוין כי לאחרונה מתגלים מחצבים נוספים בעלי תכונות דומות לאסבסט. ר' מחקר אמריקאי מנובמבר 2008,

באתר: [http://www.find-health-articles.com/rec_pub_18828048-differentiating-non-asbestiform-](http://www.find-health-articles.com/rec_pub_18828048-differentiating-non-asbestiform-amphibole-amphibole-asbestos-size.htm)

[amphibole-amphibole-asbestos-size.htm](http://www.find-health-articles.com/rec_pub_18828048-differentiating-non-asbestiform-amphibole-amphibole-asbestos-size.htm)

¹² המבנה הכללי של אסבסט מתרכז במים והסיבים (או "מחטים") אומנם נפרדים זה מזה, אך הם עצמם אינם מסיסים.

מפורקים ביולוגית. מתכונות אלו, ומכוסר הבידוד התרמי והחשמלי המעולה שלו, נובעת שימושיותו של האסבסט: כחומר, הוא מתאים למגוון רחב של מוצרים תעשייתיים והנדסיים. בצורתו הטהורה או בשילובו עם חומרים אחרים ניתן לארוג מאסבסט אריגים ולשזור כבלים. כשטוחנים אותו מהווה האסבסט חומר מילוי אינרטי "נצחי". כשמוסיפים לו גורם מדביק (צמנט למשל) נוצרת תערובת חזקה לבנייה ולעיצוב מוצרים¹³.



איור 2: מבנה פנימי של אסבסט (צילום מיקרוסקופ אלקטרוני סורק)¹⁴.

סכנתם הבריאותית של חלקיקי האסבסט (ר' ג. 4 בעיות בריאותיות הנובעות משאיפת אסבסט) נובעת ממבנה סיביו הדומים למחטים. אלה ממשיכים להתחלק ולהישבר על פי האוריינטציה הטבעית שלהם, גם לאחר טחינת החומר - כלומר בכיוון אחד - ויוצרים מחטים זעירות המתפזרות באוויר. מחטי האסבסט נעות באורכים שבין 0.1-50 מיקרון ובעובי המגיע לכדי 0.01 מיקרון. מחט אסבסט אופיינית בנויה ביחס של 1:3 בין האורך לעובי. מובן שהמגוון הרחב בגדלים של מחטי האסבסט מקשה על הניסיון לייצר כלי סינון יעיל עבורם, מאחר ומסננים מכוונים תמיד לגודל החלקיקים שאותם הם אמורים לסנן.

הצפויות ביותר להיכנס למערכת הנשימה האנושית הן מחטים שאורכן מעל 5 מיקרון ועוביין פחות מ- 3 מיקרון (חלקיקים גדולים מכך "נעצרים" בגרון או מסולקים ממערכת הנשימה האנושית באופן טבעי¹⁵). אולם חלקיקי אסבסט גדולים נוטים, כאמור, להישבר וליצור חלקיקים קטנים יותר, תוך שמירה על צורתם ה"מחטנית", שמסוכנת למערכת הנשימה.

בבנייה ובתעשייה, שם נעשה עיקר השימוש באסבסט, נהוג לחלק אותו לשני סוגים: אסבסט פריך ואסבסט צמנט. האסבסט הפריך הוא למעשה אסבסט גולמי שמותו על גבי תקרות וקירות בטון לצורכי בידוד אקוסטי, בידוד תרמי או כהגנה מפני שריפות. הוא נקרא "פריך" על שום יכולתו להתפורר במגע קל ביותר ולשחרר בדרך זו סיבים מזיקים לאוויר. אסבסט צמנט הם אותם לוחות המורכבים מ-10% אסבסט ו-90% חומרים אחרים, בדרך כלל מלט ומים ולפעמים מיני שרפים. כל עוד האסבסט מוחזק היטב בחומר המדבק הוא אינו מהווה סכנה, אך כאשר

¹³ לשימוש באסבסט יש רקע היסטורי מגוון. ישנה אגדה המספרת כי בבעלות שארל הגדול (800 לספח"ג) הייתה מפת שולחן מאסבסט. על מנת לנקות את המפה מכתמי המזון, לא היה צורך בסמרטוט או סבון, אלא רק להשליך אותה אל האש ולהוציאה משם נקייה לחלוטין. אין לסיפור סימוכין היסטוריים, אולם הוא נועד להמחיש את הרקע ההיסטורי ואופן הקסם שעוטף את האסבסט.

¹⁴ התמונה נלקחה מהאתר: <http://www.air-purifier-power.com/asbestos-home-picture.html>

¹⁵ מתוך אתר משרד הבריאות האוסטרלי: http://www.asbestos.nt.gov.au/faq/health_risks.shtml

המלט מתפורר, נשבר או נשרף, משתחררים סיבי האסבסט לאוויר ויכולים להגיע אל מערכת הנשימה האנושית.

ג.4 בעיות בריאותיות הנובעות משאיפת אסבסט

המידע אודות הנזקים הבריאותיים הקשורים לשאיפת סיבי אסבסט ידועים בעולם זה זמן רב, אולם קשה לשים את האצבע על תאריך מדויק. אנו נתייחס לתחילת הידע הנרחב אודות מחלות הקשורות באסבסט כשנת 1938 (ועל כן חישובנו כי בישראל הטיפול באסבסט התעכב בכ- 70 שנה). בשנה זו סירבו בפעם הראשונה חברות הביטוח בארה"ב לבטח פועלים העובדים במפעלים לייצור אסבסט או פועלים העובדים בבניית מבני אסבסט¹⁶. לצורך פישוט הדברים בעבודה זו, נתייחס לשנת 1938 כשנה שבה האסבסט הפך להיות סכנה מוחשית וידועה לכלל הציבור בעולם המערבי.

כאמור, סיבי האסבסט הם סיליקטים מייצרי סיבים אשר גורמים לנזקים בריאותיים משמעותיים ביותר. הסכנה שבחשיפה לאסבסט נובעת מעמידות הסיבים בסביבה ובנוף, ומכך שאין לאסבסט מראה של חומר מסוכן ואין הוא מפיץ ריחות שניתן להבחין בהם, אולם הוא עשוי לגרום למחלות חשוכות מרפא. הנזק הבריאותי נגרם כתוצאה משאיפה של סיבי אסבסט. חשיפה ממושכת לאסבסט עלולה להגביר את כמות הסיבים שנשאפת לריאות ובכך גם את הסכנה הבריאותית. נכון להיום, ידועות שלוש מחלות ריאות חמורות, שנגרמות משאיפת אסבסט: אסבסטוזיס, סרטן ומזוטליומה (Mesothelioma)¹⁷.

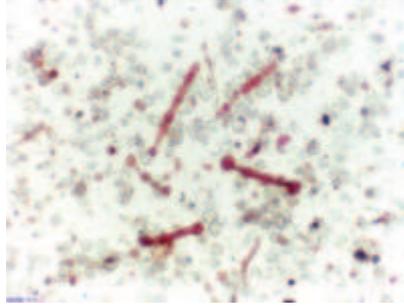
1. **אסבסטוזיס** - מחלה זו מאופיינת בהצטמקות של הרקמה הריאתית כתוצאה משאיפת סיבי אסבסט. אסבסטוזיס גורם לקוצר נשימה ולירידה בתפקודי הריאה כתוצאה מאובדן הגמישות הרגילה של הריאות ופגיעה בקצב מעבר החמצן בהן. סימני המחלה מופיעים לראשונה כעבור 10 שנים לפחות מרגע החשיפה הראשונה לאסבסט. אסבסטוזיס איננו סוג של סרטן, אבל מזוטליומה כן (ראה 2). חולים מסוימים עלולים לחלות באסבסטוזיס ובעקבותיו מפתחת מזוטליומה¹⁸. לרוע המזל, אין מרפא לאסבסטוזיס. אף על פי כן, יש מיגוון טיפולים שיכולים להקל על הסימפטומים של המחלה¹⁹.

¹⁶ מתוך הנתונים של לשכת עורכי הדין בארה"ב. באתר: <http://www.asbestosalert.com/lawyer/history.html>

¹⁷ <http://www.epa.gov/oppt/asbestos/pubs/help.html#health>

¹⁸ <http://www.allaboutmalignantmesothelioma.com/asbestos-lung-disease.htm>

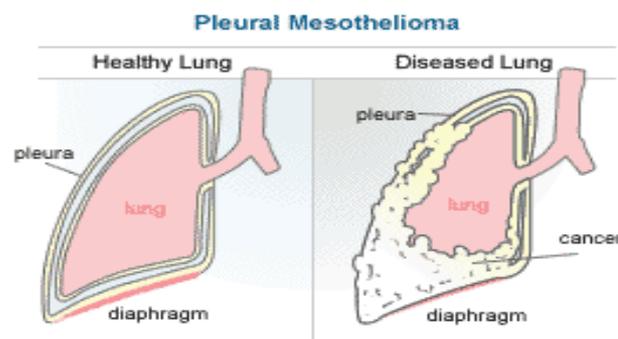
¹⁹ <http://emedicine.medscape.com/article/295966-treatment>



איור 3 : חלקיקי אסבסט בריקמת ריאה²⁰.

2. **מזוטליומה:** זהו סרטן הפוגע בקרום הריאה, בקרום הבטן ובקרום הלב והוא ייחודי לחשיפה לאסבסט. הפגיעה כתוצאה מהמחלה היא קשה, ובמרבית המקרים מסתיימת במוות. בעבר סברו כי זהו סרטן המופיע בעיקר אצל פועלים שעבדו במפעלי אסבסט ובני משפחותיהם, בשל החשיפה הממושכת, אולם היום ידוע כי הסיכון לחלות במחלה זו קיים גם אצל מי שנחשף לאסבסט חשיפות קצרות טווח בלבד²¹. הסימפטומים של מזוטליומה אינם סימפטומים ספציפיים של המחלה, אלא של מחלות אחרות. מרבית המחקרים מראים כי הסימפטומים עלולים להופיע בין 30-40 שנה לאחר החשיפה לאסבסט. לכן, חולים רבים אינם מודעים לכך שסימפטומים המתגלים אצלם הם למעשה תוצאה של מחלה הקיימת בגופם שנים רבות. הטיפול המקובל במזוטליומה דומה לטיפול בסרטנים אחרים וכולל:

- ניתוחים
- כימותרפיה
- רדיותרפיה



איור 4 : תאור סכמתי של מזוטליומה²².

²⁰ <http://www.mesotheliomamedical.com/photos/asbestos-photos.html>
²¹ <http://www.allaboutmalignantmesothelioma.com/asbestos-lung-disease.htm>
²² <http://www.mesotheliomamedical.com/photos/mesothelioma-photos.html>



איור 5 : מזוטליומה בריאת האדם (ימין – ריאה בריאה, שמאל - ריאה חולה)²³.

3. **סוגי סרטן שונים - לאסבסט כחומר מסרטן הוקדשו מחקרים רפואיים רבים, למעלה מ- 11,000 פרסומים במשך 40 השנים האחרונות**²⁴. סרטן ריאות הוא השכיח ביותר בקרב מי שנחשף לאסבסט, אולם המחקרים מצאו גם כי קיים קשר בין סוגי סרטן נוספים ובין חשיפה לאסבסט. כך למשל גילו שכיחות גבוהה של סרטן הקיבה, סרטן המעי הגס, סרטן החלחולת, סרטן של אזור הפה והגרון, סרטן הלוע וסרטן הכליות בקרב אנשים שנחשפו לאסבסט. יש קשר נסיבתי מבוסס בין עישון והסיכוי לחלות בסרטן ממוצא אסבסט.

הסכנה שבחשיפת הציבור הרחב ובמיוחד ילדים צעירים לאסבסט :

ממחקרים שנעשו בעולם ובארץ^{27,26,25} עולה כי הסכנה לחלות במחלות שצוינו לעיל קיימת בקרב האוכלוסייה הרחבה, ולא רק בקרב העובדים בתעשיית האסבסט ובני משפחותיהם. כך למשל חשף מחקר, שנערך בבריטניה בשנת 1965, כי 10% מחולי המזוטליומה אינם פועלים שבאו במגע ישיר עם אסבסט²⁸. מחקר דומה, שנערך בישראל בשנת 1976, הראה כי מחלת המזוטליומה מתגלה בשתי קבוצות אוכלוסייה שאינן עובדות באסבסט - ילדים מתחת לגיל 15 ונשים²⁹. מחקר נוסף, שנערך בארץ בשנת 1986, העלה שוב כי גם פקטורים לא תעסוקתיים גורמים למחלה³⁰.

²³ <http://www.mesotheliomamedical.com/photos/mesothelioma-photos.html>

²⁴ <http://ehponline.org/members/2008/11272/11272.html>

²⁵ <http://www.sviva.gov.il/bin/>

²⁶ <http://www.asbestos-institute.ca/specialreports/meso.html>

²⁷ Public Health Reviews, 1995, vol 23 (issue 1), pp 35-45, "Use of asbestos in expected and unexpected places in Israel".

²⁸ Greenberg M. Lloyd Davies TA Mesothelioma Register 1967-1968 Br J Ind Med 1974; 31:91-104

²⁹ Lemesch C, Steinitz R, Wassermann M. Eidemiology of Mesothelioma in Israel , Environmental Research , Vol 12, 255-61 (1976).

³⁰ Lemesch C, Katz L, Steinitz R. Mesothelioma in Israel (1973 -1982); The Journal of the Royal Society for the Promotion of Health, Vol. 106, No. 4, 141-142 (1986)

מקרה המבחן של נהרייה³¹:

במשך 45 שנות קיומו עבדו במפעל האסבסט "איתנית" שבנהריה כ-5,000 פועלים קבועים ועוד כ- 5,000 פועלים ארעיים ובני נוער. הקבוצה הראשונה הם הפועלים שעבדו במשך מספר שנים במקום ואילו הקבוצה השנייה הם אלה שנודמנו למפעל לתקופות קצרות. אין בידינו נתונים מדויקים אודות מספר השנים הממוצע, אך ידוע לנו כי משמרת במפעל הצריכה 300 פועלים שעבדו בו בין 00:17-08:00. עוד ידוע לנו כי הפועלים הגיעו בעיקר מן הגליל המערבי, הם היו תושבי הכפרים הערביים, הכפרים הדרוזים, תושבים ממושבי האזור ותושבי נהרייה, שרבים מהם נשכרו לעבודה במפעל בהיותם עולים חדשים.

עיתון "הארץ" דיווח בחודש יוני 2009 כי אזור נהרייה הוא "בין האזורים בהם קיים שיעור התחלואה הגבוה ביותר בעולם מהמחלה הממארת מזוטליומה"³². מנהל רישום הסרטן במשרד הבריאות מצא כי שיעור החולים במזוטליומה בנפת עכו (הכוללת את נהרייה) עמד בין השנים 2001-2008 על 5.72 חולים לכל 100 אלף תושבים. סך הכול נרשמו 19 חולים בתקופה זו. לצורך השוואה נציין כי השיעור הגבוה ביותר בעולם הוא בגנואה שבאיטליה, שם הוא עומד על 5.8 חולים לכל 100 אלף תושבים. השוואה נוספת ניתן לערוך לשיעור החולים בנפת תל אביב, הרחוקה מרחק רב ממפעל "איתנית", שם הוא עומד על 0.55 חולים לכל 100 אלף תושבים. כלומר באזור עכו יש פי 10 יותר חולי מזוטליומה מאשר באזור תל אביב. עובדות אלו מתחדדות עוד יותר כאשר לומדים כי בשנת 2002 עמד שיעור החולים בנפת עכו על 3.55 חולים לכל 100 אלף איש, כלומר בשש שנים גדל שיעור החולים ב-1.6. ההסבר לעובדה זו, לפי ד"ר מיכה בר חנא, יו"ר מנהל רישום הסרטן במשרד להגנת הסביבה בישראל, נובע מכך שהמזוטליומה היא מחלה שנדרש לה זמן להתפתח. מסיבה זו הוא מעריך כי שיעור החולים ימשיך ויגדל בשנים הקרובות, עם התבגרותם של אנשים שנחשפו לחומר³³.

בין השנים 1990-2008 נרשמו סך הכול 606 חולי מזוטליומה בבתי החולים בצפון הארץ – בית חולים נהרייה ובית חולים רמב"ם. בכל שנה נרשמים בממוצע כ-30 חולי מזוטליומה ברחבי הארץ³⁴. מדיווח לא רשמי שהתקבל מבתי החולים הללו, עבור עבודה זו, נמסר לנו כי עיקר החולים שהגיעו אליהם לטיפול במזוטליומה הם פועלי ייצור מן המפעל, אנשים שעבדו עם מוצרי אסבסט, קרובי משפחה מדרגה ראשונה של הפועלים ותושבי נהרייה ויישובי הגליל המערבי³⁵.

מנתוני התחלואה הרשמיים^{36,37} (ר' גם נספח 2) שהצטברו עד כה עולה כי שליש מן החולים הרשומים הן למעשה נשים ולא פועלי המפעל. עובדה זו מצביעה על כך שבנהרייה

³¹ הנתונים נלקחו מתוך האתר: <http://naen.timba.info>

³² צפריר רינת "מומחים מזהירים", עיתון "הארץ" 18.6.09.

³³ הנתונים והציטוטים נלקחו מהכתבה "מומחים מזהירים".

³⁴ הנתונים והציטוטים נלקחו מהכתבה "מומחים מזהירים".

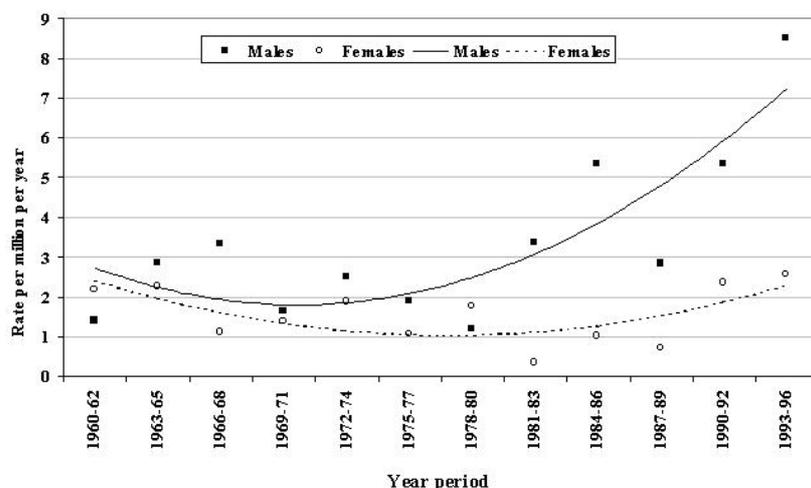
³⁵ כך מסרו במשרדי הדוברות של שני בתי החולים.

³⁶ מתוך נתוני רישום הסרטן של משרד הבריאות.

³⁷ <http://www.health.gov.il/download/sartan/2006/mesoth2006.pdf>

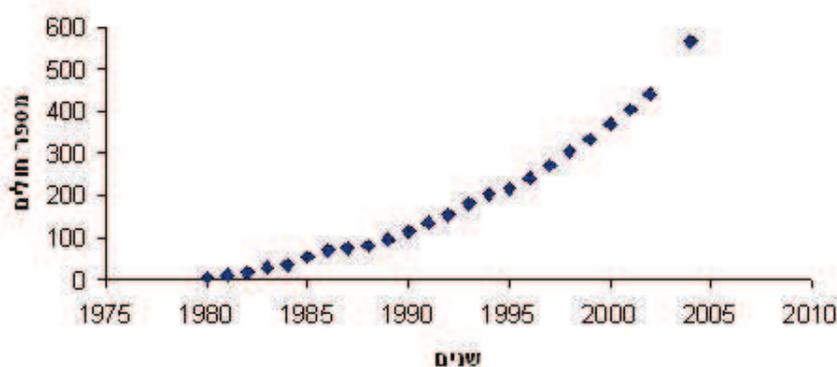
התרחשה חשיפה קהילתית גבוהה במיוחד³⁸, כלומר שאנשים רבים בקרב קהילת עובדי המפעל נחשפו לאסבסט. בשלוש השנים האחרונות נוספו 40 חולים בשנה בישראל, כשעשרה מקרים מתוכם הם מבית החולים נהרייה בלבד. חשוב להדגיש כי נתונים אלו מייצגים את התחלואה במזוטליומה בלבד, ואינם כוללים את נתוני התחלואה בסרטן ריאות, סרטן הגרון ומחלת האסבסטוזיס, שגם הם אופייניים לחשיפה לסיבי אסבסט.

מחקר נוסף³⁹ שבחן מקרים של מזוטליומה בישראל בין השנים 1960-1996 הראה כי מספר מקרי המזוטליומה עלה באופן משמעותי בשנים אלו, והעריך שמגמת העלייה תימשך גם במשך 10-15 השנים שלאחר המחקר.



איור 6: חולי מזוטליומה בישראל על פי מגדר בין השנים 1960-1996, כפי שהוצגו במחקר הנ"ל.

תחלואה במזוטליומה בין 1980 לבין 2004

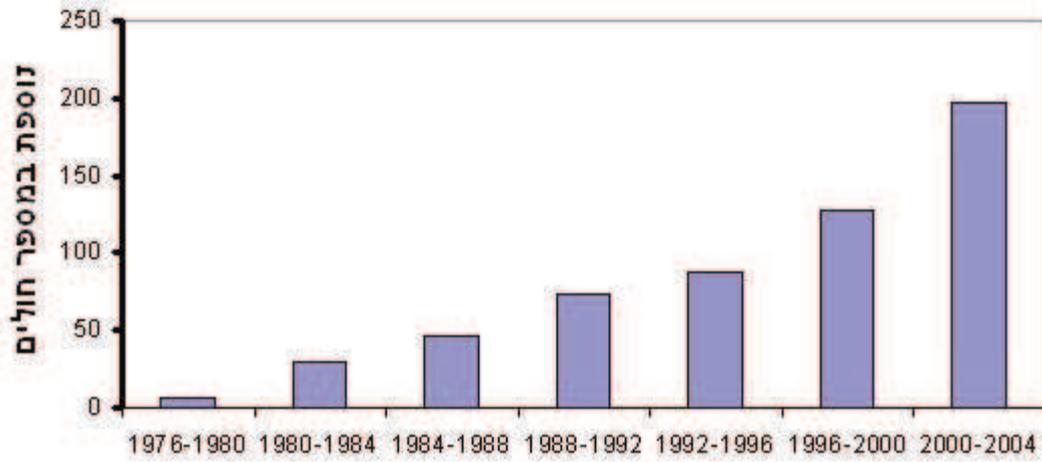


איור 7: תחלואה במזוטליומה בין השנים 1980 – 2004 בישראל, כפי שהוצגו במחקר הנ"ל.

³⁸ מדברי פרופסור פרנק, מומחה לתחלואה בינלאומי, מתוך האתר: www.timba.info

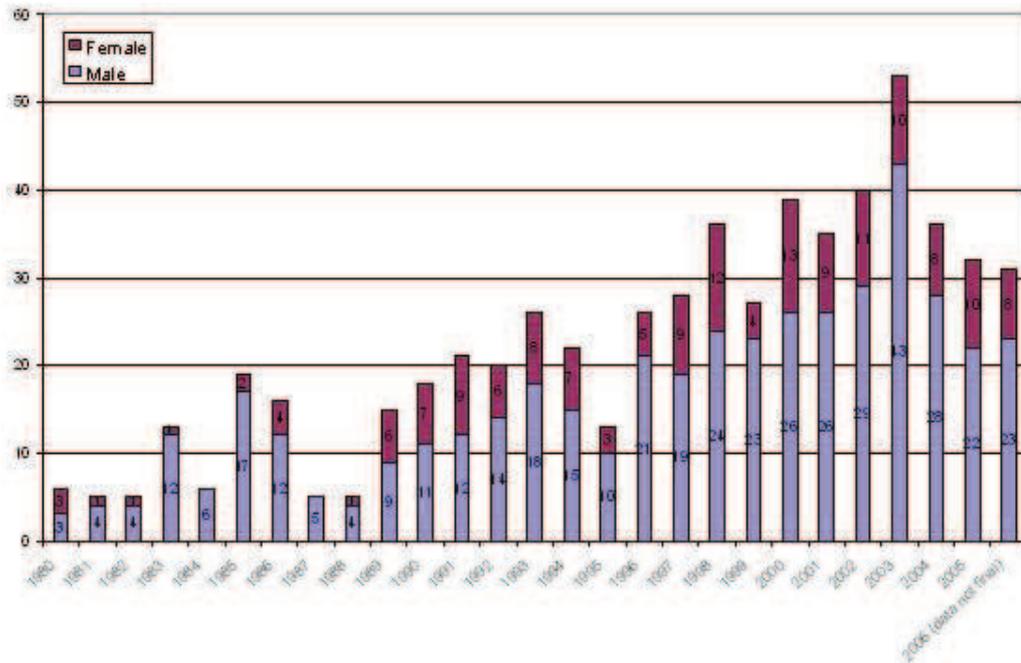
³⁹ IMAJ, Vol.2, 828-832, S.Arud et al, "A worrying increase in the Incidence of Mesothelioma in Israel"

זולי מזוטליומה -תוספת במספר חולים
לתקופה 2004-1976



איור 8 : נתוני מזוטליומה בין השנים 1990-2004, כפי שהוצגו במחקר הנייל.

Mesothelioma Cases in Israel (1980-2006), Cancer Registry, Ministry of Health



איור 9 : מקרי מזוטמוזטליומה בישראל בין השנים 1980 – 2006, כפי שהוצגו במחקר הנייל.

5.ג סקירה היסטורית של נוכחות האסבסט בישראל בדגש על מפעל "איתנית"⁴⁰

בישראל פעל מפעל אחד לייצור מוצרי אסבסט בנהרייה תחת השם "ישראלסבסט". מאוחר יותר הוחלף שמו ל"איתנית" מטעמים שיווקיים. על מנת למנוע בלבול בעבודה זו נכנה אותו "איתנית" גם בשנים בהם נקרא "ישראלסבסט". המפעל הוקם בשנת 1952 על ידי יקותיאל פדרמן. הבעלות על המפעל הייתה בידי המשפחה וניהולו הוטל על בנו, מיקי פדרמן. שטח המפעל, העומד על 200 דונם בחוף נהרייה, הוא למעשה מענק מן המדינה. הטכנולוגיה והמכונות במפעל התקבלו מחברת "אתרניט" (Eternit) השוויצרית,⁴¹ שהייתה חלוצה אירופית בתחום ייצור מוצרים מאסבסט.

בעת פעולתו המלאה, עבדו במפעל בכל יום כ- 350 פועלים (300 בפס הייצור ועוד כ-50 בעבודות מנהלה שונות). מוצרי האסבסט התקבלו בברכה כחלק מתנופת הבנייה המאסיבית שהתנהלה בארץ באותן שנים. פועלי המפעל ראו בו בית, ולראייה אף נערכו בו מסיבות וחתונות של העובדים ובני משפחותיהם. הוא נחשב לגאוות העיר נהרייה ופדרמן היה מוכר לכול כמעסיק חשוב וכגורם כלכלי מרכזי בעיר.⁴²

המפעל ייצר ומכר מוצרי אסבסט כגון פלטות צמנט-אסבסט לכיסוי גגות, לבנייה ובידוד, צינורות מים וביוב, יריעות איטום, ספסלים, אדניות, עציצים ואף מבני אסבסט שלמים לאחסון ומגורים (יזכר פרויקט בנייה למגורים משנות ה-60 אשר שמו היה "נווה אסבסט"). מוצרי המפעל נרכשו בכל הארץ בהיקף נרחב, ובין קונו העיקריים אפשר למנות את צה"ל, חברת החשמל וחברת צים.

ככל מפעל, גם מפעל "איתנית" ייצר פסולת. בשנות ה-60 הפיצו קברניטי המפעל מכתב לקונים פוטנציאליים ובו הודיעו כי פסולת אסבסט מן המפעל מתאימה מאוד לפיזור על דרכי עפר בשדות, בפרדסים ובגני פרי ומונעת שקיעה של כלי רכב בחורף. עוד צוין במכתב כי במפעל נמצאת פסולת אסבסט רבה וניתן לרכוש אותה במחיר של 10 אגורות למטר מעוקב, בתנאי שההעמסה וההובלה תיעשה על חשבון הקונה.⁴³ להצעה זו נענו מאות מתושבי הגליל המערבי וכן גופים מוסדיים גדולים כגון קיבוצים, מושבים והנהלות ערים. פסולת אסבסט שלא נמצא לה קונה הושלכה אל חוף הים, נערמה שם בערימות והוזרמה לים התיכון.

⁴⁰ מרבית העובדות אודות מפעל "איתנית" מקורן בשיחה עם גב' אורית רייך, ראש העמותה לאיכות חיים וסביבה בנהרייה.

⁴¹ פרטים נוספים אודות החברה ניתן למצוא באתר: <http://www.eternit.ch>. יצוין כי בשנת 1994 הפסיקה חברת "אתרניט" לחלוטין את ייצור מוצרי האסבסט בתחומיה, ועברה לתחומי ייצור אחרים.

⁴² על פי אתר העמותה לאיכות הסביבה נהרייה: <http://naen.timba.info/> וגם על סמך ראיון עם גב' אורית רייך, נהריה, אפריל 2009.

⁴³ פרופ' אלישע אפרת, "על זיהום הקרקע, האוויר והמים", מתוך הספרייה הטכנולוגית החינוכית, באתר:

הנתונים מראים שבין השנים 1962-1997 סיפקה חברת "איתנית" את כל צורכי האסבסט בישראל, ובעשותה כך גרמה ל"מפגע האסבסט החמור ביותר בישראל"⁴⁴.

התפתחות המודעות בכל הקשור למפעל האסבסט בנהרייה⁴⁵

כאמור, בחודש יוני השנה פרסם עיתון "הארץ" כתבה גדולה בנושא המזוטליומה ובה נתונים רבים אודות מספר החולים במחלה בישראל (ר' פרק ג.4)⁴⁶. אולם כתבה זו אינה מאפיינת את השנים הראשונות בהן פעל המפעל. באותן שנים הייתה המודעות בישראל, לפחות מן ההיבט התקשורתי, קטנה בהרבה.

כבר בעת הקמת המפעל, כלומר בשנת 1952, פורסמו ברחבי העולם מחקרים שונים שהוכיחו כי מדובר בחומר מסוכן. כפי שהוזכר, בשנת 1938 סירבו חברות הביטוח בארה"ב לבטח פועלי אסבסט⁴⁷. מחקרים רפואיים משנות ה-40 וה-50 מצביעים כבר אז על הקשר הידוע בין אסבסט לבין מחלת המזוטליומה, פגיעות אפשריות בקרומי לב, קרומי הריאה והבטן⁴⁸.

בשנת 1961 התרחש מקרה המוות הראשון של עובד במפעל כתוצאה ממזוטליומה⁴⁹. בשנת 1981 העלה חבר הכנסת יאיר צבן את עניין האסבסט בכנסת וטען כי יש לבדוק את העניין לאשורו ולחוקק חוקים בהתאם⁵⁰. בשנת 1984 הקים משרד הבריאות וועדה ("הוועדה הרפואית העליונה לאבק מזיק") לבירור נזקי האסבסט, ובראשה הועמד מ-1991 כיו"ר פרופ' עמיחי רובין, רופא ריאות בכיר. הוועדה – שהיא הגוף המכריע בכל הסוגיות הנוגעות לאסבסט וזו הקובעת אילו סוגי מחלות יוכרו ככאלה הנגרמות מחשיפה לאסבסט - לא מצאה הוכחות חותכות לקיום קשר ישיר בין שאיפת אסבסט לבין הנזק הבריאותי שנלווה לו. אולם, על אף היעדר הממצאים של הוועדה, הוחלט להנהיג במפעל "איתנית" תקנות חדשות. על פיהן הורתה הוועדה על המפעל לספק לעובדים חליפות עבודה ומסיכות מגן. כמו כן, העובדים הונחו להתקלח במקלחות שבמפעל, לשתות חלב והעישון בתחומי המפעל נאסר. אולם הפועלים מעולם לא קיבלו הסברה מסודרת על הסיכון⁵¹.

⁴⁴ פרופ' אלישע אפרת, שם.

⁴⁵ התיאור להלן מבוסס בעיקרו על ראיון עם גב' אורית רייך.

⁴⁶ רינת צפירי "מומחים מזהירים", עיתון הארץ, 18.6.09.

⁴⁷ מתוך הנתונים של לשכת עורכי הדין בארה"ב. באתר: <http://www.asbestosalert.com/lawyer/history.html>

⁴⁸ לפירוט נוסף בדבר ההיסטוריה של המודעות לסכנות האסבסט, ר' נספח 3.

⁴⁹ על פי אתר העמותה לאיכות חיים וסביבה בנהרייה: <http://naen.timba.info>

⁵⁰ מתוך ידיעה חדשותית בנושא, שהופיעה בעיתון "ידיעות אחרונות" תחת הכותרת "אתמול בכנסת", 2.4.84.

⁵¹ בראיון שהתקיים בחודש אפריל 2009 עם מר ויקטור עמאר, שהגיע לנהרייה כעולה חדש בשנת 1961 ומאז ועד שנת 1996 עבד במפעל "איתנית". מר עמאר סיפר שסכנת האסבסט נודעה לו רק בשנת 1996 באופן אקראי. אז, לדבריו, יגש אל מנהלי המפעל והתריע על כך. בו במקום הוא "שוחרר מהעבודה" עם פניסה מובטחת.

משכול זה נאמר, אפשר להביט על חוסר העשייה הממסדית בכול הקשור לאסבסט ובהמשך הפעלת המפעל עד שנת 1997 כמחדל לאומי. מחדל משום שהסכנות הבריאותיות הטמונות בסיבי האסבסט היו ידועות, אולם לא נעשה דבר כדי למנוע מהן להתרחש.

אפילו בשנת 1996, כשייצור מוצרי האסבסט במפעל הופסק והחל חיפוש אחר שימושים חדשים לשטח, הציעה עיריית נהרייה להקים על השטח הצמוד למפעל פרויקט תיירותי גדול - פארק שעשועים בשם "מדינת הילדים". התוכנית אושרה על ידי כל הגורמים המוניציפאליים בעיריית נהרייה לאחר שתסקיר ההשפעה הסביבתית (שבוצעו לאחר שמאבק ציבורי מנע את הוצאת האישור על הבנייה ללא תסקיר השפעה סביבתית) הראו כי לא קיים במקום מפגע⁵². בסופו של דבר, בשנת 1998, נעצרה בניית "מדינת הילדים" כתוצאה מפעילות ציבורית ואף עתירה לבג"ץ שהוגשה על ידי תושבי נהרייה⁵³.

דבר נוסף שהתרחש בחודש יוני השנה ומעיד על התפתחות המודעות בכל הקשור לאסבסט הוא הסדר תביעה שהוגש לבית המשפט המחוזי בחיפה⁵⁴. על פי ההסדר, תושב נהרייה אשר חלה במזוטיליומה לאחר שנחשף לאסבסט באופן עקיף, כלומר כתוצאה מן הקרבה לאביו שעבד במפעל "איתנית", יפוצה בסכום כספי העולה על 3 מיליון שקל. התובע כיום הוא בן 45 ולטענתו נחשף לאסבסט כאשר היה ילד בבית הוריו. הנתבעים הם מדינת ישראל; חברת הביטוח "מגדל", שהייתה אחראית על ביטוחי המפעל השונים; וחברת "איתנית", שכאמור מפעל האסבסט היה בבעלותה. התקדים המשפטי בתביעה זו נובע מן העובדה כי בית המשפט קבע שאין צורך בכך שהגורמים הנתבעים (המדינה, חברת הביטוח והמפעל) יודו באחריותם הישירה לנוק הבריאותי שנגרם לתובע, עליהם לפצותו בכל מקרה. חשיבות נוספת שמצויה בתביעה זו טמונה בעובדה כי גם מדינת ישראל חויבה על ידי בית המשפט לשלם פיצויים לנפגע. עובדה זו בלבד יש בה כדי להוכיח כי המדינה הייתה מודעת לסכנות שבאסבסט, אך לא עשתה די כדי למנוע אותן. עורך דינו של התובע, עורך דין משה גולדבלט, טען בדיון כך: "הפיצוי הגבוה ששולם מהווה הכרה בעובדה שגם מי שמעולם לא עבדו במפעל האסבסט נחשפו לסיכונים חמורים. בני משפחות העובדים שילמו לא אחת את המחיר הנורא ביותר, מחמת העובדה שהמפעל לא הקפיד במשך עשרות שנים על סידורי כביסה ואחסון נאותים של בגבי העבודה בשטח המפעל"⁵⁵.

בסיור שערכנו בנהרייה בחודש מאי 2009, אשר תמונות ממנו מופיעות בהמשך הפרק, ראינו את מפעל "איתנית" – שטח נרחב סגור ובו מבנים גדולים מתפוררים, ולצידו את מבנה בית הספר (בית ספר לנערים עובדים) שפעל בסמוך אליו, גם הוא סגור ומתפורר. שאריות החומר,

⁵² מתוך אתר העמותה לאיכות חיים וסביבה בנהרייה. הסקר, שמומן ע"ח מפעל "איתנית", בדק דגימות קרקע מוגבלות, ולא בדק נוכחות אסבסט באוויר.

⁵³ פירוט מלא של ההסדר, כולל פרטי העתירה וכתבי ההגנה ניתן למצוא באתר "העמותה למען איכות חיים וסביבה בנהרייה": <http://naen.timba.info>, וכן בארכיוני "אדם, טבע ודין".

⁵⁴ דבר התביעה הובא במאמר בשם "חלה בסרטן בגלל עבודת אביו באסבסט" מאת ג'קי חורי בעיתון "הארץ", 9.6.09.

⁵⁵ כפי שצוטט בכתבה: "חלה בסרטן בגלל עבודת אביו באסבסט" מאת ג'קי חורי בעיתון "הארץ", 9.6.09.

צינורות, קירות ולוחות האסבסט שהיוו את הגגות מונחים היום כשברי לוחות בשטח המפעל. בין המפעל וחוף הים, על חוף נהרייה, מושלכים בערימות שברי לוחות צמנט-אסבסט ומזדקרים יסודות בטון, צינורות, בריכות ותעלות עזובות מאסבסט, הרבה מהם במצב של התפוררות, שכאמור הוא מצב מסוכן לאדם.

לפי ידיעת העמותה לאיכות חיים וסביבה בנהרייה, חברת "איתנית", שהיא בעלת אינטרס כלכלי להכשיר את השטח מחדש למטרות שונות, מציעה להשתתף בשיקום השטח וניקויו, אך מצביה תנאי: שהממשלה תישא ב- 50 אחוז מעלות השיקום של השטח.



איור 10: גוש מתפורר של אסבסט-צמנט שקוע בחול חוף הרחצה בנהרייה בחודש מאי 2009.⁵⁶

⁵⁶ איורים 11-13 הינם צילומים שנלקחו על ידינו לצורך עבודה זו.



איורים 12-13 : מפעל "איתנית" המושבת בחודש מאי 2009 ושרידי "מדינת הילדים" בחולות חוף נהרייה.

6.ג מדיניות ממשלת ישראל בנוגע לאסבסט

כפי שמציג זאת המשרד להגנת הסביבה, ידועות כיום שלוש צורות עיקריות שבאמצעותן עלול הציבור הרחב להיחשף לאסבסט⁵⁷:

1. האופן השכיח ביותר הוא של אלמנטים בבנייה העשויים אסבסט צמנט, שהתפוררו, נשברו או נשרפו ושיחררו לאוויר סיבי אסבסט. אירועים מסוג זה עלולים להתרחש עקב ביצוע עבודות לפירוק מבני אסבסט בניגוד להנחיות המשרד להגנת הסביבה, שריפה במבנה המכיל אסבסט, אירועי מזג אוויר קיצוניים או שבירת הלוחות עקב פגיעות טילים מסוגים שונים.
2. האופן המסוכן ביותר להיחשף לאסבסט הוא על ידי מגע באסבסט פריך, שמשמש בעיקר כיריעות בידוד על קירות במבנים שונים. סכנת שחרור הסיבים גבוהה מאוד במקרה זה ובדרך כלל גם ריכוז הסיבים גבוה יותר מאסבסט צמנט.
3. המקרה השלישי ייחודי לאזור נהרייה והגליל המערבי. פסולת אסבסט, מסוג צמנט ומהסוג הפריך, הוטמנה או פוזרה בקרקע ברחבי האזור, בין היתר כמצע לשבילים בשטחים ציבוריים, שטחים חקלאיים ואף חצרות פרטיות. כל קרקע שהוטמן בה אסבסט עלולה לגרום לחשיפה מסוכנת, במיוחד כשהשטח יבש ובעת שמנשבת רוח המעלה ענני אבק.

החקיקה בישראל בנוגע לאסבסט:

פרופ' אלישע אפרת, שחקר את נושא זיהום האוויר⁵⁸, מצא כי בישראל קיימים היום כ-100 מיליון מטרים רבועים של מבני אסבסט המסכנים את בריאות הציבור: "האסבסט הוא חומר מסוכן ומסרטן כעניין של עובדה רפואית ומדעית, אך גם כעניין משפטי"⁵⁹.

האסבסט מוזכר כ"מפגע בריאותי" כבר בסעיף 53 בפקודת בריאות העם משנת 1940. כך נכתב שם: "האסבסט הוא מפגע כאשר הוא מצוי בכל מקום שמבנהו, מצבו או שימושו מסכן את הבריאות; כאשר הוא ערמה של פסולת מינרלית המסכנת את הבריאות; כאשר נעשית בו עבודה, מלאכה או עסק המזיקים לבריאות הסביבה או מתנהלים באופן המסכן את בריאות העובדים". נכון לאפריל 2009 החקיקה הקיימת בנושא האסבסט מעוגנת עדיין באמצעות תקנה (חקיקה שאינה בגדר חוק ונקבעת על ידי הרשות המבצעת), שמופיעה כחלק מתקנות הבטיחות בעבודה, גיהות תעסוקתית ובריאות הציבור באבק מזיק התשמ"ד 1984. על פי התקנות הללו אסבסט מוגדר כאבק מזיק העלול לגרום למחלות ריאה ולנזק בריאותי. עוד קובעות התקנות כי תוקם "וועדה טכנית לאבק מזיק", שתמונה על ידי השר להגנת הסביבה ושר התעשייה, המסחר והתעסוקה, ותהווה את הגוף הסטטוטורי (ישות משפטית אוטונומית) שמופקד על הטיפול

⁵⁷ מתוך חומר ההסבר של המשרד להגנת הסביבה. ניתן לקרוא אותו באתר: www.sviva.gov.il

⁵⁸ פרופ' אלישע אפרת, "על זיהום הקרקע, האוויר והמים", מתוך הספרייה הטכנולוגית החינוכית, באתר:

<http://lib.cet.ac.il>

⁵⁹ שם.

באסבסט. במסגרת פעילותה הוועדה תגבש המלצות הקשורות להיבטים הטכניים של עבודה באסבסט, תמליץ על דרכי השימוש באסבסט ובחומרים אחרים המשחררים אבק מזיק לאוויר, תסמיק מעבדות לניטור סיבי אסבסט, תשמש כמרכז מידע לציבור, למשרדי הממשלה ולמוסדות ציבוריים בכל הקשור לעבודה ולשימוש באסבסט.

כינונה של וועדה שתטפל בנושא האסבסט אכן היה צעד משמעותי, אך הגיע 32 שנה לאחר שהוקם המפעל ו - 23 שנה לאחר מקרה המוות הראשון במפעל ממזוטליומה, כלומר מאוחר מדי. כך למשל נכתב על ישראל בפברואר 2009 בחדשות השוטפות ששולח "ארגון האסבסט והמזוטליומה הבינלאומי" לחברים בו: "משרד הגנת הסביבה של ישראל עושה מאמצים להעביר חוק האוסר באופן גורף את השימוש באסבסט (ר' פרק המצב החוקי בישראל)... היוזמה לחוק הגיעה כאשר גורמים רשמיים במשרד הבינו שיש בידיהם סמכות מינימאלית ומדיניות המפגרת אחר שאר העולם בנהלים הקשורים בחומר הרעיל. רק אחרי שהחוק יעבור תתחיל הממשלה בישראל לקנוס באופן כבד את כל מי שאחראי לזיהום האסבסט ולתבוע את מי שייתפס כמייצר או מייבא מוצרי אסבסט למדינה"⁶⁰

משקמה, בשנת 1985, חילקה הוועדה את דרכי הטיפול באסבסט לשתיים, בעקבות שני סוגי האסבסט הקיימים - אסבסט פריך ואסבסט צמנט. בשנת 1987 נאסר לחלוטין השימוש באסבסט פריך על פי תקנה שהוציאה הוועדה: "אסורה התזה, ריסוס, מריחה, בידוד, ציפוי, ריצוף, סלילת דרכים, סיתות או גריסה של אסבסט". עוד קובעת התקנה כי אסבסט יטופל ויבוקר בהתאם להנחיות ולתקנות של הארגון האמריקאי EPA⁶¹.

בשנת 1993 נכנס האסבסט לרשימת החומרים המסוכנים של ישראל, שהתפרסמה בחוק החומרים המסוכנים, שם הוגדר החומר כ"מינרל טבעי סיבי". החוק מחייב כל מי שעוסק בחומרים מסוכנים בכל דרך שהיא להחזיק בהיתר רעלים מאת הממונה על כך במשרד להגנת הסביבה. החוק מפרט את הדרכים האפשריות: "לרבות ייצור, ייבוא, אריזה, מסחר, ניפוק, העברה, אחסנה, החזקה ושימוש". בפירוט הפעולות בחוק עולה בעיה בהקשר לאסבסט, מאחר וחלק מהפעולות המתבצעות על ידי מי שעובד עם אסבסט הן פירוק, הריסה, כיסוי, סילוק, פינוי ועוד, שאינן מפורטות בחוק החומרים המסוכנים. על מנת להתגבר על בעיה זו קבע המשרד להגנת הסביבה כי המילה "לרבות" נותנת לחוק תוקף על כל הפעולות שנעשות עם חומרים מסוכנים ולא רק על אלו המצוינות במפורש בחוק.

נכון להיום לא קיימת בחקיקה הישראלית התייחסות אל אסבסט כאל חומר המהווה זיהום אוויר (אלא כאל חומר בנייה, כפי שתואר עד כה). ניתן לפרש אותו כמזהם אוויר באמצעות סעיף 4 בחוק למניעת מפגעים 1961, שקובע כי חל "איסור על זיהום האוויר שעלול להפריע לאדם

⁶⁰ Administration, "Israel Introduces Asbestos Prevention Bill", by "Asbestos and Mesotelioma Organization", 10.2.09: <http://www.asbestos-news.org/asbestos-law/israel-introduces-international-organization>, <http://www.asbestos-news.org/asbestos-law/israel-introduces-international-organization>

⁶¹ תקנת אסבסט פריך, 1987. ניתן למצוא אותה במלואה באתר המשרד להגנת הסביבה: www.sviva.gov.il

המצוי בקרבת מקום או לעוברים ושבים", אולם אין בסעיף הנ"ל פירוט של המקורות הגורמים לזיהום, ובכלל זה גם לא אסבסט.

המצב החוקי בפועל:

על פי דברי המשרד להגנת הסביבה, נכון להיום לא מתבצע בישראל ייצור אסבסט. גם ייבוא החומר, שעל פי התקנות מוגבל בכמותו, אינו קיים בפועל, כך טוענים במשרד⁶². עם זאת, בדצמבר 2008 הפיץ המשרד תזכיר חוק (טיוטה ראשונה של הצעת חוק, שמזמינה את הציבור להגיב בנדון) בנושא מניעת מפגעי אסבסט (זהו אותו חוק עליו דובר בחדשות של "ארגון האסבסט והמזוטליומה הבינלאומי" שהוזכר לעיל). התזכיר הועבר לעיון וקבלת הערות למשרדי הממשלה השונים ולגורמים נוספים, וממתין לקריאה ראשונה בכנסת.

על פי המשרד להגנת הסביבה התקנות שקיימות בנושא עד כה נכתבו בדגש על היבטים תעסוקתיים ולא סביבתיים, לכן הטיפול בנושאים הסביבתיים בהן אינו מספק. הצעת החוק האמורה לעיל מבקשת להסדיר באופן כולל ואחיד את העיסוק באסבסט בישראל ואת הטיפול במפגעי אסבסט על מנת לצמצם ולמנוע חשיפה של הציבור הרחב למפגעי האסבסט. להלן סעיפי החוק המוצעים בתזכיר של המשרד להגנת הסביבה⁶³, סעיפים שאם יאושרו על ידי כל הגורמים המוסמכים יקבלו משנה תוקף של חוק:

- הוראות המחייבות את הפסקת השימוש הקיים באסבסט פריך תוך מספר שנים מיום כניסת החוק לתוקף.
- הוראות המחייבות תחזוקה נאותה של מבני ציבור בהם קיים אסבסט צמנט וחובה ליידע את הציבור על קיום האסבסט במבנה.
- הסדרת רישוי העוסקים בעבודות אסבסט על סוגיהם השונים, על מנת להבטיח כי העוסקים בתחום יהיו בעלי הכשרה מתאימה, ויהיו כפופים למנגנוני פיקוח מתאימים.
- הוראות לגבי אופן הביצוע של טיפול במפגעי אסבסט.
- מתן סמכויות רישוי, פיקוח ואכיפה לגורמי המשרד להגנת הסביבה ולרשויות המקומיות, ובכלל זה הגדלה משמעותית של שיעורי הקנסות במקרה של הפרת הוראות החוק השונות.
- איסור מוחלט על כל שימוש חדש באסבסט.
- לחייב מוכר או משכיר של נכסי מקרקעין ליידע את הקונים או השוכרים אודות הימצאות אסבסט בנכס.
- חובת רישום הערה בטאבו על הימצאות אסבסט פריך.
- הקמת קרן לטיפול במפגעי אסבסט.

⁶² כך נכתב במפורש באתר האינטרנט שלהם: www.sviva.gov.il

⁶³ ניתן למצוא באתר התזכירים של הממשלה: www.gov.il

המכרז לפינוי אסבסט בנהרייה

התפתחות נוספת ומשמעותית בנוגע לאסבסט מצויה בדמותו של מכרז, שהוציא המשרד להגנת הסביבה ביוני 2009, ובו הוא מבקש מקבלנים שונים להציע את מועמדותם כמנהלי פרויקטים לאיתור, ניקוי וסילוק אסבסט פריך מקרקעות בגליל המערבי. כך כותב המשרד להגנת הסביבה במכרז: "ברחבי הגליל המערבי קיימים מצבורי פסולת אסבסט תעשייתית המפוזרת בקרקעות שונות, הן בשטחים חקלאיים, הן בשטחים פרטיים והן בשטחי ציבור... כמות פסולת האסבסט מוערכת בכ-150,000 מ"ק, 50,000 מ"ק מתוכם בשטחים ציבוריים". המכרז דורש מהקבלנים המציעים את הצעותיהם לכלול בהן פירוט לדרך הפינוי, הטמנת האסבסט במקום בטוח, פרסום מידע לציבור על אופן הפינוי וכן הפעלת מוקד לפניות הציבור. הידע שהוצג במכרז אודות אסבסט מבוסס על שני סקרים שערכו אנשים מטעמן של "העמותה למען איכות חיים וסביבה בנהרייה" ו"עמותת אדם, טבע ודין" בשנים 2007 ו-2002. בסקר דורגו המפגעים שאותרו לשלוש רמות מבחינת דחיפות הטיפול בהן עבור בריאות הציבור⁶⁴. על פי לשון המכרז, נראה כי המשרד להגנת הסביבה מקבל את החלוקה העולה מן הסקרים וקובע כי לפי סדר זה יש לעבוד בניקוי העתידי.

יוזמת המכרז הגיעה בעקבות תביעה שהגישו שתי העמותות כנגד עיריית נהרייה, ראש העיר נהרייה והמשרד להגנת הסביבה. בתביעה, שעדין מתדיינת בבית המשפט המחוזי בחיפה, דרשו שתי העמותות לחייב את העירייה, את ראש העיר ואת המשרד להגנת הסביבה לקבל עליהם את האחריות למפגע האסבסט הקיים ולטיפול בו. התביעה כללה חוות דעת של מר יצחק פישר, מומחה לאסבסט, ובהן פירוט מדגמי של 15 מוקדים בגליל המהווים מפגע ואינם מטופלים. מחוסר חוק ספציפי כנגד אסבסט, התביעה הסתמכה על פקודת בריאות העם (ר' פרק ג.6)⁶⁵. במהלך הדיונים, המתנהלים משנת 2008 ועד היום, ציין בית המשפט שבגוף העתידי שיפעל לתיקון הנזקים יש לכלול נציגי ציבור.

אולם שתי העמותות חשות כי מהמכרז נעדרים כמה תנאים בסיסיים. הראשון שבהם הוא קובץ הגדרות הנדסיות וכמותיות ספציפיות על אופן הביצוע: מחוסר זה נובע ש"תג המחיר" נותר פתוח (מדובר בכמויות גדולות של אסבסט, שסילוקן עלול לעלות מאות מיליוני שקלים). עוד טוענות העמותות כי טרם אותר אתר לקבורת הפסולת באופן בטוח, ולא נקבעה דרך בטוחה להובלת החומר המפונה מן השטח לאתר ההטמנה. באשר לאחריות הזיהום, במכרז נאסר על השתתפות מפעל "איתנית" (הניסוח: "כל גוף שעסק בייצור ו/או שיווק מוצרי אסבסט")⁶⁶ בפינוי, וכך משחררים אותם מן האחריות למפגע שיצרו. לחלופין מציע המשרד להגנת הסביבה בתזכיר החוק למפגע אסבסט להקים "קרן לניקוי אדמות המדינה", אשר בה ישקיעו המדינה ומפעל

⁶⁴ לפרטים, ר' מכרז לניקוי הגליל ורשימת אתרים מסוכנים www.sviva.gov.il

⁶⁵ את פרטי התביעה ופרוטוקולים בית המשפט ניתן למצוא באתר "העמותה למען איכות חיים וסביבה בנהרייה":

http://naen.timba.info/asbest_news.htm

⁶⁶ זוהי סוגייה מורכבת. בבסיס הטענה של העמותות עומד העיקרון שהמזהם צריך לשלם, וודאי שלא להרוויח מניקוי הנזק שעשה. אך מן העבר השני, נדמה כי ל"איתנית", כגוף המנהל את ניקוי השטח מאסבסט, יש אינטרס מנוגד – לכוון את הלקוחים כך שיפחיתו את מידת הזיהום ש"תימצא" בשטח.

"איתנית" שווה בשווה כספים לניקוי הגליל מאסבסט. אולם שתי הצעות אלו אינן בהכרח סותרות זו את זו, שכן המכרז לניקוי הגליל יכול להתקיים ללא "איתנית" ובמקביל יממן המפעל את הקרן עבור עבודות ניקוי ושיקום נוספות.

בפועל, העבודה המעשית של פינוי האסבסט מאדמות הגליל תוכל להתחיל רק בעוד זמן רב. על קבלן מסוים ליזום במכרז ואחר כך לפרסם מכרזי משנה לחיפוש אחר קבלני משנה (ובהם יפורטו הגדרות הנדסיות וכמותיות) - מהלך שכזה מותנה באישור תקציבים והמתנה לתוצאות המכרזים הללו ונמשך על פי רוב על פני כמה שנים. לפיכך, על פי ההערכות שלנו ושל שתי העמותות האמורות, המימון הנוכחי ישמש לכל היותר לעבודות מכינות, ועבודת פינוי ממשיית תוכל להתחיל לכל המוקדם בעוד שנים אחדות.

ג.7 הצגת מודל רשתות מדיניות, כפי שהוא עולה ממחקרה של ד"ר יעל פרג

ד"ר יעל פרג מציגה מודל של רשתות מדיניות, שהוא למעשה הצעה לכלי אנליטי המסוגל לנתח מדיניות סביבתית במקומות שונים בעולם. ניתוח כזה יכול להוביל לתובנות מרתקות כדוגמת השוואת תהליך העיצוב של מדיניות הסביבה בישראל למדיניות סביבה במדינות מפותחות בעולם. מתוך ניתוח שכזה אפשר לגזור המלצות שונות בנוגע לבניית יכולות סביבתיות של מדינה, שיפור היכולות הקיימות במדינה ושיפור מידת האקטיביות של גורמי הממשל השונים במדיניות הסביבתית באותה מדינה.

בעבודתה מגדירה ד"ר פרג רשתות תהליך כך: "רשתות תהליך מאפשרות לבחון את רשתות השחקנים הפעילים בכל אחד משלבי המדיניות בנפרד, ומאפשרות להסביר את התוצרים של כל שלב מדיניות והמאפיינים שלהם"⁶⁷. היא טוענת כי קיימת חשיבות רבה לבחינת כל תהליכי המדיניות, ולא רק לבחינה מצומצמת של שלב אחד בתהליך, כפי שנהוג לעשות בדרך כלל. זאת מאחר ולשלב המוקדמים יש השפעה גדולה על עיצוב השלבים המאוחרים. רציונל זה הוא שהנחה את ד"ר פרג לבצע את המחקר מלכתחילה ואף עיצב את האופן שבו ערכה את המחקר⁶⁸.

רשתות תהליך הוא מודל ביקורתי ביסודו, מאחר והוא מציע ניתוח שבסופו ניתן לגזור המלצות לשיפור מדיניות, הנוגעות הן למבנה המוסדות במדינה הנחקרת והן למעצבי המדיניות ואף לציבור הרחב. תכונתו הביקורתית של מודל רשתות התהליך של ד"ר פרג היא זו שבזכותה ביקשנו לאמץ אותו עבור מדיניות האסבסט בישראל.

ראשית, מתחיל מודל רשתות התהליך לפרוט למרכיבים את השותפים בקבלת החלטות שונות בכל הקשור למדיניות. ד"ר פרג מכנה את השותפים "שחקנים", על כן נאמץ ביטוי זה בבואנו לתאר את המודל. לאחר מכן, פורש המודל את כל הקשרים בין השחקנים השונים, על שום הפרישה הזו נקרא המודל "רשתות". לשחקנים שונים קשרים שונים ולכמה מהם כמה קשרים זה

⁶⁷ ד"ר יעל פרג, "רשתות תהליך: מדיניות סביבה בישראל ובניית יכולות סביבתיות", עמוד 389.

⁶⁸ שם, עמוד 390.

עם זה. בפרישה זו נראה באופן מוחשי את איכות וכמות החליפין בין השחקנים השונים בשלבים השונים. בשלב הזה מבקש המודל לאתר שיתופי פעולה או ניגודי אינטרסים בין הגורמים השונים וגם להבחין באסטרטגיות פעולה בהן נוקטים השחקנים בשלבים השונים. לאחר הרדוקציה לגורמים וקשרים יוצר המודל בנייה מחדש, כתמונה מלאה. עם כך, מודל רשתות תהליך מאפשר בחינה של רכיבים שונים באופן מודולארי, אבל גם התייחסות אל כלל הרשתות כאל שלם, כאל תהליך כולל. ההתבוננות באופן של חלקים חלקים מעניקה לחוקר יכולת בדיקה של "פתיחות" ו"סגירות" של שלבים מסוימים בתהליך בפני שחקנים מסוימים. כך למשל ניתן לבדוק האם בשלב החקיקה יש פתיחות כלפי הציבור או שמא מדובר בקבוצת שחקנים סגורה (חברי כנסת לצורך ההמחשה) שפועלת לבדה⁶⁹.

המסקנות אליהן הגיעה ד"ר פרג בעבודתה בכל הקשור למדיניות סביבתית בישראל הן כי הציבור כמעט ואינו מיוצג ברשתות השונות לכל אורכו של תהליך עיצוב מדיניות הסביבה בישראל. בניגוד למקומות אחרים, דוגמת הולנד ושוויץ, הציבור הישראלי מעורב במידה מועטה מאוד בחקיקת החוקים, אופן אכיפתם ועיצוב המדיניות בכללותה. עוד טוענת ד"ר פרג כי בניגוד לציבור הנעדר מתהליכי קבלת ההחלטות, דווקא הקהילייה העסקית נוכחת מאוד בתהליכים אלו. האינטרסים הכלכליים של המגזר העסקי בישראל שלא להשקיע משאבים בהגנה על הסביבה ובמניעת תחלואה - מאחר ומשאבים כאלה מגדילים את העלויות וכך מקטינים את הרווחים - זוכים לייצוג יתר ברשתות התהליך של ישראל. אספקט נוסף שעולה מתוך המודל הוא כי משרדי הממשלה בישראל נוטים, על פי רוב, להכיל אינטרסים משותפים לבעלי העסקים, כלומר פיתוח וצמיחה כלכלית על חשבון הסביבה.

ד"ר פרג כותבת כי "מדיניות הסביבה בישראל מתפזרת על בריאות הציבור ובשם אינטרסים של פיתוח כלכלי ותעסוקה מתירה מחד למגזר העסקי להמשיך לזהם ומאידך למשרדי הממשלה להמשיך לא לעשות דבר בנדון"⁷⁰. על כך היא מוסיפה כי השחקן האחראי על בריאות הציבור בישראל, קרי משרד הבריאות, מתנהג באופן פאסיבי בכל הקשור לדחיפת מדיניות של זהירות מונעת, כמו למשל דחיפת מדיניות המטפלת בזיהום אוויר הגורם לתחלואה ציבורית. נוסף על כך מצוי השחקן האחראי על בריאות הסביבה, קרי המשרד להגנת הסביבה, במעמד חלש מכדי לקדם חוקים, אמנות (רשת חלופית לחוק ממשלתי) או אכיפה. זאת בהשוואה לאיחוד האירופי למשל, שם אומץ עיקרון בריאות הציבור כעיקרון מנחה בתהליך עיצוב המדיניות הסביבתית. בישראל נוצר מצב בו יחסי הכוחות בין שחקנים המקדמים מדיניות של הגנה על הסביבה והציבור, לבין אלה המעוניינים למנוע מדיניות כזו, הפכו את קידום המדיניות לקשה מאוד⁷¹.

⁶⁹ המודל היסודי של שחקנים ורשתות הוצע בשנת 1999 על ידי גרהם אליסון, במחקר על משבר הטילים הקובני. Allison, Graham and Zelikow, P. *Essence of Decision: Explaining the Cuban Missile Crisis*; New York: Longman, 1999.

⁷⁰ פרג, עמוד 391.

⁷¹ שם.

חשוב לנו להדגיש את ההמלצות אליהן הגיע ד"ר פרג במחקרה ולציין אותן כאן, מאחר ואנו רואים בהן את עיקר חשיבות המודל שלה. נוסף על כך אנו מבקשים לאמץ חלק ניכר מהמלצותיה כהמלצות התואמות את מה שרואות עינינו באשר לאסבסט בישראל. להלן ההמלצות שהגיעה אליהן ד"ר פרג במחקרה:

- א. קידום השימוש בחשבונאות סביבתית, בתמריצים כלכליים ובתמריצי שוק- תהליך עיצוב המדיניות צריך לכלול ניתוח כלכלי של הסביבה, על כל היבטיה, כולל עלויות והתועלות האקולוגיות, החברתיות והלאומיות. במקביל, קוראת ד"ר פרג להגברת השימוש בתמריצים המגבירים את הכדאיות הכלכלית הנלווית להגנה על הסביבה, תמריצים שיינתנו גם למגזר העסקי וגם לציבורי. על מנת להיערך לתמריצים אלו יש צורך בשיתוף פעולה בין משרדי הממשלה השונים.
- ב. על מנת לשפר את היכולות הסביבתיות בישראל יש להעצים את המוסדות ואת השחקנים הסביבתיים, כגון ארגונים למען הסביבה המשרד להגנת הסביבה, וועדות הקשורות בסביבה ועוד. העצמה פירושה הגדלת התקציבים לגורמים אלו וגם הרחבת הסמכויות והמעמד שניתן להם.
- ג. הגברת השקיפות מול הציבור באמצעות הזרמת מידע ונתונים אמינים אודות ביצועים סביבתיים של השחקנים השונים. יש גם צורך בהתייעצויות עם הציבור, לצורך כך יש לתרגם את המונחים הסביבתיים והכלכליים המורכבים לשפה בהירה, כזו שתאפשר לציבור לעקוב אחר תהליך עיצוב המדיניות ותגביר את תחושת השייכות שלו לסביבה ולתהליכי עיצוב המדיניות הקשורים בה.
- ד. השקעה במחקר מקומי ולימוד מקיף של ההשלכות המתלוות למפגעי סביבה על מערכת האקולוגית, על בריאות הציבור ועל הצדק הסביבתי והחברתי.
- ה. פיתוח תוכניות חינוכיות שיקדמו ערכי סביבה ויעמיקו את המחויבות האישית של כל אחד ואחת להגנה על הסביבה.
- ו. ההמלצה האחרונה קוראת לנבחרי הציבור בישראל לפעול להגברת הזיקה בין ישראל לזירה הבינלאומית בכל הנוגע להגנה ושמירה על הסביבה.

הטיעון המובהק ביותר, ומבחינתנו המשמעותי מכולם, במודל רשתות התהליך שתואם את הממצאים שלנו הוא הטיעון בדבר היעדר ייצוג לציבור הרחב, או ייצוג מצומצם למדי, בתהליך קבלת ההחלטות. נוכחנו לראות כי בכל הקשור לאסבסט אכן ניכרת היעדרות משמעותית של הציבור בתהליך עיצוב מדיניות הסביבה. הסיבות לחוסר בייצוג ציבורי בנושא אסבסט נובע משלל סיבות אפשריות. אחת מהן למשל היא שנושא האסבסט התמקד בעיקר באזור גיאוגרפי אחד בישראל - הגליל המערבי ונהרייה. אך לא רק הגיאוגרפיה תחמה את העיסוק באסבסט, אלא גם תיחום חברתי - עיקר הנפגעים מאסבסט היו השכבות החלשות בחברה, כגון פועלי צווארון כחול, עובדים ושבים בתחנה המרכזית בתל אביב וחיילי צה"ל. בלשון אחר, בעלי אופי סוציו-אקונומי נמוך. אין אנו באים לחרוץ מסקנה האם אלו הגורמים הרשמיים שדחקו את הציבור מן השיח הסביבתי במקרה של אסבסט, או האם הציבור הוא זה שנעדר ממנו מרצון או מכורח המציאות. כל שאנו מבקשים להצביע עליו הוא ההיעדרות עצמה. בשל העובדה שמצאנו שאלה זו מרתקת וראויה לחקירה מעמיקה, נשמח להתמקד בה בעבודותינו הבאות בלימודי סביבה ולברר

לעומקה את השאלה הבאה - מדוע הציבור בישראל אינו נוכח בתהליכי קבלת ההחלטות הסביבתיים?

ד. שאלת המחקר

מה הם הגורמים לעיכוב הממושך בארץ, עיכוב של 70 שנה, בתחילת הטיפול הממוסד למניעת נזקי האסבסט ותיקונם והאם המודל של אסבסט בישראל תואם למודל "רשתות התהליך", כפי שמציגה אותו ד"ר יעל פרג במחקרה?

שאלת המחקר מתחילה בהצגת תהליך קבלת ההחלטות של משרדי הממשלה השונים בנוגע לטיפול באסבסט, כמקור של זיהום אוויר חלקיקי. בהצגת תהליך קבלת ההחלטות ישנה התמקדות בעיר נהרייה כמייצגת העיקרית של בעיית האסבסט האקוטית בישראל, בגלל כמויות אשפת האסבסט הפריך והמתפורר שהוטלה בעיר ובסביבתה (אף כי אין לשכוח שברחבי ישראל קיימים מבני אסבסט רבים, בהיקף של מיליוני מטרים מרובעים, שגם בהם טמונה סכנה לטווח ארוך).

בדצמבר 2008 הונחה על שולחן הכנסת הצעת חוק המבקשת להסדיר באופן כולל ואחיד את העיסוק באסבסט בישראל ואת הטיפול במפגעי אסבסט על מנת לצמצם ולמנוע חשיפה של הציבור הרחב למפגעי אסבסט. מסקנתנו היא שתאריך זה מייצג עיכוב ממושך עבור טיפול בנושא שדבר הנזק הבריאותי שלו היה ידוע בעולם כבר בשנות השלושים של המאה ה-20, כלומר לפני 70 שנה.

החלק האחרון בשאלת המחקר מתמקד בהצגת מודל "רשתות תהליך", המספק כלי אנליטי לדייון מחקרי בעיצוב מדיניות סביבה בישראל. בבואנו לבדוק את מידת ההתאמה בין מדיניות האסבסט בישראל לבין מודל רשתות תהליך כפי שהיא עולה משאלת המחקר אנו מבקשים לבחון באופן נפרד וקפדני את החלק העוסק בהיעדר ייצוג לציבור הרחב בתהליך קבלת ההחלטות, כלומר מהם הגורמים שמרחיקים את הציבור ממוקד המדיניות הסביבתית.

בסופה של שאלת המחקר אנו מבקשים לשים דגש על ההמלצות אליהן חותר מודל רשתות התהליך, מאחר ואנו רואים בהן חשיבות עצומה למחקר, לשאלת המחקר ולתשובה של שאלת המחקר.

ה. חשיבותה של שאלת המחקר

אנו רואים חשיבות גדולה בשאלת המחקר שהצענו, מאחר והמסקנות העולות ממודל רשתות התהליך לגבי דרכי הפעולה המומלצות עבור ממשלת ישראל וגורמים ממשלתיים אחרים בנושאים של הגנה ושמירה על הסביבה תואמים גם את נושא האסבסט, כפי שהוא מוצג בעבודה זו.

אנו סבורים כי יש לקדם את פירוק האסבסט והפסקת השימוש בו לאלתר על ידי תמריצים כלכליים ותמריצי שוק, שיינתנו למגזר העסקי. דוגמאות לתמריצים כאלו הם למשל העלאת המחיר שתאגידים וחברות מסחריות נדרשות לשלם עבור זיהום אוויר במהלך הייצור. תמריץ כזה יעניק לחברות אינטרס כלכלי להפחית את מידת הזיהום ולא ימתין עד שאינטרס סביבתי יגרום לכך.

כמו כן, אנו רואים חשיבות גדולה בשיתוף פעולה מלא ויסודי בין משרדי הממשלה השונים בכל הקשור לאסבסט. לא ייתכן כי משרד התעשייה והמסחר, משרד הבריאות, משרד הפנים כאחראי על הרשויות המקומיות והמשרד להגנת הסביבה לא ישתפו פעולה בתחום כזה, שנוגע לתחום שיפוטם באופן זה או אחר. נוסף על כך, אנו רואים חשיבות עליונה בהעצמת המוסדות והשחקנים הסביבתיים הקשורים לאסבסט, כגון ארגונים למען הסביבה הפועלים בתחום, דוגמת העמותה למען איכות חיים וסביבה בנהרייה או עמותת אדם, טבע ודין ואף המשרד להגנת הסביבה כגוף בעל אינטרסים זהים לארגונים הלא ממשלתיים. על הארגונים האלו לשתף פעולה כפי שעל משרדי הממשלה לשתף פעולה, על מנת לחתור למטרה המשותפת – הפחתת זיהום האסבסט והסכנות הנלוות לו. כמובן שעל כל אלו יש להוסיף גם התנהלות שקופה אל מול הציבור, שקיפות שתתקבל כתוצאה מהזרמת מידע ונתונים אמניים אודות ביצועים סביבתיים של השחקנים השונים, ובעיקר אלו הממלכתיים.

המלצתנו האחרונה נוגעת לנבחרי הציבור. אנו קוראים לחברי הכנסת והממשלה, שנבחרו על ידי הציבור בישראל, לייצג נאמנה את האינטרסים של התושבים ככאלו המבקשים לדאוג לבריאותם ולסביבתם. ייצוג כזה הוא חקיקת חוקים, אמנות וחתימה להגברת הזיקה בין ישראל לזירה הבינלאומית בכל הנוגע להגנה ושמירה על הסביבה מפני נזקי האסבסט.

ולסיום, חשיבות נוספת שגלומה בשאלת המחקר שהצענו בעבודה זו היא מסוג "צדק סביבתי". צדק סביבתי הוא מונח המתאר חוסר אפליה בכל הקשור למפגעים סביבתיים. ארגון EPA הגדיר אותו כך⁷²: "מתן טיפול הוגן ומעורבות בעלת משמעות של כלל האוכלוסייה - ללא קשר למוצא, צבע, לאום או הכנסה - בהתייחס לפיתוח, יישום ואכיפה של חוקים סביבתיים, תקנות ומדיניות. טיפול הוגן פירושו שאף קבוצת אוכלוסין, כולל קבוצות מיעוטים אתניות או סוציו-אקונומיות, צריכה לשאת בחלוקה לא פרופורציונאלית של השלכות סביבתיות שליליות הנגרמות מפעולות תעשייה, רשויות מקומיות או מביצוע תוכניות ומדיניות ברמה המקומית,

⁷² מתוך אתר הארגון: www.epa.gov

האזורית והלאומית. מעורבות פירושה מתן הזדמנות ממשית לתושבי הקהילות הנפגעות לקחת חלק בהחלטות בנוגע לפעילות המשפיעה על סביבתם ובריאותם. צדק סביבתי היא מטרה שיש להשיגה עבור כל יחיד וכל קבוצת אוכלוסייה. צדק סביבתי יושג כאשר כל אדם, ללא קשר למוצאו, תרבותו או הכנסתו, ייהנה מאותה מידה של הגנה מפני סיכונים סביבתיים, ומגישה שווה לתהליך קבלת ההחלטות בנוגע לסביבה בה הוא חי, לומד ועובד". בכל הקשור לאסבסט, אנו רואים בגליל המערבי אזור פריפריה, ועל כן בתושביו קבוצה סוציו-אקונומית מוחלשת. אותו הדבר גם לגבי עובדים ממפעל "איתנית" ועובדי בניין באשר הם הבאים במגע עם אסבסט. אם כך, הפגיעה העיקרית מסיבי אסבסט מתבצעת על קבוצות אוכלוסייה מוחלשות, ועל כן נוצרת עבורם מציאות של חוסר צדק סביבתי. שאלת מחקר שתדון במדיניות הממשלתית בכל הקשור לאסבסט, תוציא לאור גם אמיתות אודות אי הצדק החברתי ואולי גם תספק מענה ופיתרון תוך כדי חתירה לשוויון ולצדק סביבתיים.

1. מסקנות בעקבות העבודה

מאחר ובחנו את הגורמים לחולשת הייצוג הציבורי בנושא האסבסט בישראל, במהלך העבודה העלינו כמה סיבות אפשריות. ניתוח הסיבות לא היה במסגרת עבודה זו ומפאת קוצר היריעה לא יכולנו להרחיב עליו את הדיבור, אולם נשמח לחלוק כמה הצעות שעלו, כתוצאות ראשונות שיכולים לסייע למחקרים עתידיים.

אחד מהגורמים לחולשת הייצוג הציבורי נובע מכך שנוקי האסבסט בישראל הצטמצמו לאזור גיאוגרפי מצומצם - הגליל המערבי והעיר נהרייה. באזור פריפריאלי זה פעל בית החרושת היחיד לייצור מוצרים מאסבסט. זהו אותו אזור שאוכלוסייתו נחשפה לזיהום בצורה הבולטת והמשמעותית ביותר. אם כך, בראש ובראשונה ולפני כל גורם אחר, מדובר פשוט בקבוצת ניזוקים קטנה יחסית. אם קבוצת הניזוקים הייתה גדולה יותר, אזי סביר להניח שהרעש הציבורי שסיפורם היה מעורר היה בהתאם גדול יותר.

השערה נוספת שהעלינו בדבר העיכוב בטיפול באסבסט בישראל היא שלא רק הגיאוגרפיה תחמה את העיסוק באסבסט, אלא גם מעמד חברתי. עיקר הנפגעים מאסבסט היו מן השכבות החלשות בחברה - פועלי צווארון כחול ומשפחותיהם וקבוצות פריפריאליות בחברה הישראלית כגון עולים חדשים, ערבים, עובדים ושבים בתחנה המרכזית בתל אביב וחיילי צה"ל. בלשון אחר, אוכלוסיות בעלות קול ציבורי מוחלש.

סיבה אפשרית שלישית קשורה במונח ובאופן החשיבה של "בניין הארץ". הקמת מפעל יצרני בפריפריה ומתן עבודה ופרנסה למספר רב של עולים חדשים ותושבים מקומיים נתפסה כמעשה חיובי על ידי החברה הישראלית, התקשורת הישראלית ומקבלי ההחלטות בישראל. כלומר תפיסות אידיאולוגיות "ציוניות" סייעו להכשיר את הצד האפל של המיזם התעשייתי הזה ולהדחיק באופן ציבורי את ההשלכות הקשות שלו.

וכמובן שקיימות סיבות אפשריות נוספות שבסיסם באינטרסים אישיים וקבוצתיים, כלכליים ופוליטיים. מפעל הוא בסופו של דבר גוף יצרני, שפועל בקונטקסט תעשייתי-כלכלי. ככזה, השיקולים הסביבתיים מוקרבים לעתים עבור שיקולים כלכליים.

אולם אנו עדין סבורים כי כל ההסברים שלעיל אסור שיסתירו את העובדה כי הגורמים השונים שאחראים להכנסת האסבסט לשימוש בישראל – והם מורכבים בראש וראשונה מהיזם הכלכלי ומקבלי ומאשרי ההחלטות בממשלה ובמוסדות השונים - היו מודעים מלכתחילה (כלומר, בשנת הקמת המפעל – 1952) ובמשך 50 השנים שלאחר מכן למפגע הבריאותי שיצרו.

חקירתנו את נושא האסבסט מחזקת את המסקנות העולות מעבודתה של ד"ר פרג באשר לדרכי הפעולה המומלצות עבור ממשלת ישראל וגורמים ממשלתיים אחרים בנושאים של הגנה ושמירה על הסביבה.

Arad S, Barchana M, Yukelson A, Geffen D (2000), IMAJ, Vol.2, 828-832, "A worrying increase in the incidence of mesothelioma in Israel".

Atmospheric Aerosols: What Are They, and Why Are They So important? NASA FS-1996-08-11-LaRC, Feb. 2004, asd-www.larc.nasa.gov

Barak Y, Achiron A, Rotstein Z., Elizur A, Noy S (1998), Psycho-oncology Vol.7, 126-128, "Stress Associated with Asbestosis: The Trauma of waiting for Death".

Besson P., Lalanne F.X., Wang Y., Guyot F. (1999), Ann. Occup. Hyg. Vol. 43, 527-541, "Multi-parameter Observation of Environmental Asbestos Pollution at the Institut de Physique du Globe de Paris (Jussieu Campus, France).

Deweese, D.N. (1987), American Scientist, Vol. 75:285-288, "Does the danger from asbestos in buildings warrant the cost of taking it out".

Greenberg M, Lloyd Davies TA Mesothelioma Register 1967-1968, Br J Ind Med, Vol. 31:91-104 (1974)

Hansen and Lacis, (1990), Nature, "Sun and dust versus greenhouse gases: An assessment of their relative roles in global climate change".

Lemesch C, Katz L, Steinitz R. Mesothelioma in Israel (1973 -1982); The Journal of the Royal Society for the Promotion of Health, Vol. 106, No. 4, 141-142 (1986)

Lemesch C, Steinitz R, Wassermann M. "Epidemiology of Mesothelioma in Israel" , Environmental Research , Vol 12: 255-61 (1976).

Pairon et al (1993), Occ. And Env. Medicine, Vol 51: 244-249, "Pleural mesothelioma and exposure to asbestos: evaluation from work histories and analysis of asbestos bodies in brochoalveolar lavage fluid or lung tissue in 131 patients".

Ribak J., Lerman Y. (1995), Public Health Reviews, Vol 23, No.1:35-45, "Use of asbestos in expected and unexpected places in Israel".

Tuch H, Tulchinsky T, Casper M, Kaane H (1986), American Journal of Industrial medicine, Vol. 10, 471-478, "Medical Screening of Former Asbestos Cement Workers in Israel: A Pilot Program.

פרג יעל (2005), "ירשתות תהליך: עיצובה של מדיניות הסביבה בישראל"

אתרי אינטרנט:

אתר EPA, הסוכנות האמריקאית להגנת הסביבה (EPA)

<http://www.epa.gov/ebtpages/airairpollutants.html>

אתר USGS, המכון הממשלתי האמריקאי לסקר מחצבים

<http://www.usgs.gov/>

אתרים עם בסיס נתונים ומידע רפואיים

<http://www.find-health-articles.com/>

<http://www.epa.gov/oppt/asbestos/pubs/help.html#health>

<http://www.asbestos-institute.ca/specialreports/meso.html>

אתר העמותה לאיכות חיים וסביבה בנהרייה

<http://naen.timba.info/index.htm>

אתרים שמכילים נתונים על חקיקה בנוגע לאסבסט

<http://www.encompassed.co.uk/latest-news/summary-of-the-control-of-asbestos-regulations.com>

<http://jpart.oxfordjournals.org/cgi/content/abstract/13/2/193>

<http://www.wsws.org/articles/2002/nov2002/asbe-n13.shtml>

<http://hg.org/asbestos>

<http://www.asbestos.net/news/asbestos-world-roundup.html>

<http://www.afsset.fr>

http://en.wikipedia.org/wiki/Asbestos_and_the_law

<http://www.rics.org/Practiceareas/Management/healthandsafety/Hazardoussubstances>

<http://hesa.etui-rehs.org/uk/newsletter/files/Newsletter27p7-21.pdf>

<http://www.btinternet.com/~ibas/>

ת. נספחיםנספח 1: רשימת מזהמי האוויר המקורית

AS Number	Chemical Name
75070	Acetaldehyde
60355	Acetamide
75058	Acetonitrile
98862	Acetophenone
53963	2-Acetylaminofluorene
107028	Acrolein
79061	Acrylamide
79107	Acrylic acid
107131	Acrylonitrile
107051	Allyl chloride
92671	4-Aminobiphenyl
62533	Aniline
90040	o-Anisidine
1332214	Asbestos
71432	Benzene (including benzene from gasoline)
92875	Benzidine
98077	Benzotrichloride
100447	Benzyl chloride
92524	Biphenyl
117817	Bis(2-ethylhexyl)phthalate (DEHP)
542881	Bis(chloromethyl)ether
75252	Bromoform
106990	1,3-Butadiene
156627	Calcium cyanamide
105602	(See Modification)Caprolactam
133062	Captan
63252	Carbaryl
75150	Carbon disulfide
56235	Carbon tetrachloride
463581	Carbonyl sulfide
120809	Catechol
133904	Chloramben
57749	Chlordane
7782505	Chlorine
79118	Chloroacetic acid

532274	2-Chloroacetophenone
108907	Chlorobenzene
510156	Chlorobenzilate
67663	Chloroform
107302	Chloromethyl methyl ether
126998	Chloroprene
1319773	Cresols/Cresylic acid (isomers and mixture)
95487	o-Cresol
108394	m-Cresol
106445	p-Cresol
98828	Cumene
94757	2,4-D, salts and esters
3547044	DDE
334883	Diazomethane
132649	Dibenzofurans
96128	1,2-Dibromo-3-chloropropane
84742	Dibutylphthalate
106467	1,4-Dichlorobenzene(p)
91941	3,3-Dichlorobenzidene
111444	Dichloroethyl ether (Bis(2-chloroethyl)ether)
542756	1,3-Dichloropropene
62737	Dichlorvos
111422	Diethanolamine
121697	N,N-Dimethylaniline
64675	Diethyl sulfate
119904	3,3-Dimethoxybenzidine
60117	Dimethyl aminoazobenzene
119937	3,3'-Dimethyl benzidine
79447	Dimethyl carbamoyl chloride
68122	Dimethyl formamide
57147	1,1-Dimethyl hydrazine
131113	Dimethyl phthalate
77781	Dimethyl sulfate
534521	4,6-Dinitro-o-cresol, and salts
51285	2,4-Dinitrophenol
121142	2,4-Dinitrotoluene
123911	1,4-Dioxane (1,4-Diethyleneoxide)
122667	1,2-Diphenylhydrazine
106898	Epichlorohydrin (1-Chloro-2,3-epoxypropane)

106887	1,2-Epoxybutane
140885	Ethyl acrylate
100414	Ethyl benzene
51796	Ethyl carbamate (Urethane)
75003	Ethyl chloride (Chloroethane)
106934	Ethylene dibromide (Dibromoethane)
107062	Ethylene dichloride (1,2-Dichloroethane)
107211	Ethylene glycol
151564	Ethylene imine (Aziridine)
75218	Ethylene oxide
96457	Ethylene thiourea
75343	Ethylidene dichloride (1,1-Dichloroethane)
50000	Formaldehyde
76448	Heptachlor
118741	Hexachlorobenzene
87683	Hexachlorobutadiene
77474	Hexachlorocyclopentadiene
67721	Hexachloroethane
822060	Hexamethylene-1,6-diisocyanate
680319	Hexamethylphosphoramide
110543	Hexane
302012	Hydrazine
7647010	Hydrochloric acid
7664393	Hydrogen fluoride (Hydrofluoric acid)
7783064	<u>(See Modification)</u> Hydrogen sulfide
123319	Hydroquinone
78591	Isophorone
58899	Lindane (all isomers)
108316	Maleic anhydride
67561	Methanol
72435	Methoxychlor
74839	Methyl bromide (Bromomethane)
74873	Methyl chloride (Chloromethane)
71556	Methyl chloroform (1,1,1-Trichloroethane)
78933	<u>(See Modification)</u> Methyl ethyl ketone (2-Butanone)
60344	Methyl hydrazine
74884	Methyl iodide (Iodomethane)
108101	Methyl isobutyl ketone (Hexone)
624839	Methyl isocyanate

80626	Methyl methacrylate
1634044	Methyl tert butyl ether
101144	4,4-Methylene bis(2-chloroaniline)
75092	Methylene chloride (Dichloromethane)
101688	Methylene diphenyl diisocyanate (MDI)
101779	4,4'-Methylenedianiline
91203	Naphthalene
98953	Nitrobenzene
92933	4-Nitrobiphenyl
100027	4-Nitrophenol
79469	2-Nitropropane
684935	N-Nitroso-N-methylurea
62759	N-Nitrosodimethylamine
59892	N-Nitrosomorpholine
56382	Parathion
82688	Pentachloronitrobenzene (Quintobenzene)
87865	Pentachlorophenol
108952	Phenol
106503	p-Phenylenediamine
75445	Phosgene
7803512	Phosphine
7723140	Phosphorus
85449	Phthalic anhydride
1336363	Polychlorinated biphenyls (Aroclors)
1120714	1,3-Propane sultone
57578	beta-Propiolactone
123386	Propionaldehyde
114261	Propoxur (Baygon)
78875	Propylene dichloride (1,2-Dichloropropane)
75569	Propylene oxide
75558	1,2-Propylenimine (2-Methyl aziridine)
91225	Quinoline
106514	Quinone
100425	Styrene
96093	Styrene oxide
1746016	2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-p-dioxin
79345	1,1,2,2-Tetrachloroethane
127184	Tetrachloroethylene (Perchloroethylene)
7550450	Titanium tetrachloride

108883	Toluene
95807	2,4-Toluene diamine
584849	2,4-Toluene diisocyanate
95534	o-Toluidine
8001352	Toxaphene (chlorinated camphene)
120821	1,2,4-Trichlorobenzene
79005	1,1,2-Trichloroethane
79016	Trichloroethylene
95954	2,4,5-Trichlorophenol
88062	2,4,6-Trichlorophenol
121448	Triethylamine
1582098	Trifluralin
540841	2,2,4-Trimethylpentane
108054	Vinyl acetate
593602	Vinyl bromide
75014	Vinyl chloride
75354	Vinylidene chloride (1,1-Dichloroethylene)
1330207	Xylenes (isomers and mixture)
95476	o-Xylenes
108383	m-Xylenes
106423	p-Xylenes
0	Antimony Compounds
0	Arsenic Compounds (inorganic including arsine)
0	Beryllium Compounds
0	Cadmium Compounds
0	Chromium Compounds
0	Cobalt Compounds
0	Coke Oven Emissions
0	Cyanide Compounds ¹
0	Glycol ethers ²
0	Lead Compounds
0	Manganese Compounds
0	Mercury Compounds
0	Fine mineral fibers ³
0	Nickel Compounds
0	Polycyclic Organic Matter ⁴
0	Radionuclides (including radon) ⁵
0	Selenium Compounds

נספח 2: פיזיקה של שהיית PM באוויר

זיהום חלקיקי (PM) הוא כינוי כולל לתערובת החלקיקים וטיפות הנוזל הזעירות הנמצאות באוויר. מרבית הגורמים הרשמיים מסכימים בדעתם כי האדם אחראי לייצור 10 אחוז מן החלקיקים הקטנים מ-5 מיקרון. בכל הקשור לחלקיקים גדולים מ- 5 מיקרון, חלקו של האדם נאמד בפחות מ- 4%⁷³.

חלק מאותם חלקיקים, כדוגמת אבק וחלקיקי פיח, גדולים וניתנים לראייה גם בעין בלתי מזוינת. אולם, מרביתם קטנים למדי, ועל כן ניתן לראות אותם רק באמצעות מיקרוסקופים אופטיים או אלקטרוניים. מטעמים מעשיים, הנהיגה EPA חלוקת החלקיקים המזהמים לשלוש קטגוריות:

1. חלקיקים הגדולים מ- 10 מיקרון (אלפית המ"מ או מיליונית המטר). חלקיקים אלה אינם נשארים לתקופות ממושכות באטמוספירה ולא נשחים לטווחים גדולים. לכן, נכון להיום, אלה אינם נחשבים מסוכנים לסביבה.
2. חלקיקים שגודלם נע בין 10 ל- 2.5 מיקרון. מכונים "חלקיקים גסים ננשמים" - "Inhalable Coarse Particles". חלקיקים אלו שוהים באוויר למשך שנים רבות.
3. חלקיקים הקטנים מ- 2.5 מיקרון. מכונים "חלקיקים עדינים" - "Fine Particles". חלוקה זו⁷⁴ התקבלה בכלל העולם.

חלוקה נוספת נעשית בין "חלקיקים ראשוניים" המופצים ישירות מן המקור (כדוגמת אתרי בנייה וסלילה, שדות, מעשנות ומדורות), ובין "חלקיקים משניים" אשר מתגבשים באטמוספירה מריאקציות בין כימיקלים. רוב החלקיקים העדינים נוצרים באופן האחרון, כלומר מריאקציות כימיות, ובעיקר מריאקציה בין תחמוצות גופרית Sulfur Dioxides ובין תחמוצות חנקניות Nitrogen Oxides.

לכך יש להוסיף כי מעבר לחלוקת החלקיקים על פי גודלם, קיימת גם חלוקה ענפה של חלקיקים על פי צורתם ועל פי הרכבם הכימי.

שהיית חלקיקים באטמוספירה ופיזורם הגיאוגרפי:

מדי שנה מעלים הרוח, גלי הים, הרי הגעש ושאר המקורות מפני כדור הארץ אל האוויר כ- 10^{14} גרם (כ- 100 מיליון טונות) של PM ושאר ארוסולים, ובאטמוספירה העולמית נישאים בכל

⁷³ פרופ' קולין פרייס, סמינר "שינויי אקלים", אוניברסיטת ת"א, החוג לגיאופיזיקה, 1/09

⁷⁴

"PM is a complex mixture of extremely small particles and liquid droplets in the air (i.e. dust, soot and particles too small to see). The standards address two categories of particle pollution: **fine particles and inhalable coarse particles**. Fine particles are 2.5 micrometers in diameter and smaller (PM2.5); inhalable coarse particles have diameters between 2.5 and 10 micrometers. (<http://enewsusa.blogspot.com/2006/09/epa-issues-final-fine-coarse-pm-air.html>)

עת כ - 10^{11} גרם (שהם כ - 100.000 טונות). המשמעות היא, שאורך החיים הממוצע של החלקיקים באוויר קטן בהרבה משנה.

Estimates of the rate in $Tg\ yr^{-1}$ at which aerosol material is emitted from various sources into the atmosphere; based on data of: (1) Peterson & Junge (1971), (2) Hidy & Brock (1971), (3) Schütz (1971), (4) Schütz (1971), Jaenicke (1978), Bach (1978). (From Jaenicke, 1988.)

	(1)	(2)	(3)	(4)
Natural sources				
Sea salt	500	1095	180	1000...2000
Mineral dust	250	7.....365	60.....300	60...1800
Volcanoes	25	4	15.....90	4
Forest Fires	5	146	3.....150	
Biological material				
Subtotal particles	780	1252...1610	258.....720	1144...2444
Converted sulfates	355	37.....365	130.....200	
Converted nitrates	60	600.....620	140.....700	160
Converted HC	75	182...1095	75.....200	154.....220
Subtotal GPC	470	819...2080	345...1100	1319
Total natural	1250	2071...3690	603...1820	2463...3763
Man-made sources				
Subtotal particles	30	37.....110	6.....54	54.....126
Converted sulfates	200	110	130.....200	
Converted nitrates	35	23	30.....35	
Converted HC	15	27	15.....90	
Subtotal GPC	250	160	175.....325	270
Total man-made	280	196...270	181.....379	324.....396

איור נספח: הערכת כמויות ארוסולים באטמוספירה ממקורות שונים⁷⁵

נשאלת השאלה באילו גורמים תלויים זמן השהייה של חלקיק באטמוספירה וטווח תפוצתו? על פי החישוב הבא ניתן לספק את שתי התשובות. חוק סטוקס [Stokes]⁷⁶ מחלץ את מהירות הנפילה הסופית של עצם (במקרה שלנו העצם הוא חלקיק זיהום שהוא גוף זעיר בעל מספר ריינולדס קטן) בפלואיד (אוויר האטמוספירה) מן הגרר האווירודינמי:

$$F_d = 6\pi\mu R V$$

כאשר F_d הוא כוח הגרר (בניוטון), μ היא הצמיגות הדינמית של הפלואיד (בפסקל שנייה), R הוא רדיוס הגוף הנופל (במטרים) ו- V היא מהירות הנפילה במטר לשנייה. החלקיקים מגיעים למהירות סופית כאשר כוח הציפה (כפי שהוא בא לידי ביטוי בחוק ארכימדס) + חיכוך האוויר משתווים לתאוצת הגרוויטציה. הנוסחה למהירות הסופית היא:

$$V_s = \frac{2(\rho_p - \rho_f)}{9\mu} g R^2$$

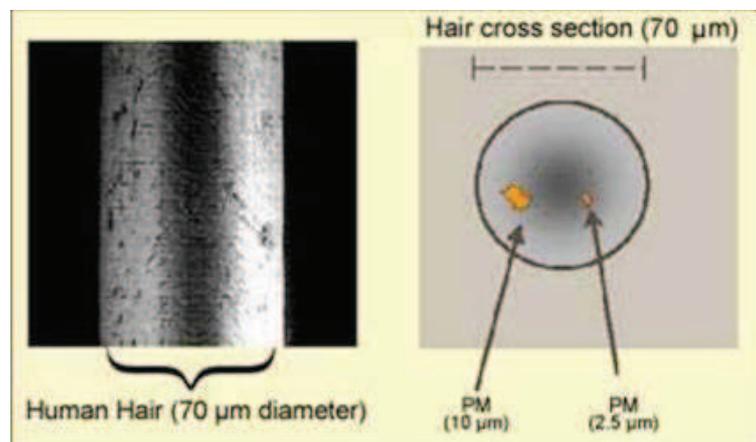
⁷⁵ החומר התקבל מפרופ' קולין פרייס, אוניברסיטת ת"א.

⁷⁶ ג'. סטוקס, 1851.

כאשר V_s היא המהירות הסופית של החלקיק כלפי מטה (מטר לשנייה), g היא תאוצת כדור הארץ, ρ_p היא הצפיפות הסגולית של החלקיק (בקי"ג למ"ק), ρ_f היא הצפיפות הסגולית של האוויר (כנ"ל).

אפשר לראות שהגדלת R (רדיוס החלקיק) מעלה את מהירות נפילתו. בפועל, ככל שהחלקיק גדול יותר, כן מהיר יותר פינויו מן האטמוספירה. חלקיק שהרדיוס שלו 10 מיקרון ייפול במהירות של 2 ק"מ ליממה, ויגיע לקרקע במהרה. לעומתו, חלקיק שהרדיוס שלו 1 מיקרון יגיע למהירות נפילה סופית של 20 מ' ליממה. חשוב לזכור כי אנו עוסקים בפינוט של חלקיק כדורי, חלקיקי מחט המתגלגלים באוויר הם נטולי יציבות אווירודינמית, ולכן ישיגו ככלל מהירויות נפילה נמוכות יותר וישהו באטמוספירה זמן רב יותר.

איטיות נפילתו של חלקיק קטן יותר, בהשוואה לחלקיק גדול, נובעת מכך שסיכויי להתרומם לגבהים גדולים גבוהה יותר ומעלה את סיכויי לשהות באוויר משך זמן רב יותר ולהגיע למרחקים גדולים יותר⁷⁷. ככלל, זמן השהייה באוויר של חלקיקים ברדיוס 2-5 מיקרון הוא נמוך משנה, ואילו חלקיקים שהרדיוס שלהם הוא 0.5-1 מיקרון עלולים להגיע לשהייה באוויר עד 12 שנים. לשם השוואה, כדי שגשם יירד נדרשת התגבשות של טיפות ברדיוס שמעל 100 מיקרון (טיפה רגילה היא ברדיוס ממוצע של כ-2000 מיקרון, או 2 מ"מ). טיפות קטנות פשוט יותר אינן יורדות.



איור 2: סדרי גודל של חלקיקי ארוסול בהשוואה לשערת אדם

⁷⁷ על פי פרופ' יואכים יוסף (יויה) ז"ל, אמריטוס אוניב' ת"א: "באמצעי חישה מרחוק, נמצא ששיא המסה של ארוסולים הוא בגבהים שבין 0.5-1.5 ק"מ, ובהתפלגות לפי גודל חלקיקים: הכבדים יורדים קרוב למקור, קלי המשקל נסחפים הרחק". (מתוך סמינר של המחלקה לגיאופיסיקה, אוניברסיטת תל אביב, 2008).

נספח 3: נתוני תחלואת מזוטליומה בישראל בשנת 2005

Israel National Cancer Registry, Cancer Incidence Tables

רישום הסרטן הלאומי בישראל, סבלאות הארצות סרטן

Pleural & Peritoneal
Mesothelioma

2006

מזוטליומה (סרטן קרום הראיה והצפק)

Age group קבוצת גיל	Jews יהודים				Arabs ערבים			
	Male גברים		Female נשים		Male גברים		Female נשים	
	No. of cases מספר מקרים	Age specific rate סגולי לגיל	No. of cases מספר מקרים	Age specific rate סגולי לגיל	No. of cases מספר מקרים	Age specific rate סגולי לגיל	No. of cases מספר מקרים	Age specific rate סגולי לגיל
0-4								
5-9								
10-14								
15-19								
20-24								
25-29								
30-34	1	0.53	1	0.53				
35-39			1	0.60				
40-44								
45-49	3	1.79	1	0.56				
50-54	3	1.81			1	5.47		
55-59	2	1.71						
60-64	1	1.09	2	1.88				
65-69	7	8.17			1	12.29		
70-74	4	5.47						
75+	6	4.89	1	0.55			1	13.00
Totals / Crude Rate סך כל המקרים / שיעור גולמי								
	27	0.98	6	0.21	2	0.28	1	0.15
Age Standardized Rate (ASR) שיעור מתוקן לגיל								
		0.79		0.19		0.64		0.26

- All rates are per 100,000; Standardization to the "World standard population"
- כל השיעורים הם ל 100,000, תקן השיעורים לפי "אוכלוסיית העולם"
- עדכון אוקטובר 2008



NATIONAL ASBESTOS BANS

Compiled by Laurie Kazan-Allen

(Revised November 1, 2006)

Date	Event
1983	Iceland introduces ban (with exceptions) on all types of asbestos (updated in 1996)
1984	Norway introduces ban (with exceptions) on all types of asbestos (revised 1991)
1986	Denmark introduces ban (with exceptions) on chrysotile Sweden introduces the first of a series of bans (with exceptions) on various uses of chrysotile
1988	Hungary bans amphiboles
1989	Switzerland bans crocidolite, amosite and chrysotile (some exceptions)
1990	Austria introduces ban on chrysotile (some exceptions)
1991	The Netherlands introduces the first of a series of bans (with exceptions) on various uses of chrysotile

- 1992 Finland introduces ban (with exceptions) on chrysotile
(came into force 1993)
- Italy introduces ban on chrysotile (some exceptions until
1994)
- 1993 Germany introduces ban (with minor exemptions) on
chrysotile, amosite and crocidolite having been banned
previously. The sole derogation remaining is for
chrysotile-containing diaphragms for chlorine-alkali
electrolysis in already existing installations. These will
be banned as of 2011
- Croatia bans crocidolite and amosite
- 1995 Japan Bans crocidolite and amosite
- Kuwait bans all types of asbestos
- 1996 France introduces ban (with exceptions) on chrysotile
- Slovenia bans production of asbestos-cement products

- 1997 Poland bans asbestos
- 1997 Monaco prohibits the use of asbestos in all building materials
- 1998 Belgium introduces ban (with exceptions) on chrysotile
- 1998 Saudi Arabia bans asbestos
- 1998 Lithuania issues first law restricting asbestos use; ban expected by 2004
- 1999 UK bans chrysotile (with minor exemptions)
- 2000 Ireland bans chrysotile (with exceptions)
- 2000/2001 Brazil – the four most industrialized states, representing 70% of the national asbestos market, ban asbestos as well as many towns and cities
- 2000/2001 Sao Paulo State implements an immediate ban
- 2001 Latvia bans asbestos (exemption for asbestos products already installed; however, they must be labelled)

Chile bans asbestos

Argentina bans chrysotile; amphiboles were banned in
2000

2002 Spain and Luxembourg ban chrysotile, crocidolite and
amosite having been banned under earlier EU directives

Slovak Republic expects to adopt EU asbestos
restrictions banning all asbestos

New Zealand imposes ban on import of raw asbestos
(import of asbestos-containing materials and second-
hand asbestos products not included)

Uruguay bans the fabricating and import of all asbestos

Slovak Republic expects to adopt EU asbestos
restrictions banning all asbestos

Malaysia close to banning chrysotile

- 2003 Australia bans the import, use and sale of products containing chrysotile, amosite and crocidolite having been banned previously
- 2004 Honduras asbestos ban (some exceptions)
- South Africa announces on June 21, 2004, a phase-out of chrysotile use over the next 3 to 5 years
- Japan bans the new use of chrysotile in building and friction materials as of October 1, 2004; this accounts for over 90% of Japanese chrysotile consumption
- 2005 Bulgaria banned the import, production and use of all asbestos fibers and types of asbestos-containing products as of January 1, 2005
- Cyprus, the Czech Republic, Estonia, Greece, Hungary, Lithuania, Malta, Portugal and Slovakia to prohibit the new use of chrysotile, other forms of asbestos having been banned previously, under EU deadline¹
- Japanese Minister Hidehisa Otsuji announces a total

asbestos ban in Japan within 3 years.

Egyptian Minister of Foreign Trade and Industry prohibits the import and manufacture of all types of asbestos and asbestos materials.

The Minister of Health in Jordan imposed an immediate ban on the use of amosite and crocidolite on August 16, 2005; a grace period of one year was allowed for the phasing out of the use of tremolite, chrysotile, anthophyllite and actinolite in friction products, brake linings and clutch pads. After August 16, 2006, all forms of asbestos will be banned for all uses.

2006

Croatia bans asbestos as of January 1, 2006. Six weeks later, the Ministry of Health was forced to reverse its position with the result that the manufacture of asbestos-containing products for export was permitted again.

2007

New Caledonia bans the production, import and sale of asbestos.



נספח 4: אסבסט בישראל בראי הזמן

<u>שנה</u>	<u>אירוע</u>
1938	חברות הביטוח בארה"ב מסרבות לבטח פועלי אסבסט.
1952	מפעל "איתנית" הישראלי מוקם בנהרייה שבגליל העליון.
1961	מקרה המוות הראשון של עובד מפעל "איתנית" ממזוטליומה.
שנות ה-60	פסולת אסבסט מן המפעל נמכרת למטרות שונות וכך מגיעה לאדמות רבות בגליל.
1981	ח"כ יאיר צבן מעלה לראשונה את עניין האסבסט בכנסת.
1984	משרד הבריאות מקים את "הוועדה הרפואית העליונה לאבק מזיק", שתפקידה לברר את נזקי האסבסט. הוועדה לא מצאה קשר ישיר בין שאיפת אסבסט לבין נזקים בריאותיים, אולם בכל זאת קובעת כי יש להנהיג במפעל "איתנית" תקנות זהירות להגנת העובדים. החקיקה בנוגע לאסבסט מעוגנת באמצעות תקנה במסגרת תקנות בטיחות בעבודה.
1987	השימוש באסבסט פריך נאסר לחלוטין על ידי הוועדה.
1993	אסבסט נכנס לרשימת החומרים המסוכנים כחלק מחוק החומרים המסוכנים.
1996	עיריית נהרייה מציעה להקים פארק שעשועים בשם "מדינת הילדים" על השטח הצמוד למפעל, קרקע שיש בה אסבסט רב.
1997	מפעל "איתנית" נסגר.
1998	פעילות ציבורית ועתירה לבג"ץ מצליחות לעצור את בניית פארק השעשועים.
2008	המשרד להגנת הסביבה מפיץ תזכיר חוק בנושא מניעת מפגעי אסבסט. נכון ליולי 2009 התזכיר ממתין לאישור כל הגורמים בטרם ייהפך לחוק בר תוקף.
2009	הסדר תביעה בין תושב נהרייה, שחלה במזוטליומה בעקבות עבודתו של אביו במפעל "איתנית", לבין הנתבעות - מדינת ישראל, חברת הביטוח "מגדל" וחברת

”איתנית” – על סכום של 3 מיליון שקל. בית המשפט קבע כי אין צורך בהוכחת אחריות המשיבות על הנעשה, בכך הוא מנכיח את מה שהיה ידוע, אך טרם התפרש לכדי מעשה - אסבסט הוא חומר מזיק באופן קשה.

בית ספר פורטר ללימודי הסביבה : אוניברסיטת תל אביב

קורס פרויקטים בחקר הסביבה

הצעה למחקר :

השפעת צעדי תכנון ירוק מצד הרשות המקומית

על רמת זיהום האוויר

יולי, 2009

מרכז קורס : עמרם אשל

מנחה : עו"ד איתי אליאב

מגישות :

הדס גבאי 040441461

חנה שומך 031945447

שלומית דקל 032829673

תודות

ברצוננו להודות לצוות הקורס ולכל אנשי המקצוע שתרמו מזמנם וסבלנותם לכתיבת הצעת המחקר :

פרופ' עמרם אשל, אוניברסיטת תל אביב

עו"ד איתי אליאב, אוניברסיטת תל אביב

פרופ' יצחק מאיר, ראש המכון לחקר המדבר, אוניברסיטת בן גוריון

ד"ר עודד פוצ'טר, אוניברסיטת תל אביב

ד"ר גדי קפלוטו, טכניון

ד"ר סימונה גלבע, המרכז למחקר כלכלי וחברתי- עיריית תל אביב

מר אדי בית הזבדי, אגף שימור משאבי תשתית- משרד התשתיות

תוכן עניינים

4.....	תקציר.....	1
6.....	מבוא.....	2
8.....	חשיבות צמצום צריכת החשמל לזיהום האוויר בישראל.....	3
11.....	סקירת הרקע המדעי.....	4
11.....	צעדים אפשריים לצמצום חשמל בשכונת מגורים.....	4.1
14.....	תעדוף בין צעדים לחסכון בחשמל במרחב הציבורי.....	4.2
16.....	סקירה ספרותית של הצעדים הנבחרים.....	4.3
23.....	שאלת המחקר.....	5
23.....	חשיבותה של שאלת המחקר.....	6
24.....	שיטת המחקר.....	7
27.....	דיון לדוגמא בשכונת מגורים יפו ג'.....	8
29.....	הערכה של הקשיים הצפויים.....	9
30.....	סיכום.....	10
31.....	רשימת מקורות.....	11
34.....	נספחים.....	12
34.....	נספח א : פליטת מזהמים פי סוג דלקים.....	12.1
35.....	נספח ב : פליטה סגולית של גופרית דו חמצנית ותחמוצות חנקן מייצור חשמל*.....	12.2
36.....	נספח ג : ריכוזים חצי שעתיים מירביים של גופרית דו חמצנית.....	12.3
37.....	נספח ד' : פירוט סעיפי תקן LEED ND על פי פרמטרים.....	12.4
39.....	נספח ה' : פירוט תוכנית לצמצום אנרגיה בשכונות קיימות.....	12.5
43.....	נספח ו' : עידוד צמצום אנרגיה בבניינים בעזרת מדיניות ממשלתית.....	12.6
44.....	נספח ז : סקירת מחקרים המתיחסים לחשיבות הייעור האורבאני.....	12.7
45.....	נספח ח' : השפעת עצים על סביבה עירונית בנויה (שעשוע בר, 2007).....	12.8
47.....	נספח ט' : השוואת השפעה של עצים שונים (שעשוע בר, 2005).....	12.9
48.....	נספח י' : מערכות פוטו וולטאיות.....	12.10
50.....	נספח יא' : מפות שכונת יפו ג'.....	12.11
52.....	נספח יב' : מאפייני הבינוי בשכונה יפו ג'.....	12.12
54.....	נספח יג' : חתך רחוב אופייני (הדמייה ממוחשבת).....	12.13

1 תקציר

מטרת מסמך זה להציע מחקר אשר ינסה לענות על השאלה באיזו מידה פעולות מצד הרשות המקומית לצמצום צריכת החשמל במרחב הציבורי של שכונת מגורים, יכולות להשפיע על רמת זיהום האוויר.

כיום מיוצרים בישראל כ- 50 מיליארד קוט"ש חשמל בשנה, תהליך הגורר אחריו שריפה של דלק ומשאבים אחרים ופליטה של מזהמים כגון תחמוצות גופרית, תחמוצות חנקן, חלקיקים נשימתיים וגזי חממה לאוויר. בעוד שזה האחרון משפיע על ההתחממות הגלובאלית, לשאר המזהמים השפעה על זיהום האוויר ברמה המקומית. אם כך, ניתן לומר, כי הקשר בין חשמל לזיהום אוויר ברור וניתן לכימות.

אחת הדרכים לצמצם את זיהום האוויר היא דרך צמצום צריכת החשמל, ובשלב שני- צמצום ייצורו. בניינים צורכים כ-30 אחוזים מצריכת החשמל במדינה, ולכן להורדת צריכת החשמל ברמת הבניין פוטנציאל גדול (הרן, 2007). אחת הדרכים לבצע זאת היא דרך פתרונות רוחביים בשכונות מגורים, שמטרתם לצמצם את צריכת החשמל של הרשות המקומית ושל התושבים. במקומות רבים בעולם כבר הבינו את הפוטנציאל הגלום בכך. במסגרת עבודה זו נסקרו צעדים המומלצים על ידי התקן האמריקאי לשכונות ירוקות (LEED ND), לצד צעדים לצמצום צריכת חשמל שנעשו בערים בעולם. במהלך העבודה נעשתה הבחנה בין צעדים אשר ננקטים ביוזמת הרשות המקומית במרחב השכונתי, לבין צעדים המערבים את התושבים ונוגעים לקניינם הפרטי. ככלל, ניתן תעדוף לצעדים אשר אינם מערבים את התושבים, על מנת לאפשר אימפלמנטציה נוחה של הצעדים בשטח. הסקירה העלתה כי שלושה תחומים הם בעלי פוטנציאל לחסכון בחשמל תוך יישום פשוט באופן יחסי: ייעור המרחב העירוני, בידוד גגות בתים וייעול אנרגטי של מערכות אלקטרוניות.

- ייעור המרחב העירוני: נטיעת עצים אשר מטרתם להצל על חזיתות הבתים ולהגן עליהם מהשמש. ככלל, סקירה ספרותית שנעשתה בנושא מורה כי כיום תכנון עירוני רואה בייעור צעד מרכזי לשיפור הנוחות האקלימית של השכונה.
- בידוד גגות בתים: לאחר שנסקרו שתי חלופות, שימוש בגגות ירוקים ובידוד גגות, נבחרה זו האחרונה: גגות מצופים בחומרים בעלי רפלקטיביות גבוהה, ובערכים גבוהים של אמסיביות תרמית (היכולת של חומר להקרין חזרה אנרגיה שנקלטה בו). יש לציין כי חלופה זו מבטיחה תועלת בעיקר לבתי מגורים ישנים אשר רמת הבידוד בהם נמוכה.
- ייעול אנרגטי של מערכות אלקטרוניות: תאורת רחוב, רמזורים, שלטי חוצות ומקורות אור נוספים בעיר יכולים לפעול באמצעות אנרגיה סולארית, או לחלופין על ידי שימוש בנורות חסכוניות. לאחר סקירה של התחום הוחלט שלא להמליץ על צעד זה כחלק ממסגרת המחקר

עקב חסמים מצד העירייה לשימוש במערכות סולאריות בשטח (מחיר, גניבות, נצילות נמוכה) והפשטות היחסית של שימוש בנורות חסכוניות (צעד שאינו מצריך מחקר מדעי).

המחקר מציע שלוש חלופות לבדיקת השפעת צעדים אלו על צריכת החשמל בשכונה. הראשונה- שימוש בתוכנת סימולציה ממוחשבת כגון ENERGY, אשר בודקת את ההשפעה מבלי להזדקק לביצוע הצעדים בשטח; השנייה- השוואה בין בניינים קיימים בשכונה בעלי נתונים זהים, למעט הפרמטרים הנבדקים; והשלישית- ביצוע התייעלות אנרגטית בפועל במרחב השכונתי או בחלק ממנו. שלוש החלופות טומנות בחובן יתרונות וחסרונות שונים. הן נבדלות בטווח הזמן, בעלות הכספית וברמת הדיוק שהן מציעות. יש להניח כי תוצאות מדויקות יתקבלו משילוב של שתיים או אפילו שלוש החלופות במקביל.

למטרת הדגמת החלופות השונות, מציג פרק 8 דיון לדוגמא בשכונה יפו ג' שבתל אביב. השכונה היא פרי תכנון של מפעל הבינוי בשנות השבעים, ובה בתי מגורים ברמת תחזוקה ירודה יחסית ודיירים מחדך סוציו-אקונומי נמוך. התנאים התכנוניים ובעיקרם הצפיפות הנמוכה, יקלו על יישום הצעדים המוצעים, אשר עשויים להביא לחסכון משמעותי בצריכת החשמל. מעבר לפוטנציאל התכנוני הגלום בשכונה ולמאפייניה הפיסיים, לא ניתן להתעלם מכך שתושבי השכונה זקוקים לשינוי בנוף השכונתי ויפיקו ממנו תועלת, בין אם תוצאות המחקר יצביעו על הפחתה ברמת זיהום האוויר, ובין אם לאו.

2 מבוא

דו"ח עדכני של הפורום הישראלי לאנרגיה קובע, כי קצב הגידול בצריכת החשמל בארץ בעשור האחרון מגיע לכדי למעלה מ- 4.8% (ובשנים מסוימות, אפילו עד כדי 6.4%) בשנה. הגורם העיקרי לעליה, נעוץ ככל הנראה בקצב גידול האוכלוסין ובעליה ברמת החיים. באם לא תשתנה מגמה זו, צפויה צריכת החשמל בארץ (בתחזית מתונה) לצמוח בכ-50% בעשור הקרוב ולהכפיל עצמה בטווח עשרים השנה הקרובות. לגידול זה כמובן משמעויות רבות, בניהן גם כאלו הנוגעות לאיכות האוויר שאנו נושמים.

ברחבי העולם כבר הבינו את הצורך במתן מענה לבעיה. כחלק מניסיון לצמצם את פליטות הפחמן הדו חמצניות ולהטיב עם בריאות התושבים, פותחו תוכניות להורדת צריכת החשמל. חלק גדול מהיוזמות כוון למרחב השכונתי- עירוני, כאשר לרוב הייתה זו העירייה אשר הובילה את המהלך. במסגרת תוכניות אלו הוחלט על שורה של צעדים להורדת צריכת החשמל. עיקר הצעדים כווננו למרחב העירוני עליו אחראית הרשות המקומית ונעשו באחריותה. חלק מהתוכניות כללו גם שינויים בתחום קניין הפרט על ידי עידוד כלכלי או רגולציה.

מחקר זה יבחן את ההשפעה של התערבות עירונית על צמצום צריכת החשמל וכפועל יוצא על פליטות מזהמים. הבחירה בצעדים אשר יכולים להינקט על ידי הרשות המקומית אינה מקרית: משקל הולך וגובר ניתן לתפקיד של הרשויות בטיפול בנושאים סביבתיים.¹ בניגוד למדינות אחרות, לא נעשתה כל התערבות בינלאומית לעודד את ישראל לקדם אג'נדה 21 מקומית ברשויות המקומיות. רק בשנת 2003, אימצה מדינת ישראל בהחלטת ממשלה באופן רשמי עקרונות אלו, ועדיין אין הכוונה מרכזית מאורגנת הקוראת לרשויות מקומיות לאמץ פיתוח בר קיימא, כמסגרת מארגנת לפיתוח היישובי, ולכונן סדר יום מקומי. למרות זאת, מזה כשלוש שנים פועלים המשרד לאיכות הסביבה ומרכז השל (ארגון חוץ ממשלתי) במימון קרנות בינלאומיות, לקידום פיתוח בר קיימא ואג'נדה 21 בשלטון המקומי בישראל. לאור כך, מצאנו ערך לבדיקת הורדת זיהום האוויר דרך צמצום בצריכת החשמל במסגרת פעילות הרשויות המקומיות.

לצורך המחקר נבחרה שכונת מגורים יפו ג', השכונה הדרומית ביותר של תל אביב. שכונת יפו ג' היא שכונת שיכונים אופיינית לאזורים רבים בארץ: מבנים סטנדרטיים משנות השבעים המאוכלסים בדיירים ממצב סוציו אקונומי בינוני ומטה. עקב מצבם הכלכלי של התושבים יצא מחקר זה מנקודת

¹מאחר ששורשי הבעיות המוזכרות באג'נדה 21, כמו גם פתרונותיהן, נעוצים ברמת הפעילות המקומית, הרי ששיתופן של הרשויות במקומיות מהווה גורם מכריע בהגשמת המטרות. ועידת ריו הכירה בתפקידן המרכזי של הרשויות המקומיות בעיצוב סדר יום סביבתי כחלק מהדרך להשיג את המטרות של אג'נדה 21, תוכנית הפעולה של מדינות בעולם לקידום פיתוח בר קיימא (1992). תפקיד זה קיבל הכרה גם במפגש הפסגה לפיתוח בר קיימא שהתקיים ביוהנסבורג ב-2002. הארגון הבינלאומי ICLE (International Council for Local Environmental Initiatives) גיבש מסגרת לפעילות רשויות מקומיות להטמעת פיתוח בר קיימא. ד"ר ארז סברדלוב וד"ר שחר דולב, הטיפול בשיאי הביקוש לחשמל בישראל, הפורום הישראלי לאנרגיה, 2009.

מוצא כי ההשקעה במחקר או ביישום תוצאותיו בשטח תחול רק על הרשויות. לכן בחרנו להתמקד בבדיקת צעדים לחסכון בחשמל אשר בעתיד יערכו על ידי העירייה, ונתנו עדיפות לצעדים אשר קשורים לצמצום החשמל ברמה העירונית. עם זאת, נבדקו גם צעדים אשר להם השפעה על צריכת החשמל בבתי התושבים, אך זאת מבלי לדרוש מהם תשומות כלכליות.

מחקר אשר נערך בטכניון כבר בשנת 1992 הראה כי ע"י תכנון מודע אקלים ואנרגיה, ואמצעים פשוטים יחסית ניתן לחסוך כ-20 אחוזים מצריכת האנרגיה לאקלום הבניין (דולב, עמ' 13).² מאחר ובנייני מגורים צורכים כ-30 אחוזים מתצרוכת החשמל במדינה, בקנה מידה ארצי מדובר על חסכון של כ-6 אחוזים בצריכת החשמל הכוללת (הרן, 2007). הפוטנציאל המשמעותי מאותת על כך שיש למדינה אינטרס גדול לעודד התייעלות אנרגטית בבניינים. צמצום צריכת החשמל במרחב הציבורי רק מתווסף לחסכון זה: סקרי אנרגיה שבוצעו בשנים האחרונות בערים הגדולות בעולם מראים כי פוטנציאל החיסכון של הרשות המקומית עומד על בין 22 ל-50 אחוזים.³

המחקר שלנו מתייחס אומנם לשכונה מסוימת, אך תוצאות חיוביות יכולות להוות זרז למקבל החלטות ברמה הארצית. ממשלות רבות בעולם, בארה"ב ובאירופה, כבר אימצו צעדים בכוון זה. בארץ כבר מופיעות סוגיות ראשונות, כגון עיריית כפר סבא.⁴ עם זאת, אין ספק כי לפנינו עוד דרך ארוכה. אנו תקווה כי מחקר זה, באם ימומש, יעזור לבחון את הפוטנציאל האמיתי לחסכון בזיהום אוויר דרך צמצום צריכת החשמל בישראל.

²יש להדגיש כי פוטנציאל החסכון במבנים חדשים גדול אף יותר ועומד על בין 40 ל 60 אחוז.

³ כ 25% -מהחיסכון, נובע מאחזקה ותחזוקה, וההשקעה בו שואפת לאפס. עוד כ 25% -הם תוצאה של השקעות בסדרי גודל של אלפי שקלים בלבד, שתקופת החזר שלהם אינה אמורה לעלות על 12 חודשים. כ 30% -מהחיסכון מתקבל אם משקיעים סכומים בסדר גודל של עשרות אלפי שקלים, שתקופת החזר שלהם מוערכת ב 30 -חודשים ו - 20% הנותרים הינם השקעות שתקופת החזר שלהם גבוהה מ-30 חודשים. (הוד, 2007)

⁴חלוצה בתחום הייתה עיריית כפר סבא אשר ב 2008 אישרה את תקני הבנייה הירוקה כתקנים מחייבים לכול תוכנית בנייה חדשה בעיר כולל מבני ציבור. כמו כן, החליפה עיריית כפר סבא את נורות הרמזורים שבתחומה לנורות חסכוניות באנרגיה ותאורת הרחוב חוברת לשעונים אסטרונומיים המתאימים את שעות הפעילות בהתאם לעונות השנה (אדם טבע ודין, עמ' 14)

3 חשיבות צמצום צריכת החשמל לזיהום האוויר בישראל

בטרם נבדוק את הקשר בין הבניה הירוקה ובין החיסכון בצריכת חשמל, ראוי שנבין כיצד משפיעים צריכת החשמל וייצורו באופן ישיר על איכות האוויר, וכיצד מתבטא הזיהום שהם יוצרים בפועל.

יחברת החשמל' אמונה על רובה ככולה של הפקת החשמל בארץ- כ-48.4 מיליארד קוט"ש בשנה. לצורך כך היא מפעילה מערך אתרים, הכולל יחידות ייצור ממקורות פוסיליים שונים: פחם- אחראי על ייצור כ-75% מצריכת החשמל במדינה; גז טבעי- כ-11.5%; מזוט- כ-8.5%; וסולר- כ-5% (אתר אט"ד, 2008). צריכת החשמל במדינה צפויה לעלות באופן דרמטי בשנים הקרובות.⁵

ייצור החשמל הגדל גורר אחריו שריפת כמויות דלק אדירות בדודי קיטור, בטורבינות גז ודיזל ובגנרטורים, וגורם לפליטת מזהמים משני סוגים (מור וסרוסי, 2001): מזהמים בעלי השפעה אזורית, ובעיקר גזים אנאורגניים- תחמוצות גופרית (SO_x) ותחמוצות חנקן (NO_x), וכן חלקיקים (PM); ומזהמים בעלי השפעה גלובלית- גזי חממה ובעיקרם CO₂. נתוני המשרד לאיכות הסביבה מצביעים על כך שמקורות הפליטה העיקריים של המזהמים הן תחנות קיטוריות המוסקות בפחם. אחריהן ניצבות תחנות קיטוריות המוסקות במזוט ואלו המוסקות בסולר ובמקום האחרון גז טבעי. לפירוט ראה רמת הזיהום בכל טכנולוגיית ייצור (ראה [נספח א'](#)).

סוג המזהמים הראשון הנפלט, הוא בעל השלכות בריאותיות משמעותיות: SO₂ שמקורו בשריפת דלקים פוסיליים כפחם, מזוט וסולר, הוא גז חסר צבע הגורם לתחושת חנק. תופעות הלוואי שלו כוללות יובש בפה, גירוי בגרון ועיניים דומעות. חלקיקי גפרה (סולפט) הנוצרים בתהליכי חמצון, חודרים לעומק דרכי הנשימה וגורמים להחרפת מחלות לב ונשימה. מחקרים שונים הוכיחו קשר ישיר בין רמות גפרה גבוהות ובין עלייה בתחלואה ובתמותה. רמת הפליטה של SO₂ מושפעת מסוג ומכמות הדלק המשמש בתהליך הבעירה. כמות המזהם הנפלטת לאטמוספירה נמצאת בעליה מתונה וקבועה, הנובעת מצריכת האנרגיה הגוברת. בארץ נפלטת כמות של כ-280,000 טון לשנה (למעלה מ-0.1% מהפליטה העולמית), כאשר יותר מ-80% ממנה, קשור באופן ישיר לייצור החשמל (אבנימלך, 1999).

לעומת תחמוצות הגופרית, נפלטות תחמוצות החנקן כתלות בתנאי הבעירה: טמפ', משך, לחץ וכמות החמצן. גם אלו מגדילות את הסיכון למחלות בדרכי הנשימה, תורמות לגשם החומצי ולאפקט החממה, והן מן המרכיבים העיקריים האחראים ליצירת זיהום אוויר פוטוכימי (אתר אט"ד, 2008). סך כל פליטות ה-NO_x בארץ הוערך ב 2005 בכ-220,000 טון, כאשר ייצור חשמל אחראי לכמחצית מכמות הפליטה. [נספח ב'](#) מציג נתוני פליטה של SO₂ ו-NO_x מייצור חשמל בארץ, ביחס למדינות

⁵דו"ח עדכני של הפורום הישראלי לאנרגיה קובע, כי קצב הגידול בצריכת החשמל בארץ בעשור האחרון מגיע לכדי למעלה מ-4.8% (ובשנים מסוימות, אפילו עד כדי 6.4%) בשנה. הגורם העיקרי לעליה, נעוץ ככל הנראה בקצב גידול האוכלוסין ובעליה ברמת החיים. באם לא תשתנה מגמה זו, צפויה צריכת החשמל בארץ (בתחזית מתונה) לצמוח בכ-50% בעשור הקרוב ולהכפיל עצמה בטווח עשרים השנה הקרובות (סברדלוב ודולב, 2009).

אחרות בעולם. נתונים המשמשים להשוואה עבור ישראל, נכונים לשנת 1995, ומוצבים למול נתוני מדינות משנת 1988. אין ספק, כי השוואה זו יכולה להעיד על פערים משמעותיים יותר בין ישראל לשאר המדינות, בעיקר עקב הירידה בפליטות שני המזהמים בין השנים הללו (אבנימלך, 1999).

חומר חלקיקי הוא זיהום אוויר בצורתו הנראית לעין, כאשר גודל החלקיק משפיע על משך שהותו באוויר ומידת קליטתו במע' הנשימה. מסוכנים במיוחד הם חלקיקים קטנים, ⁶ המסוגלים לחדור לעומק ועלולים לספוח ולשאת חומרים כימיים מזיקים ומסרטנים. מאחר ולאלו זמן שהות ארוך יותר באטמוס', הם עלולים להגיע למקומות מרוחקים מאזורי הפליטה. דו"ח ניטור האוויר בישראל 2006, מצביע כי מזהם זה נמצא בחריגה של כ- 50% מתקן היעד השנתי שהציב המשרד להגנת הסביבה. עם זאת, חשוב לציין כי התקן בארץ, אינו מעודכן ביחס למדינות מפותחות. תוצר לוואי נוסף של תהליך שריפת הפחם הוא אפר הפחם, שחלקיקים ממנו נפלטם לאטמוס'.⁷ שכונות בסמוך לתחנת הכח בחדרה, מתלוננות על אפר פחמי מרחף, המצטבר מספר פעמים בשנה בחצרות ואף מגיע לתוך הבתים. על אף כי אין הוכחה חד משמעית באשר למידת הקרינה שאפר הפחם המרחף נושא, מחקרים מראים כי חשיפה כרונית לריכוז גבוה, עלולה להזיק אף היא למערכת הנשימה.

פליטת גזי חממה, ובעיקר CO₂ בתהליכי הבעירה, משויכת להפרת המאזן הטבעי הגלובלי, וגורמת לטענת חוקרים להתגברות אפקט החממה ולשינויי אקלים. על פי דו"ח איגוד ערים שרון-כרמל לשנת 2007, פלטה תחנת הכח בחדרה לבדה, כ-15 מליון טון גזי חממה במהלך השנה. אנו נוכחים כי טווח ההשפעה של ייצור חשמל מקומי אינו מוגבל לשכונה או לאזור בו הוא מתבצע, אלא לוקח חלק בתהליכים רחבים יותר, המשפיעים על כדור הארץ.

ככלל ניתן לומר שהשפעת מזהמים מתהליכי ייצור החשמל, אינה מקומית בעיקרה.⁸ עם זאת, מרבית אירועי זיהום האוויר מגופרית דו חמצנית ותחמוצות חנקן בארץ, מתרחשים בשעות היום של עונת הקיץ. התנאים הסינופטיים בעונה מלווים בנוכחות אינברסיית רום, המונעת פיזור יעיל של הזיהום הנפלט בקצה הארובה. קרינת השמש חזקה, ורוחות מערביות גורמות לחוסר יציבות, המסיעה את המזהמים לכיוון הקרקע. על כן, לא נפלא הדבר, כי מדידות זיהום אוויר בתחנות הניטור מצביעות על כך שדווקא אזורים מגורים ממזרח לתחנת הכח, סובלים מרמת זיהום אוויר גבוהה מזו הנמדדת בסמוך לה.⁹ **נספח ג'** מציג כיצד ריכוזי SO₂ מרביים נמדדים בעיקר מדרום-מזרח לעיר.

⁶ חלקיקים נשימים (PM10) וחלקיקים נשימים עדינים (PM2.5).

⁷ מרבית אפר הפחם נלכד בטרם נפלט מן הארובה, משוקע ומורטב על מנת להקשות על פיזורו. השימוש בו מנוהל על ידי ובפיקוחה של מנהלת אפר הפחם, לצרכי תעשייה שונים.

⁸ הזיהום נפלט בגובה אפקטיבי של מאות מטרים ומתפשט על פני שטח גדול. פיזורו מושפע באופן ישיר מן התנאים המטאורולוגיים ברום: גובה שכבת הגבול האטמוספירית, מהירות וכיוון הרוח, טמפרטורה ומצב היציבות האטמוספירית.

⁹ על פי הנתונים שהוצגו באיגוד ערים חדרה, בעת אירועי זיהום אוויר, ערכים גבוהים יותר נמדדים בתחנות הניטור המזרחיות והדרום-מזרחיות (כגון תחנת הניטור ב'פרדס חנה', 'בית אליעזר', 'ברקאי ובימגל'). במהלך שנת 2007 נמדדו כ- 596 ארועי זיהום אוויר באזור חדרה וממזרח לה. כ-35% מהם אותרו כמשוייכים לייצור החשמל בתחנת 'אורות רבין'.

העלות הזולה והזמינות של חומר הגלם הפחמי, מכתיבות את מדיניות שימוש הדלק של חברת החשמל. אולם, התשלום על 'עלויות חיצוניות' ובמסגרתן עלויות התחלואה הנובעות ממפגעים סביבתיים נעשה על ידי המשק כולו.¹⁰ באשר למזהמים הנפלטים בתהליכי ייצור חשמל, קובע דו"ח של המשרד לאיכות הסביבה 'תג מחיר' עבור טון פליטה לכול אחד מסוגי הפליטות.¹¹ נכון להיום, מדינת ישראל אינה רואה באלו שיקול שווה משקל, בחישובי עלות-תועלת של פרויקטי תשתית כתחנות כח, ועל כך יעידו תוכניות להקמת תחנת כח פחמית נוספת, בניגוד למגמה הרווחת בעולם.¹²

בעולם המפותח נוקטות מדינות אמצעים לצמצום זיהום האוויר מייצור חשמל.¹³ על אף מעמדה של מדינת ישראל בעולם כ'מדינה מתפתחת', סביר כי לא תוכל להתעלם ממגמה זו לאורך זמן, ותאלץ לאמץ ולאכוף תנאי פליטה של מדינות מתקדמות (אבנימלך 1999). חברת החשמל מודעת לכך ומעידה, כי בכוונתה להסב את כלל התחנות שבבעלותה, למעט התחנות הפחמיות-חדרה ואשקלון, לשימוש בגז טבעי.¹⁴ עם זאת, אין לשכוח כי עיקר ייצור החשמל נעשה בתחנות הכח הפחמיות, הממשיכות לפלוט תחמוצות גופרית, ואין באפשרותנו לדעת בביטחון מתי ובאילו תנאים יונהג בהן השימוש במתקני סילוק המקובלים במדינות מתקדמות. צמצום צריכת החשמל בבניינים יכולה להיות חלק מהתשובה של המדינה ליעד אסטרטגי של צמצום הזיהום מייצור חשמל.

¹⁰ סך עלות זיהום האוויר למשק הישראלי נותחה על ידי ארגונים סביבתיים ומגיעה לכדי 4.3 מיליארד דולר בשנה (לב ציון, 2006), וזאת מבלי להתחשב בעלויות שאינן ניתנות לכימות, כחיי אדם. תמותה כתוצאה מזיהום אוויר בגוש דן, מוערכת בין 70 ל-1000 מקרים בשנה.

¹¹ תג המחיר הינו: CO₂ - 14.8€; SO₂ - 4,947€; NOX - 2,865€; PM10 - 7,061€; ו-PM2.5 - 9,905€. בהתאמה לתנאים הכלכליים בישראל, ותוך התחשבות בעלויות העמידה בדרישות פרוטוקול קיוטו (עפ"י דו"ח עלויות חיצוניות של זיהום אוויר מייצור אנרגיה (חשמל) בישראל של המשרד להגנת הסביבה, 2008).

¹² כלים כלכליים לתמחור העלויות החיצוניות הכרוכות ביצור אנרגיה, לצורך הכללה בחישובי עלות-תועלת של פרויקטים מסוג זה, פותחו כבר בידי האיחוד האירופי והסוכנות הפדרלית להגנת הסביבה בארה"ב. המדדים כוללים הערכה של עלות אובדן חיים וטיפול רפואי במחלות הנגרמות מזיהום אוויר. ניתן לחשב את העלויות הנלוות לזיהום ביחס לטון מזהמים, או ביחס קוטי"ש של יצור אנרגיה, בהתאם לסוגי הדלקים השונים.

¹³ פתרונות מקובלים בעולם לבעיית זיהום האוויר מייצור חשמל, הם בין השאר התקנת אמצעים להפחתת הפליטה של מזהמים כסולקנים, מסננים וקולטי חלקיקים, וכן מעבר לשימוש במקורות אנרגיה פחות מזהמים כגז טבעי. עיקר הפתרונות המיושמים בארץ, היו נחלתן של המדינות המפותחות עד לשנות השבעים. ככל שהולכים ומתבררים ממדי הפגיעה באיכות האוויר כתוצאה מייצור חשמל, כך מתגברת המגמה לעיגון תקנות וצדדים בכל מדינה, כמו גם במישור הבני"ל, באמצעות הסכמים. אמנות פרוטוקול הלסינקי (1985) קבעה הפחתה של כ-30% בפליטת SO₂ בטווח 20 שנים. כתוצאה מכך ירדה כמות הפליטות של 21 המדינות החתומות ב-48%, כאשר 12 מהן הפחיתו את רמת הפליטה בלמעלה מ-50%; פרוטוקול סופיה (1988) הביא לירידה מתונה בפליטות NOX, בעוד שבאותה תקופה חלה עליה משמעותית בישראל בפליטות מסוג זה.

¹⁴ צעד זה ימנע פליטת תחמוצות גופרית וחלקיקים ויפחית פליטת CO₂ ו-NOX באחוזים ניכרים (מור, 2001). בנוסף, תמשך הסבת טורבינות גז לעבודה במחזור משולב, שמשמעו שיפור ניצולת השריפה בלמעלה מ-15%.

4 סקירת הרקע המדעי

4.1 צעדים אפשריים לצמצום חשמל בשכונות מגורים

על מנת להבין את יכולת העירייה להביא לחיסכון אנרגטי ברמת השכונה פנינו לסקירה של צעדים דומים אשר נעשו או נעשים כיום בשכונות קיימות. בישראל אין עדיין שכונה אשר עשתה שינויים במרחב העירוני באופן רחב על מנת לחסוך בחשמל. קיימות אומנם שכונות ירוקות כגון נווה צין והשכונה הירוקה בכפר סבא, אלא שאלו שכונות חדשות אשר נבנו מן היסוד ולכן המאפיינים שלהן שונים. בעולם לעומת זאת קיימות שכונות, ופעמים רבות אף ערים, אשר שמו לעצמן למטרה לצמצם בצריכת החשמל.¹⁵

על מנת להגיע לחסכון אנרגטי אפשר לנקוט בפעולות שונות. יש לציין כי תוכניות לפיתוח בר קיימא רבות מתייחסות למרחב עירוני גדול כגון ערים ואפילו מדינות. כמובן שככל שהמרחב העירוני גדול יותר, כך אפשרי לכלול בהם תהליכים בעלי השלכות כלכליות וחברתיות רחבות יותר. נושאים רבים מתחום הקיימות אינם רלוונטיים כאשר מדובר במרחב עירוני מצומצם כמו זה בו אנו דנים. לדוגמא, רצון לבצע שינויים עקרוניים בתחום התחבורה הינו עקר אם לא ניתנת תשומת לב ליכולת של התושבים להתנייד כאשר הם יוצאים מתחומי השכונה. מכאן ששינויים שאפשריים במרחב גוש דן לדוגמא, אינם יכולים להיות נדונים בשכונת יפו ג' בפני עצמה. אנו ננסה להצביע על צעדים אשר יכולים להינקט במרחב העירוני של השכונה ללא תלות בתהליכים רחבים יותר אשר קורים ברמת העיר או המדינה.

במהלך הבדיקה נבדיל בין שינויים שהממשל המקומי יכול לבצע במרחב הציבורי לבין צעדים הגוררים חדירה למרחב הפרטי. לדוגמא, החלטה לעבור לשימוש בתאורה סולארית יכולה להתקבל על ידי העירייה ולהתבצע על ידה בצורה קלה יחסית. לעומת זאת, מעבר לשימוש במוצרי חשמל חסכוניים בתוך הדירות דורש את מעורבות הדיירים עצמם. באופן כללי, נטה בעבודה זו לאמץ פתרונות אשר יכולים להתקבל ולהתבצע על ידי הרשויות ללא מעורבות הדיירים על מנת להקל על ביצוע המחקר. עם זאת, יש מקום לשקול צעדים בתחום קניין הפרט של התושבים באם הם מביאים לחסכון אנרגטי ניכר.

¹⁵ יש לציין כי לרוב תוכנית העיר אינה מתעדת לחסוך באנרגיה בלבד אלא היא כוללת היבטים רבים נוספים ומכוונת ליצירת מרחב הפועל על פי עקרונות הקיימות (Sustainability) או הפיתוח בר הקיימא (Sustainable development). פיתוח בר קיימא מתבסס על ניצול משאבים בצורה המתעדת לענות על צרכי האנוש לצד שימור הסביבה, כך שצרכים אלה ימולאו לא רק בהווה, אלא גם בעתיד. הפיתוח ינסה לתת מענה להיבטים כלכליים חברתיים וסביבתיים במרחב העירוני. אחד ממאפייניו הבולטים הינו חשיבה אינטגרטיבית הכוללת נושאים רבים. כך שתוכניות פיתוח בר קיימא של ערים מתייחסות לצד נושא האנרגיה גם לבנייה ירוקה, תחבורה, שימושי קרקע, תרבות, מוסדות שלטון וכן הלאה. ראה לדוגמא מסמך עקרונות לפיתוח בר קיימא "This is smart growth" אשר פותח על ידי איגוד מנהלי הערים (The International City/County Management Association) ומשרד איכות הסביבה האמריקאי. (Smart Growth Network.)

4.1.1 תקן ה LEED for New Neighborhoods

אולי המסגרת הכוללת ביותר לתחום הקיימות בשכונות נעשתה במסגרת התקן האמריקאי לבנייה ירוקה הליד (LEED) לשכונות חדשות (Neighborhood New Development).¹⁶ תקן זה כולל פרמטרים פרטניים בהם צריכה לעמוד שכונה על מנת להיות שכונה ירוקה או מקיימת. על מנת ללמוד מתקן הליד לשכונה ירוקה על הצעדים שיכולים להינקט בשכונות מגורים בתחום חסכון בחשמל יש לבדל מתוכו את הסעיפים הרלוונטיים על פי הקריטריונים הבאים:

1. קשר לחיסכון בחשמל- קריטריונים רבים בליד כלל אינם קשורים או משפיעים על חשמל ולכן לא יופיעו במסגרת מחקר זה.
2. התאמה לשכונה קיימת- מאחר ותקן הליד בנוי עבור שכונות חדשות שנמצאות בתהליך תכנון, הרי שאפשר לחסוך בהם חשמל בצעדים אשר אינם אפשריים בשכונות קיימות.¹⁷ אנו נחפש צעדים אשר אפשרי לבצע אותם בשכונות קיימות.
3. הרשות כמתכנן עירוני ולא כיום- למרות שהרשות המקומית מתפקדת גם כיום בניה בתהליך בניית מבני ציבור וכזו יכולה לבחור לבנות אותם כבניינים ירוקים, אנו נתמקד בעבודה זו בשינויים במרחב העירוני ולא ברמת הבניין הבודד.¹⁸

פירוט של סעיפי התקן ובדיקתם על פי הפרמטרים השונים ניתן למצוא [בנספח ד'](#). תקן ה LEED לשכונות ירוקות חדשות מראה כי ישנם מספר בודד של שינויים אשר אפשר לקיימים במרחב העירוני בשכונות ותיקות. עם זאת, שינויים אלו יכולים להיות מושגים על ידי מספר פתרונות חלופיים. תקן ה LEED עצמו מכיר בחלופות אלו ומאפשר למתכנן לבחור מתוכן. להלן פירוט השינויים המתאימים לפרמטרים שהצגנו והחלופות להשגתן:

1. Heat Island Reduction- אי חום הינה תופעה המתרחשת במרכזים עירוניים בה עולה הטמפרטורה של איזור העיר ב 2-3 אחוזים לעומת הטמפרטורה השורה בסביבותיה וזאת עקב מרכזו של בניינים, אספלט ובטון הסופגים חום ומחזירים אותו אחר כך לסביבה. תקן ה LEED ND מצביע מספר חלופות על מנת להתמודד עם הבעיה:

¹⁶ הליד, אשר נכתב על ידי המועצה לבנייה ירוקה ארה"ב (USGBC) הינו התקן המוביל בעולם לבנייה ירוקה עד היום נבנו תחת תקן הליד לבניינים ירוקים חדשים 1200 בניינים ירוקים ברחבי העולם. תחת ה LEED מספר תקנים הלקוחים מעולם הבנייה הירוקה: תקן לבניית בניינים חדשים ירוקים, תקן לשיפוץ ושחזור ירוק, תקן לבניית בתי ספר ירוקים וכן הלאה. התקן המיועד לשכונות ירוקות הינו חדש יחסית. התקן נמצא בתהליכי פיתוח מאז 2007 אז הושקה גרסה ניסיונית והוא נמצא כיום בשלב הפתוח להערות הציבור. עם זאת, הסעיפים בו כבר בנויים ואפשר לקבל מהם מבט מעמיק לגבי האלמנטים של שכונה ירוקה. ראה אתר המועצה האמריקאית לבנייה ירוקה (USGBC): <http://www.usgbc.org/DisplayPage.aspx?REFERRER=/DisplayPage.aspx?CategoryID&CMSPageID=148>

¹⁷ לדוגמה, חסכון אנרגטי גדול יכול להתקבל רק על ידי הפנייה נכונה של בתי השכונה אל מול השמש או שמירה של זכויות שמש בין בניינים אך אין זה אפשרי בשכונה קיימת.

¹⁸ הערה זו מתייחסת לדרישה של תקן הליד לבנות כבניין ירוק את כלל הבניינים הציבוריים בשכונה. ראה: LEED ND, Green infrastructure and buildings, credit 1.

- a. שימוש בגגות בעלי SRI (מקדם החזרה) גבוה
 - b. הצללה של מדרכות על ידי גגונים
 - c. ייעור המרחב העירוני
 - d. שימוש בחניות מקורות (פחות רלוונטי לענייננו מאחר ומחייב שינויים ברמת נחלת הפרט בחניות ביתיות וקשה לביצוע על הכביש עצמו)
 - e. גגות ירוקים
2. Infrastructure energy efficiency - צמצום בשימוש בחשמל על ידי שימוש במערכות אלקטרוניות (רמזורים, משאבות מים, תאורת רחוב) חסכונית באנרגיה.
 3. On site renewable energy sources - עידוד שימוש בטכנולוגיות לייצור חשמל כגון טורבינות רוח או לוחות סולאריים ברחבי השכונה ועל הבתים. רמת החיסכון באנרגיה קובעת את הניקוד בתקן.

4.1.2 צמצום אנרגיה בערים מקיימות בעולם

בחינה של ערים או שכונות ותיקות בעולם אשר עברו תהליך פיתוח בר קיימא יכול גם כן ללמדנו על צעדים בהם אפשר לנקוט בתחום האנרגיה. בניתוחים שערכנו התייחסנו לשלושה מקרי מבחן הנבדלים בניהם במיקום בגודל המרחב ובצעדים בהם בחרו הרשויות לנקוט: איסלמורדה שבפלורידה (Islamorada)¹⁹, ברקלי שבקליפורניה (Berkley)²⁰ ונורת'המפטון שבבריטניה (Northampton)²¹. בטבלאות [בנספח ה'](#) מוצג פירוט הסעיפים הנוגעים לאנרגיה וניתוחם על פי הקריטריונים שהוזכרו לעיל (האם הפרמטר מתאים לשכונות וותיקות והאם הוא מתבצע במרחב העירוני).²² כמו כן מוצג בנספח גם ניתוח של הממצאים בכל עיר. סעיף אשר אפשר לקיימו בשכונות

¹⁹כפר קטן השוכן באי הקרוב לחופי פלורידה. בכפר כ 8000 תושבים החיים מהתיירות המקומית. הכפר הוכרז ככפר בשלטון עצמי (Incorporated village) בשנת 1997 ומשמעות הדבר שהוא קיבל זכויות ממשל עצמאיות ונפרדות, מעין מועצה מקומית נפרדת. בשנת 2007 הוחלט לבצע בכפר תוכנית קיימות. בתוכנית רשימה של צעדים בתחום האנרגיה (Village of Islamorada. 2008).

²⁰העיר השוכנת על החוף המזרחי. בעיר בסביבות 100 אלף איש בכ 45 אלף בתי אב. בשנת 2006 הוחלט בברקלי על תוכנית למלחמה בהתחממות הגלובלית (Climate Action Plan) אשר נמצאת כיום בתהליכי רוויזיה (נוסח ראשוני יצא ב 2008) ואמורה לצאת לאישור הציבור ביוני 2009. התוכנית שמה לעצמה הורדה של 80 אחוז בגזי החממה אותה מייצרת העיר והיא דנה במגוון רחב של נושאים כגון תחבורה, שימושי אדמה, הפחתת פסולת, מחזור ויחסים בקהילה. בתוכנית מוקדש פרק מיוחד לנושא האנרגיה (City of Berkley. 2008).

²¹העיר ממחוז ניוהמפשייר שבאנגליה מהווה בית לכמאתיים אלף תושבים. בשנת 2005 הוחלט לבצע בה תוכנית קיימות ובינואר 2008 יצאה טיוטה ראשונה אשר נמצאת כיום בתהליכי רוויזיה. התוכנית כוללת גם היא התייחסות לתחומים שונים כגון שימושי קרקע, פיתוח כלכלי, חיי תרבות, תחבורה וחינוך עם פרק מיוחד המתייחס ל"אנרגיה, סביבה והגנה על האקלים (Energy, environment and climate protection)" (City of Northampton. 2008).

²²הטבלאות הוכנו על ידי צוות המחקר שלנו מסקירה של תוכניות הרשויות. כמו כן הוספה עמודה הדנה בשאלה האם הצעד יכול להתבצע במרחב העירוני בישראל. לדוגמא, עירייה בישראל אינה יכולה לבצע משא ומתן עם חברת החשמל עבור תושביה אך צעד זה אפשרי בבריטניה. לכן בנורת'המפטון הכניסה הרשות כפרמטר משא ומתן עם ספק החשמל על

ותיקות, הוא אינו תלוי בתושבים אלא נעשה על ידי העירייה, ואפשר להוציאו לפועל על ידי רשות מוניציפאלית בישראל יוכל להיות מאומץ במסגרת עבודה זו.

4.2 תעדוף בין צעדים לחסכון בחשמל במרחב הציבורי

מסקירה של תקן ה LEED ומתוכניות לפיתוח בר קיימא עולים הממצאים הבאים:

1. תוכניות פיתוח בר קיימא כוללים צעדים לחסכון בחשמל אשר יכולים להתקבל ולהתבצע ישירות על ידי הרשויות ללא מעורבות התושבים. צעדים אלו לרוב, באופן טבעי, יתייחסו או ליעול אנרגטי של מבני ציבור (אינו במסגרת עבודה זו) או לשינויים במרחב הציבורי.
2. תוכניות פיתוח בר קיימא כוללים גם צעדים רבים לחסכון בחשמל אשר מתייחסים לקניין הפרטי של התושבים.

ככלל לצורך המחקר בחרנו לתת עדיפות לצעדים אשר יכולים להיעשות על ידי העירייה מבלי לחדור לקניין הפרטי של התושבים, זאת מתוך הנחה כי אלו יהיו קלים יותר לביצוע. מתוך הסקירה הספרותית אשר הצביעה על שורה של פתרונות בחרנו להתמקד בשני צעדים מרכזיים: **ייעול המרחב העירוני (הורדת פליטת חום של מדרכות ובניינים) וייעול מערכות אנרגטיות.**

עם זאת, לאחר שראינו כי בערים רבות נעשו גם צעדים בתחום רשות הפרט, לא בחרנו שלא לפסוח לגמרי על הפוטנציאל לחסכון בחשמל הגלום שם. התערבות בקניין הפרטי של התושבים יכולה להתקבל בדרכים שונות בניהם כלי רגולציה, תמריצים כלכליים וחשיפה למידע (ראה [נספח ו](#)). בעבודה זו, בחרנו להתמקד בצעדים בעלי המאפיינים הבאים:

1. פוטנציאל גבוה לחסכון בחשמל- צעדים אשר להם ההשפעה הגבוה ביותר על צריכת החשמל.
2. עדיפות לצעדים אשר אינם פוגעים ברווחת הדייר- נעדיף צעדים אשר אינם צפויים לעורר התנגדויות עקב פגיעה באינטרסים של התושבים.²³
3. יכולת אימפּלמנטציה בפועל- התמקדות בצעדים אשר אינם מטילים נטל כספי על הדיירים, או לחלופין, אשר יוכלו להיות מסובסדים על ידי העירייה.²⁴

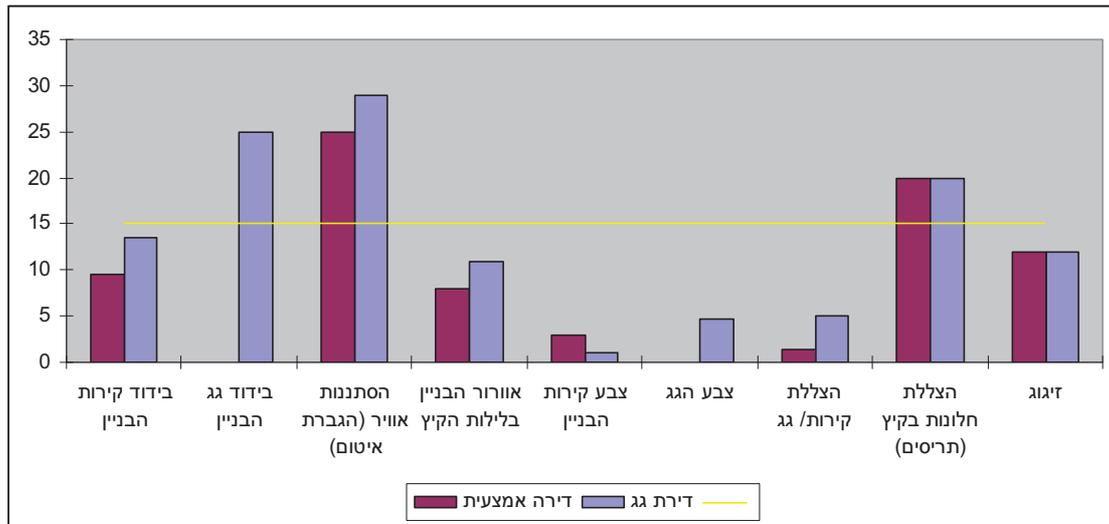
שיפורים אנרגטיים במתקנים ומערכות. יש לציין כי למעט שני סעיפים בנורת'המפתון, רוב הצעדים המוצעים בתוכניות מתאימים גם לשכונות בישראל.

²³ לדוגמא, נתנת עדיפות לצעדים אשר אינם חודרים לדירות התושבים אלא המתייחסים לשטח הציבורי של הבניין מתוך שיקולים כגון נוחות או אסתטיקה. כמו כן נעדיף צעדים אשר לא פוגעים בפיתוח העייתי של הבניין או באסתטיקה שלו.

²⁴ עיקרון זה חזק במיוחד בשכונות סוציו אקונומיות חלשות, שם מצד אחד התושבים אינם מסוגלים לשאת בעול הכלכלי ומצד שני, הצורך בהתייעלות אנרגטית גדול יותר עקב גיל ומצב הבניינים. מסיבה זו בחרנו להתמקד בבחינה של גגות קרים / ירוקים ולא בהצבת תאים פוטו וולטאיים על גגות הבתים, שכן אלו יקרים בהרבה וכרוכים בזמן רב להחזר ההשקעה.

על מנת להבין את פוטנציאל החיסכון בחשמל פנינו למחקר אשר נערך כצעד מקדים לתקן חסכון בחשמל בבנייני מגורים, ת"י 5282. המחקר בדק עבור ארבעה אזורים אקלים בישראל (ת"א, ירושלים, באר שבע ואילת) את פוטנציאל החיסכון בחשמל של שינויים צעדים שונים הננקטים בבניין.²⁵ תוצאות המחקר מובאות בלוח 1.

לוח 1: חסכון קו"טש למ"ר בדירה



מקור 1: שביב, 2002.

מהמחקר ניתן ללמוד כי להגברת האיטום, לבידוד גג הבניין ולהצלת חלונות בקיץ הפוטנציאל הגדול ביותר לחסכון אנרגטי. עם זאת, איטום בתי התושבים והגברת השימוש בתריסים הינם צעדים החודרים לדירות התושבים והמשפיעים גם על שיקולי אסתטיקה. לעומת זאת, בידוד גג הבניין מתבצע במרחב הציבורי של הבניין והוא מתאים מאוד לשכונה שבחרנו: שכונה בה לא נעשה שימוש בגגות הבניינים כלל. באם העירייה תחליט לממן צעד זה אשר מטיב עם חשבון החשמל של הדיירים, היא אינה צפויה להיתקל בהתנגדויות. לכן הצעד האחרון בו בחרנו לנקוט הינו: **בידוד גגות על ידי שימוש בחומרים בעלי מקדם קרינה SRI גבוה או גגות ירוקים.**

²⁵יש לציין כי המחקר התייחס לבניינים חדשים וכי חלק מהפעולות המוצעות בו כגון העמדת הבניין אל מול פני השמש אינו רלוונטי למחקרנו. עם זאת, פעולות אחרות יכולות להתבצע גם Ad hoc בבנייני מגורים קיימים. כמו כן יש לציין כי המחקר בדק את פוטנציאל החיסכון אל מול בניין רגיל אשר עומד בתקן לבידוד 1045 שהוא תקן מחייב בישראל. יש להניח כי בבניינים בני גילם של אלו בשכונה שלנו החיסכון האנרגטי גדול בהרבה.

4.3 סקירה ספרותית של הצעדים הנבחרים

פרק זה יבחן את הספרות המקצועית הקיימת בכל אחד מהצעדים לחסכון בחשמל המפורטים בפרק הקודם. בסוף כל צעד תיבדקנה אפשרויות היישום שלו במחקר המוצע.

4.3.1 ייעור המרחב העירוני

נושא השפעת העצים על תנאי האקלים בסביבה עירונית בנויה זוכה בשנים האחרונות לתשומת לבם של חוקרים רבים, בין היתר בשל החרפת עומס החום העירוני כתוצאה מתהליכי עיור מואצים (ראה [נספח ז'](#)).

במחקר שנעשה בשדרות ובגנים בעיר ת"א ובסביבתה (שעשוע-בר, 2002) נבדקה השפעת העצים ותרומתם לשיפור תנאי האקלים בסביבה עירונית בנויה. מטרת המחקר הייתה לימוד משמעות הגורמים הקובעים את ההשפעה הכמותית של עצים על תנאי האקלים של אזור מיוער תחום במרחב עירוני והשפעתו על הסביבה הבנויה הסמוכה. (ראה [נספח ח'](#)). בהמשך לאותו מחקר פותח מודל אנליטי ממוחשב, The Green CTTC model (Shashua-Bar & Hoffman 2002), המושתת על עקרונות פיזיקאליים ופרמטרים אמפיריים.²⁶ המודל מאפשר יישום מסקנות תכנון עירוני בטיפולוגיות שונות באזורי אקלים שונים בארץ בהם ניתן לשלב השפעות הצמחייה ע"פ סוגים עיקריים המייצגים עצי מחט ועצי רחבי עלים, ומדשאות כמייצגים משטחי צמחייה.

מחקר נוסף הנערך בתקופה זו עבור המשדך לאיכות הסביבה מהווה בסיס לפיתוח הנחיות ל"תכנון אקלימי באמצעות צמחייה".²⁷ במחקר מודגמות ההשפעות השונות של ייעור, ע"פ סוג הצמחייה ורמת הכיסוי. בהתאם לרמת הצללה/החשיפה לשמש המבוקשת, ניתן יהיה לתכנן את סוג הצמחייה ואת צפיפות הנטיעה, להשגת נוחות אקלימית מרבית. המחקר בוחן את פוטנציאל השימוש בעצי רחוב במרחב העירוני במצבי תכנון שונים לצורך שיפור תנאי מיקרו האקלים ונוחות האדם בעיר תל אביב (שעשוע בר, 2007). נבחנו שלושה סוגי עצים בעלי תצורות נוף שונות הנפוצים בערי ישראל: פיקוס השדרות התאפיין בחופה רחבה וצפופה, מכנף נאה בחופה בינונית ותמר מצוי בחופה צרה ודלילה.²⁸

²⁶ מודל זה מהווה פיתוח נוסף של מודל CTTC לחיזוי אקלים העיר (Swaid & Hoffman 1990/91) בו הוכנסו בין היתר השפעות הצמחייה.

²⁷ מתוך נספח ג. תכנון אקלימי בפרק 9 אקולוגיה עירונית, כחלק מעבודה אשר התבצעה על ידי יועצי תכנית המתאר לנושא אקולוגיה עירונית. עבור עיריית ת"א. ד"ר עודד פוצ'טר.

²⁸ בשלב הראשון בוצעו מדידות מטאורולוגיות לשם קביעת תמונת מצב של האתרים שנבדקו ולשם קביעת פרמטרים המאפיינים את התפקוד האקלימי של שלושת סוגי העצים. בעקבות הניתוח האמפירי, בוצע ניתוח אנליטי לשם קביעת אפקטים ייחודיים של משתנים תחת שליטת המתכנן. נערכו סימולציות בעזרת מודל Green CTTC model לפי שלושה משתני תכנון: סוג העץ, שטח הצללת העצים וגיאומטריה המרחב העירוני. לשם יישום התוצאות למרחב עירוני, נבדק רחוב קניון עם מבנים לאורכו, המייצג צורת בניה הנפוצה בעיר תל-אביב. נבדקו מצבי תכנון של שלושת סוגי העצים ברמות של צפיפות נטיעה בשטח כיסוי של 25%, 40%, 70%, ו-90% משטח הרחוב, בשלושה טיפוסים רחובות בעלי רמת צפיפות בניה של 4, 6 ו-8 קומות. [נספח ט](#) מובא מהלך טמפרטורת האוויר החוזיה בחתך רחוב עירוני (צפון-דרום) משתנה (גובה 4, 6 ו-8 קומות) ורמת כיסוי משתנה של עצי פיקוס (40%, 70% ו-90%), מול מהלך טמפרטורת האוויר החוזיה ברחוב עירוני משתנה ו-40% כיסוי של 3 סוגי עצים: פיקוס, מכנף ותמר.

מבין שלושת סוגי העצים שנבחנו נמצא כי פיקוס השדרות המתאפיין בחופה רחבה וצפופה, ברמת צפיפות נטיעה בשטח כיסוי של 90% משטח הרחוב, מייצר אפקט קירור מרבי.

מחקרים אלו מורים על כך שתכנון עירוני רואה כיום ביעור צעד מרכזי לשיפור הנוחות האקלימית של המרחב העירוני.

4.3.2 הפחתת קליטת החום של גגות על ידי בידוד או על ידי גגות "ירוקים"

אחד המרכיבים בעלי הפוטנציאל הרב ביותר לחיסכון בניצול החשמל הוא גג המבנה, "החזית החמישית" של הבניין.²⁹ למעבר החום דרך הגג השפעה משמעותית על הטמפרטורה השוררת בתוך הבית וכתוצאה מכך, על הנוחות התרמית והשימוש במיזוג אוויר. ועל כן ניצול גג המבנה והפחתת מעבר החום דרכו מהווים נדבך חשוב לחיסכון באנרגיה במבנים.

בטיפול בגגות המבנים קיימים מספר אמצעים דרכם ניתן לשפר את תנאי האקלים בתוך מבנים, ועל ידי כך לחסוך בכמויות האנרגיה הנצרכות לשם קירור או חימום המבנה: גגות "קרים" (גגות המצופים חומרים בעלי רפלקטיביות גבוהה) וגגות ירוקים (גגות מכוסי צמחייה) אשר עשויים להיות רלוונטיים עבור יוזמות של רשות מקומית לשיקום שכונות קיימות לצורך חיסכון אנרגטי במבנים.³⁰

יש לציין כי לשני האמצעים השפעות משמעותיות על קירור פסיבי של הבית במהלך העונות החמות, אך השפעתם על חימום/בידוד הבית במהלך החורף זניחה. כמו כן, תרומתם להפחתת מעבר החום דרך הגג גדולה רק בגגות בעלי רמת בידוד נמוכה או ללא בידוד כלל, ואינה קיימת בגגות בעלי רמת בידוד גבוהה, ועל כן צעד מסוג זה מתאים ביותר ליישום בשכונות קיימות, בהם המבנים ישנים יחסית, ולא בוצע בידוד הגג בצורה יעילה.

בבתים פרטיים כמות החום שעוברת דרך הגג יכולה להגיע עד ל-50% מצבירת החום היומית (Pearlmutter & Rosenfeld, 2007). ביום קיץ יכולה הטמפרטורה של גג מבודד המכוסה חצץ לנוע בין 60-80 מעלות צלזיוס (Peck et al. 1999). מעבר החום העושה את דרכו מהאזור החם אל האזור הקר מתקיים באופן טבעי דרך הגג. מעבר זה נעשה על ידי הולכה (תנועה מולקולארית של זרימת החום דרך החומר או כתוצאה ממגע פיזי ישיר של גופים בעלי הפרשי טמפרטורות), הסעה (תופעה של מעבר חום בנוזל או בגז הנגרמת על ידי תנועת החומר) או קרינה (זרם של חלקיקים נושאי אנרגיה הנעים בחלל בצורה של קרניים אלקטרומגנטיות).

²⁹ מבוסס על עבודתה של אורנה שוייצר, חשיבותה של "החזית החמישית" בחיסכון באנרגיה: פתרונות שונים ויישומם בישראל. אוני' ת"א, 2009.

³⁰ דרך נוספת לניצול שטחי הגגות לחיסכון בחשמל, היא התקנת תאים פוטו-וולטאים המפיקים חשמל מאנרגיית השמש. שיטה זו יעילה מאוד, ומותאמת במיוחד למדינת ישראל, בה שעות שמש רבות, אם כי נכון להיום עלויות המערכת עדיין גבוהות, ומעורבות הרשות המקומית במהלך מסוג זה תהיה פחותה, ועל כן לא נדון בשיטה מסוג זה בעבודה זו כפי שצוין בפרק הקודם.

בידוד הגג בחומרים בעלי מוליכות נמוכה מפחית את מעבר החום דרכו באופן ניכר. מחקרים שונים בדקו שיטות מגוונות להפחתת מעבר החום דרך הגג בצורה שתביא לחיסכון משמעותי בצריכת החשמל. להלן פירוט המחקרים:

1. גגות "קרים"

הכוונה היא לגגות המצופים בחומרים בעלי רפלקטיביות גבוהה, כלומר יכולת החזרה גבוהה של קרינה מהשמש, ובערכים גבוהים של אמסיביות תרמית, כלומר, היכולת של חומר להקרין חזרה אנרגיה שנקלטה בו (Bretz & Akbari, 1997).³¹ החומרים המיועדים לגגות "קרים" בדרך כלל עשויים מחומרים בעלי גוון לבן בוהק, אם כי לאחרונה פותחו גם חומרים בגוונים כהים, לגגות משופעים. כמו כן, הם חייבים להיות גם בעלי יכולת הקרנה גבוהה, המאפשרת להם להקרין לחלל האוויר אנרגית חום (המצטבר בגג) כקרינה אינפרא אדומה.³² מחקרים שונים בחנו את יעילותם של חומרים "קרים" על גבי גגות מבני מגורים בהפחתת כמויות החשמל הדרושות להפעלת מיזוג אוויר. בפלורידה נבדקה התועלת של הפחתת כמויות החשמל העונתית שצרכו 11 מבני מגורים, בהם כוסו הגגות בציפוי לבן באמצע עונת הקיץ, ונמצא כי הייתה ירידה של 7.4 קוט"ש ליום (19%) בכמויות החשמל שנצרכו במבנים (Parker et al, 1997). ההפחתה בכמויות החשמל הנצרכות הוכחה גם על ידי מחקרים שערכו סימולציות ממוחשבות של חיסכון במיזוג אוויר כתוצאה מהגדלת אפקט האלבידו (מידת ההחזרה של החומר) של הגג במבני מגורים. אחרים בדקו את ההשפעה של צבע הגג על הטמפרטורה בתוך הבית ומצאו כי בבית בעל גג שחור הטמפרטורה גבוהה ב-12 מעלות צלזיוס מבית בעל גג לבן (Cheng & Givoni, 2005). השוואות שנערכו בין בניינים בערים שונות ברחבי ארה"ב הראו שמבנה בעל גג לבן או גג "קר" יכול להסתפק בדרגת בידוד נמוכה יותר מאשר מבנה בעל גג כהה (Konopacki & Akbari, 1998).

למרבת הבתים החדשים הנבנים כיום רמת בידוד גבוהה בגג, ועל כן ציפוי גגותיהם בחומר "קר" כמעט ולא יועיל לחיסכון בחשמל, עם זאת, דווקא במרבית בתי המגורים הישנים קשה למצוא בידוד מיטבי, והתועלת שבהתקנת גג "קר" משמעותית.

³¹עלייה ברפלקטיביות של חומר גורמת לירידה בטמפרטורה שעל פני השטח שלו כתוצאה מכך שקרינת השמש מוחזרת ולא נבלעת בתוכו, דבר המביא להפחתת החום שחודר אל תוך המבנה. תופעה זו חיונית בעיקר במהלך הקיץ והצורך בקירור החלל קטן.

³²בתעשייה כיום קיימים חומרים רבים המשמשים ליישום של גגות "קרים" ומנוצלים גם למטרות כגון איטום, תיקון נזקים, הגנה והארכה של חיי הגג. ציפויים אלסטיים לבנים, המכילים פולימרים שמקנים להם אטימות ורפלקטיביות גבוהה משמשים למטרות אלו. מתוך אתר "Fix All roofs"

2. גגות "ירוקים"

תרומתה של צמחייה לשיפור הנוחות האקלימית ולצמצום תופעת "אי החום האורבאני" נדונה בהרחבה בתיאור צעד ייעור המרחב העירוני (סעיף א בפרק זה). לצמחייה הגדלה על גג מבנה השפעה דומה לזו של רחוב או פארק עירוני: צפיפות העלים שבצמחיית הגג מקנה הצללה דומה לזו של העצים הרחבים ברחוב או בפארק, ומאפשרת דיות גבוהה, שלה תפקיד חשוב בהורדת טמפרטורת הסביבה.

השימוש בצמחיה על גגות לצורך שיפור תנאי האקלים בתוך הבית נעשה זה מכבר ועורר חוקרים רבים לבחון את תרומתה של צמחיה הגדלה על הגג להפחתת הצורך בקירור/חימום הבית ולחיסכון באנרגיה. בימים חמים, טמפרטורת גג שעליו גינה עשויה להיות נמוכה יותר בעד 50 מעלות צלזיוס מטמפרטורת גג שחור רגיל.³³ בגג של בית ספר באתונה נבחנה השפעתה של הצמחייה על החיסכון באנרגיה לקירור ולחימום המבנה, ונמצא שתחת גג עם צמחיה הייתה הפחתה משמעותית בכמויות החשמל שנצרכו לצורך קירור המבנה כולו (%49-7), ובמיוחד בקומה העליונה (%87-12) (Santamouris et al, 2007). מחקר נוסף בחן פרמטרים זהים באמצעות מודל מתמטי ומצא שהירידה בצריכת החשמל לקירור נעה בין %15-39 בעוד שבצריכת חשמל לחימום נצפו תנודות המצביעות על השפעה זניחה של הצמחייה בעונה הקרה (Spala et al, 2008).

הפרמטרים החיוניים הקובעים את יעילותו של גג ירוק כטכניקה לקירור פסיבי של המבנה הם: סוג הצמחייה ומאפייניה כגון עלי הצמחים וצפיפותם (ככל שצפיפות העלים גדולה, כך גם גדלה ההשפעה של הגג על הקירור הפסיבי), תנאי האקלים באזור המיועד (סביבה יבשה בה הלחות היחסית נמוכה, מזרזת את תהליך אידוי המים מהצמחים, ובכך משפרת את יכולת הקירור שלהם) ורמת בידוד הגג (רמת בידוד גבוהה מאפשרת הגנה תרמית, ומונעת את מעבר החום מתוך המבנה אל שכבת הצמחייה, ועל כן יעילותו של גג ירוק במקרה זה זניחה).

על מנת ליישם צעד זה של התקנת גג "ירוק" יש לקחת בחשבון גם את עומס שכבת הצמחייה הנוסף על הגג. רוב הגגות מתאימים לגינון והקמת גינת גג אינה מחייבת הליך רישוי, להבדיל מתוספת בנייה, עם זאת, גג הנושא שכבת צמחייה בעומק של 10 ס"מ שוקל כ-110 ק"ג/מ"ר, ולשכבות עבות יותר משקל רב יותר,³⁴ על כן רצוי כי מהנדס בניין יבדוק את עמידות הגג לעומס המשקל. בנוסף, יש להתחשב בהיבט ההשקיה והתחזוקה השוטפת, גם לאור המחסור ההולך וגובר במים בישראל, ולהשתמש בצמחים חסכוניים במים או מערכות מחזור מים אפורים או מי נגר.

בבתים קיימים, בפרט מבנים ישנים, כגון אלו הקיימים בשכונת יפו ג', לא ניתן ככל הנראה ליישם את אמצעי הגגות "הירוקים" בשל עומס שכבת הצמחייה הנוסף על הגג אשר יהווה תוספת עומס

³³ U.S.Environmental Protection Agency, Green Roofs, 2007.
<http://www.epa.gov/heatisland/strategies/greenroofs.html>

³⁴ מתוך אתר של חברת "רוב-נוי" <http://www.rov-noy.co.il>

משמעותית באותם מבנים, ועלול להוות סיכון ממשי לעמידות המבנה מבחינה הנדסית. אי לכך, בעבודה זו נבחר לבחון את שיטת תוספת הציפויים "הקרים" בלבד.

4.3.3 ייעול אנרגטי של מערכות אלקטרוניות

צעד זה עוסק ביוזמה של הרשות המקומית בצמצום השימוש בחשמל במרחב העירוני-שכונתי באמצעות שימוש במערכות אלקטרוניות (רמזורים), פנסי תאורה, תמרורים מוארים, תאורת שלטי חוצות וכיוצ"ב) חסכוניות באנרגיה: שימוש בנורות חסכוניות / שימוש במערכות מותאמות לשימוש באנרגיה חלופית.

סך צריכת החשמל של תאורת רחוב בעיריית תל אביב עמד ב 2007 על 38 מיליון קילו וואט לשנה: כ- 1.1 אחוזים מכלל הצריכה של העיר.³⁵ מצבת הפנסים בעיר כללה בסוף 2007 כ- 63,300 פנסים, מזה 25% כספית, 37% - נתרן לחץ גבוה, 8% מטל-הלייד, 16% - פנסי ליבון, 4% נורות פלואורסצנט ו-1% - אחר. בסה"כ בעשור האחרון הייתה עלייה של 33 אחוזים במצבת הפנסים בעיר (1997-2007), כאשר 60 אחוזים מהפנסים דולקים מרדת החשיכה עד עלות השחר, בעיקר במקומות שיש בהם תנועה רבה.

1. מערכות סולאריות

החלפת תאורת הרחוב, הרמזורים, שלטי חוצות תמרורים מוארים וכיוצ"ב במתקנים הממלאים את אותה פונקציה, אך משתמשים במקורות אנרגיה "נקייה", ובכך נחסכת צריכת האנרגיה "המזהמת" המופקת ע"י חברת חשמל צריכה להיבחן הן מבחינת השפעתה על זיהום האוויר כחלק מהאמצעים לחיסכון באנרגיה בשכונות, והן מבחינת כדאיותה הכלכלית ליישום, ועל כן חשוב להבין את הטכנולוגיה העומדת מאחורי אותם "מוצרים" סולאריים. (ראה [נספח י'](#)).

בארץ היו כמה ניסיונות להצבת מתקנים סולאריים במרחב העירוני והבין-עירוני, כגון הפרויקט בנס הרים בירושלים, בו הוחלפה תאורת הכביש בתאורה פוטו-וולטאית הכוללת חיישני תנועה, כך שהפנסים נדלקו ונכבו רק ע"פ הצורך (דבר שהתברר בדיעבד כבעייתי מבחינת נוחות ויזואלית בזמן

³⁵הצריכה ב 2007 דומה לזו ב 2006 ומהווה ירידה בהשוואה לשנים קודמות: 39 מיליון קוט"ש בשנת 2005 ו-42 מיליון קוט"ש ב-2004. הירידה בצריכת חשמל לצורכי תאורה בשנים האחרונות מוסברת בכך, שהאחריות על התאורה בדרך נתיבי איילון עברה לחברת נתיבי איילון וגם משום שהוחלט על מדיניות חסכון בתחום התאורה. הירידה מוסברת גם בשל הקמת מרכז בקרה לתאורת רחובות. ככל שנה, הפעילה מחלקת המאור תאורה קישוטית לחגים, לחגיגות ולאירועים שונים. סך צריכת החשמל בת"א-יפו בשנת 2007 הגיעה לכ-3,745 מיליון קוט"ש: 33% לצריכה ביתית, 61% לצריכה מסחרית וציבורית, ו-5% לתעשייה. הנתונים המוצגים להלן מתוך השנתון הסטטיסטי של עיריית תל-אביב-יפו לשנת 2008, בנושאי תאורה וחשמל, התקבלו בהתכתבויות מיילים עם ד"ר גלבע סימונה מהמרכז למחקר כלכלי וחברתי של עת"א.

נהיגה). המערכת פעלה כ-5 שנים בלבד לאחר התקנתה.³⁶ כמו כן, היו ניסיונות להארת תחנות הסעה לחיילים שפעלו גם הן על בסיס סולארי.

הבעיה הנוכחית בתאים הפוטו-וולטאים היא נצילותם הנמוכה (פחות מ-20 אחוזים) ומחירם הגבוה יחסית.³⁷ לעומת זאת, מצטיינים באמינות גבוהה ללא צורך באחזקה ואורך חיים של כ-30 שנים ויותר. הרשויות אינן נוטות לאמץ פתרון זה: לדידם, מהלך של החלפת המערכות האלקטרוניות במערכות סולאריות כרוך בהוצאות אדירות (ידוע לדוג' שפנסי התאורה הסולאריים מחויבים בהתקנת מצבר, אשר מייקר את עלות הפנס בכ-30 אחוזים ויש להחליפו כל 4-5 שנים), ובעיקר בשכונות קיימות, בהן כבר הושקעו הכספים עבור תשתיות החשמל, ועל כן רשות מקומית לא תשקיע כספים נוספים עבור החלפת המערכות. כמו כן קיים חשש כי המערכות יגנבו.

2. ייעול אנרגטי על ידי שימוש בנורות חסכוניות

דרך נוספת לחיסכון בצריכת החשמל עבור מערכת התאורה היא באמצעות בחירת מקורות אור בעלי נצילות אורית גבוהה. כיום קיים מגוון רחב מאוד של נורות חסכוניות העונות לדרישות של תנאי ראייה אופטימאליים וניצול יעיל של אנרגיה חשמלית.³⁸ במערכות תאורה קיימות, שבתכנון לא הושם דגש ראוי על צריכת החשמל, ניתן להביא לחיסכון רב בצריכה ע"י חידוש והתקנת התקני תאורה חדשים. להבדיל ממהלך של החלפת מתקני התאורה במתקנים סולאריים, הכרוך בהשקעה כלכלית עצומה (ולרוב לא כדאית) תקופת החזר של השקעה בהחלפת מקורות האור בלבד מוערך בספרות בד"כ בשנה עד 3 שנים. כך לדוג' שיעור החיסכון והצפי מהחלפת נורות כספית בנורות נל"ג הוא עד 50 אחוזים.

סוג נוסף של נורות חסכוניות הן נורות ה-LED.³⁹ השימוש בלדים מקובל היום גם לתאורת רמזורים: בפנס של רמזור סטנדרטי מותקנת לרוב נורת ליבון אחת, בד"כ בהספק 100 או 150 וואט. המגמה הרווחת כיום ברחבי העולם המערבי היא להחליף את פנסי הרמזורים הנ"ל בפנסי רמזורים שבהם

³⁶ משיחה עם מר אדי בית הזבדי, מאגף שימור אנרגיה, משרד התשתיות הלאומיות. לאחר כ-5 שנים רוב רכיבי המערכת נגנבו, והוחלט שלא לרכשם מחדש.

³⁷ טכנולוגיית התאים הפוטו-וולטאים, שהייתה בעבר יקרה מאוד, התפתחה בקצב מהיר והמחיר בעולם ירד לכדי 5-6 אלף דולר ל-kwp – כדי מחצית ממחירם לפני כ-10-5 שנים. אחד המכשולים היום בפני גידול מהיר של תעשייה זו והגורם העיקרי לעובדה שהמחיר לא יורד הוא המחסור בעולם בסיליקון גבישי (שניתן לייצרו מחול-חומר זול המצוי בשפע). למרות מחירן הגבוה יחסית קצב הגידול בשימוש במערכות אלו בעולם הוא של כ-30% בשנה. מתוך סיכום והמלצות דיון פורום האנרגיה של מוסד שמואל נאמן, הטכניון. באתר: www.energianews.com

³⁸ ניתן למיין את נורות החשמל ל-3 קבוצות עיקריות: נורות ליבון, נורות פלואורסצנטיות ונורות פריקה בעוצמה גבוהה (אדי כספית, מטל הלייד, נתרן לחץ גבוה/נמוך).

³⁹ דיודות פולטות אור (Light Emitting Diode). במשך זמן רב יצרו לדים בצבעים שונים (כחול, ירוק, סגול, אדום) בנצילות אורית נמוכה, כאשר בשנים האחרונות פותחו לדים המפיקים אור לבן עם נצילות אורית משופרת במידה ניכרת. משך החיים של הלדים מגיע כיום ליותר מ-50 אלף שעות והתחזית היא כי הם יחפכו למקור האור העיקרי לתאורה כללית.

נורות לד, כך שההספק החשמלי הנצרך בפנס עם נורות לד הוא כ-20 וואט, ולפיכך המעבר לטכנולוגיה זו עשוי להניב חיסכון של כ-80 אחוזים בצריכת החשמל של הרמזורים. ובנוסף יש להתחשב במשך החיים הגדול שלהן, ובכך למעשה קטנות ההוצאות לתחזוקה באופן ניכר.

לסיכום צעד הייעול האנרגטי של מערכות אלקטרונית במרחב השכונה, הפיתרון האופטימאלי יהיה שילוב בין החלפת מקור האנרגיה למקור אנרגיה חלופית (סולארית) תוך שימוש בנורות חסכוניות. עם זאת, לא פחות חשוב בבחינת יישום צעד זה לכלול את בדיקת משמעותיות עלויות המערכת, עלויות ההתקנה ויעילותה לאורך השנים. במחקר זה בחרנו עקב העלות הכלכלית שלא לבחון התקנה של מערכות סולאריות. כמו כן, מאחר והחלפת מקורות האור ישים ופשוט לחישוב הוחלט לוותר גם על בחינה של צעד זה.

לאור האמור, מצאנו לנכון כי אין בסיס משמעותי להשקיע במחקר עבור חיסכון בצריכת החשמל על בסיס החלפת מקורות האור במערכות האלקטרוניות של המרחב השכונתי, ועל כן, הנושאים שהוחלט לבחון במסגרת מחקר זה יתמקדו בשני צעדים בלבד:

1. השפעת ייעור המרחב העירוני על נתוני צריכת החשמל במבנים הקיימים הסמוכים.
2. השפעת שיפור הבידוד בגגות קיימים ע"י טיפול באמצעות ציפויים "קרים" על צריכת החשמל בדירות העליונות של המבנים הקיימים.

5 שאלת המחקר

באיזו מידה פעולות מצד הרשות המקומית לצמצום צריכת החשמל במרחב הציבורי של שכונת מגורים, יכולות להשפיע על רמת זיהום האוויר?

6 חשיבותה של שאלת המחקר

לייצור חשמל השלכות מכריעות על נושא זיהום האוויר, הן ברמה הגלובאלית, והן בפרקטיקה היומיומית. עם זאת, דווקא משום כך, קיים בצמצום צריכת החשמל פוטנציאל גדול לצמצום הנזק. סקרי אנרגיה שבוצעו בשנים האחרונות בערים הגדולות בעולם מראים כי פוטנציאל החיסכון באנרגיה של הרשות המקומית הוא בין 22 ל-50 אחוזים,⁴⁰ וכי האמצעים ליישום פשוטים באופן יחסי, לרב אינם דורשים תשתיות והשקעות רחבות וניתנים ליישום גם בבניינים קיימים, ולא רק בבניה חדשה, מוכוונת גישה 'ירוקה'.

נתונים אלו, הם שמחברים אותנו לפן היישומי של העבודה ולתפקידה המרכזי של הרשות המקומית בעיצוב סדר היום הסביבתי. כחלק מאג'נדה 21- תכנית האו"מ לפיתוח בר קיימא, הכריזה ועדת ריו בשנת 1992, כי מתפקידה של הרשות המקומית להקים, להפעיל ולשמר תשתיות כלכליות, קהילתיות וסביבתיות, ולקחת חלק ביישומה של מדיניות סביבתית ארצית. נדמה כי במדינת ישראל יישום המדיניות הסביבתית נתקע דווקא בשלב הקריטי שבין התיאוריה והפרקטיקה, וכי רשויות מקומיות עדיין אינן זוכות ליד מכוונת ליישום פיתוח בר קיימא.

על מנת שהרשויות יוכלו לנקוט צעדים בשטח, עליהם להבין את הפוטנציאל דה פקטו של צעדים אלו. מחקר זה יוכל לתת אינדיקציה לחסכון בחשמל אשר יכול להתקבל בשטח ברמת הבניין, השכונה או העיר כולה. יש לציין כי לצד מחקר זה, יש להעריך גם את העלויות הכלכליות של כל צעד (דבר אשר לא יתבצע בתחומי מחקר זה). תשובה לשתי סוגיות אלו, תוכל לתת כלי בידי מקבלי ההחלטות ברמה המקומית והארצית, לאמוץ ויישום של פרקטיקות לצמצום חשמל בשכונות מגורים.

⁴⁰ כתלות בעומק הצעדים שנקטה כל רשות.

7 שיטת המחקר

לצורך ביצוע המחקר בחרנו להציע שלוש חלופות חקירה אפשריות כאשר כל חלופה מציעה שיטת מחקר שונה לבדיקת השפעת הצעדים על צמצום צריכת החשמל. החלופה הראשונה בודקת את הפעולות ברמה תיאורתית באמצעות תוכנות סימולציה ייעודיות. החלופה השנייה משווה את הנתונים שימדדו בשני בניינים קיימים בשכונה שיש לאתר ע"פ קריטריונים שיפורטו, והחלופה השלישית תבוצע בשני שלבים, כאשר בשלב הראשון יבוצעו המדידות במצב הקיים ובשלב השני ייושם השינוי המוצע במחקר ויבוצעו מדידות נוספות לאחוריו. בכל חלופה, כאשר יתקבל נתון החיסכון בחשמל, ניתן להמירו לכמות פליטות המזהמים היכולה להיחסך.

להלן יפורטו שלוש החלופות, ויתוארו יתרונותיה וחסרונותיה של כל אחת:

חלופה א': שימוש בתוכנות סימולציה ממוחשבות.

השימוש בתוכנות מחשב ייעודיות לחישוב חיסכון אנרגטי עתידי נפוץ בעולם. לתוכנות מוכנסים פרמטרים קבועים לצד פרמטרים משתנים אשר נבחנת השפעתם על התוצאות. במחקר זה בחרנו להשתמש במודל הסימולציה הממוחשב ENERGY שפותח ע"י פרופ' עדנה שביב.⁴¹ בתוכנת ENERGY ניתן להכניס כקובץ נתונים אקלימיים מדויקים של כל אזור אקלים לפי מדידות שנערכו בארץ במשך מספר שנים.⁴²

המודל מאפשר בדיקה של ההשפעה הכוללת של כל גורמי התכנון בבניין על תנאי האקלים התוך מבניים ועל צריכת החשמל. למודל יוכנסו הפרמטרים הקבועים של נתוני המבנים בשכונה הכוללים אלמנטים כגון: שיטת הבנייה, אופי המעטפת (קירות חיצוניים וגגות), שטחה, מסה תרמית, גוון הקירות ורצפת הגגות, סוג הפתחים, שטחם ואופיים, ומאפייני הבידוד התרמי של כל הגורמים (קירות, זיגוג, גגות). המודל מאפשר בחינה של שינויים בגורם תכנוני בודד תוך שמירה על כל שאר גורמי התכנון ללא שינוי. הפרמטרים המשתנים אותם אנו בודקים יבודדו בעזרת התוכנה על מנת לקבוע את אופי השינוי המצופה ורמתו.

במקרה הראשון של נטיעת עצים, נבחן את השפעת ההצללה על חזיתות המבנים מבחינת השינוי בטמפרטורת האוויר והשפעת שינוי זה על טמפרטורת האקלים התוך מבנית. לצורך קבלת נתון השינוי בטמפ' האוויר, יש להשתמש במודל הסימולציות Green CTTC, שצוין במחקרם של אריה

⁴¹ מודל הסימולציה פותח ע"י ע. שביב וג. שביב (Shaviv & Shaviv, 1977, 1978a,b). המודל מאפשר התייחסות לכל האספקטים התכנוניים, החל בתכנית הכללית, העמדת הבניין בשטח ועד פרטי הבניין. המודל מאפשר להעריך, בהסתמך על עקרונות פיסיקליים ראשוניים, את צריכת האנרגיה בבניין לחימום ולקירור, ואת ההתנהגות התרמית של הבניין בקיץ ובחורף ללא הפעלת אמצעים מכניים. מ

⁴² בארץ נעשו מספר מחקרים, Ashbel 1972, Schweitzer 1978, Manes et al. 1970, Manes and Lanets, 1982, כולל תיקונים לפי הנתונים האקלימיים המופיעים באטלס האקלימי לישראל (ביתן ורובין, 1991).

ביתן, שעשוע-בר ועודד פוציטר, בפרק ד' (לימור שעשוע-בר, 2002, ביתן, פוציטר ושעשוע-בר, 2005). על פי ממצאי המחקרים שתוארו, במחקר זה יוכנסו פרמטרים של נטיעת עצים המספקים את הייעול האנרגטי המרבי: עצי פיקוס ברמת צפיפות נטיעה המייצרת כיסוי של 90%. באמצעות מודל זה ניתן יהיה לחזות את הפחתת טמפרטורת האוויר. את הנתונים שיתקבלו יש לבחון על פי נתוני המבנה בעזרת תוכנת הסימולציה ENERGY ולקבל את נתון ההפחתה בצריכת החשמל.

במקרה השני, של בידוד הגגות, בנוסף לכל שאר הפרמטרים שהוזכרו קודם, יוכנסו גם נתוני הגגות הקיימים בשכונה: שטח, גוון, מסה תרמית ומקדם בידוד תרמי לתוכנת הסימולציה ENERGY, ויבחנו תוצאות נתוני תנאי האקלים בדירת הגג וצריכת החשמל לצורך קבלת תנאי נוחות אקלימית אופטימאלית.

נקודת המוצא במחקר זה היא שבשכונה הנבחרת המבנים הקיימים משנות ה-70 ישנים יחסית, ועל כן לא בוצע בהם בידוד הגג בצורה יעילה. במקרה זה נבחן את השפעת שינויים בבידוד הגג ע"י שימוש בציפויים "קרים", כלומר ציפוי הגגות בחומרים בעלי רפלקטיביות גבוהה. (יכולת החזרה גבוהה של קרינה מהשמש), ובערכים גבוהים של אמסיביות תרמית (יכולת של חומר להקרין חזרה אנרגיה שנקלטה בו). באמצעות התוכנה, נוכל להפיק את משמעות ההפחתה בצריכת חשמל עבור קירור הדירות העליונות של המבנה, ואת משמעות ההפחתה בזיהום האוויר.

היתרון העיקרי בשימוש במודל הסימולציה הוא יכולת הבידוד של הגורם התכנוני הרלוונטי ובחינת ההשפעות של השינוי באופן סטרילי. השימוש במודל מהווה מעין תנאי מעבדה לפרמטר הרלוונטי. התוכנה אף מאפשרת לבצע את הבדיקות תוך זמן קצר יחסית ובלי תלות בתנאי האקלים השוררים בסביבה.

בפועל, תוצאות מודל הסימולציה עלולות להטעות: בעיית חיזוי האקלים בבניין מורכבת ביותר גם בשל מספר רב של פרמטרים המשפיעים על תנאי האקלים, האינטראקציה בניהם⁴³ והעובדה שלא ניתן לחבר בצורה פשוטה את השיפור בתנאי האקלים והחיסכון בחשמל המושג על ידי כל אחד מהפרמטרים בנפרד כאשר מספר פרמטרים מופעלים יחד. בנוסף לכך, בתנאים מסוימים, לפרמטר מסוים יכולה להיות השפעה חיובית ובמקרים קיצוניים, השפעה זו עשויה להפוך לשלילית.

חלופה ב': השוואה בין שני בניינים קיימים

בחלופה זו יש לאתר בשכונה שני מבנים בעלי נתונים מבניים זהים, למעט הפרמטרים המשתנים המבוקשים, על מנת לבצע בדיקות בשטח לגבי השוני בין המבנים.

⁴³המודל לא לוקח בחשבון השפעות הדדיות של גורמי תכנון אחרים במבנה. על אף שלא מבוצע בהם כל שינוי, לדוגמה, האם כתוצאה מהצללת הקירות שבחזיתם הוספנו עצים יהיה שינוי בפרמטר תחלופת האוויר בחלל המבנה, אשר מהווה גורם חשוב ועיקרי ליצירת תנאי נוחות אקלימית תוך מבנית.

במקרה הייעור, הפרמטר המשתנה הוא הימצאותם של עצים המטילים צל על אחת (לפחות) מחזיתות המבנה. ובשיפור בידוד הגגות, הפרמטר הוא נתוני הבידוד. פרמטרים אחרים יישארו קבועים.

רצוי לאתר שני מבנים לאורך אותו הרחוב, כך שפרמטרים נוספים העשויים להשפיע על תנאי האקלים לא ישבשו את תוצאות הבדיקה. גורם נוסף שיש לבחון טרם מחליטים על שני המבנים הנדונים הוא הגורם האנושי, כלומר, אפיון האוכלוסייה המתגוררת במבנים, מצבם הסוציו-אקונומי והרגלי צריכת החשמל שלהם עבור אקלום הדירות. יש לשאוף לרמות צריכה דומות ככל האפשר בשני המבנים. לאחר איתור המבנים, יש לבצע מדידות בשטח הבודקות את נתוני צריכת החשמל לצרכי מיזוג האוויר בכל טיפוס דירה במבנים: דירת קרקע (או דירת קומה ראשונה על עמודים), דירה אמצעית, ודירת הגג. כמו כן, לצורך השלמת הנתונים יש למדוד את טמפרטורת האוויר התוך מבנית, ואת התאמתה לנתוני הנוחות האקלימית המקובלים לאותו אזור אקלימי.

היתרון הבולט בחלופה זו הוא שדרכו ניתן לקבל נתונים ממשיים "מהשטח" המתבסס על ההבדלים היחידים של הימצאות עצים בחזית המבנה או אי הימצאותם, והשוני ברמת בידוד הגגות. הקושי העיקרי בחלופה הוא מציאת שני מבנים בעלי פרמטרים זהים. קושי נוסף יהיה ביכולת חיזוי צריכת החשמל המדויקת של הדיירים דבר העלול להביא לסטייה בתוצאות.

חלופה ג': ביצוע התייעלות אנרגטית בפועל במרחב השכונתי

בחלופה זו יהיה על החוקרים לסמן רחוב ייעודי לביצוע הפעולות המוצעות במחקר באופן ממשי: נטיעת עצים לאורך רחוב ייעודי והוספת ציפויים מבודדים "קרים" בגגות המבנים. ניתן לשלב את המהלך של המחקר במסגרת עבודות שיפור פני העיר המיועדות להתבצע בשכונה בעתיד.

לאחר בחירת הרחוב הייעודי בשכונה, בשלב הראשון יבוצעו מדידות של נתוני הטמפרטורה בתוך המבנים וערכי צריכת החשמל לצורך קירור הדירות לכדי נוחות תרמית. יש לבצע תיעוד מדויק של נתוני האקלים בעת המדידות, לצורך ההשוואות עם השלב הבא, מאחר ומדובר בפרקי זמן שונים בין שני השלבים. את המדידות יש לבצע לכל אורך השנה בתנאי אקלים משתנים לפי העונות, בכדי שניתן יהיה לבחון את ההשפעות עבור תנאי אקלים שונים. בשלב השני, בתום יישום ביצוע העבודות יש לחזור על אותן מדידות בכל המבנים והדירות לאורך הרחוב, כאשר יש לבצע אותן בתנאי אקלים קרובים עד כמה שניתן לאותם תנאי האקלים שבהם בוצעו המדידות בשלב הקודם.

היתרון בחלופה זו הוא יכולתה להתגבר על אותו גורם "אנושי" שיכול להוות מכשול בחלופה הקודמת, מאחר ומדובר באותם מבנים עצמם, ובאותם משתמשים בעלי הרגלי צריכת חשמל קבועים. כמו כן, באמצעות שיטה זו נחסכת עבודת איתור המבנים בעלי פרמטרים זהים. לעומת זאת, חסרונה של חלופה זו הוא אלמנט הזמן והשינויים בתנאי האקלים. מחקר מסוג זה עלול להימשך זמן רב, הן עקב הצורך באימפלטציה של הצעדים בשטח, והן עקב הדרישה לבצע מדידות בתנאי אקלים דומים לאלו של המדידות בשלב הראשון.

8 דיון לדוגמא בשכונת מגורים יפו ג'

בבואנו לבחור אתר מייצג, לבחינת מידת האפקטיביות של הצעדים שהוצגו בפרק הקודם, לעניין צמצום צריכת החשמל וכפועל יוצא- הפחתת זיהום האוויר, עמדו לנגד עינינו מספר קריטריונים רלוונטיים.⁴⁴ ראשית החלטנו על בחירת שכונת מגורים עירונית קיימת, שתענה על מספר מאפיינים:

1. מיקום השכונה- אזור עירוני בעל מאפייני אקלים דומים למחקרים עליהם התבססנו בפרקים הקודמים. חשיבות הבחירה באזור בעל הגדרה אורבאנית ברורה, נובע מן הצורך לכתובת ישירה, באשר לאחריות שעל הרשות יהא לקחת על יישום הצעדים.
2. גבולות שכונה ברורים- יסיעו בדינו באיסוף וחישוב נתונים באשר למצב הקיים: צריכת חשמל, אופי הבניה, רמת הפיתוח המקומי, בעלויות קרקע וכיוב'.
3. חתך סוציו אקונומי המאפשר שימוש בנתוני צריכת חשמל ממוצעים למשק אל מול חתך בניה ממוצע. משמע- בדיקה של שכונה בה מרבית בנייני המגורים בעלי מספר קומות ממוצע (3-8 קומות), שאינה מזוהה עם בנייה לקבוצות הצורכות (או אינן צורכות) חשמל באופן קיצוני (בנייה לעשירון עליון, אל מול שכונת פחונים). כמו כן, קיימת חשיבות לאחידות הרקע הסוציו-אקונומי, וזאת ע"מ לאפשר בסיס נח להשוואה בין פרטים בשכונה.
4. נתונים פיסיים- התואמים את דרישות הצעדים שנבחרו. לנושא היעור, שכונה שאינה משופעת בעצים במרחב הציבורי ובעלת חתך רחוב אופייני המאפשר נטיעה. לנושא גגות, שכונה בה גגות המבנים אינם נמצאים בשימוש של דיירי הקומה העליונה

שכונה שעומדת בקריטריונים אלו היא שכונה יפו ג'. יפו ג' שוכנת בשטח השיפוט הדרומי של העיר ת"א-יפו, ותחומה מדרום על ידי רחוב 'הגבול'- קו הממשק עם העיר בת-ים. השכונה מתוחמת ממזרח על ידי רחוב שד' ירושלים וממערב- על ידי רחוב יפת. אתר העירייה מסמן את גבולה הצפוני של השכונה כרחוב 'סהרון', אך בפועל גם תושבים הגרים מצפון לרחוב זה, רואים עצמם כדיירי השכונה.⁴⁵ (ראה [נספח יא'](#))

השכונה בתצורתה הנוכחית, היא פרי תכנון של מפעל הבינוי בשנות השבעים.⁴⁶ השיכונים נבנו בפרקי זמן קצרים מפריקסטים או מחומרי בניה לא איכותיים,⁴⁷ בעיקר בידי חברת 'חלמיש' (חברה לשיכון

⁴⁴ חשוב לציין כי בחירת הקריטריונים נעשית למטרת עריכת המחקר ונוחות בידוד הנתונים, אולם משיתבררו תוצאותיו, יוכלו רשויות מקומיות לערוך בו שימוש ככלי לנקיטת הצעדים המוצעים, ללא תלות בקריטריונים שנציג להלן.

⁴⁵ למטרת עבודה זו, בחרנו להתייחס להגדרת הגבולות בידי העירייה, וזאת על מנת להתאים באופן מייטבי את הנתונים שנאספו אודות השכונה, למרחב הנבדק בפועל. עם זאת, המאפיינים הפיסיים של האזור שמצפון לשכונה אינם שונים באופן מהותי מאלו שבגבולותיה המוצהרים, ועל כן אנו מניחות כי תוצאות המחקר יהיו רלוונטיות גם עבור השטח המוגדר כיפו ג', בידי התושבים.

⁴⁶ בעבר שימשו קרקעות השכונה תושבים ערביים שנאלצו לנטוש את בתיהם לאחר קום המדינה. בתיהם של אלו אוכלסו בתושבים יהודים, ובעיקר בעולים חדשים. מצוקת הדיור והצורך ליישב את יוצאי המעברות, הולידו את השיכונים, שאוכלסו במהרה בעולים יוצאי בוכרה, ומאוחר יותר- ברה"מ ואתיופיה.

עירוני) וניתנו ב'שכירות מוגנת' לאוכלוסיות נזקקות- משפחות מחדת סוציו-אקונומי נמוך (שליידר, 2008). בסוף שנות התשעים, התאפשר לתושבי השיכונים לרכוש מחברת 'חלמיש' בתנאים טובים במיוחד את הדירות בהם גרו. חלק גדול מן התושבים עשו כן, ואחדים ביכרו להמשיך ולשכור את הדירות במחיר מוזל. כאמור, מצבם הפיסי של מבני השיכון ביפו ג' הלך והתדרדר, עד כי העירייה הגיעה לכדי הגדרתם כ'מבנים מסוכנים'. בסוף שנת 2006 יצאה העירייה בדרישה לתושבים לשפץ את המבנים שבבעלותם. היות וידם של תושבי שכונה אינה משגת לעשות כן, יתר על כן- הם טוענים כי היות והמבנים נבנו ברשלנות בידי חברת בניה ציבורית, אין הדבר נמצא באחריותם, הגיע המשבר לידי תביעה בבית המשפט מצד העירייה. בימים אלו נפתחים משפטיהם של כעשרים מתושבי השכונה, אולם עיריית תל אביב, שהשכילה להבין כי פתרון המשבר לא יצמח מתביעות כספיות של תושבים חסרי אמצעים, עוסקת במקביל להליכים בהקמת קרן שמטרתה לעזור לתושבים בשיקום ושיפוץ המבנים (קושרק 2009). חשוב לציין כי תושבי השכונה אינם מתנגדים לשיפוץ, ואף נכונים לממנו כפי יכולתם. על כן אנו נוטות להאמין כי צעדי שיפוץ שיקדמו חסכון עירוני בשכונה (דוגמת ייעור), ואף כאלו שיעשו שלא בתחומי נחלת הכלל (שימוש בגגות המבנים), יזכו להיענות מצד התושבים, בעיקר אם יזכו לתמיכת הרשות המקומית.

ככלל מתאפיינת יפו ג' בצפיפות נמוכה. המרחב הציבורי רחב וכולל שטח של כ-250 דונם. צדה המערבי של השכונה הוא בשטח 86 דונם בקרוב, ומונה 59 מבנים (ראה [נספח יב](#)). מצב שטחי הבניין הציבוריים משתנה מבית לבית. באחדים ניכר כי הושקעו מאמצים בטיפול השטח הציבורי, בעוד אחרים לוקים בהזנחה קשה. רק ארבעה גגות מבנים מכלל השכונה משמשים בפועל את דיירי הקומה העליונה. שאר הגגות משמשים לצרכים של כלל הבניין- דודי שמש, אנטנות וצלחות לוויין.

השכונה כוללת כ-29 דונם של שטחים ציבוריים פתוחים נרחבים, ואף מטופחים בצורה יחסית, אך עם זאת תשעת הרחובות שבה חפים, כמעט לחלוטין, מגינון וייעור עירוני. מרבית העצים בשכונה, הם פרי יוזמה וטיפול של התושבים בחצרות הפרטיות של הבניינים. ניכר כי פיתוח הרחובות שם דגש על מציאת פתרונות תנועה וחניה, ולא על עיצוב המרחב לכדי מקום. כתוצאה מכך הוקצה שטח רב מכפי הצורך לחניית ותנועת רכבים. רוחב כביש 'צרי' בשכונה, נע בין 7-8.5 מ', כאשר מרבית הרחובות בעלי שטח כביש רחב יותר, 12-20 מ' רוחב, וכוללים שני נתיבי תנועה וחניות בניצב למדרכות (בחלק מן המקרים משני צידי הכביש). המדרכות, אף הן רחבות באופן יחסי- בין 4-2 מ' משני צידי הרחוב (ראה [נספח יג](#)).

אין ספק כי יפו ג' עונה על הצרכים שמציב המחקר שאנו מציעות. מעבר לפוטנציאל התכנוני הגלום בשכונה ולמאפייניה הפיסיים, לא ניתן להתעלם מכך שתושבי השכונה זקוקים לשינוי בנוף השכונתי ויפיקו ממנו תועלת, בין אם תוצאות המחקר יצביעו על הפחתה ברמת זיהום האויר, ובין אם לאו.

⁴⁷ לטענת תושבי השכונה במכתבם לעירייה, נבנו המבנים מחומרים זולים, שאינם עומדים בתקן, ועל כך יעיד מצבם הפיסי הירוד (שליידר, 2008). <http://news.walla.co.il/?w=/19/1229578>

9 הערכה של הקשיים הצפויים

מחקר זה מציע שלוש חלופות מתודולוגיות אשר כל אחת מהן טומנת בחובה קשיים מסוגים שונים:

- שימוש בתוכנת סימולציה- ככלל זוהי החלופה הפשוטה ביותר. עם זאת, יש לציין כי הידע הקיים בשוק כיום לגבי שימוש בתוכנות כגון ENERGY אינו שגור בפי כל. בנוסף, יש לזכור כי התוכנה מספקת צפי התואם 'תנאי מעבדה', שכידוע אינם תואמים במדויק את המציאות.

- השוואה בין בניינים קיימים- קיים החשש כי לא ימצאו בניינים בעלי מאפיינים פסיים דומים מלבד אותם פרמטרים אותם אנו רוצים לבדוק. כמו כן, שוני בהרגלי הצריכה של הדיירים בבניינים השונים יכול להטות את תוצאות המחקר. לכן יש לבדוק מצד אחד את נתוני צריכת החשמל מן העבר על מנת להתאים את הנתונים, ולבדוק כי הרגלי הצריכה בזמן ביצוע המחקר לא השתנו. מעבר לקושי הפרוצדוראלי שבתהליך זה, קיים קושי נוסף העלול לנבוע מחוסר רצון של הדיירים לשתף פעולה עם המחקר ולחשוף את הנתונים.

- ביצוע התייעלות אנרגטית בפועל- חלופה זו כרוכה בעלות כספית של ייעור השטח ובידוד גג הבניין. מאחר ונרצה לקבל תוצאות בטווח זמן קצר (ולא של מספר שנים) נדרש לנטיעה של עצים בוגרים, דבר המייקר את תהליך הייעור. על מנת לבצע צעד זה יש למצוא מקור מממן: המקור יכול להיות מוסד אקדמי, פרטי, או הרשות המקומית עצמה. קושי נוסף הוא טווח הזמן הנדרש לביצוע התייעלות אנרגטית. מאחר וצריך להשוות בין תוצאות לפני הביצוע ואחרי ביצוע הצעדים בפועל, וזאת על פני שתי מחזורי קיץ, אביב וסתיו, פרק הזמן שידרש למחקר הוא לכל הפחות שנה וחצי עד קבלת התוצאות. כמו כן, בדומה להשוואה בין בניינים קיימים, גם בחלופה זו נדרש שיתוף פעולה של הדיירים.

ככלל, על מנת לבצע את המחקר, כדאי ורצוי לרתום את הרשות המקומית לתהליך. הרשות יכולה להוות גורם מממן ולהקל על תהליך הפניה וההתקשרות לתושבים במידה ומעורבותם נדרשת. כמו כן, באם העירייה תהיה מעורבת בתהליך, יש להניח כי קיים סיכוי גדול יותר שתוצאות המחקר ייושמו על ידה בסופו. אם לעומת זאת, תחליט הרשות המקומית כי מחקר זה אינו מעניינה, עלולים לצוץ קשיים פרוצדוראליים וכספיים.

על מנת להתמודד עם קשיי המחקר, אנו מציעים לשקול שילוב בין שתיים, או אפילו שלוש מן החלופות. שילוב זה יבטיח ממצאים מהימנים יותר, ורשת ביטחון במידה וחלופה אחת נתקלת בקשיים.

10 סיכום

תפקידן המרכזי של הרשויות המקומיות בעיצוב סדר יום סביבתי כחלק מהדרך להשגת יעדי אג'נדה 21 היווה בסיס והשראה להצעת מחקר זו. חשיבותו של המחקר הינה בהעלאת המודעות לקשר הקיים בין החיסכון בכמות פליטות המזהמים לסביבה, לבין תכנון נכון ומודע סביבה ואקלים, תוך דגש על שימוש באלמנטים תכנוניים, המאפשרים חיסכון בצריכת חשמל למטרות יצירת תנאי נוחות אקלימית תוך מבניים.

מחקר זה מציע בסיס דרכו ניתן לבחון את יעילות האימפלמנטציה של מספר צעדים לחסכון בצריכת חשמל בשכונות קיימות. ביצוע המחקר בפועל וקבלת התוצאות עשויים להוות פלטפורמה עתידית לקבלת החלטות ברמה מוניציפאלית או מדינית, באישור תכניות שיקום עירוניות.

בחינת הצעדים המוצעים ליישום המחקר ושילוב בין החלופות המתוארות עשויים להביא למציאת הפתרון האופטימאלי עבור חיסכון בצריכת החשמל ובזיהום האוויר, ויכולים להוות שיקול ממשי בבניית תכנית שיקום שכונתית ובבחירת סדרי העדיפויות של מרכיביה.

יש לציין כי ההמלצות במחקר מתבססות על שיקולים אנרגטיים בלבד, ללא התייחסות לאספקטים כלכליים. מאחר והעירייה פועלת תחת אילוצים כלכליים, אנו רואים במחקר מסוג זה נדבך משלים לעבודה זו.

11 רשימת מקורות

1. אבנימלך, י', סדרי עדיפות לאומית בתחום איכות הסביבה בישראל, מסמך עמדה, 1999.
2. בקר, ר', שביב ע', קוד אנרגיה בבניינים-הצעה לשינויים עקרוניים בתקן הישראלי לבידוד תרמי ולאופן אכיפתו, 2000.
3. ברטשניידר, ס', לוי ש', ייעול הצריכה ושימוש מושכל בחשמל במבנים, מערכות ומכשירים צורכי חשמל, דרכי פעולה בסיסיות, 2009.
4. המשרד לאיכות הסביבה, ניטור איכות אוויר בישראל, דו"ח שנתי, 2006.
5. המשרד להגנת הסביבה, עלויות חיצוניות של זיהום אוויר מייצור אנרגיה (חשמל) בישראל, 2008.
6. הפורום הישראלי לאנרגיה, הטיפול בשיאי הביקוש לחשמל בארץ, 2009.
7. חברת חשמל, דו"ח סביבתי 2007, 2007.
8. לב ציון, נ', בראי התקציב- ניתוח האסטרטגיות לפיתוח בר קיימא של משרדי ממשלה, ביחס לתקציב המדינה, דו"ח קואליצית 'דרכים לקיימות', בשיתוף ארגון חיים וסביבה וקרן היינריך בל, 2006.
9. מור, ע', סרוסי ש', דוח אמצעי מדיניות כלכלית להפחתת זיהום האוויר משרפת דלקים במגזרי התחבורה, החשמל והתעשייה בישראל, 2001.
10. סברדלוב, א', ש' דולב, הטיפול בשיאי הביקוש לחשמל בישראל, הפורום הישראלי לאנרגיה, 2009.
11. פורום המשק והכלכלה למען איכות סביבה בישראל, מסמך עמדה בנושא סדרי עדיפות לאומית בתחום איכות הסביבה בישראל, 1999.
12. קושרק, נ', עיריית ת"א האשימה את התושבים וכעת מנסה לחלצם ממשפט, הארץ, 2009.
13. שביב, ע', קפלוטו ג', קווים מנחים לתכנון אקלימי-אנרגטי של מבני מגורים באקלים ים תכנון ממוזג-קריר וחס-לח, 1992.
14. שביב, ע', קפלוטו ג', יזיאורו א', תפקוד תרמי של בניינים ופיתוח קווים מנחים לתכנון מודע לאנרגיה, חלק ראשון: קווים מנחים לתכנון בנייני מגורים, 2002.
15. שליידר, מ', עיריית ת"א נגד עניי יפו ג', אתר חדשות וואלה, 2008.
16. שעשוע-בר, ל', הופמן מ', תרומת הייעור האורבני לשיפור אקלים העיר, מחקרי מפ"ק, 2002.
17. אתר עמותת "אדם טבע ודין" <http://www.adamteva.org.il/>
18. אתר "Fix All roofs" <http://www.fixallroofs.com/>
19. אתר איגוד ערים חדרה <http://www.gudhadera.co.il/>

20. אתר חברת "רוב-נוי" <http://www.rov-noy.co.il>

21. אתר המשרד לאיכות הסביבה <http://www.sviva.gov.il>

22. אתר עיריית תל אביב <http://www.tel-aviv.gov.il>

English:

1. Bitan A., A. Rahamimoff, Bet-She'an Master Plan-Climatic Rehabilitation of an Ancient Historic City, Energy and Building, Vol.15-16, pp.23-33, 1991.
1. Bretz S., Akbari H., Long-term performance of high albedo roof coatings, Energy and buildings 25 pp.159-167, 1997.
2. Cheng V., Givoni B., Effect of envelope color and thermal mass on indoor temperatures in hot humid climate, Solar Energy 78, pp. 528-534, 2005.
3. Parker D.S., S.F. Barkaszi, Roof solar reflectance and cooling energy use: field research results from Florida, Energy and Buildings 25, pp. 105-115, 1997.
4. Pearlmutter D., S. Rosenfeld, Performance analysis of a simple roof cooling system with irrigated soil and two shading alternatives, Energy and Buildings, 2007.
5. Peck, S.W., Callaghan, C., Bass, B. and Kuhn, M.E., "Greenbacks from Green Roofs: Forging a New Industry in Canada", Research Report, Canadian Mortgage and Housing Corporation (CMHC), 1999.
6. Potchter O., P. Cohen, A. Bitan. Climatic behavior of various urban parks during hot and humid summer in the mediterranean city of Tel Aviv, Israel. International Journal of Climatology 26 pp.1695-1711, 2006.
7. Spala A., H.S. Bagiorgas, M.N. Assimakopoulos, J. Kalavrouziotis, D. matthopoulos, G. Mihalakakou, On the green roof system. Selection, state of the art and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens, Greece, Renewable Energy 33 pp. 173-177, 2008.
8. M. Santamouris, C. Pavlou, P. Doukas, G. Mihalakakou, Synnefa, A. Hatzibiros, P. Patargias, Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece. Energy 32 pp.1781-1788, 2007.
9. Theodosiou T.G., Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique, Energy and Buildings 35 pp. 909-917, 2003.

10. U.S. Environmental Protection Agency, Green Roofs, 2007.

11. <http://www.epa.gov/heatiland/strategies/greenroofs.html>

12 נספחים

12.1 נספח א: פליטת מזהמים פי סוג דלקים

PM	NOX	SO2	CO2	סוג הדלק/ פליטה (גר"/קוט"ש מיוצר)
0.01	0.5	0.02	473	גז טבעי
0.15	1.3	2.3	729	מזוט
0.08	2.5	2.5	873	פחם
0.12	0.9	0.8	616	סולר- מחזור משולב
0.09	1.6	1.1	872	סולר- טורבינות גז

מקור: חברת חשמל, דו"ח סביבתי, (2007).

12.2 נספח ב: פליטה סגולית של גופרית דו חמצנית ותחמוצות חנקן מייצור חשמל*

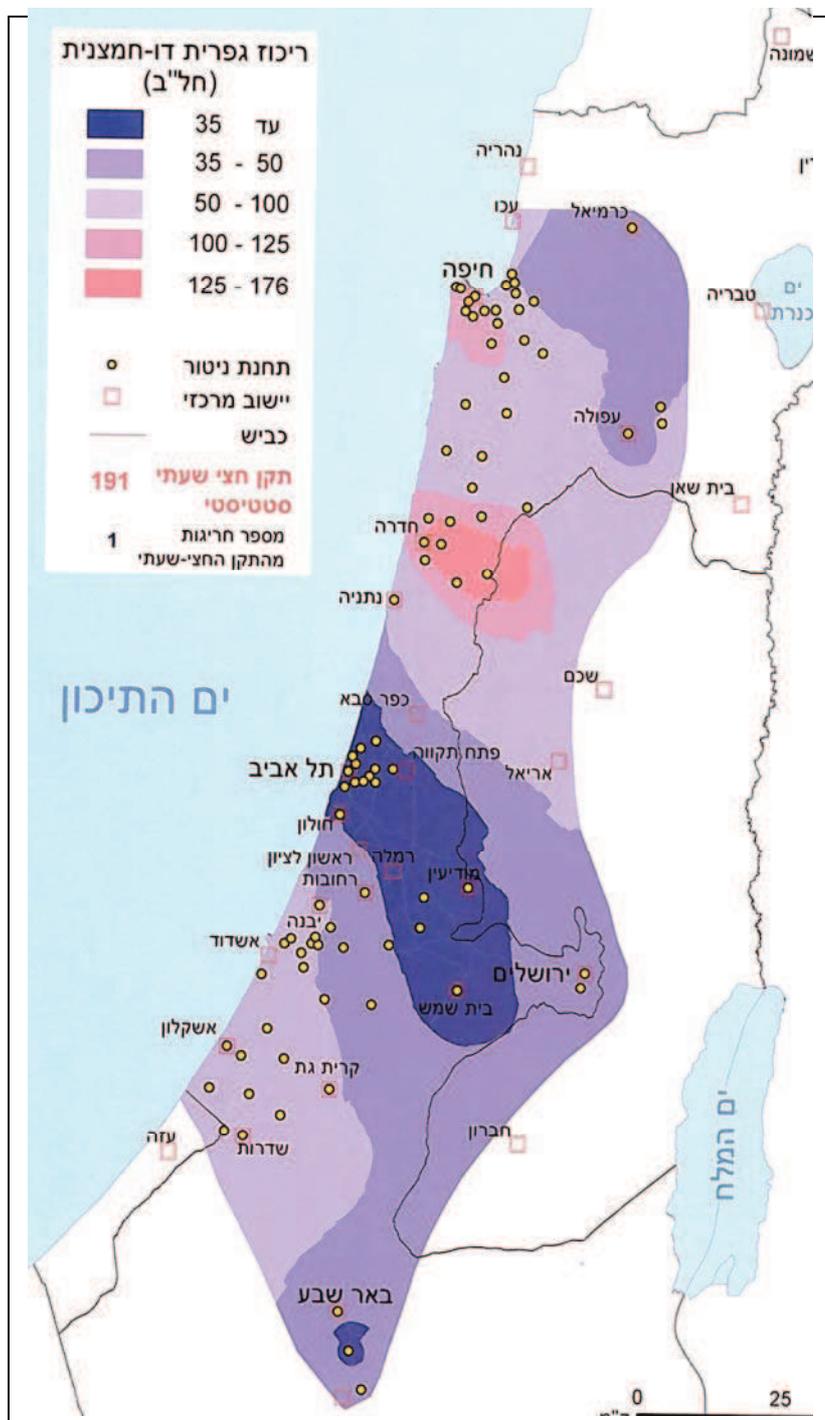
מדינה	NOX		SO2	
	(ק"ג /טון /דלק	(ק"ג /טון /דלק	גופרית	(ק"ג /טון /דלק
ישראל	13	12.5		
קנדה	8	7.5		
אוסטריה	7.4	2.1		
צרפת	7.9	2.9		
ארה"ב	10.2	5.3		
הולנד	8.6	2.2		
אנגליה	12.7	9.1		
יוון	39.3	13.2		

*עבור ישראל- הנתונים נכונים לשנת 1995. עבור יתר המדינות- הנתונים נכונים לשנת 1988.

מקור: פורום המשק והכלכלה למען איכות סביבה בישראל, מסמך עמדה בנושא סדרי עדיפות לאומית בתחום איכות הסביבה בישראל, יוני 1999

12.3 נספח ג: ריכוזים חצי שעתיים מרביים של גופרית דו-חמצנית.

מקור: (דו"ח שנתי ניטור איכות האוויר בישראל 2006)



12.4 נספח ד': פירוט סעיפי תקן LEED ND על פי פרמטרים

הטבלה הבאה מפרטת את סעיפי הליד על פי הניקוד הניתן להם בתו התקן לצד הקריטריונים אשר הוצגו לעיל.⁴⁸ הניקוד אינו מתייחס ישירות לענייננו: המדובר בניקוד לתקן ה LEED המסמל את תרומת הסעיף לשכונה המנסה לעמוד בתקן ה LEED. מהניקוד אפשר ללמוד על חשיבות הסעיף לקיימות של השכונה. הסעיפים בירוק הם אלו אשר מתאימים לשכונה זו ויכולים להתבצע על ידי העירייה ללא תלות בתושבים: (צעדים אלו הם מסוג Y-Y-C). הצעדים באדום הם אלו אשר יכולים להתבצע בשכונת מגורים קיימת אבל דורשים מעורבות מהתושבים: (צעדים אלו הם מסוג Y-Y-P).

Parameter	Max Score	Energy Related (Y/N)	Adequate for traditional neighborhood (Y/N)	Community (C) /Private(P) Level
Smart Location & Linkage	30	N	N	C
Neighborhood pattern & design	39	N	N	C
Green construction and technology	31			
Construction Activity Pollution Prevention	Required	Y	N	C
LEED Certified Green Buildings	3	Y	N	C/P
Building energy efficiencyB	3	Y	N	P
Reduced Water Use	3	N	Y	P
Building Reuse and Adaptive Reuse	2	N	Y	C
Reuse of Historic Buildings	1	N	Y	C
Minimize Site Disturbance through Site Design	1	N	N	C

⁴⁸הטבלאות הוכנו על ידי צוות המחקר שלנו על פי סקירה של סעיפי ה LEED. לפירוט מלא של סעיפי התקן והסבר אליהם, אפשר לפנות לאתר ה LEED האמריקאי: www.usgbc.org

Minimize Site Disturbance during Construction	1	N	N	C
Contaminant Reduction in Brownfields Remediation	1	N	Y	C
Stormwater Management	5	N	Y	C
Heat Island Reduction	1	Y	Y	C
Solar Orientation	1	Y	N	C
On-Site Energy Generation	1	Y	N	C
On-Site Renewable Energy Sources	1	Y	Y	P
District Heating & Cooling	1	Y	N	C
Infrastructure Energy Efficiency	1	Y	Y	C
Wastewater Management	1	N	N	C
Recycled Content for Infrastructure	1	N	N	C
Construction Waste Management	1	N	N	C
Comprehensive Waste Management	1	N	Y	C
Light Pollution (sky glow) Reduction	1	N	Y	C
Innovation & Design process	5	N	N	C
Total Score	105			

12.5 נספח ה': פירוט תוכנית לצמצום אנרגיה בשכונות קיימות

12.5.1 איסלמורדה⁴⁹

Parameter	Adequate for traditional neighborhood (Y/N)	Community © /Private(P) Level	Possible in the Municipality level in Israel
Energy			
Leed energy certification components in new building projects	N	P	Y
Leed energy certification components in renovation projects	Y	P	Y
Utilize energy efficient mechanism in buildings	N	P	Y
Set thermostats in offices to control air temperature	Y	P	Y
Install motion-sensing, auto-off light switches	Y	P	Y
procure energy efficient products	Y	P	Y
Require affordable housing projects receiving Village assistance to install ENERGY STAR® qualified appliances	Y	P	Y
Convert Founders Park pool heating to a solar panel powered system	Y	C	Y
Replace Founders Park street lights with solar lighting	Y	C	Y
Require solar hot water heating for affordable housing projects receiving Village assistance	Y	P	Y
Education for energy reduction			
Create monthly related newspaper	Y	C	Y

⁴⁹הטבלאות הוכנו בעיבוד צוות המחקר של קבוצה זו

Establish an energy conservation program/policy for all Village offices and buildings to include turning off lights and equipment when not in use.	Y	P	Y
--	---	---	---

באיסלמורדה העירייה מתכננת לנקוט מספר צעדים במרחב העירוני: שימוש בלוחות סולאריים לחימום הבריכה ולתאורת רחוב, והוצאת עלון חודשי המתאר את הצעדים המתרחשים בעיר. לעומת זאת, רבים מהצעדים קשורים דווקא למרחב הפרטי של הדיירים: שימוש בתקן בנייה ירוק לחידוש ושיפוץ מבנים, שימוש בוסת טמפרטורה בבנייני משרדים, שימוש בבקרת תאורה אוטומטית, רכישה של מוצרי חשמל חסכוניים באנרגיה, שימוש במתקנים בעלי תקן Energy Star בפרויקטים של דיור ציבורי, שימוש בדודי חימום סולאריים בפרויקטים של דיור ציבורי, הקמת תוכנית מיוחדת לבנייני משרדים לעידוד חסכון בחשמל לתאורה ולציוד

12.5.2 ברקלי- קליפורניה

Parameter	Adequate for traditional neighborhood (Y/N)	Community © /Private(P) Level	Possible in the Municipality level
Energy			
Make green building the business as usual in the new construction and remodel market	Y	P	Y
Enhance energy efficiency services and standards for existing residential properties	Y	P	Y
Enhance energy efficiency services and standards for existing commercial properties	Y	P	Y
Increase energy efficiency and renewable energy use in public buildings	Y	P	Y

בתוכנית הקיימות של ברקלי כלל הצעדים הם ברמת הבניין הבודד (למגורים או משרדים) אם בצורה ישירה דרך בנייה ירוקה והכנסת מערכות מכאניות ואם על ידי פיתוח אנרגיות חלופיות בנחלת התושבים (לדוגמא, על גגות בניינים). בתוכנית אף נאמר במפורש כי הצלחתה תלויה בסיפוק מידע

וניסיון טכני ותמריצים כלכליים לתושבים אשר רוצים ומוכנים לאמץ את עיקריה. (עמ' 33, City of berkley).

12.5.3 ניו המפשייר- בריטניה

Parameter	Adequate for traditional neighborhood (Y/N)	Community © /Private(P) Level	Possible in the Municipality level
Energy			
Providing a resource guide on cost-effective energy saving measures	Y	C	Y
Investigate contracting with an Energy Service Company (ESCO) to provide the City with energy efficiency upgrades	Y	C	N
Include line items in the capital program for replacement of old technologies with newer, cleaner, and more efficient ones.	Y	P/C	Y
Create an awards program for improvements in energy efficiency for the built environment for both City agencies and private sector development.	Y	C	N

מבדיקה של סעיפי האנרגיה בתוכנית זו עולה שרק מאגר מידע הון באפקטיביות הכלכלית של פתרונות אנרגיה שונים יכול להתבצע במרחב העירוני על ידי הרשויות בלבד. הסעיף השלישי הון בעידוד של טכנולוגיות חדשות ויעילות יותר יכול להיות מבוצע ברמת הבניין הבודד או במרחב העירוני. יש לשים לב, כי הסעיף השני הון במשא ומתן עם חברת אנרגיה בריטית אינו מתאים למשק החשמל הישראלי. עם זאת, אין בו פירוט לגבי סוג הטכנולוגיות ולכן נתייחס אליו כאל הערה כללית.

ראוי לציין כי לפחות בשתי תוכניות ענו על הקריטריונים אותם הצבנו גם צעדים מתחום החינוך והפצת הידע. באיסלמורדה הוצע עיתון חודשי אשר יספק מידע לתושבים בתחום ובנורת'המפטון מאגר מידע לחסכון האנרגטי. גם בברקלי, בדיקה פרטנית יותר של סעיפי התוכנית מגלה התייחסות

לצד הידע והייעוץ.⁵⁰ הצפה של קריטריונים מתחום הפצת הידע והחינוך אינה מפתיעה. לרשויות המקומיות מגע ישיר עם התושבים ודרכים רבות להפיץ אליהם מידע אשר יכול לזרז נקיטת אחריות ופעולה בקרב התושבים בצורה עצמאית. כמו כן, לרוב הרשות תרצה גם ליהנות בצד השיווקי מקידום תוכניות בסדר גודל כזה ולכן סביר שתתקשר אותן במגוון דרכים לאוכלוסייה. למרות המרכזיות של עזרים מתחום הידע והחינוך לא נתמקד בהם באופן ישיר בעבודה זו. לצד העובדה כי קשה מאוד לכמת את ההשפעה שלהם על האוכלוסייה הרי שלרוב הם מתמקדים בקידום שינויים בתחום הפרט ולכן הם פחות קשורים לעינייננו.

⁵⁰ לדוגמא, תוכנית במסגרתה מתבצעת בדיקה של צריכת החשמל בבניינים והמלצה לתושבים על מתווה שיפורים כגון החלפת או שדרוג המערכות המכאניות, השקעה בבידוד והקמת תשתית לאנרגיה חלופית שתספק חשמל לבניין. בברקלי אף התייחסו לסבסוד של עזרים לחסכון בחשמל (נורות חסכוניות) ובמייים (ברזים חסכוניים) ואף הפעילו תוכניות ייעודיות לנושא. תוכנית לדוגמא היא "California Youth Energy Services", (CYES) אשר מכשירה נוער לזיהוי ומתן פתרונות קלים ומהירים לחסכון אנרגטי פנים מבני (City of Berkley). הארגון קובע פגישה בבתי התושבים והצעירים מגיעים על מנת לעשות בדיקה בסיסית של מערכות החשמל, הגז והמייים ולספק עזרים חסכוניים בחינם. לדבר צוות התוכנית, בממוצע ניתן שירות ל 325 בתי אב בשנה אשר משיגים יחדיו חסכון של 150 אלף קילו וואט (City of Berkley, P. 27).

12.6 נספח ו': עידוד צמצום אנרגיה בבניינים בעזרת מדיניות ממשלתית

לצורך החלפת תאורת הרחוב או ייעור המרחב הציבורי יש להגיע להחלטה ברמת הרשויות ולמצוא לכך את התקציב המתאים. לעומת זאת, שינויים פנימיים בבניינים למגורים או למשרדים דורשים התערבות בתחום הקניין הפרטי של התושבים. התערבות זו יכולה להתקבל על ידי שימוש באחד מהעזרים הבאים:

- כלי רגולציה- רשויות מקומיות יכולות להשתמש בתקנים מקומיים מחייבים. דוגמא מהתחום בישראל היא עיריית כפר סבא אשר ב 2008 אישרה את תקני הבנייה הירוקה כתקנים מחייבים לכול תוכנית בנייה חדשה בעיר כולל מבני ציבור.⁵¹ את עלות הרגולציה יכולה העירייה להכיל על עצמה: לדוגמא, העירייה יכולה לחייב את כלל בעלי הבתים בגגות ירוקים אך לממן את המהלך בעצמה. בעזרת התקינה יכולות הרשויות להגיע לשינויים בקנה מידה רחב ולכפוף למעשה את רצונה על השוק הפרטי. עם זאת, חסרונה של התקינה היא שפעמים רבות היא מחייבת מערך אכיפה גדול הטומן בחובו עלויות גבוהות. כמו כן, צעדים אלו יכולים להתקל בהתנגדויות בקרב התושבים העלולים לעכב ואף לבטל את הביצוע.
- תמריצים כלכליים- תמריצים כלכליים יכולים להינתן בכמה צורות:
 - הקלות מס- תמריץ הנהוג ברחבי ארה"ב ואירופה. ההקלות במס יכולים להינתן לבניינים ירוקים או למוצרים מתחום הבניה בעלי צריכת אנרגיה נמוכה.⁵² בעוד שרוב הקלות במס ניתנים על ידי הממשלה, ברמה המקומית יכולים להנתן הקלות בתשלומי הארנונה.
 - מענקים - יכולים להינתן עבור בנייה של מבנה ירוק או שימוש במוצר / טכנולוגיה ירוקה. בשיקגו לדוגמא, מחלקת הסביבה של העירייה מחלקת מענקים בסך 5000 דולר לבעלי בניינים אשר מקימים גג ירוק (אדם טבע ודין, עמ' 7). מענקים יכולים

⁵¹הקבלנים ידרשו להוסיף לתוכניות הבנייה בין היתר נספח אנרגיה, לערוך סקר זיעום קרקע, לשקם את נוף האיזור, להקים מערכות להפרדת מיים אפורים ושמירת מי נגר, להקים מכולות הפרדת פסולת ולהשתמש בחומר בנייה בעלי תו ירוק. עוד על הנושא:

<https://www.haaretz.co.il/hasite/pages/ShArtPE.jhtml?itemNo=979637&contrassID=2&subContrassID=6&sbSubContrassID=0>

⁵²ממשלת ארה"ב מעניקה נקודות זיכוי מס על רכישות מוצרים העומדים בתו תקן Energy Star. את התו מקבלים מוצרים המאפשרים חסכון באנרגיה הן באמצעות יעילות אנרגטית גבוהה והן באמצעות יצירת תנאי נוחות אקלימית גבוהים (כגון: תאים פוטו-וולטאים, מחממי מים, מאווררי תקרה וכו') במדינות שונות ברחבי ארה"ב כמו טקסס, וירגיניה ועוד, מתקיים אחת לשנה יום מכירות ללא מס של מוצרים בעלי תו תקן Energy Star. (אדם טבע ודין עמ' 18). מדינות אורגון וניו יורק מציעות הקלות במס לבניינים בעלי צריכת אנרגיה נמוכה. בניו יורק יזם בניה אשר עומד ברמות אנרגיה נמוכות⁵² ומשתמש בחומרים מועדפים יכול לדרוש עד 3.75 דולר החזר מס ל SQF עבור עבודת פנים ועד 7.5 דולר עבור עבודת חוץ (Yudelso. P. 106). מדינת נבדה מציעה הפחתת מס רכוש של עד 35 אחוז לעשר שנים בפרויקטים המשיגים תקן ליד. גם חומרים ומוצרי בניה ירוקים זוכים למס רכוש מופחת בשיעור של 35 אחוז (Ibid).

להינתן גם בצורה של תוספת אחוזי בניה לפרויקט בדומה למנגנון עליו עובד תמ"א
.38

○ הלוואות ומשכנתאות- יכולות להינתן לייעול אנרגטי או לבניית מבנה ירוק. עם זאת,
צעד זה פחות רלוונטי ברמת הרשות המקומית.

● עידוד ידע וחשיפה- תוכניות לחשיפה הציבור ליתרונות שבבניה הירוקה למען עידוד הביקוש
מטעם השוק הפרטי.

נספח ז: סקירת מחקרים המתייחסים לחשיבות הייעור האורבאני

- בעבודת השיקום שנעשתה בשנות ה-80 עבור העיר ההיסטורית של בית שאן (Bitan & Rahamimoff, 1991) אפשר ללמוד רבות על יעילותה של מתודת הצללה ע"י ייעור. תכנית העל המתוארת במאמר מייצרת הזדמנות לעיצוב אקלימי בקנה מידה אורבני, כשאחת ממטרותיה היו למזג מחדש את העיצוב האקלימי ב-3 רמות: ברמה האורבאנית הכוללת, ברמת קנה המידה השכונתי וברמת הבניין הבודד, ועל ידי כך להשיג איכות אקלימית.
- התופעות האקלימיות איתם התמודדו בעבודה בבית שאן היו קרינת השמש החזקה, טמפרטורות גבוהות, ורוחות חמות חזקות המאפיינות את האזור. נטיעת עצים מוצגת כאמצעי יעיל הן כמערכת לשבירת הרוחות והן כאמצעי הצללה יעיל להפחתת הקרינה הישירה על הבניינים, הרחובות, הכיכרות העירוניות והאזורים הפתוחים. הומלץ על נטיעת עצים עם עלווה גדולה ורחבה בשני צידי הרחובות ובפארקים. היתרון המובהק שיש לעצים ולצמחייה בכלל הוא שתוך קליטת קרינת השמש ושימוש בה לתהליך הפוטוסינתזה והאידיוי היא לא הופכת לאנרגיית חום. הומלץ לנטוע עצים שמשירים את עליהם בעונת החורף ובכך זוכים ליהנות מקרינת השמש לחימום.
- במאמרם של אריה ביתן ועודד פוצ'טר (Bitan & Potchter, 1995) בו מיושמות התיאוריה והמתודולוגיה של תכנון אקלימי על העיר החדשה של בית שמש הודגשה ההמלצה לנטיעת עצים להשגת תנאי מיקרו אקלים טובים יותר וסביבה בריאה יותר. כמו כן, הומלץ לתכנן חגורה חוצצת "ירוקה" בין אזור התעשייה החדש לבין שכונות המגורים, וחגורה נוספת בין שכונות המגורים לבין הכבישים הראשיים של העיר.
- מחקר נוסף שנערך בתל אביב (Potchter, Cohen, Bitan, 2006) בחן את השפעתם של פארקים עירוניים וצורות תכנון שונות שלהם על עקת החום בסביבה בעונת הקיץ. התוצאות הראו שהצללה מירבית על-ידי עצים גבוהים ורחבים השפעה מקסימלית על הורדת הטמפרטורה במהלך היום ועל שיפור הנוחות האקלימית באזור.

12.8 נספח ח': השפעת עצים על סביבה עירונית בנויה (שעשוע בר, 2007)

השפעה זו נבדקה אמפירית באזורים ירוקים בעלי שטח קטן יחסית התחומים במרחבים עירוניים שונים בעיר תל אביב וסביבתה בעונת הקיץ, בה מתפתח עומס החום המרבי. טמפרטורת האוויר בתוך מרחב עירוני מושפעת בראש ובראשונה מאקלים הסביבה של האתר ומגורמים ייחודיים באתר, בעיקרם: גיאומטריית המרחב, סוג וגוון חומר הבינוי, צמחייה וגורמים אנתרופוגניים, כגון עומס התחבורה. בשל כך, נבחרו אתרים בעיר בעלי תכונות שונות של גיאומטריה וצמחייה. נבחנו 11 אתרים ירוקים, ביניהם 4 שדרות עם ובלי תחבורה, 2 רחובות אורכיים, ו- 4 סוגים שונים של גנים קטנים.

לאורכו של כל אתר ואתר בוצעו מדידות של משתנים אקלימיים בעונת הקיץ (חודשים יולי-אוגוסט 1996), בשעות מדידה 6:00, 9:00, 15:00, 18:00 ו- 24:00. סה"כ בוצעו כ- 714 מדידות בכל האתרים לכל שעת מדידה.

השפעת העצים על תנאי האקלים של האתר הוגדרה במחקר כאפקט הקירור של העצים. אפקט זה נמדד כהפרש טמפרטורת האוויר בתוך האתר הירוק לבין זו שמחוצה לו (מקום הייחוס לאתר). באותו האופן הוגדר אפקט הלחות.

הניתוח הסטטיסטי של אפקט הקירור על-ידי עצים באתרים השונים הצביע על שני גורמים עיקריים הקובעים את השתנות טמפרטורת האוויר בתוך האתר הירוק: טמפרטורת הסביבה הבנויה הסמוכה לאתר ומידת ההצללה של העצים בו. שאר אפקט הגורמים, ביניהם גיאומטריית המרחב ומאפייני העצים (מעבר לגורם ההצללה) נמצא בסדר גודל יחסית קטן של 0.5 מעלות מתוך ממוצע קירור של 3 עד 4 מעלות בשעות הצהרים באתרים לעומת סביבתם.⁵³

ממצאי תוצאות מדידות של טמפרטורת משטחים שונים באתרים הצביעו שאין הבדל מהותי בין טמפרטורת העלווה החשופה לקרינת השמש לבין טמפרטורת האוויר, בשעה שההבדל בין טמפרטורת האוויר לבין טמפרטורת משטחים דוממים חשופים לשמש בדרך כלל מגיע עד 20 מעלות צלזיוס. עובדה זו מצביעה שהעלווה החשופה לשמש ישירה מקררת את עצמה על-ידי תהליך הדיות (התאדות של מולקולות מים דרך העלים) ועל כן ממתנת את עליית טמפרטורת האוויר באתר. בנוסף לאפקט הקירור של העצים, נאמד טווח השפעת הקירור על סביבת האתר. טווח זה נמצא שונה בין אתר לאתר, אך בממוצע הטווח קטן בשל היותו תלוי בגודל האזור הירוק. טווח השפעת העצים באתרים על סביבתם דועך באופן חזק עם ההתרחקות מאזור העצים (שעשוע-בר, 2002).

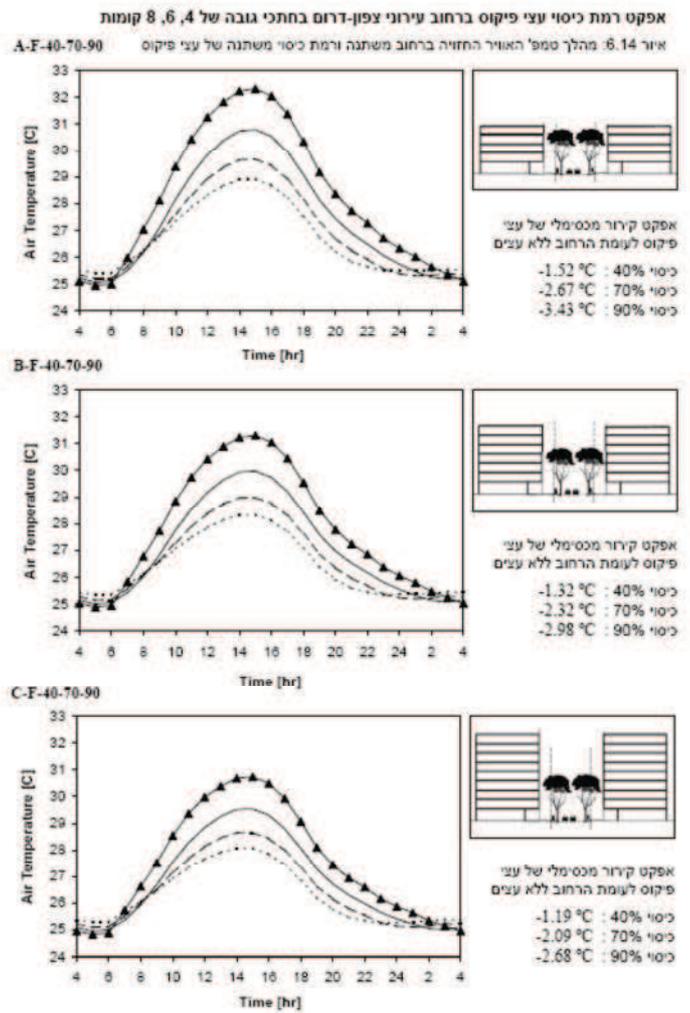
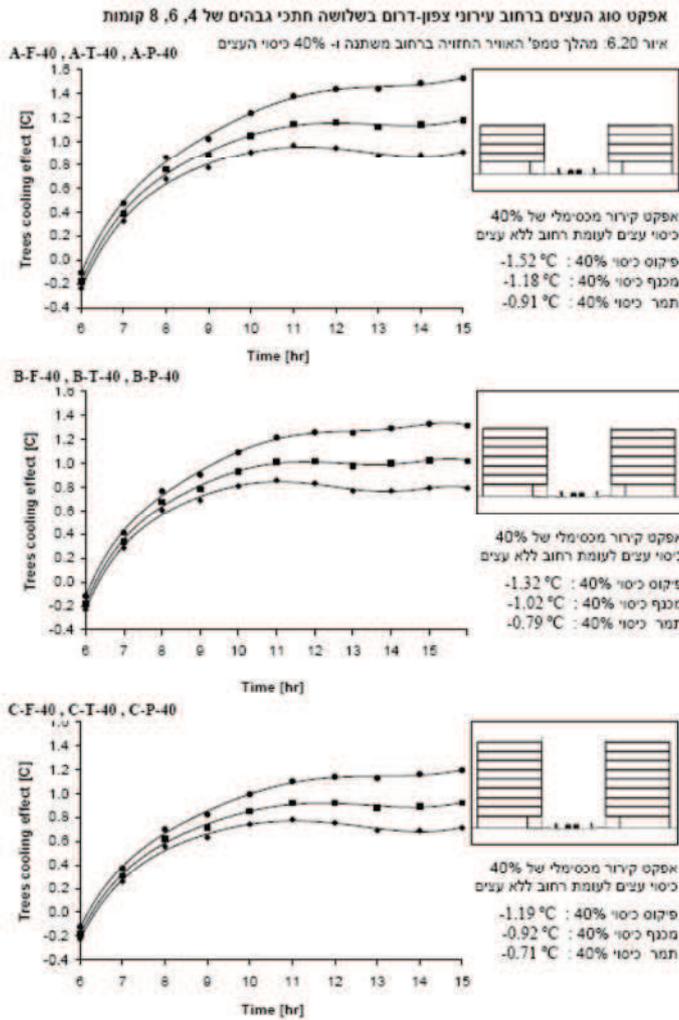
⁵³ ממצאי תוצאות מדידות הלחות הראו הבדלים קטנים בשינוי לחץ האדים באתר לעומת הסביבה וקשר יחסי הפוך בין מהלך הלחות היחסית באתרים לבין אפקט הקירור. נמצא שניתן לאמוד את אפקט הלחות כגורם נגזר מאפקט הקירור.

ניתוח הקשרים הכמותיים באותו מחקר הוביל לפיתוח מודל אמפירי לחיזוי טמפרטורת האוויר בתוך אזור אורבאני עם עצים ולחיזוי טווח השפעת הקירור על-ידי העצים על טמפרטורת האוויר של הסביבה. המודל שהוצע במחקר בנוי מרגרסיה רבת משתנים המנוסח בנוסחה.⁵⁴ דרך הקשר המתמטי במודל ניתן לקבוע את אפקט הקירור של עצים באזורי אקלים שונים מעבר לאזור האקלים הנחקר.

הממצאים האמפיריים שהוצגו במחקר זה מאפשרים פיתוח כלים לשילוב אפקטים אקלימיים של אזורים ירוקים במסגרת תכנון עירוני. על-פי ממצאי המחקר מוצעים מספר קווים מנחים למיתון עומס החום העירוני על-ידי ייעור בתוך סביבה אורבאנית. בתחום המרחב העירוני ניתן לשלב עצים בצורות שונות, כגון עצי עד, עצים נשירים, צפיפות וגובה חופת עצים שונה. שילוב נכון של עצים בתוך מרחב עירוני יכול לתרום משמעותית לקירור פסיבי.

⁵⁴ המודל נבדק לכל אתר ואתר. פרוט הנוסחה מופיע במחקר עצמו, וכולל את המשתנים הבאים: יום המדידה, נקודת המדידה, מקום הייחוס לאתר, אפקט הקירור של האתר הירוק לעומת האזור הבנוי, טמפ' האוויר במקום הייחוס, טמפ' האוויר הממוצעת של מקום הייחוס ומידת ההצללה היחסית בנקודת המדידה.

12.9 נספח ט': השוואת השפעה של עצים שונים (שעשוע בר, 2005)



צד ימין: מהלך טמפרטורת האוויר החוזיה בחתך רחוב עירוני (צפון-דרום) משתנה (גובה 4, 6 ו-8 קומות) ורמת כיסוי משתנה של עצי פיקוס (40%, 70% ו-90%), מול צד שמאל: מהלך טמפרטורת האוויר החוזיה ברחוב עירוני משתנה ו-40% כיסוי של 3 סוגי עצים: פיקוס, מנגף ותמר. התוצאות מראות השפעה מיקרו אקלימית שונה של שלושת העצים בטיפוסי הבינוי השונים ונמצא שאפקט הקירור של סוג העצים משתנה באופן מהותי עם שינוי בצפיפות הנטיעה ובצפיפות הבניה של הרחוב: ככל שחלל הרחוב עמוק יותר פוטנציאל הקירור של העצים קטן. בצוהרי היום בתנאי קיץ באקלים חם ולח, אפקט הקירור המכסימלי נמצא על ידי עצי פיקוס השדרות אשר הגיע עד $3.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ מ"צ ברחוב בצפיפות בניה של 4 קומות, וקטן בהדרגה עד ל- $2.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ מ"צ ברחוב בצפיפות בניה של 8 קומות. באותו האופן, אפקט הקירור של עצי מנגף נאה, נע מ- $2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ עד $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ מ"צ. לעומת זאת, אפקט הקירור של עצי תמר מצוי נמצא יחסית נמוך ונע מ- $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ עד $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ מ"צ. השפעת שינוי רמת צפיפות נטיעת העצים מרמות כיסוי שונות לעומת הכיסוי המרבי ברחוב, הביאה לשינוי מכסימלי של $1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ מ"צ באפקט הקירור של עצי פיקוס השדרות, $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ מ"צ בשינוי אפקט הקירור של עצי מנגף נאה ו- $0.45\text{ }^{\circ}\text{C}$ מ"צ בשינוי אפקט הקירור של עצי תמר מצוי.

12.10 נספח י': מערכות פוטו וולטאיות.

מערכת פוטו-וולטאית אופיינית⁵⁵ כוללת מערך של קולטים פוטו-וולטאים, המייצרים זרם ישר כאשר אור פוגע בהם, וציוד ממשק אלקטרוני. תפקידו של ציוד זה הוא לטעון מצברים לשימוש מושהה בשעות החשיכה, להמיר את הזרם הישר בזרם חילופין שיסופק לרשת החשמל הכללית, או שלוב של שני התפקידים. ההספק המתקבל ממערכת פוטו-וולטאית משתנה יחד עם השנויים בעוצמת הקרינה המגיעה מהשמש (הספק המתקבל מקולט החשוף לקרינה ישירה גדול בהרבה מזה המופק ביום מעונן) ותלוי גם בטמפרטורת הקולט (טמפי' גבוהות גורמות להקטנת הזרם), ובמידה מסוימת בהרכב הספקטראלי של האור הפוגע. הזרם המיוצר מוגדר באמצעות סך האנרגיה החשמלית הנאגרת בתאים הסולאריים ונמדד ביחידות וואט. יצרני הקולטים מציינים את יכולת הייצור שלו במונחי "וואט-שיא" W_p (וואט-שיא היא יחידת הספק מלאכותית שהוגדרה למטרות תקינה).⁵⁶

התאים הפוטו-וולטאים מבוססים על מוליכים למחצה (semiconductors) בעיקר סיליקון גבישי, הממירים אנרגיה של פוטונים מקרינת השמש ישירות לחשמל. כיום ישנם מס' סוגי חומרים המשמשים לייצור קולטים פוטו-וולטאים, בעלי יעילות משתנה, כגון סיליקון חד גבישי (c-si), סיליקון רב-גבישי (px-si) ושכבות דקות של חומרים אחרים. העיקרון הפיזיקאלי עליו מבוססת פעולת התא היא האפקט הפוטו-וולטאי, בו אור הפוגע בצומת המורכב משני חומרים שונים גורם לקפיצת אלקטרון מרמת אנרגיה נמוכה לגבוהה. ברגע שמחברים מוליך חשמלי לחומר, זורמים האלקטרונים דרכו ליצירת זרם חשמלי. שימוש מושהה בחשמל המופק מאנרגית האור, מתאפשר באמצעות אגירת הזרם החשמלי במצבר.

מתוך המדרוך למתכנן (פיימן, 2000) אפשר ללמוד כי תפוקת קולט פוטו-וולטאי של 1kwp המוצב באופן אופטימאלי בתל אביב היא 1560 קוט"ש בשנה.⁵⁷ בעריכת חשבון פשוט הבודק את צריכת החשמל עבור פנסי התאורה בלבד בת"א (38 מיליון קוט"ש בשנה), ניתן לומר באופן תיאורטי גס שדי בהתקנת מערכות פוטו-וולטאיות של כ-24.5 אלף kwp נחסכת פליטת המזהמים מצריכת חשמל עבור תאורת הרחובות בת"א בלבד.

⁵⁵ פרופי' ד. פיימן, דר' ד. פוירמן, דר' פ. איבצון, מר ב. מדווד, פרופי' ע. זמל, מערכות פוטו-וולטאיות בערי ישראל: איזה גודל מתאים? מדרוך למתכנן, המחלקה לאנרגית השמש ולפיזיקה סביבתית, המכון לחקר המדבר, אוני' בן גוריון בנגב, אוקטובר 2000.

⁵⁶ אפיון הקולטים נעשה ע"פ ההספק המופק בתנאי מבחן תקיניים (STC) הכוללים עוצמת אור של 1000 W/m^2 , טמפי' קולט של 250 C ותנאים ספקטראליים מוגדרים המכונים AM 1.5.

⁵⁷ בהנחה שאין מכשול מטיל צל על הקולט. מכשולים כאלו עשויים לכפות את האוריינטציה בה יוצבו הקולטים. ע"פ המחקר עולה כי הכיוון האופטימאלי להצבת המערכת היא הפניית הקולט לכיוון דרום בזווית נטיה של 30° . אם כי דווקא כיווני דרום-מזרח ודרום-מערב מועדפים יותר לתפוקה שנתית. עבור מערכת שנועדה לתאורת חוץ במשך כל השנה רצוי להציב בנטייה תלולה יותר כדי לנטרל את השפעת השילוב של לילות ארוכים ורמת קרינה נמוכה יותר במשך החורף.

12.11 נספח יא': מפות שכונת יפו ג'

מיקום שכונה יפו ג' במפת העיר ת"א (מקור: אתר עיריית ת"א, מערכת GIS)



תצ"א של שכונת יפו ג'





גבולות השכונה לטענת תושבי המקום



גבולות השכונה עפ"י אתר עיריית ת"א



מודל תלת מימדי של גבולות השכונה . מקור : מחקר זה.

12.12 נספח יב': מאפייני הבינוי בשכונה יפו ג'

- מפת השכונה- בינוי ושטח ציבורי פתוח (מקור : אתר עיריית ת"א, מערכת GIS)



- התפלגות המבנים בצדה המערבי של השכונה (עפ"י סקר עצמאי)

סוג המבנה	כמות המבנים
4 קומות+קומת עמודים	37
2קומות+קומת עמודים	6
2 קומות מגורים	4
קומה אחת למגורים	7
קומה אחת- מבני ציבור	2
5 קומות מגורים+קומת עמודים	1
7 קומות מגורים+קומת עמודים	1
8 קומות מגורים+קומת עמודים	1
סה"כ	59

- חלקה המזרחי של השכונה נקרא 'פרדס דקא' ונותר כאזור בעל אופי מעברתי, ללא רחובות מוגדרים ופיתוח עירוני. מרבית האוכלוסייה הדרה בו ערבית ובעלויות הקרקע פרטיות. תכניות הפיתוח של עיריית תל אביב מתייחסות לפניי עתידי של המתחם, ופיתוחו בהתאם לתביע האזורית, בדומה לאופי הבינוי במערב השכונה. היות והשטח אינו עונה למאפיינים שהגדרנו לעריכת המחקר, בחרנו שלא להתחשב בו בשקלול הנתונים הסופי. עם אישור תכנית המתחם, יהא זה נבון מצד העירייה להשתמש בטכנולוגיות בניה ירוקות, אך באם יעשה הדבר, יהיה זה בבחינת בניה מן המסד, ולא שינויים בבניה קיימת, כמפורט בעבודה זו.



גבולות 'פרדס דקא' ותכניות הפיתוח (מקור: אתר עיריית ת"א, מערכת GIS)

12.13 נספח יג': חתך רחוב אופייני (הדמיה ממוחשבת)



מקור: עיבוד של צוות המחקר על פי נתונים מהשטח.

ביה"ס ללימודי הסביבה ע"ש פורטר

הצעת מחקר המוגשת במסגרת קורס פרויקטים באיכות הסביבה תשס"ט:

השפעת מיזם הרכב החשמלי

על זיהום האוויר בישראל



מגישים:

אפרת הילדסהיים

רגינה פנקס

תום שפע

רינת בוטבול

מנחה: איתי אליאב

תודות

לאבי מושל ואמיר זלצברג
המשרד להגנת הסביבה
האגף לאיכות האויר ושינוי אקלים

תוכן עניינים

תקציר.....	עמ' 3
1. מבוא	עמ' 3
1.1 סקירת טכנולוגיות חלופיות לרכב מונע בנזין/דזל	
1.2 מיזם הרכב החשמלי בישראל של חברת BETTER PLACE	
1.3 חשיבות המחקר	
1.4 שאלת המחקר והשערות המחקר	
1.5 שיטת המחקר	
2. תחזית פליטות מרכבים פרטיים בישראל עד שנת 2020 - תרחיש עסקים כרגיל	עמ' 8
2.1 הנחות המתודולוגיה של תרחיש עסקים כרגיל	
2.2 מתודולוגיה לחישוב תחזית הפליטות בשנת 2020 בתרחיש עסקים כרגיל	
2.2.1 גידול בצי הרכב הפרטי בישראל עד שנת 2020	
2.2.2 השינוי בנסועה הממוצעת של רכב פרטי בישראל עד שנת 2020	
2.2.3 תקני יורו וחשוב מקדמי פליטה עתידיים	
2.3 סיכום ביניים	
3. תרחיש מעבר לרכבים חשמליים	עמ' 13
3.1 המשתנים להערכת היקף החדירה של הרכב החשמלי אל שוק הרכב הפרטי	
3.1.1 היקף הנסועה הממוצע בישראל	
3.1.2 עמדות הציבור	
3.1.3 עלויות ומיסוי	
3.1.4 השוואה להערכות נוספות	
3.1.5 מסקנות להמשך העבודה	
3.2 גידול בפליטות מייצור חשמל והפחתה בפליטות מכלי רכב רגילים בתרחיש מעבר לרכבים החשמליים	
3.2.1 חיזוי ההפחתה בפליטות מכלי רכב רגילים	
3.2.2 חיזוי הגידול בייצור החשמל והשפעתו על רמות זיהום האוויר	
3.2.3 סיכום ביניים	
4. פליטות מזהמי אוויר מרכבים ומחברת החשמל	עמ' 19
4.1 פירוט הגזים, החשיפה ומשמעות הפגיעה הבריאותית	
4.1.1 פירוט הגזים, החשיפה ומשמעות הפגיעה הבריאותית	
4.1.2 המזהמים הנפלטים מכלי רכב ומתחנות הכוח של חברת החשמל	
4.2 השוואה בין סוגי הגזים הנפלטים לפי מקור הפליטה	
4.2.1 רכבים פרטיים	
4.2.2 חברת החשמל לישראל	
4.2.3 סיכום נתוני ההשוואה	
4.3 העלייה הצפויה בפליטה מתחנות הכוח	
4.3.1 מדיניות שיפור בהפחתת הפליטות לאוויר מארובות חברת החשמל	
4.3.2 חישוב העלייה הצפויה בזיהום שייפלט מתחנות הכוח כתוצאה מהמעבר לרכבים	
4.4 ניתוח ממצאים	
4.5 הסתייגויות לניתוח הממצאים	
4.6 סיכום הפרק	
5. סיכום	עמ' 24
ביבליוגרפיה	עמ' 26
נספחים	עמ' 28

עבודה זו תציע לחקור כיצד ישפיע המעבר לשימוש ברכבים חשמליים על זיהום האוויר בישראל. כל פרק יציג את סקירת הרקע המדעי הקיים בנושא כיום, שיטות המחקר או נתונים הקיימים עליהם או מתכוונים להתבסס, וכיצד הצעה זו מחדשת בתחום המחקר.

בפרק המבוא נציג סקירה קצרה על טכנולוגיות חלופיות "ירוקות" שקיימות כיום בשוק העולמי לרכב הפרטי. בסקירה נצביע על כך שטכנולוגית הרכב החשמלי היא בעלת הסיכויים הגבוהים ביותר לחדור לשוק הרכב בישראל באופן משמעותי. המטרה העיקרית של הפרק היא להציג את חשיבות המחקר.

בפרק השני נבנה תרחיש תיאורטי של "עסקים כרגיל" לשנת 2020. בפרק זה נציע דרך להעריך את היקף זיהום האוויר מרכב פרטי בישראל בשנת 2020, ללא חדירה של רכבים חשמליים לשוק. נציג את המתודולוגיה לחישוב כמות הזיהום הצפויה מרכבים פרטיים בתרחיש זה, אשר תשמש בסיס למחקר כולו ועל-פיה יתבצעו החישובים הבאים שנציע.

בפרק השלישי נבחן את תרחיש חדירת רכבים חשמליים אל שוק הרכב הפרטי בישראל. בחלקו הראשון נציע לחוקר משתנים לחיזוי היקף החדירה. בחלקו השני של הפרק נציג נוסחאות לחישוב הגידול השנתי ברמות הזיהום מייצור החשמל, וכן את ההפחתה הצפויה בזיהום האוויר הנפלט מרכבים מונעי בנזין, בתרחיש זה. כשלב ביניים, נציב את הנתונים הידועים עד כה.

בפרק הרביעי נסקור את הגזים השונים הנפלטים מתחנות הכוח של חברת החשמל ומכלי רכב, ואת השפעותיהם על בריאות האדם. סקירה זו תיתן לחוקר תמונה רחבה ומלאה של משמעות המעבר לכלי רכב חשמליים. נערוך השוואה בין סוגי הגזים השונים הנפלטים מרכבי הבנזין ומתחנות הכוח על מנת להיווכח אילו מזהמים יופחתו ממקור אחד ויתווספו במקור אחר. נציג ממצאים ראשוניים וכן הסתייגויות.

השלמת המחקר תאפשר להעריך כיצד ישפיע המעבר לרכבים חשמליים על זיהום האוויר בישראל.

1. מבוא

בעיית זיהום האוויר בישראל הינה חמורה, במיוחד במרכזי הערים ובנתיבי תחבורה ראשיים. בגוש דן, במרכז ירושלים ובחיפה נמדדו בשנים האחרונות מאות חריגות מתקני הסביבה וריכוזים מדאיגים של תחמוצות חנקן. חלקה של התחבורה הפרטית בגרימת זיהום אוויר במרכזי הערים הוא מהגדולים והבעייתיים ביותר, הן בשל כמות הרכבים והן בשל סמיכות מקור הפליטה לאוכלוסייה.¹ כלי רכב צורכים רק כ- 20% מן האנרגיה אולם הם גורמים לכ- 92% מזיהום האוויר.² בעיה זו מגדילה את הסכנות הבריאותיות הנובעות מזיהום אוויר, במיוחד בקרב אוכלוסיות רגישות, כילדים וקשישים, ובקרב אנשים הסובלים מבעיות בדרכי הנשימה. המצב צפוי להחמיר עקב העלייה המתמדת בפליטת מזהמים כתוצאה משרפת דלק פוסילי בכלי רכב, שכן בעשורים האחרונים חל גידול רב בצי הרכב הפרטי בישראל.

רכבי הבנזין והדיזל המסורתיים עדיין שולטים ללא עוררין בשוק הרכב. הקטנת פליטת המזהמים מכלי רכב עם מנועי בנזין נעשית כיום באמצעות ממירים קטליטיים, אך אמצעי טכנולוגי זה מהווה פיתרון

¹ אתר המשרד להגנת הסביבה www.sviva.gov.il

² "הפחתת זיהום אוויר מתחבורה, מצגת, ד"ר יוסי ענבר, סמנכ"ל בכיר לתעשיות, המשרד לאיכות הסביבה, אפריל 2004. באתר מוסד שמואל נאמן: [ftp://ftp.sni.technion.ac.il/events/transport/Yosi-Inbar.pdf](http://ftp.sni.technion.ac.il/events/transport/Yosi-Inbar.pdf)

חלקי ולא מספק. במקביל לשיפור התחבורה הציבורית נדרש מעבר לשימוש בחלופות אלטרנטיביות בעלות פוטנציאל זיהום אוויר נמוך בהשוואה לדלקים המשווקים כיום.³

במקומות שונים בעולם מתפתחות טכנולוגיות התופסות נתח משמעותי משוק הרכב: ביו-אתנול, ביו-דיזל, גז טבעי, גפ"מ, רכב חשמלי ורכב היברידי. הטכנולוגיות החלופיות להנעת רכב הקיימות כיום בישראל הן: רכב מונע גפ"מ, רכב היברידי ואופנועים חשמליים.⁴ בסקירת הטכנולוגיות החלופיות ננסה להראות מדוע אנו חושבים שהרכב החשמלי הוא בעל הסיכויים הגבוהים ביותר לחדור לשוק הרכב הפרטי בישראל באופן משמעותי לעומת שאר החלופות הקיימות.

1.1 סקירת טכנולוגיות חלופיות

נציג להלן מספר טכנולוגיות "ירוקות" מתחום הרכב והדלקים. נראה כי קיימות בשוק טכנולוגיות רבות וטובות להפחתת זיהום מכלי רכב, אך רמת חדירתן לשוק הרכב אינה גבוהה כפי שיתואר בהמשך.

1.1.1 רכב הנעה היברידי

רכב היברידי הוא רכב המשתמש בשני מקורות כוח להנעתו. האחד מנוע בעירה פנימית והשני מנוע חשמלי. מנוע הבעירה הפנימית משמש הן לטעינת המצברים והן להנעת כלי הרכב. סוג הנעה זה משיג חסכון משמעותי בצריכת הדלק באמצעים שונים: אגירת אנרגיית הבלימה בסוללות החשמליות, כיבוי המנוע בעת עצירה ועוד, ולפיכך פולט פחות מזהמים מאשר רכב בנזין רגיל.

בישראל מוצעים למכירה מספר דגמים בעלי הנעה היברידית ונתוני המכירות מראים על גידול מתמיד. המלצות דוח מיסוי ירוק יושמו בפועל והמחיר הסופי לצרכן נמוך ממחירו של רכב בנזין מקביל. אנו מניחים שנתח השוק של הרכבים ההיברידיים עשוי לעלות במרוצת הזמן.⁵ בעולם, לשם השוואה, קיים גידול משמעותי בקניית רכבים היברידיים. לדוגמא, בחודש אפריל רכב היברידי מסוג HONDA INSIGHT היה הרכב הנמכר ביותר ביפן.⁶

מנתונים שנאספו מתקבל הרושם שרכבים היברידיים תופסים מקום נכבד כחלופה ירוקה ראויה בשוק הרכבים בעולם. בישראל חלופה זו הינה המובילה בשוק, אך היא עדיין זניחה. נפח הרכבים ההיברידיים מכלל הרכבים הפרטיים בישראל עמד בשנת 2008 על 0.14% (ר' נספח 1).

1.1.2 גפ"מ (גז פחמימני מעובה)

תערובת של פחמימנים (בעיקר פרופאן ובוטאן) המופקת בתהליך זיקוק הנפט, או לחלופין מופקת ישירות מהאדמה. כלי הרכב המונעים בגפ"מ בישראל, הם כלי רכב שנבנו במקור לשימוש בבנזין והוסבו לשימוש דואלי בבנזין ובגפ"מ.⁷

עפ"י דוח המדען הראשי של משרד התחבורה, נכון לחודש פברואר 2008 היוו רכבים המונעים בגפ"מ 0.18% מכלל הרכבים הפרטיים בישראל.⁸ להערכתנו, אין לצפות עלייה משמעותית של אחוז רכבי הגפ"מ

³ אתר אדם טבע ודין www.adamteva.org.il

⁴ אתר המשרד להגנת הסביבה www.sviva.gov.il

⁵ שם

⁶ ביידר, ש. (11.5.09) "מהפך בשוק הרכב היפני: ההונדה אינסייט ההיברידית היא הרכב הנמכר ביותר בחודש אפריל", גלובס

<http://www.globes.co.il/news/article.aspx?QUID=1055,U1243846089295&did=1000448786>

⁷ שם.

⁸ כהן, י., טויסטר, ג. ושראבי, נ. (2008). מיזם הרכב החשמלי בישראל – ישימות והשלכות תחברתיות אפשריות. דו"ח המדען הראשי של משרד התחבורה

בצי הרכב הפרטי בשל יעילות כלכלית נמוכה והיעדר תמריצים לצרכן ולכן חשיבות המחקר בנושא זה קטנה לדעתנו. כמו כן, תרומת רכבי הגפ"מ להפחתת פליטת גזים המסוכנים לבריאות האדם מוטלת בספק.

1.1.3 דלקים ביולוגיים (ביו-דלקים)

קבוצת חומרי דלק המופקים ממקורות ביולוגיים מתחדשים, בעיקר חומר צמחי הגדל בתהליך הפוטוסינתזה אך גם מתאית המצויה בשפע באתרי פסולת, בגזם עירוני, בשאריות מזון ועוד. דלקים אלו לרוב נקיים יותר, מכילים כמויות קטנות יותר של גופרית ובתהליך השריפה פולטים פחות מזהמי אוויר. ישנם שני סוגי ביו-דלקים נפוצים: ביו-דיזל ואתנול.

הביו דיזל, המופק בעיקר משמן צמחי (סויה, דקלים) נפוץ בעיקר באירופה, שם הוא מוסף לסולר בריכוזים של עד 100%.⁹ תקן מחייב ייכנס לתוקף עוד שלוש שנים, כך שסולר יהיה חייב לכלול 5% ביו דיזל. עד אז, הטבה בגובה 5% מהמס תינתן לתזקיק סולר שיכיל 5% ביו דיזל.¹⁰ אתנול, המיוצר בתהליך תסיסה של סוכרים להפקת אלכוהול (מסוג אתנול) מופק בעיקר בברזיל (מקנה סוכר) וארה"ב (מתירס ודגנים אחרים). ניתן למהול אתנול בריכוזים של עד 100%. בתקן הישראלי הרשמי והמחייב לבנוזין לתחבורה תידרש מהילת אתנול של 5% בבנוזין עוד 3 שנים. ועדת מיסוי ירוק המליצה לפטור את האתנול ממס קנייה לתקופה של חמש שנים, אך הוחלט לא ליישם המלצה זו.¹¹

1.1.4 גז טבעי

הגז הטבעי הוא דלק הנוצר ממקור מחצבי (פוסילי) המורכב ברובו המכריע מגז המתאן (CH₄). למרות שלא מדובר בדלק ממקור מתחדש, נחשב הגז הטבעי לנקי במיוחד, בשל כמויות המזהמים הנמוכות הנפלטות ממנו. הגז הטבעי משמש כדלק לרכב במקומות רבים בעולם אך עדיין לא נכנס לשימוש בארץ בגלל העלויות הגבוהות הכרוכות בכך.¹² ראוי לציין שבחודשים האחרונים התגלו בישראל כמויות משמעותיות של גז טבעי, אך עדיין לא ניתן לדעת האם תגלית זו רלוונטית למחקר שלנו.

1.1.5 תאי דלק

בתאי הדלק מומרת האנרגיה האצורה בדלק ללא שריפה לאנרגיה חשמלית. כיום קיימים כלי רכב המצוידים בתאי דלק, כאשר הדלק המשמש להנעתם הוא מימן, מתנול ואף בנוזין רגיל. הפליטה מתא הדלק עצמו היא של מים בלבד, וכאשר נעשה שימוש בדלק המכיל פחמן - גם פחמן דו חמצני. הטכנולוגיה נראית מבטיחה הן בשל הניצולת הגבוהה של התהליך והן בשל אמינותו.

כיום הטכנולוגיה הקיימת עדיין איננה בשלה מספיק לייצור המוני, ובשל מחירה הגבוה נעשה בה שימוש רק למטרות ייחודיות. קיימת הסכמה שיעבור לפחות עשור נוסף עד שטכנולוגיה זו תהיה זמינה באופן מסחרי ברחבי העולם. מהנ"ל ניתן להבין שהדרך לשימוש בטכנולוגיה זו בישראל עדיין רחוקה מאוד.

1.1.6 הרכב החשמלי

כלי רכב המונעים בחשמל קיימים כבר יותר ממאה שנים, אך בשנים האחרונות החל ייצור סדרתי של כלי רכב חשמליים. טכנולוגיה זו בנויה על רעיון פשוט ביותר שבמרכזו מצבר חשמלי המספק חשמל למנוע המפעיל את כלי הרכב. המצבר אוגר בתוכו אנרגיה חשמלית הניתנת להטענה.

⁹ אתר המשרד להגנת הסביבה www.sviva.gov.il

¹⁰ הודעה לעיתונות של משרד האוצר מה 8.6.09: "מהפכת המיסוי הירוק יוצאת לדרך - רותמים את הכלכלה לטובת הסביבה".

¹¹ גולדשמיט, ר. (8.6.09) טכנולוגיות להפחתת זיהום אוויר מכלי רכב וכלי המדיניות הננקטים ליישומן - מוגש לוועדת המדע והטכנולוגיה. הכנסת - מרכז המחקר והמידע -

<http://www.knesset.gov.il/committees/heb/material/data/mada2009-06-09.doc>

¹² אתר המשרד להגנת הסביבה www.sviva.gov.il

לרכב החשמלי מספר יתרונות עיקריים. הוא בעל מנוע שקט ביותר שאינו פולט מזהמים כלל. מערכת העברת הכוח הינה פשוטה ומאפשרת יעילות ניצול אנרגיה גבוהה באופן יחסי בעזרת שימוש באנרגיה הבלתימה של הרכב. החיסרון העיקרי של הרכב החשמלי נובע מכושר נשיאת האנרגיה. צפיפות האנרגיה במצברים אינה גבוהה ביחס למשקלם, והדבר מחייב נשיאת משקל רב של מצברים, או לחלופין, פחות מצברים וטעינה תכופה יותר לאחר נסיעות קצרות יחסית. לצורך הטעינה נדרשת פריסת תשתיות הכרוכה בהשקעות גדולות. כמו כן, בשלב זה המחיר הסופי לצרכן עדיין גבוה יחסית. בנוסף, יש לזכור כי רכב חשמלי מונע על ידי חשמל המופק בתחנות הכוח. פליטות המזהמים עוברים מאגוז מהרכב לארובות תחנות הכוח. בישראל מבוססות רוב תחנות הכוח על שריפת פחם.

כדי לפתור בעיות אלה נעשים מאמצים בכיוונים שונים, כגון פיתוח מצברים קלים יותר ובעלי צפיפות אנרגיה גבוהה יותר. בשנים האחרונות החל בארץ שימוש בקטנועים חשמליים ובאופניים בעלי מנוע עזר חשמלי. נבחן להלן את התקדמות מיזם הרכב החשמלי בארץ ואת סיכויי החדירה שלו אל השוק.

1.2. מיזם הרכב החשמלי בישראל של חברת BETTER PLACE

מיזם המכונית החשמלית של שי אגסי תופס כותרות בישראל ובעולם ומקבל את תמיכת משרד התשתיות הלאומיות ומשרד האוצר (ועדת מיסוי ירוק). סקר היתכנות לרכב החשמלי שבוצע ע"י חברת החשמל בהזמנת חברת 'בטר פלייס ישראל' ולדרישת משרד התשתיות בחן את השפעות המיזם לאורך ציר הזמן (2011, 2015, 2020) בשלושה תרחישים של טעינה: טעינה לא מנוהלת והתנהגות צרכנית אקראית, טעינה לא מנוהלת והתנהגות צרכנית רציונאלית וטעינה מנוהלת.

החישובים בסקר התבססו על 2 מיליון רכבים חשמליים בשנת 2020 שיהוו את כלל צי הרכב הפרטי בישראל. ממסקנות הסקר עולה כי עד 2020 הביקוש לצריכת החשמל כתוצאה משימוש ברכבים חשמליים יגדל ב 14% אבל אם הפרויקט יבוסס על טעינה מנוהלת הוא לא יצריך בניית תחנות ייצור חשמל חדשות. מבחינת הפחתת רמות זיהום האוויר בערים חברת בטר פלייס מצפה להגיע עד שנת 2020 לנתוני ניטור זיהום אוויר כמו בתרחיש של יום כיפור.¹³

שתי הנחות מרכזיות הובילו אותנו להתמקדות במחקר זה:

1. היקף החדירה של מיזם הרכב החשמלי יהיה גבוה יותר ביחס לטכנולוגיות החלופיות האחרות שנסקרו לעיל. החברה התקינה 800 נקודות טעינה נכון לחודש יוני 2009 וחתמה על חוזים עסקיים עם מספר גופים מרכזיים בישראל, כגון חברת קניוני ישראל, טבע וסלקום.

2. מיזם הרכב החשמלי יגרום להפחתת זיהום אוויר במידה משמעותית יותר מהחלופות האחרות.

1.3 חשיבות המחקר

מסקירה של פרסומים שפורסמו בתקשורת, וכן ממדיניות הממשלה בנושא מתקבל הרושם כי חברת "בטר פלייס" עושה צעדים משמעותיים לקראת כניסה אגרסיבית לשוק הרכבים הפרטיים בישראל. המנוע של הרכב החשמלי עצמו אינו פולט זיהום, אך הוא פועל על חשמל המיוצר בתחנות כח. כלומר, מקור הפליטה של הזיהום יועתק מאגוזי כלי הרכב אל ארובות תחנות הכח. חשיבות המחקר היא בשני מישורים. האחד, ניסיון להעריך האם ההפחתה בפליטות מזהמים מרכבים פרטיים תהיה קטנה, גדולה או

¹³ הודעה לעיתונות של לשכת שר התשתיות הלאומיות מיום 10.12.08 וראיון עם מנהל הרגולציה של חברת בטר פלייס, מר ערן זיני מיום – 30.4.09.

שווה לתוספת בפליטות מארובות תחנות הכוח. השני, מיפוי השינוי בהרכב המזהמים שייפלטו לסביבה כתוצאה מהמעבר לשימוש ברכבים חשמליים.

1.4 שאלת המחקר והשערות המחקר

טרם התבצע מחקר המנסה להעריך כמותית את הפליטות הנחסכות מתוצאה ממעבר לרכב חשמלי לעומת הפליטות שנוספות לתחנות הכוח בתנאים הקיימים בארץ. מחקר זה ינסה לענות על השאלה הבאה:

כיצד ישפיע המעבר לשימוש ברכבים חשמליים על זיהום האוויר בישראל?

השערותינו:

- 1) תהיה הפחתה בזיהום האוויר במרכזי הערים כתוצאה ממעבר לרכבים חשמליים.
- 2) תהיה עלייה בזיהום האוויר בתחנות בכוח כתוצאה מייצור חשמל נוסף.
- 3) ההפחתה בפליטות מזהמים מרכבים פרטיים במרכזי הערים תהיה גדולה מתוספת פליטות מזהמים מתחנות הכוח.

הנימוק להשערות הראשונה והשנייה הוא שכל רכב חשמלי שייכנס לישראל יפחית מיידית את הזיהום הנפלט מכלי רכב ויוסיף לזיהום מתחנות הכוח בשל החשמל הנוסף שיוצר. הנימוק להשערה השלישית הוא שאנו מאמינים שהזיהום שיוצר בתחנות הכוח יהיה מנוהל ע"י מערכת אחת גדולה ומבוקרת במקום ע"י אלפי אזרחים בודדים. סביר להניח שזיהום היוצא ממקור אחד הינו נשלט יותר בשל האפשרות להתקין טכנולוגיות כגון סולקנים במקום אחד.

1.5 שיטת המחקר

נציע לבצע הערכה של תחזית הפליטות מרכבי בנזין פרטיים בישראל בשנת 2020 בתרחיש עסקים כרגיל – יפורט בפרק 2. נבקש לערוך תחזית של היקף החדירה האפשרי של הרכב החשמלי אל שוק הרכב הפרטי בישראל ולחזות את רמת הפחתת הפליטות העתידית מכלי רכב רגילים, כתוצאה ממעבר לשימוש ברכבים החשמליים – יפורט בפרק 3. נרצה להעריך את התוספת שתידרש בייצור החשמל בתחנות הכוח כתוצאה מהמעבר לשימוש ברכבים חשמליים. כמו כן, נשאל האם כתוצאה מכך צפויה עלייה בכמות הפליטות מתחנות כוח. נציע לערוך השוואה בין פליטות שנגרעו מרכבים לפליטות שנוספו בתחנות כוח, תוך התייחסות להבדלים בסוגי הגזים הנפלטים משני מקורות פליטה אלה- כל זאת יפורט בפרק 4.

נתבסס על מחקרים שנעשו בתחום, דו"חות מקצועיים של משרד התחבורה, משרד התשתיות, משרד האוצר ונתונים מהמשרד להגנת הסביבה, חברת החשמל והלשכה המרכזית לסטטיסטיקה (למ"ס).

2. תחזית פליטות מרכבים פרטיים בישראל בשנת 2020 - תרחיש עסקים כרגיל

בפרק זה תוצג המתודולוגיה לחישוב כמות הזיהום הצפויה בשנת 2020 מרכבים פרטיים המונעים בדלקים פוסיליים, לפי מזהמי האוויר המרכזיים, ללא נקיטת אמצעים מיוחדים מאלו הנהוגים כיום.

שריפת דלק פוסילי במנועיהן של מכוניות פרטיות גורמת לפליטת מזהמים שונים. בשני העשורים האחרונים צומצמו הפליטות של רוב המזהמים, חלק מהן ע"י שיפורים במנועי הרכב ובאיכות הדלק.¹⁴ לדברי אבי מושל, הממונה לזיהום אוויר מתחבורה במשרד לאיכות הסביבה אין תחזית פליטות מתחבורה עדכנית ולא נעשו מחקרים בארץ בנושא למעט המחקר שהוא ערך בשנת 2000 בו הוא חישב את תחזית הפליטות מתחבורה לשנת 2005 בתרחיש עסקים כרגיל. בעיריית ת"א התחילו לעבוד על תחזית פליטות אזורית אבל המחקר נמצא בשלבים התחלתיים וטרם פורסם.¹⁵ כמו כן, קיימים מחקרים שנעשים עבור חברת בטר פלייס אך כיוון שמדובר במידע עסקי אין גישה אליהם.¹⁶

2.1 הנחות המתודולוגיה של תרחיש עסקים כרגיל

התרחיש שאליו אנו מתייחסים הוא **תרחיש תיאורטי בלבד**. לצורך בנייתו הוחלט להתבסס על מספר הנחות אשר יתעלמו במכוון משינויים אפשריים עד שנת 2020, באופן שאינו יפגע לטענתנו במהימנות המחקר. להלן הנחותינו וכן הרציונאל בבסיסן.

1. נניח כי לא יינקטו צעדים מיוחדים או אחרים מאלו הנהוגים כיום וכי כל כלי הרכב תקינים. נתון שיכול לחזק הנחה זו הוא כי אין שינוי בדרישות העתידיות של תקני היורו משנת ייצור 2009 עד 2019. מרבית כלי הרכב המיובאים לישראל עוברים מבחני זיהום לפי התקינה האירופאית: תקני היורו הנחתמים אחת ל-4 - 5 שנים, מגדירים את רמת פליטת המזהמים המרבית המותרת ממנוע רכב ומחייבים את יצרני הרכבים בשיפור המנועים ומערכות הפחתת זיהום.¹⁷ מבדיקה של רמות הפליטה המרביות המותרות של מזהמים מכלי רכב פרטיים לפי תקני יורו מתקדמים, עולה כי עבור רכבי בנזין (97% מכלי הרכב הפרטיים בישראל, נכון ל-2008)¹⁸ אין שינוי בין הדרישות של יורו 5 (מתייחס לשנת ייצור רכב מ-2009 עד 2013) ויורו 6 (מתייחס לשנת ייצור רכב מ-2014 עד 2019). משתמע מכך כי עד שנת 2019 יצרני רכבים פרטיים מונעים בבנזין לא יידרשו לשיפורים נוספים (ר' נספח).¹⁹

מן הראוי לציין כי באמירה זו לא נלקחים בחשבון שיפורים נוספים באיכויות הדלקים ופיתוח מערכות לצמצום צריכת הדלק. בנוסף, תקני יורו מגדירים רמת פליטת מזהמים מרבית מותרת, ואולם בפועל הרכבים חורגים מהרמה שנקבעה בשל רמות תחזוקה שונות.²⁰ לכן, בתרחיש יותר מציאותי יהיה נכון יותר לחשב את מקדמי הפליטה המתבססים על מודלים מורכבים ומדידות של סוגי רכבים במתקנים מיוחדים ובתנאים מקצועיים.

2. נניח כי נתח הרכבים ההיברדים והרכבים המונעים בסולר ובגפ"מ יישאר זניח מכלל צי הרכב הפרטי בישראל, ולכן לא נכלילם בחישוב תחזית הפליטות. כפי שהוזכר במבוא, רכבי הבנזין והדיזל המסורתיים עדיין שולטים ללא עוררין בשוק הרכב בישראל (ר' נספח 1). נכון לפברואר 2008 לכ-97%

¹⁴ לא קיימת כיום טכנולוגיה להפחתת פליטת CO₂ הגורם להתחממות כדור הארץ. כהן ואחרים (2008), עמ' 1.

¹⁵ התכתבות עם אבי מושל במייל מתאריך 12.5.09

¹⁶ ראיון עם מנהל הרגולציה של חברת בטר פלייס, מר ערן זיני מיום – 30.4.09

¹⁷ אתר המשרד להגנת הסביבה www.sviva.gov.il

¹⁸ כהן ואחרים (2008), עמ' 1

¹⁹ <http://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php> דיזל-נט, אתר ובו מידע על מנועי דיזל ולטות דיזל

²⁰ שיחה מיום 31.5.09 עם אמיר זלצברג, מ"מ הממונה לזיהום אוויר מתחבורה, האגף לזיהום אוויר ושינוי אקלים, המשרד להגנת הסביבה.

מכלי הרכב הפרטיים בישראל מנוע בנזין, ל- 2.8% מנוע סולר ובסה"כ כ- 0.32% נחשבים "ירוקים": מהם 0.18% מונעים בגז ו- 0.14% הם כלי רכב היברידיים.²¹

סביר להניח כי "רפורמת המיסוי הירוק"²² תשפיע על התפלגות הרכב הפרטי בישראל וכי אחוז הרכבים הירוקים הקיימים מסך כלי הרכב הפרטיים בישראל יגדל עד שנת 2020, אך קשה להעריך באיזה שיעור מכיוון שאין בנמצא סקרי דעת קהל ולא חלף מספיק זמן מהחלת הרפורמה כדי לאפיין מגמות בשוק בהתאם לתגובת הצרכן. לכן, בטווח הרחוק ביצוע המחקר יצריך התייחסות לשינוי בהתפלגות הרכב הפרטי והשפעתו על מצאי הפליטות. עם זאת יש לציין כי המלצות הוועדה למיסוי ירוק מעודדות את השימוש ברכבים ההיברידיים וכי נתוני המכירות של רכבים היברידיים מראים כי בשנת 2008 חלה עלייה של 65% במכירות לעומת שנת 2007.²³ לעומת זאת, מסקנות הוועדה אינן מעודדות את השימוש ברכבי הגפ"מ.²⁴

2.2 מתודולוגיה לחישוב תחזית הפליטות מרכבים פרטיים בשנת 2020 בתרחיש עסקים כרגיל
לשם חישוב תחזית הפליטות לשנת 2020 החלטנו להתבסס על המתודולוגיה של אבי מושל במחקר שערך לחישוב תחזית הפליטות עד שנת 2005. הנוסחה לחישוב תחזית הפליטות במחקרו הינה:

$$\text{מספר חזוי של כלי רכב פרטיים} \times \text{נסועה ממוצעת שנתית צפויה של רכב פרטי} \times \text{מקדמי פליטה עתידיים לכל סוג רכב (בנזין/דיזל) לפי סוג מזהם} = \text{כמות הזיהום הצפויה מרכבים פרטיים בתרחיש עסקים כרגיל.}^{25}$$

להלן הגדרות המשתנים שבנוסחה:

1. מספר חזוי של כלי רכב פרטיים: השינוי בגודל צי הרכב הפרטי בישראל עד שנת 2020 (ר' סעיף 2.2.1 להלן).
2. נסועה ממוצעת שנתית צפויה של רכב פרטי – טווח נסיעה שנתי ממוצע צפוי של רכב פרטי בישראל בשנת 2020 בהתבסס על נתוני הלמ"ס משנים קודמות (ר' סעיף 2.2.2 להלן).
3. מקדמי פליטה עתידיים – ערך המניח את מסת המזהם שתיפלט בנסיעה של רכב נתון ליחידת מרחק גרם/ק"מ (ר' סעיף 2.2.3 להלן).²⁶

²¹ כהן ואחרים (2008), עמ' 1.

²² בעקבות המלצות "דוח ועדת מיסוי ירוק" מינואר 2008, שגובשו למדיניות ממשלתית ארוכת טווח ביוני השנה – נקבע כי יוטל מס קנייה על רכבים בהתאם לרמת הזיהום שתיפלט מהם. במקום מס קנייה בשיעור של 72-75% על רכב (פרטי או מסחרי, בהתאמה), יוטל מס קנייה בשיעור של 92% תוך הפחתה קצובה של המס לפי מידת ה"פרס" – הציון הירוק של הרכב. יוטל מס קנייה בשיעור מופחת לרכב משולב מנוע (היברידי) - 30%, ולרכב נטול פליטות (כגון רכב חשמלי) - 10%, למספר שנים מוגבל - הודעה לעיתונות של משרד האוצר מתאריך 8.6.09 – "מהפכת המיסוי הירוק יוצאת לדרך – רותמים את הכלכלה לטובת הסביבה".

²³ אתר המשרד להגנת הסביבה - www.sviva.gov.il.

²⁴ מדו"ח הוועדה למיסוי ירוק עולה כי ממחקרים שנערכו במספר מדינות באירופה השימוש בגפ"מ מפחית את פליטת המזהמים HC ו CO, אך מגביר את פליטת ה NOx. התוצאות אינן חד-משמעיות כיוון שרכבים המונעים בגז יעילים יותר בפליטת מזהמים אחדים בעוד שרכבי בנזין יעילים יותר בפליטת גזים אחרים. מכאן, שקשה לומר בוודאות האם בישראל מעבר לשימוש במונעים המונעים בגפ"מ ייטיב עם הסביבה ככלל ועם הציבור בפרט. נקודה נוספת הינה כלכלית: הוועדה הבין משרדית המליצה להעלות את האגרה על רכבי גפ"מ באופן מדורג עד לסכום של 1500-3000 ₪ לשנה, בהתאם לשנת הייצור ובנוסף לכך נאסרה הסבה לגפ"מ לרכבים העומדים בתקן יורו 5 (דו"ח ועדת מיסוי ירוק ינואר 2008, עמ' 52 -- 53). כמו כן, ערכת ההסבה של רכב בנזין לגפ"מ עולה כ- 8000 ₪ לערך - סכום זה עלול להוות חסם כלכלי נוסף.

²⁵ מושל, א. ושפיצר, נ. (2000), עמ' 12.

²⁶ רשימת מקדמי הפליטה מתחבורה באתר המשרד להגנת הסביבה www.sviva.gov.il.

2.2.1 גידול בצי הרכב הפרטי בישראל עד שנת 2020

לצורך חישוב הגידול בצי הרכב הפרטי בישראל עד שנת 2020 ניתן להתבסס על הערכת המדען הראשי במשרד התחבורה במחקר שערך בנושא מיזם הרכב החשמלי – הערכת המדען הראשי התבססה על מודל חיזוי לוגיסטי מבוסס משתנה מסביר יחיד (הזמן) ורמת רוויה של 550 כלי רכב פרטיים לאלף איש. מובן כי משתנה הזמן הוא גורם מתווך בלבד, המבטא שיפור בהכנסה הפנויה לנפש, גידול במספר הנהגים (שהוא גם פועל יוצא של תחלופת דורות) ועוד.²⁷ לפי הערכת המדען הראשי ללא שינויים "מהפכניים" בתחום הצמיחה והמיסוי יהיו בישראל בשנת 2020 כ- 2.75 מיליון כלי רכב פרטיים.²⁸ ללוח התפתחות צי הרכב הפרטי בשנים 1987-2007 וללוח תחזית יבוא הרכב הפרטי והגידול בצי הרכב הפרטי 2007 - 2008 ר' נספחים 3, 4.

2.2.2 השינוי בנסועה הממוצעת של רכב פרטי בישראל עד שנת 2020

לשם חישוב השינוי העתידי בנסועה הממוצעת של כלי רכב פרטיים בישראל בחנו את נתוני הלמ"ס משנים קודמות כדי לזהות מגמת שינוי. מהנתונים עולה כי בעשר השנים האחרונות ממוצע הנסועה השנתית לרכב פרטי עלה או ירד מדי שנה בכ- 100 עד 500 ק"מ, כך שלא ניתן לזהות מגמה ברורה של עלייה או ירידה - ר' נספח 5 - סקר נתוני נסועה (קילומטראז') שנתית לפי סוג רכב ראשי 2007 של הלמ"ס.²⁹ לאור הבחנה זו החלטנו, לצורך ההערכה לשנת 2020, להתייחס לנתון האחרון של הלמ"ס משנת 2007 – 16,500 ק"מ.

2.2.3 תקני יורו וחישוב מקדמי פליטה עתידיים

מקדם פליטה הינו ערך המניח את מסת המזהם שתיפלט בנסיעה של רכב נתון ליחידת מרחק – גרם/ק"מ. חישוב מקדמי הפליטה הינו חישוב מורכב הלוקח בחשבון משתנים רבים כגון: שנתון הרכב, משקל כולל של הרכב, נפח מנוע, סוג הנעה, תחזוקת הרכב, מהירות נסיעה ותנאי הדרך והסביבה (שיפועים, טמפרטורה, לחות, גובה מעל הים). המשרד להגנת הסביבה מפרסם מקדמי פליטה זמניים שמתבססים על דו"ח מעבדה של הטכניון, מקדמי פליטה בריטיים והערכות של המשרד – המקדמים האחרונים שפורסמו היו תקפים עד ל- 31.8.09 ר' נספח 6. מקדמי הפליטה שמפרסם המשרד להגנת הסביבה מתייחסים לכלל צי הרכב בארץ, דהיינו ממוצע לפי שנתונים והתאמת מקדמי הפליטה לצי הרכב הקיים כיום בישראל.³⁰

כיוון שטרם פורסמו מקדמי פליטה עדכניים לשנים הבאות, וסביר להניח כי במידה והמשרד יפרסם מקדמי פליטה עתידיים הם יתייחסו לשנים 2010-2011 ולא לשנת 2020, החלטנו להעריך את מקדמי הפליטה העתידיים על בסיס הסטייה בין רמות הפליטה המצוינות בתקני היורו הקיימים בארץ (יורו 5-1) לבין מקדמי הפליטה הזמניים של המשרד להגנת הסביבה (מקדמי הפליטה מציגים רמות פליטה גבוהות יותר מרמות הפליטה המרביות המותרות בתקני היורו בשל המשתנים הרבים שנלקחים בחשבון לחישוב המקדמים). הנחנו כי סטייה זו תישמר לאורך השנים עד שנת 2020 כלומר גם שיגיעו לארץ רכבים של יורו 6 (שנת 2014).

²⁷ הנוסחה המכילת לפי נתוני השנים 1987-2007: $MR = 550 / (1 + e^{(0.904 - 0.0344 * T)})$. כהן ואחרים (2008), עמ' 7.

²⁸ שם, עמ' 7.

²⁹ הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, סקר נתוני נסועה (קילומטראז') 2007, ירושלים, אוגוסט 2008.

³⁰ רשימת מקדמי הפליטה מתחבורה באתר המשרד להגנת הסביבה www.sviva.gov.il ושיחה מיום 31.5.09 עם אמיר זלצברג, מ"מ הממונה לזיהום אוויר מתחבורה - האגף לזיהום אוויר ושינוי אקלים – המשרד להגנת הסביבה.

קיימת בעייתיות בחישוב הסטייה מרמות הפליטה המצוינות בתקני היורו למקדמי הפליטה כיוון שמקדמי הפליטה מתבססים על ממוצע של כל השנתונים הקיימים וכוללים את המשתנים הנוספים שפורטו לעיל ואילו רמות הפליטה המותרות בתקני היורו מתייחסות לשנתון הרכב בלבד ולרכבים לא משומשים. מכאן, החלטנו להסתפק בהערכה של מ"מ הממונה לזיהום אוויר מתחבורה, אמיר זלצברג, ונשתמש בפקטור של 1.75 עבור נסיעה משולבת (בינעירונית ועירונית) - זאת אומרת שנוסיף 75% לרמות הפליטה מרכב פרטי המצוינות בתקני היורו לפי כל מזהם כדי לקבל הערכה לפליטה בפועל מרכבים פרטיים. לשם הערכה של מקדמי הפליטה העתידיים עד שנת 2020 נוסיף 75% לרמות הפליטה המצוינות בתקני יורו 5 ו- 6.³¹

על מנת להתאים את ההערכות של מקדמי הפליטה לצי הרכב הפרטי בישראל של שנת 2020 נשתמש במתודולוגיה של ד"ר חיים לוריא לחישוב מקדמי פליטה עתידיים המתבססת על ההנחה כי ההתפלגות של צי הרכב הפרטי לפי שנת ייצור הרכב בשנת 2008 תישמר גם בשנת 2020 כלומר, בשנת 2020 השנתונים ישתנו אך היחסים בין השנתונים יישמרו (באחוזים).³² לכל שנתון רכב נתאים את רמת הפליטה המרבית המותרת בתקני היורו ונוסיף 75% לרמה זו. נציין כי החלטנו להתייחס בכל שנתון של רכב רק לרמת הפליטה המותרת לרכבי בנזין כי נכון להיום רכבי הדיזל מהווים 2.8% בלבד מכלל צי הרכב הפרטי ואנו צופים כי לאור "רפורמת המיסוי הירוק" של משרד האוצר מספר רכבי הדיזל הפרטיים בישראל יפחת בהדרגה לאורך השנים, הן בשל הציון הירוק הנמוך אותו יקבלו, יחסית לרכבים אחרים וזאת למרות היעילות האנרגטית שלהם, והן בשל הסרת הפיקוח על מחיר הסולר - מה שהופך את השימוש ברכב ליקר יותר.³³

2.3 סיכום ביניים

בפרק זה הוצגה המתודולוגיה לחישוב תחזית הפליטות מרכבים פרטיים בשנת 2020. המתודולוגיה התבססה על נוסחה במחקרו של אבי מושל ועל המתודולוגיה של ד"ר חיים לוריא לחישוב מקדמי פליטה עתידיים. כיוון שאין בנמצא מחקרים בהם חושבה תחזית הפליטות מרכבים בישראל לשנת 2020 מצאנו לנכון לעשות התאמות לאחד ממשתני הנוסחה ובזה חידוש ותרומת הפרק. נסכם ונמנה את הנתונים שנאספו:

1. מספר עתידי של כלי רכב – בשנת 2020 יהיו בישראל כ- 2.75 מיליון כלי רכב פרטיים - הערכת המדען הראשי במשרד התחבורה.³⁴
2. נסועה עתידית של אותו סוג רכב – 16,500 ק"מ בהתבסס על נתוני הלמ"ס לשנת 2007.
3. מקדם פליטה עתידי - התאמת תקן היורו ורמת הפליטה לפי סוג מזהם לכל שנתון של רכב והוספת פקטור של 1.75 - 75% עבור נסיעה משולבת (עירונית ובינעירונית) לרמת הפליטה שנקבעה בתקן היורו.

³¹ שיחה מיום 2.6.09 עם אמיר זלצברג, מ"מ הממונה לזיהום אוויר מתחבורה - האגף לזיהום אוויר ושינוי אקלים - המשרד להגנת הסביבה.

³² לוריא, ח. (2009). מצגת: פיתוח מתודולוגיה לחישוב מקדמי פליטה לצי רכב ישראלי. לשם שפר איכות סביבה בע"מ - ועדת מקדמי פליטה. התפלגות צי הרכב הפרטי לפי שנת ייצור בשנת 2008 על בסיס נתוני הלמ"ס והתפלגות צפויה של צי הרכב הפרטי לפי שנת ייצור בשנת 2020 מוצגת בנספח 7.

³³ שמיל, ד. (6.1.09) "המיסוי הירוק יכחיד את הדיזל בישראל", דה מרקר.

³⁴ כהן ואחרים (2008), עמ' 8.

נציב אותם בנוסחה שהוצגה בסעיף 2.2 :

1. נחשב את התפלגות צי הרכב הפרטי בשנת 2020 = כמות הרכבים בכל שנתון עד שנת 2020 על בסיס התפלגות צי הרכב הפרטי בשנת 2008 : $X\%$ מתוך 2.75 מיליון רכבים.
2. נכפיל את כמות הרכבים בכל שנתון בנסועה הממוצעת לרכב - 16,500 ק"מ, וברמת הפליטה המתאימה לכל שנתון לכל מזהם לפי תקני היורו (כל תקן יורו תקף ל - 4-5 שנים ולכן מתייחס למספר שנתונים) ובהתאם לתוספת של 75% לרמת פליטה זו = תחזית פליטות מרכבים פרטיים בכל שנתון רכב פר מזהם.
3. נחבר את תחזית הפליטות של כל השנתונים כדי לקבל את רמות הפליטה מרכבים פרטיים בשנת 2020.

מספר חזוי של כלי הרכב הפרטיים: 2.75 מיליון X

נסועה ממוצעת שנתית צפויה של רכב פרטי: 16,500 ק"מ X

מקדמי פליטה עתידיים לכל סוג רכב (בנזין/דיזל) לפי סוג מזהם: נתון שצריך לחשב עפ"י המתודולוגיה שהוצגה בסעיף 2.2.3 לעיל (נתייחס רק לרכבי בנזין) =

כמות הזיהום הצפויה מרכבים פרטיים בתרחיש עסקים כרגיל

בפרק הבא ניתן הערכה להיקף החדירה של הרכב החשמלי אל שוק הרכב הפרטי בישראל עד שנת 2020 ונציג מתודולוגיה לחיזוי הגידול השנתי בזיהום כתוצאה מייצור החשמל, ולחיזוי ההפחתה הצפויה בזיהום האוויר הנפלט מרכבים מונעי בנזין, בתרחיש חדירת הרכבים החשמליים לישראל, בשנת 2020.

3. תרחיש מעבר לרכבים חשמליים

מטרתו של פרק זה היא לבחון את תרחיש חדירת רכבים חשמליים אל שוק הרכב הפרטי בישראל. לשם כך נסקור תחילה את המשתנים הנדרשים לצורך הערכה של היקף החדירה של הרכבים החשמליים עד שנת 2020: היקף הנסועה הממוצע בישראל- והשלכותיו על נוחות השימוש ברכב החשמלי, עמדות הציבור, עלויות ומיסוי והשוואה להערכות נוספות שנערכו לגבי המיזם או מיזמים מסוג זה. ננסה לגבש הערכה ראשונית על בסיס הנתונים הקיימים כיום לגבי המשתנים הנ"ל. לאחר מכן נציג נוסחאות לחיזוי הגידול השנתי בזיהום כתוצאה מייצור החשמל, וכן לחיזוי ההפחתה הצפויה בזיהום האוויר הנפלט מרכבים מונעי בנזין, בתרחיש חדירת הרכבים החשמליים לישראל, לשנת 2020.

3.1 המשתנים להערכת היקף החדירה של הרכב החשמלי אל שוק הרכב הפרטי

אי-הוודאות לגבי עלות ייצור הרכב והסוללה, לגבי הענות הציבור ולגבי התפתחויות רלוונטיות נוספות, דורשת לקחת בחשבון מספר תרחישים לגבי הפרמטרים השונים. להלן הפרמטרים שנלקחו בחשבון.

3.1.1. היקף הנסועה הממוצע בישראל

דו"ח ההיבטים התחבורתיים של מיזם הרכב החשמלי בישראל, שנערך ע"י המדען הראשי של משרד התחבורה מתבסס על נתוני שנת 2006 על מנת לחשב כמה פעמים בשבוע בממוצע יצטרך הרכב החשמלי להחליף או להטעין סוללה.³⁵ לשם הרציפות בעבודתינו, נשתמש בנתוני 2007: כפי שהוצג בפרק 2, הנסועה הממוצעת של רכב פרטי בישראל בשנה זו הייתה 16,500 ק"מ והחציון היה 10,000 ק"מ (ראהנספח 8), ובהתאמה- 317 ו-192 ק"מ שבועיים.

על-פי יזמי הפרויקט, כותב דו"ח משרד התחבורה, טווח הנסיעה של סוללה מלאה נע בין 120-160 ק"מ, מה שמצריך את טעינת או החלפת הסוללה לאחר כ- 100-120 ק"מ נסיעה. בהתחשב בנתוני הנסועה הממוצעת לשנת 2007, אשר נראה כי יהיו רלוונטיים גם לשנים הבאות³⁶, רכב פרטי בישראל ייאלץ להחליף או לטעון סוללה 2-3 פעמים בממוצע מדי שבוע. בתנאים אלו ניתן להניח שהרכב החשמלי לא יוכל לשמש כתחליף לרכב פרטי המאופיין בשימוש אינטנסיבי והיקף נסועה גדול. נראה כי פוטנציאל הרכב החשמלי כתחליף לרכב פרטי הוא בעיקר עבור רכבים בפרופיל הבא:

1. רכב הנוסע עד 12,000 ק"מ בשנה (כ- 24.8% מן הרכבים הפרטיים בשנת 2006)³⁷, כך שיזדקק להטענה או החלפת סוללה בתכיפות של לא יותר מפעמיים בשבוע. סקר העדפות מוצהרות שנערך לגבי פרויקט הרכב החשמלי בקליפורניה מאשר הנחה זו, כאשר הראה כי טווחי הנסיעה הינם משמעותיים בבחירת רכב אלטרנטיבי.³⁸
2. רכב שני או יותר במשק הבית (לכ-16.3% ממשקי הבית שתי מכוניות ויותר).³⁹ הסקר בקליפורניה מאשר הנחה זו, כאשר הראה כי משקי בית עם רכב אחד מעדיפים רכב בנזין או דיזל⁴⁰.

³⁵ כהן ואחרים (2008), עמ' 9-8.

³⁶ שכך כפי שהצגנו בפרק 2- אין מגמה ברורה של עלייה או ירידה משמעותית מדי שנה בהיקף הנסועה הממוצעת בישראל.

³⁷ שם, עמ' 9

³⁸ כהן ואחרים (2008), עמ' 31.

³⁹ אלפנדר, י., דופז, ל. ושמשי, י., בעלות על מוצרים בני קיימה, סקר הוצאות משק הבית 2006 סיכומים כלליים, ירושלים, דצמבר 2007

⁴⁰ כהן ואחרים (2008), עמ' 31.

3. רכב המשמש לנסיעות בתחומים עירוניים ופרבריים בעיקר. לפי נתוני הלמ"ס, סך הנסועה של רכבים ממונעים בשנת 2007 היה 44,996 מיליון ק"מ (מתוכם רכבים פרטיים 28,595 מיליון ק"מ).⁴¹ סך הנסועה הלא-עירונית בשנה זו היה 27,540 מיליון ק"מ,⁴² כלומר 61.2% מסך הנסועה. חסרים נתונים לגבי חלקם היחסי של הרכבים הפרטיים בהיקף הנסועה השנתית בדרכים בין-עירוניות, וכן נתונים לגבי ההתפלגות הפנימית בקרב הרכבים הפרטיים לפי שימושים עיקריים- לנסועה עירונית ובינעירונית.

חתך זה מצמצם במידה ניכרת את המאגר הפוטנציאלי של רכבים פרטיים המתאימים להחלפה ברכבים חשמליים. בהתאם לפרופיל שהוצג, יש להשלים את הנתונים החסרים על מנת לחשב את היקפו של מאגר זה, וכן יש לעקוב אחר תוכניות היזמים באשר לתשתית טעינת הסוללות, אשר יעילותה ורמת השירות שלה תשפיע על נוחות הטעינה ותרחיב בהתאם את המאגר שהוצג לעיל.

3.1.2. עמדות הציבור

עד כה אף אחת מן ההערכות לגבי היקף החדירה של הרכב החשמלי בארץ אינן נשענות על סקר עמדות ציבור הרוכשים הפוטנציאלי. דו"ח המדען הראשי של משרד התחבורה מציין כי היזמים ראינו מנהלי ציי רכב בנושא, והם עורכים בהווה סקר בקרב הציבור הרחב, אולם פרטי הסקר אינם מתפרסמים ובשל האופי המסחרי של הנושא נראה שתוצאותיו גם לא ימסרו למשרד התחבורה לכשיתקבלו. על כן, מומלץ יהיה לערוך סקר עצמאי.

דוגמא לסקר כזה נוכל למצוא בקליפורניה. חידוש מאמצי הפיתוח של כלי רכב חשמליים ממניעים סביבתיים צבר תאוצה משמעותית ראשונה בקליפורניה, בעקבות חקיקת הממשל נגד זיהום אוויר מכלי רכב. ב-1996, Institute of Transport Studies, UCI, פותח מודל בחירת רכב אשר התבסס על סקר העדפות מוצהרות (SP) בקרב 4,747 משקי בית בקליפורניה. מטרת המחקר הייתה לבצע תחזיות שנתיות של ביקוש לכלי רכב לפי סוג הרכב ואזור גיאוגרפי.⁴³ במחקר נוסף באותה השנה, פותח מודל ביקוש של ציי רכב לכלי רכב אלטרנטיביים בקליפורניה.⁴⁴ יש לציין כי בפועל, התחזיות לא התממשו בשל התפתחויות פוליטיות ומשפטיות כפי שנפרט בהמשך (ר' סעיף 3.1.4.3), וכי כל כלי הרכב החשמליים שנמכרו לבסוף נלקחו חזרה על-ידי היצרנים ורובם הושמדו.

ניתן לבנות סקר ביקוש לכלי רכב אלטרנטיביים בהתבסס על זה שנערך בקליפורניה, תוך התאמת המשתנים לתנאי הארץ. השאלון המקורי (ראה נספח 9) מציג שלושה פרופילים של רכבים אלטרנטיביים: חשמלי, מונע גז ומתנול. הסקר שייערך בארץ יציג את שתי האלטרנטיבות הקיימות כיום בארץ- רכב מונע גפ"מ והיברידי, בתוספת הרכב החשמלי. הנסקרים יתבקשו להצהיר האם היו רוכשים מה מבין שלושת סוגי הרכבים, האם הרכב הנבחר היה נרכש כתחליף לרכבם הנוכחי או בנוסף לו, ואיזה סוג רכב בבעלותם כיום. גיבוש ההעדפה המוצהרת ייעשה בהתאם לפרופיל שיפורט לגבי כל אחת מן האלטרנטיבות.

הפרופיל יכלול נתונים לגבי: טווח הנסיעה הממוצע לכל טעינה או תדלוק, מחיר רכישה ממוצע, עלות האנרגיה המשוערת לק"מ בתחנות השירות, זמן האצה, מהירות מירבית, פליטה ישירה, סוגי רכבים מוצעים (מכונית, משאית או טנדר), גודל הרכב וגודל חלל המטען.

⁴¹ הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, סקר נתוני נסועה (קילומטראזי) 2007, ירושלים, אוגוסט 2008, לוח 1

⁴² הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, ספירות תנועה בדרכים לא-עירוניות 2002-2008, ירושלים, מרס 2009, עמ' 18

⁴³ Brownstone, Bunch, Golob and Ren, 1996 בתוך כהן ואחרים (2008), עמ' 30-32.

⁴⁴ Golob, Torous, Bradley, Brownstone, Crane and Bunch, 1996, שם

כמו כן הפרופיל יכול נתונים אשר בשלב זה אינם ידועים: משך טעינה ביתית ועלות אנרגיה לק"מ בטעינה ביתית (לא ידוע עדיין באיזה היקף תתאפשר טעינה ביתית), משך טעינה בתחנות השרות (תלוי תשתיות והאפשרות להחלפת סוללה), נגישות לתחנות השרות (תלוי תשתיות).

לסיכום, יש להמתין להתפתחויות נוספות של המיזם על מנת להשלים את הנתונים החסרים, שהינם משמעותיים לדעתנו לשם גיבוש העדפה מוצהרת, ולערוך את הסקר באופן שאינו תלוי ביזמי הפרויקט.

3.1.3. עלויות ומיסוי

שיעור החדירה של הרכב החשמלי יוכתב בפועל במידה רבה על-פי מחירו למשתמשים ביחס לחלופת הרכב מונע הבנזין. על הרכב להיות לכל הפחות זול במקצת למשתמש מבחינת עלויות הרכישה והשימוש. עלות השימוש כוללת: עלות הון (עקב רכישת הרכב), תחזוקת הרכב, ביטוחים ואגרות, ודלק (בנזין או חשמל- בהנחה ש-90% מטעינת הסוללות תעשה בלילה בתעריף הזול של תעו"ז). ברכב החשמלי נוספת עלות השימוש בסוללה (אשר בבעלות היזמים ועבורה יגבו דמי שימוש) ועלות השימוש בתשתית אספקת החשמל (המגולמות בהתאם לעלויות הקמת ותחזוקת התשתיות בתוספת 10% רווח ליזמים).

בעוד עלויות השימוש ברכבי הבנזין ידועות, ישנם סימני שאלה משמעותיים באשר לחלק מעלויות הרכב החשמלי. בהתאם לכך ערך הדו"ח של משרד התחבורה את התחשיב לגביהן במספר תרחישים לגבי המשתתפים הבאים:

1. חדירה בין 5% ל-10% מצי הרכב הפרטי, המשפיעה על עלות התשתית בממוצע לרכב.
2. מחיר סוללה בין 50 ל-100 אלף ש"ח: העלות הנוכחית ליצרן של סוללת הליתיום היא כ-120,000 ש"ח. ההערכה היא כי בשלב הייצור ההמוני קיים פוטנציאל להפחתה משמעותית ביותר. עלויות הסוללה יאמדו בשתי רמות: האחת 40,000 ש"ח ובתוספת ביטוח ומע"מ 50,000 ש"ח, והשנייה במחיר כפול של 100,000 ש"ח. יש להדגיש שזו העלות ליצרן. מהמשתמש יגבה מחיר באמצעות דמי שימוש שיכללו רווח ליזמים של 10% על השקעתם.
3. מס קנייה על הרכב החשמלי בין 10% עד שנת 2014 ו-30% משנת 2015 עד שנת 2019.⁴⁵

לאחר ניתוח מחיר הרכב החשמלי יחסית לרכב מונע הבנזין הצפוי בתרחישים שונים, מעריך דו"ח המדען הראשי של משרד התחבורה את המשתתפים העיקריים שישפיעו על סיכויי החדירה של הרכב החשמלי לשוק הרכב הפרטי בארץ, כדלקמן:

1. ללא הוזלה משמעותית של מחיר ייצור הסוללה עד לכדי 50,000 ש"ח, אשר תהפוך את הרכב החשמלי לזול במעט מן הרכב הקונבנציונאלי, אין סיכויי לחדירה משמעותית של הרכב החשמלי, גם בתרחיש בו מחיר חבית נפט יוכפל ריאלי. בתנאים אלה גם לא תמצא כדאיות להקמת מערך ארצי לאספקת חשמל לרכב החשמלי.⁴⁶ בהערכה אופטימית של הוזלת מחיר הסוללה, הרכב החשמלי יהיה זול מעט לצרכן ביחס לרכב מונע בנזין, וקיימת סבירות שיוכל להגיע לנתח שוק של 10% ויותר מכלל הרכב הפרטי עד 2020. השיעור ימשיך לגדול לאחר 2020 ועשוי להגיע ל-15%.

⁴⁵ בהתאם למתווה הועדה למיסוי ירוק

⁴⁶ יש לציין כי גם אם תוזל הסוללה, הרכב החשמלי יהיה יקר יותר למשק הלאומי, מבלי להתחשב ביתרונותיו החיצוניים.

2. אם אכן תצומצם העדפת המס של הרכב החשמלי ב- 2015, עפ"י מתווה הוועדה למיסוי ירוק, מעריך דו"ח משרד התחבורה ששיעור החדירה המצטבר עד 2020 יצטמצם לכ- 7.5% וישאר קבוע לאחר 2020.

3. כאמור- ירידה בשיעורי החדירה של הרכב החשמלי יגדילו את עלות כיסוי התשתיות הממוצעת לרכב, ובכך עלולה להשפיע בחזרה על שיעור החדירה.

אם כן, על מנת להעריך את העלויות הצפויות של רכב חשמלי בהשוואה לרכב בנזין, יש לעקוב אחר ההתפתחויות בתחום ייצור הסוללה ובנושא מדיניות מיסוי הנסיעה ברכב חשמלי.

3.1.4. השוואה להערכות נוספות

להלן סקירה של מספר הערכות מוקדמות שנערכו לגבי מיזם הרכב החשמלי בארץ או לגבי מיזמים דומים בחו"ל.

1. בדו"ח המסכם שפרסמה הוועדה למיסוי ירוק בינואר 2008⁴⁷ העריכה הוועדה שמשקל הרכב החשמלי מתנספות הרכב הפרטי השנתיות בארץ יעלה בהדרגה עד ל- 15% ב- 2015 ואילך. לפי קצב זה חלקו של הרכב החשמלי מכלל הפרטי ב- 2020 יהיה 8.5%.

2. הערכת המדען הראשי של משרד התחבורה משנת 2008 היא, כי חלקו של הרכב החשמלי מכלל הפרטי ב- 2020 יהיה 15%-8.5%⁴⁸.

3. הערכת פרויקט הרכב החשמלי בקליפורניה: ההערכות בקליפורניה נשענו על סקרי עמדות מפורטים של הציבור. תחזיות המחקר לגבי קצב החדירה של רכב חשמלי לשנת 2010 נעו בין 5%-2.6%. בפועל, כאמור, נכשל הפרוייקט, בעקבות הלחץ הפוליטי שהפעילו חברות הדלק ויצרניות הרכב אשר טענו כי ייצור הרכב החשמלי לא יהיה כדאי בעשור הקרוב. הוגשו אף תביעות משפטיות כנגד חוק ה-ZEV, אשר חוקק הממשל ב-1990 וחייב את 7 יצרניות הרכב הגדולות למכור 2% רכבים בסטנדרט Zero Emission Vehicle עד 1998, ו- 10% עד 2003. באפריל 2003 בוטל לבסוף החוק, וכל הרכבים החשמליים שנמכרו עד כה נלקחו על-ידי היצרנים.⁴⁹ ואולם, תנאי הפתיחה לשיווק הרכב החשמלי בארץ טובים מאלו ששררו בקליפורניה בשנות ה-90: פיתוח סוללות הליתיום, הארכה משמעותית של אורך חייהן והוזלתן, התייקרות הבנזין והסולר, חוסר הוודאות לגבי עתודות הנפט וכן האינטרס המקומי בהפחתת התלות בו. בנוסף יש לציין את העדפת המס הייחודית לצרכנים בארץ ברכישת רכב חשמלי, בשל המס הגבוה המוטל על כלי הרכב המתחרים שאינו קיים בארה"ב. גם היערכות המיזם הישראלי להשקעה נרחבת בתשתית אספקת החשמל לרכבים משפרת את סיכויו. על כן, סביר יהיה שטווח הערכות חדירת הרכב החשמלי יהיו גבוהות מאלו של קליפורניה.

3.1.5 מסקנות להמשך העבודה

נסכם את הצעדים שיש לבצע במהלך המחקר לגבי כל אחד מהמשתנים שהוצגו לעיל, על מנת לקבל הערכה מדויקת יותר של היקף החדירה של הרכב החשמלי עד שנת 2020:

⁴⁷ דו"ח הוועדה הבין-משרדית ל"מיסוי ירוק", משרד האוצר, משרד התחבורה והבטיחות בדרכים, משרד התשתיות, המשרד לאיכות הסביבה, ינואר 2008
⁴⁸ כהן ואחרים (2008)
⁴⁹ כהן ואחרים (2008), עמ' 33-35.

א. בשל גורם טעינת הסוללות התכופה הנדרשת, יש לחשב את המאגר הפוטנציאלי של רכבים פרטיים המתאימים להחלפה ברכבים חשמליים בהתאם לפרופיל שהוצג- רכב שני או יותר במשק הבית, הנוסף חות מ-12,000 ק"מ בשנה בממוצע, משמש בעיקר לנסיעות עירוניות ופרבריות. כמו כן יש לעקוב אחר תוכניות היזמים באשר לתשתית טעינת הסוללות אשר ישפיעו על תנאי הטעינה.

ב. מבחינת עמדות הצרכנים, יש לבחון את נכונות הציבור לרכוש רכב חשמלי באמצעות עריכת סקר צרכנים בלתי תלוי, בדומה לזה שנערך בקליפורניה (ר' נספח 9), בהתאמה לתנאים בארץ.

ג. מבחינת העלויות, יש להמשיך ולעקוב אחר ההתפתחויות בתחום ייצור הסוללה, אשר ישפיעו במידה ניכרת על עלויות הרכב החשמלי בהשוואה לרכב הקונבנציונאלי. כמו כן יש לעקוב אחר ההתפתחויות בנושא מדיניות מיסוי הנסיעה ברכב חשמלי.

בשל המחסור החלקי בנתונים הקיימים ולצורך המשך תחשיבי העבודה בשלב זה, בחרנו להשתמש להלן ברמת חדירה של 10% כהערכת ביניים, בהתבסס על הערכת טווח החדירה של המדען הראשי במשרד התחבורה. יש לציין כי בהמשך ניתן יהיה להציב גם הערכה שונה, במידה ותתברר במהלך המחקר ועם התפתחות המיזם.

3.2 גידול בפליטות מיצור חשמל והפחתה בפליטות מכלי רכב רגילים בתרחיש מעבר לרכבים חשמליים

משסקרנו את שני התרחישים- תרחיש "עסקים כרגיל" ותרחיש המעבר לרכבים חשמליים, ומשהצגנו את השיטות לאיסוף הנתונים, נוכל להציע נוסחה לחיזוי השינוי ברמות הזיהום האוויר.

3.2.1 חיזוי ההפחתה בפליטות מכלי רכב רגילים

<p>ההפחתה בכמות הרכבים הפרטיים כתוצאה מהמעבר לרכבים חשמליים</p>	X	<p>כמות הזיהום הצפויה מרכבים פרטיים בתרחיש "עסקים כרגיל", לפי סוגי מזהמים, טונות</p>	=	<p>סך ההפחתה בזיהום השנתי הנפלט מצי הרכבים מונעי הבנזין בשנת 2020, לפי סוגי מזהמים, טונות.</p>
10%, הערכת הביניים בפרק 3.1		מתודולוגיה הוצגה בפרק 2		

לשם השגת התוצאות יש לחשב את מקדמי הפליטה העתידיים של רכבים רגילים לשנת 2020, על-פי המתודולוגיה שהוצגה בפרק "תרחיש עסקים כרגיל".

3.2.2 חיזוי הגידול בייצור החשמל והשפעתו על רמות זיהום האוויר

ראשית, נחשב כמה כלי רכב חשמליים יהיו בישראל בשנת 2020:

<p>מספר כלי הרכב הפרטיים החזוי לשנת 2020</p>	X	<p>אחוז חזוי של כלי רכב חשמליים מסך כלי הרכב הפרטיים בשנת 2020</p>	=	<p>מספר חזוי של כלי הרכב החשמליים בישראל בשנת 2020</p>
עפ"י ההערכה שהצגנו בפרק 2 (תרחיש עסקים כרגיל): 2.75 מיליון		עפ"י ההערכה שהוצגה בפרק 3.1 (תרחיש מעבר לרכבים חשמליים): 10%		275 אלף

כעת נחשב מה תהיה צריכת החשמל השנתית הממוצעת של רכב חשמלי:

<p>צריכת החשמל של רכב חשמלי לק"מ נסיעה, בממוצע, קוט"ש</p>	X	<p>היקף נסועה שנתית ממוצעת של כלי רכב בישראל, ק"מ</p>	=	<p>צריכת החשמל השנתית הממוצעת של רכב חשמלי בישראל, מגה-ואט שעה</p>
---	---	---	---	--

17 צריכת החשמל הידועה היא 0.22 קוט"ש, על-פי דו"ח משרד התחבורה

16,500, כפי שהצגנו בפרק 3.1.1

3.36 מגה-ואט שעה

על-פי הנתונים הנ"ל נוכל לחשב מה תהיה צריכת החשמל השנתית הממוצעת של כלל הרכבים החשמליים בישראל בשנת 2020:

מספר חזוי של כלי הרכב החשמליים בישראל בשנת 2020	X	צריכת החשמל השנתית הממוצעת של רכב חשמלי בישראל, מגה-ואט שעה	=	סך התוספת השנתית לייצור החשמל בישראל בשנת 2020 כתוצאה מהמעבר, מגה-ואט שעה
275 אלף		3.36 מגה-ואט שעה		924 אלף מגה-ואט שעה

אז נתרגם את נתוני התוספת השנתית לייצור החשמל, בשנת 2020, לשינויים הצפויים ברמות הזיהום (ראה סעיף 4.3):

סך התוספת לייצור החשמל בישראל בשנת 2020 כתוצאה מהמעבר, מגה-ואט שעה	X	פליטת מזהמים לפי סוגים מתחנות הכוח בישראל, ק"ג למגה-ואט שעה	=	סך התוספת לזיהום שייפלט מתחנות הכוח בשנת 2020 לפי סוגי מזהמים, טונות.
924 אלף מגה-ואט שעה		יוצג בפרק 4		

3.2.3 סיכום ביניים

את המתודולוגיה לחישוב כמות הזיהום הצפויה מרכבים פרטיים בשנת 2020 בתרחיש "עסקים כרגיל" הצגנו בפרק השני. לשם השגת התוצאות יש לבצע את המחקר המוצע, כך שבשלב זה לא נגיע לנתוני סך ההפחתה בזיהום השנתי הנפלט מרכבים מונעי בנזין, בתרחיש מעבר לרכבים חשמליים.

בפרק הבא נסקור את הגזים הנפלטים הן מרכבים מונעי בנזין והן מתחנות הכוח של חברת החשמל, נשווה ביניהם ונעמוד על משמעויותיהן הבריאותיות. לאחר הצגה של פליטת המזהמים, לפי סוגים, מתחנות הכוח בישראל, נוכל לחשב את סך תוספת הזיהום מייצור החשמל בשנת 2020 בתרחיש המעבר לרכבים חשמליים.

4. פליטות מזהמי אוויר מרכבים ומחברת החשמל

מטרת פרק זה היא להבין את המשמעות של סוגי הגזים השונים הנפלטים מתחנות הכוח של חברת החשמל ומכלי הרכב השונים. לימוד סוגי המזהמים על מקורותיהם השונים והשפעותיהם הבריאותיות יתנו לנו תמונה רחבה ומלאה של משמעות והשלכות המעבר לכלי רכב חשמליים. בפרק זה תיערך השוואה בין סוגי הגזים השונים ובין מקורות הפליטה וכך נוכל לראות אילו מזהמים יופחתו ממקור אחד ויתוספו במקור אחר. בסופו נוכל לשער את מידת ההשפעה הסביבתית של חדירת הרכב החשמלי.

4.1 פירוט הגזים, החשיפה ומשמעות הפגיעה הבריאותית

בחלק זה נציג בפירוט את סוגי המזהמים העיקריים.⁵⁰ הפירוט יעשה לפי תת חלוקה בה קודם כל יוצגו המזהמים המאפיינים כלי רכב בלבד, אח"כ אלו המשותפים הנפלטים מכלי רכב ומתחנות הכוח.

4.1.1 המזהמים הנפלטים מכלי רכב

פחמן חד חמצני: תוצר לוואי של שריפה בלתי מושלמת של הדלק. שאיפת פחמן חד חמצני מקטינה באופן משמעותי את יכולת נשיאת החמצן בדם. אוכלוסיות רגישות במיוחד הן נשים בהריון, קשישים וחולים במחלות כרוניות בשנים האחרונות פחתו ריכוזי הפחמן החד חמצני באוויר כתוצאה משיפור הדלקים, משיפור מערכת השריפה במנועי כלי הרכב ומכניסתם לשימוש של ממירים קטליטיים.

פחמימנים: (Hydrocarbons) היא קבוצה של תרכובות כימיות הבנויות מאטומי מימן ופחמן. תרכובות אלה מהוות מרכיב בדלקים. מירב הפחמימנים מקורם בפליטות כלי רכב ממנועי בנזין. השפעות משמעותיות על הבריאות מתעוררות לאחר חשיפה לריכוזים גבוהים ויכולות להיות ארוכות טווח. וקשורות למקרים של סרטן.

עופרת: מתכת כבדה ורעילה, המוגדרת כחומר מסרטן. המקור העיקרי לעופרת הוא כלי רכב. פליטת העופרת בדלק ירדה בשנים האחרונות בעשרות אחוזים וצפויה לרדת עוד עם הפסקת השימוש בתוספים על בסיס עופרת בדלק. נשים בהריון, תינוקות וילדים הם האוכלוסייה הרגישה ביותר.

4.1.2 המזהמים הנפלטים מכלי רכב ומתחנות הכוח של חברת החשמל

גפרית דו חמצנית: תרכובת גזית הנוצרת מחמצן וגופרית. המקור העיקרי הוא שריפת דלקים פוסיליים כגון: פחם ודלק. שריפת דלקים אלה יוצרת גם חומרים מוצקים אחרים בצורת חלקיקים ולכן גופרית דו-חמצנית נמצאת לעתים קרובות בצרוף עם חלקיקים. היא מהווה גם סמן מקדים להיווצרותם של חלקיקים חומציים, המתבטאים כגשם חומצי. ההשפעה העיקרית על הבריאות היא בקרב קבוצות סיכון להשפעת מזהמים, כמו אסמתיים. קשה מאד להעריך את ההשפעה של גופרית דו-חמצנית על הבריאות מפני שזו נוטה להופיע באוויר הפתוח בשילוב עם מזהמים נוספים כגון חלקיקים ואוזון.

חומר חלקיקי: אבק מרחף או חלקיקים, המכיל בעיקר פחמן, אפר, חול, אבק, פיח ועפר הנישא ברוח, מתכות, אבקנים. ריכוזי החלקיקים נוטים להיות גבוהים במיוחד באזורים תעשייתיים ובאזורים צפופי תחבורה. מקורו בעיקר מפליטות מכלי רכב, עשן מארובות ביתיות ותעשייתיות, שרפות, כרייה, בנייה, מקורות טבעיים כמו סופות חול, חלקיקים עדינים מופיעים באטמוספירה גם בצורת אירוסולים. ההשפעות הרחבות באות לידי ביטוי בשיעור וגירוי של קנה הנשימה ושל העיניים וכן פגיעה בחילוף החומרים בריאות.

⁵⁰ מתוך רשימת מזהמי אוויר נפוצים, המשרד להגנת הסביבה <http://www.sviva.gov.il>

תחמוצות חנקן: גז חום אדמדם הנראה בערפיח שמעל המטרופולינים. חד תחמוצת החנקן (NO) נפלט מתחבורה ומתעשייה כתוצאה מחמצון חנקן אטמוספרי. דו תחמוצת החנקן ($2NO$) יכול להפוך לחומצה חנקתית ($3HNO$), אשר יחד עם חומצה גופרתית, גורמים לגשם חומצי. תחמוצות אלו פוגעות בדרכי הנשימה, גורמות לגירוי בריאות ובעיניים ומקטינות את עמידות הגוף בפני חיידקים. **תחמוצות חנקן ואוזון** - חנקן דו-חמצני ממלא גם תפקיד מרכזי בייצורו של הגז המזהם אוזון ומזהמים פוטוכימיים אחרים. כמו כן, חשיפה מוקדמת לחנקן דו-חמצני מגבירה את חומרת התגובות בחשיפה לגז האוזון. **תחמוצות חנקן וחלקיקים** - באוויר הפתוח הופך חלק מהמזהם חנקן דו-חמצני לארוסולים עדינים של חנקן.

אוזון: $3O$. גז רעיל בעל ריח חריף, חסר צבע ומורכב משלושה אטומי חמצן. נפוץ הבלבול בין אוזון 'טוב' ואוזון 'רע'. האוזון ה'טוב' הוא שכבת האוזון הסטרטוספירית המהווה מגן טבעי מפני חדירת קרינה אולטרא סגולה (UV) שמקורה בשמש, לשכבות נמוכות של האטמוספירה ולפני כדור הארץ. האוזון ה'רע' נוצר על ידי פעילות של קרינת השמש על תרכובות כימיות שהן תוצר של תהליכי שריפה, בעיקר פחמימנים ותחמוצות חנקן הנפלטות מכלי רכב. בשל כך הוא נחשב למזהם שניוני. האוזון גורם לגירוי ניכר בעיניים ובאף, פוגע בתפקוד תקין של הראות. חשיפה ארוכת טווח גורמת לפגיעה בחלקים העדינים ביותר בדרכי הנשימה ולמעבר חמצן. בנוסף, פוחתת יכולת ההגנה של הריאות מפני פולשים זרים.

4.2 השוואת סוגי הגזים הנפלטות לפי מקור הפליטה

לצורך הערכת משמעות חדירת הרכב החשמלי וההשלכות הבריאות של חדירה זו נערוך השוואה בין סוגי הגזים השונים הנפלטות מכלי הרכב לבין אלו מתחנות הכוח של חברת החשמל.

4.2.1 סוגי הגזים הנפלטות מרכבים פרטיים

עבור כלי רכב התייחסנו ל 6 גזים המרכיבים את סה"כ הפליטות (הטבלה מבוססת על נתוני הלמ"ס- ר' נספחים 10-13). הנתונים הינם נתונים שנתיים עבור שנת 2007 ועבור כלי רכב פרטיים בלבד.

הגז	סימן	סה"כ ביחידות של אלפי טונות
פחמימנים	HC	16.417
פחמן חד חמצני	CO	164.902
תחמוצות חנקן	NOX	11.352
אבק מרחף	SPM	0.381
תחמוצות גפרית*	SOX	חסרים נתונים
עופרת*	PB	חסרים נתונים

* הנתונים החסרים לגבי גפרית דו חמצנית ועופרת פורסמו בטבלאות אחרות, המפרטות פליטות לפי סוגי יצרן ובתוכם רכבי בנזין אך ללא פרוט והפרדה של רכבים פרטיים מתוך סה"כ רכבי הבנזין.

4.2.2 סוגי הגזים הנפלטות מתחנות הכוח של חברת החשמל לישראל

מתוך "דין וחשבון סביבתי לשנת 2007" של חברת החשמל, עולה התייחסות וניטור של הרכב גזים ומזהמים שונים כפי שנמדדו מארובות תחנות הכוח (ר' נספח 15). נתונים אחרים המסופקים ע"י חברת החשמל הינם נתוני הפליטות לאוויר לפי גרם לקילוואט שעה מיוצר (ר' נספח 16). נתונים אלו המוצגים בטבלה להלן, יהוו בסיס לחישוב העלייה ברמת הזיהום שיפלט מחברת החשמל.

הגז	הסימן	גרם לקילוואט שעה מיוצר	סה"כ ביח' של אלפי טונות
גופרית דו חמצנית	SO2	1.9	99.8
תחמוצות חנקן	NOX	1.9	104.3
אבק מרחף	SPM10	0.07	3.81
דו תחמוצת הפחמן	CO2	776	41,512
אוזון	O3	חסרים נתונים	חסרים נתונים

4.2.3 סיכום נתוני השוואה

מנתונים ראשוניים אלו עולה שישנם גזים ייחודיים לפליטה מכלי רכב: הפחמימנים, הפחמן החד חמצני והעופרת (לגבי העופרת חסרים הנתונים ויש לקחת בחשבון שיתכן ושינוי מרכיבי הדלקים בשוק יפחית את מרכיב העופרת בזיהום באופן משמעותי). מכאן שהפחתה בכלי הרכב פרטיים מונעי בנוזין תביא להפחתה בגזים האלו. הגזים הנפלטים גם מכלי הרכב וגם מארובות חברת החשמל הם תחמוצות חנקן, תחמוצות גפרית וחומר חלקיקי. המזהמים הנפלטים בייצור החשמל בלבד הם דו תחמוצת הפחמן⁵¹ והאוזון. מכאן שהפחתה בפליטות מרכבים מונעי בנוזין ומעבר לשימוש ברכבים חשמליים יביאו לעליה בפליטות מזהמים אלו.

הטבלה שלהלן מסכמת את מקורות הזיהום והגזים הנפלטים מהם:

הגז	כלי רכב	חברת החשמל
NOX תחמוצות חנקן	+	+
SPM חלקיקים	+	+
SO2 גפרית דו חמצנית	+ - נתון חסר	+
HC פחמימנים	+	-
CO פחמן חד חמצני	+	-
CO2 פחמן דו חמצני	*** נתון חסר	+
PB עופרת	+	-
O3 אוזון	+ נתון חסר	+ נתון חסר

4.3 העלייה הצפויה בפליטות מתחנות הכוח

בסעיף 3.2.2 חישבנו את סך התוספת לייצור החשמל בישראל בשנת 2020, כתוצאה מהמעבר לרכבים חשמליים, והצענו כיצד לחשב את תוספת הפליטות בתחנות הכוח. בתת פרק זה נבדוק את העלייה הצפויה בפליטות מתחנות הכוח כתוצאה מהמעבר לרכבים חשמליים, לפי מזהמים, תוך התייחסות למדיניות השיפור בהפחתת הפליטות של חברת החשמל.

4.3.1 מדיניות שיפור בהפחתת הפליטות לאוויר מארובות חברת החשמל

מדירוג המפעלים המזהמים ביותר שערך המשרד להגנת הסביבה עולה כי חברת החשמל היא המזהמת העיקרית בין המפעלים בישראל. שתי תחנות הכוח הגדולות בחדרה ובאשקלון תרמו יחד בשנת 2007 כ-65% מכלל הפליטות של תחמוצות גופרית וכ-60% מכלל הפליטות של תחמוצות חנקן. מתוך מסמכי חברת

⁵¹ יש לציין שפליטה זו נחשבת כפליטת גז חממה ואינה ברשימת מזהמי האוויר הנפוצים לפי החוק האמריקאי

החשמל⁵² עולה שהמודעות לפליטות מזהמות מביאה באופן מתמיד לניסיונות לשפר את מצב הפליטות ורמת זיהום האוויר שבעקבותיהן. מתוך המדיניות המוצהרת בחרנו לציין כאן רק מה שמובא כנתון מספרי אותו אפשר יהיה לקחת בחשבון או להעריך על פיו ולהכלילו בתוך כלל נוסחאות החישוב לצפי הזיהום.

- **תמהיל הדלקים:** הגז הטבעי נחשב לדלק "ירוק" ונקי יותר, והוא תורם לגיוון מקורות האנרגיה עליהם מסתמכת מדינת ישראל. צירופו של הגז הטבעי לסל הדלקים מאפשר לחברת החשמל להגדיל את כושר ייצור החשמל, תוך הפחתה משמעותית ברמת פליטות המזהמים לסוגיהם, הנוצרים בתהליך ייצור החשמל. עם כניסתו של הגז הטבעי לתמהיל הדלקים, ישמשו שני סוגי דלק ראשיים לייצור חשמל במדינת ישראל. על פי תוכנית הפיתוח, בתוך עשור יכסה הגז הטבעי כ-60% מכושר הייצור המותקן של חברת החשמל, והפחם, לו תפקיד חיוני ביותר כדלק לייצור הבסיס במשק החשמל - יכסה כ-40% מכושר הייצור המותקן.
- **צמצום פליטת גפרית דו חמצנית:** סולקנים שיוקמו באתר "אורות רבין" יביאו לצמצום נוסף בפליטת גופרית דו-חמצנית (SO₂) ויתרמו לשיפור איכות האוויר. סולקנים יותקנו באתר "אורות רבין" בחדרה, לו כושר ייצור חשמל של כ- 2,500 מגוואט, המהווים כ-22% מסך ייצור החשמל בישראל. בשלב הראשון, תתקין החברה סולקנים לקליטת גופרית דו-חמצנית בשתי יחידות ייצור מתוך 6. הסולקן יפחית כ- 90% מהגופרית הדו-חמצנית הנוצרת ביחידה אחת. פליטות הגופרית הדו-חמצנית תפחת ב- 34% באתר אורות רבין.

4.3.2. חישוב העלייה הצפויה בזיהום שייפלט מתחנות הכוח כתוצאה מהמעבר לרכבים חשמליים

בהתבסס על הנתונים שהוצגו בפרק זה ובפרקים הקודמים, נוכל להשלים את הנתונים לגבי התוספת לזיהום שייפלט מתחנות הכוח בתרחיש "מעבר לרכבים חשמליים", על-פי הנוסחה שהוצגה בפרק 3.2.2:

סך התוספת לזיהום שייפלט מתחנות הכוח בשנת 2020 לפי סוגי מזהמים, טונות	=	סך התוספת לייצור החשמל בישראל בשנת 2020 כתוצאה מהמעבר לרכבים חשמליים, מגה-ואט שעה	X	פליטה מתחנות הכוח בישראל, ק"ג למגה-ואט שעה מיוצר	הגז המזהם
1755.6		924 אלף (ראה פרק 3.2)		1.9	SO ₂
1755.6				1.9	NOX
64.68				0.07	SPM10, SPM2.5
717,024				776	CO ₂

לסיכום תת פרק זה, יש לשים לב ולסייג תחשיב זה בהקשר של מדיניות חברת החשמל להפחתת הפליטות מארובות: שינוי בתמהיל הדלקים והתקנת סולקנים להפחתת פליטת הגופרית הדו חמצנית.

4.4 ניתוח ממצאים

מעבר לשימוש ברכבים חשמליים יוביל לתוצאות הבאות:

1. הפחתה ישירה בזיהום פחמן חד חמצני, פחמימנים ועופרת.

⁵² שמואלי, ש. ובולטיאנסקי, ו. (מאי 2008) הדו"ח השנתי לשנת 2007, סיכום ממצאי ניטור איכות האוויר מתחנות הניטור של חברת החשמל. חיפה.

2. הפחתה בכמות האבק החלקיקי, העופרת, תחמוצות החנקן ותחמוצות הגפרית בתוך ריכוזי האוכלוסייה הגבוהים במרכזי הערים. עליה של אלו בפליטה מארובות תחנות הכוח.
3. עליה בפליטת אוזון ודו תחמוצת הפחמן מארובות תחנות הכח של חברת החשמל.

4.5 הסתייגויות לניתוח הממצאים

בבחינת הממצאים יש לקחת בחשבון את הגורמים המשפיעים על ריכוזי מזהמי האוויר בסביבה:⁵³

- קצב פליטת המזהמים
- מיקום הארובה וגובהה.
- קצב סילוק או יצירה של מזהמי האוויר באטמוספירה בתהליכים כימיים. ריאקציות כימיות תלויות, כמובן, בטמפרטורה ובריכוז המזהמים, וכן גם בלחות וברמת הקרינה. באופן זה התהליכים הכימיים תלויים, בעקיפין גם במיקום גיאוגרפי, בעונת השנה ובכיסוי העננים.
- תהליכים פיזיקאליים כגון שקיעה רטובה או יבשה. גורמים נוספים שישפיעו על הריכוזים הם אופן הפיזור, המיחול וההסעה של המזהמים באטמוספירה. גורמים אלה תלויים בפרמטרים מטאורולוגיים ואטמוספריים שונים כגון מצב היציבות האטמוספרי, כיוון ומהירות הרוח ומקדמי הדיפוזיה באטמוספירה.
- השפעתם של מספר כה רב של גורמים על ריכוז המזהמים באטמוספירה גורם לכך שהם משתנים במקום ובזמן בצורה מסובכת.

נובע מכך כי תרומת מקורות הפליטה השונים לרמת החשיפה בפועל של האוכלוסייה למזהמי האוויר אינה בהכרח בהתאם לחלקם בסך הפליטות.

המשמעות של הפחתת הגזים הנפלטים על ידי כלי הרכב אינה רק באותם גזים ספציפיים המצוינים לעיל שיופחתו. הגזים מכלי הרכב נפלטים בתוך מרחב עירוני צפוף, באופן ישיר, בגובה ובתנאים בהם הם מזיקים ביותר. צירוף המזהמים, כמו שתואר לעיל, בסיטואציה האורבאנית והצפופה טמונה סכנה גדולה. העברת הפליטות, גם אם הן פליטות של אותו הגז ממש, לארובות חברת החשמל נראית על פניו העברת זיהום ממקום למקום אך את הסוגיה יש לבחון לאור העובדה שזיהום מארובות מתפזר באופן שונה ומגיע לאוכלוסייה כאשר ריכוז המזהמים נמוך בהרבה יותר. כמו כן יש לקחת בחשבון התפתחות טכנולוגיות עתידיות כגון קולטנים וממירים המותקנים בארובות וכד.⁵⁴

4.6 סיכום הפרק

בפרק זה סקרנו את מזהמי האוויר ואת ההשפעות הבריאותיות שלהם, תוך הבחנה בין אלו הנפלטים מרכבים לבין אלו מתחנות הכח. הראנו את כמות הזיהום הנפלטת מרכבים ביחידות של אלפי טון וכמות הזיהום מתחנות הכח ביחידות של אלפי טון וביחידות של גרם מזהם לקילוואט שעה מיוצר. את הנתונים הקיימים והחסרים הצגנו בטבלה מסכמת. בהמשך הפרק התייחסנו לעליה הצפויה בפליטות חברת חשמל והצגנו חישוב מספרי לעליה הצפויה בזיהום שיפלט כתוצאה מהמעבר לרכב חשמלי. ניתחנו נתונים מספריים אלו והצגנו הסתייגויות לניתוח הממצאים.

⁵³ אתר המשרד להגנת הסביבה <http://www.sviva.gov.il>

⁵⁴ אין בידנו כרגע נתון מדויק לגבי הערכת הפחתה בזיהום מארובות תחנות הכוח של חברת החשמל.

5. סיכום

מיזם הרכב החשמלי מקבל עידוד ממקבלי החלטות מדיניים ונכון להיום מסתמן כחלופה "ירוקה" עם פוטנציאל היישום הגבוה ביותר בישראל. טרם נעשה מחקר לבחינת השפעת המיזם על זיהום האוויר בישראל ובזאת תרומתו וחידושו של המחקר המוצע. לשם ביצוע המחקר הצענו לבחון את מצאי הפליטות העתידי מרכבים פרטיים בישראל ומאורבות חברת החשמל בשנת 2020, כתוצאה מהמעבר לשימוש ברכבים חשמליים: הפחתה בפליטות מזהמים מרכבי בנזין פרטיים למול עלייה בפליטות מזהמים מאורבות, כתוצאה מהעלייה בייצור החשמל, תוך השוואת המזהמים הנפלטים מרכבים ומאורבות וכמות הזיהום שתיפלט מכל מקור.

לחישוב ההפחתה בפליטות מרכבים פרטיים הצענו:

- לחשב את תחזית הפליטות מרכבי בנזין פרטיים לפי מזהמים בשנת 2020 בתרחיש עסקים כרגיל. נתונים שנאספו: גידול בצי הרכב הפרטי ונסועה ממוצעת שנתית לרכב פרטי. נתונים שיש לחשב: מקדמי פליטה עתידיים וסה"כ פליטות מרכבים בשנת 2020.
- להעריך את היקף החדירה של רכבים חשמליים לישראל, בתרחיש מעבר לרכבים חשמליים. נתונים שיש להשלים: מאגר הרכבים הפוטנציאליים להחלפה, סקר ביקוש צרכנים ועלות הסוללה בייצור המוני. בהתבסס על הנתונים החלקיים הקיימים, הוצגה הערכת ביניים.
- לחשב את השינוי החזוי בפליטות מרכבים בתרחיש עסקים כרגיל כתוצאה מהמעבר לשימוש ברכבים חשמליים. נתונים שחושבו: מספר חזוי של רכבים חשמליים בשנת 2020. נתונים שיש לחשב: הפחתה מסה"כ הפליטות מרכבים בשנת 2020 בתרחיש עסקים כרגיל.

לחישוב העלייה בפליטות מזהמים מאורבות חברת החשמל, כתוצאה מהעלייה בייצור החשמל, תוך השוואת סוגי מזהמים וכמות הזיהום שתיפלט מרכבים ומאורבות הצענו:

- לחשב את העלייה בייצור החשמל כתוצאה ממעבר לרכבים חשמליים. להכפיל את סך התוספת השנתית לייצור החשמל בישראל בשנת 2020, כתוצאה מהמעבר לרכבים חשמליים, בכמות המזהמים הנפלטים מתחנות הכוח בישראל (ק"ג למגה-ואט שעה מיוצר). חושב.
- לסקור את סוגי המזהמים הנפלטים מכל מקור פליטה ולבחון את השפעתם הבריאותית ואת המשמעות של הגידול ו/או הפחתה בפליטות מזהמים אלו, להשוות בין כמות וסוגי הפליטה שתופחת מרכבים פרטיים למול כמות הפליטה שתתווסף לאורבות החשמל. נתונים שנאספו: פירוט סוגי המזהמים לפי מקור פליטה והשפעות בריאותיות. נתונים חסרים: לגבי כלי רכב נתוני פליטת גופרית, אוזון ופחמן דו חמצני, לגבי תחנות הכוח נתוני פליטת אוזון.

לאחר בחינת הממצאים הראשוניים הצענו לקחת בחשבון במחקר עתידי את הגורמים המשפיעים על ריכוזי מזהמי האוויר השונים בסביבה, וכן את הפיתרונות הטכנולוגיים שחברת החשמל מצהירה להתקין

בעתיד בארובות החשמל, כגון קולטנים וממירים. מספר נקודות נוספות שיש לתת עליהן את הדעת, על מנת להגיע להבנה שלמה יותר של מלוא המשמעויות מן המעבר לרכבים חשמליים:

- יש להשוות את התפרוסת המרחבית הצפויה של הזיהום עפ"י תרחיש עסקים כרגיל לתפרוסת המרחבית הצפויה של הזיהום בעקבות חדירת הרכב החשמלי. השוואה כזו תצביע על העברת זיהום ממרכז הערים לפריפריה. השינוי המרחבי שיגרם בתפרוסת הזיהום מעלה שאלה של צדק סביבתי. ככל הנראה, תושבים באזורים מסוימים בפריפריה יסבלו מזיהום אויר שמקורו בתחבורה עירונית. כלומר, תושבי העיר ייהנו מאויר נקי יותר במחיר סבלם של תושבי פריפריה מסוימים. מבחינתם של תושבי פריפריה כאלה המעבר לרכב חשמלי לא יהיה ידידותי לסביבה כלל. יתכן כי תפרוסת הזיהום החדשה שתיוצר תהיה יעילה יותר מבחינה זו שכמות האוכלוסייה שתיחשף לזיהום תהיה קטנה יותר. עם זאת, השאלה האם שינוי כזה בתפרוסת הזיהום הוא שינוי צודק ראוי לניתוח אתי ולדיון ציבורי. נציע לאפיין את מדדי פיזור המזהמים באוויר.

- הרכב החשמלי לא ישפר את בעיית פליטת גזי החממה אלא יגביר אותה. חדירת הרכב החשמלי תעלה באופן משמעותי פליטות אלו. יש לתת את הדעת לנתונים אלו בייחוד לאור מעמדה של ישראל מול דרישות הקהילה האירופאית והבין לאומית.

- החלפת רכב מונע בדלקים פוסיליים ברכב חשמלי לא תגרע מכמות הרכבים הפרטיים בישראל אשר נמצאת בעלייה מתמדת. המהלך לא יספק פיתרון לבעיות עומסי תנועה, בעיות חניה ותאונות הדרכים, על כל ההשלכות החברתיות והכלכליות הכרוכות בכך.

- למרות הנקודות הקודמות, תדמית הרכב החשמלי כ"ידידותי לסביבה" עלולה ליצור תחושה בקרב הציבור ומקבלי ההחלטות כי ייפתרו מרבית בעיותינו. מדיניות ההשקעה בתשתית הכבישים על חשבון שיפור התחבורה הציבורית בישראל תלך ותקבל לגיטימציה נוספת, אלא אם כן יורחב המחקר בתחום ויובא למודעות הציבור.

לאור התקדמות מיזם הרכב החשמלי בישראל, ההשקעה בתשתיות והתמיכה הממשלתית לה הוא זוכה, חשיבות המחקר המוצע טמונה בחלוציות שלו ובאי-תלותו בגורמים המעורבים בנושא בשל אופיו המסחרי. כפי שהצענו לעיל, ממצאיו יכולים ונדרשים להוות נקודת מוצא להמשך המחקר על השפעות עידוד מיזם הרכב החשמלי בישראל.

ביבליוגרפיה

- אלפנדרי, י., דופז, ל. ושמשיין, י., (דצמבר 2007) בעלות על מוצרים בני קיימה, סקר הוצאות משק הבית 2006 סיכומים כלליים, ירושלים.
- גולדשמיט, ר. (8.6.09) טכנולוגיות להפחתת זיהום אוויר מכלי רכב וכלי המדיניות הננקטים ליישומן - מוגש לוועדת המדע והטכנולוגיה. במרכז המחקר והמידע של הכנסת:
<http://www.knesset.gov.il/committees/heb/material/data/mada2009-06-09.doc>
- כהן, י., טויסטר, ג. ושראבי, נ. (2008). מיזם הרכב החשמלי בישראל – ישימות והשלכות תחבורתיות אפשריות. המדען הראשי במשרד התחבורה.
- לוריא, ח. (2009). מצגת - פיתוח מתודולוגיה לחישוב מקדמי פליטה לצי רכב ישראלי. לשם שפר איכות סביבה בע"מ - ועדת מקדמי פליטה.
- מושל, א. ושפיצר, נ. (2000). גיבוש יעדי הפחתה לאומיים לצמצום זיהום האוויר מתחבורה. המשרד להגנת הסביבה – אגף איכות אוויר.
- ענבר, י. (אפריל 2004), מצגת - הפחתת זיהום אוויר מתחבורה. המשרד להגנת הסביבה. באתר מוסד שמואל נאמן: <ftp://ftp.sni.technion.ac.il/events/transport/Yosi-Inbar.pdf>
- שמואלי, ש. ובולטיאנסקי, ו. (מאי 2008) הדו"ח השנתי לשנת 2007, סיכום ממצאי ניטור איכות האוויר מתחנות הניטור של חברת החשמל. חיפה.
- שראבי, נ. (2008). רכב חשמלי- הנסיון, טכנולוגיה ומגמות בעולם, סקר ספרות, נספח לדו"ח המדען הראשי במשרד התחבורה.
- דו"ח הוועדה הבין-משרדית "מיסוי ירוק" (ינואר 2008) משרד האוצר, משרד התחבורה והבטיחות בדרכים, משרד התשתיות, המשרד לאיכות הסביבה.
- הודעה לעיתונות של משרד האוצר מתאריך 8.6.09 – "מהפכת המיסוי הירוק יוצאת לדרך – רותמים את הכלכלה לטובת הסביבה".
- הודעה לעיתונות של לשכת שר התשתיות הלאומיות מיום 10.12.08 - "השר בן אליעזר: להשלים את הרגולציה שתאפשר הטענה מבוקרת של הרכבים החשמליים".

עיתונות

- ביידר, ש. (11.5.09) "מהפך בשוק הרכב היפני - ההונדה אינסייט ההיברידי היא הרכב הנמכר ביותר בחודש אפריל" אתר גלובס.
- שמיל, ד. (6.1.09) "המיסוי הירוק יכחיד את הדיזל בישראל", אתר דה מרקר.

אתרי אינטרנט

- אתר משרד התחבורה - www.mot.gov.il
- אתר המשרד להגנת הסביבה - www.sviva.gov.il

www.cbs.gov.il - אתר הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה

<http://www.mof.gov.il> - אתר משרד האוצר

<http://www.mni.gov.il> - אתר משרד התשתיות

<http://www.israel-electric.co.il> - אתר חברת החשמל

"דיזלנט", אתר המכיל מידע על מנועי דיזל ועל פליטות ממנועי דיזל - www.dieselnet.com

סוג רכב /מנוע	מספר כלי רכב	%
בנזין	1,764,130	96.89
סולר	50,735	2.79
גפ"מ	3,337	0.18
היברידי	2,608	0.14
סה"כ	1,820,810	100.00

נספח 2: טבלת רמות פליטה מותרות לכל מזהם – חלוקה לפי מספר יורו ולפי מנוע בנזין/דיזל.⁵⁶

Table 1
EU Emission Standards for Passenger Cars (Category M₁*), g/km

Tier	Date	CO	HC	HC+NOx	NOx	PM
Diesel						
Euro 1†	1992.07	2.72 (3.16)	-	0.97 (1.13)	-	0.14 (0.18)
Euro 2, IDI	1996.01	1.0	-	0.7	-	0.08
Euro 2, DI	1996.01 ^a	1.0	-	0.9	-	0.10
Euro 3	2000.01	0.64	-	0.56	0.50	0.05
Euro 4	2005.01	0.50	-	0.30	0.25	0.025
Euro 5	2009.09 ^b	0.50	-	0.23	0.18	0.005 ^e
Euro 6	2014.09	0.50	-	0.17	0.08	0.005 ^e
Petrol (Gasoline)						
Euro 1†	1992.07	2.72 (3.16)	-	0.97 (1.13)	-	-
Euro 2	1996.01	2.2	-	0.5	-	-
Euro 3	2000.01	2.30	0.20	-	0.15	-
Euro 4	2005.01	1.0	0.10	-	0.08	-
Euro 5	2009.09 ^b	1.0	0.10 ^c	-	0.06	0.005 ^{d,e}
Euro 6	2014.09	1.0	0.10 ^c	-	0.06	0.005 ^{d,e}

* At the Euro 1..4 stages, passenger vehicles > 2,500 kg were type approved as Category M₂ vehicles
 † Values in brackets are conformity of production (COP) limits
 a - until 1999.09.30 (after that date DI engines must meet the IDI limits)
 b - 2011.01 for all models
 c - and NMHC = 0.068 g/km
 d - applicable only to vehicles using DI engines
 e - proposed to be changed to 0.003 g/km using the PMP measurement procedure

מקור הטבלה: דיזלנט, אתר מקצועי בנושא רכבי דיזל. הטבלה מתבססת על דירקטיבות אירופיות.

חלוקות פנימיות בטבלה: בין רכבים מונעי דיזל לבין רכבים מונעי בנזין, בין תקני היורו לפי שנת התוקף ובין סוגי המזהמים שנפלטים - לכל מזהם ניתנת רמת פליטה מירבית מותרת בכל תקן יורו במנוע דיזל ובנזין. ניתן לראות כי אין שינוי ברמות הפליטה המירביות המותרות בין יורו 5 ליורו 6 - ניתן להסיק כי יצרני רכבי הבנזין לא יידרשו לשיפורים נוספים עד שנת 2019 (כל תקן יורו תקף ל 4-5 שנים).

⁵⁵ כהן ואחרים (2008), עמ' 1.

⁵⁶ <http://www.dieselnat.com/standards/eu/ld.php>

לוח 3 - התפתחות צי הרכב הפרטי ורמת המינוע של רכב פרטי בישראל בשנים 1987-2007

שנה	רכב פרטי (אלפים) *	תוספת (נטו) רכב פרטי (אלפים)	אוכלוסייה (סוף שנה, אלפים)	רמת מינוע (כלי רכב פרטיים לאלף נפש)	הגידול השנתי ברמת המינוע (כלי רכב)
1987	701.1		4,407	159.1	
1988	759.4	58.3	4,477	169.6	10.5
1989	783.3	23.9	4,560	171.8	2.2
1990	810.6	27.3	4,822	168.1	-3.7
1991	858.2	47.6	5,059	169.6	1.5
1992	933.5	75.3	5,196	179.7	10.0
1993	997.7	64.2	5,328	187.3	7.6
1994	1,058.8	61.2	5,472	193.5	6.3
1995	1,124.7	65.9	5,612	200.4	6.9
1996	1,189.8	65.1	5,758	206.6	6.2
1997	1,244.0	54.2	5,900	210.9	4.2
1998	1,289.8	45.7	6,041	213.5	2.6
1999	1,333.8	44.1	6,209	214.8	1.3
2000	1,413.8	79.9	6,369	222.0	7.1
2001	1,477.0	63.2	6,509	226.9	5.0
2002	1,513.7	36.7	6,631	228.3	1.3
2003	1,543.0	29.3	6,748	228.6	0.4
2004	1,594.2	51.2	6,870	232.1	3.4
2005	1,655.5	61.3	6,991	236.8	4.7
2006	1,712.9	57.4	7,117	240.7	3.9
2007	1,796.2	83.3	7,242	248.0	7.3
סה"כ לתקופה	1,095.0				88.9

* צי הרכב הפרטי - ע"פ נתוני אגף מערכות מידע במשרד התחבורה, יש הבדלים קלים בין מידע זה לבין נתוני הלמ"ס.

לוח 4 - תחזית יבוא הרכב הפרטי והגידול בצי הרכב הפרטי 2008-2020 (באלפים)

שנה	צי רכב פרטי בהתחלת השנה	יבוא כולל	גריעה	תוספת נטו	צי רכב פרטי בסוף השנה
2007					1,796
2008	1,796	170	95	74	1,871
2009	1,871	163	99	64	1,935
2010	1,935	168	103	66	2,001
2011	2,001	173	106	67	2,068
2012	2,068	179	110	69	2,137
2013	2,137	184	113	71	2,208
2014	2,208	189	117	72	2,280
2015	2,280	195	121	74	2,354
2016	2,354	200	125	76	2,430
2017	2,430	206	129	77	2,507
2018	2,507	212	133	79	2,586
2019	2,586	218	137	81	2,666
2020	2,666	224	141	82	2,748

⁵⁷ כהן ואחרים (2008), עמ' 7

⁵⁸ כהן ואחרים (2008), עמ' 8

נסועה (קילומטראז') שנתית לפי סוג רכב ראשי⁶¹

2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	1999	1998	יחידה	סוג רכב
44,596	43,242	41,729	39,869	38,944	37,960	37,658	36,482	34,963	34,075	מיליון ק"מ	סך כולל ⁶¹
20.2	20.2	20.1	19.8	19.8	19.6	20.1	20.5	20.5	20.7	אלף ק"מ	סך הכל ממוצע לרכב
28,595	27,063	26,436	24,683	24,423	23,815	24,006	22,800	21,702	21,300	מיליון ק"מ	כלי רכב פרטי
16.5	16.3	16.6	16.0	16.2	16.1	16.8	16.8	16.8	17.0	אלף ק"מ	סך הכל ממוצע לרכב
12,292	12,293	11,489	11,119	10,832	10,383	10,279	10,216	9,915	9,375	מיליון ק"מ	משאית
34.5	34.8	33.0	32.6	32.2	31.4	32.3	33.9	34.5	33.7	אלף ק"מ	סך כולל ממוצע לרכב
1,790	1,975	1,994	2,253	2,225	2,427	2,838	3,390	3,882	4,060	מיליון ק"מ	משאית בדרך סך הכל

נספח 6: מקדמי פליטה זמניים של המשרד להגנת הסביבה⁶⁰

אגף איכות אוויר ושינוי אקלים

מקדמי פליטה זמניים 01/04/2009 - 31/08/2009 (פליטה של גרם מזהם לקילומטר נסיעה אלא אם כן מצוין אחרת)

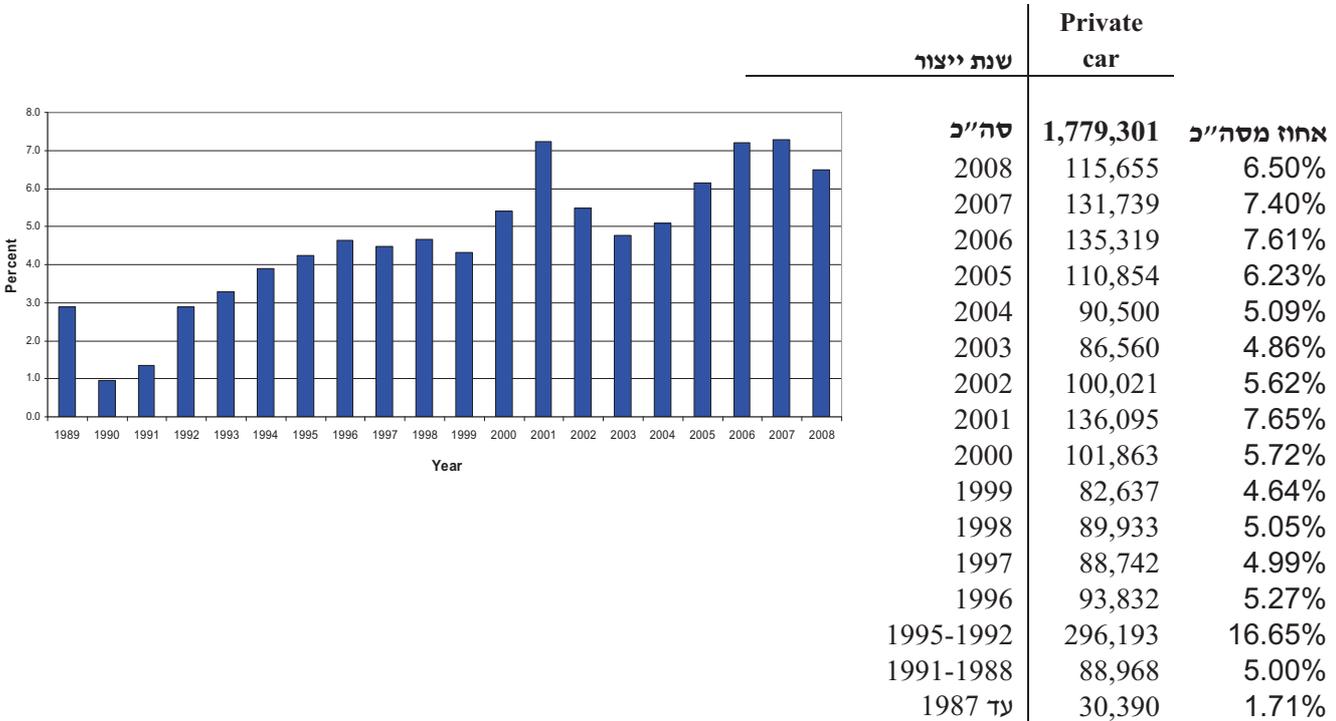
100	90	80	70	60	50	40	30	20	15	10	0(g/s)	מזהם	סוג רכב/מהירות
0.4351	0.3974	0.3663	0.3410	0.3217	0.3087	0.3035	0.3069	0.3193	0.3284	0.3403	0.00153	NOx	פרטי
0.0032	0.0030	0.0029	0.0028	0.0028	0.0028	0.0029	0.0030	0.0032	0.0033	0.0034	0.00003	PM2.5	
0.6746	0.6173	0.5835	0.5695	0.5739	0.5969	0.6419	0.7167	0.8424	0.9430	1.0979	0.00522	NOx	מונית
0.0440	0.0376	0.0327	0.0294	0.0278	0.0278	0.0293	0.0325	0.0373	0.0403	0.0438	0.00065	PM2.5	
1.1410	1.0238	0.9442	0.9016	0.8966	0.9290	0.9989	1.1059	1.2509	1.3408	1.4287	0.00526	NOx	טנדר (משאית עד 4 טון)
0.0875	0.0673	0.0521	0.0421	0.0368	0.0360	0.0406	0.0500	0.0648	0.0737	0.0841	0.00064	PM2.5	
1.1189	0.9912	0.9080	0.8693	0.8752	0.9256	1.0208	1.1603	1.3453	1.4541	1.5737	0.00557	NOx	מיניבוס (אוטובוס זעיר)
0.1068	0.0825	0.0641	0.0518	0.0454	0.0445	0.0500	0.0613	0.0790	0.0898	0.1022	0.00830	PM2.5	
3.3545	3.3545	3.2934	3.2205	3.1949	3.2414	3.4089	3.8005	4.6642	5.4778	6.9238	0.02004	NOx	משאית (יותר מ-4 טון)
0.0634	0.0634	0.0632	0.0642	0.0673	0.0734	0.0843	0.1038	0.1409	0.1733	0.2241	0.00191	PM2.5	
4.8793	4.8793	4.8793	4.9907	5.2616	5.6458	6.2644	7.4044	9.8173	12.1022	15.9997	0.03529	NOx	אוטובוס
0.1142	0.1142	0.1142	0.1167	0.1241	0.1368	0.1591	0.1994	0.2745	0.3371	0.4336	0.00471	PM2.5	
0.3901	0.3516	0.3138	0.2785	0.2465	0.2181	0.1941	0.1763	0.1682	0.1696	0.1760	0.00109	NOx	אופנוע
0.0713	0.0713	0.0713	0.0713	0.0713	0.0713	0.0713	0.0713	0.0713	0.0713	0.0713	0.00069	PM2.5	

⁶⁰ מקדמי הפליטה וההנחיות נכתבו בסיוע ד"ר חיים לוריא והגב' ענת שרטר

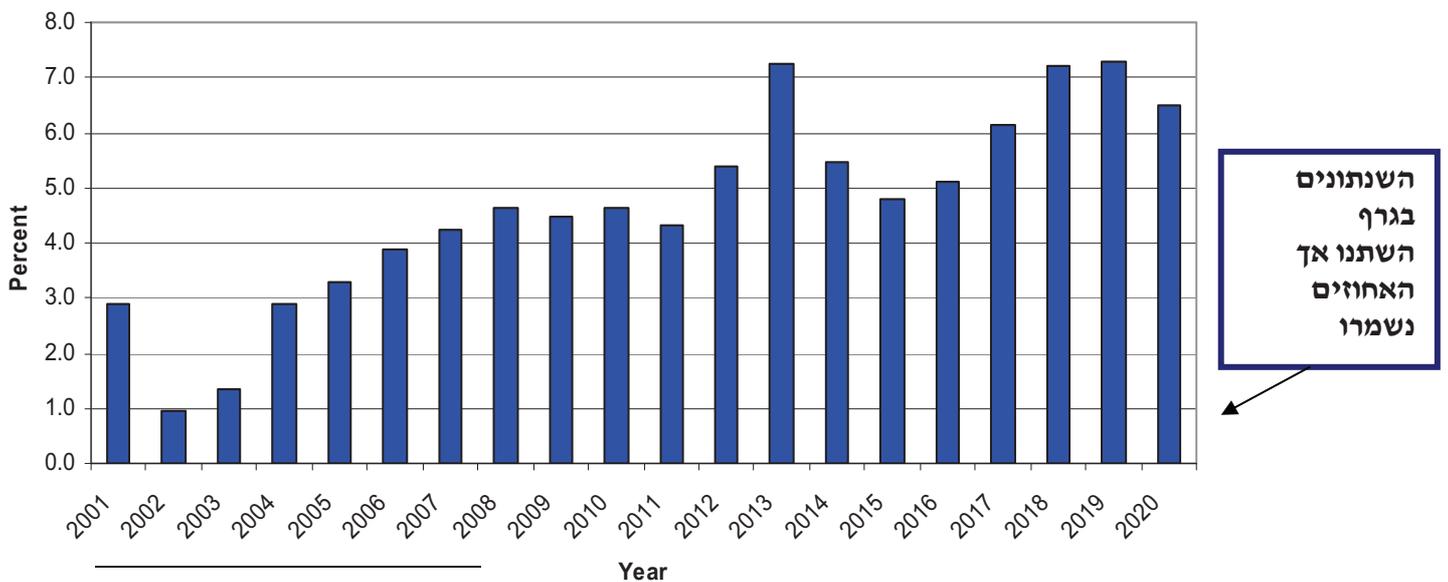
⁵⁹ הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, סקר נתוני נסועה (קילומטראז') 2007, ירושלים, אוגוסט 2008, לוח 4.
⁶⁰ אתר המשרד להגנת הסביבה - www.sviva.gov.il

נספח 7: התפלגות צי הרכב הפרטי לפי שנת ייצור רכב בשנת 2020 על בסיס ההתפלגות של שנת 2008

א. התפלגות כלי רכב מנועיים לפי סוג ושנת ייצור, טבלה מעובדת של נתוני הלמ"ס לשנת 2008⁶¹



ב. התפלגות צפויה של צי הרכב הפרטי לפי שנת ייצור בשנת 2020 על בסיס נתוני 2008



⁶¹ הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, כלי רכב מנועיים לפי סוג ושנת ייצור - 2008.

משאית בנדזין		כלי רכב פרטי		
2007	2006	2007	2006	
581	544	10,124	9,149	כלי רכב במדגם
אחוזים				
100.0	100.0	100.0	100.0	נסועה שנתית לרכב (אלפי ק"מ)
4.8	5.1	6.5	6.2	עד 5.9
7.6	7.5	13.2	14.9	6.0-9.9
37.9	34.2	50.2	50.4	10.0-17.9
21.7	18.4	16.2	16.2	18.0-23.9
12.0	14.0	6.8	5.7	24.0-29.9
16.0	20.8	7.1	6.6	30.0 +
אלפי ק"מ				
17.0	18.8	10.0	12.0	חציון
20.0	20.0	10.0	12.0	שכיח
21.2	21.9	16.5	16.3	ממוצע לכלי רכב
קילומטרים				
8.9	9.0	10.5	10.6	ממוצע לליטר דלק

⁶²הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, סקר נתוני נסועה (קילומטראזי) 2007, ירושלים, אוגוסט 2008, לוח 4

Vehicle Choice Survey Question			
Suppose that you were considering purchasing a vehicle and the following three vehicles were available: (assume that gasoline costs \$1.20 per gallon)			
	Vehicle A	Vehicle B	Vehicle C
Fuel Type	Electric Runs on electricity only.	Natural Gas (CNG) Runs on CNG only.	Methanol Can also run on gasoline.
Vehicle Range	80 miles	120 miles on CNG	300 miles on methanol
Purchase Price	\$21,000 (includes home charge unit)	\$19,000 (includes home refueling unit)	\$23,000
Home Refueling Time	8 hrs for full charge (80 miles)	2 hrs to fill empty tank (120 miles)	Not Available
Home Refueling Fuel Cost	2 cents per mile (50 MPG gasoline equiv.) for recharging between 6 pm and 10 am 10 cents per mile (10 MPG gasoline equiv.) for recharging between 10 am and 6 pm	4 cents per mile (25 MPG gasoline equiv.)	
Service Station Refueling Time	10 min. for full charge (80 mi.)	10 min. to fill empty CNG tank (120 mi.)	6 min. to fill empty tank (300 mi.)
Service Station Fuel Cost	10 cents per mile (10 MPG gasoline equiv.)	4 cents per mile (25 MPG gasoline equiv.)	4 cents per mile (25 MPG gasoline equiv.)
Service Station Availability	1 recharge station for every 10 gasoline stations	1 CNG station for every 10 gasoline stations	Gasoline available at current stations
Acceleration Time to 30 mph	6 seconds	2.5 seconds	4 seconds
Top Speed	65 miles per hour	80 miles per hour	80 miles per hour
Tailpipe Emissions	'Zero' tailpipe emissions	25% of new 1993 gasoline car emissions when run on CNG	Like new 1993 gasoline cars when run on methanol
Vehicle Size	Like a compact car	Like a sub-compact car	Like a mid-size car
Body Types	Car or Truck	Car or Van	Car or Truck
Luggage Space	Like a comparable gasoline vehicle	Like a comparable gasoline vehicle	Like a comparable gasoline vehicle

1. Given these choices, which vehicle would you purchase? (please circle one choice)

- 1) Vehicle "A" (car)
- 2) Vehicle "A" (truck)
- 3) Vehicle "B" (car)
- 4) Vehicle "B" (van)
- 5) Vehicle "C" (car)
- 6) Vehicle "C" (truck)

2. Would this vehicle most likely be purchased as a replacement vehicle for your household, or as an additional vehicle?

1) Replacement 2) Additional

3. If you choose "Replacement" in Question 2, please cross off the household vehicle that would be replaced from the following list:

- 1) 1990 Ford Bronco
- 2) 1989 Toyota Camry
- 3) ...

⁶³ מתוך: שראבי, נ. (2008). רכב חשמלי- הנסיון, טכנולוגיה ומגמות בעולם, סקר ספרות, נספח לדו"ח המדען הראשי במשרד התחבורה, עמ' 55-56

נספח 10: טבלת פליטות SPM לפי סוג דלק ורכב, נתוני הלמ"ס, שנתון סטטיסטי 2007

פליטות חלקיקי אבק מרחף (SPM) משריפת דלקים בכלי רכב, לפי סוג רכב וסוג דלק

Emissions of Suspended Particulate Matter (SPM) from Fuel Combustion in Vehicles, by Type of Vehicle and Type of Fuel

Tons	שנות								
	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	
Total	1,702	1,859	2,008	2,057	2,453	2,569	2,715	2,978	סה"כ
Type of Vehicle	סוג רכב								
Trucks *	665	750	792	757	987	1,007	1,145	1,224	משאיות *
Buses	169	193	210	221	280	314	363	450	אוטובוסים
Taxis	299	345	398	481	492	508	485	522	מוניות
Minibuses	100	105	115	120	149	186	151	195	מיניבוסים
Private Cars	381	396	426	425	479	493	519	528	כלי רכב פרטיים
Motorcycles	87	70	66	73	66	63	63	58	אופנועים
Type of Fuel	סוג דלק								
Gasoline	266	271	290	312	336	363	418	466	בנזין
Diesel oil	1,436	1,588	1,719	1,746	2,116	2,206	2,297	2,512	סולר
* Including Commercial Vehicles									* כולל רכבים מסחריים

נספח 11: טבלת פליטות NOx לפי סוג דלק ורכב, נתוני הלמ"ס, שנתון סטטיסטי 2007

פליטות תחמוצות חנקן (NOx) משריפת דלקים בכלי רכב, לפי סוג רכב וסוג דלק

Emissions of Nitrogen Oxides (NOx) from Fuel Combustion in Vehicles, by Type of Vehicle and Type of Fuel

Tons	שנות								
	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	
Total	55,386	59,547	62,375	61,926	70,182	73,431	79,883	87,729	סה"כ
Type of Vehicle	סוג רכב								
Trucks *	30,668	33,136	33,699	32,832	37,260	37,612	41,420	43,641	משאיות *
Buses	9,347	9,801	10,141	10,033	11,125	11,810	12,545	15,277	אוטובוסים
Taxis	376	426	482	549	532	532	502	524	מוניות
Minibuses	3,458	3,469	3,696	3,739	4,139	4,953	3,856	4,806	מיניבוסים
Private Cars	11,352	12,571	14,219	14,626	16,990	18,396	21,431	23,362	כלי רכב פרטיים
Motorcycles	186	145	137	149	137	127	129	119	אופנועים
Type of Fuel	סוג דלק								
Gasoline	14,986	16,860	18,750	20,161	22,335	24,374	28,741	32,276	בנזין
Diesel oil	40,400	42,687	43,625	41,767	47,847	49,057	51,143	55,453	סולר
* Including Commercial Vehicles									* כולל רכבים מסחריים

נספח 12: טבלת פליטות HC לפי סוג דלק ורכב, נתוני הלמ"ס, שנתון סטטיסטי 2007

פליטות פחמימנים (HC) משריפת דלקים בכלי רכב, לפי סוג רכב וסוג דלק

Emissions of Hydrocarbons (HC) from Fuel Combustion in Vehicles, by Type of Vehicle and Type of Fuel

Tons	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	טונות
Total	41,505	42,477	44,848	47,955	50,361	53,411	60,534	66,050	סה"כ
Type of Vehicle									סוג רכב
Trucks *	10,627	12,168	12,727	14,029	14,141	15,172	17,772	20,692	משאיות *
Buses	780	826	849	852	887	917	989	1,171	אוטובוסים
Taxis	65	70	75	93	94	106	108	131	מוניות
Minibuses	484	502	549	572	610	753	811	815	מיניבוסים
Private Cars	16,417	18,113	20,433	21,022	24,438	26,627	31,204	34,151	כלי רכב פרטיים
Motorcycles	13,132	10,800	10,213	11,388	10,211	9,836	9,870	9,090	אופנועים
Type of Fuel									סוג דלק
Gasoline	35,550	36,038	38,194	41,549	43,509	46,343	53,090	57,836	בנזין
Diesel oil	5,955	6,439	6,654	6,406	6,852	7,068	7,444	8,213	סולר
* Including Commercial Vehicles									* כולל רכבים מסחריים

נספח 13: טבלת פליטות CO לפי סוג דלק ורכב, נתוני הלמ"ס, שנתון סטטיסטי 2007

פליטות פחמן חד חמצני (CO) משריפת דלקים בכלי רכב, לפי סוג רכב וסוג דלק

Emissions of Carbon Monoxide (CO) from Fuel Combustion in Vehicles, by Type of Vehicle and Type of Fuel

Tons	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	טונות
Total	211,796	223,631	243,739	250,134	270,692	289,653	332,805	363,740	סה"כ
Type of Vehicle									סוג רכב
Trucks *	27,416	31,033	33,004	37,760	38,063	41,986	51,873	64,704	משאיות *
Buses	973	1,109	1,208	1,288	1,448	1,630	1,839	2,361	אוטובוסים
Taxis	327	332	358	420	418	455	459	545	מוניות
Minibuses	777	811	907	958	1,060	1,348	1,145	1,601	מיניבוסים
Private Cars	164,902	175,628	194,294	193,867	215,706	230,451	263,748	281,909	כלי רכב פרטיים
Motorcycles	17,400	14,819	13,971	15,841	13,996	13,764	13,741	12,621	אופנועים
Type of Fuel									סוג דלק
Gasoline	202,256	213,579	233,570	240,294	260,456	279,189	322,115	352,095	בנזין
Diesel oil	9,540	10,053	10,169	9,840	10,237	10,464	10,690	11,645	סולר
* Including Commercial Vehicles									* כולל רכבים מסחריים

פליטות לאוויר משריפת זלק בתחנות-הכוח של חברת החשמל

אלפי טונות

2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	סוג הדלק
גופרית דו-חמצנית (SO ₂)							
0.2	0.3	0.1	0.2	-	-	-	גז טבעי
4.0	6.5	8.5	12.9	26.8	27.1	35.0	מזוט
92.1	88.9	93.9	107.1	110.4	103.5	108.6	פחם
2.2	1.5	1.3	0.9	1.2	0.7	0.3	סולר במחזור משולב
1.3	0.9	1.1	0.4	0.5	0.9	0.6	סולר בטורבינות גז
99.8	96.1	104.9	121.4	138.9	132.2	144.5	סה"כ
תחמוצות חנקן (NO _x)							
5.8	4.7	3.7	2.5	-	-	-	גז טבעי
2.3	3.5	4.9	6.2	10.3	14.3	19.8	מזוט
92.0	88.4	85.4	84.9	90.7	87.7	100.5	פחם
2.4	1.9	1.4	1.1	1.5	0.8	0.4	סולר במחזור משולב
1.9	2.1	2.9	0.9	1.3	2.4	1.6	סולר בטורבינות גז
104.3	100.7	98.3	95.6	103.7	105.1	122.3	סה"כ
חלקיקים (PM)							
0.11	0.09	0.06	0.05	-	-	-	גז טבעי
0.26	0.46	0.62	0.85	1.34	1.40	2.00	מזוט
3.02	2.75	2.90	3.13	3.20	3.19	3.99	פחם
0.32	0.19	0.15	0.11	0.13	0.06	0.02	סולר במחזור משולב
0.1	0.10	0.14	0.05	0.07	0.10	0.04	סולר בטורבינות גז
3.81	3.60	3.87	4.20	4.74	4.76	6.05	סה"כ
דו-תחמוצת הפחמן (CO ₂)							
5,004	4,165	3,105	2,245	-	-	-	גז טבעי
1,253	2,022	2,666	3,455	5,509	5,185	6,133	מזוט
32,512	30,856	30,873	30,928	30,871	29,757	28,198	פחם
1,711	1,192	997	739	917	525	257	סולר במחזור משולב
1,031	745	859	285	398	735	486	סולר בטורבינות גז
41,512	38,980	38,501	37,653	37,694	36,202	35,074	סה"כ

* אוסרן המתבסס על בדיקות ארובה ומכלת גופרית בדלק הנצרך.

** חיסוב פליטת דו-תחמוצת הפחמן לוקח בחשבון את מקדם האקסידציה המבטא את שיעור התמוצון של הפחמן בדלק והפיכתו לדו-תחמוצת הפחמן.

⁶⁴ שמואלי, ש. ובולטיאנסקי, ו. (מאי 2008) הדו"ח השנתי לשנת 2007, סיכום ממצאי ניטור איכות האוויר מתחנות הניטור של חברת החשמל. חיפה.

נספח 15: פליטות לאוויר משריפת דלק בתחנות הכוח של חברת החשמל בערכים סגוליים של גרם לקוט"ש מיוצר⁶⁵

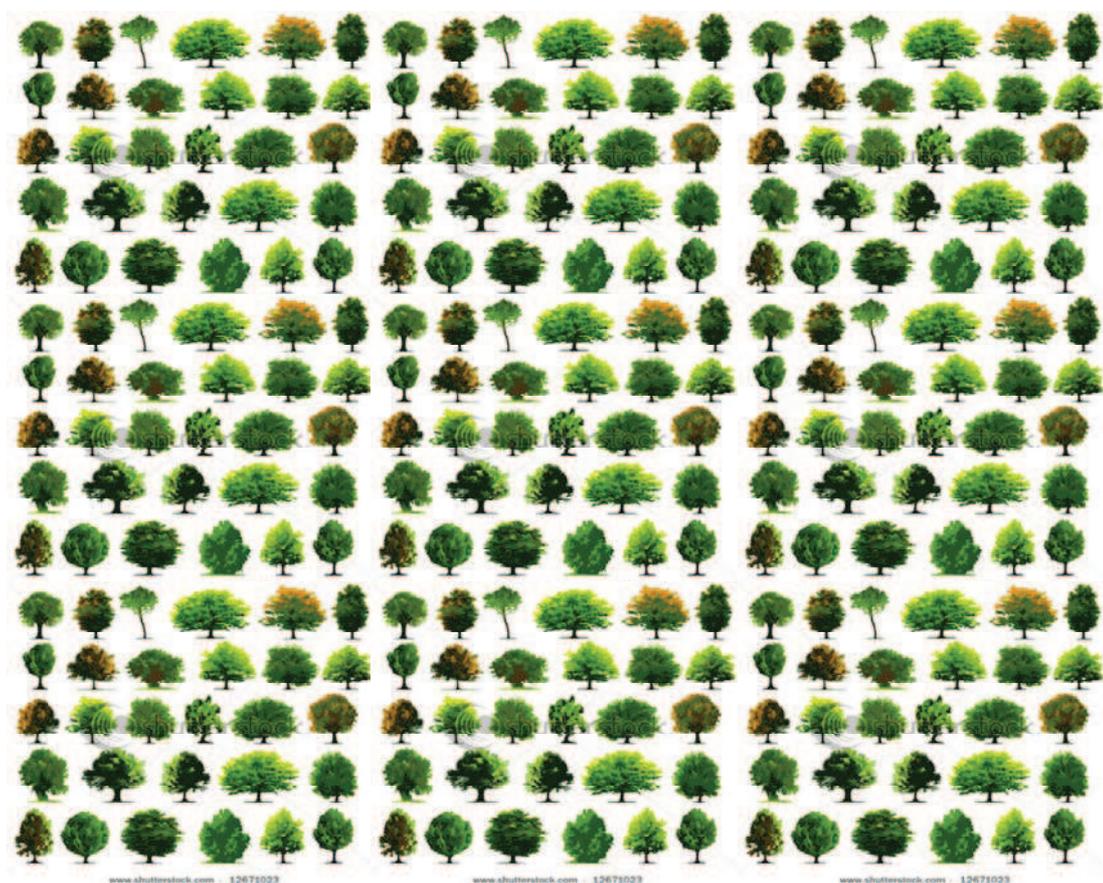
⁶⁵ שמואלי, ש. ובולטיאנסקי, ו. (מאי 2008) הדו"ח השנתי לשנת 2007, סיכום ממצאי ניטור איכות האוויר מתחנות הניטור של חברת החשמל. חיפה.

יכולת ספיחת מזהמים על ידי צמחייה במרחב העירוני ומשמעותה הכלכלית

הצעת מחקר בהנחיית ד"ר שחר דולב

במסגרת קורס "פרויקטים בחקר הסביבה", פרופ' עמרם אשל,
לימודי תואר שני, בי"ס פורטר ללימודי הסביבה, אוניברסיטת ת"א

מוגש על ידי קרן יעבץ, מאיה אלוני-שפיר, צור משעל ויעקב (קובי) ניר



תאריך: 2 באוגוסט 2009

א. תוכן עניינים

5	תודות.....	ב.
6	תקציר המחקר.....	ג.
7	מבוא.....	ד.
7	סקירת הרקע המדעי.....	ה.
7	הגדרת זיהום אויר.....	1.
7	זיהום אויר פנימי וחיצוני.....	1.1
8	מקורות עיקריים לזיהום אויר חיצוני.....	2.
8	כללי.....	2.1
8	השפעת זיהום האוויר על האדם והסביבה.....	2.2
8	מקורות אנטרופוגניים עיקריים לזיהום אויר.....	2.3
10	סוגים מרכזיים של מזהמי אוויר חיצוניים והשפעתם על הבריאות.....	3.
10	גפרית דו-חמצנית (SULFUR DIOXIDE) SO2.....	3.1
10	חנקן דו-חמצני NO, NO2, (NITRIC OXIDE, NITRIC DIOXIDE).....	3.2
10	אוזון O3 (OZONE).....	3.3
10	חומרים אורגניים נדיפים (VOLATILE ORGANIC COMPOUND) VOC'S.....	3.4
10	חלקיקי מזהמים PM10, PM2.5 AND PM1 (FINE PARTICLE MATTERS).....	3.5
11	פחמן דו-חמצני CO2 (CARBON DIOXIDE).....	3.6
11	פחמן חד-חמצני CO (CARBON MONOXIDE).....	3.7
11	בנזן C6H6 (BENZENE).....	3.8
11	עופרת וחלקיקי מתכת כבדים (LEAD AND HEAVY METALS).....	3.9
11	בוטדין 1,3-BUTADIENE.....	3.10
12	טומפס TOXIC ORGANIC MICRO-POLLUTANTS - (TOMPS).....	3.11
12	איזופרן (ISOPRENE).....	3.12
12	נזקי זיהום אויר.....	4.
12	סוגים שונים של נזקי זיהום אויר.....	4.1
12	יכולות ניטור והערכה אזורית של זיהום אויר.....	4.2
12	השלכות כלכליות של זיהום אויר.....	5.
12	עלויות חיצוניות.....	5.1
12	עצים וזיהום אויר.....	6.
12	כללי.....	6.1
13	השפעת חיוביות של עצים על איכות האוויר.....	6.2
14	השפעת שליליות של עצים על איכות האוויר.....	6.3
14	השפעות משולבות של עצים על זיהום אויר.....	6.4
15	כיצד עצים סופחים מזהמים.....	7.
15	תנועתם של מזהמים.....	7.1
15	הסרתם של מזהמים מהאטמוספירה.....	7.2
16	גורמים נוספים המשפיעים על ספיחת המזהמים.....	8.
16	כללי.....	8.1
16	עונות השנה ומשך היום.....	8.2
16	עצים ירוקים או נשירים.....	8.3
16	גודל העץ.....	8.4
16	כמות משקעים.....	8.5
16	ריכוזי זיהום.....	8.6
16	תנאים מטאורולוגיים.....	8.7
17	הרמה העירונית : שטח כיסוי וצפיפות.....	8.8
17	השפעת סוג העץ על ספיחת המזהמים.....	8.9
17	השפעת זיהום האוויר על הצמחיה.....	8.10
17	מתודה לחישוב ספיחת מזהמים על ידי היער האורבאני: NOVAK ומודל UFORE.....	9.

17	רקע ומטרת המחקר	9.1
18	המבנה הכללי של המתודה המחקרית	9.2
18	מודל UFORE : חמשת סוגי המודלים	10
18	כללי	10.1
18	מודל UFORE- A - אנטומיה של היער האורבאני : זהו המודל הרלוונטי עבור מחקריו ולכן נרחיב עליו	10.2
21	המודל השני UFORE- B : שיערוך פליטות של גזים ביו-גנים אורגניים (VOC'S)	10.3
21	המודל השלישי UFORE- C : יכולת אחסון של פחמן על ידי חופת היער	10.4
21	המודל הרביעי UFORE- D : ספיחת גזים מזהמים על ידי עצים זהו מודל נוסף הרלוונטי עבור מחקריו ולכן נרחיב עליו בסעיף הבא מס' 17	10.5
21	המודל החמישי UFORED- E : חסכון בצריכת אנרגיה בעקבות הורדת הטמפרטורה של מבנים עירוניים על ידי היער האורבאני	10.6
21	הרחבה של המודל הרלוונטי מודל D :	11
21	כללי	11.1
21	נתונים הנדרשים ליישום המודל D (בנוסף למידע הנאסף ממודל A) :	11.2
22	נוסחאות המודל :	11.3
22	הכפלת תוצאות חישובי הספיחה לקבלת ערכים כלליים, של כלל היער האורבאני :	11.4
22	המרת ערכי זרם ההדחה לשווי כלכלי	11.5
23	השפעות חיצוניות (EXTERNALITIES) : מהן ומדוע יש להתחשב בהן :	12
23	כללי	12.1
23	חשיבות ההתחשבות בהשפעות חיצוניות :	12.2
23	מודל הביקוש וההיצע	12.3
24	ההשפעות החיצוניות ונקודת שיווי המשקל של השוק	12.4
24	התעצמות מעמד העלויות החיצוניות	12.5
24	כשל השוק והגישות השונות להתמודדות עימו :	13
24	גילום ההשפעות החיצוניות במחיר המוצר	13.1
25	מקור פתרון כשל השוק – בשוק עצמו	13.2
25	פתרון הכלכלה הסביבתית וביקורת הכלכלה האקולוגית	13.3
25	שימוש יתר בכלי רכב בישראל, העלויות חיצוניות מתחבורה בישראל והתרומה של ספיחת מזהמים על ידי עצים	14
25	העלויות החיצוניות מתחבורה בישראל	14.1
25	מאפייני העלות החיצונית מתחבורה בישראל :	14.2
26	שימוש יתר בכלי רכב בישראל	14.3
26	דו"ח הוועדה הבין-משרדית ל"מיסוי ירוק"	14.4
27	תיקון כשל השוק ע"י הפנמת העלויות החיצוניות- עצים בעיר (יער עירוני)	14.5
27	חישוב ערך העצים בעיר תוך התחשבות בעלות החיצונית	15
27	כללי	15.1
28	הנוסחה המוצעת :	15.2
28	נושא ושאלת המחקר	ו
28	נושא המחקר :	16
28	שאלת המחקר :	17
28	חשיבות המחקר	ז
29	שיטות המחקר	ח
29	מתודת מחקר – התאמה לישראל :	18
29	שלב ראשון: מודל A	18.1
29	שלב שני: מודל D	18.2
30	שלב שלישי : שימוש בכל הנתונים שנאספו, לחישוב קצב הדחת המזהמים על ידי הצמחים השונים	18.3
30	שלב רביעי : חישוב קצב הספיחה של סך כל היער האורבאני	18.4
30	שלב חמישי : המרת ערכי זרם ההדחה לשווי כלכלי	18.5
31	תוכנת ה- I-TREE :	19
31	הערכת הקשיים הצפויים לחוקר	ט

32	סיכום	יא.
33	רשימת מקורות	יב.
	נספחים	יג.

ב. תודות

אנו מבקשים להודות לפרופסור עמרם אשל מהמחלקה לביולוגיה של אוניברסיטת תל אביב, על שפתח לפנינו את הצוהר לבחינה מקצועית של נושא זיהום האוויר ועזר לנו להאיר בו זוויות, שלא היינו מודעים להן עד כה, כמנחה הקורס "פרויקטים בחקר הסביבה" במסגרת בית ספר פורטר ללימודי הסביבה באוניברסיטת תל אביב ובמיוחד על עזרתו כמנחה הראשוני של הצעת מחקר זו.

תודה לפרופסור אביטל גזית, המנהל האקדמי של מסלול התואר השני על התמיכה המקצועית ובמיוחד על היזמה ליום הסיור בנושא זיהום האוויר, שהשכיל אותנו בנושא יותר מאלף מילים בכיתת הלימוד.

תודה לבית ספר פורטר עצמו ולכל הצוות המקצועי, בראשות ד"ר אריה נשר ופרופסור פנחס אלפרט ובמיוחד לסמדר ואליה הבלתי נלאות, על הבית החם והתמיכה לאורך כל השנה האחרונה.

תודה לגב' מיכל נהרי, האגרונומית של אגף שפ"ע עיריית ת"א, על המידע הנוגע לנטיעות, למספרי וסוגי העצים בתל אביב.

תודה למר יוסי באזיס, אחראי איכות אויר באגף לאיכות הסביבה בעיריית ת"א על המאמרים אליהם הפנה אותנו בנושא.

תודה לד"ר ניר בקר ממכללת תל חי על הסיוע באיתור נתוני העלויות החיצוניות של זיהום האוויר מתחבורה בישראל.

ואחרון אחרון חביב במיקום, אך ראשון במהות – ד"ר שחר דולב מאוניברסיטת תל אביב, מנחה הצעת מחקר זו : תודה על העזרה, הרעיונות, ההע(א)רות, ההכוונה, העידוד, התמיכה, הסבלנות ובעיקר על המעורבות והרגשת השותפות שהטמעת בכולנו – למותר לציין שהצעת מחקר זו לא הייתה מגיעה לרמה אליה הגיעה, ללא מעורבותך לאורך כל הדרך. שוב תודה.

ג. תקציר הצעת המחקר

הצעת מחקר זו עוסקת ביכולות הטבעיות של הצמחים לטהר את האויר ובמתודות לכימות שירות היער האורבאני בספיחת מזהמים ובהמרתו לערך כלכלי, תוך דגש על יישום המחקר בישראל. היער האורבאני הוא סה"כ הצמחייה, העצים והשיחים (להלן העצים), הנמצאים באזור עירוני מוגדר. מחקרנו מתמקד כאמור, בעיר, ונשען על מודל אמריקאי קיים - UFORE - Urban forests effects, שמישם בהצלחה בעשרות ערים בארה"ב ובעולם.

תיאור שלבי המחקר המוצע:

בהצעת המחקר מחקר מפורטת בעיית זיהום האוויר, מקורותיה והשלכותיה תוך דגש על זיהום מתחבורה שהוא הדומיננטי בערים. בהמשך מוסברים השפעותיהם השונות של העצים על איכות האוויר ובייחוד, התמקדות על יכולתם של העצים לספוח מזהמי אוויר, כיצד ומה הם סופחים ומה הם הגורמים המשפיעים על כמות וקצב הספיחה.

ההצעה מעמיקה לתוך המודל הקיים ה-UFORE ולומדת את השלבים המתודיים הנוצרים להיכרות עם היער האורבאני וכימות שירותיו השונים תוך כדי התמקדות ביכולת ספיחת המזהמים. הנתונים הנדרשים ליישום המודל, הן האמפיריים והן התיאורטיים, מומרים לנתונים הרלוונטיים לארץ ממקורות מידע ישראליים.

בהמשך עוסקת הצעת המחקר בהמרת הערכים של הגזים השונים הנספחים על ידי הצמחייה, לערכים כלכליים, המשוכללים כחישובי העלויות החיצוניות של העצים. באופן זה, לעץ ניתן ערך הגדול בהרבה מערכו המקובל כיום בקרב הגורמים הציבוריים השונים. שכלול ערך החיסכון בזיהום האוויר מספק לנו מחיר אמיתי יותר של העץ ויכול לתמרץ את הטיפול של העצים הקיימים והקצאת משאבים לנטיעות עתידיות בהיקף רחב.

החלטנו לא להתמקד ביישום של המתודה בעיר ספציפית אלא, בהצגת הכללית והנרחבת והתאמתה לארץ ישראל בכללותה ובכך לאפשר לחוקר לבחור את השטח הישראלי, הנתון בו יתבצע המחקר לפי צרכיו. הצעת מחקר זו יכולה לשמש, אם כן, עיריות ורשויות מקומיות שונות הרוצות למפות ולשערך את יכולות היער האורבאני ולהמיר אותם לערך כלכלי. ההצעה מראה גם כי, בארץ ישנן מספיק תשתיות ומאגרי מידע קיימים לאיסוף הנתונים הרבים הנדרשים ליישום המודל.

בנוסף, לרשות החוקר עומדת תוכנת ה-TREE - I המהווה מסד נתונים רחב מימדים הכולל בין היתר את כל העצים הנפוצים בארץ בשתילות העירונית וכמו כן מכיל תוכנות לחישוב שירותי היער האורבאני המבוססות על הנוסחאות המתמטיות של המודל שבבסיס מחקר זה ה-UFORE.

עיקר ההמרה של המודל לישראל, לכן, עוסקת ביכולת ובדרך לאיסוף המורכב של הנתונים.

ד. מבוא

עצים וצמחים אחרים, הינם, כידוע, חלק טבעי ובלתי נפרד מחיינו.

לעצים תועלות רבות, מנקודת מבט אנושית – הם קולטים פחמן דו-חמצני ופולטים חמצן וכך משמשים עבורנו מעין מטהרי אוויר, עצים חוסמים רוחות ורעשים, ממתנים טמפרטורות, מעלים, בדרך כלל, את ערך הנכסים שמסביבם ולא פחות ואולי אף יותר חשוב – משפרים את חיינו מבחינה אסטטית ועוזרים לנו לחוש רגועים ושלווים יותר.

לעצים יש גם יתרון גדול נוסף, המוכר ומנוצל היטב בעולם, אך, לצערנו, אינו מיושם כלל בישראל עד כה: **לעצים יכולת לספוח מזהמי אוויר** מסוגים שונים וכך הם עוזרים לצמצום ההיקף של בעיית זיהום האוויר – אחת הרעות החולות והמעיקות ביותר של החברה המודרנית, שפגיעתה רעה, מבחינה בריאותית, כלכלית וסביבתית.

ליכולת זו של עצים לספיחת מזהמים משמעות בריאותית ברורה, שאין צורך לפרטה, אך גם משמעות כלכלית עצומה – בארצות הברית לבדה, כפי שנראה בהמשך, שווה יכולת העצים לספוח מזהמים קרוב לארבעה(!) מיליארד דולר לשנה.

בחרנו, איפוא, להתמקד בהצעת מחקר זו בשניים: ראשית בעצם יכולתם של עצים לספיחת מזהמים במרחב העירוני (בו מתבצעות כ-90% מכלל הפליטות) – מהם מאפייני התופעה, כיצד מתבצעת הספיחה, מה הוא היקפה והאם היא רלוונטית לכל סוגי המזהמים והעצים או רק לחלקם ומדוע. שנית, בחרנו לבדוק את המשמעות הכלכלית האפשרית של שימוש אפשרי בתופעה כחלק משיקולי הנטיעה במדינת ישראל – תחום, שלמיטב ידיעתנו לא נחקר עד כה כלל.

ה. סקירת הרקע המדעי

1. הגדרת זיהום אוויר

1.1 זיהום אוויר פנימי וחיצוני

תחום זיהום האוויר ניתן לחלוקה עקרונית, לפחות על פי אחד הפרמטרים המרכזיים שלו, **לזיהום אוויר פנימי** (בתוך חללים סגורים) ו**לזיהום אוויר חיצוני**, הכולל את כל האזורים שאינם חללים סגורים.

1.1.1 זיהום אוויר פנימי

זיהום אוויר פנימי הוא זיהום אוויר בתוך מבנים וחללים סגורים. עקרונית יכול חלל פנימי לסבול, אף אם במידה מופחתת עקב ההגנה המסוימת, שהוא מעניק, מזיהומים דומים לאלו שבחלל חיצוני.

עם זאת, יכול חלל פנימי לסבול ממזהמי אוויר האופייניים לו, שהשפעתם בשטח פתוח תהיה שולית או אפילו בלתי רלוונטית.

כך למשל גז הרדון הוא גז רדיואקטיבי חסר צבע, ריח וטעם, המצוי בכל סוגי הקרקע בריכוזים משתנים ואינו מזהם אוויר חיצוני מרכזי. ואלם הרדון קיים גם בכל חומרי הבנייה המיוצרים על בסיס אדמה וסלעים ועקב כך אחראי לקרוב לכ-40% מהזיהומים בחללים פנימיים ומבחינה רפואית יכול לגרום לסרטן. בהקשר זה ניתן עוד להזכיר מקורות זיהום הקשורים למבנים ולנושאי האוויר שלהם כמו "תסמונת הבניין החולה"¹ המפורסמת וזיהומים שמקורם בחומרי ניקוי והדברה ובחמרי בעירה (של קמינים למשל), אך כיוון שעבודה זו מתמקדת בשטחים חיצוניים ולא בחללים פנימיים סגורים לא נרחיב בעניין זה.

יצוין רק, להשלמת התמונה, למרות שכאמור, עבודה זו מתמקדת בחללים חיצוניים, כי צמחים מוכרים זה מכבר כמעין "מטהרי אוויר" מוכרים בחללים סגורים ובעיקרון זה נעשה שימוש כיום, גם בישראל, כחלק משיקולי גינון מקובלים.

1.1.2 זיהום אויר חיצוני

זיהום אוויר חיצוני הוא זיהום אוויר בשטחים פתוחים, שאינם בתוך מבנים או חללים סגורים. האבחנה העיקרית המקובלת למזהמים חיצוניים היא בין מקורות נייחים לניידים.

למותר לציין שהמקור המרכזי לזיהום אוויר חיצוני הוא, כפי שנראה מייד, כל התחום התחבורתי ומייד אחריו בסדר החשיבות, המקורות התעשייתיים – החל ממפעלי ענק בעלי ארובות מעשנות בולטות שאינן מבשרות טוב וכלה בתעשייה זעירה (כמו מוסכים קטנים) ומייד אחר כך המקורות המסחריים (מסעדות למשל).

עוד יודגש, כי, סטטיסטית, ייצור החשמל, (ראה 2.3.1 להלן) הוא המקור המרכזי החיצוני לפליטת מזהמים אך כיוון, שייצור החשמל מוטה צריכה, חשוב מאד, מעבר וללא קשר לניסיון להקטין את פליטת המזהמים בתהליך ייצור החשמל, לאבחן את מקורות דרישת הצריכה, על מנת לנסות ולהקטין את פליטות המזהמים הן בקצה הייצור והן בקצה הצריכה.

2. מקורות עיקריים לזיהום אויר חיצוני

2.1 כללי

היסטורית, מזהמי האוויר המסורתיים נוצרו משימושים ביתיים לתאורה, חימום ובישול והחל ממאה ה-18 לערך גם, במידה גוברת והולכת, משימושים תעשייתיים שונים, כאשר מקורם נבע, בעיקר, משריפת פחם ודלקים מאובנים (fossil Fuels) - דלקים המשמשים להפעלת מנועי בעירה פנימית המבוססים על שימוש באנרגיה ממקורות מתכלים - כמו פחם, נפט ומוצרים, גז טבעי ומינרלים שונים.

מקורות הזיהום יכולים להיות אנטרופוגניים – מקורות מעשה ידי אדם ומקורות ביאוגניים, טבעיים, שמקורם בעיקר מצמחייה, כמו איזופרן ומונוטרפן.

על אף העובדה, שחלק גדול ממזהמי האוויר אינו נראה כלל, פגיעתם בבריאות כולנו מהותית והם אחראיים במידה משמעותית, במיוחד באזורים עירוניים ובאזורים עתירי תעשייה, ליצירת והחמרת מחלות שונות - בעיקר מחלות הקשורות לראות, לדרכי הנשימה וכן עלול לגרום למספר סוגי סרטן.

עוד יודגש כי, השפעת מזהמי האוויר, בעיקר במרחב העירוני, עלולה גם להחמיר מחלות קיימות כמו אסטמה ולפגוע במיוחד בקבוצות אוכלוסין רגישות כמו זקנים או ילדים, הקרובים לעיתים משמעותית, יותר ממבוגרים, למקור זיהום ישיר עקב גובהם, כמו למשל בעת המתנה על אי תנועה במעבר בין שני חלקי כביש סואן.

2.2 השפעת זיהום האוויר על האדם והסביבה

השפעת זיהום האוויר על האדם נמדדת כמובן, ראשית כל, במונחי בריאות והפגיעה בתחום זה היא חריפה – קיצור תוחלת חיים, עלייה ברמת התחלואה, יצירה והגברה של מחלות גנטיות הן רק דוגמאות מייצגות ולצידן מפגעים נוספים, שאין עמם השפעה בריאותית ישירה דווקא, כמו מטרדי ריח למשל.

ההשפעה היחסית על הסביבה חמורה עוד יותר, אם נתעלם לצורך העניין מהקדימות המובנת שיש לנושא הבריאות בעינינו – פגיעה בבתי הגידול ובכל המרקם הטבעי של החי והצומח, פגיעה בשרשרת המזון, הקטנת ראות ועכירות אוויר, פגיעה במערכות אקלימיות, פגיעה בנכסי מקרקעין, נזקים מהותיים לחקלאות וזוהי בהחלט רשימה מייצגת בלבד.

2.3 מקורות אנטרופוגניים עיקריים לזיהום אויר

2.3.1 מקורות נייחים

לזיהום ממקורות נייחים שני קצוות: קצה השימוש מזה וקצה הייצור מזה ושני הקצוות קשורים זה לזה. הסיבה המרכזית היא כי ייצור החשמל הוא תהליך מוטה צריכה. במילים אחרות, החשמל אינו מיוצר כמוצר מדף, אלא כתגובה על דרישה צרכנית. ככל שהביקוש בזמן נתון לחשמל יעלה, תגדל גם כמות החשמל שתיוצר כדי לענות על הביקוש. ברור לכן, כי ייצור אנרגיה יהיה המקור

המרכזי לפליטת מזהמים, שכן הוא מייצג קשת צרכנים רחבה – הן בשימוש ביתי והן בשימושים אחרים כמו שימוש תעשייתי או מסחרי.

אין זה מפתיע, איפוא, כי משק החשמל בישראל הוא הגורם העיקרי לזיהום אויר מפליטת מזהמים וכי תחנות הכוח בישראל פולטות כ- 65% תחמוצות גופרית, 45% תחמוצות חנקן, 38% חלקיקים, ו- 60% של פחמן דו חמצני, מסך כל הפליטה השנתית של מזהמים אלה בישראל² יש לקוות כי המהלך המבוצע בימים אלו של הגדלת שיעור הייצור בגז ישפר מצב דברים זה.

מקור ניח עיקרי אחר, הם מפעלי תעשייה מסוגים מגוונים, הפולטים מזהמים רבים, מהם נפוצים כמו תחמוצות חנקן וגפרית, אך גם כמויות קטנות יותר של מזהמים (גזים או חלקיקים) מיוחדים, הקשורים לתהליך ייצור מסוים ובתוכם מספר לא קטן של מזהמים מסוכנים, שיש לטפל בהם בצורה מיוחדת.

הזיהומים התעשייתיים נפלטים בתצורות שונות (ארובות, בריכות, תהליכי שינוע ואחסון, תפזרות) ומענפי תעשייה שונים, כמו תעשיות חקלאיות (הדברה, מזון לבעלי חיים, מיכונים שונים), מהתעשיות הכימיות והפטרוכימיות, מתעשיות המחצבים וגם, במצטבר, מכלל התעשיות הקלות, שכל פריט מהן נראה לפעמים קטן מדי מכדי להזיק בתמונה הכוללת ואפילו מתעשיות סביבתיות "חיוביות" כמו תעשיית המיחזור למשל.

מקורות ניחים נוספים שיש להזכירם הם מה שמכונה "מקורות שטח" קבועים כמו אתרי הטמנת אשפה למשל ואתרים לא מוקדמים שלעיתים הינם בעלי אופי זמני כמו תחנות מעבר לריכוז פסולת בניין למשל.

עוד יש לציין כמקורות ניחים את המגזר הביתי (למשל, מחמרי הדברה וניקוי לא אקולוגיים, שעל אף שקיימים להם תחליפים על בסיס טבעי עדיין שולטים בשוק ותחומים אחרים כמו בישול והסקה ביתית) ומקורות חקלאיים, בעיקר עקב שימוש בחמרי הדברה ופעולות נקודתיות כמו בירוא יערות על ידי שרפתם.

2.3.2 מקורות ניידים

המקור האנטרופוגני הנייד המרכזי לזיהום אוויר הוא, כמובן, התחבורה לכל סוגיה ובעיקר התחבורה הפרטית, המחולק בדרך כלל למקורות דרך ישירים (on road) ולמקורות שבצידי הדרך (off road) כאשר הכוונה ב-off road היא לכלים כמו ציוד מכני כבד, מלגזות וכיוצא באלו. כן יש להזכיר בהקשר זה אניות ומטוסים – שני תחומי תעבורה מזהמים ביותר גם בפעילות השגרה שלהם, שלא להזכיר תקלות הרות אסון כמו טביעת מיכליות, בעיקר בסמוך לחוף³.

כלי רכב הם גם המזהמים האורבאניים המרכזיים – על פי נתוני הלמ"ס, 95% (!), למשל, מכמות פליטות הפחמן הדו-חמצני במרחב האורבאני, מקורו בתחבורה⁴ והנחה זו אינה נזקקת אפילו לתימוכין מדעיים – די אם נציין, לעניין זה, את העובדה, שביום כיפור שובתות גם תחנות הניטור מעבודה – לא עקב קדושת החג דווקא, אלא מכיוון שהמזהמים נעלמים כמעט לחלוטין והרמה הנמדדת קרובה ל- 0%.

2.3.3 חוק אוויר נקי

חוק אוויר נקי התשס"ח 2008⁵, שמרביתו תיכנס לתוקף רק ב- 2011 מגדיר מקור פליטה נייד כ- "מקור פליטה שהוא כלי תחבורה או שניתן להעבירו ממקום למקום באמצעות מנוע בעירה פנימית המנוי בתוספת השנייה". ויש לשים לב בהגדרה זו לדרישה של יכולת התנועה העצמית של המקור הנייד.

מקור פליטה ניח מוגדר שם באורח שיורי ככל מקור פליטה שאיננו נייד.

3. סוגים מרכזיים של מזהמי אוויר חיצוניים והשפעתם על הבריאות

3.1 גפרית דו-חמצנית (Sulfur dioxide) SO₂

גפרית דו חמצנית נוצרת משריפת חמרים או דלקים המכילים גפרית. מרבית הגפרית הדו-חמצנית נוצרת ממקורות טבעיים והמקור המרכזי הנובע מפעילות אנושית הוא תחנות הכוח המשתמשות בדלקים מאובנים כמו מזוט ופחם וכן מערכי חימום ביתי ותעשייתי, הנפוצים עדיין במקומות רבים, על בסיס פחמי. כמויות קטנות יחסית של החומר יכולות להשפיע על תפקוד הריאות ולגרום להתקפי שיעול ולחצים בחזה ולהחמיר מצבן של קבוצות אוכלוסין רגישות כמו חולי אסטמה.

3.2 חנקן דו-חמצני (Nitric oxide, Nitric Dioxide) ,NO₂, NO

חנקן נוצר בעיקר ממקורות תחבורתיים או מייצור חשמל. חנקן חד-חמצני כשלעצמו, (NO - Nitric oxide), אינו מזיק, אך בהשתחררו לאטמוספירה, עובר בדרך כלל תהליך חמצון מהיר והופך לחנקן דו-חמצני (NO₂- Nitric Dioxide), העלול לגרום לנזק בריאותי ממשי. השפעתו הבריאותית מתבטאת בעיקר בגירוי הריאות והקטנת עמידותן לזיהומים אפשריים בדרכי הנשימה, כאשר חשיפה ממושכת עלולה להחמיר היקף מחלות נשימתיות קיימות, בעיקר אצל ילדים.

3.3 אוזון O₃ (Ozone)

אוזון הוא גז נטול צבע בעל ריח חריף, שאינו נוצר ישירות מפעילות אנושית אלא הינו תוצר של תגובות כימיות שונות - בעיקר תגובה של גזים הנוצרים בתהליכי בעירה (של מנועי מכוניות למשל) לאור המגיע מהשמש. זוהי גם הסיבה לעלייה בכמויות האוזון באטמוספירה בתקופות חמות עם הרבה שעות אור.

תהליך הייצור של האוזון אינו מהיר במיוחד ויכול להימשך שעות ואף ימים. התוצאה היא שכמויות אוזון חריגות המאותרות במקום מסוים, לא נוצרו בהכרח באותו איזור, אלא, לעיתים, במרחק אלפי קילומטרים ממנו.

בחלק העליון של האטמוספירה לאוזון תפקיד חיובי חשוב בהגנה על כדור הארץ מפני קרניים אולטרה-סגוליות, אך בחלק התחתון, בו אנו נושמים כמובן, הוא עלול להזיק. בעיקר ביצירת גירויים בדרכי הנשימה והוא מסוכן במיוחד לחולי אסטמה ומחלות ריאה אחרות השואפים אותו.

3.4 חומרים אורגניים נדיפים (Volatile organic compound) VOC's

זהו שם כולל לחומרים אורגניים נדיפים שונים, שנוהגים לחלקם לחומרים על בסיס מתאן, שמקורם בפעילות חקלאית בעיקר, ולחומרים אחרים, שאינם ממקורות של פעילות חקלאית, (methane Non-volatile organic compounds - "nmvocs"), כמו פרופאן, (Propane) אוקסילאן (Xylene) ובוטאן (Butane), שמקורם מפעילות תחבורתית ותעשייתית עיקר.

חלקם של החומרים הללו מתועל היום, במקרים רבים, לשימושים מועילים, כמו למשל ניצול מתאן ממצבורי אשפה ומגללי פרות לייצור אנרגיה.

נזקים בריאותיים של VOC's חריפים במיוחד במקומות סגורים, כמו אדי צבע בחדר סגור למשל, אך, בניסבות ובכמויות מתאימות, עלולה חשיפה אליהם לגרום נזק גם במקומות פתוחים - בעיקר לדרכי הנשימה ולריאות.

3.5 חלקיקי מזהמים (Fine Particle Matters) PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁

יכולים להיווצר ממספר רב של מקורות אפשריים - משריפה של חומרים במנועי בעירה פנימית (כמו מכוניות), מתגובות כימיות שונות באטמוספירה לחיבורים שונים של חומרים (גפרית למשל) או חלקיקים גסים יותר היכולים להיווצר ממקורות כמו פסולת בנייה למשל.

הם נמדדים בדרך כלל על בסיס היקפם האוויר-דינמי הממוצע וההיקפים הממוצעים הנמדדים בדרך כלל היו בדרך כלל PM₁₀ אך היום נמדדים חלקיקים קטנים יותר כ- PM_{2.5} ואף PM₁. חלקיקים אלו

מסוכנים מבחינה בריאותית ויכולים להינשא ישר לריאות ולהחמיר מצבם של אנשים עם בעיות ריאה ולב קיימות.

3.6 פחמן דו-חמצני (Carbon dioxide) CO₂

פחמן דו-חמצני הוא גז נטול צבע וריח הנוצר גם באופן טבעי (נשימה אנושית או אדי מים למשל) וגם מיוצר, בכמויות גדולות, על ידי פעילות אנושית (תחבורה לדוגמא). לפחמן דו חמצני שימושים מגוונים החל מחומרים לכיבוי אש, עבור דרך הובעות במשקה הסודה וכלה בתהליך הפוטוסינתזה בעצים והוא חומר חשוב בתעשיות כמו תעשיית המזון והתעשיות הכימיות.

CO₂ הוא גם גז חממה מרכזי (פליטות מרכבים בעיקר) ונעשים מאמצים רבים גם בארה"ב וגם בנציבות האירופית להגביל משמעותית את הפליטות התחבורתיות למיניהן ועל ידי כך להקטין את כמות פליטות ה-CO₂ בעולם.

בערכים נמוכים באוויר אין ה-CO₂ מזיק אך בערכים גבוהים יותר הוא יכול לגרום נזקים בריאותיים שונים ואף קשים כשהאחוז הכללי שלו באוויר חוצה את גבול האחוז הבודד. כך, למשל, ברמה של 3% CO₂ באוויר עלולות להיגרם בעיות של לחץ דם, לחץ על פעילות הלב ובעיות שמיעה וברמה של 5% תופענה תופעות של סחרחורת וכאבי ראש העלולות להגיע עד אובן הכרה ברמה של 8%.

3.7 פחמן חד-חמצני (Carbon Monoxide) CO

בניגוד ל-CO₂, שספק אם ניתן לכנותו גז מזהם מלכתחילה, פחמן חד חמצני CO, הוא גז שפגיעתו רעה. כשכמות החמצן (O₂) מסביבו מספקת הוא עובר, בתהליך בעירתו, תהליך התחמצנות ל CO₂ אולם, בהעדר חמצן בכמות מספקת, כמו בתהליכי הצתה או האטה משמעותית של מנועי מכוניות למשל או תהליכי שריפת אשפה הוא הופך לגז מסוכן.

הסכנה של ה-CO טמונה בעיקר בשאיפת כמות מופרזת שלו. ריכוזו באזורים עירוניים במיוחד, יכול להשתנות בנסיבות שונות ועל אף שהכמות המקובלת באזורים עירוניים היא 10ppm (parts per million) ובנסיבות מיוחדות היא יכולה להגיע גם עד 500ppm ושאיפתו יכולה, במקרה זה, עקב העובדה שהוא נספח להמוגלובין בדם, לגרום למותם של תאים ורקמות.

יצוין, כי CO הוא גם מזהם פנימי בולט ומסוכן, בעיקר עקב בעירת תנורי גז חימום ובישול.

3.8 בנזן (Benzene) c6h6

בנזן הוא מזהם הנוצר משריפת דלקים וגם מתהליכי הפצתם. הוא שייך למשפחת ה-VOC's ומהווה כ-70% מהפליטות התחבורתיות.

הבנזן מסוכן ביותר מבחינה בריאותית ויכול לגרום למחלות סרטניות מסוגים שונים ולפגיעות במערכת העצבים בכבד ובכליות.

3.9 עופרת וחלקיקי מתכת כבדים (Lead and Heavy Metals)

בעבר, לפני המעבר לדלקים נטולי עופרת בתעבורה, היו העופרת וחלקיקי המתכת הכבדים מזהם אופייני בתחום זה, אולם עם הטמעתו של הדלק נטול העופרת, המקורות המרכזיים להיווצרותם היום הם תעשייתיים.

גם כמויות קטנות מאד של Lead and Heavy Metals יכולות להיות מסוכנות במיוחד לתינוקות, ילדים ולנשים בהריון.

3.10 בוטדין 1,3-Butadiene

גם בוטדין שייך למשפחת ה-VOC's ונפלט מפעילות תחבורתית כבדה בעיקר כמו ממנועי דיזל של משאיות כבדות וכלי עבודה כבדים למיניהם וכן מפעילויות תעשייתיות שונות.

פגיעתו הבריאותית קשה לרבות פגיעות אפשריות במערכות העצבים, הכליות, הכבד ונזקים אפשריים לעוברים כתוצאה מפגיעה של נשים בהריון.

3.11 טומפס (TOMPS) - Toxic Organic Micro-Pollutants

נוצרים מפעילויות בעירה שלא הושלמו בתהליכים תעשייתיים בעיקר. מחולקים למספר רב של סוגים וכימיקלים שונים, שלא נלאה כאן בפירוט שלהם אך חשוב לזכור שאפילו חשיפה לכמות זעירה שלהם יכולה לגרום נזקים בריאותיים משמעותיים, בעיקר למערכות החיסונית של גוף האדם ולסרטן.

3.12 איזופרן (Isoprene)

עצים אינם רק סופחים מזהמים, אלא גם פולטים מזהמים מסוימים. איזופרן הוא דוגמה למזהם שדווקא נפלט מעצים ותורם לתופעות כמו ערפיח למשל. (ראה לעניין זה 12.3 להלן).

4. נזקי זיהום אויר

4.1 סוגים שונים של נזקי זיהום אוויר

מזהמי אוויר גורמים לנזקים מסוגים מגוונים. הנזק המרכזי, גם מבחינה כלכלית, אך ראשית כל מבחינה מהותית, הוא הנזק הבריאותי. מעבר לחשיבותם המהותית, נזקים בריאותיים הם גם המרכיב העיקרי בעלות הכלכלית של נזקים ישירים מזיהום האוויר, לצד נזקים ישירים אחרים כמו נזקים הנובעים מידידת ערך נדל"ן. זיהום אוויר גורם גם לנזקים עקיפים, הקשים יותר לכימות, כמו פגיעה באיכות החיים, נזקים אסטטיים ופגיעה במערכות אקולוגיות.

4.2 יכולות ניטור והערכה אזורית של זיהום אויר.

ניטור של זיהום אוויר משמען מעקב ומדידה רציפים, בהפרשי זמן קבועים של זיהומים באיזור מסויים או של מקורות זיהום מוגדרים. שיטות הניטור והשיטות להערכת כמויות המזהמים הנפלטים אינם מעיקריה של הצעת מחקר זו ולכן לא ניכנס כמובן לפרוט, שאין מקומו כאן.

נציין רק, שבישראל קיימת מערכת ניטור הכוללת למעלה מעשרים תחנות ברחבי הארץ המשדרות מידע באופן שוטף המוצג on line באתר המשרד להגנת הסביבה.

5. השלכות כלכליות של זיהום אויר

5.1 עלויות חיצוניות

ההשלכות הכלכליות של זיהום האוויר באות לידי ביטוי בעיקר באופן עקיף. הנזקים שגורם זיהום האוויר, אינם מכוסים בדרך כלל, בעיקר בתחום המרכזי לעניין זה – התחבורה – בעלויות ישירות. במילים אחרות הנהג המזהם ברכבו את האוויר אינו מפצה את הנפגעים הפוטנציאליים בעצמו, אלא עלות זו נופלת על החברה ככלל. עלויות אלו הן, איפוא, חיצוניות ומובחנות בכך שהן משפיעות על אנשים או גופים אשר לא היו מעורבים באופן ישיר ורצוני בפעילות שיצרה את העלות.

6. עצים וזיהום אויר

6.1 כללי

עצים משפיעים על איכות האוויר, באופן ישיר ובאופן בלתי ישיר, במספר רב של דרכים. בדרך כלל ההשפעה של העצים על איכות האוויר חיובית – עצים הם בעלי יכולת לספיחת מזהמי אוויר שונים, כפי שנראה עוד בהמשך, אך לעיתים השפעתם דווקא שלילית. נסקור ראשית להלן, את ההשפעות המרכזיות של עצים על איכות האוויר.

6.2 השפעת חיוביות של עצים על איכות האוויר

6.2.1 עצים כמפחיתי טמפרטורה

הפחתת טמפרטורות האוויר ע"י העצים משפרת את איכות האוויר, עקב העובדה, שפליטות של מזהמים ותרכובות כימיקליות שונות היוצרות גזים מזהמים, כמו אוזון תלויים בטמפרטורות. במחקר שנערך לאחרונה במימון נציבות הקהילייה האירופית נמצא כי, באזורים עתירי צמחייה בערים, כמו פרקים למשל, הטמפרטורה יכולה להיות נמוכה עד 4 (!) מעלות צלסיוס מחלק אחר, נטול צמחייה, של אותה עיר ממש⁶.

6.2.2 עצים כסופחי מזהמים

לעצים יכולת לספוח מזהמי אויר שונים. קיימים מודלים מתמטים שונים, כדי לאמוד את כמויות המזהמים, שעצים סופחים. מחקר זה יתמקד במודל ממוחשב, שנתייחס אליו עוד בפירוט בהמשך, בשם **UFORE** (Urban Forest Effects) - ("מודל UFORE")⁷.

מודל זה, שפיתחו מדענים מטעם רשות היערות האמריקנית, ה- USDA forest service בראשות המדען הראשי, דייוויד נובק. (Davik Novak) הפך ל"אורים ותומים" בתחום זה.

באמצעות מודל UFORE ניתן לאמוד את כמויות המזהמים שסופחים העצים בעיר נתונה. מדובר במזהמים שונים, כמו תחמוצות חנקן, תחמוצות גופרית, אוזון, פחמן חד חמצני וחלקיקים (PM) הקטנים מ-10 מיקרון. העיר הראשונה בארה"ב שבה התבצע המחקר הייתה שיקגו בשנת 1991, ולאחר מכן נערך המחקר בערים רבות נוספות.

בשנת 2006 פורסם מחקר המקיף אמפירית 55 ערים שונות ברחבי ארה"ב⁸ ומשווה את נתוני הספיחה שלהם, לגבי מזהמים שונים בממוצע וגם את טווח התוצאות בשעות השונות של היממה. (טבלה 1- נספח) המחקר גם משתמש במודל UFORE על מנת לחשב את כמויות הספיחה של כל העצים בערים בארה"ב. על פי תמצית נתוני המחקר, עצים בערים בארה"ב סופחים מזהמים, בשווי כלכלי של **3.8 מיליארד דולר**. (טבלה 2- נספח)

למרות, שעצים בעיר סופחים טונות של מזהמי אויר מדי שנה, האחוז הממוצע של שיפור באיכות האוויר, בחלוקה למזהמים השונים, ע"י עצים במהלך שעות היממה, הוא, **בממוצע, פחות מאחוז אחד** (וזאת בתקופה בה הייתה הצמחייה עתירת עלים) וזאת בהתבססות על ריכוזי מזהמים ותנאים מטאורולוגיים משתנים. ראוי, אולי, לאזכר שנית, בהקשר זה, כי אותו אחוז בודד, מבחינת שוויו הכלכלי, משמעו קרוב לארבעה מיליארד דולר באזורים האורבאניים של ארצות הברית בלבד.

התוצאות מראות גם, שאחוזי השיפורים באיכות האוויר היו יותר גבוהים לאוזון, חלקיקים (PM) ותחמוצות גופרית ואף, שהשיפורים באיכות האוויר, הודות לעצים, הם יחסית נמוכים, השיפור **אינו במזהם בודד**, אלא **במספר מזהמים** ולכן השיעור של הסרת המזהמים הוא משמעותי. (מאות לאלפי טון/מטר של זיהום לכל עיר)

עם זאת, להערכתנו ובכל הכבוד הראוי, הנתונים הללו, אינם מעריכים, לפחות לא במידה הראויה, את כל האפקט של היעור העירוני, בשל שתי עובדות עיקריות:

ראשית העובדה, שהנתונים אינם מחשבים את היכולת של עלוות העצים למנוע את הערבוב של המזהמים בשכבות האוויר העליונות להגיע לפני הקרקע ושנית, חשוב להדגיש, שערך שנתי של ספיחת מזהמים עירונית כוללת, שהינו נמוך לכאורה, יכול להיות משמעותי מאוד בחלק מסויים נתון של אותה עיר.

לדוגמה ערך של זיהום ממוצע שנתי עירוני קטן -1%, באיזור נתון מסויים בעיר, יכול לעמוד על 13% ספיחה בשעות של פעילות אנושית עמוסה באותו האיזור.

6.2.3 חסכון בשימוש של אנרגיה

במקרים רבים, עצים מצילים על הבתים ומפזרים לחות באופן המקטין את התחממות הבית בקיץ, או מונעים מרוחות קרות לקרר את הבית בחורף, ועל כן חוסכים אנרגיה לקירור וחימום הבתים

בהתאמה. התוצאה הנוספת הנובעת מעובדה זו, היא חסכון עקיף במזהמי אוויר הנוצרים מייצור חשמל בתחנות הכוח.

6.3 השפעת שליליות של עצים על איכות האוויר

6.3.1 פליטות VOC,s מעצים

עצים לא רק סופחים מזהמים – הם גם פולטים אותם. פליטת VOC's ע"י עצים תורמת להיווצרות אוזון (O3) ופחמן חד חמצני (CO).

תרכובות אורגניות נדיפות ממקור ביוגני, **העיקריות** שבהן איזופרן ומונוטרפן, נפלטות באופן טבעי מסוגים רבים של צמחים. **האיזופרן**, למשל, נפלט מעלים של עצי צפצפה, אלון, ערבה, שקמה ואיקליפטוס. ההשערה היא, שעצים אלו פולטים איזופרן כדי להגן על עצמם מהחום. האיזופרן מתקיים בטרופוספירה ובשילוב עם קרינת השמש, תחמוצות חנקן ותרכובות אורגניות נדיפות ממקורות תעשייתיים, נוצרים המזהמים השניוניים האמורים.

האם עצים אלה לפיכך תורמים לזיהום אוויר? יש שיענו על כך בחיוב אך, לטעמנו, לא בהכרח. באטמוספירה עם ריכוזי נמוכים של תחמוצות חנקן (באזורים כפריים למשל), עצים מורידים את רמת האוזון, מחמת העובדה, שפליטת תרכובות אורגניות נדיפות תלויות בטמפרטורות (ככל שהטמפרטורות גבוהות יותר כך תגדל גם כמות הפליטות) ועצים, כזכור, מפחיתים בדרך כלל טמפרטורות. עליה בכיסוי עצים מורידה את רמתן הכוללת של הטמפרטורות וכתוצאה מכך את רמת האוזון.⁹

השאלה היא האם עצים אלה פולטים יותר מזהמים משהם סופחים ועקב כך נוצר אוזון בכמויות גדולות מאלו הנספחות על ידם. מאחר ומדובר ברשת של השפעות, קשה לאמוד זאת אך בהחלט ניתן לקחת זאת כשיקול בבחירת העצים במדיניות נטיעות להפחתת זיהום אוויר. ישנן טבלאות בהן מדורגים העצים לפי פליטות האיזופרן והמונוטרפן שלהן ובהן ניתן להשתמש בשיקולי נטיעות עצים.

6.3.2 פליטת מתחזקת עצים

עצים לרוב תלויים, לצורכי התחזוקה שלהם, בהשקעת אנרגיה רבה, בעיקר מפעולות המבוצעות באמצעות מכשירים מכאניים המופעלים מדלקים פוסיליים, כמו שינוע, גיזום וניקוי עלים. הפליטות ממיכון זה הן של תרכובות אורגניות נדיפות, פחמן חד חמצני ותרכובות חנקן וגופרית. כמות הפליטות מאותם מכשירי תחזוקת עצים צריכה אף היא להישקל, בקביעת מאזן ההשפעה הכולל של עצים על איכות האוויר.

6.4 השפעות משולבות של עצים על זיהום אוויר

למרות העובדה שעצים פולטים מזהמים ולא רק סופחים אותם, שינויים במיקרו אקלים העירוני משפיעים על היווצרות הפליטות ובעיקר על היווצרות של אוזון. באזור אטלנטה ארה"ב נערכה הדמיה במודל, בה דוגם אבדן של 20 אחוזים מערך בעקבות פעילות עיור והתוצאה הייתה, **עלייה בריכוז האוזון** ברמה של 14%¹⁰.

במילים אחרות: למרות שכמות העצים הכוללת **פחתה** וכתוצאה מכך פחתו גם פליטות ה-VOC's, טמפרטורות האוויר **עלתה** הודות לאי החום העירוני, אשר נוצר בעקבות אובדן העצים. עליית הטמפרטורה, בתורה, הובילה ליצירת תגובות כימיות במעורבות של תרכובות אורגניות נדיפות משאר העצים וממקורות אנתרופוגניים, **שהעלו בסופו של דבר את כמות האוזון**.

7. כיצד עצים סופחים מזהמים

7.1 תנועתם של מזהמים

המזהמים עוברים ממקום היווצרותם המקורי לעצים וצמחים, באמצעות רוחות ומערבולות אוויר. המהירות שבה הם זזים בשכבת העירוב, משתנה ממקום למקום. מרחק ממוצע של שינוע אופקי של מזהמים, הוא בין 100 ל-500 ק"מ ליום. במהלך התנועה המזהם עובר תהליכים כימיים, אשר מעבירים את המזהמים הראשוניים למצב שניוני ולאירוסולים. השינוי בצורה הכימית והפיסיקלית משפיע על קצב השיקוע מהאטמוספירה באמצעות שיקוע רטוב ושיקוע יבש (Fowler dry and wet deposition) (2002)¹¹.

7.2 הסרתם של מזהמים מהאטמוספירה

זיהום אוויר מוסר מהאטמוספירה בשלוש דרכים: **שיקוע** (deposition) **רטוב**, **שיקוע יבש** ותהליכים כימיים

7.2.1 שיקוע רטוב

שיקוע רטוב מורכב משני אופנים: בראשון, המזהמים מתווספים להתעבות של העננים לפני שהטיפות מתחילות ליפול ובשני, המזהמים נספחים לטיפות של גשם, ברד או שלג.

7.2.2 שיקוע יבש

7.2.2.1 שיקוע יבש של גזים:

במצב של שיקוע יבש, עצים סופחים מזהמים במצב צבירה גזי, בעיקר ע"י שאיבה דרך הפיוניות בעלה. הפיונית היא פתח בעלי הצמח אשר מווסת את חילוף הגזים בין הצמח והסביבה. דרך הפיונית מתרחשת גם דיות (התאדות) של מים מהעלה. במהלך שעות היום כאשר העלים מאדים מים בתהליך הדיות, גזים, **כולל מזהמים במצב גזי**, נכנסים לעלה. בתוך העלה, הגזים מתפזרים בחללים בין התאים ונספגים ע"י רקמות מים ליצירת חומצות או לתגובה עם חללים בתוך העלה. ברגע שהגז מגיב עם העץ ונקלט בעץ, הוא מוסר מהאטמוספירה. בנוסף, גזים מסוימים נספחים בשטח הפנים של העלה¹².

7.2.2.2 שיקוע יבש של חלקיקים

עצים גם סופחים זיהום ע"י קליטת חלקיקים. חלקיקים נוחתים על העלים כתוצאה מגרביטציה ותנועת הרוח. חלקיקים מסוימים נקלטים בתוך העץ, למרות שרוב החלקיקים נשארים בשטח הפנים של העץ. החלקיקים מתיישבים על חופת העץ ונצמדים לשטח העלה. החלקיקים חוזרים בסופו של דבר לאטמוספירה, נשטפים ע"י גשם או נופלים לאדמה עם העלים או הענפים. בסופו של דבר, העצים הם אתר אחזקה זמני לרוב החלקיקים¹³.

7.2.3 אופן ספיחת המזהמים על ידי עלים

ספיחה של מזהמים לתוך העלה משתנה בעקבות גורמים שונים ונקבעת לפי כוחות הקשורים למזהם, לצמח ולסביבה (המאזן של המים בעלה, כמות האור, מהירות הרוח, מסיסות הגז במים, צורת העלה) (Smith 1981)¹⁴.

האופי של שטח הפנים של הצמחייה והתגובה הכימית בין המזהם לעלה, משפיעים על שעורי השיקוע. ככל ששטח הפנים יותר גס שעורי השקיעה יותר גבוהים. ככל שהתגובה הכימית של המזהם עם העלה חזקה יותר, כך הוא שוקע מהר יותר.

לדוגמא: SO₂ (גפרית דו חמצנית) ו-O₃ (אוזון) יוצרים תגובות כימיות הן עם שטח הפנים החיצוני והן בתוך העלה. במפגש של SO₂ עם שטח הפנים של העלה יש שכבת שעווה בשם קוטיקולה אשר מגינה על הצמח מאיבוד מים, ושכבה של מים בעובי כמה מולקולות. (בארצות

צפוניות רוב השנה יש שכבה של מים על העלים). הרכב היונים, כחלק מהרכב של מולקולות המים בשכבה החיצונית קובע את קצב המסיסות של תחמוצת הגופרית.

במקרה של O₃, מחקרים ביערות בסקוטלנד לאורך שנתיים, על ספיחה של אוזון, הראו שיותר ממחצית הספיחה של האוזון נעשית לא דרך הפיוניות אלא על שטח העלה. הספיחה של אוזון בשטח הפנים של העלה הוא לא ע"י שכבת מים. הכימיה של המפגש בין האוזון לשטח העלה אינו ידוע והוא מושא לחקירה¹⁵.

8. גורמים נוספים המשפיעים על ספיחת המזהמים

8.1 כללי

הגורמים הנוספים המשפיעים על ספיחת המזהמים הם, על פי מודל UFORE : עונות השנה, משך היום, האם העץ ירוק עד או נשיר, גודל העץ, ריכוזי הזיהום ומשקעים ומשתנים מטאורולוגיים כגון גובה שכבת העירוב.

ברמה העירונית, כאשר באים לאמוד יכולת ספיחה במרחב העירוני, הגורמים הם: אחוז שטח כיסוי העצים בעיר וצפיפות העצים.

8.2 עונות השנה ומשך היום

ההשפעה של עצים על ספיחת אוזון, תחמוצות גופרית ותחמוצות חנקן גדולה יותר בשעות היום, מאשר בשעות הלילה.

בתהליך הדיות, בתקופה בה העצים מכוסים בעלים (באביב ובקיץ), הסרת חלקיקים מתרחשת יום וליל כל השנה.

ספיחת פחמן חד חמצני (CO) מתרחשת כל היום ובתקופה בה העצים מכוסים בעלים, אך בקצב איטי יותר משאר המזהמים.

8.3 עצים ירוקים או נשירים

עצים ירוקי עד סופחים יותר מעצים נשירים וגם במשפחת העצים הנשירים יש יתרון לעצים עם רמת נשירות נמוכה ותקופת עלים יותר ארוכה, יחסית, לאלו בעלי רמת הנשירות הגבוהה.

8.4 גודל העץ

עצים גדולים מסירים פי 60 עד 70 (!) מזהמים לשנה מאשר עצים קטנים, משום שיש להם שטח פנים וביומסה יותר גדולים של עלים.

8.5 כמות משקעים

כמות משקעים רבה יותר מובילה להפחתה בספיחה של שיקוע יבש, שעל פיו מתבסס מודל UFORE

8.6 ריכוזי זיהום

עלייה בריכוזי זיהום האוויר מובילה לעלייה בספיחה הכוללת.

8.7 תנאים מטאורולוגיים

שיפור באיכות האוויר עקב ספיחת מזהמים ע"י העצים עולה ככל ששכבת העירוב באטמוספירה יורדת בגובה.

8.8 הרמה העירונית : שטח כיסוי וצפיפות

ככל שעצים מכסים שטח עירוני גדול יותר עולה גם כמות הספיחה יחסית לשטח כיסוי קטן יותר. בערים עם אזורים של 100% כיסוי עצים (יער טבעי) אחוז השיפורים באיכות אויר, בתקופת העלים הירוקים במהלך היום, הייתה 2% עבור אוזון, חלקיקים (pm) ו-SOXs. בערים אחרות, שיפורים באיכות אויר לטווח קצר (שעה אחת) באזורים עם 100 אחוזים כיסוי עצים הייתה 16% לאוזון ותחמוצות גופרית, 9% לתחמוצות חנקן, 8% לחלקיקים, ו-0.03 לחד תחמוצת הפחמן.

בהשוואה בין נתוני הספיחה בערים השונות בארצות הברית, ניתן לראות כיצד הגורמים המשפיעים על הספיחה שנימנו לעיל, משפיעים על הנתונים. בלוס אנג'לס, למשל, נמצאו נתונים גבוהים של הורדת זיהום ליחידת שטח בשל היות רוב העצים ירוקי עד, עם מיעוט משקעים וריכוז מזהמים גבוה יחסית, שהוביל למהירות וכמות שיקוע גבוהה. מינאפוליס הצפונית, לעומת זאת, היא העיר עם נתוני ספיחת המזהמים הנמוכים ביותר ליחידת שטח בשל העובדה שרוב העצים נשירים עם תקופת עלים קצרה.

8.9 השפעת סוג העץ על ספיחת המזהמים

מחקר אנגלי שהשווה בין חמישה סוגי עצים, שהשווה את יכולתם לקלוט חלקיקים קטנים מעשרה מיקרון על שטח הפנים שלהם, מצא שעצים מחטניים סופחים יותר חלקיקים מעצים רחבי עלים. מבין העצים רחבי העלים, עלים עם שטח פנים מחוספס סופחים יותר חלקיקים. הדרך לאמוד רמות שונות של ספיחת חלקיקים ע"י עצים באופן מבוקר היא ע"י חשיפה של עצים למינונים ידועים של חלקיקים במנהרות רוח. מידע זה מספק מודלים שימושיים, על מנת למקסם את התועלות של עצים לאיכות אויר המקומית. (Beckett 2000)¹⁶.

מחקר נוסף שבדק יכולת קליטה של תחמוצות חנקן ע"י 217 צמחים ועצים שונים סימן מספר עצי רחוב כבעלי יכולת קליטה גבוהה לתחמוצות חנקן ביניהם מינים של אקליפטוסים וצפצפות, שנמצאים גם במזרח התיכון. חנקן דו חמצני הוא בעל תפקיד חשוב בחילוף החומרים שלהם ולכן ניתן לכנותם כבעלי חיבה לחנקן דו חמצני. ניתן להשתמש בהם כצמחייה בצידי כבישים בשביל להפחית את כמות דו תחמוצת החנקן באטמוספירה. (Morikawa 1998)¹⁷.

8.10 השפעת זיהום האויר על הצמחיה

ההשפעה של מזהמים על עצים משתנה לפי סוג המזהם, הכמות שלו, סוג וגיל העץ, תנאים סביבתיים ועוד. מזהמים עשויים לגרום לפגיעה בגדילה, מחלה ואף מוות. יש להבדיל בין פגיעה מריכוז גבוה של מזהם לבין חשיפה של כמויות קטנות של מזהמים לאורך זמן. מזהמי אויר פוגעים בעלים וגורמים להם לכתמים, לכלורזה ונמק. הקצב של פוטוסינתזה של עצים פוחת גם הוא בשל מזהמי האויר.

התהליכים המעורבים בכך, הם סגירת הפיוניות, שינויים בשיעור חילוף החומרים ופגיעה בקרומי התא. הצטברות חלקיקים על העלה מונעת מאור להגיע לעלה ובכך בפוטוסינתזה. לטווח ארוך הפגיעה בפוטוסינתזה גורמת לירידה ביצירה ובגדילה של העלים. בנוסף תיתכן פגיעה בגידול העץ, בגודל הגזע ובשורשים.

עמידות לזיהום משתנה בין מינים וגם בתוך אותה משפחה קיים, לעתים, שוני. הדבר קשור לגודל העץ, מספר הפיוניות ולעמידות בתגובות הביוכימיות. ניתן להשביח זני עצים שהראו עמידות טובה למזהמים, בנוסף לתכונות נבחרות אחרות. (Kozlowski 1986)¹⁸.

9. מתודה לחישוב ספיחת מזהמים על ידי היער האורבאני: Novak ומודל UFORE

9.1 רקע ומטרת המחקר

תחום מחקרו של דויד ג'י נובאק מאגד מדענים שונים ותיאוריות שונות ליצירת 5 מודלים עיקריים, שבאמצעותם ניתן להעריך את היכולת והתכונות השונות של היער האורבאני. מטרת מחקריו היא לעזור

למתכננים ומנהלים שונים להעריך ולכמת את המבנה של היער העירוני ואת השירותים השונים שהוא מספק, ועל ידי כך לנהל את היער האורבאני באופן היעיל והמקיים ביותר.

9.2 המבנה הכללי של המתודה המחקרית

המודלים מבוססים על נתונים אמפיריים וחישובים תיאורטיים, הניתנים לאיסוף ולחישוב על ידי מדידות שטח, פענוח של תצלומי אויר והצבת הנתונים במשוואות המודלים. משוואות המודלים מתבססות על חוקים ביולוגים, פיזיקאליים וכימיים שונים, המשוקללים למודל מורכב.

מטרת המודל היא כאמור, לכמת את השירותים השונים המסופקים על ידי היער האורבאני. בעזרת הצבת נתונים אמפיריים במשוואות המודלים, ניתן להעריך את כמויות המזהמים הנספחים על ידי היער, כמויות התרכובות אורגאניות הנדיפות שמופצות על ידי היער, יכולת אגירת הפחמן של העצים, והשפעת היער על הטמפרטורה האזורית.

10. מודל UFORE : חמשת סוגי המודלים.

10.1 כללי

מודל UFORE¹⁹ מחולק לחמישה מודלים שונים, המכמתים פעילויות ופונקציות שונות של היער האורבאני.

סוגי המידע הנדרשים על מנת ליישם את המודלים השונים הינם: נתונים מטאורולוגים, נתוני זיהום אויר, נתוני היער ונתוני השטח עצמו – סוג האדמה או אופן השימוש בה. על מנת ליישם את המודלים B ו-D (שיפורטו בתמצית בהמשך) יש צורך במערך נתונים דיגיטאלי, המתעדכן על בסיס שעותי, של נתונים מטאורולוגים ושל נתוני ריכוזי זיהום אויר.

להלן תאור תמציתי של חמשת המודלים עם התמקדות על שני המודלים הרלוונטיים להצעת מחקר זו (A ו-D):

10.2 מודל UFORE-A - אנטומיה של היער האורבאני : זהו המודל הרלוונטי עבור מחקרנו ולכן נרחיב עליו.

המודל הראשון הינו מודל בסיסי, שמטרתו הן לאפיין את סוג היער האורבאני, מבנהו, תכונותיו המשמעותיות וכן לכמת את הביומאסה שלו.

מודל כולל את שלב של איסוף נתונים רלוונטיים, מדידות שטח, פענוח של תצלומי אויר, חישוב ביומאסה של העצים על ידי הצלבת נתונים והסקת מסקנות לגבי מבנה היער האורבאני.

במודל זה משתמשים בנתוני השדה לכימות של מבנה היער האורבאני באזור מוגדר, לפי שימושי קרקע או לפי סוגי מינים של עצים.

המודל מכמת את מספר העצים, קומפוזיציה המינים, צפיפות העצים, קוטר העץ בגובה נשימה, יכולת ההפצה של עצים באזור, גובה תחילת הכותרת, אזורי הנסיגה של העלים בכותרת (אזורים לא חיוניים), שטח העלים וביומאסה של העלים (לפי המשוואות הפרוגרסיביות שפורטו שם).

המודל גם בודק את המצב הבריאותי של העצים, העושר של המינים השונים, יכולת ההתרבות וההפצה שלהם לפי מקור מין העץ, הפצה של חיפויי קרקע ומפגעים של מזיקים כגון עש, סוגי מבנים ומאפייני מבנים, מרחק העצים ממבנים ועוד נתונים על פי הצורך.

מודל זה הינו שלב בסיסי והכרחי לכל אחד מהמודלים האחרים, שהינם מודלים המתמחים בסוג שירות ספציפי של היער כגון, אגירת פחמן או קירור טמפרטורה.

עוד מכיל מודל זה את שלב המדידות האמפיריות של היער, מדידות השטח שפורטו למעלה ובנוסף את ההמרה של נתונים אלו, לחישובי הביומאסה של העלים. במודל זה מחלקים את השטח לשדות מדידה קטנים על מנת לאפשר איסוף נתונים מדויק ומסודר (ראה סעיף 18 – מתודת המחקר בפרק המיפוי).

10.2.1 איסוף נתונים אמפיריים חיצוניים ליער האורבאני

נדרשים נתונים נוספים לשימוש במודלים של נובאק, נתונים מטאורולוגים שונים ונתוני ריכוזי מזהמים שונים באוויר. לדוגמא, איכות השירותים השונים של היער האורבאני, כגון ספיחת מזהמים ואגירת פחמן, מושפעים מפרמטרים שונים כגון: התנגדות האוויר, קרינת השמש, לחצים אטמוספיריים, מהירות הרוחות, אחוזי לחות ועוד.

10.2.2 איסוף נתונים אמפיריים של היער האורבאני: מדידות שטח וניתוח של תצלומי אויר

איסוף הנתונים האמפיריים מבוסס על שילוב בין מדידות שטח לבין שיטות לניתוח תצלומי אויר. (הרחבה על שיטות מדידה וניתוח שטח עירוני מיוער על ידי תצלומי אויר מתוארות במאמר: "Measuring and analyzing urban tree cover"²⁰)

10.2.2.1 איסוף נתונים בעזרת שיטות לניתוח ומיפוי תצלומי אויר של היער העירוני:

את המפה מחלקים לאזורי חלוקה משניים של היער, זאת על מנת להקל וליעל את שלב ניתוח הנתונים. אזורי המשנה נקבעים לפני סוג תנאי השטח וסוגי שימושי הקרקע השונים. דוגמאות לנתונים שיש לאספם: כמות עצים לשטח נתון, כמות זנים בשטח נתון, מצב בריאותי של העצים, גיל של העצים, מימדים של כותרות העצים, קומפוזיציה העצים - מיקום של העצים ביחס לתנאי השטח וסוגי שימוש הקרקע (מבנה היער).

המאמר המוזכר²¹, מסכם את המתודות השונות למדידות שטח מיוער ומיפוי על ידי ניתוח של תצלומי אויר.

שיטות ניתוח תצלומי האוויר המפורטות במאמר של נובק הן: מדידה על ידי סימון קווי רוחב המייצרים חלוקה לפי פרמטרים שונים, חלוקה לנקודות מדידה המייצגות אזורי איסוף נתונים ושיטה אחרונה - ניתוח על ידי סריקה רב שכבתית, כאשר כל שכבה מייצגת שכבת נתונים שונה של השטח.

בשתי שיטות הניתוח הראשונות, מפורטת הדרך לחישובי סטיות נפוצות. למתודה האחרונה, המתבצעת על ידי סריקה ושהינה המתודה המדויקת ביותר, נדרש ציוד מיוחד ויקר ועבודה אינטנסיבית וקפדנית יותר. הרחבה נוספת לטכניקות של דיוק בפענוח תצלומי אויר ניתן למצוא במאמר: "Urban cover mapping using digital, high spatial resolution aerial imagery"²². - במאמר זה הדגש הוא על יכולת הבדלה בין סוגי שטח המתקבלים בתצלומי אויר, באופן זהה העלול לבלבל, כגון מים ומשטחי בטון, שלעיתים נראים זהים. המאמר מרחיב על פילטרים שונים לפענוח תצלומי האוויר.

10.2.2.2 איסוף נתונים על ידי מדידות שטח:

סוגי הפרמטרים שמודדים בשטח: עוביים של הגזע (בדר"כ בגובה החזה), מימדים ומשקלים של עלים (רטבים ויבשים), גובה העץ, היקף הכותרות, גובה התחלת הכותרת, מצב בריאותי של העצים וגילאים של העצים. המדידה של כל עץ נעשית על ידי מקל מדידה טלסקופי ולקיחת עלים מכמה אזורים שונים של העץ על ידי מנוף קטן. העלים נמדדו ונשקלו, יובשו ונמדדו שוב.

פירוט והרחבה של שיטות מדידות השטח השונות של קוטר הגזע, גובה ורוחב של עץ, מרחקים ממבנים ועוד פרמטרים נוספים, ניתן למצוא בספר הוראות המשתמש של תוכנת ה-"I-Tree". תוכנה זו, פותחה על בסיס מחקריו של נובאק, במטרה לעזור למתכנן העירוני, לנהל ולמקסם את שירותי היער האורבאני.

בעזרת הממשק של תוכנה זו ניתן להזין נתונים אמפיריים שונים ולחשב שירותים שונים של היער האורבאני כפי שיפורטו בסעיף הבא. בהוראות השימוש ניתן למצוא פירוט של דרכי המדידה והתמודדות עם מדידות של עצים חריגים שונים (ראה עמ' 128-132 ב-" I-TREE Software Suite User's manual- Appendix C. UFORE Appendices"²³).

10.2.3 הצלבת נתונים ראשונית וניתוח פרמטרים מרכזיים ראשוניים לאפיון היער האורבאני:

שני המשתנים המהותיים המשפיעים על היקפו של השטח המיוער הינם, אופי הסביבה הטבעית - אקלים וסוג אדמה, ואופן השימוש והניצול של השטח על ידי האדם.

ערי מדבר, ערי ערבה וערים מיוערות מכילות אחוזים כלליים של שטחים ממוצעים מיוערים, אך עם זאת, אחוז זה משתנה בעקבות מאפיינים ספציפיים של כל עיר, הקשורים גם לדרך בה האדם מנצל את האדמה.

דוגמאות לדרכי ניצול שונות הן: משטחי בטון- מגרשי חנייה וכבישים, אדמה ירוקה מעובדת כגון פארקים ומדשאות, אזורי בר טבעיים, מקורות מים טבעיים ומלאכותיים ועוד. לכן, גם עיר עם פוטנציאל ייעור טבעי גבוהה יכולה לסבול ממחסור בצמחייה עקב ניצול משמעותי של קרקע לשימושים המונעים צמיחה והתרחבות של היער האורבאני.

את נתוני הצפיפות של העצים בשטח המיוער אפשר להציב בטבלה כנגד סוג האדמה (מדברית, ערבה או מיוערת) וכנגד אופן השימוש האנושי באדמה (חקלאות, מגורים, בר, תשתיות בטון ועוד) ובכך להסיק מסקנות הקושרות בין פעילויות אנושיות המעודדות את הייעור העירוני ופעולות אנושיות המעכבות כיום את יכולת הייעור האורבאני. (ראה עמ' 53-54 לטבלאות 2,3,4,5 למאמר הנ"ל "Measuring and analyzing urban tree cover"²⁴. בנוסף ניתן לייצר טבלאות משנה המחלקות את העצים לפי מינים, גילאים ומצב בריאותי, שוב, בהשוואה לסוגי הקרקע ואופן שימושי הקרקע.

10.2.4 שימוש בנתונים האמפיריים ליישום משוואות המחשבות ביומאסה של עלים.

חישובי שטח הפנים של העלים והביומאסה של העלים לעץ מסוים מפורטים במאמר: "Estimating leaf area and leaf biomass of open-grown deciduous urban trees"²⁵.

במאמר זה, מציג נובאק את משוואת החישוב הרגרסיבית העוזרת לחשב את שטח הפנים וביו-מאסת העלים של עץ נשיר. הנוסחה מחשבת את הערך הכללי הממוצע של העץ, תוך התחשבות בכלל עונות השנה ובמצבים המשתנים של העץ בעקבות חילופי העונות (שלכת ופריחה). הנוסחה משפרת ומשכללת נוסחאות קודמות, שהתבססו על נתונים אמפיריים של היקפי העץ, לחישוב כלל השטח והביומאסה של העץ.

הנתונים האמפיריים הנדרשים להצבה במשוואת חישוב הביומאסה הינם: קוטר הגזע בגובה החזה- 4.5ft (dbh), גובה העץ, גובה הגזע עד לבסיס כותרת העלים, רוחב כותרת העלים, משקל העלים וגודלם, פני שטח חיצוניים של העץ ומקדם הצל שהינו קבוע ותלוי בכמות האור הנאגרת בכותרת העץ (מחקרו של: McPherson, 1984)²⁶.

10.2.4.1 נוסחת חישוב ביומאסה של עץ נשיר:

פרמטרים אלו מוצבים בנוסחה הרגרסיבית שפותחה במחקר של נובאק לחישוב הביומאסה וסה"כ כל שטח העלים בעץ (ראה עמ' 505):

$$\ln y = b_0 + b_1 H + b_2 D + b_3 S + b_4 C$$

כאשר: $Y =$ לשטח העלה (m^2) או למשקל ביומאסה של עלה יבש (g), $X =$ קוטר הגזע בגובה החזה- (dbh (cm) = H , גובה הכותרת (m), $S =$ ממוצע של אפקט ההצללה של המין הנבדק (את מקדמי הצל ניתן לראות בנספח המופיע במאמר בעמ' 506), C הוא החישוב החיצוני של שטח פני העץ (חישוב שנחקר על ידי Gacka- Grzesikiewicz 1980). נוסחה זו טובה לעצים ממוצעים עירוניים שגובה הכותרת שלהם נע בין 1 מ' ל-12 מ' ורוחב הכותרת הוא בין 1 מ' ל-14 מ', DBH שבין 11 ל-53 ס"מ ואפקט הצללה שבין 0.67 ל-0.88. רב העצים העירוניים, סביר שיתאימו לטווח הגדלים המפורט.

10.3 המודל השני UFORE- B: שיערוך פליטות של גזים ביו-גנים אורגניים (VOC'S).

כמות הפליטות קשורה לסוגי המינים השונים, ביומאסה של העלים, טמפרטורת האוויר ועוד כמה מרכיבים סביבתיים. המודל משערך את הפליטה בכל שעה. הביומאסה של העלים לפי סוג העץ (נתונים הלקוחים מהמודל הראשון), מוכפלים במקדם פליטות של אותו המין המסוים, על מנת להניב את דרגות הפליטה הממוצעות וזאת, בתנאי אור – שמש מלאים. למבנה היער ולסוגי המינים השפעה על כמויות הגזים הנפלטות.

מודל זה יכול לעזור לנהל ולתכנן שתילות ודרכי תחזוקה עתידיות חכמות יותר המייצרות פחות פליטות על פי צרכים מוגדרים.

10.4 המודל השלישי UFORE- C: יכולת אחסון של פחמן על ידי חופת היער.

העצים, דרך תהליך גדילתם, אוגרים פחמן בתוך הרקמות שלהם. על ידי תכונה זו, העצים עוזרים להוריד את ריכוז הפחמן שבאוויר. על מנת לחשב את יכולת האחסון, ביומאסה של כל עץ מחושבת (ראה סעיף 10.2.4.1) ומוכפלת ב-0.5 על מנת להיות מומרת לערך האחסון של העץ.

על מנת לחשב את יכולת האגירה השנתית של עץ משכללים את קצב גדילת העץ, התלוי במצבו הבריאותי (נתונים מהמודל הראשון). יש לציין, כי חסכון זה בריכוזי פחמן באוויר, הינו קטן ביחס לכמות הפחמן שניתן לחסוך על ידי קירור המבנים, על ידי היער האורבאני. הורדת הטמפרטורה מובילה לתצרוכת פחמן- חשמל קטנה יותר.

10.5 המודל הרביעי: UFORE- D: ספיחת גזים מזהמים על ידי עצים זהו מודל נוסף הרלוונטי עבור מחקרנו ולכן נרחיב עליו בסעיף הבא מס' 17.

מודל זה מחשב את ההדחה (ספיחה) השעתית של כמות מזהמים מן האוויר על ידי חופת היער האורבאני. המזהמים המודחים הם: PM10, O3, SO2, NO2, CO, M.

זרם המזהמים המודח (F) מחושב כתוצר של קצב ההדחה (Vd) וריכוז הזיהום (C).

$$F(\text{gm-2 s-1})=Vd(\text{ms-1})\cdot C(\text{gm-3})$$

10.6 המודל החמישי: UFORED- E: חסכון בצריכת אנרגיה בעקבות הורדת הטמפרטורה של מבנים עירוניים על ידי היער האורבאני.

שירות זה, של הורדת הטמפרטורה העירונית הינו שירות יעיל יותר משירות אגירת הפחמן, מכיוון שנחסך הזיהום במקור ולא לאחר ההפצה של המזהם. זאת אומרת לירידה בטמפרטורה יש השפעה ישירה על הורדת היקפי צריכת החשמל לצרכי קירור המבנים העירוניים ובכך יורדת רמת הזיהום, במקור, מהיקף צריכת החשמל העירונית.

11. הרחבה של המודל הרלוונטי מודל D:

11.1 כללי

המודל הראשון, כאמור, הינו מודל בסיסי המאפיין את סוג היער את מבנהו ותכונותיו המשמעותיות של היער האורבאני, המתודות והשיטות המנחות כמו גם הנוסחאות לחישובי הביומאסה פורטו בהרחבה בסעיף 2.2. המודל הנוסף, הרלוונטי עבורנו, הינו לב המחקר, מודל D. כאמור, מודל זה מחשב את ההדחה השעתית של כמות מזהמים מן האוויר על ידי חופת היער האורבאני. המזהמים המודחים הם: PM10, O3, SO2, NO2, CO, M.

11.2 נתונים הנדרשים ליישום המודל D (בנוסף למידע הנאסף ממודל A):

11.2.1

מערך עדכונים שעתיים מטאורולוגים. מהירות רוח, לחות אבסולוטית, קרינת שמש ולחצים אטמוספריים. בארה"ב מסופק על ידי ה- NCDC- National Climate Data Center

11.2.2

מערך מדידות של נתוני זיהום אויר שעתיים לפי סוגי מזהמים שונים. נתוני זיהום האויר מומרים ל- gm^{-3} על בסיס נתוני טמפרטורה ולחצים אטמוספריים. (Seinfeld, 1986) ומשולבים בנוסחאות למדידת זרם ההדחה ביחידות אלו. בארה"ב מסופק על ידי ה- EPA- Environment Protection Center

11.2.3

מדידות של גובה שכבת הגבול – מדידות הניעשות על ידי שילוב של מדידות הבוקר והערב לחישוב הגבהים המשתנים במשך היום. בארה"ב מסופק על ידי ה- EPA- Environment Protection Center.

11.2.4

נתוני קרינת השמש, בארה"ב, מסופקים על ידי ה- METSTAT – National renewable laboratory meteorological statistical solar radiation model.

11.3 נוסחאות המודל:

11.3.1 נוסחה א':

זרם המזהמים המודח (F) מחושב כתוצר של קצב ההדחה (Vd) וריכוז הזיהום (C).
$$F(gm^{-2} s^{-1})=Vd(ms^{-1}) * C(gm^{-3})$$

11.3.2 נוסחה ב':

עוצמת ההדחה מחושבת על ידי ערך הופכי לערך הכולל של נתוני ההתנגדות האוירודינמית (Ra), נתוני ההתנגדות של שכבת הגבול (Rb) ונתוני ההתנגדות של הצמרות (Rc). חישוב התנגדות של הצמרות מחייב עדכון מידע בכל שעה של נתוני קרינה אקטיבית פוטו סינטטית (PAR), טמפרטורה (K'), מהירות רוח (ms^{-1}), ריכוזי דו תחמוצת פחמנית (360ppm) ולחות אבסולוטית ($kg m^{-3}$).

$$Vd=(Ra+Rb+Rc)^{-1}$$

*הרחבה על חישובי התנגדות הצמרות והמשוואות השונות – המהווים חלק מרכב מאוד בחישובי המתודה, והמצריכים ידע בתחומי המדעים השונים, ניתן לקרא במאמר "modeling the effects of urban vegetation on air pollution"²⁷.

11.4 הכפלת תוצאות חישובי הספיחה לקבלת ערכים כלליים, של כלל היער האורבאני:

הממוצע השעתי של זרם הדחת המזהמים, מוכפל בשטח החופה המיוערת, זאת על מנת לשערך את קצב ההדחה הכללי, המתרחש כל שעה, בעיר על ידי היער האורבאני.

11.5 המרת ערכי זרם ההדחה לשווי כלכלי .

כמות ההדחה של היער מומרת לפי שווי המזהם המודח. המרה זו תפורט בהמשך בפרק הכלכלי של מחקר זה.

תיאור מקרה – ברוקלין, ניו-יורק, ארה"ב.

בעיר ברוקלין שבמדינת בניו יורק, ארה"ב התקיים מחקר יישומי לגבי היער האורבאני שלה. במאמר המסכם את שלבי המחקר ניתן לראות יישום מלא של מתודת הערכת המזהמים הנספחים על ידי היער האורבאני, משלב איסוף הנתונים והמיפוי ועד לשלבי החישוב של זרם הספיחה ותרגומו לערך כלכלי²⁸.

12. השפעות חיצוניות (Externalities): מהן ומדוע יש להתחשב בהן:

12.1 כללי

על פי ההגדרה, המקובלת במילוני המונחים הכלכליים, **השפעות חיצוניות** (Externalities) הן השפעות לוואי של פעילות כלכלית, אשר אין להן ביטוי במערכת המחירים של השוק. השפעות חיצוניות יכולות להיות חיוביות, ואז הן יוגדרו כתועלות חיצוניות. מאידך הן יכולות להיות שליליות ואזי הן ייקראו עלויות חיצוניות. עלויות חיצוניות יכולות לנבוע מזיהום אוויר, זיהום מים, אפקט החממה ועוד.

לדוגמה: כל קילומטר שאנו נוסעים ברכבנו, גורם לזיהום אוויר אשר, בתורו, גורם לתחלואה. אך העלות של תחלואה זו, המתבטאת בעלויות אשפוז בבתי חולים, הפסד ימי עבודה וכו' אינה משולמת על ידי הנהגים הגורמים לזיהום - עלות זו היא **עלות חיצונית**. (ראה האתר המשרד להגנת הסביבה)²⁹.

דוגמה קלאסית **לתועלת חיצונית**, למשל, היא כוורת הדבורים. כוורת הממוקמת בשדה מסוים, תורמת לכך שההפרייה של הצמחיה, באזור שבשדה שמסביבה, תהיה מקסימלית, ובכך תורמת לגידולים של חקלאים שאינם מעורבים בפעילות הכלכלית של ייצור הדבש בכוורת. (ראה אתר אקונומיסט)³⁰.

ההשפעות החיצוניות, עלות ותועלת חיצונית כאחד, מובחנות בכך שאינן משפיעות ישירות על השחקנים בשוק נתון, זאת מכיוון שהן משפיעות על שחקן או שחקנים אשר אינם מעורבים באופן ישיר ורצוני בעסקה הנוגעת בדבד.

12.2 חשיבות ההתחשבות בהשפעות חיצוניות:

נקודת האיזון במודל "השוק החופשי": בתפיסה הכלכלית הקלאסית המבוססת על השוק חופשי ישנה הכרה בהשפעות החיצוניות, אולם לרוב אין התחשבות בהן והן נתפסות כגורם שולי. הוגי התפיסה כלכלת השוק החופשי, התפיסה הכלכלית הדומיננטית בקרב כלכלנים רבים עד היום, כגון פרידריך האייק ומילטון פרידמן מתייחסים אל השפעות חיצוניות כאל "השפעות שכונתיות" או "גודשים".

ההפחתה בחשיבותן של עלויות החיצוניות, וההתעלמות מהן במרבית החישובים הכלכליים, מאפשרת למודל השוק החופשי להתעלם מן ההשפעה של הפעילות הכלכלית על הסביבה.

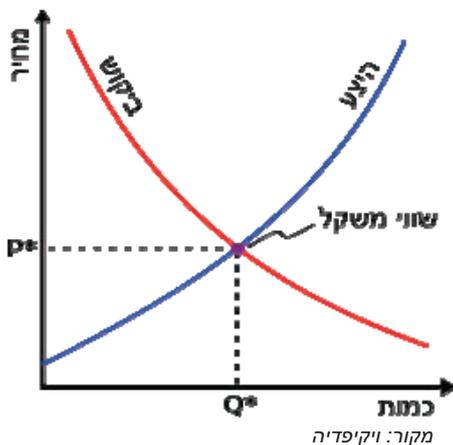
אחת מהנחות היסוד בתפיסת השוק החופשי, היא המודל הכלכלי של "היצע וביקוש", אשר מניח כי קיים קשר ישיר בין שני שחקנים חופשיים מרכזיים - **יצרן וצרכן**.

זהו מודל כלכלי אשר נלמד עד היום כאחד השעורים הראשונים בכלכלה על פי הנוסח של הכלכלן אלפרד מרשל, כלכלן בן המאה ה-19 בספרו "עקרונות הכלכלה". המודל מתיישב היטב עם תפיסת התועלתנות אשר ממנה צמחה כלכלת השוק החופשי, ובייחוד עם תפיסתו של ג'ון סטיוארט מיל אשר ראה בחירויות הפרט את חזות הכל.

בצורתו הבסיסית, המודל מניח קיומו של **שוק** של מוצר אחד, בו פועלים כל היצרנים וכל הקונים באופן רציונלי, משוחררים מהשפעות או כפייה, כשהם נהנים מידע מלא ומיידי על כל שינוי בשוק ויכולים להגיב לכל שינוי כזה מיידית. מערכת הנחות זו מכונה בכלכלה "**תחרות משוכללת**". ההנחה היא כי קשר זה בין שני שחקני השוק הללו (יצרן וקונה) יוביל למציאת נקודת האיזון בין הביקוש לבין היצע, ומכאן לייצור של הכמות המדויקת והרצויה של המוצר.

12.3 מודל הביקוש והיצע

מודל היצע והביקוש מוצג, בדרך כלל, בצורה הבאה:



על פי מודל הביקוש וההיצע ככל שמחירו של מוצר גבוה יותר, כך תפחת הכמות המבוקשת ממנו מצדו של הצרכן. ואילו ככל שמחירו של המוצר נמוך יותר, כך תגדל הכמות המבוקשת ממנו, והכמות המיוצרת והמוצעת של המוצר תגדל.

כאשר ההיצע והביקוש נפגשים באותה נקודה, ניתן לומר כי המערכת הכלכלית כולה נמצאת ב"שיווי משקל" וגם המחיר נמצא בנקודת שיווי המשקל שלו. האינטרסים של היצרנים והצרכנים בשוק נפגשים בנקודה זו באופן מיטבי, שכן המוצר מיוצר בכמות ובמחיר המתאימים לרצונותיהם ולתועלתם של שני הצדדים. כל זאת יביא למיקסום התועלת לחברה, שזוהי למעשה המטרה של המערכת הכלכלית כולה.

מודל ההיצע והביקוש אינו מתיימר לתאר במדויק מצב ממשי בשוק ממשי, אלא להצביע על הנטייה הכללית לאורך זמן של מחירים בשוק בו פועלים קונים ומוכרים. ובכל זאת זהו הבסיס אשר מתחשבים ומסבירים על פיו את המדיניות הכלכלית בחברות מסחריות, ממשלות ובקרב מרבית הגורמים השותפים בפעילות כלכלית.

עם זאת, למודל זה יש מספר חולשות ואחת העיקריות שבהן, היא כשל השוק של ההשפעות החיצוניות, ובייחוד הנזקים הנגרמים מן העלויות החיצוניות שהן ככל הנראה יותר מאשר "השפעות שכונתיות".

12.4 ההשפעות החיצוניות ונקודת שיווי המשקל של השוק

נשאלת השאלה, האם ללא ההתחשבות בהשפעות חיצוניות ניתן להגיע לנקודת שיווי המשקל הרצויה? על פי הכלכלה האקולוגית, ללא התחשבות בעלויות חיצוניות לא ניתן להגיע לנקודת שיווי המשקל. לפי גישה זו, עלות חיצונית כלומר מהווה את הכלל ולא היוצא מן הכלל. למעשה כל ייצור מלווה בעלויות חיצוניות. זאת מכיוון שיש לה השפעה על מערכות אקולוגיות שאינה נלקחת בחשבון. מקור חומרי גלם הוא מחומרי כדור הארץ, והזיהום נפלט אל המערכות האקולוגיות של כדור הארץ. ישנן עלויות חיצוניות הן ברמה מקומית האזורית, הגלובלית והבין דורית. לפיכך עלויות העסקה להפחתת הזיהום יהיו אדירות³¹.

12.5 התעצמות מעמד העלויות החיצוניות

בשנים האחרונות גם כלכלנים מן הממסד הכלכלי הניאו-קלאסי מאמינים כי ישנה חשיבות גדולה להשפעות חיצוניות, וכי יש להתחשב בהן ולהצמוד עימן.

הכלכלן ניקולס שטרן, מי שהיה סגן נשיא הבנק העולמי התבקש ע"י ממשלת בריטניה לחבר דו"ח אשר יעריך את הנזקים הכלכליים האפשריים כתוצאה ממשבר האקלים עקב ההתחממות הגלובלית – אולי העלות החיצונית הבולטת והמדובת ביותר בעולם כיום.³³

הדו"ח מעריך כי ייצוב גזי חממה באטמוספירה יעלה אחוז אחד מהתוצרת העולמית השנתית עד 2050. אי נקיטה בפעולה, לעומת זאת, עלול לקצץ את הצריכה העולמית לאדם ב-5 עד 20 אחוזים. הדו"ח מעריך כי התועלת שכרוכה בפעולות נגד התחממות הגלובלית שינקטו כבר השנה עומדת על 205 מיליארד דולר. כשולן בהתמודדות עם התופעה עלול להביא למשבר כלכלי דומה לזה של שנות ה-30 במאה הקודמת. שטרן מכנה את משבר האקלים "כשל השוק הגדול ביותר שידע העולם"³².

13. כשל השוק והגישות השונות להתמודדות עימו:

13.1 גילום ההשפעות החיצוניות במחיר המוצר

כשל השוק של השפעות חיצוניות נובע מכך, שהן אינן מגולמות במחיר המוצר.

מכיוון שהשחקן אינו מפוצה או נקנס על ההשפעה החיצונית החיובית / שלילית שלו, יש פחות מידי עסקאות עם השפעה חיובית ויותר מידי עסקאות עם השפעה שלילית. על כן מודל ההיצע והביקוש לא מגיע לנקודת האיזון האמיתית.

כך, למשל, מחיר המכוניות, אינו כולל את עלות הנזקים הבריאותיים או את השפעתן השלילית על המערכות האקולוגיות של כדור הארץ וכתוצאה מכך מחיר המכוניות נמוך מן המחיר שהיה מתקבל אילו

הייתה התחשבות אמיתית בעלויות החיצוניות. התוצאה היא שכמות המכונות הנרכשות גדולה יותר מן הרצוי, והתועלת לחברה לא מגיעה למקסימום.

באופן דומה מחיר החשמל בישראל אינו מייצג את מחיר הנזקים הבריאותיים הנגרמים כתוצאה מפליטת מזהמים, וגם לא את עלות הנזקים העתידיים, שייגרמו כתוצאה מפליטת גזי חממה לאטמוספירה והחרפת משבר האקלים.

13.2 מקור פתרון כשל השוק – בשוק עצמו

על פי בתפיסת ה"שוק החופשי", הדרך הטובה ביותר להתמודד עם השפעות חיצוניות היא דרך השוק. השוק לבדו מסוגל לפתור את הבעיה בצורה הטובה ביותר. כך במקרה של זיהום אוויר, עיתון האקונומיסט מציע לקבוע "זכויות אוויר" עבור אוויר נקי. מתן זכויות אלה יאפשרו בעל הזכויות לתבוע את המזהם אם אוויר מזהם יגיע אליו.³³

רעיון זה מבוסס על "תאוריית קואס" (Coase Theorem) אשר על פיה אם ישנן זכויות קנין מוגדרות וברורות, ניתן על ידי סחר בזכויות להגיע לשיווי משקל כלכלי ואין זה משנה מהי חלוקת הזכויות.

13.3 פתרון הכלכלה הסביבתית וביקורת הכלכלה האקולוגית

הכלכלה הסביבתית מציעה דרך התמודדות אחרת המבוססת על הטלת מסים על מוצרים בעלי השפעה חיצונית שלילית, או סיבסוד עבור מוצרים בעלי השפעה חיצונית חיובית. ההתערבות הזו תביא להפנמת ההשפעות החיצוניות, ולהצבת נקודת שיווי המשקל במקום המתחשב בעלות לחברה כולה- **העלות השולית החברתית**, ולא רק **בעלות השולית הפרטית**, המתחשבת רק בצרכן יחיד.

על פי תפיסה זו, אשר שייכת עדיין למסגרת הכוללת של תורת השוק החופשי, יש אמנם ניסיון להתחשב בעלויות החיצוניות ולהפנימן, אולם עדיין, ייצור של מוצרים מזהמים, נחזה כאילו הוא מביא תועלת לחברה, זאת מכיוון שיש להם ביקוש, מישהו ירצה לקנות אותם ובכך תגדל הנאתו.

הביקורת של הכלכלה האקולוגית היא, כי מדד זה עדיין מאפשר זיהום אשר יפר את האיזון של מערכות אקולוגיות, על אף שישנה הפחתה מסוימת ברמת הזיהום.

לטענתם המדד היחיד אשר צריך לקבוע האם המוצר מביא תועלת, הוא המדד של יכולת כדור הארץ להתמודד עם הייצור שלו. העיקרון הוא שאין לאפשר זיהום מעבר לכמות שהמערכת האקולוגית יכולה לטפל בו.³⁴

14. שימוש יתר בכלי רכב בישראל, העלויות חיצוניות מתחבורה בישראל והתרומה של ספיחת מזהמים על ידי עצים

14.1 העלויות החיצוניות מתחבורה בישראל.

המקור העיקרי של זיהום האוויר במרבית הערים הוא תחבורה. בחרנו להתמקד, לכן, בהבנת התרומה האפשרית של העצים להפחתת זיהום האוויר שמקורו בתחבורה, ולנסות ולחשב את הערך הכלכלי של הפחתת זיהום האוויר בעיר ע"י עצים על בסיס חישוב העלויות החיצוניות ממקורות של תחבורה עירונית, ולשם כך עלינו להכיר את המאפיינים של העלות החיצונית מתחבורה בישראל.

14.2 מאפייני העלות החיצונית מתחבורה בישראל:

זיהום אוויר – זהו המרכיב המוביל של העלויות החיצוניות התחבורתיות. עלויות זיהום האוויר אינן מיוחסות, כפי שכבר צויין לעיל למזהמים הנהגים דווקא אלא מוטלות, כמו שאר העלויות החיצוניות, על החברה כולה.

גודש וצפיפות – עיכובים בזמן הנסיעה הנגרמים לנהגים כתוצאה מהצפיפות בכבישים עולים, אין צורך לומר, בממון רב. צפיפות גורמת לפגיעה במרקם החיים העירוני, בנוחיות, בביטחון, בפרטיות, מצמצמת את מרחב המחיה ועוד.

תאונות דרכים – גורמות לעלויות כספיות כתוצאה מפציעות ומוות, פגיעה ברכוש, ירידה בפריון, הפסדי תוצר, חסימת התנועה בכביש לאחר תאונה ועלות ההפעלה של צוותי החירום המגיעים למקום התאונה.

התחממות גלובלית – כתוצאה מפליטת פחמן דו חמצני בעת שרפת דלק - אפקט גזי החממה.

רעש -פוגע בחלק ניכר מהאוכלוסייה במרבית שעות היום ובמיוחד באלה המתגוררים בקרבת עורקי תחבורה ראשיים.

זיהום מי תהום – בעיקר כתוצאה מדליפות ממאגרי דלק כלליים ומיכלי תחנות הדלק.

תשתיות לשימוש כלי הרכב – כולל בנייה, תחזוקה ומתן שירותים בנתיבים הבין עירוניים, תפעול מערכת חוקית ומשפטית לעברייני תנועה ועוד.

שימוש בקרקע – עלות הקרקע לתחבורה או לחנייה הניתנת ללא תשלום (מוערכת לפי שווי העלות האלטרנטיבית של שימוש בקרקע לתחומים אחרים).

סילוק כלי הרכב – כ 50 מיליון כלי רכב הופכים כל שנה לגרוטאות במדינות ה- OECD. (ראה דו"ח מיסוי ירוק המצויין להלן).

14.3 שימוש יתר בכלי רכב בישראל

העלויות החיצוניות האמורות אינן נלקחות בחשבון על ידי המשתמשים אך משפיעות על כלל הציבור. כתוצאה מכך ש"מישהו אחר" משלם עבור העלויות החיצוניות הללו והן אינן משולמות ישירות על ידי משתמשי הרכב הפרטי, נוצר מצב של מחירי חסר. כלומר, המחיר של שימוש ברכב עבור הפרט, אינו משקף את המחיר האמיתי, או, במילים אחרות, את התוספת של העלות החברתית.

מצב זה גורם לשימוש יתר בכלי רכב, ושימוש חסר באמצעי תחבורה אלטרנטיביים כגון הליכה, רכיבה על אופניים, נסיעה בתחבורה ציבורית ועוד. מבנה עלויות זה מגביר את בעיית הצפיפות, הזיהום והפגיעה הסביבתית, מקטין את השקעות ההון בתחבורה ציבורית ופוגע ברווחה החברתית, בשוויוניות וביעילות הכלכלית.

14.4 דו"ח הועדה הבין-משרדית ל"מיסוי ירוק"

דו"ח הועדה הבין-משרדית ל"מיסוי ירוק" הוגש בינואר 2008. הדו"ח מהווה תוצר של עבודה שנמשכה שנתיים והשתתפו בה נציגים של משרדי ממשלה רבים, כולל נציגות מכובדת של אנשי משרד האוצר. מטרת הועדה הייתה לגבש מדיניות כוללת בעניין הפחתת זיהום האוויר מתחבורה במטרה למצוא פתרונות להפחתת הזיהום והנזקים הנובעים ממנו.

מחברי מסמך "מיסוי ירוק" מציעים פיתרון קלאסי של הכלכלה סביבתית להתמודדות עם בעיה זו- מיסוי אשר ישווה את מחיר הנסיעה ברכב לעלות השולית החברתית. לשם כך יש להטיל על משתמשי הרכב מס בגובה הפרש בין העלות השולית החברתית, לבין העלות השולית הפרטית. כלומר, יש לחייב את בעלי הרכב לשלם את העלות השולית הכוללת של הנסיעה.

הכלכלה האקולוגית תטען כי גם השוואת הפער הזה מותירה בעינה את האפשרות כי כתוצאה משימוש ברכב הפרטי ייגרמו נזקים סביבתיים כלפי כדור הארץ במידה כזו שהמערכות האקולוגיות לא יוכלו לשאת, ולכן התיקון הזה איננו בהכרח מספק.

אולם בהתחשב בהתעלמות המוחלטת שהייתה נהוגה עד היום בכל הנוגע להשפעת הפעילות הכלכלית על הסביבה, יש לראות במסמך זה פריצת דרך בישראל.

המסמך חושף רגע נדיר של חשבון נפש בקרב קובעי המדיניות הכלכלית בישראל. ראשית זהו ניסיון לשנות את מקומן של העלויות החיצוניות בשיקולים הכלכליים, ולהשתמש בכלים כלכליים על מנת לתקן עיוותים סביבתיים וחברתיים. בנוסף לכך יש הכרה במוגבלות של התיאוריה הכלכלית הדומיננטית היום אל מול המציאות. דבר זה בא לידי ביטוי בהערת שוליים לכאורה שולית שנכתבה כהערה למשפט הבא:

"התיאוריה הכלכלית גורסת כי ניתן להגיע להקצאת מקורות יעילה בתחבורה כאשר מחיר הנסיעה ישתווה לעלות השולית החברתית".

ובהערת שוליים נכתב:

"המחירים בסקטור הפרטי לעיתים נדירות מקיימים תנאי זה, בשל מסים מעוותים ועמלות, תחרות לא משוכללת, בקרת מחירים, סובסידיה, מכסות, השפעות חיצוניות, מידע חסר ועוד."

הדו"ח מציע דרכים שונות למיסוי הנסיעה ברכב, דבר אשר עשוי להפחית את השימוש בכלי רכב פרטיים אם הוא יעשה נכון.

ראה דוח הוועדה הבין-משרדית למיסוי "ירוק", ריכוז ועריכה החטיבה לתכנון ולכלכלה, רשות המיסים בישראל [docs/misui150108.pdf/http://ozar.mof.gov.il/taxes](https://docs.misui150108.pdf/http://ozar.mof.gov.il/taxes)

דרך התמודדות נוספת, שניתן לאמצה והינה לב עבודה זו היא הפחתת הזיהום ע"י עצים. הדגש הוא על עצים בעלי יכולת ספיחת מזהמים גבוהה. ניתן לראות בכך דרך של התמודדות עם זיהום האוויר ע"י הגדלת היכולת של המערכת האקולוגית העירונית להתמודד עם מזהמים. ליכולת זו ישנו ניתן למצוא ערך כלכלי על מנת להשתלב בשיח של הכלכלי ולהוסיף ערך כלכלי לעץ אשר יילקח בחשבון ע"י קובעי המדיניות בנושא.

14.5 תיקון כשל השוק ע"י הפנמת העלויות החיצוניות- עצים בעיר (יער עירוני)

זיהום אוויר מתחבורה בעיר נגרם ע"י כלל משתמשי הרכב בעיר וגורם לנזקים בריאותיים ולנזקים אחרים שצויינו כבר לעיל. עקרונית, זהו נזק, אשר נגרם על ידי כלל תושבי העיר בעלי רכב ותושבי העיר, (ובעלי הרכב עצמם בכלל זה) הם גם הנפגעים העיקריים מן הזיהום. ברור, לכן, כי על העירייה מוטלת אחריות להפנים את העלויות החיצוניות מזיהום האוויר מן התחבורה בעיר בהיותה נציגת הקולקטיב של התושבים המזהמים החייבת לשמור על זכויות התושבים כולם. (ישנם כמובן נהגים שאינם תושבי העיר, אולם במקרה זה הם יהנו מהשפעה חיצונית חיובית של פעילות העירייה).

אחת הדרכים להפנמת העלויות החיצוניות של זיהום האוויר מתחבורה בעיר, היא על ידי התחשבות ביכולת ספיחת המזהמים של העצים בעיר ובהוספת המשמעות הכלכלית של יכולת זו לרשימת השיקולים בנטיעת עצים עירונית.

15. חישוב ערך העצים בעיר תוך התחשבות בעלות החיצונית

15.1 כללי

ישנה חשיבות רבה להתחשבות בעלויות החיצוניות של זיהום האוויר אותם חוסכים העצים. שיקול זה שוי להיות משמעותי בהחלטות בנוגע לתקציב נטיעת עצים בעיר. לדוגמא מתן העדפה לעצים בעלי יכולת גבוהה של ספיחת מזהמים, נטיעת עצים רבים יותר, מניעת כריתת עצים ועוד.

לאחר שבעזרת מודל UFORE נמצא את כמות המזהמים אותם מסוגלים לספוח העצים בעיר, נוכל לחשב את הערך הכלכלי של הפחתת זיהום האוויר ע"י עצים, על פי החישוב המוצג במתודולוגיה של הצעת מחקר זה.

הבסיס לחישוב הינו העלות החיצונית של זיהום אוויר מתחבורה בישראל.

בחרנו בבסיס חישוב זה מכיוון שמרבית זיהום האוויר בעיר מקורו בתחבורה. הערכים עליהם אנו מתבססים הם הערכים המומלצים ע"י משרד התחבורה במסגרת דו"ח מיסוי ירוק.

יש לציין כי, על אף שבמקרים רבים המחקרים המקומיים אשר יתבצעו על פי המחקר אשר יבוצע על בסיס הצעה זו יתמודדו עם ערים בהם מרבית זיהום האוויר על פני הקרקע מקורו מתחבורה, יהיו מקרים בהם החוקר יבקש לחקור עיר או שכונה בעלת מאפייני זיהום אוויר שונים, כגון שכונה הסמוכה למפעל מזהם. במקרים הללו יהיה על החוקר להתחשב במוקדי הזיהום המקומיים ובעלות החיצונית שלהם. הגופים העיקריים אשר יוכלו לספק לחוקר מידע מסוג זה אלו הם איגודי הערים לאיכות הסביבה הפזורים ברחבי הארץ אשר מפקחים על מקורות זיהום מקומיים בעזרת תחנות ניטור.

15.2 הנוסחה המוצעת:

עלות העץ (נטיעה ותחזוקה) - הערך הכלכלי של הפחתת זיהום האוויר + תועלות נוספות של העץ = התועלת הכלכלית לעץ נטו.

נוסחה זו מחשבת רק את התועלת הכלכלית הנובעת מאחד מיתרונותיו הרבים של היער האורבאני – יכולת ספיחת המזהמים על ידי עצים, שהיא מרכזו של המחקר המוצע כאן. יש לזכור עם זאת כי קיימות, כפי שהוזכר בפתיח, תועלות רבות נוספות, בעלת משמעות כלכלית לעצים, שתקצר היריעה מלפרטן כאן, אשר ניתן לראותן כבנוס, שלא להזכיר את הנושא החשוב מכל בו פתחנו – התועלת הבריאותית שוודאי תצמח מכך.

1. נושא ושאלת המחקר

16. נושא המחקר:

יכולת ספיחת מזהמים על ידי צמחייה במרחב העירוני ומשמעותה הכלכלית.

17. שאלת המחקר:

מהי התועלת (כלכלית ואחרת) של יכולת ספיחת מזהמים של עצים וצמחים במרחב העירוני ואיך ניתן להגדירה ולחשבה לישראל?

2. חשיבות המחקר

עצים וצמחים אחרים, הינם, כידוע, חלק טבעי ובלתי נפרד מחיינו.

לעצים תועלות רבות, מנקודת מבט אנושית – הם קולטים פחמן דו-חמצני ופולטים חמצן וכך משמשים עבורנו מעין מטהרי אוויר, חוסמים רוחות ורעשים, ממתנים טמפרטורות, מעלים, בדרך כלל, את ערך הנכסים שמסביבם ולא פחות ואולי אף יותר חשוב – משפרים את חיינו מבחינה אסתטית ועוזרים לנו לחוש רגועים ושלווים יותר.

תחום זיהום האוויר מחולק, עקרונית לזיהום אוויר פנימי (בתוך חללים סגורים) ולזיהום אוויר חיצוני, הכולל את כל האזורים השחורים שאינם חללים סגורים. אין חולק על חשיבות נושא זיהום האוויר הפנימי ובתחום זה נחשבים עצים וצמחים (להלן יחדיו "עצים") זה מכבר, כ"מטהרי אוויר" לכל דבר ועניין. עם זאת, הצעת מחקר זו מתמקדת ביכולתם של עצים לספיחת מזהמים חיצוניים, שמחוץ לחללים סגורים – תחום, שמעצם טבעו וטיבו מורכב הרבה יותר ומעמיד בפני חוקרים פוטנציאליים אתגרים גדולים וסבוכים יותר.

חשיבות הצעת המחקר המוצעת, היא פועל יוצא מהעובדה שלעצים יש גם יתרון גדול נוסף, המוכר ומנוצל היטב בעולם, אך, לצערנו, אינו מיושם כלל בישראל עד כה: לעצים יכולת לספוח מזהמי אוויר מסוגים שונים וכך הם עוזרים לצמצום ההיקף של בעיית זיהום האוויר – אחת הרעות החולות והמעיקות ביותר של החברה המודרנית, שפגיעתה רעה, מבחינה בריאותית, כלכלית וסביבתית.

ליכולת זו משמעות בריאותית, שאין צורך להכביר מילים לגביה ומשמעות סביבתית שגם היא, לטעמנו ברורה – עצים משנים מהותית, כפי שנראה בהמשך, את מראה הסביבה בה הם מצויים ואת התחושה ואופן ההתייחסות של כל אחד מאתנו אליה.

אולם, לצד התועלות הבריאותיות והסביבתיות, ליכולת המיוחדת הזו של עצים לספיחת מזהמים יש גם משמעות כלכלית נכבדה – בארצות הברית לבדה מוערך השווי הכלכלי הישיר של ספיחת מזהמים על ידי עצים בסכום עתק של קרוב לארבעה מיליארד דולר לשנה וזאת, בעיקר, עקב חסכוניות ישירים בהוצאות בריאות ובירידת ערך נדל"ן, לצד חסכוניות הנחשבים כעקיפים, לפחות בעיני הכלכלה המסורתית, כמו שיפור באיכות החיים והפחתה בפגיעה אפשרית במערכות אקולוגיות.

הצעת מחקר זו בודקת את עצם יכולתם של עצים לספוח מזהמי אוויר, כיצד מתבצעת הספיחה, האם תכונה זו מוטמעת כלל בשיקולי הנטיעות במדינת ישראל ומהי משמעותה הבריאותית הסביבתית ובעיקר הכלכלית.

כן מנסה הצעת מחקר זו, להציע לחוקר/ים, שיחקרו בעתיד, (כך אנו מקווים לפחות), את ההשלכות והתחומים הרבים המצויים במסגרתו של נושא חשוב זה, **מתודה מסודרת לביצוע מחקרים פרטניים, שיעקר תכליתם היא השערוך הכלכלי במקום ומצב נתונים**, של יכולת מופלאה זו של עצים וצמחים לספיחת מזהמי אוויר.

ח. שיטות המחקר

18. מתודת מחקר – התאמה לישראל:

18.1 שלב ראשון: מודל A

שלב זה כולל איסוף נתוני שטח של היער האורבאני, ניתוח של תצלומי אוויר וריכוז נתונים שונים של תכונות היער. לאחר, מציבים את הנתונים בנוסחה לחישוב הביומסה הכוללת של היער. פירוט השלבים:

18.1.1 חלוקת השטח העירוני לאזורי משנה על פי מאפייני שטח זהים.

בסעיף 10.2.2.1 מפורטות דרכים שונות לחלוקת השטח הממופה לאזורי משנה.

18.1.2 איסוף נתוני שטח של היער האורבאני על ידי מדידות שטח

נתונים הנדרשים הם: מספר העצים, קוטר הגזע בגובה החזה- 1.3 מטר (dbh), מימדים ומשקלים של עלים (רטובים ויבשים), גובה העץ, היקף הכותרות, פני שטח חיצוניים (מעטפת) של העץ, גובה הגזע עד לבסיס כותרת העלים וגילאים של העצים.

המדידה של כל עץ נעשית על ידי מקל מדידה טלסקופי ולקייחת עלים מכמה אזורים שונים של העץ על ידי מנוף קטן. העלים נמדדים ונשקלים, לאחר מיובשים, ונמדדים שנית. (10.2.2.2)

18.1.3 איסוף נתוני שטח על ידי תצלומי אוויר

תצלומי אוויר ניתן להשיג מגופים כגון המרכז למיפוי ישראל. הנתונים, שיש לשאוב מתצלומי האוויר הם: כמות זנים בשטח נתון, צפיפות העצים, אזורי הנסיגה של העלים בכותרת (אזורים לא חיוניים), מימדים של כותרות העצים, מיקום של העצים ביחס לתנאי השטח וסוגי שימוש הקרקע.

18.1.4 חישוב הביומסה של היער האורבאני:

חישוב הביומסה ייעשה על ידי הצבת הנתונים שנאספו בשלבים הקודמים במשוואה שפותחה במודל UFORE-A.

הנתונים האמפיריים הנדרשים להצבה במשוואת חישוב הביומסה הינם: קוטר הגזע בגובה החזה- 1.3 מ' (dbh), גובה העץ, גובה הגזע עד לבסיס כותרת העלים, רוחב כותרת העצים, משקל העלים וגודלם, פני שטח חיצוניים (מעטפת) של העץ ומקדם הצל.

פרמטרים אלו מוצבים בנוסחה הרגרסיבית שפותחה במחקר של נובאק לחישוב הביומסה וסה"כ כל שטח העלים בעץ

$$\ln y = b_0 + b_1H + b_2D + b_3S = b_4C$$

18.2 שלב שני: מודל D

יצירת מערך מידע או שימוש במערך מידע קיים, המתעדכן כל שעה.

18.2.1 נתונים מטאורולוגיים

כגון: מערך עדכונים שעתיים מטאורולוגיים. מהירות רוח, לחות אבסולוטית, ולחצים אטמוספריים ונתוני קרינת השמש ניתן להשיג ממסדי הנתונים של השירות המטאורולוגי הישראלי.

18.2.2 מדידות של גובה שכבת הגבול

מדידות הנעשות על ידי שילוב של מדידות הבוקר והערב לחישוב הגבהים המשתנים במשך היום. ניתן להשיג על ידי שירות המטאורולוגי (השמ"ט) אשר מריץ כיום מודל חיזוי אזורי, HRM שהינו פיתוח של השירות המטאורולוגי הגרמני לתחנות עבודה, ושהותאם ע"י השמ"ט לתנאי מזרח הים התיכון.

18.2.3 נתוני זיהום אויר

מערך מדידות של נתוני זיהום אויר שעתיים לפי סוגי מזהמים שונים. נתוני זיהום האוויר מומרים ל- gm^{-3} על בסיס נתוני טמפרטורה ולחצים אטמוספריים. ניתן להשיג מריכוזי נתוני הניטור של המשרד להגנת הסביבה.

18.3 שלב שלישי : שימוש בכל הנתונים שנאספו, לחישוב קצב הדחת המזהמים על ידי הצמחים השונים.

18.3.1 נוסחאות לחישוב קצב ההדחה של המודל:

18.3.1.1 נוסחה א':

זרם המזהמים המודח (F) מחושב כתוצר של קצב ההדחה (Vd) וריכוז הזיהום (C)
$$F(gm^{-2} s^{-1}) = Vd(ms^{-1}) * C(gm^{-3})$$

18.3.1.2 נוסחה ב':

עוצמת ההדחה מחושבת על ידי ערך הופכי לערך הכולל של נתוני ההתנגדות האווירודינמית (Ra), נתוני ההתנגדות של שכבת הגבול (Rb) ונתוני ההתנגדות של הצמרות (Rc). חישוב התנגדות של הצמרות מחייב עדכון מידע בכל שעה של נתוני קרינה אקטיבית פוטו סינטטית (PAR), טמפרטורה (K'), מהירות רוח (ms⁻¹), ריכוזי דו תחמוצת פחמנית (360ppm) ולחות אבסולוטית (kg m⁻³)

$$Vd = (Ra + Rb + Rc)^{-1}$$

הרחבה על חישובי ההתנגדות של היער מפורטת בסעיף 13.2.2

18.4 שלב רביעי : חישוב קצב הספיחה של סך כל היער האורבאני.

הממוצע השעתי של זרם הדחת המזהמים, מוכפל בשטח החופה המיוערת, זאת על מנת לשערך את קצב ההדחה הכללי, המתרחש כל שעה, בעיר על ידי היער האורבאני. כמות ההנדחה הכללית של היער ניתנת ביחידות המדידה: $gm^{-2} = F$

18.5 שלב חמישי : המרת ערכי זרם ההדחה לשווי כלכלי.

נוסחה להמרת ערך זרם ההדחה/ כמות ההדחה לערך כלכלי:

$$X gm^{-2} * \gamma euro =$$

החישוב לכל מזהם X, נעשה בנפרד, לפי כמות הדחתו שחושבה בסעיף הקודם ולפי עלותו המופרטת בטבלה הבאה:

חישוב הערך הכלכלי Y, של ספיחת מזהמים מתחבורה בעיר על פי הערכים בטבלה הבאה:

18.5.1 הערכת עלויות מזהמים כתוצאה מפליטת מזהמים מרכב (אירו לטון):

מזהם	עלות מוערכת
CO	500
HC	900
Nox	10,000
PM ₁₀	20,000
CO ₂	30

מקור: דוח הועדה הבין-משרדית למיסוי "ירוק", ריכוז ועריכה החטיבה לתכנון ולכלכלה, רשות המיסים בישראל, <http://ozar.mof.gov.il/taxes/docs/misui150108.pdf>

18.5.2 חישוב סה"כ התועלת של היער העירוני כולל עלויות חימוניות:

עלות העץ (נטיעה ותחזוקה) - הערך הכלכלי של הפחתת זיהום האוויר מתחבורה+תועלות נוספות של העץ

= התועלת הכלכלית לעץ נטו

הנוסחה מוסיפה מרכיב נוסף המגדיל את הערך החיובי של היער העירוני:
נתונים קיימים:

1. עלות נטיעת העץ ואחזקתו .

2. תועלות נוספות שניתן להן כבר ערך כלכלי בישראל.

הנתון הנוסף בנוסחה: ערך כלכלי של הפחתת זיהום האוויר מתחבורה בעיר

19. תוכנת ה- I-TREE:

לרשות החוקר עומדת תוכנת ה-I-TREE – I, המהווה מסד נתונים רחב מימדים הכולל בין היתר את כל העצים הנפוצים בארץ בשתילות העירוניות ("ראה נספח א") וכמו כן מכיל תוכנות לחישוב שירותי היער האורבאני המבוססות על הנוסחאות המתמטיות של המודל שבבסיס מחקר זה ה-UFORE. אם כן עיקר ההמרה של המודל לישראל עוסקת ביכולת ובדרך לאיסוף המורכב של הנתונים.

תוכנה זו, פותחה על בסיס מחקריו של נובאק, במטרה לעזור למתכנן העירוני, לנהל ולמקסם את שירותי היער האורבאני. בעזרת הממשק של תוכנה זו ניתן להזין נתונים אמפיריים שונים ולחשב שירותים שונים של היער האורבאני.

ט. הערכת הקשיים הצפויים לחוקר

החוקר מהווה חולייה מקשרת בין גורמי מידע רבים ושונים המנותקים האחד מהאחר (השירות המטאורולוגי, המרכז למיפוי, תחנות הניטור השונות ועוד).

על החוקר לקבל עדכונים שעתים, מכל הגופים מולם יעבוד ולעקוב אחריהם וזאת לאורך תקופת זמן של שנה אחת לפחות, על מנת לכסות לפחות פעם אחת את כל אחת מעונות השנה.

בנוסף קשה לקבוע מראש מהו הפילוח המדוייק של מקורות הזיהום השונים (אנרגיה, תחבורה, תעשייה וכו') מה שמקשה לקבוע את העלויות החיצוניות המדוייקות של אותם מקורות זיהום.

בכיסוי המרחבי של תחנות הניטור הקיימות בישראל אינו מלא כמובן ובאיזורים עירוניים מסויימים הכיסוי יהיה חסר ועל כן קשה יהיה לקבל נתונים מדוייקים.

בישראל, אין עד כה, לצערנו, כל התייחסות מעשית ליכולתם של עצים לספוח מזהמי אוויר **חיצוניים** וחבל.

החשיבות אינה נעוצה ביישום של נוסחה כזו או אחרת בישראל. עצם יכולתם של עצים לספיחת מזהמי אוויר חיצוניים, כפי שפורט בהצעת מחקר זו, היא יכולת מוכחת הניתנת לכימות כלכלי ועובדה זו, כשלעצמה, אינה במחלוקת.

ייתכן, כי יש מקום להתאמת נוסחות החישוב של מודל UFORE לשימוש בישראל אך עובדה היא כי, נכון להיום, יכולתם של עצים לספוח מזהמים, אינה מוטמעת כלל במערך שיקולי הנטיעה ואדריכלות הנוף בארץ וממילא לא מתקצב הערך הכלכלי העצום הנובע מכך וחבל.

נראה לנו כי יש מקום לבדוק את מודל UFORE מנקודת הראות של שימוש מעשי אפשרי בו בישראל, על מנת לנסות לאבחן ולבצע מראש, במידת האפשר, את ההתאמות שתיתכן ותידרשנה ליישומו בארץ ולבצע פיילוט, על בסיס הצעת מחקר זו, בהיקף מוגבל על מנת לבדוק את דרכי היישום הטובות ביותר.

לאחר פיילוט ראשוני נסיוני זה מן הראוי להרחיבו וליישם את עקרונות מודל UFORE בישראל בצורה שתמצה את יתרונותיו ותאפשר את יישומו המעשי בארץ בצורה היעילה ביותר.

יא. רשימת מקורות

- Cancer Help- www.cancerhelp.org.il ¹
- ראה אתר המשרד להגנת הסביבה : ²
http://www.sviva.gov.il/bin/en.jsp?enPage=BlankPage&enDisplay=view&enDispWhat=Zone&enDispWho=mezahamim_policy&enZone=mezahamim_policy
- אתר אדם טבע ודין ³
<http://www.adamteva.org.il/?CategoryID=320&ArticleID=208>
- מחקר הלמ"ס תחבורה 1995-2006 ⁴
http://www.cbs.gov.il/statistical/trans_heb08.pdf
- חוק אויר נקי התשס"ח 2008 ⁵
<http://www.justice.gov.il/NR/rdonlyres/9DAF049C-968E-44F1-BFE6-4D70BB015B46/11300/2174.pdf>
- ראה תמצית המחקר ב- ⁶
<http://www.environmental-expert.com/resultEachPressRelease.aspx?cid=8819&codi=39804>
- ראה אתר המודל ⁷
<http://www.ufore.org>
- Nowak, D.J., Crane D.E. and J. Stevens, (2006), Air pollution removal by urban trees and shrubs in the ⁸
United States, *Urban Forestry & Urban Greening* 4 (2006) 115-123
- Nowak, D.J. (1994)c. Air pollution removal by Chicago's urban forest. In: McPherson, E.G.; Nowak, D.J.; ⁹
Rowntree, R.A., eds. *Chicago's urban forest ecosystem: results of the Chicago Urban Forest Climate Project*. Gen. Tech. Rep. NE-186, Radnor, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station
- ראה הערה 8 לעיל ¹⁰
- Fowler D (2002) pollutant deposition and uptake by vegetation in- " air pollution and plant life", second ¹¹
edition, edited by Bell J.N.B and Treshow M, John Wilky&sons Ltd. 43-68 P
- ראה הערה 8 לעיל ¹²
- Nowak D.J (1994) , The effects of urban trees on air quality (summary paper) USDA Forest Service, ¹³
www.fs.fed.us/ne/syracuse Syracuse, NY 1-4 p.
- Smith, W.H. 1981. *Air pollution and forests*. New York: Springer-Verlag. 618P ¹⁴
- ראה הערה 11 לעיל. ¹⁵
- Beckett et al (2000) Effective tree species for local air quality management, *Journal of Arboriculture* ¹⁶
26(1): January 2000, 12-19 P
- Morikawa, H (1998) "More than a 600-fold variation in nitrogen dioxide assimilation among 217 plant ¹⁷
taxa", *Plant, Cell and Environment* (1998) 21, 180-190 P
- Kozłowski T.T (1986) "The impact of environmental pollution on shade trees", *journal of arboriculture*, ¹⁸
February 1986 Vol. 12, No. 2, 29-37
- Nowak, D.J., and D.E. Crane. 2000. "The Urban Forest Effects (UFORE) Model: quantifying urban ¹⁹
forest structure and functions". In: Hansen, M. and T. Burk (Eds.) *Integrated Tools for Natural Resources Inventories in the 21st Century*. Proc. Of the IUFRO Conference. USDA Forest Service General Technical Report NC-212. North Central Research Station, St. Paul, MN. pp. 714-720.
- Nowak, D J.; Rowntree, R A.; McPherson, E, G; Sisinni, S M.; Kirkmann, E R.; Stevens, J.C. (1996). ²⁰
"Measuring and analyzing urban tree cover". *Urban Planning*. 36: 49-57
- שם ²¹
- Myeong S, Nowak D.J, Hopkins F, (2001) "Urban cover mapping using digital, high spatial resolution ²²
aerial imagery", *Urban Ecosystems*, 5: 243-256
- I-TREE Software Suite User's manual- Appendix C. UFORE Appendices ²³
<http://www.itreetools.org/index.shtm>
- ראה הערה 20 לעיל. ²⁴

- Nowak, D.J. 1996. Estimating leaf area and leaf biomass of open-grown deciduous urban trees. *Forest Science*. 42(4): 504-507²⁵
- McPherson, E.G. 1984: "planting design for solar control.. Energy-conserving site design. American Soc. Of Landscape Washington, DC. (P. 141-164)²⁶
- Nowak, D.J., McHale P.J., Ibarra, M., Crane, D., Stevens, J., and Luley, C. 1998. "modeling the effects of urban vegetation on air pollution" In: *Air Pollution Modeling and Its Application XII*. (S. Gryning and N. caumerliac, eds.) Plenum Press, New York, pp. 399-407²⁷
- Nowak, D.J., Crane, D.E., Stevens, J.C., and Ibarra, M.(2000) In review. "Brooklyn's Urban Forest". USDA Forest Service, Gen. Tech. Rep
 המשרד להגנת הסביבה www.sviva.gov.il²⁸²⁹
- אתר מגזין אקונומיסט <http://www.economist.com/research/economics/alphabetic.cfm?letter=E#externality>³⁰
- אתר האגודה הישראלית לכלכלה בת קיימא <http://www.ecoeco.org.il/?q=node/41>³¹
- אתר המשרד לשינוי אקלים, ממשלת בריטניה, http://www.hm-treasury.gov.uk/d/Summary_of_Conclusions.pdf³²
- ראה אתר המשרד לשינוי אקלים, ממשלת בריטניה
http://www.hm-treasury.gov.uk/d/Summary_of_Conclusions.pdf³³
- ראה אתר מגזין אקונומיסט – שם³³
- ראה הערה 31³⁴
- דוח הועדה הבין-משרדית למיסוי "ירוק", ריכוז ועריכה החטיבה לתכנון ולכלכלה, רשות המיסים בישראל
docs/misui150108.pdf/http://ozar.mof.gov.il/taxes³⁵

מקורות מידע נוספים:

1. גורדר ס (2000), השפעת הצמחייה על איכות האויר באזורים עירוניים- אפשרות להפחתת או איזון רמת הזיהום בעיר ע"י שתילת עצים המסוגלים לקלוט מזהמים שונים, עבודת פרו"ס בהדרכת עודד פוצ'טר, החוג לגיאוגרפיה, הפקולטה למדעי הרוח, אוניברסיטת תל אביב.
2. (2)Baldocchi, D.D.; Hicks, B.B.; Camara, P.1987. A canopy stomatal resistance model for gaseous deposition to vegetated surfaces. *Atmospheric Environment*. 21: 91-101
3. Geiger, J.R. 2002. *Green plants or power plants?* Davis, CA: Center for Urban Forest Research, Pacific Southwest Research Station, USDA Forest Service; 4p. Research summary, http://www.fs.fed.us/psw/programs/cufr/products/3/cufr_148.pdf
4. (4) Urban forest research, January 2005, Special edition- air pollution control- the tree factor, center for urban forest research , USDA forest service, pacific southwest research center. <http://cufr.ucdavis.edu/>

Table 2. Estimated percent air quality improvement in selected US cities due to air pollution removal by urban trees

City	%tree cover	% air quality improvement				
		CO	NO ₂	O ₃	PM ₁₀	SO ₂
Atlanta, GA	32.9	0.002 (0.001–0.009)	0.5 (0.1–2.5)	0.7 (0.1–4.4)	0.7 (0.3–2.8)	0.7 (0.1–4.3)
Boston, MA	21.2	0.002 (0.000–0.006)	0.4 (0.0–1.8)	0.6 (0.1–3.4)	0.6 (0.1–1.8)	0.5 (0.1–3.4)
Dallas, TX	28.0	0.002 (0.001–0.008)	0.4 (0.1–2.2)	0.6 (0.1–3.9)	0.6 (0.2–2.4)	0.6 (0.1–3.8)
Denver, CO	26.0	0.001 (0.000–0.007)	0.2 (0.0–1.5)	0.3 (0.0–2.1)	0.4 (0.1–2.2)	0.3 (0.0–2.0)
Milwaukee, WI	19.1	0.001 (0.000–0.005)	0.3 (0.0–1.5)	0.4 (0.1–2.7)	0.4 (0.1–1.6)	0.4 (0.0–2.7)
New York, NY	16.6	0.001 (0.000–0.005)	0.3 (0.0–1.4)	0.4 (0.1–2.6)	0.5 (0.1–1.4)	0.4 (0.1–2.6)
Portland, OR	42.0	0.003 (0.001–0.012)	0.6 (0.1–2.7)	0.8 (0.1–3.7)	1.0 (0.3–3.5)	0.7 (0.1–4.0)
San Diego, CA	8.6	0.001 (0.000–0.002)	0.2 (0.0–0.7)	0.3 (0.0–1.4)	0.3 (0.1–0.7)	0.3 (0.0–1.4)
Tampa, FL	9.6	0.001 (0.000–0.003)	0.2 (0.0–0.8)	0.2 (0.0–1.4)	0.2 (0.1–0.8)	0.2 (0.0–1.4)
Tucson, AZ	13.7	0.001 (0.000–0.004)	0.1 (0.0–1.0)	0.1 (0.0–1.7)	0.2 (0.1–1.2)	0.1 (0.0–1.7)
Washington, DC	31.1	0.002 (0.001–0.009)	0.4 (0.2–2.3)	0.6 (0.1–3.9)	0.7 (0.2–2.6)	0.6 (0.1–3.9)

Estimates are given for actual tree cover conditions in city for ozone (O₃), particulate matter less than 10 μm (PM₁₀), nitrogen dioxide (NO₂), sulfur dioxide (SO₂), and carbon monoxide (CO) based on local boundary layer height and pollution removal estimates. Bounds of total tree removal of O₃, NO₂, SO₂, and PM₁₀ were estimated using the typical range of published in-leaf dry deposition velocities (Lovett, 1994)

Table 3. Air pollution removal and value for all urban trees in the coterminous United States

Pollutant	Removal (t)	Value (\$ × 10 ⁶)
O ₃	305,100 (75,000–390,200)	2,060 (506–2635)
PM ₁₀	214,900 (84,000–335,800)	969 (378–1514)
NO ₂	97,800 (42,800–119,100)	660 (289–804)
SO ₂	70,900 (32,200–111,100)	117 (53–184)
CO	22,600 na	22 Na
Total	711,300 (256,600–978,800)	3828 (1,249–5158)

Estimates are given for ozone (O₃), particulate matter less than 10 μm (PM₁₀), nitrogen dioxide (NO₂), sulfur dioxide (SO₂), and carbon monoxide (CO). The monetary value of pollution removal by trees is estimated using the median externality values for the United States for each pollutant (Murray et al., 1994). Externality values for O₃ were set to equal the value for NO₂. Bounds of total tree removal of O₃, NO₂, SO₂, and PM₁₀ were estimated using the typical range of published in-leaf dry deposition velocities (Lovett, 1994).

25 שמות עבריים ולטיניים של עצי רחוב נפוצים בת"א – יפו
(באדיבות מחלקת שיפור פני העיר של עיריית ת"א-יפו)

- Tipuana tipu - מכנף נאה
- Jacaranda acutifolia - סיגלון חד-עלים ג'קרנדה
- Bauhinia variegata - בוהיניה מגוונת
- Dalbergia sissoo או dalbergia sisso - סיסם הודי
- Brachychiton populneum - ברכיכטון צפצפתי
- Bracnychiton acerifolius - ברכיכטון אדרי
- Delonix regia - צאלון נאה
- Erythrina corallodendrum - אלמוגן רחב עלים
- Ficus microcarpa - פיקוס השדרות
- sycomorus Ficus - פיקוס השיקמה
- Ficus rubiginosa - פיקוס חלודי
- Ficus religiosa - פיקוס קדוש
- Olea europaea - זית אירופי
- Albizzia lebbek - אלביציה צהובה
- celtis australis - מייש דרומי
- Peltophorum dubium שלטית מסופקת (פלטופורום)
- Olea europaea - זית אירופי
- malabaricum Bombax - בומבק הודי
- Washingtonia robusta - ושינגטוניה חסונה
- canariensis Phoenix - תמר קנרי
- Ulmus canescens - אולמוס שער

-
- *Koelreuteria bipinnata* - פנסית דו-נוצתית) קלרויטריה
 - *Quercus ithaburensis* - אלון תבור
 - *Eucalyptus camaldulensis*, River-red Gum - אקליפטוס המקור

זיהום אויר מפעילות בנמל התעופה בן-גוריון



ירון הירש
איתי פרידיונג
מיכל שורץ

פרויקטים בחקר הסביבה, אוגוסט תשס"ט
בית הספר ללימודי סביבה ע"ש פורטר
אוניברסיטת תל-אביב

תודות

- פרופ' עמרם אשל- על הנחייה בפרויקט
- קרין ארדון- על הייעוץ במיקום תחנות הניטור
- יוסי זהר - מערך ניטור רשות שדות התעופה
- הצוות במחלקת תכנון והנדסה, רשות שדות התעופה
- אפרת שיר – שליוותה אותנו בחלק מהדרך.

תוכן העניינים

4.....	תקציר
5.....	מבוא
6.....	רקע תיאורטי
14.....	שאלת המחקר וחשיבות המחקר
15.....	שיטות מחקר
19.....	הערכת הקשיים הצפויים במחקר
20.....	סיכום
21.....	רשימת מקורות

תקציר

פעילות נמל תעופה גורמת לנזקים סביבתיים רבים בעיקר של רעש וזיהום אוויר. המחקר בעולם לגבי זיהום אוויר שנוצר מתחבורה אווירית מחולק לשתי קטגוריות: האחת עוסקת בזיהום האוויר ממטוסים בגובה רב ואילו השנייה עוסקת בזיהום האוויר בנמלי תעופה שנוצר במעגל ההמראה והנחיתה של המטוסים (Landing and Take Off (LTO), פעילות קרקע של ציוד העזר הנלווה למטוסים (GSE) ו-Auxiliary (APU) Power Unit והתנועה של כלי הרכב המשמשים להובלת הנוסעים לנמל וממנו (Kesgin, 2006). בשנים האחרונות נערכו מחקרים רבים באספקטים השונים של זיהום אוויר מנמלי תעופה. חלקם בודקים את ההשפעה שיש לנמלי התעופה על איכות האוויר באזורים הנמצאים בסמוך להם (Unal, 2005). אחרים בודקים את היחס הקיים בין מזהמים שונים הפועלים בנמל התעופה והתרומה שלהם לרמת הזיהום (Kesgin, 2006).

בארץ הנושא עדין איננו מפותח ולא נערך אף מחקר הבודק את היקף הזיהום הנוצר בנמל התעופה בן-גוריון (נתב"ג). את הנמל מקיפים מספר ישובים קטנים והוא מרוחק 19 ק"מ מהעיר ת"א. המספר הכולל של הטיסות היוצאות וחוזרות בשנת 2007 היה 74,462 וזהו גידול של 9.89% ממספר הטיסות של שנת 2006. מספר הנוסעים שעברו בטרמינל בשנת 2007 היה 10,102,793 וזהו גידול של 14.64% מסך הנוסעים של שנת 2006 (רשי"ת, 2009).

הצעת המחקר עוסקת בתוצרי השריפה של שלושה דלקים פוסילים המשמשים במנועי בעירה פנימית והם: קרוסין המשמש כדלק סילוני, בנזין וסולר המשמשים את המנועים של ציוד העזר וכלי הרכב המובילים את הנוסעים (Holzman, 1997). המחקר יתמקד בחיזוי וניטור של ארבעה סוגי מזהמים: SO_x , NO_x , CO ו- P.M 2.5. הצעת המחקר מתבססת על שימוש בשתי שיטות:

1. מודל פליטת ופיזור-EDMS (Emissions and Dispersion Modeling System) שפותח

על ידי ה-Federal Aviation Administration (FAA) של ארה"ב.

2. על ידי הקמת מערך ניטור חדש בנוסף לקיים, הקמת חמש תחנות ניטור נוספות לשתי

התחנות שכבר קיימות: תחנת "בית רבקה" הממוקמת כ-850 מטר מדרום לטרמינל 3

ותחנת "נתב"ג" הממוקמת על גג המשרד הראשי של רשי"ת.

נמל התעופה ע"ש בן גוריון אינו "אי מבודד" ולכן קיים קושי לנטר את הזיהום שנוצר בו בנפרד משאר המקורות יוצרי זיהום בסביבתו, כגון כביש ירושלים – תל אביב, שהוא אחד הכבישים העמוסים ביותר בישראל, או למשל מפעלים הממוקמים בסמיכות לנתב"ג וכו'.

שילוב המודל התיאורטי ומערך הניטור ייתנו תוצאות אשר בקירוב טוב, יאמדו את שיעור היקף הפליטות מפעילות נתב"ג ובנוסף, באמצעות המודל ישנה אפשרות לחיזוי פליטות עתידיות מנתב"ג לפי הגידול הצפוי במספר הטיסות ובכך ניתן יהיה לתכנן בצורה טובה יותר את פיתוח נמל התעופה העתידי.

1. מבוא

בשנים האחרונות נרשמת עליה עקבית בכמות הטיסות הבינ"ל היוצאות והנכנסות לנמל התעופה בן גוריון (נתב"ג). מכלול הפעילות של היחידות השונות הפועלות בתחומי שדה התעופה גורם לפליטות של מזהמים מסוגים שונים וממקורות שונים. במחקר זה נבדק מהו אותו היקף זיהום האוויר שנגרם ממכלול פעילות שדה התעופה. המחקר יתמקד בחודשי הקיץ והחגים בהם אנו מצפים שייווצר הזיהום המקסימאלי בנתב"ג משום שחודשים אלו הם חודשי השיא מבחינת כמות הטיסות וכמות האנשים המגיעים לנמל התעופה. שיקול נוסף הוא יציבות האטמוספירה, בחודשי הקיץ נוצרת שכבת אינברסיה והזיהום הנוצר נשאר בשכבה הנמוכה ואינו מתפזר טוב. זיהום האוויר הנפלט ממכלול פעילות שדה התעופה הוא נושא חשוב מאוד בעל השלכות רבות עקב כמות התושבים הגרה בסמיכות לשדה התעופה ומיקומו הגיאוגרפי במרכז מדינת ישראל ובסמוך ליישובים רבים, ועקב כמות העובדים הגדולה העובדת בתחומי שדה התעופה. התוכניות האופרטיביות להגדיל את נפח תנועת הנוסעים בשדה התעופה מ- 11 מיליון נוסעים (מס' הנוסעים בשנת 2008) ל- 16 מיליון נוסעים בשנה יגררו השלכות סביבתיות רבות, בין היתר בכל הקשור לכמות המזהמים הנפלטים לאוויר, השלכות אשר לא נבדקו עד היום בשדה התעופה. עד היום לא נחקר נתב"ג כיחידה רגיונלית אחת ולא ידועה השפעת פעילות שדה התעופה על זיהום האוויר באזור, השפעה אשר אנו ננסה לבחון לראשונה ולהסיק מסקנות אשר יוכלו לשמש את רשויות השדה בכל הקשור לתכנון עתידי של כל שינוי בנפח פעילותו של שדה התעופה או לשינויים מרחביים.

2. רקע תיאורטי

שדות תעופה הם מקור למטרד רעש, זיהום מים וזיהום אוויר (Holzman, 1997). זיהום המים הוא זניח ומתרחש רק בחורף, כאשר יש צורך להמיס קרח מהמטוסים, אולם מטרד הרעש הוא בעיה שעוסקים בה רבות וזיהום האוויר שהוא ענינה של עבודה זו. הפליטות העיקריות בשדות תעופה הם של חלקיקים, CO_2 ותחמוצות חנקן והערכה היא שעד שנת 2017 תוכפל כמות זיהום האוויר הנוצר מפעילות שדות תעופה.

בעשורים האחרונים ישנה מגמת עליה בתעבורה האווירית הבינלאומית. עליה של כ- 5% במספר הנוסעים בתחבורה האווירית העולמית בשנה (Lee, 2003). זהו גידול משמעותי והקצב שלו גדול מהיכולת של יצרניות המטוסים לבצע שיפורים טכנולוגיים הקשורים בצמצום הפליטות מנועי מטוסים. לנתון זה ישנה השפעה גוברת על הסביבה וההנחה היא שכמות המזהמים הנפלטה מכלי טיס תגדל. בשנים האחרונות ישנה עליה בכמות המחקרים הבודקים את השפעות זיהום האוויר של נמלי תעופה בעולם.

זיהום האוויר מיוצר בנמל התעופה משלושה גורמים עיקריים:

1. המטוסים, אופן חישוב הפליטות שלהם מתבצע בשלבי מעגל ההמראה – נחיתה (LTO) landing and take off הנושנים אלו הם ארבעה מצבים עיקריים בהם נמצא כלי הטיסה: גישה למסלולי ההמראה, המראה, נסיקה עד לגובה 3000 רגל, נחיתה והגעה לאזור הורדת הנוסעים (איור 1). בכל מצב המנוע נמצא בשלב אחר ופולט מזהמים בכמות שונה.
2. auxiliary power unit (APU) או גנראטורים אליהם מחובר המטוס המספקים יחידות חשמל להפעלת המערכות החשמליות של המטוס כאשר המנועים אינם פועלים.
3. ציוד עזר קרקעי הקשור לתפעול המטוסים (GSE) ground support equipment כלי הרכב המשמשים לשינוע הנוסעים מהנמל ואליו ולפריקה והעמסה של המטען (Kesgin, 2006).

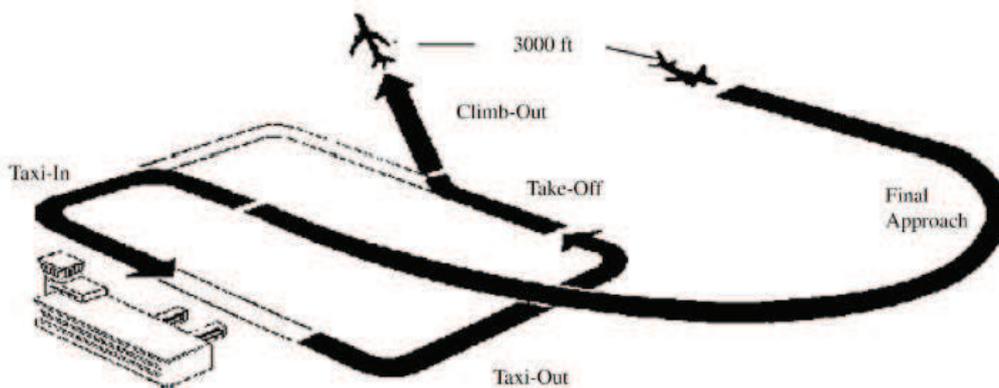


Fig. 1. A typical LTO cycle.

איור 1. מעגל ההמראה ונחיתה – LTO (Kesgin, 2006).

ישנו קושי להפריד בין הזיהום המיוצר ממטוסים לזה המיוצר מכלי רכב ולמעשה חלק גדול מהזיהום בשדות תעופה נובע מכלי הרכב. ישנם הערכות המסתמכות על חישובים ולפיהן למשל הפליטה של חלקיקים מכלי רכב היא 56% מסך הפליטות המיוצרות בשדה לעומת 32% להם אחראים המטוסים בזמן מעגל הנחיתה המראה שלהם וזה כולל את ציוד העזר של המטוסים

(APU). לעומת זאת כלי הרכב אחראים 39% של תחמוצות החנקן ואילו המטוסים ל 46% (Lee, 2003).

ברוב המחקרים הקיימים משתמשים לשם ביצוע הערכות פליטות ממטוסים בנתונים מבנק הנתונים של The International Civil Aviation Organization (ICAO) אשר הוקם ב-1995, מאגר הנתונים על מקדמי הפליטה של מנועי מטוסים.

ברוב המחקרים הקיימים משתמשים לשם ביצוע הערכות פליטות ממטוסים בנתונים מבנק הנתונים של The International Civil Aviation Organization (ICAO) אשר הוקם ב-1995, מאגר הנתונים על מקדמי הפליטה של מנועי מטוסים.

Kesgin (2006) מתאר במחקרו, "פליטות מנמלי תעופה בטורקיה", את תוצאותיו של מחקר ובו התבצע ניטור של ארבעת המזהמים: HC , CO , NO_x , SO_2 , ב 40 שדות תעופה בתורכיה בזמן מעגל ההמראה והנחיתה (LTO). מסקנות המחקר מבוססות על נתונים שהתקבלו מרשות שדות התעופה התורכית והם כוללים מידע על סוג המטוס ומספרו, מידע על כמות הנוסעים ומידע על כמות המטען ולוח הזמנים של תנועת המטוסים התוצאות הן בין 7600 ל 8300 טון של פליטות מזהמים בשנה (ערכי מינימום ומקסימום פליטות לשנה), ויש התאמה בין התוצאות הללו למחקרים דומים שנעשו בארה"ב. לפחות חצי מסך כל הפליטות הם מנמל התעופה הבינלאומי אטאטורק (AIA), כאשר 67% מתוכן מיוחסות לפליטות של טיסות בינלאומיות. הערכה היא שעליה בהיקף של 25% במעגל ההמראה נחיתה בנמל אטאטורק תביא לעליה של בין 31% ל 33% בפליטות המזהמים ולעומת זאת, צמצום זמן ההמתנה של המטוס על הקרקע לפני ההמראה או לאחר הנחיתה יכול להביא להפחתה של 6% בכמות הפליטות של מזהמים.

נמל התעופה הבינלאומי של אטלנטה, שבהתאם למספר הנוסעים העוברים בו, זה נמל התעופה העמוס ביותר בעולם. מטרת המחקר שמתפרסם במאמר "פליטות הקשורות בנמל התעופה והשפעתם על איכות האוויר: בישום על נמל התעופה הבינלאומי של אטלנטה" (Unal, 2005), הייתה לכמת את ההשפעה שיש לפליטות של מטוסים וציוד העזר על איכות האוויר המקומית בסביבת הנמל. הנתונים המוצגים במאמר מצביעים על כך שהגידול עולמי בכמות הטיסות בין השנים 1991 ל 2000 היה 47% והסוכנות להגנת הסביבה של ארה"ב מעריכה שהגידול בפליטות חלקיקים מנמלי תעופה בארה"ב גדל משנת 1970 ב 80% ואילו כמות הפליטות של חומצות חנקן הוכפלה. השיטה שבה השתמשו במחקר זה הייתה מורכבת מכמה שלבים. ראשית כל נערכה רשימה המפרטת את סוגי הפליטות של המטוסים וציוד העזר המופעל בשדה, לאחר מכן התבצעה סימולציה של רמת איכות האוויר באזור שמסביב לשדה במטרה לזהות את סוגי המזהמים ולקשר אותם למקורות הזיהום. הסימולציה בוצעה במשך 10 ימים בחודש אוגוסט 2000, זמן שבו על פי הנתונים של עורכי המחקר קיימת רמת זיהום אוויר גבוהה באזור. עיבוד הנתונים של רמת הפליטות במעגל ההמראה נחיתה מתבצע באמצעות מודל EDMS. הנתונים הראו שלשדה התעופה יש השפעה חלקית בלבד על רמת הזיהום באזור הלא בנוי שמסביב לשדה שהזיהום בו נשלט בעיקר ע"י מקורות זיהום מקומיים נייחים וניידים והזיהום בהמשך מתערבב ומופץ במרחב.

"התרומה של פעילות נמלי תעופה לרמות זיהום האוויר בשכונות סמוכות" (Hsu, et al, 2008), הוא מחקר נוסף שעוסק בהשפעה שיש לזיהום של נמל תעופה על סביבתו והוא מתייחס לדאגה הגוברת של קהילות הנמצאות בסמוך לנמלי תעופה מזיהום, שהמקור שלו הוא פעילות הנמל. המחקר בודק את רמת הזיהום של שכונה שנמצאת בסמוך לנמל התעופה T.F. Green Warwick בארה"ב ומנסה לקבוע מה התרומה של הנמל לזיהום האוויר במקום. הבדיקה נעשתה במהלך שלוש עונות משנת 2007 ועד שנת 2008. הבדיקה נעשתה ע"י שלוש תחנות ניטור שהוצבו מסביב לנמל בכיווני רוח שונים וביצעו מדידות של חלקיקים, פחמימנים, ותחמוצות חנקן. נתוני כיוון הרוח והמהירות נאספו יחד עם נתונים על זמני הנחיתות והמראות של המטוסים והדגם שלהם. הנתונים שנמדדו הצביעו על הטרונגניות ברמת הפיזור של חומצות חנקן באזורי הבדיקה כאשר הרמה עלתה בשטח שליד בנין הטרמינל ובמורד הרוח מכבישים ראשיים. הייתה עליה בכמות החלקיקים ופחמימנים כאשר הרוח נשבה מכיוון אזורי הפעילות של הנמל. שילוב של המידע יחד עם נתוני הטיסות ומזג האוויר מצביע על כך שיש השפעה משמעותית של מהירות הרוח וכיוונה על רמת הזיהום מהנמל באזור שנבדק. החוקרים מסיקים שיש לבצע באזורים בהם ישנם מקורות שונים של פעילות בדיקות על מנת לקבוע את רמות הזיהום להם אחראי כל מקור.

במחקר שנעשה בנמל התעופה של בודפשט בהונגריה (Groma, et al. 2007), ישנה התייחסות למכלול הפעילות בנמל הכוללת את כלי הרכב המשמשים להובלת הנוסעים לנמל וממנו. המחקר מדגיש את החשיבות שיש במדידת רמות הזיהום גם מכלי הרכב וצידוד העזר בניתוח ההשפעה שיש לנמל על הסביבה. ברוב המקרים רמות הזיהום שנמדדו בנמל התעופה היו נמוכות באופן משמעותי מאלו שנמדדו במרכז העיר בודפשט ופרבריה. זיהום חלקיקים PM10 באזור הנמל היה מושפע בעיקר מהזיהום שנוצר בעיר, אולם זיהום חלקיקים PM2.5 היה גבוה יותר באזור נמל התעופה.

2.1 נתב"ג - מיקום ונפח פעילות

נמל התעופה בן-גוריון הינו נמל התעופה הבינלאומי של מדינת ישראל ומוקד ההתעניינות של מחקר זה. הנמל נמצא כ-19 ק"מ דרומית-מזרחית לתל אביב וכ-13 ק"מ מחופי הים התיכון. צורתו כשל משולש, אורכו ממזרח למערב הוא כ-4.5 ק"מ, ורוחבו מצפון לדרום מגיע ל-4 ק"מ. שטחו של הנמל משתרע על 1700 דונם כאשר 270 דונם הינם שטח בנוי. הנמל שוכן בגובה של 30 עד 41 מטר מעל גובה פני הים, ושטחו מנוקז על ידי נחל איילון, הזורם כיום בתעלה מלאכותית מדרום לשדה. מספר יישובים שוכנים בקרבת גבולותיו של הנמל, ועל אלה נמנים זיתן ויגל מדרום, צפריה וחמד ממערב, אור יהודה ויהוד-מונוסון מצפון ובני עטרות, טירת יהודה, בית עריף וכפר טרומן ממזרח. בשנים האחרונות נמל התעופה עבר שינוי מבני עקב הגידול העקבי בתנועת הנוסעים בטיסות הבינ"ל וכהכנה לגל התיירים שהיה צפוי להגיע לישראל בשנת 2000 ולקראת חגיגות ה-60 למדינת ישראל.

כיום מכיל נמל התעופה 2 טרמינלים פעילים:

טרמינל 1 היה בעבר בית הנוסעים הראשי של השדה, אשר שירת את רוב תעבורת הנוסעים הבינלאומית בשדה התעופה. הטרמינל נסגר והוסב לבניין משרדים לאחר הפעלת טרמינל 3, אם כי המשיך לשמש גם לקליטת עולים חדשים. בפברואר 2007 נפתח המבנה מחדש כטרמינל לטיסות פנים.

טרמינל 3, המוכר גם בכינוי נתב"ג 2000, נחנך בשנת 2004. הטרמינל הוקם במרחק של 2.5 ק"מ מערבית לטרמינל 1, ובנייתו הייתה אחד ממיזמי התשתית הגדולים ביותר בישראל בשנים האחרונות. בטרמינל, 24 גשרי עלייה למטוסים הערוכים בשלוש זרועות (B, C ו-D), אך בעתיד יהיה ניתן להרחיבו ולהתאימו לכמות נוסעים גדולה יותר באמצעות הקמת שתי זרועות נוספות (A ו-E). גם החלק היבשתי של טרמינל 3 נבנה באופן המאפשר את הרחבתו בשני צדדיו. הטרמינל תוכנן לקלוט עד 10 מיליון נוסעים בשנה ועוד 10 מיליון מבקרים. עם השלמת הזרוע הרביעית והחמישית יהיה הטרמינל מסוגל לטפל בכ- 16 מיליון נוסעים בשנה בשלב הראשון. תכנון הטרמינל מאפשר להתאימו לשינויים עתידיים בהיקפי הפעילות לנוסעים ולמטענים.

בשטח נמל התעופה פועלים 3 מסלולי המראה ונחיתה (איור 2): מסלול 12/30 הינו מסלול הנחיתה הראשי של שדה התעופה והמסלול הקרוב ביותר לטרמינלים. אורכו 3112 מטרים ורוב הנחיתות מתבצעות בו ממערב למזרח (אזימוט 120). כאשר נושבת רוח מערבית חזקה, הנחיתות מתבצעות בכיוון ההפוך (אזימוט 130) מסלול 08/26 נקרא גם "המסלול השקט". אורכו 3657 מטרים והוא משמש כמסלול ההמראות המרכזי. רוב ההמראות בו מתבצעות ממזרח למערב (אזימוט 260). מסלול 03/21 הוא המסלול הקצר. אורכו 1780 מטרים וכיום הוא משמש בעיקר כמסלול הסעה של המטוסים לקראת המראה מהמסלול השקט.



איור 2. תצלום אוויר של נתב"ג, ניתן לראות את חלקיו השונים של הנמל. (מחלקת תכנון והנדסה, 2009).

דרכי גישה לנתב"ג

נמל התעופה שוכן מצפון לכביש מס' 1 ורוב תנועת הנוסעים לשדה נעשית באמצעות כביש זה, דרך מחלף בן גוריון המהווה את שער הכניסה הראשי לשדה. בתוך שטח שדה התעופה עובר כביש 4503 המחבר בין הטרמינלים ומהווה את כביש הגישה הפנימי עליו נוסעים כל הנוסעים בהגיעם

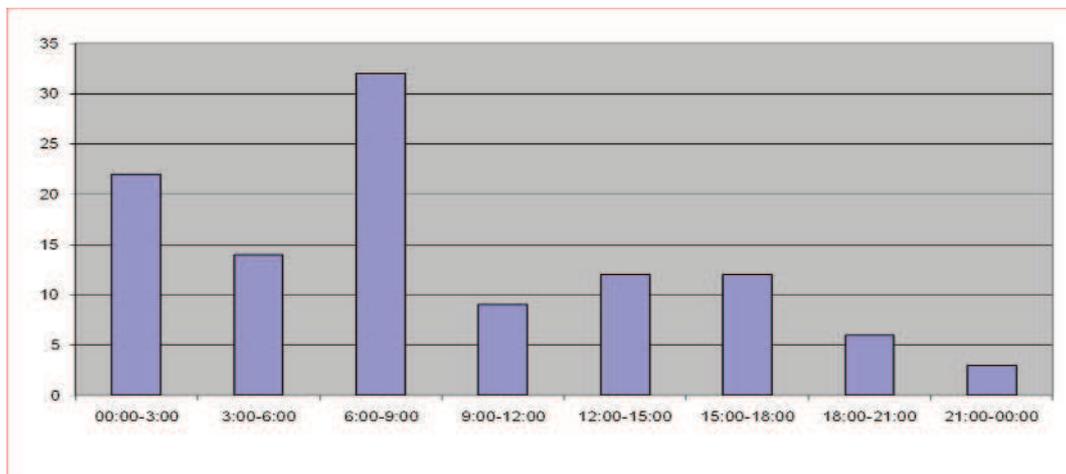
הביני"ל, תנועת הנוסעים בטיסות פנים- ארציות נשאת יציבה לאורך כל השנה ואינה מתאפיינת בתנודתיות עונתית.



איור 5. התפלגות תנועת הנוסעים בין חודשי השנה, בחודשי הקיץ תנועת הנוסעים הרבה ביותר. (רש"ת)

התנודתיות של הטיסות הביני"ל מתאפיינת גם בימי השבוע השונים ובשעות היממה (איור 6). בימים ראשון וחמישי ישנה תנועה ערה עקב כמות גדולה של טיסות שכר ונוסעים הטסים וחוזרים מחופשות סופי השבוע. מיום שישי בצהריים ועד מוצ"ש נפח התנועה בשדה התעופה קטן עקב כך שחברת אלעל לא טסה בשבת.

במהלך שעות הבוקר המוקדמות (לאחר סיום עוצר ההמראות שמתחיל ב- 01:40 ומסתיים ב- 05:30) נרשם נפח התנועה הגדול ביותר בשדה התעופה. בשעות 18:00 – 24:00 נרשם נפח פעילות קטן.



איור 6. התפלגות המראות מנתב"ג – 5.6.09 לפי שעות היממה (רש"ת).

תכנית המתאר הארצית לנתב"ג, תמ"א 2/4, אשר בהתאם להוראותיה פועלת רשות שדות התעופה בעניין המדיניות הסביבתית, מגדירה בפרק הסביבתי (פרק ט': "המערכת הסביבתית") את "מערכת הניטור הסביבתית והתעופתית". המערכת המורכבת משתי "תחנות קצה" לניטור ריכוזי המזהמים והניטור מופעל על שלושה ריכוזי מזהמים:

1. תחמוצות חנקן (NO_x)

2. אוזון טרופוספרי (O_3)

3. חלקיקים נשימים עדינים (PM2.5)

מערכת הניטור המורכבת בנתב"ג איננה מנטרת את הזיהום של נתב"ג כיחידה רגיונאלית אלא את הזיהום הקיים באזור השדה ללא הפרדה ממקורות זיהום אחרים באזור. עקב כך ובהתאם למגמה העולמית של בדיקת ההשפעות שיש לנמלי תעופה על זיהום האוויר עולה הצורך בעריכת מחקר הנוכחי שיבדוק את היקף הזיהום הנוצר בנתב"ג.

2.2 סוגי הזיהום

המחקר יעסוק בניטור של ארבעה סוגי מזהמים:

1. פחמימנים: קבוצה של תרכובות כימיות הבנויות מאטומי מימן ופחמן (C_xH_y). תרכובות אלה מהוות מרכיב בשמן, צבע, ממסים ודלקים וחלקים מהם גורמים לזיהום אוויר. דוגמא לפחמימן זה הבנזן – (C_6H_6). הבנזן הוא תרכובת ארומאטית נדיפה מאד. חשיפה לריכוזים גבוהים של בנזן הוכחה כקשורה באופן ברור לויקמיה, לכן, הוכר הבנזן כחומר מסרטן והתעוררה מודעות לעובדה שגם רמות נמוכות של בנזן באוויר הפתוח עלולות להיות קשורות למקרים של סרטן הדם בקרב כלל האוכלוסייה. כחומר המסוכן ביותר בהרכב של גזי פליטה ממנועי דיזל נחשב הפחמימן בנזן (a) פירן (בן-דוד, 2007).

2. חלקיקים נשימים: נפלים ממנועים בעיקר אלא המונעים בדיזל. החלקיקים הנפלים ממנועי דיזל הינם קטנים מאד (90% פחות מ 1 μm) חלקיקים בקוטר 2.5 מיקרומטר ומטה הם המסוכנים ביותר לריאות האדם. לחלקיקים אלה שטח פנים גבוה אליו נספחים חומרים מסוכנים ומסרטנים רבים כגון פחמימנים ומתכות כבדות והם נשאפים בקלות לתוך דרכי הנשימה (בן-דוד, 2007).

3. תחמוצות חנקן: חד תחמוצת חנקן (NO) ודו תחמוצת חנקן (NO_2) גז חום אדמדם הנראה בערפיח שמעל מטרופלינים, כאשר הוא חודר לעומק דרכי הנשימה הוא גורם למחלות בדרכי הנשימה והחלשת המערכת החיסונית של הגוף. באוויר הפתוח הופך חלק מהמהם CO לארוסלים עדינים של חנקן. ארוסולים אלו של חנקן מהווים באזורים מסוימים בעולם למשל לוס אנג'לס בארה"ב, שליש מכמות החלקיקים העדינים הנשימים באוויר (בן-דוד, 2007).

4. תחמוצות גופרית (SO_x): גז רעיל, קורוזי בעל ריח אופייני, חסר צבע ונוצר בעיקר בעת שריפת דלק נוזלי כבד. הגופרית הדו חמצנית מתחמצנת באוויר לגופרית תלת חמצנית (SO_3) הצירוף של $SO_2 + SO_3$ מכונה תחמוצות גופרית (SO_x). SO_2 מהווה כ 95% מהפליטה של תחמוצות גופרית והיתר הוא פליטה של SO_3 (גרבר, 2009).

ארבעת המזהמים אלה הם תוצרים של שריפת דלקים פוסילים, המופקים מנפט: קרוסין המשמש להנעה של מנועי הסילון במטוסים, סולר ובנזין המשמשים את ציוד העזר הפועל בשדה ואת כלי הרכב המשמשים לנסיעה אל הנמל וממנו.

הקרוסין הוא נוזל חסר צבע בעל תכולה אנרגטית גבוהה מה שהופך אותו למתאים עבור מנועי סילון. הקרוסין משמש להנעה סילונית כבר מראשית השימוש במנועים מסוג זה. אשר דלק מטוסים נשרף תוצרי הפליטה שלו הם תחמוצות גופרית, תחמוצות חנקן, פחמימנים וחלקיקים. כל זה כפוף לדגם המנוע מצב התחזוקה שלו וסוג התוספים בדלק. (Chevron Global Aviation,)

2009). עד עתה לא נמצא קריטריון ייחודי לקרוסין שיכול להבדיל אותו מסולר וההבדל הוא ברמת הפליטה ולא בסוג הפליטה (Cheung, 2004). ארגון התעופה האזרחית הבינלאומי (ICAO) הציב הגבלות לפליטות של החומרים הנ"ל בזמן נחיתה והמראה על מנת להקטין את הזיהום בפני הקרקע. הפחתה של תחמוצת גופרית SO_x נדרשת במנועי מכוניות אבל אין הגבלה למטוסים והכמות המותרת היא PPM 3000 אבל הממוצע העולמי עומד בין PPM 500-1000. מתקיים דיון בתעשיית התעופה במטרה להפחית את כמות הגופרית אבל עדיין לא נעשו שום צעדים מעשיים בעניין.

למעט המטוסים שמשמשים בקרוסין הערכתנו היא שחלק ניכר מהזיהום בנמל התעופה הוא תוצאה של שריפת שני דלקים פוסילים נוספים – סולר ובנזין, שמשמשים את ציוד העזר וכלי הרכב המובילים את הנוסעים לנמל וממנו. לפי אתר "המשרד לאיכות הסביבה - זיהום אוויר מכלי רכב" (המשרד לאיכות הסביבה, 2009), תכונות הסולר בארץ נקבעות לפי תקן ישראלי 107. תקן זה מגדיר מאפיינים כגון מספר הצטאן, תכולת המחמצנים וכד'. כיום, תחנות הדלק מספקות סולר עם PPM 50 ו-PPM 10 גופרית. החל משנת 2009 יימכר רק סולר PPM 10. סולר זה נקי יותר וגורם לפליטה מופחתת של מזהמים. הבנזין הנמכר בארץ חייב לעמוד בדרישות תקן ישראלי ת"י 90. בתקן זה נקבעות תכונות הדלק כגון מספר האוקטן, הרכבו הכימי ועוד. החל משנת 2009 התקן הישראלי מחייב שימוש בבנזין המכיל עד PPM 10 גופרית. תכולת הגופרית הנמוכה מקטינה את זיהום האוויר הנפלט ומגבירה את יעילות המערכות להפחתת פליטות מהרכב. בפרסום סטטיסטיקל של הלמ"ס (למ"ס, 2009) נטען כי מזהמי האוויר העיקרים הנובעים מכלי רכב, נכון לשנת 2007, הם פחמימנים ותחמוצות חנקן. כ 95% מכלל הפחמן החד חמצני CO ושליש מתחמוצות החנקן הוא תוצאה של שריפת דלקים בכלי רכב. אולם זה ירידה של 69% בכמות ה-CO וירידה של 40% בכמות תחמוצות החנקן משנת 1995.

3. שאלת המחקר

מהו היקף זיהום האוויר, שמקורו בפעילות נמל התעופה ע"ש בן-גוריון בחודשי הקיץ ?
המחקר משלב שתי שיטות עיקריות: מודל תיאורטי EDMS ומדידת כמות הזיהום בפועל
באמצעות תחנות ניטור, על מנת לאמוד את כמות זיהום האוויר שמקורו בפעילות נתב"ג.

4. חשיבות המחקר

בשנים האחרונות בעקבות מודעות הולכת וגוברת להשפעתו של זיהום זה על החיים בכדור הארץ
ישנו מאמץ עולמי להביא לצמצומו. מיפוי הגורמים המזהמים מאפשר בשלב מאוחר יותר למקד
את המאמץ להורדת רמת הזיהום מהמזהמים העיקריים.

מחקרים מקיפים רבים פורסמו בעולם בנושא זיהום אוויר שמקורו בפעילות נמלי תעופה.
מחקרים אילו מהווים בסיס לקבלת החלטות כגון מיקום נמל התעופה, או הרחבתו, שעות פעילות
הנמל, קביעת מסלולי המראה ונחיתה ועוד.

בארץ, למעט שתי תחנות ניטור שהוקמו כחלק מתוכנית מתאר 24, נושא הזיהום מנמל התעופה
כמעט איננו מטופל. אולם מיקומו של נתב"ג במרכז הארץ וקרבתו לישובים רבים, מצריך קיום
מחקר מקיף כמו זה המוצע וזה על מנת לאמוד את השפעת פעילות השדה על איכות האוויר
בסביבתו.

מספר הנוסעים בשדה עולה מידי שנה ואיתה עולה גם כמות הזיהום הנפלט לאוויר, כפי שניתן
לראות בפרק הרקע התיאורטי. תוצאות המחקר יאפשרו להשפיע על פיתוחו העתידי של נתב"ג
מתוך הבנה טובה יותר של השפעת הפעילות שלו על הסביבה ולהוות בסיס למחקרי המשך
בנושאים נוספים כגון:

- א. אפשרויות לצמצום כמות הזיהום הנפלטת.
- ב. השפעת הזיהום על בריאות האוכלוסייה ברדיוס הקרוב לנתב"ג.
- ג. חישוב חלקו היחסי ותרומו של נתב"ג בזיהום האוויר בישראל.
- ד. החלת שיטות המחקר שיושמו כאן לנמלי תעופה נוספים.

5. שיטות מחקר

המחקר מציע לשלב בין שתי שיטות:

1. שימוש במערכת מודל פליטת ופיזור - Emissions and Dispersion Modeling System (EDMS) שפותחה במנהל הפדראלי לתעופה של ארה"ב Federal Aviation Administration (FAA). באמצעות מודל זה ניתן לאמוד את שיעור הפליטות במגוון רחב של מזהמים הנפלטים מפעילות מטוסים וציוד העזר שלהם בנמל תעופה וניתן גם בעזרתו לחזות שינויים עתידיים בפליטות המזהמים כתוצאה מעלייה במספר הטיסות.

2. עיבוי של מערך הניטור הקיים בחמש תחנות ניטור נוספות. המערך החדש יבדוק את ריכוזי המזהמים מפעילות נתב"ג בארבעה מזהמים עיקריים: CO, NO_x, SO_x, PM 2.5, בשילוב של פרמטרים מטאורולוגיים: טמפרטורה, לחות יחסית, כיוון ועצמת רוח על מנת לקבוע את מקור הפליטות.

באמצעות שילוב של המודל התיאורטי ושל מערך הניטור המוצע ניתן יהיה לדעתנו להעריך בהסתברות טובה, את היקף הזיהום הנפלט מנתב"ג כמו גם את חלקם היחסי של הגורמים השונים הקשורים בפעילות השדה.

5.1 מערכת מודל פליטת ופיזור - Emissions and Dispersion Modeling System (EDMS)

ההסבר על המודל ואופן השימוש בו נלקח מתוך מדריך למשתמש לגרסה 5.1 שיצאה בספטמבר 2008 מאתר ה-FAA.

מודל זה פותח באמצע שנות ה-80 כקומפלקס של מודלים ממוחשבים על מנת לאמוד את איכות האוויר והשפעתו על פיתוח נמלי תעופה בארה"ב. המודל הוא אחד מהכלים הבודדים אשר תוכנן להכיל את כל הגורמים המזהמים הקשורים לפעילויות בנמל תעופה. המודל מציג בצורה גראפית את מקורות הזיהום השונים ומאפשר למשתמש לבצע התאמה אישית לסוגים השונים של המטוסים ושל התמיכה הטכנית על הקרקע. המודל עבר מספר עדכונים במהלך השנים וכיום נחשב למוביל מסוגו בעולם.

5.2 אופן השימוש במודל

המודל ניזון ממספר נתונים המהווים בסיס לחישוב כמות הזיהום:

- **פליטות ממטוסים** - כמות מטוסים, סוג המטוס, זמני פעילות מנועי המטוס במעגל נחיתה-המראה בשלביו השונים, לוח הזמנים ומקדמי פליטה של המנועים.
- * הנתונים לגבי סוג המטוס ולוח זמני הטיסה יתקבלו מיחידת תכנון והנדסה של נתב"ג. זמני פעילות מנועי המטוס בשלבים השונים של מעגל נחיתה המראה יימדדו בשטח, נתוני מקדמי פליטות מנועי הסילון יתקבלו מ- International Civil Aviation Organization (ICAO).

- **ציוד סיוע למטוסים על הקרקע (GSE)** - סוג הרכב, משך זמן פעולה ומקדמי פליטה של המנוע.
- * סוג הרכב ומשך זמן פעולתו ממקורות נתב"ג, מקדמי הפליטות ייתקבלו מ-(ICAO).
- **יחידות סיוע חשמליות (APU)** - אופי הסיוע, משך זמן פעולה ומקדמי הפליטה של הגנראטורים.
- * סוג הרכב ומשך זמן פעולתו ממקורות נתב"ג. מקדמי הפליטות יתקבלו מ-(ICAO).
- **מזג האוויר** - שימוש במודל AERMET שהינו חלק ממודל ה-EDMS. שימוש בנתונים מטאורולוגיים לפי שעות היממה, והצבה של גובה שכבת ערבוב האוויר.
- * הנתונים המטאורולוגיים יתקבלו מתחנות הניטור השונות. בנוסף, יעשה שימוש באלגוריתמים של פיזור מזהמים שיתקבלו מ- Environmental Protection Agency's (EPA).
- **כלי רכב המגיעים לנמל התעופה** - שימוש במודל MOBILE6 שהוא מודל חיצוני של מודל ה-EDMS יחושב לפי נפח התנועה המגיע לנתב"ג, סוג הרכב (אוטובוסים, רכבים פרטיים) זמני פעולת המנוע ע"פ המרחק שעליהם לעבור עד הטרמינלים השונים וזמני המתנה.
- * על מנת לחשב את נפח כלי הרכב שמגיע לנתב"ג ואת סוגם, נקים מערכת אפיון וספירת רכבים ממוחשבת בשער הראשי של נתב"ג. נתוני מקדמי פליטות של הרכבים יילקחו מה-EPA.

5.3 תוצאות חישוב המודל

תוצאות המודל מתייחסות למזהמים הבאים:

1. CO₂ (פחמן דו חמצני) מחושב רק למטוסים,

2. CO (פחמן חד חמצני),

3. THC (סה"כ הידרו פחמימנים) מחושב למטוסים ו-APUs,

4. NMHC (הידרו פחמימנים שאינם מתאן),

5. VOC (תרכובות אורגניות נדיפות),

6. TOG (סה"כ תרכובות אורגניות),

7. NO_x (תחמוצות חנקן),

8. SO_x (תחמוצות גפרית),

9. PM-10 (חלקיקים עד 10 מיקרון),

10. PM-10 חלקיקים עד 2.5 מיקרון.

המזהמים המודגשים הם המזהמים אשר ינוטרו בתחנות הניטור שיוקמו במהלך המחקר המוצע.

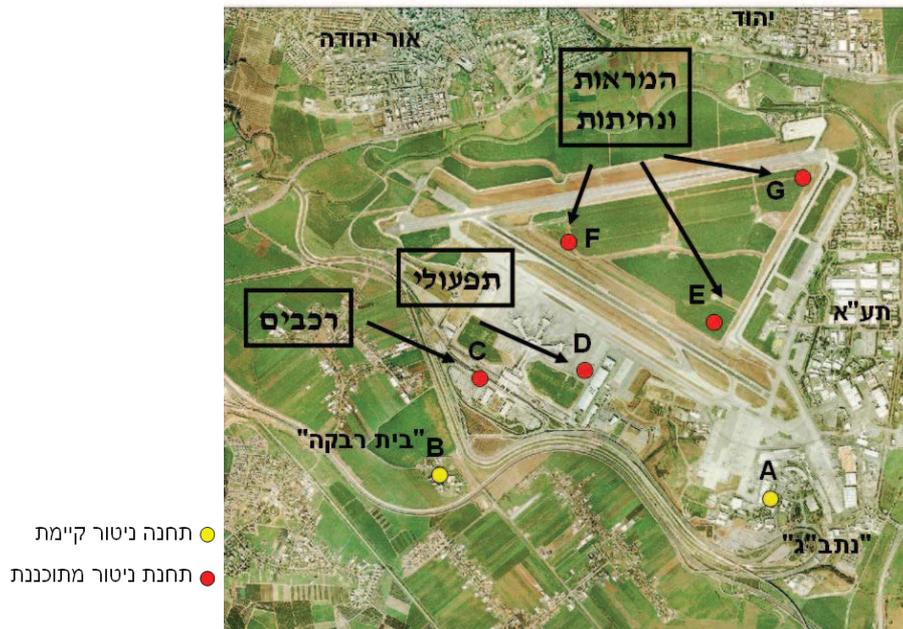
5.4 סיכום מודל EDMS

שימוש במודל ה-EDMS דורש מהמשתמש לאפיין את הפעילות שגורמת לפליטת מזהמים מכל מקור אפשרי, להזין נתונים של מקדמי הפליטות ומשך זמן פעולה של כל אחד מהגורמים ובנוסף לשלב נתונים מטאורולוגיים וגיאוגרפיים שונים. לאחר הפעלת המודל מתקבל תקציר של רשימת הממצאים ובו כמות המזהמים השונים לכל אחד מהמקורות יוצרי הזיהום ליחידת זמן וסה"כ כללי כפונקציה של מרחק מהנמל. ניתן לבחור מספר סוגי יחידות ע"פ בחירת המשתמש.

5.5 הקמת מערך ניטור

לשם מדידת היקף הפליטות הנפלטות מנתב"ג בפועל, אנו מציעים להקים 5 תחנות ניטור בנוסף לשתי התחנות שכבר קיימות. תחנות הניטור ימוקמו במקומות שונים ברחבי נמל התעופה באופן שיאפשר כיסוי טוב לזיהום הנפלט מנתב"ג, הן כתוצאה מפעילות המטוסים והן כתוצאה מפעילות גורמים מזהמים אחרים הפועלים בנתב"ג, בהתחשב בפרמטרים מטאורולוגיים שונים. תחנות הניטור יוקמו בסמיכות למוקדי הפעילות השונים ובכך ניתן גם לחשב את חלקו היחסי של כל גורם בסך כל הזיהום הנפלט לאוויר.

5.6 אופן פריסת תחנות הניטור בנתב"ג



איור 7. מיקום תחנות הניטור בנתב"ג (מחלקת תכנון והנדסה, רש"ת).

באיור 7, ניתן לראות את מיקום תחנות הניטור בנתב"ג, כאשר תחנות A-B, אלו הן התחנות הקיימות ותחנות C-E, אלו הן התחנות החדשות.

- **תחנה A:** תחנת ניטור "נתב"ג" נמצאת על גג המשרד הראשי של רשות שדות התעופה.
- **תחנה B:** תחנת ניטור "בית רבקה" נמצאת על גג המכללה של מוסד בית רבקה כ-850 מטר מדרום לטרמינל 3 וכ-250 מטר מצפון לכביש ירושלים-תל אביב.

- **תחנה C:** תחנה זו תמוקם ביציאה מהחניון קצר הטווח ליד אולם הנוסעים, באזור "צוואר הבקבוק", ההנחה היא, שכל רכב המגיע לנתב"ג עובר באזור זה ולכן התחנה תנטר בעיקר את הזיהום של כלי התחבורה.
- **תחנה D:** התחנה תוקם באזור התפעולי של נתב"ג, באזור הפעולה של רכבי סיוע הקרקע (GSE) ויחידות הסיוע החשמליות (APU).
- **תחנות E + F + G:** תחנות אלו ימוקמו באזור מסלולי ההמראה והנחיתה וינטרו בעיקר את הזיהום הנפלט מהמטוסים בשלבי מעגל נחיתה- המראה השונים. תחנה G תמוקם בסמוך למסלול ההמראה בשלב בו המנוע פועל בעוצמה מקסימלית ונוצר מרבית הזיהום על פני הקרקע. תחנות E ו- F ימוקמו באזור מסלול הנחיתה כאשר תחנה E קרובה למסלול הגישה למסלול ההמראה (שלב ה-Taxing) ותחנה F קרובה לשלב שבו המטוס נוחת ונוגע בקרקע.

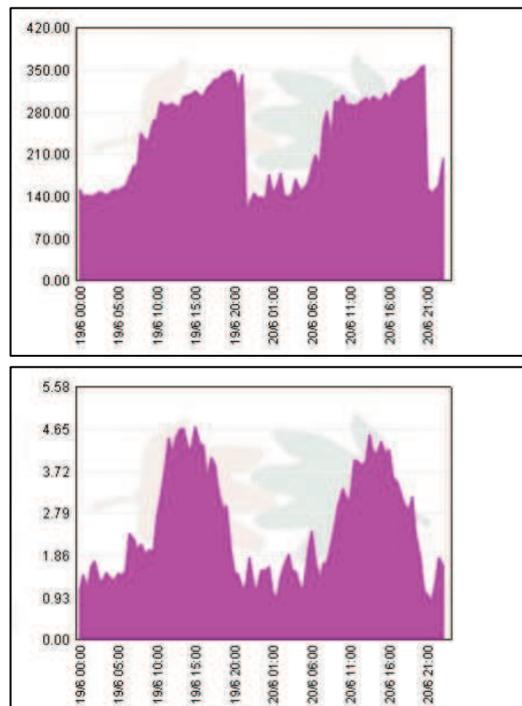
כל התחנות ימוקמו בגובה של 10 מטרים מעל פני הקרקע ויהיו בטכנולוגיה זהה. משילוב הנתונים שיתקבלו משבע תחנות הניטור נוכל ליצור גרדיאנטים של המזהמים השונים ולכמת את הנתונים בצורה שתיתן כמות פליטות ממוצעת לכל אחד מהחודשים שנכללים במחקר. באמצעות מערך הניטור נוכל לבדוק את התוצאות התיאורטיות של היקף הזיהום שיתקבלו משימוש במודל לבדוק את מידת התאמה ביניהם.

6. הערכת הקשיים הצפויים במערך המחקר

- א. נמל התעופה ע"ש בן גוריון אינו "אי מבודד" ולכן קיים קושי לבודד באופן מוחלט את הזיהום שנוצר בו משאר מקורות יוצרי זיהום בסביבתו, כגון כביש ירושלים-תל אביב אחד מהכבישים העמוסים ביותר בישראל, מפעלים הממוקמים בסמיכות לנתב"ג וכו'.
- ב. הקמת תחנות הניטור עשויות לפגוע בבטיחות הטיסה – בעיקר התחנות המתוכננות להבנות בסמיכות למסלולי המראה ונחיתה.
- ג. בשל העובדה שהמחקר משלב שתי שיטות שלא תלויות האחת בשנייה, עשויים להתקבל תוצאות שונות שאינם מתיישבות ביחד.
- ד. איסוף הנתונים לצורך תוצאה מדויקת דורש משאבים רבים ומספר רב של גורמים ונתונים המשתנים בפרקי זמן קצרים.

7. התמודדות עם חלק מהקשיים

על מנת להתמודד עם הבעיה הראשונה, שאלת המחקר מתייחסת לזיהום שנוצר בנתב"ג בחודשי הקיץ בלבד, בתקופה זו משטר הרוחות יציב, כפי שניתן לראות איור 8 א. כיוון הרוח הוא מצפון לדרום למעט שעות 00:00-6:00 כך שאין השפעה גדולה של הכביש על תחנות הניטור בשעות היום והערב, הבעיה היא בשעות בהן כיוון הרוח מתהפך והרוח נושבת מדרום לצפון (כאמור 00:00-24:00) במצב זה תחנות הניטור יכולות לנטר גם את הזיהום שנוצר מהכביש המדובר. ניתן לראות באיור 8 שעוצמת הרוח בשעות אלו נמוכה מאוד ובנוסף נפח התנועה בשעות אלו נמוך משמעותית מאשר בשעות היום ולכן תחנות הניטור בחודשי הקיץ ינטרו את רוב הזיהום שייווצר בנתב"ג. בנוסף, המחקר המוצע אינו מסתמך אך ורק על הניטור, השימוש במודל התיאורטי מנטרל את ההשפעות החיצוניות ומחשב אך ורק את הזיהום הנפלט מנתב"ג בלבד.



א.

ב.

איור 8. א. כיוון הרוח לפי אזימוט, ב. עוצמת הרוח (מטר לשנייה). כפי שניתן לראות בגרפים 1-2, כיוון הרוח מתהפך בשעות 00:00-6:00 ובמקביל עוצמת הרוח נמוכה משמעותית בשעות 00:00-20:00 (הנתונים נלקחו מאתר המשרד להגנת הסביבה תחנת ניטור נתב"ג 19-20/6/09).

בעשורים האחרונים ישנה מגמת עליה של כ- 5% במספר הנוסעים בתחבורה האווירית העולמית בשנה (Lee, 2003). בשל מגמה זו נושא פליטות מזהמים ממטוסים ומפעילות נמלי תעופה בפרט הוא תחום מחקר שמרבית לעסוק בו בעולם. פותחו שיטות ומודלים רבים למדידת שיעור הפליטות מהמטוסים השונים ואף פורסמו מספר רב של מחקרים בנושא.

בארץ הנושא אינו מפותח, ולא נערך מחקר הבדוק את היקף הזיהום הנוצר בנתב"ג. מיקומו של נתב"ג במרכז הארץ וקרבתו לישובים רבים מצריך קיום מחקר מקיף כמו המחקר המוצע.

המחקר מתוכנן להתבצע בחודשי הקיץ והחגים, חודשים אלו הם חודשי השיא מבחינת כמות הטיסות וכמות האנשים המגיעים לנמל התעופה. שיקול נוסף להתמקד בחודשים אלו הוא יציבות האטמוספירה, בחודשי הקיץ נוצרת שכבת אינברסיה והזיהום הנוצר נשאר בשכבות הנמוכות ואינו מתפזר טוב באטמוספירה. אנו מצפים שבחודשים אלו ייווצר הזיהום המקסימאלי בנתב"ג.

המחקר המוצע משלב שתי שיטות המחקר, מודל ממוחשב EDMS, שיספק לנו הערכה לגבי כמות הפליטות של המזהמים השונים ללא השפעות של גורמים חיצוניים ועיבוי מערך הניטור בנמל שיבדוק את פליטות הזיהום בפועל. שילוב של המודל התיאורטי ומערך הניטור ייתנו תוצאות אשר בקירוב טוב, יאמדו את היקף הפליטות ממכלול פעילויות נתב"ג.

בנוסף, ישנה אפשרות לחיזוי פליטות עתידיות מנתב"ג באמצעות המודל התיאורטי לפי הגידול הצפוי במספר הטיסות ובכך ניתן יהיה לתכנן בצורה טובה יותר את פיתוח נמל התעופה העתידי.

מכיוון שמחקר זה הינו ראשוני וייחודי הוא יכול להוות את הבסיס למספר מחקרי המשך בנושא.

9. ביבליוגרפיה

1. בן דוד, ב. (2007). זיהום אוויר מכלי רכב. איגוד ערים אזור חיפה – איכות הסביבה. באתר איגוד ערים אזור חיפה – איכות הסביבה. (הורדה ב 2.7.09).
www.envihaifa.org.il/heb/pdf/cars01.pdf
2. גרבר, מ. (2002). פליטות וריכוזים של מזהמי אוויר בישראל. ביוספרה – ירחון המשרד לאיכות הסביבה. באתר סנונית. (נצפה ב 2.7.09).
http://www.snunit.k12.il/heb_journals/biosfera/2403010.html
3. הלמ"ס (2007). סטטיסטיקל. באתר הלמ"ס. (נצפה ב 20.7.09).
http://www.cbs.gov.il/reader/?MIval=cw_usr_view_SHTML&ID=337
4. המשרד לאיכות הסביבה. (2009). זיהום אוויר מכלי רכב. באתר המשרד לאיכות הסביבה. (נצפה ב 21.7.09)
<http://www.environment.gov.il/>
5. רשות שדות התעופה. (2009). דו"ח חודשי לתנועת נוסעים, כלי רכב ומטענים במסופי הגבול – סיכום 2007. באתר רשות שדות התעופה. (הורדה ב 8.7.09).
<http://www.iaa.gov.il/NR/rdonlyres/6F178277-E68D-4DD3-B948-61B3FBB798FE/0/Border.PDF>
6. Chevron Global Aviation. (2008). Aviation fuels technical review. In Chevron Global Aviation website (download in 20.5.09).
www.chevronglobalaviation.com/docs/aviation_tech_review.pdf
7. FAA (2009). Emissions and Dispersion Modeling System (EDMS). The FAA website. (Seen in 16.06.09).
http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/aep/models/edms_model/
8. EDMS 5.1 User Manual. (download in 16.6.09).
http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/aep/models/edms_model/
EDMS 5.1 User Manual Appendix.
9. Holzman, D. (1997). Plane Pollution. Environmental Health Perspectives, 105(12). Pp: 1300–1305. In ehp website. (view in 22.7.09).

<http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=1470416>

10. Hsu, H. Adamkiewicz, G. Vallarino, J. Melly, S J. Spengler, J D. Levy, J. (2008). Contributions of Airport Activities to Air Pollution Levels in Surrounding Neighborhoods. Epidemiology: Vol 19. In epa website (download in 6.8.09).
www.epa.gov/ttnamti1/files/ambient/airtox/warfy04.pdf
http://journals.lww.com/epidem/Fulltext/2008/11001/Contributions_of_Airport_Activities_to_Air.813.aspx
11. ICAO (2009). Engine Exhaust Emissions Data Bank. (seen in 8.8.09).
<http://www.icao.int/env>
12. Groma, V. Alföldy, B. Osán, J. Kugler, S. (2007).
[Impact of the airport related traffic on the urban particulate pollution.](#)
Proceeding of European Aerosol
Conference, 2007.
13. Kesgin, U.(2006). Aircraft Emissions at Turkish Airports. Energy, Vol. 31(2-3)
pp. 372-384.
http://findarticles.com/p/articles/mi_qa5467/is_200505/ai_n21379246/?tag=content;coll
14. Lee, J.(2003) "The Potential Offered by Aircraft and Engine Technologies", in: P. Upham (ed.) Towards Sustainable Aviation, Earthscan pp. 162-179
<http://books.google.co.il>
15. Unal, A. (2005). Airport related emissions and impacts on air quality: Application to the Atlanta International Airport. Atmospheric Environment.
people.ce.gatech.edu/~todman/ae-2005.pdf
16. Yu K.N., Cheung Y.P., Cheung T. and R.C. Henry (2004) "Identifying the Impact of Large Urban Airports on Local Air Quality by Nonparametric Regression",
[Atmospheric Environment](#), Vol. 38(27).

הצעת מחקר המוגשת במסגרת קורס פרויקטים באיכות הסביבה תשס"ט:

חקר סיכון מפריצה כוללת של מיכל אמוניה הגורם לזיהום אויר במפרץ חיפה.

**עדי שפירא , לורית ליבוביץ,
לירון פרידמן ואשד מזוריץ**

מנחה : פרופ' עמרם אשל

2009

תודות:

לפרופ' עמרם אשל ולד"ר גד פנחסי, על העזרה, ההכוונה והתמיכה האישית והמקצועית לאורך הדרך.

תקציר

במסגרת מחקר העוסק בזיהום אויר, הוחלט לבחון את השפעת חומר מסוכן המתאדה ומתערבב באוויר במטרה להעריך את מספר האנשים שיפגעו מחשיפה לחומר. בעבודה זו נחקר את מיכל האמוניה במפרץ חיפה, המהווה סיכון רב לתושבים המתגוררים סביב, כמקרה מבחן. הסיכון שמהווה מיכל האמוניה נובע מהחשש מפריצת המיכל ופיזור תכולתו בסביבה, בעת פריצת המיכל כמות הגז שיתפזר לאוויר תהיה גדולה ומסוכנת, להערכתנו במקרה כזה ימצאו התושבים הגרים בקרבת מקום בסכנת חיים עקב חשיפתם לזיהום האוויר החמור.

מטרת המחקר הנוכחי היא לבחון תרחיש של התפרצות מיכל האמוניה עקב פגיעת טיל ישירה ולחשב את הסיכון לתושבי האזור בצורה כמותית.

המחקר הנוכחי יתמקד בפיתוח תת-מודל הבוחן את פיזור המזהם בהשפעת התנאים האטמוספריים. שאלת המחקר באה לבחון את השפעת התנאים האטמוספריים על קצב פיזור המזהם באירוע של קריסת מיכל אמוניה המאוחסנת בקירור. האמוניה המאוחסנת בקירור מתנהגת כגז כבד בעת שלב פיזור הראשוני, ולכן מודל הפיזור יחזה את פיזור הגז הכבד, ואת המעבר לפיזור פאסיבי עם התחממות הגז.

במסגרת המחקר, יתבצע סקר נתונים המשפיעים על הפיזור של המזהם באוויר כגון: נתונים טופוגרפיים, תכסית, נתונים מטאורולוגיים ופיזור אוכלוסיה. תנאים אלה יוזנו במודל פיזור לקבלת פילוג הריכוזים בזמן ובמרחב של החומר המסוכן, כל זאת, על מנת למצוא את התנאים המובילים לתרחיש המסוכן ביותר. במחקר ימצאו התנאים המטאורולוגיים: כיוון רוח, יציבות אטמוספרית, לחות, משקעים וטמפרטורה בהן קצב פיזורו של ענן הגז הכבד מוביל למספר הרב ביותר של נפגעים. כתוצאות ראשוניות מוצגות דוגמאות פלט מודל הערכת סיכונים המבוסס על תרחיש הנראה כתרחיש החמור ביותר, הפלט כולל מפת פילוג האוכלוסייה, פילוג הריכוזים במרחב, מפת הסיכון ומספר ההרוגים.

תוכן העניינים

6.....	מבוא	.1
6.....	כללי	.1.1
6.....	רקע היסטורי	.1.2
7.....	מודל הערכת סיכונים - רקע	.1.3
8.....	המתקן הנחקר- מיכל האמוניה במפרץ חיפה	.1.4
8.....	המחקר המוצע וחשיבותו	.1.5
8.....	רקע מדעי : מודלים לפיזור גז כבד	.2
8.....	אופייני הפיזור	.2.1
10.....	תיאור המודלים	.2.2
11.....	השפעת תנאים מטאורולוגיים על פיזור הגז הכבד	.2.3
15.....	מצב אטמוספרי של התרחיש המסוכן ביותר-תקן	1.3
16.....	סקר תוכנות לפיזור גז כבד	1.4
18.....	מקרה המבחן : מיכל האמוניה במפרץ חיפה	.3
18.....	המתקן – מיכל האמוניה	.3.1
18.....	תנאי אחסון	3.2.
20.....	החומר המסוכן- אמוניה	3.3.
21.....	עבודות מחקר על המתקן	.3.4
22.....	תרחישים אפשריים לפריצת המיכל	.3.5
23.....	המחקר המוצע	.4
23.....	מטרת העבודה ושאלת המחקר	.4.1
23.....	שיטת המחקר	.4.2
24.....	חשיבות המחקר	.4.3
24.....	בעיות אפשריות במחקר	.4.4
25.....	איסוף נתונים	.5
25.....	נתונים טופוגרפיים	.5.1
25.....	אוכלוסייה ופילוגה	.5.2
25.....	נתונים מטאורולוגיים	.5.3
26.....	תוצאות ראשוניות	.6
27.....	התרחיש המנותח	.6.1
27.....	תוצאות	.6.2
29.....	סיכום	.7
30.....	מקורות ספרותיים	.8
30.....	ספרות	8.1.
31.....	אתרים ברשת	.8.2
33.....	נספח א' : תכונות פיסיקליות –אמוניה	.9
33.....	אמוניה	.9.1
34.....	נספח ב' : איסוף נתונים עבור האזור הנחקר- מפרץ חיפה	.10

34.....	נתונים טופוגרפים	.10.1
35.....	נתונים מטאורולוגים	.10.2
34.....	אוכלוסייה ופילוגה	.10.3
36.....	פריסת תחנות הניטור באזור הנחקר	.10.4
37.....	נספח ג': תאור מתמטי של המודלים	11.
37.....	מודל פיזור פאסיבי	.11.1
40.....	מודל פיזור גז כבד	.11.2
43.....	נספח ג': תנאים אטמוספריים- כללי	12.
45.....	נספח ה': קובץ קלט של תוכנת SLAB	.13

1. מבוא

1.1. כללי

בחודשים שקדמו למלחמת לבנון השנייה, ובעיקר בחודשים אחריה, התעוררה התעניינות רבה בכל הנוגע לסיכונים ולהשפעות הסביבתיות של מיכל האמוניה המקוררת השייך למפעל חיפה כימיקלים בנמל הקישון הנמצא במפרץ חיפה.

עקב המחלוקת הקשה לגבי רמת הסיכון שמהווה המיכל במפרץ חיפה, נדרשים מודלים של הערכת סיכונים וביניהם המודל לתרחיש החמור ביותר (קיצון). מודל סיכון מורכב משקלל בתוכו מספר תת מודלים: מודל מקור - המחשב את קצב הפריצה והאיזוי מהמיכל, מודל פיזור המזהם - המחשב את שדה הריכוזים סביב המקור כתלות בתנאי הסביבה האטמוספריים ומודל מנה - החוזה את מספר הנפגעים וחומרת הפגיעה.

במסגרת הקורס פרויקטים באיכות הסביבה בנושא זיהום אוויר, מוצעת בזאת הצעת מחקר לבחינת פיזור המזהם- החומר המסוכן, בהשפעת התנאים האטמוספריים.

1.2. רקע היסטורי

תאונות בהן נחשפת אוכלוסיה לחומר מסוכן מתרחשות בעיקר עקב דליפה או פיצוץ של חומר מסוכן במפעלי תעשייה. החומר נישא באוויר, גורם לזיהום אוויר כבד ופוגע באוכלוסיית האזור עם החשיפה אליו. חומרת הפגיעה תלויה ברעילות החומר, ריכוזו באוויר, משך החשיפה ובמספר האנשים שבאו איתו במגע. התנאים האטמוספריים בזמן התרחשות אירוע מסוג זה הינם גורם חשוב ומשפיע על רדיוס וכיוון פיזורו המרחבי של ענן החומר המסוכן.

במרוצת השנים התרחשו בעולם מספר תקריות של חומרים מסוכנים. למשל - בסווסו, איטליה (1976), בבופאל, הודו (1984) ובעיר סאן חואניקו, מקסיקו (1984) (Lees, 1996). במדינת

ישראל עדיין לא התרחש אירוע של חומרים מסוכנים בסדר גודל דומה לאירועים אלו. ארועי פליטת אמוניה בסדר גודל קטן התרחשו בארץ פעמים ספורות, למשל, במפעל "טנא נגה" בבאר טוביה בשנת 2006, באירוע נפצעו כ-20 אנשים ועובדי המפעל פונו מהאזור (תאונת "טנא נוגה", אתר ynet). אירוע נוסף אירע במלחמת לבנון השנייה, כאשר שישה טונות של גז אמוניה נפלטו לאוויר כתוצאה מטיל שפגע באזור קריית שמונה. באירוע נפגעו מספר אנשים באורך קל (תאונת קריית שמונה, אתר ynet).

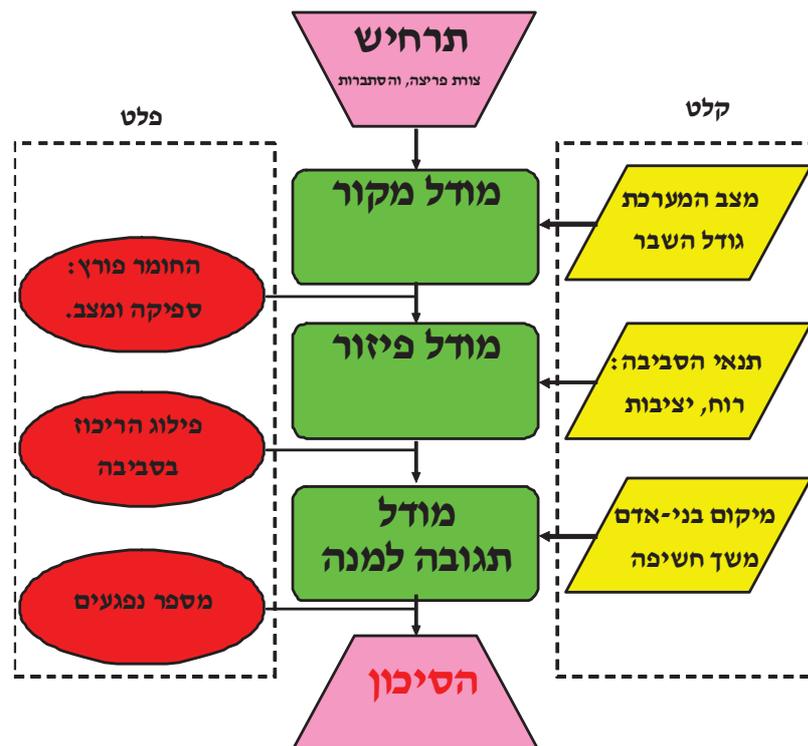
מקרים אלו שהתרחשו בעולם ובפרט בישראל עוררו את שאלת המחקר עליה נדון בעבודה זו.

1.3. מודל הערכת סיכונים - רקע

ערך כמותי של "הסיכון" (Risk) מוגדר כמנה בין מספר הנפגעים לשכיחות האירוע (מספר הרוגים ליחידת זמן). ישום מודל להערכת סיכונים (Risk Assessment) בתעשייה הכימית כולל בניה של שלושה תת-מודלים:

1. מודל מקור (Source term model): המחשב את כמות החומר המשוחררת לאטמוספירה בזמן הפריצה.
2. מודל פיזור (Dispersion model): המחשב את שדה הריכוזים: הריכוז בכל נקודה סביב המקור בזמן ההתפשטות.
3. מודל מנה (Dose response model): החוזה את מספר הנפגעים כתלות בריכוז האוכלוסייה והחומר ובזמן החשיפה.

מבנה המודל מתואר באיור 1. באיור נתוני הקלט מסומנים בצהוב ונתוני הפלט של כל מודל מסומנים באדום.



איור 1: תרשים זרימה המתאר את הגורמים המשפיעים ושקלולם בתתי המודלים בבניית מודל הסיכון.

1.4. המתקן הנחקר- מיכל האמוניה במפרץ חיפה

מיכל האמוניה של חברת חיפה כימיקלים באזור מפרץ חיפה מאחסן עד 12 אלף טון אמוניה. בבעלות מפעל חיפה כימיקלים שני אתרים נפרדים לאחסון אמוניה באזור מפרץ חיפה. באתר בו תתמקד עבודה זו, מאוחסנת אמוניה מקוררת במיכל אחסון אשר ממוקם בנמל הקישון במתחם שנקרא "מסוף הכימיקלים הצפוני" (איור 1) (חיפה כימיקלים, 2000)

1.5. המחקר המוצע וחשיבותו

הפרויקט יתמקד בפתוח ויישום תת-מודל הבוחן את פיזור המזהם בהשפעת התנאים האטמוספריים, במטרה לזהות את התרחיש המסוכן ביותר בתאונה של פריצת חומר מסוכן. המחקר עוסק במקרה מבחן של פריצת מיכל האמוניה המונזלת בקירור במפרץ חיפה. מיכל האמוניה במפרץ חיפה, המצוי תחת ויכוח ציבורי, מהווה סיכון שערכו לא ידוע עד כה. לראשונה יבחן התרחיש המסוכן ביותר במקרה של פריצת מיכל האמוניה ותנותח השפעת התנאים האטמוספריים על תוצאות תרחיש זה. התרחיש שיבחן הינו פריצה כוללת של המיכל עקב פגיעת טיל בגג המיכל, במסגרת זו יחקרו אופייני הפיזור של החומר המסוכן והגורמים המשפיעים. מודלים מתקדמים כאלו ל"הערכת סיכונים", נדרשים לקיום תעשייה (פרנסת האדם) לצד שמירה על האדם והסביבה.

2. רקע מדעי: מודלים לפיזור גז כבד

המחקר המוצע יתמקד בניתוח מודלים לפיזור האמוניה אחרי אידויה מהבריכה הנוצרת לאחר פריצת המיכל, האד המתאדה מהבריכה הינו בטמפרטורה נמוכה, ולכן מתנהג כגז הכבד מהאוויר. בפרק זה תתואר התנהגות ענן הגז הכבד, יפורטו, הגורמים המשפיעים על פיזורו ויסקרו מודלים לפיזור גז כבד באטמוספירה מתוכם יבחרו המודלים העדיפים לעבודה הנוכחית.

2.1. אופייני הפיזור

מודלים לתיאור הפיזור של גז צפוף מן האוויר, מתארים את התפשטות ענן ברדיוס ענן המזהם, גובהו וצפיפותו ופילוג הריכוז החומר בזמן ובמקום, זאת כתלות בתנאי הסביבה. התנהגות החומר שהשתחרר באטמוספירה נקבעת על ידי צפיפותו יחסית לאוויר הסובב, חומרים רבים המקובלים בתעשייה הכימית הינם כבדים מן האוויר ופיזורם באטמוספירה מושפע מאפקטים גרביטציוניים, עד התגברות התהליכים של פיזור פסיבי (דיפוזיה טורבולנטית- על ידי ערבוב). מודלי אלו מופיעים בספרות (Lees, 1996; World Bank, 1985; Kaiser, 1989)

2.1.1. שלבי הפיזור ענן הגז

אופן פיזור גז כבד מחולק לשני שלבים עיקריים: שלב גרביטציוני ושלב פיזור פאסיבי. בהתאם לכך מודל המתאר את הפיזור מורכב משני תת-מודלים וקריטריון המעבר בניהם:

1. שלב פיזור גז כבד: בשלב הראשוני צפיפות ענן הגז גבוהה מהאוויר לכן אופי הפיזור יושפע בעיקר מאפקטים גרביטציוניים. צפיפות הענן הגבוהה, מקורה בצפיפות החומר הפורץ (צפיפות גז טהור בתנאים אטמוספריים- לחץ וטמפרטורה) ו/או בטמפרטורה הנמוכה בו.
 2. שלב פיזור פסיבי: לאחר זמן ומרחק מסוים הענן נמהל עם אויר הסביבה בהשפעת מערבולות האוויר, כך שצפיפותו והטמפרטורה בו קרובים לתכונות האוויר הסובב. בשלב זה נדרש להשתמש במודל התמרה הגאוסית לתיאור פיזור של חומר בעל ציפה חיובית או ניטרלית. מודלים לפיזור מזהמים מבוססים בעיקר על מודל גאוסיאני (Gaussian Dispersion Model)
- במודל הפיזור נדרש קריטריון מעבר בין שתי תצורות הפיזור. (קריטריון לדוגמה מפורט בנספח ג')

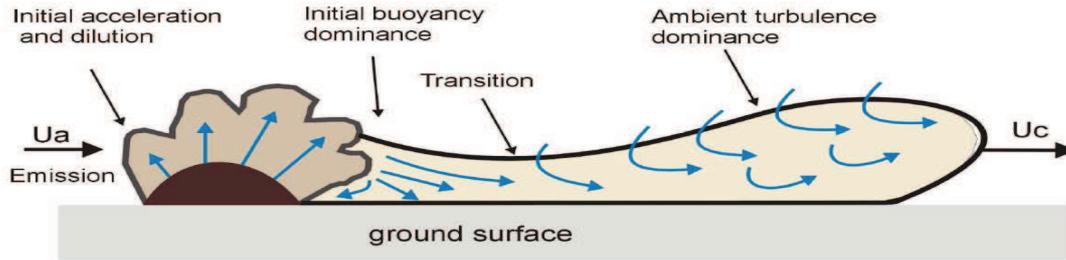
2.1.2 שלבי הפיזור בהשפעת המקור- תלות בזמן

- אופי פיזור גז שמקורו בפריצה תאונה הינו פיזור התלוי בזמן. במקרה של פריצה ממושכת אופי פיזור יכול להיות מתואר על ידי שחרור רציף. בהתאם לכך, מודל הפיזור כולל שני צורות ניתוח, עבור מקור פתאומי או רציף:
1. שלב תלוי בזמן: בשלב זה מתוארת תנועת הענן והתפשטותו על ידי מודל "ענן נפיחה" (Puff): חוזה את שדה הריכוזים בענן נע- תלות בזמן ובמקום.
 2. שלב רציף: בשלב זה מתואר פילוג הריכוזים על ידי מודל תימרה (Plume): חוזה את שדה הריכוזים עבור מקור רציף - תלות במקום. מודלים עבור פיזור פאסיבי מתוארים בנספח ג'.

2.1.3 גורמים המשפיעים על פיזור ענן הגז

בשני סוגי המודלים- פיזור פאסיבי ופיזור גז כבד, השפעת התנאים הטופוגרפיים, תכסית והתנאים המטאורולוגיים מתבטאים בפרמטר שונות הפיזור (מתואר בנספח ג'). פרמטר זה משתנה גם במודל הפשוט ביותר (המודל הגאוסיאני) כתלות במרחק מהמקור, באופי פני השטח וביציבות האטמוספריית. נוכחות הקרקע ושכבת האינורסיה מתבטאים בדרך כלל כהחזרות על ידי שיקופים של משוואת הפיזור.

בעבודה הנוכחית תחקר השפעת התנאים האטמוספריים על אופי הפיזור, ויבחן מודל המיישם את התרחיש הנבחר, יוצגו השפעות הפרמטרים השונים ופילוג הריכוז על פי המודלים השונים.



איור 2: אופייני פיזור ענן גז כבד.

2.2 תאור המודלים

בסעיף זה יתוארו המקורות והמאפיינים של המודלים בשימוש. המודל הגאוסיאני, מודל פיזור הגז הכבד וקריטריון המעבר בניהם.

2.2.1 מודל פיזור פאסיבי- המודל הגאוסיאני

על מנת להעריך את פיזור החומר הפורץ, פותחו מספר תיאוריות, אשר בעזרת פונקציות סטטיסטיות, ומשוואות הזרימה, צפו בדיוק סביר (30%-45) שדה הריכוזים של ענן החומר המזהם. הפיתוח המוכר ביותר והשמיש ביותר פותח ע"י פסקוויל וג'יפורד (Pasquill, 1961), פיתוח זה מניח פיזור גאוסיאני של החומר בשלושת הצירים, ולוקח בחשבון את תכונות החומר בזמן ההתפרצות, גובה השחרור, מהירות הרוח, יציבות אטמוספירית. המודל הגאוסיאני מפורט בנספח ג'.

במודל הגאוסיאני מחושבת שונות הפיזור, לדוגמה, מודל Briggs (1973) מבחין בין שטח פתוח לשטח אורבני כתלות ביציבות אטמוספירית, בתחום מרחקים $10^2 < x < 10^4$ m. המודל מתואר אף הוא בנספח ג'.

2.2.2 מודלים לפיזור של גזים צפופים מן האוויר

המודלים אשר יהיו בשימוש בעבודה זו הינם מודלים מסוג "קופסה" (Box Models), הנחשבים לפשוטים יחסית למודלים המבוססים על תיאורית ה-K (דיפוזיה של מערבולות אוויר). המודל הבסיסי הינו המודל של Cox and Carpenter (1980). מודל זה מאפשר תיאור של שחרור רגעי וממושך:

1. שחרור רגעי מיוצג על ידי ענן גלילי (top-hat) בעל צפיפות אחידה, אשר מקבל צורה עגלגלה (pancake) בהשפעת אפקטים גרביטציוניים, מתפשט באופן רדיאלי סביב מרכזו ובו בזמן מתקדם עם הרוח. ניתן לבטא את ההתפשטות הרוחבית באמצעות המשוואה של Van Ulden (1974), שמשקללת את רדיוס, גובה וצפיפות הענן יחסית לאוויר ומתאימה לשלב הקרוי slumping (נפילה). (ראה נספח)

2. שחרור ממושך מיוצג על ידי תמרה בעלת חתך מלבני, צרה למדי, אשר מתפשטת באופן רוחבי (בניצב לכיוון הרוח) בהשפעת כוח הכובד ומערבולות האוויר.

בשני סוגי השחרור, הרגעי והממושך, האוויר נסחף לתוך הענן דרך פני שטחו החשופים לאוויר. מקורות למיהול הענן באוויר בזמן התפשטותו הינם ערבוב בדופנותיו וערבוב דרך פני השטח העליון, תהליכי ערבוב אלו נשלטים על ידי הטורבולנציה האטמוספרית ועל ידי הבדלי הצפיפות בין הענן והאוויר.

השפעת הטמפרטורה על רמת המיהול, מתבטאת במודל הפיזור דרך ניתוח מעבר החום מהאוויר לענן, המודל פותר את משוואות הזרימה ומעבר החום עבור הסעה מאולצת (השפעת הרוח) ועבור הסעה טבעית (השפעת הציפה), בהתאם לכך מעריך את עוצמת מיהול הענן (שינוי צפיפות הענן במיקום ובזמן).

מודל נוסף מקובל לניתוח התפשטות ענן הגז הכבד הינו של (Kaiser and Walker, 1978),

המוכל כאופציה הפשוטה ביותר בתוכנת הערכת הסיכונים DENZ (Fryer and Kaiser, 1974).

המודל מניח כי אין כלל סחיפת אוויר לתוך הענן בשלב ה-slumping, כלומר שהריכוז נשאר קבוע בענן במשך שלב זה. מודל זה מציג שלב נוסף בין שלב ה-slumping והשלב הפסיבי: זהו שלב ה-hugging, בו סחיפת האוויר לתוך הענן גורמת לגידול בגובה הענן, אך בשיעור קטן בהרבה מהשיעור המתאים לפעולת הטורבולנציה האטמוספרית. ההנחות העיקריות של המודל הינן:

1. פני השטח הינם שטוחים וחספוס הקרקע הינו אחיד. כלומר אין מכשולים משמעותיים.
2. התנאים המטאורולוגיים (מהירות הרוח ויציבות אטמוספרית) אינם משתנים בזמן הפיזור.

2.2.3 תיאור המעבר לפיזור פסיבי

כאשר קצב ההתפשטות הרוחבית הנגרמת ע"י הטורבולנציה האטמוספרית מתחיל לגבור על קצב ההתפשטות הנובעת מאפקטים גרביטציוניים, יש לבצע מעבר למודל פיזור פסיבי. קריטריון המעבר אינו קבוע בין התוכנות והמודלים המצויים בשימוש. קריטריון המעבר מן השלב הצפוף לשלב הפסיבי הינו כאשר הפרש הצפיפויות בין הענן והאוויר יורד מתחת לערך מסוים שנבחר, למשל $\Delta\rho=10^{-3} \text{ kg/m}^3$. יש לציין שהאופציה הרגילה של מודל DENZ, הדומה מאד למודל של Cox and Carpenter, משתמשת בשני מבחנים אלטרנטיביים, על מנת לקבוע את מועד המעבר לשלב הפסיבי. הקריטריונים מפורטים בנספח ג'. בכל מקרה, אין שיטה שמקובלת על כולם.

2.3 השפעת תנאים מטאורולוגיים על פיזור הגז הכבד

במחקר המוצע יתבצע ניתוח של השפעת התנאים המטאורולוגיים על פיזור הגז הכבד, על מנת לקבוע את התרחיש המסוכן ביותר. בסעיף הנוכחי יפרטו הגורמים המשפיעים על הפיזור.

2.3.1. מיצוע של פרמטרים מטאורולוגיים, על תקופות זמן

עבור מודלים לזיהום אוויר, מקובל בארץ ובעולם, להתחשב בממוצעים של נתונים מטאורולוגיים, הנמדדים בשעה אחת. הסיבה העיקרית לכך היא המערכות המטאורולוגיות המשמשות את מרכזי החיזוי, מרכזי הניתור ונמלי התעופה, בהן הנתונים נמדדים בפרקי זמן של שעה אחת, הנתונים הללו נשמרים ופתוחים לבחינה.

בדרך כלל הנתונים אינם מייצגים את הממוצע על שעה אחת אלא מדידות נקודתיות הנלקחות לערך 10 דקות לפני שעה עגולה. במקרה והמידע נאסף למטרות זיהום אוויר, ערכי הפרמטרים נמדדים בשעה אך גם ניתנות לסכימה על תקופות קצרות משעה אחת.

במערכת הניטור של איגוד ערים נמדדים המשתנים המטאורולוגיים ונתוני זיהום האוויר אחת לחמש דקות, נתונים אלו מוזרמים למשרדי האיגוד בממוצע חצי שעתי (אתר איגוד ערים חיפה).

כיוון שמושג הסיכון הינו מושג סטטיסטי, נדרשת בעבודה זו התייחסות לא רק למצב אטמוספרי מסוים אלא גם לשכיחות להופעתו.

2.3.2. רוח: עוצמה, כיוון ופרופיל מהירות

בכדי לדעת את ריכוז החומר המזהם בסביבת היישובים נדרש לדעת את עוצמת הרוח, כיוונה, פרופיל המהירות בסמוך לקרקע ורמת הטורבולנציה. גורמים אלו הינם משמעותיים בפיזור הענן ומשפיעים על האוכלוסייה בהתאם לתנאים הטופוגרפיים ולפיזור האוכלוסייה.

1. עוצמה: ריכוז הענן מצוי ביחס הפוך למהירות הרוח: ככל שמהירות הרוח גבוהה יותר פיזור הענן רב יותר. בניתוח גורם זה, יידרש למצוא את עוצמת הרוח המובילה לפיזור הענן ולריכוז המרבי באזורים המיושבים.

2. כיוון: כוון הרוח יקבע את כוון התפשטות המזהמים, לפי הגדרת כוון הרוח. רוח מערבית תגרום לפיזור לכוון מזרחה מהמקור, על סמך הנתונים בשטח הנחקר נדרש לדעת את כיוון הרוח המסוכן ושכיחותו. הסטטיסטיקה של עוצמת הרוח וכיוונה מבוטאים בצורה גראפית כשושנת הרוחות (wind rose) (מוצג לדוגמה בנספח ד')

3. פרופיל: בהשפעת הקרקע וסוג התכסית לשכבת הגבול האטמוספרית פילוג מעריכי (מוצג בנספח ג') איור 3. פרופיל זה תלוי בתכסית, בפילוג הטמפרטורה המשתנה בין יום ללילה. פרמטרים של קבוע המשוואה וחזקתה מוזנים כקלט במודלי הפיזור ונדרש לדעת את רגישות המודלים לפרמטרים אלו.

2.3.3. רמת הטורבולנציה, פרופיל הטמפרטורה ויציבות אטמוספרית

טורבולנציה הנה תנועת אוויר בסקאלות זמן קטנות יותר מזמן קביעת הרוח הממוצעת הנגרמות עקב טורבולנציה מכאנית ועל ידי אפקט הציפה שבאוויר. הטורבולנציה מורכבת ממערבולות בכיוונים שונים אופקיים, אנכיים, וכיווני ביניים המערבות את המזהם עם אוויר נקי או מזוהם פחות.

טורבולנציה מכאנית נגרמת עקב מכשול פיזי המפריע להתמדה בכוון הרוח המקורי, כגון צמחייה או מבנים. ככל שמהירות האוויר גדולה יותר, וככל שחספוס הקרקע גדול יותר

הטורבולנציה המכאנית גדולה יותר, טורבולנציה מכאנית יכולה להיווצר גם בגלל מהירויות שונות של זרמי אוויר סמוכים במרחב.

טורבולנציה-ציפה נגרמת על ידי חימום או קירור האוויר בסמוך לקרקע. במקרה של טורבולנציה ציפה חיובית חימום הקרקע יוצר זרמי אוויר כלפי מעלה, בחימום גדול נוצרות מערבולות זרימה שעשויות להגיע לגובה של עד 1000 – 1500 מטרים. טורבולנציה ציפה אופיינית לשעות צהריי היום כאשר השמיים נקיים מעננים והרוח קלה, לעומת זאת, בשעות הלילה הקרקע מתקררת ונוצרים זרמי אוויר בכיוון ההפוך.

במשך היום, קיום זרמי אוויר חם מצביעים על יציבות נמוכה, זרמים אלו מובילים לתנועת אוויר כלפי מעלה, בהתאם לציפת אוויר החם, וזרימות הפוכות לפיצוי על המסה שעברה. הזרימה מעלה-מטה גורמת לפיזור אנכי של המזהם.

בלילה עם רוח קלה תהיה טורבולנציה מזערית עקב המבנה היציב, הטורבולנציה המכאנית הקטנה תופחת עלי ידי טורבולנציה הציפה השלילית ובהתאמה מתקבלות מערבולות קטנות יחסית ופיזור קטן יחסית.

בין שני המצבים הללו קיימים תנאים של מצב יציבות ניטרלי, בתנאים אלו אין כמעט זרימה של חום בין האוויר לקרקע וכן ישנו חימום או קירור קל של שכבת האוויר הקרובה לקרקע. פרופיל הטמפרטורה האטמוספרי במצב ניטרלי ללא זרמי אוויר: מתקיימת ירידה קלה בטמפרטורות עם העלייה בגובה מעל פני הקרקע (עם העלייה הלחץ האטמוספרי קטן ולכן האוויר טמפרטורה יורדת). מצב זה מאפשר לאוויר העולה למעלה להתפשט לנפח גדול יותר תוך כדי הירידה בלחץ, ההתפשטות מתרחשת בקירור. שיפוע הטמפרטורה נקרא "לפס אדיאבטי" (adiabatic lapse rate) והקצב שלה הוא 0.098 K/m . במצב ניטרלי זרם האוויר החם ליד הקרקע שואף לאפס, שינוי הטמפרטורה לאורך הגובה קרובה לשינוי האדיאבטי.

התנאים הנייטרלים יכולים להיווצר עקב מספר סיבות:

- 1) עננות הממסכת את קרינת השמש הנכנסת ואת הקרינה היוצאת.
- 2) רוח חזקה שתערבב את החימום או הקירור האנכי שמתרחש ליד הקרקע.
- 3) מצבי מעבר בין יום ללילה כלומר הזריחה והשקיעה, האטמוספירה תשנה את מצב היציבות מיציב לבלתי יציב (או הפוך) דרך מצב יציבות נייטרלי.

2.3.4 נוכחות שכבת אינוורסיה

במצבים מסוימים מתקבל מצב בו נוצרות שתי שכבות באטמוספירה כאשר שכבה חמה מצויה מעל שכבה קרה – אינוורסיה. השפעת האינוורסיה גורמת לייצוב התנועה האנכית של האוויר, והקטנת הפיזור לגובה בכיוון האנכי. בתנאים אלה טורבולנציה הציפה מוגדרת שלילית. לעתים מצב זה ישפיע להפחתת הטורבולנציה המכאנית.

שכבת האינוורסיה גורמת לכליאת המזהם בשכבה צרה בסמוך לקרקע, ובכך מהווה את התרחיש המסוכן ביותר לכאורה. גובה שכבת האינוורסיה, אם קיימת, נדרש כקלט במודלים של פיזור מזהמים. נתון שזה מתבטא במודלים הפשוטים כשיקופים של הפתרון הכללי (מפורט בנספח)

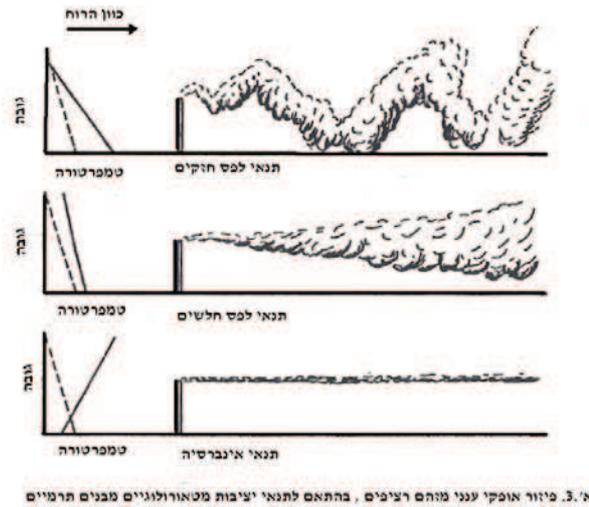
2.3.5 יציבות אטמוספרית- הגדרת רמות

יציבות האטמוספרית מסווגת לשש רמות ומסמנות באותיות A-F (ראה נספח ג'), ערכים אלו מציינים את רמות הפיזור והטורבולנציה, ומהווים קלט למודלים לפיזור. שלוש הרמות העיקריות הינן (מסוכמות בטבלה 1 וצורת הפיזור באיור 2):

1. **בלתי יציב** – בתנאים בלתי יציבים הענן יופיע בצורת לולאות גדולות, הצורה נוצרת עקב קליטת המזהם בזרמי האוויר המשנים את מיקומם בהתאם לתנועות זרמי האוויר, כמות המזהם הנקלטת בזרמי האוויר הקרים שוקעת. ניתן לראות את התנועות האנכיות של הענן לאורך ציר ההתקדמות האופקי, הפיזור האנכי גדול יחסית בטווח של שעה, בגלל שכוון המערבולות מגוון, נוצר גם פיזור אופקי גדול יחסית.
2. **נייטרלי** – בתנאים נייטרליים מתרחשת טורבולנציה מכאנית, המערבולות של האוויר הן בעלות כוונים שונים וכתוצאה מכך מתרחש פיזור סימטרי קוני בכוון הרוח האופקי, כשראש הקונוס הוא המקור הפולט. בגלל הגודל הבינוני של המערבולות נקבל ענן מתקדם בזמן לא מאוד שונה מהענן הראשוני הנפלט.
3. **יציב** – בתנאים יציבים המבנה התרמי מעכב תנועה אנכית ולכן לא מתרחש כמעט פיזור אנכי. המבנה התרמי לא מעכב את התנועה האופקית ולכן נקבל מגוון אפשרויות לענן, מרצועה צרה ודקה ועד לפיזור אופקי רחב יחסית. ניתן לראות את כלל צורות הענן באיור.

טבלה 1: נתונים עבור מצבי יציבות שונים.

תנאים באטמוספרה	תנאים נפוצים	כיוון זרמי אוויר חם	מבנה תרמי	אופי הטורבולנציה
בלתי יציב	צהריים, שמיים נקיים, רוח קלה	למעלה	סופר אדיאבטי	אופקי ואנכי
נייטרלי	רוח חזקה או עננות גבוהה, או מעבר בין יום ללילה	אין	קרוב לאדיאבטי, יבש	ממוצע
יציב	לילה, שמיים נקיים, רוח קלה	למטה	איזותרמי או אינברסיה	דועכת אנכית



איור 3: צורות התמרה כתלות במצב יציבות האטמוספירה.

2.3.6. טמפרטורה

כיוון שהעבודה דנה בפיזור ענן קר, השפעת טמפרטורת הסביבה הינה מכריעה - הפרש הטמפרטורות בין הענן לסביבה קובע את רמת הציפה או השקיעה של הענן, בנוסף, יש לפרופיל הטמפרטורה כתלות בגובה השפעה על היציבות האטמוספירית. טמפרטורת פני הקרקע נמדדת באופן קבוע על ידי תחנות הניטור.

2.3.7. לחות ומשקעים

לחומר הנחקר, אמוניה, נטייה להיספג במים, ולכן, רמת הלחות והמשקעים משפיעים על פיזור הגז, נוכחות של טיפות או לחות גבוה יקטינו את רמת הפיזור וישמשו כאיבר "בור" לקליטת המזהם. עוצמת ספיגת האמוניה במים תלויה בעיקר בריכוז הרוויה של תמיסת אמוניה-מים. מסיסות האמוניה בשיווי משקל הינה $(0^{\circ}\text{C}) [89.9 \text{ g}/100\text{ml}]$ (נספח א': תכונות אמוניה).

1.3 מצב אטמוספרי של התרחיש המסוכן ביותר-תקן

הגדרת התרחיש המסוכן ביותר הינו שלב מפתח בניתוח הסיכונים. כתקן, נבחר קריטריון שהוצג על ידי Woodward and Wotthington (1999), על מנת להגדיר את התנאים האטמוספריים ה"חמורים" ביותר, המובילים לריכוז הגבוה ביותר של המזהם על הקרקע לאורך זמן הרב ביותר. על פי קריטריון זה, נבחר התרחיש החמור ביותר בעת שחרור חומר מסוכן או דליק, בזמן שחרור העולה על עשר דקות בתנאים מהירות רוח 1.5 m/s ויציבות אטמוספירית F. יש לציין כי קיים קריטריון אחר עבור שחרור העולה על 60 דקות הקובע יציבות אטמוספירית D.

1.4 סקר תוכנות לפיזור גז כבד

על מנת למצוא את המודל האידיאלי לתרחיש החמור ביותר, יש לבצע סקר של תוכנות מסחריות מקובלות, על מנת למצוא את התוכנה המתאימה ביותר לתרחיש הנחקר. כמו כן, יתכן ויהיה צורך להשתמש ביותר מתוכנה אחת על מנת להעריך את הפיזור, שדה הריכוזים והסיכון. בטבלה 2 מוצגות התוכנות הזמינות באופן חופשי והמקובלות לעבודה במודלים להערכת סיכונים (Hanna, 2008). תאור התוכנות החופשיות ואפשרות להורדה מופיע באתר EPA בדף תוכנות גז כבד (קישור במקורות).

התוכנה לשימוש תיבחר על פי רמת מורכבות, התאמת הנחות המודל לתרחיש, מועד בניה ועדכון, נוחות וזמן הרצה.

טבלה 2 : השוואה בין תוכנות לפיזור גז כבד (Hanna, 2008).

התוכנה	מפתח	תכונות	הערות
ALOHA	Office of emergency Management EPA and Emergency response division NOAA	בעלת יכולת רחבה של תכונות ופשוטה לשימוש.	בשימוש בעיקר שרותי חירום.
AERMOD	AMS/EPA Regulatory Model Improvement Committee, AERMIC		
SLAB: An Atmospheric Dispersion Model for Denser-Than-Air Releases	Environmental Protection Agency	מודל החוזה ענן צפוף התאדה מבריכה. המודל כולל סילון אנכי.	פותח ב-1980 מופץ מ EPA תוכנה חופשית
HGSYSTEM	מופץ ע"י ה-EPA	מתאימה למודל תת-לחץ ושחרור איטי או לשחרור מהיר בלחץ גבוה	תת מודלים : AEROPLOUME, HEGADAS למודל מקור, HEGABOX, לשחרור ושינוי פאזה מידי
SCIPUFF	מופץ ע"י: Department of Defense support(DOD).	מתמקד בפלומה, בהתנהגות גז כבד ומגע עם הקרקע	בשימוש סוכנויות ברחבי העולם
TRACE	מופץ ע"י SAFER Systems:	חומרים מסוכנים, כולל מודל דליפה ופיזור	בשימוש רחב
PHAST	מופץ ע"י DNV	מודל דליפה ופיזור	דומה מאוד ל-TRACE, בשימוש סוכנויות והתעשייה הכימית
DEGADIS (Dense Gas Dispersion Model)	EPA	מודל כולל אידוי מבריכה	
DENZE	UKAEA - סוכנות האנרגיה האטומית הבריטית	מודל לפיזור ואידוי גזים מסוכנים ונפיצים	

3. מקרה המבחן: מיכל האמוניה במפרץ חיפה

בסעיף זה יתואר מקרה המבחן שינוח בעבודה זו, כמו כן, יתואר המתקן, החומר המסוכן והתרחיש שנבחר כתרחיש הייחוס.

3.1. המתקן – מיכל האמוניה

מיכל האמוניה הנחקר בעבודה זו, שייך לחברת "חיפה כימיקלים" שבבעלות אריה גנר, "חיפה כימיקלים" הינה היבואנית היחידה של אמוניה לישראל.

מפעל "חיפה כימיקלים בע"מ", הוקם בשנת 1966 באזור מפרץ חיפה (ראה מפה), המפעל נמצא בבעלות החברה האמריקאית - Trans Resources Inc. תוצרו של המפעל הינם דשנים ייחודיים וכימיקלים לתעשייה, אחד הדשנים המרכזיים המיוצרים במפעל ומיוצא לכמאה מדינות ברחבי העולם הינו חנקת האשלגן (KNO_3). בתהליך הייצור של חנקת האשלגן משתמשים באמוניה כחומר גלם (חיפה כימיקלים - אתר, 2002).

בבעלות מפעל חיפה כימיקלים שני אתרים נפרדים בהם מאוחסנת אמוניה באזור מפרץ חיפה. כמות קטנה של אמוניה מאוחסנת בחצר המפעל, באתר השני (בו תתמקד עבודה זו), מאוחסנת אמוניה מקוררת במיכל אחסון, אשר ממוקם בנמל הקישון במתחם שנקרא "מסוף הכימיקלים הצפוני" (חיפה כימיקלים, 2000).

אמוניה מיובאת מנמל Yuzhny באוקריאנה, אל מסוף הכימיקלים הצפוני הממוקם בנמל הקישון. דרך המסוף מסופקת האמוניה למפעלים המוגדרים כחיוניים (מפעלי מזון, תעשייה ביטחונית ועוד), האמוניה מגיעה לישראל באמצעות 12 אוניות בשנה, כל אחת נושאת כ-10,000 טון, משך השהייה של כל אונייה בנמל הוא כ-24 שעות. ממכל האמוניה מועבר החומר באמצעות צינורות ומכליות למפעל דשנים וחומרים כימיים ולמפעל הדרומי של חיפה כימיקלים.

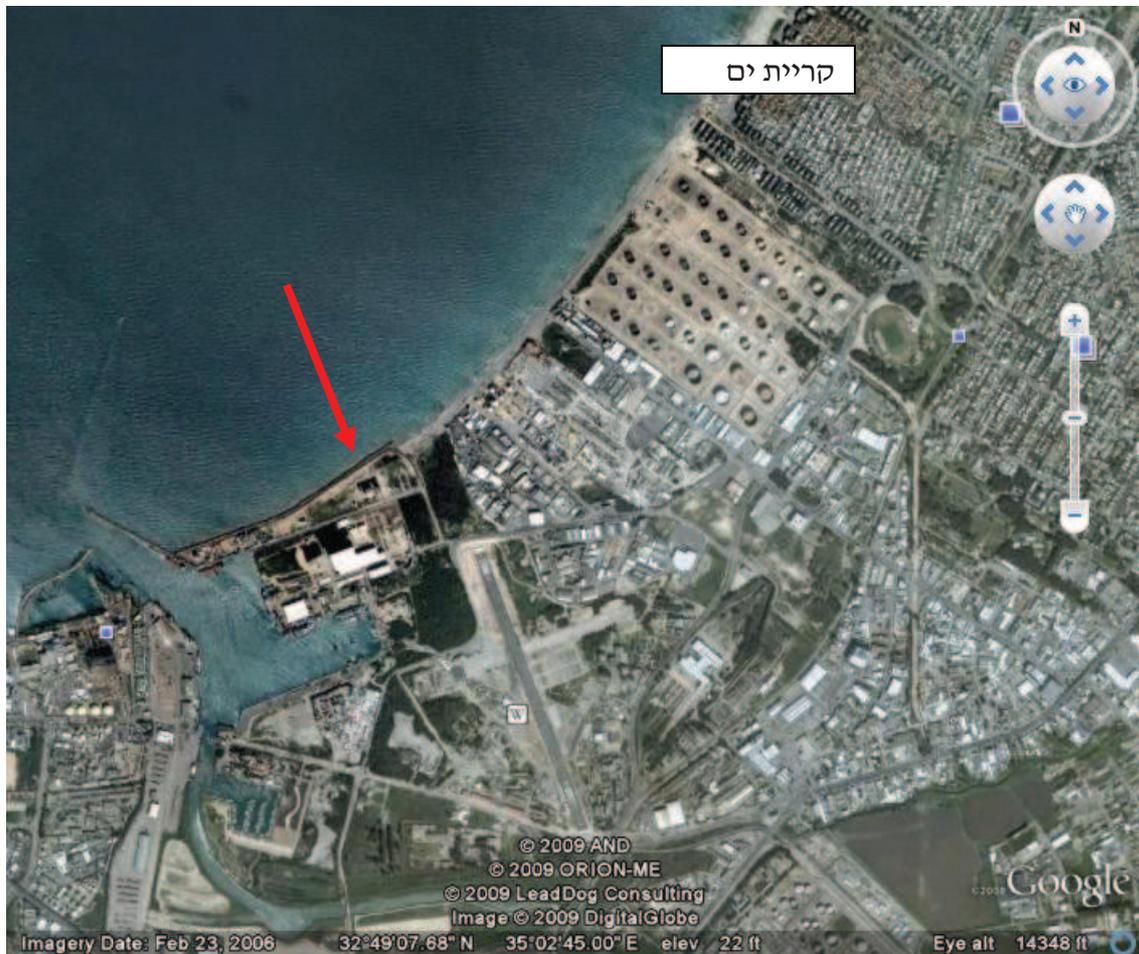
3.2. תנאי אחסון

עקב הסכנה הנובעת מאחסון האמוניה במיכלי לחץ, נבנה בשנת 1985 מתקן האחסון בקירור (הג"א, 1985) (רפא"ל, 1985):

1. מיכל לאחסון אמוניה במצב נוזלי, בקירור בטמפרטורה של $33^{\circ}C$ - ובלחץ אטמוספרי.
2. מיכל יחיד גדול העשוי מפוליאוריטון, מבודד תרמית.
3. המיכל מוקף בזוג קירות מגן מאסיביים מבטון.
4. המיכל מוקף במאצרה שמטרתה לאחסן את האמוניה במקרה ותישפך אל מחוץ לקירות המגן.
5. אגן היקוות מצוי באזור המיכל, על מנת למנוע שפיכת האמוניה אל הים התיכון.



איור 4 : מיכל האמוניה



איור 5 : סביבת המתקן (אתר Google Earth)

3.3. החומר המסוכן- אמוניה

3.3.1. אמוניה

אמוניה (Ammonia) היא תרכובת חנקן ומימן שנוסחתה NH_3 , לאמוניה חשיבות גבוהה בתעשייה הכימית ובביולוגיה בתנאי לחץ וטמפרטורה הסביבה האמוניה היא גז חסר צבע ובעל ריח חריף, שנעשה בו שימוש בעיקר לייצור דשנים, חומרי נפץ ופולימרים. (תכונות אמוניה מצורפות כנספח). האמוניה הנמצאת בשימוש בארץ מיוצרת באירופה ומגיעה לחיפה כימיקלים בע"מ, ממנה קונים מפעלי התעשייה בישראל לרוב בכמויות קטנות ומדוללות, לרוב ליצירת דשנים. בטמפרטורת הסביבה אמוניה הינו גז קל יחסית לאוויר, ולכן ניתן להעריך את פיזורו על ידי מודל גז פאסיבי (מודל גאוסיאני פסקוויל).

3.3.2. רעילות

גז האמוניה רעיל בנשימה או במגע עם העור ובמקרים מסוימים עלול לגרום למוות. הריכוז הגורם באופן מיידי לסכנה לבריאות ועלול אף לגרום למוות הינו 1100ppm, הפגיעות העיקריות לבני אדם הינן כוויות, פגיעה בעיניים וכשל נשימתי (אתר אוניברסיטת אוקספורד- MSDS אמוניה). מודל Level of Concern- LOC משמש להערכת סיכונים על בסיס מספר תקנים, להגדרת רמות סיכון על בסיס ריכוז חשיפת ציבור (Public exposure guidelines) (Lees, 1996):

- AEGL (Acute Exposure Guideline Level)
- ERPG (Emergency Response Planning Guideline)
- TEEL (Temporary Emergency Exposure Limit)

תקן ERPG

תקן חשיפה של ERPG (emergency response planning guidance) המגדיר שלוש דרגות סיכון על פי ריכוזי סף ועבור זמן חשיפה של שעה

ערך עבור אמוניה [ppm]		
25	סף ריכוז מרבי המוביל לחשיפה עם נזק הפיך הריכוז באוויר היכול לגרום לאי נוחות (כגון צריבות וגירויים), התוצאה הפיכה אם המגע יהיה לשעה או פחות.	ERPG1
30	סף ריכוז מרבי המוביל לסיכון בריאותי חמור הריכוז באוויר היכול לגרום לתסמינים בלתי הפיכים, לסיכון בריאותי חמור או פגיעה חמורה ביכולת ההימלטות, אם המגע יהיה לשעה או פחות.	ERPG2
750	סף הריכוז מזערי המוביל לסיכון למוות הריכוז באוויר שיכול לגרום לסיכון במוות אם יבואו במגע במשך שעה. הערכים כוללים אוכלוסייה בוגרת בריאה בלבד.	ERPG3

תקן TEEL

מדד זמני, להערכת סיכון מחשיפה לחומרים כימיים מסוכנים, התקן שימושי בעיקר לחומרים כימיים שאין להם עדיין תקן מוגדר. כמו כן, תקנים אלו נועדו לייצג תגובה צפויה של מספר חומרים ולדעת מה יהיה ריכוז הכימיקלים בזמן תאונה. תקני TEEL אינם כוללים בתוכם כללי בטיחות. לתקן ארבע דרגות :

הדרגה	המשמעות	ערך עבור אמוניה [ppm]
TEEL0	ריכוז סף, מתחתיו אנשים לא ירגישו את חשיפתם לחומר המסוכן.	25
TEEL1	ריכוז מרבי להופעתן של השפעות רפואיות מתונות ולא קיצוניות, המזוהה על ידי ריח לא נעים.	30
TEEL2	ריכוז מרבי שעדיין יש אפשרות לנקוט באמצעים אקטיביים במניעה, הפגיעה הגופנית לא קשה כל כך.	160
TEEL3	הריכוז מעליו המוות הוא מייד.	1100

3.4. עבודות מחקר על המתקן

בעבר בוצעו מספר עבודות להערכת הסיכון מהמיכל (המשרד להגנת הסביבה- מדריך לניהול סיכונים, 2005), מחקר הטכניון (נוטע וסגל, 2001) בחן את התרחיש של פגיעה בחלק העליון של מיכל האמוניה ומצא כי האוכלוסייה אשר תהה בסיכון עלולה להגיע עד 200,000 נפש. וכן סקרי סיכונים שבוצעו על ידי גורמים מקצועיים כמו ארגון הולנד למחקר מדעי יישומי (TNO, 2002) שבחן את המיכל וארגון ADL, שבחן את תהליכי השינוע (ADL 2002).

ועדה מיוחדת שהוקמה לסקר חומרים מסוכנים בישראל בעקבות מלחמת לבנון השנייה – ועדת שפיר- דנה במיכל האמוניה ומצאה כי קיימות נקודות תורפה העלולות לגרום לפריצתו במקרה של פגיעה ישירה, על פי הוועדה האיום העיקרי על המכל הוא מרעידת אדמה שעלולה להרוס אותו לחלוטין. הוועדה מצאה כי, במקרה של פגיעה קלה במכל: בין מאות לכמה עשרות אלפי נפגעים, ברדיוס של עד 1.7 ק"מ, פגיעה קשה- פריצה מוחלטת של המכל: עד 90 אלף נפגעים ברדיוס של יותר משבעה ק"מ.

תחקירי עיתון "הארץ" בעקבות המלחמה מתחו ביקורת קשה על התנהלות פיקוד העורף במלחמה, והעלו את המודעות הציבורית לנושא (תחקירי "הארץ": "ההימור של גירי", 25.8.06 "מחדל האמוניה", 31.8.06). כתבת הטלוויזיה בתוכנית התחקירים של הערוץ הראשון "מבט שני" הציגה את הבעיה כ"פצצה מתקתקת" (קישור מצורף לכתבה), בעקבות כך התקיימו כמה דיונים בוועדות הכנסת ובמשרד מבקר המדינה (מבקר המדינה, 2003, ועדת פנים ואיכות הסביבה, 2006).

אולם, המחקרים והסקרים הללו התבססו על תוצאות ממודלים פשוטים יחסית לניתוח הפיזור ולא בוצע כלל סקר בנוגע להשפעת התנאים האטמוספריים וזיהוי התנאים האטמוספריים המובילים למצב המסוכן ביותר.

3.5. תרחישים אפשריים לפריצת המיכל

עבור המחקר המוצע יש להגדיר תחילה את איבר המקור- כמות ותנאים של החומר המשוחרר לסביבה, איבר המקור תלוי בתרחיש התאונה ובצורת הפריצה. שלושה תרחישי תאונה מצויים בדיון הציבורי כיום:

1. קריסת מיכל כוללת מפגיעה מלחמתית: 15 טון גז נפלטים בהבזקה ראשונית (לפי מדידות של משרד הביטחון לפגיעת אמל"ח), ושוללית עם שאר החומר, בהתאם למאצרות שבמפעל, הממשיכה להתנדף. (לדוגמה נוספת: פגיעת רקטת קטיושה בגג מיכל- תרחיש שלא נחקר עד עתה)
2. קריסת מיכל כוללת שלא מפגיעה מלחמתית (לדוגמה רעידת אדמה) 18% נפלטים הבזקה ראשונית ושאר החומר ממשיך להתנדף משלולית הנוצרת במקום.
3. התבקעות (כתוצאה מפגיעת אמל"ח לא ישירה כגון רסיסים או פגיעה שגרתית למשל מלגזה) – ביקוע המיכל בקטרים שונים 4-10 cm. מעל ומתחת לפני הנוזל.

תרחישים אלו יקבעו את איבר המקור, שהוא הקלט למודלים הנחקרים במחקר הנוכחי.

4. המחקר המוצע

המחקר המוצע עוסק בזיהוי התנאים האטמוספריים המובילים לתרחיש המסוכן בפריצת מיכל האמוניה במפרץ חיפה.

4.1 מטרת העבודה ושאלת המחקר

בפרויקט המוצע יפותח ויישם תת-מודל הבוחן את פיזור המזהם בהשפעת התנאים האטמוספריים, במטרה לזהות את התרחיש המסוכן ביותר במקרה של תאונה שתגרום לפריצת חומר מסוכן. המחקר עוסק במקרה מבחן של פריצת מיכל האמוניה המונזלת בקירור במפרץ חיפה. תוצאות המחקר ישמשו כתנאי קלט למודלים להערכת סיכונים לניתוח ערך הסיכון, הנובע מנוכחות מתקן המכיל חומר מסוכן בסביבת אוכלוסיה.

שאלת המחקר נוסחה כדלקמן: מהי השפעת התנאים האטמוספריים על קצב פיזור המזהם, באירוע של פריצת אמוניה המאוחסנת בקירור, במיכל האמוניה במפרץ חיפה?

4.2 שיטת המחקר

המחקר הינו עבודה תיאורטית, ומתבצע בעיקר על ידי איסוף נתוני שטח, יישום מודלים במחשב וניתוח התוצאות. למחקר שלושה שלבים עיקריים בהם יאספו הנתונים, יישמו מודלים לפיזור וינתחו התוצאות.

4.2.1 שלב א': איסוף נתונים אטמוספריים וניתוחם

שלב הראשוני של איסוף הנתונים יכלול סקר סביבתי של נתונים קבועים ואטמוספריים, בשלב זה יוגדר איבר המקור לניתוח: כמות החומר המשוחרר ותכונותיו.

עבור התנאים הקבועים, יתבצע סרק על טופוגרפיה, תכסית, אוכלוסיה, פרטי המתקן ונתונים תפעולים מתיק המפעל.

עבור הנתונים האטמוספריים יאספו המשתנים על פי ממוצעים בפרקי זמן שונים- מנתונים שעתיים עד לממוצעים שנתיים, הנתונים האטמוספריים הדרושים הינם: סטטיסטיקה של מהירויות וכיוון, יציבות אטמוספריית, טמפרטורות, לחות וכו'.

בשלב זה יתבצע ניתוח הקורלציה בין נתונים אטמוספריים אלו על מנת למצוא אילו מהתנאים תלויים זה בזה ומופיעים יחדיו.

4.2.2 שלב ב': יישום מודלים של פיזור גז כבד

בשלב השני יישמו תוכנות שונות לפיזור גז כבד, ותיבחר התוכנה התואמת בהנחותיה את הבעיה הנחקרת. בשלב זה תתקבל תלות של מפות הריכוזים בתנאים האטמוספריים השונים. תלות זו הינה סטטיסטית במהותה, ויידרש ניתוח הסתברותי למציאת השכיחות של כל מצב אטמוספרי שנבחן.

4.2.3. שלב ג': ניתוח תוצאות במודל מנה

בשלב השלישי ינותחו מפות הריכוזים שיתקבלו במודל מנה פשוט ומקובל, על מנת לקבל את מספר הנפגעים בכל אירוע ואת ערך הסיכון (מנה בין מספר הנפגעים לשכיחות האירוע). ערך הסיכון יזהה את המצב האטמוספרי ה"מסוכן" ביותר תחת התרחיש של פריצת המיכל. בניית תוצאות, יתבצע ניתוח רגישות (Sensitivity Analysis) בו תיבחן רגישות המודל לשינויים בקלט מבחינת הנתונים האטמוספריים המוזנים.

4.3. חשיבות המחקר

העניין הציבורי סביב מתקן האמוניה וסמיכותו לאוכלוסיה מציב בפני מקבלי ההחלטות אתגר כבד, על מנת להגיע להחלטה מיטבית, נדרשים הם למידע מהימן על ערך הסיכון אותו מהווה המתקן. השפעתם של הנתונים המטאורולוגיים על תוצאות התרחיש פריצת חומר מסוכן הינה משמעותית ביותר, שכן מודל הפיזור מהווה את אחד מאבני היסוד של מודל הערכת סיכונים. כל שינוי בתנאים אלו עשוי להביא לתוצאות שונות עבור אותו תרחיש, עקב כך, נידרש לדעת את השפעתן של התנאים האטמוספריים, ואת התנאים המובילים לסיכון הרב ביותר. המחקר המוצע יענה על שאלה זו וייצור תמונה מגובשת לגבי התרחיש המסוכן ושכיחותו.

4.4. בעיות אפשריות במחקר

- בהשגת מטרות המחקר יתכנו מספר קשיים עקב רגישות הנושא ואופי הסטטיסטי של התוצאות:
1. נגישות לנתונים: בשלב המכין ואיסוף הנתונים, תיתכן התנגדות וחוסר שיתוף פעולה של החברה בעלת המתקן להספקת נתוני תפעול, זאת עקב רגישות הנושא מבחינה ציבורית, שמירת חיסיון מסחרי ואבטחת מידע בטחוני. למרות זאת, ניתן למצוא נתונים מספקים על המתקן ממקורות גלויים. כמו כן, קיים מתקן זהה בטורקיה דרכו ניתן ללמוד על תפעול המתקן.
 2. נתונים אטמוספריים לא מלאים: לצורך יישום המודלים, נדרש לאסוף נתונים האטמוספריים מפורטים יחסית, יתכן כי לעיתים ידרשו הנחות מסוימות על מנת לפצות על חוסר בנתונים מסוימים. לדוגמה, גובה שכבת האינורסיה הינו נתון שלא נאסף בצורה רציפה על ידי תחנות הניטור, ויש להצליב נתונים עם המכון המטאורולוגי.
 3. ניתוח סטטיסטי והסתברותי של התוצאות: עקב אופיין הסטטיסטי של הנתונים המטאורולוגיים, ערך הסיכון המחושב בעבודה זו מאופיין גם הוא בצורה סטטיסטית. תוצאה המוצגת בצורה זו מקשה על הבנת התוצאות והצגתן למקבלי ההחלטות ולציבור הרחב.

5. איסוף נתונים

על האזור הנחקר יאספו נתונים טופוגרפיים, אקלימיים ונתונים של פילוג אוכלוסיה שימשו כקלט למודלי הפיזור. בסעיף זה יפורטו הנתונים הדרושים מהמקורות להשגתם, נתונים ראשוניים שנאספו מרוכזים בנספח ב'.

5.1 נתונים טופוגרפיים

הנתונים הטופוגרפיים, תבליט ותכסית, נדרשים כקלט למודלים לניתוח פיזור מזהמים, רמת הפרוט והדיוק הנדרש בקלט זה משתנה ממודל למודל על פי מורכבותו. לניתוח תבליט מורכב, כנוכחות הרים ועמקים נדרשים מודלים מורכבים במיוחד, לרוב, גורם זה נלקח בחשבון בהזנת כיווני הרוח ולא בניתוח המודל עצמו. התכסית משפיעה על אופי שכבת הגבול, ומוזנת כקלט לחישוב מקדמים בפרופיל המהירות. סוגי התכסית המוגדרים באופן כללי בתוכנות הינן: שטח פתוח, אורבאני, יער וכולי. האזור הנחקר הינו אורבאני ברובו, ומקדמים יילקחו בהתאם. נתונים טופוגרפיים יילקחו מניתוח מפות מעודכנות וזמינות לציבור הרחב, ופרוט יילקח מהמרכז למיפוי ישראל (אתר המרכז). בנספח ב' מוצגת מפת האזור הנחקר בק"מ 1:50:000. תחום האזור לניתוח המקובל להערכת סיכונים הינו טווח של 12 ק"מ מהמתקן, אולם יתכן שטווח זה יצומצם, בהתאם לתוצאות המודלים ומפות הפיזור שיתקבלו.

5.2 אוכלוסייה ופילוג

לקביעת הסיכון יש לבצע ניתוח משולב של תוצאות מודל הפיזור שיתקבלו במחקר (מפות פילוג הריכוז עבור כל תרחיש) עם פילוג האוכלוסייה בשטח הנחקר, זאת על ידי מודל מנה. לצורך כך נדרש פילוג צפיפות האוכלוסייה בשטח. בטווח של 12 ק"מ ממיכל האמוניה, מתגוררים נכון לשנת 2005, 451,600 נפש, על פי החלוקה המוצגת בנספח ב'. נתונים אלו יעודכנו במהלך המחקר, יעובדו לצורת מפת פילוג אוכלוסין ויוזנו למודל מנה כקלט. כמקורות לנתונים אלו, ישמשו הרשויות המקומיות ואגף המדידות (אתר מרכז למיפוי ישראל).

5.3 נתונים מטאורולוגיים

הנתונים המטאורולוגיים הינם לב ליבה של העבודה, והם נדרשים כקלט במודלי הפיזור. בעבודה זו יאספו נתונים המטאורולוגיים הנמדדים בשטח במהלך שנה ייצוגית וכן ממוצעים שנתיים, יתבצע ניתוח סטטיסטי של נתונים אלו לקבלת ממוצעים ומקדמי שונות עבור פרקי זמן משנתיים - משעה עד לממוצע שנתי. הנתונים הדרושים להזנה במודל פיזור מוצגים בטבלה 6, ודוגמה לקובץ קלט של מודל פיזור מפורטת בנספח ד' בו מוצג קלט של תוכנת SLAB.

טבלה 3 : טבלת נתונים מטאורולוגיים דרושים

משתנה	מקור המידע	הערות
לחץ ברומטרי	שרות מטאורולוגי, איגוד ערים	
טמפרטורה	שרות מטאורולוגי, איגוד ערים	
לחות יחסית	שרות מטאורולוגי, איגוד ערים	
כיוון הרוח	שרות מטאורולוגי, איגוד ערים	
עוצמת הרוח	שרות מטאורולוגי, איגוד ערים	
קרינה סולרית	שרות מטאורולוגי, איגוד ערים	
גובה אינוורסיה		תדרוש הערכה
משקעים	שרות מטאורולוגי, איגוד ערים	
גשם	שרות מטאורולוגי, איגוד ערים	
עננות	שרות מטאורולוגי	(דוגמה בנספח ב')
התאיידות מחושבת	שרות מטאורולוגי	

מקור מוסמך לקבלת נתונים אלו הינו השרות המטאורולוגי, אולם נוח יותר לקבל נתונים הנאספים מתחנות הניטור של איגוד ערים חיפה, לאיגוד מערך ניטור משוכלל הכולל כיום 15 תחנות ניטור נייחות במרחב האיגוד, ותחנה ניידת אחת על מנת למדוד את איכות האוויר באזור אחריותו. התחנות קשורות בתקשורת בזמן אמת אל מרכז בקרה ממוחשב הנמצא במשרדי האיגוד, אליו מועברים אחת לחצי שעה, מדידות של המזהמים המתבצעות בכל תחנות הניטור. פריסת תחנות הניטור והגדלים הנמדדים בכל תחנה מצורף בנספח ב'.

התחנות הסמוכות למיתקן הינן התחנות בקריית ים וקריית אתא, אולם בשלב הראשוני ייאסף המידע מכל התחנות לשם השוואה ומיצוע במרחב.

נתונים אלו ינותחו בצורה סטטיסטית לקבלת ממוצע וסטיית תקן, דוגמה לייצוג ניתוח שכזה מוצג כשושנת הרוחות בה מוצגים כיוון הרוח, עוצמתה ושכיחות עבור כל מצב (בנספח ב' מוצגת שושנת הרוחות לדוגמה).

6. תוצאות ראשוניות

בסעיף זה מוצגות לדוגמה תוצאות ניתוח מודל המוצע לעבודה זו. ההצגה לשם הדגמה של תוצאות פלט של ניתוח מודל פיזור ושילוב עם ניתוח הערכת סיכונים, ניתוח זה נלקח מהרצות דוגמה במסגרת עבודת המחקר לתואר שני של עדי שפירא.

6.1. התרחיש המנותח

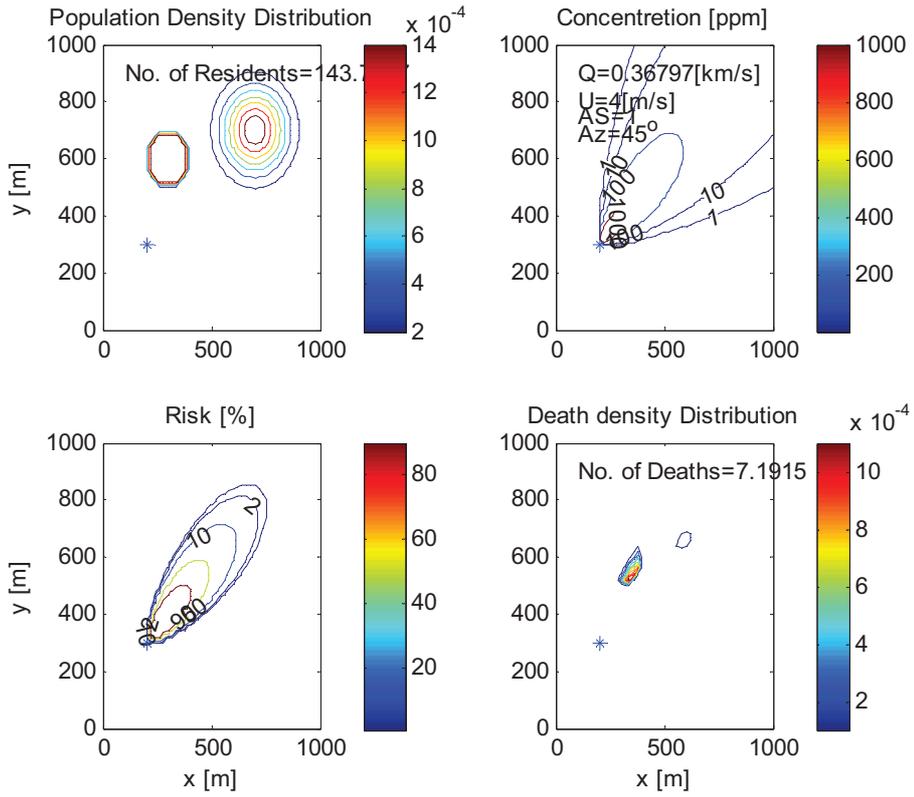
התרחיש המנותח כדוגמא הינו פריצה כוללת של מיכל אמוניה המצוי בלחץ האדים שלו, בסביבת המתקן הוצבו שני ישובים קטנים עם 150 תושבים בתחום של ק"מ רבוע באזור המתקן, נתונים האטמוספריים נלקחו עבור מהירות רוח של 4m/s ביציבות אטמוספרית ניטרלית, וחישוב הריכוזים כתלות בזמן ומספר הנפגעים עקב השחרור. תרחיש זה נבחר להדגמה בלבד. מודל הפיזור מחשב את שדה הריכוזים כתלות בזמן, הפלט הוא בצורת סרט המדגים את התפשטות הענן, להדגמה מוצג שדה הריכוזים לאחר שעה במהירות רוח 4 m/s. המודל התלוי בזמן מבוסס על מודל פיזור Puff ומתבצעת אינטגרציה בזמן של שדה הריכוזים על מנת למצוא את העומס הרעיל בנקודה. העומס הרעיל מתקבל באינטגרציה בזמן של העומס הרעיל בכל רגע ורגע. מוצג שדה העומס הרעיל שמתקבל עקב האירוע. מעומס זה מחושב מספר הנפגעים לפי מודל פרוביט.

6.2. תוצאות

תוצאות המודל מבוטאות בסדרת מפות שתכליתן למפות את הסיכון ותוצאות האירוע. המפות כוללות פילוג האוכלוסייה, מפת פילוג הריכוז, מפת אזורי סיכון לפי מדד ERPG, מפת סיכון לפי מדד Probit ומפת פילוג הרוגים. באיור 6 מוצגות מפות הניתוח:

1. מפת פילוג האוכלוסייה המשמשת כקלט, בה מופיעים שני ריכוזי אוכלוסיה בטווח 1 ק"מ מהמקור, סה"כ 150 איש.
2. מפת הריכוזים בשדה.
3. מפת ערך הסיכון הסתברות למוות.
4. מפת פילוג מספר ההרוגים ואינטגרציה למציאת מספר הרוגים כולל: 7.1 הרוגים בתרחיש.

כאמור, תוצאות אלו מוצגות כהדגמה של אופי תוצאות שיתקבלו במחקר.



איור 6 : מפות אוכלוסיה, ריכוזים, סיכון ונפגעים מרכזות.

7. סיכום

מדינת ישראל הינה אחת המדינות הצפופות ביותר בעולם המערבי (מעל ל-600 תושבים לכל קמ"ר), בנוסף, לתעשייה, חשיבות מכרעת בהתפתחות הכלכלה בישראל. מיכל האמוניה במפרץ חיפה, הינו דוגמא לתעשייה שתרמה להתפתחות הכלכלית במדינת ישראל, ובד בבד מהווה סכנה לאוכלוסיה המתגוררת סביבו, מודלים מתקדמים ל"הערכת סיכונים" נדרשים לקיום תעשייה (פרנסת האדם) לצד שמירה על האדם והסביבה.

הפרויקט המוצע יוביל להבנת הסיכון הנובע מנוכחות של מתקן חומר מסוכן בכמות כה גדולה בסמוך לאוכלוסיה צפופה, המחקר יעסוק בזיהוי התרחיש המסוכן והשפעת התנאים האטמוספריים עליו. הפרויקט הינו תיאורטי ויישם מודלים לניתוח פיזור גז כבד על נתונים אטמוספריים שיאספו על השטח לחישוב שדה הריכוזים והסיכון הנובע ממנו.

8. מקורות ספרותיים

8.1 ספרות

Briggs, G.A. (1973) "Diffusion Estimation for Small Emissions", ATDL Contribution File No. 79, Atmospheric Turbulence and Diffusion Laboratory.

Cox R.A. and Carpenter R.J., (1979). "Further developments of a dense vapour cloud dispersion model for hazard analysis". In: *Symp. on Heavy Gas Dispersion* Frankfurt, S. Hartwig, Editor, *Heavy Gas and Risk Assessment*, Reidel, Dordrecht (1979), p. 55.

Fryer, L.S. and G.D. Kaiser, (1979), "DENZ - A Computer Program for the Calculation of the Dispersion of Dense Toxic or Explosive Gases in the Atmosphere, United Kingdom Atomic Energy Authority", Report SRD R152

Hanna, S. (2008) "Comparison of Six Widely-Used Dense Gas Dispersion Models for Three Recent Chlorine Railcar Accidents", *Process Safety Progress*, **27** (3), 248-259.

Kaiser, G.D. and Walker, B.C. (1978), "Release of anhydrous ammonia from pressurized containers—the importance of denser-than-air mixtures". *Atmospheric Environment* **12** (1978), pp. 2289–2300.

Lees, F.P. (1996) *Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 1-3, Butterworth-Heinemann, Oxford.

Pasquill, F. (1961) "The estimation of the dispersion of windborn material", *Meteorol. Mag.*, **90**, 33-49.

World Bank (1985) *Manual of Industrial Hazard Assessment Techniques*, Office of Environmental and Scientific Affairs, The World Bank.

Woodward, J. and Wotthington D, (1999), Comparison of EPA Guidelines Tables With a Commercial Model, *Process Safety Progress*, Vol.18, No.

ארגון הולנד למחקר מדעי ישומי (T.N.O) (2002) ניתוח סיכונים של פעילויות אמוניה בחיפה כימיקלים בע"מ מפרץ חיפה, הולנד.

בלומנפלד, ס. (2005) מדיניות סביבתית בתכנון מפעלי חומרים מסוכנים: המקרה של ישראל, עבודת גמר לתואר מוסמך, אוניברסיטת חיפה: החוג לגיאוגרפיה ולימודי סביבה.
הג"א (1985) הקמת מיכל אמוניה מקורר 12,000 טון-מסוף הקישון, ישראל.

המשרד להגנת הסביבה, ישראל (2005) מדריך ניהול סיכונים ממקורות נייחים בהיבט של תקריות חומרים מסוכנים (מצב קיים)- מהדורה 2.0, ישראל: ירושלים.
 ועדת פנים ואיכות הסביבה (2006) פרוטוקול מספר 39, ישראל: ירושלים.
 חיפה כימיקלים (2000) תיק מפעל- נספח 21- מסוף האמוניה, ישראל: חיפה.
 מבקר המדינה (2003) דוח שנתי 54 לשנת 2003 ולחשבונות שנת הכספים 2002- מניעת אירועים שמעורבים בהם חומרים מסוכנים, ישראל: ירושלים.
 נוטע, ע. וסגל, י. (2001) בטיחות מיכל אמוניה 12,000 טון של חיפה כימיקלים, טכניון חיפה.
 קוד, זאן. 2006, חוברת הרצאות בקורס "הערכת סיכונים עקב תאונות במפעלים כימיים", המגמה להנדסת סביבה, אוניברסיטת תל אביב.
 רפא"ל (1985) מיגון מיכלי אמוניה: מבוא, סיכום ומסקנות, ישראל.

8.2 אתרים ברשת

מיכל האמוניה- רקע

כתבת מבט שני בנוגע למיכל האמוניה במפרץ חיפה. חלקים 1-4

<http://video.google.de/videoplay?docid=-6803699976292393385&hl=de>

<http://video.google.de/videoplay?docid=7484418612909477562&hl=de>

<http://video.google.de/videoplay?docid=-8848668271560085143&hl=de>

<http://video.google.de/videoplay?docid=-292049068446124946>

כתבה ב"הארץ"

<http://www.haaretz.co.il/hasite/pages/ShArtPE.jhtml?itemNo=875808&contrassID=2&subContrassID=13&sbSubContrassID=0>

תכתובת עם מבקר המדינה דוח שפיר ועל הויכוח על התרחיש המסוכן

www.knesset.gov.il/protocols/data/rtf/pnim/2007-07-25.rtf

תאונת אמוניה במפעל "טנא נוגה" – אתר ynet

<http://www.ynet.co.il/articles/0,7340,L-3313227,00.html>

תאונת אמוניה בקריית שמונה – אתר ynet

<http://www.nrg.co.il/online/1/ART1/765/874.html>

תוכנות פיזור מזהמים

אתר US. Environmental Protection Agency (EPA), תוכנות לתיאור גז כבד

http://www.epa.gov/scram001/dispersion_alt.htm

נתונים- מקורות

אתר Google Earth
אתר "עמוד ענן" מפות טופוגרפיות

[/http://amudanan.co.il](http://amudanan.co.il)

אתר אוניברסיטת אוקספורד- MSDS אמוניה

http://msds.chem.ox.ac.uk/AM/ammonia_anhydrous.html

אתר מרכז למיפוי ישראל

[/http://www.mapi.gov.il](http://www.mapi.gov.il)

אתר השירות המטאורולוגי

http://www.ims.gov.il/IMS/All_Tahazit/homepage.htm

אתר איגוד ערים חיפה

<http://www.envihaifa.org.il/heb/100.asp>

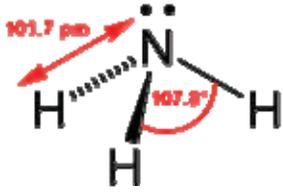
באתר מועדון השייט בחיפה

<http://www.windfinder.com/forecast/haifa>

9. נספח א': תכונות החומר המסוכן – אמוניה

בנספח זה מפורטים תכונות החומר המסוכן- אמוניה

9.1 אמוניה

	המולקולה NH ₃
1005	מספר ברשימת החומרים המסוכנים על פי האו"ם
7664-41-7	מספר CASRN
גז יציב חסר צבע בעל ריח חזק	תכונות- כללי

ערך	יחידות		
17.0306	[kg/kmol]	MW	מסה מולרית
0.6942	[kg/m ³]	ρ	צפיפות
-33.3	[°C]	T _b	טמפי' הרתיחה
-77.73	[°C]	T _m	טמפרטורת היתוך
89.9	[g/100 ml] (0 °C)		מסיסות במים

לחץ אדים (משוואת אנטואן)

$$\log_{10}(P) = A - \frac{B}{T - C} \quad (1)$$

כאשר:

[K]	טמפרטורה בתחום (190 - 333 K)	T
[kPa]	לחץ	P
	מקדם (עבור אמוניה- 6.67956)	A
	מקדם (עבור אמוניה- 1002.711)	B
	מקדם (עבור אמוניה- 25.215)	C

10. נספח ב': איסוף נתונים עבור האזור הנחקר - מפרץ חיפה

מצורפים הנתונים שנאספו עד כה וכן צורת הצגת הנתונים לדוגמה, עבור נתונים טופוגרפיים, פילוג האוכלוסייה ונתונים מטאורולוגיים.

10.1 נתונים טופוגרפיים

מפה טופוגרפית (1:50,000) לדוגמה של האזור הנחקר



איור 7: תבליט ותכסית בסביבת המתקן (אתר "עמוד ענן")

10.2 אוכלוסייה ופילוגה

בטבלה 4 מוצגים הנתונים הראשוניים בנוגע לפילוג האוכלוסייה בשטח הנחקר. בטווח של 12 ק"מ ממכל האמוניה, מתגוררים נכון לשנת 2005, 451,600 נפש פי הפילוג המפורט בטבלה.

טבלה 4: פילוג האוכלוסייה באזור הנחקר (בלומנפלד, 2005)

יישוב/עיר	אוכלוסייה (1000 נפש)	צפיפות [נפש לקמ"ר]
חיפה	267	4192.2
קריית ביאליק	36.7	4469.6
קריית ים	37.6	8732.6
קריית מוצקין	39.8	10463.7
קריית אתא	49.2	2947.1
נשר	21.3	1760.7
סה"כ	451.6	

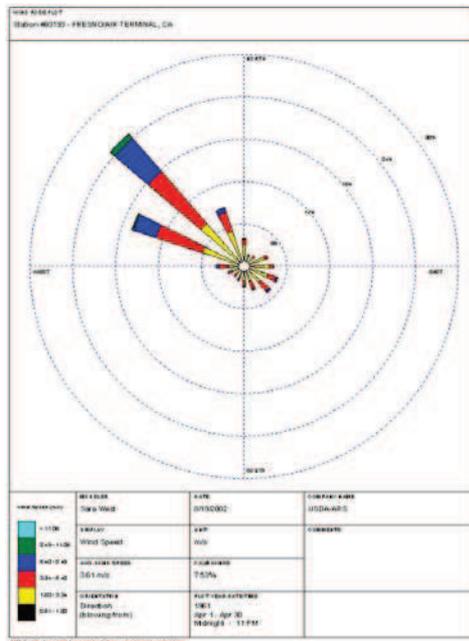
10.3 נתונים מטאורולוגיים

את כיווני הרוח ומהירותה אפשר להוציא בכל רגע נתון מאתרים הנזונים מהשרות המתאורולוגי לדוגמא באתר מועדון השייט. בדוגמא מוצגת הטבלה של כיוון הרוח, מהירות הרוח, הטמפרטורה וכ'י

טבלה 5 : טבלת נתונים מטאורולוגיים לדוגמה –תחנת בת גלים בתאריך 28.7.09

Israel - Bat Gallim (GFS 28.07. 00 UTC)		Powered by WINDGURU																						
windguru	Tu	Tu	Tu	Tu	Tu	Tu	Tu	We	Th	Fr	Fr													
	28.	28.	28.	28.	28.	28.	28.	29.	29.	29.	29.	29.	29.	29.	29.	30.	30.	30.	30.	30.	30.	30.	31.	31.
	03h	06h	09h	12h	15h	18h	21h	03h	06h	09h	12h	15h	18h	21h	03h	06h	09h	12h	15h	18h	21h	03h	06h	
Wind speed (knots)	4	7	5	9	11	8	4	4	6	6	9	11	9	6	4	4	5	9	11	9	4	3	3	
Wind direction	↗	↗	↗	→	→	↘	↘	↗	↗	↗	→	→	↘	↘	→	↗	↗	→	→	→	↘	→	↗	
Temperature (°C)	27	26	29	31	31	30	28	27	26	29	31	31	30	27	26	25	28	30	30	28	26	25	24	
Cloud cover (%)	-																							
Rain (mm/3h)	-																							
Windguru rating											★												★	
Lat: 32.83, Lon: 34.98 Timezone: IDT (UTC+3) ☀️ 05:54 - 19:38																							[Archive]	

ייצוג סטטיסטי של מהירות הרוח בשושנת הרוחות



איור 8 : פרופיל שושנת הרוחות- הדגמה.

10.4 פריסת תחנות הניטור באזור הנחקר

פרוט תחנות הניטור של איגוד ערים חיפה שישמשו מקור עיקרי לניתוח נתונים מטאורולוגיים בשטח הנחקר (אתר איגוד ערים חיפה). מפורטים בטבלה, רשימת תחנות הניטור באזור האיגוד כולל סיכום הפרמטרים הנמדדים בכל תחנה.

טבלה 6: תחנות ניטור של איגוד ערים חיפה (אתר איגוד ערים חיפה)

מס'	תחנות הניטור	מיקום	מזהמים נמדדים	פרמטרים מטאורולוגיים נמדדים
1	קריית אתא	רח' הוגו מולר, ביי"ס מקיף רוגוזין	O ₃ , CO, NO _x , SO ₂ , PM2.5*, PM10**	WS, WD, RH, BPR, SR
2	נשר	רח' ששת הימים		
3	נווה שאנן	רח' הגליל, ביי"ס תל-חי		
4	קריית חיים	רח' דגניה	PM10, SO ₂	WS, WD, TEMP
5	שוק תלפיות	רח' סירקין	O ₃ , NO _x , SO ₂ , PM10	WS, WD, TEMP
6	אינשטיין	רח' אינשטיין	SO ₂	TEMP, WS, WD
7	אחוזה	רח' חורב	SO ₂	WS, WD, TEMP
8	קריית מוצקין	רח' החשמונאים, ביי"ס שרת	SO ₂	
9	קריית ים	רח' עדולם, ביי"ס המפלסים	SO ₂	WS, WD
10	קריית ביאליק	רח' ההגנה	SO ₂	WS, WD
11	כפר חסידים	כפר הנוער הדתי, כפר חסידים	SO ₂	WS, WD
12	קריית טבעון	ככר בן גוריון, בנין המועצה	NO _x , O ₃ , SO ₂ , PM10	WS, WD, TEMP
13	ק. שפרינצק	דרך ביי"ס רמות	NO _x , O ₃ , SO ₂	WS, WD
14	קריית בנימין	קריית אתא, בנימין	PM10, SO ₂	WS, WD
15	איגוד (תחנה חדשה)	רח' החרמש 24, צ'ק פוסט	O ₃ , NO _x , SO ₂ , BTX, PM10/2.5	WS, WD, RH, BPR, PCIP, TEMP
16	תחנה ניידת		CO, NO _x , SO ₂	WS, WD

משקעים- PCIP ; לחץ ברומטרי - BPR ; לחות יחסית - RH ; כיוון הרוח - WD ; עוצמת הרוח - WS חלקיקים נשימים - PM10/PM2.5 ; קרינה סולרית - SR ; טמפרטורה - TEMP, גשם- PCIP ; גופרית דו חמצנית - SO₂ ; אוזון - O₃ ; חד תחמוצת הפחמן - CO ; תחמוצות חנקן - NO_x ; בנזן, טולואן, פארה-קסילן- BTX ; דוגם אבק לא רציף - Hi-Vol ;

* מופעל בתחנה נווה שאנן בלבד.

** מופעל בתחנות נווה שאנן וקריית אתא.

11.1. נספח ג': תאור מתמטי של המודלים

בנספח זה יתוארו המודלים הפשוטים יחסית לשימוש שתוארו בפרק 2 והנתונים להם הם נדרשים.

11.1. מודל פיזור פאסיבי

11.1.1. פיזור במצב עמיד

פיזור פאסיבי לחומר באטמוספירה במצב עמיד מתואר על ידי משוואת פיזור גיאוסני עם התחשבות בנוכחות הקרקע

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (11.1)$$

כאשר

Q	עוצמת מקור
U	מהירות רוח
H	גובה שחרור
σ_y	סטיית תקן לציר y
σ_z	סטיית תקן לציר z
x, y, z	קואורדינאטות של פיזור הענן

משוואת הפיזור תוך התחשבות בנוכחות הקרקע ושכבת האינורסיה.

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \times \quad (11.2)$$

$$\left(\exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H-2mL)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H+2mL)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z-H+2mL)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H-2mL)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \right)$$

מודל (Briggs1973) מבחין בין שטח פתוח לשטח אורבני כתלות ביציבות אטמוספרית, בתחום מרחקים $10^2 < x < 10^4$ m. באופן כללי ניתן לרשום את הקשרים הללו לפי הנוסחה

$$\sigma_i = ax_i(1 + bx_i)^n \quad (11.3)$$

טבלה 7: קבועי Briggs (1973) עבור תכסית שונה: שטח פתוח ושטח עירוני

Model 1: Data

Briggs(1973)

Open Country

		a	b	c	sigma_y
1	A	0.22	0.0001	-0.5	21.89082
2	B	0.16	0.0001	-0.5	15.9206
3	C	0.11	0.0001	-0.5	10.94541
4	D	0.08	0.0001	-0.5	7.960298
5	E	0.06	0.0001	-0.5	5.970223
6	F	0.04	0.0001	-0.5	3.980149

		a	b	c	sigma_z
1	A	0.22	0	1	22
2	B	0.12	0	1	12
3	C	0.08	0.0002	-0.5	7.92118
4	D	0.06	0.0015	-0.5	5.595029
5	E	0.036	0.0009	1	3.924
6	F	0.016	0.0003	1	1.648

Urban country

		a	b	c	sigma_y
1	A	0.32	0.0004	-0.5	31.37858
2	B	0.32	0.0004	-0.5	31.37858
3	C	0.22	0.0004	-0.5	21.57277
4	D	0.16	0.0004	-0.5	15.68929
5	E	0.11	0.0004	-0.5	10.78639
6	F	0.11	0.0004	-0.5	10.78639

		a	b	c	sigma_z
1	A	0.24	0.001	0.5	25.17141
2	B	0.24	0.001	0.5	25.17141
3	C	0.2	0	1	20
4	D	0.14	0.0003	-0.5	13.79461
5	E	0.08	0.00015	-0.5	7.940667
6	F	0.08	0.00015	-0.5	7.940667

11.1.2. מודל פיזור תלוי בזמן

מודל פיזור הגאוסיוני של החומר בשלושת הצירים התלוי בזמן הינו:

$$C(x, y, z, t) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{(x-ut)^2}{2\sigma_x^2}\right] \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (11.4)$$

		כאשר
[kg]	עוצמת מקור	Q
[m/s]	מהירות רוח	u
[m]	גובה שחרור	H
[m]	סטיית תקן	σ_y
[m]	סטיית תקן	σ_z
[m]	סטיית תקן בכיוון x	σ_x
[m]	קואורדינאטות	x, y, z

עבור מודל ענן מוגדרות רק שלוש יציבויות אטמוספריות: יציב, נטרלי, לא יציב. תלות של סטיות התקן נמצא ע"י הקשרים:

$$\sigma_y = ax^n \quad (5)$$

$$\sigma_z = ax^n$$

טבלה 8: קבועי הפיזור עבור מודל ענן

	sigma y		sigma z	
	n	a	n	a
Unstable	0.92	0.14	0.73	0.53
Netural	0.92	0.06	0.7	0.15
Very stable	0.89	0.024	0.61	0.05

11.2. מודל פיזור גז כבד

המודלים המתוארים הינם מודלים מסוג "קופסה" (Box Models), הנחשבים לפשוטים יחסית למודלים המבוססים על תיאורית ה- K (דיפוזיה של מערבולות אוויר). המודל הבסיסי הינו המודל של Cox and Carpenter (1980).

11.2.1. התפשטות הענן

שחרור רגעי מיוצג על ידי ענן גלילי (top-hat) בעל צפיפות אחידה, אשר מקבל צורה עגלגלה (pancake) בהשפעת אפקטים גרביטציוניים, מתפשט באופן רדיאלי סביב מרכזו ובו בזמן מתקדם עם הרוח. ניתן לבטא את ההתפשטות הרוחבית באמצעות המשוואה של Van Ulden (1974), שמשקלת את רדיוס, גובה וצפיפות הענן יחסית לאוויר ומתאימה לשלב הקרוי slumping (נפילה).

$$\frac{dR}{dt} = \sqrt{kg h (\delta_{ca} - 1)} \quad (6)$$

		כאשר
[kg/s]	רדיוס הענן כתלות בזמן	R
[m]	גובה הענן כתלות בזמן	h
[]	צפיפות יחסית של הענן יחסית לצפיפות האוויר	δ_{ca}
[m/s ²]	תאוצת הכובד	g
	קבוע ניסיוני	k

11.2.2. קצב סחיפת האוויר לענן

בשני סוגי השחרור, הרגעי והממושך, האוויר נסחף לתוך הענן דרך פני שטחו החשופים לאוויר. מקורות למיהול הענן באוויר בזמן התפשטותו הינם ערבוב בדופנותיו וערבוב דרך פני השטח העליון. תהליכי ערבוב אלו הנשלטים על ידי הטורבולנציה האטמוספרית ועל ידי הבדל הצפיפות בין הענן והאוויר. קצב המהול מורכב סכום מקצב מיהול בדפנות הענן וקצב מיהול מחלקו העליון. סכום זה מאפשר להעריך את מיהול הכולל של הענן, ובהתאם לחשב את הטמפרטורה שלו וצפיפותו הממוצעת.

הערבוב בדפנות

מתואר ע"י המשוואה:

$$Q_e = 2\pi JhR \frac{dR}{dt} \quad (7)$$

		כאשר	
[m ³ /s]	קצב סחיפת האוויר	Q_e	
[m]	מקדם נסיוני	J	

קצב סחיפת האוויר לענן מפני השטח עליונים

הקצב של סחיפת האוויר נמצא ע"י המכפלה של מהירות סחיפת האוויר דרך פני השטח העליון בשטח של חלקו העליון של הענן. מהירות סחיפת האוויר דרך פני השטח העליון, הנגרמת ע"י טורבולנציה אטמוספרית, ניתנת ע"י המשוואה:

$$U_e = \frac{\alpha U_\varepsilon}{Ri} \quad (8)$$

		כאשר	
[m/s]	מהירות סחיפת האוויר	U_e	
[m/s]	מהירות הטורבולנטיות (פרופורציונית למהירות החיכוך)	U_ε	
[]	מספר Richardson	Ri	
	מקדם ניסיוני (ערך ברירת מחדל – 0.5)	α	

מספר Richardson נתון ע"י המשוואה:

$$Ri = \frac{gl}{U_\varepsilon^2 \delta_{ca}} \quad (9)$$

		כאשר	
[m]	אורך טורבולנטי אופייני (תלוי בגובה פני השטח ובמצב היציבות)	l	

11.2.3. תיאור המעבר לפיזור פסיבי

כאשר קצב ההתפשטות הלטראלית הנגרמת ע"י הטורבולנציה האטמוספרית מתחיל לגבור על קצב ההתפשטות הנובעת מאפקטים גרביטציוניים, יש לבצע מעבר למודל פיזור פסיבי. הקריטריון למעבר הינו:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{d\sigma_y}{dt} \quad (10)$$

כאשר

σ_y מקדם הפיזור הרוחבי במודל הגאוס $[m]$

לפי שיטת Fryer & Carpenter (1979): השוואה בין אפקטים הגרביטציוניים טורבולנטיים:

המעבר מתבצע אם מתקיימים שני התנאים:

א. קצב גידול הענן קטן מנגזרת מקדם הפיזור הרוחבי בזמן. (התלות בזמן מקבילה לתלות במרחק עם התפשטות הענן בזמן)

$$\frac{dr}{dt} < 2.14 \frac{d\sigma_y(x)}{dt} \quad (11)$$

הנחה זו מבוססת על ההנחה המקובלת שהרדיוס נמצא בקצה -10% של הפרופיל הגאוס. כלומר: מהירות סחיפת האויר גדולה ממהירוץ הטורבולנטית האורכית (פרופרציונית למהירות החיכוך).

$$U_e > U_1 \quad (12)$$

כאשר תנאי זה מתקיים המשוואה פיזור גז כבד בלתי תקפה.
 ב. הפרש הצפיפויות בין הענן והאוויר: המעבר מתרחש כאשר הפרש הצפיפויות בין הענן והאוויר יורד מתחת לערך מסוים שנבחר. המעבר מתבצע אם הפרש זה קטן מ- 10^{-3} kg/m^3 ,

12. נספח ג': פילוג הזרימה בשכבת הגבות האטמוספרית

12.1. שכבת גבול זרימה

נוסחת פילוג המהירות בשכבת הגבול:

$$\frac{u_z}{u_a} = \left(\frac{z}{z_a} \right)^n \quad (13)$$

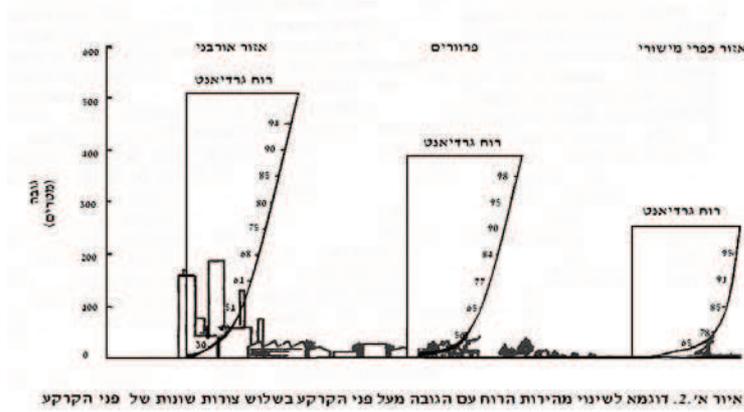
כאשר:

[m/s]	מהירות הרוח בגובה אופקי z מעל הקרקע	u_z
[m/s]	מהירות הרוח בגובה המדידה (מד הרוח).	u_a
[m]	גובה מעל הקרקע	z
[m]	גובה המדידה מעל הקרקע	z_a
	חזקה התלויה בעיקר ביציבות האטמוספרית, משתנה מ 0.07 עבור תנאים בלתי יציבים עד 0.55 עבור תנאים יציבים.	n
[m]	פרמטר חספוס. (עבור שטח אורבני: 1.0-3.0)	z_0

קיים אפקט חיכוך בין הרוח לפני הקרקע והאלמנטים שעליה. מהירות הרוח קטנה בקרבה לקרקע וגדלה ככול שהמרחק מהקרקע גדל.

אובייקטים הנמצאים על פני הקרקע ישפיעו באמצעות חיכוך על מהירות הרוח ליד הקרקע. פרמטר המייצג רת התכסיט הינו חספוס הקרקע z_0 . ערכים טיפוסיים של פרמטר זה נתונים בטבלה.

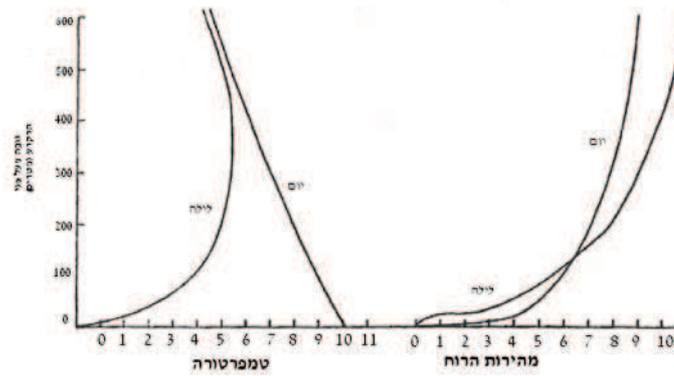
התנהגות טיפוסים של מהירות הרוח עם גובה במהלך היום מוצגת בתרשים.



איור 9: פרופיל מהירות האוויר סמוך לקרקע עבור תכסית שונה.

12.2 שכבת גבול זרימה ושכבת גבול תרמית

מוצגת התנהגות הטמפרטורה כפונקציה של הגובה ביום ובלילה.



איור 10. התנהגות של מהירות הרוח וטמפרטורה כפונקציה של מרחק מהקרקע.

איור 10: שכבת גבול אטמוספירית: פרופיל זרימה ותרמית.

13. נספח ה': קובץ קלט של תוכנת SLAB

```

% SLAB data
%
% SLAB
%
% Shapira, A.
% 14/07/09
% -----
%
idspl =          2; % idspl spill source type
%              1 - evaporating pool release
%              2 - horizontal jet release
%              3 - vertical stack/jet release
%              4 - instantaneous or short duration evaporating pool
release
  ncalc =          1;% - ncalc sub-step multiplier (input
parameter)
  wms = 0.016043;% - wms molecular weight of source gas (kg)
  cps = 2238.00;% - cps heat capacity at const. p. (j/kg-'k)
  tbp = 111.70;% - tbp boiling point temperature ('k)
  cmed0 = 0.00;% - cmed0 initial liquid mass fraction
  dhe = 509900.;% - dhe heat of vaporization (j/kg)
  cpsl = 3348.50;% - cpsl liquid heat capacity (j/kg-'k)
  rhosl = 424.10;% - rhosl liquid density of source material
(kg/m3)
  spb = -1.00;% - spb saturation pressure constant
(default: spb=-1.)
  spc = 0.00;% - spc saturation pressure constant
(default: spc=0.)
  ts = 111.70;% - ts temperature of source material ('k)
  qs = 117.00;% - qs mass source rate (kg/s)
  as = 657.00;% - as source area (m2)
  tsd = 107.;% - tsd continuous source duration (s)
  qtis = 0.00;% - qtis instantaneous source mass (kg)
  hs = 0.00;% - hs source height (m)
  tav = 10.00;% - tav concentration averaging time (s)
  xffm = 1000.00;% - xffm far field length (m)
  zp(1) = 0.00;% - zp(i) heights of concentration
calculation; i=1,4 (m)
  zp(2) = 0.00;
  zp(3) = 0.00;
  zp(4) = 0.00;
  z0 = 0.000200;% - z0 surface roughness height (m)
% Meteorological Variables
  za = 2.88;% - za ambient measurement height (m)
  ua = 1.92;% - ua ambient wind speed (m/s)
  ta = 306.00;% - ta ambient temperature ('k)
  rh = 4.60;% - rh relative humidity (percent)
  stab = 0.00;% - stab stability class values
% class value description
% a 1.0 very unstable
% b 2.0 unstable
% c 3.0 slightly unstable
% d 4.0 neutral
% e 5.0 slightly stable
% f 6.0 stable
%
% default 0.0 input 'ala' for stability
%

```

```
ala = 0.0665;% - ala inverse monin-obukhov length (1/m)
% (ala is an input parameter only when stab=0.0)
%
z01=-1.0; % ==-1 end data

%=====
===
```

אוניברסיטת תל אביב
בית הספר ללימודי הסביבה ע"ש פורטר

השפעת זיהום האוויר על כמות המשקעים באזור חיפה

הצעת מחקר המוגשת במסגרת הקורס פרויקטים באיכות הסביבה, תשס"ט
בהנחיית: פרופ' עמרם אשל וגב' קרין ארדון



מגישים:

מישל שפירר, 302378609

רותם נאור, 060770286

יואב גוטרמן, 062886809

ירון בלסלב, 035804699

יולי 2009

תוכן עניינים

3.....	תקציר.....
4.....	מבוא.....
5.....	סקירת הרקע המדעי.....
15.....	שאלת המחקר.....
15.....	חשיבותה של שאלת המחקר.....
16.....	שיטות המחקר.....
17.....	הערכה של הקשיים הצפויים.....
17.....	הצעה להמשך מחקר.....
18.....	סיכום.....
19.....	רשימת מקורות.....
22.....	נספחים.....

תודות

ברצוננו להודות למר בוריס גולדמן מאיגוד ערים אזור חיפה לסביבה, אשר סייע רבות בהשגת הנתונים הרלווטים לעבודתנו. בנוסף נבקש להודות לגב' קרין ארדון שהקדישה מזמנה ומרצה בהנחיית עבודה זו.

תקציר

זה שנים רבות האוויר באזור חיפה והמפרץ סובל מזיהום מתמשך שמקורו בתעשייה כבדה, תשתיות לייצור אנרגיה, בתי זיקוק, נמל, ותחבורה מסחרית ופרטית רבה המאפיינת את האזור. אחת מתצורות הזיהום הנפוצות היא אירוסולים, חלקיקים מוצקים זעירים, הנפלטים לאוויר יחד עם תערובות גזיות מארובות ומצינורות הפליטה של הרכבים. החלקיקים מקבלים תנופה ביציאתם אל האטמוספירה בתוך פלומה חמה הזורקת אותם מעלה. כך, חלקיקים כבדים יחסית יכולים להגיע לרום ולקחת חלק בתהליך היווצרות הענן. בגלל אורך חייו הקצר של ענן הגשם (עשרות דקות) יש להניח כי חלק מהשפעות החלקיקים (במידה ואלה מתקיימות) תבואנה לידי ביטוי בצורת משקעים בטווח המידי באזור הקרוב וכן ובמורד הרוח ביחס למקור הפליטה.

חוקרים רבים, בחו"ל וכן בישראל, בחנו את השפעתם של ריכוזי מזהמים מסוגים שונים באוויר על כמויות המשקעים. עד היום, אין הסכמה בנוגע לחוזק הקשר ויש המערערים על עצם קיומו. עם זאת, בקרב החוקרים השונים רווחת הדעה כי אירוסולים מסוימים היכולים לתפקד כגרעיני התעבות משפיעים על תהליכי היווצרות ענני הגשם.

במחקר זה נבקש לבחון את הקשר בין ריכוזי האירוסולים הנפלטים באזור חיפה והמפרץ ממקור אנתרופוגני, לכמות המשקעים הנמדדת באותו האזור. כדי לבחון קשר זה נבקש לאסוף נתונים מגוונים שנרשמו באזור בשלושים השנים האחרונות. בשלב הבא, נציב נתונים אלה במודלים מטאורולוגיים שנציג ונבקש לקבל צפי לכמות המשקעים בתנאים אלה. איכות המודלים תבחן בעזרת השוואת נתוני המשקעים שנמדדו בפועל בתקופת המבחן לנתוני המשקעים אשר חזה המודל. לבסוף, נבצע קורלציה בין ריכוז האירוסולים לכמות המשקעים ונבחן את השפעת ריכוז האירוסולים על כמות המשקעים הצפויה לרדת בעזרת הצבת ריכוזים שונים במודל כתנאי התחלתי.

זיהום האוויר בישראל הינו תחום רחב שנחקר רבות על היבטיו השונים. הצעת מחקר זו עוסקת בהיבט מסויים והוא הקשר בין זיהום האוויר הנפלט באזור מסוים לבין כמויות המשקעים היורדות באותו האזור. לשם כך, נבחר אזור חיפה המאופיין ברמות זיהום אוויר גבוהות. שאלת המחקר היא **מהי מידת ההשפעה של אירוסולים הנפלטים ממקור אנתרופוגני באזור מפרץ חיפה על כמות המשקעים היורדת באותו האזור?** לשם כך נבחר את מאפייני זיהום האוויר ואת המשתנים המטאורולוגיים והמשקעים באזור חיפה. לבסוף נשתמש במודלים מטאורולוגיים על מנת לבדוד את משתנה האירוסולים, ולבחון כיצד משתנה זה משפיע על כמות המשקעים באזור. ריכוז האירוסולים בדרך כלל גבוה יותר בקרבה למקור הזיהום ובסמוך לקרקע בהתאם למסת החלקיקים. חלקיקים קטנים יכולים לשהות באוויר ימים רבים, בעוד הכבדים יותר ישקעו מהר ומשך שהייתם באוויר מוגבל. באזורים מזהמים ניתן לעיתים למצוא ריכוז של חלקיקי זיהום הגבוה בשני סדרי גודל לעומת אזורים נקיים. פה באה לידי ביטוי חשיבותו של מחקר הבוחן את ההשפעה של האירוסולים בטווח הפיסי הקרוב.

נושא זה נחקר רבות, אך טרם התקבלו מסקנות ברורות לקשר בין ריכוז מזהמים לכמות משקעים. יחד עם זאת, מאז החל המחקר בנושא, רבים מאנשים המדע הטילו ספק ביכולתו של המין האנושי להשפיע על תופעות אקלימיות. עם השנים התברר לקהילה המדעית כי האדם משפיע על האקלים והדיונים נסבו סביב מידת השפעתו. מעל לחמישים שנות מחקר מגלות כי זיהום האוויר הנפלט ממקורות אנתרופוגנים (תעשייה, תחבורה, חקלאות, שריפות ועוד), משפיע על סוג, גודל ומהירות היווצרותם של העננים. עם זאת, ועל אף המחקרים הרבים בנושא, עד היום אין הוכחה ברורה להשפעה זו. תרומתו של מחקר זה, היא בבחינת הקשר המדובר באמצאות מודלים בהם ניתן להזין נתוני עבר, ובכך לאמת את יכולת החיזוי של המודל. בעזרת הרצת המודלים עם ריכוזי זיהום שונים, המחקר המוצע יאפשר לבחון את מידת השפעת האירוסולים הנפלטים באזור חיפה על כמות המשקעים היורדת באזור זה.

סקירת הרקע המדעי

א. זיהום אוויר- רקע כללי

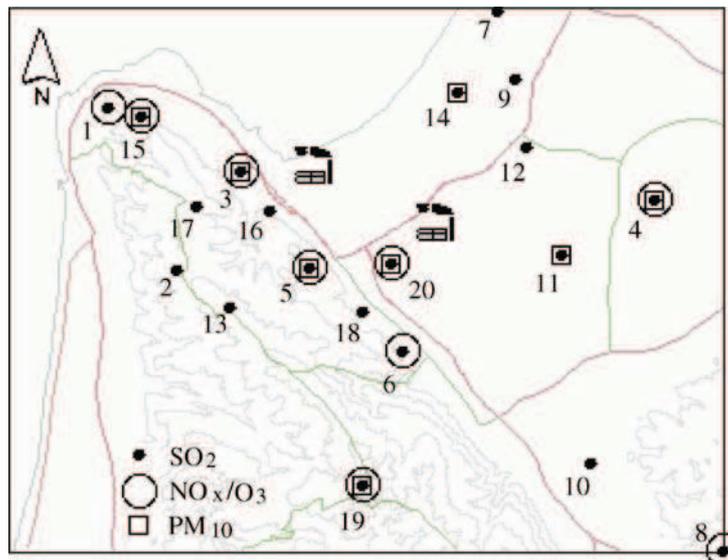
בבואנו לדרוש בסוגיות הקשורות בזיהום האוויר, ראשית עלינו להגדיר מונח זה. על אף שלכאורה משימה זו נדמית כפשוטה, עיון בספרות מעלה לכך הגדרות שונות. שוני זה נובע ממידת הנזק האפשרי מן הזיהום, מקור הזיהום וגישות ערכיות שונות כלפי התערבות האדם בטבע והנכונות לקבל פגיעה בו (אפשטיין, 2001). בעבודה זו, נתייחס לזיהום אוויר כתוספת כלשהיא לאוויר המייצגת את תחילתו של תהליך הצפוי לחולל נזק בעתיד. הגדרה זו כוללת זיהום ממקורות אנתרופוגניים וטבעיים כאחד. על מנת להבין את משמעות זיהום האוויר על סוגי המזהמים השונים ומקורותיהם, יש לתת את הדעת בקצרה לנזקי זיהום זה. חומרת זיהום האוויר מושפעת רבות מכך שנוקיו הם רב-תחומיים. נזקים אלו נעים בסקאלה רחבה החל מזיהום אסטטי, דוגמת עשן המיתמר מארובה, דרך זיהומי ריח, ועד לנזקים בריאותיים שונים כגון גירויים, תחושות אי-נוחות, אלרגיות, מחלות כרוניות, הפרעות נשימה, עלייה ברמת הסיכון למחלות שונות וכלה במקרי מחלות סופניות ומוות. כל אלו עלולים להופיע ברמות שונות כתוצאה מחשיפה ונשימת אוויר שלא בהרכבו הטבעי. תוצאות בריאותיות אלו הביאו רבים לראות בזיהום האוויר את המפגע הסביבתי החמור בישראל. אמירה זו מגלמת בחובה (פרט לנזק הבריאותי) את מאפייני התפשטות זיהום האוויר ועצם ניטורו בסביבה. כלומר, בניגוד למפגעים אחרים (כגון רעש, פסולת ואף זיהום מים), זיהום האוויר מתפשט במהירות רבה ולמרחקים עצומים. מהירות וכיוון התפשטותו תלויים בגורמים אקלימיים ומטאורולוגיים רבים המשתנים באופן ניכר לעיתים במשכי זמן קצרים. עובדה זו מקשה על חיזוי רמת זיהום האוויר הן בזמן והן במרחב (אפשטיין, 2001).

זיהום האוויר האנתרופוגני נוצר בעקבות פליטת מזהמים מקבוצות וממקורות שונים. קבוצות מזהמים אלו כוללות את קבוצת ה-PM (המוכרים כחלקיקים מרחפים או אירוסולים), תחמוצות חנקן (NOx), גופרית דו-חמצנית (SO₂), פחמן דו-חמצני (CO₂), תרכובות אורגניות נדיפות (VOC) ואוזון (O₃). (מירן אפשטיין, 2001). במחקר המוצע נתמקד בחלקיקים המרחפים. קבוצת ה-PM כוללת תערובות המורכבות ממוצקים ונוזלים גם יחד. נהוג להגדיר חלקיקים אלו כיחידה בודדת רציפה, מוצקה או נוזלית, המכילה מולקולות רבות המוחזקות יחדיו בכוחות בין-מולקולרים וגודלה עולה על 0.001 מיקרון. הממד המשמש למיון חלקיקים אלו הוא גודלם ולא הרכבם הכימי המשתנה. גודל החלקיקים משפיע ישירות על הנזק הגופני העלול להיגרם מהם. חלקיקים הקטנים מ-10 מיקרון (PM₁₀) יכולים לחדור לריאות. חלקיקים קטנים יותר (PM_{2.5}) עלולים לגרום לנזק בריאותי חמור הכולל סרטן ואף למוות. מקור פליטת חלקיקים אלו הוא בתהליכי שריפה המתרחשים במגוון מקורות. בישראל נפלטו בשנת 1999 44% מה-PM ממקורות תעשייתיים, 36% מייצור חשמל ו-20% מתחבורה. ככלל, ריכוז האירוסולים על פי רוב גבוה יותר סמוך לקרקע ולמקורות פליטתם. כמו כן, ככול שהחלקיקים קטנים יותר, גדל משך הזמן בו הם יכולים להישאר באטמוספירה. בשנים 1980-1996, חלה עלייה של 41% בפליטת חלקיקים מרחפים. 44% מזיהום זה מקורו בתעשייה, 36% בייצור החשמל ו-20% בתחבורה (בפרט רכבי דיזל). בשנת 1996 נפלטו בישראל 40,000 טון חלקיקים מרחפים (מירן אפשטיין, 2001).

ניתן לחלק את מקורות זיהום האוויר הנפלט באזור חיפה והמפרץ לשניים: התעשייה והתחבורה. התעשייה: באזור המפרץ פועלת תעשייה כבדה מסוגים שונים, בתי זיקוק, תחנת הכוח, וכד'. מתקנים אלה הם התורמים העיקריים לפליטות דו תחמוצות הגופרית (SO_2). כמו כן, מפעלים אחרים באזור העוסקים בייצור כימיקלים, דשנים, מלט ומוצרים רבים אחרים פולטים לאוויר מזהמים מגוונים אחרים (כתחמוצות חנקן, חלקיקים אורגניים נדיפים, אירוסולים וכד').

התחבורה: באזור חיפה והמפרץ עוברים מידי יום כ-125,000 כלי רכב פרטיים, 30,000 משאיות ומאות אוטובוסים (Broday, 2006). רכבים אלה תורמים משמעותית לזיהום האוויר באזור. זאת ועוד, הטופוגרפיה התלולה של אזור הכרמל גורמת למאמץ רב של מנועי כלי הרכב בעת נסיעתם בעליות ובכך לפליטות מוגברות של מזהמים מכלי הרכב השונים (המשרד להגנת הסביבה, 2007).

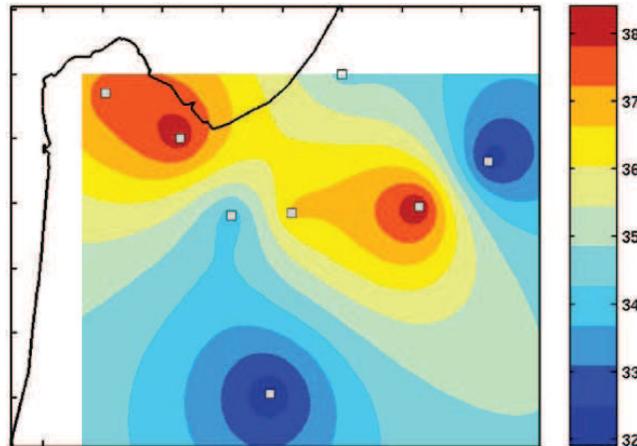
אזור מפרץ חיפה היה הראשון בארץ בו הוקם מערך ניטור אוויר. מערכת זו הוקמה על ידי איגוד ערים אזור חיפה לאיכות הסביבה בסוף שנות השבעים. כיום, מערך זה נחשב אחד המתקדמים והמוצלחים בעולם. נכון להיום, כולל מערך ניטור האוויר כ-16 תחנות ניטור של איגוד ערים אזור חיפה לסביבה, 3 תחנות של חברת החשמל ותחנה אחת של המשרד להגנת הסביבה (ר' נספח מספר 3). חלק מתחנות האיגוד הן תחנות ייעודיות הבוחנות פרמטרים מסוימים, בהתאם לאופי האזור בו הן מוצבות. כך למשל, מפעיל האיגוד תחנות המיועדות להיות מוצבות במרכזי מגורים, מרכזים עירוניים, שטחים כפריים, שטחי פרברים, צירי תחבורה, אזורי תעשייה וכן תחנות עבור מבנים סגורים (אבנימלך, 2006). תחנות אלה מודדות מגוון רחב של מזהמים ונתונים מטאורולוגים בהתאם למיקומן ולייעודן, כפי שניתן לראות באיור מס' 2. נכון להיום, אזור חיפה והמפרץ נחשב אחד האזורים המנוטרים בארץ. המרחק הממוצע בין תחנות ניטור המודדות את אותו המזהם הוא 3.2-5 ק"מ (Broday, 2006).



איור מס' 2: מציג מתאר טופוגרפי של האזור הנבחן, כבישים מרכזיים, ריכוזי תעשייה כבדה ומיקום תחנות הניטור באזור. כל תחנת ניטור מסומנת בהתאם לסוגי המזהמים אותם היא מודדת (Broday, 2006).

בין השנים 2004 ל-2006 ערך David Broday מחקר מקיף באזור חיפה והמפרץ במטרה למפות דפוסים וריכוזים של מזהמי אוויר מסוגים שונים באזור. במחקרו מצא כי יש שתי "נקודות

חמות", בהן ריכוזי ה- PM_{10} הממוצעים גבוהים במיוחד. האחת ברחוב סירקין (בסמוך לשוק), והשנייה בקריית בנימין. איור מס' 3 מציג ממצאים אלה.



איור מספר 3. ריכוז ממוצע של PM_{10} בין השנים 2002-2004 באזור הנבחן. סולם הערכים מימין מתאר יחידות מ"ג למטר קוב. ניתן לזהות שתי "נקודות חמות" בהן ריכוזי ה- PM_{10} הממוצע גבוהה במיוחד. האחת ברחוב סירקין (באזור העיר התחתית), והשנייה בקריית בנימין (ליד קריית אתא) (Broday, 2006).

במחקרו, מצא Broday (2006) כי קיים באזור חיפה והמפרץ קשר חיובי בקורלציה גבוהה בין PM_{10} ל- NO_x וקשר שלילי בקורלציה גבוהה בין ה- PM_{10} ו- NO_x ל- O_3 (נספח מס' 4). יש לזכור כי O_3 הוא מזהם שניוני הנוצר בתגובה פוטוכימית בין מזהמים ראשוניים וקרני השמש. לכן, לא נמצא מזהם זה בסמוך למקור הזיהום אלא במורד הרוח. לפיכך, הסיק החוקר כי מקורם של שלושת קבוצות מזהמים אלה הוא זהה. לעומת זאת הוא מצא קורלציה נמוכה בין ריכוזי PM_{10} , O_3 ו- NO_x ל- SO_2 . ממצא זה גרם לו להסיק כי מקור פליטת ה- SO_2 שונה ממקור פליטת PM_{10} , O_3 ו- NO_x . מכיוון שידוע כי התחבורה מתאפיינת בפליטת NO_x בריכוזים גבוהים בעוד שהתעשייה מתאפיינת בפליטת SO_2 בריכוזים גבוהים (אפשטיין, 2001). Broday (2006) הסיק כי מקורן העיקרי של פליטות ה- PM_{10} הוא התחבורה באזור ולא התעשייה. מסקנה זו חוזקה לאחר מדידות אשר הראו יחס גופרית חנקן נמוכים (המאפיינים זיהום שמקורו בתחבורה) באזור כולו. עם זאת, ראוי לציין כי אחת הנקודות החמות עליהן הצביע ממוקמת בקריית בנימין. אזור זה אינו מתאפיין בעומסי תחבורה.

נראה אם כן, כי לאזור חיפה והמפרץ מאפיינים רבים המשפיעים בישרות ובעקיפין על איכות האוויר שבו. התעשייה הכבדה, האוכלוסייה הצפופה, עומסי התחבורה, הטופוגרפיה המגוונת והריבוי ברשויות המקומיות, לכל אלה השפעה משמעותית על איכות האוויר שנמדדת באזור.

מכיוון שהאירוסולים הם קבוצת המזהמים המשפיעה על תהליכי היווצרות העננים וירידת המשקעים, התמקדנו בה וראינו כי דווקא התחבורה, היא המקור העיקרי לפליטתם באזור. כמו כן, ראינו כי יש נקודות מסוימות בהן נמדדים באופן עקבי ריכוזים גבוהים של אירוסולים. במחקר שכזה יש צורך בנתונים רבים ובהבנה עמוקה של המשתנים השונים השוררים באזור. רק כך נצליח להבין את יחסי הגומלין המורכבים המתקיימים ברמה המקומית ובטווח הזמן המידי.

עננות אורוגרפית בכרמל

עננות אורוגרפית נוצרת כאשר אוויר לח פוגש מחסום טופוגרפי. הרוח ממשיכה לנשוב ודוחפת את האוויר ובכך מאלצת אותו להקיף את המחסום או לטפס מעליו. כתוצאה מהטיפוס המהיר לגובה האוויר מתקרר מהר ומאיץ את תהליך ההתעבות. הסיבה לכך שהעננים האורוגרפיים "רגישים" יותר לזיהום נעוצה בגובה בו מתרחש התהליך. בסוג עננות זה אדי המים מתעבים בסמוך לפני הקרקע, היכן שמזוהם יותר בדרך כלל, ויותר חלקיקי זיהום משתתפים בתהליך ההתעבות. רכס הכרמל בחיפה מתנשא עד לגובה של 520 מטר מעל לפני הים. לרוב במערכות גשם, הרוחות מתחילות לנשב מכיוון דרום מערב וחגות עם כיוון השעון. בשל מיקומו של הים ביחס ליבשה, הגשם יורד כאשר הרוחות מגיעות עם רכיב מערבי. לכן כאשר הרוח דרומית מערבית עד מערבית יש לעננות אורוגרפית פוטנציאל להתפתח על רכס הכרמל, אך במקרה זה הזיהום שיצטבר בעננים יהיה ממקורות במישור החוף הצפוני ומרכס הכרמל עצמו הנמצאים במעלה הרוח. כאשר הרוח צפונית מערבית עד צפונית יש לעננות האורוגרפית פוטנציאל להתפתח על הרכס בתוספת זיהום מאזור העיר חיפה והמפרץ כולו.

ג. אירוסולים והיווצרות עננים

הקשר בין אירוסולים להיווצרות עננים מובחן בפרט ב"ענני גשם חמים", כלומר עננים מורידי גשם בהם הטמפרטורה לא ירדה אל מתחת לנקודת הקיפאון. העננים החמים מתהווים בשלב הראשון כתוצאה מספיחה של אדי מים לגרעיני ההתעבות. בשלב השני הטיפונות ממשיכות לגדול על ידי התנגשויות ביניהן המביאות להתלכדות עד אשר הן מגיעות למסה הדרושה על מנת שכוח המשיכה הפועל עליהן יגבר על כוחות העילוי הקיימים בענן. בהגיען למסה זו הן נופלות מן הענן כמשקעים אל הקרקע. על מנת שאדי מים טהורים יתהוו לטיפונות נוזליות יש צורך להגיע לרוויה באוויר שאינה אפשרית בתנאים הטבעיים באטמוספירה. פה מגיעה חשיבותם של גרעיני ההתעבות, שנוכחותם חיונית בהפיכת אדים לטיפונות בסביבה טבעית (Gunn and Phillips, 1957). תהליך זה נקרא "תהליך הטרוגני" מכיוון שלוקחים בו חלק אדי מים טהורים יחד עם חלקיקים מוצקים המתפקדים כגרעיני התעבות - CCN (Cloud Condensation Nuclei). לא כל האירוסולים מתאימים לשמש כגרעיני התעבות. על מנת שחלקיק יתפקד כגרעין התעבות עליו להיות היגרסקופי, כלומר בעל יכולת לספוח מים, כמו סולפטים ומלחים. יחד עם זאת, טיב התפקוד של אירוסול כגרעין התעבות תלוי בריכוזו פיזורו באטמוספירה ובגובה היווצרות העננים. על מנת שטיפונות המים תגדלנה ותספחנה עוד ועוד אדי מים עליהן לגדול באופן ספונטני. תיאורית קוילר (Köhler Theory) מתארת את התהליך בו אדי מים מתעבים לטיפונות. כלומר, מהי הרוויה הדרושה, "הרוויה הקריטית", עבור גודל טיפונת מסוים על מנת שזו תמשיך לגדול באופן ספונטני, (גם אם הרוויה תרד) לגודל של טיפת גשם. חשוב לציין שסדר גודל של רדיוס גרעין התעבות הוא מעל ל-0.1 מיקרון, בעוד שרדיוסה של טיפת גשם עולה על 1 מ"מ. במילים אחרות, מרגע שטיפת הענן נוצרת, עליה לגדול פי 1,000 על מנת להפוך לטיפת גשם, וכל זאת במהלך זמן החיים של הענן.

Schaefer (1946) היה בין הראשונים שכתב על נושא תהליכי התעבות עננים. בעקבות מאמר זה נכתבו מאמרים רבים נוספים אשר התבססו על מדידות ומודלים קיימים. מטרת המאמרים היתה להבין טוב יותר שינויי עבר ובכך להצליח לחזות שינויים עתידיים במשטרי הגשמים ברחבי העולם. ספרו של Fletcher, שפורסם בשנת 1962, נחשב לפרסום המקיף הראשון בנושא המיקרופיסיקה של הענן. הספר רמז לראשונה על ההשפעה של האירוסולים האנתרופוגנים על האקלים דרך האינטראקציה עם העננים.

הקשר שבין אירוסולים לכמות המשקעים

משנות ה-60 התקדם עולם המדע והחל לעסוק בקשר שבין גרעיני ההתעבות לירידת משקעים. תחילה גילו Twomey and Warner (1967a) קשר מובהק בין כמות גרעיני ההתעבות לכמות הטיפונות בענן. בעבודתם, הם מראים כי באזורים מזוהמים באירוסולים תהיינה יותר טיפונות, ומכיוון שכמות אדי המים מתחלקת ליותר טיפונות, כל טיפה תהיה קטנה יותר. המשמעות של טיפונות קטנות היא סיכוי נמוך יותר להגיע לרוויה הקריטית ולגדול עד ההגעה למשקל הדרוש על מנת להפוך למשקעים. במחקר נוסף בדקו Warner and Twomey (1967b) את ריכוז הטיפונות בעננים באזורי שריפות של שדות קנה סוכר באוסטרליה בין השנים 1964-1966. בנוסף ביצעו החוקרים בדיקות מעבדה. תוצאת מחקרם קבעה כי קיים קשר וודאי בין ריכוז הטיפונות הגבוהה בעננים לזיהום הנוצר משריפות קנה הסוכר. הקשר העיד על הפחתה בכמות הגשם בתקופות בהן יש שריפות באזורים המזוהמים. Warner (1968) המשיך את המחקר ובדק את התואמות מהמאמר הקודם. שנה לאחר פרסום המאמר הראשון, פרסם מאמר ובו הציג בדיקה של 60 שנות משקעים בתקופה של שלושת חודשי קצירת שדות קנה הסוכר. ממצאיו העידו על ירידה בכמות המשקעים בתחנות במקביל להרחבת ייצור הסוכר, בעוד שבתחנות הבקרה במעלה הרוח לא נמדד שינוי במשקעים. עם זאת, Warner נזהר בפרסום מסקנותיו, בטוענו כי האפשרות שישנם משתנים נוספים הגורמים לשינוי האקלימי אינה ניתנת להתעלמות (Warner, 1968).

Rosenfeld (1999) כתב כי הקשר בין העשן משריפות הצמחייה להפחתה בכמות המשקעים היה בגדר השערה שנים רבות, אך הספק הוסר עם תצפיות ממשימת ממדידות גשמים טרופים (TRMM), שבוצעה על ידי נאס"א וסוכנות החלל היפנית לאחר שיגור לוויין שביצע מדידות ותצפיות ב-1997. התצפיות גילו הפחתה עד כדי הפסקת משקעים מעננים "מזוהמים" שהטמפרטורה בפסגתם מגיעה לכ-10°C באזורים טרופים. Rosenfeld הוסיף וכתב על כך שיחסית לידע הרב בנוגע להשפעת זיהום משריפות צמחיה על המשקעים, מעט ידוע על השפעת זיהום תעשייתי על המשקעים. תחילה סברה קהילת המדע שההשפעה של הזיהום התעשייתי דומה לזו של הזיהום משריפות צמחיה (Gunn and Phillips, 1957). בהמשך, מחקרים באזורים מטרופוליניים ובאזורים מתועשים העלו את הסברה כי הזיהום מגביר את המשקעים במורד הרוח (Braham et al., 1981 ; Eagen, Hobbs and Radke, 1974). זאת בזכות גרעיני התעבות ענקיים (GCCN) שגודלם ההתחלתי עולה על 100 מיקרון (Johnson, 1982). עם זאת, אף מחקר לא הצליח להוכיח קשר מובהק. הסיבה לכך נעוצה במורכבות של תהליך היווצרות ענני גשם ובאינטראקציות הרבות בין גורמים שונים בעננים (Rosenfeld, 2000).

מחקרים בישראל

גם בישראל בוצעו מחקרים בנושא השפעת זיהום אנתרופוגני מהערים ומאזורי תעשייה על המשקעים. Givati and Rosenfeld (2004) בדקו בהרי יהודה והשומרון במקביל לקליפורניה את השפעת הזיהום מהאזור העירוני בחוף על העננים האורוגרפים בפנים הארץ, באזור ההר. תוצאות המחקר העידו על ירידה של 15-25% במשקעים מהממוצע השנתי, באזור ההר במורד הרוח מהמטרופולין, וכי ירידה זו באה במקביל לתיעוש ולהתפשטות הפעילות העירונית במעלה הרוח. זאת בעוד שבאזורים סמוכים שלא במורד הרוח מהמטרופולין אין כל שינוי בכמות המשקעים. לכן קבעו החוקרים כי ירידה בכמות המשקעים בהר נובעת מהאירוסולים הנפלטים באזור החוף לאחר שאלה נספחים לעננים בתהליך היווצרותם. מאמר זה נסתר על ידי Alpert et al. (2008) שבדקו וגילו כי אין שינוי משמעותי בכמות הגשמים בישראל בהר ב-50 השנים האחרונות, ואף ניתן אפילו לראות עליה בכמות הגשמים בהר ביחס לזו שנמדדה בחוף. לטענתם, הסיבה לכך Givati and Rosenfeld טענו להפחתה בכמות הגשמים בהר היא בגלל ההשוואה לגשמים בפנים הארץ שהתרבו בזכות אי החום האורבאני ואפקטים אורבאנים אחרים. לכן ההפרש בין הגשמים בהר לגשמים בפנים הארץ פורש כהשפעה שלילית של הזיהום על הגשמים האורוגרפים בהר.

עד היום ישנם חילוקי דעות בנושא הקשר שבין ריכוז האירוסולים לבין כמות המשקעים. מחקרים רבים סוכם בסברות ולא בהוכחות חותכות ולעיתים אף בספקנות לגבי התוצאות. כמו כן, מאמרים שטענו לתוצאות ברורות נסתרו על ידי מאמרים אחרים. לכן בפאנל הבין-ממשלתי לשינויי אקלים (IPCC) בשנת 2007 הוכרז כי יש עדות סבירה כי אירוסולים ממקור אנתרופוגני משפיעים על מזג האוויר על ידי שינוי מאזן האנרגיה בכדור הארץ. האירוסולים סופגים קרינה בעת חדירתה לאטמוספירה או ביציאתה ובכך משנים את כמות האנרגיה הנקלטת בכדור הארץ. העננים, שבינם לבין הקרקע או לים קיימת אינטראקציה, מושפעים משינויי הקרינה, ובכך גם מושפעים מהאירוסולים בצורה עקיפה. לעומת זאת סוכם כי ידוע פחות על השפעת אירוסולים על המשקעים. בשל המורכבות של התהליך והאינטראקציות הרבות בין הפרמטרים המטאורולוגיים, האירוסולים, והתהליכים המיקרופיסיקליים והדינאמיים בענן, קשה להצביע על קשר ברור. במקביל, לאחר תצפיות, ניסויים ובדיקות מודלים, מדגישים המחברים כי קל יותר להצביע על קשר בין אירוסולים לעננות מאשר בין אירוסולים לשינוי בכמות המשקעים (Levin and Cotton, 2009).

ד. השימוש במודלים בחקר זיהום אוויר ודפוסי מזג אוויר

השימוש במודלי חיזוי הוא כלי חשוב לחיזוי ולהסבר שינויים בדפוסי מזג אוויר וכמות משקעים. מודל חיזוי מנתח מידע מטאורולוגי עתידי במיקום ובתנאים מוגדרים. הדבר נעשה על ידי הזנת נתונים מטאורולוגיים מן ההווה והעבר ופרמטרים נוספים לתוך נוסחאות מתמטיות המשקפות תנאים אטמוספריים. ניתן להשתמש במודלים לחיזוי של השפעת זיהום אוויר, כמו פליטת אירוסולים, על מזג האוויר. ניתוחים אלו מתבצעים על ידי תוכנת מחשב שפותרת נוסחאות ומריצה ואלגוריתמים המדמים את השפעת ריכוז האירוסולים על רמת המשקעים. בסקירה זו, נבחן בפרט מודלים העוסקים במשקעים והדמיה מתמטית של השפעת אירוסולים על היווצרות עננים וכמות המשקעים.

כיצד עובדים מודלים?

נתונים מבלוני מדידות (רדיוסונדות), לוינים מטאורולוגיים ותחנות מדידה קרקעיות נאספים אל תחנות קרקעיות. המידע יכול לכלול: לחץ, גובה, מיקום גיאוגרפי, טמפרטורה, לחות יחסית, מהירות וכיוון רוח, ריכוז אוזון ורמות זיהום. המידע מוזן לתוכנה לצורך אתחול מודל. משוואות נוספות יכולות לשמש עבור: תרמאלים, קרינה, עננים ומשקעים, שינויי חום, קרקע, צמחייה, מי נגר, אפקט קינמטי של השטח וקונבקציה. לאחר הצבת הנתונים המודל מריץ את תוכניותיו ונותן חיזוי של המצב האטמוספרי זמן קצר בעתיד הקרוב (סדר גודל של שניות או דקות ספורות). על מנת לקבל תחזית לעתיד הרחוק יותר, תוצאות ניתוח המידע ההתחלתי מוזנות למשוואות מחדש. המודל מחשב בשלב זה "צעד זמן" עתידי נוסף של התפתחות התנאים השונים שהוזנו. צעדי זמן, או הצבת תוצאות החישובים עבור חישוב נוסף, נמשכים עד להגעת המודל ליעד הזמן המבוקש.

עריכת מודל משקעים

המחקר המוצע, העוסק בהשפעת זיהום האוויר על ירידת משקעים באזור חיפה, יתמקד בפרט בעריכת מודל משקעים. מודלים אלו יבדקו את השפעת האירוסולים על יצירת עננים וכמות המשקעים בהקשר לריכוז גרעיני התעבות בעננים (CCN). זאת על ידי הזנת רמות וערכי ריכוז CCN שונים למודל.

עבור חיזוי שינויים ברמת המשקעים. בעבודה זו נשתמש בשני מודלי חיזוי:

- מודל דו מימדי לענן בודד (TAU 2-D)
- מודל אזורי - Regional Atmospheric Modeling System (RAMS)

אי וודאות במודלי חיזוי מזג האוויר

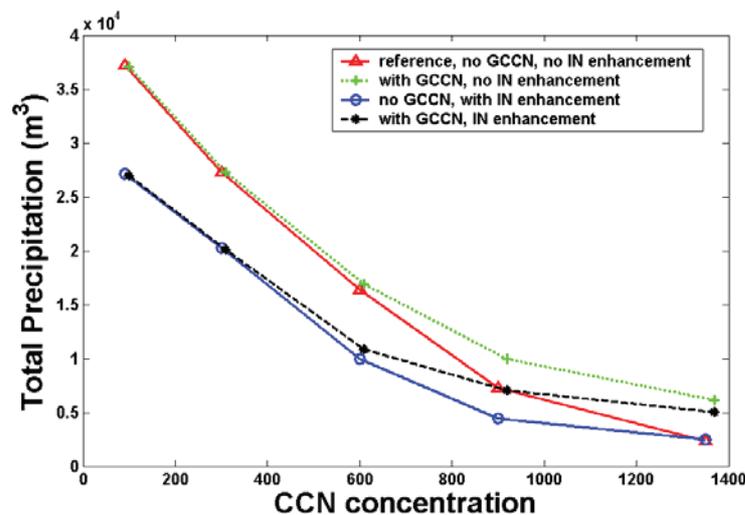
בטרם נתאר את שני המודלים בהם נשתמש, חשוב לציין מדוע בחרנו להשתמש בשני סוגי מודלים שונים. בחיזוי מזג האוויר, אנו מנסים לחזות את העתיד, דבר שאינו ניתן לעשותו במאת אחוזי וודאות עקב שני גורמים. האחד הוא כאוס: אין זה אפשרי לחזות באופן מוחלט את המצב האטמוספרי והתנודתיות שבו. הגורם השני הוא הערכה: תחזיות מחושבות בעזרת משוואות מתמטיות המחשבות את התנאים והשינויים הפיסיקליים והאטמוספריים שאינם ליניאריים ואינם ניתנים לפירוש מדויק. אין תשובה מדויקת, אך תוצאות המודל צריכות להיות בגבולות הדיוק הנחוץ למטרותינו. עקב אי וודאות זו, ואי יכולתו של אף מודל לחזות באופן מושלם את הקשר בין האירוסולים לכמות המשקעים, אנו נשלב במחקר שני מודלים עבור רמת המיקרו ועבור רמת המאקרו על מנת לקבל תוצאה טובה יותר מאשר שימוש במודל אחד.

מודל 2-D

מודל 2-D הוא מודל ענן דו-מימדי סימטרי "נון-הידרוסטטי", המפרט תהליכים מיקרופיסיקליים בתוך ענן אחד. במילים אחרות, מודל זה בוחן את דינאמיקת התהליכים הפיסיקליים בתוך ענן אחד. המודל מתוכנן לערוך הדמיה של היווצרות משקעים בעננים בשלבים שונים החל מגרעיני ההתעבות. עבור זאת נעשה שימוש בתיאוריית קוילר המוזכרת למעלה, המתארת את התהליך בו אדי מים מתעבים ויוצרים טיפות. המודל מחשב את הגידול בטיפות המים וחלקיקי הקרח במספר תהליכים כגון גירעון מים וקרח, עיבוי, איסוף, כפור, המסה, נקודת הטל וסדימנטציה.

Yin (2000) השתמש במודל זה על מנת לבחון את תרומת גרעיני התעבות ענקיים GCCN להתפתחות חלקיקי משקעים והחזרי רדאר. התוצאה הראתה ש-GCCN יוצרים שובל של טיפות גדולות בתפוצת רסס הענן בסמוך לבסיסו. כאשר קיים ריכוז גבוה של גרעיני התעבות קטנים, כפי שיש בעננים יבשתיים, נוכחות ה-GCCN מאיצה התמזגות בין טיפות מים ומובילה להתפתחות מוקדמת של טיפות גדולות בחלקו התחתון של הענן. כאשר קיים ריכוז נמוך של גרעיני התעבות קטנים, כפי שמתרחש בעננים ימיים, השפעת ה-GCCN קטנה יותר והתפתחות המשקעים מובלת על ידי רסס הנוצר סביב גרעיני התעבות גדולים.

Teller and Levin (2006) השתמשו במודל TAU-2D על מנת לחקור את השפעת עליית ריכוז CCN, GCCN ו-IN (גרעיני קרח) על התפתחות משקעים ומבנה העננים. הם בחנו זאת בעננים סוב-טרופיים מוליכי חום בשלבים מעורבים ובנתונים המייצגים תנאי חורף ים-תיכוניים אופייניים. מסקנתם הייתה שתחת תנאים מטאורולוגיים זהים, עננים מזוהמים מפיקים פחות משקעים, מועד ירידת המשקעים מתעכב ומשך חיי הענן ארוכים יותר. כמצוין באיור 4 להלן, Teller and Levin מצאו שעם עליית ריכוז ה-CCN כמות המשקעים הכוללת מעטן יחיד פוחתת.

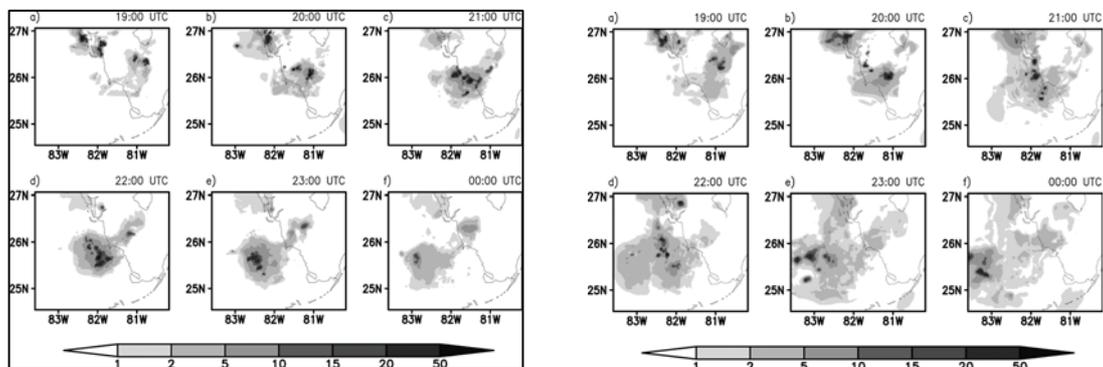


איור מספר 4. סך כל המשקעים שנוצרו על הקרקע בכל מקרה. סך המשקעים חושבו על ידי שיעור עובי ענן של קילומטר אחד.

מודל Regional Atmospheric Modeling System (RAMS)

מודל זה הוא מודל מורכב הכולל מגוון נוסחאות המדמות תנועות אטמוספיריות, תוך הוספת פרמטרים עבור: תרמאלים, קרינה סולארית וקרקעית, לחות, תהליכי עננים ומשקעים נוזליים וקפואים, חום נסתר וגלוי באטמוספירה, שכבות קרקע שונות, צמחייה, מי נגר, אפקט קינמטי של השטח וקונבקציה. RAMS פותח על ידי חוקרים מאוניברסיטת קולרדו. זהו מודל מגוון הנועד לדמות ולחזות תופעות מטאורולוגיות מכל סוג. על פי רוב, השימוש במודל זה נעשה באזורים קטנים, אולם ניתן להשתמש בו גם לאזורים נרחבים ביותר.

Van Den Heever (2006) השתמש במודל זה כדי לבחון את השפעת ריכוז ה-CCN, GCCN ו-IFN על מאפייני הולכת חום בסופות מעל חצי האי של פלורידה. בדיקה זו מצאה שמגוון ריכוזי גרעיני התעבות יכול להשפיע על המבנה הדינמי של סופה ושהעלאת ריכוז ה-CCN מפחיתה את כמות הגשם המגיע לפני הקרקע, כמוצג באיור מס' 5. לעומת זאת, מצא החוקר כי העלאת ריכוזי ה-GCCN וה-IFN מעלה את כמות הגשם המגיע אל הקרקע.



איור מס' 5. הדמיית טיפונות מים (במ"מ) מעל מפרץ פלורידה בקבועי זמן של שעה. מימין הדמיית ענן "נקי", משמאל ענן "מלוכלך" - בעל ריכוז רב של גרעיני התעבות.

שאלת המחקר

במחקר זה נבקש לבחון:

מהי מידת ההשפעה של אירוסולים ממקור אנתרופוגני במפרץ חיפה על כמות המשקעים היורדת באזור?

חשיבותה של שאלת המחקר

אחת הסוגיות החשובות במדינת ישראל היא משבר המים הנמשך. במדינה אשר יבשה מרבית ימות השנה, בעוד ניצול משאבי המים שבה הולך וגובר, ישנה חשיבות הידרולוגית לבחינת הקשר בין זיהום אוויר לכמות המשקעים. כמויות המשקעים בשנים האחרונות נמוכות מהממוצע, והסכנה היא שבעתיד יורגש המחסור גם אם נזכה לחורפים עם כמויות משקעים ממוצעות. הוזהר אומר שיתכן וזיהום האוויר באזור בו נוצרים עננים גורם למיעוט גשמים ובאופן זה להידלדלות מקורות המים על פני הקרקע ומי התהום הנאגרים מגשמים אלו. תוצאות מובהקות של מחקר זה תוכלנה להביא, פרט לידע המדעי, להפעלת לחץ להפחתת זיהום האוויר הפוגע במקורות המים. דבר שבנוסף ישיב את איכות האוויר ויפחית את הסיכון הבריאותי של תושבי האזור המזוהם.

חקר השפעת אירוסולים על היווצרות עננים וירידת משקעים, הוא כאמור נושא שנחקר רבות, ללא מסקנה גורפת. בישראל מחקרים אלו מועטים, ביחס לעולם, ובולטים בהם אלו של Givati and Rosenfeld (2004) ושל Alpert et al. (2008). מחקרים אלה בדקו נושא זה באופן רחב, אך הם לא בחנו את הזיהום האנתרופוגני באזור חיפה. להערכתנו לבדיקת שאלה ממוקדת, כפי שאנו מעוניינים לבדוק, אזור חיפה מהווה "מעבדה" טובה ביותר. זאת משום שזיהום האוויר באזור רב ביותר ומופץ ממקורות שונים, אך גם מנוטר במידה רבה. כמו כן, רכס הכרמל גורם להיווצרות עננות אורוגרפית ה"רגישה" במיוחד לריכוז המזהמים השונים באוויר. אם כן, מענה על שאלת המחקר אותה הצגנו ירחיב את הידע המדעי בשאלה עליה המדע חלוק, תוך עריכת מחקר מסוג זה בחבל ארץ המספק תנאים מיטביים למחקר מסוג זה.

שיטות המחקר

שלב א', איסוף הנתונים:

איסוף כמות המשקעים ופרמטרים מטאורולוגיים נוספים (טמפרטורה, רוח, לחות יחסית, לחץ ברומטרי, כיוון הרוח ועוצמתה) יעשה מתחנות הניטור הקיימות. נתונים אלו ייאספו משלושים השנים האחרונות, בהתאם למגבלות המצאי. כרגע אין בידינו את פירוט התחנות המודדות את כמות המשקעים ואת משך התקופה בהן מדדו בשל הדישה הכספית. לכן, במידת החסר, מידע זה יושלם מתחנות המידע השירות המטאורולוגי הפרושות בשטח (נספח 5). כמו כן יאספו ריכוזי PM_{10} ו- $PM_{2.5}$ מתחנות הניטור הנ"ל בשלושים השנים האחרונות.

שלב ב', הרצת המודלים ובדיקת אמינותם:

- 1) הזנת המשתנים המטאורולוגיים, ללא המשקעים למודל 2-D שם נבחן את השפעת האירוסולים על המיקרו - עבור ענן בודד.
- 2) בשלב הבא נבחן את השפעת האירוסולים על רמת המאקרו – עבור מודל אזורי (RAMS).
- 3) הורדת ימי סופות האבק מהנתונים על מנת לבודד זיהום אנתרופוגני.
- 4) המודל ירוץ עבור שלושים השנים האחרונות ותוצאותיו תהיינה כמויות משקעים. תוצאות אלו ישוו לכוונות המשקעים שירדו בפועל, על מנת לבחון את מהימנות המודלים בנתוני אזור חיפה שנאספו.

שלב ג', בחינת השפעת האירוסולים:

- 1) בדיקת הקשר בין כמות האירוסולים (PM_{10} ו- $PM_{2.5}$) למשקעים: בחינת הקשר בין כמויות זיהום שעתיות, יומיות ועונתיות לכמות המשקעים בכל תחנה בנפרד ולכל אזור המחקר יחד, פעם עבור PM_{10} ופעם עבור $PM_{2.5}$. באופן זה יימצא הקשר בין האירוסולים (בגדליהם השונים) לבין כמות המשקעים בכל תחנה, ובכלל התחנות יחדיו.
- 2) בדיקת שינויים בריכוז האירוסולים והשפעתם על המשקעים: ביצוע מבחני רגישות בריכוזי ה- PM שונים. מבחנים אלה ייעשו על ידי הרצת המודל לחמש השנים הבאות. בכל הרצה תשוונה כמויות ריכוז ה- PM ותבדקנה כמויות המשקעים עבור כל שינוי בריכוז. תחילה ירוץ המודל על ריכוז זהה לקיים היום. בשלב השני יועלה הריכוז ב-10%, ב-20% וב-50% ובשלישי יורד באותן כמויות. כך תתקבל ההשפעה של האירוסולים, בגדלים שונים, על כמות המשקעים.

הערכה של הקשיים הצפויים

- (1) בנסיוננו להשיג מידע אודות נתוני הניטור מתחנות מפרץ חיפה נתקלנו בדרישה כספית גבוהה עבור אספקת הנתונים. כיוון שכך, לא התאפשר לנו לוודא כי אכן קיימים מלוא הנתונים המבוקשים. על אף שעל פניו נתונים אלו נאספו במערך הניטור באזור חיפה, הקיים מעל שלושים שנה, יש להניח שלא כל הנתונים המבוקשים נמדדו לאורך כל התקופה בכל התחנות.
- (2) במידה ותוצאות ריצת המודל עבור שנים בהן יש נתוני משקעים אינן תואמות את כמות המשקעים שנצפתה בתחנות ייתכן ורזולוציית המודל אינה טובה מספיק. לכן יש צורך לשפר את המודל בעזרת מתכנת.
- (3) יתכן שתוצאות המחקר לא תהינה מובהקות. במקרה זה יש לבדוק את כמות האירוסולים בעננים באזור על מנת לוודא כי אכן החלקיקים הנפלטים ממקורות הזיהום מגיעים אליהם. לכן, אנו ממליצים לערוך בדיקה זו באמצעות ספקטרומטרים מהקרקע המודדים, בשיטות אופטיות שונות, את גודלם ומספרם של חלקיקי הענן השונים. או לבצע מדידות ממטוסים באמצעות דוגמי חלקיקים. מכשירים אלה מכילים מסננים, על גביהם נאספים החלקיקים, הנשאבים לתוך המכשיר במהלך הטיסה.

הצעה למחקרי המשך

המחקר המוצע בודק השפעה מקומית ומיידית במיקרו אקלים של מפרץ חיפה - כיצד הזיהום מאזור חיפה משפיע על המשקעים באזור חיפה וסביבתה. בשל העובדה כי משך חיי ענן גשם באזורנו הוא עשרות דקות, סביר שההשפעות האירוסולים תבואנה לידי ביטוי בתחום השטח הנבדק. עם זאת ייתכן וההשפעות תחולנה על אזורים מרוחקים יותר בפנים הארץ אשר לא נכללים במחקר. לכן אנו מציעים, בהסתמך על מחקר זה, להרחיב את המחקר בעתיד, בשני אופנים:

- (1) להרחיב את גבולות אזור המחקר על מנת לבחון כיצד זיהום האוויר הנוצר במפרץ חיפה משפיע על האזורים שמדרום מזרח עד צפון מזרח עמק יזרעאל עד לגליל העליון.
- (2) המחקר בוחן PM_{10} ו- $PM_{2.5}$. אנו מציעים במחקר המשך לבדוק השפעה של מזהמים שונים ואירוסולים בגדלים אחרים (PM_1 , GCCN) על כמות המשקעים.

סיכום

במחקר זה אנו מבקשים לבחון את הקשר בין זיהום אוויר הנפלט ממקורות אנתרופוגניים בחיפה והמפרץ לכמות המשקעים היורדת באזור. אנו מבקשים לחקור נושא עליו ממועט הידע ומרובות ההשערות. בניגוד למחקרים רבים, ברצוננו ללמוד האם קיים קשר מקומי (האם הזיהום הנפלט באזור משפיע על המשקעים היורדים באותו האזור) ובטווח הזמן המייד. כיום לא ניתן לספק תשובה מובהקת לשאלת המחקר אותה אנו מעוניינים לבדוק. הוכחת הקשר בין אירוסולים הנפלטים ממקור אנתרופוגני לבין תהליכי היווצרות עננים והשפעה על כמות המשקעים באזור, תהווה ציון דרך בחקר השפעת המזהמים השונים באוויר על האקלים. לשם כך, מהווה מפרץ חיפה "מעבדה" איכותית לבחינת הסוגיה. זאת בזכות זיהום האוויר האנתרופוגני הרב שבו, פרישת תחנות הניטור באזור ומשך ואורך תקופת עבודתן וכן המאפיינים הטופוגרפיים הגורמים ליצירת עננות אורוגרפית באזור.

ייחוד המחקר הוא בשילוב איסוף נתוני ניטור האוויר ונתונים מטאורולוגיים שנאספו בשלושים השנים האחרונות והזנתם במודלים מטאורולוגיים מתקדמים. טווח הזמן בו אנו משתמשים מאפשר בחינה של מהימנות המודלים, על ידי הרצת נתונים התחלתיים ידועים במודל והשוואת התוצאות לנתוני סיום התקופה. השימוש במודלי 2D ו-RAMS מאפשר את בידוד השפעת האירוסולים בתהליך היווצרות העננים, על ידי הרצת המודל עם רמות שונות של פרמטר זה. באופן זה ניתן למדוד כמה משקעים צפויים לרדת בריכוזי PM שונים באזור המחקר.

ביצוע המחקר המוצע ובחינת תוצאותיו יוכל לשפוך אור על תחום חשוב ומשמעותי. יש לדעת בבטחה האם לאדם ישנה השפעה ישירה על ענני הגשם הנוצרים באזור בו הוא מזהם, ומכאן על כמות המשקעים. מתן מענה לסוגיה זו ישפר את ההבנה בדבר המחיר הסביבתי של זיהום האוויר, ויספק כלי נוסף לגבי האופן בו ניתן להגביר את כמות המשקעים בארץ המשוועת למים. הצלחת מחקר זה, תקל על הרחבתו לאזור גיאוגרפי רחב יותר ולסוגי מזהמים נוספים.

רשימת מקורות

אבנימלך י., 2006, זיהום אוויר במפרץ חיפה – תמונת מצב והמלצות לפעול. דו"ח המיועד לשר להגנת הסביבה, מוסד שמואל נאמן.

איגוד ערים אזור חיפה-איכות סביבה, מערך תחנות הניטור באזור חיפה, נלקח ב-02/07/2009, מתוך אתר האינטרנט <http://www.envihaifa.org.il/heb/stations.asp>

אפשטיין, מ., 2001, זיהום אוויר ובריאות הציבור בישראל, מרכז השל.

הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, 2008, אוכלוסיה בישובים שמנו מעל 2,000 תושבים ושאר אוכלוסיה כפרית ב-31/12/2008, נלקח ב-02/07/2009 מתוך אתר האינטרנט:

http://www.cbs.gov.il/population/new_2009/table3.pdf

המשרד להגנת הסביבה, 2007, הגורמים המשפיעים על רמת הפליטה מרכב, נלקח ב-02/07/2009, מתוך אתר האינטרנט:

http://www.sviva.gov.il/bin/en.jsp?enPage=BlankPage&enDisplay=vw&enDispWhat=Object&enDispWho=Articals^I3773&enZone=car_pollution

המשרד להגנת הסביבה, מערך ניטור אוויר, נלקח ב-02/07/2009, מתוך אתר האינטרנט:

<http://avir.sviva.gov.il/DocGenerator.asp>

חברת החשמל, 2009, דוחות חודשיים של ניטור איכות אוויר, נלקח ב-02/07/2009, מתוך אתר האינטרנט:

[http://www.israel-](http://www.israel-electric.co.il/bin/ibp.jsp?ibpDispWhat=zone&ibpDisplay=view&ibpPage=I)

[electric.co.il/bin/ibp.jsp?ibpDispWhat=zone&ibpDisplay=view&ibpPage=I&ibpDispWho=EnvMonitoring&ibpZone=EnvMonitoring&](http://www.israel-electric.co.il/bin/ibp.jsp?ibpDispWhat=zone&ibpDisplay=view&ibpPage=I&ibpDispWho=EnvMonitoring&ibpZone=EnvMonitoring&)

עיאדאת, פ., 2007, "חיפה מזוהמת – פחות ממה שחשבתם", הארץ Online, 26 בדצמבר, נלקח ב-02/07/2009, מתוך אתר האינטרנט:

<http://www.haaretz.co.il/hasite/spages/938130.html>

Alpert, P., N. Halfon and Z. Levin, 2008: Does air pollution really suppress precipitation in Israel? *J. Appl.*, 47, 933-943.

Braham, R. R., R. G. Semonin, A. H. Auer, S. A. Changnon Jr., and J. M. Hales, 1981: Summary of urban effects on clouds and rain. *METROMEX: A Review and Summary, Meteor. Monogr.*, 40, Amer. Meteor. Soc., 141-152.

Brodav M. David, 2006: High-resolution spatial patterns of long-term mean Concentrations of air pollutants in Haifa Bay area. *Atmospheric Environment.*, 40, 3653-3664.

- Eagan, R. C., P. V. Hobbs and L. F. Radke, 1974: Particle emissions from a large Kraft paper mill and their effects on the microstructure of warm clouds. *J. Appl. Meteor.*, 13, 535–552.
- Fletcher, N. 1962: *The Physics of Rainclouds*. Cambridge University Press.
- Givati, A. and D. Rosenfeld, 2004: Quantifying precipitation suppression due to air pollution. *J. Appl. Meteor.*, 43, 1038–1056.
- Gunn, R. and B. B. Phillips, 1957: An experimental investigation of the effect of air pollution on the initiation of rain. *J. Meteor.*, 14, 272–280.
- Halfon, N., Z. Levin and P. Alpert, 2009: Temporal rainfall fluctuations in Israel and their possible link to urban and air pollution effects. *Environ. Res. Lett.*, 4.
- Houze, R. A. 1994. *Cloud Dynamics*. Academic Press.
- IPCC Third Assessment Report – Climate Change, 2001, <http://www.ipcc.ch/index.htm>
- Johnson, D. B., 1982: The role of giant and ultragiant aerosol particles in warm rain initiation. *J. Atmos. Sci.*, 39, 448–460.
- Levin, Z. and W. R. Cotton, 2009: *Aerosol Pollution Impact on Precipitation*. Springer.
- Rosenfeld, D., 1999: TRMM observed first direct evidence of smoke from forest fires inhibiting rainfall. *Geophys. Res. Lett.*, 26, 3105–3108.
- Rosenfeld, D., 2000: Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. *Science*, 287, 1793–1796.
- Schaefer, V. J., 1946: The production of ice crystals in a cloud of supercooled water droplets. *Science*, 104, 457–459.
- Teller, A. and Z. Levin, 2006: Effects of aerosols on precipitation and cloud dimension. *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 67–80.
- Twomey, S. and J. Warner, 1967a: Comparison of measurements of cloud droplets and of cloud nuclei. *J. Atmos. Sci.*, 24, 702–703.
- Van Den Heever, S. C. and W. R. Cotton, 2007: Urban Aerosol Impacts on Downwind Convective Storms. *J. Appl. Meteor.*, 46, 828–850.
- Warner, J., 1968: A reduction in rainfall associated with smoke from sugar-cane fires: an inadvertent weather modification. *J. Appl. Meteorol.*, 7, 247–251.
- Warner, J., and S. Twomey, 1967b: The production of cloud nuclei by cane fires and the effect on cloud droplet concentration. *J. Atmos. Sci.*, 24, 704–706.

Yin et al., 2000: Seeding convective clouds with hygroscopic flares: Numerical simulations using a cloud model with detailed microphysics. *J. Appl. Meteor.*, 39, 1460-1472.

נספחים

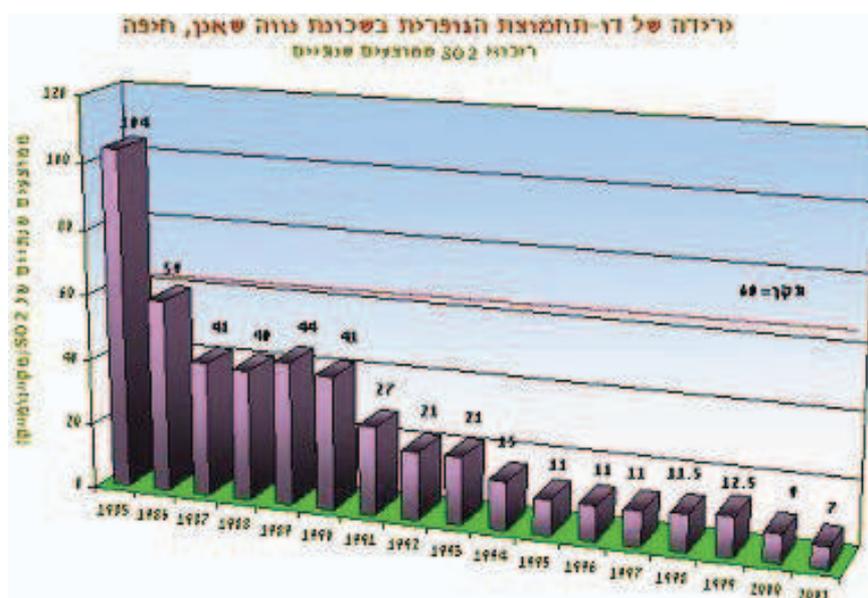
נספח מס' 1

רשויות מקומיות באזור הנבחן. לפי נתוני הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה (הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, 2008):

סוג הרשות	שם	מס תושבים
עירייה	חיפה	265,300
עירייה	קריית אתא	50,000
עירייה	נשר	21,400
עירייה	קריית מוצקין	39,800
עירייה	קריית ים	36,500
עירייה	קריית ביאליק	36,300
עירייה	טירת הכרמל	18,800
מועצה מקומית	קריית טבעון	14,400
מועצה אזורית	זבולון	12,902
מועצה מקומית	רכסים	8,900

נספח מספר 2

ריכוזי הגופרית הדו חמצנית, כפי שנמדדו בנווה שאנן בעשרים השנים האחרונות (אבנימלך, 2006):



נספח מספר 3

א. רשימת תחנות הניטור של איגוד ערים חיפה והסביבה וסיכום הפרמטרים הנמדדים בכל תחנה (איגוד ערים אזור חיפה):

מס'	תחנות הניטור	מיקום	מזהמים נמדדים	פרמטרים מטאורולוגיים נמדדים
1	קריית אתא	רח' הוגו מולר, ביי"ס מקיף רוגוזין	SO_2 , NO_x , CO , O_3 , $PM_{2.5}^*$, PM_{10}^{**}	WS, WD, RH, BPR, SR
2	נשר	רח' ששת הימים		
3	נווה שאנן	רח' הגליל, ביי"ס תל-חי		
4	קריית חיים	רח' דגניה	SO_2 , PM_{10}	WS, WD, TEMP
5	שוק תלפיות	רח' סירקין	SO_2 , NO_x , O_3 , PM_{10}	WS, WD, TEMP
6	אינשטיין	רח' אינשטיין	SO_2	TEMP, WS, WD
7	אחוזה	רח' חורב	SO_2	WS, WD, TEMP
8	קריית מוצקין	רח' החשמונאים, ביי"ס שרת	SO_2	
9	קריית ים	רח' עדולם, ביי"ס המפלסים	SO_2	WS, WD
10	קריית ביאליק	רח' ההגנה	SO_2	WS, WD
11	כפר חסידים	כפר הנוער הדתי, כפר חסידים	SO_2	WS, WD
12	קריית טבעון	ככר בן גוריון, בנין המועצה	SO_2 , NO_x , O_3 , PM_{10}	WS, WD, TEMP
13	ק. שפרינצק	דרך צרפת, ביי"ס רמות	SO_2 , NO_x , O_3	WS, WD
14	קריית בנימין	קריית בנימין, ק. אתא	SO_2 , PM_{10}	WS, WD
15	איגוד (תחנה חדשה)	רח' החרמש 24, ציק פוסט	SO_2 , NO_x , O_3 , $PM_{10}/2.5$, BTX	WS, WD, RH, BPR, PCIP, TEMP
16	תחנה ניידת		SO_2 , NO_x , CO	WS, WD

ב. רשימת תחנות הניטור של חברת החשמל באזור חיפה ופירוט הפרמטרים הנמדדים בכל תחנה (חברת החשמל):

שם התחנה	פרמטרים נמדדים
חוגים	SO_2
כרמל צרפתי	SO_2 , NO_x , O_3 , PM_{10}
פארק הכרמל	SO_2 , NO_x , O_3 , PM_{10}

ג. תחנת הניטור של המשרד להגנת הסביבה. מיקומה ופירוט הפרמטרים הנמדדים בה (המשרד להגנת הסביבה):

שם התחנה	פרמטרים נמדדים
חיפה- שדרות העצמאות	CO , NO_x , PM_{10} , NO , NO_2

משקעים- PCIP; לחץ ברומטרי - BPR; לחות יחסית - RH; כיוון הרוח - WD; עוצמת הרוח - WS חלקיקים נשימים - $PM_{10}/PM_{2.5}$; קרינה סולרית - SR; טמפרטורה - TEMP, גשם - PCIP; גופרית דו חמצנית - SO_2 ; אוזון - O_3 ; חד תחמוצת הפחמן - CO; תחמוצות חנקן - NO_x ; בנזן, טולואן, פארה-קסילן - BTX; דוגם אבק לא רציף - Hi-Vol;

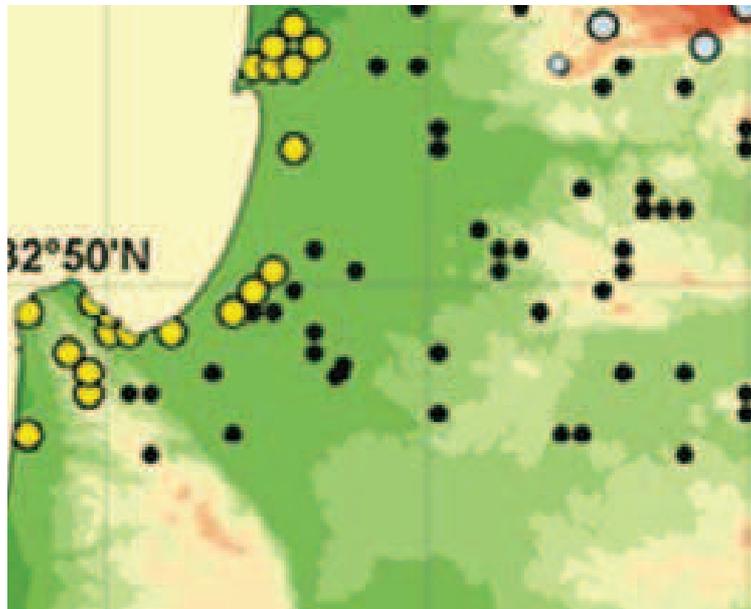
נספח מס' 4

טבלה המתארת את רמת הקשר שנמדד בין המזהמים השונים במפרץ חיפה (Broday, 2006):

	NO	NO ₂	O ₃	PM ₁₀	SO ₂
NO	1.00	0.85	-0.78	0.79	-0.06
NO ₂	0.85	1.00	-0.86	0.69	-0.42
O ₃	-0.78	-0.86	1.00	-0.60	0.07
PM ₁₀	0.74	0.69	-0.60	1.00	-0.17
SO ₂	-0.06	-0.42	0.05	-0.16	1.00

נספח מס' 5

פיזור התחנות המטאורולוגיות באזור המחקר וסביבתו (Halfon et al., 2009):





אוניברסיטת תל-אביב

בית הספר ללימודי הסביבה ע"ש פורטר

מה הם הגורמים המשפיעים
ביותר על ריכוז האירוסולים
הטבעיים במזרח הים התיכון
ובישראל?

הצעת מחקר המוגשת במסגרת קורס פרויקטים באיכות
הסביבה

מגישים : איה לביא, אבי לובצ'יק, אסף הוכמן

תקציר

חוקרים רבים בדקו מה הן ההשפעות של אירוסולים על המערכת האקלימית ועל בריאות האדם. תוצאות מחקרים אלו מראים כי ההשפעה הכימית והפיסיקלית של אירוסולים טבעיים ואנתרופו-גנים על המערכת האקלימית הינה דו קוטבית. בנוסף עלייה בריכוז החלקיקים בסביבה מקושרים למערך שלם של השפעות על בריאות האדם, המתפרשות מגירוי נשמתי והפחתה בתפקודי ריאות ועד למוות.

האירוסולים האנתרופו-גנים והשפעותיהם על האקלים ובריאות האדם הוא תחום נחקר ביותר בשנים האחרונות. פחות תשומת לב מוקדשת לאירוסולים הטבעיים בעוד שריכוזי רקע אלו מהווים בסיס להשפעתם של אירוסולים בכלל, לעומת האירוסולים האנתרופו-גנים ההשפעה של האדם על ריכוזם באטמוספירה קטנה עד לא קיימת כלל. מטרתו של מחקר זה היא לענות על השאלה מה הם הגורמים העיקריים המשפיעים על ריכוז האירוסולים הטבעיים במזרח הים התיכון ובישראל.

על מנת לענות על שאלת מחקר זאת, נעשה שימוש בטכניקה הלקוחה מעולם מכונות הלמידה (Machine Learning). כלומר בחינת היכולת של שילוב גורמים פיסיקליים להסביר את השונות בריכוזי האירוסולים הטבעיים באטמוספירה.

במחקר מקדים שערכנו מצאנו כי הקורלציות שבין מדד ריכוז האירוסולים הטבעיים (AI) ובין מדד הבצורת (PDSI), הלחץ בפני השטח (SLP) ולחץ אדי המים בפני השטח במזרח הים התיכון וישראל משתנה כתלות בזמן ובמרחב (קורלציות אלו מגיעות לרמה של $0.7 < p < 0.1$). ממצא זה מצביע כי התהליכים הפיסיקליים בתחום זה עדיין אינם ברורים לחלוטין. כמו כן נראה כי הגורמים אותם בחרנו לבחון הם אכן דומיננטיים ומעניין יהיה לראות עד כמה שילובם במודל סטטיסטי מצביע על היותם הגורמים החשובים ביותר בהשפעתם על ריכוז האירוסולים הטבעיים באזורינו.

תוכן

4	.....מבוא	
5	..... 1 סקירת הרקע המדעי	
5	..... 1.1 שינוי אקלים	
5	..... 1.2 השפעה על בריאות האדם	
6	..... 1.3 פרוט סוגי האירוסולים הטבעיים	
6	..... 1.3.1 אירוסולים של מלח ים (SSA-Sea Salt Aerosols)	
7	..... 1.3.2 אירוסולים מינראליים-אבק מדברי (Mineral Aerosols)	
7	..... 1.3.3 פירוט של טווח הגדלים של חלקיקים	
8	..... 1.3.4 אירוסולים קטנים ($r_{80} \leq 1\mu m$)	
8	..... 1.3.5 אירוסולים בינוניים ($1\mu m \leq r_{80} \leq 25\mu m$)	
8	..... 1.3.6 אירוסולים גדולים ($25\mu m \leq r_{80}$)	
9	..... 1.3.7 גורמים המשפיעים על ייצור, סחיפה, העברה והסרת אירוסולים	
13	..... 1.4 שאלת המחקר	
13	..... 1.5 חשיבות המחקר	
14	..... 2 נתונים	
17	..... 3 שיטות	
17	..... CORRELATIONS & TELE-CONNECTIONS	3.1
17	..... FEATURE SELECTION – REDUCTION OF DIMENSIONALITY	3.2
17	..... MACHINE LEARNING ALGORITHM	3.3
18	..... CROSS- VALIDATION	3.4
19	..... 4 תוצאות ראשוניות	
22	..... 5 סיכום	
23	..... 6 מקורות	

מבוא

הים התיכון, הינו אזור הכלוא כמעט באופן מוחלט ע"י הרים. אזור זה בעל חשיבות מיוחדת בגלל היותו "צומת דרכים" של אירוסולים טבעיים (אבק מדברי ומלח ים) ואירוסולים אנתרופוגניים ממקורות שונים (זיהום תעשייתי, צפיפות אוכלוסין גבוה ועומסי תחבורה). בעוד יש מספר רב של מאמרים העוסקים באירוסולים אנתרופוגניים באזור הים התיכון, מעט מחקרים עוסקים באירוסולים הטבעיים באזור זה (Quinn et al., 2000 2007, Zakey et al., 2008).

מספרם המועט של מחקרים בתחום האירוסולים הטבעיים נובע משתי סיבות עיקריות: מגמות מחקריות הנוטות אל תחומי ההשפעה של האירוסולים האנתרופוגניים, היכולת האנושית להשפיע על ייצור האירוסולים שאינם טבעיים לעומת הטבעיים. במחקר זה אנו מציעים להתמקד באירוסולים הטבעיים מכיוון שריכוזי הרקע של אירוסולים אלו מהווים בסיס להשפעתם של אירוסולים בכלל, ומכאן חשיבותם הרבה.

מטרת מחקר זה לבחון מה הם הגורמים העיקריים המשפיעים על ריכוז האירוסולים הטבעיים במזרח הים התיכון ובישראל.

1 סקירת הרקע המדעי

נוכחותם של חלקיקי אירוסולים באטמוספירה ידועה בשתי סוגיות סביבתיות עיקריות: שינויי אקלים והשפעת האירוסולים על בריאות האדם. האירוסולים משפיעים על שינוי האקלים באופן ישיר ע"י פיזור ובליעה של קרינה סולרית וקרינת קרקע. באופן לא ישיר הם משנים את טיפות הענן, אופן פיזור האלבדו, זמן החיים של הענן ואת המשקעים.

1.1 שינוי אקלים

מחקרים שנעשו מראים שמעל שטח האוקיינוס, אירוסולים של מלח ים הינם האירוסולים האפקטיביים ביותר בפיזור קרינה סולרית (Murphy et al. 1998, Quinn and Coffman 1999). אפקטים אלו מובילים לשינויים במאזן האנרגיה של האטמוספירה ובסופו של דבר גורמים לשינויי אקלים (Guelle et al., 2001).

1.2 השפעה על בריאות האדם

ההשפעה הסביבתית הנוספת היא ההשפעה על בריאות האדם. חלקיקי אירוסולים יכולים להישאף לעומק הריאות וכך עלולים לפגוע בבריאות האדם. חשיפה לזיהום אוויר חלקיקי מוגדרת כמסוכנת ביותר לבריאות הציבור, ואף נמצאה כגורם לעודף תמותה במחקר שנערך בשש בארה"ב ערים בין השנים 1974-1989 (Dockery, 1993). חדירת החלקיקים למערכת הנשימה, על חלקיה השונים, יכולה לגרום לתופעות בריאותיות שונות. בטווח הקצר – פגיעה בתפקודי ריאה והתקפי אסטמה ואלרגיה. בטווח הארוך – תחלואה באסטמה ואלרגיה, ירידה בפוריות, עלייה בשיעורי הפלות ספונטאניות, עלייה בתמותה פתאומית, ובתמותה ממחלות לב-ריאה (קרסנטי, 2004). בנוסף, שטח הפנים של האירוסולים גדול יחסית, ומאפשר ספיחת חומרים שונים על גביהם. עובדה זו גורמת לסינרגיזם – השפעת מזהם אחד מחריפה בשילוב עם מזהם אחר. כך לדוגמה נמצא כי חשיפה לחלקיקים ולאבקנים גורמת להחרפת סימפטומים של אסטמה (Zhong et al, 2006).

המקורות העיקריים של PM_{10} הם טבעיים – אבק, רסס מי ים, אבקנים וחומר חלקיקי הנפלט מהרי געש. לעומתם, המקורות העיקריים של $PM_{2.5}$ הם אנטרופוגניים. חשיפה לרמות גבוהות של חלקיקים נשימים (PM_{10}) גורמת לעליה בשיעורי התמותה הפתאומית באוכלוסיות רגישות, ולהחמרה במצבם של חולי לב ריאה. חשיפה לחלקיקים לטווח ארוך גורמת לעלייה בתחלואה נשימתית ופגיעה במערכת החיסון. נמצא כי עליה של $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ בריכוזי PM_{10} מביאה לעליה במחלות דרכי הנשימה התחתונות בקרב ילדים. (קרסנטי, 2004)

במחקר שנערך בשנת 2002 גלר ושותפיו בדקו את הזיהום החלקיקי - בחוץ (outdoor) ובפנים (Indoor) במדבריות קליפורניה. אזור מדברי מאופיין בזיהום PM_{10} , ולכן צפוי היה שריכוזים גבוהים ימצאו בחוץ. אך נמצאו ריכוזים גבוהים גם של $PM_{2.5}$ בתוך הבית (indoor) שמקורם בפעולות כמו

בישול וניקיון (Geller et al., 2002). באנליזה שביצעו לגודל החלקיקים נמצא כי הריכוזים הגבוהים הם של חלקיקים שגודלם נע בין $2.5\mu\text{m}$ ל- $10\mu\text{m}$, כלומר PM_{10} . עובדה זו מחזקת את הקשר בין PM_{10} לשיעורי תמותה ותחלואה.

1.3 פרוט סוגי האירוסולים הטבעיים

קיים מגוון של אירוסולים אטמוספריים; אירוסולים אנתרופגנים (הנוצרים מפעילות אדם) PM , סולפט וכו', ואירוסולים טבעיים כגון אבק מדברי, אבק מרחף ואירוסולים של מי ים.

1.3.1 אירוסולים של מלח ים (SSA-Sea Salt Aerosols)

אירוסולים של מלח ים נוצרים בעיקר על-ידי פעילות הרוח. לחץ הרוח על פני הים יוצר גלים, אשר חלקם נשברים הנושאים אוויר לעומקים שונים. באופן הזה הנוצרות עולות לפני השטח, יוצרות קצף ופרץ של טיפות מלח המוזרקות ישירות לאטמוספירה. בנוסף לכך כאשר יש רוח חזקה הטיפות נקרעות באופן ישיר מפסגות הגלים.

מרגע שנוצרו האירוסולים, חלק מהטיפות, תלוי בגודלם ובמצבם המטאורולוגי (בעיקר מהירות הרוח והלחות היחסית), עולים כלפי מעלה ע"י מערבולות טורבולנטיות, בעוד אחרים נופלים בחזרה לים.

חשיבותם של אירוסולים של מלח ים הוא מסיבות מגוונות:

- משמשים ליצירת גרעני התעבות בענני טיפות.
- משמשים לחילוף גזים באטמוספירה ומבצעים ריאקציות כימיות.
- אחראים על פיזור אור.
- מחליפים לחות עם האטמוספירה.

החשיבות בקבלת גודל מדויק של אירוסולים הוא להבנת התפתחות תהליך ספציפי באטמוספירה ותלוי בגודלם, ריכוזם של החלקיקים, זמן הישארותם הממוצע באטמוספירה ובשיעור ערבובם באופן וורטיקאלי.

אירוסולים ימיים (Marine Aerosols), האירוסולים הנוצרים בשכבת הגבול הימית, מורכבים ממגוון רחב של קומפוננטים אשר חלקם טבעיים וחלקם אנתרופוגנים. מכיוון שכ-2/3 משטחו של כדור הארץ מכוסה באוקיינוסים, לאירוסולים הימיים יש השפעה גדולה על מגוון תהליכים גיאוכימיים וגיאופיזיקאליים באקלים של כדור הארץ.

הרדיוס של אירוסולים אלה נע בין חלקיקים קטנים מ- $0.1\mu\text{m}$ עד לגדולים מ- $1000\mu\text{m}$. אירוסולים של מלח ים הינם מרכיב חשוב מהאירוסולים הימיים ובד"כ נהוג לייחס להם חלק דומיננטי. בנוסף לכך האירוסולים של מלח ים הינו אחד מהתורמים העיקריים של חלקיקים מרחפים באטמוספירה כאשר מעריכים את קצב הפליטה השנתי בין $0.3 \cdot 10^{12} \text{ kg}$ ל- $30 \cdot 10^{12} \text{ kg}$ (Lewis and Schwartz, 2004).

1.3.2 אירוסולים מינראליים-אבק מדברי (Mineral Aerosols)

תשומת הלב מכוונת לאבק המדברי בשל היותו גורם סביבתי פעיל. הוא משמש כגורם הפועל נגד התחממות האטמוספירה ונגד שינויים באקלים ובמזג האוויר שנובעים מעליית גזים באטמוספירה.

האבק המדברי נוטה לקרר את האטמוספירה לפני השטח מאחר שהוא מחזיר חלק מקרינת השמש חזרה אל החלל. בנוסף לכך, הוא משפיע גם על העננות ועל המשקעים. בדומה לחשיבותם של האירוסולים של מלח ים כך גם חשיבותם של האירוסולים המינראליים כמו פיזור האור, ריאקציות כימיות באטמוספירה, מעברי קרינה ועוד.

במהלך השנים האחרונות, נעשו מספר רב של מאמצים בניסיון לשפר את חיזוי האירוסולים הטבעיים. המחקרים הראשונים נעשו ע"י Monahan et al (1986) ו-Smith et al. (1993) והם שופרו עוד יותר ע"י Andreas (1998), Gong (2003) וחוקרים נוספים. שיטות נוספות של מדידה וגישות של פרמטריזציות פותחו ע"י Reid et al. (2003) אשר השתמשו במטוס מדידה בבניית השיטה למציאת הריכוזים ו-Petelski et al. (2005) הציע למדוד את גרדיאנט הריכוזים בים הבלטי ופיתח פרמטריזציה של הפליטות המבוסס על מהירות הרוח בפני הקרקע וגובה גלים סיגנפיקנטיים (משמעותיים-Significant). כמה מהמאמצים האחרונים התמקדו במודלים גלובלים של פיזור אירוסולים ומחקרים על איכות האוויר. ההשפעות על מקורות היווצרות האירוסולים במודלים גלובלים נחקרו ע"י Guelle et al. (2001).

חלקיקים עם $r_{80} \sim 0.1 \mu m$ מתרחשים בריכוזים אשר ניתנים למדידה ומהווים תפקיד במגוון של תופעות אטמוספריות. (r - מייצג את הרדיוס האווירודינמי של האירוסול). לפיכך הגבול התחתון המעשי של טווח הגדלים של חלקיקים אלו לרוב יילקח $r_{80} \approx 0.1 \mu m$. בגבול העליון, למרות שחלקיקי האירוסולים r_{80} עד למספר מאות מיקרו-מטר ייווצרו הטיפות הגדולות. שיקולים אלו מאפשרים לפשט את ההנחות להתנהגות חלקיקי אירוסולים ולהגביל את טווח הגדלים אשר מחויבים להתייחסות בעת בחינת מאפיינים פיסיקאליים, קינמטיים ודינמיים של חלקיקי אירוסולים (Lewis and Schwartz, 2004).

1.3.3 פירוט של טווח הגדלים של חלקיקי

מתוך השיקולים של מספר גורמים הכוללים; שקיעה יבשה, זמן הישארות באטמוספירה, ריכוזים וגרדיאנט הזרמים הקרובים לשטח פני הים, זמן תגובה בהתייחסות ל-RH ומהירות הרוח נהוג לחלק את החלקיקים ל-3 טווחים המבוססים על התנהגותם באטמוספירה ועל חשיבותם בזרמים.

שלושת הגדלים הללו הם :

$$\begin{aligned}r_{80} &\leq 1\mu m \\1\mu m &\leq r_{80} \leq 25\mu m \\25\mu m &\leq r_{80}\end{aligned}$$

הגבולות של טווח זה אינם צריכים להתקבל כגבולות קבועים, לדוגמא הגבול העליון של הטווח האמצעי הינו ללא הסכמה בקרב החוקרים ויכול להיות מ- $25\mu m - 40\mu m$. בכל אופן, גבולות אלו כאשר הם תלויים במספר נתונים מטאורולוגיים, מקבלים ערכים ברורים.

1.3.4 אירוסולים קטנים ($r_{80} \leq 1\mu m$)

אירוסולים קטנים הינם דומיננטיים בריכוז ובוזרמים של כמות האירוסולים ולהם תרומה מכרעת אך, תרומתם לריכוז האירוסולים בשטח הפנים ובנפח שלהם הינה הרבה פחות משמעותית (מוצג בטבלה מס' 1). גודל התלות בין הזרמים והריכוזים של חלקיקים קטנים אלו אינה ידועה מספיק, אבל הגודל אינו שיקול חשוב בהשפעות הנגרמות על-ידי התהליכים הנוצרים מחלקיקים אלו.

הגררויטציה משחקת תפקיד קטן בתנועה של חלקיקים אלו; לדוגמא, לחלקיקי אירוסולים בעלי רדיוס של $1\mu m$ דרוש כמעט יום שלם על-מנת לבצע נפילה של $10m$ באוויר רגוע. לכן נצפה לראות אירוסולים כאלו פזורים באופן אחיד והומוגני מעל שכבת הגבול הימית.

1.3.5 אירוסולים בינוניים ($1\mu m \leq r_{80} \leq 25\mu m$)

חלקיקים אלו מספקים את התרומה המשמעותית ביותר הן לריכוז והן ולזרמים האפקטיביים של אירוסולים בפני השטח ובנפח. לכן חלקיקים אלו הם החשובים ביותר ליישומים המעורבים בפזור אור. לדוגמא, כאשר יש עלייה בשיעור ה- r_{80} , הגררויטציה הופכת להיות יותר משמעותית בתנועה ובזמן החיים של חלקיקים אלו, והשפעת האירוסולים בייצור הזרמים הופכות ונהיית פחות מאשר הממשק של האירוסולים ביצירת הזרמים.

1.3.6 אירוסולים גדולים ($25\mu m \leq r_{80}$)

חלקיקים אלו מספקים את התרומה המשמעותית ביותר לזרמי האירוסולים של הלחות, המומנטום והחום הכמוס והמוחשי בין האוקיינוס והאטמוספירה. הגררויטציה משחקת תפקיד חשוב ביותר בשליטת התנועה של חלקיקים אלו, כתוצאה מגרדיאנטים ורטיקאליים של הריכוז, מוגבל העירוב האופקי וזמן ההישארות באטמוספירה הינו קצר ביותר. טבלה 1 מסכמת את תכונות האירוסולים לפי גודלם.

תכונה	קטן	בינוני	גדול
$r_{80} \mu m / range$	$\sim 0.1 - \sim 1$	$\sim 1 - \sim 25$	≥ 25
חשיבות אטמוספרית	גרעיני התעבות, כימיה אטמוספרית	כימיה אטמוספרית, פיזור אור	זרמים של חום מוחשי וכמוס
התרומה דומיננטית ל:	ריכוז	ריכוז של שטח פני הים, נפח ומסה	ממשק של זרמים של שטח פני הים, נפח ומסה
הגבה ללחות יחסית (RH)	$\leq 0.1 s$	$0.1 s to 50 s$	$\geq 50 s$
הגבה למהירות הרוח	$\leq 3 \cdot 10^{-5} s$	$\sim 3 \cdot 10^{-5} s to \sim 0.02 s$	$\geq 0.1 s$
השפעת הגרוויטציה	זניח	חשוב	דומיננטי
גרדיאנט הריכוזים האופקי	זניח	קטן	גדול מאד
מנגנון השקיעה העיקרי	שקיעה רטובה	שקיעה יבשה	גרוויטציה
גובה העירוב	כל שכבת הגבול הימית	משתנה באופן משמעותי עם r_{80}	מספר מטרים מעל גובה פני הים
זמן הישארות באטמוספירה	בין ימים לשבועות	בין דקות לימים	שניות

טבלה 1. סיכום תכונות האירוסולים לפי גודלם

1.3.7 גורמים המשפיעים על ייצור, סחיפה, העברה והסרת אירוסולים

כאשר בוחנים את התהליכים המשפיעים על יצירת אירוסולים בפני הים ואירוסולים מינראליים והעלתם לתוך האטמוספירה, ניתן לחשוב על מספר גורמים העלולים להשפיע על יצירתם, העברתם והסרתם של אירוסולים המושפעים על-ידי תהליכים מטאורולוגים או סביבתיים. גורמים אלו יכולים להשפיע על מאפייני האוקיינוס והקרקע, שבירת הגלים או על רמת טורבולנציה בפני הים ובפני השטח. בנוסף לכך כל פקטור המסוגל להשפיע על יצירתם והעברתם של האירוסולים עלול להשפיע גם על ריכוזם ומאפייניהם של האירוסולים. גורמים אלו הם מושא מחקר זה. אנו מציעים לבחון האם גורמים אלו הם אכן הגורמים הדומיננטיים

בהשפעה על ריכוז האירוסולים הטבעיים במזרח הים התיכון וישראל (Lewis and Schwartz, 2004).

מהירות הרוח

הגורם העיקרי ביצירת מעגל האירוסולים היא הרוח. הרוח היא הגורם העיקרי בשבירת גלים, ביצירת קצף וכתוצאה מכך גורמות לבעות ליצור טיפות פילים ונתז. הרוח היא הגורמת לקריעת הגל ביצירת טיפות רסס. הרוח היא גם הגורמת לכניסתם כלפי מעלה של האירוסולים לתוך האטמוספירה ושולטת על תנועתם. בנוסף הרוח מהווה את הכלי העיקרי להעלאת אירוסולים מינראליים מפני השטח באזורים מדבריים. בדרך כלל מהירות הרוח המדווחת הינה הממוצע של מהירות הרוח בגובה של 10 מטר מעל פני הקרקע, U_{10} ובהתאמה לכך U_5 מתייחס לגובה של 5 מטר מעל פני הקרקע.

הרוח מעל האוקיינוס מאופיינת בשונות רבה. הרוח הממוצעת מעל האוקיינוס נעה בין $5 m s^{-1}$ ל- $10 m s^{-1}$ תלוי בגובה ובעונה, כאשר טווח המהירויות (ולא הממוצע) הוא $3-12 m s^{-1}$. בדרך כלל ניתן להניח כי הרוח הממוצעת ידועה היטב ונמדדת בקלות יחסית, אך למעשה הרוח נמדדת ממגדלים, מצופים, ספינות או מטוסים ומדידות אלו לפעמים קשות לביצוע. אע"פ שהרוח הינה אחד הגורמים המשפיעים ביותר בתהליך ייצור האירוסולים, ואע"פ שמדידות מסווגות את הרוח ע"י מהירות רוח ממוצעת במקום ובזמן המדידה, הדבר ברור שמהירות הרוח לבדה אינה מספקת על-מנת לקבוע ולאפיין את תהליך היווצרות האירוסולים, ופקטורים נוספים עלולים ואכן משפיעים על היווצרות האירוסולים.

משקעים

טיפות גשם הנופלות על הים יכולות תחת תנאים מסוימים לייצור אירוסולים באופן ישיר כתוצאה מנפילתם לאוקיינוס ולפני הקרקע. טיפות גשם יכולות גם ליצור אירוסולים באופן לא ישיר ע"י סחיפה של בעות ולאחר מכן הן עולות לפני הים. הגשם יכול להיות בעל השפעה גדולה על ריכוז האירוסולים באוויר. מעבר ליכולתו של הגשם לתרום להיווצרות האירוסולים, במקרים רבים הוא יכול להשפיע על שקיעתם של אירוסולים. אירוסולים של מלח ים ואירוסולים מינראליים באופן יעיל יוצאים מהאטמוספירה על ידי שקיעה רטובה (wet deposition). הם משמשים כגרעיני התעבות של ענני גשם, אשר יכולים כתוצאה מכך להיות מוסרים במשקעים או על-ידי שקיעה גרוויטציונית או על-ידי יירוט ונפילה הידרו מטריית (פגיעה ישירה של הגשם באירוסול הגורמת לשקיעתו חזרה לפני הקרקע). לכן אחרי אירוע גשם אינטנסיבי וממושך, ריכוז האירוסולים בגודל נתון יהיה נמוך באופן משמעותי מאשר קודם לכן.

לחות יחסית

הלחות היחסית, היחס בין לחץ אדי המים ללחץ האדים ברוויה של מים בטמפרטורת הסביבה, משפיע על הגודל הפיזיקאלי, הצפיפות והמסה של האירוסולים הטבעיים. לכן הלחות היחסית משפיעה על הריכוז של תמיסה זו בטיפות מלח ים ובצפיפות האוויר ביכולת להסיע

אירוסולים מינראליים ועל ההתנהגות של טיפות אלו באטמוספירה. התלות בכמות הלחות היחסית חשוב כתוצאה ממדידות שמוצאות את הגודל הפיזיקאלי של האירוסול. בנוסף לכך המהירות הסופית של אירוסולים עם רדיוס נתון של r_{80} תלוי בלחות היחסית- המהירות הסופית של אירוסול בשווי משקל של 95% לחות היא כמעט פי שניים ממהירות סופית של אירוסול ב- 80% לחות.

טמפרטורת פני הים והאוויר

טמפרטורת הים מגדירה את הצמיגות הקינמטית של מלח ים וכך יש לו אפקט על מהירות העלייה של הבועות; זה משפיע על שיעור חילוף הגזים בין הבועה והסביבה הנוזלית שלה וכך על מספר וגודל הפיזור של הבועות המגיעות לפני הים; זה משפיע על אופי התפרצות הבועות וכך גם על תהליך היווצרות הטיפות. כך שטמפרטורת הים מהווה תפקיד גדול בממשק היצירה של זרמים של אירוסולים.

היציבות האטמוספרית והעירוב המכאני של האטמוספירה מעל הים מושפע בעיקר מההבדל בין טמפרטורת האוויר לטמפרטורת הים. לפיכך טמפרטורה זו מהווה תפקיד חשוב ביכולת העלאת אירוסולים לתוך האטמוספירה (Lewis and Schwartz, 2004).

עוצמת הבצורת

בנוסף על כל הפרמטרים שצוינו לעיל אנו מציעים לבחון האם עוצמת הבצורת היא יכולה להוות את אחד הגורמים המשפיעים על ריכוז האירוסולים הטבעיים.

חוקרים רבים הקדישו מזמנם על מנת לבדוק מה הן ההשפעות של אירוסולים על המערכת המטאורולוגית והאקלימית כאחד (Alpert et al 2008, Givati and Rosenfeld 2004). תוצאות מחקרים אלו מראים כי ההשפעה הכימית והפיזיקלית של אירוסולים טבעיים ואנתרופוגנים הינה דו קוטבית. מצד אחד ישנם מחקרים המראים כי האירוסולים מגבירים את כמויות המשקעים, ומנגד מחקרים המראים את ההפחתה בכמות המשקעים. רובם המוחלט של המחקרים עוסק בהשפעתם של האירוסולים על האקלים. חלק קטן יותר בודק מה יהיו ההשפעות של אקלים משתנה על עומס החלקיקים. אחת ההיפותזות הרווחות מציינת כי אירועי בצורת קיצוניים מורידים את רמות הלחות בקרקע ובכך מספקים חומר מרחף נוסף שעלול להשפיע כלולאת משוב על האקלים ובנוסף על כך גם על איכות האוויר (Rosenfeld et al., 2001).

בצורת היא סיכון טבעי שמקורו בתנודות אקלימיות טבעיות. למרות שיש לבצורת הגדרות רבות, תופעה זאת נובעת מחוסר הכשירות של המשקעים בכמות, בעוצמה ובתזמון. חוסר כשירות זאת גורמת למחסור במים לפעילויות שונות של אדם קבוצה או סקטור. נובע מהגדרתה של הבצורת כי ההתייחסות היא לממוצע ארוך טווח של המאזן בין משקעים (Precipitation) והתאדות (Evapo-transpiration).

באזורים רבים בעולם נמצא כי גורמים אקלימיים נוספים משפיעים על חומרת הבצורת בהם: טמפרטורות גבוהות, רוחות חזקות, לחות יחסית נמוכה וזיהום אויר. כמו-כן אין להתייחס לבצורת כאירוע פיסי לבדו אלא כאירוע שמקורו ביחסי הגומלין בין חוסר הכשירות של המשקעים והשינויים בצריכה של משאב המים (Paulo and Pereira 2006).

ישנן מספר הגדרות אופרטיביות לבצורת שמטרתן אפיון חומרת הבצורת. הגדרות אלו מקורן בדיסציפלינות העוסקות בתחום זה: (1) **הגדרה מטאורולוגית** – חוסר חמור במשקעים יחסית לממוצע ארוך טווח. הגדרה זאת כמובן צריכה להתחשב במשטר הגשמים באזור הנבדק, שכן השונות בתנאים המטאורולוגיים גדולים בין אזור לאזור. (2) **הגדרה הידרולוגית** – ההשפעה של חוסר חמור במשקעים על כמויות המים העיליים וכמויות המים בתת הקרקע. (3) **הגדרה חקלאית** – ערעור חמור של יחסי הגומלין בין הדרישה של הסקטור החקלאי למים ובין היכולת של המשקעים ורמת הלחות בקרקע לספק דרישה זאת (Hisdal and Talaksen 2000).

הסקטור החקלאי הוא הראשון להיפגע מבצורת בשל התלות החזקה שלו בלחות הקרקע. במידה והמחסור נמשך לאורך זמן הבצורת עלולה לפגוע באזור מסוים כלכלית, חברתית וסביבתית.

אחת מהפגיעות הסביבתיות האפשריות היא העלייה בכמויות האירוסולים הטבעיים בהם אבק, חול, ומלח ים. במחקר זה נבדוק האם הבצורת היא אחד הגורמים החשובים המשפיעים על כמויות האירוסולים הטבעיים במזרח הים התיכון וישראל, זאת תוך שימוש באינדקס הבצורת Palmer Drought Severity Index (PDSI).

מטרתם של אינדקסים של בצורת היא לשלב בין אלפי פיסות מידע לגבי התנאים המטאורולוגיים וההידרולוגיים, ולתת תמונה כללית ומובנת יותר של עוצמת בצורת או תקופה רטובה. בד"כ אינדקסים אלו מספקים מספר יחיד שהוא הרבה יותר שימושי למקבלי החלטות ולמדענים מאשר כמויות של מידע גולמי. למרות שישנם אינדקסים רבים אף אחד מהם לא נחשב טוב מהאחרים. לכל אחד מהאינדקסים הקיימים יש יתרונות וחסרונות, ולכן הבחירה למחקר זה או אחר צריכה להיות על פי היתרונות של אינדקס מסוים על פני האחרים למטרות המחקר הספציפי (Heim et al 2002).

במחקר זה בחרנו להשתמש ב-Palmer Drought Severity Index (PDSI). מטרתו של אינדקס זה הינה לחשב את התנודות בתנאי לחות הקרקע ולנרמל תנאים אלה על מנת שניתן יהיה להשוות בין אזורים שונים ובין חודשים שונים והוא מבוסס על משוואת מאזן המים. הנתונים הגולמיים של אינדקס זה הם: המשקעים, הטמפרטורה וה- Available Water Capacity (AWC). באמצעות אלה ניתן להסיק את כל הפרמטרים במשוואת מאזן המים בהם: ה- Runoff, Soil Recharge, Evapo-Transpiration, ואיבוד הלחות מפני הקרקע. ההשפעות האנושיות על הקרקע לא מחושבות באינדקס זה (Dai et al 2004). אנו בחרנו באינדקס זה, מכיוון שהלחות בפני הקרקע היא כנראה הגורם המכריע ביותר ליצירת תנאים לשחרור של אירוסולים טבעיים אל האוויר. בנוסף על כך מכיוון שה-PDSI הוא הוותיק והשמיש ביותר מבין האינדקסים הקיימים, ניתן יהיה לעשות באמצעותו ניתוחים סטטיסטיים תקפים ולהשוות את התוצאות של מחקר זה למחקרים אחרים באזורים אחרים בעולם. בנוסף על כך אי התחשבותו של האינדקס בהשפעתו של האדם מאפשרת לנו לבדוד את פוטנציאל האירוסולים הטבעיים שישתחררו לאוויר כתוצאה מתנאי בצורת משתנים.

1.4 שאלת המחקר

מה הם הגורמים העיקריים המשפיעים על ריכוז האירוסולים הטבעיים במזרח הים התיכון ובישראל?

1.5 חשיבות המחקר

השפעת האירוסולים הטבעיים הינה גדולה, הן מבחינת השפעותיהם הבריאותיות והן מבחינת השפעותיהם האקלימיות. מכיוון שאירוסולים טבעיים מושפעים בעיקר מפרמטרים מטאורולוגיים-פיסקאליים (בניגוד לאירוסולים אנתרופגניים המושפעים מפעילות אנושית), בחינת פרמטרים אלו תביא להבנת התהליכים הטבעיים המשנים את ריכוז האירוסולים. בעזרת השיטות המוצעות במחקר זה ננסה לבחון מהם הפקטורים העיקריים המשפיעים על ריכוז האירוסולים הטבעיים באטמוספירה, לפרמטרים שונים חשיבות שונה ביכולתם לשנות את ריכוז האירוסולים בטבע, כך לדוגמא; כמות המשקעים מהווה פקטור מרכזי בשינוי ריכוז האירוסולים לעומת טמפרטורת פני הים. אחד ההסברים המוצעים להבדלים אלו הוא גורם הווריאביליות (גורם השוני - Variability). כמות המשקעים באגן הים התיכון בכלל, ובישראל בפרט משתנה באופן משמעותי בין אזור אחד לאזור אחר, ואף משתנה בתוך אותו אזור בין תקופה אחת לאחרת (קיץ וחורף לדוגמה). מאידך טמפרטורת פני הים כמעט וזהה באופן מוחלט בכל אגן הים התיכון ומשתנה באופן הדרגתי מאד בין עונה לעונה. לכן, ההשלכות של כמות המשקעים מהווה פקטור חשוב בהשפעותיה על ריכוז האירוסולים לעומת טמפרטורת פני הים. בעבודה זו נעמוד על הבדלים אלו בין הפקטורים השונים. בעזרת מחקר זה ניתן יהיה בעתיד לבחון מהם הפקטורים שיש להכניס למודלים נומריים-אטמוספריים, המחשבים את ריכוז האירוסולים הטבעיים. בנוסף ניתן יהיה לבחון באופן מעשי כיצד שינויים בפרמטרים מסוימים משפיעים על השלכות בריאותיות ביחס ישיר לריכוז האירוסולים באטמוספירה. בעתיד מחקר ספציפי באזור מוגדר וברזולוציה גבוה יסתמך על תוצאות מחקר זה בבואו להחליט באיזה פרמטרים להתמקד בהשפעה על ריכוז האירוסולים הטבעיים.

2 נתונים

בפרק זה יוצגו הנתונים בהם נשתמש. כאמור, ריכוזי האירוסולים המתקבלים מושפעים ממספר רב של גורמים ומטרת מחקר זה היא למצוא מי הם הגורמים העיקריים בהשפעה על הריכוזים הסופיים. לשם כך, נשתמש בנתוני עוצמת הבצורת (PDSI), כיסוי הצמחייה (NDVI), ממוצעי לחץ פני הים (SLP), לחץ אדי המים, ממוצעי טמפרטורת פני הים והאוויר, וממוצעי המשקעים. את הנתונים הללו נייחס לנתוני אינדקס האירוסולים, כפי שיפורט בפרק השיטות, החל מ-1979 עד שנת 2000.

סדרת הנתונים הראשונה המייצגת את ריכוז האירוסולים הטבעיים (כדוגמת אבק, עשן ואפר וולקני) היא רשומת נתוני ה-Toms Aerosol Index (AI) הרשומה מכסה את תקופת הזמן שבין ינואר 1979 ואפריל 1993 ובין יולי 1996 ועד דצמבר 2000. ה-AI הוא מדד לכמה קרינת UV הוחזרה, מאטמוספירה המכילה אירוסולים, כתלות באורך הגל. ההגדרה הכמותית למדד זה ניתנת בנוסחה: $AI = 100 \ln[Im360/Ic360]$ כאשר Im360 היא הקרינה הנמדדת על ידי ה-Toms באורך גל של 360nm ו-Ic360 היא הקרינה המחושבת לאטמוספירה בפיזור ריילי. ברוב התנאים האטמוספריים המדד הוא חיובי לאירוסולים בולעי קרינה ושלילי לאירוסולים מפזרי קרינה. בכל 8 שניות מתקבלות 35 מדידות. כ-200,000 קריאות יומיות מכסות כמעט כל נקודה על פני כדור הארץ. קבצי הנתונים עבור מדד זה הם ברזולוציה מרחבית של 1° על 1° מעל הימים והיבשות, ובסקאלת זמן חודשית (Torres et al 1998, 2002).

סדרות הנתונים אותם נציג בשורות הבאות הן הגורמים אותם אנו מעוניינים לבחון כגורמים המשפיעים ביותר על ריכוז האירוסולים הטבעיים במזרח הים התיכון וישראל. הרשומה שתייצג את עוצמת הבצורת במחקר זה היא ה-Palmer Drought Severity Index (PDSI). רשומה זאת מכסה את השנים 1870-2003 ברזולוציה מרחבית של 2.5° על 2.5° ובסקאלת זמן חודשית. ה-PDSI הוא מדד לסטייה של היצע הלחות האטמוספרית, והביקוש ללחות זאת בקרקע. באופן תיאורטי ה-PDSI הוא מדד מנורמל הנע בין 10 (מאוד לח) ל-10 (מאוד יבש) המאפשר השוואה בין אזורים שונים בעולם, ועל כן יתרונו הגדול (טבלה 2). כמו כן מדד זה הינו מהותיים שבמדדי הבצורת ולכן ניתן יהיה להשוות תוצאות מחקר זה למחקרים רבים אחרים שנעשו באמצעותו. תאור מפורט של המדד מופיע ב-Palmer (1965), Alley (1984) ו-Karl (1986).

Palmer Classifications	
4.0 or more	extremely wet
3.0 to 3.99	very wet
2.0 to 2.99	moderately wet
1.0 to 1.99	slightly wet
0.5 to 0.99	incipient wet spell
0.49 to -0.49	near normal
-0.5 to -0.99	incipient dry spell
-1.0 to -1.99	mild drought
-2.0 to -2.99	moderate drought
-3.0 to -3.99	severe drought
-4.0 or less	extreme drought

טבלה 2 – קטגוריות אינדקס הבצורת על פי Palmer (Palmer 1965).

גורם נוסף אותו אנו מעוניינים לבחון הוא הכיסוי הצמחי. נתונים עבור צפיפות הצמחייה ניקח מרשומות נתוני GIMMS (Global Inventory Modeling and Mapping Studies) רשומות אלו הן ה-NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) אשר קיימות לשנים 1981-2006. נתונים אלו יוצרו ע"י מכשיר ה-AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) הנמצא על לווייני NOAA שכויל עבור אפקטים שונים שאינם קשורים לכיסוי הצמחי כדוגמת עפר וולקני, וזווית הצפייה הגיאומטרית (Pinzon et al, 2005, Tucker et al, 2005) ערכי ה-NDVI נעים בין 0 ל-1 כאשר 0 מייצג כיסוי צמחייה נמוך ו-1 מייצג כיסוי צמחייה גבוה.

למעט שני המדדים המוזכרים לעיל, במחקר זה נעשה שימוש בנתונים עבור כמה פרמטרים אטמוספריים ואוקיאניים שהזכרנו במבוא להצעה זאת, והם כוללים את: מהירויות הרוח, המשקעים, טמפרטורת הים והאוויר, הלחות היחסית והלחץ בפני השטח. נתונים עבור פרמטרים אלו קיימים מה-NCEP Reanalysis Project אשר מסופק ע"י NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, מהאתר שלהם <http://www.cdc.noaa.gov/>. בארכיב זה קיימים נתוני Reanalysis, כלומר, נתונים אשר הם תוצאה של שילוב מדידות ממקורות שונים כדוגמת: ספינות, לוויינים, תחנות קרקעיות, מכ"מים ועוד. אנו נעשה שימוש בסדרת נתוני ה-[Reanalysis II NCEP/DOE](http://www.cdc.noaa.gov/) אשר הם עדכון של נתוני [NCEP/NCAR Reanalysis I](http://www.cdc.noaa.gov/).

עדכון זה מכסה את תקופת הזמן 1979-2007, כלומר מתחילת תקופת הלוויינים המטאורולוגים הראשונים, תוך שימוש במודל טוב יותר המשלב בין מכשירי המדידה בצורה טובה יותר.

3 שיטות

על מנת לזהות את הגורמים החשובים ביותר המשפיעים על ריכוז החלקיקים הטבעיים במזרח הים התיכון וישראל, נעשה שימוש בשיטת מידול מבוססת על Machine Learning Algorithms (MLA) הפרוצדורה שנשתמש בה כוללת ארבעה שלבים: (1 Correlations & Tele-Cross-Validation (4 Machine Learning Algorithm (3 Feature Selection (2 connections . בהמשך חלק זה נפרט בקצרה על כל אחד משלבי הפרוצדורה.

3.1 Correlations & Tele-connections

אנו מציעים לבחון את הקורלציות ואת הקשרים ארוכי הטווח בזמן ובמרחב בין ה-Toms Aerosol Index (AI) ובין כל אחד מהפרמטרים הבאים: כיוון ועוצמת הרוחות הממוצעת, הלחץ האטמוספרי בקרקע וברום, הלחות היחסית הממוצעת, הטמפרטורה הממוצעת, ומדד הבצורת (PDSI). וזאת על מנת לבחון את היתכנות השערותינו לגבי כל אחד מהמשתנים בנפרד כגורמים החשובים בהשפעה על עומס החלקיקים במזרח הים התיכון וישראל.

3.2 Feature Selection – Reduction of Dimensionality

שיטה נפוצה ב-Machine Learning על מנת לבחור קבוצת מכוונים רלוונטיים, בכדי לייצר מודלים סטטיסטיים תקפים. זהו שלב קריטי בתהליך בניית המודל על מנת להימנע מ-Over-fitting (Mierswa et al, 2006). Over-fitting יכול להתרחש, כאשר נעשה שימוש נרחב מדי במכוונים על מנת להתאים פונקציה. כלומר המחשב יתאים פונקציה מושלמת הקושרת בין המכוונים השונים ובין המטרה, במקרה זה מדד האירוסולים הטבעיים (AI) שתתאים לתקופת הכיול אך לא לתקופת האימות. חיפוש מפרך אחר קבוצת המכוונים הטובה ביותר יכול להיות מאוד אפקטיבי אבל דורש משאבי מחשב רבים. על כן במחקר זה נעשה שימוש ב-Forward Selection Multiple Regression על מנת לצמצם את מספר המימדים בהם אנו פועלים וזאת תוך שימוש סביר במשאבי מחשב. למרות שישנה הנחה מסוימת של ליניאריות הוכח בעבר כי Multiple Regressions יכולים לבחור את המכוונים במידה טובה לפחות כמו שיטות אחרות (Addison et al, 2004).

3.3 Machine Learning Algorithm

השימוש בשיטות ליניאריות לתאר תופעות טבעיות שלטה ברוב התחומים המדעיים במשך שנים רבות. למרות השימוש הנרחב בשיטות אלה היכולת שלהם לתאר תופעות לא ליניאריות לוקות בחסר. על מנת לזהות את רמת הקשר בין שילוב המכוונים שבחרנו לבדוק ובין ריכוז האירוסולים הטבעיים במזרח הים התיכון וישראל בחרנו להשתמש ב-Non linear Machine Learning Algorithms כדוגמת Support Vector Machines ו-Artificial Neural

Networks שהוכחו במספר רב של מחקרים כיעילים בפתרון שאלות מהסוג אותה אנו חוקרים (Calvo, et al. 2004, Steiner, et al. 2005).

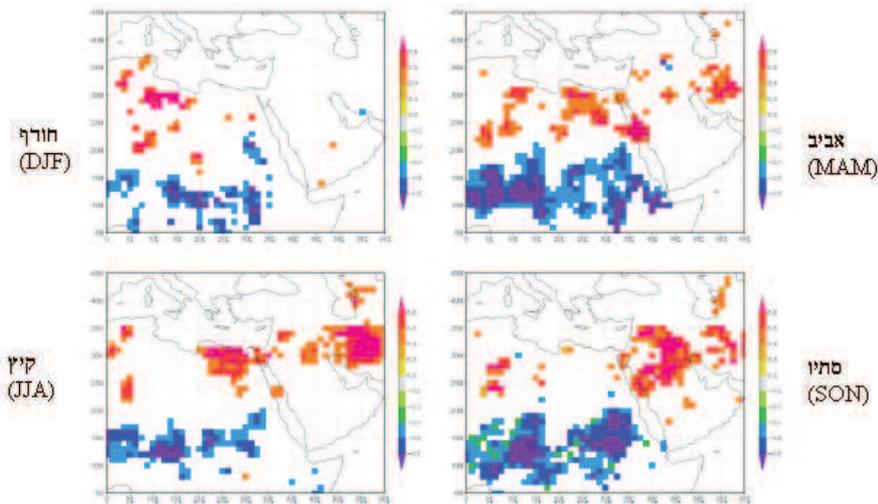
Cross- Validation 3.4

לעיתים קרויה גם Rotation Estimation, היא השיטה הסטטיסטית המחלקת את הנתונים לתת-קבוצות כך שהניתוח הראשוני ייעשה על קבוצה אחת ובקבוצות האחרות ייעשה שימוש על מנת לאמת את הניתוח הראשוני (Michaelson, 1987). ב-K-folds-cross-validation תקופת המחקר מחולקת ל-K תת-קבוצות, מאלה קבוצה אחת נותרת לאימות והשאר נועדו לאימון האלגוריתם. תהליך זה מתרחש K פעמים ואז K התוצאות יכולות לעבור מיצוע על-מנת לקבל הערכה אחת לטיב המודל (www.cs.cmu.edu/~awm/tutorial). שיטה זאת יכולה למנוע over-fitting וכן למנוע את ההשפעה שבין תקופות זמן עוקבות על הנתונים האקלימיים (Hsu, et al. 2003). מטרת שלב זה בפרוצדורה היא, להעריך עד כמה שילוב הפרמטרים הפיסיקליים במודל לא ליניארי מבוסס מכונות למידה, מסוגלים להסביר את השונות בריכוז האירוסולים הטבעיים במזרח הים התיכון וישראל. ובכך לבחון האם פרמטרים אלו הם אכן הגורמים החשובים ביותר המשפיעים על ריכוז האירוסולים.

4 תוצאות ראשוניות

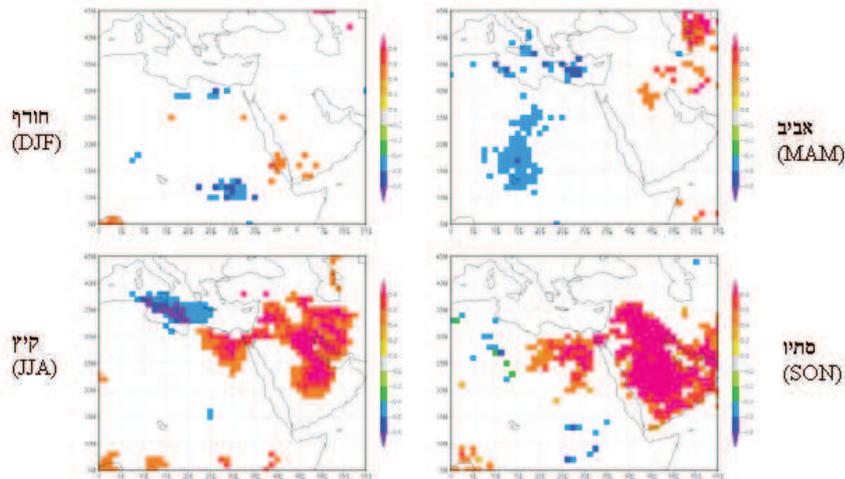
פרק זה יעסוק בתוצאות הראשוניות של מחקר זה. בפרק זה נציג את הקורלציות הפשוטות שבין ה-Toms Aerosol Index (AI) ובין כל אחד מהגורמים המשפיעים על מדד זה. איורים 1-3 מציגים קורלציות אלו כתלות בעונות השנה ובמיקום הגיאוגרפי. בדקנו את הקורלציות כתלות בעונות השנה, וזאת על מנת למנוע מהשינויים הבין עונתיים להטיל צל על ההשפעות הפיזיקאליות הנוספות. הקורלציות כולן נבדקו ברמת מובהקות של ($p < 0.1$). מחקר זה מתמקד באזור מזרח הים התיכון וישראל ולכן גם ההתייחסות באיורים כולם היא לאזור זה. באמצעות שיטת הקורלציה הליניארית לא ניתן בשלב זה להצביע על קשר סיבתי פיזיקאלי בין הגורמים השונים ובין ה-AI אלא רק על קיום קשר סטטיסטי ביניהם ועל כן לא נתיימר בשלב זה של המחקר להסביר קשרים אלו, אלא רק לתאר אותם ולהעלות השערות לגביהם.

איורים 1,2,3 מציגים את הקורלציות שבין מדד ריכוז האירוסולים הטבעיים (AI) ובין מדד הבצורת (PDSI), הלחץ בפני השטח (SLP) ולחץ אדי המים בפני השטח בהתאמה. ניתן לראות כי באיור 1 הקורלציות בעונות הסתיו והקיץ הן חיוביות באזורינו, כלומר ככל שהבצורת קלה יותר ריכוז האירוסולים הטבעיים עולה. זאת בניגוד למה שהיינו מצפים שכן במידה והלחות בקרקע גבוה היינו מצפים לניתוק קטן יותר של אירוסולים טבעיים מהקרקע. הסבר לתופעה יכול להיות מוסבר באופן הבא; בשנת בצורת כמות הגשם קטנה יותר ולכן האירוסולים היוצאים מהים קטנה (יש קשר ישיר בין כמות הגשמים ומהירות הרוח לריכוז האירוסולים הימיים) ולכן הריכוז הכללי של האירוסולים הטבעיים קטן. לעומת זאת, באזור ספר המדבר באזורים המרוחקים מן הים הקורלציות הן שליליות, כלומר ככל שהבצורת מחריפה יש עלייה בריכוזי האירוסולים. אירוסולים אלו הם כנראה ממקור מינרלי מדברי ולא אירוסולים של מלח ים.



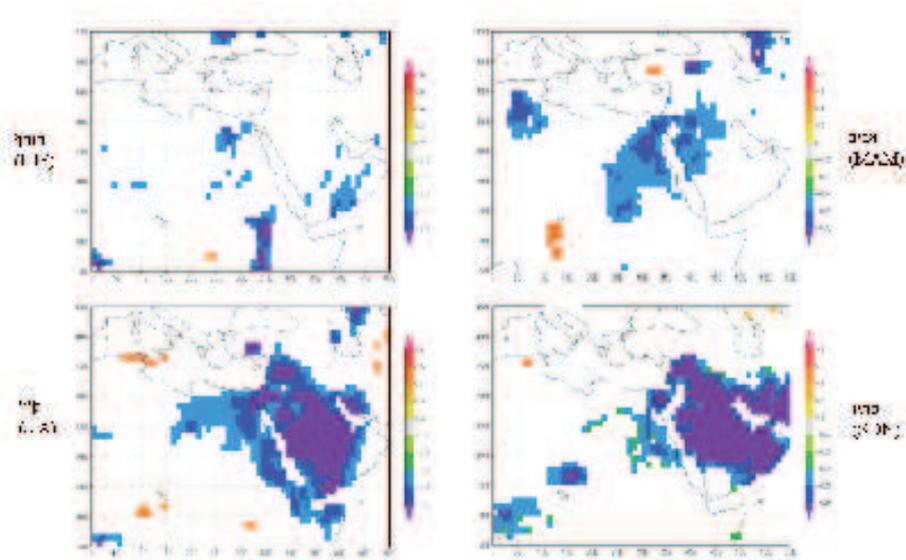
איור 1 – הקורלציות שבין מדד הבצורת (PDSI) ובין מדד ריכוז האירוסולים הטבעיים (AI) על פי עונות השנה לשנים 1980-2002. הצבעים מייצגים את עוצמת הקורלציה, כאשר הצבעים החמים מייצגים את הקורלציה החיובית והצבעים הקרים מייצגים את הקורלציה השלילית. הקשרים נבדקו ברמת מובהקות של ($p < 0.1$).

באיור 2 ניתן לראות כי הקורלציה באזור מזרח הים התיכון וישראל, בעונות הקיץ והסתיו הן חיוביות, כלומר ככל שהלחץ בפני השטח עולה גם ריכוז האירוסולים הטבעיים עולה. זאת כנראה בשל העובדה כי במצבים הסינאופטיים בהם הלחץ עולה זרימת האוויר מקורה במדבר מדרום או ממזרח ולכן ריכוז האירוסולים עולה. לעומת זאת, בעונות החורף והאביב לא נראית קורלציה סיגניפיקנטית באזורינו לקשר שבין ריכוז האירוסולים הטבעיים והלחץ בפני הים.



איור 2 – הקורלציות שבין הלחץ בפני השטח (SLP) ובין מדד ריכוז האירוסולים הטבעיים (AI) על פי עונות השנה לשנים 1980 – 2002. הצבעים מייצגים את עוצמת הקורלציה, כאשר הצבעים החמים מייצגים את הקורלציה החיובית והצבעים הקרים מייצגים את הקורלציה השלילית. הקשרים נבדקו ברמת מובהקות של $p < 0.1$.

באיור 3 ניתן לראות כי בעונות הקיץ והסתיו חשיבות העלייה בלחץ אדי המים להורדת ריכוז האירוסולים הטבעיים היא גדולה. שכן ככל שלחץ אדי המים עולה ריכוז האירוסולים הטבעיים יורד, וזאת כנראה בשל התכונות ההיגרוסקופיות של רוב האירוסולים הטבעיים. כלומר, אירוסולים אלו מסוגלים לספוח מים ולשקוע במהירות לקרקע כאשר הלחות נמצאת בעלייה.



איור 3 - הקורלציות שבין לחץ אדי המים בפני השטח ובין מדד ריכוז האירוסולים הטבעיים (AI) על פי עונות השנה לשנים 1980 – 2002. הצבעים מייצגים את עוצמת הקורלציה, כאשר הצבעים החמים מייצגים את הקורלציה החיובית והצבעים הקרים מייצגים את הקורלציה השלילית. הקשרים נבדקו ברמת מובהקות של $(p < 0.1)$.
ההבדלים שבין עונות הקיץ והסתיו לעומת החורף והאביב מקורם כנראה בתהליכי השקיעה של האירוסולים. תהליכים אלו בעונות היבשות הם ברובם תהליכים של שקיעה יבשה כלומר כתוצאה מכוח הכובד וללא מעורבות של מים ואילו בעונות הרטובות יותר הם ברובם תהליכים של שקיעה רטובה כלומר במעורבות של משקעים. התהליכים המשפיעים על עלייה או ירידה בריכוזי האירוסולים הטבעיים עדיין אינם מובנים במלואם, כמו כן הגורמים הדומיננטיים המשפיעים על תהליכים אלו אינם ברורים לגמרי, ולכן למחקר זה חשיבות מכרעת בהעמקת ההבנה כיצד הגורמים השונים פועלים ביחד ולחוד כתלות בזמן ובמרחב להעלאת ריכוז האירוסולים הטבעיים או הורדתו.

5 סיכום

מחקר זה משמש כבסיס לעבודה עתידית בבחינת השפעת הפקטורים האטמוספריים על ריכוז האירוסולים הטבעיים באגן הים התיכון. מתוצאות המחקר עולה כי הקשר בעונות הסתיו והקיץ בין מדד ריכוז האירוסולים (AI) ומדד הבצורת (PDSI), הוא חיובי כלומר ככל שהבצורת קלה יותר ריכוז האירוסולים הטבעיים עולה. תוצאה זו עמדה בניגוד להשערת הבסיס שלנו שככל שהבצורת חזקה יותר כך ריכוז האירוסולים יגדל. יש לזכור שמדד הבצורת הינו פרמטר סטטיסטי המכיל בתוכו פרמטרים מטאורולוגיים רבים. בחינה מדוקדקת של הפרמטרים הספציפיים כגון; השפעת כמות המשקעים בלבד על ריכוז האירוסולים הטבעיים יכולה לענות על שאלה זו. בנוסף הראנו כי קיים קשר בין לחץ אדי המים ומדד האירוסולים בעונות הקיץ והסתיו, בעונה זו יש ירידה בריכוז האירוסולים כפונקציה של עלייה בלחץ אדי המים. תופעה זו נגרמת עקב תכונתם ההיגרוסקופית של האירוסולים הטבעיים.

במחקר זה אין התייחסות לתופעות מזו-מטאורולוגיות (תופעות בסקאלה בינונית, של עד-30km). במקרים רבים תופעות אלו, כמו בריזת הים ורוחות מקומיות, אינם נלקחים בחשבון ועלולים להטות את תוצאות המחקר.

על-סמך תוצאות מחקר זה אנו ממליצים לבצע מחקר פרטני, על-ידי הגדלת הרזולוציה של בסיסי הנתונים והקטנת אזור המחקר לאזור מסוים (לדוגמא; מדינת ישראל בלבד) במציאת הקשר בין הפרמטרים האטמוספריים וריכוז האירוסולים הטבעיים.

6 מקורות

- קורדובה ל. ניטור איכות אוויר בישראל. דו"ח שנתי לשנת 2004. המשרד לאיכות הסביבה.
- קרסנטי, א. (2004). זיהום אוויר, חלקיקים מרחפים ובריאות האדם. בריאות מהשטח: ביטאון לבריאות הסביבה והמזון 10, 33-35.
- Addison, J. F. D., K. J. McGarry, S. Wermter, and J. Macintyre, 2004: *Stepwise Linear Regression for Dimensionality Reduction in Neural Network Modelling. Artificial Intelligence and Applications*, ACTA Press Inc.
- Alley, W. M. (1984) Palmer Drought Severity Index: Limitations and assumptions. *J. Climate Appl. Meteor.*, **23**, 1100–1109.
- Alpert P., N. Halfon, Z. Levin, (2008) Does Air Pollution Really Suppress Precipitation in Israel? , *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **47**, 933-943.
- Andreas E.L., (1998) A new spray generation functions for wind speed up to $32 m s^{-1}$. *J. Phys. Oceanogr*, **28**, 2175-2184.
- Calvo, R. A., H. D. Navone, and H. A. Ceccato, 2000: Neural Network Analysis of Time Series: Applications to Climatic Data.
- Dai A., K. E. Trenberth, T. Qian, (2004) A Global Dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870–2002: Relationship with Soil Moisture and Effects of Surface Warming, *Journal of Hydrometeorology*, **5**, 1117-1130.
- Dockery, W. D. (1993) An Association between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities The New England journal of medicine (winter)
- Garcia, M.A., A. Sanchez-Archilla, J.P. Sierra, J. Sospedra, and J. Gomez (1993), Wind waves off the Ebro Delta, NW Mediterranean, *Journal of Marine System*, **4**, 235-262.
- Giorgi, F., G. T. Bates, and S. J. Nieman (1993a) The multi-year surface climatology of a regional atmospheric model over the western United States, *J. Clim.*, **6**, 75 – 95,
- Givati A., and D. Rosenfeld, (2004) Quantifying Precipitation Suppression Due to Air Pollution, *Journal of Applied Meteorology*, **43**, 1038-1056.
- Gong, S. L., L. A. Barrie, and M. Lazare (2002) Canadian Aerosol Module (CAM): A size-segregated simulation of atmospheric aerosol processes for climate and air quality models, 2. Global sea-salt aerosol and its budgets, *J. Geophys. Res.*, **104**, 4779.

- Gueller, W., M. Schultz, Y. Balkanski, and F. Dentener (2001) Influence of the source formulation on modeling the global distribution of sea-salt aerosol, *J. Geophys. Res.*, **106**, 27 509–27 524.
- Heim, R. R., Jr., (2000) Drought indices: A review. *Drought: A Global Assessment*, D. A. Wilhite, Ed., Routledge, 159–167.
- Hisdal, H. and L.M. Tallaksen (eds.), (2000) Drought Event Definition, *ARIDE Technical Report No. 6*, University of Oslo, Norway, 45 pp.
- Hsu C.W., C.C. Chang, C.J. Ling, (2003) A Practical Guide to Support Vector Classification.
- Karl, T.R. (1986) The Sensitivity of the Palmer Drought Severity Index and Palmer's Z-Index to their Calibration Coefficients Including Potential Evapotranspiration, *J. Climate Appl. Meteor.*, **25**, 77-86.
- Levin, Z., A. Teller, E. Ganor, and Y. Yin (2005), On the interactions of mineral dust, sea-salt particles, and clouds: A measurement and modeling study from the Mediterranean Israeli Dust Experiment campaign, *J. Geophys. Res.*, 110, D20202, doi:10.1029/2005JD005810.
- Lewis, E., and S. E. Schwartz (2004), Sea salt aerosol production: Mechanisms, Methods, Measurements, and Models: 4-23, Wiley, New York.
- Michaelson, J., 1987: Cross-Validation in Statistical Climate Forecasts Models. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **26**, 1589-1600.
- Mierswa, and Coauthors, 2006: YALE: Rapid Prototyping for Complex Data Mining Tasks. *The 12th ACM SIGKDD International Conference of Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-06)*.
- Monahan, E. C., D. E. Spiel, and K. L. Davidson (1986), A model of marine aerosol generation via whitecaps and wave disruption. In: *Oceanic Whitecaps and Their Role in Air-Sea Exchange*, edited by E. C. Monahan and G. MacNiocaill, Norwell, Mass., 167-174
- Paulo A. A., and L. S. Pereira (2006) Drought Concepts and Characterization: Comparing Drought Indices Applied at Local and Regional Scales, *Water International*, 31(1), 37 – 49.
- Palmer, W.C., 1965: Meteorological drought. *Research Paper No. 45*. U.S. Weather Bureau. [NOAA Library and Information Services Division, Washington, D.C. 20852]
- Petelski, R. K., 2005: On the theory of CISK. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **123**, 407–418.
- Pinzon, J., M.E. Brown, and C.J Tucker (2005) Satellite time series correction of orbital drift artifacts using empirical mode decomposition. In: N. Huang (Editor), *Hilbert-Huang Transform: Introduction and Applications*, pp. 167-186.

- Quinn, P.K., T.S. Bates, D.J. Coffman, T.L. Miller, J.E. Johnson, D.S. Covert, J.-P. Putaud, C. Neusub, and T. Novakov (2000) A comparison of aerosol chemical and optical properties from the 1st and 2nd Aerosol Characterization Experiments. *Tellus*, 52B, 239-257.
- Rosenfeld D., Y. Rudich, R. Lahav, (2001) Desert Dust Suppressing Precipitation: A Possible Desertification Loop, *PNAS*, 98 (11), 5975-5980.
- Smith, M. H., P. M. Park, and I. E. Consterdine (1993), Marine aerosol concentrations and estimated fluxes over the sea, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 119(512), 809–824, doi:10.1002/qj.49711951211.
- Steiner, D., A. Walter, and H. J. Zumbuhl, (2005) The Application of Non-Linear Back-Propagation Neural Network to Study the Mass Balance of Grosse Aletschgletscher, Switzerland. *Journal of Glaciology*, **51**, 313-323.
- Torres, O., P.K. Bhartia, J.R. Herman, A. Sinyuk and B. Holben (2002) A long term record of aerosol optical thickness from TOMS observations and comparison to AERONET measurements, *J. Atm. Sci.*, 59, 398-413.
- Torres O., P.K. Bhartia, J.R. Herman and Z. Ahmad (1998) Derivation of aerosol properties from satellite measurements of backscattered ultraviolet radiation. Theoretical Basis, *J. Geophys. Res.*, 103, 17099-17110.
- Tucker, C.J., J. E. Pinzon, M. E. Brown, D. Slayback, E. W. Pak, R. Mahoney, E. Vermote and N. El Saleous (2005) An Extended AVHRR 8-km NDVI Data Set Compatible with MODIS and SPOT Vegetation NDVI Data. *International Journal of Remote Sensing*, (26)20, 4485-5598.
- Zakey A. S., F. Giorgi, and X. Bi (2008), Modeling of sea salt in a regional climate model: Fluxes and radiative forcing, *J. Geophys. Res.*, 113.
- Zhong W, Levin L, Reponen T, Hershey G.K, Adhikari A, Shukla R et al. (2006) Analysis of short-term influences of ambient aeroallergens on pediatric hospital visits. *Science of Total Environment*. 370, 2-3. 330-336.