

המשרד להגנת הסביבה



الوزارة لحماية البيئة
Israel Ministry of Environmental Protection

הספר הירוק

הערכה ומדידה של עלויות סביבתיות

עלויות חיצוניות של מזהמי אוויר וגזי חממה

הוכן על ידי-

פרופ' ניר בקר, החוג לכלכלה וניהול, המכללה האקדמית תל-חי
מיכל גרוסמן, AVIV AMCG
יוגב ברק, AVIV AMCG
פרופ' נאווה חרובי, מכללה אקדמית נתניה

הנחיה

אביטל עשת, מנהלת תחום כלכלה, המשרד להגנת הסביבה
יובל לסטר, ראש אגף מדיניות ואסטרטגיה, המשרד להגנת הסביבה

ליווי מקצועי

אמיר זלצברג, ראש אגף תחבורה, המשרד להגנת הסביבה
ד"ר צור גלין, ראש אגף איכות אוויר, המשרד להגנת הסביבה
גיא לסט, מנהל תחום צמצום זיהום אוויר מתעשייה
ד"ר רותי קירו, ממונה איכות אוויר ושינוי אקלים
ד"ר גיל פרואקטור, מנהל תחום אנרגיה ושינוי אקלים

יולי 2020

תוכן עניינים

5	תקציר	
13	רקע	1
18	רקע תיאורטי - מהם מחירים סביבתיים	2
21	רקע מתודולוגי לאמידת מחירים סביבתיים לנזקים ממזהמי אוויר	3
21	אומדן מחירים סביבתיים מזיהום אוויר ממקורות נייחים	3.1
26	אומדן מחירים סביבתיים מזיהום אוויר מתחבורה	3.2
27	מתודולוגיית עדכון המחירים והעברת תועלות לישראל (Benefit Transfer)	4
33	מתודולוגיה מפורטת להערכת נזקים למזהמי אוויר ממקורות נייחים ב-CE DELFT (2018)	5
33	תהליך עדכון המחירים הסביבתיים ביחס למחירונים קודמים	5.1
39	שימוש במחירים הסביבתיים לטובת תחזיות	5.2
40	הערכת נקודות הקצה	5.3
40	שיטות ההערכה של נקודות קצה	5.3.1
41	הערכה של השפעות על בריאות האדם	5.4
44	שירותי מערכת אקולוגית (כולל חקלאות)	5.5
47	בניינים וחומרים (הון שנבנה על ידי האדם)	5.6
49	מתודולוגיה מפורטת להערכת נזקים ממזהמי אוויר בתחבורה ב-CE DELFT (2019)	6
49	רקע מתודולוגי לאמידת מחירים סביבתיים של מזהמי אוויר מתחבורה יבשתית וימית	6.1
50	השפעות זיהום אוויר מתחבורה	6.2
52	מתודולוגיה להערכה כלכלית של השפעות פליטות פחמן דו-חמצני וגזי חממה נוספים	7
54	שימוש במחירי פחמן דו-חמצני באירופה (CE DELFT)	7.1
58	שימוש במחירי פחמן דו-חמצני בארה"ב	7.2
62	סיכום והמלצה	7.3
64	תוצאות	8
64	כללי	8.1
67	הערה עבור המזהם NMVOC	8.2
67	הערה עבור המזהם PM לסוגיו	8.3
68	תוצאות – מקורות נייחים	8.4
69	תוצאות – תחבורה יבשתית וימית	8.5
72	תוצאות - גזי חממה	8.6
74	סיכום	8.7
75	נוסחת העדכון השנתית	9
75	נוסחת עדכון לעלויות חיצוניות למזהמי אוויר	9.1
76	נוסחת עדכון לגזי חממה	9.2
77	מקדמי עדכון שנתיים בניתוחי עלות-תועלת	10

79.....	ביבליוגרפיה.....
81.....	נספח 1- עלויות חיצוניות לרשימה מפורטת של מזהמי אוויר בפליטות ממקור נייח.....
88.....	נספח 2 - מאפייני מזהמי אוויר עיקריים ונזקיהם.....

רשימת איורים

23.....	איור 1 – מערכות הקשרים שנותחו לטובת ספר העלויות החיצוניות הסביבתיות של בין מזהמים (פליטות/ מטרדים) לבין ערך כספי, דרך נקודות הביניים ונקודות הקצה.....
25.....	איור 2 – מערכת הקשרים בין ממצאי המחקרים להערכה כלכלית של השפעות סביבתיות בנקודות הקצה.....
35.....	איור 3 – שלבי עדכון CE DELFT (2018) ביחס לגרסאות קודמות.....
57.....	איור 4 – עלויות עמידה ביעדי הפחתה על בסיס תכניות הפחתת גזי חממה שונות מהאיחוד האירופי וה-OECD.....
58.....	איור 5 – התפלגות ערכי עלות ה- CO_2 עבור שנת 2020.....

רשימת טבלאות

7.....	טבלה 1 – ערכי אמצע למזהמי אוויר ממקור נייח (שקלים לטון 2019).....
8.....	טבלה 2 – ערכי אמצע למזהמי אוויר מתחבורה (שקלים לטון 2019).....
8.....	טבלה 3 – טווח ערכים למזהמי אוויר ממקור נייח – פליטה מתחת ל-100 מ' (שקלים לטון 2019).....
9.....	טבלה 4 – טווח ערכים למזהמי אוויר ממקור נייח – ארובות מעל 100 מ' (שקלים לטון 2019).....
9.....	טבלה 5 – עלות מזיהום תחבורתי (שקלים לטון 2019).....
10.....	טבלה 6 – עלויות עבור נוסחת "ציון ירוק" (שקלים לטון 2019).....
11.....	טבלה 7 – ערכים מומלצים לגזי חממה (שקלים לטון 2019).....
31.....	טבלה 8 – חלוקה יחסית של הנזק ממזהמים לפי סוג הנזק*.....
32.....	טבלה 9 – פרמטרים מומלצים להעברת תועלות לנקודות קצה שונות.....
48.....	טבלה 10 – שקלול השפעות על מבנים וחומרים (במחירי אירו 2015 לק"ג פליטה).....
55.....	טבלה 11 – מחירי CO_2 (במחירי אירו 2015 לק"ג פליטה, כולל מע"מ).....
57.....	טבלה 12 – עלויות מניעה של שינוי אקלים באירו/ טון CO_2 במחירי 2016 (מתוך CE DELFT, 2019).....
59.....	טבלה 13 – סיכום המודלים העיקריים הרלוונטיים לקביעת מחיר הפחמן.....
60.....	טבלה 14 – עלות חברתית של CO_2 בשנים 2015-2050.....
61.....	טבלה 15 – קצב גידול שנתי במחיר הפחמן בין השנים 2010 ל 2050.....
65.....	טבלה 16 – יחסים בין ערכים גבוהים לערכי אמצע ובין ערכי אמצע.....
66.....	טבלה 17 – מקדמים להעברת תועלות בהתחשב בגמישות ביחס לצפיפות אוכלוסייה.....
68.....	טבלה 18 – טווח ערכים למזהמי אוויר ממקור נייח – פליטה מתחת ל-100 מ' (שקלים לטון 2019).....
69.....	טבלה 19 – טווח ערכים למזהמי אוויר ממקור נייח – ארובות מעל 100 מ' (שקלים לטון 2019).....
70.....	טבלה 20 – עלות מזיהום מתחבורה יבשתית (שקלים לטון 2019).....
71.....	טבלה 21 – עלויות עבור נוסחת "ציון ירוק" (שקלים לטון 2019).....
72.....	טבלה 22 – עלות מזיהום מתחבורה ימית בים התיכון (שקלים לטון 2019).....
73.....	טבלה 23 – ערכים מומלצים לגזי חממה (שקלים לטון 2019).....
76.....	טבלה 24 – קצב גידול שנתי במחיר פליטת פחמן דו חמצני בין השנים 2020-2050.....

תקציר

המשרד להגנת הסביבה (להלן "המשרד") מתמחר את העלויות החיצוניות הנובעות מפליטות מזהמי אוויר וגזי חממה בישראל, על מנת לספק בסיס להפנמת עלויות הנזקים הנובעים מזהום אוויר.

בשנים 2008 ו-2012 פורסמו שתי עבודות כלכליות אשר העריכו את עלות נזקי זיהום אוויר בישראל. פארטו (2008) העריכו את עלות זיהום האוויר מייצור חשמל. בקר וכיוון (2012) העריכו את עלות הזיהום אשר נוצר בתעשייה (שאיננה ממגזר האנרגיה) ובמגזר התחבורה. עבודות אלו היוו בסיס לערכי העלויות החיצוניות של מזהמי אוויר בישראל אשר המשרד פרסם לאורך השנים ועדכן אותם מדי שנה על פי נוסחת עדכון הכוללת שינויים בתמ"ג, אינפלציה וגודל אוכלוסייה.¹

מטרת מסמך זה היא עדכון הערכים הבסיסיים של העלויות החיצוניות הנ"ל, להבדיל מהעדכון השנתי על פי שינויים בפרמטרים מקרו-כלכליים. עדכון הערכים הבסיסיים התבצע בהתאמה למתודולוגיות הנהוגות כיום במדינות מפותחות, המבוססות על מחקרים מדעיים עדכניים, ובפרט על פרסומים עדכניים של ארגון הבריאות העולמי (WHO) בנושא השפעות זיהום אוויר על בריאות האדם.

שינויים באופן קביעת העלויות החיצוניות

הן בעבודה הנוכחית והן בעבודות הקודמות (פארטו 2008; בקר וכיוון 2012) ערכי העלויות החיצוניות של זיהום אוויר בישראל נקבעו על ידי שימוש בשיטת "העברת תועלות" אשר מקובלת בתחום כלכלת הסביבה. בשיטה זו משתמשים בערכי עלויות חיצוניות שחושבו במדינות אחרות ומתאימים אותם למאפיינים הפיזיים והכלכליים בישראל.² בעבודות הקודמות הערכים הישראליים חושבו על בסיס ערכים שנקבעו במחקרים שונים מרחבי העולם, שנערכו בתקופות שונות, תוך התאמה על פי פרמטרים שונים שמסבירים את שונות הנזק בין מדינה למדינה. בעבודה הנוכחית הערכים הישראליים חושבו על בסיס ערכים שנקבעו במחקרים עדכניים במדינות האיחוד האירופי (EU-28) שפורסמו בשנים האחרונות. חברת הייעוץ ההולנדית CE Delft, אשר מתמחה במחקרי כלכלת סביבה, פרסמה שני ספרי

¹ עלויות חיצוניות מזהום אוויר – אתר המשרד להגנת הסביבה

² להרחבה אודות שיטת העברת תועלות ראו פרק 6 במדריך ה-OECD לניתוחי עלות-תועלת סביבתיים
OECD (2018), *Cost-Benefit Analysis and the Environment: Further Developments and Policy Use*, OECD Publishing, Paris.

מחירים סביבתיים (כלומר ערכי עלויות חיצוניות) עבור מדינות האיחוד האירופי; העבודה הראשונה (להלן- "CE DELFT (2018)") בוצעה עבור ממשלת הולנד וכוללת ערכי עלויות חיצוניות של זיהום ברכיבי סביבה שונים, כולל זיהום אוויר. העבודה השנייה (להלן- "CE DELFT (2019)") בוצעה עבור האיחוד האירופי וכוללת ערכי עלויות חיצוניות של זיהום אוויר שמקורו בתחבורה. המחירים הסביבתיים, קרי ערכי העלויות החיצוניות, אשר פורסמו במסגרת עבודות אלו משקפים מידע ממחקרים עדכניים בדבר השפעות זיהום אוויר על בריאות האדם והסביבה.

שוני נוסף הוא שבעבודות קודמות (פארטו 2008; בקר וכיוון 2012), הייתה הבחנה בין ערכי עלויות חיצוניות של מזהמי אוויר הנפלטים מסקטור האנרגיה לאלו הנפלטים מסקטור התעשייה (שאיננה תעשיית אנרגיה). הבחנה זו ביטאה הנחה בדבר הבדל בגובה הארובות; בדרך כלל ייצור אנרגיה היה כרוך בפליטות מארובות שגובהן מעל 100 מטר ובתעשייה אחרת – מתחת ל-100 מטר. אלא שכיום, עם מעבר ליצור חשמל באמצעים שונים מפחם, הנחה זו אינה בהכרח נכונה, כיוון שניתן לייצר חשמל בארובות נמוכות מ-100 מטר. לפיכך, בעבודה הנוכחית ההבחנה היא אפוא בין פליטות מארובות גבוהות (מעל 100 מטר), פליטות ממקורות נייחים בגובה נמוך מ-100 מטר (תעשייה ופעילויות אחרות) ופליטות מתחבורה.

השינוי האחרון ביחס לעבודות הקודמות הוא הצגה של טווח ערכים (גבוה, אמצעי ונמוך) לזיהום אוויר ממקורות נייחים ומתחבורה ולתחזיות שונות של השפעת שינוי אקלים, באופן שמשקף את אי הודאות הבלתי נמנעת בהערכות מסוג זה. מומלץ להשתמש בערכי האמצע למקרים שבהם ההתייחסות צריכה להיות נקודתית, כמו מיסוי סביבתי. בערכים הגבוהים והנמוכים (המפורטים להלן בתקציר ובפרק 8) בטווח מומלץ להשתמש בניתוחי עלות-תועלת, כטווח בניתוח רגישות.

עלויות חיצוניות של מזהמי אוויר עיקריים

טבלה 1 מציגה את ערכי האמצע של עלויות חיצוניות מפליטות מזהמי אוויר עיקריים ממקורות נייחים, תוך הבחנה בין גובה הפליטה. טבלה 2 מציגה את ערכי האמצע לתחבורה.

העברת התועלות מהערכים האירופאיים בוצעה על ידי התאמה לתמ"ג לנפש מותאם לכוח הקנייה וצפיפות האוכלוסייה. בנוסף, בוצעה התאמה לערכי שנת 2019 לפי שינויי מדד המחירים לצרכן (משום שהעבודות האירופאיות מציגות ערכים לשנים 2015 ו-2016), המרה לפי שער חליפין אירו/שקל והמרה ליחידת מידה של טון פליטה (העבודות האירופאיות מציגות ערכי פליטה ליחידת מידה של ק"ג).

טבלה 1 – ערכי אמצע למזהמי אוויר ממקור נייח (שקלים לטון 2019)

מזהם	פליטה מתחת ל-100 מ'	ארובה מעל ל-100 מ'
PM _{2.5}	270,760	124,536
*PMCoarse	16,773	8,539
PM ₁₀	151,738	77,010
NO _x	118,208	54,259
SO ₂	85,381	39,259
NM _{VOC} ³	7,217	7,217
NH ₃	103,803	47,812

* ערכי חלקיקים – PM, מתייחסים לשלושה סוגי חלקיקים –
 PM_{2.5} - חומר חלקיקי עדין מרחף שקוטרו חלקיקיו קטן מ-2.5 מיקרומטר
 PMCoarse - חומר חלקיקי עדין מרחף שקוטרו חלקיקיו גדול מ-2.5 מיקרומטר וקטן מ-10 מיקרומטר
 PM₁₀ - חומר חלקיקי מרחף, שקוטרו קטן מ-10 מיקרומטר. מכיל גם את קבוצת PM_{2.5} וקבוצת PMCoarse.
 ערכי PM₁₀ מבטאים הערכה כללית של התפלגות גודל החלקיקים בקבוצה בהתאם לסקטור המזהם (מקורות נייחים, תחבורה יבשתית, תחבורה ימית)
 במידה וקיים מידע כמותי לגבי יותר מקבוצה אחת של חלקיקים (PM לסוגיו), יש לחשב את העלויות עבור PM_{2.5} ו- PMcoarse ובאופן זה להתייחס להתפלגות גודל החלקיקים האמיתית ולהימנע מכפילויות.
 במידה ולא ידועה התפלגות גודל החלקיקים בתוך הקבוצה, יש להשתמש בעלות הנזק מ- PM₁₀.

³ NM_{VOC} היא קבוצת מזהמים, אשר רוב התרכובות האורגניות הכלולות בה גורמות להיווצרות אוזון בתהליך פוטוכימי, כך שהאוזון הוא הגורם לנזקי הקצה. זיהום זה מוגדר כזיהום שניוני והוא מבוטא בערכים המוצגים בטבלאות עבור NM_{VOC}. חשוב לציין כי לחלק מהתרכובות הכלולות בקבוצת ה- NM_{VOC} קיים בנוסף לנזק השניוני גם נזק ישיר. עלויות עבור הנזק הישיר אינן מכומתות בערך של NM_{VOC} אלא מכומתות עבור כל מזהם בנפרד ומוצגות בנספח 1.

לפיכך קיימת חשיבות לשימוש בערכים של מזהמים אורגניים ספציפיים מתוך כלל ה- NM_{VOC} בהתאם לסוגי הפליטות. יש עדיפות לחישוב כמה שיותר מזהמים ספציפיים על פי הערכים בנספח 1 (ככל שידועות כמויות הפליטה שלהם), לאחר מכן יש להוסיף את הערך של כלל ה- NM_{VOC} בהפחתת כמויות הפליטה של המזהמים שכבר חושבו בנפרד (זאת על מנת לא לייצר כפילויות בנזק השניוני, אשר מכומת גם בערך ה- NM_{VOC} וגם בערכי המזהמים הספציפיים בנספח 1).

טבלה 2 – ערכי אמצע למזהמי אוויר מתחבורה (שקלים לטון 2019)

ערך אמצעי			מזהם
מחוז לעיר	עיר בינונית	מטרופולין – מעל 500,000 תושבים	
283,230	497,676	1,541,580	PM2.5
8,497			PMCoarse
150,568			PM10
81,888	128,176		NOX
6,839			NMVOC
114,528			NH ₃

עבור ניתוחי רגישות, טבלאות 3, 4 ו-5 להלן מציגות טווח ערכים לפליטות ממקורות נייחים (בשני גבהי פליטה) ותחבורה, את ערכי האמצע שהוצגו בטבלאות 1 ו-2 לעיל, ובנוסף, את הערכים הגבוהים והנמוכים.

טבלה 3 - טווח ערכים למזהמי אוויר ממקור נייח – פליטה מתחת ל-100 מ' (שקלים לטון 2019)

מזהם	ערך נמוך	ערך אמצעי	ערך גבוה
PM2.5	193,800	270,760	416,285
PMCoarse	11,976	16,773	29,939
PM10	108,385	151,738	233,883
NOx	79,631	118,208	176,513
SO2	61,623	85,381	132,897
NMVOC	5,272	7,217	11,548
NH ₃	59,316	103,803	149,477

**טבלה 4 - טווח ערכים למזהמי אוויר ממקור נייד –
ארוכות מעל 100 מ' (שקלים לטון 2019)**

מזהם	ערך נמוך	ערך אמצעי	ערך גבוה
PM2.5	89,138	124,536	191,470
PMCoarse	6,097	8,539	15,242
PM10	55,007	77,010	118,700
NOx	36,552	54,259	81,023
SO2	28,335	39,259	61,108
NMVOС**	5,272	7,217	11,548
NH ₃	27,321	47,812	68,850

** עבור NMVOС הערך לא משתנה בהתאם לגובה הפליטה מכיוון שמבטא נזק שניוני בלבד בתהליך פוטוכימי.

טבלה 5 - עלות מזהום תחבורתי (שקלים לטון 2019)

מזהם	ערך נמוך	ערך אמצעי	ערך גבוה
PM2.5 מחוץ לעיר	202,725	283,230	435,457
PM2.5 בעיר בינונית	356,217	497,676	765,160
PM2.5 במטרופולין**	1,103,405	1,541,580	2,370,130
PMCoarse	6,067	8,497	15,167
*PM10	107,549	150,568	232,079
NOX - עירוני	86,345	128,176	191,398
NOX – מחוץ לעיר	55,164	81,888	122,279
NMVOС	4,995	6,839	10,942
NH ₃	65,445	114,528	164,921

* PM10 יכול לשמש כאומדן לחלקיקים הנפלטים מחיכוך צמיגים ובלמים (abrasive emissions).

** מטרופולין – למעלה מ-0.5 מיליון תושבים.

עבור נוסחת "הציון הירוק" של כלי רכב⁴, מוצע להשתמש בערכים הבאים והעדכונים השנתיים העתידיים שלהם שיתפרסמו ע"י המשרד:

טבלה 6 - עלויות עבור נוסחת "ציון ירוק" (שקלים לטון 2019)

מזהם	עלות חיצונית
PM2.5	*497,676
NOx	*128,176
NM VOC	6,839
CO	**323
CO ₂	140

*ערך לעיר בינונית

**עבודה זו לא כוללת ערך ייעודי עבור העלות של פחמן חד-חמצני הנפלט מתחבורה ולכן, עבור מזהם זה, מוצע להשתמש בערך העלות החיצונית כפי שחושב עבור פליטות ממקור נייח (ראו נספח 1).

פירוט נוסף מופיע בסעיף 8.5.

עלויות חיצוניות של גזי חממה

בנושא אמידת הנזק מפליטת גזי חממה נבחנו מספר גישות מתודולוגיות מהעולם. הגישה שנבחרה היא של הערכה לפי עלות הנזק, להבדיל מהגישה של הערכה לפי עלות הפחתה. המלצתנו היא על הערך אשר מומלץ על ידי סוכנות הסביבה האמריקאית (EPA), אשר, לאחר המרה והתאמה לתנאים הכלכליים, עומד על 140 ש"ח לשנת 2019. מנעד הערכים נקבע לפי שערי היוון שונים בהתאם לגישת ה-EPA, כמפורט בטבלה שלהלן. כמו כן, מוצגים בטבלה 7 מספר גזי חממה אופייניים, כאשר ההמרה ביחס ל- CO_2 מתבססת על מקדמי ההמרה המומלצים ע"י הפאנל הבין-ממשלתי לשינוי אקלים (IPCC)⁵. ה-IPCC ממליץ על מקדמי המרה אשר משקפים נזק לאופק של 20 שנים (GWP_{20}) ומקדמים שמשקפים נזק לאופק של 100 שנים (GWP_{100}).

⁴ מנגנון לחישוב הנחה במס קניה לכלי רכב פרטיים ורכבי משא קלים כתלות בדרגת זיהום האוויר של הרכב.
⁵ IPCC 2014, IPCC 2013

גזי חממה מסוימים כדוגמת מתאן (CH_4) הם בעלי זמן מחצית חיים קצר יחסית באטמוספירה, כלומר, מתפרקים לאורך זמן וריכוזם יורד. לפיכך, השפעתם בטווח הקרוב (לדוגמא, באופק זמן של 20 שנה) היא משמעותית הרבה יותר מהשפעתם על פני 100 שנה. הבחירה באופק הזמן הרלוונטי תיעשה בהתאם למטרת החישוב, כך שעבור הערכת הנזק בטווח הזמן המידי או לשנים הקרובות יעשה שימוש ב- GWP_{20} ועבור תחזיות ארוכות טווח לעשרות שנים קדימה יעשה שימוש ב- GWP_{100} .

טבלה 7 - ערכים מומלצים לגזי חממה (שקלים לטון 2019)

לאופק של 100 שנים:

גזי חממה / שער היוון	מזהמים	5%	3%	2.5%
CO_2	פחמן דו חמצני	40	140	207
* N_2O	חמצן דו-חנקני	10,600	37,100	54,766
* CH_4	מתאן	1,120	3,920	5,787
* SF_6	גופרית 6 פלואורידית	911,989	3,191,960	4,711,941

לאופק של 20 שנים:

גזי חממה / שער היוון	מזהמים	5%	3%	2.5%
CO_2	פחמן דו חמצני	40	140	207
* N_2O	חמצן דו-חנקני	10,560	36,960	54,559
* CH_4	מתאן	3,360	11,760	17,360

* יש לשים לב שבמידה ומזהמים אלה מוצגים כשווה ערך טון פחמן דו חמצני, יש להשתמש בערך של פחמן דו חמצני לעיל.

ניתן לחשב עלויות חיצוניות של גזי חממה נוספים (כדוגמת HFC , PFC ו- NF_3) על ידי הכפלת העלות של CO_2 במקדם ההמרה הרלבנטי לכל גז חממה, כפי שהוא מפורסם על ידי ה-IPCC בעת ביצוע החישוב.⁶

⁶ ר' טבלאות מפורטות בנספח 8A בדו"ח IPCC 2013

לסיכום, מומלץ להשתמש בערכים הכספיים המפורטים לעיל על מנת לכמת את העלויות החיצוניות למשק הנובעות מפליטת מזהמי אוויר וגזי חממה. מומלץ להשתמש בערכים האמצעיים כאשר נדרש שימוש בערך יחיד, ובערכים הגבוהים והנמוכים על מנת להציג טווח רגישות של התוצאה, על מנת לבטא את אי הוודאות הכרוכה בהערכות מסוג זה. מוצע לעדכן ערכים אלה אחת לשנה בהתאם לנוסחה המפורטת בסעיף 9 להלן, וכן לבצע עדכון מעמיק יותר מעת לעת, בהתאם לתוצאות מחקריות עדכניות, ולשינוי במתודולוגיה במדינות מפותחות.

1. רקע

מגוון פעולות אנושיות יומיומיות - ייצור חשמל, פעילות תעשייתית למיניה וכן שימוש בתחבורה מבוססת דלקים פוסיליים, גורמות לפליטות מזהמים לאוויר. לפליטת מזהמים לאוויר השפעות חיצוניות שליליות על בריאות האדם ועל הסביבה שאינן מובאות בחשבון בעת ביצוע הפעולה. תיאורטית, עלויות אלו היו אמורות להשתקף במחיר העסקה. כלומר מי שנהנה מביצוע הפעולה, היה אמור לשאת במחירה המלא, כולל מחיר ההשפעות החיצוניות שלה. אולם, העלויות הללו הן חיצוניות לשוק. כלומר, העלויות הנובעות מחשיפה לזיהום אוויר אינן מיוחסות באופן ישיר לפעולה שגרמה לפליטת המזהמים. על מנת להביא אותן בחשבון בעת ביצוע פעולה/ עסקה הגורמת להן ולשקף את השפעתן, מחושבים ערכי העלויות החיצוניות.

עלויות חיצוניות מבטאות ערך כספי של אובדן רווחה חברתית מפליטת מזהמים. כלומר, עלויות חיצוניות סביבתיות מתבססות על חישוב הנזק התיאורטי מפליטת מזהמים שונים. מטרת חישוב עלויות חיצוניות סביבתיות היא לאפשר למקבלי החלטות להביא בחשבון את ערך הנזקים הללו בהחלטות מדיניות, וכן לסייע לשימוש בכלים כלכליים ורגולטוריים לטובת הפחתת הנזק. המחירים הסביבתיים מבטאים את העלויות החיצוניות, וכך מהווים כלי תומך החלטה. ניתן להשתמש במחירים סביבתיים במקרים מגוונים -

- ניתוח עלות תועלת של החלטת השקעה (למשל בניית כביש מהיר) הכרוכה בעלויות ותועלות שחלקן כספיות וחלקן לא.
- בחינת כלי מדיניות (למשל תמיכה במיזמי אנרגיה מתחדשת, מיסוי סביבתי), שלהם עלויות ותועלות, ברמת הממשלה וברמת התעשייה והצרכנים.
- בחינת חלופות מדיניות, וכימות ההשפעות של כל חלופה.
- תביעות (בפרט, תביעות ייצוגיות), שבמסגרתן נדרש לכמת השפעות חיצוניות.

כיוון שלענייננו מדובר בהשפעות חיצוניות של פליטת מזהמי אוויר, נדרש לבצע הערכות על מנת לקשר בין הפליטה לנזק, וכן להשתמש בשיטות הערכה שונות על מנת לכמת את ערכו של נזק

זה לציבור הרחב. במקרים כאלה, על מנת להשתמש במחירים הסביבתיים, נדרש קודם כל להעריך את היקף ההשפעות הסביבתיות הצפויות במונחים כמותיים של פליטות לאוויר (למשל- ק"ג פליטה ממוזהם אוויר מסוים). כפי שהוסבר לעיל, פליטות אלה מתפשטות במרחב הפיסי ויוצרות השפעות בנקודות קצה (בריאות האדם, שירותי מערכת אקולוגית וכו'). המחירים הסביבתיים מאפשרים לקשור בין הפליטות לנקודת הקצה ולתת מחיר להשפעות אלו.

בישראל, הערכת הנזקים הסביבתיים והפנמתם במחירים של המזהמים השונים התבססה עד כה על שתי עבודות עיקריות- פארטו (2008) ובקר וכיוון (2012)⁷. בעבודות אלו, כמו בעבודה המוצגת כאן, ערכי העלויות החיצוניות של זיהום אוויר בישראל חושבו תוך שימוש בשיטת "העברת תועלות" (benefit transfer) אשר מקובלת בתחום כלכלת הסביבה. בשיטה זו משתמשים בערכי עלויות חיצוניות שחושבו במדינות אחרות ומתאימים אותם למאפיינים הפיזיים והכלכליים בישראל. להרחבה אודות שיטה זו ראו פרק 4.

בעבודות של פארטו (2008) ובקר וכיוון (2012) הערכים הישראליים חושבו (בשיטת העברת תועלות) על בסיס ערכים שנקבעו במחקרים שונים מרחבי העולם, שנערכו בתקופות שונות, תוך התאמה על פי פרמטרים שונים שמסבירים את שונות הנזק בין מדינה למדינה. לעומת זאת, בעבודה הנוכחית הערכים הישראליים חושבו (בשיטת העברת תועלות) על בסיס ערכים שנקבעו במחקרים עדכניים באירופה (EU-28) שפורסמו במהלך השנה האחרונה. עבודות אלו נבחרו כבסיס ל"העברת תועלות" משום שהן מקיפות ביותר והמחירים הסביבתיים המוצגים בהן מבוססים על מחקרים עדכניים בדבר השפעות זיהום אוויר על בריאות וסביבה, ובפרט על פרסומים עדכניים של ארגון הבריאות העולמי (WHO) בנושא זה. בנוסף, על פי הנחיות ה-OECD, כאשר מבצעים חישוב בשיטת "העברת תועלות", מומלץ לבססו על ערכים שמיוחסים למיקום קרוב גאוגרפי⁸. מבחינה זו, המחקרים האירופאיים מספקים לא רק ערכים חדשים ועדכניים שמקורם ממדינות ייחוס רלבנטיות למדיניות המשרד להגנת הסביבה, אלא גם עונים על הצורך המתודולוגי להסתמך על מחירים סביבתיים שמקורם באזור גאוגרפי קרוב.

⁷ בישראל בוצעו מספר עבודות לאורך השנים שאומצו ע"י הממשלה והפכו לעלויות חיצוניות מוכרות לזיהום אוויר "עלויות חיצוניות של זיהום אוויר מייצור (אנרגיה) חשמל בישראל", פארטו הנדסה בע"מ, 2008. "חישוב העלויות החיצוניות של זיהום אוויר מתחבורה ומתעשייה בישראל", פרופ' ניר בקר וחברת כיוון, 2012. 2012, Delft, "External Costs of CO Emissions for Transport in Israel".

⁸ "גישות שונות לקביעת מחיר הפחמן הדו-חמצני המשמש לצרכי ניתוחי עלות-תועלת בתחומי הסביבה והאנרגיה", EcoFinance, 2013. ⁸ OECD (2018), [Cost-Benefit Analysis and the Environment: Further Developments and Policy Use](#), OECD Publishing, Paris. בפרט סעיף 6.4.

שני המחקרים הנרחבים אשר נעשה בהם שימוש בוצעו על ידי חברת CE DELFT ההולנדית. החברה פרסמה לאחרונה, ב-2018 ו-2019 שני מחירונים סביבתיים רחבי היקף-

- CE DELFT (2018) הוא ספר עלויות חיצוניות סביבתיות שהותאם למדינות האיחוד האירופי (EU28)⁹. ספר המחירים הוכן עבור המשרד הממשלתי ההולנדי לחקלאות טבע ומזון, במטרה לתמוך בשימוש ב"ל בו¹⁰. המחירון מתייחס למאות מזהמים ומגוון מדיות סביבתיות (פליטה לאוויר, מים, קרקע וכו').
- CE DELFT (2019) הוא ספר עלויות חיצוניות של תחבורה¹¹. ספר המחירים הוכן עבור ה-European Commission כחלק מעבודה בנושא "גביית תשלום עבור תשתיות תחבורה באופן בר-קיימא והפנמה של עלויות חיצוניות בתחום התחבורה". הערכים הכספיים בו משקפים השפעות חיצוניות מגוונות של תחבורה יבשתית, ימית ואווירית (זיהום אוויר, השפעה על שינוי האקלים, רעש, גודש, נזק לבתי גידול ומגוון ביולוגי וכו').

דו"חות אלו מציגים מסגרת מחקרית ומתודולוגיה למתן "תג מחיר" להשפעות חיצוניות ונזקים הנובעים מפליטות מזהמים. המחירונים מתייחסים לנזקים פוטנציאליים מ-232 מזהמי אוויר ממקורות נייחים (תעשייה ופעילויות אחרות) וכן מציגים התייחסות מפורטת, ייעודית לסקטור התחבורה בהתייחס ל-6 מזהמים מתוכם.

דו"חות אלה מהווים עדכון של ספרי מחירים סביבתיים שפרסמה החברה החל משנות ה-90¹². פרסומי החברה לאורך השנים הם תוצר המשך של פעילות במסגרת פרויקט (New Energy Needs Externalities Developments for Sustainability)¹³ שהתבצע בין 2004-2008 והיה שלב אחרון במסגרת סדרת פרויקטים שבוצעו בין שנות ה-90 ל-2005 תחת הכותרת (ExternE External Costs of Energy). הדו"חות מתבססים הן על פרויקט NEEDS, פרי עבודתן של 66 קבוצות מחקר מדעיות מ-26 מדינות, והן על מודלים נוספים ועדכונים של ארגון הבריאות העולמי, כפי שיפורט להלן. ככלל, מודלים אלה מתבססים על אלפי מחקרים מדעיים, ובפרט מחקרים אפידמיולוגיים.

עדכון העלויות החיצוניות אחת לכמה שנים מתבצע על מנת להתאים את המחירים הסביבתיים למחקרים חדשים (ביחס למועד פרסום) בנושא השפעות של מזהמים סביבתיים על

⁹ CE DELFT (2018) Environmental Prices Handbook EU28 version - Methods and numbers for valuation of environmental impacts

¹⁰ הבקרה על המסמכים נעשתה ע"י משרדי הממשלה ההולנדיים הבאים - המשרד לתשתיות וסביבה, המשרד לחקלאות טבע ומזון, המשרד לעניינים כלכליים, הסוכנות להערכה סביבתית, הסוכנות ההולנדית לניתוח מדיניות כלכלית, מנהל מדיניות מים ועבודות ציבוריות, המוסד הלאומי לבריאות הציבור והסביבה, ומשרד האוצר.

¹¹ Ce Delft (2019) Handbook on the external costs of transport. For the European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport

¹² מדריכים בגרסאות קודמות פורסמו בשנים 1997, 2002, 2010.

¹³ [אתר פרויקט NEEDS](#)

בריאות האדם וסביבתו, ולהנחיות עדכניות (ביחס למועד פרסום) בנושא כימות עלויות חיצוניות בתחום הסביבתי- חברתי.

מטרת עבודה זו היא אפוא להתאים את המחירים הסביבתיים לישראל בתחום זיהום אוויר ושינוי אקלים ולהנגיש את המסמך לקורא הישראלי. זאת, על מנת לאפשר הפנמה של עלויות חיצוניות בבחינות כלכליות ברמה לאומית וכלל-משקית. ניתן יהיה להשתמש במחירים הסביבתיים המותאמים לישראל למשל במסגרת בחינת עלות-תועלת חברתית, הערכת השפעה של רגולציה חדשה (RIA = Regulatory Impact Assessment), השוואת חלופות מדיניות, מיסוי סביבתי, תביעות משפטיות בנושאים סביבתיים וכו'.

בישראל, עבודה זו מהווה עדכון לערכי עלויות חיצוניות בתחום זיהום אוויר וגזי חממה, אשר חושבו במקור על ידי פארטו (2008) ובקר וכיוון (2012).

עבודות אלו היוו בסיס לערכי העלויות החיצוניות של מזהמי אוויר בישראל אשר המשרד פרסם לאורך השנים ואף עדכן אותם מדי שנה על פי נוסחת עדכון הכוללת שינויים בתמ"ג, אינפלציה וגודל אוכלוסייה.¹⁴ מטרת מסמך זה היא עדכון הערכים הבסיסיים של העלויות החיצוניות, להבדיל מהעדכון השנתי על פי שינויים בפרמטרים מקרו-כלכליים. עדכון הערכים הבסיסיים התבצע בהתאמה למתודולוגיות הנהוגות כיום במדינות מפותחות, המבוססות על מחקרים מדעיים עדכניים, ובפרט על פרסומים עדכניים של ארגון הבריאות העולמי (WHO) בנושא השפעות זיהום אוויר על בריאות האדם.

ערכי העלויות החיצוניות של מזהמי אוויר וגזי חממה שמפרסם המשרד הפכו במהלך השנים לכלי עבודה שימושי במגוון החלטות מדיניות וכלים כלכליים (לדוגמא- מיסוי ירוק לרכבים, היתרי פליטה לאוויר, הערכת השפעות רגולציה בתחומים מגוונים וכו').

הרקע התיאורטי, שיטת העבודה להערכת המחירים הסביבתיים, השימושים האפשריים ומגבלות השימוש הפוטנציאליות בהם, המתודולוגיה והתוצאות למזהמים העיקריים מפורטים להלן. הערכים לכלל המזהמים, לגבי פליטות ממקורות נייחים, מפורטים בנספח 1.

נדגיש שביחס לדו"חות הקודמים ובהלימה עם דו"ח אחד מבין השניים של חברת CE DELFT (2018), העלויות החיצוניות מוצגות במנעד ערכים- אמצעי, גבוה ונמוך. הערך האמצעי נועד למקרים בהם יש צורך בערך בודד, כגון מיסוי סביבתי. מנעד הערכים – גבוה ונמוך – נועד לתת למקבלי ההחלטות כלי לניתוח רגישות במקרים של בחינות עלות-תועלת. בדיקת רגישות היא בדיקה שבה משנים חלק מהנחות העבודה, לגביהן ישנה אי וודאות, על מנת לבחון את

¹⁴ עלויות חיצוניות מזיהום אוויר – אתר המשרד להגנת הסביבה

המשמעות מבחינת התוצאה. בדיקה כזו מאפשרת למשל לבדוק האם שינוי בהנחות העבודה ישנה את החלופה המועדפת.

שאר המסמך בנוי כך: הפרק הבא ידון ברקע התיאורטי של עלויות חיצוניות. פרק 3 יציג רקע מתודולוגי לאומדן עלויות חיצוניות לקביעת מחירים סביבתיים לפליטות ממקורות נייחים ומתחבורה. פרק 4 יציג את שיטת עדכון המחירים והעברת התועלות לישראל. פרק 5 מוקדש לפירוט אודות המתודולוגיה של הערכת נזקים ממזהמי אוויר ממקורות נייחים. באופן משלים, פרק 6 יפרט אודות המתודולוגיה להערכת נזקים ממזהמי אוויר מתחבורה. פרק 7 מציג מתודולוגיה להערכה כלכלית של השפעות פליטות פחמן דו-חמצני. פרק 8 מציג את סיכום תוצאות חישוב העברת התועלות. פרק 9 מפרט את נוסחת העדכון השנתית של העלויות החיצוניות (אקס-פוסט) ופרק 10 מציע מקדמי עדכון שנתיים לעלויות החיצוניות לצורך שילובן בניתוחי עלות-תועלת (אקס-אנטה).

2. רקע תיאורטי - מהם מחירים סביבתיים

מחירים סביבתיים הם כלי לביטוי הערך הכלכלי של פליטות מזהמים לסביבה. הם נועדו להציג את ההשפעה של תוספת או של גריעה של מזהמים על האדם ורווחתו, ביחס ליחידת פליטה מתאימה (לדוגמא בק"ג).

על מנת להבין מהו מחיר סביבתי ומהן הדרכים לאמוד אותו, יש להתחיל מההגדרה של מחיר והאופן שבו הוא נקבע בשוק. על פי התיאוריה הכלכלית, מחירו של מוצר או שירות נקבע בשוק, במפגש בין ביקוש והיצע. המחיר מבטא את הערך שהחברה מייחסת למוצר או שירות כלשהוא במועד ביצוע עסקה בין מוכר לקונה. מחירי שוק משקפים את מחירי העסקאות בהן מוצרים ושירותים עוברים מהיצרן לצרכן. במחיר השוק, התועלת השולית של המוצר עבור הצרכן שווה לעלות השולית לייצורו של המוצר מנקודת המבט של היצרן. עובדה זו היא שעומדת בבסיס הטענה שמחירי שוק יוצרים מצע להקצאה יעילה של גורמי ייצור ומוצרים במשק.

אולם, ישנם מוצרים ושירותים שאין אפשרות לסחור בהם בשוק באופן ישיר, ולכן אין להם מחיר שוק, ובכל זאת הם בעלי ערך רב מבחינת החברה. איכות סביבה, ובפרט אוויר נקי, היא אחד מאותם מוצרים.

עסקים וממשלות נעזרים בכלים כלכליים כגון מיסים וסובסידיות, וכן כחלק מניתוח וכימות השקעות וחלופות מדיניות, השוואת עלויות ותועלות של פרויקטים וכד'. במסגרת זו נוצר צורך לבטא גם את הערך של המוצרים הסביבתיים, יחד עם שאר ההיבטים הכלכליים, במונחים שיאפשרו את הבאתם בחשבון השיקולים. כלומר, על מנת לבטא את הערך של אותם נושאים במסגרת קבלת ההחלטות, ולהציג את המשמעות שלהם במטבע זהה לשאר הנושאים המובאים בחשבון בקבלת ההחלטה, יש לאמוד את אותם ערכים סביבתיים ולתת להם תג מחיר.

המטרה של מחירים סביבתיים היא לבטא את המחיר שאנשים היו מוכנים לשלם עבור איכות מסוימת, במידה והיה לה שוק. כיוון שאין שוק ואין מסחר באיכות זו, מחירים סביבתיים אינם ניתנים לזיהוי באמצעות תצפית על המחירים שנקבעים בשווקים, כמו במוצרים רגילים, ונדרש

לחשב אותם באופן מחקרי. הערכה כלכלית של משאבי טבע וסביבה מתבצעת לפי שיטות המקובלות בדיסציפלינת הכלכלה הסביבתית, השואפת לאמוד את נכונות הפרט לשלם עבור מוצרים אלו (WTP-willingness to pay).

מחירים סביבתיים, אפוא, משקפים אומדן של הנכונות לשלם עבור משאבי טבע. קיימות שתי שיטות עיקריות לאמוד מחירים סביבתיים -

- הדרך הראשונה היא באמצעות "העדפות נגלות"¹⁵. הן נקראות כך כיוון שהן מתגלות תוך התבוננות בהתנהגותם של פרטים. לדוגמה, רוב אנשים יהיו מוכנים לשלם יותר על בית שנמצא בשכונה רחוקה ממקורות פליטת זיהום אוויר מאשר בית זהה לחלוטין שנמצא בשכונה חשופה יותר לזיהום אוויר. אם ננתח אקונומטרית את מחירי הנדל"ן בהתאם לפרמטרים השונים המשפיעים עליהם, נוכל לבודד את השפעת זיהום האוויר על מחיר הנכסים. כאן למעשה מנוצל שוק הנדל"ן, כ"מקורב" ל"שוק" זיהום האוויר, כשהמטרה היא לכמת את הערך שאנשים מייחסים לזיהום האוויר.
- הדרך השנייה היא באמצעות "העדפות מוצהרות". הן נקראות כך כיוון שהן מתבססות על הצהרה של הפרט ללא כל התבוננות על פעולה אנושית ממשית. השיטה מאפשרת לאמוד ערכים שאינם קשורים לשימוש במשאב. לדוגמה, כאשר אומדים ערך של נחל הנמצא במקום מבודד, נדרש לאמוד גם ערכים שאינם קשורים בשימוש בפועל, אלא בתועלת למשתמשים מעצם קיומו של המשאב (ערך קיומו, האפשרות להורישו לילדינו, האופציה להשתמש בו בעתיד וגם עצם הידיעה שהנחל קיים). במקרה כזה, ניתן לשאול אנשים לגבי הנכונות לשלם עבור שימורו של המשאב, כמייצג של ערכו עבורם. "העדפות מוצהרות" נאמדות אמנם בצורה היפותטית, אולם בשיטה זו, כאמור, ניתן לאמוד ערכים רבים יותר, כאלו שאין דרכים אחרות לאמוד אותם על בסיס המחירים בשווקים, באופן ישיר או עקיף. להרחבה בנושא שיטות להערכה כלכלית של משאבי טבע ראו פרק 5.

מחקרים כאלו נעשו בעולם מאז שנות ה-60 של המאה ה-20. בישראל מחקרים כאלו התחילו להתבסס בספרות המקצועית בתחילת שנות ה-90 עם הערכות תחלואה ותמותה באזור חיפה. הערכות אלו התבססו הן על שיטות של העדפות מוצהרות, והן על שיטות של העדפות נגלות. בשנת 2008 התפרסם דו"ח המסכם את העלויות החיצוניות כתוצאה מייצור אנרגיה, בשנת 2012 יצא דו"ח משלים המסכם את העלויות החיצוניות כתוצאה מזיהום אוויר שנוצר מפעילות תעשייתית ומתחבורה, וכן דו"חות עם חישוב ייעודי לערכי זיהום שונים כולל פליטת CO₂

¹⁵ לפירוט נוסף לגבי שיטות אמידה, ראו - OECD (2018), Cost-Benefit Analysis and the Environment: Publishing, Paris. Further Developments and Policy Use, OECD

לאוויר¹⁶. דו"חות אלו מתבססים על מחיר ליחידת פליטה על בסיס ערכים שחושבו במדינות אחרות ואשר הותאמו למאפיינים הפיזיים והכלכליים בישראל בשיטת "העברת תועלות". בין המחקרים שבוצעו בעולם ניתן למנות גם את עבודותיה של חברת CE DELFT אשר מפרסמת מחירים סביבתיים של מזהמים שונים החל מ-1997, על בסיס מחקרים מדעים עדכניים (כמפורט להלן בסעיף 5). לאורך השנים, החברה פרסמה עדכונים למחירים הסביבתיים והוסיפה ערכים לרשימה ההולכת ומתארכת של מזהמים בעלי תג מחיר סביבתי. כל גרסה חדשה של מחירים סביבתיים מתבססת על מחקרים עדכניים (נכון למועד הפרסום) בנוגע להשפעות של מזהמים סביבתיים על הבריאות.

המחירים הסביבתיים מבטאים את אובדן הרווחה החברתית בגין יחידת פליטה נוספת של מזהם (שיבוטא למשל בק"ג, בהתאם לסוג הזיהום) הנפלט לסביבה, במונחים כספיים. כלומר, הם מבטאים את הערך החברתי השולי של הנזק מפליטות לאדם ולסביבתו, מנקודת מבט אנתרופוצנטרית (ממוקדת באדם), במונחי מטבע ליחידת מידה.

ספר העלויות החיצוניות הסביבתיות מתבסס על הקשרים בין פליטות ומטרדים סביבתיים לנזקים סביבתיים לאדם ולסביבה, במגוון סוגי השפעות סביבתיות (פירוט בהמשך). קשרים אלה מאפשרים לתרגם את ההערכה הכספית של סוגי נזק שונים, לכדי ערך לפליטה עצמה. בהמשך המסמך מופיע פירוט לגבי שיטות ההערכה השונות לסוגים השונים של ההשפעות החיצוניות. הקשרים נותחו במחירוניהם הסביבתיים האירופיים בהתייחס למפעל ממוצע במיקום ממוצע באירופה (ובו הכנסה ממוצעת וצפיפות אוכלוסייה ממוצעת) ולפי השפעה אופיינית לכל סוג תחבורה. בהתאם, חושבו החשיפה (מבחינת רצפטורים, שהם אובייקטים המושפעים מזיהום, כלומר, אדם וחי, וכן השפעה על בניינים חמינות משאבים), ההשפעות הסביבתיות (על מרכיבי הסביבה השונים – אוויר, מים וכו') והערך הכלכלי¹⁷.

¹⁶ ראו הערת שוליים 3
¹⁷ CE DELFT (2018) באירו 2015, וב-CE DELFT (2019) באירו 2016

3.

רקע מתודולוגי לאמידת מחירים סביבתיים לנזקים ממזהמי אוויר

3.1. אומדן מחירים סביבתיים מזהום אוויר ממקורות

נייחים

CE DELFT (2018) הוא ספר עלויות חיצוניות רחב היקף, יישומי ועקבי, המציע מסגרת מחקרית ומתודולוגיה לקביעת ערכים כספיים שהחברה מייחסת לאיכות הסביבה. מסגרת הניתוח מתמקדת בכימות כלכלי של השפעות על הסביבה מנקודת מבט של רווחת האדם. הניתוח מביא בחשבון מספר שלבים שבהם משפיע המזהם, ואת הקשרים בין שלבים אלה-

- **שלב הפליטה** או ההתערבות בסביבה (Emissions level). במקרה שלנו, השלב בו מזהם אוויר נפלט לאוויר.

- **נקודות ביניים** (Midpoint) - מצב שבו יש השפעה סביבתית, שלה עצמה השפעות משניות. בנקודות האלה, פליטת המזהם גרמה להשפעה סביבתית שלילית, שניתן לכמתה. אולם, יש להביא בחשבון כי גם היא עצמה הביאה להשפעה סביבתית נוספת שעלינו לכמת, המכונה נקודת קצה.

נקודות הביניים שנותחו -

(1) דילול אחון

(2) שינוי אקלים

(3) יצירת חלקיקים

(4) יצירת חמצון פוטוכימי Photochemical Oxidant Formation

(5) הגברת חומציות/ החמצה (Acidification)

(6) אאוטרופיקציה (העתרה - הצטברות חומר אורגני במקורות מים)

(7) רעילות לאדם

(8) רעילות לבתי גידול - מערכת החי והצומח

- **נקודות קצה (Endpoint)** - הנקודה בה אין יותר לפליטת המזהם השפעות משניות.

נקודות הקצה שנותחו:

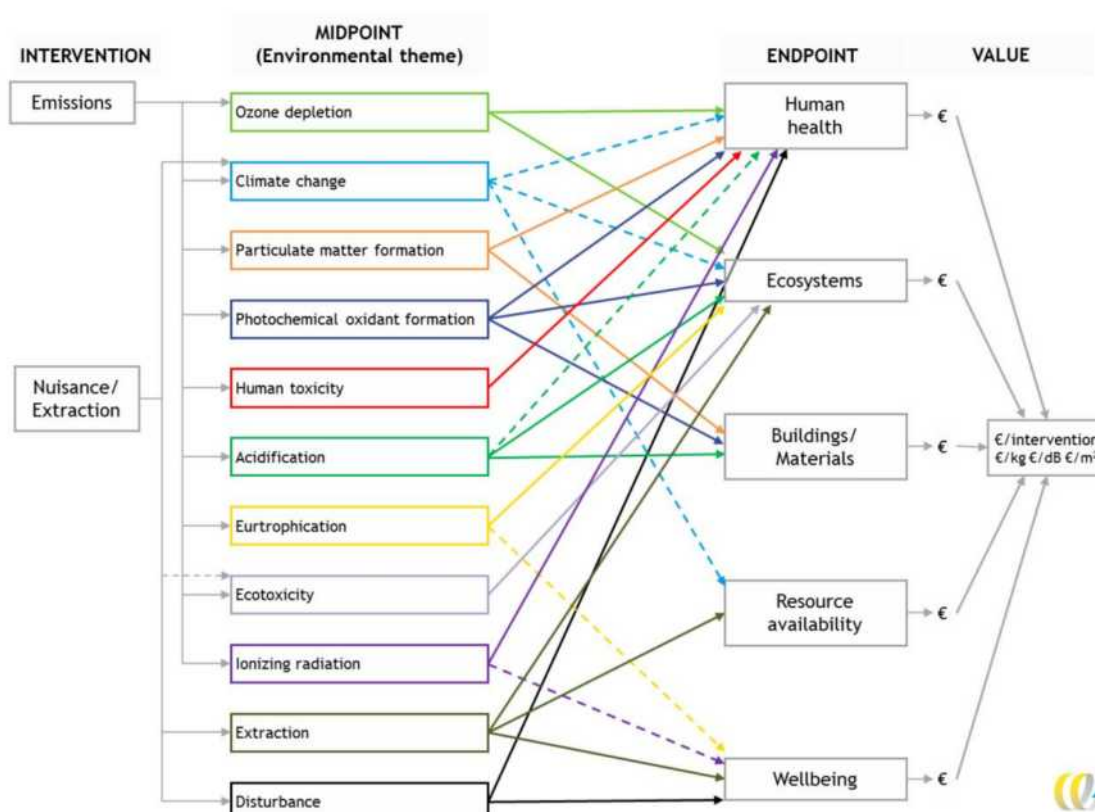
- (1) בריאות האדם (תחלואה ותמותה בטרם עת) – כפי שניתן לראות בטבלה 8 בהמשך, רוב הנזק של מזיהום אוויר מיוחס להשפעות על בריאות האדם. לגבי חלק מהמזהמים, ההשפעה על בריאות האדם מהווה 100% מהנזק.
 - (2) שירותי מערכת אקולוגית (כולל חקלאות).
 - (3) בניינים וחומרים (הון שנבנה על ידי האדם).
- לצורך חישוב המחירים הסביבתיים, מופו הקשרים בין השלבים ורמות ההשפעה השונות, לטובת ניתוח כולל של השפעות פליטת מזהמים.

אומדן המחירים מתבצע בשני מהלכים עיקריים-

- א. ניסוח הקשרים בין פליטות ומטרדים סביבתיים (Emissions level) להשפעות סביבתיות בנקודות הביניים (Midpoint) ומשם אל נקודות הקצה (Endpoint).**
- ב. הערכה של ההשפעה בנקודות הקצה והמרה של השפעה זו לערכים כספיים של נזק כלכלי הנובע מהפליטה או המטרד.**

איור 1 ממחיש את מערכות הקשרים השונות שנותחו בספר העלויות החיצוניות הסביבתיות. הקשרים בין רמת הפליטה, נקודות הביניים ונקודות הקצה נותחו לטובת הערכת העלות לכל יחידת פליטה.

איור 1 – מערכות הקשרים שנותחו לטובת ספר העלויות החיצוניות הסביבתיות של בין מזהמים (פליטות/ מטרדים) לבין ערך כספי, דרך נקודות הביניים ונקודות הקצה



מקור - CE DELFT (2018)

* קווים מקווקים מייצגים יחסים שכומתו בספר המחירים בצורה חלקית בלבד. פירוט מופיע בפרק המתודולוגיה המפורטת. האיור מתייחס לכלל המדידות שנותחו ב- CE DELFT (2018), ולא רק למזהמי אוויר.

המחירים הסביבתיים מבטאים אובדן רווחה (תועלת) כתוצאה מנזקי מזהמי אוויר. הנזקים הכלכליים נאמדים בשיטות המקובלות בכלכלת סביבה והם משקפים נכונות לשלם עבור מניעת הנזקים, אומדנים של עלויות טיפול, אובדן הכנסה וכו'. באמצעות ניתוח הקשרים בין נקודות הקצה ונקודות הביניים, והתרומה של כל מזהם להשפעות הביניים, ניתן ערך לפליטה במקור. תהליך זה מאפשר לאמוד את הנזק ולייחס אותו לפליטה.

פליטה של מזהם מביאה להשפעות סביבתיות שונות בנקודות הקצה, ולכן נדרש להשתמש במודלים. סוגי המודלים המשמשים לכך משתייכים לאחד משני סוגי מחקרים:

א. מחקרים סביבתיים המשלבים בין -

א.1. מודלים של נתיב השפעה (Impact Pathway Models) שמתארים את היחסים בין מזהמים, דרך פיזור וריכוז, עד להשפעה, תוך שמירה על עקביות בין השפעות על נקודת ביניים לנקודת קצה.

א.2. מודלים מסוג "אפיון" של השפעות מזהמים אשר כוללים מודלים פיזיקו-כימיים שמשמשים לביסוס הקשר בין מזהמים ונקודת ביניים ובין נקודת ביניים לנקודת קצה. "פקטור אפיון" (Characterization Factor), מבטא עד כמה כמות של מזהם מסוים תורמת להשפעה סביבתית מסוימת, וכך מאפשר לתרגם הערכה כלכלית של מזהם אחד למזהמים נוספים שיש להם השפעה על אותה נקודת קצה¹⁸.

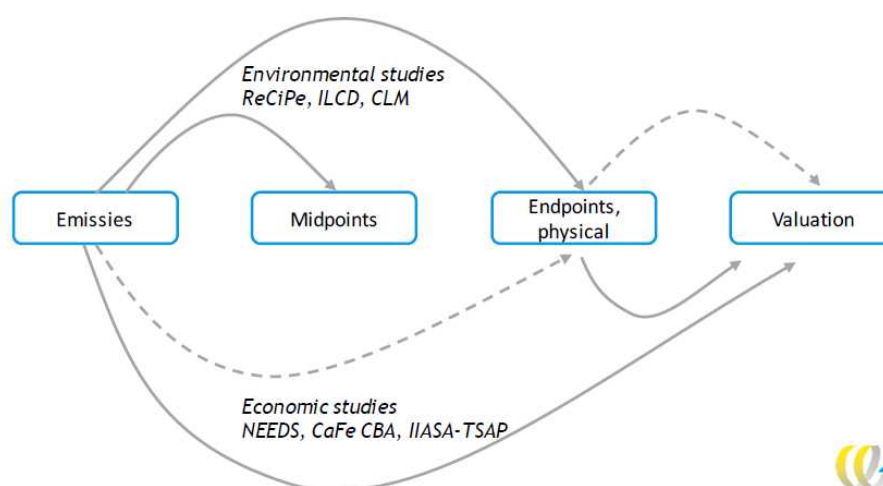
אולם, במודלים אלה הקשר הכלכלי בין פליטות לנקודת קצה מבוטא בממוצע עולמי (או, בהיעדר נתונים, אירופי) בלבד, וללא היוון של תוצאות עתידיות. לכן, נעשה גם שימוש במחקרים כלכליים, לצד המודלים הסביבתיים הנ"ל.

ב. מחקרים כלכליים - מחקרים להערכות כלכליות מציגים קשר בין מודל אשר מתאר פיזור של המזהם, פונקציית "מינון-תגובה" להערכת ההשפעה הבריאותית ומתן ערך כלכלי לכל נקודת קצה. מחקרים אלו מציגים בדרך כלל קשר בין נקודת קצה (מסוג בריאות האדם, למשל) לכ-20 מזהמים בלבד, וכוללים פירוט מצומצם של ההשפעות הסביבתיות של כל מזהם.

מערכת הקשרים בין ממצאי המחקרים להערכה כלכלית של השפעות סביבתיות בנקודות הקצה מתוארת באיור 2 להלן.

¹⁸ ב- CE DELFT (2018) פקטור האפיון התבסס על המתודולוגיה המקובלת ב-ReCiPe 2013

איור 2 – מערכת הקשרים בין ממצאי המחקרים להערכה כלכלית של השפעות סביבתיות בנקודות הקצה



כלומר, שני סוגי המחקרים משרטטים את הקשר בין פליטות לנקודות קצה, אבל לכל אחד דגשים אחרים, ולכן, נדרש להתייחס אליהם בצורה משלימה. מחקרים אלה (בפרט, NEEDS, ReCiPe ואחרים המפורטים באיור שלעיל) מתבססים ומסכמים אלפי מחקרים מדעיים (בפרט, אפידמיולוגיים) אחרים, ומאפשרים שימוש פרקטי בתוצאות מחקרים אלה. כמו כן, הם עודכנו ודויקו על בסיס הנחיות ארגון הבריאות העולמי¹⁹.

לסיכום, במסגרת CE DELFT (2018) שולבו מחקרים סביבתיים ומחקרים כלכליים, על מנת להגיע להערכה עקבית של העלות מבחינת רווחה חברתית כתוצאה מפליטות, ברמת הפליטה, נקודת הביניים ונקודת הקצה. להרחבה אודות המתודולוגיה לחישוב מחירים סביבתיים לנזקי מזהמי אוויר ממקורות נייחים – ראו פרק 5.

¹⁹ WHO, 2013. Health risks of air pollution in Europe – HRAPIE project. Recommendations for concentration–response functions for cost–benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide, Geneva: World Health Organization (WHO).
WHO, 2014. WHO Expert Meeting: Methods and tools for assessing the health risks of air pollution at local, national and international level, meeting report 12-13 May, Bonn: WHO.

3.2. אומדן מחירים סביבתיים מזיהום אוויר מתחבורה

ההשפעות החיצוניות לזיהום אוויר ב-CE DELFT (2019) המתמקד בתחבורה, חושבו באותה גישה של CE DELFT (2018). ההבדל העיקרי בין עלויות פליטה ממקורות נייחים ופליטה מתחבורה היא ההתחשבות בגודל העיר בה נפלט הזיהום כאומדן (פרוקסי) לצפיפות העירונית. בכך, מתבסס ספר המחירים לתחבורה על ספרות מקצועית בנושא²⁰. הדבר מאפשר לקבל ערך שונה ברמת אזור גיאוגרפי, באופן שמשקף את החשיפה הפוטנציאלית למזהם. בנוסף, כולל CE DELFT (2019) התייחסות לעלויות חיצוניות מפליטות מזהמים מכלי שייט – תחבורה ימית. זאת בהתאם לגוף המים הרלוונטי, כולל התייחסות לים התיכון. להרחבה אודות המתודולוגיה לחישוב מחירים סביבתיים לנזקי מזהמי אוויר מתחבורה ראו פרק 6.

²⁰ למשל HEATCO, IMPACT

4. מתודולוגיית עדכון המחירים והעברת תועלות לישראל (Benefit Transfer)

אחת ממטרות פרסום ספרי העלויות החיצוניות הסביבתיות של חברת CE DELFT היא לסייע למדינות באיחוד האירופי ומחוצה לו להשתמש בערכים הללו, בהתאמה לתנאים בכל מדינה. התאמה זו מבוצעת בשיטה הנקראת העברת תועלות (Benefit Transfer). השיטה מתבססת על העברה של ערכים כספיים המבטאים השפעות חיצוניות (תועלות חיצוניות) ממדינה (או מקבץ של מדינות) למדינת אחרת.

ישנן כמה דרכים לעשות זאת. שיטת העברת התועלות בה מומלץ לעשות שימוש בספרי העלויות החיצוניות של חברת CE DELFT נקראת "העברת ערך ליחידה" (Unit value transfer)²¹. במסגרת זו נלקח הערך ליחידת זיהום/מטרד ומועבר לאחר התאמה למדינת היעד. התהליך מתבסס על התאמה להבדלים במדדים כלכליים ואחרים בין מדינת היעד למדינת המקור. ההתאמה הכלכלית לרמת ההכנסה מתבססת על תמ"ג לנפש, המותאם לכח הקנייה באמצעות מדד שוויון כוח הקנייה – Purchasing Power Parity (PPP)²², אשר מנטרל את הפרשי יוקר המחיה הקיימים בין מדינות. כך למשל מתאפשרת התאמת ערכים גם למדינות שבהן התוצר לנפש נמוך, אך גם יוקר המחיה נמוך, כלומר, הן אינן עניות, כפי שעלולה לרמוז רמת התוצר לנפש במצב טרום העדכון.

נוסחת העברת הערך, בהתאמה להכנסה בין שתי מדינות תיראה לדוגמא כך-

$$Bp' = Bs (Yp/Ys)^\beta$$

²¹ לפירוט נוסף לגבי העברת תועלות, ראו OECD (2018), *Cost-Benefit Analysis and the Environment: Further Developments and Policy Use*, OECD Publishing, Paris. שיטות נוספות שניתן להשתמש בהן, במידה וישנו מידע מתאים הן -

- העברת פונקציה - ניתן להשתמש בשיטה זו במידה ומסופקים, או שניתן לחשב באמצעות רגרסיות מרובות משתנים, מקדמי המרה מתאימים המאפשרים להתאים את הערך לתנאים (הכלכליים, דמוגרפיים ואחרים) במדינת היעד ביחס למדינת המקור.
- מטא-אנליזה- המאפשרת, בנוסף למקדמי ההמרה משיטת העברת הפונקציה, גם משתנה דמי לסוג המחקר ושיטת ההערכה של העלויות החיצוניות בו.

²² ניתן למצוא את המדד באתרים שונים, כגון ב-OECD stat ובאתר הבנק העולמי.

זאת, כאשר B מסמל את הערך (התועלת, Benefit), s מסמל את מדינת המקור, p מסמל את מדינת היעד, γ מסמל את התוצר לנפש (מתוקנן במדד שוויון כח הקנייה, PPP), ו- β מסמל את גמישות ההכנסה.

גמישות ההכנסה מוגדרת כשינוי באחוזים בביקוש למוצר כלשהו ביחס לשינוי בהכנסה. לפי מרבית המחקרים בתחום, הביקוש לאיכות סביבה דומה לביקוש למוצר "נורמלי", אולם עם גמישות יחסית קשיחה (גדולה מ-0 וקטנה מ-1). במלים אחרות, שינוי באחוזים בערך המיוחס לאיכות הסביבה גדל פחות מאשר ההכנסה גדלה באחוזים. כלומר אם מדינה מסוימת עשירה פי שניים ממדינה אחרת, ערך המוצר הסביבתי גדול בפחות מפי שניים. המחקרים מצביעים²³ על גמישות הכנסה שתלויה במזהם עצמו. הערך המומלץ על פי CE DELFT (2019) הוא 0.8, והוא זה ששימש להעברת התועלות.

התאמה לתנאים הדמוגרפיים מתבססת על התאמה לצפיפות האוכלוסייה (בנפשות למ"ר), בהתאמה לגמישות למשתנה זה. בערכים לתחבורה²⁴ ובערכים למזהמים עיקריים ממקורות נייחים, הגמישות הותאמה לכל מזהם על בסיס ערכי גמישות לצפיפות אוכלוסייה המפורטים בדו"ח העזר Benefito (CE DELFT, 2011)²⁵. עבור יתר המזהמים המפורטים בנספח 1 בוצעה התאמה לפי יחסי צפיפות על בסיס הערכים של הולנד (CE DELFT, 2017)²⁶, שכן רמת הצפיפות קרובה מאוד בין המדינות והדבר מאפשר התאמה מינימלית.

בנוסף, בכל השיטות מתבצעת המרה של המטבע באמצעות שער החליפין והתאמה לאינפלציה בין שנת מחקר הבסיס לשנת מחקר היעד. להלן פירוט של שלבי העברת התועלות לערכי הנזק ממזהמים ממקורות נייחים ובתחבורה יבשתית.

הערכים לתחבורה ימית מוצגים במקור בהתאמה לגוף הימי, ומותאמים לים התיכון. לכן, לגבי ערכים אלה נדרשה התאמה של שע"ח והאינפלציה בלבד.

²³ Desaiques, B., Ami, D., Bartczak, A., Braun-Kohlová, M., Chilton, S., Czajkowski, M., & Kaderjak, P. (2011). Economic valuation of air pollution mortality: A 9-country contingent valuation survey of value of a life year (VOLY). *Ecological indicators*, 11(3), 902-910.

Alberini, A., & Krupnick, A. (2002). Valuing the health effects of pollution. *The International Yearbook of Environmental and Resource Economics*, 2003, 233-77.

Krupnick, A., Harrison, K., Nickell, E., & Toman, M. (1996). The value of health benefits from ambient air quality improvements in Central and Eastern Europe: An exercise in benefits transfer. *Environmental and Resource Economics*, 7, 307-332.

²⁴ למעט PM2.5, לו סופקו ערכים המותאמים ל-3 גדלים שונים של מרחב עירוני (מטרופולי, עיר בינונית ומרחב חוץ עירוני)

²⁵ CE DELFT (2011) Benefito – Description of the Excel tool and user manual

²⁶ בנושא העברת ערכים למדינות שונות, וכולל גמישויות מתאימות לצפיפות למזהמים העיקריים. CE DELFT (2017) Environmental Prices Handbook 2017

יישום העברת התועלות לישראל

העברת התועלות נעשתה תוך התאמה של שישה גורמים עיקריים-

א. **יחסי תוצר**- העברת התועלות על בסיס יחסי תוצר בין האיחוד האירופאי לבין ישראל (לפי הכנסה לנפש מותאמת PPP), בהתאמה לגמישות ההכנסה לאיכות סביבה -

$$V'_{IS} = V_{EU} (Y_{EU}/Y_{IS})^{0.8}$$

ב. **יחסי צפיפות**-

לתחבורה²⁷ הובאו בחשבון יחסי הצפיפות בין האיחוד האירופאי וישראל מתוקננים בגמישות, בהתאם למקדם ייעודי (β) לכל מזהם, כפי שמומלץ ב-Benefito (CE DELFT, 2011). הנוסחה היא כלהלן-

$$V''_{IS} = V'_{EU} \times (PD_{EU}/PD_{IS})^\beta$$

זאת מלבד המרת ה NMVOC אשר נעשית בצורה הבאה-

$$V''_{IS} = V'_{EU} + \beta \times \ln (PD_{EU}/PD_{IS})$$

ערכי מקדמי הצפיפות עבור המזהמים השונים מפורטים להלן בפרק התוצאות.

למקורות נייחים ההמרה נעשתה על בסיס עלויות חיצוניות שחושבו להולנד (CE DELFT, 2017). היות והצפיפות בהולנד זהה כמעט לחלוטין (99%) לזו של ישראל, ההעברה היא בעיקר בפרמטר התוצר, עם תקנון מזערי להבדלי הצפיפות. עבור **המזהמים העיקריים** (להבדיל מאלו המפורטים בנספח 1), בוצעה גם התאמה לפי מקדם ייעודי (β) לכל מזהם, כפי שמומלץ ב-Benefito (CE DELFT, 2011).

ג. **המרה של הערכים משנת הבסיס**- המרה של הערכים משנת הבסיס לשנת 2019. הערכים לזיהום אוויר ב-CE DELFT (2018) נתונים במונחי אירו 2015. הערכים ב-CE DELFT (2019) נתונים במונחי אירו 2016²⁸. בכדי להמיר את הערכים למונחי שנת 2019 השתמשנו בנוסחת העדכון המקובלת של המשרד להגנת הסביבה.

$$M = ((1+R) / (1+S)) - 1$$

$$^{29}\text{מקדם העדכון} = ((1+M)^*(1+L)^*(1+0.85*K))-1$$

$$P_1 = (1+\text{מקדם העדכון}) * P$$

²⁷ למעט ל-PM2.5, כמפורט בהערת שוליים לעיל.

²⁸ שער ההמרה התבסס על נתוני [אתר בנק ישראל](#). שער"ח ליום 28/8/2019 היה 3.91 ₪ לאירו.

²⁹ ההמרה עד כה נעשתה בהתייחס לגמישות הכנסה של 0.85. ההמלצה היא לשנות את הגמישות כעת ל 0.80.

כאשר-

- P_1 - העלות החיצונית של מזהם מסוים, לאחר העדכון;
 P - העלות החיצונית של מזהם מסוים, הידועה ביום העדכון.
 M - מדד מחירי התוצר.
 R - שיעור השינוי בין התמ"ג השנתי במחירים שוטפים הידוע ביום העדכון ובין התמ"ג השנתי במחירים שוטפים הידוע בשנה שלפני יום העדכון.
 S - שיעור השינוי בין התמ"ג הריאלי השנתי הידוע ביום העדכון ובין התמ"ג הריאלי השנתי הידוע בשנה שלפני יום העדכון.
 L - שיעור השינוי בין היקף האוכלוסייה הממוצעת הידוע ביום העדכון לשנה האחרונה ובין היקף האוכלוסייה הממוצעת הידוע ביום העדכון לשנה שלפני האחרונה.
 K - שיעור השינוי בין התמ"ג הריאלי לנפש הידוע ביום העדכון ובין התמ"ג הריאלי לנפש הידוע בשנה שלפני יום העדכון.

ד. גובה הפליטה - יחסי הנזק בהתייחס לגובה ארובה גבוה וגובה פליטה נמוך מסתמך על CE DELFT (2018). השתמשנו ביחסים המפורטים לגבי התרומה של המזהמים השונים להיווצרות $PM_{2.5}$, מעל ומתחת 100 מ', כפי שמופיע בטבלאות 29 ו-30. יחס זה עומד על 1:2. כלומר, הנזק מפליטת מזהמים מארובה מעל 100 מ' הוא מחצית מהנזק מפליטה בגובה נמוך מ-100 מ'. הנחנו כי יחסים אלו נשמרים לכל המזהמים העיקריים עבור הנזק הישיר.

NMVOC הוא יוצא דופן והנחה זו לא חלה עליו. זאת, מכיוון שערכו מתייחס לנזק שניוני בלבד (היווצרות אחון פוטוכימי והנזק שנגרם ע"י האחון, תהליך אשר מתרחש לאורך זמן ובמרחק רב ממקור הפליטה ולכן עבורו אין הבדל ביחס לגובה הארובה).

כך ניתן היה לקבל ערכים לשלוש קטגוריות-

- גובה גבוה – ארובות מעל 100 מ'
- גובה נמוך – פליטות עד 100 מ'
- נזק מתחבורה

ה. סוג הנזק – בהתאמה להשפעה בנקודות קצה שונות.

בכדי לייחס את הנזק לנקודות הקצה השונות השתמשנו בחלוקה היחסית שהוצגה בדו"ח הקודם שפרסמה CE DELFT ב-2010³⁰. חלוקה זו מתוארת בטבלה שלהלן.

טבלה 8 - חלוקה יחסית של הנזק ממזהמים לפי סוג הנזק*

מזהם/סוג הנזק	בריאות	מבנים**	שירותי מערכת אקולוגית	חקלאות
PM2.5	100%	0%	0%	0%
PM Coarse***	100%	0%	0%	0%
PM10	100%	0%	0%	0%
NO _x	89%	0%	11%	0%
SO ₂	93%	1.8%	3.3%	1.8%
NM VOC	95%	3%	0%	3%
NH ₃	85%	0%	15%	0%

* מתבסס על נתונים מטבלה 12 מתוך CE DELFT (2010) Shadow Prices Handbook, ותיקון נתונים לגבי שיעור הבריאות מכלל הנזק בהתאם למידע שנמסר מחברת CE DELFT. כיוון שב-CE DELFT (2018) נקודות הקצה יכול ומבנים הוצגו כנקודה אחת ללא הפרדה ביניהן, הונח כי הנזק מתחלק בין נקודות קצה אלה באופן אחיד (כל אחת 50% מהנזק).
 * לפי CE DELFT (2018), לחלקיקים יש השפעה על מבנים. עם זאת, בדו"ח מ-2010 הובאה בחשבון רק ההשפעה על הבריאות. כיוון שזו ההשפעה הדומיננטית, זה קירוב סביר.
 ***חומר חלקיקי עדין מרחף שקוטר חלקיקיו קטן מ-10 מיקרומטר וגדול מ-2.5 מיקרומטר

כפי שניתן לראות מהטבלה, הנזק העיקרי הנגרם על ידי מזהמי אוויר הוא לבריאות האדם. מבין הערכים העיקריים שמשפיעים על סוגי נזק נוספים ניתן לציין את ה-NO_x וה-NH₃ לגבי השפעה על שירותי מערכת אקולוגית (14% ו-17% בהתאמה), וה- NM VOC בבניינים וחקלאות (9% לכל סוג נזק).

בכדי לבצע המרה של הנתונים לתנאים בישראל, נתייחס לטבלה הבאה, המצביעה על מערכת הקשרים השונים שבין סוגי הנזק השונים לבין הפרמטרים הנדרשים. חלוקת הנזק נאמדה על בסיס CE DELFT (2010) גם לתחבורה וגם למקורות נייחים בהתאם לטבלה הבאה.

³⁰ CE DELFT (2010) Shadow Prices Handbook Valuation and weighting of emissions and environmental impacts. For Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment, thermPhos, Stichting Stimular.

טבלה 9 – פרמטרים מומלצים להעברת תועלות לנקודות קצה שונות

יחס צפיפות אוכלוסיה לפי גמישות	יחס הכנסה לנפש מותאם PPP	שרשור בין השנים/ שש"ח	
X	X	X	בריאות
	X	X	מבנים
X	X	X	שירותי מערכת אקולוגית*
		X	יבול חקלאי

* מומלצת גם התאמה לסוג מערכת אקולוגית, אולם זו אינה רלוונטית ברמה ארצית

1. מנעד ערכים – כל הערכים מוצגים בהתאם לטווח ערכים.

התבססנו על הטווח המפורט ב-CE DELFT (2018), לגבי היחס בין הערך האמצעי לעומת ערך גבוה וערך נמוך. היחסים בין שלושת הערכים נשמרים כפי שחושבו ב-CE DELFT (2018). כדי לשמור על עקביות, יחסים אלו אומצו כאומדן מתאים לטווח אי הוודאות גם לערכי הזיהום מתחבורה, יבשתית וימית, המתבססים על CE DELFT (2019). לפי CE DELFT (2018), שלושת הערכים מבטאים מידת ודאות ביחס לנזק. הנמוך והאמצעי מתבססים על מידע בגין נזקים ודאיים, בעוד הערך הגבוה מתבסס על נזקים שאינם ודאיים, זאת בהתבסס על מגוון מחקרים מדעיים, כמפורט בפרק המתודולוגיה להלן.

הערכים על בסיס העברת התועלות מפורטים בפרק התוצאות.

5.

מתודולוגיה מפורטת להערכת נזקים למזהמי אוויר ממקורות נייחים ב-CE DELFT (2018)

5.1. תהליך עדכון המחירים הסביבתיים ביחס למחירוניהם

קודמים

כפי שנסקר בסעיף 3.1, CE DELFT (2018) עושה שימוש במודלים סביבתיים וכלכליים המסייעים לאפיון ההשפעות של מזהמים שונים ולהערכה כספית של הנזק מהם.

שני המודלים העיקריים ששולבו הם-

- **NEEDS** - מחקרים ובסיסי מידע שפורסמו במסגרת פרויקט **NEEDS** (NEW ENERGY EXTERNALITIES DEVELOPMENT FOR SUSTAINABILITY)³¹. פרויקט זה הוא המעודכן והנגיש ביותר מבין סדרה של מחקרים שבוצעו במימון האיחוד האירופי בין 1991-2008 על ידי 66 קבוצות מחקר מ-26 מדינות. זהו מודל נתיב השפעה (Impact Pathway Approach), כלומר מתאר את ההשפעה בין פליטות לבין נקודות קצה, ובעיקר בריאות האדם.
- **ReCiPe** (Goedkoop, et al., 2013) – מודל אפיון, המשמש לניתוח השפעות פליטות מזהמים בנקודות הביניים (למשל- על התדלדלות האוזון) ובנקודות הקצה (למשל- בריאות האדם). על מנת לעדכן את ערכי העלויות החיצוניות, בוצעו מספר עדכונים במודלים. לכל אחת מחמש נקודות הקצה המפורטות בסעיף 3.1 לעיל עודכנו עלויות כספיות על בסיס ספרות עדכנית עולמית בתחום כלכלת סביבה³², כמפורט להלן-
א. עודכן מודל נתיב השפעה (Impact Pathway Models), המתאר את הקשר בין פליטות לבין השפעה על נקודות קצה, בהתבסס על פונקציות מינון-תגובה (Dose -Response Functions). פונקציות אלה מאפשרות המרה מריכוז מזהם באוויר לנקודת קצה פיזיות (כלומר, השפעה על בריאות האדם והסביבה).

³¹ אתר פרויקט **NEEDS**.

³² וכן הנחיות של גופים ממשלתיים הולנדיים כבסיס לעדכון.

- ב. התוצאות שלעיל שולבו עם התייחסות לגזי חממה CFC ו- CO_2 , לטובת הערכה ישירה של מחירים סביבתיים ל-15 מזהמים/קבוצות מזהמים עיקריות.
- ג. בוצעה חלוקה של אותם 15 מזהמים/קבוצות מזהמים לפי השפעתם על נקודות הביניים שפורטו בסעיף 3.1, כאשר רוב המזהמים משפיעים על מספר נקודות ביניים³³.
- ד. בהתאם, בוצעה הערכה של עלות הנזק מכל מזהם לכל נקודת ביניים, לפי שקלול של הכמויות שנפלטו באיחוד האירופי³⁴. הכמויות הומרו ל-ReCiPe equivalency factors (כלומר, לכמויות במזהם שווה ערך ייצוגי, בהתאם למשקלות במודל אפיון זה). כך, נוצר ערך כספי ממוצע משוקלל לנזק בנקודת הביניים. בהתאם, חושב הנזק ממזהמים שאופיינו ב-ReCiPe וממנו הוסק פקטור נזק משוקלל לכל נקודת הביניים. לסיום התהליך, חושב בהתאם מחיר סביבתי לכל המזהמים שאופיינו ב-ReCiPe ביחס לנקודות הקצה בדו"ח (ראו נספח 1 הכולל את רשימת המזהמים המפורטת, לגבי פליטות ממקורות נייחים).

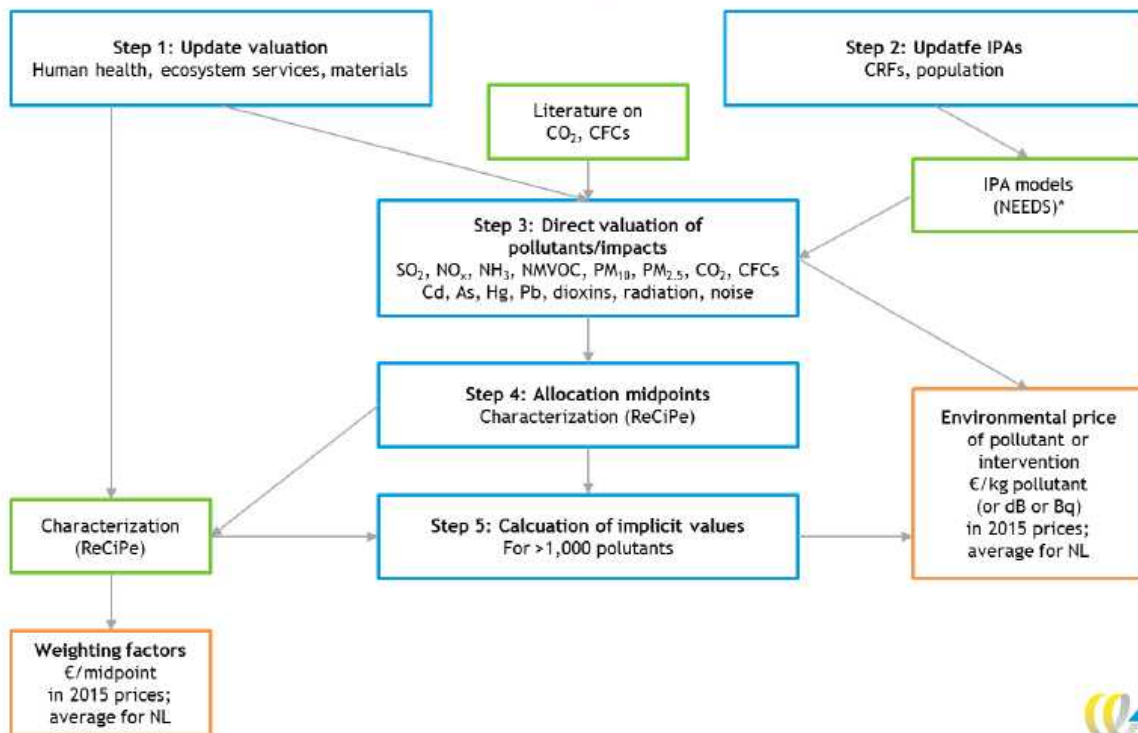
תהליך זה מתואר באיור הבא.

³³ למזהמים שמשפיעים על מספר נקודות ביניים, חולקה ההשפעה לפי נקודות הקצה ב-ReCiPe. למשל, תחמוצות חנקן וגופרית משפיעות על חלקיקים ואוקסידנטים ודרכם על הבריאות. מחלקים את ההשפעה, אירו לק"ג תחמוצות גופרית המשפיע על חלקיקים ואירו לק"ג תחמוצות גופרית המשפיע על אוקסידנטים. כדי לקבל מחיר לנקודת ביניים, ממירים את כל המזהמים למזהם שווה ערך ומקבלים אירו לק"ג למזהם שווה ערך, לפי יחידות ההמרה של ReCiPe.

³⁴ בהתאם למדינות EU28 נכון לשנת 2015 - להערכת כותבי המכירות הסביבתיים האירופיים מחברת CE DELFT, השימוש בנתונים המתבססים, בין השאר, על הפליטות באירופה לצורך הכימות, צפוי לגרום לסטייה ביחס לנתונים ייעודיים של ישראל ב-10%-20% (התכתבות מיום 8/8/19).

איור 3 – שלבי עדכון CE DELFT (2018) ביחס לגרסאות קודמות

The Environmental Prices Handbook methodology



נפרט עתה את העדכונים העיקריים שבוצעו ב-CE DELFT (2018) ביחס לגרסאות קודמות שלו שפורסמו בעבר על ידי חברת ³⁵CE DELFT-

- כמו בגרסאות קודמות, גם בגרסת 2018, הוחלט להתבסס על מחקרים ובסיסי מידע שפורסמו במסגרת פרויקט ³⁶NEEDS. מתודולוגיית NEEDS מתבססת על גישת נתיב ההשפעה (Impact-Pathway), המשלבת ארבעה רכיבים מתודולוגיים-
 1. בסיס מידע/ תחזית פליטות.
 2. מודל פיזור המאפשר להמיר פליטות לריכוז על בסיס מודלים מטאורולוגיים וכימו-אטמוספיריים.
 3. פונקציית מניון תגובה (Dose Response Functions) – המאפשרת המרה מריכוז לנקודות קצה פיזיות (השפעה על בריאות האדם והסביבה).
 4. הערכה מוניטרית של ההשפעות הפיזיות.

³⁵ ראו הערת שוליים 12.

³⁶ הכותבים אף מציינים כי מחירוים סביבתיים עדכניים שפורסמו באירלנד, בלגיה וגרמניה מתבססים על מתודולוגיית NEEDS.

בגרסת 2018 בוצעו מספר התאמות לערכים מתוך NEEDS ביחס למחירוים קודמים-

✓ **התאמה להנחיות בריאותיות עדכניות** – ארגון הבריאות העולמי (WHO) פרסם ב-2013 ו-2014 מסמכים בנושא השפעות זיהום אוויר על הבריאות. מסמכים אלה מתייחסים בפרט לעליה בהשפעות של NO_x ו-NM VOC. על מנת להביא זאת בחשבון במודל, עודכנו קבוצות הסיכון בפונקציות מינון תגובה של NEEDS, האומדות השפעות של תחלואה ותמותה של מזהמים שונים.

✓ **התאמה לירידה בריכוזי הרקע של מזהמים שונים במדינות האיחוד האירופי בין השנים 2005 ל-2015** – על מנת לבצע את התאמה, החוקרים שילבו בין תחזיות הפליטה במודל לשנים 2010 ו-2020 לייצוג פליטות 2015. התוצאות הותאמו לרמת הפליטה ב-2015, בהתאם לפער בין תחזיות 2010 ו-2020 וההנחות במודל לגבי הפליטות בשנים אלה. לאחר מכן, נדונו הבדלים בתוצאות עם מומחים לכימיה אטמוספירית, לבדיקת סבירות התוצאות.

✓ **התאמה לגודל האוכלוסייה באיחוד האירופי ב-2015 והרכבה** – הונח כי התחזית ב-NEEDS שיקפה את גידול האוכלוסייה ב-4% בין 2005-2015.³⁷ עם זאת, היה שינוי בהרכב האוכלוסייה בפועל, והיא הזדקנה בממוצע. לשם ביצוע התאמה לנושא זה השתמשו במידע עדכני מ-EuroStat לגבי הרכב האוכלוסייה ויישמו אותו ישירות על פונקציות מינון תגובה, האומדות השפעות של תחלואה ותמותה של מזהמים שונים, לפי קבוצות גיל.

- ערכי הנזק הוצגו ב-CE DELFT (2018) לראשונה (ביחס למחירוים קודמים) כטווח של שלושה ערכים (גבוה, אמצעי ונמוך) ולא כמספר יחיד³⁸. הטווח מבטא מידת ודאות ביחס לנזק- הערכים הנמוך והאמצעי מתבססים על מידע בגין נזקים ודאיים, בעוד הערך הגבוה מתבסס על נזקים שאינם ודאיים. ההצגה כטווח מאפשרת למקבלי החלטות גמישות בשימוש בכלי כמפורט בהמשך.
- כמו בגרסאות קודמות של ספר העלויות החיצוניות, אפיון השפעת הנזקים מהמזהמים השונים התבסס על מודל RECiPe³⁹. ב-CE DELFT (2018) התבססו על ReCiPe בגרסת 2013.

³⁷ להשפעות שנאמדו שלא על בסיס NEEDS (מתכות כבדות למשל), הונח גידול אוכלוסייה של 4% בין 2005 ל-

2015

³⁸ למעט פחמן דו חמצני והשפעותיו על שינוי האקלים, שהוצג כטווח ערכים גם בגרסה קודמת Shadow Prices (CE DELFT, 2010) Handbook. כמו כן, בגרסת 2010, לצד ערכי הנזק הוערכו גם עלויות הפחתת הנזק (כלומר, אומדן עלות האמצעים הטכנולוגיים והארגוניים הנדרשים להפחתת הפליטות).

³⁹ ReCiPe הוא מודל אפיון של השפעות מזהמים. מודל זה מתבסס על מודלים פיזיקליים-כימיים, שמשמשים לביסוס הקשר בין מזהמים ונקודות ביניים ובין נקודות ביניים לנקודת קצה. "פקטור אפיון" (Characterization Factor), מבטא עד כמה כמות של מזהם מסוים תורמת להשפעה סביבתית מסוימת, וכך מאפשר לתרגם הערכה כלכלית של מזהם אחד למזהמים נוספים שיש להם השפעה על אותה נקודת קצה.

מודל זה מכיל ניתוח מחזור חיים למגוון מזהמים, כולל התייחסות לנקודות הביניים ונקודות הקצה, באופן הרמוני ומתואם בין ההשפעות השונות. מודל זה מאפשר לעשות שימוש בנתונים על בסיס מספר גישות לניתוח השפעות עתידיות-

- הגישה האינדיבידואליסטית - גישה המניחה אופטימיות טכנולוגית, ולכן טווח הזמן בה הוא 20 שנה בלבד. גישה זו מגיעה לתוצאות דומות לאלו המתבססות על הנחות העבודה של פרויקט NEEDS, בו מסגרת הזמן הייתה 30 שנה, בשיעור היוון של 3%. לכן, זו הגישה שאומצה ל- CE DELFT (2018), למעט להשפעות על הטבע, כמפורט בנקודה הבאה.

- הגישה ההיררכית - המתבססת על מסגרת זמן של 100 שנה.
- והגישה האגלטרית⁴⁰ – המתבססת על מסגרת זמן של 500 שנה.
- הונח כי העלייה השנתית היחסית של השפעות בלתי הפיכות על הטבע ומגוון ביולוגי היא 1%. כך, ניתן להשתמש בנתונים לייצור תחזיות והערכת השפעות עתידיות. כיוון שמדובר בנזק שהונח כי גדל עם הזמן, הוחלט לגבי נקודת קצה זו להשתמש במודל ReCiPe בגישה ההיררכית, בעלת אופק הזמן הארוך יותר, כמפורט לעיל.
- ב- CE DELFT (2018), על בסיס הנחייה של ועדת שיעור ניכיון מטעם ממשלת הולנד, הונח שבנושאי השפעות בריאות, אין עדכון על פי גמישות הכנסה. כלומר, נזנחה ההנחה לגבי גמישות הכנסה חיובית לנושאי איכות הסביבה, המשקפת התייחסות לאיכות סביבה כמוצר נורמלי (כלומר, מוצר שהביקוש אליו עולה עם העלייה ברמת ההכנסה). ההנחה ב- CE DELFT (2018) היא שלמרות עלייה בביקוש (שירותי) בריאות כתוצאה מגידול בהכנסה, המחיר לא יעלה, כי השפעת העלייה בכמות המבוקשת תקוזז על ידי עלייה בהיצע כתוצאה מהתקדמות טכנולוגית. בספר מוצגת גם הצדקה חלופית לשינוי זה, והיא ההנחה שהתועלת השולית מבריאות פוחתת – כלומר, כל "יחידת בריאות" נותנת פחות תועלת. יחד עם זאת, ב- CE DELFT (2019) החוקרים חזרו להנחה הקודמת שהייתה מקובלת בעבודות קודמות ומחקרים בתחום, לפיה איכות הסביבה היא מוצר נורמלי עם גמישות הכנסה חיובית. לכן, הונח שם כי גמישות הביקוש לאיכות סביבה היא בשיעור 0.8% ביחס לשינוי בהכנסה. אנו שומרים על הנחה זו בהתאמת המחירים לישראל, והיא תלווה אותנו הן לצורך העברת התועלות והן לצורך עדכון שנתי של המחירים לאורך זמן.

בעקבות החישובים והעדכונים המפורטים לעיל, ניתן היה לעדכן (ביחס לספרי עלויות חיצוניות קודמים) מחירים סביבתיים לנקודות הביניים המפורטות לעיל. לפי מחירים אלה ניתן היה לחלץ

⁴⁰ אגליתרי, מהמילה שוויון.

מחירים בהתאם ליחס הסביבתי בין מזהמים התורמים לאותה נקודת ביניים (אותה תמה סביבתית), בהתאם למודל האפיון ReCiPe, וכך נעשה ל-2500 מזהמים, במדיות שונות (אוויר, מים, קרקע וכו').

חשוב להדגיש כי חישוב ערכים כאלו מתבסס על שתי הנחות מפשטות-

1. ליניאריות בין תרומת המזהם לנקודת הביניים ובין הנזק, כלומר כל ק"ג נוסף של זיהום משפיע בצורה דומה⁴¹.

2. ההשפעה של המזהם ביחס למחיר של נקודת הביניים הוא זהה באירופה ובישראל, ולכן ניתן להשתמש באפיון של מודל ReCiPe, המבוסס על ממוצע אירופי.

מובן כי הנחות אלה הן מפשטות ואינן מדויקות, אולם בחינה מפורטת שלהן חורגת מתחום המחקר שבוצע.

⁴¹ בהקשר זה, נעיר כי ריכוזי הרקע הטבעיים של חלקיקים מסוג PM10 ו-PM2.5 בישראל הם גבוהים משמעותית לעומת מדינות אירופה. המיקום הגאוגרפי של מדינת ישראל בשילוב תנאים מטאורולוגיים אופייניים, חמן השהייה הארוך של חלקיקים קטנים באטמוספירה, יוצרים מצב בו חלקיקים נשימים מוסעים לאזורינו ממדבריות צפון אפריקה, מדבריות ערב במזרח, ומפעילות אנתרופוגנית במזרח אירופה ומייצרים ריכוזים גבוהים באוויר באופן קבוע. בהתאמה להנחה המפשטת של הליניאריות, הוחלט שלא להביא בחשבון את ריכוזי הרקע הגבוהים ביחס לאירופה.

5.2. שימוש במחירים הסביבתיים לטובת תחזיות

כאמור, המחירונים הסביבתיים מחושבים לפי ממוצע אירופי לשנת 2015 למקורות נייחים ולשנת 2016 לתחבורה. לחיזוי השפעת פליטות עתידיות, נדרש להניח מספר הנחות לגבי התפתחותם לאורך זמן-

- לגבי פליטות מזהמי אוויר, אין הנחה מקובלת לגבי השינוי בהשפעות על הבריאות לאורך זמן. קיימות אינדיקציות לאפשרות של עלייה בנזק לאורך זמן, אבל הן אינן מובהקות, ולכן, לשם השמרנות, הונח במחירונים הסביבתיים האירופיים כי אין שינוי⁴².
- יש להוון השפעות עתידיות לפי שיעור ניכיון חברתי של 3%⁴³.
- כאמור, הונח כי העלייה השנתית היחסית של נקודת הקצה "שירותי מערכת אקולוגית ומגוון ביולוגי", המייצגת השפעות בלתי הפיכות על הטבע, היא 1%. כך יש להניח גם לגבי תחזיות.

כמו כן, שימוש בעתיד יבוצע באמצעות התאמה לאינפלציה על סמך מדד המחירים, ותוך התאמה לשינוי ברמת ההכנסה, ובגודל האוכלוסיה, כמפורט בנוסחת העדכון. סיבות שיצדיקו שינויים מהותיים יותר ועדכון של הערכים נוגעות בעיקר לידע מדעי חדש בנושאים אלה, למשל-

- שינוי בהמלצות ארגון הבריאות העולמי (WHO) לגבי פוטנציאל נזקי מזהמים.
- שינוי בשיטת החישוב לגבי נזקים לבריאות האדם או שירותי מערכת אקולוגית.
- אם יוערך כי נחצו ספי זיהום הגורמים לשינוי מהותי בנזק כרוני ממזהמים מסוימים.
- שינויים משמעותיים בפיקור המזהמים והשפעותיו החזיות.
- שינוי בפקטור אפיון של השפעת מזהמים (ראו הערת שוליים 37)⁴⁴.

⁴² להלן דוגמא לא אינטואיטיבית לשינוי בהשפעות עם השינוי בריכוזי הזיהום - ההשפעה של ה-NOx ו-SO₂ דווקא עולה כשכמות המזהמים הללו יורדת, בנוכחות חנקן בכמויות גבוהות באטמוספירה, בשל היווצרות מזהמי משנה.
⁴³ המלצה זו מתואמת עם המלצת ממשלת הולנד, כמו גם עם ההמלצה בפרויקט NEEDS, שהתייחס להיוון השפעות עתידיות לאורך 50 שנה, בריבית 3%. כמו כן, הוא מתואם עם העבודה של ברק, (2016) מחיר ההון הפרטי והחברתי - המלצה לחישוב שער ניכיון חברתי, הוגש למשרד להגנת הסביבה.
⁴⁴ ראו הערת שוליים 39.

5.3. הערכת נקודות הקצה

5.3.1. שיטות ההערכה של נקודות קצה

על מנת לאמוד את עלות הנזק מפליטות מזהמים, יש להבין את השפעתם. ניתוח זה מתבצע הן בנקודות הביניים והן בנקודות הקצה. כאמור, נקודת הביניים היא הנקודה בה יש השפעה סביבתית, שלה עצמה השפעות משניות. בנקודות הביניים, פליטת המזהם גורמת להשפעה סביבתית שלילית, שניתן לכמתה. גם נקודת הביניים עצמה יוצרת השפעה סביבתית ניתנת לכימות, והיא משפיעה על נקודות קצה. נקודת הקצה היא הנקודה שבה אין יותר השפעות משניות. נקודות הביניים והקצה מפורטות לעיל בסעיף 3.1.

בגישה המתבססת על עלות הנזק, מנסים להעריך את אובדן הרווחה (תועלת) כתוצאה ממפגעים סביבתיים. בהקשר של נזקי תחלואה, נהוג להעריך את הנזק הכלכלי הכרוך בעלויות טיפול ואובדן הכנסה. כדי לקבל תמונה מלאה של אובדן התועלת החברתית יש להוסיף ולאמוד את נכונות הפרט לשלם עבור איכות הסביבה, כפי שהוסבר בפרק 2 לעיל⁴⁵.

את התועלת של בני האדם מאיכות הסביבה מעריכים בנקודות הקצה, משום שאנשים מסוגלים להבין את המשמעות של שינויים לטובה ולרעה בנקודת קצה, למשל כהשפעה על הבריאות, ולהעריך כמה הם היו מוכנים לשלם תמורת מצב בריאותי משופר. שלוש שיטות אמידה שונות ומשלימות ננקטו ב- CE DELFT (2018) לאמידת הנכונות לשלם לטובת מניעת נזק סביבתי בתחום זיהום אוויר-

א. **שיטת ההעדפות הנגלות** – בשיטה זו, התנהגות בשוק מקביל משמשת לאמידת שוק שאינו קיים. בדרך כלל, השימוש הוא במחירים הדוניים לנדל"ן, כלומר ניתוח אקונומטרי של מחירי נדל"ן באזורים הסובלים ממפגעי איכות סביבה שונים. היתרון העיקרי הוא אמידה על בסיס בחירות אמיתיות של אנשים, באופן שמשקלל בצורה מהימנה גם את מגבלת התקציב שלהם. החסרונות הוא שיש לעיתים קורלציה בין משתנים (רעש ונזקי זיהום אוויר למבנים למשל), ולכן יש קושי לבודד את ההשפעה של משתנה מסוים⁴⁶.

ב- CE DELFT (2018) נעשה שימוש בשיטת ההעדפות הנגלות לאומדן נזקי זיהום אוויר על מבנים, על בסיס עלויות ניקוי מבנים.

ב. **שיטת ההעדפות המוצהרות** – שיטה זו מבוססת על הערכה של מוצר מסוים במצב היפותטי של שינוי בהיצע שלו (כמותו). כלומר, אנשים מתבקשים לבצע הערכה של המוצר, המותנית

⁴⁵ לחלופין, ניתן להעריך את הנכונות לקבל תשלום בגין פגיעה באיכות הסביבה (Willingness To Accept), אולם לא נעשה שימוש בשיטה זו.

⁴⁶ כמו כן, לפעמים חסר לאנשים מידע לגבי המשמעות של מפגעים סביבתיים מסוימים, ולכן הם אינם מובאים בחשבון גם בשווקים מקבילים. לדוגמא, מחקרים מצביעים כי לרעש השפעה בריאותית של ממש, מעבר להיותו מטרד, השפעה שרוב האנשים אינם מודעים לה.

בתרחישים השונים המתוארים בשאלון, ולכן השיטה נקראת גם "הערכה מותנית" (Contingent Valuation Method). על מנת שהשיטה תספק תוצאות מהימנות לערך של המוצר, יש להרכיב את השאלונים באופן שהנשאלים יקבלו מידע מלא, ויספקו תשובה כנה⁴⁷.

ב-CE DELFT (2018) נעשה שימוש בשיטת ההעדפות המוצהרות לאומדן הערך של נזקים לבריאות מזיהום אוויר, ולחלק מההערכות לגבי שירותי מערכת אקולוגית.

שיטת עלויות השיקום - שיטה זו מתבססת על הערכת העלויות הנדרשות להחזרת המצב לקדמותו. לשיטה זו שני חסרונות, העלולים להביא להערכת חסר או יתר. מחד, החזרת המצב לקדמותו אינה תמיד הבחירה האופטימלית כלכלית (למשל, כאשר עלויות השיקום עולות על התועלות ממנו. במקרה כזה, זו עלולה להיות הערכת יתר), ומאידך, לא תמיד ניתן להחזיר את המצב לקדמותו במלואו (גם במקרה שבו החזרת המצב לקדמותו היא הדבר הרצוי למשק. במקרה כזה, זו עלולה להיות הערכת חסר). לכן, ב-CE DELFT (2018), נעשה בה שימוש רק במקרים בהן שתי השיטות הראשונות המפורטות לעיל אינן אפשריות ליישום, לגבי חלק מהשפעות זיהום אוויר על מבנים וחומרים, וחלק מההערכות לגבי שירותי מערכת אקולוגית.

5.4. הערכה של השפעות על בריאות האדם

מבין ההשפעות על נקודות הקצה שנבחנו, מזהמי האוויר משפיעים בעיקר על בריאות האדם (בשיעור של 82%-94%, כמפורט בטבלה 8 לעיל) נובעות מעלויות תחלואה ובתמותה. עלויות אלו נחלקות לשלושה סוגים-

- תמותה בטרם עת בחשיפה כרונית – בעיקר ממחלות לב וכלי דם ומחלות ריאה.
 - תמותה בטרם עת בחשיפה אקוטית – בעיקר מאירועי כשל לבבי⁴⁸.
 - אחוזי תחלואה גבוהים יותר באוכלוסייה - בעיקר אסטמה ומחלות ריאה, אלרגיות ועוד.
- נזקים לבריאות הם כאמור נקודת קצה של השפעת מזהמים, והם פועל יוצא של השפעות

⁴⁷ כיוון שמדובר בשאלון שבו הערכים שנשאלים מספקים הם תיאורטיים, חשוב שהנשאלים יעריכו נכון את מגבלת התקציב שלהם, על מנת שהערכים לא יהיו גבוהים יותר מאלו שהם יהיו מוכנים לשלם בפועל במצב מציאותי. כמו כן, חשוב שהנשאלים לא יתנו תשובות שמטרתן לרצות את החוקר או להועיל להם אסטרטגית, אלא תשובות כנות, המשקפות את העדפותיהם.

להעמקה בנושא בניית שאלונים מסוג CVM ו-Discrete Choice Experiment, ולפירוט נוסף לגבי שיטות אמידה, ראו OECD (2018), Cost-Benefit Analysis and the Environment: Further Developments and Policy Use, Publishing, Paris. OECD

⁴⁸ יש לציין כי זיהום אוויר הוא בד"כ תורם נוסף למוות בטרם עת, ובד"כ לא מזוהה כסיבת המוות העיקרית. כשל לבבי יכול, בנסיבות בריאותיות מסוימות, להיגרם כתוצאה מזיהום כבד של ערפיח למשל.

בנקודות הביניים הבאות-

1. דילול אחזן
2. יצירת חלקיקים
3. יצירת חמצון פוטוכימי Photochemical Oxidant Formation
4. רעילות לאדם⁴⁹

חשוב לציין, כי נוסף על השפעות בנקודות הביניים שפורטו לעיל, גם שינוי אקלים הוא נקודת ביניים שמשפיעה על בריאות האדם, אולם הוא כומת באופן נפרד, במפורט בפרק 7 להלן.

אמידת תחלואה מתבססת בעיקר על מחקרים אשר משלבים בין עלויות טיפול ומניעת המחלה לבין ההסתברות לחלות במחלה. הסתברויות מעין אלו נמצאות במחקרים אפידמיולוגיים ומכונות פונקציות תגובה-מינון (Dose-response functions). אמידת תמותה מבוטאת בדרך כלל בסוגי האינדיקטורים הבאים-

- Value of Life Year - VOLY – ערך המיוחס לשנת חיים בהתבסס על אורך חיים צפוי, ולכן מתאים להשפעות מזהמים על הבריאות (לפי NEEDS 2008).
 - Value of Statistical Life - VSL – ערך חיים סטטיסטיים. ערך זה מתבסס על שתי שיטות עיקריות. מחקרים בשוק העבודה על פרמיות סיכון בארה"ב ומחקרים על נכונות לשלם עבור הפחתת הסיכון למוות מוקדם. שיקלול של ההסתברות למוות מוקדם בנכונות לשלם למניעתו מביאים לערך המבוקש. ה-VSL הוא ערך נוכחי של VOLYs, כלומר, ערך החיים מתבסס על ערך מהוון של שנות חיים ממוצעות.
 - Years of Life Lost - YOLL – מספר השנים שאבדו בשל מוות בטרם עת.
 - Disability-Adjusted Life Years - DALY – מספר שנות חיים אבודות בשל בריאות לקויה.
 - Quality-Adjusted Life Years - QALY – מספר שנות חיים בבריאות שלמה.
- ב-CE DELFT (2018) האינדיקטור הרלוונטי הוא VOLY⁵⁰.

בפרויקט NEEDS (2006) בוצעה הערכה של VOLY באמצעות שיטת הערכה מותנית⁵¹, כלומר שאלו אנשים על נכונותם לשלם עבור הארכת חיים של 3-6 חודשים כתוצאה משיפור באיכות

⁴⁹ ובנוסף, השפעות מינוריות של הגברת חומציות/ החמצה (Acidification), שלא כומתו במסגרת המחקר שבוצע לטובת CE DELFT (2018).

⁵⁰ הדבר נכון גם לאומדן השפעות זיהום אוויר בספר העלויות החיצוניות לתחבורה. עם זאת, לטובת אמידת השפעות תאונות דרכים נעשה שימוש ב-VSL.

⁵¹ המתודה התבססה על ראיונות פנים אל פנים, ובחירה באמצעות כרטיס תשלומים.

האוויר. תוצאת מחקר זה הייתה ערך שנת חיים של 41,000 אירו לשנת 2006 לממוצע של מדינות EU15 יחד עם שווייץ, למקרה של מוות בטרם עת מחשיפה כרונית לזיהום.⁵²

הערכים הכלכליים ב-NEEDS מתבססים על אירו של שנת 2000, ולכן שורשו קדימה מבחינת שינויים באינפלציה.⁵³ לאחר שרשור זה, הערך של NEEDS ל-VOLY עודכן ל-48,000 אירו לשנת 2015.⁵⁴

ערך זה דומה לסף התחתון ב"מדריך עבודה לניתוח עלות תועלת בתחום החברתי" שפורסם ב-2016 בהולנד, לפיו טווח הערכים של QALY ושל VOLY הוא 50,000-100,000 אירו.⁵⁵

הוא גם דומה לחציון שחולץ ממטה-אנליזה של מחקרים מאז 2011 בנושא VOLY בתחום עלות-תועלת של מדיניות איכות אוויר באיחוד האירופי - 58,000 אירו.⁵⁶ בניתוח זה, עלויות התחלואה התבססו על הערכת עלויות בפועל (של אשפוז, אובדן יום עבודה, וכו')⁵⁷.

הערך העליון חולץ מתוך מטא-אנליזה שפורסמה על ידי ה-OECD (2012) בה נקבו ב-VOLY של 60,000-120,000 אירו,⁵⁸ וכן מתוך מדריך עבודה לניתוח עלות תועלת בתחום החברתי שפורסם ב-2016 בהולנד במפורט לעיל, ונקבע על 110,000 אירו.

לכן, ב-CE DELFT (2018) הטווח לאובדן שנת חיים (VOLY) נקבע בין 50,000-110,000 אירו (מחירי 2015).

⁵² כיוון שנמצא במחקרים קשר בין הכנסה לבין הערך המיוחס למוות בטרם עת - ערך זה פולג בין המצטרפות הוותיקות לאיחוד - EU25 + שווייץ - 40,000 אירו, למצטרפות החדשות - 33,000 אירו. בגרסאות קודמות אומצה תוצאה של מחקרים קודמים שצוטטו ב-NEEDS ייעודית למוות בטרם עת מחשיפה אקוטית, 60,000 אירו, אשר במחקר זה הוחלט לא לאמץ, שכן מוות מחשיפה אקוטית מזיהום אוויר פוגע בעיקר באוכלוסיית הקשישים, אשר מייחסת ערכים נמוכים יותר לשנת חיים נוספת מאשר קבוצות גיל נמוכות יותר. הוחלט כי גם מקרי מוות כאלו יקבלו את הערך של מוות בטרם עת מחשיפה כרונית.
⁵³ אולם, כאמור לעיל, ב-CE DELFT (2018) לא בוצעה התאמה לעלייה בהכנסה, המייצגת הנחה לגבי גמישות ביקוש לאיכות סביבה ביחס לעליית הכנסה. זאת על בסיס הנחיית וועדה ממשלתית הולנדית בנושא שיעור הניכיון המתאים. ועדה זו קבעה שעם הגידול בהכנסה, מתרחש גם גידול ב"היצע שירותי בריאות", המוריד את ערכם. לכן, הוועדה הנחתה, בניגוד למחקרים קודמים רבים בנושא, שלא להתחשב בגמישות ביקוש לאיכות סביבה ביחס להכנסה, ששיעורה המקובל הוא 0.8-0.85%. נציין כי גם ב-CE DELFT (2010) וגם ב-CE DELFT (2019), הונח כי גמישות הביקוש של איכות סביבה ביחס לשינויים בהכנסה הוא 0.85% ובתחבורה 0.8%.
⁵⁴ בנוסף, נקבע לגבי השפעה על תמותת תינוקות, בהתבסס על NEEDS (2008), לפי VSL כפול משל מבוגרים - 15 מיליון אירו ו-3 מיליון אירו כגבול תחתון (כאשר משקלו של רכיב זה בסך ההשפעה מזיהום אוויר נחשב זניח יחסית).
⁵⁵ SEO (2016a). טווח זהה הוצג גם ב-European Commission's 2009 Impact Assessment Guidelines ל-VOLY.

⁵⁶ Holland, 2014. יש לסייג ולומר שערכים אלה מתבססים על סיכון תמותה ולא על השפעה על תוחלת חיים, וכן מבוסס על ערכים שתוקנו לאינפלציה בתקופה של אינפלציה גבוהה, עם התחלת השימוש במטבע המשותף, האירו.

כמו כן, הממוצע של המחקרים שנסקרו היה גבוה בהרבה - 135,000 אירו. בנוסף, מספר מחקרים (Chanel & Luchini (2014), Mouters & Chorus (2016)) טענו שזה הערכת חסר, כיוון שהיא מתבססת על הערכת הערך של מוות מוקדם לנשאל בלבד, וצריכה הייתה לכלול את הערך של מוות מוקדם לאנשים שהפרט אוהב, ולא רק לעצמו.

⁵⁷ אובדן ימי עבודה תומחר לפי 175 אירו (כולל מע"מ) ליום במחירי 2015, על בסיס רכיב ייצור (משכורות וסוציאליות) בחשבונות הלאומיים.

⁵⁸ כמו כן, נמצא קשר חיובי בין רמת השכלה לבין הערך המיוחס ל-VOLY.

בנוסף, על בסיס מחקר מוקדם יותר שצוטט גם הוא ב-NEEDS, אשר בחן את הנכונות לשלם, בוצעה הערכה המתבססת על שנות חיים בבריאות שלמה (QALY) לסוגי תחלואה שונים כגון- בעיות נשימה, סרטן, אובדן שעות עבודה כתוצאה ממחלה ועלות ביקורים בבתי חולים. הערך של מספר שנות חיים אבודות בשל בריאות לקויה (DALY) הוערך כפי 1.087 ביחס לשנות חיים בבריאות שלמה (QALY). זאת על בסיס בחינת הרכב הגיל ואחוזי התחלואה. בהתאם, טווח העלויות אמור להיות 54,350-108,700 אירו.

בהתבסס על כך, ערך של שנות חיים בבריאות טובה (הערך המוצמד ל-QALY) נקבע בין 50,000-100,000 אירו (מחירי 2015).

הן עבור VOLY והן עבור QALY מומלץ ערך אמצעי של 70,000 אירו (כיוון ששניהם אינם מתפלגים נורמלית).

5.5. שירותי מערכת אקולוגית (כולל חקלאות)

מערכות אקולוגיות תורמות לשגשוג אנושי במגוון דרכים, שניתן להגדירן תחת הכותרת כ"שירותי מערכת אקולוגית". פליטות לאוויר יכולות לשנות את התפקוד של מערכות אקולוגיות ואת הזמינות של שירותי המערכת האקולוגית. מלבד שירותי המערכת, לעצם קיומו של מגוון ביולוגי – מגוון הצמחים וצורות החיים, יש חשיבות, והוא בעל ערך לשרידות ולאיכות המערכות האקולוגיות – הוא תומך בתהליכים בסיסים של היווצרות ושימור קרקע, מחזור המים בטבע וכו', שהם הבסיס לשירותי המערכת האקולוגית.

על פי CICES⁵⁹ קיימים שלושה סוגים של שירותי מערכת אקולוגית-

- שירותי אספקה, כגון מזון, דלקים ביולוגיים, מים שפירים ועוד.
 - שירותים תרבותיים, כדוגמת שירותי פנאי ונופש.
 - שירותי ויסות ותחזוקה, כגון ויסות אקלימי, היווצרות קרקע, בקרת מזיקים, טיהור מים ועוד.
- מחקר רב נערך בנושא סוגי השירותים וסיווגם, אך עדיין קיים מידע מועט לגבי ההשפעות המזיקות של מזהמי אוויר (שאינם CO₂) על שירותי מערכת אקולוגית. המידע הקיים נוגע בעיקר לנזקים לשירותי אספקה מסוג יבול חקלאי, כתוצאה מנוכחות של מזהמים מסוימים.

היחס בין שירותי מערכת אקולוגית למגוון ביולוגי הוא יחס מורכב, קשה לכימות, אינו ליניארי ומשתנה בין סוגי שירותים שונים. כלומר, מגוון ביולוגי תורם לשירותי ויסות ולשירותי תרבות,

⁵⁹ קישור לאתר The Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) – בסיס מידע שפותח ע"י סוכנות הסביבה של האיחוד האירופי (EEA) שמטרתו סיווג של שירותי מערכת אקולוגית כחלק מפיתוח חשבונאות סביבתית.

אולם מגוון ביולוגי עלול בסיטואציה מסוימת גם להקטין יבול חקלאי, ובכך להקטין שירותי אספקה. עם זאת, בטווח הארוך מהווה מגוון ביולוגי תנאי בסיס לשירותי אספקה. מגוון ביולוגי יכול להיחשב שירות נוסף, או תורם (ולעיתים תנאי בסיס) להיווצרותם של שירותים האחרים. על סמך מודל ReCiPe הונח כי מגוון מינים יכול לשמש כמשתנה פרוקסי (מקורב) להערכת תפקוד מערכות אקולוגיות. ב-NEEDS הונח כי אובדן מגוון ביולוגי מוביל לאובדן של פונקציות של מערכות אקולוגיות והרעה בעמידות שלהן, וכך גם ב-⁶⁰ Science for Environment Policy (2015). בהתאם, נעשה ניסיון לכמת את הקשר בין פליטות להכחדת מינים, וב- CE DELFT (2018) הוחלט לחשב את הנזקים לשירותי מערכת אקולוגית לפי אובדן של מגוון ביולוגי וכן אובדן יבול⁶¹.

נקודות הביניים הרלוונטיות להיווצרות הנזק בנקודת הקצה של שירותי מערכת אקולוגית הן⁶² -

1. דילול אחון
 2. יצירת חלקיקים (בעיקר ערפיח)
 3. הגברת חומציות/ החמצה (Acidification)
 4. אאוטרופיקציה (הצטברות חומר אורגני במקורות מים - העתרה)
 5. רעילות לאדם
 6. רעילות לבתי גידול – מערכת החי והצומח
- בנוסף על השפעות בנקודות הביניים שפורטו לעיל, שינוי אקלים מהווה גם הוא נקודת ביניים שמשפיעה על שירותי מערכת אקולוגית, אולם הוא כומת באופן נפרד, במפורט בפרק 7 להלן. המזהמים שהשפעתם על שירותי מערכת אקולוגית כומתו הם SO_2 , NO_x ו- NH_3 . הקשר בין השפעות לפליטות הוערך עפ"י NEEDS (2008), דילול אחון בוסס על ערכים מ- Hayashi et al. (2006) ושאר נקודות הביניים על ReCiPe (2013).
- הנזק הכמותי של אובדן שירותי מערכת אקולוגית מבוטא על ידי האינדיקטור Potentially Disappeared Fraction (PDF). אינדיקטור זה מייצג את שיעור אובדן המינים כתוצאה מהשפעות שליליות שונות (כולל פליטות מזהמים לאוויר), בערכים של-PDF / מ"ר/ שנה. כדי להעריך השפעת פליטות באינדיקטור זה, מעריכים את אחוז המינים שאבד בשל תנאים סביבתיים כגון חומציות, אאוטרופיקציה וכו'.

⁶⁰ בסיס מידע מתעדכן של ה-European Commission בנושאי מחקרי סביבה.
⁶¹ במחירון CE DELFT בגרסת 2010 יבול היה חלק ממבנים וחומרים. וכומתו השפעות של SO_2 ושל אחון על מספר יבולים על בסיס NEEDS, כאשר הערך שיוחס לכל התבסס על ממוצע מחירים ליבולים אלה.
⁶² לגבי שלושת הראשונים כומתה ההשפעה הן על המגוון הביולוגי והן על היבול, ולגבי השאר כומתה רק ההשפעה על המגוון הביולוגי, מתוך ההנחה שההשפעות על היבול בנקודות ביניים אלו אינן חיצוניות לשוק, כלומר מתומחרות כחלק ממחיר השוק למוצר.

הערך הכספי לאינדיקטור זה התבסס על Kuik et al. (2008) הן ב-NEEDS, הן ב- CE DELFT (2010) והן ב- CE DELFT (2018) Kuik et al. . (2008) ערך מטא אנליזה של מחקרי נכונות לשלם עבור מגוון ביולוגי (באספקטים שונים- שימור יערות, שימור מערכות אקולוגיות, תיירות וכו'). הערך הוא אומד לפגיעה ברווחה בשל פגיעה במגוון ביולוגי. הערך הממוצע לנזק הממוצע באירופה שנמצא הוא 0.47 אירו (מחירי 2004) לכל PDF/מ"ר / שנה, והוא שימש כערך הגבוה בטווח. הערך האמצעי נקבע לפי החציון מאותו מחקר - 0.06 אירו (מחירי 2004) לכל PDF/מ"ר / שנה. הערך התחתון התבסס על עלויות שיקום של Ott (2005) - 0.017 לכל PDF/מ"ר / שנה. עלויות שיקום מתאימות כערך תחתון במקרה זה, כי בכל מקרה צפוי אובדן של מידע גנטי, גם במקרה של שיקום.

על מנת להביא את הערכים לבסיס משותף, הם שורשרו לשנת 2015. כמו כן, כאמור, הוסף 1% למחירים הריאליים כל שנה, כדי לבטא את העלייה בנדירות של הטבע שאינו תחליפי, אשר גדל בקצב נמוך יותר מאשר הצריכה, ועל סמך המלצת ועדת הניכיון של ממשלת הולנד⁶³. השרשור הביא לתוצאות הבאות-0.649 בערך הגבוה, 0.083 בערך האמצעי ו-0.024 בערך הנמוך ל-PDF/מ"ר / לשנה, אירו במחירי 2015. בנוסף, תוספת אובדן היבול בשל פליטות מזהמים חושבה לפי מחירים אופייניים לאירופה של 9 סוגי יבולים, במחירי 2015, כולל מע"מ.

⁶³ כאמור, ב- CE DELFT (2018) לא בוצעה התאמה לעלייה בהכנסה, המייצגת הנחה לגבי גמישות ביקוש לאיכות סביבה ביחס לעליית הכנסה (פירוט בסעיף 5.1).

5.6. בניינים וחומרים (הון שנבנה על ידי האדם)

זיהום יכול להשפיע גם על האיכות של טובין מעשה ידי אדם (לעיתים אלו אתרי מורשת) עקב בלאי מואץ ושחיקת חומרי הגלם מהם הם עשויים, ולחייב גידול בהוצאות תחזוקה וניקיון. כמו כן, גם במקרה שפליטות מועברות למתקני טיפול, כדוגמת זרמי שפכים, יש כמובן עלות לטיפול בהם במתקן.

הנזקים לנקודת קצה זו הם בעיקר תוצאה של נקודות הביניים הבאות-

1. יצירת חלקיקים

2. הגברת חומציות/ החמצה (Acidification)

3. יצירת חמצון פוטוכימי Photochemical Oxidant Formation

לנקודת קצה זו – נזקים לבניינים וחומרים – מוצגות רק שתי רמות של ערכים, זאת בניגוד להצגת שלושה ערכים ביחס לשאר נקודות הקצה. כאמור, שלושת הערכים מבטאים מידת ודאות ביחס לנזק- הנמוך והאמצעי מתבססים על מידע בגין נזקים ודאיים, בעוד הערך הגבוה מתבסס על נזקים שאינם ודאיים. אולם, ביחס לנזקים לבניינים וחומרים נמצאו יותר ראיות לכך שהערך הנמוך הוא ודאי, והוחלט להשתמש בו כאומד גם לערך האמצעי. לשם אמידת הנזק, התייחסו לארבע קטגוריות-

- **קורחיה כתוצאה מחומציות** – השפעות אלו על מתכות, אבן וצבע במבנים מבוססות על NEEDS (2008) לפי עלויות תחזוקה למ"ר לחומרים אלה. לא בוצעה התאמה לגידול במספר המבנים באירופה בין 2000 לשנת 2015, כיוון שהשינוי שם אינו משמעותי, והונח שהוא אחן על ידי שימוש בחומרים פחות מועדים לקורחיה.
- **זיהום מחלקיקים (בעיקר פח)** – כומת על בסיס Defra (2016) על סמך ניתוח של הוצאות שיפוץ וניקיון של מבנים שנפגעו מזיהום אוויר⁶⁴, וממנו חולץ ערך של 0.3 אירו ל-1 ק"ג PM10 ב-EU28, ובהתאם ליחס בין חלקיקים עדינים וגסים, ערך של 0.15 אירו ל-1 ק"ג PM2.5 ב-EU28.
- **השפעות קורחיה על אתרי מורשת תרבותית** – במקרה זה, ישנה אי וודאות רבה מאוד, ולכן השפעה זו שולבה רק בערך הגבוה של התוצאות. הוערך כזה לרכיב התחזוקה לשחיקה מקורחיה.

⁶⁴ המחקר המקורי בוצע ע"י Rabl (1999) ב-15 ערים בצרפת. לפי ניתוח אקונומטרי, הוערך כי בצרפת ההשפעות נבעו מ-PM ולא מ-SO₂. עם זאת, כיוון שיש קושי להפריד בין נזקים למבנים משני מזהמים אלה, הוחלט לא לכלול את הערך ל-SO₂ בטווח הנמוך-אמצעי, על מנת להימנע מספירה כפולה ביחס לקטגוריות האחרות.

- **השפעות מזהמים על צבע ופלסטיק** – השפעות אלה הן מינוריות, וככל שהן קיימות, הן קטנות עם השנים, בשל מעבר לשימוש בחומרים עמידים יותר. לכן, לצורך הערך הנמוך-אמצעי הוחלט שהן שוות 0, והן נכללו רק בערך הגבוה. ערך זה התבסס על פונקציות מינון תגובה מ-Watkiss, et al. (2006) שבו יוחס ערך של 0.1 אירו ל-NMVOC.kg.

שקלול ההשפעות המפורטות לעיל מוצג בטבלה 10. הכותבים ממליצים, על בסיס סקר ספרות, להתייחס לערכים אלה כקבועים, גם במקרה של ירידה בכמות הפליטות, כיוון שמחקרים מניחים ליניאריות בין כמות הפליטות לנזקים ביחס לנקודת קצה זו.

טבלה 10 – שקלול השפעות על מבנים וחומרים (במחירי אירו 2015 לק"ג פליטה)

Midpoint	Indicator used	Lower value (= central value)	Upper value
Particulate matter formation	kg PM ₁₀ -eq.	0	€ 0.8
Acidification	kg SO ₂ -eq.	€ 0.6	€ 1.2
Photochemical oxidant formation	Kg NMVOC-eq.	€ 0	€ 0.1

6. מתודולוגיה מפורטת להערכת נזקים ממהמי אוויר בתחבורה ב- CE DELFT (2019)

6.1. רקע מתודולוגי לאמידת מחירים סביבתיים של מזהמי אוויר מתחבורה יבשתית וימית

כאמור, המחירים הסביבתיים ב-CE DELFT (2019) חושבו באותה גישה כמו ב-CE DELFT (2018). כלומר, לפי גישת NEEDS (2008) ומחקרים תומכים, עם עדכון והתאמות בהתאם לסקר ספרות עדכני, כמפורט בסעיף 5 לעיל, ועדכונים קלים המתאימים לתחבורה ומפורטים להלן, בהתאמה למדינות הרלוונטיות ולשנת הפרסום⁶⁵.

CE DELFT (2019) כולל הערכה של עלויות חיצוניות של תחבורה מסוגים שונים – כבישים, מסילות, תחבורה אווירית, נתיבי מים פנים ארציים ותחבורה ימית (כולל התייחסות ספציפית לנמלים בים התיכון). המסמך מתייחס לעלויות שוליות (כלומר, לתוספת של ק"ג מזהם), ממוצעות וכוללות למדינות האיחוד האירופי ומספר מדינות נוספות⁶⁶. העלויות מוצגות בו עבור כל מדינה ועבור האיחוד האירופי בכללותו.

ב-CE DELFT (2019) מפורטות עלויות חיצוניות מסוגים שונים, חלקן גם לא סביבתיות (עלויות גודש ועלויות תאונות דרכים). מתוכן נעסוק רק בעלויות חיצוניות מפליטת מזהמי אוויר וגזי חממה.

⁶⁵ ספר העלויות החיצוניות הסביבתיות האירופי הקודם לתחבורה שפורסם ב-2014, התבסס על (NERI 2010) ועל EU-project CAFE CBA

⁶⁶ לפי מחקרים אפידמיולוגיים, ההשפעה של מזהמי אוויר מתחבורה על הבריאות היא קרובה לליניארית. כלומר, כל תוספת של פליטה משפיעה באופן דומה, ולכן העלויות השוליות והממוצעות דומות.

6.2. השפעות זיהום אוויר מתחבורה

כאמור, השפעות מזהמי אוויר נחקרו רבות מאז שנות ה-90 של המאה ה-20. בשנים האחרונות בוצעו בעיקר מחקרים אפידמיולוגיים במודל מיון-תגובה אשר חקרו את היחס בין חשיפה לסיכוני בריאות. כמפורט לעיל, פליטות מזהמי אוויר גורמות בעיקר להשפעות על הבריאות, אך גם לנזקים למבנים וחומרים, אובדן יכולת חקלאי ופגיעה במערכות אקולוגיות ומגוון ביולוגי. להלן פירוט השפעות אלו בהקשר של מזהמי אוויר מתחבורה-

- השפעות על בריאות – שאיפת חלקיקים ($PM_{2.5}$ ו- PM_{10}) וכן NO_x מגבירה את הסיכון למחלות נשימה, ריאות ולב, ולעיתים לתמותה מוקדמת. השפעות אלו מתבטאות כלכלית בעלויות טיפול, הפסדי ייצור ועלות תמותה.
- אובדן יכולת חקלאי – כאשר אחוז נוצר כמזהם משני (הנוצר מ- NO_x ו-VOC, ותחמוצות נוספות) הוא עלול לפגוע ביבול.
- נזקים למבנים וחומרים – נזקים אלה באים לידי ביטוי בפגיעה בשטח הפנים של מבנה מחלקיקים ואבק, וכן בנזקי קורוזיה מחומרים חומציים.
- פגיעה במגוון הביולוגי – הנזק המשמעותי ביותר של פליטות אוויר למערכות אקולוגיות נובע מהגברת חומציות/ החמצה (Acidification) של הקרקע והמים על ידי תחמוצות שונות וכן מאאוטרופיקציה של מערכות אקולוגיות. השפעות אלו פוגעות במגוון הביולוגי.

המחירים הסביבתיים של מזהמי אוויר מתחבורה מוצגים בשלוש רמות של ערכים, כמו מזהמי אוויר ממקורות נייחים. אולם, לגבי שני מזהמי אוויר מתחבורה יבשתית – חלקיקים $PM_{2.5}$ ו- NO_x – הערכים מוצגים גם במנעד שמשקף צפיפות עירונית במקום בו המזהם נפלט, על ידי ערכים שונים בהתאם לגודל העיר בה נפלט הזיהום. בכך, מתבסס CE DELFT (2019) על ספרות מקצועית בנושא, כמפורט להלן. הדבר מאפשר לקבל ערך שונה ברמת אזור גיאוגרפי, באופן שמשקף את החשיפה הפוטנציאלית למזהם-

- בנושא $PM_{2.5}$ מתחבורה⁶⁷, ההתייחסות לצפיפות בהתאם לשלושה גדלים שונים של מרחב עירוני (כפרי, עיר בינונית ומטרופולין) מתבססת על מודלים מקובלים בתחבורה שנקראים Heatco (2006) ו-IMPACT (2008)⁶⁸.

⁶⁷ מעל רמת חשיפה מסוימת NO_x גורם להיווצרות NO_2 , שלו השפעות שליליות על הבריאות. רמת חשיפה זו מאפיינת ערים בעיקר (התכתבות מיום 8/8/19 עם נציג חברת CE DELFT)
⁶⁸ לפי Heatco חילקו את ההשפעה של $PM_{2.5}$ בין מטרופולין למחוז לעיר, ובהתאם ל-IMPACT הניחו כי ההשפעה על ערים קטנות-בינוניות היא שליש ביחס למטרופולין.

- בנושא השפעות NO_x, כדי להבדיל בין אזור עירוני וכפרי הניחו ש-80% ממי שגר בעיר ו-10% ממי שגם בכפר (בעיקר ליד כבישים ראשיים) נחשף לרמה NO₂ שנתית הגדולה מ-20/μg/m³. החשיפה תורמה למקרי מחלה, ולעלות כספית, כמפורט לעיל.
 - לגבי NH₃ ו-SO₂ הפיזור הוא רחב יותר, ולכן הצפיפות היא פחות משמעותית⁶⁹.
- מספר התאמות נוספות שבוצעו ב-CE DELFT (2019) ביחס ל-CE DELFT (2018), כלומר בתחבורה ביחס למקורות נייחים-
- כדי לייצג רכבים חשמליים, התבססו על היחס הממוצע בין הפליטות הממוצעות לפליטות מרכבים חשמליים ב-NEEDS (2008)⁷⁰.
 - השפעות קצה על בניינים וחומרים שנלקח לפי הערך הגבוה בטווח, והונח כי הוא רלוונטי לערים, כפול במטרופולין, ואינו רלוונטי באזורים כפריים.
 - להשפעות של תמותה בטרם עת, התבססו על הערך האמצעי מתוך CE DELFT (2018), כלומר 70,000 אירו ל-VOLY⁷¹.

⁶⁹ לגבי NMVOC ו-PM₁₀ הפיזור הוא משמעותי, אך לא נכנס לחישוב ב-CE DELFT (2019)
⁷⁰ במדינות צפופות השפעת רכבים חשמליים גדולה יותר (כי תחנות הכוח קרובות לתושבים)
⁷¹ לעומת זאת, תאונות דרכים חושבו לפי VSL, ראו הגדרות לעיל.

7.

מתודולוגיה להערכה כלכלית של השפעות פליטות פחמן דו- חמצני וגזי חממה נוספים

תופעות שינוי האקלים נובעות משינויים אטמוספיריים באקלים כדור הארץ כתוצאה מריכוז גזי חממה באטמוספירה כגון- CO_2 , CH_4 , N_2O וכן גזי חממה שונים הגורמים לדילול האוזון. גזי החממה מאפשרים כניסת קרינה סולארית ומונעים פליטת קרינה אינפרא-אדומה הנפלטת משטח הפנים של כדור הארץ. אפקט החממה גורם לעליית טמפרטורות וכבר היום משפיע על מערכות אקולוגיות ועל משטר המים בעולם.

המשך גישת "עסקים כרגיל" בנושא פליטות גזי חממה צפוי לגרום לעלייה של 6 מעלות צלזיוס בטמפרטורה העולמית הממוצעת ביחס למצב טרום העידן התעשייתי (IPCC, 2007). לשינויים כאלה יהיו השלכות כבדות, בלתי הפיכות ולא צפויות על מערכות מזג אוויר ותופעות מזג אוויר קיצוניות, גובה פני הים, הסביבה הנדרשת לקיום חיים על פני כדור הארץ, והתפשטות מחלות. השלכות אלה יהיו כבדות יותר במדינות מתפתחות, להן כושר עמידות והיערכות נמוך יותר. לפי ה-IPCC (2013), ההשלכות הצפויות הן-

- אובדן אדמה חקלאית, בשל עליית פני הים, בעיקר בדלתא של נהרות, בהם מתגורר רוב מכריע מאוכלוסיית העולם. הדבר עלול לגרום להגירה מאסיבית בעולם כולו.
- השפעות על בריאות האדם בשל עליית הטמפרטורה, גידול בסיכוני חשיפה למחלות טפיליות, שהשפעתן כיום מוגבלת לאזורים טרופיים.
- תנודות משמעותיות ומהירות במפת ייצור המזון העולמית, וקיצון צפוי בסך היבולים, העלולים לגרום להגירה ולרעב.
- השפעות על היצע מים – בצורות, המלחה, אך גם היצע מים מוגבר באזורים מסוימים.
- השפעות לא צפויות על מערכות אקולוגיות ומגוון ביולוגי. עלולה להיות הכחדה של מינים פגיעים ומבודדים, ושינויים בדרכי תפוצה של מינים.
- השלכות קיצוניות מגוונות נוספות אשר קשה לחזות באופן אמין, והשלכותיהן כבדות ביותר. אירועי מזג אוויר קיצוניים כמו גלי חום, בצורות, סופות וטורנדו לא תלויים רק בעליית טמפרטורה, וקשה מאוד לאמוד מראש את הנזק העלול להיגרם מהם.

המקור העיקרי לפליטות גזי חממה הוא שריפת דלקים פוסיליים, בשלל סקטורים (למשל, בתעשיות ייצור מלט ואלומיניום). מקורות משמעותיים נוספים הם חקלאות, גידול בעלי חיים, פליטות ממטמנות וגזי קירור. ישנם מזהמים נוספים התורמים להתחממות כדור הארץ, ולעומת זאת, למזהמים מסוימים מיוחס אפקט קירור⁷².

לפי הנחיות ה-IPCC, ניתן להשוות בין פליטות גזי חממה שונים בהתאם לפוטנציאל התרומה שלהם להתחממות גלובלית (GWP = Global Warming Potential). במדד זה השפעת $\text{CO}_2=1$, ושאר גזי החממה מוצגים במדד בהתאם ליחס ביניהם לבין CO_2 (CO₂ equivalent). על מנת לאמוד את הנזק הנובע מריכוז גזי החממה באטמוספירה, ניסו להעריך לאורך השנים את המחיר החברתי של פחמן (Social Cost of Carbon – SCC) לפי הערך הנוכחי של זרם העלויות והתועלות מפליטה של שווה ערך CO_2 , ובהתאם להנחות לגבי מגמות בהתפלגות וגובה הכנסות בעולם. מחקרים שונים בעולם הראו טווח תוצאות נרחב מאוד בנושא זה.

אלטרנטיבה לחישוב עלות הנזק היא לבצע הערכה על פי שיטת חישוב עלויות מניעה/הפחתה של ריכוז גזי חממה לרמה נתונה מראש. שיטה זו מתבססת על עלות מינימלית שולית (כלומר, על סמך הטון "האחרון" ולא הממוצע) להשגת יעדי הפחתת פליטות גזי החממה שנקבעו. בשיטת אמידה זו, ההנחה היא שיעדי המדיניות משקפים העדפה קולקטיבית, ולכן העלות היעילה ביותר כלכלית להשגת מטרה זו היא אומדן לנכונות הקולקטיבית לשלם עבור הפחתת הנזק כתוצאה מפליטות ה- CO_2 . שיטה זו מתאימה בעיקר כאשר אין אפשרות לאמוד את הנזק באופן ישיר, שכן הוא כרוך כאמור באי וודאות רבה ומורכב לאמידה. עלויות מניעה אינן בהכרח אלו אשר משקפות את הנזק השולי מפחמן דו-חמצני אשר משקף הפחתה אופטימאלית. הן מושפעות מבחירת היעדים המתאימים מתוך תכניות ההפחתה, אפשרויות ההפחתה (טכנולוגיות שיפותחו, עלויות דלקים), הערכת תרחיש הבסיס (מצב הכלכלה והשפעותיו על הפליטות בתרחיש הבסיס), התאמה לגזי חממה נוספים (לפי מחקרים, הפחתת גזי חממה שאינם CO_2 יקרה יותר) וכו'.

ההבדל העקרוני שבין גזי חממה ובין מזהמי אוויר אחרים הוא שגזי חממה משפיעים באופן עולמי ולא מקומי. ככאלה, ניתן להסתמך גם על מקורות מידע נוספים ולא רק על אלו שחושבו על ידי CE DELFT. בכדי להמליץ על ערך לישראל נתחיל מסקירה של העלויות בהקשר האירופאי כפי שמומלצות על ידי CE DELFT בשני הדו"חות, ונמשיך בסקירה לגבי המחירים הנהוגים בארה"ב.

⁷² ערפיח (Black Carbon – PM0.1) למשל תורם להתחממות אף שאינו גז חממה. ו- SO_2 למשל תורם לקירור בשל החזרת קרני אור ע"י האירוסולים וכן באופן עקיף בשל תרומתם להיווצרות עננים, (Fuglestedt, et al., 2010). גם מזהמים הנפלטים ממטוסים תורמים לאפקט חימום כמו גם אפקט קירור (CE Delft, 2014).

7.1. שימוש במחירי פחמן דו-חמצני באירופה (CE DELFT)

הערכת עלות פליטות פחמן דו חמצני ממקורות נייחים

בספר העלויות החיצוניות הסביבתיות שפורסם על ידי CE DELFT ב-2010 העלות החיצונית של גזי חממה חושבה בשיטת עלויות המניעה⁷³, על בסיס מדיניות הפחתת פליטות שהייתה בתוקף בשעתו. בספר מ-2010 המחירים נעו בין 25 אירו לטון CO₂ עד 2020, עם עליה הדרגתית ל-85 אירו לטון עד 2050 (במחירי 2008). ב-2015 נחתם הסכם פריס, במסגרת אמנת המסגרת של האו"ם בנושא שינויי אקלים. הסכם פריס עוסק בהפחתת פליטת גזי חממה, מזעור הנזק הקיים ומימון הטיפול בפליטת גזי חממה על ידי מדינות העולם. נכון להיום ההסכם אושרר על ידי 187 מדינות (מתוך 197 המדינות החברות באמנת האקלים של האו"ם), וישראל ביניהן. בעקבות ההסכם, תכניות ההפחתה הפכו יותר ממוקדות ומוגדרות סביב יעד כמותי שמטרתו להגביל את ההתחממות הגלובלית למקסימום 1.5 מעלות בהשוואה לתקופה הטרומ-תעשייתית. על מנת לעמוד ביעדים אלה, המחירים בשיטת עלויות המניעה צפויים לעלות, בהתאם למיצוי האפשרויות הזולות להפחתה ראשונות.

ב-CE DELFT (2018) הוחלט לשלב בין עלויות נזק לעלויות מניעה, כך שהערך הנמוך מבוסס על שיטת הערכת הנזק והערכים האמצעי והגבוה על שיטת עלות המניעה. טווח ערכי העלויות החיצוניות נקבע לפי מספר מקורות מידע-

- הערך הנמוך מתבסס על החציון מתוך Bijgaart et al (2014). מחקר זה עשה שימוש במודל מונטה קרלו,⁷⁴ הבוחן את אי הוודאות של התרחשות הנזק בהתאם לטמפרטורה, בהתבסס על אי הוודאות של פרמטרים מרכזיים- הרגישות של הטמפרטורה להכפלת ריכוז גזי החממה, הכנסה עולמית ברוטו, שיעור הניכיון, דעיכת ה-CO₂ באטמוספירה והקצב בו טמפרטורת פני הקרקע מתאימה את עצמה לשינוי. החציון במחקר זה הוא 20.2 אירו לטון CO₂ (במחירי 2010). התוצאות בו מראות כי האומד למחיר החברתי של פחמן (SCC) הוא מוטה, ובעל "זנב" ארוך, כלומר בסבירות נמוכה יותר, המחיר עלול להיות גבוה בהרבה.
- הערך האמצעי מתבסס על עלויות מניעה/ הפחתה, ובאופן ספציפי על תכניות הפחתה באיחוד האירופי בשיעור של 40% עד 2030, עם המשך הפחתה בצורה ליניארית של עד

⁷³ עלויות מניעה נקראות לעיתים גם עלויות הפחתה.
⁷⁴ מודל המאפשר בחינת תוצאות ותחזיות במספר רב של תרחישים אפשריים.

65% ב-2050 ביחס ל-1990⁷⁵. עלויות ההפחתה על מנת לממש תכניות אלה חושבו על ידי ממשלת הולנד⁷⁶. הם הוערכו על בסיס תחזית להרחבה של מנגנון הסחר בפליטות – EU ETS⁷⁷, ומתוכם חולצו העלויות השוליות הנדרשות לעמידה ביעדים ב-2050.

- לחישוב הערך הגבוה – השתמשו שוב בהערכות של ממשלת הולנד, המתבססות על עלויות מניעה/ הפחתה, אבל הניחו תרחיש מחמיר יותר של עמידה בהתחייבות להגבלת עליית טמפרטורה ל-2 מעלות צלזיוס. מחירים אלה מתואמים גם עם עלות ייצוב ארוך טווח של ריכוז גזי החממה (ריכוז של PPM 450 שווה ערך CO₂) כפי שנאמד ב- (Kuik et al. (2009), על בסיס מטא-אנליזה של 63 מחקרים.

על מנת להעריך את המחיר לטווח זמן מיידי (שנת 2015) ובינוני (שנת 2030), הניחו כי הריכוז המקסימלי של גזי חממה באטמוספירה דומה למלאי של משאב מתכלה, ולכן הפעילו את "כלל הוטלינג", הגורס כי המחיר הנקי של משאב טבע מתכלה צריך לעלות בגובה הריבית⁷⁸. שער ההיוון של הדו"ח נקבע על 3.5% שנתי (Aalbers et al. 2016), לכן, מחירי פליטות גזי החממה ב-CE DELFT (2018) כולל עלייה של 3.5% כל שנה ביחס לשנת 2015, ויש להתאים את המחירים העתידיים (ראו סעיף 5.2).

המרה בין גזי חממה התבססה על פוטנציאל התרומה שלהם להתחממות גלובלית (Global Warming Potential = GWP) לפי IPCC 2014, באופן של 100 שנה, התואם את אופן התכנון למדיניות הפליטות.

בטבלה 11 מוצג טווח מחירי ה-CO₂ המומלצים לפי אופקי זמן ב-CE DELFT (2018).

טבלה 11 – מחירי CO₂ (במחירי אירו 2015 לק"ג פליטה, כולל מע"מ⁷⁹)

	2015	2030	2050
Lower	22	37	73
Central	57	95	190
Upper	94	160	315

⁷⁵ התכניות עליהן בוסס התחשיב פורסמו ב-2014, והמשיכו להתפתח מאז במגוון כלי עבודה, וביניהם EU ETS – מנגנון סחר סקטוריאלי לפליטות גזי חממה, המתבסס על רגולציה של מכסה וסחר בפליטות וחל על סקטורים הפולטים כ-45% מסך פליטות בגזי חממה באיחוד האירופי.

⁷⁶ Aalbers, et al., 2016 – נכתב ע"י ה-CPB וה-PBL – סוכנויות ממשלתיות הולנדיות לנושאי כלכלה. מתבסס על

תרחישי WLO (תרחישי אקלים המאפשרים שגשוג ואיכות חיים והערכת פליטות CO₂)
⁷⁷ התרחיש הרלוונטי הוא התרחיש הגבוה – בו הונח שיתוף פעולה עולמי בנושא הפחתת גזי חממה, המשך סחר עולמי, גידול במגמת ההגירה, המשך גידול אוכלוסייה והמשך צמיחה של 2% בשנה

⁷⁸ להסבר על כלל הוטלינג אנא ראו את Gaudet, G. (2007). Natural resource economics under the rule of Hotelling. Canadian Journal of Economics/Revue canadienne d'économie, 40(4), 1033-1059.

⁷⁹ המע"מ הוסף להערכת עלויות CO₂ שהתבססו על עלויות הפחתה, על מנת לאפשר השוואה לערכים אחרים שהתבססו על עלויות נזק, ובד"כ על מחקרים נכונות לשלם. במחקרי נכונות לשלם הפרט נשאל על העדפותיו, ולכן מנקודת מבטו הערכים כוללים מע"מ.

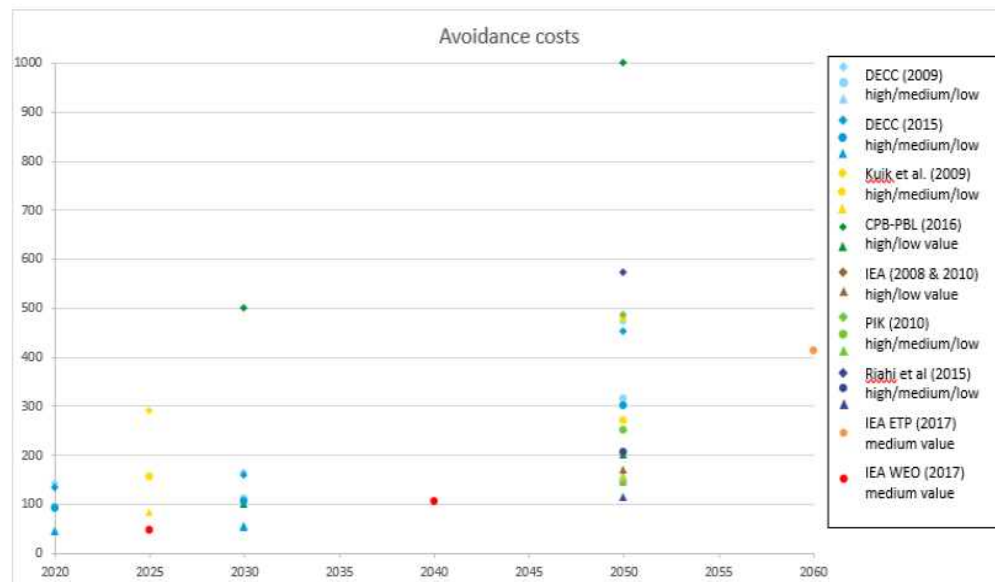
הערכת עלות פליטות פחמן דו חמצני מתחבורה

ב-CE DELFT (2019), אמידת עלויות שינוי אקלים בוצעה בשיטת עלויות המניעה. כאמור, שיטה זו מתאימה למקרים מסוג זה, בהם אין אפשרות להעריך את עלות הנזק באופן ישיר. הצדקה נוספת אשר מועלית ב-CE DELFT (2019) כסיבה לשימוש בעלויות מניעה היא המחויבות של האיחוד האירופי להסכם פריס, לפיה כל פליטה של CO₂ מתחבורה תחייב הפחתת פליטות במקום אחר. המשמעות של המחויבות הזו היא שהערך של פליטת CO₂ הוא אכן ההפחתה אליה התחייבו המדינות, ולא הנזק מ-CO₂. כמפורט לעיל, לפי ה-IPCC (2013), ללא מדיניות קונקרטית, יעלו הטמפרטורות בצורה משמעותית עד סוף המאה, באופן שישפיע בצורה משמעותית ובלתי הפיכה על מערכות אקולוגיות, בריאות האדם ומבנים חברתיים, זאת בשל עלייה בריכוז גזי חממה באטמוספירה. בגירסה קודמת של ספר העלויות החיצוניות הסביבתיות לתחבורה,⁸⁰ נעשה שימוש בעלויות מניעה, והעלות של טון CO₂ לפי הגבלת ריכוז גזי חממה של 450 PPM (חלקים למיליון) ועלייה של עד 2 מעלות, היתה 90 אירו (במחירי 2014). הבסיס להערכת עלויות ההפחתה היה תכניות העבודה של ה-EU, כולל הסכם פריס, להפחתת 20% מהפליטות ביחס ל-1990 עד 2020, 40% עד 2030 ו-80-95% עד 2050. כל זאת, לצורך הגבלת עליית טמפרטורה ל-1.5-2 מעלות צלזיוס "בלבד", באמצעות הגבלת ריכוז שווה ערך CO₂ באטמוספירה של 450 PPM. על בסיס סקר ספרות, חושב ממוצע ערכים (תוך השמטת ערכי קיצון, כלומר את הערך הגבוה והנמוך ביותר לכל אופק זמן) של עלויות עמידה ביעדי הפחתת פליטות גזי חממה, שתוצאותיו מוצגות באיור 4.

⁸⁰ Ricardo-AEA, TRT, DIW Econ & CAU, 2014

איור 4 – עלויות עמידה ביעדי הפחתה על בסיס תכניות הפחתת גזי חממה שונות מהאיחוד האירופי וה-OECD

Figure 18 - Review of avoidance cost values found in the literature (€₂₀₁₆/t CO₂ equivalent)



בהתאם לממצאים הנ"ל, הוחלט ב- CE DELFT (2019) לקבוע את עלויות המניעה עד 2030 ל- 100 אירו לטון CO₂ במחירי 2016, ו- 269 אירו לטון CO₂ לטווח השנים 2030-2060 במחירי 2016. הוצע כי הטווח הגבוה והנמוך ישמשו לבדיקות רגישות. הערכים מוצגים בטבלה 12.

טבלה 12 – עלויות מניעה של שינוי אקלים באירו/ טון CO₂ במחירי 2016 (מתוך CE DELFT, 2019)

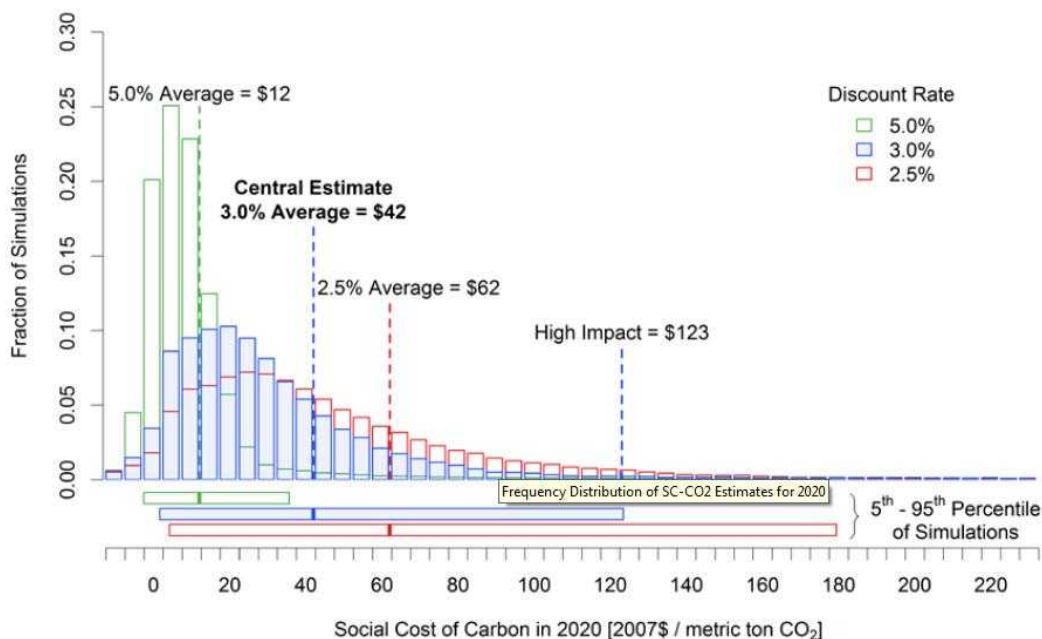
	Low	Central	High
Short-and-medium-run (up to 2030)	60	100	189
Long run (from 2040 to 2060)	156	269	498

7.2. שימוש במחירי פחמן דו-חמצני בארה"ב

המדד המוניטארי המקובל על הסוכנות להגנת הסביבה בארה"ב, ה- EPA (Environmental Protection Agency), מבטא נזק לטווח ארוך לטון CO_2 בשנה נתונה. מדד זה מייצג את הנזק שנמנע כתוצאה מהפחתת הפליטה וכולל נזק כגון ירידה בפריורן חקלאי, נזק בריאותי, נזק לרכוש כתוצאה מסיכון מוגבר לשיטפון ושינויים בהוצאות של מערכות אנרגיה (פחות חימום ויותר מיזוג אוויר).

איור 5 מתאר את התפלגות האומדנים השונים של נזק שהתקבלו עבור מספר שונה של הרצות סימולציה שנערכו על ידי ה-EPA⁸¹ -

איור 5 – התפלגות ערכי עלות ה- CO_2 עבור שנת 2020



⁸¹ Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases, United States Government (2016). Technical Support Document: Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis Under Executive Order 12866

המודלים השונים אשר שימשו בסיס להערכה מתוארים בטבלה 13, והסבר מפורט לגביהם מופיע אחריה.

טבלה 13 – סיכום המודלים העיקריים הרלוונטיים לקביעת מחיר הפחמן

IAM	Version used in 2010 IWG Analysis	Version Used since May 2013	Key changes relevant to IWG SC-CO ₂
DICE	2007	2010	Updated calibration of the carbon cycle model and explicit representation of sea level rise (SLR) and associated damages.
FUND	3.5 (2009)	3.8 (2012)	Updated damage functions for space heating, SLR, agricultural impacts, changes to transient response of temperature to buildup of GHG concentrations, and inclusion of indirect climate effects of methane.
PAGE	2002	2009	Explicit representation of SLR damages, revisions to damage function to ensure damages do not exceed 100% of GDP, change in regional scaling of damages, revised treatment of potential abrupt damages, and updated adaptation assumptions.

- מודל DICE מתייחס למלאי ולזרם הפחמן בין האטמוספירה והאוקיינוסים ולוקח בחשבון את הדינמיקה של גובה פני הים והשפעותיה. הנזק הכלכלי מיוצג על ידי הפסד התפוקה הכלכלית עקב טמפרטורות חריגות, שחלק ממנה מושקע במלאי ההון כדי לייצר תפוקה עתידית. לפי (Nordhaus (2010, הנזקים בשנת 2095 צפויים לעמוד על 12 טריליון דולר או 2.8% מהתפוקה הגלובלית עבור עליית טמפרטורה גלובלית של 3.4 מעלות צלסיוס. הנזקים הגבוהים בשנים עתידיות יהיו כתוצאה מעליית פני הים.
- מודל FUND מתבסס על עדכונים ביחס לצרכי החימום (תועלת), לחקלאות (עקב עליית טמפרטורה) ולעליית פני הים (הקטנת שטח יבשתי), בנוסף לשינויים בטמפרטורה עקב פליטות מימן (Narita et. al., 2010).
- במודל PAGE השינויים כוללים תוספת של השפעות ישירות עקב שינוי גובה פני הים ועדכונים של פונקציות נזק לתמ"ג (מושפעות מטמפרטורה ומגובה פני הים) ופונקציות הסתברות עקב אי רציפות (HOPE, 2013).

ההרצות כללו שימוש בשלושת המודלים המפורטים לעיל, שלושה שערי היוון וחמישה תרחישים, ויצרו 45 פונקציות התפלגות של אומדני הנזק לכל שנה.

המודלים אומדים את הנזקים לאחר הפליטה ועד שנת 2030, ומהווים אותם לשנת הפליטה. התוצאות בטבלה שלהלן מתבססות על ממוצע בין תוצאות המודלים שלעיל, בהינתן שינויים

בשיעור ההיוון - 5%, 3%, 2.5%. בטבלה 14 שלוש העמודות השמאליות מציגות את התוצאות בשיעורי היוון שונים, בעוד העמודה הימנית מציגה תוצאות המתבססות על תרחיש קיצוני יותר, המיוצג ע"י האחוזן ה- 95% של שיעור היוון 3% (הסתברות נמוכה להשפעה גדולה). כלומר, העמודה הימנית מציגה נזקים שיכולים להתרחש בהסתברות של 5% בלבד (לפי ממוצע תוצאות של המודלים המפורטים לעיל, ועל בסיס שיעור היוון של 3%). תרחיש זה מניב, כמובן, את הנזקים הגבוהים ביותר. במודל זה יש אי וודאות לגבי השפעות של קטסטרופות, שינויים טכנולוגיים ונזקים מטמפרטורות גבוהות. הסיבה להצגתו במסמך של ה-EPA, היא הצטברות של ראיות בספרות המדעית והכלכלית לפוטנציאל של תרחישים בהסתברות נמוכה, המאופיינים בנזקים בהיקף גבוה, להזיק באופן מיוחד לחברה, ולכן להיות רלוונטיים במיוחד למקבלי החלטות. לכן, הוחלט להכליל ערך זה, שיוכל לשמש לבדיקות רגישות, ולייצג את הנזק הפוטנציאלי העלול להתרחש בהסתברות נמוכה.

ערכים אלו חושבו על ידי קבוצה של רשויות רגולטוריות בשנת 2010, עודכנו ב 2013⁸² ובסוף שנת 2016.⁸³ העלויות מפורטות בטבלה 14.

טבלה 14 – עלות חברתית של CO₂ בשנים 2015-2050

Year	Discount Rate and Statistic			
	5% Average	3% Average	2.5% Average	High Impact (3% 95 th percentile)
2015	\$11	\$36	\$56	\$105
2020	\$12	\$42	\$62	\$123
2025	\$14	\$46	\$68	\$138
2030	\$16	\$50	\$73	\$152
2035	\$18	\$55	\$78	\$168
2040	\$21	\$60	\$84	\$183
2045	\$23	\$64	\$89	\$197
2050	\$26	\$69	\$95	\$212

^a The SC-CO₂ values are dollar-year and emissions-year specific.

* מקור - US Government (2013)

⁸² Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases, United States Government (2016). Technical Support Document: Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis Under Executive Order 12866

⁸³ EPA (2016). EPA FACT SHEET: SOCIAL COST OF CARBON.

היות ושער ההיוון המקובל בישראל לנושאים סביבתיים-חברתיים עומד על 3%⁸⁴, וזהו גם שער ההיוון המומלץ ע"י ה-EPA לעניין זה, מוצע להשתמש בתוצאה זו כמדד יחיד, ובתוצאות האחרות כטווח רגישות. לשנת 2020, בשער היוון של 3%, הנזק המהוון של טון פליטה של פחמן דו-חמצני מוערך ב-42 דולר (במחירי 2007).

מטבלה 14 עולה כי הנזק גדל על פני זמן כאשר הפליטות העתידיות יגדילו את הנזקים, הן משום שהמערכות הפיזיות והכלכליות צפויות לסבול מלחצים נוספים בתגובה לשינוי אקלימי מתמשך, והן משום שהתמ"ג גדל, כאשר השפעות הנזק נמדדות בפרופורציה לתוצר.

בטבלה 15 מוצג קצב הגידול השנתי המומלץ על ידי ה-EPA למחיר הפחמן.

טבלה 15 – קצב גידול שנתי במחיר הפחמן בין השנים 2010 ל 2050

Average Annual Growth Rate (%)	5.0% Avg	3.0% Avg	2.5% Avg	3.0% 95th
2010-2020	1.2%	3.2%	2.4%	4.4%
2020-2030	3.4%	2.1%	1.7%	2.3%
2030-2040	3.0%	1.9%	1.5%	2.0%
2040-2050	2.6%	1.6%	1.3%	1.6%

כפי שניתן לראות, קצב הגידול השנתי אשר מומלץ על ידי ה-EPA הוא 2.1% לשנה עד לשנת 2030, 1.9% בין 2030-2040, ו-1.6% בין 2040-2050. זהו גם קצב הגידול המומלץ על ידינו. נתייחס לנושא גם בסעיף נוסחת העדכון השנתית המוצעת להלן.

⁸⁴ ברק, ב. (2016) מחיר ההון הפרטי והחברתי – המלצה לחישוב שער ניכיון חברתי, הוגש למשרד להגנת הסביבה.

7.3. סיכום והמלצה

מבין שתי האלטרנטיבות לחישוב הערך של פליטות גזי חממה – חישוב בשיטת עלות הנזק או חישוב בשיטת עלויות מניעה/הפחתה – אין פתרון יחיד "נכון". בגישת עלות הנזק, הערך המומלץ על ידי ה-EPA עומד על 42 דולר לטון (149 שקלים לטון⁸⁵). בגישת עלות המניעה/הפחתה, הערך המומלץ על ידי CE DELFT עומד על 100 אירו לטון (391 שקלים לטון⁸⁶). מבין שתי האלטרנטיבות, גישת עלות הנזק היא השמרנית יותר, ועל כן המלצתנו היא לאמץ את הערך שחושב בשיטה זו ומומלץ ע"י ה-EPA. כיוון שהמספרים בדו"ח ה-EPA נקובים בדולר ארה"ב במונחי 2007, על מנת להמיר ולשרשר את הנתונים לישראל, יש להביא בחשבון את השינוי בשער החליפין ובמדד המחירים, בנוסף להמרה על בסיס שע"ח החליפין הנוכחי. ניתוח הרגישות של ה-EPA בוצע לפי שערי היוון שהם הגורם המכריע בדיון על גזי חממה, כיוון שמתבססים על תחזית השפעות עתידיות. שערי ההיוון האלטרנטיביים ל-3% הם 5% ו-2.5%. הערך המתקבל על פי כל אחד מהתרחישים הוצג בטבלה 14. בנוסף, ערך עלות הפחמן אמור לעלות ב-2.1% כל שנה משנת 2020 ועד לשנת 2030, ב-1.9% לשנה בין השנים 2030-2040, וב-1.6% לשנה בין השנים 2040-2050. כיוון שנתונים מדעיים מתעדכנים, בפרט בנושא חשוב זה, מעת לעת, מוצע לבצע עדכון יזום של ערכים אלו תוך עשור לכל היותר. גזי חממה נוספים יוכפלו במקדם המרה קבוע, בהתאם להשפעתם ביחס ל- CO_2 , על בסיס הנחיות ה-IPCC, בהתאם לפוטנציאל התרומה שלהם להתחממות גלובלית (Global Warming) (GWP= Potential⁸⁷). ה-IPCC מציג מקדמי המרה אשר משקפים נזק לאופק של 20 שנים (GWP_{20}) ומקדמים שמשקפים נזק לאופק של 100 שנים (GWP_{100}).

⁸⁵ Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases, United States Government (2016). Technical Support Document: Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis Under Executive Order 12866

⁸⁶ על בסיס CE Delft 2019 ושער חליפין 3.91 שקל לאירו לפי [אתר בנק ישראל](#) ביום 28/8/2019. ⁸⁷ IPCC 2014, AR5. כשיתפרסם דו"ח חדש ע"י ה-IPCC, יהיה צורך לעדכן את העלויות החיצוניות של גזי החממה בהתאם למקדמי ההמרה העדכניים שיתפרסמו.

לגז החממה 6SF מקדם ההמרה התבסס על הנתון העדכני ביותר שפורסם, והוא בדו"ח IPCC מ-2007 – 4AR – Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Fourth Assessment Report (AR4), Working Group 1 (WG1), Chapter 2, Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing

גזי חממה מסוימים כדוגמת מתאן (CH_4) הם בעלי זמן מחצית חיים קצר יחסית באטמוספירה, כלומר, מתפרקים לאורך זמן וריכוזם יורד. לפיכך, השפעתם בטווח הקרוב (לדוגמא, באופק זמן של 20 שנה) היא משמעותית הרבה יותר מהשפעתם על פני 100 שנה. הבחירה באופק הזמן הרלוונטי תיעשה בהתאם למטרת החישוב, כך שעבור הערכת הנזק בטווח הזמן המידי או לשנים הקרובות יעשה שימוש ב- GWP_{20} ועבור תחזיות ארוכות טווח לעשרות שנים קדימה יעשה שימוש ב- GWP_{100} .

8. תוצאות

8.1. כללי

פרמטרים לחישוב העלויות החיצוניות בישראל בשיטת העברת תועלות

כמפורט בפרק העברת התועלות לעיל, הפרמטרים שנדרשים לצורך העברת התועלות הם תוצר לנפש מותאם כוח קנייה, צפיפות אוכלוסייה, שינוי במדד המחירים לאורך זמן ההמרה וגמישות הביקוש לאיכות הסביבה ביחס להכנסה ("גמישות הכנסה") -

- יחס תוצר לנפש בישראל לעומת האיחוד האירופאי = 0.92, לעומת הולנד = ⁸⁸0.72
- יחס צפיפות בישראל לעומת האיחוד האירופאי = 3.67, לעומת הולנד ⁸⁹0.99
- מקדם שרשור של שינוי הערך משנת 2015 לשנת 2019 = 1.14 (על פי נוסחת העדכון השנתית של המשרד)
- מקדם שרשור של שינוי הערך משנת 2016 לשנת 2019 = 1.1 (על פי נוסחת העדכון השנתית של המשרד)
- גמישות הכנסה לאיכות סביבה = 0.80 (CE DELFT (2018))

ייחוס שווי נזק לנקודות הקצה

כאמור בפרק 4, הפרמטרים שנזכרו לעיל אינם רלבנטיים לכל נקודות הקצה. למשל, הפרמטר של צפיפות האוכלוסיה רלבנטי לנזקי בריאות אבל לא לנזקים למבנים. על כן, יש לקבוע איזה שיעור מהנזק הכולל מיוחס לנזק בכל אחת מנקודות הקצה. בכדי "לחלק את הנזק" בין נקודות

⁸⁸ נתונים נכון לדצמבר 2019. עבור ישראל, עבור האיחוד האירופאי ועבור הולנד.
⁸⁹ נתונים נכון לאוגוסט 2019. עבור ישראל, עבור הולנד (המקור כאן) ועבור האיחוד האירופאי.

הקצה השונות השתמשנו בחלוקה היחסית שהוצגה בדו"ח הקודם שפרסמה CE DELFT במסמכים קודמים⁹⁰, כמפורט לעיל בפרק 4.

מנעד ערכים לשימוש כטווח בבדיקות רגישות

את מקדמי ההמרה שבין ערכים גבוהים ונמוכים לבין הערך האמצעי קיבלנו על סמך היחסים שמתוארים ב-CE DELFT (2018). אלו מתוארים בטבלה 16-

טבלה 16 - יחסים בין ערכים גבוהים לערכי אמצע ובין ערכי אמצע לערכים נמוכים

מזהם	יחס ערך נמוך לאמצעי	יחס ערך גבוה לאמצעי
PM2.5	72%	154%
PMCoarse	71%	178%
PM10	71%	154%
NO _x	67%	149%
SO ₂	72%	156%
NM VOC	73%	160%
NH ₃	57%	144%

הבחנה בין גבהי ארובות

השתמשנו ביחסים שבין ארובה מעל ומתחת ל-100 מטר בכדי לחשב את הנזק בישראל מפליטות בגבהים שונים. יחסי הנזק בהתייחס לגובה הפליטה מסתמך על CE DELFT (2018) בהתייחס לתרומה של המזהמים השונים להיווצרות PM2.5⁹¹. הנחת העבודה היא שיחסים אלו נשמרים לכל המזהמים העיקריים עבור הנזק הישיר⁹². היחס מקורב ל-1:2, כלומר הנזק מפליטה בגובה נמוך מ-100 מטר כפול מזה של ארובה שגובהה עולה על 100 מטר. זאת, למעט NM VOC, שערך הנזק שלו מבטא נזק שניוני ולכן עבורו אין הבחנה בין גבהי פליטה.

⁹⁰ CE DELFT (2010) Shadow Prices Handbook Valuation and weighting of emissions and environmental impacts. For Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment, thermPhos, Stichting Stimular.

וכן התכתבות עם חברת דלפט מתאריך 10/10/2019.
⁹¹ טבלאות 29 ו-30 ב-CE DELFT (2018), המתייחסות לנקודת הביניים "היווצרות חלקיקים", המתייחסות לארובה מתחת ומעל 100 מ' בהתאמה

⁹² היחס מקורב ל-1:2 בין שני סוגי הארובות שהומלץ גם הוא ב-CE DELFT 2018 כהערה כללית.

התייחסות לצפיפות

לתחבורה יבשתית ומזהמים עיקריים ממקורות נייחים-

טבלת העדכון לצפיפות אוכלוסייה שלהלן, מבטאת את הגמישות בה יש לשערך כל אחד מהמזהמים העיקריים שעבורם ישנו מקדם צפיפות ייחודי, והתבססה על נספח B של Benefito (CE DELFT, 2011), במפורט לעיל בפרק העברת התועלות.

ההמרה היא בשני שלבים. בשלב הראשון נעשה שימוש בפונקציית הרגרסיה הכוללת את החותך בכדי לקבל את הערך באיחוד האירופאי באופן כללי. בשלב השני, העברת התועלות לכל מדינה מתבססת על יחסי הצפיפות ושיפוע פונקציית הרגרסיה בלבד (β).

טבלה 17 - מקדמים להעברת תועלות בהתחשב בגמישות ביחס לצפיפות אוכלוסייה

	α	β	R2
NO _x	6,915327	0,30578	0,21797
SO ₂	7,572995	0,238344	0,428711
NH ₃	7,199164	0,370432	0,36261
PPM _{2.5}	8,336719	0,32167	0,352839
PPM _{coarse}	4,939189	0,394474	0,334274
NM VOC	0	174,8174	0,23924
Cd	11,08626	0,045464	0,602234
As	12,91613	0,048816	0,599886
Pb	12,37173	0,030077	0,606612
Ni	4,247402	0,621648	0,692085
Cr	6,161857	0,599373	0,718192
Cr-VI	7,771295	0,599373	0,718192

* מתוך Benefito (CE DELFT, 2011).

למזהמים ממקורות נייחים אשר מפורטים בנספח 1 (מזהמים שאינם עיקריים) -

ההמרה נעשתה על בסיס עלויות חיצוניות שחושבו להולנד (CE DELFT, 2017). היות והצפיפות בהולנד זהה כמעט לחלוטין (99%) לזו של ישראל, ההעברה היא בעיקר בפרמטר התוצר, עם תקנון מזערי להבדלי הצפיפות.

לתחבורה ימית-

כיוון שהערכים הוצגו בהתאם לאזורים ימיים מסוימים, כולל הים התיכון, לא נדרשה התאמה לצפיפות האוכלוסיה, ובוצעה המרה של שער חליפין ועדכון אינפלציה בלבד.

8.2. הערה עבור המזהם NMVOC

NMVOC היא קבוצת מזהמים, אשר רוב התרכובות האורגניות הכלולות בה גורמות להיווצרות אחון בתהליך פוטוכימי, כך שהאחון הוא הגורם לנזקי הקצה. זיהום זה מוגדר כזיהום שניוני והוא מבוטא בערכים המוצגים בטבלאות עבור NMVOC. חשוב לציין כי לחלק מהתרכובות הכלולות בקבוצת ה-NMVOC קיים בנוסף לנזק השניוני גם נזק ישיר. עלויות עבור הנזק הישיר אינן מכומתות בערך של NMVOC אלא מכומתות עבור כל מזהם בנפרד ומוצגות בנספח 1. לפיכך קיימת חשיבות לשימוש בערכים של מזהמים אורגניים ספציפיים מתוך כלל ה-NMVOC בהתאם לסוגי הפליטות. יש עדיפות לחישוב כמה שיותר מזהמים ספציפיים על פי הערכים בנספח 1 (ככל שידועות כמויות הפליטה שלהם), לאחר מכן יש להוסיף את הערך של כלל ה-NMVOC בהפחתת כמויות הפליטה של המזהמים שכבר חושבו בנפרד (זאת על מנת לא לייצר כפילות בנזק השניוני, אשר מכומת גם בערך ה-NMVOC וגם בערכי המזהמים הספציפיים בנספח 1).

הערה זו רלוונטית עבור פליטה ממקורות נייחים בלבד.

8.3. הערה עבור המזהם PM לסוגיו

בנוגע לחלקיקים – PM, התוצאות מתייחסות ל-3 גדלים שונים, שיש ביניהם חפיפה חלקית, כמפורט להלן-

PM_{2.5} - חומר חלקיקי עדין מרחף שקוטר חלקיקיו קטן מ-2.5 מיקרומטר

PM_{Coarse} - חומר חלקיקי עדין מרחף שקוטר חלקיקיו גדול מ-2.5 מיקרומטר וקטן מ-10 מיקרומטר

PM10 - חומר חלקיקי מרחף, שקוטרו קטן מ-10 מיקרומטר. מכיל גם את קבוצת PM2.5 וקבוצת PMCoarse

במידה וקיים מידע כמותי לגבי יותר מקבוצה אחת, יש לחשב את העלויות עבור PM2.5 ו-PMcoarse ובאופן זה להתייחס להתפלגות גודל החלקיקים האמיתית ולהימנע מכפילויות. עלות הנזק מ-PM10 מתייחסת להערכה כללית של התפלגות גודל החלקיקים בקבוצה בהתאם לסקטור המזהם (מקורות נייחים, תחבורה יבשתית, תחבורה ימית), יש להשתמש בה במידה ולא ידועה התפלגות גודל החלקיקים בתוך הקבוצה.

8.4. תוצאות – מקורות נייחים

התוצאות ניתנות בטבלאות 18 ו-19 עבור פליטה מגובה עד 100 מטר וארובות מעל ל-100 מ'. לצורך שימוש בניתוחי רגישות, מוצג טווח ערכים עבור כל גובה פליטה. כפי שהוסבר בפרק 5, שלושת הערכים מבטאים מידת ודאות ביחס לנזק; הנמוך והאמצעי מתבססים על מידע בגין נזקים ודאיים, בעוד הערך הגבוה מתבסס על נזקים שאינם ודאיים, זאת בהתבסס על מגוון מחקרים מדעיים.

טבלה 18 - טווח ערכים למזהמי אוויר ממקור נייח – פליטה מתחת ל-100 מ' (שקלים לטון 2019)

מזהם	ערך נמוך	ערך אמצעי	ערך גבוה
PM _{2.5}	193,800	270,760	416,285
*PMCoarse	11,976	16,773	29,939
PM ₁₀	108,385	151,738	233,883
NO _x	79,631	118,208	176,513
SO ₂	61,623	85,381	132,897
NM VOC	5,272	7,217	11,548
NH ₃	59,316	103,803	149,477

* חומר חלקיקי עדין מרחף שקוטרו חלקיקיו קטן מ-10 מיקרומטר וגדול מ-2.5 מיקרומטר

טבלה 19 - טווח ערכים למזהמי אוויר ממקור נייח – ארובות מעל 100 מ'

(שקלים לטון 2019)

מזהם	ערך נמוך	ערך אמצעי	ערך גבוה
PM _{2.5}	89,138	124,536	191,470
***PMCoarse	6,097	8,539	15,242
PM ₁₀	55,007	77,010	118,700
NO _x	36,552	54,259	81,023
SO ₂	28,335	39,259	61,108
**NMVOC	5,272	7,217	11,548
NH ₃	27,321	47,812	68,850

** עבור NMVOC הערך לא משתנה בהתאם לגובה הפליטה מכיוון שמבטא נזק שניוני בלבד בתהליך פוטוכימי.

*** חומר חלקיקי עדין מרחף שקוטר חלקיקיו קטן מ-10 מיקרומטר וגדול מ-2.5 מיקרומטר

8.5. תוצאות – תחבורה יבשתית וימית

התוצאות עבור תחבורה יבשתית מוצגות בטבלה 20 ועבור תחבורה ימית בים התיכון – ב

טבלה 22.

לצורך שימוש בניתוחי רגישות, מוצג טווח ערכים. כפי שהוסבר לעיל, שלושת הערכים מבטאים מידת ודאות ביחס לנזק; הנמוך והאמצעי מתבססים על מידע בגין נזקים ודאיים, בעוד הערך הגבוה מתבסס על נזקים שאינם ודאיים, חזת בהתבסס על מגוון מחקרים מדעיים.

טבלה 21 מציגה ערכים עבור נוסחת "הציון הירוק" של כלי רכב.

טבלה 20 - עלות מזיהום מתחבורה יבשתית (שקלים לטון 2019)

מזהם	ערך נמוך****	ערך אמצעי	ערך גבוה
PM _{2.5} מחוץ לעיר	202,725	283,230	435,457
PM _{2.5} בעיר בינונית	356,217	497,676	765,160
PM _{2.5} במטרופולין**	1,103,405	1,541,580	2,370,130
***PM _{Coarse}	6,067	8,497	15,167
PM ₁₀	107,549	150,568	232,079
NO _x - עירוני	86,345	128,176	191,398
NO _x - מחוץ לעיר	55,164	81,888	122,279
NM _{VOC}	4,995	6,839	10,942
NH ₃	65,445	114,528	164,921

* PM₁₀ יכול לשמש כאומדן לחלקיקים הנפלטים מחיכוך צמיגים ובלמים (abrasive emissions).

** מטרופולין – מרחב עירוני המאכלס למעלה מ-0.5 מיליון תושבים.

*** חומר חלקיקי עדין מרחף שקוטר חלקיקיו קטן מ-10 מיקרומטר וגדול מ-2.5 מיקרומטר.

**** היחס בין הערך הגבוה והנמוך ביחס לערך האמצעי מתבסס על CE DELFT (2018)

להבדיל מהנזק שנגרם ממקורות נייחים, כאן הנזק הוא אחיד מלבד PM_{2.5} ו NO_x. אלו מחולקים על פי גודל המרחב העירוני. הדבר בא לידי ביטוי במיוחד ב PM_{2.5}. הנזק מזיהום ממקור נייח נמוך מ-100 מטר עומד על 270,760 שקלים לטון בו בזמן שהנזק מזיהום תחבורתי מחוץ לעיר עומד על 283,230 שקלים לטון ואילו הנזק מזיהום תחבורתי בעיר בינונית ובמטרופולין גבוה משמעותית (494,676 ו 1,541,580 שקלים לטון בהתאמה).

עלויות חיצוניות עבור נוסחת "הציון הירוק" של כלי רכב

החל משנת 2009 מחושב עבור כל דגם רכב חדש בישראל דרגת זיהום המשקפת את פליטות מזהמי האוויר וגזי החממה מהרכב. דרגת הזיהום של הרכב מספקת בסיס לקביעת הטבת מס הקנייה לה זכאי הרכב ("המיסוי הירוק") ואף חלה חובה לגלות אותה בכל פרסומת לרכב (בעיתונות, טלוויזיה, שלטי חוצות, אולמות תצוגה וכד').⁹³

דרגת הזיהום נקבעת על ידי נוסחה ייחודית המשקללת חמישה סוגי מזהמים הנפלטים מהרכב ומתועדים במסגרת הליך אישור אב הטיפוס לדגם הרכב (נוסחת "הציון הירוק"). השקלול בין המזהמים נעשה באמצעות העלויות החיצוניות (ש"ח לטון) לכל מזהם. חמשת המזהמים הנלקחים בחשבון לצורך חישוב דרגת זיהום האוויר הם: פחמן חד חמצני (CO), חלקיקים נשימים עדינים (PM2.5), תחמוצות חנקן (NOx), תרכובות אורגניות נדיפות (VOC) ופחמן דו חמצני (CO₂).

עבור נוסחת "הציון הירוק" של כלי רכב, מוצע להשתמש בערכים הבאים והעדכונים השנתיים העתידיים שלהם שיתפרסמו ע"י המשרד:

טבלה 21 - עלויות עבור נוסחת "ציון ירוק" (שקלים לטון 2019)

מזהם	עלות חיצונית
PM2.5	*497,676
NOx	*128,176
NM VOC	6,839
CO	**323
CO ₂	140

*ערך לעיר בינונית

**עבודה זו לא כוללת ערך ייעודי עבור העלות של פחמן חד חמצני הנפלט מתחבורה ולכן, עבור מזהם זה, מוצע להשתמש בערך העלות החיצונית כפי שחושב עבור פליטות ממקורות נייחים (ראו נספח 1).

⁹³ מנגנון לחישוב הנחה במס קניה לכלי רכב פרטיים ורכבי משא קלים כתלות בדרגת זיהום האוויר של הרכב.

התוצאות לסקטור התחבורה הימית ניתנות בטבלה שלהלן.

טבלה 22 - עלות מזיהום מתחבורה ימית בים התיכון (שקלים לטון 2019)

מזהמים	ערך נמוך*	ערך אמצעי	ערך גבוה
PM2.5	75,846	105,966	75,709
*PM10	43,075	60,306	42,998
Nox	8,705	12,923	8,975
SO ₂	28,602	39,629	28,170
NM VOC	1,573	2,154	1,651
NH ₃	-	-	-

* היחס בין הערך הגבוה והנמוך ביחס לערך האמצעי מתבסס על CE DELFT (2018)

8.6. תוצאות - גזי חממה

כפי שהוסבר בפרק 7, בגישת עלות הנזק, הערך המומלץ על ידי ה-EPA עומד על 42 דולר לטון (149 שקלים לטון⁹⁴).

כיוון שהמספרים בדו"ח ה-EPA נקובים בדולר ארה"ב במונחי 2007, על מנת להמיר ולשרשר את הנתונים לישראל, יש להביא בחשבון את השינוי בשער החליפין ובמדד המחירים, בנוסף להמרה על בסיס שער"ח החליפין הנוכחי⁹⁵.

הערך המוצע לאחר התאמות אלה הוא 140 ₪ לטון פחמן דו-חמצני.

טבלה 23 מפרטת את ערכי העלויות החיצוניות עבור פחמן דו-חמצני וגזי חממה נוספים.

⁹⁴ Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases, United States Government (2016). Technical Support Document: Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis Under Executive Order 12866

⁹⁵ לפי [אתר בנק ישראל](#) שער החליפין נכון ליום 1/1/2007 היה 4.025, כלומר חל פיחות בשער הדולר ביחס לשקל בין 2007 ל-2019 של 26%. במקביל, מדד המחירים בארה"ב בתקופה 2007 ל-2018 (בממוצע שנתי) עלה ב-21%, לפי אתר [InflationData.com](#). אנו מכפילים את שיעורי השינוי הללו בערך לאחר המרתו מדולר לש"ח לפי שער החליפין הנוכחי.

טבלה 23 – ערכים מומלצים לגזי חממה (שקלים לטון 2019)

לאופק של 100 שנים:

גזי חממה/ שער היוון	מזהמים	5%	3%	2.5%
CO ₂	פחמן דו חמצני	40	140	207
*N ₂ O	ניטרוס אוקסיד	10,600	37,100	54,766
*CH ₄	מתאן	1,120	3,920	5,787
*SF ₆	גופרית 6 פלואורידית	911,989	3,191,960	4,711,941

לאופק של 20 שנים:

גזי חממה/ שער היוון	מזהמים	5%	3%	2.5%
CO ₂	פחמן דו חמצני	40	140	207
*N ₂ O	ניטרוס אוקסיד	10,560	36,960	54,559
*CH ₄	מתאן	3,360	11,760	17,360

* יש לשים לב שבמידה ומזהמים אלה מוצגים כשווה ערך טון פחמן דו חמצני, יש להשתמש בערך של פחמן דו חמצני לעיל.

גזי החממה המופיעים בטבלה 23, הומרו בהתאם להנחיות ה-IPCC, לפי מקדם המרה קבוע על בסיס הערך של פחמן דו-חמצני.⁹⁶ מקדם ההמרה משקף את פוטנציאל התרומה של גזים אלו להתחממות גלובלית (GWP = Global Warming Potential), ביחס לפחמן-חמצני. ה-IPCC מציג מקדמי המרה אשר משקפים נזק לאופק של 20 שנים (GWP₂₀) ומקדמים שמשקפים נזק לאופק של 100 שנים (GWP₁₀₀). גזי חממה מסוימים כדוגמת מתאן (CH₄) הם בעלי זמן מחצית חיים קצר יחסית באטמוספירה, כלומר, מתפרקים לאורך זמן וריכחם יורד. לפיכך, השפעתם בטווח הקרוב (לדוגמא, באופק זמן של 20 שנה) היא משמעותית הרבה יותר מהשפעתם על פני 100 שנה. הבחירה באופק הזמן הרלוונטי תיעשה בהתאם למטרת החישוב, כך שעבור הערכת הנזק בטווח הזמן המידי או לשנים הקרובות יעשה שימוש ב-GWP₂₀ ועבור תחזיות ארוכות טווח לעשרות שנים קדימה יעשה שימוש ב-GWP₁₀₀.

⁹⁶ מקדמי ההמרה (GWP) מתבססים על דו"ח IPCC לשנת 2014, AR5. ככל שיתפרסם דו"ח נוסף של ה-IPCC, יידרש עדכון של מקדמי ההמרה, בהתאם.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp
לגז החממה SF₆ מקדם ההמרה התבסס על הנתון העדכני ביותר שפורסם, והוא בדו"ח IPCC מ-2007 – 4AR – Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Fourth Assessment Report (AR4), Working Group 1 (WG1), Chapter 2, Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing

ניתן לחשב **עלויות חיצוניות של גזי חממה נוספים** שאינם מופיעים בטבלה 23 (כדוגמת HFC, PFC ו-NF3) על ידי הכפלת העלות של CO₂ במקדם ההמרה הרלבנטי לכל גז חממה, כפי שהוא מפורסם על ידי ה-IPCC⁹⁷ בעת ביצוע החישוב. הערכים מוצגים בטווח של שלושה ערכים, בהתאם לשערי ההיוון ששימשו בניתוח הרגישות שבוצע על ידי ה-EPA (ראו טבלה 14). ערכים אלו אמורים לשמש באופן זהה לשימוש שהומלץ בנוגע לשאר המזהמים. כלומר, ערך אמצעי לנושא תמחור ומיסוי וערכים חלופיים לניתוחי רגישות במסגרת בחינת עלות-תועלת.

8.7. סיכום

מומלץ להשתמש בערכים הכספיים המוצגים בפרק זה ובהתאם להנחיות המפורטות בו על מנת לכמת את העלויות החיצוניות למשק הנובעות מפליטת מזהמי אוויר וגזי חממה.

מומלץ להשתמש בערכים האמצעיים כאשר נדרש שימוש בערך יחיד, ובערכים הגבוהים והנמוכים על מנת להציג טווח רגישות של התוצאה, על מנת לבטא את אי הוודאות הכרוכה בהערכות מסוג זה.

מוצע לעדכן ערכים אלה אחת לשנה בהתאם לנוסחה המפורטת בסעיף 9 להלן, וכן לבצע עדכון מעמיק יותר מעת לעת, בהתאם לתוצאות מחקריות עדכניות, ולשינוי במתודולוגיה במדינות מפותחות.

⁹⁷ ר' טבלאות מפורטות בנספח 8A בדו"ח IPCC 2013.

9. נוסחת העדכון השנתית

על מנת להתאים את המחירים הסביבתיים לרמות המחירים בישראל, יש לבצע התאמה שנתית (אקס-פוסט) בהתאם למדדים המקרו כלכליים, ולשינויים נוספים במשק. נדגיש כי מחיר הוא מספר יחסי, ובמידה ולא נעדכן את המחירים בהתאם לשאר המדדים במשק, ניצור עיוות כלכלי.

9.1. נוסחת עדכון לעלויות חיצוניות למזהמי אוויר

מוצע לשמור על נוסחת העדכון השנתית הנהוגה נכון להיום, לבד מעדכון גמישות הביקוש לאיכות סביבה ביחס לשינוי בהכנסה בהתאם ל-CE DELFT (2019), ל-0.8 (במקום 0.85)-

$$M = ((1+R) / (1+ S)) - 1$$

$$^{98} \text{מקדם העדכון} = ((1 + M) * (1+L) * (1+0.85*K))-1$$

$$P1 = (1 + \text{מקדם העדכון}) * P$$

כאשר-

$P1$ - העלות החיצונית של מזהם מסוים, לאחר העדכון;

P - העלות החיצונית של מזהם מסוים, הידועה ביום העדכון.

M - מדד מחירי התוצר.

R - שיעור השינוי בין התמ"ג השנתי במחירים שוטפים הידוע ביום העדכון ובין התמ"ג

השנתי במחירים שוטפים הידוע בשנה שלפני יום העדכון.

S - שיעור השינוי בין התמ"ג הריאלי השנתי הידוע ביום העדכון ובין התמ"ג הריאלי השנתי הידוע בשנה שלפני יום העדכון.

L - שיעור השינוי בין היקף האוכלוסייה הממוצעת הידוע ביום העדכון לשנה האחרונה ובין היקף האוכלוסייה הממוצעת הידוע ביום העדכון לשנה שלפני האחרונה.

K - שיעור השינוי בין התמ"ג הריאלי לנפש הידוע ביום העדכון ובין התמ"ג הריאלי לנפש הידוע בשנה שלפני יום העדכון.

⁹⁸ ההמרה עד כה נעשתה בהתייחס לגמישות הכנסה של 0.85. ההמלצה היא לשנות את הגמישות כעת ל 0.80.

9.2. נוסחת עדכון לגזי חממה

כפי שהוסבר בפרק 7, מוצע לעדכן את הנתונים לגזי חממה בקצב גידול שנתי המשתנה בין השנים. בטבלה שלהלן שיעור השינוי השנתי המוצע-

טבלה 24 – קצב גידול שנתי במחיר פליטת פחמן דו חמצני בין השנים

2020-2050

שיעור השינוי השנתי בעלות החיצונית לפליטת CO ₂	בין השנים
2.1%	2020-2030
1.9%	2030-2040
1.6%	2040-2050

בנוסף, יש לעדכן את הערכים בהתאם לשינוי במדד המחירים לצרכן בשנה החולפת.

10. מקדמי עדכון שנתיים

בניתוחי עלות-תועלת

ערכי עלויות חיצוניות נדרשים, בין היתר, לצורך שילובם בניתוחי עלות-תועלת (אקס-אנטה), אשר בוחנים כדאיות כלכלית של חלופות מדיניות ופרויקטים במונחי ערך נוכחי. ההנחה היא כי ערכי העלויות החיצוניות עולים בכל שנה. על כן, בחישוב של ערך נוכחי, בנוסף להיוון (מהעתיד להווה), נדרש גם לחשב את העליה בערכי העלויות החיצוניות על פי המקדמים המומלצים בפרק זה.

10.1 מקדם עדכון שנתי בניתוח עלות-תועלת – עבור מזהמי

אוויר מקומיים

מקדם העדכון לצורך ניתוח עלות-תועלת מתבסס על תחזיות, הן בנוגע להיקף האוכלוסייה והן בנוגע לגידול בתוצר לנפש. העדכון השנתי אמור להתייחס סימולטנית לשינוי החזוי בשני משתנים אלו.

תחזית לגידול באוכלוסייה: פראן וקלינגר (2018)⁹⁹ קבעו בניתוח כלכלי סטטיסטי שאחוז הגידול בין 2015 ל-2065 אמור להיות 1.6%. זהו עדכון כלפי מטה מתחזית קודמת של 1.9%. העדכון כלפי מטה נובע מירידה בפריון נטו של שלושת קבוצות האוכלוסייה העיקריות: יהודים לא חרדים, יהודים חרדים וערבים. עשירות אחוזים יכולים להצטבר למספרים גדולים על פני 50 שנים ולכן חישוב תחזית מהימן משפיע רבות על האופן שבו המשק אמור להיערך למספר תושבים עתידי. בתוך כל אלו כמובן גם היערכות להשפעה של זיהום אוויר על אוכלוסייה גדולה יותר.

⁹⁹ אתר הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, "תחזית אוכלוסיית ישראל 2015-2065".

תחזית לגידול בתוצר לנפש: Gullimette and Turner (2018) פרסמו מסמך תחזית עולמית מטעם ה-OECD¹⁰⁰. מסמך זה הוא מסמך מעמיק אשר כולל תחזיות עולמיות, אזוריות וגם לפי מדינות. הוא גם מציין את הסיבות השונות לתחזיות על מודלים מבניים. לגבי ישראל, הדו"ח מציין שתי תקופות: עד 2030 ומ-2030 עד 2060. לגבי התקופה הראשונה, קצב הגידול הוא 2.2% ולגבי השנייה, 1.9%. זאת ההמלצה העדכנית והסבירה ביותר נכון לכתיבת הדו"ח.

על סמך שני מרכיבים ובהינתן גמישות הכנסה של 0.8, יש לעדכן את העלויות החיצוניות של מזהמי אוויר מקומיים (שאינם גזי חממה) בשיעור של 3.39% מדי שנה, במחירים קבועים עד שנת 2030.¹⁰¹

מעבר לשנת 2030, מומלץ לעדכן את הערכים השנתיים ב 3.14%¹⁰². עלייה זו אמורה לשקף את העלייה ברמת החיים מתוקננת בגמישות ההכנסה ואת העלייה בגודל האוכלוסייה. יודגש שאלו מחירים קבועים שאינם לוקחים בחשבון את העלייה במדד המחירים לצרכן. במידה ורוצים להעריך בזמן אמת את העלות במחירים שוטפים יש להתחשב גם בשיעור האינפלציה בחישוב. במידה ורוצים לבצע חישוב בהווה לגבי העתיד, אין צורך להתחשב בשינוי במדד המחירים.

10.2 מקדם עדכון שנתי בניתוח עלות-תועלת – עבור גזי

חממה

מקדם העדכון של העלויות החיצוניות של גזי חממה הוא בהתאם לשיעורים בטבלה 24 לעיל, ללא התאמה לשינויים במדד המחירים לצרכן.

¹⁰⁰ אתר ה-OECD, "The Long View: Scenarios for the world economy to 2060"

¹⁰¹ $(1 + 0.022 \cdot 0.8) \cdot 1.016$

¹⁰² $(1 + 0.019 \cdot 0.8) \cdot 1.016$

ביבליוגרפיה

-
- בקר, נ. וחברת כיוון (2012) חישוב העלויות החיצוניות של זיהום אוויר מתחבורה ומתעשייה בישראל. הוגש למשרד להגנת הסביבה.
- פארטו הנדסה בע"מ (2008) עלויות חיצוניות של זיהום אוויר מייצור(אנרגיה) חשמל בישראל. הוגש למשרד להגנת הסביבה.
- DHVMED (2017) הסבב הראשון של היתרי פליטת מזהמים למפעלי תעשייה וייצור האנרגיה – בחינת עלויות ותועלות, הוגש למשרד להגנת הסביבה
- EcoFinance (2013) גישות שונות לקביעת מחיר הפחמן הדו-חמצני המשמש לצרכי ניתוחי עלות-תועלת בתחומי הסביבה והאנרגיה. הוגש למשרד להגנת הסביבה.
- Aldy, J., 2017, Designing and Updating a US Carbon Tax in an Uncertain World, Faculty Research Working Paper Series, Harvard Kennedy School, RWP17-001, February 2017
- CE DELFT (2019) Calculation exclusive damage costs PM10 - A short note by Sander de Bruyn (PhD), CE DELFT, bruyn@ce.nl
- CE DELFT (2019) Review Benefit Transfer external environmental costs of air pollution gases in Israel. Correspondence with Sander de Bruyn (PhD), CE DELFT, bruyn@ce.nl
- CE DELFT (2019) Handbook on the external costs of transport. For the European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport
- CE DELFT (2018) Environmental Prices Handbook EU28 version - Methods and numbers for valuation of environmental impacts – for the EU
- CE DELFT (2017) Environmental Prices Handbook EU28 version - Methods and numbers for valuation of environmental impacts – for the Netherlands
- CE DELFT (2012) External Costs of CO Emissions for Transport in Israel. For the ministry of environmental protection of Israel
- CE DELFT (2010) Shadow prices handbook - Valuation and weighting of emissions and environmental impacts
- CE DELFT (2010) Benefito - Description of the Excel tool and user manual

Hope, C., 2013. Critical issues for the calculation of the social cost of CO₂: what the estimates from PAGE09 are higher than those from PAGE2002. *Climate Change* 117:531-543.

Interagency Working Group. (2013). Technical update on the social cost of carbon for regulatory impact analysis-under executive order 12866. Interagency Working Group on Social Cost of Carbon, United States Government.

IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]

IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Leggett, J.A., 2017. Federal Citations to the Social Cost of Greenhouse Gases
Specialist in Energy and Environmental Policy, Congressional Research Service,
March 21, 2017

Nordhaus, W. 2010, Economic aspects of global warming in post-Copenhagen environment. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107(26): 11721-11726.

OECD (2018), *Cost-Benefit Analysis and the Environment: Further Developments and Policy Use*, OECD Publishing, Paris.

Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases, United States Government (2016). Technical Support Document: Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis Under Executive Order 12866

EPA (2016). EPA FACT SHEET: SOCIAL COST OF CARBON.

נספח 1- עלויות חיצוניות לרשימה מפורטת של מזהמי אוויר

בפליטות ממקור נייד

נספח זה כולל מחירים לרשימה מפורטת של מזהמים, אך אינה כוללת את המזהמים העיקריים, המפורטים בגוף העבודה.

Pollutant	Pollutant Name (Israel)	Pollutant Symbol	CAS registry number	Lower value ILS/ton (2019)	Central value ILS/ton (2019)	Upper value ILS/ton (2019)
1,1'-Biphenyl, 3,3',4,4'-tetrachloro-, PCB-77			032598-13-3	13	51	98
1,2,3,6,7,8-Hexachlorodibenzo-p-dioxin			057653-85-7	10,151	40,808	79,592
1,2,3,7,8-Pentachlorodibenzo-p-dioxin			040321-76-4	1,554,746	6,239,221	12,174,912
1,3-Dichloro-2-propanol			000096-23-1	45	180	351
1,5,9-Cyclododecatriene			004904-61-4	0	0	0
1-Bromopropane			000106-94-5	0	0	0
2,2-Bis(4-hydroxy-3,5-dibromophenyl)propane			000079-94-7	80	322	627
2,3-Dibromo-1-propanol			000096-13-9	0	0	0
2,3-Dinitrotoluene			000602-01-7	52	208	405
2,4,5,2',5'-Pentachlorobiphenyl			037680-73-2	47	187	364
2,4,6-Tri(tert-butyl)phenol			000732-26-3	60	240	469
2,4-Diaminoanisole sulfate			039156-41-7			
2,5-Dinitrotoluene			000619-15-8	7	28	55
2-Butenal			004170-30-3	0	0	0
2-Ethoxyethyl acetate			000111-15-9	0	0	0
2-Methoxyethyl acetate			000110-49-6	0	0	0
3,4-Dinitrotoluene			000610-39-9	7	28	55
3,5-Dinitrotoluene			000618-85-9	0	1	3
4,4'-Methylene di-o-toluidine			000838-88-0	2,570	3,507	5,430
4,4'-Methylenebis-(2-chlorobenzeneamine)			000101-14-4	7,858	10,758	16,627
4,4'-Oxybisbenzenamine			000101-80-4	1,457	1,993	3,079
4,4'-Thiodianiline			000139-65-1	5,497	7,521	11,602
4-Aminoazobenzene			000060-09-3	2	6	12
Acenaphthene			000083-32-9	476	651	1,002
Acenaphthene, 5-nitro-			000602-87-9	13,355	18,279	28,228
Acridine			000260-94-6	15	59	115
Acrylamide	אקרילאמיד	C ₃ H ₅ NO	000079-06-1	205,388	280,934	435,059
Acrylonitrile			000107-13-1	33,726	46,204	71,161

Pollutant	Pollutant Name (Israel)	Pollutant Symbol	CAS registry number	Lower value ILS/ton (2019)	Central value ILS/ton (2019)	Upper value ILS/ton (2019)
A-endosulfan			000959-98-8	7,521	30,218	58,682
Aldrin	אלדרין		000309-00-2	197,294	270,141	418,196
Aniline, p-chloro-			000106-47-8	3,174	4,351	6,745
Anisole, pentachloro-			001825-21-4	96	384	749
Anthracene			000120-12-7	190	262	405
Arsenic	ארסן	As	007440-38-2	2,370,904	3,473,728	4,148,239
Azobenzene			000103-33-3	27	110	214
Azocyclotin			041083-11-8	81,279	113,655	177,059
Benomyl			017804-35-2	368	523	820
Benz(a)acridine			000225-11-6	41	167	325
Benz(c)acridine			000225-51-4	499	2,007	3,912
Benzene ¹⁰³	בנזן	C ₆ H ₆	000071-43-2	2,712	5,396	5,396
Benzene, (epoxyethyl)-			000096-09-3	1,194	1,632	2,523
Benzene, 1-(1,1-dimethylethyl)-3,5-dimethyl-2,4,			000081-15-2			
Benzene, 1,2,3-trichloro-			000087-61-6	10	41	80
Benzene, 1,2,4-trichloro-			000120-82-1	3,440	4,722	7,285
Benzene, 1,3,5-trichloro-			000108-70-3	4	14	28
Benzene, 1-methyl-2-nitro-			000088-72-2	0	1	2
Benzene, 2,4-dichloro-1-(4-nitrophenoxy)-			001836-75-5	1,278	1,804	2,819
Benzene, hexachloro-			000118-74-1	478,902	657,648	1,018,511
Benzene, pentachloro-			000608-93-5	87,012	119,726	185,153
Benidine			000092-87-5	50,588	69,137	106,910
Benidine dihydrochloride			000531-85-1			
Benidine, 3,3'-dichloro-			000091-94-1	31,938	43,843	67,451
Benidine, 3,3'-dimethyl-			000119-93-7	0	1	2
Benidine, 3,3'-dimethyl-, dihydrochloride			000612-82-8			
Benzo(a)anthracene			000056-55-3	0	0	0
Benzo(a)pyrene			000050-32-8	28,195	38,447	59,694
Benzoic acid, 4-(tert-butyl)-			000098-73-7	1	3	5
Benzotrichloride			000098-07-7	335,232	458,667	708,236
Benzyl chloride			000100-44-7	2,145	2,934	4,519
Beryllium			007440-41-7	186,839,374	222,251,169	291,388,482
beta-Naphthylamine			000091-59-8	981	1,342	2,074

¹⁰³ ערך הבנזן בטבלה הינו ראשוני וטעון עדכון. זאת, בהתאם למחקרים שהתפרסמו במקביל לפרסום מסמך CE DELFT 2018 ועל כן לא נכללו בו. על פי [נתוני ארגון הבריאות העולמי \(WHO\)](#), חשיפה לבנזן נקשרה למגוון של מחלות והשפעות בריאותיות חריפות וארוכות טווח, כולל סרטן והשפעות המטבוליות. לאור זאת, בימים אלו המשרד יחם מחקר המשך עדכני הממוקד בעלות החיצונית של בנזן בעזרת חברת CE DELFT. על כן, ערך הבנזן בטבלה הנ"ל צפוי להתעדכן. עד פרסום ערך עדכני, ככל שנעשה שימוש בערך הבנזן מתוך הטבלה הנ"ל יש לציין כי הערך הוא אומדן ראשוני בלבד.

Pollutant	Pollutant Name (Israel)	Pollutant Symbol	CAS registry number	Lower value ILS/ton (2019)	Central value ILS/ton (2019)	Upper value ILS/ton (2019)
Binapacryl			000485-31-4	14	56	109
Biphenyl, 4-amino-			000092-67-1	19,055	26,070	40,133
Bis(chloromethyl)ether			000542-88-1	24,181,197	33,084,734	51,262,789
Bisphenol A			000080-05-7	1,126	1,568	2,442
Brodifacoum			056073-10-0	8	32	62
Butadiene	-1,3 בטודיאן	C ₄ H ₆	000106-99-0	10,455	13,794	20,842
Butadiene, hexachloro-			000087-68-3	50	203	395
Butane	בוטאן	C ₄ H ₁₀	000106-97-8	3,234	4,216	6,307
C.I. basic violet 3			000548-62-9	253	1,015	1,976
C.I. disperse blue 1			002475-45-8	157	215	333
C.I. solvent yellow 3			000097-56-3	16,998	23,271	36,086
Cadmium	קדמיום	Cd	007440-43-9	2,691,296	3,912,160	6,171,770
Carbamic acid, ethyl ester			000051-79-6	570	779	1,204
Carbendazim			010605-21-7	1,504	2,462	4,047
Carbon monoxide	פחמן חד חמצני	CO	000630-08-0	248	323	513
Chlordane , pur			000057-74-9	4,721,573	6,441,574	9,949,028
Chlorfenvinphos			000470-90-6	485,647	667,765	1,032,001
Chloromethyl methyl ether			000107-30-2	12,715	17,402	26,879
Chloroprene			000126-99-8	3,676	5,025	7,791
Chromium	כרום	Cr	007440-47-3	513	1,791	3,440
Chromium (VI)	כרום 6 ערכי	Cr (VI)	18540-29-9	-	-	-
Copper	נחושת	Cu	007440-50-8	3,878	14,165	27,824
Crotonaldehyde			000123-73-9			
Cyclododecane			000294-62-2	0	0	0
Cyclododecane, hexabromo-			025637-99-4	72	290	563
Cycloheximide			000066-81-9	5	21	41
Cyclopentadiene, hexachloro-			000077-47-4	785,805	1,075,844	1,662,668
Cyhexatin			013121-70-5	49,914	69,812	108,933
DDT			000050-29-3	211,796	290,714	448,549
Decabromodiphenyl oxide			001163-19-5	431,687	593,569	913,962
Delta-hexachlorocyclohexane			000319-86-8	56	227	442
Dibenz(a,h)anthracene			000053-70-3	1,467,060	2,006,668	3,102,748
Dibenzofuran, 2,3,7,8-tetrachloro-			051207-31-9	1,773,962	7,149,810	13,894,914
Dibutyl dichloro tin			000683-18-1	12	47	90
Dibutyltin oxide			000818-08-6	0	0	0
Dicofol			000115-32-2	239,788	328,149	505,883
Dieldrin			000060-57-1	2,364,159	3,237,650	5,025,102
Difenacoum			056073-07-5	1	3	6
Di-isobutylphthalate			000084-69-5	0	1	2
Dimethyl formamide			000068-12-2	4,991	6,846	10,556

Pollutant	Pollutant Name (Israel)	Pollutant Symbol	CAS registry number	Lower value ILS/ton (2019)	Central value ILS/ton (2019)	Upper value ILS/ton (2019)
Dimethylcarbamy chloride			000079-44-7	114,667	156,824	242,149
Dimethylphenol phosphate (3:1)			025155-23-1	1	4	7
Dinitrogen monoxide	חמצן דו-חנקני (ניטרוס אוקסיד)	N ₂ O	010024-97-2	נכלל בטבלה נפרדת לנושא גז"ח, ראו לעיל		
Dinocap			039300-45-3	16,998	23,507	36,424
Dinoseb			000088-85-7	241,812	334,894	519,373
Dinoterb			001420-07-1	2,351	9,477	18,414
Dioxin, 1,2,3,7,8,9-hexachlorodibenzo-			019408-74-3			
Dioxin, 2,3,7,8 Tetrachlorodibenzo-p-			001746-01-6	165,255,042,093	226,298,231,111	350,745,395,462
Diuron			000330-54-1	10,320	15,345	24,451
Endosulfan			000115-29-7	34,737	47,553	73,522
Endosulfan (beta)			033213-65-9	10,387	41,820	81,279
Endrin			000072-20-8	43,169	63,067	99,490
Endrocid (endox) (coumatetralyl)			005836-29-3	0	2	4
Epichlorohydrin			000106-89-8	67,451	92,408	142,659
Ethane, 1,2-dibromo-			000106-93-4	77,569	106,235	163,906
Ethane, 1,2-dichloro-	-1,2 דיכלורואתאן	C ₂ H ₄ Cl ₂	000107-06-2	17,267	23,608	36,424
Ethane, pentachloro-			000076-01-7	0	0	0
Ethanol, 2-ethoxy-			000110-80-5	3,845	5,025	7,555
Ethanol, 2-methoxy-			000109-86-4	4,047	5,362	8,128
Ethene, bromo-			000593-60-2	9,814	13,423	20,741
Ethene, chloro-	ויניל כלוריד	C ₂ H ₃ Cl	000075-01-4	8,128	11,129	17,166
Ethene, trichloro-			000079-01-6	3,079	4,013	6,037
Ethyl O-(p-nitrophenyl) phenylphosphonothionate			002104-64-5	1,325,413	1,814,433	2,799,218
Ethylene oxide	אתילן אוקסיד	C ₂ H ₄ O	000075-21-8	5,329	7,285	11,264
Ethylene thiourea			000096-45-7	2,556	3,507	5,396
Ethyleneimine			000151-56-4	335,232	458,667	708,236
Fenbutatin oxide			013356-08-6	218,541	299,145	462,040
Fenchlorazole-ethyl	אזירידין		103112-35-2	330	1,329	2,583
Fentin acetate			000900-95-8	1,163,530	1,595,217	2,465,335
Fentin chloride			000639-58-7	1,170,276	1,608,707	2,488,943
Fentin hydroxide			000076-87-9	1,109,570	1,521,021	2,354,041
Fluazifop-butyl			069806-50-4	9	37	71
Flucythrinate			070124-77-5	45,867	98,141	173,349
Fluoranthene			000206-44-0	1,008	1,410	2,192
Fluorene			000086-73-7	1,315	1,814	2,813
Flusilazole			085509-19-9	42,494	58,345	90,047

Pollutant	Pollutant Name (Israel)	Pollutant Symbol	CAS registry number	Lower value ILS/ton (2019)	Central value ILS/ton (2019)	Upper value ILS/ton (2019)
Formaldehyde	פורמאלדהי ד (פורמלין)	CH ₂ O	000050-00-0	65,090	88,698	136,588
Furan			000110-00-9	160,871	220,228	340,628
Glufosinate ammonium			077182-82-2	19,224	26,340	40,808
Glycidol			000556-52-5	17,942	24,552	37,773
Glycydyltrimethylammonium chloride			003033-77-0	0	0	0
Heptachlor			000076-44-8	49,577	68,126	105,224
Heptachlor epoxide			001024-57-3	559,844	768,942	1,187,138
Heptachloronorborene			028680-45-7	1	2	4
Hexachlorocyclohexane			000608-73-1	48,565	66,777	103,537
Hexamethylphosphoramide			000680-31-9	721,726	988,158	1,527,766
Hydrazine	הידריזין		000302-01-2	135,577	185,828	287,004
Hydrazine, 1,1-dimethyl-			000057-14-7	1,089	1,609	2,560
Hydrazine, 1,2-diphenyl-			000122-66-7	0	1	1
Hydrazine, phenyl-, hydrochloride			000059-88-1			
Isobutane	איזובוטאן (מתילפרופ אן)	C ₄ H ₁₀	000075-28-5	2,823	3,676	5,497
Isodrin			000465-73-6	76	304	590
Isoprene	איזופרן	C ₅ H ₈	000078-79-5	10,118	13,187	19,797
Isoquinoline			000119-65-3	2	6	12
Kepone			000143-50-0	593,569	822,903	1,274,825
Lead	עופרת	Pb	007439-92-1	13,389,031	19,931,782	22,258,842
Lindane			000058-89-9	242,486	333,208	516,000
Lindane, alpha-			000319-84-6	46,878	64,078	99,490
Lindane, beta-			000319-85-7	27,925	38,110	59,020
Linuron			000330-55-2	7,993	11,096	17,234
Mercury	כספית	Hg	007439-97-6	83,639,287	116,353,040	180,768,781
Methane	מתאן	CH ₄	000074-82-8	נכלל בטבלה נפרדת לנושא גז"ח, ראו לעיל		
Methoxychlor			000072-43-5	1,784	2,445	3,777
Methylmercury			022967-92-6	8,701,184	11,905,108	18,414,133
Mirex			002385-85-5	36,423,560	49,576,513	76,556,928
Naphthalene	נפתלן	C ₁₀ H ₈	000091-20-3	3,811	5,194	8,027
Naphthalene, 2-methyl-			000091-57-6	3,261	4,452	6,880
Nickel	ניקל	Ni	007440-02-0	252,941	448,549	758,824
Nitroanisole, o-			000091-23-6	6,914	9,477	14,637
Nitrobenzene	ניטרובנזן		000098-95-3	66,102	90,384	139,624
Nitrosoguanidine, N-methyl-N'-nitro-N-			000070-25-7	173,686	237,428	367,608
Nitrous acid, 2-methylpropyl ester			000542-56-3			
N-Nitrosodiethanolamine			001116-54-7	13,423	18,347	28,329
N-Nitrosodimethylamine			000062-75-9	819,530	1,119,687	1,730,119

Pollutant	Pollutant Name (Israel)	Pollutant Symbol	CAS registry number	Lower value ILS/ton (2019)	Central value ILS/ton (2019)	Upper value ILS/ton (2019)
N-Nitrosodipropylamine			000621-64-7	1,784,080	2,441,728	3,777,258
N-nonylphenol			084852-15-3	20	79	154
Nonylphenol			025154-52-3	0	0	0
O,p'-ddt			000789-02-6	469	1,882	3,676
o-Aminoanisoole			000090-04-0	0	0	0
o-Toluidine			000095-53-4	0	0	0
o-Toluidine, 4-chloro-, hydrochloride			003165-93-3	2,580	3,541	5,464
Oxirane, (phenoxymethyl)-			000122-60-1	1,066	1,460	2,253
P-(1,1,3,3-tetramethylbutyl)phenol			000140-66-9	9	36	70
p-Cresidine			000120-71-8	121	166	257
Pentabromodiphenyl ether			032534-81-9	441,804	603,687	930,824
Phenanthrene			000085-01-8	1	3	5
Phenanthridine			000229-87-8	8	33	63
Phenol, pentachloro-			000087-86-5	23,169	31,702	48,902
Phenolphthalein			000077-09-8	198	271	418
Phenyl hydrazine			000100-63-0	0	0	1
Phenylmercuric acetate			000062-38-4	3,743,533	5,126,279	7,925,497
Phosphate, tris(2-chloroethyl)-			000115-96-8	0	0	1
Phthalate, butyl-benzyl-			000085-68-7	631	867	1,342
Phthalate, dibutyl-			000084-74-2	536	759	1,184
Phthalate, dihexyl-			000084-75-3	2	10	19
Phthalate, dioctyl-			000117-81-7	32,849	44,855	69,475
P-nonylphenol			000104-40-5	1	4	8
Polychlorinated biphenyls			001336-36-3	9	38	74
Propane sultone			001120-71-4	27,621	37,773	58,345
Propane, 1,2,3-trichloro-			000096-18-4	99,828	136,588	211,122
Propane, 1,2-dibromo-3-chloro-			000096-12-8	569,961	779,059	1,204,001
Propane, 1,2-dichloro-			000078-87-5	140,298	192,235	296,785
Propane, 2-nitro-			000079-46-9	4,317	5,936	9,140
Propiolactone			000057-57-8	61,718	84,651	130,518
Propylene oxide			000075-56-9	22,394	30,623	47,216
P-tert-amylphenol			000080-46-6	1	4	8
Pyrene			000129-00-0	1,781	2,438	3,777
Quinoline			000091-22-5	2	8	15
Safrrole			000094-59-7	59	81	125
Sulfallate			000095-06-7	813	1,113	1,720
Sulfur hexafluoride	גופרית שש פלואורידית	SF ₆	002551-62-4	נכלל בטבלה נפרדת לנושא גז"ח, ראו לעיל		
Sulfuric acid, dimethyl ester			000077-78-1	0	0	0
Tetrabutyltin			001461-25-2	0	0	0
Tetraethyl lead			000078-00-2	82,964,776	113,317,743	175,035,443

Pollutant	Pollutant Name (Israel)	Pollutant Symbol	CAS registry number	Lower value ILS/ton (2019)	Central value ILS/ton (2019)	Upper value ILS/ton (2019)
Tetrahydrofurfuryl alcohol			000097-99-4	0	0	0
Tetramethyl lead			000075-74-1	0	0	0
Tetramethyldiaminobenzophenone			000090-94-8	..		
Tetrasul			002227-13-6	0	1	3
Thioacetamide			000062-55-5	4,317	5,902	9,106
Toluene, 2,4-diamine			000095-80-7	8,330	11,399	17,638
Toluene, 2,4-dinitro-			000121-14-2	77,569	106,235	163,906
Toluene, 2,6-dinitro-			000606-20-2	795,922	1,089,334	1,686,276
Toluene, dinitro-			025321-14-6			
Toxaphene			008001-35-2	17,166	25,159	39,796
Tributylstannane			000688-73-3	0	0	0

נספח 2 - מאפייני מזהמי אוויר עיקריים ונזקיהם

מתוך- "הסבב הראשון של היתרי פליטת מזהמים למפעלי תעשייה וייצור אנרגיה – בחינת העלויות והתועלות" – הוכן על ידי DHV-MED, עבור המשרד להגנת הסביבה להלן תיאור תמציתי של מזהמי האוויר העיקריים לצד הנזקים הבריאותיים המיוחסים לעלייה בריכוזם בסביבה.

חלקיקים (PM10, PM2.5)

בישראל הם מגיעים הן ממקורות טבעיים, ובעיקר מאבק מדברי, והן ממקורות אנתרופוגניים, עקב פעולות האדם.

הטופוגרפיה, התנאים האטמוספריים ובעיקר גודל החלקיקים הם שקובעים את משך שהותם של החלקיקים באוויר. מקובל להבחין בין שני גדלים של חלקיקים – PM10 - חלקיקים הקטנים מקוטר אווירודינמי של 10 מיקרומטר; PM2.5 - חלקיקים הקטנים מקוטר אווירודינמי של 2.5 מיקרומטר.

החלקיקים נפלטם לסביבה בעקבות תהליכים שונים. בין התהליכים התעשייתיים בולטים פעילות שריפת דלקים, עיבוד קרקע בחקלאות, גריסת חומרי חציבה ובנייה וערמות אחסון של חומרים אבקתיים. ההשפעה הבריאותית של החשיפה לחלקיקים קשורה למקור החלקיקים ולגודלם. לפי נתוני ארגון הבריאות העולמי, חלקיקים נשימים עדינים (PM2.5) הם מזהם האוויר בעל ההשפעה הגדולה ביותר על בריאות הציבור. חלקיקים אלה עלולים לחדור לעומק דרכי הנשימה ואף למערכת הלב וכלי הדם. על-פי סקרים אפידמיולוגיים, אפילו חשיפה נשימתית קצרת טווח לחלקיקים אלה עלולה לגרום לעלייה בתחלואה ואף בתמותה בקרב אוכלוסיות רגישות כמו אנשים מבוגרים וילדים, חשיפה נשימתית ארוכת טווח לרמות גבוהות של חלקיקים נשימים עדינים תשפיע על מערכות נוספות מלבד מערכות הלב והריאה, כמו מערכת החיסון.

תחמוצת גופרית (SO₂)

קבוצת תחמוצת גופרית היא קבוצה של מזהמים גזיים, המורכבת בעיקר מהמזהם גופרית דו-חמצנית (SO₂) ומזהמים נוספים. תחמוצות גופרית נוצרות כאשר גופרית מתחמצנת בעת שריפתה ונפלטת לסביבה. המקורות לגופרית דו-חמצנית הם תהליכים תעשייתיים שבהם מתרחשת שריפת דלקים עם תכולת גופרית גבוהה (פחם ומזוט) כמו במתקני אנרגיה, בתי זיקוק לנפט ובדודי קיטור בתעשייה. במחקרים בריאותיים נמצא כי ההשפעה העיקרית של גופרית דו-

חמצנית על הבריאות היא בקרב קבוצות סיכון- ילדים ומבוגרים וכן בקרב חולים כרוניים במחלות ריאה.

תחמוצות חנקן (NOx)

תחמוצות חנקן היא קבוצה של מזהמים גזיים, המורכבת בעיקר מחנקן חד חמצני (NO) ומחנקן דו חמצני (NO₂).

מכלל תחמוצות החנקן, חנקן דו חמצני הוא הבעייתי ביותר מבחינה בריאותית וסביבתית. תחמוצות חנקן נפלטות לסביבה כאשר גז החנקן, הנמצא באופן טבעי באוויר, מתחמצן בעת השריפה בטמפרטורות גבוהות. גזים אלה נפלטים מכל תהליך שריפה בטמפרטורות גבוהות כמו דודי קיטור וארובות של תחנות כוח לייצור אנרגיה.

על-פי סקרים אפידמיולוגיים, חשיפה נשימתית לתחמוצות חנקן עלולה לגרום לעלייה בתחלואה ואף בתמותה בקרב אוכלוסיות רגישות כגון אנשים מבוגרים וילדים, זאת על רקע מחלות לב ונשימה.

קבוצת תרכובות זו תורמת ליצירת מזהם נוסף, אוזון קרקעי, הנוצר באופן שניוני בהשפעת קרינת השמש ופוגע באזורים במורד הרוח, כלומר הרחק ממוקדי הפליטה של תחמוצות החנקן.

חומרים אורגניים נדיפים שאינם מתאן (NMVOC)

קבוצה זו היא אסופה גדולה ומגוונת של חומרים אורגניים (המכילים אטומי פחמן) המתנדפים ונמצאים במצב גזי בטמפרטורת הסביבה. לחומרים אלה שימושים רבים כמרכיבים במוצרים שונים בתעשייה, בתחבורה ובתחנות דלק וכן בסביבה התוך-מבנית. על אף השונות הגדולה בין חומרים אלה, רובם תורמים להיווצרות אוזון (O₃), שהוא מזהם הפוגע בתפקוד הריאות. חומרים אלה נפלטים ממגוון מקורות בתעשייה ובהם- תהליכי שריפה של דלקים, שימוש בממסים, זיקוק דלקים, מכלי אחסון של דלקים, חומר גלם, תוצרי ביניים ותוצרים המורכבים או מכילים חומרים אורגניים. מקורות הפליטה יכולים להיות מוקדיים, כגון ארובות וונטים וגם לא מוקדיים כגון מכלי אחסון ורכיבי צנרת.

